

Skript zur Vorlesung

Aufbau der Materie

(Sommersemester 2014)

Dieses Geheft enthält in kompakter, manchmal nur stichpunktartig aufzählender Form, die wesentlichen fachlichen und experimentellen Grundlagen, wie sie in der Vorlesung „Aufbau der Materie“ vorgestellt werden.

Es ist zum Gebrauch neben der Vorlesung gedacht und erhebt nicht den Anspruch, „in sich selbst verständlich“ oder vollständig zu sein.

S. Hilger

Inhaltsverzeichnis

1 Die Teilchenvorstellung	4
1.1 Alltagsphänomene zur Teilchenvorstellung	5
1.2 Die Teilchenvorstellung im Unterricht	5
1.3 Didaktische Anregungen	5
1.4 V Experimente	6
2 Stationen auf dem Weg zur Atomlehre	7
2.1 Leukippos von Milet	7
2.2 Demokritos	7
2.3 Aristoteles	7
2.4 John Dalton	8
2.5 Louis-Joseph Gay-Lussac	9
2.6 Exkurs: Der Hofmann'sche Zersetzungsapparat	10
2.7 Amadeo Avogadro	11
2.8 William Prout	11
2.9 Michael Faraday	11
2.10 Robert Brown: Die Molekularbewegung	12
2.11 Dimitrij Mendelejew, Lothar Meyer	12
3 Wie groß sind Teilchen?	14
3.1 Modellversuche	14
3.2 Der Ölfleckversuch	14
3.3 Größen im Mikrokosmos	15
3.4 Spezialfall: Ideale Gase	17
3.5 Beispiele zur Größenvorstellung	17
4 Aufbau eines Atoms	18
4.1 Die Geschichte der Atommodelle	18
4.1.1 Ausgangslage: Das Kugelmodell	18
4.1.2 Das Rosinenkuchenmodell	19
4.1.3 Das Planetenmodell	19
4.1.4 Das Bohr'sche Atommodell	20
4.1.5 Das Orbitalmodell	21
4.2 Atomstruktur	22
4.2.1 Die Atombausteine	22
4.2.2 Die Atomhülle	22
4.3 Spektroskopie	22
4.4 Der Atomkern	23
4.4.1 Neutronen	23
4.4.2 Kräfte im Atomkern	23
4.4.3 Das Tröpfchenmodell des Atomkerns	24
4.4.4 1911: Millikan	25
4.4.5 1956	26
4.4.6 1963: Murray Gell-Mann	26

5	Radioaktivität	27
5.1	Typen radioaktiver Strahlung	27
5.2	Das Zerfallsgesetz — Die Halbwertszeit	28
5.3	Wirkungen radioaktiver Strahlung	30
5.4	Anwendungen von Radioaktivität	31
5.4.1	Die C 14-Methode	31
5.5	Dosimetrie	32
6	Kernenergie	33
6.1	Kernspaltung	33
6.2	Kettenreaktion	33
6.3	Wie erreicht man (Über)Kritikalität?	34
6.4	Reaktortypen	36
6.4.1	Leichtwasserreaktoren	36
6.4.2	Graphitreaktoren	36
6.4.3	Brutreaktoren	36
6.4.4	Hochtemperaturreaktoren	37
6.5	Herstellung von Brennelementen für Kernkraftwerke	37
6.6	Brennstoffveränderung	37
6.7	Wiederaufarbeitung, Entsorgung und Transport	38
6.8	Aufbau eines Kernkraftwerks	39
6.9	Die Atombombe	40
6.9.1	Grundsätzliche Funktionsweise	40
6.9.2	Historischer Ablauf	41

1 Die Teilchenvorstellung

Unter der *Teilchenvorstellung* versteht man die Auffassung, dass die uns umgebende Materie (Körper) aus abgegrenzten Einheiten, eben den *Teilchen*, besteht.

Wir wollen im folgenden verschiedene Facetten dieser Vorstellung diskutieren.

- Die Teilchenvorstellung wird auch als *Teilchenmodell*, als *Teilchenkonzept* oder *Teilchenhypothese* bezeichnet. Hier kommen jeweils andere Nuancen dieser Begriffe zum Ausdruck.
- Die gegenteilige Auffassung besteht gerade darin, dass die Materie kontinuierlich (oder homogen) im Raum verteilt ist.
- Das Teilchenmodell ist heute durch zahlreiche experimentelle Befunde abgesichert und theoretisch ausgezeichnet fundiert.
- Diese Erkenntnis beruht auf einem langwährenden historischen Prozess. Wir wollen diesem Prozess in dieser Vorlesung genauer nachspüren.
- Die Chemie hat gezeigt, dass Teilchen entweder *Atome* (griechisch $\alpha\theta\omega\mu\omega\sigma$: unteilbar) oder *Moleküle* (Verbindungen mehrerer Atome) sind.

Die obige These ist sehr allgemein formuliert. Es schließen sich viele weitere Fragen an, bei deren Formulierung man aber beachten muss, dass fragwürdige Begriffe verwendet werden.

1. Sind die Teilchen im Raum dicht verteilt oder gibt es noch Platz zwischen ihnen?
2. Kann man die Teilchen irgendwie klassifizieren? Sind alle gleich oder keine zwei gleich?
3. Was heißt überhaupt gleiche Teilchen? Durch welche Eigenschaften könnten sie als unterschiedlich oder identisch erkannt werden?
4. Welche Beziehungen bestehen zwischen den Teilchen? Was verleiht einem (makroskopischen) Körper seine Struktur?
5. Sind die Teilchen beweglich oder starr in ein „Gerüst“ eingebunden?
6. Wie groß sind Durchmesser, Volumen, Masse, Ladung eines Teilchens?
7. Haben die Teilchen eine innere Struktur? Sind sie teilbar?

Jeder dieser Aspekte wurde in einem historischen Prozess erarbeitet. Der Physiker muss bei der Beantwortung der Fragen darauf achten, dass allein Messungen — und nicht naiv übertragene Vorstellungen aus der Makrophysik — die Grundlage seiner Erkenntnis bilden.

Wir wollen gleich hier einige Antworten auf diese Frage vorwegnehmen.

1.1 Alltagsphänomene zur Teilchenvorstellung

Die folgenden Phänomene können mit Hilfe der Teilchenvorstellung anschaulich geklärt werden und damit die Teilchenvorstellung plausibel, wenn auch nicht: denknötwendig, machen.

- Verdunstung, Beschlagen.
- Lösen von Stoffen (Ausfällen, Kristallwachstum), (→ Waschmittel, Putzmittel, Zucker im Tee).
- Spurenweise Verdünnung von Substanzen (Verschmutzung, Vergiftung)
- Geruch: Kaffeeduft oder Parfum verteilt sich im ganzen Raum.
- Zunehmende Verkleinerung von Stoffen: Teilen von Butter oder Kreide. Wie groß sind Staubkörnchen?
- Bremsspur, Bleistiftstrich, Ölfilm auf dem Wasser, Blattgold.

1.2 Die Teilchenvorstellung im Unterricht

- Aggregatzustände, Phasenübergänge: Es bestehen Kräfte zwischen den Teilchen (Modellvorstellungen: Federanordnung, Klebrige Gummibänder, vgl. Wärmelehre),
- Temperatur: Die Teilchen sind in ständiger Bewegung (auch in ruhenden, kalten Körpern),
- Innere Energie,
- Magnetisierung in Festkörpern: Elementarmagnete, Weiß'sche Bezirke,
- Chemie: Chemische Reaktionen (Multiple Proportionen),
- Vorgänge im Zusammenhang mit el. Strom: El. Leitung in Festkörpern, Flüssigkeiten, Gasen, Elektrolyse, galvanische Elemente, Halbleiter/Elektronik.

1.3 Didaktische Anregungen

Heute ist man schnell versucht, die Teilchenvorstellung sofort zur Erklärung oder Deutung von physikalischen Sachverhalten heranzuziehen. Die Frage, wann und inwieweit dieser Zugang in die Erfahrungen von der Welt eingebracht werden soll, wird immer wieder neu gestellt. (Wagenschein, Sprekelsen, Hilscher, Kircher, Wiesner).

- Wie kann man ein Kind, einen Erwachsenen von der Teilchenvorstellung überzeugen?
- Wo im Alltag wird die Teilchenvorstellung als plausible Erklärung für Phänomene herangezogen?
- Soll die Teilchenvorstellung in der Grundschule herangezogen werden?
- Was versteht man unter den Begriffen

Stoff, Masse, Körper, Materie, Element, Substanz, Menge, Gegenstand, Ding?

Stimmen sie überein? Wie kann man sie gegeneinander abgrenzen?

- Gibt es einen Lichtstoff oder einen Wärmestoff? Wie kann man die Antwort begründen?
- Woran denken Menschen heute bei Nennung des Begriffs „Atom“?

1.4 V Experimente

- Verdünnungen aller Art: Gebe ein KMnO_4 -Kriställchen in einen halben Liter Wasser.
- Verdunstung: Kölnisch Wasser in einem kleinen Schälchen (Filmdosendeckel) verdunstet.
- Kondensation: Aufsteigender Wasserdampf kondensiert an einer kalten Platte.
- Löslichkeit:
 - Zucker löst sich in heißem Wasser oder Tee besser als im kalten.
 - Teebeutel in heißes bzw. kaltes Wasser.
 - Die Farbe aus einem Permanent-OHP-Stift wird durch Brennspiritus, nicht aber durch Wasser, gelöst.
- Betrachtung von kleinen Teilchen unter dem Mikroskop.
- Ölfleckversuch: Siehe unten.
- Brown'sche Molekularbewegung: siehe unten
- Mische in einem Gefäß 100 ml Wasser und 100 ml Brennspiritus. Es stellt sich heraus, dass das Gemisch ein Volumen deutlich kleiner als 200 ml aufweist.

2 Stationen auf dem Weg zur Atomlehre

2.1 Leukippos von Milet

(um 450 v. Chr.). Er gilt als Begründer der Atomistik, einer philosophische Denkrichtung, die auf der Idee des „Kleinsten“ oder „Unteilbaren“ beruhen.

a tomos: unteilbar.

2.2 Demokritos

Demokritos (~ 460 – 370), ein Schüler von Leukippos, gilt als Universalgelehrter seiner Zeit. Er befasste sich mit Mathematik, Physik, Astronomie, Navigation, Geographie, Anatomie, Physiologie, Psychologie, Musik und Philosophie, Ethik. Er unternahm Studienreisen nach Ägypten, Persien, Indien.

Die Auffassung Demokritos' kann man in einigen Thesen anreißen:

- (Atomistik) Die Welt ist zusammengesetzt aus letzten unvergänglichen Teilchen (Atomen), die den Raum ausfüllen und dabei sich in ihm bewegen. Sie sind unvergänglich und unveränderlich, bestehen alle aus dem gleichen Stoff, sind dabei aber von verschiedener Größe und Gewicht. Alle Eigenschaften der Dinge beruhen auf den Unterschieden in Gestalt, Größe und Anordnung der Atome. Es werden dabei unterschieden die ...
 - primären Eigenschaften wie Schwere, Dichtigkeit und Undurchdringlichkeit. Sie beruhen auf den entsprechenden Eigenschaften der Atome an sich.
 - sekundären Eigenschaften wie Farbe, Wärme, Geruch, Geschmack, Töne: Sie beruhen auf der Art und Weise, wie die Atome und ihre Zusammensetzungen auf unsere Sinnesorgane einwirken.

Was behauptet Demokritos? Dass sich unzählige unteilbare ... Substanzen, die qualitätslos und unveränderlich seien, zerstreut im leeren Raum bewegten. Wenn sie sich aber einander näherten oder zusammenträfen oder sich miteinander verflöchten, dann käme als das Ergebnis einer solchen Vereinigung in dem einen Fall Wasser, in dem anderen Feuer, ein andermal eine Pflanze, ein andermal ein Mensch zustande. Es seien aber alles Atome oder „Ideen“, wie er sie nennt, und nichts anderes.

(Aus: Plutarch (45 – 125 n. Chr.), „Gegen Kolotes“).

- (Determinismus) Alles geschieht in eherner, dem Seienden innewohnender Gesetzmäßigkeit, d.h. ohne einen äußeren Antrieb und nicht durch Zufall.
- (Philosophischer Atomismus) Auch der Mensch, in Leib und Seele besteht aus Atomen. Nach dem Tod zerstreuen sich die Seelenatome.

2.3 Aristoteles

(384 – 322 v. Chr.),

Wir sehen, dass derselbe Körper beständig bald flüssig, bald fest ist und dass diese Veränderung nicht durch Trennung und Wiedervereinigung erfolgt, auch nicht durch andere Lage oder Anordnung der Atome, wie das Demokritos behauptet.

(Aus: Vom Werden und Vergehen)

2.4 John Dalton

Vorläufer: Jeremias Benjamin Richter (Dt, 1762 – 1807) und Joseph-Louis Proust (Fr, 1754–1826) begründen das Gesetz der konstanten Proportionen:

Bei chemische Reaktionen (Veränderung von Stoffen unter drastischer Veränderung der Eigenschaften) treten die beteiligten chemischen Elemente (Stoffe) in konstanten Massen-Proportionen auf.

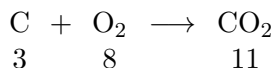
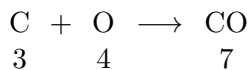
Es bildet die Grundidee der heutigen Stöchiometrie.

John Dalton (Eng, 1766 – 1844), (1801: Gesetz der Partialdrucke) entdeckt 1808 das *Gesetz der multiplen Proportionen*.

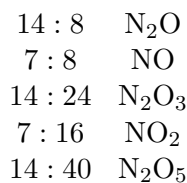
Zwei Stoffe, die sich zu einem dritten verbinden, tun dies nur in einem — **oder mehreren** — ganz bestimmten Massenverhältnissen.

Beispiele:

- Kohlenstoff und Sauerstoff können sich im Massen-Verhältnis 3 : 4 oder im Massen-Verhältnis 3 : 8 vereinigen.



- Stickstoff und Sauerstoff können sich in den Massen-Verhältnissen



verbinden.

Die Deutung dieser Vorgänge führte Dalton zur Atom-Hypothese. Hier nicht enthalten ist die These davon, dass alle Atome (Massen-)Vielfache eines Atoms (des Wasserstoffatoms) sind.

Man unterscheidet ... bei den Körpern drei Zustände; es sind diejenigen, welche man mit den Ausdrücken elastisch-flüssig, flüssig und fest unterscheidet. Ein sehr bekanntes Beispiel bietet uns das Wasser als ein Stoff, der unter gewissen Umständen alle diese drei Zustände annehmen kann. Im Wasserdampf erkennen wir einen vollkommen elastisch-flüssigen, im Wasser einen vollkommen flüssigen und im Eis einen vollkommen festen Stoff. Diese Beobachtungen haben stillschweigend zu dem allgemein angenommenen Schlusse geführt, dass alle Körper ... aus einer ungeheuren Anzahl äußerst kleiner Teilchen oder Atome bestehen, welche durch die Kraft der Anziehung zusammengehalten werden. Diese letztere ist je nach den Umständen mehr oder weniger stark. ...

Wenn sich ein Stoff im elastisch-flüssigen Zustand befindet, so sind seine Teilchen ungleich weiter voneinander entfernt als in irgend einem anderen Zustand. ... Wollen

wir versuchen, uns die Anzahl der in der Atmosphäre enthaltenen Teilchen vorzustellen, so ähnelt dieses Unternehmen dem, die im Weltall befindlichen Sterne zu zählen. . . . Aber nimmt man irgendein bestimmtes Volumen von einer Gasart, so kann man überzeugt sein, dass die Anzahl der Teilchen doch endlich sein müsse; so wie in einem gegebenen Raume des Universums die Anzahl der Sterne und Planeten nicht unbegrenzt sein kann.

(Aus: A New System of Chemical Philosophy, 1808)

2.5 Louis–Joseph Gay–Lussac

(1778 – 1850) entdeckte (außer dem „bekanntem“ Gesetz $\frac{V}{T} = \text{const}$) den folgenden Zusammenhang:

Wenn ideale Gase miteinander reagieren, so tun sie dies in einfachen Volumenverhältnissen, vorausgesetzt, Druck und Temperatur stimmen überein.

Die chemische Natur der Gase spielt dabei keine Rolle.

2.6 Exkurs: Der Hofmann'sche Zersetzungsapparat

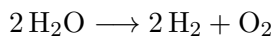
Der Apparat besteht aus drei kommunizierenden Röhren, die oben mit einem Trichter bzw. mit Hähnen versehen sind. Vorbereitung:

- Halterung in einem standfesten Stativ, achte darauf, dass es nicht zu Verspannungen im Glasgefäß kommt.
- Befestige die Kohle- oder Platin-Elektroden an den Unterseiten der Außenröhren. Sie werden an die Pole einer Kleinspannungs-Netzgerätes angeschlossen.
- Fülle in die mittlere Röhre (mit Schwefelsäure zu $\approx 10\%$) angesäuertes Wasser ein. Um ein Aufsteigen in allen drei Röhren zu ermöglichen, müssen die beiden Hähne dabei geöffnet sein.
- Die Hähne werden geschlossen.

Durchführung:

- Die Gleichspannung wird auf einen Wert im 10...20 V Bereich eingestellt.
- Man sieht in den beiden Außenröhren Gasbläschen aufsteigen. Die Gasbildung kann durch Erhöhung der Spannung oder der Säurekonzentration gesteigert werden.
- Nach einiger Zeit kann man an der Kathode (Minus-Pol) gasförmigen Wasserstoff auffangen. Das Reagenzglas wird dabei mit der Öffnung nach unten über den Hahn gehalten, da Wasserstoff eine geringere Dichte als Luft besitzt. Verschließe das Glas mit dem Daumen. Der Nachweis geschieht mit der sogenannten Knallgasprobe: Das verschlossene Reagenzglas wird waagrecht in die Nähe einer Kerzenflamme gehalten und dann geöffnet; es entsteht ein Pfeif-Knall-Geräusch.
- Der an der Anode (Plus-Pol) entstehende Sauerstoff kann ebenfalls — mit der Glimmspanprobe nachgewiesen werden: Ein Glimmspan wird in einer Flamme zum Glühen gebracht und dann über den geöffneten Hahn gehalten. Der Glimmspan glüht auf.

Erläuterung: Im Prinzip werden bei der Elektrolyse mittels des Hofmann'schen Zersetzungsapparats die Wassermoleküle in ihre Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt:



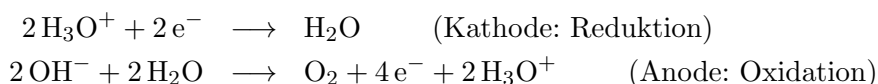
Nimmt man an, dass die Entstehungsprodukte der Modellvorstellung des „Idealen Gases“ genügen, d.h. das molare Volumen für diese Gase gleich ist, so erkennt man, dass zwei Volumenteile Wasserstoff und ein Volumenteil Sauerstoff entstehen. Anfangs ist das Verhältnis 2 : 1 nicht so deutlich zu erkennen, da sich der Sauerstoff zunächst im Wasser löst.

Da in reinem Wasser keine freien Ladungsträger vorhanden sind, ist es für das Zustandekommen der Reaktion notwendig, solche — in Form von Ionen der Schwefelsäure — hinzuzugeben.

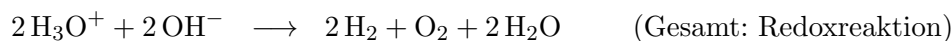
Es stehen dann Ionen zur Verfügung:



Sie vermitteln dann wie folgt die Elektrolyse:



Addiert man — unter Verdoppelung der ersten — die beiden Reaktionen, so erhält man insgesamt:



2.7 Amadeo Avogadro

(It, 1776 – 1856)

Gleiche Volumina von idealen Gasen enthalten bei gleichem Druck und gleicher Temperatur gleich viele Teilchen.

2.8 William Prout

Arzt und Chemiker, (Eng, 1785 – 1850) stellte 1815 die folgende Vermutung auf:

Die molare Masse M_m eines jeden chemischen Elements ist ein ganzzahliges Vielfaches der molaren Masse von Wasserstoff.

Dies führt weiter zu der Hypothese, dass die Teilchen eines jeden Elements aus den Teilchen des Wasserstoffs bestehen.

2.9 Michael Faraday

(Eng, 1791 – 1867) fand 1833/34 bei Untersuchungen zur Elektrolyse die beiden folgenden nach ihm benannten Gesetze:

1. Die Stoffmenge der elektrolytischen Zersetzungsprodukte ist der durchgegangenen Ladungsmenge direkt proportional.

$$I \cdot t = Q \sim n \quad Q = F \cdot n$$

Die Konstante F heißt Faraday-Konstante. (Später: Es gilt $F = N_A \cdot e$.)

2. Die durch die gleiche Ladungsmenge aus Elektrolyten abgeschiedenen Massen verschiedener Stoffe verhalten sich wie

$$m_1 : m_2 = \frac{M_{r1}}{w_1} : \frac{M_{r2}}{w_2}.$$

m_i : Masse, M_{ri} : Relative Molekülmasse, w_i : Wertigkeit des Stoffes.

Bis 1947 bildete das erste Faraday'sche Gesetz die Grundlage für die Definition der Einheit Ampere.

2.10 Robert Brown: Die Molekularbewegung

□ Es werden (Zigaretten-)Rauchteilchen in eine (luftgefüllte) mit Glasplättchen verschlossene Kammer geblasen. Bei seitlicher Beleuchtung (z.B. mit Laser) werden die Teilchen unter dem Mikroskop ($V \approx 500$, $f \approx 2,5$ cm) beobachtet.

Bei kurzem Objektiv (5fach): Etwa 2 cm Abstand.

Bei mittlerem Objektiv (10fach): Etwa 1 cm Abstand.

Alternativ könnte man auch Sporen oder TiO_2 in Flüssigkeit beobachten.

Beobachtung: Die Rauchteilchen führen unregelmäßige zuckende Bewegungen aus.

Deutung: Die relativ großen sichtbaren Rauchteilchen werden ständig von den kleinen unsichtbaren Luftteilchen angestoßen. Das heißt, die Rauchteilchen machen die Bewegung der Luftteilchen mittelbar sichtbar.

Anschauliche Analogie: Die Existenz und Bewegung der Ameisen in einem weiter entfernten Haufen wird durch die Beobachtung der größeren Kiefernadeln indirekt sichtbar.

Fazit: Die Teilchen eines Körpers sind in ständiger ungeordneter Bewegung.

Anwendung:

- Die mikroskopische Bewegung führt zu Dauerschwankungen bei hochempfindlichen Messinstrumenten.
- Man kann die Brown'sche Bewegung (angeblich) auch bei Staubteilchen im Sonnenstreulicht beobachten.

Historisch: Robert Brown (1773 – 1858, 1828) untersuchte Pflanzenpollen im Wasser:

Als ich die Gestalt dieser in Wasser getauchten Teilchen untersuchte, bemerkte ich, dass viele von ihnen sichtlich in Bewegung waren. Nach häufiger Wiederholung dieser Beobachtungen überzeugte ich mich, dass diese Bewegungen weder von Strömungen in der Flüssigkeit, noch von deren allmählicher Verdampfung herrührten, sondern den Teilchen selbst angehörten. Kleinere Teilchen bewegen sich augenscheinlich schneller als größere. Auch Teilchen, die aus toten, jahrelang getrockneten Pflanzen gewonnen worden waren, zeigten dieselbe Bewegung.

Quantitative Überlegungen zur Brown'schen Bewegung enthielt auch Albert Einsteins Dissertation aus dem „annus mirabilis“ 1905.

2.11 Dimitrij Mendelejew, Lothar Meyer

Dimitrij Iwanowitsch Mendelejew (1834 – 1907) und Julius Lothar Meyer (1830 – 1895) stellten 1869 gleichzeitig, aber unabhängig voneinander, das Periodensystem der Elemente auf. Es war ihnen dadurch möglich, Existenz und Eigenschaften von damals noch unbekanntem Elementen vorherzusagen.

Ihre eigentliche Leistung besteht darin, zwischen den Atommassen (Ordnungszahlen) der Elemente und ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften einen Zusammenhang herzustellen und diesen in einem System zu formulieren.

Erst später (ab 1900) stellte sich heraus, dass dieses System seine tiefere Begründung darin erfährt, dass das chemische Verhalten im wesentlichen durch die Konfiguration der Elektronenhülle bestimmt ist.

(Ketzerisch:) Chemie ist die Physik der Atomhülle.

Das Periodensystem wurde weiterentwickelt und vervollständigt.

Alle (heute bekannten etwa $\gtrsim 100$) Elemente können in

- 7 (waagrecht geschriebenen) Perioden (\sim Zahl der Schalen) und
- 8 (senkrecht geschriebenen) Gruppen (\sim Zahl der Elektronen in der äußersten Schale)

Alkalien / Erdalkalien / Erden / C – Si / N – P / Chalkogene (Erzbildner) / Halogene / Edelgase

angeordnet werden.

Die Größenordnungen wichtiger chemischer oder physikalischer Stoffkonstanten wie chemische Wertigkeit, Schmelztemperatur, Ausdehnungskoeffizienten, optische Spektren, . . . werden im Periodensystem „wiedergespiegelt“.

Mit Hilfe der Quantenmechanik kann heute das Periodensystem theoretisch (mathematisch) begründet werden. (Schrödinger–Gleichung, Darstellungstheorie von Lie–Gruppen)

3 Wie groß sind Teilchen?

3.1 Modellversuche

Das Volumen einer Menge kleiner Kugeln wird bestimmt. Anschließend werden die Kugeln in eine Schale geschüttet, so dass sie dicht aneinandergereiht zu liegen kommen.

Der Durchmesser d einer Kugel ist gleich der Dicke der Schicht, diese kann abgeschätzt werden zu

$$d = \frac{V_{\text{Kugelmenge}}}{A_{\text{Kugelschicht}}}$$

Auf eine Wasseroberfläche (Kuchenblech) wird Mehlstaub gestreut. Gibt man einen Tropfen Speiseöl auf die Schicht, so wird der Mehlstaub von ihm verdrängt.

3.2 Der Ölfleckversuch

vgl. StEx: F 83/T2 H91/T2 H92/T3 F02/T3 F06/T3

Vorbereitung Stelle eine 1 : 5000-Lösung „Ölsäure in Wundbenzin“ her. Das Volumen von einem Pipettentropfen Ölsäure kann durch Auszählen der Tropfen in 1 cm^3 Ölsäure bestimmt werden.

Durchführung

- Lasse gleichmäßig $1,0 \text{ ml}$ Lösung aus einer Bürette in ein Gefäß ab. Zähle die Zahl N der Tropfen.
- Fange — bei gleichmäßiger Tropffrequenz — einen einzigen Bürettentropfen auf in eine Schale mit „Korkmehl auf Wasser“.

Beobachtung Das Wundbenzin auf dem Wasser verdunstet. Es bildet sich ein Ölfleck der Fläche A aus, der aufgrund der Korkmehlverdrängung sichtbar wird.

Auswertung

- Bestimme das Volumen der Ölsäure in einem Bürettentropfen:

$$V = \frac{1,0 \text{ ml}}{5000 \cdot N}$$

- **Durchmesser** Unter der (chemisch begründbaren) Annahme, dass sich auf der Wasseroberfläche eine Schicht aus einer Lage Ölsäuremoleküle gebildet hat, gilt für den Durchmesser der Moleküle

$$d = \frac{V}{A}, \quad \text{da} \quad V = A \cdot d.$$

- **Volumen** Nimmt man — in grober Näherung — an, dass das Molekül würfelförmig ist, so ergibt sich das Volumen V_i eines Moleküls zu

$$V_i = d^3.$$

- **Masse** Die Dichte von Ölsäure ist $\varrho = 0,89 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Daraus ergibt sich die Masse eines Moleküls zu:

$$m_i = \varrho \cdot V_i$$

- **Masse eines Kohlenstoffatoms** Die wissenschaftlich-chemische Bezeichnung für Ölsäure ist Octaden-(9)-säure. Die Formel ist



Die Massenzahl von Ölsäure ist

$$34 \cdot 1 + 18 \cdot 12 + 2 \cdot 16 = 282,$$

also ist die Masse eines Kohlenstoffatoms ^{12}C :

$$m_i(^{12}\text{C}) = \frac{12}{282} \cdot m_i.$$

- **Avogadro-Konstante** Kohlenstoff ^{12}C hat die molare Masse $\frac{12 \text{ kg}}{\text{kmol}}$. Deshalb folgt für die Avogadro-Konstante

$$N_A = \frac{12 \text{ kg}}{m_i(^{12}\text{C}) \cdot \text{kmol}}.$$

Aufgabe Bestimme aus den Ergebnissen: $N = 50$, $A = 50 \text{ cm}^2$ die Avogadro-Konstante! Stimmt sie mit dem Literaturwert überein?

3.3 Größen im Mikrokosmos

Für einen konkret gegebenen Körper \mathcal{K} kann man verschiedene physikalische Größen einführen, die seine „Größe“ oder „Substanz“ oder „Menge“ beschreiben.

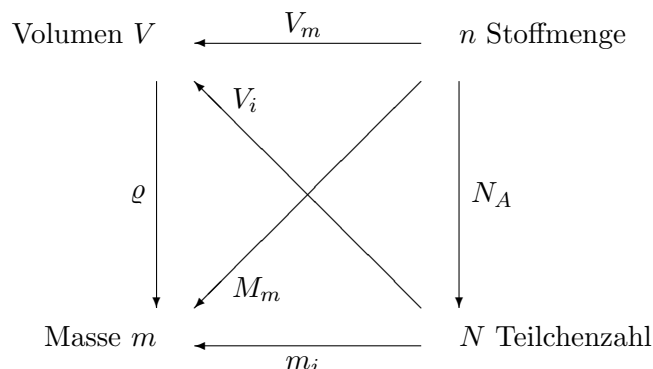
1. Die *Masse* m von \mathcal{K} ist durch makroskopische Messungen als träge oder schwere Masse festlegbar.
2. Das *Volumen* V von \mathcal{K} ist ebenfalls durch makroskopische Messungen festlegbar.
3. Die Einheit der *Stoffmenge* n kann aufgrund der Erkenntnisse von Dalton und Avogadro sinnvoll definiert werden durch die folgende Vorschrift:

Ein Körper hat die Stoffmenge $n = 1 \text{ kmol}$ (1 Kilomol), wenn er aus genau so vielen Teilchen besteht wie **Atome** in 12 kg des Kohlenstoffisotops ^{12}C enthalten sind.

Für den konkret gegebenen Körper \mathcal{K} ergibt sich die Vielfachheit dann über die Vielfachheit der Masse.

4. Die *Teilchenzahl* in dem Körper \mathcal{K} wird mit N bezeichnet.

5. Die Beziehungen zwischen diesen vier Größen werden durch Größen geregelt, die nicht mehr von dem konkreten Körper, sondern von dem zugrundeliegenden Stoff (und eventuell Temperatur, Druck und anderen Parametern) abhängen:



6. Die *Dichte* eines Körpers ist der Quotient aus Masse und seinem Volumen:

$$\rho := \frac{m}{V} \quad \text{Einheit: } 1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}.$$

7. Das *molare Volumen* ist der Quotient aus Volumen und Stoffmenge bei Normalbedingungen (0°C , 1,01325 bar):

$$V_m := \frac{V}{n} \quad \text{Einheit: } 1 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}.$$

8. Die *molare Masse* ist der Quotient aus Masse und Stoffmenge

$$M_m := \frac{m}{n} \quad \text{Einheit: } 1 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}.$$

9. Die *relative Molekülmasse* (auch Massenzahl, früher Molekulargewicht) ist der Zahlenwert der molaren Masse bei der gerade angegebenen Einheit

$$M_r := \{M_m\} := \frac{M_m}{1 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}.$$

10. Das *Individualvolumen* (oder *Teilchenvolumen*) V_i ist der Quotient aus dem Volumen des Körpers und seiner Teilchenzahl:

$$V_i := \frac{V}{N}.$$

11. Die *Individualmasse* (oder *Teilchenmasse*) m_i ist der Quotient aus der Masse des Körpers und seiner Teilchenzahl:

$$m_i := \frac{m}{N}.$$

12. Die *Avogadro-Konstante* N_A ist der Quotient aus Teilchenzahl des Körpers und seiner Stoffmenge:

$$N_A := \frac{N}{n} = \frac{N(^{12}\text{C})}{\text{kmol}}.$$

Der zweite Ausdruck folgt aus der Definition der Stoffmenge (siehe oben). Aus genauen Messungen ist heute bekannt:

$$N_A = 6,022\,136\,7 \cdot 10^{26} \frac{1}{\text{kmol}} = 6,022\,136\,7 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}.$$

13. Die *atomare Masseneinheit* u ist definiert als ein Zwölftel der Masse eines **Atoms** des Kohlenstoffisotops ^{12}C . 1 kmol von ^{12}C hat gerade die Masse 12 kg, so dass sich ergibt:

$$\begin{aligned} 1u &:= \frac{m_i(^{12}\text{C})}{12} = \frac{12 \text{ kg}}{N_A \cdot 12} = \frac{1}{N_A \text{ kmol}} \text{ kg} = \frac{1}{6,022\,136\,7 \cdot 10^{26}} \text{ kg} \\ &= 1,660\,540\,2 \cdot 10^{-27} \text{ kg}. \end{aligned}$$

(Es handelt sich nicht um die Masse eines Wasserstoffatoms!)

3.4 Spezialfall: Ideale Gase

Aufgrund der Erkenntnisse von Gay-Lussac und Avogadro sind einige der weiter oben eingeführten Größen

stoffunabhängig, falls sich der Körper \mathcal{K} im Zustand „Ideales Gas“ befindet.

Diese festen Werte sind dann

1. Das Ideale-Gas-Gesetz von Avogadro besagt, dass 1 kmol eines idealen Gases (bei Normalbedingungen) immer das gleiche Volumen einnimmt:

$$V_m = \text{const} = 22,4 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}} = 22,4 \frac{\ell}{\text{mol}}.$$

2. Das Individualvolumen hat dann ebenfalls einen festen Wert. Sein Kehrwert ist die Anzahl der Teilchen pro Volumen und trägt die Bezeichnung *Loschmidt-Konstante*:

$$L := \frac{1}{V_i} = \frac{N}{V} = \frac{N/n}{V/n} = \frac{N_A}{V_m} = \frac{6,022 \cdot 10^{26} \frac{1}{\text{kmol}}}{22,4 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}} = 2,68 \cdot 10^{25} \frac{1}{\text{m}^3}.$$

3.5 Beispiele zur Größenvorstellung

Man kann versuchen, sich eine anschauliche Vorstellung von der Größenordnung der Teilchen zu machen.

- Ein Kubikzentimeter Eisen besteht aus 10^{21} (1 Trilliarde) Eisenatomen.
- Ein Glas Wasser (0,3 kg) enthält in etwa 10^{25} (10 Quadrillionen) Wassermoleküle der Masse $18u \approx 3,0 \cdot 10^{-26}$ kg
- Im Physiksaal befinden sich etwa 10^{28} (10 Quadrilliarden) „Luftteilchen“.

4 Aufbau eines Atoms

4.1 Die Geschichte der Atommodelle

Wie wir gesehen haben, ist im Laufe des 19. Jahrhunderts zunehmend klar geworden, dass Materie aus „kleinsten Teilchen“ besteht.

Forschungen in der Chemie haben ergeben, dass diese kleinsten Teilchen „sortiert“ werden konnten.

- Es gibt etwa 100 „Sorten“ von Atomen. Makroskopisch sind ihnen die *chemischen Elemente* (Reinstoffe) zugeordnet. Sie konnten gemäß ihren Eigenschaften im Periodensystem der Elemente (PSE) angeordnet werden.
- Zwei oder mehr Atome können sich zusammenschließen zu einem Molekül. Die zugehörigen Stoffe heißen *chemische Verbindungen*. Sie weisen gänzlich andere Eigenschaften auf als die beteiligten chemischen Elemente.

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts stellte sich zunehmend die Frage:

Welche innere Struktur besitzen die Atome?

Genauer verbunden waren damit die folgenden Fragen:

- Welches sind die „Bausteine“ eines Atoms?
- Welche Eigenschaften sind für das „Zahlenspiel“ des Mikrokosmos (Dalton-Gesetze, Periodensystem) maßgeblich?
- Welcher Natur sind die Kräfte, die den Zusammenhalt der Atome in Molekülen, Festkörpern, Flüssigkeiten bestimmen?
- Wie kann das Zusammenspiel von Materie mit Elektrizität, Magnetismus, Licht, Wärme, Temperatur auch mikroskopisch gedeutet bzw. erklärt werden?
- Können die vielen Stoffkonstanten (Dichte, el. Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Spezifische Wärmekapazität, Elastizitätskonstanten, . . .) aus den Naturkonstanten der Mikrophysik rechnerisch bestimmt werden?

Diese Fragen sollten im Kontext einer vermeintlich abgeschlossenen Physik-Theorie (Newton'sche Mechanik, Maxwell'sche Elektrodynamik) beantwortet werden.

4.1.1 Ausgangslage: Das Kugelmodell

Über die innere Struktur der Atome war zunächst nichts bekannt. Man nahm also — naheliegend — an, es handele sich um Kugeln.

Das **Kugelmodell**:

Ein einzelnes Atom hat die Form einer Kugel, es ist elektrisch neutral.

4.1.2 Das Rosinenkuchenmodell

Kurz vor 1900 zeigten Untersuchungen an Kathodenstrahlen in verdünnten Gasen auf, dass es ein universelles Teilchen mit negativer Ladung und vergleichsweise geringer Masse gibt, das als Bestandteil in allen Atomen und als freier Ladungsträger in Metallen vorkommt. Man nannte es *Elektron*.

Die intensive Forschung über Elektronen regte Joseph J. Thomson (engl., 1856 – 1940) dazu an, das Kugelmodell zu modifizieren:

Das **Rosinenkuchenmodell (Thomson'sche Atommodell)**:

Ein Atom ist eine gleichmäßig mit positiv geladener Materie ausgefüllte Kugel, in die die (punktförmigen) Elektronen eingebettet sind.

Thomson konnte so das Zustandekommen der Spektrallinien qualitativ, nicht aber quantitativ, deuten.

4.1.3 Das Planetenmodell

In den Jahren 1906 – 1913 führte Ernest Rutherford (engl., 1871 – 1937, NP 1908) umfangreiche Versuchsreihen durch. Im wesentlichen wurde beobachtet, wie α -Teilchen an sehr dünnen Goldfolien gestreut werden.

Er stellte fest, dass die Streuwinkel-Anzahl-Verteilung $N(\varphi)$ nicht, wie es aufgrund des Kugel- (bzw. Rosinenkuchen)-Modells zu erwarten wäre, gleich einer Gauß-Verteilung ist, sondern eine andere charakteristische Form aufweist. Insbesondere gab es sehr wenige Teilchen, die stärker (auch mehr als 90°) gestreut werden.

Umfangreiche mathematisch-theoretische Analysen der Versuchsergebnisse auf der Grundlage des Coulomb-Gesetzes führten Rutherford (1911) auf das nach ihm benannte Atommodell:

Das **Planetenmodell (Rutherford'sches Atommodell)**:

Das Atom besteht aus einem

- Kern von etwa 10^{-14} m Durchmesser, in dem die positive Ladung konzentriert ist, und
- einer Hülle von etwa 10^{-10} m Durchmesser, die von den negativ geladenen Elektronen gebildet wird.

Das Planetenmodell ist

- wegen der Analogie zum Planetensystem,
- wegen seiner unmittelbaren Anschaulichkeit,
- wegen seines geringeren mathematischen Anspruchs und
- wegen seiner Anwendbarkeit zum Verständnis von chemischen und elektrischen Vorgängen

ausgezeichnet geeignet für den Unterricht in der Hauptschule oder Mittelstufe von Realschule oder Gymnasium.

4.1.4 Das Bohr'sche Atommodell

Mit Hilfe des Rutherford-Modells konnten wesentliche Fragen der Atomphysik geklärt werden, es warf aber — vor allem vor dem Hintergrund der damaligen „klassischen“ Physik — eine ganze Reihe von Fragen auf:

- Worin bestehen die Strukturen der Atomhülle, die das zum Teil sehr unterschiedliche chemische Verhalten der Stoffe hervorrufen?
- Warum gibt es das Periodensystem der Elemente, d.h. also „Atomsorten“?
- Auf der Grundlage der Maxwell'schen Elektrodynamik lässt sich herleiten, dass beschleunigte el. Ladungen Strahlung abgeben und so an Energie verlieren. Die in der Atomhülle kreisenden Elektronen müssten also eigentlich — unter Aussendung von Bremsstrahlung — in den Kern stürzen.
- Die diskrete Struktur der optischen Spektren (Fraunhofer-Linien) konnte nicht erklärt werden.

Diese Probleme führten Niels Bohr (dän, 1885 – 1962, NP 1922) auf zwei künstliche, d.h. zunächst nicht weiter erklärbare, Postulate, die er dem Rutherford'schen Atommodell hinzufügte:

Das Bohr'sche Atommodell:

- Die Elektronen der Hülle nehmen nur diskrete Umlaufbahnen ein.
Eine Auswahlbedingung für „erlaubte“ Bahnen ist dabei, dass der Drehimpuls L eines Hüllenelektrons ein ganzzahliges Vielfaches von $\hbar := \frac{h}{2\pi}$ (h Planck'sches Wirkungsquantum) ist.
Aufgrund der klassischen Mechanik kann dann jeder Bahn auch ein (diskreter) Energiewert zugeordnet werden.
- Strahlung in Form von Lichtteilchen (= Photonen) wird nur beim Übergang eines Elektrons zwischen zwei solchen Umlaufbahnen absorbiert oder emittiert:
 - Bei der Absorption eines Photons wird ein Elektron von einer niedrigeren auf eine höhere Bahn „gehoben“. Dieser Vorgang heißt auch *Anregung* des Atoms.
 - Bei der Emission eines Photons wird ein Elektron von einer höheren zu einer niedrigeren Bahn „abgesenkt“.

Die Frequenz ergibt sich aus der Einstein'schen Lichtquantenhypothese:

$$h \cdot \nu = E_{\text{vorher}} - E_{\text{nachher}}.$$

Bohr konnte mit Hilfe dieser Postulate das Wasserstoffspektrum (glänzend) erklären. Die Verallgemeinerung auf andere Elemente gestaltete sich jedoch schwierig.

Es blieb aber die Frage, wie der offensichtliche Widerspruch zur klassischen Physik (Mechanik, Elektrodynamik) aufgeklärt werden kann.

Die weitere Entwicklung der Atomphysik zeigt auf, dass das Bohr'sche Atommodell als eine historische Zwischenstufe betrachtet werden muss. Aufgrund der „erkenntnisgewinnenden“ Funktion kommt ihm aber eine große Bedeutung zu hinsichtlich

- Erkenntnistheorie (Hypothese → Falsifizierung → Hypothese),
- Wissenschaftsgeschichte (Zwischenstufe),
- Didaktik (Elementarisierung durch Bezug auf historische Entwicklung).

Das Bohr'sche Atommodell wird heute sehr stark in der Oberstufe des Gymnasiums eingesetzt.

4.1.5 Das Orbitalmodell

Die Analogie zwischen dem Bohr'schen Atommodell und einer schwingenden Saite (\square Monochord) bzgl. der diskreten Zustände führte Erwin Schrödinger (1887 – 1961, NP 1933) im Jahr 1926 zur Aufstellung der heute nach ihm benannten Gleichung, die eine sogenannte zeitabhängige Form

$$i\hbar \frac{d\Psi}{dt} = - \underbrace{\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + U(x)}_{H(x)} \Psi$$

und eine zeitunabhängige Form

$$- \underbrace{\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + U(x)}_{H(x)} \Psi = E \cdot \Psi$$

jeweils für die unbekannte Funktion Ψ besitzt.

Setzt man in die zweite dieser Gleichungen das Potential für das Wasserstoffatom ein, so erhält man als Lösungen gerade die Bohr'schen Postulate.

Ein größerer theoretischer Rahmen, innerhalb dessen diese Gleichung ihre Berechtigung hat, ist die Quantenmechanik, die von Bohr, Heisenberg, Schrödinger, Pauli, Dirac und anderen in den Zwanziger Jahren entwickelt wurde. Aspekte dieser Theorie sind:

- Klassische Begriffe wie „genauer Ort“ oder „genaue Geschwindigkeit“ eines Teilchens sind nicht anwendbar. Man kann vielmehr nur von Aufenthaltswahrscheinlichkeiten sprechen.
- Bestimmte Messvariable unterliegen einer grundsätzlichen Beschränkung hinsichtlich der Genauigkeit ihrer Erfassung. Dieses Prinzip kann mathematisch präzise als *Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation* (1926) formuliert werden.
- Der Austausch von Energie, Impuls, Drehimpuls u.ä. zwischen Teilchen kann nur in „gequantelten“ Beträgen erfolgen.
- „Wer über Quantenmechanik nachdenken kann, ohne wirr im Kopf zu werden, hat sie nicht wirklich verstanden“ (Niels Bohr).

Innerhalb dieser Theorie kann man nun ein neues Atommodell beschreiben:

Das **Orbitalmodell (Quantenmechanisches Atommodell):**

Das Verhalten eines Atoms (oder seiner „Bestand-Teilchen“) bei Wechselwirkungen (beispielsweise Messung) wird durch die Schrödingergleichung mit Coulomb-Potential, beschrieben.

Die zugrundeliegende Quantenmechanik erfordert, den Begriff der „Bahn eines Elektrons“ zu verwerfen. Er muss durch den Begriff *Orbital* ersetzt werden.

Bis heute hat sich dieses Modell glänzend bewährt. Es ist in der Lage, unzählige Phänomene und Fragen aus der Atom-, Kern-, Festkörper-, Teilchen-, Plasmaphysik, Astronomie, ... genau zu klären.

4.2 Atomstruktur

Ein Atom insgesamt besteht aus dem Atomkern und der Atomhülle. Die Größenordnungen kann man der folgenden Tabelle entnehmen:

Teilchen	<i>H</i> -Atom	<i>H</i> -Kern	<i>U</i> -Atom	<i>U</i> -Kern
Masse \approx	1 <i>u</i>	1 <i>u</i>	235 <i>u</i>	235 <i>u</i>
Durchmesser \approx	$0,5 \cdot 10^{-10}$ m(*)	10^{-15} m	10^{-9} m	10^{-14} m

(*) Bohr'scher Radius.

Anschaulicher Vergleich: Hätte der Kern den Durchmesser eines Apfels (10 cm), so würden die Elektronen mit Sandkorngröße (1 mm) in einem Abstand von etwa 10 km um diesen Apfel „kreisen“.

4.2.1 Die Atombausteine

Die drei Bausteine eines Atoms und ihre Kenndaten sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

(Elementar-)Teilchen	Elektron	Proton	Neutron
Symbolzeichen	e^-	p	n
Bezug zum Atom	Atomhülle	Atomkern	Atomkern
Ladung q	$-e$	$+e$	0
Masse m	$9,109 \cdot 10^{-31}$ kg	$1,673 \cdot 10^{-27}$ kg	$1,675 \cdot 10^{-27}$ kg
Durchmesser \approx	10^{-17} m	10^{-16} m	10^{-16} m

Bei all diesen Daten stellt sich die Frage nach den Messvorschriften. Man kann ein Elektron nicht auf die Waage legen oder mit einem Lineal abmessen.

4.2.2 Die Atomhülle

In der *Atomhülle* sind die Elektronen in verschiedenen Schalen angeordnet. Der Zustand eines Elektrons in der Hülle ist durch mehrere Quantenzahlen gekennzeichnet.

Für das chemischen Verhalten des Atoms ist die Struktur der äußersten Schale mit den sogenannten Valenzelektronen maßgeblich.

„Die Chemie ist die Physik der Atomhülle“.

Befinden sich in der Atomhülle zu viele oder zu wenige Elektronen, so spricht man von einem *Ion*.

4.3 Spektroskopie

- Das Spektrum kann man mit einem Prismen- oder Gitterspektroskop betrachten bzw. analysieren.

V Spektrallampen.

- Strahlt man weißes Licht (Mischung aller Frequenzen) in ein Gas aus gleichen Atomen ein, so wird der Anteil mit der passenden Frequenz absorbiert. Analysiert man das Spektrum dieses Lichts nach dem Durchgang durch das Gas, so wird man schwarze Spektrallinien feststellen.
- Führt man einem Gas aus gleichen Atomen Energie zu (Erwärmung, Stromdurchgang), so werden die Atome dabei angeregt. Fallen die Elektronen auf niedrigere Bahnen zurück, so wird Licht der zugehörigen Frequenz emittiert. Bei der Betrachtung des Spektrums zeigen sich Eine Analyse des Spektrums

4.4 Der Atomkern

Ein *Atomkern* (= *Nuklid*) wird durch ein Symbol ${}^A_Z X$ (Bsp: ${}^{235}_{92}U$) gekennzeichnet. Die Bedeutung der einzelnen Zeichen ist:

- X Es ist das Zeichen des zugehörigen chemischen Elements.
- Z = Ordnungszahl = Anzahl der Protonen im Kern = Zahl der Elektronen in der Atomhülle.

Damit ist el. Gesamtladung des Atoms gleich Null. Es ist elektrisch neutral.

- A *Massenzahl* = *Nukleonenzahl*: Es ist die Zahl der *Nukleonen* (Protonen und Neutronen) im Atomkern.
- $N = A - Z$ Anzahl der Neutronen. Die Tatsache, dass in dem Symbol anstelle der Neutronenzahl N die Massenzahl A aufgeführt wird, hat seine Ursache darin, dass diese sich eher im Gesamtverhalten (Spektrum, ...) des Atoms auswirkt und daher auch einer Messung direkt zugänglich ist.
- Atomkerne mit gleicher Protonenzahl, aber unterschiedlichen Neutronenzahlen heißen *Isotope* (zueinander).
- Kerne mit gleicher Ordnungs-, Neutronen- und daher Massenzahl können verschiedene Kernkonfigurationen (bzgl. Energie, Spin, ...) einnehmen. Man spricht von *Isomeren*.

4.4.1 Neutronen

- Da das Neutron elektrisch neutral ist, ist es vergleichsweise schwer experimentell nachzuweisen. Nach theoretischer Vorhersage durch Werner Heisenberg (1932) konnte es im selben Jahr durch Chadwick im Experiment gefunden werden.
- Während die Neutronenzahl für das chemische Verhalten des Gesamtatoms von untergeordneter Bedeutung ist, ist sie für das physikalische Verhalten des Atomkerns von entscheidender Bedeutung.

4.4.2 Kräfte im Atomkern

Eigentlich müssten sich die Protonen aufgrund des Coulomb-Gesetzes gegenseitig abstoßen. Der Atomkern könnte eigentlich gar nicht stabil sein.

Die Erklärung für diese Widersprüchlichkeit ist, dass innerhalb des Kerns eine weitere Kraft, die *Starke Wechselwirkung* auftritt, die eine starke Anziehung der Protonen — und Neutronen — untereinander bewirkt.

Diese Kraft übertrifft betragsmäßig die Coulomb-Kraft, sie hat aber eine sehr kleine Reichweite. Das bedeutet, dass zwei Protonen bei Überschreiten eines bestimmten Abstands „auseinanderschließen“. Eine genauere Analyse dieser Verhältnisse (beispielsweise im Rahmen des sogenannten *Tröpfchenmodells des Atomkerns* (Siehe unten!)) bildet die theoretische Grundlage für das Verständnis von Radioaktivität und Kernenergie.

Ein Modell für diese Bindungsverhältnisse bildet eine (kugelförmiges) Gerüst von Kugeln, die durch ein System von arretierten gestauchten Federn zusammengehalten werden. Das Gerüst ist stabil.

Wird eine der gestauchten Federn stärker gedehnt, so löst sich die Arretierung, die Feder entspannt sich. Die Federbindung löst sich. Ein Teil des Gerüsts wird „fortgeschleudert“.

Kommt es dabei zu einer „Lawinenreaktion“, so „fliegt das Gerüst auseinander“.

4.4.3 Das Tröpfchenmodell des Atomkerns

Ein Modell für den Kernaufbau aus Protonen und Neutronen ist das sogenannte *Tröpfchenmodell*. Es setzt den Atomkern in Analogie zu einem Flüssigkeitstropfen, in dem Kräfte zwischen Teilchen und Kräfte an der Oberfläche auftreten.

Eine mathematische Beschreibung erfährt dieses Modells durch die sogenannte *Weizsäcker-Formel*. Sie gestattet es, die im Kern auftretenden Bindungsenergien zu deuten. Sie lautet

$$E_{\text{Bind}} = \underbrace{Z \cdot m_p c^2}_1 + \underbrace{N \cdot m_n c^2}_2 - \underbrace{6\varepsilon A}_3 + \underbrace{6\varepsilon A^{2/3}}_4 + \underbrace{\frac{3}{5} \cdot \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Z^2}{A^{1/3}}}_5 + \underbrace{\eta \frac{(N-Z)^2}{A}}_6 + \underbrace{\frac{\delta}{A}}_7$$

Dabei sind

$$\begin{array}{ll} Z & \text{Protonenzahl} \\ N & \text{Neutronenzahl} \\ A = Z + N & \text{Massenzahl.} \end{array}$$

Positive Beiträge symbolisieren die Abstoßung, negative einen anziehenden Charakter der zugehörigen Kräfte. Je „negativer“ die Energie, desto stabiler der Kern.

Zur Bedeutung der einzelnen Beiträge:

- 1 Die zu den Protonenmassen äquivalente Energie.
- 2 Die zu den Neutronenmassen äquivalente Energie.
- 3 Energie aufgrund der starken Wechselwirkung: Setzt man hier eine Energie von 1ε pro Nukleonbindung an, so ergibt sich eine Energie von 6ε pro Nukleon, da in einer „dichtesten Kugelpackung“ (Tropfen) jedes Nukleon 12 Nachbarnukleonen hat und damit 6 Bindungen pro Nukleon auftreten.
- 4 Korrektur zum Beitrag 3, da an der Oberfläche Bindungspartner fehlen:

$$\text{Oberfläche} \sim \text{Volumen}^{2/3} \sim A^{2/3}.$$

- 5 Energie aufgrund der Coulomb-Abstoßung der Protonen. Sie ist proportional zu $\frac{1}{r} \sim \frac{1}{A^{1/3}}$.
- 6 Korrektur aufgrund des Pauli-Prinzips: Zwei identische Teilchen können nicht den gleichen Energiezustand besetzen. Das bedeutet, dass diesbezüglich der Kern bei Gleichverteilung ($Z = N$) am stabilsten ist.

7 Energie aufgrund von Spinabsättigung bei Teilchenpaaren: Das Vorzeichen von δ richtet sich danach, in welcher Parität die Protonen- und Neutronenzahlen stehen:

Z	N	Vorzeichen
g	g	–
u	g	0
g	u	0
u	u	+

Es stellt sich heraus, dass die Formel die tatsächlichen Verhältnisse auf etwa 1% genau beschreibt.

Trägt man den Zusammenhang von Bindungsenergie-pro-Nukleon über der Massenzahl, graphisch auf, so erhält man das $A-E_{\text{BEPN}}$ -Diagramm wie auf dem Beiblatt.

Dazu einige Bemerkungen:

- Oft findet man in Schul- oder Lehrbüchern, dass $-E_{\text{BEPN}}$ aufgetragen ist. Es ergibt sich eine an der horizontalen Achse gespiegelte Darstellung. Die Darstellung hier ist an der Konvention (aus der Thermodynamik) orientiert, dass Energien, die ein System abgibt (abgeben kann), negativ gezählt werden.
- In der Darstellung sind nicht die Beiträge 1 und 2 aus der Energie-Massen-Äquivalenz berücksichtigt.
- Das Minimum der Funktion befindet sich bei $A = 56$ (Eisen). Im Eisenkern sind die Bindungskräfte am größten. Er ist am stabilsten.
- Fusion: Werden zwei leichte Kerne (B: Wasserstoff-Kerne) verschmolzen, so hat der entstehende Kern (Helium-Kern) weniger Energie als die beiden ursprünglichen Kerne. Es wird also Energie freigesetzt.
- Fission: Werden schwere Kerne gespalten (Siehe später: Uran), so haben die entstehenden Kerne weniger Energie als der ursprüngliche Kern. Es wird ebenfalls Energie freigesetzt.
- Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über Größenordnungen von Energien, die bei Wechselwirkungen mit verschiedenen „Bereichen“ eines Atoms umgesetzt werden:

Atomhülle außen	Chemie Licht	\sim eV
Atomhülle innen	Röntgenstrahlung	\sim keV
Atomkern	Radioaktivität Kernenergie	\sim MeV

4.4.4 1911: Millikan

Millikan bestimmt die Elementarladung durch genaue Beobachtung (unter dem Mikroskop) von el. geladenen Öltröpfchen im el. Feld eines Kondensators.

Später (1962) Bestimmung der Elementarladung mit Hilfe des Josephson-Effekts: Durchtunnelung von Cooper-Paaren durch dünne Isolatorschichten zwischen Supraleitern.

4.4.5 1956

Nachweis des Neutrinos.

4.4.6 1963: Murray Gell–Mann

Nach dem Krieg ist die Zahl der bekannten nachgewiesenen Elementarteilchen auf etwa 100 angestiegen. Es stellte sich die Frage, ob in diesem Teilchen–„Zoo“ irgendein Ordnungs–System wirkt.

Ein wesentlicher Schritt in diese Richtung gelang Murray Gell–Mann (*1929, NP 1969, [?, LXVIII]), George Zweig und unabhängig Yuval Ne’eman (*1925) mit ihrer *Quark–Theorie*. Der Name „Quark“ ist einem Gedicht in dem Roman „Finnegan’s Wake“ von J. Joyce entlehnt.

Die Quark–Theorie ist eine mathematische Theorie der „Irreduziblen Darstellungen der Gruppe $SU(3)$ “, einer Gruppe, die eng mit der Struktur der vierdimensionalen Raum–Zeit verknüpft ist. Sie deutet in befriedigender Weise eine ganze Reihe von experimentellen Ergebnissen der Elementarteilchenforschung, sogenannte Baryon–Resonanz–Spektren, magnetische Momente, Streuquerschnitte.

Gemäß dieser Theorie gibt es 6 Quarks, die in der folgenden Tabelle zusammengestellt sind:

Name	Ladung
Up	$+\frac{2}{3}e$
Down	$-\frac{1}{3}e$
Charm	$+\frac{2}{3}e$
Strange	$-\frac{1}{3}e$
Top	$+\frac{2}{3}e$
Bottom	$-\frac{1}{3}e$

- Zu jedem der Quarks gibt es ein Antiquark, das gerade eine Ladung umgekehrten Vorzeichens trägt.
- Alle Elementarteilchen kann man — nach ihrer Masse in drei Klassen unterteilen:

Leptonen — Mesonen — Baryonen.

Die Quark–Theorie besagt, dass Mesonen aus je einem Quark und Antiquark, Baryonen aus jeweils zwei Quarks aufgebaut sind.

Leptonen sind in ihrer „Elementarität“ vergleichbar mit Quarks.

- Quarks kommen frei nicht vor, sie sind immer innerhalb größerer Teilchen gebunden.
- Das Neutron besteht aus 1 Up und 2 Down, das Proton aus 2 Up und 1 Down. Elektronen bilden eine Sorte von Leptonen.
- Die anderen Quarks kommen als Bestandteile „unserer“ Materie nicht vor. Sie waren nach den gängigen Theorien im Urknall präsent. Sie können heute nur in Hochenergie–Beschleunigern nachgewiesen werden.
- Das Top–Quark konnte als einziges lange nicht nachgewiesen werden. Dies gelang erst im April 1993 im Fermi Accelerator Lab bei Chicago ([?, LXXXIV]).

5 Radioaktivität

Der radioaktive Zerfall wurde 1896 von Henri Becquerel (1852 – 1908, NP 1903) entdeckt. Er ließ versehentlich ein Stück Uranpechblende auf einer dichtverpackten Photoplatte liegen. Nach der Entwicklung fand er ein Abbild der Konturen des Stücks.

Marie (1867 – 1934, NP 1903, NPC 1911) und Pierre (1859 – 1906, NP 1903) Curie isolierten in jahrelanger Arbeit aus der Pechblende die radioaktiven Elemente Polonium und Radium. Sie zeigen bei großer Reinheit eine sehr intensive Strahlung.

Unter radioaktivem Zerfall versteht man den spontanen „Zerfall“ eines Nuklids (= Atomkerns, s.u.) unter Emission eines Teilchens. Der Kern wird durch diesen Prozess umgewandelt. Die ausgesandten Teilchen sind vergleichsweise sehr, wenn nicht extrem, energiereich.

5.1 Typen radioaktiver Strahlung

Strahlungstyp	α	β	γ
Vertreter	Uran 238, Uran 235	Strontium 90 Cäsium 137 Kohlenstoff 14	Yttrium 90 Barium 137
Ausgesandte Teilchen	${}^4_2\text{He}$ -Kerne 	(Relativistische) Elektronen	El.-Magn. Strahlungsquanten (wie Röntgenstrahlung, härter)
Kernreaktion	${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + {}^4_2\text{He}$	${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z+1}\text{Y} + e^-$	${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_Z\text{X}$ (Isomerer Zustand)
Kernbausteine (Nukleonen)	Kern verliert 2 Protonen und zwei Neutronen	Ein Neutron wandelt sich in ein Proton um.	Keine Veränderung
Physikalische Effekte	Tunneleffekt	FermiTheorie, Schwache Wechselwirkung, Aussendung eines Neutrinos	Kernspektroskopie, Mößbauereffekt.
Ablenkung im Magnetfeld	schwach (positiv)	stark (negativ)	keine
Abschirmung	Blatt Papier	Buch, Alublech	Dicke Bleischichten oder Betonwände (nicht vollständig)
Reichweite in Luft	Wenige Zentimeter	Einige Meter	sehr groß
Reichweite in Gewebe	Hundertstel Millimeter	Milli- bis Zentimeter	Körperdimensionen
Gefahr durch	Anreicherung der Kerne in bestimmten Organen	Anreicherung der Kerne in bestimmten Organen/Haut	äußere Exposition des Körpers (vor allem)

5.2 Das Zerfallsgesetz — Die Halbwertszeit

Der radioaktive Zerfall ist ein statistischer Prozess, d.h. sein Eintreten an einem einzelnen Atomkern ist prinzipiell nicht vorhersagbar. Es sind nur Angaben für eine Gesamtheit (= Probe) von (identischen) Kernen möglich. Das Zerfallsgesetz lautet:

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

- Dabei ist t die seit $t = 0$ verstrichene Zeit und $N(t)$ die Anzahl der zum Zeitpunkt t unzerfallenen (= radioaktiven) Kerne der Probe.
- Setzt man in der Gleichung $t = 0$, so ergibt sich $N(0) = N_0$. Also ist N_0 die Zahl der unzerfallenen Kerne zu Beginn.
- Die Größe λ heißt *Zerfallskonstante (oder -rate)*, die zugehörige Einheit ist $[\lambda] = \frac{1}{s}$. Die Zerfallsrate hängt allein vom Typ des Nuklids ab und nicht etwa von der Anzahl N .
- Den Kehrwert der Zerfallsrate bezeichnet man als *mittlere Lebensdauer* $\tau = \frac{1}{\lambda}$.
- In einer mathematischen Formulierung des Zerfallsgesetzes (wie oben) verwendet man die Zerfallsrate. Eine anschaulichere Vorstellung von ihr erhält man, wenn man ihr die Zeitspanne

$$T_{\frac{1}{2}} := \frac{\ln 2}{\lambda} = \ln 2 \cdot \tau$$

zuordnet. Es gilt dann $N(T_{\frac{1}{2}}) = \frac{1}{2} \cdot N_0$, also ist $T_{\frac{1}{2}}$ die *Halbwertszeit*, sie gibt an, nach welcher Zeitspanne die Hälfte der vorhandenen radioaktiven Kerne zerfallen ist.

Übung: Rechne nach, dass $N(k \cdot T_{\frac{1}{2}}) = \frac{1}{2^k} \cdot N_0$.

- Die Größe $A := -\frac{dN}{dt}$ bezeichnet man als *Aktivität*. Sie gibt die Anzahl der Zerfälle pro Zeitspanne, also die eigentlich direkt beobachtbare Größe, an. Die Einheit ist $[A] = \frac{1}{s} =: 1 \text{ Bq (Becquerel)}$. Mit dem Zerfallsgesetz folgt:

$$A(t) := -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N_0 \cdot e^{-\lambda t} = \lambda \cdot N(t).$$

Also ist die Aktivität direkt proportional zur Anzahl der radioaktiven Kerne.

- Setzt man diesen Zusammenhang zwischen Aktivität $A(t)$ und Zahl der unzerfallenen Kerne $N(t)$ in das Zerfallsgesetz ein, so ergibt sich

$$A(t) = \lambda \cdot N(t) = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t} = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

oder zusammengefasst

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (*)$$

Also nimmt auch die Aktivität im Laufe der Zeit exponentiell ab.

- Für kleine Zeiten t kann man näherungsweise setzen:

$$e^{-\lambda t} \approx 1 - \lambda t.$$

Setzt man dies in die obige Gleichung ein, so ergibt sich

$$A(t) = A_0 \cdot (1 - \lambda t) \quad (**)$$

- Die Aktivität ist direkt messbar. Nimmt man eine Zeit–Aktivität–Messreihe auf, so kann man mit Hilfe der Gleichung (*) oder (**) die Zerfallskonstante λ und damit die Halbwertszeit $T_{\frac{1}{2}}$ bestimmen.

Die gleiche mathematische Gesetzmäßigkeit liegt auch anderen physikalischen Situationen zugrunde:

- Die barometrische Höhenformel: Halbwertshöhe $h_{1/2} \approx 5,5$ km.
- Die Gesetze über Absorption von Strahlung (Licht, radioaktiv, . . .) in absorbierenden Medien,
- Die Entladung eines Kondensators.

In einem Unterricht, bei dem keine Experimente mit radioaktiven Präparaten durchgeführt werden (MS: dürfen), kann das Zerfallsgesetz über analoge Vorgänge nahegebracht werden:

- Das Experiment mit dem Bierschaumzerfall. Die Schaumkrone auf einem frisch eingeschenkt Glas (Weizen–)Bier zerfällt nach dem exponentiellen Gesetz. Das Phänomen der Halbwertszeit zeigt sich also.

$$\boxed{\text{V}} \quad t_{1/2} \approx 60 \text{ s.}$$

Daneben bietet sich immer die Simulation auf einem Rechner an.

Weitere Aspekte:

- Tochterkerne, radioaktive Zerfallsreihen.
- Absorptionsgesetz: Schwächung von radioaktiver Strahlung beim Durchgang durch Materialien.
- Nachweis
 - Generell: Durch die ionisierende Wirkung (B: Geiger–Müller–Zählrohr).
 - Eine Differenzierung hinsichtlich der verschiedenen Typen erreicht man durch Abschirmung oder Ablenkung.

5.3 Wirkungen radioaktiver Strahlung

Radioaktive Strahlung hat Ionisationswirkung: Atome oder Moleküle, die von den ausgesandten Teilchen getroffen werden, verlieren Elektronen in ihrer Hülle und werden ionisiert.

Für Moleküle — und weiter allgemein: Zellen — in Organismen kann dies bedeuten, dass sie dadurch ihre Funktionsfähigkeit verlieren oder absterben.

- Schädigung von somatischen Zellen: Hier entfaltet sich die Wirkung akkumulativ

Schwindelgefühl → Mattigkeit → Appetitlosigkeit → Kopfschmerzen → Übelkeit
→ Erbrechen → Entzündungen → Geschwüre → Organschäden → Tod.

und/oder spezifisch:

Schädigung von bestimmten Organen, die besonders belastet werden oder empfindlich reagieren (Schilddrüse wegen Einlagerung von radioaktivem Jod, Milz, Knochenmark).

- Schädigung von genetischen Zellen: Radioaktive Strahlung kann hier Veränderungen der Gene (DNA, Basensequenz) hervorrufen und so Unfruchtbarkeit oder Erbschäden bewirken.
- Die Radioaktivität kann aber unter Umständen auch gezielt therapeutisch zur Zerstörung von krankhaftem Gewebe, insbesondere bei der Krebstherapie, aber auch bei bestimmten Haut- oder Augenkrankheiten, eingesetzt werden.
- α -Teilchen rufen bei Zinksulfid (ZnS) Fluoreszenz hervor.

V Dies wird bei einem Spintariskop ausgenutzt. Mit einer Lupe wird eine Zinksulfidfläche betrachtet, auf der infolge eines in der Nähe angebrachten (sehr schwachen) Radiumpräparat (α -Strahler) Lichtblitze erscheinen.

Moderne Messgeräte, die auf diesem Effekt beruhen, sind Szintillationszähler.

5.4 Anwendungen von Radioaktivität

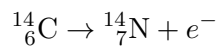
- Medizinische Diagnose (Markierung). Beispiel: Radioaktives Jod wird in der Schilddrüse angereichert, man kann die Funktion der Schilddrüse von außen untersuchen.
- Sterilisation, Abtötung von Keimen auf Instrumenten oder in Verbandsmaterial.
- Gentechnik: Durch gezielte Veränderung von Genen werden neue Sorten gezüchtet, die „bessere“ Eigenschaften als die bisherigen aufweisen. Dies ist sehr umstritten.
- Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung: Bei veränderten Materialstärken (Stahlrohre) erfolgt eine messbare veränderte Absorption von (beispielsweise γ -)Strahlung.
- Physikalische Altersbestimmung, ^{14}C -Methode: Siehe Nächster Abschnitt.

5.4.1 Die C 14-Methode

Die physikalische Altersbestimmung mit Hilfe des ^{14}C -Isotops wurde im Jahr 1949 von William Frank Libby (USA, 1908 – 1980) entwickelt. Er erhielt dafür 1960 den Nobelpreis für Chemie.

Diese Methode funktioniert für Material, das ein Alter zwischen 100 und 60.000 Jahren hat.

- Das ^{12}C ist das normale Kohlenstoff-Isotop. Da es der wichtigste Baustein der organischen Chemie, des Lebens auf der Erde überhaupt ist, ist die atomare Masseneinheit 1u als Zwölftel der Masse dieses Isotops definiert.
- In den oberen Luftschichten der Atmosphäre werden unter dem Einfluss der Höhenstrahlung ständig ^{14}C Isotope (mit 6 Protonen und 8 Neutronen) gebildet. Dieses Isotop ist radioaktiv



mit einer Halbwertszeit von 5730 a.

- Es besteht ein Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Zerfall, so dass das Verhältnis

$$^{12}\text{C} : ^{13}\text{C} : ^{14}\text{C} \approx 98,89\% : 1,11\% : 10^{-10}\%$$

im Laufe der Zeit gleich bleibt.

- Da ein lebender Organismus ständig mit seiner Umgebung Kohlenstoff austauscht, gilt dieses Verhältnis auch für die in ihm enthaltenen Kohlenstoff-Isotope.
- Stirbt der Organismus, so geschieht kein Austausch mit der Umgebung mehr. Infolge des radioaktiven Zerfalls nimmt der Anteil der ^{14}C Isotope in dem toten Organismus ab.
- Mißt man das Verhältnis $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ in dem toten Organismus (beispielsweise durch Messung der Aktivität von ^{14}C), so kann man mit Hilfe der Halbwertszeit auf den Zeitpunkt des Absterbens schließen.

5.5 Dosimetrie

1. Aktivität einer radioaktiven Probe: Mit Aktivität bezeichnet man die Anzahl der Zerfälle in einer bestimmten Zeitspanne:

$$\text{Aktivität} = \frac{\# \text{ Zerfälle}}{\text{Zeit}} \quad \text{Einheit: } 1 \text{ Bq} = \frac{1}{\text{s}} \quad (\text{Becquerel}).$$

Früher wurde hier die Einheit Curie verwendet.

$$1 \text{ Ci} = 3 \cdot 10^{10} \text{ Bq} \quad (\text{Aktivität von } 1 \text{ g } ^{226}\text{Radium})$$

2. Bezüglich der Wirkung auf Materie bezeichnet man als Energiedosis die „pro Masse“ aufgenommene Energie:

$$\text{Energiedosis} = \frac{\text{Absorbierte Strahlungsenergie}}{\text{Masse}} \quad \text{E: } 1 \text{ Gy} = \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (\text{Gray}).$$

Bis 1985 verwendete man hier die Einheit rad (Radiation).

$$1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}.$$

3. Äquivalentdosis: Da die biologische Wirkung von radioaktiver Strahlung nicht nur von der Energiedosis, sondern auch von der Art der Strahlung abhängt, wird die Energiedosis mit einem Bewertungsfaktor gewichtet.

$$\text{Äquivalentdosis} = \text{Bewertungsfaktor} \cdot \text{Energiedosis}.$$

$$\text{Einheit: } 1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} \quad (\text{Sievert, bei Bewertungsfaktor } 1)$$

Bis 1979 wurde hier die Einheit „rad equivalent man“ verwendet.

$$1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv}.$$

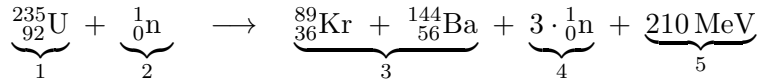
Die folgende Tabelle listet einige Werte von Bewertungsfaktoren auf:

Strahlungsart	Bewertungsfaktor
Röntgen, γ	1
Elektronen (β), Positronen	1
Thermische Neutronen	2 ... 3
Schnelle Neutronen	10
α -Teilchen	20
Schwere Ionen	20

6 Kernenergie

6.1 Kernspaltung

1938 wurde von Otto Hahn und Fritz Straßmann die Kernspaltung entdeckt (Seidel S. 44). Es liegt die folgende Kernreaktion vor:



Zu den einzelnen Termen gibt es das folgende zu sagen:

1. Im Natururan kommen die Uranisotope in den folgenden Anteilen vor:

${}_{92}^{234}\text{U}$	${}_{92}^{235}\text{U}$	${}_{92}^{238}\text{U}$
$\approx 0\%$	0,7%	99,3%

Der Anteil an ${}_{92}^{235}\text{U}$ reicht für das Unterhalten einer Kettenreaktion nicht aus. Deshalb muss es angereichert werden (Siehe unten).

2. Damit ein Neutron ${}_0^1\text{n}$ vom Urankern eingefangen werden kann, muss es vergleichsweise langsam (oder thermisch: Energie $\approx 1\text{ eV}$) sein.
3. Als Produkt der Spaltung entstehen zwei Kerne. Das Massezahl–Häufigkeit–Diagramm auf dem Beiblatt zeigt die statistische Verteilung der auftretenden möglichen Spaltprodukte. Sie sind im allgemeinen radioaktiv (\rightarrow Problem der Entsorgung).
4. Abhängig von den auftretenden Spaltprodukten werden bei einer Spaltung 2 oder 3 (schnelle) Neutronen (Im Mittel 2,43) freigesetzt.
5. Bei einer einzelnen Uranspaltung werden im Mittel $2,1 \cdot 10^2\text{ MeV} \approx 3,3 \cdot 10^{-11}\text{ J}$ frei.

Bei der Spaltung von 1 g ${}_{92}^{235}\text{U}$ wird die Energie $2,8\text{ tSKE} = 82\text{ GJ}$, das ist genau so viel wie bei der Verbrennung von 2,8 t Steinkohle (Heizwert: $29,3\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$), frei.

6.2 Kettenreaktion

Von den pro Einzelspaltung frei werdenden 2,43 Neutronen

- werden (per definitionem) α (Stück) von anderen ${}_{92}^{235}\text{U}$ eingefangen, so dass eine weitere Spaltung eintritt. Die anderen
- werden von ${}_{92}^{238}\text{U}$ angelagert,
- verlassen die Uranprobe,
- werden durch geeignete Regelkörper (Z.B. Cadmium–Regelstäbe) weggefangen.

Je nach Wert der Größe α heißt eine Uranprobe (ein Reaktor)

- Unterkritisch ($\alpha < 1$): Das ist der natürliche Normalfall. Die bei einer Einzelspaltung frei werdenden Neutronen sind zu schnell, als dass sie weitere Kernspaltungen (in Kettenreaktionen) in Gang setzen könnten.
- Kritisch ($\alpha \approx 1$): Dies ist der für die Aufrechterhaltung einer gleichbleibenden Kettenreaktion günstige Grenzfall. Er gilt für den Normalbetrieb eines Kernkraftwerks.
- Überkritisch ($\alpha > 1$): Hier kommt es zu einer lawinenartigen Kettenreaktion. Dieser Fall tritt bei der Explosion einer Atombombe oder bei einem Kernkraftunfall (\rightarrow Kernschmelze) auf.

6.3 Wie erreicht man (Über)Kritikalität?

- Moderation: Die schnellen Neutronen werden abgebremst durch Stöße mit Kernen eines dazwischenliegenden Körpers. Dabei sind Kerne umso besser geeignet, je stärker sie die folgenden Eigenschaften aufweisen:
 - Die Energieverringering (Abbremsung) beim Stoß soll möglichst groß sein, so dass die Neutronen schnell abgebremst — und damit nicht eingefangen — werden. Dies ist besonders gut dann verwirklicht, wenn die Stoßpartner etwa gleiche Massen haben (Modellversuch: Geldstücke auf dem TLP, Flummybälle). Die Masse eines Moderator-kerns sollte also etwa gleich der Neutronenmasse sein.
 - Der Moderator-kern sollte eine nicht so große Neigung besitzen, Neutronen einzufangen. Anderenfalls bleiben u.U. zu wenig Neutronen für die Aufrechterhaltung der Kettenreaktion übrig.

Die folgende Tabelle listet für einige Isotope von möglicherweise beteiligten Kernen Maße für diese Eigenschaften auf:

Kern	Stoff	Mittlere Stoßzahl für eine Abbremsung von 1,75 MeV auf 0,025 eV	Neigung zum Einfang thermischer Neutronen bezogen auf Deuterium	Kosten	Wo?
Wasserstoff ${}^1_1\text{H}$	(Leichtes) Wasser	18	650	Billig	D
Deuterium ${}^2_1\text{H}$	Schweres Wasser	25	1	Sehr teuer	CA
Beryllium ${}^9_3\text{Be}$		86	7		
Kohlenstoff ${}^{12}_6\text{C}$	Graphit	114	10	Preiswert	GB, RUS, Tscherno- byl
Uran ${}^{238}_{92}\text{U}$		2172	5600		

- Wasserstoff ist als „Bremsmittel“ optimal, hat jedoch den Nachteil einer höheren Einfangwahrscheinlichkeit. Es ist sehr billig und kann gleichzeitig die Rolle des Kühlmittels einnehmen. Es wird in den Leichtwasserreaktoren eingesetzt.
- Das sehr teure Deuterium ist günstig wegen seiner geringen Einfangneigung. Wegen des in der Natur auftretenden Verhältnisses

$$\#_1^2\text{H} : \#_1^1\text{H} = 1 : 6500$$

ist die Anreicherung von Deuterium, das heißt die Herstellung von Schwerwasser sehr teuer.

- Bei der Verwendung von Graphit als Moderator sind sehr viele Stöße zur Abbremsung nötig, weiter ist die Einfangneigung gering. Das bedeutet gerade, dass die Wahrscheinlichkeit für den Neutroneneinfang durch ${}^{238}_{92}\text{U}$ steigt und damit mehr Plutonium entsteht (Siehe unten).

- Isotopenanreicherung: Der Anteil von ${}^{235}_{92}\text{U}$ wird von 0,7% erhöht auf ...
 - 2% bis 4% im Falle der Brennstäbe von Kernkraftwerken,
 - nahezu 100% im Falle der Uranbombe.
- Herstellung einer kritischen Masse bzw. Geometrie: Wenn der Urankörper groß genug und geometrisch geeignet geformt ist, steigt die Wahrscheinlichkeit dafür, dass Neutronen auf ihrem Weg durch den Körper abgebremst und schließlich weitere Kerne spalten. (Bei reinem ${}^{235}_{92}\text{U}$ ist die kritische Masse etwa 50 kg).

6.4 Reaktortypen

6.4.1 Leichtwasserreaktoren

Hier wird gewöhnliches (sehr reines) Wasser verwendet, das zwei Funktionen erfüllt:

- Moderation: Es tritt eine schnelle Abbremsung der Neutronen auf, die Einfangneigung ist allerdings hoch.
- Kühlung: Es dient der Aufnahme und dem Transport der auftretenden Energien.

Die Idee, dass Kühlung und Moderation als Funktion zusammengefasst sind, ist für die Sicherheit günstig:

Negativer Dampfblasenkoeffizient: Ein Leistungsanstieg im Reaktor führt zu vermehrter Wasserdampfbildung, damit zu einer verminderten Moderation.

Es ist weiter gewährleistet, dass nicht so viel Plutonium erbrütet wird.

Ein Nachteil der Leichtwasserreaktoren besteht darin, dass der Reaktorkern in einem Druckbehälter eingebaut sein muss. Dies ist aufwendig in der Konstruktion, ein Wechsel der Brennelemente ist nur bei Reaktorstillstand möglich.

Man unterscheidet weiter

- Siedewasserreaktoren (Krümmel, Gundremmingen): Hier verdampft das Wasser, die Turbinen werden durch Dampf angetrieben.
- Druckwasserreaktoren (Brokdorf): Das Sieden des Wassers wird durch hohen Druck verhindert. Die Energie wird in einem Wärmetauscher innerhalb der Reaktoranlage an das Wasser eines zweiten Kühlkreislaufs abgegeben.

6.4.2 Graphitreaktoren

Hier wird zur Moderation Graphit (1700 t Graphitziegel) verwendet. Die Kühlung erfolgt mit Wasser, das in *Druckröhren* durch den Reaktorkern geführt wird.

Diese Reaktorbauart weist hinsichtlich ökonomischer Gesichtspunkte eine Reihe von Vorteilen, in Bezug auf Sicherheit eher Nachteile auf:

Positiver Dampfblasenkoeffizient: Ein (unkontrollierter) Leistungsanstieg im Reaktor führt zu vermehrter Wasserdampfbildung, damit zu einem verminderten Neutroneneinfang durch Wasser.

Es kann zu einem lawinenartigen Anstieg der Leistung kommen, wodurch der gesamte Reaktor zerstört wird mit allen negativen Folgen.

Genau dies ist am 26. April 1986 in Tschernobyl/Ukraine passiert. Zur Durchführung eines speziellen Testprogramms wurden Sicherheitssysteme abgeschaltet, der obige Effekt ist dann aufgetreten und außer Kontrolle geraten.

6.4.3 Brutreaktoren

Wird in einem Reaktor aus ${}_{92}^{238}\text{U}$ (oder auch ${}_{90}^{232}\text{Th}$, Thorium) mehr ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ erzeugt (siehe unten) als ${}_{92}^{235}\text{U}$ verbraucht wird, so spricht man vom „Brüten“. *Brutreaktoren* (B: Superphenix, F) dienen vorrangig diesem Zweck. Hier wird ein Gemisch aus UO_2 und PuO_2 in den Brennelementen verwendet. Eine Moderation entfällt, da Plutonium auch von schnellen Neutronen gespalten wird. Da Wasser wegen des Neutroneneinfangs als Kühlmittel nicht geeignet ist, wird flüssiges Natrium (100 mal wärmeleitfähiger als Wasser, Schmelztemperatur 98°C) zur Kühlung verwendet.

6.4.4 Hochtemperaturreaktoren

Hier werden Graphit zur Moderation und Helium zur Kühlung verwendet. Aus $^{232}_{90}\text{Th}$ Thorium wird $^{233}_{92}\text{U}$ erbrütet. Es treten sehr hohe Kühlmitteltemperaturen auf, so dass Prozesswärme abzweigbar ist.

6.5 Herstellung von Brennelementen für Kernkraftwerke

- ◇ Ausgangsmaterial ist das natürlich vorkommende Uranoxid mit einem Anteil von etwa 0,5% im Trägergestein.
- ↔ In einem mehrstufigen physikalisch-chemischen Verfahren (noch innerhalb der Lagerstätte) wird das Uranoxid bis zu einem Gehalt von 50 – 70% angereichert: „Yellow cake“.
- ↔ Durch die sogenannte Konversion wird das Uranoxid in Uranhexafluorid (UF_6 , bei Normalbedingungen gasförmig) übergeführt. Der Anteil von $^{235}_{92}\text{U}$ beträgt nach wie vor 0,7%.
- ↔ In Gasdiffusionsanlagen oder Ultrazentrifugen (Schlüssel-Hochtechnologie, der Export unterliegt weltweit scharfen (?) Kontrollen) wird der Anteil von $^{235}_{92}\text{U}$ im Uranhexafluorid auf 3% erhöht.
- ↔ Durch einen chemischen Prozess wird das Uranhexafluorid in Urandioxid (UO_2 , ein braunschwarzes Pulver) überführt.
- ↔ In Press- und Sinterverfahren ($1700\text{ }^\circ\text{C}$) werden Urandioxid-Tabletten (genormt, Durchmesser, Höhe $\frac{1}{2}\text{ cm}$) hergestellt.
- ↔ Diese werden gasdicht in 4 m lange Hüllrohre aus einer Zirkonium-Legierung ($_{40}\text{Zr}$) eingeschlossen: Brennstäbe.
- ↔ Die Brennstäbe werden in Haltesystemen gebündelt, Vorrichtungen für ein Einschieben von Cadmium-Regelstäben sind vorgesehen: Brennelemente (Seidel 32/35).

6.6 Brennstoffveränderung

In einem Leistungsreaktor tritt in etwa drei Jahren die folgende Veränderung der Zusammensetzung der Brennelemente ein:

$3\% \text{ }^{235}_{92}\text{U}$	→	$1\% \text{ }^{235}_{92}\text{U}$ $2\% \text{ Spaltprodukte}$
$97\% \text{ }^{238}_{92}\text{U}$	→	$95\% \text{ }^{238}_{92}\text{U}$ $1\% \text{ }^{239}_{94}\text{Pu}$ $1\% \text{ andere Transurane}$

Die Erzeugung von Plutonium und anderen Transuranen aus $^{238}_{92}\text{U}$ geschieht durch Neutroneneinfang und anschließende β -Zerfälle.

Verschiedene Aspekte, Probleme, Konsequenzen:

- Ist das Verhältnis von $^{235}_{92}\text{U}/^{238}_{92}\text{U}$ immer schlechter, so ist eine Kettenreaktion nicht mehr aufrechtzuerhalten. Der Brennstoff ist unbrauchbar.
- Die Spaltprodukte sind hochradioaktiv. Sie müssen separiert und entsorgt werden.
- Zur Plutonium–Problematik
 - Das Plutonium–Isotop $^{239}_{94}\text{Pu}$ ist ein radioaktiver α –Strahler mit einer Halbwertszeit von 24.100 Jahren.
 - Das Plutonium ist hochtoxisch. Besonders seine Organaffinität macht seine Gefährlichkeit aus: Plutonium kann als Staub eingeatmet werden, seine wasserlöslichen Verbindungen werden ins blutbildende Knochenmark eingelagert.
Es gibt auch andere Stoffe mit diesen Eigenschaften, das Plutonium fällt aber in vergleichsweise großen Mengen an.
 - Das Plutonium ist spaltbar. Es kann daher in Brennelementen für Kernkraftwerke wiederverwendet werden.
 - Mit ausreichenden Mengen von Plutonium kann man relativ leicht Atombomben bauen. Deshalb sollte die Erzeugung von Plutonium in Kernkraftwerken, Brutreaktoren und seine Weiterverarbeitung in Wiederaufarbeitungsanlagen strengen Kontrollen unterliegen.
 - Leichtwasserreaktoren sind in dieser Beziehung sicherer. Die Plutonium–Brutrate liegt deutlich unter 1 (\rightarrow Nordkorea–Problematik).

6.7 Wiederaufarbeitung, Entsorgung und Transport

In Wiederaufarbeitungsanlagen werden verbrauchte Brennelemente behandelt:

- Die wiederverwertbaren Anteile ($^{235}_{92}\text{U}$, $^{239}_{94}\text{Pu}$) werden abgetrennt und angereichert.
- Die Spaltprodukte und Transurane werden ebenfalls separiert. Sie müssen entsorgt werden.

Die Entsorgung geschieht durch Zwischen- und Endlagerung.

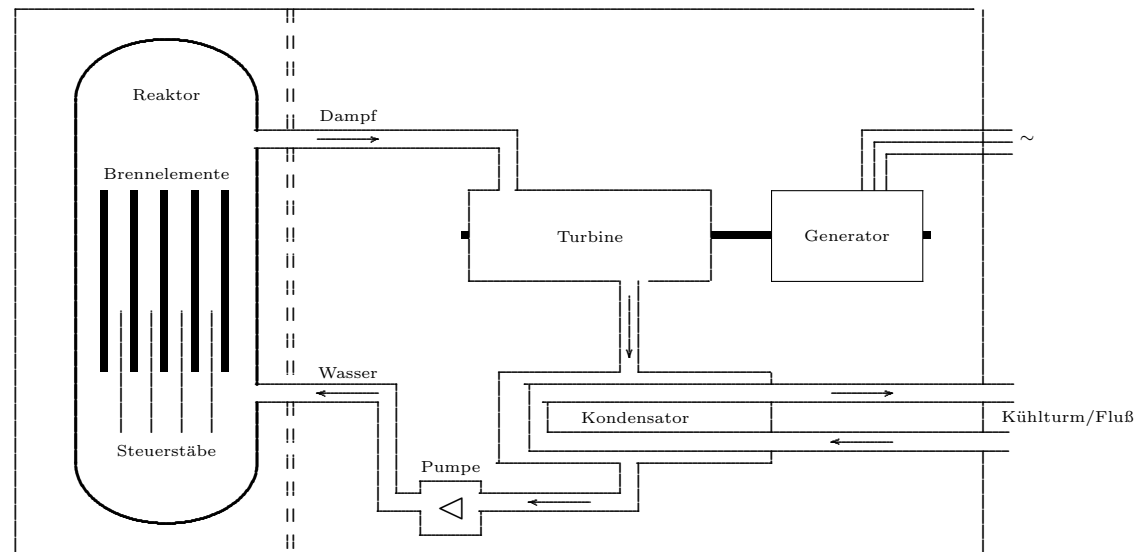
- Schwachradioaktive Abfälle (aus der Medizin, . . .) werden in Stahlblechfässer gefüllt.
- Mittelradioaktive und flüssige Abfälle werden mit Beton vermischt und dann in Stahlblechfässer gefüllt.
- Hochradioaktive Abfälle werden mit anderen Materialien verschmolzen, in Edelstahlbehälter verfüllt.

Die Endlagerung geschieht in tiefen Bohrlöchern von Salzstöcken. Salzstöcke sind geeignet, da diese seit Millionen von Jahren geologisch stabil sind und keine Verbindungen zum Grundwasser aufweisen. Das Problem ist der Schutz vor Missbrauch.

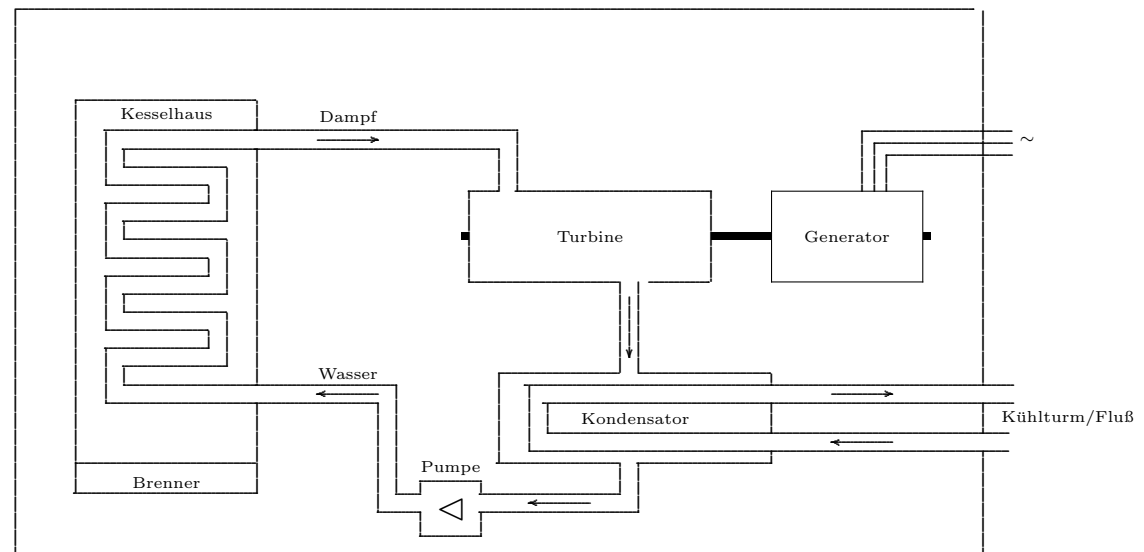
Der Transport der „abgebrannten“ Brennstäbe geschieht in international genormten Spezialbehältern, den sogenannten CASTOR–Behältern.

Sie müssen gegen mechanische, chemische und thermische Belastung von außen geschützt sein. Ein Problem stellt die Dichtigkeit dar, die besonders aufgrund der im Inneren freigesetzten Wärme (aus der Radioaktivität, Temperaturen um 80°C) eine Herausforderung darstellt.

6.8 Aufbau eines Kernkraftwerks



Aufbau (stark schematisch) eines Kernkraftwerks mit Siedewasserreaktor



Aufbau (stark schematisch) eines Kohlekraftwerks

6.9 Die Atombombe

Kommt die oben angesprochene Kettenreaktion von Kernspaltungen lawinenartig zustande, so werden ungeheure Energiemengen freigesetzt. Dies kann nur in einer äußerst aufwendig gebauten Bombe passieren, der Atombombe (eigentlich müsste sie Kernbombe oder Nuklearbombe heißen).

6.9.1 Grundsätzliche Funktionsweise

Zum Bau einer Atombombe werden die beiden Isotope



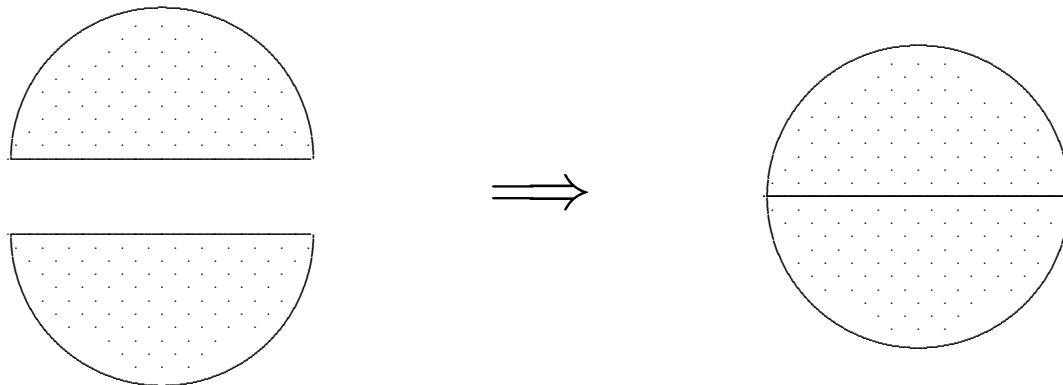
verwendet. Das Sprengmaterial muss in reiner (zu nahezu 100% angereicherter) Form vorliegen.

In einer Atombombe befinden sich zwei Teile von jeweils unterkritischer Masse dieses Materials.

Werden diese zwei Teile „zusammengefügt“, so wird die kritische Masse



überschritten. Die Kettenreaktion kommt — auch ohne Moderation — zustande.



Nähern sich die zwei Teile an, so kommt es wegen der startenden Kettenreaktion zu einer Temperaturerhöhung und zu Kräften, die die Teile wieder auseinandertreiben. Die Bombe verpufft.

Deshalb muss man die beiden Teile durch eine Explosion mit gewöhnlichem Sprengstoff ineinandertreiben. Damit der Explosionsdruck nach innen wirkt, muss die Bombe in einem sehr stabilen Bleimantel und Stahlbehälter eingeschlossen sein.

Tatsächlich wird dabei nur ein kleiner Teil des Urans (beispielsweise 1 kg von etwa 50 kg) gespalten.

Alternativ kann die kritische Masse dadurch verkleinert werden, dass man die Dichte des Bombenmaterials durch eine Implosion erhöht: Implosionsbombe.

Wirkungen der Atombombe:

- Blitz: Blendung und Erblindung.
- Druckwellen: Es werden großflächig Gebäude zerstört.
- Hohe Temperaturen (Im Explosionszentrum einige Millionen °C), Brände, Austrocknung.
- Langanhaltende Radioaktivität: Die radioaktiven Spaltprodukte (mit teilweise hohen Halbwertszeiten) führen auch noch nach Jahren zu Erkrankungen (Krebs).

6.9.2 Historischer Ablauf

Dezember 1938: Otto Hahn und Fritz Straßmann (KdP496, FS ist Nachfolger der vertriebenen Lise Meitner) weisen nach, dass in einer Uranprobe durch nach Beschuss durch Neutronen Barium entsteht. Sie deuten dies als das Resultat des „Zerplatzens“ von Urankernen. Es stellte sich weiter heraus, dass beim Zerplatzen sehr große Energiemengen freigesetzt werden. Damit konnten plötzlich befremdliche Ergebnisse bei Experimenten anderer Physiker (insbesondere des Ehepaares Joliot–Curie) richtig gedeutet werden.

Im Laufe der Jahre 1939, 1940 stellte sich heraus, dass beim Zerplatzen der Urankerne weitere Neutronen frei werden. Den weltweit führenden Physikern wurde zunehmend klar, dass damit das Prinzip einer Bombe mit ungeheurer Wirkung gegeben ist.

Zugleich waren wegen des Kriegsausbruchs und der vorhergehenden politischen Entwicklungen die Möglichkeiten eingeschränkt und dann ganz unterbunden, dass die Physiker über diese Fragen kommunizieren können.

1941: In Deutschland wird der Uranverein gegründet (Leitung Werner Heisenberg, KdP440): Es wird ein Reaktor in Berlin–Dahlem gebaut. Es stellt sich heraus (und wird von Hitler dann entschieden), dass Deutschland den hohen technischen und finanziellen Aufwand zum Bau einer Uranbombe nicht erbringen kann.

Historisch verdichtet kann man diese Entwicklung festmachen an dem „Kopenhagener Spaziergang“, den Werner Heisenberg und Niels Bohr (KdP: 436) im Herbst 1941 unternahmen. Heisenberg hat das Gespräch aus der Erinnerung wiedergegeben: Vgl. Robert Jungk, „Heller als Tausend Sonnen“, S. 337 f.

Bei den Gegnern Nazideutschlands nährte dies den Argwohn, dass in Deutschland versucht werden könnte, die Bombe zu bauen. Diese Gefahr veranlasste besorgte Physiker, vor allem in den USA, die Initiative für ein eigenes Atombombenprojekt zu ergreifen. Wichtig ist hier ein Brief Albert Einsteins an den amerikanischen Präsidenten Roosevelt vom 2. August 1939:

Einige mir im Manuskript vorliegende neuere Arbeiten von E. Fermi und L. Szilard lassen mich annehmen, dass das Element Uran in absehbarer Zeit in eine neue wichtige Energie verwandelt werden könnte. Gewisse Aspekte der Situation scheinen die Aufmerksamkeit der Regierung und, wenn nötig, rasches Handeln zu erfordern. Ich halte es daher für meine Pflicht, Ihnen die folgenden Fakten und Vorschläge zu unterbreiten:

Im Lauf der letzten vier Monate wurde — durch die Studien von Joliot in Frankreich und von Fermi und Szilard in den Vereinigten Staaten — die Möglichkeit geschaffen, in einer großen Uranmasse atomare Kettenreaktionen zu erzeugen, wodurch gewaltige Energiemengen und große Quantitäten neuer radiumähnlicher Elemente ausgelöst würden. Es scheint jetzt fast sicher, dass dies in der allernächsten Zeit gelingen wird.

Dieses neue Phänomen würde auch zum Bau von Bomben führen, und es ist denkbar — obwohl weniger sicher —, dass auf diesem Wege neuartige Bomben von höchster Detonationsgewalt hergestellt werden können. Eine einzige Bombe dieser Art, auf einem Schiff befördert oder in einem Hafen explodiert, könnte unter Umständen den ganzen Hafen und Teile der umliegenden Gebiete völlig vernichten. Möglicherweise würden solche Bomben infolge ihres Gewichts den Transport über den Luftweg ausschließen.

Die Vereinigten Staaten verfügen nur über bescheidene Mengen schwacher Uran-Erze. Kanada und die frühere Tschechoslowakei dagegen habe gute Uran-Erze. Die beste Uranerz-Quelle ist der belgische Kongo.

Im Hinblick auf diese Situation mögen Sie es für wünschenswert erachten, dass ein ständiger Kontakt zwischen der Regierung und der Gruppe von Physikern in Amerika hergestellt wird, die an dem Zustandekommen der Kettenreaktion arbeiten. Das könnte vielleicht dadurch erreicht werden, dass Sie eine ihr Vertrauen genießende Person benenne, die, möglicherweise in nichtamtlicher Kapazität wirkend, folgende Aufgaben übernehmen könnte:

- a) Verbindung mit Regierungsstellen, die ständig über die weiteren Entwicklungen zu informieren wären; Vorschläge von Regierungsstationen, wobei der Sicherung ausreichender Uranerz-Quantitäten für die Vereinigten Staaten besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden müsste.
- b) Beschleunigung der experimentellen Arbeiten, die gegenwärtig mit den beschränkten Mitteln der Universitätslaboratorien finanziert werden; falls nötig, Beschaffung zusätzlicher Fonds durch Kontakte mit Privatpersonen, die die Sache zu unterstützen gewillt sind; vielleicht auch Gewinnung der Mitarbeit industrieller Laboratorien, die über die nötigen technischen Einrichtungen verfügen.

Es wurde mir mitgeteilt, dass Deutschland den Verkauf von Uran aus dem von ihnen übernommenen tschechoslowakischen Bergwerken eingestellt hat. Dass diese Aktion so frühzeitig erfolgte, mag dadurch zu erklären sein, dass der Sohn des Staatssekretärs im deutschen Auswärtigen Amt von Weizsäcker mit dem Kaiser-Wilhelm-Institut in Berlin verbunden ist, wo einige der amerikanischen Uranexperimente jetzt wiederholt werden.

Ihr sehr ergebener
(Albert Einstein)

Enrico Fermi KdP495.

Am 6. Dezember 1941 (zufällig 1 Tag vor Pearl Harbor) wurde offiziell das amerikanische Atom-bombenprojekt (wenig später „Manhattan Project“ genannt) gegründet:

- Es wurden 1943 eigens drei Städte (Los Alamos (NM), Oak Ridge (TE), Hanford (WA)) gebaut.
- An dem Projekt arbeiteten zeitweise 150.000 Menschen, die nur mit wenigen Ausnahmen gar nicht wussten, wofür sie arbeiteten.
- Die Wissenschaftler mussten sich einer strengen militärischen Disziplin, Überwachung und Geheimhaltung unterwerfen.
- Es gab einen militärischen Leiter General Groves. Zum wissenschaftlichen Leiter wurde im Juli 1943 J. R. Oppenheimer bestellt.

Auf einem Testgelände der Luftwaffe in der Nähe von Alamogordo bei Santa Fe im Bundesstaat New Mexico erfolgte beim Trinity-Test am 16. Juli 1945 um 5.30 Uhr Ortszeit die erste erfolgreiche Zündung einer Nuklearwaffe.

Am 6. August 1945 um 8.15 Ortszeit wurde die Uran-235-Atombombe „Little Boy“ in 580 m Höhe über Hiroshima von dem B29-Flugzeug „Enola Gay“ abgeworfen. Die Explosionskraft der Atombombe entsprach 12,5 kt TNT. Es gab 260.000 Tote und 160.000 Verletzte. GdT416

Am 9. August 1945 um 11.02 Ortszeit wurde die mit Plutonium-239 gefüllte Atombombe „Fat Man“ (4,5 m Länge, 1,5 m Durchmesser, 4,5 t Gewicht) über Nagasaki abgeworfen. GdT416

Am 21. Mai 1946, Bikini-Atoll: Der russisch-stämmige Physiker Louis Slotin schob, um Messungen durchzuführen zu können, zwei unterkritische Uran-Teilstücke zusammen, um Fast-Kritikalität zu erreichen. Dabei ist ihm ein Schraubenzieher ausgerutscht, das Uran ist leicht überkritisch geworden. Er hat die Teile mit den Händen wieder getrennt. Aufgrund der hohen Strahlungsbelastung ist er neun Tage später gestorben.

Nach dem Krieg gab es jahrelange politische Auseinandersetzungen um Fragen der Atomrüstung, der weltweiten Verbreitung der Atomwaffen und Kontrolle der Atomenergie. Viele beteiligte, zum Teil auch prominente, Wissenschaftler, die für eine öffentliche und internationale Kontrolle eintraten, wurden von Politikern und Militärs angegriffen, in der Öffentlichkeit verunglimpft, in ihrer Arbeit behindert.

1950: Klaus Fuchs, einer der jüngeren Physiker und Mitarbeiter am Projekt wird verhaftet, er gesteht, für die SovietUnion Geheimnisse verraten zu haben.

In vielen Appellen, Radio- und Fernsehansprachen warnt Albert Einstein vor den Gefahren einer weltweiten atomaren Rüstung. Kurz vor seinem Tod am 18. April 1955 unterzeichnet er einen letzten Appell.

1. März 1954: Erster Test einer Wasserstoff-Fusions-Bombe auf dem Bikini-Atoll im Pazifik.

Bis 1974: Auch die Sowietunion, Großbritannien, Frankreich, China und Indien zünden Atombomben.

Im Jahr 1956 wurde die Frage nach einer Frage der Ausrüstung der Bundeswehr mit sogenannten taktischen Atombomben aktuell und brisant. Dazu nahmen 18 prominente deutsche Physiker (die „Göttinger 18“) am 12.4.1957 in einem Manifest Stellung:

Die Pläne einer atomaren Bewaffnung der Bundeswehr erfüllen die unterzeichnenden Atomforscher mit tiefer Sorge. Einige von ihnen haben den zuständigen Bundesministern ihre Bedenken schon vor mehreren Monaten mitgeteilt. Heute ist eine Debatte über diese Frage allgemein geworden. Die Unterzeichnenden fühlen sich daher verpflichtet, öffentlich auf einige Tatsachen hinzuweisen, die alle Fachleute wissen, die aber der Öffentlichkeit noch nicht hinreichend bekannt zu sein scheinen.

1. Taktische Atomwaffen haben die zerstörende Wirkung normaler Atombomben. Als „taktisch“ bezeichnet man sie, um auszudrücken, dass sie nicht nur gegen menschliche Siedlungen, sondern auch gegen Truppen im Erdkampf eingesetzt werden sollen. Jede einzelne taktische Atombombe oder -granate hat eine ähnliche Wirkung wie die erste Atombombe, die Hiroshima zerstört hat. Da die taktischen Atomwaffen heute in großer Zahl vorhanden sind, würde ihre zerstörende Wirkung im ganzen

sehr viel größer sein. Als „klein“ bezeichnet man diese Bomben nur im Vergleich zur Wirkung der inzwischen entwickelten „strategischen“ Bomben, vor allem der Wasserstoffbomben.

2. Für die Entwicklungsmöglichkeit der lebensausrottenden Wirkung der strategischen Atomwaffen ist keine natürliche Grenze bekannt. Heute kann eine taktische Atombombe eine kleinere Stadt zerstören, eine Wasserstoffbombe aber einen Landstrich von der Größe des Ruhrgebietes zeitweilig unbewohnbar machen. Durch Verbreitung von Radioaktivität könnte man mit Wasserstoffbomben die Bevölkerung der Bundesrepublik wahrscheinlich schon heute ausrotten. Wir kennen keine technische Möglichkeit, große Bevölkerungsmengen vor dieser Gefahr sicher zu schützen.

Wir wissen, wie schwer es ist, aus diesen Tatsachen die politischen Konsequenzen zu ziehen. Uns als Nichtpolitikern wird man die Berechtigung dazu abstreiten wollen; unsere Tätigkeit, die der reinen Wissenschaft und ihrer Anwendung gilt und bei der wir viele junge Menschen unserem Gebiet zuführen, belädt uns aber mit einer Verantwortung für die möglichen Folgen dieser Tätigkeit. Deshalb können wir nicht zu allen politischen Fragen schweigen. Wir bekennen uns zur Freiheit, wie sie heute die westliche Welt gegen den Kommunismus vertritt. Wir leugnen nicht, dass die gegenseitige Angst vor den Wasserstoffbomben heute einen wesentlichen Beitrag zur Erhaltung des Friedens in der ganzen Welt und der Freiheit in einem Teil der Welt leistet. Wir halten aber diese Art, den Frieden und die Freiheit zu sichern, auf die Dauer für unzuverlässig, und wir halten die Gefahr im Falle des Versagens für tödlich. Wir fühlen keine Kompetenz, konkrete Vorschläge für die Politik der Großmächte zu machen. Für ein kleines Land wie die Bundesrepublik glauben wir, dass es sich heute noch am besten schützt und den Weltfrieden noch am ehesten fördert, wenn es ausdrücklich und freiwillig auf den Besitz von Atomwaffen jeder Art verzichtet. Jedenfalls wäre keiner der Unterzeichnenden bereit, sich an der Herstellung, der Erprobung oder dem Einsatz von Atomwaffen in irgendeiner Weise zu beteiligen. Gleichzeitig betonen wir, dass es äußerst wichtig ist, die friedliche Verwendung der Atomenergie mit allen Mitteln zu fördern, und wir wollen an dieser Aufgabe wie bisher mitwirken.

Fritz Bopp, Max Born, Rudolf Fleischmann, Walther Gerlach, Otto Hahn, Otto Haxel, Werner Heisenberg, Hans Kopfermann, Max v. Laue, Heinz Maier-Leibnitz, Josef Mattauch, Friedrich-Adolf Paneth, Wolfgang Paul, Wolfgang Riezler, Fritz Straßmann, Wilhelm Walcher, Carl Friedrich Frhr. v. Weizsäcker, Karl Wirtz.

In den 50er/60er Jahren: Weltweite Atomtests mit weltweitem Fallout:

August 1963: Atomteststoppabkommen für Versuche im Weltraum, Wasser und in der Luft. (Es sind damit nur noch unterirdische Tests möglich). Das Abkommen wird von USA, UdSSR und Großbritannien unterzeichnet.

Hauptinitiator dieses weltweiten Verbots von oberirdischen Atomtests ist Linus Pauling (1954 NP Chemie für Aufklärung der Struktur von Aminosäuren, 1962 Friedensnobelpreis).

1960er Jahre: Entwicklung der Neutronenbombe: Geringere Sprengkraft, Freisetzung von vielen schnellen Neutronen. Die Wirkung ist nicht so sehr die Zerstörung von Gebäuden und technischen Einrichtungen als viel mehr die Vernichtung von Leben. Damit sollte die Glaubwürdigkeit einer „flexible response“ auf einen Einmarsch des Warschauer Pakts im Westen erhöht werden.

Heute verfügen viele Staaten über Atombomben: USA, Russland, China, England, Frankreich, Indien, Pakistan, wahrscheinlich auch Israel.

Von weiteren Staaten ist nicht genau bekannt, ob sie im Besitz der Atombombe sind: Brasilien, Südafrika, Argentinien,

Weitere Staaten versuchen, in den Besitz der Atombombe zu kommen: Nord-Korea, Iran.