

(I) Lichtgeschwindigkeit

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen (Lichtgeschwindigkeit) ist konstant

- Lichtgeschwindigkeit $c = 299.792.458 \text{ m/s}$
- Beziehung zwischen Lichtgeschwindigkeit / Wellenlänge / Frequenz:
 $c = \lambda \cdot \nu$

(I) Teilcheneigenschaften von EM-Strahlung

Bei Wechselwirkung mit Materie kann elektromagnetische Strahlung Teilcheneigenschaften annehmen.

- Zu EM-Strahlung korrespondierende, teilchenähnliche Energiepakete heißen Photonen.
- Energie von Photonen:

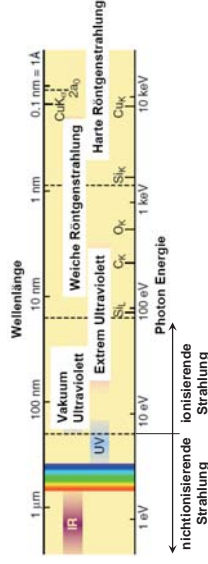
$$E = h \nu = hc/\lambda$$

h = Plancksches Wirkungsquantum ($6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$)

- Für E in [keV] und λ in [nm] folgt:

$$E[\text{keV}] = \frac{1.24}{\lambda[\text{nm}]}$$

(I) Energie elektromagnetischer Strahlung



Ionisierende Strahlung besitzt pro Photon genug Energie um Elektronen aus der Elektronenhülle zu entfernen. Nichtionisierende Strahlung besitzt zu wenig Energie für die Ionisierung von Atomen oder Molekülen.

(I) Welle-Teilchen Dualismus

- 1899 Planck: $E = h \nu$
- 1905 Einstein: $E = mc^2$
- 1925 Louis de Broglie: $h \nu = mc^2$

Nachdem Albert Einstein die Doktorarbeit von de Broglie (einseitig) gelesen hatte, schrieb er an Max Born: "Das müssen Sie lesen! Wenn es auch vertrackt aussieht, so ist es doch durchaus gediegen".

Mit den bekanntesten Formeln für Wellenlänge und Impuls ($\lambda = c/\nu$; $p = E/c$) folgt:

$$\lambda = h/p$$

Jedem Teilchen mit einem Impuls p kann die de Broglie Wellenlänge λ , zugeordnet werden, oder: **Teilchen sind auch Wellen - und umgekehrt!**

(I) de Broglie Wellenlängen für Teilchen

Teilchen	Ruhemasse [kg]	Geschwindigkeit [km/s]	Wellenlänge [m]	Energie [eV]
Elektron	$9,1 \cdot 10^{-31}$	1	$2 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^6$
Elektron (EM)	$9,1 \cdot 10^{-31}$	13.260	$5,5 \cdot 10^{-11}$	500
Elektron (CERN)	$9,1 \cdot 10^{-31}$	300.000	$4,1 \cdot 10^{-17}$	$3 \cdot 10^{10}$
Neutron (Reaktor)	$1,7 \cdot 10^{-27}$	2,2	$1,8 \cdot 10^{-10}$	0,025
Sauerstoffkern	$2,7 \cdot 10^{-26}$	75.000	$3 \cdot 10^{-16}$	$4,9 \cdot 10^8$
Tennisball	0,045	0,025	$5,7 \cdot 10^{-34}$	$9 \cdot 10^{19}$
Fußball	0,450	0,025	$5,7 \cdot 10^{-35}$	$9 \cdot 10^{20}$

(II) Strahlenarten

Die in der medizinischen Radiologie genutzten ionisierenden Strahlungsarten lassen sich wie folgt unterteilen:

- geladene Partikel (direkt ionisierend)
- schnelle Elektronen (indirekt ionisierend)
- Neutronen (indirekt ionisierend)
- Gammastrahlung (indirekt ionisierend)

Ionisation:

Aufnahme oder Abgabe eines Elektrons aus dem elektronischen Grundzustand

direkt ionisierende Strahlung:

unmittelbare Ionisierung entlang der Bahn von geladenen Partikeln

indirekt ionisierende Strahlung:

Ionisierung durch ein durch Strahlung ionisiertes, reaktives Molekül

(II) Wechselwirkung geladene Partikel - Materie

Teilchen mit ionisierender Wirkung sind:

- α -Teilchen (${}^4\text{He}^{2+}$)
 - Protonen (p^+)
 - Elektronen (e^-)
 - Positronen (e^+)
 - Neutronen (n)
- } geladen
} ungeladen

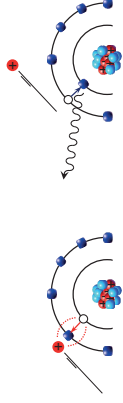
Die Wechselwirkung zwischen Partikeln und Materie ist von deren jeweiligen Masse abhängig.

(II) Wechselwirkung geladene Partikel - Materie

Geladene, energetische Teilchen interagieren mit Materie (Elektronenhülle) über elektrische Wechselwirkungen unter Verlust von kinetischer Energie durch:

- Anregung
- Ionisierung
- Strahlungsverluste

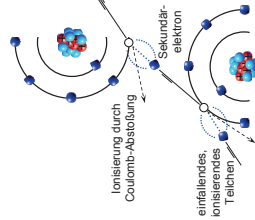
(II) Geladene Partikel: Anregung



Teilweise Übertragung der Energie ($<$ Bindungsenergie) des einfallenden Teilchens auf ein Elektron.

Elektron wird auf eine weiter außen liegende Schale angehoben. Nach der Anregung kehrt das Elektron unter Aussendung elektromagnetischer Strahlung in den ursprünglichen, energiereicheren Zustand zurück.

(II) Geladene Partikel: Ionisierung



Ist der Energieübertrag größer als die Bindungsenergie wird ein Elektron aus der Hülle geschlagen.

→ Ionisierung, Ionenpaar: Elektron und das positiv geladene Atom

Besitzt das ausgetretene Elektron genügend Energie kann es zu sekundären Ionisationen kommen.

(II) Geladene Partikel: Ionisierung

70 % der Energie geladener, mit der Elektronenhülle interagierender Teilchen, resultiert in nichtionisierender Anregung von Materie.

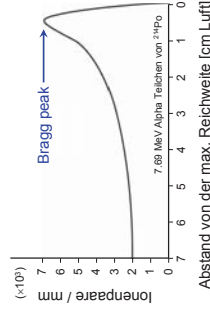
Die spezifische Ionisierung (Ionenpaare/mm) steigt mit:

- elektrischer Ladung des Teilchens
- Eintrittsgeschwindigkeit

Die spezifische Ionisierung eines Alpha-Teilchens kann bis zu 7000 IP/mm betragen.

Spezifische Ionisierung eines Elektrons: 50 – 100 IP/mm.

(II) Geladene Partikel: Reichweite & Ionisierungspotential



Schneller Anstieg der spezifischen Ionisierung zu einem Maximum (Bragg Peak).

Scharfer Abfall nach komplettem Verlust der kinetischen Energie und nachfolgende Neutralisierung der Ladung.

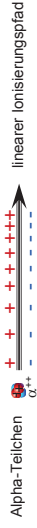
(II) Geladene Partikel: Strahlentherapie

Die medizinische Anwendung macht sich Eigenschaften ionisierender Strahlung durch genaues Einstellen der kinetischen Energie der schweren, geladenen Teilchen zu Nutze:

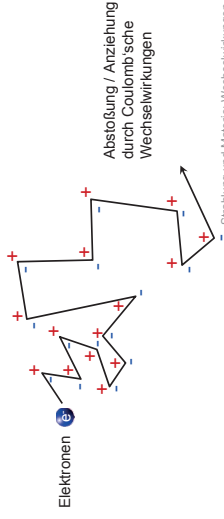
- hohe Strahlendosis in einer entsprechenden Tiefe
- bestrahlter Bereich ist relativ eng umgrenzt

(II) Geladene Partikel: zurückgelegter Weg

Schwere geladene Teilchen zeigen eine geringe Ablenkung beim Weg durch Materie.



Leichte geladene Teilchen zeigen hohe Ablenkungen.



(II) Geladene Partikel: Pfadlänge und Eindringtiefe

Pfadlänge := Entfernung die ein Teilchen zurücklegt
Eindringtiefe := Eindringtiefe in Materie

Alpha-Teilchen: linearer Pfad
Pfadlänge \equiv Eindringtiefe
Elektron: zickzackförmiger Verlauf
Pfadlänge > Eindringtiefe

(II) Geladene Partikel: Streuung

Streuung := Ablenkung eines Teilchens von seiner ursprünglichen Bahn.

Elastische Streuung:

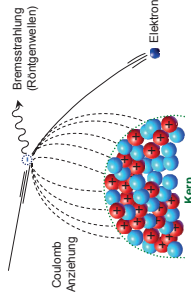
die kinetische Energie der am Stoßprozess beteiligten Teilchen bleibt insgesamt konstant.

Inelastische Streuung:

die kinetische Energie der beteiligten Teilchen nimmt durch den Stoßprozess ab.

(II) Geladene Partikel: Bremsstrahlung

Inelastische Streuung von Elektronen



Bahnabweichung freier Elektronen durch Wechselwirkung mit der positiven Ladung von Atomkernen unter Verlust kinetischer Energie.

(II) Geladene Partikel: Bremsstrahlung

Frei werdende Energie wird instantan in Form von Röntgenstrahlung abgegeben (Energieerhaltung).

Durch Verzögerung schneller Elektronen (Bremsstrahlung) wird in Röntgenröhren Röntgenstrahlung für die diagnostische Bildgebung erzeugt.

Niedrige kinetische Energie der Elektronen: Röntgenstrahlung (Photonen) wird im Winkel zwischen 60° und 90° zur Bahnrichtung emittiert.

Hohe kinetische Energie der Elektronen: Emission von Röntgenstrahlung in Bahnrichtung.

(II) Geladene Partikel: Bremsstrahlung

Wahrscheinlichkeit für Bremsstrahlung ist proportional zu Z^2 (Z = Ordnungszahl) des Absorbers.

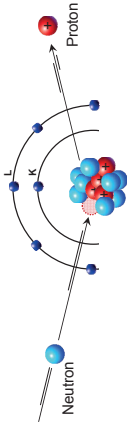
Die Emissionsenergie ist umgekehrt proportional zum Quadrat der Masse des einfallenden Teilchens.
 → Protonen oder α -Teilchen erzeugen weniger als die 10^6 fache Emissionsenergie gleich schneller Elektronen.

Für gegen eine Wolframelektrode ($Z = 74$) mit 100 keV beschleunigte Elektronen wird ca. 1% der freierwirdenden Energie in Röntgenstrahlung umgesetzt.

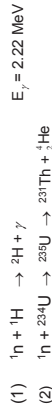
Durch Bremsstrahlung entstehende Röntgenstrahlung kann jeden Wert bis zur gesamten kinetischen Energie des Elektrons annehmen.

(II) Wechselwirkung ungeladener Partikel: Neutronen

Neutronen besitzen keine Ladung, d.h. keine Interaktion mit Elektronen
 → keine direkte Anregung oder Ionisierung



Neutronen wechselwirken auf 2 Arten mit Atomkernen:



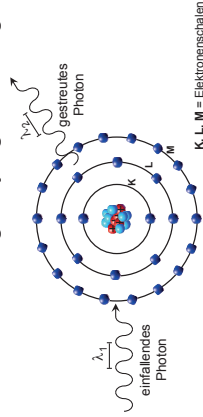
(II) Wechselwirkung Gammastrahlung - Materie

Beim Durchgang durch Gewebe werden Photonen
 - gestreut, oder
 - absorbiert

Es gibt vier Haupttypen der Wechselwirkung zwischen Materie und Gammastrahlungsphotonen die von Bedeutung für Radiologische Diagnostik und Nuklearmedizin sind:

- Rayleigh Streuung
- Compton Streuung
- Photoelektrischer Effekt
- Paarbildung

(II) Gammastrahlung: Rayleigh Streuung



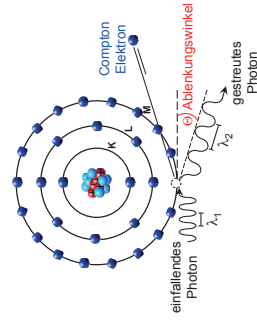
Rayleigh-Streuung:

- Interaktion mit der gesamten Atom (Schwingungsenergie).
- Röntgenstrahlung wird in der Richtung verändert.
- Kein Wechsel des Energiezustandes, kein Energieverlust ($\lambda_1 = \lambda_2$), keine Ionisation.
- Vorwiegend bei niedrig energetischer Strahlung zu beobachten.
- Tritt nur zu ca. 5% auf.

(II) Gammastrahlung: Streuung

Compton-Streuung:

- Interaktion eines Photons mit einem Valenzelektron.
- Elektron wird aus der Elektronenhülle geschlagen
 → Ionisation.
- Das Photon wird unter Energieverlust gestreut.
- Das gestreute Photon kann weitere Wechselwirkungen mit Materie eingehen.



(II) Gammastrahlung: Compton Streuung

- Vorherrschende Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie im Bereich diagnostischer Energien.
- Den Effekt vor allem beim Einsatz höher energetischen Strahlen zu beobachten.
- Die Compton Streuung hängt von der Elektronenzahl ab, sie ist unabhängig von der Ordnungszahl.
- Energie- und Impulserhaltungssatz gelten für den Streuvorgang.

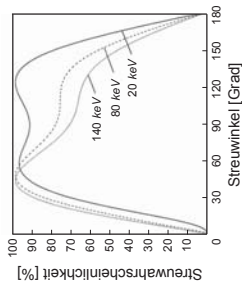
(II) Gammastrahlung: Compton Streuung

Die Energie des gestreuten Photons (E_s) kann aus der Energie des einfallenden Photons (E_0) und dem Ablenkwinkel ϑ des gestreuten Photons berechnet werden:

$$E_s = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{511 \text{ keV}} (1 - \cos \vartheta)}$$

511 keV: max. Energie E_s bei 90° Streuung

255 keV: max. Energie E_s bei 180° Streuung



(II) Gammastrahlung: Compton Streuung

Bedeutung für die diagnostische Radiologie:

- Gestreute Photonen behalten viel Energie
→ sie erreichen den Film
- Schlierbildung und Kontrastminderung.
- Compton Streuung ist schwierig zu filtern, da die Strahlung oft in Richtung des Primärstrahls verläuft.
- Die Streustrahlung die nicht in Primärstrahlrichtung weist, belastet nicht so sehr den Patienten, aber das Personal.

(II) Gammastrahlung: photoelektrischer Effekt

Die Gesamtenergie eines Photons (E_0) wird auf ein Elektron einer inneren Schale übertragen, das daraufhin aus dem Atom austritt → Ionisierung.

Kaskadenartig und unter Aussendung von Strahlung springen Elektronen äußerer Schalen in die jeweils unvollständig besetzten, weiter innen liegenden Elektronenschalen.

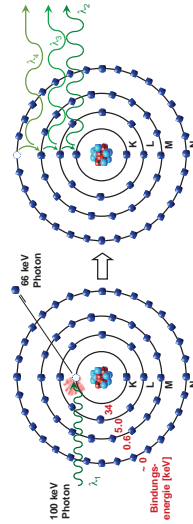
Die Energie des Photons muß größer als die Bindungsenergie des Photoelektrons (E_B) sein.

Die kinetische Energie (E_K) des austretenden Photoelektrons beträgt:

$$E_K = E_0 - E_B$$

(II) Gammastrahlung: photoelektrischer Effekt

Wechselwirkung eines 100 keV Photons mit einem Jod-Atom



Charakteristische Röntgenstrahlung:

- λ_4 : 0.6 keV (N → M)
- λ_3 : 4.4 keV (M → L)
- λ_2 : 29 keV (L → K)

(II) Gammastrahlung: photoelektrischer Effekt

Die Wahrscheinlichkeit für die Emission von Photoelektronen sinkt mit fallender Ordnungszahl Z des Absorbers.

Für die photoelektrischer Absorption H pro Gewichtseinheit gilt:

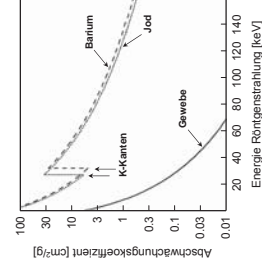
$$H = \frac{Z^3}{E_0^3}$$

→ je schneller die Photonen (E_0), desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Photoelektronen.

Ausnahme: Elementspezifische Absorptionskanten

(II) Gammastrahlung: photoelektrischer Effekt

Die photoelektrische Absorption zeigt für jedes Element Diskontinuitäten in Abhängigkeit der Photonenenergie (elementspezifische Absorptionseigenschaften).



Oberhalb einer Kante steigt die Wahrscheinlichkeit für photoelektrische Wechselwirkungen sprunghaft an.
→ energetische Voraussetzung

Biologisch wichtige Elemente wie H, C, N, und O haben Absorptionskanten bei ~ 1 keV.

Barium und Jod dienen als Röntgenkontrastmittel.

(II) Photoelektrischer Effekt und Bildgebung

Unterhalb von 50 keV Photonenenergie spielt der photoelektrische Effekt eine wichtige Rolle in der Bildgebung von Weichteilgewebe.

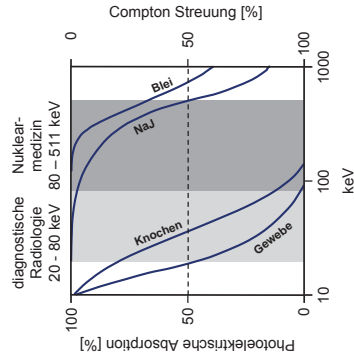
Photoelektrische Absorption kann zur Verstärkung der Abschwächung von Geweben mit leicht unterschiedlicher effektiver Ordnungszahl eingesetzt werden.

Dieser Mechanismus der Kontrastverstärkung kann gesteuert werden durch:

- Elektrodenmaterialien
- Filter
- Detektoren

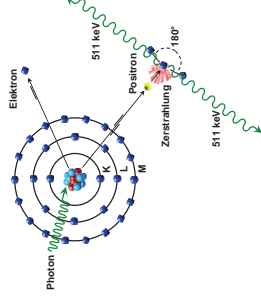
Anwendung: Mammographie

(II) Photoelektrischer Effekt und Bildgebung



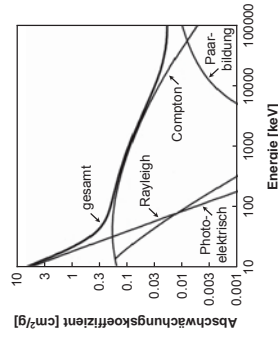
(II) Gammastrahlung: Paarbildung

Bei der Paarbildung wechselwirkt ein energiereiches (<1.02 MeV) Photon mit dem elektrischen Feld eines Atomkerns. Transformation der Photonenenergie in die Bildung eines Positron-Elektronen-Paars.



Die Ruhemasse eines Elektrons entspricht 511 keV.
 → Photonenenergie ≥ 1.02 MeV.
 Überflüssige Photonenenergie wird in kinetische Energie des Antimateriepaars umgesetzt.
 Aufgrund der benötigten hohen Energien spielt die Paarbildung keine Rolle beim diagnostischen Röntgen.

(II) Abschwächung elektromagnetischer Strahlung



Abschwächung für Weichteilgewebe ($Z_{\text{eff}} = 7$)

(III) Radioaktiver Zerfall - Aktivität

Wann ist eine Substanz radioaktiv?
 Zerfall unter Aussendung von Strahlung (α , β , γ -Strahlung)
 Stärke der Strahlung wird über die Aktivität gemessen
 Einheit: Becquerel (Bq)

1 Becquerel:
 Anzahl Zerfälle/Sekunde
 (Strahlungsmenge die pro Sekunde durch Zerfall erzeugt wird).



(III) Dosisbegriffe und Dosisseinheiten

Der Dosisbegriff in der Radiologie ist zu verstehen als Menge der Strahlung („Wirksstoff“) bezogen auf die bestrahlte Masse. Grundsätzlich interessiert bei der Strahlenexposition allein der vom Körper absorbierte Anteil der Strahlung. Strahlung jedweder Art, die den Körper ohne Wechselwirkung mit Geweben wieder verläßt, ist für das Individuum belanglos und trägt nicht zur Dosis bei.

Die Wirkung der Strahlung hängt unter anderem ab von:
 - der Art des Gewebes

- der Dichte der Ionisierungsprozesse
- der absorbierten Energie
- modifizierende Faktoren der Strahlenwirkung (zeitliche und räumliche Dosisverteilung, strahlensensibilisierende Substanzen, ...)

(III) Dosisbegriffe und Dosisseinheiten

Da die Wirkung ionisierender Strahlen im menschlichen Körper von vielen Faktoren abhängt, existieren verschiedene Dosisbegriffe. Weil innerhalb eines bestrahlten Volumens die Dosisverteilung sehr unterschiedlich sein kann, definiert man sie massen- oder gewebeabhängig.

Die wichtigsten Dosisgrößen sind:

- Ionendosis (für die Messtechnik)
- Energiedosis (für die zu erwartenden Strahlungseffekte)
- Äquivalentdosis / effektive Äquivalentdosis (Strahlenschutz)

(III) Ionendosis

Die Ionendosis ist eine in der Praxis weitverbreitete Messmethode. Die Ionendosis in Luft (Standardionendosis) wird mit einer luftgefüllten Ionisationskammer gemessen. Dabei wird die Anzahl von Ladungen (positiv oder negativ) pro Gramm Luft bestimmt.

Über die in der Luft erzeugten Ionen wird die Strahlendosis gemessen, die während der Exposition durch Röntgenstrahlung in einem Raumelement vorhanden ist und gegebenenfalls den Körper trifft. Die Ionendosis besagt jedoch noch nichts über die tatsächlich biologisch wirksame Dosis.

$$\text{Ionendosis} = \frac{\text{Ladung}}{\text{Masse}_{\text{Luft}}} \left[\frac{\text{C}}{\text{kg}} \right] \left(\frac{\text{Coulomb}}{\text{kg}} \right)$$

(III) Energiedosis

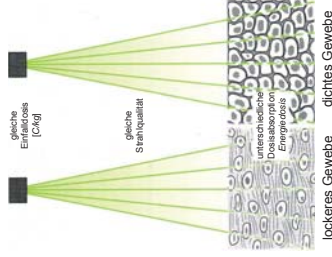
Aktivität/ionendosis: **keine** Aussage zur Wirkung von Strahlung auf den Körper.

→ Bestimmung der Energie die Körpers absorbiert wird:

die pro Masse absorbierte **Energiedosis (D)** wird in Gray (Gy) gemessen (1 Gray entspricht der Energiemenge von einem Joule pro Kilogramm Gewebe).

$$D = \frac{\text{Energie}}{\text{Masse}_{\text{(des absorbierenden Materials)}}}$$

$$\text{Einheit: } \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} = \text{Gy} \right] \quad (\text{Gray})$$



(III) Äquivalentdosis

Um die biologische Wirksamkeit der radioaktiven Strahlung auf den Körper anzugeben, benutzt man anstelle der Energiedosis die **Äquivalentdosis (H)**. Sie berücksichtigt die Tatsache, dass verschiedene Arten von Strahlen ganz unterschiedliche Wirkungen auf den Körper haben.

Daher wird jede Strahlungsart mit dem sogenannten **Strahlenwichtungsfaktor w_R** gewichtet. Gemessen wird die Äquivalentdosis in **Sievert (Sv)**. Sie ergibt sich aus der Multiplikation der Energiedosis mit dem Strahlenwichtungsfaktor w_R .

$$H = D \cdot w_R \quad [\text{Sv}] \quad (\text{Sievert})$$

(III) Äquivalentdosis

Strahlungswichtungsfaktor: berücksichtigt unterschiedliche biologische (kanzerogene) Wirkungen der jeweiligen Strahlungsart.

Strahlungsart	Wichtungsfaktor w_R
Röntgenstrahlung	1
Protonenstrahlung	1.3
Ionen leichter Elemente (z.B. ^{12}C)	5-50
Neutronenstrahlung	100 keV – 2 MeV: 20 2 MeV – 20 MeV: 10 Alphastrahlung, schwere Kerne: 20

Beispiel:
die Äquivalentdosis für 1 Gy Röntgenstrahlung beträgt 1 Sv
die Äquivalentdosis für 1 Gy Neutronenstrahlung beträgt 10-20 Sv

(III) Effektive Äquivalentdosis

Um das Kanzerogenese-Risiko nach Strahlenexposition differenziert beurteilen zu können, wurde die effektive Äquivalentdosis H_{eff} eingeführt. Dabei wird berücksichtigt, daß unterschiedliche Gewebe hinsichtlich der Tumorentwicklung unterschiedliche Empfindlichkeit gegenüber ionisierender Strahlung aufweisen.

Die effektive Äquivalentdosis ist definiert als Produkt von Äquivalentdosis H_T am Gewebe T und einem gewebespezifischen Wichtungsfaktor w_T

$$H_{\text{eff}} = \sum_T H_T \cdot w_T \quad [\text{Sv}] \quad (\text{Sievert})$$

Die Wichtungsfaktoren w_T wurden durch die bei den Überlebenden der Atombombenabwürfe auf Hiroshima und Nagasaki zusätzlich auftretenden Krebsfälle bestimmt. Maßgeblich war die Mortalität, nicht die Häufigkeit des Auftretens der Krankheit (Inzidenz).

(III) Effektive Äquivalentdosis

Beispiele für Gewebewichtungsfaktoren w_T :

Gewebe / Organ	Wichtungsfaktor w_T
Knochenoberfläche, Haut	je 0.01
Schildrüse, Brust, Speiseröhre	gesamt 0.02
Leber und alle nicht genannten Organe	gesamt 0.30
rotes Knochenmark, Lunge	je 0.12
Magen und Dickdarm	gesamt 0.48
Keimdrüsen	je 0.10
	gesamt 0.20
	Totale: 1.00

Die Äquivalentdosis ist wie die Ionen- oder Energiedosis differenziell und gilt nur für kleine Volumen. Die effektive Äquivalentdosis beschreibt dagegen die Strahlenbelastung einer gesamten Person.

49

Dosisbegriffe und Dosisseinheiten

(III) Strahlenbelastung

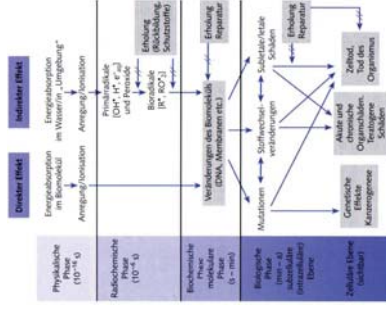
Um die Wirkung radioaktiver Strahlung auf den Körper genau einzuschätzen, muß die Zeitdauer bekannt sein, über die eine bestimmte Dosis auf den Körper einwirkt.

Daher wird die Strahlenbelastung meist in Sievert pro Zeiteinheit gemessen. Die durchschnittliche natürliche Strahlenbelastung liegt in Deutschland bei 2,1 Millisievert pro Jahr, also 0,24 Mikrosievert pro Stunde. Im Schnitt kommen zwei Millisievert pro Jahr durch künstliche Quellen von Radioaktivität hinzu, den größten Anteil dabei haben medizinische Anwendungen.

50

Dosisbegriffe und Dosisseinheiten

(IV) Ionisierende Strahlung und biologische Strukturen



Der Weg vom physikalischen Primäreignis der Energieabsorption zum biologischen Effekt kann unmittelbar und länger sein, verläuft meist aber über verschiedene Zwischentreffpunkte.

Eine Reparatur ist auf allen Ebenen möglich!

Strahlenbiochemie und Strahlenbiologie 51

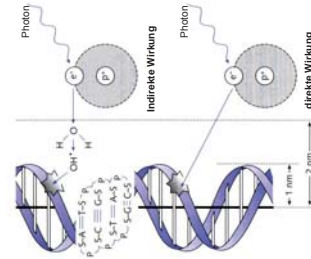
(IV) Ionisierende Strahlung und biologische Strukturen

Die vielfältigen und komplex miteinander wechselwirkenden Ereignisse die zu bleibenden biologischen Schädigungen führen, lassen sich in drei Ebenen unterteilen:

- Radiochemische Vorgänge (Dauer ~ 1 µs) Bildung von Primär- und Bioradikalen
- Biochemische Reaktionen (Dauer Sekunden bis Minuten) Veränderungen an biologischen Molekülen, z.B. DNA und Membranen
- Biologische Folgen (Dauer Stunden bis Jahrhunderte) Genetische, teratogene, akute und chronische somatische Strahlenfolgen

Strahlenbiochemie und Strahlenbiologie 52

(IV) Direkte und indirekte Strahlenwirkung

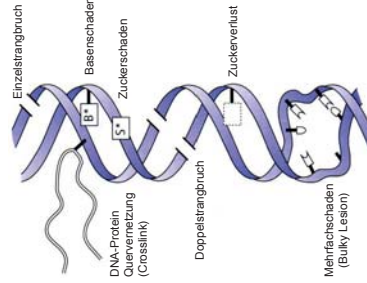


Ionisierende Strahlung wechselwirkt zunächst mit Wasser unter Entstehung freier Wasserradikale. Diese können weit genug diffundieren, um ein kritisches Ziel zu schädigen. Energieabsorption und Bioeffekt erfolgen in unterschiedlichen Strukturen.

Die indirekte Strahlenwirkung ist der dominierende Vorgang bei Röntgenstrahlung und Elektronenstrahlen.

Strahlenbiochemie und Strahlenbiologie 53

(IV) DNA und ionisierende Strahlung



Experimentell lassen sich folgende DNA-Schäden feststellen:

- Basenmodifikationen
- Basenverluste
- Veränderung der Zuckermoleküle
- Einzelstrangbrüche
- Doppelstrangbrüche
- DNA-Vernetzungen
- DNA-Protein-Vernetzungen
- Mehrfacheffekte

Strahlenbiochemie und Strahlenbiologie 54

(IV) DNA und ionisierende Strahlung

Strahlenschäden an der DNA sind verantwortlich für die genetischen und die meisten somatischen und teratogenen Strahlenfolgen am Menschen.

Die häufigsten strahleninduzierten Veränderungen sind Basenmodifikationen. Nach der Bestrahlung mit 1 Gy Röntgenstrahlung findet man pro Zelle:

- 1000 – 2000 Basenveränderungen
- 500 – 1000 Einzelstrangbrüche
- 800 – 1600 Veränderungen an Zuckermolekülen
- 150 DNA-Protein-Quervernetzungen
- 50 Doppelstrangbrüche oder Bulky Lesions

(IV) Reparatur der DNA-Strahlenschäden

Zur Reparatur der entstandenen DNA-Schäden existiert in der Zelle ein komplexes Kontroll-, Regulations-, und Reparatursystem. Zweck:

- Erhalt der Integrität der DNA
- Verhindern von Mutationen
- Vermeidung Kanzerogenese

Erster Reparaturschritt: Erkennung des Schadens. Danach: teils komplexe und zeitaufwendige Reparaturvorgänge, bei denen mehrere Enzyme und Proteine eingebunden sind.

- „schnelle Reparatur“: 10 – 20 Minuten
- „langsame Reparatur“: 2 – 8 Stunden

Der verbleibende Restschaden ist kleiner als 5%

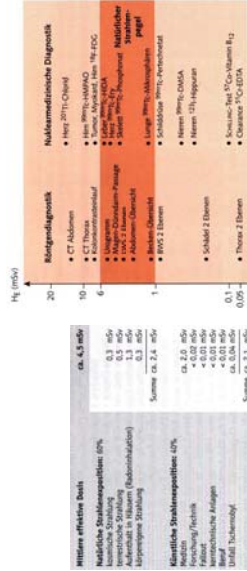
(IV) Strahlenfolgen

Das wichtigste Strahlenrisiko für den Menschen ist die Kanzerogenese. Die wesentliche Ursache für die Krebsentstehung ist die Transformation einer Somazelle infolge Mutationen.

Es wird vermutet, daß auch kleinste Strahlendosen bösartige Tumoren induzieren können. Am häufigsten sind Karzinome des Magen-Darm Traktes, Lungenkarzinome, Brustkrebs und Leukämien. Die Latenzzeit bis zu ihrem Auftreten kann Jahrzehnte betragen.

Eine somatische Zelle ist eine Körperzelle, deren genetische Information im Gegensatz zu einer Geschlechtszelle nicht an die folgende Generation weitergegeben wird. Nahezu alle Körperzellen höherer Organismen sind somatische Zellen.

(IV) Strahlensexposition Alltag - Röntgendiagnostik



Effektive Dosen von Untersuchungen zur Röntgendiagnostik und Nuklearmedizin

Mittlere Strahlensexposition der Bevölkerung der BRD

(IV) Risiken und statistische Lebenserwartung

Einbuße an individueller Lebenserwartung (Δ LE) durch ionisierende Strahlung und andere alltägliche Risiken:

Ursache	Δ LE (Jahre)
Alkoholisismus ledig bleiben	- 432
Rauchen ledig bleiben	- 350
Rauchen 30% Übergewicht	- 240
Passivrauchen	- 1600
Strahlung 1 mSv pro Jahr, lebenslang	- 1425
10 mSv einmalig	- 130
3 mSv einmalig	- 50
1 mSv einmalig	- 19
	- 3
	- 1
	- 0,5

Radiologische Größen in SI und historischen Einheiten

Quantity	Description of Quantity	SI Units (Abbreviations) and Definitions	Traditional Units (Abbreviations) and Definitions	Symbol	Definitions and Conversion factors
Exposure	Amount of ionization in air produced by x-rays or gamma rays	C kg ⁻¹	Röntgen (R)	X	1R = 2.58 × 10 ⁻⁴ C kg ⁻¹ 1R = 2.58 mRy 1R = 0.877 rads in air 1R = 0.877 rads in air 100 rad = 1 Gy
Absorbed dose	Amount of energy imparted by ionizing radiation per unit mass of matter	J kg ⁻¹	Gray (Gy)	D	1Gy = 100 rad 1Gy = 0.01 kGy
Kerma	Amount of energy imparted to charged particles per unit mass of air	J kg ⁻¹	Gray (Gy)	K	1Gy = 100 rad 1Gy = 0.01 kGy
Air kerma	Amount of energy imparted to charged particles per unit mass of air	J kg ⁻¹	Gray (Gy)	K _a	1Gy = 100 rad 1Gy = 0.01 kGy
Equivalent dose	Total radiation energy imparted to matter	Sievert (Sv)	Sievert (Sv)	H	1Sv = 100 rem 1Sv = 0.01 kSv
Effective dose	Equivalent dose weighted by organ sensitivity to stochastic effects	Sievert (Sv)	Sievert (Sv)	H	1Sv = 100 rem 1Sv = 0.01 kSv
Activity	Number of disintegrations per second	Becquerel (Bq)	Curie (Ci)	A	1Ci = 3.7 × 10 ¹⁰ Bq 1mCi = 3.7 × 10 ⁷ Bq 1μCi = 3.7 × 10 ⁴ Bq 1nCi = 3.7 × 10 ¹ Bq

Anhang: Linearer Abschwächungskoeffizient

Linearer Abschwächungskoeffizient (μ):

Anzahl n von Photonen die über eine Schichtdicke x aus einem monochromatischen Röntgenstrahl absorbiert werden:

$$N = N_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

N_0 : Gesamtzahl von Photonen die auf das Material auftreffen

N : Anzahl von Photonen die das Material penetrieren

In der diagnostischen Anwendung nimmt der lineare Abschwächungskoeffizient mit zunehmender Photonenenergie ab.

Für Weichteilgewebe: $0.35 \leq \mu \leq 0.6 \text{ [cm}^{-1}\text{]}$.

A

2

Anhang: Linearer Abschwächungskoeffizient

Der gesamte lineare Abschwächungskoeffizient (μ_G) berechnet sich additiv:

$$\mu_G = \mu_{\text{Rayleigh}} + \mu_{\text{Compton}} + \mu_{\text{Photoelektrisch}} + \mu_{\text{Paarbildung}}$$

In der diagnostischen Anwendung nimmt der lineare Abschwächungskoeffizient mit zunehmender Photonenenergie ab.

Für Weichteilgewebe: $0.35 \leq \mu_G \leq 0.6 \text{ [cm}^{-1}\text{]}$.

Bei gegebenem Material und Dicke hängt der lineare Abschwächungskoeffizient von der Dichte ab:

$$\mu_{\text{Wasser}} > \mu_{\text{Eis}} > \mu_{\text{Wasserdampf}}$$

A

3

Anhang: Massenabschwächungskoeffizient

Der Massenabschwächungskoeffizient (μ_p) ist der auf die Dichte normierte lineare Abschwächungskoeffizient:

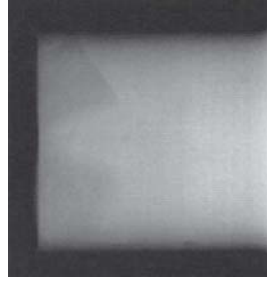
$$\mu_p = \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right]$$

Die Masse ist eine wichtige Größe in der diagnostischen radiologischen Bildgebung

A

4

Anhang: Massenabschwächungskoeffizient



Röntgenbild von 2 Eiswürfeln in Wasser. Die Eiswürfel können durch ihre geringere Dichte visualisiert werden.

A

5

Anhang: Halbwertsdicke

Die Halbwertsdicke ist die Dicke eines Materials, bei der die Intensität elektromagnetischer Strahlung auf die Hälfte reduziert wird.

Die Halbwertsdicke ist ein indirektes Maß für die Photonenenergie eines Strahls (Strahlqualität).

Zur Messung der Strahlqualität muß sichergestellt werden, das nur unangeschwächte Photonen den Detektor erreichen → „narrow-beam condition“

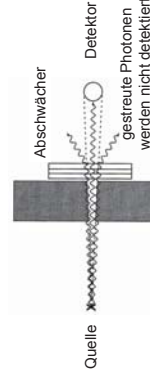
Photonenquelle	Halbwertsdicke [mm]		
	Gewebe	Aluminium	Blei
70 keV (^{201}Tl)	37	11	0.2
140 keV ($^{99\text{m}}\text{Tc}$)	44	18	0.3

A

6

Anhang: Narrow-Beam-Condition

Die narrow-band Geometrie wurde zur Vermeidung der Detektion gestreuter Photonen entwickelt.



Der Aufbau von Kollimator und Detektor verhindern die Messung gestreuter Photonen (Streustrahlung)

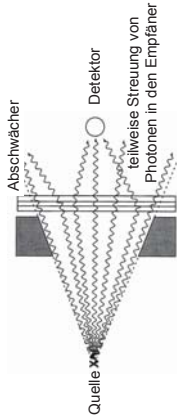
A

7

Anhang: Broad-Band-Condition

Bei der Broad-Band Geometrie ist der Strahl so weit, daß gestreute Photonen zum Detektor gelangen.

Die den Detektor erreichenden gestreuten Photonen bewirken eine Unterschätzung der Abschwächung (oder in einer Überschätzung der Halbwertsdicke).



8

Anhang: Absorption von Energie aus Strahlung

Definition einiger grundlegenden Größen:

Die **Fluenz** Ψ ist die Anzahl von Photonen die eine Einheitsfläche penetrieren:

$$\Phi = \frac{\text{Photonen}}{\text{Fläche}} \left[\frac{n}{\text{cm}^2} \right]$$

Der **Fluß** ist die auf ein Zeitintervall normierte Fluenz:

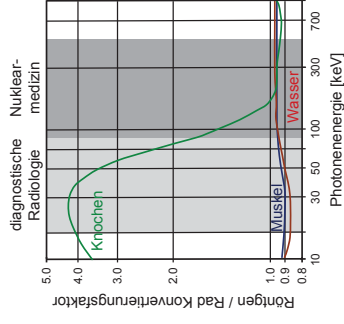
$$\phi = \frac{\text{Photonen}}{\text{Fläche} \cdot \text{Zeit}} \left[\frac{n}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \right]$$

Die **Energiefluenz** für einen monochromatischen Röntgenstrahl (Energie pro Einheitsfläche) ist:

$$\Psi = \frac{\text{Photonen} \cdot \text{Energie}}{\text{Fläche} \cdot \text{Photon}} \left[\frac{\text{keV}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \right]$$

9

Anhang: Röntgen / Rad Konvertierung



10

(I) Technische Anwendungen des EM-Spektrums

Wellenlängenbereich	Frequenz [Hz]	Energie [eV]	Bezeichnung	Verwendung
18.000 km	$16\frac{2}{3}$	$6,9 \cdot 10^{-14}$	technischer	elektrische Bahn
6000 km	50	$2,1 \cdot 10^{-15}$	Wechselstrom	Energieversorgung
10.000-1000 m	$3 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^{-10} - 1,2 \cdot 10^{-9}$	Langwelle	Rund-, Weiterfunk
1000-182 m	$3 \cdot 10^5 - 1,65 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^{-9} - 6,6 \cdot 10^{-9}$	Mittelwelle	Rund- und Seefunk
100-10 m	$3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^{-8} - 1,2 \cdot 10^{-7}$	Kurzwellen	Rund-, Flug- und Amateurfunk
10-1 m	$3 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^{-7} - 1,2 \cdot 10^{-6}$	Ultraschurzwelle	Rundfunk, Fernsehen, Polizeifunk
1 m-10 cm	$3 \cdot 10^8 - 3 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^{-6} - 1,2 \cdot 10^{-5}$	Dezimeterwellen	Mobilefon, Militär, Satellitensteuerung
10 cm-1 cm	$3 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{10}$	$1,2 \cdot 10^{-5} - 1,2 \cdot 10^{-4}$	Zentimeterwellen	Radar, Mikrowellenheizung
1 mm-0,78 µm	$3 \cdot 10^{11} - 3,9 \cdot 10^{14}$	$1,2 \cdot 10^{-3} - 1,6$	Infrarot	Nachrichtentechnik, Infrarot-, Lasertechnik
0,78-0,38 µm	$3,9 \cdot 10^{14} - 7,9 \cdot 10^{14}$	1,6-3,3	sichtbares Licht	Regenbogen

11

(I) Technische Anwendungen des EM-Spektrums

Wellenlängenbereich	Frequenz [Hz]	Energie [eV]	Bezeichnung	Verwendung
0,38-0,01 µm	$7,9 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$	3,3-124	UV-Licht	Sonnenbrand
30 nm- 10^{-6} nm	$10^{16} - 3 \cdot 10^{26}$	$41 - 1,2 \cdot 10^{21}$	sehr weiche bis sehr harte Röntgenstrahlung	Röntgendiagnostik und -therapie, Materialprüfung, Kernreaktionen
0,4-10-4 nm	$7,5 \cdot 10^{17} - 3 \cdot 10^{21}$	$3,1 \cdot 10^{-3} - 1,2 \cdot 10^7$	Gammastrahlung	Strahlentherapie, Materialprüfung, Kernreaktionen
< 10-5 nm	$> 3 \cdot 10^{22}$	$> 1,2 \cdot 10^8$	sekundäre Höhenstrahlung	Teilchenerzeugung

12