



# Strahlen und deren Eigenschaften

Dr. R. Mini

# Strahlung

**Unter Strahlung versteht man einen nicht an Medien gebundenen Energie- (und Massen -) Transport durch Strahlungsquanten (oder Teilchen)**



## Strahlenquellen

Orte, Körper oder Maschinen von welchen Strahlenteilchen ausgesendet werden

## Punktförmig isotrope Strahlenquellen

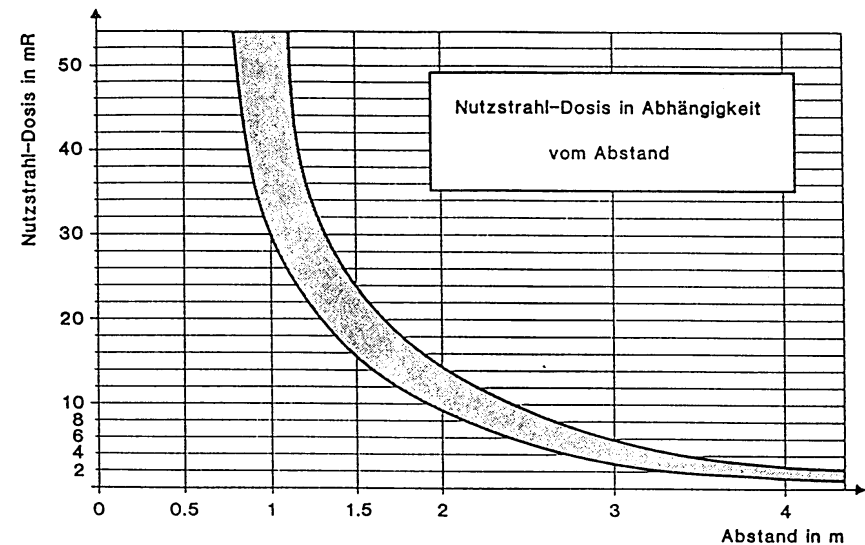
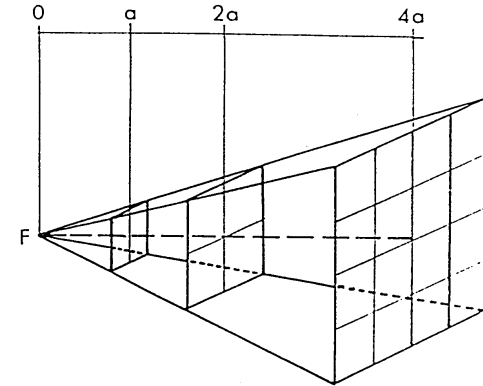
Quellen kleinster Dimension, welche Strahlenteilchen gleichmässig in alle Raumrichtungen aussenden



# Strahlenquellen

## Abstandsquadrat-Gesetz

Breitet sich die Strahlung einer **punkt-förmigen** Quelle **geradlinig isotrop** im Raume aus, so nimmt die **Strahlungs-dichte** mit dem **Quadrat des Abstandes** ab



## 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

(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



## Photonenstrahlung

Die Strahlungsquanten einer Photonenstrahlung sind Photonen (Lichtteilchen) die elektromagnetische Energie transportieren.

Photonenstrahlungen umfassen alle elektromagnetische Strahlungen von der Radiowelle, über die Infrarot-, Licht- und Ultraviolett-Strahlung bis hin zur Röntgen- und Gammastrahlungen



# Medizinphysik I: Strahlen und deren Eigenschaften

Bezeichnung der Welle	Frequenz (Hz)	Wellenlänge <sup>(1)</sup>	Energie (eV) <sup>(1)</sup>
Techn. Wechselströme	$50 - 3 \cdot 10^3$	6000 - 1000 km	$2 \cdot 10^{-13} - 10^{-11}$
Telegrafiewellen	$3 \cdot 10^2 - 3 \cdot 10^3$	1000 - 100 km	$10^{-12} - 10^{-11}$
Langwellen <sup>(3)</sup>	$3 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$	10 - 1 km	$10^{-10} - 10^{-9}$
Mittelwellen <sup>(3)</sup>	$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6$	1000 - 100 m	$10^{-9} - 10^{-8}$
Kurzwellen <sup>(3)</sup>	$3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$	100 - 10 m	$10^{-8} - 10^{-7}$
Ultrakurzwellen <sup>(3)</sup>	$3 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^8$	10 - 1 m	$10^{-7} - 10^{-6}$
Dezimeterwellen <sup>(4)</sup>	$3 \cdot 10^8 - 3 \cdot 10^9$	1 - 0.1 m	$10^{-6} - 10^{-5}$
Zentimeterwellen	$3 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{10}$	10 - 1 cm	$10^{-5} - 10^{-4}$
Millimeterwellen	$3 \cdot 10^{10} - 3 \cdot 10^{11}$	10 - 1 mm	$10^{-4} - 10^{-3}$
Wärmestrahlung <sup>(5)</sup>	$2 \cdot 10^{11} - 4 \cdot 10^{14}$	1.5 mm - 800 nm	$10^{-3} - 2$
Licht (sichtbar)	$4 \cdot 10^{14} - 7 \cdot 10^{14}$	800 - 400 nm	2 - 3.1
rot	$4.3 \cdot 10^{14}$	700 nm	1.8
violett	$7.5 \cdot 10^{14}$	400 nm	3.1
Ultraviolett	$7 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{16}$	400 - 3 nm	2.9 - 40
UVA	$7 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{15}$	400 - 320 nm	2.9 - 3.7
UVB	$(0.9 - 1.1) \cdot 10^{15}$	320 - 280 nm	3.7 - 4.5
UVC <sup>(2)</sup>	$(1.1 - 1.5) \cdot 10^{15}$	280 - 200 nm	4.5 - 6.2
Röntgen-, Gammastrl.	$1 \cdot 10^{15} - 5 \cdot 10^{24}$	$3 \cdot 10^{-8} - 6 \cdot 10^{-17}$ m	$4 - 2 \cdot 10^{10}$
extrem weich	$1 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{-8} - 3 \cdot 10^{-10}$ m	$4 - 4 \cdot 10^3$
weich	$1 \cdot 10^{18} - 5 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{-10} - 6 \cdot 10^{-11}$ m	$4 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4$
mittel	$5 \cdot 10^{18} - 3 \cdot 10^{19}$	$6 \cdot 10^{-11} - 1 \cdot 10^{-11}$ m	$2 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^5$
hart	$3 \cdot 10^{19} - 1 \cdot 10^{20}$	$1 \cdot 10^{-11} - 3 \cdot 10^{-12}$ m	$1 \cdot 10^5 - 4 \cdot 10^5$
extrem hart	$1 \cdot 10^{20} - 5 \cdot 10^{20}$	$3 \cdot 10^{-12} - 6 \cdot 10^{-17}$ m	$4 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^{10}$



## Benennung von Photonenstrahlungen je nach Entstehungsart

- Bremsstrahlung
- Charakteristische Strahlung
- Röntgenstrahlung
- X-Strahlung
- Gammastrahlung





## Bremsstrahlung

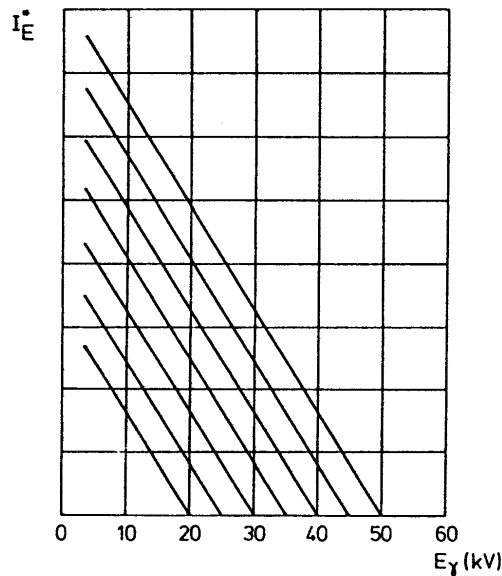
Bremsstrahlung ist die el.-mag. Strahlung, die durch Abbremsung elektrisch geladener Teilchen im Coulombfeld von Atomkernen entsteht.

Die Bremsstrahlung stellt stets ein **heterogenes** Photonenspektrum dar

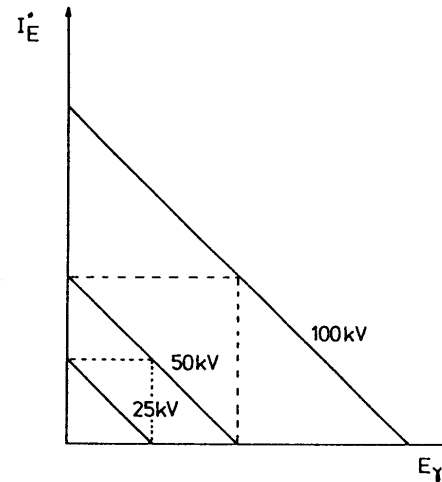


# Intensitätsspektrum der Röntgenbremsstrahlung

$$I^*(E_\gamma) = b \cdot (E_g - E_\gamma) \text{ mit der Randbedingung } E_g \geq E_\gamma$$



(a)

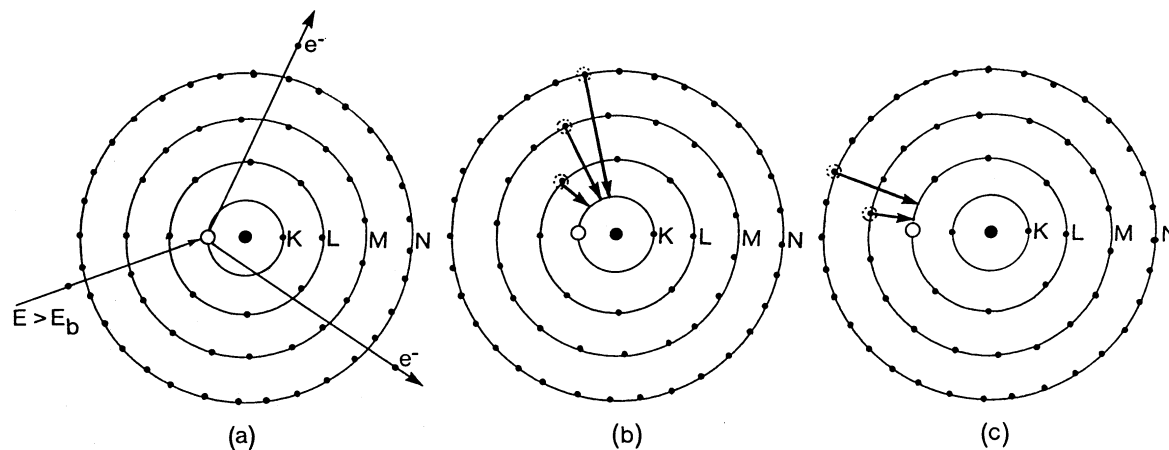


(b)

(a): Schematische Darstellung der Veränderung der Bremsstrahlungs-Intensitätsspektren mit der Beschleunigungsspannung an Röntgenröhren (alle Spektren ohne Filterung), (b): Ver- vierfachung bzw. Viertelung der Gesamtintensität im Röntgenspektrum bei verdoppelter bzw. halbierter Röhrenspannung.

## Charakteristische Strahlung

Charakteristische Strahlung entsteht beim Übergang von Elektronen von einer äusseren auf eine innere Elektronenschale einer Atomhülle.



Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung am Beispiel eines schweren Atoms.  
(a): Ionisierung des Atoms in einer der inneren Schalen (hier K-Schale) durch Elektronenstoß, falls die Bewegungsenergie des einlaufenden Elektrons größer als die K-Bindungsenergie ist.  
(b): Verschiedene Möglichkeiten zum Auffüllen des K-Schalen-Loches durch Elektronen äusserer Schalen. Die beim Auffüllen der K-Schale emittierte Strahlung wird als K-Serie bezeichnet.  
(c): Auffüllen eines Loches in der L-Schale und Emission der Bindungsenergie Differenz in Form von L-Serien-Strahlung

## Charakteristische Strahlung (Wolfram-Anode)

$$I \propto (E_{\text{kin,e}} - E_B)^n$$

$$n = \text{ca. } 2$$

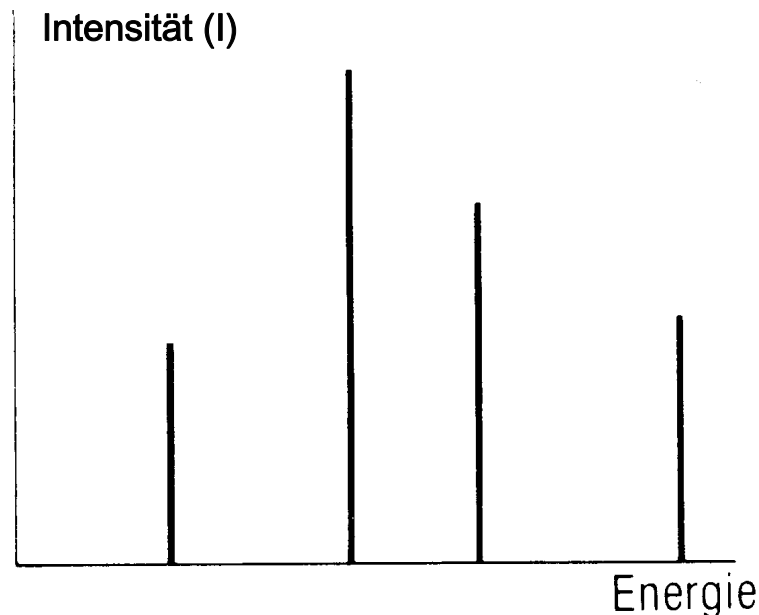
Serie	Linie	Übergang	Energie (keV)	Rel. Intensität (%)
<b>K-Serie</b>	<b>K-Bindungsenergie:</b>	<b><math>E_K</math>: 69.523 keV</b>		
Linien:	$K\beta_2^1$	$N_{III} \rightarrow K$	69.100	8
	$K\beta_2^2$	$N_{II} \rightarrow K$	69.005	
	$K\beta_1$	$M_{III} \rightarrow K$	67.245	22
	$K\beta_3$	$N_{III} \rightarrow K$	66.951	11
	$K\alpha_1$	$L_{III} \rightarrow K$	59.318	100
	$K\alpha_2$	$L_{II} \rightarrow K$	57.981	57
<b>L-Serie</b>	<b>L-Bindungsenergien:</b>	<b><math>E_{LI}</math>: 12.099 keV, <math>E_{LII}</math>: 11.542 keV, <math>E_{LIII}</math>: 10.205 keV</b>		
Linien:	$L\gamma_1$	$N_{IV} \rightarrow L_{II}$	11.287	9
$L\beta_2$	$L\beta_2$	$N_V \rightarrow L_{III}$	9.962	22
$L\beta_i$	$L\beta_1$	$M_{IV} \rightarrow L_{II}$	9.673	52
$La_1$	$L\alpha_1$	$M_V \rightarrow L_{III}$	8.398	100
$La_2$	$L\alpha_2$	$M_{IV} \rightarrow L_{III}$	8.336	11
<b>M-Serie</b>	<b>M-Bindungsenergien:</b>	<b><math>E_{MI}</math>: 2.817 keV, <math>E_{MII}</math>: 2.572 keV, <math>E_{MIII}</math>: 2.278 keV, <math>E_{MIV}</math>: 1.869 keV, <math>E_{MV}</math>: 1.807 keV</b>		
Linien:	$M\gamma$	$N_V \rightarrow M_{III}$	2.035	
	$M\beta$	$N_{VI} \rightarrow M_{IV}$	1.835	
	$M\alpha_1$	$N_{VII} \rightarrow M_V$	1.775	
	$M\alpha_2$	$N_{VI} \rightarrow M_V$	1.773	

Energien der wichtigsten Elektronenübergänge im Wolframatom ( $Z = 74$ ). Neben der historischen Bezeichnung (nach Siegbahn) ist der Elektronenübergang und die Bindungsenergiedifferenz der beteiligten Niveaus angegeben. Die relativen Intensitäten beziehen sich auf den jeweils stärksten Übergang der Serie. Nicht aufgeführte Übergänge sind verboten oder stark behindert.



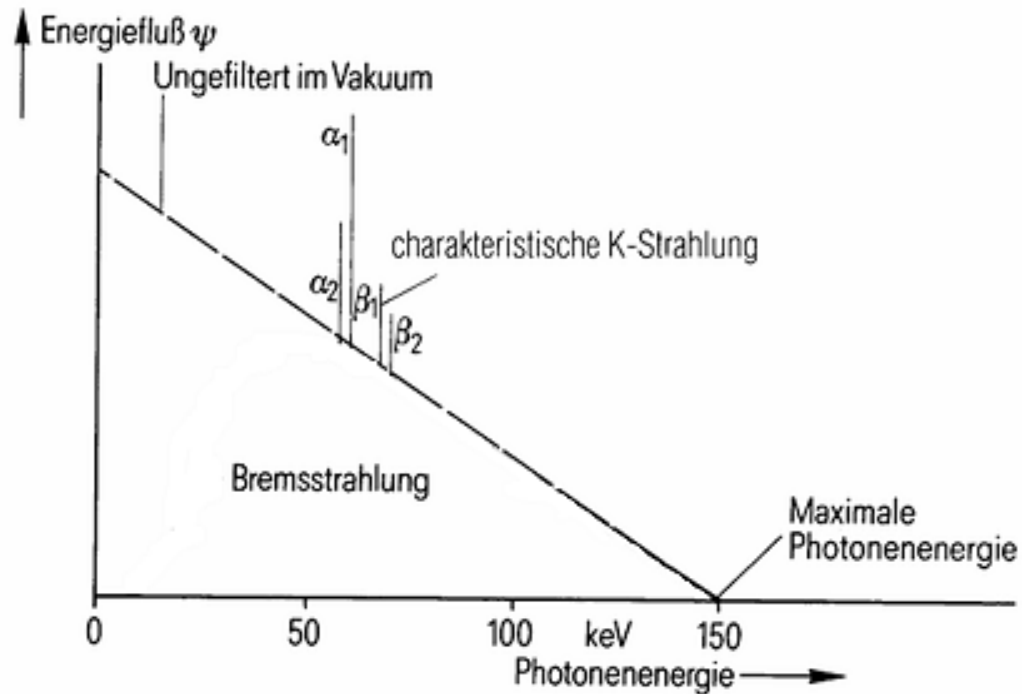
## Charakteristische Strahlung

Das Spektrum der charakteristischen Strahlung ist ein Linien-spektrum mit Photonenenergien, die für ein bestimmtes Element charakteristisch sind. Die charakteristische Strahlung, die bei einem Elektronenübergang in die K-, L-, M-... -Schale entsteht, wird K-, L-, M-...-Strahlung genannt.



## Röntgenstrahlung

Röntgenstrahlung, oft auch X-Strahlung genannt, setzt sich aus der Bremsstrahlung und der charakteristischen Strahlung zusammen.



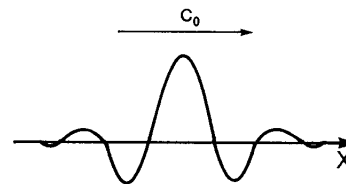
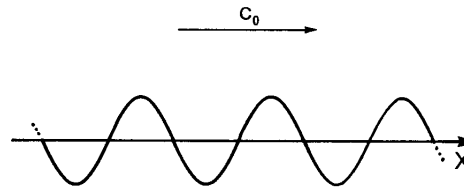
## Gammastrahlung

Gammastrahlungen sind Photonenstrahlungen, die von angeregten Atomkernen ausgesandt werden, wenn sie in einen Zustand kleinerer Energie übergehen.

Das Spektrum der Gammastrahlung ist ein Linienspektrum mit Photonenenergien, die für das betreffende Nuklid charakteristisch sind.



## Photonenstrahlung als Wellenpaket



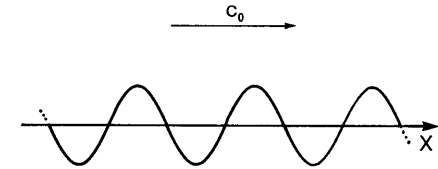


# Beschreibung der Photonenstrahlung

$T$  : Schwingungsdauer

$\nu$  : Frequenz =  $1/T$

$\lambda$  : Wellenlänge



$c$  : Lichtgeschwindigkeit  $\rightarrow c = \lambda \cdot \nu$

( $c_{\text{vak}} = 2,997 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ )

-----

$h$  : Planksches Wirkungsquant

( $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ )

$E_{\text{ph}}$  : Energie  $\rightarrow E_{\text{ph}} = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda$

$p_{\text{ph}}$  : Impuls  $\rightarrow p_{\text{ph}} = E_{\text{ph}} / c = h / \lambda = m_{\text{ph}} \cdot c$

$m_{\text{ph}}$  : rel. Photonenmasse  $\rightarrow m_{\text{ph}} = h \cdot \nu / c^2$

## Teilchenstrahlung

Ist Strahlung auch mit einem Materietransport (Ruhemasse) verbunden, bezeichnet man diese als **Teilchen- oder Korpuskularstrahlung**.

Diese kann aus **elektrisch geladenen oder ungeladenen Teilchen** bestehen, wobei die Strahlungsenergie vor allem in Form von kinetischer Energie der Teilchen transportiert wird.

Zusätzlich zu dieser Bewegungsenergie enthalten solche Strahlungsfelder immer auch die Ruheenergien der transportierten Teilchen.



## Teilchenenergie

$$E_{\text{tot}} = m \cdot c^2 = E_o + E_{\text{kin}}$$

$$m = m_o / (1 - v^2/c^2)^{1/2} = E_{\text{tot}} / c^2$$

$$p = m \cdot v$$

$$\begin{aligned} \rightarrow E_{\text{kin}} &= E_{\text{tot}} - E_o = m \cdot c^2 - m_o \cdot c^2 \\ &= m_o \cdot c^2 (m/m_o - 1) \\ &= m_o \cdot c^2 ((1 - v^2/c^2)^{-1/2} - 1) \end{aligned}$$

für  $v \ll c$  gilt:

$$E_{\text{kin}} = 1/2 \cdot m_o v^2 = p^2 / 2m_o \quad \text{mit}$$

$$p = m_o \cdot v$$

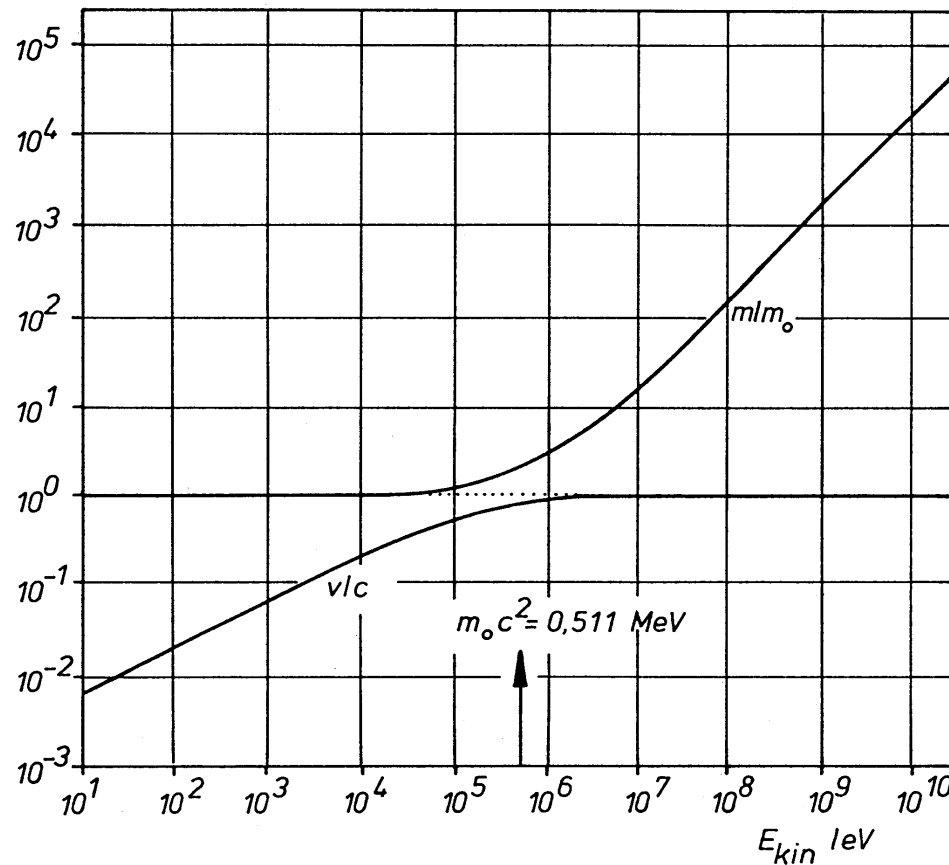


Teilchen	Ruhemasse $m_0$ (kg)	Ruheenergie $E_0$ (J)	$E_0$ (MeV)*
Elektron ( $e^-$ )	$0.9109534 \cdot 10^{-30}$	$8.1868 \cdot 10^{-14}$	0.5110
Neutrino ( $\nu$ )	$\approx 0$	$\approx 0$	$< 2 \cdot 10^{-5}$
Myon ( $\mu^\pm$ )	$0.188368 \cdot 10^{-27}$	$0.1693 \cdot 10^{-10}$	105.6594
Pion ( $\pi^\pm$ )	$0.24878 \cdot 10^{-27}$	$0.2236 \cdot 10^{-10}$	139.5673
Pion ( $\pi^0$ )	$0.24055 \cdot 10^{-27}$	$0.2162 \cdot 10^{-10}$	134.9630
Proton (p)	$1.6726485 \cdot 10^{-27}$	$1.5033 \cdot 10^{-10}$	938.2796
Neutron (n)	$1.6749543 \cdot 10^{-27}$	$1.5054 \cdot 10^{-10}$	939.5713
Alpha ( $\alpha$ )	$6.644 \cdot 10^{-27}$	$5.9713 \cdot 10^{-10}$	3727.2

: Ruhemassen und Ruheenergien einiger wichtiger Teilchen (nach Daten aus [Kohlrausch], Bd. III, 1986). (\*): Umrechnung der Energieeinheiten mit dem Faktor  $1\text{eV} = 1.6022 \cdot 10^{-19}\text{J}$ . Daten schwererer Teilchen befinden sich in Tab. (6.1) in Abschnitt 6.

Bewegungsenergie (eV)	$v/c$	$m/m_0$
$25 \cdot 10^{-3}$ (*)	0.000'313	1.000'0000'5
$10^0$	0.002	1.000'000'2
$10^1$	0.006	1.000'02
$10^2$	0.020	1.000'2
$10^3$	0.062	1.002
$10^4$	0.195	1.02
$10^5$	0.548	1.20
$10^6$	0.941	2.96
$10^7$	0.998'8	20.6
$10^8$	0.999'987	197.
$10^9$	0.999'999'87	1'958.
$10^{10}$	0.999'999'998'7	19'600.

Änderungen des Geschwindigkeitsverhältnisses  $v/c$  und des Quotienten aus relativistischer Gesamt- und Ruhemasse für Elektronen als Funktion der Bewegungsenergie. Berechnet mit den Gln. (1.7, 1.8). (\*): Größenordnung der thermischen Bewegungsenergie eines Gasmoleküls bei 20°C (kT).



: Verlauf der relativen Geschwindigkeit und der relativen Masse von Elektronen als Funktion ihrer Bewegungsenergie (berechnet nach Gl. 1.7 sowie den Daten aus Tabelle 1.2). Aufgetragen sind die Verhältnisse der Gesamtmasse zur Ruhemasse und der Elektronengeschwindigkeit zur Vakuumlichtgeschwindigkeit über der Bewegungsenergie des Elektrons. Eine deutliche Zunahme des Massenverhältnisses findet erst ab etwa 100 keV statt. Bei 10 MeV Elektronenbewegungsenergie ist praktisch Lichtgeschwindigkeit erreicht. Ab dort bleibt die Elektronengeschwindigkeit konstant.

## Dualismus Teilchen-Welle

### Materiewelle – De-Broglie-Wellenlänge

$$p_e = m_e \cdot v = h / \lambda_e \quad \rightarrow \quad \lambda_e = h / (m_e \cdot v)$$



## **Zusammenfassung:**

- **Die Strahlungsphysik unterscheidet Teilchen- und Wellenstrahlung anhand der Ruhemasse der Strahlungsquanten.**
- **Photonen können als elektromagnetische Energiepakete verstanden werden. Sie haben keine Ruhemasse und bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit.**
- **Im Rahmen der Strahlungsphysik werden sie meistens durch Angabe ihrer Energie in der angepaßten atomphysikalischen Energieeinheit eV und deren Vielfachen charakterisiert.**
- **Korpuskeln haben eine endliche Ruhemasse. Sie bewegen sich deshalb immer langsamer als das Licht im Vakuum. Ihre relativistische Masse wächst mit der Geschwindigkeit.**
- **Energieangaben von Korpuskeln in der Strahlungsphysik beziehen sich in der Regel auf die Bewegungsenergie der Teilchen. In einigen Fällen wie bei der Paarvernichtung oder Paarerzeugung ist es günstiger, die relativistischen Größen Gesamtenergie und Ruheenergie zu verwenden.**





## Beschreibung von Strahlungen



## Phasenraum

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

In der Strahlentransporttheorie geht man gewöhnlich von der **Phasenraumdichte**  $n(r, v, t)$  oder  $n(r, E, \Omega, t)$  aus.

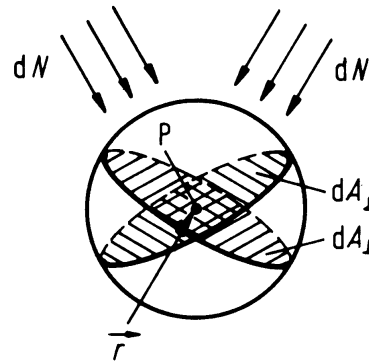
Zusammen mit Angaben zur Strahlenart enthält die Phasenraumdichte alle Informationen, die zur Beschreibung der Transportprozesse notwendig sind



## Strahlungsfeld

Unter einem Strahlungsfeld versteht man einen Bereich im Raum, der von Strahlenteilchen durchsetzt ist.

Ein Strahlungsfeld lässt sich vollständig beschreiben durch die Zahl  $N$  der in ihm enthaltenen Teilchen und deren Energie- und Richtungsverteilungen



## 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	$p_E(t, E, \Omega, \mathbf{r}) = \left. \begin{aligned} &= d^4N/(dt dE d\Omega dA_{\perp}) \\ &\varphi_{E,\Omega}(t, E, \Omega, \mathbf{r}) \end{aligned} \right\}$	$s^{-1}J^{-1}sr^{-1}m^{-2}$
spektrale Teilchenflußdichte	$\varphi_E(t, E, \mathbf{r}) = d^3N/(dt dE dA_{\perp})$	$s^{-1}J^{-1}m^{-2}$
spektrale, raumwinkelbezogene Teilchenfluenz	$\Phi_{E,\Omega}(E, \Omega, \mathbf{r}) = d^3N/(dE d\Omega dA_{\perp})$	$J^{-1}sr^{-1}m^{-2}$
spektrale Teilchenfluenz	$\Phi_E(E, \mathbf{r}) = d^2N/(dE dA_{\perp})$	$J^{-1}m^{-2}$
Teilchenradianz ( <i>particle radiance</i> ) oder raumwinkel- bezogene Teilchenflußdichte	$p(t, \Omega, \mathbf{r}) = \left. \begin{aligned} &= d^3N/(dt d\Omega dA_{\perp}) \\ &\varphi_{\Omega}(t, \Omega, \mathbf{r}) \end{aligned} \right\}$	$s^{-1}sr^{-1}m^{-2}$
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“.

## Einteilung von Strahlungen



## Einteilungen von Strahlungen

- Photonenstrahlungen
- Teilchenstrahlungen
  
- Ionisierende Strahlungen
- nicht ionisierende Strahlungen
  
- direkt ionisierende Strahlungen
- indirekt ionisierende Strahlungen



# Ionisierende/nicht ionisierende 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 (zBsp. Elektronen) ionisiert.







---

# Strahlen und deren Eigenschaften