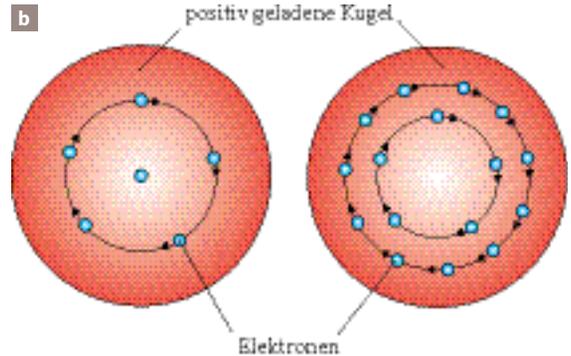
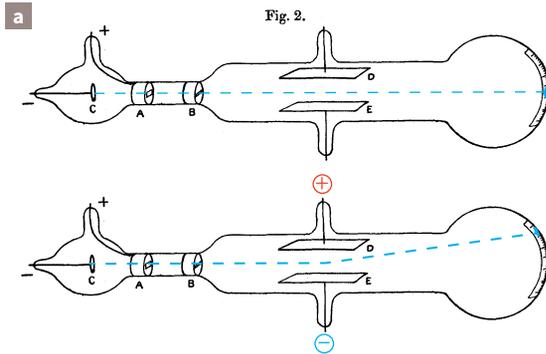


4.1 Aufbau der Atome und Atomkerne



B1 a) Am Ende der luftleeren Röhre erzeugt eine Strahlung einen Leuchtpunkt. Sie kann mithilfe zweier geladener Platten abgelenkt werden (aus Originalartikel von J.J. THOMSON, bearbeitet). b) THOMSONS Atommodell nach der Entdeckung der Elektronen: Negativ geladene „Partikel“ bewegen sich auf konzentrischen Kreisen – eingebettet in einer positiv geladenen Kugel wie Rosinen im Kuchenteig.

Vom Elektron zum Atomkern – Im Jahr 1897 veröffentlichte der britische Physiker Joseph John THOMSON die Ergebnisse von Versuchen, die er mit so genannten Kathodenstrahlröhren durchgeführt hatte. Er hatte dabei entdeckt, dass diese Strahlen sich durch elektrisch geladene Platten (Bild **B1a**) oder von Magneten ablenken lassen. THOMSON hatte daraus geschlossen, dass die Strahlen aus *negativ geladenen* „Partikeln“ bestehen. Er hatte damit die **Elektronen** entdeckt, und erhielt dafür 1906 den Nobelpreis für Physik.

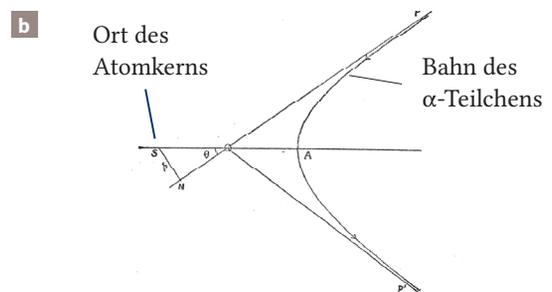
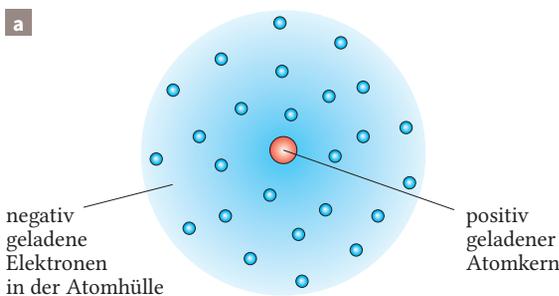
THOMSON entwickelte daraus folgendes Modell für den Aufbau eines Atoms: Die Elektronen sind in einer gleichmäßig positiv geladenen Kugel eingebettet wie Rosinen in einem Teig und bewegen sich dabei jeweils in gleichmäßigen Abständen auf konzentrischen Kreisen um den Kugelmittelpunkt (Bild **B1b**).

Etwa zur gleichen Zeit experimentierte der Neuseeländer Ernest RUTHERFORD, ein Schüler THOMSONS, an der Universität Montreal und später dann in Manchester

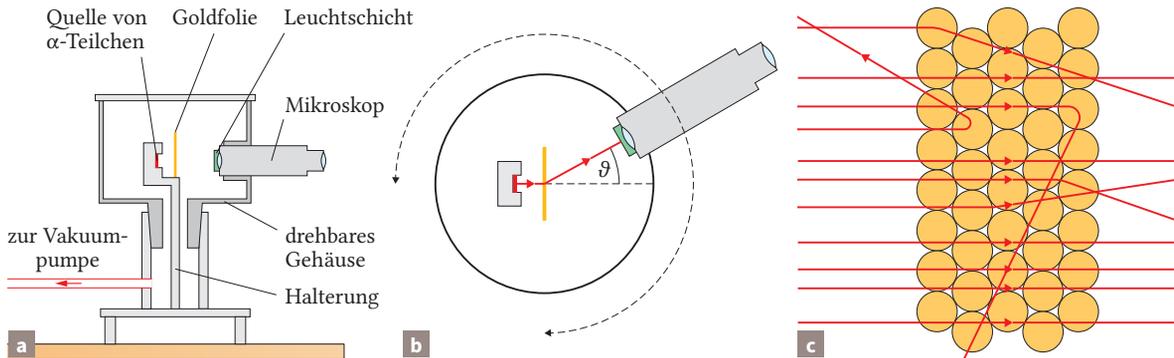
mit **α -Teilchen**. Diese Teilchen wurden von Atomen des Elements Radium ausgesendet. Man hatte schon herausgefunden, dass α -Teilchen positiv geladenen Heliumatome sind und eine hohe Bewegungsenergie besitzen (mehr dazu später).

Nun untersuchte man, wie sich diese Teilchen verhalten, wenn man sie auf Materie schießt. Dabei fand man, dass mehr α -Teilchen um große Winkel abgelenkt wurde, als man nach dem bisherigen Modell erwartet hatte. RUTHERFORD entwickelte daher eine weitere Modellvorstellung über den Aufbau von Atomen, die er 1911 veröffentlichte.

Er berechnete, dass sich die bisherigen Versuchsergebnisse mit folgender Vorstellung decken: Das Atom besteht aus einem positiv geladenen, sehr kleinen **Atomkern** und einer **Atomhülle**, in der sich die negativ geladenen Elektronen verteilen (Bild **B2a**). Die α -Teilchen würden demnach durch elektrische Kräfte am positiv geladenen Atomkern abgelenkt (Bild **B2b**).



B2 a) Kern-Hülle-Modell vom Atom: In der Atomhülle befinden sich die negativ geladenen Elektronen. Der Atomkern ist sehr klein und positiv geladen. Das Atom ist insgesamt elektrisch neutral. b) Originalzeichnung von Rutherford (bearbeitet): Ein α -Teilchen kommt von rechts oben, wird durch elektrische Kräfte am positiv geladenen Atomkern abgelenkt und durchfliegt die gebogene Bahn.



B3 a) Seitenansicht des Versuchs von GEIGER und MARSDEN; b) Draufsicht: Das Mikroskop wird um die Goldfolie gedreht und dabei der Winkel ϑ zur Strahlrichtung gemessen. c) Die meisten α -Teilchen dringen ungehindert durch die Folie, manche werden stark abgelenkt.

Der rutherfordische Streuversuch – RUTHERFORDS

Assistenten HANS GEIGER und ERNEST MARSDEN führten daraufhin im Jahr 1913 ein Experiment durch, das heute **rutherfordischer Streuversuch** genannt wird, um die Ablenkung der α -Teilchen präzise zu vermessen. Dazu platzierten sie eine α -Teilchen-Quelle in einer Kammer, aus der sie die Luft herauspumpten. Der Teilchenstrahl wurde auf eine Goldfolie gerichtet. In einer Leuchtschicht hinter der Folie lösten die α -Teilchen Lichtblitze aus, die mit einem Mikroskop beobachtet wurden (Bild **B3a**). Die Kammer wurde mit dem Mikroskop um die Goldfolie herumgedreht (Bild **B3b**). Nun zählten sie jeweils über eine bestimmte Zeitspanne die Lichtblitze beim Winkel ϑ . Sie stellten fest:

Die meisten α -Teilchen dringen gerade durch die über tausend Atomschichten der Folie, einige werden um große Winkel, manchmal sogar um 180° abgelenkt (Bild **B3c**). Die Ergebnisse stimmten dabei mit den Berechnungen von RUTHERFORD überein und bestätigten somit die Vorstellung, dass das Atom aus einer Atomhülle und einem sehr kleinen Atomkern besteht.



B4 Vergrößert man in Gedanken ein Atom so, dass der Atomkern die Größe eines Reiskorns hat, so nimmt die Atomhülle ungefähr den Raum eines Stadions ein.

Kern-Hülle-Modell für Atome – Der rutherfordische Streuversuch und andere Experimente ergaben noch weitere Eigenschaften der Atome. Sie führten zu einer grundlegenden **Modellvorstellung** vom Aufbau der Atome, wie sie derzeit allgemein anerkannt ist:

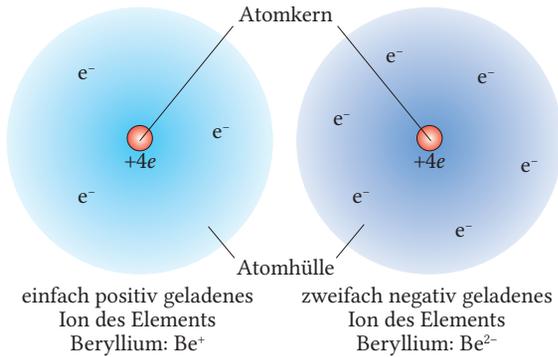
- Ein Atom besteht aus einem Atomkern und einer Atomhülle (Bild **B2a**). Der Atomkern ist positiv geladen. In der Atomhülle befinden sich negativ geladene Elektronen. Nach außen erscheint das Atom elektrisch neutral.
- Nahezu die gesamte Masse des Atoms befindet sich im Atomkern.
- Das Atom als Ganzes hat einen Durchmesser von etwa einem Zehnmillionstel Millimeter ($10^{-7} \text{ mm} = 10^{-10} \text{ m}$).
- Der Durchmesser des Atomkerns beträgt etwa ein Hunderttausendstel des Atomdurchmessers, das sind etwa $10^{-12} \text{ mm} = 10^{-15} \text{ m}$.

Bild **B4** veranschaulicht die Größenverhältnisse innerhalb des Atoms: Vergrößern wir in Gedanken den Atomkern auf die Größe eines Reiskorns (ca. 1 mm), so ist die Atomhülle einhunderttausend Mal so groß, also $100\,000 \text{ mm} = 100 \text{ m}$. Sie würde damit etwa ein Fußballstadion füllen, das Reiskorn läge am Anstoßpunkt.

! Merksatz

Atome

- bestehen aus einem positiv geladenen Kern und einer Hülle von negativ geladenen Elektronen;
- sind nach außen elektrisch neutral;
- enthalten nahezu die gesamte Masse im Atomkern.



B1 Atome, bei denen die elektrische Ladung von Atomhülle und Atomkern sich nicht ausgleicht, nennt man Ionen.

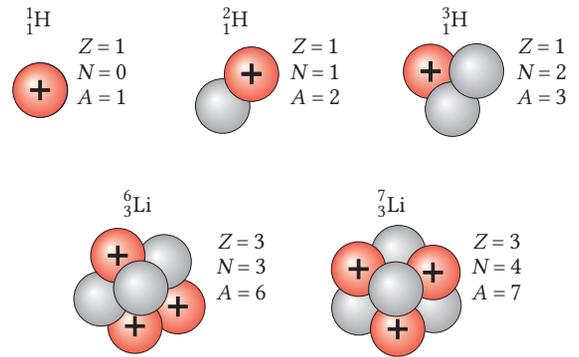
Ionen sind geladene Atome. Als man die Eigenschaften der Elektronen erforschte, fand man, dass sie alle die gleiche elektrische Ladung besitzen und geladene Körper nur ganzzahlige Vielfache dieser Ladungsmenge tragen. Die Ladung des Elektrons ist die kleinste Ladungsmenge, die man frei beobachtet. Man nennt sie daher **Elementarladung** e . Da das Elektron negativ geladen ist, schreibt man für die Ladung eines Elektrons $q_{\text{Elektron}} = -e$ und kürzt das Elektron mit e^- ab.

Bei einem elektrisch neutralen Atom mit z. B. vier Elektronen ist also die Ladung $q_{\text{Hülle}} = -4e$ in der Atomhülle vorhanden. Entsprechend muss der Atomkern dann eine Ladung von $q_{\text{Kern}} = +4e$ besitzen, damit das Atom insgesamt neutral ist.

Aus der Chemie wissen wir, dass Atome bei chemischen Prozessen Elektronen aus der Hülle abgeben oder in die Hülle aufnehmen. Das Atom erscheint dann elektrisch nicht mehr neutral, sondern geladen – man spricht von einem **Ion**. Enthält die Atomhülle ein Elektron mehr als im neutralen Zustand, so nennt man das Atom *einfach negativ geladen*, bei zwei zusätzlichen Elektronen *zweifach negativ geladen* usw. Fehlt in der Atomhülle ein Elektron, erhält man entsprechend ein *einfach positiv geladenes* Atom usw.

! Merksatz

Elektronen besitzen die Ladung $q_{\text{Elektron}} = -e$.
Atome, die in der Atomhülle mehr oder weniger Elektronen haben als im neutralen Zustand, nennt man Ionen. Negativ geladene Atome haben mehr Elektronen in der Atomhülle als das neutrale Atom, bei positiv geladenen Atome sind es weniger.



B2 Atomkerne bestehen aus positiv geladenen Protonen (Anzahl: Z) und elektrisch neutralen Neutronen (Anzahl: N).

Protonen und Neutronen im Atomkern – Bei chemischen Untersuchungen hatte man Anfang des 20. Jahrhunderts entdeckt, dass es Atome des gleichen Elements gibt, die aber unterschiedliche Massen besitzen. Man fand dafür zunächst keine schlüssige Erklärung, bis 1932 der englische Physiker James CHADWICK in einem Versuch Beryllium-Atome mit α -Teilchen beschoss. Dabei entdeckte er eine neue Strahlungsart, die dicke Materieschichten durchdringen konnte. Er konnte nachweisen, dass sie aus elektrisch neutralen Teilchen besteht, die aus dem Atomkern stammen. Man nennt sie heute **Neutronen** (Symbol: **n**).

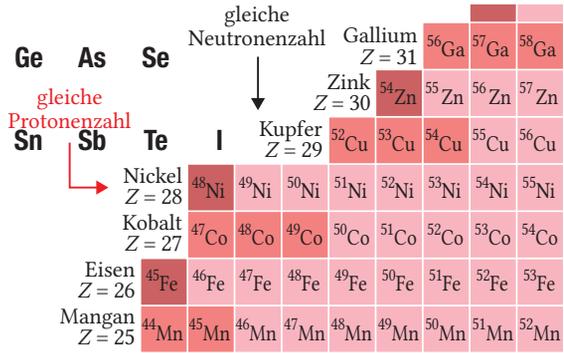
Damit wurde klar, dass auch der Atomkern eine innere Struktur besitzt. Er besteht aus elektrisch positiv geladenen **Protonen** (Symbol: **p**) und elektrisch neutralen Neutronen (siehe Bild **B2**). Die Ladung des Protons ist eine Elementarladung, also $q_{\text{Proton}} = +e$. Neutron und Proton haben nahezu gleiche Masse. Die Masse des Elektrons beträgt im Vergleich dazu nur etwa $1/2000$.

Aus der Tatsache, dass sich positiv geladene Körper gegenseitig abstoßen, folgt, dass zwischen den Protonen im Atomkern noch eine andere Kraft als die elektrische Kraft wirken muss, damit der Atomkern stabil bleibt. Diese Kraft zwischen den Teilchen des Atomkerns nennt man **Kernkraft** oder **starke Kraft**.

! Merksatz

Der Atomkern besteht aus elektrisch positiv geladenen Protonen und elektrisch neutralen Neutronen. Protonen und Neutronen haben etwa die gleiche Masse. Die elektrische Ladung eines Protons ist $q_{\text{Proton}} = +e$.

	V	VI	VII	VIII	VIII	VIII	I	II	Alk.
	50,94 23 Vanadium V	51,99 24 Chrom Cr	54,94 25 Mangan Mn	55,85 26 Eisen Fe	58,93 27 Cobalt Co	58,69 28 Nickel Ni	63,55 29 Kupfer Cu	65,39 30 Zink Zn	69,72 31 Gallium Ga
	92,91 41 Niob Nb	95,94 42 Molybdän Mo	(99) 43 Technetium Tc	101,07 44 Ruthenium Ru	102,91 45 Rhodium Rh	106,42 46 Palladium Pd	107,87 47 Silber Ag	112,41 48 Cadmium Cd	114,82 49 Indium In
	180,95 73 Tantal Ta	183,84 74 Wolfram W	186,21 75 Rhenium Re	190,23 76 Osmium Os	192,22 77 Iridium Ir	195,08 78 Platin Pt	196,97 79 Gold Au	200,59 80 Quecksilber Hg	204,39 81 Thallium Tl
	(262) 105 Dubnium Db	(266) 106 Seaborgium Sg	(264) 107 Bohrium Bh	(269) 108 Hassium Hs	(268) 109 Meitnerium Mt	(271) 110 Darmstadtium Ds	(272) 111 Roentgenium Rg	(277) 112 Copernicium Cn	



B3 a) Ausschnitt aus dem Periodensystem: In jeder Zeile sind die Elemente von links nach rechts nach zunehmender Kernladungszahl geordnet. b) Ausschnitt aus der Nuklidkarte: In jeder Zeile sind die Isotope eines Elements von links nach rechts mit zunehmender Neutronenzahl angegeben. In jeder Spalte stehen Isotope gleicher Neutronenzahl mit von unten nach oben zunehmender Protonenzahl.

Periodensystem und Isotopentafel – Aus den Erkenntnissen der Chemie und der Physik entwickelte sich folgendes Bild vom Aufbau der Materie:

- Materie besteht aus *Atomen*, die zu etwa 120 verschiedenen *Elementen* gehören.
- Alle Atome *eines Elements* haben die *gleiche Anzahl an Protonen* im Atomkern. Diese Anzahl nennt man **Protonenzahl** oder **Kernladungszahl Z**.
- Ein *neutrales Atom* besitzt in der Atomhülle *genauso viele Elektronen wie Protonen* im Atomkern sind.

Im **Periodensystem der Elemente** sind die Elemente unter anderem nach der Kernladungszahl Z geordnet. Diese stimmt dabei mit der **Ordnungszahl** im Periodensystem überein (Ausschnitt siehe Bild **B3a**; vollständiges Periodensystem siehe Anhang). Der Name des Elements ist dabei eindeutig mit dieser Zahl verknüpft. Das bedeutet z. B., dass die Aussage „Die Ordnungszahl ist 26“ übereinstimmt mit den Aussagen „Das Atom gehört zum Element Eisen (Fe)“, „Im Kern des Atoms befinden sich 26 Protonen“ und „ $Z = 26$ “.

- Die Atome *eines Elements* (d. h. gleiche Kernladungszahl Z) können sich in der *Anzahl der Neutronen* unterscheiden. Diese Anzahl heißt **Neutronenzahl N**.
- Die Summe der Protonenzahl Z und der Neutronenzahl N nennt man **Nukleonenzahl** oder **Massenzahl A**: $A = Z + N$.
- Atome *eines Elements* (gleiche Kernladungszahl Z) mit verschiedener Massenzahl A nennt man **Isotope** oder **Nuklide**. Alle Isotope eines Elements haben gleiche chemische, aber unterschiedliche physikalische Eigenschaften, z. B. verschiedene Massen.

Man kennt heute insgesamt über 4000 Isotope, die zu fast 120 Elementen gehören. Sie werden in der **Isotopentafel** oder **Nuklidkarte** dargestellt – ähnlich wie die Elemente im Periodensystem (Ausschnitt siehe Bild **B3b**). In *jeder Zeile* findet man die Isotope *eines Elements* – d. h. alle Atome in dieser Zeile haben die gleiche Kernladungszahl Z . Die einzelnen Quadrate sind dabei so angeordnet, dass Atome mit *gleicher Neutronenzahl N* übereinander *in einer Spalte* stehen.

Da sich die Isotope eines Elements oft wesentlich in ihren physikalischen Eigenschaften unterscheiden, war es notwendig, eine passende Kennzeichnung dafür zu erfinden. Heute sind im Wesentlichen zwei Schreibweisen in Gebrauch (siehe auch Bild **B2**):

- A_ZX } X: chemisches Elementsymbol (z. B. Fe)
- $X-A$ } Z: Kernladungszahl
- } A: Massenzahl

Beispiele:

- ${}^{16}_8\text{O}$ oder O-16: Damit meint man ein Sauerstoff-Atom mit 8 Protonen. Der Kern enthält 16 Nukleonen, d. h. außer den 8 Protonen noch 8 Neutronen. Das neutrale Atom hat 8 Elektronen in der Hülle.
- ${}^{26}_{12}\text{Mg}$ oder Mg-26 bezeichnet ein Magnesium-Atom mit 12 Protonen. Da der Kern aus insgesamt 26 Nukleonen besteht, enthält er 14 Neutronen. In der Hülle des neutralen Atoms sind 12 Elektronen.

! Merksatz

Alle Atome eines Elements X haben die gleiche Kernladungszahl Z . Atome eines Elements X , die eine unterschiedliche Massenzahl A haben, nennt man Isotope. Man schreibt dafür A_ZX oder $X-A$.

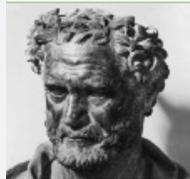
Exkurs: Aufbau der Materie bis 1920

Die Frage, woraus Materie besteht, war zunächst Gegenstand philosophischer Betrachtungen. Detailliert überliefert sind uns Vorstellungen der griechischen Antike aus dem 5. Jahrhundert v. Chr. Viele praktische Erkenntnisse werden dann bei Gewinnung von Metal-

len und in der Chemie gewonnen. Daraus entstehen erste naturwissenschaftliche Ideen vom Atom. Erst im 20. Jahrhundert wird der Aufbau der Materie zur Sache der Physiker. Mit der Quantenphysik rücken dabei Chemie und Physik eng zusammen.

Philosophie

DEMOKRIT von Abdera (ca. 460–370 v. Chr.): Materie besteht aus kleinsten unteilbaren Teilchen (atomos – unteilbar) in Form regelmäßiger geometrischer Körper. Größe und Schwere eines Körpers entsprechen der Menge und der Schwere der Teilchen.



5. Jhd.
v. Chr.

1.-3.
Jhd.
n. Chr.

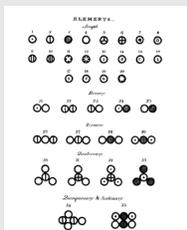


René DESCARTES (1596–1650): Alles was nicht klar ersichtlich ist, muss kritisch hinterfragt werden. Man gewinnt Erkenntnis schrittweise mittels Analyse und logischer Schlüsse. Von ihm stammt: „Ich denke, also bin ich.“

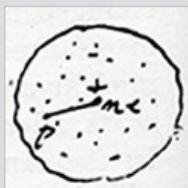
1600

1700

John DALTON (1766–1844): Experimentell ermittelte Gesetze für chemische Reaktionen führen ihn zu Grundzügen der modernen Atomvorstellung: Materie besteht aus Verbindungen von Atomen verschiedener Elemente. Alle Atome eines Elements sind gleich. Bei chemischen Reaktionen trennen oder verbinden sie sich oder sie ordnen sich neu an.



1800



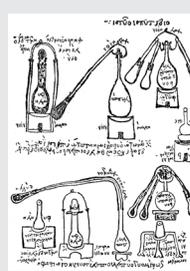
Ernest RUTHERFORD (1871–1927): Er untersucht die 1896 neu entdeckte radioaktive Strahlung und entdeckt mithilfe von α -Strahlen den Atomkern.

In seinem Atommodell von 1911 sind die Elektronen um den Kern auf Kugelschalen oder in Ringen angeordnet.

1900

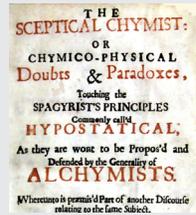
2000

Metallgewinnung und Chemie



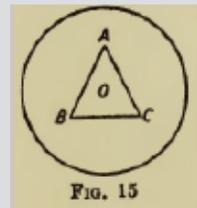
ALCHEMISTEN in Griechenland und Ägypten: Einst Fachleute für die Gewinnung von Metallen, entwickeln sie viele technische Verfahren. Mit philosophischen Überlegungen und mystischen Vorstellungen erklären sie den Aufbau der Materie. Zentral sind die Suche nach dem „Stein der Weisen“ und die Herstellung von Gold. In ersten Schriftstücken wird das Wissen gesammelt.

Robert BOYLE (1627–1692): Er geht chemische Untersuchungen logisch an und bezeichnet die Endprodukte von chemischen Analysen als „Elemente“ - heute würde man „Reinstoffe“ dazu sagen.

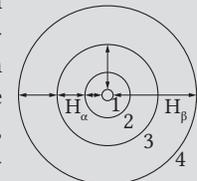


Physik

Joseph John THOMSON (1856–1940) entdeckt die negativ geladenen Elektronen. In seinem Atommodell kreisen sie auf konzentrischen Ringen im Inneren einer positiv geladenen Kugel.



Niels BOHR (1885–1962): In seinem Modell von 1913 kreisen Elektronen auf Bahnen mit verschiedenen Radien. Sie können diese nur wechseln, wenn sie passende Energiemengen aufnehmen oder in Form von Licht abgeben. Bohr kann so das Linienspektrum des Wasserstoffs erklären. Später löst die Quantenphysik diese Modellvorstellung ab.



Löse selbst

Elektronen, Kern-Hülle-Modell

- 1** Skizziere, wie sich J. J. THOMSON und E. RUTHERFORD jeweils den Aufbau eines Atoms vorstellten. Beschreibe Unterschiede und Gemeinsamkeiten.
- 2** Veranschauliche die Größen eines Atoms und eines Atomkerns mit einem Vergleich. Ergänze dazu folgende Sätze:
 - a) Würde man alle Atome eines Stecknadelkopfs mit 1 mm Durchmesser so vergrößern, dass sie so groß sind wie der Stecknadelkopf, dann würde dieser ...
 - b) Würde man einen Atomkern so vergrößern, dass er einen Durchmesser von 1 mm hat, dann hätte das Atom selbst einen Durchmesser von ...
- 3** Jemand aus deiner Klasse hat in der Stunde gefehlt. In der rutherford'schen Streuversuch durchgenommen wurde. Schreibe eine kurze Zusammenfassung, in der du anhand geeigneter Skizzen den Versuch beschreibst und erklärst.

Ionen, Protonen, Neutronen

- 4** Skizziere ähnlich wie in Bild B1 auf Seite 128 den Aufbau folgender Ionen bzw. Atome. Nutze dazu auch das Periodensystem (Anhang):
 - a) neutrales Lithium-Atom;
 - b) doppelt negativ geladenes Sauerstoff-Atom;
 - c) einfach positiv geladenes Natrium-Atom;
 - d) dreifach positiv geladenes Aluminium-Atom;
 - e) einfach negativ geladenes Chlor-Atom.
- 5** Gib an, was aus den aufgeführten Ionen bzw. Atomen entsteht, wenn sie ein Elektron aus der Hülle abgeben bzw. ein Elektron in die Hülle aufnehmen:
 - a) einfach positiv geladenes Eisen-Atom;
 - b) einfach negativ geladenes Fluor-Atom;
 - c) neutrales Stickstoffatom;
 - d) zweifach negativ geladenes Schwefel-Atom;
 - e) zweifach-positiv geladenes Calcium-Atom.
- 6** Begründe, welche der folgenden Aussagen richtig, welche falsch ist:
 - a) Im neutralen Atom sind genauso viele Elektronen in der Hülle, wie Protonen im Kern vorhanden.
 - b) Es gibt kein Ion ohne Elektronen.
 - c) Protonen und Neutronen ziehen sich an.
 - d) Alle Atomkerne enthalten Neutronen.

Isotope

- 7** Du gibst jemandem Nachhilfe in Physik. Erkläre ihm/ ihr folgende Begriffe: Isotop, Protonenzahl, Neutronenzahl, Kernladungszahl, Massenzahl, Nukleonenzahl, Ordnungszahl
- 8** Für Isotope gibt es zwei Schreibweisen. Begründe ...
 - a) ... warum es ausreichend ist, entweder die Kernladungszahl oder den Elementnamen anzugeben.
 - b) ... warum die Angabe der Massenzahl allein noch nicht ausreicht, um zu erkennen, um welches Element es sich handelt.
- 9** Gib jeweils an, aus wie vielen Protonen, Neutronen und Elektronen ein neutrales Atom des jeweiligen Isotops besteht. Nutze dazu auch das Periodensystem.
 - a) ${}^3_1\text{H}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{137}_{55}\text{Cs}$, ${}^{208}_{82}\text{Pb}$
 - b) C-14, F-19, K-40, Co-60
 - c) Xe-134, Pb-206, Rn-220, U-235
- 10** Übersetze jeweils in die andere Schreibweise:
 - a) He-4, Mg-24, Au-197, Kr-84
 - b) ${}^{63}_{34}\text{Cu}$, ${}^{31}_{15}\text{Pb}$, ${}^{58}_{26}\text{Fe}$, ${}^{186}_{74}\text{W}$
- 11** Skizziere den Aufbau von neutralen Atomen (inkl. Atomhülle) folgender Isotope:
 - a) He-3
 - b) Li-6
 - c) C-12
 - d) F-19
- 12** In den Grafiken sind die Atomkerne von verschiedenen Isotopen symbolisch dargestellt. Gib deren Bezeichnung jeweils in beiden Schreibweisen an.

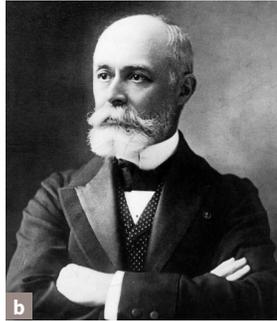
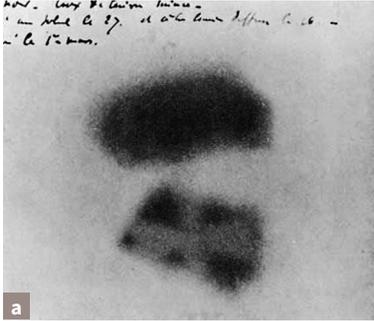
a

b

c

d
- 13** Gib das jeweilige Isotop in der Schreibweise ${}^A_Z\text{X}$ an:
 - a) $Z = 82, N = 124$
 - b) $Z = 10, N = 14$
 - c) $A = 35, N = 21$
 - d) $A = 35, N = 22$
 - e) $X = \text{U}, N = 143$
 - f) $X = \text{O}, N = 14$
 - g) $X = \text{Bi}, A = 214$
 - h) $X = 40, A = 94$

4.2 Radioaktive Strahlung: Nachweis und Eigenschaften



B1 a) Originale Fotoplatte mit handschriftlichen Notizen von Henri BECQUEREL. Die Schwärzungen führten zur Entdeckung der Radioaktivität. b) Henri BECQUEREL (1852–1908) c) Marie CURIE (1867–1934) und Pierre CURIE (1859–1906) mit Tochter IRÈNE

Die Radioaktivität wird entdeckt. Die Entdeckung der **Radioaktivität** ist eine Mischung aus gezieltem Experimentieren und Zufall. Der französische Physiker Henri BECQUEREL hatte sich auf die Untersuchung von Kristallen spezialisiert, die im Dunkeln nachleuchten, wenn sie vorher dem Tageslicht ausgesetzt waren (so genannte Fluoreszenz).

Im Jahr 1896 wollte er untersuchen, ob bei einem solchen Vorgang Kristalle eines Uranminerals auch die kurz zuvor entdeckte **Röntgenstrahlung** aussenden. Er hatte dazu eine Fotoplatte lichtdicht verpackt, musste aber das Experiment abbrechen und lagerte das Mineral mit der Fotoplatte in einer Schublade. Einige Tage später fand er dann, dass die Fotoplatte geschwärzt war, obwohl das Mineral nicht dem Tageslicht ausgesetzt war (Bild **B1**). Er folgerte daraus, dass das Uranmineral eine neue Art von Strahlung aussendet.

In der Folge untersuchten seine beiden Assistenten Pierre CURIE und Marie CURIE (geb. SKŁODOWSKA) in mühevoller Kleinarbeit, welche Stoffe diese Strahlung aussenden. Sie fanden dabei neben dem schon bekannten Element **Uran** zwei neue Elemente - **Radium** und **Polonium**. Ersteres wurde so benannt, weil es viel stärker strahlte als Uran (lat. *radius* – der Strahl), letzteres nach Polen, dem Heimatland von Marie CURIE.

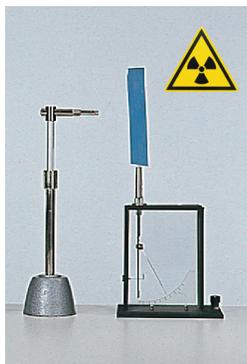
Radioaktive Strahlung ionisiert. Eine der Hauptuntersuchungsmethoden beruhte darauf, dass **radioaktive Strahlung** ein geladenes Elektroskop entlädt, wenn man sie auf dessen Kopf richtet (Versuch **V1**). Bei diesem Versuch stellt sich folgendes heraus:

- Das Elektroskop wird entladen, unabhängig davon, ob man es zuvor positiv oder negativ auflädt.
- Es wird nahezu nicht entladen, wenn man den Versuch im Vakuum durchführt.

V1 Radioaktive Strahlung ionisiert

Durchführung:

- a) Wir laden das Elektroskop zunächst positiv oder negativ auf.
- b) Wir richten einen Strahlerstift, in dessen Spitze eine winzige Menge Radium ($\approx 10^{-7}$ g) eingekapselt ist, auf den Kopf des geladenen Elektroskops.
- c) Wir wiederholen den Versuch mit dem entgegengesetzt geladenen Elektroskop.
- d) Wir führen den Versuch im Vakuum durch.



! Vorsicht Gefahr

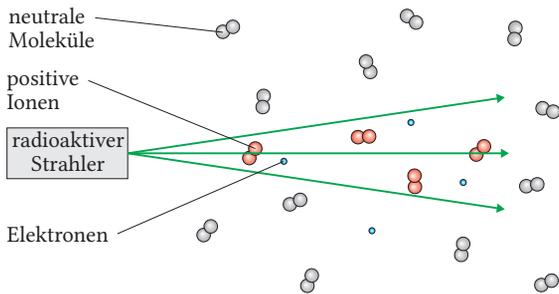
Von radioaktiver Strahlung geht eine Gefährdung der Gesundheit aus. Beachte daher beim Umgang mit radioaktiven Substanzen die so genannte **AAA-Regel**:



Aufenthaltsdauer: Halte dich möglichst kurz im Bereich radioaktiver Strahlung auf.

Abstand: Halte so weit Abstand von der Strahlenquelle, wie möglich.

Abschirmung: Nutze Abschirmungsmaterial, um den Bereich möglichst gering zu halten, der von radioaktiver Strahlung getroffen wird.



B2 Radioaktive Strahlen schlagen auf ihrem Weg durch die Luft Elektronen aus den Molekülen und erzeugen so positive Ionen.

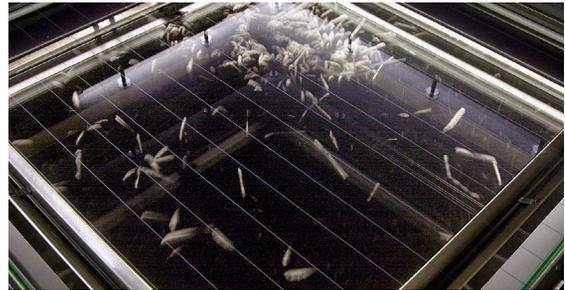
Wie lässt sich nun das Ergebnis von Versuch **V1** interpretieren? Eine naheliegende Antwort wäre, dass radioaktive Strahlung selbst aus positiv und negativ geladenen Teilchen besteht. Der Versuch müsste aber dann im Vakuum genauso gut funktionieren wie in Luft – was er nicht tut! Also bleibt nur noch, dass die radioaktive Strahlung die Luft so verändert, dass sie in der Lage ist, ein Elektroskop zu entladen. Tatsächlich werden die Atome und Moleküle in der Luft von der radioaktiven Strahlung *ionisiert*, indem aus den Atomhüllen Elektronen herausgeschlagen werden. Auf diese Weise findet man entlang der Bahn der radioaktiven Strahlen positive Ionen und frei herumfliegende negativ geladene Elektronen (Bild **B2**). Der Kopf des Elektroskops zieht dann die jeweils entgegengesetzt geladenen Teilchen an. Damit entlädt sich dann nach und nach das Elektroskop.

Aufgrund dieser Eigenschaft wird radioaktive Strahlung auch zu den **ionisierenden Strahlungen** gezählt. Andere ionisierende Strahlungen sind **Röntgenstrahlung** und **UV-Strahlung**.

Merksatz

Radioaktive Strahlung kann Atome und Moleküle ionisieren. Dabei schlägt sie aus den Atomhüllen Elektronen heraus, sodass freie Elektronen und positive Ionen entstehen.

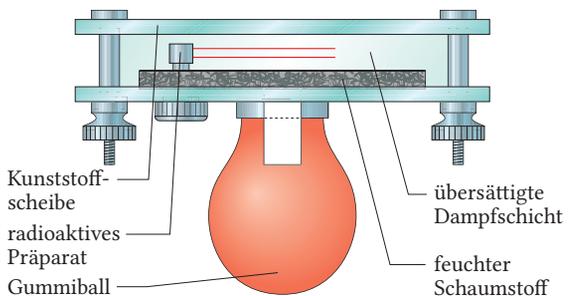
Nahezu alle Nachweisgeräte für radioaktive Strahlung nutzen diese ionisierende Wirkung. Im Folgenden werden zwei dieser Geräte vorgestellt: Die **Nebelkammer** hat nur noch historische Bedeutung; sie wird aber gerne zur Veranschaulichung eingesetzt. Das **Geiger-Müller-Zählrohr** hingegen ist eines der Standardmessgeräte für radioaktive Strahlung.



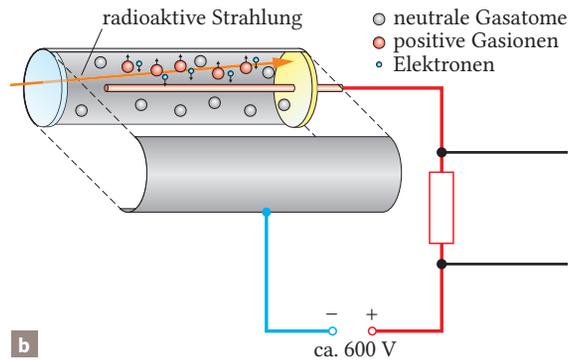
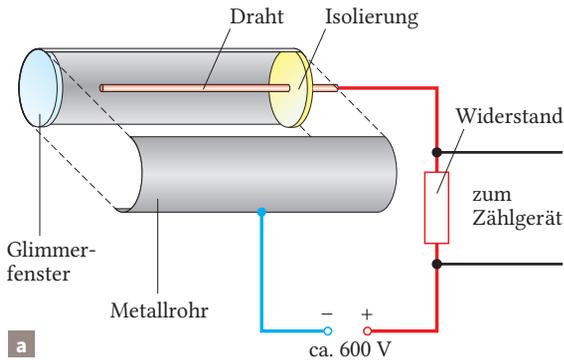
B3 In einer Nebelkammer machen helle Kondensstreifen radioaktive Strahlung „sichtbar“.

Die Nebelkammer – Luft kann bis zu einem gewissen Prozentsatz unsichtbaren Wasserdampf enthalten. Wie viel, hängt im Wesentlichen von der Temperatur ab. Wird der Maximalwert für eine bestimmte Temperatur überschritten, so kondensiert der Wasserdampf und wird als Nebel sichtbar. Unter gewissen Umständen (ruhige, saubere Luft) kann dieser Maximalwert etwas überschritten werden, ohne dass Nebelbildung auftritt – man spricht von einem *übersättigtem Dampf*. Schon kleine Störungen (Staubkörnchen, ionisierte Moleküle) führen dann schlagartig zur Nebelbildung.

Auf diesem Prinzip beruht die Nebelkammer (Bild **B3**): In ihr befindet sich über dem Boden eine Schicht übersättigter Alkoholdampf (Bild **B4**). Durchquert nun radioaktive Strahlung diese Dampfschicht, so werden entlang ihres Wegs Moleküle und Atome ionisiert. Diese lösen den Kondensationsprozess aus und es bildet sich eine *Nebelspur*. Der Weg der Strahlung wird auf diese Weise sichtbar ähnlich wie der Weg eines Verkehrsflugzeugs durch dessen Kondensstreifen. Erfunden wurde die Nebelkammer vom schottischen Physiker Charles Thomson Rees **WILSON** (1869–1959). Er erhielt dafür 1927 den Nobelpreis für Physik.



B4 Einfache Nebelkammer: Aus dem Schaumstoff verdunstet Alkohol. Durch Zusammenpressen und schlagartiges Loslassen des Gummiballs entsteht kurzzeitig eine übersättigte Dampfschicht, in der der Weg radioaktiver Strahlung sichtbar wird.



B1 a) Prinzipieller Aufbau eines Geiger-Müller-Zählrohrs (Schnittzeichnung). b) Radioaktive Strahlung ionisiert Gasatome im Zählrohr.

Das Geiger-Müller-Zählrohr – Ein wichtiges Messgerät für radioaktive Strahlung ist das **Geiger-Müller-Zählrohr (GMZ)**, das Hans GEIGER mit seinem Doktoranden Walther MÜLLER im Jahr 1929 der Öffentlichkeit vorstellte. GEIGER war vorher Assistent von Ernest RUTHERFORD und führte den Streuversuch durch, aus dem sich das Kern-Hülle-Modell des Atoms ergab (siehe Seite 3).

Prinzipiell sind Geiger-Müller-Zählrohre so aufgebaut, wie es die Schnittzeichnung in Bild **B1a** zeigt: Ein *Metallrohr* ist am einen Ende mit einem dünnen *Glimmerfenster*, am anderen Ende mit einer elektrischen *Isolierung* verschlossen. Das Rohr ist mit einem Edelgas unter geringem Druck gefüllt. Durch die Isolierung hindurch führt ein *Draht*, der ohne Kontakt in das Rohr hineinragt. Der Draht wird über einen *Widerstand* mit dem Pluspol eines Netzgeräts verbunden, das Metallrohr mit dem Minuspol. Die Spannung zwischen den Polen beträgt etwa 600 Volt. Vom Widerstand führen zwei Anschlüsse zum *Zählgerät*.

Tritt nun radioaktive Strahlung durch das Glimmerfenster ein, so ionisiert sie Atome der Gasfüllung (Bild **B1b**). Die freigesetzten Elektronen werden dann zum Draht hin beschleunigt, die positiven Gasionen zum Metallrohr. Auf dem Weg dorthin ionisieren sie weitere Gasatome und lösen so eine *Ladungslawine* aus.

Es kommt nun zu einem kurzfristigen Stromfluss durch den Widerstand, der mit dem Zählgerät registriert wird. Schließt man einen Lautsprecher am Zählgerät an, so wird der Stromfluss als Knackgeräusch hörbar. Je intensiver die radioaktive Strahlung ist, umso mehr Zählereignisse werden in einer bestimmten Zeit registriert.

Verschiedene Strahlenarten – Schon recht bald nach der Entdeckung der Radioaktivität hatte Ernest RUTHERFORD herausgefunden, dass sich bei radioaktiver Strahlung drei Komponenten unterscheiden lassen. Er nannte diese Strahlungsarten **α -Strahlung**, **β -Strahlung** und **γ -Strahlung** – diese Bezeichnungen werden auch heute noch unverändert verwendet.

Unter anderem untersuchte RUTHERFORD, wie sich die Intensität der Strahlung verändert, wenn man sie auf verschieden dicke Schichten unterschiedlicher Materialien richtet (Versuch **V1**).

V1 Radioaktive Strahlung wird absorbiert



Durchführung: Drei verschiedene Strahlerstifte (Pu-238, Kr-85, Co-60) werden nacheinander in eine Halterung eingespannt und auf ein Geiger-Müller-Zählrohr gerichtet.

- Man verändert den Abstand zwischen Strahlerstift und Zählrohr.
- Man bringt verschiedene Materialien in unterschiedlicher Dicke zwischen Strahlerstift und Zählrohr. Als Materialien stehen zur Verfügung: Papier, Aluminium (0,3 mm; 0,5 mm; 1 mm); Plexiglas (1 mm); Blei (0,5 cm; 1 cm)



B2 a) Die Nebelkammeraufnahme von Irène Joliot-Curie zeigt die kurzen, dicken Spuren eines α -Strahlers. b) β -Strahlen erzeugen in der Nebelkammer lange, dünne Spuren, die oft krummlinig sind. c) γ -Strahlung macht sich in der Nebelkammer nur durch herausgeschlagene Elektronen (Fotoelektronen) bemerkbar, die kurze stark gekrümmte Spuren hinterlassen.

Man findet bei diesem Versuch, dass die Strahlung aus dem Strahlerstift mit dem Isotop Pu-238 (Plutonium) in Luft eine sehr kurze Reichweite hat. Auch wird sie bereits durch ein Blatt Papier vollständig absorbiert. Sie heißt **α -Strahlung** und besteht aus zweifach positiv geladenen Heliumatomen d.h. Heliumkernen.

Beim Strahlerstift mit Kr-85 (Krypton) ist die Reichweite der Strahlung in Luft einige Meter. Zur Abschirmung benötigt man einige Millimeter Aluminiumblech. Es handelt sich hier um **β -Strahlung**, genauer wird sie heute **β^- -Strahlung** genannt – sie besteht aus sehr schnellen Elektronen.

Später entdeckte man eine Strahlung, bei der Teilchen ausgesendet werden, die die gleichen Eigenschaften wie Elektronen haben, bis auf die elektrische Ladung – diese ist *positiv*. Die Teilchen nennt man **Positronen**, die Strahlung heißt **β^+ -Strahlung**.

Die Strahlung von Co-60 (Kobalt) hat in Luft eine sehr große Reichweite und ist nur durch mehrere Zentimeter Blei abschirmbar. Man nennt sie **γ -Strahlung**. Es handelt sich um elektromagnetische Strahlung (bzw. Photonen).

Weitere Eigenschaften, wie z.B. die Ionisationsfähigkeit, die elektrische Ladung etc., ergeben sich unter anderem aus Versuchen mit radioaktiver Strahlung in der Nebelkammer (Bild **B3**), mit elektrisch geladenen Platten und Magneten (siehe Tabelle **T1**).

! Merksatz

Es gibt drei radioaktive Strahlenarten, die man α -Strahlung, β -Strahlung und γ -Strahlung nennt. Sie unterscheiden sich u.a. durch die Reichweite in Luft, die Abschirmbarkeit, die elektrische Ladung und die Ablenkbarkeit im Magnetfeld.

Strahlungsart	α -Strahlung	β -Strahlung	γ -Strahlung
Nebelkammerbild	dicke, kurze, gleich lange Spuren (Bild B3a)	lange, dünne Spuren, oft krummlinig (Bild B3b)	kurze, sehr krumme Spuren (Bild B3c)
Reichweite in Luft	maximal 10 Zentimeter	maximal 20 Meter	etwa 2 Kilometer
(nahezu) vollständige Abschirmung durch	ein Blatt Papier	5 Millimeter Aluminium	5–10 Zentimeter Blei
ionisiert Materie	sehr stark	mittel	gering
elektrische Ladung	positiv	negativ (β^-) bzw. positiv (β^+)	keine
Ablenkung durch geladene Platten/im Magnetfeld	schwer ablenkbar	leicht ablenkbar	nicht ablenkbar
besteht aus	Helium-Kernen	Elektronen bzw. Positronen	elektromagnetischer Strahlung (Photonen)

T1 Verschiedene Eigenschaften von α -Strahlung, β -Strahlung bzw. γ -Strahlung

Exkurs – Röntgenstrahlung

Ende des 19. Jahrhunderts wurden innerhalb von zwei Jahren drei Entdeckungen gemacht, welche die Vorstellung zur Struktur der Materie stark vorantrieben. Die letzte war die Entdeckung des Elektrons 1897 durch Joseph John THOMSON. Bereits 1896 hatte Henri BECQUEREL die Radioaktivität entdeckt. Er wiederum machte seine Versuche in der Folge von Experimenten, die Wilhelm Conrad RÖNTGEN durchgeführt und 1895 veröffentlicht hatte.

RÖNTGEN hatte Versuche mit sogenannten Kathodenstrahlröhren durchgeführt und entdeckt, dass dabei eine sehr durchdringende Strahlung entsteht, die er „X-Strahlen“ nannte: „Lässt man durch eine



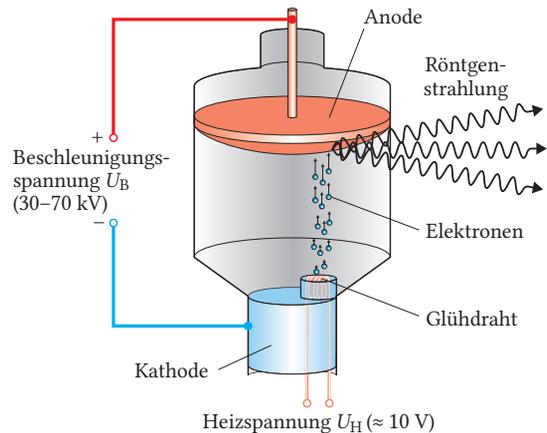
Hittorf'sche Vacuumröhre, [...] die Entladungen eines grösseren Rühmkorff's [Anm.: Apparat zur Erzeugung hoher Spannungen] gehen und bedeckt die Röhre mit einem ziemlich eng anliegenden Mantel aus dünnem, schwarzem Carton, so sieht man einen [...] mit Bariumplatincyaniür angestrichenen Papierschirm bei jeder Entladung hell aufleuchten, fluoresciren, gleichgültig ob die angestrichene oder die andere Seite des Schirmes dem Entladungsapparat zugewendet ist. Die Fluoreszenz ist noch in 2 m Entfernung vom Apparat bemerkbar. [...] Papier ist sehr durchlässig: hinter einem eingebundenen Buch von ca. 1000 Seiten sah ich den Fluoreszenzschirm noch deutlich leuchten.“



Bald fand RÖNTGEN heraus, dass man damit ins Innere des menschlichen Körpers blicken konnte. Berühmt ist die erste Röntgenaufnahme, die er von der Hand des Anatomen und Ehrenvorsitzenden der Physikalisch-medizinischen Gesellschaft Würzburg, VON KÖLLIKER, machte. Diese Eigenschaft der X-Strahlen verbreitete sich wie ein Lauffeuer bei den Ärzten. Da die Apparate zur Erzeugung dieser Strahlen vergleichsweise einfach aufzubauen waren, vergingen nur wenige Monate, bis an vielen Orten Ärzte in der Lage waren Röntgenaufnahmen zu machen.

In Deutschland wurden die X-Strahlen noch zu Lebzeiten RÖNTGENS in Röntgenstrahlen umbenannt. Im Englischen heißen sie immer noch „X-rays“.

Den grundlegenden Aufbau einer **Röntgenröhre** zeigt die Abbildung hier. Die ganze Röhre ist dabei luftleer gepumpt („Vakuumröhre“).



Mithilfe eines *Glühdrahtes* setzt man zuerst Elektronen frei. Diese werden dann zwischen der negativen *Kathode* und der positiven *Anode* durch eine hohe Spannung von 30 bis 70 Kilovolt beschleunigt (Beschleunigungsspannung U_B). Die Elektronen prallen dann mit sehr hoher Geschwindigkeit auf die Anode, die aus Metallen mit guter Wärmeleitfähigkeit und hohem Schmelzpunkt besteht (z. B. Wolfram, Molybdän, Kupfer). Beim Aufprall auf die Anode geben die Elektronen ihre Energie ab; ein Teil dieser Energie (ca. 5%) wird dann in Form von *Röntgenstrahlung* nach außen abgestrahlt. Da die restliche Energie in Wärme umgewandelt wird, muss man die Anode kühlen, z. B. indem man sie ständig rotieren lässt.

Die Röntgenstrahlung ist in der Lage, je nach Material auch dicke Schichten zu durchdringen. Da sie aber zu den *ionisierenden Strahlungen* gehört, verliert sie beim Durchgang durch Materie an Intensität. Bei Röntgenaufnahmen macht man sich auch zunutze, dass verschiedene Materialien bei gleicher Dicke die Röntgenstrahlung verschieden stark absorbieren – z. B. Knochen mehr als das umgebende Gewebe. So entsteht quasi ein Schattenbild von unserem „röntgenologisch durchsichtigen“ Körper.

Löse selbst

1 Beschreibe, wie man nachweisen kann, dass radioaktive Strahlung die Luft ionisiert.

2 Jemand führt den Versuch **V1** von Seite 8 durch und verwendet dabei

- a) einen α -Strahler;
- b) einen β -Strahler;
- c) einen γ -Strahler.

Beschreibe welche Beobachtungen du erwartest, wenn zwischen den Strahler und den Kopf des Elektroskops jeweils folgende Gegenstände gehalten werden: ein Blatt Papier, ein Buch (100 Seiten), eine zusammengepresste Getränkedose (Aluminium), ein Ziegelstein. Begründe die Antworten.



3 Ein positiv geladenes Elektroskop wird zusammen mit einem Strahlerstift unter eine Glasglocke gestellt, aus man die Luft herauspumpt („Vakuimglocke“). Man beobachtet das Elektroskop über längere Zeit. Begründe, was du erwarten würdest, wenn der Strahlerstift ein Präparat enthält mit

- a) einem α -Strahler;
- b) einem β -Strahler;
- c) einem γ -Strahler.
- d) Würde sich etwas ändern, wenn man das Elektroskop zuerst negativ auflädt? Begründe.

4 Beschreibe den Aufbau und die Funktionsweise

- a) eines Elektroskops;
- b) einer Nebelkammer;
- c) eines Geiger-Müller-Zählrohrs.

5 In natürlichen Erzen wie z. B. Pechblende sind immer verschiedene radioaktive Isotope enthalten. Solche Erze senden oft mehr als eine Strahlenart aus.



Beschreibe, wie du mithilfe eines Geiger-Müller-Zählrohrs nachweisen könntest, dass ein Erzbrocken

- a) α - und γ -Strahlung, aber keine β -Strahlung;
- b) β - und γ -Strahlung, aber keine α -Strahlung;
- c) alle drei Strahlenarten aussendet. Begründe jeweils deine Antwort.

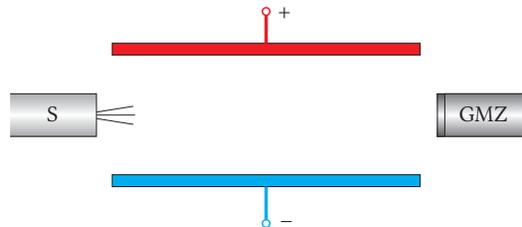
6 Beschreibe im Vergleich, welche Vor- und Nachteile eine Nebelkammer und ein Geiger-Müller-Zählrohr bei der Beobachtung radioaktiver Strahlung haben.

7 Die AAA-Regel (siehe **Vorsicht!Gefahr!** auf Seite 8) beschreibt drei Maßnahmen, mit der du die Gefährdung durch radioaktive Strahlung verringern kannst. Stelle dir folgende Situation vor: Du sollst eine radioaktive Flüssigkeit von einem Reagenzglas in ein anderes umfüllen. Beschreibe, welche der drei Maßnahmen jeweils geeignet ist:

- a) einem α -Strahler;
- b) einem β -Strahler;
- c) einem γ -Strahler.



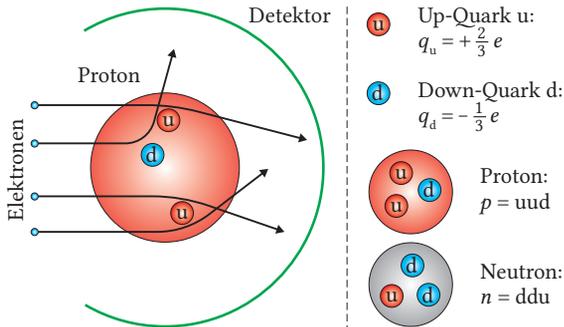
8 In einem Experiment (siehe Grafik) lässt man radioaktive Strahlung aus einem Strahlerstift (S) zwischen zwei geladenen Platten hindurchfliegen. Auf der gegenüberliegenden Seite registriert ein Geiger-Müller-Zählrohr (GMZ) jeweils fünf Minuten lang die ankommende Strahlung. Die Anordnung befindet sich in Luft, die Plattenlänge beträgt 3 cm.



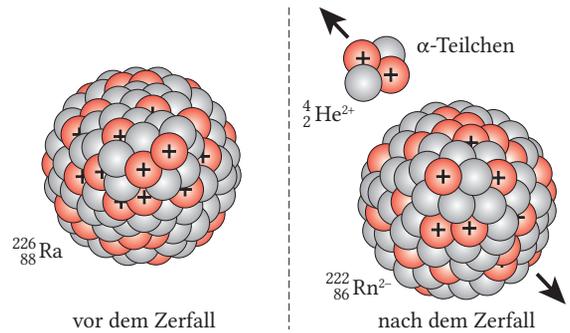
- a) Skizziere, welchen Weg die einzelnen Strahlenarten zwischen den beiden Platten nehmen.
- b) Die beiden Platten werden anschließend entladen und die Versuche wiederholt. Begründe, welche Veränderungen du bei den Messwerten für die einzelnen Strahlenarten erwartest.
- c) Der Versuch wird mit einem Plattenpaar von 30 cm Länge wiederholt. Welche Veränderungen ergeben sich hierbei? Begründe.

9 Um Atome zu ionisieren muss Energie aufgewendet werden. Begründe damit den Zusammenhang zwischen den Eigenschaften „ionisiert Materie“ und „Reichweite in Luft“ in Tabelle **T1** auf Seite 11.

4.3 Radioaktive Strahlung: Prozesse im Atomkern



B1 Proton und Neutron bestehen aus up- und down-Quarks.



B2 α -Zerfall von Ra-226; die Atomhüllen sind nicht dargestellt.

Radioaktive Strahlung, Atomkern und Quarks – Die Erforschung der Radioaktivität war anfangs meist eine Sache der Chemie. Dabei fand man, dass die Aussendung radioaktiver Strahlung die *chemischen Eigenschaften* des Ausgangsstoffes ändert. Atome eines Elements mussten sich also in Atome eines anderen Elements umwandeln, d. h.: Atomkerne änderten sich. Details dieser Vorgänge konnte man erst aufklären, nachdem man eine Reihe von Teilchen, deren Existenz man aufgrund physikalischer Theorien vermutete, in Versuchen nachwies:

- das **Neutron**: Vorhersage 1920 durch Ernest RUTHERFORD; Nachweis 1932 durch James CHADWICK;
- die **Antiteilchen**: Vorhersage von Paul DIRAC 1928 (Positron), Nachweis durch C. D. ANDERSON 1932;
- das **Neutrino**: Vorhersage 1930 durch Wolfgang Pauli; Nachweis 1956 durch F. REINES und C. COWAN;
- die **Quarks**: Vorhersage 1964/65 durch MURRAY GELLMANN und unabhängig davon GEORGE ZWEIG bzw. ANDRÉ PETERMANN; Nachweis in den 1960er/1970er Jahren durch verschiedene Arbeitsgruppen.

Streuexperimente ergaben, dass *Protonen* im Inneren drei Streuzentren enthalten – zwei *up-Quarks* und ein *down-Quark*. Diese Quarks sind geladene Teilchen: Das up-Quark (u) trägt die Ladung $q_u = +\frac{2}{3} e$, das down-Quark (d) trägt die Ladung $q_d = -\frac{1}{3} e$.

Ähnlich fand man für *Neutronen*, dass sie aus zwei down-Quarks und einem up-Quark bestehen. Kurz schreibt man: $p = uud$; $n = ddu$ (Bild **B1**).

! Merksatz

Protonen (p) und Neutronen (n) bestehen aus up-Quarks (u) und down-Quarks (d).
 Ein up-Quark trägt die Ladung $q_u = +\frac{2}{3} e$, ein down-Quark trägt die Ladung $q_d = -\frac{1}{3} e$.
 Es gilt: $p = uud$; $n = ddu$.

α -Strahlung im Detail – α -Strahlung besteht aus Atomkernen des stabilen Heliumisotops He-4 (man könnte auch sagen: zweifach positiv geladenen Heliumatome). Diese verlassen mit hoher Geschwindigkeit den Atomkern; man nennt sie dann auch **α -Teilchen**.

α -Teilchen bestehen aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Daher bleibt nun ein Atomkern übrig, bei dem nach diesem Vorgang die *Kernladungszahl* Z um 2 kleiner, die *Massenzahl* A um 4 kleiner ist. Bild **B2** stellt diesen Vorgang am Beispiel des Radiumisotops Ra-226 schematisch dar.

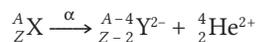
Die Atomhülle bleibt bei diesem Prozess zunächst unverändert. Da sich nun im Kern zwei positive Elementarladungen weniger befinden als im „alten“ Atomkern, sind in der Atomhülle nun zwei Elektronen überschüssig. Daher ist das so entstandene Atom zuerst zweifach negativ geladen; die überschüssigen Elektronen werden jedoch bald an positive Ionen in der Umgebung abgegeben.

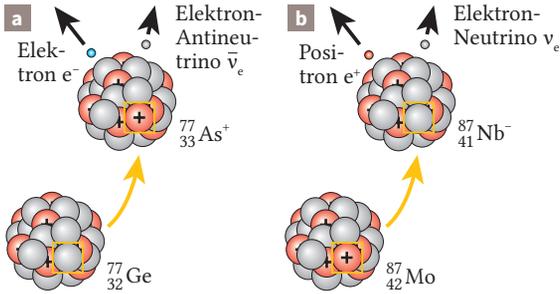
Man nennt diesen Vorgang **α -Zerfall**. Mit der Kurzschreibweise für Isotope lassen sich α -Zerfälle übersichtlich in einer **Zerfallsgleichung** darstellen. Am Beispiel von Ra-226 sieht das so aus (Beachte, dass dabei zunächst Ionen entstehen!):



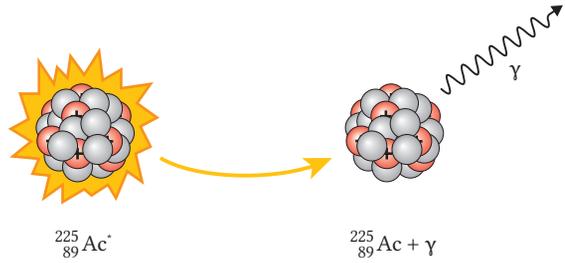
! Merksatz

Beim α -Zerfall verlässt ein Heliumion $^4_2\text{He}^{2+}$ den Atomkern. Dadurch verringert sich die Kernladungszahl Z um 2, die Massenzahl A um 4:





B3 a) β^- -Zerfall von Ge-77 b) β^+ -Zerfall von Mo-87



B4 Ein angeregter Atomkern sendet γ -Strahlung aus.

β -Strahlung im Detail – Viel schwieriger als die α -Strahlung war die β -Strahlung zu verstehen, die in es in zwei Varianten gibt, β^- -Strahlung und β^+ -Strahlung. Wir beginnen zunächst mit der β^- -Strahlung.

β^- -Strahlung besteht aus sehr schnellen *Elektronen*. Wie bei der α -Strahlung entsteht auch hier ein Atom eines anderen Elements. Das bedeutet aber, dass diese Elektronen aus dem Atomkern kommen müssen – in dem aber eigentlich keine Elektronen vorhanden sind!

Des Rätsels Lösung: Ein Neutron n wandelt sich in ein Proton p um. Dabei werden ein Elektron e^- (**β^- -Teilchen**) und ein **Antineutrino** $\bar{\nu}_e$ mit sehr hoher Geschwindigkeit ausgesendet (Bild **B3a**). Dadurch vergrößert sich nur die Kernladungszahl Z um 1, die Massenzahl A bleibt unverändert, ebenso wie die Elektronenhülle. Das Atom ist nach dem **β^- -Zerfall** daher zunächst positiv geladen. Wie dann die Zerfallsgleichung aussieht, wird hier am Beispiel von Ge-77 gezeigt:



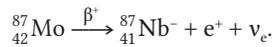
! Merksatz

Beim β^- -Zerfall wandelt sich ein Neutron n in ein Proton p um, wobei ein Elektron e^- und ein Antineutrino $\bar{\nu}_e$ ausgesendet werden. Die Kernladungszahl Z vergrößert sich dabei um 1, die Massenzahl A bleibt unverändert:

$${}^A_Z \xrightarrow{\beta^-} {}^A_{Z+1} Y^+ + e^- + \bar{\nu}_e.$$

Beim **β^+ -Zerfall** geschieht quasi das Umgekehrte: Ein Proton p wandelt sich in ein Neutron n um. Dabei werden ein Positron e^+ (**β^+ -Teilchen**) und ein **Neutrino** ν_e mit sehr hoher Geschwindigkeit ausgesendet (Bild **B3b**). Jetzt verkleinert sich nur die Kernladungszahl Z um 1,

die Massenzahl A bleibt unverändert. Das Atom ist danach negativ geladen. Am Beispiel von Mo-87 ist hier die Zerfallsgleichung dargestellt:



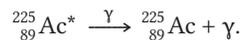
! Merksatz

Beim β^+ -Zerfall wandelt sich ein Proton p in ein Neutron n um, wobei ein Positron e^+ und ein Neutrino ν_e ausgesendet werden. Die Kernladungszahl Z verkleinert sich dabei um 1, die Massenzahl A bleibt unverändert:

$${}^A_Z X \xrightarrow{\beta^+} {}^A_{Z-1} Y^- + e^+ + \nu_e.$$

γ -Strahlung im Detail – Nach einem α - oder β -Zerfall kann es vorkommen, dass der neue Atomkern sich nicht in seinem Grundzustand befindet. Er ist noch „angeregt“. Du kannst dir das so vorstellen: Du (α -Teilchen) springst aus einem Ruderboot (Atomkern) an Land – das Boot wippt noch eine ganze Weile nach.

Der Atomkern gibt dann seine überschüssige Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung – man nennt sie **γ -Strahlung** – nach außen ab (Bild **B4**). Bei diesem Vorgang ändern sich weder die Kernladungszahl Z noch die Massenzahl A . Den angeregten Zustand kennzeichnet man mit einem Sternchen (*):



! Merksatz

Atomkerne können sich in einem angeregten Zustand befinden. Sie senden dann γ -Strahlung aus:

$${}^A_Z X^* \xrightarrow{\gamma} {}^A_Z X + \gamma.$$

Exkurs – Aufbau der Materie ab 1920

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts gewinnt man immer mehr experimentelle Ergebnisse und die Vorstellungen vom Aufbau der Materie entwickeln sich stetig weiter. Sie führen schließlich zur heutigen *Quantenphysik* und dem *Standardmodell der Teilchenphysik*.

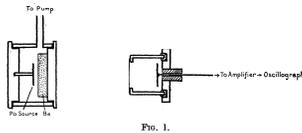
Als 1913 Niels BOHR sein Atommodell vorstellt, herrscht noch Unklarheit, wie es im Atomkern aussieht. Man weiß, dass β^- -Strahlen aus Elektronen bestehen und aus dem Atomkern stammen. So schlägt ERNEST RUTHERFORD im Jahr 1920 vor, dass der Kern neben positiv geladenen Protonen



auch Elektronen enthält, die die positive Ladung teilweise neutralisieren. Er vermutet, dass sich ein Elektron und ein Proton zu einem neutralen Teilchen verbinden könnten – und ahnt damit die Existenz des *Neutrons* voraus.

James CHADWICK, der Seite an Seite mit RUTHERFORD arbeitet, folgert 1921, dass im Atomkern eine bisher unbekannte Kraft wirkt, die die Protonen zusammenhält – er nennt sie „starke Kraft“.

Später kann er das Neutron nachweisen, indem er eine Scheibe aus Beryllium mit α -Teilchen beschießt. Mit einer *Ionisationskammer* (siehe Originalgrafik) registriert er, dass die Strahlungsintensität steigt, wenn er zwischen Beryllium-Scheibe und Ionisationskammer eine Paraffinschicht einbringt: Die α -Teilchen schlagen aus dem Beryllium Neutronen heraus und diese ihrerseits Protonen aus dem Paraffin.

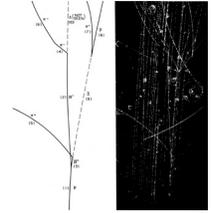


Der Brite Paul DIRAC stellt 1928 eine mathematische Gleichung auf, deren Lösung die Eigenschaften des Elektrons richtig beschreibt. Daneben gibt es auch Lösungen, die keine Entsprechung in der Realität haben.

DIRAC zeigt auf, dass diese einem Teilchen mit den gleichen Eigenschaften wie ein Elektron, nur mit positiver elektrischer Ladung entsprechen – dem *Positron*. Beim Aufeinandertreffen von Positron und Elektron sollten beide zu Energie zerstrahlen. Das

Positron wird das erste *Antiteilchen*, das Carl David ANDERSON schließlich 1932 entdeckt.

Zwischen 1930 und 1960 findet man mit immer weiter verbesserten Geräten und in zahlreichen Experimenten eine Vielzahl neuer „Elementarteilchen“, die kleiner als Atome sind. Aufnahmen mit der *Blasenkammer* (Bild) spielen dabei eine große Rolle. Man spricht mittlerweile von einem *Teilchenzoo*, zunächst ohne erkennbare Systematik.



Der amerikanische Physiker Murray GELL-MANN erforscht seit den 1950er Jahren, wie man diese Teilchen klassifizieren könnte. In seiner Theorie spielen Überlegungen zur Symmetrie eine große Rolle. 1964 schlägt er vor, dass Protonen und Neutronen aus je drei *Quarks* bestehen. Ähnliche Überlegungen stellen gleichzeitig unabhängig davon GEORGE ZWEIG bzw. ANDRÉ PETERMANN an.

In den folgenden Jahrzehnten entdeckt man mithilfe von immer größeren *Teilchenbeschleunigern* wie SLAC in Stanford, Fermilab in Batavia, DESY in Hamburg (Bild) und CERN in Genf, die theoretisch vorhergesagten Teilchen – zuletzt am CERN im Jahr 2012 das *Higgs-Teilchen*.



Im *Standardmodell der Teilchenphysik* gibt es drei Generationen von *Teilchen*. Jede Teilchengeneration enthält zwei *Leptonen* und zwei *Quarks* – eine besteht aus dem Elektron, dem Elektronneutrino sowie dem up- und dem down-Quark. Zudem gibt es drei *Wechselwirkungen* (WW) mit ihren Austauschpartnern – die elektromagnetische WW mit dem Photon, die schwache WW mit W- und Z-Bosonen, die starke WW mit den Gluonen. Dazu kommen noch das Higgs-Teilchen und die Gravitation.

	Materie (Fermionen)				Bosonen
Quarks	u up	c charm	t top	γ Photon	H Higgs Boson
	d down	s strange	b bottom	g Gluon	
	ν_e Elektron-Neutrino	ν_μ Myon-Neutrino	ν_τ Tau-Neutrino	Z^0 Z Boson	
Leptonen	e Elektron	μ Myon	τ Tau	W^\pm W Boson	Eichbosonen

Löse selbst

- 1** Beschreibe die Prozesse, die in einem Atom stattfinden bei
 a) einem α -Zerfall; b) einem β^- -Zerfall;
 c) einem β^+ -Zerfall; d) Aussendung von γ -Strahlung.

- 2** Entwirf jeweils eine Zeichnung, in der symbolisch folgender Vorgang mit Berücksichtigung der Atomhülle dargestellt ist:

- a) α -Zerfall; b) β^- -Zerfall;
 c) β^+ -Zerfall; d) Aussendung von γ -Strahlung.

- 3** Vervollständige jeweils die Zerfallsgleichung unter Berücksichtigung der elektrischen Ladung mithilfe des Periodensystems im Anhang:

- a) ${}^{235}_{92}\text{U} \xrightarrow{\alpha} ?$ b) ${}^{232}_{90}\text{Th} \xrightarrow{\alpha} ?$
 c) $? \xrightarrow{\alpha} {}^{237}_{93}\text{Np} + ?$ d) $? \xrightarrow{\alpha} {}^{222}_{86}\text{Rn} + ?$
 e) ${}^{210}_{84}\text{Po} \xrightarrow{\alpha} ?$ f) ${}^{238}_{92}\text{?} \xrightarrow{\alpha} ?$
 g) $\text{Sm-147} \xrightarrow{\alpha} ?$ h) $? \xrightarrow{\alpha} \text{Yb-170}$

- 4** Vervollständige jeweils die Zerfallsgleichung unter Berücksichtigung der elektrischen Ladung mithilfe des Periodensystems im Anhang:

- a) ${}^{40}_{19}\text{K} \xrightarrow{\beta^-} ?$ b) ${}^{210}_{82}\text{Pb} \xrightarrow{\beta^-} ?$
 c) $? \xrightarrow{\beta^-} {}^{14}_7\text{N} + ?$ d) $? \xrightarrow{\beta^-} {}^{204}_{81}\text{?} + ?$
 e) ${}^{176}_{71}\text{?} \xrightarrow{\beta^-} ?$ f) $? \xrightarrow{\beta^-} {}^{52}_{24}\text{Cr}^+ + e^- + \bar{\nu}_e$
 g) $? \xrightarrow{\beta^-} \text{Xe-131} + ?$ h) $\text{Tl-206} \xrightarrow{\beta^-} ?$

- 5** Vervollständige jeweils die Zerfallsgleichung unter Berücksichtigung der elektrischen Ladung mithilfe des Periodensystems im Anhang:

- a) ${}^{68}_{31}\text{Ga} \xrightarrow{\beta^+} ?$ b) ${}^{210}_{82}\text{Pb} \xrightarrow{\beta^+} ?$
 c) ${}^{22}_{11}\text{?} \xrightarrow{\beta^+} ?$ d) $? \xrightarrow{\beta^+} {}^{53}_{25}\text{Mn}^- + e^+ + \nu_e$
 e) $? \xrightarrow{\beta^+} {}^{17}_8\text{O}^- + e^+ + \nu_e$ f) $\text{C-11} \xrightarrow{\beta^+} ?$

- 6** Beschreibe auf der Quark-Ebene, welcher Vorgang im Atomkern stattfinden muss bei
 a) einem β^- -Zerfall, b) einem β^+ -Zerfall.

- 7** Bei einem radioaktiven Zerfall entsteht oftmals wieder ein radioaktives Isotop usw. Man nennt das eine Zerfallsreihe. Gib an, wie sich jeweils Kernladungszahl, Massenzahl und Neutronenzahl ändern, wenn der Reihe nach folgende Zerfallsarten auftreten:

- a) α, α, β^- b) β^-, β^-, α
 c) $\alpha, \beta^-, \beta^-, \alpha$ d) α, β^+, β^+

- 8** Allgemein bezeichnet man das Isotop, das zu Beginn eines Zerfalls vorhanden ist als *Mutterkern*. Das Isotop, das nach dem Zerfall vorhanden ist, heißt dann *Tochterkern*. Gesucht ist jeweils, wo man das Element des Tochterkerns bzw. des Mutterkerns im Periodensystem findet.

Perioden	Hauptgruppen	
	I	II
1	1,01 H Wasserstoff	
2	6,94 3 Li Lithium	9,01 4 Be Beryllium
3	22,99 11 Na Natrium	24,31 12 Mg Magnesium
4	39,10 19 K Kalium	40,08 20 Ca Calcium

- a) Der Mutterkern ist ein α -Strahler.
 b) Der Tochterkern stammt aus einem α -Zerfall.
 c) Der Mutterkern ist ein β^- -Strahler.
 d) Der Tochterkern stammt aus einem β^- -Zerfall.
 e) Der Mutterkern ist ein β^+ -Strahler.
 f) Der Tochterkern stammt aus einem ein β^+ -Zerfall.
 e) Der Mutterkern ist ein γ -Strahler.

- 9** Beschreibe wie sich die Positionen von Tochter- und Mutterkern in einer Isotopentafel (Nuklidkarte) voneinander unterscheiden ...

- a) ... nach einem α -Zerfall;
 b) ... nach einem β^- -Zerfall;
 c) ... nach einem β^+ -Zerfall.

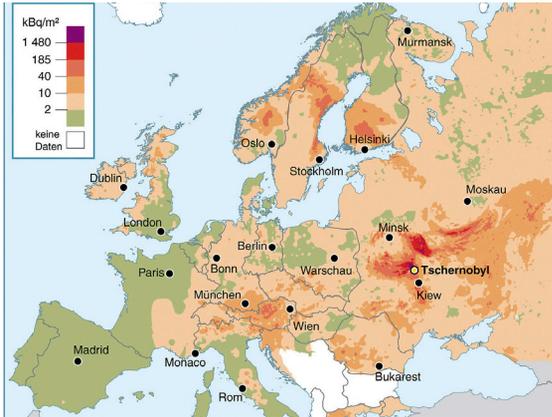
- 10** Es kommt recht häufig vor, dass nach dem radioaktiven Zerfall wieder ein Isotop entsteht, das ebenfalls radioaktiv ist, usw., bis man am Schluss bei einem stabiles Isotop landet. Die Abfolge der Isotope bis zum Erreichen des stabilen Isotops bezeichnet man als *Zerfallsreihe*. Recherchiere mithilfe einer Nuklidkarte, dem Internet o. ä., welche Zerfälle und welche Isotope in der Zerfallsreihe auftauchen, die beim angegebenen Nuklid beginnen .

- a) U-238; b) Nd-161
 c) ein radioaktives Nuklid deiner Wahl.

- 11** Überprüfe, ob die nachfolgenden Aussagen ohne Zusätze richtig oder falsch sind:

- a) Wenn in einer Zerfallsreihe nur β^- -Zerfälle auftauchen, nimmt die Kernladungszahl ständig ab.
 b) Zwei Isotope unterscheiden sich in ihrer Massenzahl um 8, die Kernladungszahlen unterscheiden sich um 12. Dann haben dazwischen zwei α -Zerfälle und vier β^- -Zerfälle stattgefunden.
 c) Zwei Nuklide, deren Massenzahlen sich nicht um ein Vielfaches von 4 unterscheiden, können nicht in ein und derselben Zerfallsreihe sein.

4.4 Radioaktive Strahlung: Halbwertszeit



B1 1986 lagerten sich nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl europaweit radioaktive Isotope ab, die nach und nach zerfallen.

Radioaktive Atome zerfallen zufällig. Mit dem Geiger-Müller-Zählrohr (GMZ) registriert und zählt man die Zerfälle von einzelnen Atomen. Mit einem Lautsprecher kann man diese Ereignisse als einzelne Knackgeräusche („Impulse“) hörbar machen.

Nimmt man ein GMZ wie in Versuch **V1a** in Betrieb, ohne dass ein radioaktives Präparat in der Nähe ist, hört man in *unregelmäßigen, nicht vorhersagbaren zeitlichen Abständen* solche Knackgeräusche. Sie stammen von radioaktiven Atomen, die überall in der Umgebung vorhanden sind. Die Zerfälle dieser Atome sind nicht vorhersagbar, sie ereignen sich *zufällig*.

Wenn man allerdings mehrmals eine Minute lang diese Impulse zählt, so ergeben sich Werte, die nahe beieinander liegen (siehe Tabelle).

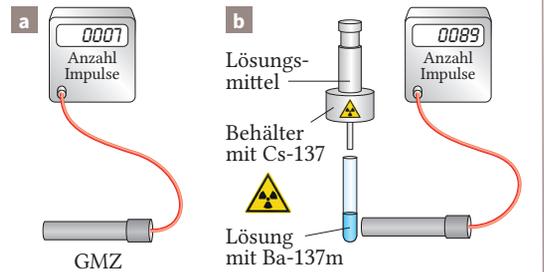
Messreihen-Nr.	1	2	3	4	5	6
Impulse pro Minute	25	27	24	25	23	25

Bildet man den Mittelwert dieser Messungen, so erhält man die so genannte **Nullrate**, hier z. B. 25 Impulse/Minute. Die Nullrate variiert von Ort zu Ort und ist z. B. bei vulkanischen Gesteinen höher als bei Sedimentgesteinen. Auch Ereignisse wie der Reaktorunfall von Tschernobyl (Bild **B1**) beeinflussen die Nullrate.

! Merksatz

Radioaktive Atome zerfallen zufällig, d. h. zu einem nicht vorhersehbaren Zeitpunkt. Aufgrund der Radioaktivität in der Umwelt, misst man immer eine Nullrate.

V1 Nullrate und Halbwertszeit



Durchführung:

- Man zählt mit dem GMZ mehrmals eine Minute lang die Impulse, ohne dass ein radioaktives Präparat in der Nähe ist.
- Man drückt etwas Lösungsmittel durch den Behälter mit dem radioaktiven Cs-137. Dadurch wäscht es das ebenfalls radioaktive Zerfallsprodukt Ba-137m aus. Die Lösung fängt man in einem Reagenzglas auf und bringt sie in die Nähe eines GMZ. Man zählt jeweils fünf Sekunden lang die Impulse.

Ein Gesetz für den radioaktiven Zerfall – In Versuch **V1b** wird die Strahlung des radioaktiven Isotops Ba-137m untersucht („m“ steht für „metastabil“). Dieses entsteht durch einen β -Zerfall von Cs-137 und stellt einen angeregten Zustand des stabilen Isotops Ba-137 dar. Ba-137m geht durch Aussendung von γ -Strahlung in den nicht angeregten Grundzustand über:



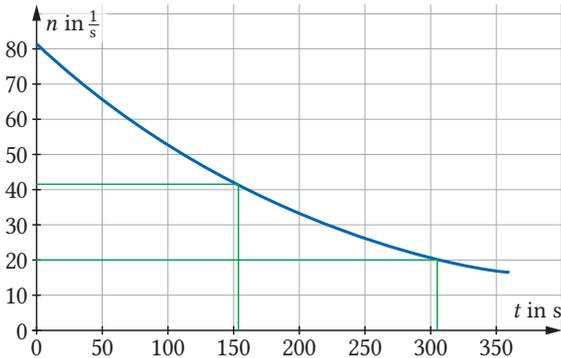
Diese γ -Strahlung wird mit dem GMZ registriert. Die Tabelle zeigt die Ergebnisse einer Messreihe. Die Variable t gibt dabei den Zeitpunkt an, ab dem jeweils während einer Zeitspanne $\Delta t = 5 \text{ s}$ die Impulse gezählt wurden (Anzahl ΔN). Teilt man diese Anzahl durch die Messdauer, so erhält man die **Zählrate** n :

$$\text{Zählrate} = \frac{\text{Anzahl Impulse}}{\text{Messdauer}}; n = \frac{\Delta N}{\Delta t}$$

Die Zählrate gibt an, wie viele Atome durchschnittlich in einer Sekunde radioaktive Strahlung aussenden.

t in s	0	60	120	180	240	300	360
n in $\frac{1}{5}$	82	63	48	37	28	21	17

Die Zählrate nimmt bei diesem Versuch kontinuierlich ab – zuerst schnell, dann immer langsamer. In einem t - n -Diagramm (Bild **B2**) kann man erkennen:



B2 Die Zählrate ist nach etwa 150 Sekunden halb so groß, nach weiteren 150 Sekunden beträgt sie nur noch ein Viertel.

Nach etwa 150 Sekunden ist die Zählrate halb so groß, nach weiteren 150 Sekunden nur noch ein Viertel des ursprünglichen Werts. Führt man die Messung weiter, so reduziert sich nach nochmals 150 Sekunden die Zählrate sich auf ein Achtel. Man findet dies bei allen radioaktiven Isotopen: Die Zählrate reduziert sich in gleichen Zeitspannen jeweils auf die Hälfte des Werts zu Beginn der Zeitspanne. Man nennt diese Zeitspanne daher auch **Halbwertszeit** $T_{1/2}$.

Die Länge der Halbwertszeit ist jeweils typisch für das Isotop bzw. den radioaktiven Zerfall (Beispiele siehe Tabelle **T1** und Anhang). Halbwertszeiten benutzt man u. a. zur Altersbestimmung von Gewebeproben wie bei der Gletschermumie „Ötzi“ (Bild **B3**).

! Merksatz

Beim radioaktiven Zerfall eines Isotops verringert sich die Zählrate in gleichen Zeitspannen jeweils auf die Hälfte des Anfangswerts. Diese Zeitspanne nennt man Halbwertszeit $T_{1/2}$. Jedes radioaktive Isotop hat eine typische Halbwertszeit.



B3 Grundlage für die Altersbestimmung der Gletschermumie „Ötzi“ bildet der radioaktive Zerfall des Kohlenstoffisotops C-14.

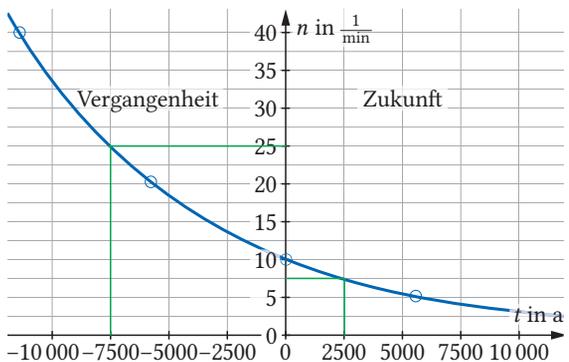
Isotop / Strahlenart	$T_{1/2}$	Isotop / Strahlenart	$T_{1/2}$
C-14 / β^-	5730 a	Cs-137 / β^-	30,1 a
Na-22 / β^+	2,60 a	Th-213 / α	144 ms
K-40 / β^-	$1,25 \cdot 10^9$ a	Rn-222 / α	3,82 d
Co-60 / β^-	5,27 a	Ra-226 / α	1600 a
Tc-98 / β^-	$4,21 \cdot 10^6$ a	U-238 / α	$4,47 \cdot 10^9$ a
Xe-120 / β^+	40 min	Np-237 / α	$2,14 \cdot 10^6$ a
I-131 / β^-	8,02 d	Pu-238 / α	87,7 a

T1 Halbwertszeiten für ausgewählte Isotope. K-40 und Rn-222 tragen hauptsächlich zur natürlichen Strahlenexposition bei.

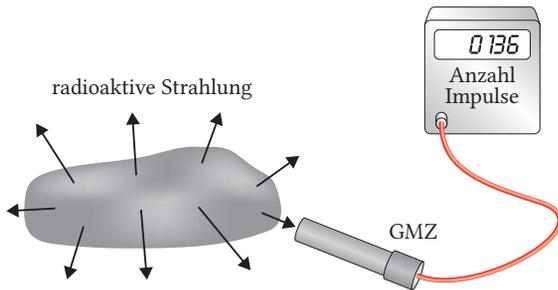
Mit der Halbwertszeit kalkulieren – Ist die Halbwertszeit eines Isotops und die Zählrate zu einem bestimmten Zeitpunkt bekannt, lassen sich mithilfe eines t - n -Diagramms Zählraten für zukünftige oder zurückliegende Zeitpunkte ermitteln oder Zeitpunkte für festgelegte Zählraten bestimmen.

Beispiel: Eine Materialprobe enthält das Isotop C-14 (Halbwertszeit $T_{1/2} = 5730$ a, siehe Tabelle **T1**). Zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ a beträgt die Zählrate $n_0 = 10 \frac{1}{\text{min}}$. Aufgabe: Bestimme den Zeitpunkt t_1 , zu dem die Zählrate $n_1 = 25 \frac{1}{\text{min}}$ war, bzw. die Zählrate n_2 in 2500 Jahren.

Im t - n -Diagramm trägt man bei $t_0 = 0$ a die Zählrate 10/min ein; bei $t = 5730$ a ist dann die Zählrate 5/min, bei $t = 11460$ a beträgt sie $2,5 \frac{1}{\text{min}}$. In der anderen Richtung trägt man bei $t = -5730$ a die Zählrate $20 \frac{1}{\text{min}}$ und bei $t = -11460$ a die Zählrate $40 \frac{1}{\text{min}}$ ein (Kreuze in Bild **B4**). Durch diese Punkte zeichnet man nun eine „möglichst glatte“ Kurve. Aus ihr lassen sich dann die gesuchten Werte ablesen (grüne Linien). Man erhält: $t_1 = -7500$ a bzw. $n_2 = 7,5 \frac{1}{\text{min}}$.



B4 t - n -Diagramm für eine Halbwertszeit von 5730 a



B1 Ein GMZ registriert nur einen kleinen Teil der Strahlung, die von einer Materialprobe ausgeht.

Mit der physikalischen Größe Aktivität radioaktive Strahlung bewerten – Mit einem GMZ registriert man meist nur einen kleinen Teil der radioaktiven Strahlung, die von einer Materialprobe ausgeht (siehe Bild **B1**). Wie groß dieser registrierte Anteil ist, hängt u. a. von der Form der Materialprobe und der Strahlenart ab. Damit man verschiedene Materialproben miteinander vergleichen kann, wird aus der Zählrate n unter Berücksichtigung der weiteren Einflussgrößen die so genannte **Aktivität A** berechnet. Sie gibt an, wie viele radioaktive Zerfälle insgesamt in der Materialprobe in einer Sekunde stattfinden.

$$\text{Aktivität} = \frac{\text{Anzahl aller Zerfälle in einer Probe}}{\text{Zeitspanne}}; A = \frac{\Delta N}{\Delta t}$$

Die Einheit der Aktivität ist:

$$[A] = 1 \text{ Becquerel} = 1 \text{ Bq} = \frac{1}{\text{s}} = 1 \text{ s}^{-1}.$$

Die Aktivität A wird z.B. bei Strahlerstiften für den Physikunterricht, aber auch bei Lebensmitteln angegeben. Die Tabelle **T1** zeigt, welche Aktivität bestimmte Lebensmittel aufgrund *natürlich* vorhandener radioaktiver Isotope aufweisen.

Die Aktivität wird z.B. bei Lebensmitteln benutzt, um zu bewerten, ob die in ihnen enthaltene Radioaktivität zu einer Gesundheitsgefährdung führen könnte. Innerhalb der EU gilt beispielsweise die Richtlinie, dass Lebensmittel mit einer Aktivität von mehr als 600 Bq je Kilogramm nicht verkauft werden dürfen.

! Merksatz

Die Aktivität A gibt an, wie viele radioaktive Zerfälle pro Sekunde in einer Materialprobe stattfinden.

$$\text{Aktivität} = \frac{\text{Anzahl aller Zerfälle in einer Probe}}{\text{Zeitspanne}}; A = \frac{\Delta N}{\Delta t}$$

Die Einheit ist: $[A] = 1 \text{ Becquerel} = 1 \text{ Bq} = \frac{1}{\text{s}} = 1 \text{ s}^{-1}$.

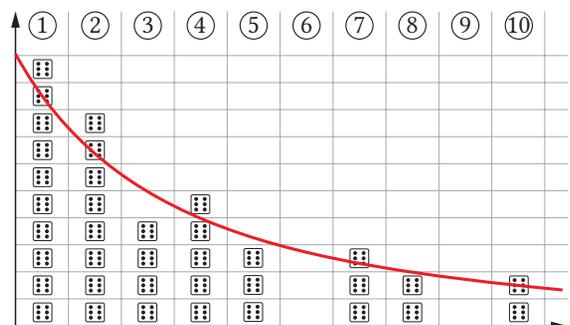
Lebensmittel	Aktivität A in Bq
1 L Milch	40–60
1 kg Schweinefleisch	30–140
1 kg Rindfleisch	50–150
1 kg Geflügelfleisch	40–130
1 kg Gemüse	30–150
1 kg Haselnüsse	190–270
1 kg Honig	30–200

T1 Natürliche Radioaktivität in Lebensmitteln

Ein Modell für den radioaktiven Zerfall – Die einzelnen Zerfallsereignisse sind bei einer Stoffprobe, die ein radioaktives Isotop enthält, nicht vorhersehbar und treten zufällig auf. Trotzdem findet man mit der Halbwertszeit eine Größe, die eine Vorhersage zulässt. Dieser scheinbare Widerspruch lässt sich in einem **Modellversuch** auflösen.

Du nimmst dazu z. B. 50 Würfel. Jeder Würfel stellt ein radioaktives Atom dar. Wirfst du diese Würfel gleichzeitig, so zeigen sie anschließend – zufällig – eine Sechs oder keine Sechs. Jeder Würfel, der eine Sechs zeigt, repräsentiert nun ein Atom, das gerade einen radioaktiven Zerfall ausgeführt hat, jeder Wurf ein bestimmtes Zeitintervall.

Die „zerfallenen“ Würfel legst du wie in Bild **B2** nun in die erste Spalte einer Tabelle. Die restlichen Würfel werden nun wieder geworfen und die „zerfallenen Atome“ – d. h. die Würfel mit einer Sechs – aussortiert und in die zweite Spalte gelegt. Diesen Vorgang wiederholt man, solange noch Würfel vorhanden sind. Die „Messwerte“ in Bild **B2** liegen nun auf einer ähnlichen Kurve, wie sie Bild **B4** auf der vorigen Seite zeigt.



B2 Mit Würfeln lässt sich der radioaktive Zerfall modellieren. Aus zufälligem „Zerfall“ wird trotzdem eine regelmäßige Kurve.

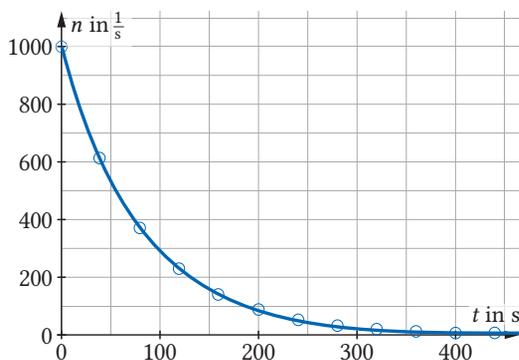
Löse selbst

Tipp: Halbwertszeiten sind in Tabelle T1, Seite 19 bzw. im Anhang, Seite XX zu finden.

- 1** Gib allgemein an, wie viele Halbwertszeiten mindestens verstreichen müssen, damit die Zählrate den genannten Bruchteil des Anfangswerts erreicht:
- weniger als 10%
 - weniger als 5%
 - etwa 1%
 - etwa 1%
 - etwa 1 Millionstel.

- 2** Nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl im Jahr 1986 lagerten sich in Europa hauptsächlich die Isotope I-131 und Cs-137 ab. Beide Isotope sind β -Strahler.
- Gib die jeweiligen Zerfallsgleichungen an.
 - Die Zählrate für I-131 in einer Probe Blattspinat betrug anfänglich $n = 200$ 1/s. Begründe, dass nach zwei Monaten keine Gefahr mehr von I-131 ausging.
 - Bei einer Bodenprobe betrug die Zählrate aufgrund von Cs-137 anfangs $n = 128$ 1/s. Bestimme das Jahr, in dem die Zählrate bei dieser Probe 16 1/s ist.

- 3** Bei einem radioaktiven Präparat wurden Zählraten gemessen, deren zeitlicher Verlauf das Diagramm darstellt.



- Ermittle aus dem Diagramm die Halbwertszeit möglichst genau.
- Bestimme mithilfe der Tabellen zur Halbwertszeit (Tabelle T1, S. 19 oder Anhang, S. XX), um welches Isotop es sich gehandelt haben könnte.
- Beschreibe, was sich an dem Diagramm ändern würde, wenn die anfängliche Zählrate zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ s den Wert $n_0 = 2000$ $\frac{1}{s}$ gehabt hätte.
- Übertrage das Diagramm in dein Heft und zeichne die entsprechenden Graphen für $n_0 = 600$ $\frac{1}{s}$ bzw. $n_0 = 400$ $\frac{1}{s}$.

- 4** Bei einer Messung haben sich die Zählraten in der Tabelle ergeben:

t in s	0	90	180	270	360	450	540
n in 1/s	200	162	132	107	87	71	57

- Zeichne ein t - n -Diagramm und bestimme daraus die Halbwertszeit.
- Welche Zählrate würdest du bei $t = 900$ s erwarten?
- Finde ein passendes Isotop im Anhang, Seite XXX.

- 5** Pb-210 hat eine Halbwertszeit von $T_{1/2} = 22,3$ a. Bei einer Probe hat man anfangs eine Zählrate von 240 $\frac{1}{s}$.
- Zeichne ein passendes Diagramm.
 - Ermittle damit die Zählraten zu folgenden Zeitpunkten $t = 5,0$ a; $t = 10$ a; $t = 30,0$ a; $t = 100$ a.
 - Bestimme die Zeitpunkte mit folgenden Zählraten: $n = 200$ $\frac{1}{s}$; $n = 150$ $\frac{1}{s}$; $n = 100$ $\frac{1}{s}$; $n = 50$ $\frac{1}{s}$; $n = 5$ $\frac{1}{s}$.

- 6** Beschreibe den Unterschied zwischen den Größen „Zählrate“ und „Aktivität“.

- 7** Auf einem Strahlerstift, der das Isotop Na-22 enthält, findet man die Angabe 74 kBq.



- Ermittle, welche Art von Strahlung von diesem Stift ausgeht und gib die entsprechende Zerfallsgleichung an.
- Ermittle die Halbwertszeit von Na-22 und zeichne ein t - A -Diagramm für den Zeitraum von $t_A = 0$ a bis $t_A = 26$ a.
- Bestimme mithilfe des Diagramms von Aufgabe b), ab welchem Zeitpunkt die Aktivität des Strahlerstifts unter 5 kBq gesunken ist.

- 8** Recherchiere Pressemeldungen, in denen die Einheit Becquerel auftaucht. Beschreibe, worum es in der entsprechenden Pressemeldung geht und in welchen Zusammenhang die Einheit verwendet wird.

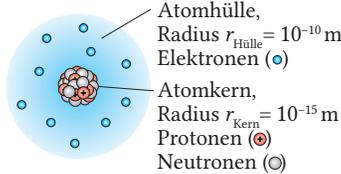
- 9** Im lebenden Organismus ist das Verhältnis von C-12 (stabil) zu C-14 (radioaktiv) aufgrund des Stoffwechsels (ständiger Austausch von C-Atomen) konstant.
- Begründe, wie sich dieses Verhältnis nach dem Tod des Organismus verändert.
 - Begründe, wie man damit das Alter eines toten Organismus (z. B. „Ötzi“, Bild B3) bestimmen kann.
 - Diese C-14-Methode reicht maximal etwa 50 000 Jahre zurück. Begründe, warum.



Zusammenfassung

1. Atomkern, Atomhülle, Ionen

Atome bestehen aus einer Atomhülle und einem Atomkern. Der Radius beträgt bei der Atomhülle etwa

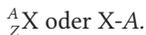


$r_{\text{Hülle}} \approx 10^{-10}$ m, beim Kern etwa $r_{\text{Kern}} \approx 10^{-15}$ m. Die Atomhülle enthält elektrisch negativ geladene Elektronen, der Atomkern besteht aus elektrisch neutralen Neutronen und positiv geladenen Protonen. Die Ladung eines Elektrons ist $-e$, die eines Protons $+e$ (e : Elementarladung).

Beim neutralen Atom ist die Anzahl der Elektronen in der Hülle gleich der Anzahl der Protonen im Kern. Sind mehr Elektronen in der Hülle als Protonen im Kern, spricht man von einem negativen Ion, im umgekehrten Fall von einem positiven Ion.

2. Elemente und Isotope

Atome mit der gleichen Protonenzahl im Atomkern gehören zum gleichen chemischen Element. Im Periodensystem sind die Elemente unter anderem nach der Anzahl der Protonen im Kern geordnet. Atome eines Elements mit unterschiedlicher Neutronenzahl nennt man Isotope. Zur Kennzeichnung eines Isotops verwendet man Kurzschreibweisen:



- X: chemisches Formelzeichen; z. B. Fe
 - A: Massenzahl oder Nukleonenzahl: Summe aus Protonen- und Neutronenzahl, z. B. 56
 - Z: Kernladungszahl oder Ordnungszahl: Anzahl der Protonen im Atomkern, z. B. 26
- In der Nuklidkarte (Isotopentafel) sind die Isotope nach Protonen- und Neutronenzahl geordnet.

3. Quarks

Proton und Neutron bestehen aus up- und down-Quarks. Ein up-Quark (u) hat die Ladung $+\frac{2}{3}e$, ein down-Quark (d) die Ladung $-\frac{1}{3}e$. Die Zusammensetzung des Protons ist duu, die des Neutrons ddu.

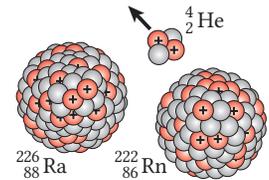
4. Radioaktive Strahlenarten – Eigenschaften

Man unterscheidet drei Arten ionisierender Strahlung:
□ α -Strahlung besteht aus sehr schnellen Heliumkernen, ihre Reichweite beträgt in Luft maximal zehn Zentimeter, sie ist stark ionisierend und lässt sich daher durch ein Blatt Papier abschirmen.

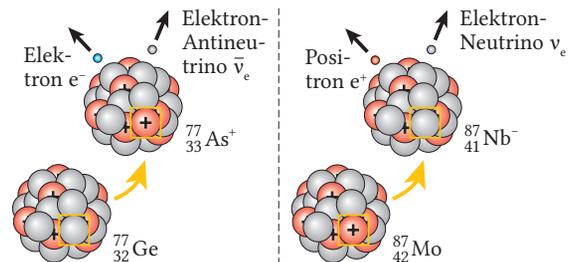
- β -Strahlung besteht aus sehr schnellen Elektronen (β^-) bzw. Positronen (β^+), ihre Reichweite in Luft maximal ist zwanzig Meter, sie ist mittelstark ionisierend und lässt sich durch fünf Millimeter Aluminium abschirmen.
- γ -Strahlung besteht aus elektromagnetischer Strahlung, ihre Reichweite beträgt in Luft maximal zwei Kilometer, sie ist wenig ionisierend und lässt sich nur durch mehrere Zentimeter Blei abschirmen.

5. Prozesse im Atomkern

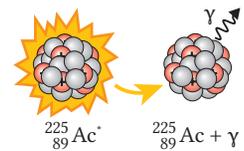
Ein α -Strahler schleudert zwei Protonen und zwei Neutronen in Form eines Heliumkerns aus dem Atomkern.



Bei einem β^- -Zerfall wandelt sich ein Neutron in ein Proton um, wobei ein Elektron und ein Anti-Neutrino ausgesendet wird. Bei einem β^+ -Zerfall wandelt sich ein Proton in ein Neutron um unter Aussendung eines Positrons und eines Neutrinos.



Bei einem γ -Strahler sendet der angeregte Atomkern Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung aus und geht in den Grundzustand über.



6. Zählrate und Aktivität

Die Zählrate n ist der Quotienten aus der gemessenen Anzahl an Zerfällen und der Zeitspanne der Messung: $n = \frac{\Delta N}{\Delta t}$, die Einheit ist $[n] = 1 \text{ 1/s}$.

Die Aktivität A gibt die Anzahl aller Zerfälle an, die einer Materialprobe pro Sekunde stattfinden:

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t}; [A] = 1 \text{ Becquerel} = 1 \text{ Bq} = 1 \frac{1}{\text{s}}$$

7. Halbwertszeit

Bei allen radioaktiven Isotopen gibt es eine typische Zeitpanne $T_{1/2}$, in der sich die Zählrate bzw. die Aktivität jeweils auf die Hälfte des Anfangswerts verringert. Diese Zeitspanne heißt Halbwertszeit.



Aufgaben mit Lösungen

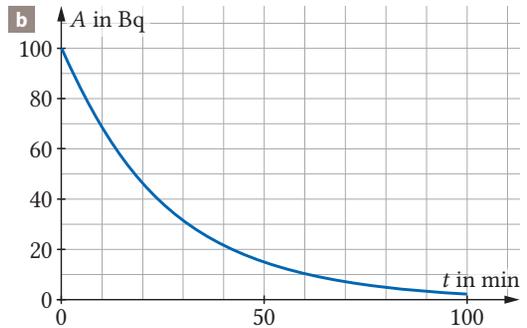
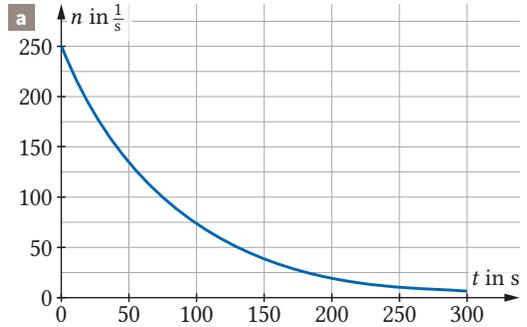
Tipp: Halbwertszeiten findest du im Anhang, Seite XXX

- 1** Beschreibe jeweils die Eigenschaften der drei radioaktiven Strahlenarten.
- 2** Beschreibe, wie du mithilfe eines Zählrohrs und verschiedenen Materialien herausfindest, welche Strahlenarten von einem radioaktiven Präparat ausgehen.
- 3** Beurteile die Vorsichtsmaßnahmen der AAA-Regel jeweils hinsichtlich der drei Strahlenarten (α , β , γ).
- 4** Hält man zwischen ein Präparat mit Co-60 und ein Geger-Müller-Zählrohr ein Blatt Papier, so ändert sich die Zählrate kaum. Bei einer 5 mm dicken Aluminiumscheibe verringert sich die Zählrate, ist aber weiterhin deutlich über der Nullrate. Bestimme, welche Strahlung Co-60 aussendet.
- 5** Am-241 ist radioaktiv. Der größte Teil der Strahlung durchdringt Papier nicht. Die restliche Strahlung wird durch eine 5 mm dicke Aluminiumplatte kaum, geschwächt. Bestimme die Strahlenarten.
- 6** Die chemische Analyse einer radioaktiven Substanz hat ergeben, dass sie aus Atomen von zwei Elementen besteht, die im Periodensystem direkt nebeneinander stehen. Gib jeweils eine mögliche Zerfallsart an, wenn die Atome des Elements mit höherer Ordnungszahl nach einiger Zeit
 - a) häufiger vorkommen, b) weniger vorkommen.
- 7** Ein radioaktives Atom X zerfällt, daraus entsteht das Atom Y. Gib an, wo man das Element im Periodensystem findet, zu dem das Atom Y gehört
 - a) nach einem α -Zerfall; b) nach einem β^- -Zerfall.
- 8** Ergänze jeweils die fehlenden Angaben mithilfe des Periodensystems:

a) ${}_{75}^{167}\text{Re} \xrightarrow{\alpha} ?$	b) $\text{Bi-211} \xrightarrow{\alpha} ?$
c) $? \xrightarrow{\alpha} \text{Os-186}$	d) ${}_{83}^{210}\text{Bi} \xrightarrow{\beta^-} ? + ?$
e) $? \xrightarrow{\beta^-} {}^{87}\text{Sr} + e^- + \bar{\nu}_e$	f) $? \xrightarrow{\beta^-} {}^{86}\text{Kr} + e^- + \bar{\nu}_e$
g) ${}_{36}^{79}\text{Kr} \xrightarrow{\beta^+} ?$	h) $? \xrightarrow{\beta^+} {}^{125}\text{Xe} + e^+ + \nu_e$
- 9** Gib mithilfe der Isotopentafel im Anhang, Seite YYY die Zerfälle folgender Nuklide und ihrer Tochterkerne an, bis ein stabiles Isotop erreicht wird:

a) C-16	b) Po-214
c) Bi-212	d) U-239

- 10** Die Diagramme zeigen den zeitlichen Verlauf der Zählrate (a) bzw. der Aktivität (b) von zwei radioaktiven Präparaten. Bestimme jeweils die Halbwertszeit und identifiziere mithilfe der Tabelle im Anhang, Seite YYY, um welches Isotop es sich handeln könnte.



- 11** Die Halbwertszeit eines Isotops beträgt 25 min. Anfangs ($t = 0$ min) misst man eine Zählrate von $160 \frac{1}{s}$.
- a) Bestimme die zu erwartenden Zählraten zu den Zeitpunkten $t = 50$ min, 75 min, 100 min usw.
 - b) Zeichne das zugehörige t - n -Diagramm.
 - c) Bestimme mit dem Diagramm die Zählrate zu den Zeitpunkten $t = 45$ min, 60 min und 90 min.
 - d) Ermittle aus dem Diagramm die Zeitpunkte, an denen die Zählrate $n = 50 \frac{1}{s}$, $30 \frac{1}{s}$ bzw. $25 \frac{1}{s}$ ist.
 - e) Wiederhole die Aufgabe mit einer anfänglichen Zählrate von $1600 \frac{1}{s}$. Vergleiche die Werte.
- 12** Die Halbwertszeit des β^+ -Strahlers Na-22 beträgt 2,6 Jahre. Er wird in Strahlerstiften für den Schulbereich eingesetzt. Die anfängliche Zählrate beträgt $4000 \frac{1}{s}$, die Nullrate im Physiksaal ist $25 \frac{1}{s}$.
- a) Erläutere, dass in den ersten 5 Jahren nach dem Erwerb des Strahlerstifts dieser schon einen großen Teil seiner „Radioaktivität“ eingebüßt hat.
 - b) Wann sollte die Schule daran denken, sich einen Ersatzstrahler zu besorgen? Begründe.