



# **Medizinphysik II**

## **Dosimetrie Grundlagen**

**Dr. Roberto Mini**



# Aufgaben der Strahlenmesstechnik

## Strahlenmesstechnik

### Allgemeines

Eine ionisierende Strahlung manifestiert sich nur durch ihre Wechselwirkung mit Materie bzw. durch die in einem Absorber verursachten physikalischen, chemischen oder biologischen Folgereaktionen.

Das Ziel der Strahlenmesstechnik ist die Registrierung der Anwesenheit und Wirkung ionisierender Strahlungen durch Messung der durch diese in einem Medium anhand von Wechselwirkungen verursachten Strahleneffekte.



# Strahlenmesstechnik

## Allgemeines

### Primäre physikalische Strahleneffekte:

- Anregung und Ionisation von Atomen

### Sekundäre physikalischen Strahleneffekte:

- Thermische Effekte
- Optische Effekte
- Elektrische Effekte

### Primäre biologische Strahleneffekte:

- Molekülbrüche
- Biologische Effekte



## Aufgaben der Strahlenmesstechnik

Die Aufgaben der Strahlenmesstechnik sind je nach Interessengebiet (Physik, Medizin, Strahlenschutz) bzw. je nach Fragestellung verschieden:

### Strahlennachweis

- „Qualitativer“ Strahlennachweis
- Quantitative Strahlenfeldmessungen

### Dosimetrie

- Bestimmung der primären Strahlenwirkung (Energiedosis)





# Aufgaben des Strahlennachweises

## Strahlennachweisgeräte - Spektrometer

Unter einem **Strahlennachweisgerät** versteht man eine Messeinrichtung, die die Anzahl Strahlenteilchen registriert, die in ein bestimmtes Messvolumen eindringen. Damit lassen sich das Vorhandensein einer ionisierenden Strahlung und deren Intensität feststellen.

Anhand von **Spektrometern** können zudem bestimmte Eigenschaften dieser Strahlenteilchen (Energie, Ladung) ermittelt werden. Diese Messsysteme dienen zur Beschreibung von Strahlenfeldern.

Die wichtigsten Strahlennachweisgeräte sind :

- Geiger-Müller-Zähler
- Proportionalzähler
- Szintillationszähler
- Photoemulsion (Röntgenfilme)
- Festkörperdetektoren



## **„Qualitativer“ Strahlennachweis (Strahlenschutz)**

**Kontaminationsmessungen**

**Umweltüberwachung**

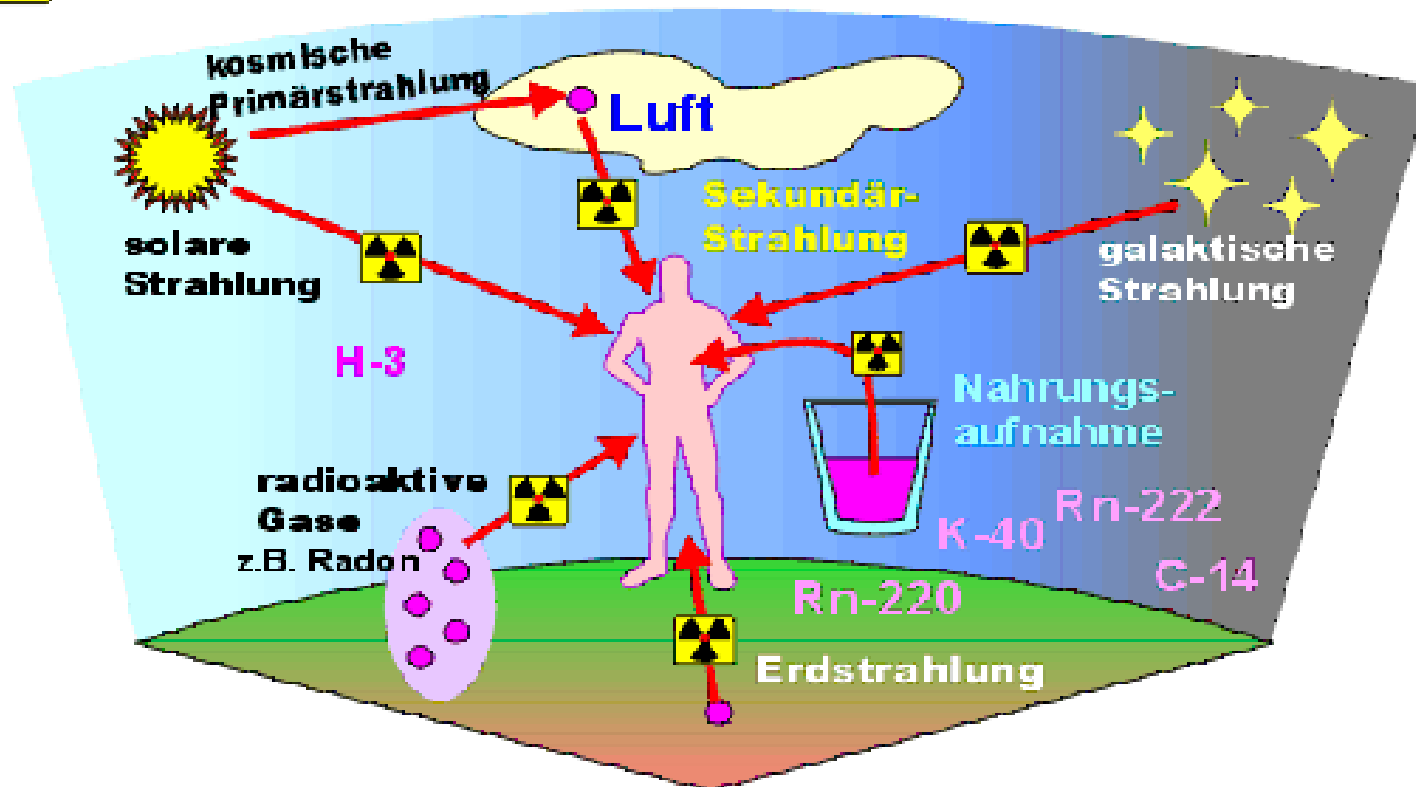
**Abfallüberwachung**



## Umwelt - Radioaktivität



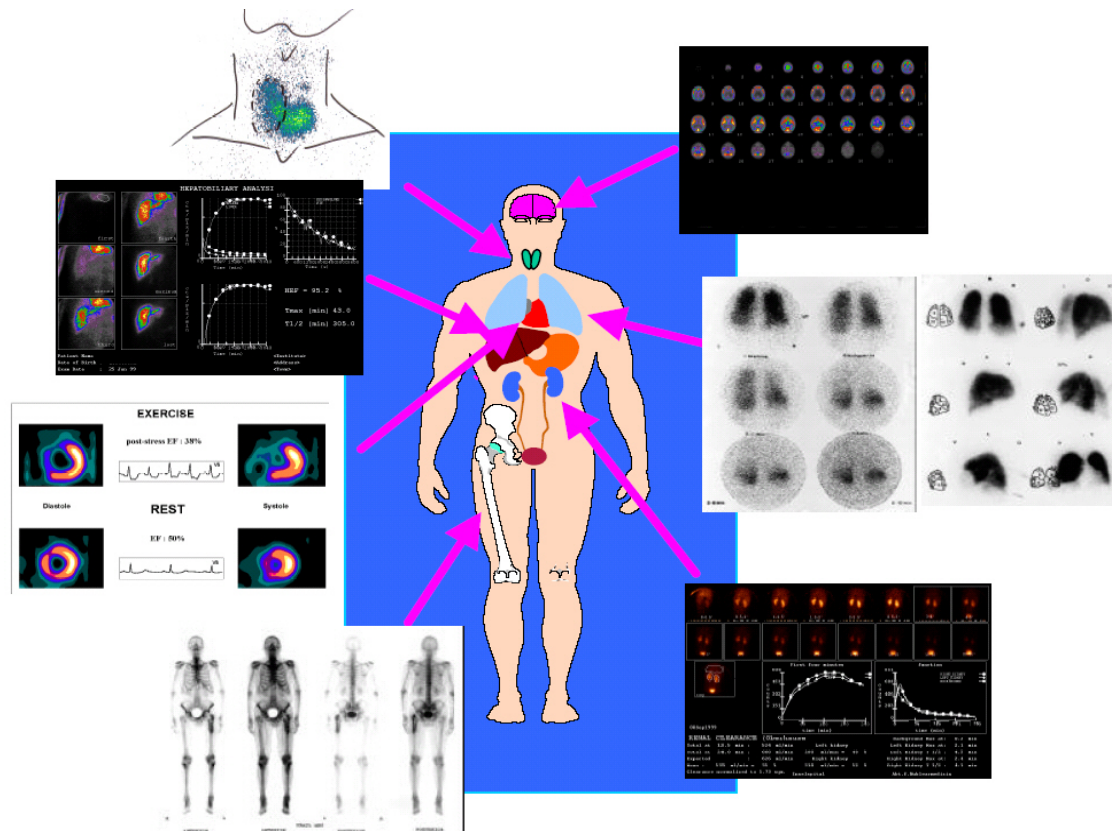
**Strahlung gibt es nicht erst seit es Kernkraftwerke gibt**



*Alles Leben ist immer schon ionisierenden Strahlungen ausgesetzt gewesen. Sie erreicht uns aus dem Weltall, aus der Erde, Ihrer Atmosphäre, aus der Nahrung und aus den Baumaterialien unserer Häuser.*

# Quantitativer Strahlungsnachweis Medizin und Strahlenschutz

## Aktivitätsmessungen der Nuklearmedizin



## Quantitative Strahlenfeldmessungen (Physik, Medizin, Strahlenschutz)

### Quantitativer Teilchen- bzw. Quantennachweis

- Aktivitätsmessungen

### Strahlungsfeldanalyse

Messung der räumlichen und zeitlichen Verteilung von

- Teilchenart
- Teilchen- bzw. Quantenfluss
- Energiefluss
- Raumwinkelbezogene Flussdichten

### Spektrometrie

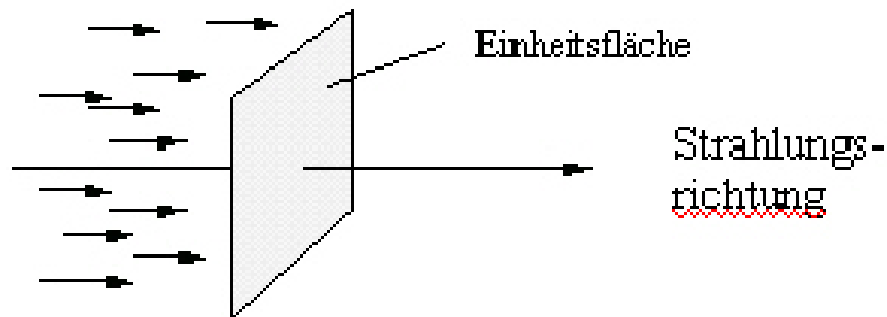
- Verteilung der Teilchen- bzw. Quantenenergien
- Verteilung der Teilchenladungen



# Quantitative Strahlenfeldmessungen in der Physik

## Bestimmung der Strahlenfeldeigenschaften

- **Art** des Energieträgers (Elektron, Photon etc.)
- **Energie** des Energieträgers
- **Flussdichte** der Energieträger = Anzahl Träger pro Einheitsfläche und Zeit [Anz./m<sup>2</sup>s]



## Skalare Strahlungsfeldgrößen

Tab. 2.1 Skalare Strahlungsfeldgrößen

$dA_{\perp}$  Querschnittsfläche einer differentiellen Kugel um einen interessierenden Punkt.  
 $E$  kinetische Energie korpuskularer Teilchen und Energie  $h\nu$  von Photonen

Name	Symbol	SI-Einheit
spektrale Teilchenradianz ( <i>spectral particle radiance</i> ) oder spektrale, raumwinkelbezogene Teilchenflußdichte	$p_E(t, E, \Omega, \mathbf{r}) = \left. \begin{aligned} &\varphi_{E, \Omega}(t, E, \Omega, \mathbf{r}) \end{aligned} \right\} = d^4N/(dt dE d\Omega dA_{\perp})$	$s^{-1}J^{-1}sr^{-1}m^{-2}$
spektrale Teilchenflußdichte spektrale, raumwinkelbezogene Teilchenfluenz	$\varphi_E(t, E, \mathbf{r}) = d^3N/(dt dE dA_{\perp})$ $\Phi_{E, \Omega}(E, \Omega, \mathbf{r}) = d^3N/(dE d\Omega dA_{\perp})$	$s^{-1}J^{-1}m^{-2}$ $J^{-1}sr^{-1}m^{-2}$
spektrale Teilchenfluenz Teilchenradianz ( <i>particle radiance</i> ) oder raumwinkel- bezogene Teilchenflußdichte	$\Phi_E(E, \mathbf{r}) = d^2N/(dE dA_{\perp})$ $p(t, \Omega, \mathbf{r}) = \left. \begin{aligned} &\varphi_{\Omega}(t, \Omega, \mathbf{r}) \end{aligned} \right\} = d^3N/(dt d\Omega dA_{\perp})$	$J^{-1}m^{-2}$ $s^{-1}sr^{-1}m^{-2}$
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
spektrale Energieflußdichte ( <i>spectral energy fluence rate</i> )	$\psi_E(t, E, \mathbf{r}) = d^3R/(dt dE dA_{\perp})$	$s^{-1}m^{-2}$
spektrale Energiefluenz	$\Psi_E(E, \mathbf{r}) = d^2R/(dE dA_{\perp})$	$m^{-2}$
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 <sup>1)</sup> ( <i>radiant energy</i> )	$R$	J

<sup>1)</sup> Nicht zu verwechseln mit „Energie der Strahlteilchen“.



# Aufgaben der Dosimetrie

## Dosimeter

Unter einem **Strahlendosimeter** versteht man eine Messeinrichtung, die eine quantitative Ermittlung der strahleninduzierten Primärwirkungen (**Energiedosis**) erlaubt. Je nach Messsystem werden hierzu die unterschiedlichsten physikalischen oder chemischen Reaktionen registriert, die über möglichst grosse Bereich dosisproportional sein müssen. Die Energiedosis gilt als repräsentativste Messgrösse zur Bestimmung der strahleninduzierten Primärwirkungen (Anzahl Anregungen und Ionisationen).

Als Strahlendosimeter werden hauptsächlich folgende Messsysteme eingesetzt:

- Kalorimeter (Eichdosimeter)
- Ionisationskammer
- Photoemulsion
- Festkörperdosimeter



## Aufgaben der Dosimetrie

Die Aufgaben der Dosimetrie sind je nach Interessengebiet (Physik, Medizin, Strahlenschutz) bzw. je nach Fragestellung verschieden:

Bestimmung der **Energiedosis D**

Ermittlung biologisch-medizinisch definierter Wirkungsgrößen

- **Äquivalentdosis  $H_T$**
- **Effektiver Dosis E**

Messung strahlenschutztechnischer Referenzgrößen

- **Personendosen  $H_p(10)$ ,  $H_p(0.3)$ ,  $H_p(0.07)$**
- **Ortsdosen**



## Allgemeine Dosimetrie

Gegenstand: Bestimmung der primären Strahlenwirkung

-Anregung und Ionisation

Ziel der Strahlenmesstechnik ist die Bestimmung der

-Energiedosis  $D$



## Allgemeine Dosimetrie

$$D_{\text{med}} = \frac{dE_{\text{abs}}}{dm_{\text{med}}} = \frac{dE_{\text{abs}}}{\rho_{\text{med}} \cdot dV}$$

Die **Energiedosis D** ist der Erwartungswert der bei einer Strahlenexposition von einem Absorbermaterial lokal absorbierten Energie  $dE$  dividiert durch die Masse des bestrahlten Volumens  $dm=\rho \cdot dV$ .

Die SI-Einheit der Energiedosis D ist

$$[D]=\text{J/kg, wobei } 1\text{J/kg}=1\text{Gy}$$



## Dosimetrie in Medizin und Strahlenschutz

„Dosis“ griechisch Menge bezeichnet in der Medizin eine Arzneimittelmenge die für eine bestimmte biologische Wirkung verantwortlich ist.

Für das „Arzneimittel“ Strahlung musste vorerst eine messbare Grösse, die mit den strahleninduzierten biologischen Wirkungen korreliert, gefunden werden.

Als Grössen für die Beurteilung der medizinischen Strahlenwirkungen sowie der Strahlenrisiken in einem menschlichen Körper dienen die Äquivalentdosis H und die effektive Dosis E.



## Dosimetrie in der Medizin (Klinische Dosimetrie)

Gegenstand: Bestimmung der nach einer Strahlenexposition zu erwartenden, **medizinisch beobachtbaren deterministischen Strahlenwirkung**

**-Gewebe- und Organreaktionen**

Aufgabe der Strahlenmesstechnik ist die **Bestimmung der Energiedosis  $D$  zur Berechnung der Äquivalentdosis  $H_T$**



## Dosimetrie im Strahlenschutz

Gegenstand: Bestimmung der nach einer Strahlenexposition zu erwartenden, **medizinisch beobachtbaren Strahlenrisiken**

**-somatische und vererbare Risiken**

Ziel der Strahlenmesstechnik ist die Messung der **Energiedosis  $D$**  zur Berechnung der **Äquivalentdosis  $H_A$**  und der hieraus resultierenden **effektiven Dosis  $E$** .



## Strahlenmesstechnik - Dosimetrie

Primäres Ziel der Dosimetrie ist die Bestimmung der **Energiedosis D**.

Je nach Messsystem werden hierzu in einem Medium bestimmte **physikalische oder chemische Strahlenreaktionen** gemessen, die über einen möglichst grossen Bereich **dosisproportional** sein müssen.

Aus den gewonnen Messergebnissen wird dann die durch die Strahlenexposition im Medium verursachte **Energiedosis berechnet**.

Eine **direkte Umrechnung** allein aufgrund physikalisch-chemischer Kenntnisse ist **nur in speziellen Situationen** mit genügender Genauigkeit **möglich**.



## Allgemeine Dosimetrie

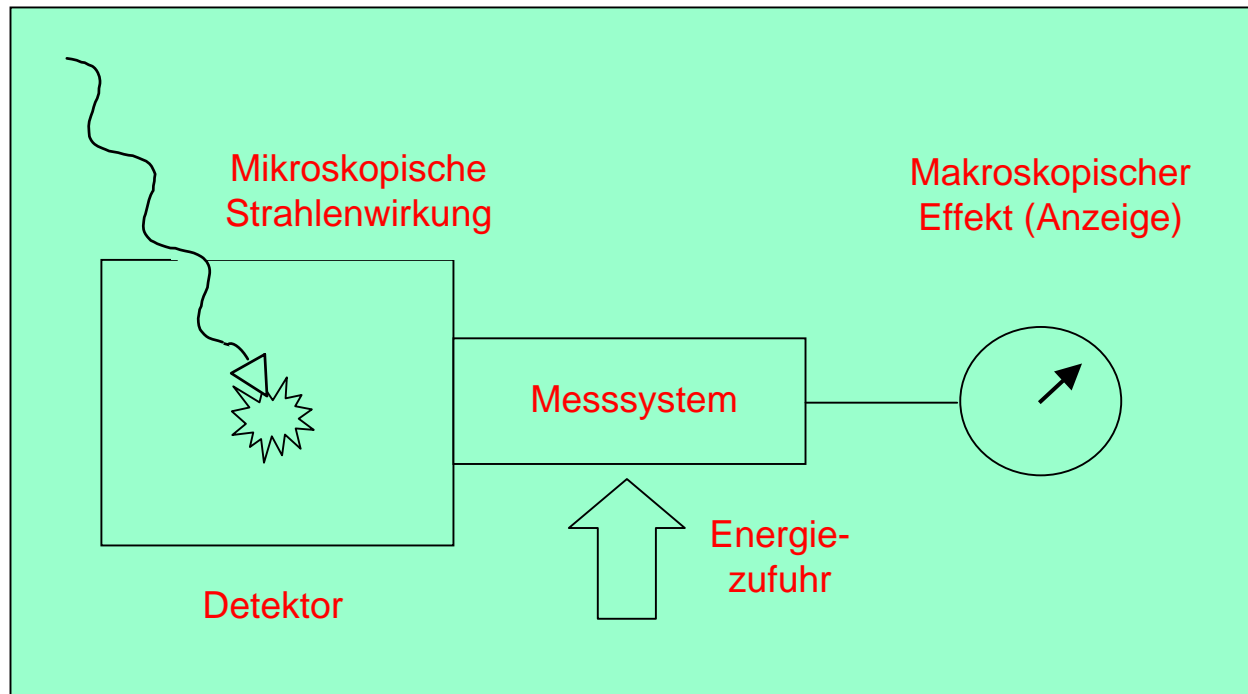
Umrechnung der Anzeige M in die Energiedosis D

- Referenz-Messgrösse (Schwärzung, Lumineszenz usw.)
- Zusammenhang zwischen Anzeige und Messgrösse
- messtechnische Einflussfaktoren
  - Beeinflussung des Strahlenfeldes
  - Beeinflussung der Anzeige
- physikalisch-chemische Energiebilanz
- Räumlicher Bezugspunkt
- Bezugsmasse



# Strahlenmessapparatur

## Sondenmesstechnik



**Messsonde**

**Auswertegerät**

**Anzeigegerät**

## Kalibrieren von Dosimetern

In den häufigsten Fällen behilft man sich mit einer Umrechnung der Anzeige  $M$  in eine Energiedosis  $D$  anhand von **Kalibrierfaktoren**.



## Dosimetrie

Messsysteme zur **direkten Dosisbestimmung**  
(Absolutedosimetrie)

- Kalorimetrie

**Relativverfahren:** Messsysteme bei denen die Dosen  
indirekt mit Hilfe von strahlenfeldabhängigen  
**Kalibrierfaktoren** und Umrechnungen ermittelt werden

- Ionisationsdosimetrie
- Filmdosimetrie
- Thermolumineszenz-Dosimetrie



## Kalibrieren von Dosimetern

**Das Kalibrieren** ist die Feststellung des Zusammenhanges zwischen der Anzeige am Messgerät und dem richtigen Wert der Messgrösse. Durch die Kalibrierung wird der Kalibrierfaktor ermittelt oder geprüft. Der **Kalibrierfaktor N** ist der Faktor, mit dem die **Anzeige M** eines Dosimeters unter Bezugsbedingungen multipliziert werden muss, um den richtigen Wert der Messgrösse zu erhalten:

$$\text{z.Bsp. Energiedosis } D = N * M$$

Normalerweise werden die Dosimeter vom Hersteller kalibriert.

Die Kalibrierung eines Dosimeters kann mit Hilfe einer **Kontrollanzeige** überprüft werden. Bei Dosimetern ist dies die Anzeige, die sich unter der Einwirkung einer Kontrollvorrichtung (Strahlenquelle: meistens Sr-90) einstellt. Der resultierende Ist-Wert wird mit dem bei der Kalibrierung bestimmten Soll-Wert verglichen, wobei der radioaktive Zerfall der Kontrollquelle zu berücksichtigen ist.

Therapiedosimeter werden normalerweise in „**Wasser-Energiedosis**“ kalibriert, teilweise auch frei Luft zur Anzeige der „**Luft-Kerma**“.



## QS-Kontrollen



## Allgemeine Dosimetrie

Umrechnung der Anzeige M in die Energiedosis D anhand von Kalibrierfaktoren N:

- Messgrösse
- Zusammenhang zwischen Anzeige und Messgrösse
- messtechnische Einflussfaktoren
  - Beeinflussung des Strahlenfeldes
  - Beeinflussung der Anzeige
- Gültigkeit der Kalibrierfaktoren N
  - Strahlenqualität
  - Expositionsbedingungen
- Räumlicher Bezugspunkt
- Bezugsmasse



## Eichung von Dosimetern

**Das Eichen** ist eine Amtshandlung und beinhaltet die von einer Eichbehörde nach gesetzlichen Vorschriften vorzunehmende Prüfung von Messgeräten. Durch diese Prüfung wird festgestellt, ob das Messgerät den Anforderungen an seine Beschaffenheit und messtechnischen Eigenschaften genügt, insbesondere ob die Fehlergrenzen eingehalten werden.

In der Schweiz ist dafür das Eidgenössische Amt für Messwesen (**EAM**) in Wabern bei Bern zuständig. Das Durchführen von Eichungen kann an akkreditierte Institute delegiert werden.

In der Medizin besteht die Eichpflicht im speziellen für alle **Therapiedosimeter**.

Die Gültigkeitsdauer einer Eichung für Eichpflichtige Dosimeter ist beschränkt.





# **Dosimetrische Äquivalenz**

## **Dosisumrechnungen**

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

- Dosimetrische Äquivalenz
- unter speziellen Strahlenfeldbedingungen
  - das Sekundärelektronengleichgewicht
  - die Bragg-Gray-Bedingung



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

Bei der Bestimmung der Energiedosis  $D$  mit der Sondenmethode unterscheidet sich in der Regel das Sondenmaterial vom interessierenden Referenzmedium.

Die Resultate der Messung können nur dann ohne Einschränkung auf andere Medien (Materialien) übertragen werden, wenn diese in ihrer Wirkung auf das Strahlenbündel (Schwächung, Streuung, Stoss- und Strahlungsbremmung) und der Energieabsorption an jedem Punkt des bestrahlten Materials identisch sind.

Bei der Anwendung der Sondenmethode darf das zu untersuchende Strahlenfeld im Idealfall nicht durch die Sonde verändert werden. Das Sondenmaterial (Messsystem) muss hierzu möglichst äquivalent zum Referenzmedium sein.



## Dosimetrische Äquivalenz

### Photonenstrahlung

Für Photonenstrahlung ist diese Äquivalenz nur dann streng erfüllt, wenn in jedem Punkt des Sondenmaterials und dessen Umhüllung die **Wirkungsquerschnitte** für die Wechselwirkungsprozesse (Photo-, Comptoneffekt, Paarbildung) und deren Energie- und Dichteabhängigkeit mit denjenigen des interessierenden Referenzmediums übereinstimmen.

**Der Massenenergietransmissionskoeffizient des Sondenmaterials und des Mediums müssen identisch sein.**

Im weitem muss die Zahl der erzeugten Sekundärelektronen pro Massenelement, deren Energie- und Richtungsverteilung wie auch das totale Bremsvermögen für diese Elektronen überall übereinstimmen.



# Photonen-Wechselwirkungen

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 $1/E$	$\gamma$ , $e^-$
klass. Streuung	$Z^{2.5}/A$	$1/E^2$	$\gamma$
Paarbildung	$Z^2/A$	$\log E_\gamma$ ( $E_\gamma > 1022 \text{ keV}$ )	$e^-$ , $e^+$
Kernphotoeffekt	Riesenresonanz	$E_\gamma > E_{\text{schwelle}}$	n, p, (Spaltung), $\gamma$

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

## Dosimetrische Äquivalenz

### Elektronenstrahlung

Für Elektronenstrahlungen müssen neben dem die Energiedosis bestimmenden **Stossbremsvermögen**, das **Strahlungsbremsvermögen** wie auch das **Streuvermögen** in den verschiedenen Materialien (Sondenmaterial, Referenzmedium) für alle Elektronenenergien übereinstimmen (Elektronenspektrum) .



## Massenstossbremsvermögen $S_{\text{col}}$

$$S_{\text{col}} = \left( \frac{dE}{dx} \right)_{\text{col}} \propto \rho \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{v^2} \propto \rho \cdot \frac{m_e}{E}$$

## Strahlungsbremsvermögen $S_{\text{rad}}$

$$S_{\text{rad}} = \left( \frac{dE}{dx} \right)_{\text{rad}} \propto \rho \cdot \left( \frac{e}{m} \right)^2 \cdot Z^2 \cdot E$$




## Dosimetrische Äquivalenz

Die Äquivalenzforderung lässt sich quantitativ durch die **Absorptionskoeffizienten der Photonenstrahlung** und durch das **Stossbremsvermögen der Elektronenstrahlungen** mathematisch beschreiben. Dabei haben alle Wechselwirkungskoeffizienten  $k$  in erster Näherung die Form:

$$k = \rho \cdot \frac{Z^n}{A} \cdot f(E)$$

Dominierende Wechselwirkung	Strahlungsqualität	Exponent $n$
Photoeffekt	weiche Photonenstrahlung	$\approx 4$
Comptoneffekt	harte Photonenstrahlung	1
Paarbildung	ultraharte Photonenstrahlung	2
Stoßbremsung	schnelle Elektronen, Photonen	1
Strahlungsbremsung	schnelle Elektronen, ultraharte Photonen	2
Elektronenstreuung	schnelle Elektronen, ultraharte Photonen	2

 Zuordnung von dominierender Wechselwirkung und Wechselwirkungsexponent  $n$  für Photonen- und Elektronenstrahlungen.



## Dosimetrische Äquivalenz

Für zwei monoatomare (reine) Substanzen a und b gilt die globale dosimetrische Äquivalenz, wenn alle ihre Wechselwirkungskoeffizienten übereinstimmen, d.h. wenn für alle n gilt:

$$\left[ \rho \cdot \frac{Z^n}{A} \cdot f(E) \right]_a = \left[ \rho \cdot \frac{Z^n}{A} \cdot f(E) \right]_b$$

Für chemische Verbindungen oder Stoffgemischen als Ersatzsubstanzen müssen für  $Z^n/A$  die Werte der atomaren Komponenten wie folgt eingesetzt werden:

$$\left( \frac{Z^n}{A} \right)_{\text{eff}} = \sum_i p_i \cdot \frac{Z_i^n}{A_i}$$

Hierbei steht  $p_i$  für die relativen Massenanteile der verschiedenen Atomkomponenten i



## Dosimetrische Äquivalenz

-Die Äquivalenzforderung lässt sich somit wie folgt beschreiben:

$$\left[ \rho \cdot f(E) \cdot \sum_i p_i \cdot \frac{Z_i^n}{A_i} \right]_a = \left[ \rho \cdot f(E) \cdot \sum_i p_i \cdot \frac{Z_i^n}{A_i} \right]_b$$

-Diese Gleichung lässt sich durch Kürzung der  $f(E)$ -Faktoren vereinfachen:

$$\left[ \rho \cdot \sum_i p_i \cdot \frac{Z_i^n}{A_i} \right]_a = \left[ \rho \cdot \sum_i p_i \cdot \frac{Z_i^n}{A_i} \right]_b$$

Substanz	Dichte $\rho(\text{g/cm}^3)$	$(Z^n/A)_{\text{eff}}$		
		n = 1	n = 2	n = 4
Wasser	1.0	0.555	3.66	227
Luft*	0.001293	0.499	3.67	223
Acryl(Plexi)glas, PMMA	1.18	0.539	3.16	147
Polystyrol	1.06	0.538	2.84	99.6
Polyäthylen	0.92	0.570	2.71	92.5
Paraffin	0.88	0.573	2.70	92.0
Kork	0.3	0.529	3.37	175.4
Muskel	1.05	0.549	3.60	230
Lunge	0.3	0.557	3.67	227.7
Fett	0.92	0.558	2.87	111.0
Knochen	1.5	0.530	4.63	847

Dichten und effektive Ordnungszahlabhängigkeiten einiger wichtiger dosimetrischer Substanzen (nach [DIN 6809-1] und [Jaeger/Hübner]). \*: Unter Normalbedingungen.





# **Medizinphysik II**

## **Dosimetrie Grundlagen**