Ionisierende Strahlung und Strahlenschutz - Eine Einführung -

Inhalt

1. Ionisierende Strahlung
2. Wechselwirkung mit Materie
3. Dosimetrie
4. Biologische Wirksamkeit
5. Strahlenschutz

1 Ionisierende Strahlung

Was ist ionisierende Strahlung?

- geladene Teilchen (α, β, Ionen, μ, etc.),
- elektromagnetische Wellen (Röntgen und γ).

$\Rightarrow$ Treten mit Elektronen der Atomhülle in Wechselwirkung und entfernen diese aus dem Atom (Energien der Strahlung $\geq$ 10 eV – 120 keV).

Quellen ionisierender Strahlung in Medizin und Forschung:

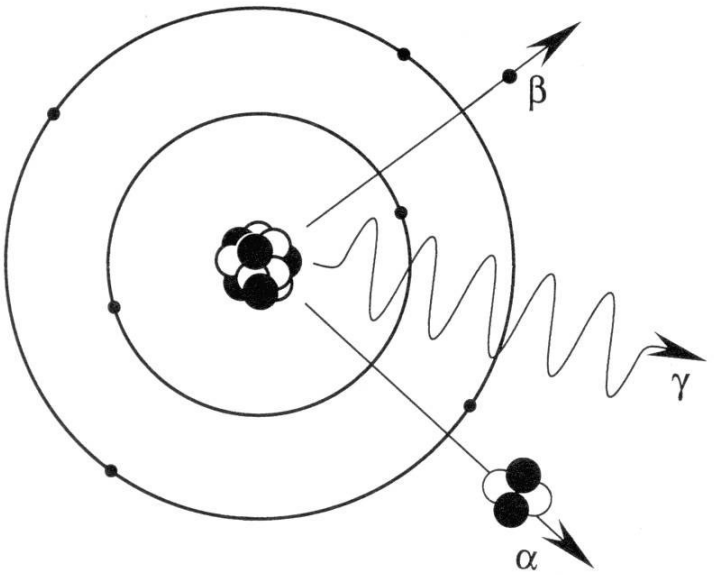
- Radioaktive Quellen (α, β, γ),
- Röntgenröhren,
- Teilchenbeschleuniger.

Radioaktive Quellen

Kernumwandlungen führen zur Emission von α–, β– oder γ – Strahlung.

- α: Heliumkerne,
- β: Elektronen oder Positronen,
- γ: elektromagn. Wellen = energiereiches “Licht”.

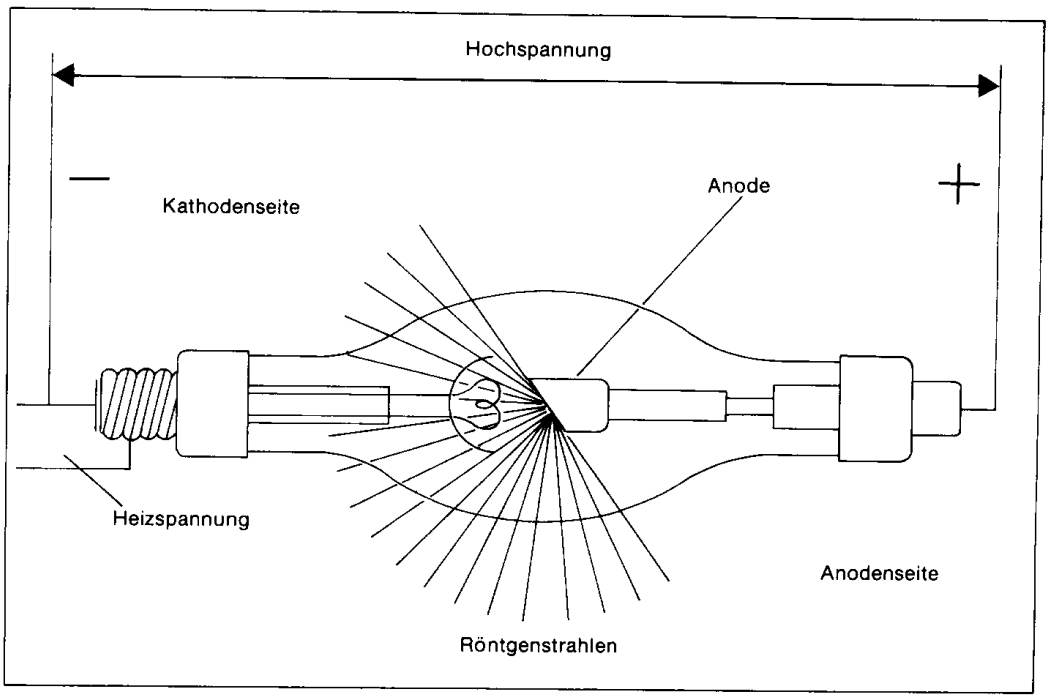
Bei Kernumwandlungen $\Rightarrow$ Energie wird frei, die auf die gebildeten Produkte verteilt wird.



Wird nur ein Teilchen (α–, γ– Strahlung) ausgesandt, hat dieses Teilchen eine feste (diskrete) Energie. Werden zwei Teilchen oder mehr (β– Strahlung) ausgesandt, verteilt sich die Energie unterschiedlich auf die Teilchen:

Röntgenröhre

In der Röntgenröhre werden Elektronen durch ein elektrisches Feld beschleunigt ($\sim$ Fernseher).
Die Elektronen treffen auf ein Absorbermaterial (z.B. Wolfram) $\Rightarrow$ Röntgenstrahlung ("Bremsstrahlung")

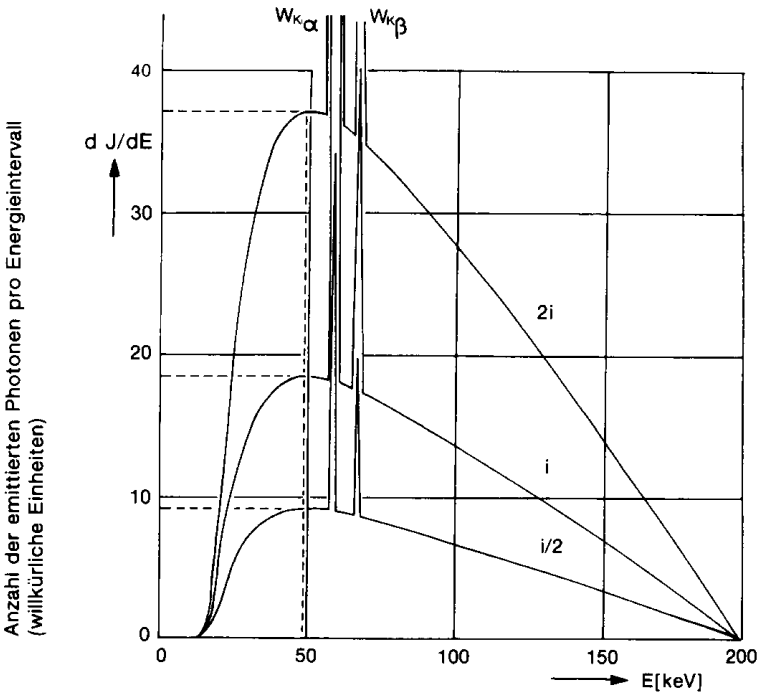


Die kürzeste Wellenlänge der Röntgenstrahlung ist umgekehrt proportional zur Energie der Elektronen:

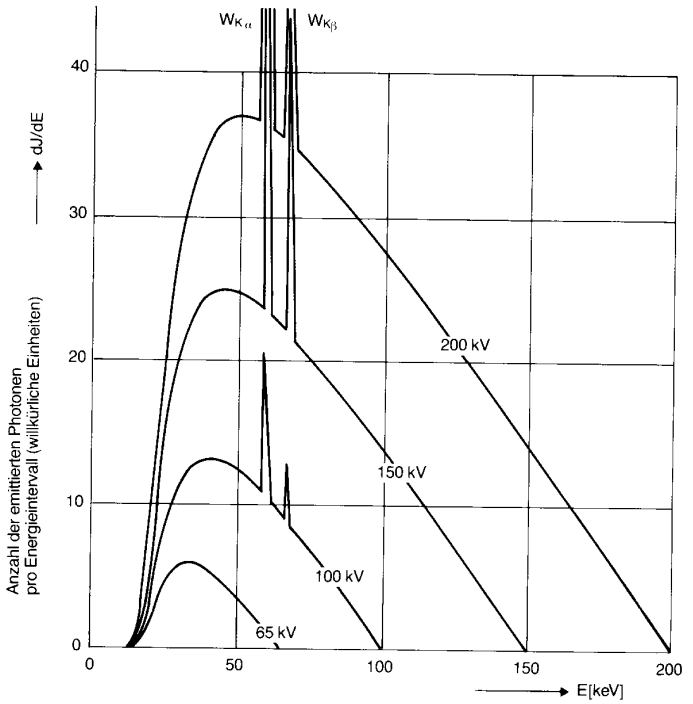
$$\lambda_{grenz} \quad \propto \quad \frac{1}{E_e}$$

Das Spektrum hängt vom Anodenstrom und der Beschleunigungsspannung in der Röntgenröhre ab.

- Anodenstromes $\propto$ Intensität der Strahlung,



- Energie der Elektronen $\propto$ Maximalenergie der Strahlung.



$\Rightarrow$ Einfluß auf biologische Wirkung.

Beschleuniger

Geladene Teilchen werden durch elektrische Wechselfelder beschleunigt.
Es gibt Linearbeschleuniger oder Kreisbeschleuniger, in denen die Teilchen nach und nach immer stärker beschleunigt werden.
$\Rightarrow$ Maximierung der Teilchenenergie.

Beschleuniger	Teilchenart	Energie	Verwendung
Röntgenröhre	e^-, γ	$<$ 150 keV	Diagnose
Betatron	e^-, γ	$<$ 100 MeV	Krebs–Therapie
Zyklotron	p, d, α, ^{3}He	5–100 MeV	künstl. Aktivierung
Protonen-Synchrotron	p, $\pi^\pm$	1 GeV	Krebs–Therapie
Kernreaktor	n	1 eV – 10 MeV	künstl. Aktivierung
HERA	$e^\pm$,p	27,5/920 GeV	Teilchenphysik
DORIS (HASYLAB)	e^+	12 GeV	Festkörperphysik

2 Wechselwirkung mit Materie

Die Wechselwirkung von Teilchen (n, p, e^+, e^-, γ, etc.) mit Energien in keV und aufwärts in Materie hängt stark ab von:

- der Art des Teilchens,
- der Energie des Teilchens und
- der Art des Materials.

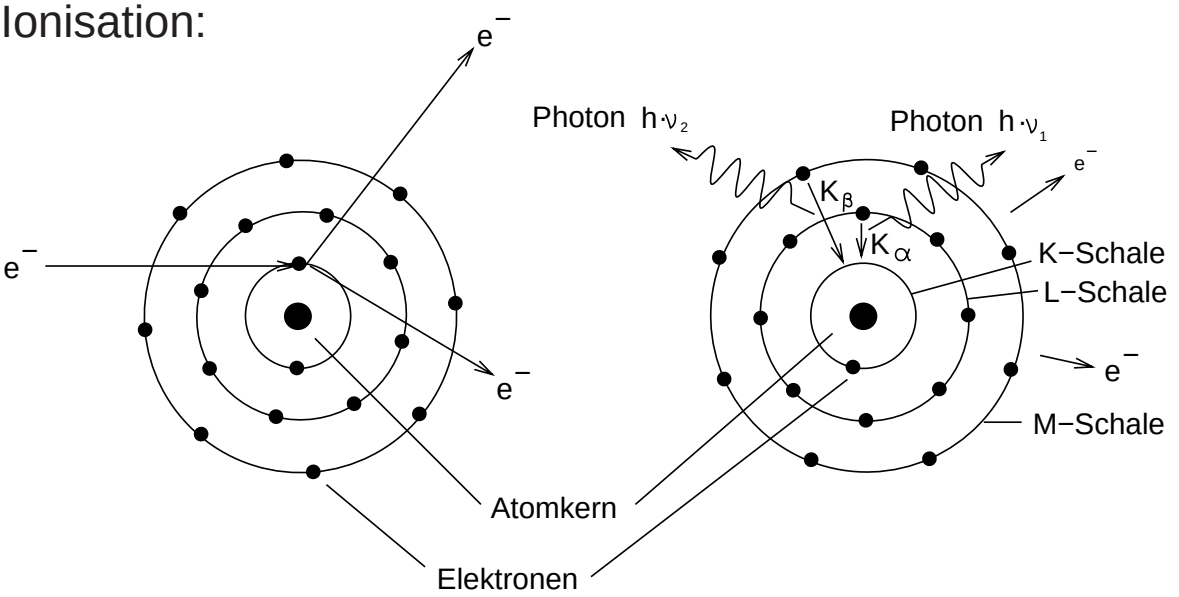
Dabei entstehen folgende Teilchenreaktionen:

- Reaktionen mit dem Atomkern,
- elastische/inelastische Streuung am Atomkern,
- Inelastische Kollisionen mit den Elektronen des absorbierenden Atoms,
- (bei Antimaterie/Materie-Kollision:) Annihilation,
- Cherenkov-Strahlung und
- Bremsstrahlung.

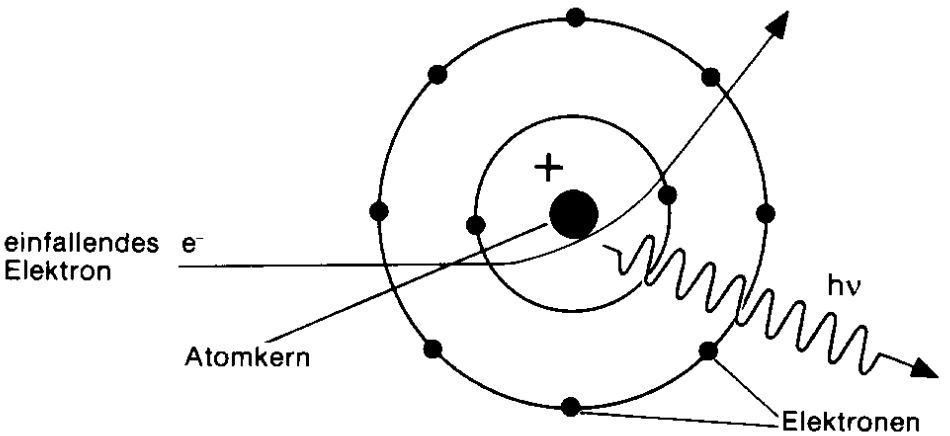
Ww von Elektronen in Materie

Die Wechselwirkung von Elektronen in Materie erfolgt im wesentlichen über zwei Prozesse:

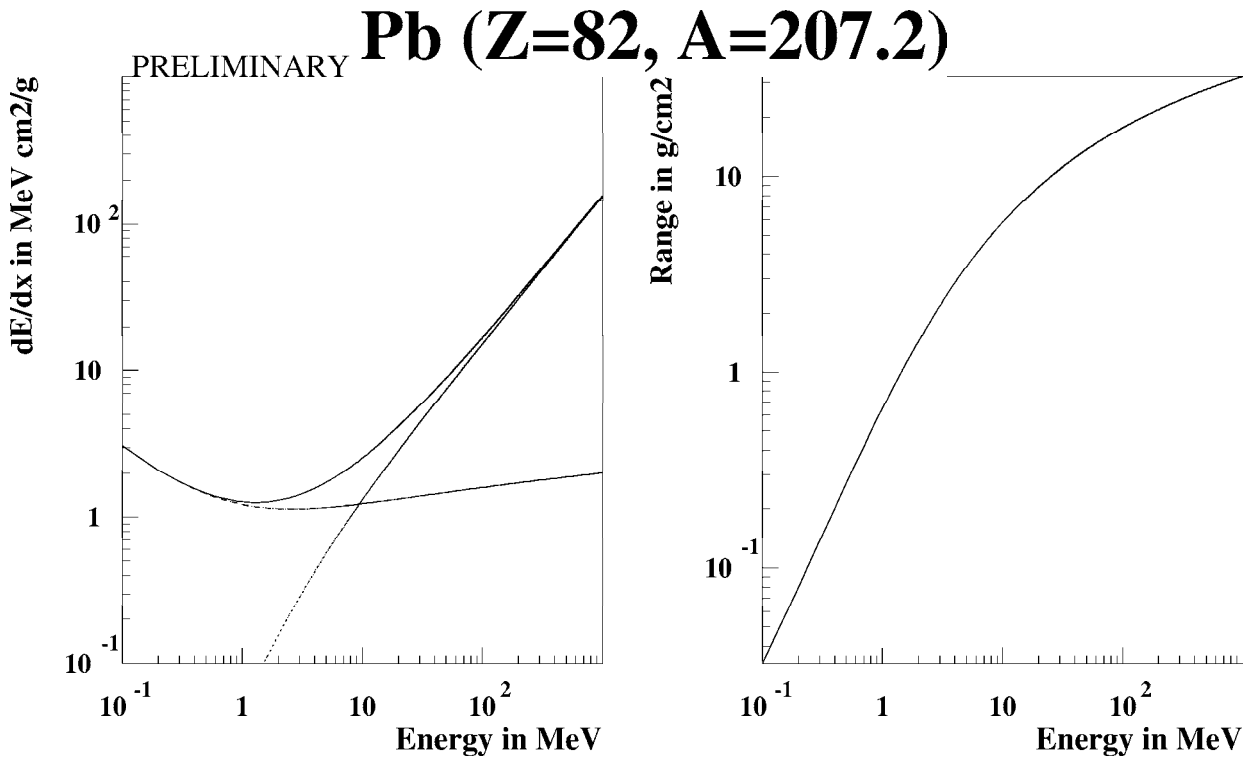
- Ionisation:



- Bremsstrahlung:



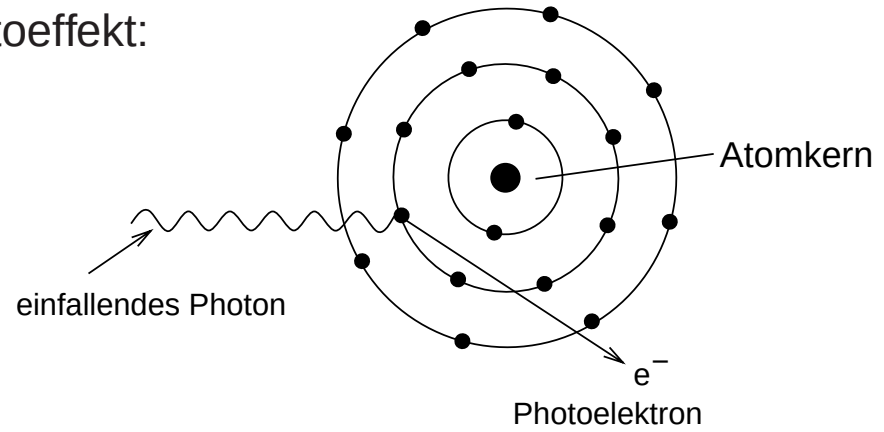
Ionisation dominiert bei kleinen Elektronenenergien, bei großen Energien überwiegen Bremstrahlungsprozesse.



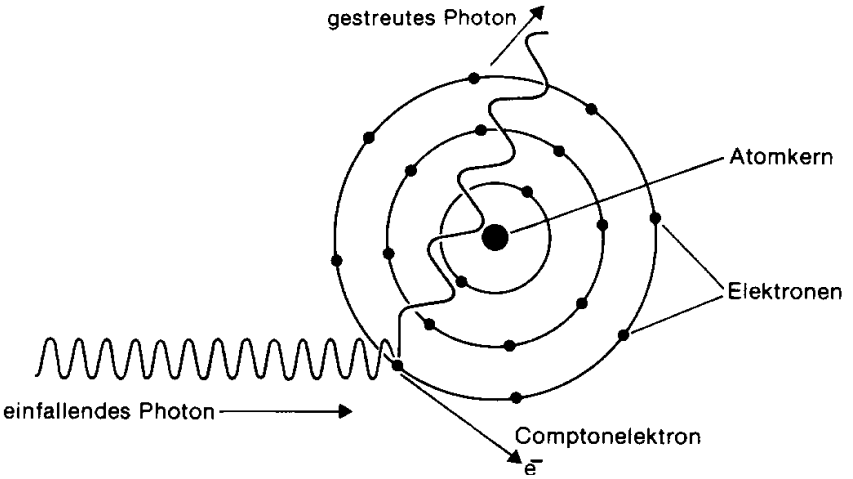
Ww von Licht in Materie

Drei Prozesse bestimmen die Wechselwirkung von Photonen mit Materie:

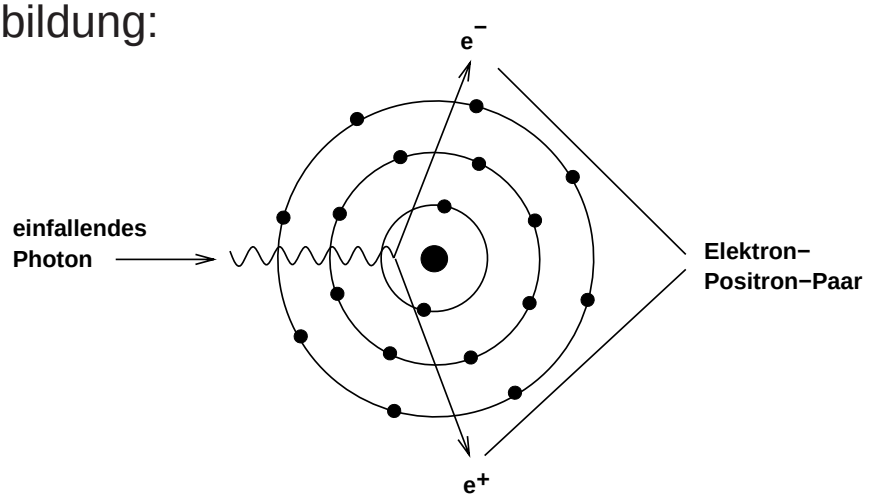
- Photoeffekt:



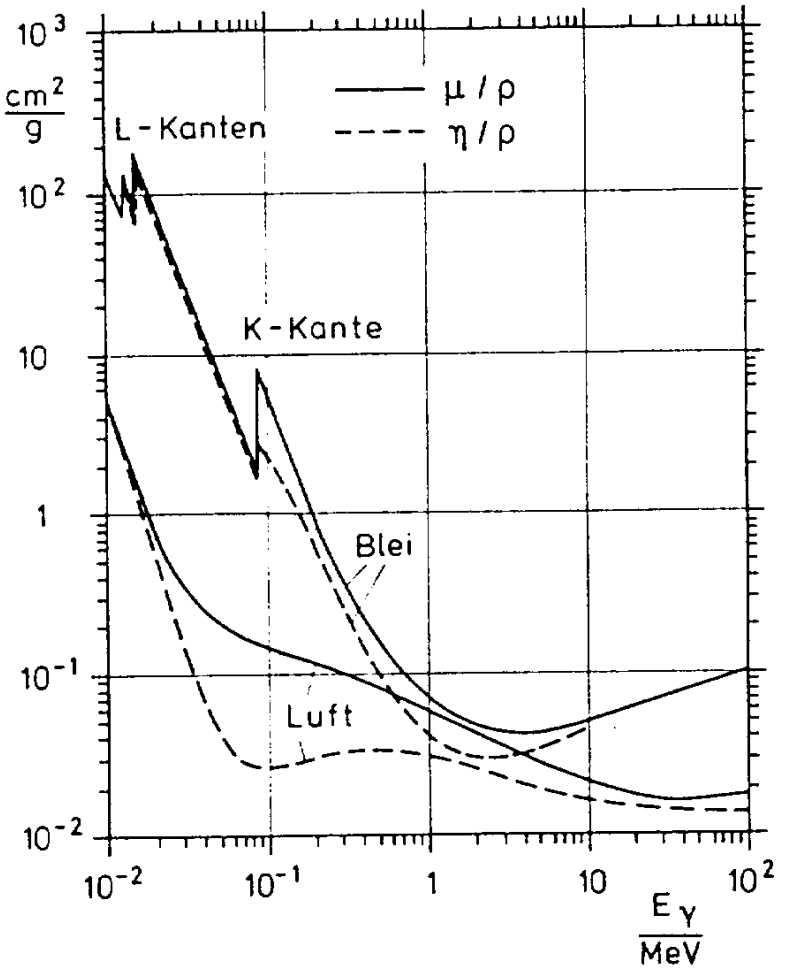
- Comptoneffekt:



- Paarbildung:



Von der Energie der Strahlung hängt ab, welcher der Prozesse dominiert!



Die Wahrscheinlichkeiten P für die Wechselwirkungen hängen stark von der Ordnungszahl Z des absorbierenden Stoffes ab
(Photoeffekt: $P \sim Z^4 ... Z^5$, Comptoneffekt:$P \sim Z$, Paarbildung: $P \sim Z^2$).

Charakteristisch für die Schwächung ist der Schwächungskoeffizient μ, der angibt, welcher Anteil (dN/N) der Photonen auf einer bestimmten Strecke (ds) mit dem Material in Wechselwirkung tritt:

Es ergibt sich eine exponentielle Schwächung der Strahlung:

$$N(s) = N_0 \cdot e^{-\mu \cdot s}.$$

3 Dosimetrie

A) Aktivität

$$\text{Aktivität } A = \frac{\text{Zerfälle}}{\text{Sekunde}}$$

$$[A] = \text{Bq} \quad (\text{Becquerel})$$

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$$\text{Halbwertszeit: } t_{1/2} = ln2/\lambda$$

$$\Rightarrow \; A(t_{1/2}) = A_0/2$$

B) Energiedosis

$$\text{Energiedosis } D = \frac{\text{absorbierte Energie}}{\text{Masse}}$$

$$[D] = \text{Gy} \quad (\text{Gray})$$

$$1\,\text{Gy} = 1\,\frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Alte Einheit rd (Rad); 100 rd $\widehat{=}$ 1 Gy.

C) Äquivalentdosis

$$\text{Äquivalentdosis } H = q \cdot D$$

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

$$1\,\text{Sv} = 1\,\frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Alte Einheit rem; 100 rem $\widehat{=}$ 1 Sv.

Der Bewertungsfaktor q berücksichtigt die unterschiedlichen biologischen Wirksamkeiten der einzelnen Strahlungsarten:

Strahlenart	q
Röntgen-, Gammastrahlung	1
Betastrahlung	1
Alphastrahlung	20
Neutronen	2 – 10

Die Wirksamkeit hängt davon ab, wieviel Energie eine Strahlungsart beim Durchqueren einer bestimmten Strecke im Körper deponiert (Linearer-Energie-Transfer LET).

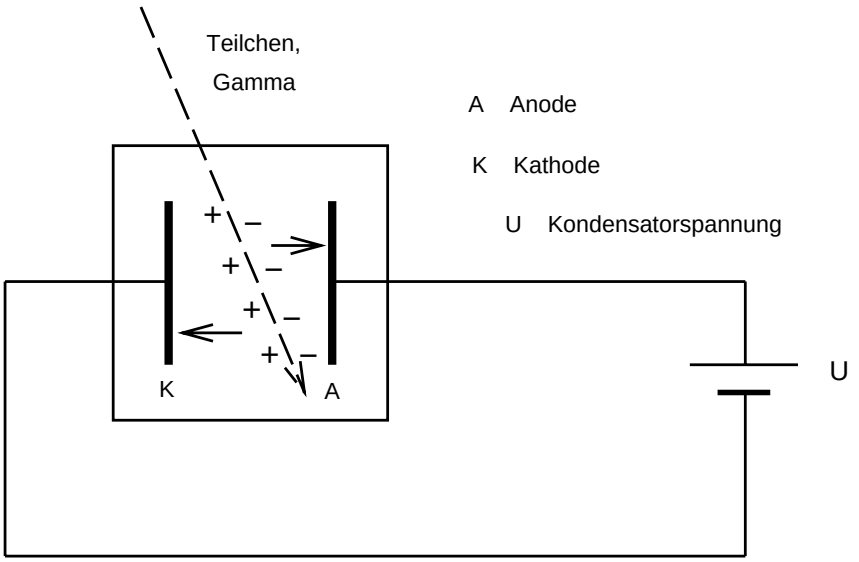
D) Äquivalentdosisleistung

$$\text{Dosisleistung } \dot{H} = \frac{\text{absorbierte Äquivalentdosis}}{\text{Zeiteinheit}}$$

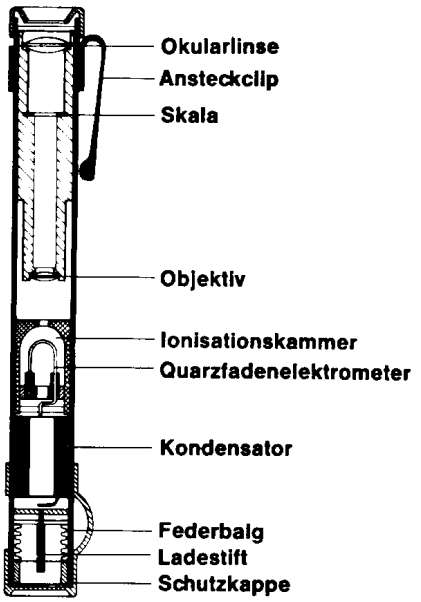
$$\left[\dot{H}\right] = \frac{\text{Sv}}{\text{s}}$$

Meßgeräte

A) Ionisationskammer



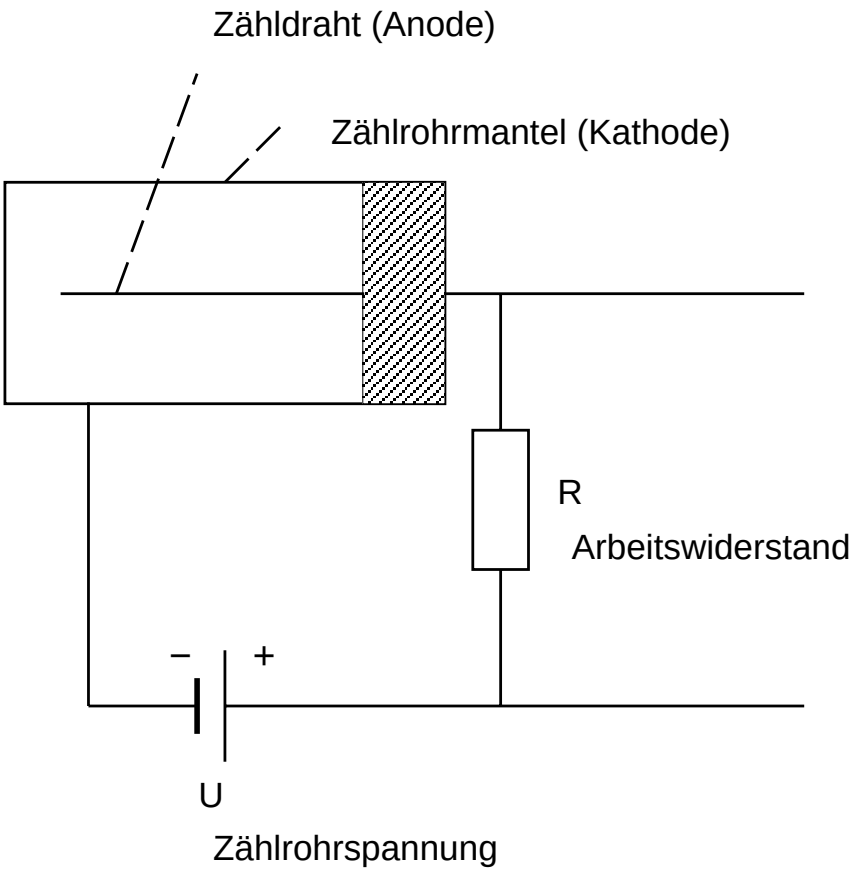
Durchquert Strahlung einen geladenen Kondensator, fließt ein Strom!



Schematische Darstellung eines Stabdosimeters

Je mehr Strahlung das Dosimeter durchquert hat, desto stärker ist der Kondensator entladen.

B) Zählrohre

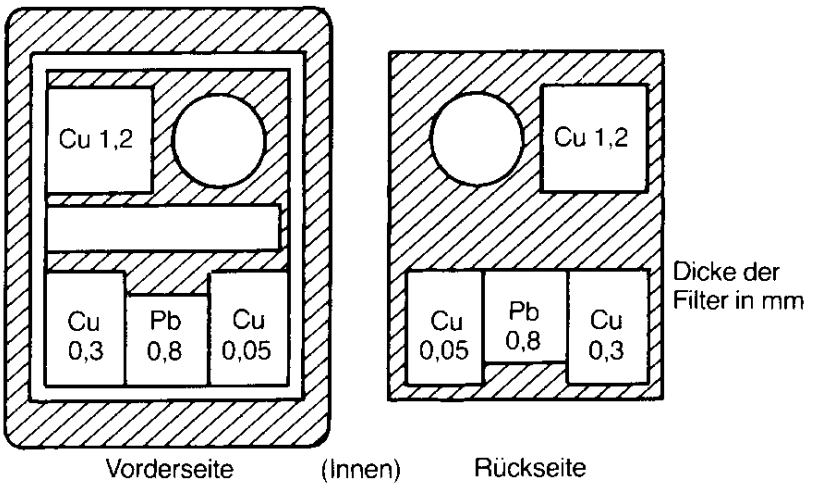


- Höhere Spannung als eine Ionisationskammer,
- Elektronen ionisieren auf dem Weg zum Zähldraht weitere Gasmolküle (“Gasverstärkung”),
- bei sehr hohen Spannungen (ca. 800 V) wird das Zählrohr sehr empfindlich $\Rightarrow$ Geiger–Müller–Zählrohr.

Zählrohre werden insbesondere für Dosisleistungs-messungen eingesetzt.

C) Fotoemulsionen

Trifft ionisierender Strahlung auf Fotoemulsionen $\Rightarrow$ Schwärzung des Materials.
In der Personendosimetrie werden Filme verwendet, die besonders empfindlich auf ionisierende Strahlen reagieren.



Verschiedene Metalle bedecken den lichtdicht verpackten Film teilweise $\Rightarrow$ Aussagen über Strahlenarten (Energie) und Einfallsrichtung der Strahlen.

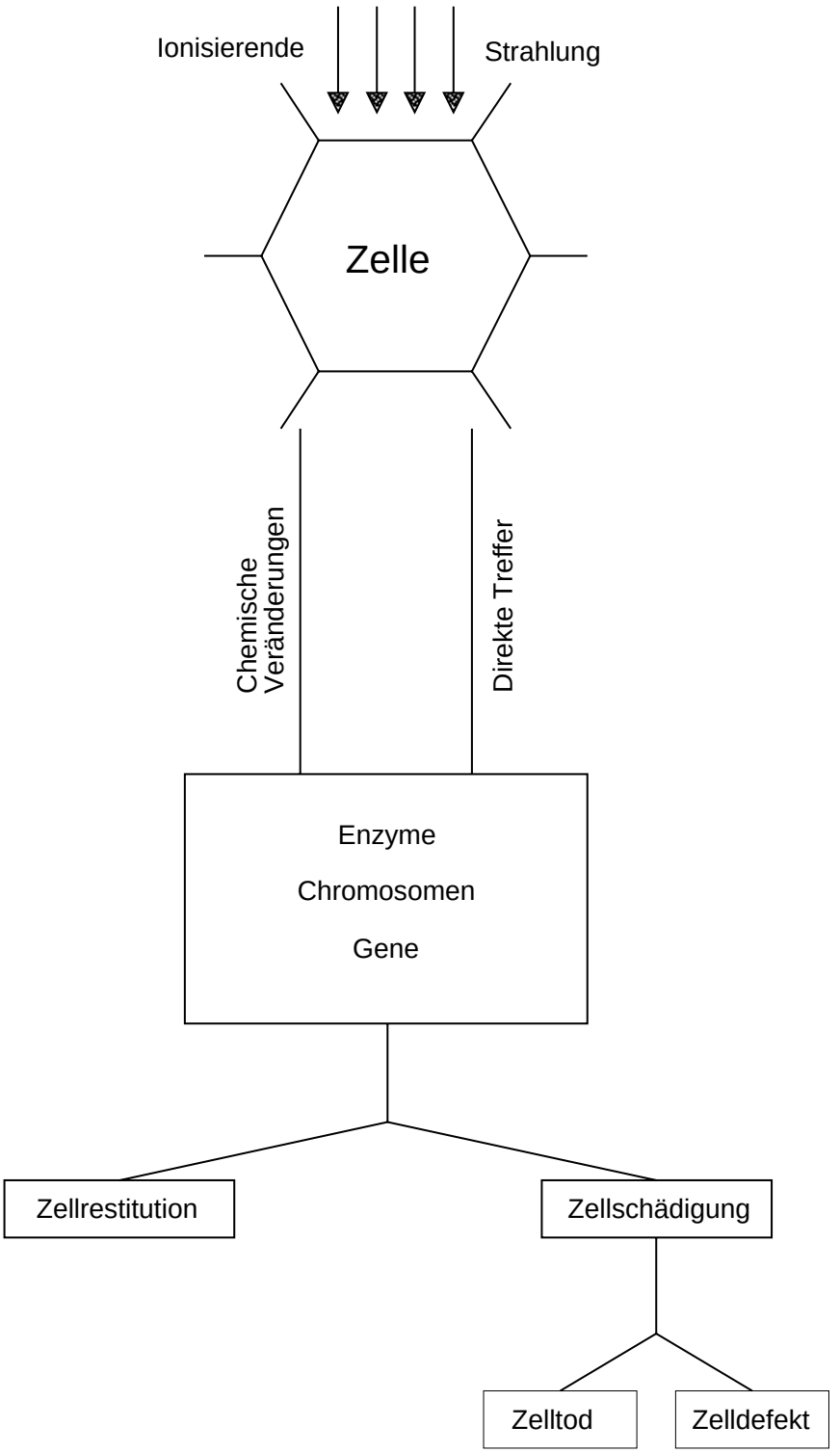
D) Thermolumineszens-Dosimetrie (TLD)

LiF_2-Kristalle, deren Lumineszens sich nach Bestrahlung verändert. Erlaubt auch Messungen von Neutronendosen.

4 Biologische Wirksamkeit

Grundlegende Mechanismen:

Ww von ionisierender Strahlung in menschlichen Zellen
$\Rightarrow$ chemischen Veränderungen an der DNA.



- Veränderungen an der DNA, die direkt durch die ionisierende Strahlung hervorgerufen werden.
- Etwa 80% der Ionisationen finden nicht an den Zellbausteinen, sondern im Wasser der Zelle statt $\Rightarrow$ Radikale (z.B. Wasserstoffperoxid),
- Die meisten Schäden an der DNA (ca. 99,9%) werden nach Bestrahlung mit kleinen Dosen repariert; bei großen Dosen sind die Reparaturmechanismen in den Zellen zu langsam.

Mögliche Folgen für den Menschen:

A) Inaktivierung von Zellen/Organen,

B) Veränderungen von Genen: Beeinträchtigung der Transformation $\Rightarrow$ Karzinom, Mutation.

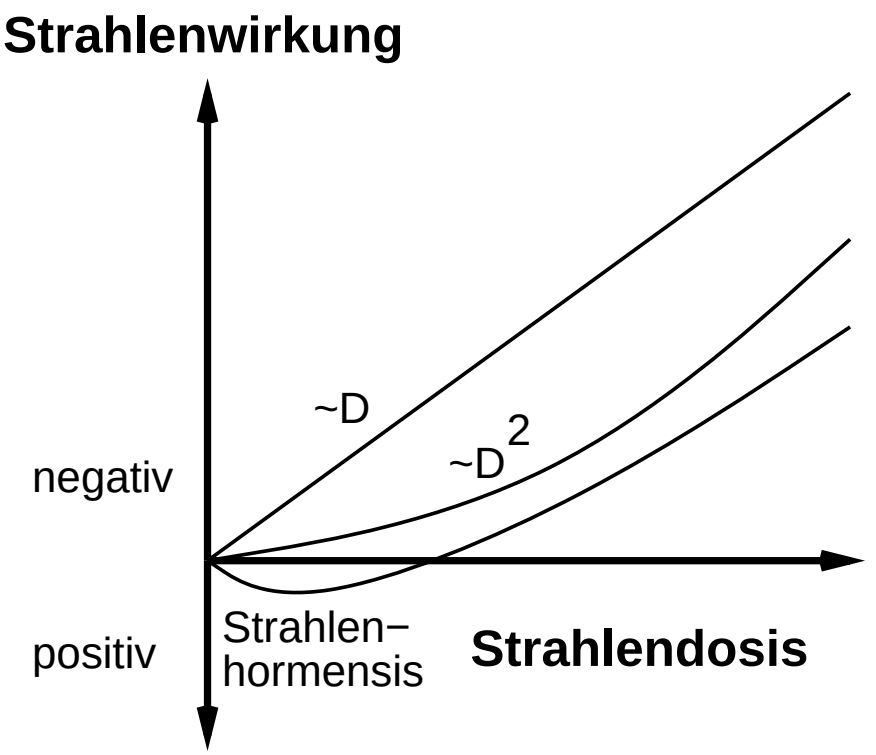
Strahlenschäden

- Deterministische Schäden:
  Die Schwere eines Schadens steigt mit der Dosis ab einer gewissen Schwellendosis.

- Stochastische Schäden:
  Die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt eines Schadens steigt mit der Dosis und es gibt hier keine Schwelle:

  1. Somatischen Schäden betreffen den bestrahlten Menschen direkt: Funktionsstörungen von Organen (z. B. Trübung der Augenlinse), Mißbildung bei Bestrahlung in utero und Strahlenkrebs.
     Für die Wahrscheinlichkeit einer tödlichen Krebserkrankung gibt es verschiedene Abschätzungen; nach neuesten Erkenntnissen führt eine Dosis von 10 mSv pro Person bei 1 Mio Menschen zu 500 (ICRP) zusätzlichen Krebstoten.
  2. Genetische Schäden: Rezessiven Mutationen, die erst in späteren Generationen auftreten, wenn zwei mutierte Gene aufeinandertreffen, und die in der Bevölkerung akkumuliert werden.

Strahlenrisiko



- Lineare Strahlendosis-Wirkung-Beziehung,
- kleinste Dosen wirken relativ schwächer als große Dosen,
- kleinste Dosen haben u.U. positive biologische Effekte.

Natürliche und künstliche Strahlenbelastung

1. Natürliche Strahlenexposition				2,5
1.1	Kosmische Strahlung		0,3 mSv/a	
1.2	Terrestrische Strahlung		0,5 mSv/a	
	1.2.1 Im Freien	0,43 mSv/a		
	1.2.2 Bei Aufenthalt im Haus	0,57 mSv/a		
1.3	Inkorporierte radioaktive Stoffe		0,3 mSv/a	
1.4	Inhalation von Radon-Folgeprodukten		1,3 mSv/a	
2. Künstliche Strahlenexposition				1.5
2.1	Anwendungen in der Medizin		1,4 mSv/a	
	2.1.1 Röntgendiagnostik	1,3 mSv/a		
	2.1.2 Nuklearmedizin	0,07 mSv/a		
	2.1.3 Strahlentherapie	0,03 mSv/a		
2.2	„Fallout“ von Atombombenversuchen		0,01 mSv/a	
2.3	Gebrauchsgüter, Forschung		0,03 mSv/a	
	2.3.1 Technische Strahlenquellen	0,01 mSv/a		
	2.3.2 Industrieprokukte	0,01 mSv/a		
	2.3.3 Störstrahler (Fernsehen)	0,01 mSv/a		
2.4	durch beruflich Strahlenexponierte		0,01 mSv/a	
2.5	durch friedliche Nutzung der Kernenergie		0,01 mSv/a	

Die gesamte Dosis liegt liegt zwischen 1-4 mSv/a.

5 Strahlenschutz

Anwendung der deutschen Gesetzgebung: StrSchV!
$\Rightarrow$ Sachgerechter Betrieb mit Anlagen zur Produktion von ionisierenden Strahlen bzw. Umgang mit radioaktiven Präparaten bedeutet:

- Ausschluß von deterministischen Schäden.
- Minimierung von stochastischen Schäden auf ein gesetzlich vorgeschriebenes Minimum, das als verträglich gilt.

Beispiele der gesetzlichen Restriktionen:

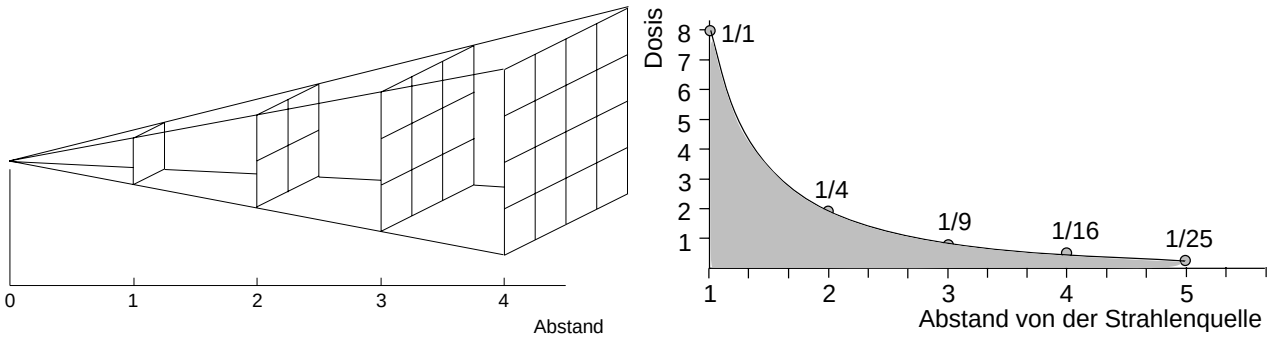
- Spezielle Behälter beim Transport von radioaktivem Material.
- Interlocksysteme, die den Zutritt zu Anlagen mit ionisierenden Strahlen verhindern bzw. zur Abschaltung der Anlagen führen.
- Bedingungen für die Errichtung/den Betrieb von Anlagen mit ionisierenden Strahlen.

Allgemein gilt:

1. Unnötige Expositionen mit ionisierender Strahlung sind zu vermeiden.
2. Ist eine Strahlenexposition nicht vermeidbar, ist das **ALARA**-Prinzip (*As Low As Reasonably Achievable*) hinsichtlich der Personendosis anzuwenden.
3. Alle Personen, die in Gegenwart von ionisierender Strahlung arbeiten, müssen bzgl. des Strahlenrisikos und der Schutzmaßnahmen informiert sein.

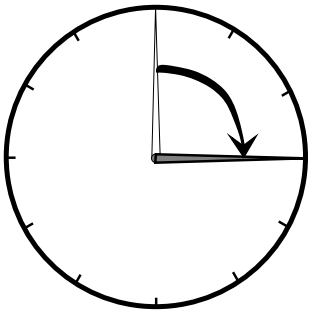
Drei Grundsätze im Umgang mit ionisierender Strahlung:

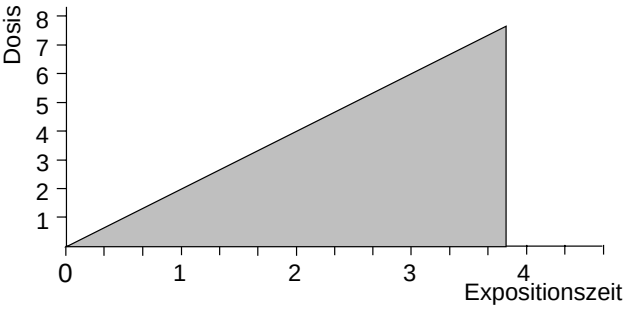
- **Abstand**
- **Aufenthaltsdauer**
- **Abschirmung**



Die Dosis nimmt mit dem Quadrat des Abstandes ab:

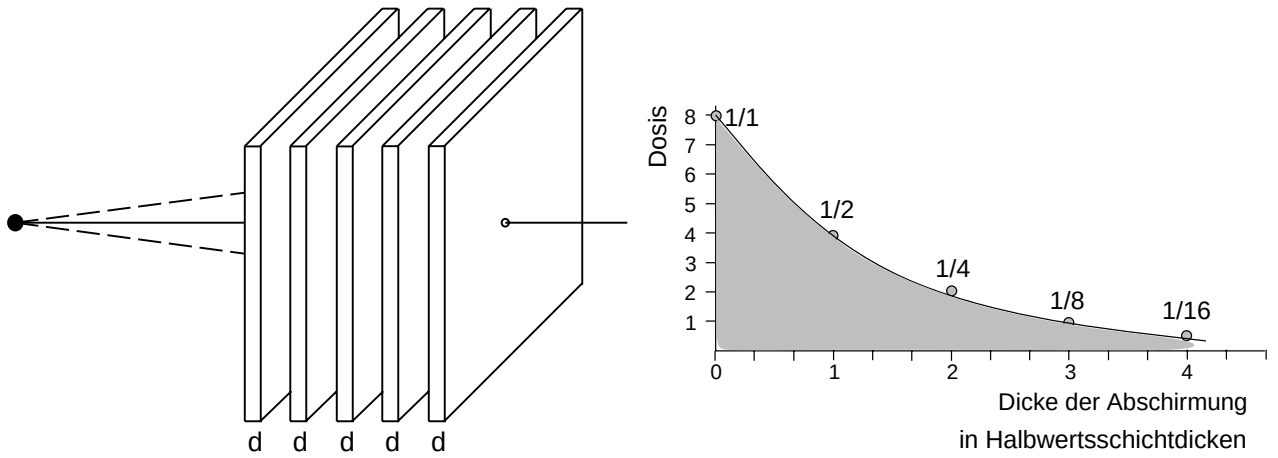
$$D \sim \frac{1}{A^2}$$





Die Dosis wächst proportional mit der Expositionszeit:

$$D \sim t$$



Die Dosis nimmt bei Gammastrahlung mit der Dicke der Abschirmschicht d exponentiell ab:

$$D = D_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}$$

Acknowledgement:

Der Vortrag basiert maßgeblich auf dem Seminar von Dr. W. Busjan (Universität Hamburg, 1997): “Physikalisches Praktikum für Studierende der Human-medizin, Zahnmedizin und Biochemie/Molekularbiologie”.

Literatur:

C. Gerthsen, H. O. Kneser, H. Vogel, Physik, Berlin, Heidelberg, 1982.

E. Grimsehl, A. Lösche, W. Schallreuter, Lehrbuch der Physik, Band 4, Struktur der Materie, Leipzig, 1990.

W. Jansen, R. Peuker, K. Renz, Strahlenschutz, Köln, 1990.

Strahlenschutzseminar der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel; Strahlenschutzkurs 1994.

H.-G. Vogt, Strahlenschutzkurs Beschleuniger in DESY Hamburg, 2001.

Photoinjektor Teststand in DESY Zeuthen

Dosisabschätzung bei max. erreichbaren Strahlenergien:

- Dosisleistung des Elektronenstrahls ($\approx$ kGy/h)
  $\Rightarrow$ Abschirmung, Interlocksystem.
- Aktivierung von Anlageteilen oder der Luft
  (nur bei E_e >8 MeV):
  1. Im Absorber erzeugte Neutronen im Erdreich (max. 0,67 Bq/g)
     $\Rightarrow$ Aktivität kleiner als die von Sand.
  2. Kühlwasser des Absorbers
     $\Rightarrow$ geschlossener Kreislauf.
  3. Luftaktivierung (Folgedosis von etwa 0,1 mSv/a)
     $\Rightarrow$ für den Strahlenschutz bedeutungslos.

$\Rightarrow$ Am Photoinjektor Teststand ist ein On-Line wie Off-Line-Meßsystem installiert, das den aktiven Strahlenschutz gewährleistet.