



Photonen-Wechselwirkungen

Dr. R. Mini

Wechselwirkungen zwischen Strahlungen und Materie



Strahlung

Unter **Strahlung** versteht man einen „freien“,
kontinuierlichen Energietransport durch
Strahlenteilchen



Strahlenarten

Je nach Charakter der Strahlenteilchen kann der Energietransport einer Strahlung mit oder ohne Materietransport verbunden sein.

Entsprechend unterscheidet man grundsätzlich zwischen zwei Strahlenarten:

- Strahlungen mit Wellencharakter (Photonen)

(ohne Ruhemasse)

Diese lassen sich anhand der Frequenzen oder der Wellenlängen ihrer Quanten beschreiben

- Strahlungen mit Teilchencharakter

(mit Ruhemasse)

Diese werden durch die Eigenschaften und die kinetischen Energien ihrer Teilchen charakterisiert



Phasenraum

Abbildung aller Strahlenteilchen in einem sechsdimensionalen Raum durch Angabe der Koordinaten $n(x,y,z,v_x,v_y,v_z)$ oder $n(x,y,z,E,\Omega)$

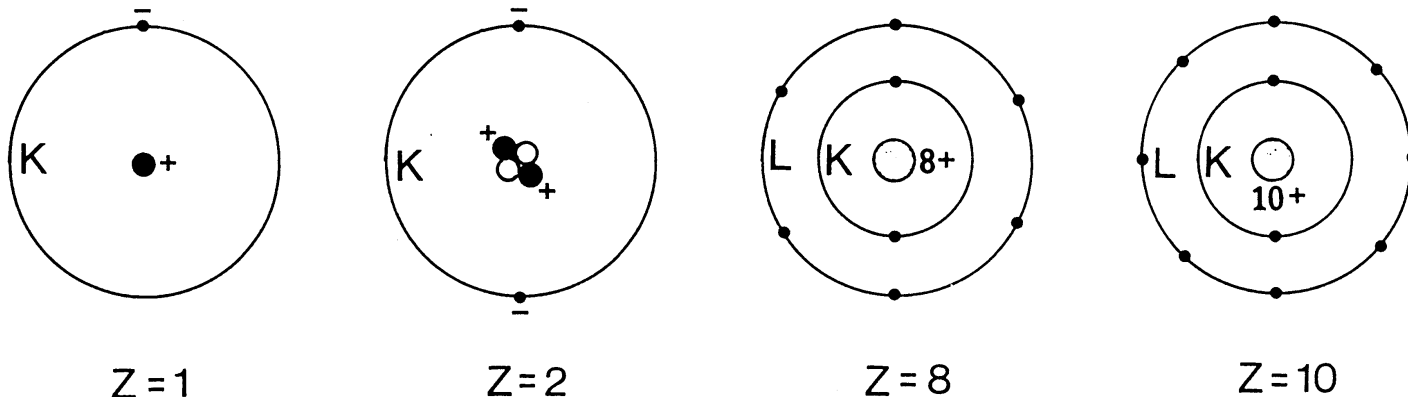
Teilchenflußdichte (<i>particle fluence rate</i>)	$\varphi(t, \mathbf{r})$	$= d^2N/(dt dA_{\perp})$	$s^{-1}m^{-2}$
Teilchenfluenz (<i>particle fluence</i>)	$\Phi(\mathbf{r})$	$= dN/dA_{\perp}$	m^{-2}
Teilchenfluß (<i>particle flux</i>)	$\dot{N}(t)$	$= dN/dt$	s^{-1}
Teilchenzahl (<i>particle number</i>)	N		1

Energieflußdichte (<i>energy fluence rate</i>)	$\psi(t, \mathbf{r})$	$= d^2R/(dt dA_{\perp})$	$Js^{-1}m^{-2}$
Energiefluenz	$\Psi(\mathbf{r})$	$= dR/dA_{\perp}$	Jm^{-2}
Energiefluß (Strahlleistung)	$\dot{R}(t)$	$= dR/dt$	W
Strahlungsenergie ¹⁾ (<i>radiant energy</i>)	R		J

¹⁾ Nicht zu verwechseln mit „Energie der Strahlteilchen“.

Aufbau der Atome

Der Anschaulichkeit zu liebe wird auf die einfache „klassische“ Vorstellung des **Bohrschen Atommodelles** zurückgegriffen



Vereinfachter Aufbau der Atomhüllen nach dem Bohrschen Atommodell für verschiedene Elemente ($Z = 1$: Wasserstoff, $Z = 2$: Helium, $Z = 8$: Sauerstoff, $Z = 10$: Neon, Elemente mit einer maximal gefüllten äußeren Elektronenschale werden Edelgase genannt). Darstellung nicht maßstabsgerecht.

Strahlenwirkungen

Trifft ein Strahlungsfeld auf Materie, so kommt es zur Wechselwirkung (WW) zwischen Strahlungsfeld und bestrahlter Materie. Dies ist im Allgemeinen mit einem Übertrag von Strahlungsenergie auf die Materie (Absorber) verbunden.

Bei den in der Medizin verwendeten Strahlungen führt dies in den häufigsten Fällen zu einer Anregung oder Ionisation von Atomen im Absorber (Patientenkörper).



Primäre Wirkung hochenergetischer Strahlungen

Anregung und Ionisation von Atomen

Trifft ein Strahlungsfeld auf Materie, so kommt es zur Wechselwirkung (WW) zwischen Strahlungsfeld und bestrahlter Materie. Dies ist im Allgemeinen mit einem Übertrag von Strahlungsenergie auf die Materie (Absorber) verbunden.

Bei den in der Medizin verwendeten Strahlungen führt dies in den häufigsten Fällen zu einer Anregung oder Ionisation von Atomen im Absorber (Patientenkörper).



Wirkungswahrscheinlichkeit

Als Mass für die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit eines Teilchen- oder Photonenstrahlenbündels mit einem Absorber wird der sog. **Wirkungsquerschnitt** σ verwendet.

Wirkungsquerschnitte lassen sich als „Trefferfläche“, die ein Reaktionszentrum (ein Atom, ein Atomkern oder ein Hüllenelektron) einem Strahl entgegenstellt, veranschaulichen.

$$[\sigma] = \text{m}^2 \text{ oder Barn. } 1\text{b} = 10^{-28}\text{m}^2$$



Wirkungsquerschnitte σ

In der Quantenmechanik ist der Wirkungsquerschnitt als Quotient aus Reaktionsrate R (Zahl der Reaktionen eines bestimmten Typs pro Zeit und pro Reaktionszentrum; $[R]=s^{-1}$) und der Dichte j der einfallenden Teilchen (Zahl der Teilchen pro Zeit und Fläche; $[j]=m^{-2}\cdot s^{-1}$)

$$\sigma = \frac{R}{j}$$



Wirkungsquerschnitte σ

Wirkungsquerschnitt pro Atom

$${}_a\sigma = \frac{\mu}{\rho \cdot n_a} = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{M}{N_A}$$

Wirkungsquerschnitt pro Elektron

$${}_e\sigma = \frac{{}_a\sigma}{Z} = \frac{1}{Z} \cdot \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{M}{N_A}$$

mit

n_a : Atomzahldicht

$$n_a = N_A/M$$

μ : Schwächungskoeffizient

N_A : Avogadrokonstante

M : molare Masse

$$\mu = \rho \cdot n_a \cdot \sigma_a = \rho \cdot \sigma_a \cdot \frac{N_A}{M}$$



Einteilung von Strahlungen aufgrund der Wechselwirkungsart



Einteilungen von Strahlungen

- Ionisierende Strahlungen
- nicht ionisierende Strahlungen

- direkt ionisierende Strahlungen
- indirekt ionisierende Strahlungen



Ionisierende/Nichtionisierende Strahlungen

Je nach dem ob Strahlungen genügend Energie besitzen um Elektronen aus den Atomhüllen einer bestrahlten Materie zu lösen, werden diese in ionisierende und nichtionisierende Strahlungen eingeteilt.

Die zur Ionisation benötigte Teilchenenergie beträgt je nach bestrahlter Materie wenige eV bis zu einigen keV. ($1\text{eV} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$)



Direkt und indirekt ionisierende Strahlungen

Zu den **direkt ionisierenden** Strahlungen werden alle **geladenen Teilchenstrahlungen** gezählt, die durch Stösse unmittelbar die grösste Anzahl Ionisationen in der bestrahlten Materie erzeugen.

Zu den **indirekt ionisierenden** Strahlungen zählt man dagegen alle **Strahlungen elektrisch ungeladener Teilchen und Photonen**. Bei diesen Strahlungen wird die bestrahlte Materie zum weitaus grössten Teil durch die nach der Primärwirkung entstehenden, elektrisch geladenen Sekundärteilchen (hauptsächlich Elektronen) ionisiert.





Wechselwirkungen der Photonenstrahlungen

Wechselwirkung ionisierender Photonenstrahlungen mit Materie

Da Photonen keine elektrische Ladung tragen, ist die Wahrscheinlichkeit für eine Wechselwirkung mit Materie wesentlich kleiner als für geladene Teilchen. Die Photonenstrahlung kann deshalb sehr durchdringend sein (Strahlenschutz).

Wegen der geringen Schwächung ermöglicht die Photonenstrahlung die perkutane Bestrahlung von tiefliegenden Tumoren oder die Durchleuchtung relativ dicker Materieschichten (Patientenkörper) in der Röntgendiagnostik.



Wechselwirkung ionisierender Photonenstrahlungen mit Materie

Photonenwechselwirkungen mit Atomhüllen

- klassische Streuung (kohärente Streuung, Rayleigh-Streuung, Thomson-Streuung)
- Photoeffekt
- Comptoneffekt (inkohärente Streuung)

Photonenwechselwirkung im el.mag. Feld von Atomkernen

- Paarbildung

Photonenwechselwirkungen mit Atomkernen

- Kernphotoeffekt



Klassische (kohärente) Streuung

Bei der klassischen Streuung werden die Photonen ohne Energieverlust, aber mit Richtungsänderung gestreut; die Atomhülle bzw. das Atom bleibt unverändert.

Die klassische Streuung heisst im Bereich des sichtbaren Lichtes „Rayleigh-Streuung“; im Bereich niederenergetischer ionisierender Photonenstrahlung „Thomsonstreuung“



Kohärente Streuung

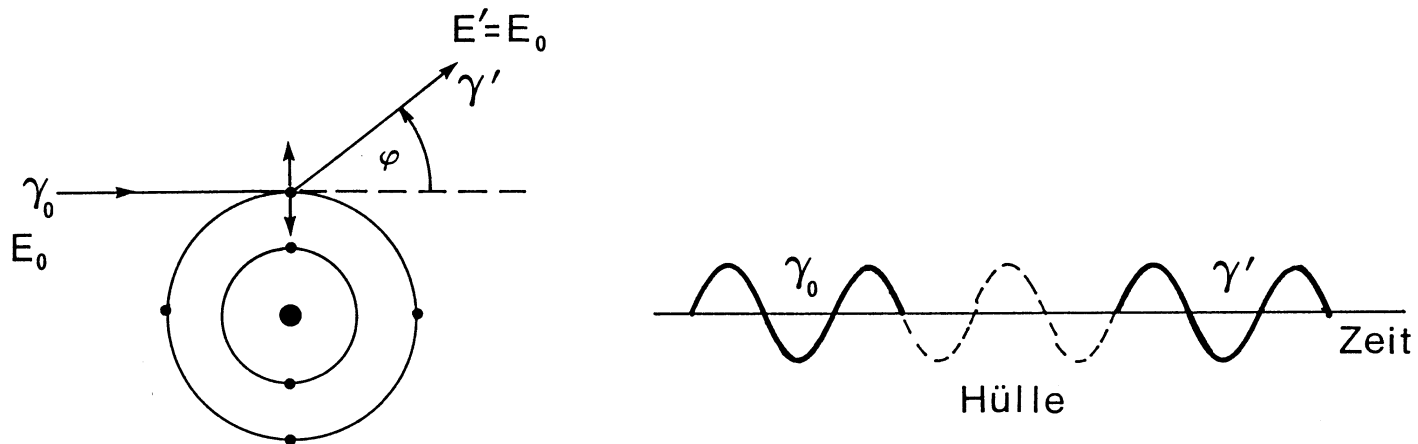


Fig. 4.10: Links: Schematische Darstellung des klassischen Streuvorganges an gebundenen Elektronen. Das primäre Photon regt die Elektronenhülle zu erzwungenen Schwingungen an. Das gestreute Photon hat zwar dieselbe Energie aber im allgemeinen eine andere Richtung als das primäre Photon. Rechts: Phasenbeziehung zwischen einlaufendem Photon γ_0 , Hüllenschwingung und gestreutem Photon γ' .

Kohärente Streuung

$$\sigma_{kl} \propto \rho \cdot \frac{Z^{2.5}}{A \cdot E_{\gamma}^2} \approx \rho \cdot \frac{Z^{1.5}}{E_{\gamma}^2}$$

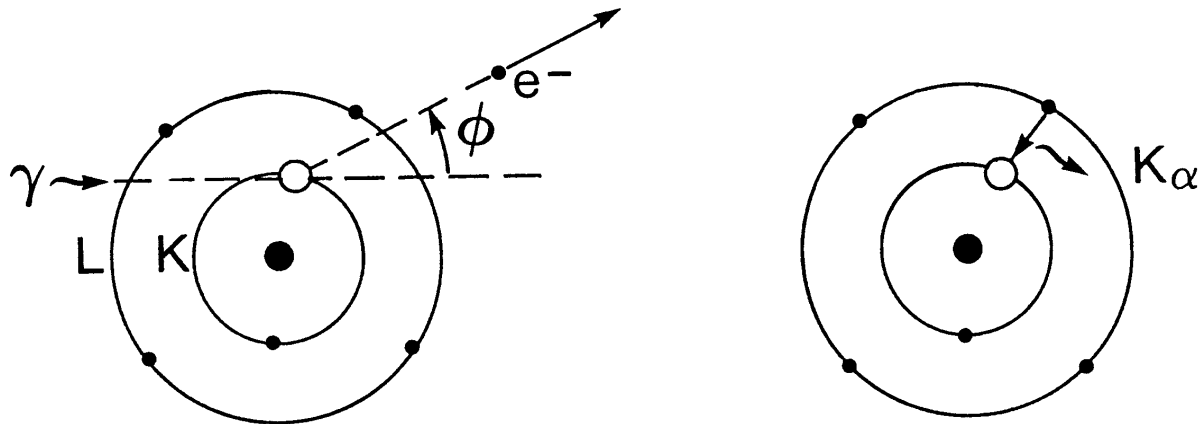


Photoeffekt

Ein Photon stösst ein Elektron aus einer inneren Schale einer Atomhülle indem es diesem die gesamte Energie überträgt. Das Photon wird somit absorbiert.



Photoeffekt



: Schematische Darstellung des Photoeffektes an einem K-Elektron. Links: Absorption des Photons durch ein K-Elektron mit Ionisierung der Atomhülle. In der K-Schale bleibt ein Elektronenloch. Rechts: Das Elektronenloch wird durch ein äußeres Elektron aufgefüllt. Die Differenzenergie wird als charakteristisches Photon emittiert oder auf ein weiteres Hüllenelektron übertragen (Augerelektronenemission).

Photoeffekt

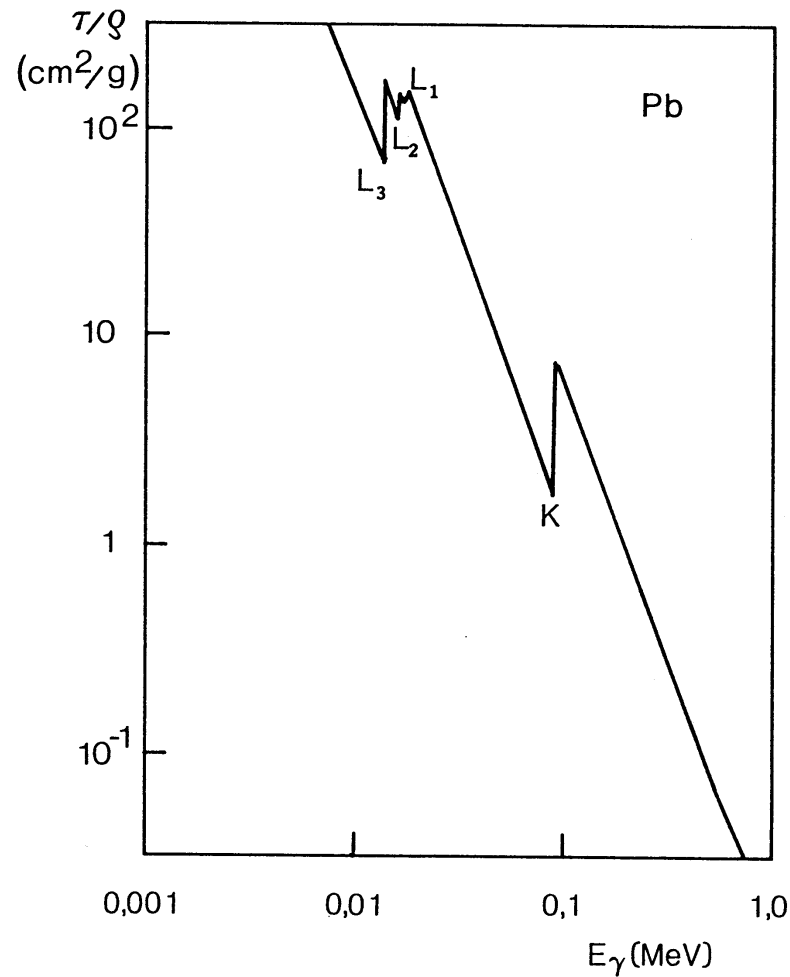
$$\tau \propto \rho \cdot \frac{Z^{n+1}}{A \cdot E_\gamma^3} \approx \rho \cdot \frac{Z^n}{E_\gamma^3} \quad (E_\gamma \ll 511 \text{ keV})$$

$$\tau \propto \rho \cdot \frac{Z^{n+1}}{A \cdot E_\gamma} \approx \rho \cdot \frac{Z^n}{E_\gamma} \quad (E_\gamma \gg 511 \text{ keV})$$

$$n = 4 - 5$$

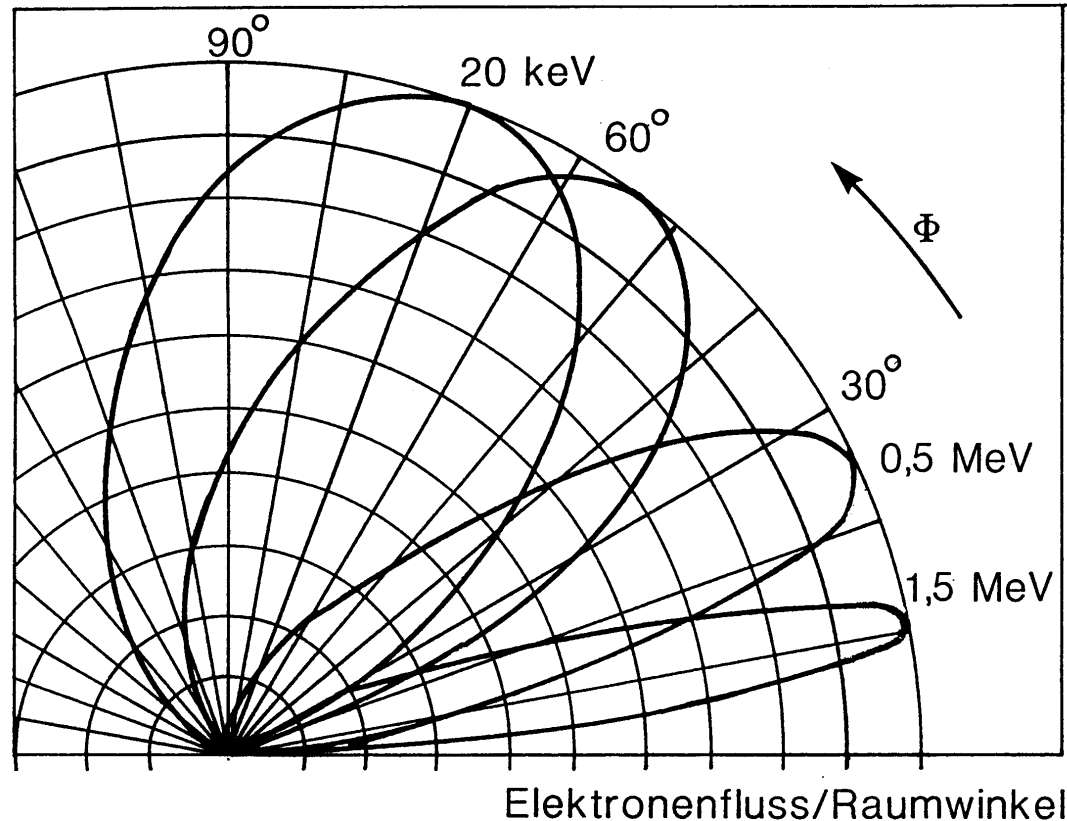


Photoeffekt



Energieabhängigkeit des Massen-Photoabsorptionskoeffizienten τ/ρ für Blei. L1-L3 und K sind die Absorptionskanten (s. Text).

Photoeffekt



: Relative, auf das jeweilige Emissionsmaximum normierte Winkelverteilungen von Photoelektronen in Abhängigkeit von der Photonenenergie und dem Emissionswinkel Φ relativ zur Einstrichrichtung der Photonen (von links).

Photoeffekt

Beim Photoeffekt wird das einfallende Photon absorbiert, aus einer der inneren Schalen der Absorberatome wird ein Photoelektron freigesetzt. Bevorzugt findet Photoeffekt an K- oder L-Schalenelektronen statt.

Bis auf den ordnungszahlabhängigen Bindungsenergieanteil übernimmt das Elektron die ganze Photonenenergie als Bewegungsenergie. Bei hohen Photonenenergien und leichten Absorbern mit kleinen Bindungsenergien stimmen deshalb Energie des Photons und kinetische Energie des Elektrons fast überein.

Photoelektronen zeigen eine photonenergieabhängige Winkelverteilung. Je höher die Energie des Photons ist, um so mehr werden die Photoelektronen nach vorne, also in Strahlrichtung, emittiert.



Photoeffekt

Neben den Photoelektronen als eigentlichen Sekundärteilchen entstehen als Tertiärstrahlungen die isotrop (d. h. gleichmässig in alle Richtungen) ausgestrahlte charakteristische Röntgenstrahlung, Augerelektronen sowie hauptsächlich in schweren Materialien die Bremsstrahlung der abgebremsten Photoelektronen.

Der Photoeffekt findet vor allem bei niedrigen Photonenenergien und hohen Ordnungszahlen des Absorbers statt. In menschlichem Gewebe spielt er für den Bereich der Medizin nur in der Röntgendiagnostik eine Rolle. In hochatomigen Strahlenschutzabschirmungen ist er insbesondere für Energien bis zu einigen 100 keV die wichtigste Photonenwechselwirkung.



Inkohärente (Compton-) Streuung

Die inkohärent gestreuten Photonen verlieren bei der Wechselwirkung einen Teil ihrer Energie an ein Elektron einer äusseren Atomhülle und ändern ihre Richtung.

Das angestossene Hüllenelektron wird aus der Atomhülle gestossen und kann seinerseits mit den Atomen des Absorbers wechselwirken.



Comptoneffekt

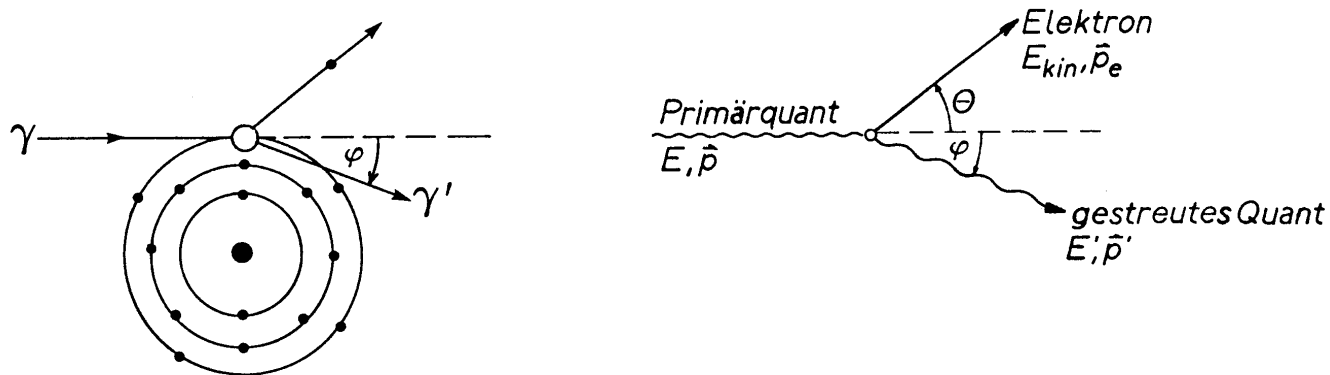


Fig. 4.4: Schematische Darstellung des Comptoneffektes als Stoßprozeß des einfallenden Photons mit einem schwach gebundenen äußeren Hüllenelektron. Sowohl Impuls als auch Photonenenergie werden in Abhängigkeit vom Streuwinkel φ auf das Comptonelektron und das gestreute Photon verteilt. Das Atom wird durch eine Compton-Wechselwirkung einfach ionisiert.

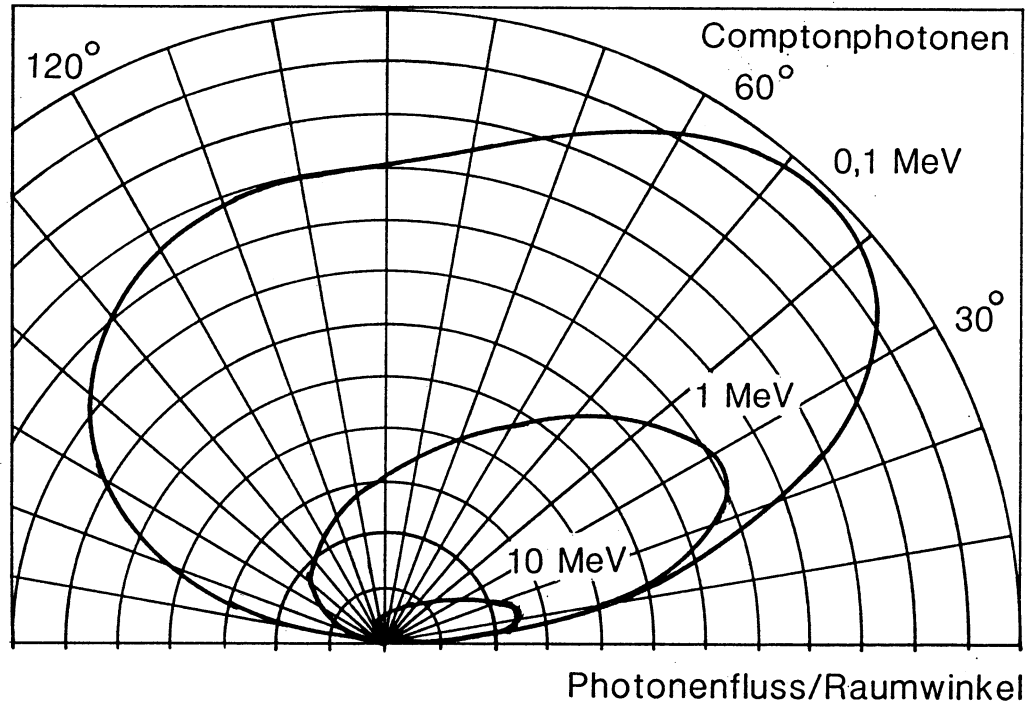
Comtoneffekt

$$\sigma_c \propto \rho \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{E_\gamma^n} \neq f(Z) \quad (n = 0.5 \text{ bis } 1)$$

E zwischen 0.2 MeV und 10 MeV



Comptoneffekt



: Winkelverteilungen von Comptonphotonen (nach [Evans 1958]). Die primären Photonen werden in dieser Darstellung von links eingestrahlt. Ein erheblicher Anteil der Photonen wird auch in Rückwärtsrichtungen gestreut (Backscatter). Bei Energien bis etwa 100 keV ähnelt das Winkelverteilungsdiagramm der Comptonphotonen einem Schmetterlingsflügel, bei hohen Energien schmalen, nach schräg vorne gerichteten Keulen. Dargestellt ist der differentielle Wirkungsquerschnitt pro Elektron und pro Winkелеlement als Funktion des Streuwinkels (die Energiefluenz = Energie pro Flächeneinheit).

Comptoneffekt

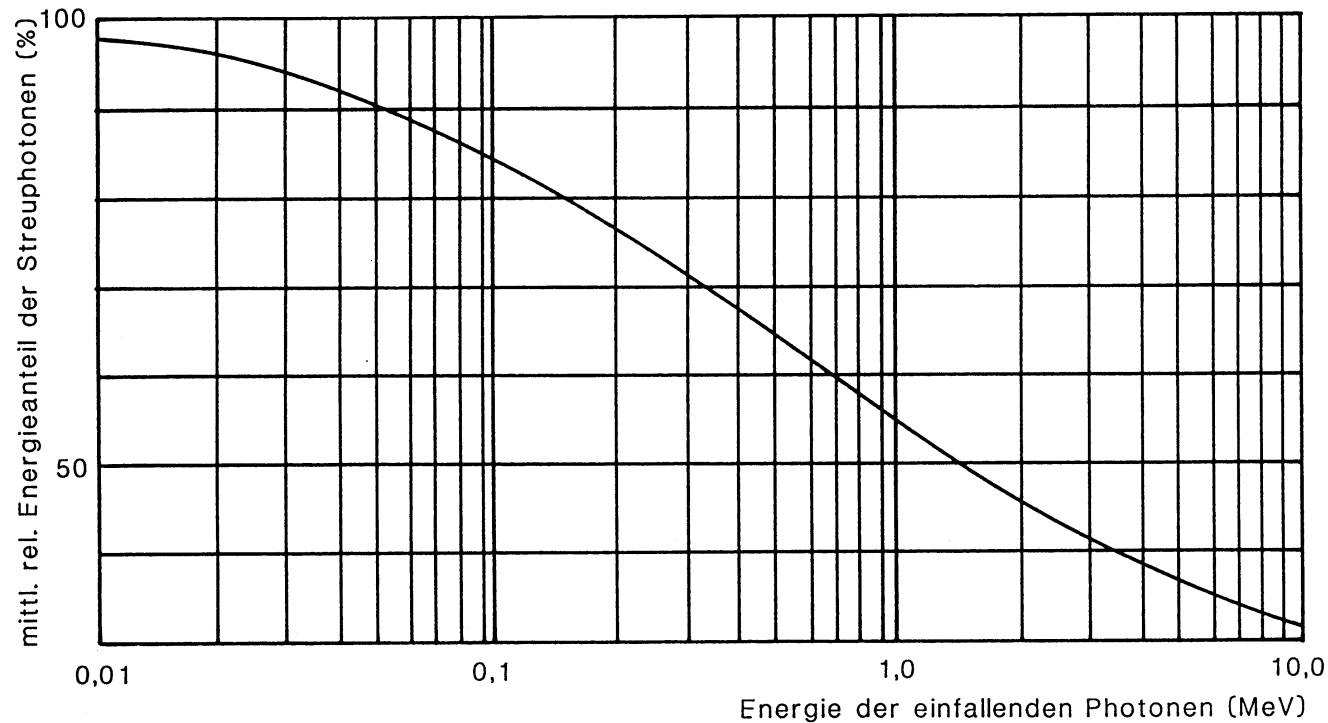
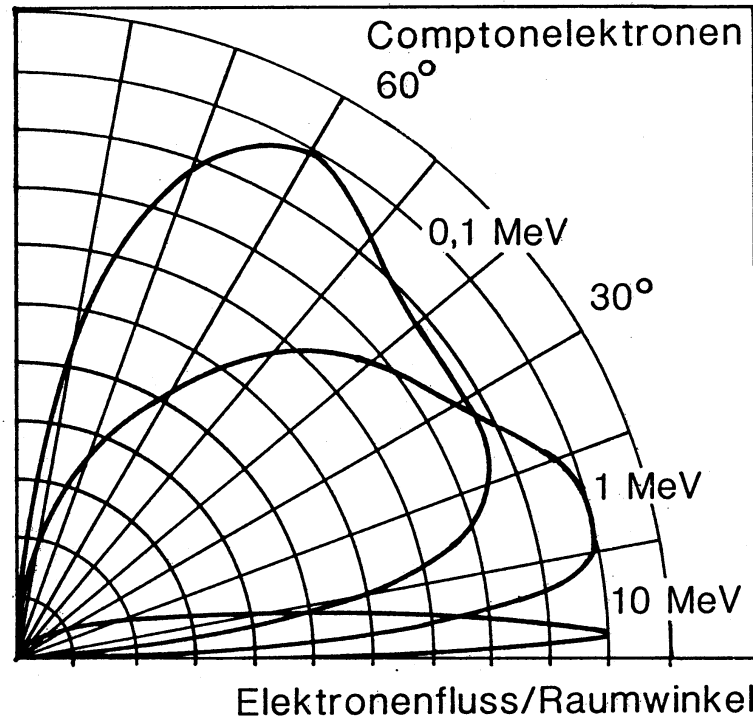


Fig. 4.8: Über alle Streuwinkel gemittelter Restenergieanteil comptongestreuter Photonen, bezogen auf die Energie des einfallenden Photons. Nach Daten von [Greening 1981].

Comptoneffekt



: Auf das jeweilige Maximum normierte Winkelverteilungen von Comptonelektronen nach [Whyte 1959]. Die primären Photonen werden von links eingeschossen. Dargestellt ist die relative Teilchenfluenz (die Teilchenzahl pro Flächeneinheit und pro Winkelement) als Funktion des Emissionswinkels der Elektronen.

Der Comptoneffekt

Unter Comptoneffekt versteht man die inelastische Streuung von Photonen an äusseren Hüllenelektronen. Dabei wird Energie vom Photon auf das Elektron übertragen. Dieses wird seitlich oder in Vorwärtsrichtung gestreut. Der dadurch entstehende Sekundärelektronenfluss ist um so stärker nach vorne ausgerichtet, je höher die Photonenenergie ist.

Das Photon selbst wird zwar nicht absorbiert, verliert aber einen Teil seiner Energie. Je höher die Photoenergie und der Photonenstreuwinkel ist, um so grösser ist auch der relative Energie-übertrag auf die Rückstosselektronen.



Der Comptoneffekt

Die Photonen werden bei der Wechselwirkung ebenfalls aus ihrer Richtung gelenkt. Dabei ist sogar Streuung in Rückwärtsrichtung möglich. Auch für die gestreuten Photonen gilt, dass sie mit zunehmender Photonenergie mehr in Strahlrichtung gestreut werden. Die höchsten Rückstreubeiträge treten bei niedrigen Photonenenergien auf.

Der Comptoneffekt ist in menschlichem Weichteilgewebe und anderen Substanzen mit niedriger Ordnungszahl für therapeutische und diagnostische Photonenstrahlung ab etwa 30 keV der dominierende Wechselwirkungsprozess.



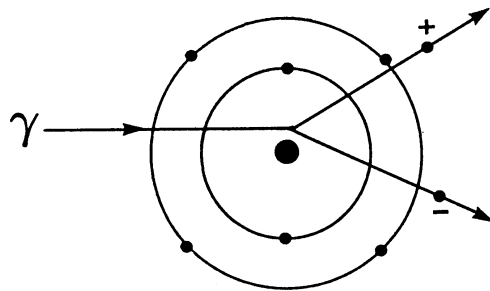
Paarbildung

Im elektrischen Feld eines Atomkernes wird ein Photon in ein Teilchen-Antiteilchenpaar (Elektron-Positron) umgewandelt. Das Photon wird absorbiert.

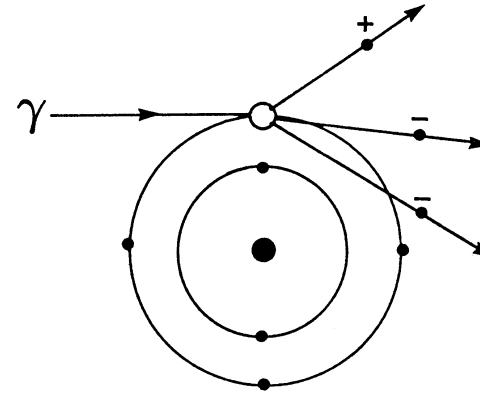
Beide entstandenen Teilchen können ihrerseits mit den Atomen des Absorbers wechselwirken, wobei das Positron beim Zusammentreffen mit einem Elektron unter Bildung von Vernichtungsstrahlung zerstrahlt.



Paarbildung



$$E_{\gamma} > 1022 \text{ keV}$$



$$E_{\gamma} > 2044 \text{ keV}$$

- 4.9: Schematische Darstellung der Paarbildungsprozesse. Links: Paarbildung im Coulombfeld eines Atomkernes. Das erzeugte Teilchen-Antiteilchenpaar besteht aus Elektron und Positron. Damit ist dem Gesetz von der Erhaltung der Teilchenzahl genüge getan. Aus Gründen der Impulserhaltung werden die Teilchen nach vorne emittiert. Die nach der Massenbildung verbleibende Energie des Photons tritt als Bewegungsenergie des Elektron-Positron-Paares auf. Rechts: "Triplettbildung" im Coulombfeld eines Hüllenelektrons. Die Energieschwelle liegt bei $4 \cdot m_0 \cdot c^2$ (s. Text). Die Positronen zerstrahlen nach Abgabe ihrer Bewegungsenergie oder auch im Flug mit einem weiteren Elektron des Absorbers unter Emission der sogenannten Vernichtungsstrahlung von 2·511 keV (s. Abschnitt 3.1.3).

Paarbildung

$$\kappa_{\text{paar}} \propto Z \cdot \rho \log \cdot E_{\gamma}$$

mit $E_{\gamma} > 1022 \text{ keV}$



Paarbildung

Bei der Paarbildung wird im elektrischen Feld eines Atomkernes spontan ein Elektron-Positronpaar gebildet.

Für die Paarbildung besteht eine Energieschwelle von 1022 keV, da die Ruheenergien des Teilchen-Antiteilchenpaares aufgebracht werden müssen.

Der Atomkern bleibt dabei unverändert, er dient nur zur Impulserhaltung.

Bei der Elektron-Positronen-Paarbildung im Feld eines Hüllenelektrons liegt die Energieschwelle bei 2044 keV.

Das Positron zerstrahlt bei der Rekombination mit einem Elektron des Absorbers zu zwei Vernichtungsgammaquanten zu je 511 keV.



Kernphotoreaktionen

Photonen können ihre Energie auf einzelne Nukleonen oder den gesamten Atomkern übertragen und werden dabei absorbiert. Ein Nukleon wird emittiert, der Atomkern wird radioaktiv.

Kernphotoreaktionen sind in der Regel auch mit der Emission von Gammastrahlungen verbunden.



Kernphotoreaktionen

Reaktion	Schwelle (MeV)	Tochternuklid	Zerfallsart	T½	E _γ (keV)
¹² C(γ,n)	18.7	¹¹ C*	β+,EC	20.4 min	511
¹⁴ N(γ,n)	10.5	¹³ N*	β+	9.96 min	511
¹⁶ O(γ,n)	15.68	¹⁵ O*	β+,EC	122 s	511
¹⁶ O(γ,2n)	28.9	¹⁴ O*	β+,γ	70.6 s	511,2313
²⁷ Al(γ,n)	12.7	²⁶ Al*	β+,EC,γ	6.4 s	511,1810
⁶³ Cu(γ,n)	10.8	⁶² Cu*	β+,EC	9.73 min	511
²⁰⁸ Pb(γ,n)	7.9	²⁰⁷ Pb	stabil	-	-
¹² C(γ,p)	16.0	¹¹ B	stabil	-	-
¹⁶ O(γ,p)	12.1	¹⁵ N	stabil	-	-
²⁷ Al(γ,p)	8.3	²⁶ Mg	stabil	-	-
⁶³ Cu(γ,p)	6.1	⁶² Ni	stabil	-	-
²⁰⁸ Pb(γ,p)	8.0	²⁰⁷ Tl*	β-	4.8 min	-

Tab. 4.1: Reaktions- und Zerfallsdaten für Kernphotoreaktionen an einigen für die Radiologie wichtigen Materialien. *:radioaktives Tochternuklid.

Kernphotoeffekt

Photonenstrahlung kann über das elektromagnetische Feld mit Atomkernen oder einzelnen Nukleonen wechselwirken.

Bewirkt die Wechselwirkung eine Teilchenemission, so spricht man vom Kernphotoeffekt.

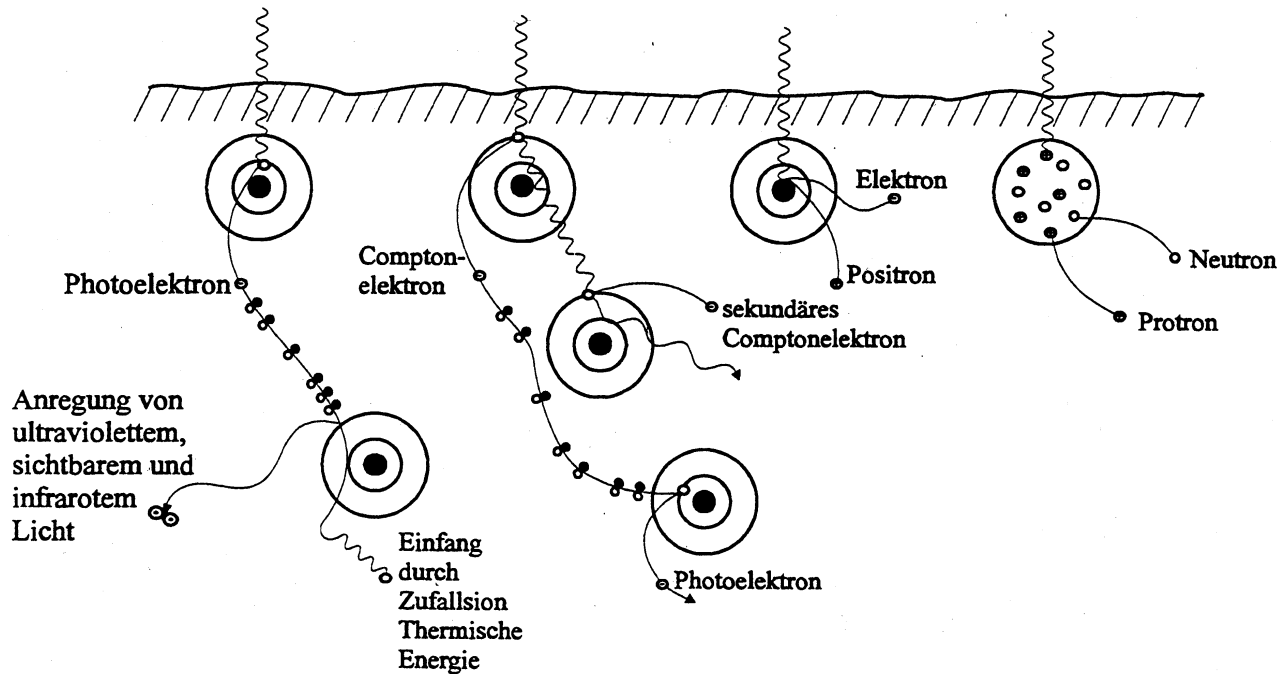
Atomkerne werden durch den Kernphotoeffekt in der Regel radioaktiv, da ihr Neutronen-Protonen-Gleichgewicht durch Teilchenemission gestört wird.

Der Kernphotoeffekt kann wegen seiner geringen Wirkungs-querschnitte für die Schwächung von Photonenstrahlenbündel in der Regel gegenüber den anderen Photonenwechselwirkun-gen vernachlässigt werden.



Schlussfolgerungen

Energie	Photoeffekt	Comptoneffekt	Paarerzeugung	Kernprozess
10 keV	> 99%	—	—	—
200 keV	< 1%	> 99%	—	—
2 MeV	< 1‰	~ 99%	~ 1%	—
20 MeV	—	~ 50%	~ 49%	~ 1%



Schlussfolgerungen

Wechselwirkung	$f(Z,A)$	$f(E_\gamma)$	Sekundärstrahlungen
Photoeffekt	Z^4/A bis Z^5/A	$1/E^3$ ($E \ll 511 \text{ keV}$) $1/E$ ($E \gg 511 \text{ keV}$)	e^- , Röntgenstrl., Auger-e
Comptoneffekt	Z/A	$1/E^{0.5}$ bis $1/E$	γ , e^-
klass. Streuung	$Z^{2.5}/A$	$1/E^2$	γ
Paarbildung	Z^2/A	$\log E_\gamma$ ($E_\gamma > 1022 \text{ keV}$)	e^- , e^+
Kernphotoeffekt	Riesenresonanz	$E_\gamma > E_{\text{schwelle}}$	n, p, (Spaltung), γ

Tab. 4.2: Näherungsweise Abhängigkeiten der Photonen-Wechselwirkungskoeffizienten von Photonenenergie, Ordnungszahl und Massenzahl des Absorbers.

Schlussfolgerungen

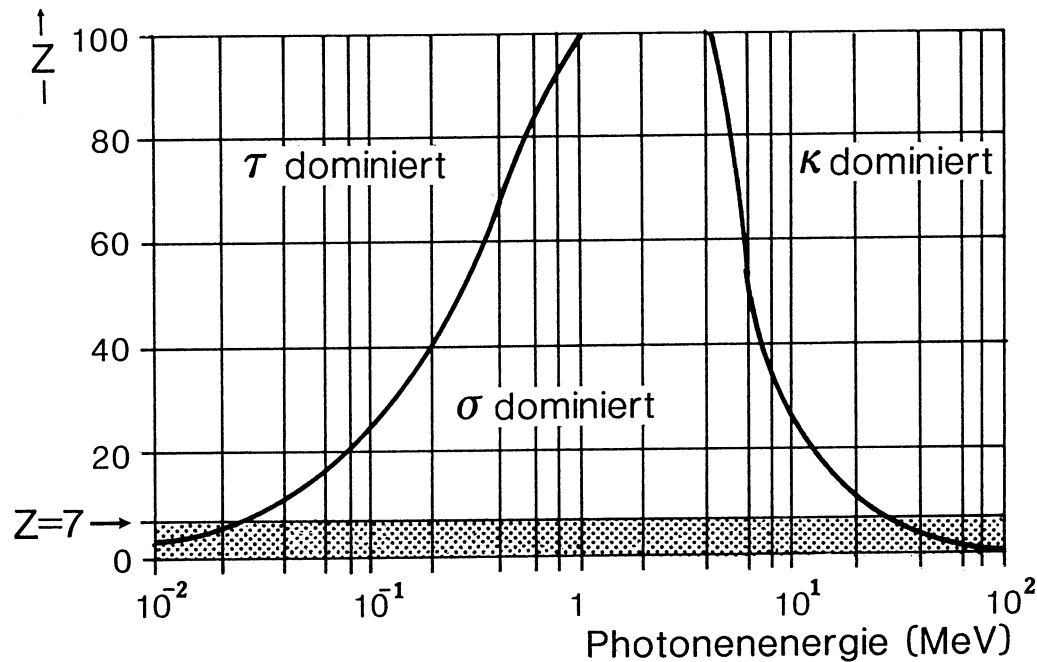


Fig. 4.12: Flächendiagramm der wichtigsten relativen Anteile der Photonen-Wechselwirkungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Photonenenergie und der Ordnungszahl des Absorbers (nach [Evans 1968]). Punktiert: Gewebe und Phantommaterialien. Die geschwungenen Linien zeigen die Bereiche von Ordnungszahl und Energie, in denen jeweils angrenzende Effekte (Photo- und Comptoneffekt bzw. Comptoneffekt und Paarbildung) gleich wahrscheinlich sind.

Photonen-Wechselwirkung

Die Schwächung eines Photonenstrahlenbündels kann durch Streuung oder Absorption der primären Photonen stattfinden.

Streuung findet bei niedrigen Photoenergien vor allem in Form klassischer Streuungen statt, bei höheren Energien wird bevorzugt über den Comptoneffekt inkohärent gestreut.

Absorption von Photonenenergie wird durch den Photoeffekt und die Paarbildung verursacht sowie partiell beim Comptoneffekt. Die Schwelle für den Photoeffekt ist die Bindungsenergie der inneren Hüllenelektronen, für die Paarbildung das Massen-Energie-Äquivalent des Elektron-Positron-Paares (1022 keV).

Schwächung eines Photonenstrahlenbündels wird durch energie- und ordnungszahlabhängige Wechselwirkungskoeffizienten beschrieben



Photonen-Wechselwirkung

Für bestimmte Ordnungszahl- und Energiebereiche gibt es dominierende Wechselwirkungen. Für hohe Ordnungszahlen überwiegt bei niedrigen Energien der Photoeffekt, bei hohen Photonenenergien die Paarbildung. Bei Energien zwischen 1 bis 5 MeV dominiert bei allen Ordnungszahlen die Comptonwechselwirkung.

Kohärente (klassische) Streuung ist im Vergleich zu den anderen Photonen-Wechselwirkungen in der Regel zu vernachlässigen; Kernphotoreaktionen spielen für die Photonenschwächung ebenfalls nur eine untergeordnete Rolle.

Photoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildung sind also die in der medizinischen Radiologie und im Strahlenschutz wesentlichen Photonen-Wechselwirkungsprozesse.

Die grössten Beiträge zur Energiedosis in menschlichem Gewebe und damit zu den biologischen Strahlenwirkungen liefern die Comptonelektronen nach einem Comptoneffekt.





Photonen-Wechselwirkungen