



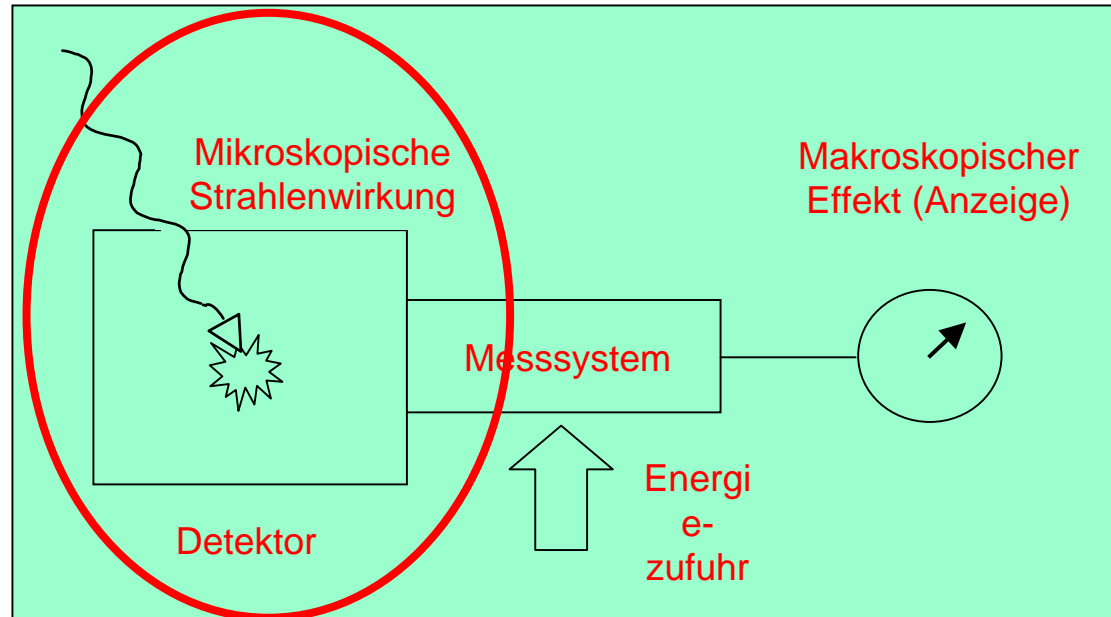
Medizinphysik II

Sondendosimetrie

Dr. Roberto Mini

Strahlenmessapparatur

Bei vielen Fragestellungen wird in der Strahlenmesstechnik eine Sondenmesstechnik verwendet



Messsonde

Auswertegerät

Anzeigegerät





Bestimmung der Sondendosis

Energiedeposition in Materie

Aus der Strahlenphysik wissen wir, dass

- durch die primäre Strahlenwirkung (Anregung und Ionisation) in der Sonde Energie deponiert wird
 - die **Energiedeposition** hauptsächlich durch Wechselwirkungen der primären und sekundären Elektronen geschieht
 - die **Reichweite** der meisten sekundären Elektronen im Vergleich zu derjenigen der primären Elektronen klein ist
 - die **Durchdringungsfähigkeit** primärer und sekundärer Photonen vergleichsweise gross ist
- der Ort der Energiedeposition (Wirkung) der Primärstrahlung nicht mit dem Ort der Energiedeposition der Sekundärstrahlung übereinstimmt. Diese Verschiebung der Energiedeposition ist von den Eigenschaften der Primärstrahlung (Art, Energie) und des Absorptionsmaterials abhängig.



Energieübertragung von Photonenstrahlung auf Materie

Da insbesondere bei Photonenstrahlungen (indirekt ionisierende Strahlung) die Energiedeposition in zwei Schritten geschieht, ergeben sich hieraus für die Dosimetrie nicht zu vernachlässigende Effekte.

Diese Effekte lassen sich durch die entsprechenden

- **Massenschwächungskoeffizient (μ/ρ) bzw.**
- **Energieübertragungskoeffizient (μ_{tr}/ρ)**

beschreiben



Linearer Energieübertragungs-koeffizient μ_{tr}

$$\mu_{tr} = \frac{\overline{E}_{tr}}{E_{\gamma}} \cdot \mu$$

E_{tr} : Energieübertrag durch WW

$$\mu_{tr} = t_{\tau} \cdot \tau + t_c \cdot \sigma_c + t_{paar} \cdot \kappa_{paar} + t_{tripl} \cdot \kappa_{tripl} + (t_{kp} \cdot \sigma_{kp})$$

t_i : Transfer-Faktoren



Transfer-Faktoren t_i

Photoeffekt

$$t_{\tau} = \frac{E_{\gamma} - E_b}{E_{\gamma}} = 1 - \frac{E_b}{E_{\gamma}}$$

Comptoneffekt

$$t_c = \frac{E_{\gamma} - E_b - E'_{\gamma m}}{E_{\gamma}}$$

Paarbildung

$$t_{\text{paar}} = \frac{E_{\gamma} - 2 \cdot 511 \text{keV}}{E_{\gamma}} = 1 - \frac{2 \cdot m_0 \cdot c^2}{E_{\gamma}}$$

Triplettbildung

$$t_{\text{tripl}} = \frac{E_{\gamma} - 2 \cdot 511 \text{keV} - E_b}{E_{\gamma}} = 1 - \frac{2 \cdot m_0 \cdot c^2 + E_b}{E_{\gamma}}$$



Massenschwächungskoeffizient (μ/ρ) vs Energieübertragungskoeffizient (μ_{tr}/ρ)

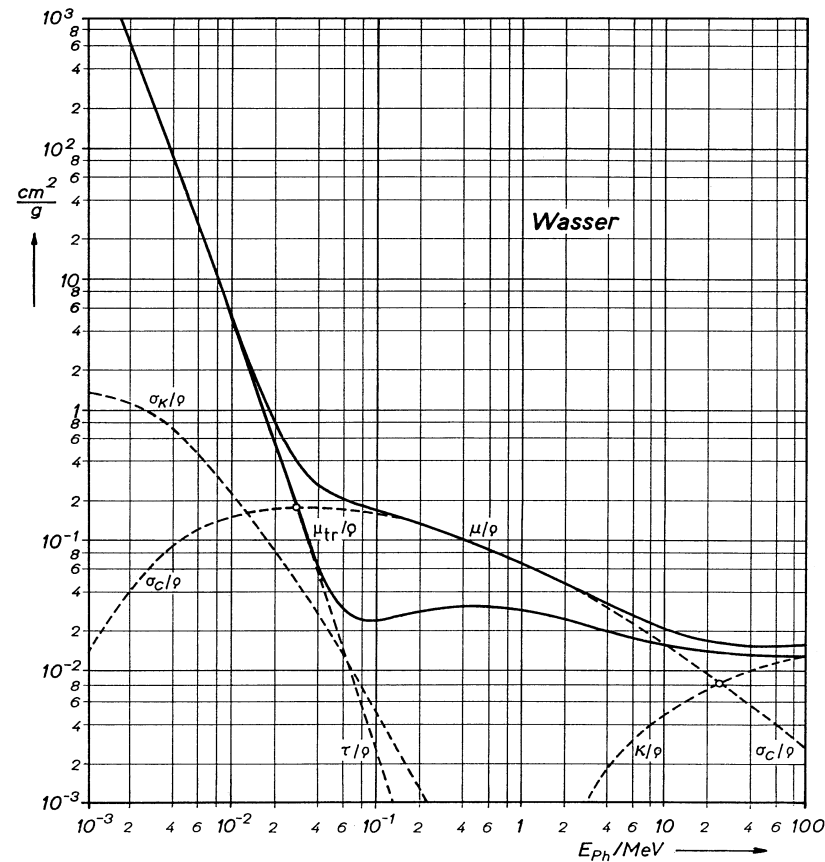


Fig. 4.23: Massenschwächungskoeffizient (μ/ρ) für Photonen in Wasser, seine Zusammensetzung aus den Koeffizienten (τ/ρ , σ_C/ρ , κ/ρ) sowie Massenenergieumwandlungskoeffizient (μ_{tr}/ρ) in Abhängigkeit von der Photonenenergie (vgl. Fig. 4.17, numerische Daten s. Tabellenanhang).

Energieübertragung von Photonenstrahlung auf Materie

Der Energieübertrag von Photonen auf geladene Sekundärteilchen wird durch **Energieübertragungskoeffizienten** μ_{tr} beschrieben, die aus einer Wichtung der Wechselwirkungskoeffizienten mit dem relativen Anteil übertragener Energie berechnet werden.

Für mittlere Photonenenergien und Niedrig-Z-Materialien entspricht der totale Energieübertragungskoeffizient μ_{tr} im wesentlichen dem **Comptonenergieübertragungskoeffizienten** $\sigma_{tr,c}$.



Kerma K

Als Mass für die Energieübertragung indirekt ionisierender Strahlungen auf einen Absorber dient die **Kerma K**

KERMA: kinetic energy relased per unit mass

$$K_{\text{med}} = \frac{dE_{\text{trans}}}{dm_{\text{med}}} = \frac{dE_{\text{trans}}}{\rho_{\text{med}} \cdot dV}$$

Unter Kerma K versteht man den Quotienten aus der durch ungeladene Primärteilchen in einem Volumen V im Medium med auf geladene Sekundärteilchen übertragene Bewegungsenergie E_{tran} und der Masse dm des Volumens (wobei $dm=\rho \cdot dV$).

Die SI-Einheit des Kerma K ist $[K]=\text{J/kg}$, wobei $1 \text{ J/kg}=1 \text{ Gy}$



Energieabsorption von Photonenstrahlung in Materie

Für die Wirkung (Anregung und Ionisation) in einem Absorber, das heisst für die Dosimetrie ist nicht primär die Energieübertragung sondern die **Energieabsorption** von Bedeutung.



Lokale Energiedeposition

Bei einer Photonenstrahlung erfolgt die **lokale Energiedeposition** im Absorber fast ausschliesslich durch die geladenen Sekundärteilchen (**sekundären Elektronen**).

Demgegenüber transportieren die entstehenden **Sekundärphotonen** (Bremsstrahlung) in der Regel ihre Energie **vom primären Wirkungsort weg**.

$$\mu_{\text{en}} = \mu_{\text{tr}} \cdot (1 - G)$$

μ_{en} : **Energieabsorptionskoeffizient**

G : **Bremsstrahlungsausbeute**



Bremsstrahlungsausbeute G

Elektronenenergie (MeV)	Bremsstrahlungsausbeute G (%) in:					
	Wasser	Luft	Knochen	PMMA	Wolfram	Blei
0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.11	0.12
0.05	0.03	0.04	0.04	0.03	0.54	0.61
0.10	0.06	0.07	0.08	0.05	1.03	1.16
0.15	0.08	0.09	0.10	0.07	1.47	1.66
0.50	0.20	0.22	0.26	0.18	3.71	4.24
1.00	0.36	0.40	0.46	0.32	6.03	6.84
2.0	0.71	0.78	0.90	0.64	9.86	10.96
5.0	1.91	2.00	2.37	1.73	19.02	20.45
10.0	4.06	4.11	4.96	3.71	30.06	31.62
20.0	8.33	8.17	9.97	7.67	44.03	45.55
50.0	19.20	18.25	22.19	17.92	63.16	64.39
100.0	31.90	30.22	35.74	30.19	75.26	76.17

Tab. 4.4: Relativer Energieanteil G der Anfangsenergie von Sekundärelektronen aus Photonenwechselwirkungen, der in Bremsstrahlung umgewandelt wird (Angaben gerundet, nach [ICRU 37], PMMA: Plexiglas). Weitere ausführlichere Daten befinden sich im Tabellenanhang.

Berechnung der Energiedosis

Kennt man die in einer Sonde resultierende Kerma K muss diese im Verhältnis der entsprechenden

Energieübertragungskoeffizienten μ_{tr}
Energieabsorptionskoeffizient μ_{en}

In die Energiedosis D umgerechnet werden

Bei niederenergetischen Photonenstrahlungen unterscheiden sich die beiden Dosisgrößen nur wenig.



Unterschiedliche Verläufe der TDK bei hochenergetischen Photonenstrahlungen



Bestimmung der Sondendosis

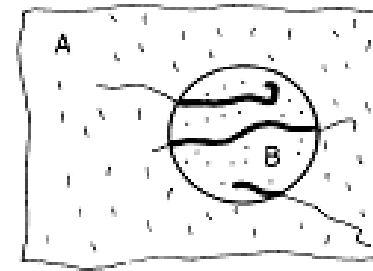
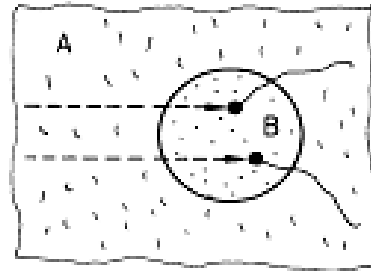
Frage:

Was für eine Dosis wird mit einer Sonde gemessen?

Kerma K_s ? oder Energiedosis D_s ?



Physikalische Dosisgrössen



$$K = \frac{dE_{\text{tran}}}{dm} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE_{\text{tran}}}{dV}$$

$$D = \frac{dE_{\text{abs}}}{dm_a} = \frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{dE_{\text{abs}}}{dV}$$

Bestimmung der Sondendosis

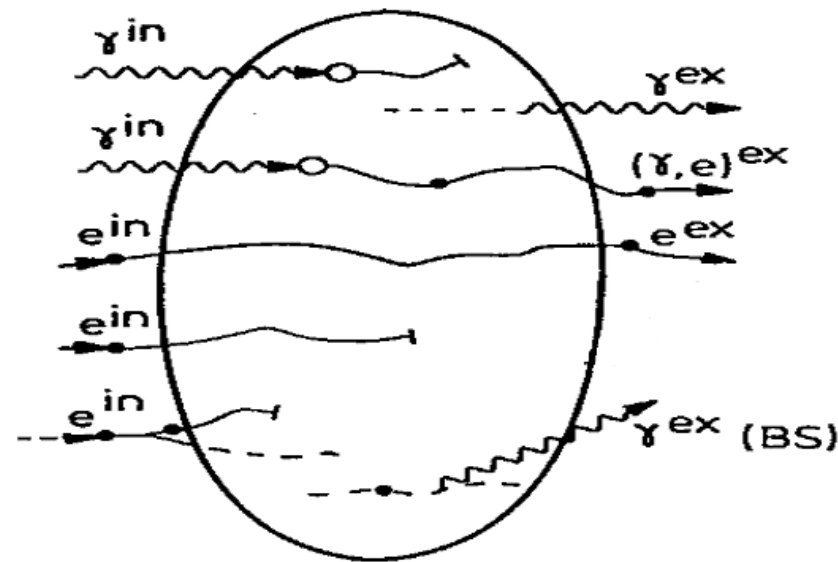
Diese Frage kann nur bei Erfüllung bestimmter Bedingungen schlüssig Beantwortet werden:

- das Sekundärelektronengleichgewicht oder
- die Bragg-Gray-Bedingung



Energiedeposition in einer Messsonde

Sondendosis D_s



$$D_s = \frac{1}{dm} \cdot (E_{in}^{\gamma} - E_{ex}^{\gamma} - E_{ex}^{\gamma, e} + E_{in}^e - E_{ex}^e)$$

Sekundärelektronengleichgewicht

In einer Messsonde besteht

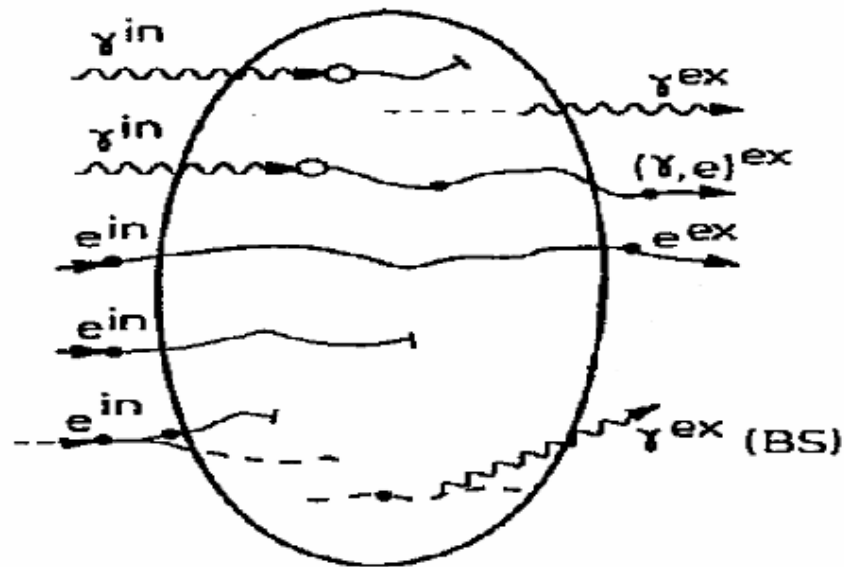
Sekundärelektronengleichgewicht,

wenn die in der Sonde gemessene Energiedeposition der Energiedeposition der Primärteilchen entspricht.

Dies ist der Fall, wenn die durch Primärteilchen in der Sonde auf Sekundärelektronen übertragene und von diesen hinaustransportierte Energie gleich gross ist wie die Energie, welche von Sekundärelektronen von Ausserhalb der Sonde in diese hinein transportierte wurde.



Sekundärelektronengleichgewicht



$$-E_{\text{ex}}^{\gamma} - E_{\text{ex}}^{\gamma, e} + E_{\text{in}}^e - E_{\text{ex}}^e = 0$$

Sekundärelektronengleichgewicht bei Photonenstrahlenfelder

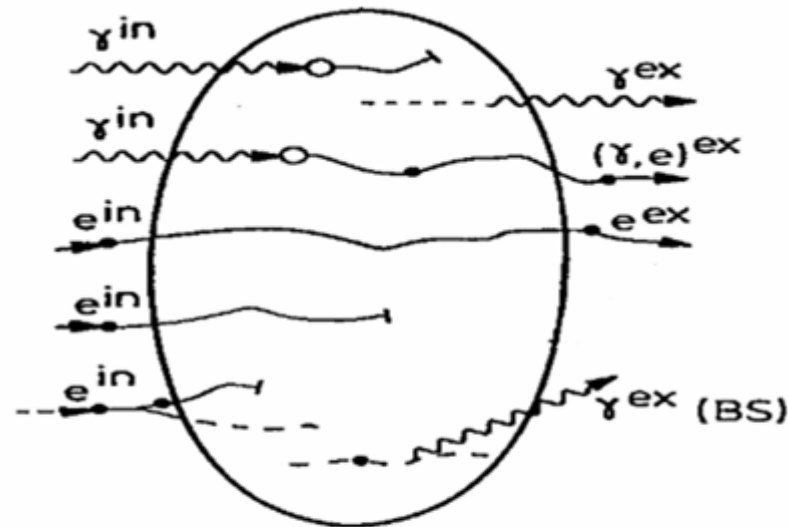
Da die Energiebilanz der Sekundärelektronen ausgeglichen ist, gibt die Sondendosis bei **Sekundärelektronengleichgewicht** im Falle einer **primären Photonenstrahlung** die im Sondenvolumen durch Wechselwirkungen mit diesen Photonen absorbierte Energie wieder.

Bei Sekundärelektronengleichgewicht entspricht die in der Sonde gemessene Dosis dem **Kerma K** .



Sekundärelektronengleichgewicht

Sondendosis = Kerma K_s



$$K_s = \frac{1}{dm} \cdot (E_{in}^{\gamma} - E_{ex}^{\gamma} - E_{ex}^{\gamma, e} + E_{in}^e - E_{ex}^e)$$

Bestimmung der Dosen unter BRAGG-GRAY-Bedingungen

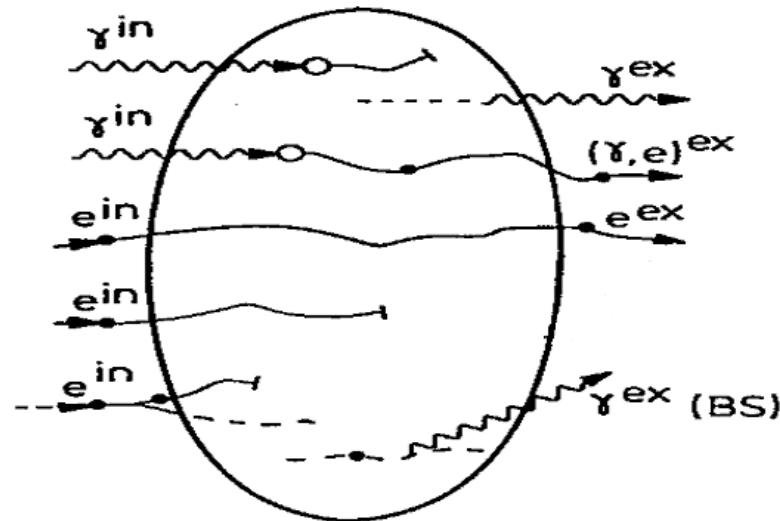
Ist ein Hohlraum innerhalb eines Materials A mit einem Material B gefüllt, so besteht ein Strahlungsfeld unter BRAGG-GRAY-Bedingungen, wenn

- a) die Flußdichte der Elektronen der ersten Generation sowie ihre Energie- und Richtungsverteilung durch den mit dem Material B gefüllten Hohlraum nicht verändert wird,**
- b) die Energie, die von den im Material B durch Photonen ausgelösten Sekundärelektronen auf dieses Material übertragen wird, im Verhältnis zu der insgesamt auf das Material B übertragenen Energie verschwindend klein ist,**
- c) die spektrale Flußdichteverteilung der Elektronen aller Generationen innerhalb des Materials B ortsunabhängig ist.**



BRAGG-GRAY-Bedingungen

Sondendosis = Energiedosis D_s



$$D_s = \frac{1}{dm} \cdot (E_{in}^{\gamma} - E_{ex}^{\gamma} - E_{ex}^{\gamma,e} + E_{in}^e - E_{ex}^e)$$

wobei $E_{in}^{\gamma} - E_{ex}^{\gamma} - E_{ex}^{\gamma,e} = 0$

Bestimmung der Sondendosis

Sonden die unter Bragg-Gray-Bedingungen arbeiten messen direkt die durch Sekundärelektronen deponierte Energie. Die Sondendosis entspricht der **Energiedosis D_s** im Sondenmaterial.





Dosisumrechnungen

Bestimmung der Dosis im Umgebungsmaterial

Energiedeposition in Materie

Photonenstrahlung

Bei Einstrahlung von Photonen in Materie erfolgt die Energiedeposition in zwei Stufen (**indirekt ionisierende Strahlung**):

- primäre Wechselwirkungen (Photo-, Compton-, Paarbildungs-Effekt)
(Mass: KERMA K)

Es entsteht ein Fluss geladener Sekundärteilchen (Elektronen, δ -Elektronen)

- Wechselwirkungen der Sekundärteilchen (Anregung, Ionisation, chem. Veränderungen) (Mass: Energiedosis D, Ionendosis J);

Elektronenstrahlung

Bei Einstrahlung von Elektronen erfolgt die Erzeugung einer Energiedosis in Materie in einem Schritt (**direkt ionisierende Strahlung**)

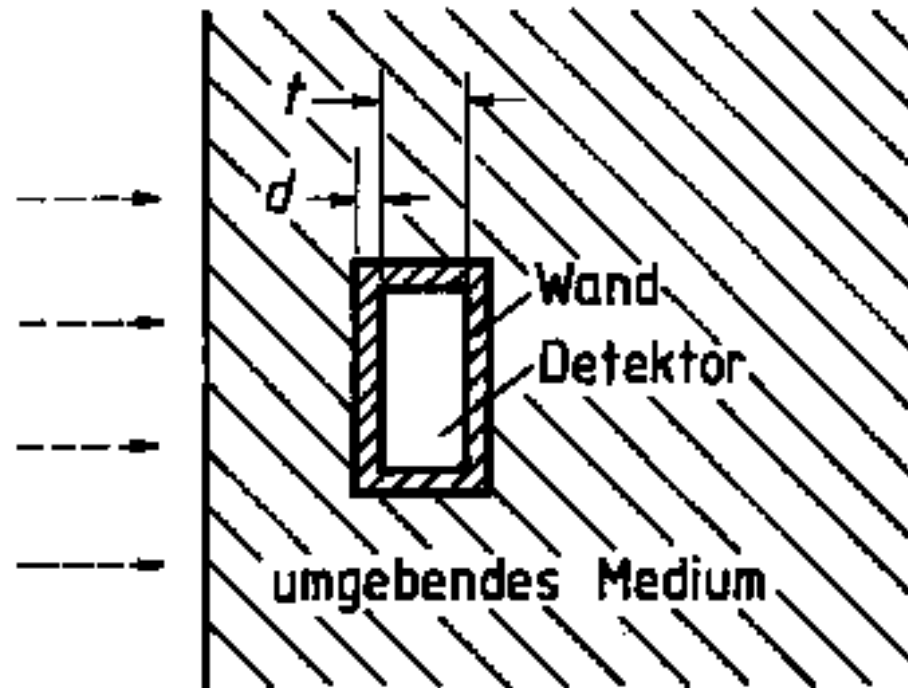
- Wechselwirkungen der Elektronen mit lokaler Energiedeposition durch Sekundärelektronen (Stossbremsung)

(Mass: Energiedosis D);

- lokale “Bremsstrahlungsverluste“



Sondendosimetrie



Sonde im umgebenden Medium, d Wanddicke, t Dicke des Meßvolumens

Lokale dosimetrische Äquivalenz

Bei der Dosimetrie nach der Sondenmethode kann bei

- Sekundärteilchengleichgewicht oder unter
- Bragg-Gray-Bedingungen

die Äquivalenzforderung für die Umgebung und die Messsonde gegenüber der globalen Äquivalenz stark eingeschränkt werden. Voraussetzung ist nur noch die Äquivalenz des Strahlenfeldes am Sondenort und in der unmittelbaren Umgebung der Sonde (Sondenwand). Das ist der Bereich, der bei

- Sekundärteilchengleichgewicht etwa der Reichweite R der Sekundärteilchen entspricht und bei
- Hohlraumbedingungen durch den maximal zulässigen Sondenradius r gegeben ist.



Lokale dosimetrische Äquivalenz

Lokale Äquivalenz (Umgebungsäquivalenz) ist somit gegeben:

-bei Sekundärteilchengleichgewicht

Bei Übereinstimmung der **Massenenergieabsorptionskoeffizienten** für

-das Sondenvolumen

-die“nähere“ Umgebung (Sondenwand)

-bei Hohlraumbedingungen

Bei Übereinstimmung der **Massenstossbremsvermögen** der beteiligten Materialien .



Umrechnung der dosimetrisch ermittelten Sondendosis auf die Sondenumgebung bzw. auf ein anderes Absorptions-Medium

Falls das Sondenmaterial zum Referenzmedium nicht bzw. nicht genügend äquivalent ist, muss die in der Sonde gemessene Energiedosis D_s in die Energiedosis D_{med} umgerechnet werden. Mit dieser Umrechnung berücksichtigt man das unterschiedliche Verhalten des Strahlenfeldes (Anregung und Ionisation) in den beiden Medien.

Diese Dosisumrechnung ist je nach Messbedingungen:

- Sekundärelektronengleichgewicht oder
- Bragg-Gray-Bedingung

unterschiedlich.



Umrechnung der dosimetrisch ermittelten Sondendosis auf die Sondenumgebung bzw. auf ein anderes Absorptions-Medium

Photonenstrahlung

Um bei Sekundärelektronengleichgewicht von der gemessenen Sonden-dosis (Kerma K_s) auf die Umgebungsdosen K_{med} oder D_{med} schliessen zu können muss diese bei nicht äquivalenten Sonden anhand der von der Energie der Primärphotonen abhängigen

Massenenergie transmissionskoeffizienten bzw.

Massenenergie absorptionskoeffizienten

umgerechnet werden.



Umrechnung der dosimetrisch ermittelten Sondendosis auf die Sondenumgebung bzw. auf ein anderes Absorptions-Medium

Sonden die unter **Bragg-Gray-Bedingungen** arbeiten messen direkt die durch Sekundärelektronen deponierte Energie, die Sondendosis entspricht der **Energiedosis D_s** im Sondenmaterial.

Bei nicht äquivalenten Sonden geschieht die Umrechnung der Sondendosis D_s in die im umgebenden Referenzmedium zu erwartenden Energiedosis D_{med} anhand der entsprechenden

Massenstossbremsvermögen der Sekundärelektronen.

Letztere sind von der Energie der Sekundärelektronen abhängig und somit von Ort zu Ort im Medium verschieden!





Medizinphysik II

Sondendosimetrie