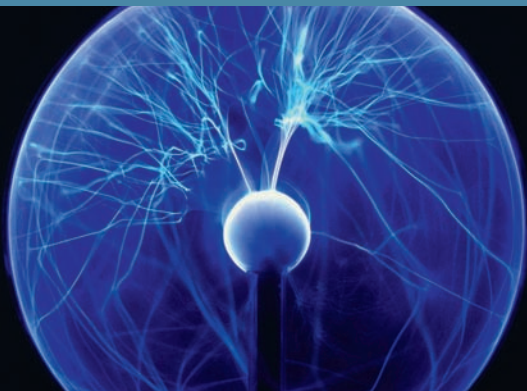
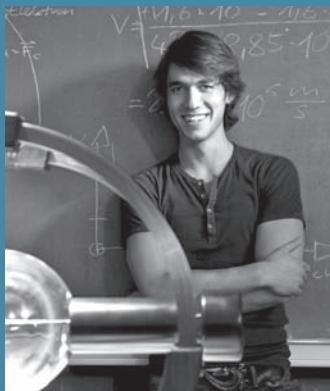


# DUDEN



## Schülerduden Physik

Das Fachlexikon von A–Z

Mit  
Referate-  
manager  
als  
Down-  
load

## Schülerduden **Physik**





## Alle Schülerduden im Überblick:

Rechtschreibung  
Grammatik  
Fremdwörterbuch  
Lateinisch-Deutsch  
Literatur  
Kunst  
Musik  
Religion und Ethik  
Philosophie

Mathematik I  
Mathematik II  
Physik  
Chemie  
Biologie  
Geografie  
Politik und Gesellschaft  
Geschichte

**Schülerduden**

# Physik

Das Fachlexikon von A–Z

**7., aktualisierte Auflage**

Herausgegeben und bearbeitet  
von der Redaktion Schule und Lernen

**Dudenverlag**

Mannheim · Leipzig · Wien · Zürich

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Das Wort **Duden** ist für den Verlag Bibliographisches Institut AG als Marke geschützt.

Alle Rechte vorbehalten.

Nachdruck, auch auszugsweise, vorbehaltlich der Rechte, die sich aus den Schranken des UrhG ergeben, nicht gestattet.

Für die Inhalte der im Buch genannten Internetlinks, deren Verknüpfungen zu anderen Internetangeboten und Änderungen der Internetadressen kann der Verlag keine Verantwortung übernehmen und macht sich diese Inhalte nicht zu eigen. Ein Anspruch auf Nennung besteht nicht.

© Bibliographisches Institut AG, Mannheim 2010 D C B A

**Redaktionelle Leitung** Dipl.-Phys. Martin Bergmann

**Redaktion** Dr. Matthias Delbrück

**Grafik** Bibliographisches Institut AG

**Herstellung** Annette Scheerer

**Umschlaggestaltung** Hemm-communication design, Filderstadt

**Umschlagabbildungen** Clive Streeter / Dorling Kindersley / Getty Images,

München: Plasmakugel; Matthias Turger / Photodisc / Getty Images,

München: Schüler

**Satz** Bibliographisches Institut AG, Mannheim

**Druck und Bindung** Offizin Andersen Nexö Leipzig GmbH

Printed in Germany

ISBN 978-3-411-05377-3

# Inhaltsverzeichnis

Benutzungshinweise	6
--------------------	---

## Lexikon A-Z 7-504

### TOPTHEMEN:

Atom	25
Chaostheorie	59
Einstein	91
Elektrosmog	109
Elementarteilchen	117
Galilei	159
Halbleiter	181
Laser	257
Newton	311
Radioaktivität	353
Relativitätstheorie	367
Schrödingers Katze	387
Supraleitung	435
Urknall	461
Vakuum	469

## Anhang

Griechische Buchstaben in der Physik	505
Größen, Einheiten und Naturkonstanten	506
Chemische Elemente und Periodensystem	511
Literatur- und Internethinweise	514
Ausgewählte Kurzbiografien	516
Abkürzungen	525
Bildquellen	526

# Benutzungshinweise

## Lexikon A–Z

■ Die alphabetische Sortierung der blauen Hauptstichwörter ordnet Umlaute wie die einfachen Selbstlaute ein, also ä wie a, ö wie o usw. Das ß wird wie ss eingeordnet.

■ Mehrteilige Hauptstichwörter werden ohne Rücksicht auf die Wortgrenzen durchalphabetisiert, z. B. **spezifischer Widerstand, spezifisches Gewicht, spezifische Wärmekapazität**.

■ Begriffe, die denselben Sachverhalt wie das Hauptstichwort beschreiben (Synonyme), werden, gegebenenfalls mit Sprachangabe, in runden Klammern angegeben, z. B. **Aperturblende (Öffnungsblende)**.

■ Mehrfachbedeutungen des Hauptstichworts werden durch das Symbol ♦ angezeigt, z. B. **Gitter** als Begriff der Elektronik, der Festkörperphysik und der Optik.

■ Die Betonung eines Stichworts wird durch einen untergesetzten Strich (betonter langer Vokal), z. B. **Amplitude**, oder einen untergesetzten Punkt (betonter kurzer Vokal), z. B. **Akustik**, gekennzeichnet.

■ Weitere Aussprachehilfen werden in der gebräuchlichen internationalen Lautschrift angegeben, Hinweise zur Herkunft folgen dem Hauptstichwort in eckigen Klammern.

■ Begriffe oder Bezeichnungen, die mit dem Hauptstichwort in enger inhaltlicher Beziehung stehen, werden als Unterstichwörter hervorgehoben, z. B. **Ozonloch** unter **Atmosphäre**.

■ Der Verweispeil (t) besagt, dass ein Begriff unter einem anderen Stichwort behandelt wird oder dort ergänzende Informationen zu finden sind.

## Topthemen

■ Auf farbigen Sonderseiten informieren ausgewählte Topthemen zu zentralen, besonders interessanten und aktuellen Begriffen.

Sie bieten vertieftes Wissen, dienen als Einstieg für Referate oder laden ein zum Lesen und Mitdenken.

■ Jedes Topthema schließt mit Tipps, Internethinweisen und Literaturempfehlungen für diejenigen ab, die sich noch eingehender mit diesem Thema beschäftigen möchten.

■ Eine Mind-Map am Artikelende vernetzt das Topthema mit anderen Stichwörtern des Schülerdudens. Bei diesen Stichwörtern finden sich wichtige Zusatzinformationen oder Erläuterungen zu verwandten Themen.

## Anhang

■ Verschiedene Übersichten stellen häufig benötigte Informationen und Zahlen zusammen (vgl. Inhaltsverzeichnis).

■ Die Literatur- und Internethinweise führen zu weiter gehenden Informationen rund um das Thema Physik.

■ Eine Zusammenstellung ausgewählter Kurzbiografien präsentiert bedeutende Physiker und Physikerinnen, ihre wichtigsten Arbeitsgebiete und ihre wichtigsten Leistungen.

■ Das Abkürzungsverzeichnis stellt die im Text verwendeten Abkürzungen zusammen.

## Referatemanager Physik

■ Der Referatemanager ist eine Software, die auf einfache Weise Recherche, Materialverwaltung, Erstellung und Präsentation eines Referats oder einer Facharbeit unterstützt.

■ Der Referatemanager enthält außerdem das Einstiegsmaterial zu 50 typischen Referatethemen aus der Physik.

■ Mithilfe des Passworts lässt sich der Referatemanager kostenlos aus dem Internet downloaden. Wie das geht, ist im vorderen Buchdeckel beschrieben.

**a:**

- ◆ Abk. für den ↑Einheitenvorsatz Atto (Trillionstel =  $10^{-18}$ -fach).
- ◆ Einheitenzeichen für die Flächeneinheit Ar ( $1\text{ a} = 100\text{ m}^2$ ).
- ◆ Einheitenzeichen für die Zeiteinheit ↑Jahr (von lat. annum).
- ◆ ( $\vec{a}$ ): Formelzeichen für die ↑Beschleunigung (von engl. acceleration).

**A:**

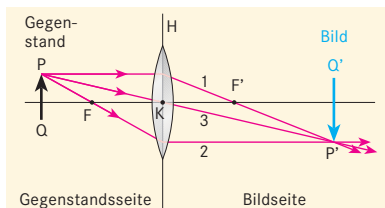
- ◆ Einheitenzeichen für ↑Ampere.
- ◆ (A): Formelzeichen für ↑Abbildungsmaßstab.
- ◆ (A): Formelzeichen für ↑Aktivität.
- ◆ (A): Formelzeichen für ↑Auflösungsvermögen.
- ◆ (A): Formelzeichen für ↑Massenzahl (Nukleonenzahl).

**Å:** Einheitenzeichen für ↑Ängström.

**Abbildung (optische Abbildung):** die Erzeugung eines Bildes von einem Gegenstand mithilfe der von ihm ausgehenden oder an ihm reflektierten Lichtstrahlen, wobei Brechungs- und Reflexionserscheinungen ausgenutzt werden.

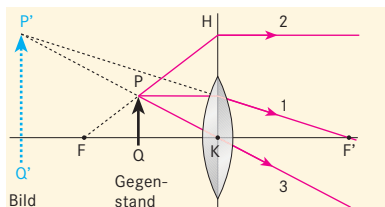
Das von einem Punkt P des Gegenstands (**Gegenstandspunkt**) ausgehende Strahlenbündel wird dabei beim Durchgang durch eine ↑Linse oder ein Linsensystem gebrochen bzw. an einem ↑Spiegel reflektiert und im Idealfall wieder in einem Punkt P', dem **Bildpunkt**, vereinigt. Die Gesamtheit der Bildpunkte ergibt das Bild Q' des Gegenstands Q. In der Realität wird das Bild aber oft durch ↑Abbildungsfehler beeinträchtigt. Zur Berechnung der Bildpunkte gilt die für das jeweilige optische System (z.B. Linse, Wölb-, Hohlspiegel) charakteristische ↑Abbildungsgleichung. Sie nimmt für Strahlen dicht an der optischen Achse und parallel zu ihr (**achsennahe** und **achsenparallele Strahlen**) eine besonders einfache Form an.

Sind die ↑Brennweiten in dem optischen System bekannt, so lässt sich das Bild (abgesehen von Abbildungsfehlern) auch zeichnerisch bestimmen. Dabei wird ausgenutzt, dass sich *alle* von einem Gegenstandspunkt



**Abbildung (Abb. 1):** Bei der Konstruktionsweise des Bildes sind der bildseitige Brennstrahl 1, der gegenstandsseitige Brennstrahl 2 und der Hauptstrahl 3 ausgezeichnet.

ausgehenden Strahlen im entsprechenden Bildpunkt wieder schneiden. Zur Konstruktion des Bildpunkts genügen also zwei beliebige Strahlen. Man wählt daher von den durch den Gegenstandspunkt P gehenden Strahlen diejenigen zwei Strahlen, deren



**Abbildung (Abb. 2):** bildseitiger Brennstrahl 1, gegenstandsseitiger Brennstrahl 2 und Hauptstrahl 3 bei der Konstruktion eines virtuellen Bildes

Verlauf durch die Eigenschaften des optischen Systems besonders leicht zu bestimmen ist. Hierfür kommen infrage (Abb. 1):

- der von P aus parallel zur optischen Achse einfallende Strahl (**Parallelstrahl**), der

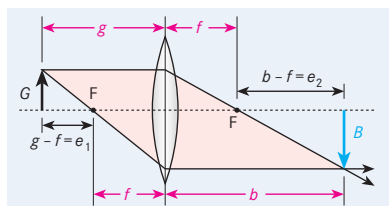


nach Brechung an der Linse als bildseitiger Brennstrahl durch den bildseitigen Brennpunkt  $F'$  geht;

- der durch  $P$  und den gegenstandsseitigen Brennpunkt  $F$  gehende Strahl (**gegenstandsseitiger Brennstrahl**), der das System nach Brechung an der Linse als Parallelstrahl verlässt;
- der von  $P$  zum Linsenmittelpunkt  $K$  laufende Strahl (**Hauptstrahl**), der nach Durchgang durch die Linse seine Richtung nicht geändert hat. Bei dünnen Linsen wird er auch als **Mittelpunktstrahl** bezeichnet.

Unter bestimmten Bedingungen ( $\uparrow$ Abbildungsgleichung) vereinigen sich die aus dem optischen System austretenden Strahlen auf der Gegenstandsseite nicht, sondern nur ihre rückwärtige Verlängerung. Dann spricht man von einem  $\uparrow$ virtuellen Bild (Abb. 2).

Diese zeichnerische Konstruktion mit der Brechung an *einer* Ebene gilt nur für dünne Linsen, wie sie in der Schule durchweg benutzt werden. Bei dicken Linsen muss man dagegen *zwei*  $\uparrow$  Hauptebenen unterscheiden.



**Abbildungsgleichung:** zur Begriffsbildung bei der gewöhnlichen und bei der newtonschen Form der Abbildungsgleichung

**Abbildungsfehler:** bei einer optischen  $\uparrow$ Abbildung die Abweichungen (Aberrationen) von den Abbildungsgesetzen dünner Linsen. Bei einfarbigem (monochromatischem) Licht treten folgende A. auf:

- **Öffnungsfehler** (sphärische Aberration): Hier werden nicht alle Lichtstrahlen eines parallel zur optischen Achse auf die Linse einfallenden Bündels in einem Punkt gesammelt. Für solche Fehler sind bei sphärischen Linsen die achsenfernen Strahlen verantwortlich.
- **Astigmatismus:** Punkte außerhalb der optischen Achse werden nicht punktförmig abgebildet. In zwei von der Linse unterschiedlich entfernten Ebenen entstehen senkrechte Striche. Ursache des Astigmatismus ist die unterschiedliche Brechkraft einer Linse in zwei zueinander senkrechten Richtungen.
- **Bildfeldwölbung:** Die Punkte einer Ebene werden nicht genau auf eine Ebene abgebildet, sondern auf eine Rotationsfläche um die Linsenachse.
- **Asymmetriefehler** (Koma): Hier wird ein schief zur optischen Achse einfallendes Parallelstrahlbündel, das durch eine Blende begrenzt wird, nicht mehr rotationssymmetrisch zur optischen Achse abgebildet.
- Bei mehrfarbigem Licht treten zusätzlich  $\uparrow$ chromatische Aberrationen auf, die auf der Dispersion des brechenden Mediums beruhen.

**Abbildungsgleichung:** der mathematische Zusammenhang zwischen Gegenstandsweite  $g$ , Bildweite  $b$  und Brennweite  $f$  bei einer optischen  $\uparrow$ Abbildung. Für achsennahe Strahlen gilt:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}.$$

Bei Sammellinsen und Hohlspiegeln ist die Brennweite  $f$  positiv, bei Zerstreuungslinsen und Wölbspiegeln negativ zu rechnen. Die Bildweite  $b$  ist bei reellen Bildern positiv, bei virtuellen Bildern dagegen negativ. Oft verwendet man anstelle der Gegenstandsweite  $g$  die Entfernung  $e_1$  des Gegenstands zum Brennpunkt und anstelle der Bildweite  $b$  die Entfernung  $e_2$  des Bilds vom

**Abbildungsgleichung · Zusammenhang zwischen Bildweite und Gegenstandsweite**

Gegenstandsweite $g$	Bildweite $b$	Art des Bildes
$0 < g < f$	Bild liegt auf derselben Seite der Linse wie der Gegenstand, $ b  > g$ .	virtuell, aufrecht stehend, größer als der Gegenstand
$g = f$	$b = \infty$	es entsteht kein Bild
$f < g < 2f$	$b > 2f$	reell, umgekehrt, größer als der Gegenstand
$g = 2f$	$b = 2f$	reell, umgekehrt, ebenso groß wie der Gegenstand
$g > 2f$	$f < b < 2f$	reell, umgekehrt, kleiner als der Gegenstand
$g = \infty$	$b = f$	punktförmiges »Bild«

**Abhängigkeit der Bildweite  $b$  und der Art des entstehenden Bildes bei einer Sammellinse von der Gegenstandsweite  $g$**

beidseitigen Brennpunkt. Es gilt dann  $e_1 = g - f$  und  $e_2 = b - f$ . Damit erhält man die newtonsche Form der Abbildungsgleichung (nach I. NEWTON):

$$e_1 \cdot e_2 = f^2.$$

Sie gilt bei Linsen jedoch nur für einfarbiges (monochromatisches) Licht und nur dann, wenn sich auf beiden Seiten der Linse dasselbe optische Medium befindet.

**Abbildungsmaßstab**, Formelzeichen  $A$ : bei einer optischen ↑ Abbildung das Verhältnis von Bildgröße  $B$  zu Gegenstandsgröße  $G$ . Im Allgemeinen gilt:

$$A = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$

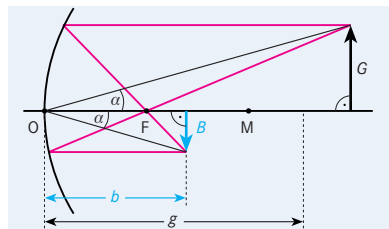
( $g$  Gegenstandsweite,  $b$  Bildweite). Für  $A > 1$  ist das Bild größer, für  $A < 1$  ist das Bild kleiner als der Gegenstand. Der  $A$  wird auch ↑ Vergrößerung genannt.

**Aberration** [lat. »Entfernung, Ablenkung, Abweichung«]:

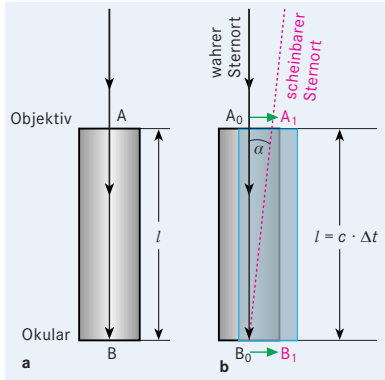
♦ **Optik**: ein ↑ Abbildungsfehler, speziell die ↑ chromatische Aberration.

♦ **Astronomie**: die scheinbare Verschiebung eines Fixsterns am Himmelsgewölbe. Sie ist auf die endliche Lichtgeschwindigkeit und die Bewegung der Erde zurückzuführen.

In Abb. 1a tritt ein Lichtstrahl durch die Mitte A des Objektivs in ein Fernrohr. Ist das Fernrohr in Ruhe, so durchläuft der mit der Geschwindigkeit  $c$  sich ausbreitende Lichtstrahl die Fernrohlänge  $l$ , gelangt nach der Zeit  $\Delta t$  zur Mitte B des Okulars und kann dort beobachtet werden. Der Ort des mit dem Fernrohr anvisierten Sterns liegt dann auf der Verlängerung der Fernrohrachse BA. Nun soll sich das Fernrohr mit der Geschwindigkeit  $v$  senkrecht zur Richtung des Lichtstrahls bewegen. Dann befindet sich das Fernrohr in der in Abb. 1b schwarz gezeichneten Lage, wenn das vom Stern kommende Licht in die Mitte  $A_0$  des Objektivs



**Abbildungsmaßstab**: Abbildung an einem Hohlspiegel (O optischer Mittelpunkt, F Brennpunkt, M Krümmungsmittelpunkt)



**Aberration** (Abb. 1): Lichtstrahl im Fernrohr. Ist das Fernrohr in Ruhe (a), so tritt keine Aberration auf, bewegt sich das Fernrohr (b), so scheint sich der Sternort zu verschieben.

eintritt. Während der Zeit  $\Delta t$ , in der das Licht die Fernrohrlänge  $l$  durchläuft, hat sich das Fernrohr aber um die Strecke  $s = v \cdot \Delta t$  bewegt (blau eingezeichnet). Der Lichtstrahl trifft dann nicht mehr auf die Mitte  $B_1$  des Okulars, sondern auf einen Punkt im Abstand  $v \cdot \Delta t$ , der sich dort befindet, wo ursprünglich der Mittelpunkt  $B_0$  des Okulars gewesen ist. Dem Beobachter erscheint dadurch der Sternort in der Verlängerung der Strecke  $B_0A_1$ , also um den Winkel  $A_0B_0A_1 = \alpha$  verschoben. Der Winkel  $\alpha$  heißt **Aberrationswinkel**. Für ihn gilt nach Abb. 2

$$\tan \alpha = \frac{v \cdot \Delta t}{c \cdot \Delta t} = \frac{v}{c}.$$

Man unterscheidet mehrere Aberrationseffekte:

- die **tägliche Aberration**, die durch die Rotation der Erde verursacht wird. Der Aberrationswinkel hängt von der geografischen Breite ab; er ist am Äquator mit  $\alpha = 0,32''$  am größten und nimmt zu den geografischen Polen hin auf 0 ab.

- die **jährliche Aberration**, die auf die Bewegung der Erde um die Sonne zurückgeht. Der maximale Aberrationswinkel beträgt in diesem Fall  $20,5''$ .

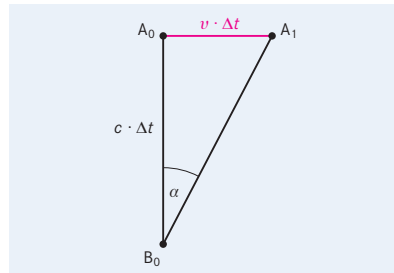
**Aberrationswinkel:** ↑ Aberration.

**abgeleitete Zustandsgrößen:** ↑ Zustandsgrößen.

**abgeschlossenes System:** ein physikalisches ↑ System, das in keinerlei Wechselwirkung mit seiner Umgebung steht, also weder Energie noch Materie austauscht. In einem a. S. bleibt die Energie konstant (↑ Erhaltungssätze). Gegensatz: ↑ offenes System.

**Ablenkplatten:** ↑ Bildschirm.

**Abplattung:** Abweichung der ↑ Erde von der idealen Kugelform. Die Pole befinden sich näher am Erdmittelpunkt als der Äquator.



**Aberration** (Abb. 2): zur Berechnung des Aberrationswinkels

**Abschirmung:**

- ◆ **Elektrotechnik:** das Fernhalten von elektrischen oder magnetischen Feldern aus einem begrenzten Gebiet.

Ein elektrostatisches Feld lässt sich durch eine allseitig umgebende, elektrisch leitende Wandung abschirmen. Die Feldlinien enden dann in den durch Influenz (↑ elektrische Influenz) gebildeten Oberflächenladungen. Der Innenraum bleibt also feldfrei. Praktische Ausführung einer elektrischen A. ist ein ↑ Faraday-Käfig. Zur magnetischen A.

umgibt man den Raum mit einem magnetisch weichen Material mit hoher  $\uparrow$ Permeabilität ( $\mu_r = 10^3$  bis  $10^5$ ).

♦ **Atomphysik:** die Erscheinung, dass in einem Atom mit hoher Kernladungszahl  $Z$  die äußeren Elektronen ein abgeschwächtes elektrisches Feld spüren. Die Ladung der inneren Elektronen in der atomaren Hülle schirmt nämlich die Ladung des Kerns nach außen ab. Das abgeschwächte Feld kann man durch eine kleinere »effektive« Kernladungszahl  $Z_{\text{eff}}$  erfassen. Die Differenz  $Z - Z_{\text{eff}}$  heißt **Abschirmzahl**. Sie ändert sich mit der Elektronenschale.

♦ **Kerntechnik:** eine Anordnung von Materialien mit dem Ziel, die Intensität einer ionisierenden Strahlung zu verringern. Die Schwächung beruht auf der Wechselwirkung der Strahlungsteilchen mit dem Material (z. B.  $\uparrow$ Streuung oder  $\uparrow$ Absorption). Die Strahlung hat im abschirmenden Material eine sehr geringe  $\uparrow$ Reichweite.

**absolute Brechzahl:**  $\uparrow$ Brechung.

**absolute Dielektrizitätskonstante:**  $\uparrow$ Dielektrizitätskonstante.

**absoluter Nullpunkt:**  $\uparrow$ Temperatur.

**absolutes Maßsystem:** das  $\uparrow$ CGS-System.

**absolute Temperatur,** Formelzeichen  $T$ : die auf den absoluten Nullpunkt bezogene Temperatur, die in  $\uparrow$ Kelvin (K) angegeben wird ( $\uparrow$ Temperaturskalen).

**Absorption** [lat. absorbere »verschlucken«]:

♦ die Schwächung der Intensität einer elektromagnetischen Welle oder die Verringerung der Energie einer Teilchenstrahlung beim Durchgang durch Materie. Das absorbierende Material heißt **Absorber**. Die absorbierte Energie wird in Wärmeenergie (die **Absorptionswärme**) umgewandelt oder durch die Anregung oder Ionisierung der Atome bzw. Moleküle des Absorbers verbraucht. Wenn die Atome bzw. Moleküle eines Stoffs bei der Anregung nur bestimmte

Energiebeträge  $E$  (Energiequanten) aufnehmen können, werden nur bestimmte Frequenzen und Wellenlängen (beim Licht bestimmte Farben) gemäß der Gleichung  $E = h \cdot \nu$  absorbiert ( $h$  plancksches Wirkungsquantum,  $\nu$  Frequenz der Strahlung). Dies nennt man selektive A. oder **Linienabsorption**; das entstehende **Absorptionspektrum** ist ein Linienspektrum. Kontinuierliche A. liegt vor, wenn Strahlung eines breiten Wellenlängengebiets absorbiert wird.

Die Intensität einer elektromagnetischen Welle nimmt bei der A. exponentiell ab, wie im **Lambert-Beer-Gesetz** beschrieben:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu s}$$

Dabei ist  $I_0$  die Intensität der Strahlung vor dem Absorber,  $s$  der von der Strahlung im Absorber zurückgelegte Weg,  $I$  die Intensität nach Durchlaufen der Strecke  $s$  und  $\mu$  der  $\uparrow$ Absorptionskoeffizient.

Für die A. von Teilchenstrahlung gibt es kein allgemeingültiges Gesetz, sie hängt wesentlich vom »Mechanismus« der A. ab (z. B. Streuung, Ionisation oder Stoßanregung).

♦ die Aufnahme eines Gases durch eine Flüssigkeit oder einen Festkörper (Absorptionsmittel), die im Unterschied zur  $\uparrow$ Absorption zu einer gleichmäßigen Verteilung (Lösung) im Innern des absorbierenden Stoffs führt. Mit der A. ist keine chemische Reaktion verbunden.

**Absorptionskoeffizient** (**Absorptionskonstante**), Formelzeichen  $\mu$ : eine stoffspezifische Größe, welche die exponentielle Schwächung der Intensität in einem Absorber beschreibt ( $\uparrow$ Absorption).  $\mu$  heißt auch **Extinktionskoeffizient**, wenn neben der Intensitätsschwächung durch Absorption auch die Streuung eine bedeutende Rolle spielt.

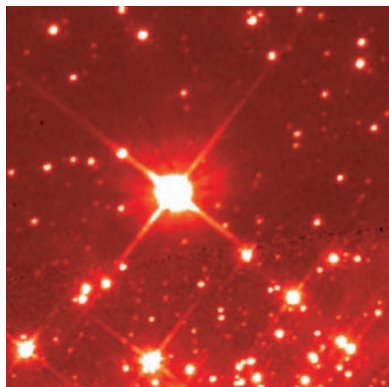
**Absorptionspektrum:**  $\uparrow$ Absorption.

**Abstoßung:** das Bestreben von Körpern, ihren gegenseitigen Abstand zu vergrößern

aufgrund bestimmter Kräfte (**Abstoßungskräfte**), die zwischen ihnen wirken.

**Abtrennarbeit:** ↑ Austrittsarbeit.

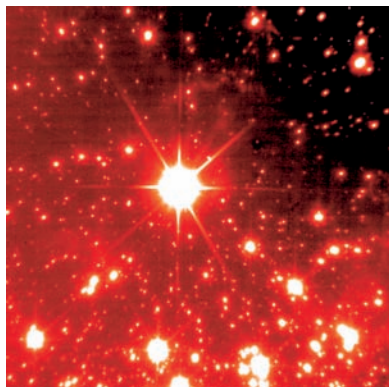
**achromatische Linse** [griech. achromatos »farblos«] (**Achromat**): ein Linsensystem, bei dem die ↑ chromatischen Aberrationen, also die Abbildungsfehler, die durch die unterschiedliche Brechung verschiedenfarbigen Lichts verursacht werden, weitgehend ausgeglichen sind. Als a. L. verwendet man Kombinationen von Zerstreuungs- und Sammellinsen aus Glassorten unterschiedlicher ↑ Dispersion.



**adaptive Optik:** Das Sternentstehungsgebiet NGC 3603 (innerhalb unserer Milchstraße), links mit dem Hubble Space Telescope aufgenommen, rechts mit dem Very Large Telescope (VLT)

**Adaptation** [lat. adaptare »anpassen«] (**Adaption**): Bezeichnung für die Fähigkeit des ↑ Auges, seine Empfindlichkeit der jeweiligen Helligkeit anzupassen. Das Anpassen der Empfindlichkeit nennt man Adaptieren.

**adaptive Optik:** ein Spiegel, dessen Form sich in geringen Grenzen computergestützt verändern lässt. Auf diese Weise werden Veränderungen der optischen Weglänge im Strahlengang (z. B. durch Luftdruckschwankungen) ausgeglichen. Adaptive Optiken werden vor allem in der Astronomie als



unter Einsatz adaptiver Optik. Mithilfe der adaptiven Optik lassen sich auch von der Erde aus Bilder mit hohem Detailreichtum und hoher Auflösung erzielen.

**Achse:** eine Gerade mit gegebener Richtung (z. B. bei Körpern die ↑ Drehachse, in einem optischen System die ↑ optische Achse). Mathematisch bilden drei nicht in einer Ebene liegende Achsen (Raumrichtungen) ein räumliches Koordinatensystem.

**achsennaher Strahl:** ↑ Abbildung.

**achsenparalleler Strahl:** ↑ Abbildung.

**actio = reactio** [lat. »Wirkung = Gegenwirkung«]: das dritte ↑ newtonsche Axiom.

Teleskope eingesetzt, um Bildstörungen, etwa durch atmosphärisches Flimmern, zu vermeiden und die ↑ Auflösung zu erhöhen.

**Addition von Kräften:** ↑ Kräfteparallelogramm.

**Adhäsion** [lat. adhaerere »anhaften«]: das Aneinanderhaften eines festen und eines flüssigen oder gasförmigen Körpers durch ↑ Molekularkräfte.

**Adiabate:** ↑ Poisson-Gesetz.

**adiabatisch** [griech. *adiabatos* »nicht zu durchschreiten«]: bezeichnet einen Prozess »ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung«. Dazu muss das System gut isoliert oder der Prozess so schnell sein, dass für den Wärmeausgleich keine Zeit ist.

**adiabatische Entmagnetisierung:** Verfahren zur Erzeugung sehr tiefer Temperaturen. Bringt man eine paramagnetische Substanz ( $\uparrow$  Paramagnetismus) in ein starkes Magnetfeld, so orientieren sich die Elementarmagnete (die magnetischen Momente der Moleküle) z. T. in Richtung des Magnetfelds. Dabei sinkt die Gesamtenergie gegenüber dem ungeordneten Zustand. Entfernt man das Magnetfeld, so verteilen sich die Elementarmagnete wieder in alle Richtungen. Die dazu nötige Energie wird der kinetischen Energie der Moleküle, also der thermischen Energie der Substanz, entzogen. In der Praxis muss die Substanz mit einer  $\uparrow$  Kältemaschine vorgekühlt werden. Mit dem Verfahren lassen sich Temperaturen bis  $10^{-6}$  K erreichen.

**adiabatische Zustandsänderung:** die Zustandsänderung eines Gases ohne Wärmeaustausch (Energieaustausch) mit der Umgebung. Z. B. kann das schnelle Zusammenpressen von Luft in einer verstopften Luftpumpe als adiabatischer Vorgang angesehen werden. Für ein ideales Gas gilt dabei das  $\uparrow$  poissonsche Gesetz.

**Adsorption** [lat. *ad* »an« und *sorbere* »verschlucken«]: die Anlagerung von Gasen oder gelösten Substanzen an der Oberfläche eines festen Stoffes (nicht im Stoff drin wie bei der  $\uparrow$  Absorption).

**Alerodynamik** [griech. *aer* »Luft« und *dynamis* »Kraft«]: die Lehre von den Strömungsvorgängen in Gasen, besonders in Luft. Insbesondere untersucht sie theoretisch und experimentell (z. B. im Windkanal) die Kräfte, die an umströmten Körpern auftreten, und erarbeitet damit die Grundlagen für die Bewegung von Flugkörpern

( $\uparrow$  fliegen) und von am Boden bewegten Fahrzeugen ( $\uparrow$  Luftwiderstand).

**Aerogel** [lat. *gelatus* »erstarrt«]: hochporöser, für sichtbares und infrarotes Licht transparenter Schaum aus Quarz oder Kieselsäure mit einem Porenanteil von bis zu 98%. Die Poren haben Durchmesser von einigen Atomdurchmessern und sind mit Luft gefüllt. Aerogele werden z. B. als durchsichtige Wärmedämmung oder in Detektoren zum Nachweis der  $\uparrow$  Tscherenkow-Strahlung eingesetzt.

**Aerosol** [lat. *solutus* »aufgelöst«]: feinstverteilte Materie (Feststoffe oder Flüssigkeiten) in Luft oder anderen Gasen. Ein A. wirkt als  $\uparrow$  Kondensationskern. Typische Erscheinungsformen sind Rauch, Staub, Dunst oder Nebel.

**Aggregatzustand** [lat. *aggregare* »beigessen«]: Erscheinungsform, in der ein Stoff vorliegt; er wird durch die Stoffeigenschaften und äußere Bedingungen wie Druck und Temperatur bestimmt. Nach der Anschauung unterteilt man in den festen, den flüssigen und den gasförmigen Zustand; sie unterscheiden sich u. a. durch den Widerstand gegen eine Änderung des Volumens oder der Form:

Ein **Festkörper** hat ein bestimmtes Volumen und eine bestimmte Gestalt. Er setzt einer Formänderung einen Widerstand entgegen, da seine Bausteine (Atome, Moleküle) durch elektromagnetische Kräfte fest verbunden sind.

Eine **Flüssigkeit** hat zwar ein bestimmtes Volumen, aber keine bestimmte Gestalt. Sie nimmt die Form des Gefäßes an, in dem sie sich befindet, und bildet eine Oberfläche.

Ein **Gas** hat weder ein bestimmtes Volumen noch eine bestimmte Gestalt. Es nimmt jeden ihm zur Verfügung stehenden Raum ein und bildet keine Oberfläche.

Eine andere Einteilung geht von den molekularen Verhältnissen aus und unterschei-

det zwischen Kristallen, amorphen und gasförmigen Stoffen:

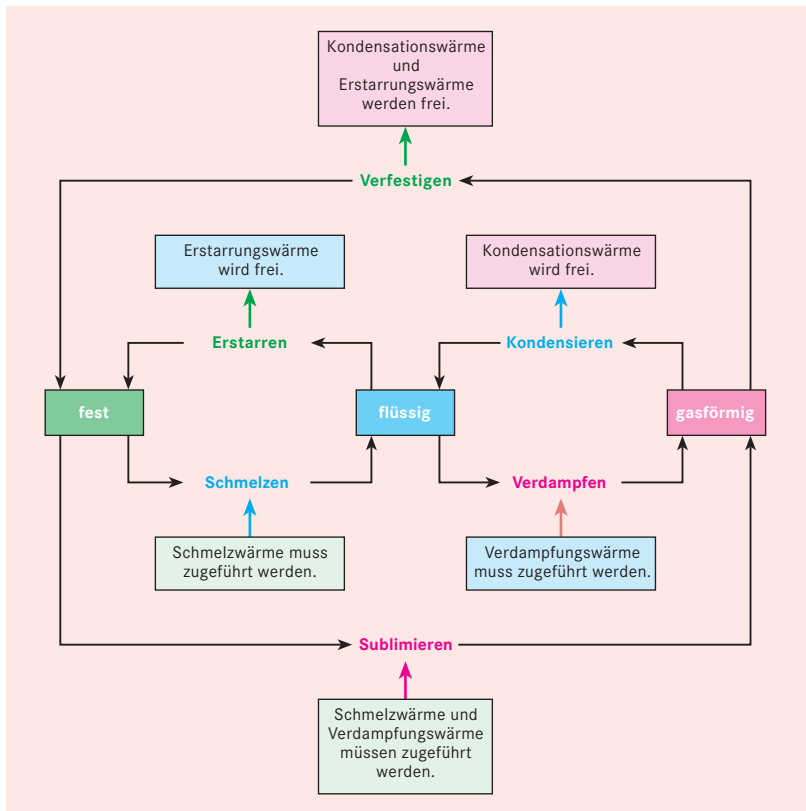
**Kristallin** sind Stoffe, bei denen die einzelnen Bausteine (Atome, Moleküle, Ionen) an bestimmte Orte gebunden sind, um die herum sie schwingen können. Kristalle sind darum sehr volumen- und formbeständig.

**Amorph** heißen Stoffe, deren Bausteine sich leicht gegeneinanderbewegen können. Ihr mittlerer Abstand aber bleibt etwa gleich. Daher haben sie eine geringe Formbestän-

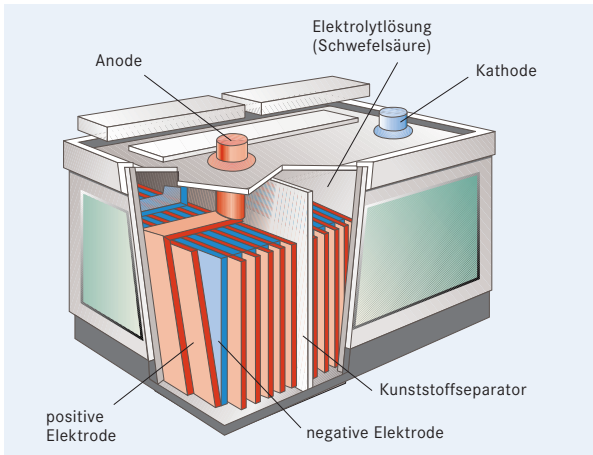
digkeit, aber eine große Volumenbeständigkeit. Beispiele für amorphe Stoffe sind die Flüssigkeiten, aber auch nichtkristalline Festkörper wie Glas oder Wachs.

**Gasförmig** heißen solche Stoffe, bei denen sich die Bausteine völlig frei bewegen können. Form und Volumen von Gasen sind darum leicht zu ändern.

Die meisten Stoffe (Ausnahmen sind z. B. ↑Flüssigkristalle) können in allen drei A. vorkommen; bei tiefen Temperaturen sind sie fest, bei mittleren flüssig und bei hohen



**Aggregatzustand:** Namen der Übergänge zwischen den einzelnen Aggregatzuständen



**Akkumulator:**  
Schema eines Bleiakkumulators

gasförmig. Der Übergang von einem Zustand ( $\uparrow$ Phase) in einen anderen heißt  $\uparrow$ Phasenübergang. Er findet bei Werten der Temperatur und des Drucks statt, die für den jeweiligen Stoff charakteristisch sind. Bei sehr hohen Temperaturen tritt eine oft als »vierter Aggregatzustand« bezeichnete Form der Materie auf, das  $\uparrow$ Plasma.

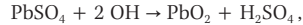
**Ah:** Einheitenzeichen für  $\uparrow$ Amperestunde.

**Akkomodation** [lat. »Anpassung«]: die Entfernungseinstellung des  $\uparrow$ Auges auf ein Objekt.

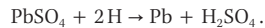
**Akkumulator** [lat. accumulare »aufhäufen«], Abk. **Akku** (**Sekundärelement**): eine auf elektrochemischer Basis arbeitende Gleichstromquelle, die dank ihrem geringen Innenwiderstand – im Gegensatz zu einer  $\uparrow$ Batterie – wieder aufgeladen werden kann. Der bekannteste Typ ist der **Bleiakkumulator** (»Autobatterie«). Er besteht aus Bleiplatten als Elektroden, die in verdünnte Schwefelsäure  $\text{H}_2\text{SO}_4$  als Elektrolyt tauchen und durch Separatoren getrennt sind (Abb.). Die Platten überziehen sich mit einer Schicht aus Bleisulfat  $\text{PbSO}_4$ . Beim **Ladevorgang** schließt man die Elektroden an eine

Gleichspannungsquelle an. Es findet eine Elektrolyse statt; an der Anode bildet sich Bleidioxid  $\text{PbO}_2$ , an der Kathode metallisches Blei. Gleichzeitig entsteht durch Wasserentzug konzentrierte Schwefelsäure:

Anode (positive Elektrode):



Kathode (negative Elektrode):



Ist der Akku geladen, bilden die Elektroden zusammen mit dem Elektrolyten ein  $\uparrow$ galvanisches Element. Die Leerlaufspannung ( $\uparrow$ Klemmenspannung) zwischen den Elektroden beträgt etwa 2V.

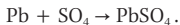
Wird der Akku über einen Verbraucher entladen, so fließt in entgegengesetzter Richtung wie bei der Aufladung ein **Entladestrom**. Durch Rückumwandlung der chemischen Energie in elektrische werden die Elektroden und der Elektrolyt wieder in den Ausgangszustand zurückgebildet:

Anode (positive Elektrode):





Kathode (negative Elektrode):



Technisch bedeutend war lange der **Nickel-Cadmium-Akkumulator**, der in vielen Elektrogeräten die nicht aufladbaren Batterien ersetzte. Wegen der Giftigkeit des Schwermetalls Cadmium jedoch soll seine Verwendung in der EU verboten werden. Der NiCd-Akku verwendet Kalilauge als Elektrolyt; er ist leichter und unempfindlicher als der Bleiakku, hat aber einen geringeren Wirkungsgrad und liefert nur eine Leerlaufspannung von 1,2 V. Weitere, modernere Typen sind der Nickel-Metallhydrid- und der Lithium-Ionen-Akkumulator. Ersterer hat bei gleicher Spannung eine doppelt so große Energiedichte, letzterer liefert 3,6 V Spannung und eine sogar noch höhere Energiedichte, ist aber auch deutlich teurer.

**Aktivierung** [lat. activus »tätig«]:

♦ *allgemein* jeder Prozess, durch den ein Stoff in einen reaktionsfähigen Zustand überführt wird, z.B. die Erzeugung großer reaktionsfähiger Oberflächen durch Zerkleinern des Stoffs.

♦ *Kernphysik*: die Erzeugung künstlich radioaktiver Atomkerne (↑Radioaktivität, ↑Kern) durch Beschuss stabiler Atomkerne mit energiereichen Teilchen (meist mit Neutronen).

♦ *Kristallphysik*: die Dotierung von Kristallen mit Fremdatomen (sog. Farbzentren), um ↑Lumineszenz zu erreichen.

**Aktivierungsenergie**: der Energiebeitrag, der zur ↑Aktivierung eines Stoffes oder zur Auslösung physikalischer bzw. chemischer Prozesse benötigt wird (z. B. die Emission eines Alphateilchens bzw. die Bildung eines Moleküls).

**Aktivität**, Formelzeichen  $A$ : die Zerfallsrate eines radioaktiven Stoffs, anders ausgedrückt die Zahl der Zerfälle  $\Delta N$  pro Zeiteinheit  $\Delta t$ :

$$A = \Delta N / \Delta t.$$

SI-Einheit ist das ↑Becquerel. Die  $A$  ist proportional zur Anzahl  $N$  der noch nicht zerfallenen, radioaktiven Kerne:

$$A = N \cdot \lambda.$$

Die Proportionalitätskonstante  $\lambda$  heißt ↑Zerfallskonstante. Die  $A$  eines Gramms einer radioaktiven Substanz nennt man **spezifische Aktivität**.

**Akustik** [griech. akoustikos »das Gehör betreffend«]: die Lehre vom ↑Schall einschließlich der biologischen und psychologischen Aspekte des ↑Hörens. Die physikalische Akustik ist ein Teilgebiet der Mechanik, sie untersucht die Schwingungen materieller Systeme mit Frequenzen zwischen 16 Hz und 20 kHz (↑Hörbereich). Diese breiten sich in einem elastischen Medium wellenförmig (zumeist als ↑Longitudinalwellen) aus und rufen im Gehör (↑Ohr) einen Schalleindruck hervor. Wegen ihres physikalisch ähnlichen Verhaltens werden auch Schwingungen und Wellen mit Frequenzen unter 16 Hz (↑Infraschall) bzw. über 20 kHz (↑Ultraschall) der Akustik zugerechnet.

**Akzeptor** [lat. accipere, acceptum »empfangen«]: ↑elektrische Leitung.

### Albedo · Werte für verschiedene Körper

Körper	Albedo
Mond	0,07
Wolken	0,7–0,9
Schnee	0,5–0,9
Wasser	0,02–0,7
Basalt	0,05

**Albedo** [lat. »weiße Farbe«]: Maß für das diffuse Rückstrahlungsvermögen eines Körpers, im Gegensatz zur gerichteten ↑Reflexion. Albedo 0 bedeutet keine, Albedo 1 vollständige Rückstrahlung des Lichts.

**allgemeine Gasgleichung**: die allgemeine ↑Zustandsgleichung für Gase.

**allgemeine Gaskonstante:** ↑Gaskonstante.

**AlNiCo®:** Überbegriff für magnetisch harte Legierungen hauptsächlich aus Aluminium, Nickel, Cobalt und Eisen, die sich besonders zum Bau von ↑Dauermagneten eignen.

**Alphaspektrum (α-Spektrum):** das Energiespektrum der Alphateilchen beim ↑Alphazerfall.

**Alphastrahlung (α-Strahlung):** Bezeichnung für die beim radioaktiven Alphazerfall auftretende Strahlung aus Heliumkernen. Sie wirkt stark ionisierend und hat in Luft eine Reichweite von wenigen Zentimetern. Zur ↑Abschirmung reicht bereits ein Blatt Papier.

**Alphateilchen (α-Teilchen):** das vollständig ionisierte Heliumatom, das beim ↑Alphazerfall frei wird.

**Alphateilchenmodell:** Spezialfall des Clustermodells (↑Kernmodelle).

**Alphazerfall (α-Zerfall):** eine Art des radioaktiven Zerfalls (↑Radioaktivität), bei der der Ausgangskern (Mutterkern) ein **Alphateilchen** abstrahlt. Dieses besteht aus einem Heliumkern, d.h. aus zwei Protonen und zwei Neutronen, und hat die Massenzahl  $A = 4$ . Die Restkerne (Tochterkerne) nach dem  $A$  sind Isotope, deren Ordnungszahl  $Z$  um 2 und deren Massenzahl  $A$  um 4 kleiner sind als die des Mutterkerns.

Der  $A$  beruht auf der ↑starken Wechselwirkung. Die emittierten α-Teilchen (**Alphastrahlung**) haben meist nur eine einzige Energie (z.B. bei Radium 4,9 MeV); das **α-Spektrum** ist also ein Linienspektrum. Damit haben die α-Teilchen auch alle dieselbe Reichweite (einige Zentimeter in Luft, im Körper unter 0,1 mm). Als ↑Abschirmung genügt im Prinzip schon ein Blatt Papier.

**Altersbestimmung:** Datierung von geologischen Ereignissen und archäologischen Funden mit naturwissenschaftlichen Messmethoden.

Bei **Abzählverfahren** zählt man Eis- und Sedimentschichten oder Baumringe und kann

so das Alter von Proben relativ zueinander oder – bei bekanntem Zeitmaßstab – auch absolut angeben.

Die **radioaktive Altersbestimmung** beruht auf dem Zerfall der in den Proben enthaltenen radioaktiven Isotope (↑Radioaktivität). Man nutzt aus, dass durch den Zerfall der Gehalt an radioaktiven Mutterisotopen ständig ab- und der an stabilen Tochterisotopen ständig zunimmt (radioaktives ↑Zerfallsgesetz). Das Verhältnis von Mutter- und Tochterisotopen wird mit einem ↑Massenspektrografen bestimmt.

Besonders weit verbreitet ist die **C-14-Methode**, bei der man in organischen Proben den Gehalt des Kohlenstoffisotops  $^{14}\text{C}$  misst, das unter dem Einfluss der ↑Höhenstrahlung aus dem Stickstoff der Luft entsteht. Ab dem Tod des Lebewesens nimmt der C-14-Gehalt ständig ab. Damit sind Datierungen zwischen 1000 und 50000 Jahren möglich.

Zur Datierung von alten Gesteinen eignet sich die **Kalium-Argon-Methode**. Sie beruht auf dem Zerfall des Kaliumisotops  $^{40}\text{K}$  (Halbwertszeit 1,3 Mrd. Jahre) in Calcium ( $^{40}\text{Ca}$ ) durch ↑Betazerfall oder in Argon ( $^{40}\text{Ar}$ ) durch ↑Elektroneneinfang. Da bei der Mineralbildung nur sehr wenig Argon eingelagert wird, lässt sich durch Messung des Kalium- und Argongehalts das Alter gut bestimmen.

Weitere Methoden der radioaktiven  $A$  an jungen Gesteinen nutzen die ↑Lumineszenz bei Erwärmung, mit der man die ursprüngliche Aktivität berechnet (**Thermolumineszenzmethode**), oder die Störung des Kristallgitters durch den Zerfall des enthaltenen Urans (**Spaltspurmethode**), die im Mikroskop sichtbar ist.

**AM:** Abk. für Amplitudenmodulation: ↑Modulation.

**amontonssches Gesetz** [am5't5-, nach GUILLAUME AMONTONS, \* 1663, † 1705]: ↑Gasgesetz.

**amorph** [griech. »formlos«]: ↑Aggregatzustand eines festen oder flüssigen Stoffs, bei dem die Atome oder Moleküle zwar im Mittel einen festen Abstand haben, aber nicht im Kristallgitter angeordnet sind.

**Ampere** [am'pe:r, nach A. M. AMPÈRE], Einheitenzeichen A: SI-Einheit der ↑Stromstärke und eine der sieben ↑Basisseinheiten im Internationalen Einheitensystem.

**Festlegung:** Das Ampere ist die Stärke eines zeitlich konstanten elektrischen Stroms, der durch zwei parallele, geradlinige, im Abstand von 1 m voneinander angeordnete Leiter fließt und zwischen diesen Leitern pro 1 m Leitungslänge die Kraft von  $2 \cdot 10^{-7}$  Newton hervorrufen würde. Dabei soll der Querschnitt der Leiter vernachlässigbar klein sein und die Anordnung sich im Vakuum befinden.

**Amperemeter:** ↑Strom- und Spannungsmessung.

**Amperesekunde**, Einheitenzeichen As: Einheit der Elektrizitätsmenge (↑Ladung). Es ist  $1 \text{ As} = 1 \text{ C}$  (↑Coulomb).

**Amperestunde**, Einheitenzeichen Ah: von der ↑Amperesekunde abgeleitete Einheit der Elektrizitätsmenge, verwendet vor allem bei elektrochemischen Spannungsquellen (z. B. Autobatterien). Es gilt:  $1 \text{ Ah} = 3600 \text{ As}$ .

**Amplitude** [lat. »Größe, Weite«], Formelzeichen  $\hat{y}$ ,  $A$ : der größtmögliche Wert, den eine sich periodisch ändernde Variable bei einer ↑Schwingung annimmt. Bei mechanischen Schwingungen ist die Amplitude der Maximalwert der ↑Auslenkung aus der Ruhelage.

**Amplitudenmodulation**, Abk. AM: ↑Modulation.

**analog** [griech. analogos »entsprechend«]: bezeichnet die Eigenschaft einer zur Informationsübertragung dienenden physikalischen Größe, dass sie sich kontinuierlich ändern, also (innerhalb bestimmter Grenzen) jeden Zwischenwert annehmen kann.

Gegensatz: ↑digital. Eine **Analoganzeige** ist eine ↑Anzeige mit analogen Werten.

**Analysator** [griech. analysis »Auflösung«]:

♦ **allgemein:** Gerät zur Feststellung eines physikalischen Zustands, z. B. ein Impulshöhenanalysator für eine Folge von Strom- oder Spannungsimpulsen.

♦ **Optik:** ein Gerät zum Nachweis von linear polarisiertem Licht (z. B. ein ↑Nicol-Prisma).

**Aneroïdbarometer:** ↑Barometer.

**Anfangsbedingungen:** ein Satz von Bedingungen, die den Zustand eines physikalischen Systems (z. B. eines Körpers) zu einem beliebig gewählten **Anfangszeitpunkt**  $t = t_0$  festlegen. Dieser Zeitpunkt dient meist auch als Anfang der Zeitzählung ( $t_0 = 0$ ). Die Anfangsbedingungen für einen bewegten Körper sind seine Geschwindigkeit (**Anfangsgeschwindigkeit**) und sein Ort (**Anfangslage**) zur Zeit  $t = t_0$ .

**Ångström** ['ɔŋ-, nach ANDERS J. ÅNGSTRÖM, \* 1814, † 1874], Einheitenzeichen Å: bisweilen in der Atomphysik verwendete Längeneinheit. Umrechnung:  $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$ .

**An|ion** [griech. ana »hinauf« und ion »(etwas) Gehendes«]: einfach oder mehrfach negativ geladenes Ion (z. B.  $\text{NaOH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$  oder  $\text{SO}_4^{2-}$ ), das von einer positiven Elektrode (↑Anode) angezogen wird.

**an|isotrop** [griech. an- »nicht«, isos »gleich« und tropos »Richtung«]: bezeichnet die Beschaffenheit eines Körpers, dass wenigstens eine physikalische Eigenschaft richtungsabhängig ist (Gegensatz: ↑isotrop). Die meisten Kristalle sind anisotrop, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts in ihnen richtungsabhängig ist. Dies führt zu Effekten wie ↑Polarisation oder ↑Doppelbrechung.

**Anker:** Bestandteil eines ↑Elektromotors oder ↑Generators.

**Annihilation** [lat. ad »zu« und nihil »nichts«]: ↑Paarvernichtung.

**An|ode** [griech. ana »hinauf« und hodos »Weg«]:

- ♦ positiv geladener Pol einer elektrochemischen Spannungsquelle (z. B. einer Batterie oder eines Akkumulators).
- ♦ positive Elektrode einer Elektronenröhre oder einer Röntgenröhre.

**Anodenfall:** bei einer ↑Glimmentladung der unmittelbar vor der Anode auftretende Spannungsabfall.

**anomal** [griech. anomos »gesetzlos«] (*nicht* anomal): von der Regel abweichend, z. B. anomale ↑ Dispersion.

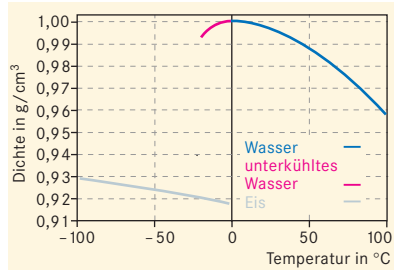
**Anomalie des Wassers:** Bezeichnung für das von den meisten anderen Stoffen abweichende Verhalten des Wassers bei Temperaturänderungen:

- Erwärmt man (flüssiges) Wasser von 0 °C, so nimmt sein Volumen nicht zu, sondern zunächst *ab*, bis +4 °C erreicht sind. Erst bei weiterem Erwärmen zeigt sich die erwartete Volumenzunahme. Wasser hat also bei +4 °C seine größte Dichte (Abb. 1).
- Anders als bei den meisten Stoffen hat der feste Zustand des Wassers (das Eis) eine geringere Dichte als der flüssige (bei 0 °C), sodass Eis auf der Wasseroberfläche schwimmt. Da die dichtesten Wasserschichten nach unten sinken, bleibt die Temperatur in einem See bei Frost in den tieferen Schichten bei +4 °C, sodass Wassertiere überleben können (Abb. 2). Erst bei lang anhaltendem Frost friert der See von oben her zu.

**Anregung:** der durch Energiezufuhr bewirkte Übergang eines gebundenen Teilchensystems (z. B. Atom, Kern, Molekül, Kristallgitter usw.) aus einem Anfangs- in einen energetisch höher liegenden Endzustand (angeregter Zustand). Der tiefstmögliche Anfangszustand ist der ↑Grundzustand.

Die für den Prozess benötigte Energie (↑ Anregungsenergie) kann dem System auf zwei Wegen zugeführt werden: entweder durch Absorption elektromagnetischer Strahlung

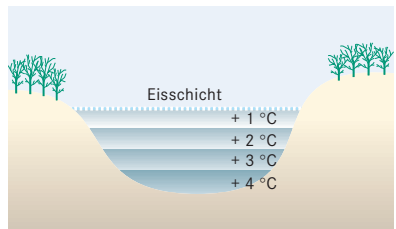
oder durch **Stoßanregung**, bei der ein Teilchen einen bestimmten Teil seiner kinetischen Energie im Verlauf eines Stoßes auf das System überträgt. Der Nachweis verschiedener Anregungszustände in der Atomhülle gelang mit dem ↑ Franck-Hertz-Versuch.



**Anomalie des Wassers (Abb. 1):**  
Volumenänderung des Wassers bei Temperaturänderung

**Anregungsenergie:** die Energie, die zur Anregung eines gebundenen Teilchensystems in einen bestimmten Energiezustand erforderlich ist.

Ist  $E_0$  die Energie des Grundzustands und  $E_1$  die Energie des angeregten Zustands, so ist die A. die Differenz  $\Delta E = E_1 - E_0$ . In der Atomphysik (z. B. beim ↑ Franck-Hertz-Versuch) gibt man sie meist in ↑ Elektronvolt an.



**Anomalie des Wassers (Abb. 2):**  
Temperaturschichtung in einem zugefrorenen See

**Antenne** [lat. antenna »Segelstange«]: Vorrichtung zum Senden oder Empfangen von ↑elektromagnetischen Wellen. Eine einfache Antenne lässt sich als einseitig geerdeter ↑Dipol auffassen.

**Antiferromagnetismus** [griech. anti- »gegen«]: ein besonderes magnetisches Verhalten gewisser Stoffe, deren ↑magnetische Suszeptibilität bis zu einer bestimmten Temperatur  $T_N$  (**Néel-Temperatur**) ansteigt und bei weiterer Temperatursteigerung wieder absinkt.

Dieses Verhalten ist folgendermaßen zu erklären: Bei sehr tiefen Temperaturen sind die auf die Spins zurückgehenden magnetischen Dipolmomente eines Kristalls paarweise antiparallel ausgerichtet und kompensieren sich gegenseitig (anders als beim ↑Ferromagnetismus). Mit steigender Temperatur wird diese Ordnung durch die Wärmebewegung gestört und bricht schließlich bei  $T = T_N$  zusammen. Oberhalb von  $T_N$  verhalten sich antiferromagnetische Stoffe paramagnetisch. Bei einer kleinen Gruppe von Stoffen zeigt die elektrische Polarisierung ein analoges Verhalten; dieses nennt man **Antiferroelektrizität** (↑Ferroelektrizität).

**Antimaterie**: Form der Materie, deren ↑Atome (Antiatome) aus den ↑Antiteilchen der Elektronen, Protonen und Neutronen (also aus Positronen, Antiprotonen und Antineutronen) aufgebaut sind. Treffen Materie und Antimaterie zusammen, zerstrahlen sie in Strahlungsquanten (z.B. Gammaquanten).

Nach dem Urknallmodell für die Weltentstehung gab es bei extrem hoher Energiedichte gleich viel Materie wie Antimaterie. Aus dem ↑Urknall stammende Reste von A. sind bislang nicht beobachtet worden; das Überwiegen der Materie nach dem Urknall wird mit einer schwachen Verletzung bestimmter Erhaltungssätze begründet. In großen Teilchenbeschleunigern werden Antiteilchen

künstlich erzeugt; 2002 konnten erstmals Antiwasserstoffatome in größerer Zahl hergestellt werden.

**anti|statisch**: bezeichnet die Eigenschaft bestimmter fettähnlicher Stoffe, die elektrostatische Aufladung von Kunststoffen und damit die Anziehung von Staub und elektrische Entladungen zu verhindern.

**Antiteilchen**: das zu jedem ↑Elementarteilchen vorhandene Teilchen, dessen Existenz sich aus quantentheoretischen Symmetrieeigenschaften (↑Symmetrie) theoretisch herleiten lässt. Das A. besitzt die gleiche Masse und den gleichen ↑Spin wie das zugehörige Teilchen, aber in allen gerichteten Größen (also solchen, die ein Vorzeichen haben, z.B. die elektrische Ladung) den entgegengesetzten Wert.

Trifft ein Teilchen mit seinem Antiteilchen zusammen, kommt es zur ↑Paarvernichtung. Dabei werden mindestens zwei Gammaquanten in entgegengesetzter Richtung emittiert; ihre Gesamtenergie ist gleich der doppelten ↑Ruheenergie der Teilchen.

Das A. wird in der Regel mit einem Querstrich über dem Symbol des Teilchens bezeichnet.

## Antiteilchen · Paare von Teilchen und Antiteilchen

Elektron $e^-$	Positron $e^+$
Proton $p$	Antiproton $\bar{p}$
Neutron $n$	Antineutron $\bar{n}$
Neutrino $\nu_e$	Antineutrino $\bar{\nu}_e$
Myon $\mu^-$	Antimyon $\mu^+$
Up-Quark $u$	Antiup-Quark $\bar{u}$

**Antrieb**: in der Technik der Mechanismus, mit dem ein Körper in Bewegung versetzt wird, oder auch der einem Körper zugeführte Impuls; im übertragenen Sinn auch die Kraftmaschine (z.B. ↑Wärmekraftmaschine, ↑Wasserkraftmaschine oder ↑Elektromotor), die den Antrieb liefert.

**Anzahldichte** (Teilchendichte), Formelzeichen  $n$ : Verhältnis aus der Anzahl  $N$  von Teilchen in einem Volumen  $V$  und diesem Volumen:  $n = N/V$ . Die SI-Einheit der A. ist  $1/\text{m}^3 = 1\text{ m}^{-3}$ .

**Anzeige**: Darstellung eines Messwerts an einem Messgerät. Bei einer **Analoganzeige** liest man den Wert mithilfe eines Zeigers oder einer Flüssigkeitssäule an einer **Skala** ab, einer bezifferten Stricheinteilung mit Angabe der Einheit. Bei einer **Digitalanzeige** wird der Wert als Folge von Ziffern dargestellt; sie befinden sich auf Rollen (wie bei einer Wasseruhr) oder erscheinen auf einem Display.

**Anziehung**: das Bestreben von Körpern, ihren gegenseitigen Abstand zu verringern aufgrund von zwischen den Körpern wirkenden Kräften (**Anziehungskräfte**). So gibt es aufgrund der  $\uparrow$ Gravitation eine Anziehung zwischen Massen und aufgrund des  $\uparrow$ Coulomb-Gesetzes eine zwischen entgegengesetzten Ladungen. Das Gegenteil der Anziehung ist die  $\uparrow$ Abstoßung.

**aperiodische Dämpfung** [griech. a- »nicht«]:  $\uparrow$  Schwingungen und Wellen.

**Aperturblende** (Öffnungsblende): eine meist regelbare  $\uparrow$  Blende im Strahlengang eines optischen Systems, die den Öffnungswinkel der zur Abbildung beitragenden Strahlenbündel begrenzt. Auf diese Weise beeinflusst sie das  $\uparrow$ Auflösungsvermögen des Systems.

**Apfelmännchen**:  $\uparrow$  Chaostheorie.

**Äquipotenzialflächen**: Flächen gleichen  $\uparrow$  Potentials in einem  $\uparrow$  Feld (z. B. elektrisches Feld, Schwerfeld) im Raum. Bei einer elektrischen Punktladung beispielsweise wird die Ä. durch eine Kugelschale gebildet, in deren Mittelpunkt sich die Ladung befindet.

Bei der Bewegung eines Körpers auf einer Ä. wird keine Arbeit verrichtet. Die Feldlinien verlaufen stets senkrecht zu diesen Flächen.

**Äquivalentdosis**:  $\uparrow$  Dosis.

## Äquivalenzprinzip:

- ♦ die Äquivalenz von träger und schwerer  $\uparrow$  Masse.
- ♦ die Hypothese von der  $\uparrow$  Äquivalenz von Masse und Energie.

**Äquivalenz von Masse und Energie**: die Aussage innerhalb der  $\uparrow$  Relativitätstheorie, dass die Masse  $m$  und die Energie  $E$  gleichwertig sind, ausgedrückt in der Formel ( $c$  Lichtgeschwindigkeit):

$$E = m \cdot c^2.$$

**Äräometer** [griech. araios »dünn«] (**Senkwaage**):  $\uparrow$  Waage.

**Arbeit**, Formelzeichen  $A$  oder  $W$  [engl. work »Arbeit«]: grundlegende physikalische Größe, die sich aus den Größen »Kraft« und »Weg« herleitet und eng mit der  $\uparrow$  Energie verknüpft ist.

Eine A. wird immer dann verrichtet, wenn ein Körper unter dem Einfluss einer auf ihn wirkenden Kraft bewegt wird. Haben Kraftvektor und Wegvektor  $\vec{s}$  die gleiche Rich-

## Äquivalenz von Masse und Energie

### Masse und Energie in Zahlen

Der Zusammenhang zwischen Energie und Masse gilt für beliebige Vorgänge in der Natur. Das Erhitzen von 1 Liter Wasser von 20 °C auf 100 °C erfordert z. B. eine Energiezufuhr von 335 kJ – und das bedeutet eine Massenzunahme des Wassers um  $3,7 \cdot 10^{-12}$  kg, also weniger als 1 Milliardstel Prozent. An dieser Zahl sieht man, dass bei alltäglichen Vorgängen die Massenveränderungen keine Rolle spielen.

Bei der Energieerzeugung in der Sonne fusionieren pro Sekunde 567 Millionen Tonnen Wasserstoff. Dabei werden in jeder Sekunde 4,2 Millionen Tonnen Masse in eine Energie von  $3,8 \cdot 10^{26}$  J umgewandelt.

tung und ist die Kraft längs des gesamten Wegs konstant, so gilt:

$$W = F \cdot s.$$

In Worten: Die Arbeit  $W$  ist das Produkt aus dem Betrag  $F$  der Kraft und der Länge  $s$  des Wegs. Dabei weisen Kraft und Weg in die gleiche Richtung, andernfalls muss noch der Winkel  $\alpha$  zwischen ihnen berücksichtigt werden:

$$W = \vec{F} \cdot \vec{s} = F \cdot s \cdot \cos \alpha$$

ist das Skalarprodukt von Kraftvektor  $\vec{F}$  und Wegvektor  $\vec{s}$ ,  $\alpha$  ist der von  $\vec{F}$  und  $\vec{s}$  eingeschlossene Winkel.

Ändert sich schließlich der Kraftvektor längs des Wegs, ergibt sich die allgemeingültige Integralgleichung:

$$W = \int F ds = \int F \cos \alpha ds.$$

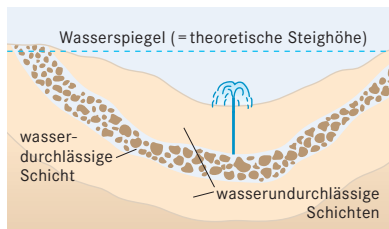
Die  $A$  ist also das Wegintegral der Kraft. Sie ist eine skalare Größe, d. h., sie wird anders als ein  $\uparrow$ Vektor durch einen einzelnen Zahlenwert charakterisiert. Die SI-Einheit ist das Joule (J), es ist  $1 \text{ J} = 1 \text{ Nm}$ .

Je nachdem, um was für eine Kraft es sich handelt, spricht man von elektrischer oder magnetischer Arbeit, von Formänderungs- oder Reibungsarbeit usw. Allerdings leistet nicht jede Kraft notwendigerweise  $A$ , z. B. wirkt die  $\uparrow$ Lorentz-Kraft immer senkrecht auf die Bewegungsrichtung einer elektrischen Ladung, das Skalarprodukt aus Kraft und Weg (bzw.  $\cos \alpha$ ) ist somit immer null. Auch gibt es Formen von  $A$ , die nicht unmittelbar auf eine Kraft zurückgeführt werden können, etwa wenn ein erhitztes Gas bei der Ausdehnung gegen den  $\uparrow$ Druck der Behälterwände  $A$  leistet.

**archimedisches Prinzip** [nach dem griech. Philosophen ARCHIMEDES]: die Aussage, dass sich das Gewicht eines in Gas oder Flüssigkeit eintauchenden Körpers scheinbar um so viel verringert, wie die von ihm verdrängte Gas- oder Flüssigkeitsmenge

wiegt. Der Körper erfährt also einen (hydrostatischen)  $\uparrow$ Auftrieb.

**artesischer Brunnen** [nach der frz. Landschaft Artois]: ein auf dem Prinzip der  $\uparrow$ kommunizierenden Röhren beruhender Springbrunnen. Befindet sich zwischen zwei wasserundurchlässigen Erdschichten (z. B. Ton) eine wasserdurchlässige Schicht (z. B. Kies), so kann in einer Mulde die Erdoberfläche unterhalb des Wasserspiegels in der wasserundurchlässigen Schicht liegen. Durchbohrt man hier die obere wasserundurchlässige Schicht, so entsteht ein Springbrunnen. Er steigt theoretisch so hoch, wie die Wasserführende Schicht über der Talsohle liegt.



**artesischer Brunnen**

**As:** Einheitenzeichen für  $\uparrow$ Amperesekunde.  
**astonscher Massenspektrograf** [nach F. W. ASTON]: ältere Form des  $\uparrow$ Massenspektrografen.

**Astronomie:** die Naturwissenschaft, die sich mit der Erforschung des Universums sowie mit der Entwicklung des Alls als Ganzes befasst. Eine Einteilung liefert die Art der Beobachtungstechnik: Die **optische Astronomie** fängt Lichtwellen mit Instrumenten wie Fernrohren auf und analysiert sie. Die **Radioastronomie** untersucht mit Radioteleskopen die  $\uparrow$ Radiowellen, langwellige Signale bestimmter Radioquellen. **Röntgen- und Infrarotastronomie** arbeiten mit Satelliten und untersuchen die Signale von Röntgensternen und Wärmewellen. Als eigenständige Forschungsrichtung hat sich die



**Astrophysik** herausgebildet, die nicht allein die Himmelskörper, sondern das ganze Universum als physikalisches Objekt betrachtet; sie beschreibt seine Eigenschaften und seine Entwicklung mit physikalischen Methoden.

**astronomisches Fernrohr:** das keplersche ↑Fernrohr, dessen Linsen ein auf dem Kopf stehendes Bild erzeugen.

**at:** Einheitenzeichen für technische ↑Atmosphäre.

**Äther** [griech. aither »heiterer Himmel«]: ein hypothetischer Stoff, von dem man bis zum Ende des 19. Jh. annahm, er würde alle Materie durchdringen und den ganzen Raum erfüllen. Er sollte das Medium sein, in dem sich Licht, Wärme und die Schwerkraft ausbreiten (analog zur Ausbreitung von Schall in Luft). Die Ätherhypothese führte jedoch zu zahlreichen Widersprüchen. Mit dem ↑Michelson-Versuch wurde die Existenz des Äthers 1881 widerlegt.

**atm:** Einheitenzeichen für physikalische ↑Atmosphäre.

**Atmosphäre** [griech. atmos »Dampf« und sphaira »Kugel«]:

♦ **Geophysik, Umweltphysik:** jede gasförmige Hülle eines Himmelskörpers, die durch dessen Schwerkraft gebunden wird; im engeren Sinne die Atmosphäre der Erde.

Die Erdatmosphäre reicht bis in eine Höhe von etwa 3 000 km, etwa 80 % ihrer Masse von 1,5 Milliarden Tonnen liegen aber unterhalb von 7 km Höhe.

Die Zusammensetzung der A. am Erdboden (Tab.) unterscheidet sich sehr von der in größerer Höhe. So findet sich in ca. 20–25 km Höhe eine merklich höhere Konzentration von Ozon. Diese sog. **Ozonschicht** absorbiert einen wesentlichen Teil der auf die Erde auftreffenden UV-Strahlung. Die um 1980 erstmals gemessene zeitweise Zerstörung der Ozonschicht an den Polen (**Ozonloch**) geht auf menschliche Einflüsse zurück (z. B. Treibgase in Spraydosen) und ist heute

ein ernstes ökologisches Problem. Neben den genannten Gasen enthält die A. noch stark wechselnde Anteile an Wasserdampf (zwischen nahezu 0 und 4 %).

#### Atmosphäre · Zusammensetzung

Stickstoff	78,09 %
Sauerstoff	20,94 %
Argon	0,93 %
Kohlendioxid (jährlicher Anstieg 0,000 2 %)	0,039 %
Methan (jährlicher Anstieg 0,000 002 %)	0,000 2 %
Sonstiges (Neon, Helium u. a.)	0,003 %

#### Zusammensetzung der Atmosphäre am Erdboden in Volumenprozent (ohne Wasserdampf)

Eine der wichtigsten Eigenschaften der A. ist die Möglichkeit, Wärmestrahlung zu absorbieren und auf den Erdboden zurückzustrahlen (natürlicher ↑Treibhauseffekt).

♦ **physikalische Atmosphäre,** Einheitenzeichen atm: veraltete Einheit des ↑Drucks. 1 atm ist der Normwert des Luftdrucks, festgelegt als 760 mm Hg (↑Millimeter Quecksilbersäule). SI-Einheit des Drucks ist das ↑Pascal (Einheitenzeichen Pa). Es gilt:

$$1 \text{ atm} = 1013,25 \text{ hPa} = 1,013\,25 \text{ bar} \\ = 760 \text{ Torr.}$$

♦ **technische Atmosphäre,** Einheitenzeichen at: veraltete Einheit des ↑Drucks. 1 at ist festgelegt als die Gewichtskraft von 1 kg auf 1 cm<sup>2</sup> Fläche. SI-Einheit des Drucks ist das ↑Pascal (Einheitenzeichen Pa). Es gilt:

$$1 \text{ at} = 98\,100 \text{ Pa} = 981 \text{ hPa} \\ = 736 \text{ Torr} = 0,981 \text{ bar.}$$

**Atom:** siehe Topthema Seite 25.

**atomare Masseneinheit,** Einheitenzeichen u: gesetzlich zugelassene Nicht-SI-Ein-



heit der Masse für die Angabe von Teilchenmassen.

**Festlegung:** eine atomare Masseneinheit ist der zwölfte Teil der Masse eines Atoms des Nuklids  $^{12}_6\text{C}$  (Kohlenstoff):

$$1\text{ u} = 1,660\,538\,86 \cdot 10^{-27}\text{ kg}.$$

Dieser Wert entspricht einer  $\uparrow$ Ruheenergie von 931,494 043 MeV.

**Atombombe:**  $\uparrow$  Kernwaffen.

**Atomfalle:** eine käfigartige Anordnung aus drei Elektroden (zwei Halbkugeln mit einem dazwischenliegenden Ring), mit der sich unter  $\uparrow$ Vakuum einzelne geladene Atome (Ionen) über längere Zeit festhalten lassen. Elektrische Wechselfelder, die an die Elektroden angelegt werden, stoßen das Ion ständig hin und her. Dabei wird es in die Mitte des Käfigs gezwungen, wo sich die Kräfte gegenseitig aufheben.

**Atomhülle:** die Gesamtheit der im  $\uparrow$ Atom gebundenen Elektronen.

**Atomkern:**  $\uparrow$  Kern.

**Atomkraftwerk,** Abk. AKW (Kernkraftwerk, Abk. KKW):  $\uparrow$  Kernreaktor.

**Atomlaser:** ein auf der  $\uparrow$ Bose-Einstein-Kondensation beruhender Laser, bei dem ausgenutzt wird, dass entsprechend der Quantenmechanik jedes Materieteilchen auch Welleneigenschaften besitzt. Die Atome eines Bose-Einstein-Kondensats haben wie die Photonen eines herkömmlichen Lasers identische Wellenlänge und bewegen sich im Gleichtakt. Der erste Atomlaser wurde 1997 am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Boston (USA) gebaut. Anstatt Photonen sendet er einen kohärenten Strahl von Natriumatomen aus. Da Atome – anders als Photonen – der Schwerkraft unterliegen, könnten Atomlaser als Präzisionssensoren zur Messung der Erdbeschleunigung (und damit z.B. zur Erdbebenüberwachung) eingesetzt werden. Eine besonders wichtige Anwendung könnte die Atomlithografie sein, mit deren Hilfe sich

höchst genau sehr kleine Strukturen auf Halbleiteroberflächen ( $\uparrow$  Mikroelektronik) erzeugen ließen.

**Atommasse:** Man unterscheidet die absolute und die relative Atommasse:

Die **absolute Atommasse** ist die Masse eines einzelnen Atoms ( $\uparrow$  atomare Masseneinheit).

Die **relative Atommasse** ist eine Verhältniszahl, die angibt, wievielfach die Masse eines bestimmten Atoms größer ist als eine vorgegebene Bezugsmasse. 1961 wählte man als Referenzwert  $^{1}_{12}$  der Masse des Kohlenstoffnuklids  $^{12}_6\text{C}$  und ordnete diesem somit die relative Atommasse 12 zu.

**Atommodell:** ein aufgrund experimenteller Befunde entwickeltes Bild vom  $\uparrow$ Atom und seinem inneren Aufbau. Das bekannteste Beispiel ist das bohrsche Atommodell.

**Atomnummer:** die  $\uparrow$ Ordnungszahl.

**Atomoptik:** Teil der Physik, in dem man die quantenmechanischen  $\uparrow$ Materiewellen nutzt, um »Optik« mit Atomstrahlen zu betreiben. Man nutzt dazu die Beugung und Interferenz aus. An Apparaten werden oft  $\uparrow$ Atomlaser und  $\uparrow$ Atomfallen verwendet.

**Atomphysik:** im engeren Sinn die Physik der Atome, Ionen und Moleküle und aller von ihnen verursachten physikalischen Erscheinungen, im weiteren Sinn die Physik aller mikrophysikalischen Erscheinungen. Heute versteht man unter A. meist die Physik der Elektronenhülle und der Vorgänge, an denen die Atomelektronen beteiligt sind. Experimentell untersucht die A. vor allem die  $\uparrow$ Spektrallinien der von den Atomen ausgesandten Strahlung und die Streuung von Atomstrahlen. Die Theorie beruht vor allem auf der  $\uparrow$ Quantenmechanik. Enge Beziehungen bestehen zur Laserphysik ( $\uparrow$ Laser) und zur  $\uparrow$ Festkörperphysik. – Die Physik der Atomkerne ist die  $\uparrow$ Kernphysik.

**Atomrumpf:** der Teil des  $\uparrow$ Atoms, der aus dem  $\uparrow$ Kern und den abgeschlossenen Elektronenschalen besteht. Er entspricht also

► Fortsetzung auf Seite 29

## Atom

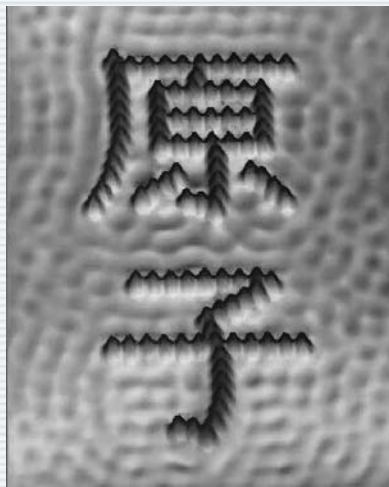
Unter einem Atom (griech. atomos »unteilbar«) versteht man die kleinste, mit chemischen Mitteln nicht zerlegbare Einheit eines chemischen Elements.

Die Vorstellung, dass sich die Welt aus solchen kleinsten Teilchen zusammensetzt, geht auf den griechischen Philosophen DEMOKRIT (um 400 v. Chr.) zurück. Seine Auffassung konnte sich aber nicht durchsetzen. Erst Naturforscher wie I. NEWTON (Ende 17. Jh.) oder der Chemiker J. DALTON (Anfang 19. Jh.) griffen seine Idee wieder auf. Seitdem sind die Vorstellungen vom Aufbau der Atome immer detaillierter geworden; ihre Entwicklung ist eng mit derjenigen der ↑Quantentheorie verknüpft. Heute ist man sicher, dass es Atome gibt, und man kennt ihre Struktur und Wechselwirkungen sehr genau – aber sie sind weder unteilbar (↑Kernspaltung) noch sind sie die kleinsten Teilchen in der Natur: ↑Elementarteilchen (Quarks, Elektronen usw.) sind mindestens 100 Mio. Mal kleiner als das kleinste Atom!

### Eigenschaften der Atome

Atome haben eine Masse zwischen 1 und 300 atomaren Masseneinheiten (ca.  $10^{-27}$  bis  $10^{-25}$  kg) und verhalten sich, als hätten sie einen Durchmesser von 0,05 bis 0,5 nm. Normalerweise sind Atome elektrisch neutral, man kann sie jedoch ionisieren (↑Ionisation). Aufgrund seiner geringen Ausdehnung kann man ein Atom nicht sehen – es ist 1000- bis 10 000-mal kleiner als die Wellenlänge sichtbaren Lichts! Es gibt aber verschiedene Methoden, mit denen man ihre Existenz beweisen kann, z. B.

mit dem ↑Massenspektrometer oder über die Beugung von Röntgenstrahlen an Kristallen. Und mit einem ↑Rastertunnelmikroskop lässt sich sogar die Ausdehnung einzelner Atome darstellen (Abb. 1).



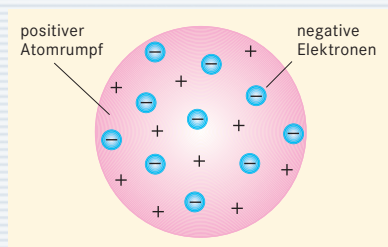
(Abb. 1): das Wort »Atom« in japanischen Schriftzeichen – dargestellt durch Eisenatome, die mit einem Rastertunnelmikroskop auf einer Kuperoberfläche positioniert wurden

Ein Atom besteht aus einem positiv geladenen ↑Kern und einer Hülle aus (negativ geladenen) Elektronen. Bei neutralen Atomen enthält die Hülle gerade so viele Elektronen, wie im Kern positive Ladungen vorhanden sind. Anzahl und Anordnung der Elektronen in der Atomhülle bestimmen das physikalische und chemische Verhalten der einzelnen Elemente. Zu einem bestimmten

Element gehören alle Atome mit identischen chemischen Eigenschaften, also Atome mit gleicher Elektronenzahl (im neutralen Zustand) und damit auch mit gleicher  $\uparrow$ Kernladungs- oder  $\uparrow$ Ordnungszahl.

## Atommodelle einst und jetzt

In der Geschichte wurden unterschiedliche Vorstellungen zum Aufbau der Atome (**Atommodelle**) entwickelt, die den jeweiligen Kenntnisstand ihrer Zeit widerspiegeln. Das **Kugelmodell** von J. DALTON (1803) beschreibt das Atom als eine kleine, gleichmäßig mit Masse gefüllte Kugel. Mit ihm lassen sich u. a. die Gasgesetze und Vorgänge wie Diffusion und Osmose erklären. Nach dem **Thomson-Modell** (»Rosinenkuchenmodell«, nach J. J. THOMSON, 1904) ist das Atom eine homogene positiv geladene



(Abb. 2): das thomsonsche Rosinenkuchenmodell

Kugel, in die negative Ladungen so eingebettet sind, dass das Atom als Ganzes nach außen neutral ist. Im **rutherfordischen Atommodell** (nach E. RUTHERFORD, 1911) besteht das kugelförmige Atom aus einem winzigen Kern (Radius etwa 1 fm), in dem sich die gesamte positive Ladung und fast die gesamte Masse konzentrieren, und aus Elektronen, die den Kern umkreisen;

der Raum dazwischen ist leer. Der Radius der Kreisbahnen wird berechnet, indem man die Zentripetalkraft gleich der Coulomb-Kraft setzt. Mit diesem Modell ließ sich die  $\uparrow$ Streuung von Alphateilchen an Goldatomen erklären (rutherfordischer Streuversuch), und man konnte die Lage von  $\uparrow$ Spektrallinien berechnen.

## Das bohrsche Atommodell

Das rutherfordische Modell widerspricht den Gesetzen der Elektrodynamik, weil ein kreisendes Elektron Strahlung und damit Energie abgibt (1 Bremsstrahlung) – das Elektron müsste also in kürzester Zeit in den Atomkern stürzen! Daher machte 1913 RUTHERFORDS Schüler N. BOHR zwei revolutionäre Annahmen, um stabile Elektronenbahnen herzuleiten. Sie bilden die Grundlage des **bohrschen Atommodells**. Die wichtigste Forderung wird als **erstes bohrsches Postulat (bohrsche Quantenbedingung)** bezeichnet:

Die Elektronen bewegen sich strahlungsfrei, also ohne Energieverlust, auf Kreisbahnen, für die das Produkt aus Impuls  $m_e \cdot v$  und Umfang  $2\pi \cdot r$  ein ganzzahliges Vielfaches des  $\uparrow$ planckschen Wirkungsquantums  $h$  ist:

$$2\pi \cdot r_n \cdot m_e \cdot v_n = n \cdot h.$$

Man nennt  $n$  eine  $\uparrow$ Quantenzahl, und die Bahnen mit Radius  $r_n$  und Bahngeschwindigkeit  $v_n$  heißen bohrsche Bahnen.

Um den Radius der innersten Bahn ( $n = 1$ ) zu berechnen, setzt man, wie im rutherfordischen Modell, die Coulomb-Kraft zwischen Kern und Elektron gleich der Zentripetalkraft. Für das Wasserstoffatom ergibt sich dann

$$r_1 = a_0 = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ m}.$$

$a_0$  ist der **bohrrsche Radius**, der in der Atomphysik oft als Längeneinheit verwendet wird; man kann ihn als Richtwert für die Größe des Wasserstoffatoms ansehen.

Jeder bohrrschen Bahn entspricht ein diskretes Energieniveau im Atom. BOHR nahm an, dass beim Übergang von einer Bahn zu einer anderen mit geringerer Energie elektromagnetische Strahlung mit fester Frequenz emittiert wird. Umgekehrt muss das Atom, um von einem niedrigeren auf ein höheres Niveau zu gelangen, Licht genau dieser Frequenz absorbieren. Man spricht vom **zweiten bohrrschen Postulat (bohrrsche Frequenzbedingung)**. Die Frequenz  $\nu$  der emittierten oder absorbierten Strahlung ist danach durch

$$h \cdot \nu = E_2 - E_1 \quad (E_1 < E_2)$$

gegeben (Abb. 3).

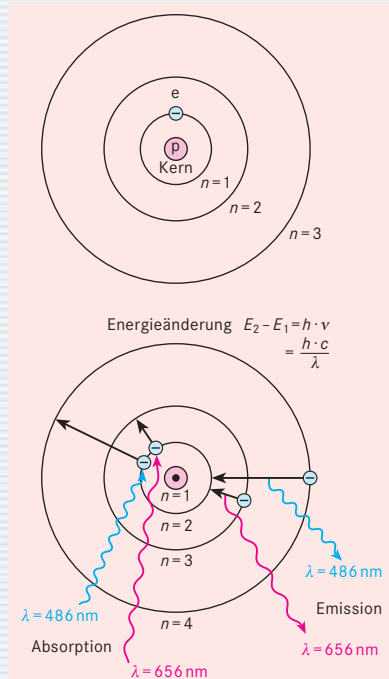
Die Emission oder Absorption von Strahlung *anderer* Frequenzen ist *nicht* möglich.

Mit seinem Modell gelang BOHR die erste befriedigende Erklärung des  $\uparrow$ Wasserstoffspektrums. Das Modell hat aber offensichtliche Widersprüche (auch hier müsste ein Elektron  $\uparrow$ Bremsstrahlung abgeben; eine Kreisbewegung mit Bahndrehimpuls null ist unmöglich) und wurde daher später weiterentwickelt.

### Orbitale und Schalen

Erst die Quantentheorie gab eine befriedigende physikalische Grundlage für die diskreten Energieniveaus. Allerdings gibt es dort keine klar definierten Elektronenbahnen mehr, sie sind über einen Raumbereich um den Kern »verschmiert«. Man kann sich ein solches **Orbital** als dreidimensionale stehende  $\uparrow$ Materiewelle vorstellen; höhere Energieniveaus sind dann in diesem Sinne

einfach »Oberschwingungen«. Das einfachste Orbital und damit der Grundzustand ist kugelsymmetrisch und hat keinen Drehimpuls; kompliziertere Orbitale haben z. B. Keulen- oder Hantelform.



(Abb. 3): bohrsche Quantenbahnen

Die wichtigsten Aussagen des quantenmechanischen Atommodells fasst man im **Schalenmodell** zusammen: Dort werden Orbitale durch **Hauptquantenzahl  $n$** , **Drehimpulsquantenzahl  $l$**  und **magnetische Quantenzahl  $m$**  gekennzeichnet, zwischen denen bestimmte Beziehungen gelten ( $\uparrow$ Auswahlregeln). Zustände mit gleichem  $n$  werden zu Schalen zusammengefasst, die man mit den Buchstaben K, L, M, ... bezeichnet ( $n=0$ ,

$n = 1$ , usw.). Aus den erlaubten Werten der Haupt- und Nebenquantenzahlen und damit der Struktur der Schalen und Unterschalen lässt sich der gesamte Aufbau des ↑Periodensystems der Elemente erklären.

## Übergang zur klassischen Physik

Im Grundzustand des Atoms besetzen die Elektronen die Orbitale der niedrigsten Energie, angefangen beim niedrigsten werden die nächsthöheren sukzessive aufgefüllt. Absorption elektromagnetischer Strahlung kann Elektronen in Orbitale höherer Energie anheben, d. h. in einen angeregten Zustand. Eine Besonderheit sind *Rydberg-Atome*, bei denen sich das äußerste Elektron in einem extrem hoch angeregten Zustand befindet. Dadurch haben diese Atome einen Durchmesser von bis zu  $10^{-2}$  mm, das entspricht dem 100 000-Fachen des Durchmessers eines Atoms im Grundzustand. Auch ihre Lebensdauer ist mit bis zu 1 s außergewöhnlich lang, niedrig angeregte Zustände zerfallen nach durchschnittlich  $10^{-8}$  s. Das angeregte Elektron befindet sich mit seiner hohen ↑Hauptquantenzahl (im Weltraum wurden Werte von bis zu 350 beobachtet, auf der Erde zwischen 10 und 290) im Grenzbereich zwischen gebundenen Zuständen und Kontinuum. Das macht die Rydberg-Atome interessant für die Un-

tersuchung des Korrespondenzprinzips. Dieses besagt, dass zwischen der klassischen Physik und der Quantenmechanik eine formale Analogie besteht, welche nötig ist, damit die ↑Quantenmechanik für große Quantenzahlen – die makroskopischen Zuständen entsprechen – in die klassische Physik übergeht.

### TIPP

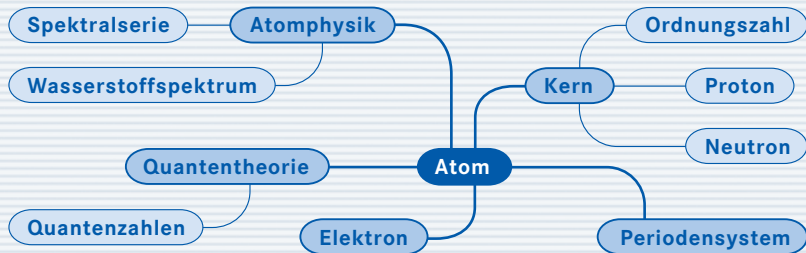
Stelle dir einen Atomkern von 1 mm Durchmesser vor (dies ist  $10^{12}$ -mal so viel wie der Durchmesser eines Protons:  $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ ). Wie groß wäre dann der bohrsche Radius (0,05 nm), wie groß die Ausdehnung eines Cäsiumatoms (0,25 nm)? Der bohrsche Radius beträgt 50 m, das Cäsiumatom wäre 250 m groß.

### WWW

[www.quantenwelt.de](http://www.quantenwelt.de) Atomphysik und Quantenmechanik ohne Formeln  
[www.weltderphysik.de](http://www.weltderphysik.de) allgemein verständliche Seite der DPG und des Bundesforschungsministeriums

### LITERATUR

BRÖCKER, BERNHARD: dtv-Atlas Atomphysik. München (dtv) © 1997.  
 HERTEL, INGOLF V.: Atomphysik und Grundlagen der Spektroskopie. Berlin (Springer) 2008.  
 PhysLab Atom- und Kernphysik. CD-ROM. Stuttgart (Klett) 2006.



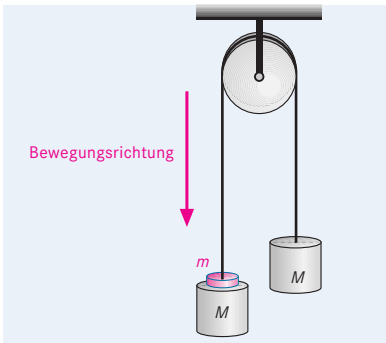
◀ Fortsetzung von Seite 24 dem Atom ohne die Elektronen in der Außenschale.

**Atomuhr (Cäsiumuhr):** †Uhr.

**Atto:** †Einheitenvorsätze.

**Attraktor** [lat. attractum »angezogen«]: †Chaostheorie.

**Atwood-Fallmaschine** [ˈætʊd; nach GEORGE ATWOOD, \*1745, †1807]: Gerät zur Demonstration der Fallgesetze (†freier Fall) und zur Messung der Fallbeschleunigung  $g$ . Die A.-F. besteht aus einer reibungsfreien Rolle, über die ein als masselos angenommenes Seil mit zwei gleichen Massenstücken der Masse  $M$  hängt. Bringt man eine zusätzliche kleine Masse  $m$  auf einer Seite an, so führt das System eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung aus (Abb.).



**Atwood-Fallmaschine: Schema**

Die beschleunigende Kraft hat den Betrag  $F = m \cdot g$ , beschleunigt wird die Masse  $2M + m$  (das Trägheitsmoment der Rolle wird nicht betrachtet). Dann gilt für den Betrag  $a$  der Beschleunigung  $m \cdot g = (2M + m) \cdot a$  oder:

$$a = \frac{m}{2M + m} g.$$

Der Fallvorgang verläuft also wesentlich langsamer als beim freien Fall.  $a$  lässt sich dann leicht messen und daraus  $g$  berechnen.

**Aufdruck:** †hydrostatischer Druck.

**Aufhängung:** die Befestigung eines hängenden Körpers z.B. durch eine Kette oder einen Stab. Weitere Typen sind die †bifilare Aufhängung und die †kardanische Aufhängung.

**Auflösungsvermögen:** Maß für die Fähigkeit eines Messgeräts, zwei nebeneinanderliegende Objekte deutlich voneinander unterscheiden zu können.

Als **optisches Auflösungsvermögen**  $U$  definiert man den Kehrwert des Abstands  $d_{\min}$ , den zwei Punkte mindestens haben müssen, um als getrennt erkannt zu werden:

$$U = \frac{1}{d_{\min}}.$$

Für ein *Mikroskop* ergibt sich  $d_{\min}$  als:

$$d_{\min} = 0,61 \cdot \frac{f \cdot \lambda}{R} = 0,61 \cdot \frac{\lambda}{A}$$

( $f$  Brennweite,  $\lambda$  Wellenlänge des Lichts,  $R$  Radius des Objektivs,  $A$  Apertur). Das  $A$  ist dann:

$$U = 1,64 \cdot \frac{A}{\lambda}.$$

Die Apertur ist das Produkt aus dem Sinus des halben Objektivöffnungswinkels und der Brechzahl des Mediums zwischen Gegenstand und Objektiv:  $A = n \cdot \sin \alpha$ . Das  $A$  eines Mikroskops lässt sich somit steigern, indem man 1. den Objektivdurchmesser  $d$  vergrößert, 2. kurzwelliges Licht verwendet oder 3. eine Flüssigkeit mit hoher Brechzahl  $n$  zwischen Objekt und Objektiv bringt. Glycerin ist eine solche **Immersionsflüssigkeit**.

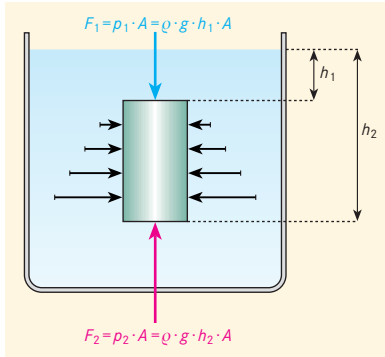
Bei einem *Fernrohr* wird das  $A$  etwas anders definiert, da man den wahren Abstand zweier Punkte nur selten messen kann. Hier interessiert der kleinste Sehwinkel  $\delta_{\min}$ , unter dem zwei Objektpunkte erscheinen dürfen, damit sie noch getrennt werden, und definiert  $A = 1/\delta_{\min}$ . Berücksichtigt man die Beugung, so gilt

$$A = \frac{0,82 \cdot d}{\lambda}$$

( $d$  Durchmesser der Eintrittsöffnung des Objektivs,  $\lambda$  Wellenlänge des Lichts). Diese



## Auftrieb



**Auftrieb (Abb. 1):** zur Herleitung

Beziehung gilt auch für das *Auge*: Nimmt man einen Pupillendurchmesser von 3 mm und eine Wellenlänge von  $6 \cdot 10^{-4}$  mm (rotes Licht) an, so gilt  $A = 4100$ ; daraus folgt der kleinste Sehwinkel zu  $\delta_{\min} = 1/A \approx 44$  Winkelsekunden.

Das **spektrale Auflösungsvermögen**  $U$  gibt die Fähigkeit eines  $\uparrow$ Spektralapparats an, zwei dicht beieinanderliegende Spektrallinien gerade noch zu trennen. Man definiert  $U = \lambda / \Delta \lambda$ . Das A. eines Beugungsgitters nimmt mit der Zahl der beleuchteten Striche und der Ordnung der beobachteten Beugungsmaxima zu.

**Auftrieb:** eine der Gewichtskraft entgegengerichtete Kraft.

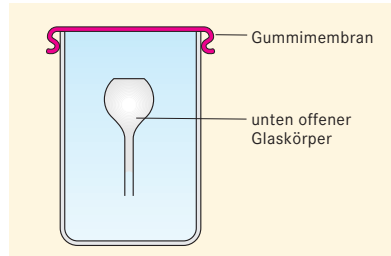
Der **hydrostatische Auftrieb** ist eine der Schwerkraft entgegengesetzte Kraft, die ein in Flüssigkeit eintauchender Körper aufgrund des unterschiedlichen hydrostatischen Drucks an Ober- und Unterseite erfährt. Nach dem  $\uparrow$ archimedischen Prinzip ist der Auftrieb eines Körpers so groß wie die Gewichtskraft der von ihm verdrängten Flüssigkeitsmenge. Analog erfährt ein Körper auch in einem Gas einen A. (aerostatischer Auftrieb), dieser ist aber meistens vernachlässigbar klein; Ausnahme: Ballons und Luftschiffe. Ursache des A. ist der in un-

terschiedlichen Tiefen verschiedene  $\uparrow$ hydrostatische Druck.

Für die Herleitung des A. betrachten wir einen zylindrischen Körper mit der Grundfläche  $A$  (Abb. 1). Auf seine Deckfläche wirkt die Kraft  $F_1 = p_1 \cdot A = h_1 \cdot \rho \cdot g \cdot A$  nach unten. Entsprechend wirkt auf die Grundfläche die Kraft  $F_2 = p_2 \cdot A = h_2 \cdot \rho \cdot g \cdot A$  nach oben. Da  $h_1 < h_2$ , ist auch  $p_1 < p_2$ . Es resultiert eine nach oben gerichtete Kraft  $\vec{F}_a$ , der Auftrieb. Sein Betrag ist

$$F_a = A \cdot (h_2 - h_1) \cdot \rho \cdot g.$$

Da  $A \cdot (h_2 - h_1)$  gerade das Volumen  $V$  des Körpers und damit das Volumen der verdrängten Flüssigkeit ist, gilt  $F_a = V \cdot \rho \cdot g$ , und das ist gerade die Gewichtskraft  $G$  der verdrängten Flüssigkeitsmenge. Diese Herleitung gilt entsprechend auch für andere Formen.



**Auftrieb (Abb. 2):** kartesischer Taucher

Sei nun  $G$  die Gewichtskraft und  $\rho_K$  die Dichte eines Körpers,  $F_2$  der Auftrieb und  $\rho_{Fl}$  die Dichte der Flüssigkeit, in die er eintaucht. Dann gilt:

Für  $F_a < G$  (oder  $\rho_K > \rho_{Fl}$ ) *sinkt* der Körper. Für  $F_a = G$  bzw.  $\rho_K = \rho_{Fl}$  *schwebt* der Körper an jeder Stelle der Flüssigkeit (z. B. ein Fisch im Wasser). Ist  $F_a > G$  (oder  $\rho_K < \rho_{Fl}$ ), dann steigt der Körper und taucht so weit aus der Flüssigkeit auf, bis der verringerte Auftrieb wieder gleich  $G$  ist. Der Körper *schwimmt* dann auf der Oberfläche der Flüssigkeit.

Diese drei Fälle lassen sich auch mit einem **kartesischen Taucher** (nach R. DESCARTES, latinisiert CARTESIUS) demonstrieren. Ein unten offener, mit Luft gefüllter Glaskörper befindet sich in einem bis oben mit Wasser gefüllten Gefäß, das mit einer elastischen Membran verschlossen ist. Seine Gewichtskraft ist kleiner als der Auftrieb, er schwimmt. Drückt man auf die Membran, dann wird die Luft im Glaskörper zusammengepresst, und es dringt Wasser von unten her ein. Damit verkleinert sich das Volumen des Systems aus Glaskörper und Luft, und so verringert sich auch der Auftrieb. Je nachdem, wie stark man auf die Membran drückt, schwebt der Körper, oder er sinkt.

Die Temperaturabhängigkeit des A. nutzt man beim ↑Galilei-Thermometer.

Der **dynamische Auftrieb** wirkt auf Körper in einer strömenden Flüssigkeit oder einem strömenden Gas. Er tritt auf, wenn die Strömungsgeschwindigkeit auf einer Seite des umströmten Körpers größer ist als auf der anderen. Nach der ↑Bernoulli-Gleichung be-

steht eine Druckdifferenz zwischen den verschieden schnellen Strömungen, die zu einer resultierenden Auftriebskraft führt. Der dynamische Auftrieb ist die Grundlage dafür, dass z. B. ein Flugzeug fliegt (↑fliegen).

**Auge:** Sehorgan bei Menschen und Tieren, das Lichtreize wahrnimmt und so Informationen über die Umwelt vermittelt.

Das menschliche Auge hat einen Durchmesser von etwa 24 mm. Die physikalisch wichtigsten Bestandteile sind die Iris, die Linse und die Netzhaut (Retina). Die **Iris** hat die Funktion einer Lochblende; der Durchmesser ihrer Öffnung (die Pupille) kann durch zwei Muskeln stetig verändert werden. Die Wölbung der elastischen **Linse** lässt sich durch Anspannung eines Muskels verändern. Die Linse und die vor ihr liegende, mit Kammerflüssigkeit gefüllte Augenkammer werden durch die Hornhaut geschützt. Den Raum hinter der Linse nimmt der Glaskörper ein, der aus einer gallertartigen Masse besteht und an die **Netzhaut** angrenzt. Auf ihr befinden sich die Sinneszellen, etwa 120 Mio. helldunkelempfindli-

## Auftrieb

### Auf und ab mit der Schwimmblase

Mit ihrer Schwimmblase, einer Art Luftballon im Körper, regulieren Fische ihre Schwimmhöhe und nutzen damit ein dem kartesischen Taucher ähnliches Prinzip. Indem sie über die Blutbahn Luft aus der Blase ablassen oder sie wieder auffüllen (einige Fische »schlucken« auch Luft über den Darm), verändern sie ihr Volumen und damit ihren Auftrieb: Nach Luftzufuhr – also bei größerem Volumen (das Gewicht bleibt gleich) – steigt der Fisch auf und umgekehrt.

Das aktive Aufpumpen oder Luftablassen ist jedoch nicht immer nötig. Steigt der Fisch durch Flossenbewegungen in etwas

geringere Wassertiefe auf, verringert sich der Wasserdruck. Dadurch wird die Schwimmblase weniger zusammengedrückt und ihr Volumen vergrößert sich von allein. Mitunter muss der Fisch beim Aufsteigen sogar Luft ablassen, damit die Volumenzunahme der Blase aufgrund des sinkenden Wasserdruckes den Aufstieg nicht zu schnell werden lässt. Beim Abtauchen verlaufen die Vorgänge entsprechend umgekehrt.

Es gibt auch Fische ohne Schwimmblase (z. B. Haie), die die Höhenregulierung allein über Flossenbewegungen bewältigen müssen.



# DUDEN

Das Fachlexikon zu sämtlichen Themen  
des Physikunterrichts

**Alles drin:** ein umfassendes Wissenspaket mit  
mehr als 2 400 Stichwörtern

**Topthemen:** farbige Sonderseiten zu aktuellen  
und zentralen Fachthemen

**Referatemanager:** Software zur einfachen  
Erstellung von Referaten und Facharbeiten,  
kostenlos downloaden unter  
[www.schuelerlexikon.de](http://www.schuelerlexikon.de)

**Nützliche Extras:** Kurzbiografien bedeutender  
Wissenschaftler, weiterführende Internet-  
und Literaturhinweise

Für Schülerinnen und Schüler ab  
der 7. Klasse bis zum Abitur

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

## Alle Schülerduden im Überblick:

Rechtschreibung

Grammatik

Fremdwörterbuch

Lateinisch – Deutsch

Literatur

Kunst

Musik

Religion und Ethik

Philosophie

Mathematik I

Mathematik II

Physik

Chemie

Biologie

Geografie

Politik und Gesellschaft

Geschichte

ISBN 978-3-411-05377-3  
17,95 € (D) • 18,50 € (A)



9 783411 053773