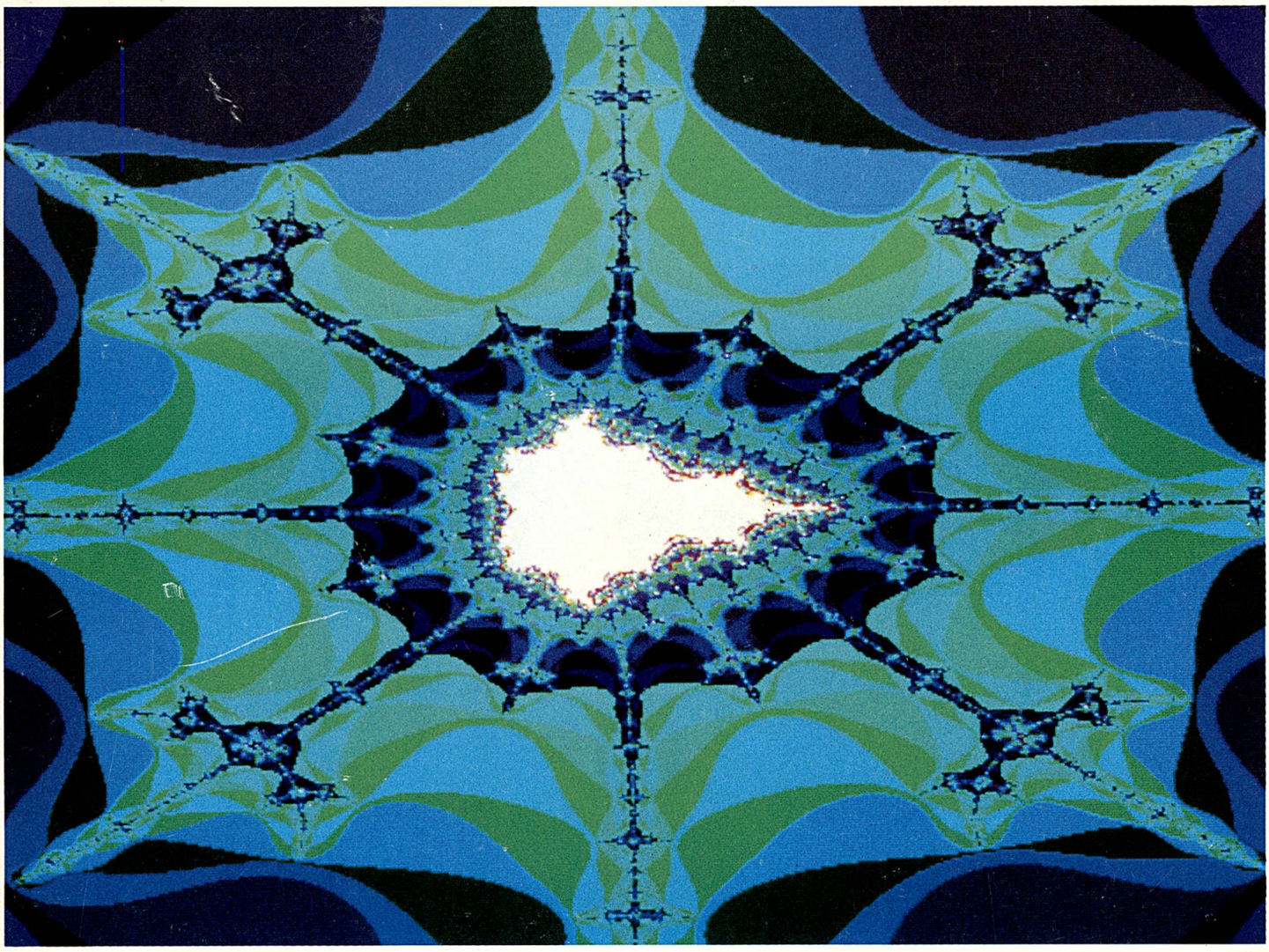
Kraker - Paill

Physik

HTL Band 4



Kraker - Paill

Physik, Band 4

Gedruckt auf
österreichischem
umweltschonend
gebleichtem Papier

E. DORNER

Mit Bescheid des Bundesministeriums für Unterricht und Kunst, Zl. 42.522/1-I/9/92, für den Unterrichtsgebrauch an höheren technischen und gewerblichen Lehranstalten mit Ausnahme der Fachrichtungen Bautechnik (Ausbildungszweige Hoch- und Tiefbau), Möbelbau und Innenausbau sowie Textil-Design im Unterrichtsgegenstand Physik und angewandte Physik in den Jahrgängen II bis V geeignet erklärt.

Benützerhinweise:

Beispiel A
durchgerechnete Anwendung eben erarbeiteter Inhalte

➤ **Beispiel A**
Ein mit einem Pfeil bezeichnetes Beispiel vermittelt außerdem einen für das weitere Verständnis unverzichtbaren Lernschritt.

Buch-Nr. 3944

Kraker - Paill
Physik, Band 4 HTL

© 1992 by Verlag E. DORNER Ges.m.b.H., Wien
Alle Ausgaben mit © 1992 sind nebeneinander verwendbar.

ISBN 3 - 7055 - 0073 - 2

Illustrationen: Wolfgang Greiderer, Datagraph Computergraphik Ges.m.b.H., Wien
Druck: Medien Produktion Ges.m.b.H., St. Pölten
Printed in Austria

Inhalt

1. Relativitätstheorie

1.1 Mechanik und Elektrodynamik aus klassischer Sicht 5
1.2 Relativitätsprinzip 6
1.3 Lichtgeschwindigkeit 7
1.4 Zeitdilatation 7
1.5 Längenkontraktion 8
1.6 Lorentztransformation 9
1.7 Gleichzeitigkeit 9
1.8 Relativistische Geschwindigkeitsaddition 10
1.9 Relativistische Masse 11
1.10 Energie 12
1.11 Dopplereffekt 14
1.12 Zwillingsparadoxon 15
1.13 Einige Effekte der allgemeinen Relativitätstheorie 16

2. Grundbegriffe der Atomistik

2.1 Atommasse 20
2.2 Atomgröße 20
2.3 Elektronen 21
2.4 Atomstruktur 21
2.5 Bindungsenergie 22
2.6 Temperatur 23

3. Elektromagnetische Felder und Wellen

3.1 Elektrische Felder 24
3.2 Magnetische Felder 24
3.3 Veränderliche Felder 25
3.4 Abstrahlung elektromagnetischer Wellen 26
3.5 Lichtemission 27
3.6 Lichtstreuung 28

4. Die Quantennatur der elektromagnetischen Strahlung

4.1 Plancksches Wirkungsquantum 29
4.2 Photoeffekt 30
4.3 Comptoneffekt 31
4.4 Eigenschaften der Photonen 31
4.5 Dualismus des Lichtes 32

5. Bohrsches Atommodell

5.1 Die Bohrschen Postulate 33
5.2 Das Wasserstoffatom 33
5.3 Atomanregung durch Elektronenstoß 37
5.4 Die Grenzen des Bohrschen Atommodells 37

6. Atombau

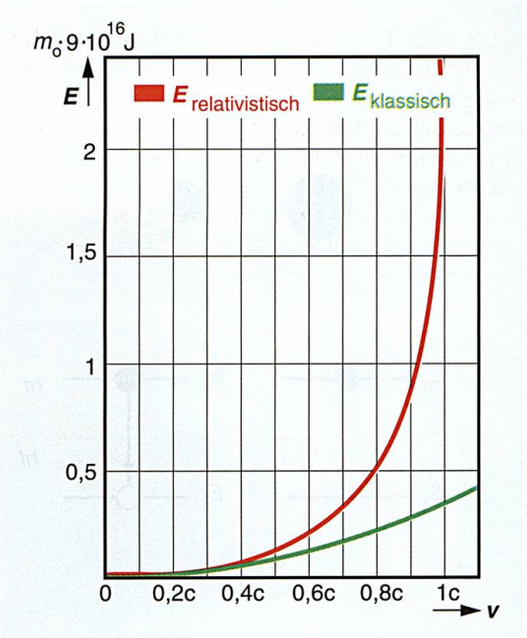
6.1 Erweiterung des Bohrschen Atommodells 39
6.2 Das Aufbauprinzip 40

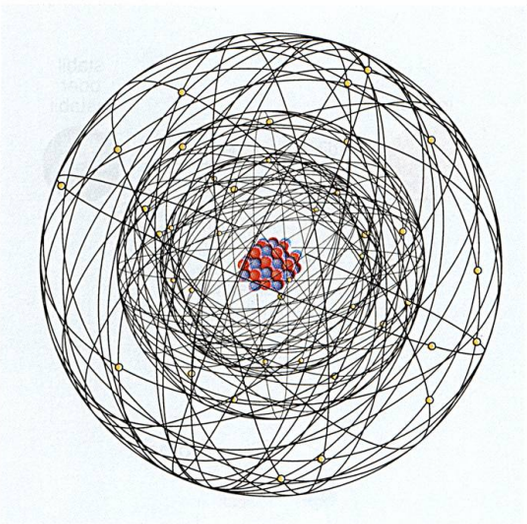
7. Quantenmechanik

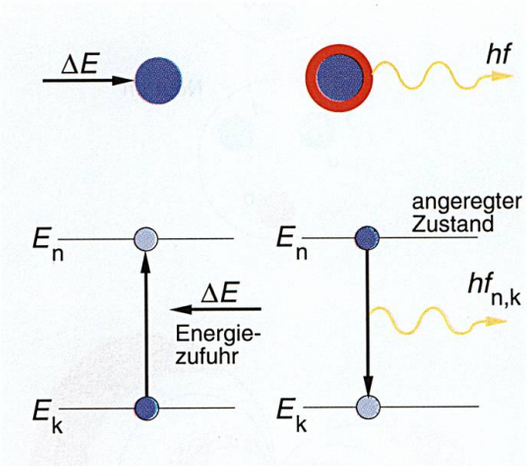
7.1 Welle-Teilchen-Dualismus 41
7.2 Wahrscheinlichkeitswelle 42
7.3 Unschärferelation 44
7.4 Quantenmechanisches Atommodell 45
7.5 Tunneleffekt 49
7.6 Elektronenmikroskop 50

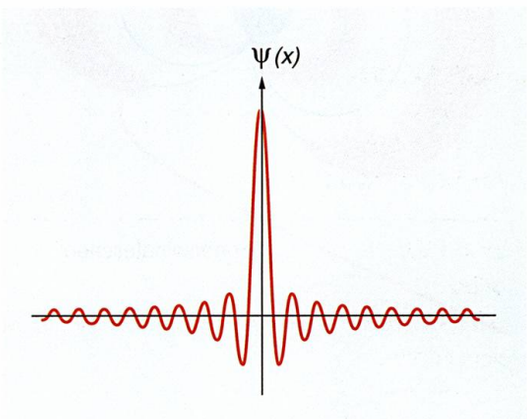
8. Röntgenstrahlung

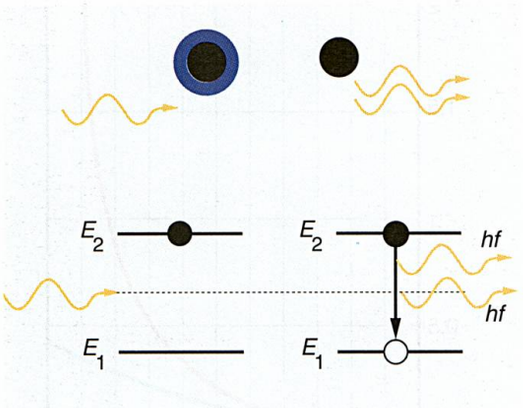
8.1 Erzeugung von Röntgenstrahlung 51
8.2 Röntgenspektrum 52
8.3 Auger-Effekt 53
8.4 Röntgenstrukturanalyse 53

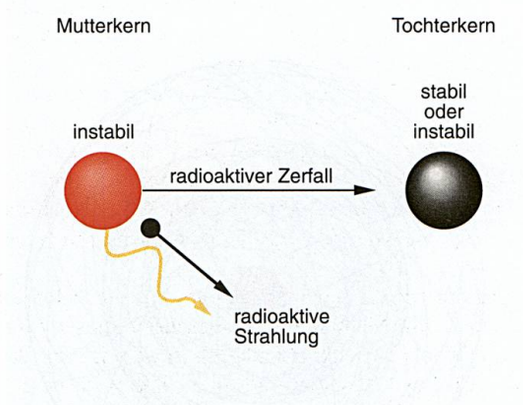


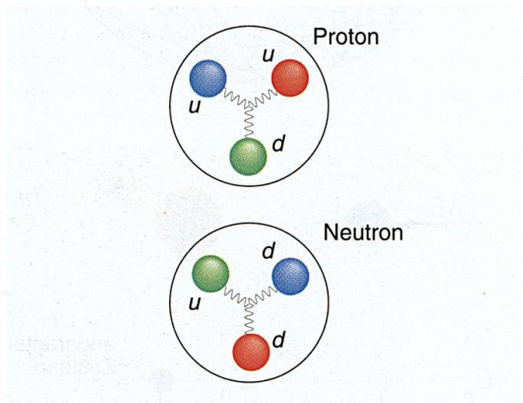


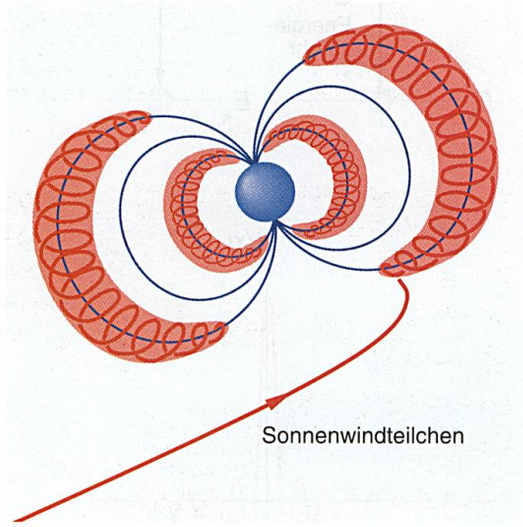












9. Laser

9.1 Absorption und Emission von Strahlung 55
9.2 Umbesetzung von Energieniveaus 55
9.3 Prinzipaufbau des Lasers 56
9.4 Resonator 56
9.5 Lasertypen 57
9.6 Eigenschaften des Laserlichtes 58
9.7 Anwendungen des Laserlichtes 59

10. Atomkern

10.1 Aufbau des Atomkerns 60
10.2 Isotope 61
10.3 Atommasse 61
10.4 Kernkräfte und Kernradius 61
10.5 Massendefekt und Bindungsenergie 62
10.6 Kernmodelle 63

11. Radioaktivität

11.1 Instabile Kerne zerfallen 64
11.2 Das Zerfallsgesetz 64
11.3 Die Aktivität 65
11.4 Arten radioaktiver Strahlung 66
11.5 Natürliche Radioaktivität 68
11.6 Künstliche Radioaktivität 69
11.7 Nachweis radioaktiver Strahlung 69
11.8 Anwendung von Radioisotopen 70

12. Kernenergie

12.1 Kernspaltung 72
12.2 Kernfusion 74

13. Strahlenschutz

13.1 Strahlungsgrößen 75
13.2 Die Strahlenbelastung des Menschen 76
13.3 Biologische Wirkungen der Strahlung 77
13.4 Strahlenschutz 77

14. Elementarteilchen

14.1 Einteilung der Elementarteilchen 79
14.2 Antiteilchen 80
14.3 Symmetrie und Parität 80
14.4 Wechselwirkungen 82
14.5 Grundlegende Hypothesen 85
14.6 Teilchenbeschleuniger 85

15. Astronomie

15.1 Einleitung 88
15.2 Grundbegriffe 88
15.3 Spektren 89
15.4 Aufbau des Sonnensystems 91
15.5 Energieerzeugung in einem Stern 97
15.6 Sternentwicklung 98
15.7 Kosmologie 102

Lösungen 106
Personen- und Sachregister 108
Periodensystem der chemischen Elemente 112

1. Relativitätstheorie

Der erste Abschnitt des Kapitels "Relativitätstheorie" beschäftigt sich mit der *Speziellen Relativitätstheorie*.

1.1 Mechanik und Elektrodynamik aus klassischer Sicht

Als *Albert Einstein* die Relativitätstheorie entwickelte, gab es zwei große abgeschlossene Theorien:

– die *Newtonsche Mechanik,*
– die *Maxwellsche Elektrodydnamik* .

Man bezeichnet diese Theorien auch als *klassische Physik.*

Newtonsche Mechanik

Die Newtonsche Mechanik basiert auf drei Axiomen:

(1) Trägheitsgesetz

Jeder Körper verharrt in Ruhe oder in gleichförmig geradliniger Bewegung, solange keine Kraft auf ihn einwirkt. Jeder Körper setzt einer Änderung des Bewegungszustandes (Beschleunigung oder Verzögerung) einen Widerstand (Trägheitswiderstand) entgegen.

(2) Dynamisches Grundgesetz

Eine Masse m erfährt unter der Wirkung einer Kraft F eine Beschleunigung a: $F = m\,a$

(3) Wechselwirkungsgesetz

Wirkt ein Körper mit einer Kraft (Aktion) auf einen zweiten Körper, so wirkt der zweite Körper mit einer gleich großen, aber entgegengerichteten Kraft (Gegenkraft, Reaktion) auf den ersten Körper. Kräfte treten immer paarweise auf. Kraft und Gegenkraft greifen an verschiedenen Körpern an.

Als Grundlage seiner Mechanik hat Newton folgende Festlegungen für Raum und Zeit getroffen:

Der (absolute) Raum bleibt stets gleich und unbeweglich, ohne Bezug auf einen äußeren Gegenstand.

Die (absolute) Zeit vergeht an sich gleichförmig und ohne Bezug auf irgendeinen äußeren Gegenstand.

Maxwellsche Elektrodynamik

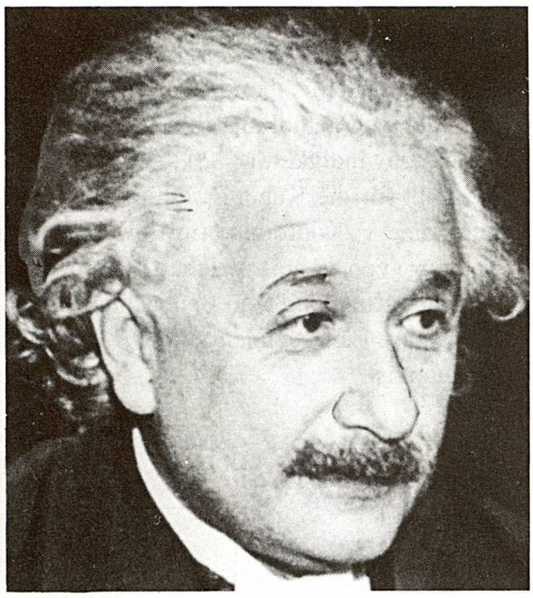
Als große, abgeschlossene Theorie galt zu Beginn des 20. Jahrhunderts die Maxwellsche Elektrodynamik. Die Elektrodynamik ist die Lehre von bewegten Ladungen. Maxwell erkannte, daß ein veränderliches elektrisches Feld ein magnetisches Feld hervorruft und ein veränderliches magnetisches Feld ein elektrisches. Er konnte mit der Vereinigung der beiden Felder, dem elektromagnetischen Feld, die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen erklären. Weiters konnte Maxwell zeigen, daß sich elektromagnetische Wellen mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten; jedoch forderte er - analog zur Ausbreitung mechanischer Wellen - ein Medium, in welchem sich elektromagnetische Wellen ausbreiten können. Dieses Medium wurde als *Weltäther* bezeichnet.

Newton und Maxwell schufen - in einem Zeitabstand von zwei Jahrhunderten - Theorien, die jeweils einen großen Erfahrungsbereich beschreiben: mechanische Bewegungen mit kleinen Geschwindigkeiten (Newton) bzw. Wellenphänomene mit der höchsten (bekannten) Geschwindigkeit (Maxwell).

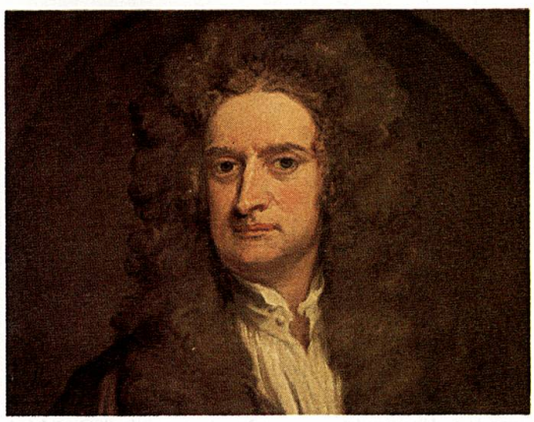
Obwohl beide Theorien in ihrem jeweiligen Anwendungsbereich gültig sind, erhebt sich die Frage, ob sie sich miteinander vereinen lassen oder zu einem Widerspruch führen.

Die Newtonschen Gesetze sind zunächst einmal in einem zum absoluten Raum ruhenden Bezugssystem gültig.

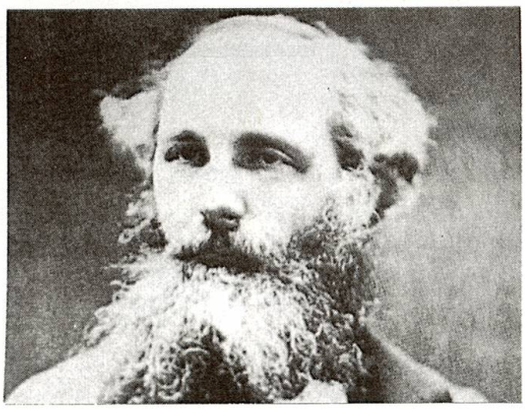
Wie läuft das Naturgeschehen in einem beliebigen gleichförmig geradlinig bewegten System ab?



5.1 *Albert Einstein* (1879-1955) veröffentlichte 1905 seine Abhandlung "Zur Elektrodynamik bewegter Körper" über die *Spezielle Relativitätstheorie* und 1915/16 jene über die *Allgemeine Relativitätstheorie*. Einstein zählt zu den bedeutensten und bekanntesten Physikern. Er entwickelte neue Vorstellungen über die Struktur der Materie und des Universums. Das Weltbild der Physik konnte durch seine wissenschaftlichen Arbeiten wesentlich erweitert werden.
Einstein beschäftigte sich bereits in jungen Jahren intensiv mit Mathematik. Er beschrieb dies so:„Im Alter von 12 bis 16 machte ich mich mit den Elementen der Mathematik vertraut, inklusive Prinzipien der Differential- und Integralrechnung."
Der Chemiker *Chaim Weizmann* und spätere Präsident Israels erzählte über eine Atlantikreise mit Einstein: „Einstein erklärte mir jeden Tag seine Relativitätstheorie, und bei meiner Ankunft war ich völlig davon überzeugt, daß *er* sie verstand."



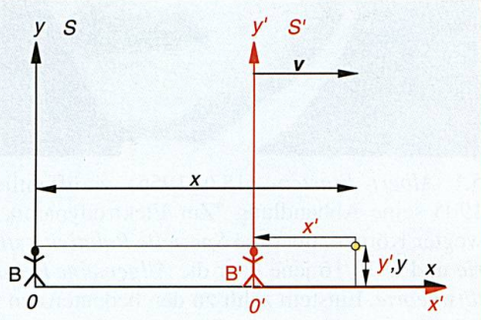
5.2 *Isaac Newton* – Schöpfer der klassischen Mechanik



5.3 *James Clerk Maxwell* schuf die Theorie der elektromagnetischen Wellen.

➤ Beispiel A

Ein Beobachter B' befindet sich in einem Zug, der sich geradlinig gleichförmig mit der Geschwindigkeit $v = 20$ km/h bewegt. B' mißt für die Kugel K, die neben ihm liegt, eine x'-Koordinate (in Bewegungsrichtung) von 80 cm. Welche x-Koordinate für die Kugel mißt ein Beobachter B am Bahnsteig, 1,2 s nachdem B' an B vorbeigefahren ist?



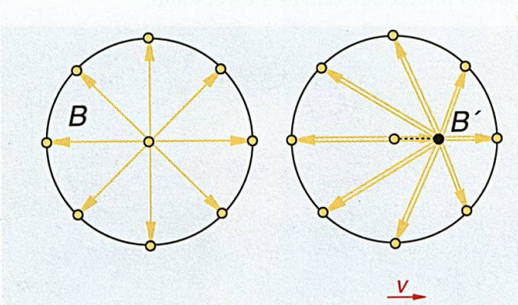
S ist das Bezugssystem (Koordinatensystem) des ruhenden Beobachters, S' das des bewegten Beobachters.

Zwischen den Koordinatensystemen S und S' bestehen folgende Beziehungen:

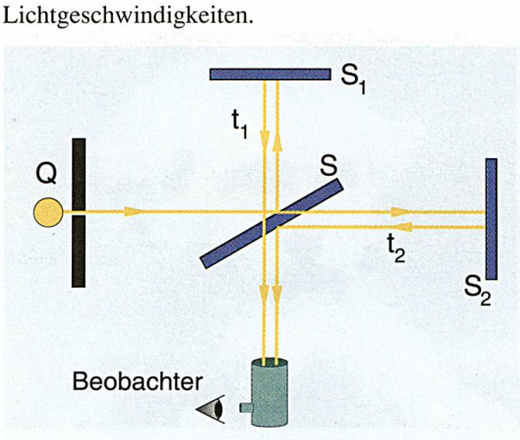
$x = x' + v\,t$

$x = 0{,}8\ \text{m} + 20/3{,}6\ \text{ms}^{-1} \cdot 1{,}2\ \text{s}$

$x = 7{,}47\ \text{m}$



6.1 Ausbreitung eines Lichtblitzes für einen bezüglich des Weltäthers ruhenden Beobachter (links) und für einen sich mit der Geschwindigkeit v bewegenden Beobachter (rechts) klassisch betrachtet. Die Pfeillängen sind ein Maß für die vermuteten Lichtgeschwindigkeiten.



6.2 Michelson-Interferometer

1.2 Relativitätsprinzip

Galilei-Transformation

Entfernt sich ein System S' mit der Geschwindigkeit v vom System S in x-Richtung, dann bleiben die y-Koordinate und z-Koordinate gleich – siehe Beispiel A. Es gelten folgende Transformationsgleichungen, um vom System S' in das System S umzurechnen:

Galilei-Transformation

$x = x' + v\,t\,,\quad y = y'\,,\quad z = z'$

Betrachtet man das System S' als ruhend, gilt:

$x' = x - v\,t\,,\quad y' = y\,,\quad z' = z$

Wird im geradlinig gleichförmig bewegten Zug einer Kugel ein Kraftstoß erteilt, wird dessen Größe in beiden Systemen gleich beurteilt: Die Kugel erfährt in beiden Systemen dieselbe Beschleunigung (dieselbe Änderung des Bewegungszustands).

Das bedeutet: Keines der beiden Systeme ist gegenüber dem anderen ausgezeichnet. In beiden gilt das Trägheitsgesetz.

Bezugssysteme, in denen das Trägheitsgesetz gilt, heißen *Inertialsysteme*.
inertia (lat.), Trägheit

Bewegung ist eine Ortsveränderung relativ zu einem Bezugssystem. Da es kein absolutes Bezugssystem gibt, das sich vor allen anderen auszeichnet, gibt es auch keine absolute Bewegung. Es gibt nur Relativbewegungen zu willkürlich gewählten Bezugssystemen.
Alle Bezugssysteme, die sich gegenüber einem Inertialsysteme in Ruhe oder geradlinig gleichförmiger Bewegung befinden, sind selbst Inertialsysteme.
Für kurzzeitige Experimente kann die Erde in guter Näherung als Inertialsystem betrachtet werden.
Das Naturgeschehen läuft immer gleich ab, unabhängig davon, welches Inertialsystem man zugrunde legt.

Relativitätsprinzip
In allen Inertialsystemen gelten dieselben Naturgesetze.

1.3 Die Lichtgeschwindigkeit – eine absolute Konstante

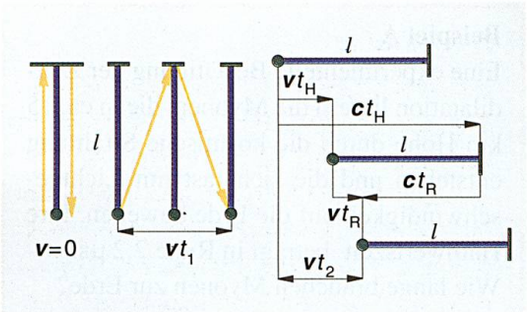
Der Versuch von Michelson und Morley

Maxwell hatte für die Ausbreitung von Licht und anderer elektromagnetischer Wellen die Existenz eines materiellen Mediums vorausgesetzt. Dieser *Weltäther* sollte eine Substanz sein, die den gesamten Raum erfüllt. Nach der Newtonschen Bewegungslehre ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts für einen Beobachter nur dann nach allen Richtungen gleich, wenn er sich bezüglich des Äthers in Ruhe befindet (Abb. 6.1).

Auf Anregung Maxwells versuchten die beiden amerikanischen Physiker *Michelson* und *Morley* im Jahr 1887, die Geschwindigkeit der Erde gegenüber dem Äther zu bestimmen. (Die Erde bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 30 km/s um die Sonne. Daher konnte wohl angenommen werden, daß sie sich gegenüber dem Äther nicht in Ruhe befindet.) Dabei gingen sie folgend vor (Abb. 6.2).

Ein Lichtstrahl, der von einer Lichtquelle Q ausgesandt wird, trifft unter einem Winkel von 45° auf einen halbdurchlässigen Spiegel S. Der Lichtstrahl wird geteilt, wobei ein Anteil vom Spiegel S_1, der andere von S_2 reflektiert wird. Auf dem Schirm überlagern sich die von S_1 reflektierten und S durchdringenden Strahlen mit jenen von S_2 und an der Rückseite von S reflektierten Strahlen. Es entsteht auf dem Beobachtungsschirm ein Interferenzmuster konzentrischer Ringe. Der eine Arm dieser Anordnung zeigt in Richtung der Erdbahn, der

andere liegt im rechten Winkel dazu. Dreht man die Versuchsanordnung um 90°, sollte sich das Laufzeitverhältnis t_1/t_2 nach klassischer Berechnung umkehren, was eine Verschiebung des Interferenzbildes bedeutet hätte – siehe Abb. 7.1. Diese Verschiebung tritt aber nicht ein! Damit war der Nachweis, daß sich die Erde durch den Weltäther bewegt, und somit auch der Nachweis, daß der Weltäther überhaupt existiert, gescheitert. Dennoch sollte das Versuchsergebnis von größter Tragweite sein. Die Hypothese von der Existenz des Weltäthers geriet ins Wanken. Einstein kam zu dem Schluß: Es gibt keinen Äther. Es existiert kein ausgezeichnetes Inertialsystem (*Relativitätsprinzip*).



7.1 Grafik zur klassischen Berechnung der Laufzeiten t_1 und t_2 im Versuch von Michelson und Morley

Elektromagnetische Wellen benötigen für ihre Ausbreitung kein Medium. Die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit ist eine *absolute Konstante*. Sie ist unabhängig von der Ausbreitungsrichtung und der Geschwindigkeit des Beobachters.

Skizzierung eines Versuchs zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit: Von einem Raumschiff, welches sich in bezug auf die Erde mit der Geschwindigkeit v bewegt, wird ein Laserstrahl ausgesandt. Ein Beobachter B auf der Erde und ein Beobachter B' im Raumschiff messen die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtstrahls. Nach der Newtonschen Mechanik müßten sich für B die beiden Geschwindigkeiten v und c addieren. Doch in Wirklichkeit messen beide Beobachter dieselbe Lichtgeschwindigkeit c.

Die Grundlage der Speziellen Relativitätstheorie Albert Einsteins bilden das Relativitätsprinzip und die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Diese beiden Erkenntnisse werden auch als die beiden *Einsteinschen Postulate* bezeichnet. Um das Ergebnis des Versuches von Michelson und Morley erklären zu können, konzentrierte sich Einstein auf das Verhalten von Uhren und Maßstäben.

Berechnung von t_1:

$$\left(\frac{c\,t_1}{2}\right)^2 = l^2 + \left(\frac{v\,t_1}{2}\right)^2 \Leftrightarrow \ldots \Leftrightarrow$$

$$t_1^{\,2} = \frac{4\,l^2}{c^2 - v^2} \Leftrightarrow t_1 = \frac{2\,l}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Berechnung von t_2:

(1) $t_2 = t_{Hinweg} + t_{Rückweg}$

(2) $c\,t_H = l + v\,t_H \Leftrightarrow t_H = \frac{l}{c - v}$

(3) $c\,t_R = l - v\,t_R \Leftrightarrow t_R = \frac{l}{c + v}$

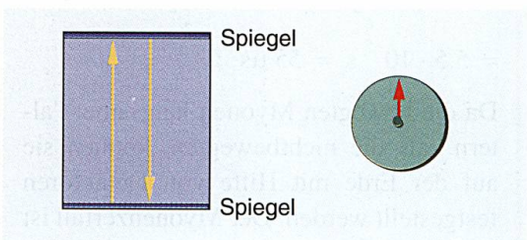
(1), (2), (3)

$$t_2 = \frac{l}{c - v} + \frac{l}{c + v} = \ldots =$$

$$= \frac{2\,l}{c\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} = \frac{t_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} > t_1$$

1.4 Zeitdilatation

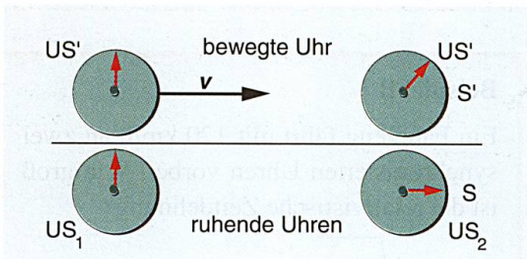
Wir stellen uns eine in einem System S' ruhende *Lichtuhr* US' vor (Abb. 7.2). Diese besteht aus zwei parallelen Spiegeln, zwischen denen ein Lichtblitz hin und her reflektiert wird. Ein Hin- und Herlauf stellt eine Schwingung (Periode) dar. Das System S' bewegt sich mit der Geschwindigkeit v bezüglich eines als ruhend betrachteten Inertialsystems S. Die Uhr steht dabei quer zur Bewegungsrichtung (Abb. 7.3).



7.2 Lichtuhr mit Anzeige

Im System S befinde sich eine völlig gleiche Uhr US_1. Wenn US' an ihrem Vorbeiflug US_1 erreicht hat, wird US' mit US_1 synchronisiert. Da zueinander geradlinig gleichförmig bewegte Systeme sich höchstens einmal treffen können, ist kein weiterer direkter Uhrenvergleich mehr möglich. Dies bedeutet, daß wir in S eine weitere Uhr US_2 benötigen, die mit US_1 synchron läuft. Die Synchronisation erfolgt beispielsweise durch einen genau in der Mitte der beiden Uhren US_1, US_2 ausgesendeten Lichtblitz, der beide Uhren in Gang setzt.

Es kann nun mit Hilfe der zweiten Uhr vom ruhenden System S aus festgestellt werden, daß eine Zeitdifferenz zwischen den Uhren US' und US_2 aufgetreten ist; die bewegte Uhr US' weist einen langsameren Gang auf.



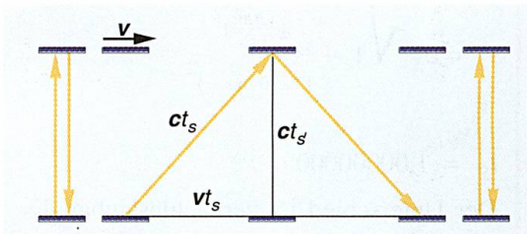
7.3 Bewegte Uhren gehen langsamer

Aus Abbildung 7.4 ist zu erkennen, daß von S aus betrachtet das Licht in der bewegten Uhr US' zwischen zwei Reflexionen einen größeren Weg zurücklegen muß als in den ruhenden Uhren.

Für beide Systeme gilt die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Die in S gemessene halbe Schwingungsdauer wird mit t_S , die in S' mit $t_{S'}$ bezeichnet.

Aus S' betrachtet legt der Lichtblitz in US' in der Zeit $t_{S'}$ den Spiegelabstand $c\,t_{S'}$ zurück. Aus S betrachtet legt er in der Zeit t_S die Strecke $c\,t_S$ zurück. Nach dem Pythagoreischen Lehrsatz gilt:

$$c^2 t_S^{\,2} = v^2 t_S^{\,2} + c^2 t_{S'}^{\,2} \Leftrightarrow t_S^{\,2}(c^2 - v^2) = c^2 t_{S'}^{\,2} \Leftrightarrow \ldots \Leftrightarrow t_S = \frac{t_{S'}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



7.4 Der Lichtweg in einer bewegten Uhr ist größer.

Beispiel A

Eine experimentelle Bestätigung der Zeitdilatation liefern die Myonen, die in ca. 15 km Höhe durch die kosmische Strahlung entstehen und die sich fast mit Lichtgeschwindigkeit auf die Erde bewegen. Ihre Halbwertszeit beträgt in Ruhe 2,2 µs.
Wie lange brauchen Myonen zur Erde?

a) Nichtrelativistische Betrachtung:
Laufzeit t bei $v = 0{,}9992\ c$:

$$t = \frac{H}{v} = \frac{15 \cdot 10^3\ \text{m}}{0{,}9992 \cdot 3 \cdot 10^8\ \text{ms}^{-1}} = 50\ \mu\text{s}$$

50 µs sind wesentlich größer als die Halbwertszeit. Dies würde bedingen, daß auf der Erdoberfläche fast keine Myonen mehr festgestellt werden könnten. Bereits nach rund 660 m wäre die Hälfte der Teilchen zerfallen. Mit Hilfe von Detektoren wurde jedoch eine wesentlich höhere Teilchenanzahl nachgewiesen, als nach klassischer Berechnung zu erwarten wäre. Für die sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit bewegenden Myonen ist die Zeitdilatation in die Berechnung einzubeziehen.

b) Relativistische Betrachtung:
Die bewegten Myonen können als bewegte Uhren angesehen werden. Für den Beobachter von der Erde aus ist die Halbwertszeit gedehnt.

$$\tau = \frac{\tau'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2{,}2 \cdot 10^{-6}\ \text{s}}{\sqrt{1 - \frac{(0{,}9992\ \text{c})^2}{c^2}}} =$$

$$= 5{,}5 \cdot 10^{-5}\ \text{s} = 55\ \mu\text{s}$$

Da die bewegten Myonen langsamer "altern" als die nichtbewegten, können sie auf der Erde mit Hilfe von Detektoren festgestellt werden. Der Myonenzerfall ist ein experimenteller Nachweis für die relativistische Zeitdehnung.

Beispiel B

Ein Fahrzeug fährt mit 120 km/h an zwei synchronisierten Uhren vorbei. Wie groß ist die relativistische Zeitdehnung?

$$t_{S'} = t_S \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} =$$

$$= t_S \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{120\text{m}}{3{,}6\text{s}}\right)^2}{(3 \cdot 10^8\ \text{ms}^{-1})^2}}$$

$$t_{S'} = 1{,}00000000\ t_S$$

Der Unterschied ist vernachlässigbar. Es genügt die klassische Berechnung.

Relativistische Zeitdehnung oder Zeitdilatation

Eine relativ zu einem Inertialsystem bewegte Uhr geht langsamer als die synchronisierten Uhren im Inertialsystem, an denen sie vorbeikommt. Während im Inertialsystem die Zeit t_S verstreicht, rückt die Anzeige der bewegten Uhr um $t_{S'}$ vor.

$$t_S = k \cdot t_{S'} \quad \text{mit} \quad k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad v \ \ldots \ \text{Relativgeschwindigkeit}$$

Da sowohl S als auch S' Inertialsysteme sind, müssen nach dem Relativitätsprinzip in S' dieselben Naturgesetze gelten wie in S. Daher kann man auch in S' mit zwei synchron laufenden Uhren feststellen, daß eine Uhr in S langsamer geht. Es ist somit ein *symmetrischer Effekt* zu beobachten, der nur durch die Relativbewegung zwischen den Systemen S und S' hervorgerufen wird.
Einstein konnte zeigen, daß die Zeit *keine absolute* Größe ist; es gibt also keine "wirkliche" Zeit, sondern die gemessene Zeit ist vom Bewegungszustand des Systems abhängig.
Die Zeitdilatation ist unabhängig vom Bau des Zeitmeßgerätes, also eine Eigenschaft der Zeit an sich. Andernfalls könnte man mit zwei Uhren verschiedener Bauart unterschiedliche Gangabweichungen in verschiedenen Inertialsystemen feststellen. Damit aber wäre das Relativitätsprinzip verletzt.
Alle physikalischen, chemischen und biologischen Vorgänge laufen in einem bewegten System für den nicht mitbewegten Beobachter langsamer ab.
Instabile Atome und subatomare Teilchen haben eine bestimmte Halbwertszeit: Von einer großen Anzahl gleicher Teilchen ist nach einer jedesmal gleichen Zeitspanne die Hälfte zerfallen, davon wieder die Hälfte usw. Radioaktive Atome oder Teilchen stellen somit atomare Uhren dar. (Beispiel A)

Aufgaben

1. Mit welcher Geschwindigkeit müßte sich eine Person A relativ zu einer anderen Person B bewegen, damit ein Vorgang, der von A aus gesehen 10 min beansprucht, von B aus betrachtet 5 min dauert?

2. Geladene Pionen weisen im ruhenden Zustand eine Halbwertszeit von $2{,}6 \cdot 10^{-8}$s auf. Wie ändert sich die Zerfallszeit, wenn sich die Pionen mit einer Geschwindigkeit $v = 0{,}92\ c$ bewegen?

1.5 Längenkontraktion

Ein Gedankenexperiment: Wir bewegen uns mit den Myonen in der sekundären kosmischen Strahlung. Dabei gilt für uns die Halbwertszeit ruhender Myonen. Nach klassischer Betrachtung müßte der überwiegende Teil unserer "Begleiter" vor dem Erreichen der Erde zerfallen. Dies ist aber nicht der Fall. Der mitbewegte Beobachter stellt einen anderen Abstand zur Erde hin fest als der ruhende. Die Strecke ist für den Beobachter im mitbewegten System *verkürzt*.

Wir betrachten einen Maßstab der Länge l, der in einem Inertialsystem S ruht. An jedem Stabende befindet sich eine Uhr. Die beiden Uhren sind synchronisiert. Parallel zum Maßstab bewegt sich ein Inertialsystem S' mit der Geschwindigkeit v. In S' befindet sich ebenfalls eine Uhr (Abb. 9.1). Wenn diese den Stabanfang passiert, wird sie mit der dort befindlichen Uhr synchronisiert. Passiert sie das Stabende, werden die Zeiten t und t' abgelesen. Wie verhält sich nun die Stablänge l im System S zur Stablänge l' im System S'?
Da v als konstante Geschwindigkeit angenommen wird, gilt:

$$v = \frac{l}{t} = \frac{l'}{t'} \Rightarrow l' = l\frac{t'}{t}$$

Daraus und aus $t = k \cdot t'$ folgt:

$$l' = l\frac{t'}{k\,t'} = \frac{l}{k} = l\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Längenkontraktion
Bewegt sich ein Beobachter an einem Maßstab mit der Geschwindigkeit v vorbei, wird dessen Länge in Bewegungsrichtung verkürzt gemessen. Die Längen normal zur Bewegungsrichtung bleiben unverkürzt.

$$l' = \frac{l}{k} = l\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

Beachte: Die Längenkontraktion ist so wie die Zeitdilatation ein symmetrischer Effekt. Bewegen sich zwei Beobachter mit Maßstäben relativ zueinander, sieht jeder der beiden den Maßstab des anderen kürzer als seinen eigenen.

Aufgaben

3. Ein Stab bewegt sich mit 0,5 c in Längsrichtung. Im ruhenden Zustand wird eine Länge von 3 m gemessen. Welche Länge wird vom bewegten Körper gemessen?

4. Mit welcher Geschwindigkeit bewegt sich ein Elektron in einem 1200 m langen Teilchenbeschleuniger, wenn diese Strecke vom Elektron aus betrachtet nur 100 m beträgt?

1.6 Lorentz-Transformation

Die absolute Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und das Relativitätsprinzip haben zur Folge, daß es keine absolute Zeit und keine absoluten Maßstablängen (keinen absoluten Raum) gibt. Findet ein Ereignis im System S am Ort x und zum Zeitpunkt t statt, können wir die entsprechenden Ereignisdaten x' und t' im System S' nicht mit der Galilei-Transformation ermitteln. Denn diese setzt ja voraus, daß Zeit und Raum absolut sind. An ihre Stelle tritt die *Lorentz-Transformation.* (Wie schon bei der Galilei-Transformation wird der Einfachheit halber angenommen, daß sich S' mit der Geschwindigkeit v parallel zur x-Achse von S gleichförmig bewegt.)

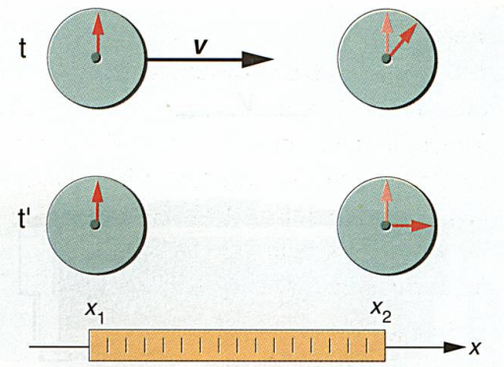
Lorentz-Transformation
Die in der folgenden Tabelle aufgestellten Beziehungen werden durch Beispiel B verifiziert. Bewegen sich zwei Inertialsysteme mit der Geschwindigkeit v in x-Richtung gegeneinander, dann gilt:

$x = k(x' + v\,t')$	mit $k = \dfrac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$	$x' = k(x - v\,t)$
$t = k(t' + \frac{v}{c^2}x')$		$t' = k(t - \frac{v}{c^2}x)$
$y = y'$		$y' = y$
$z = z'$		$z' = z$

Der Faktor k tritt bei allen Gesetzmäßigkeiten der Speziellen Relativitätstheorie auf. Nähert sich die Geschwindigkeit v immer mehr der Lichtgeschwindigkeit, gehen Uhren immer langsamer, werden Längen immer mehr verkürzt. Abb. 9.2 ist zu entnehmen, daß die Geschwindigkeit v stets kleiner als die Lichtgeschwindigkeit c ist. c ist daher eine Grenzgeschwindigkeit, die von Körpern nicht erreicht oder gar überschritten werden kann.

1.7 Gleichzeitigkeit

Im Sprachgebrauch gilt es als selbstverständlich, daß folgende Aussage sinnvoll ist: "Ein Ereignis an der Stelle A, etwa auf der Erde, und ein Ereignis an der Stelle B, etwa auf dem Mond, finden gleichzeitig statt." Für den messenden Beobachter ist diese Aussage jedoch ohne Sinn, da er diese Behauptung nicht überprüfen kann. Das folgende Beispiel veranschaulicht, daß nicht nur die Zeit, sondern auch Gleichzeitigkeit keine absolute Gültigkeit besitzt.
Ein Zug bewegt sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit gleichförmig. In der Mitte des Waggons befindet sich Beobachter B' und am Bahndamm Beobachter B. Sobald beide Beobachter auf gleicher Höhe sind, wird in der Mitte



9.1 Für den bewegten Beobachter ist der Maßstab kürzer als für den ruhenden.

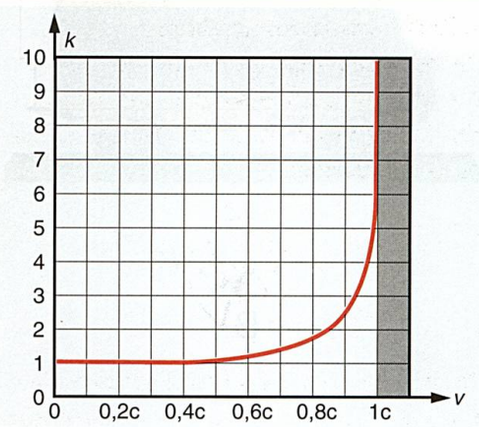
Beispiel A

In einem Teilchenbeschleuniger legen Elementarteilchen einen Weg von 2 km mit einer Geschwindigkeit von 0,992 c zurück. Welche Strecke legt dabei ein Teilchen von seinem Bezugssystem aus gesehen zurück?

$$l' = l\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} =$$

$$= 2 \cdot 10^3\ \text{m}\sqrt{1-\frac{(0{,}992\,c)^2}{c^2}}$$

$$l' = 252{,}48\ \text{m}$$



9.2 Abhängigkeit des Faktors k von der Geschwindigkeit v. Dem Ausdruck für k ist zu entnehmen, daß dieser für v > c imaginär ist und die Transformationsgleichungen dann nicht mehr sinnvoll sind.

Beispiel B

Da die Lichtgeschwindigkeit eine absolute Konstante ist, breitet sich eine Lichtwelle in S und S' mit derselben Geschwindigkeit c aus. Wenn die Lorentz-Transformation richtig ist, muß aus $x' = c\,t'$ folgen: $x = c\,t$.

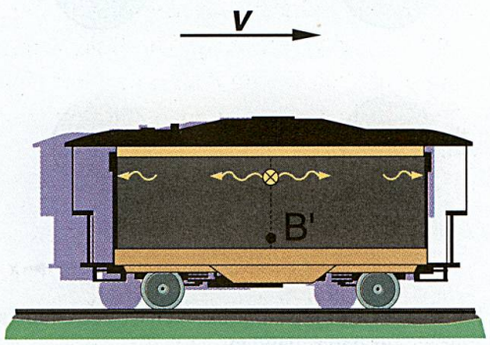
$$x = k(c\,t' + v\,t') = k\,t'(c+v) =$$

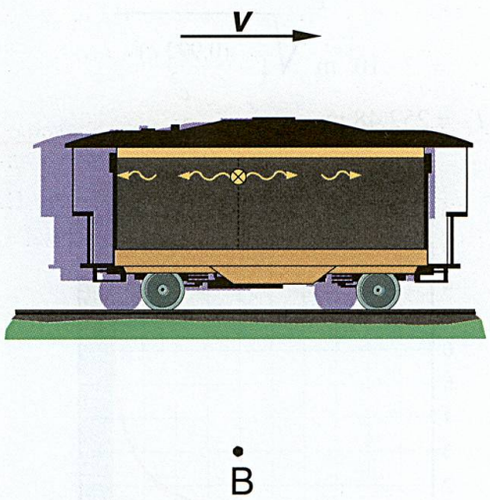
$$= k^2(t - \frac{v}{c^2}x)(c+v) =$$

$$= \frac{c^2}{c^2 - v^2}(t - \frac{v}{c^2}x)(c+v) =$$

$$= \frac{c^2\,t - v\,x}{c - v} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow c\,x - v\,x = c^2\,t - v\,x \Leftrightarrow x = c\,t$$





10.1 Für B' gleichzeitig (oben), für B nicht gleichzeitig (unten)

des Waggons ein Lichtblitz gezündet. Dieses Ereignis findet für beide gleichzeitig statt. Nun soll jeder von ihnen die Zeitpunkte vergleichen, zu denen die Lichtsignale an der Vorder- und an der Rückwand des Waggons eintreffen.

B': Vorderwand und Rückwand sind relativ zum Beobachter in Ruhe und gleich weit von ihm entfernt. Daher treffen die Lichtstrahlen an beiden Wänden zugleich ein. Die Ereignisse finden *gleichzeitig* statt (Abb. 10.1 oben).

B: Die Vorderwand eilt dem Lichtstrahl voraus, die Rückwand kommt ihm entgegen. Daher trifft der Lichtstrahl an der Rückwand früher ein als an der Vorderwand. Die Ereignisse finden *nicht gleichzeitig* statt (Abb. 10.1 unten).

Da kein Inertialsystem gegenüber einem anderen ausgezeichnet ist, hängt es vom Bezugssystem ab, ob Ereignisse gleichzeitig stattfinden oder nicht.

Die Erde kann für die kurzen Zeitspannen der Signalübertragung als Inertialsystem betrachtet werden.

Relativität der Gleichzeitigkeit

Ereignisse, die am gleichen Ort zur gleichen Zeit stattfinden, tun dies auch für jeden Beobachter, der sich relativ zum ersten geradlinig gleichförmig bewegt. Ereignisse, die in einem Inertialsystem an verschiedenen Orten gleichzeitig stattfinden, sind aus der Sicht eines relativ zum ersten bewegten Inertialsystems, im allgemeinen nicht mehr gleichzeitig.

1.8 Relativistische Geschwindigkeitsaddition

➤ Beispiel A

Beim Zerfall des Neutrons entstehen ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino. Befindet sich das Neutron im Ruhezustand, erhält das Elektron eine Geschwindigkeit von 0,7 c.

Berechne die Geschwindigkeit des Elektrons, wenn sich ein Neutron vor dem Zerfall mit einer Geschwindigkeit von 0,8 c bewegt hat.

Nach klassischer Vorstellung müßte man die beiden Geschwindigkeiten addieren: $v_{ges} = 0{,}7\ c + 0{,}8\ c = 1{,}5\ c$. Das ist ein Widerspruch zur Tatsache, daß die Lichtgeschwindigkeit c nicht überschritten werden kann.

Verallgemeinerung der Problemstellung: Das Inertialsystem S' bewegt sich mit der Geschwindigkeit v bezüglich eines als ruhend angesehenen Systems S. In S' wird ein Signal mit der Geschwindigkeit u in Bewegungsrichtung abgegeben. Dieses legt in der Zeit t' den Weg $x' = u\,t'$ zurück.

Um die Geschwindigkeit von S aus zu berechnen, wenden wir die Lorentz-Transformation an:

(1) $x = k\,(x' + v\,t') = k\,t'\,(u + v)$

(2) $t = k\,(t' + \frac{v}{c^2}\,x') = k\,t'\,(1 + \frac{v\,u}{c^2})$

(1), (2) $v_{ges} = \frac{x}{t} = \frac{u+v}{1+\frac{u\,v}{c^2}}$ Wir setzen ein: $u = 0{,}7\,c$ und $v = 0{,}8\,c$

$$v_{ges} = \frac{0{,}7\,c + 0{,}8\,c}{1 + \frac{0{,}7\,c \cdot 0{,}8\,c}{c^2}} = 0{,}96\,c$$

Beispiel B

Zwei "Superraketen" fliegen aufeinander zu. Die Geschwindigkeit der ersten Rakete beträgt gegenüber einem als ruhend angenommenen Beobachter 0,5 c und die der zweiten 0,6 c.

Welche Geschwindigkeit der entgegenkommenden Rakete mißt ein in der anderen Rakete mitfliegender Beobachter?

Man betrachtet eine Rakete als ruhendes System. Damit ergibt sich die Relativgeschwindigkeit als:

$$v_{ges} = \frac{u+v}{1+\frac{u\,v}{c^2}} = \frac{0{,}5\,c + 0{,}6\,c}{1+\frac{0{,}5\,c \cdot 0{,}6\,c}{c^2}} = 0{,}85\,c$$

Relativistische Geschwindigkeitsaddition

Bewegen sich ein Inertialsystem S' mit der Geschwindigkeit v und ein Gegenstand relativ zu diesem mit der Geschwindigkeit u, so hat dieser im Ruhesystem S die Geschwindigkeit

$$v_{ges} = \frac{u+v}{1+\frac{u\,v}{c^2}}$$

Wenn $v \ll c$ und $u \ll c$, gilt die klassische Geschwindigkeitsaddition

$$v_{ges} = u + v$$

1.9 Relativistische Masse

Wieso ist es eigentlich nicht möglich, einen Körper so lange zu beschleunigen, bis er die Lichtgeschwindigkeit erreicht oder diese gar überschreitet?
Die folgende Überlegung soll die Anwort liefern:

Zwei gleiche Wägelchen mit der Masse m sind durch einen Faden verbunden, welcher durch eine Feder gespannt ist (Abb. 11.1). Der Schwerpunkt dieses Systems befindet sich zwischen den beiden Fahrzeugen. Er ist durch einen Stift markiert. Wird der Faden durchgebrannt, fahren die Wägelchen in entgegengesetzte Richtungen auseinander.

Nach dem Impulserhaltungssatz erfahren beide Fahrzeuge entgegengesetzt gleiche Geschwindigkeitsänderungen. Nach dem Beschleunigungsvorgang besitzen sie die konstante Geschwindigkeit u.

Wie wird die Situation z. B. vom linken Wägelchen aus beurteilt?
Von diesem System, das nach dem Beschleunigungsvorgang wieder als Inertialsystem angesehen werden kann, entfernt sich der Markierungsstift mit der Geschwindigkeit u.

Das rechte Wägelchen besitzt jedoch nicht die Geschwindigkeit $2\,u$, es ist die relativistische Geschwindigkeitsaddition zu beachten. Es gilt:

$$v = \frac{2\,u}{1 + \frac{u^2}{c^2}} < 2\,u$$

Der obigen Ungleichung ist zu entnehmen, daß $u > v/2$.

Der markierte Schwerpunkt entfernt sich somit mit einer Geschwindigkeit, die größer ist als $v/2$. Dies bedeutet jedoch, daß sich der Schwerpunkt zu jedem Zeitpunkt näher beim rechten Fahrzeug befindet als beim linken. Das ist nur dann möglich, wenn das rechte Wägelchen eine *größere Masse* hat als das linke.

Da die beiden Wägelchen im Ruhezustand gleiche Massen hatten, muß offenbar zwischen *Ruhemasse* und *bewegter Masse* unterschieden werden.

Einstein hat dies durch die folgende Formel ausgedrückt (sie läßt sich aus obiger Überlegung nicht ableiten):

$$m = k\,m_0 \quad \text{mit} \quad k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

m ... bewegte oder relativistische Masse m_0 ... Ruhemasse

Die mit der Geschwindigkeit v bewegte Masse ist k-mal so groß wie die Ruhemasse.

Der Abbildung 9.2 ist zu entnehmen, daß bei Annäherung von v gegen c der Faktor k gegen Unendlich strebt. Entsprechend würde daher die bewegte Masse m eines Körpers mit der Ruhemasse m_0 über alle Schranken anwachsen. Diese Massenzunahme verhindert, daß der Körper Lichtgeschwindigkeit erreichen kann – wäre doch dafür eine "unendlich" große Energiezufuhr notwendig (vgl. Kap. 1.10).

Die Lichtteilchen, *Photonen* genannt, bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit. Daraus folgt, daß sie *keine Ruhemasse* besitzen können.

Die Massenzunahme bei bewegten Objekten ist Ursache für wesentliche Effekte in Teilchenbeschleunigern. So erfordert das Ansteigen der Protonenmasse bei Kreisbeschleunigern hohe Feldstärken der Elektromagnete, um das Teilchen auf seiner Bahn zu halten. Die klassische Berechnung führt zu völlig falschen Ergebnissen.

Beispiel C

Die beiden Raketen von Beispiel B fliegen in dieselbe Richtung. Die Rakete mit $0{,}5\ c$ wird von der anderen mit $0{,}6\ c$ eingeholt. Wie groß ist nun die Relativgeschwindigkeit?

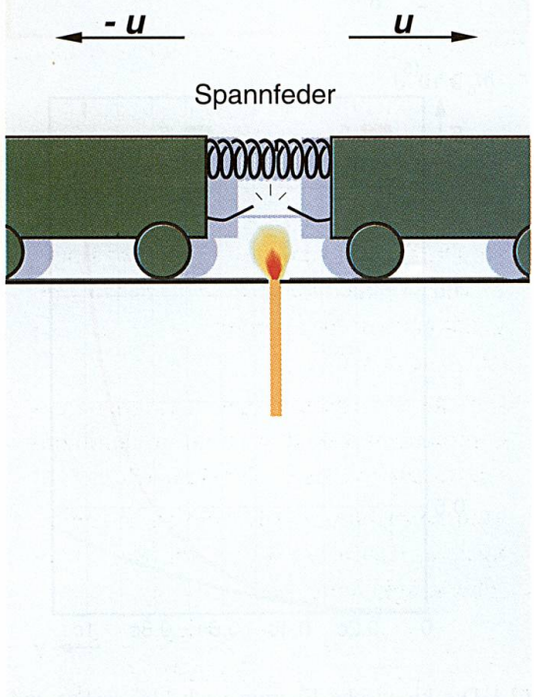
Sieht man die schnellere Rakete als ruhendes System, kommt die langsamere Rakete mit einer bestimmten Relativgeschwindigkeit näher. Die langsamere Rakete bewegt sich nach "hinten". Daher gilt für ihre Geschwindigkeit: $v = -0{,}5\ c$.

$$v_{ges} = \frac{0{,}6\,c - 0{,}5\,c}{1 - \frac{0{,}6\,c \cdot 0{,}5\,c}{c^2}} = 0{,}14\,c$$

Aufgaben

5. Eine "Superrakete" fliegt gegenüber einem Ruhesystem mit einer Geschwindigkeit von c/2. Von der Rakete wird ein Geschoß mit der Geschwindigkeit c/2 abgefeuert. Berechne die Geschwindigkeit des Geschosses auf das Ruhesystem bezogen.

6. Zwei Protonen in einem Teilchenbeschleuniger sind auf Kollisionskurs mit einer Geschwindigkeit von jeweils 0,65 c. Welche Geschwindigkeit besitzt ein Proton vom anderen aus betrachtet?



11.1 Gedankenversuch zur relativistischen Masse

Beispiel A

Ein Proton bewegt sich in einem Teilchenbeschleuniger mit der Geschwindigkeit $v = 0{,}98\,c$.
Berechne die Masse des Protons, wenn die Ruhemasse $1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg beträgt.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} =$$

$$= \frac{1{,}67 \cdot 10^{-27}\,\text{kg}}{\sqrt{1 - \frac{(0{,}98\,c)^2}{c^2}}} = 8{,}39 \cdot 10^{-27}\,\text{kg}$$

Binomische Reihe

$$(1+x)^r = 1 + \binom{r}{1} x + \binom{r}{2} x^2 + \ldots =$$

$$= \sum_{\nu=0}^{\infty} \binom{r}{\nu} x^\nu$$

Beispiele:

$$(1+x)^2 =$$

$$= 1 + \binom{2}{1} x + \binom{2}{2} x^2 + \binom{2}{3} x^3 +$$

$$+ \ldots = 1 + \frac{2}{1} x + \frac{2 \cdot 1}{1 \cdot 2} x^2 +$$

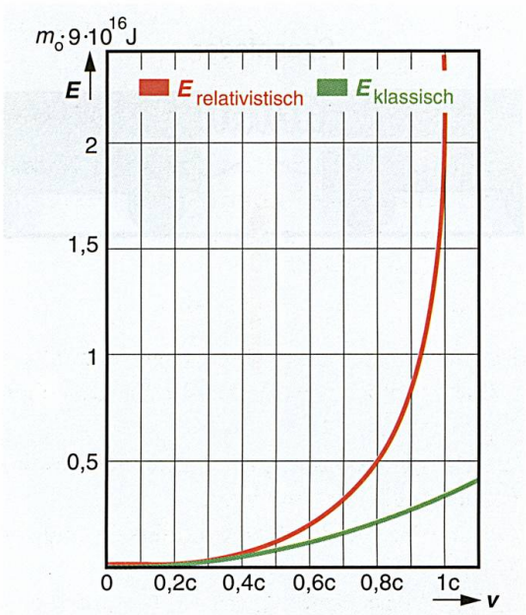
$$+ \frac{2 \cdot 1 \cdot 0}{1 \cdot 2 \cdot 3} x^3 + \ldots = 1 + 2x + x^2$$

$$(1+x)^{-\frac{1}{2}} =$$

$$= 1 + \binom{-0{,}5}{1} x + \binom{-0{,}5}{2} x^2 + \ldots =$$

$$= 1 + \frac{-0{,}5}{1} x + \frac{(-0{,}5)(-1{,}5)}{1 \cdot 2} x^2 + \ldots =$$

$$= 1 - \frac{x}{2} + \frac{3}{8} x^2 - \ldots + \ldots$$



12.1 Die kinetische Energie nach klassischer und nach relativistischer Berechnung

Aufgaben

7. Ein Elektron besitzt eine Ruhemasse von $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg. Berechne dessen Masse bei einer Geschwindigkeit $v = 0{,}99\,c$.

8. Auf welche Geschwindigkeit muß ein ruhendes Teilchen beschleunigt werden, damit seine Masse verdreifacht wird?

1.10 Energie

Die Massenzunahme bei bewegten Körpern muß eine entsprechende Auswirkung auf die Formulierung des Energieerhaltungssatzes haben. Um diese Auswirkungen diskutieren zu können, entwickeln wir den Faktor k als binomische Reihe (vgl. Rechenbeispiele in der Randspalte):

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} = 1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8}\frac{v^4}{c^4} + \ldots$$

Bei Geschwindigkeiten $v < c$ ist bereits das dritte Glied dieser Reihe vernachlässigbar klein: $k \approx 1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}$.

Damit erhält die Gleichung $m = k\,m_0$ die folgende Gestalt:

$$m = m_0 + \frac{1}{2} m_0 \frac{v^2}{c^2} \quad \Leftrightarrow \quad m\,c^2 = m_0\,c^2 + \frac{1}{2} m_0\,v^2$$

Das zweite Glied auf der rechten Seite ist die kinetische Energie. Die gesamte Gleichung stellt somit eine Energiebilanz dar:

$$E = m\,c^2 = m_0\,c^2 + \frac{1}{2} m_0\,v^2$$

E ist die *relativistische Gesamtenergie* eines sich mit der Geschwindigkeit v bewegenden Körpers.

Die kinetische Energie ergibt sich als Differenz zweier Energiezustände

$$E_{kin} = mc^2 - m_0c^2 = k\,m_0\,c^2 - m_0\,c^2 = m_0\,c^2\,(k-1)$$

Der Term $mc^2 - m_0c^2$ stellt auch dann die kinetische Energie dar, wenn v/c groß ist. Die kinetische Energie wird dann nicht allein durch $m_0\,v^2/2$ wiedergegeben, die anderen Glieder der Reihenentwicklung müssen miteinbezogen werden.

Nähert sich die Geschwindigkeit v eines Körpers der Lichtgeschwindigkeit, nimmt die kinetische Energie stark zu. Umgekehrt müssen zur Beschleunigung von Elementarteilchen auf große Geschwindigkeiten hohe Energien aufgewendet werden; für $v = c$ wäre unendlich viel Energie aufzubringen; die Lichtgeschwindigkeit ist eine Grenzgeschwindigkeit, die von materiellen Teilchen nicht erreicht werden kann.

Für die Geschwindigkeit $v = 0$ geht die Gleichung $E = m_0\,c^2 + \frac{1}{2} m_0\,v^2$ über in $E = m_0\,c^2$. Das ist die Energie der Ruhemasse m_0. Man nennt sie *Ruheenergie*. In jeder Masse steckt ein Energievorrat, die Ruheenergie. Diese spielt bei Energieumwandlungen in der klassischen Physik keine Rolle, da sich die Masse bei solchen Vorgängen nicht ändert.

Masse und Energie sind äquivalente Begriffe, deren Beziehung zueinander durch die Gleichung

$$E = m_0\,c^2$$

ausgedrückt wird.

Beispiel B

Ein bewegtes Elektron besitzt eine kinetische Energie von 1,2 MeV (1 eV = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J). Berechne die Masse m (die Ruhemasse m_0 beträgt $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg) und die Geschwindigkeit des Elektrons.

$$E_{kin} = (m - m_0)\,c^2 \;\Leftrightarrow\; \ldots \;\Leftrightarrow\; m = \frac{E_{kin} + m_0\,c^2}{c^2}$$

$$m = \frac{1{,}2 \cdot 10^6 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\text{J} + 9{,}1 \cdot 10^{-31}\,\text{kg} \cdot (3 \cdot 10^8\,\text{m s}^{-1})^2}{(3 \cdot 10^8\,\text{m s}^{-1})^2} =$$

$$= 30{,}4 \cdot 10^{-31}\,\text{kg}$$

$$m = \frac{m_o}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \;\Leftrightarrow\; m^2 = \frac{m_o^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \;\Leftrightarrow\; \ldots \;\Leftrightarrow\; v = c\sqrt{1 - \frac{m_o^2}{m^2}}$$

$$v = 3 \cdot 10^8\,\text{m/s}\,\sqrt{1 - \left(\frac{9{,}1 \cdot 10^{-31}\,\text{kg}}{30{,}4 \cdot 10^{-31}\,\text{kg}}\right)^2} = 2{,}86 \cdot 10^8\,\text{m/s}$$

Beispiel C

In einem Elektronenmikroskop werden Elektronen durch eine Spannung von 300 kV beschleunigt. Berechne die Geschwindigkeit der Elektronen nach dem Durchlaufen der Beschleunigungsstrecke. ($m_0 = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg, $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ As)

Die für die Beschleunigung eines Elektrons aufgewendete elektrische Energie entspricht der kinetischen Energie des Elektrons nach dem Durchlaufen der Beschleunigungsstrecke: $E_{el} = E_{kin}$

$$e\,U = m_o\,c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1\right) \;\Leftrightarrow\; \ldots \;\Leftrightarrow\; \frac{e\,U}{m_o\,c^2} + 1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \;\Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow\; 1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{\left(1 + \frac{e\,U}{m_0\,c^2}\right)^2} \;\Leftrightarrow\; \ldots \;\Leftrightarrow\; v = c\sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{e\,U}{m_0\,c^2}\right)^2}}$$

$$v = 3 \cdot 10^8\,\text{m/s}\,\sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\text{As} \cdot 3 \cdot 10^5\,\text{V}}{9{,}1 \cdot 10^{-31}\,\text{kg} \cdot 9 \cdot 10^{16}\,\text{m}^2\,\text{s}^{-2}}\right)^2}} =$$

$$= 2{,}33 \cdot 10^8\,\text{ms}^{-1}$$

Nach klassischer Berechnung $e\,U = \frac{m_0\,v^2}{2}$ hätten die Elektronen bereits Überlichtgeschwindigkeit.

Masse und Energie sind äquivalent

Aus seiner berühmten Formel $E = m\,c^2$ (bzw. $m = E/c^2$) hat Einstein den Schluß gezogen, daß jeder Art von Energie eine Masse m zugeschrieben werden kann.

Wird etwa einem Körper innere Energie in Form von Wärme zugeführt, erhöht sich auch seine Masse. Diese Massenänderung ist jedoch vernachlässigbar klein.

Bei der Kernspaltung und der Kernfusion wird Masse in Energie umgewandelt, wobei bereits kleine Massen aufgrund des Faktors c^2 hohe Energien liefern.

Elektromagnetische Wellen transportieren Energie, es kann ihnen somit auch eine Masse zugeschrieben werden. Jeder Energie entspricht eine äquivalente Masse.

Dies bedeutet somit auch, daß es möglich sein muß, aus Energie Masse zu erzeugen. Man nimmt an, daß es bei der Entstehung des Universums eine Phase gab, bei der es eine ständige Umwandlung von Energie in Masse und umgekehrt gegeben hat.

Masse und Energie sind gleichwertige Begriffe, Massen sind gewaltige Energieanhäufungen.

1.11 Dopplereffekt

Eine wichtige Bestätigung der Speziellen Relativitätstheorie ist der optische Dopplereffekt. Der Dopplereffekt für Schallwellen wird in Band 2, Seite 31ff, behandelt. Bekanntlich registriert ein Beobachter eine Frequenzveränderung, wenn sich Schallquelle und Beobachter relativ zueinander bewegen.

Dieses Phänomen tritt auch bei elektromagnetischen Wellen auf. Der optische Effekt unterscheidet sich vom akustischen dadurch, daß für elektromagnetische Wellen zur Ausbreitung kein materieller Träger erforderlich ist. Ein sol-

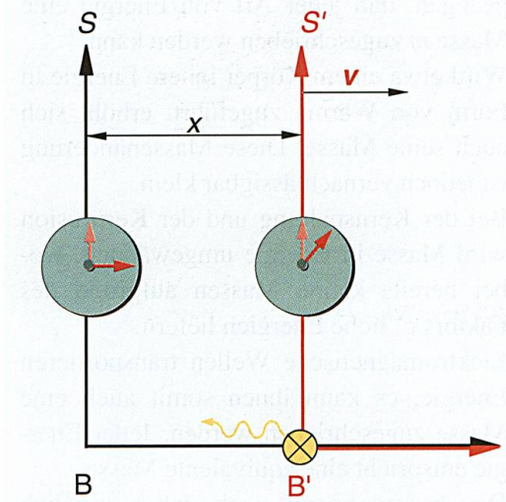
Aufgaben

9. In einem Elektronenmikroskop werden Elektronen durch eine Spannung von 100 kV beschleunigt. Berechne die Elektronengeschwindigkeit nach der Beschleunigung.

10. Berechne die Ruheenergie von 1 g Masse.

11. Ein Elektron besitzt in einem Beschleuniger eine kinetische Energie von 0,9 MeV.
a)Wie groß ist die Elektronenmasse in diesem Bewegungszustand?
b)Berechne die Geschwindigkeit.

12. Gegeben ist eine Masse von 1 kg. Diese soll aus dem Ruhezustand auf 0,99 c beschleunigt werden.
Erstelle ein Computerprogramm, welches folgende Möglichkeiten bietet:
(1) Tabelle für die Geschwindigkeit und die Masse,
(2) graphische Darstellung, wobei auf der x-Achse die Geschwindigkeit und auf der y-Achse die Masse aufzutragen ist.



14.1 Zur Herleitung der Formel für den Doppler-Effekt

cher Träger wird in der Akustik als ruhendes Bezugssystem angenommen; dies ist bei elektromagnetischen Wellen nicht möglich.

Sind Sender und Empfänger zueinander gleichförmig bewegt, kann nur die Relativgeschwindigkeit gemessen werden.

Wir nehmen einen Beobachter B' mit einer Lichtquelle an, die im Inertialsystem S' ruht. Das System S' bewegt sich mit der Geschwindigkeit v gleichförmig relativ zum System S, in welchem sich ein Beobachter B befindet.

Wenn die Uhr in S' und die Uhr in S einander passieren, werden sie in Gang gesetzt (Abb. 14.1).

Zeigt die Uhr in S', daß die Zeitspanne $t_{B'}$ verstrichen ist, wird ein Lichtstrahl in Richtung B ausgesendet. Zu welcher Zeit t kommt der Lichtstrahl bei B an?

Vom System S aus weist die bewegte Uhr einen langsameren Gang auf:

$$(1)\quad t_B = \frac{t_{B'}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Um die Strecke x von B' nach B zurückzulegen, benötigt der Lichtstrahl die Zeit x/c. Daraus folgt für t :

$$(2)\quad t = t_B + \frac{x}{c}$$

x ist die Strecke, um welche sich die beiden Uhren in der Zeit t_B mit der Relativgeschwindigkeit v voneinander entfernt haben:

$$(3)\quad x = v\,t_B$$

$$(1),(2),(3)\quad t = t_B + \frac{v\,t_B}{c} = t_B\left(1+\frac{v}{c}\right) = \frac{t_{B'}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\left(1+\frac{v}{c}\right) = t_{B'}\sqrt{\frac{1+\frac{v}{c}}{1-\frac{v}{c}}}$$

t und $t_{B'}$ können als Periodendauern einer elektromagnetischen Welle betrachtet werden. Dabei ist $t_{B'}$ die Periodendauer, die beim "Sender", und t die Periodendauer, die beim "Empfänger" gemessen wird. Die Kehrwerte sind dann Frequenzen:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f'}\sqrt{\frac{1+\frac{v}{c}}{1-\frac{v}{c}}} \quad\Leftrightarrow\quad f = f'\sqrt{\frac{1-\frac{v}{c}}{1+\frac{v}{c}}}$$

Ersetzt man v durch $-v$, stellt dies eine Annäherung der Quelle an den Beobachter dar:

$$f = f'\sqrt{\frac{1+\frac{v}{c}}{1-\frac{v}{c}}}$$

Beispiel A

Eine Lichtquelle sendet in beide Richtungen einer Geraden grünes Licht mit der Wellenlänge $\lambda = 510$ nm aus. Ein Beobachter B_1 bewegt sich entlang der Geraden mit der Geschwindigkeit $v = 0{,}4\,c$ auf die Lichtquelle zu, ein anderer Beobachter B_2 bewegt sich mit der gleichen Geschwindigkeit von ihr weg. Welche Wellenlänge λ_1 haben die Lichtsignale für B_1, welche Wellenlänge λ_2 für B_2? Welche Farbe hat das Licht für jeden der beiden Beobachter?

$$f' = \frac{c}{\lambda} = \frac{3\cdot 10^8\ \mathrm{m\,s^{-1}}}{510\cdot 10^{-9}\ \mathrm{m}} = 5{,}88\cdot 10^{14}\ \mathrm{s^{-1}}$$

$$f_1 = f'\sqrt{\frac{1+0{,}4}{1-0{,}4}} = 1{,}528\,f'$$

$$f_2 = f'\sqrt{\frac{1-0{,}4}{1+0{,}4}} = 0{,}655\,f'$$

$$\lambda_1 = \frac{c}{f_1} = \frac{3\cdot 10^8\ \mathrm{m\,s^{-1}}}{1{,}528\cdot 5{,}88\cdot 10^{14}\ \mathrm{s^{-1}}} = 334\ \mathrm{nm}$$

(Violett)

$$\lambda_2 = \frac{c}{f_2} = \frac{3\cdot 10^8\ \mathrm{m\,s^{-1}}}{0{,}655\cdot 5{,}88\cdot 10^{14}\ \mathrm{s^{-1}}} = 779\ \mathrm{nm}$$

(Rot)

Optischer Dopplereffekt

Entfernen sich Sender und Empfänger, so ist die Empfangsfrequenz f kleiner als die Sendefrequenz f' :

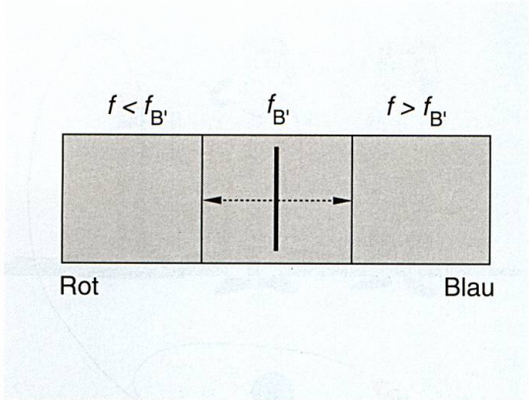
$$f = f'\sqrt{\frac{1-\frac{v}{c}}{1+\frac{v}{c}}}$$

Bei Annäherung ist die Empfangsfrequenz f größer als die Sendefrequenz f' :

$$f = f'\sqrt{\frac{1+\frac{v}{c}}{1-\frac{v}{c}}}$$

Der optische Dopplerfefekt ist im Gegensatz zum akustischen symmetrisch. In der Akustik kommt es auf die Relativbewegung von Schallquelle, Beobachter und schallübertragendem Medium an; die elektromagnetische Welle jedoch benötigt kein Übertragunsmedium, die Geschwindigkeit der Welle ist konstant.

Bei Entfernung einer Lichtquelle stellt der ruhende Beobachter eine Frequenzverringerung, *Rotverschiebung*, bei Annäherung eine Frequenzerhöhung, *Blauverschiebung*, fest (Abb. 15.1).



15.1 Rotverschiebung bei Annäherung, Blauverschiebung bei zunehmender Entfernung

➤ Beispiel B

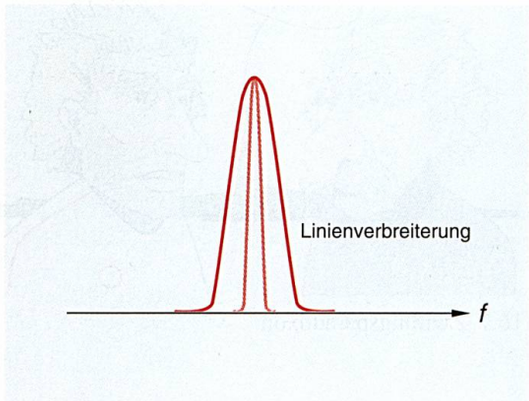
Für die Wellenlänge einer bekannten Spektrallinie, die von einer weit entfernten Galaxie kommt, wird ein Wert von 550 nm gemessen. Die Wellenlänge dieser Linie wird bei einem ruhenden Medium mit 450 nm gemessen. Mit welcher Geschwindigkeit entfernt sich die Galaxie?

$$(1)\quad f = f' \sqrt{\frac{1-\frac{v}{c}}{1+\frac{v}{c}}} = f' \sqrt{\frac{c-v}{c+v}} \qquad (2)\quad \lambda = \frac{c}{f}$$

$$(1), (2)\quad \lambda = \lambda' \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} \Leftrightarrow \lambda^2 = \lambda'^2 \frac{c+v}{c-v} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow\quad v = \frac{c\,(\lambda^2 - \lambda'^2)}{\lambda^2 + \lambda'^2}$$

$$v = \frac{3 \cdot 10^8\ \text{m/s}\ ((550 \cdot 10^{-9}\ \text{m})^2 - (450 \cdot 10^{-9}\ \text{m})^2)}{(550 \cdot 10^{-9}\ \text{m})^2 + (450 \cdot 10^{-9}\ \text{m})^2} = 5{,}94 \cdot 10^7\ \text{m/s}$$



15.2 Dopplerverbreiterung

Dopplerverbreiterung

Die Linienbreite von Spektrallinien wird vergrößert, wenn die mikroskopischen Strahlungsquellen (Atome, Moleküle, Kerne) sich relativ zum Beobachter bewegen. Das Licht fast aller Lichtquellen entsteht durch spontane Emission angeregter Atome; nur beim Laser ist dies nicht der Fall. Die Anregung der Atome kann auf mehrere Arten erfolgen:

- Absorption von Licht
- Stoßprozesse

Die Moleküle eines Gases etwa besitzen nicht alle dieselbe Geschwindigkeit, sondern es gibt eine Geschwindigkeitsverteilung, die *Maxwell-Boltzmann-Verteilung*. Geben nun die angeregten Moleküle eine Strahlung ab, so treten neben den Spektrallinien, die die Moleküle im Ruhezustand aussenden, Linien mit kleinerer bzw. größerer Frequenz um diese "Ruhelinien" auf; die Linien zeigen eine Doppler-Verbreiterung. Je höher die Temperatur ist, umso größer ist dieser Effekt.

So kann aus der Dopplerverbreiterung eines Sternspektrums auf Teilchengeschwindigkeiten in der Sternatmosphäre bzw. turbulente Strömungen geschlossen werden.

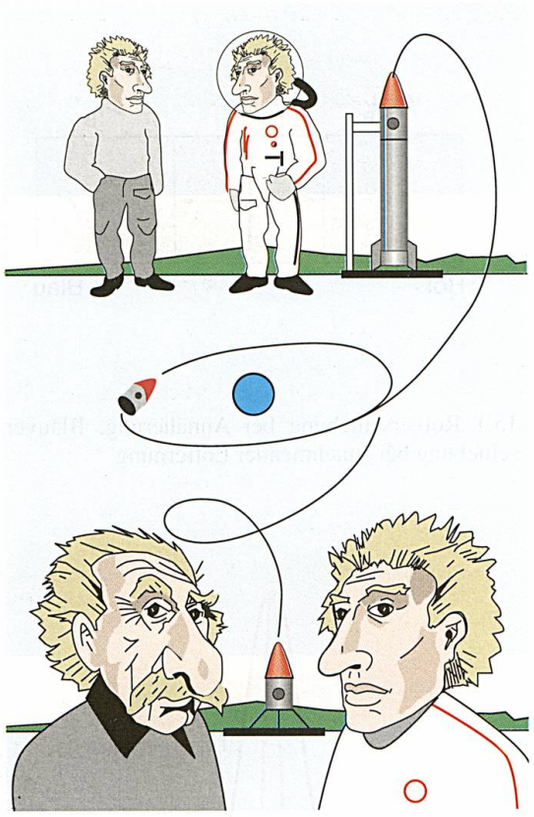
Aufgabe

13. Die Natrium-D_1-Linie weist auf der Erde eine Wellenlänge von 589,6 nm auf. Im Spektrum eines Sterns wird die Wellenlänge mit 593,5 nm bestimmt. Mit welcher Geschwindigkeit entfernt sich der Stern von der Erde?

1.12 Zwillingsparadoxon

Dieses Paradoxon wird von der Speziellen Relativitätstheorie als Folge der Zeitdilatation vorhergesagt.

Zwei relativ zueinander gleichförmig geradlinig bewegte Beobachter behaupten jeweils vom anderen, daß dessen Uhr langsamer gehe. Dies ist kein Widerspruch. Die beiden Beobachter können niemals eine Zeitdauer miteinander vergleichen, da sie sich höchstens einmal treffen.



16.1 Zwillingsparadoxon

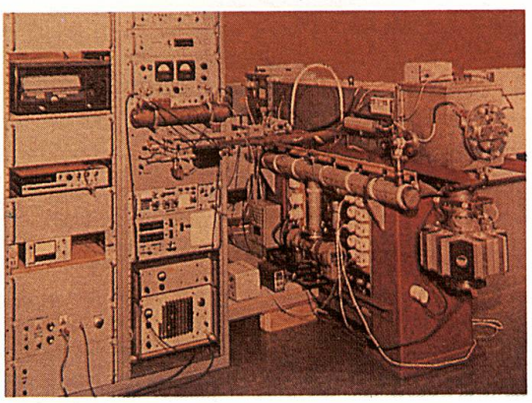
Was passiert, wenn zwei Beobachter trotzdem wieder zusammentreffen, weil sich einer der beiden nicht ständig gleichförmig geradlinig bewegt?
Wir nehmen zwei Zwillinge an, von denen einer auf der Erde bleibt, der andere mit hoher Geschwindigkeit in einem Raumschiff zu einem Stern reist. Nach dem Erreichen des Sterns kehrt er um und fliegt zurück. Für den Zwilling auf der Erde ist die Uhr seines Bruders sowohl beim Hin- als auch beim Rückflug nachgegangen. Dies gilt umgekehrt jedoch nicht für den Raumfahrer.

Erklärung:
Wie bereits festgestellt, ist die Zeitdilatation ein symmetrischer Effekt. Nehmen wir eine Reisegeschwindigkeit von $v = 2/3\ c$ an, gilt:

$$t_S = \frac{t_{S'}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{t_{S'}}{\sqrt{1 - \frac{4}{9}}} = 1{,}34\ t_{S'}$$

Da der Zwilling auf der Erde in einem (annähernd) gleichförmig bewegten Inertialsystem verbleibt, gilt: Wenn für den Raumfahrer 5 Jahre vergehen, sind dies für den Beobachter auf der Erde 6,7 Jahre.

Der Zwilling im Raumschiff darf diese Aussage jedoch nicht treffen, da er sich nicht in einem Inertialsystem befindet. Er muß nämlich beschleunigt werden, um die Reisegeschwindigkeit zu erreichen, die Umkehr ist mit einem Beschleunigungsvorgang verbunden, die Landung mit einer Verzögerung. Damit ist die Symmetrie nicht gewährleistet. Eine Uhr im Raumschiff und eine auf der Erde zeigen beim Zusammentreffen der Zwillinge unterschiedlichen Zeitintervalle auf, obgleich sie beim Abflug gleichzeitig in Gang gesetzt worden sind. Doch nicht nur die Uhr des Raumfahrers geht langsamer, auch dessen biologischen Vorgänge laufen langsamer ab. Der Zwilling im Raumschiff ist weniger gealtert als sein Bruder.



16.2 Atomuhr

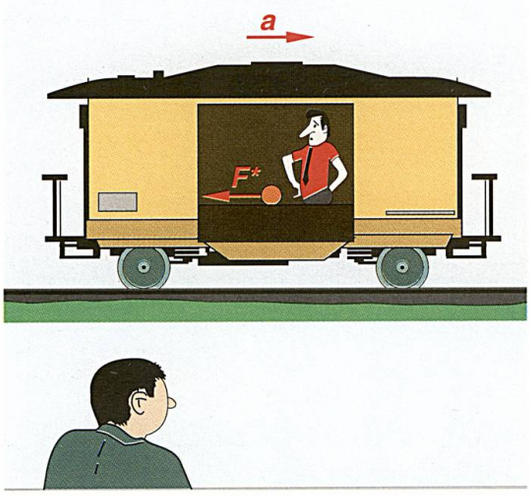
Eine Bestätigung des Zwillingsparadoxons gelang mit Hilfe von Atomuhren, die mit Düsenflugzeugen um die Erde geflogen wurden. Beim Vergleich mit ruhenden Atomuhren wurde eine Zeitdifferenz festgestellt; die bewegten Uhren sind nachgegangen.

1.13 Einige Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

In den Jahren 1915/16 schloß Albert Einstein seine Allgemeine Relativitätstheorie in Berlin ab. Dabei verallgemeinerte er die Gesetzmäßigkeiten von gleichförmig bewegten Bezugssytemen auf ungleichförmig bewegte.

In diesem Abschnitt werden einige Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie besprochen.

Eine im Zug liegende Kugel rollt nach "hinten", wenn der Zug seine Fahrt beschleunigt. Für einen mitbewegten Beobachter greift an der Kugel eine Kraft an, die *Trägheitskraft*. Trägheitskräfte treten in beschleunigten Bezugssystemen auf. Sie werden nur vom mitbewegten Beobachter festgestellt.



16.3 Trägheitskräfte treten in beschleunigten Bezugssystemen auf.

Erfährt ein Bezugssystem eine Beschleunigung, so wirkt auf jede Masse eine Trägheitskraft. $\boldsymbol{F}^* = -m\,\boldsymbol{a}$

Trägheitskräfte
Ist ein System geradlinig gleichmäßig beschleunigt, stehen alle Körper unter dem Einfluß von Kräften, die unter sich die gleiche Richtung haben. Diese vom mitbewegten Beobachter festgestellten Kräfte sind den Massen der Körper proportional.

Träge und schwere Masse

Wirkt auf einen Körper eine Kraft, so wird er beschleunigt, wobei die Beschleunigung proportional zur Kraft ist. Der Proportionalitätsfaktor ist die Masse *m:*

$$m = \frac{F}{a}$$

Die so festgesetzte Masse wird als *träge Masse* bezeichnet. Das Newtonsche Gravitationsgesetz führt zu einer weiteren wichtigen Erkenntnis:

Jeder Körper besitzt nicht nur eine träge Masse. Sein Gewicht in einem Gravitationsfeld ist proportional zu einer Körpereigenschaft, die wir als *schwere Masse* bezeichnen.

Mit Hilfe von Experimenten konnte gezeigt werden, daß träge und schwere Masse eines Körpers gleich groß sind.
Betrachten wir einen Astronauten, der vor dem Start der Raumfähre ein Gewicht von 750 N hat. Beschleunigt im Weltraum die Raumfähre mit 9,81 m/s^2, kann er dasselbe Gewicht wie auf der Erde messen. Durch kein Experiment innerhalb der Rakete kann festgestellt werden, ob dies durch ein Gravitationsfeld oder durch eine Beschleunigung hervorgerufen wurde.

Es besteht somit kein Unterschied zwischen einem unbeschleunigten System, in dem ein konstantes Gravitationsfeld herrscht, das allen Körpern dieselbe Beschleunigung erteilt, und einem gravitationsfreien System, das eine Beschleunigung erfährt. Damit ist es auch möglich, die Wirkung eines Gravitationsfeldes durch die Beschleunigung des Bezugssystems aufzuheben.

Einstein faßte diese Erscheinungen zum *Äquivalenzprinzip* zusammen:

Äquivalenzprinzip
Wirkungen von Gravitationsfeldern und von Beschleunigungen des Bezugssystems sind nicht nur bei mechanischen Vorgängen, sondern allgemein grundsätzlich nicht unterscheidbar.

Damit ist auch die Gleichheit von träger und schwerer Masse verbunden.
Die rollende Kugel in einem beschleunigten Zug kann nun auch so gedeutet werden, daß der Zug ein System bildet, in welchem ein Gravitationsfeld auftritt. Dieses ist dem Beschleunigungsvektor entgegengerichtet.

Versuch
Ein Laserstrahl durchläuft einen ruhenden Kasten in horizontaler Richtung; er tritt durch eine Öffnung in der Kastenwand ein und wird an der gegenüberliegenden Seite auf einem Schirm aufgefangen.

Bewegt sich der Kasten gleichförmig mit der Geschwindigkeit v nach oben, so ist der eintretende Lichtstrahl relativ zum Kasten nach unten geneigt. Dies tritt umso stärker auf, je größer die Geschwindigkeit des Kastens ist.

Wird der Kasten nach oben beschleunigt, beschreibt der Lichtstrahl eine *gekrümmte* Bahn.
Nach dem Äquivalenzprinzip muß für den Lichtstrahl dieselbe Krümmung auftreten, wenn er einem Gravitationsfeld ausgesetzt wird; das heißt, wenn im ruhenden Kasten eine nach unten wirkende Gravitationskraft auftritt.

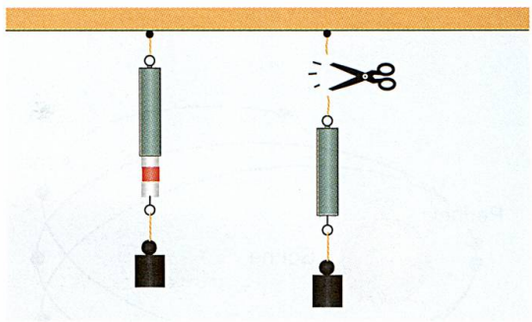
Nach der Formel $E = m\,c^2$ wissen wir, daß Energie und Masse zueinander proportional sind. Die Äquivalenz von Trägheit und Schwere bezieht sich demnach nicht nur auf Massen, sondern auch auf die Energie. Das bedeutet, daß Energie immer der Gravitation unterliegt.
Dieser Effekt konnte in der Astronomie bestätigt werden.

Ein Lichtstrahl, der – von einem Fixstern kommend – an der Sonne vorbeistreicht, wird von dieser angezogen und beschreibt eine zur Sonne hin gekrümmte Bahn. Die erste Überprüfung gelang 1919 dem britischen Astronomen *Eddington*, während einer totalen Sonnenfinsternis. Licht fällt wie jede Masse in einem Gravitationsfeld, es ist jedoch durch seine hohe Geschwindigkeit ausgezeichnet.

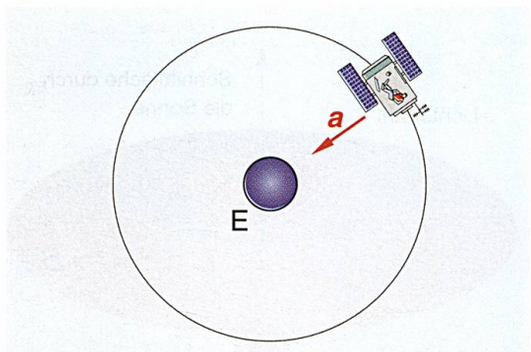
Weitere Erscheinungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

Gravitations-Rotverschiebung

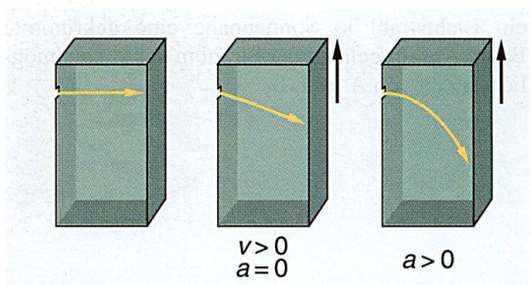
Versuch
Eine Lichtquelle am Fuße eines 20 m hohen Turms sendet einen Lichtstrahl an die Turmspitze, bei welcher sich ein Detektor befindet. Bei der Frequenzmes-



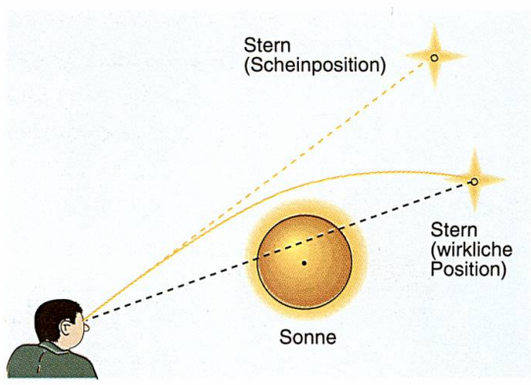
17.1 Freier Fall einer Federwaage mit einem Massenstück. Während des freien Falls geht die Ausdehnung der Feder auf Null zurück. Dies läßt sich dadurch erklären, daß beide Körper derselben Beschleunigung unterliegen. Daher gibt es keine Relativbewegung zwischen Federwaage und Massenstück. Für einen mitbewegten Beobachter, sind beide Objekte in Ruhe. Die Gravitationskraft kann also durch eine geeignete Beschleunigung aufgehoben werden. Dies tritt immer dann ein, wenn ein Bezugssytem einen freien Fall durchführt.



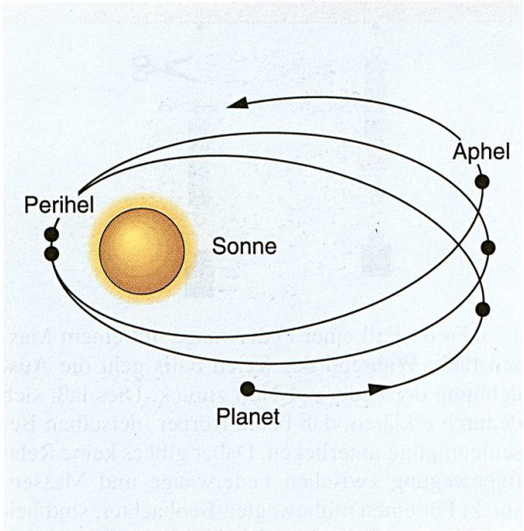
17.2 Ein Raumschiff wird auf seiner Umlaufbahn um die Erde stets zum Erdmittelpunkt hin beschleunigt, es führt sozusagen eine dauernde Fallbewegung durch. Aus diesem Grund sind die Raumfahrer und alle Gegenstände im Raumschiff nahezu schwerelos.



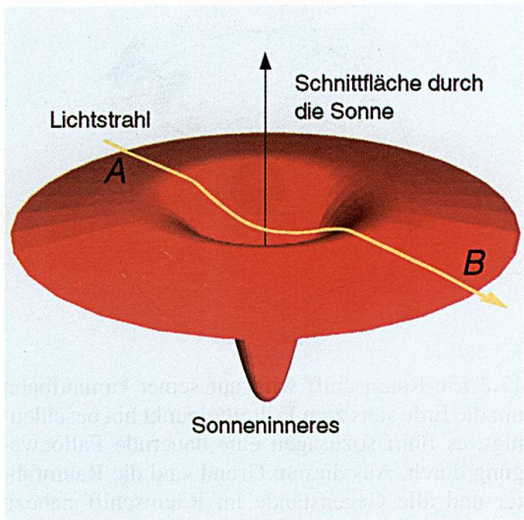
17.3 Wird der Kasten nach oben beschleunigt, beschreibt der Lichtstrahl eine nach unten gekrümmte Bahn.



17.4 Lichtstrahlen werden im Gravitationsfeld großer Massen abgelenkt.



18.1 Periheldrehung des Merkur



18.2 Die Existenz von Materie führt zur Krümmung des sie umgebenden Raumes. So beschreibt ein Lichtstrahl in Sonnennähe eine gekrümmte Bahn. Auf ihr gelangt der Strahl in der kürzestmöglichen Zeit von A nach B.

sung wird eine Verringerung gemessen, die Wellenlänge ist daher größer. Das Licht zeigt für den Detektor eine *Rotverschiebung*.

Erklärung:
Wenn ein Atom ein Photon (Lichtquant) abgibt, verringert sich die Energie des Atoms um die Photonenenergie. Diese ist direkt proportional zur Frequenz des Lichtes (vgl. Kapitel 4, Seite 29): $E \sim f$.

Nach Einstein kann jeder Energie eine bestimmte Masse zugeordnet werden:

$$m = \frac{E}{c^2}$$

Um eine Masse in einem Gravitationsfeld nach außen zu bewegen, muß Arbeit zugeführt werden. Dies gilt somit auch für ein Photon, welches sich in einem Schwerefeld bewegt. Die für diese Arbeit benötigte Energie wird der Photonenenergie entzogen, was eine Frequenzverringerung zur Folge hat. Mit dem Detektor wird ein *rotverschobenes* Licht gemessen.

Der experimentelle Nachweis für diese Frequenzänderung im Erdschwerefeld gelang mit Hilfe des *Möß bauer-Effektes*.

Elektromagnetische Strahlung, die von einer Masse mit großem Gravitationsfeld ausgeht, erreicht uns mit einer meßbar geringeren Frequenz, also größerer Wellenlänge.

Bestimmungen der Rotverschiebung im Gravitationsfeld der Sonne und von Weißen Zwergen sind wegen der Überlagerung mit anderen Effekten (z.B.: Dopplereffekt) mit einiger Ungenauigkeit behaftet.

Zeitdilatation

Die Sekunde ist die Zeiteinheit im SI.
Danach ist 1 Sekunde das 9 192 631 770fache der Periodendauer jener Strahlung, die beim Übergang zwischen zwei eng nebeneinander liegenden Energieniveaus von einem Cäsiumatom emittiert wird. Cäsium-Atomuhren benützen diese Strahlung als Zeitstandard.

Wird eine Strahlungsquelle in einem Gravitationsfeld nach außen bewegt, wird Energie zugeführt. Damit werden auch in den Atomen die Energieniveaus angehoben. Das bedeutet, daß zwei Atomuhren in unterschiedlichen Höhen unterschiedliche Frequenzen beim Übergang zwischen vergleichbaren Energieniveaus und daher eine unterschiedliche Dauer für eine Sekunde aufweisen. Der Frequenzstandard ist an verschiedenen Orten unterschiedlich. Tiefer gelegene Uhren gehen langsamer als dazu höher gelegene; sie zeigen eine Zeitdilatation.

Uhren in einem Gravitationsfeld zeigen eine Zeitdilatation, sie gehen langsamer als Uhren außerhalb dieses Feldes.

Periheldrehung

Der Einfluß der bewegungsabhängigen Effekte konnte durch die *Periheldrehung* des Merkur experimentell gestützt werden. Der Merkur beschreibt eine stark exzentrische Ellipsenbahn um die Sonne, wodurch der sonnennächste Punkt (Perihel) sehr genau bestimmt werden kann.

Aufgrund des Einflusses der Sonne und der anderen Planeten auf Merkur kommt es bei jedem Umlauf zu einer geringfügigen Verschiebung des Perihels. Nach den Newtonschen Gesetzen läßt sich die Periheldrehung pro Jahrhundert bis auf einen ungeklärten Rest von 42,9" berechnen. Die Allgemeine Relativitätstheorie liefert für diesen Restbetrag einen Wert von 43,03".

Der gekrümmte Raum

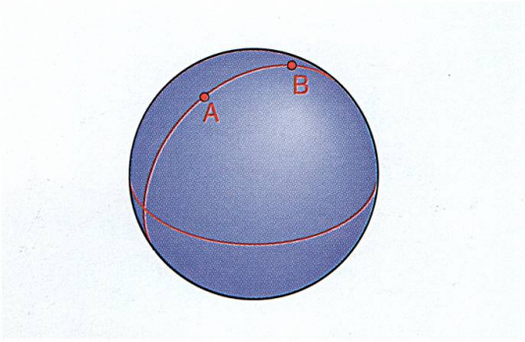
Die Allgemeine Relativitätstheorie besagt, daß jede Masse den Raum in ihrer Umgebung derart verändert, daß frei bewegte Objekte einer Bahn folgen, die in Richtung jener Masse gekrümmt ist, die diese Änderung hervorruft.

Nach der Euklidschen Geometrie ist eine Gerade die kürzeste Verbindung zweier Punkte. Dies ist nach der klassischen Physik zugleich die Bahn eines Lichtstrahls. Die Berechnungen der geometrischen Optik erfolgen daher auch

nach den Gesetzmäßigkeiten dieser Geometrie. Da jedoch alle Lichtstrahlen unter dem Einfluß von Gravitationsfeldern gekrümmt werden, gibt es keine Möglichkeit, eine Gerade im Sinne Euklids zu definieren. Dies bedeutet jedoch, daß diese Geometrie für große Distanzen im astronomischen Sinn nicht mehr angewendet werden kann. Die Euklidsche Geometrie ist als Spezialfall einer übergeordneten Geometrie zu betrachten.

Die kürzeste Verbindung zweier Punkte auf einer beliebigen Oberfläche wird *Geodäte* genannt. Sie ist z. B. auf einer Kugel ein Teil eines Großkreises.

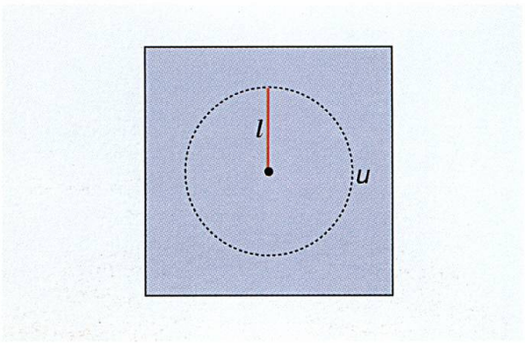
Die Raumkrümmung K ist nach der Allgemeinen Relativitätstheorie gegeben durch $K = \frac{a}{R^2}$ a heißt Krümmungsindex.



19.1 Die Geodäte zwischen den Punkten A und B ist ein Streckenstück eines Großkreises.

Folgende Fälle sind zu unterscheiden:
$a = 1$: sphärisch gekrümmter Raum
$a = 0$: flacher, ungekrümmter Raum
$a = -1$: hyperbolisch gekrümmter Raum

Die Veranschaulichung dieser Räume ist durch ihre zweidimensionalen Analogien möglich. (Abb. 19.2 bis 19.4)

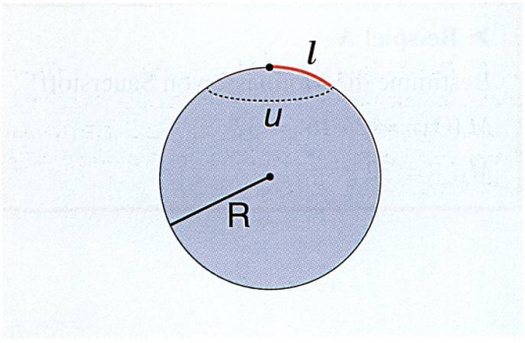


19.2 $a = 0$: Ebene. $u = 2\pi l$

Einstein bediente sich der mathematischen Theorie *Georg Riemanns*, die von *Marcel Grossmann* ausgebaut wurde, und wandte sie in der Allgemeinen Relativitätstheorie an.

Danach wird ein Körper nicht in einem Gravitationsfeld abgelenkt, sondern nach den Gesetzen einer gekrümmten Geometrie geführt. Freie Teilchen bewegen sich in einem Gravitationsfeld entlang von Geodäten. Der Abstand zweier Punkte ist daher von der Verteilung der Massen abhängig.

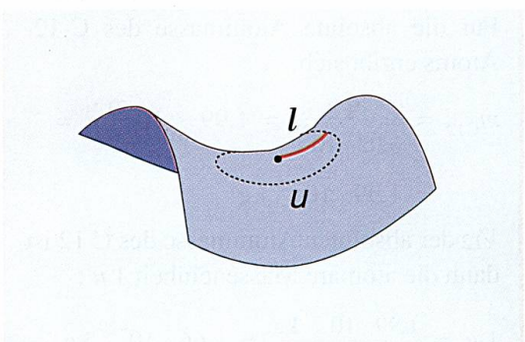
Einstein hat in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie die Vorstellungen über Raum und Zeit verändert; aus der absoluten Zeit und dem absoluten Raum Newtons ist eine dynamische Geometrie der Raum-Zeit geworden. Die Relativitätstheorie enthält die Newtonschen Gesetze als Grenzfall.



19.3 $a = 1$: Kugel. $u < 2\pi l$

Kontrollfrage

1. Was versteht man unter klassischer Physik?
2. Wie lautet die Galileitransformation?
3. Was zeichnet Inertialsysteme aus?
4. Wie lautet das Relativitätsprinzip?
5. Beschreibe den Versuch von Michelson und Morley.
6. Welche Folgerungen ergeben sich aus dem Versuch von Michelson und Morley?
7. Leite die Formel für die Zeitdilatation ab.
8. Wie kann die Längenkontraktion abgeleitet werden?
9. Wozu dient die Lorentztransformation? Was unterscheidet sie von der Galileitransformation?
10. Unter welchen Bedingungen finden für verschiedene Beobachter Ereignisse gleichzeitig statt?
11. Leite die Formel für die Geschwindigkeitsaddition ab.
12. Warum nimmt die Masse bei Geschwindigkeitszunahme zu?
13. Warum spielt die Ruheenenergie in der klassischen Physik keine Rolle?
14. Was besagt der Dopplereffekt bei elektromagnetischen Wellen?
15. Erkläre den Begriff Dopplerverbreiterung.
16. Beschreibe das Zwillingsparadoxon.
17. Was versteht man unter träger, was unter schwerer Masse?
18. Wie lautet das Äquivalenzprinzip?
19. Beschreibe einen Versuch zum Äquivalenzprinzip.
20. Erläutere die Gravitations-Rotverschiebung.
21. Wie wird die Zeitdilatation aufgrund der Gravitation beschrieben?
22. Was versteht man unter dem gekrümmten Raum? Welche Fälle sind dabei zu unterscheiden?



19.4 $a = -1$: Sattelfläche. $u > 2\pi l$

2. Grundbegriffe der Atomistik

Der moderne Atombegriff entstand zu Beginn des 19. Jh. aus den Erfahrungen der Chemiker (1807: Atomhypothese von *John Dalton*). Atome sind die kleinsten Bestandteile eines chemischen Elementes. Ein chemisches Element besteht aus Atomen gleicher Art. Atome können durch chemische Methoden nicht mehr geteilt werden, sie bleiben bei einer chemischen Reaktion erhalten. Bei der Entwicklung der kinetischen Gastheorie in der zweiten Hälfte des 19.Jhs. zeigte sich die *atomistische Struktur* der Materie besonders deutlich. So läßt sich der Gasdruck durch Stöße kleiner, massebehafteter Teilchen gegen die Gefäßwand erklären. Diese kleinsten, physikalisch selbständigen Masseteilchen eines Gases, die ständig in Bewegung sind, werden als Moleküle bezeichnet. Moleküle können einatomig (z. B. He) oder mehratomig (z. B. CO_2) sein.

2.1 Atommasse

Jede Atomsorte besitzt eine ganz bestimmte Masse. Bei einer chemischen Reaktion ist das Massenverhältnis der beteiligten Elemente gleich dem Massenverhältnis der Atome. Auf diese Weise konnte die *relative Atommasse M* bestimmt werden. Zur Zeit Daltons waren die relativen Atommassen für eine Reihe von Elementen bekannt. Dabei wurden die Werte auf Wasserstoff als leichtestes Element bezogen. Die relative Atommasse von Wasserstoff wurde damals mit 1 festgesetzt.

Relative Atommasse
Die atomare Masseneinheit 1 *u* ist heute durch 1/12 der Masse des Kohlenstoffisotops C 12 festgelegt. Die relative Atommasse gibt an, das Wievielfache dieser Einheit die Masse eines Atoms beträgt.

Die *relative Molekülmasse* ergibt sich aus der Summe der relativen Atommassen. Ein H-Atom hat annähernd 1/12 der Masse eines C-Atoms. Bei gleicher Anzahl von Atomen wiegt Kohlenstoff 12mal soviel wie Wasserstoff. Daraus folgt, daß 12 g Kohlenstoff aus gleich vielen Atomen bestehen wie 1 g Wasserstoff. Diese Überlegung führt zur Grundgröße *Stoffmenge*. Die Einheit der Stoffmenge ist 1 Mol.

1 Mol ist jene Menge einer Substanz, die aus gleich vielen Teilchen (Atomen, Molekülen) besteht wie 12 g des Kohlenstoffisotops C12.

Die Anzahl der Teilchen in einem Mol wird als Loschmidtkonstante *L* oder Avogadrozahl bezeichnet.

Loschmidtkonstante
$L = 6{,}02 \cdot 10^{23}\ \text{mol}^{-1} = 6{,}02 \cdot 10^{26}\ \text{kmol}^{-1}$

Die Berechnung dieser Zahl gelang dem Österreichischen Physiker *J. Loschmidt* im Jahr 1865. Die Loschmidtkonstante stellt die Verbindung zwischen Mikro- und Makrophysik her. Die *Molmasse* (molare Masse) M_{Mol} ist die in g ausgedrückte relative Atommasse (Molekülmasse).

Atomare Masseneinheit
$1u = 1{,}66 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$

2.2 Atomgröße

Um die Größe von Atomen abzuschätzen, betrachten wir den festen Aggregatzustand eines Stoffes. Feste Stoffe sind größtenteils kristallin aufgebaut. Kennzeichnend für die kristalline Struktur ist die regelmäßige Anordnung von Atomen (Ionen, Atomgruppen) in einem Raumgitter. Die Atome werden als starre Kugeln angenommen, die dicht gepackt angeordnet sind. Um den Raumbedarf eines Atoms zu berechnen, betrachten wir dieses zunächst als würfelförmig.

➤ Beispiel A

Bestimme die Molmasse von Sauerstoff!

$M(O_2) = 2 \cdot 16 = 32$

$M_{Mol} = 32\ \text{g}$

➤ Beispiel B

Berechne die Masse 1 *u* in kg!

Aus der Molmasse und der in ihr enthaltenen Teilchenzahl läßt sich die *absolute Atommasse* (Molekülmasse) berechnen. Für die absolute Atommasse des C-12-Atoms ergibt sich:

$$m_{C12} = \frac{12\ \text{g}}{6{,}02 \cdot 10^{23}} = 1{,}99 \cdot 10^{-23}\ \text{g} =$$

$$= 1{,}99 \cdot 10^{-26}\ \text{kg}$$

1/12 der absoluten Atommasse des C 12 ist dann die atomare Masseneinheit 1 *u* :

$$1\ u = \frac{1{,}99 \cdot 10^{-26}\ \text{kg}}{12} = 1{,}66 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$$

➤ Beispiel A

Berechne die Kantenlänge eines würfelförmig angenommenen Eisenatoms!

Für Eisen gilt: $\rho = 7{,}9\ \mathrm{g/cm^3}$, $M_{Mol} = 56\ \mathrm{g}$

$6{,}02 \cdot 10^{23}$ Eisenatome haben eine Masse von 56 g und nehmen daher ein Volumen von $\frac{56\ \mathrm{g}}{7{,}9\ \mathrm{g/cm^3}} = 7{,}1\ \mathrm{cm^3}$ ein. Das Volumen eines Atoms ist daher $\frac{7{,}1\ \mathrm{cm^3}}{6{,}02 \cdot 10^{23}}$. Daraus folgt für dessen Kantenlänge:

$$a = \sqrt[3]{\frac{7{,}1\ \mathrm{cm^3}}{6{,}02 \cdot 10^{23}}} = 2{,}2 \cdot 10^{-10}\ \mathrm{m}$$

Diese Kantenlänge entspricht dem Atomdurchmesser.

Andere Methoden liefern ähnliche Werte, auch für andere Atomsorten.

Durchmesser von Atomen liegen in der Größenordnung von 10^{-10} m.

2.3 Elektronen

Gegen Ende des 19. Jh. wurde ein Teilchen entdeckt, das wesentlich leichter ist als irgendein Atom. *J. J. Thomson* konnte beweisen, daß es sich bei den von einer Kathode ausgehenden Kathodenstrahlen um negativ geladene Teilchen handelt. Das Teilchen erhielt den Namen *Elektron.* Durch Ablenkung in elektrischen und magnetischen Feldern wurden Ladung und Masse des Elektrons bestimmt.

Ladung und Masse des Elektrons

e	$= 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ As	Betrag der Ladung
m_e	$= 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ kg	Masse

Das Elektron besitzt eine negative Elementarladung und eine Masse, die gleich dem 1836-ten Teil der Masse des Wasserstoffatoms ist. R. A. Millikan hat mit Hilfe von Öltröpfchen gezeigt, daß alle Ladungen ganzzahlige positive oder negative Vielfache der Elementarladung e sind (siehe Band 3, Seite 18). Ladungen kommen nur in "Paketen", den sogenannten *Quanten*, vor. Im Mikrobereich ist die Ladung gequantelt, im Makrobereich erscheint sie kontinuierlich. Eng verknüpft mit dem Elektron ist eine wichtige Energieeinheit der Atomphysik.

Elektronvolt

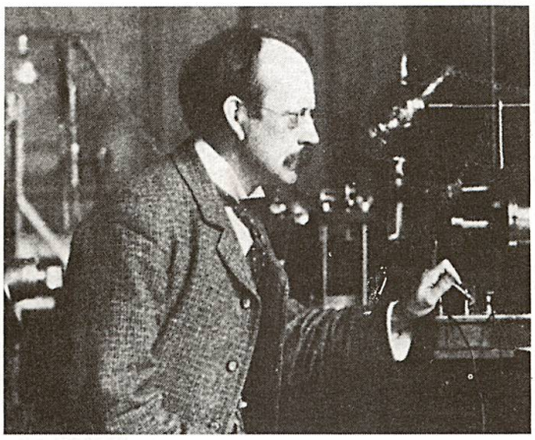
1 Elektronvolt (1 eV) ist die Energie, die ein Elektron beim "Durchfallen" einer Spannung von 1 V erhält.

$1\ \mathrm{eV} = 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ J

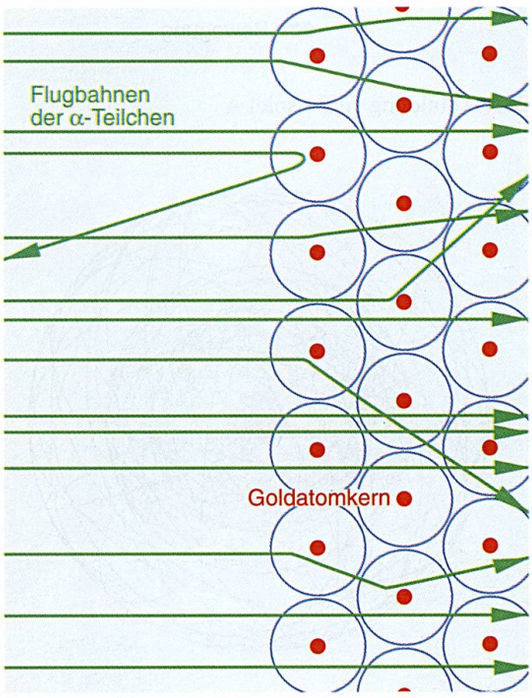
2.4 Atomstruktur

Zu Beginn des 20. Jh. hatte man keine Kenntnisse über den inneren Aufbau der Atome. Man nahm an, daß diese positive Ladungen und Elektronen enthalten. Um die Atomstruktur zu erforschen, begannen die Physiker, Atome mit schnellen Teilchen (Elektronen, α-Teilchen) zu beschießen. Aus der Ablenkung (Streuung) der Teilchen lassen sich Rückschlüsse auf die Ladungs- und Massenverteilung im Atom ziehen.

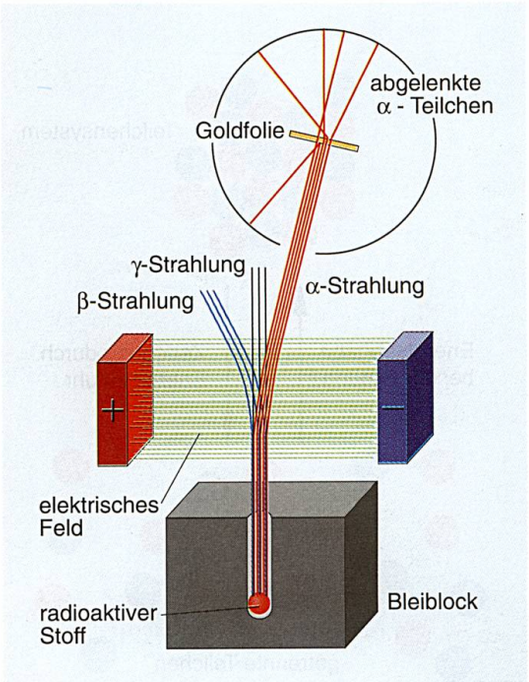
Bedeutende Ergebnisse lieferte die Streuung von α-Teilchen *(Rutherford-Streuung).* α-Teilchen werden von radioaktiven Stoffen ausgesandt (siehe Abschnitt 11). α-Teilchen sind identisch mit dem Heliumkern. Die positive Ladung eines α-Teilchens ist dem Betrag nach gleich der doppelten Elementarladung, die Masse ist ca. das 7000-fache der Elektronenmasse. Bei Streuexperimenten ab dem Jahr 1909 wurden dünne Metallfolien (z. B. eine 1/1000 mm dicke Goldfolie) mit α-Teichen beschossen (Abb. 21.2).



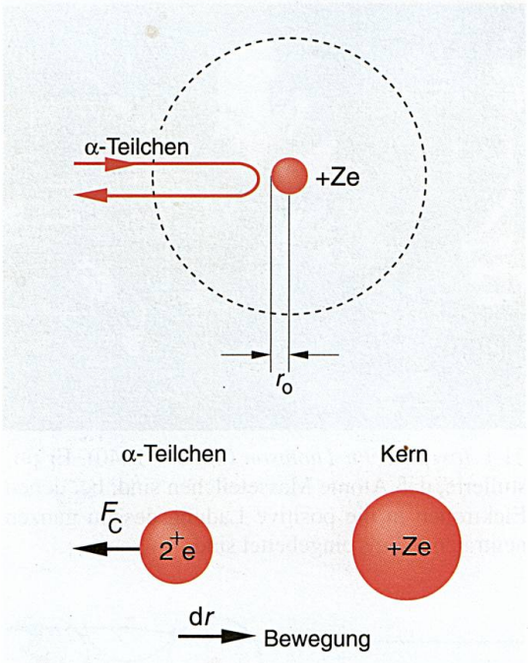
21.1 *Joseph John Thomson* (1856 – 1940). Er postulierte, daß Atome Masseteilchen sind, bei denen Elektronen in die positive Ladung des im ganzen neutralen Atoms eingebettet sind.



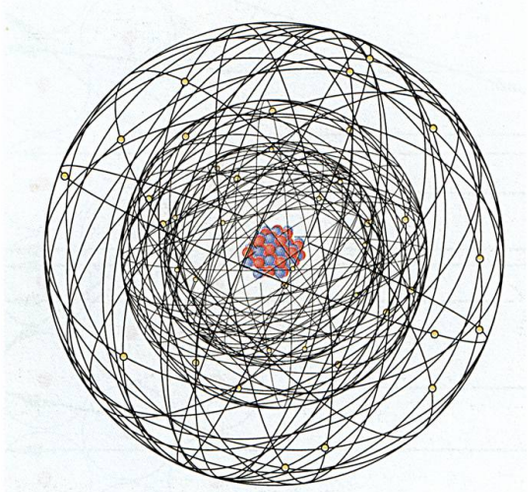
21.2 Streuung von α-Teilchen an Gold-Atomen



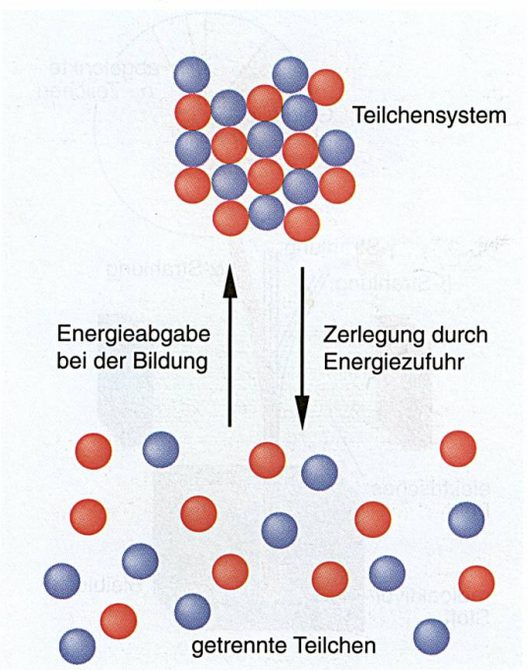
21.3 Apparatur für den Rutherfordschen Streuversuch



22.1 Abbildung zu Beispiel A



22.2 Atommodell nach Rutherford. Man spricht von einem Planetenmodell, weil man das Atom mit unserem Sonnensystem vergleicht.



22.3 Veranschaulichung der Bindungsenergie

Dabei durchdrangen die meisten α-Teilchen die Folie ohne Ablenkung oder mit sehr geringer Ablenkung (Streuung). Nur etwa eines von 2000 α-Teilchen wurde um mehr als 90° gestreut. Daraus schloß *Ernest Rutherford*, daß die Streuzentren im Vergleich zu den Atomabmessungen sehr klein sind. In diesen Streuzentren, den Atomkernen, ist praktisch die gesamte Masse des Atoms vereinigt. Auf Grund der Abstoßung der α-Teilchen müssen die Atomkerne positiv geladen sein.

Atomkerne enthalten eine positive Ladung vom Betrag $Z \cdot e$. Die Kernladungszahl Z ist gleich der Elektronenzahl im Atom.

➤ Beispiel A

Bei einem Streuversuch wird eine Goldfolie ($Z = 79$) mit α-Teilchen mit einer Energie von 7,68 MeV beschossen. Wie weit können sich die Teilchen dem Kern nähern? (Abb. 22.1)

Zunächst wird die Arbeit berechnet, die erforderlich ist, um ein α-Teilchen aus der Entfernung ∞ in den Abstand r_0 zu bringen. Da die Coulombkraft (siehe Kapitel 3.1) vom Abstand abhängig ist, erfordert die Berechnung eine Integration.

$$W = -\int_{\infty}^{r_0} F_c \, dr = -\frac{(2e)\cdot(Ze)}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \int_{\infty}^{r_0} \frac{dr}{r^2} =$$

$$= -\frac{(2e)\cdot(Ze)}{4\pi\varepsilon_0}\left[-\frac{1}{r}\right]_{\infty}^{r_0} = \frac{2Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_0}$$

Die erforderlich Arbeit wird durch die Energie der α-Teilchen aufgebracht.

$$E_\alpha = \frac{2Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_0} \qquad r_0 = \frac{2Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 E_\alpha}$$

$$r_0 = \frac{2 \cdot 79 \cdot (1{,}60 \cdot 10^{-19}\,\text{As})^2}{4\pi \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}\,\text{As/Vm} \cdot 7{,}68 \cdot 10^{6} \cdot 1{,}60 \cdot 10^{-19}\,\text{J}}$$

$$r_0 \approx 3 \cdot 10^{-14}\,\text{m}$$

Nähert sich das α-Teilchen bis auf den Abstand r_0, dann kann man r_0 als obere Grenze für den Kernradius ansehen.

Der Radius des Atomkernes ist von der Größenordnung 10^{-14} m.

In Anlehnung an das Sonnensystem postulierte Rutherford im Jahr 1911 ein Planetenmodell für das Atom. Um den positv geladenen Atomkern kreisen die Elektronen. Sie bilden die Elektronenhülle. Ursache der Bewegung ist die Coulombsche Anziehungskraft zwischen den negativen Elektronen und dem positiven Kern. Im folgenden Abschnitt werden wir erkennen, daß dieses Rutherfordsche Atommodell eigentlich keine Stabilität besitzen kann. Eine Lösung dieses Problems ist untrennbar verbunden mit der Wechselwirkung von Licht und Materie (Kapitel 4 und 5).

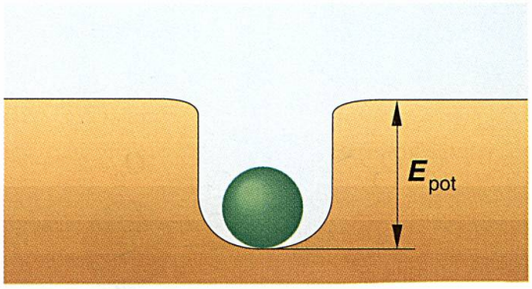
2.5 Bindungsenergie

Atomare Teilchen treten in vielfältiger Weise in gebundener Form auf.

Beispiele für Teilchensysteme:

- Atome eines Kristalls
- Atome eines Moleküls
- Moleküle einer Flüssigkeit
- Elektronen des Atoms
- Protonen und Neutronen eines Atomkernes
- Elektronen eines Metalles

Die *Bindungsenergie* ist gleich dem Betrag der Arbeit, die aufgewendet werden muß, um ein Teilchensystem in seine Bestandteile zu zerlegen. Die Bindungsenergie wird bei der Bildung des Systems frei (Abb. 22.3). Das System hat also eine niedrigere Energie als die getrennten Teilchen. Nur dann ist das System stabil (Abb. 23.1). Wird den getrennten Teilchen die Energie Null zugeordnet, dann ist die Systemenergie negativ.



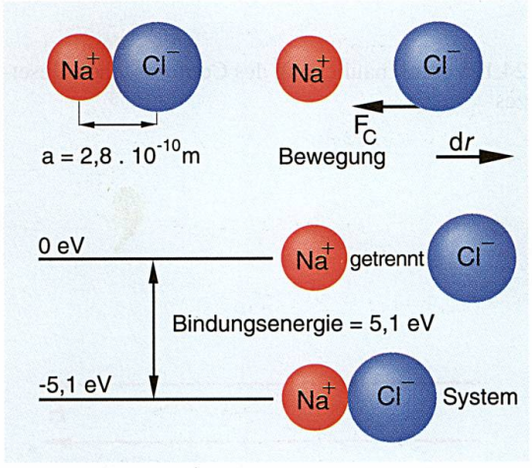
23.1 Die Kugel in der Mulde (im "Potentialtopf") ist in einer stabilen Gleichgewichtslage. Sie veranschaulicht ein stabiles System.

Beispiel A

In einem NaCl-Kristall werden die Na^+- und Cl^--Ionen durch Coulombsche Kräfte zusammengehalten. Es soll nun eine Anordung betrachtet werden, die aus einem Na^+- und einem Cl^--Ion im Abstand von $2{,}8 \cdot 10^{-10}$ m (wie im NaCl-Kristall) besteht.
Welche Arbeit ist erforderlich, um die beiden Ionen vollständig zu trennen, also in "unendliche" Entfernung zu bringen? (Abb. 23.2)

$$E_B = W = \int_a^\infty F_c \, dr = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0} \int_a^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 a}$$

$$E_B = \frac{(1{,}60 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{As})^2}{4\pi \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{As/Vm} \cdot 2{,}8 \cdot 10^{-10}\ \mathrm{m}} = 8{,}2 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J} = 5{,}1\ \mathrm{eV}$$



23.2 Abbildungen zu Beispiel A

Die Bindungsenergie liegt im allgemeinen in der Größenordung von eV, nur im Kernbereich treten MeV auf.

Die Bindung ist umso fester, je tiefer die Energie des Systems, d. h. je größer die Bindungsenergie ist.

2.6 Temperatur

Nach der Entdeckung der *Brownschen Bewegung* hat man erkannt, daß atomare Teilchen in allen Aggregatzuständen ständig in Bewegung sind. Mit steigender Temperatur nimmt die Heftigkeit dieser *thermischen Bewegung* zu. Die kinetische Theorie der Wärme liefert für Gase den folgenden Zusammenhang zwischen mittlerer kinetischer Energie eines Moleküls und der Gastemperatur:

Mittlere kinetische Energie eines Moleküls

$$\frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} k T \qquad k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \mathrm{J/K} \ \ldots \ \textit{Boltzmannkonstante}$$

Die Gasmoleküle besitzen drei Freiheitsgrade der Translation. Ein Freiheitsgrad entspricht einer unabhängigen Koordinate zur Ortsangabe des Moleküls. Die mittlere kinetische Energie pro Freiheitsgrad beträgt $\frac{1}{2} k T$.

Durch die kinetische Gastheorie wird die Temperatur auf mechanische Größen zurückgeführt. In einem Festkörper beträgt die mittlere Energie pro Atom $3\,kT$.

Die Temperatur kann durch eine entsprechende thermische Energie der Atome ausgedrückt werden. Dabei ist die Boltzmannkonstante der Umrechnungfaktor.

In einem Körper mit der Temperatur T ist die mittlere Energie pro Atom (Molekül) von der Größenordnung $k T$.

Der Zimmertemperatur (293 K) entspricht die thermische Energie

$$k T = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \mathrm{J/K} \cdot 293\ \mathrm{K} = 4{,}04 \cdot 10^{-21}\ \mathrm{J} = 0{,}025\ \mathrm{eV}$$

Aufgaben

14. Wie viele Atome enthält a) 1 g Eisen b) 1 cm^3 Eisen ?

15. Schätze den Atomdurchmesser von Aluminium ab. $M = 27$, $\rho = 2{,}7\ \mathrm{g/cm^3}$

16. Wie weit kann sich ein α-Teilchen mit einer Geschwindigkeit von $1{,}61 \cdot 10^7$ m/s einem Kupferatom ($Z = 29$) nähern?

17. Die Bindungsenergie für H_2 beträgt $4{,}3 \cdot 10^5$ J/Mol. Wie groß ist die Bindungsenergie pro Molekül in eV?

18. Die Verdampfungswärme von Wasser beträgt $2{,}26 \cdot 10^6$ J/kg. Schätze damit die Bindungsenergie pro Molekül in eV ab.

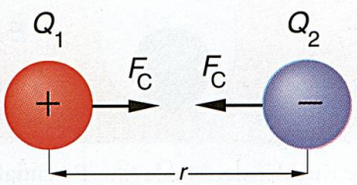
19. Bei Versuchen mit Silberdampf von 1500 °C wurde eine mittlere Geschwindigkeit von 659 m/s gemessen. Berechne daraus die relative Atommasse von Silber.

Kontrollfragen

1. Wie ist die atomare Masseneinheit festgelegt? Was versteht man unter relativer Atommasse?
2. Erkläre die Grundeinheit Mol.
3. Was versteht man unter der Quantelung der elektrischen Ladung?
4. Erkläre die Streuung von α-Teilchen an Atomkernen.
5. Was versteht man unter der Bindungsenergie?
6. Welche Bedeutung hat das Produkt $k T$?

3. Elektromagnetische Felder und Wellen

3.1 Elektrische Felder



24.1 Veranschaulichung des Coulombschen Gesetzes

Zwischen elektrischen Ladungen wirkt die *Coulombsche Kraft*.

Coulombsches Gesetz (Abb. 24.1)

$$F_C = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\,\pi\,\varepsilon_0\,r^2} \qquad \varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \text{As/Vm} \ldots \text{elektrische Feldkonstante}$$

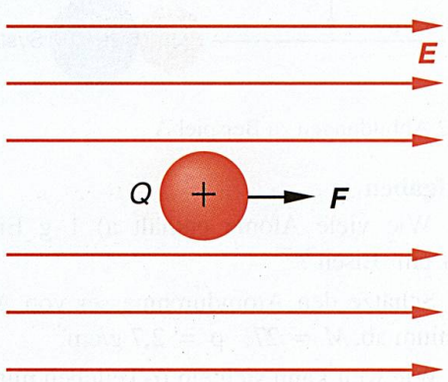
Zur Beschreibung von Kraftwirkungen hat Faraday den Feldbegriff eingeführt. Dem Raum um eine Ladung wird die Rolle zugewiesen, Kräfte zu vermitteln. Eine elektrische Ladung besitzt in ihrer Umgebung ein elektrisches Feld.

Das elektrische Feld ist die Eigenschaft des Raumes, die durch die Kraftwirkung auf elektrische Ladungen gekennzeichnet ist.

Ein elektrisches Feld wird durch die *elektrische Feldstärke* $\boldsymbol{E}$ beschrieben.

Elektrische Feldstärke $\boldsymbol{E}$

$$E = \frac{F}{Q} \qquad [E] = 1\,\frac{\text{V}}{\text{m}} \qquad \boldsymbol{E} \ldots \text{elektrischer Feldvektor}$$



24.2 In einem elektrischen Feld wirkt auf die Ladung Q die Kraft F: $F = Q\,E$

Im elektrischen Feld der Stärke E wirkt auf eine ruhende oder bewegte Ladung die Kraft $F = Q \cdot E$ (Abb. 24.2).

Wird etwa ein Kondensator aufgeladen, dann ist die dazu notwendige Arbeit im elektrischen Feld zwischen den Kondensatorplatten gespeichert. Bezieht man die Energie des Feldes auf das Volumen, erhält man die *Energiedichte* des elektrischen Feldes.

Energiedichte des elektrischen Feldes (im Vakuum oder in Luft)

$$\rho_{el} = \frac{\varepsilon_0 \cdot E^2}{2}$$

3.2 Magnetische Felder

In der Umgebung eines Dauermagneten oder eines stromdurchflossenen Leiters ist ein magnetisches Feld vorhanden.

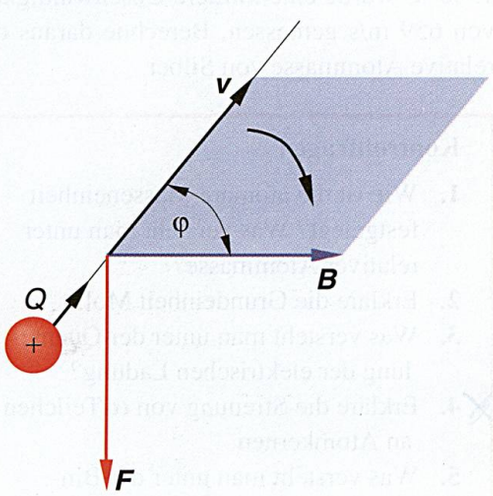
Ein magnetisches Feld ist die Eigenschaft des Raumes, die durch die Kraftwirkung auf bewegte Ladungen gekennzeichnet ist.

Ein Magnetfeld wird durch die *magnetische Flußdichte* $\boldsymbol{B}$ beschrieben.

Magnetische Flußdichte $\boldsymbol{B}$

$$B = \frac{F}{Q \cdot v} \qquad [B] = 1\,\frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = \boldsymbol{1\ Tesla = 1\ T}$$

$\boldsymbol{B}$ ... magnetischer Feldvektor



24.3 Auf eine bewegte Ladung in einem Magnetfeld wirkt die Lorentzkraft $\boldsymbol{F}$.

In einem Magnetfeld mit der Flußdichte $\boldsymbol{B}$ wirkt auf eine mit der Geschwindigkeit $\boldsymbol{v}$ bewegte Ladung Q die Lorentzkraft $\boldsymbol{F}$ (Abb. 24.3).

Lorentzkraft $\boldsymbol{F}$

Für eine positive Ladung gilt in Vektorschreibweise:

$\boldsymbol{F} = Q \cdot (\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B})$

Die Kraft $\boldsymbol{F}$ steht normal auf der durch $\boldsymbol{v}$ und $\boldsymbol{B}$ aufgespannte Ebene, wobei $\boldsymbol{v}$, $\boldsymbol{B}$ und $\boldsymbol{F}$ ein Rechtssystem bilden.

Für den Betrag der Kraft gilt: $F = Q\,v\,B \cdot \sin\varphi$.
Für den wichtigen Sonderfall, daß $\boldsymbol{v}$ und $\boldsymbol{B}$ senkrecht aufeinander stehen ($\varphi = 90^{\circ}$), erhält man $F = Q\,v\,B$.

Beim Einschalten einer Spule steigt die Stromstärke verzögert an und baut ein magnetisches Feld auf. Die erforderliche Arbeit ist im Magnetfeld gespeichert. Bezieht man die Energie des Magnetfeldes auf das Volumen, erhält man die *Energiedichte* des magnetischen Feldes.

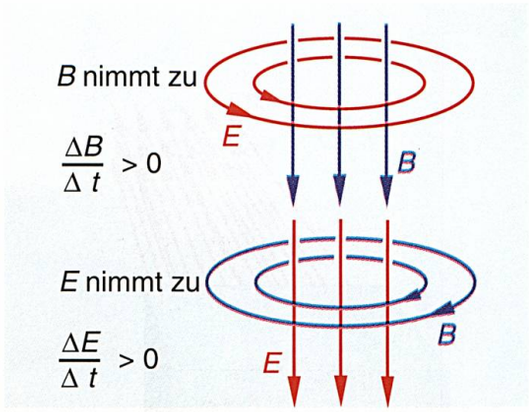
Energiedichte ρ_{magn} des magnetischen Feldes

$\rho_{magn} = \dfrac{B^2}{2\,\mu_o}$ $\quad \mu_o = 1{,}256 \cdot 10^{-6}$ Vs/Am ... magnetische Feldkonstante

3.3 Veränderliche Felder

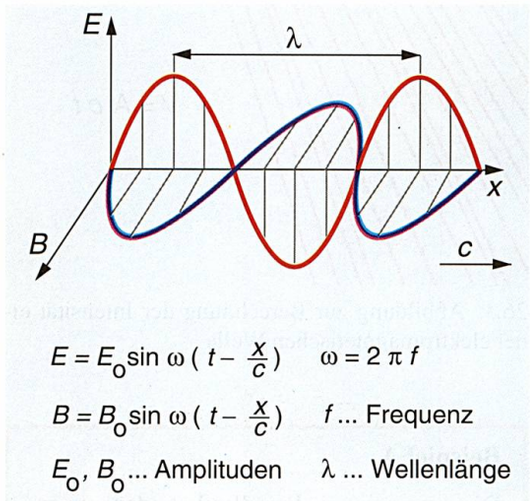
Elektrische Felder werden nicht nur von elektrischen Ladungen, sondern auch von veränderlichen Magnetfeldern erzeugt. Magnetische Felder werden nicht nur von elektrischen Strömen, sondern auch von veränderlichen elektrischen Feldern erzeugt.

Jedes sich ändernde elektrische Feld ist von einem magnetischen Wechselfeld umschlossen. Jedes sich ändernde magnetische Feld ist von einem elektrischen Wechselfeld umschlossen (Abb. 25.1).



25.1 Ein sich änderndes elektrisches (magnetisches) Feld wird von einem magnetischen (elektrischen) Wechselfeld umschlossen.

Diese Kopplung elektrischer und magnetischer Wechselfelder hat J.C. Maxwell im Jahre 1865 in Form der *Maxwellschen Gleichungen* formuliert. Maxwell hat auch weiter geschlossen, daß sich ändernde elektrische und magnetische Felder im Raum als *elektromagnetische Welle* ausbreiten. Erst im Jahre 1888 konnte *H. Hertz* elektromagnetische Wellen experimentell nachweisen.



25.2 Elektromagnetische Wellen sind Transversalwellen.

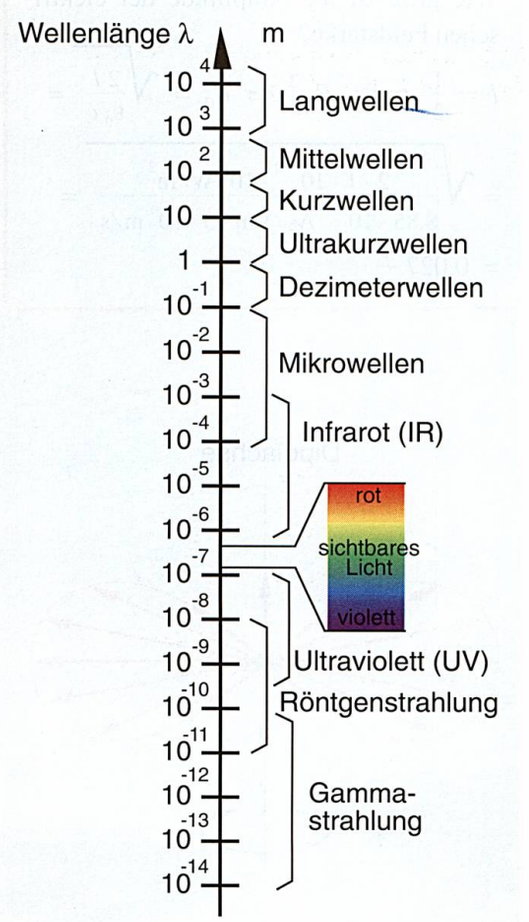
Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen beruht auf der Kopplung der elektrischen und magnetischen Wechselfelder. Erfolgen die Feldänderungen langsam, dann sind die beiden Felder praktisch entkoppelt. Niederfrequente oder statische Felder sind an ihre Quellen gebunden. Elektrische und magnetische Felder können dann getrennt betrachtet werden. Nur hochfrequente Felder lösen sich von ihrer Quelle (Antenne) und breiten sich im Raum als elektromagnetische Welle aus. Elektromagnetische Wellen sind Transversalwellen. D.h., elektrische und magnetische Felder schwingen quer zur Ausbreitungsrichtung. Elektrischer und magnetischer Feldvektor stehen normal aufeinander und sind in Phase (Abb. 25.2).

Für elektromagnetische Wellen gilt die Beziehung $c = \lambda f$. Aus den Maxwellschen Gleichungen ergibt sich für die Ausbreitungsgeschwindigkeit c der Welle (in Vakuum und Luft):

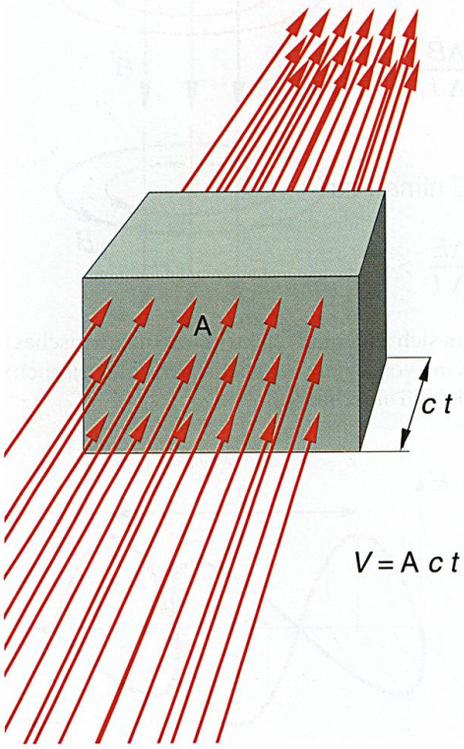
$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{1{,}256 \cdot 10^{-6}\ \text{Vs/Am} \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \text{As/Vm}}} \approx 3 \cdot 10^8\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Da sich für die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wert der Lichtgeschwindigkeit ergibt, hat Maxwell angenommen, daß auch Licht eine transversale, elektromagnetische Welle ist. Tatsächlich ist auch Licht wie etwa eine Radiowelle eine elektromagnetische Welle. Im *elektromagnetischen Spektrum* werden alle elektromagnetischen Wellen zusammengefaßt und in Abhängigkeit von der Wellenlänge (Frequenz) dargestellt (Abb. 25.3). Diese Erkenntnisse Maxwells gehören zu den wichtigsten Grundlagen der klassischen Physik.

Elektrische und magnetische Felder besitzen eine Energiedichte. Die Energiedichte des elektromagnetischen Feldes ist zu gleichen Teilen im elektrischen und im magnetischen Feld enthalten.



25.3 Das elektromagnetische Spektrum



26.1 Abbildung zur Berechnung der Intensität einer elektromagntetischen Welle

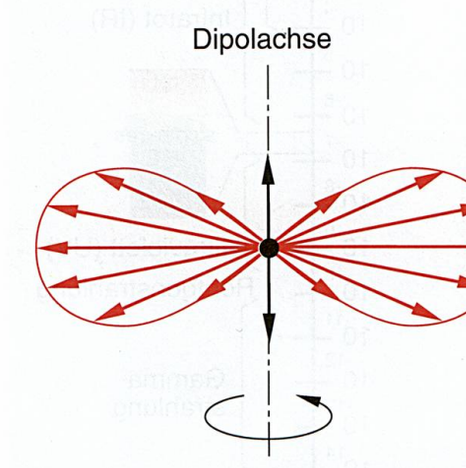
Beispiel A

Die von einem Rundfunksender ausgestrahlte Welle hat am Empfangsort eine Strahlungsintensität von $1 \cdot 10^{-10}$ W/cm^2. Wie groß ist die Amplitude der elektrischen Feldstärke?

$$I = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_0 \cdot c \cdot E_0^{\,2} \Leftrightarrow E_0 = \sqrt{\frac{2I}{\varepsilon_0 c}} =$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \cdot 10^{-10} \cdot 10^4 \text{ W/m}^2}{8{,}85 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}} =$$

$$= 0{,}027 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$



26.2 Strahlungscharakteristik eines Hertzschen Dipols

Energiedichte ρ eines elektromagnetischen Feldes

$$\rho = \frac{\varepsilon_0 \cdot E^2}{2} + \frac{B^2}{2\,\mu_0}$$

Aus $\rho = \rho_{el} + \rho_{magn}$ und $\rho_{el} = \rho_{magn}$ folgt $\rho = 2\,\rho_{el} = 2\,\rho_{magn}$

Mit $E = E_o \sin \omega (t - \frac{x}{c})$ ergibt sich $\rho = \varepsilon_o E_o^2 \sin^2 \omega (t - \frac{x}{c})$

Die Energiedichte ändert sich mit der Zeit nach einer $\sin^2$-Funktion. Von Bedeutung ist aber der zeitliche Mittelwert.

Mittlere Energiedichte ρ_m *des elektromagnetischen Feldes*

$$\rho_m = \frac{1}{2}\,\varepsilon_0 \cdot E_0^{\,2} \qquad [\rho] = 1\,\frac{\text{J}}{\text{m}^3}$$

Aus $\varepsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_0}$ und $c = \frac{1}{(\mu_0 \cdot \varepsilon_0)^{\frac{1}{2}}}$ folgt $E = B\,c$

Zusammenhang zwischen dem elektrischen und dem magnetischen Feld

$$E = B\,c$$

Die *Intensität I* einer elektromagnetischen Welle (oder elektromagnetischen Strahlung) ist die Energie, die in der Zeiteinheit durch die Flächeneinheit hindurchtritt. Die Strahlung, die die Fläche A durchsetzt, legt in der Zeit t den Weg $c \cdot t$ zurück (Abb. 26.1). Mit dem Volumen $V = A\,c\,t$ und der Energiedichte läßt sich der Energieinhalt des Quaders berechnen:

$$I = \frac{Energie}{A \cdot t} = \frac{\rho_m \cdot V}{A \cdot t} = \frac{\rho_m \cdot A \cdot c \cdot t}{A \cdot t} = \rho_m \cdot c$$

Intensität I einer elektromagnetische Welle (Strahlung)

$$I = \rho_m \cdot c = \frac{1}{2}\,\varepsilon_0 \cdot c \cdot E_0^{\,2} \qquad [I] = 1\,\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Die Strahlungsintensität ist proportional zum Amplitudenquadrat der elektrischen Feldstärke: $I \sim E_o^2$

3.4 Die Abstrahlung elektromagnetischer Wellen

Aus der Maxwellschen Theorie folgt, daß beschleunigte Ladungen elektromagnetische Wellen abstrahlen. Die abgestrahlte Leistung ist proportional zum Quadrat der Beschleunigung: $P \sim a^2$. Jede Schwingung ist eine beschleunigte Bewegung. Als Modell für eine Schwingung dient der harmonische Oszillator, der sich in der Mechanik etwa als Federpendel realisieren läßt. Für die Beschleunigung gilt $a = \omega^2 \cdot r$. Daraus und aus $\omega = 2\,\pi f$ folgt:

Die von einer schwingenden Ladung abgestrahlte Leistung steigt mit der vierten Potenz der Frequenz: $P \sim f^4$

In der Antenne eines Rundfunksenders fließt ein hochfrequenter Wechselstrom, der ja nichts anderes als Ladungsschwingungen darstellt. Die Grundform einer Antenne ist der *Dipol* (*Hertzscher Dipol*). Abbildung 26.2 zeigt die Strahlungscharakteristik eines Dipols. Die Dipolachse gibt die Schwingungsrichtung an. Ein Dipol strahlt überwiegend senkrecht zur Dipolachse, in Richtung der Dipolachse erfolgt keine Abstrahlung.

Auch in elektrischen Funken und im Blitz werden Ladungen beschleunigt und daher elektromagnetische Wellen abgestrahlt. In der Röntgenröhre werden Elektronen abgebremst und emittieren dabei Strahlung (vgl. Abschnitt 8). In

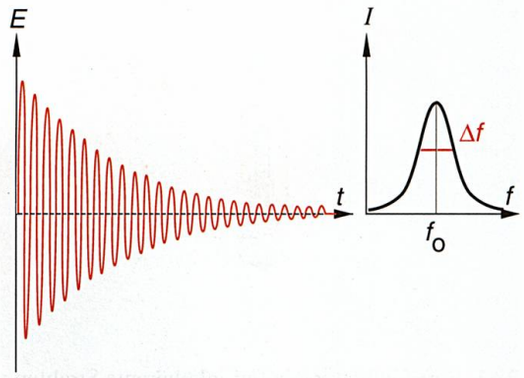
Teilchenbeschleunigern (vgl. Abschnitt 14) bewegen sich geladene Teilchen etwa auf Kreisbahnen. Da die Kreisbewegung eine beschleunigte Bewegung ist, wird elektromagnetische Strahlung - *Synchrotronstrahlung* - emittiert. Die emittierte Strahlung reicht vom sichtbaren Bereich bis zu den Röntgenstrahlen. Dadurch treten Energieverluste auf. Andererseits kann ein derartiges Gerät als Strahlungsquelle benützt werden.

3.5 Lichtemission

Licht wird von schwingenden Atomen - genauer von den schwingenden Elektronen der Atome - emittiert. Durch Energiezufuhr werden Ladungen aus ihrer Gleichgewichtslage ausgelenkt und beginnen zu schwingen. Dies ist vergleichbar mit den Schwingungen eines harmonischen Oszillators (z.B. Federpendel). Die Ladungsschwingungen stellen einen schwingenden Dipol dar.

Licht wird durch die Schwingungen atomarer Dipole erzeugt.

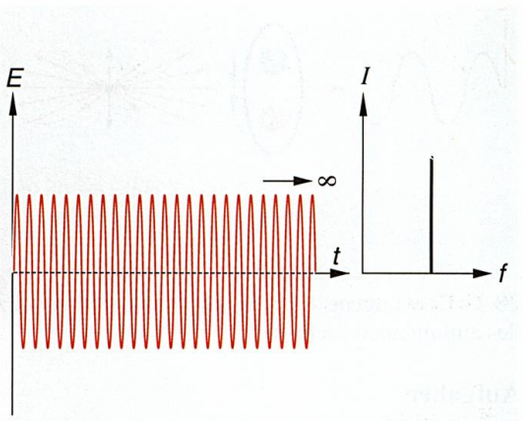
Wegen der Strahlungsemission verliert der Dipol Energie. Daher sind seine Ladungsschwingungen gedämpft (Abb. 27.1). Die Abklingzeit liegt im allgemeinen in der Größenordnung von 10^{-8} s .



27.1 Ladungsschwingungen sind gedämpft. Frequenzspektrum der Strahlungsemission eines schwingenden Dipols

Untersucht man die Intensität der Strahlung in Abhängigkeit von der Frequenz, dann findet man ein überraschendes Ergebnis. Neben der zu erwartenden Frequenz f_0, mit der der Oszillator schwingt, treten dicht gedrängt noch weitere größere und kleinere Frequenzen auf. Das Frequenzspektrum ist kontinuierlich und hat die Form einer Resonanzkurve. Die Breite in halber Höhe heißt Linienbreite Δf.

Um zu verstehen, wie dieses Spektrum zustandekommt, betrachten wir zunächst einen unendlich ausgedehnten sinusförmigen Wellenzug. Er stellt eine streng monochromatische Welle dar. Er besitzt eine einzige Frequenz f_0, dargestellt durch eine Linie (Abb. 27.2).



27.2 Eine streng monochromatische Welle

Periodizität bedeutet eine unbegrenzte Wiederholung einer bestimmten Amplitude in gleichen Zeitintervallen. Ein begrenzter sinusförmiger Wellenzug oder eine gedämpfte Schwingung sind daher keine periodischen Vorgänge. Nichtperiodische Vorgänge lassen sich nicht durch ein Linienspektrum, sondern durch ein kontinuierliches Spektrum darstellen.

Abb. 27.3 zeigt die Spektren zweier verschieden langer Wellenzüge. Man erkennt, daß die Linienbreite umso größer wird, je kürzer der Wellenzug ist. Die Umwandlung des zeitabhängigen Signals in das frequenzabhängige Spektrum erfolgt durch eine Fourier-Transformation.

Ein Wellenzug endlicher Länge kann als Überlagerung unendlich vieler, monochromatischer Wellen aufgefaßt werden, deren Frequenzen kontinuierlich um das Intensitätsmaximum verteilt sind.

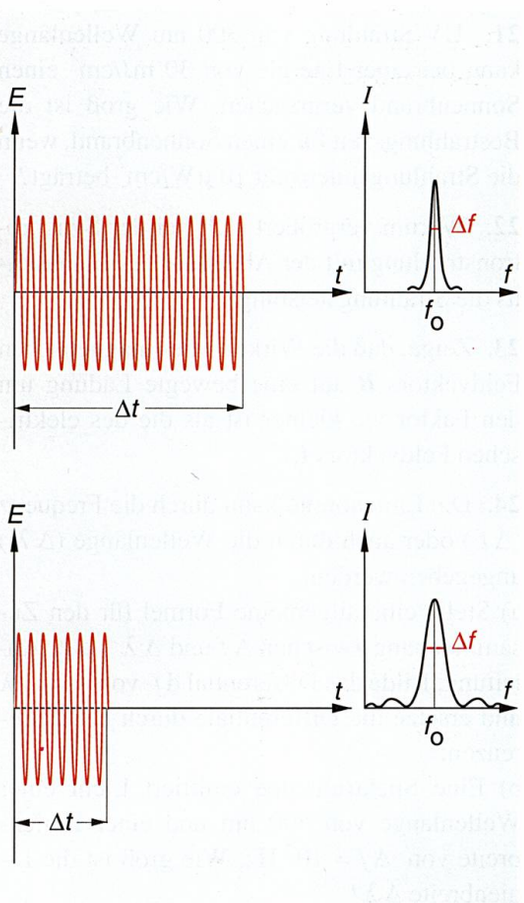
Diese Spektralanalyse ist in Physik und Technik von großer Bedeutung. Für den Zusammenhang zwischen Abklingzeit Δt der gedämpften Schwingung und der Linienbreite Δf gilt annähernd:

$$\Delta t \approx \frac{1}{\Delta f}$$

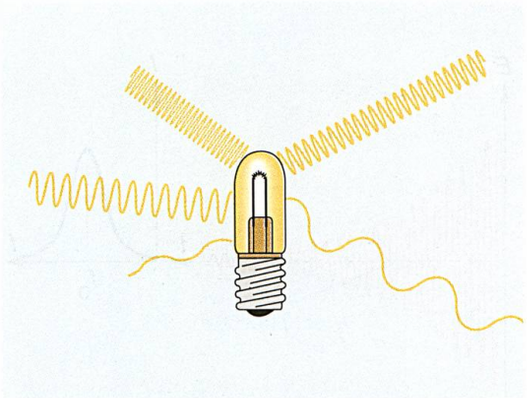
Damit läßt sich die Länge des Wellenzuges Δl berechnen:

$$\Delta l = c \cdot \Delta t = \frac{c}{\Delta f}$$

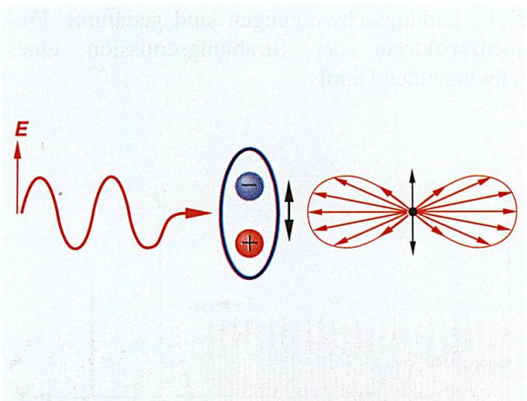
Mit dem Begriff *Kohärenz* wird die Interferenzfähigkeit von Wellen beschrieben. Werden etwa zwei Dipolantennen durch einen Hochfrequenzgenerator gespeist, so sind die beiden Wellen vollständig synchron und damit interferenzfähig. Sie sind kohärent. Bei Lichtquellen liegen ganz andere Verhältnisse vor. Eine Lichtquelle enthält eine große Zahl voneinander unabhängiger atomarer



27.3 Ein begrenzter sinusförmiger Wellenzug erzeugt ein kontinuierliches Spektrum. Dabei kommt es auch auf die Länge des Wellenzuges an.



28.1 Eine Glühlampe liefert inkohärente Strahlung.



28.2 Erzwungene Schwingung mit der Frequenz des einfallenden Lichtstrahls

Aufgaben

20. Welche Intensität muß eine Lichtwelle besitzen, damit die Amplitude der elektrischen Feldstärke 1 V/cm beträgt?

21. UV-Strahlung von 300 nm Wellenlänge kann bei einer Energie von 30 mJ/cm^2 einen Sonnenbrand verursachen. Wie groß ist die Bestrahlungszeit für einen Sonnenbrand, wenn die Strahlungsintensität 10 µW/cm^2 beträgt?

22. Warum vergrößert sich bei der Synchrotronstrahlung mit der Abnahme des Bahnradius die Strahlungsleistung?

23. Zeige, daß die Wirkung des magnetischen Feldvektors ***B*** auf eine bewegte Ladung um den Faktor v/c kleiner ist als die des elektrischen Feldvektors ***E***.

24. Die Linienbreite kann durch die Frequenz (Δf) oder auch durch die Wellenlänge ($\Delta \lambda$) angegeben werden.
a) Stelle eine allgemeine Formel für den Zusammenhang zwischen Δf und $\Delta \lambda$ auf. Anleitung: Bilde das Differential df von $f = c / \lambda$ und ersetze die Differentiale durch die Differenzen.
b) Eine Spektrallampe emittiert Licht einer Wellenlänge von 500 nm und einer Linienbreite von $\Delta f = 10^9$ Hz. Wie groß ist die Linienbreite $\Delta \lambda$?

25. Um das Wievielfache überwiegt der violette Anteil des gestreuten Lichtes den roten Anteil?

Dipole. Die Lichtstrahlung besteht daher aus einer statistischen Folge von Wellenzügen verschiedener Frequenzen und begrenzter Länge (Abb. 28.1). Die Strahlung ist inkohärent. Voraussetzung für eine Interferenz (Kohärenz) ist eine feste Phasenbeziehung zwischen den Wellenzügen und damit auch Frequenzgleichheit. Die Frequenzänderung infolge der Linienbreite Δf schränkt nun die Kohärenzzeit ein. Diese entspricht der Abklingzeit Δt der atomaren Dipolschwingungen. Die Länge des Wellenzuges wird auch als Kohärenzlänge $\Delta l = c \cdot \Delta t$ bezeichnet.

Interferenz ist nur dann beobachtbar, wenn die Wegdifferenz der interferierenden Wellenzüge die Kohärenzlänge nicht überschreitet (siehe Band 2). Beim Laserlicht ist die Kohärenzlänge besonders groß (Abschnitt 9).

3.6 Lichtstreuung

Trifft eine Lichtwelle auf Atome (Moleküle), so wirkt infolge der elektrischen Feldstärke

$$E = E_0 \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$$

eine periodisch veränderliche Kraft auf die Ladungen. Die Ladungen führen erzwungene Schwingungen mit der Frequenz der einfallenden Lichtwelle durch und emittieren daher wieder Licht derselben Frequenz. Die schwingenden Ladungen sind atomare Dipole mit der Dipol-Strahlungscharakteristik. Ein Teil der einfallenden Welle wird daher aus der ursprünglichen Richtung abgelenkt. Man nennt dies Streuung. Für die Intensität des Streulichtes gilt $I \sim f^4$. Daraus und aus $f = c / \lambda$ folgt $I \sim 1/\lambda^4$.

Beim Durchgang des Sonnenlichtes durch die Atmosphäre wird der kurzwellige Anteil (Violett, Blau) stärker gestreut als der langwellige Anteil (Rot). Mit dieser Überlegung konnte *J. W. Rayleigh* 1899 eine Erklärung für die blaue Himmelsfarbe liefern.

Die Streuung des Lichtes hat gezeigt, daß Ladungen eines Atoms unter dem Einfluß der elektrischen Feldstärke E einer Lichtwelle zum Schwingen gebracht werden. Durch Versuche konnte auch gezeigt werden, daß Schwärzung einer Photoschicht durch die Einwirkung des elektrischen Feldes erfolgt. Im allgemeinen wird daher eine Lichtwelle durch den elektrischen Feldvektor E dargestellt. Er wird auch oft als Lichtvektor bezeichnet.

Die in diesem Abschnitt behandelten elektromagnetischen Erscheinungen werden auch unter dem Begriff *Elektrodynamik* zusammengefaßt. Diese bildet zusammen mit der *Newtonschen Mechanik* die *klassische Physik* (vgl. Abschnitt 1).

Kontrollfragen

1. Was versteht man unter einem elektrischen bzw einem magnetischen Feld und durch welche Größen werden sie beschrieben
2. Erkläre die Lorentzkraft.
3. Beschreibe die elektromagnetische Welle.
4. Wie lassen sich Energiedichte und Strahlungsintensität einer elektromagnetischen Welle berechnen?
5. Unter welchen Umständen werden elektromagnetische Wellen abgestrahlt?
6. Erkläre den Mechanismus der Lichtemission mit Hilfe der klassischen Physik.
7. Wodurch unterscheidet sich eine monochromatische von einer nichtmonochromatischen Welle?
8. Wie hängt die Länge eines Wellenzuges mit der Linienbreite zusammen?
9. Wie läßt sich die blaue Himmelfarbe erklären?
10. Was versteht man unter dem Lichtvektor?

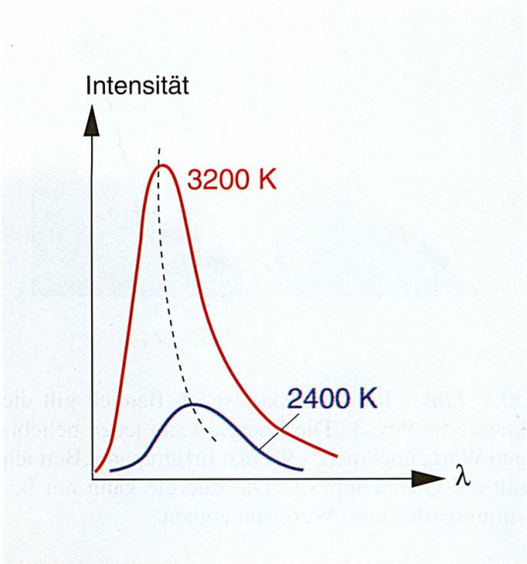
4. Die Quantennatur der elektromagnetischen Strahlung

4.1 Plancksches Wirkungsquantum

Am Ende des 19. Jh versuchten die Physiker ein Gesetz aufzustellen, das die spektrale Energieverteilung der *Schwarzen Strahlung* beschreibt. Die Strahlung, die ein Körper infolge seiner Temperatur emittiert, wird als *Temperaturstrahlung* bezeichnet. Im Idealfall kann ein Temperaturstrahler als Schwarzer Strahler angesehen werden (siehe Band 2, Seite 84). Die spektrale Energieverteilung ist nur von der Temperatur des Strahlers abhängig. Für jede Temperatur gibt es eine ganz bestimmte kontinuierliche Verteilung der Strahlungsenergie über die Wellenlänge (Frequenz). Charakteristisch ist die Wellenlänge λ_{max} des Strahlungsmaximums. Sie wird durch das *Wiensche Verschiebungsgesetz* beschrieben (Abb. 29.1).

Wiensches Verschiebungsgesetz

$$\lambda_{max} \cdot T = 2{,}9 \cdot 10^{-3}\ \text{mK}$$



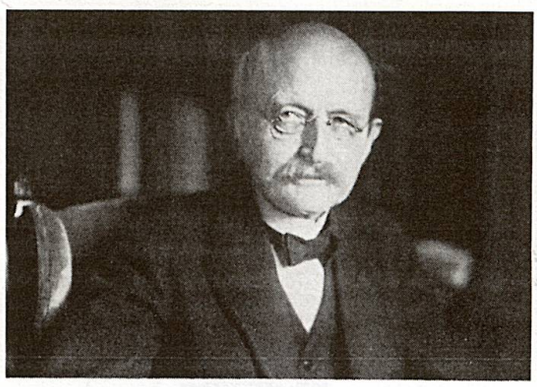
29.1 Verteilung der Strahlungsenergie. Mit steigender Temperatur verschiebt sich das Strahlungsmaximum zur kürzeren Wellenlänge hin.

Mit zunehmender Temperatur verschiebt sich das Strahlungsmaximum zu kürzeren Wellenlängen hin. Um die Strahlungsemission zu erklären, stellte man sich vor, daß die Wände des Strahlers atomare Oszillatoren enthalten, die thermisch zum Schwingen angeregt werden. Die richtige Strahlungsformel konnte *M. Planck* im Jahr 1900 aufstellen. Er nahm an, daß ein Oszillator Energie nur in "Paketen" absorbieren oder emittieren kann. Diese Energiepakete nennt man *Energiequanten*. Die Energieaufnahme oder Energieabgabe ändert die Energie des Oszillatore um ΔE. Planck stellte die Hypothese auf, daß die Energieänderung ΔE proportional zur Schwingungsfrequenz des Oszillators ist: $\Delta E \sim f$.

Mit dem Proportionalitätsfaktor h erhält man:

$$\Delta E = h \cdot f, \quad [h] = \frac{[E]}{[f]} = 1\ \text{Js}$$

Durch Vergleich mit der gemessenen Spektralverteilung konnte der Proportionalitätsfaktor h bestimmt werden.



29.2 *Max Planck* (1858 -1947; Nobelpreis 1918)

Plancksches Wirkungsquantum (Planck-Konstante)

$$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{Js}$$

Das Plancksche Wirkungsquantum stellte sich als universelle Naturkonstante heraus.

Wenn die Aufnahme und Abgabe von Energie gequantelt ist, dann muß auch die Energie selbst gequantelt sein.

Schwingende Oszillatoren können nur diskrete Energiezustände annehmen, die sich als Vielfaches eines elementaren Energiequants $h \cdot f$ ergeben.

$$E_n = n\,h\,f \qquad n = 1, 2, 3, 4, \ldots$$

Diese Energiequantelung stellte einen ungeheuren Eingriff in die damalige Denkweise der Physik dar. Es stellte sich sofort die Frage, warum derartige Enegieabstufungen vorher nicht entdeckt wurden.

Beispiel B

Ein Federpendel mit einer Masse von 100 g und einer Federkonstante von 100 N/m schwingt mit einer Amplitude von 1 cm.

Schwingungsenergie: $E = \frac{k\,r^2}{2} = 50\ \text{N/m} \cdot (0{,}01\ \text{m})^2 = 5 \cdot 10^{-3}\ \text{J}$

Eigenfrequenz: $f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{100\ \text{N/m}}{0{,}1\ \text{kg}}} \approx 5\ \text{Hz}$

Energiequant: $hf = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{Js} \cdot 5\ \text{s}^{-1} = 3{,}3 \cdot 10^{-33}\ \text{J}$

➤ **Beispiel A:** Abschätzung des Proportionalitätsfaktors h

Ein Stück Eisen wird auf 1000 K erwärmt, es leuchtet hellrot. Das Strahlungsmaximum liegt im IR-Bereich:

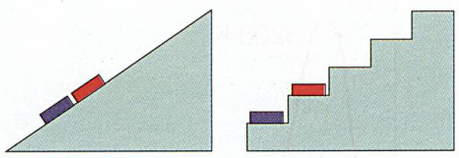
$$\lambda_{max} = \frac{2{,}9 \cdot 10^{-3}\ \text{mK}}{1000\ \text{K}} \approx 3 \cdot 10^{-6}\ \text{m}$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = 1 \cdot 10^{14}\ \text{Hz}$$

Die atomaren Dipole, die diese Strahlung emittieren, werden thermisch angeregt und besitzen daher eine Energie von der Größenordnung $k \cdot T$. Daher gilt:

$$h \cdot f \approx k \cdot T \Leftrightarrow h = \frac{k\,T}{f}$$

$$h = \frac{1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \text{JK}^{-1} \cdot 1 \cdot 10^{3}\ \text{K}}{1 \cdot 10^{14}\ \text{s}^{-1}} \approx 10^{-34}\ \text{Js}$$



30.1 *Links:* Im makroskopischen Bereich gilt die klassische Physik. Die Energie kann jeden beliebigen Wert annehmen. - *Rechts*: Im atomaren Bereich gilt die Quantenphysik. Die Energie kann nur bestimmte (diskrete) Werte annehmen.

Drehimpulsquantelung

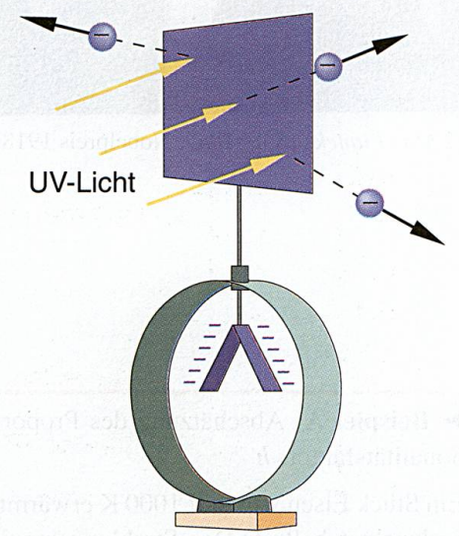
$$E = \frac{I\,\omega^2}{2} = \frac{L^2}{2\,I}$$

Für die Änderung der Energie gilt:

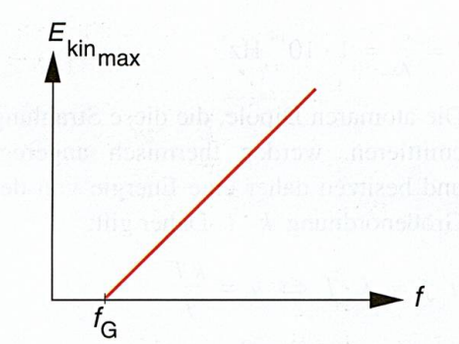
$$\mathrm{d}E = \frac{2\,L\,\mathrm{d}L}{2\,I} = \omega\,\mathrm{d}L \Rightarrow \Delta E = \omega\,\Delta L$$

$$\Delta L = \frac{\Delta E}{\omega} = \frac{h\,f}{\omega} = \frac{h\,f}{2\,\pi\,f} = \frac{h}{2\,\pi} \Leftrightarrow$$

$$L = n \cdot \frac{h}{2\,\pi}$$



30.2 Photoeffekt: Wird die Zinkplatte mit UV-Licht bestrahlt, werden Photoelektronen von der Platte abgelöst, und das Elektroskop entlädt sich.



30.3 Der Photoeffekt tritt erst ab einer bestimmten Grenzfrequenz f_G auf.

Wegen der "Kleinheit" des Planckschen Wirkungsquantums kann die Energiequantelung beim Federpendel nicht nachgewiesen werden. In der Makrophysik kann die Energie jeden beliebigen Wert annehmen. Die Energiequantelung wird erst im atomaren Bereich wirksam. Das Plancksche Wirkungsquantum gibt die Grenze für die klassische Physik an. Die Entdeckung des Planckschen Wirkungsquantums kann man als die Geburtsstunde der Quantenphysik ansehen.

Die Einheit des Planckschen Wirkungsquantums ist das Produkt aus Einheit der Energie mit der Einheit der Zeit. Eine derartige Größe bezeichnet man als *Wirkung*. Auch der Drehimpuls L hat die Einheit einer Wirkung:

$$L = I \cdot \omega \quad [\,L\,] = 1\ \mathrm{kgm^2s^{-1}} = 1\ \mathrm{Nms} = 1\ \mathrm{Js}$$

Es hat sich herausgestellt, daß der Drehimpuls im atomaren Bereich ebenfalls gequantelt ist und eine wichtige Rolle in der Atomphysik spielt.

4.2 Photoeffekt

Versuch (Abb. 30.2)

Eine Zinkplatte, die mit einem Elektroskop verbunden ist, wird negativ aufgeladen. Sichtbares Licht verursacht keine Änderung des Elektroskopausschlages. Bestrahlt man die Zinkplatte jedoch mit UV-Licht, dann geht der Ausschlag des Elektroskops zurück. Die Metallplatte entlädt sich, weil Elektronen abgelöst werden.

Dieser Effekt wurde gegen Ende des 19. Jh. beobachtet. Genaue experimentelle Untersuchungen lieferten die folgenden Ergebnisse:

- Die Anzahl der abgelösten Elektronen ist proportional zur Lichtintensität
- Die kinetische Energie der abgelösten Elektronen hängt nicht von der Lichtintensität, jedoch von der Frequenz des Lichtes ab.
- Unter einer bestimmten Grenzfrequenz f_G (über einer bestimmten Grenzwellenlänge λ_G) werden überhaupt keine Elektronen abgelöst, auch wenn die Lichtintensität noch so groß ist.

Diese experimentellen Ergebnisse lassen sich mit der elektromagnetischen Wellentheorie nicht erklären. Danach müßte nämlich die kinetische Energie der Elektronen von der Lichtintensität abhängen. Auch die Existenz einer Grenzfrequenz läßt sich nicht erklären. Erst im Jahre 1905 konnte *A. Einstein* mit seiner *Lichtquantenhypothese* den Photoeffekt erklären. Er nahm an, daß Licht aus *Lichtquanten* oder *Photonen* "besteht". Damit ist gemeint, daß die Energie des Lichtes in "Paketen" auftritt, also gequantelt ist. Licht ist ein Photonenstrom.

Energie eines Lichtquants oder Photons

$$E = h \cdot f$$

Beispiel A

Berechne die Energie eines Photons für Licht mit der Wellenlänge $\lambda = 0{,}5\ \mu\mathrm{m}$.

$$E = h\,f = \frac{h\,c}{\lambda} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{Js} \cdot 3 \cdot 10^{8}\ \mathrm{ms^{-1}}}{0{,}5 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{m}} = 3{,}98 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J} = 2{,}5\ \mathrm{eV}$$

Mit der Lichtquantenhypothese läßt sich der Photoeffekt folgendermaßen deuten. Die im Metall frei beweglichen Elektronen besitzen eine zu geringe Energie, um das Metall zu verlassen. Die Arbeit, die erforderlich ist, um die energiereichsten Elektronen abzulösen, nennt man Austrittsarbeit W_A.

Ein Photon verhält sich wie ein Teilchen. Trifft es auf ein Metallelektron, so kann es seine Energie h.f auf dieses übertragen. Das Photon existiert dann nicht mehr. Damit ein Elektron abgelöst werden kann, muß die Energie h.f des Photons mindestens gleich der nötigen Austrittsarbeit W_A sein.

Daraus ergibt sich für die Grenzfrequenz f_G :

$$h \cdot f_G = W_A$$

Die überschüssige Energie tritt als kinetische Energie E_{kin} des Photons auf:

$$h \cdot f = W_A + E_{kin}$$

Die Zahl der abgelösten Elektronen ist proportional der Photonenzahl. Diese wiederum ist proportional zur Lichtintensität. Die Austrittsarbeit ist charakteristisch für das betreffende Metall.

Beispiel B

Berechne die Grenzwellenlänge für Kupfer.

(1) $h f_G = W_A$ (2) $c = \lambda_G \cdot f_G$

$$\lambda_G = \frac{h\,c}{W_A} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{Js} \cdot 3 \cdot 10^{8}\ \text{ms}^{-1}}{4{,}84 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J}} = 2{,}56 \cdot 10^{-7}\ \text{m} = 0{,}256\ \mu\text{m}$$

λ_G liegt im UV-Bereich.

4.3 Comptoneffekt

Trifft ein Photon der Energie h.f0 auf ein freies Elektron, dann findet ein elastischer Stoß statt (Abb. 31.2). Dabei kommt es zu einer Energie- und Impulsübertragung. Der elastische Stoß läßt sich durch den Energie- und den Impulserhaltungssatz beschreiben. Das um den Winkel θ abgelenkte (gestreute) Photon besitzt nach dem Stoß eine geringere Frequenz und damit auch eine geringere Energie $h f$.

Bei zu geringer Frequenz der einfallenden Strahlung (sichtbares Licht) ist die relative Frequenzänderung äußerst gering. Erst im Röntgenbereich tritt eine gut beobachtbare Frequenzänderung auf. Dieser von *A. H. Compton* im Jahre 1923 entdeckte Effekt ist eine weitere Bestätigung für die Quantennatur der elektromagnetischen Strahlung. Einem Photon können eine bestimmte Energie und ein bestimmter Impuls zugeordnet werden.

4.4 Eigenschaften der Photonen

- Photonen einer monochromatischen Strahlung mit der Frequenz f besitzen die Energie $E = h f$.
- Photonen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus.
- Nach der Energie-Masse-Äquivalenz kann dem Photon eine Masse zugeordnet werden:

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h f}{c^2}$$

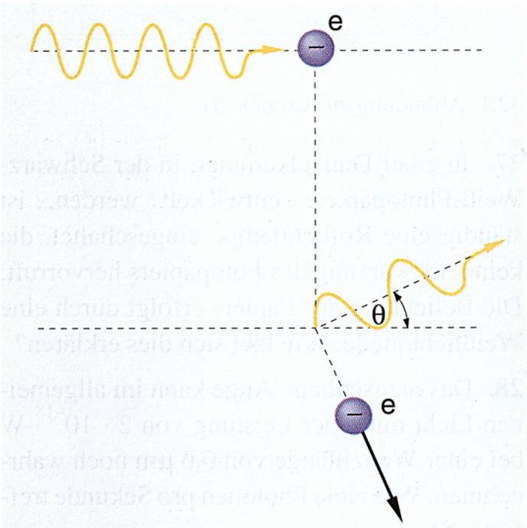
- Da sich Photonen mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, ist ihre Ruhemasse Null.
- Photonen besitzen einen Impuls.

Die für das Licht entwickelte Photonenvorstellung läßt sich auch auf die anderen Bereiche des elektromagnetischen Spektrums übertragen. Nicht nur das Licht, sondern alle elektromagnetischen Wellen sind gequantelt. Man spricht von *Strahlungsquantelung*.

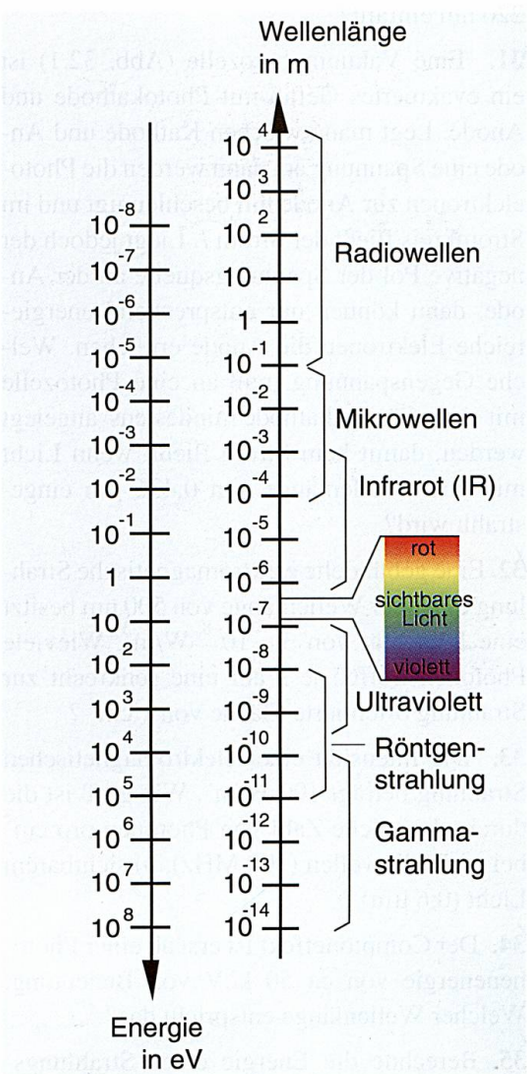
Abb. 31.3 zeigt das elektromagnetische Spektrum in Abhängigkeit von der Wellenlänge und der Energie der Strahlungsquanten. Die Energie der Strahlungsquanten nimmt mit zunehmender Frequenz bzw mit abnehmender Wellenlänge zu. γ-Strahlung besitzt energiereiche, Radiowellen besitzen energiearme Strahlungsquanten.

Cs	1,99
Pt	5,66
Cu	4,84
Zn	4,34

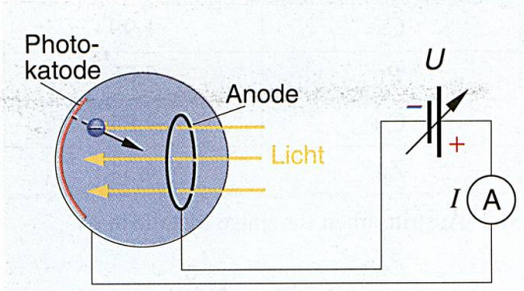
31.1 Austrittsarbeit für einige Metalle in eV



31.2 Compton-Effekt: Beim elastischen Stoß ist die Energieübertragung am größten, wenn die Stoßpartner annähernd massengleich sind. Erst bei Frequenzen im Röntgenbereich erreicht die Masse des Photons etwa jene des Elektrons. Nun erst kommt es zu einer nennenswerten Energieübertragung und damit zu einer gut beobachtbaren Frequenzänderung.



31.3 Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Energie der Strahlungsquanten



32.1 Abbildung zu Aufgabe 31

27. In einer Dunkelkammer, in der Schwarz-Weiß-Photopapiere entwickelt werden, ist ständig eine Rotlichtlampe eingeschaltet, die keine Schwärzung des Fotopapiers hervorruft. Die Belichtung des Papiers erfolgt durch eine Weißlichtquelle. Wie läßt sich dies erklären?

28. Das menschliche Auge kann im allgemeinen Licht mit einer Leistung von $2 \cdot 10^{-18}$ W bei einer Wellenlänge von 0,6 µm noch wahrnehmen. Wie viele Photonen pro Sekunde treffen auf?

29. Die Grenzwellenlänge für den Photoeffekt beträgt 640 nm. Berechne die Austrittsarbeit.

30. Wie groß ist die maximale kinetische Energie eines Photoelektrons von einer Zinkplatte, wenn Licht mit einer Wellenlänge von 220 nm einfällt?

31. Eine Vakuumphotozelle (Abb. 32.1) ist ein evakuiertes Gefäß mit Photokathode und Anode. Legt man zwischen Kathode und Anode eine Spannung an, dann werden die Photoelektronen zur Anode hin beschleunigt und im Stromkreis fließt der Strom I. Liegt jedoch der negative Pol der Spannungsquelle an der Anode, dann können nur entsprechend energiereiche Elektronen die Anode erreichen. Welche Gegenspannung muß an eine Photozelle mit einer Cäsiumkathode mindestens angelegt werden, damit kein Strom fließt, wenn Licht mit einer Wellenlänge von 0,436 µm eingestrahlt wird?

32. Eine gebündelte elektromagnetische Strahlung mit einer Wellenlänge von 500 nm besitzt eine Intensität von $3 \cdot 10^{-8}$ W/m^2. Wieviele Photonen treffen je s auf eine senkrecht zur Strahlung orientierte Fläche von 1 cm^2 ?

33. Die Intensität einer elektromagnetischen Strahlung beträgt 100 W/m^2. Wie groß ist die durchschnittliche Zahl von Photonen pro cm^3 bei a) Radiowellen (100 MHz), b) sichtbarem Licht (0,6 µm) ?

34. Der Comptoneffekt ist erst ab einer Photonenenergie von ca 50 keV von Bedeutung. Welcher Wellenlänge entspricht das?

35. Berechne die Energie eines Strahlungsquants für a) Mikrowellen (3 cm), b) Gammastrahlung ($2 \cdot 10^{-12}$ m).

4.5 Dualismus des Lichtes

Elektromagnetische Strahlung verhält sich einmal wie eine Welle und dann wieder wie Teilchen. Wellen- und Teilchenbild schließen einander allerdings aus. Um die Lichtausbreitung zu beschreiben, benützen wir das Wellenmodell. Vorgänge wie Interferenz, Reflexion, Brechung und Beugung werden mit Hilfe der Wellenoptik erklärt. Ein Grenzfall der Wellenoptik ist die Strahlenoptik. Sie gilt, wenn die Wellenlänge klein ist gegenüber den Abmessungen von Objekten. Trifft Licht jedoch auf Materie auf und wird es dabei in eine andere Energieform umgewandelt, dann tritt die Quantennatur ("Teilchennatur") des Lichtes in Erscheinung. Als Beispiele dafür haben wir den Photoeffekt und Comptoneffekt kennengelernt. So reicht etwa ein einziges Photon aus, um in einem vollkommen dunkel adaptierten menschlichen Auge einen Reiz auszulösen.

Durch elektromagnetische Strahlung wird Energie transportiert. Im Wellenbild gilt für die Intensität der Strahlung

$$I = \frac{\varepsilon_0 \, c \, E_0^{\,2}}{2} \quad .$$

Im Teilchenbild ergibt sich die Intensität als Energie des Photonenstroms, der pro Sekunde durch die Flächeneinheit hindurchtritt:

$$I = \frac{h f N}{A t} \qquad N \text{ ... Anzahl der Photonen}$$

Beispiel A

Die Intensität einer monochromatischen Strahlung mit einer Wellenlänge von 0,5 µm beträgt $2{,}5 \cdot 10^{-14}$ W/m^2 . Wie viele Photonen gehen pro Sekunde durch eine Fläche von 1 cm^2? Wie groß ist die Amplitude der elektrischen Feldstärke?

$$N = \frac{I A t \lambda}{h c} = \frac{2{,}5 \cdot 10^{-14}\ \text{Wm}^{-2} \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2 \cdot 1\text{s} \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-6}\ \text{m}}{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{Js} \cdot 3 \cdot 10^{8}\ \text{ms}^{-1}} = 6{,}28$$

$$E_0 = \sqrt{\frac{2I}{\varepsilon_0 c}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-14}\ \text{W/m}^2}{8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \text{As/Vm} \cdot 3 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}} = 4{,}34 \cdot 10^{-6}\ \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

6,28 Photonen / s · cm^2 ist ein Durchschnittswert, der sich nach langer Beobachtungszeit einstellt. Es ist nicht möglich, Zeit und Ort für ein einzelnes Photon anzugeben.

Aufgaben

26. Eine fotografische Schicht enthält AgBr-Kristalle. Diese benötigen eine Mindest-Photonenenergie von 2,8 eV, um ein Elektron freizusetzen. Welcher Wellenlänge des Lichtes entspricht das? Für welchen Bereich des sichtbaren Lichtes ist AgBr empfindlich?

Kontrollfragen

1. Welche Bedeutung hat das Plancksche Wirkungsquantum?
2. Wodurch unterscheiden sich die Energien im atomaren und im makroskopischen Bereich?
3. Erkläre den Photoeffekt.
4. Erkläre den Comptoneffekt.
5. Unter welchen Umständen zeigt Licht eine Wellen- bzw eine Teilchennatur?
6. Beschreibe die Eigenschaften der Photonen.
7. Wie läßt sich die Intensität einer Strahlung beschreiben?
8. Von welchen Größen hängt die Energie eines Strahlungsquants ab?

5. Bohrsches Atommodell

5.1 Die Bohrschen Postulate

Nach dem *Rutherfordschen Atommodell* umkreisen die negativen Elektronen den positiven Kern, wobei die *Coulombsche Anziehungskraft* die Ursache für die Kreisbewegung ist.

Nun ist aber die Kreisbewegung eine beschleunigte Bewegung, und beschleunigte Ladungen strahlen elektromagnetische Wellen ab. Wenn aber ein kreisendes Elektron Energie abstrahlt, dann verliert es Energie und stürzt in den Kern. Nach den Gesetzen der klassischen Physik (Newtonsche Mechanik und Elektrodynamik) gäbe es keine stabilen Atome. Eine erste Lösung des Problems gelang *Niels Bohr* im Jahre 1913. Er nahm an, daß die Gesetze der klassischen Physik für die Beschreibung im atomaren Bereich nicht genügen und daher abgeändert werden müssen. Die Überlegungen Bohrs werden durch die *Bohrschen Postulate* dargestellt:

• Elektronen bewegen sich auf Kreisbahnen um den Kern. Anstelle der unendlich vielen möglichen Kreisbahnen nach der klassische Physik, sind nur ganz bestimmte (diskrete) Bahnen erlaubt. Die Bewegung auf diesen erlaubten Bahnen ist entgegen den Gesetzen der klassischen Physik strahlungslos.

• Die Auswahl dieser diskreten, stabilen Bahnen erfolgt durch die *Quantelung* des *Drehimpulses L:*

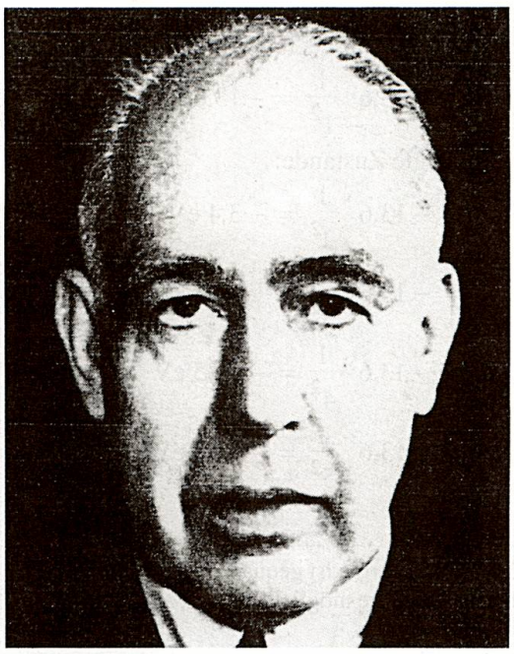
Quantenbedingung

$L = n \cdot h / 2\pi$ $\quad n = 1, 2, 3, 4, \ldots$ Hauptquantenzahl

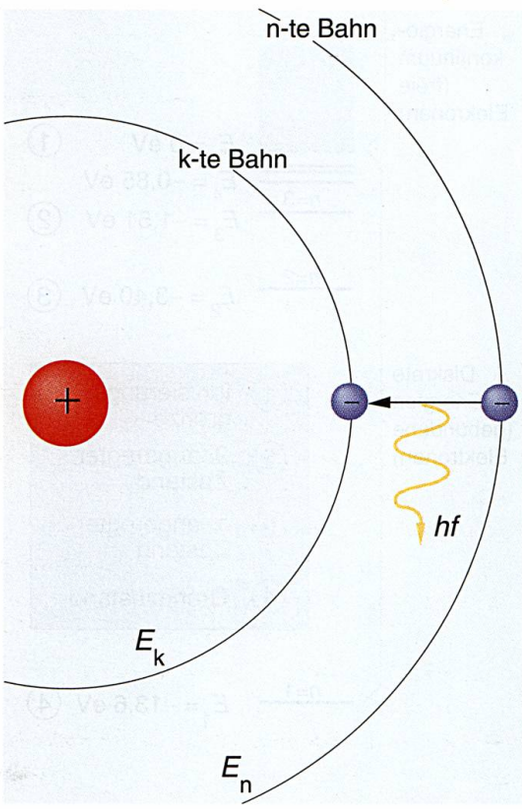
• Wechselt ein Elektron von einer höheren Bahn auf eine tiefere Bahn (von einem Zustand höherer Energie in einen Zustand niedriger Energie), dann wird die Energiedifferenz im allgemeinen in Form eines Photons abgegeben (Abb. 33.2):

Bohrsche Frequenzbedingung

$$h \cdot f_{n,k} = E_n - E_k$$



33.1 *Niels Bohr* (1885 - 1962; 1922 Nobelpreis)



33.2 Wechselt ein Elektron von der n-ten auf die k-te Bahn, wird die Energiedifferenz in Form eines Lichtquants abgestrahlt.

5.2 Das Wasserstoffatom

Für die n-te Bahn des Elektrons gilt (Abb. 33.3) :

(1) Zentripetalkraft F_Z = Coulombkraft F_C:

$$m\,\omega_n^2\,r_n = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\,r_n^{\,2}}$$

(2) Quantenbedingung:

$$L = n\frac{h}{2\pi} \quad \text{und} \quad L = I\,\omega = m\,r_n^{\,2}\,\omega \quad \Rightarrow \quad m\,r_n^{\,2}\,\omega_n = n\frac{h}{2\pi}$$

Durch die Quantenbedingung (2) wird die klassische Physik (1) eingeschränkt. Die zwei Gleichungen ermöglichen die Berechnung der Unbekannten r_n und ω_n.

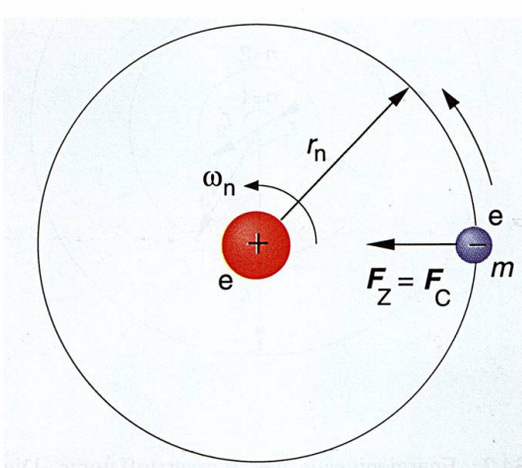
Der Bahnradius

Aus (1), (2) folgt für r_n:

$$r_n = \frac{h^2\,\varepsilon_0}{\pi\,m\,e^2}\cdot n^2 = \frac{(6{,}63\cdot 10^{-34}\ \text{Js})^2\cdot 8{,}85\cdot 10^{-12}\ \text{As}\cdot\text{V}^{-1}\,\text{m}^{-1}}{\pi\cdot 9{,}11\cdot 10^{-31}\ \text{kg}\cdot(1{,}60\cdot 10^{-11}\ \text{As})^2}\cdot n^2$$

Radius r_n der n-ten Bahn

$$r_n = 5{,}3\cdot 10^{-11}\cdot n^2\ \text{m}$$



33.3 Die Zentripetalkraft F_Z, die auf das Elektron wirkt, ist die Coulombkraft F_C.

Grundzustand:

$$E_1 = -13{,}6 \cdot \frac{1}{1^2} = -13{,}6 \text{ eV}$$

angeregte Zustände:

$$E_2 = -13{,}6 \cdot \frac{1}{2^2} = -3{,}4 \text{ eV}$$

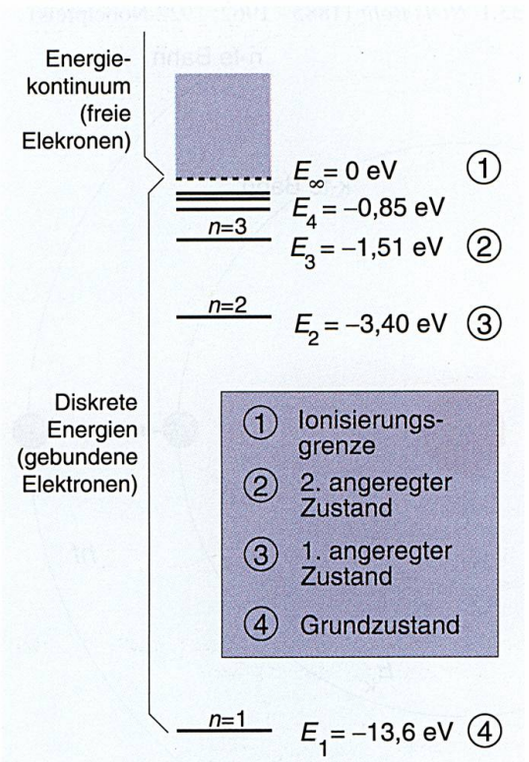
$$E_3 = -13{,}6 \cdot \frac{1}{3^2} = -1{,}51 \text{ eV}$$

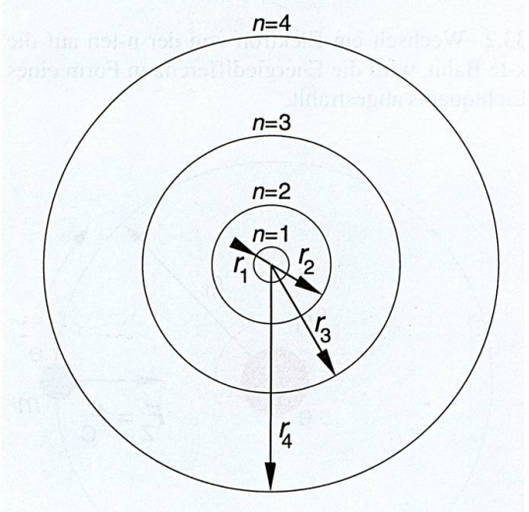
$$E_4 = -13{,}6 \cdot \frac{1}{4^2} = -0{,}85 \text{ eV}$$

$$E_5 = -13{,}6 \cdot \frac{1}{5^2} = -0{,}54 \text{ eV}$$

u.s.w.

34.1 Die Energie ist gequantelt. Es sind nur diskrete Energiewerte möglich.





34.2 Energieniveaus des Wasserstoffatoms. Die einzelnen Energiezustände sind durch horizontale Striche dargestellt.

Bei Zimmertemperatur befindet sich das Elektron auf der ersten (innersten) Bahn ($n = 1$), das Atom ist im *Grundzustand*. Für den Radius der innersten Bahn ergibt sich $r_1 = 5{,}3 \cdot 10^{-11}$ m. Der Durchmesser des H-Atoms beträgt damit etwa $1 \cdot 10^{-10}$ m und stimmt größenordnungsmäßig mit den aus anderen Überlegungen gewonnen Werten überein (Abschnitt 2). Alle höheren Bahnen des Elektrons ($n = 2, 3, 4, ...$) entsprechen den *angeregten Zuständen* des Atoms. Durch Energiezufuhr kann das Atom vom Grundzustand in einen angeregten Zustand übergehen.

Die Energiezustände

Das umlaufende Elektron besitzt kinetische Energie und im Feld des Atomkerns potentielle Energie. Es gilt:

$$(1)\ E_{kin,n} = \frac{m\, v_n^{\,2}}{2} \qquad (2)\ v_n = \omega_n \cdot r_n \qquad (3)\ r_n = \frac{h^2\, \varepsilon_o}{\pi\, m\, e^2} \cdot n^2$$

$$(1),(2),(3)\ E_{kin,n} = \frac{m\, e^4}{8\, h^2\, \varepsilon_o^{\,2}} \cdot \frac{1}{n^2}$$

Die potentielle Energie ist gleich der Arbeit, die erforderlich ist, um das Elektron aus unendlicher Entfernung in den Abstand r_n zu bringen:

$$E_{pot,n} = \int_\infty^{r_n} F_c \,\mathrm{d}\, r = \frac{e^2}{4\,\pi\,\varepsilon_0} \cdot \int_\infty^{r_n} \frac{\mathrm{d}\, r}{r^2} = \frac{e^2}{4\,\pi\,\varepsilon_0} \left[-\frac{1}{r} \right]_\infty^{r_n} = -\frac{e^2}{4\,\pi\,\varepsilon_0\, r_n}$$

Wird für r_n eingesetzt, erhält man:

$$E_{pot,n} = -\frac{m\, e^4}{4\, h^2\, \varepsilon_0^{\,2}} \cdot \frac{1}{n^2}$$

Daraus folgt für die Gesamtenergie E_n:

$$E_n = E_{kin,n} + E_{pot,n} = \frac{m\, e^4}{8\, h^2\, \varepsilon_0^{\,2}} \cdot \frac{1}{n^2} - \frac{m\, e^4}{4\, h^2\, \varepsilon_0^{\,2}} \cdot \frac{1}{n^2} = -\frac{m\, e^4}{8\, h^2\, \varepsilon_0^{\,2}} \cdot \frac{1}{n^2}$$

$$E_n = -\frac{9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \text{kg} \cdot (1{,}60 \cdot 10^{-19}\ \text{As})^2}{8 \cdot (6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{Js})^2 \cdot (8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \text{As V}^{-1}\,\text{m}^{-1})^2} \cdot \frac{1}{n^2} =$$

$$= -2{,}17 \cdot 10^{-18} \cdot \frac{1}{n^2}$$

Energie der n-ten Bahn in Joule: $E_n = -2{,}17 \cdot 10^{-18} \cdot \frac{1}{n^2}$

Energie der n-ten Bahn in eV: $E_n = -13{,}6 \cdot \frac{1}{n^2} \qquad n = 1, 2, 3, ...$

Es ist üblich, die einzelnen Energiezustände des Atoms durch horizontale Striche darzustellen, die man auch *Energieniveaus* nennt (Abb. 34.2).

Übergänge zwischen den Energieniveaus

Durch Energiezufuhr ΔE geht ein Atom in einen höheren Zustand über, es wird angeregt. Im allgemeinen geht es nach einer Zeit von ca. 10^{-8} s wieder in den Grundzustand über und emittiert ein Photon der Energie $h \cdot f$. Zwischen dieser Vorstellung der Lichtemission und jener nach der Elektrodynamik läßt sich folgende Verbindung herstellen: Ein Atom im angeregten Zustand verhält sich wie ein Dipol, der während des Übergangs in den Grundzustand Strahlung emittiert. Über die Bahn des Elektrons beim Übergang von einem Zustand in einen anderen, macht die Bohrsche Theorie keine Aussage.

Die Emission von Licht erfordert eine vorherige Anregung des Atoms. Bei Zimmertemperatur beträgt die thermische Energie der Gasatome ca. 0,025 eV. Diese Energie ist zu gering, um durch Zusammenstöße Atome anzuregen.

Alle Gasatome befinden sich daher bei Zimmertemperatur praktisch im Grundzustand und geben keine Strahlung ab. Eine thermische Anregung von Gasatomen erfordert hohe Temperaturen. Deshalb können die Gasmoleküle in der kinetischen Gastheorie als starre Kugeln ohne innere Struktur betrachtet werden. Eine andere Möglichkeit bietet eine elektrische Entladung. Dabei werden etwa Elektronen so stark beschleunigt, daß sie Gasmoleküle bei Zusammenstößen anregen können (siehe Franck-Hertz-Versuch und Abb. 35.1).
Mit Hilfe der Bohrschen Frequenzbedingung läßt sich die Frequenz des ausgestrahlten Lichtes berechnen:

$$h \cdot f_{n,k} = E_n - E_k = 2{,}17 \cdot 10^{-18} \cdot \frac{1}{n^2} - (-2{,}17 \cdot 10^{-18} \frac{1}{k^2}) =$$

$$= 2{,}17 \cdot 10^{-18} \cdot (\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2})$$

$$f_{n,k} = \frac{2{,}17 \cdot 10^{-18}}{6{,}63 \cdot 10^{-34}} \cdot (\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2}) = 3{,}29 \cdot 10^{15}\ \mathrm{s}^{-1} \cdot (\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2})$$

$$f_{n,k} = R \cdot (\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2}) \qquad R = 3{,}29 \cdot 10^{15}\ \mathrm{s}^{-1} \qquad \textit{Rydbergfrequenz}$$

Alle Übergänge in den Grundzustand ($k = 1$) werden als *Lyman-Serie* bezeichnet. Die Übergänge in den ersten angeregten Zustand ($k = 2$) heißen *Balmer-Serie*, und die Übergänge in den zweiten angeregten Zustand ($k = 3$) nennt man *Paschen-Serie* (Abb. 35.2).

➤ Beispiel A

Es sind die Frequenzen und Wellenlängen der Balmer-Serie zu berechnen. Für den Übergang in den ersten angeregten Zustand gilt:

$k = 2; n = 3, 4, 5, 6 \ldots$ $\qquad f_{n,2} = R \cdot (\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}) \qquad \lambda = \frac{c}{f}$

$f_{3,2} = 3{,}29 \cdot 10^{15} \cdot (\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}) = 4{,}57 \cdot 10^{14}\ \mathrm{Hz} \qquad \lambda_{3,2} = 6{,}56 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{m}$

(Rot)

$f_{4,2} = 3{,}29 \cdot 10^{15} \cdot (\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2}) = 6{,}17 \cdot 10^{14}\ \mathrm{Hz} \qquad \lambda_{4,2} = 4{,}86 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{m}$

(Blaugrün)

$f_{5,2} = 3{,}29 \cdot 10^{15} \cdot (\frac{1}{2^2} - \frac{1}{5^2}) = 6{,}91 \cdot 10^{14}\ \mathrm{Hz} \qquad \lambda_{5,2} = 4{,}34 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{m}$

(Blau)

$f_{6,2} = 3{,}29 \cdot 10^{15} \cdot (\frac{1}{2^2} - \frac{1}{6^2}) = 7{,}31 \cdot 10^{14}\ \mathrm{Hz} \qquad \lambda_{6,2} = 4{,}10 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{m}$

(Violett)

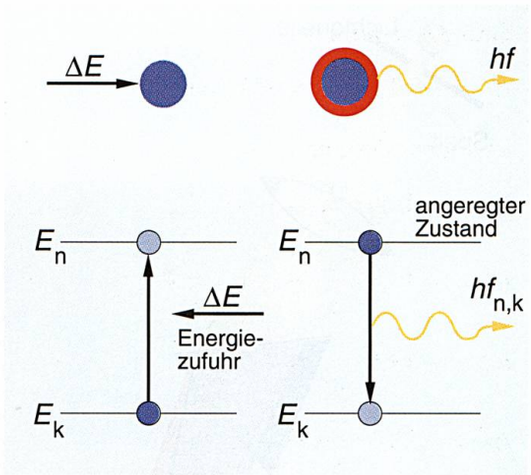
Dieser Übergang liegt an der Grenze zwischen sichtbarem Licht und UV-Licht. Alle höheren Frequenzen liegen im UV-Bereich. Für die Seriengrenze $n \to \infty$ erhält man:

$f_{\infty,2} = 3{,}29 \cdot 10^{15} \cdot \frac{1}{2^2}\ \mathrm{Hz} = 8{,}23 \cdot 10^{14}\ \mathrm{Hz} \qquad \lambda_{\infty,2} = 3{,}65 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{m}$

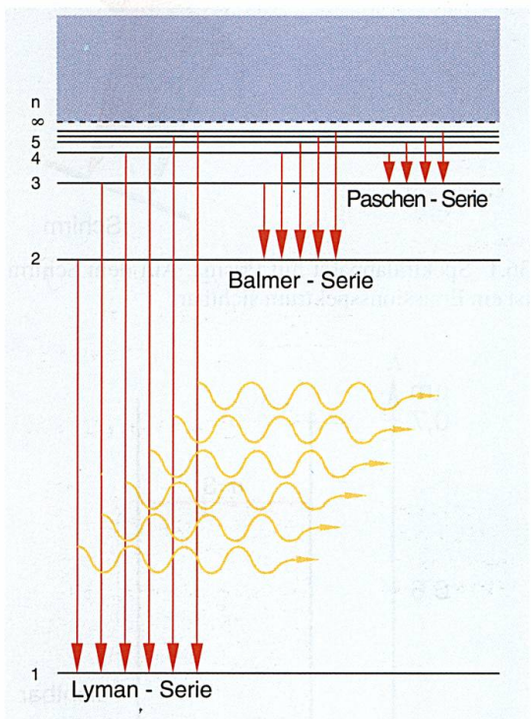
(Ultraviolett)

Je stärker ein Atom angeregt wird, desto höher ist die Hauptquantenzahl n. Für $n = \infty$ wird $E = 0$. Das Elektron ist dann nicht mehr an den Kern gebunden, das Atom ist ionisiert.

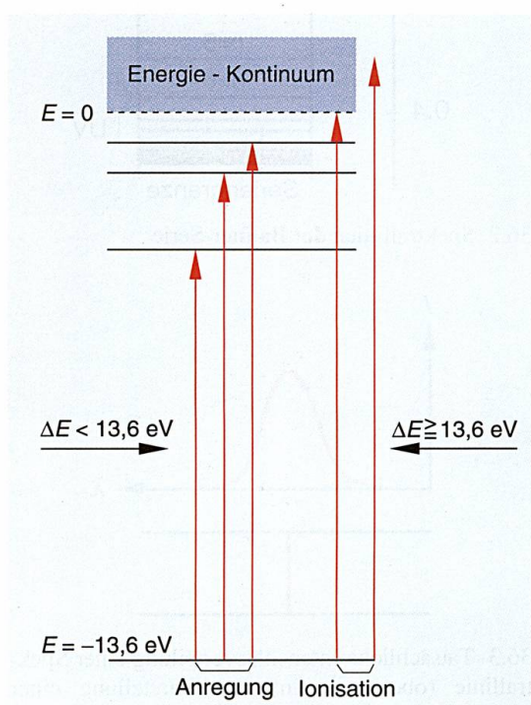
Die Ionisierungsenergie ΔE beträgt:
$\Delta E = E_\infty - E_1 = 0 - (-13{,}6\ \mathrm{eV}) = 13{,}6\ \mathrm{eV}$



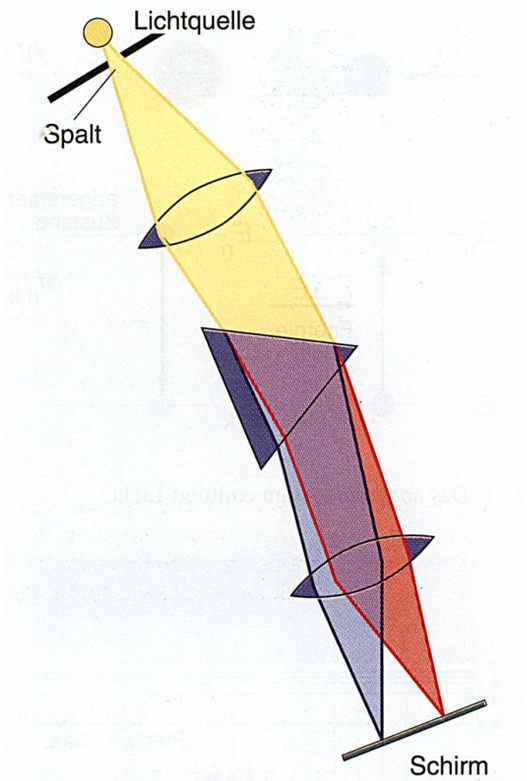
35.1 Das angeregte Atom emittiert Licht.



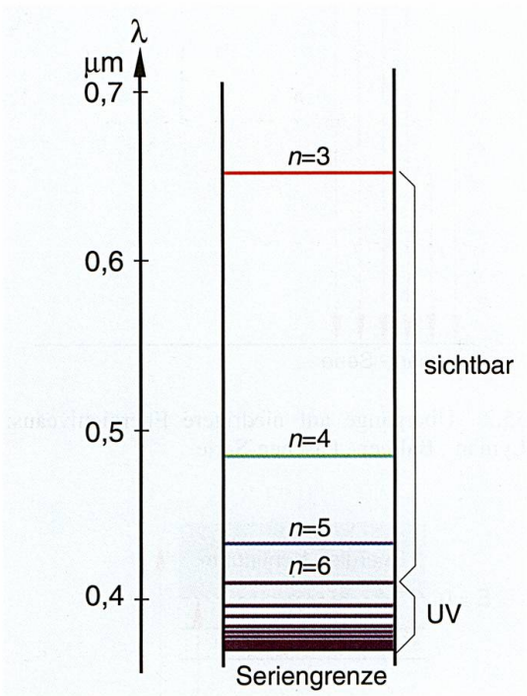
35.2 Übergänge auf niedrigere Energieniveaus: Lyman-, Balmer-, Paschen-Serie



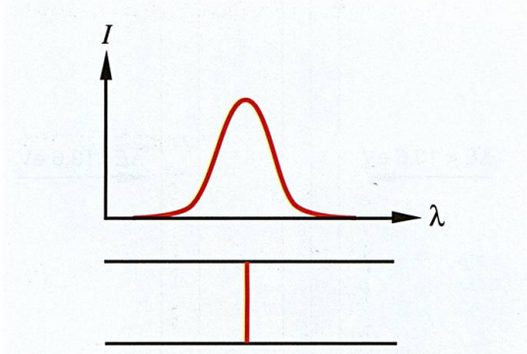
35.3 Anregung und Ionisation des Wasserstoffatoms



36.1 Spektralapparat mit Prisma. Auf dem Schirm ist ein Emissionsspektrum sichtbar.



36.2 Spektrallinien der Balmer-Serie



36.3 Tatsächliche Intensitätsverteilung einer Spektrallinie (oben); vereinfachte Darstellung einer Spektrallinie (unten). Die natürliche Linienbreite wird z.B. durch den Dopplereffekt, als Folge der thermischen Bewegung der Atome, vergrößert.

Ist die zugeführt Energie ΔE größer als 13,6 eV, so erhält das abgetrennte, jetzt freie Elektron noch kinetische Energie. Das an den Kern gebundene Elektron kann nur ganz bestimmte (diskrete) Energien aufnehmen. Das freie Elektron jedoch kann beliebige Energien aufnehmen. Daher befindet sich über den diskreten Energiestufen des Atoms ein Energiekontinuum (Abb. 35.3).

Spektren

Die Untersuchung des von einem angeregten Gas emittierten Lichtes erfolgt in einem Spektralapparat. In diesem wird die Strahlung in ihre spektralen Bestandteile, d.h. nach Wellenlänge (Frequenz), zerlegt. Es entsteht ein *Spektrum*. Abbildung 36.1 zeigt einen Spektralapparat mit einem Prisma. Das Spektrum eines selbstleuchtenden Körpers (zB eines Gases) bezeichnet man als *Emissionsspektrum*. Läßt man das Emissionsspektrum auf einen Schirm auffallen, dann erhält man eine Reihe von hellen Linien auf dunklem Hintergrund, die man als *Spetrallinien* bezeichnet. Abbildung 36.2 zeigt einen Ausschnitt aus dem Emissionsspektrum des H-Atoms. Im Bild sind die Spektrallinien auf hellem Hintergrund dargestellt. Die gemessenen Wellenlängen stimmen mit den berechneten Werten gut überein.

Die erste Spetrallinie im Wasserstoffspektrum - die rote Balmerlinie - wurde bereits in der Mitte des 19. Jh. entdeckt. Bis zu Beginn des 20. Jh. lagen zahlreiche Meßergebnisse vor. So hat z.B. Balmer im Jahre 1888 eine Formel angegeben, mit der die Frequenzen der Balmerserie berechnet werden konnten. Das Emissionsspektrum des Wasserstoffs gab einen deutlichen Hinweis, daß das Atom nur diskrete Energiezustände annehmen kann.

Atomspektren sind Linienspektren. Jede Spektrallinie entspricht einer bestimmten Wellenlänge (Frequenz) und gehört damit zu einem bestimmten Übergang im Energieniveauschema des Atoms.

Untersucht man eine Spektrallinie genauer, so findet man eine Intensitätsverteilung ähnlich einer Resonanzkurve (Abb. 36.3). Jede Spektrallinie besitzt eine natürliche Linienbreite. Eine Erklärung dafür liefert schon die klassische Physik (Abschnitt 3). Die natürliche Linienbreite ist durch die Dauer des angeregten Zustandes gegeben (vgl. auch Abschnitt 7).

Die Energieniveauschemata und die Spektren von Atomen mit mehr als einem Elektron sind wesentlich komplizierter als die des H-Atoms. Sie können mit Hilfe des Bohrschen Atommodells nicht berechnet werden. Bestimmte Mehrelektronenatome sind jedoch dem Wasserstoff sehr ähnlich. Dazu gehört die Gruppe der Alkalimetalle (Li, Na, ...). Diese besitzen eine abgeschlossene Elektronenschale und ein Außenelektron (Valenzelektron). Dieses Valenzelektron bestimmt im wesentlichen die optischen und chemischen Eigenschaften des Atoms. Es wird auch als Leuchtelektron bezeichnet. Diese Atome besitzen wasserstoffähnliche Spektren, die durch die Anregung des Valenzelektrons zustande kommen.

Jedes Element besitzt ein charakteristisches Emissionsspektrum.

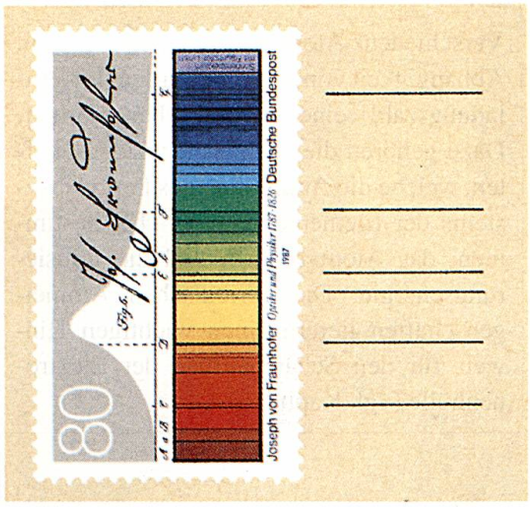
Eine Spektralanalyse kann daher zur Identifizierung von Elementen verwendet werden. Mit Hilfe der Spektralanalyse wird Licht von Sternen untersucht. Mit Hilfe elektrischer Funken können Spektren zur Materialuntersuchung erzeugt werden.

Läßt man weißes Licht durch Wasserstoffgas hindurchtreten und untersucht es anschließend mit einem Spektralapparat, so findet man im Spektrum des weißen Lichtes dunkle Linien. Die H-Atome absorbieren aus dem kontinuierlichen weißen Licht ganz bestimmte Frequenzen, die als dunkle Linien erscheinen. Man spricht von einem *Absorptionsspektrum*. Dabei treten die dunklen Linien des Absorptionsspektrums bei den gleichen Frequenzen auf wie die hellen Linien des Emissionsspektrums.

Atome absorbieren genau die Frequenzen (Wellenlängen), die sie auch emittieren.

Das Atom absorbiert dabei Photonen, deren Energie der Differenz zweier Energieniveaus entspricht. Dadurch wird das Atom angeregt und gibt nach kurzer Zeit ein Photon gleicher Energie ab. Die Absorption und anschließende Emission von Licht gleicher Frequenz nennt man *Resonanzfluoreszenz*. Das dabei emittierte Licht wird in alle Richtungen abgestrahlt. Da nur ein kleiner Teil davon durch den Spektralapparat erfaßt wird, sind die Absorptionslinien überhaupt sichtbar.

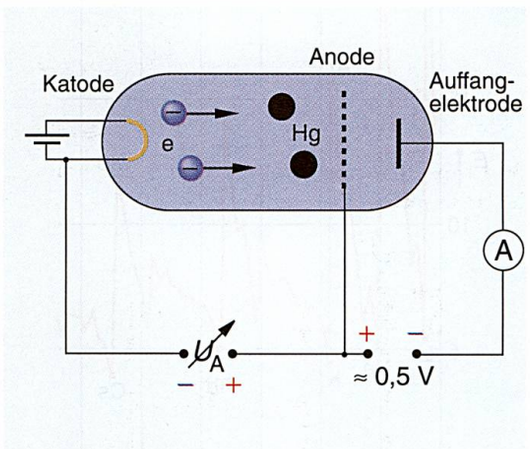
Damit die verschiedenen Absorptionslinien beobachtet werden können, muß das Gas auch Atome in verschiedenen angeregten Zuständen enthalten. Im Sonnenspektrum treten alle Absorptionslinien des Wasserstoffs auf, da Atome in allen möglichen angeregten Zuständen vorkommen. Diese Absorptionslinien heißen *Fraunhofersche Linien* (Abb. 37.1).



37.1 Gedenkmarke zum 200. Geburtstag des deutschen Physikers *Joseph von Fraunhofer*: Das Bild stellt das Sonnenspektrum mit Fraunhoferschen Linien dar. Von oben nach unten: Ca, H, Mg, Fe, Na, H.

5.3 Atomanregung durch Elektronenstoß

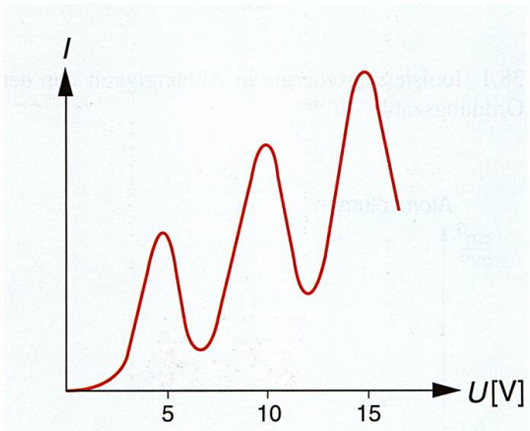
Im Jahre 1913 konnten *J. Franck* und *G. Hertz* experimentell beweisen, daß die Energieübertragung im atomaren Bereich gequantelt ist (Franck-Hertz-Versuch). In einem mit Hg-Dampf gefüllten Rohr werden die aus der Glühkatode austretenden Elektronen durch die Anodenspannung U_A beschleunigt (Abb. 37.2). Hinter der netzförmigen Anode befindet sich eine Auffangelektrode, die gegenüber der Anode um ca. 0,5 V negativ vorgespannt ist. Dadurch können nur solche Elektronen zur Auffangelektrode gelangen, die nach dem Durchfliegen der Anode eine Energie von mindestens 0,5 eV besitzen.



37.2 Franck-Hertz-Versuch

Bei der Versuchsdurchführung wird die Anodenspannung U_A erhöht und die Stromstärke I gemessen. (Abb. 37.3). Mit wachsender Anodenspannung steigt auch die Stromstärke an, da immer mehr Elektronen genügend Energie besitzen, um gegen die Auffangelektrode anzulaufen. Die Elektronen stoßen mit den Hg-Atomen elastisch zusammen und geben dabei keine Energie ab. Bei einer Spannung von 4,9 V beginnt die Stromstärke stark abzusinken. Der Grund liegt darin, daß die Elektronen jetzt mit den Hg-Atomen unelastisch zusammenstoßen und Energie an diese abgeben. Sie besitzen daher nicht mehr genügend Energie, um gegen die Auffangelektrode anlaufen zu können.

Erhöht man die Spannung weiter, dann steigt die Stromstärke wieder an. Bei 9,8 V sinkt die Stromstärke wieder stark ab. Bei dieser Spannung können die Elektronen auf ihrem Weg zur Anode zweimal Energie an Hg-Atome abgeben. Geben die Elektronen Energie ab, so führt dies zu einer Anregung der Hg-Atome. Nach kurzer Zeit kehrt das Hg-Atom unter Abgabe eines Photons in den Grundzustand zurück.



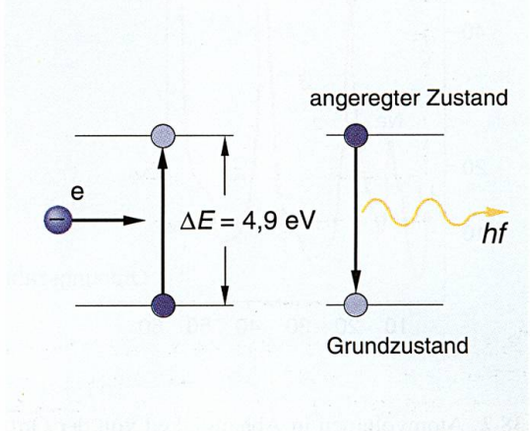
37.3 Zusammenhang zwischen Anodenspannung U_A und Stromstärke I beim Franck-Hertz-Versuch

Die emittierte Strahlung liegt im UV-Bereich und kann mit einem Spektralapparat gemessen werden. Der Franck-Hertz-Versuch zeigt, daß Atome nur ganz bestimmte Energiebeträge aufnehmen können. Daher müssen im Atom auch diskrete Energiestufen existieren.

5.4 Die Grenzen des Bohrschen Atommodells

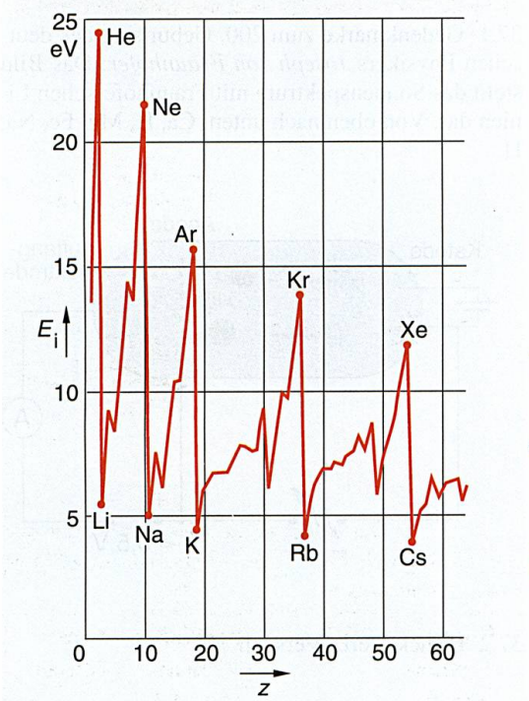
Das Bohrsche Atommodell
- liefert die Energieniveaus und damit die Wellenlängen der Spektrallinien des H-Atoms;
- liefert die Ionisierungsenergie des H-Atoms;
- macht keine Aussagen über die Intensität der Spektrallinien;
- ermöglicht nicht die Behandlung von Mehrelektronenatomen.

Der Grund für die Schwächen des Bohrschen Atommodells liegt in der Betonung der Teilchennatur der Elektronen und der damit verbundenen Annahme definierter Elektronenbahnen und Geschwindigkeiten. Eine Loslösung von diesem Modell erfolgt in der Quantenmechanik (Abschnitt 7).

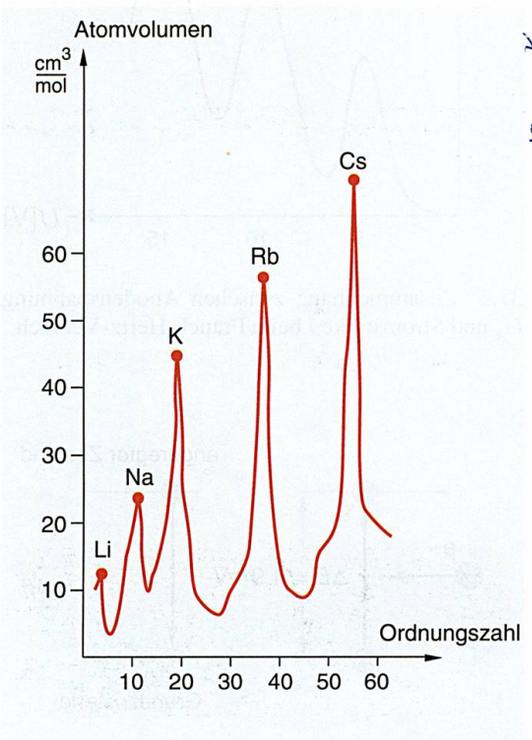


37.4 Energieaufnahme eines Hg-Atoms: 4,9 eV

Verschiedene Atomeigenschaften zeigen in Abhängigkeit von der Ordnungszahl (Kernladungszahl) einen periodischen Verlauf. Dazu gehören die chemischen Eigenschaften, welche die Anordnung des Periodensystems der Elemente (vgl. S. 112) bestimmen, das Atomvolumen und die Ionisierungsenergie. Die periodischen Atomeigenschaften liefern einen wichtigen Hinweis für den Schalenaufbau der Elektronenhülle (vgl. Kapitel 6).



38.1 Ionisierungsenergie in Abhängigkeit von der Ordnungszahl



38.2 Atomvolumen in Abhängigkeit von der Ordnungszahl

Das Bohrsche Atommodell bzw. die Erweiterung zum *Bohr-Sommerfeldschen Atommodell* (Abschnitt 6) ermöglicht aber einen einfachen, anschaulichen Zugang zum Atombau und zu den Atomspektren.

Das Bohrsche Korrespondenzprinzip

Bei sehr großen Quantenzahlen ist die Strahlungsfrequenz beim Übergang zwischen zwei benachbarten Energiezuständen praktisch gleich der Umlauffrequenz des Elektrons (siehe Aufgabe 42). Das heißt, die Strahlungsfrequenz läßt sich mit Hilfe der Elektrodynamik berechnen. Die Quantenphysik enthält die klassische Physik als Grenzfall für große Quantenzahlen. Bei großen Quantenzahlen werden auch die Atomradien sehr groß. Das Atom nähert sich makroskopischen Größenordnungen, und für diese gelten ja die Gesetze der klassischen Physik. Antennen im Hochfrequenzbereich besitzen makroskopische Abmessungen, daher gelten für sie die Gesetze der Elektrodynamik. Die Strahlungsfrequenz ist gleich der Schwingungsfrequenz der Ladungen.

Im atomaren Bereich gilt die Quantenphysik, sie enthält die klassische Physik als Grenzfall.

Aufgaben

36. Welche Wellenlänge muß eine Strahlung besitzen, um das H-Atom vom Grundzustand in den zweiten angeregten Zustand zu bringen?

37. Welche Mindestenergie ist zur Anregung von Wasserstoff bei Zimmertemperatur erforderlich?

38. Welche Wellenlänge besitzt Licht, das beim Übergang vom dritten in den zweiten angeregten Zustand des H-Atoms emittiert wird? In welchem Bereich des elektromagnetischen Spektrums liegt die Strahlung?

39. In einem Wasserstoffgas sind auch Atome im Zustand $n = 4$ angeregt.
a) Wie viele Spektrallinien können beobachtet werden? (Zeichne alle möglichen Übergänge ein!)
b) Versuche eine allgemeine Formel für alle möglichen Übergänge aufzustellen (Kombinatorik).

40. Berechne die obere und untere Grenzfrequenz und die dazugehörigen Wellenlängen der Lyman-Serie. In welchem Bereich des elektromagnetischen Spektrums liegt die Serie?

41. Unter welchen Bedingungen können H-Atome durch Strahlungsabsorption vom ersten in den zweiten angeregten Zustand gebracht werden?

42. Strahlungsfrequenz bei großen Quantenzahlen:
a) Welcher Bahnradius gehört zur Quantenzahl $k = 1000$?
b) Berechne die Strahlungsfrequenz für den Übergang vom Zustand $n = 1001$ in den Zustand $k = 1000$.
c) Berechne die Umlauffrequenz des Elektrons für die Bahn $k = 1000$.
d) Vergleiche und kommentiere die Ergebnisse!

Kontrollfragen

1. Erkläre die Bohrschen Postulate.
2. Was versteht man unter einem Energieniveauschema?
3. Erkläre die Lichtemission.
4. Was versteht man unter Anregung bzw Ionisation?
5. Was stellt eine Spektrallinie dar?
6. Was versteht man unter einem Emissions- bzw Absorptionsspektrum und wie werden diese erzeugt?
7. Worauf beruht die Spektralanalyse und wozu kann sie verwendet werden?
8. Erkläre den Franck-Hertz-Versuch und seine Bedeutung.

6. Atombau

6.1 Erweiterung des Bohrschen Atommodells

Nach dem Bohrschen Atommodell wird der Zustand des Elektrons durch die Hauptquantenzahl n gekennzeichnet. Für ein Mehrelektronenatom reicht dies nicht aus. Das Bohrsche Atommodell wurde daher von *Arnold Sommerfeld* erweitert. Er hat angenommen, daß sich die Elektronen, ähnlich wie Planeten um die Sonne, auch auf Ellipsenbahnen bewegen können. Zu einer Hauptquantenzahl n gehören dann neben Kreisbahnen auch Ellipsenbahnen verschiedener Exzentrizität, insgesamt n verschiedene Bahnformen (Abbildung 39.1).

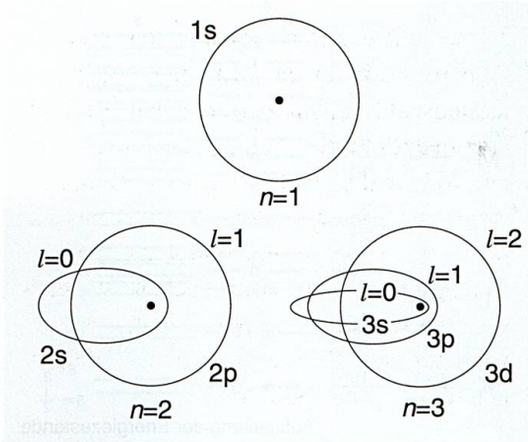
Die Hauptquantenzahl n bestimmt den Kreisradius oder die große Halbachse der Ellipse. Alle Bahnformen, die zur gleichen Hauptquantenzahl gehören werden zu einer *Schale* zusammengefaßt. Die Schalen werden mit den Buchstaben K für $n = 1$, L für $n = 2$, M für $n = 3$ usw. bezeichnet. Die verschiedenen Bahnformen - Ellipsen verschiedener Exzentrizität - unterscheiden sich durch den *Bahndrehimpuls*. Dieser ist, wie beim Bohrschen Atommodell, gequantelt und kann daher nur bestimmte Werte annehmen, die durch die *Bahndrehimpulsquantenzahl* l festgelegt werden. l kann n verschiedene Werte annehmen, nämlich 0, 1, 2, ... , $n - 1$. Die verschiedenen Bahnformen werden daher mit 0, 1, 2, 3, ... , n – 1 durchnumeriert. Verschiedene Bahnformen werden entsprechend den Werten $l = 0, 1, 2, 3, 4, ...$ mit den Kleinbuchstaben $s, p, d, f, ...$ gekennzeichnet. Die unterschiedlichen Bahnformen, die zu einer Schale gehören, werden auch als *Unterschalen* bezeichnet. Tabelle 39.2 zeigt, welche Unterschalen ($s, p, d, f, ...$) in den einzelnen Schalen ($K, L, M, ...$) möglich sind.

Nach der klassischen Physik haben die verschiedenen Bahnformen einer Schale auch die gleiche Energie. Im Atom jedoch besitzen Elektronen, die auf Ellipsenbahnen verschiedener Exzentrizität umlaufen, auch unterschiedliche Energien. Daher kommt es im Energieniveauschema zu einer *Aufspaltung* der Energiezustände, die zu einer bestimmten Hauptquantenzahl gehören (Abb. 39.3). Die verschiedenen Bahnen ($s, p, d, f, ...$) liegen nun nicht in einer Ebene, sondern haben im Raum unterschiedliche Orientierungen. Zu deren Festlegung benötigt man eine Vorzugsrichtung. Dazu eignet sich ein äußeres Magnetfeld. Denn ein umlaufendes Elektron stellt einen Kreisstrom dar und verhält sich daher wie ein kleiner Stabmagnet (magnetischer Dipol). Die Dipolachse steht normal auf die Bahnebene. Die Umlaufbahn kann sich nur in ganz bestimmten Richtungen zum äußeren Magnetfeld einstellen. Man spricht von *Richtungsquantelung*. Die möglichen Orientierungen der einzelnen Bahnen werden durch die *magnetische Quantenzahl* m bestimmt. Diese kann $2l + 1$ Werte annehmen (Tabelle 39.4).

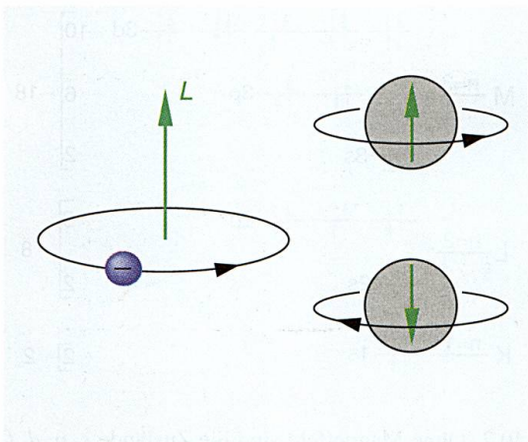
Ohne äußeres Magnetfeld haben die Bahnen mit gleichem n und gleichem l auch die gleiche Energie. Man sagt, sie sind *entartet*. Im Magnetfeld besitzen die verschieden orientierten Bahnen unterschiedliche Energien. Es kommt also zu einer Aufspaltung der Energiezustände s, p, d, f, ... in jeweils $2l + 1$ Zustände.

Ein Elektron besitzt, unabhängig vom Bahndrehimpuls, auch einen Eigendrehimpuls, der als *Spin* bezeichnet wird. Mit dieser Eigenrotation der Ladung ist auch ein magnetischer Dipol verbunden. In einem äußeren Magnetfeld gibt es zwei Orientierungen für den Spin, nämlich parallel oder antiparallel. Dies wird durch die *Spinquantenzahl* s ausgedrückt, die die Werte – 1/2 und 1/2 annehmen kann. Es kommt dadurch zu einer weiteren Aufspaltung der Energiezustände. Jede Linie in Abb. 40.1 rechts gibt einen möglichen Energiezustand für ein Elektron an. Jeder Elektronenzustand ist durch die vier Quantenzahlen n, l, m, s eindeutig charakterisiert. Im Jahre 1925 stellte der österreichische Physiker *Wolfgang Pauli* ein Ausschließungsprinzip - das *Pauli-Prinzip* - auf.

In einem Atom können sich niemals zwei Elektronen im selben Zustand befinden. Sie dürfen nicht in allen vier Quantenzahlen n, l, m, s übereinstimmen.



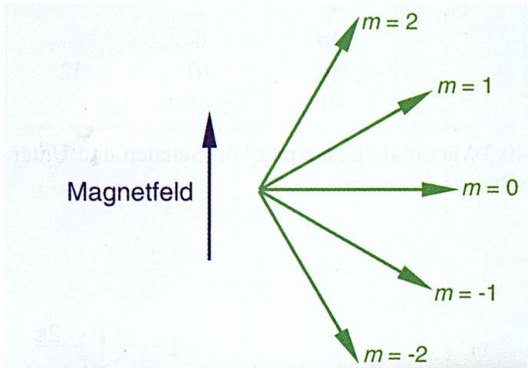
39.1 Nach dem Bohr-Sommerfeldschen Atommodell gehören zu jeder Hauptquantenzahl ($n > 1$) verschiedene Bahnformen.



39.2 *Links:* Das umlaufende Elektron besitzt den Bahndrehimpuls *L*. - *Rechts:* Die zwei möglichen Spinorientierungen

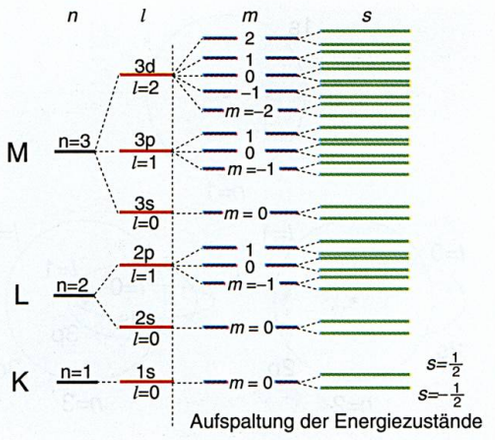
Hauptquantenzahl n	Schale	Drehimpulsquantenzahl l	Unterschale
1	K	0	1s
2	L	0 1	2s 2p
3	M	0 1 2	3s 3p 3d

39.3 Die unterschiedlichen Unterschalen einer Schale

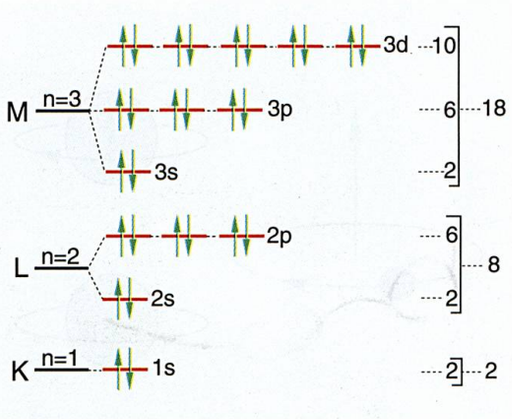


Bahnform	Bahndrehimpulsquantenzahl l	Anzahl der möglichen Orientierungen der Bahn ($2l+1$)	Magnetische Quantenzahl m
s	0	1	0
p	1	3	-1, 0, 1
d	2	5	-2, -1, 0, 1, 2

39.4 Die möglichen Bahnorientierungen der *d*-Unterschale sind durch die Orientierungen des Bahndrehimpulsvektors dargestellt.



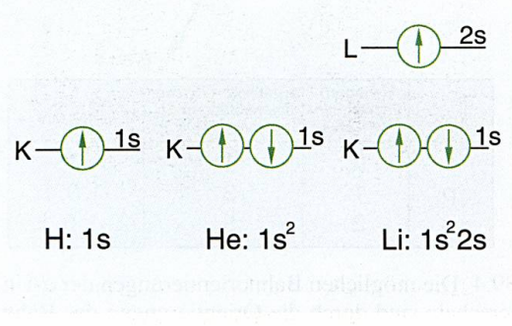
40.1 Mögliche Aufspaltung der Energieniveaus



40.2 Ohne Magnetfeld sind die Zustände *s, p, d, f,* ... entartet.

Schale	Unterschale	maximale Besetzung der Unterschale	maximale Besetzung der Schale
K	1s	2	2
L	2s 2p	2 6	8
M	3s 3p 3d	2 6 10	18
N	4s 4p 4d 4f	2 6 10 14	32

40.3 Maximale Besetzung von Schalen und Unterschalen



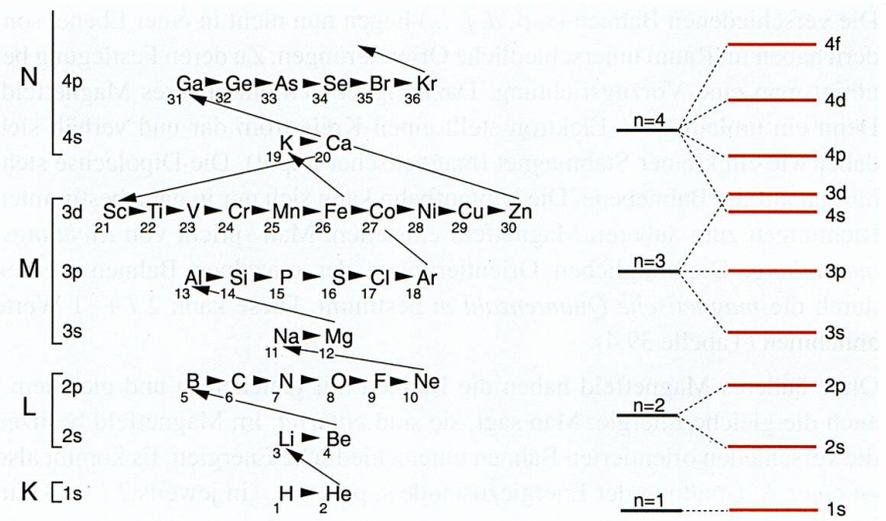
40.4 Elektronenkonfiguration von H, He, Li

Die im Magnetfeld aufgespaltenen Zustände (Abb. 40.1) fallen ohne Magnetfeld zusammen (Abb. 40.2). Das heißt, die Zustände *s, p, d, f,* ... sind entartet. Die Aufspaltung im Magnetfeld zeigt, mit wie vielen Elektronen sie besetzt werden können.

6.2 Das Aufbauprinzip

Durch schrittweise Erhöhung der Kernladungszahl um eine Einheit und durch den Einbau eines weiteren Elektrons läßt sich vom Wasserstoffatom ausgehend das Periodensystem erklären. Jedes Elektron ist so einzubauen, daß die Energie möglichst gering und das Pauli-Prinzip erfüllt ist. Wasserstoff enthält ein Elektron in der *K*-Schale. Helium besitzt zwei Elektronen in der *K*-Schale, die damit abgeschlossen ist. Beim Lithium kommt das dritte Elektron in die L-Schale (2 *s*-Unterschale). Es besitzt die Elektronenkonfiguration $1\,s^2\,2\,s$ (Abb. 40.4).

Abb. 40.5 links zeigt die Elektronenverteilung für einen Teil des Periodensystems. Bis zum Element Ar werden alle Unterschalen in der erwarteten Reihenfolge besetzt. Nach dem Element Ar wird jedoch nicht die 3*d*-Unterschale besetzt, sondern die 4s-Unterschale. Der Grund liegt darin, daß der 4*s*-Zustand energetisch tiefer liegt als der 3*d*-Zustand (Abb. 40.5 rechts). Dieses Ergebnis liefert aber erst die Quantenmechanik. Von großer Bedeutung für die Entwicklung der Vorstellung über den Atombau war die Ionisierungsenergie. Sie liefert ein deutliches Bild vom Schalenaufbau der Elektronenhülle. Die Edelgase (He, Ne, Ar, Kr, Xe) erfordern die höchsten Ionisierungsarbeiten. Sie besitzen bis auf He eine abgeschlossene *p*-Unterschale und damit eine mit 8 Elektronen besetzte Schale. Diese besitzt eine besonders hohe Stabilität (Edelgaskonfiguration). Die Edelgase sind chemisch sehr träge. Für die Alkaliatome (Li, Na, K, Rb, Cs) ist die Ionisierungsarbeit am kleinsten. Sie besitzen ein einziges Elektron außerhalb einer abgeschlossenen Edelgasunterschale. Dieses Elektron ist sehr locker gebunden.



40.5 *Links:* Elektronenverteilung für einen Teil des Periodensystems - *rechts:* Der 4 s-Zustand liegt energetisch tiefer als der 3 d-Zustand.

Aufgaben

43. Stelle eine Formel auf, mit der die maximale Besetzungszahl einer Schale in Abhängigkeit von der Hauptquantenzahl n berechnet werden kann.

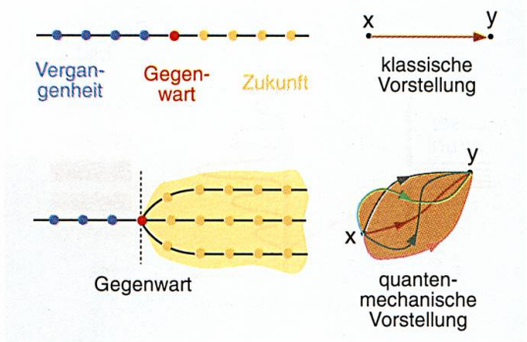
44. Schreibe die Elektronenkonfiguration für Na an.

Kontrollfragen

1. Erkläre die Bedeutung der vier Quantenzahlen.
2. Was sagt das Pauli-Prinzip aus?
3. Wie viele Bahnformen sind in der *N*-Schale ($n = 4$) möglich und wie werden sie bezeichnet?

7. Quantenmechanik

Die Quantenmechanik revolutionierte ähnlich der Relativitätstheorie das Weltbild der Physik. Die Newtonsche Mechanik lieferte die Beschreibung der Vorgänge in der sichtbaren Welt. Die Pfeiler der Physik Newtons sind der *Determinismus* und die *Objektivität*. Der Determinismus ist die Lehre von der eindeutigen Bestimmtheit des Geschehens durch Ursachen. Das Weltgeschehen läuft wie ein Uhrwerk nach strengen Gesetzen und innerhalb unverrückbarer Grenzen ab. *Objektivität* ist die Annahme, daß Körper objektiv existieren, auch wenn man sie nicht direkt beobachtet. Schließt man die Augen, sollen sie noch immer "vorhanden" sein.
Die genaue Kenntnis des Zustandes (Masse, Lage und Geschwindigkeit aller Teilchen, herrschende Kräfte zwischen ihnen) eines Geschehens zu einem bestimmten Zeitpunkt erlaubt es, die Vorgänge in der Vergangenheit zu berechnen bzw. die Zukunft vorherzusagen.
Beschreibt man die Bahn eines Elektrons, so haben wir es nach der klassischen Vorstellung mit einem Teilchen zu tun, das sich vom Ort *X* zum Ort *Y* bewegt Abb. 41.1). Nach der quantenmechanischen Vorstellung ist ein Elektron ein Zustand, der an einem bestimmten Ort mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auftritt.



41.1 Nach der klassischen Vorstellung läuft das Geschehen "wie am Schnürchen ab". Vergleicht man die Abläufe im Naturgeschehen mit einer Schnur, so sind die Knoten in der Schnur nicht rein zufällig, sondern durch Gesetzmäßigkeiten bestimmt. - Die quantenmechanische "Schnur" ist in der Vergangenheit festgelegt, die Gegenwart wird durch Messungen bestimmt. Für die Zukunft ist nur die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Ereignisses bestimmbar.

7.1 Der Welle-Teilchen-Dualismus

William Bragg, britischer Nobelpreisträger für Physik, meinte zum Welle-Teilchen-Dualismus: „Das ist ganz einfach: Montag, Mittwoch und Freitag unterrichten wir Wellentheorie, Dienstag, Donnerstag und Samstag Korpuskulartheorie." - Beugungs- und Interferenzerscheinungen des Lichtes lassen sich durch das Wellenbild beschreiben. Photoeffekt und Comptoneffekt konnten mit Hilfe des Photonenmodells erklärt werden. Einstein sagte voraus, daß sich Photonen(Lichtquanten) wie Teilchen mit einem Impuls $p = h / \lambda$ verhalten. Es ergab sich somit das scheinbare Paradoxon: Licht zeigt sowohl Teilcheneigenschaften als auch Welleneigenschaften.
Louis de Broglie stellte nun die Forderung auf, daß auch Teilchen mit nicht verschwindender Ruhemasse, wie das Elektron, unter bestimmten Bedingungen Wellencharakter besitzen:

41.2 *Louis de Broglie* (1892 - 1987; 1929 Nobelpreis)

De-Broglie-Wellenlänge

$$\lambda = \frac{h}{m\,v} = \frac{h}{p}$$

$m\,v$ ist der Impuls p des Teilchens

Man spricht in diesem Zusammenhang auch von De-Broglie-Wellen. Die Vermutung de Broglies konnte 1927 durch *Davisson* und *Germer* nachgewiesen werden. Sie zeigten, daß Elektronen wie Wellen interferieren können. Davisson und Germer gelang die Beugung von Elektronenstrahlen an einem Zinkkristall; weitere Versuche wurden mit Metallfolien durchgeführt. Es zeigten sich Beugungsringe wie bei der Verwendung von Röntgenstrahlen (Abb.41.4).

41.3 *C.J. Davisson* (1881 - 1958; Nobelpreis 1937) und *L.J. Germer* (1886 - 1971)

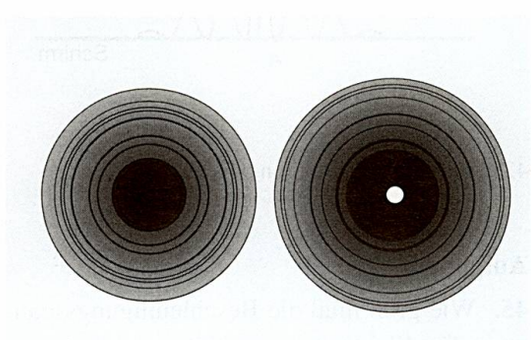
Beispiel A

Berechne die De-Broglie-Wellenlänge eines Elektrons bei einer Beschleunigungsspannung von 800 V. (Die relativistischen Effekte dürfen bei dieser Spannung vernachlässigt werden.)

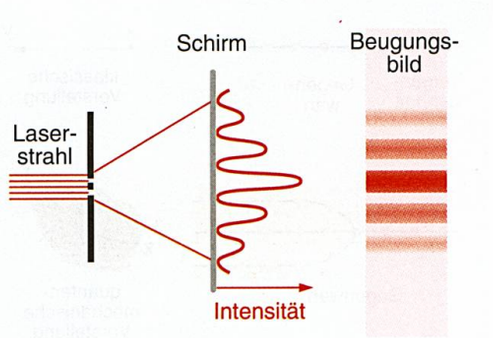
$$(1)\ e\,U = \frac{m\,v^2}{2} \Leftrightarrow v = \sqrt{\frac{2\,e\,U}{m}} \qquad (2)\ \lambda = \frac{h}{m\,v}$$

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2\,e\,m\,U}} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{Js}}{\sqrt{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{As} \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \text{kg} \cdot 800\ \text{V}}} =$$

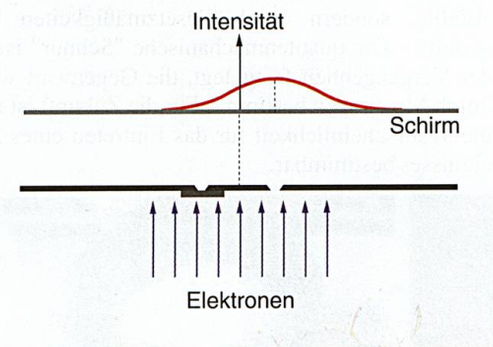
$$= 0{,}043\ \text{nm}$$



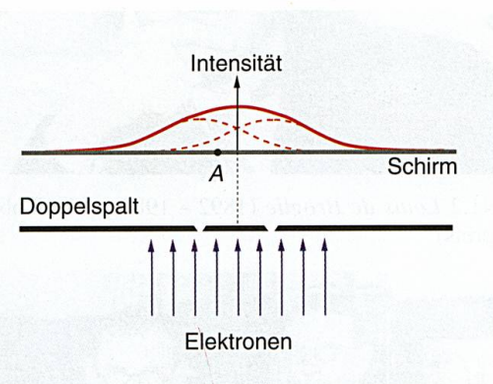
41.4 Beugungsbilder von Röntgenstrahlen (links) und von Elektronenstrahlen (rechts) an einer Silberfolie



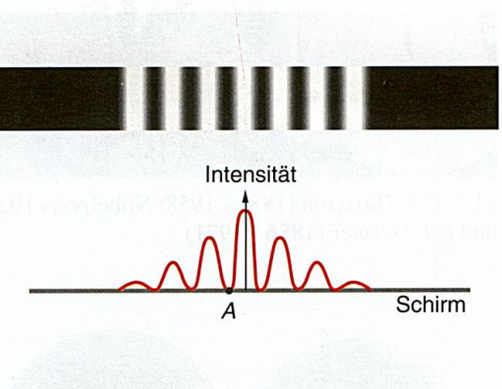
42.1 Doppelspaltexperiment mit einem Laser-Strahl



42.2 Schließt man einen Spalt, liefert das Experiment eine Einzelspalt-Beugungsfigur.



42.3 Die klassisch erwartete Elektronenverteilung bei zwei geöffneten Spalten



42.4 Doppelspalt-Beugungsfigur

Aufgaben

45. Wie groß muß die Beschleunigungsspannung für Elektronen gewählt werden, damit die De-Broglie-Wellenlänge 0,06 nm beträgt?

46. Berechne die Wellenlänge von Elektronen, deren Geschwindigkeit 0,005 c beträgt!

Doppelspaltexperiment

Aus der Wellenoptik ist folgender Versuch bekannt:

Ein Doppelspalt wird von einem Laserstrahl getroffen; das hindurchtretende Licht liefert auf einem Schirm eine Beugungsfigur (Abb. 42.1).

Versuchsanordnung

Der Welle-Teilchen-Dualismus tritt nicht nur bei Lichtquanten, sondern auch bei Elektronen auf. Dies kann auf folgende Weise demonstriert werden:
Ein geeigneter Doppelspalt, bei welchem ein Spalt vorerst verdeckt ist, wird von einem Elektronenstrahl getroffen. Jener Anteil des Strahls, der den Spalt passiert, trifft auf einen Detektor, einen Leuchtschirm, bei welchem jedes auftreffende Elektron einen Lichtblitz auslöst. Man erhält eine Beugungsfigur für den Einzelspalt (Abb. 42.2).
Bei Öffnung des zweiten Spaltes wird man - bei klassischer Berechnung - beispielsweise an der Stelle A ein Anwachsen der Zahl der auftreffenden Elektronen erwarten (Abb.42.3). Paradoxerweise stellt man aber ein Sinken der Zählrate der Lichtblitze auf Null fest; es bildet sich an dieser Stelle ein Minimum aus. Schließt man nun den zweiten Spalt, werden an dieser Stelle wieder Elektronen gezählt.
Dies heißt mit anderen Worten: „Teilchen vom ersten Spalt plus Teilchen vom zweiten Spalt liefert an der Stelle eines Minimums kein Teilchen." Dies ist nach klasssischer Betrachtung nicht zu deuten.
Sind beide Spalte geöffnet, erhält man die Beugungsfigur für einen Doppelspalt (Abb. 42.4).
Bei der Lösung dieses Problems setzen wir voraus, daß das Elektron vor dem Doppelspalt nicht in zwei Stücke geteilt wird, die sich nach dem Passieren wieder zusammensetzen (Prinzip der Unteilbarkeit von Elementarteilchen).

Wenn jedes Elektron an der Entstehung der Beugungsfigur beteiligt ist, muß es von beiden Spalten beeinflußt sein.

Die Versuchsanordnung wird nun so geändert, daß an jedem Spalt mit einem Detektor das Passieren eines Elektrons registriert wird. Damit kann erwartungsgemäß festgestellt werden, daß ein Elektron nur durch einen Spalt geht, aber nicht durch beide. Die Überraschung dabei ist, daß nun keine Doppelspalt-Beugungsfigur auftritt.

Zusammenfassung der Versuchsergebnisse:
Wird experimentell nicht festgestellt, welchen Spalt ein Elektron passiert, erhält man eine Beugungsfigur für den Doppelspalt. Wird experimentell gemessen, durch welchen Spalt das Elektron fliegt, geht die Doppelspalt-Beugungsfigur verloren.

Dies bedeutet, daß durch die Messung der Elektronen am Spalt die Versuchsergebnisse beeinflußt werden. Die Messung ist somit ein Teil des Prozesses.

7.2 Wahrscheinlichkeitswelle

Materiewellen

Lichtquanten, Elektronen und andere Elementarteilchen können sowohl Wellen- als auch Teilchencharakter besitzen. Es stellt sich nun die Frage, wie die Welleneigenschaften der Materie beschrieben werden können.

Zu diesem Zweck betrachten wir vorerst eine ebene Welle, die sich in x-Richtung ausbreitet. Das kann durch die folgende Wellengleichung beschrieben werden (Abb. 43.1):

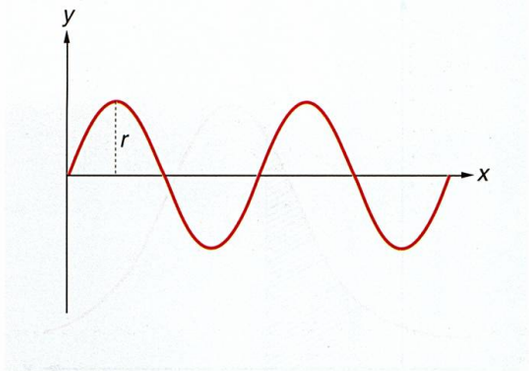
$$y = r \cdot \sin \omega \left(t - \frac{x}{v}\right)$$

Überlagert man zwei Wellen gleicher Amplitude, aber unterschiedlicher Frequenz, kommt es an bestimmten Stellen zur Addition der beiden Einzelamplituden (Verstärkung), an anderen zu einer Subtraktion (Auslöschung). Man erhält als Ergebnis wieder eine Welle, die in gewissen Bereichen verstärkt, in

anderen abgeschwächt wird. Die resultierende Welle besteht aus einzelnen Wellenpaketen. Die Geschwindigkeit eines Wellenpaketes (einer Wellengruppe) wird als Gruppengeschwindigkeit bezeichnet (Abb. 43.2).

Erhöht man die Anzahl der Wellen mit geringen Frequenzunterschieden, tritt die Amplitude gegenüber ihrer Umgebung immer markanter hervor: Es ist durch Überlagerung vieler Wellen möglich, eine stärkere Lokalisierung zu erreichen. Die resultierende Amplitude ψ ist räumlich konzentriert (Abb. 43.3). Diese Lokalisierung läßt nun einen Vergleich mit der Teilchenvorstellung zu, denn Teilchen sind ebenfalls in einem bestimmten Raumbereich streng lokalisiert. Die Gruppengeschwindigkeit der Welle ist dann identisch mit der Teilchengeschwindigkeit. Dies legt eine Verbindung von Wellenbild und Teilchenbild nahe, nämlich die Gleichwertigkeit von Teilchen und Wellenpaketen.

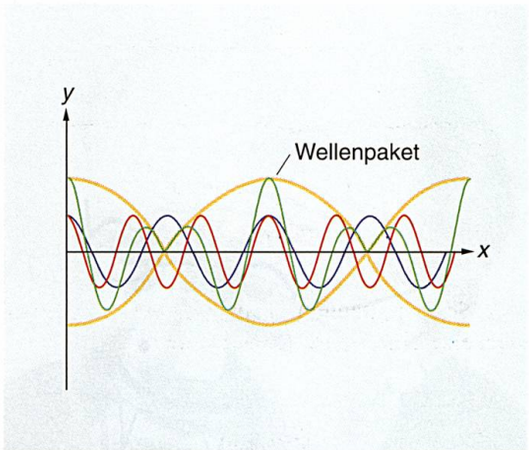
Diese Beschreibung einer Materiewelle ist allgemein *nicht* möglich, da die Wellenpakete ihre Form nicht streng behalten können und "auseinanderfließen". Die Lösung dieser Frage soll der nächste Versuch und dessen Interpretation bringen.



43.1 Die Wellengleichung gibt die Auslenkung y im Abstand x vom Ursprung zum Zeitpunkt t wieder.

Wahrscheinlichkeitswelle

Aus den Beugunsversuchen von Licht an einem Spalt wissen wir, daß das erzeugte Beugungsbild Streifen unterschiedlicher Intensität liefert, also eine Intensitätsverteilung. Die Intensität einer Welle ist nach der Wellentheorie proportional zum Quadrat der Amplitude. Bei der Beugung wird die gesamte Intensität durch das Auftreten von Interferenz räumlich verteilt. Aber auch bei der Beugung von Elektronen an einem Spalt haben wir eine Intensitätsverteilung erhalten.



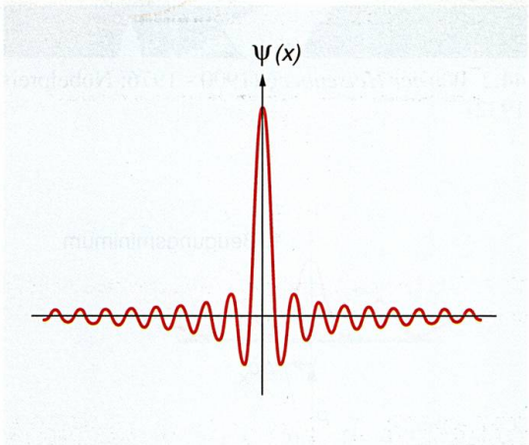
43.2 Wellenpaket

Versuch (Abb. 43.4)

Ein Elektron mit konstanter Geschwindigkeit v wird durch einen Einzelspalt geschickt und trifft auf einen Leuchtschirm. Dabei löst es einen Lichtblitz aus. Das Elektron, als Welle betrachtet, liefert eine Intensität I. Die Intensität dieser Welle ist proportional zum Quadrat ihrer Amplitude: $I \sim \psi^2$.

Der Leuchtschirm selbst ist eine Meßvorrichtung, bei der ein auftreffendes Elektron lokalisiert wird, d.h. seine Auftreffstelle ist bekannt.
Führt man den Versuch nur einige Male durch, erhält man jedoch keineswegs das erwartete Beugungsbild. Erst durch sehr viele Wiederholungen oder bei gleichzeitiger Beugung sehr vieler Elektronen, tritt das Bild auf.

Die Lokalisation der Elektronen ist somit *stochastisch* verteilt. Den genauen Auftreffpunkt eines Elektrons kann niemand vorhersagen. Stochastische Prozesse sind nicht-deterministische Vorgänge mit einer Zufallskomponente.

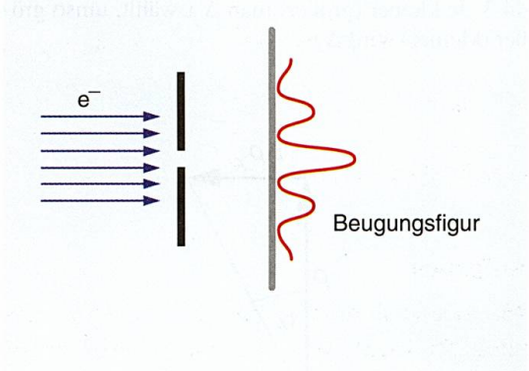


43.3 Die resultierende Ampiltude ψ vieler Wellen mit geringen Frequenzunterschieden

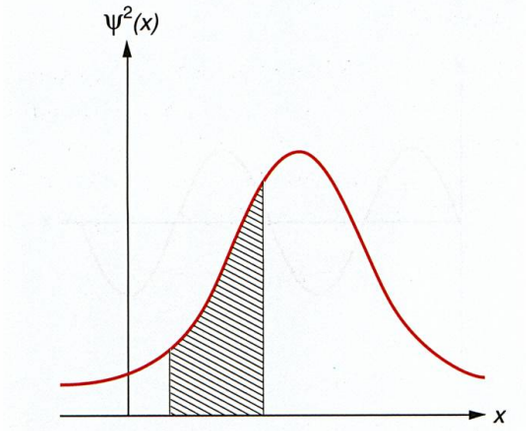
Vergleicht man die Durchführung eines Experimentes in der Quantenmechanik mit einem Würfelspiel, so kann die Augenzahl eines Wurfes nicht vorhergesagt werden. Es kann jedoch die Wahrscheinlichkeit angegeben werden, mit der eine Augenzahl auftritt. Dies ist bei einem homogenen Würfel 1/6. Werden nun 6 Würfe durchgeführt, wird im allgemeinen nicht jede Augenzahl erscheinen. Bei 1000 Würfen jedoch kann bereits eine Gleichverteilung auf alle 6 Augenzahlen erkannt werden.

Nun kehren wir zu unserem Einzelspaltexperiment zurück. Welle und Teilchenbild lassen sich durch folgende Vorstellung verbinden: Die Intensität des Beugungsbildes in einem beliebigen Raumgebiet ist einerseits proportional zum Quadrat der Amplitude und andererseits ist diese proportional zur Wahrscheinlichkeit, das Elektron in diesem Gebiet anzutreffen. Nach der Quantenmechanik verhält sich ein Elektron nicht wie eine Materiewelle. Was sich tatsächlich wie eine Welle verhält, ist die Wahrscheinlichkeit, ein Elektron vorzufinden. Daraus kann folgender Schluß gezogen werden:

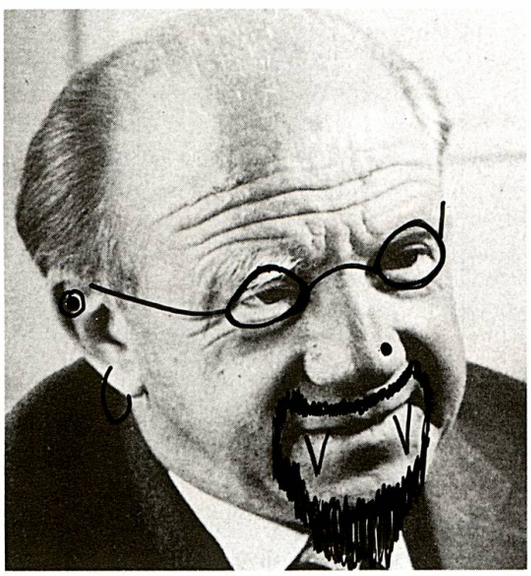
Das Amplitudenquadrat ψ^2 gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, daß ein Elektron in einem bestimmten Bereich angetroffen wird. Die De-Broglie-Welle ist eine *Wahrscheinlichkeitswelle*.



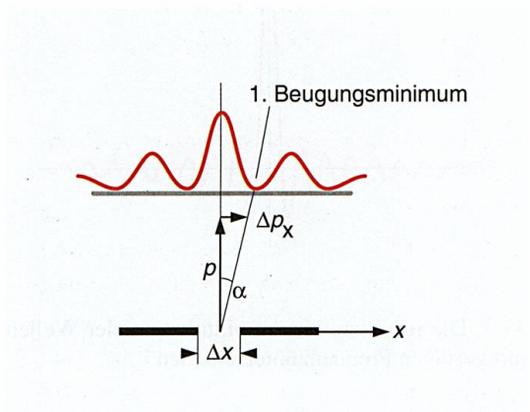
43.4 Beugungsfigur eines Elektronenstrahls am Spalt



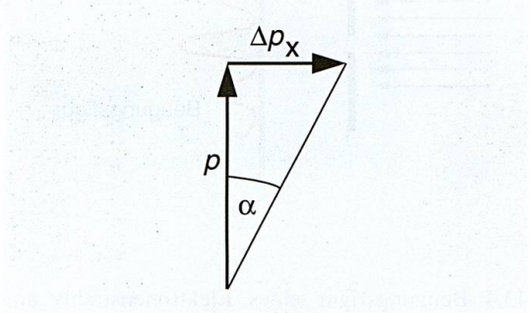
44.1 Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Teilchens in einem bestimmten Intervall



44.2 *Werner Heisenberg* (1900 - 1976; Nobelpreis 1932)



44.3 Je kleiner (größer) man Δx wählt, umso größer (kleiner) wird Δp_x.



44.4 Ist α klein, dann gilt: $\sin\alpha \approx \tan\alpha$

Die sogenannte Quanteneigenart liegt darin, daß sich ein Elektron wie eine Wahrscheinlichkeitswelle verhält, solange man es nicht nachweist. Sobald es mit einem Detektor festgestellt wird, verhält es sich wie ein Teilchen.
Der Doppelspaltversuch läuft mit Photonen gleich ab wie mit Elektronen. Das Quadrat der Amplitude einer Lichtwelle gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, Photonen in einem bestimmten Bereich anzutreffen.

In der klassischen Physik sind Welle und Teilchen zwei Erscheinungen, die einander ausschließen. In der Quantenmechanik sind Elektron und Photon sogenannte *Quantenobjekte*, denen jeweils Wahrscheinlichkeitswellen zugeordnet werden können.

Beachte: Die Wahrscheinlichkeitswelle ist keine mechanische Welle, es schwingt dabei keine Materie. Mit einer Wahrscheinlichkeitswelle ist keine physikalische Schwingung verbunden. Die Fragestellungen der Quantenmechanik lassen sich jedoch mathematisch mit Hilfe der "klassischen" Wellentheorie behandeln.

Im Diagramm (Abb. 44.1) sind auf der x-Achse der Aufenthaltsort, auf der y-Achse die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten an einer bestimmten Stelle angegeben. Es kann daher die Wahrscheinlichkeit dafür abgelesen werden, ein Elektron an einem bestimmten Ort anzutreffen. Da das Elektron in diesem Bereich irgendwo gefunden werden muß, ist der Inhalt der von der Kurve und der x-Achse eingeschlossenen Fläche nach der Wahrscheinlichkeitsrechnung 1. Die schraffierte Fläche gibt die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Teilchens in einem bestimmten Bereich an.

7.3 Unschärferelation

Dieses physikalische Prinzip wurde von *Werner Heisenberg* entdeckt.

In der klassischen Mechanik haben Teilchen folgende Grundeigenschaften:

Jedes Teilchen nimmt zu jedem beliebigen Zeitpunkt einen genau definierten Ort im Raum ein und besitzt dafür einen bestimmten Impuls ($p = m\,v$). Die gleichzeitige Bestimmung der Lage und der Geschwindigkeit (des Impulses) erscheint als charakteristisches Merkmal. Daß das Elektron einmal als Welle und zum anderen als Teilchen auftritt, läßt eine wesentliche Einschränkung einer solchen klassischen Zustandsbeschreibung erwarten.

Trifft ein Elektronenstrahl auf einen geeigneten Spalt, erhält man - wie von de Broglie postuliert - ein Beugungsbild. Die Mehrzahl der Elektronen liefert das Hauptmaximum. Es gibt jedoch auch Elektronen, die ihre Richtung ändern und auf verschiedene Stellen des Schirms fallen, sodaß sich die angegebene Intensitätsverteilung ergibt. Tritt nun ein Elektron durch den Spalt, so ist dessen Ort im Augenblick des Durchgangs mit der Ungenauigkeit Δx, also der Spaltbreite, bekannt (Abb.44.3). Das Elektron kann jedoch beim Durchgang durch den Spalt eine Ablenkung (Beugung) erfahren. Dies bedeutet, daß das Elektron beim Durchgang einen zusätzlichen Impuls Δp_x in der angegebenen x-Richtung erhält.

Mit Verengung des Spalts kann die Lage des Elektrons mit immer größerer Genauigkeit bestimmt werden. Die Ortsunschärfe wird umso kleiner, je kleiner die Spaltbreite ist. Daraus folgt jedoch eine Verbreiterung des Hauptmaximums, die Impulskomponente in x-Richtung wird größer.

Vor dem Spalt war der Impuls scharf bestimmt durch $p = h / \lambda$, $\Delta p_x = 0$. Betrachtet man aber die Richtung zum ersten Minimum der Beugungsfigur, gilt:

(1) $\sin\alpha = \dfrac{\lambda}{\Delta x}$ (2) $\tan\alpha = \dfrac{\Delta p_x}{p}$ (3) Bei kleinem α: $\sin\alpha \approx \tan\alpha$

(1),(2),(3) $\dfrac{\Delta p_x}{p} \approx \dfrac{\lambda}{\Delta x} \Leftrightarrow \Delta x \cdot \Delta p_x \approx \lambda \cdot p$

Daraus und aus $p = h / \lambda$ folgt: $\Delta x \cdot \Delta p_x \approx h$

Heisenbergsche Unschärferelation

$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx h$

Die Heisenbergsche Unschärferelation besagt, daß Ort und Impuls von Quantenobjekten nur mit Ungenauigkeiten Δx und Δp_x bestimmbar sind, deren Produkt bei genauer Berechnung mindestens den Wert $h / 2\pi$ hat.

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{2\pi}$$

Die Unschärferelation hat nichts mit einer Meßungenauigkeit zu tun, sie ist eine quantenphysikalische Tatsache.
Hinsichtlich des Ortes x eines Objektes im Raum besteht eine Unschärfe, die ungefähr der Wellenlänge des Lichtes entspricht, welches zur Entdeckung dieses Objektes notwendig ist. Um mit einem Mikroskop den Ort des Elektrons mit entsprechender Genauigkeit zu bestimmen, ist eine Strahlung mit sehr kleiner Wellenlänge und somit sehr hoher Energie $E = h \cdot f$ erforderlich. Diese Strahlung beeinflußt jedoch die Richtung und die Geschwindigkeit, also die Impulskomponente des Elektrons (Comptoneffekt).

➤ Beispiel B

Nach dem Bohrschen Atommodell besitzt das Elektron der *K*-Schale im Wasserstoffatom eine Geschwindigkeit von $2 \cdot 10^6$ m/s; die Masse des Elektrons beträgt $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg.

Der Impuls errechnet sich als

$$p = m\,v = 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \text{kg} \cdot 2 \cdot 10^6\ \text{m s}^{-1} = 1{,}82 \cdot 10^{-24}\ \text{kg m s}^{-1}$$

Bei der Kreisbewegung kann die Impulskomponente für eine vorgegebene Richtung Werte zwischen 0 und p einnehmen. Somit erhält man für die Unschärfe bezüglich des Ortes:

$$\Delta x \cdot \Delta p \approx h \qquad x \approx \frac{h}{p} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{Js}}{1{,}82 \cdot 10^{-24}\ \text{kg m s}^{-1}} = 3{,}6 \cdot 10^{-10}\ \text{m}$$

Dies entspricht dem dreifachen Wert des von Bohr berechneten Durchmessers für die K-Schale. Daraus folgt, daß eine exakte Beschreibung der Elektronenbahnen unmöglich ist, daß selbst der Bahnbegriff nicht sinnvoll erscheint.

Die Unschärferelation läßt sich auch vom Energiestandpunkt aus anwenden, da sie sich auf Größen bezieht, deren Produkt eine *Wirkung* ist, somit auch auf Energie und Zeit. Je besser die Energie eines Objektes bekannt ist, desto weniger weiß man über den exakten Zeitpunkt, zu dem ein Objekt diese Energie hatte. Verweilt hingegen ein Teilchen nur kurze Zeit in einem bestimmten Zustand, dann ist seine Energie mit einer großen Unsicherheit behaftet. So sind die Energiezustände in einem Atom streng definiert. Dies hat zur Folge, daß die zeitliche Eingrenzung für einen bestimmten Energiezustand (Lage und Impuls der Elektronen) mit einer großen Unschärfe versehen ist.

Beispiel A

Ein Teilchen mit der Masse $4 \cdot 10^{-5}$ kg und einem Durchmesser von 1,5 mm fliegt durch eine Öffnung, sodaß ein Spielraum von 0,02 mm bleibt. Wie groß ist die Unschärfe bezüglich der Geschwindigkeit?

$$\Delta x \cdot \Delta (m \cdot v) \approx h \Leftrightarrow \Delta v \approx \frac{h}{\Delta x \cdot m}$$

$$\Delta v \approx \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{Js}}{0{,}02 \cdot 10^{-3}\ \text{m} \cdot 4 \cdot 10^{-5}\ \text{kg}} =$$

$$= 8{,}3 \cdot 10^{-25}\ \text{m s}^{-1}$$

Die Unschärfe ist so klein, daß sie sich einer Messung entzieht. Die Bewegung eines solchen Teilchens kann mit Hilfe der klassischen Physik beschrieben werden.

Schärfe von Spektrallinien

Die Unschärferelation hat auch eine Auswirkung auf die Schärfe von Spektrallinien. Zustände in Atomen, die sich mit der Zeit nicht ändern, besitzen eine scharf begrenzte Energie. Aber jede Anregung eines Atoms ist mit einer Energieänderung in einem bestimmten Zeitintervall verbunden. Kehrt ein angeregtes Atom in den Grundzustand zurück, ist dies mit einer Energieänderung, z.B. der Abgabe eines Strahlungsquants verbunden. Dieser Vorgang kann als Spektrallinie beobachtet werden.
Nach der Unschärferelation gilt:

$\Delta E \cdot \Delta t \approx h$ und $E = hf \Rightarrow$

$\Rightarrow \Delta (hf) \cdot \Delta t \approx h \Leftrightarrow \Delta f \approx \frac{1}{\Delta t}$

Die Frequenz ist somit mit einer bestimmten Unschärfe verbunden.
So tritt beim Laser durch die Wirkung der induzierten Emission eine Verringerung der Bandbreite der abgegebenen Strahlung auf.
Die Zeitdauer für einen Emissionsvorgang ist rund 10^5 mal länger als bei einer spontanen Emission. Die Unschärfe im Energieniveau und damit die Linienbreite ist dadurch extrem verringert.

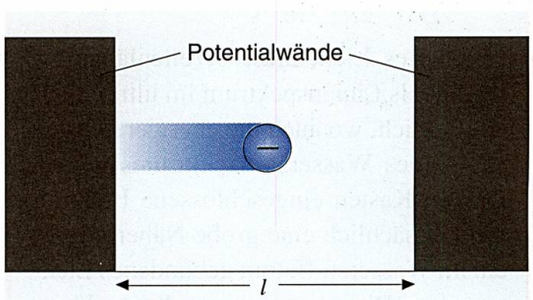
7.4 Quantenmechanisches Atommodell

Potentialtopf

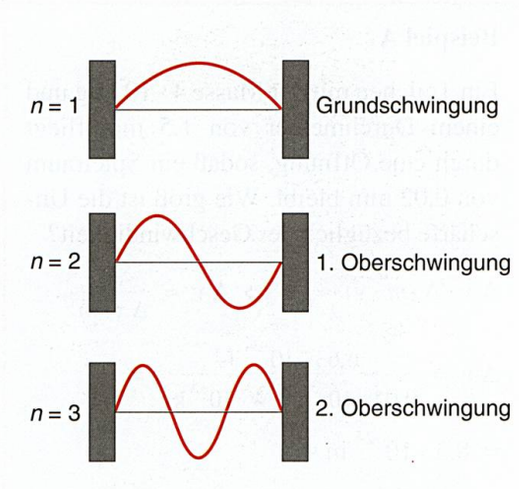
Wir betrachten ein Elektron, welches in einem "eindimensionalen" Kasten eingeschlossen ist. Dieser besitzt reflektierende Wände, die den Abstand l voneinander haben. Das Teilchen fliegt zwischen den Wänden hin und her (Abb. 45.1). Es besitzt eine kinetische Energie E_{kin}.

(1) $E_{kin} = \frac{m\,v^2}{2}$

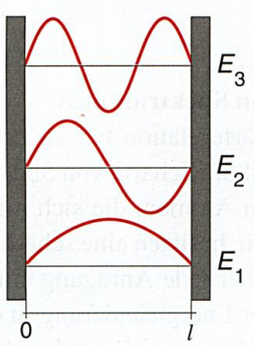
Es kann ihm eine bestimmte de Broglie-Wellenlänge λ zugeordnet werden:



45.1 Das Elektron fliegt zwischen den Potentialwänden hin und her, ohne Energie abzugeben.



46.1 Bei einer stehenden Welle muß die Länge des Kastens ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge sein.



46.2 Die verschiedenen Quantenzahlen können durch stehende Wellen veranschaulicht werden.

Beispiel A

Ein Elektron befindet sich in einem Kasten der Länge $l = 10^{-10}$ m im Energiezustand E_2. Wie groß ist die Wellenlänge des Photons, welches beim Übergang in den Zustand E_1 emittiert wird?

$$h \cdot f_{2,1} = E_2 - E_1$$

$$h \cdot f_{2,1} = \frac{4\,h^2}{8\,m\,l^2} - \frac{h^2}{8\,m\,l^2} = \frac{3\,h^2}{8\,m\,l^2} \Leftrightarrow$$

$$f_{2,1} = \frac{3\,h}{8\,m\,l^2} = \frac{3 \cdot 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{Js}}{8 \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \text{kg} \cdot (10^{-10}\ \text{m})^2}$$

$$f_{2,1} = 2{,}73 \cdot 10^{16}\ \text{Hz}$$

$$\lambda = \frac{c}{f_{2,1}} = \frac{3 \cdot 10^{8}\ \text{m s}^{-1}}{2{,}73 \cdot 10^{16}\ \text{s}^{-1}} = 1{,}1 \cdot 10^{-8}\ \text{m}$$

Emittiertes Licht dieser Wellenlänge erscheint als Linienspektrum im ultravioletten Bereich, wo auch die energiereichsten Linien des Wasserstoffspektrums liegen. Das im Kasten eingeschlossene Elektron stellt tatsächlich eine grobe Näherung für ein im Wasserstoffatom gebundenes Elektron dar. (Die angenommene Kastenlänge entspricht dem Atomdurchmesser.)

(2) $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m\,v} \Rightarrow v = \frac{h}{m\,\lambda}$

(1),(2) $E_{kin} = \frac{m}{2} \cdot \left(\frac{h}{m\,\lambda}\right)^2 = \frac{h^2}{2\,m\,\lambda^2}$

Damit die Bewegung des Elektrons ohne Energieverlust möglich ist und im Einklang mit dem Wellenmodell steht, muß sich eine stehende Welle ausbilden (Abb. 46.1):

$$l = n\frac{\lambda}{2} \Leftrightarrow \lambda = \frac{2\,l}{n} \qquad \text{mit } n = 1, 2, 3, \ldots$$

Daraus und aus $E_{kin} = \frac{h^2}{2\,m\,\lambda^2}$ folgt $E_{kin} = \frac{h^2}{8\,m\,l^2} \cdot n^2$ mit $n = 1, 2, 3, \ldots$

An den Rändern ist die Aufenthaltswahrscheinlichkeit für ein Elektron Null, so wie der Punkt einer materiellen Welle an einem Knoten in Ruhe ist. Weiters sei vorausgestzt, daß die Wahrscheinlichkeit Null ist , das Elektron außerhalb dieses Kastens anzutreffen.
Die Wahrscheinlichkeitswelle beschreibt einen stationären Zustand, bei welchem ein Elektron eine bestimmte kinetische Energie besitzt.
In einem solchen Kasten bewegte Elektronen besitzen überall in diesem Bereich die gleiche potentielle Energie; diese kann daher auch Null gesetzt werden. An den Wänden jedoch soll das Potential so stark ansteigen, daß es für das Elektron unüberwindbar ist. Die Wände dieses Kastens werden daher als *Potentialwände*, der Kasten selbst als *Potentialtopf* bezeichnet.

Gesamtenergie des Elektrons in einem Potentialtopf

$$E = E_{pot} + E_{kin} = \frac{h^2}{8\,m\,l^2} \cdot n^2 \quad \text{mit } n = 1, 2, 3, \ldots$$

Wir erhalten ein für die Quantentheorie typisches Ergebnis:
Ein Elektron kann in diesem Potentialtopf nur *diskrete* Energiewerte annehmen, die Energie ist *quantisiert*.

Der Fall $n = 0$ ist auszuschließen, da sonst die Welle verschwindet, also gar kein Teilchen vorhanden wäre. Die Energie für den Fall $n = 1$ wird als *Nullpunktsenergie* bezeichnet. Nach der klassischen Physik kann ein Teilchen auch die Energie Null haben, nach quantenmechanischer Vorstellung jedoch erhält man die kleinstmögliche Teilchenenergie in einem Potentialtopf bei $n = 1$:

$$E_1 = \frac{h^2}{8\,m\,l^2}$$

Beachte: Freie Elektronen, z.B. in einer Katodenstrahlröhre, können ihre Energie kontinuierlich ändern.

Übergänge zwischen den Energiestufen

Geht ein Elektron von einem Zustand E_n in einen Zustand niedrigerer Energie E_k über, so ist dieser Vorgang mit der Emission eines Lichtquants verbunden:

$$h \cdot f_{n,k} = E_n - E_k$$

Da das Elektron im Potentialtopf nur bestimmte diskrete Energiewerte annehmen kann, werden auch nur Quanten diskreter Energien bzw. Wellenlängen emittiert (vgl. Beispiel A).
Ein Energiequant dieser Wellenlänge bewirkt umgekehrt ein Anheben des Elektrons von der Energiestufe E_k auf E_n. Das Quant wird dann absorbiert. Emission und Absorption von Quanten bewirken eine Änderung der Wahrscheinlichkeitsverteilung.

Orbitale

Erwin Schrödinger vereinigte die von *Bohr* geforderte Quantisierungsbedingung für die im Atom gebundenen Elektronen (Schalenaufbau der Elektronenhülle) mit der Beschreibung des Elektrons als stehende Welle. Er stellte 1926

die nach ihm benannte *Schrödinger-Gleichung* auf. Mit Hilfe dieser Gleichung läßt sich das Elektron als Energiewelle beschreiben. *Max Born* entwickelte die Schrödinger-Gleichung weiter, indem er die Energiewelle als Wahrscheinlichkeitswelle interpretierte. Die Wellengleichung drückt für jede Entfernung vom Kern die Wahrscheinlichkeit aus, dort ein Elektron zu finden.

Während Bohr keinen tieferen Grund für die Quantelung angeben konnte, kann das quantenmechanische Modell dies erklären; Teilchen in gebundenen Zuständen können nur gequantelte Energiezustände einnehmen.

In unserer bisherigen Betrachtung der gebundenen Elektronen haben wir einen eindimensionalen Potentialtopf verwendet. In einem Atom stehen aber alle Raumrichtungen zur Verfügung, sodaß wir einen dreidimensionalen Topf erhalten. Für jede Raumrichtung ist daher eine Quantenzahl anzugeben, also n_x, n_y und n_z. Die Gesamtenergie ergibt sich damit als:

$E = \frac{h^2}{8\,m\,l^2} \cdot (n_x^{\,2} + n_y^{\,2} + n_z^{\,2})$ Die Gesamtheit der besetzten Energieniveaus erhält man, wenn man alle möglichen Kombinationen für n_x, n_y und n_z anführt:

$n_x = 1, 2, \ldots$ $\quad n_y = 1, 2, \ldots$ $\quad n_z = 1, 2, \ldots$

Für $n = n_x = n_y = n_z$ erhält man:

$$E = \frac{3\,h^2}{8\,m\,l^2} \cdot n^2$$

Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Elektrons kann durch eine verschieden starke Punktierung dargestellt werden (Abb. 47.2). Die einem Elektron im Atom zugeordnete dreidimensionale Wahrscheinlichkeitswelle wird als *Orbital* bezeichnet. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit ist in der Nähe des Kerns am größten. Sie ist jedoch für jeden Raumpunkt um den Kern endlich.

Die räumlichen Verteilungen der Aufenthaltswahrscheinlichkeit für Elektronen in einem Atom werden *Orbitale* genannt.

Für den Energiewert $E = \frac{3\,h^2}{8\,m\,l^2}$ gibt es eine einzige Kombination der 3 Quantenzahlen, nämlich $n_x = n_y = n_z = 1$. Dieser Energiezustand wird als 1 *s*-Zustand, das zugehörige Orbital als 1 *s*-Orbital bezeichnet. Dies entspricht der Grundschwingung im eindimensionalen Potentialtopf. Nach dem *Pauliprinzip* kann jedes Orbital zwei Elektronen entgegengesetzten Spins aufnehmen. Der 1*s*-Zustand besitzt maximal zwei Elektronen und nur ein einziges Orbital.

Prinzipiell gleich wie das Elektron des Wasserstoffatoms verhalten sich die Elektronen aller Atome; nur nimmt mit wachsender Elektronenzahl die Anzahl der Orbitale zu. Zahl und Form der Orbitale hängen auch davon ab, ob sich ein Atom im (energiearmen) Grundzustand oder einem angeregten (energiereicheren) Zustand befindet. Angeregte Zustände treten zum Beispiel bei der Bildung und Trennung chemischer Bindungen oder aufgrund von Energiezufuhr auf.

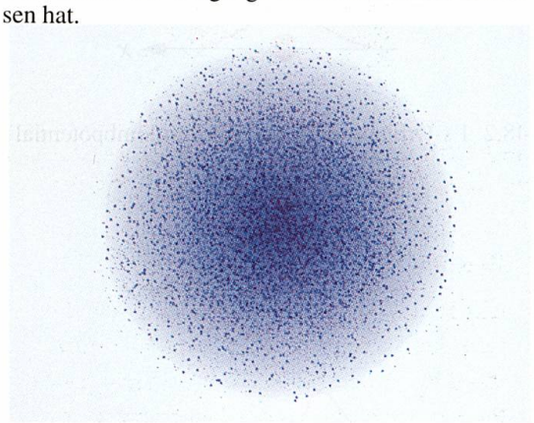
Der 2 *s*-Zustand ($n_x = n_y = n_z = 2$) mit dem zugehörigen Energiewert

$E = \frac{h^2}{8\,m\,l^2} \cdot 12$ bildet das einzige 2s-Orbital.

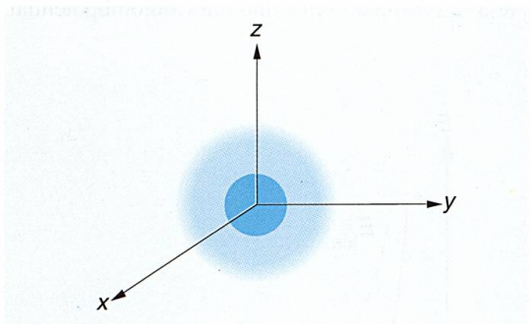
Dieses hat wie das 1 *s*-Orbital eine radiale Wahrscheinlichkeitsverteilung, jedoch ist es größer. Die Berechnung liefert außerdem zwei rotationssymmetrische Gebiete, die durch einen Bereich mit der Wahrscheinlichkeit Null (Knotenfläche) getrennt werden. Die Knotenflächen einer dreidimensoinalen Welle entsprechen den Knotenpunkten einer eindimensionalen stehenden Welle. Weiters sind jetzt solche Fälle möglich, bei denen nicht alle Quantenzahlen nach allen Raumrichtungen gleich sind. So erhält man für die Quantenzahlen (2,1,1), (1,2,1) und (1,1,2) drei Zustände gleicher Energie, die sich nur in ihrer Orientierung bezüglich des Koordinatensystems unterscheiden.

Es ergeben sich daraus drei hantelförmige Orbitale in jeder Raumrichtung, ein 2 p_x-, 2 p_y- und 2 p_z-Orbital. Jedes dieser Orbitale (Abb. 48.1) besitzt eine Knotenfläche. In analoger Weise lassen sich die Orbitale für höhere Quantenzahlen erklären.

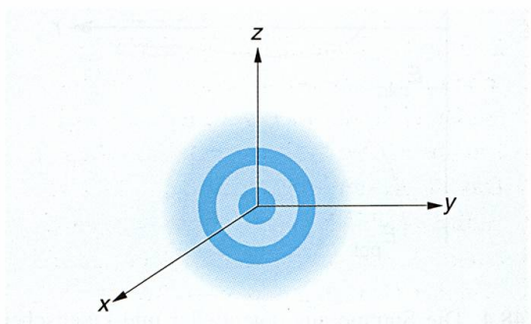
47.1 *Erwin Schrödinger* (1887 - 1961), österreichischer Physiker, erhielt 1933 gemeinsam mit *Paul Dirac* den Nobelpreis für Physik. Schrödinger entwickelte jene Gleichung, die sich als Schlüssel zum Verständnis für Vorgänge im Mikrokosmos erwiesen hat.



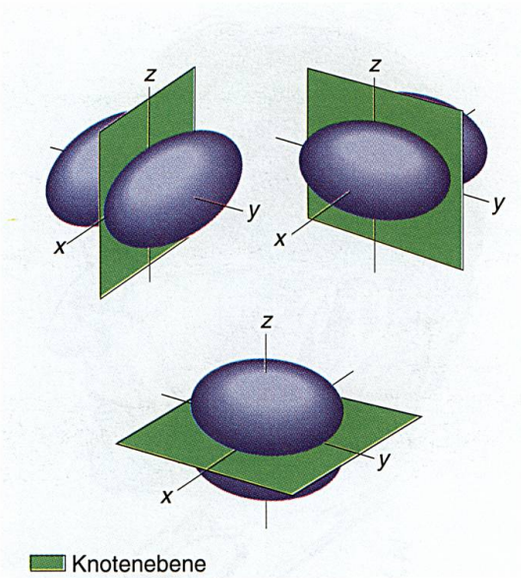
47.2 Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Elektrons, dargestellt durch eine verschieden starke Punktierung.



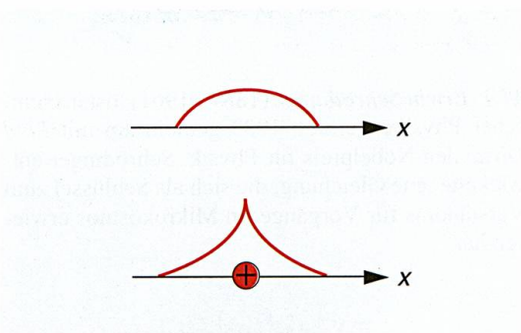
47.3 1s-Orbital



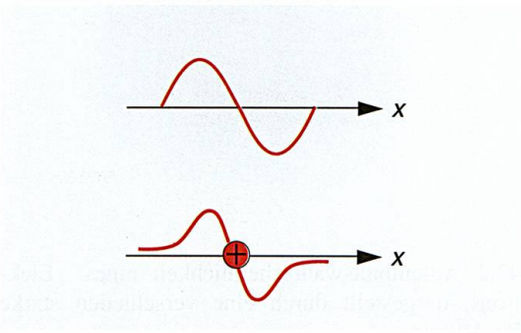
47.4 2s-Orbital



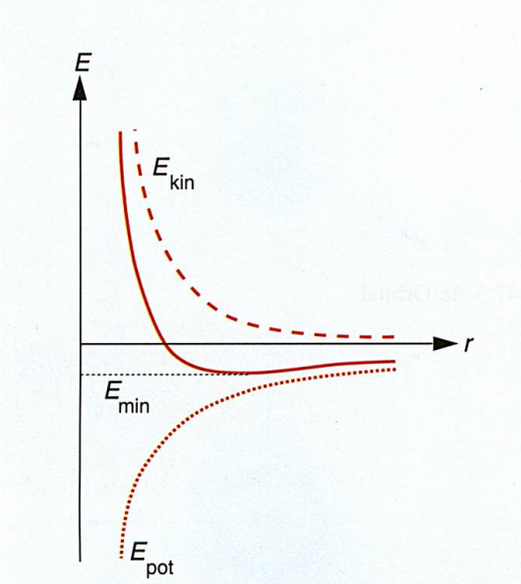
48.1 Die hantelförmigen 2 *p*-Orbitale



48.2 1 *s*-Orbital - ohne und mit Coulombpotential



48.3 2 *s*-Orbital - ohne und mit Coulombpotential



48.4 Die Summe aus potentieller und kinetischer Energie liefert die angegebene Kurve.

Bei unseren bisherigen Betrachtungen der Orbitale haben wir die potentielle Energie außer Betracht gelassen. Bezieht man das Coulombpotential des Kerns mit ein, kommt es zu einer leichten Deformierung der Orbitale; die grundsätzlichen Erkenntnisse bleiben jedoch gleich.

Die Lösung der Schrödinger-Gleichung liefert die Ladungsverteilungen und Energien in einem Atom. Man erhält eine begrenzte Anzahl von Zuständen, die durch die Hauptquantenzahl n, die Nebenquantenzahl l und die magnetische Quantenzahl m festgelegt sind.

Wasserstoffatom

Wie nach klassischer Berechnung gezeigt werden kann, ergibt sich die Gesamtenergie des Elektrons im Wasserstoffatom als Summe aus potentieller und kinetischer Energie:

$$(1)\quad E = E_{kin} + E_{pot} = \frac{m v^2}{2} - \frac{e^2}{4 \pi \varepsilon_0 r}$$

Daraus und aus $\frac{m v^2}{r} = \frac{e^2}{4 \pi \varepsilon_0 r^2}$ (Zentripetalkraft = Coulombkraft) folgt:

$$E = -\frac{e^2}{8 \pi \varepsilon_0 r}$$

Strebt r gegen 0, dann strebt die Energie gegen $-\infty$. Die Energie kann immer mehr abgesenkt werden, es gibt keinen kleinsten Radius.

Aus quantenmechanischer Sicht gilt nach der Heisenbergschen Unschärferelation: Vom energetischen Standpunkt aus sind alle Abstände von 0 bis zum Atomradius r für das Elektron möglich, die Unschärfe bezüglich des Ortes beträgt somit r. Damit ergibt sich eine Impulsunschärfe von

$$(2)\quad p \approx \frac{h}{r}$$

$$(1),(2)\quad E = \frac{p^2}{2 m} - \frac{e^2}{4 \pi \varepsilon_0 r} = \frac{h^2}{2 m r^2} - \frac{e^2}{4 \pi \varepsilon_0 r}$$

Berechnet man mit Hilfe der Differentialrechnung das Minimum des Energieausdrucks, ergibt sich für r:

$$r = \frac{4 \pi \varepsilon_0 h^2}{m e^2}$$

Die minimale Energie liegt also nicht mehr bei $r = 0$.

Setzt man nun den Ausdruck für r in E ein, erhält man für E:

$$E = -\frac{e^4 m}{32 \pi^2 \varepsilon_0^2 h^2}$$

Damit erhält man schon die richtige Größenordnung für das Wasserstoffatom.

Wird h durch $h / 2 \pi$ ersetzt, liefert dies die exakte Lösung:

$$E = -\frac{e^4 m}{8 \varepsilon_0^2 h^2}$$

Betrachtungen zur Nullpunktsenergie

Alle gebundenen Teilchen besitzen nach der Quantenmechanik einen minimalen Energieinhalt. So führen etwa die Bausteine eines Kristallgitters ständig Nullpunktsschwingungen durch. Diese Bewegung tritt selbst beim absoluten Nullpunkt auf. So läßt sich etwa damit erklären, warum Helium selbst in der Nähe des absoluten Nullpunktes noch immer flüssig ist.

Betrachtet man eine Schaukel in ihrem tiefsten Punkt, ist ihre Lage exakt bekannt. Nach der Unschärferelation muß daher der Impuls mit einer großen Unschärfe versehen sein. Vom quantenmechanischen Standpunkt aus darf die Schaukel als nicht völlig ruhend angesehen werden. Diese Bewegung ist jedoch unmeßbar klein. Für mikroskopische Teilchen hingegen ist die Nullpunktsenergie eine wesentliche Größe.

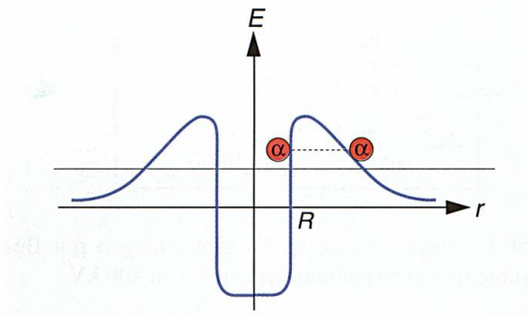
7.5 Tunneleffekt

α-Teilchen sind He-Kerne, in welchen die Nukleonen eine Bindungsenergie von 28,3 MeV aufweisen. Sie sind somit sehr stabile Teilchen.

Im Kern sind zwei Kräfte wirksam:

- elektrostatische Abstoßung der gleichnamig geladenen Protonen
- Anziehung aufgrund der starken Kraft

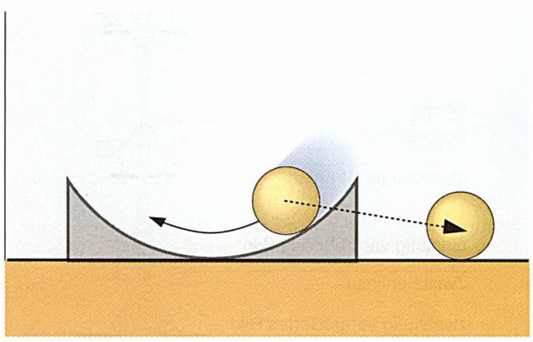
Diese beiden Kräfte ergeben einen *Potentialwall* (Abb. 49.1). Der Gipfel dieser Barriere ist der Punkt, an dem die Anziehung durch die starke Wechselwirkung betragsgleich ist mit der Abstoßung durch die elektrostatische Wechselwirkung. An Punkten, die dem Kern näher liegen als der "Gipfelpunkt" ($r < R$) ist die Anziehung größer als die Abstoßung. Für $r > R$ ist der Potentialverlauf durch die elektrostatische Abstoßung der α-Teilchen durch die positive Kernladung bestimmt. R gibt die Reichweite der starken Kraft an (ca. 10^{-13} cm).



49.1 Potentialwall

Nach der klassischen Betrachtungsweise müßten die α-Teilchen, die aus dem Kern kommen, mindestens so viel Energie besitzen wie die Höhe dieses Potentialwalls ausmacht. Dies ist jedoch bei vielen Teilchen *nicht* der Fall.

Nach den Gesetzen der Quantentheorie kann ein Teilchen durch diese Energiebarriere "hindurchtunneln". Ist nämlich der Zeitpunkt für einen α-Zerfall mit einer sehr kleinen Unschärfe bekannt (etwa 10^{-13}s), ist die Energie umso unbestimmter. Diese reicht aus, um den Potentialwall überwinden zu können. Die Breite der Barriere, die überwunden werden kann, hängt davon ab, wie schnell sich Teilchen in der kurzen Zeit bewegen, in der ihnen die Unschärferelation eine höhere Energie erlaubt. Mit welcher Wahrscheinlichkeit ein α-Teilchen den Potentialwall durchdringen kann, bestimmt die mittlere Lebensdauer eines radioaktiven Kerns. Der Tunneleffekt tritt nicht nur bei α-Teilchen, sondern auch bei anderen Teilchen im atomaren Bereich, z.B. Elektronen, auf.



49.2 Läßt man die Kugel am Rand der Schale los, rollt sie hin und her. Nach der Quantenmechanik besitzt sie eine, wenn auch sehr kleine, Wahrscheinlichkeit (ungefähr $1:10^{10000000000000000000000000000000}$), die Schale zu verlassen.

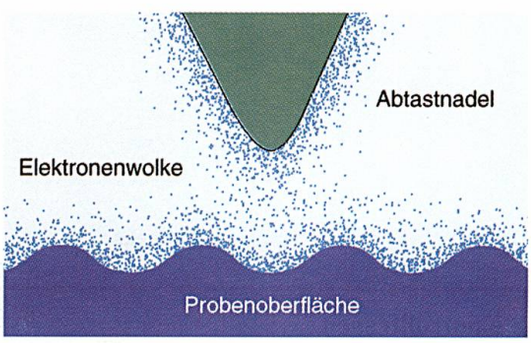
Eine Anwendung ist das *Rastertunnelmikroskop:* Das Rastertunnelmikroskop (engl. *Scanning Tunneling Microscope*, kurz STM) wird zur Untersuchung von Oberflächenstrukturen eingesetzt. Entwickelt wurde es von *Gerd Binnig* und *Heinrich Rohrer,* die für diese Leistung mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurden. Die Funktionsweise beruht auf der *Feldemission.*

Versuch

An zwei Elektroden wird eine Spannung gelegt. Wird die Katode beheizt, emittiert sie Elektronen; diese Erscheinung wird als glühelektrischer Effekt bezeichnet (siehe Band 3, Seite 93). Es kann nun nachgewiesen werden, daß auch bei tiefen Temperaturen Elektronen austreten können. Dies läßt sich mit Hilfe des Tunneleffektes erklären. Die Elektronen durchtunneln den Potentialwall am Übergang Metall-Umgebung. Die Elektronen bilden an der Oberfläche eine Elektronenwolke.

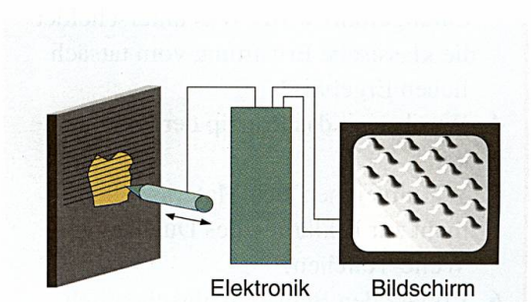
Experimentell kann man dies durch Anordnung zweier Metallplatten zeigen, welche durch eine dünne Isolierschicht voneinander getrennt sind. Die Isolierschicht wird dabei so dünn gewählt, daß sich die Elektronenwolken der beiden Metallplatten überlappen. Legt man eine Spannung an die beiden Platten an, kann ein Strom über die sich überlappenden Elektronenwolken fließen.

Statt der beiden Metallplattenelektroden werden beim STM eine scharfe nadelähnliche Spitze und die Probe selbst als Elektroden verwendet. Als Isolator dient eine Flüssigkeit, ein Gas oder Vakuum (Abb.49.1).

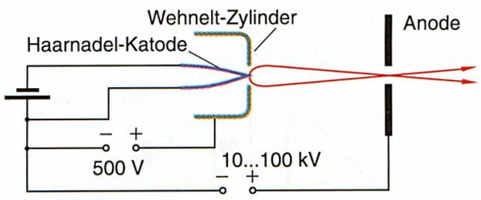


49.3 Rastertunnelmikroskop: Der Abstand zwischen Spitze und Probenoberfläche wird konstant gehalten.

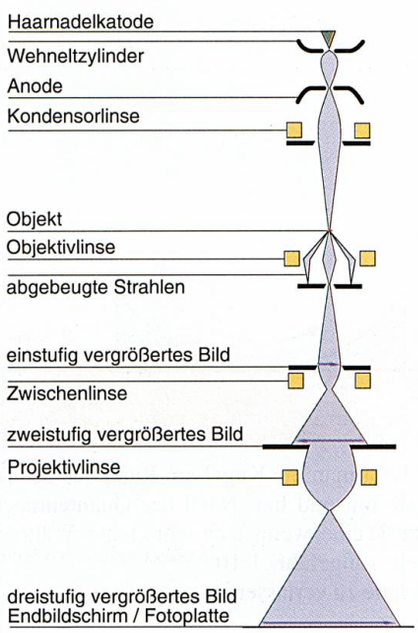
Um die Oberfläche abzurastern, bewegt man die Spitze in Richtung Oberfläche, bis sich die Elektronenwolken von Spitze und Probe leicht berühren. Wird eine Spannung zwischen Spitze und Probe angelegt, fließen Elektronen innerhalb der Elektronenwolken, der sogenannte *Tunnelstrom.* Da die Dichte der Elektronenwolke exponentiell mit dem Abstand abnimmt, reagiert der Tunnelstrom sehr empfindlich auf Abstandsänderungen zwischen Spitze und Probenoberfläche. Während die Spitze die Oberfläche abfährt, mißt ein Regelsystem den Tunnelstrom und hält den Abstand zwischen Spitze und Oberfläche konstant, sodaß die Spitze dem Oberflächenniveau folgt. Die Probe wird in parallelen Linien abgefahren. Die gewonnenen Daten werden in einem Computer verarbeitet; dieser erzeugt daraus ein dreidimensionales Bild der Oberfläche.



49.4 Die Oberfläche wird in parallelen Linien abgerastert. Mit Hilfe des STM kann eine 10^8-fache Vergrößerung erzielt werden.



50.1 Elektronenquelle. Es gibt Anlagen mit Beschleunigungsspannungen von bis zu 400 kV.



50.2 Aufbau eines Durchstrahlungsmikroskops

Verwendungszwecke des Rastertunnelmikroskops

- Bestimmung der Oberflächenstruktur von Kristallen,
- Überprüfung von Schaltkreisen in der Elektronik,
- Virenuntersuchung in der Biologie,
- Bestimmung der Rauheit von Oberflächen,
- Untersuchung an Supraleitern: Das Wachstum supraleitender Gebiete an der Oberfläche bei Abkühlung unter die Sprungtemperatur kann beobachtet werden.

7.6 Elektronenmikroskop

Eine weitere Anwendung der quantenhaften Eigenschaften der mikroskopischen Teilchen ist das *Elektronenmikroskop.*

Als Elektronenquelle dient eine Glühkatode, vor der eine ringförmige Anode angebracht ist. Die Elektronen werden in einem Feld von ca. 100 kV beschleunigt. Hiebei sind bei der Beschleunigung relativistische Effekte zu beachten.

Die Wellenlänge eines Elektronenmikroskops mit einer Beschleunigungsspannung von 100 kV beträgt ungefähr 0,003 nm, während die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes zwischen 780 nm und 360 nm liegt. Dieses Gerät bildet also nicht mit Licht- sondern mit Elektronenstrahlen ab. Das reale Auflösungsvermögen eines Elektronenmikroskops ist aufgrund der wesentlich geringeren Wellenlänge um mehrere Zehnerpotenzen besser als bei einem Lichtmikroskop.

Die Elektronen werden durch Anwendung stark konzentrierter rotationssymmetrischer Magnetfelder gebündelt; diese werden durch hohe elektrische Ströme in ringförmigen Spulen erzeugt, *magnetische Linsen* genannt. Obwohl die Elektronenbahnen sehr kompliziert zu beschreiben sind, kann die Wirkung einer magnetischen Linse in Begriffen der dünnen idealen Glaslinse beschrieben werden. Herkömmlicherweise repräsentieren Linien die Lichtstrahlen oder die Elektronenbahnen und stellen damit den Durchgang von Strahlung durch das System dar. In der Elektronenoptik hat man es gewöhnlicherweise mit Elektronenbahnen zu tun, die mit der Linsenachse einen sehr kleinen Winkel einschließen, also mit Paraxialstrahlen. Es ist jedoch die Feinheit des Strahls durch die Heisenbergsche Unschärferelation begrenzt. Die Verkleinerung des Strahldurchmessers erhöht die Unbestimmtheit des Querimpulses, was eine Strahlauffächerung bedeutet.

Eine wichtige Aufgabe in der Elektronenmikroskopie ist die Präparation der zu untersuchenden Objekte.

Kontrollfragen

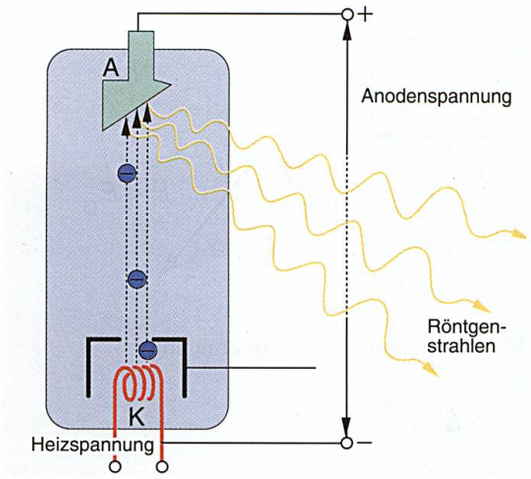
1. Was unterscheidet die Quantenmechanik von der Newtonschen Physik?
2. Erkläre den Begriff Materiewelle. Was ist die De-Broglie-Wellenlänge?
3. Beschreibe das Doppelspaltexperiment, welches mit Elektronenstrahlen durchgeführt wird? Was unterscheidet die klassische Erwartung vom tatsächlichen Ergebnis?
4. Was besagt das Prinzip der Unteilbarkeit?
5. Warum eignen sich Materiewellen nicht zur Erklärung des Dualismus Welle-Teilchen?
6. Erkläre den Begriff Wahrscheinlichkeitswelle.
7. Wie werden Elektronen und Photonen in der Quantenmechanik behandelt?
8. Was besagt die Unschärferelation? Leite sie ab.
9. Wie läßt sich die Unschärfe von Spektrallinien erklären?
10. Wie errechnet sich die Energie in einem Potentialtopf? Welche Möglichkeiten gibt es dabei?
11. Erkläre den Begriff Nullpunktsenergie.
12. Wie erfolgen Übergänge zwischen den Energiestufen?
13. Was sind Orbitale?
14. Beschreibe das 1*s*- und das 2*s*-Orbital!
15. Wie ergeben sich die 2p-Orbitale? Wie kann man sich diese vorstellen?
16. Was verändert das Coulombpotential an den Orbitalen?
17. Ermittle die minimale Energie beim Wasserstoffatom.
18. Was besagt der Tunneleffekt?
19. Wie funktioniert ein Rastertunnelmikroskop? Wozu wird es verwendet?
20. Beschreibe den Aufbau eines Elektronenmikroskops.
21. Warum ist die Auflösung eines Elektronenmikroskops größer als die eines Lichtmikroskops?
22. Wie erfolgt die Fokussierung bei einem Elektronenmikroskop?

8. Röntgenstrahlung

8.1 Erzeugung von Röntgenstrahlung

Aufbau der Röntgenröhre

Eine Röntgenröhre besteht aus einem evakuierten Glaskolben, in welchem zwei Metallelektroden eingeschmolzen sind. Die aus einer Glühkatode tretenden Elektronen werden durch eine Hochspannung (10^3V - 10^6V) beschleunigt. Beim Auftreffen auf die Anode, welche aus einem Metall mit hoher Atommasse (Wolfram, Molybdän, Kupfer usw.) besteht, werden die Elektronen abgebremst. Der Großteil der kinetischen Energie wird in innere Energie umgewandelt, was zu einer Erwärmung der Anode führt. Um eine Überhitzung zu verhindern, muß die Anode gekühlt werden. Die restliche Energie führt zu einer elektromagnetischen Strahlung, der *Röntgenstrahlung*. Dabei handelt es sich um eine sehr kurzwellige (unsichtbare) Strahlung in einem Wellenlängenbereich von 10^{-15}m bis 10^{-8}m , welche eine hohe Energie aufweist.
Röntgen bezeichnete die elektromagnetische Strahlung, die er 1895 entdeckt hatte, als *X-Strahlen*. Diese Bezeichnung hat sich im anglo-amerikanischen Raum gehalten. Im deutschen Sprachraum wird dieser Bereich des elektromagnetischen Spektrums Röntgenstrahlung genannt.
Röntgen führte sehr viele Experimente zur Erforschung der Eigenschaften dieser Strahlung durch. Alle seine Arbeiten zeichnen sich durch originell begründete Fragestellung und Versuchsanordnung aus; weiters prüfte er extrem kritisch die experimentelle Bearbeitung.



51.1 Schema einer Röntgenröhre

Nachweis von Röntgenstrahlung

Röntgenstrahlung hat die Eigenschaft, Materie zu durchdringen, fotografische Platten zu schwärzen und Gase zu ionisieren. Röntgenstrahlen werden durch elektrische und magnetische Felder nicht beeinflußt.
Beim Durchgang durch Materie wird die Intensität der Strahlung durch Absorption mehr oder weniger geschwächt, wobei die Absorption größer ist für Substanzen, die höhere Dichte besitzen bzw. für Elemente mit Atomen größerer Masse. Die Schwächung der Intensität erfolgt nach der Formel:

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

I_0 ist die einfallende Intensität, I die durchgelassene Intensität, x die Dicke der Substanz. Der Schwächungskoeffizient μ ist abhängig vom durchstrahlten Material und der Energie der Röntgenquanten. Die Intensität hängt von der Anzahl der Elektronen ab, die auf die Anode treffen. Sie kann somit über die Heizspannung reguliert werden.
Mit steigender Anodenspannung erhöht sich das Durchdringungsvermögen der Strahlung, sie wird "härter" (Tab. 51.3). Harte Strahlen sind energiereicher und besitzen eine kürzere Wellenlänge. Beachte: Da Röntgenstrahlung eine ionisierende Wirkung aufweist, darf der Mensch nur einer bestimmten Strahlungsdosis ausgesetzt werden.

überweich	5 kV - 20 kV
weich	20 kV - 60 kV
mittelhart	60 kV - 120 kV
hart	120 kV -2 50 kV
ultrahart	mehr als 250 kV

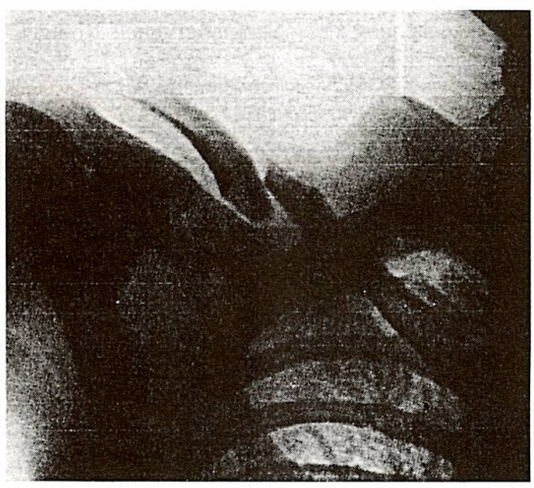
51.2 Je höher Anodenspannung, umso härter die Strahlung

λ in nm	**μ(Pb)**	**μ(Al)**
10^{-1}	850	38
10^{-2}	42	0,44
10^{-3}	0,80	0,16

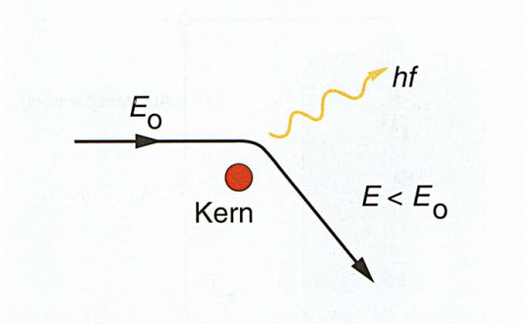
51.3 Schwächungskoeffizient μ in cm^{-1} fürBlei und Aluminium bei verschiedenen Wellenlängen der Röntgenstrahlung

Anwendungen

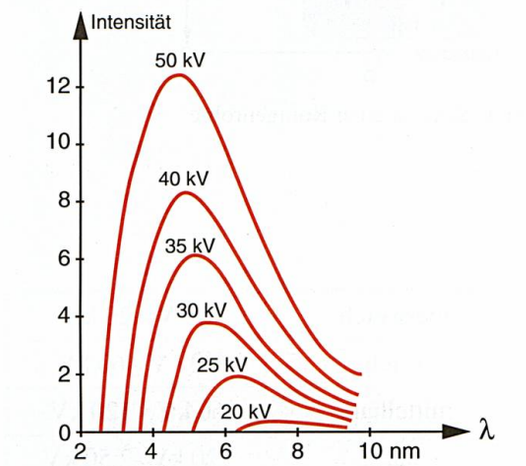
Treffen Röntgenstrahlen etwa auf eine Hand, wird nur sehr wenig Strahlung vom Gewebe, doch wesentlich mehr von den Knochen absorbiert. In einer Röntgenaufnahme werden jene Teile des Films, welche von den Knochen abgedeckt werden, kaum geschwärzt; die Knochen erscheinen hell, das umgebende Gewebe dunkel.
Zur Untersuchung von Weichteilen gibt es eigenes Röntgenverfahren, die *Computertomografie*. Dabei wird mittels einer rotierenden Röntgenröhre mit geringer Strahlungsintensität der Körper schichtweise "durchleuchtet". In den verschiedenen Richtungen gibt es eine unterschiedliche Absorption. Aus diesen Daten wird mittels eines Computers ein Bild erzeugt.
Röntgenstrahlung spielt auch in der Materialuntersuchung eine Rolle. So werden etwa Bauelemente, die eine geringe Ausfallswahrscheinlichkeit aufweisen dürfen, mit Hilfe von Röntgenstrahlung auf Materialfehler untersucht, z.B. Tragseile von Liften.



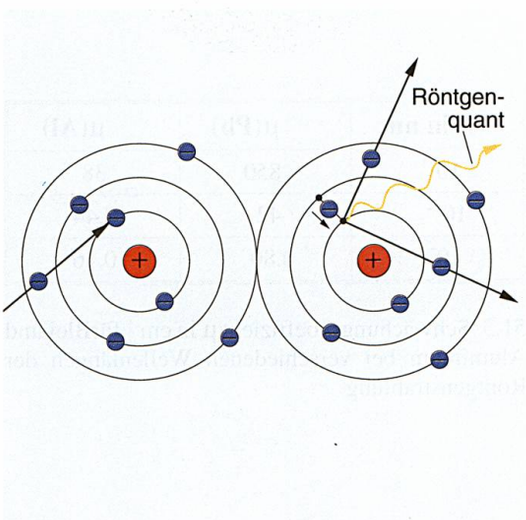
51.4 Röntgenbild eines gebrochenen Schlüsselbeins



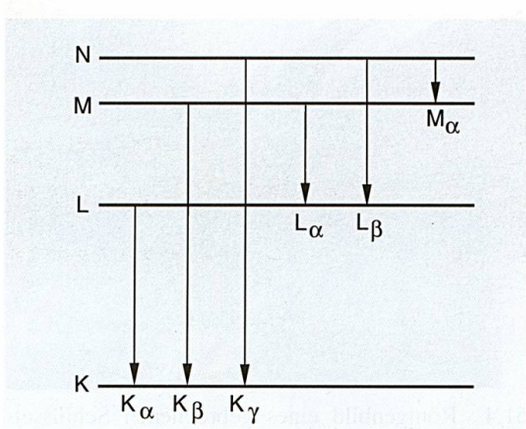
52.1 Entstehung der Bremsstrahlung



52.2 Die Bremsstrahlung liefert je nach Anodenspannung ein unterschiedliches Intensitätsspektrum. (Die Intensität ist in willkürlichen Einheiten aufgetragen.)



52.3 Enstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



52.4 Die Serien eines charakteristischen Spektrums

8.2 Röntgenspektrum

Röntgenstrahlung besteht aus der *Bremsstrahlung* und der *charakteristischen Strahlung*. Die beiden Komponenten treten meist gleichzeitig auf; das bedeutet, sie überlagern sich.

Bremsstrahlung

Die Bremsstrahlung entsteht direkt durch das Abbremsen der Elektronen in den Feldern der Anodenatome (Abb. 52.1). Der Energieverlust der Elektronen kann auf einmal, in mehreren Schritten oder in nur geringem Maße erfolgen. Eine beschleunigte Ladung strahlt nach der Elektrodynamik eine elektromagnetische Welle ab. Die nahe an den Atomkernen vorbeifliegenden Elektronen werden in deren Feldern abgelenkt und abgebremst. Bei jedem einzelnen "Bremsvorgang" wird ein Lichtquant (Photon) der Form $h \cdot f = E_0 - E$ abgegeben. Die Abbremsung der auftreffenden Elektronen erfolgt nicht einheitlich, sodaß Photonen mit unterschiedlicher Photonenenergie abgegeben werden. Das Bremsspektrum ist *kontinuierlich*.
Wird die gesamte Energie eines Elektrons in einem Quant abgegeben, erhält man die sogenannte *Grenzfrequenz f*, welche das kurzwellige Ende des Spektrums liefert; das Spektrum der Bremsstrahlung besitzt somit eine scharfe Grenze.

$$h \cdot f = e \cdot U \Leftrightarrow f = \frac{e\,U}{h} \qquad U \text{ ... Anodenspannung}$$

Beispiel A

Die Anodenspannung in einer Röntgenröhre beträgt 100kV. Berechne die obere Frequenzgrenze für die Bremsstrahlung.

Die Höchstfrequenz tritt auf, wenn ein Elektron ohne Energieverlust zur Anode kommt und dort seine gesamte Energie in einem Bremsvorgang verliert.

$$f = \frac{e\,U}{h} = \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{As} \cdot 10^{5}\ \text{V}}{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{Js}} = 2{,}4 \cdot 10^{19}\ \text{Hz}$$

Charakteristische Röntgenstrahlung

Die charakteristische Strahlung entsteht, wenn die Atome des Anodenmaterials zur Abgabe von Eigenstrahlung angeregt werden (Abb. 52.3).
Energiereiche Elektronen schlagen aus einer inneren Schale ein Hüllenelektron heraus. Die dadurch entstehende Lücke wird von einem Elektron aus einem äußeren Energieniveau wieder aufgefüllt. Bei diesem Vorgang wird ein Photon (Röntgenquant) emittiert, dessen Energie der Energiedifferenz zwischen den beiden Niveaus entspricht. Die auftretenden Spektrallinien werden in Serien zusammengefaßt, die mit *K, L, M* ... bezeichnet werden.
Jede Serie besteht aus einzelnen Linien, die mit griechischen Buchstaben bezeichnet werden. Etwa die K_α-Linie entsteht, wenn ein Elektron aus dem *L*-Niveau auf das *K*-Niveau unter Strahlungsabgabe springt.
Das entstehende Spektrum ist charakteristisch für eine bestimmte Atomart. *Henry Moseley* gelang es, eine Formel für die Frequenzen der *K*-Linien in Röntgenspektren zu erstellen:

$$f = R\,(Z-1)^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{m^2}\right) \qquad m = 2, 3, 4, \ldots$$

R ist die Rydbergfrequenz ($R = 3{,}29.10^{15}$Hz), *Z* die Kernladungszahl des Elementes; *m* gibt das Niveau an, von welchem das Elektron stammt, das auf das K-Niveau springt.

Mit Hilfe dieser Formel ist es möglich, aus dem bekannten Spektrum eines Elementes seine Kernladungszahl zu ermitteln.

Beispiel B

Berechne die Wellenlänge der K_α-Linie für Kupfer ($Z = 29$).

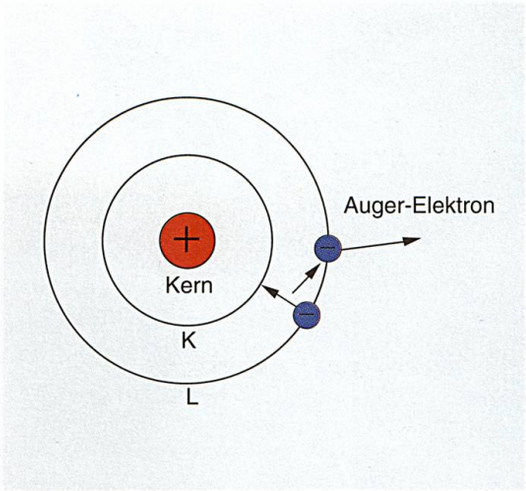
$$f = R\,(Z-1)^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{m^2}\right) = 3{,}29 \cdot 10^{15}\ \text{Hz} \cdot 28^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{2^2}\right) = 1{,}93 \cdot 10^{18}\ \text{Hz}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = 1{,}55 \cdot 10^{-10}\ \text{m}$$

8.3 Auger-Effekt

Nicht alle Atome, bei welchen ein Elektron aus einer inneren Schale durch Elektronenbeschuß "herausgeschossen" wurde, emittieren Röntgenstrahlung. Es gibt dabei auch die Möglichkeit, daß statt eines Röntgenquants ein Elektron einer äußeren Schale abgegeben wird. Der Vorgang erfolgt strahlungslos; die entstehenden Elektronen heißen *Auger-Elektronen*. (Abb. 53.1)

Der Auger-Effekt ist der Konkurrenzvorgang zur Röntgenemission.

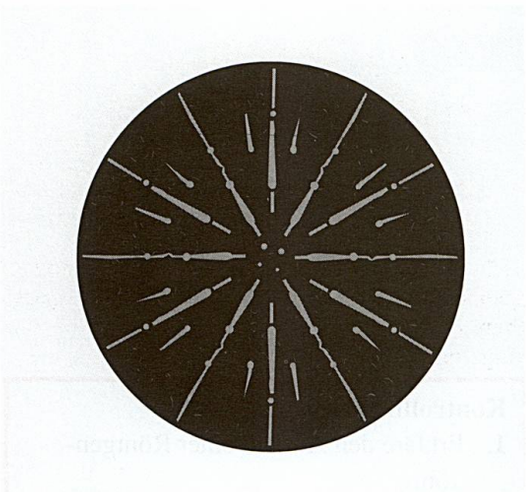


53.1 Nachdem die *K*-Schale ionisiert wurde, fällt ein *L*-Elektron von der *L*- in die *K*-Schale. Die frei werdende Energie wird benutzt, um ein zweites *L*-Elektron aus der *L*-Schale zu entfernen, es wird emittiert (Auger-Effekt).

8.4 Röntgenstrukturanalyse

Die *Röntgenstrukturanalyse* beschäftigt sich mit der Erforschung des Aufbaus von Stoffen. Mit Hilfe der Röntgenstrahlen konnte man erstmals den atomaren Aufbau der Materie erkennen.

Da Röntgenstrahlung eine sehr kurzwellige Strahlung ist, war man sehr lange nicht in der Lage, Beugungsversuche durchzuführen. Gitter mit derart kleinen Gitterkonstanten konnten nicht hergestellt werden. *Max von Laue* gelang 1912 der erste Beugungsversuch, indem er als Beugungsgitter einen Kristall verwendete. Die Gitterbausteine dienten dabei sozusagen als dreidimensionales Punktgitter. Die entstehenden Interferenzbilder werden *Laue-Diagramme* genannt (Abb. 53.2).



53.2 Laue-Diagramm

Kontinuierliche Röntgenstrahlung kann dazu verwendet werden, die Struktur von Kristallen zu erforschen. Zur Untersuchung des Kristallgitters werden Röntgenstrahlen unter einem bestimmten Winkel auf einen Kristall gerichtet (Abb. 53.3). Beobachtet man Strahlung einer bestimmten Wellenlänge, werden einige Strahlen an der obersten Kristallebene, andere an den darunterliegenden reflektiert. Die beiden parallelen Strahlen weisen einen bestimmten Gangunterschied auf. Sie sind in Phase, wenn ihr Gangunterschied g ein Vielfaches der Wellenlänge ist (Verstärkung). Ist g ein ungeradzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge, tritt Auslöschung ein.

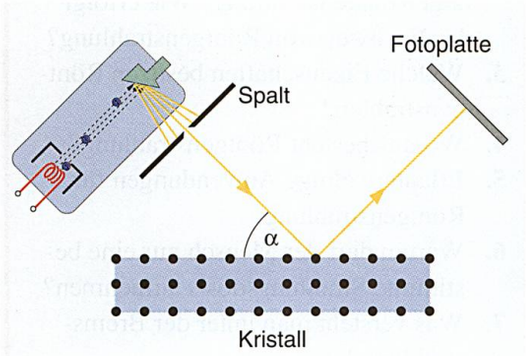
Es gilt:

$$(1)\quad \frac{g}{2} = d \cdot \sin\alpha \Leftrightarrow g = 2\,d \cdot \sin\alpha$$

Für die Intensitätsmaxima gilt:

$$(2)\quad g = n \cdot \lambda$$

Aus (1) und (2) folgt:



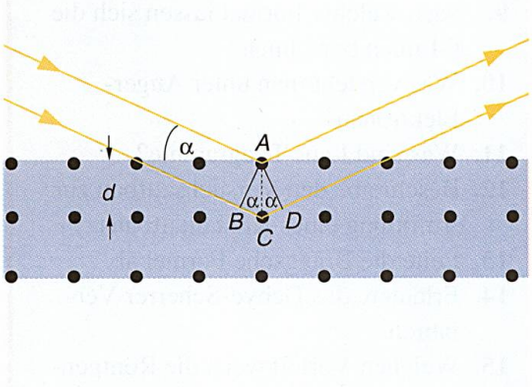
53.3 Strukturuntersuchungen an Kristallen

Braggsche Formel

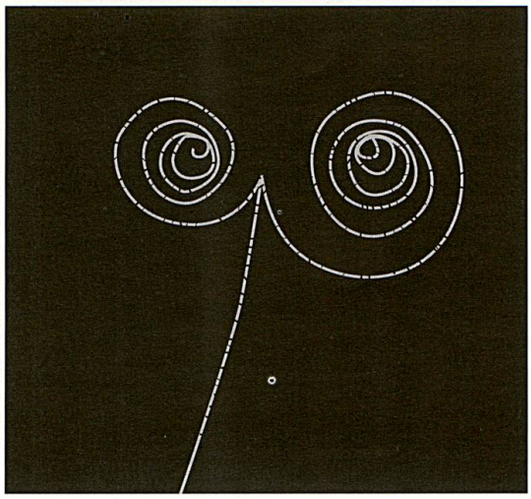
$$\sin\alpha = \frac{n\,\lambda}{2\,d}$$

Diese Gleichung wurde von *W. H. Bragg* und seinem Sohn *W. L. Bragg* abgeleitet.

Beim Bestrahlen eines Kristalls mit Röntgenstrahlung, bei welchem die Kristallebenen einen Abstand d besitzen, beobachtet man die Reflexionen unter verschiedenen Winkeln. Für $n = 1$ erhält man eine Reflexion 1. Ordnung, welche die größte Intensität besitzt. Mit steigender Ordnung nimmt der Winkel zu, die beobachtete Intensität der reflektierten Strahlen wird schwächer.



53.4 Wenn z.B. $\overline{BC} = \overline{CD} = g/2$, dann tritt ein Intensitätsmaximum auf.



54.1 Paarbildung

Der Kristall wird drehbar gelagert, die reflektierten Strahlen mit Hilfe eines Detektors registriert. Der Detektor kann z.B. eine fotografische Platte oder eine Ionisationskammer sein. Wenn die eintreffenden Strahlen die Braggsche Gleichung erfüllen, werden starke Reflexionen am Detektor gemessen. Man erhält somit eine spektrale Zerlegung der einfallenden Röntgenstrahlung.

Aus dem Winkel, der Wellenlänge und der Ordnung der Reflexion kann der Abstand der Kristallebenen, der sogenannten Netzebenen errechnet werden. Damit kann die Kristallstruktur ermittelt werden.

Debye-Scherrer-Verfahren

Verwendet man statt eines festen Kristalls ein Kristallpulver, dann schließen die Röntgenstrahlen alle möglichen Winkel mit den Kristallebenen ein. Das Pulver braucht nicht gedreht zu werden, die Intensitätsverteilung wird sofort erreicht.

Beispiel A

Ein Kristall liefert bei Röntgenbestrahlung unter einem Winkel von 30,62° eine Reflexion 1. Ordnung. Wie groß ist der Netzebenenabstand, wenn die Wellenlänge 0,234 nm beträgt?

$$\sin\alpha = \frac{n\lambda}{2d} \Leftrightarrow d = \frac{n\lambda}{2\sin\alpha} = \frac{0{,}234 \cdot 10^{-9}\,\text{m}}{2\sin 30{,}62^\circ} = 0{,}230\,\text{nm}$$

Aus einem bekannten Netzebenenabstand kann umgekehrt bei gegebenem α die Wellenlänge einer Röntgenstrahlung ermittelt werden.

Röntgenstrahlen ermöglichten am Beginn des 20. Jahrhunderts die Erforschung des Aufbaus der Materie. Mit Hilfe der Röntgenkristallografie ließ sich Materie erstmals bei atomarer Auflösung exakt abbilden.

Röntgenmikroskopie

Röntgenmikroskope erreichen eine wesentlich bessere Auflösung als optische Geräte, wobei auch die Verteilung der chemischen Elemente in einem Stoff ermittelt werden kann. Im Gegensatz zur herkömmlichen Elektronenmikroskopie lassen sich Proben sowohl in Luft als auch in Wasser untersuchen. Das bedeutet, daß biologische Objekte unter natürlichen Bedingungen erforscht werden können. Dies ist bei Elektronenmikroskopen meist nicht möglich.

Man verwendet niederenergetische Röntgenstrahlen mit Wellenlängen von 2nm bis 4nm. Röntgenmikroskope stellen eine wertvolle Ergänzung zu den Verfahren der Licht- und Elektronenmikroskopie dar.

Paarbildung

Trifft Röntgenstrahlung hoher Energie, größer als 1,02 MeV, auf ein Atom, so kann dies zur Bildung eines Elektron-Positron-Paares führen (Abb. 54.1). Diese Energie ist gleich der Ruhemasse der beiden entstehenden Teilchen. Das Positron hat nur eine sehr kurze Lebensdauer, da es sich mit einem Elektron wieder in Energie umwandelt.

Kontrollfragen

1. Erkläre den Aufbau einer Röntgenröhre.
2. In welchem Wellenlängenbereich liegt Röntgenstrahlung? Wie erfolgt der Nachweis von Röntgenstrahlung?
3. Welche Eigenschaften besitzen Röntgenstrahlen?
4. Woraus besteht Röntgenstrahlung?
5. Erläutere einige Anwendungen für Röntgenstrahlung.
6. Warum darf der Mensch nur eine bestimmte Strahlungsdosis aufnehmen?
7. Was versteht man unter der Bremsstrahlung?
8. Wie entsteht die charakteristische Strahlung?
9. Nach welcher Formel lassen sich die *K*-Linien berechnen?
10. Was versteht man unter Auger-Elektronen?
11. Was sind Laue-Diagramme?
12. Beschreibe den Versuchsaufbau zur Ermittlung eines Kristallaufbaus.
13. Leite die Braggsche Formel ab.
14. Erläutere das Debye-Scherrer Verfahren.
15. Welchen Vorteil weist die Röntgenmikroskopie auf?
16. Was versteht man unter Paarbildung?

Aufgaben

47. Berechne die kürzeste Wellenlänge der Bremsstrahlung, wenn ein Elektron, das mit Hilfe einer Spannung von 50 kV beschleunigt wurde, an der Anode einer Röntgenröhre abgebremst wird.

48. Berechne die Kernladungszahl eines Elementes, dessen K_α-Linie eine Wellenlänge von $1{,}47 \cdot 10^{-11}$ m aufweist.

49. Der Netzebenenabstand eines Kristalls beträgt 0,251 nm. Bei Bestrahlung unter einem Winkel von 27,01 ° erhält man eine Reflexion 1. Ordnung. Ermittle die Wellenlänge der einfallenden Strahlung.

9. Laser

Das Wort Laser setzt sich aus den Anfangsbuchstaben von ***L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation* (Lichtverstärkung durch stimulierte Strahlungsemission) zusammen.

9.1 Absorption und Emission von Strahlung

Atome besitzen komplizierte Energieniveauschemata. Für viele Überlegungen genügt es aber, zwei Energiezustände zu betrachten. Dabei stellt das untere Energieniveau E_1 den Grundzustand dar, in dem sich das Atom meist befindet.

Absorption

Trifft Licht auf ein Atom, das sich im unteren Energiezustand E_1 befindet, kann ein Photon absorbiert werden, wenn seine Energie $h \cdot f$ gleich der Energiedifferenz zwischen den Energiezuständen E_1 und E_2 ist. Das Atom geht in den angeregten Zustand E_2 über (Abb. 55.2).

Spontane Emission

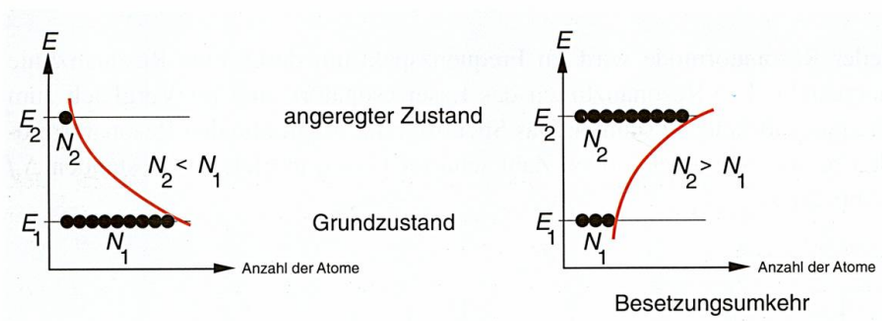
Der angeregte Zustand des Atoms hat im allgemeinen eine mittlere Lebensdauer von ca. 10^{-8} s. Das Atom kehrt sodann ohne äußere Einwirkung - spontan - in den Grundzustand zurück (Abb. 55.3). Die *spontane Emission* tritt in thermischen Lichtquellen (z.B. Glühlampe) auf. Die einzelnen Emissionen von verschiedenen Atomen erfolgen unabhängig voneinander und sind über alle Raumrichtungen statistisch verteilt. Das Licht ist daher inkohärent.

Induzierte oder stimulierte Emission

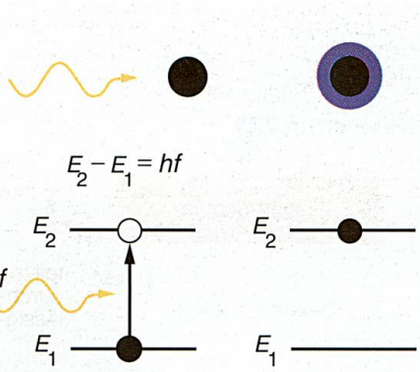
Der Übergang vom angeregten Zustand in den Grundzustand kann aber nicht nur spontan erfolgen, sondern auch durch ein Photon (gleicher Energie $h \cdot f$), das mit dem Atom in Wechselwirkung tritt, *erzwungen (induziert, stimuliert)* werden (Abb. 55.4). - Das durch die induzierte Emission ausgelöste Photon bewegt sich in in die gleiche Richtung wie das einfallende Photon. Treffen diese beiden Photonen auf angeregte Atome, dann kann pro Atom jeweils ein weiteres in gleiche Richtung laufendes Photon dazukommen. Im Wellenbild bedeutet dies: Der durch die induzierte Emission erzeugte Wellenzug ist gleichphasig mit der einfallenden Welle. Mit Hilfe der induzierten Emission läßt sich eine gerichtete, kohärente Strahlung erzeugen (Abb. 55.5).

9.2 Umbesetzung von Energieniveaus

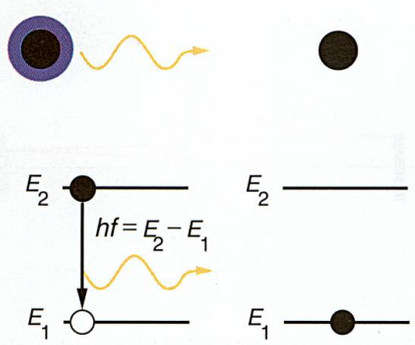
Zu einer Lichtverstärkung kann es nur dann kommen, wenn das Licht auf Materie trifft, die überwiegend angeregte Atome enthält. Normalerweise (bei Zimmertemperatur) befinden sich praktisch alle Atome im Grundzustand. Selbst bei höheren Temperaturen sind nur wenige Atome im angeregten Zustand (Abb. 55.1). Trifft nun eine Lichtwelle auf, dann überwiegt die Absorption gegenüber der induzierten Emission. Die einfallende Lichtwelle wird geschwächt. In einer thermischen Lichtquelle ist die induzierte Emission gegenüber der spontanen Emission vernachlässigbar. Um eine Lichtverstärkung zu ermöglichen, müssen sich mehr Atome im angeregten als im Grundzustand befinden. Oder anders ausgedrückt: Der angeregte Zustand muß stärker besetzt sein als der Grundzustand. Man spricht von einer *Besetzungsumkehr*.



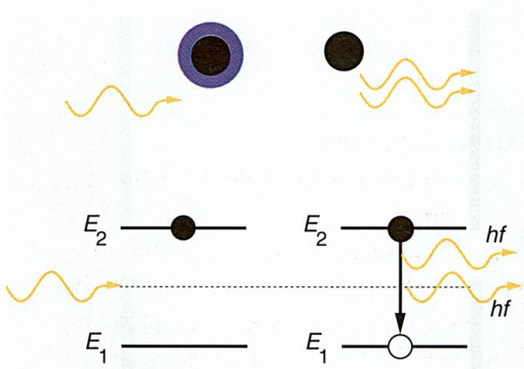
55.1 Verteilung der Atome auf Grund- und angeregten Zustand bei thermischem Gleichgewicht (links) und bei einer Besetzungsumkehr (rechts)



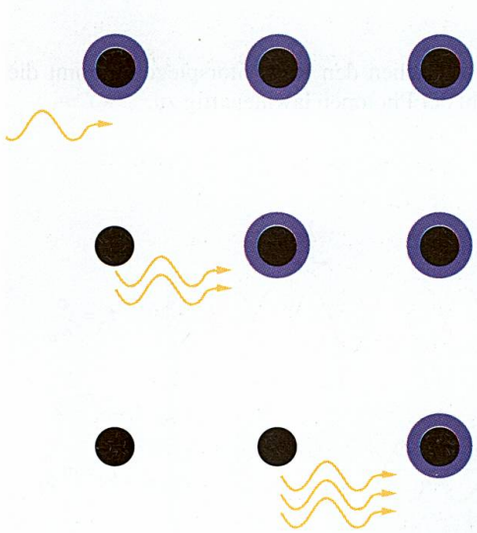
55.2 Absorption eines Photons



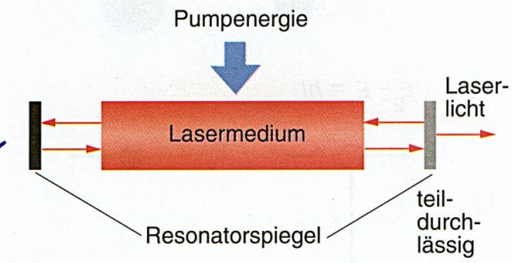
55.3 Spontane Emission eines Photons



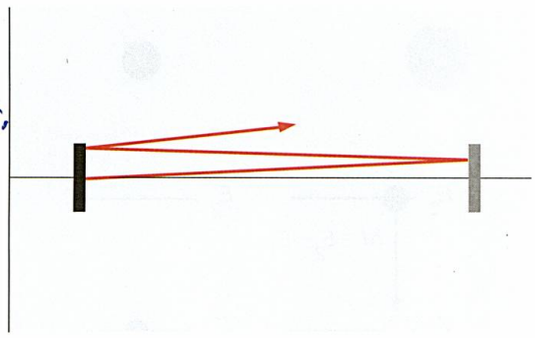
55.4 Induzierte Emission



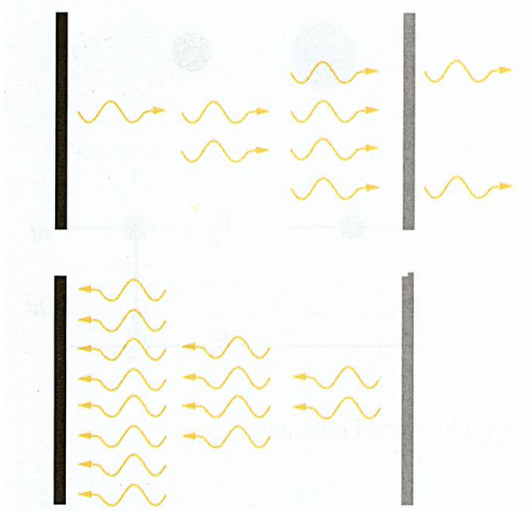
55.5 Durch induzierte Emission kann es zu einer Lichtverstärkung kommen.



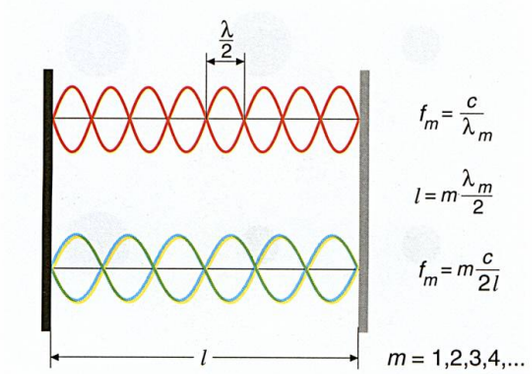
56.1 Aufbau eines Lasers



56.2 Nicht axial verlaufendes Licht verläßt das Lasermedium seitlich.



56.3 Zwischen den Resonatorspiegeln nimmt die Anzahl der Photonen lawinenartig zu.



56.4 Zwei mögliche Eigenschwingungen (longitudinale Moden) des Resonators

Die Umkehr der normalerweise vorliegenden Besetzung erreicht man durch geeignete Energiezufuhr, die als Pumpen bezeichnet wird. Außerdem muß der angeregte Zustand des Lasermediums eine lange Lebensdauer besitzen. Dieses Pumpen kann auf verschiedene Arten erfolgen, wie etwa mit Licht, durch Stöße mit Atomen oder mit elektrischen Feldern.

9.3 Aufbau des Lasers

Je länger der Lichtweg im Lasermedium ist, desto größer ist auch die Lichtverstärkung. Der Lichtweg läßt sich dadurch vergrößern, daß man das Lasermedium zwischen zwei Spiegeln anordnet. Das Licht "pendelt" zwischen den Spiegeln hin und her. Die Reflexion des Lichtes an einem Spiegel stellt eine Rückkopplung dar. Licht, das nahezu senkrecht auf die Spiegeloberfläche auftrifft, hat die Möglichkeit, sehr oft durch das Lasermedium zu laufen. Dagegen verläßt schräg laufendes Licht das Lasermedium seitlich, ohne nennenswert verstärkt zu werden (Abb. 56.2). Zwischen den Spiegeln baut sich eine Photonenlawine auf, die auf einen engen Winkelbereich um die Laserachse beschränkt bleibt. Einer der beiden Spiegel ist teildurchlässig. Er läßt einen Teil des Lichtes - ein nahezu paralleles Laserstrahlbündel - austreten. Das reflektierte Licht durchläuft erneut das verstärkende Lasermedium (Abb.56.3).

Bisher sind wir davon ausgegangen, daß Licht einfällt und verstärkt wird. Bei genügend großer Verstärkung kann es ohne Lichteinstrahlung zu einer Selbsterregung kommen. Der Verstärker wird zum Oszillator. Das Anschwingen des Oszillators wird durch Photonen der spontanen Emission hervorgerufen. Unter einem Laser versteht man im allgemeinen einen derartigen selbstanschwingenden Oszillator.

9.4 Resonator

Die beiden Spiegel bilden einen Resonator. Verstärkung kann nur dann auftreten, wenn sich hin- und rücklaufende Wellen nicht durch Interferenz auslöschen. Ist der Spiegelabstand ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge, dann bilden sich stehende Wellen aus (Abb. 56.4).

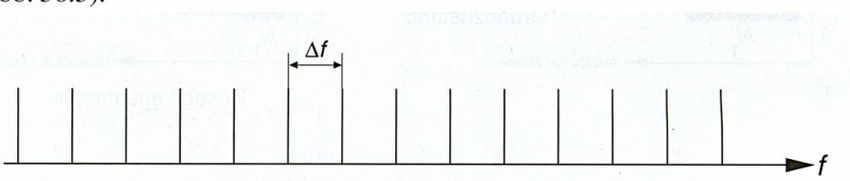
Die stehenden Wellen oder *Eigenschwingungen* des Resonators sind vergleichbar mit denen einer schwingenden Saite. Da die Resonatorlänge ein Vielfaches (10^5 - 10^6) der Wellenlänge ist, sind sehr viele Eigenschwingungen möglich. Zu jeder Eigenschwingung gehört eine bestimmte Frequenz bzw Wellenlänge. Die verschiedenen Eigenschwingungen des Resonators werden als *longitudinale Moden* bezeichnet. Abbildung 56.4 zeigt zwei Eigenschwingungen (Moden) des Resonators. Alle Photonen, die zu einem Mode gehören, sind kohärent.

Beispiel A

Es ist der Frequenzabstand der longitudinalen Moden zu berechnen (Brechzahl des Lasermediums = 1, Resonatorlänge l = 50 cm).

$$\Delta f = f_{m+1} - f_m = (m+1)\frac{c}{2l} - m\frac{c}{2l} = \frac{c}{2l} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{2 \cdot 0{,}5 \text{ m}} = 300 \text{ MHz}$$

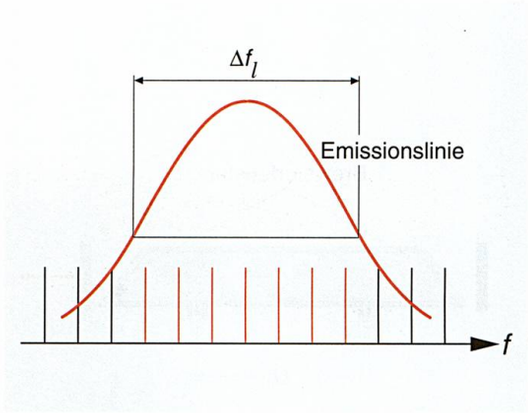
Jeder Resonatormode wird im Frequenzspektrum durch eine Resonanzlinie dargestellt. Die Resonanzlinien des Laserresonators sind im Vergleich zum Frequenzabstand Δf schmal. Das Spektrum der longitudinalen Resonatorrmoden besteht aus einer großen Zahl scharfer Linien in gleichen Abständen Δf (Abb. 56.5).



56.5 Spektrum der longitudinalen Resonatormoden

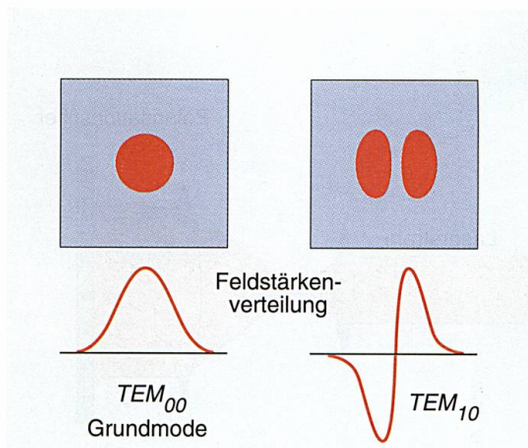
Licht wird im Lasermedium durch induzierte Emission erzeugt. Diese Emissionslinie besitzt eine bestimmte Linienbreite (vgl. Abschnitt 5.2). Im Resonator können sich nur solche Frequenzen (Moden) ausbilden, die innerhalb dieser Linienbreite liegen. In Abbildung 57.1 liegen 7 Eigenfrequenzen (Moden) des Resonators innerhalb der Linienbreite der Emissionslinie.

Für die Eigenfrequenzen in der Nähe des Maximums der Emissionslinie ist die Verstärkung am größten. Daher ist die Breite der Einhüllenden der Resonator-Eigenfrequenzen geringer als die ursprüngliche Emissionslinie. Im Laser werden im allgemeinen mehrere Moden zum Schwingen angeregt. Durch geeignete Maßnahmen können auch Moden unterdrückt werden, sodaß im Extremfall nur eine Modenfrequenz abgestrahlt wird (Monomodenbetrieb). Das geht allerdings auf Kosten der Leistung. Leistungslaser arbeiten im Multimodenbetrieb.



57.1 Nur die Resonanzmoden, die innerhalb der Linienbreite der Emissionslinien liegen, können angeregt werden.

Bisher sind wir davon ausgegangen, daß das Licht in Richtung der Resonatorachse verläuft. Nun wird aber senkrecht auffallendes Licht nicht exakt in sich selbst reflektiert, denn der Spiegelrand wirkt als Blende, und es kommt zur Beugung des Lichtes. Daher müsen auch Wellen betrachtet werden, die einen kleinen Laufwinkel zur Resonatorachse besitzen. Für eine schräg laufende Welle ist der tatsächliche Spiegelabstand größer. Daher stellen sich andere Resonanzfrequenzen ein. Die Schwingungen quer zur Resonatorachse bezeichnet man als *Transversal Elektromagnetische Moden (TEM)*. Neben den longitudinalen treten auch transversale Moden auf. Abbildung 57.2 zeigt Intensitäts- und Feldstärkenverteilung in einer Ebene senkrecht zur Resonatorachse. Bei allen Moden, außer dem TEM_{00}, gibt es Stellen (Knotenlinien) auf dem Resonatorspiegel, wo die Feldstärke ständig Null ist. Der Modenindex gibt die Anzahl der Knotenlinien in *x*- bzw. *y*-Richtung an. Durch geeignete Maßnahmen können alle transversalen Moden bis auf den Grundmode unterdrückt werden.



57.2 Räumliche Verteilung der Intensität und Feldstärke (transversale Moden)

9.5 Lasertypen

Die Laser lassen sich zu folgenden Gruppen zusammenfassen:

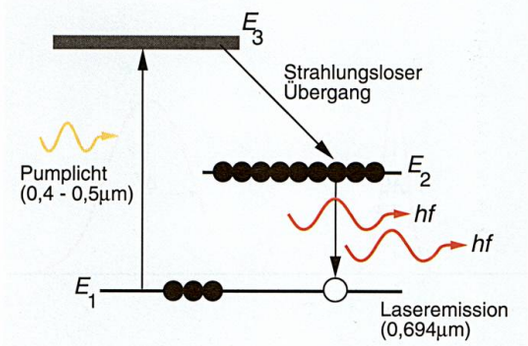
- *Festkörperlaser:* z.B. Rubinlaser; Nd-YAG-Laser (Neodym Yttrium-Aluminium-Granat)
- *Gaslaser:* z.B. He-Ne-Laser; CO_2-Laser
- *Halbleiterlaser* (vgl. Band 3, S. 103 f)
- *Flüssigkeitslaser*

Man unterscheidet zwischen zwei Betriebsarten des Lasers:

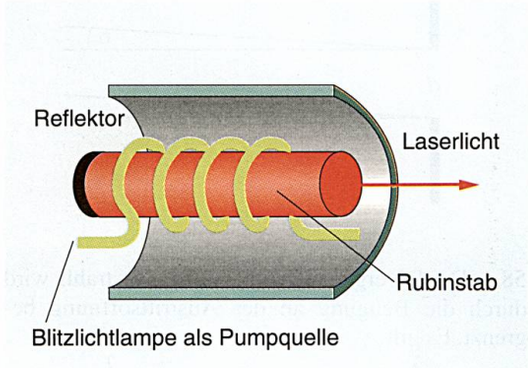
- *cw-Betrieb:* Dauerstrich- oder kontinuierlicher Laser (continuous wave) z.B. He-Ne-Laser
- *Impulsbetrieb:* Während einer sehr kurzen Zeit wird eine hohe Leistung abgestrahlt; z.B. Rubin-Laser

Rubin-Laser

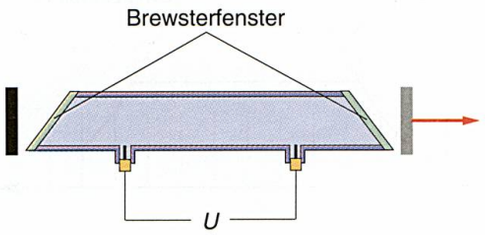
Er ist der erste, im Jahre 1960 gebaute Laser. Das Lasermedium ist ein künstlicher Rubinstab. Rubin besitzt ein Al_2O_3-Gitter, in dem ca 0,05 % Al-Ionen durch Cr-Ionen ersetzt sind. Für die Laserwirkung von Bedeutung ist das Energieniveauschema der Cr^{3+}-Ionen im Kristallgitter. Abbildung 57.3 zeigt das vereinfachte Energieniveauschema und die Übergänge im Rubinlaser. E_1 ist der Grundzustand, E_2 und E_3 sind angeregte Zustände. E_3 ist ein Energieband. (Es entsteht dadurch, daß sich die Energieniveaus der isolierten Atome bei deren Einbau in das Kristallgitter verbreitern.) Durch Einstrahlung von Pumplicht werden Cr-Atome in den angeregten Zustand E_3 gebracht. Von diesem erfolgt ein strahlungsloser Übergang in das Energieniveau E_2. Dabei wird Energie in Wärme umgesetzt. Die Lebensdauer des Zustandes E_2 beträgt ca. 10^{-3} s. Bei genügend großer Pumpleistung sammeln sich ausreichend viele Atome im Zustand E_2 an. Dies geht auf Kosten des Grundzustandes, es kommt also zu einer Besetzungsumkehr. Geht ein Atom nach etwa 10^{-3} s spontan in den Grundzustand über, dann kann das emittierte Photon mit einem angeregten Atom in



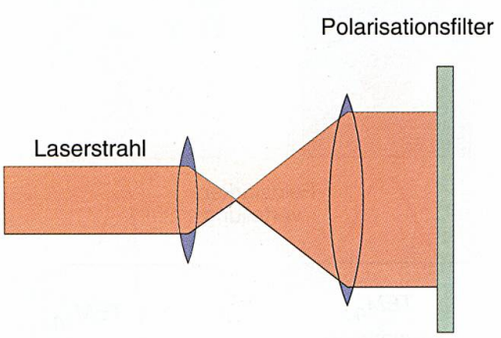
57.3 Vereinfachtes Energieniveauschema für den Rubinlaser



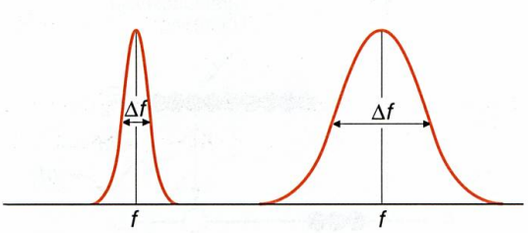
57.4 Prinzipieller Aufbau des Rubinlasers



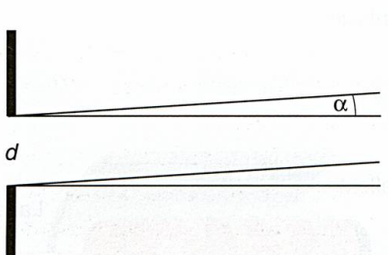
58.1 Prinzipieller Aufbau des He-Ne-Lasers



58.2 Versuchsaufbau, um die Polarisationsebene eines aufgeweiteten Laserstrahls feststellen zu können



58.3 Vergleich der Linienbreiten eines Lasers (links) und einer konventionellen Lichtquelle



58.4 Der Divergenzwinkel α des Laserstrahls wird durch die Beugung an der Austrittsöffnung begrenzt. Es gilt:

$$\sin\alpha \approx \frac{\lambda}{d} \quad \text{und} \quad \sin\alpha \approx \alpha \Rightarrow \alpha \approx \frac{\lambda}{d}$$

Wechselwirkung treten und den Übergang in den Grundzustand erzwingen (induzierte Emission). Die beiden Photonen laufen in die gleiche Richtung und können weitere angeregte Atome zu Emissionen zwingen. Die Anzahl der Photonen, die in die gleiche Richtung laufen, steigt lawinenartig an.

Der Rubinstab besitzt planparallel verspiegelte Endflächen, deren eine teildurchlässig ist. Der erste Laser enthielt eine spiralförmig um den Laserstab gewundene Blitzlichtröhre als Pumplichtquelle. Ein Lichtblitz dieser Röhre löst einen Laserimpuls aus.

Helium-Neon-Laser

Ein Glasrohr enthält ein Gemisch der Gase He und Ne im Verhältnis von ca. 10 : 1. Durch eine hohe Gleichspannung oder durch eine hochfrequente Wechselspannung wird eine Gasentladung erzeugt. Elektronen regen durch Zusammenstöße He-Atome an. Diese wiederum geben durch Stöße ihre Energie an Ne-Atome ab, die dadurch in einen höheren angeregten Zustand gebracht werden. Dieser ist gegenüber einem darunter liegenden Niveau überbesetzt. Damit ist die nötige Besetzungsumkehr erreicht. Die Ne-Atome sind das eigentliche Lasermedium. He dient als Pumpgas. Für Versuche im Unterricht wird meist ein He-Ne-Laser verwendet. Er gibt eine kontinuierliche Strahlung mit einer Wellenlänge von 0,63 µm (rot) mit einer Leistung von ca. 1 mW ab. Beim Gaslaser befinden sich die Resonatorspiegel außerhalb des Entladungsrohres, da sie sonst nicht mehr justiert werden können. Das Entladungsrohr ist an beiden Enden meist mit einem *Brewster-Fenster* abgeschlossen (Abb. 58.1).

Trifft Licht unter dem Brewster-Winkel (ca. 56° für Glas) auf eine Glasplatte, dann wird die in der Einfallsebene schwingende Komponente des Lichtvektors nicht reflektiert, sie tritt ungeschwächt durch (siehe Band 2, Seite 86). Auf diese Weise lassen sich Reflexionsverluste für den in der Einfallsebene schwingenden Lichtvektor vermeiden. Das austretende Laserlicht ist linear polarisiert.

Versuch

Der Strahl eines He-Ne-Lasers wird mit zwei Sammellinsen aufgeweitet und durch ein Polarisationsfilter auf einen Schirm geschickt (Abb. 58.2). Durch Verdrehen des Polarisationsfilters läßt sich die Polarisationsebene feststellen.

9.6 Eigenschaften des Laserlichtes

Große Frequenzschärfe

Laserlicht besitzt im Vergleich zu normalen Lichtquellen eine sehr geringe Linienbreite Δf (Abb. 58.3). Es ist praktisch monochromatisch. Während mit normalen Lichtquellen relative Linienbreiten von maximal $\Delta f / f \approx 10^{-6}$ erreichbar sind, ist bei Lasern ein Wert von $\Delta f / f \approx 10^{-12}$ möglich.

Hohe Kohärenz

Aus der geringen Linienbreite Δf folgt eine lange Kohärenzzeit Δt und eine große Kohärenzlänge $\Delta l = c / \Delta f$.

Beispiel A

Die Spektrallinie einer Spektrallampe hat bei einer Wellenlänge von 0,5 µm eine relative Linienbreite von $\Delta f / f = 10^{-5}$. Ein Laser hat bei der gleichen Wellenlänge den Wert $\Delta f / f = 10^{-12}$. Berechne die Kohärenzlängen für beide Lichtquellen.

Spektrallampe: $\Delta l = \frac{c}{\Delta f} = \frac{\lambda f}{\Delta f} = \frac{\lambda}{\frac{\Delta f}{f}} = \frac{0{,}5 \cdot 10^{-6}\,\text{m}}{10^{-5}} = 5\,\text{cm}$

Laser: $\Delta l = \frac{\lambda}{\frac{\Delta f}{f}} = \frac{0{,}5 \cdot 10^{-6}\,\text{m}}{10^{-12}} = 0{,}5 \cdot 10^{6}\,\text{m} = 500\,\text{km}$

Geringe Divergenz

Laserlicht ist nahezu parallel. Der Divergenzwinkel α - der halbe Öffnungswinkel des Strahlenbündels - ist praktisch durch die Beugung an der Austrittsöffnung begrenzt (Abb. 58.4).

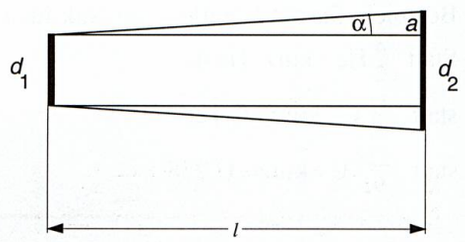
Beispiel B

Der Divergenzwinkel eines Laserstrahls beträgt 1 mrad. Welchen Durchmesser hat der Lichtfleck in 1 km Entfernung? (Abb. 59.1)

(1) $d_1 << d_2$ und $a = \frac{d_2 - d_1}{2} \Rightarrow a \approx \frac{d_2}{2}$

(2) $\tan\alpha = \frac{a}{l}$ *und* $\tan\alpha \approx \alpha \Rightarrow \alpha \approx \frac{a}{l}$

(1),(2) $\alpha = \frac{a}{l} = \frac{\frac{d_2}{2}}{l} \Leftrightarrow d_2 = 2\,\alpha\, l = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 1000\,\text{m} = 2\,\text{m}$



59.1 Abbildung zu Beispiel B

Gute Fokussierbarkeit und große Strahlintensität

Ein Laserstrahl läßt sich auf eine sehr kleine Fläche fokussieren. Dadurch können große Intensitäten erreicht werden.

Beispiel C

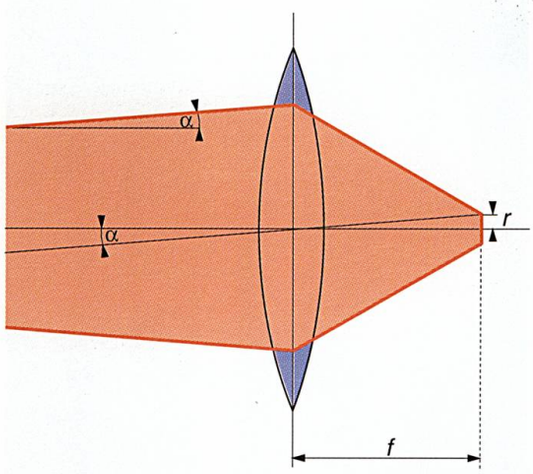
Laserlicht (Leistung: 10 W, Divergenzwinkel: 0,1 mrad) soll mit einer Sammellinse ($f = 100$ mm) fokussiert werden. Wie groß sind Querschnittsfläche des Brennflecks und Intensität im Brennfleck? (Abb. 59.2)

$r = f\tan\alpha$ und $\tan\alpha \approx \alpha \Rightarrow r \approx f\alpha$

$r = f\alpha = 0{,}1\,\text{m} \cdot 10^{-4} = 1 \cdot 10^{-5}\,\text{m}$

$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{r^2\pi} = \frac{10\,\text{W}}{(1 \cdot 10^{-5}\,\text{m})^2\,\pi} \approx 3 \cdot 10^{10}\,\text{W m}^{-2} = 30\,\frac{\text{GW}}{\text{m}^2} = 30\,\frac{\text{kW}}{\text{mm}^2}$

Wird Licht einer normalen Lichtquelle fokussiert, dann sind die erreichbaren Intensitäten um viele Zehnerpotenzen kleiner.



59.2 Abbildung zu Beispiel C

9.7 Anwendungen des Laserlichtes

Meßtechnik: Entfernungs- und Richtungsmessung bei Landvermessung, Straßenbau, Tunnelbau, Präzisionslängenmessung mit Interferometer (Band 2, Seite 78), Geschwindigkeitsmessung über Dopplereffekt (Band 2, Seite 33).

Holographie: Band 2, Seite 90 f

Nachrichtenübertragung über Glasfasern (Lichtwellenleiter): Als Lichtquelle dient ein Halbleiter-Laser (Band 2, Seite 56 f)

Laserdrucker in der Datenverarbeitung

Compact-Disc (CD): Die CD wird mittels Laserstrahl abgetastet (Band 2, Seite 78).

Materialbearbeitung: Der gebündelte Laserstrahl verursacht eine örtlich begrenzte, starke Erwärmung, die zum Schmelzen oder Verdampfen des Materials führt: Bohren sehr kleiner Löcher, z.B. für Uhrenlagersteine; Schneiden verschiedener Materialien, z.B Stahlbleche in der Autoindustrie, Schweißen, Oberflächenbehandlung.

Medizin: Netzhautfixierung, Tumorentfernung, Zerstörung von Harnleitersteinen

Aufgaben

50. Das Licht eines 10-W-Lasers wird auf einen Durchmesser von 1 µm fokussiert. Wie groß ist die Intensität?

51. Ein Laserstrahl (Leistung: 25 W, Divergenzwinkel: 1,2 mrad) soll durch eine Linse so fokussiert werden, daß die Strahlungintensität im kreisförmigen Brennfleck 800 W/mm^2 beträgt. Welche Brennweite ist erforderlich?

52. Ein Laserstrahl (Strahldurchmesser: 5 mm, Divergenzwinkel: 0,1 mrad) wird durch eine Linse (f =1 0cm) fokussiert. Wie ändert sich die Strahlungsintensität?

53. Warum nimmt bei einer Verkleinerung der Resonatorlänge die Zahl der longitudinalen Moden ab?

Kontrollfragen

1. Welcher Unterschied besteht zwischen spontaner und induzierter Emission?
2. Was versteht man unter der Umbesetzung von Energieniveaus? Warum ist dies erforderlich?
3. Erkläre den prinzipiellen Aufbau eines Lasers und seine Funktion.
4. Welche Rolle spielt der Resonator?
5. Erkläre Aufbau und Funktion des Rubinlasers.
6. Erkläre den Aufbau des He-Ne-Lasers.
7. Welche Eigenschaften hat das Laserlicht?
8. Nenne Anwendungen für das Laserlicht.

Beispiel A

Beispiele für die Notation von Nukliden:

Statt $^{4}_{2}\mathrm{He}$ kurz He 4;

statt $^{12}_{6}\mathrm{C}$ kurz C 12;

statt $^{238}_{92}\mathrm{U}$ kurz U 238

10. Atomkern

10.1 Aufbau des Atomkerns

Nach dem Rutherfordschen Atommodell enthält der Kern Z positve Ladungen. Diese Kernladungszahl Z ist gleich der Ordnungszahl des Elementes und damit gleich der Elektronenzahl. Das leichteste Element - der Wasserstoff - besitzt die Kernladungszahl $Z = 1$. Die Masse eines Elementes ist annähernd ein ganzzahliges Vielfaches der Wasserstoffmasse. Zu Beginn des 20. Jh. nahm man daher an, daß der Wasserstoffkern ein elementarer Baustein aller Atomkerne ist. Er erhielt den Namen *Proton*.

Aus dieser Annahme folgerte man, daß ein Kern aus so vielen Protonen besteht, wie es der Kernmasse entspricht. Demnach müßte Helium mit der relativen Atommasse 4 im Kern vier Protonen enthalten. Da aber die Kernladungszahl $Z = 2$ ist, hat man sich vorgestellt, daß die überschüssige Zahl von positiven Ladungen durch zwei Kernelektronen neutralisiert wird. Erst nach der Entdeckung des *Neutrons* durch *J. Chadwick* im Jahr 1932 konnte der Aufbau des Atomkerns erklärt werden.

Der Atomkern ist aus *Protonen* und *Neutronen*, den sogenannten *Nukleonen*, aufgebaut.

Das Neutron ist ein elektrisch neutrales Teilchen mit annähernd gleicher Masse wie das Proton. Die Kernladungszahl ist gleich der Anzahl der Protonen.

Nukleon	Masse	Ladung
Proton p	1,007276 u	1 positive Elementarladung
Neutron n	1,008665 u	keine

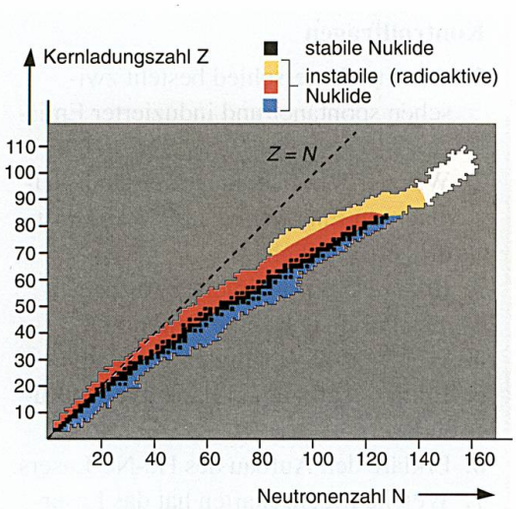
Da die Elektronenmasse 1/1836 der Protonenmasse beträgt, wird die Atommasse praktisch durch die Kernmasse bestimmt.

$A = Z + N$

Die Summe aus Kernladungszahl (Protonenzahl) Z und Neutronenzahl N wird als *Massenzahl* A bezeichnet.

Die Massenzahl A gibt die Anzahl der Nukleonen an. Zur Charakterisierung eines Kernes sind zwei Angaben erforderlich. Es ist üblich, zum chemischen Symbol als unteren Index die Kernladungszahl Z und als oberen Index die Massenzahl A zu schreiben. Allerdings ist die Angabe der Kernladungszahl Z überflüssig, da sie ja durch das chemische Symbol festgelegt ist. Daher ist auch eine kürzere Schreibweise möglich.

Eine Kernart mit bestimmter Massenzahl A und Kernladungszahl Z wird als *Nuklid* bezeichnet.



60.1 Nuklidkarte: Die Isotope der Elemente sind in Abhängigkeit von der Kernladungszahl (Protonenzahl) Z und der Neutronenzahl N eingezeichnet.

In der *Nuklidkarte* (Abb. 60.1) ist die Kernladungszahl Z gegen die Neutronenzahl N aufgetragen. Die in der Natur vorkommenden, stabilen Kerne (Nuklide) sind durch schwarze Punkte dargestellt.

Neben diesen ca. 260 stabilen Kernen sind derzeit noch über 2000 instabile Kerne bekannt (in Abb. 60.1 blau, rot und gelb). Die Nuklidkarte zeigt auch deutlich, daß die Neutronenzahl stärker ansteigt als die Protonenzahl. Der Bereich der stabilen und der instabilen Kerne weicht mit zunehmender Protonenzahl immer mehr von der Geraden $Z = N$ ab.

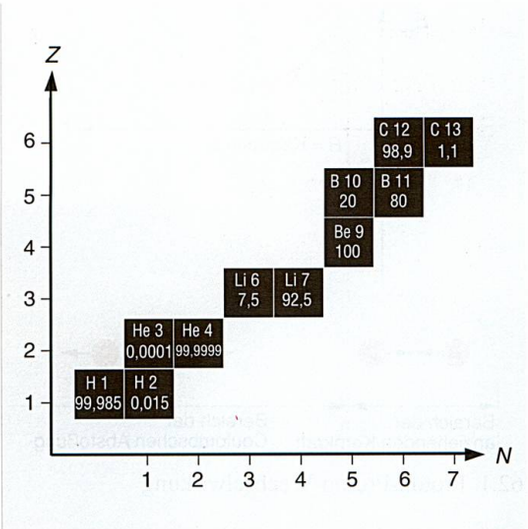
10.2 Isotope

Eine horizontale Linie in der Nuklidkarte gehört zu einer bestimmten Protonenzahl und damit auch zu einem bestimmten Element. Die Nuklidkarte zeigt, daß zu sehr vielen Protonenzahlen - also chemischen Elementen - mehrere Nuklide gehören, die sich durch die Neutronenzahlen unterscheiden.

Nuklide mit gleicher Protonenzahl aber unterschiedlicher Neutronenzahl werden als *Isotope* bezeichnet.

Die meisten Elemente sind Isotopengemische. Abbildung 61.2 zeigt einen kleinen Ausschnitt aus der Nuklidkarte. In jeder Zeile sind die Isotopen des natürlichen Elementes angeführt. Jedes stabile Nuklid ist durch ein schwarzes Quadrat dargestellt. Neben dem Elementsymbol steht die Nukleonenzahl A und darunter die prozentuelle Häufigkeit im natürlichen Element. Die Häufigkeitsverteilung der Isotope eines Elementes ist auf der Erde praktisch konstant.

Die Isotope eines Elementes zeigen gleiches chemisches Verhalten. Daher ist eine Isotopentrennung nur durch physikalische Methoden möglich.



61.2 Ausschnitt aus der Nuklidkarte. Es sind nur stabile Isotope angeführt.

10.3 Atommasse

Die relative Atommasse des Elementes (chemische Atommasse) ist die mittlere Masse des Isotopengemisches. Sie ist charakteristisch für das Element (Tabelle 61.1).

Z	Element	A	N	rel. Häufigkeit in %	Isotopenmasse in u	Atommasse in u
1	H	1 2	0 1	99,985 0,015	1,007825 2,014102	1,008
6	C	12 13	6 7	98,9 1,1	12,000000 13,003354	12,011

61.1 Die Atommasse eines Elementes ist ein Mittelwert.

Beispiel A

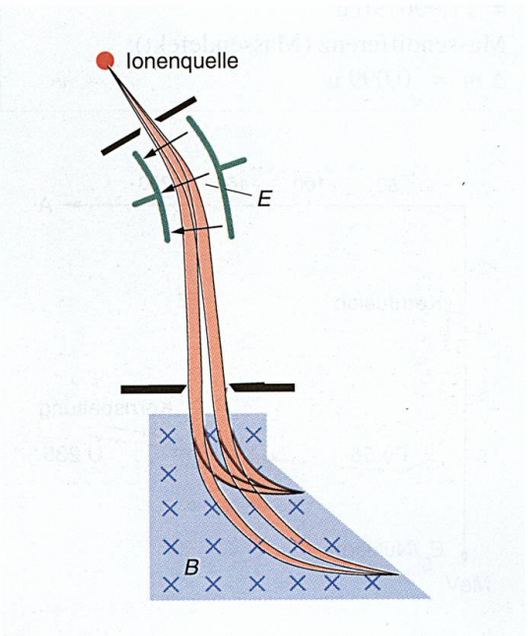
Das Element Wasserstoff (H) ist ein Gemisch der Isotope H 1 und H 2.

H 1 ($^1_1$H) : "Leichter Wasserstoff", der Kern enthält ein Proton; 99,985 % des Gesamtvorkommens an natürlichem Wasserstoff

H 2 ($^2_1$H, $^2_1$D) : "Schwerer Wasserstoff" oder Deuterium; der Kern enthält ein Proton und ein Neutron; 0,015 % des Gesamtvorkommens an natürlichem Wasserstoff

Atommassen können mit einem *Massenspektrometer* bestimmt werden. Die zu untersuchenden Atome werden ionisiert und beschleunigt. Ein sehr enges Bündel - ein Ionenstrahl - wird sodann durch elektrische und magnetische Felder abgelenkt.

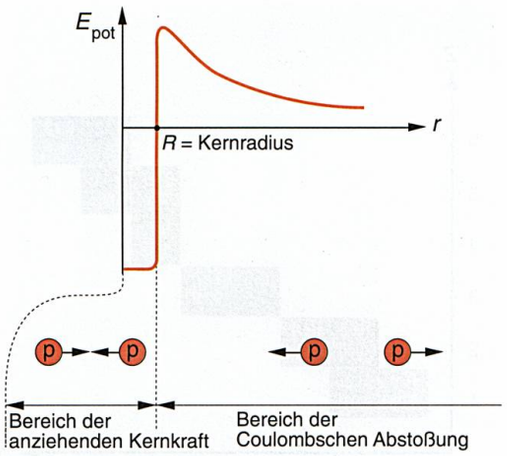
Im Jahre 1913 konnten erstmals auf diese Weise Isotope nachgewiesen werden. Durch geeignete Anordnung und Dimensionierung der Felder kann man erreichen, daß sich Ionen gleicher Masse, aber mit verschiedenen Geschwindigkeiten, in einem Punkt sammeln. Ionen mit verschiedenen Massen (Isotope) werden daher auf verschiedenen Stellen eines Schirmes auftreffen (Abb. 61.3). Atommassen (Kernmassen) können auf diese Weise mit großer Genauigkeit bestimmt werden.



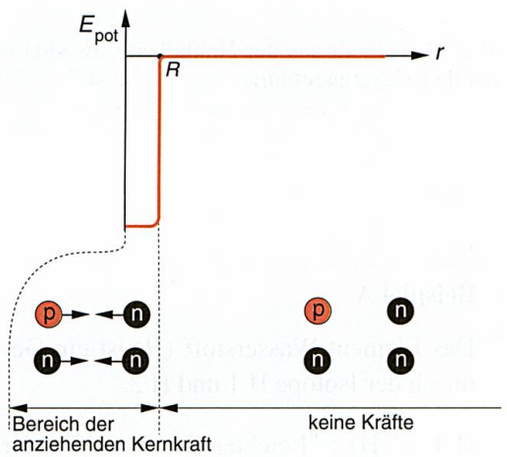
61.3 Prinzip eines Massenspektrometers

10.4 Kernkräfte und Kernradius

Zwischen den Protonen wirken Coulombsche Abstoßungskräfte. Damit trotzdem ein stabiler Kern existieren kann, muß es noch andere Kräfte geben. Um diese zu untersuchen, führt man Streuversuche durch. Beim Rutherfordschen Streuversuch zu Beginn des 20. Jh wurden Atomkerne mit α-Teilchen mit einer Energie von 8,7 MeV beschossen. Sie wurden vom positiv geladenen Kern abgelenkt (gestreut). Verwendet man jedoch α-Teilchen mit einer Energie von etwa 30MeV, dann können sie die Coulombsche Abstoßung überwinden und in den Kern eindringen. Die α-Teilchen kommen nicht mehr zurück. Sie unterliegen einer anziehenden Kraft, die man als *Kernkraft* bezeichnet.

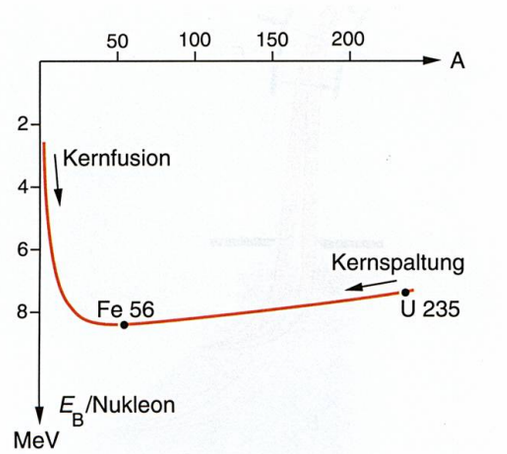


62.1 Proton-Proton-Wechselwirkung



62.2 Proton-Neutron- und Neutron-Neutron-Wechselwirkung

Ein C-12-Kern enthält 6 Protonen und 6 Neutronen.
Masse der vollständig getrennten Nukleonen:
Protonenmasse + Neutronenmasse =
$6 \cdot 1{,}007276\ \text{u} + 6 \cdot 1{,}008665\ \text{u} =$
$= 6{,}043656\ \text{u} + 6{,}051990\ \text{u} = 12{,}095646\ \text{u}$
Kernmasse:
Masse des C 12-Atoms – Elektronenmasse
$= 12{,}000000\ \text{u} - 6 \cdot 0{,}000549\ \text{u} =$
$= 11{,}996796\ \text{u}$
Massendifferenz (Massendefekt):
$\Delta m = 0{,}099\ \text{u}$



62.3 Verlauf der Bindungsenergie pro Nukleon in Abhängigkeit von der Massenzahl A

Diese Kernkraft ist nur bei sehr kleinen Entfernungen (ca. 10^{-15} m = 1 fm) wirksam. Abbildung 62.1 zeigt den Wirkungsbereich der abstoßenden Coulombkraft und den der anziehenden Kernkraft. Diese Kernkraft ist aber auch zwischen Neutronen (nn) und zwischen Neutronen und Protonen (np) wirksam (Abb. 62.2).

Die Kernkraft ist stärker als die Coulombsche Kraft, deshalb wird sie auch als starke Wechselwirkung bezeichnet (siehe Abschnitt 14). Die Kurve für die Kernkraft fällt sehr steil ab, d.h. ihre Reichweite ist sehr gering und scharf begrenzt. Die Kernkraft wirkt nur zwischen benachbarten Nukleonen.

Der Neutronenüberschuß mit zunehmender Protonenzahl ist wegen der abstoßenden Coulombschen Kräfte erforderlich. Durch verschiedene Experimente hat man herausgefunden, daß zwischen Kernradius R und Massenzahl A folgender Zusammenhang gilt:

$$R = r_o \, A^{\frac{1}{3}} \qquad r_o = 1{,}4 \cdot 10^{-15}\,\text{m}$$

Nimmt man den Kern als kugelförmig an, dann gilt für das Kernvolumen V:

$$V = \frac{4\,\pi\,R^3}{3} = \frac{4\,\pi\,r_o^3}{3} \cdot A$$

$\frac{4\,\pi\,r_o^3}{3}$ kann man als Volumen eines Nukleons betrachten. Damit gilt:

Kernvolumen = Volumen eines Nukleons mal Nukleonenzahl. Daraus folgt auch, daß alle Kerne gleiche Dichte haben.

10.5 Massendefekt und Bindungsenergie

Werden Protonen und Neutronen zu einem Kern "zusammengefügt", dann wird die Bindungsenergie frei (siehe Abschnitt 2). Der Kern hat eine niedrigere Energie als die getrennten Bestandteile, er ist stabil. Wird den getrennten Teilchen die Energie Null zugeordnet, dann besitzt der Kern eine negative Energie. Gerechnet wird mit dem Betrag der Energie. Woher kommt nun diese freiwerdende Bindungsenergie? Um diese Frage beantworten zu können, muß man eine Massenbilanz ziehen. Die Summe der Massen der getrennten Nukleonen wird dabei mit der Kernmasse verglichen (siehe den Kasten in der Randspalte).

Die Kernmasse ist geringer als die Summe der Massen seiner Bestandteile. Die Massendifferenz wird als Massendefekt bezeichnet.

Die Verbindung zwischen Massendefekt und Bindungsenergie liefert die Relativitätstheorie (siehe Abschnitt 1): $E_B = m \cdot c^2$
Dem Massendefekt Δm entspricht die freiwerdende Bindungsenegie E_B.

$$E_B = 0{,}099 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27}\,\text{kg} \cdot (3 \cdot 10^8\,\tfrac{\text{m}}{\text{s}})^2 = 1{,}48 \cdot 10^{-11}\,\text{J} = 9{,}2 \cdot 10^7\,\text{eV} =$$
$$= 92\ \text{MeV}$$

Die 12 Nukleonen des Kerns sind mit einer Gesamtenergie von 92 MeV gebunden. Um den Kern in seine Bestandteile zu zerlegen, muß dieser Energiebetrag zugeführt werden. Die Bindungsenergie der Elektronen wurde nicht berücksichtigt. Dividiert man die Gesamtbindungsenergie durch die Nukleonenzahl (Massenzahl) A, erhält man die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon für den C-12-Kern:

$$\frac{E_B}{A} = \frac{92\ \text{MeV}}{12} = 7{,}7\ \text{MeV}$$

Abbildung 62.3 zeigt die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon in Abhängigkeit von der Massenzahl A.

Der Kurvenverlauf zeigt, daß die Bindungsenergie für Fe 56 und seine Nachbarelemente am größten ist. Die Nukleonen sind am stärksten gebunden, und die Elemente sind am stabilsten. Kernenergiegewinnung kann entweder durch die Verschmelzung (Fusion) leichter Kerne oder durch die Spaltung schwerer Kerne erfolgen (siehe Abschnitt 12).

10.6 Kernmodelle

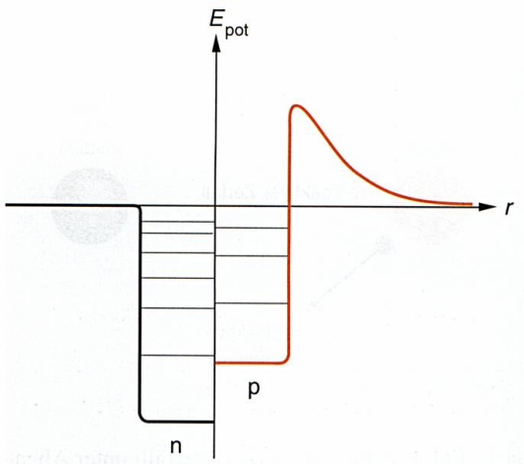
- Bisher haben wir folgende Kerneigenschaften kennengelernt:
- Alle Kerne haben die gleiche Dichte.
- Zwischen benachbarten Nukleonen wirken anziehende Kräfte kurzer Reichweite.
- Sieht man von den leichtesten Kernen ab, dann ist die Bindungsenergie pro Nukleon annähernd konstant. D.h., die Bindungsenergie ist proportional zur Nukleonenzahl.

Diese Eigenschaften zeigen auch Flüssigkeitstropfen:

- Sie haben gleiche Dichte.
- Zwischen benachbarten Molekülen wirken anziehende Kräfte kurzer Reichweite.
- Die Bindungsenergie wird frei, wenn die Moleküle zu einem Tropfen kondensieren. Sie ist proportional zur Molekülzahl.

Auf Grund dieser "Verwandtschaft" wurde das *Tröpfchenmodell* entwickelt (1930), mit dem sich einige Kerneigenschaften erklären lassen.

Das *Schalenmodell* (1949) betrachtet den Kern als Potentialtopf, in dem sich die Nukleonen bewegen. Ähnlich wie für die Elektronen in der Hülle sind auch für die Nukleonen im Kern nur diskrete Energiezustände erlaubt (Abb. 63.1). Diese Energiezustände sind durch zahlreiche Meßdaten erfaßt. Neben diesen beiden Kernmodellen wurden noch weitere entwickelt. Aber kein Modell ist in der Lage, alle Kerneigenschaften zufriedenstellend zu beschreiben.



63.1 Der Potentialtopf für Neutronen und Protonen mit diskreten Energieniveaus

Aufgaben

54. Aus welchen Isotopen setzt sich das Element Lithium zusammen und wie sind diese aufgebaut?

55. Berechne die relative Atommasse (chemische Atommasse) von natürlichem Wasserstoff.

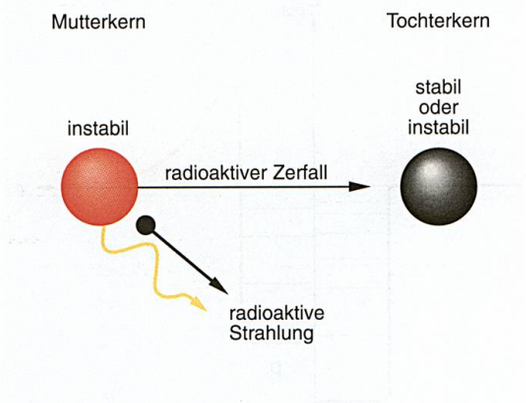
56. Berechne die Kerndichte.

57. Welche Energie entspricht einem Massendefekt von 1u ?

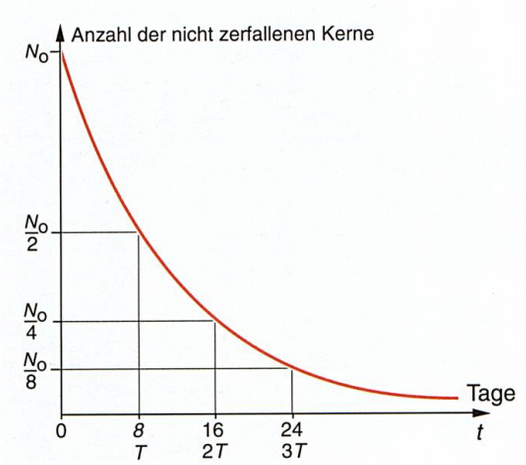
58. Berechne Massendefekt und Bindungsenergie pro Nukleon für He 4 (relative Atommasse: 4,002603).

Kontrollfragen

1. Aus welchen Bestandteilen ist ein Atomkern aufgebaut und welche Eigenschaften haben diese?
2. Was versteht man unter einem Nuklid und wie wird es gekennzeichnet?
3. Beschreibe die Nuklidkarte (nur für stabile Kerne).
4. Wozu dient ein Massenspektrometer und wie funktioniert es prinzipiell?
5. Welche Eigenschaften hat die Kernkraft?
6. Was versteht man unter dem Massendefekt? Wie hängt er mit der Bindungsenergie zusammen?
7. Beschreibe das Tröpfchenmodell.



64.1 Ein instabiler Mutterkern zerfällt unter Abgabe radioaktiver Strahlung in einen stabilen oder in einen instabilen Tochterkern



64.2 Zerfallskurve für Jod 131

Rn 220	55 s
J 131	8 Tage
Co 60	5 Jahre
H 3	12 Jahre
Sr 90	28 Jahre
Cs 137	30 Jahre
Ra 226	1600 Jahre
C 14	5700 Jahre
U 235	$7 \cdot 10^8$ Jahre
K 40	$1{,}3 \cdot 10^9$ Jahre
U 238	$4{,}5 \cdot 10^9$ Jahre

64.3 Die Halbwertszeiten einiger Radionuklide

11. Radioaktivität

11.1 Instabile Kerne zerfallen

Im Jahe 1896 entdeckte *A. H. Becquerel* bei Untersuchungen über Fluoreszenz, daß die dazu verwendeten Uranverbindungen eine lichtdicht verpackte Photoplatte schwärzen konnten. Becquerel vermutete, daß vom Uran eine bislang unbekannte Strahlung ausgeht. Er hatte damit die Radioaktivität entdeckt.

Radioaktivität ist die Eigenschaft instabiler Kerne, spontan zu zerfallen und dabei energiereiche Teilchen und Photonen auszusenden.

Instabile Kerne sind *radioaktiv* und werden als *Radionuklide* bezeichnet. Der radioaktive Zerfall erfolgt ohne äußeren Einfluß, also *spontan*. Der Ausgangskern wird als Mutterkern, der sich bildende Kern als Tochterkern bezeichnet (Abb. 64.1). Ist der Tochterkern instabil, dann zerfällt er selbst wieder. Auf diese Weise entstehen *radioaktive Zerfallsreihen*.

11.2 Das Zerfallsgesetz

Die Anzahl der zerfallenden Kerne pro Zeiteinheit - die Zerfallsgeschwindigkeit dN / dt - ist stets proportional zur Anzahl N der noch nicht zerfallenen Kerne:

$$\frac{dN}{dt} \sim N$$

Mit der Zerfallskonstanten λ als Proportionalitätsfaktor erhält man eine Gleichung (Differentialgleichung). Durch den Zerfall verringert sich die Anzahl der Kerne und damit auch die Zerfallsgeschwindigkeit. Dies wird durch ein negatives Vorzeichen ausgedrückt:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

Die Zerfallskonstante λ ist charakteristisch für den betreffenden Kern und gibt an, welcher Teil der gerade vorhandenen radioaktiven Substanz in der Zeiteinheit zerfällt.

Die Lösung der Differentialgleichung erfolgt durch "Trennung der Variablen" und Integration. Dabei wird die Integrationskonstante in der Form $\ln C$ angeschrieben.

$$\int \frac{dN}{N} = -\lambda \int dt \Leftrightarrow \ln N = -\lambda t + \ln C \Leftrightarrow N = C \cdot e^{-\lambda t}$$

Bezeichnet man mit N_0 die Anzahl der Kerne zur Zeit $t = 0$, erhält man:

$$N_o = C \cdot e^{-\lambda \cdot 0} = C \cdot e^0 = C \cdot 1 = C$$

Zerfallsgesetz

$$N = N_o \cdot e^{-\lambda t} \qquad [\lambda] = 1/s$$

N_o ... Anzahl der anfangs vorhandenen Kerne,
N ... Anzahl der nach der Zeit t noch nicht zerfallenen Kerne

Die Kerne zerfallen unabhängig voneinander. Es läßt sich auch nicht voraussagen, wann ein bestimmter Kern zerfällt. Aber für eine große Zahl von Kernen läßt sich die Wahrscheinlicht (λ) für den Zerfall angeben.

Da der radioaktive Zerfall von außen nicht beeinflußt werden kann, ist die Zerfallskonstante λ im Gegensatz zu vielen anderen physikalischen "Konstanten" unabhängig von Temperatur und Druck. Die Zerfallskonstante λ ist ein Maß für die Zerfallsgeschwindigkeit. Überlicherweise wird diese jedoch durch die *Halbwertszeit* T ausgedrückt.

Die Halbwertszeit T ist jene Zeit, nach der die Hälfte der anfangs vorhandenen Kerne noch nicht zerfallen ist.

Setzt man für $t = T$ und für $N = N_0/2$ ein, erhält man:

$$\frac{N_o}{2} = N_o e^{-\lambda T} \Leftrightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda T} \Leftrightarrow T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Nach einer Halbwertszeit ist von den anfangs vorhandenen Kernen (N_0) die Hälfte ($N_0/2$) noch nicht zerfallen. Nach einer weiteren Halbwertszeit ist noch die Hälfte von $N_0/2$, also ein Viertel ($N_0/4$) nicht zerfallen usw. (Tabelle 65.1).

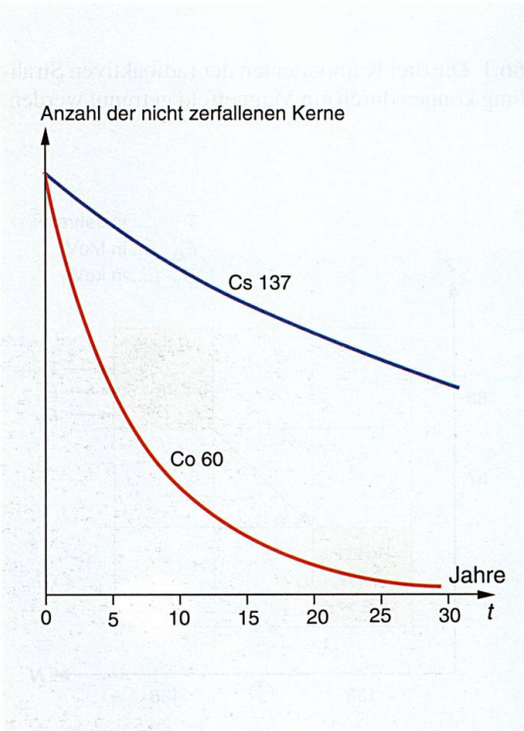
Nach zehn Halbwertszeiten ist die Zahl der nicht zerfallenen Kerne auf ca. 1 Promille gesunken.

Die Halbwertszeiten der natürlichen Radionuklide liegen etwa zwischen 10^{-7}s und 10^{10} Jahren. In Tabelle 64.3 sind die Halbwertezeiten einiger Radionuklide angegeben.

Zeitpunkt	Anzahl der nicht zerfallenen Kerne
0	N_o
T	$N_0/2$
2 T	$N_0/4$
3 T	$N_o/8$
10 T	$N_0/1024$

65.1 Veranschaulichung der Halbwertszeit

Je größer die Halbwertszeit eines Radionuklids ist, desto langsamer zerfällt dieses.



65.2 Die Zerfallskurven für Cs 137 und Co 60

11.3 Die Aktivität

Die Zahl der in der Zeiteinheit zerfallenden Kerne - der Betrag der Zerfallsgeschwindigkeit dN/dt - wird als *Aktivität A* ("Radioaktivität") bezeichnet:

$$(1)\quad A = \lambda \cdot N$$

Die Aktivität einer radioaktiven Substanz hängt von der Zerfallskonstanten und von der Anzahl der gerade vorhandenen Kerne (Substanzmenge) ab. Da bei einem Zerfall radioaktive Strahlung abgegeben wird, ist die Aktivität ein Maß für die Strahlungsintensität.

Die Anzahl N der Kerne nimmt wegen des Zerfalls ab, daher verringert sich auch die Aktivität einer radioaktiven Substanz:

$$(2)\quad N = N_o \cdot e^{-\lambda t} \Leftrightarrow N\lambda = N_o \lambda \cdot e^{-\lambda t}$$

Aus (1),(2) folgt:

Aktivität A

$A = A_o e^{-\lambda t}$ [A] = 1 / s = 1 Becquerel = 1 Bq (1 Zerfall pro s)

A_0 ... Anfangsaktivität, A ... Aktivität zur Zeit t

Eine alte, in der Praxis noch verwendete Einheit:

1 Curie = 1 Ci = $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Bq

Da 1 Ci eine große Aktivität darstellt, wird diese meist in nCi oder pCi angegeben.

Beispiel A

Berechne die Aktivität von 1g Radium 226.

(1) $A = \lambda N$ (2) $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$

226 g Radium enthalten $6{,}02 \cdot 10^{23}$ Kerne.

1 g Radium enthält daher $N = \frac{6{,}02 \cdot 10^{23}}{226}$ Kerne.

$$A = \frac{\ln 2}{1600 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600\,\text{s}} \cdot \frac{6{,}02 \cdot 10^{23}}{226} = 3{,}7 \cdot 10^{10}\,\text{s}^{-1} = 1\,\text{Ci}$$

Die Aktivität von 1 g Radium wurde viele Jahrzehnte als deren Einheit verwendet - siehe den Hinweis vor diesem Beispiel!

Beispiel B

Die Co-60-Quelle eines Krankenhauses hatte eine Anfangsaktivität von 5000 Ci. Wie groß ist die Aktivität nach 20 Jahren?

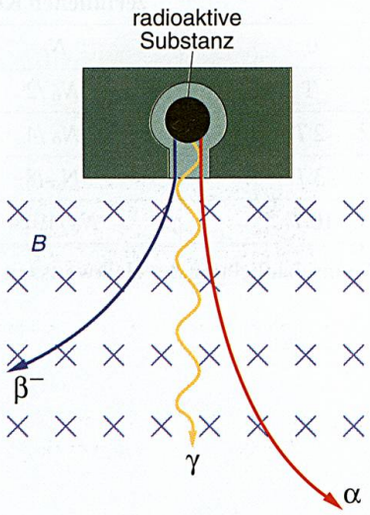
$A = A_o e^{-(\ln 2)\cdot \frac{t}{T}} = 5000 \cdot e^{-\ln 2 \cdot \frac{20}{5}} =$

$= 312{,}5$ Ci

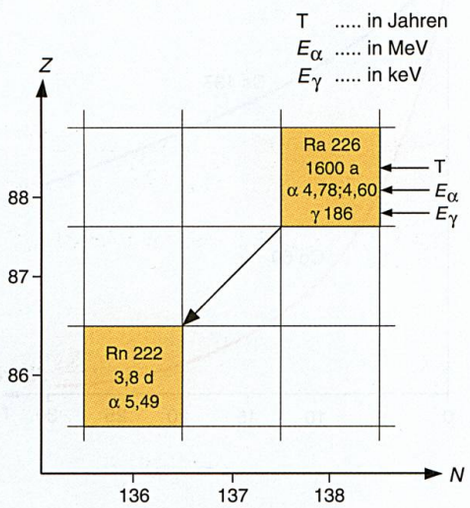
Da die Zeitspanne (20 Jahre) ein Ganzzahlig-Vielfaches der Halbwertszeit (5 Jahre) ist, läßt sich die Aufgabe auch ohne Gleichung lösen.

In 20 Jahren (4 Halbwertszeiten) sinkt die Aktivität auf $1/2^4 = 1/16$ ab.

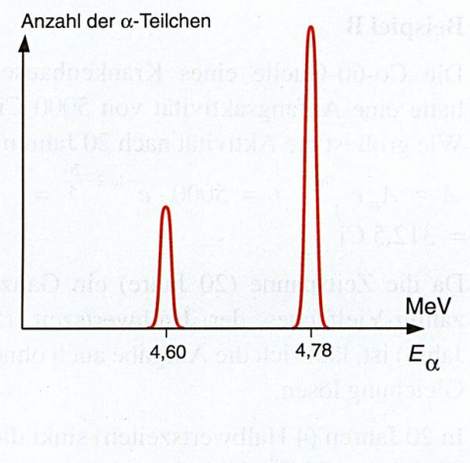
$A = A_0 / 16 = 5000 / 16 = 312{,}5$ Ci



66.1 Die drei Komponenten der radioaktiven Strahlung können durch ein Magnetfeld getrennt werden.



66.2 Der Ausschnitt aus der Nuklidkarte zeigt den Zerfall von Ra 226. α-Strahler sind gelb eingezeichnet.



66.3 α-Strahlung besitzt ein diskretes Energiespektrum

Die Halbwertszeit (oder die Zerfallskonstante) ist ein Maß für die Zerfallsgeschwindigkeit eines Radionuklids. Die Aktivität charakterisiert die Strahlungsintensität einer bestimmten Substanzmenge.

11.4 Arten der radioaktiven Strahlung

Bald nach der Entdeckung der Radioaktivität fand man heraus, daß die radioaktive Strahlung aus drei Komponenten besteht: α-, β- und γ-Strahlung (Abb. 66.1)

α-Strahlung

α-Teilchen sind He-4-Kerne (2p + 2n). Diese sind zweifach positv geladen und besitzen die Massenzahl $A = 4$. Bei einem α-Zerfall verringert sich daher die Massenzahl des Kernes um 4 und die Kernladungszahl um 2 (Abb. 66.2). Es findet eine Kernumwandlung statt.

➤ Beispiel A

$^{226}_{88}\text{Ra}$ — (1600 Jahre) —> $^{222}_{86}\text{Rn} + {}^{4}_{2}\text{He}$

$Z \dashrightarrow Z-2 \qquad A \dashrightarrow A-4$

Ra 226 geht unter Emission eines α-Teilchens in Rn 222 über: $^{4}_{2}\text{He} = \alpha$.

Abb. 66.2 zeigt einen Ausschnitt aus der Nuklidkarte. Die gelbe Farbe gibt an, daß es sich um einen α-Strahler handelt. Der Tochterkern Rn 222 ist selbst instabil und zerfällt daher weiter. Mißt man die Energie der α-Teilchen, die beim Zerfall von Ra 226 emittiert werden, so findet man zwei Gruppen mit jeweils einheitlichen Energien von 4,78 MeV und 4,60 MeV. Abb. 66.3 zeigt das Energiespektrum der α-Teilchen. α-Teilchen besitzen diskrete Energien, ihr Energiespektrum ist ein Linienspektrum. In der Nuklidkarte sind unter der Bezeichnung des Radionuklids die Halbwertszeit und die α-Energien in MeV eingetragen. α-Teilchen sind schwer und daher relativ langsam. Ihre Geschwindigkeiten sind in der Größenordnung von 1/10 der Lichtgeschwindigkeit. Trifft ein α-Teilchen auf ein Atom, dann wird dieses ionisiert. Es entstehen ein Elektron und ein positives Ion. Das α-Teilchen verliert dabei einen Teil seiner Energie. Ein α-Teilchen kann auf seinem Weg durch Materie eine große Zahl von Ionenpaaren bilden. Dabei verliert es ständig Energie, bis es schließlich vollständig abgebremst ist. Fängt es schließlich zwei Elektronen ein, wird es zu einem He-Atom. Die Reichweite eines α-Teilchens hängt von seiner Energie und von der Dichte der Materie ab, die durchquert wird. α-Teilchen bestimmter Energie besitzen in einem bestimmten Material eine definierte Reichweite. In Luft beträgt die Reichweite einige cm und in menschlichem Gewebe ca. 40 µm (E = 5 MeV). Zur Abschirmung genügt ein Blatt Papier. Die Reichweite der α-Strahlung kann in einer Nebelkammer sichtbar gemacht werden (Abb. 70.2).

β-Strahlung

β^--Strahlung besteht aus schnellen Elektronen, die bei einem β^--Zerfall aus dem Kern emittiert werden. Nun enthält der Kern aber keine Elektronen! Um dies zu erklären, betrachten wir zunächst ein Beispiel.

➤ Beispiel B

C 14 geht unter β^--Emission in N 14 über.

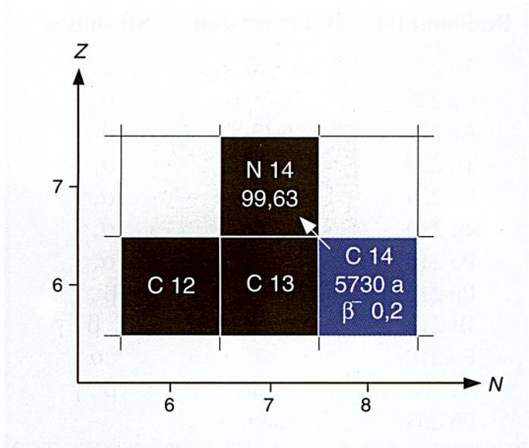
$^{14}_{6}\text{C}$ — (5700 Jahre) —> $^{14}_{7}\text{N} + \beta^-$ $\quad Z \rightarrow Z+1 \quad A = \text{const}$

Die Kernladungszahl Z hat sich um 1 erhöht, die Massenzahl A ist gleich geblieben (Abb. 67.1). Das bedeutet, daß sich ein Neutron in ein Proton umgewandelt hat. Diese Umwandlung ist energetisch möglich, da ja die Neutronenmasse größer ist als die Protonenmasse. Die Nuklidkarte zeigt, daß der C-14-Kern einen Neutronenüberschuß gegenüber den stabilen Kernen besitzt.

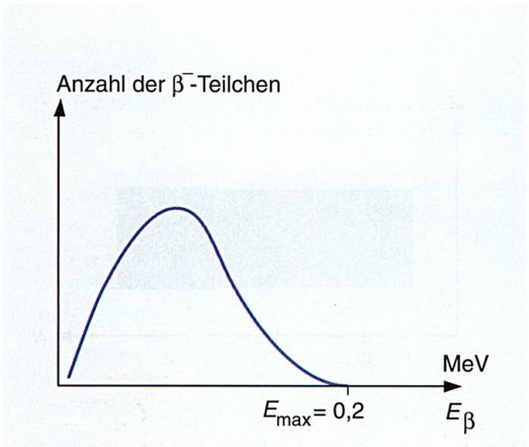
Durch die Umwandlung eines Neutrons in ein Proton entsteht ein stabilerer Kern. β^--Strahler sind in der Nuklidkarte blau gekennzeichnet. Die meisten in einem Kernreaktor erzeugten Radionuklide besitzen einen Neutronenüberschuß und sind daher β^--Strahler. Die Energie der β^--Teilchen erstreckt sich über einen großen Bereich. Im Gegensatz zu den α-Teilchen ist das Energiespektrum kontinuierlich (Abb. 67.2). Charakteristisch für die Strahlung ist die maximale Energie E_{max}. Diese kann aus der Nuklidkarte entnommen werden. Als man die kontinuierliche Energieverteilung entdeckte, trat folgendes Problem auf. β^--Teilchen, die nicht die maximale Energie besitzen, verletzen den Energiesatz. Daher hat der Österreichische Physiker *W. Pauli* im Jahre 1930 ein weiteres Teilchen, das *Neutrino* (bzw. *Antineutrino*), vorgeschlagen (siehe Abschnitt 14). Dieses ist elektrisch neutral und übernimmt beim β-Zerfall die restliche Energie.

$$n \rightarrow p + \beta^- + \text{Antineutrino}$$

β^--Teilchen besitzen annähernd Lichtgeschwindigkeit (eine "relativistische Geschwindigkeit"). Sie können auf ihrer Bahn Atome ionisieren. Ihr Ionisationsvermögen ist geringer als das der α-Teilchen, daher haben sie eine größere Reichweite. Diese beträgt in Luft einige m, in Aluminium einige mm und in menschlichem Gewebe ca. 2 mm (für $E_{max} = 0{,}5$ MeV).



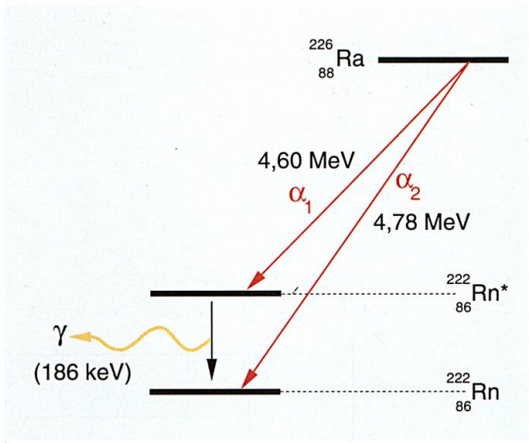
67.1 Der Ausschnitt der Nuklidkarte zeigt den Zerfall von C 14. Der β^--Strahler ist blau eingezeichnet.



67.2 β-Strahlung besitzt ein kontinuierliches Energiespektrum.

γ-Strahlung

γ-Strahlung ist eine elektromagnetische Strahlung mit sehr kurzer Wellenlänge (sehr hoher Frequenz). Sie tritt oft zusammen mit einem α-Zerfall oder einem β^--Zerfall auf. Im Kern existieren diskrete Energiezustände. Ein stabiler Kern befindet sich im Grundzustand. Ein α-Zerfall oder ein β-Zerfall kann zu einem angeregten Tochterkern führen. Dieser angeregte Kern geht unter Aussendung eines γ-Quants in den Grundzustand über. Dies läßt sich mit den Übergängen zwischen den Energiezuständen der Elektronenhülle und der damit verbundenen Emission eines Lichtquants vergleichen. Der α-Zerfall von Ra 226 ist mit einer γ-Strahlung verbunden. Abbildung 67.3 zeigt, daß beim α-Zerfall auch angeregte Rn^* 222-Kerne entstehen. Diese gehen unter Abgabe eines γ-Quants (0,186 MeV) in den Grundzustand über. Die Energie der γ-Strahlung kann der Nuklidkarte entnommen werden.



67.3 Beim Zerfall von Ra 226 tritt neben α-Strahlung auch γ-Strahlung auf.

Beispiel C

Wie groß ist die Wellenlänge der γ-Strahlung beim Ra-226-Zerfall?

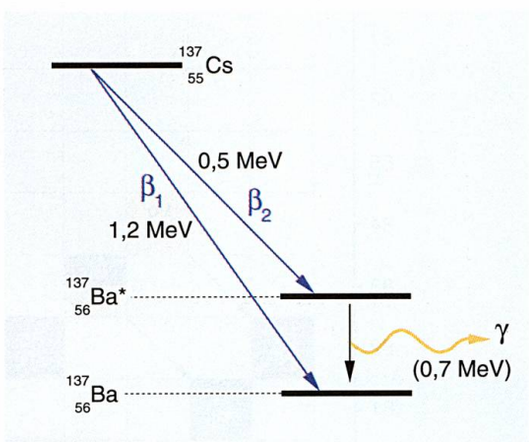
$$E = hf = h\frac{c}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{h\,c}{E}$$

$$\lambda = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{Js} \cdot 3 \cdot 10^{8}\ \text{m s}^{-1}}{0{,}186 \cdot 10^{6} \cdot 1{,}60 \cdot 10^{-19}\ \text{J}} = 6{,}5 \cdot 10^{-12}\ \text{m}$$

Beim β^--Zerfall von Cs 137 tritt γ-Strahlung auf (Abb. 67.4) . Bei einem kleineren Teil der Zerfälle erfolgt ein Übergang direkt in den Grundzustand des Ba^* 137. Der größte Teil der Zerfälle führt zu einem angeregten 137-Kern, der unter γ-Emission in den Grundzustand übergeht.

Beim Zerfall von C 14 (Abb. 67.1) tritt keine γ-Strahlung auf. C 14 ist ein reiner β-Strahler.

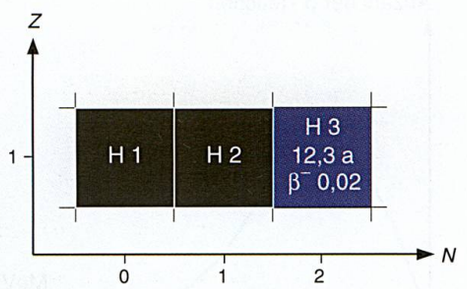
Da die γ-Strahlung durch Übergänge zwischen diskreten Energieniveaus entsteht, ist das Energiespektrum ein Linienspektrum. γ-Strahlung ist eine kurzwellige (harte) elektromagnetische Strahlung mit sehr großer Durchdringungsfähigkeit. Ihre Reichweite ist wesentlich größer als die der α- und β-Teilchen.



67.4 Beim Zerfall von Cs 137 tritt neben β^-- auch γ-Strahlung auf.

Radionuklid	Halbwertszeit	Strahlung
Th 232	$1{,}4 \cdot 10^{10}$a	a, g
Ra 228	5,75 a	b^-, γ
Ac 228	6,13 h	β^-, γ
Th 228	1,9 a	α, γ
Ra 224	3, 6 Tage	α, γ
Rn 220	55,6 s	α, γ
Po 216	0,15 s	α, γ
Pb 212	10,6 h	β^-, γ
Bi 212	9 min, 60 min	α, β^-, γ
Po 212	$3 \cdot 10^{-4}$ s	α
Tl 208	3 min	β^-, γ
Pb 208	stabil	–

68.1 Halbertszeiten und Zerfallsarten der Thoriumreihe



68.2 Der Ausschnitt der Nuklidkarte zeigt die Isotope des Wasserstoffs.

Während diese Teilchen auf ihrer Bahn abgebremst werden, also Energie und Geschwindigkeit abnehmen, bewegt sich ein Strahlungsquant mit Lichtgeschwindigkeit. Es kann aber bei einer einzigen Wechselwirkung seine gesamte Energie abgeben und damit verschwinden. Die Schwächung der γ-Strahlung erfolgt bei Energien bis etwa 100 keV im wesentlichen durch den *Photoeffekt*. Bei höheren Energien ist der *Comptoneffekt* von Bedeutung. Ist die Energie des γ-Quants größer als 1 MeV, kann es zu einer *Paarbildung* kommen. Dabei verschwindet das γ-Quant, und es tritt ein Elektron-Positron-Paar auf. Das Positron ist das Antiteilchen des Elektrons (siehe Abschnitt 14). Bei der Paarbildung wird aus elektromagnetischer Strahlung Materie erzeugt. Die bei diesen Prozessen frei werdenden Elektronen können ionisieren. γ-Strahlung ist bei der Paarbildung indirekt ionisierend.

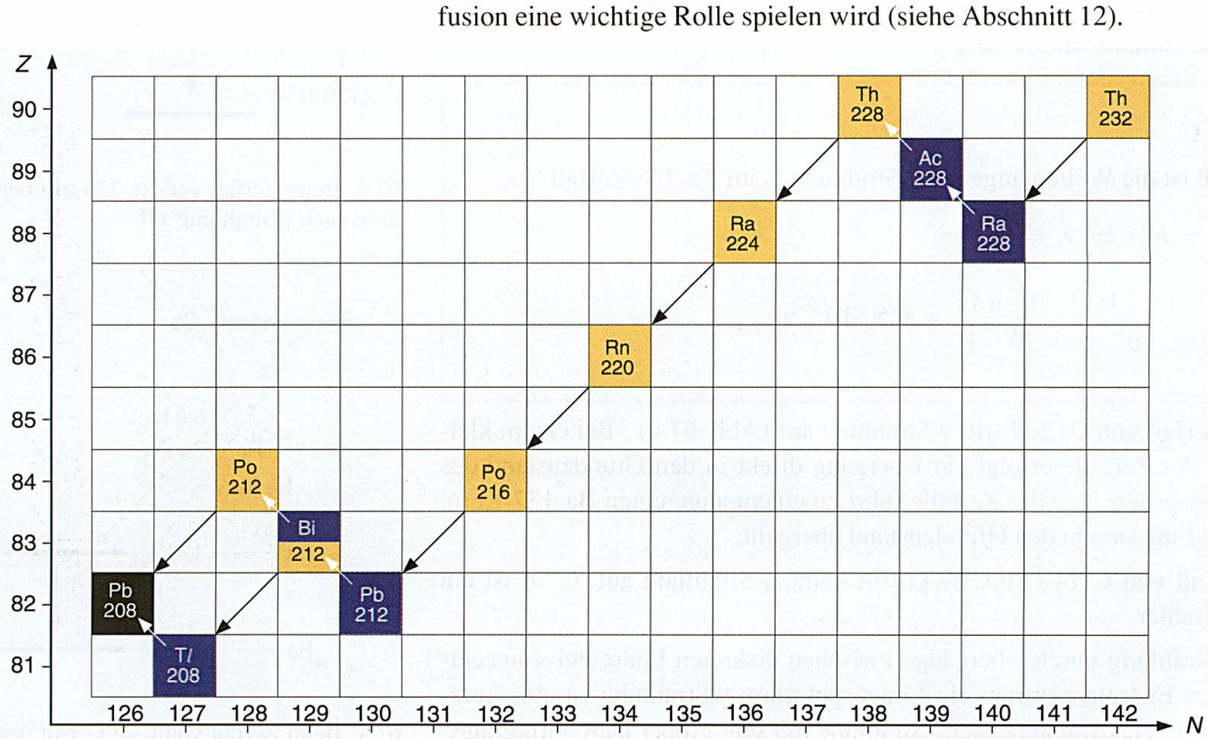
11.5 Natürliche Radioaktivität

Von natürlicher Radioaktivität spricht man dann, wenn das Radionuklid in der Natur vorkommt. Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten:

a) Es gibt eine Reihe von Radionukliden, die aus der Entstehungszeit der Erde stammen, wegen ihrer langen Halbwertszeit aber noch nicht vollständig zerfallen sind. Dazu gehören: K 40, Rb 87, Th 232, U 238, U 235.

b) Die Radionuklide Th 232, U 235 und U 238 zerfallen in radioaktive Tochternuklide, die wiederum in radioaktive Tochternuklide zerfallen u.s.w. Der Zerfall geht so lange weiter, bis schließlich ein stabiles Nuklid entstanden ist. Dabei treten die drei natürlichen Zerfallsreihen auf. Auf diese Weise werden ständig Radionuklide neu gebildet. Alle Nuklide, deren Massenzahl größer als 209 ist, sind instabil. Abbildung 68.3 zeigt die *Thoriumreihe*. Beginn der Zerfallsreihe ist das Th 232. Die Reihe endet beim stabilen Pb 208. Der instabile Tochterkern Bi 212 neigt sowohl zum α- als auch zum β-Zerfall. Daher verzweigt sich die Reihe an dieser Stelle. In Tabelle 68.1 sind die Halbwertszeiten und die Zerfallsarten der Thoriumreihe angeführt. Der Tabelle ist zu entnehmen, daß die Halbwertszeiten der einzelnen Tochterkerne einen sehr großen Bereich umspannen.

c) Schließlich werden in der Erdatmosphäre durch Einwirkung kosmischer Strahlung laufend die Radionuklide C 14 und Tritium (H 3) gebildet. Der Tritiumkern besteht aus einem Proton und zwei Neutronen. Tritium wird auch als "überschwerer Wasserstoff" bezeichnet. Abb. 68.2 zeigt in einem Ausschnitt der Nuklidkarte die Wasserstoffisotope. Tritium ist ein β^--Strahler mit einer Halbwertszeit von ca. 12 Jahren. Es ist zu erwarten, daß Tritium bei der Kernfusion eine wichtige Rolle spielen wird (siehe Abschnitt 12).



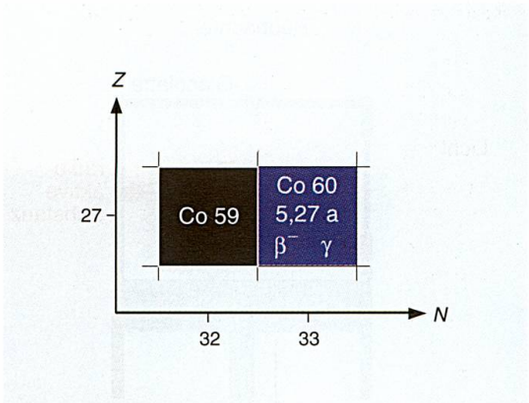
68.3 Die Thorium-Reihe

11.6 Künstliche Radioaktivität

Werden Radionuklide vom Menschen hergestellt, spricht man von künstlicher Radioaktivität. Das erste künstliche Radionuklid wurde im Jahre 1913 erzeugt. Aluminium wurde einer α-Strahlung ausgesetzt. Es bildete sich ein radioaktives Phosphorisotop. Einen derartigen Vorgang bezeichnet man ganz allgemein als *Kernreaktion*. Dabei findet eine *Kernumwandlung* statt.

Seit diesem Zeitpunkt sind weit über 1000 Radionuklide hergestellt worden. Als "Geschosse" für eine Kernumwandlung können etwa α-Teilchen, Protonen oder Neutronen verwendet werden. So wird z.B. das Radioisotop Co 60 durch Neutronenbestrahlung aus dem stabilen Co 59 hergestellt. Durch "Einfangen" eines Neutrons entsteht der instabile Co-60-Kern (Abb. 69.1).

$$^{59}_{27}\mathrm{Co} + n \rightarrow {}^{60}_{27}\mathrm{Co}$$



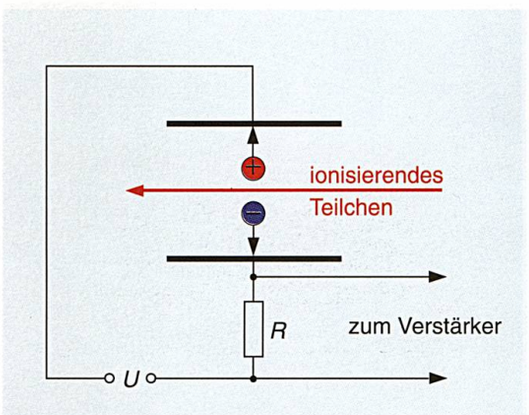
69.1 Ausschnitt aus der Nuklidkarte. Das instabile Isotop Co 60 besitzt um ein Neutron mehr als das stabile Isotop Co 59.

11.7 Nachweis radioaktiver Strahlung

Ionisationsdetektoren

Versuch

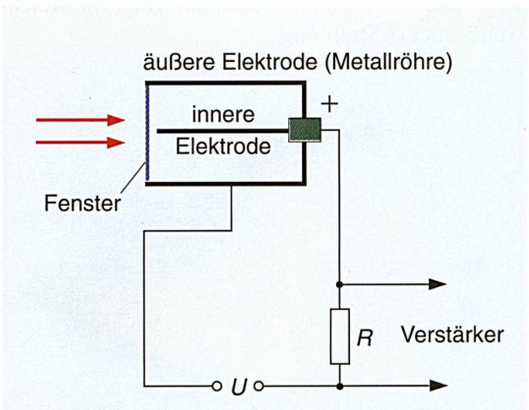
Ein Kondensator, an den ein Elektroskop angeschlossen ist, wird aufgeladen. Nähert man ein radioaktives Präparat, geht der Ausschlag des Elektroskops zurück. Durch die radioaktive Strahlung wird die Luft ionisiert, und der Kondensator entlädt sich. Als radioaktives Präparat ist bereits ein Gasglühstrumpf (thoriumhältig) geeignet.



69.2 Aufbau einer Ionisationskammer

Eine *Ionisationskammer* ist gasgefüllt und enthält zwei Elektroden (Abb. 69.2). Durch Anlegen einer Spannung wird ein elektrisches Feld erzeugt. Fällt ionisierende Strahlung ein, entstehen frei bewegliche Ladungsträger (Ionen und Elektronen), die unter dem Einfluß des Feldes zu den Elektroden wandern. Die Spannung wird so gewählt, daß alle gebildeten Ladungsträger die Elektroden erreichen. Die Stromstärke ist ein Maß für die Strahlungsintensität.

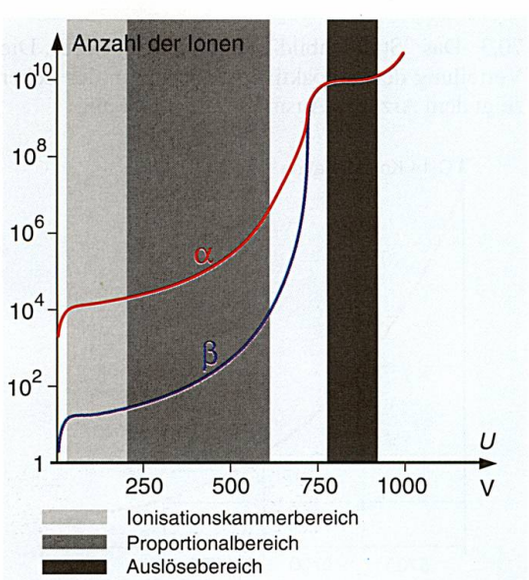
Beim *Proportionalzähler* ist die angelegte Spannung höher als bei der Ionisationskammer. Auch ist die innere Elektrode als Draht ausgeführt, daher erreicht die Feldstärke hohe Werte (Abb. 69.3). Die durch die einfallende Strahlung gebildeten Elektronen werden dadurch so stark beschleunigt, daß sie selbst ionisieren, also Elektron-Ionenpaare bilden können. Die freigesetzten Elektronen können wiederum ionisieren. Es kommt zu einer lawinenartigen Vermehrung der Ladungsträger. Der Multiplikationsfaktor dieser Gasverstärkung beträgt 10^5 bis 10^6. Die Impulshöhe am Ausgang des Zählrohrs ist proportional zur Energie des ionisierenden Teilchens.



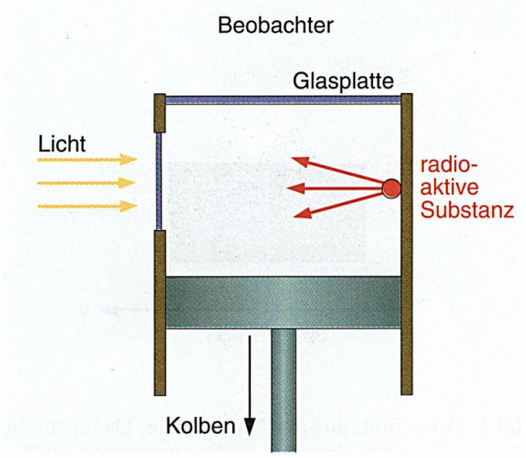
69.3 Aufbau eines Zählrohres

Ein *Geiger-Müller-Zähler* (Auslösezähler) ist prinzipiell gleich aufgebaut wie der Proportionalzähler, allerdings ist die Spannung höher. Bei einer genügend hohen Spannung wird nämlich der Impuls unabhängig von der Energie des ionisierenden Teilchens. Die Gasverstärkung erreicht Werte bis zu 10^8. Das Zählrohr ist sehr empfindlich und spricht auf jedes Teilchen an. Damit nacheinander einfallende Teilchen gezählt werden können, muß der Entladungsvorgang dazwischen abbrechen. Dieses Löschen der Entladung wird durch spezielle Gasfüllungen beschleunigt. Der Geiger-Müller-Zähler ist ein in der Praxis sehr häufig benützter Detektor, der durch einfaches Zählen der Impulse eine Intensitätsbestimmung ermöglicht.

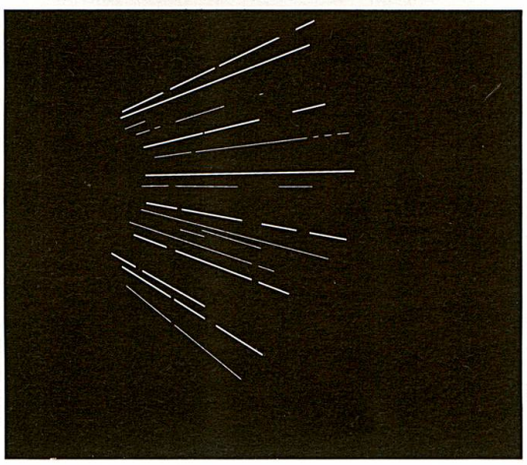
Der *Halbleiterdetektor* entspricht im Prinzip einer Ionisationskammer. Nur befindet sich anstelle eines Gases ein Halbleiter zwischen den Elektroden. Durch die einfallende Strahlung wird ein Elektron-Loch-Paar gebildet. Durch das elektrische Feld zwischen den Elektroden werden die Ladungsträger beschleunigt und können weitere Elektron-Loch-Paare erzeugen, die schließlich an einem äußeren Widerstand zu einem Spannungsimpuls führen. Der Halbleiterdetektor ist sehr empfindlich. Da der Ausgangsimpuls proportional zur absorbierten Strahlungsenergie ist, kann der Detektor zur Energiebestimmung benützt werden.



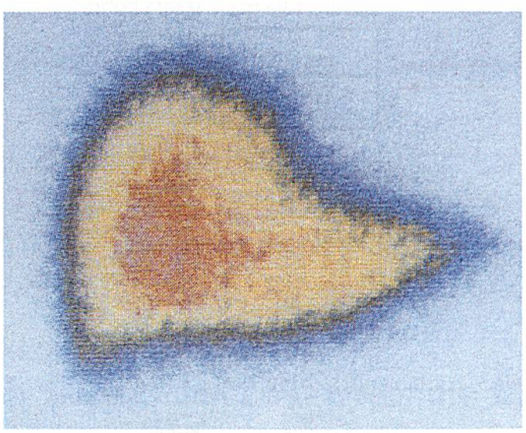
69.4 Anzahl der an den Elektroden gesammelten Ionen in einem Gasionisationsdetektor in Abhängigkeit von der Spannung für α- und β-Strahlung



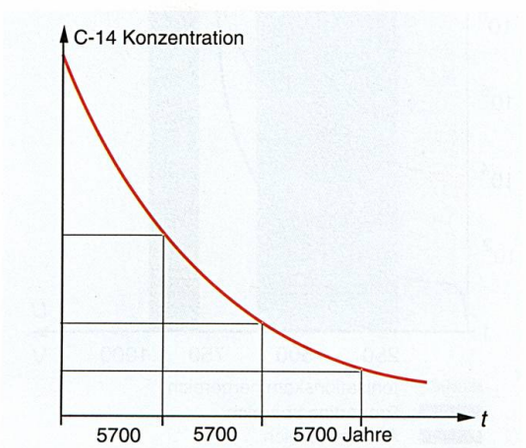
70.1 Aufbau der Nebelkammer nach Wilson



70.2 Die Nebelkammeraufnahme zeigt die Reichweite einer α-Strahlung.



70.3 Das "Strahlenbild" einer kranken Leber. Die Verteilung der radioaktiven Substanz in der Leber zeigt dem Arzt das Ausmaß der Erkrankung.



70.4 Jeweils nach 5700 Jahren hat sich die C-14-Konzentration halbiert. Dies läßt sich etwa 7 Perioden lang verfolgen.

Teilchenspurdetektoren

Die *Nebelkammer* nach *Wilson* dient zur Sichtbarmachung der Bahnen ionisierender Teilchen. Sie besteht im wesentlichen aus einem Zylinder mit Kolben. Zunächst ist die Luft im Zylinder mit Wasserdampf gesättigt. Dann wird der Kolben rasch zurückgezogen. Bei dieser plötzlichen Expansion (adiabatisch) kühlt sich die Luft ab und ist daher mit Wasserdampf übersättigt. Es kommt zu einer Kondensation des Wasserdampfes in Form kleiner Nebeltröpfchen. Die von einem radioaktiven Präparat ausgehende Strahlung erzeugt auf ihrem Weg Ionen, die als Kondensationskeime wirken. Daher erzeugt ein ionisierendes Teilchen in der Kammer eine *Nebelspur*. Das seitlich eingestrahlte Licht wird an den Tröpfchen gestreut. Von oben betrachtet zeigt sich die Teilchenspur als helleuchtender Streifen auf dunklem Untergrund (Abb. 70.1).

Die *Blasenkammer* arbeitet anstelle des übersättigten Dampfes mit einer überhitzten Flüssigkeit, die wegen des hohen Druckes nicht siedet. Bei plötzlicher Druckerniedrigung bilden sich Dampfblasen längs der Bahnen ionisierender Teilchen. Die Blasenkammer besitzt eine größere Dichte als die Nebelkammer, daher ist sie für energiereichere Teilchen geeignet.

11.8 Anwendung von Radioisotopen

Indikatormethode

Eine bekannte Anwendung in der Medizin ist der Radiojod-Test zur Untersuchung der Schilddrüse. Jod wird in der Schilddrüse gespeichert. Nimmt ein Patient eine geringe Menge radioaktives J 131 zu sich, so kann dessen γ-Strahlung von außen gemessen werden. Damit läßt sich der Weg des Radionuklids im Körper verfolgen und die Verteilung in der Schilddrüse ermitteln (Funktionsdiagnostik). Auch andere Organe lassen sich mit dieser Methode untersuchen. Es muß nur das Element, das von dem betreffenden Organ aufgenommen wird, teilweise durch ein Radioisotop ersetzt werden (Abb. 70.3).

Die Verwendung radioaktiver Indikatoren beruht darauf, daß ein Radionuklid sich von dem zu verfolgenden Element chemisch nicht unterscheidet. Im Idealfall ist das gewählte Radionuklid ein Isotop des betreffenden Elements. In der Biologie dient die Indikatormethode etwa der Erforschung von Stoffwechselvorgängen. In der Technik wird sie z.B. für Verschleißuntersuchungen, zur Lecksuche und für die Untersuchung industrieller Kreisläufe verwendet.

Strahlenbehandlung

Durch die Einwirkung energiereicher Strahlung können im Zellkern irreparable Schäden entstehen, die zum Zelltod führen können (vgl. Abschnitt 13.3). Das Ziel einer Strahlentherapie ist die Vernichtung von Tumorzellen. Von besonderer Bedeutung dabei ist die Schonung des gesunden Gewebes in der Umgebung des Tumors. Die Strahlendosis im gesunden Gewebe soll möglichst gering sein. Aus diesem Grund wird der Tumor durch einzelne Strahlenbündel aus verschiedenen Richtungen bestrahlt. Bei einer Protonenstrahlung etwa läßt sich eine bestimmte Reichweite durch Veränderung der Energie einstellen. Auf diese Weise bleibt das Gewebe hinter dem Tumor praktisch unbestrahlt.

Altersbestimmung

Da der radioaktive Zerfall von außen unbeeinflußt vor sich geht, kann er zur Zeitbestimmung benützt werden. Eine wichtige Anwendung ist die C-14-Methode (Radiokohlenstoff-Methode) in der Archäologie. In der Atmosphäre wird durch Einwirkung der kosmischen Strahlung laufend das Radionuklid C 14 gebildet. Es hat eine Halbwertszeit von 5700 Jahren. Dieses C 14 verbindet sich mit Sauerstoff zu radioaktivem Kohlendioxid. Dieses wird von den Pflanzen aufgenommen und gelangt über die Nahrungskette in alle anderen lebenden Organismen. Zwischen dem zerfallenden und neugebildeten C 14 stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein. Das führt dazu, daß in allen Organismen eine bestimmte Konzentration an C 14 vorhanden ist, die über viele Jahrtausende annähernd konstant geblieben ist.

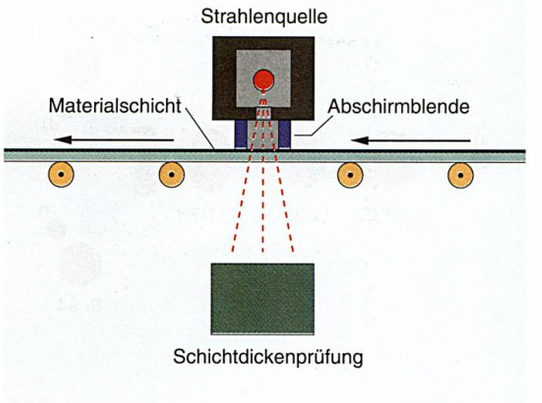
Unter 10^{12} C-12-Atomen befindet sich im Mittel ca. ein C-14-Atom. Stirbt ein Organismus ab, dann wird kein C 14 mehr aufgenommen, und der C-14-Gehalt sinkt nach dem radioaktiven Zerfallsgesetz ab. Wird der C-14-Gehalt einer Probe gemessen, so läßt sich daraus die Zeitspanne seit dem Absterben der Probe berechnen.

Meß-und Überwachungsverfahren

γ- und β-Strahlung werden in vielfältiger Weise zur Messung bzw Kontrolle der Dicke oder Füllhöhe und zur Schweißnahtprüfung verwendet (Abb. 71.1).

Energieumwandlung

Die beim radioaktiven Zerfall emittierten Strahlen besitzen eine hohe Energie. Dies führt bei der Absorption durch Materie zu einer Erwärmung. Mit Hilfe des thermoelektrischen Effektes kann eine Umformung in elektrische Energie erfolgen. Derartige Radionuklidbatterien werden in Satelliten verwendet.



71.1 Prüfung der Schichtdicke: Je dicker die Schicht, umso mehr wird die Strahlung beim Durchdringen der Schicht geschwächt.

Aufgaben

59. Rechne nCi und pCi in Bq um.

60. Wieviel g U 238 haben eine Aktivität von 1 Ci?

61. Die Aktivität pro Masseneinheit bezeichnet man als spezifische Aktivität. Berechne die spezifische Aktivität von U 238 in Bq/g und in Ci/g.

62. Natürliches Kalium enthält 0,01 % radioaktives K 40. Für 1 g einer Kaliumprobe wurde eine Aktivität von 0,81 nCi gemessen. Berechne die Halbwertszeit von K 40.

63. K 40 ist ein β^--Strahler. Welches Tochternuklid entsteht?

64. Die Aktivität einer bestimmten radioaktiven Substanz sinkt innerhalb von 5 Stunden um 20 %. Wie groß ist die Halbwertszeit?

65. Welche Aktivität hat eine Co-60-Probe nach einem Jahr, wenn die Anfangsaktivität 20 Ci beträgt?

66. Welche Geschwindigkeit haben α-Teilchen mit einer Energie von 4 MeV?

67. Welche Geschwindigkeit haben β^--Teilchen mit einer Energie von 1 MeV? (Relativistische Rechnung!)

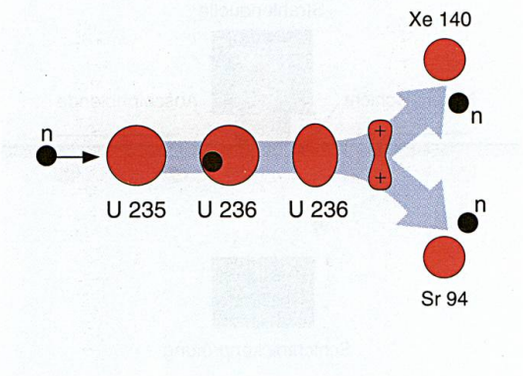
68. Wie groß ist die Aktivität von 1 g Kohlenstoff eines lebenden Organismus?

69. Eine fossile Holzprobe enthält 30 g Kohlenstoff. Die Aktivität beträgt 2 Bq. Wie viele C-14-Atome enthält die Probe, und vor wie vielen Jahren starb sie ab?

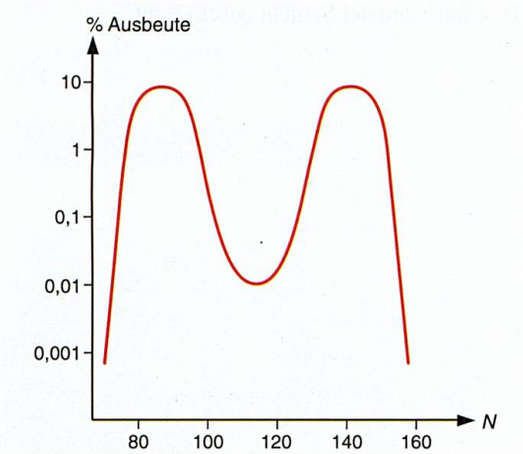
70. Stelle die Reaktionsgleichung für den Zerfall von a)Tritium, b) Co 60 auf. Ist der Tochterkern stabil oder instabil?

Kontrollfragen

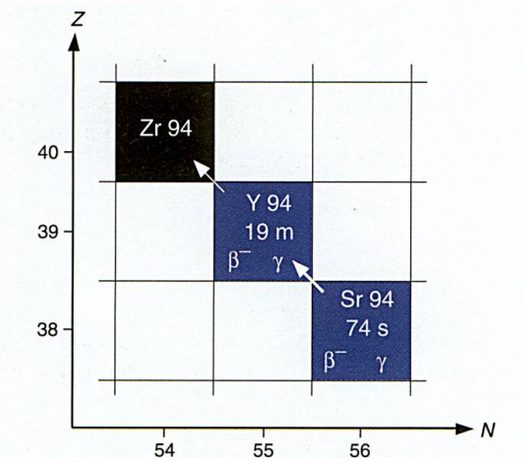
1. Was versteht man unter Radioaktivität?
2. Wovon hängt die Zerfallsgeschwindigkeit eines Radionuklids ab?
3. Erkläre das Zerfallgesetz. Was gibt die Halbwertszeit an?
4. Was versteht man unter der Aktivität und wie ändert sie sich mit der Zeit?
5. Erkläre den α-Zerfall und den β^--Zerfall anhand je eines Beispiels.
6. Wie entsteht γ-Strahlung?
7. Welche Eigenschaften haben α-, β^-- und γ-Strahlung?
8. Zähle Beispiel für die natürliche Radioaktivität auf.
9. Was versteht man unter künstlicher Radioaktivität?
10. Erkläre die Funktion des Geiger-Müller-Zählers und der Nebelkammer.
11. Beschreibe die Nebelkammer.
12. Was versteht man unter der Indikatormethode?
13. Erkläre die C-14-Methode.



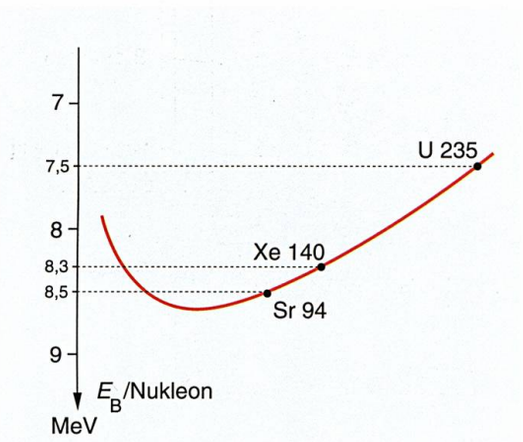
72.1 Die Verformungen des schwingenden U-236-Kernes führen zu einer Spaltung in zwei Stücke.



72.2 Die Verteilung der Spaltprodukte bei der Spaltung von U 235 durch thermische Neutronen



72.3 Der Ausschnitt der Nuklidkarte zeigt den Zerfall des Spaltprodukts Sr 94



72.4 Abbildung zu Beispiel A

12. Kernenergie

12.1 Kernspaltung

Die Spaltung von U 235

Im Jahr 1938 wurde die Spaltung von U-235-Kernen durch Neutronenbeschuß nachgewiesen. Wird ein U-235-Kern mit langsamen Neutronen beschossen, so kann der Kern dieses Neutron einfangen. Dabei entsteht ein U-236-Kern, der sich in einem angeregten Zustand befindet. Nach dem "Tröpfchenmodell" stellt man sich vor, daß dieser angeregte Zwischenkern ins Schwingen gerät und dabei deformiert wird. Bei großen Deformationen nimmt der Zwischenkern auch langgestreckte Formen an, sodaß praktisch zwei getrennte positive Ladungsschwerpunkte auftreten, die einander abstoßen. Dadurch wird der Zwischenkern weiter eingeschnürt und zerbricht schließlich in zwei Stücke (Abb. 72.1).

Es gibt eine große Anzahl verschiedener Spaltreaktionen. Abb. 72.2 zeigt die Häufigkeit der auftretenden Spaltprodukte. Man erkennt, daß Spaltprodukte mit $A \approx 95$ und $A \approx 140$ am häufigsten vorkommen. Eine mögliche Spaltreaktion soll näher betrachtet werden.

$$ {}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{236}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{140}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{94}_{38}\mathrm{Sr} + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n} $$

Die schweren Kerne - wie U 235 - enthalten relativ gesehen mehr Neutronen als die mittelschweren Kerne, wie etwa Sr 94. Auf Grund dieses Neutronenüberschusses werden 2 bis 3 Neutronen frei. Der Ausschnitt aus der Nuklidkarte (Abb.72.3) zeigt, daß die Spaltprodukte - etwa Sr 94 - noch immer einen Neutronenüberschuß besitzen. Sie sind daher instabil und zerfallen unter β^--Emission. Für das Spaltprodukt Sr 94 ergibt sich die folgende Zerfallsreihe:

$$ {}^{94}_{38}\mathrm{Sr} - (\beta^- \text{–Strahlung}) \rightarrow {}^{94}_{39}\mathrm{Y} - (\beta^- \text{–Strahlung}) \rightarrow {}^{94}_{40}\mathrm{Zr} $$

Im allgemeinen sind die einzelnen Kerne dieser Zerfallsreihe angeregt. Daher tritt neben der β^--Strahlung auch γ-Strahlung auf. Die frei werdende Energie läßt sich aus der Massenbilanz mit Hilfe des Massendefektes berechnen. Im folgenden Beispiel soll aber nur eine Abschätzung der Energie auf zwei andere Arten vorgenommen werden.

Beispiel A

a) Aus der Kurve (Abb. 72.4), die die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon darstellt, werden die Bindungsenergien für U 235, Xe 140 und Sr 94 entnommen.

Zur Spaltung von U 235 wird eine Energie von rund 7,5 MeV/Nukleon benötigt. Bei der Bildung von Xe 140 wird eine Energie von rund 8,3 MeV/Nukleon und bei der Bildung von Sr 94 wird eine Energie von rund 8,5 MeV/Nukleon frei. Damit ergibt sich folgende Energiebilanz:

$(140 \cdot 8{,}3 + 94 \cdot 8{,}5 - 235 \cdot 7{,}5)$ MeV/Kern ≈ 200 MeV/Kern

b) Die frei werdende Energie entspricht im wesentlichen der kinetischen Energie der Spaltprodukte. Diese wird durch die Coulombsche Abstoßung verursacht. Zuerst werden die beiden Kernradien abgeschätzt:

$$ R_{\mathrm{Xe}} = r_o A_{\mathrm{Xe}}^{\frac{1}{3}} = 1{,}4 \cdot 10^{-15} \cdot 140^{\frac{1}{3}} = 7{,}3 \cdot 10^{-15}\ \mathrm{m} $$

$$ R_{\mathrm{Sr}} = 1{,}4 \cdot 10^{-15} \cdot 94^{\frac{1}{3}} = 6{,}4 \cdot 10^{-15}\ \mathrm{m} $$

Daraus folgt für den Zentralabstand d der beiden Kerne:

$$ d = R_{\mathrm{Xe}} + R_{\mathrm{Sr}} = 13{,}7 \cdot 10^{-15}\ \mathrm{m} $$

Daraus ergibt sich für die frei werdende Energie E:

$$ E = \frac{(Z_1\, e) \cdot (Z_2\, e)}{4\,\pi\,\varepsilon_o\, d} = \frac{54 \cdot 38 \cdot (1{,}60 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{As})^2}{4\,\pi \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{As\,(Vs)^{-1}} \cdot 13{,}7 \cdot 10^{-15}\ \mathrm{m}} = $$

$$ = 3{,}4 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{J} \approx 215\ \mathrm{MeV} $$

Bei der Spaltung von U 235 wird eine Energie von ca. 200 MeV/Kern frei. Neben zwei bis drei Neutronen entstehen radioaktive Spaltprodukte, die unter β^--und γ-Emission weiter zerfallen.

Die bei der Kernspaltung frei werdenden Energien sind ca. um den Faktor 10^6 größer als bei chemischen Reaktionen (siehe Aufgabe 71).

Wird einmal ein U-235-Kern gespalten, so kann jedes der zwei bis drei frei werdenden Neutronen selbst wieder eine Spaltung einleiten. Auf diese Weise kann die Anzahl der Spaltungen lawinenartig ansteigen. Man spricht dann von einer *Kettenreaktion*.

Der thermische Reaktor

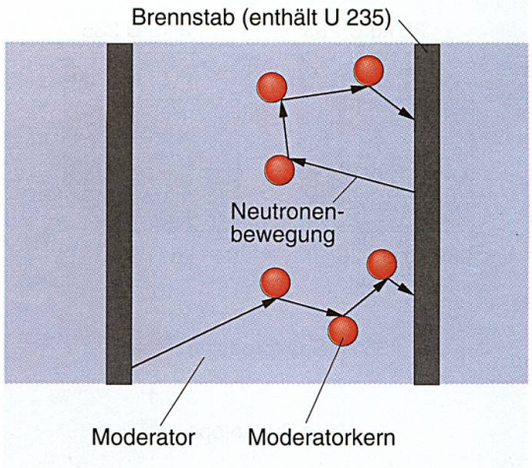
Natururan enthält 99,3 % U 238 und 0,7 % U 235. Bei jeder Spaltung werden schnelle Neutronen mit einer Energie von einigen MeV frei. Nun kann zwar U 238 durch schnelle Neutronen gespalten werden, aber mit größerer Wahrscheinlichkeit werden Neutronen eingefangen, ohne daß es zu einer Spaltung kommt. Daher kommt es im U 238 zu keiner Kettenreaktion, und es ist als Kernbrennstoff nicht geeignet. U 235 ist der einzige in der Natur vorkommende Kern, mit dem sich eine Kettenreaktion aufrecht erhalten läßt.
Nun nimmt aber die Wahrscheinlichkeit für eine Spaltung von U 235 mit zunehmender Neutronenenergie ab. Daher müssen die bei der Spaltung frei werdenden schnellen Neutronen abgebremst werden. Entspricht ihre Energie der Umgebungstemperatur ($E \approx kT = 0{,}025$ eV), dann bezeichnet man sie als *thermische Neutronen*. Das Abbremsen erfolgt in einem *Moderator*, mit dessen Kernen die Neutronen zusammenstoßen (Abb. 73.1). Damit ein Neutron bei einem Stoß viel Energie verliert, sollen sich die Massen von Neutron und Moderatorkern möglichst wenig unterscheiden (73.2). Auch darf der Moderator nicht zu viele Neutronen absorbieren. Die wichtigsten Moderatorstoffe sind Wasserstoff (H 1) als Leichtwasser, Deuterium (D 2) als Schwerwasser und Kohlenstoff (C) als Graphit.

Damit eine Kettenreaktion abläuft, muß mindestens ein Neutron, das bei der Spaltung frei wird, zu einer weiteren Spaltung führen. Ist die Spaltmasse zu gering oder die geometrische Anordnung ungünstig, dann können zu viele Neutronen entweichen, und es kommt zu keiner Kettenreaktion. Für die Kettenrektion ist eine Mindestmasse - die kritische Masse - erforderlich. Graphit und Schwerwasser absorbieren so wenige Neutronen, daß eine Kettenreaktion auch mit Natururan möglich ist. Leichtwasser ist zwar ein wirksamerer Moderator, absorbiert aber mehr Neutronen, sodaß als Brennstoff *angereichertes Uran* (ca. 3 % U 235) erforderlich ist. Diese Anreicherung des Natururans erfolgt in Isotopentrennanlagen.

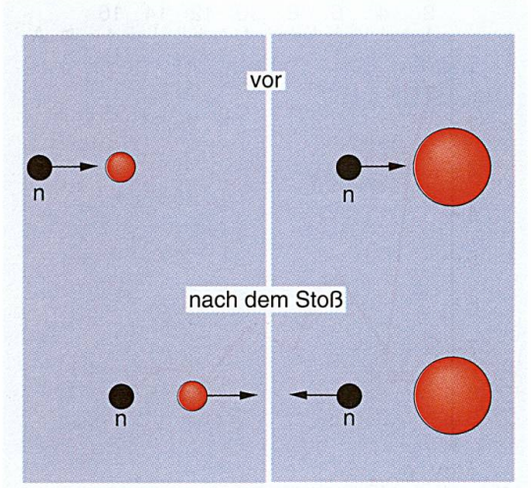
Das hohe Absorptionvermögen bestimmter Stoffe für Neutronen wird zur Steuerung des Reaktors verwendet. Die sogenannten *Regelstäbe* enthalten Cd oder B. Je tiefer sie in das Reaktorinnere (Reaktorcore) hineingeschoben werden, desto mehr Neutronen werden absorbiert. Damit kann die Kettenreaktion gesteuert werden. In der Atombombe (Kernspaltungsbombe) verläuft die Kettenreaktion ungesteuert. Die Energie wird dabei in äußerst kurzer Zeit freigesetzt.

Die große kinetische Energie der Spaltprodukte im Reaktor führt zu einer starken Erwärmung der Brennstäbe. Die Wärme wird mit einem Kühlmittel abgeführt. Abbildung 73.3 zeigt den Aufbau eines Siedewasserrektors. Die Brennstäbe enthalten angereichertes Uran. Leichtwasser dient als Moderator und als Kühlmittel. Der Dampf kann unmittelbar zum Antrieb einer Turbine verwendet werden. Die Turbine kann sich aber auch in einem Sekundärkreislauf befinden, der über einen Wärmetauscher angekoppelt ist.

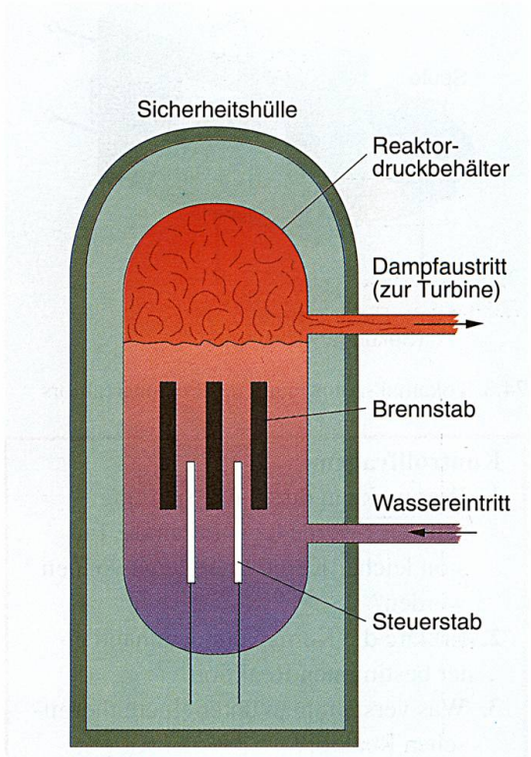
Man nimmt an, daß es in Gabun (Afrika) vor ca. einer Milliarde Jahren einen Naturreaktor gegeben hat. Damals betrug der U-235-Anteil im Natururan noch ca. 3 %. Durch Wassereinbruch in die Uranlagerstätten ist eine Kettenreaktion in Gang gekommen.



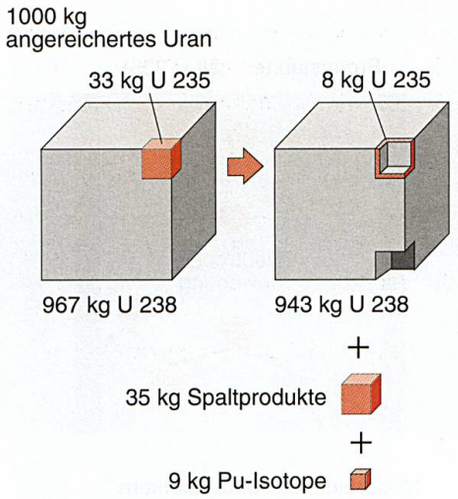
73.1 Die schnellen Neutronen werden bei Zusammenstößen mit Moderatorkernen abgebremst und dadurch zu thermischen Neutronen



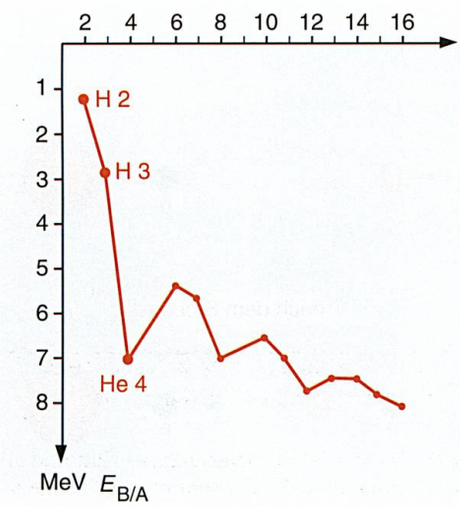
73.2 Ein Neutron wird beim Stoß umso mehr abgebremst, je weniger sich die Massen von Neutron und Moderatorkern unterscheiden.



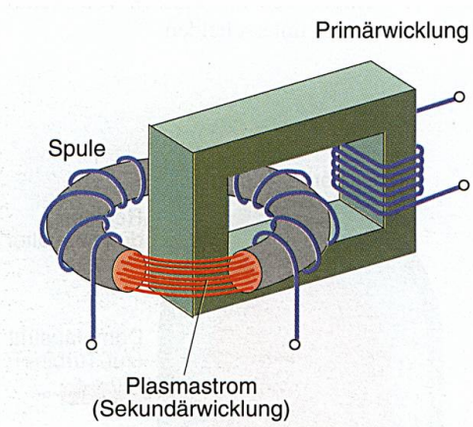
73.3 Schema eines Siedewasserreaktors



74.1 Der "Lebensweg" von 1000 kg angereichertem Uran in einem Reaktor. Die in der Graphik nicht berücksichtigte Restmasse von etwa 5 kg verteilt sich auf U 236 und Np 237.



74.2 Mittlere Bindungsenergie pro Nukleon für die leichtesten Kerne



74.3 Tokamak-Anordnung des Fusionsreaktors

Kontrollfragen

1. Warum kann durch die Spaltung schwerer Kerne bzw. durch die Fusion leicher Kerne Energie gewonnen werden?
2. Erkläre die Kernspaltung anhand einer bestimmten Reaktion.
3. Was versteht man unter einem thermischen Reaktor?
4. Erkläre den prinzipiellen Aufbau eines Siedewasserreaktors.

Der radioaktive Abfall

Ein Leichtwasserreaktor wird etwa mit 30 bis 100 t angereichertem Uran beschickt. Abbildung 74.1 zeigt die weitere Entwicklung von 1000 kg Brennstoff.

Nach einer Betriebszeit von ca. 3 Jahren sind von je 1000 kg angereichertem Uran noch ca. 8 kg U 235 nicht verbraucht. Weiters sind 35 kg Spaltprodukte und etwa 9 kg Plutonium entstanden. Die abgebrannten Brennstäbe enthalten eine große Zahl radioaktiver Isotope mit Halbwertszeiten, die entweder kleiner als 100 Jahre oder größer als 100 000 Jahre sind.

Daraus ergibt sich, daß der radioaktive Abfall für unvorstellbar lange Zeiten sicher gelagert werden muß. Der radioaktive Abfall wird zuerst ca. ein Jahr lang in Wasserbecken aufbewahrt. Dabei zerfällt der Anteil der kurzlebigen Radionuklide. Von dem verbleibenden Rest kann in Wiederaufbereitungsanlagen Uran und Plutonium getrennt werden, um wieder als Brennstoff eingesetzt zu werden. Die nicht brauchbaren Spaltprodukte müssen "endgelagert" werden.

12.2 Kernfusion

Der Verlauf der mittleren Bindungsenergie pro Nukleon (Abb. 74.2) zeigt, daß die Verschmelzung (Fusion) von sehr leichten Kernen zu einem Kern mit größerer Bindungsenergie führen kann. Die Energieerzeugung in den Fixsternen erfolgt auf diese Weise (siehe Abschnitt 15).

Damit die Fusion zweier Kerne stattfinden kann, müssen sich diese gegen die Coulombschen Abstoßungskräfte bis auf den Wirkungsbereich der Kernkräfte nähern. In den Fixsternen erhalten die Kerne die erforderliche hohe kinetische Energie durch die hohe Temperatur (ca. 10^7 K) im Sterninneren. Auch in den Fusionslaboratorien wird mit so hohen Temperaturen gearbeitet. Bei diesen Temperaturen sind die Atome vollständig ionisiert. Dieses Gemisch aus positiven Ionen und negativen Elektronen wird als *Plasma* bezeichnet.

Stoßen zwei Kerne zusammen, kann es zu einer Fusion kommen. Wegen der hohen Temperatur spricht man auch von einer thermonuklearen Reaktion. Ein Plasma dieser Temperatur kann natürlich nicht einfach in einem Gefäß eingeschlossen werden. Da die Teilchen elektrisch geladen sind, lassen sie sich durch magnetische Felder zusammenhalten (magnetischer Einschluß). Bei der *Tokamak-Anordnung* ist der evakuuierte Plasmaraum toroidförmig von einer Spule umgeben (Abb. 74.3). Das ringförmige Plasma bildet aber auch die Sekundärwicklung eines Transformators. Durch diesen Transformator wird ein Strom im Plasma induziert. Dieser Strom erzeugt ebenfalls ein Magnetfeld und dient auch zum Aufheizen des Plasmas. Eine mögliche Reaktion ist die Deuterium-Tritium-Fusion.

$$^2_1\mathrm{H} + ^3_1\mathrm{H} \rightarrow ^4_2\mathrm{He} + ^1_0\mathrm{n} + 17{,}6\ \mathrm{MeV}$$

Das Wasserstoffisotop Deuterium kommt im natürlichen Wasserstoff mit einer Konzentration von 0,015 % vor. Das radioaktive Wasserstoffisotop Tritium könnte im Reaktor mit Hilfe der frei werdenden Neutronen aus Lithium hergestellt werden. Fusionsforschung wird seit der Mitte des 20. Jh betrieben. Es ist aber derzeit nicht absehbar, wann ein Fusionsreaktor zur Stromerzeugung zur Verfügung stehen wird.

Aufgabe

71. Berechne die Energie (in J, kWh und MW-Tagen), die bei der vollständigen Spaltung von 1 kg U 235 maximal frei wird? Wieviel kg Steinkohle (Heizwert: 30 000 kJ/kg) liefern die gleiche Energie?

13. Strahlenschutz

13.1 Strahlungsgrößen

Aktivität

Die Aktivität ist eine wichtige Größe zur Charakterisierung einer radioaktiven Quelle - siehe die Beispiele in der Randspalte! Abbildung 75.2 zeigt den Aktivitätsverlauf von Cs 137 und J 131 in der Kuhmilch nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl am 26. 4. 1986.

Energie

Die Energiespektren sind charakteristisch für ein Radionuklid. Die Analyse eines Energiespektrums ermöglicht daher die Identifizierung von Radionukliden und auch die Bestimmung ihres mengenmäßigen Anteils in einem Gemisch (z.B. bei einem Reaktorunfall). Die Radionuklidbestimmung ist für den Strahlenschutz sehr wichtig, da verschiedene Radionuklide sehr unterschiedliche Strahlenwirkungen hervorrufen können.

Halbwertszeit

Sie kann auch zur Identifizierung von Radionukliden dienen. Für den Strahlenschutz ist das Abklingen der Aktivität - durch die Halbwertszeit bestimmt - von großer Bedeutung.

Dosis

Für die physikalische und biologische Strahlenwirkung ist die auf die Materie übertragene Energie maßgebend. Diese wird durch Dosisgrößen dargestellt. Die Dosismessung wird auch als Dosimetrie bezeichnet. Die *Energiedosis D* gibt die pro Masseneinheit absorbierte Energie an.

$$\text{Energiedosis } D = \frac{\text{übertragene Energie}}{\text{Masse}} \qquad [D] = 1\ \text{J/kg} = 1\ \text{Gray} = 1\ \text{Gy}$$

alte Einheit: 1rad ("radiation absorbed dose") 1 Gy = 100 rad

Ionisierende Strahlung mit vergleichsweise geringer Energie ruft große biologische Wirkungen hervor. So ist eine Energiedosis von 10 Gy (10 J/kg) tödlich, während eine Wärmemenge von 10 J 1kg Wasser um 0,002° C erwärmen kann! Die direkte Messung der Energiedosis ist aufwendig. Meßtechnisch einfacher ist die Bestimmung der *Ionendosis I*. Darunter versteht man die durch Ionisierung erzeugten Ladungen (eines Vorzeichens) pro Masseneinheit.

$$\text{Ionendosis } I = \frac{\text{Ladung}}{\text{Masse}} \qquad [I] = 1\ \text{As/kg} = 1\ \text{C/kg}$$

alte Einheit : 1 R (Röntgen)

1R ist die Ionendosis einer ionisierenden Strahlung, die in Luft eine Ladung von $2{,}5810^{-4}$ C/kg erzeugt. Daraus ergibt sich: 1 C/kg = 3876 R

Zwischen Energiedosis und Ionendosis besteht allerdings kein fester Zusammenhang, da ja die zur Ionisierung erforderliche Energie vom Stoff abhängig ist. In Luft, Wasser und weichem Gewebe gilt annähernd: 1 rad = 1 R .

Nun besitzen verschiedene Strahlenarten unterschiedliche biologische Wirkungen. So haben etwa α-Strahlen eine stärkere Ionisationsfähigkeit als β-Strahlen. Die Energiedosis ist daher zur Beurteilung der biologischen Wirkung einer Strahlung nicht geeignet. Als Maß für die biologische Wirksamkeit wurde die *Äquivalenzdosis* D_Q eingeführt. Man erhält sie, indem man die Energiedosis *D* mit einem Qualitätsfaktor *Q* multipliziert. Der *Q-Faktor* wird für die verschiedenen Strahlenarten experimentell ermittelt (Tabelle 75.4).

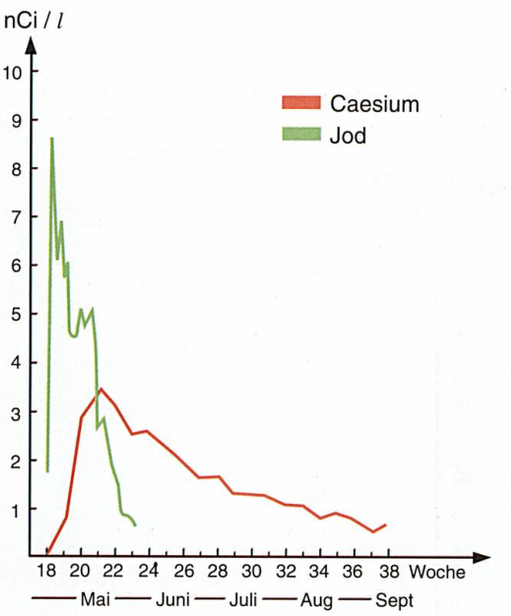
Gleiche Äquivalenzdosen verschiedener Strahlenarten rufen gleiche biologische Wirkungen hervor. Die Äquivalenzdosis besitzt dieselbe Einheit wie die Energiedosis, erhält aber zur Unterscheidung einen eigenen Einheitennamen:

Einheit der Äquivalenzdosis: $[D_Q] = 1$ Sievert = 1 Sv

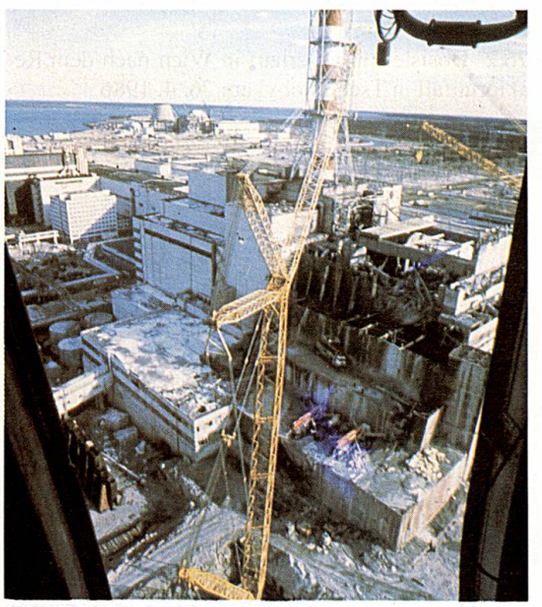
alte Einheit: 1 rem ("roentgen equivalent men") 1 Sv = 100 rem

- Ein radioaktives Präparat für Schulzwecke hat etwa eine Aktivität von 1 MBq.
- Die spezifische Aktivität von K40 im Granit beträgt ca. 1 Bq/g.
- Beim Reaktorunfall in Tschernobyl wurden Teilchen mit einer Gesamtaktivität von ca. $5 \cdot 10^6$ Ci ($\approx 2 \cdot 10^{17}$ Bq) in die Luft geschleudert.

75.1 Die Aktivität einiger radioaktiver Quellen



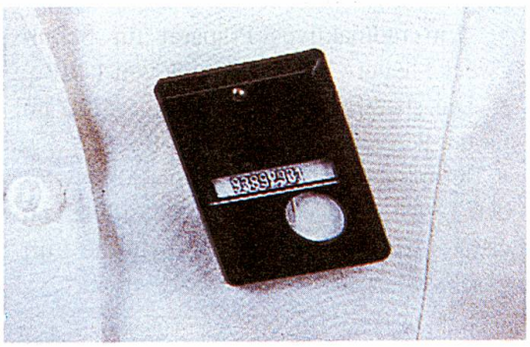
75.2 Cs-137- und J-131-Belastung der Kuhmilch in Österreich nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl



75.3 Tschernobyl mit dem zerstörten Reaktorblock Nr. 4

Strahlenart	Q-Faktor
Röntgen-, γ- und β-Strahlung	1
α-Strahlung	10 - 20
schnelle Neutronen	10

75.4 Der Q-Faktor verschiedener Strahlenarten



76.1 Ein Filmdosimeter

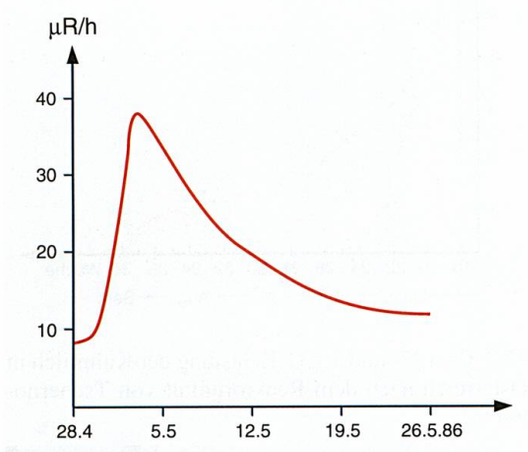
Die Dosismessung ist für den Personenschutz in strahlengefährdeten Bereichen von Bedeutung. Ein Dosimeter mißt die in einem bestimmten Zeitraum absorbierte Energiedosis (Äquivalenzdosis). In einem Filmdosimeter wird die Schwärzung eines Filmes genützt (Abb. 76.1). Die pro Zeiteinheit absorbierte Dosis wird als *Dosisleistung* bezeichnet.

$$\text{Dosisleistung} = \frac{\text{Dosis}}{\text{Zeit}}$$

Dabei ist zwischen *Energiedosisleistung, Ionendosisleistung* und *Äquivalenzdosisleistung* zu unterscheiden.

Beispiele: Ein γ-Strahler (Co-60-Präparat) mit einer Aktivität von 3,7 MBq verursacht in 0,5 m Abstand eine Äquivalenzdosisleistung von ca. 5 µSv/h. Abbildung 76.2 zeigt den Dosisleistungsverlauf in Wien nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl.

In Österreich ist ein Strahlenfrühwarnsystem aufgebaut. Mit einigen hundert Meßstationen, die über das Bundesgebiet verteilt sind, kann ständig die Dosisleistung gemessen werden. Das Frühwarnsystem ermöglicht es, die zeitliche Entwicklung der Dosisleistung zu erfassen.



76.2 Dosisleistungsverlauf in Wien nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl am 26. 4. 1986

13.2 Die Strahlenbelastung des Menschen

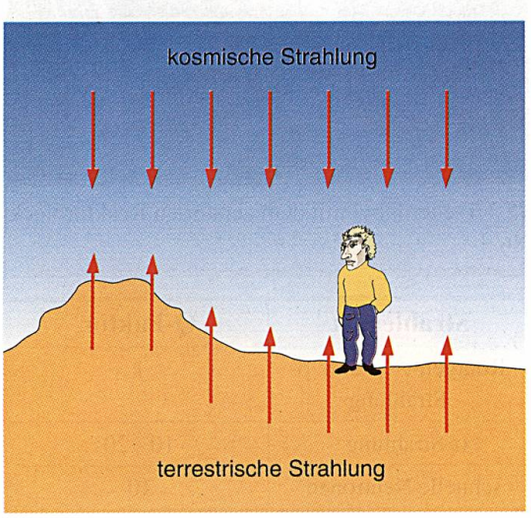
Die Einwirkung von Strahlung auf den menschlichen Körper bezeichnet man auch als Strahlenexposition.

Natürliche Strahlenbelastung

Ursache ist die natürliche Radioaktivität. Man unterscheidet zwischen äußerer und innerer Bestrahlung. Die *äußere Strahlenbelastung* erfolgt durch kosmische und terrestrische Strahlung (Abb. 76.3) und beträgt in Österreich im Durchschnitt 0,8 mSv/Jahr (80 mrem/Jahr). Die terrestrische Strahlung geht von den in der Erdkruste vorkommenden Radionukliden aus. Die Verteilung der Radionuklide ist von Ort zu Ort verschieden und kann zu großen regionalen Unterschieden in der Dosisleistung führen.

Die *innere Strahlenbelastung* (Eigenstrahlung des Körpers) erfolgt vor allem durch die Radionuklide K 40, C 14, Ra 226 und Rn 222. Diese werden entweder mit der Nahrung oder beim Atmen aufgenommen. Die innere Strahlenbelastung beträgt im Mittel etwa 1 mSv/Jahr (100 mrem/Jahr). Damit beträgt die gesamte natürliche Strahlenbelastung in Österreich an die 1,8 mSv/Jahr (180 mrem/Jahr).

Radionuklide sind in verschiedenen Baustoffen regional sehr unterschiedlich vorhanden. Das kann auch zu einer erhöhten Strahlenbelastung innerhalb eines Hauses führen. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang das aus verschiedenen Gesteinen und Baustoffen austretende, gasförmige Rn 222. Dieser α-Strahler wird vom Menschen eingeatmet. Daher sollten Räume öfter gelüftet werden und Wände gasdurchlässig sein.



76.3 Die äußere Strahlenbelastung

Zivilisatorische Strahlenbelastung

Sie wird vor allem durch die Anwendung von Röntgenstrahlung und Radioisotopen in Medizin und Technik verursacht. Kernwaffenversuche und der Betrieb von Kernkraftwerken tragen ebenfalls zur Strahlenbelastung bei. Im Mittel wird ein Wert von 0,6 mSv/Jahr (60mrem/Jahr) angegeben.

Die *gesamte Strahlenbelastung* für den Österrreicher beträgt im Mittel ca 2,4 mSv/Jahr (240 mrem/Jahr).

Bei einer Aufnahme von radioaktiven Stoffen durch den Menschen (Inkorporation), ist es wichtig zu wissen, daß manche Radionuklide vorzugsweise in einem bestimmten Organ (kritisches Organ) angereichert werden. Verschiedene Isotope eines chemischen Elementes verhalten sich im Stoffwechsel gleich. Das Radionuklid J 131 wird hauptsächlich in der Schilddrüse angelagert. Aber auch chemisch verwandte Elemente können oft nicht unterschieden werden.

So wird Cs 137 mit Kalium "verwechselt" und im Muskelgewebe, in Leber und Niere angelagert. Sr 90 wird mit Calcium "verwechselt" und in den Knochen angelagert. Auf diese Weise kann es zu einer sehr hohen Strahlenbelastung (Dosis) in einzelnen Organen kommen, die viel schädlicher sein kann als eine Verteilung der Strahlung über den ganzen Körper.

13.3 Biologische Wirkungen der Strahlung

Bald nach der Entdeckung der Röntgenstrahlung wurde beobachtet, daß sich die Haut nach einer Bestrahlung rötet. In der Folge erkannte man auch, daß Körperzellen zerstört werden. Energiereiche Strahlung (Elektronen, Protonen α-Teilchen, Photonen und Neutronen) kann Atome oder Moleküle ionisieren. Deshalb spricht man auch von ionisierender Strahlung. Als Folge treten chemische Veränderungen auf.

Von besonderer Bedeutung ist die Strahleneinwirkung auf die lebende Zelle. Der Zellkern enthält ein kompliziert aufgebautes Molekül, die DNS (Desoxyribonucleinsäure). In der DNS sind alle für die Funktion und die Vermehrung der Zelle nötigen Informationen gespeichert. Sie ist Träger des genetischen Codes. In vielen Körpergeweben kommt es zu einer ständigen Erneuerung der Zellen. Im menschlichen Körper werden pro Sekunde Millionen Zellen durch Zellteilung neu gebildet. Auch jedes Wachstum ist eine Folge von Zellteilungen.

Ein Strahlenschaden an einer Zelle kann zum Zelltod führen. Es können sich aber auch andere weitreichende Folgen einstellen. Die Veränderung der im Zellkern gespeicherten Informationen kann zu einer Fehlfunktion der Einzelzelle führen. Bei einer Zellteilung können falsche Informationen an neue Zellgenerationen weitergegeben werden. Zellschäden oder Übertragungsfehler bei der Zellteilung sind nicht immer Folgen energiereicher Strahlung, sondern können auch spontan, unter normalen Umweltbedingungen auftreten. Jede Zelle besitzt einen Reparaturmechanismus, der verschiedene Fehler und Schäden korrigieren kann. Da dieser Mechanismus nicht fehlerfrei arbeitet, kann das Risiko nicht ausgeschaltet, sondern nur verringert werden. Das bedeutet, daß auch ein einziges Strahlungsquant einen irreparablen Schaden verursachen kann. Mit zunehmender Strahlungsdosis nimmt auch das Risiko für irreparable Schäden zu.

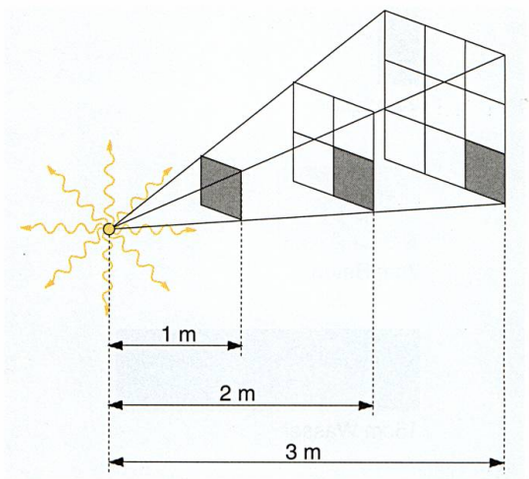
Während der Zellteilung sind die Zellen besonders empfindlich gegenüber Strahlenschäden. Je größer die Zellteilungsrate ist, umso größer ist auch die Empfindlichkeit. Daraus erklärt sich die unterschiedliche Strahlenempfindlichkeit verschiedener Organe. Am empfindlichsten sind die blutbildenden Organe (Knochenmark, Milz, Lymphknoten) und die Keimdrüsen (Gonaden). Auch der Embryo im Mutterleib ist besonders gefährdet, da in ihm rasch aufeinanderfolgende Zellteilungen ablaufen. Durch energiereiche Strahlung können somatische und genetische Strahlenschäden verursacht werden. Die somatischen Schäden betreffen den bestrahlten Menschen selbst. Genetische Schäden treten an Keimdrüsen und -zellen auf und wirken sich als Erbschäden aus. Durch eine hohe kurzzeitige Strahlendosis kommt es zu einem akuten Strahlenschaden.
Nach dem Abklingen der Strahlenkrankheit können Strahlenspätschäden (Krebs, Leukämie) auftreten. Strahlenspätschäden (somatisch und genetisch) können auch durch eine niedrige Strahlendosis ausgelöst werden. Obwohl ein Strahlenschaden umso wahrscheinlicher wird, je größer die Strahlendosis ist, kann auch durch den Zerfall eines einzigen Radionuklids im Körper ein Strahlenschaden ausgelöst werden.

13.4 Strahlenschutz

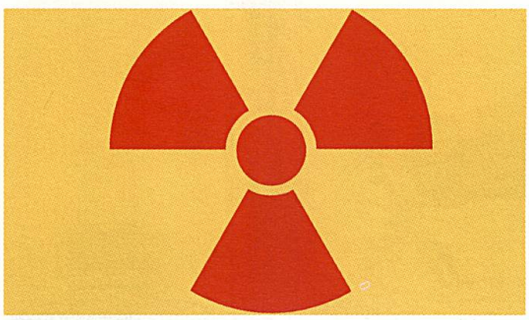
Jede Einwirkung ionisierender Strahlung auf den menschlichen Körper ist so niedrig wie möglich zu halten, jede unnötige Einwirkung ist zu vermeiden.
Durch das Österreichische Strahlenschutzgesetz und durch die Strahlenschutzverordnung wird der "Umgang" mit ionisierender Strahlung geregelt. Die Vorschriften dienen dem Schutz beruflich strahlenexponierter Personen und dem der Bevölkerung. Dazu werden Grenzwerte festgelegt.

Milch	5 nCi/l C s137, 5 nCi/l J 131
Obst	3 nCi/kg Cs 137, 2 nCi/kg J 131

77.1 Grenzwerte für Lebensmittel (November 1986) nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl



77.2 Bei Verdoppelung (Verdreifachung) des Abstandes sinkt die Strahlenbelastung auf ein Viertel (ein Neuntel)



77.3 Strahlenwarnzeichen

bis 0,5 Sv (50 rem)	geringe Blutbildveränderung
5 Sv (500 rem)	ca. 50 % Todesfälle
8 Sv (800 rem)	fast 100 % Todesfälle

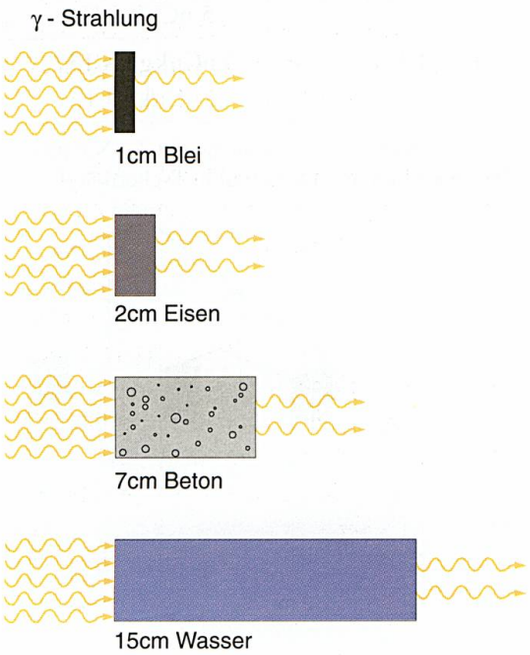
77.4 Akute Wirkung einer hoher Strahlendosis

Sirenensignale zur Warnung vor Strahlengefahren

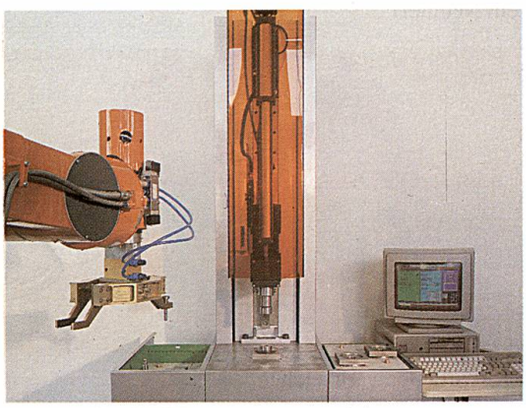
1. *Warnung*: gleichbleibender Dauerton von 3 Minuten - Rundfunkgeräte einschalten, Weisungen abwarten.

2. *Alarm*: auf- und abschwellender Heulton von mindestens einer Minute - Sofortinformation im Rundfunk einholen, im Sinn der Information sofort handeln, einen geschützten Bereich aufsuchen (Schutzraum, Keller ...)

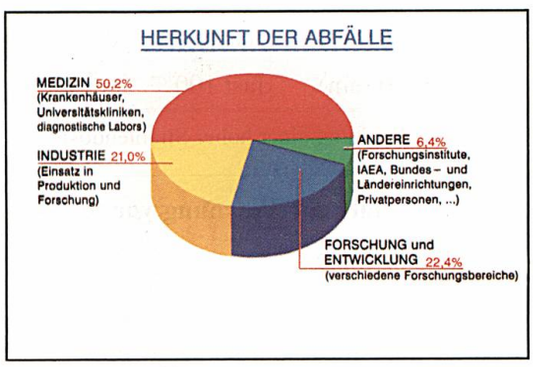
3. *Entwarnung*: gleichbleibender Dauerton von einer Minute - Anleitungen im Rundfunk einholen. Die Gefahrensituation ist zu Ende.



78.1 Halbwertsdicke einiger Stoffe für γ-Strahlung



78.2 "Künstliche Hände" zum Experimentieren mit radioaktiven Nukliden



78.3 Herkunft der radioaktiven Abfälle, die in Österreich anfallen

Kontrollfragen

1. Erkläre die Dosisgrößen und ihre Einheiten.
2. Wie kann man sich vor einer äußeren a) α- oder β-Strahlung b) γ-Strahlung schützen?
3. Was versteht man unter Kontamination?
4. Wie verhalten sich verschiedene Radionuklide bei einer Inkorporation.

Für die Bevölkerung beträgt der Gesamtkörpergrenzwert 1,67 mSv/Jahr. Für beruflich strahlenexponierte Personen ist der Grenzwert das Dreißigfache (50 mSv/Jahr).
Nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl trat eine zusätzliche Strahlenbelastung auf, die es erforderlich machte, speziell für diese Situation Grenzwerte festzulegen. Da die Belastung hauptsächlich über Nahrungsmittel erfolgte, wurden Grenzwerte für die Aktivität von Lebensmitteln festgelegt (Tab. 77.1).

Ein Schutz vor radioaktiver Strahlung ist nur möglich, wenn man weiß, auf welchen Wegen (Expositionspfaden) "freigesetzte Radioaktivität" auf den Menschen einwirken kann.

Äußere Bestrahlung

Sie entsteht durch "technische" oder "medizinische" Radionuklide, durch "radioaktive Wolken" oder durch die Verunreinigung (Kontamination) des Bodens nach einem radioaktiven Niederschlag.

Grundregeln des Strahlenschutzes:

- Abstand
- Abschirmung
- kurze Bestrahlungszeit

Auf Grund der geringen Reichweite der α- und β-Strahlung kann man sich vor dieser durch einen entsprechenden Abstand schützen. Für γ-Strahlung gilt das gleiche quadratische Abstandgesetz wie für Licht- oder Schallwellen. Bei einer Verdopplung des Abstandes von der Strahlungsquelle sinkt die Dosisleistung auf 1/4 ab (Abb. 77.2).

Für die γ-Strahlung läßt sich im Gegensatz zur α- und β-Strahlung keine Reichweite angeben. Die Schwächung erfolgt nach einem Exponentialgesetz. Die abschirmende Wirkung eines Materials wird durch die *Halbwertsdicke* angegeben. Das ist jene Schichtdicke, welche die Dosisleistung auf die Hälfte vermindert. Die Schwächung ist auch von der Energie der γ-Strahlung abhängig. Abbildung 78.1 zeigt Werte für eine γ-Energie von 1 MeV.

Bei jedem Aufenthalt in einem Strahlungsbereich nimmt die vom Menschen aufgenommene Dosis mit wachsender Aufenthaltsdauer zu. Daher ist die Aufenthaltsdauer auf ein Minimum zu beschränken.

Radioaktive oder radioaktiv verseuchte (kontaminierte) Gegenstände dürfen nicht berührt werden. Zu beachten ist auch, daß nach einem radioaktiven Niederschlag der Boden, sowie angebautes Gemüse und Obst kontaminiert sind.

Innere Bestrahlung

Sie erfolgt durch die Aufnahme (Inkorporation) von radioaktiven Stoffen durch die Nahrung (Ingestion) oder über die Atmung (Inhalation). Schutz vor dem Einatmen von Radionukliden bieten Schutzräume, in geringerem Maße auch schon geschlossene und abgedichtete Räume. Haben Nahrungsmittel bereits über die Pflanzenwurzeln Radionuklide aus dem Boden aufgenommen, dann müssen Lebensmittel, die die festgelegten Grenzwerte überschreiten, aus dem Verkauf gezogen werden.

Aufgaben

72. Berechne aus der Beziehung 1 rad = 1 R den Zusammenhang zwischen Gy und C/kg

73. Die Kaliumkonzentration beim erwachsenen Menschen beträgt ca 2g/kg.Der K-40-Anteil an Kalium ist 0,01%. Berechne die Aktivität von K 40 in einer 70 kg schweren Person (innere Strahlenbelastung).

74. Die äußere, natürliche Strahlenbelastung beträgt in Österreich im Durchscnitt 0,8 mSv/Jahr. Berechne daraus die Dosisleistung pro Stunde und vergleiche mit dem Anfangswert der Kurve in Abbildung 76.2.

75. Auf welchen Wert sinkt die Dosisleistung von 1 Sv/h ab, wenn durch eine 28cm dicke Betonwand abgeschirmt wird?

14. Elementarteilchen

14.1 Einteilung der Elementarteilchen

Der griechische Philosph *Demokrit* (ungefähr 400 v. Chr.) stellte folgende Behauptung auf: "Alle Dinge bestehen aus kleinen, unteilbaren Stücken und aus Leere."

Um 1935 stellten Physiker fest: "Alle Dinge bestehen aus Protonen, Neutronen und Elektronen und aus Leere."

Diese Behauptung wurde um 1980 verfeinert: "Da Protonen und Neutronen aus noch kleineren Teilchen, den Quarks, bestehen, kann man sagen, daß alle Dinge aus Quarks, Elektronen und aus Leere bestehen." Dies ist die Aussage des sogenannten *Standardmodells*.

Der Begriff *Elementarteilchen* oder *subatomare Teilchen* wird für Teilchen verwendet, die "kleiner" als Atome sind. Er hat nicht die Bedeutung "elementar" im strengen Sinn.

Die grundsätzlichen Fragen der Elementarteilchenphysik lauten:

- Wie können die Teilchen erzeugt werden?
- Wie kann man sie charakterisieren und identifizieren?
- Können die Teilchen zu Familien zusammengefaßt werden?

Subatomare Teilchen können bei Experimenten in Teilchenbeschleunigern erzeugt werden. Dabei geht man fast immer von Elektronen und Protonen aus. Freie Elektronen erzeugt man mit Hilfe einer Glühkatode, freie Protonen werden aus gasförmigem Wasserstoff in einem Lichtbogen gewonnen. Diese freien Teilchen werden jeweils durch geeignete elektrische Felder gebündelt und in einen Beschleuniger geleitet. Dort werden sie bis nahe an die Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Die Teilchen werden dann aufeinander oder auf andere Atomkerne gelenkt. Aus der frei werdenden Bremsenergie entstehen nach der Einsteinschen Formel $E = m \cdot c^2$ neue Teilchenpaare.

Dies führte zum "Entsetzen" der Physiker zu einer Vielzahl von neuen, unbekannten Elementarteilchen. Durch Experimente wurden die Eigenschaften der einzelnen Teilchen erforscht.

Wichtige Eigenschaften der Elementarteilchen sind: Größe von Ruhemasse, elektrischer Ladung, Eigendrehimpuls (Spin) und die Lebensdauer.

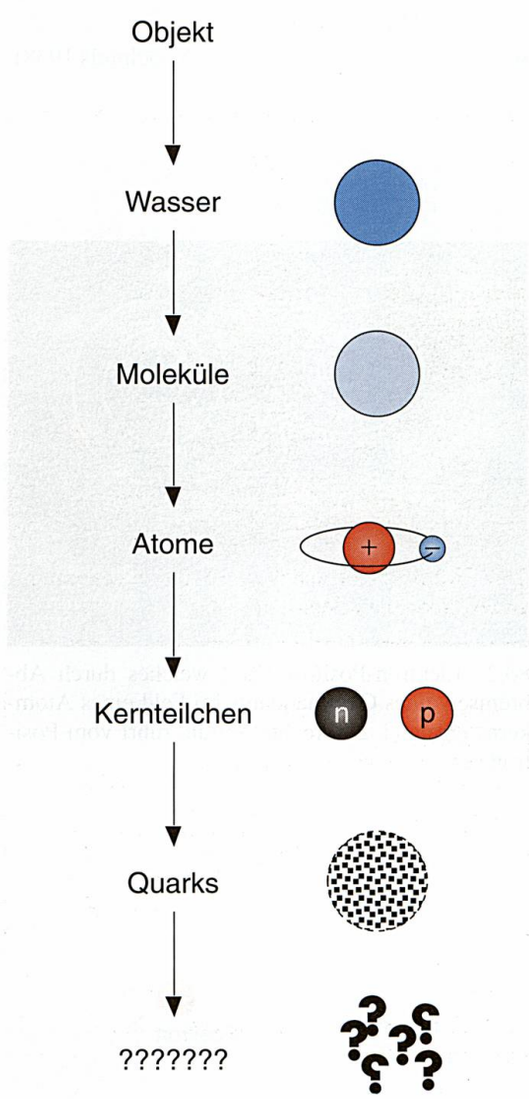
Für den Spin gibt es kein klassisches Analogon, denn selbst Teilchen mit der Ruhemasse Null, wie das Photon, besitzen einen Spin. Zur Veranschaulichung denkt man sich das Elementarteilchen als Kugel, die um eine durch das Zentrum gehende Achse rotiert (Abb. 79.2). Der Spin wurde erstmals vom österreichischen Physiker *Erwin Schrödinger* diskutiert. Der Spin kann nicht beliebige Werte annehmen, er ist gequantelt.

Die subatomaren Teilchen lassen sich in zwei große Familien einteilen, die *Leptonen* und die *Hadronen*, neben diesen gibt es das *Photon*.

Zu den Leptonen (leichte Teilchen) gehören Elektron, Myon und Neutrino; ihr Spin ist 1/2.

Die Hadronen bestehen aus zwei Gruppen: den *Baryonen* (schwere Teilchen) und den *Mesonen* (mittelschwere Teilchen). Die wichtigsten Vertreter der Baryonen sind das Proton und das Neutron. Vertreter der Mesonen sind das *Pion* und das *Kaon*. Der Spin der Hadronen ist in der Form 0, 1/2, 1, 3/2, ... gequantelt, beträgt also ein ganzzahliges Vielfaches von 1/2.

Im folgenden Abschnitt werden einige wichtige Elementarteilchen vorgestellt; die Eigenschaften von Proton, Neutron und Elektron jedoch als bekannt vorausgesetzt.



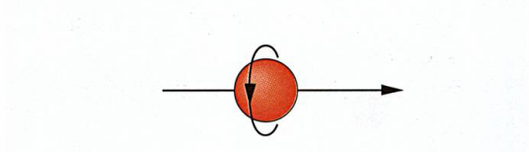
79.1 Vom Objekt bis zu subatomaren Teilchen

Photon

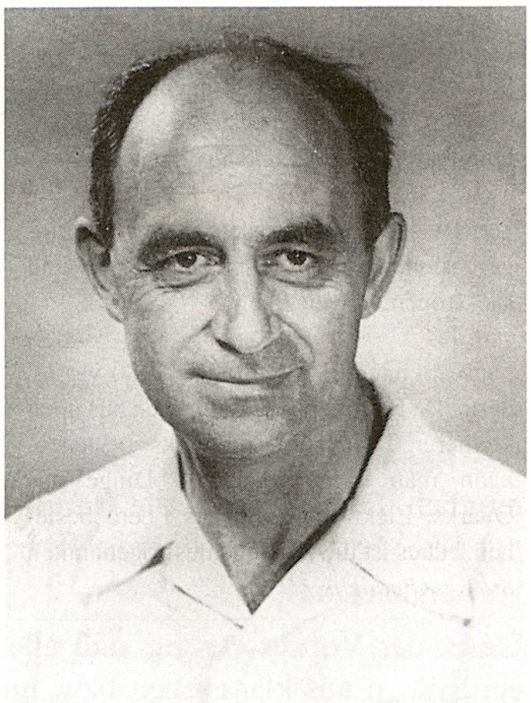
Beim Photoeffekt werden Elektronen durch elektromagnetische Strahlung aus einer festen Oberfläche abgelöst. Einstein deutete die Versuchsergebnisse, die nicht mit der Wellentheorie in Einklang zu bringen waren, durch eine Photonenhypothese: Licht besteht aus Photonen(Quanten) der Energie $h \cdot f$.

Experimentell nachgewiesen wurden die Photonen durch *Millikan* und *Compton* zwischen 1914 und 1916. Compton streute Röntgenstrahlung an Elektronen und entdeckte dabei eine Verringerung der Frequenz. Dies entspricht einem Energieverlust aufgrund der Stöße zwischen den Photonen und den Elektronen. Der Compton-Versuch liefert eine der wichtigsten Bestätigungen für die Lichtquantenhypothese - vergleiche dazu Kapitel 4.2!

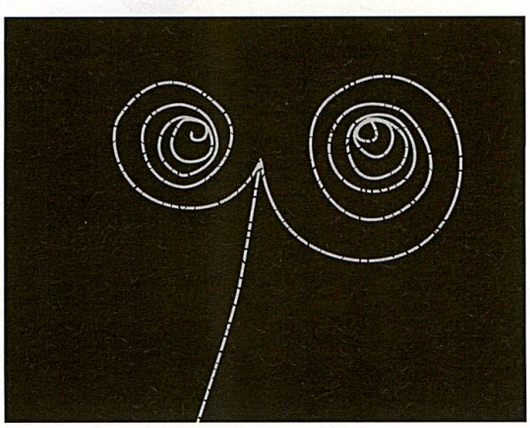
Photonen sind elektrisch neutral und besitzen keine Ruhemasse. Sie bewegen sich immer mit Lichtgeschwindigkeit und sind daher keine Atombausteine.



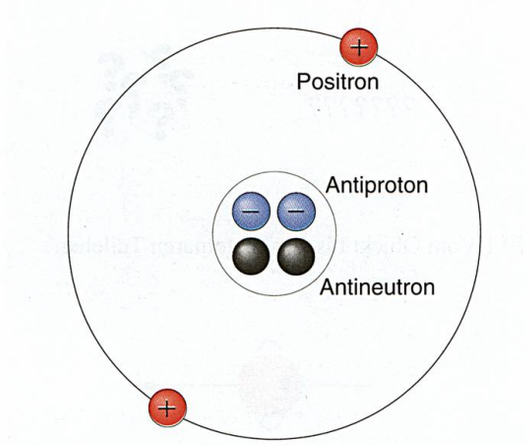
79.2 Veranschaulichung des Spins



80.1 *Enrico Fermi* (1901 - 1954; Nobelpreis 1938)



80.2 Elektron-Positron-Paar, welches durch Abbremsen eines Gammaquants im Feld eines Atomkerns entstand. Die rechte Spirale rührt vom Positron her, die linke vom Elektron.



80.3 Antihelium

Neutrino

Wolfgang Pauli postulierte 1930 dieses Teilchen, um den β-Zerfall erklären zu können. *Enrico Fermi* nannte das Teilchen Neutrino , was soviel wie "kleines Neutron" bedeutet.

Die Wechselwirkung von Neutrinos mit Materie ist äußerst gering. Ein Neutrino könnte Lichtjahre in Blei zurücklegen, bevor es absorbiert wird. Ob dieses Teilchen eine Ruhemasse besitzt, ist nicht geklärt.

Myon

Das Myon wurde im Jahr 1937 von *Carl Anderson* und *Seth Neddermeyer* entdeckt. Myonen sind Bestandteil der sekundären kosmischen Strahlung, sie entstehen in etwa 15 km Höhe durch die kosmische Strahlung. Sie besitzen die gleiche Ladung wie die Elektronen, nur haben sie ungefähr die 200fache Elektronenmasse. Das Myon zerfällt mit einer Halbwertszeit von $2{,}20 \cdot 10^{-6}$s in ein Elektron und in Neutrinos.

14.2 Antiteilchen

Positronen

Paul Dirac vereinte die Spezielle Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik. Dabei entwickelte er eine Gleichung, die jedes Elektron quantenmechanisch beschreibt. Die Lösungen dieser Gleichung lieferten einerseits die Eigenschaften des Elektrons, andererseits ein Teilchen mit der Elektronenmasse aber einer positiven Ladung, das *Positron*.

Das Positron ist das Antiteilchen des Elektrons.

Das Positron wurde 1932 von *Carl Anderson* entdeckt. Er stellte fest, daß ein Elektron-Positron-Paar in einem starken Magnetfeld entgegengesetzt abgelenkt wird (Abb. 80.2).

Wird ein Positron in Materie abgebremst, kommt es beim Zusammentreffen mit einem Elektron zur Vernichtung (Annihilation) der beiden Teilchen; dabei werden zwei Photonen ausgesendet. Masse wird in Energie umgewandelt.

Wenn ein Teilchen und das zugehörige Antiteilchen zusammentreffen, vernichten sie einander, indem zwei oder mehrere Photonen und auch andere Teilchen entstehen können.

Heute wird angenommen, daß es zu jedem Teilchen ein Antiteilchen gibt; diese stimmen in Masse, Drehimpuls und Lebensdauer überein; alle anderen Eigenschaften besitzen entgegengesetztes Vorzeichen. So gibt es ein Antiproton mit negativer Ladung, das Antineutron hingegen besitzt wie das Neutron keine Gesamtladung. Möglicherweise bilden Antiprotonen, Antineutronen und Positronen *Antiatome* (Abb. 80.3). Alle Naturvorgänge sind mit den entsprechenden Antiteilchen möglich. Man könnte nun erwarten, daß die Hälfte der Masse des Universums aus Antimaterie aufgebaut ist. Dies ist jedoch nicht der Fall. Warum die positive Ladung gegenüber der negativen bevorzugt erscheint, ist nicht geklärt.

Das *Antiphoton* ist selbst ein Photon, es ist sein eigenes Antiteilchen.

Antineutrino

Das Antineutrino entsteht, wenn sich ein Neutron in ein Proton umwandelt. Bei diesem Vorgang werden ein Elektron und ein Antineutrino emittiert.

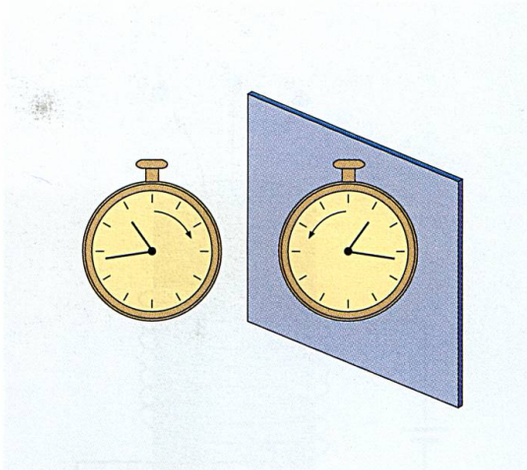
$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

14.3 Symmetrie und Parität

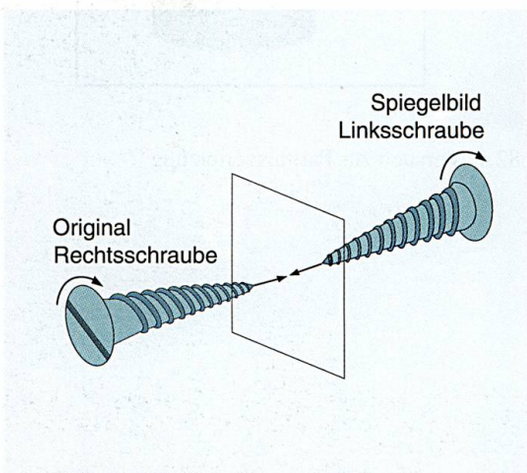
Physikalische Modelle beruhen auf grundlegenden Prinzipien, den Erhaltungssätzen. Das Ziel ist es, eine umfassende Beschreibung von physikalischen Abläufen zu liefern. Dies ist möglich, wenn physikalische Größen erkannt wer-

den, die während eines solchen Ablaufes erhalten bleiben, also zeitunabhängig sind.
Die gefundenen Größen werden als *Erhaltungsgrößen* bezeichnet; dies sind etwa die Energie, der Impuls und die Ladung.
Eine weitere Erhaltungsgröße ist die *Symmetrie*. Das bekannteste Beispiel für eine Symmetrie ist die Spiegelsymmetrie (Abb. 81.1). In einem Spiegel erscheinen links und rechts miteinander vertauscht. Würde man das Spiegelbild einer Uhr bauen, würde sie gleich funktionieren, nur der Umlaufsinn der Zeiger wäre entgegengesetzt. Aus einer Rechtsschraube (rechtshändigen Schraube) wird im Spiegelbild eine Linksschraube (linkshändige Schraube) - Abb. 81.2.

Die *Händigkeit* eines Elementarteilchens hängt von der Orientierung seines Spins ab (Abb. 81.3). Zeigen Geschwindigkeitsvektor und Spinvektor in die gleiche Richtung, so ist das Teilchen *rechtshändig*. Zeigen die beiden Vektoren in entgegengesetzte Richtungen, so ist das Teilchen *linkshändig*.
Linksquarz und Rechtsquarz kommen in der Natur mit der gleichen Häufigkeit vor. Es läßt sich nicht erkennen, ob in der Natur eine Bevorzugung von links oder rechts auftritt.



81.1 Spiegelsymmetrie



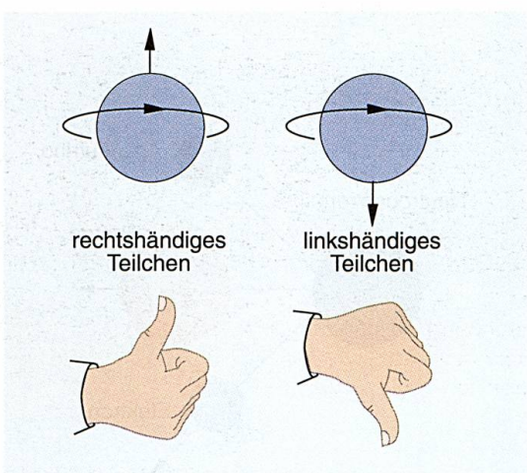
81.2 Rechtsschraube - Linksschraube

Parität

Betrachten wir das Bild eines rotierenden Zylinders in einem Spiegel. Wir denken uns das Original mit dem Spiegelbild so zur Deckung gebracht, daß der Drehsinn erhalten bleibt. Dies ist dann möglich, wenn Grund- und Deckfläche nicht unterscheidbar sind (Abb. 81.4 links).
Das Spiegelbild eines rotierenden Kegels läßt sich mit dem Kegel vor dem Spiegel zwar zur Deckung bringen, die Drehrichtungen sind dann jedoch entgegengesetzt (Abb. 81.4 rechts). Die beiden Körper, Zylinder und Kegel, zeigen unterschiedliche *Parität*. Man sagt, die beiden Zylinder weisen *gerade Parität* auf, die beiden Kegel *ungerade Parität*. So haben auch zwei gerade (ungerade) Zahlen gerade Parität, eine ungerade und eine gerade Zahl ungerade Parität. Schaut man in den Spiegel, ist die linke Hand mit der rechten vertauscht, die Parität ist ungerade.

Der Symmetriebegriff läßt sich auch auf physikalische Vorgänge erweitern. Naturgesetze sind symmetrisch.

Bis zum Zerfall des Neutrons kannte man keinen Naturvorgang, der es erlaubte, die Vorgänge in der "realen" Welt und in der "Spiegelwelt" zu unterscheiden. Beide Welten sind gleichwertig. Die Parität bleibt erhalten. Dieser Erhaltungssatz beschreibt die Spiegelsymmetrie im Naturgeschehen.



81.3 Rechtshändiges und linkshändiges Teilchen

Paritätserhaltung
Zu jedem physikalischen Vorgang gibt es einen spiegelbildlich gleichen Vorgang, für den dieselben Gesetzmäßigkeiten gelten.

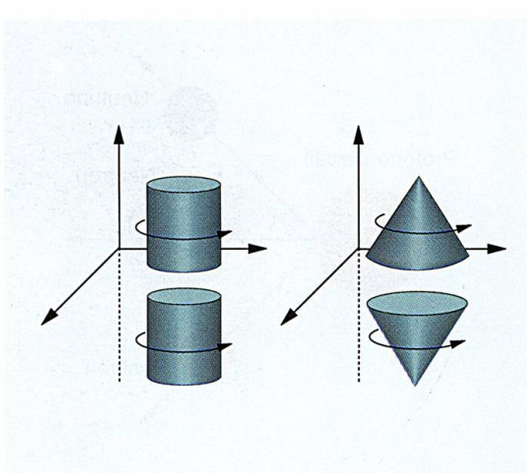
Paritätsverletzung

Versuch

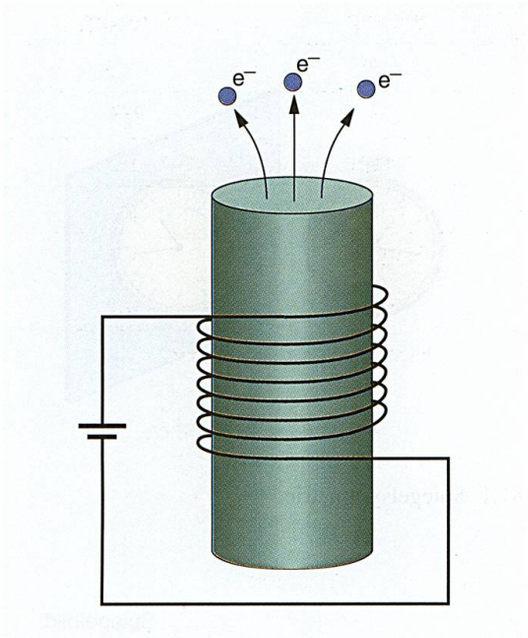
Der erste Versuch zur Paritätsverletzung wurde im Jahre 1957 von der Physikerin *Chien-Chiung Wu* durchgeführt (Abb. 82.1). Radioaktives Kobalt (Co 60) zerfällt in Nickel (Ni 60), ein Elektron und ein Antineutrino:

$$^{60}_{27}\mathrm{Co} \rightarrow {}^{60}_{28}\mathrm{Ni} + \mathrm{e}^- + \overline{\nu}$$

Beim Zerfall werden das Elektron und das Antineutrino emittiert.
Die Kobaltkerne weisen einen Spin auf, der gleichmäßig nach allen Raumrichtungen verteilt ist. Legt man ein Magnetfeld an, kommt es zu einer Ausrichtung der Spinachsen. Nach dem Symmetrieerhaltungssatz müßten nun gleich viele Elektronen nach oben und nach unten emittiert werden, ebenso bei Umpolung des Magnetfeldes.
Wu konnte durch Messung der Intensität auf beiden Seiten nachweisen, daß die Elektronen zum Großteil entgegengesetzt zur Richtung des Magnetfeldes und damit zum Spin der Kobaltkerne ausgesendet wurden; die Elektronen zeigten sich linkshändig.



81.4 Zylinder: gerade Parität; Kegel: ungerade Parität



82.1 Versuch zur Paritätsverletzung

Damit war die Allgemeingültigkeit des Symmetrieerhaltungssatzes gefallen; man bezeichnet dies auch als *Paritätsverletzung, Sturz der Parität* oder *Symmetriebrechung.*

Diese Tatsache hat nun eine Folgewirkung auf die Antineutrinos. Da der Gesamtdrehimpuls der Kobaltkerne beim Zerfall erhalten bleiben muß, sind die linkshändigen Elektronen mit rechtshändigen Antineutrinos verbunden. Diese "Einseitigkeit" gilt auch für das Neutrino: Ein mit einem Positron emittiertes Neutrino ist immer linkshändig.

14.4 Wechselwirkungen

Erteilt man einem Ball einen Stoß treten die Stoßpartner miteinander in Wechselwirkung. Die Stoßkraft, welche auf den Ball wirkt, wird durch bewegte Moleküle erzeugt. Zwischen diesen herrschen Molekularkräfte, die durch Vorgänge in den Elektronenhüllen erklärbar sind. Zwischen Hülle und Kern herrschen elektromagnetische Kräfte, deren Wirkungen durch Photonen übertragen werden.

Die bisher entdeckten Wechselwirkungen können im sogenannten *Standardmodell* zusammengefaßt werden. In diesem Modell gibt es 4 verschiedene Wechselwirkungen:

- Gravitationswechselwirkung
- Elektromagnetische Wechselwirkung
- Starke Wechselwirkung
- Schwache Wechselwirkung

Nur die ersten beiden Wechselwirkungen sind leicht demonstrierbar, die beiden anderen können nicht in einfachen Experimenten gezeigt werden. Die Gravitationskraft ist im Vergleich zu den anderen Kräften sehr schwach, vor allem im Vergleich mit der elektromagnetischen Kraft. Für zwei Elektronen verhalten sich die beiden wie $1 : 4 \cdot 10^{42}$. Bei atomaren Vorgängen kann die gravitative Wechselwirkung vernachlässigt werden. In der Entwicklung des Kosmos hingegen spielt die Gravitation eine ganz bedeutende Rolle.

Bei der Erforschung des Atomkerns erkannte man, daß die gleichnamig geladenen Protonen durch Kernkräfte zusammengehalten werden, die wesentlich stärker sind als die elektrostatische Abstoßung. Diese Kernkräfte werden auf die *starke Wechselwirkung* zurückgeführt.

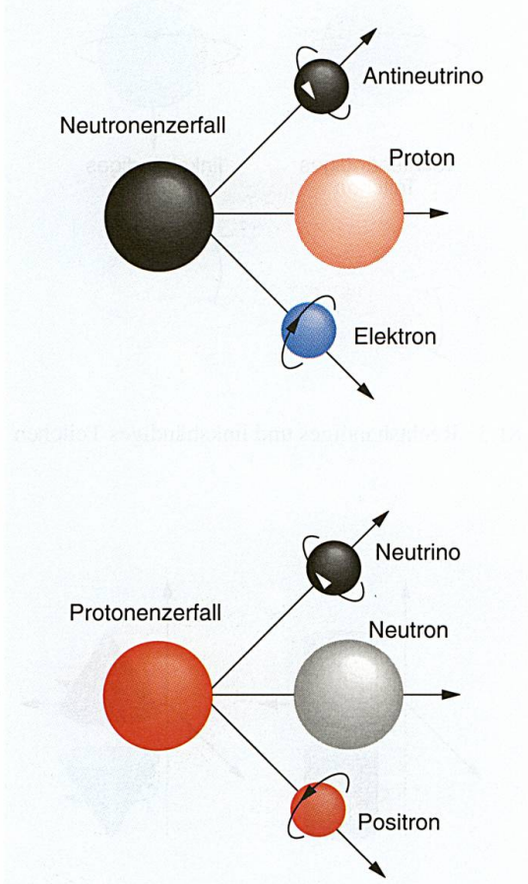
Die Neutrinos und Antineutrinos unterliegen der *schwachen Wechselwirkung,* welche eine sehr geringe Reichweite, etwa 1/100 des Protonendurchmessers, hat. Daher sind Reaktionen zwischen Neutrinos (Antineutrinos) und anderen Teilchen sehr selten. Trifft nun etwa ein Antineutrino auf ein Proton, entstehen ein Neutron und ein Positron.

$$\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$$

Dann kann das Positron beim Zusammentreffen mit einem Elektron zerstrahlen, zwei γ-Quanten entstehen. Das Neutron wird dann von einem Kern eingefangen, was zur Aussendung eines dritten γ-Quants führt. Die schwache Wechselwirkung zwischen Neutrinos und Nukleonen kann durch die Messung der γ-Quanten nachgewiesen werden.

Elektromagnetische und schwache Wechselwirkung konnten von *S. L. Glashow, Salam* und *Weinberg* zur *elektroschwachen Wechselwirkung* zusammengefaßt werden. Das heute anerkannte *Feldkonzept* entstand aus der Kombination von Quantenmechanik und Relativitätstheorie. Man bezeichnet diese übergeordnete Theorie als *Quantenfeldtheorie.*

Wird einem Teilchen ein Stoß versetzt, können sich die Kräfte auf ein benachbartes Teilchen nicht im selben Moment ändern, denn die Ausbreitung dieses Signals kann höchstens mit Lichtgeschwindigkeit erfolgen (im Einklang mit der Relativitätstheorie). Dies bedeutet jedoch eine prinzipielle Verzögerung der Kraftwirkung.



82.2 Der Neutronenzerfall liefert ein Antineutrino, der Protonenzerfall ein Neutrino. Das Neutrino ist linkshändig, das Antineutrino rechtshändig.

Energie- und Impulserhaltungssatz müssen zu jedem Zeitpunkt gültig bleiben. Diese Forderung läßt sich durch die Vorstellung erfüllen, daß das gestoßene Teilchen ein Feld hervorruft, welches Energie und Impuls durch den umgebenden Raum transportiert. Das wird auf das benachbarte Teilchen übertragen.

Nach der Quantenmechanik treten Energie und Impuls in Quanten auf, die man als elementare Teilchen identifizieren kann. Nach der Quantenfeldtheorie werden Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen als Austausch von Elementarteilchen erklärt.

Nach der Unschärferelation gilt: $\Delta p \cdot \Delta x \approx h$

Die Unsicherheiten in Kenntnis des Impulses und des Ortes eines Teilchens sind zueinander indirekt proportional. Damit ist auch die Reichweite einer Kraft indirekt proportional zur Masse des ausgetauschten Teilchens.

Elektromagnetisches Feld und Gravitationsfeld besitzen unendliche Reichweite, ihre Austauschteilchen *Photon* und *Graviton* besitzen daher die Masse Null.

In den fünfziger Jahren fand man eine große Zahl von Hadronen. Diese werden in ihrem Verhalten von der starken Wechselwirkung beeinflußt. Um eine Ordnung in den "Hadronenzoo" zu bringen, schlugen 1963 *Murray Gell-Mann* und *George Zweig* unabhängig voneinander die gleiche Deutung für diese Hadronenvielfalt vor. Danach sind Hadronen aus Teilchen, den *Quarks*,aufgebaut.

Die Bezeichnung "Quarks" entnahm Gell-Mann der Dichtung "Finnegan's Wake" des irischen Dichters *James Joyce*. Dort findet man die Zeile "Three quarks for Master Mark !". Die Quarks sind in diesem Stück die Kinder des Herrn Mark, welche selbst als Herr Mark auftreten.

Quarks

Quarks sind Quantenteilchen ähnlich dem Elektron und mit demselben Spin (1/2) wie das Elektron. Es gibt sechs Sorten, *Flavors* ("Geschmacksrichtungen") genannt. Quarks besitzen Ladungen, welche nicht-ganzzahlige Vielfache der Elementarladung sind.

Quarks besitzen eine weitere Eigenschaft, die als *Farbe* bezeichnet wird. Dies bedeutet natürlich nicht, daß die Quarks selbst eine Farbe im herkömmlichen Sinn besitzen; die Farbe kennzeichnet eine neue Eigenschaft. Jeder Flavor kommt in den Farben Rot,Grün und Blau vor. Die Austauschteilchen zwischen den Quarks sind die masselosen *Gluonen*. Diese haben selbst die Eigenschaft "Farbe" und unterliegen den gleichen Kräften, die sie vermitteln.

Dies ist beim Photon, dem Austauschteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung, nicht der Fall. Es ist masselos und trägt keine Ladung.

Zu jedem Quarktyp gibt es ein Antiquark mit entgegengesetzter Ladung und der Antifarbe, veranschaulicht durch die Komplementärfarbe.
Ein Baryon besteht aus drei Quarks, einem roten, einem grünen und einem blauen. Ein Baryon ist also "farblos" (Abb. 83.2). Nur farblose Quarkkombinationen sind als freie Teilchen beobachtbar. Die Kraft zwischen den Quarks wird auch als *Farbkraft* bezeichnet. Die Theorie, welche die Wechselwirkungen zwischen den Quarks beschreibt, heißt *Quantenchromodynamik*.

Die Begriffe "Kernkraft", "starke Kraft" oder "Farbkraft" werden sowohl für die Kraft zwischen den Nukleonen im Atomkern als auch für die Kraft zwischen den Quarks verwendet.

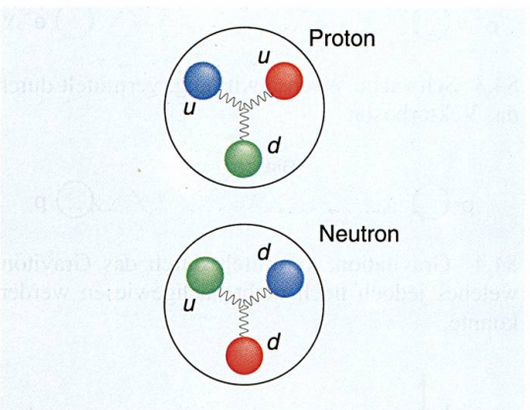
Weitere Möglichkeiten für "farblose" Quarkkombinationen sind:
3 Antiquarks, Quark-Antiquarkpaar. So bestehen die Antibaryonen (z.B. Antiproton und Antineutron) aus 3 Antiquarks.

Bei der Quark-Antiquarkkombination wird nach der Quarkhypothese die Forderung gestellt, daß alle drei Farben mit gleicher Wahrscheinlichkeit vertreten sind. Repräsentanten dafür sind die Mesonen; sie bestehen aus jeweils zwei Quarks, die zusammen farblos sind.

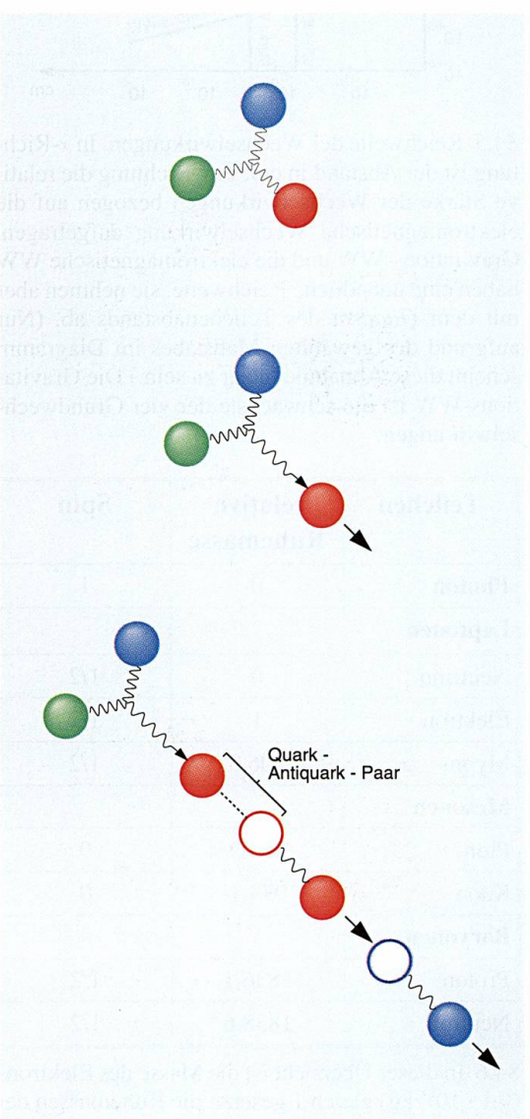
Es ist bis heute nicht gelungen, ein Quark allein aus einem Hadron zu isolieren. Dies läßt sich, wie folgt, erklären (Abb.83.3):

Flavor	Ladung
down	-1/3
up	2/3
strange	-1/3
charm	2/3
bottom	-1/3
top	2/3

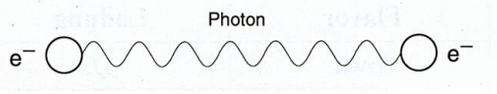
83.1 Es gibt 6 Sorten von Quarks.



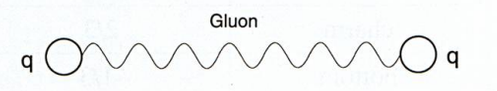
83.2 Baryonen. Oben Proton, unten Neutron. Das Proton besteht aus zwei *up*-Quarks und einem *down*-Quark, die Ladung ist daher +1. Das Neutron besteht aus der Kombination *u-d-d* mit der Gesamtladung 0.



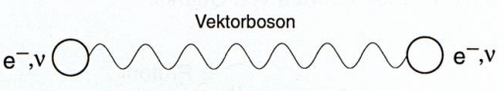
83.3 Quarks lassen sich nicht isolieren.



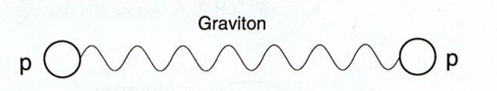
84.1 Elektromagnetische Wechselwirkung, vermittelt durch das Photon



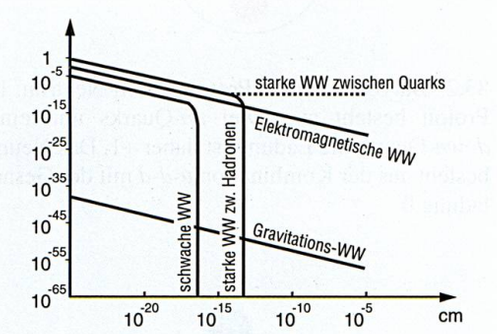
84.2 Starke Wechselwirkung, vermittelt durch das Gluon



84.3 Schwache Wechselwirkung, vermittelt durch das Vektorboson



84.4 Gravitation, vermittelt durch das Graviton, welches jedoch noch nicht nachgewiesen werden konnte.



84.5 Reichweite der Wechselwirkungen. In x-Richtung ist der Abstand in cm, in y-Richtung die relative Stärke der Wechselwirkungen bezogen auf die elektromagnetische Wechselwirkung aufgetragen. Gravitations-WW und die elektromagnetische WW haben eine unendliche Reichweite, sie nehmen aber mit dem *Quadrat* des Teilchenabstands ab. (Nur aufgrund des gewählten Maßstabes im Diagramm scheint diese Abnahme linear zu sein.) Die Gravitations-WW ist die schwächste der vier Grundwechselwirkungen.

Teilchen	relative Ruhemasse	Spin
Photon	0	1
Leptonen		
Neutrino	0	1/2
Elektron	1	1/2
Myon	206,8	1/2
Mesonen		
Pion	263,9	0
Kaon	974,1	0
Baryonen		
Proton	1836,1	1/2
Neutron	1838,6	1/2

84.6 In dieser Übersicht ist die Masse des Elektrons ($9{,}1 \cdot 10^{-31}$kg) gleich 1 gesetzt; die Ruhemassen der anderen Teilchen sind relativ zur Elektronenmasse angegeben.

Die Quarks sind durch die starke Kraft aneinander gebunden. Die Stärke der Kraft zwischen Quarks untereinander und zwischen Gluonen untereinander bleibt auch bei "größeren" Teilchenabständen gleich. Versucht man ein Quark aus einem Hadron zu lösen, scheitert dies an der hohen potentiellen Energie, welche in der Bindung steckt. Diese wird unweigerlich in Quark-Antiquark-Paare umgesetzt, sobald die Energie die Ruheenergie der beiden Quarkmassen überschreitet. Das neugebildete Quark vervollständigt das Hadron, das abgetrennte Quark bildet zusammen mit dem neugebildeten Antiquark ein Meson. In diesem können beide ihre Farben spontan wechseln, sodaß im zeitlichen Mittel alle drei Farben gleichberechtigt vertreten sind.

	Gravitation	Elektro-magnetismus	starke Kraft	schwache Kraft
Reichweite	∞	∞	10^{-13}-10^{-14}cm	$<<10^{-14}$cm
betroffene Teilchen	alle	geladene Teilchen	Hadronen Quarks	Leptonen Quarks
Austausch-teilchen	Graviton	Photon	Gluonen	Vektor-bosonen

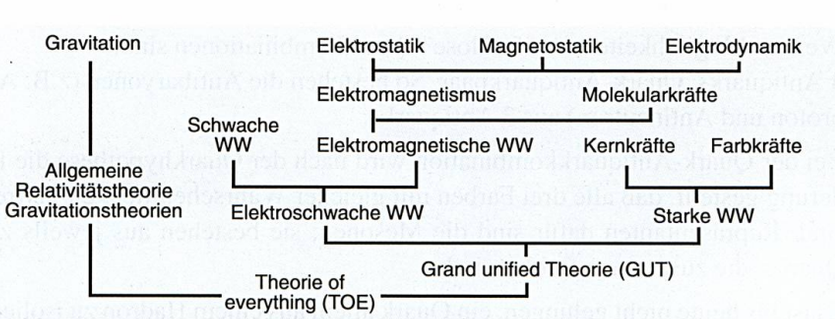
84.7 Die 4 Wechselwirkungen mit ihren Austauschteilchen

Die Vielfalt in der Welt der Elementarteilchen und die verschiedenen Wechselwirkungen sollten in einer vereinheitlichten Theorie verschwinden. Man sucht nach der großen Vereinheitlichung kurz *GUT* (Grand Unified Theory) genannt. Ausgangspunkt ist die elektroschwache Theorie und die Quantenchromodynamik (für die Farbkraft). Dabei werden zu den 12 Austauschteilchen dem Photon, den Vektorbosonen W^+, W^-, Z^0 und den acht Gluonen noch 12 weitere Bosonen, die X-Teilchen, gefordert.

Für die X-Teilchen wurde eine Masse von 10^{14} GeV berechnet. Man versucht diese über den Zerfall des Protons, einem der wichtigsten Bausteine der Materie, zeigen zu können. Die Halbwertszeit für den Protonenzerfall wird auf etwa 10^{30} Jahre geschätzt. Das Alter des Universums liegt bei etwa $20 \cdot 10^9$ Jahren. Beobachtet man in einem Experiment 10^{33} Protonen (dies entspricht 5000 t Wasser), sind bestenfalls 1000 Zerfälle pro Jahr zu registrieren. Die Problematik besteht nun darin, daß die Detektoren auch auf hochenergetische Teilchen in der kosmischen Strahlung ansprechen, deren Abschirmung sehr schwierig ist; die Versuchsanlagen befinden sich daher tief unter der Erde.

Ein Beispiel für ein solches Projekt:
Ort: Mont-Blanc-Tunnel
Abschirmende Schicht umgerechnet in Metern Wasserhöhe: 4300 m
Materialprobe: 200 t Eisen

Bei GUT wird die gravitative Wechselwirkung noch immer separat behandelt. Die Forschungen auf diesem Gebiet sind noch lange nicht abgeschlossen. Man sucht nach einer übergeordneten Theorie, die alle Wechselwirkungen umfaßt, der sogenannten TOE (*Theory of Everything*).



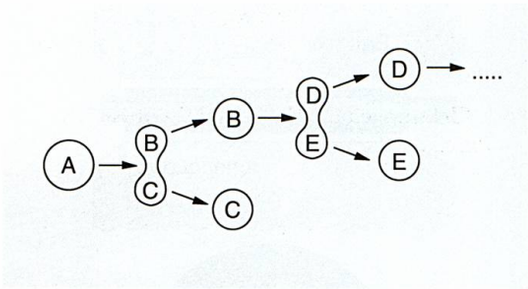
84.8 Übersicht über die Wechselwirkungen und ihre (möglichen) Vereinigungen

14.5 Grundlegende Hypothesen

Folgende Hypothesen können der Erforschung der Elementarteilchen zugrunde gelegt werden:

(1) *Welten innerhalb von Welten* (Abb. 85.1)

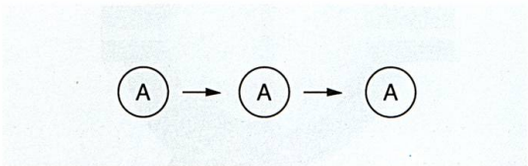
Jedes neu gefundene Teilchen besteht wiederum aus weiteren Teilchen, d.h. jedes Teilchen ist wieder teilbar. Jedes Materieniveau besteht wieder aus weiteren Niveaus usw. Dies bedeutet, daß es keine Elementarteilchen gibt, aus welchen die Materie aufgebaut ist. Jede Teilchenwelt besteht aus weiteren Welten.



85.1 Welten innerhalb von Welten

(2) *Urgrund* (Abb. 85.2)

Es existieren Teilchen, die unteilbar sind; also tatsächliche Elementarteilchen. In der Entwicklung der Atomphysik glaubte man, mit Proton, Neutron und Elektron solche Teilchen gefunden zu haben. Dies hat sich jedoch als Irrtum erwiesen. Wenn es solche Urteilchen, den Urgrund gibt, können alle anderen Teilchen aus diesen zusammengesetzt werden.

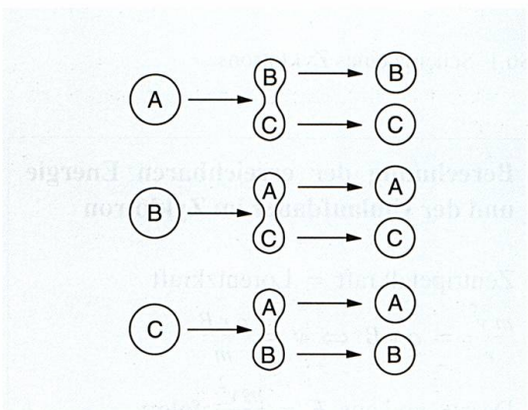


85.2 Urgrund: Es existieren Teilchen, die unteilbar sind.

(3) *Bootstrap-Hypothese* (Abb. 85.3)

Nach dieser Hypothese lassen sich die Teilchen weiter teilen, es entstehen jedoch wieder die Ausgangsteilchen. Dabei haben alle Hadronen die gleiche Bedeutung. Jedes Hadron soll aus anderen Hadronen aufgebaut werden, sodaß es unmöglich ist festzustellen, welches elementar und welches zusammengesetzt ist. *Gell-Man* nannte dies eine "nukleare" Demokratie.

Diese angeführten Hypothesen sollen zeigen, daß die Erstellung neuer Modelle philosphischer Grundlagen bedarf.



85.3 Bootstrap-Hypothese

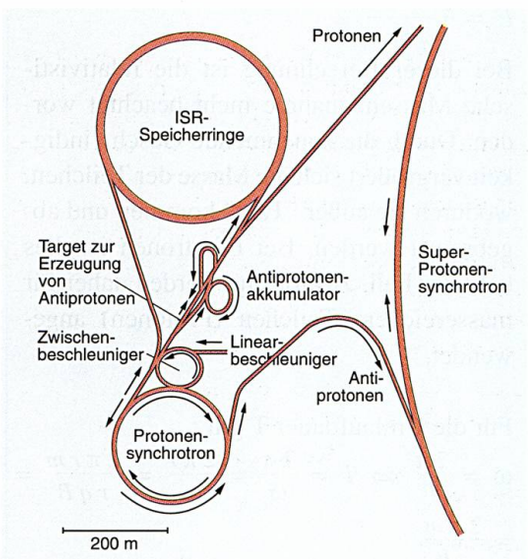
14.6 Teilchenbeschleuniger

Ein wesentlicher Bestandteil, den Aufbaus der Materie zu erforschen, sind die sogenannten *Teilchenbeschleuniger*. Teilchen, zum Beispiel Protonen, werden stark beschleunigt (in den Bereich der Lichtgeschwindigkeit) und prallen dann auf nukleare Ziele, *Targets* genannt. Aus den Folgen dieser Zusammenstöße können Schlüsse über den Materieaufbau gezogen werden.

Ein Hochenergiebeschleuniger ist eigentlich nichts anderes als ein Materiemikroskop, mit dem man die Quanten der Elementarteilchen sehen kann. Bei einem Lichtmikroskop besteht der Lichtstrahl aus Photonen, die an dem Gegenstand gestreut werden, der untersucht werden soll. Mit Hilfe von Linsen wird das Bild aufgelöst und verstärkt. Das Lichtmikroskop versagt jedoch, wenn der zu untersuchende Gegenstand kleiner ist als die Lichtwellenlänge; der nächste Schritt ist das Elektronenmikroskop. Damit läßt sich der Aufbau der Moleküle zeigen. Zur Erforschung des Atomkerns müssen Teilchenstrahlen noch höhere Geschwindigkeiten und damit kürzere Wellenlängen erreichen ($\lambda = h / p$).

John Cockcroft gelang es 1932, einen Protonenstrahl in einem elektrostatischen Feld so stark zu beschleunigen, daß die Protonen die um den Kern wie eine Barriere wirkenden elektrischen Felder durchdringen konnten.

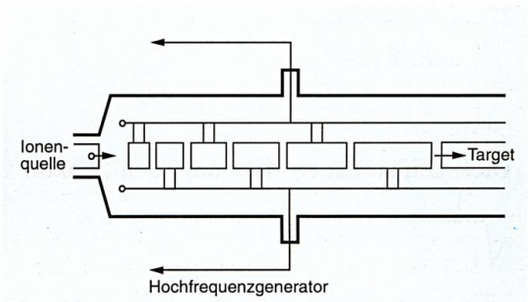
Es folgte eine Entwicklung von verschiedenen Typen von Beschleunigungsanlagen.



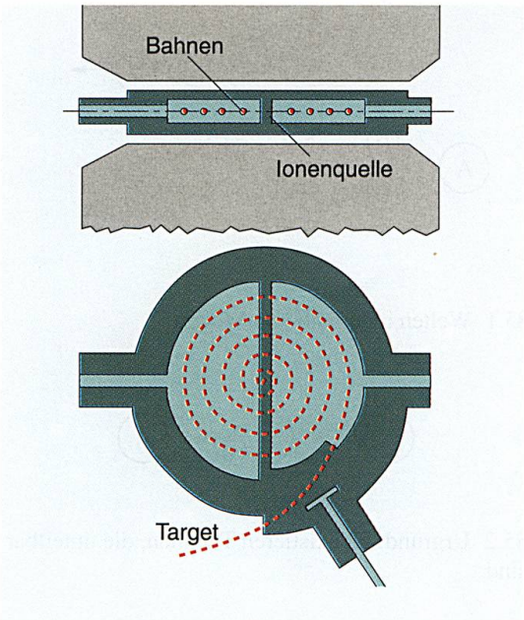
85.4 CERN (Centre Européen de Recherches Nucléaires), das Europäische Zentrum für Teilchenphysik in der Nähe von Genf. Es werden Protonenenergien bis zu 450 GeV erreicht.

Linearbeschleuniger

Bei einem Linearbeschleuniger (Abb. 85.5) werden die aus einer Ionenquelle stammenden Teilchen durch eine hohe Gleichspannung vorbeschleunigt. Dann gelangen sie in ein evakuiertes Rohr mit einer Reihe zylindrischer Elektroden mit zunehmender Länge. Die Elektroden liegen an einer hochfrequenten Wechselspannung. Wenn sich die geladenen Teilchen zwischen zwei Zylindern befinden, ist die Spannung zwischen ihnen maximal; dadurch erfolgt eine starke Beschleunigung der geladenen Teilchen ($W = U \cdot Q$). In der nächsten Halbperiode durchlaufen sie den (feldfreien) Zylinder, wie in einem Faradayschen Käfig; dadurch wird eine Verzögerung verhindert.



85.5 Schema eines Linearbeschleunigers



86.1 Schema eines Zyklotrons

Berechnung der erreichbaren Energie und der Umlaufdauer im Zyklotron

Zentripetalkraft = Lorentzkraft

$$\frac{m v^2}{r} = q v B \Leftrightarrow v = \frac{q r B}{m}$$

Daraus und aus $E = \frac{m v^2}{2}$ folgt:

$$E = \frac{q^2 r^2 B^2}{2 m}$$

Bei dieser Berechnung ist die relativistische Massenzunahme nicht beachtet worden. Durch die zunehmende Geschwindigkeit vergrößert sich die Masse der Teilchen, wodurch sie außer "Takt" kommen und abgebremst werden. Bei Elektronen ist dies bald der Fall. Zyklotrone werden daher für massereichere Teilchen (Protonen) angewendet.

Für die Umlaufdauer T gilt :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \Leftrightarrow T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi r m}{r q B} = \frac{2\pi m}{q B}$$

Im Sinne der relativistischen Betrachtungsweise wird $m = \frac{m_o}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ gesetzt:

$$T = \frac{2 m_o \pi}{q B \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Die Umlaufdauer ist um den Faktor $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ größer als im nicht-relativistischen Fall.

Im Übergang zum nächsten Zylinder weist die Spannung wieder die "richtige" Polung auf, es erfolgt wieder eine Beschleunigung usw.

Da die Geschwindigkeit und damit die Energie der Teilchen zunimmt, muß die Zylinderlänge bei gleicher Frequenz der Wechselspannung größer werden. Über einen Ablenkmagneten kann der Ionenstrahl dann auf ein Target gerichtet werden.

Der Linearbeschleuniger in Stanford (USA) weist eine Länge von 3 km auf; damit können Energien bis zu 40 GeV erreicht werden.

Zirkularbeschleuniger

Zirkularbeschleuniger sind Anlagen, in welchen geladene Teilchen unter der Wirkung eines Magnetfeldes auf Kreisbahnen gezwungen und bei jedem Umlauf beschleunigt werden.

Zyklotron (Abb. 86.1)

Zwischen zwei hohlen, halbkreisförmigen Metallelektroden liegt eine Wechselspannung, die eine Beschleunigung der Teilchen bewirkt. Ein senkrecht dazu wirkendes Magnetfeld zwingt die Teilchen auf eine Kreisbahn. Auf diese Weise wird erreicht, daß das Teilchen die Beschleunigungsstrecke zwischen den beiden Elektroden wiederholt durchquert. Dabei wird jedesmal die Geschwindigkeit (Energie) des Teilchens erhöht. Dadurch wächst aber der Bahnradius an. Die Teilchen durchlaufen eine Art Spiralbahn. Damit ein Teilchen nach dem Durchlaufen einer halbkreisförmigen Elektrode im Bereich zwischen den Elektroden wieder beschleunigt wird, muß die Spannung umgepolt werden.

Synchrozyklotron

Bei diesem Beschleunigertyp wird die relativistische Massenänderung berücksichtigt. Die Frequenz der anliegenden Spannung muß mit zunehmender Geschwindigkeit des Teilchens und der daraus resultierenden Massenzunahme sinken. Es wird die Umlaufszeit mit der anliegenden hochfrequenten Wechselspannung synchronisiert.

Synchrotron

Außer der Schwingungsdauer der Hochfrequenzspannung kann bei einem Zirkularbeschleuniger auch das anliegende magnetische Feld verändert werden. Mit jedem Umlauf wird das Magnetfeld erhöht. Dadurch kann erreicht werden, daß der Bahnradius der Teilchen konstant bleibt.

Die Teilchen laufen mehrere hunderttausendmal durch eine evakuierte ringförmige Röhre, wobei es bei jedem Umlauf zu einer Beschleunigung kommt. Das magnetische Feld wird bei einem Synchrotron durch ringförmig angebrachte Polschuhe entlang der Röhre erzeugt. Dies läßt damit größere Bahndurchmesser zu als bei einem Zyklotron.

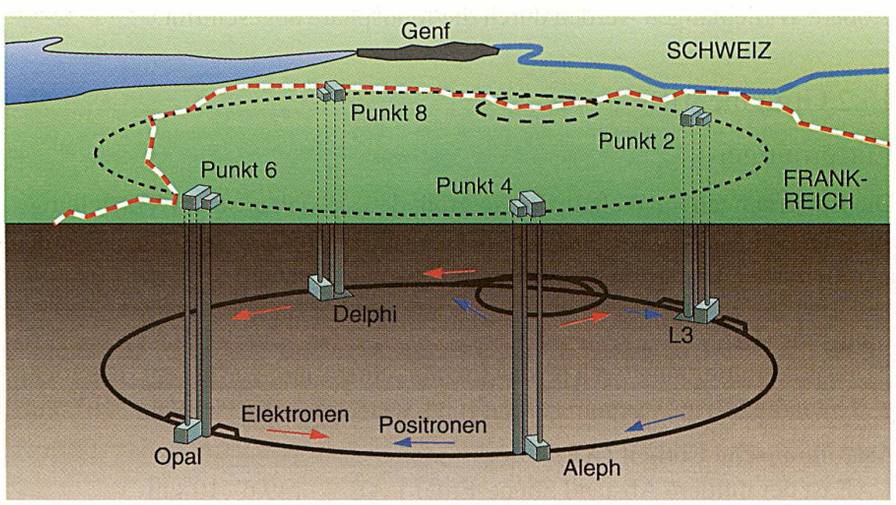
Mit Hilfe dieses Detektors gelang der Nachweis des Z^o -Teilchens. Der Detektor besteht aus 10m hohen Bleiglas- und Eisenwänden. Auf dem Foto ist eine Hälfte sichtbar. Beide Teile umschließen einen riesigen Spulenmagneten und eine gasgefüllte Kammer, welche die Bahnen der geladenen Teilchen sichtbar macht. Damit können Richtung und Impuls der Teilchen gemessen werden.

Prallen in einem Teilchenbeschleuniger schwere Atomkerne mit nahezu Lichtgeschwindigkeit aufeinander, entstehen neuartige Zustandsformen der Materie. Man hofft durch Erforschung dieser Materieformen, die Entstehung des Universums besser verstehen zu können.

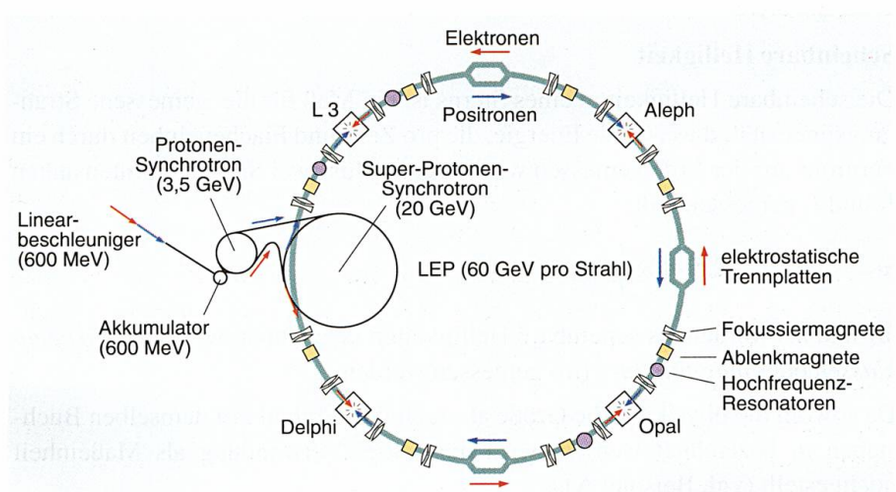
Die Urknalltheorie soll durch solche Experimente in Teilchenbeschleunigern gestützt werden. Hier schließt sich der Bogen zwischen der Erforschung des Kleinsten, den Elementarteilchen, und des Größten, dem Universum.

Kontrollfragen

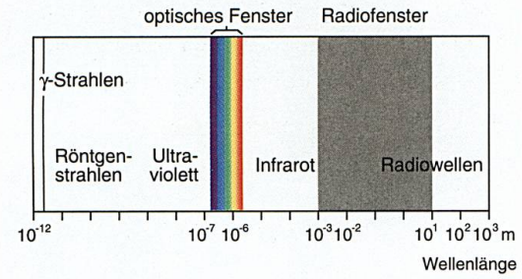
1. In welche Familien lassen sich die Elementarteilchen einteilen?
2. Welche Eigenschaften besitzt das Photon?
3. Was ist ein Myon?
4. Wie wurden die Positronen entdeckt?
5. Erkläre den Begriff Parität.
6. Was ist unter Paritätsverletzung zu verstehen?
7. Welche Wechselwirkungen gibt es im Standardmodell?
8. Welche Eigenschaften besitzt die schwache Wechselwirkung? Wo tritt sie auf?
9. Was versteht man unter Quarks?
10. Wie können die Quarks eingeteilt werden?
11. Welchen Aufbau weisen Proton und Neutron auf?
12. Welche Austauschteilchen gibt es für die 4 Wechselwirkungen?
13. Welche Hypothesen können der Erforschung der Elementarteilchen zugrunde gelegt werden?
14. Wofür werden Teilchenbeschleuniger verwendet?
15. Welche Beschleunigertypen gibt es?
16. Wie funktioniert ein Linearbeschleuniger?
17. Beschreibe die Funktionsweise eines Zyklotrons.
18. Welcher Unterschied besteht zwischen Synchrotron und Synchrozyklotron?



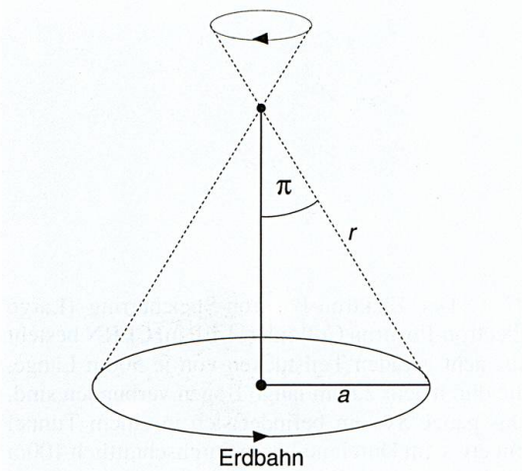
87.1 Der Elektron-Positron-Speicherring (Large Electron-Positron Colloider) LEP im CERN besteht aus acht geraden Teilstücken von je 500m Länge, die durch acht 2,8km lange Bögen verbunden sind. Das ganze System befindet sich in einem Tunnel mit etwa 4m Durchmesser in durchschnittlich 100m Tiefe. In ihm prallen in vier Stoßpunkten (Aleph, Delphi, L3 und Opal) gegenläufig kreisende Elektronen- und Positronenbündel bei Energien von fast 100 GeV zusammen.



87.2 Ein System kleinerer Beschleuniger erzeugt Elektronen- und Positronenstrahlen mit einer Energie von 20 GeV, die dann in den LEP-Speicherring eingeschossen werden. Dort erfolgt die weitere Beschleunigung. An Kreuzungspunkten verhindern elektrostatische Trennplatten eine Kollision der e^-- und e^+-Teilchen.
Das Super-Protonen-Synchrotron kann zur Beschleunigung sowohl von Protonen als auch von Elektronen verwendet werden.



88.1 Durchlaßbereiche der Erdatmosphäre



88.2 Die Parallaxe π eines Sterns ist derjenige Winkel, unter dem die Erdbahnhalbachse *a* vom Stern aus gesehen erscheint.

Beispiel A

Die Intensitäten zweier Sterne verhalten sich wie 1:10. Wie groß ist der Unterschied in den scheinbaren Helligkeiten ?

$$m_1 - m_2 = -2{,}5 \cdot \log \frac{1}{10}$$

$$m_1 - m_2 = 2{,}5 \text{ Größenklassen} = 2{,}5^{\text{m}}$$

15. Astronomie

15.1 Einleitung

Die *Astronomie* ist ein Teilgebiet der Physik, welches sich speziell mit Raum, Materie und Vorgängen außerhalb der Erde beschäftigt. Sie kann wieder in Teilgebiete wie *sphärische Astronomie, Astrophysik* mit *Röntgenastronomie* und *Kosmologie* gegliedert werden. Die sphärische Astronomie ist für die Vermessung der Gestirne zuständig, die Astrophysik erforscht den Aufbau der Himmelskörper. In der Kosmologie geht es um die von der Beobachtung her gelieferten Grundlagen und die sich daraus ergebenden Möglichkeiten für Aufbau und Entwicklung des Universums.

Im Unterschied zu anderen Naturwissenschaften können in der Astronomie die zu untersuchenden Objekte nicht gezielten Experimenten unterworfen werden. Es müssen jene Objekte und Vorgänge untersucht werden, die dem Beobachter dargeboten werden. Die wichtigste Informationsquelle ist die von den Objekten ausgesandte oder von ihnen beeinflußte elektromagnetische Strahlung. Diese wird untersucht hinsichtlich Richtung, Intensität, spektraler Zusammensetzung und Polarisation.

Vor der Entwicklung der Raumfahrt war man allein auf die Beobachtungsergebnisse angewiesen, die von der Erde aus gewonnen wurden. Dabei tritt jedoch ein schwerwiegender Nachteil auf. Die Erdatmosphäre wirkt wie ein Filter, welches einen Großteil der Strahlung absorbiert. Es gibt zwei Wellenlängenbereiche, *Fenster* genannt, welche die Atmosphäre durchdringen (Abb. 88.1). Dies sind das *optische Fenster* für einen Bereich von 300 nm bis 2000 nm und das *Radiofenster* für einen Bereich von 1 mm bis 20 m. Noch größere Wellenlängen werden durch die Ionosphäre abgeschirmt.

15.2 Grundbegriffe

Entfernungen

Die Entfernungen im Weltall sind so groß, daß sie sich unserem Vorstellungsvermögen entziehen. Um mit handlichen Zahlen arbeiten zu können, werden astronomische Distanzen in eigenen Einheiten angegeben:

Lichtjahr (Lj)
1 Lj ist die Entfernung, welche das Licht in einem Jahr zurücklegt. Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum beträgt rund $3 \cdot 10^5$ km/s. 1 Lj = $9{,}46 \cdot 10^{12}$ km

Astronomische Einheit (AE)
1 AE ist der mittlere Abstand Sonne-Erde: 1 AE = $149{,}6 \cdot 10^6$ km

Parsec (pc)
1 pc ist die Entfernung, von welcher aus die große Halbachse der elliptischen Erdbahn um die Sonne unter dem Winkel von 1 Bogensekunde erscheint. Dies entspricht einer Distanz von 3,26 Lj.

Helligkeiten

Scheinbare Helligkeit

Die scheinbare Helligkeit m eines Sterns ist ein Maß für die gemessene Strahlungsintensität; dies ist jene Energie, die pro Zeit- und Flächeneinheit durch ein Fernrohr auf der Erde gemessen wird. Werden für zwei Sterne die Intensitäten I_1 und I_2 gemessen, gilt:

$$m_1 - m_2 = -2{,}5 \cdot \log \frac{I_1}{I_2}$$

m_1 und m_2 werden als scheinbare Helligkeiten bezeichnet, welche in *Größenklassen* oder *magnitudines* (m) gemessen werden.

Da sowohl die physikalische Größe als auch ihre Einheit mit demselben Buchstaben m bezeichnet werden, wird dieser bei Verwendung als Maßeinheit hochgestellt (vgl. Beispiel A).

Vom Stern mit der größten scheinbaren Helligkeit, der Sonne, zu den schwächsten mit modernen Meßeinrichtungen erfaßbaren Sternen besteht eine Differenz von 50^m.

Um für jeden Stern eine scheinbare Helligkeit angeben zu können, muß ein Bezugspunkt festgelegt werden. Dies ist der Polarstern; ihm wird (willkürlich) die scheinbare Helligkeit 2, 12^m zugeordnet. Die Sonne weist dabei die Helligkeit $-26{,}8^m$ auf.

Bereits in der Antike wurden die Sterne in eine sechsteilige Größenklassenskala eingeteilt. Die hellsten Sterne hatten 1. Größe und die schwächsten noch sichtbaren Sterne 6. Größe.

Absolute Helligkeit

Die wahre Helligkeit eines Sterns nimmt mit dem Quadrat der Entfernung zum Beobachter ab. Um die wahren Helligkeiten miteinander vergleichen zu können, hat man die *absolute Helligkeit* definiert. Die absolute Helligkeit eines Sterns hängt von seiner Energieabgabe und von seiner Entfernung ab.

Absolute Helligkeit M
Die *absolute Helligkeit M* eines Sterns ist seine scheinbare Helligkeit, wenn er sich in einer gedachten Entfernung von 10 pc befindet.

Die Differenz $m - M$ heißt *Entfernungsmodul* und ist ein direktes Maß für die Entfernung (vgl. Beispiel B). Es wird jedoch von der interstellaren Absorption abgesehen.

$$m - M = -2{,}5 \cdot \log \frac{I(r)}{I(10)} = -2{,}5 \cdot \log \frac{10^2}{r^2} \quad (r \text{ ist in pc einzusetzen.})$$

Entfernungsmodul
$m - M = -5 + 5 \cdot \log r$

Leuchtkraft

Eine wesentliche Größe ist die gesamte Energieabgabe eines Sterns in Form von elektromagnetischer Strahlung. Die *Leuchtkraft L* ist die gesamte Strahlungsenergie, die pro Zeiteinheit von der gesamten Sternoberfläche in allen Frequenzen abgegeben wird. Die Leuchtkraft der Sonne beträgt $3{,}86 \cdot 10^{23}$ kW.

Die Leuchtkraftbestimmung gelingt nur für wenige Sterne sehr genau, da bei weit entfernten Sternen Absorptionen auftreten, deren Bestimmung mit Ungenauigkeiten behaftet ist.

Nach der Leuchtkraft lassen sich die Sterne in 6 Klassen einteilen:
I: Überriesen
II: helle Riesensterne
III: normale Riesensterne
IV: Unterriesen
V: Zwerge
VI: Unterzwerge

15.3 Spektren

Die mit einem Fernrohr aufgenommene Strahlung wird verschiedenen Strahlungsanalysegeräten zugeführt, zum Beispiel *Spektrographen*. In einem Spektrographen wird das Licht mit Hilfe eines Prismas (Abb. 89.1) oder eines Gitters in sein Spektrum zerlegt.

Temperatur

Jeder Körper sendet einer seiner Temperatur entsprechende elektromagnetische Strahlung aus, deren Verteilung über die einzelnen Wellenlängen nach dem Planckschen Strahlungsgesetz gegeben ist. Dieses beschreibt die Verteilung der Strahlungsintensität auf die einzelnen Wellenlängen für eine bestimmte Temperatur. Ein heißerer Stern hat das Intensitätsmaximum bei einer kürzeren Wellenlänge als ein kälterer (Abb. 89.2, 90.1).

Beispiel B

Der Entfernungsmodul eines Sterns beträgt -1. Berechne die Entfernung des Sterns in Parsec und in Lichtjahren.

$m - M = -5 + 5 \cdot \log r \Leftrightarrow$

$\Leftrightarrow r = 10^{\frac{m - M + 5}{5}}$

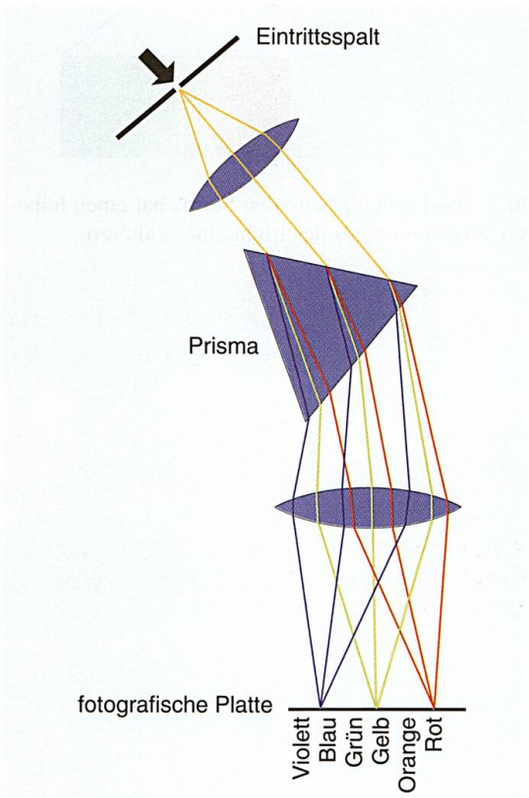
$r = 10^{0{,}8}$ pc $= 6{,}3$ pc $= 20{,}6$ Lj

Die Sonne ist bei dieser Festlegung , also in einer Entfernung von 10 pc, ein schwach leuchtender Stern.

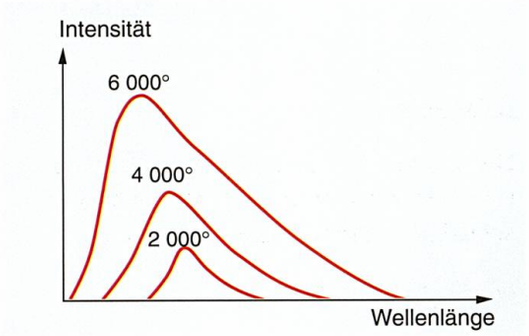
Aufgaben

76. Zwei Sterne unterscheiden sich in ihren scheinbaren Helligkeiten um 5^m. Wie verhalten sich die gemessenen Intensitäten dieser Himmelskörper?

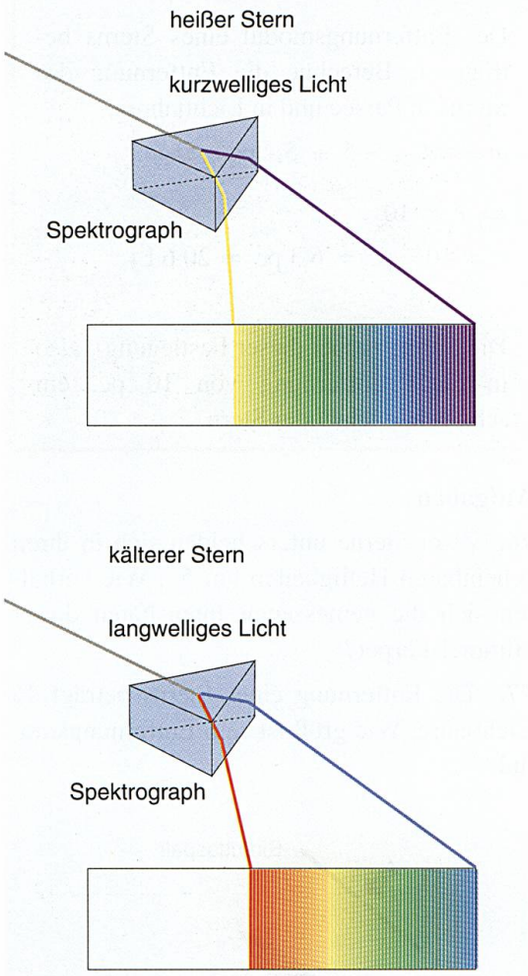
77. Die Entfernung eines Sterns beträgt 45 Lichtjahre. Wie groß ist sein Entfernungsmodul?



89.1 Aufbau eines Prismenspektrographen



89.2 Strahlungsmaximum bei einer bestimmten Temperatur



90.1 Das Licht eines heißen Sterns hat einen höheren Violettanteil als das Licht eines kälteren.

Spektralanalyse

Die Spektralanalyse beruht auf der grundlegenden Tatsache, daß jedes Element unter geeigneten Bedingungen ein ganz bestimmtes und für dieses Element charakteristisches Spektrum aussendet. Man kann aus dem Spektrum einer Lichtquelle auf die chemischen Elemente der in ihr vorhandenen Stoffe schließen. Das Spektrum eines glühenden festen oder flüssigen Körpers ist stets ein kontinuierliches Spektrum, glühende Gase und Dämpfe liefern ein diskontinuierliches Spektrum.

Spektralklassen

Die Sternspektren zeigen eine große Vielfalt. Sie bestehen aus einem Kontinuum, welches von Absorptionslinien überlagert ist; in speziellen Fällen sind auch Emissionslinien vorhanden.

E.C. Pickering und *A.Cannon* haben die Spektren nach typischen, immer wieder auftretenden Merkmalen in die *Spektralklassen* O, B, A, F, G, K, M eingeteilt. Man bezeichnet diese Folge auch als Harvardsequenz; sie läßt sich leicht durch folgenden Spruch merken: "*O*, *B*e *A* *F*ine *G*irl, *K*iss *M*e!"

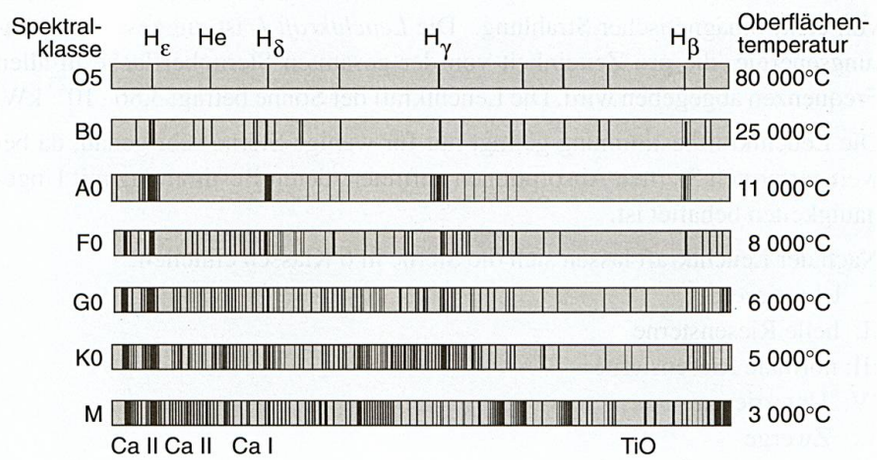
Zur Verfeinerung wird jede Klasse noch unterteilt:

B 0 ,B 1, ... B 9, A 0, A 1, ... A 9; die O-Sterne beginnen mit O 5.

Die Zahl der Absorptionslinien ändert sich vom O- bis zum M-Typ von einigen Linien bis zu einer Fülle von nebeneinander liegenden Linien, die das Kontinuum fast gänzlich überdecken.

In Abbildung 90.2 wird die Ionisationsstufe des absorbierenden Atoms durch eine römische Zahl gekennzeichnet. I steht für neutrale, II für einfach ionisierte, III für zweifach ionisierte Atome usw.

Als erstes Einordnungskriterium nimmt man die Balmerserie des Wasserstoffs, bei gleich starken Wasserstofflinien werden weitere Linien, z.B. die des Kalziums herangezogen. Ab dem Spektraltyp K nehmen die Wasserstofflinien ab und die Linien neutraler Metalle zu. Bei M existieren fast nur Linien neutraler Metalle, besonders auffallend sind die Titanoxid(TiO)-Linien.



90.2 Spektralklassen

Neben dieser Hauptserie gibt es noch zwei Sterntypen mit besonderen Spektren, welche als R- und N-Typen bezeichnet werden. Diese sind die sogenannten Kohlenstoffsterne.

Beim Übergang vom O- zum M-Typ verschiebt sich die Intensität der Strahlung und damit die Stärke der Spektrallinien zu immer größeren Wellenlängen; die Sternfarbe geht damit von Blau über Gelb zu Rot.

Die Sonne ist nach der Havardsequenz ein Stern, der zum Spektraltyp G2 gehört. Die Klassifikation neu entdeckter Sterne erfolgt durch Vergleich mit Standardspektren.

Um von einem Spektrum eines Sterns auf die Struktur und chemische Zusammensetzung der Atmosphäre schließen zu können, berechnet man eine Serie von Modellatmosphären, die solange verändert werden, bis ein Modellspektrum das vorhandene Sternspektrum reproduzieren kann.

Radiofrequenzstrahlung

Viele kosmische Objekte senden elektromagnetische Strahlung im Bereich der Radiofrequenzen aus, die die Erdatmosphäre durchdringen können (Radiofenster). Dabei wurden bis dahin unbekannte kosmische Gebilde entdeckt. Es entwickelte sich ein Spezialgebiet der Astronomie, die Radioastronomie, welche einen großen Fortschritt in der Erforschung des Universums brachte.

Der Empfang der Radiowellen wird durch deren geringe Intensität erschwert. Außerdem erhält man keine Bilder wie im Bereich der optischen Astronomie. Man kann jedoch die Energiequellen lokalisieren und deren Energieausstoß messen.

91.2 Radioteleskop

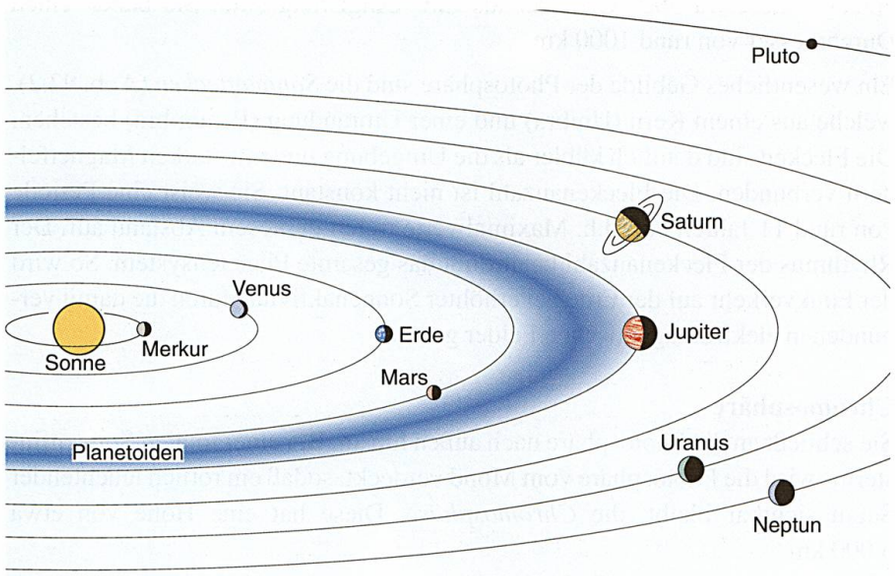
15.4 Aufbau des Sonnensystems

Für die Vermessung der Gestirnpositionen war es zweckmäßig, zwischen den für das bloße Auge beweglichen *Planeten* und den für das Auge unveränderlichen *Fixsternen* zu unterscheiden. Damit ist es möglich, die Bahnen der "Wandelsterne" anzugeben.

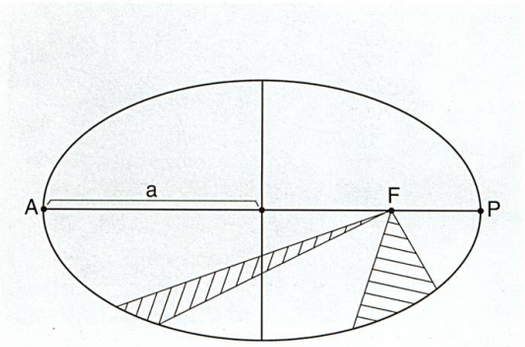
Ein Sonnensystem ist eine große Anzahl von Himmelskörpern (Planeten, Monde, Kometen usw.), die aufgrund der Gravitation an einen Zentralstern, Sonne genannt, gebunden ist.

Jeder der neun Planeten unseres Sonnensystems führt zwei Bewegungen gleichzeitig aus: Er rotiert um seine Achse und bewegt sich auf einer Umlaufbahn um die Sonne.

Die *inneren Planeten* unseres Sonnensystems heißen Merkur und Venus, die *äußeren* Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun und Pluto.



91.1 Das Sonnensystem



91.3 Veranschaulichung der ersten beiden Kepler-Gesetze. *Aphel* (A) ist der größte Abstand vom Zentralstern, *Perihel* (P) ist der kleinste Abstand vom Zentralstern.

Charakteristische Daten der Planeten

Planet	mittlerer Sonnenabstand (in Mill. km)	Umlaufzeit (in Jahren)	Masse bezogen auf die Erde
Merkur	57,9	0,24	0,056
Venus	108,2	0,62	0,815
Erde	149,6	1,00	1,000
Mars	227,9	1,88	0,107
Jupiter	778,3	11,86	317,826
Saturn	1429,4	29,46	95,147
Uranus	2884	84,02	14,56
Neptun	4504,3	164,79	17,23
Pluto	5966	247,70	0,002

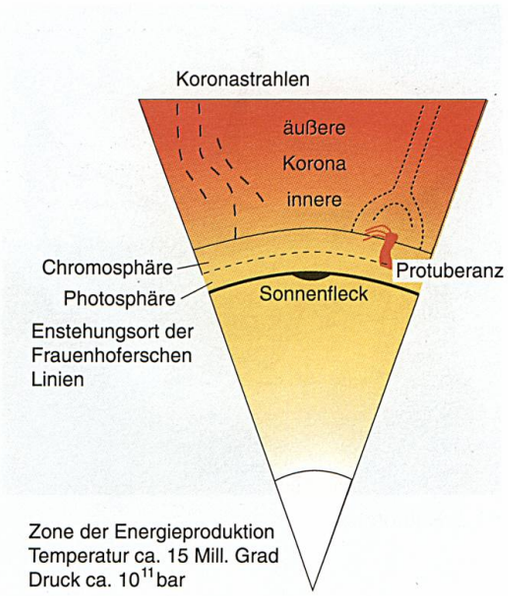
Die 3 Kepler-Gesetze über die Planetenbahnen

1. Die Planetenbahnen sind Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.

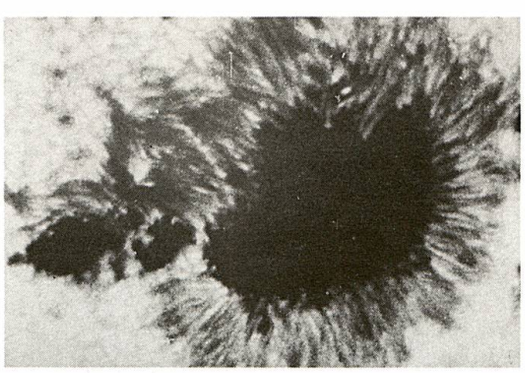
2. Der von der Sonne zu einem Planeten gezogene Leitstrahl überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.

3. Die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich wie die Kuben der großen Halbachsen ihrer Bahnen.

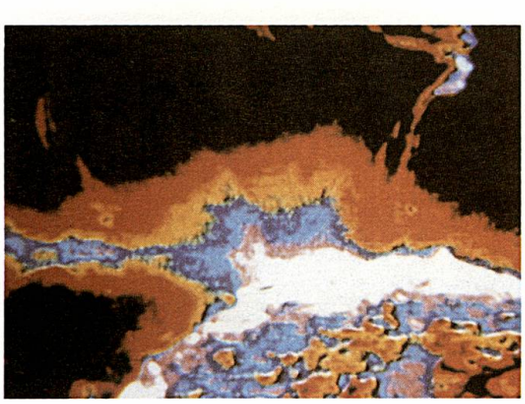
$$T_1^{\,2} : T_2^{\,2} = a_1^{\,3} : a_2^{\,3}$$



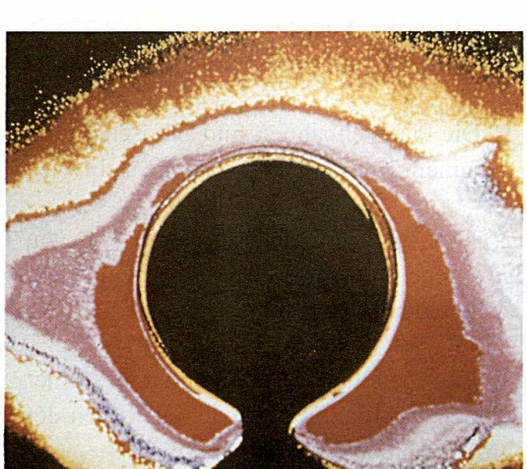
92.1 Aufbau der Sonne



92.2 Ein Sonnenfleck



92.3 Eruptive Protuberanz



92.4 Sonnenkorona (Falschfarbenaufnahme aus dem Raumschiff Skylab)

Die Sonne

Die Sonne ist ein Stern mit einem Durchmesser von $1{,}39 \cdot 10^6$ km. Sie besteht zu 78 % aus Wasserstoff, zu 20 % aus Helium und zu 2% aus anderen Elementen. Die Sonnenmasse beträgt $2 \cdot 10^{30}$ kg, was etwa 330 000 Erdmassen entspricht. Druck, Dichte und Temperatur nehmen zum Zentrum hin zu. Die Temperatur an der Oberfläche beträgt etwa 6000 °C, im Inneren jedoch $15 \cdot 10^6$ °C. Die Sonne strahlt pro m^2 $64 \cdot 10^6$ W ab. Die gesamte abgegebene Strahlungsleistung (Leuchtkraft) beträgt $3{,}86 \cdot 10^{23}$ kW. Diese wird durch Kernfusion im Inneren erzeugt. Dabei werden pro Sekunde $616 \cdot 10^6$ Tonnen Wasserstoff in $612 \cdot 10^6$ Tonnen Helium umgewandelt. Die Differenzmasse wird, abgesehen von den Neutrinoverlusten, in Energie nach der Beziehung $E = mc^2$ umgewandelt.

Die Sonne hat nur scheinbar einen scharf begrenzten Rand. Da sie eine durch Gravitation zusammengehaltene Gaskugel ist, müssen ihre Außenschichten kontinuierlich in den interplanetaren Raum übergehen. Die Dichte nimmt dabei von 10^{-7} kg/m^3 auf 10^{-18} kg/m^3 ab. Man teilt die Außenzonen in verschiedene Teilschichten ein (Abb. 92.1).

Photosphäre

Nahezu die gesamte von außen sichtbare Strahlung geht von dieser etwa 300 km dicken Schicht aus. Die Photosphäre stellt praktisch die leuchtende Oberfläche der Sonne dar.

Sonnenflecken

Die Photosphäre hat eine körnige Struktur, die als *Granulation* bezeichnet wird. Diese Granulen werden durch aus dem Inneren aufsteigende heiße Gase erzeugt, die etwa 300 °C heißer als ihre Umgebung sind. Sie haben einen Durchmesser von rund 1000 km.

Ein wesentliches Gebilde der Photosphäre sind die *Sonnenflecken* (Abb. 92.2), welche aus einem Kern (Umbra) und einer Umrandung (Penumbra) bestehen. Die Flecken sind deutlich kühler als die Umgebung und mit starken Magnetfeldern verbunden. Die Fleckenanzahl ist nicht konstant. Sie weist eine Periode von rund 11 Jahren auf, d.h. Maximalwerte treten in diesem Abstand auf. Der Rhythmus der Fleckenanzahl beeinflußt das gesamte Planetensystem. So wird der Funkverkehr auf der Erde bei erhöhter Sonnenaktivität durch die damit verbundenen elektromagnetischen Felder gestört.

Chromosphäre

Sie schließt an die Photosphäre nach außen hin an. Bei einer totalen Sonnenfinsternis wird die Photosphäre vom Mond verdeckt, sodaß ein rötlich leuchtender Saum sichtbar bleibt, die *Chromosphäre*. Diese hat eine Höhe von etwa 6 000 km.

Eine eindrucksvolle Erscheinung der Chromosphäre sind *Protuberanzen,* wolkenförmige Gebilde, welche aus Wasserstoff und Helium bestehen (Abb. 92.3). Man unterscheidet ruhende und eruptive Formen. Bei der eruptiven Protuberanz wird Sonnenmaterie mit hoher Geschwindigkeit bis zu 200 000 km ins Weltall hinausgeschleudert, welche dann wieder zurückfällt.

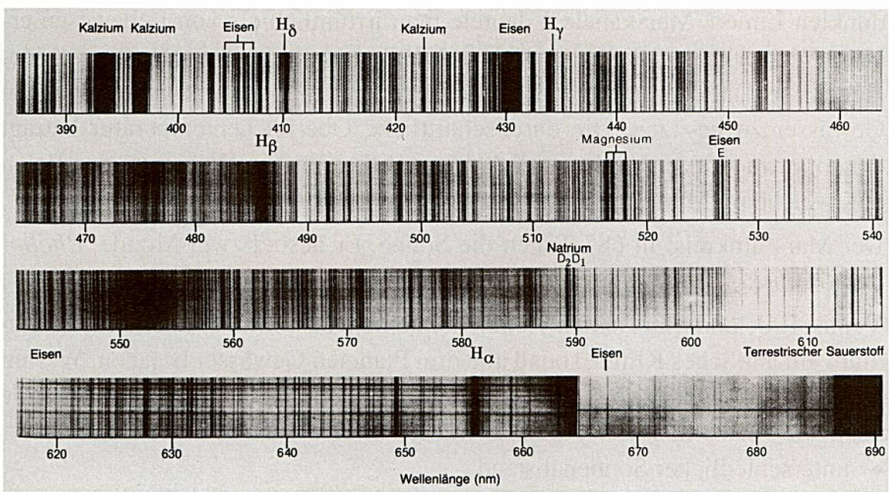
Korona

Die Korona ist die äußere Atmosphärenschicht der Sonne, die sich einige Millionen Kilometer ins Weltall erstreckt. Die Korona weist eine Temperatur von über 1 Million Grad auf, ist aber wegen der geringen Dichte nur bei Sonnenfinsternissen zu sehen. Diese Sonnenhülle wird sonst von der Photosphäre überstrahlt.

Sonnenspektrum

Das Sonnenspektrum stellt eine Überlagerung der Strahlungen aus den verschiedenen Sonnenschichten dar. Die Strahlung zwischen dem UV und IR, die über 90 % der Energieabgabe enthält, kommt aus der Photosphäre.

Beim Durchgang durch die Chromosphäre erfährt das kontinuierliche Licht eine selektive Absorption. Im Sonnenspektrum erscheinen dadurch Absorptionslinien, die nach ihrem Entdecker *Fraunhofersche Linien* genannt werden.

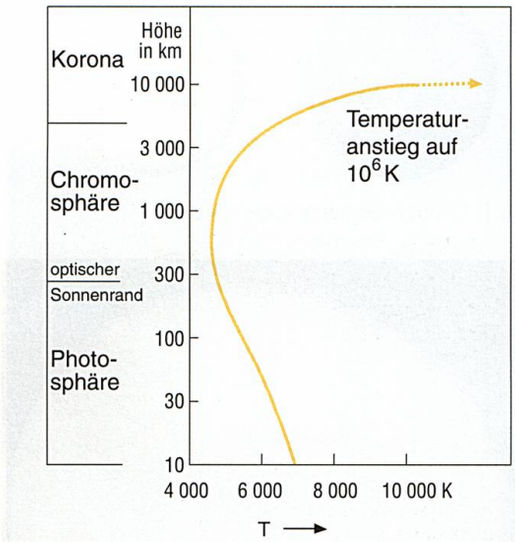


93.1 Sonnenspektrum im sichtbaren Bereich zwischen 390 nm und 690 nm

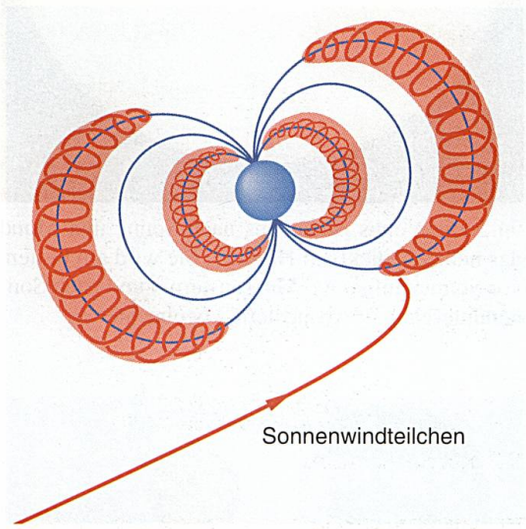
Sonnenwind

Von der Sonnenkorona wird ein ständiger Strom geladener Teilchen, ein Plasma aus Protonen, Elektronen und Heliumkernen nach allen Seiten weggeschleudert. Man bezeichnet diese Erscheinung als *Sonnenwind*. Dadurch verliert die Sonne schätzungsweise 100 Milliarden Tonnen Materie pro Tag, welche einen Teil des interplanetaren Gases bildet. Jener Teil des Sonenwindes, der in Richtung Erde abgegeben wird, wird vom Magnetfeld der Erde eingefangen (Abb. 93.3). Die Teilchen bewegen sich auf schraubenartigen Bahnen um die magnetischen Feldlinien zwischen Nord- und Südpol. Diese Zonen hoher Dichte an geladenen Teilchen wurden durch die ersten Erdsatelliten nachgewiesen.

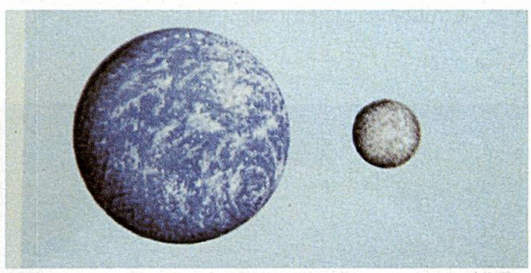
Das Erdmagnetfeld schützt uns vor einem Großteil der energiereichen und damit gefährlichen Teilchen des Sonnenwindes. Unter dem Einfluß des Sonnenwindes kommt es auch zu einer Verformung des Erdmagnetfeldes. Auf der sonnenzugewandten Seite wird das Magnetfeld komprimiert, auf der sonnenabgewandten Seite zieht der Sonnenwind die Magnetosphäre in Form eines magnetischen Schweifs in die Länge. Es kommt zur Ausbildung zweier Strahlungsgürtel, deren innerer auch als *Van Allen-Gürtel* bezeichnet wird (vgl. Band 3, Seite 47).



93.2 Temperaturverlauf in der Sonnenatmosphäre



93.3 Strahlungsgürtel der Erde (ohne die Verformung durch den Sonnenwind)



93.4 Größenvergleich Erde - Merkur

Planeten

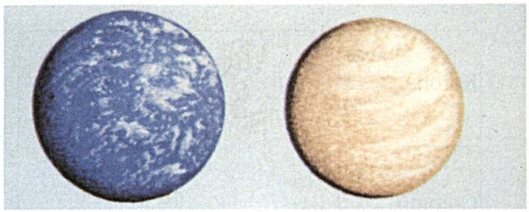
Merkur

Der Merkur ist der sonnennächste Planet, dessen Durchmesser etwas mehr als ein Drittel des Erddurchmessers beträgt (Abb. 93.4). Er umkreist die Sonne in knapp drei Monaten mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 48 km/s. Der Merkur besitzt keine Atmosphäre, daher schwankt seine Oberflächentemperatur zwischen -180 °C auf der sonnenabgewandten Seite und 430 °C auf der sonnenzugewandten Seite.

Venus

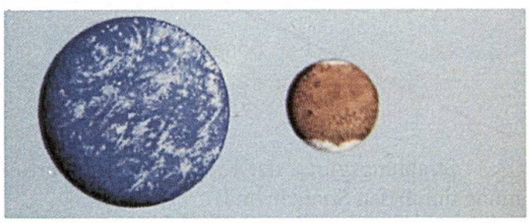
Die Venus ist nur etwas kleiner als die Erde. Sie besitzt eine dichte Atmosphäre, die zu 97 % aus Kohlendioxid besteht. Die Oberfächentemperatur beträgt 460 °C. Der Druck der Atmosphäre ist rund 90mal größer als der Wert auf der Erde. Ein Venustag dauert 117 Erdtage. Die Venus ist von allen Planeten am besten zu beobachten; sie zeigt wie der Erdmond verschiedene Lichtgestalten.

93.5 Die Sonde Mariner 10 machte 1974 und 1975 einige tausend Aufnahmen von der Merkuroberfläche. Man findet zahlreiche Krater, die zum Teil mit Lava gefüllt sind.

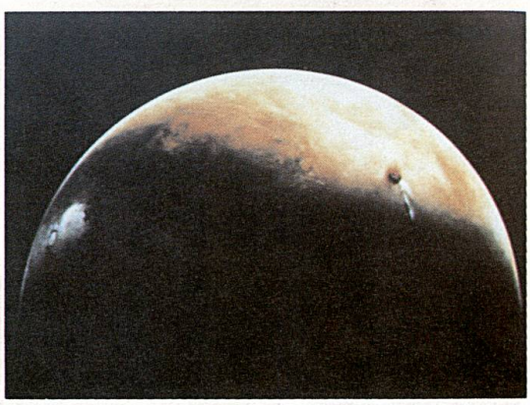


94.1 Größenvergleich Erde - Venus

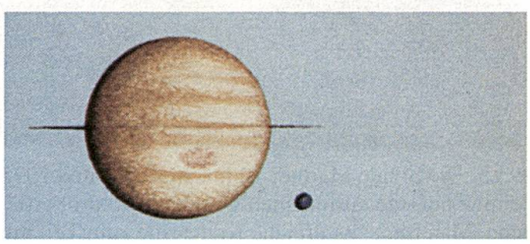
94.2 Die Venus ist für uns nach Sonne und Mond das hellste Objekt am Himmel. Sie wird am besten vor Sonnenaufgang ("Morgenstern") und nach Sonnenuntergang ("Abendstern") beobachtet.



94.3 Größenvergleich Erde - Mars



94.4 Mars



94.5 Größenvergleich Erde - Jupiter

Mars

Auf dem Mars, dem *Roten Planeten,* wurde sehr lange eine außerirdische Zivilisation vermutet.

Dieser Planet wurde von mehr Raumsonden besucht als jeder andere; dabei sammelte man zahlreiche Daten über die Oberfläche und die Atmosphäre, welche hauptsächlich aus Kohlendioxid besteht. Die im Fernrohr erkennbaren dunklen Linie ("Marskanäle") deutete man irrtümlich als von Lebewesen erbaute Wasserkanäle. Sie haben sich zum Teil als optische Täuschung erwiesen. Heute wird angenommen, daß der Mars früher einmal warm genug war, um Gewässer zu besitzen. Die durchschnittliche Oberflächentemperatur beträgt derzeit etwa – 60 °C. Jahreszeitlich treten Eiskappen aus Wasser an den Polen auf, welche im Marssommer zu winzigen Eisresten schrumpfen.

Der Mars umkreist in 687 Tagen die Sonne. Er besitzt zwei Monde, *Phobos* und *Deimos.*

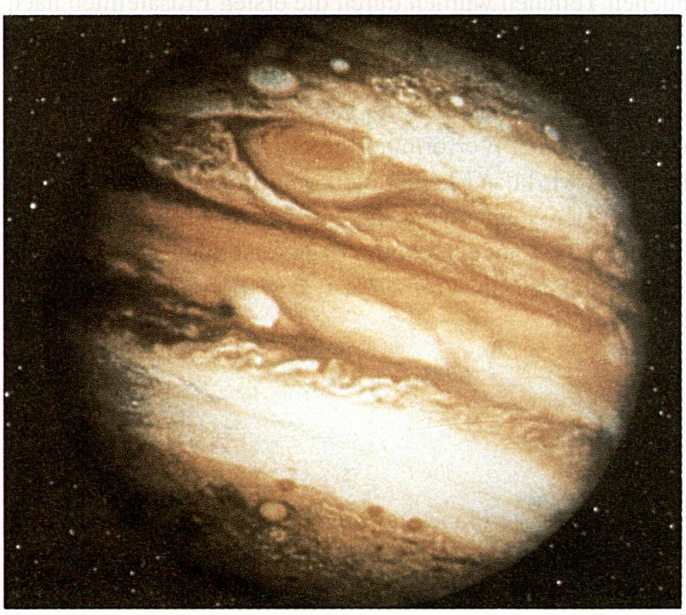
Venus, Erde und Mars hatten vielleicht in einem bestimmten Entwicklungsstadium ein ähnliches Klima, sodaß alle drei Planeten Gewässer besaßen. Warum diese auf der Venus verdampften, auf dem Mars gefroren und auf der Erde nach wie vor vorhanden sind, dafür werden zwei Ursachen angenommen:

- unterschiedlicher Sonnenabstand,
- Kohlendioxidaustausch zwischen Atmosphäre und Planetenkruste.

Auf der Erde führte das Kohlendioxid zum Treibhauseffekt und damit zu einer geeigneten Oberflächentemperatur von durchschnittlich 15 °C.

Jupiter

Der Jupiter ist der weitaus größte Planet in unserem Sonnensystem (Abb. 94.5). Er ist größer und hat eine größere Masse als alle anderen Planeten zusammen. Die Erde würde etwa 1300mal in sein Volumen passen. Seine Atmosphäre besteht vorwiegend aus Wasserstoff mit Beimengungen von Ammoniak, Methan, Wasserdampf, Schwefelwasserstoff und anderen Gasen. Die oberen Wolkenschichten haben eine Temperatur von etwa – 130 °C. Der Planet selbst besteht vermutlich hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium.



94.6 Jupiter wird von vielen kleinen Felsbrocken umkreist, die einzelne Ringe bilden.

Er ist aufgrund der schnellen Eigenrotation an den Polen stark abgeplattet; er dreht sich in knapp 10 Stunden einmal um seine Achse. Kennzeichnend ist der *Große Rote Fleck,* ein gewaltiger Wirbelsturm, der in bestimmten Abständen über den Planeten wandert.

Jupiter strahlt 2,5mal mehr Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung ab, als er von der Sonne empfängt; bemerkenswert ist die hohe Radiofrequenzstrahlung. Der Planet besitzt außerdem ein außergewöhnlich starkes Magnetfeld.

Die Raumsonden Voyager 1 und 2 sandten tausende Bilder und Meßdaten über diesen Riesenplaneten zur Erde. Derzeit sind 16 Monde bekannt. Die vier größten wurden bereits von *Galilei* im Jahr 1610 entdeckt. Diese Galileischen Monde heißen Ganymed, Kallisto, Io und Europa. Ganymed und Kallisto sind größer als der Merkur.

Saturn

Der Saturn, der zweitgrößte Planet (Abb. 95.1), ist dem Jupiter sehr ähnlich. Er besitzt jedoch die geringste Dichte unter allen Planeten. Auffallend ist das Ringsystem, welches aus Gesteins- und Eisbrocken gebildet wird. Das System, welches einen Durchmesser von rund 270 000 km hat, aber nur etwa 1 km dick ist, besteht aus konzentrischen Ringen, die durch dunkle Zwischenräume voneinander getrennt sind.

Weiters umkreisen den Saturn 22 bekannte Monde. Der größte von diesen, *Titan,* besitzt als einziger Mond eine Atmosphäre.

Uranus

Im Jahr 1981 entschloß man sich, die Flugroute der Raumfähre Voyager 2 zu verändern und den Planeten Uranus anzusteuern. Dies wurde durch eine günstige Planetenkonstellation möglich.

Durch die Anziehungskraft des Saturns wurde die Raumfähre in Richtung auf die Planeten Uranus und Neptun umgelenkt. Diese Gravitationsschleudertechnik, *Swing-by* genannt, wurde schon vorher genutzt, um die Voyagersonden vom Jupiter zum Saturn umzulenken.

Uranus besteht aus einem Metall- und Gesteinskern, welcher von Eispanzern umgeben ist. Die Atmosphäre enthält Wasserstoff, Helium und Methan. Der 1781 vom deutschen Astronomen *Wilhelm Herschel* entdeckte Planet besitzt ein Mond- und Ringsystem. Die dünnen Ringe sind nur wenige Kilometer breit und voneinander durch hunderte Kilometer fast leeren Raumes getrennt.

Neptun

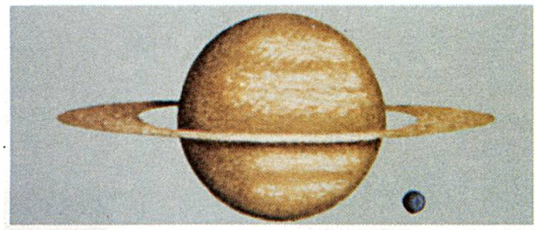
Dieser Planet (Abb. 95.5) wurde nach der Entdeckung des Uranus und dessen Bahnverlauf vorhergesagt und 1846 entdeckt. Neptun, der vermutlich den gleichen Aufbau wie Uranus aufweist, besitzt - wie Jupiter, Saturn und Uranus - ein Ringsystem. Neptun wird von derzeit zwei bekannten Monden umkreist, Triton und Nereide.

Eine Hypothese zur Ringentstehung von Saturn, Uranus und Neptun

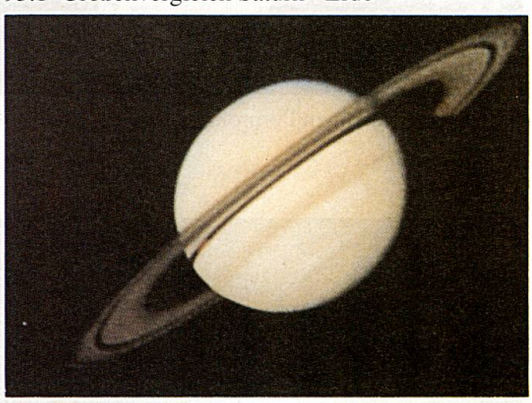
Die Ring- und Mondsysteme von Saturn, Uranus und Neptun zeigen eine Gemeinsamkeit: Sie besitzen von außen nach innen einige große Monde, auf welche viele kleine folgen; daran schließt sich ein Ringsystem (Abb. 96.5). Der Übergang von den Monden zu den Ringen fällt mit der sogenannten *Roche-Zone* zusammen. Gerät ein Mond in diesen Bereich, wird er aufgrund der großen Gravitationskraft verformt und zerrissen. Der französische Astronom *Édouard Roche* berechnete als erster diesen Radius. Nach dieser Hypothese sind die Ringe somit Reste von einstigen Monden.

Pluto

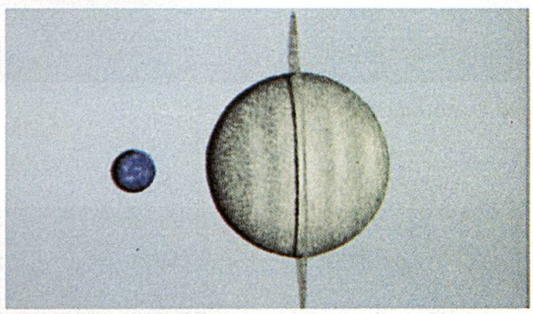
Pluto, der erst 1930 entdeckt wurde, ist mit gefrorenem Methan bedeckt. Er wird vom vergleichsweise riesigen Mond *Charon* umkreist. Während die Bahnen der äußeren Planeten nahezu kreisförmig sind, weist der neunte Planet eine stark elliptische Bahn zwischen 30 und 50 Erdbahnradien auf. Pluto ist zeitweise der Sonne näher als Neptun. Durchmesser und Masse des Pluto wurden anfangs viel zu hoch angenommen, weil er fälschlicherweise als Ursache für Störungen der Bahnbewegungen von Uranus und Neptun gesehen wurde. Der Durchmesser mußte jahrelang nach unten korrigiert werden, und zwar von 12 000 km auf ungefähr 2300 km. Pluto ist somit der kleinste Planet im Sonnensystem.



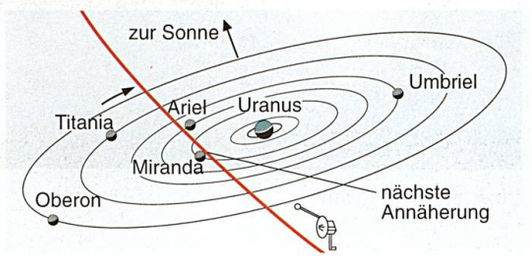
95.1 Größenvergleich Saturn - Erde



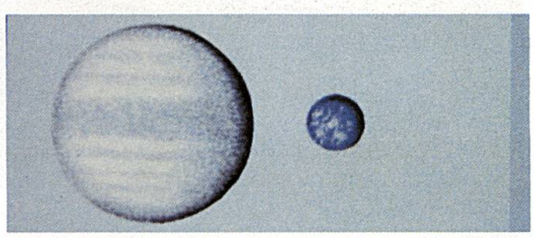
95.2 Saturn wurde von der Sonde Voyager 2 im Jahr 1981 fotografiert. Die ersten vier bekannten Ringe werden von innen nach außen mit D, C, B, A bezeichnet, daran schließen der F- und der G-Ring an. Die Lücke zwischen A- und B-Ring wird *Cassiniteilung,* jene zwischen B- und C-Ring *Maxwellteilung* genannt.



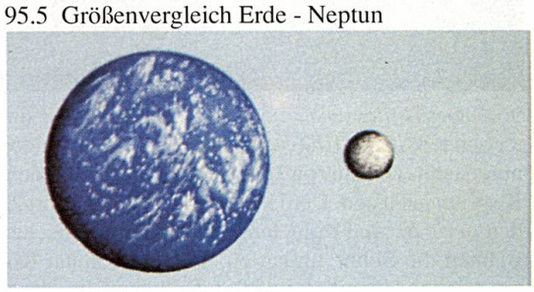
95.3 Größenvergleich Erde - Uranus



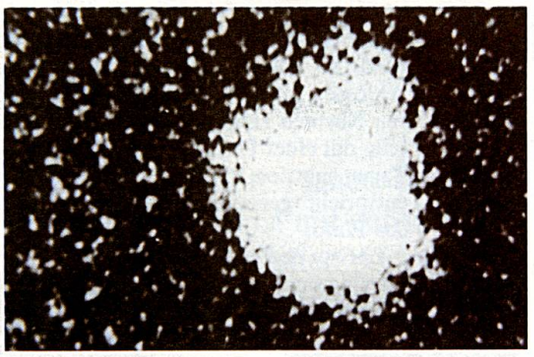
95.4 Derzeit sind 15 Uranus-Monde bekannt, die fünf größten sind Oberon, Titania, Umbriel, Ariel und Miranda.



95.5 Größenvergleich Erde - Neptun

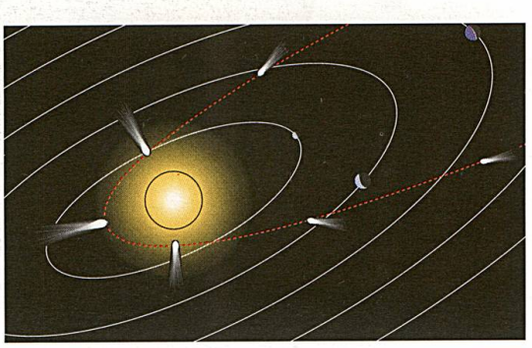


95.6 Größenvergleich Erde - Pluto



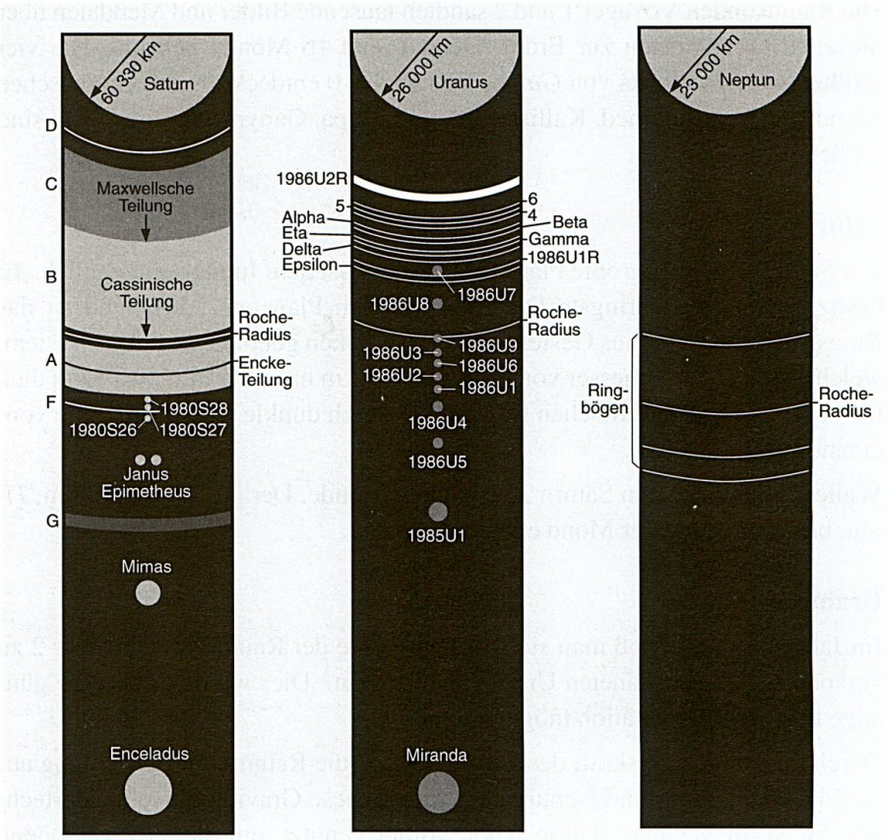
96.1 Pluto mit einem Fernrohr beobachtet

96.2 Aufbau eines Kometen



96.3 Kometenbahn

96.4 Der *Halleysche Komet* ist der berühmteste unter den Kometen. 1986 wurde er von 5 Raumsonden untersucht. Die europäische Sonde Giotto kam dem Kern am nächsten. Der Halleysche Komet gehört zu den *periodischen* Kometen, welche auf elliptischen Bahnen die Sonne umlaufen. Weiters können Kometen auch Hyperbel- und Parabelbahnen beschreiben.



96. 5 Saturn, Uranus und Neptun besitzen jeweils ein Mond- und Ringsystem.

Planetoiden

Die Astronomen *Titius* und *Bode* erkannten, daß für die mittleren Abstände A der Planeten von der Sonne näherungsweise folgende Gesetzmäßigkeit gilt:

$A_{\text{Planet}} = 0{,}4 + 0{,}3 \cdot 2^n$ *Titius-Bode-Regel*

A_{Planet} wird in astronomischen Einheiten gemessen. Merkur erhält den Wert 0,4 AE, für die anderen Planetenentfernungen gilt $n = 0, 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8$.

Für $n = 3$ besteht eine Lücke im Planetensystem (etwa $420 \cdot 10^6$ km von der Sonne entfernt) zwischen der Mars- und der Jupiterbahn.

Diese wird von kleinen Himmelskörpern, den *Planetoiden* oder *Asteroiden*, gefüllt. Der erste Planetoid wurde 1801 entdeckt. Bis heute kennt man mehr als 4000 Planetoiden, ihre Gesamtzahl wird auf 50 000 geschätzt. Ihre Durchmesser betragen 1 bis 800 km, sie sind meist unregelmäßig geformt. Die größten Repräsentanten sind *Ceres* und *Pallas*.

Kometen

Kometen bestehen aus einer Ansammlung von Materiebrocken, die von Gas und feinem Staub eingehüllt wird. Die Bestandteile sind der helle Kern (Nukleus), die Koma, eine nebelartigen Hülle und der Schweif, welcher aus schwachleuchtenden Gasschichten besteht. Kern und Koma bilden den Kometenkopf (Abb. 96.2).

Von der Sonne weit entfernte Kometen sind Eisbrocken, die aus Kohlendioxid, Ammoniak, Wasser, Steinen und Staubteilchen bestehen. Nähert sich ein Komet der Sonne, bildet sich eine Koma aus Gas und Staub aus. Die vom Kometenkern wegsublimierenden Gasmoleküle werden durch das Sonnenlicht gespalten und zum Teil ionisiert. Der Sonnenwind, ein von der Sonne ausgehender Strom von Protonen, Heliumkernen und Elektronen, verursacht die Ausbildung des Kometenschweifs. Dabei tritt eine elektromagnetische Wechselwirkung zwischen dem Sonnenwind und dem Kometenplasma auf. Das Sonnenlicht wird am Kometenstaub gestreut und macht dadurch Koma und Schweif sichtbar. Die UV-Strahlung regt Moleküle und Ionen der Gaskoma zum Leuchten an.

Das elektromagnetische Feld des Sonnenwindes wird an der der Sonne zugewandten Kometenseite nach hinten abgelenkt; der Schweif weist daher von der Sonne weg.

Kometen bestehen zum Teil aus dem Urmaterial, aus dem sich das Sonnensystem gebildet hat. Durch die Erforschung der Kometenmaterie hofft man, neue Erkenntnisse über die Entstehung unseres Sonnensystems zu gewinnen.

Meteorite

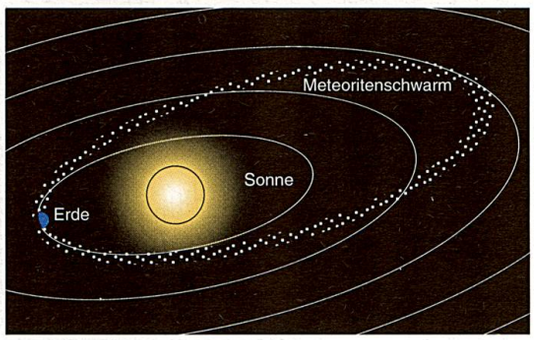
Meteorite sind feste, aus dem Universum stammende Partikel, die in die Erdatmosphäre eindringen und zu Leuchterscheinungen führen. Meteorite, deren Massen zwischen 10^{-6} g und 10^{6} kg liegen können, sind vermutlich Überreste von Kometen oder von Planetoiden. Große Meteorite können beim Aufschlagen auf die Erde infolge der plötzlichen Abbremsung explodieren und tiefe Krater reißen.

Kleine Teilchen verglühen in der Atmosphäre. Die dabei hervorgerufenen Leuchterscheinungen werden mit einem Sammelbegriff als *Meteor* bezeichnet. Eine weitere Bezeichnung dafür ist *Sternschnuppen.* Im allgemeinen treten die Leuchtspuren in Höhen von 80 bis 100 km auf. Feuerkugeln sind besonders helle Meteore.

Hinsichtlich der Zusammensetzung können Eisen- und Steinmeteorite unterschieden werden. Daneben gibt es Tektite oder Glasmeteorite, deren meteorischer Ursprung nicht gänzlich geklärt ist.

Meteore treten nicht mit gleicher Stärke während eines Jahres auf, es gibt bestimmte Ballungen. Diese werden durch Meteoritenschwärme verursacht, die sich auf geschlossenen Bahnellipsen um die Sonne bewegen (Abb. 97.2). Besitzt die Erdbahn einen Schnittpunkt mit der Bahn der Meteoriten, wird beim Zusammentreffen der Schwarm von der Erde eingefangen. Dies äußert sich in einer Zunahme von Meteoren, und zwar im August (Perseidenschwärme) und im November(Leonidenschwärme).

97.1 Der größte erforschte Meteoritenkrater liegt in Arizona. Er hat einen Durchmesser von 1200 m und eine Tiefe von 170 m.



97.2 Ein Meteoritenschwarm

15.5 Energieerzeugung in einem Stern

Die von einem Stern abgegebene Energie stammt von den im Inneren ablaufenden Kernreaktionen, den *Kernfusionen.* Die meiste Energie wird bei der *Wasserstoff-Fusion* ("Wasserstoffbrennen") frei, nämlich $6 \cdot 10^{14}$ J pro kg umgewandelter Masse. Die Umwandlung von Wasserstoff in Helium erfolgt über mehrere Einzelreaktionen. Je nach Temperaturbereich können zwei unterschiedliche Reaktionsfolgen unterschieden werden:

Proton-Proton-Zyklus

Als erstes reagieren zwei Protonen (Wasserstoffkerne) miteinander, welche Deuterium ergeben, weiters entstehen ein Positron und ein Neutrino.

$${}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{2}_{1}\mathrm{H} + \mathrm{e}^{+} + \nu \qquad \mathrm{e}^{+} \text{ ... Positron} \quad \nu \text{ ... Neutrino}$$

Die nächste Reaktion ist:

$${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + \gamma \qquad \gamma \text{ ... Photon der Gammastrahlung}$$

Nach zweimaligem Ablauf der ersten beiden Reaktionen folgt:

$${}^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{3}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\,{}^{1}_{1}\mathrm{H}$$

Dieser Reaktionsablauf tritt vor allem bei Temperaturen zwischen $5 \cdot 10^{6}$ K und $15 \cdot 10^{6}$ K auf. Es wird dabei eine Energie von 26,21 MeV frei.

Kohlenstoff-Stickstoff-Sauerstoff-Zyklus

Er herrscht bei Temperaturen zwischen $15 \cdot 10^{6}$ K und $30 \cdot 10^{6}$ K vor. Im Reaktionsablauf treten die Kerne von C, N und O als Reaktionspartner bzw. Zwischenprodukte auf - siehe den Reaktionsablauf in der Randspalte!
Die frei werdende Energie beträgt 25,03 MeV.

Die bei den Reaktionen entstehenden Positronen zerstrahlen sofort wieder mit Elektronen zu γ-Quanten. Jedoch können die frei werdenden Neutrinos aufgrund ihrer geringen Wechselwirkung den Stern ungehindert verlassen. Damit geht ein Teil der Energie dem Stern verloren.

Bei Bildung jedes He-4-Kerns in der Sonne entstehen 2 Neutrinos; dies ergibt für die Erde 10^{15} Neutrinos pro Quadratmeter und Sekunde.

C-N-O-Zyklus

$${}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{13}_{7}\mathrm{N} + \gamma$$

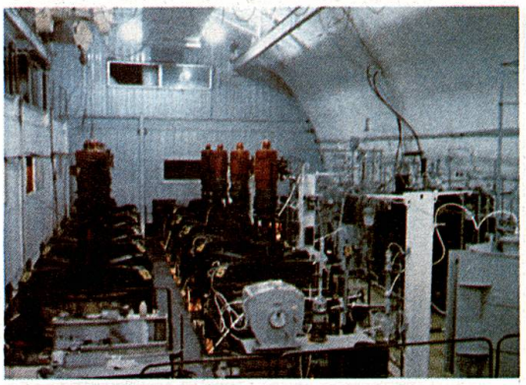
$${}^{13}_{7}\mathrm{N} \rightarrow {}^{13}_{6}\mathrm{C} + \mathrm{e}^{+} + \nu$$

$${}^{13}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + \gamma$$

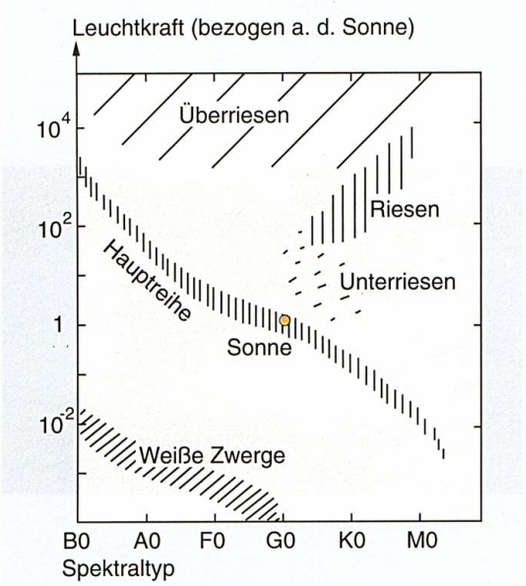
$${}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{15}_{8}\mathrm{O} + \gamma$$

$${}^{15}_{8}\mathrm{O} \rightarrow {}^{15}_{7}\mathrm{N} + \mathrm{e}^{+} + \nu$$

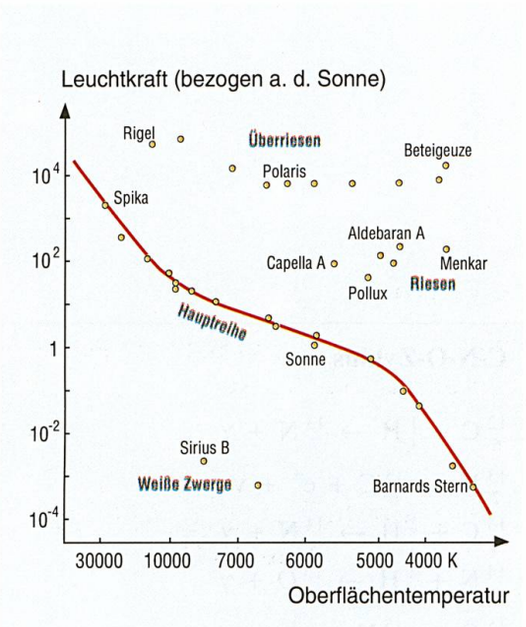
$${}^{15}_{7}\mathrm{N} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$



98.1 Neutrinodetektor: Als Detektormaterial dient Gallium. Absorbiert ein Ga-71-Kern ein Neutrino, wandelt es sich in ein radioaktives Germanium (Ge 71) um und gibt dabei ein Elektron ab. Das entstehende Germanium wird chemisch vom Gallium getrennt und die Masse bestimmt. Mit den bisherigen Detektoranlagen konnte ein Neutrinofluß gemessen werden, der wesentlich geringer ist als der vorhergesagte Wert. Die Ursachen dafür sind noch nicht bekannt.



98.2 Hertzsprung-Russell-Diagramm



98.3 Hertzsprung-Russell-Diagramm mit den bekanntesten hellen Sternen

Helium-Fusion

Wenn in der Entwicklung eines Sterns der gesamte Wasserstoff zu Helium geworden ist, erlöschen zunächst die Kernreaktionen. Steigt die Temperatur danach auf ungefähr 10^8 K an, können Heliumkerne zu schwereren Kernen wie Kohlenstoff und Sauerstoff aufgebaut werden. Die dabei gewonnene Energie beträgt 7,3 MeV pro C-12-Kern.

Kohlenstoff- und Sauerstoff-Fusion

Ist auch das Helium zu C 12 und O 16 "verbrannt", so setzen zwischen $5 \cdot 10^8$ K und 10^9 K Reaktionen zwischen zwei Kohlenstoffkernen ein. Dabei bildet sich als Zwischenprodukt ein Magnesiumkern, der in weiterer Folge in leichtere Kerne, wie Natrium und Neon, zerfällt.

Bei ungefähr $1{,}4 \cdot 10^9$ K reagieren auch die Sauerstoffkerne miteinander, wobei Schwefel, Phosphor, Silizium und andere Elemente gebildet werden.

Silizium-Fusion

Die Siliziumkerne können bei $2 \cdot 10^9$ K zur Fusion gebracht werden. Dabei wird Eisen aufgebaut. Damit ist das stabilste Element erreicht. Ein Energiegewinn tritt nur bei Verschmelzung von Kernen mit einer Nukleonenzahl auf, die kleiner als 56 ist. Die Fusionsfolge, die mit Wasserstoff begonnen hatte, hört damit auf.

15.6 Sternentwicklung

Hertzsprung-Russell-Diagramm

Im *Hertzsprung-Russell-Diagramm* (HRD) wird die absolute Helligkeit eines Sterns gegen seinen Spektraltyp aufgetragen. Dabei ist zu erkennen, daß die Sterne bestimmte Bereiche ausfüllen. Die weitaus meisten Sterne liegen in der sogenannten *Hauptreihe*, welche von 10^3-facher bis zu 10^{-3}-facher Leuchtkraft der Sonne verläuft.

In unserem Kosmos können Sterne mit unterschiedlichem Alter und in verschiedenen Entwicklungsstadien bobachtet werden. Daraus lassen sich Modelle für Sternentstehung und Entwicklung mit Hilfe von Computerberechnungen erstellen. Danach entstehen Sterne aus interstellaren Gaswolken; diese bestehen aus Staub und Gas. Ist die Gravitation größer als der Druck im Inneren, zieht sich die Wolke zusammen. Dabei treten noch keine Kernreaktionen auf. Wegen der großen Oberfläche besitzen diese jungen Sterne trotz ihrer geringen Temperatur hohe Leuchtkräfte. Im HRD wandern die Sterne infolge der Kontraktion von rechts oben nach unten und später wegen der Erhöhung der Temperatur aufgrund der Kompression meist nach links.

Auf die Masse kommt es an

Ist die Masse des Sterns kleiner als 1/10 der Sonnenmasse, hört die Kontraktion erst dann auf, wenn die Dichte so groß geworden ist, daß im Inneren ein entartetes Gas entstanden ist. In einem entarteten Gas ist die Energieverteilung nahezu temperaturunabhängig. Die Maxwell-Boltzmann-Verteilung gilt nicht mehr. Ein hochverdichtetes Gas übt nämlich auch bei tiefen Temperaturen einen hohen Druck aus. Es entsteht ein *Weißer Zwerg*. Dieser besitzt eine Dichte von 10^8 bis 10^{11} kg/m^3. Ein Weißer Zwerg verändert bei weiterer Abkühlung seine Struktur nicht mehr; ein Endzustand ist erreicht.

Bei massereicheren Sternen steigt die Temperatur im Inneren so weit an, daß das Wasserstoffbrennen einsetzen kann. Durch diesen Prozeß wird eine weitere Kontraktion verhindert. Sterne in diesem Stadium findet man am Beginn der Hauptreihe rechts im HRD. Da die Wasserstoffusion sehr langsam abläuft, bleiben Sterne lange in diesem Hauptreihenstadium. Dieses dauert um so länger, je kleiner die Sternenmasse ist; es liegt zwischen 10^6 und 10^{11} Jahren. Besitzt ein Stern die 15fache Sonnenmasse, so dauert es 10^7, bei der Sonne selbst $9 \cdot 10^9$ Jahre.

Wie die Entwicklung weitergeht, hängt von der Restmasse des Sterns ab. Die genaue Zuordnung ist recht unsicher, da man den Gesamtverlust während der Entwicklung nur ungenau kennt.

Die Sternrestmasse ist kleiner als 1,5 Sonnenmassen

Besteht das Sternzentrum nur noch aus Heliumkernen, verlagern sich die Wasserstoff-Kernreaktionen vom Zentrum langsam in eine konzentrischen Schale. Der Stern bläht sich auf, die Oberflächentemperatur sinkt, die Leuchtkraft steigt. Es entsteht ein *Roter Riese*. Hören die Fusionsprozesse schließlich auf, kommt es zur Kontraktion.

Ist die Sternmasse kleiner als 0,5 Sonnenmassen, endet der Stern als *Weißer Zwerg*. Ist die Masse größer als 0,5 Sonnenmassen, kommt es infolge der hohen Kompression und der damit verbundenen Temperaturerhöhung zum Einsetzen der Heliumfusion. Diese läuft bei Sternen mit Sonnenmasse sehr schnell ab. Die Leuchtkraft steigt sehr stark an, wodurch der Stern zum *Roten Überriesen* wird. Nach dem Erlöschen dieser Fusionen entwickelt sich schließlich daraus ein Weißer Zwerg.

Die Sternrestmasse ist größer als 1,5 Sonnenmassen

Die Entwicklung zum Roten Riesen bzw. Überriesen ist ähnlich, nur erfolgt sie mit wesentlich höherer Geschwindigkeit. In der weiteren Entwicklung kommt es infolge der Gravitationskräfte zu einer immer weiteren Kontraktion, die Dichte nimmt zu.

Ist die Sternrestmasse kleiner als 3 Sonnenmassen, entsteht ein *Neutronenstern*, welcher eine Dichte von 10^{16} bis 10^{18} kg/m^3 besitzt. Dabei können im Inneren des Sterns keine Atomkerne existieren; die atomare Struktur wird zerstört. Die Materie besteht dann aus Neutronen. Im Kern selbst können die Neutronen ein festes Gitter bilden, welches nach außen hin von Neutronenflüssigkeit umgeben ist.

Bei Neutronensternen beträgt die Fluchtgeschwindigkeit aufgrund der hohen Gravitation c/3, Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie sind zu beachten.

Der Strahlungsdruck kann in einem heißen, massereichen Stern so stark ansteigen, daß er explodiert. Es ensteht eine *Nova* oder eine *Supernova*.

Nova ist ein Stern, der infolge eines Zusammenbruchs und einer darauf folgenden Explosion eine enorme Leuchtkraft erhält; der Stern leuchtet hell auf. Die Außenschichten des Sterns werden mit einer Geschwindigkeit von 500 km/s bis 3000 km/s abgestoßen.

Bei einer Supernova ist die abgegebene Energie wesentlich größer als bei einer Nova. Die letzte Supernova konnte 1987 beobachtet werden. In den ersten 10 Sekunden eines Supernovaausbruchs, bei dem der Kern des Sterns implodiert und einen Neutronenstern bildet, wird von einer Region von etwa 30 km Durchmesser mehr Energie abgestrahlt als von allen sichtbaren Gestirnen des Weltalls zusammen. Dabei wird mehr Energie frei als von der Sonne während ihrer gesamten Existenz in 10 Milliarden Jahren.

Wie bei einer Nova wird eine Materiehülle abgestoßen, die als Nebel beobachtet werden kann.

Folgeerscheinungen von Supernovae können *Pulsare* sein. Dies sind Sterne, deren gesamte meßbare Strahlung auf kurze Strahlungspulse konzentriert ist. Vermutlich sind Pulsare Neutronensterne, die ein schnell rotierendes Magnetfeld besitzen, welches als Beschleunigungsfeld für Elektronen dient. Diese geben eine Synchrotronstrahlung ab, deren Strahlungskegel ähnlich der Signallampe eines Leuchtturms mitrotiert.

Übersteigt die Sternrestmasse - etwa nach einer Supernova - das Dreifache der Sonnenmasse, kann es zu einer weiteren Kontraktion kommen. Ab einem bestimmten Grenzradius, dem *Schwarzschildradius*, ist der Stern unsichtbar, da aufgrund der enormen Gravitation Photonen, die vom Stern emittiert werden, auf diesen zurückfallen. Damit kann keine Information dieses Objekt verlassen. Es ist ein *Schwarzes Loch* entstanden.

Die Allgemeine Relativitätstheorie liefert für den Schwarschildradius R die Formel:

$$R = \frac{2GM}{c^2} \qquad G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{m^3\,kg^{-1}\,s^{-2}}$$

99.1 Im Zentrum des Ringes befindet sich ein Weißer Zwerg

Beispiel A

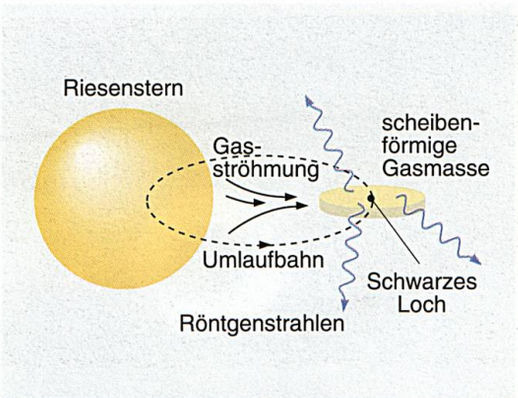
Berechne den Schwarzschildradius für die Sonnenmasse ($2 \cdot 10^{30}$ kg).

$$R = \frac{2GM}{c^2}$$

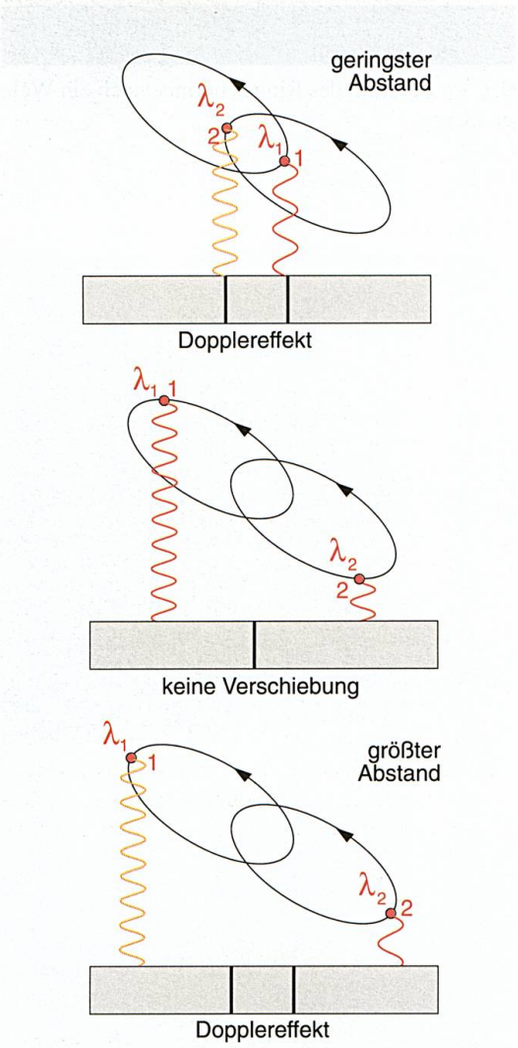
$$R = \frac{2 \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{m^{-3}\,kg^{-1}\,s^{-2}} \cdot 2 \cdot 10^{30}\ \mathrm{kg}}{(3 \cdot 10^{8}\ \mathrm{m\,s^{-1}})^2}$$

$$R = 3\ \mathrm{km}$$

Bei einem Radius von 3 km wäre die Sonne ein Schwarzes Loch.



100.1 Wirkung eines Schwarzen Loches



100.2 Optischer Dopplereffekt bei Doppelsternen

100.3 Elliptische Galaxie NGC 4472 (NGC steht für New General Catalogue of Nebulae and Clusters). Sie ist 60 Millionen Lichtjahre von uns entfernt.

Die Existenz eines Schwarzen Loches kann nur durch die Gravitationswirkung auf benachbarte Sterne oder durch die im Röntgenbereich liegende Strahlung von hineinfallender Materie gezeigt werden. Jede Gaswolke, die auf ein Schwarzes Loch fällt, wird komprimiert und damit aufgeheizt. Sie strahlt so lange Energie ab, bis sie den Schwarzschildradius erreicht hat.

Derzeit werden drei Endstadien in der Sternentwicklung angenommen: Weißer Zwerg, Neutronenstern und Schwarzes Loch. Der Existenznachweis für Schwarze Löcher ist jedoch noch nicht zweifelsfrei gelungen.

Doppelsterne

Eine beträchtliche Zahl von Sternen bilden Doppelsternsysteme. Sie stellen eine bedeutende Informationsquelle zur Erforschung des Universums dar. Doppelsterne rotieren aufgrund der gegenseitigen Anziehung um einen gemeinsamen Schwerpunkt. Kennt man in einem solchen System die Bahnbewegung der beiden Sterne, können ihre Massen ermittelt werden.

Einige Doppelsterne sind daran zu erkennen, daß sie eine periodische Änderung ihrer Helligkeit zeigen. Diese rührt daher, daß einer der beiden Sterne in periodischen Abständen den anderen verdeckt. Man nennt solche Doppelsterne auch *Bedeckungsveränderliche*. Viele Doppelsterne erkennt man jedoch an einer periodischen Verschiebung der Spektrallinien einmal nach Rot und dann nach Blau (optischer Dopplereffekt). Solche Doppelsterne heißen *spektroskopische Doppelsterne*.

In Abbildung 100.2 oben haben die beiden Komponenten des Doppelsternsystems den geringsten Abstand, sie bewegen sich mit großer Geschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung. Da die Komponente 1 sich vom Beobachter entfernt, wird eine herausgegriffene Linie des Spektrums rotverschoben wahrgenommen - die Wellenlänge wird größer. Die Komponente 2 nähert sich dem Beobachter - die Spektrallinie erfährt eine Blauverschiebung. Daraus folgt, die beiden Linien sind gegeneinander verschoben. In der mittleren Abbildung bewegen sich die beiden Komponenten so, daß keine Verschiebung auftritt. Die Abbildung unten zeigt bei größtem Abstand der Komponenten die Umkehrung zu Fall 1.

Galaxien

Galaxien sind "Inseln" im Weltraum, die aus Milliarden von Sternen und interstellarer Materie bestehen. Ursprünglich hielt man Galaxien für Gasnebel, bis man mit Hilfe leistungsfähiger Teleskope einzelne Sterne erkennen konnte. Nach der äußeren Erscheinung können verschiedene Formen unterschieden werden:

- *Elliptische Galaxien.* Sie zeigen keine inneren Strukturen und können kugelförmige Gestalt haben oder stark abgeplattet sein.
- *Scheibengalaxien.* Scheibengalaxien besitzen einen kugelförmigen zentralen Kern und eine flache Scheibe, die den Kern umgibt. Im Zentrum ist die Dichte der Sterne sehr hoch, zum Rand hin nimmt sie ab.

Bei den Scheibengalaxien können *Spiralgalaxien* (Abb. 101.2) und *S0-Galaxien* (Abb. 101.3) unterschieden werden. Die Scheiben der Spiralgalaxien besitzen ausgeprägte Arme, die der S0-Galaxien sind unstrukturiert.

Scheibengalaxien sind vermutlich aus *Protogalaxien* entstanden. Darunter versteht man eine nahezu kugelförmige, rotierende Gaswolke, die im wesentlichen aus Wasserstoff und Helium besteht. Wenn die Gravitation die Expansion im protogalaktischen Gas übertrifft, stürzt die Wolke in sich zusammen: Sterne entstehen, es bildet sich eine Galaxie.

Milchstraße (Galaxis)

Unser Sonnensystem ist Teil einer Galaxie, *Milchstraße* oder *Galaxis* genannt. Sie ist eine Spiralgalaxie, in welcher die Sonne etwa 30000 Lichtjahre vom Zentrum entfernt ist. Die Sonne mit ihrem Planetensystem umkreist dieses Zentrum innerhalb von 200 Millionen Jahren.

Die Galaxis ist vermutlich aus einer riesigen Wasserstoff-Helium-Wolke entstanden, die durch Kontraktion und Rotation zu einer flachen Scheibe geworden ist. Die meisten Sterne befinden sich in den Spiralarmen.

Man unterscheidet drei Hauptkomponenten der Milchstraße:
- Zentraler Bereich: Er besitzt einen Durchmesser von etwa 13 000 bis 16 300 Lichtjahre.
- Galaktische Scheibe: Ihr äußerer Rand ist ungefähr 50 000 Lichtjahre vom Zentrum entfernt.
- Halo: Dieser Bereich hat die Form einer leicht abgeplatteten Kugel mit einem Radius von 65 000 Lichtjahren. Der Halo enthält die ältesten Objekte der Galaxis.

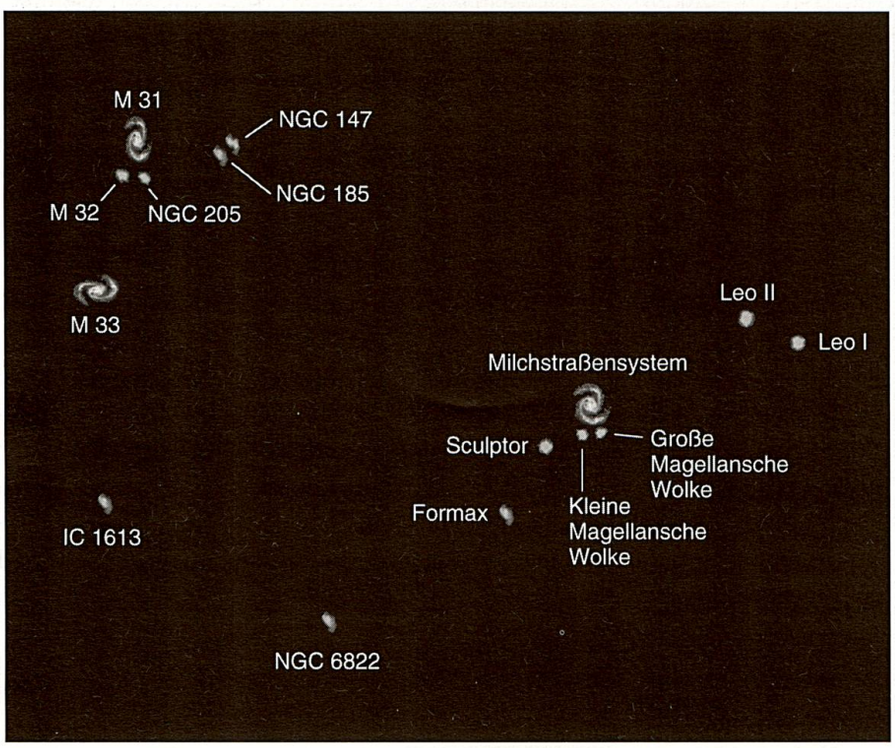
Die Abmessungen weiter nach außen sind nicht vollkommen bekannt. Die mittlere Entfernung der Sterne in der Milchstraße beträgt etwa 5 Lichtjahre.

Man schätzt, daß der für den Menschen erfaßbare Teil des Kosmos etwa 100 Milliarden Galaxien enthält, von denen jede im Schnitt rund 100 Milliarden Sterne aufweist.

Galaxienhaufen

Galaxien selbst können wieder Bestandteile von Galaxienhaufen sein. Galaxienhaufen bilden wiederum sogenannte Superhaufen.

Die Milchstraße ist ein Teil des Galxienhaufens mit dem Namen *Lokale Gruppe*. Dies ist ein sehr kleines System mit etwa 20 Galaxien, die meist deutlich kleiner sind als die Milchstraße. Es gibt jedoch Galaxienhaufen, welche aus tausenden Galaxien bestehen, die ihrerseits wiederum Milliarden von Sternen enthalten.



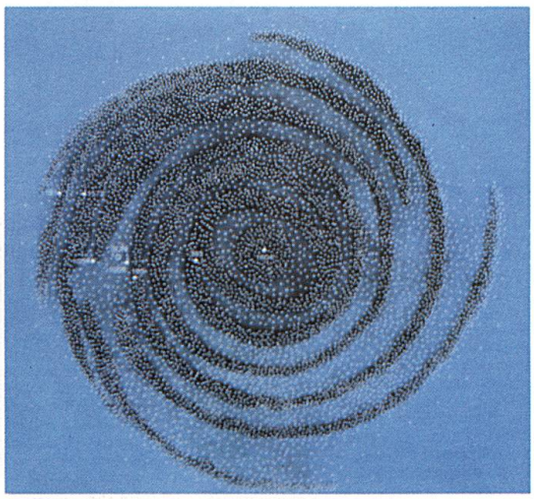
101.1 Lokale Gruppe

Quasare

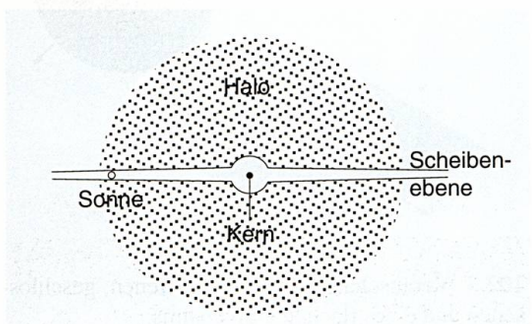
Quasare wurden am Beginn der sechziger Jahre von *Maarten Schmidt* entdeckt. Sie konnten mit Hilfe von Radioteleskopen festgestellt werden. Einige von ihnen wurden optisch als sternartig eingestuft. Die Bezeichnung "Quasar" ist eine Abkürzung für *quasistellar radio source*. Auffallend an diesen kosmischen Objekten sind die starken Rotverschiebungen in ihren Spektren. Dies läßt auf eine hohe Geschwindigkeit schließen, mit der sie sich von der Erde entfernen; außerdem müssen sie sehr weit entfernt sein. Die größte Entfernung eines beobachteten Quasars beträgt 15 Milliarden Lichtjahre. Dies bedeutet, daß die empfangene Strahlung vor 15 Milliarden Jahren ihre Reise angetreten hat. Damit ein Quasar mit irdischen Teleskopen geortet werden kann, muß er eine Helligkeit aufweisen, die jene von einer ganzen Galaxie übertrifft.

101.2 Spiralgalaxie

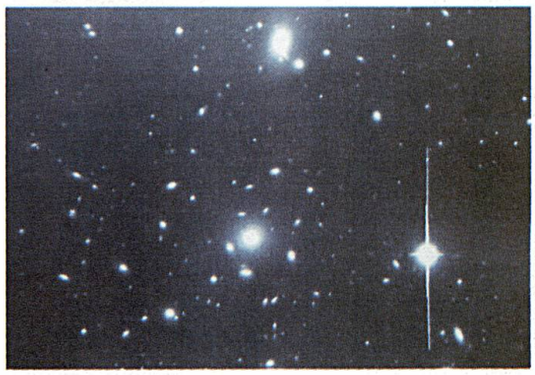
101.3 S0-Galaxie



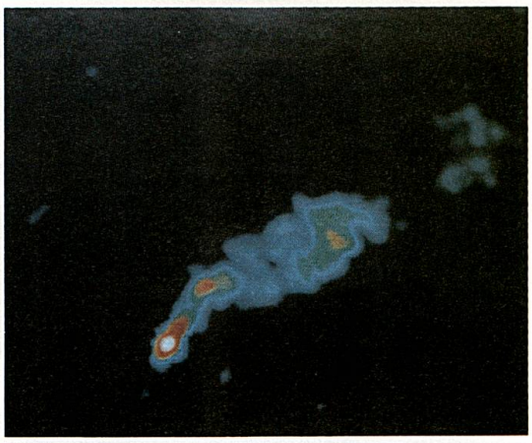
101.4 Die Milchstraße. Die weißen Punkte veranschaulichen die Sternverteilung, die dicken weißen Punkte kennzeichnen Orte mit Supernovaausbrüchen.



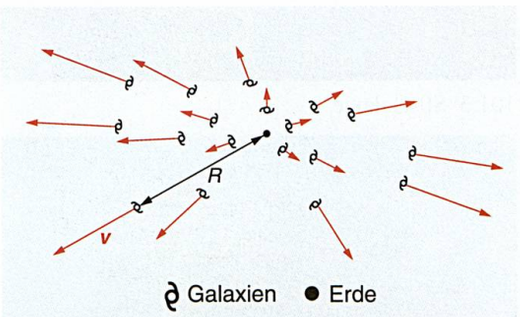
101.5 Aufbau der Milchstraße



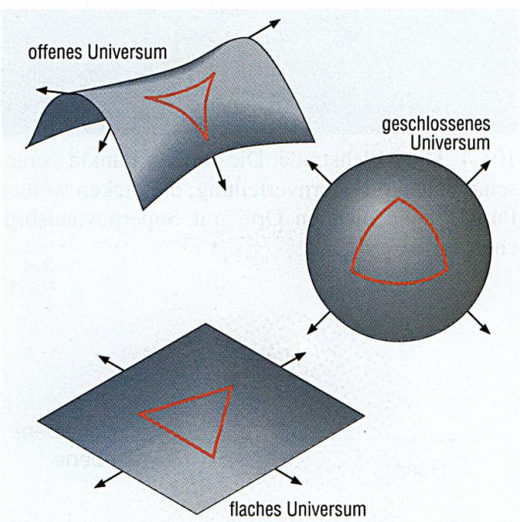
101.6 Galaxienhaufen im Sternbild "Haar der Berenike"



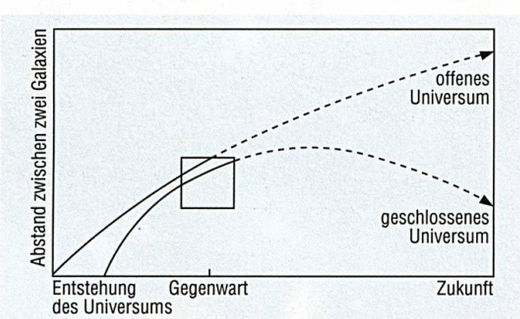
102.1 Der Quasar 3 C 273 ist $3 \cdot 10^9$ Lichtjahre entfernt.



102.2 Die Hubble-Beziehung gilt nur ab einer gewissen Mindestentfernung, die Hubble-Konstante ist sehr ungenau bestimmt.



102.3 Veranschaulichung eines offenen, geschlossenen und eines flachen Universums



102.4 Ein offenes Universum expandiert für immer, ein geschlossenes beginnt ab einem bestimmten Zeitpunkt wieder zu schrumpfen.

Aus der Erforschung der Quasare erhofft man sich weitere Erkenntnisse über die Entstehung und Entwicklung des Kosmos.

15.7 Kosmologie

Die modellmäßige Beschreibung des Kosmos ist nach derzeitigem Wissensstand sehr schwierig. Es gibt jedoch einige Hypothesen, die nebeneinander bestehen können. Folgende Fragestellungen gibt es zur räumlichen und zeitlichen Struktur des Kosmos:

- Ist die Masse im Kosmos endlich oder unendlich?
- Ist der Raum euklidisch?
- Gilt das Gravitationsgesetz auch über große Entfernungen?
- Kann eine statische Welt existiern?

In der Kosmologie werden Modelle erstellt, die in sich widerspruchsfrei sein müssen und mit den vorhandenen Beobachtungen übereinstimmen.

Ein Beispiel für eine widersprüchliche Annahme ist das sogenannte *Olbersche Paradoxon*. Es fordert, daß die Materie im Weltall gleichmäßig verteilt ist mit endlicher Dichte, einen unendlich großen euklidischen Raum, die Gültigkeit des Gravitationsgesetzes und eine statische Welt.

Diese Annahmen führen zu einem Widerspruch: Das Volumen einer Kugel steigt mit der dritten Potenz des Radius, die Helligkeit und die Gravitationskraft nehmen jedoch nur mit dem Quadrat der Entfernung ab. Dies würde bedeuten, daß es unendlich große Gravitationskräfte und eine unendlich hohe Helligkeit geben müßte.

Im folgenden werden die in vielfältigen und aufwendigen Meßreihen gewonnenen Daten und die möglichen Folgerungen daraus dargestellt:

Hubble-Beziehung

Die Spektrallinien von Galaxienspektren zeigen eine Rotverschiebung. λ_o ist die Wellenlänge bei einem ruhenden Objekt und λ die verschobene Wellenlänge. Für die relative Verschiebung z gilt:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_o}{\lambda_o}$$

Ist z positiv, liegt eine Rotverschiebung vor. Diese läßt sich durch den Dopplereffekt erklären. Galaxien die 20 Millionen Lichtjahre von uns entfernt sind, weisen eine Rotverschiebung von z = 0,001 auf, 10 Milliarden Lichtjahre entfernte eine Verschiebung von 0,75.

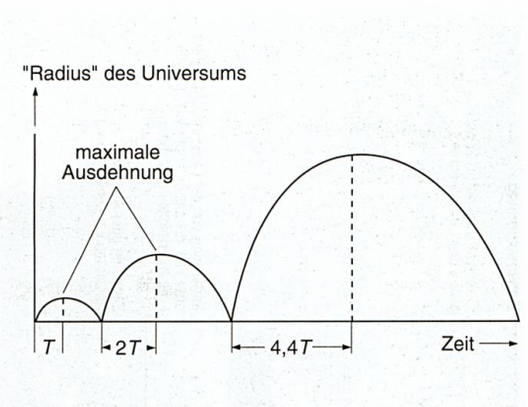
Hubble entdeckte, daß sich sehr viele Galaxien von uns entfernen. Dabei stellte er einen linearen Zusammenhang zwischen der Entfernung R von der Erde und der Fluchtgeschwindigkeit v auf: $R \sim v$

Hubble-Beziehung
$v = H \cdot R$
H ist die Hubble-Konstante. Sie hat einen Wert von (75 ± 25) km s^{-1} Mpc^{-1}.
R wird in Mpc gemessen.

Die beobachteten Fluchtgeschwindigkeiten der Galaxien lassen vom derzeitigen Stand aus drei Möglichkeiten zu: ein *geschlossenes,* ein *offenes* und ein *flaches Universum*. Gekrümmte dreidimensionale Räume sind schwer vorstellbar. Man kann sie jedoch durch gekrümmte Flächen im dreidimensionalen Raum veranschaulichen (Abb. 102.3).

Das Analogon zum flachen Universum ist eine Ebene. Die Winkelsumme im Dreieck beträgt 180^o. Dem offenen Univerum entspricht eine Sattelfläche, die Winkelsumme im Dreieck ist kleiner als 180^o. Das geschlossene Universum ist analog zur Oberfläche einer Kugel, die Winkelsumme ist dabei größer als 180^o.

Ein offenes Universum bedeutet, daß es sich immer ausdehnen wird, ein geschlossenes, daß die Expansionsgeschwindigkeit auf Null abnimmt und schließlich ihr Vorzeichen umkehrt: Das Universum beginnt wieder zu schrumpfen.
Aus der Annahme eines geschlossenen Universums läßt sich folgende Hypothese ableiten: Der Kosmos durchläuft zyklisch Phasen der Kontraktion und der Expansion. Dabei dauert jede nachfolgende Periode länger und hat eine größere Ausdehnung als die vorhergehende (Abb. 103.1).



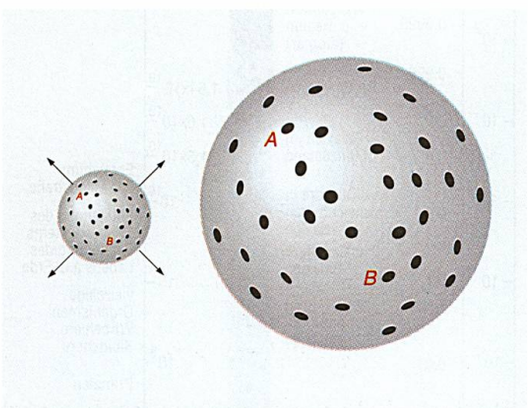
103.1 Ist das Universum geschlossen, dann durchläuft es zyklische Phasen der Kontraktion und der Expansion.

Kosmologisches Postulat

Astronomische Beobachtungen haben gezeigt, daß die großräumige Massenverteilung sich im wesentlichen nicht zu ändern scheint, auch wenn man zu größeren Distanzen übergeht. Davon ausgehend denkt man sich Sterne, Galaxien und Galaxienhaufen gleichmäßig über den ganzen Raum verteilt. Diese Idealisierung ist eine Voraussetzung für die modellhafte Beschreibung des Kosmos als Ganzes. Daraus ergibt sich das *kosmologische Postulat* oder *Weltpostulat:*

Das ganze Weltall ist homogen und isotrop, das bedeutet, die Welt im Großen bietet von jedem Punkt aus den gleichen Anblick.

Veranschaulicht man das Universum durch einen Luftballon, indem man auf der Oberfläche die Galaxien als Punkte einzeichnet, zeigt sich beim Aufblasen, daß sich die Entfernung der Galaxien vergrößert. Einander entsprechende Entfernungen wachsen im selben Verhältnis. Als Beobachter in einem beliebigen Punkt stellt man fest, daß sich alle Punkte in allen Richtungen entfernen, die Struktur jedoch gleichbleibt (Abb 103.2).



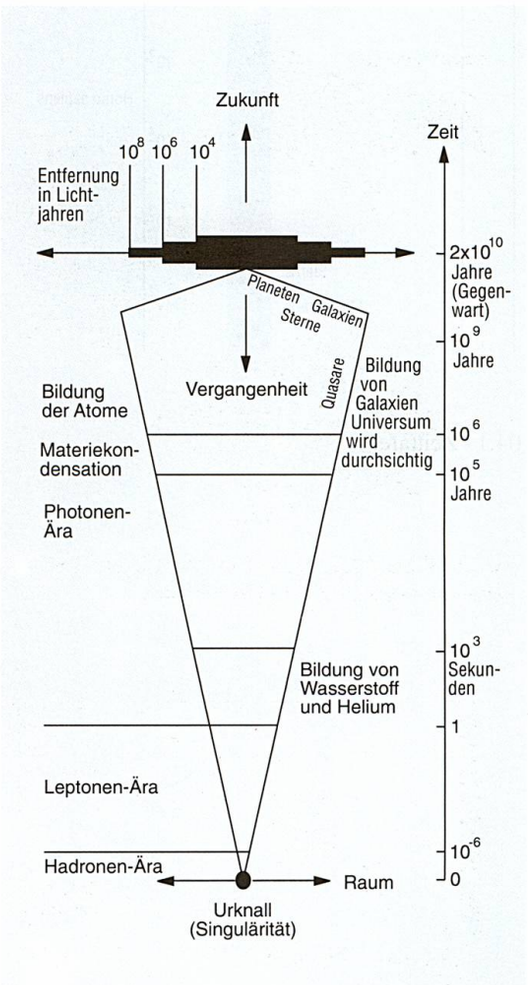
103.2 Als Beobachter in einem beliebigen Punkt stellt man fest, daß sich alle Punkte in allen Richtungen entfernen, die Struktur jedoch gleichbleibt.

Kosmische Hintergrundstrahlung

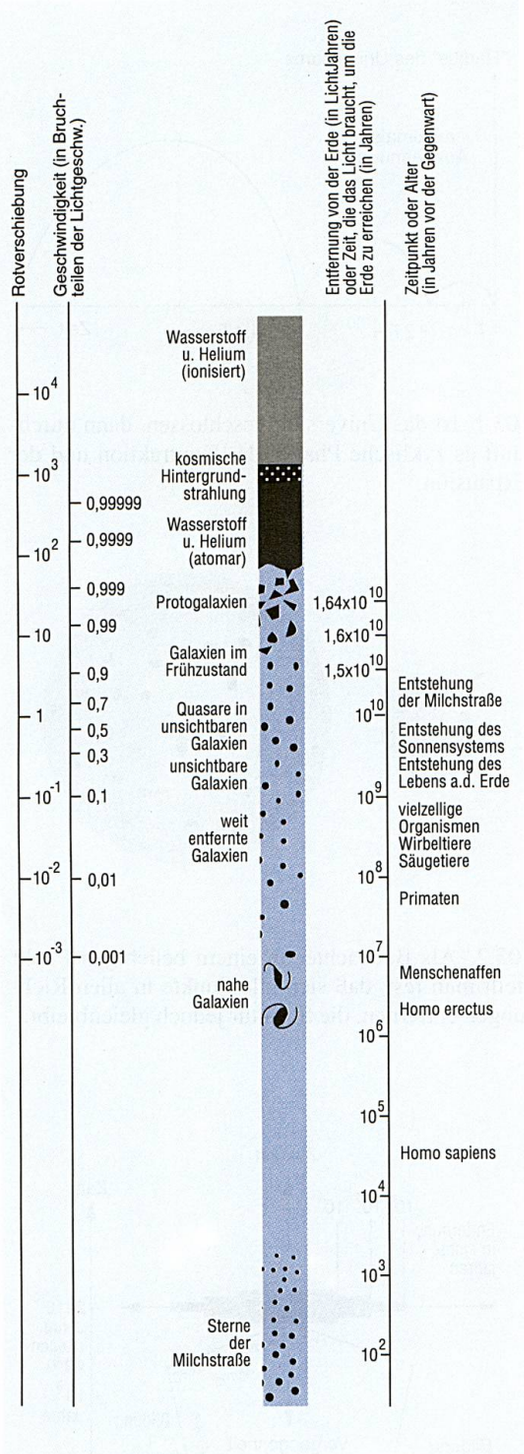
Die kosmische Hintergrundstrahlung ist einer der Beweise für das kosmologische Postulat. Diese Mikrowellenstrahlung, die von *A. Penzias* und *W. Wilson* im Jahr 1965 entdeckt wurde, ist in ihrer Intensität nach allen Himmelsrichtungen hin gleich groß. Sie entspricht der Strahlung eines idealen schwarzen Körpers mit einer Temperatur von (2,73 ± 0,05) K. Da die Hintergrundstrahlung gleichmäßig von allen Richtungen herkommt, ist ihre Herkunft von mehreren Strahlungsquellen derzeit undenkbar. 1992 wurden Schwankungen in der Hintergrundstrahlung festgestellt.

Urknall

Die Ursache der kosmischen Hintergrundstrahlung könnte der *Urknall* oder *Big Bang* vor ungefähr $20 \cdot 10^9$ Jahren gewesen sein. Aus einem (für uns unvorstellbaren) Punkt unendlich hoher Dichte (einer sogenannten *Singularität*) entwickelte sich das Universum.
Nach dieser Hypothese herrschten in den ersten tausendstel Sekunden des Universums so hohe Temperaturen, daß eine fortwährende Umwandlung von Materie in Energie und umgekehrt stattfand. Aus einem Proton und Antiproton etwa entstanden zwei energiereiche Photonen, aus Photonen entstanden Nukleonen und ihre Antiteilchen. Dabei ist es zu einem Ungleichgewicht zwischen Materie und Antimaterie gekommen. Die zeitliche Grenze der Beschreibungsmöglichkeiten des Geschehens liegt bei 10^{-43} Sekunden, der sogenannten Planck-Zeit. Die gewohnte Interpretation von Raum und Zeit versagt in dem Bereich vorher. Die Planck-Zeit wird von vielen Kosmologen als vorläufiger Zeitpunkt der Entstehung unseres Weltalls betrachtet, die Zeit davor offen gelassen.
Neue experimentelle Tatsachen, genauere Meßmethoden lassen jedoch erkennen, daß es momentan kein befriedigendes Modell gibt. Zum Beispiel ist die Frage offen, was zu Beginn des Urknalls war, was davor, oder ob das kosmologische Postulat wirklich allgemein gültig ist.



103.3 Urknall - Vergangenheit - Gegenwart - Zukunft



104.1 Zeittafel

Die nebenstehende Zeittafel gilt unter der Voraussetzung, daß das Universum durch den Urknall entstanden ist und sich immer weiter ausdehnt. Objekte entfernen sich dabei umso schneller, je größer ihre Entfernung ist. Bewegt sich ein Körper, der eine elektromagnetische Strahlung aussendet, vom Beobachter weg, stellt dieser eine Rotverschiebung des Spektrums fest (Dopplereffekt - vgl. S. 13 ff). Aus der Rotverschiebung können folgende Schlüsse gezogen werden, die das sich entfernende Objekt betreffen: Geschwindigkeit, Entfernung und Alter. Als Maß für die Rotverschiebung gilt der Ausdruck:

$z = \Delta\lambda/\lambda_o$. Dabei ist λ_o die Ruhewellenlänge, $\Delta\lambda$ die Verschiebung der Spektrallinien im Spektrum.

Aus den Entfernungen kann die Zeitdauer berechnet werden, die das Licht braucht, um die Erde zu erreichen. Da die Lichtgeschwindigkeit einen endlichen Wert besitzt, kann man auf diese Weise gewissermaßen in die Vergangenheit des Universums blicken.

Modellrechnungen zufolge entstanden die ersten Galaxien einige hundert Millionen bis ein paar Milliarden Jahre nach dem Urknall. Mit Hilfe des Satelliten COBE konnten 1992 Galaxien meßtechnisch erfaßt werden.

Kontrollfragen

1. Wer liefert die Informationen über die kosmischen Objekte?
2. Was versteht man unter 1 Parsec?
3. Erkläre die scheinbare und die absolute Helligkeit. Was ist der Entfe rnungsmodul?
4. Wie ist die Leuchtkraft definiert?
5. Was versteht man unter der Spektralanalyse?
6. Wie können Sternspektren eingeteilt werden?
7. Was ist die Aufgabe der Radioastronomie?
8. Beschreibe den Aufbau der Sonne.
9. Welche Sonnenschicht ist von der Erde aus sichtba
10. Was versteht man unter Sonnenflecken und Protuberanzen?
11. Was ist die Korona?
12. Beschreibe die inneren und äußeren Planeten unseres Sonnensystems.
13. Was sind die Planetoiden?
14. Wie ist ein Komet aufgebaut?
15. Beschreibe die Eigenschaften von Meteoriten.
16. Wie erfolgt die Energieerzeugung in einem Stern?
17. Welche Zyklen gibt es bei der Kernfusion?
18. Wann hört die Kernfusion auf?
19. Beschreibe das Hertzsprung-Russell-Diagramm.
20. Wie läuft die Sternentwicklung ab? Wovon ist sie abhängig?
21. Was sind Schwarze Löcher?
22. Was versteht man unter dem Schwarzschildradius?
23. Wann entstehen Novae und Supernovae?
24. Was sind Pulsare?
25. Welche Bedeutung haben Doppelsterne?
26. Erkläre den Begriff Galaxie? Welche Formen sind möglich?
27. Beschreibe den Aufbau der Milchstraße.
28. Was sind Galaxienhaufen?
29. Auf welche Weise wurden Quasare entdeckt?
30. Beschreibe das Olbersche Paradoxon.
31. Wie lautet die Hubble-Beziehung?
32. Welche Möglichkeiten sind für den Aufbau des Universums derzeit denkbar?
33. Wie lautet das kosmologische Postulat?
34. Was versteht man unter der kosmischen Hintergrundstrahlung?
35. Was versteht man unter dem Urknall?

1 0,866 c

2 $6{,}63 \cdot 10^{-8}$ s

3 2,60 m

4 0,997 c

5 0,8 c

6 0,887 c

7 $6{,}45 \cdot 10^{-30}$ kg

8 0,943 c

9 0,548 c

10 $9 \cdot 10^{-13}$ J

11 $2{,}51 \cdot 10^{-30}$ kg

12 Es ist ein Computerprogramm zu erstellen.

13 1,98 · 106 m/s

14 a) $1{,}08 \cdot 10^{22}$ b) $8{,}50 \cdot 10^{22}$

15 $2{,}5 \cdot 10^{-10}$ m

16 $1{,}6 \cdot 10^{-14}$ m

17 4,5 eV

18 0,4 eV

19 102

20 13 W/m^2

21 50 min

22 $P \sim a^2$ $a = \frac{v^2}{R}$ $P \sim \frac{1}{R^2}$

23 $F_{el} = q \cdot E$ $E = B \cdot c$ $F_m = q \cdot v \cdot B$

24 a) $\Delta f = \frac{c}{\lambda^2} \cdot \Delta\lambda$ b) $8 \cdot 10^{-13}$ m

25 16

26 0,44 µm, blau-violett
AgBr ist unempfindlich gegenüber grünem, gelbem und rotem Licht. Durch Zusatz von Farbstoffen kann eine fotografische Schicht auch für diese Farben sensibilisiert werden. So ist etwa ein panchromatischer Film übermäßig rotempfindlich.

27 Die Photonen des Rotlichts besitzen eine zu geringe Energie, um das Fotopapier zu schwärzen.
Der blau-violette Anteil des Weißlichts schwärzt das Fotopapier.

28 6

29 1,94 eV

30 1,31 eV

31 0,91 V

32 $7{,}5 \cdot 10^6$

33 a) $5 \cdot 10^{12}$ b) 10^6

34 25 pm

35 a) $4 \cdot 10^{-5}$ eV b) 0,62 MeV

36 0,1 µm

37 10,2 eV

38 1,88 µm, *I R*

39 a) 6 b) 6

40 $2{,}47 \cdot 10^{15}$ Hz 0,12 µm UV
$3{,}29 \cdot 10^{15}$ Hz 0,091 µm UV

41 Es müssen Atome im ersten angeregten Zustand vorkommen. Die Photonenenergie muß 1,89 eV betragen.

42 a) 53 µm b) 6,57 · 106 Hz c) 6,56 · 106 Hz

43 $2\,n^2$

44 $1\,s^2$ $2\,s^2$ $2p^6$ 3 s

45 419 V

46 0,486 nm

47 0,025 nm

48 92

49 0,114 nm

50 $10\ \mathrm{MW/mm^2}$

51 83 mm

52 Die Strahlungsintensität vergrößert sich auf das 62 500fache.

53 Der Frequenzabstand $\Delta f = \frac{c}{2\,l}$ der Moden nimmt zu.
Daher liegen weniger Eigenfrequenzen innerhalb der Frequenzbreite des Laserübergangs.

54 ${}^{6}_{3}\mathrm{Li}$: 3 p und 3 n ${}^{7}_{3}\mathrm{Li}$: 3 p und 4 n

55 1,007976

56 $10^{17}\ \mathrm{kg/m^3}$

57 934 MeV

58 0,0304 u ; 7,1 MeV

59 1 nCi = 37 Bq ; 1 pCi = 0,037 Bq

60 $3 \cdot 10^{6}$ g

61 $1{,}2 \cdot 10^{4}$ Bq/g ; $3{,}3 \cdot 10^{7}$ Ci/g

62 $1{,}1 \cdot 10^{9}$ Jahre

63 Ca 40

64 15,5 h

65 17,4 Ci

66 $1{,}39 \cdot 10^{7}$ m/s

67 $2{,}82 \cdot 10^{8}$ m/s

68 0,19 Bq

69 $5{,}187 \cdot 10^{11}$; 8760 Jahre

70 a) ${}^{3}_{1}\mathrm{H} \text{ --- } \beta^- \text{ --->} {}^{3}_{2}\mathrm{He}$ (stabil)
b) ${}^{60}_{27}\mathrm{Co} \text{ --- } \beta^- \text{ --->} {}^{60}_{28}\mathrm{Ni}$ (stabil)

71 $8{,}19 \cdot 10^{-13}$ J ; $2{,}28 \cdot 10^{7}$ kWh:
948 MW-Tage ; $2{,}73 \cdot 10^{6}$ kg Steinkohle

72 1 Gy = 0,026 C/kg

73 3562 Bq

74 $9{,}1 \cdot 10^{-8}$ Sv/h 9,1 µrem/h ; 9,1 µR/h ($Q = 1$)

75 $\frac{1}{16}\ \frac{\mathrm{Sv}}{\mathrm{h}}$

76 1 : 100

77 0,7

Personen- und Sachregister

A
Atombau 39ff
Absorption von Strahlung 55
Absorptionsspektrum 36f
Aktivität 65f, 75
Allgemeine Relativitätstheorie 16ff
Alpha-Strahlung 66
Alpha-Teilchen 21f, 61, 66
Anderson, Carl David (geb. 1905) 80
angeregter Zustand 34
angereichertes Uran 73f
Antiatome 80
Antihelium 80
Antineutrino 67, 80
Antiphoton 80
Antiquarks 83ff
Antiteilchen 80
Anwendung von Radioisotopen 70f
Anwendungen von Laserlicht 59
Aphel 91
Äquivalenz von Masse und Energie 12f
Äquivalenzdosis 75
Äquivalenzprinzip 17
Asteroiden 96
Astronomie 88ff
Astronomie, sphärische 88
astronomische Einheit (AE) 88
Astrophysik 88
atomare Masseneinheit 20
atomarer Dipol 27
Atomdurchmesser 21
Atomgröße 20f
Atomistik 20ff, 22
Atomkern 60ff
Atommasse 20, 61
Atomstruktur 21f
Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Elektronen 47
Auger-Effekt 53
Austauschteilchen 83f

B
Bahndrehimpuls 39
Bahndrehimpulsquantenzahl 39f
Balmer-Serie 35, 90
Baryonen79ff
Becquerel (Einheit) 65
Becquerel, Antoine Henri (1852 - 1908) 64
Bedeckungsveränderliche 100
Besetzungsumkehr 55
Bestrahlung, äußere 77f
Bestrahlung, innere 78
Beta-Strahlung 66f
Bindungsenergie 22f, 62f
binomische Reihe 12
biologische Wirkung von Strahlung 77
Blasenkammer 70
Blauverschiebung 15
Bohr, Niels (1885 - 1962) 33
Bohr-Sommerfeldsches Atommodell 39
Bohrsche Postulate 33
Bohrsches Atommodell 33ff, 45
Boltzmannkonstante 23
Bootstrap-Hypothese 85
Born, Max (1882 - 1970) 46
Braggsche Formel 53
Bremsstrahlung 52
Brewster-Fenster 58
Broglie, Louis de (1892 - 1987) 41
Brownsche Bewegung 23

C
C-14-Methode 70
CERN 85, 87
Chadwick, James (1891 - 1974) 60
charakteristische Röntgenstrahlung 52f
Chromosphäre 92
Cockcroft, John (1897 - 1967) 85
Compton, A. H. (1892 - 1962) 31, 79
Comptoneffekt 31, 45, 68
Computertomografie 51
Coulombsches Gesetz 24
Coulombkraft 33
Curie (Einheit) 65

D
Dalton, John (1766 - 1844) 20
Davisson, C. J. (1881 - 1958) 41
De-Broglie-Wellenlänge 41
Debye-Scherrer-Verfahren 54
Determinismus 41
Dirac, Paul (1902 - 1984) 47
diskrete Energiewerte 46
Doppelspaltexperiment 42, 44
Doppelsterne 100
Doppelsterne, spektroskopische 100
Dopplereffekt 13ff, 100, 104
Dopplerverbreiterung 15
Dosisleistung 76
Drehimpulsquantelung 30, 33
Dualismus 41f
Dualismus des Lichtes 32

E
Eigendrehimpuls 79
Eigenschaften von Laserlicht 58f
Eigenschwingungen eines Resonators 56
Einstein, Albert (1879 - 1955) 5
elektrische Feldstärke 24
elektrisches Feld 24
Elektrodynamik 28
elektromagnetische Welle 25
elektromagnetisches Feld 24ff
elektromagnetisches Spektrum 25
Elektron 21
Elektron-Positron-Paar 54, 80
Elektronenmikroskop 50
Elektronvolt 21
Elementarteilchen 79ff
Emission, induzierte 55
Emission, spontane 55
Emission, stimulierte 55
Emissionsspektrum 36
Energiedichte 24ff
Energiedosis 75
Energieerzeugung in einem Stern 97f
Energieniveau 34f
Energiequant 29
Energiestufen 46
Energiezustände 34f
entartete Bahnen 39f
Entfernungsmodul 89
Erhaltungsgrößen 81

F
Farben von Quarks 83ff
Fermi, Enrico (1901 - 1954) 80

Flavor eines Quarks 83ff
Franck, James (1882- 1964) 37
Franck-Hertz-Versuch 37
Fraunhofersche Linien 37, 93
Frequenzbedingung 33

G

Galaxien 100
Galaxienhaufen 101
Galaxis 100f
Galilei-Transformation 6
Gamma-Strahlung 67f
Geiger-Müller-Zähler 69
gekrümmter Raum 18f
Gell-Mann, Murray (geb. 1915) 83, 85
Geodäte 19
Germer, L.J. (1886 - 1971) 41
Gleichzeitigkeit 9f
Gluonen 83ff
Grand Unified Theory 84
Gravitations-Rotverschiebung 17
Graviton 83
Gray (Einheit) 75
Größenklasse 88f
Grundzustand 34
GUT 84

H

Hadronen 79ff
Halbleiterdetektor 69
Halbwertsdicke 78
Halbwertszeit 64ff, 75
Halleyscher Komet 96
Händigkeit eines Elementarteilchens 81f
Härte von Röntgenstrahlen 51
Hauptquantenzahl 33
Heisenberg, Werner (1900 - 1976) 44
Heisenbergesche Unschärferelation 44f, 83
Helium-Fusion 98
Helium-Neon-Laser 58
Helligkeit 88f
Helligkeit, absolute 89
Helligkeit, scheinbare 88f
Hertz, Gustav (1887 - 1975) 37
Hertz, Heinrich (1857 - 1894) 25
Hertzscher Dipol 26
Hertzsprung-Russel-Diagramm 98f
Hubble-Beziehung 102

I

Indikatormethode 70
Inertialsystem 6
inkohärente Strahlung 28
instabile Kerne 64ff
Intensität 26
Intensitätsmaximum 89
Interferenz 28
Ionisationsdetektoren 69
Ionisationskammer 69
Ionisierungsdosis 75
Isotop 61

J

Jupiter 94

K

Kaon 79ff
Kepler-Gesetze 91
Kernenergie 72ff
Kernfusion 74, 97
Kernkräfte 61f
Kernladungszahl 60ff
Kernmodelle 63
Kernspaltung 72ff
Kettenreaktion 73
kinetische Gastheorie 23
klassische Physik 5, 28
Kohärenz 27
Kohlenstoff-Fusion 98
Kometen 96
Korona 92
kosmische Hintergrundstrahlung 103
Kosmologie 88, 102ff
kosmologisches Postulat 103
Krümmungsindex 19

L

Längenkontraktion 8
Large Electron-Positron Colloider 87
Laser 55ff
Laserlicht 58f
Lasertypen 57f
Laue, Max von (1879 - 1960) 53
Laue-Diagramm 53
LEP 87
Leptonen 79ff
Leuchtkraft 89
Lichtgeschwindigkeit 6f
Lichtjahr (Lj) 88
Lichtquant 30ff
Lichtstreuung 28
Lichtuhr 7ff
Linearbeschleuniger 85f
Linienspektrum 36
linkshändiges Teilchen 81
Linksquarz 81
Lorentz-Transformation 9
Lorentzkraft 24f
Loschmidt, Joseph (1821 - 1895) 20
Loschmidtkonstante 20
Lyman-Serie 35

M

magnetische Flußdichte 24
magnetische Linse 50
magnetische Quantenzahl 39f
magnetisches Feld 24
Mars 94
Massendefekt 62f
Massenspektrometer 61
Massenzahl 60ff
Materiewelle 42f
Maxwell, James Clerk (1831 - 1879) 5
Maxwellsche Elektrodynamik 5
Maxwellsche Gleichungen 25
Merkur 93
Mesonen 79ff
Meteor 97
Meteorit 97
Milchstraße 100f
Millikan, R. A. (1868 - 1953) 21, 79
Moden eines Resonators 56f
Moderator 73
Mol 20
monochromatische Welle 27
Mößbauer, Rudolf (geb. 1929) 18
Myon 8, 79, 80ff

N

Nachweis von Radioaktivität 69f
Nebelkammer 70
Neptun 95

Neutrino 67
Neutron 60ff, 79ff
Neutronenstern 99
Neutronenzahl 60ff
Neutron-Neutron-Wechselwirkung 62
Newton, Isaac (1642 - 1727) 5
Newtonsche Mechanik 5, 28
Nova 99
Nukleonen 60ff
Nuklidkarte 60ff, 67, 68, 72
Nullpunktsenergie 46, 48

O
Olbersches Paradoxon 102
optischer Dopplereffekt 13ff
optisches Fenster 88
Orbital 46ff

P
Paarbildung 54, 68, 80
Parallaxe 88
Parität 80ff
Parität, gerade 81
Parität, ungerade 81
Paritätserhaltung 81
Paritätsverletzung 81f
Parsec (pc) 88
Paschen-Serie 35
Pauli, Wolfgang (1900 - 1958) 39
Pauli-Prinzip 39
Perihel 91
Periheldrehung des Merkur 18
Photoeffekt 30f, 68
Photon 11, 30ff, 55f, 79ff
Photosphäre 92
Pion 79ff
Planck, Max (1858 - 1947) 29
Planck-Konstante 29ff
Plancksches Wirkungsquantum 29ff
Planeten 91, 93ff
Planeten, äußere 91
Planeten, innere 91
Planetoiden 96
Plasma 74
Pluto 95
Positron 80
Potentialtopf 23, 45f, 63
Potentialwall 49
Prismenspektrograph 89
Proportionalzähler 69
Protogalaxien 100
Proton 60ff, 79
Proton-Neutron-Wechselwirkung 62
Proton-Proton-Wechselwirkung 62
Pulsar 99

Q
Q-Faktor 75
Quantelung des Drehimpulses 30, 33
Quantenbedingung 33
Quantenchromodynamik 83
Quantenfeldtheorie 82
Quantenmechanik 41ff
quantenmechanisches Atommodell 45ff
Quantennatur elektromagnetischer Strahlung 29ff
Quantenobjektge 44
Quantenzahl 46
quantisierte Energie 46
Quarks 83ff
Quasare 101

R
radioaktive Zerfallsreihe 64
radioaktiver Abfall 74
Radioaktivität 64ff
Radioaktivität, künstliche 69
Radioaktivität, natürliche 68
Radiofenster 88
Radiofrequenzstrahlung 91
Radionuklid 64ff
Rastertunnelmikroskop 49f
Reaktor, thermischer 73f
rechtshändiges Teilchen 81
Rechtsquarz 81
Regelstäbe 73
relative Atommasse 20
relativistische Gesamtenergie 12f
relativistische Geschwindigkeitsaddition 10
relativistische Masse 11ff
relativistische Zeitdehnung 7ff
Relativität der Gleichzeitigkeit 10
Relativitätsprinzip 6
Relativitätstheorie 5ff
Resonanzfluoreszenz 37
Resonator eines Lasers 56
Riemann, Georg F.B. (1826 - 1866) 19
Ring- und Mondsysteme 95f
Röntgen, Wilhelm Conrad (1845 - 1923) 51
Röntgenastronomie 88
Röntgenmikroskopie 54
Röntgenspektrum 52
Röntgenstrahlung 51ff
Röntgenstrukturanalyse 53f
Roter Riese 99
Roter Überriese 99
Rotverschiebung 15, 17
Rubin-Laser 57f
Ruhemasse 11
Rutherford, Ernest (1871 - 1927) 21f
Rutherford-Streuung 21
Rutherforsches Atommodell 20ff, 33
Rydbergfrequenz 35, 52

S
Saturn 95
Sauerstoff-Fusion 98
Schalen eines Atoms 39f
Scheibengalaxien 100
Schrödinger, Erwin (1887 - 1961) 46f, 79
Schrödinger-Gleichung 46
Schwarzes Loch 99f
Schwarzschild-Radius 99
schwere Masse 17
Siedewasserreaktor 73
Sievert (Einheit) 75
Silizium-Fusion 98
SO-Galaxien 100
Sommerfeld, Arnold (1868 - 1951) 39
Sonne 92f
Sonnenflecken 92
Sonnenspektrum 92f
Sonnensystem 91ff
Sonnenwind 93
Spektralanalyse 90
Spektralklassen 90
Spektrallinie 36, 45
Spektraltypen 90
Spektren 89f
Spektrograph 89
Spektrum 36f
Spezielle Relativitätstheorie 6ff
Spin 39, 79
Spinquantenzahl 39f
Spiralgalaxien 100
Standardmodell (Wechselwirkungen) 82
Sternentwicklung 98ff
Sternklassen 89
stochastische Verteilung 43

Stoffmenge 20
Strahlenbelastung 76f
Strahlenbelastung, äußere 76
Strahlenbelastung, innere 76
Strahlenbelastung, natürliche 76
Strahlenbelastung, zivilisatorische 76f
Strahlenfrühwarnsystem 76
Strahlenschutz 75ff
Strahlentherapie 70
Strahlungsgrößen 75f
Strahlungsquantelung 31
subatomare Teilchen 79
Supernova 99
Symmetrie (Erhaltungsgröße) 80ff
Symmetriebrechung 82
Synchronzyklotron 86
Synchrotronstrahlung 27

T
Targets 85
Teilchenbeschleuniger 85f
Teilchenspurendetektoren 70
Theory of Everything 84
thermische Bewegung 23
thermische Neutronen 72f
thermischer Reaktor 73f
Thomson, Joseph John (1856 - 1940) 21
Thorium-Reihe 68
Titius-Bode-Regel 96
TOE 84
Tokamak-Anordung 74
träge Masse 16
Trägheitskräfte 16
Tunneleffekt 49f
Tunnelstrom 49

U
U 235 72ff
Umbesetzung von Energieniveaus 55f
Universum 102f
Universum, flaches 102f
Universum, geschlossenes 102f
Universum, offenes 102f
Unschärferelation 44f, 83
Unterschale 39f
Uran, angereichertes 73f
Uranus 95
Urgrund 85
Urknall 103

V
Vektorboson 84
Venus 93f

W
Wahrscheinlichkeitswelle 42f
Wasserstoff-Fusion 97
Wasserstoffatom 33ff, 48
Wasserstoffbrennen 97
Wechselfeld 25
Wechselwirkung, elektromagnetisch 82ff
Wechselwirkung, elektroschwache 82
Wechselwirkung, gravitative 82ff
Wechselwirkung, schwache 82ff
Wechselwirkung, starke 82ff
Wechselwirkungen 82ff
Weißer Zwerg 98f
Welle-Teilchen-Dualismus 41f
Welt innerhalb von Welten 85
Weltäther 5
Wiensches Verschiebungsgesetz 29

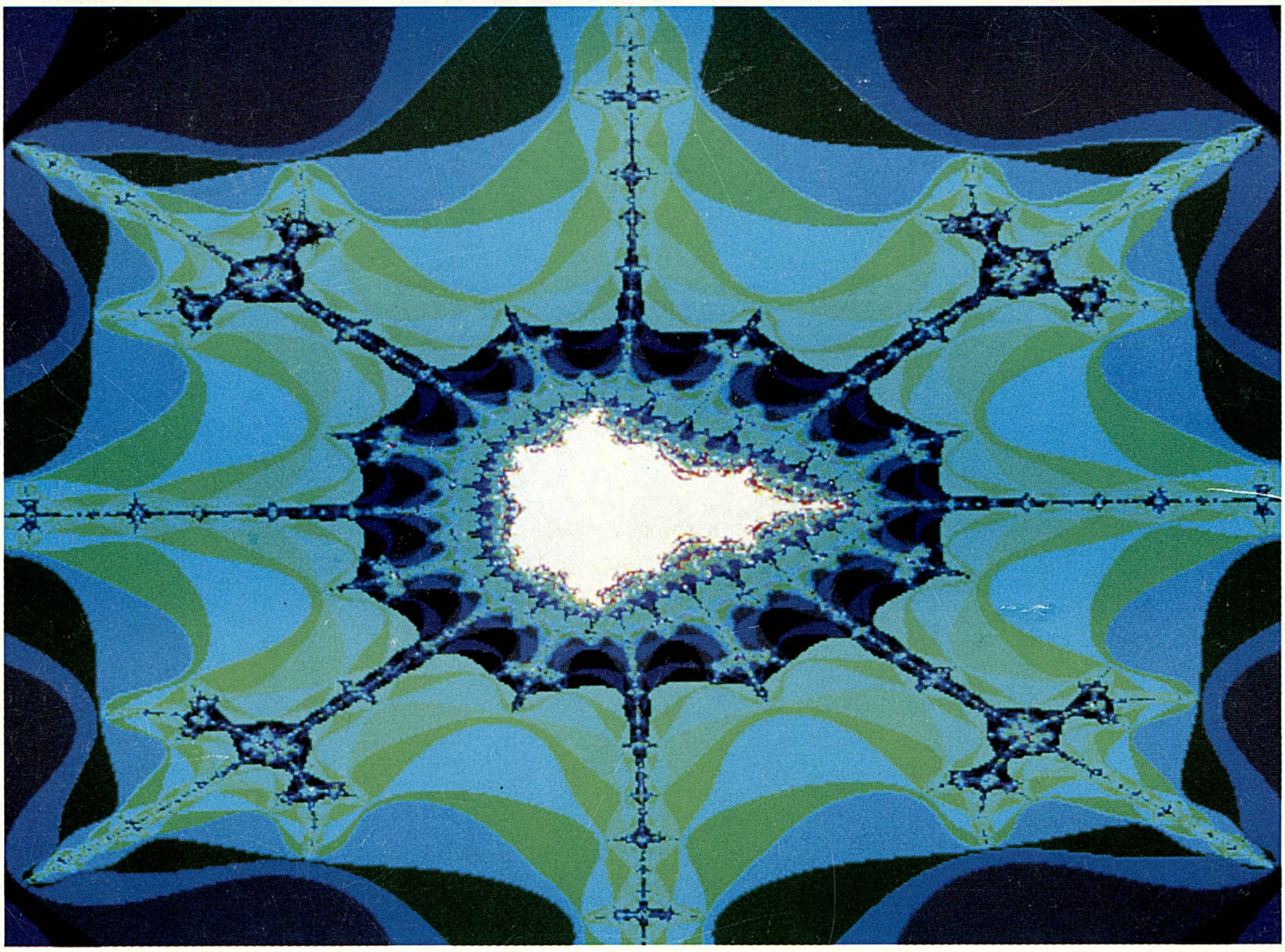
X
X-Strahlen 51

Z
Zeitdilatation 7f, 18
Zerfallsgesetz 64f
Zerfallskonstante 64
Zirkularbeschleuniger 86
Zwillingsparadoxon 15f
Zyklotron 86

Das Periodensystem der Elemente

	Hauptgruppen I	II	Nebengruppen								III
1. Periode	1,008 **H** 1 Wasserstoff										
2. Periode	6,94 **Li** 3 Lithium	9,01 **Be** 4 Beryllium									10,81 **B** 5 Bor
3. Periode	22,99 **Na** 11 Natrium	24,31 **Mg** 12 Magnesium	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	VIIIa	Ia	IIa	26,98 **Al** 13 Aluminiu
4. Periode	39,10 **K** 19 Kalium	40,08 **Ca** 20 Calcium	44,96 **Sc** 21 Scandium	47,88 **Ti** 22 Titan	50,94 **V** 23 Vanadium	52,00 **Cr** 24 Chrom	54,94 **Mn** 25 Mangan	55,85 **Fe** 26 Eisen	58,93 **Co** 27 Cobalt	58,69 **Ni** 28 Nickel	63,55 **Cu** 29 Kupfer	65,37 **Zn** 30 Zink	69,72 **Ga** 31 Gallium
5. Periode	85,47 **Rb** 37 Rubidium	87,62 **Sr** 38 Strontium	88,91 **Y** 39 Yttrium	91,22 **Zr** 40 Zirkonium	92,91 **Nb** 41 Niob	95,94 **Mo** 42 Molybdän	(98,91) **Tc** 43 Technetium	101,07 **Ru** 44 Ruthenium	102,91 **Rh** 45 Rhodium	106,42 **Pd** 46 Palladium	107,87 **Ag** 47 Silber	112,41 **Cd** 48 Cadmium	114,8 **In** 49 Indium
6. Periode	132,91 **Cs** 55 Cäsium	137,33 **Ba** 56 Barium	138,91 **La** 57 Lanthan	178,49 **Hf** 72 Hafnium	180,95 **Ta** 73 Tantal	183,85 **W** 74 Wolfram	186,2 **Re** 75 Rhenium	190,2 **Os** 76 Osmium	192,22 **Ir** 77 Iridium	195,08 **Pt** 78 Platin	196,97 **Au** 79 Gold	200,59 **Hg** 80 Quecksilber	204,3 **Tl** 81 Thallium
7. Periode	(223,02) **Fr** 87 Francium	(226,03) **Ra** 88 Radium	(227,03) **Ac** 89 Actinium	(261) **Ku** 104 Kurtschatovium	(262) **Ha** 105 Hahnium	106	107	108	109				

140,12 **Ce** 58 Cer	140,91 **Pr** 59 Praseodym	144,24 **Nd** 60 Neodym	(146,92) **Pm** 61 Promethium	150,36 **Sm** 62 Samarium	151,97 **Eu** 63 Europium	157,25 **Gd** 64 Gadolinium	158,93 **Tb** 65 Terbium	162,5 **Dy** 66 Dysprosi
232,04 **Th** 90 Thorium	(231,04) **Pa** 91 Protactinium	238,03 **U** 92 Uran	(237,04) **Np** 93 Neptunium	(244,06) **Pu** 94 Plutonium	(243,06) **Am** 95 Americium	(247,07) **Cm** 96 Curium	(247,07) **Bk** 97 Berkelium	(251,0 **Cf** 98 Californi



Buch-Nr. 3944

Kraker - Paill
Physik, Band 4 HTL

© 1992 by Verlag E. DORNER Ges.m.b.H.
Hoher Markt 1, 1010 Wien

ISBN 3 - 7055 - 0073 - 2