

Grundlagen der Kernchemie

Atomkern

Der **Atomkern** bildet den Masseschwerpunkt des Atoms. Von dem lateinischen Wort für Kern (*nucleus*) leitet sich der Begriff *nuklear* ab. Er bezeichnet Dinge oder Wirkungen, die mit Eigenschaften oder mit Reaktionen von Atomkernen zusammenhängen, beispielsweise Nuklearmedizin. Eine Atomkernsorte heißt zur Unterscheidung von einem einzelnen Kern Nuklid (z.B. ^{12}C -Nuklide).

Bestandteile des Atomkerns (*Nukleonen*):

- Protonen \Rightarrow positive elektrische Ladung, Masse 1 u
- Neutronen \Rightarrow keine elektrische Ladung, Masse 1 u

(1 u = 1/12 der Masse von einem Atom ^{12}C)

Der Kern

- befindet sich Zentrum des Atoms
- ist etwa 100.000-mal kleiner als die Elektronenhülle
- Konzentriert mehr als 99,9 % der Masse/Energie des gesamten Atoms in sich. Die Gesamtzahl der Nukleonen im Kern heißt deshalb auch *Massenzahl*.

Kernkraft und Coulombkraft

Die positiv geladenen Protonen im Kern stoßen sich aufgrund der Coulombkraft gegenseitig ab. Es muss also im Kern eine weitere Kraft existieren, durch die er zusammen hält. Diese muss stärker als die Coulombkraft sein. Man spricht von der *starken Wechselwirkung* oder *Kernkraft*.

Die Kernkraft

- verfügt nur über eine sehr kurze Reichweite, die von der Größenordnung des Nukleon-Durchmessers (etwa 1 fm (Femtometer) = 10^{-15} m) ist
- bewirkt, dass es keine beliebig großen Kerne gibt:

Ein Proton an der "Oberfläche" eines großen Kerns erfährt Anziehung durch Kernkraft nur von seinen nächsten Nachbar-Nukleonen, Coulomb-Abstoßung hingegen von *allen* anderen Protonen des Kerns. Sind genügend viele andere Protonen vorhanden, überwiegt daher schließlich die Abstoßung, der Kern wird instabil und zerfällt.

Geschichte der Radioaktivität

Als **Radioaktivität** (von lat. *radius*, Strahl) bezeichnet man die Eigenschaft instabiler Atomkerne, sich spontan unter Energieabgabe umzuwandeln. Die frei werdende Energie wird in Form ionisierender Strahlung, nämlich energiereicher Teilchen und/oder Gammastrahlung, abgegeben.

1896 entdeckte Antoine Henri Becquerel bei dem Versuch, die gerade gefundene Röntgen-Strahlung durch Fluoreszenz erklären zu wollen, dass Uransalz fotografische Platten zu schwärzen vermochte. Wie er später zeigte, konnte diese neue Strahlung lichtundurchlässige Stoffe durchdringen und Luft ionisieren, ohne dabei von Temperaturänderungen oder chemischen Behandlung der Probe beeinflusst zu werden.

1898 fanden Marie und Pierre Curie weitere radioaktive Elemente: Thorium sowie zwei neue, um ein Vielfaches stärker strahlenden Elemente, die sie Radium und Polonium taufte.

Durch Untersuchung des Durchdringungsvermögens gelang es Ernest Rutherford 1899 zwei Strahlungskomponenten zu unterscheiden. Stefan Meyer und Egon Schweidler sowie Friedrich Giesel

konnten noch im gleichen Jahr zeigen, dass diese in magnetischen Feldern in unterschiedliche Richtungen abgelenkt werden.

Eine dritte Komponente, die sich nicht durch Magnetfelder ablenken ließ und ein sehr hohes Durchdringungsvermögen aufwies, wurde 1900 von Paul Ulrich Villard entdeckt.

Für die drei Strahlungsarten prägte Rutherford die Bezeichnungen

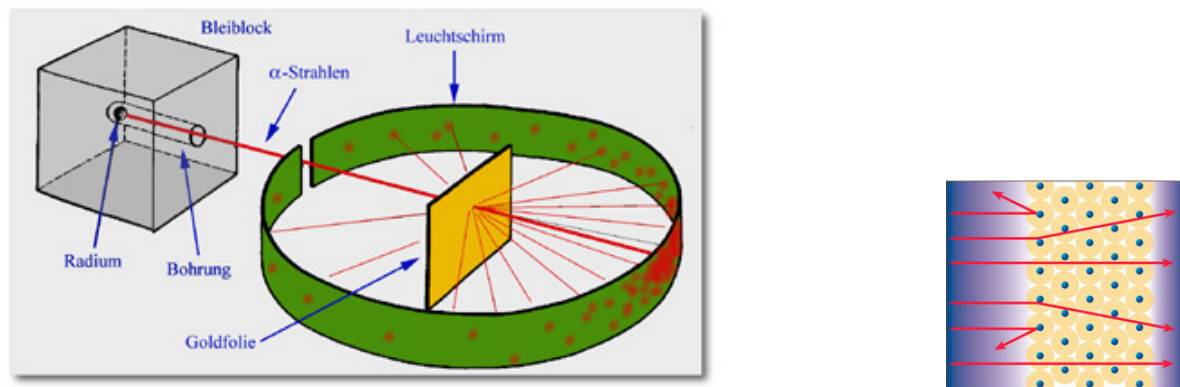
- Alphastrahlung (α -Strahlung)
- Betastrahlung (β -Strahlung)
- Gammastrahlung (γ -Strahlung)

Bis 1909 hatte sich erwiesen, dass

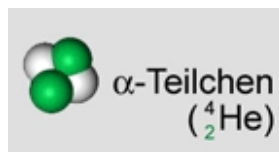
- α -Strahlung aus Heliumkernen und
- β -Strahlung aus Elektronen besteht.

Die Vermutung, dass es sich bei Gammastrahlung um eine elektromagnetische Welle handelt, konnte erst 1914 von Rutherford und Edward Andrade gezeigt werden.

Streuer Versuch nach Rutherford

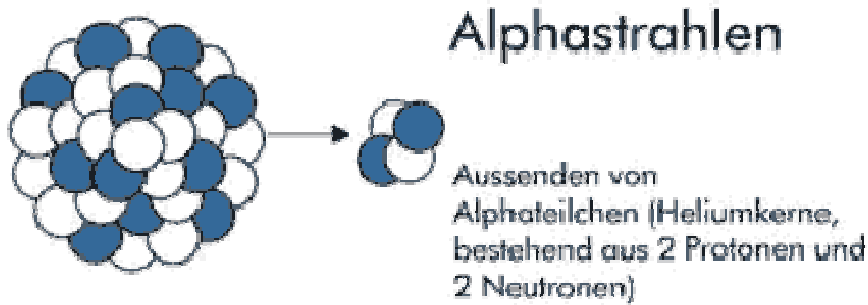


Alpha-Strahlung



Bei Alphastrahlung handelt es sich um Teilchenstrahlung: Alphateilchen bestehen aus zwei Protonen und zwei Neutronen, also einem Helium-Atomkern. Da Helium-Atomkerne Ionen sind, zählt die Alphastrahlung auch zur Ionenstrahlung. Ihre Durchdringungskraft ist gering; so kann sie etwa durch ein Blatt Papier vollständig absorbiert werden.

Die ionisierende Wirkung von Strahlung wird in der *Nebelkammer* genutzt, um die Flugbahn geladener Teilchen (z.B. α -Teilchen) sichtbar zu machen und fotografieren zu können.



Beta-Strahlung

Die Elementarteilchen der Betastrahlen sind Elektronen, die mit hoher Energie (Geschwindigkeit) aus dem Atomkern eines sich gerade durch radioaktiven Zerfall verändernden Atoms ausgestoßen werden.

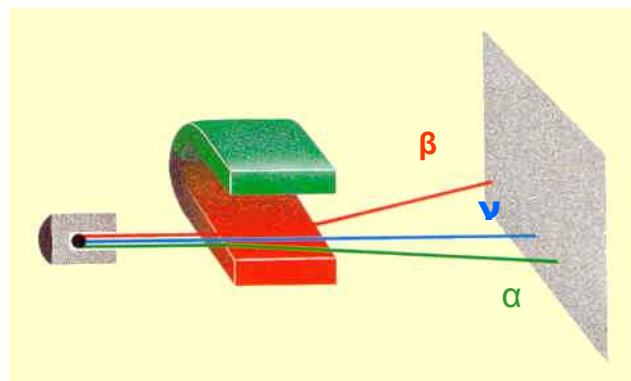
Betastrahlen lassen sich mit einem einige Millimeter dicken Absorber (beispielsweise Aluminiumblech) gut abschirmen. Allerdings wird dabei ein Teil der Energie der Betateilchen in Röntgen-Bremsstrahlung umgewandelt. Um diesen Prozess zu verringern, sollte das Abschirmmaterial möglichst leichte Atome aufweisen, also von geringer Ordnungszahl sein. Dahinter kann dann ein Schwermetall als zweiter Absorber dienen, der die Bremsstrahlung abschirmt.

Eindringtiefe von Betastrahlern in verschiedene Materialien

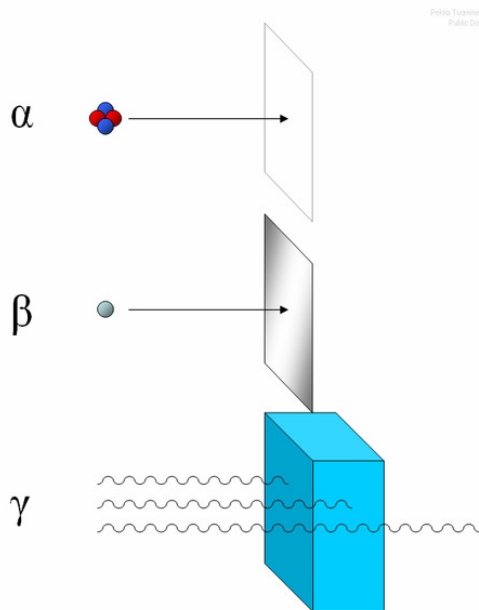
Nuklid	Energie in MeV	Reichweite in cm		
		Luft	Plexiglas	Glas
H-3	0,019	8	-	-
C-14	0,156	65	-	-
P-32	1,71	710	0,72	0,4
S-35	0,167	70	-	-
J-131	0,6	250	0,26	-

Gammastrahlung

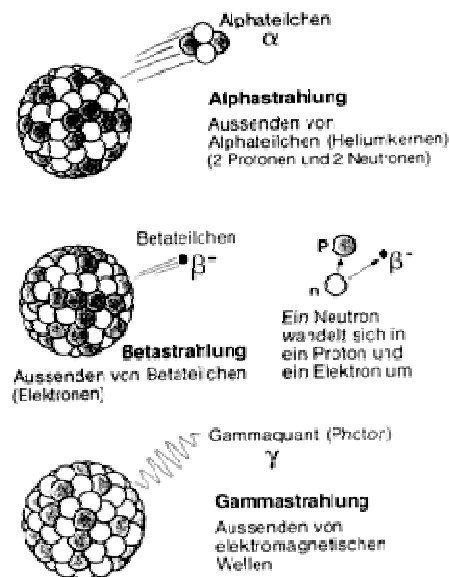
γ -Strahlung ist eine elektromagnetische Strahlung. Gammastrahlen lassen sich daher weder von elektrischen noch von magnetischen Feldern beeinflussen. Beim Durchflug durch ein magnetisches Feld erfahren γ -Quanten im Gegensatz zu α - und β -Teilchen keine Ablenkung und sind dadurch von diesen leicht unterscheidbar.



Gammastrahlung entsteht als Folge radioaktiver Kernumwandlungen. Es handelt sich um ionisierende Strahlung, die eine hohe Durchdringungsfähigkeit besitzt.



Alphastrahlung wird durch ein stärkeres Blatt Papier, Betastrahlung durch ein Metallblech von höchstens einigen mm Dicke vollständig absorbiert; zur hinreichenden Schwächung von Gammastrahlung braucht man eine dickere Schicht aus möglichst schwerem Material (z.B. Blei).



Auswirkungen radioaktiver Strahlung

- **Physikalische Wirkungen**
- Die physikalische Wirkung von Strahlen auf Materie bestehen im Wesentlichen in der Übertragung von Energie. Die Energiedosis, die von einem bestrahlten Stoff aufgenommen wird, misst man in Gray (Gy). Ein Gray bezeichnet eine reine Strahlendosis von einem Joule, die pro Kilogramm absorbiert wurde.

● **Biologische Wirkungen**

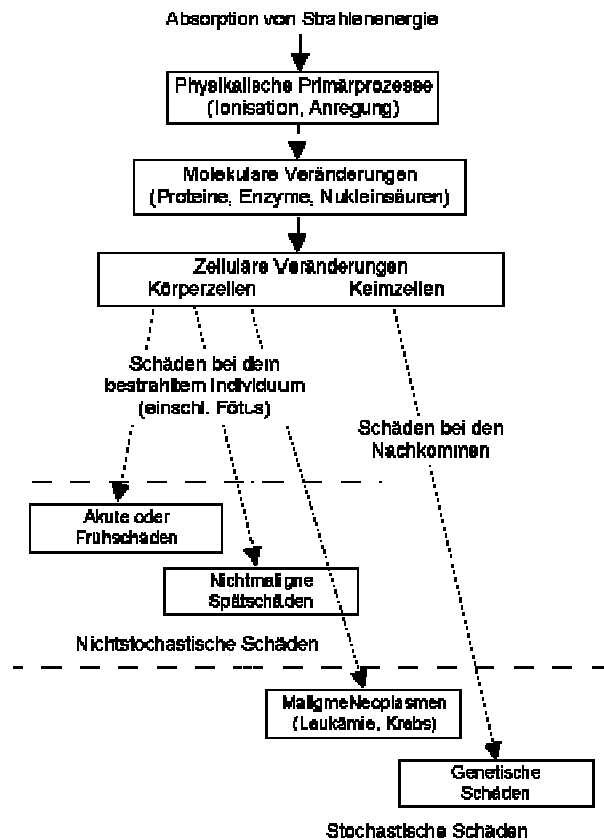
Die von der Strahlung erzeugten Anregungen und Ionisationen können an den Makromolekülen des Gewebes durch Sprengung von Molekülbindungen Veränderungen verursachen. Die Zellen schützen sich zwar durch Reparaturmechanismen gegen solche, auch von anderen Noxen hervorgerufenen Effekte. Es können aber entweder in den Zellmembranen, in der Zellsubstanz oder in den Zellkernen Veränderungen bleiben. Eine stark vereinfachte und schematisierte Reaktionskette zeigt Abb. 3. Es lassen sich zwei verschiedene Gruppen von Strahleneffekten bei Strahleneinwirkung auf Lebewesen erkennen:

❖ *Deterministische Wirkungen*

Dazu gehören einerseits akute Schäden wie Erythem oder Strahlenkrankheit sowie Spätschäden wie zum Beispiel Gewebsveränderungen oder Trübungen der Augenlinse. Bei diesen Effekten wird durch Strahlung die Funktion der betroffenen Gewebe oder Organe gestört, wenn eine zu große Zahl von Stammzellen abgetötet wird. Da im Gewebe die Zellen ständig erneuert werden, treten diese Schäden erst ab einer bestimmten Strahlenmenge, dem so genannten Schwellenwert, auf. Die Schwere des Schadens oberhalb des Schwellenwerts ist der Strahlendosis proportional.

❖ *Stochastische Wirkungen (zufallsbedingte Strahleneffekte)*

Hierzu gehören vererbare Schäden, die sich als Erbkrankheiten erst bei den Nachkommen der bestrahlten Personen äußern, Leukämie sowie maligne Neubildungen (Krebs). Diese Effekte rühren von Veränderungen an der DNS einzelner Zellen her. Deshalb ist hier die Wahrscheinlichkeit der Schäden der Strahlendosis proportional. Nach heutigem Wissen gibt es keine Schwellendosis.



Biologische Wirkungsmechanismen ionisierender Strahlung

	Mittlere effektive Dosis (mSv)
1. Natürliche Strahlenexposition	ca. 2,4
davon durch	
kosmische Strahlung	ca. 0,3
terrestrische Strahlung von außen	ca. 0,5
Inhalation von Radon in Wohngebieten	ca. 1,3
inkorporierte natürliche radioaktive Stoffe	ca. 0,3
2. Zivilisatorische Strahlenexposition	ca. 1,55
davon durch	
kerntechnische Anlagen	< 0,01
Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung in der Medizin	ca. 1,5
Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung in Forschung, Technik und Haushalt	< 0,02
berufliche Strahlenexposition (Beitrag zur mittleren Strahlenexposition der Bevölkerung)	< 0,01
Fall-out von Kernwaffenversuchen	< 0,01
3. Strahlenexposition durch den Unfall in Tschernobyl (im Mittel)	ca. 0,11
von außen	ca. 0,07
durch inkorporierte Stoffe	ca. 0,04

0 bis 0,2 Sv

Wahrscheinliche angenommene Spätfolgen: Krebs, Erbgutveränderung. Diese zählen nicht zur Strahlenkrankheit im eigentlichen Sinne; sie sind also stochastische Strahlenschäden.

0,2 bis 0,5 Sv

Keine Symptome, nur klinisch feststellbare Reduzierung der roten Blutkörperchen

0,5 bis 1 Sv

Leichter Strahlenkater mit Kopfschmerzen und erhöhtem Infektionsrisiko. Temporäre Sterilität beim Mann ist möglich.

1 bis 2 Sv; leichte Strahlenkrankheit

10 % Todesfälle nach 30 Tagen (Letale Dosis(LD) 10/30).

Zu den typischen Symptomen zählen – beginnend innerhalb von 3-6 Stunden nach der Bestrahlung, einige Stunden bis zu einem Tag andauernd – leichte bis mittlere Übelkeit (50 % wahrscheinlich bei 2 Sv) mit gelegentlichem Erbrechen. Dem folgt eine Erholungsphase, in der die Symptome abklingen. Leichte Symptome kehren nach 10-14 Tagen zurück. Diese Symptome dauern etwa vier Wochen an und bestehen aus Appetitlosigkeit (50 % wahrscheinlich bei 1,5 Sv), Unwohlsein und Ermüdung (50 % wahrscheinlich bei 2 Sv). Die Genesung von anderen Verletzungen ist beeinträchtigt, und es besteht ein erhöhtes Infektionsrisiko. Temporäre Unfruchtbarkeit beim Mann ist die Regel.

2 bis 3 Sv; schwere Strahlenkrankheit

35 % Todesfälle nach 30 Tagen (LD 35/30).

Erkrankungen nehmen stark zu und eine signifikante Sterblichkeit setzt ein. Übelkeit ist die Regel (100 % bei 3 Sv), das Auftreten von Erbrechen erreicht 50 % bei 2,8 Sv. Das Auftreten der Anfangssymptome beginnt innerhalb von einer bis sechs Stunden und dauert ein bis zwei Tage. Danach setzt eine 7- bis 14-tägige Erholungsphase ein. Wenn diese vorüber ist, treten folgende Symptome auf:

Haarausfall am ganzen Körper (50 % wahrscheinlich bei 3 Sv), Unwohlsein und Ermüdung. Der Verlust von weißen Blutkörperchen ist massiv, und das Infektionsrisiko steigt rapide an. Bei Frauen beginnt das Auftreten permanenter Sterilität. Die Genesung dauert einen bis mehrere Monate.

3 bis 4 Sv; schwere Strahlenkrankheit

50 % Todesfälle nach 30 Tagen (LD 50/30).

Nach der Erholungsphase treten zusätzlich folgende Symptome auf:

Durchfall (50 % wahrscheinlich bei 3,5 Sv) und unkontrollierte Blutungen im Mund, unter der Haut und in den Nieren (50 % wahrscheinlich bei 4 Sv).

4 bis 6 Sv; akute Strahlenkrankheit

60 % Todesfälle nach 30 Tagen (LD 60/30).

Die Sterblichkeit erhöht sich schrittweise von ca. 50 % bei 4,5 Sv bis zu 90 % bei 6 Sv (solange keine massive medizinische Intensivversorgung zur Anwendung kommt). Das Auftreten der Anfangssymptome beginnt innerhalb von 30 bis 120 Minuten und dauert bis zu zwei Tage. Danach setzt eine 7- bis 14-tägige Erholungsphase ein. Wenn diese vorüber ist, treten im Allgemeinen und verstärkt die gleichen Symptome wie bei 3 bis 4 Sv auf. Bei Frauen ist das Auftreten permanenter Unfruchtbarkeit die Regel. Die Genesung dauert mehrere Monate bis zu einem Jahr. Wenn der Tod in der Regel 2-12 Wochen nach der Bestrahlung eintritt, so sind die Todesursachen Infektionen und Blutungen.

bis 10 Sv; akute Strahlenkrankheit

100 % Todesfälle nach 14 Tagen (LD 100/14).

Die Überlebenschance kommt auf den Einsatz medizinischer Intensivversorgung an. Das Knochenmark ist nahezu oder vollständig zerstört, und eine Knochenmarktransplantation ist erforderlich. Das Magen- und Darmgewebe ist schwer geschädigt. Das Auftreten der Anfangssymptome beginnt innerhalb von 15 bis 30 Minuten und dauert bis zu zwei Tagen. Danach setzt eine 5- bis 10-tägige Erholungsphase ein, die als Walking-Ghost-Phase bezeichnet wird. Die Endphase endet mit dem Eintritt des Todes durch Infektionen und innere Blutungen. Falls eine Genesung eintritt, dauert sie mehrere Jahre, wobei diese wahrscheinlich nie vollständig erfolgen wird.

10 bis 20 Sv; akute Strahlenkrankheit

100 % Todesfälle nach 7 Tagen (LD 100/7).

Diese hohe Dosis führt zu spontanen Symptomen innerhalb von 5 bis 30 Minuten. Nach der sofortigen Übelkeit durch die direkte Aktivierung der Chemorezeptoren im Gehirn und einer starken Schwäche folgt eine mehrtägige Phase des Wohlbefindens (Walking-Ghost-Phase). Danach erfolgt die Sterbephase mit raschem Zelltod im Magen-Darmtrakt, welcher zu massivem Durchfall, Darmblutungen und Wasserverlust sowie der Störung des Elektrolythaushalts führt. Der Tod tritt mit Fieberdelirien und Koma durch Kreislaufversagen ein. Eine Therapie besteht nur noch im Stillen der Schmerzen.

20 bis 50 Sv; akute Strahlenkrankheit

100 % Todesfälle nach 3 Tagen (LD 100/3), ansonsten wie bei „10 bis 20 Sv“

über 50 Sv

Sofortige Desorientierung und Koma innerhalb von Sekunden oder Minuten. Der Tod tritt in wenigen Stunden durch völliges Versagen des Nervensystems ein.

über 80 Sv

Die US-Streitkräfte rechnen bei einer Dosis von 80 Sv schneller Neutronenstrahlung mit einem sofortigen Eintritt des Todes.

Chemische Wirkungen

Durch radioaktive Bestrahlung können Bindungen zwischen Atomen zerstört werden; es entstehen *Radikale*.