Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (http://www.ub.tuwien.ac.at).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/).

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

VIENNA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

DIPLOMARBEIT

Atomare und Subatomare Physik,

aufbereitet für den Schulunterricht

ausgeführt am

Atominstitut der Österreichischen Universität,

Technische Universität Wien

unter der Anleitung von

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Manfried Faber

von

Kenan Ekici

Matrikelnummer 0327824

Wurlitzergasse 62/13

1160 Wien

Wien, im März 2008 Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung 6

1 Quantenphysik

1.1 Einleitung.....7

1.2 Wärmestrahlung , Schwarzkörperstrahlung -Plancksche Strahlungsgesetz.....7

1.3 Photoeffekt (Äußerer lichtelektrischer Effekt).....10

1.4 Photonen.....15

1.5 Compton- Effekt.....15

1.6 Materiewellen.....16

1.7 Technische Bedeutung der Materiewellen.....17

1.8 Ausbau der Quantenphysik.....18

1.8.1 Doppelspaltversuch.....18

1.8.2 Elektronenmikroskop.....20

1.8.3 Heisenbergsche Unschärferelation.....22

1.8.4 Schrödingergleichung.....23

1.8.5 Zusammenfassung.....24

2 Atomphysik

2.1 Die Geschichte des Atoms.....25

2.2 Atommodell.....26

2.2.1 Daltonsche Atommodell.....26

2.2.2 Thomsonsche Atommodell.....27

2.2.3 Rutherfordsche Atommodell.....28

2.2.4 Bohrsche Atommodell.....30

2.3 Quantenmechanik der Atome.....30

2.3.1 Materiewellen im Atom.....30

2.3.2 Orbitale……31

2.4 Periodensystem……33

2.5 Laser……37

2.5.1 Eigenschaften und Anwendungen……39

3. Kernphysik

3.1 Einleitung der Kernphysik……41

3.2 Eigenschaften der Atomkerne……41

3.3 Radioaktivität und Zerfallsgesetz……46

3.4 Alpha-Zerfall……48

3.5 Beta-Zerfall……49

3.6 Gamma-Strahlung……50

3.7 Natürliche Radioaktivität und Zerfallsreihe……51

3.8 Künstliche Radioaktivität……52

3.9 Nachweismethoden radioaktiver Strahlung……53

3.9.1 Ionisationskammer……53

3.9.2 Geiger- Müller Zählrohr……54

3.9.3 Szintillationszähler……54

3.9.4 Halbleiterdetektor (Halbleiterzähler)……55

3.10 Anwendungen der Radioaktivität……55

3.11 Kernspaltung……56

3.12 Kernreaktoren……58

3.13 Kernfusion……60

4.Teilchenphysik

4.1 Teilchenphysik und Elementarteilchen……63

4.2 Fundamentalteilchen……65

4.3 Die Wechselwirkungen……67

4.3.1 Die starke Wechselwirkung……67

4.3.2 Die elektromagnetische Wechselwirkung……67

4.3.3 Die schwache Wechselwirkung……67

4.3.4 Die Gravitation……67

4.4 Teilchenbeschleuniger……67

4.4.1 Linearbeschleuniger……68

4.4.2 Zirkularbeschleuniger……69

4.4.3 Synchrotron……69

Anhang……71

Einheitensystem……71

Einige bedeutende Physiker……73

Literaturverzeichnis……80

DANKE!

Ich bedanke mich ganz herzlich bei Univ. Prof. Dr. Manfried Faber für seine Geduld, seine vorbildliche Betreuung und sein freundliches und lachendes Gesicht. Bei Roman Höllwieser, Thomas Layer, Mario Pitschmann bedanke ich mich für das mühsame Korrekturlesen und ihren freundschaftlichen Beistand.

Außerdem danke ich Univ. Prof. Dr. techn. Helmut Leeb für sein Verständnis und freundliches Entgegenkommen bei der Lösung allfälliger Probleme.

Weiters bin ich meiner Mutter, meinem Vater und meinen Schwestern zu großem Dank verpflichtet; da sie mir bis jetzt durch großzügige finanzielle Unterstützung ein sorgenfreies Studium ermöglicht haben.

Zusammenfassung

Diese Diplomarbeit soll als ein Lehrbuch der Physik für Schüler der Maturastufe dienen.

Folgende zwei Hauptziele soll diese Diplomarbeit verfolgen. Erstens die logische und verständliche Erläuterung der Quanten-, Atom-, Kern- und Teilchenphysik und zweitens durch Besprechung von Versuchen aus dem Alltagsleben die Grundbegriffe und Prinzipien der Physik des 20. Jhdts. aus einer breiten Perspektive verständlich zu machen.

Um diese Zielsetzung zu erreichen ist diese Diplomarbeit auf aktuellen, wichtigen und wertvollen Versuchen und physikalischen Diskussionen aufgebaut worden.

Für eine ansprechende Fachübermittlung der Physik des 20. Jhdts. wurden interessante Anwendungsbeispiele aus anderen wissenschaftlichen Bereichen wie zum Beispiel aus der Medizin und Chemie angeführt.

1 Quantenphysik

1.1 Einleitung

Durch die Entdeckung der speziellen Relativitätstheorie wurden Widersprüche der klassischen Physik (Newton-Mechanik und Elektrodynamik) aufgeklärt. Im Verlauf des 20. Jhdts. konnten mittels der speziellen Relativitätstheorie verschiedene Probleme sowohl auf der theoretischen als auch auf der praktischen Ebene gelöst werden.

Die Abläufe in den atomaren Dimensionen der Materie konnten mit den Gesetzen der klassischen Physik nicht entschlüsselt werden. Genannt seien als Beispiele der Schwarze Strahler, der fotoelektrische Effekt und die Spektrallinien der Atome.

Als die Physiker immer wieder neue Wege zur Beantwortung dieser Fragen suchten, begann in den Anfängen des 20. Jhdts. ein neues Zeitalter der Physik, die Zeit der Quantenphysik. Nun konnten die Problematiken, die Atome, Moleküle und Kerne betreffen, erfolgreicher angegangen werden.

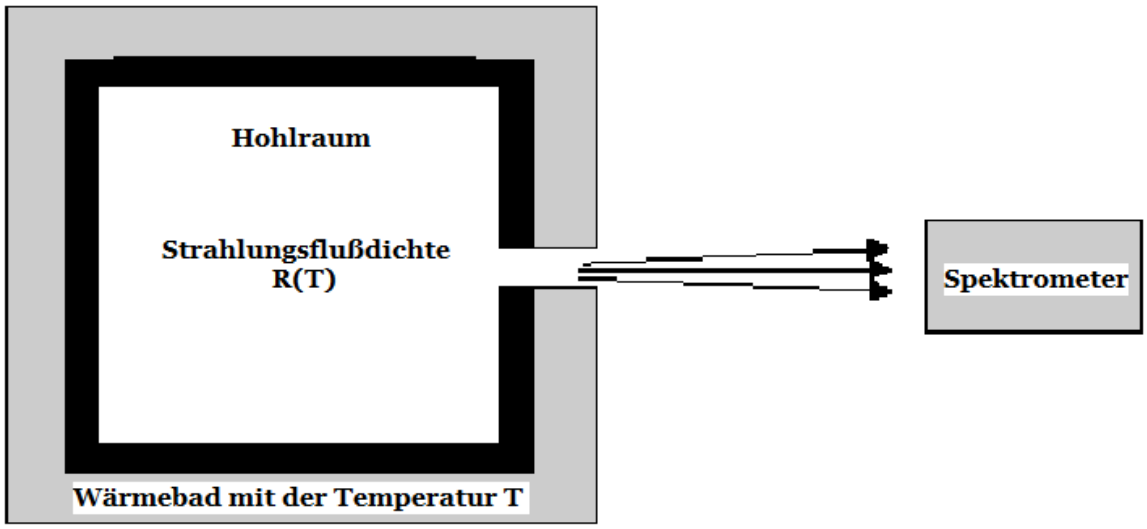
Die erste Grundidee verfolge der deutsche Physiker Max Planck. Die mathematische Entwicklung und weitere Interpretationen erfolgte durch großartige Physiker wie Einstein, Bohr, Schrödinger, De Broglie und Heisenberg.

In dieser Diplomarbeit werden die Gesetze der Quantenphysik in einer einfachen und einführenden Weise den Schülern näher gebracht.

1.2 Wärmestrahlung, Schwarzkörperstrahlung - Plancksche Strahlungsgesetz

Jedes Objekt mit einer nichtverschwindenden Temperatur emittiert Strahlung, die sogenannte Wärmestrahlung. Die Charakteristika dieser Strahlung sind abhängig von der Temperatur bzw. Wärme des Körpers und dessen Eigenschaften. Bei niedrigen Temperaturen ist die Strahlung mit freiem Auge nicht sichtbar. Bei steigender Temperatur beginnen die Objekte rot zu glühen und senden somit sichtbare Strahlung aus. Bei weiterer Temperaturerhöhung strahlen sie dann orange, gelb und schließlich weiß. Dieses Phänomen kann folgenderweise erläutert werden: Mit steigender Temperatur der Objekte erreicht die kontinuierliche Wärmestrahlung den sichtbarem Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Aus der klassischen Sicht entsteht die Wärmestrahlung durch die Beschleunigung der Atome eines Körpers. Doch die klassische Sichtweise reicht nicht, Strahlung zu erklären. Ein schwarzer Körper ist ein ideales System, das die gesamte einfallende fallenden Strahlungen komplett absorbiert. Eine Öffnung in einem schwarzen Hohlraum, wie in Abbildung 1, stellt ein gutes Beispiel für einen schwarzen Körper dar.

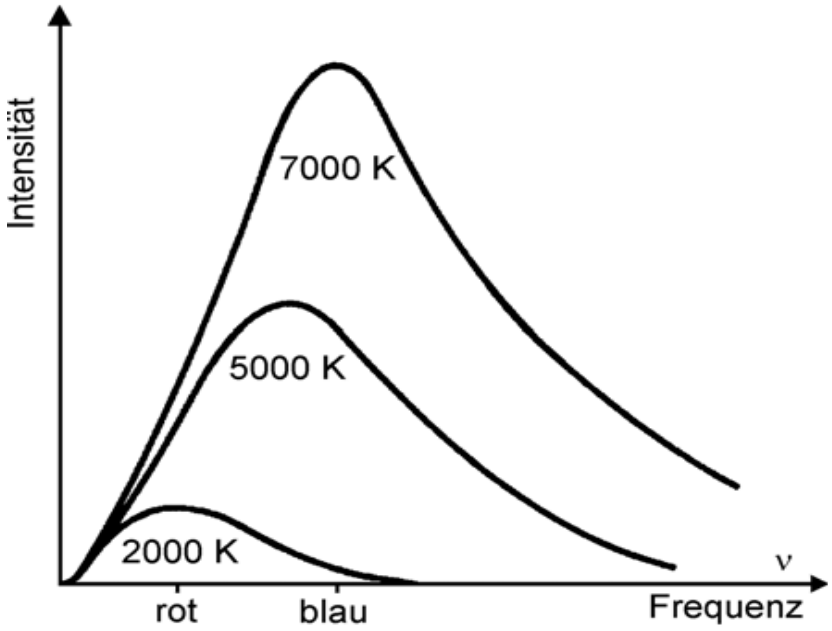
Abbildung 1 : Schematische Darstellung der Hohlraumstrahlung. Ein Hohlraum befindet sich in einem Wärmebad der Temperatur T. Die innere Oberfläche des Hohlraums ist schwarz. Die Intensitätsverteilung der austretenden Wärmestrahlung wird mit einem Spektrometer gemessen.



Die Strahlung hängt nur von der Temperatur des hohlen Objektes und nicht von dessen Eigenschaften ab. Ein sehr ähnliches und bekanntes Beispiel ist die Verbrennung von Kohle. Die Strahlung der glühenden Kohle stimmt sehr gut mit der Schwatzkörperstrahlung überein.

Abbildung 2: Die Intensität und das Spektrum der Strahlung eines schwarzen (glühenden) Körpers verändert sich mit der Temperatur.

Abbildung 3: Plancksche Strahlung (Strahlung eines schwarzen Körpers bei verschiedenen Temperaturen). Die gesamte Strahlungsleistung steigt mit der vierten Potenz der absoluten Temperatur und die Frequenz des Maximums des Spektrums ist zur absoluten Temperatur proportional.



Eine Veränderung der Temperatur des Objektes führt zu einer Frequenzänderung und folglich zu einer Farbänderung der Strahlung, (z.B.: von unsichtbarer Wärmestrahlung zu rotem und weißem Glühen). Die Abhängigkeit der Frequenz von der Temperatur wird durch das Wiensche Verschiebungsgesetz beschrieben.

$\lambda_{max.} \cdot T = a$

$a=2{,}898 \cdot 10^{-3}$ m K……..konstant

$\lambda_{max.}$……. Wellenlängenlängen mit maximaler Intensität

T ……. Die absolute Temperatur des Objektes, das die Strahlung aussendet.

Beispiel:

Wie können wir die Oberflächentemperatur der Sonne berechnen?
Das Intensitätsmaximum des Sonnenlichtes hat eine Wellenlänge von $\lambda_{max} = 5 \cdot 10^{-7}$ m = 0.55 µm.
Mit Hilfe der obigen Formel berechnet man:

$\lambda_{max} \cdot T = a \rightarrow T = \frac{a}{\lambda}$

$$T = \frac{2{,}898 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m\,K}}{5 \cdot 10^{-7}\mathrm{m}} = 5796\ \mathrm{K}$$

In Abbildung 3 sieht man, dass die Wellenlänge des Maximums indirekt proportional zur absoluten Temperatur ist. Im Jahre 1900 ist es Max Planck gelungen, eine allgemeine Formel für die Strahlung der schwarzen Körper aufzustellen. Diese Formel beinhaltet eine Konstante h. Diese wird heute die Plancksche Konstante genannt. h ist eine Naturkonstante, d.h. von den Materialien und von allen physikalischen Größen, also auch der Temperatur, unabhängig. Sie hat den Wert $h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Js. Die Plancksche Konstante h gibt zusammen mit der Frequenz f die Energie E der Quanten (Photonen) des elektromagnetischen Feldes an. Für Strahlung der Frequenz f beträgt die Energie eines Photons

$E = h \cdot f$.

Im Strahlungsspektrum können nur ganzzahlige Vielfache solcher Quanten vorhanden sein. n ist deshalb eine natürliche Zahl und wird Quantenzahl oder Photonenzahl genannt. Die Abstrahlung der Quanten erfolgt durch eine Änderung des Zustandes eines Atoms, durch einen sogenannten Quantensprung. Die Energiedifferenz zwischen dem Ausgangs- und dem Endzustand des Atoms ist gleich der Energie des ausgesendeten Photons.

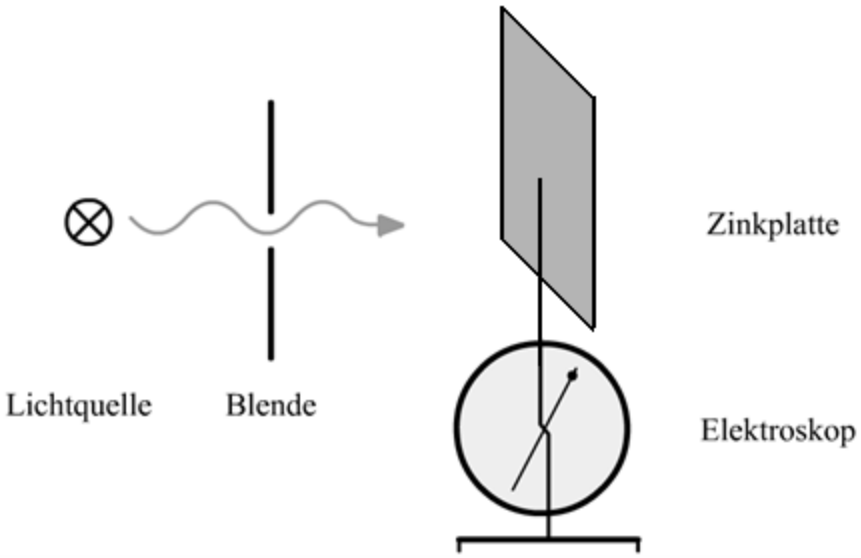
1.3 Photoeffekt (Äußerer lichtelektrischer Effekt)

W. Hallwachs erkannte 1888 bei seinen Versuchen, dass die Belichtung mancher Metalle z.B: von Zink (Zn) und Cäsium (Cs) einen Elektronenausstoß aus der Oberfläche hervorruft. Dies wird als Photoeffekt bzw. äußerer lichtelektrischer Effekt bezeichnet. Mit Hilfe der klassischen Physik konnte man diesen Effekt nicht verstehen. Erst mit der Quantenphysik wurde dieser Effekt verständlich.

VERSUCHE:

Die folgenden Versuche zeigen den Fotoeffekt eindrucksvoll.

Abbildung 4: Entladung einer Zinkplatte durch Bestrahlung(Versuch 1)

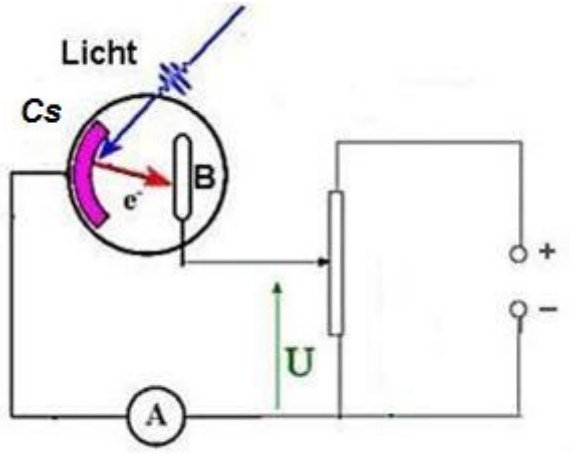


Eine gereinigte, frisch geschmirgelte Zinkplatte wird mit einem Elektroskop verbunden und negativ aufgeladen. Bei Bestrahlung mit dem (UV-)Licht einer Quecksilberdampflampe geht der Ausschlag des Elektroskops rasch zurück, die überschüssigen Elektronen werden also durch die Bestrahlung aus der Zinkplatte herausgelöst. Schiebt man eine Glasplatte zwischen Quecksilberdampflampe und Zinkplatte, so findet auch bei der Bestrahlung einer negativ geladenen Zinkplatte keine Entladung statt. Da eine Glasplatte UV-Licht absorbiert, schließen wir, dass nur der UV-Anteil der Strahlung der Quecksilberdampflampe in der Lage ist, die überschüssigen Elektronen herauszulösen. Bei positiver Aufladung der Zinkplatte hat die Bestrahlung keinerlei Auswirkung.

Licht ausreichend hoher Frequenz (also genügend kleiner Wellenlänge) kann aus der Metalloberfläche Elektronen herauslösen. Die Anzahl dieser pro Zeiteinheit herausgelösten „Photoelektronen“, der Photostrom, steigt mit der Beleuchtungsstärke. Eine negativ geladene Zinkplatte stößt die Elektronen ab. Es kommt zur Entladung. Eine positiv geladene Platte zieht jedoch die herausgelösten Elektronen wieder an und entlädt sich deshalb nicht.

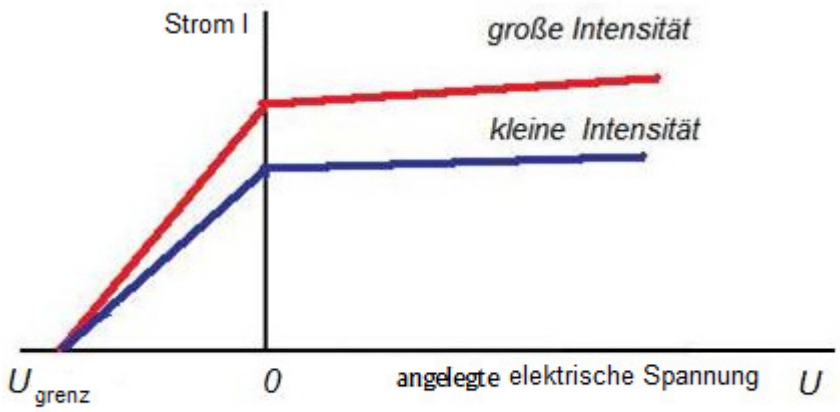
Die Frequenzabhängigkeit des Photoeffektes kann man sehr gut mit einer Elektronenröhre untersuchen, die eine metallische Kathode (z.B. aus Cs, Na, K oder auch Zn) enthält.

Abbildung 5 : Photoeffekt (Versuch 2)



Die bildliche Darstellung des Versuches zeigt eine kreisförmige und evakuierte Glasröhre. Das Cs-Plättchen bildet die Kathode. Die gegenüberliegende Anode fängt die Elektronen auf. Bevor das Licht eingeschaltet wird, fließt durch das Amperemeter A kein Strom. Wenn das Cs-Plättchen negativ geladen ist (die Spannung U ist positiv), so stößt es bei Beleuchtung die Elektronen ab, und wird entladen. Eine Erhöhung der Spannung U erhöht die Stromstärke I nicht, wie die Abbildung 6 zeigt. Dieser Sättigungsstrom steigt jedoch mit der Beleuchtungsstärke der Photokathode an.

Abbildung 6 :



Sogar bei einer Umkehrung des Vorzeichens der Spannung U, bei geringer negativer Polung der Anode ist das Licht noch in der Lage, Elektronen aus dem Plättchen herauszulösen. Das elektrische Feld bremst jedoch die losgelösten Elektronen. Diese sogenannte Gegenfeldmethode erlaubt es, die maximale kinetische Energie der losgelösten Elektronen zu messen. Die Stromstärke erreicht bei einer Grenzspannung U_{grenz} den Wert Null. Über dieser Spannung werden die losgelösten Elektronen durch die Gegenspannung vollständig abgebremst und können die Anode nicht mehr erreichen. Es gilt deshalb

$E_{kin} = e_0 \cdot U_{grenz}$

Die genaue Messung mit Licht verschiedener Frequenzen zeigt eine interessante Beziehung zwischen der kinetischen Energie E_{kin} der Elektronen und der Frequenz f des eingestrahlten Lichtes. Wie die Abbildung 7 zeigt, ist der Zusammenhang zwischen f und E_{kin} linear und kann mit der folgenden Gleichung beschrieben werden.

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

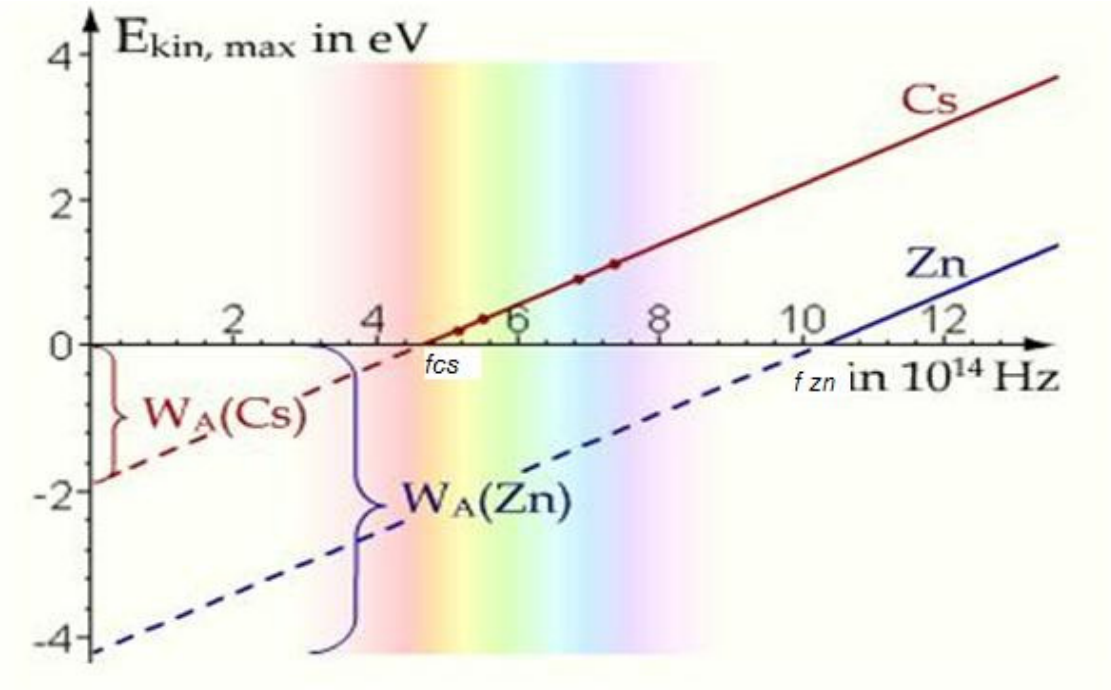
E_{kin} = Kinetische Energie der austretenden Elektronen

W_A = Austrittsarbeit der Elektronen, abhängig von der Art des Metalls

h = Plancksche Wirkungsquantum ($h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Js)

f = Frequenz der Photonen

Abbildung 7 : Energie – Frequenz – Diagramm (klassische Energie der Photoelektronen in eV)



Besonders interessant in Abbildung 7 ist die Parallelität der Geraden für verschiedene Materialien. Diese Parallelität äußert sich in einer Konstanz der Steigung h. Der Wert der Konstanten h ist weder von der Art des Lichtes noch vom Material abhängig, er ist durch nichts beeinflussbar. Die Konstante h nennt man deshalb eine Naturkonstante. Nach Max Planck wird h als Plancksche Konstante oder Plancksches Wirkungsquantum bezeichnet. Die zweite Konstante in der Beziehung zwischen der kinetischen Energie und der Frequenz, die Größe W_A, bezeichnet man als Ablösearbeit. Zur Herauslösung der Elektronen aus einer Cäsium-Kathode ist offenbar eine gewisse Mindestenergie $W_A(Cs) = h \cdot f_{Cs}$ notwendig.

Die oben beschriebenen Experimente werden verständlich, wenn man annimmt, dass das Licht der Frequenz f aus Teilchen, den Photonen, der Energie $h \cdot f$ besteht. Diese geben beim Auftreffen auf die Kathode ihre Energie an die Metallelektronen ab. Ein Teil der Energie geht als Ablösearbeit verloren, die Restenergie wird den Elektronen als kinetische Energie mitgegeben. Das macht auch verständlich, warum sichtbares Licht aus einer Zink-Kathode keine Elektronen herauslösen kann. Die Photonen des sichtbaren Lichtes haben eine geringere Energie $h \cdot f$ als die Ablösearbeit W_A für Zink beträgt. Das UV-Licht der Quecksilberdampflampe ist hingegen zur Ablösung der Elektronen in der Lage.

Eine sehr wichtige Folgerung der Experimente zum Photoeffekt ist das Versagen der Wellentheorie des Lichtes. Die ersten Photonen werden nämlich, wie sehr genaue Messungen zeigen, unmittelbar

beim Einstrahlen des ersten Lichtes emittiert. Nach der Wellenvorstellung des Lichtes müsste ein Atom für einige Zeit genügend Energie aufsammeln, um dann die Ablösearbeit aufbringen zu können.

Versagen der Wellentheorie des Lichtes

Genaue Messungen des Photoeffektes ergaben folgende Eigenschaften:

→ Die Anzahl der pro Sekunde ausgelösten Photoelektronen ist proportional zur Beleuchtungsstärke.

→ Die Aussendung von Photoelektronen beginnt unmittelbar nach Einsetzen der Bestrahlung.

→ Die Energie der Photoelektronen ist unabhängig von der Beleuchtungsstärke und steigt linear mit der Frequenz des Lichtes.

→ Der Photoeffekt tritt nur auf, wenn die Wellenlänge des eingestrahlten Lichtes kleiner als die für das betreffende Metall charakteristische Grenzwellenlänge ist.

Abbildung 8 : Eigene Werte der Austrittsarbeit W_A in eV und λ_{max} in nm

Metall	W_a / eV	λ_{max}/nm
Na	2.28	543
Cs	1.94	639
Ca	3.20	387
Sr	2.74	452
Cu	4.48	277
Zn	4.27	290
Cr	4.45	278
Fe	4.63	268
Ni	4.91	252
Pt	5.36	231
Na2KSb	1.46	859
AgOCs	0.99	1250

Ein Vergleich der Ablösearbeiten W_A in dieser Tabelle zeigt, dass Alkalimetalle besonders niedere Ablösearbeiten besitzen.

Beispiel: Photoelektrische Erscheinung für Calcium.

Die Oberfläche des Calciums wird mit ultraviolettem Licht der Wellenlänge 300 nm beleuchtet.
Die Austrittsarbeit W_A für Calcium beträgt 3,2 eV (Abbildung 7). Wie hoch ist die maximale kinetische Energie der Photoelektronen, die von der Oberfläche des Calciums gelöst werden?
Lösung: Wir berechnen zuerst die Energie $h \cdot f$ der Photonen und unter Berücksichtigung der Ablösearbeit W_A die kinetische Energie der Elektronen.

$E = h \cdot f = h \cdot c/\lambda = (6{,}626 \cdot 10^{-34}\,Js) \cdot (3 \cdot 10^{8}\,m/s)/(300 \cdot 10^{-9}\,m) =$

$= 6{,}626 \cdot 10^{-19}\,J = 6{,}626 \cdot 10^{-19}/1{,}602 \cdot 10^{-19}\,eV = 4{,}136\,eV$

$E_{kin} = h \cdot f - W_A = 4{,}136\,eV - 3{,}2\,eV = 0{,}936\,eV$

1.4 Photonen

Jeder Energie entspricht nach der Relativitätstheorie auch eine Masse. Die Beziehung $E = h \cdot f$ gibt die Energie der Strahlungsquanten, der Photonen wieder. Den Photonen muss daher auch eine bestimmte Masse zugeschrieben werden.

$m = E/c^2 = h \cdot f/c^2$

Da Photonen sich immer mit Lichtgeschwindigkeit bewegen haben sie keine „Ruhemasse". Berechnen wir formal dennoch die Ruhmasse gemäß der Formel

$$m_0 = m \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0$$

erkennen wir, dass diese verschwindet. Die Masse der Photonen ist somit rein dynamisch. Daraus folgt, dass Photonen nur existieren können, da sie sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen.

Die Masse der Lichtquanten führt dazu, dass ein Lichtstrahl, der sich nahe an einem Körper großer Masse (z.B. der Sonne) vorbeibewegt, in geringem Maß von dieser Masse angezogen und von seiner Richtung abgelenkt wird. Eine weitere Begründung für diese experimentell gesicherte Erscheinung lässt sich aus der Allgemeinen Relativitätstheorie ableiten.

In einer späteren Arbeit sah sich Einstein veranlasst, den Photonen auch einen Impuls zuzuschreiben.

$p = m \cdot c = E/c = h/\lambda$

1.5 Compton – Effekt

Einstein hat 1919 entdeckt, dass ein Photon mit Energie E einen Impuls von $E/c = h \cdot f/c$ hat. Einen weiteren Schritt machte 1922 Arthur Holly Compton. Compton und seine Kollegen stellten sich bei ihren Versuchen den Photonenimpuls nicht als Impuls einer Welle, sondern als Impuls eines punktförmigen Teilchens der Energie $E = h \cdot f$ und des Impulses $h \cdot f/c = E/c$ vor. Außerdem legten sie Wert auf die Feststellung, dass bei jedem Photon-Elektron Zusammenstoß die Energie und der Impuls konstant bleiben.

Abbildung 9: Quantenmodell des Compton – Effekts

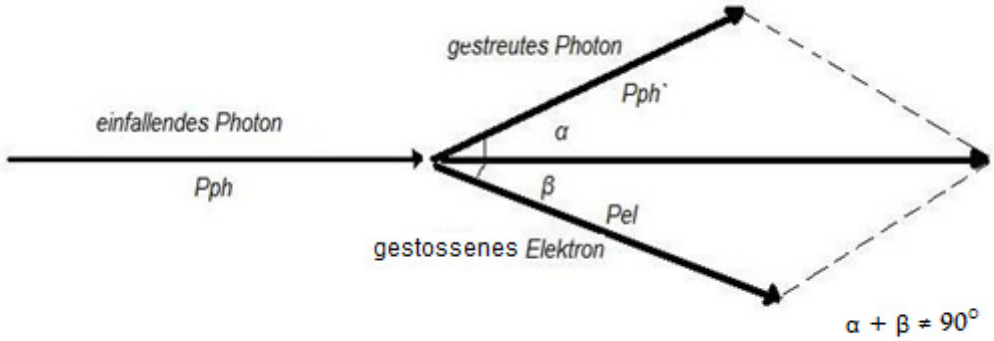
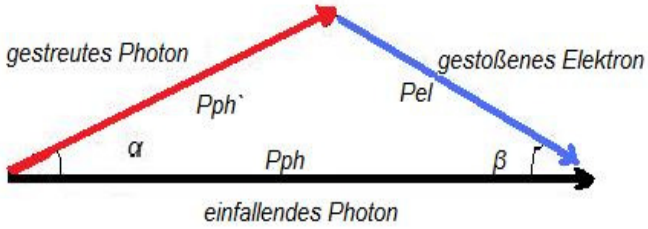


Abbildung 10: Ein Photon mit dem Impuls p_{ph} stößt ein Elektron, das dadurch den Impuls p_{el} bekommt. Nach dem Zusammenstoß hat das Photon den geringeren Impuls $p_{ph`}$.



Bei der klassischen Überlegung bewegt sich nach dem Photon-Elektron Zusammenstoß das Elektron in die Richtung des eingestrahlten Photons. Nach dem Quantenmodell fliegen sie nach dem Zusammenstoß in verschiedene Richtungen, wie z.B. Billardkugeln. Die Energie des Photons ist nach dem Zusammenstoß geringer, d.h. nach dem Stoß besitzt das Photon eine größere Wellenlänge. Dieses Phänomen wirft die folgenden Fragen auf: Was ist Licht? Eine Welle oder ein Teilchen? Diese Frage kann man so erläutern: Manche physikalische Probleme lassen sich mit der Annahme, dass das Licht eine Welle ist lösen, z.B. die Beugung. Doch Photoeffekt und Compton-Effekt lassen sich nur mit der Vorstellung verstehen, dass Licht aus Teilchen besteht. Licht besitzen also beide Eigenschaften, es ist sowohl Welle als auch Teilchen.

1.6 Materiewellen

Louis De Broglie stellte 1923 in seiner Doktorarbeit erstmals die These auf, dass nicht nur Licht sondern alle Teilchen diese Doppeleigenschaft haben könnten. Wie oben besprochen, wusste De Broglie, dass die Energie der Photonen mit $E = h \cdot f = h \cdot c/\lambda$ und der Photonenimpuls durch $p = E/c$ gegeben sind. Durch die Kombination beider Beziehungen ergibt sich für den Photonenimpuls $p = E/c = h/\lambda$. Die Wellenlänge der Photonen ist also durch ihren Impuls bestimmt: $\lambda = h/p$.

Teilchen mit der Masse m und der Geschwindigkeit v haben den Impuls $p = m \cdot v$. De Broglie stellte die Hypothese auf, dass allen Teilchen eine Wellenlänge

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

zugeordnet werden kann. Außerdem vermutete er, dass Teilchen mit der Energie E eine Frequenz f besitzen, die durch die von Einstein aufgestellte Formel $E = h \cdot f$ gegeben ist.

$f = \frac{E}{h}$ = Frequenz

E = Gesamtenergie des Teilchens

h = Plancksche Konstante

Mit den obigen Formeln wurde somit jedem Teilchen, auch jenen der Materie, zusätzlich zu den Teilcheneigenschaften Welleneigenschaften zugeordnet.

Die Teilcheneigenschaften p und E und die Welleneigenschaften f und λ stehen miteinander über die oben angeführten De Broglie-Relation in direkter Beziehung.

Beispiel :

Wie groß ist die Wellenlänge eines Elektrons bei einer Geschwindigkeit von 30% der Lichtgeschwindigkeit? (h: $6.626 \cdot 10^{-34}$ Js, c: $3 \cdot 10^{8}$ m/s, m_e: $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg)

$\lambda = h/(m \cdot v) = h/(m_e \cdot 0.3 \cdot c) = 8{,}090$ pm

1.7 Technische Bedeutung der Materiewellen

→ Bei der Herstellung kleinster Bauteile in der Mikroelektronik ist man schon längst bei Größenordnungen angelangt, bei denen die Wellenlänge von Materiewellen eine wesentliche Rolle spielt.

→ Elektronenmikroskop: Epochal war die Entwicklung des Elektronenmikroskops durch Ernst Ruska. Er erhielt dafür 1986 den Nobelpreis für Physik.

→ Elektronenbeugung in Kristallen: Das Kristallgitter stellt für Elektronenstrahlen mit geeigneter Wellenlänge ein Beugungsgitter dar. Das Verständnis der elektrischen Eigenschaften von Materie wie Fließen von Strom, der Ohmschen Widerstand, die Halbleitereigenschaften usw. sind ohne Einbeziehung der Welleneigenschaften von Materie nicht vollständig verständlich. Eine Voraussetzung für die Entwicklung der Halbleitertechnik war das Verständnis der Quantenmechanik.

1.8 Ausbau der Quantenmechanik

1.8.1 Doppelspaltversuch

Thomas Young entwickelte den Doppelspaltversuch, um die Welleneigenschaften des Lichts zu beweisen. Er veröffentlichte seine Arbeit im Jahre 1805. Besonders gut kann der Versuch mit einfarbigem Licht durchgeführt werden. In diesem Fall besitzen die Lichtquanten identische Wellenlängen.

Im Doppelspaltversuch wird das Licht auf zwei Spalten gelenkt und dahinter auf einem Schirm aufgefangen. Es entsteht ein Beugungsbild aus hellen und dunklen Streifen. Dies kann mit Hilfe des Wellenmodells des Lichtes erklärt werden. Die einfallende Welle wird an den zwei Spalten gebeugt. Die beiden dadurch entstehenden Wellen interferieren miteinander und führen zu dem Streifenmuster aus hellen und dunklen Streifen. Die hellen Bereiche entstehen dort, wo die Maxima oder Minima der beiden Wellen zusammentreffen, also wo sich die beiden Wellen verstärken. An Stellen an denen sich Maxima und Minima überlagern, löschen sich die Wellen aus, dort bilden sich dunkle Bereiche.

Abbildung 11: Doppelspaltversuch als Überlagerung von Wellen, durch Auslöschung und Verstärkung erhält man ein periodisches Muster

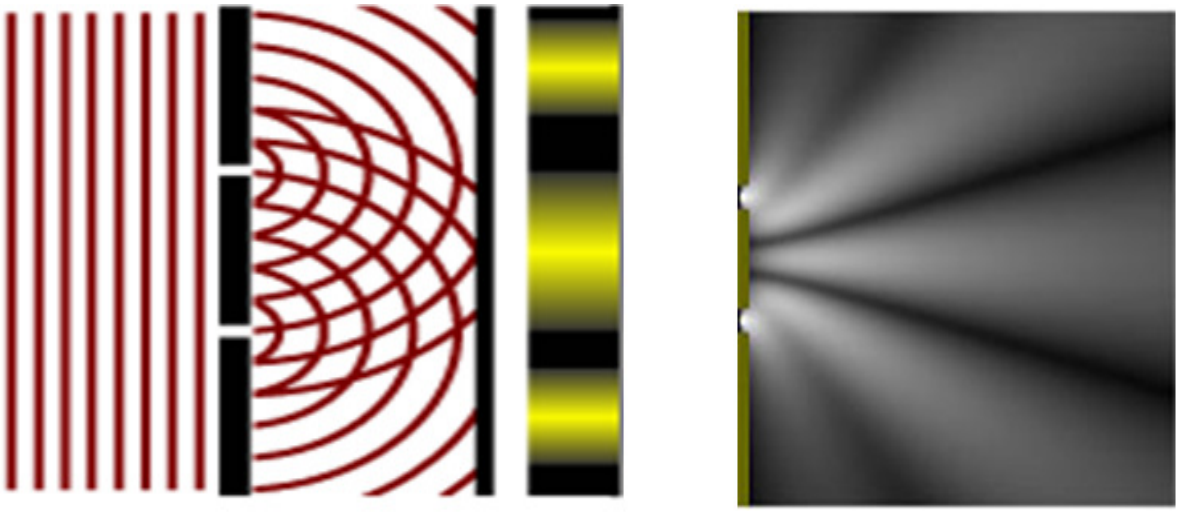
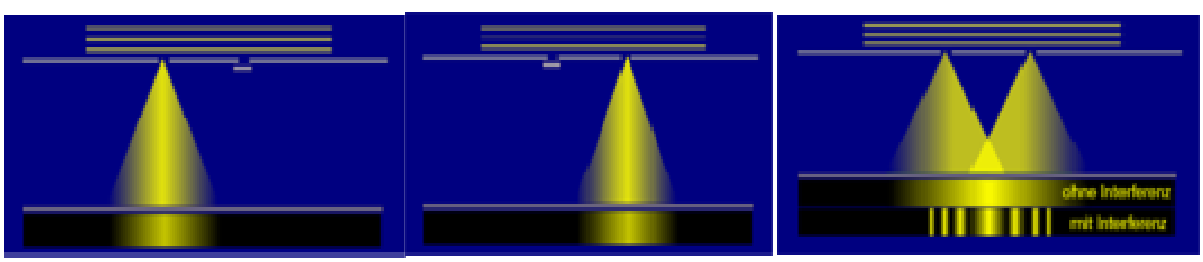


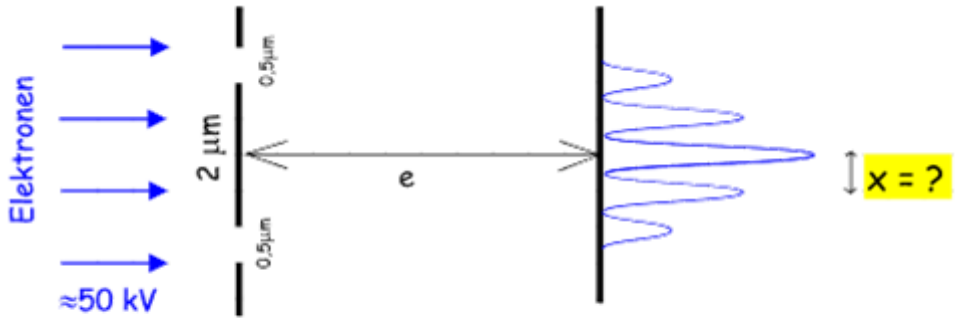
Abbildung 12: Versuche mit offenen und geschlossenen Spalten.



Einer der interessantesten Versuche in der Geschichte der Physik wurde erstmals 1927 durchgeführt. Im Jahre 1927 bewiesen Clinton Davisson und Lester Germer in ihren Versuchen zum Doppelspaltversuch, dass auch Elektronen Welleneigenschaften besitzen. Der Versuch von Davisson und Germer ist ein Doppelspaltversuch, der mit Elektronen anstatt mit Licht durchgeführt wird. Elektronen einer bestimmten Energie werden auf einen Doppelspalt gelenkt, wobei die Breite der Spalten kleiner als ihre Entfernung sein muss. Ein Elektronenzähler registriert in ausreichender Entfernung hinter dem Spalt die Elektronen.

Weiters stellte sich heraus, dass die in der klassischen Physik als Teilchen bekannten Protonen und Neutronen bei solchen Interferenzversuchen analoge Ergebnisse lieferten. Teilchen besitzen also auch Welleneigenschaften. Inzwischen konnten Beugungserscheinungen sogar mit ^{60}C – Molekülen nachgewiesen werden.

Abbildung 13: Elektronen werden mit ≈ 50 kV beschleunigt und auf einen Doppelspalt geschickt.



Beispiel :

Auf der Fotoplatte entsteht eine Interferenzfigur. Wie groß ist der Abstand des ersten Maximums?

λ ≈ 5pm; d = 2,5 µm; e = 0.5m; k = 1

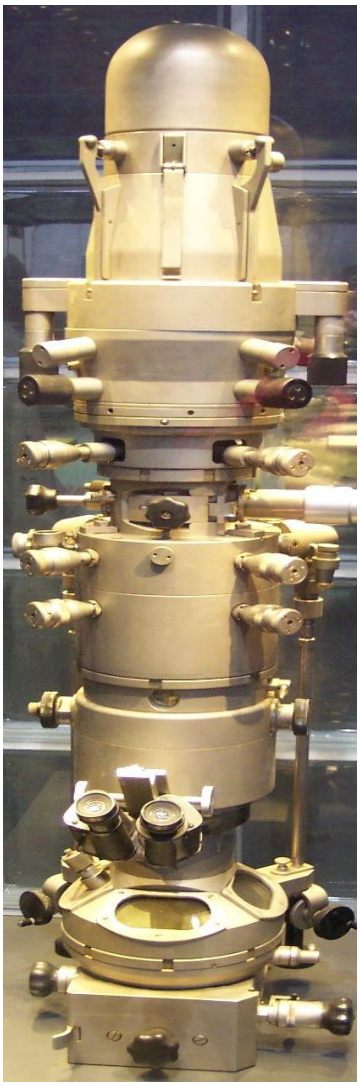
$\frac{k \cdot \lambda}{d}$ = sind α ≈ tan α = $\frac{x}{e}$ => x = $\frac{e \cdot \lambda}{d}$ ≈ 1 µm

Diese kleinen Strukturen wurden mit einem Elektronenmikroskop sichtbar gemacht.

1.8.2 Elektronenmikroskop

Der Doppelspaltversuch hat bewiesen, dass auch Elektronen Welleneigenschaften besitzen. Das ermöglicht, die Konstruktion eines Elektronenmikroskops, um dünne und glatte Objekte mit hoher Auflösung abzubilden.

Abbildung 1.12: Prinzipieller Aufbau eines Elektronenmikroskops



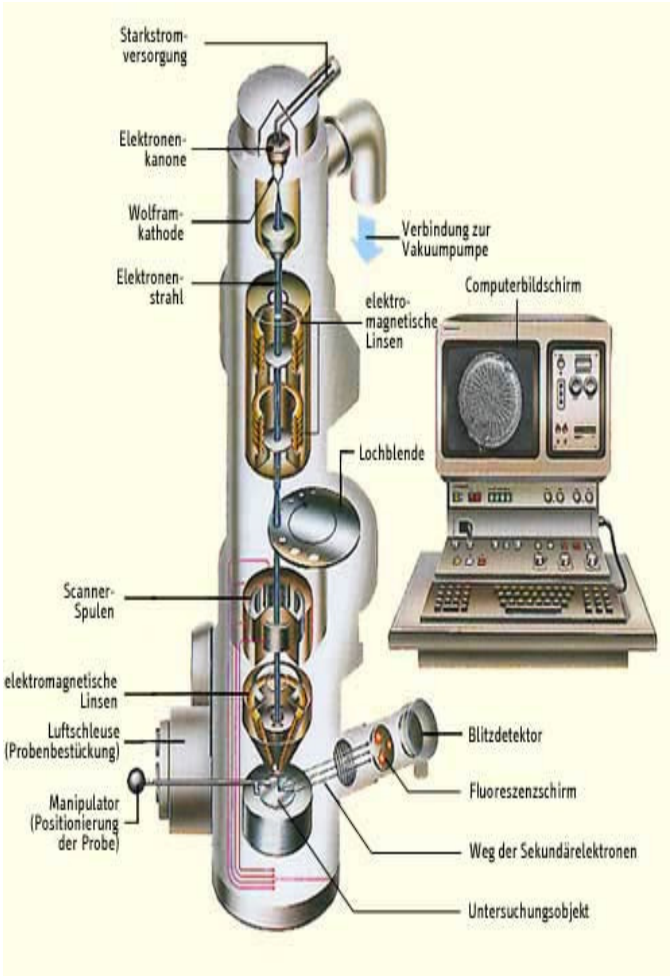
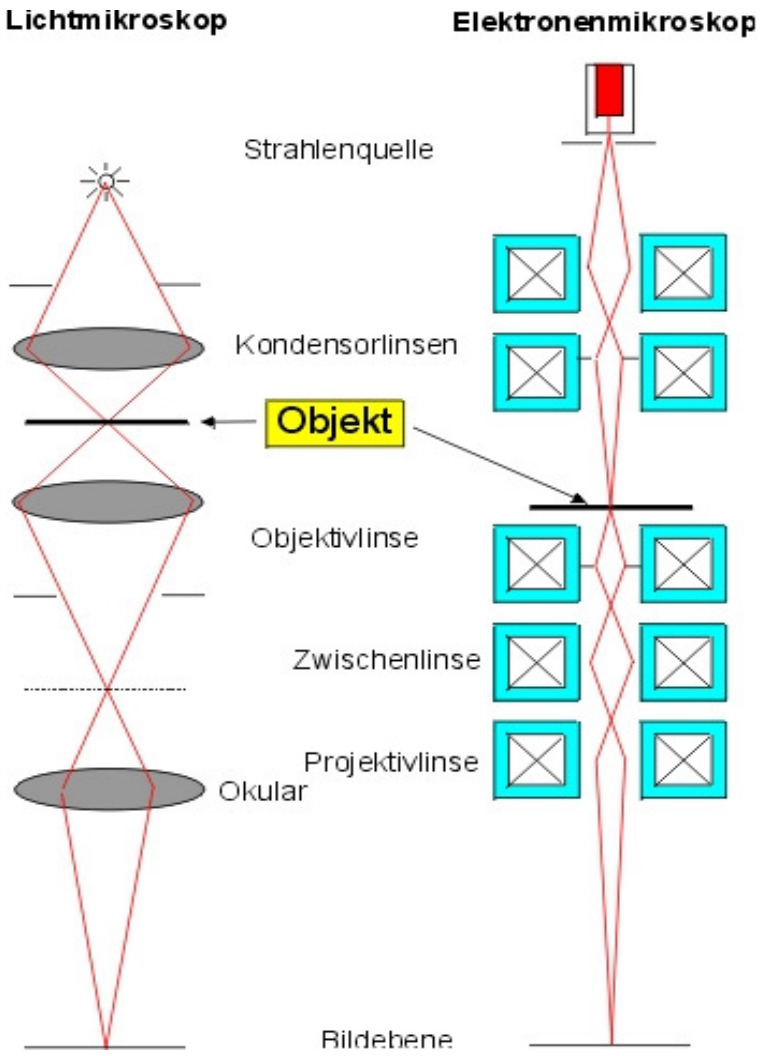


Abbildung 1.13: Vergleich des Aufbaus eines Lichtmikroskops mit einem Elektronenmikroskop



Ein Elektronenmikroskop ähnelt in vieler Weise einem Lichtmikroskop. Der wichtigste Unterschied besteht darin, dass ein Elektronenmikroskop eine weit höhere Auflösung besitzt. Der Grund dafür ist, dass Elektronen hohe kinetische Energien und somit kürzere Wellenlängen erreichen können. Das Auflösungsvermögen der Mikroskope wird durch die Wellenlänge begrenzt. Je kürzer die Wellenlänge ist, desto „schärfer“ wird das Bild. Die Funktionsweise des Elektronenmikroskops kann folgendermaßen beschrieben werden: Auf der Oberfläche des zu untersuchenden Körpers werden Elektronen gestreut. Um unerwünschte Reflexionen an dem zu untersuchenden Körper zu vermeiden wird jedoch nur eine sehr dünne Probe verwendet, die durch magnetische Linsen auf einem Fluoreszenzbildschirm abgebildet wird.

1.8.3 Heisenbergsche Unschärferelation

1927 formulierte Werner Heisenberg ein physikalisches Grundprinzip der Quantentheorie:“ Ort und Impuls eines Teilchens sind nicht gleichzeitig zur Gänze bestimmbar“. Je genauer der Ort eines Teilchens gemessen wird, d.h. je kleiner die Ortsunschärfe Δx ist, desto ungenauer ist sein Impuls bestimmt, d.h. desto größer ist die Impulsunschärfe Δp_x, und umgekehrt. Das Produkt der beiden Unschärfen ist stets größer als $\frac{\hbar}{2}$. ($\hbar = \frac{h}{2\pi}$)

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2$$

Diese Unschärferelation wird nicht durch die Ungenauigkeiten der Messgeräte bewirkt, sondern ist eine prinzipielle Eigenschaft der Materie, ein Resultat der Quanteneigenschaften. Heisenberg überlegte sich dazu folgendes Gedanken-Experiment: Wenn wir versuchen, den Ort eines ruhenden Elektrons in einem Elektronenmikroskop mit höchst möglicher Genauigkeit zu bestimmen, so muss mindestens ein Photon verwendet werden, das mit dem Elektron zusammenstößt und im Meßapparat oder den Augen absorbiert wird. Dabei ist zu beachten, dass beim Zusammenstoß des Photons mit dem Elektron ein Teil der Photonenenergie auf das Elektronen übertragen wird. Will man die Ortsauflösung verbessern, so muss die Wellenlänge des Photons verringert und damit der Impuls des Photons erhöht werden. Das Elektron wird somit stärker gestoßen und die Impulsunschärfe des Elektrons wächst.

Beispiel: Ortsunschärfe

Wir nehmen an, dass nach dem Rutherfordschen Atommodell Elektronen mit einer bestimmten Geschwindigkeit um den Atomkern kreisen. Mit Hilfe der Unschärferelation kann gezeigt werden, zu welch absurden Folgerungen die Annahme führt, dass die Geschwindigkeit der Elektronen genau bekannt ist.

Annahme: Das Elektron kreist mit Geschwindigkeit von $2 \cdot 10^6$ m/s. Die Unsicherheit der Geschwindigkeit sei 0,02%. Daraus ergibt sich:

$\Delta v = 0{,}0002 \cdot 2 \cdot 10^6 \text{m/s} = 4 \cdot 10^2 \text{m/s}$

Berechnet man die Ortsunsicherheit ergibt sich mit der Masse des Elektrons von $0{,}911 \cdot 10^{-30}$ kg

$\Delta x \approx \hbar/(2 \cdot m_e \cdot \Delta v) = 1{,}055 \cdot 10^{-34}$ Js$/(2 \cdot 0{,}9108 \cdot 10^{-30}$ kg $\cdot$ 400 m/s)

$= 1{,}45 \cdot 10^{-7}$ m

Der Atomdurchmesser ist in der Größenordnung von 10^{-10}m, also 1000-mal kleiner als die in diesem Beispiel berechnete Unsicherheit der Elektronenbahn.

Beispiel: Geschwindigkeitsunschärfe

Man kann aus der Ortsunschärfe eines Elektrons auf die Unschärfe seiner Geschwindigkeit schließen.

Annahme: Wir stellen uns vor, dass ein Elektron in einem Bereich von der Größenordnung des Atomkerndurchmessers (10^{-14}m) lokalisiert ist. Über die Unschärferelation ergibt sich eine Unsicherheit der Geschwindigkeit

$\Delta p_x \cdot \Delta x = m_e \cdot \Delta v_x \cdot \Delta x \approx \hbar/2$ $\quad$ $(\Delta p_x = m \cdot \Delta v_x)$

$\Delta v_x \approx \hbar/(2 \cdot \Delta x \cdot m_e) = 1{,}055 \cdot 10^{-34}\ \text{Js}/(2 \cdot 10^{-14}\ \text{m} \cdot 0{,}911 \cdot 10^{-30}\ \text{kg})$

$= 5{,}8 \cdot 10^{9}\ \text{m/s}$

Diese Geschwindigkeitsunschärfe wäre weit größer als die Lichtgeschwindigkeit. Wir schließen daraus, dass es unmöglich ist ein Elektron in einem Atomkern einzuschließen. Dieses Argument zeigt weiters, dass ein Elektron nicht in einen Atomkern stürzen kann.

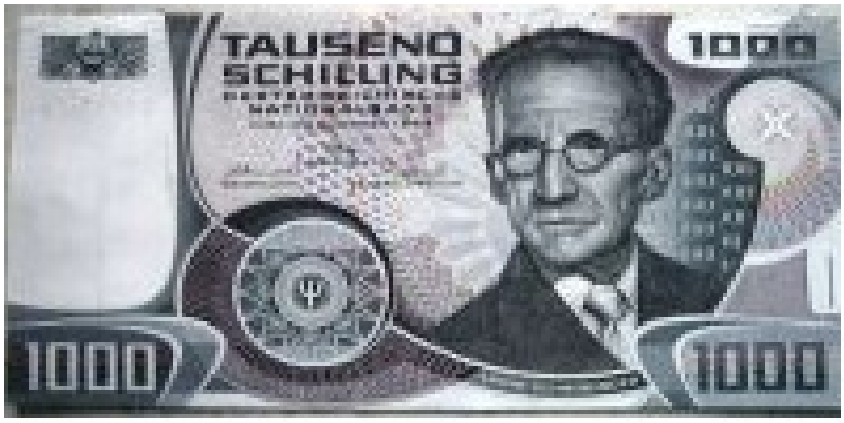
1.8.4 Schrödingergleichung

Da materielle Teilchen auch Welleneigenschaften zeigen, kann die klassische Mechanik ihr Verhalten nicht exakt beschreiben. Es wurden daher nach dem Vorschlag De Broglies Anstrengungen unternommen eine „Wellenmechanik“ zu finden, welche die Welleneigenschaften der Materie berücksichtigen.

Der österreichische Physiker Erwin Schrödinger konnte dieses Problem im Jahr 1926 lösen. Die nach ihm benannte Schrödingergleichung ist eine Wellengleichung, die das Verhalten von Quantenobjekten beschreibt.

Ein Bild von Erwin Schrödinger war für viele Jahre auf der 1000 Schilling Banknote abgebildet.

Abbildung 1.14: Bild Schrödingers auf der 1000 Schilling - Note



Schrödinger soll vorerst von der Idee dieser De Broglie Materiewellen nicht begeistert gewesen sein. Er hat sich trotzdem damit beschäftigt und eine Gleichung aufgestellt, die zum Fundament der Quantenmechanik wurde. Der Kern der Schrödingergleichung geht auf den Energieerhaltungssatz und das Hamiltonsche Prinzip zurück. Das Ergebnis ist eine partielle Differentialgleichung.

→ Die Gesamtenergie E setzt sich aus der kinetische Energie E_{kin} und der potenziellen Energie $E_{pot} = V(r)$ zusammen, wobei r der Abstand zwischen Elektron und Kern ist.

$$E = E_{kin} + E_{pot} = p^2/2 \cdot m + V(r).$$

Die kinetische Energie des Elektrons kann durch den Impuls p ausgedrückt werden,

$$E_{kin} = m \cdot v^2/2 = p^2/2m, \qquad p = m \cdot v \rightarrow v = p/m.$$

Die Schrödingergleichung für ein Teilchen mit der Gesamtenergie E, das sich in einer Dimension x bewegt und einem Potenzial V(x) ausgesetzt ist, lautet

$$E \cdot \psi(x) = -\hbar^2/(2 \cdot m) \cdot d^2\psi(x)/dx^2 + V(x) \cdot \psi(x).$$

1.8.5 Zusammenfassung:

→ Die Begriffe Teilchen bzw. Welle sind nicht geeignet, für sich alleine Phänomene in der Natur zu beschreiben. Sie sind vereinfachte Modellvorstellungen des Menschen zur anschaulichen Beschreibung von Naturvorgängen.

→ Der Zustand mikroskopischer Systeme ist nicht immer durch beliebig scharfe Angaben verschiedener physikalischer Größen beschreibbar. Insbesondere ist der klassische Begriff einer Elektronenbahn innerhalb eines Atoms sinnlos.

→ Man kann im Bereich der Quantenphysik nur mehr Wahrscheinlichkeitsaussagen treffen. Das Verhalten einzelner Teilchen (Photonen oder materieller Teilchen) ist nicht mit beliebiger Genauigkeit vorhersagbar. Diese gehen für eine große Menge gleichartiger Teilchen (üblicherweise immer vorhanden) in exakte statistische Voraussagen, also in Häufigkeitsverteilungen, über.

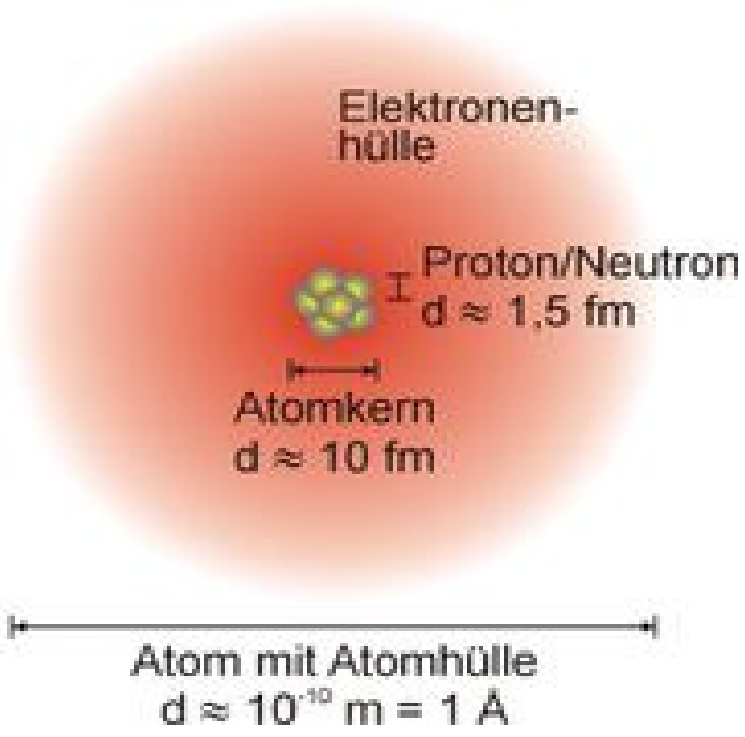
2. Atomphysik

2.1 Geschichte des Atoms

Das Wort Atom leitet sich vom griechischen Wort „Atomos“ ab. Es bedeutet unteilbar. Leukipp und Demokrit hatten als erste Gelehrte die Idee, dass die Materie aus kleinsten, unteilbaren Teilchen aufgebaut ist.

Nach einer Hypothese von Empedokles und Aristoteles besteht alle Materien aus den vier Elementen Wasser, Luft, Feuer und Erde. Erst im 19. Jhdt. stellte Dalton zum ersten Mal ein realistischeres Atommodell auf. Er schloss aus chemischen Reaktionen, dass Materie aus mehreren verschiedenen Atomarten besteht. 1897 wies J. J. Thomson nach, dass Kathodenstrahlen aus Elektronen bestehen. Die Grundlagen des heutigen Wissens über den Atomaufbau legte Ernest Rutherford. Er entdeckte die Atomkerne und nannte die positiv geladenen Teilchen in den Atomkernen Protonen. Außerdem behauptete er, dass die Hülle des Atoms aus Elektronen aufgebaut ist. Niels Bohr entwickelte in seinem Atommodell die Ideen Rutherfords weiter. Erst 1932 konnte Chadwick nachweisen, dass Atomkerne neben den Protonen auch ungeladene Teilchen, die sogenannten Neutronen enthalten, die ca. die gleiche Masse wie Protonen besitzen. Abbildung 2.1 zeigt die Größenordnung der einzelnen Bestandteile von Atomen nach der heutigen Vorstellung.

Abbildung 2.1: Die derzeitige Vorstellung von Atom und Atomkern mit Größenangaben.



Der Durchmesser der Atomhülle beträgt ca. 10^{-10} m, der Durchmesser des Atomkerns einige 10^{-15} m.

Im letzen Kapitel erklärten wir, dass die Auflösung eines Bildes in einem Mikroskop mit der Wellenlänge des Lichtes zu tun hat. Da die Wellenlänge des Lichtes größer als der Durchmesser von Atomen ist, können Atome mit einem herkömmlichen Mikroskop nicht sichtbar gemacht werden, man benötigt hierzu entweder ein Elektronenmikroskop oder ein sogenanntes Röntgenmikroskop mit einer kürzeren Wellenlänge.

2.2 Atommodelle

2.2.1 Daltonsches Atommodell

Die erste wissenschaftliche Untersuchung der Atome erfolgte durch den englischen Chemiker John Dalton. Die Feststellung der Erhaltung der Masse bei chemischen Reaktionen, sowie die Gesetze der konstanten und multiplen Proportionen führten um 1810 zur Neubegründung des Atomismus durch Dalton. Er stellte sich die Atome als unveränderliche elastische Kugeln vor.

Abbildung 2.2: Das Daltonsche Atommodell

Die Grundeigenschaften des Daltonschen Atommodells:

- → Materie besteht aus kleinsten Teilchen, den Atomen.
- → Die Atome verschiedener Elemente sind unterschiedlich.
- → Die Atome des gleichen Elementes haben alle dieselbe Größe und Masse.

→ Atome können nicht zerlegt oder vereinigt werden.

→ Atome bleiben bei einer chemischen Reaktion erhalten.

→ Atome sind Kugeln (siehe Abbildung 2.2).

Das Daltonsche Atommodell hat drei große Fehler:

→ Atome sind keine Kugeln.

→ Elemente der gleichen Art haben nicht exakt die gleiche Masse. Es gibt die sogenannten Isotope mit ungleicher Masse.

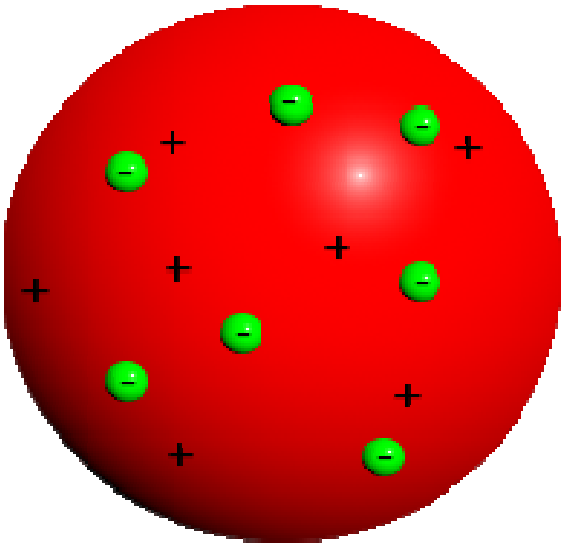
→ Die Überlegung, dass Atome die kleinsten Teile der Materie und unteilbar sind, stimmt mit späteren Erkenntnissen nicht überein. Durch Radioaktive Strahlen können Atome geteilt werden.

Außerdem waren Dalton Elektronen, Neutronen und Protonen noch unbekannt.

2.2.2 Thomsonsche Atommodell

Mit Hilfe einer Kathodenröhre hat Thomson 1887 die Existenz von Elektronen nachgewiesen und ein neues Atommodell entwickelt. Gemäß dem Thomsonschen Atommodell sind Atome kleine Kugeln, die gleichmäßig mit Masse und positiver Ladung erfüllt sind. Darin eingebettet sind die Elektronen. Durch elektrostatische Kräfte werden sie an bestimmte Ruhelagen gebunden. Die Elektronen stellte sich Thompson wie Rosinen in einem Kuchen vor. Deswegen hat das Modell den Namen „Rosinenkuchen-Modell“ erhalten. Es ist in Abbildung 2.3 gezeigt.

Abbildung 2.3: Rosinenkuchen–Modell von Thomson



2.2.3 Rutherfordsches Atommodell

Ernest Rutherford (1871-1937) und seine Schüler Hans Geiger und Ernest Marsden konnten zeigen, dass das Atommodell von Thomson nicht der Natur entspricht.

In einem Versuch haben sie positiv geladene Alpha-Teilchen an dünnen Goldblättchen gestreut. Das Ergebnis des Versuches war verblüffend. Die meisten positiv geladenen Atome durchdrangen das Metall, einige wurden stark abgelenkt und einige wenige wurden sogar reflektiert.

Abbildung 2.4: Die von links kommenden α-Teilchen werden nur von den Kernen abgelenkt.

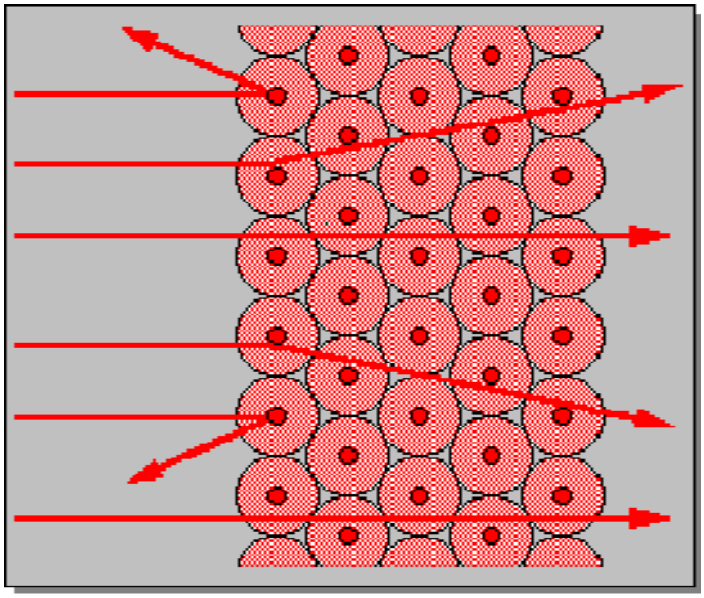


Abbildung 2.5: Unterschied zwischen Thomsonschen und Rutherfordschem Atom-modell.

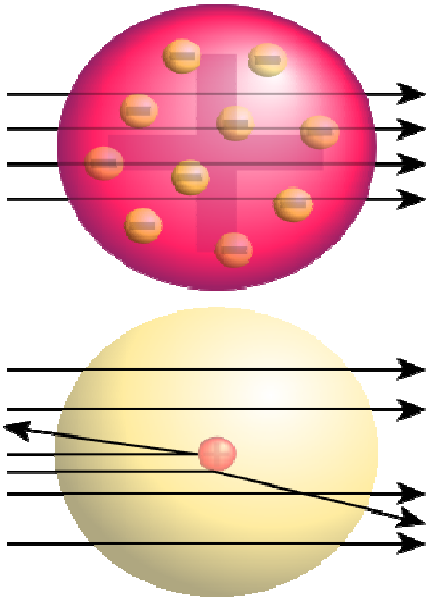
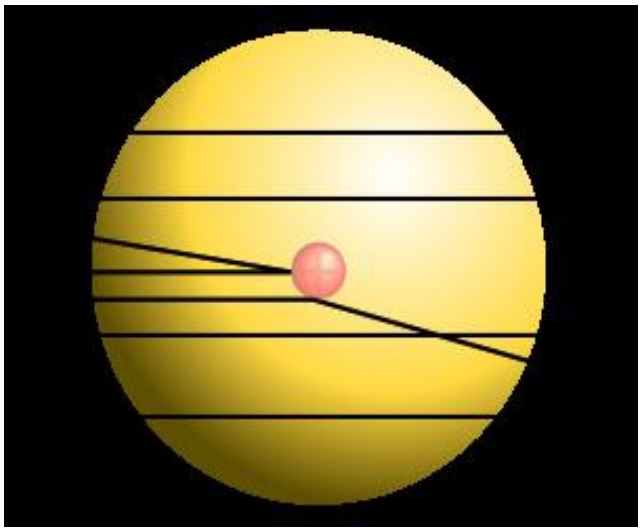
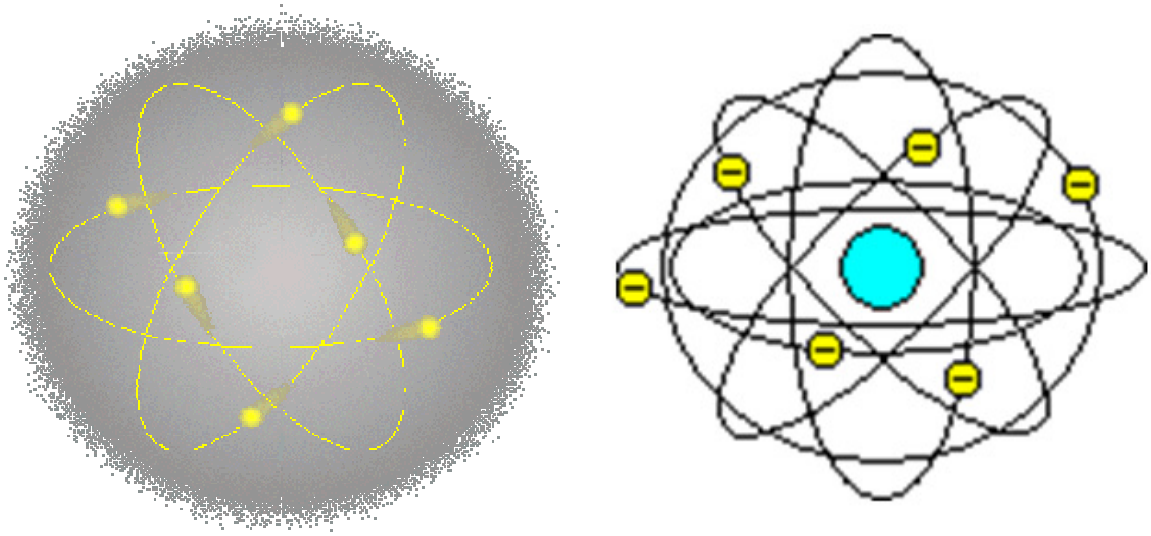


Abbildung 2.6: Rutherfords Streuversuch.



Der Grund für die großen Richtungsänderungen der positiv geladenen Alphateilchen ist die Konzentration der in den Atomen vorhandenen positiven Ladungen in winzigen Bereichen im Zentrum der Atome, in den Atomkernen. Die Elektronen befinden sich außerhalb der Kerne. Atome haben also eine gewisse Ähnlichkeit mit einem Sonnensystem, siehe Abbildung 2.5. Die Elektronen werden zwar vom zentralen Atomkern angezogen, fallen aber wegen ihrer hohen Geschwindigkeit nicht in den Kern hinein.

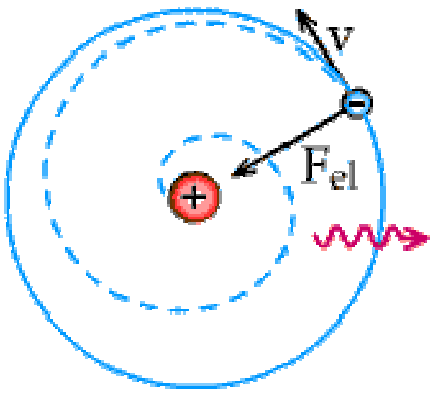
Abbildung 2.7: Planetenmodell des Atoms.



Nach diesem Modell umkreisen die Elektronen den Kern, genauso wie die Planeten die Sonne umkreisen.

Das Rutherford Atommodell hat einige Mängel. Nach den Vorstellungen Rutherfords umkreisen die Elektronen den Atomkern, führen also eine beschleunigte Bewegung aus. Beschleunigte Ladungen strahlen jedoch Energie ab. Rutherfords Atommodell kann nicht erklären, warum Elektronen nicht laufend Energie abstrahlen und deshalb Energie verlieren und schließlich in den Kern stürzen. Weiters kann dieses Atommodell nicht erklären, warum ein Wasserstoff-Kern mit einer positiven Ladung vier Mal leichter ist als ein Helium-Kern mit zwei positiven Ladungen. Dieses Problem wurde erst durch Chadwick geklärt, der nachwies, dass sich im Atomkern auch Neutronen befinden.

Abbildung 2.8: Darstellung der in den Kern stürzenden Elektronen



Eine Verbesserung des Rutherfordschen Atommodells brachte eine bahnbrechende Arbeit von Niels Bohr.

2.2.4 Bohrsches Atommodell

Bohr erkannte, dass die klassische Strahlungstheorie bei atomaren Größenordnungen nicht mehr gültig ist und formulierte als Ausweg folgende Postulate:

Die drei Bohrschen Postulate:

→ Elektronen werden, wie schon Rutherford annahm, durch die elektrische Anziehung des Atomkerns auf Kreisbahnen gehalten.

→ Es gibt gewisse stabile Elektronenbahnen, in denen die Elektronen keine Energie verlieren. Diese sind charakterisiert durch eine natürliche Zahl, die sog. Quantenzahl n. Auf diesen stabilen Bahnen hat der Drehimpuls $m \cdot v \cdot r$ den n-fachen Wert von $\frac{h}{2 \cdot \pi}$. Auf stabilen Bahnen gilt somit $2 \cdot \pi \cdot m \cdot r \cdot v = n \cdot h$, wobei h das nach Max Planck genannte Wirkungsquantum ist. Man sagt der Drehimpuls der Elektronen ist quantisiert.

→ Elektronen können unter Energieverlust ihre Bahn wechseln, also von einem höheren Energiezustand E_1 auf einen tieferen Energiezustand E_2 fallen ($E_1 \rightarrow E_2$). Der Energieverlust E_1-E_2 wird als Photon mit der Frequenz f und der Energie $h \cdot f$ abgestrahlt, $E_1 - E_2 = h \cdot f$.

Bohr gelang es mit dem nach ihm benannten Atommodell die Strahlung, die angeregte Atome abgeben, zu erklären. Der Erfolg des Bohrschen Atommodells zeigte, dass in der submikroskopischen, der atomaren Welt, neue Gesetze gelten, die in der makroskopischen Welt nicht bekannt waren. Zur Beschreibung atomarer Phänomene ist die klassische Physik unzureichend. Außerdem bestätigte Bohr die Erkenntnis von Rutherford und seinen Mitarbeitern, dass Atome aus einem Atomkern und Elektronen aufgebaut sind.

Obwohl Bohr das Rutherfordsche Atommodell verbesserte, so erlaubten doch Bohrs Vorstellungen kein vollständiges Verständnis der in Atomen geltenden Gesetze. So konnte Bohr nicht erklären, warum einzelne Bahnen stabil waren und andere Bahnen instabil. Er konnte auch nicht erklären, warum die Energieabgabe zwischen zwei Elektronenbahnen zur Abgabe von Strahlung führte. Schließlich waren Bohrs Vorstellungen nicht auf Atome mit mehreren Elektronen anwendbar.

2.3 Quantenmechanik der Atome

2.3.1 Materiewellen im Atom

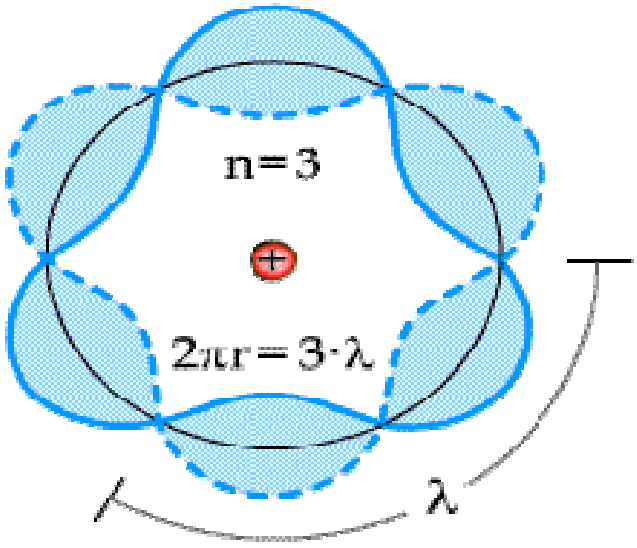
Bei der Besprechung des Bohrschen Atommodells haben wir gesehen, dass eine radikale Abkehr von den Gesetzen der klassischen Physik notwendig ist, wenn man Prozesse innerhalb eines Atoms beschreiben will. Diese Notwendigkeit neue Vorstellungen zu entwickeln, wurde auch durch die

Welleneigenschaften der Elektronen nahegelegt, die 1927 von Davisson und Germer nachgewiesen wurden.

Den ersten Versuch, das Bohrsche Atommodell mit den Welleneigenschaften der Elektronen in Einklang zu bringen, unternahm De Broglie. Er zeigte, dass Bohrs Quantisierungsbedingung für den Drehimpuls $2 \cdot \pi \cdot m \cdot r \cdot v = n \cdot h$ verständlich wird, wenn man verlangt, dass Elektronen stehende Wellen bilden. Mit dem von ihm gefundenen Zusammenhang zwischen Impuls $m \cdot v$ und Wellenlänge λ der Elektronen $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$ ergibt sich $2 \cdot \pi \cdot r = n \cdot \lambda$. Der Umfang der Kreisbahn des Elektrons ist also auf stabilen Bahnen ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge, die De Broglie den bewegten Elektronen zugeordnet hat. Was im Bohrschen Modell als unerklärbare Annahme an die Spitze der Überlegungen gestellt werden musste, ergibt sich als zwanglose Forderung zur Existenz stehender Wellen.

Abbildung 2.11: Stehende Elektronenwelle im Atom

$2 \cdot \pi \cdot r = n \cdot \lambda$



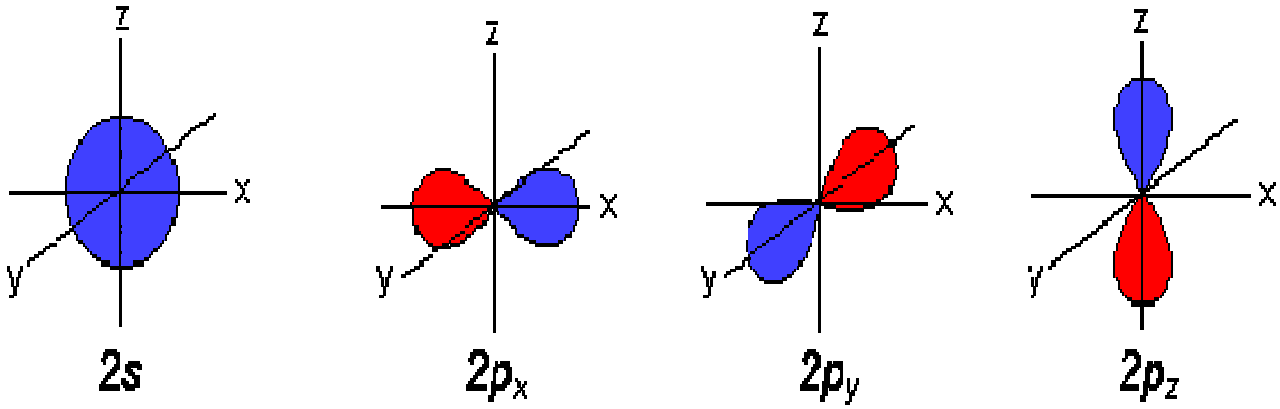
2.3.2 Orbitale

Der einfache *Gedanke* stehender Wellen führt ohne jede Zusatzannahme sofort zur Existenz bestimmter erlaubter Bahnen und damit bestimmter erlaubter Energiezustände der Elektronen im Wasserstoffatom. Damit ist die Leistungsfähigkeit der Vorstellungen von Materiewellen demonstriert. Ein Einbeziehen der räumlichen Struktur der Atome fehlt jedoch noch. Die Schrödingergleichung liefert die mathematische Grundlage zur Berechnung dieser die Elektronenwellen beschreibenden Funktionen. Die Elektronenwellen können nicht als eindimensionale Gebilde betrachten werden, sondern müssen als dreidimensionale Schwingungszustände aufgefasst werden, die durch eine Wellenfunktion beschrieben werden. Die Schrödingergleichung ist eine Differentialgleichung. Ihre Lösungen, die Wellenfunktionen,

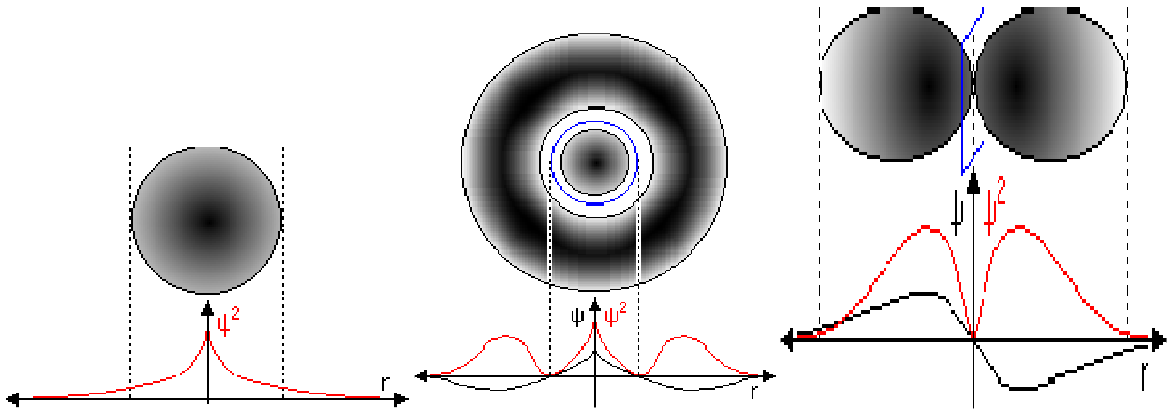
beschreiben nur dann stehende Wellen als Lösung, wenn gewisse Parameter der Funktion ganzzahlige Werte annehmen. Auf diese Art erhält man neben der Quantenzahl n, noch zwei weitere Quantenzahlen l und m. Diese Quantenzahlen l und m hatte schon Sommerfeld eingeführt, als er in einer Erweiterung des Bohrschen Atommodells elliptische Bahnen für die Elektronen zuließ. In der Schrödingergleichung ergeben sich diese Quantenzahlen als Forderung nach der Existenz stehender Wellen. Die Quantenzahlen geben die Zahl der Knotenlinien an, die die dreidimensionalen Wellenfunktionen besitzen.

Die stehenden Wellen der Elektronen bezeichnet man auch als Orbitale. Orbitale sind räumliche Bereiche um den Atomkern, in denen das Elektron angetroffen werden kann. Sie sind nach außen nicht scharf begrenzt, sondern eher als Wolke vorstellbar, die an den Rändern immer dünner wird. In diesem räumlichen Bereich hat ein Elektron eine von Ort zu Ort wechselnde Aufenthalts-wahrscheinlichkeit.

Beispiel 2.12.a: Beispiele von Orbitalen



Beispiel 2.12.b: Beispiele von Orbitalen



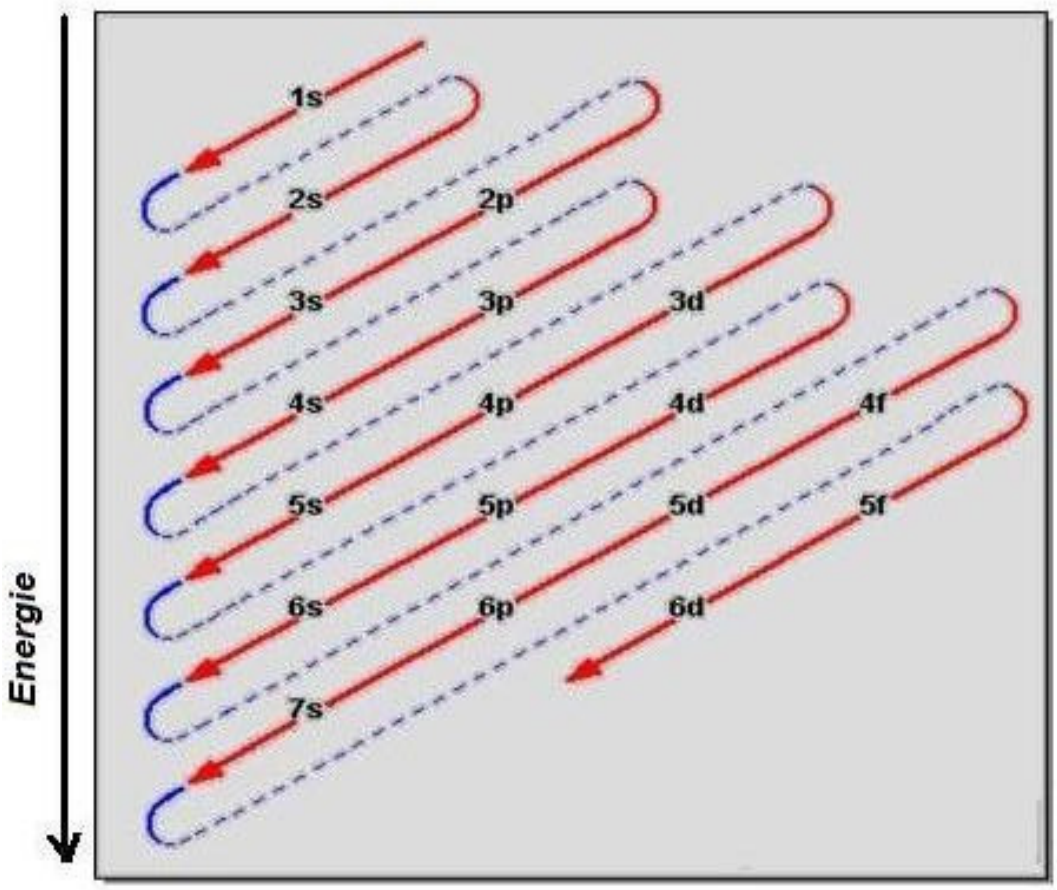
2.4 Periodensystem

Um die Untersuchung der Elemente zu vereinfachen und sich an deren Eigenschaften besser erinnern zu können, haben sich schon seit alten Zeiten Physiker und Chemiker über eine Klassifizierung Gedanken gemacht. Johann W. Döbereiner war der erste Physiker, der eine Beziehung zwischen den Eigenschaften der Elemente und ihren Massen gefunden hat. 1828 erkannte er einige chemische Ähnlichkeiten bei manchen Elementen und konnte sie zu Dreiergruppen zusammenfassen. Verschiedene Wissenschaftler vertraten dann die Ansicht, dass man ein System in dem alle Elemente enthalten sind, entwickeln könnte. Der englische Chemiker J. A. R. Newlands behauptete 1864, dass die Elemente nach steigender Atommasse gruppiert werden können. Er fand jedoch für die Elemente nach Calcium keine Erklärung. 1869 hat der russische Chemiker Dmitri Iwanowitsch Mendelejew ein unserem heutigen Periodensystem ähnliches System entwickelt. Er hat dabei neben Elementen, für die es keine eindeutigen Nachfolger gab, freie Plätze gelassen und konnte deren Eigenschaften vorhersagen. Dies schuf die Möglichkeit, noch neuen Elementen zu suchen. Unser heutiges Periodensystem ist nicht nach der Atommasse, sondern nach den Atomnummern, der Ordnungszahl, aufgelistet. Somit ist das Mendelejewsche Problem des Periodensystems gelöst. Die chemischen Eigenschaften sind eine periodische Funktion der Ordnungszahl. Dies hat mit den Energiezuständen der Elektronen zu tun. Somit entsteht eine Tabelle, in der Elemente mit ähnlichen chemischen Eigenschaften untereinander nach steigenden Atomnummern angeordnet sind. Dies nennt man das Periodensystem.

Wenn sich mehrere Elektronen in der Hülle eines Atoms befinden, haben die Erfahrungen aus Chemie und Spektroskopie gezeigt, dass in den Orbitalen nur eine begrenzte Anzahl von Elektronen Platz finden.

Die Elektronen können nicht alle gleichzeitig den niedrigsten Energiezustand einnehmen. Verschiedene Formen der Elektronhülle führen damit auf die verschiedenen chemischen Eigenschaften der Elemente. Zwei Elektronen dürfen nicht in allen Quantenzahlen übereinstimmen. Das ist das sogenannte Pauliverbot, benannt nach dem Physiker Wolfgang Pauli. Die Quantenzahlen sind mathematische Ausdrücke für Physikalische Eigenschaften. Neben den drei erwähnten Quantenzahlen n, l und m, die die räumliche Verteilung der Elektronenwelle charakterisieren, gibt es noch eine vierte Quantenzahl m_s, die eine innere Eigenschaft des Elektrons, die Richtung des Elektronenspins angibt, und zur Festlegung der Energieniveaus der Elektronen in der Hülle verwendet werden muss.

Abbildung 2.13: Die Besetzung der Orbitale



Besetzungsreihe der Orbitale: 1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 4s, 3d, 4p, 5s, 4d, 5p, 6s, 4f, 5d, 6p, 7s, 5f, 6d usw.

Anmerkung: Das Periodensystem ist in aufeinanderfolgende Perioden eingeteilt. Für die chemischen Eigenschaften eines Elementes ist entscheidend, welche Orbitale gefüllt sind. Die Reihenfolge, wie die Orbitale gefüllt werden, ist in Abb. 2.13 wiedergegeben. Am Beginn jeder neuen Periode werden zunächst die zwei Zustände im jeweiligen s-Orbital besetzt. Ab der zweiten Periode gibt es 6 p-Orbitale, ab der vierte Periode 10 d- und ab die fünften 14 F-Orbitale. Es fällt auf, dass die d- und f-Orbitale erst später besetzt werden. Wenn man davon ausgeht, dass die Elektronenzustände entsprechend ihrer Energie der Reihe nach besetzt werden, so zeigt die Reihenfolge der Füllung der Orbitale, dass die Energie der einzelnen Orbitale nicht nur von der Hauptquantenzahl n, sondern auch von der Quantenzahl l abhängt, die für s-, p-, d- und f-Zustände die Werte 0, 1, 2 und 3 annimmt.

Element Konfiguration	Element Konfiguration
1 H $1s$	31 Ga [Ar] $3d^{10}\ 4s^2\ 4p$
2 He $1s^2$	32 Ge [Ar] $3d^{10}\ 4s^2\ 4p^2$
3 Li $1s^2\ 2s$	33 As [Ar] $3d^{10}\ 4s^2\ 4p^3$
4 Be $1s^2\ 2s^2$	34 Se [Ar] $3d^{10}\ 4s^2\ 4p^4$
5 B $1s^2\ 2s^2\ 2p$	35 Br [Ar] $3d^{10}\ 4s^2\ 4p^5$
6 C $1s^2\ 2s^2\ 2p^2$	36 Kr [Ar] $3d^{10}\ 4s^2\ 4p^6$
7 N $1s^2\ 2s^2\ 2p^3$	37 Rb [Kr] $5s$
8 O $1s^2\ 2s^2\ 2p^4$	38 Sr [Kr] $5s^2$
9 F $1s^2\ 2s^2\ 2p^5$	39 Y [Kr] $4d\ 5s^2$
10 Ne $1s^2\ 2s^2\ 2p^6$	40 Zr [Kr] $4d^2\ 5s^2$
11 Na [Ne] $3s$	41 Nb [Kr] 4d4 5s
12 Mg [Ne] $3s^2$	42 Mo [Kr] $4d^5\ 5s$
13 Al [Ne] $3s^2\ 3p$	43 Tc [Kr] $4d^5\ 5s^2$
14 Si [Ne] $3s^2\ 3p^2$	44 Ru [Kr] $4d^7\ 5s$
15 P [Ne] $3s^2\ 3p^3$	45 Rh [Kr] $4d^8\ 5s$
16 S [Ne] $3s^2\ 3p^4$	46 Pd [Kr] $4d^{10}$
17 Cl [Ne] $3s^2\ 3p^5$	47 Ag [Kr] $4d^{10}\ 5s$
18 Ar [Ne] $3s^2\ 3p^6$	48 Cd [Kr] $4d^{10}\ 5s^2$
19 K [Ar] $4s$	49 In [Kr] $4d^{10}\ 5s^2\ 5p$
20 Ca [Ar] $4s^2$	50 Sn [Kr] $4d^{10}\ 5s^2\ 5p^2$
21 Sc [Ar] $3d\ 4s^2$	51 Sb [Kr] $4d^{10}\ 5s^2\ 5p^3$
22 Ti [Ar] $3d^2\ 4s^2$	52 Te [Kr] $4d^{10}\ 5s^2\ 5p^4$
23 V [Ar] $3d^3\ 4s^2$	53 I [Kr] $4d^{10}\ 5s^2\ 5p^5$
24 Cr [Ar] $3d^5\ 4s$	54 Xe [Kr] $4d^{10}\ 5s^2\ 5p^6$
25 Mn [Ar] $3d^5\ 4s^2$	55 Cs [Xe] $6s$
26 Fe [Ar] $3d^6\ 4s^2$	56 Ba [Xe] $6s^2$
27 Co [Ar] $3d^7\ 4s^2$	57 La [Xe] $5d\ 6s^2$
28 Ni [Ar] $3d^8\ 4s^2$ (oder $3d^9\ 4s$)	58 Ce [Xe] $4f\ 5d\ 6s^2$ (oder $4f^2\ 6s^2$)
29 Cu [Ar] $3d^{10}\ 4s$	59 Pr [Xe] $4f^3\ 6s^2$
30 Zn [Ar] $3d^{10}\ 4s^2$	60 Nd [Xe] $4f^4\ 6s^2$

Abbildung 2.14: Die bei einem chemischen Symbol eines Elementes links oben stehende Zahl ist die Ordnungszahl. In jedem Kästchen steht rechts oben die relative Atommasse. Blau und lila sind die Elementsymbole von Metallen. Nichtmetalle sind in hellem Grün eingetragen und Halbmetalle in Weiß. Rot geschriebene Symbole stehen für flüssige und blau für gasförmige Stoffe. Wir können erkennen, dass sich die Orbitale im Aufbau des Periodensystems wiederspiegeln:

s-Orbitale bilden 2 Gruppen, die Elemente unterhalb von Lithium und Beryllium, Helium wurde aus chemischen Gründen oberhalb des Neons als Edelgas eingefügt.

p-Orbitale bilden 6 Gruppen, die Elemente unterhalb von Bor bis Neon.

d-Orbitale bilden 10 Gruppen, die Elemente unterhalb von Scandium bis Zink.

f-Orbitale bilden die 14 Gruppen der Lanthaniden und Actiniden.

Abbildung 2.14: Periodensystem

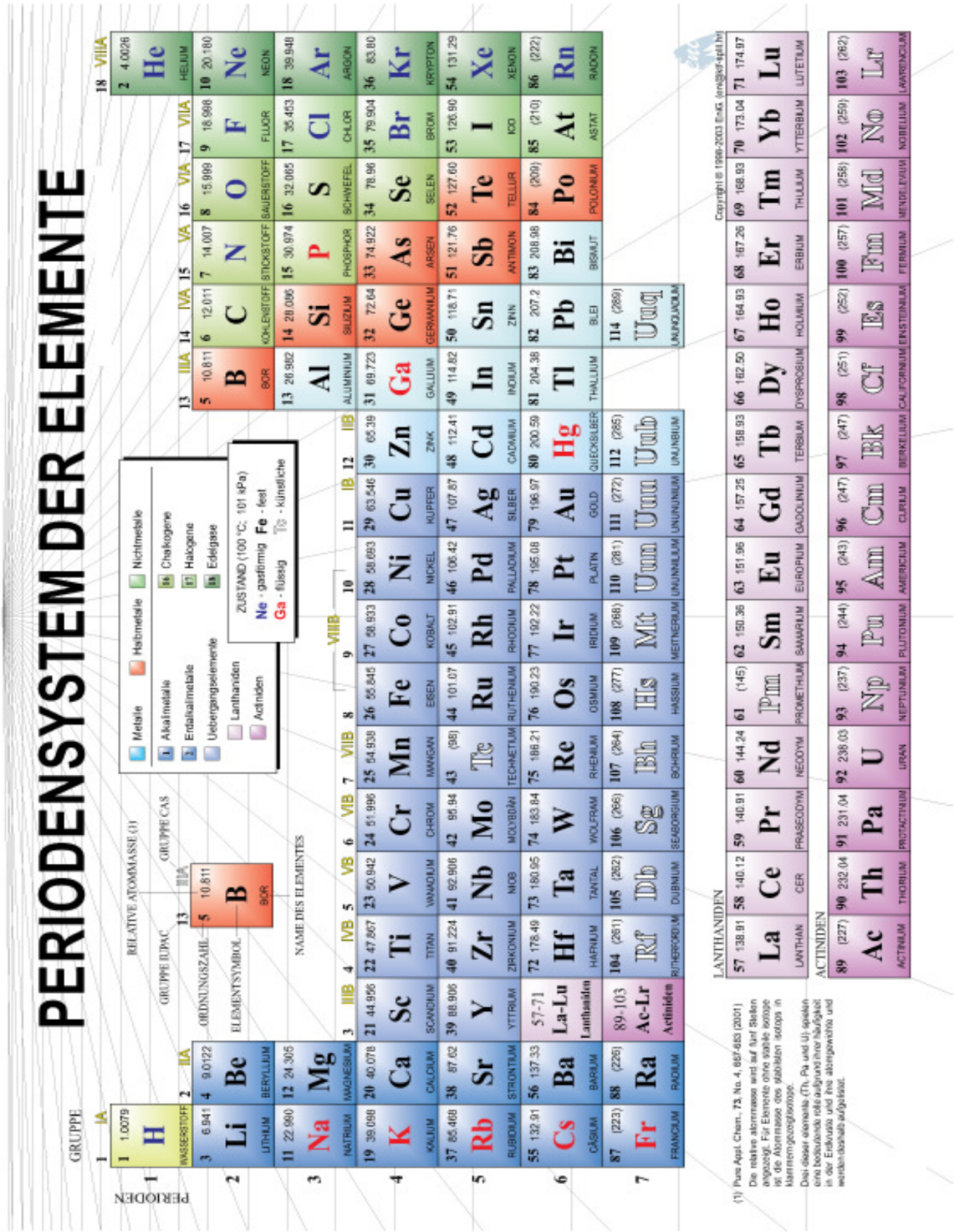
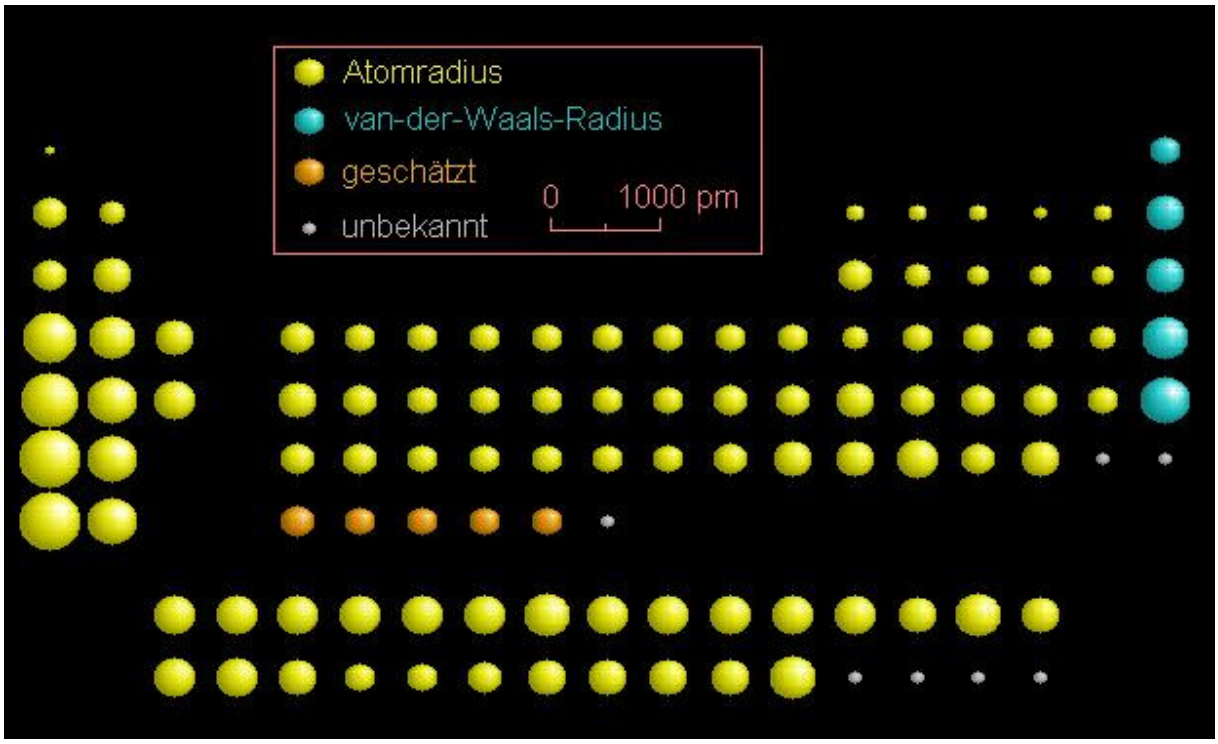


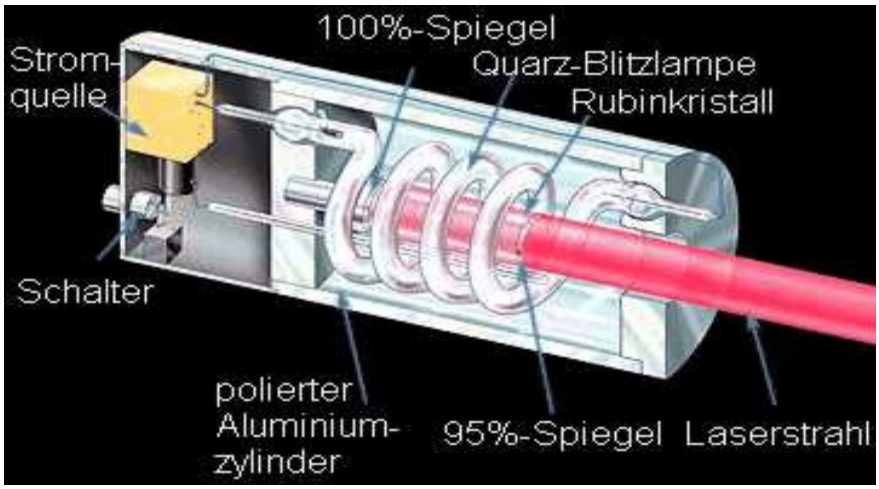
Abbildung 2.15: Atomradius in Abhängigkeit von der Ordnungszahl.



2.5.1 Laser

Das Laserlicht besteht aus Wellen, die sich alle in die gleiche Richtung bewegen und exakt die gleiche Farbe (monochromatisch) und somit gleiche Frequenz besitzen. Es ist kohärent, polarisiert und bildet einen parallelen Strahl mit hoher Energiedichte. Wie wir oben gesehen haben kann man Licht auch als Strom von Photonen auffassen. Beim Laser sind alle diese Teilchen ident und bewegen sich in die gleiche Richtung. Aufgrund dieser Eigenschaften ist das Laserlicht in vielerlei Hinsicht verwendbar. Der erste Laser wurde 1960 von Theodor Maiman gebaut. Er konstruierte einen sogenannten Festkörperlaser. Ein solcher Laser besteht aus einem durchsichtigen Kristall mit einer geeigneten aktiven Substanz. Der Kristall besitzt an zwei gegenüberliegenden Seiten exakt parallele und verspiegelte Flächen. Einer der Spiegel ist nur zu ungefähr 98% verspiegelt, deshalb kann der Laserstrahl dort austreten. Dem Laser wird Energie durch eine Gasentladungslampe zugeführt, die im Laser in einen Lichtstrahl mit den oben erwähnten Eigenschaften umgewandelt wird. In Maimans Laser war die aktive Substanz Rubin. Der stabförmige Rubinkristall war von einer Xenon-Hochleistungs-Blitzlampe schraubenförmig umgeben, wie in Abbildung 2.16 gezeigt. Der Rubin-Laser wird durch periodische Blitze zu Lichtimpulsen angeregt.

Abbildung 2.16: Rubin-Laser



Der Weg vom Labor-Gerät im Jahr 1960 zu millimetergroßen Festkörperlasern in einem CD-Gerät oder Laserpointern ist ein interessantes Beispiel der Technikgeschichte.

Um die Funktionsweise eines Lasers zu verstehen, muss man die verschiedenen Möglichkeiten von Strahlungsübergängen in Atomen betrachten.

Drei Typen von Strahlungsübergängen im Zweiniveausystem:

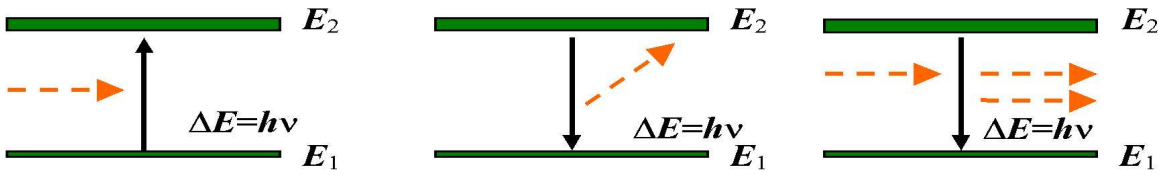
→ Spontane Emission: In der Regel geht ein Elektron, das sich in einem angeregten Zustand befindet, von selbst (spontan) unter Abstrahlung eines Photons in einen leeren, niedrigeren Energiezustand über. Atome eines Gases oder eines Festkörpers sind voneinander unabhängig, deshalb führen spontane Emissionen zu inkohärentem Licht, d.h. Wellenberge und Wellentäler verschiedener Lichtteilchen sind miteinander nicht im Phase.

→ Absorption: Wenn die Energie E eines Photons genau der Energiedifferenz zwischen einem besetzten Energieniveau E_1 und einem unbesetzten, höheren Niveau E_2 entspricht, kann es absorbiert werden. Dabei wird das Elektron in den höheren Energiezustand E_2 „gehoben".

→ Stimulierte Emission: Trifft ein Lichtquant mit der Energie $E = E_2 - E_1$ auf ein angeregtes Atom im Energiezustand E_2, so kann es nicht absorbiert werden, es regt im Gegenteil das Atom zur Emission eines Lichtquants derselben Energie, Bewegungsrichtung und Phase an. Dadurch existieren im Anschluss zwei Photonen mit gleichen Eigenschaften. Es kommt somit zur Lichtverstärkung. Durch die Blitzlampe bringt man möglichst viele Elektronen in den Atomen des Kristalls in denselben angeregten Zustand, sodass die stimulierte Emission lawinenartig

stattfinden kann. Es entsteht daher ein energiereicher, paralleler Lichtstrahl, der den Laser durch die teilweise verspiegelte Fläche verlässt. Der Laserstrahl ist deshalb monochromatisch, parallel und kohärent, d.h. die den Photonen entsprechenden Wellen sind alle in derselben Phasenlage.

Abbildung 2.17: Darstellung der drei Typen von Strahlungsübergängen im Zweiniveausystem



Absorption **spontane Emission** **stimulierte Emission**

Das Prinzip des Lasers beruht auf Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung, engl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, abgekürzt LASER. Die Realisierung eines Lasers erfordert Materialien (aktive Substanzen) mit besonderen, metastabilen, d.h. langlebigen Energieniveaus E_2. Sie bleiben also genügend lange im angeregten Zustand und können dann gleichzeitig, lawinenartig zur stimulierten Emission angeregt werden. Da der Lichtstrahl zwischen den reflektierenden parallelen Spiegeln vor dem Austritt mehrmals hin und her läuft spricht man von einem optischen Resonator.

2.5.2 Eigenschaften und Anwendungen

Die wichtigsten Eigenschaften der Laserstrahlung sind:

→ Hohe Kohärenz, d.h. über eine große Strecke exakt periodische Welle

→ Alle Wellen bewegen sich in dieselbe Richtung. Die Divergenz des Laserlichts ist somit weit geringer als bei anders erzeugten Lichtbündeln.

→ Extrem hohe Leistung (bei einem Impulslaser)

→ Äußerst geringe Frequenzbreite und somit „scharf“ definierte Frequenz des Laserlichtes

Diese Eigenschaften führen zu den vielfältigsten Anwendungen:

→ Laser sind präzise Lichtquellen an Supermarktkassen und in CD-Spielern

- → Materialbearbeitung (schweißen, schneiden, bohren und chirurgische Anwendungen in der Medizin)
- → Anpassung der Augenhornhaut zur Korrektur von Fehlsichtigkeit
- → Nachrichtenübertragung (in Glasfaserkabeln)
- → Holographie (Erzeugung räumlicher Bilder)
- → Erzeugung extremer Hitze in Experimenten zur kontrollierten Kernfusion
- → Vermessungstechnik (z.B. im Tunnelbau)
- → präzise Muster lassen sich in Glas und Metall schreiben.

Abbildung 2.17: Laser Distanzmessgerät

3. Kernphysik

3.1 Einleitung

1896 hat Antoine Henri-Becquerel entdeckt, dass Uran radioaktive Strahlung aussendet. Das war die Geburt der Kernphysik. Später hat er viele Untersuchungen an radioaktiven Kernen durchgeführt. Durch die Arbeiten von Rutherford erkannte man, dass sich die damals bekannten Arten radioaktiver Strahlung in drei verschiedene Arten einteilen lassen, die man nach dem griechischen Alphabet in Alpha-, Beta- und Gamma-Strahlung benannte. Diese Unterscheidung wurde nach der elektrischen Ladung der emittierten Teilchen, dem Absorptionsgrad der Materie und der Ionisierung der Luft getroffen. In späteren Untersuchungen zeigte man, dass die Alphastrahlen aus Helium-Kernen, die Betastrahlen aus Elektronen und die Gammastrahlen aus Photonen hoher Energie bestehen.

Im Jahre 1911 unternahmen Rutherford, Geiger und Marsden genaue Versuche mit Alpha-Teilchen. Sie zeigten damit, dass Atomkerne viel kleiner als Atome sind und für diese Versuche als punktförmig betrachtet werden konnten. Sie stellten fest, dass sich fast die gesamte Masse der Atome in den Kernen befindet. In weiteren Versuchen wurde gezeigt, dass in Atomkernen eine sehr starke Kraft wirkt, deren Reichweite jedoch kleiner als 10^{-14} m ist. Außerhalb dieser Abstände wirkt diese Kraft kaum mehr.

Die Entwicklung der Kernphysik

→ 1896: Entdeckung der radioaktiven Strahlung durch Antoine Henri Becquerel

→ 1930: Durch die Verwendung von künstlich beschleunigten Kernen haben „Cockraft und Walton“ erste künstliche Kernreaktionen mit einem Beschleuniger durchgeführt.

→ 1932: Sir James Chadwick entdeckte das Neutron und zeigte, dass Neutronen ungefähr die Hälfte der Kernmasse ausmachen.

→ 1933: Entdeckung der künstlichen radioaktiven Strahlung durch Irene Joliot-Curie

→ 1938: Die Kernfusion wird durch Otto Hahn und Fritz Straßmann entdeckt.

→ 1942: Enrico Fermi baut den ersten kontrollierbaren Kernspaltungsreaktor.

3.2 Eigenschaften der Atomkerne

1897 entdeckte J.J. Thomson die Elektronen. 1900 entwarf Ernest Rutherford die Grundlagen der heutigen Atommodelle. Er hat die positiven Ladungen im Atomkern als Protonen bezeichnet. Ernest Rutherford fand, dass der Kern von Elektronen umlaufen wird, die das Atomvolumen ausfüllen. 1932 entdeckte Chadwick die Neutronen. Somit war der Aufbau des Atoms verständlicher geworden. Wie wir heute wissen, setzen sich Atome aus Protonen, Neutronen und Elektronen zusammen. Die

Atomkerne bestehen nur aus Protonen und Neutronen. Die einzige Ausnahme bildet Wasserstoff mit nur einem Proton jedoch keinem Neutron in seinem Kern.

Für die Bezeichnung der Atome werden wir die folgenden Symbole und Definitionen verwenden:

Z = Anzahl der Ladungsträger im Atom, Ordnungszahl

N = Die Anzahl der Neutronen

A = Die Summe aus Neutronen- und Protonenzahlen nennt man Massenzahl

$A = Z + N.$

Die Anzahl der Protonen in einem Atomkern nennt man auch Ordnungszahl oder Kernladungszahl Z. Als nützlich hat sich erwiesen, die Massenzahl A, die Protonenzahl Z und die Neutronenanzahl N an das Elementsymbol X anzufügen, ${}^{A}_{Z}X_{N}$, z.B.: ${}^{56}_{26}Fe_{30}$. Der Kern von ${}^{56}Fe$ enthält 26 Protonen und 30 Neutronen. Alle Atome des gleichen Elementes haben die gleiche Anzahl von Protonen, jedoch können sie unterschiedliche Neutronenzahlen haben. Atome mit derselben Protonenanzahl aber unterschiedlicher Neutronenanzahl werden Isotope genannt. Die Häufigkeit der einzelnen Isotope hängt vom Material ab.

Wir können natürliche und künstliche, stabile und instabile Kerne unterscheiden:

→ Natürlich und stabil: 268 Nuklide z.B. ${}^{1}H$, ${}^{12}C$, ${}^{16}O$

→ Natürlich und instabil: 50 Nuklide z.B. ${}^{16}C$, ${}^{235}U$

→ Künstlich und stabil? Wir kennen kein Beispiel

→ Künstlich und instabil: bisher sind etwa 2500 solche Nuklide bekannt, z.B. ${}^{239}Pu$.

Proton und Elektron haben genau gleich große Ladungen, jedoch mit umgekehrtem Vorzeichen. Das Neutron ist elektrisch neutral. Aus diesem Grund kann man Neutronen sehr schwer nachweisen.

Die Masse des Protons ist 1836-mal größer als die Elektronmasse. Die Protonenmasse und Neutronenmasse sind ungefähr gleich. Eine günstige Einheit für die Angabe von Atommassen ist die „Atomare Masseneinheit“.

Die atomare Masseneinheit 1 u ist der 12-te Teil der Masse des Kohlenstoffisotops ${}^{12}C$.

Atomare Masseneinheit: $1\ u = m({}^{12}C)/12 = 1{,}660\,540 \cdot 10^{-27}\ kg = 931{,}494\ MeV/c^2$.

Die Masse eines ${}^{12}C$-Atoms beträgt demnach genau 12 atomare Masseneinheiten, $m({}^{12}C) = 12{,}000\ u$. Man sagt auch, die relative Atommasse A_r von ${}^{12}C$ ist 12,000. Unter der relativen Atommasse versteht man das Verhältnis aus Atommasse und atomarer Masseneinheit,

$$A_r = \frac{m(Atom)}{u}$$

Die relativen Atommassen von Proton, Neutron und Elektron betragen:

A_r(Proton) = 1,007276, m_p = 1,007 276 u.

A_r(Neutron) = 1,008665, m_n = 1,008 665 u.

A_r(Elektron) = 0,0005486, m_e = 0,000 548 6 u.

Tatsächlich sind die Atommassen kleiner sind als die Summen aus Protonen-, Neutronen- und Elektronenmassen. Das ist von besonderer Bedeutung und wird im Folgenden noch besprochen.

Beispiel: Kohlenstoff (C) besitzt zwei natürliche Isotope $^{12}_{6}C$ und $^{13}_{6}C$ mit den relativen Häufigkeiten 1.1% für $^{13}_{6}C$ und 98,9% für $^{12}_{6}C$. $^{14}_{6}C$ und $^{11}_{6}C$ sind künstliche Isotope. Diese Kerne (=Nuklide) kann man im Labor mit Kernreaktionen produzieren.

Beispiel 1:

Wir werden die Gesamtmasse der „Bausteine“ eines ^{12}C-Atoms bestimmen. Ein neutrales $^{12}_{6}C_6$-Atom besteht aus 6 Protonen, 6 Neutronen und 6 Elektronen. Die Gesamtmasse beträgt:

6 Protonenmassen + 6 Neutronenmassen + 6 Elektronenmassen = $6 \cdot m_p + 6 \cdot m_n + 6 \cdot m_e$ =

$= 6 \cdot 1{,}007276\ u + 6 \cdot 1{,}008665\ u + 6 \cdot 0{,}0005486\ u =$

$= 12{,}099\ u.$

Einige Werte für die relativen Atommassen A_r können aus Tabelle 2.9 entnommen werden.

Abbildung 2.9 : Relative Atommassen einiger Elemente

	A_r
Wasserstoff	1,00794 u
Chlor	35,453 u
Sauerstoff	15,9994 u
Stickstoff	14,0067 u
Kohlenstoff	12,0107 u

Das Phänomen, dass die Masse eines Atoms kleiner als die Gesamtmasse seiner Protonen, Neutronen und Elektronen ist, nennt man Massendefekt. Der Massendefekt Δm ist definiert als

$\Delta m = \sum_{i=1}^{A} m_i - m_0$

Δm = Massendefekt

$\sum_{i=1}^{A} m_i$ = Summe der Einzelmassen

m_0 = Masse des Atoms

Bei der Bildung eines Atoms aus seinen Bestandteilen wird Energie frei, die sog. Bindungsenergie. Auf Grund der Äquivalenz zwischen Masse und Energie ist die Abgabe dieser Bindungsenergie die Ursache für diesen Massenverlust, den Massendefekt Δm.

Beispiel 2:

Das α-Teilchen ist der Kern des Helium–Atoms, also des Nuklids ^{4}He. Es besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Für die Masse des Helium–Atoms ergibt sich somit:

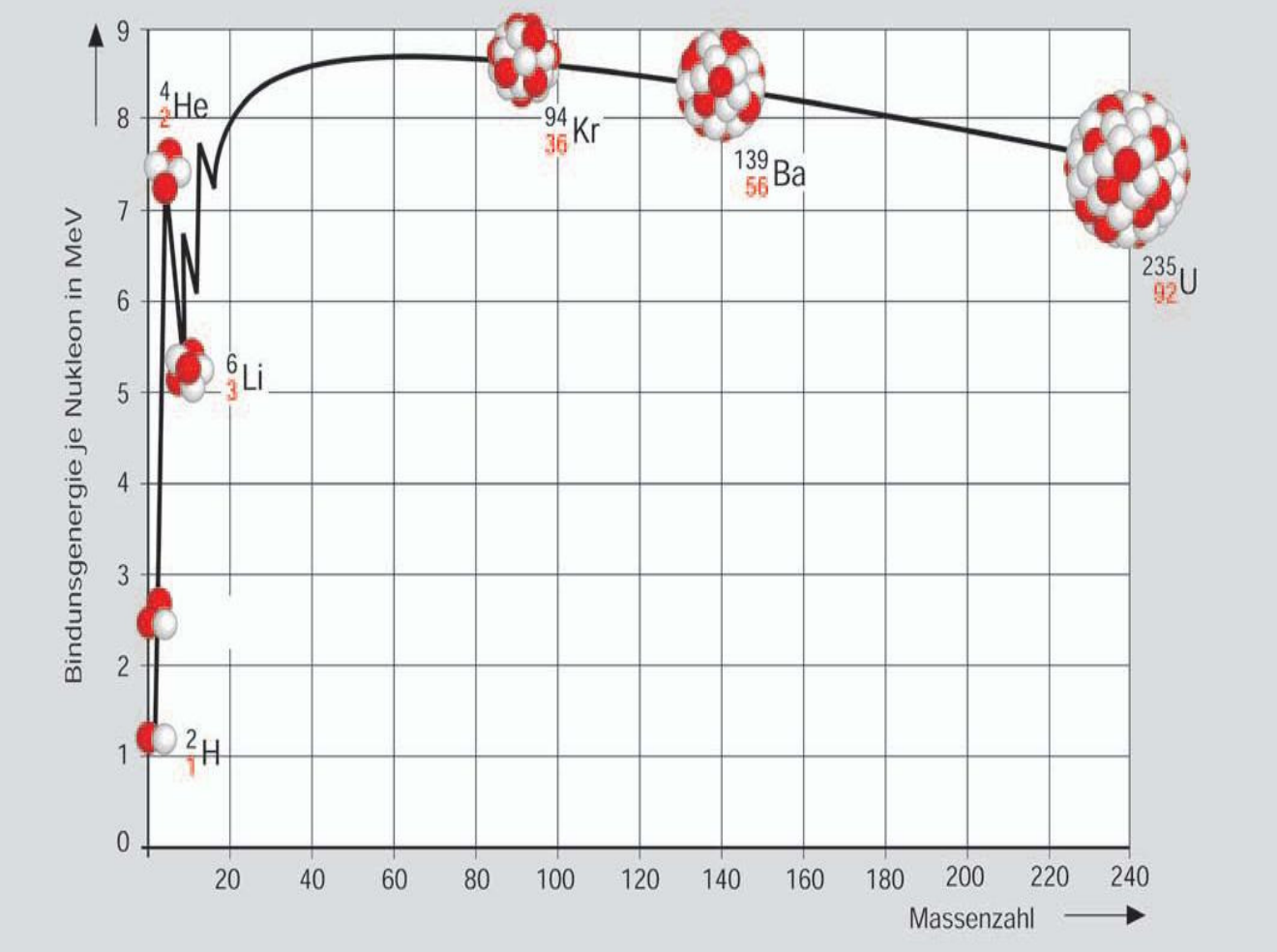
Kern:	
Zwei Protonen zu je 1,007276 u	2,01455 u
Zwei Neutronen zu je 1,008665 u	2,01733 u
Atomhülle:	
Zwei Elektronen zu je 0,0005486 u	0,00110 u

Summe der Massen der Bestandteile	4,03298 u
Experimentelle Atommasse	4,00260 u

Massendefekt des Heliumkerns	0,03038 u
Massendefekt pro Nukleon Δm/A	0,00760 u

Die Bindungsenergie der Atome ist näherungsweise proportional zur Massenzahl A. Die Bindungsenergie pro Nukleon ist deshalb nicht sehr stark von der Massenzahl A abhängig, wie die folgende Abbildung zeigt. Die Bindungsenergie pro Nukleon hat ein Maximum beim Eisen, während sie in Richtung zu leichteren und schwereren Elementen abfällt.

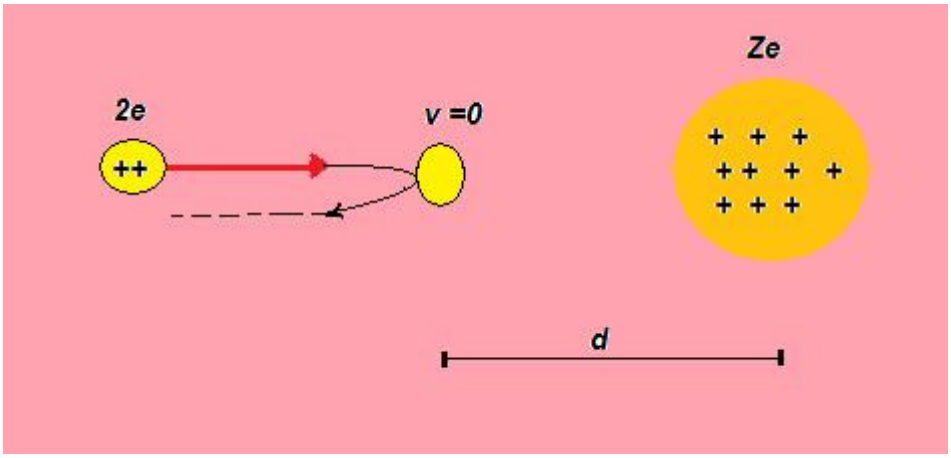
Abbildung 10: Mittlere Bindungsenergie je Nukleon in Abhängigkeit von der Massenzahl



Die Kerne mittlerer Massenzahl (um A ≈ 50) besitzen die größte Bindungsenergie pro Nukleon, also die größte Stabilität. Leichtere Kerne (A < 50) können durch Verschmelzung (Fusion) in stabilere Kerne umgewandelt werden, wobei Energie frei wird. Schwere Kerne (A > 50) können durch Spaltung in stabilere Bruchstücke zerlegt werden, wobei ebenfalls Energie frei wird.

Ernst Rutherford hatte 1911 positiv geladene Heliumkerne (Alphateilchen) auf dünne Goldblättchen geschossen. Er stellte fest, dass die meisten Alphateilchen das Metall durchdrangen, während manche ihre Bewegungsrichtung stark veränderten oder sogar reflektiert wurden. Das bedeutet, dass einige Heliumkerne die Atomkerne direkt getroffen haben. Mit dem Satz von der Erhaltung der Energie kann man den kürzesten Abstand d ausrechnen, bis zu dem sich Alphateilchen den Atomkernen auf Grund der Abstoßung nähern. Beim Abstand d ist die kinetische Energie der Alphateilchen Null, die potenzielle Energie hat sich vollständig in kinetische Energie umgewandelt.

Abbildung 3.1: Zusammenstoß eines Alpha-Teilchens mit einem Kern der Masse Ze.



Aus der Äquivalenz von kinetischer und elektrischer potenzieller Energie können wir den Wert des Abstandes d herleiten.

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = k_e \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{d} = k_e \cdot \frac{2e \cdot Ze}{d} \rightarrow d = \frac{4 \cdot k_e \cdot Z \cdot e^2}{m \cdot v^2}$$

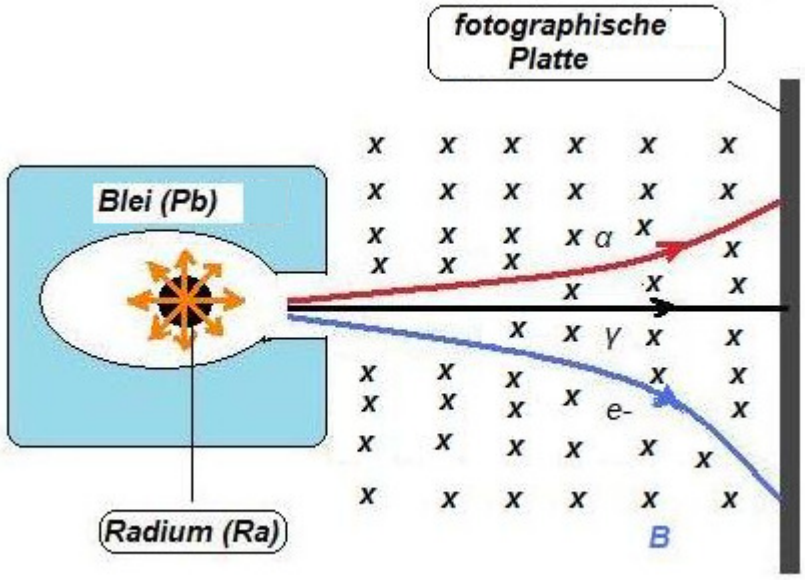
Hier muss man darauf achten, dass der Abstand d der kürzeste Abstand zum Kern ist. Somit können wir eine maximale Größe und einen maximalen Radius des Atomkerns bestimmen. Rutherford zeigte mit seinen Versuchen, dass der Kern kleiner als 10^{-14} m sein muss. Zur Angabe der Größe von Atomkernen ist es günstig die Längeneinheit Femtometer (fm) zu benützen, wobei 1 fm = 10^{-15} m beträgt. Rutherford hat bei seinen weiteren Versuchen gezeigt, dass der Radius des kugelförmigen Atoms mit $r = r_0 \cdot A^{1/3}$ berechnet werden kann, wobei A die Massenzahl ist und $r_0 = 1{,}2 \cdot 10^{-15}$ m.

3.3 Radioaktivität und Zerfallsgesetz

Antoine Henri Becquerel hat die radioaktive Strahlung im Jahr 1896 zufällig entdeckt. Becquerel stellte fest, dass die Strahlung von Uran eine neue Art von Strahlung ist. Die Eigenschaft von Uran, diese Strahlung zu emittieren, nannte man Radioaktivität. In ähnlichen Versuchen wurde gezeigt, dass andere Materialien ebenfalls radioaktive Eigenschaften haben. Alle diesbezüglichen Versuche ergaben, dass instabile Kerne die Zerfälle verursachen. Das Ehepaar Marie und Pierre Curie hat im Jahr 1911 zwei solche Elemente gefunden, die sie Radium und Polonium nannten. Radioaktive Materialien können durch drei Zerfallsarten Strahlung emittieren: Alphastrahlung ($\alpha = {}^4_2He$), Beta-Strahlung (β), bei der ein Elektron (-e) oder Positron(+e) emittiert wird, sowie Gammastrahlung, die aus hochenergetischen Photonen besteht. Positronen haben die gleichen physikalischen Eigenschaften wie Elektronen jedoch die umgekehrte Ladung. Die radioaktive Strahlung kann, wie in Abbildung 3.2 gezeigt, entsprechend ihrer Ladung getrennt werden. Ein magnetisches Feld lenkt die unterschiedlich geladenen Teilchen in unterschiedliche Richtungen ab. Die positiv geladenen Alpha-

Teilchen und Positronen werden in Abb. 3.2 nach oben, die negativen Ladungen nach unten abgelenkt. Die elektrisch neutrale Gammastrahlung erfährt keine Ablenkung.

Abbildung 3.2: Ladungsseparation im Magnetfeld.



Die drei Strahlungsarten durchdringen Materie in unterschiedlicher Stärke. Die Gammastrahlung kann eine Blei-Platte von mehreren Zentimetern durchdringen. Beta-Teilchen (Elektronen und Positronen) werden bereits von Aluminium von einigen Zentimetern Stärke absorbiert, während Alpha-Teilchen schon von einem Blatt Papier abgeschirmt werden. Die Zerfallsgeschwindigkeit von radioaktivem Material hängt von der Anzahl der noch nicht zerfallenen Kerne und von der Substanz ab.

Wir können bei einer größeren Menge einer radioaktiven Substanz vorhersagen, wie viele Kerne pro Zeiteinheit zerfallen werden. Mit Hilfe der Differentialrechnung erhält man das Zerfallsgesetz.

$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$

N(t) = Anzahl der Teilchen zum Zeitpunkt t, [N(t)] = 1

N_o = Anzahl der ursprünglich vorhandenen Teilchen, $[N_o] = 1$

λ = Zerfallskonstante, [λ] = 1/s

t = Zeit, [t] = 1 s

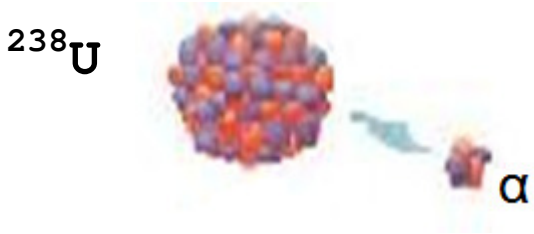
Eine wichtige Größe ist die Halbwertzeit $T_{1/2}$. Sie gibt die Zeit an, in der die Hälfte des ursprünglich vorhandenen Materials zerfällt. Für die Halbwertzeit $T_{1/2}$ gilt: $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$. Der Kehrwert der Zerfallskonstante wird als Lebensdauer τ bezeichnet: $\tau = 1/\lambda$.

3.4 Alpha-Zerfall

Wenn ein Kern ein Alpha-Teilchen, also einen He-Kern $^{4}_{2}He$ abstrahlt, dann verliert er zwei Protonen und zwei Neutronen. Dieser Zerfall wird symbolisch folgendermaßen dargestellt:

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$$

Abbildung 3.3: Alpha Zerfall von ^{238}U



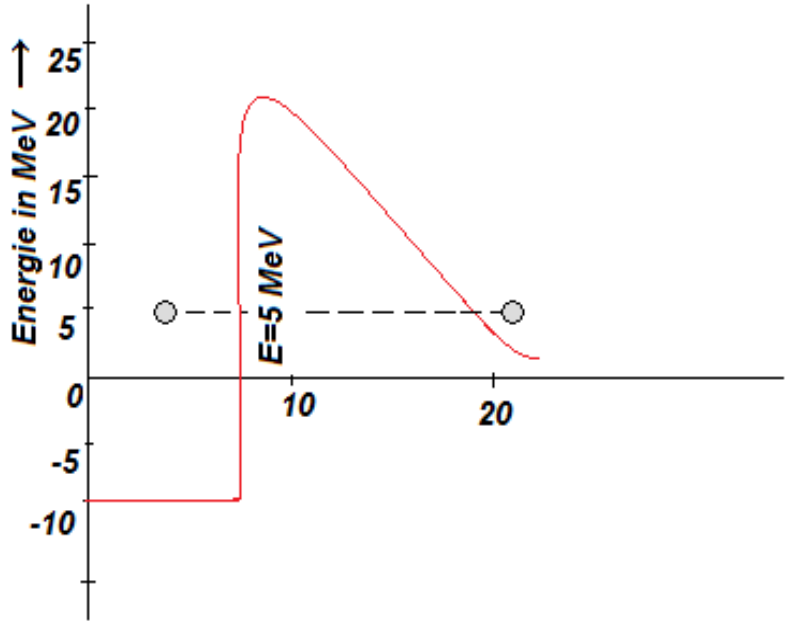
Bei der Alpha-Strahlung entsteht ein neuer Kern, der Tochterkern genannt wird. Für Uran(^{238}U) oder Radium(^{226}Ra) ergeben sich als Tochterkerne Thorium und Radon,

$$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He, \qquad {}^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$$

Beim Alpha-Zerfall gilt die Erhaltung von Gesamtenergie und Gesamtimpuls. Alpha-Teilchen besitzen typischerweise eine Energie von etwa 4 - 8 MeV.

Da Alpha-Teilchen sehr leicht abgeschirmt werden können, kann man sich verhältnismäßig leicht gegen Alphastrahlung schützen. Gefährlich ist es jedoch, wenn alpha-aktive Stoffe mit der Haut in Berührung kommen, mit der Nahrung aufgenommen oder eingeatmet werden. Zigaretten beinhalten das alpha-aktive Polonium ^{210}Po, welches Darm- und Leberkrebs verursachen kann.

Abbildung 3.4: Die Energiedifferenz zwischen Mutterkern und Tochterkern lässt eine Abschätzung der Lebensdauer des Mutterkerns zu. Ist die Energiedifferenz groß, so durchtunnelt das α- Teilchen den Potenzialwall in der Nähe seiner Potenzialspitze und erhält eine hohe kinetische Energie.



3.5 Beta-Zerfall

Wenn ein radioaktiver Kern Betastrahlung, also Elektronen e^- oder Positronen e^+ emittiert, verändert sich die Ordnungszahl um plus oder minus Eins. Symbolisch stellt man dies folgendermaßen dar:

$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + e^-$ $\qquad$ $^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + e^+$

Abbildung 3.5: Beta-Zerfall

Beim Beta-Zerfall verändert sich die Ordnungszahl Z, die Massenzahl A bleibt jedoch gleich. Das heißt, dass sich entweder ein Neutron in ein Proton und ein Elektron oder ein Proton in ein Neutron und ein Positron umwandelt. Die dabei entstehenden Elektronen oder Positronen können nicht im Atomkern festgehalten werden und werden deshalb emittiert.

Beispiel : Beta-Zerfall

$^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + e^- + \bar{\nu}_e$ $\qquad$ $^{12}_{7}N \rightarrow {}^{12}_{6}C + e^+ + \nu_e$

Neben dem Elektron entsteht beim β^- –Zerfall ein sehr schwer nachweisbares neutrales Teilchen, ein Elektronantineutrino $\bar{\nu}_e$: n → p + e- + $\bar{\nu}_e$. Beim β^+-Zerfall entsteht entsprechend ein Elektronneutrino ν_e: p → n + e^+ + ν_e. Beim β^--Zerfall muss ein neues Proton im Tochterkern gegen die Coulombabstoßung der anderen Protonen in den Kern eingebaut werden.

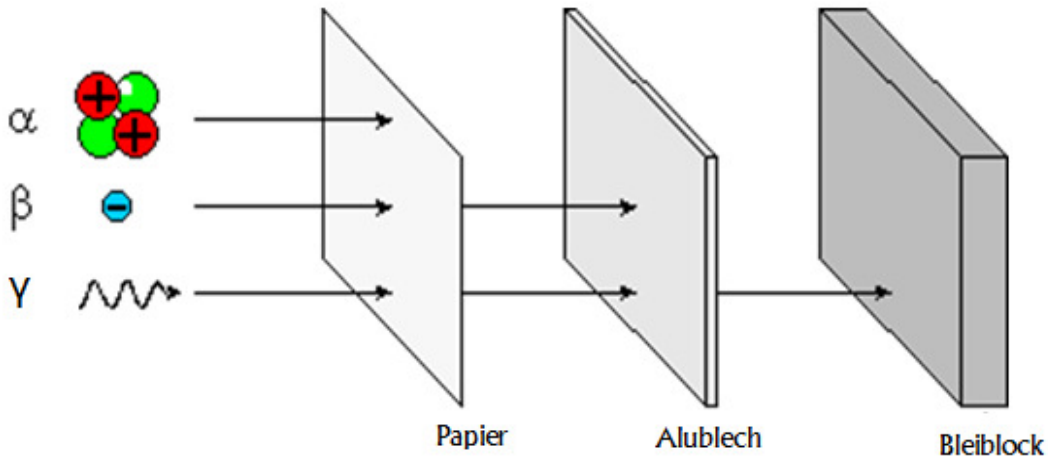
3.6 Gamma-Strahlung

Ein radioaktiver Kern besitzt nach einem radioaktiven Zerfall meist eine hohe Energie, die er rasch in Form von Gamma-Strahlung (hochenergetische Photonen) abstrahlt. Durch einen solchen Gammaübergang verändert der Tochterkern seine Zusammensetzung nicht, sondern geht nur in einen Zustand niederer Energie über. Die Position des Tochterkerns im Periodensystem wird durch den Gammaübergang nicht geändert.

Symbolisch lässt sich das folgendermaßen darstellen:

$^{A}_{Z}X^* \rightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma$, $\qquad$ $^{12}_{6}C^* \rightarrow {}^{12}_{6}C + \gamma$

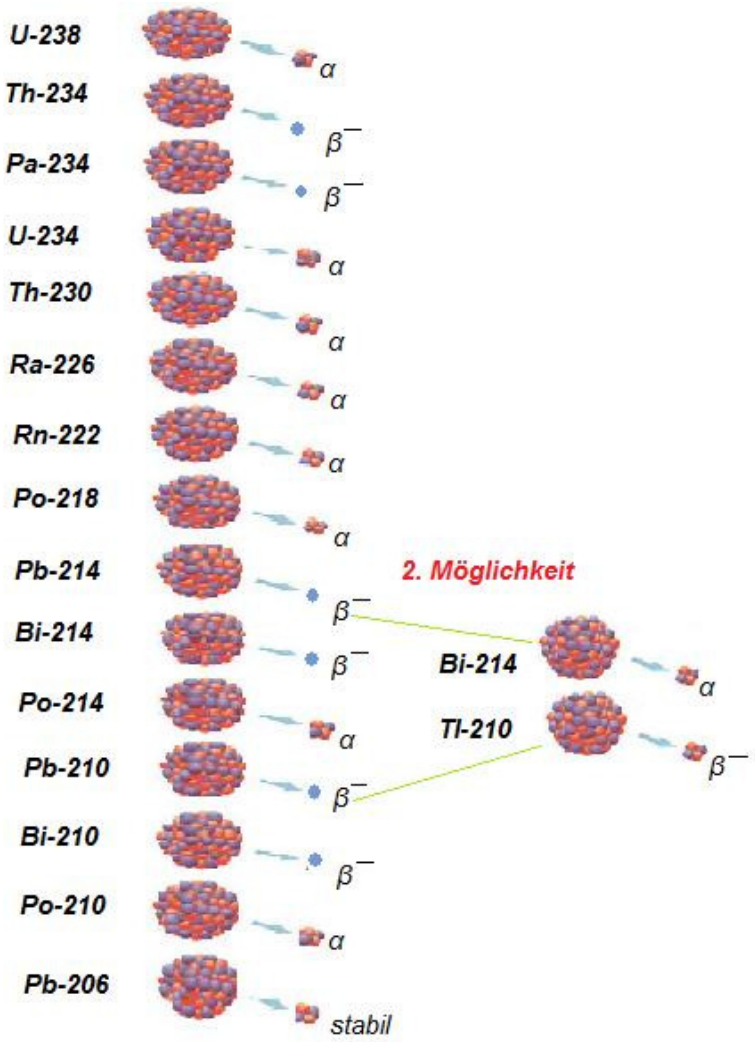
Abbildung 3.7: Abschirmung von Alpha-, Beta- und Gammastrahlung γ



3.7 Natürliche Radioaktivität und Zerfallsreihen

Die meisten in der Natur vorkommenden radioaktiven Elemente kann man in drei Zerfallsreihen einordnen, die bei Isotopen von Uran und Thorium (^{238}U, ^{235}U und ^{232}Th) beginnen. Diese drei Zerfallsreihen enden nach verschiedenen Alpha- und Betazerfällen bei den stabilen Kernen ^{206}Pb, ^{207}Pb und ^{208}Pb. In Abbildung 3.8 ist die U-Ra-Reihe dargestellt. Manche Kerne können auf zwei Arten zerfallen, wie ^{214}Bi, das sowohl einen Alpha- als auch einen Betazerfall erleiden kann. Diese beiden Zerfallsmöglichkeiten sind in Abbildung 3.8 wiedergegeben.

Abbildung 3.8: U-Ra-Reihen

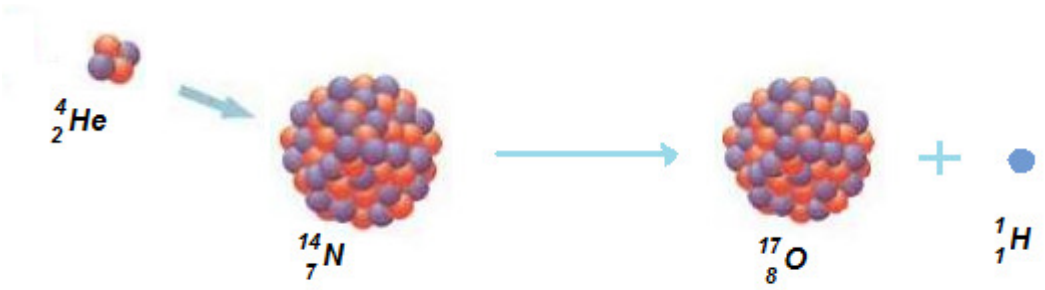


3.8 Künstliche Radioaktivität:

Neben den natürlich radioaktiven Kernen gibt es noch künstlich radioaktive Kerne, die im Labor erzeugt werden können. Bestrahlt man stabile Atomkerne mit verschiedenen Teilchen wie Protonen, Elektronen, Neutronen oder Alphateilchen, so können nach dem Stoß instabile Teilchen zurückbleiben. Diese instabilen Atomkerne können Alpha-, Beta- und Gamma-Zerfälle zeigen. Dies wird als künstliche Radioaktivität bezeichnet.

Die erste künstliche Kernreaktion wurde bereits von Ernest Rutherford im Jahr 1919 durchgeführt. Rutherford hat stabile Stickstoffisotope $^{14}_{7}N$ mit Alpha-Teilchen bestrahlt und dabei stabile Sauerstoffisotope $^{17}_{8}O$ produziert.

Abbildung 3.9: Darstellung der erster künstliche Kernreaktion.



$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}\alpha \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H$

Die künstliche Radioaktivität wurde erst im Jahr 1934 von Joliot Curie entdeckt. Durch Kernreaktion wurden inzwischen viele verschiedene künstliche Isotope erzeugt. So kann beispielsweise aus Aluminium, durch Beschuss mit Alpha-Teilchen, radioaktives Phosphor produziert werden.

$^{27}_{13}Al + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{30}_{15}P + ^{1}_{0}n$ $^{30}_{15}P \rightarrow ^{30}_{14}Si + ^{0}_{1}\beta$

Heute wird durch Kernfusion und Kernspaltung nukleare Energie technisch nutzbar gemacht.

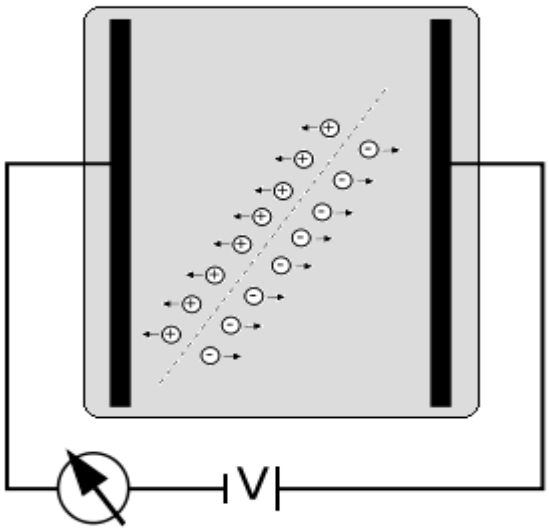
3.9 Nachweismethoden radioaktiver Strahlung

Viele verschiedene Detektoren wurden entwickelt, um radioaktive Strahlung zu messen. Am häufigsten wird dabei deren ionisierende Wirkung ausgenutzt. Diese Detektoren werden bei verschiedenen medizinischen Untersuchungen und zum Messen von Teilchenmassen, Teilchenimpulsen oder Teilchenenergien benutzt. Im Folgenden soll nur ein kurzer Überblick über die wichtigsten Nachweisverfahren gegeben werden. Das Gebiet des Strahlennachweises hat sich zu einem sehr bedeutendem Forschungsgebiet der experimentellen Kernphysik entwickelt.

3.9.1 Ionisationskammer

Die Ionisationskammer ist der einfachste und älteste Detektor. Mit diesem Gerät kann man ionisierende Strahlung nachweisen. Sie besteht aus einem Plattenkondensator in einem gasgefüllten Gefäß.

Abbildung 3.10: Schematische Abbildung einer Ionisationskammer

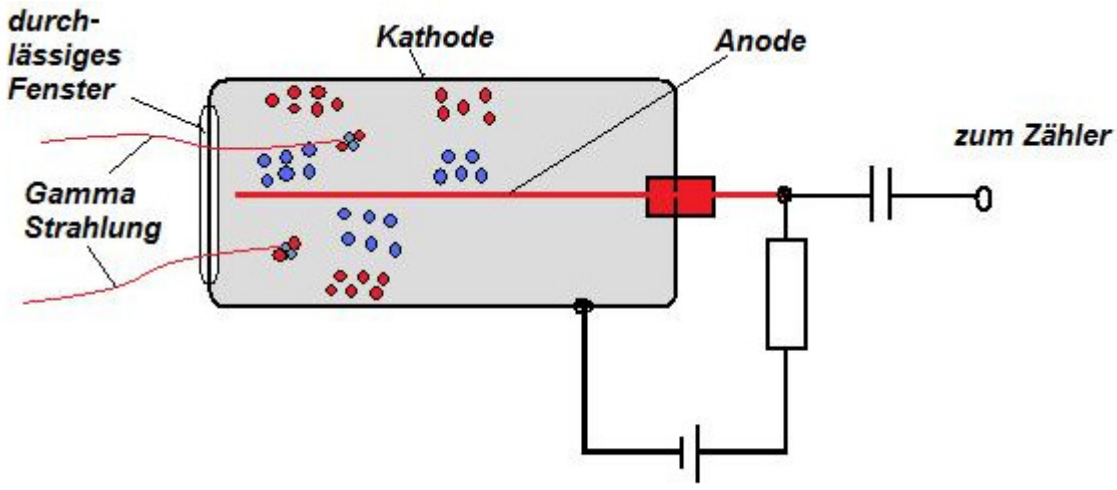


Wenn ein ionisierendes Teilchen das Kammervolumen durchfliegt, so werden im Gas Ionenpaare gebildet. Das elektrische Feld im Plattenkondensator trennt diese und ruft so einen elektrischen Strom hervor, der zur Strahlungsintensität proportional ist.

3.9.2 Geiger-Müller-Zählrohr

Beim Geiger-Müller Zählrohr (kurz Geigerzähler) handelt es sich um einen der ältesten Detektortypen, der immer noch in Gebrauch ist. Dieser Detektor wird vor allem zur Dosismessung radioaktiver Strahlung eingesetzt. Er wurde bereits im Jahre 1908 von Hans Geiger erfunden und von ihm 1928 gemeinsam mit seinem Kollegen Walther Müller weiterentwickelt. Dieser Detektor ist eine Weiterentwicklung der einfachen Ionisationskammer. Das Geiger-Müller-Zählrohr besteht aus einem dünnwandigen Metallzylinder (Kathode) in welchem ein dünner Draht als Anode gespannt wird. Das Rohr ist mit Gas unter geringem Druck gefüllt. Die von einem ionisierenden Teilchen gebildeten Ladungsträger werden so stark beschleunigt, dass sie neutrale Atome des Gases im Stoß ionisieren können und so den Effekt der Ionisationskammer verstärken.

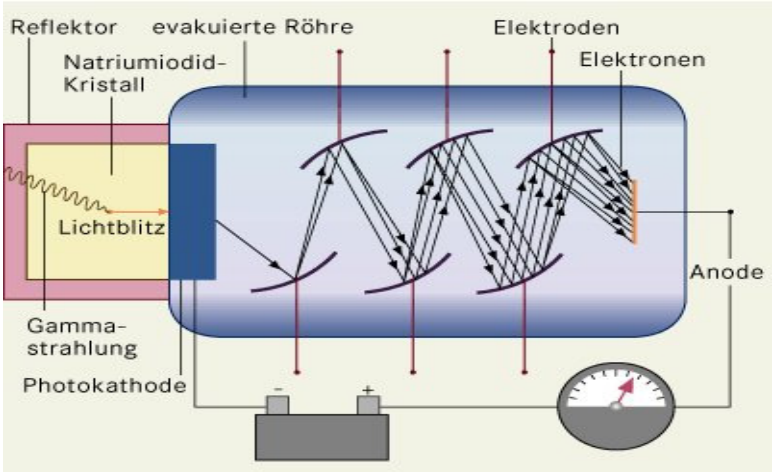
Abbildung 3.11: Modell eines Geiger-Müller-Zählrohres



3.9.3 Szintillationszähler

Ein Szintillationszähler ist ein Gerät zur Zählung und Energiemessung energiereicher Elementarteilchen und Photonen. Die in einem Szintillator ausgelösten Lichtblitze werden mit einer Fotozelle oder einem Fotoelektronenvervielfacher verstärkt und können dann registriert und elektrisch weiterverarbeitet werden. Szintillationszähler werden zunehmend durch Halbleiterdetektoren ersetzt.

Abbildung 3.12: Modell eines Fotoelektronenvervielfachers



3.9.4 Halbleiterdetektor (Halbleiterzähler)

Der Halbleiterdetektor ist ein Strahlungsnachweisgerät, dessen Wirkungsweise auf dem Sperrschichteffekt an einem pn-Übergang beruht. Beim Anlegen einer Spannung bildet sich eine Dipolschicht. Fehlstellen (Löcher) werden durch einfallende Strahlung (Alphastrahlung, Betastrahlung, Gammastrahlung) beschleunigt und können die Sperrschicht durchdringen. Der resultierende Stromstoß ist ein Maß für die Energie der einfallenden Strahlung.

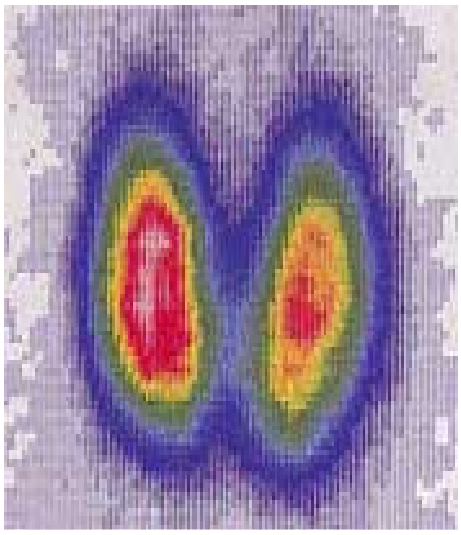
3.10 Anwendungen der Radioaktivität

Radioaktivität wird in verschiedenen Bereichen angewendet. In der Medizin können Radionuklide sowohl zur Erkennung als auch einer Behandlung verwendet werden. Die Anreicherung bestimmter Radionuklide wird dazu benutzt, um die Funktionsweise von Organen zu überprüfen. In der Behandlung werden Radionuklide, wie schon die natürlichen radioaktiven Elemente seit der Entdeckung des Radiums, zur Krebsbekämpfung eingesetzt, da ihre Strahlung Gewebe zerstören kann. Das Nuklid Co (Kobalt) steht dabei an erster Stelle, weil das Nuklid ähnliche Eigenschaften wie Radium hat, aber wesentlich billiger ist. Die selektive Speicherung von Radionukliden in bestimmten Organen ermöglicht eine gezielte innere Bestrahlung. Bei der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) wird den Patienten ein β^+- Strahler zugeführt. Die emittierten Positronen treffen im Gewebe auf Elektronen und zerstrahlen unter Abgabe energiereicher Strahlung, der sogenannten Vernichtungsstrahlung. Diese wird von einer ringförmigen PET – Kamera registriert und an einen Computer weitergeleitet, der daraus Bilder generiert. Somit ist es möglich, Stoffwechselvorgänge im Gewebe sichtbar zu machen.

Szintigraphie, Gammakamera

Bei dieser Methode nimmt der Patient Radiopharmaka, also radioaktive Substanzen ein, welche dem zu untersuchenden Organ angepasst sind. Ein bekanntes Beispiel ist radioaktives Jod für Schilddrüsenuntersuchungen.

Abbildung 3.12: Schilddrüsenszintigramm



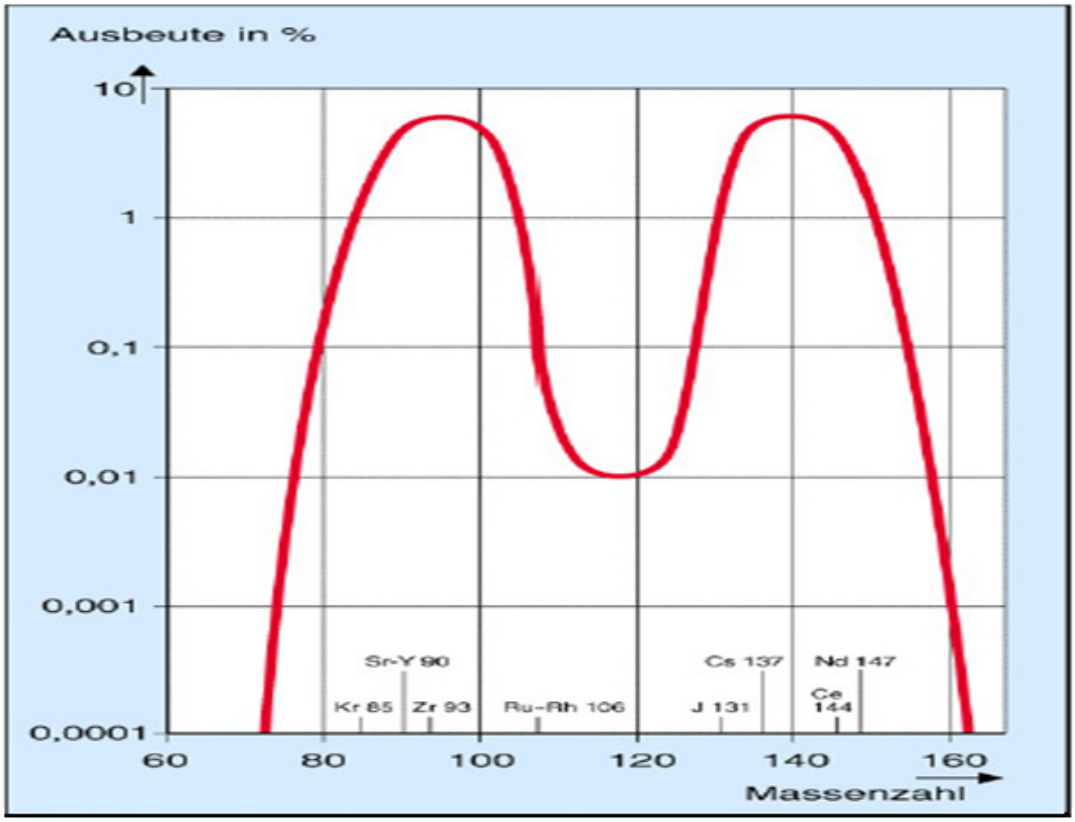
3.11 Kernspaltung

Kernenergie kann auf zwei Arten gewonnen werden: durch Spaltung von schweren Kernen in leichtere (Kernspaltung) und durch Verschmelzung von leichten zu schweren Kernen (Kernfusion). In beiden Fällen wird Energie auf Grund des Massendefektes frei gesetzt.
Otto Hahn und Fritz Straßmann bestrahlten im Jahr 1938 Uran mit Neutronen, um Atomkerne zu erzeugen, die schwerer als Uran sind. Die neutralen Teilchen sollten in die Kerne eindringen und neue radioaktive Isotope bilden. Statt der erwarteten Transurane wurde Uran in zwei kleinere Kerne gespalten, wie die Physikerin Lise Meitner herausfand.

Unter Kernspaltung versteht man den Zerfall eines schweren Atomkerns in zwei Bruchstücke, der meist durch Absorption eines Neutrons verursacht wird. Die Differenz der Bindungsenergien zwischen Ausgangskernen und Endprodukten wird dabei frei. Eine der vielen möglichen Reaktionen ist die von Otto Hahn und Fritz Straßmann gefundene Reaktion

$^{235}U + n \rightarrow {}^{145}Ba + {}^{88}Kr + 3n$

Abbildung 3.16: Verteilung der Spaltprodukte in Abhängigkeit von der Massenzahl. Die meisten Spaltprodukte entstehen um Barium und Krypton



Bei der Spaltung eines Urankerns werden ca. 200 MeV an Energie und zwei oder drei Neutronen frei. Diese Neutronen können nun ihrerseits zum Beschuss von Urankernen benutzt werden, um diese zu spalten. Werden dabei von Generation zu Generation mehr Kerne gespalten, spricht man von einer Kettenreaktion.

Es gibt einige Voraussetzungen damit Kettenreaktionen stattfinden können.

→ ^{235}U ist notwendig als Spaltmaterial. Man findet in der Natur 99,3 % ^{235}U und 0,7 % ^{238}U. Natürliches Uran muss für Druckwasserreaktoren (siehe unten) auf etwa 3 bis 5 % angereichert werden. Diese Anreicherung ist sehr aufwendig.

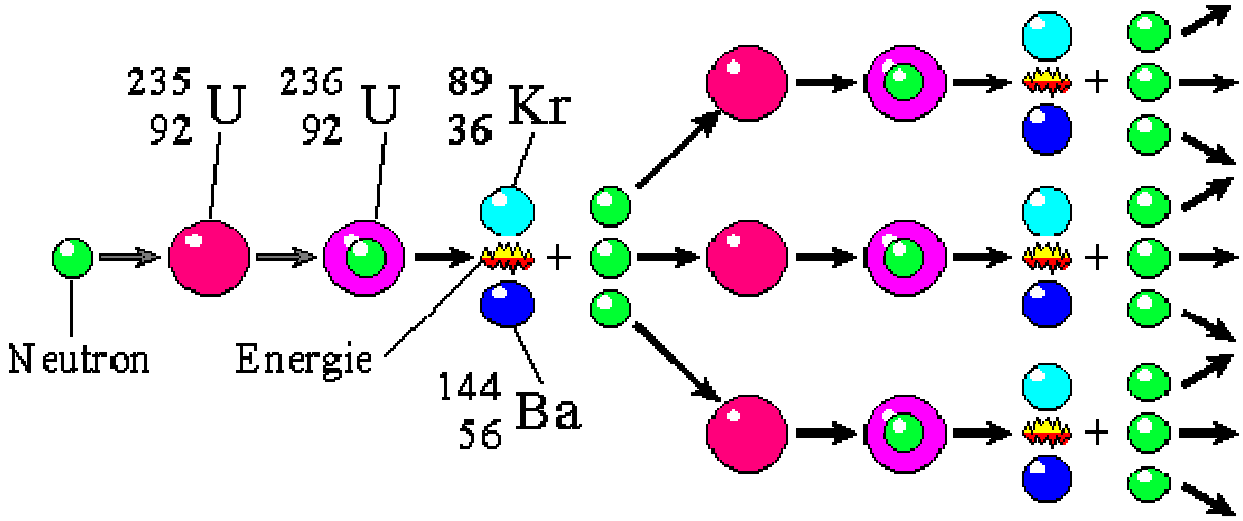
→ Es muss genügend spaltbares Material vorhanden sein, damit die Neutronen nicht aus dem Material entweichen können, bevor sie neue Kernspaltungen auslösen. Ab einer bestimmten Masse des Ausgangsmaterials erzeugen die frei gewordenen Neutronen genügend weitere Kernzerfälle, um die Kernreaktionen aufrecht zu erhalten. Diese Masse nennt man kritische Masse.

→ Die bei der Spaltung frei werdenden Neutronen haben hohe Energie. Sie müssen mit Hilfe von Moderatoren (z.B. Wasser) abgebremst werden, da nur langsame, sogenannte thermische Neutronen in der Lage sind, die Kerne des Isotops ^{235}U zu spalten.

3.12 Kernreaktoren

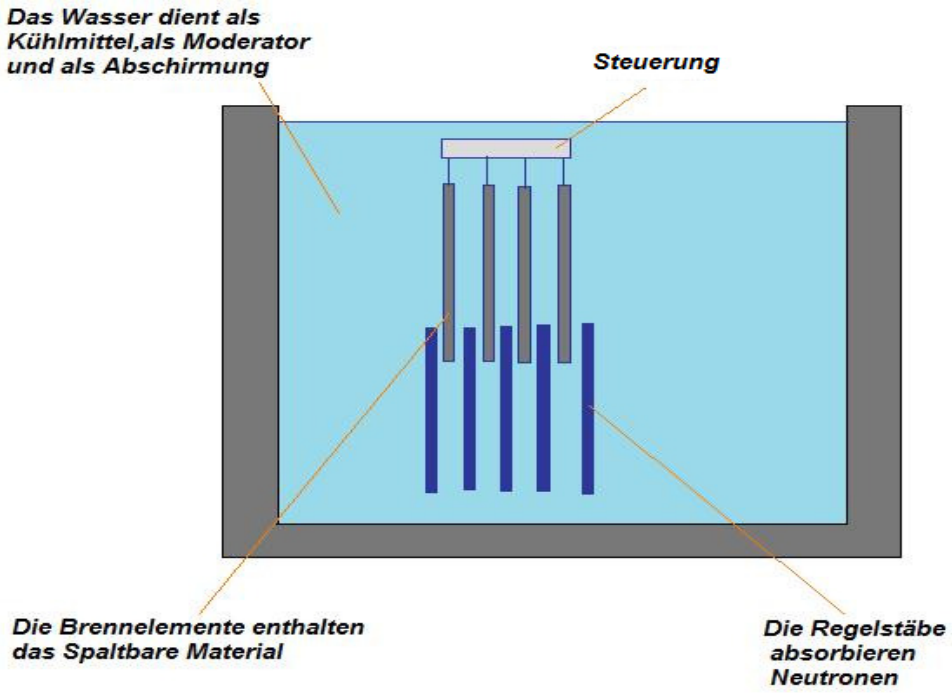
Werden Kerne des Uranisotops ^{235}U mit Neutronen beschossen, so können diese in zwei ungefähr gleich große Bruchstücke gespalten werden. Dabei werden auch zwei bis drei Neutronen frei, wie wir im Kapitel über die Kernspaltung noch genauer besprechen werden. Diese neu erzeugten Neutronen können zur weiteren Spaltung von Urankernen genützt werden. Dadurch kann es zu einer Kettenreaktion kommen.

Abbildung 3.13: Schema einer Kettenreaktion



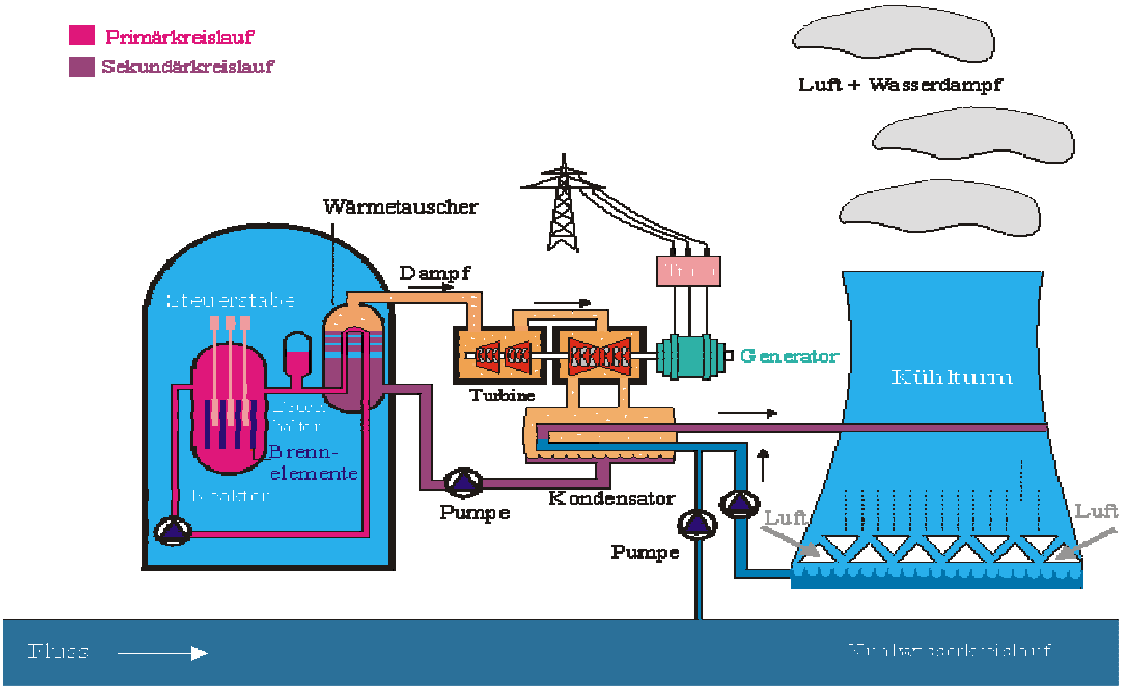
Wenn die Kettenreaktion unkontrolliert erfolgt, dann wird in kurzer Zeit sehr viel Energie frei, es kommt zu einer Explosion. In kontrollierten Kettenreaktionen in Kernreaktoren kann die Energie zur Stromerzeugung genutzt werden, eine Möglichkeit zur Erzeugung elektrischer Energie, die von vielen Ländern genutzt wird. Damit die Kettenreaktion stattfinden kann, müssen die frei werdenden Neutronen vom Urankern (^{235}U) eingefangen werden. Natürliches Uran besteht aus zwei Isotopen, zu 99,3% aus ^{238}U und zu 0,7% aus ^{235}U. Die Wahrscheinlichkeit für den Neutroneneinfang an ^{235}U ist umgekehrt proportional zur Geschwindigkeit der Neutronen, da sich langsame Neutronen viel länger beim Urankern aufhalten. Die Neutronen, die bei einer Kernspaltung frei werden, haben eine hohe Energie von ungefähr 2 MeV. Deswegen können die Kerne von ^{235}U die Neutronen kaum einfangen, die Neutronen müssen zuerst in einem sogenannten Moderator abgebremst werden. In den meisten Fällen ist der Moderator Wasser. Er reduziert die kinetische Energie der Neutronen, sodass diese mit genügend hoher Wahrscheinlichkeit von ^{235}U-Kernen eingefangen werden können. ^{238}U kann jedoch nur durch Neutronen hoher Energie gespalten werden, aber mit weit geringerer Wahrscheinlichkeit als ^{235}U durch die langsamen Neutronen. Die Geschwindigkeit der Kettenreaktion wird mit Regelstäben gesteuert, die den Neutronenfluss regulieren. Regelstäbe bestehen aus Materialien, die Neutronen sehr stark absorbieren und durch Ein- oder Ausfahren in den Reaktorkern den Neutronenfluss verringern oder erhöhen können.

Abbildung 3.14: Schema der wichtigsten Bauelemente eines Reaktors



Es gibt verschiedene Reaktortypen, um Kernenergie (Nukleare Energie) in elektrische Energie umzuwandeln. Die Bauform des Kernreaktors, die am häufigsten benutzt wird, ist die des Druckwasserreaktors.

Abbildung 3.15: Modell eines Druckwasserreaktors



Die bei der Kernspaltung frei werdende Energie erwärmt zuerst das Wasser im Reaktor. Dabei wird der Druck hoch gehalten, damit das Wasser erst bei höherer Temperatur siedet. Dieses Wasser ist radioaktiv und zirkuliert im sogenannten Primärkreislauf. In einem Wärmetauscher wird dessen Wärme auf einen zweiten Wasserkreislauf, den sogenannten Sekundärkreislauf übertragen, dessen Wasser mit dem Primärkreislauf nicht in Berührung kommen darf. Der Dampf aus dem Wasser des sekundären Kreislaufes wird dazu verwendet, um über Generatoren elektrischen Strom zu erzeugen. Bei Kernreaktoren muss man auf höchste Sicherheit achten, insbesondere darauf, dass radioaktive Strahlung nicht aus dem Reaktor entweichen kann. Werden die notwendigen Sicherheitsvorkehrungen nicht beachtet, können verheerende Unfälle eintreten. Der größte dieser Unfälle fand im Jahr 1986 in Tschernobyl statt, ein weiterer großer Unfall fand 1979 in Harrisburg bei Pennsylvania in den USA statt.

Ein großes Problem bei Kernreaktoren besteht darin, dass durch die Kernspaltung langlebige radioaktive Materialien in den Brennstäben erzeugt werden. Diese hoch radioaktiven Materialien müssen für Jahrtausende sicher gelagert werden. Idealerweise werden diese hoch radioaktiven Stoffe in tiefen Erzlagern aufbewahrt. Auch auf den Transport dieser radioaktiven Materialien zu ihren Endlagern ist dabei zu achten. Der Einsatz von Kernreaktoren ist erst dann sinnvoll, wenn diese Probleme gelöst sind.

3.13 Kernfusion

Bei der Kernfusion vereinigen sich zwei leichte Kerne und es entsteht dabei ein schwererer Kern. Die Masse des entstehenden Tochterkerns ist geringer als die Gesamtmasse der Mutterkerne. Der Massendefekt entspricht der frei werdenden Energie, die zahlenmäßig mit der Formel $E = m \cdot c^2$ berechnet werden kann. Im Folgenden sind zwei Beispiele von Kernfusionsprozessen angegeben.

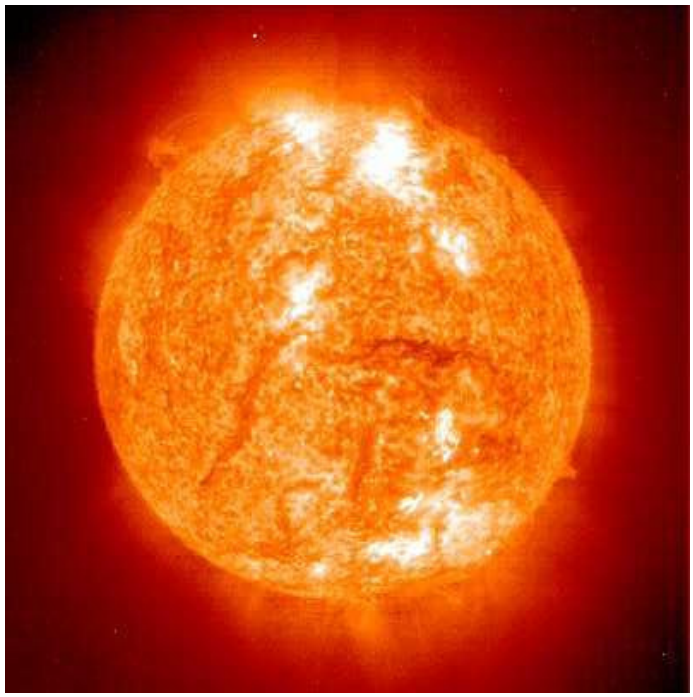
$^{1}_{1}H + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{2}_{1}H + e^{+} + \nu_e$,

$^{1}_{1}H + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He + \gamma$

ν_e: Elektronneutrinos sind neutrale Teilchen mit sehr kleiner Masse und sehr schwacher Wechselwirkung.

Durch diese und weitere Reaktionen wird aus Wasserstoff schließlich Helium erzeugt. Diese Reaktionen laufen im Inneren unserer Sonne ab und erzeugen die von der Sonne abgestrahlte Energie. Um Kernfusionsreaktionen in Gang zu setzen, wird eine sehr hohe Temperatur benötigt.

Abbildung 3.16: Ein Bild der Sonne



Bei der Kernfusion wird sehr viel Energie frei, die technisch nutzbar gemacht werden kann. Derzeit wird großer finanzieller und technischer Aufwand betrieben, um Kernfusionsreaktionen in einem Kraftwerk zu realisieren. Weil bei der Kernfusion weit geringere Mengen an radioaktivem Material entstehen, ist die Kernfusion der Kernspaltung bei der Erzeugung nutzbarer Energie vorzuziehen. Es gibt verschiedene Reaktionen, welche Hoffnung geben, in einem Kernfusionsreaktor realisiert zu werden.

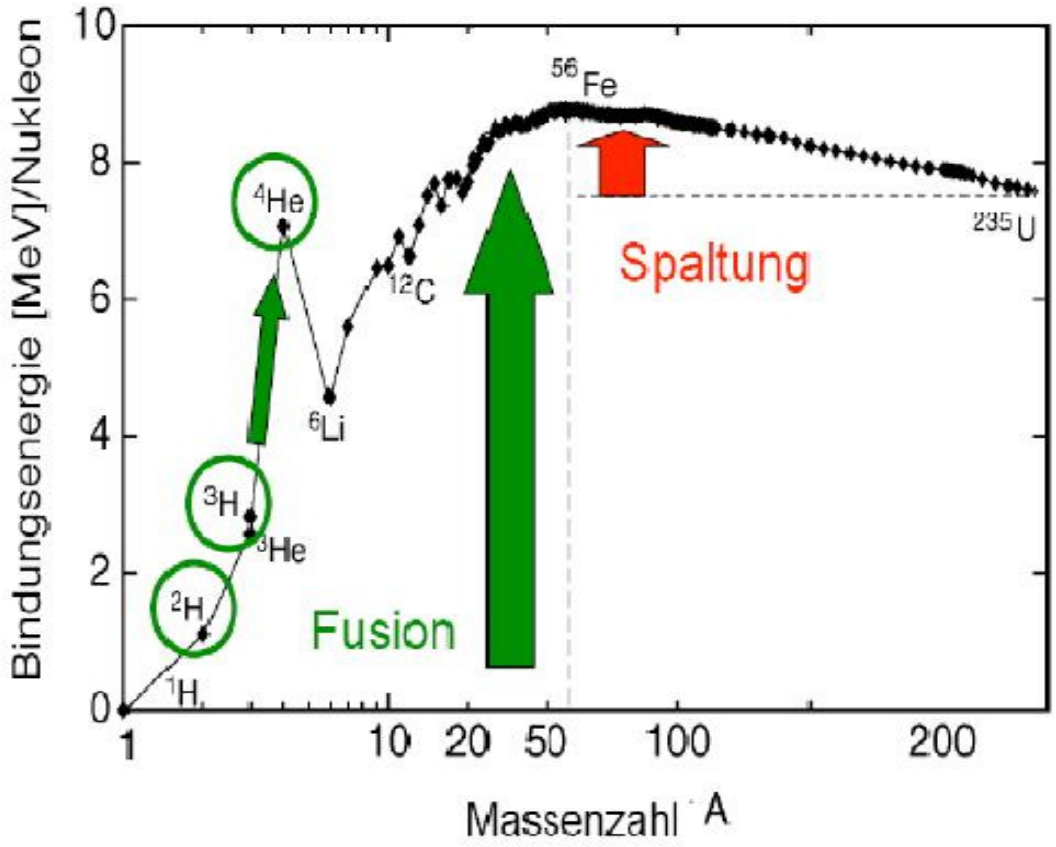
$^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He + {}^{1}_{0}n \qquad Q = 3{,}27 \text{ MeV}$

$^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{1}H + {}^{1}_{1}H \qquad Q = 4{,}03 \text{ MeV}$

$^{3}_{1}H + {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n \qquad Q = 17{,}59 \text{ MeV}$

Im Meer kommt Deuterium ($^{2}_{1}H$) in großer Menge vor und kann mit geringem finanziellem und technischem Aufwand gewonnen werden. Tritium $^{3}_{1}H$ kommt in der Natur kaum vor und muss deshalb künstlich erzeugt werden. Das große Problem bei der Kernfusion ist die Überwindung der elektrischen Abstoßung, der Coulombkraft, zwischen den Mutterkernen. Dies gelingt nur wenn die Mutterkerne genügend hohe kinetische Energie besitzen. Dazu müssen diese auf hohe Temperatur gebracht werden. Jede Kernfusionsreaktion besitzt eine kritische Temperatur, ab der die Fusionsreaktionen einsetzen können.

Abbildung 3.17: Bindungsenergie pro Nukleon



4. Teilchenphysik

4.1 Teilchenphysik und Elementarteilchen

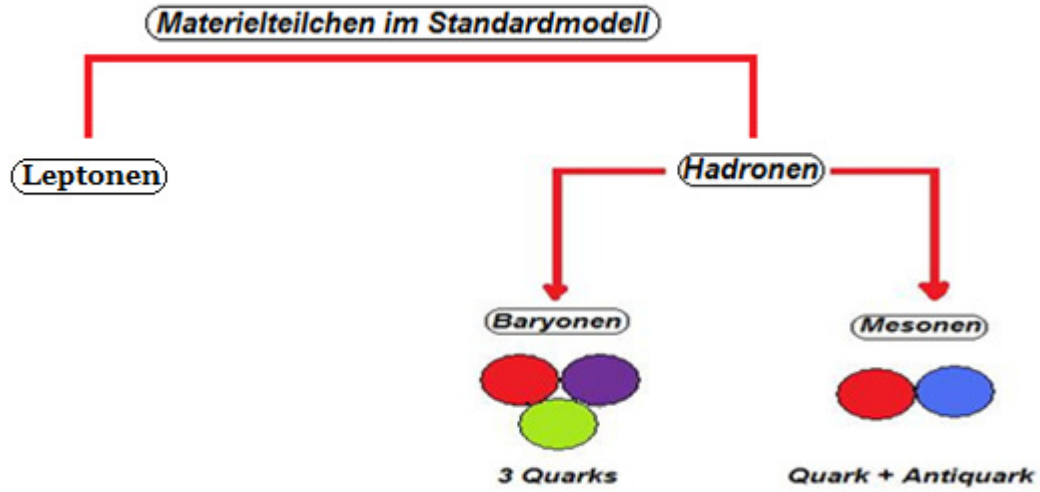
Es wurde bereits von griechischen Philosophen in der Antike vermutet, dass Materie aus kleinsten unteilbaren Bausteinen besteht. Diese haben sie Atome genannt (altgriechisch *„atomos“* bedeutet *„unteilbar“*). Im Jahr 1932 haben Versuche gezeigt, dass Atome aus drei verschiedenen Bausteinen bestehen: aus Protonen, Neutronen und Elektronen. Die Physiker haben im Weiteren nach systematischen Verbindungen zwischen diesen Elementarteilchen gesucht. Deswegen wurden Teilchenbeschleuniger für hohe Energien und andere experimentelle Geräte geschaffen um Elementarteilchen zu untersuchen. In den 1960er Jahren wurde gezeigt, dass Proton und Neutron keine Elementarteilchen sind, sondern aus fundamentaleren Teilchen, den Quarks, bestehen. Im 20. Jahrhundert haben wir viel über den Aufbau der Atome gelernt. Die Teilchenphysik ist jener Teilbereich der Physik, welcher sich der Erforschung der Teilchen widmet. Beschränkte sich dies gegen Ende des 19. Jahrhunderts noch auf Atome und Moleküle, so liegt der Schwerpunkt der wissenschaftlichen Arbeiten heute bei den Elementarteilchen. Die experimentelle Überprüfung geschieht in der modernen Teilchenphysik primär durch Teilchenbeschleuniger, in denen verschiedene Teilchen aufeinander geschossen werden (z.B. Elektronen auf Positronen). Weitere Teilchen wurden postuliert (Neutrino und Positron). Außerdem hoffte man mit Hilfe der Quantentheorie die Struktur des Atomkerns noch genauer klären zu können, dabei entdeckte man ebenfalls neue Elementarteilchen. Die Elementarteilchen sind die kleinsten Bausteine der Materie, die mit den momentan zur Verfügung stehenden Mitteln und Energien nicht weiter zerlegt werden können.

Man teilte die Teilchen auf Grund ihrer Eigenschaften ähnlich dem Periodensystem in Gruppen ein.

→ Auf Grund ihrer Masse teilen wir die Elementarteilchen in:

Hadronen: (griechisch *„hadros“* bedeutet *„schwer“*) Diese Teilchen unterliegen der starken Wechselwirkung. Man unterteilt Hadronen weiters in Baryonen und Mesonen.

Abbildung 4.1: Einleitung der Elementarteilchen



Da nach heutigem Verständnis Hadronen aus Quarks zusammengesetzt sind, sind Hadronen keine „Elementarteilchen" im eigentlichen Sinn. Die wichtigsten Hadronen sind die Nukleonen (Neutronen und Protonen) aus denen die Atomkerne aufgebaut sind. Baryonen sind jeweils aus drei Quarks aufgebaut, Mesonen sind Quark - Antiquarkpaare.

Leptonen: (griechisch „*leptos*" bedeutet „*leicht*") Sie unterliegen nicht der starken Wechselwirkung. Mit Leptonen bezeichnet man eine Klasse von Elementarteilchen, die zusammen mit Quarks und Eichbosonen die fundamentalen Bausteine der Materie bilden. Die Bezeichnung Lepton ist historisch bedingt, da man mittlerweile ein Lepton entdeckt hat, das die doppelte Masse eines Protons besitzt. Zu den Leptonen gehören Elektronen und Neutrinos.

→ Wir unterteilen die Elementarteilchen auch nach ihrem Spin.

Der Spin ist eine quantenmechanische Eigenschaft von Elementarteilchen, die in der klassischen Physik kein Analogon besitzt. Er ist eine Art „nicht-klassischer" Eigenrotation. Die dazu gehörige klassische Vorstellung ist nach heutiger Sichtweise falsch und es kann der zuletzt benutzte Begriff beim Verständnis nur bedingt behilflich sein. Wie die elektrische Ladung ist auch der Spin gequantelt. Die Einheit des Spins ist die Plancksche Konstante dividiert durch 2π, also ħ. Elementarteilchen sind entweder Bosonen oder Fermionen.

Fermion: Fermionen sind Teilchen, die einen halbzahligen Spin besitzen (also $\frac{\hbar}{2}$, $\frac{3\hbar}{2}$ usw.). Unter den Elementarteilchen gehören beispielsweise das Elektron, das Neutrino und die Quarks zu den Fermionen. Für Fermionen gilt das Pauliprinzip, da bei Vertauschung zweier gleicher Fermionen die quantenmechanische Wellenfunktion ihr Vorzeichen ändert.

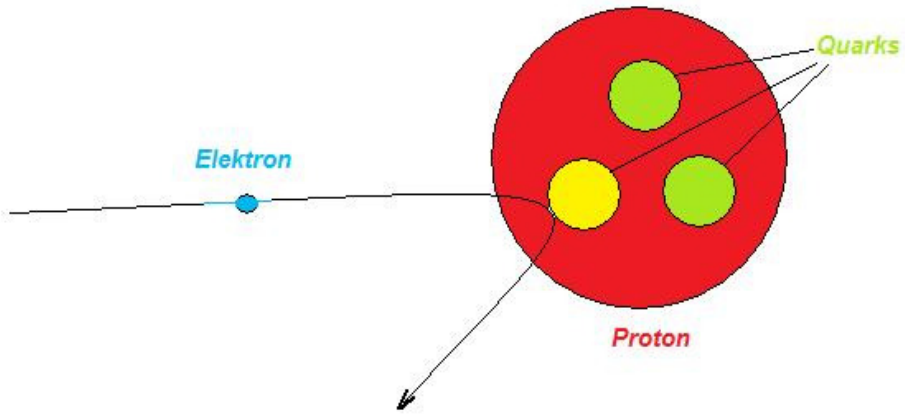
Boson: Bosonen sind Teilchen, die einen ganzzahligen Spin besitzen. Das Pauliprinzip gilt nicht für Bosonen, da sich bei Vertauschung zweier gleicher Bosonen die quantenmechanische Wellenfunktion nicht ändert.

Teilchen und Antiteilchen haben gleiche Masse, Lebensdauer und gleichen Spin (Eigendrehimpuls). Sie unterscheiden sich nur im Ladungsvorzeichen. Trifft ein Teilchen mit seinem Antiteilchen zusammen, so werden beide vernichtet, man nennt dies Paarvernichtung. Die frei werdende Energie, die der Massensumme entspricht, tritt meist in Form von γ –Quanten auf. Umkehrt können aus Energie (z.B. γ-Quanten) Paare von Teilchen und Antiteilchen entstehen.

4.2 Fundamentalteilchen

Robert Hofstadter hat im Jahr 1960 mit seinen Versuchen am Linearbeschleuniger von Stanford gezeigt, dass das Proton eine innere Struktur besitzt. Die Ergebnisse der Streuung von hochenergetischen Elektronen an Protonen ließen sich durch die Annahme erklären, dass die Gesamtladung des Protons auf mehrere Zentren verteilt ist.

Abbildung 4.3: Entdeckung der inneren Struktur des Protons



Murray Gell-Mann und George Zweig haben im Jahr 1964 unabhängig voneinander ein neuartiges Modell für den Aufbau der Elementarteilchen postuliert. Sie forderten die Existenz von Subnuklearteilchen, die Gell-Mann Quarks nannte. Wir können den Aufbau aller Hadronen mit der Annahme der Existenz von sechs verschiedenen Quarks und deren Antiquarks verstehen. Baryonen bestehen aus einer Kombination dreier Quarks (bzw. Antiquarks). Mesonen bestehen aus einem Quark-Antiquarkpaar. Die Quarks können in je drei verschiedenen Zuständen (Farben) vorkommen, sodass mit diesen Kombinationen tatsächlich die ganze Vielfalt der bisher bekannten Elementarteilchen reproduzierbar ist. Quarks sind hypothetische Teilchen mit nicht ganzzahliger Elementarladung. Sie können nie einzeln beobachtet werden, da deren Separation aus einem Hadron nicht möglich ist. Bevor es zur Separation eines Quarks kommt, entsteht ein neues Quark-Antiquarkpaar, also ein Meson. Diesen Einschluss der Quarks nennt man Confinement.

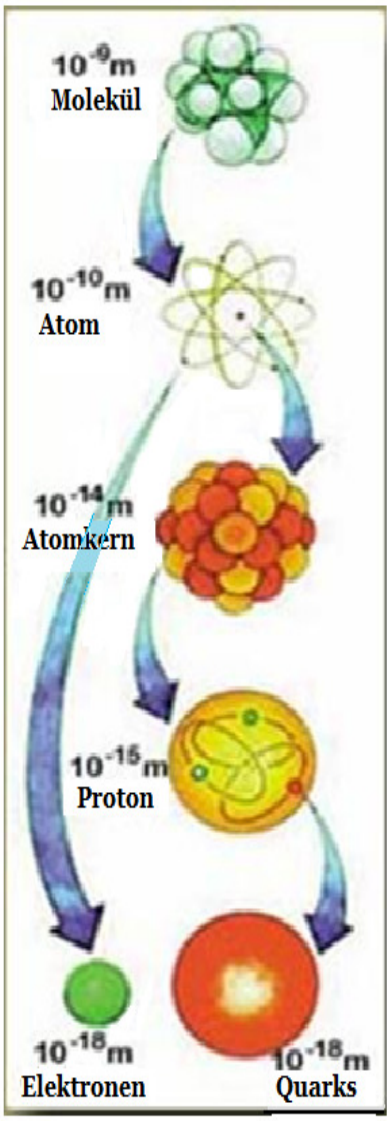
Wir kennen heute zwölf fundamentale Bausteine der Materie sowie deren Antiteilchen.

Leptonen: Es gibt insgesamt 6 Leptonen, die Aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften in drei Generationen unterteilt werden.

Abbildung 4.4: In der folgenden Tabelle sind einige Eigenschaften der Leptonen zusammengefasst.

Name	Symbol	Elektrische Ladung	Ruhemasse · c^2 in MeV	Lebensdauer in s	Generation
Elektron	e	-1	0,511	∞(stabil)	1
Elektron-Neutron	ν_e	0	$<0{,}46 \cdot 10^{-4}$	∞(stabil)	1
Myon	μ	-1	105,66	$2{,}197 \cdot 10^{-6}$	2
Myon-Neutrino	ν_μ	0	<5	∞(stabil	2
Tauon	γ	-1	1777	$3.4 \cdot 10^{-13}$	3
Tauon-Neutrino	ν_γ	0	<164	∞(stabil	3

Abbildung 4.5: Größenverhältnisse der Bausteine



Wir wissen jetzt aufgrund der großen physikalischen Datenmenge, dass Materie aus Leptonen und Hadronen besteht.

4.3 Die Wechselwirkungen

Es gibt in der Natur vier verschiedene fundamentale Wechselwirkungen, die starke Wechselwirkung, die schwache Wechselwirkung, die Gravitation und die elektromagnetische Wechselwirkung. Die Eigenschaften dieser Wechselwirkungen sind voneinander sehr verschieden.

4.3.1 Die starke Wechselwirkung

Diese Wechselwirkung ist die stärkste Wechselwirkung, die in der Natur vorkommt. Sie wirkt auf Baryonen und Mesonen und hat eine Reichweite von ungefähr 10^{-15} m. Diese Wechselwirkung bewirkt, dass sich Quarks zu Protonen und Neutronen verbinden, sowie dass sich letztere zu Atomkernen zusammenfügen.

4.3.2 Die elektromagnetische Wechselwirkung

In Atomkernen beträgt der Beitrag der (abstoßenden) elektrischen Wechselwirkung etwa 1% der starken Wechselwirkung. Die elektrische Wechselwirkung hat eine unbegrenzte Reichweite. Sie bewirkt, dass sich Elektronen mit den Kernen zu Atomen binden können.

4.3.3 Die schwache Wechselwirkung

Die schwache Wechselwirkung spielt für Zerfälle eine wichtige Rolle. Beispielsweise ist die schwache Wechselwirkung verantwortlich für die Beta-Strahlung. Diese Wechselwirkung, mit einer Reichweite unter 10^{-17} m, ist weit schwächer als die starke Wechselwirkung.

4.3.4 Die Gravitation

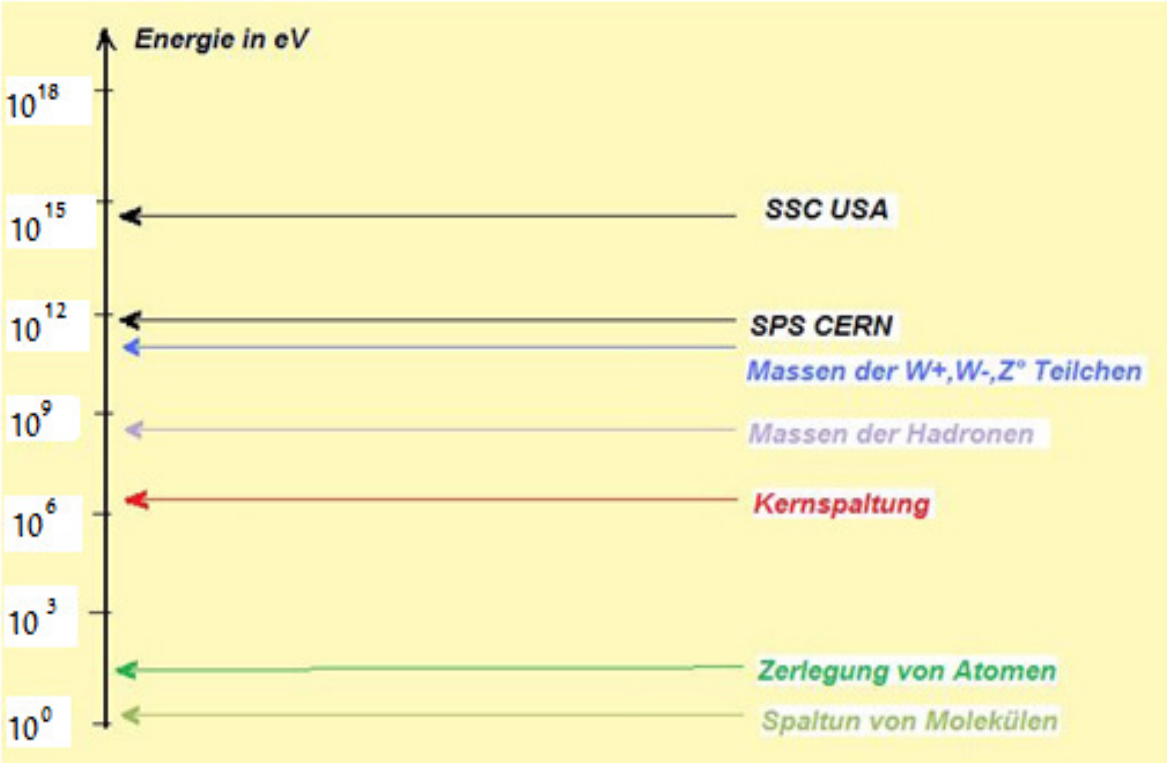
Die Gravitation, die das Sonnensystem zusammenhält, wirkt zwischen allen Teilchen. Sie hat unbegrenzte Reichweite und ist die schwächste aller Wechselwirkungen. Ihre Wirkung kann zwischen Elementarteilchen vernachlässigt werden. Während Quarks mit allen vier Wechselwirkungen aufeinander wirken, spüren Leptonen die starke Wechselwirkung nicht.

4.4 Teilchenbeschleuniger

Je höher die Energie die der beschleunigten Teilchen ist, umso tiefer kann man in die Struktur der Materie eindringen. Ein Teilchenbeschleuniger ist ein Gerät, in dem geladene Teilchen durch elektrische Felder auf große Geschwindigkeiten beschleunigt werden, wobei je nach Teilchenart und

Beschleunigertyp die Teilchen annähernd Lichtgeschwindigkeit erreichen können. Die Teilchen erlangen dabei eine Bewegungsenergie, die einem Vielfachen ihrer Ruhenergie entspricht.

Abbildung 4.6: Energien, die zur Erforschung der Materie benötigt werden.



4.4.1 Linearbeschleuniger

Ein Linearbeschleuniger besteht aus mehreren abwechselnd an die Pole eines Hochfrequenzgenerators angeschossenen Driftröhren. Das Innere der Driftröhren ist feldfrei. Zwischen den Driftröhren wird ein geladenes Teilchen entsprechend der daran anliegenden Spannung beschleunigt. Die Driftröhren müssen so lang sein, dass die Teilchen diese während einer halben Periodendauer durchlaufen.

Abbildung 4.7: Der größte Linearbeschleuniger ist der über 3 km lange Linearbeschleuniger von Stanford.

4.4.2 Zirkularbeschleuniger

Nachteile des Linearbeschleunigers sind seine große Länge und hohe Anzahl von Elektroden. Man kann jedoch die Beschleunigungselektroden auf einer Kreisbahn anordnen, so können sie von den zu beschleunigenden Teilchen immer wieder durchlaufen werden. Zur Führung der Teilchen braucht man auf einer Kreisbahn zusätzlich ein Magnetfeld.

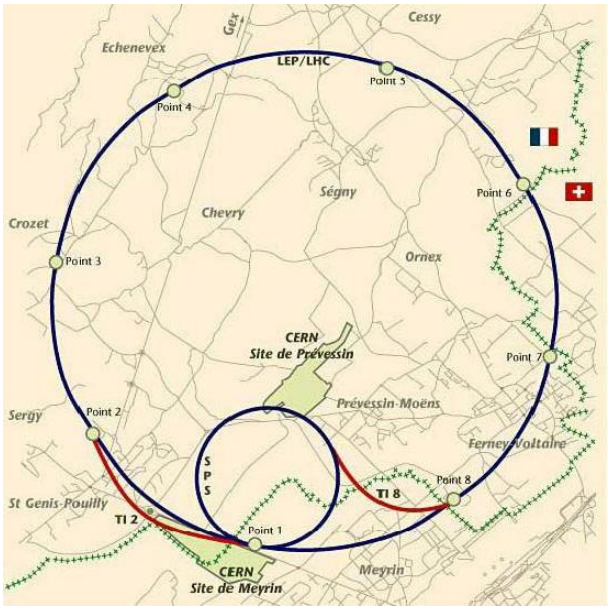
Die beiden halbkreisförmigen Elektroden liegen beim Zyklotron zwischen den Polen eines starken Elektromagneten, der sich in einem Hochvakuum befindet. Die Teilchen werden im Raum zwischen den beiden dosenförmigen Elektroden beschleunigt. Sie durchlaufen in jeder Dose unter Einwirkung des Magnetfeldes einen Halbkreis, dessen Radius mit wachsender Geschwindigkeit steigt. Sie werden bei Erreichen der äußeren Wand von einem elektrischen Hilfsfeld herausgezogen. Wegen der relativistischen Massenzunahme ist die Beziehung zwischen Frequenz der Beschleunigungsspannung und Magnetfeld nur für kleine Geschwindigkeit konstant. Bei Protonen beträgt daher die mit einem Zyklotron maximal erreichbare Energie 10 bis 15 MeV.

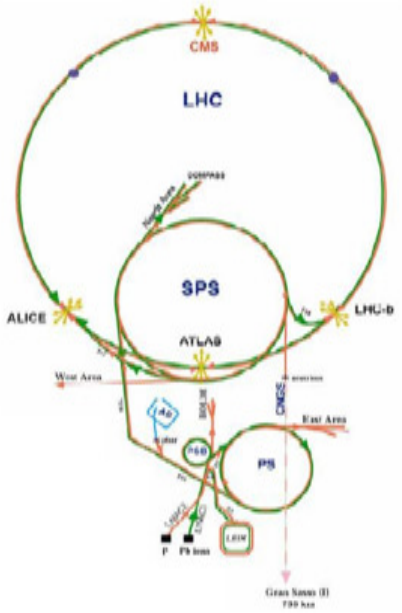
4.4.3 Synchrotron

Das Synchrotron, in dem geladene Elementarteilchen auf sehr hohe Geschwindigkeiten beschleunigt werden, ist ein weiterer Teilchenbeschleuniger. Die Teilchen können sehr hohe kinetische Energien erreichen. Deshalb ist es notwendig, relativistische Effekte zu berücksichtigen. Nähert sich ein Teilchen der Lichtgeschwindigkeit, so verringert sich seine Umlauffrequenz. Diese ist daher nicht mehr synchron mit der Oszillatorfrequenz. Ein weiteres Problem tritt bei höheren Energien auf. Die Kreisbahnen von Protonen werden immer größer und die Elektromagnete, müssten unrealistische Maße annehmen um Protonen auf ihrer Bahn zu halten. Das magnetische Feld und die Oszillatorfrequenz werden bei den Beschleunigungsvorgängen beim Protonsynchrotron kontinuierlich verändert. Das bewirkt, dass sich Protonen auf einer Kreisbahn und nicht mehr auf

einer Spiralbahn bewegen. Die Massen der Magnete können daher klein gehalten werden, der Radius der Bahn wird aber sehr groß, wenn man große Energien erreichen will.

Abbildung 4.8: Der neue LHC-Beschleuniger des CERN wird in den Tunnel des LEP-Beschleunigers eingebaut. Wegen der beim Betrieb auftretenden Strahlung und zum Schutz vor der kosmischen Strahlung befindet sich der Tunnel etwa 100m unterhalb der Erdoberfläche. (Transferlinien zum LCH)





Anhang

Einheitensystem

In der Physik und auch anderen Bereichen werden die Einheiten nach dem SI, dem *Systeme International d´ Unités* festgelegt. Neben SI-Einheiten sind aber z.T. noch alte Einheiten in Gebrauch (in der Medizin z.B. mmHg für den Druck).
Die sieben Grundgrößen des SI und ihre Einheiten sind in Tabelle A1 aufgeführt.

Tabelle A1: Die sieben Grundgrößen des SI

Grundgröße	*Einheit*	*Symbol*
Zeit	Sekunde	*s*
Länge	Meter	*m*
Masse	Kilogramm	*kg*
Temperatur	Kelvin	*K*
Elektrische Stromstärke	Ampere	*A*
Lichtstärke	Candela	*cd*
Stoffmenge	Mol	*Mol*

Dezimale Vielfache und Teile der Maßeinheiten können durch Vorsilben oder Präfixe gebildet werden. In Tabelle A.2 sind die gebräuchlichsten wiedergegeben.

Tabelle A2: Vorsilben der Maßeinheiten

Zehnerpotenz	*Vorsilbe*	*Kurzzeichen*
10^{18}	*Exa*	*E*
10^{15}	*Peta*	*P*
10^{12}	*Tera*	*T*
10^{9}	*Giga*	*G*
10^{6}	*Mega*	*M*
10^{3}	*Kilo*	*k*
10^{2}	*Hekto*	*h*
10^{1}	*Deka*	*da*
10^{-1}	*Dezi*	*d*
10^{-2}	*Zenti*	*c*
10^{-3}	*Milli*	*m*
10^{-6}	*Mikro*	*µ*
10^{-9}	*Nano*	*n*
10^{-12}	*Piko*	*p*
10^{-15}	*Femto*	*f*
10^{-18}	*Atto*	*a*

Tabelle A3: Wichtige Größen und Ihre SI-Einheiten.

Physikalische Größe Formelzeichen		***Maßeinheit***	
Frequenz	*f, v*	$\frac{1}{s} = Hz$	*Hertz*
Kreisfrequenz	*ω*	$\frac{rad}{s}$	
Geschwindigkeit	*v*	$\frac{m}{s}$	
Beschleunigung	*a*	$\frac{m}{s^2}$	
Kraft	*F*	$kg\ \frac{m}{s^2} = N$	*Newton*
Druck	*p*	$\frac{kg}{m \cdot s^2} = \frac{N}{m^2} = Pa$	*Pascal*
Arbeit, Energie	*W, E*	$kg\ \frac{m^2}{s^2} = N\ m = J$	*Joule*
Leistung	*P*	$kg\ \frac{m^2}{s^2} = W$	*Watt*
Wärme	*Q*	$kg\ \frac{m^2}{s^2} = N\ m = J$	*Joule*
elektrische Ladung	Q_e	$A \cdot s = C$	*Coulomb*
elektrische Spannung	*U*	$\frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s^3} = \frac{W}{A} = V$	*Volt*
elektrischer Widerstand	*R*	$\frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3} = \frac{V}{\lambda} = \Omega$	*Ohm*
Kapazität	*C*	$\frac{s^4 \cdot A^2}{kg \cdot m^2} = \frac{C}{V} = F$	*Farad*
magnetische Induktion	*B*	$\frac{kg}{A \cdot s^2} = T$	*Tesla*
Induktivität	*L*	$\frac{kg \cdot m^2}{s^2 \cdot A^2} = H$	*Henry*
Energiedosis	*D*	$\frac{m^2}{s^2} = Gy$	*Gray*
Aktivität	*A*	$\frac{1}{s}$	*Becquerel*

Tabelle A4: Wichtige Naturkonstanten (gerundete Werte).

Bezeichnung	***Symbol***	***Wert***
Vakuum – Lichtgeschwindigkeit	c	$2.998 \cdot 10^8\ \frac{m}{s}$
universelle Gaskonstante	R	$8.31\ \frac{J}{mol \cdot K}$
Boltzmannkonstante	k	$1.38 \cdot 10^{-23}\ \frac{J}{K}$
Avogadrozahl	N_A	$6.0221 \cdot 10^{23}\ mol^{-1}$
Elementarladung	e	$1.602 \cdot 10^{-19}\ A \cdot s$
magnetische Feldkonstante	μ_0	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}\ \frac{V\ s}{A \cdot m}$
Planckssches Wirkungsquanten	h	$6.626 \cdot 10^{-34}\ Js$
Gravitationskonstante	γ	$6.67 \cdot 10^{-11}\ \frac{N \cdot m^2}{kg^2}$
Faradaykonstante	F	$9.648 \cdot 10^4\ \frac{A \cdot s}{mol}$
elektrische Feldkonstante	ϵ_0	$8.854 \cdot 10^{-12}\ \frac{A\ s}{V \cdot m}$

Einige bedeutende Physiker:

ANDERSON CARL DAVID (1905–1991). Der amerikanische Physiker entdeckte das Positron und Myon und erhielt 1936 den Nobelpreis.

BECQUEREL ANTONIE HENRI (1852-1908). Der französische Physiker entdeckte im Jahr 1896 die von Uran ausgesendeten radioaktiven Strahlen und erhielt 1903 den Nobelpreis

BOHR NIELS HENRIK DAVID (1885-1962) In seinem Atommodell vereinigte Bohr die Plancksche Quantentheorie mit Rutherfords Atommodell und erhielt 1922 den Nobelpreis.

BOLTZMANN LUDWIG (1844-1906) Der österreichische Physiker, der bedeutende Beiträge zur kinetischen Gastheorie leistete, war auch Philosoph.

BROGLIE LOUIS VIKTOR DUC DE (1892-1974). Der französische Physiker hat nach Arbeiten über Röntgenstrahlung und Spektren seine grundlegenden Ideen zur Wellentheorie der Materie dargelegt.

CHADWICK SIR JAMES (1891-1974). Der englische Physiker entdeckte das Neutron und erhielt 1935 den Nobelpreis.

COMPTON ARTHUR HOLLY (1892-1962) Der amerikanische Physiker zeigte mit der Entdeckung des Compton-Effekts die Teilchennatur der elektromagnetischen Strahlung auf.

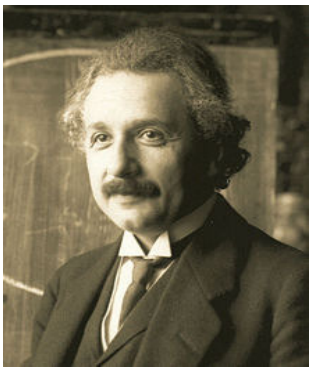
COULOMB CHARLES AUGUSTIN DE (1736-1806) Der französische Physiker entdeckte mit Hilfe einer Drehwaage das Coulombsche Gesetz. Die Einheit der Elektrizitätsmenge (Ladung) wird nach ihm benannt.

CURIE MARIE (1867-1934) Die polnische Chemikerin entdeckte mit ihrem Mann Pierre Curie die radioaktiven Elemente Polonium und Radium. Sie erhielt 1903 mit ihrem Mann den Nobelpreis für Physik und 1911 den Nobelpreis für Chemie.

CURIE PIERRE (1859-1906) Der französische Physiker machte grundlegende Untersuchungen zum Magnetismus und entdeckte mit seiner Frau Marie Curie Polonium und Radium.

CURIE IRENE JOLIOT (1897-1956) Die Physikerin war Tochter von Marie und Pierre Curie. Sie erhielt 1935 mit ihrem Mann den Nobelpreis für die Entdeckung der künstlichen Radioaktivität.

DALTON JOHN (1766-1844) Er war englischer Physiker und Chemiker. Er begründete die moderne Atomtheorie und formulierte die ersten Gesetze für chemische Reaktionen.



EINSTEIN ALBERT (1879-1955) Der deutsch-amerikanische Physiker stellte 1905 die spezielle und 1915 die allgemeine Relativitätstheorie auf und erkannte die Äquivalenz von Masse und Energie. Weiters formulierte er 1905 die Gesetze für den Teilchencharakter des Lichtes. Er erhielt 1921 den Nobelpreis.

FERMI ENRICO (1901-1954) Der italienische Physiker entdeckte die Kernumwandlung durch Neutronenbeschuss. Unter seiner Leitung gelang der Bau des ersten Kernreaktors. Er erhielt 1938 den Nobelpreis.

GAUß CARL FRIEDRICH (1777-1855) Er war Physiker, Mathematiker und Astronom. Er arbeitete auf fast allen Gebieten der Mathematik und Physik. Ihm gelang die Konstruktion des ersten elektromagnetischen Telegraphen und die Reduktion aller Maßeinheiten auf die Einheiten der drei Grundgrößen Länge, Zeit und Masse.

GEIGER HANS (1882-1945) Der deutsche Physiker arbeitete über Radioaktivität und erfand das Geiger-Müller-Zählrohr, das vor allem bei kernphysikalischen Untersuchungen und bei der Untersuchung radioaktiv verseuchter Gebäude verwendet wird.

HAHN OTTO (1879-1968) Der deutsche Chemiker entdeckte radioaktive Elemente und gemeinsam mit Fritz Straßmann den Zerfall des Urans in mittelschwere Elemente, wodurch die wissenschaftlichen Grundlagen für die Nutzung der Atomenergie gegeben waren. Er erhielt 1944 den Nobelpreis.

HEISENBERG WERNER (1901-1976) Der deutsche Physiker stellte die Unschärferelation auf, entwickelte die Matrixformulierung der Quantentheorie und erkannte unter anderem 1932 Neutronen und Protonen als Bausteine der Atomkerne.

LAPLACE PIERRE SIMON MARQUIS DE (1749-1827) Er war französischer Mathematiker und Astronom. Er entwickelte eine Nebularhypothese über die Entstehung des Planetensystems, begründete die Theorie der Kugelfunktionen und entwickelte die Wahrscheinlichkeitsrechnung.

PAULI WOLFGANG (1900-1958) Der österreichische Physiker war Entdecker des Pauli-Prinzips und postulierte das Neutrino. Er erhielt 1945 den Nobelpreis.

PLANCK MAX (1858-1947) Der deutsche Physiker entdeckte bei seinen Untersuchungen zur Thermodynamik eine neue Naturkonstante, die ihm zu Ehren Planckscheses Wirkungsquantum genannt wird. Das Plancksche Strahlungsgesetz gibt die Abhängigkeit der elektrischen Energie eines schwarzen Körpers von seiner Temperatur und der Frequenz der Strahlung an.

RÖNTGEN WILHELM KONRAD (1845-1923) Der deutsche Physiker beschäftigte sich zuerst mit der Kompressibilität, entdeckte 1895 die Röntgenstrahlung und erhielt 1901 den Nobelpreis.

RUTHERFORD ERNEST BARON (1871-1919) Er war neuseeländischer Chemiker und Physiker. Er formulierte das erste moderne Atommodell und erzielte 1919 die erste künstliche Kernreaktion.

Schrödinger Erwin (1887-1961) Der Österreichische Physiker begründete in seinem Hauptwerk die Wellenmechanik und erhielt 1933 gemeinsam mit Dirac den Nobelpreis.

STRAßMANN FRITZ (1902-1980) Der deutsche Chemiker entdeckte mit Otto Hahn 1938 die Uranstrahlung und untersuchte radioaktive Isotope.

Literaturverzeichnis

[1] Prof. Franz Bader, Prof. Friedrich Dorn, Physik 3 Für die 8. Klasse der Allgemein Bildenden Höheren Schulen.Buchnummer:110484

[2] Christian Schweitzer, Peter Svoboda, Lutz Trieb Physik Band 2 Elektrizität und Magnetismus Moderne Physik R. Oldenbourg Verlag Wien 2002.Art nummer:SBW001215

[3] Walter Fertl, Ludwig Matzner, moderne Physik .Schulbuchnummer: 120774

[4] Roman U. Sexl, Helmut Kühnelt, Helga Stadler, Eva Sattlberger Physik 7

Für die 7. Und 8. Klasse der allgemein bildenden Höheren Schulen. Schulbuchnummer:125691

[5]] Roman U. Sexl, Helmut Kühnelt, Helga Stadler, Eva Sattlberger Physik 8

Für die 7. Und 8. Klasse der allgemein bildenden Höheren Schulen. Schulbuchnummer:130193

[6] Albert Jaros, Alfred Nussbaumer, Peter Nussbaumer, Physik Compact Basiswissen 8 Schulbuchnummer:130191

[7] Albert Jaros, Alfred Nussbaumer, Peter Nussbaumer, Basiswissen Physik- Compact Schulbuchnummer :110278

[8] Dr. Josef Schreiner Physik 4 Für die Oberstufe der allgemeinbildenden höheren Schulen. Schulbuchnummer :3465

[9] Albert Jaros, Alfred Nussbaumer, Peter Nussbaumer Physik Compact Basiswissen 7 Schulbuchnummer :125690

[10] Leopold Mathelitsch, Simone Steurer Physik Compact Themenheft Elementarteilchen Schulbuchnummer :110280

[11] Albert Jaros, Alfred Nussbaumer, Peter Nussbaumer Basiswissen Physik Compact 3 Schulbuchnummer :105283

[12] Sexl, Kühnelt, Stadler, Jakesch, Physik 4 Schulbuchnummer :3464

[13] Ercan Öztürk , Lise Fizik ders kitabi .Schulbuchnummer :2000010010370

[14] Ercan Öztürk, Lise Fizik kitabi. Schulbuchnummer :2000200109723

[15] nihat Bilgin, Kemal Cagici Lise Fizik kitabi. Schulbuchnummer :978975653623C

[16] www.wikipedia.org (Quantenphysik, Atomphysik, Kernphysik, Teilchenphysik)

[17] www.hpwt.de(Quantenphysik)

[18] www.uibk.ac.at(Quantenphysik)

[19] www.Quantenphysik-schule.de (Quantenphysik)

[20] www.zamandayolculuk.com(Quantenphysik, Atomphysik, Kernphysik, Teilchenphysik)

[21] www.ödevarsivi.com (Quantenphysik, Kernphysik)

[22] www.schule.at(Atomphysik, Kernphysik)

[23] www.quantenwelt.de(atomphysik)

[24] www.utanet.at(atomphysik)

[25] www.weltderphysik.de(quantenphysik, Kernphysik, Teilchenphysik)

[26] www.atomphsik.de(atomphysik)

[27] www.teilchenphysik.de(teilchenphysik)

[28] www.physikverstehen.de(teilchenphysik)

[29] www.grundlagen-der-teilchenphysik.de(teilchenpysik)

[30] www.weltderphysik.de