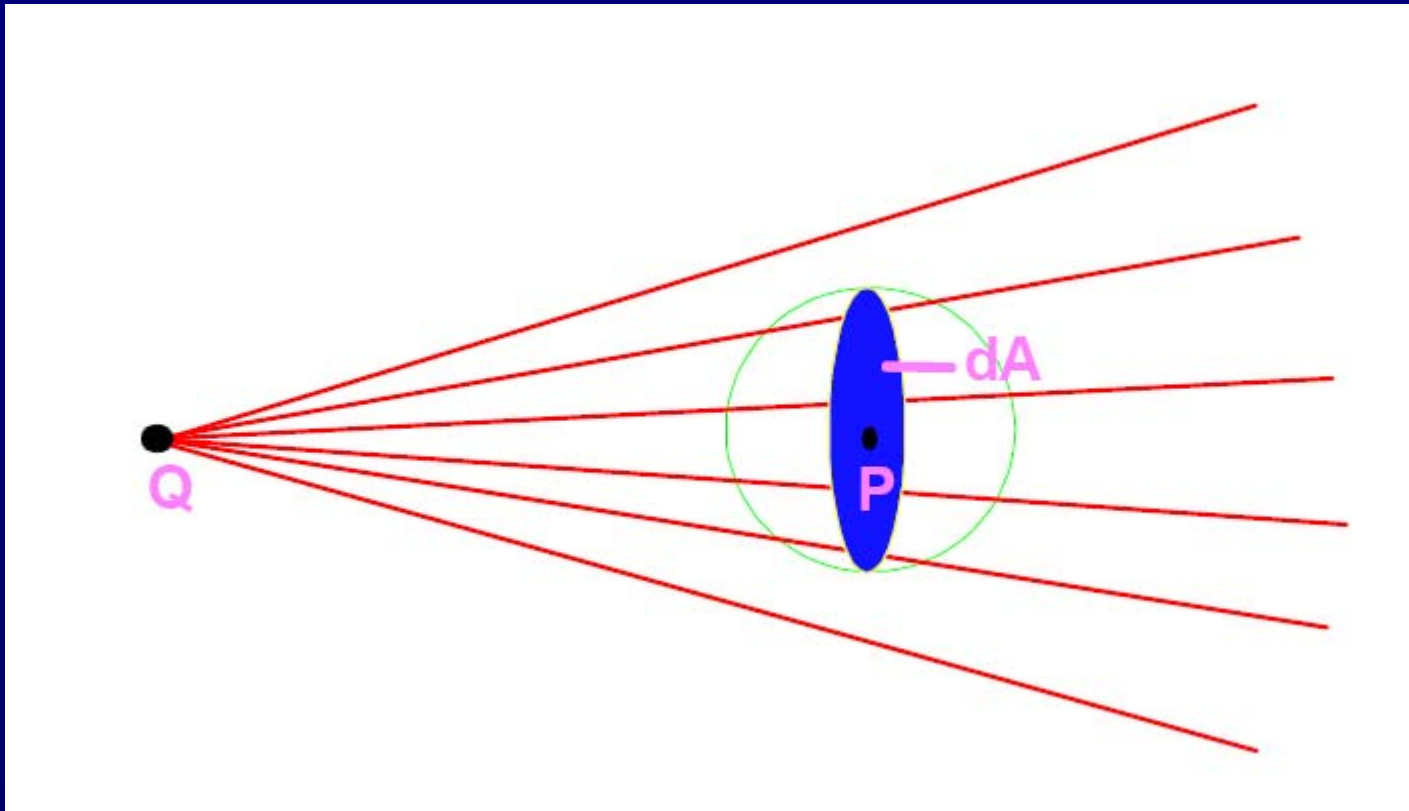


Grundlagen der Dosimetrie



Teilchenflußdichte φ

$$\varphi = - \frac{d^2 N}{dt dA}$$

$d^2 N$ Anzahl der Teilchen
 dt Zeitelement
 dA Querschnittsfläche

Teilchenfluenz Φ

$$\Phi = \int_{t_1}^{t_2} \varphi dt$$

dt Zeitelement
t₁ bis t₂ Zeitspanne

Energieflußdichte Ψ

$$\Psi = \frac{d^2 W}{dt dA}$$

$d^2 W$ Summe der Energie der Teilchen

dt Zeitelement

dA Querschnittsfläche

Energiefluenz ψ

$$\psi = \int_{t_1}^{t_2} \Psi \, dt$$

Ψ	Energieflußdichte
dt	Zeitelement
t_1 bis t_2	Zeitspanne

Spektrale Teilchenflußdichte φ_E

$$\varphi_E = \frac{d\varphi(E)}{dE}$$

$d\varphi(E)$ Flußdichte der Teilchen mit Energie zwischen E und $E+dE$

Spektrale Fluenz- Richtungsverteilung $\Phi_{\Omega,E}$

$$\Phi_{\Omega,E} = \frac{d^2\Phi(\Omega, E)}{dE}$$

KERMA K

$$K = \Phi E \frac{\mu_{tr}}{\rho}$$

Energiebilanz

$$\iiint_V D\rho dV = - \iint_A \vec{G} dA$$

Vektorielle Energiefluenz $\vec{G}$

$$\vec{G}(r, \Omega, E) = \iint E \vec{\Omega} \Phi_{\Omega, E} dE d\Omega$$

Energiedosis

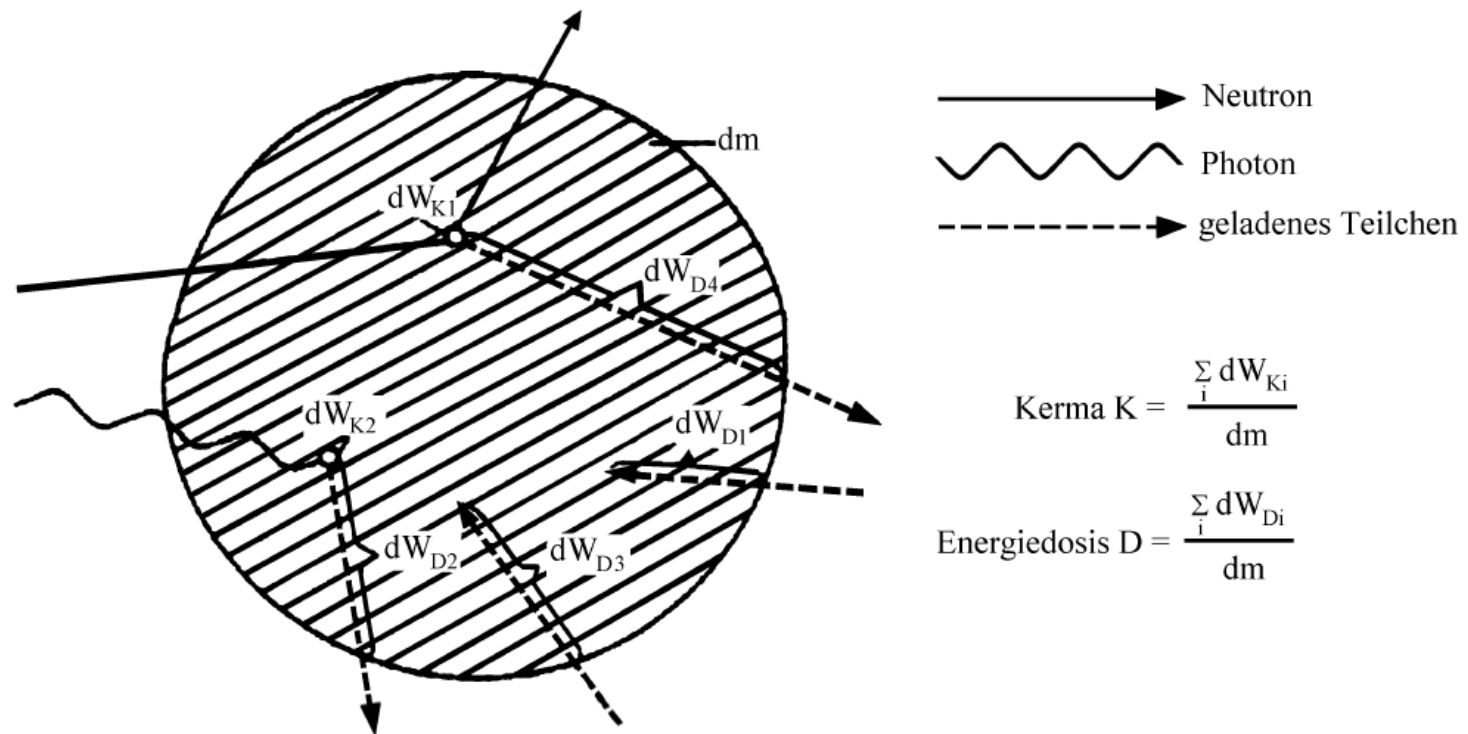
$$D = -\frac{\operatorname{div}(G_u + G_g)}{\rho}$$

Energiedosis - KERMA

$$D - K + B = -\frac{\operatorname{div}(G_g)}{\rho}$$

B= Bremsstrahlungsverlust

Kerma - Energiedosis



Wechselwirkungskoeffizienten

Beschreibung des folgenden Zusammenhanges:



WW zwischen ionisierender Strahlung und Materie:

Energieumwandlung

Streuung

Massenschwächungskoeffizient

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dN}{N \cdot dl}$$

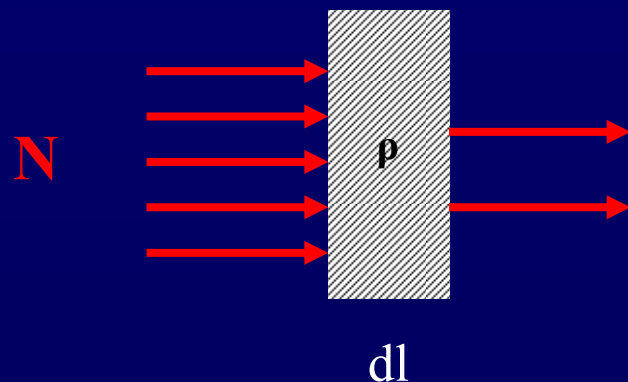
Für indirekt ionisierende Strahlung

ρ : Dichte des Materials

$[\mu/\rho] = \text{m}^2/\text{kg}$

dN/dl : relativer Anteil der Teilchenzahl N , die beim Durchdringen der Materieschicht der Dicke dl eine Wechselwirkung erfahren

μ : Schwächungskoeffizient



Zusammenhang zwischen zwei Strahlungsfeldgrößen (vor Eintritt in Materieschicht und nach der Wechselwirkung)

Massenenergieübertragungskoeffizient

$$\frac{\mu_{\text{tr}}}{\rho} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE_{\text{tr}}}{E \cdot dl}$$

Für indirekt ionisierende Strahlung

Beschriebener Zusammenhang:

$$K = \frac{\mu_{\text{tr}}}{\rho} \cdot \psi$$

ρ : Dichte des Materials

$[\mu_{\text{tr}}/\rho] = \text{m}^2/\text{kg}$

dE_{tr}/dl : relativer Anteil der Energie N , der einfallenden indirekt ionisierenden Strahlung, die pro Längeneinheit dl in kinetische Energie geladener Sekundärteilchen umgewandelt wird.

Ψ : Energiefluss

Gilt für homogenes, monoenergetisches, paralleles Strahlensbündel, ansonsten Verwendung der differentiellen Energiefluenz

Massenenergieabsorptionskoeffizient

$$\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} = (1 - g) \cdot \frac{dE_{\text{tr}}}{E \cdot dl}$$

Für indirekt ionisierende Strahlung

Beschriebener Zusammenhang:

$$D = \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \cdot \psi$$

Ψ : Energiefluss

D = K-B (bei Sek.elektronen GG)

Gilt für homogenes, monoenergetisches, paralleles Strahlenbündel.

ρ : Dichte des Materials

$[\mu_{\text{en}}/\rho] = \text{m}^2/\text{kg}$

g : Anteil der Energie der Sekundärteilchen, der nicht zur Ionisation am Referenzort im Material aufgebraucht wird, sondern in Bremsstrahlung umgewandelt wird und den Referenzort verläßt.

Zusammenhang zwischen WW-Koeffizienten und Elementarprozessen

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\sigma_R}{\rho} + \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho} + \frac{K}{\rho}$$

Anteile des Massenschwächungskoeffizienten μ/ρ

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{\tau_a}{\rho} + \frac{\sigma_a}{\rho} + \frac{K_a}{\rho}$$

Anteile des Massenenergieübertragungskoeffizienten μ_{tr}/ρ

Massenbremsvermögen

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE_s}{dl}$$

Für direkt ionisierende Strahlung

ρ : Dichte des Materials

$[S/\rho] = \text{Jm}^2/\text{kg}$

dE_s : Energieverlust eines geladenen Teilchens bei, Durchgang durch eine Materieschicht der Dicke dl .

Zusammenhang:

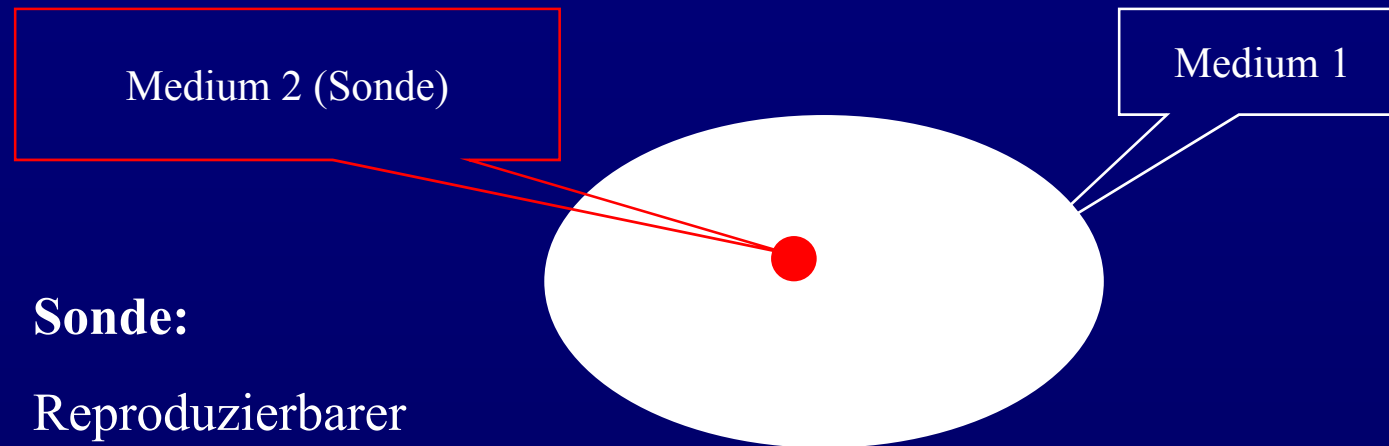
$$D = \frac{S}{\rho} \cdot \Phi$$

Φ : Teilchenfluss

Gilt nur für monoenergetische Strahlung

Dosismessung nach der Sondenmethode

Basisgröße: Energiedosis D



Sonde:

Reproduzierbarer
Effekt (z.B. Ionisation)

Meßgröße M (z.B.
Strom)

$M \longrightarrow D_{\text{Sonde}} \longrightarrow D_{\text{Gewebe}} \longrightarrow \text{biolog. Wirkung}$

Dosismessung nach der Sondenmethode

Bedingungen

- 1. Rückwirkungsfreie Sonde (Sonde darf das Strahlungsfeld nicht stören)**
- 2. Im interessierenden Energiebereich Energie-unabhängigkeit gewährleisten (4 Umrechnungen)**
- 3. Unabhängigkeit von der Kenntnis der Feldgrößen**

Dosismessung nach der Sondenmethode

Ansätze:

1. Ermittlung der von Quanten erzeugten Dosis im biolog. Gewebe:

$$D_{\text{Gewebe}} = \left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_{\text{Gewebe}} \cdot \psi_{\text{Gewebe}}$$

$$D_{\text{Sonde}} = \left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_{\text{Sonde}} \cdot \psi_{\text{Sonde}}$$

$$D_{\text{Gewebe}} = \frac{\left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_{\text{Gewebe}} \cdot \psi_{\text{Gewebe}}}{\left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_{\text{Sonde}} \cdot \psi_{\text{Sonde}}} \cdot D_{\text{Sonde}}$$

Bedingung:
Rückwirkungsfreiheit

$$\frac{\psi_{\text{Gewebe}}}{\psi_{\text{Sonde}}} = 1$$

Dosismessung nach der Sondenmethode

Ansätze:

2. Ermittlung der von Elektronen erzeugten Dosis im biolog. Gew.:

$$D_{\text{Gewebe}} = \left(\frac{S}{\rho} \right)_{\text{Gewebe}} \cdot \Phi_{\text{Gewebe}}$$

$$D_{\text{Sonde}} = \left(\frac{S}{\rho} \right)_{\text{Sonde}} \cdot \Phi_{\text{Sonde}}$$

$$D_{\text{Gewebe}} = \frac{\left(\frac{S}{\rho} \right)_{\text{Gewebe}} \cdot \Phi_{\text{Gewebe}}}{\left(\frac{S}{\rho} \right)_{\text{Sonde}} \cdot \Phi_{\text{Sonde}}} \cdot D_{\text{Sonde}}$$

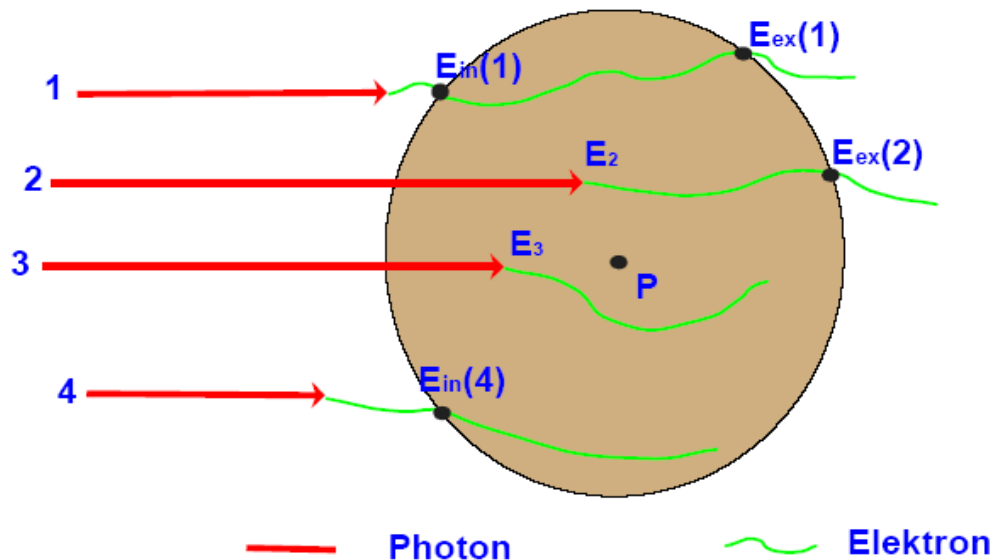
Bedingung:
Rückwirkungsfreiheit

$$\frac{\Phi_{\text{Gewebe}}}{\Phi_{\text{Sonde}}} = 1$$

Photonendosismessung unter SEG

Sekundärteilchengleichgewicht

$$E_{in}(1)+E_{in}(4) = E_{ex}(1)+E_{ex}(2)$$



Sekundärteilchengleichgewicht an einem Punkt innerhalb eines Materials besteht, wenn die **Summe der kinetischen Energien** der von indirekt ionisierenden Teilchen (Photonen) erzeugten **geladenen Sekundärteilchen** (Elektronen), die in die Volumeneinheit **eintreten**, gleich der Summe der kinetischen Energien der geladenen Sekundärteilchen ist, die aus diesem Volumen **austreten**.

Photonendosismessung unter SEG

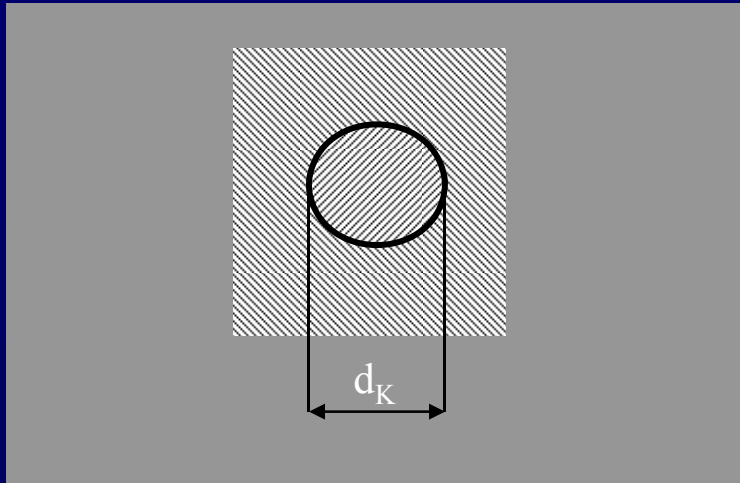
1. Rückwirkungsfreiheit:

Gegeben wenn:

$$\Psi_{\text{Gewebe}} = \Psi_{\text{Sonde}}$$

Möglichkeiten:

1. Sonde aus gewebeäquivalentem Material (nicht möglich)
2. Realisierung über bestimmte Sondenabmessungen



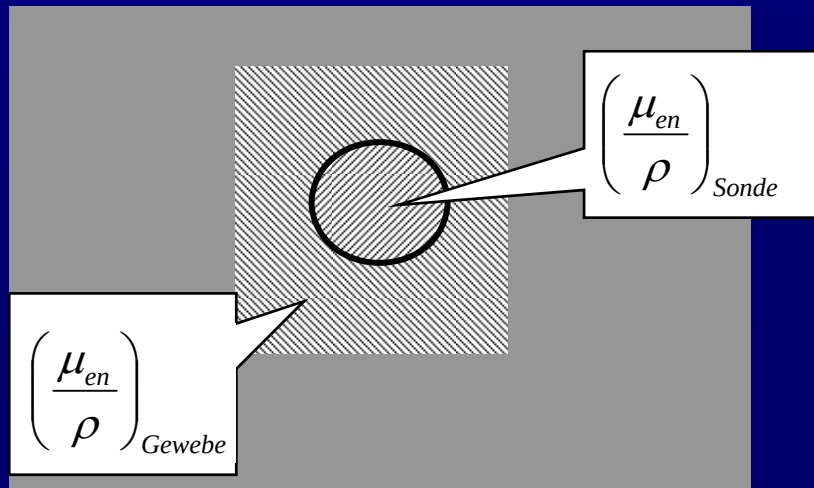
$$d_K \ll 1/\mu$$

Dann ist Ψ in gesamter Sonde const.

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$

Photonendosismessung unter SEG

1. Dosisproportionalität der Anzeige



$$D_{Sonde} = \frac{dE}{dm}$$

Energiebilanz in der Sonde

$$dE = \boxed{E_{\lambda in} - E_{\lambda ex}} - E_{\lambda eex} + \boxed{E_{ein} - E_{eex}} - E_{e\delta ex} + \boxed{E_{\delta in} - E_{\delta ex}} + \dots$$

$$D_{Sonde} = \frac{E_{\lambda in} - E_{\lambda ex}}{dm}$$

= Sekundärteilchengleichgewicht

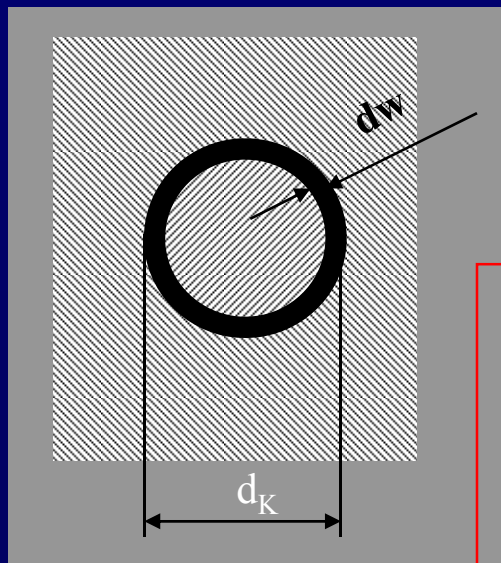
Alle anderen Terme sollen durch geschickte Gestaltung der Kammer 0 werden

Photonendosismessung unter SEG

1. Dosisproportionalität der Anzeige

Kammer muß so groß sein, dass alle in ihr erzeugten Sekundärteilchen im Volumen verbleiben

Verhinderung des Eintritts von Sek.elektronen aus der Umgebung durch eine feste Wand (= inhomogene Sonde)



$d_w >$ Reichweite der Sekundär- und Tertiärelektronen aus der Umgebung

Kammerwand äquivalent zum Innenraum

$d_w >$ Reichweite der Sekundärelektronen aus der Umgebung

$d_k \ll 1/\mu$

$d_k >$ Reichweite der in der Kammer durch Quanten erzeugten Sekundärelektronen

Fanotheorem

1. Im homogenen Primärstrahlungsfeld existiert unabhängig von Dichteunterschieden ein homogener Fluß von Sekundärteilchen (bei Materialien gleicher atomarer Zusammensetzung)
2. Erzeugungsrate von Sekundärteilchen steigt linear mit der Dichte an.
3. Vernichtungsrate von Sekundärteilchen steigt linear mit der Dichte an.

Voraussetzung für Sonden mit gasförmigem Volumen und fester Wand

Anforderungen an die Kammerkonstruktion

Kammermaterial:

- Umgebungsäquivalent
- Kammerwand und Kammerinneres müssen sich WW-äquivalent verhalten
- Kammerdurchmesser d_k

$$R_{\lambda e} < d_k < 1/\mu$$

- Wanddicke d_w

$$R_{eGew} < d_w < 1/\mu$$

Berechnung für allgemeines Sondenmaterial

$$D_{\text{Gewebe}} = \frac{\left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_{\text{Gewebe}} \cdot \psi_{\text{Gewebe}}}{\left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_{\text{Sonde}} \cdot \psi_{\text{Sonde}}} \cdot D_{\text{Sonde}}$$

$$D_{\text{Gewebe}} = t_{m/a}^{\text{en}} \cdot D_{\text{Sonde}} = t_{m/a}^{\text{en}} \cdot k \cdot M$$

Elektronen- und Photonendosismessung nach Bragg-Gray

Dosisproportionalität der Anzeige

Rückwirkungsfreiheit:

$$D_{Gew} = \frac{\left(\frac{S}{\rho}\right)_{Gew}}{\left(\frac{S}{\rho}\right)_{Sonde}} \cdot \frac{\Phi_{Gew}}{\Phi_{Sonde}} \cdot D_{Sonde}$$

Rückwirkungsfrei, wenn $\Phi_{Gew} = \Phi_{Sonde}$

$$d_k < R_e$$

R_e = Reichweite der Elektronen:

Primäre Elektronen oder

Sekundärelektronen bei Photonenstrahlung

$$d_k \ll 1/\mu$$

Elektronen- und Photonendosismessung nach Bragg-Gray

Energiebilanz

$$\Delta E = E_{\lambda \text{in}} - E_{\lambda \text{ex}} - E_{\lambda \text{eex}} + E_{\text{ein}} - E_{\text{eex}} - E_{\delta \text{eex}} + E_{\delta \text{in}} - E_{\delta \text{ex}}$$

Rest = 0 : Bragg Gray Bedingungen

$$E_{\lambda \text{in}} - E_{\lambda \text{ex}} = 0$$

$$d_k \ll 1/\mu$$

$$E_{\lambda \text{eex}} = 0$$

Wenn in Kammer keine WW, können auch keine Sek.teilchen entstehen.

$$E_{\delta \text{eex}} = 0$$

Energiebetrag von Elektronen auf δ -Elektronen übertragen und verlässt mit den δ -Elektronen die Kammer:

Dosisanzeige wird zu klein (Volumenabhängig)

$$d_k > R_{\text{e}\delta}$$

Elektronen- und Photonendosismessung nach Bragg-Gray

$$D_{\text{Sonde}} = \frac{\Delta E}{\Delta m} = \frac{E_{\text{ein}} - E_{\text{eex}}}{\Delta m}$$

Alle in der Kammer erzeugten δ -Elektronen sollen auch in der Sonde abgebremst werden, Anzeige wird dann volumenunabhängig.

Rest $R_{e\delta\text{exw}}$ geht in die Kammerwand

$$E_{\delta\text{in}} = E_{\delta\text{in GAS}} + E_{\delta\text{in Wand}}$$

$$E_{\delta\text{in GEWEBE}} = 0$$

$$d_w > R_{\delta\text{GEW}}$$

Rest $E_{\delta\text{in Wand}}$

$$E_{\delta\text{in Wand}} = E_{e\delta\text{in Wand}}$$

Delta-Elektronen-Gleichgewicht

Elektronen- und Photonendosismessung nach Bragg-Gray

Zwei Bedingungen sind einzuhalten:

Bragg-Gray Bedingungen
Deltateilchengleichgewicht

Konstruktive Forderungen an die Sonde:
Kammerdurchmesser:

$$R_{e\delta} < d_k < R_e$$

$$d_k \ll 1/\mu$$

Wanddicke:

$$R_{\delta\text{Gew}} < d_w < R_e$$

$$d_w \ll 1/\mu$$

Elektronen- und Photonendosismessung nach Bragg-Gray

Berechnung für allgemeines
Sondenmaterial

$$D_{Gew} = \frac{\left(\frac{S}{\rho} \right)_{Gew}}{\left(\frac{S}{\rho} \right)_{Sonde}} \cdot D_{Sonde}$$

$$D_{Gewebe} = S_{m/a}^{BG} \cdot D_{Sonde} = S_{m/a}^{BG} \cdot k \cdot M$$

Zusammenfassung

SEG: Markierter Term = 0

$$dE =$$
A horizontal bar consisting of three rectangular segments. The leftmost segment is green, the middle segment is red, and the rightmost segment is green. The segments are separated by thin black lines.

**Bragg-Gray-Bedingung mit Deltateilchen Gleichgewicht:
Markierter Term = 0**