

Radioaktivität und Kernenergie

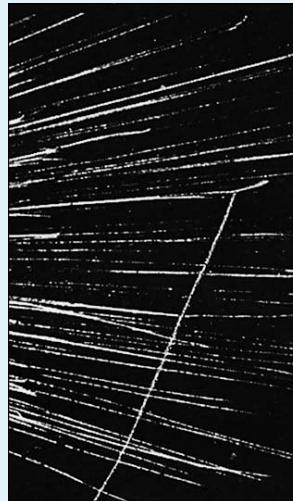
Ein 2000 MW-Kohlekraftwerk verfeuert pro Jahr knapp 3 Mio. t Kohle. Ein gleich großes Kernkraftwerk benötigt dagegen nur etwas mehr als 50 t Uran. Kernkraftwerke scheinen also riesige Energiemengen praktisch aus dem Nichts zu erzeugen!

Woher kommen diese gewaltigen Energiemengen? Welche physikalischen Prozesse laufen in einem Kernreaktor ab? Warum sind Kernkraftwerke so umstritten? Was ist Radioaktivität überhaupt und wieso ist sie gefährlich?





■ **Röntgenstrahlung** wird heute längst nicht mehr nur zu diagnostischen Zwecken, z. B. zur Erkennung von Knochenbrüchen, eingesetzt. Mithilfe von energiereicher Röntgenstrahlung und radioaktiver Strahlung können viele Krankheiten behandelt werden, zum Beispiel Krebs. Die Strahlung ist aber nicht nur hilfreich und heilsam, sondern auch gefährlich. Nutzen und Schaden müssen deshalb stets sehr sorgfältig gegeneinander abgewogen werden.



■ **Entdeckungen:** Etwa 1920 setzte ERNEST RUTHERFORD Stickstoff radioaktiver Strahlung aus. Die Strahlung bestand aus sehr schnell fliegenden Helium-Kernen. Er beobachtete und fotografierte die erste Umwandlung eines Elements (Stickstoff) in ein anderes (Sauerstoff). Bei der Umwandlung entstand noch ein drittes Teilchen, dessen Spur in der Nebelkammeraufnahme schräg nach unten verläuft. RUTHERFORDS Versuchen folgten viele weitere. Dabei wurden zahlreiche neue Elemente und die Kernspaltung entdeckt.

■ **Kernkraftwerke** emittieren kein Kohlenstoffdioxid (CO_2) und leisten damit keinen Beitrag zur globalen Erwärmung. Andererseits ist das Problem der sicheren Endlagerung der abgebrannten hochradioaktiven Brennstäbe, die noch Jahrtausende strahlen werden, nirgendwo auf der Welt gelöst. Die Brennstäbe müssen mindestens ein Jahr lang in einem Wasserbecken mit Kühlung im Reaktorgebäude verweilen, bevor sie in geeigneten Behältern in großen Hallen zwischengelagert werden können.



■ **Schutzmaßnahmen:** Zur Wahrnehmung radioaktiver Strahlung oder Röntgenstrahlung besitzt der Mensch keine Sinnesorgane. Zum Nachweis ist er daher auf geeignete Messgeräte angewiesen. Jeder Raum, in dem radioaktive Substanzen oder Röntgengeräte benutzt oder gelagert werden, muss deshalb eine entsprechende Kennzeichnung haben. Personen, die mit ihnen umgehen, müssen entsprechend geschult sein.



Vorbereitung

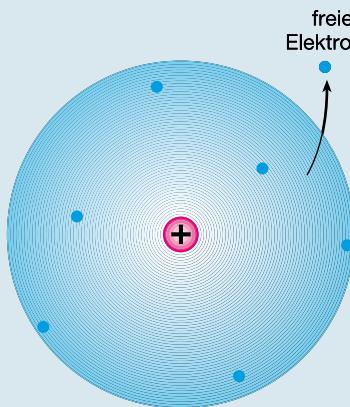
- 1 Lies die Texte dieser beiden Seiten durch und betrachte die zugehörigen Bilder. Schreibe zu den einzelnen Themen Fragen auf, die du dazu hast.
- 2 Blättere das folgende Kapitel durch, lies die Überschriften und betrachte die Bilder. Notiere neben den Fragen aus 1 die Seitenzahlen, die deiner Meinung nach Antworten zu deinen Fragen liefern könnten.
- 3 Überlege und schreibe auf, was du in Experimenten untersuchen möchtest. Vielleicht hast du ja schon Ideen, wie die Versuche aussehen könnten
- 4 Wiederhole die in der Wiederholung „Atome und Ladungen“ auf Seite 190 dargestellten Zusammenhänge. Schreibe dazu die wichtigsten Begriffe zusammen mit einer kurzen Erklärung auf.

Wiederholung

Atome und Ladungen

Atome, Moleküle

- Jeder Körper besteht aus winzig kleinen Teilchen, den Atomen oder aus Atomen zusammengesetzten Molekülen.
- Atome bestehen aus einem Atomkern mit positiver Ladung und einer Atomhülle, bestehend aus negativ geladenen Elektronen.
- Die positive Ladung des Kerns und die negative Ladung der Hülle sind gleich groß, das Atom ist nach außen elektrisch neutral.
- Die Anzahl der Hüllenelektronen eines neutralen Atoms bestimmt die Atomart und damit das chemische Element.



Ionen, geladene Körper

- Nimmt ein Atom ein oder mehrere Elektronen in seine Hülle auf, dann entsteht ein negativ geladenes Ion.
- Gibt ein Atom Elektronen ab, dann überwiegt die positive Ladung des Kerns, es entsteht ein positiv geladenes Ion.
- Ein negativ geladener Körper besitzt insgesamt einen Elektronenüberschuss, bei einem positiv geladenen Körper herrscht Elektronenmangel.



Die Kugel ist negativ geladen, da die Glühlampe am zugewandten Ende leuchtet.



Gleichnamig geladene Körper (fester Stab und Zeiger des Elektroskops) stoßen sich ab. Die Ladungsart ist nicht bestimmbar.

Das Periodensystem der Elemente

Elemente sind alle die Stoffe, die mit chemischen Methoden nicht mehr weiter zerlegt werden können. Die Ordnung dieser Elemente nach chemischen Gesichtspunkten führt zum Periodensystem der Elemente (PSE).

Im PSE sind die Elemente

- in den Spalten nach ihren chemischen Eigenschaften angeordnet;
- in den Perioden (Zeilen) nach aufsteigender Zahl ihrer Hüllenelektronen sortiert.

feste Elemente: schwarz
flüssige Elemente: blau
gasförmige Elemente: rot
künstliche Elemente: weiß
natürliche radioaktive Elemente: grün

Periode	Hauptgruppen		Nebengruppen (Übergangselemente)														Hauptgruppen	
	1	2	3		4			5				6					7	
1	H	He	Li Be		Sc Ti V Cr Mn Fe Co Ni Cu Zn Ga Ge As Se Br Kr			Al Si P S Cl Ar				B C N O F Ne					He Ne	
2	Li	Be	Na Mg		K Ca Sc			Ti V Cr Mn Fe				Co Ni Cu Zn Ga					Ge As Se Br Kr	
3	Na	Mg	Mg Al		Ca Sc Ti			V Cr Mn Fe				Co Ni Cu Zn Ga					Ge As Se Br Kr	
4	K	Ca	Mg Sc		Sc Ti V			Cr Mn Fe Co				Ni Cu Zn Ga					Ge As Se Br Kr	
5	Rb	Sr	Sc Y		Y Zr Nb			Nb Mo Tc Ru				Ru Rh Pd Ag Cd					Ge As Se Br Kr	
6	Cs	Ba	Sc La-Lu		La-Lu Hf Ta W			Ta W Re Os				Os Ir Pt Au Hg					Ge As Se Br Kr	
7	Fr	Rb	La-Lu Ac-Lr		Ac-Lr Rf Db Sg Bh Hs Ml			Rf Db Sg Bh Hs				Ml Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu					Ge As Se Br Kr	
	Elemente der Lanthanreihe		La Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu		Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu			Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu				Nd Pr Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu					Ge As Se Br Kr	
	Elemente der Actiniumreihe		Ac Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr		Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr			Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr				U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr					Ge As Se Br Kr	
Atommasse in u	26,98		Al			Aluminium				Elementsymbol					H			
Ordnungszahl	13		Aluminium			Elementname				H					He			

Radioaktivität um uns herum

Projekt

Alle Materie besteht aus Atomen. Die Modellvorstellung für das Atom ist das Kern-Hülle-Modell. Dieses Kapitel trägt die Überschrift: Radioaktivität und Kernenergie. Das deutet darauf hin, dass im Atomkern Energie steckt.



P1 Ergründet die Bedeutung dieses Symbols. Falls ihr es schon einmal gesehen habt, schreibt auf, wo das war.

a) Was wisst ihr bereits über Radioaktivität? Kommt sie in eurer unmittelbaren Umgebung vor oder spielt

sie vielleicht anderswo eine Rolle?
Notiert in Stichworten.

b) Informiert euch auch im Internet über das Thema. Die folgenden Stichworte sollen euch dabei helfen:

- **Strahlung**
- **Natürliche Radioaktivität**
- **Strahlentherapie**
- **Untersuchungen in der Medizin**
- Welche **radioaktiven Abfälle** entstehen und welche Möglichkeiten zu ihrer **Entsorgung** gibt es?
- **c)** Erstelle eine Präsentation.



Kernkraftwerke – Nutzen und Gefahren

Projekt



P1 Radioaktivität und Kernenergie rufen bei vielen Menschen große Ängste hervor.

a) Informiert Euch über die Argumente der Kernkraftgegner und der Befürworter. Notiert die Argumente des Für und Wider in Tabellenform und bewertet diese Argumente. Achtet besonders darauf, ob

Argumente sachlich oder eher polemisch sind und ob die Kernkraftgegner Alternativen zur Energiebereitstellung anbieten.

b) Stellt die Ergebnisse in Plakatform dar.

P2 Bildet ein Team und befragt eure Klassenkameraden, Eltern, Bekannte und Verwandte nach ihrer Einstellung zur Kernenergie.

a) Mögliche Fragen sind:

- Wie ist der Kenntnisstand zur Kernenergie?
- Welche Befürchtungen bzw. Ängste gibt es?
- Gibt es die Bereitschaft, Energie zu sparen, damit Kernkraftwerke abgeschaltet werden können?
- Gibt es Alternativen zu Kernkraftwerken und welche Einschränkungen müssen in Kauf genommen werden, wenn alle Kernkraftwerke abgeschaltet würden?
- Welche Abfälle entstehen und wie wird damit umgegangen?

b) Ergänzt diese Liste und schreibt auch auf, was ihr selbst zum Thema wisst, aber auch, was ihr vom Thema nicht versteht.

c) Vergleicht dies hinterher mit euren Umfrageergebnissen und stellt die Ergebnisse in Plakatform dar.

P3 Eine Alternative zum Bau neuer Kraftwerke oder zum Erhalt vorhandener Kraftwerke wäre eine Reduzierung des **Energiebedarfs**.

a) Überlegt Möglichkeiten zum **Energiesparen**. Achtet darauf, dass die Vorschläge auch durchführbar sind und angemessene Einsparungen bewirken.

b) Formuliert eure Vorschläge als Fragebogen, mit dem festgestellt werden kann, wie groß die Bereitschaft zum Energiesparen wäre, und lasst den Fragebogen von Klassenkameraden beantworten.

c) Bezieht auch Eltern, Verwandte und Bekannte in die Fragebogenaktion ein und vergleicht die Ergebnisse mit der Klassenbefragung.

P4 Seit einigen Jahrzehnten wird daran geforscht, mithilfe der Kernfusion Energie bereit zu stellen. Das heißt: Die Menschheit versucht nachzubauen, was in der Sonne schon seit Milliarden Jahren funktioniert. Nach Prognosen der 80er Jahre müsste heute schon der erste Fusionsreaktor arbeiten – dies ist aber offensichtlich nicht der Fall.

Recherchiert zum Thema **Kernfusion**. Folgende Stichpunkte können dabei helfen:

- Wie weit ist die Forschungsarbeit? Gibt es spezielle Gründe, warum die Prognosen der 80er Jahre so falsch lagen?
- Gibt es in absehbarer Zeit Hoffnung auf einen **Fusionsreaktor**.
- Ist die Kernfusion im Labor schon einmal gelungen?
- Was bedeuten die Begriffe **Tokamak**, **Stellarator** und **Iter**?

Aufbau der Atome

Die Atome sind so klein, dass sie auch mit einem sehr stark vergrößern- den Lichtmikroskop nicht betrachtet werden können. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen: Der Atomkern ist gegenüber dem Atom so klein wie ein Reiskorn gegenüber einem Fußballstadion. Trotzdem konnte das Kern-Hülle-Modell zur Erklärung vieler Erscheinungen im Mikrokosmos entwickelt werden. Kann es bestätigt werden? Wie groß sind Atome eigentlich? Und woraus besteht der Atomkern?



Abschätzung des Atomdurchmessers

Eine Vorstellung von der Größe der Atome kann mit dem **Ölfleckversuch** erhalten werden.

Wird ein Tropfen mit Leichtbenzin verdünnter Ölsäure auf eine Wasserfläche aufgebracht, die mit sehr feinen und leichten Blütensporen bestreut wurde, dann verdunstet das leicht flüchtige Benzin und die geringe Menge Ölsäure breitet sich auf dem Wasser aus. Die Größe des entstandenen Kreises wird durch die vom Öl verdrängten Blütensporen sichtbar gemacht. Daraus kann der Durchmesser des Ölflecks bestimmt werden. Werden zwei oder drei Tropfen Ölgemisch auf das

Wasser gegeben, so hat der Ölfleck genau die doppelte bzw. dreifache Größe.



Daraus lässt sich schließen, dass die Ölschicht immer die gleiche Dicke hat, sich die Moleküle also alle nebeneinander anordnen, und somit der Moleküldurchmesser gleich der Höhe der Schicht ist.

Die Auswertung dieses relativ einfachen makroskopischen Versuchs – siehe Rechenbeispiel – ergibt eine erstaunlich gute Vorstellung von den Größenordnungen der Moleküle und sogar der Atome:

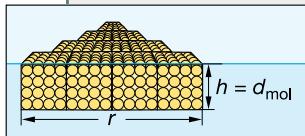
Atome können als Kugeln mit Radien in der Größenordnung 10^{-10} m aufgefasst werden.

Rechenbeispiel

Ein Tropfen Ölsäuremischung (Mischungsverhältnis mit Leichtbenzin 1:2000) verursacht einen Fleck mit der Fläche $A = 125 \text{ cm}^2$. 49 Tropfen der Mischung haben ein Volumen von $1,00 \text{ cm}^3$.

1. Berechnung des Ölvolumentes $V_{\text{Öl}}$ in einem Tropfen:

$$V_{\text{Öl}} = \frac{1,00 \text{ cm}^3}{49 \cdot 2000} = 1,02 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3.$$



2. Abschätzung des Moleküldurchmessers d_{Mol} :

Die Dicke h des zylindrischen Ölflecks entspricht dem Moleküldurchmesser d_{Mol} :

$$d_{\text{Mol}} = h = \frac{V_{\text{Öl}}}{A} = \frac{1,02 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3}{125 \text{ cm}^2} = 8,2 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$$

3. Abschätzung des Atomdurchmessers:

Ölsäure $\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COOH}$ besteht aus 18 Kohlenstoffatomen, 34 Wasserstoffatomen und 2 Sauerstoffatomen, insgesamt also 54 Atomen. Zur Vereinfachung werden

die Atome und Moleküle als Würfel gedacht. Ein Molekülwürfel, der die Kantenlänge von 3 Atomen hat, enthält $3^3 = 27$ Atome, ein Molekülwürfel mit der Kantenlänge 4 Atome enthält $4^3 = 64$ Atome. Das Ölsäuremolekül besitzt also eine Kantenlänge von ungefähr 4 Atomdurchmessern.

Damit ergibt sich für den Atomdurchmesser in etwa ein Viertel des Moleküldurchmessers:

$$d_{\text{Atom}} \approx d_{\text{Mol}} : 4 = 2 \cdot 10^{-8} \text{ cm} = 2 \cdot 10^{-10} \text{ m.}$$

Da das Ölsäuremolekül aus verschiedenen Atomen besteht und zudem einige vereinfachende Annahmen gemacht wurden, kann der erhaltene Atomdurchmesser nur die ungefähre Größe von Atomen angeben. Genauere Untersuchungen bestätigen jedoch, dass der Durchmesser von Atomen zwischen $1 \cdot 10^{-10}$ m und $5 \cdot 10^{-10}$ m liegt.

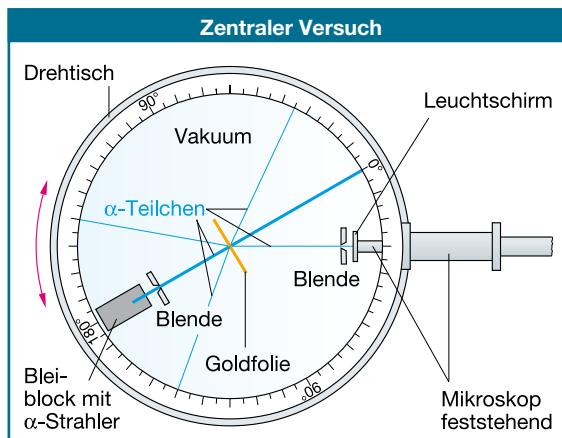
Das Rutherford'sche Atommodell

ERNEST RUTHERFORD (1871–1937) beschoss Anfang des 20. Jahrhunderts eine sehr dünne Goldfolie mit α -Teilchen – das sind positiv geladene Kerne von Heliumatomen, die von manchen Stoffen ausgesandt werden. Er untersuchte, unter welchen Winkeln die α -Teilchen aus der Einfallsrichtung abgelenkt werden. Den Raum um die Folie „tastete“ er mit einem Leuchtschirm ab. Die α -Teilchen erzeugten beim Auftreffen auf den Leuchtschirm kleine Lichtblitze, die mit einem Mikroskop beobachtet wurden. So bestimmte RUTHERFORD die Anzahl der unter einem bestimmten Winkel abgelenkten α -Teilchen pro Zeitintervall.

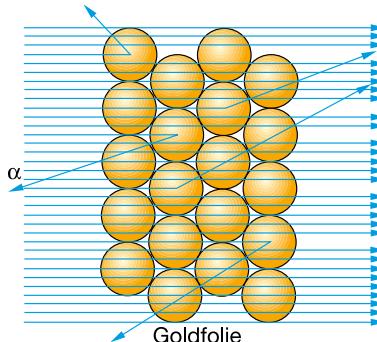
Da Atome nach außen neutral sind, stellte man sie sich damals als positiv geladene Kugeln vor, in die die negativ geladenen Elektronen gleichmäßig verteilt eingebettet waren wie Rosinen in einem Kuchenteig (*Thomson'sches Atommodell*).

RUTHERFORD erwartete dementsprechend, dass die α -Teilchen durch die Atome der Folie nahezu unabgelenkt hindurchfliegen, da die leichten Elektronen im positiven Teig des Atoms kaum Einfluss auf die Flugbahn der schweren α -Teil-

chen haben sollten und die gleichmäßig verteilte positive Ladung ebenfalls keine Richtungsänderung hervorrufen könnte.



Das Experiment ergab aber ein ganz anderes Ergebnis. Die meisten α -Teilchen flogen zwar geradlinig durch die Folie, allerdings wurden unter allen Winkeln – auch unter sehr großen – abgelenkte, d.h. gestreute α -Teilchen beobachtet.



Aus RUTHERFORDS Versuchen ergaben sich folgende Schlussfolgerungen für den Aufbau der Atome:

- Die meisten α -Teilchen passieren die Atome unbehindert. Das massive und geladene Objekt im Atom ist daher sehr klein; sein Radius – der Kernradius – ist etwa 100 000-mal kleiner als der Atomradius. Das entspricht dem Verhältnis 1 cm : 1 km.
- Da die α -Teilchen in wenigen Fällen auch reflektiert werden, muss der Atomkern undurchdringbar sein und eine sehr große Masse besitzen.
- Die von RUTHERFORD entwickelte Gleichung zur Berechnung der Streuung der α -Teilchen erfordert einen positiv geladenen Kern.
- Rutherford's Erkenntnisse führen zum **Kern-Hülle-Modell**:

Positive Ladung und fast die gesamte Masse eines Atoms sind im Atomkern konzentriert. Der Durchmesser des Kerns beträgt nur $\frac{1}{100000}$ des Atomdurchmessers. Die negative Ladung des Atoms wird durch die Elektronen der Hülle gebildet.

Aufgaben

- 1 Erkläre, warum beim Beschuss einer dünnen Goldfolie mit α -Teilchen die meisten α -Teilchen nahezu unabgelenkt hindurchfliegen können.
- 2 Erläutere die Verwendung von Stoffen mit relativ schweren Atomkernen bei Streuversuchen.
- 3 Die Elektronen in der Atomhülle haben praktisch keinen Einfluss auf die Flugbahn der α -Teilchen. Erkläre dieses Versuchsergebnis.
- 4 Angenommen, die Kernmaterie wäre im gesamten

- Atom gleichmäßig verteilt. Stelle die Versuchsergebnisse dar, die dann beim Beschuss mit α -Teilchen zu erwarten wären.
- 5 Eine Ölsäurelösung in Leichtbenzin enthält 2,0 g Ölsäure (Dichte $\rho = 8,9 \cdot 10^2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) in 1,0 l Lösung. Der mit einer Pipette auf eine Wasseroberfläche gebrachte Tropfen (Volumen $\frac{1}{90} \text{ cm}^3$) erzeugt dort einen Ölleck der Fläche 140 cm^2 . Ermittle aus diesen Versuchswerten die Größenordnung der Moleküle.

Ladung und Masse atomarer Teilchen

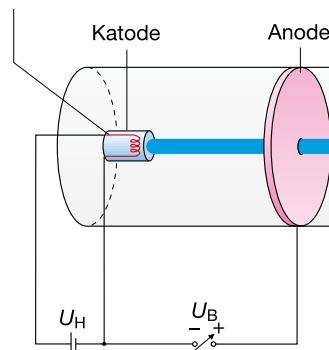
Die Elektronenstrahl-Ablenkröhre

Da der Atomkern positiv und die Elektronen negativ geladen sind, muss es möglich sein, sie durch magnetische Felder zu beeinflussen. Aus der Bahn der geladenen Teilchen können dann Schlussfolgerungen über ihre Eigenschaften gezogen werden.

Der zentrale Versuch zeigt:

- Je stärker das Magnetfeld, desto größer die Ablenkung.
- Je schneller die Elektronen, desto kleiner die Ablenkung.

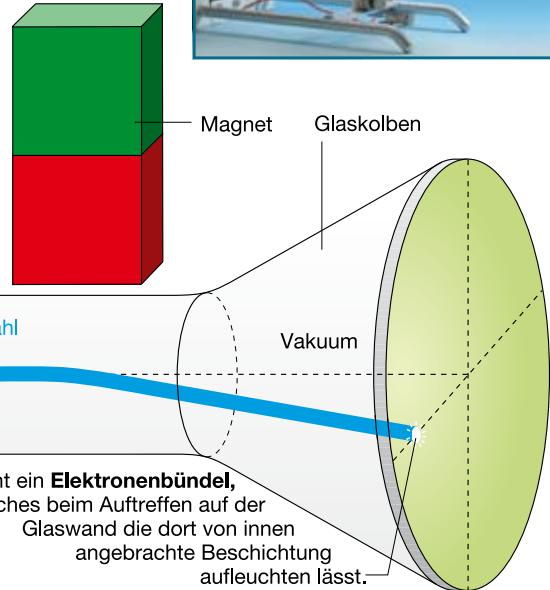
Elektronen im weiß glühenden Draht der Katode erhalten so viel Energie, dass sie aus dem Drahtmaterial austreten und eine Art Wolke um die Katode bilden.



Je größer die Beschleunigungsspannung, desto schneller fliegen die Elektronen von der Glühkatode zur ringförmigen Anode.

Elektronen fliegen infolge der Trägheit durch ein Loch in der Anode hindurch bis zum Leuchtschirm. Im Feld des Stabmagneten wird das Elektronenbündel abgelenkt (Linke-Hand-Regel).

Bewegt sich ein Elektron in einem Magnetfeld senkrecht zur Feldrichtung, so wirkt die Lorentzkraft auf das Teilchen. Die Richtung der Kraft kann mit der Linken-Hand-Regel bestimmt werden.



Es entsteht ein **Elektronenbündel**, welches beim Auftreffen auf der Glaswand die dort von innen angebrachte Beschichtung aufleuchten lässt.

Aufgaben

- a)** Skizziere den Verlauf des Elektronenbündels, wenn beim Stabmagneten Nord- und Südpol vertauscht werden.
b) Erkläre anhand einer Skizze, wo sich der Stabmagnet befinden müsste, damit das Elektronenbündel nach oben oder unten abgelenkt wird.
c) Erkläre welche Vorteile es gäbe, wenn der Stabmagnet durch einen geeigneten Hufeisenmagneten ersetzt würde.
- Erläutere, wie sich die Beschleunigungsspannung auf die Ablenkung des Elektronenbündels auswirkt. Erkläre auch die Rolle, die dabei der Dauermagnet spielt.
- Schildere die Folgen, wenn der Dauermagnet durch einen Elektromagnet ersetzt würde.

Werkzeug	Linke-Hand-Regel (UVW-Regel)
	<p>• Der Daumen der linken Hand zeigt in die Bewegungsrichtung der Elektronen von \ominus nach \oplus (Ursache). • Der abgespreizte Zeigefinger zeigt in Richtung der Magnetfeldlinien von N nach S (Vermittlung). • Der zu beiden senkrecht abgespreizte Mittelfinger zeigt dann die Richtung der Lorentzkraft an (Wirkung).</p>

Ablenkung positiv geladener Teilchen

In einem Gedankenversuch werden die Elektronen in der Elektronenstrahlröhre durch positive geladene Teilchen ersetzt. Dies könnten zum Beispiel Protonen sein oder positiv geladene Ionen. Da diese Teilchen eine wesentlich größere Masse als



Elektronen haben, wird ihre Ablenkung im Magnetfeld deutlich kleiner ausfallen.

Es ergeben sich folgende Abhängigkeiten für den Bahnverlauf dieser Teilchen im Magnetfeld:

- Je größer die Masse der Teilchen ist, desto kleiner ist die Ablenkung.
- Je größer die Ladung der Teilchen ist, desto größer ist ihre Ablenkung

Da die Ladung positiv ist, kann die Richtung der Ablenkung mithilfe der Rechte-Hand-Regel vorhergesagt werden.

Aufgaben

- 1 Erläutere, warum ein Nachweis von Neutronen mit dem hier besprochenen Verfahren nicht möglich ist.
- 2 Stelle anhand einer einfachen Skizze dar, in welche Richtung die Feldlinien des magnetischen Feldes bei der Nebelkammer zeigen müssten, damit die dargestellte Ablenkung zustande kommt.
- 3 Nenne eine Bedingung, unter der es möglich wäre, dass die untere Spur der Nebelkammeraufnahme von einem Proton stammt.

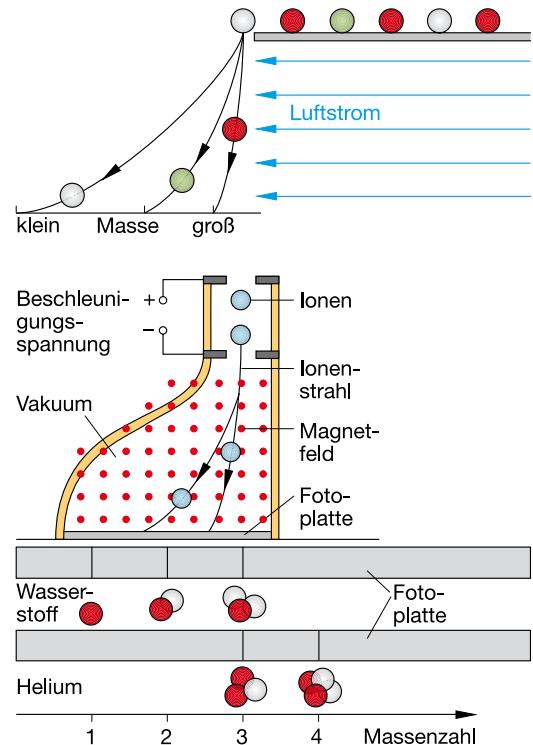
Die Ablenkung geladener Teilchen im Magnetfeld hängt von den Teilcheneigenschaften ab (Geschwindigkeit, Masse, Ladung) und von der Stärke des Magnetfeldes.

Massenspektroskop

Im Umkehrschluss ist es möglich, bei bekannter Geschwindigkeit und Magnetfeldstärke aus der Teilchenablenkung auf deren Masse zu schließen. Dieses Verfahren kann besonders dann sehr hilfreich sein, wenn ein Gemisch von Teilchen verschiedener Massen vorliegt. Durch die unterschiedlichen Massen werden die Teilchen unterschiedlich stark abgelenkt und dadurch sortiert.

Um festzustellen, aus welchen Teilchen ein Element besteht und wie häufig diese vorkommen, wird ein **Massenspektroskop** verwendet. Die Abbildung rechts zeigt das Prinzip: Durch einen Luftstrom wirkt auf alle Kugeln eine gleich große Kraft, welche die leichten Kugeln mehr und die schwereren weniger stark ablenkt.

Beim Massenspektroskop werden die Atome zuerst ionisiert und dann in einem elektrischen Feld beschleunigt. Im magnetischen Feld werden die Ionen dann durch die Lorentzkraft seitlich abgelenkt. Wenn alle Ionen die gleiche Ladung und Geschwindigkeit (Geschwindigkeitsfilter) besitzen, hängt die Ablenkung nur von ihrer Masse ab. Der Versuch zeigt bei Wasserstoff mehrere Schwärzungslinien auf der Fotoplatte, eine stark ausgeprägte Linie für die leichtesten Ionen (nur ein Proton) und zwei weitere, deutlich schwächere Linien für schwerere Wasserstoffkerne. Auch bei Helium gibt es zwei Schwärzungslinien, die auf die Existenz von Heliumkernen unterschiedlicher Masse hinweisen. Bei allen untersuchten Elementen unterscheiden sich die Massen immer um eine Nukleonemasse oder ein Vielfaches davon.



Aufbau der Atomkerne

Nach dem Atommodell von RUTHERFORD besteht das Atom aus dem positiven Kern, der nahezu die gesamte Masse enthält, und der Hülle mit den Elektronen.

Die Kerne bestehen aus einzelnen Kernbausteinen, den **Nukleonen**. Alle Nukleonen haben etwa die gleiche Masse. Es gibt positiv geladene Nukleonen, die **Protonen**, und ungeladene Nukleonen, die **Neutronen**. Wasserstoffatome sind die kleinsten, am einfachsten gebauten Atome. Der Atomkern besteht bei den meisten Wasserstoffatomen nur aus einem Proton. Es gibt aber auch noch das seltener vorkommende Deuterium, ein Wasserstoffatom mit einem Kern aus einem Proton und einem Neutron, oder das Tritium, das aus einem Proton und zwei Neutronen besteht. Diese Wasserstoffvarianten, die sich nur in der Anzahl der Neutronen im Kern unterscheiden, sind die **Isotope** des Wasserstoffs.

Solche Isotope gibt es bei allen Elementen. Sie haben die gleiche Anzahl von Protonen und dadurch

den gleichen Aufbau der Atomhülle. Sie besitzen daher alle die gleichen chemischen Eigenschaften.

Die verschiedenen Isotope kommen im natürlichen Element unterschiedlich häufig vor, wobei eine Isotopenart meist deutlich überwiegt. Bei Stickstoff z.B. hat eines von zwei Isotopen die Häufigkeit 99,6%. Die Atommasse ist der gewichtete Mittelwert der unterschiedlichen Isotopenmassen. So erklärt es sich, dass die Atommassen im Periodensystem keine ganzen Zahlen sind: Bei Chlor z.B. 35,45 u, wobei u die **atomare Masseneinheit** ist. Sie ist definiert als ein Zwölftel der Masse eines Atoms des Kohlenstoffisotops $^{12}_6\text{C}$, dessen Kern aus 6 Protonen und 6 Neutronen besteht: $1\text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$.

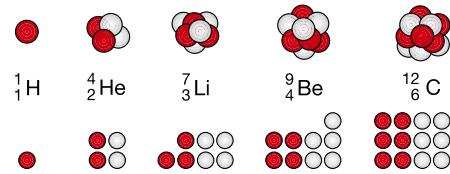
Alle in der Natur vorkommenden Atome eines Elements haben die gleiche Anzahl von Protonen, unterscheiden sich aber in der Neutronenzahl. Das sind die Isotope eines Elements.

Schreibweisen

Mithilfe der Kernladungszahl Z und der Massenzahl A können Isotope eines Elements eindeutig beschrieben werden:

- Die **Kernladungszahl Z** gibt die Anzahl der Protonen im Kern an (in der Chemie heißt sie auch Ordnungszahl). Neutrale Atome besitzen genau so viele Elektronen in der Hülle wie Protonen im Kern.
- Die **Massenzahl A** ist die Summe aus der Protonen- und der Neutronenzahl.

Die Massenzahl A wird oben, die Kernladungszahl Z unten an das Elementsymbol geschrieben.

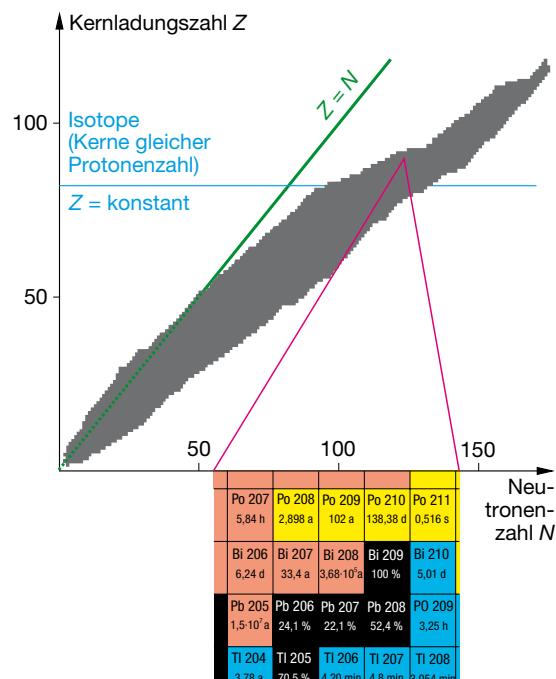


Da die Information über die Kernladungszahl schon in der Elementbezeichnung steckt, wird diese häufig weggelassen. Aus $^{12}_6\text{C}$ wird kurz ^{12}C oder C12.

Feste Körper und doch nicht stabil

In der Chemie gibt es als Ordnungsschema das *Periodensystem* der Elemente. In der Kernphysik ist die Entsprechung die **Nuklidkarte**. Sie ist aufgebaut wie ein Koordinatensystem, bei dem entlang der Rechts-Achse die Neutronenzahl N und auf der Hoch-Achse die Kernladungszahl Z aufgetragen sind. He4 hat also die Koordinaten: dritte Spalte ($N = 2$) und dritte Zeile ($Z = 2$), denn der He-Kern besteht aus 2 Protonen und 2 Neutronen. Alle Kerne in einer Zeile gehören zum gleichen Element, da sie die gleiche Protonenzahl haben, sind aber wegen der unterschiedlichen Anzahl von Neutronen unterschiedlich schwer. Sie heißen **Isotope**.

Werden alle Kerne in die Karte eingetragen, so fällt auf, dass sie sich nicht entlang der Linie $Z = N$ gruppieren, sondern mit schwerer werdenden Kernen deutlich darunter. Bei schwereren Kernen überwiegt also die Anzahl der Neutronen. Der vergrößerte Ausschnitt zeigt, dass die Nuklidkarte eine Fülle von Informationen enthält.

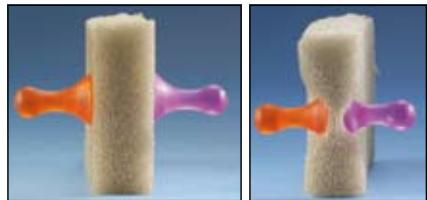


Kernkraft

Kerne bestehen aus positiv geladenen Protonen und ungeladenen Neutronen. Doch eigentlich dürften sie wegen der abstoßenden Kraft zwischen den Protonen nicht zusammenhalten. Es muss also eine Kraft existieren, die folgende Bedingungen erfüllt:

- sehr geringe Reichweite, gerade bis zum nächsten Nukleon;
- deutlich stärker als die abstoßende elektrische Kraft;
- wirkt auch zwischen Neutronen untereinander und zwischen Protonen und Neutronen.

Eine Vorstellung, wie diese **Kernkraft** die sonst dominierende elektrische Kraft übertrifft, liefert der folgende Versuch:



Schaumstoff hineingedrückt, so ziehen sich die Magnete so stark an, dass der Schaumstoff dazwischen völlig plattgedrückt wird. Bei kurzem Abstand übertrifft also die anziehende magnetische Kraft die abstoßende Kraft des Schaumstoffs – genau wie im Atomkern die Kernkraft die Protonen zusammenhält trotz der abstoßenden elektrischen Kraft zwischen ihnen.

Neutronen und Protonen werden durch eine Kraft von sehr kurzer Reichweite zusammengehalten – der Kernkraft.

Aufgaben

- 1** a) Erläutere die Schreibweise ${}^9_4\text{Be}$ und ${}^{12}_6\text{C}$.
b) Stelle in einer Tabelle die Namen der Elemente und die Anzahl der Neutronen und Protonen für folgende Kerne zusammen: H4, He4, O17, Co60, Ni60, Pb206, U235 und U238.
- 2** Die Kerne B10 und B12 sind Isotope des Elements Bor. Erkläre ihren Aufbau.
- 3** Die Masse eines Nukleons (Proton oder Neutron) beträgt ungefähr $1,66 \cdot 10^{-24}$ kg. Berechne die Masse des He4-Kerns
- 4** Begründe, warum der Aufbau eines Atomkerns aus Protonen und Neutronen nur möglich ist, wenn es die Kernkraft gibt
- 5** Wird eine Tür zugezogen, ohne die Klinke herunterzudrücken, muss eine Kraft gegen die Feder des Türschnappers aufgebracht werden. Erst im letzten Moment rastet der Türschnapper ein. Erkläre an Hand dieses Beispiels die Reichweite der Kernkraft.

Quarks und Aufbau der Materie

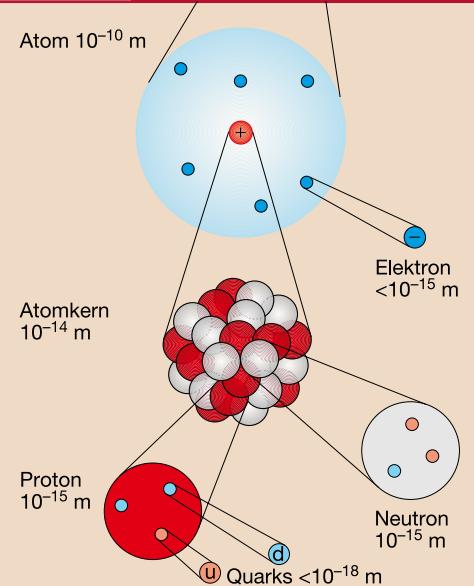
Teilchen, die früher einmal als nicht zusammengesetzt galten, sogenannte **Elementarteilchen**, haben sich im Laufe der Zeit als aus immer kleineren Teilchen zusammengesetzt herausgestellt.

Zuerst wurde der Aufbau der Atome aus Kern und Hülle entdeckt, dann der des Kerns aus Protonen und Neutronen und schließlich der Aufbau der Protonen und Neutronen aus **Quarks**.

Demnach besteht ein Proton aus drei Quarks – zwei up-Quarks und einem down-Quark; das Neutron dagegen ist aus einem up-Quark und zwei down-Quarks zusammengesetzt:
Proton: uud Neutron: udd

Da alle Atome nur aus Protonen und Neutronen im Kern sowie Elektronen in der Hülle bestehen, kann die gesamte Materie auf der Erde nur aus den beiden Quarks u und d und Elektronen aufgebaut werden.

Streifzug



Streifzug

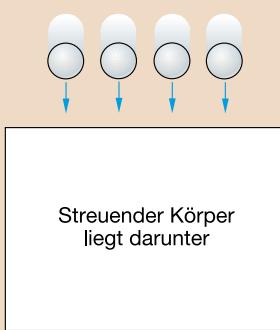
Anhand von Streuexperimenten wird in physikalischen Experimenten untersucht, wie es im Innersten der Materie aussieht. Dabei werden Teilchen, die als Geschosse fungieren, an anderen Teilchen – der zu untersuchenden Probe, dem Target – gestreut. Die Art und Weise, wie die aufprallenden, eindringenden oder durchfliegenden Teilchen ihre Flugbahn verändern, verrät, wie das Target beschaffen ist.

Kein Mensch hat jemals ein Elektron, ein Proton oder ein Photon mit eigenen Augen gesehen. Trotzdem wird in der Physik über die Eigenschaften dieser Objekte geredet und überlegt, wie noch mehr über sie zu erfahren wäre. Wirklich zu sehen sind dabei nur kilometerlange und wohnblockgroße Maschinen, mit denen die Welt des Allerkleinsten untersucht wird: Teilchenbeschleuniger und Teilchendetektoren.



Diese Geräte sind so kompliziert, dass sie von mehreren hundert Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern betreut werden müssen. Darunter befindet sich längst niemand mehr, der über Sinn und Zweck eines jeden Kabels Bescheid weiß.

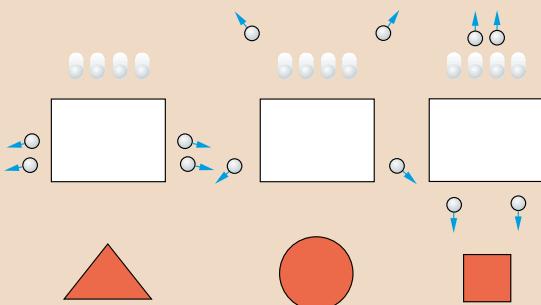
Aber wie können über Streuexperimente Erkenntnisse im Mikrokosmos gewonnen werden? Ein Analogie-Versuch hilft weiter:



Wenn Kugeln auf ein festes, unter einer Abdeckung verborgenes Hindernis treffen, können aus der weiteren Bewegung der Kugeln Rückschlüsse darüber gezogen werden, welche Form das Hindernis hat, das nicht direkt zu sehen ist.

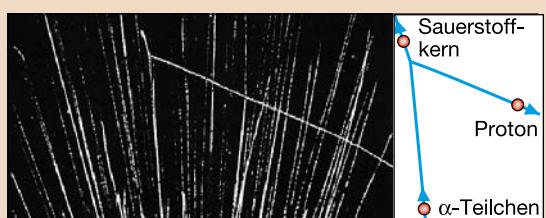
Streuexperimente

Bewegen sich die Kugeln nach dem Zusammenstoß mit dem Hindernis so wie in den Bildern angegeben, lassen sich Vermutungen über die Form der getroffenen Gegenstände anstellen. Bei Beschränkung auf die zweidimensionale Gestalt der Streukörper ist unter den Abdeckungen ein Dreieck, ein Kreis und ein Quadrat bzw. ein Rechteck zu erkennen. Aber ob die Körper gefüllt oder hohl sind, ist nicht auszumachen.



In den wirklichen Beschleunigern werden Targets mit Teilchen sehr hoher Energie beschossen. So können diese Teilchen in die beschossenen Objekte eindringen oder diese sogar durchdringen und eventuell auch Teile davon herausschlagen. Beim Rutherford-Versuch z.B. durchflogen α -Teilchen die Goldfolie zum großen Teil unabgelenkt.

Selbst in einfachen Schulversuchen ist zu erkennen, wie die Bahn eines α -Teilchens sich plötzlich teilt und zwei Teilchen wegfliegen, eines davon nach rechts unten. Was ist geschehen? Das α -Teilchen (Heliumkern) trifft auf einen Stickstoffkern, wobei ein Sauerstoffkern und ein Proton entstehen.



Und woher kommt dieses Wissen? Aus der bekannten Masse des Geschosses und des Targets, aus den beobachteten Winkeln und Bahnlängen können Rückschlüsse auf Masse und Energie der beiden wegfliegenden Teilchen gezogen werden. Durchfliegen die Teilchen zusätzlich ein Magnetfeld, kann auch die Bahnkrümmung Informationen liefern.

Modelle und Simulationen

Ohne Modelle und Simulationen gibt es kein neues Auto. Nahezu alles, was neu auf den Markt kommen soll, muss – bevor es in Originalgröße produziert wird – zuerst im Modell nach- oder besser vorgebildet und in Modellrechnungen, sogenannten **Simulationen**, auf sein Verhalten überprüft werden. Zwei Beispiele:



Bevor der Airbus 380 zum ersten Mal abhob, fanden schon tausende virtuelle Flüge statt, wurde seine Aerodynamik am Modell im Windkanal getestet und die Festigkeit der Tragflächen am Computer simuliert.

Kann die Klimakatastrophe noch abgewendet werden? Wie entwickelt sich unser Klima in den nächsten 30 Jahren? Hier kann nur mit Modellen und Simulationen gearbeitet werden. Um zu prüfen, wie realistisch deren Aussagen sind, müssen die Simulationen mit bekannten Daten aus der Vergangenheit „gefüttert“ werden. Dann wird überprüft, wie gut mit den Modellen die bisherigen Veränderungen des Klimas beschrieben werden. Nur wenn inzwischen eingetretene Szenarien brauchbar wiedergegeben werden, kann Zukünftiges vorausgesagt werden.

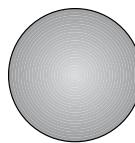
Ein Modell ist ein materielles oder gedankliches Objekt, das anstelle eines Originals genutzt wird. Dabei handelt es sich um eine Vereinfachung des Originals und somit der Wirklichkeit. Das Modell sollte in möglichst vielen Eigenschaften mit dem Original übereinstimmen.

Mit einem Modell lassen sich deshalb eine Reihe von Erscheinungen voraussagen und erklären, andere aber nicht; dafür muss dann ein anderes Modell benutzt werden. Modelle sind nur innerhalb bestimmter Grenzen gültig und sinnvoll nutzbar.

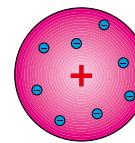
Für die Modelle und Simulationen gibt es im Bereich der Atom- und Kernphysik noch ein weiteres Problem: Sie sind kein vergrößertes Abbild der Wirklichkeit, sondern vergegenständlichte Vorstellungen über den Mikrokosmos. Der Mikrokosmos wird dabei durch Gegenstände veranschaulicht, die aus der makroskopischen Wirklichkeit bekannt sind, die in vielfältiger Weise anders ist als die Welt des Allerkleinsten. „Es kann nicht nachgeprüft werden, wie die Dinge tatsächlich aussehen.“

Durchblick

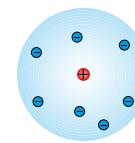
Das Atommodell hat sich von der unteilbaren Kugel über die mit Elektronen gespickte, positiv geladene Massenkugel zum Rutherfordmodell mit Kern und Hülle entwickelt. Mit jedem neuen Modell wuchs die Erkenntnis über den Aufbau der Materie. Trotzdem sind auch alte, nicht so detaillierte Modelle nicht automatisch falsch, sondern genügen zur Erklärung vieler Vorgänge im atomaren Bereich.



DALTON
um 1800



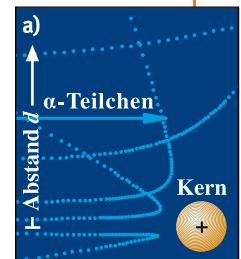
THOMSON
um 1900



RUTHERFORD
um 1910

Alle Modelle müssen ihre Nützlichkeit beweisen, indem sie in Simulationen und Computerexperimenten die Ergebnisse von Realexperimenten richtig vorhersagen oder bestätigen. Weil weder Photonen, Atome, Elektronen, Protonen oder Neutronen direkt beobachtet werden können, sind alle Vorstellungen, die wir uns davon machen, nur Modelle, die – wenn sie durchgerechnet oder anschaulich simuliert werden – die gleichen Ergebnisse liefern wie reale Experimente mit den entsprechenden Teilchen.

Simulationen am Computer haben den Vorteil, dass ohne Materialverschleiß und mit relativ geringen Kosten die verschiedensten Versuchsbedingungen und Konstellationen „durchgespielt“ werden können. So können z.B. beim Rutherfordexperiment anstelle von Goldfolien andere Stoffe verwendet und beobachtet werden, wie sich die α -Teilchen dann verhalten. Es können auch schnellere bzw. langsamere α -Teilchen oder auch andere Geschosse wie z.B. Protonen etc. verwendet werden.



Zur Absicherung und Bestätigung aller Erkenntnisse, die theoretisch oder mit Modellen und Simulationen erlangt wurden, ist natürlich immer noch das Real-experiment absolut zwingend erforderlich. Modelle und Simulationen sind aber inzwischen zu unverzichtbaren Hilfsmitteln in der Physik zur Erklärung der Natur und zur Veranschaulichung der beobachteten Phänomene geworden.

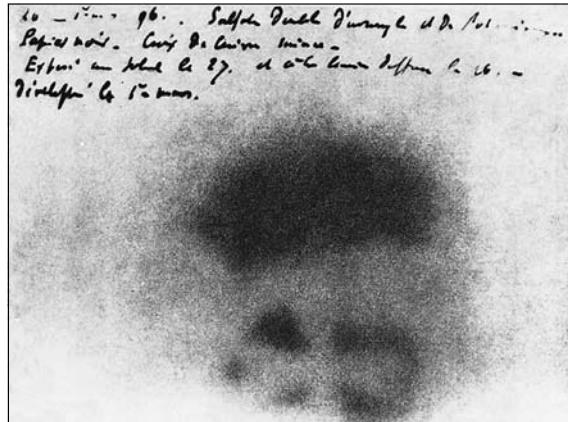
Radioaktivität

Bereits vor gut 100 Jahren machte HENRI BECQUEREL eine erstaunliche Entdeckung: Auf einem lichtdicht verpackten Fotopapier hatte er durch Zufall einige Tage lang ein Stück Uranerz liegenlassen. Nach der Entwicklung des Films zeigte sich eine Schwärzung, die den Steinumrisse entsprach.

Wie war dies ohne Lichteinwirkung möglich?

Warum wurde das Papier nur an den Stellen „belichtet“, an denen sich das Erz befand?

Besteht ein Zusammenhang mit Röntgenstrahlung bzw. mit UV-Licht?



Nachweis von Radioaktivität

Experimente mit Uran führte um 1910 auch die in Polen geborene Physikerin MARIE CURIE durch. Sie konnte die Ergebnisse nur so erklären, dass von dem Uran eine unsichtbare Strahlung ausging, die Fotopapier schwärzte und noch weitere Wirkungen hatte. Die Stoffe, die diese Strahlung aussendeten, nannte sie „radioaktiv“ (Strahlung aussendend).

Im Versuch wird ein Strahlerstift in die Nähe eines negativ bzw. positiv geladenen Elektroskops gebracht. Der Zeigerausschlag geht in beiden Fällen zurück – das Elektroskop wird also entladen. Diese Entladung kann nur durch positiv oder negativ geladene Teilchen geschehen, die vorher nicht in der Luft vorhanden waren. Also muss die vom Präparat ausgehende Strahlung die Atome der Luft ionisiert haben, wodurch die Luft elektrisch leitend wurde.

Von bestimmten Stoffen geht eine unsichtbare Strahlung aus, die Fotopapier schwärzt und Luft ionisiert.

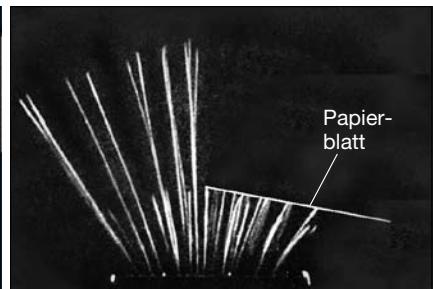
Die Nebelkammer

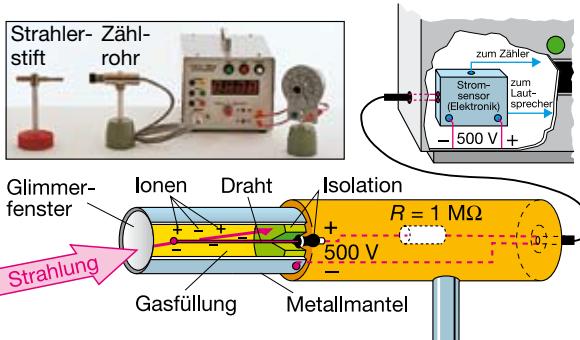
In einer solchen Kammer befindet sich Luft, die mit Wasser- und Alkoholdampf gesättigt ist. Mit der Kammer ist ein Gummiball verbunden, der zusammengedrückt werden kann. Wird dieser Gummiball nun plötzlich losgelassen, so dehnt sich die Luft in der Kammer schlagartig aus. Dadurch sinkt die Temperatur unter die Kondensationstemperatur des Alkohol-Luft-Gemisches ab. Die Strahlung aus dem Strahlerstift, der in der Kammer angebracht ist, erzeugt Ionen, die als Kondensationskeime wirken. Durch sie bilden sich kleinste Wassertropfchen, die von der Seite kommendes Licht streuen. Auf diese Weise kann der Weg der Strahlung sichtbar gemacht werden.



Im Foto sind Nebelstreifen von 2 bzw. 4 cm Länge zu erkennen, die Spuren der ionisierenden Strahlung. Ein Stückchen Papier als Hindernis beendet die Spuren sofort. Was folgt daraus?

- Die durch die Nebelpuren registrierte Strahlung hat eine sehr begrenzte Reichweite in Luft und kann schon durch ein Blatt Papier völlig abgeschirmt werden.
- Die unterschiedlichen Bahllängen weisen darauf hin, dass es Strahlung unterschiedlicher Energie geben muss.
- Das Bild der Nebelpuren entsteht sofort mit dem Loslassen des Gummiballs. Dies deutet darauf hin, dass vom Strahlerstift so viel Strahlung ausgesendet wird, dass immer welche vorhanden ist. Außerdem muss sie eine sehr hohe Geschwindigkeit haben.





Das Zählrohr

Das Zählrohr besteht aus einem Metallzylinder, in dessen Inneren ein Draht isoliert eingespannt ist. Auf der einen Seite ist das Metallrohr von einem dünnen Glimmerfenster und auf der anderen Seite durch eine Isolierschicht luftdicht verschlossen. Gefüllt ist das Rohr mit einem Edelgas unter geringem Druck. Zwischen Draht und Metall liegt eine Spannung von einigen 100 V.

Gelangt Strahlung durch das Glimmerfenster in das Rohr, ionisiert sie Atome der Gasfüllung. Die entstehenden Elektronen werden zum positiven Draht hin beschleunigt, die positiven Ionen zur negativen Metallwand hin. Durch die hohe Spannung werden sie so schnell, dass sie durch Stöße weitere Gasatome ionisieren können und diese wiederum andere – es kommt zur **Stoßionisation**.

Die Zahl der Elektronen wächst dadurch lawinenartig an, es fließt ein messbarer Strom I über den Widerstand R und verursacht dadurch einen Spannungsabfall $U_R = R \cdot I$. Durch ihn wird die Spannung zwischen Draht und Wand reduziert und zwar so stark, dass im Zählrohr keine Stoßionisation mehr möglich ist und das Gas wieder zum Isolator wird. Die Zeit, in der keine weiteren Ereignisse gemessen werden können, heißt **Totzeit**. Sie liegt bei den meisten Zählrohren unter einer Millisekunde. Nach der Totzeit kann das Zählrohr erneut auf ionisierende Strahlung reagieren.

Die kurzen Stromstöße, die durch den Widerstand fließen, werden verstärkt und können in einem Lautsprecher ein Knacken verursachen oder von einer entsprechenden Elektronik gezählt werden.

Aufgaben

1 Früher gab es Uhren, von denen wurde behauptet, ihre Leuchtziffern wären radioaktiv. Beschreibe zwei Möglichkeiten, wie diese Behauptung überprüft werden kann.

2 **a)** Erläutere, wie ein Zählimpuls bei einem Zählrohr zustande kommt.
b) Was erwartest du, wenn du eine Messung mehrfach durchführst? Begründe.

3 Dieses Fotopapier hat einige Tage lichtdicht verpackt auf der Fliese gelegen. Erkläre das Zustandekommen der Schwärzung des Fotopapiers.

Zählrate und Nulleffekt

Die Zählrate

Die Einheit ist $1 \frac{\text{Imp}}{\text{s}}$.

Das Formelzeichen ist Z .

Die Überprüfung verschiedener radioaktiver Stoffe mit dem Zählrohr führt zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Beim Strahlerstift werden in vergleichbaren Zeiten die meisten Impulse gemessen; er verursacht also die höchste Zählrate. Wird eine Messung wiederholt, so kann das Ergebnis deutlich abweichen (Fliese!)

Strahler	Strahlerstift	Uranerz	Leuchtziffern	Fliese	Fliese
Zeit	30 s	45 s	100 s	60 s	60 s
Impulse	31800	78	62	371	355
Z	$1060 \frac{\text{Imp}}{\text{s}}$	$1,7 \frac{\text{Imp}}{\text{s}}$	$0,6 \frac{\text{Imp}}{\text{s}}$	$6,2 \frac{\text{Imp}}{\text{s}}$	$5,9 \frac{\text{Imp}}{\text{s}}$

Radioaktivität ist ein Vorgang, der unregelmäßig und zufällig auftritt und dadurch zu unterschiedlichen Zählraten führen kann. Dieser Effekt wird bei sehr kurzen Messzeiten besonders deutlich.

Zeit	60 s	600 s	6000 s	60000 s
Impulse	18	212	195	2067
Z	$0,3 \frac{\text{Imp}}{\text{s}}$	$0,35 \frac{\text{Imp}}{\text{s}}$	$0,33 \frac{\text{Imp}}{\text{s}}$	$0,34 \frac{\text{Imp}}{\text{s}}$

Auch wenn sich kein radioaktives Material in der Nähe des Zählrohres befindet, registriert das Zählrohr Impulse. In diesem Fall wird die natürliche Radioaktivität aus der Umwelt gemessen. Dieser **Nulleffekt** ist ständig vorhanden und tritt sehr unregelmäßig auf. Erst bei Messungen über einen längeren Zeitraum gleichen sich diese zufälligen Schwankungen aus. Die auf den Nulleffekt zurückzuführende Zählrate wird **Nullrate** genannt und ist bei allen Messungen zu berücksichtigen.

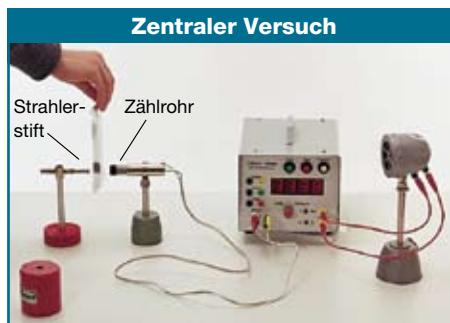
Die Zählrate Z ist die pro Zeiteinheit mit einem Zählrohr gemessene Impulszahl. Sie ist ein Maß für die am Ort des Zählrohres vorliegende Intensität radioaktiver Strahlung.



Durchdringungsvermögen radioaktiver Strahlung

Versuche zum Durchdringungsvermögen radioaktiver Strahlung zeigen, dass es verschiedene Strahlungsarten gibt. Dazu werden Platten aus dickem Papier, Aluminium und Blei zwischen den Ra226-Strahlerstift und das Zählrohr gehalten und jeweils die Zahl der Impulse 10 s lang gemessen. Der Abstand zwischen Zählrohr und Strahlerstift beträgt dabei höchstens 2–3 cm und darf sich bei allen Messungen nicht ändern.

Die Ergebnisse sind in den Diagrammen dargestellt. Ohne jedes Plättchen registriert das Zählrohr ca. 19 000 Impulse in 10 s. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung beider Diagramme.

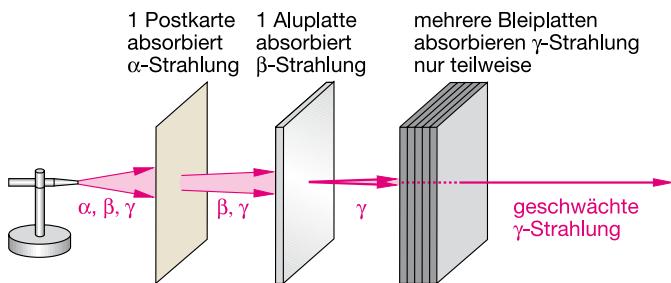
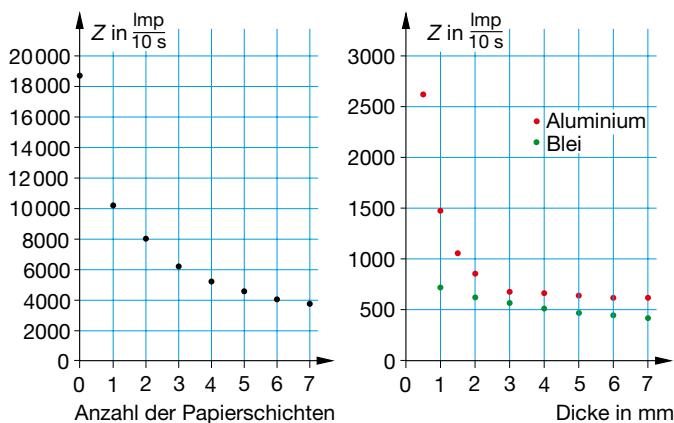


- Die Strahlung von Ra226 wird bereits durch eine einzige Lage Papier deutlich absorbiert. Die durch ein Blatt Papier hindurchgehende Strahlung wird aber durch weitere Papierlagen viel weniger abgeschwächt.
- Aluminiumplatten schwächen die Strahlung wesentlich stärker, aber ab 4 mm Dicke bewirkt eine Vergrößerung der Aluminiumschichtdicke praktisch keine weitere Schwächung der Strahlung.

- Bereits durch 1 mm dickes Blei wird eine vergleichbare Absorption der Strahlung bewirkt. Eine dicke Bleischicht lässt die Zählrate weiter sinken. Es werden aber sehr dicke Bleischichten benötigt, um die Strahlung nahezu völlig zu absorbieren, denn eine Zählrate von ca. 400 Impulsen in 10 s liegt noch erheblich über dem Nulleffekt.

Aus den Versuchsergebnissen lässt sich schließen, dass das Radiumpräparat drei verschiedene Strahlungsarten emittiert. Eine erste Strahlungsart – **α -Strahlung** – wird bereits durch ein Blatt Papier absorbiert. **β -Strahlung** wird durch eine wenige Millimeter dicke Aluminiumschicht absorbiert. Darüber hinaus gibt es eine dritte Strahlungsart – **γ -Strahlung** – die erst durch dicke Bleischichten deutlich geschwächt wird.

Radioaktive Stoffe senden α -, β - oder γ -Strahlung aus. Das Durchdringungsvermögen von α -Strahlung ist im Gegensatz zu β - und γ -Strahlung sehr gering.



	α -Strahlung	β -Strahlung	γ -Strahlung
besteht aus	He-Kernen	schnellen Elektronen	Energiepaketen
Reichweite in Luft	einige cm	einige dm	„unendlich“
Abschirmung	Papier	Aluplatte	dicker Bleimantel

Aufgaben

- 1 Ein radioaktives Präparat wird mit einer 4 mm dicken Aluplatte abgeschirmt und die Zählrate gemessen. Anschließend werden Bleiplatten von 4 mm Dicke dazugenommen und die Zählraten jeweils erneut gemessen.

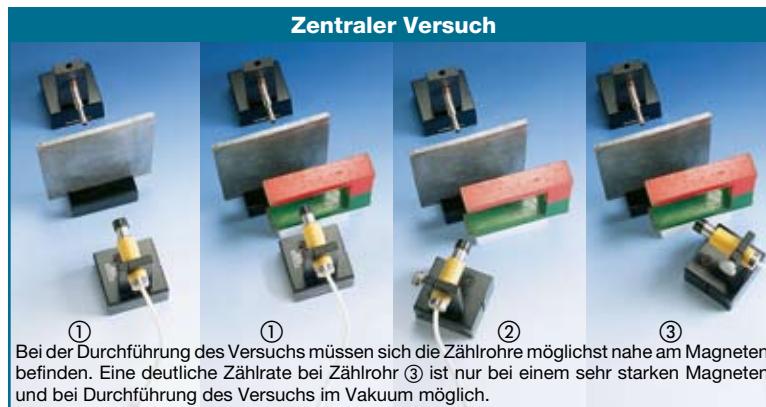
- a) Erläutere den Versuchsablauf und begründe insbesondere die Verwendung der Aluplatte.
b) Zeichne das Diagramm. Erläutere: Die „Halbwertsdicke“ von Blei beträgt 12 mm.

D	0 mm	4 mm	8 mm	12 mm	16 mm
Z	446 Imp 5 min	313 Imp 5 min	276 Imp 5 min	226 Imp 5 min	167 Imp 5 min

- 2 Erläutere, warum im Versuch der Abstand zwischen Strahlerstift und Zählrohr gleich bleiben muss.

Ablenkarkeit radioaktiver Strahlung

Wird zwischen Strahlerstift und Zählrohr eine dicke Bleiplatte gehalten, so werden keine Impulse mehr registriert. Die von dem Strahlerstift ausgesandte Strahlung wird von Blei fast vollständig abgeschirmt. Hat die Blende ein Loch, so wirkt sie wie eine Blende in der Optik. Wird das Zählrohr hinter dem Loch hin und her geschoben, ist zu erkennen, dass die Strahlung das Loch als relativ schmales, eng begrenztes Bündel geradlinig verlässt.



Läuft das Strahlungsbündel eines Ra226-Strahlerstifts durch das Feld eines möglichst starken Hufeisenmagneten in der fotografierten Weise, so zeigen sich die folgenden Ergebnisse:

- Die Zählraten des Zählrohres in Position ① sind mit Hufeisenmagnet deutlich kleiner als ohne.
- Das Zählrohr in Stellung ② registriert ebenfalls Strahlung, abseits der geradlinigen Ausbreitungsrichtung!
- Befindet sich die Anordnung im Vakuum und ist der Magnet extrem stark (Elektromagnet), registriert auch das Zählrohr in Stellung ③ Strahlung.

Auch dies lässt den Schluss zu, dass aus dem Ra226-Strahlerstift drei Arten von Strahlung austreten.

- Die Strahlung, die bei Vorhandensein des Magnets in Stellung ① registriert wird, wird durch das Magnetfeld nicht beeinflusst. Es handelt sich entweder um ungeladene Teilchen oder um eine materielle Strahlung wie Licht. Genaue Untersuchungen haben Letzteres bestätigt. Diese Strahlung ist die **γ-Strahlung**.
- Die vom Zählrohr in Stellung ② registrierte Strahlung wird wie negativ geladene Teilchen abgelenkt. Die Bestimmung ihrer Masse und Ladung ergab, dass die Strahlung aus Elektronen besteht. Es handelt sich um **β-Strahlung**.
- Die vom Zählrohr in Stellung ③ registrierte Strahlung wird wie positiv geladene Teilchen abgelenkt. Ihre Masse und Ladung entspricht der von Heliumkernen. Da die Strahlung **α-Strahlung** heißt, werden die He-Kerne oft auch α-Teilchen genannt.

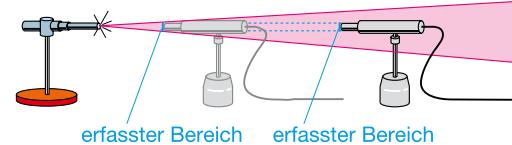
α-Strahlung besteht aus Helium-Kernen, β-Strahlung aus sehr schnellen Elektronen, γ-Strahlung ist sehr energiereiche, materielle Strahlung. α- und β-Teilchen lassen sich im Magnetfeld ablenken, γ-Strahlung nicht.

Reichweite radioaktiver Strahlung

In der Nebelkammer sind Nebelstreifen von etwa 2 bzw. 4 cm Länge zu erkennen, die durch ein Blatt Papier sofort unterbrochen werden. Die die Nebelpuren erzeugende Strahlung muss nach den vorherigen Erkenntnissen α-Strahlung sein. α-Strahlung hat in Luft also nur eine Reichweite von wenigen Zentimetern.

Ein Krypton-85-Strahlerstift sendet nur β-Strahlung aus, ein geeignet abgedeckter Radium-Strahlerstift nur γ-Strahlung. Die Strahlung verlässt den Strahlerstift in einem kegelförmigen Bereich. Ein Zählrohr misst deshalb mit größer werdendem Abstand eine immer kleinere Zählrate. Trotzdem gibt es Unterschiede: β-Strahlung besitzt nur eine Reichweite von wenigen Dezimmetern, die γ-Strahlung nimmt weniger schnell ab und ist auch in 1 m Abstand noch gut nachweisbar.

Die Reichweite von α- und β-Strahlung beträgt in Luft nur wenige Zentimeter bzw. Dezimeter. Die Reichweite von γ-Strahlung ist in Luft praktisch unbegrenzt.



Abstand	$Z_{\beta}^{(1)}$	$Z_{\gamma}^{(1)}$
0 cm	9892 Imp/min	8538 Imp/min
5 cm	218 Imp/min	1322 Imp/min
10 cm	82 Imp/min	439 Imp/min
20 cm	11 Imp/min	137 Imp/min
50 cm	— ²⁾	22 Imp/min
100 cm	— ²⁾	5 Imp/min

1) Nullrate schon abgezogen;
2) kein Unterschied zur Nullrate

Streifzug

Aus α wird Helium

Wie lässt sich nachprüfen, ob von einem α -Strahler tatsächlich Helium-Kerne ausgesendet werden? Dies ist insofern schwierig, als die Menge des entstehenden Heliums sehr gering ist. Im Jahre 1908 gelang die Nachprüfung ERNEST RUTHERFORD (1871–1937) und seinen Mitarbeitern.

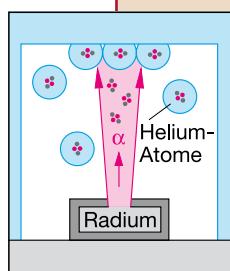
In einem nahezu luftleer gepumpten Glaskolben befand sich ein Radiumpräparat, welches α -Strahlung aussandte. Wegen ihrer geringen Durchdringungsfähigkeit konnten die He-Kerne den Glaskolben nicht verlassen, sondern sammelten sich in ihm. Zusammen mit Elektronen aus der Restluft entstanden neutrale Heliumatome. Die Spuren des Edelgases konnten von RUTHERFORD und seinen Mitarbeitern nachgewiesen werden.

Damit war experimentell gezeigt, dass α -Strahlung aus He-Kernen besteht.

Wie viele Heliumatome entstehen in einem Zählrohr in einem Jahr?

Würde ein Zählrohr ein Jahr lang 40 Wochen täglich 5 Stunden genutzt, so wären das $1000 \frac{\text{h}}{\text{a}}$. Bei einer Zählrate von $1000 \frac{\text{Imp}}{\text{s}}$ entstehen bestensfalls 1000 He-Atome je Sekunde. In einem Jahr ergibt das: $1000 \cdot 1000 \cdot 3600 \approx 3,6 \cdot 10^9$ Atome.

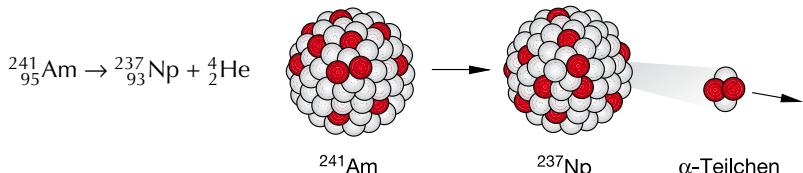
Zum Vergleich: 1 cm^3 reines Helium enthält ca. 10^{20} Atome.



α -Zerfall

α -Teilchen sind Heliumkerne, die aus 2 Protonen und 2 Neutronen bestehen. Durch das Aussenden eines He-Kerns ist die Massenzahl A des Restkerns um 4 und die Kernladungszahl Z um 2 geringer als die des Ausgangskerns. Damit gehört der Restkern zu einem anderen chemischen Element. Der Zerfall lässt sich in Form einer Reaktionsgleichung darstellen. Da keine Nukleonen verloren gehen können, muss bei einer solchen Gleichung die Bilanz immer stimmen: Die Summe aller Massen- bzw. Kernladungszahlen auf der linken Seite der Reaktionsgleichung muss gleich der Summe aller Massen- bzw. Kernladungszahlen auf der rechten Seite sein.

Beispiel: Durch das Aussenden von α -Strahlung wird aus dem Element Americium das Element Neptunium:



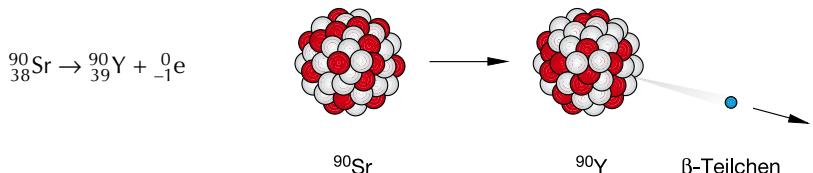
β -Zerfall

β -Teilchen sind Elektronen, die mit großer Geschwindigkeit aus dem Kern geschleudert werden. Wie ist dies möglich, wo doch ein Atomkern nur aus Protonen und Neutronen besteht?

Ein Neutron kann sich unter bestimmten Umständen in ein Proton und ein Elektron umwandeln. Das Elektron kann im Kern nicht bleiben, sondern wird aus ihm herausgeschleudert. Zurück bleibt ein Kern mit gleicher Massenzahl, aber einer um 1 größeren Kernladungszahl, da sich die Anzahl der Protonen um 1 erhöht hat.

Beispiel β -Zerfall von Strontium: Es muss ein Element entstehen, das ein Proton mehr, aber ein Neutron weniger besitzt, also mit $Z = 39$; es ist das Element Yttrium.

Damit die Reaktionsgleichung weiterhin gilt, wird dem Elektron die Massenzahl 0 und die Kernladungszahl -1 zugeordnet (negative Ladung).



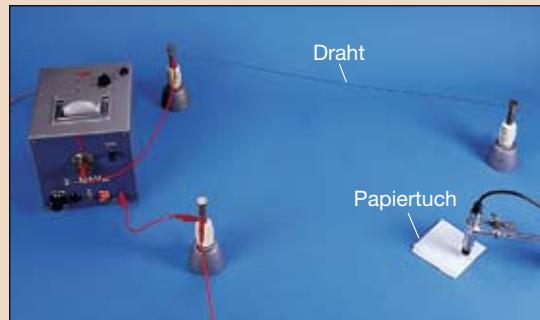
Aufgaben

- 1 Das Thoriumisotop $^{227}_{90}\text{Th}$ ist ein α -Strahler.
 - a) Gib die Reaktionsgleichung für die Abgabe eines α -Teilchens an.
 - b) Nenne die Kerne, die bei diesem Zerfall entstehen.
- 2 Kohlenstoff kann sich durch β -Zerfall in Stickstoff umwandeln.
 - a) Stelle die Gleichung für den Zerfall von $^{14}_{6}\text{C}$ auf.
 - b) Erläutere im Unterschied dazu den Zerfall von $^{16}_{6}\text{C}$. Stelle beide Reaktionsgleichungen auf.
- 3 Ra226 zerfällt unter Aussendung von Strahlung in Rn222. Stelle die Zerfallsgleichung auf.
- 4 Beschreibe, wie die Ablenkbartigkeit von β -Strahlung im Magnetfeld experimentell überprüft werden kann. Begründe weshalb dabei eine dicke Bleiplatte benutzt werden muss.

Umgebungsstrahlung

Streifzug

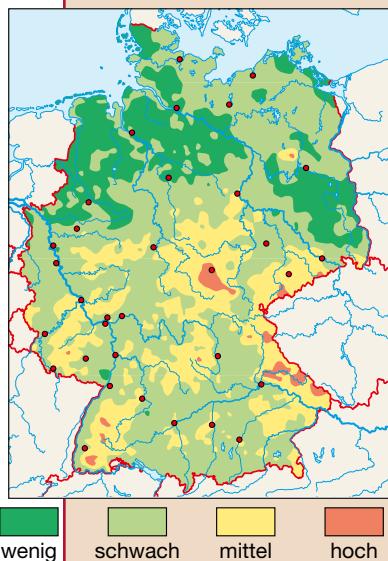
An einen isoliert aufgespannten Draht wird eine Stunde lang eine Spannung von einigen kV gelegt. Danach wird der Staub mit einem sauberen Papiertuch vom Draht abgestreift. Die Messung der Zählrate des Tuchs zeigt einen gegenüber der Nullrate leicht erhöhten Wert. Der Staub in der Luft ist teilweise radioaktiv. Das liegt daran, dass Baumaterial (Ziegel, Beton, natürliches Gestein) radioactive Stoffe enthält, die das radioactive Edelgas Radon freisetzen.



Systematische Untersuchungen haben gezeigt, dass es drei Quellen für die Strahlung in unserer Umgebung gibt:

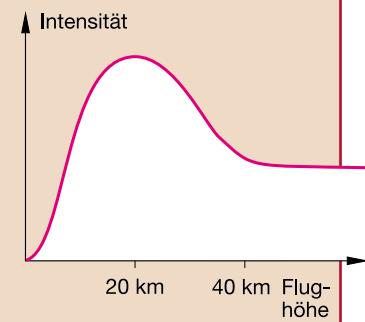
- Viele in der Natur vorkommende Stoffe sind von Natur aus radioaktiv. Die daraus resultierende Strahlung wird unter dem Namen **terrestrische Strahlung** zusammengefasst.

- Messungen in großer Höhe haben eine erhöhte Radioaktivität ergeben. Dies lässt den Schluss zu, dass Strahlung auch aus dem Weltraum kommt. Sie heißt **kosmische Strahlung**.
- Ein weiterer Anteil, die **künstliche Strahlung**, entstammt technischen Anlagen oder medizinischen Geräten.



Alle diese Anteile zusammen ergeben die **Umgebungsstrahlung**. Sie gab es – mit Ausnahme der künstlichen Strahlungsquellen – schon immer. Sie scheint keine schädlichen Auswirkungen auf Menschen, Tiere und Pflanzen zu haben. Gefährlich wird es, wenn die vom Menschen verursachte künstliche Radioaktivität zu hoch wird.

Die Belastung durch die kosmische Strahlung nimmt mit der Höhe zu. Langstreckenflüge finden heute in 10–12 km Höhe statt. Messungen haben ergeben, dass das Flugpersonal bei 500 Flugstunden einer doppelt so hohen Belastung ausgesetzt ist wie die mittlere natürliche Belastung in Meereshöhe. Im Laufe eines Berufslebens summiert sich diese Belastung zu einem um 0,4 % erhöhten Risiko, an Krebs zu erkranken. Ein einzelner Langstreckenflug ist unerheblich.



- 5** Für einen α -Strahler wird eine Zählrate von $89 \frac{\text{Imp}}{\text{s}}$ gemessen.
- Berechne die Maximalzahl der Heliumatome, die dadurch in einer Stunde entstehen können.
 - Gib die Zahl der Atome in 1 cm^3 Helium an und berechne die Zeit, die der α -Strahler braucht, um genügend Kerne für 1 cm^3 Helium zur Verfügung zu stellen.

- 6**
 - Erkläre, wie radioaktive Präparate aufbewahrt werden müssen, um weitestgehenden Schutz vor ihrer Strahlung zu erzielen.
 - Vergleiche α -, β - und γ -Strahlung und nenne konkrete Maßnahmen (Material, Dicke des Aufbewahrungsbehälters usw.).

7 Ein γ -Strahler befindet sich genau in der Mitte eines wassergefüllten Swimmingpools

- ($8 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$). Berechne die Zählrate, die an der Wasseroberfläche
- in der Mitte
 - an den Rändern des Pools gemessen wird, wenn die ohne Wasser direkt am Strahler gemessene Zählrate $12\,800 \frac{\text{Imp}}{\text{s}}$ beträgt. (Hinweis: Die Halbwertsdicke für γ -Strahlung beträgt bei Wasser 12 cm.)

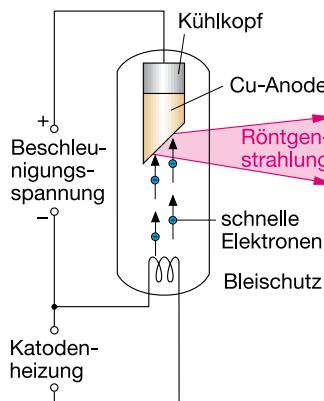


Teilchenfreie Strahlung

Röntgenstrahlung

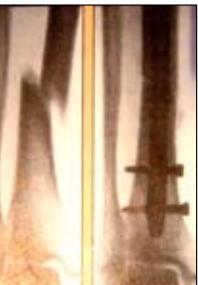
Röntgenstrahlung wurde 1895 von WILHELM CONRAD RÖNTGEN (1845–1923) entdeckt, also etwa ein Jahrzehnt vor der Radioaktivität. Eine Röntgenröhre besteht aus einem luftleer gepumpten Glaskolben mit einer geheizten Katode und einer Anode. Die aus der Katode austretenden Elektronen werden mit einer sehr hohen Spannung (mindestens 10 kV) beschleunigt und treffen daher mit sehr hoher Geschwindigkeit auf die Anode, welche aus massivem Metall (Kupfer, Molybdän oder Wolfram) besteht. Die Bewegungsenergie der Elektronen wird beim Aufprall auf die Anode zu ca. 1 % in Röntgenstrahlung umgewandelt. Der Rest führt zur starken Erwärmung der Anode, die daher gekühlt werden muss.

Röntgenstrahlung kann vom Menschen nicht wahrgenommen werden; erst wenn sie auf einen mit geeignetem Material beschichteten Schirm trifft, leuchtet dieser hellgrün auf. Werden Platten gleicher Dicke aus verschiedenem Material in das Röntgenbündel gestellt, so zeigt sich, dass Hartpapier die Röntgenstrahlung kaum schwächt, während Metalle nur schwer durchdringen werden. Insbesondere lässt Blei fast keine Röntgenstrahlung mehr durch. Erstaunlich ist die starke Schwächung der Röntgenstrahlung durch Glas, welches beinahe so viel Strahlung absorbiert wie eine gleich dicke Aluminiumschicht.



Röntgenstrahlung ist Strahlung, die von stark beschleunigten Elektronen beim Auftreffen auf eine Anode erzeugt wird. Mit Abschalten der Beschleunigungsspannung ist auch die Röntgenstrahlung verschwunden.
Röntgenstrahlung ist wie γ -Strahlung eine teilchenfreie Strahlung und besitzt ionisierende Wirkung.

Anwendungen der Röntgenstrahlung in Medizin und Technik



Röntgenstrahlung wird in der Medizin zur *Diagnose* und *Therapie* eingesetzt. Die Röntgenuntersuchung bietet den Vorteil, einen erkrankten oder verletzten Körperteil „betrachten“ zu können ohne zu operieren. Die künstlich erzeugte Röntgenstrahlung wird von den verschiedenen Stoffen des Körpers (Knochen, Gewebe, Organe) unterschiedlich stark absorbiert. Ein Film oder eine Kamera mit Monitor liefert dadurch unterschiedliche Schwärzungen des Bildes. Die Fotos links zeigen einen Schienbeinbruch und seine Behebung durch einen Stahlnagel und Schrauben.

Auch in der Technik kann die Röntgenstrahlung eingesetzt werden etwa zur Überprüfung der Schweißnähte einer Pipeline. Diese dürfen keine versteckten Fehler enthalten z. B. Luftblasen oder feine Risse. Dieses Verfahren wird *zerstörungsfreie Werkstoffprüfung* genannt.

Auch zur Untersuchung des atomaren Aufbaus von Materie kann Röntgenstrahlung eingesetzt werden. Das nebenstehende Foto zeigt Reflexionen an Atomschichten von NaCl (Kochsalz), die Rückschlüsse auf die Kristallstruktur zulassen.



Photonen und ihre Energie

Streifzug

Wird der tropfende Wasserhahn weiter aufgedreht, entsteht erst ein dünner – dann ein kräftiger Wasserstrahl. Einzelne Wassertropfen vereinigen sich zu einem Rinnsal, dieses wird zu einem Wasserstrom. Dieser Wasserstrom besteht also aus einzelnen Wassertropfen. Auch ein elektrischer Strom besteht aus einzelnen Teilchen, den Elektronen. Sie bewegen sich im Stromkreis gemeinsam in eine Richtung vom Minus- zum Pluspol und bilden damit den Elektronenstrom.



In beiden Fällen wird durch das Strömen Energie transportiert. Durch das Wasser kann ein Wasserrad angetrieben werden oder eine Turbine, mittels des elektrischen Stroms kann eine Lampe leuchten.

Durch Sonnenlicht wird die Erde erwärmt, es strömt also Energie von der Lichtquelle zum bestrahlten Objekt. Wird die Vorstellung des Energietransportes beim Stromkreis auf das Licht übertragen, so können auch hier kleinste Energiepakete angenommen werden. Sie heißen **Photonen**. Auch die anderen Strahlungsarten (γ -, Röntgen-, UV- und Wärmestrahlung) sind in Form von Energiepaketen, den Photonen **gequantelt**.

Die Ausbreitung der Photonen ist – sofern sie nicht auf Hindernisse treffen – nur geradlinig möglich. Dabei bewegen sie sich mit Lichtgeschwindigkeit.

Fazit: Energie kommt immer in kleinsten (gequantelten) Portionen vor.

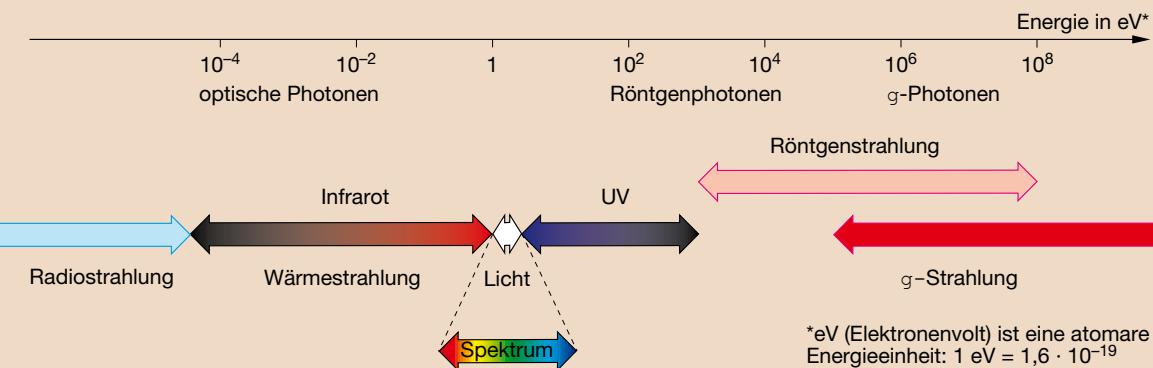
Viele Strahlungsarten

Das Licht der Sonne kann durch ein Glasprisma spektral zerlegt werden; an den sichtbaren Spektralbereich schließen sich links und rechts IR- und UV-Licht an. In wissenschaftlichen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass von der Sonne auch Röntgen- und γ -Strahlung sowie Radiostrahlung ausgesendet wird. Gäbe es ein „Universalprisma“ für alle diese Strahlungsarten, so entstünde ein Spektrum wie in der Abbildung unten. Das Ordnungsprinzip ist die Größe der Energieportion der jeweiligen Strahlung, also die Energie einzelner Photonen, die von energieschwacher Radiostrahlung über Licht bis zur extrem energiereichen γ -Strahlung ansteigt.

Ab einer gewissen Photonenergie ist die Strahlung in der Lage, Atome und Moleküle des Körpers zu ionisieren; darin liegt die Gefährlichkeit dieser energiereichen Strahlung.

Ein deutlicher Unterschied zeigt sich in der Wirkung, die Strahlung auf Menschen, Tiere und Pflanzen hat. Insbesondere kann der Mensch intensive Wärmestrahlung sehr schmerhaft erfahren (Verbrennungen); zu starker Lichteinfall kann zu Augenschäden führen; UV-Licht kann Sonnenbrand hervorrufen. Bei nicht zu intensiver Einwirkung sind viele dieser Schäden heilbar, während der Einfluss von Röntgen- und γ -Strahlung, welche vom Menschen möglicherweise im Moment gar nicht wahrgenommen wird, zu erheblichen Beeinträchtigungen führen kann.

Fazit: Die Energie der Photonen von UV-, Röntgen- und γ -Strahlung ist erheblich größer als die von sichtbarem Licht und für die Schädigung von Zellen verantwortlich.



Zerfallskurve und Halbwertszeit

Manche Atomkerne zerfallen ohne äußere Einwirkung unter Aussendung von Kernstrahlung. Dabei ist der Zerfall eines einzelnen Atomkernes ein vollkommen zufälliges Ereignis. Es ist nicht möglich vorherzusagen, welcher Kern als nächstes zerfällt und wann er das tun wird. Existieren trotzdem Gesetzmäßigkeiten beim radioaktiven Zerfall vieler Atomkerne?

Im Versuch wird der radioaktive Zerfall der Kerne einer Flüssigkeit über einen längeren Zeitraum untersucht. Der dunkle Zylinder auf dem Reagenzglas enthält radioaktives Cäsium (Cs137), das durch Aussendung von β -Strahlung in Barium (Ba137) zerfällt. Die Bariumkerne sind nach dem Zerfall noch angeregt und geben ihre überschüssige Energie in Form von γ -Strahlung ab.

Im Versuch werden diese Bariumkerne durch eine geeignete Flüssigkeit aus dem Gefäß herausgelöst (kleines Bild im ZV). Die im Reagenzglas aufgefangene radioaktive Flüssigkeit wird mithilfe eines Geiger-Müller-Zählrohres untersucht.

Die Messwerte in der Tabelle zeigen, dass die Zählrate Z mit der Zeit abnimmt. Das liegt daran, dass die Anzahl der radioaktiven Kerne im Reagenzglas mit der Zeit immer kleiner wird. Aus dem zugehörigen t - Z -Diagramm lässt sich ablesen, dass die Zähl-



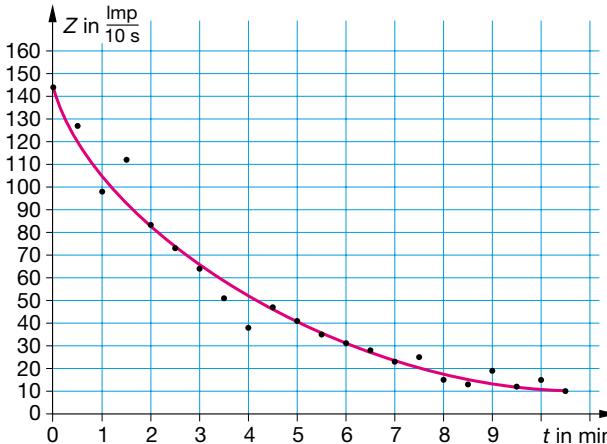
rate – trotz der teilweise erheblichen Schwankungen – in bestimmten Zeitspannen immer auf etwa die Hälfte ihres vorherigen Wertes zurückgeht. Insofern liegt die Vermutung nahe, dass es sich beim radioaktiven Zerfall um eine exponentielle Abnahme der radioaktiven Kerne handelt. Die eingezzeichnete exponentielle Regressionskurve (rot) bestätigt dies. Die Abnahme von $120 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$ auf $60 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$ dauert genauso lange wie die von $60 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$ auf $30 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$. Im Versuch beträgt die Zeit etwa 2,7 min.

Die Zeit, in der sich die Zählrate und damit die Anzahl der radioaktiven Kerne halbiert, wird als **Halbwertszeit** bezeichnet. Sie hat das Formelzeichen $t_{1/2}$ (oder auch t_H). Die Halbwertszeit für radioaktive Isotope ist verschieden. Sie reicht von Mikrosekunden bis zu Milliarden von Jahren.

Isotop	$t_{1/2}$	Isotop	$t_{1/2}$
Uran238	4,4 Mrd a	Polonium210	138 d
Radium226	1600 a	Iod128	25 min
Cäsium137	30 a	Radon220	55,6 s

Die Halbwertszeit eines radioaktiven Isotops gibt an, nach welcher Zeitspanne nur noch die Hälfte seiner Kerne vorhanden ist. Die Halbwertszeiten für radioaktive Isotope sind verschieden.

Zeit	Impuls
0 min	$144 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$
0,5 min	$127 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$
1 min	$98 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$
1,5 min	$112 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$
2 min	$83 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$
2,5 min	$73 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$
3 min	$64 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$
3,5 min	$51 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$
4 min	$38 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$
4,5 min	$47 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$
5 min	$41 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$
5,5 min	$35 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$
6 min	$31 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$
6,5 min	$28 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$
7 min	$23 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$
7,5 min	$25 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$
8 min	$15 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$
8,5 min	$13 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$
9 min	$19 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$
9,5 min	$12 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$
10 min	$15 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$
10,5 min	$10 \frac{\text{Imp}}{10 \text{s}}$



Aufgaben

- 1 a) Cäsium137 ist ein β -Strahler. Erläutere, wie das in einem Versuch gezeigt werden könnte.
- b) Begründe, weshalb es wenig sinnvoll ist, zur Bestimmung der Halbwertszeit von Cs137 einen Tag lang zu Beginn jeder Stunde für fünf Minuten die Impulszahlen zu bestimmen.
- c) Bestimme, wie viele von 1 Million Cs137-Kernen nach 150 Jahren noch (etwa) vorhanden sind.

Ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Zeit t und der Anzahl N der radioaktiven Teilchen kann mit unseren Mathematikkenntnissen noch nicht gefunden werden. Es lässt sich aber zeigen, dass die Zerfallskurve im Vergleich zu den uns bekannten Funktionen wesentlich schneller abklingt. Eine indirekte Proportionalität zwischen der Teilchenzahl und t^2 oder höheren Potenzen von t kann somit ausgeschlossen werden.

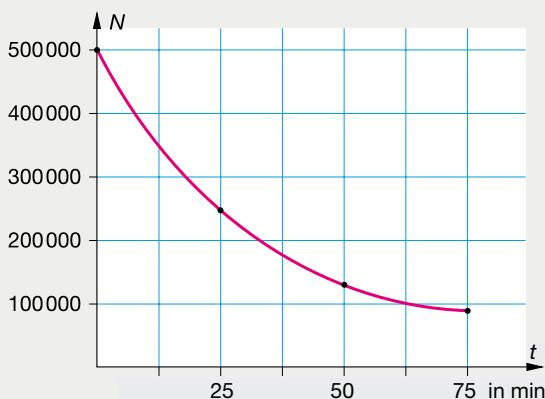
Aufgaben

- 1** Bestimme die Zeit, nach der die Strahlung von Strontium 90 auf $\frac{1}{16}$ des ursprünglichen Wertes zurückgegangen ist.
 - 2** Für Schulen gibt es einen radioaktiven Strahlerstift mit Po210. Bestimme, nach welcher Zeit die Strahlung dieses Stifts auf $\frac{1}{16}$ bzw. $\frac{1}{100}$ des ursprünglichen Werts zurückgegangen ist. Deute deine Ergebnisse.
 - 3** Zeichne für das Isotop Iod131 ein Zerfallsdiagramm wie in der Abbildung links. Trage dazu die Anzahl der Kerne über der Zeit ab. Zum Zeitpunkt $t = 0$ enthält die Probe 1000 000 Kerne.
 - 4** Bestimme aus dem Diagramm links die Halbwertszeit von Iod131.
-

Rechenbeispiel

In einer Probe befinden sich 500 000 Iod128-Kerne. Nach der Halbwertszeit $t_{1/2} = 8,0$ h sind davon die Hälfte, also 250 000 Kerne, noch nicht zerfallen. Nach weiteren 8,0 h, also nach $t = 16$ h, sind noch ein Viertel, d.h. 125 000 nicht zerfallene Kerne, vorhanden, nach wieder 8,0 h ($t = 24$ h) sind noch ein Achtel der ursprünglichen Kernanzahl (62 500) nicht zerfallen, usw. ...

Werden diese Wertepaare in ein t - N -Diagramm eingetragen, dann ergibt sich folgende Zerfallskurve für Iod128:

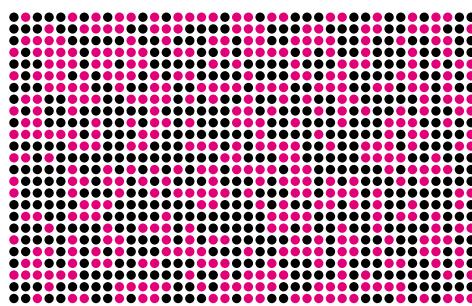


Simulation des radioaktiven Zerfalls

Im Internet findet sich eine Vielzahl an Simulationsprogrammen. Beim Ablauf der Simulation kann einmal die dargestellte Teilchenmenge betrachtet werden. Hierbei ist deutlich zu sehen, dass zu Beginn des Zerfallsprozesses pro Zeitspanne sehr viele Atome zerfallen. Erst nach ein bis zwei Halbwertszeiten kann das Auge den Zerfällen folgen. Eingebaute Zähler für noch nicht und schon zerfallene Kerne zeigen, dass sich die Anzahl der radioaktiven Kerne jeweils nach Ablauf einer Halbwertszeit halbiert hat.

Parallel dazu wird oft noch die Zerfallskurve gezeigt, in der der aktuelle Zerfallszustand gekennzeichnet ist. In nebenstehendem Bildschirmpunkt einer Simulation wird die verstrichene Zeit t als Vielfache der Halbwertszeit angegeben und die Hochachse des Diagramms zeigt den prozentualen Anteil der noch nicht zerfallenen Kerne an.

Werkzeug

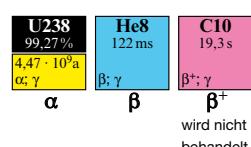


Zerfallsreihen

Beim Zerfall eines radioaktiven Nuklids unter Aussen-dung von Strahlung sind die neu entstehenden Nuklide häufig ebenfalls radioaktiv und zerfallen weiter. Dieser Vorgang kann sich mehrfach wiederholen und es ent-steht eine ganze Zerfallsreihe, die sich sehr gut mithilfe einer **Nuklidkarte** verfolgen lässt.

Die einzelnen Felder einer solchen Nuklidkarte müssen groß genug sein, damit außer dem Elementsymbol noch weitere Informationen eingetragen werden können, z.B. Massenzahl, Zerfallsarten, Halbwertszeit.

Die Farbe der Kästchen gibt an, welche Art von Strahlung das jeweilige Nuklid aussendet.

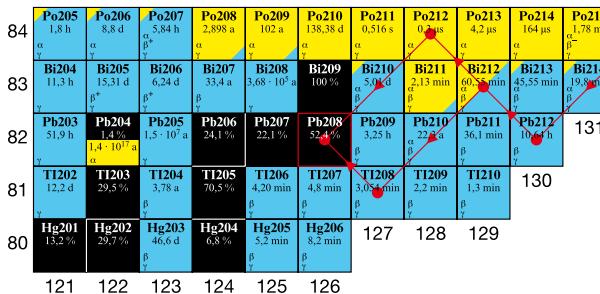


Beispiele für Zerfälle:

1. Zerfall von ${}^3\text{H}$: Das blaue Kästchen weist auf β -Zerfall hin: Aus dem instabilen Tritium ($\text{H}3$) wird das stabile Nuklid $\text{He}3$ – in der Karte muss nur ein Feld nach links und ein Feld nach oben gegangen werden.

2. Zerfall von ^{232}Th : Der Karte ist α -Zerfall zu entnehmen, d.h. das Folgenuklid ist bei $Z-2$ (zwei Felder nach unten) und $N-2$ (zwei Felder nach links) zu finden: Ra228. Hier wird β -Zerfall abgelesen – das Element Ac228 wird erreicht. Die Zerfallsreihe lässt sich fortsetzen bis zum stabilen Nuklid Ble208.

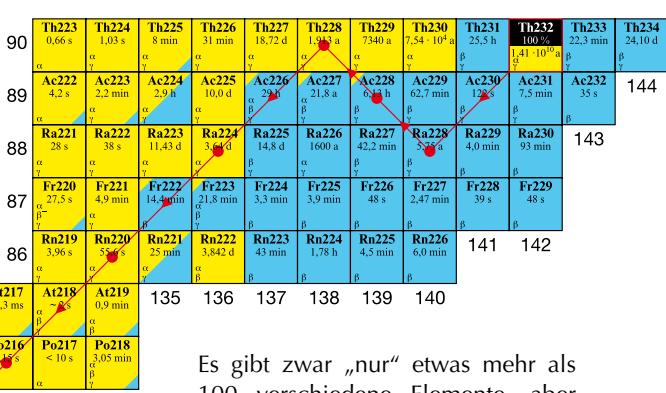
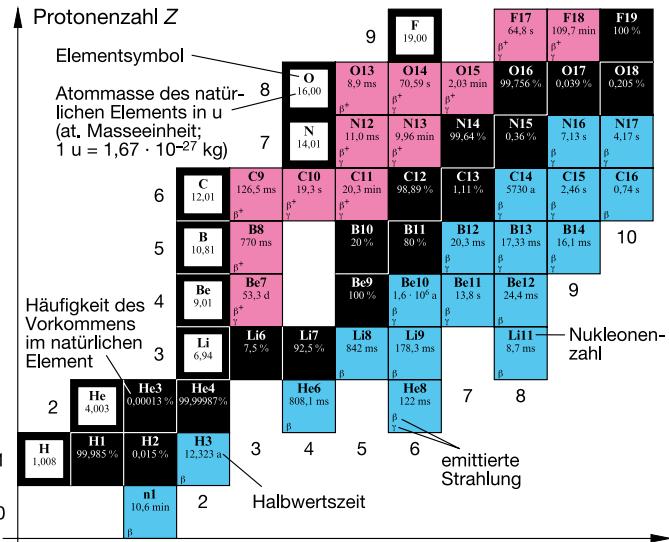
3. Der β^+ -Zerfall des Nuklids C10 wird im vorliegenden Buch nicht behandelt.



Einige Isotope zeigen eine Besonderheit, z.B. Bi212: Bei ihnen kann sowohl α - als auch β -Zerfall auftreten – zu erkennen an der diagonalen Gelb-Blau-Färbung des Kästchens. Für einen bestimmten Bi212-Kern ist aber natürlich nur ein Zerfallsprozess möglich, entweder zu Tl208 (α) oder zu Po212 (β).

α -Zerfall: zwei Felder nach unten
zwei Felder nach links

β -Zerfall: ein Feld nach oben – ein Feld nach links



Es gibt zwar „nur“ etwas mehr als 100 verschiedene Elemente, aber viele von ihnen haben zahlreiche Isotope, sodass eine Nuklidkarte aus über 2000 Nukliden besteht.

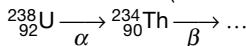
Aufgaben

- 1** Die Tabelle zeigt die zeitliche Abnahme der Kernanzahl N eines Radiumisotops:

<i>t</i>	0 min	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min
<i>N</i>	740 000	622 000	523 000	440 000	370 000	311 000

- a)** Stelle den Zusammenhang in einem Diagramm dar.
 - b)** Ermittle die Halbwertszeit und entscheide, um welches Radiumisotop es sich handelt.

- 2** U238 und Ac235 sind jeweils Ausgangsisotope einer Zerfallsreihe. Schreibe diese Reihen jeweils mithilfe der Nuklidkarte (am Ende des Buches) auf z. B. so:

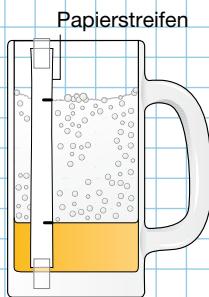


Radioaktivität

Diese Versuche können Stationen eines **Lernzirkels** sein.

V1 Bierschaum zerfällt ähnlich wie radioaktives Material.

a) Gieße alkoholfreies Bier so in ein hohes, schmales, zylinderförmiges Glas, dass eine möglichst große Schaumkrone entsteht. Markiere alle 10 s Ober- und Unterkante des Schaums. Trage in einem Diagramm die Schaumhöhe h über die Zeit auf.



b) Bestimme aus dem Diagramm die Halbwertszeit.

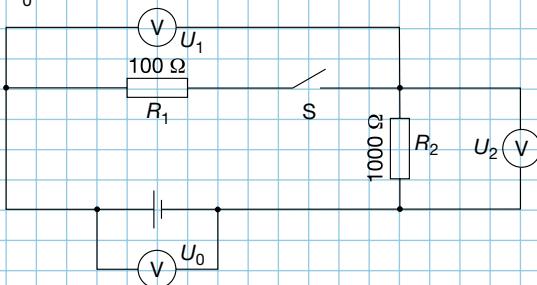
V2 a) Lege 50 gleiche Münzen (1 Ct-Stücke) in einen Würfelbecher. Schüttle den Becher und schüttle die Münzen auf einem Tisch aus. Nimm alle Münzen, die Zahl zeigen, heraus und zähle sie. Wiederhole den Vorgang, bis auch die letzte Münze Zahl zeigt. Zeichne ein Diagramm (x-Achse: Wurfnummer, y-Achse: Anzahl der Münzen mit Zahl).

b) Wiederhole den Versuch aus a) nun mit 50 Reißzwecken. Zähle dabei die Zustände \perp (Kopf).

c) Wiederhole den Versuch mit 50 Würfeln. Zähle nun die Anzahl der Einsen.

d) Erkläre, welcher Zusammenhang zwischen diesen Würferversuchen und dem Zerfall radioaktiver Kerne besteht. Bei welchem Würferversuch liegt die größte Halbwertszeit vor? Begründe.

V3 a) Baue den Versuch gemäß der Schaltkizze mit $U_0 = 11 \text{ V}$ auf.



b) Miss die Spannungen U_1 und U_2 zunächst bei geöffnetem Schalter S, dann bei geschlossenem Schalter S.

c) Erkläre die Versuchsbeobachtungen mithilfe der Gesetzmäßigkeiten für Reihenschaltungen von Widerständen.

Versuche und Aufträge

d) Der Versuch stellt einen Modellversuch zur Funktionsweise eines Geiger-Müller-Zählrohres dar. Das Schließen des Schalters S simulierte ein Ionisationsereignis, welches durch radioaktive Strahlung ausgelöst wird. Erkläre.

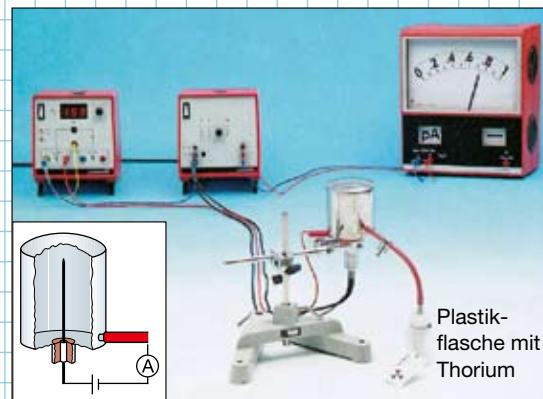
A4 a) Stelle einen tabellarischen Lebenslauf von MARIE CURIE und HENRI BECQUEREL zusammen. Recherchiere dazu im Internet und in Büchereien.

b) Erläutere ihre Entdeckungen und die dabei bestehenden wesentlichen Unterschiede hinsichtlich ihrer Vorgehensweise.

c) Nenne die radioaktiven Stoffe bzw. Einheiten, die nach CURIE und BECQUEREL benannt wurden.

A5 Die Abbildung zeigt den Aufbau einer Ionisationskammer. In diese Kammer kann durch einen Schlauch das radioaktive Edelgas Radon220, das eine Halbwertszeit von etwa 55 s besitzt, geleitet werden.

a) Erkläre, weshalb grundsätzlich ein elektrischer Strom zu messen ist. Erläutere den Unterschied zum Geiger-Müller-Zählrohr.



b) Beschreibe und erkläre den zu erwartenden Stromstärkeverlauf, nachdem eine bestimmte Menge Radon in die Kammer eingeleitet wurde.

V6 a) Teile ein Blatt Fotopapier. Hebe eine Hälfte gut geschützt auf; packe die andere Hälfte lichtdicht ein und klebe sie auf eine alte farbige Küchenfliese. Nimm das Papier nach 2–3 Tagen ab. Entwickle beide Hälften. Beschreibe das Versuchsergebnis.

b) Führe den Versuch auch mit anderen Materialien durch, z. B. mit Parfüm, Uhr mit Leuchtziffern usw.

Hinweis zur Papierentwicklung:

- Belichtetes Bild etwa 2 Minuten in den Entwickler legen
 - Bild im Wasserbad abspülen
 - Zum Schluss 10 Minuten ins Fixierbad legen
- Achtung:** Arbeitet sorgfältig und achte darauf, dass du nicht unnötig mit den Chemikalien in Berührung kommst.

Streifzug

Wie alt ist Ötzi?

C14 hilft bei der Altersbestimmung

Durch den Einfluss der Höhenstrahlung auf die Atmosphäre entsteht ständig das radioaktive Isotop C14, welches mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren wieder zerfällt. Dieser Vorgang ist seit vielen Jahrtausenden gleichbleibend; dadurch hat sich ein Gleichgewicht eingestellt: Bei Luft kommt ein radioaktives C14-Atom auf 10^{12} C12-Atome. Bei einer Probe, die 1 g Kohlenstoff enthält, werden durchschnittlich $14 \frac{\text{Imp}}{\text{min}}$ gemessen.

Wie C12 verbindet sich auch C14 mit Sauerstoff zu CO_2 , welches von den Pflanzen aufgenommen wird. Über die Nahrungskette gelangt C14 auch in den menschlichen Organismus. Für alle lebenden organischen Substanzen gilt: 1 g Kohlenstoff enthält auch hier so viel C14, dass $14 \frac{\text{Imp}}{\text{min}}$ gemessen werden. Nach dem Absterben der organischen Substanz findet kein Luftaustausch mit der Umgebung mehr statt; deshalb nimmt der C14-Gehalt der toten Substanz nach

den Gesetzen des radioaktiven Zerfalls ab (siehe Diagramm).

Das bedeutet: 5730 Jahre nach dem Absterben wird nur noch eine Zählrate von $7 \frac{\text{Imp}}{\text{min}}$ gemessen. Wird bei einem Knochen z.B. die Zählrate $3,5 \frac{\text{Imp}}{\text{min}}$ für 1 g Kohlenstoff festgestellt, so ergibt sich aus dem Diagramm: Das Lebewesen, zu dem der Knochen gehört hat, ist vor etwa 11500 Jahren gestorben.

Mit dieser Methode kann also mit guter Genauigkeit das Alter von archäologischen Fundstücken bestimmt werden. Voraussetzung ist allerdings, dass das Fundstück organisches Material enthält. Für „Ötzi“, eine im Ötztal gefundene Gletscherleiche, ist nach dieser Methode festgestellt worden, dass er vor 6500 Jahren gelebt haben muss.

Zeitliche Zwischenwerte wie bei Ötzi lassen sich dabei mithilfe der zugehörigen Funktionsgleichung ermitteln.

Die C14-Methode ist allerdings nur geeignet für Datierungen, die maximal 60000 Jahre zurückreichen, weil die Zählrate nach einem noch längeren Zeitraum kaum noch messbar ist. Es muss auch vorausgesetzt werden, dass das Kohlenstoffgleichgewicht zu dieser Zeit so war wie heute.



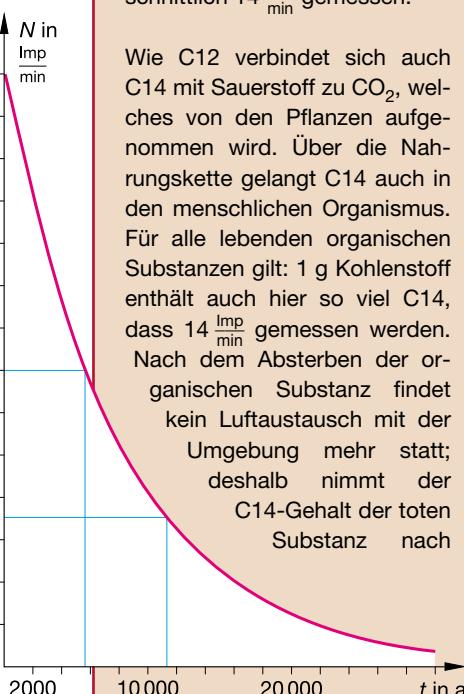
Die Uran-Blei-Methode

Die natürlichen Isotope U238 und U235 zerfallen über viele Zwischenstationen in die stabilen Isotope Pb206, Pb207 und Pb208. In vielen Versteinerungen sind auch diese Isotope vorhanden. Durch aufwendige Messungen ist es möglich, das Verhältnis der Anteile der verschiedenen Blei-isotope im Vergleich zum Uran-isotop zu bestimmen. Aus diesem Mischungsverhältnis kann über die Zerfallsreihen das Alter von Gesteinsproben berechnet werden.

Die ältesten mit dieser Methode bestimmten Gesteine hatten ein Alter von etwa vier Milliarden Jahren – das Alter der Erde.

Aufgaben

- 1** In einer Höhle wurden Bärenknochen gefunden, deren C14-Gehalt im Vergleich zu lebendem Gewebe noch 12,5 % betrug. Ermittle anhand der nebenstehenden Zerfallskurve, wann der Bär gelebt hat.
- 2** Für eine Materialprobe (1 g) eines Bibeltextes wurde eine Zählrate von $11,1 \frac{\text{Imp}}{\text{min}}$ bestimmt. Ermittle das Alter des Textes.
- 3** Messungen an Uranerzen aus großer Tiefe haben ergeben, dass etwa 1/3 der U238-Kerne zerfallen sind. Berechne daraus das Mindestalter.



Wegbereiter der Kernphysik

Streifzug

MARIE CURIE



MARIE CURIE (geb. SKLODOWSKA) wurde am 7. November 1867 in Warschau geboren. Ihr Vater war Physiklehrer. Sie ging 1891 nach Paris und schrieb sich an der Sorbonne ein. Zwei Jahre später bestand sie die Abschlussprüfung für Physik. 1895 heiratete sie PIERRE CURIE.

MARIE CURIE interessierte sich für die jüngsten Entdeckungen von Strahlung durch HENRI BECQUEREL und begann, diese Strahlung des Urans zu untersuchen. Als sie feststellte, dass die Strahlung des Erzes Pechblende intensiver war als die des Urans, folgerte sie, dass im Erz noch unbekannte Elemente vorhanden sein müssen, deren Strahlung die des Urans übersteigt. MARIE CURIE war die erste, die den Begriff „radioaktiv“ zur Beschreibung von Elementen verwendete. Innerhalb von vier Jahren verarbeiteten die CURIOS eine Tonne Pechblende, aus der sie in mühsamer Kleinarbeit den Bruchteil eines Gramms Radium isolierten. 1903 erhielten sie gemeinsam mit BECQUEREL den Nobelpreis für Physik für die Entdeckung der Radioaktivität. MARIE CURIE war damit die erste Frau, die einen Nobelpreis entgegennehmen konnte.

PIERRE CURIE wurde 1904 als Professor für Physik an die Sorbonne berufen und 1905 zum Mitglied der französischen Akademie der Wissenschaften ernannt. Obwohl MARIE CURIE 1908 ebenfalls eine Professur an der Sorbonne erhielt, wurde sie nie Mitglied der Akademie. Derartige Positionen konnten damals noch nicht von Frauen eingenommen werden, sodass MARIE CURIE eine ähnliche Anerkennung versagt blieb. 1911 erhielt sie – ein noch nie da gewesener Fall – einen zweiten Nobelpreis, dieses Mal in Chemie für ihre Arbeiten zu Radium und Radiumverbindungen.

Die CURIOS hatten zwei Töchter, von denen eine ebenfalls Nobelpreisträgerin wurde: IRÈNE JOLIOT-CURIE und ihr Ehemann FRÉDÉRIC erhielten 1935 den Nobelpreis für Chemie für die Synthese neuer radioaktiver Elemente.

Im Jahr 1934 erkrankte MARIE CURIE an Anämie, die durch ständiges Arbeiten ohne Schutz vor Strahlung ausgelöst worden war. Sie starb am 4. Juli 1934.

OTTO HAHN und LISE MEITNER

Am 8. März 1879 wurde OTTO HAHN in Frankfurt/Main geboren. Bereits in seiner Schulzeit hatte er, angeregt durch „chemische Spielereien“, sein Interesse für die Chemie entdeckt. Nach seinem Doktorexamen ging er 1904 nach England und begann, sich mit Problemen der Radioaktivität zu beschäftigen. Durch Fleiß und Forscherglück gelang ihm die Entdeckung des „Radiothors“, des Thorium-isotops Th228. Ermutigt durch diesen Erfolg ging er 1905 nach Montreal zu ERNEST RUTHERFORD, um seine Kenntnisse zur Radioaktivität weiter zu vervollkommen. Die Versuchsbedingungen waren damals sehr primitiv. Die radioaktive Strahlung wies Otto Hahn z.B. noch mithilfe eines Elektroskops nach, das er selbst aus einer Konservendose gebaut hatte.

Im September 1907 traf OTTO HAHN zum ersten Mal mit LISE MEITNER (geboren am 7. November 1878) zusammen. Weder Abitur noch Studium waren für Mädchen und Frauen damals eine Normalität. LISE MEITNER war erst die zweite Frau, die 1905 in Wien promoviert wurde. Als sie 1907 nach Berlin kam, hatte sie sich bereits einige Zeit mit Problemen der Radioaktivität beschäftigt.



Die Zusammenarbeit zwischen der Physikerin MEITNER und dem Chemiker HAHN führte zu bedeutsamen Entdeckungen: 1934 begannen beide Forscher gemeinsam mit FRITZ STRASSMANN, Uran mit Neutronen zu bestrahlen. Als Ergebnis der Reaktion erwarteten sie verschiedene Radium-isotope. Stattdessen wiesen HAHN und STRASSMANN 1939 jedoch Barium und Krypton nach. MEITNER lieferte die erste wissenschaftliche Erklärung für diese Kernreaktion und gab ihr den Namen **Kernspaltung**. Sie wies außerdem nach, dass dabei große Mengen Energie frei werden. LISE MEITNER war Jüdin und wurde durch das Hitlerregime politisch verfolgt. Deshalb musste sie

Strahlenwirkungen und Strahlenschutz

Strahlenschutzsymbole sind an vielen Stellen zu finden, z. B. an Röntgengeräten, Aufbewahrungsbehältern von radioaktiven Substanzen und natürlich an Kernkraftwerken. Das Symbol weist darauf hin, dass im Umgang mit den gekennzeichneten Geräten oder Gegenständen höchste Vorsicht geboten ist, denn von ihnen geht ionisierende Strahlung aus.

Welche Wirkungen hat die Strahlung auf den menschlichen Körper? Sind die Wirkungen immer und für jede Strahlung gleich? Wie kann sich der Mensch schützen? Gibt es auch Anwendungsmöglichkeiten in Medizin oder Technik?

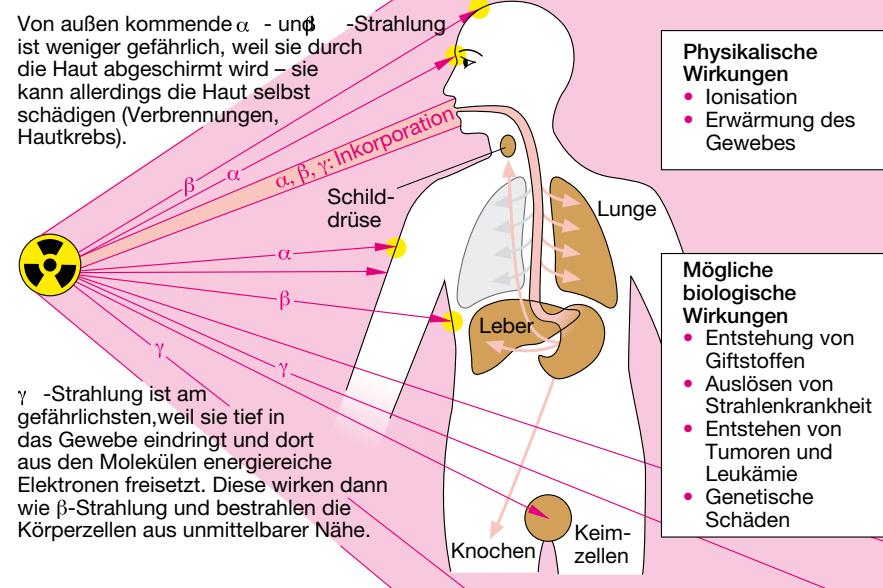


Wirkungen von Strahlung

Wenn α -, β - oder γ -Strahlung sowie Röntgenstrahlung auf den menschlichen Körper trifft, kommt es zu Wechselwirkungen der Strahlung mit Materie. Die physikalischen Effekte sind Ionisation und Anregung von Atomen und Molekülen. Diese Effekte können chemische oder biologische Änderungen in einzelnen Organen auslösen, was den gesamten Organismus erheblich stören kann:

- Intensive Strahlung kann zu Hautveränderungen wie bei einem starken Sonnenbrand führen;
- Moleküle bzw. Atome können als Folge der aufgenommenen Energie zerbrechen;
- Moleküle bzw. Atome zeigen Reaktionen, die sich vom Verhalten nichtionisierter Moleküle oder Atome drastisch unterscheiden. Entstehende Giftstoffe können die natürlichen Abläufe in den Zellen stören oder sogar ihre Funktion dauerhaft lahmlegen.

Dies gilt sowohl für Strahlung, die von außen, als auch für Strahlung, die durch **Inkorporation** (Aufnahme radioaktiver Substanzen in den Körper) von innen auf den Organismus wirkt. Einige radioaktive Stoffe verteilen sich gleichmäßig im Körper (z. B. Caesium), andere werden



bevorzugt in bestimmten Organen abgelagert, z.B. Iod in der Schilddrüse oder Strontium im Knochenmark.

Die durch die Absorption zugeführte Energie führt zwar auch zu einer minimalen Temperaturerhöhung, aber die Schädigung der Zellen ist auf die ionisierende Wirkung der Strahlung zurückzuführen.

Dabei spielt es keine Rolle, ob die Strahlungsquelle sich außerhalb oder innerhalb des Körpers befindet. Folgende Faktoren sind allerdings von Bedeutung:

- α -, β - oder γ -Strahlung sowie Röntgenstrahlung haben unterschiedliche biologische Wirkungen.

- Die Bestrahlungsstärke, die zeitliche Dauer der Bestrahlung und die Größe des bestrahlten Körpervolumens beeinflussen die mögliche Wirkung ebenfalls.
- Die einzelnen Organe sind unterschiedlich empfindlich.
- Auch Milieufaktoren (z. B. die Art der Ernährung) oder der Gesundheitszustand spielen eine Rolle.

Wenn Strahlung auf Körperzellen trifft, führt die absorbierte Energie zu Ionisationen von Atomen und Molekülen. Diese lösen chemische und biologische Prozesse aus, die zu Gesundheitsschäden führen können.

Schäden durch ionisierende Strahlung

Die biologischen Wirkungen ionisierender Strahlung lassen sich in drei Kategorien einteilen:

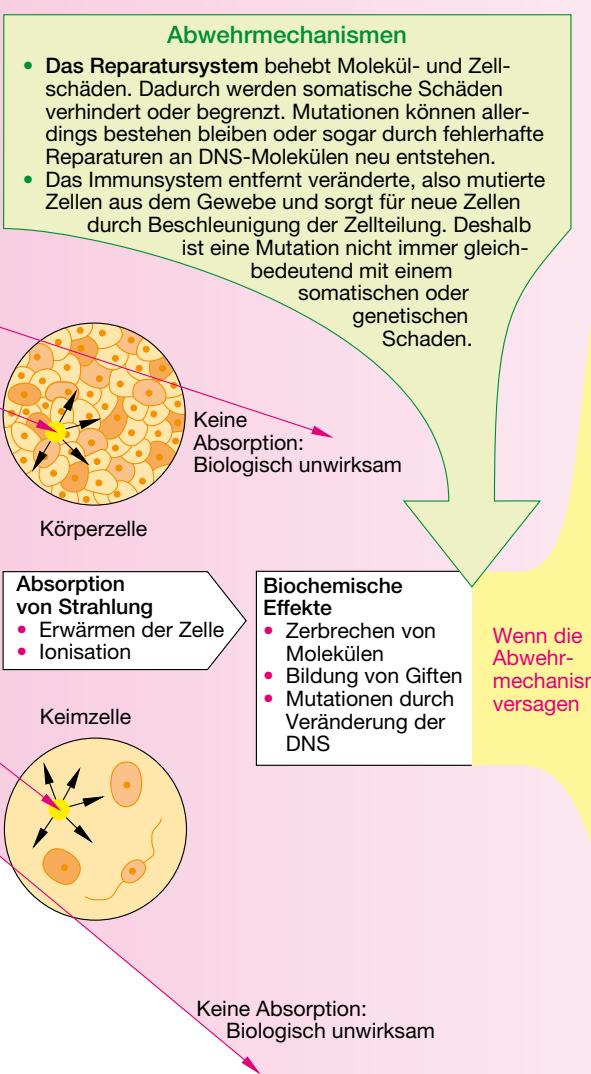
- **Somatische** (körperliche) **Frühschäden** sind an den bestrahlten Personen selbst erkennbar. Die Menschen leiden nach starker Bestrahlung an **vorübergehender** oder **schwerer Strahlenkrankheit** (siehe unten).
- Wenn durch die Bestrahlung Krebs, z. B. Leukämie, ausgelöst wird, sind dies **somatische Spätschäden**.
- Die ionisierende Strahlung kann auch eine Schädigung von Zellen bewirken, die Erbinformationen enthalten. Die gespeicherten Erbinformationen werden verändert, was dann in der Folge zu **genetischen Schäden (Mutationen)** führt (siehe unten).

Während somatische Schäden an den bestrahlten Menschen selbst auftreten, wirken sich genetische Schäden an den Keimzellen erst bei den direkten Nachkommen oder in den Folgegenerationen aus.

Wird der Körper von Strahlung getroffen, stehen zwei sehr wirksame **Abwehrmechanismen** bereit: das *Reparatursystem* und das *Immunsystem*. Sie schaffen es, dass eine vorübergehende Strahlenkrankheit im Normalfall rasch überwunden wird, wenn der Körper des Menschen gesund und widerstandsfähig ist.

Schädigungen durch Strahlung können dagegen nur teilweise oder gar nicht abgewendet werden, wenn die körpereigenen Abwehrsysteme überlastet sind, weil das Immunsystem z. B. gleichzeitig gegen eine Virusinfektion ankämpfen muss. Sehr starke Strahlung kann die Abwehrmechanismen selbst so schwächen, dass sie ganz versagen.

Aber nicht jede Bestrahlung verursacht zwangsläufig Schäden. Das Risiko, an Krebs oder Leukämie zu erkranken, wird auch von Umweltfaktoren, den Erbanlagen, dem Alter und der Lebensweise einer Person stark beeinflusst.



Die Absorption von ionisierender Strahlung kann bei Körperzellen zu somatischen und bei Keimzellen zu genetischen Schäden führen.

Immun- und Reparatursystem können Schäden – wenn sie nicht zu schwer sind – beheben.

Somatische Schäden

Vorübergehende Strahlenkrankheit

- Die Schutz- und Abwehrfunktionen des Körpers sind geschwächt.
- Die Anzahl der Zellverluste ist höher als die Zellneubildungen. Die Zahl der weißen Blutkörperchen nimmt rapide ab.
- Zwei bis drei Wochen nach der Bestrahlung kommt es zu Appetitlosigkeit, Entzündungen im Bereich der Luft- und Speisewege, Haarausfall, kleinen Hautflecken und allgemeinem Unwohlsein. Die Abwehrkräfte erlahmen und Verletzungen heilen nur noch schwer.

Schwere Strahlenkrankheit

- Immer mehr Zellen verlieren die Fähigkeit, sich zu teilen, oder sterben sogar ab.
- Dramatische Blutveränderungen als Folge der Zellbeeinträchtigungen führen nach 10 bis 14 Tagen zu schweren Entzündungen und inneren Blutungen.
- Bei Männern kann vorübergehende oder lebenslange Unfruchtbarkeit eintreten.

Genetische Schäden

Spätschäden

- Körperzellen können z. B. zu unkontrolliertem Wachstum und damit zu Krebsbildungen angeregt werden.
- Wenn Samen oder Eizellen von Mutationen betroffen sind, wirkt sich das auf die Entwicklung des ungeborenen Kindes aus. Zum Beispiel können Missbildungen oder Down-Syndrom bei Neugeborenen auftreten.
- Gestörte Erbinformationen können an die Nachkommen weitergegeben werden, was dann zu Erbkrankheiten führt.

Messung der Strahlenbelastung

Die radioaktive Strahlung, die von Natur aus und auch durch medizinische Anwendungen, Kerntechnik oder Kernwaffenexplosionen ein Bestandteil der Umwelt ist, lässt sich mit den Sinnesorganen nicht erfassen. Sie kann nur mithilfe spezieller Messeinrichtungen nachgewiesen werden. Die Aktivität der Probe eines radioaktiven Stoffes allein erlaubt aber noch keine Aussage darüber, welche Wirkungen die Absorption der Strahlung auf den Menschen hat.

- Zur Angabe der Strahlenwirkung dient die **Energiedosis D**. Sie gibt an, wie viel Energie pro Kilogramm eines bestrahlten Stoffes absorbiert wird:

$$D = \frac{\text{absorbierte Energie}}{\text{Masse des bestrahlten Körpers}} = \frac{E}{m}$$

Die Energiedosis ist von der Masse des bestrahlten Gewebes abhängig. Daher macht es einen Unterschied, ob die absorbierte Energie vom ganzen Körper oder z.B. nur von einer Hand aufgenommen wird.

- Die Wirkung der ionisierenden Strahlung auf lebende Organismen ist von der Art der hauptsächlich absorbierten Strahlung abhängig. Jede Strahlungsart wirkt unterschiedlich auf das Körpergewebe und führt zu verschiedenen starken biologischen Folgen. Die biologische Wirkung der gleichen Energiedosis ist bei α -Strahlung viel größer als bei

β - oder γ -Strahlung. Daher reicht die Angabe der Energiedosis für eine Abschätzung der Wirkung nicht aus. Die Energiedosis muss mit einem **Bewertungsfaktor Q** multipliziert werden; das ergibt die **Äquivalentdosis H**:

$$H = Q \cdot D$$

Die Bewertungsfaktoren sind Erfahrungswerte aus Experimenten:

$Q = 1$ für β -, γ -, Röntgenstrahlung,

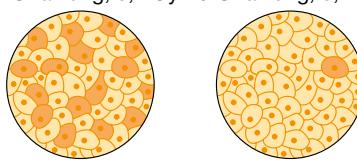
$Q = 10$ für Neutronenstrahlung,

$Q = 20$ für α -Strahlung.

Um Äquivalentdosen von Energiedosen unterscheiden zu können, wird als spezielle Einheit das Sievert (Sv) verwendet:

$$1 \text{ Sv} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Bestrahlung von Körperzellen mit α -Strahlung, 0,1 Gy β -Strahlung, 0,1 Gy



- Mit der Angabe der Äquivalentdosis kann die biologische Wirkung der Strahlung auf das lebende Gewebe aber immer noch nicht vollständig erfasst werden. Zusätzliche Bedeutung hat der Faktor Zeit: Es ist ein erheblicher Unterschied, ob die gleiche Strahlendosis in einem längeren oder kürzeren Zeitraum einwirkt.

Energiedosis

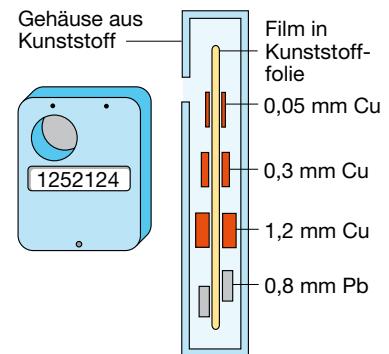
Die Einheit ist $1 \text{ Gy} (\text{Gray}) = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$. Das Formelzeichen ist D .

Äquivalentdosis

Die Einheit ist $1 \text{ Sv} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$. Das Formelzeichen ist H .

Die Äquivalentdosis berücksichtigt die biologische Wirksamkeit der Strahlungsarten auf organisches Gewebe. α -Strahlung wirkt 20-mal stärker, Neutronenstrahlung 10-mal stärker als β -, γ - und Röntgenstrahlung.

- Mit einem einfachen Geiger-Müller-Zählrohr lässt sich zwar eine schwache Strahlung von einer starken unterscheiden, die Energie- bzw. Äquivalentdosis lässt sich mit ihm jedoch nicht messen. Hierzu wurden verschiedene Dosimeter-Typen entwickelt.



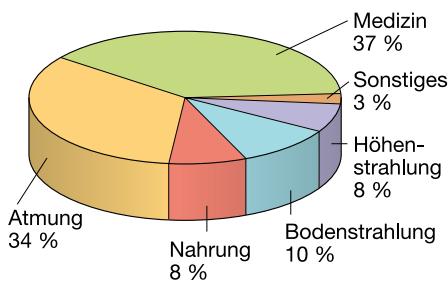
Filmdosimeter enthalten in einem flachen Gehäuse ein Stück Film, das an manchen Stellen durch verschiedene Metallfilter abgeschirmt ist. Durch radioaktive Strahlung und Röntgenstrahlung wird der Film geschwärzt. Nach der Entwicklung kann durch Schwärzungsvergleich mit definiert bestrahlten Filmen die aufgenommene Dosis bestimmt werden.

Dosis	Symptome (in der Mehrzahl der Fälle)
0–0,3 Sv	äußerlich keine Symptome erkennbar
ab 0,3 Sv	gelegentlich Übelkeit und Erbrechen; erste Veränderungen im Blutbild
ab 1 Sv	vorübergehende Strahlenkrankheit: nach 2 Stunden Erbrechen; Kopfschmerzen; nach 2 Wochen Haarausfall; nach Jahren Trübungen der Augenlinse
ab 3 Sv	schwere Strahlenkrankheit: nach 30 Minuten Erbrechen; ständige Kopfschmerzen; später Fieber, Entzündungen im Mund/Rachen; blutiger Durchfall; in 50% der Fälle Tod
ab 8 Sv	tödliche Strahlenkrankheit: nach Minuten Erbrechen und Fieber; innere und äußere Blutungen; Bewusstseinstrübung; schneller Kräfteverfall; ohne Therapie in 100% der Fälle Tod

Strahlenschutz

Das Leben auf der Erde hat sich von Beginn an unter der Einwirkung von radioaktiver Strahlung entwickelt. Sie kommt aus dem All (kosmische Strahlung), dem Erdboden (terrestrische Strahlung) und der Atmosphäre. Radioaktive Strahlung ist also Bestandteil der Umwelt. So gar der menschliche Körper ist ein Strahler: Durch die Nahrung und die Atmung gelangen radioactive Stoffe in den Körper, werden dort gespeichert und strahlen weiter.

Neben der natürlichen **Strahlenbelastung** sind die Menschen zusätzlich zivilisationsbedingten Strahlungsquellen ausgesetzt. An erster Stelle steht dabei die Röntgendiagnostik in der Medizin. Aber auch durch kerntechnische Anlagen (Kernkraftwerke) oder durch Kernwaffenversuche werden die Menschen zusätzlich belastet.



Die Jahressdosis aufgrund der natürlichen Strahlenbelastung beträgt in Deutschland je Einwohner durchschnittlich 2,4 mSv. Der Wert schwankt jedoch regional und liegt in Deutschland zwischen 1 und 5 mSv pro Jahr. Die medizinisch bedingte Strahlenbelastung beträgt durchschnittlich 1,8 mSv, sodass jeder Bewohner durchschnittlich einer Belastung von 4,2 mSv im Jahr ausgesetzt ist.

Die Grenzwerte für die Bevölkerung und beruflich strahlenexponierte Personen sind in der **Strahlenschutzverordnung (StrlSchV)** festgelegt.

Die Grenzwerte für die Normalbevölkerung orientieren sich dabei an der normalen Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenbelastung.

Die StrlSchV schreibt u.a. vor, dass

- die Strahlendosis so gering wie möglich zu halten ist;
- Grenzwerte zu kontrollieren und einzuhalten sind.

Beruflich strahlenexponierte Personen müssen deshalb stets ein Dosimeter tragen. Überschreitet eine Person z.B. in einem Kernkraftwerk den für sie geltenden Grenzwert für die Jahressdosis, darf sie nicht länger an einem Arbeitsplatz tätig sein, an dem sie Strahlung ausgesetzt ist.

Grenzwerte für die Bestrahlung			
Körperbereich	Erwachsene maximal	Jugendliche maximal	Bevölkerung im Schnitt
ganzer Körper	20 mSv	1 mSv	1 mSv
Alle Organe, falls nicht im Folgenden genannt	150 mSv	15 mSv	0,9 mSv
Keimdrüsen; Gebärmutter; Knochenmark	50 mSv	5 mSv	0,3 mSv
Knochenoberfläche; Haut	300 mSv	30 mSv	1,8 mSv
Hände/Arme; Füße/Beine samt zugehöriger Haut	500 mSv	50 mSv	0,9 mSv
	beruflich strahlenexponierte Personen	Normalbevölkerung	

Aufgaben

- 1 Erkläre die Funktionsweise des Filmdosimeters. Begründe, dass damit auch die Strahlungsarten unterschieden werden können.
- 2 a) Erläutere, wovon die schädigende Wirkung radioaktiver Strahlung abhängt und welche verschiedenen Schäden sie hervorrufen kann.
b) Die Notwendigkeit der Einführung des Bewertungsfaktors zeigt die Grenzen physikalischer Sichtweisen. Erläutere diese Aussage.
- 3 Begründe die Grundregeln des Strahlenschutzes mithilfe der Eigenschaften und Wirkungen radioaktiver Strahlung.
- 4 Bei der natürlichen Strahlenbelastung spielt das radioaktive Edelgas Radon220 eine zentrale Rolle. Informiere dich, erkläre.
- 5 Informiere dich im Internet über Aufbau und Funktionsweise eines Taschendosimeters.
- 6 α -Strahlung wird schon durch eine dünne Pappe absorbiert. Trotzdem ist der Bewertungsfaktor für α -Strahlung $Q = 20$. Erkläre diesen scheinbaren Widerspruch. Beachte dabei z.B. die unterschiedliche Größe von α - und β -Teilchen.

Strahlenschutz

ist für jeden Menschen wichtig. Die Grundregeln sind einfach:

- **Abstand halten:** Je größer die Entfernung von der Strahlungsquelle, desto schwächer ist die Strahlung. Bei doppelter Entfernung sinkt die Strahlungsintensität auf weniger als ein Viertel ab.
- **Nur kurzer Aufenthalt** in der Nähe einer Strahlungsquelle: Die vom Körpergewebe absorbierte Energiedosis ist proportional zur Bestrahlungszeit. Eine Halbierung der Bestrahlungszeit bedeutet daher auch eine Halbierung der Strahlendosis.

Abschirmung

- **Keine Nahrung zu sich nehmen** während des Umgangs mit radioaktiven Stoffen: Durch Nahrungsaufnahme können radioaktive Stoffe in den Körper gelangen und sich dort in einzelnen Organen ablagern. Dadurch sind die Körperfunktionen in der Nähe der betroffenen Organe einer verstärkten Bestrahlung ausgesetzt.

Streifzug**Nahrungsketten und Belastungspfade**

Die Strahlung, die aus der Luft von außen auf den Körper einwirkt, ist kaum ein Anlass zur Beunruhigung, denn die Reichweite der ionisierenden Strahlung ist gering. α - und β -Strahlung wird bereits durch die oberen Hautschichten zurückgehalten. Bedeutender ist die Tatsache, dass radioaktive Stoffe aus der Luft, dem Wasser und dem Boden direkt mit der Atemluft oder dem Trinkwasser oder indirekt über eine Nahrungskette in den menschlichen Körper gelangen.

Werden radioaktive Stoffe in den Körper aufgenommen, zerfallen sie und ihre Strahlung trifft das Zellgewebe ohne „schützende“ Luft- bzw. Hautschicht direkt. Dies unterscheidet die künstlich verursachte Radioaktivität auch von der natürlichen. Ein großer Teil der natürlichen Strahlung wird nicht direkt oder indirekt in den Körper eingebracht und ist daher relativ ungefährlich.

Werden radioactive Stoffe an irgendeiner Stelle in die Luft freigesetzt, so lagern sie sich an Staubeilchen oder Wassertropfen an. Durch die Winde werden die radioaktiven Stoffe anschließend weltweit verteilt. Dann geschieht Folgendes:

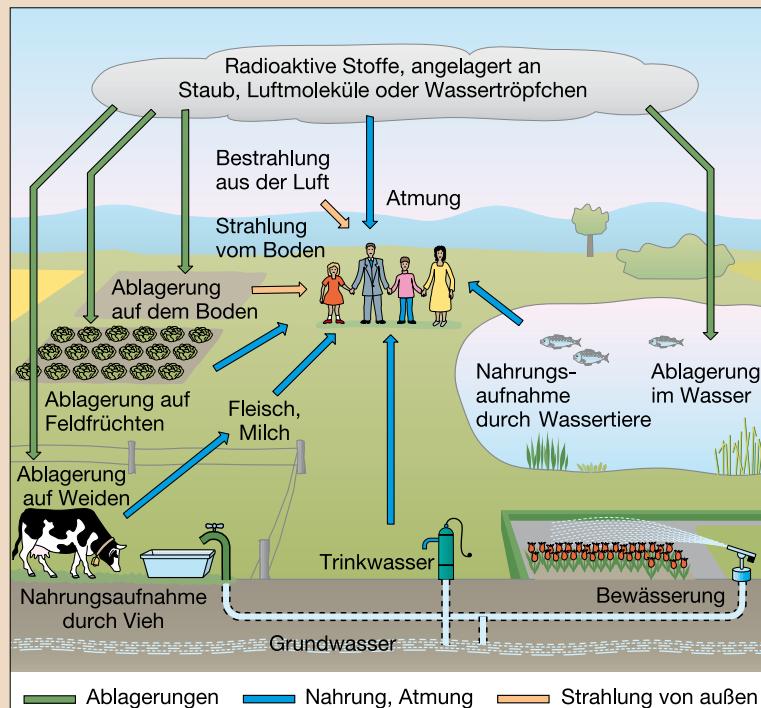
- Mit Niederschlägen oder infolge ihrer Masse fallen die radioaktiven Stoffe auf die Erdoberfläche. Dadurch verringern sich zwar bei Störfällen mit Freisetzung von radioaktiven Substanzen die gemessenen Aktivitätswerte in der unmittelbaren Umgebungsluft, aber es kommt zu einer Anreicherung am Boden – eventuell in ganz anderen Regionen.

- Die radioaktiven Stoffe bleiben nicht an der Oberfläche von Pflanzen oder Böden.

Durch Niederschläge werden sie abgewaschen und dringen in das Erdreich ein. Von dort gelangen sie in Grund- und Trinkwasser.

- Durch Wurzeln oder die Blattoberflächen werden die radioaktiven Stoffe in das Innere der Pflanzen transportiert.
- Als Nahrung (eventuell über die Zwischenstation „Tier“) oder als Trinkwasser werden die radioaktiven Stoffe schließlich vom Menschen aufgenommen.

Gefährlich ist, dass manche radioaktiven Stoffe von Pflanzen genau so „verarbeitet“ werden wie ungefährliche chemische Elemente oder Verbindungen, die durch diese „Doppelgänger“ ersetzt werden. Da-



durch reichern sich die radioaktiven Stoffe in Pflanzen, Tieren oder Menschen stark an. Einige zerfallen schnell entsprechend ihrer Halbwertszeit in ungefährliche Folgeprodukte (z.B. Iod), andere dagegen bleiben lange Zeit im Körper gespeichert. Strontium zum Beispiel mit einer Halbwertszeit von rund 30 Jahren bleibt praktisch ein Leben lang in den Knochen eingelagert. Es bestrahlst das Knochenmark, in dem die roten Blutkörperchen gebildet werden, dauernd aus nächster Nähe.

Die Herkunft der Nahrungs- und Genussmittel, des Wassers und der Luft sowie die Lebens- und Ernährungsgewohnheiten bestimmen die Menge der vom Körper aufgenommenen radioaktiven Stoffe.

STRAHLENBELASTUNGEN

Typische Strahlenbelastungen

Art der Belastung	Äquivalentdosis
Zahnröntgenaufnahme	10 µSv
Brustkorbröntgen	100 µSv
Mammographie	500 µSv
Schilddrüsenszintigraphie	800 µSv
Computertomographie Brustkorb	10 mSv
Flug Frankfurt-New York	30 µSv

Um das Risiko der Strahlenbelastung abzuschätzen, muss diese mit der natürlichen Äquivalentdosis verglichen werden, die bei etwa 2 mSv pro Jahr liegt und unvermeidbar ist.

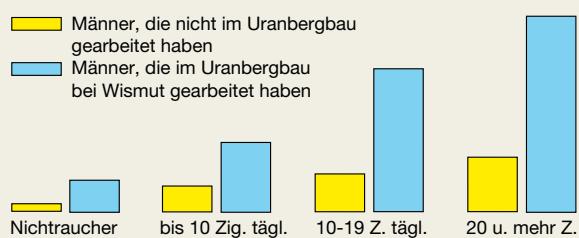
Radioaktive Baustoffe

Alle Gesteine und Böden enthalten Spuren radioaktiver Nuklide. Da diese auch zum Bau von Häusern verwendet werden, ergibt sich eine natürliche Strahlenbelastung in Wohnhäusern. Die Aktivität der einzelnen Materialien variiert je nach Fundort über einen großen Bereich. So sind z. B. die Wohnungen im Erzgebirge wesentlich höher belastet als die an der Nordsee. Für Vergleichszwecke ist jeweils die Aktivität eines Kilogramms des entsprechenden Materials angegeben.

	Baustoffspezifische Aktivität in $\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$		
	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th
Naturstein			
Granit	1300	100	80
Schiefer	900	50	60
Marmor	40	20	20
Sandstein	20	30	30
Mauersteine			
Ziegel	700	60	70
Schamotte	400	60	90
Betonsteine	500	130	100
Kalksandstein	200	20	20
Zuschläge			
Sand, Kies	250	15	20
Hochofenschlacke	500	120	130
Flugasche	700	200	130
Bindemittel			
Portlandzement	220	30	20
Hüttenzement	150	60	90
Kalk	180	30	20
Naturgips	70	20	10
Chemiegips	110	560	20
Bitumen	110	20	20

Raucherrisiko

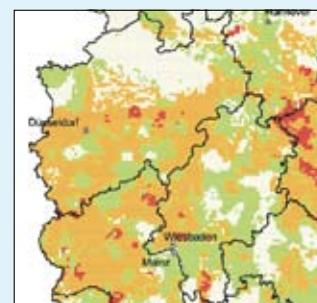
In der Stadt Schneeberg (Sachsen) wurden über mehrere Jahrhunderte bis 1990 Erze unter Tage abgebaut. Seit ca. 500 Jahren fiel auf, dass viele Bergleute an einer Lungenkrankheit, der „Schneeberger Krankheit“ starben, die Anfang des letzten Jahrhunderts als Lungen- und Bronchialkrebs identifiziert werden konnte. Die Ursache für das erhöhte Lungenkrebsrisiko der Bergleute liegt in der erhöhten Strahlenbelastung. Diese kommt einerseits durch das Einatmen radioaktiver Uranstäube und andererseits durch die Inhalation des radioaktiven Edelgases Radon zustande, das beim Zerfall des Urans entsteht. Deutlich zu erkennen ist, dass der Milieufaktor „Rauchen“ das Risiko für Lungenkrebs um ein Vielfaches erhöht. Die ionisierende Strahlung und die Aufnahme vieler krebsfördernder Stoffe mit dem Zigarettenrauch verstärken sich und vergrößern so die Zellschäden.



Relatives Lungenkrebsrisiko für Männer, aufgeschlüsselt nach Rauchgewohnheiten und Uranbergbau-Exposition (Wismut-Tätigkeit): Die Zahlenwerte geben an, um welchen Faktor das Risiko, an Lungenkrebs zu erkranken, erhöht ist, bezogen auf das Lungenkrebsrisiko von Männern aus der gleichen Region, die Nichtraucher sind und die nicht im Uranbergbau gearbeitet haben.

Radonbelastung

Das radioactive Edelgas Radon, das aus Zerfallsprodukten im Boden entsteht, kann über Risse in der Erdrinde und der Bodenplatte in Häuser gelangen. Es führt dort zu einer zusätzlichen Belastung. Diese kann durch Lüften wesentlich verringert werden.



Radioaktivitätskonzentration in der Bodenluft 2005

- > 100 [kBq/m³]
- 40-100
- 20-40
- < 20

Strahlentherapie und Strahlendiagnostik

Nach der Entdeckung der Radioaktivität im Jahr 1896 durch BEQUEREL bzw. der Röntgenstrahlung 1895 durch RÖNTGEN dauerte es nicht lange, bis die ionisierende Strahlung im medizinischen Bereich sowohl zur Diagnose als auch zur Therapie eingesetzt wurde. Am bekanntesten ist die Röntgendiagnostik wie z.B. bei der Computertomographie. Hier wird die gute Durchdringungsfähigkeit der Röntgenstrahlung ausgenutzt.

Strahlentherapie

Ionisierende Strahlung hat nicht nur schädigende Wirkungen auf den menschlichen Organismus, sondern kann auch gezielt zur Heilung bestimmter Krankheiten eingesetzt werden, z.B. von Krebs. Dazu wird das erkrankte Körperteil ionisierender Strahlung ausgesetzt. Als Strahlungsquellen werden heute Geräte bzw. Stoffe benutzt, die energiereiche teilchenfreie Strahlung emittieren: Röntgenröhren, radioaktive Substanzen (Co^{60} , Cs^{137}) und Linearbeschleuniger. Die Bestrahlungen bewirken über eine Hemmung der Zellteilung einen Wachstumsstillstand oder sogar ein Absterben von Gewebeanteilen, wobei wachsendes Gewebe, wie zum Beispiel Tumore, empfindlicher reagiert als gesunde, ausgewachsene Körperteile.

Die Strahlungsquelle wird auf einer kreisförmigen Bahn um den Patienten herum geführt. Hierdurch wird erreicht, dass das gesunde Gewebe nur mit einer geringen Energiedosis belastet wird und gleichzeitig eine gleichbleibend hohe Strahlendosis auf den Tumor trifft. Vielfach wird zusätzlich mit individuell angefertigten Schutzmasken gearbeitet, z.B. bei Bestrahlungen im Bereich des Kopfes. Eine genaue Positionierung auf dem Bestrahlungstisch ist für den Erfolg der oft mehrere Wochen dauernden Therapie mitentscheidend.

Wie eine Chemotherapie ist auch eine Strahlentherapie mit starken Nebenwirkungen verbunden. Dazu zählen z.B. Interesselosigkeit und Appetitmangel, Übelkeit und

Erbrechen. Auch Hautstörungen wie Rötungen, Abschuppungen und Juckreiz sind beobachtet worden. Eine Strahlentherapie führt insgesamt zu einer Schwächung der Abwehrkräfte.

Möglich ist es auch, das Tumorgewebe von innen zu bestrahlen. Hierzu werden winzige Mengen einer radioaktiven Substanz direkt in den Tumor gebracht und nach der entsprechenden Behandlungszeit wieder entfernt.

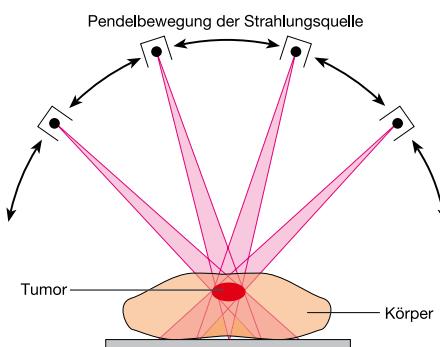
Strahlendiagnostik

Es gibt eine große Anzahl von Anwendungsgebieten, bei denen die nuklearmedizinische Diagnostik den anderen Untersuchungsmethoden überlegen ist:

Bestimmte Erkrankungen können gegenüber anderen Untersuchungsverfahren früher erkannt werden und somit frühzeitig behandelt werden. Die Beobachtung der Verteilung radioaktiver Substanzen oder ihre bevorzugte Anlagerung in Gewebe- oder Körperteilen bietet die Möglichkeit, funktionale Zusammenhänge oder Informationen über Verteilungs-, Durchblutungs- und Stoffwechselvorgänge genauer zu erfassen als mit anderen Verfahren.

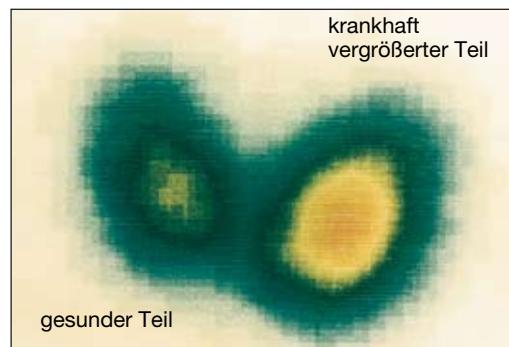
Ein Hauptanwendungsgebiet ist die Funktions- und Lokalisationsuntersuchung von Drüsen, z.B. die Bestimmung von Lage, Größe und Funktion der Schilddrüse, der Nebennieren u.a.

Dazu wird ungefährlich radioaktives Technetium oder Iod beigegeben. Diese Flüssigkeit wird dann in das Blut des Patienten gespritzt. Weil Iod oder Technetium bevorzugt in den kranken Bereichen der Schilddrüse abgelagert werden, senden diese Teile mehr Strahlung aus als die gesunden. Die Strahlung wird von einem Detektor aufgefangen und von einem Computer zu einem Strahlungsbild (Szintigramm) der Schilddrüse umgewandelt.



Aufgaben

- 1** Begründe, warum der Tumor von mehreren Seiten bestrahlt wird, und beschreibe die Wirkung der Strahlung.
- 2** Erläutere, wie ein Schilddrüsen-Szintigramm gemacht wird.

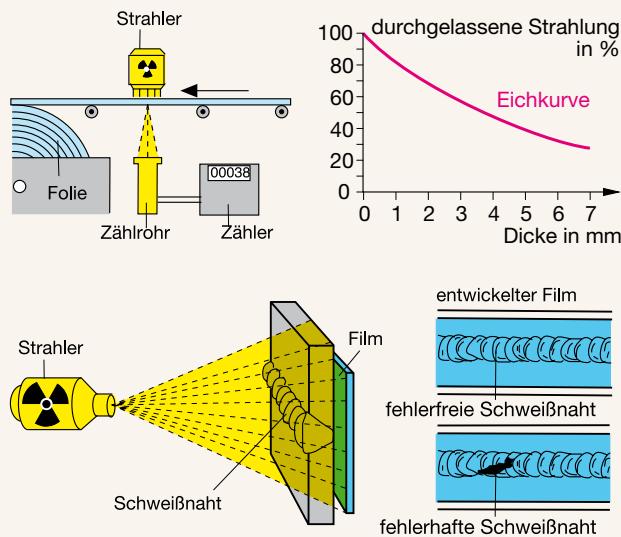


ANWENDUNG VON STRAHLUNG

Materialprüfung

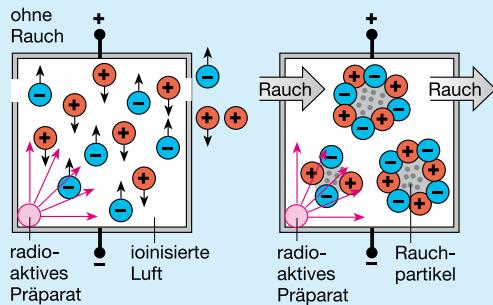
Bei der Dickenmessung und zerstörungsfreien Werkstoffprüfung wird die Abnahme der Intensität einer γ - oder Röntgenstrahlung mit der Dicke der durchdrungenen Materialschicht genutzt.

Der zu untersuchende Gegenstand befindet sich zwischen der Strahlungsquelle und einem Nachweisgerät, z. B. einem Film oder einem Zählrohr. Je nach Dicke der Schicht bzw. des eingebrachten Gegenstandes wird die Strahlung geschwächt. Unterschiede in der Zusammensetzung des Materials, Risse oder Hohlräume zeigen sich durch verschiedene Schwärzungsgrade auf dem Film oder unterschiedliche Zählraten. Auf diese Art erfolgt die Untersuchung von hochbelasteten und sicherheits-relevanten Bauteilen. Drahtseile für Seilbahnen oder Aufzüge und gegossene Felgen z. B. von Pkws oder die Radreifen bei der Eisenbahn werden so mit Röntgenstrahlung zerstörungsfrei untersucht.



Brandmelder

Es gibt Brandmelder, in denen ein radioaktives Präparat eingebaut ist, welches die Luft, die von außen in die Messkammer eindringt, permanent ionisiert. Dadurch kann ein elektrischer Strom durch die Messkammer fließen. Wenn Rauchpartikel in die Kammer gelangen, lagern sich die ionisierten Luftmoleküle an den Rauchpartikeln an. Die so entstandenen großen und schweren „Rauch“-Ionen sind nahezu ungeladen, die Stromstärke sinkt. Die Abnahme der Stromstärke kann elektronisch registriert werden und Alarm auslösen. Wird allerdings nach einem Brand ein solcher Ionisationsrauchmelder bei den Aufräumarbeiten nicht gefunden, muss der Brandschutt als Sondermüll entsorgt werden.



Materialbeeinflussung

In der Industrie werden Kunststoffe veredelt, indem sie für eine bestimmte Zeit β -Strahlung ausgesetzt werden. Dadurch vernetzen sich die Molekülketten im Kunststoff. Dieser wird dadurch z. B. beständiger gegen Hitze und Chemikalien.

Konservierung von Lebensmitteln

In einigen Ländern (auch in der EU) werden ganze Paletten mit Lebensmitteln ionisierender Strahlung ausgesetzt, um sie dadurch zu konservieren (haltbarer zu machen). Das Bestrahlen von Lebensmitteln ist nicht umstritten und in Deutschland ist zurzeit nur die Bestrahlung getrockneter Gewürze und Kräuter erlaubt.

Sterilisation

Zur Sterilisation (Entkeimung) werden medizinische Instrumente, hitzeempfindliche Arzneimittel, Schläuche, Verbundstoffe und Ähnliches ionisierender Strahlung ausgesetzt. Durch die Bestrahlung mit hohen Energiedosen werden Bakterien, Sporen oder Viren getötet. Auch der Klärschlamm aus Kläranlagen wird ionisierender Strahlung ausgesetzt, um ihn anschließend als keimfreien Dünger verwenden zu können.

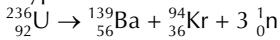
Kernenergie

Kernkraftwerke sind Wärmekraftwerke, die sich nur in der Art der Wärmeerzeugung von Kohle-, Öl- und Gaskraftwerken unterscheiden. Während in Kohle-, Öl- und Gaskraftwerken fossile Brennstoffe verbrannt werden, wird in Kernkraftwerken die Energie genutzt, die in Atomkernen steckt. Welche Vorteile bietet die Kernenergie? Welche Prozesse laufen in einem Kernkraftwerk ab? Welche Sicherheitsvorkehrungen schützen vor den Gefahren radioaktiver Strahlung und wie werden die Abfälle entsorgt?



Kernspaltung

In Kernkraftwerken wird die Energie genutzt, die bei der Spaltung von schweren Atomkernen entsteht. Ausgangsstoff ist das stabile Uranisotop $^{235}_{92}\text{U}$. Dringt ein langsames Neutron, ein *thermisches Neutron*, in diesen Urankern ein, so ist der entstandene $^{236}_{92}\text{U}$ -Kern instabil und zerfällt in zwei Kerne, die **Spaltprodukte**. Neben der freiwerdenden Energie entstehen bei dieser Kernspaltung zwei oder drei schnelle Neutronen. Das Uranisotop 236 kann beispielsweise unter Aussendung von drei schnellen Neutronen in einen Barium- und einen Kryptonkern zerfallen:



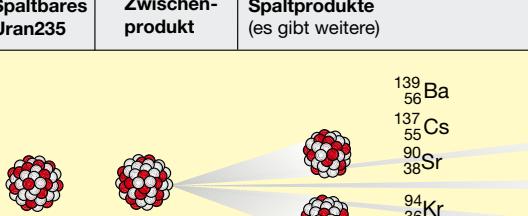
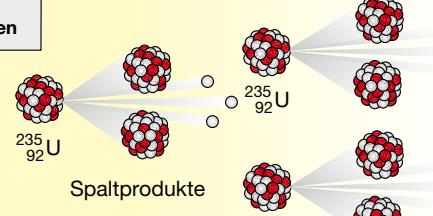
Die Spaltprozesse können aber nur ausgelöst werden, wenn das Neutron beim Zusammenstoß mit dem U235-Kern die passende Geschwindigkeit hat. Schnelle Neutronen prallen einfach ab; mittelschnelle Neutronen werden zwar eingefangen, lösen aber keine Spaltung aus. Im Gegensatz dazu können beim Uranisotop238 nur schnelle Neutronen eingebaut werden. Auch andere schwere Kerne wie Plutonium können durch Neutronen gespalten werden.

Kettenreaktion

Wenn bei der Spaltung mehrere Neutronen freigesetzt werden, die eine für weitere Spaltungen geeignete Geschwindigkeit haben oder auf diese Geschwindigkeit abgebremst werden, dann können diese von anderen spaltbaren Kernen absorbiert werden, erneute Spaltungen auslösen und weitere Neutronen freisetzen. So entsteht eine **Kettenreaktion**.

Für die technische Nutzung der Kernenergie in Kernkraftwerken wird eine **kontrollierte Kettenreaktion** benötigt. Hierbei muss eine Spaltung wieder genau zu einer neuen Spaltung führen, sodass die Gesamtanzahl der Spaltungen, die in einer bestimmten Zeitspanne ablaufen, konstant ist. Dies geschieht dadurch, dass nicht alle Neutronen auf die für die Spaltung nötige Geschwindigkeit abgebremst werden, und dass Neutronen durch andere Materialien eingefangen werden. Sie stehen dann nicht mehr für eine Spaltung zur Verfügung. In Kernwaffen dagegen löst jede Spaltung durch die freiwerdenden Neutronen entsprechend viele Spaltungen aus. Die Anzahl der Spaltungen wächst exponentiell, es kommt zu einer **unkontrollierten Kettenreaktion**.

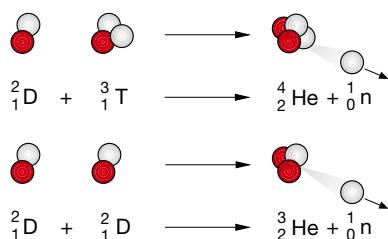
Die Kerne von Uran und Plutonium können Neutronen einfangen und sich dann unter Energiefreisetzung in Spaltprodukte und freie Neutronen spalten.

Thermisches Neutron	Spaltbares Uran235	Zwischenprodukt	Spaltprodukte (es gibt weitere)	Neutronen für weitere Spaltungen
			 <p>stabilisierter $^{235}_{92}\text{U}$-Kern instabilisierter $^{236}_{92}\text{U}$-Kern</p>	 <p>Spaltprodukte</p>
<p>Ein thermisches Neutron (geringe Geschwindigkeit) und ein U235-Kern treffen aufeinander.</p> <p>M Materie</p>	<p>Ein instabilisierter Uran236-Kern ist entstanden. Der Zerfall erfolgt nach sehr kurzer Zeit (1 billionstel Sekunde).</p>	<p>Der U236-Kern zerfällt z.B. in die beiden Spaltprodukte Krypton94 und Barium139. Die Spaltprodukte stoßen sich wegen ihrer gleichen Ladung ab und fliegen mit hoher Geschwindigkeit auseinander. Dabei geben sie ihre Energie an die umgebende Materie ab.</p>	<p>Bei jeder Kernspaltung werden je nach Art des Spaltprodukts 2–3 schnelle Neutronen frei, die abgebremst weitere Kernspaltungen auslösen können: Kettenreaktion.</p>	

Kernfusion

Nicht nur bei der Spaltung schwerer Kerne wird Energie freigesetzt. Auch wenn zwei leichte Kerne zu einem größeren Kern verschmelzen, kann bei der Reaktion Energie abgegeben werden. Dieser Prozess der **Kernfusion** findet in unserer Sonne und jedem anderen Stern statt.

Das Alter der Sonne wird auf ca. 4,5 Milliarden Jahre geschätzt; sie wird zukünftig noch einmal den selben Zeitraum diese große Energiemenge abstrahlen, von der weniger als der zwei milliardste Teil auf die Erde trifft. Die Annahme, dass die Sonne diese Energie mittels chemischer Reaktionen freisetzen würde, wie z. B. mit der Verbrennung von Kohlenstoff, führt auf eine Lebensdauer von ca. 150 Jahren. Also müsste sie längst schon ihren Brennstoffvorrat aufgebraucht haben und erloschen sein. Auch die Kernspaltung liefert keine Erklärung, da die Sonne vor allem aus Wasserstoff und Helium besteht, also aus Elementen mit sehr kleinen Massenzahlen. Elemente mit hohen Massenzahlen wie Uran oder Plutonium sind in der Sonne nicht zu finden.



Werden Atomkerne **leichter** Elemente nahe zusammengebracht, so können sie miteinander verschmelzen. In der Sonne verschmelzen beispielsweise Wasserstoffisotope (Deuterium und Tri-

tium) zu Helium. Dabei wird ein sehr großer Energiebetrag frei: Bei der Bildung von 1 kg Helium wird etwa die Energie frei, die bei der Verbrennung von 15 Millionen kg Steinkohle entsteht.

Wenn sich zwei leichte Atomkerne sehr nahe kommen, können sie unter Energiefreisetzung fusionieren. Neben dem Fusionsprodukt entsteht mindestens ein Neutron.

Aufgaben

- Erläutere die Begriffe „Kernspaltung“ und „kontrollierte Kettenreaktion“.
- Erkläre, warum die Bindungsenergie pro Nukleon für mittelschwere Kerne am größten ist.
- Erläutere an einem selbstgewählten Beispiel, warum sowohl eine Kernspaltung als auch eine Kernfusion zu einer Freisetzung von Energie führen kann.

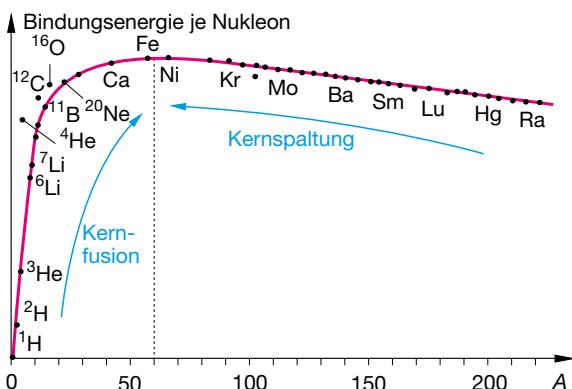
Kernbindungsenergie

Welche Kerne sind leicht und setzen durch die Fusion zu einem schwereren Kern Energie frei und welche sind so schwer, dass sie bei der Spaltung in zwei leichtere Kerne Energie abgeben?

Einen Hinweis liefert die *Kernkraft*, die Protonen und Neutronen im Kern zusammenhält, obwohl sich die Protonen aufgrund der elektrischen Kraft gegenseitig abstoßen. Die Kernkraft ist „stärker“ als die elektrische Kraft, besitzt aber im Gegensatz zu dieser nur eine begrenzte Reichweite von ca. 10^{-15} m. Daher wirkt sie nur zwischen benachbarten Nukleonen, während die elektrische Kraft zwischen allen Protonen wirkt. Das Wechselspiel beider Kräfte führt dazu, dass der Zusammenhalt eines Kerns sowohl von seiner Größe als auch von seiner Zusammensetzung abhängt. Zur Charakterisierung der Stärke dieses Zusammenhaltes dient die **Kernbindungsenergie**. Sie gibt an, welche Energie frei wird, wenn der Kern durch Zusammenfügen seiner einzelnen Nukleonen entsteht. Häufig wird die Kernbindungsenergie durch die Anzahl der Nukleonen dividiert, was die **Kernbindungsenergie pro Nukleon** ergibt.

Mittlerweile ist es gelungen, die Kernbindungsenergie pro Nukleon für viele Kerne im Experiment präzise zu bestimmen. Das Diagramm unten zeigt, dass sie ein Maximum für Kerne mittlerer Größe besitzt. Daher wird sowohl bei der Spaltung schwerer Kerne als auch bei der Fusion leichter Kerne Energie freigesetzt. Auch radioaktive Zerfälle laufen immer so ab, dass die Endprodukte näher am Maximum liegen

Bis Eisen wird Energie freigesetzt, wenn zwei leichte Kerne verschmelzen (Kernfusion).
Bei schwereren Kernen wird die Energie durch Spaltung freigesetzt (Kernspaltung).



Der Reaktorkern

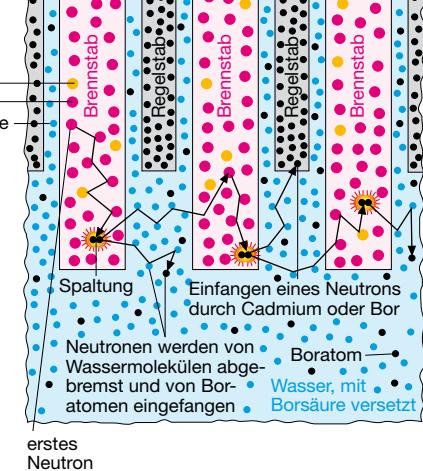
Der Reaktorkern ist der Teil des Kernreaktors, der den „Kernbrennstoff“ enthält und in dem die **kontrollierte Kettenreaktion** abläuft. Er besteht aus ca. 300 Brennelementen, die etwa 100 t Uran enthalten.

Damit eine kontrollierte Kettenreaktion ablaufen kann, muss genau eines der zwei bis drei bei einer Spaltung freigesetzten Neutronen eine erneute Spaltung auslösen. Allerdings sind die entstehenden Neutronen zu schnell, um eine Spaltung zu bewirken. Sie müssen abgebremst werden. Die Materialien, die diese Aufgabe übernehmen, heißen **Moderatoren**. Meist wird Wasser als Moderator verwendet, weil es billig ist und die Energie der Neutronen aufnehmen kann. Zudem kann mit dem Wasser die bei der Spaltung entstehende Energie gut abtransportiert werden.

Wird Wasser als Moderator verwendet, so ist diesem Bor in Form von Borsäure zugesetzt. Bor fängt bevorzugt Neutronen ein, ohne dass irgendwelche Reaktionen ablaufen. Als weitere Neutronenfänger wirken **Regelstäbe** aus Bor oder Cadmium. Diese können mehr oder weniger tief in den Reaktorkern eingeschoben werden und mehr oder

weniger Neutronen einfangen. So mit wird sichergestellt, dass im Mittel nur eines der zwei bis drei bei einer Spaltung freigesetzten Neutronen eine weitere Spaltung auslöst. Ein lawinenartiges Ansteigen der Kernspaltungen (*unkontrollierte Kettenreaktion*) wie bei einer Atom bombe ist dadurch unmöglich.

Damit es überhaupt zu einer Kettenreaktion kommt, muss genügend spaltbares Material dicht beieinander sein. Natürliches Uran enthält zu ca. 0,7% das spaltbare Isotop U235. Die restlichen 99,3% bestehen aus Uran238. Wenn schnelle Neutronen auf dieses treffen, so werden sie einfach absorbiert, ohne dass es zu einer Spaltung kommt. In einem solchen Gemisch kann sich eine Kettenreaktion aus sich selbst heraus nicht erhalten. Daher muss natürliches Uran mit U235 **angereichert** werden, d. h. der Anteil wird von 0,7% auf 3% erhöht, so



dass reaktorfähiges Uran üblicherweise aus 97% U238 und 3% U235 besteht. Das Uran liegt danach als Urandioxid-Pulver vor, das auch als Yellow Cake bezeichnet wird. Es wird zu kleinen zylindrischen Tablettten (Pellets) gepresst. Diese werden in ein 4 m langes Rohr aus einer Zirkonlegierung gefüllt. Diese Zirkonlegierung lässt die Neutronen ungehindert passieren. Ca. 300 dieser so entstandenen **Brennstäbe** werden zu einem **Brennelement** zusammenggebaut.

Das Zusammenspiel von Moderator (Wasser) und Regelstäben ermöglicht im Reaktorkern eine kontrollierte Kettenreaktion.

Aufgaben

- Erkläre die Funktionsweise und die Notwendigkeit eines Moderators im Kernreaktor.
- Begründe, warum Uran in seiner natürlichen Isotopenzusammensetzung nicht als Kernbrennstoff geeignet ist.
- Erläutere die Funktion der Regelstäbe.

Brennstab: Der Kernbrennstoff Urandioxid wird zu kleinen zylindrischen Tablettten (Pellets) gepresst. Sie werden in ein Rohr aus einer Zirkon-Legierung eingebracht. Diese Legierung lässt Neutronen, die zur Auslösung der Kernspaltung benötigt werden, weitgehend ungehindert passieren.

Brennstab (4 m lang)

Brennelement: Die einzelnen Brennstäbe werden luft- und wasserdicht verschweißt. Das spaltbare Material und die Spaltprodukte sind dadurch sicher eingeschlossen. Verbleibende Hohlräume in den Brennstäben sind mit Helium gefüllt. Das Brennelement eines Reaktors wird aus bis zu 300 Brennstäben zusammengesetzt. Die Brennstäbe werden in einer besonderen Halterung von Federn fixiert.



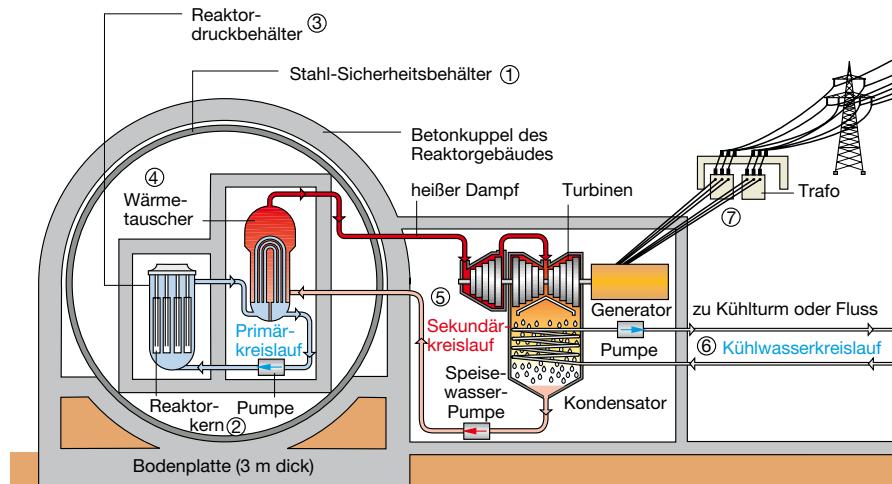
Urandioxid
(Yellow Cake)

Pellet
(Original-
größe)



Energiewandlung im Reaktor

Ein Kernkraftwerk ist wie ein Kohlekraftwerk ein Wärmekraftwerk. Das Wasser zwischen den Brennstäben nimmt die Bewegungsenergie der bei den Kernspaltungen freigesetzten Neutronen und der Spaltprodukte auf und erhitzt sich dadurch extrem. Mithilfe eines Wärmetauschers wird Wasser verdampft und dieser Wasserdampf treibt eine riesige Turbine und diese schließlich einen Generator an. Die Kernenergie wird somit in elektrische Energie gewandelt.



① Innerhalb der kuppelförmigen Stahlbetonhülle des Reaktorgebäudes, das auf einer erdbebensicheren Bodenplatte steht, befindet sich ein kugelförmiger **Stahl-Sicherheitsbehälter**, der den nuklearen Teil des Kernkraftwerkes umschließt. Er ist so ausgelegt, dass er den bei einem Störfall aus dem Reaktorkühlkreislauf austretenden Dampf aufnehmen kann. Der Behälter ist bei einem 1300 MW-Kraftwerk eine stählerne Kugel mit mehr als 50 m Durchmesser. Zwischen Sicherheitsbehälter und Betonkuppel herrscht Unterdruck. Dadurch wird ein etwaiges Entweichen radioaktiver Stoffe in die Umwelt verhindert.

② Der **Reaktorkern** besteht aus ca. 300 Brennelementen. Sie füllen einen Raum, der etwa so groß ist wie ein Würfel mit 4 m Kantenlänge. Die Brennelemente enthalten insgesamt etwa 100 t Uran. In ihnen läuft die Kernspaltung ab.

③ Der gesamte Reaktordruckbehälter ist mit normalem, gereinigtem Wasser gefüllt. Es wird von unten durch den Reaktorkern gepumpt und umspült die bis zu 800 °C heißen Brennelemente. Sie geben Energie an das Wasser ab, wodurch sie gekühlt werden. Das Wasser selbst wird etwa 350 °C heiß. Es steht unter hohem Druck, damit es bei dieser hohen Temperatur nicht siedet. Deshalb heißen solche Reaktoren **Druckwasserreaktoren**. Der Reaktordruckbehälter hat die Funktion des Heizkessels bei einem konventionellen Wärmekraftwerk. Er ist zudem eine Barriere, die verhindert, dass radioaktive Strahlung nach außen dringt. Der aus Spezialstahl gefertigte Behälter ist bis zu 12 m hoch und hat einen Durchmesser bis zu 5 m.

④ Das Wasser des **Primärkreislaufs** enthält radioaktive Stoffe. Damit diese nicht austreten können, wird die von ihm im Reaktorkern aufgenommene Energie in einem **Wärmetauscher** an das Wasser

⑤ Das Wasser des **Sekundärkreislaufs** verdampft. Der Dampf wird zur Turbine geleitet und treibt diese an. Über eine gemeinsame Welle wird die Drehung der Turbine auf den Generator übertragen. Nach dem Austritt aus der Turbine strömt der Dampf in den Kondensator. Dort wird er verflüssigt und wieder in den Wärmetauscher zurückgepumpt.

⑥ Die beim Verflüssigen freiwerdende Energie wird über einen dritten Wasser-kreislauf, den **Kühlkreislauf**, einem Fluss oder Kühlurm zugeführt und geht so als entwertete Energie in die Umwelt.

⑦ Wie bei jedem anderen Kraftwerk wird die vom Generator erzeugte Spannung hochtransformiert, um die Energieentwertung längs der Übertragungsleitungen zu verringern.

Energieflussdiagramm eines Kernkraftwerks



Der Wirkungsgrad eines Kernkraftwerks beträgt ca. 40 %.

Im Reaktor eines Kernkraftwerks läuft eine kontrollierte Kettenreaktion ab. Die Energieabgabe des Reaktors wird durch Absorption von Neutronen gesteuert.

Ein Kernkraftwerk ist ein Wärmekraftwerk. Der Reaktordruckbehälter hat die Funktion des Heizkessels eines Wärmekraftwerks.

Brennstoffkreislauf

Der Ausgangspunkt der Kernenergienutzung ist die Versorgung mit Uran. Der Urangehalt der abgebauten Erze beträgt typischerweise 0,2 %. In einem Aufbereitungsverfahren wird das Uran aus dem Erz gelöst. Es liegt dann als Uranoxid (UO_2) vor mit der natürlichen Isotopenzusammensetzung von 0,7 % U235 und 99,3 % U238. Zum Betrieb eines Kernkraftwerks wird jedoch Uran mit einem Anteil von rund 3 % des spaltbaren Isotops U235 benötigt. Daher muss das Natururan mit dem Isotop U235 „angereichert“ werden.

In der Brennelementfabrik werden dann aus UO_2 -Pulver Tabletten gepresst, die in Hüllrohre gefüllt und gasdicht verschlossen werden. Dadurch entstehen einzelne Brennstäbe, die zu den Brennelementen zusammengesetzt werden.

Während der Einsatzzeit (3–4 Jahre) der Brennelemente im Reaktor sinkt durch die Vielzahl der Kernspaltungen der Anteil des spaltbaren U235. Es entstehen zum Teil radioactive

Spaltprodukte sowie größere Mengen des neuen Kernbrennstoffs Plutonium. Die ausgedienten Brennelemente, die noch etwa $\frac{1}{3}$ des ursprünglich vorhandenen Uran235 enthalten, müssen ausgetauscht werden. Während der jährlichen Überprüfung der Kernkraftwerke erfolgt auch der Brennelementwechsel. Die ausgewechselten Brennelemente werden zunächst in das *Abklingbecken* befördert, wo sie mindestens ein Jahr lang verbleiben. Während dieser Zeit geht die Strahlungsintensität und die Wärmeentwicklung erheblich zurück. Anschließend sind zwei Arten der Entsorgung möglich:

- **Wiederaufarbeitung** mit Rückgewinnung und Wiederverwendung der nutzbaren Anteile Plutonium und Uran;
- **direkte Endlagerung**, bei der die ausgedienten Brennelemente als Abfälle deponiert werden.

Der Transport zu einer Wiederaufarbeitungsanlage oder zur Endlagerung erfolgt in speziellen Behältern.

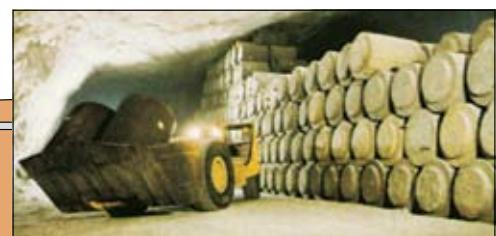
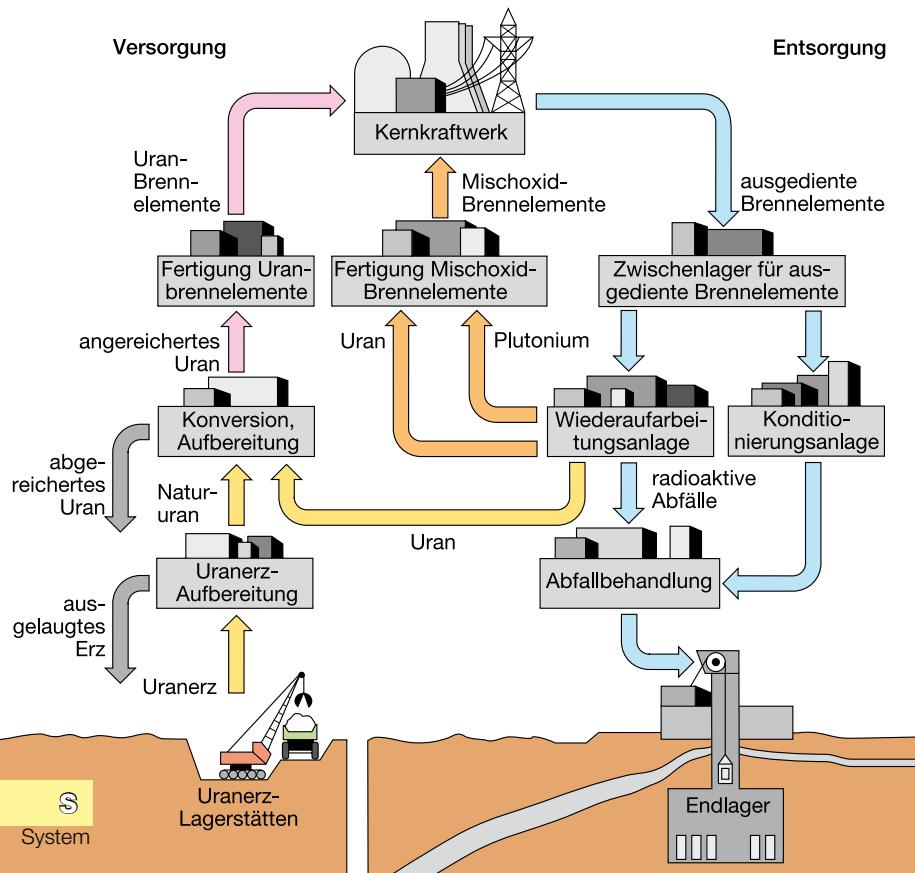
Wiederaufarbeitung

Die verbrauchten Brennelemente enthalten noch fast das gesamte ursprüngliche Uran238, ungefähr ein Drittel des Uran235 sowie das durch Neutroneneinfang aus U238 entstandene Plutonium239. Bei der Wiederaufarbeitung wird das Uran wiedergewonnen und zur Herstellung neuer Brennelemente verwendet. Das neu entstandene Plutonium239 kann anstelle von Uran235 in Brennelementen verwendet werden – oder aber für die Produktion von Atombomben! Daher ist die Wiederaufarbeitung politisch umstritten, denn die Risiken der heimlichen Produktion und unerlaubten Verbreitung von Plutonium239 für den Bau von Kernwaffen sind groß. Europäische Wiederaufarbeitungsanlagen stehen in La Hague (Frankreich) und in Windscale/Sellafield (Großbritannien). Dort lässt auch Deutschland, das keine eigene Anlage besitzt, seine Abfälle aufarbeiten.

Im gesamten Brennstoffkreislauf, insbesondere beim Betrieb von Kernkraftwerken und bei der Wiederaufarbeitung entstehen feste, flüssige oder gasförmige radioaktive Abfälle. Bei der Vorbereitung für die Wiederaufarbeitung oder Endlagerung wird nach schwach-, mittel- und hochaktiven Abfällen unterschieden.

Die radioaktiven Abfälle aus Kernkraftwerken werden je nach Art und Beschaffenheit besonders aufgearbeitet. Im Hinblick auf die Endlagerung wird zwischen zwei Abfallarten unterschieden:

- radioaktive Abfälle, die viel Wärmeenergie abgeben;
- radioaktive Abfälle, deren Wärmeabgabe zu vernachlässigen ist.



Reaktorsicherheit

Alle Sicherheitsvorkehrungen dienen dem obersten Ziel, die Bevölkerung und das Kraftwerkspersonal vor α -, β -, γ - und Neutronen-Strahlung zu schützen. Dazu wurde ein Konzept erarbeitet, um jederzeit einen ordnungsgemäßen Betrieb des Reaktors sicherzustellen. Zum Konzept gehören die Möglichkeiten:

- den Reaktor jederzeit abschalten und ihn im abgeschalteten Zustand halten zu können;
- durch die Kernspaltungen freigesetzte Energie während des Betriebs und im abgeschalteten Zustand („Nachwärme“) jederzeit abführen zu können;
- die radioaktiven Stoffe im Kern in jedem Betriebszustand des Reaktors sicher eingeschlossen zu halten. Der Einschluss soll durch mehrere hintereinander angeordnete Barrieren, die sich zwischen den radioaktiven Stoffen und der Umgebung befinden, sichergestellt werden.

Ein Kernreaktor kann nicht wie eine Atombombe explodieren. Dies ist aufgrund der geringen Menge spaltbaren Materials nicht möglich. Im Notfall fallen die Regelstäbe durch ihr Eigengewicht automatisch zwi-

schen die Brennstäbe und stoppen die Kettenreaktion.

Ein Bruch der Hauptkühlmittelleitung mit massivem Kühlmittelverlust ist für einen Druckwasserreaktor der **Größte Anzunehmende Unfall („GAU“)**, der aber bei der Konstruktion des Kraftwerks berücksichtigt und im Betrieb beherrscht werden muss. Wird nämlich die erzeugte innere Energie nicht mehr vom Kühlsystem abgeführt, kann es zur Überhitzung des Kernbrennstoffes kommen. Der Brennstoff und die Inneneinrichtungen des Reaktors würden schließlich schmelzen. Es muss verhindert werden, dass der Reaktorbehälter zerstört wird und radioaktives Material in die Umwelt gelangen kann.

In den Kernkraftwerken sind daher Kontroll- und Steuereinrichtungen in mehrfacher Ausführung und technisch verschieden vorhanden. Sie sind räumlich voneinander getrennt untergebracht und verfügen über eigene Notstromversorgungen. Damit existiert bei Ausfall eines Systems mindestens ein funktionsfähiges zweites System. Insbesondere gibt es 3 bis 4 Notkühlssysteme,

durch die Kühlmittel in den Reaktordruckbehälter gepumpt werden kann.

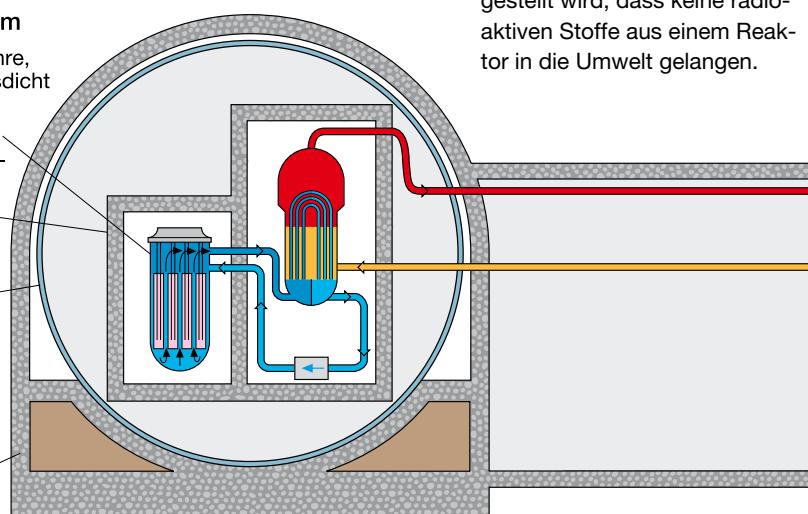
Die Sicherheitsbarrieren müssen auch dann funktionieren, wenn Einwirkungen von außen eintreten wie Brände, Erdbeben oder Flugzeugabstürze. Mögliche Vorkommnisse dieser Art werden bei Konstruktion und Bau von Kernkraftwerken berücksichtigt.

Aufgaben

- 1** **a)** Erläutere, wie ein Reaktor schnell abgeschaltet werden kann.
b) Begründe, weshalb nach dem Abschalten auf keinen Fall die Pumpe des Primärkreislaufs abgeschaltet werden darf.
- 2** Ein Notkühlssystem pumpt im Notfall borhaltiges Wasser in den Reaktordruckbehälter. Erläutere den Zweck des Bor-Zusatzes.
- 3** **a)** Begründe, weshalb der Kernbrennstoff in den metallenen Hüllrohren **gasdicht eingeschweißt** sein muss.
b) Erkläre die runde Form des Reaktorgebäudes.
c) Erläutere, wodurch sicher gestellt wird, dass keine radioaktiven Stoffe aus einem Reaktor in die Umwelt gelangen.

Das 5 Barrieren-Sicherheitssystem

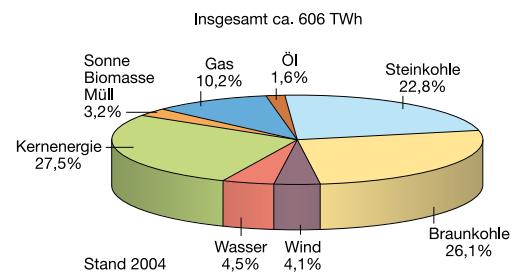
- 1. Barriere:** Metallene Hüllohre, in die der Kernbrennstoff gasdicht eingeschweißt ist
- 2. Barriere:** Die bis zu 25 cm dicke Stahlhülle des Reaktordruckbehälters
- 3. Barriere:** Eine meterdicke Stahlbetonwand schirmt γ - und Neutronenstrahlung ab
- 4. Barriere:** Kugelförmiger Sicherheitsbehälter aus 3 cm dicken Stahlplatten. Er kann das gesamte Kühl mittel aufnehmen, selbst wenn es vollständig verdampft.
- 5. Barriere:** Eine bis zu 2 m dicke Stahlbetonhülle schirmt äußere Einflüsse ab.



Kraftwerke im Vergleich

Die Erzeugung von elektrischer Energie in Kernkraftwerken gibt immer wieder Anlass für heftige Diskussionen. Dabei werden von Befürwortern und Gegnern der Kernenergie kontroverse Argumente im Hinblick auf die Notwendigkeit, den Nutzen, das Risiko und die möglichen Alternativen ausgetauscht. Je nach Interessenlage werden dabei ganz verschiedene Daten und Fakten vorgetragen.

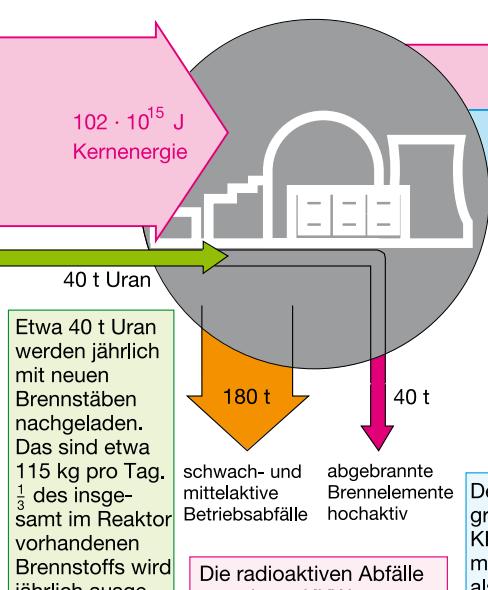
Kernkraftwerke wie Philipsburg 2 (in Betrieb seit 1984) oder Brokdorf (in Betrieb seit 1986) haben eine elektrische Leistung von etwa 1400 MW. Sie erzeugen im Mittel ca. 6500 Stunden im Jahr elektrische Energie. An der Erzeugung elektrischer Energie sind sie in Deutschland mit etwa 30 % beteiligt.



Die Leistung eines Kraftwerkblocks beträgt bei Kohlekraftwerken ca. 500 MW (Steinkohle) bzw. 800 MW (Braunkohle). Mehrere Blöcke an einem Standort werden zu einem Kraftwerk mit einer Gesamtleistung von einigen Tausend MW zusammengekoppelt. Ihre mittlere jährliche Betriebsdauer beträgt knapp 4500 h bei Steinkohlekraftwerken und ca. 7000 h bei Braunkohlekraftwerken. Zusammen liefern die Kohlekraftwerke ca. 60 % der in Deutschland erzeugten elektrischen Energie.

Kernkraftwerk

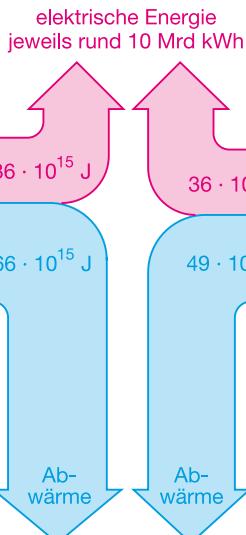
1 Reaktor mit 1400 MW
7000 h in Betrieb



Kernkraftwerk

1 Reaktor mit 1400 MW

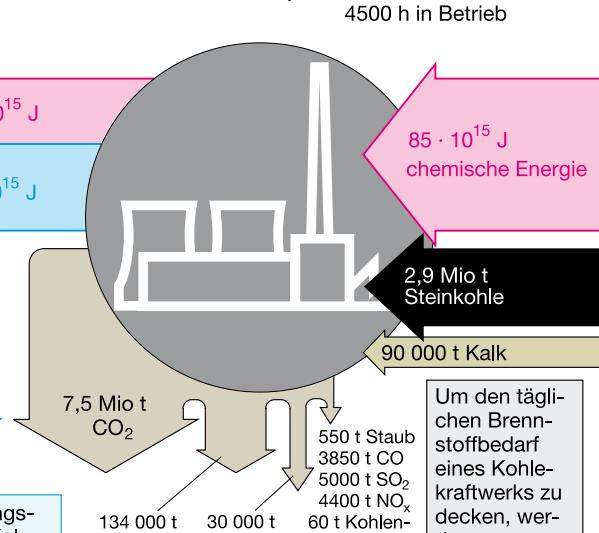
7000 h in Betrieb



Steinkohlekraftwerk

4 Blöcke mit je 550 MW = 2200 MW

4500 h in Betrieb



Zur Kernspaltung wird keine Luft benötigt. Daher erfolgt durch Kernkraftwerke keine CO₂-Emission in die Atmosphäre. Sie leisten deshalb einen erheblichen Beitrag zur Verminderung des CO₂-Ausstoßes bei der Erzeugung elektrischer Energie.

Kernkraftwerke geben aber – im Rahmen der gesetzlichen vorgeschriebenen Grenzwerte – gasförmige radioaktive Stoffe wie z. B. I₁₁₃, Kr₈₅, Sr₉₀ oder H₃ mit der Abluft an die Umwelt ab.

Der Wirkungsgrad von Kohlekraftwerken liegt maximal bei 45 %. Mindestens 55 % der in der Kohle steckenden Energie werden nicht in elektrische Energie umgewandelt, sondern gehen als Abwärme in die Luft oder mit dem Kühlwasser in Flüsse, wenn sie nicht für „Fernwärme“ verwendet werden.

Hauptabfallprodukt eines Kohlekraftwerkes ist Kohlenstoffdioxid (CO₂). Die Kraftwerke, in denen fossile Brennstoffe verbrannt werden, belasten mit den riesigen Mengen CO₂ die Umwelt extrem und tragen durch ihre Emissionen stark zum Treibhauseffekt bei. Die Abgase enthalten außerdem Schwefeldioxid (SO₂) und Stickoxide (NO_x), die zu Smog und saurem Regen führen, und weiterhin Staub, giftiges Kohlenstoffmonoxid (CO) und Krebs erregende Kohlenwasserstoffe. Außerdem etwa so viele radioaktive Nuklide (z. B. Ra₂₂₆ oder Rn₂₂₂), wie mit der Abluft aus einem KKW freigesetzt werden. Entstaubungs-, Entschwefelungs- und Entstickungsanlagen haben in den letzten Jahren eine erhebliche Verminderung des Schadstoffausstoßes bewirkt.

Risiken und Umweltbelastungen

Wenn die Umweltbelastungen von Kraftwerken miteinander verglichen werden, darf nicht nur der Prozess der Energieerzeugung in den Kraftwerken selbst betrachtet werden. Ein ganz wichtiger Punkt bei der Diskussion ist, dass die Vorräte an fossilen Energieträgern nicht beliebig lange reichen, wenn so weitergewirtschaftet wird wie bisher oder wenn sich der „Energiehunger“ der Menschheit sogar erhöht. Außerdem müssen auch die Maßnahmen vor, während und nach dem Betrieb berücksichtigt werden.

Abbau der Brennstoffe

KKW: Beim Abbau von Uranerz werden große Bodenflächen zerstört, weil das geförderte Gestein nur ca. 0,2–0,5% Uran enthält. Auch die Gewinnung des Erzes aus dem Gestein, die Urananreicherung und die Brennelementherstellung belasten die Umwelt.

Kohle: Bei der Kohlegewinnung in Tagebau-Revieren werden Landschaften zerstört und der Grundwasserspiegel abgesenkt. Die Bewohner müssen umgesiedelt werden; große Flächen bleiben trotz Renaturierung auf Jahrzehnte unbewohnbar.

Gefährdung der Mitarbeiter

KKW: In den Uranminen atmen die Arbeiter das aus dem Uranerz austretende Gas Radon-222 ein.

Kohle: Der eingeatmete Kohlenstaub und z.B. mögliche Schlagwetterexplosionen gefährden die Gesundheit und das Leben der Bergarbeiter.

KKW: Die Beschäftigten in Kernkraftwerken und Wiederaufarbeitungsanlagen sind auch bei Normalbetrieb einer geringen zusätzlichen Strahlendosis ausgesetzt. Sie kann bei Störfällen gefährlich groß werden und Strahlenschäden hervorrufen.

Entsorgung der Abfälle

Kohle: Die Entsorgung der Abfälle (Schlacke, Flugasche und Gips) aus Kohlekraftwerken ist unproblematisch. Hauptproblem ist die Entstehung und Emission des Treibhausgases CO₂, das zur globalen Erwärmung der Erde beiträgt.

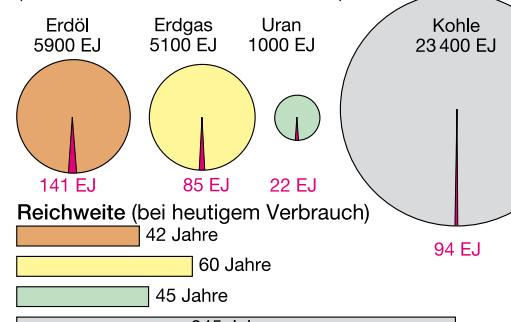
KKW: Die radioaktiven Abfälle aus Kernkraftwerken und Wiederaufarbeitungsanlagen sind wegen ihrer schädigenden Wirkung ein Risiko. Sowohl die Transporte zur Wiederaufarbeitung, Zwischenlagerung etc. als auch die Lagerung selbst sind nicht unproblematisch. Für die Endlagerung gibt es bisher nur Pläne, aber keine endgültige Lösung. Das gilt auch für Verfahren zur Stilllegung von Kernkraftwerken. Sie sind zur Zeit noch kaum erprobt.

Gefährdung der Bevölkerung

KKW: Eine Gefährdung der Gesundheit lässt sich nicht hundertprozentig ausschließen, denn menschliches Versagen kann trotz aller Sicherheitsvorkehrungen zu außergewöhnlichen, gefährlichen Situationen führen.

Schadstoffe aus Kernkraftwerken tragen zu einer Belastung oder gar Veränderung der natürlichen Umwelt des Menschen bei. Trotz modernster Erkenntnisse und Untersuchungen ist nicht sicher, wie Menschen, Tiere und Pflanzen auf diese zusätzlichen Belastungen langfristig reagieren werden. Insbesondere ist umstritten, ob und in welchem Umfang sehr niedrige Strahlendosen schädlich sind. Es ist nicht auszuschließen, dass bei einzelnen Menschen zusätzlich zur natürlichen Strahlung aufgenommene Dosen Langzeitschädigungen zur Folge haben. Sie werden eventuell durch andere Umweltschadstoffe noch verstärkt.

Vorräte und Jahresbedarf weltweit (erschlossen und sicher abbaubar)



Fazit

Jede Art der Erzeugung elektrischer Energie in Wärmekraftwerken beeinträchtigt die Umwelt. Wärmekraftwerke stellen durch die unvermeidliche Emission von CO₂ und radioaktiven Stoffen ein Risiko für die Gesundheit der Menschen dar. Elektrische Energie hat eben ihren Preis. Wie hoch er genau ist, ist derzeit nur sehr schwer oder gar nicht abzuschätzen. Letztlich ist zu entscheiden, ob die Gesellschaft das verbleibende Risiko akzeptieren will.

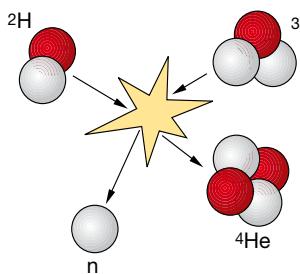
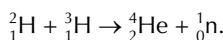
Eine absolut sichere Energieerzeugung in der Größenordnung, in der sie in Deutschland tagtäglich benötigt wird, gibt es zurzeit nicht. Das zeigen Störfälle und Unfälle in kerntechnischen Anlagen, in Kohlekraftwerken und Bergwerken. Dennoch liegt die Gefährdung der Bevölkerung durch Kraftwerke im Normalbetrieb, also ohne außergewöhnliche Unfälle, die bislang bei uns glücklicherweise noch nicht aufgetreten sind, sicher im unteren Bereich auf einer Skala von Risiken, denen Menschen durch Naturkatastrophen, Feuer, Dammbrüche, Chemieunfälle oder im Verkehr und im Beruf ausgesetzt sind.

Die großtechnische Erzeugung von elektrischer Energie hat ein hohes Risiko bezüglich der unvermeidlichen Folgen und Gefahren für Mensch und Umwelt.

Kernfusion und Fusionskraftwerk

Neben der Spaltung schwerer Kerne liefert auch die **Fusion (Verschmelzung)** leichter Kerne die Möglichkeit, Energie bereitzustellen und diese großtechnisch in elektrische Energie zu wandeln. Bei Fusionsreaktionen wird ca. eine Million Mal mehr Energie frei als bei chemischen Reaktionen wie etwa der Verbrennung von fossilen Energieträgern wie Kohle oder Öl. Daher könnte die Nutzung der Kernfusion mittel- und langfristig die Energieversorgung sichern, ohne dabei das klimaschädliche Gas Kohlenstoffdioxid zu produzieren.

Die aus verschiedenen Gründen in Frage kommende Fusionsreaktion ist folgende:

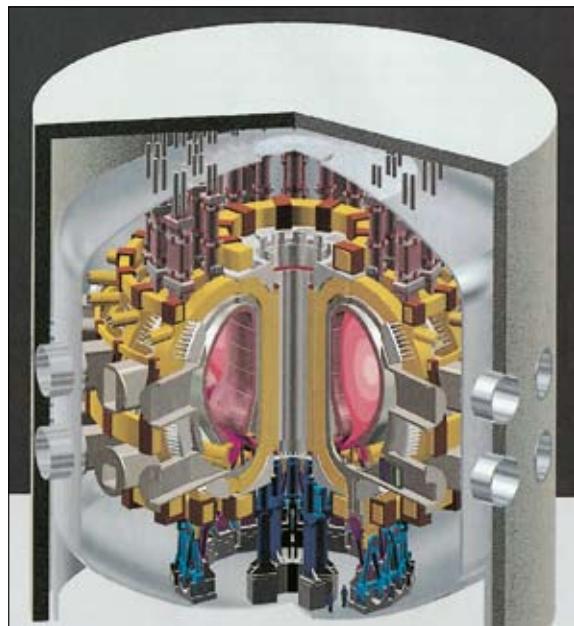


Hierbei verschmelzen die schweren Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium zu Helium, wobei zusätzlich ein Neutron abgegeben wird. Dies ist im Prinzip die Reaktion, die seit etwa 4 Milliarden Jahren in der Sonne abläuft und diese auch noch ungefähr die nächsten 4 Milliarden Jahre scheinen lässt. Daher wird versucht, dieses „Sonnenfeuer“ auf die Erde zu holen. Die Verschmelzung der Kerne soll kontrolliert in Fusionsreaktoren ablaufen.

Damit die Kernfusion in einem Reaktor kontrolliert ablaufen kann, müssen mehrere Bedingungen erfüllt sein:

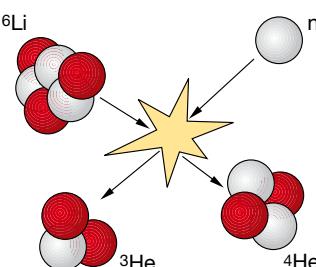
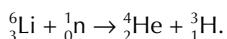
- Atomkerne besitzen eine positive Ladung und stoßen sich daher gegenseitig ab. Damit die Kernkraft aber wirksam wird und sie verschmelzen, müssen sie sich extrem nahe kommen. Dies bedeutet, dass ihre Geschwindigkeiten genügend groß sein müssen. Große Geschwindigkeiten entsprechen einer hohen Temperatur. In diesem Fall muss die Temperatur etwa 100 000 000 °C betragen.
- Die Elektronen sind bei solch extrem hohen Temperaturen nicht mehr an die Kerne gebunden, sondern es existiert ein Gemisch aus Elektronen und völlig ionisierten Atomen, also Kernen. Ein solches Gemisch wird als **Plasma** bezeichnet. Physiker nennen diesen Zustand auch den *vierten (Aggregat-)Zustand der Materie*.

Damit die Annäherung zweier Kerne auch genügend häufig passiert, muss dass Plasma genügend dicht sein und entsprechend stark komprimiert werden.



Wenn diese beiden Bedingungen erfüllt sind, und eine genügend große Anzahl an Fusionsreaktionen stattfindet, wird die Bewegungsenergie der Heliumkerne hauptsächlich dazu genutzt, um das Plasma zu heizen. Die Neutronen, die den größten Teil der freiwerdenden Kernbindungsenergie mitbekommen, werden außerhalb des Plasmas abgebremst und heizen dabei ein spezielles Material auf. Durch ein Kühlmedium wird die Energie dann weitertransportiert und wie bei einem Wärme-kraftwerk benutzt, mittels Dampferzeugung, Turbinen und Generatoren elektrische Energie bereitzustellen.

Die Grundstoffe der Kernfusion sind Deuterium und Tritium. Während Deuterium im Wasser nahezu unbegrenzt vorhanden ist, ist Tritium in der Natur sehr selten. Allerdings kann es durch Beschuss von Lithium mit Neutronen direkt im Reaktor gewonnen werden:



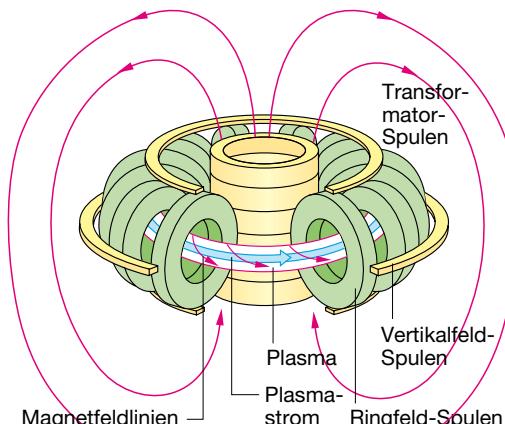
Der Vorteil der Fusion wird ganz deutlich, wenn die Menge der nötigen Rohstoffe zur Deckung des Jahresverbrauchs einer Familie an elektrischer Energie verglichen wird: 1 000 Liter Öl stehen dabei 75 mg Deuterium und 225 mg Lithium gegenüber, welche in 2 Litern Wasser bzw. 250 g Gestein zu finden sind.

Probleme und Vorteile der Fusion

Die technische Umsetzung der kontrollierten Kernfusion in Reaktoren bereitet noch große Probleme. Um diese zu lösen wird seit 2007 in einem weltweiten Projekt ein großer Forschungsreaktor namens **ITER** in Cadarache (Südfrankreich) gebaut. An diesem Forschungsreaktor entwickeln alle Industriekonzerne der Welt mit, denn seine Baukosten sind mit 4 Milliarden Euro sehr groß. Die Betriebskosten werden auf ca. 265 Mio € jährlich geschätzt. Das Bild auf der linken Seite zeigt ein Modell des ITER. Zu beachten sind die Dimensionen der Anlage im Vergleich zu den Menschen unten rechts.

Ein großes Problem ist das heiße Plasma. Es gibt kein Gefäß, das diese Temperaturen aushält, und daher muss das Plasma von den Behälterwänden ferngehalten werden. Dies geschieht mithilfe von Magnetfeldern, in denen die sich bewegenden geladenen Teilchen (Elektronen und Kerne) Kräfte erfahren. Beim ITER wird dazu das Plasmagefäß ringförmig gestaltet. Um diesen Ring befinden sich Spulen, die das Magnetfeld erzeugen.

Das Plasma darf nicht an die Gefäßwände kommen, da es dadurch abkühlt und verunreinigt würde. Die Fusionsreaktionen kämen sofort zum Erliegen.

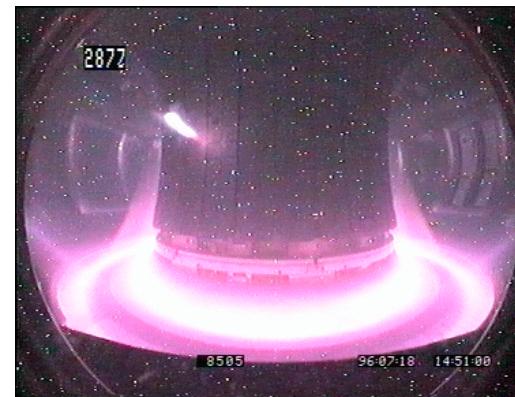


Da dies nicht vollständig verhindert werden kann, werden die Gefäßwände mit verschiedenen Materialien beschichtet. Zudem werden Werkstoffe gesucht, die durch den hohen Neutronenstrom nicht so stark aktiviert, d.h. radioaktiv werden.

In den Bildern rechts ist die größte deutsche Fusionsanlage zu sehen. Sie steht in Garching bei München. Das obere Bild zeigt, wie Wartungsarbeiten in der Plasmakammer durchgeführt werden; das zweite zeigt das Plasma in der Kammer.

Ähnlich wie bei Spaltungsreaktoren entstehen durch den Betrieb eines Fusionsreaktors radioaktive Abfälle. Allerdings ist das entstehende Helium, die „Asche“ des Fusionsprozesses, nicht radioaktiv. Der Müll entsteht durch die Reaktion der schnellen Neutronen mit den Materialien, die das Plasmagefäß umgeben. Der Vorteil im Vergleich zu Spaltungsreaktoren liegt aber in den vorkommenden Halbwertszeiten. Diese sind wesentlich kleiner, sodass die nötigen Lagerzeiten wesentlich kürzer sind.

Da es sehr schwierig ist, das sehr heiße Plasma über längere Zeit so einzusperren, dass die Fusionsreaktionen ablaufen, kann bei einem Fusionsreaktor ein GAU (Größter Anzunehmender Unfall) nicht auftreten. Selbst beim Ausfall aller Kühlssysteme ist die vorhandene Energie so gering, dass eine Zerstörung des Reaktors mit Austritt größer Mengen radioaktiven Materials unmöglich ist. Zudem sind die Mengen radioaktiven Materials im Plasma relativ klein und die aktivierte Materialien außerhalb des Plasmagefäßes sind fest und daher nicht flüchtig. Selbst bei einer vollständigen Zerstörung des Reaktors wären die Umweltbelastungen relativ gering.



Bisher sind die Probleme bei der Kernfusion noch nicht soweit gelöst, dass sie zur Bereitstellung elektrischer Energie genutzt werden kann.

Wenn dies aber in Zukunft der Fall sein sollte, wären die Energieprobleme wegen der fast unbeschränkt auf der Welt vorkommenden benötigten Rohstoffe zu einem großen Teil behoben.

Aufgaben

- 1** Erläutere in groben Zügen die Funktionsweise eines Fusionsreaktors. Gehe dabei speziell auf die technischen Probleme bei der Umsetzung ein.
- 2** Vergleiche Nutzen und Risiken eines Spaltungs- und eines Fusionsreaktors und stelle dies übersichtlich dar.

Historische Entwicklung der Atom- und Kernphysik

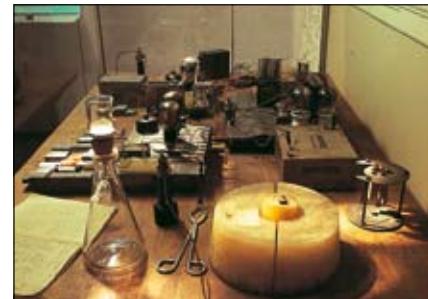
Schon in der Antike kamen die griechischen Naturphilosophen LEUKIPP und DEMOKRIT zu der Überzeugung, dass es kleinste, unteilbare Teilchen geben müsse, aus denen sich alle Stoffe zusammensetzen, die Atome. Aus dem griechischen Wort „atomos“ für unteilbar wurde der heute übliche Begriff „Atom“ abgeleitet.

Es dauerte mehr als 2000 Jahre, bis Forscher in der Lage waren, diese Thesen auch im Experiment zu untersuchen. Im 19. Jahrhundert stellte JOHN DALTON fest, dass sich chemische Elemente immer in ganz bestimmten einfachen Zahlenverhältnissen verbinden. Dies begründete er damit, dass es Stoffe gibt, die aus nur einer Atomsorte bestehen, die chemischen Elemente. Die Entdeckung des Periodensystems durch DMITRIJ IVANOVIC MENDELEEW und JULIUS LOTHAR MEYER deutete daraufhin, dass Atome aus gleichartigen Bauteilen zusammengesetzt sein mussten.

Noch bevor JOSEPH JOHN THOMSON die elektrischen Eigenschaften des Atoms herausfand, das Elektron entdeckte und sein Atommodell aufstellte, entdeckte HENRI BECQUERELL 1896 die Radioaktivität. Bereits wenige Jahre später (1902) gelang MARIE CURIE die Isolierung des Elementes Radium.

Weitere zehn Jahre später machte ERNEST RUTHERFORD seine berühmten Versuche zur Entdeckung des Atomkerns. Auf ihn geht das auch heute noch gültige Kern-Hülle-Modell für die Atome zurück. Von da an nahm die weitere Erforschung der Atome und ihrer Kerne einen rasanten Verlauf.

OTTO HAHNS Arbeitsplatz



L. MEITNER (1878–1968)
F. STRASSMANN (1902–1980)
O. HAHN (1879–1968)
Erste Kernspaltung

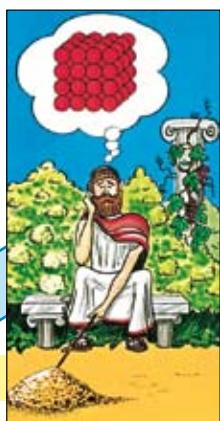
J. CHADWICK
1891–1974)
Nachweis des
Neutrons
1932

1933

NIELS BOHR (1885–1962)
Bohr'sches Atommodell:
Schalenstruktur der Atomhülle
1913



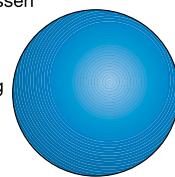
LEUKIPP (um 450)
DEMOKRIT (460–370)
Erstes Atommodell:
Alle Körper bestehen aus
winzigen, nicht weiter
teilbaren Bausteinen



Periodensystem
D. MENDELEEW (1834–1907)
J. L. MEYER (1830–1895)

1803
J. DALTON (1766–1844)
Elemente bestehen aus leichten
Atomen und verbinden sich mit
anderen Elementen immer in ein-
fachen Zahlenverhältnissen
($2 \text{H} + 1 \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$)

Dalton Atommodell:
Atome sind kugelförmig
und vollständig mit
Materie gefüllt



Kern-Hülle-Modell:
Atome bestehen aus negativ
geladener Hülle und positiv
geladenem Kern; fast die
gesamte Masse des Atoms
ist im Kern konzentriert.

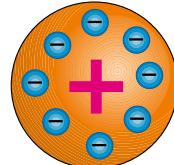
H. BECQUEREL
(1852–1908)
Entdeckung der
Radioaktivität
1896

E. RUTHERFORD
(1871–1937)
Entdeckung des
Atomkerns
Kern-Hülle-Modell
1902

M. CURIE
(1867–1934)
Isolierung des
Radiums
1903

Sir J. THOMSON
(1856–1940)
Entdeckung des
Elektrons
1903

Thomson Atommodell:
Positiver „Kuchen“ mit
negativen „Rosinen“



Die friedliche Nutzung der Kernenergie

Mit der Entwicklung von Kernkraftwerken schien das Energieproblem für alle Zeiten gelöst.

- Das Risiko von Kernkraftwerken ist technisch minimiert worden und statistisch sehr gering. Die Beinahe-Katastrophe 1979 in Harrisburg (USA) und der schreckliche Super-GAU 1986 in Tschernobyl haben aber gezeigt, dass auch diese unwahrscheinliche Situation eintreten kann und dann eine Katastrophe auslöst, die alle anderen durch Menschen verursachten Unfälle um ein Vielfaches übersteigt.

- Für die endgültige Lagerung der strahlenden Abfälle ist noch keine allgemein akzeptierte Lösung gefunden. Die Belastung der Umwelt auf Jahrtausende mit den Abfällen heutiger Energiegewinnung wird von vielen als unverantwortbar angesehen. Ist die Energiegewinnung aus Kernspaltung, die physikalisch so sinnvoll und elegant erscheint, eine technologische Sackgasse?

E. FERMI (1901–1954)
erste kontrollierte Kettenreaktion

1942

Manhattan-Projekt: 1. Atombombe gezündet in Alamogordo (USA)



1945

Atombombenabwurf auf Hiroshima und Nagasaki

Der „Wettlauf“ zur Atombombe

In Deutschland forschten WEIZSÄCKER, HEISENBERG u.a., in den USA FERMI, TELLER, OPPENHEIMER u.a. (Manhattan Projekt). Das entsetzliche Ergebnis: Am 6. 8. 1945 fiel die erste Atombombe auf Hiroshima; wenige Tage später wurde auch Nagasaki durch eine Atombombe vernichtet. Dabei fanden hunderttausend Menschen sofort den Tod; viel mehr noch starben bis heute an den Spätfolgen. Zehntausende von Zivilisten und Soldaten kostete der Umgang bei Tests von Kernwaffen in den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts die Gesundheit oder das Leben.

Anfang der Fünfziger Jahre wurde dann die Wasserstoffbombe mit einer noch viel größeren zerstörerischen Wirkung entwickelt. Das Zeitalter der atomaren Bedrohung in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts brachte das Wettrüsten, den „kalten Krieg“ und unvorstellbare Waffenarsenale. Die „offiziellen“ Atommächte (USA, Russland, Frankreich, Großbritannien und China) bauen diese Waffen heute mit immensem Aufwand wieder ab. Dagegen rüsten Indien, Pakistan und evtl. weitere Staaten atomar auf. Diese Staaten haben den Atomwaffensperrvertrag (der atomare Waffen verbietet, aber die friedliche Nutzung der Kernenergie in Kraftwerken erlaubt) nicht unterschrieben.

1952

Erster
Kernreaktor
liefert Strom in
den USA

1. H-Bombe (Kernfusion)
gezündet

1952

Mainauer Erklärung führender Naturwissenschaftler zur Gefahr durch Kernwaffen

1955

1956

1. KKW
in Europa
(Calder Hall,
England)

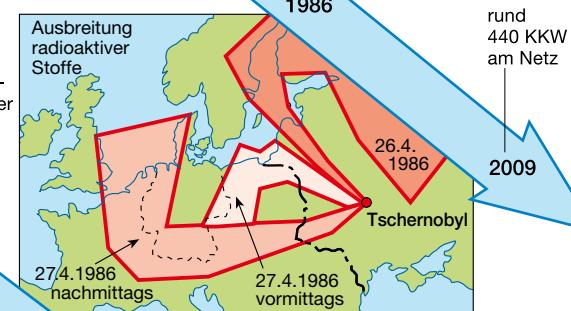
1968

1. KKW in
Deutschland:
Obrigheim
(Druckwasserreaktor)

1979

Harrisburg – fast ein „Supergau“
Der Supergau von Tschernobyl am 26.04.

1986



1968 — Atomwaffen-Sperrvertrag

Ende des
„Kalten Krieges“
und des atomaren
Wettrüstens
1990

1991

Kernfusions-
versuchsreaktor
(Jet in England)

Zu neuen Ufern!

Mithilfe riesiger Elementarteilchenbeschleuniger (z.B. CERN und LHC in der Schweiz oder DESY in Hamburg) wird heute nicht nur der Blick in das Innere des Atomkerns ermöglicht, sondern auch der Aufbau der Kernbausteine untersucht. Seit 1974 sind sich die Physiker sicher, dass Proton, Neutron und Elektron nicht die kleinsten Bausteine der Materie sind, sondern selbst aus noch kleineren Teilchen, den Quarks, zusammengesetzt sind. Diese tiefen Einblicke in das Innere der Materie haben viele wichtige Erkenntnisse in der Chemie, Geologie, Biologie und Medizin gebracht.

Die Elementarteilchenforschung ermöglicht aber auch den Blick zurück:

- Wie ist unser Universum entstanden?
- Wie sieht der Bauplan des Weltalls aus?

Grundwissen

Strahlungsarten und Eigenschaften

α -Strahlung: energiereiche Heliumkerne, die aus Atomkernen emittiert werden; absorbierbar durch Papier; wenige cm Reichweite in Luft

β -Strahlung: energiereiche Elektronen aus Atomkernen (Umwandlung von Neutronen in Protonen); absorbierbar durch 4 mm dicke Aluminiumschichten; einige dm Reichweite in Luft

γ -Strahlung: keine Teilchen, sondern Energieportionen wie Licht, aber viel energiereicher; nur durch dicke Bleischichten abschirmbar; (unendlich) große Reichweite in Luft

Röntgenstrahlung: entsteht durch Abbremsung sehr schneller Elektronen; Eigenschaften wie γ -Strahlung

UV-Strahlung: wie Licht, aber energiereicher und nicht sichtbar

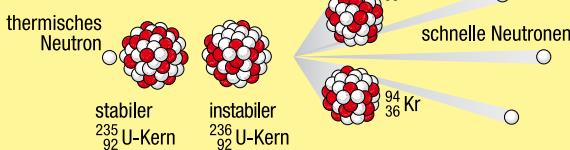
Nachweis von Strahlung

α -, β -, γ - und Röntgenstrahlung bewirkt die **Ionisation** von Atomen und Molekülen (\rightarrow Schäden)

Im Geiger-Müller-Zählrohr führt die **Stoßionisation** der Moleküle eines Gases durch Strahlung zu Spannungsstößen, die gezählt werden.

Zählrate Z: Anzahl der Impulse pro Zeiteinheit

Nullrate: Zählrate, die auch ohne Vorhandensein radioaktiver oder Röntgenstrahlung gemessen wird.



Kernspaltung und Kernkraftwerke

Brennstäbe: Kernspaltung von U235-Kernen durch langsame Neutronen, Freisetzung von 2–3 schnellen Neutronen und sehr viel Energie.

Moderator (Wasser): Abbremsung der schnellen Neutronen, um weitere Spaltungen zu ermöglichen.

Regelstäbe: Kontrollierte Kettenreaktion durch Neutronen absorzierende Regelstäbe.

Kernkraftwerke sind **Wärmekraftwerke**.

Reaktordruckbehälter: hat die Funktion eines Heizkessels.

Primärkreislauf: Die bei den Kernspaltungen freigesetzte Energie erhitzt Wasser unter hohem Druck. Im Wärmetauscher Übertragung der Energie an den **Sekundärkreislauf**. Antrieb der Turbinen durch Wasserdampf.

Spaltprodukte sind hochradioaktiv (Problem der **Endlagerung** der radioaktiven Abfälle).

Radioaktivität und Kernenergie

Aufbau der Atome

Atome (Durchmesser $d \approx 10^{-10}$ m) bestehen aus einer Atomhülle (mit Z Elektronen) und einem Atomkern (Nuklid, $d \approx 10^{-15}$ m), der seinerseits aus **A Nukleonen** (**Z Protonen** und **N Neutronen**) besteht. **A** heißt **Massenzahl**, **Z Kernladungszahl** (= Ordnungszahl).

Zwischen den Nukleonen wirkt die starke, sehr kurzreichweite **Kernkraft**.

Isotope eines chemischen Elements sind Atome mit gleichem Z , aber verschiedenem N .

$^{226}_{88}\text{Ra}$ oder Ra 226 ist ein Radiumisotop mit $Z = 88$, $A = 226$ und $N = A - Z = 138$

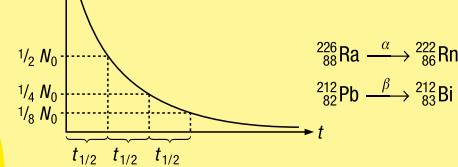


Radioaktiver Zerfall
Manche Kerne zerfallen zufällig (**stochastisch**) unter Aussendung von α - oder β -Strahlung.

Durch γ -Strahlung gibt ein angeregter Folgekern seine überschüssige Energie ab.

Halbwertszeit $t_{1/2}$: Zeit, in der jeweils die Hälfte einer radioaktiven Substanz zerfällt; sie ist charakteristisch für jede Kernart.

Der radioaktive Zerfall vieler Kerne verläuft (im Mittel) **exponentiell**.



Strahlenwirkungen – Strahlenschutz

natürliche Strahlenbelastung: terrestrische Strahlung, kosmische Strahlung

zivilisatorisch bedingte Strahlenbelastung: Einsatz von radioaktiver und Röntgenstrahlung in der Medizin, Kernkraftwerken, Technik

somatische Schäden (bei der bestrahlten Person selbst), **genetische Strahlenschäden** (wirken sich bei den direkten Nachkommen aus)

Äquivalentdosis H = Bewertungsfaktor $Q \cdot$ Energiedosis D

Einheit: $1 \text{ Sv} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$ messbar mit **Dosimetern**



Grundbegriffe

- Atomdurchmesser S. 192
- Kern-Hülle-Modell S. 193
- Elektronenstrahl-Ablenkröhre S. 194
- Massenspektrometer S. 195
- Isotope, Nukleonen S. 196
- Nuklidkarte S. 196, 210
- Kernkraft S. 197
- Nebelkammer, Zählrohr S. 200/201
- Zählrate, Nulleffekt S. 201
- α -, β - und γ -Strahlung S. 202/203
- Röntgenstrahlung S. 206
- Halbwertszeit S. 208/209
- Zerfallsreihen S. 210
- Strahlenwirkungen, Schäden S. 214/215
- Energiedosis, Äquivalentdosis S. 216
- Strahlenschutz S. 217
- Strahlentherapie; Strahlendiagnostik S. 220
- Kernspaltung, Kettenreaktion S. 222
- Kernfusion S. 223, 230/231
- Kernbindungsenergie S. 223
- Kernkraftwerk S. 224–229

A1 Fertige mit den Grundbegriffe auf der linken Seite Karteikarte an. Notiere den Begriff auf der Vorderseite und erläutere ihn auf der Rückseite, eventuell mit Einheiten und sonstigen Besonderheiten.
Anstelle der Karteikarten kannst du auch eine elektronische Datenbank anlegen.

A1 Bei einer Messung mit dem Zählrohr werden für ein radioaktives Präparat in 20 Sekunden 560 Impulse gemessen, ohne Präparat wurden 120 Impulse in 5 Minuten registriert.

- a)** Berechne die Zählraten und deute das Versuchsergebnis.
- b)** Erläutere, welche Ergebnisse zu erwarten sein könnten, wenn die Messungen wiederholt werden. Begründe.

A2 a) Beschreibe am Beispiel des Kohlenstoffisotops C14 die zur β -Strahlung gehörige Kernumwandlung. Bestimme auch die Kernart, in die sich C14 umwandelt.
b) Erläutere zwei wesentliche Unterschiede bzgl. der Eigenschaften von α - und γ -Strahlung.

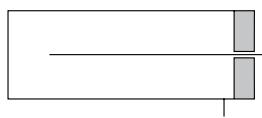
c) Ergänze die folgende Zerfallsreihe:



d) Erläutere wesentliche Gemeinsamkeiten und Unterschiede von γ - und Röntgenstrahlung – auch hinsichtlich ihrer Entstehung.

A3 a) Radium226 ist ein α -Strahler. Begründe, weshalb ein Ra226-Strahlerstift α -, β - und γ -Strahlung abgibt.
b) Kann durch Abschirmung des Ra226-Strahlerstiftes erreicht werden, dass nur noch β -Strahlung mit einem Zählrohr gemessen wird? Begründe.

A4 a) Ergänze im Heft die Schaltskizze für ein Zählrohr (ohne Lautsprecher und Digitalzähler.)



b) Beschreibe den Vorgang, den ein eintreffendes α -Teilchen im Zählrohr in Gang setzt.
c) Mit einem Zählrohr wurde folgende Messreihe aufgenommen. (Z: Zählrate)

t	0 s	20 s	40 s	60 s	80 s	100 s	120 s
Z	620 $\frac{\text{Imp}}{10 \text{ s}}$	470 $\frac{\text{Imp}}{10 \text{ s}}$	354 $\frac{\text{Imp}}{10 \text{ s}}$	259 $\frac{\text{Imp}}{10 \text{ s}}$	191 $\frac{\text{Imp}}{10 \text{ s}}$	151 $\frac{\text{Imp}}{10 \text{ s}}$	124 $\frac{\text{Imp}}{10 \text{ s}}$

Fertige einen Graphen an und ermittle nachvollziehbar die Halbwertszeit.

d) Mit welcher Zählrate ist in c) nach einer Zeit von 5 Minuten zu rechnen? Dokumentiere dein Vorgehen.

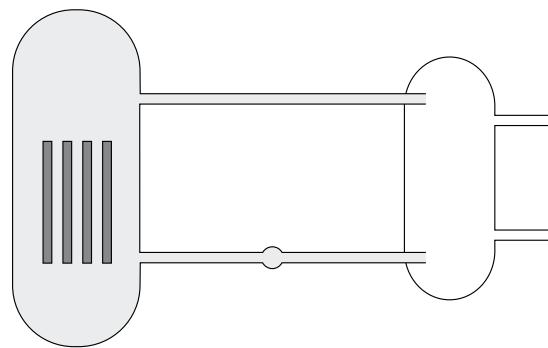
A5 Das Radionuklid Ir195 hat eine Halbwertszeit von 2,5 Stunden. Zu Beginn der Messung sei die Masse genau 1,0 g.

- a)** Zeichne das zugehörige Zerfallsdiagramm.
- b)** Gib an, nach welcher Zeit nur noch 0,2 g Ir195 vorhanden sind.
- c)** Ermittle, wieviele Halbwertszeiten mindestens vergehen müssen, damit weniger als 3 mg Ir195 vorhanden sind.

A6 a) Erläutere, wie eine Kernspaltung ausgelöst wird.

b) Beschreibe die notwendigen Maßnahmen, um eine kontrollierte Kettenreaktion aufrecht zu erhalten.

c) Erläutere, wie ein Kernkraftwerk „abgeschaltet“ werden kann.



A7 a) Ergänze im Heft und beschrifte die wesentlichen Bestandteile des Primärkreislaufes eines Kernkraftwerkes (Druckwasserreaktor).

b) Skizziere die beiden Hauptaufgaben des die Brennstäbe umgebenden Wassers.

A8 Bei der Kernspaltung in einem Kernkraftwerk entsteht radioaktive Strahlung. Erläutere, durch welche Sicherseinrichtungen verhindert wird, dass diese nach außen dringt.

A9 a) Erläutere, welche möglichen Wirkungen ionisierende Strahlung auf den Organismus hat. Beschreibe die dabei auftretenden Symptome.

b) Beurteile, ob jede Bestrahlung zu Strahlenschäden führt.

A10 In einem Reaktor soll der für die Fusion nötige „Brennstoff“ Tritium (H_3) durch Beschuss mit Neutronen aus Lithium (Li_6) hergestellt werden. Schreibe die zugehörige Reaktionsgleichung auf.