

Bauchemie

Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten

Bearbeitet von
Roland Benedix

6., überarbeitete und aktualisierte Auflage 2015. Buch. XIII, 603 S. Gebunden

ISBN 978 3 658 04143 4

Format (B x L): 16,8 x 24,6 cm

Gewicht: 1190 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Baukonstruktion, Baufachmaterialien > Bauökologie, Baubiologie, Bauphysik, Bauchemie](#)

Zu [Inhaltsverzeichnis](#)

schnell und portofrei erhältlich bei


DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

2 Atombau und Periodensystem der Elemente

2.1 Bau der Atome

2.1.1 Bestandteile des Atoms – Isotope

Die Frage nach der Struktur der Materie ist ein besonders instruktives Beispiel dafür, wie in enger Wechselbeziehung zwischen Experiment, Theorienbildung und Modellvorstellung die schrittweise Aufklärung der atomaren Substruktur zu immer detaillierteren Kenntnissen hinsichtlich des Aufbaus des Atomkerns und der Elektronenhülle führte.

Gegen Ende des neunzehnten Jahrhunderts zeichnete sich ab, dass die Atome aus noch kleineren Teilchen aufgebaut sein müssten. Basierend auf den Arbeiten von *M. Faraday* zur Elektrolyse, d.h. zur Zersetzung von chemischen Verbindungen durch den elektrischen Strom, schlug *G. J. Stoney* 1874 die Existenz elektrischer Ladungsträger vor, die mit dem Atom in irgendeiner Weise assoziiert sind. Diesen Ladungsträgern gab er später den Namen **Elektronen**. Der experimentelle Nachweis der Elektronen gelang mit der Entdeckung der Katodenstrahlen (*J. Plücker* 1859). Katodenstrahlen entstehen, wenn an zwei Elektroden, die sich in einer evakuierten Glasröhre befinden, eine hohe Spannung angelegt wird. Aus dem Metall der negativen Elektrode (Katode) treten unsichtbare Strahlen aus. Sie sind negativ geladen, deshalb bewegen sie sich zur positiven Elektrode (Anode). Sie breiten sich geradlinig aus und verursachen ein Leuchten, wenn sie auf die Glaswand auftreffen. Die Strahlung wurde bald als Teilchenstrahlung erkannt. Die schnell bewegten, negativ geladenen Teilchen sind Elektronen. Durch Messung der Ablenkung der Katodenstrahlen in elektrischen und magnetischen Feldern bestimmte *J. Thomson* das Verhältnis von Ladung und Masse für das Elektron. Die genaue Bestimmung der Ladung des Elektrons geht auf *R. Millikan* zurück (Öltröpfchenversuch 1909). Sie beträgt $q = -e = -1,602\ 1892 \cdot 10^{-19}$ C. Der Wert e wird als **Elementarladung** bezeichnet. Die Masse des Elektrons beträgt $9,109\ 534 \cdot 10^{-31}$ kg.

Verwendet man in der oben beschriebenen Versuchsanordnung keine vollständig evakuierte Röhre, sondern eine solche, die ein unter vermindertem Druck stehendes Gas enthält, tritt beim Anlegen einer hohen Spannung eine weitere Strahlung auf. Durch den Beschuss der Gasatome mit den Elektronen des Katodenstrahls werden Elektronen aus den Atomen herausgeschlagen. Dabei entstehen positiv geladene Ionen, die in Richtung der negativ geladenen Katode beschleunigt werden. Durchbohrt man die Katode, durchqueren diese Teilchen den „Kanal“ in der Katode (*Kanalstrahlen*). Das positive Ion mit der kleinsten beobachtbaren Masse tritt bei Verwendung von Wasserstoff als Füllgas der Kanalstrahlröhre auf. Es wird als **Proton** bezeichnet. Seine Ladung entspricht im Betrag der des Elektrons, besitzt jedoch ein *positives* Vorzeichen. Die Masse des Protons beträgt $1,672\ 6485 \cdot 10^{-27}$ kg. Sie ist damit 1836-mal größer als die des Elektrons.

Basierend auf den Erkenntnissen aus Gasentladungs- und Nachfolgeexperimenten gelang es 1911 dem englischen Physiker *E. Rutherford*, erste Aussagen zur inneren Struktur des Atoms zu formulieren. *Rutherford* beschoss eine dünne Goldfolie, deren Dicke etwa 2000 Atomlagen hintereinander entsprach, mit zweifach positiv geladenen Heliumkernen (α -Strahlung, Abb. 2.1). Er gelangte zu dem Resultat, dass 99% der He^{2+} -Kerne die dünne Metallfolie passieren, ohne ihre Richtung zu ändern. Nur 1% der Teilchen wurde gestreut bzw. zurückgeworfen. Dieses Ergebnis veranlasste ihn zu seinem berühmten Kommentar: „Das Atom besteht in erster Linie aus Nichts!“

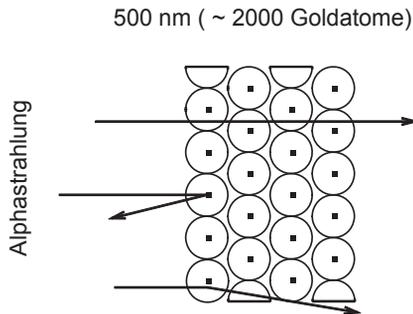


Abbildung 2.1
Streuversuch an einer
dünnen Goldfolie
(nach Rutherford)

Rutherfords Experiment brachte sowohl Licht in die Größenverhältnisse als auch in die Massenverteilung innerhalb des Atoms. Zur Strukturierung des Kerns konnte er zunächst noch keine Aussagen machen. Nach den heutigen Vorstellungen kann der Aufbau eines Atoms vereinfacht wie folgt beschrieben werden:

Aufbau des Atoms

- Anders als es noch Dalton 1808 in seinen Postulaten formuliert hatte (Kap. 1.2.1) sind die Atome keine starren, strukturlosen Kugeln.

Atome enthalten einen kleinen positiv geladenen Kern und eine kugelförmig um den Kern angeordnete Elektronenhülle, die die negativ geladenen **Elektronen** enthält. Die positive Ladung des Atomkerns wird durch die negative Ladung der Elektronenhülle kompensiert.

Der Atomkern ist sehr klein. Sein Durchmesser beträgt etwa 10^{-15} m, während der des Atoms in der Größenordnung von 10^{-10} m liegt. Der Kern ist damit mehr als hunderttausend Mal kleiner als das Atom. *Veranschaulichung*: Angenommen der Kern habe den Durchmesser einer Erbse, dann ergibt sich für die Elektronenhülle ein Radius von ca. einem Viertel Kilometer.

- Der Atomkern ist gleichfalls strukturiert. Er besteht aus positiv geladenen **Protonen** und ungeladenen (elektrisch neutralen) **Neutronen**. Trotz gleicher Ladung und der daraus resultierenden gegenseitigen Abstoßung werden die Protonen im Kern zusammengehalten. Ihr Zusammenhalt wird durch sogenannte „Kernkräfte“ bewirkt. Sie sind wesentlich stärker als elektrostatische Wechselwirkungskräfte und stellen eine der fundamentalen Kraftwirkungen in der Natur dar. Die Kernbausteine Protonen und Neutronen bezeichnet man als **Nucleonen**. Elektronen, Protonen und Neutronen werden als **Elementarteilchen** bezeichnet.

Durch Protonen- und Neutronenzahl charakterisierte Atomsorten nennt man **Nuclide**. Instabile Nuclide bezeichnet man als *Radionuclide*. Zu den bis jetzt bekannten 263 stabilen und über 70 radioaktiven natürlichen Nucliden wurden noch etwa 2000 künstliche (radioaktive) Nuclide hinzugewonnen, so dass man heute von fast 2500 verschiedenen Atomsorten der 112 Elemente ausgehen kann.

- Die *Masse* eines Protons (1,0073 *u* , mit *u* = atomare Masseneinheit; s. S. 11) entspricht in etwa der eines Neutrons (1,0087 *u*). Beide Kernteilchen sind ca. 2000-mal so schwer wie ein Elektron. Damit sind 99,8% der Gesamtmasse des Atoms im Atomkern konzentriert. Die Gesamtzahl der Nucleonen, also der Protonen und Neutronen, bezeichnet man als die **Massenzahl**.
- Die Atomkerne unterschiedlicher Elemente unterscheiden sich in ihrer Protonenzahl. Damit ist die Protonenzahl eines jeden Atoms (Elements) eine charakteristische Größe. Sie wird als **Kernladungszahl** bezeichnet und ist identisch mit der **Ordnungszahl** im Periodensystem der Elemente.
- Es gilt: **Anzahl der Protonen = Anzahl der Elektronen**. Damit kann aus der Ordnungszahl im PSE sofort die Elektronenzahl abgeleitet werden.

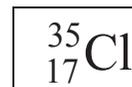
Isotope. Die Anzahl der Neutronen in Atomen eines Elements gleicher Kernladungszahl kann schwanken. Atome des gleichen Elements, die eine unterschiedliche Anzahl von Neutronen und damit unterschiedliche Atommassen aufweisen, werden als Isotope bezeichnet.

Isotope eines Elements sind Atome gleicher Protonenzahl, die sich in ihrer Neutronenzahl unterscheiden.

Die meisten der natürlich vorkommenden Elemente bestehen aus mehreren Isotopen. Sie werden als *Mischelemente* bezeichnet. *Reinelemente*, wie z.B. Be, F, Na, P, Al, P, Mn und Co, weisen dagegen nur eine bestimmte, charakteristische Neutronenzahl auf. Stabile Atomkerne enthalten in der Regel etwa die gleiche Anzahl bis anderthalbmal so viele Neutronen wie Protonen.

Die Schreibweise zur Kennzeichnung eines Nuclids soll am Beispiel des Chlorisotops mit der Massenzahl 35 erläutert werden:

oben links: *Massenzahl* = *Anzahl der Protonen (17) + Anzahl der Neutronen (18)*



unten links: *Kernladungszahl* = *Anzahl der Protonen (17)*

Chlor besitzt eine relative Atommasse von 35,453. Das ist der Durchschnittswert für die beiden Chlorisotope $^{35}_{17}\text{Cl}$ (natürliche Isotopenhäufigkeit: 75,77%) und $^{37}_{17}\text{Cl}$ (natürliche Isotopenhäufigkeit: 24,23%). Beide Atomarten enthalten demnach 17 Protonen, jedoch einmal 18 und einmal 20 Neutronen.

Die Elemente Wasserstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff bestehen aus folgenden Isotopen:

Wasserstoff ^1_1H (Protonium, natürliche Isotopenhäufigkeit: 99,9855%), ^2_1H (Deuterium, 0,0145%) und ^3_1H (Tritium, $10^{-15}\%$). Beim Übergang vom Wasserstoffnuclid ^1_1H zum Deuterium und anschließend zum Tritium ändert sich die Anzahl der Kernteilchen um je-

weils ein Neutron. Die angegebene Isotopenverteilung führt zu einer resultierenden mittleren relativen Atommasse des Wasserstoffs von $A_r = 1,008$.

Kohlenstoff $^{12}_6\text{C}$ (98,89%), $^{13}_6\text{C}$ (1,11%), $^{14}_6\text{C}$ (Spuren, radioaktiv) → resultierende mittlere Atommasse: 12,011;

Sauerstoff $^{16}_8\text{O}$ (99,759%), $^{17}_8\text{O}$ (0,037%), $^{18}_8\text{O}$ (0,204%) → resultierende mittlere Atommasse: 15,9994.

In der Praxis benutzt man häufig eine vereinfachte Schreibweise zur Charakterisierung von Nucliden indem lediglich die Massenzahl hinter das chemische Symbol gesetzt wird, z.B. Cl-35, Al-27 oder U-235.

Da vor allem die Elektronen der Hülle eines Atoms sein chemisches Verhalten bestimmen, besitzen Isotope eines Elements weitgehend gleiche chemische Eigenschaften.

Zur **Trennung von Isotopengemischen** werden vorwiegend physikalische Eigenschaften ausgenutzt, bei denen der Massenunterschied wirksam wird, z.B. Diffusion, Thermodiffusion und Zentrifugieren. Die (gering) unterschiedlichen Siedepunkte von Isotopen nutzt man bei der Anreicherung durch Destillation.

2.1.2 Radioaktivität

2.1.2.1 Natürliche Radioaktivität

Im Jahre 1896 entdeckte *Becquerel*, dass Uranverbindungen eine unsichtbare Strahlung aussenden. Die Strahlen sind in der Lage, fotografische Platten zu schwärzen, Luft zu ionisieren und ein elektrisch aufgeladenes Elektroskop zu entladen. 1898 isolierte Marie Curie gemeinsam mit ihrem Mann Pierre aus Pechblende (UO_2) die radioaktiven Elemente Polonium (Po) und Radium (Ra). Die Eigenschaft von Stoffen, Strahlung auszusenden, bezeichnete M. Curie als *Radioaktivität*. *Rutherford* und *Soddy* (1903) erkannten, dass die Radioaktivität auf einen Zerfall von Atomkernen zurückzuführen ist.

Die Stabilität eines Atomkerns wird durch zwei Faktoren bestimmt: Zum einen darf er nicht mehr als 83 Protonen enthalten, zum anderen darf das Verhältnis Protonen- zu Neutronensumme, das mindestens 1 beträgt, den Wert 1,6 nicht übersteigen. Bei Werten größer 1,6 kommt es zur Instabilität. Der Kern zerfällt und sendet Strahlung aus, die *radioaktive Strahlung*. Die ausgesandten Strahlen sind Zerfallsprodukte der instabilen Kerne. Beim Zerfall entstehen neue Elemente. Die spontane Kernumwandlung instabiler Nuclide in andere Nuclide unter Abgabe von Strahlung wird als **radioaktiver Zerfall** bezeichnet. Die Atomhülle ist an den Zerfallsprozessen nicht beteiligt.

Bei den die radioaktiven Kernumwandlungen begleitenden **Strahlungsemissionen** handelt es sich entweder um Korpuskular (α , β)- oder elektromagnetische (γ) Strahlung:

α -Strahlung: Emission von Teilchen mit etwa der vierfachen Masse des Protons und zwei positiven Elementarladungen (*Alphateilchen*). Die Alphateilchen können als zweifach positiv geladene ^4_2He -Kerne aufgefasst werden. Der Atomkern verliert bei einem α -Zerfall zwei Protonen und zwei Neutronen. Die Reichweite an der Luft beträgt wenige Zentimeter. α -Strahlen können ein Blatt Papier nicht durchdringen.

β -Strahlung: Emission schneller Elektronen (*Betateilchen*), die fast Lichtgeschwindigkeit erreichen. Das Elektron entsteht bei der Umwandlung eines Neutrons in ein Proton. Der gebildete Atomkern hat die gleiche Massenzahl wie vorher, aber ein Proton mehr. Zum Beispiel entsteht aus dem Cäsiumisotop $^{137}_{55}\text{Cs}$ bei β -Zerfall ein Isotop des Bariums $^{137}_{56}\text{Ba}$. Die Reichweite an der Luft beträgt mehrere Meter. β -Strahlen werden durch Metall-, Kunststoff- und Holzplatten (ab einigen mm) abgeschirmt.

γ -Strahlung: Elektromagnetische Strahlung ähnlich der Röntgenstrahlung, nur energiereicher. An Luft praktisch keine Abschwächung, zur Abschirmung sind dicke Bleiplatten notwendig.

Eine Serie aufeinanderfolgender Kernreaktionen, die von einer radioaktiven Atomart (Radionuclid) über weitere instabile Kerne schließlich zu einem stabilen Isotop führt, nennt man eine **radioaktive Zerfallsreihe**. Es gibt drei natürliche Zerfallsreihen, die von den Uranisotopen U-238 und U-235 sowie vom Thoriumisotop Th-232 ausgehen und als Endnuclid stets ein Bleiisotop besitzen. Abb. 2.2 zeigt die Zerfallsreihe des $^{238}_{92}\text{U}$, die beim stabilen Bleiisotop Pb-206, dem sogenannten „Uranblei“ endet. Innerhalb einer Zerfallsreihe stellen sich Gleichgewichte hinsichtlich der Bildungs- und Zerfallsgeschwindigkeiten der beteiligten instabilen Atomsorten ein („radioaktive Gleichgewichte“).

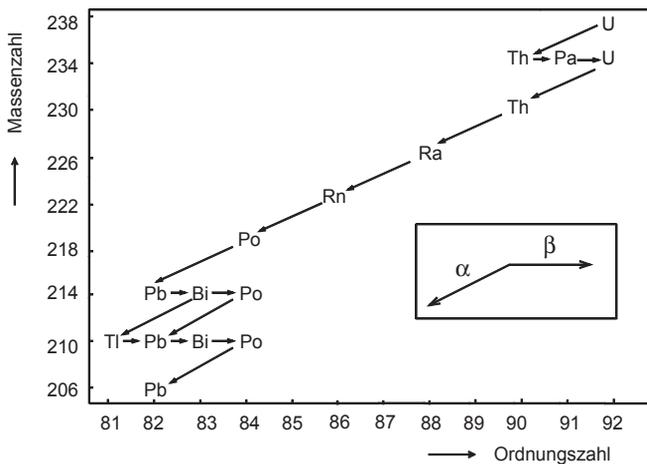


Abbildung 2.2

Zerfallsreihe von U-238

Ein radioaktives Element ist durch seine *Aktivität* und seine *Halbwertszeit* charakterisiert. Die **Aktivität** A kennzeichnet die Strahlungsmenge, die pro Zeiteinheit aus der radioaktiven Probe austritt. Sie wird als Anzahl der Kernprozesse pro Zeiteinheit angegeben. Die SI-Einheit für die Aktivität ist das Becquerel (Bq). 1 Becquerel bedeutet *einen* Kernzerfall pro Sekunde, also $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ (ältere Maßeinheit: Curie Ci, $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$). Die Aktivität verhält sich umgekehrt proportional zur Halbwertszeit. Unter der **Halbwertszeit** $\tau_{1/2}$ versteht man den Zeitraum, in dem die Hälfte der vorhandenen radioaktiven Kerne zerfallen ist. Die Halbwertszeit der verschiedenen Radionuclide liegt zwischen Bruchteilen von Sekunden und Millionen von Jahren. Die **spezifische Aktivität** a ist die auf die Masseneinheit bezogene Aktivität. Sie wird in der Regel in Bq/kg angegeben.

Bezogen auf die Anzahl $N(t)$ der zurzeit t noch vorhandenen instabilen Atomkerne ergibt sich die Aktivität A auch als die Abnahme $-dN(t)$ der Kerne pro Zeitintervall dt :

$$\boxed{A = \frac{-dN(t)}{dt}} \quad (2-1)$$

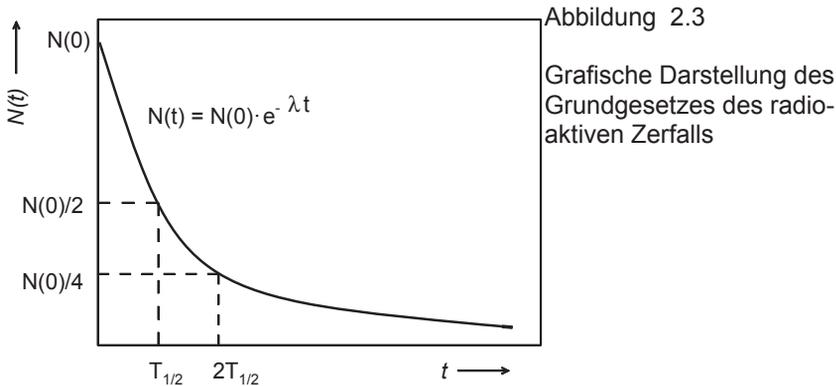
Die Anzahl der pro Zeitintervall zerfallenden Kerne $-dN(t)/dt$ ist der Gesamtzahl der radioaktiven Kerne proportional:

$$-\frac{dN(t)}{dt} = \lambda \cdot N(t) \quad \lambda = \text{Zerfallskonstante, charakteristische Größe für jedes Radionuclid.} \quad (2-2)$$

Integration führt zum bekannten **Zerfallsgesetz**:

$$\boxed{N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda t}} \quad N(0) = \text{Anzahl der instabilen Kerne zu Beginn der Zählung } (t = 0). \quad (2-3)$$

Vergleichbar anderen Naturvorgängen nimmt die Anzahl der instabilen Kerne beim radioaktiven Zerfall nach einer e-Funktion ab (Abb. 2.3).



Für die biologische Wirkung der Strahlung ist die vom Körper aufgenommene **Energiedosis D** wichtig. Die Energiedosis beschreibt die von einer bestimmten Masse absorbierte Energiemenge und wird in Joule/kg oder in Gray (Gy) gemessen ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$). Sie ist damit ein Maß für die physikalische Strahlenwirkung. Mit der Einführung der **Äquivalentdosis H** wurde schließlich versucht, die biologisch relevanten Vorgänge bei Strahleneinwirkung zu berücksichtigen. Die Äquivalentdosis kann als biologisch wirksame, absorbierte Energiedosis betrachtet werden. Sie wird durch Multiplikation der Energiedosis D mit einem sogenannten Bewertungs- oder Wichtungsfaktor q erhalten: $H = D \cdot q$ (mit $q = 1$ für β - und γ -Strahlen, $q = 20$ für α -Strahlen). Ihre Einheit ist Sievert (Sv oder mSv). Bezieht man die Äquivalentdosis auf einen bestimmten Zeitraum (meist ein Jahr), spricht man von der Äquivalentdosisleistung h (Einheit: Sv/a). Aus den Bewertungsfaktoren ist ersichtlich, dass

die biologische Wirkung von α -Strahlen bei gleicher Energiedosis 20-mal höher ist als die von β - und γ -Strahlen.

In Deutschland beträgt die durchschnittliche effektive Strahlenbelastung einer Person derzeit etwa 4 mSv/a. Sie setzt sich zu 55% aus der natürlichen (kosmische und terrestrische Strahlung, Inhalation von Radon) sowie zu 45% aus der künstlichen Strahlung (medizinische Diagnostik, kerntechnische Anlagen, Waffentests) zusammen [Jahresbericht BMU, 2009].

2.1.2.2 Radioaktivität von Baustoffen

Baumaterialien besitzen generell eine natürliche Radioaktivität. Die entscheidenden Radionuclide sind Ra-226, Th-232 und K-40, allerdings weist ihre spezifische Aktivität von Material zu Material große Unterschiede auf. Auch innerhalb der Baustoffarten ergibt sich eine meist erhebliche Variationsbreite (Tab. 2.1). Relativ hohe spezifische Aktivitäten weisen kieselsäurehaltige, magmatische Gesteine wie Granite, Tuffe und Bimsstein auf.

Tabelle 2.1 Spezifische Aktivität natürlicher Radionuclide in ausgewählten Baustoffen ¹⁾
[Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), 2015]

Baustoffe	Ra-226	Th-232	K-40
Granit	100 (30–500)	120 (17–311)	1000 (600–4000)
Gneis	75 (50–157)	43 (22–50)	900 (830–1500)
Basalt	26 (6–36)	29 (9–37)	270 (190–380)
Tuff, Bims	100 (< 20–200)	100 (30–300)	1000 (500–2000)
Naturgips, Anhydrit	10 (2–70)	< 5 (2–100)	60 (7–200)
Kies, Sand, Kiessand	15 (1–39)	16 (1–64)	380 (3–1200)
Ziegel, Klinker	50 (10–200)	52 (12–200)	700 (100–2000)
Beton	30 (7–92)	23 (4–71)	450 (50–1300)
Porenbeton, Kalksandstein	15 (6–80)	10 (1–60)	200 (40–800)

¹⁾ Angabe der Nuclide: Mittelwert (Bereich), Werte in Bq/kg

Von besonderem Interesse im Hinblick auf die Strahlenbelastung von Gebäuden und Einrichtungen ist das radioaktive Edelgas **Radon (Rn)**. Das durch α -Zerfall aus Radium-226 entstehende Edelgas Radon-222 ($\tau_{1/2} = 3,8$ d) sowie seine Folgeprodukte, die Schwermetalle Polonium und Bismut (Abb. 2.4), senden ebenfalls ionisierend wirkende α -Strahlen aus, die – höhere Rn-Konzentrationen vorausgesetzt – bei inhalativer Aufnahme zu einem erhöhten Lungenkrebsrisiko führen können. Man geht heute davon aus, dass die Rn-Konzentration in geschlossenen Räumen im Durchschnitt vier- bis achtmal höher ist als im Freien. Die Konzentration von Radon in der Raumluft wird durch die *Aktivitätskonzentration* c_A angegeben. Sie ist definiert als der Quotient aus der Aktivität A und dem Volumen V der Luft, angegeben in Becquerel pro m^3 .

In die Raumluft von Wohnhäusern gelangt Radon über zwei Wege: aus dem Untergrund der Häuser oder aus radiumhaltigen Baustoffen. Die Freisetzung von Radon aus Baumaterialien wird neben der Porosität und der Porenstruktur sowie der Feuchtigkeit des Baustoffs vor allem durch die spezifische Aktivität des Radium-226 bestimmt. Zur Erfassung der unterschiedlichen Radonabgabe wurde die **Radonexhalationsrate** eingeführt. Sie gibt die Exhalation (= Ausgasung) von Radon aus fester Materie an. Gemessen wird die Aktivität, die pro Quadratmeter und Stunde aus einem Stoff entweicht, Einheit: $\text{Bq/m}^2 \text{ h}$. Nachfolgend einige Rn-222-Exhalationsraten ausgewählter Baustoffe (Mittelwerte in $\text{Bq/m}^2 \text{ h}$): Ziegel, Klinker (0,2), Naturgips (0,4), Kalksandstein (0,6), Beton (0,7), Porenbeton (1,1), Blähton (0,4 und Naturstein (3,3), [Quelle: BfS].

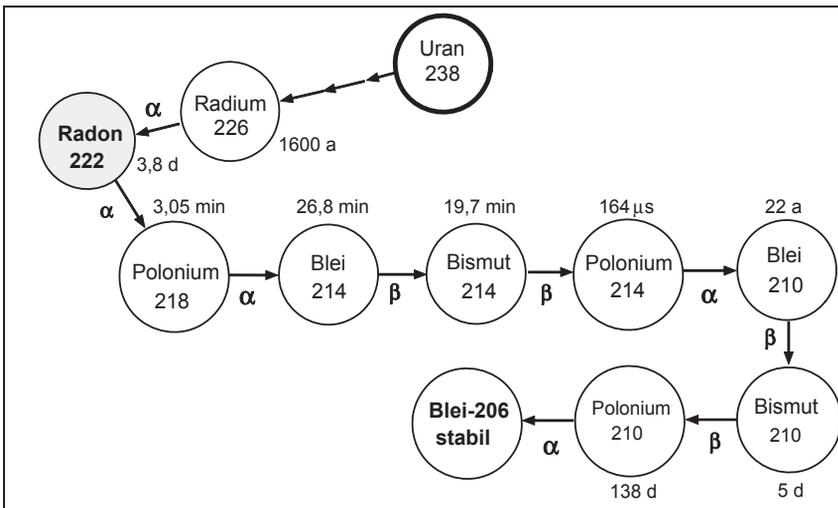


Abbildung 2.4 Radioaktiver Zerfall von Uran-238 mit Halbwertszeiten (vereinfachtes Schema)

Wie zahlreiche Untersuchungen der letzten Jahre zeigten, sind die in Deutschland traditionell in großen Mengen verwendeten Baustoffe wie Beton, Ziegel, Porenbeton und Kalksandstein eben nicht die Ursache für eventuelle Überschreitungen des vom BfS empfohlenen Jahresmittelwertes der Radonkonzentration von 100 Bq/m^3 in Aufenthaltsbereichen. Der Beitrag von Radon-222 aus Baustoffen zur Gesamt-Rn-Konzentration in Wohnräumen liegt bei etwa 50 Bq/m^3 . Damit sind die Möglichkeiten zur Reduzierung der Rn-Konzentration in Gebäuden mit hohen Radonkonzentrationen (s.u.) durch Verwendung radonarmer Baumaterialien stark eingeschränkt. Der Optimierungsspielraum liegt bei 10 Bq/m^3 , maximal 20 Bq/m^3 . Bei erhöhten Rn-Konzentrationen in Gebäuden stammt der Hauptanteil vielmehr aus dem Gebäudeuntergrund, je nach geologischen Verhältnissen bis zu 90%.

Das Radonproblem ist kein Problem der Baustoffe. Das Edelgas Radon kann sowohl durch Risse und Fugen im Fundament oder durch Kabel- und Rohrdurchführungen in die Kellerräume einströmen als auch durch Diffusions- und Permeations (Konvektions)-Prozesse im Porensystem des Betons in die Innenraumluft gelangen.

Die mittlere Rn-Konzentration in deutschen Wohnungen liegt bei 50 Bq/m^3 . Vermutlich weisen höchstens 0,3% aller Wohngebäude mehr als 1000 Bq/m^3 auf. Maximal einige hundert Häuser sind mit Rn-Konzentrationen $> 10.000 \text{ Bq/m}^3$ belastet, z.B. in den Uranbergbaugebieten der ehemaligen sowjetischen Wismut-AG Schneeberg-Johanngeorgenstadt [BfS].

Gesetzliche Regelungen zur Strahlenexposition durch Radon in Wohnräumen und Gebäuden existieren in Deutschland bis jetzt nicht. Laut Empfehlung der deutschen Strahlenschutzkommission darf die Rn-Konzentration in geschlossenen Räumen im Jahresmittel einen Richtwert von **250 Bq/m^3** nicht überschreiten (*Normalbereich*). Bei Werten zwischen 250 und 1000 Bq/m^3 (*Ermessensbereich*) sollen einfache Maßnahmen zur Reduzierung der Rn-Exposition eingeleitet werden, wobei die Möglichkeiten stark von der Situation vor Ort abhängen (Eintrittspfade und Verteilung des Radon, Bauart und -zustand des Hauses). Bei Konzentrationen $>1000 \text{ Bq/m}^3$ spricht man vom *Sanierungsbereich*. Hier müssen aufwändigere Maßnahmen ergriffen werden, um die Rn-Konzentration zu reduzieren.

Zur **Messung** des Radon-222 und seiner Folgeprodukte wird in allen Fällen der proportional zur Anzahl der Radonatome stattfindende radioaktive Zerfall genutzt. Folgende Messverfahren werden eingesetzt: Ionisationskammern, Halbleiter-Alpha-Spektrometer und Szintillationszellen, sowie Aktivkohle- und Thermolumineszenz-Dosimeter.

Verwendung von Radionucliden. Zahlreiche natürliche und künstliche Radionuclide sind wichtige Hilfsmittel sowohl in der chemischen und biochemischen Forschung (Isotopenmarkierung), in der medizinischen Diagnostik und Therapie (Tumorerkennung und -behandlung, z.B. mit Co-60) als auch in der Baustoff- und Bauwerksprüfung. Zum Beispiel kann mittels **Gammadiagnostik** die Qualität von Schweißnähten im Rohrleitungsbau, das Vorhandensein von Rissen in Stahlrohren oder von Schwindungshohlräumen (Lunkern) in Gusseisen oder Stahl überprüft werden (*zerstörungsfreie Werkstoffprüfung*). Das Prüfmaterial wird der Gammastrahlung einer umschlossenen, punktförmigen Strahlungsquelle ausgesetzt, die ein radioaktives Isotop (z.B. Co-60) enthält. Bei Materialfehlern tritt eine im Vergleich zum fehlerfreien Material verstärkte γ -Strahlung aus, die nach dem Durchgang durch das zu prüfende Material mittels Film oder γ -Detektor registriert wird. Die Gammadiagnostik wird auch zur Feststellung der *Position der Bewehrung im Beton* eingesetzt.

Zur Altersbestimmung kohlenstoffhaltiger historischer und prähistorischer Organismen wird die **Radiokohlenstoff-Methode** herangezogen („Kohlenstoff-Uhr“), deren Grundprinzip kurz beschrieben werden soll: Durch das Auftreffen von Neutronen der kosmischen Strahlung auf das in der Atmosphäre befindliche Stickstoffisotop $^{14}_7\text{N}$ entsteht ständig das radioaktive Kohlenstoffisotop C-14 (β -Strahler, $\tau_{1/2} = 5730$ Jahre). Das C-14-Isotop wird in der Atmosphäre zu CO_2 oxidiert, deshalb ist das Kohlendioxid der Luft zu einem geringen Anteil radioaktiv. Durch β -Zerfall kann sich aus dem Kohlenstoffisotop $^{14}_6\text{C}$ wieder $^{14}_7\text{N}$ bilden. Zwischen entstehendem und zerfallendem $^{14}_6\text{C}$ stellt sich ein Gleichgewicht ein, so dass der Anteil an radioaktivem CO_2 in der Luft einen konstanten Wert annimmt. Das Kohlenstoffisotop $^{14}_6\text{C}$ gelangt als radioaktives Kohlendioxid über die Photosynthese in die Pflanzen und über die Nahrungskette in den tierischen und menschlichen Organismus. Die C-14-Atome können über den Stoffwechsel und die Atmung den Organismus wieder ver-

lassen, ein Teil von ihnen zerfällt jedoch im Organismus. Aus dem Verhältnis der C-14- zu den stabilen C-12-Kernen ($1:10^{12}$) und der Halbwertszeit des Isotops C-14 ergeben sich bei einem lebenden Organismus 15,3 Zerfälle pro Minute pro Gramm Kohlenstoff. In einem lebenden Organismus (Tier, Pflanze) ist der Anteil $^{14}_6\text{C}$ im Kohlenstoff gleich groß wie in der Atmosphäre. Stirbt ein Lebewesen, kommt der Kohlenstoff-Austausch mit der Atmosphäre zum Stillstand. Da die C-14-Atome weiter mit konstanter Halbwertszeit zerfallen, sinkt ihr Gehalt im Organismus stetig. Aus dem $^{14}_6\text{C}$ -Anteil des toten Gewebes, dem bekannten $^{14}_6\text{C}$ -Anteil des lebenden Organismus und der Halbwertszeit $\tau_{1/2}$ kann der ungefähre Zeitpunkt berechnet werden, an dem das Lebewesen gestorben ist.

Bestimmung des Alters von Kalkmörteln. Die Idee, das Alter von Kalkmörteln mittels der C-14-Methode zu bestimmen, stammt von *Delibrias* und *Labeyrie* [BC 11]. Der Erhärtungsvorgang der Kalkmörtel beruht auf der CO_2 -Aufnahme aus der Atmosphäre. Da der Zeitraum des Abbindens des Mörtels, bezogen auf die Halbwertszeit von $^{14}_6\text{C}$ relativ kurz ist, kann bei bekanntem $^{14}_6\text{C}$ -Gehalt des Mörtels die Bauepoche bestimmt werden. Das ist möglich, da nach der vollständigen Carbonatisierung keine CO_2 - und damit auch keine $^{14}_6\text{C}$ -Aufnahme mehr erfolgt. Aus den $^{14}_6\text{C}$ -Messungen einer C-haltigen Probe des Alters null und der zu datierenden Probe kann, nach Korrekturen, das $^{14}_6\text{C}$ -Alter bestimmt werden. Eine routinemäßige Anwendung dieser Methode ist gegenwärtig noch nicht möglich, da die Messwerte mit zu großen Fehlern behaftet sind. Ein Problem ist die sehr unterschiedliche Carbonatisierungsdauer.

Das chemische Verhalten der Elemente wird hauptsächlich durch die Elektronen bestimmt, deshalb existiert ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen den stofflichen Veränderungen und den Veränderungen der Elektronenhülle. Genauere Kenntnisse zur Struktur der Elektronenhülle sind deshalb sowohl für das Verständnis der chemischen Reaktivität als auch der chemischen Bindung unerlässlich.

2.1.3 Aufbau der Elektronenhülle

2.1.3.1 Bohrsches Atommodell

Die Weiterentwicklung der Spektroskopie und der daraus resultierende Erklärungsbedarf hinsichtlich der inneren Struktur der Spektren führte zu neuen grundlegenden Erkenntnissen über den Aufbau der Elektronenhülle. *Rutherfords* Annahme planetenähnlicher Umlaufbahnen für die Elektronen stand im Gegensatz zu den Gesetzen der klassischen Physik, nach denen das kreisende Elektron – wie jede sich bewegende Ladung - kontinuierlich Energie abstrahlen und schließlich in den Kern stürzen sollte. Die Stabilität der Atome und die Tatsache, dass Atome keine kontinuierliche Strahlung aussenden, stand damit im Widerspruch zur klassischen Physik.

Zerlegt man weißes Sonnenlicht durch ein Prisma, erhält man ein **kontinuierliches Spektrum** (Abb. 2.5a). Es besteht aus einer Abfolge von Farben von rot bis violett, die entsprechend ihrer jeweiligen **Wellenlänge** λ kontinuierlich nacheinander erscheinen. Das sichtbare Licht umfasst den Wellenlängenbereich des elektromagnetischen Spektrums von 380 bis 780 nm (nm = Nanometer, 1nm = 10^{-9} m). Blaues Licht besitzt eine kleinere Wellen-



<http://www.springer.com/978-3-658-04143-4>

Bauchemie

Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten

Benedix, R.

2015, XIII, 603 S. 156 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-658-04143-4