

Grundlagen der Physik für Geographen

Übersicht:

- 1) SI-Einheiten
- 2) Mechanik
- 3) Hauptsätze der Wärmelehre
- 4) Luftdruck
- 5) Atmosphäre
- 6) Strahlungsgesetze

1) SI-System - Größen und Einheiten

Anmerkungen

- Physikalische Größen bestehen immer aus **Zahlenwert** und **Einheit**.
- Basiseinheiten müssen voneinander unabhängig sein.
- Das MKSA-System (Meter - Kilogramm - Sekunde - Ampere) ist für mechanische und elektromagnetische Vorgänge völlig ausreichend.

Viele abgeleitete Einheiten haben aufgrund der großen Bedeutung der jeweiligen phys. Größe eigene Bezeichnungen.

- Neben SI-Einheiten gibt es noch weiter zweckmäßige Einheiten. z.B. wird die Energie der Elementarladung in Elektronenvolt ($1\text{eV} \approx 1.6022 \cdot 10^{-19}\text{J}$, $1\text{J} = 1\text{Ws}$) angegeben.

Definition der MKS-Basiseinheiten

- Länge: Länge der Strecke, die das Licht im Vakuum während der Dauer von $1/299.792.458$ Sekunde zurücklegt (Lichtgeschwindigkeit in Vakuum).

- Masse: Ein Kilogramm ist gleich der Masse des Internationalen Kilogrammprototyps.
- Zeit: Das 9.192.631.770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustandes von Atomen des Cäsium-Isotops ^{133}Cs entsprechenden Strahlung.

Basiseinheiten

Größe	Symbol	Einheit	Name
Länge	s	$[s] = 1\text{m}$	Meter
Masse	m	$[m] = 1\text{kg}$	Kilogramm
Zeit	t	$[t] = 1\text{s}$	Sekunde
Stromstärke	I	$[I] = 1\text{A}$	Ampere
Temperatur	T	$[T] = 1\text{K}$	Kelvin
Lichtstärke	I_v	$[I_v] = 1\text{Cd}$	Candela
Stoffmenge	n	$[n] = 1\text{mol}$	Mol

Abgeleitete Einheiten

Aus den Basiseinheiten können alle anderen physikalischen Einheiten abgeleitet werden, wie z.B. Geschwindigkeit, Beschleunigung, Kraft, Energie, Leistung, Spannung, Ladung usf.

Übrigens: Meter kommt von messen und Geometrie bedeutet daher

Vorsatzzeichen im SI-System (Präfixe)

Ist ein Zahlenwert (einer phys. Größe) sehr groß oder klein, kann eine Zehnerpotenz als Präfix verwendet werden. Im täglichen Gebrauch ist das Präfix *Kilo* zur Angabe einer Masseinheit in kg wohl am verbreitetsten und stellt gleichzeitig eine Ausnahme dar, da Kilogramm als SI-Basiseinheit definiert ist. Im technischen Sprachgebrauch gibt es eine Vielzahl von prominenten Beispielen: 88,8 MHz, 4 TB, 5 nm usf.

10^3	k	Kilo
10^6	M	Mega
10^9	G	Giga
10^{12}	T	Tera
10^{-3}	m	Milli
10^{-6}	μ	Mikro
10^{-9}	n	Nano
10^{-12}	p	Pico

Die große und die kleine Skala:

Im 19. und bis zum zweiten Drittel des 20. Jahrhunderts wurde einheitlich in GB die lange, in den USA hingegen die kurze Skala verwendet, so dass man sie damals auch als *britisches* und *amerikanisches* System bezeichnete. Seit 1974 gilt in Großbritannien jedoch halboffiziell die kurze Skala, womit diese Umschreibung veraltet ist.

Außer in den USA, Großbritannien und Brasilien gilt die kurze Skala auch in Australien, Neuseeland, Irland und dem englischsprachigen Teil Kanadas. Eine Variante der kurzen Skala, die für 10^9 analog zur langen Skala auch das Wort „Milliarde“ verwendet, gilt in Russland, der Türkei, in Israel allen arabischsprachigen und vielen afrikanischen Ländern.

In Frankreich war die Verwendung im Verlauf des 19. Jahrhunderts uneinheitlich: Die meisten französischen Enzyklopädien dieser Zeit greifen auf die *kurze Skala* zurück. Das ursprüngliche System der *langen Skala* findet dort entweder überhaupt keine Erwähnung oder wird als *hinfällig* bezeichnet. Im Jahr 1961 kehrte Frankreich offiziell zur langen Skala zurück, so dass in Europa bis zum Ausscheren Großbritanniens 1974 ein einheitlicher Gebrauch vorlag.

Die 11. Generalkonferenz für Maß und Gewicht, das höchste Organ der Meterkonvention, also des SI-Systems, konstatiert die Verwechslungsmöglichkeit der Begriffe *parts per billion* (abgekürzt *ppb*) und *parts per trillion* (abgekürzt *ppt*) aufgrund der Koexistenz von langer und kurzer Skala. Die Konferenz empfiehlt, diese verwirrenden Begriffe und ihre Abkürzung zu vermeiden.

<i>Kurze Skala</i>		<i>Lange Skala</i>			<i>Zehner- potenz</i>
Name	Systematik	Chuquet	Peletier	Systematik	
[Einheit]	Tausend ¹⁻¹	[Einheit]	[Einheit]	Million ⁰	10 ⁰
Tausend	Tausend ¹⁺⁰	Tausend	<u>Tausend</u>	Million ^{0,5}	10 ³
Million	Tausend ¹⁺¹	Million	<u>Million</u>	Million ¹	10 ⁶
Billion	Tausend ¹⁺²	Tausend Millionen	<u>Milliarde</u>	Million ^{1,5}	10 ⁹
Trillion	Tausend ¹⁺³	Billion	<u>Billion</u>	Million ²	10 ¹²
Quadrillion	Tausend ¹⁺⁴	Tausend Billionen	<u>Billiarde</u>	Million ^{2,5}	10 ¹⁵
Quintillion	Tausend ¹⁺⁵	Trillion	<u>Trillion</u>	Million ³	10 ¹⁸
Sextillion	Tausend ¹⁺⁶	Tausend Trillionen	<u>Trilliarde</u>	Million ^{3,5}	10 ²¹
Septillion	Tausend ¹⁺⁷	Quadrillion	<u>Quadrillion</u>	Million ⁴	10 ²⁴

Ein **Millionstel** steht für die Zahl 10^{-6} und ist vergleichbar mit dem Prozent (%) für die Zahl 10^{-2} und Promille (‰) für die Zahl 10^{-3} .

Weithin gebräuchlich ist auch der englische Ausdruck **parts per million** (abgekürzt **ppm**), wörtlich übersetzt „Anteile pro Million“.

Der englische Ausdruck **parts per billion (ppb)**, zu Deutsch „Teile pro Milliarde“) steht für die Zahl 10^{-9} (also ein Milliardstel) und wird manchmal im Zusammenhang mit relativen Mengenangaben benutzt, also für die Angabe derjenigen Gehaltsgrößen, die Anteile sind.

Da das Wort *billion* je nach Gebrauch der langen oder kurzen Skala eine Milliarde oder eine Billion bedeuten kann, empfahl die IEC 1978, die Begriffe ppm und ppb nicht zu verwenden.

Aber solche Empfehlungen setzen sich nicht durch, indem man die Benutzer überzeugt, sondern indem sie aussterben.....

2)Mechanik

Kraft und Beschleunigung

Die **Ursache** für eine Bewegungsänderung (= **Beschleunigung**) ist immer eine **Kraft**.

Die Eigenschaft aller Körper, ohne Krafteinwirkung ihren Bewegungszustand beizubehalten, bezeichnet man als **Trägheit**.

Die Fundamente der klassischen Mechanik beruhen auf den von **Isaac Newton** 1687 formulierten Bewegungsgesetzen, die auch als **Newton'sche Axiome** bekannt sind (ein *Axiom* ist so etwas wie eine grundlegende Aussage).

1. Newton'sches Axiom (Trägheitsgesetz)

Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung, solange er nicht durch einwirkende Kräfte zu einer Änderung des Bewegungszustandes gezwungen wird.

Die Alltagserfahrung kann zu falschen Vorstellungen führen

Nach dem Trägheitsgesetz müsste sich ein Körper in Bewegung mit unverminderter Geschwindigkeit fortbewegen, so lange keine Kraft auf ihn wirkt, die ihn abbremst. Dies widerspricht scheinbar unserer Alltagserfahrung, denn um mit gleichbleibender Geschwindigkeit z.B. mit dem Auto oder mit dem Fahrrad weiterzufahren, müssen wir Gas geben oder weiter treten. Ohne eigenen Antrieb kommt jeder Körper auf der Erde irgendwann zum Stillstand.

Es tritt praktisch immer Reibung auf.

Der Grund dafür ist jedoch nicht, dass *keine* Kraft wirkt, sondern vielmehr, dass praktisch *immer* eine weitere Kraft wirkt, nämlich die *Reibungskraft*. Diese sorgt in den meisten Fällen dafür, dass jeder Körper abgebremst wird.

Damit sich ein Körper gleichförmig weiterbewegt, muss die Reibungskraft überwunden werden, wozu letztendlich eine *Antriebskraft* benötigt wird.

Gibt es keine Reibung oder ist diese vernachlässigbar (*Beispiele*: Ein Wagen gleitet auf einer Luftkissenbahn oder ein Raumschiff schwebt im Weltall), wird für die Bewegung dagegen *kein* Antrieb benötigt.

Dass es im Alltag praktisch immer Reibung gibt, führt häufig zu falschen Vorstellungen über den Zusammenhang zwischen Kraft und Bewegung. Man meint, dass es ohne Kraft keine Bewegung gäbe und dass die Ursache für eine Bewegung eine Kraft sei.

Die Vorstellung, dass ein Körper eine Kraft *besäße*, die dem Körper mitgegeben wurde und mit der Zeit langsam *aufgebraucht* wird, gab es bereits im Mittelalter.

Diese Vorstellung ist jedoch falsch!

Es können nur durch *Wechselwirkungen* Kräfte auf einen Körper wirken. Ein Körper "*besitzt*" jedoch keine Kraft, sondern je nach Bewegungszustand nur *Energie* und *Impuls*.

Richtig ist:

- Ein Körper, der in Bewegung ist, bleibt in (gleichförmiger) Bewegung, solange keine Kraft auf ihn wirkt.
- Ein Körper, der in Ruhe ist, bleibt in Ruhe, solange keine Kraft auf ihn wirkt.
- Eine Kraft kann eine *Bewegungsänderung*, also eine *Beschleunigung* bewirken.

Jeder Körper ist träge

Dass jeder Körper bestrebt ist, seinen Bewegungszustand beizubehalten, merkt man z.B., wenn man versucht, ein Auto anzuschieben, einen schweren Gegenstand aufzuhalten oder wenn man eine Tischdecke schnell vom Tisch zieht - die Gegenstände auf dem Tisch bewegen sich nicht mit der Decke mit sondern bleiben stehen, da sie träge sind.

Die *Trägheit* und damit die Kraft, die erforderlich ist, um einen Körper zu beschleunigen, hängt von seiner *Masse* ab - **je größer die Masse eines Körpers ist, umso größer ist seine Trägheit.**

Dabei gilt:

Ist die Beschleunigung konstant, so sind Kraft und Masse zueinander proportional:

$$F \sim m$$

Außerdem gilt:

Je größer die Kraft ist, die auf einen Körper wirkt, umso größer ist die Beschleunigung des Körpers. Bei konstanter Masse sind Kraft und Beschleunigung zueinander proportional:

$$F \sim a$$

Zusammen ergibt sich eine Proportionalität zwischen der Kraft und dem Produkt aus Masse und Beschleunigung:

Der Proportionalitätsfaktor ist in diesem Fall "1", daher gilt: **$F = m \cdot a$** Das ist kein Zufall, sondern ist in der Festlegung der Einheit für die Kraft begründet.

Newtons „Law of Motion“.

Die Einheit der Kraft

Die Einheit der Kraft heißt "Newton". Die Definition lautet:

1 Newton (N) ist die Kraft, die benötigt wird, um einen Körper der Masse 1kg aus der Ruhe in einer Sekunde auf die Geschwindigkeit 1m/s zu beschleunigen.

Das ist gleichbedeutend mit der Formulierung:

1 Newton (N) ist die Kraft, die benötigt wird, um einen Körper der Masse 1kg die Beschleunigung 1m/s^2 zu erteilen.

Die Aussage über die Proportionalität zwischen Kraft und dem Produkt aus Masse und Beschleunigung wird als *zweites Newtonsches Axiom* bezeichnet. (Ursprünglich wurde dabei jedoch die Kraft als *Impulsänderung* pro Zeit definiert. **Also $F = m \cdot dv/dt$**)

2. Newton'sches Axiom (Grundgleichung der Mechanik)

$$F = m \cdot a$$

Aus der Grundgleichung der Mechanik sowie aus der Definition der Kraft ergibt sich auch der Zusammenhang zwischen der Einheit Newton und den Basiseinheiten:

$$1 \text{ Newton} = 1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$$

Beispiele und Anwendungen

Mit der Grundgleichung der Mechanik lässt sich für alle Körper bekannter Masse die Kraft berechnen, die für eine bestimmte Beschleunigung erforderlich ist:

Um einen Körper mit einer Masse von $m = 60\text{kg}$ um 1m/s^2 zu beschleunigen, benötigt man eine Kraft von

$$F = 60 \text{ N}$$

Welche Kraft muss auf einen Körper wirken, damit er mit $9,81\text{m/s}^2$ beschleunigt wird?

Die genannte Beschleunigung ist die *Fallbeschleunigung*, also die Beschleunigung, mit der jeder frei fallende Körper (auf der Erde) beschleunigt wird.

Setzen wir diese Beschleunigung in die Grundgleichung der Mechanik ein, so erhalten wir:

$$F = m \cdot a = m \cdot g$$

Wir erhalten so die *Gewichtskraft* F_G des Körpers - denn dies ist ja die Kraft, die jeden Körper

Auf einen Körper der *doppelten Masse* wirkt also die *doppelte Gewichtskraft*. Die Beschleunigung bleibt konstant.

Aus diesem Zusammenhang ergibt sich unmittelbar die Erkenntnis, dass alle Körper gleich schnell fallen! (ohne Berücksichtigung der Luftreibung).

Die Beschleunigung, die alle frei fallenden Körper erfahren, heißt **Fallbeschleunigung g**.

Die Fallbeschleunigung ist *ortsabhängig* und beträgt auf der Erde (bzw. in Erdnähe) $9,81 \text{ m/s}^2$

Diese Beschleunigung wird daher auch als *Erdbeschleunigung* bezeichnet.

Da der Mond eine deutlich kleinere Masse hat als die Erde, ist die Gravitation und damit die Fallbeschleunigung auf dem Mond deutlich kleiner als auf der Erde. Sie beträgt etwa $1/6$ der Erdbeschleunigung. $g_M = 1,62 \text{ m/s}^2$.

Das Gravitationsgesetz

Newton stellte im Jahre 1687 ein Gesetz auf, mit dem sich die Gravitationskraft zwischen zwei Körpern der Massen m_1 und m_2 , die sich im Abstand r voneinander befinden, berechnen lässt.

Das **Gravitationsgesetz** lautet: $F = G \cdot m_1 \cdot m_2 / r^2$

Dabei ist r der **Abstand der Massenmittelpunkte** und G die **Gravitationskonstante**.

Die Gravitationskonstante hat den Wert $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{kg}^2$

Aus dem Gravitationsgesetz folgt: Verdoppelt man die Entfernung r der beiden Massen, so verringert sich die Anziehungskraft zwischen den Massen um den Faktor

In einer Höhe von 6378km (über der Erdoberfläche) erfährt ein Körper nur noch seiner Gewichtskraft auf dem Erdboden, da der Abstand vom Erdmittelpunkt doppelt so groß ist. Aber so weit weg war nicht einmal Felix B.

Auch auf der Erde ist die Fallbeschleunigung aufgrund schwankender Gravitation nicht überall gleich groß. U.a. wegen der Abflachung an den Polen ist die Fallbeschleunigung an den Polen größer als am Äquator.

Erdbeschleunigung an verschiedenen Orten auf der Erde:

Äquator: $9,78 \text{ m/s}^2$

Linz: $9,81 \text{ m/s}^2$

Pol: $9,83 \text{ m/s}^2$

Das Wechselwirkungsprinzip

Die Gewichtskraft von $F_G = mg$ wirkt auf jeden Körper auf der Erde zu jeder Zeit.

Dass die Gewichtskraft außer beim freien Fall jedoch nicht dazu führt, dass alle Körper gleichermaßen beschleunigt werden, liegt daran, dass eine oder mehrere weitere Kräfte wirken.

Steht oder liegt ein Körper auf dem Boden oder auf einem Tisch, so gibt es jeweils eine weitere Kraft, die genauso groß ist wie die Gewichtskraft aber dieser entgegengerichtet ist. Diese Kraft wird vom Boden, vom Tisch etc. aufgebracht und führt dazu, dass die Summe der auf den Körper wirkenden Kräfte 0 ist, wodurch es keine Änderung des Bewegungszustandes gibt.

Diese Kraft kann als *Reaktionskraft* bezeichnet werden - der Boden oder Tisch reagiert auf die Gewichtskraft des Körpers mit einer gleich großen entgegengesetzt gerichteten Kraft. Könnte z.B. ein Tisch die entsprechende Reaktionskraft nicht aufbringen, so würde dieser zusammenbrechen.

Es ist nicht möglich, dass ein Körper eine Kraft auf einen zweiten Körper ausübt, ohne dass dieser nicht gleichermaßen eine Kraft auf den ersten Körper ausübt.

3. Newton'sches Axiom (Wechselwirkungsprinzip)

Kräfte treten immer paarweise auf. Übt der Körper A eine Kraft auf Körper B aus (genannt „ACTIO“), so übt Körper B eine gleich große aber entgegengesetzt gerichtete Kraft auf Körper A aus (genannt „REACTIO“).

Wer zieht wen an?

Das Wechselwirkungsprinzip gilt für alle Arten von Kräften.

Auf die Frage, ob wir von der Erde angezogen werden oder die Erde von uns, lautet die Antwort:

Wir ziehen die Erde mit der gleichen Kraft an, mit der wir von der Erde angezogen werden. Es handelt sich um eine **wechselseitige Anziehung**.

Dass wir in Richtung Erde fallen und nicht umgekehrt, liegt nur an der wesentlich größeren Masse der Erde und ihrer damit verbundenen Trägheit.

Das gleiche gilt auch für *magnetische* Anziehungs- oder Abstoßungskräfte. Genauso wie ein Magnet ein Stück Eisen anzieht, zieht das Stück Eisen den Magneten an - und zwar mit der gleichen Kraft!

Wieviel g hält ein Mensch aus?

Diese Frage lässt sich nicht pauschal beantworten, da zum einen die *Richtung* der auftretenden Beschleunigungskräfte (*längs* oder *quer* zur Körperachse) wie auch die *Dauer* eine große Rolle spielen.

Menschen, die besonders hohen Beschleunigungskräften ausgesetzt sind, wie z.B. Kampfpiloten, Astronauten oder Rennfahrer, müssen ein spezielles Training absolvieren. Nicht alle Menschen sind dazu geeignet.

Für kurze Zeit (unterhalb von 0,5s) können längs der Körperachse etwa 20g ohne Folgeschäden überstanden werden.

Quer zum Körper kann man kurzzeitig etwa 30g ertragen. Für einige Sekunden liegt die Grenze hier bei etwa 15g.

Bei Achterbahnen liegt die Grenze des Erlaubten bei 6g, Astronauten müssen beim Start bis zu 5g aushalten - das dann allerdings für einige Minuten!

Keplergesetze

Tycho Brahe war der praktisch begabte Beobachter. Als es darum ging, das Datenmaterial mit fundierten mathematischen Kenntnissen auszuwerten, benötigte er Hilfe. Das war einer der Gründe, warum er *Johannes Kepler* nach Prag einlud. Nach Tychos Tod brauchte Kepler mehrere Jahre, bis er anhand der Marsdaten die Zusammenhänge fand. Das Resultat wird heute als die **drei Keplergesetze** zitiert:

1. Keplergesetz:

Die Bahnen der Planeten sind Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.

2. Keplergesetz:

Der von der Sonne zum Planeten gezogene Vektor überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.

3. Keplergesetz:

Die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen ihrer großen Bahnhalbachsen:

Die Bedeutung der drei Gesetze:

- Das erste Keplergesetz klärt die Frage der **Planetenbahnen**. Dabei bricht es mit zwei Lehrmeinungen des Ptolemaeus: das keplersche Weltbild ist heliozentrisch, und es bricht mit der Tradition, dass himmlische Bewegungen „perfekt“ im theologischen Sinne, also kreisförmig sein müssen. Faktisch ist aber die Abweichung von der Kreisbahn bei den großen Planeten gering, hingegen ist die „Verschiebung“ der Sonne aus dem Mittelpunkt der Bahn deutlich.

•

Beispiel: Bei der Erde beträgt der Unterschied zwischen großer und kleiner Halbachse nur knapp 21 000 km, aber die Sonne ist um rund 2.5 Millionen km aus dem Zentrum der Bahn verschoben. Die Erde hat im **Perihel**, dem sonnennächsten Punkt ihrer Bahn – den sie anfangs Januar erreicht – einen Abstand von rund 147.1 Millionen km zur Sonne. Im **Aphel**, dem sonnenfernsten Punkt ihrer Bahn – den sie anfangs Juli erreicht – hat die Erde einen Abstand von rund 152.1 Millionen km zur Sonne.

- Das zweite Keplergesetz klärt die **Art der Bewegung**: in der Nähe des Perihels bewegt sich ein Planet schneller als in Aphelnähe.
- Bsp.: Berechnen sie die Dauer des Sommerhalbjahres und des Winterhalbjahres.
- Das dritte Keplergesetz kann in seiner Bedeutung nicht hoch genug eingeschätzt werden. Die Umlaufzeiten können verhältnismäßig leicht bestimmt werden. Die Abstände sind hingegen nur mit großem Aufwand zu bestimmen. Das dritte Keplergesetz bietet nun aber die Möglichkeit, wenigstens das Verhältnis der **Bahnhalbachsen** allein aus den Umlaufzeiten **zu berechnen**. Dazu setzt man die große Bahnhalbachse der Erdbahn zu $a = 1$ AE. Vor diesem Hintergrund erklären sich die großen Anstrengungen, eine Distanz im Sonnensystem durch Triangulation möglichst genau zu bestimmen. Dadurch wird dann der absolute Maßstab im Sonnensystem festgelegt.

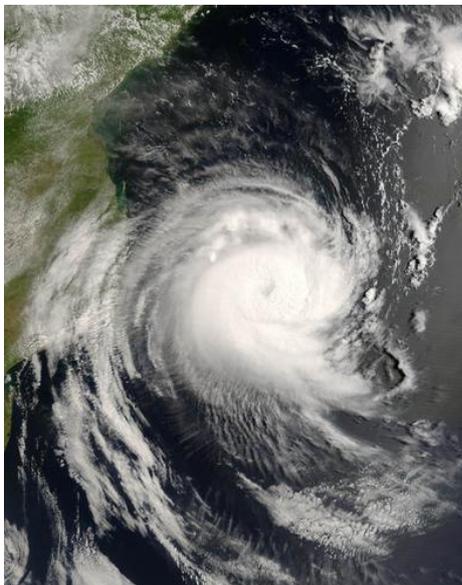
Die Corioliskraft:

Was ist die Corioliskraft?

Flugzeuge, die von New York nach Frankfurt fliegen, haben ordentlich Rückenwind. Der Wind, der sie antreibt, bläst in etwa 10 Kilometern Höhe von West nach Ost. **Jetstream (oder Strahlstrom)** heißt diese starke Luftströmung, die bis zu 500 km/h schnell sein kann. Ihre Richtung ist das Ergebnis der so genannten Corioliskraft.

Sie ist benannt nach dem französischen Wissenschaftler Gaspard Gustave de Coriolis, der sie im Jahr 1835 als erster mathematisch untersuchte. Ursache für die Corioliskraft ist die Drehung der Erde um die eigene Achse: Am Äquator dreht sich die Erde mit 1670 Kilometern pro Stunde nach Osten, in Richtung der Pole nimmt die Geschwindigkeit immer weiter ab. Strömen Luftmassen vom Äquator zum Nordpol, nehmen sie den Schwung nach Osten mit und bewegen sich dann schneller als die Erdoberfläche. Von der Erdoberfläche aus betrachtet, sieht es so aus, dass sie von ihrem nördlichen Kurs nach Osten – also nach rechts – abgelenkt werden. Umkehrt werden Luftmassen, die vom Pol zum Äquator strömen, von der Erdoberfläche überholt, werden also auf ihrem südlichen Kurs nach Westen – ebenfalls nach rechts – abgelenkt.

Auf dem Weg zum Südpol sind die Richtungen umgekehrt: Luftmassen auf dem Weg zum Pol werden von ihrem südlichen Kurs nach Osten, also nach links abgelenkt – ebenso wie die Luftmassen auf nördlichen Kurs Richtung Äquator, die nach Westen abgelenkt werden. So führt also die Corioliskraft auf der Nordhalbkugel zu einer Rechtsablenkung, auf der Südhalbkugel zu einer Linksablenkung, und zwar umso stärker, je näher man den Polen kommt.



Hurrikans/Taifune entstehen über tropischen Meeren

Auf diese Weise beeinflusst die Corioliskraft das globale Windsystem, die großen Luftströmungen auf der Erde. Damit hat sie einen großen Einfluss auf das Wetter: In unseren Breiten zum Beispiel strömt die Luft Richtung Nordpol und wird daher nach Osten abgelenkt. Bei uns kommt der Wind also meistens aus Westen, vom Atlantik her und bringt deshalb eher feuchte Luft mit gemäßigten Temperaturen. Auch die Strahlströme verdanken ihre Richtung der Corioliskraft.

Sogar tropische Wirbelstürme mit einigen 100 Kilometern Durchmesser entstehen mit Hilfe der Corioliskraft. Denn durch sie beginnt sich feuchtheiße Luft zu drehen bis sie zum zerstörerischen Wirbel heranwächst. Die Corioliskraft wirkt sich aber nicht nur auf große Luftmassen aus, sie lenkt auch Meeresströmungen ab. So ist es zu erklären, dass der warme Golfstrom auf dem Weg nach Norden nach rechts driftet und große Teile Nordeuropas beheizt.

Wie bewegt sich die Erde?

Jeden Morgen sehen wir, wie die Sonne aufgeht, über den Himmel wandert und abends wieder untergeht. Für uns sieht es so aus, als bewege sich die Sonne um die Erde. Noch bis ins späte Mittelalter hinein haben viele Menschen tatsächlich geglaubt, die Erde stehe still in der Mitte des Universums und alles kreise um sie herum.

Heute wissen wir, dass es genau umgekehrt ist: Tag und Nacht erleben wir, weil sich die Erde dreht. Und die Erde steht weder still noch im Mittelpunkt, sondern sie kreist um die Sonne.

Dabei hält die Anziehungskraft der Sonne die Erde fest, wie an einer langen Leine. Genauer gesagt: einer fast 150 Millionen Kilometer langen Leine. So groß ist der Abstand, in dem die Erde um die Sonne kreist.

Die Zeit, die die Erde für eine Umrundung braucht, nennen wir ein Jahr. In dieser Zeit legt die Erde eine Strecke von etwa 940 Millionen Kilometern zurück. Das bedeutet, sie rast mit einer Geschwindigkeit von über 100000 km/h durchs All! (Das sind fast dreißig Kilometer pro Sekunde.)

Das globale Windsystem

Rund um den Erdball strömen die Luftmassen der Atmosphäre: Sie steigen auf und sinken, treffen aufeinander und vermischen sich. Das geschieht allerdings nicht wild durcheinander, sondern die Winde folgen einem ganz bestimmten Muster. Beeinflusst wird dieses globale Windsystem (auch planetarische Zirkulation genannt) vor allem durch die Einstrahlung der Sonne und durch die Corioliskraft.

Der unermüdliche Kreislauf der Luft beginnt am Äquator, wo ständig warme Luft aufsteigt. Am Boden bildet sich eine ganze Kette von Tiefdruckgebieten, die sogenannte äquatoriale Tiefdruckrinne. Die aufgestiegene Luft bewegt sich in großer Höhe in Richtung der Pole. Weil sie unterwegs abkühlt, sinkt sie in den Subtropen bei etwa 30° nördlicher und südlicher Breite wieder ab und strömt am Erdboden als Passatwind zurück in Richtung Äquator. Der gesamte Windkreislauf um den Äquator wurde schon 1753 von dem englischen Wissenschaftler George Hadley beschrieben und wird darum „Hadley-Zelle“ genannt. (Als „Zelle“ bezeichnen Meteorologen eine kreisförmige Luftströmung.)

Auch rund um die Pole zirkulieren Luftmassen und bilden die beiden „polaren Zellen“: Weil am Pol kalte Luft zu Boden sinkt, entsteht an dieser Stelle ein Hochdruckgebiet. Von hier aus strömt am Boden kalte Luft in Richtung Äquator. Sobald sich diese Luftmasse ausreichend erwärmt hat, steigt sie wieder auf: Eine ganze Reihe von Tiefs entsteht rund um den 60. Breitengrad, die subpolare Tiefdruckrinne. Die Luft, die hier aufsteigt, fließt in der Höhe zurück zum Pol.

Zwischen polarer Zelle und Hadley-Zelle, etwa zwischen dem 30. und 60. Breitengrad treffen sich die Luftmassen der Polargebiete und der Passatzzone: Hier hat sich die dritte große Windzelle ausgebreitet. Nach ihrem Entdecker, dem Amerikaner William Ferrel, heißt sie auch „Ferrel-Zelle“. Weil in dieser Region kalte und warme Luftmassen aufeinandertreffen, herrscht hier oft wechselhaftes und regenreiches Wetter, das wir in Mitteleuropa gut kennen. Der Wind kommt vorherrschend aus westlicher Richtung. Darum wird die Region zwischen 40. und 60. Breitengrad in Europa Westwindzone genannt. Auch in der Höhe kommt der Wind aus Westen: An der Grenze zur polaren Zelle fließen starke Höhenwinde, die durch die Corioliskraft gedreht und nach Osten gelenkt werden – die sogenannten Jetstreams.

Auf jeder Halbkugel haben sich also drei große Windkreisläufe aufgebaut: die Hadley-Zelle, die Ferrel-Zelle und die polare Zelle. Warum es gerade drei sind, hängt mit der Geschwindigkeit der Erdrotation zusammen. Was passieren würde, wenn sich die Erde viel langsamer drehen würde, lässt sich mit dem Computer simulieren: Dann würde die warme Luft einfach am Äquator aufsteigen, abgekühlt am Pol wieder sinken und am Boden zurückfließen. Es gäbe auf jeder Hemisphäre nur eine große Windzelle. Je schneller man aber im Computermodell die Erde rotieren lässt, desto mehr Windzellen spalten sich ab. Bei der Simulation der tatsächlichen Drehgeschwindigkeit der Erde kommt auch der Computer zum Ergebnis: Es gibt auf jeder Halbkugel genau drei große Windzellen.

Wirbelstürme

Im August 2005 erlebte der Südosten der USA eine Katastrophe: Hurrikan Katrina raste über die Küste, fast 2000 Menschen kamen ums Leben. Wie alle Hurrikane war Katrina ein tropischer Wirbelsturm. In anderen Regionen der Erde heißen sie auch Taifun oder Zyklon. Sturmfluten, sintflutartige Regenfälle, Erdbeben und Überschwemmungen sind ihre Folge. Doch wie kommt es zu einem solchen Wirbelsturm?

Ein Hurrikan entsteht da, wo warmes Wasser verdunstet und feuchtwarme Luft schnell und hoch aufsteigt. Zum Ausgleich wird kalte Luft nach unten gesaugt. Ein Gewitter zieht auf. Durch die Corioliskraft beginnen sich die kalten und warmen Luftmassen wie in einer Spirale zu drehen. Durch das Rotieren saugen sie noch mehr feuchtwarme Meeresluft an. So wird der Wirbelsturm immer stärker: Er kann einen Durchmesser von mehreren Hundert Kilometern erlangen und Tausende von Kilometern zurücklegen. Seine Luftmassen erreichen dabei eine Geschwindigkeit von bis zu 300 Stundenkilometern. Nur im Zentrum herrscht Windstille: Das ist das Auge des Hurrikans. Bis sich der Sturm legt, kann es über eine Woche dauern.

Um einen solchen Wirbelsturm zu bilden, muss das Wasser eine Temperatur von mindestens 27° Celsius besitzen. Zusätzlich wird die Corioliskraft benötigt, die eine Drehung der Luftmassen verursacht. In Richtung der Pole ist das Wasser zu kalt, in Richtung Äquator wird die Corioliskraft zu gering. Aus diesem Grund entstehen Hurrikane nur in einem Streifen in den Tropen, der etwa zwischen dem 5. und dem 20. Breitengrad liegt.

Kleiner, aber noch viel schneller als Hurrikane sind Tornados, auch „Windhosen“ genannt. Sie bilden sich in feuchtheißen Regionen beim Zusammentreffen von warmer und kalter Luft während eines Gewitters. Wie ein gewaltiger Rüssel senken sie sich aus einer Gewitterwolke herab bis zum Boden. Im Inneren dieses Rüssels herrscht sehr geringer Luftdruck, der die Luftmassen ansaugt und herumwirbelt. Solche Tornados können sehr klein sein, aber auch einen Durchmesser von bis zu 1,5 Kilometern bekommen und sind bis in die Ferne gut sichtbar, weil sie Staub und Wasserdampf weit nach oben reißen. Schon nach kurzer Zeit ist der Spuk vorbei.

Dort, wo der Tornado entlangrast, hinterlässt er indes eine Schneise der Verwüstung. Besonders häufig kommen die gefährlichen Luftwirbel im Mittleren Westen der USA vor. Dort gibt es sogar eine richtige „Tornado-Straße“: Weil hier kalte und warme Luftmassen aus Nord und Süd ungehindert aufeinanderprallen, rasen durch diese Gegen mehrere hundert Tornados im Jahr.

Passatwinde

Es gibt Gebiete auf der Erde, da bläst der Wind immer aus der gleichen Richtung. In den Tropen zum Beispiel – der Region um den Äquator – wehen Passatwinde aus östlicher Richtung. Früher nutzten Seefahrer diese Tatsache: Sie richteten die Routen ihrer Segelschiffe nach der Windrichtung. Mit Unterstützung des Ostwinds war eine sichere Überfahrt von Europa über den Atlantik nach Nordamerika möglich. Von dieser Überfahrt – auf italienisch „passata“ – erhielten die verlässlichen Winde auch ihren Namen: Passatwinde. Weil sie trockenheiße Luft transportieren, dörren sie den Boden aus. Im Bereich der Passatwinde liegen große Wüsten wie die Sahara im nördlichen und die Kalahari im südlichen Afrika, die australischen Wüsten oder die Atacama in Südamerika.

Ihren Ursprung haben die Passatwinde am Äquator. Dort treffen die Sonnenstrahlen senkrecht auf die Erde und heizen die Luft sehr stark auf. Die Luftmassen dehnen sich aus und steigen auf. Oben breiten sie sich in Richtung der Wendekreise aus. Weil die Luft auf dieser Reise abkühlt, sinkt sie nach einer Weile wieder nach unten und sorgt am Boden für Hochdruck. So bilden sich in etwa 30° nördlicher und südlicher Breite eine ganze Reihe von Hochdruckgebieten: der subtropische Hochdruckgürtel. Zu diesem subtropischen Hochdruckgürtel gehört zum Beispiel das Azorenhoch, das sich stark auf das Wetter in Europa auswirkt.

Am Äquator selbst sind durch die aufsteigenden Luftmassen Gebiete mit tiefem Luftdruck entstanden. Durch diesen Unterdruck werden Luftmassen vom subtropischen Hochdruckgürtel angesaugt, die Passatwinde. Diese wehen allerdings nicht direkt vom Hoch zum Tief, sondern werden durch die Corioliskraft abgelenkt. Darum weht der Passat auf der Nordhalbkugel immer aus Nordost, auf der Südhalbkugel aus Südost. Am Äquator treffen diese Passatwinde aufeinander. Durch die starke Sonneneinstrahlung steigt die Luft erneut nach oben, so dass es fast windstill ist. Hier schließt sich der Kreislauf der Passatwinde, die Teil eines globalen Windmusters sind.

Weil der Stand der Sonne im Lauf eines Jahres wandert, verlagert sich auch der Ort der stärksten Sonneneinstrahlung. Dadurch verschiebt sich die ganze Passatzirkulation um einige Breitengrade zwischen Nord und Süd.

Meeresströmungen

Wie riesige Flüsse durchqueren Meeresströmungen alle fünf Ozeane. Sie transportieren gewaltige Wassermassen, ähnlich einem Förderband, rund um den Globus. Damit sorgen sie für einen Austausch von Wärme, Sauerstoff und Nährstoffen auf der ganzen Erde. Warmes Wasser vom Äquator strömt in Richtung der Pole, kaltes Wasser der Polargebiete sinkt zum Meeresboden und fließt zurück zum Äquator. Durch diesen Kreislauf werden die Temperaturen im Wasser und an Land ausgeglichen. Auch Eisberge, Schiffe oder Müll können durch die Strömung transportiert werden.

Angetrieben werden die Meeresströmungen durch den unterschiedlichen Salzgehalt und durch die unterschiedliche Temperatur von Meerwasser. Wo Meerwasser gefriert, wird Salz frei. Das Meerwasser unter einer Eisschicht ist darum besonders salzig – und gleichzeitig dichter und schwerer. Es sinkt nach unten und zieht weitere Wassermassen mit sich. In mehreren tausend Metern Tiefe fließt das Wasser zurück in wärmere Regionen. Dort steigt es wieder auf und der Kreislauf schließt sich.

An der Wasseroberfläche setzen zusätzlich Winde das Wasser in Bewegung. Der Wind verursacht eine Strömung an der Oberfläche. Diese Strömung bewegt sich nicht genau in Windrichtung, sondern wird durch die Coriolis-Kraft abgelenkt: Auf der Nordhalbkugel lenkt die Coriolis-Kraft das Wasser in Strömungsrichtung gesehen nach rechts, auf der Südhalbkugel nach links. Auch die Winde werden von der Corioliskraft beeinflusst.

Durch die verschiedenen Einflüsse, wie Temperaturunterschiede des Wassers, Wind und die Coriolis-Kraft, entsteht an der Oberfläche und in der Tiefe der Ozeane ein Muster, das sich aus vielen einzelnen Strömungen zusammensetzt: Ein weltweiter Kreislauf, der auch das „globale Förderband“ genannt wird.

Golfstrom

Die ersten Seefahrer, die den Atlantik überquert hatten, standen nach ihrer Rückkehr vor einem Rätsel: Warum war ihr Schiff auf der Strecke von Amerika nach Europa schneller als umgekehrt? Heute kennen wir die Lösung: Eine Meeresströmung im Nordatlantik trieb das Schiff auf dem Weg nach Europa an – der Golfstrom.

Der Golfstrom ist eine mächtige Meeresströmung im Atlantik. Er ist bis zu 200 Kilometer breit. Die Wassermenge, die er transportiert, übertrifft die Menge des Wassers, das aus sämtlichen Flüssen der Erde ins Meer strömt, um mehr als ein Hundertfaches. Gespeist wird der Golfstrom durch warme Meeresströmungen in der Nähe des Äquators. Der Golfstrom beginnt nördlich der Bahamas. Von hier bewegt er sich zunächst entlang der amerikanischen Ostküste über 1.000 Kilometer weit nach Norden.

Westwinde und Coriolis-Kraft zwingen den Strom auf der Höhe des US-Bundesstaates North Carolina nach Nordosten. Auf seinem Weg in Richtung Europa verliert der Golfstrom immer weiter an Tempo. Er bewegt sich nicht mehr schnurgerade, sondern schlängelt sich vorwärts. Teile des Stroms spalten sich ab und fließen zurück. Aus dem Norden kommt ihm schließlich der eiskalte Labradorstrom in die Quere; der Golfstrom verliert weiter an Kraft und an Wärme. Durch Verdunstung nehmen Salzanteil und Dichte des Wassers zu, bis der Golfstrom schließlich östlich von Grönland abtaucht. Teile seiner Wassermassen fließen von hier aus als Tiefenströmung in Richtung Südatlantik und Indischer Ozean.

Für Europa ist der Golfstrom sehr wichtig: Er wirkt wie eine Zentralheizung auf unser Klima. Ohne seine Wärme wären die Winter in West- und Mitteleuropa wesentlich härter. Nur seinetwegen sind auch Häfen in Nordeuropa das ganze Jahr über eisfrei – außer an der Ostsee, wohin die Strömung nicht gelangt. Selbst die Tatsache, dass an Englands Südwestküste Palmen wachsen und Zitronenbäume gedeihen, verdanken wir dem gewaltigen und warmen Golfstrom.

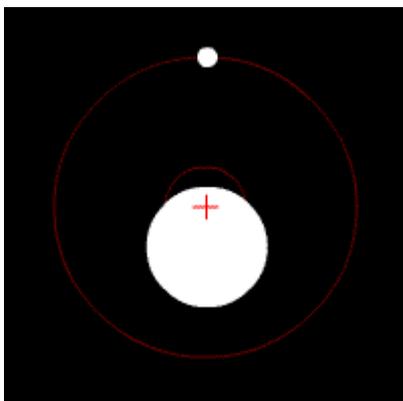
Ebbe und Flut

Jeder, der einmal Urlaub am Meer gemacht hat, kennt das Phänomen: Man möchte am Strand schwimmen gehen, aber dort, wo vor wenigen Stunden noch das Meer war, ist jetzt kilometerweit nur Land zu sehen. Das Meer hat sich zurückgezogen - von der Küste zur hohen See. Es kommt und geht in einer immer gleichen Zeitfolge. Zusammen dauern Ebbe und Flut etwa zwölf Stunden und 25 Minuten. Flut nennt man dabei den Zeitraum, zu dem das Wasser ansteigt und Ebbe den Zeitraum, zu dem der Wasserstand sinkt.

Doch warum gibt es Ebbe und Flut und wer oder was ist dafür verantwortlich? Wer die Gezeiten oder Tide, wie man das Zusammenspiel zwischen Ebbe und Flut auch nennt, verstehen will, muss sich unseren Planeten Erde im Weltall vorstellen. Denn die Gezeiten werden von Erde, Mond und Sonne bestimmt. Dabei spielen zwei physikalische Kräfte eine bedeutende Rolle: die Anziehungskraft und die Fliehkraft. Wer diese Kräfte kennt, versteht auch besser, warum es Ebbe und Flut gibt. Doch beginnen wir mit dem Einfluss des Mondes und seiner Anziehungskraft auf das Wasser der Erde.

Durch die Gravitation zieht die Erde den Mond und der Mond wiederum die Erde an. Da Wasser flüssig, also beweglich ist, kann der Mond mit seiner Anziehungskraft das Wasser auf der Erde ein Stück zu sich hin "ziehen". An der Erdseite, an welcher der Mond gerade steht, hebt sich der Wasserspiegel der Meere also an. Es entsteht an der mondzugewandten Erdseite ein so genannter "Flutberg". Da sich die Erde um sich selbst dreht, wandert sie durch diesen Flutberg hindurch. Deshalb wechseln sich Ebbe und Flut ab. Das Wasser "wandert" also nicht einfach nur mit dem Mond weiter, sondern die Erde dreht sich dabei auch unter dem Flutberg hindurch. Warum dauert es aber etwa zwölf Stunden bis zur nächsten Flut? Die Erde dreht sich innerhalb von 24 Stunden, also in einem Tag, einmal um sich selbst und damit einmal unter dem "Flutberg" hindurch. Es gibt aber noch einen zweiten Flutberg - dieser liegt direkt gegenüber dem ersten an der mondabgewandten Seite der Erde. Doch wie entsteht dieser zweite Flutberg? Dazu müssen wir die zweite physikalische Kraft hinzuziehen: die Fliehkraft.

Ein "himmlisches Karussell"



Das rote Kreuz markiert das Schwerkraftzentrum, also den gemeinsamen Drehpunkt im System "Erde-Mond". Der Mond braucht etwa 28 Tage, um diesen Punkt zu umkreisen.

Wer einen Globus besitzt, weiß, dass man ihn um seine Achse drehen kann - Achse bedeutet auf Althochdeutsch "Drehpunkt". Die Achse ist also der Bereich, um die sich ein oder mehrere drehende Körper herumbewegen. Die Drehung nennt man auch Rotation. Dabei entstehen Kräfte, die alles rund um die Drehachse nach außen "schleudern". Gleichzeitig wirkt dabei eine Kraft zum Mittelpunkt der Kreisbewegung, also zur Drehachse hin und hält die Drehbewegung stabil. Die nach innen gerichtete Kraft nennt man "Zentralkraft" oder auch "Zentripetalkraft" (lateinisch: petere bedeutet "anziehen"). Die nach außen wirkende Kraft wird als "Fliehkraft" oder auch "Zentrifugalkraft" (lateinisch: fugere bedeutet "fliehen") bezeichnet. Ein Beispiel für die Fliehkraft ist das Kettenkarussell. Je schneller es sich dreht, umso größer wird die Fliehkraft und umso höher "schweben" auch die Fahrer in die Luft.

Die Fliehkraft, die bei der Rotation von Erde und Mond entsteht, ist also für den zweiten, gegenüberliegenden Flutberg verantwortlich.

Ein Problem gibt es noch: Es dauert zwölf Stunden und 25 Minuten von einer Flut bis zur nächsten - und nicht nur einfach zwölf Stunden. Das liegt daran, dass sich der Mond innerhalb eines Tages weiter um die Erde bewegt. Teilt man den Erdball in 360 Grad ein, wandert der Mond jeden Tag um etwa 13 Grad um die Erde herum. Anschaulich wird es, wenn man sich die Zeit notiert, an dem der Mond aufgeht. Nehmen wir an, er ginge genau um zwölf Uhr auf. Würden wir einen Tag später wieder messen, ginge er etwa 51 Minuten später, um 12:51 Uhr, auf. Rechnen wir diese 51 Minuten also zu den 24 Stunden, die die Erde braucht, um sich einmal um sich selbst zu drehen. Teilen wir die Summe jetzt durch zwei, denn während dieser Zeit dreht sich die Erde genau einmal unter den zwei Flutbergen hindurch. Wir kommen dann auf zwölf Stunden und 25,5 Minuten. Das entspricht der Zeit, die zwischen zwei Fluten liegt.

Bei Neu- und Vollmond ist die Flut höher

Auch die Sonne hat einen Einfluss auf Ebbe und Flut. Doch obwohl die Sonne viel mehr Masse hat als der Mond, ist ihr Einfluss auf die Gezeiten nicht einmal halb so groß. Dies liegt an der großen Entfernung der Sonne zur Erde. Denn je größer die Entfernung zweier Körper voneinander ist, desto kleiner ist ihre gegenseitige Anziehungskraft - die Anziehungskraft der Sonne auf die Erde ist deshalb etwa drei Mal so klein.

Je nach Stand des Mondes zur Sonne und Erde hat die Sonne dabei eine verstärkende oder auch abschwächende Wirkung auf die Gezeiten. Stehen Sonne, Erde und Mond auf einer Linie (siehe Bild rechts), so addieren sich die "Gezeitenkräfte" von Sonne und Mond. Der "Tidenhub" ist dann besonders groß. Tidenhub nennt man den Höhenunterschied zwischen dem Wasserpegel bei Ebbe und Flut. Da besonders viel Wasser zu den Flutbergen strömt, ist die Flut höher als sonst. Man nennt diese besondere Gezeitenform dann Springtide. Auch die Ebbe ist bei der Springtide ausgeprägter als sonst.

In einigen Buchten kommt es bei einer Springflut manchmal sogar zu einer sichtbaren Gezeitenwelle. Gefährlich kann eine Springflut dann werden, wenn sich ein Sturm bildet und den Wasserpegel noch zusätzlich erhöht. Geschehen ist dies zum Beispiel 1962 in Hamburg. Damals waren die Deiche den Wassermassen nicht gewachsen und brachen

schließlich ein. Mehrere Stadtteile standen unter Wasser und es kamen 315 Menschen ums Leben.

Zum Glück kommt es nur selten zu solchen Extremfluten. Eine normale Springtide gibt es alle 14 Tage, nämlich bei Neu- und bei Vollmond. Immer dann stehen alle drei Himmelskörper auf einer Linie. Bei zu- und abnehmendem Halbmond stehen Erde, Mond und Sonne etwa in einem rechten Winkel zueinander (siehe Bild links). Die Gezeitenkräfte von Mond und Sonne wirken dann gegeneinander und die Flutberge sind kleiner als bei einer sonstigen Flut. Diese besondere Gezeitenform nennt man Nippflut.

Gefährliche Flut

Immer wieder ertrinken Menschen, weil sie von der schnell ansteigenden Flut überrascht werden. Meistens sind es Touristen, die sich unwissend den Gefahren der Flut aussetzen. Dabei gehen sie bei Ebbe nichtsahnend Muscheln sammeln oder durchs Watt spazieren. Oft laufen sie weite Strecken dem Wasser entgegen, um zu baden und wissen nicht viel von Ebbe und Flut. Doch plötzlich steigt die Flut so rasch an, dass die Badenden nicht schnell genug an Land kommen.

Erst 2004 sind an der englischen Küste 18 chinesische Touristen ertrunken. Sie waren zum Muschelsammeln durchs Watt gelaufen und von der Flut überrascht worden. Trotz des Einsatzes von Armee und Polizei konnte nicht einmal die Hälfte der Gruppe gerettet werden. Dies verdeutlicht, wie extrem gefährlich Unwissenheit über die Gezeiten sein kann. Deshalb sollte man einige Regeln beachten, wenn man durchs Watt wandert.

3) Die Hauptsätze der Wärmelehre

Stellt man einen heißen Körper in eine kältere Umgebung, so kühlt er ohne Fremdeinwirkung allmählich ab. Nach einiger Zeit ist er im so genannten thermischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung, nimmt also im Normalfall die gleiche Temperatur wie seine Umgebung an. Ebenso werden anfänglich kalte Körper durch eine warme Umgebung bis zum thermischen Gleichgewicht erwärmt.

Erster Hauptsatz der Wärmelehre

Energie kann nicht erzeugt oder vernichtet, sondern nur von einer Energieform in eine andere umgewandelt werden. Dieser Erhaltungssatz gilt nicht nur für mechanische Energieformen, sondern auch für Wärmemengen. Wird einem System von außen eine Wärmemenge ΔQ zugeführt oder eine Arbeitsmenge ΔW am System verrichtet, so erhöht sich dessen „innere“ Energie ΔU um genau diesen Betrag:

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

Dieser Zusammenhang, der erstmals von **Julius Robert Mayer** und **Hermann von Helmholtz** formuliert wurde, wird erster Hauptsatz der Wärmelehre genannt. Ist ein System nach außen hin thermisch isoliert („abgeschlossenes System“), so bleibt die innere Energie U des Systems erhalten. Wird einem System Arbeit oder Wärme zugeführt, so erhalten die entsprechenden Mengen in den obigen Gleichungen üblicherweise ein positives, andernfalls ein negatives Vorzeichen.

Erster Hauptsatz: Energiebilanz eines thermodynamischen Systems.

Beispiele:

- Erhitzt man beispielsweise einen Topf mit Wasser auf einer elektrischen Herdplatte, so führt man dem System (Topf) von außen eine Wärmemenge Q zu. Wird vom Topf weniger Wärme an die Umgebung abgegeben (beispielsweise durch Wärmestrahlung), so erhöht sich seine innere Energie und damit seine Temperatur.

Im umgekehrten Fall gibt jedes System durch **Wärmeleitung** und/oder **Wärmestrahlung** eine Wärmemenge $-Q$ ab, wenn es in eine kältere Umgebung gebracht wird. In beiden Fällen ändert sich die innere Energie, ohne dass mechanische Arbeit verrichtet wird.

- Reibt man sich die Hände, so erhöht sich deren Temperatur, ohne dass von außen Wärme zugeführt wird. In diesem Fall führt die verrichtete Reibungsarbeit zu einer Erhöhung der inneren Energie.

Vorgänge wie im letzten Beispiel, bei denen innere Energie (im Idealfall) ohne Wärmeaustausch in Arbeit umgewandelt wird, nennt man **adiabatisch**. Sie lassen sich aufgrund stets auftretender Wärmestrahlung und nur endlichen Wärmewiderstandswerten nie vollständig verwirklichen, können aber beispielsweise bei sehr schnell stattfindenden Prozessen zumindest in guter Näherung auftreten.

Der erste Hauptsatz der Wärmelehre schließt als Energie-Erhaltungssatz die Existenz einer Maschine aus, die ohne Zufuhr von Energie mechanische Arbeit verrichten kann.

Zweiter Hauptsatz der Wärmelehre

Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre ist im Laufe der Geschichte auf verschiedene Arten formuliert worden, wobei sich herausgestellt hat, dass diese verschiedenen Formulierungen gleichwertig sind.

Formulierung nach Clausius

Der erste Hauptsatz der Wärmelehre schließt zwar die Existenz einer Maschine aus, die Arbeit ohne Energiezufuhr verrichten kann. Es wäre mit dem ersten Hauptsatz jedoch denkbar, dass eine Maschine, deren innere Energie U unverändert bleibt, ausschließlich Wärme in Arbeit umwandelt. Beispielsweise wäre es nach dem ersten Hauptsatz möglich, dass ein Schiff auf einem Ozean in der Lage ist mechanische Arbeit zu verrichten alleinig dadurch, dass es dem Ozean Wärme entzieht.

Der zweite Hauptsatz schließt die Existenz eines solchen „Perpetuum Mobiles“ aus, indem er vorgibt, in welche *Richtung* eine Übertragung von Wärme stattfindet. Diese Tatsache wurde ursprünglich von **Rudolf Clausius** formuliert:

„Wärme fließt immer vom wärmeren System in Richtung eines kälteren Systems.“

Bsp.: Ehebett im kalten Schlafzimmer und Füße.

Alle realen Prozesse, in denen Reibung auftritt, sind irreversibel, da die durch Reibungsarbeit erzeugte Wärme nicht wieder zurück in mechanische Arbeit umgewandelt werden kann.

Entropie

Neben der oben beschriebenen Formulierung von Clausius gibt es eine weitere Möglichkeit, den zweiten Hauptsatz der Wärmelehre zu beschreiben; eine zentrale Bedeutung hat hierbei der Begriff der „Entropie“.

Als „Entropie“ S bezeichnet man den „Grad der Unordnung“ eines thermodynamischen Systems. Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre schließt hierbei aus, dass bei spontan (also ohne Energiezufuhr) ablaufenden Prozessen aus Unordnung plötzlich Ordnung entsteht. Ein Schreibtisch räumt sich beispielsweise auch nicht von selbst auf, sondern wird im Lauf der Zeit immer chaotischer, bis man selbst mal wieder Arbeit verrichtet und Ordnung herstellt; ebenso entstehen bei einem herunterfallenden Glas von selbst viele chaotisch verteilte Glasscherben, aber beim Herunterfallen von Glasscherben wird sich nicht von selbst wieder ein Glasgefäß bilden.

Auf mikroskopischer Ebene kann man sich mechanische Arbeit als gezielte Verschiebung von Teilchen im Raum vorstellen – Wärme hingegen stellt eine ungerichtete Bewegung von Teilchen dar. Es ist möglich eine gerichtete Bewegung in eine ungerichtete umzuwandeln (Arbeit \rightarrow Wärme), doch es ist ohne ein Verrichten von Arbeit nicht möglich, eine ungerichtete Bewegung vieler Teilchen eine vollständig gerichtete Bewegung zu erzeugen.

- Die Entropie S ist ein Maß für die Unordnung und gleichzeitig ein Maß für die Wahrscheinlichkeit eines Zustandes. Die Entropie kann in einem abgeschlossenen System nie abnehmen. Systeme streben aus eigenem Antrieb immer in den Zustand der höchstmöglichen Entropie (2. Hauptsatz).

Dritter Hauptsatz der Wärmelehre

Der dritte Hauptsatz der Wärmelehre, auch Nernst'sches Wärmetheorem genannt, macht eine Aussage über das Verhalten von Stoffen in unmittelbarer Nähe des absoluten Nullpunktes, also von 0 Kelvin. Man kann diesen Hauptsatz in Kurzform folgendermaßen formulieren:

„Es ist unmöglich, ein System durch irgendeinen Vorgang auf den absoluten Nullpunkt abzukühlen.“

Verwendet man den Begriff der Entropie, so lässt sich der dritte Hauptsatz der Wärmelehre gleichwertig auch folgendermaßen formulieren:

„Am absoluten Nullpunkt ist die Entropie eines Systems gleich Null.“

Anschaulich kann man sich dies etwa so vorstellen: Eine Entropie von Null ist gleichbedeutend mit einer perfekten Ordnung. Um eine solche perfekte Ordnung zu erreichen, muss Arbeit verrichtet beziehungsweise Energie zugeführt werden. Eine Energiezufuhr bewirkt jedoch, dass die Temperatur nicht den absoluten Nullpunkt erreichen kann. Auch mit dieser Formulierung wird somit ausgeschlossen, dass der absolute Temperatur-Nullpunkt erreicht werden kann.

4)Der Luftdruck

Luftdruck und Wetter hängen eng miteinander zusammen. Ein Hochdruckgebiet ist häufig mit schönem Wetter, ein Tiefdruckgebiet mit schlechtem Wetter verbunden. Von den Druckunterschieden in der Atmosphäre ist es auch abhängig, in welcher Richtung und mit welcher Geschwindigkeit Wind weht. Druck- und Temperaturunterschiede bestimmen Luftströmungen an Bergen (Steig- und Fallwinde), Aufwinde oder die Entstehung von Föhn. Je nach den vorhandenen Bedingungen entstehen Wolken und Niederschlag in Form von Regen, Schnee oder Hagel. Aus zahlreichen Beobachtungsdaten und Messwerten ergeben sich kurz- und mittelfristige Wettervorhersagen.

Luftdruck und Wetter hängen eng miteinander zusammen. Ein Hochdruckgebiet ist häufig mit schönem Wetter, ein Tiefdruckgebiet mit schlechtem Wetter verbunden. Von den Druckunterschieden in der Atmosphäre ist es auch abhängig, in welcher Richtung und mit welcher Geschwindigkeit Wind weht. Druck- und Temperaturunterschiede bestimmen Luftströmungen an Bergen (Steig- und Fallwinde), Aufwinde oder die Entstehung von Föhn. Je nach den vorhandenen Bedingungen entstehen Wolken und Niederschlag in Form von Regen, Schnee oder Hagel. Aus zahlreichen Beobachtungsdaten und Messwerten ergeben sich kurz- und mittelfristige Wettervorhersagen.



Tiefdruckgebiete und Hochdruckgebiete

Der Luftdruck hat am Erdboden einen Normalwert von 1013,25 hPa. In Abhängigkeit von der Wetterlage kann dieser Luftdruck aber zwischen etwa 970 hPa und 1030 hPa schwanken.

Gebiete mit niedrigem Luftdruck werden als Tiefdruckgebiete oder Tiefs, solche mit hohem Luftdruck als Hochdruckgebiete oder Hochs bezeichnet.

Diese Gebiete verschiedenen Luftdrucks kommen durch die unterschiedliche Erwärmung von Festland und Meer und die damit verbundenen Luftströmungen zustande. Dabei spielen sowohl globale als auch regionale Vorgänge eine Rolle. Die Lage von Tiefdruck- und Hochdruckgebieten ändert sich ständig. Damit entstehen unterschiedliche Wetterlagen und verschiedene Windrichtungen. Luft strömt dabei am Boden immer von Gebieten hohen Luftdrucks in Bereiche niedrigen Luftdrucks, vom Hoch zum Tief (Bild 2). Tiefdruckgebiete und Hochdruckgebiete werden bei uns mit weiblichen oder männlichen Vornamen benannt, wobei es früher üblich war, dass Tiefs stets männliche und Hochs stets weibliche Vornamen erhielten.

Im Tiefdruckgebiet steigt die Luft, die vom Hochdruckgebiet abgeflossen ist, sich erwärmt hat und an der Erdoberfläche Feuchtigkeit aufgenommen hat, nach oben. Es kommt dabei zur Abkühlung der Luft, zu Wolkenbildung und häufig zu Niederschlag. Tiefdruckgebiete sind daher meist mit schlechtem Wetter verbunden.

Im Hochdruckgebiet dagegen fließt die Luft nach unten ab. Das ist verbunden mit Temperaturzunahme und Wolkenauflösung. Im Bereich von Hochdruckgebieten herrscht meist schönes Wetter.

Auf der Nordhalbkugel dreht sich ein Tiefdruckgebiet im Gegenuhrzeigersinn, auf der Südhalbkugel hingegen im Uhrzeigersinn. Bei auf Satellitenbildern unsichtbaren Hochdruckgebieten ist es hingegen gerade umgekehrt.

5) Die Atmosphäre

Die **Atmosphäre** der Erde, auch **Erdatmosphäre** (von altgriechisch ἀτμός *atmós*, deutsch ‚Dampf‘ und σφαῖρα *sfaira*, deutsch ‚Kugel‘) ist die gasförmige Hülle der Erdoberfläche. Sie hat einen hohen Anteil an N- und O-Atomen.

Ihre vertikale Gliederung ist durch unterschiedliche Temperaturen bedingt. Das Wettergeschehen findet in den unteren etwa 15 Kilometern statt, der Troposphäre. Die höheren Schichten haben keinen so hohen Einfluss mehr.

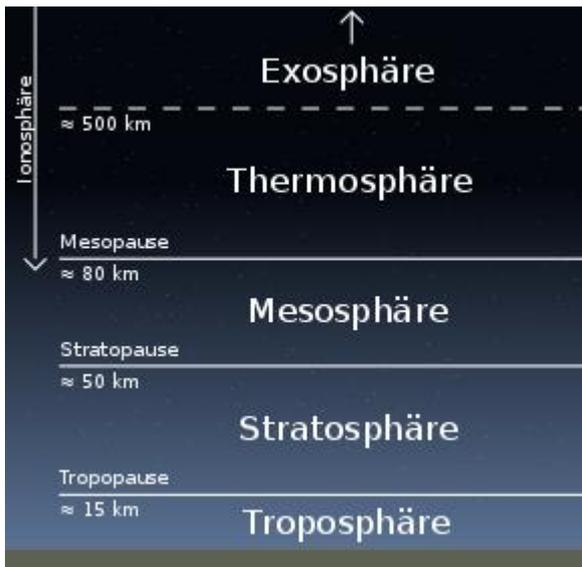
Die bodennahen Schichten bis in etwa 90 km Höhe haben eine recht gleichförmige Zusammensetzung, weshalb man auch von Homosphäre spricht. Was als Luft bezeichnet wird, besteht im Wesentlichen bei Außerachtlassen des wechselnden Wasserdampfgehalts (d.h. in Volumenprozent trockener, wasserdampffreier Luft) aus:

78,084 % (N₂), 20,946 % (O₂) und 0,934 % (Ar), dazu Aerosole und Spurengase, darunter (CO₂, mit derzeit 0,04 %, nach Wasserdampf der wichtigste Verursacher des Treibhauseffektes, ferner (CH₄), (O₃), (SO₂) und einige Stickstoffverbindungen. ^[1]

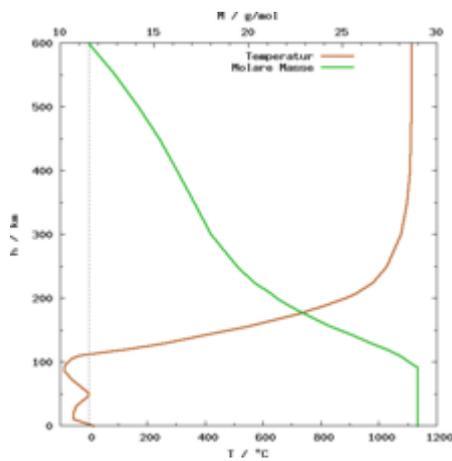
Für die Entstehung des **Wetters** ist neben der Energiezufuhr durch die Sonnenstrahlung und ihrer tages- und jahreszeitlichen Schwankung hauptsächlich der Gehalt an Wasserdampf verantwortlich. Dieser kommt in wechselnder Konzentration von 0 % Vol. bis etwa 4 % Vol. in der Luft vor, siehe Luftfeuchtigkeit. Die regionale Sonneneinstrahlung hängt über den Gehalt an Aerosolen auch von der Transparenz der Atmosphäre ab.

Die Hochatmosphäre ist ein bereits sehr dünnes Gas, in das auch hochenergetische Anteile der Sonnenstrahlung noch eindringen können. Durch kurzwelliges UV-Licht werden die Moleküle dissoziiert und teilweise ionisiert. Ferner kommt es in Höhen über etwa 100 km auch zu einer Entmischung der Bestandteile nach ihrer unterschiedlichen molaren Masse, weshalb dieser Abschnitt auch Heterosphäre genannt wird. Mit wachsender Höhe nehmen daher die Anteile leichter Teilchen wie Wasserstoffatome und Helium zu. Diese beiden Elemente entweichen allmählich in den Weltraum, sowohl thermisch bedingt als auch nach Photoionisation und Ladungstransfer.

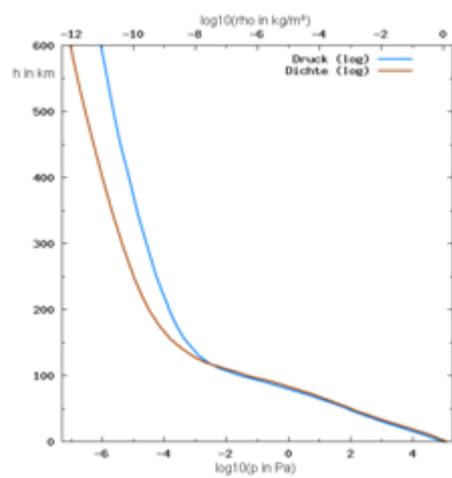
Aufbau



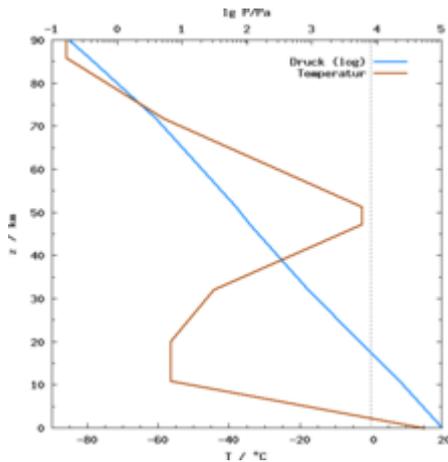
Aufbau der Atmosphäre der Erde



Durchschnittliche Temperatur und molare Masse der Luft in Abhängigkeit von der Höhe



Durchschnittlicher Luftdruck und Luftdichte in Abhängigkeit von der Höhe



Standardatmosphäre 1976 bis 90 km Höhe

Schichtung

Die Atmosphäre weist eine Masse von etwa $5,15 \cdot 10^{18}$ kg auf, also knapp ein Millionstel der Erdmasse. Sie besteht hinsichtlich ihres vertikalen Temperaturverlaufs, insbesondere dessen Gradienten, aus mehreren Schichten:

- Troposphäre von der Erdoberfläche bis zur Tropopause in Höhen zwischen 7 km (Polargebiete) und 17 km (Tropen)
- Stratosphäre bis zur Stratopause in 50 km Höhe
- Mesosphäre bis zur Mesopause in 80 bis 85 km Höhe
- Thermosphäre (siehe auch unten, Ionosphäre)
- Exosphäre darüber.

Die Troposphäre wird auch als *untere Atmosphäre* bezeichnet, Stratosphäre und Mesosphäre gemeinsam als *mittlere Atmosphäre* und die Thermosphäre als *obere Atmosphäre*.

Grenze zum Weltraum

Der Übergang zwischen Exosphäre und Weltraum ist kontinuierlich, man kann daher keine scharfe Obergrenze der Atmosphäre ziehen. In der Exosphäre (oberhalb der Exobase in ~600 km Höhe) ist die mittlere freie Weglänge so groß, dass Teilchen entweichen können, wenn sie Fluchtgeschwindigkeit erreichen können. Einzelnen Wasserstoff-Teilchen wird dies durch Zusammenstöße bereits bei mittleren Geschwindigkeiten von 3-4 km/s möglich.

Seitens der Fédération Aéronautique Internationale wird die Homopause bzw. eine Höhe von rund 100 km (Kármán-Linie) als Grenze angesehen. Diese Definition ist international weitestgehend anerkannt, wenn sie auch keine uneingeschränkte Gültigkeit besitzt. So wird zum Beispiel von der NASA die Mesopause (etwa 80 km) als Grenze definiert.

Die Entwicklung der Atmosphäre ist ein Teil der chemischen Evolution der Erde und zudem ein wichtiges Element der Klimageschichte. Sie wird heute in vier wesentliche Entwicklungsstufen unterschieden.

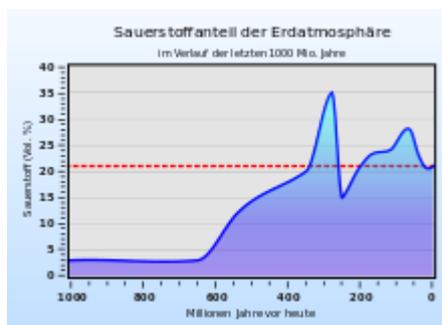
Am Anfang stand die Entstehung der Erde vor etwa 4,56 Milliarden Jahren. Dabei verfügte sie schon sehr früh über eine vermutlich aus Wasserstoff (H_2) und Helium (He) bestehende Gashülle, die jedoch wieder verloren ging.

Der Vulkanismus als wesentlicher Faktor der Atmosphärenentwicklung

Durch die langsame Abkühlung der Erde und den dabei auftretenden Vulkanismus kam es zu einer umfangreichen Ausgasung aus dem Erdinneren. Die dadurch erzeugte Atmosphäre bestand zu etwa 80 % aus Wasserdampf (H_2O), zu 10 % aus Kohlendioxid (CO_2) und zu 5 bis 7 % aus Schwefelwasserstoff. Dabei handelt es sich um die Produkte des Vulkanismus, die auch heute noch beobachtet werden können. Der hohe Anteil des Wasserdampfs erklärt sich dadurch, dass die Atmosphäre zu diesem Zeitpunkt noch zu warm war, um Niederschläge bilden zu können. Es gab also noch keine Gewässer auf der Erde. Der eigentliche Ursprung des Wassers ist umstritten.

Nachdem die Temperatur der Atmosphäre unter den Siedepunkt des Wassers fiel, kam es zu einem extrem langen Dauerregen, nach dessen Ende sich die Ozeane gebildet hatten und dementsprechend die anderen Atmosphärgase relativ zum Wasserdampf angereichert wurden.

Die hohe UV-Einstrahlung bedingte eine photochemische Zerlegung der Wasser-, Methan- und Ammoniakmoleküle, wodurch sich Kohlenstoffdioxid und Stickstoff relativ anreicherten. Die leichten Gase wie Wasserstoff oder Helium verflüchtigten sich in den Weltraum. Kohlenstoffdioxid wurde in großen Mengen in den Ozeanen gelöst und von C-autotrophen Mikroorganismen zum Teil verbraucht. Unverändert blieb der inerte Stickstoff. Dieser wurde mit der Zeit weiter relativ angereichert und bildete vor etwa 3,4 Milliarden Jahren den Hauptbestandteil der Atmosphäre.



Entwicklung des O_2 -Gehaltes während der letzten Jahrmilliarde

Der Sauerstoff O_2 spielt die Hauptrolle bei der weiteren Entwicklung zur heutigen Atmosphäre. Oxygen photosynthetisch aktive Cyanobakterien führten als C-Autotrophe zu einem weiteren Absinken der Kohlenstoffdioxidkonzentration, bildeten aber vor allem (möglicherweise schon vor etwa 3,5 Milliarden Jahren beginnend) Sauerstoff. Die Sauerstoffkonzentration der Atmosphäre blieb jedoch zunächst gering, weil der gebildete Sauerstoff in den Ozeanen bei der Oxidation von Eisen(II)-Ionen und Schwefelwasserstoff verbraucht wurde. Erst vor etwa zwei Milliarden Jahren begann Sauerstoff in die Atmosphäre zu entweichen, nämlich als die mit Sauerstoff reagierenden Stoffe knapp wurden. Vor einer Milliarde Jahren überstieg die Sauerstoffkonzentration der Atmosphäre drei Prozent, wodurch sich im Verlauf der nächsten 400 Millionen Jahre allmählich eine erste Ozonschicht bilden konnte. Vor 500–600 Millionen Jahren stieg der Sauerstoffgehalt, bedingt durch das

erste massenhafte Auftreten von Landpflanzen, rapide an und erreichte vor 350 Millionen Jahren erstmals das heutige Niveau. Nach mehreren starken Schwankungen während des Erdmittelalters pendelte sich der Luftsauerstoff schließlich auf den heutigen Wert von 21 % ein.

6) Strahlungsgesetze

Eine Glühwendel leuchtet bei ca. 700 °C rot, bei 2500 °C gelborange, bei 5500 °C weiß.

Das **plancksche Strahlungsgesetz** gibt die Verteilung der elektromagnetischen Energie der Wärmestrahlung eines schwarzen Körpers in Abhängigkeit von der Wellenlänge oder der Frequenz der Strahlung an.

Max Planck fand das Strahlungsgesetz im Jahr 1900 und bemerkte, dass eine Herleitung im Rahmen der klassischen Physik nicht möglich ist. Vielmehr erwies es sich als notwendig, ein neues Postulat einzuführen, dem zufolge der Energieaustausch zwischen Oszillatoren und dem elektromagnetischen Feld nicht kontinuierlich, sondern in Form kleinster Energiepakete (später als Quanten bezeichnet) stattfindet. Plancks Herleitung des Strahlungsgesetzes gilt daher heute als die Geburtsstunde der Quantenphysik.

Nach dem Strahlungsgesetz von Kirchhoff sind für jeden Körper für jede Wellenlänge das Absorptionsvermögen und das Emissionsvermögen für thermische Strahlung proportional zueinander. Ein schwarzer Körper (oder auch Schwarzkörper) ist ein hypothetischer Körper, der auf ihn treffende Strahlung jeglicher Wellenlänge und Intensität vollständig absorbiert. Da sein Absorptionsvermögen für jede Wellenlänge den größtmöglichen Wert annimmt, nimmt auch sein Emissionsvermögen für alle Wellenlängen den maximal möglichen Wert an. Ein echter (oder auch *realer*) Körper kann auf keiner Wellenlänge mehr thermische Strahlung aussenden als ein Schwarzkörper, der daher eine ideale thermische Strahlungsquelle darstellt. Da das Spektrum des Schwarzkörpers (auch **Schwarzkörperspektrum** und **Planck-Spektrum** genannt)^{[2][3]} von keinem anderen *Parameter* als der Temperatur abhängt, stellt er ein für zahlreiche Zwecke nützliches *Referenzmodell* dar.

Neben der erheblichen praktischen Bedeutung des Schwarzkörpers gilt die Entdeckung des planckschen Strahlungsgesetzes im Jahre 1900 gleichzeitig als Geburtsstunde der Quantenphysik, da Planck zur Erklärung der zunächst empirisch gefundenen Formel annehmen musste, dass Licht (bzw. elektromagnetische Strahlung im Allgemeinen) nicht kontinuierlich, sondern nur diskret in *Quanten* (heute spricht man von Photonen) aufgenommen und abgegeben wird.

Weiterhin vereinigte und bestätigte das plancksche Strahlungsgesetz Gesetzmäßigkeiten, die schon vor seiner Entdeckung teils empirisch, teils aufgrund thermodynamischer Überlegungen gefunden worden waren, wie z.B.

- das Stefan-Boltzmann-Gesetz, das die abgestrahlte Leistung E eines Schwarzkörpers (proportional zu T^4) angibt.

$$E = \sigma \cdot T^4$$

Bsp.: Emissionsvermögen von Sternen mit verschiedenen Oberflächentemperaturen

- das wiensche Verschiebungsgesetz, das Wilhelm Wien (1864–1928) 1893 formulierte, und das den Zusammenhang zwischen Emissionsmaximum eines Schwarzkörpers und seiner Temperatur herstellt.

$$\Lambda_{\max} \cdot T = \text{const.}$$

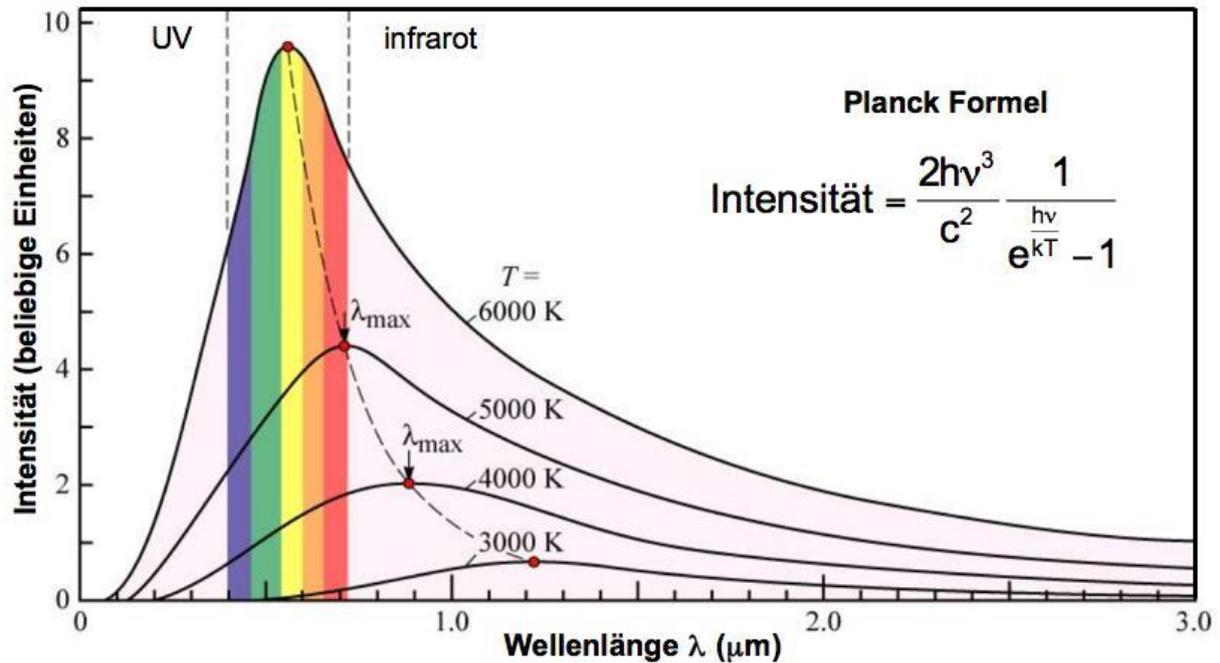
Bsp.: Farbe von stark erhitzten Metallen

Planck stützte sich bei seiner Herleitung des Strahlungsgesetzes nicht auf ältere Ansätze, vielmehr ging er von der Entropie aus und fügte in die Gleichungen probeweise verschiedene Zusatzterme ein, die nach den damaligen Physikkenntnissen zwar unverständlich waren – ihnen aber auch nicht widersprachen. Besonders einfach war ein Zusatzterm, der zu einer Formel führte, die die schon gemessenen Spektralkurven sehr gut beschrieb (1900). Damit blieb diese Formel reine Empirie – aber sie beschrieb die bekannten experimentellen Messungen über das gesamte Frequenzspektrum korrekt. Planck gab sich damit aber nicht zufrieden. Es gelang ihm, die Strahlungskonstanten C und c aus der wienschen Formel durch Naturkonstanten zu ersetzen, nur ein Faktor h („h“^{ilf}) blieb übrig.

Die Quantenhypothese

Ausgehend von der verbesserten empirischen Strahlungsformel kam Planck innerhalb weniger Monate zu einem epochemachenden Ergebnis, es war die Geburtsstunde der Quantenphysik: Er musste sich selbst gegen seine eigene Überzeugung eingestehen, dass die Energieabgabe nicht kontinuierlich erfolgt, sondern nur in Vielfachen von kleinsten „ h “-Einheiten, die ihm zu Ehren dann später als plancksches Wirkungsquantum bezeichnet wurde. Nach dieser von Planck eingeführten Quantenhypothese kann ein Oszillator der Frequenz ν anstelle beliebiger Energiemengen nur ganzzahlige Vielfache der Energie $h\nu$ aufnehmen; insbesondere bedarf er einer Mindestenergie $h\nu$, um überhaupt angeregt zu werden. Schwingungszustände, deren Mindestenergie $h\nu$ deutlich über der thermisch zur Verfügung gestellten Energie kT liegen, können nicht angeregt werden, sie bleiben *eingefroren*. Jene Schwingungszustände, deren Mindestenergie nur wenig über kT liegt, können mit gewisser Wahrscheinlichkeit angeregt werden, so dass von ihnen ein bestimmter Bruchteil zur gesamten Hohlraumstrahlung beiträgt. Lediglich Schwingungszustände mit niedriger Mindestenergie $h\nu$, also kleineren Frequenzen, können die angebotene thermische Energie vollständig aufnehmen und werden (im Mittel) mit Sicherheit angeregt.

Weil die mittlere Energie bei hohen Frequenzen stärker abnimmt als die Zustandsdichte anwächst, nimmt die spektrale Energiedichte – als deren Produkt – zu höheren Frequenzen hin wieder ab – nachdem sie ein Maximum durchlaufen hat – und die Gesamtenergiedichte bleibt endlich. So erklärte Planck mittels seiner Quantenthese, warum die von der klassischen Thermodynamik vorausgesagte Ultraviolett-Katastrophe in Wirklichkeit nicht stattfindet.



Plancksche Strahlungsspektren für verschiedene Temperaturen

Das obige Bild zeigt plancksche Strahlungsspektren eines Schwarzstrahlers für verschiedene Temperaturen zwischen 300 K und 6000 K. Man erkennt die typische Form mit einem deutlich ausgeprägten Strahlungsmaximum, einem steilen Abfall zu kurzen Wellenlängen hin und einem länger auslaufenden Abfall zu großen Wellenlängen hin. Die Lage des Strahlungsmaximums verschiebt sich, wie es das Wien'sche Verschiebungsgesetz verlangt, mit zunehmender Temperatur zu kürzeren Wellenlängen. Gleichzeitig nimmt gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz die gesamte spezifische Ausstrahlung mit der vierten Potenz der absoluten Temperatur T zu.

Dieses überproportionale Anwachsen der Strahlungsintensität mit steigender Temperatur erklärt die mit steigender Temperatur zunehmende Bedeutung der Wärmeabstrahlung gegenüber der über Konvektion abgegebenen Wärme.