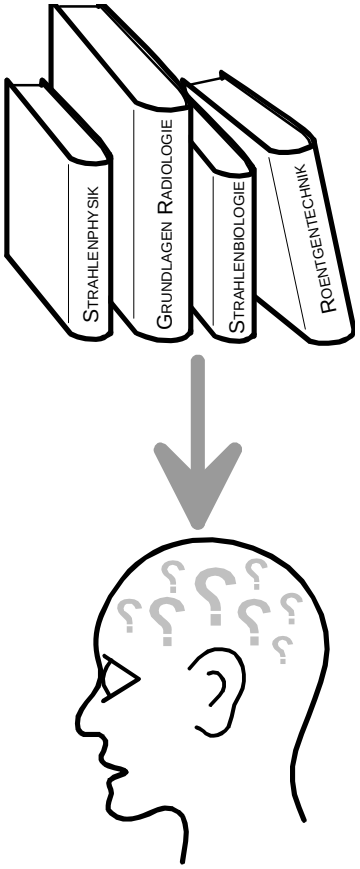
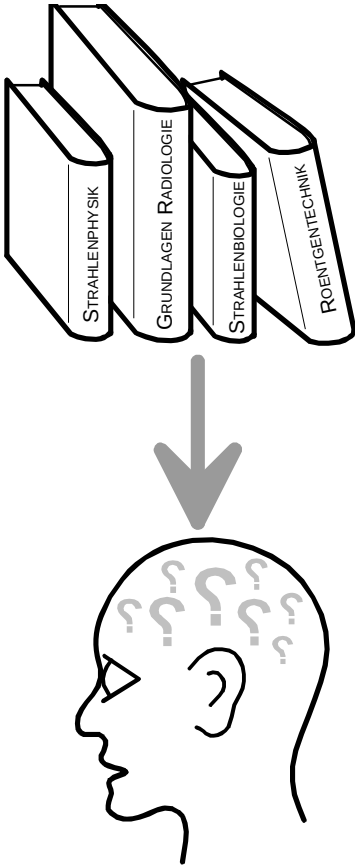
Teil B: Strahlenbiophysik (Teil B)



- Eigenschaften ionisierender Strahlung
- LET, Dosis und Dosisbegriffe
- Modellierung in der Strahlentherapie
- Modellierung in der Nuklearmedizin

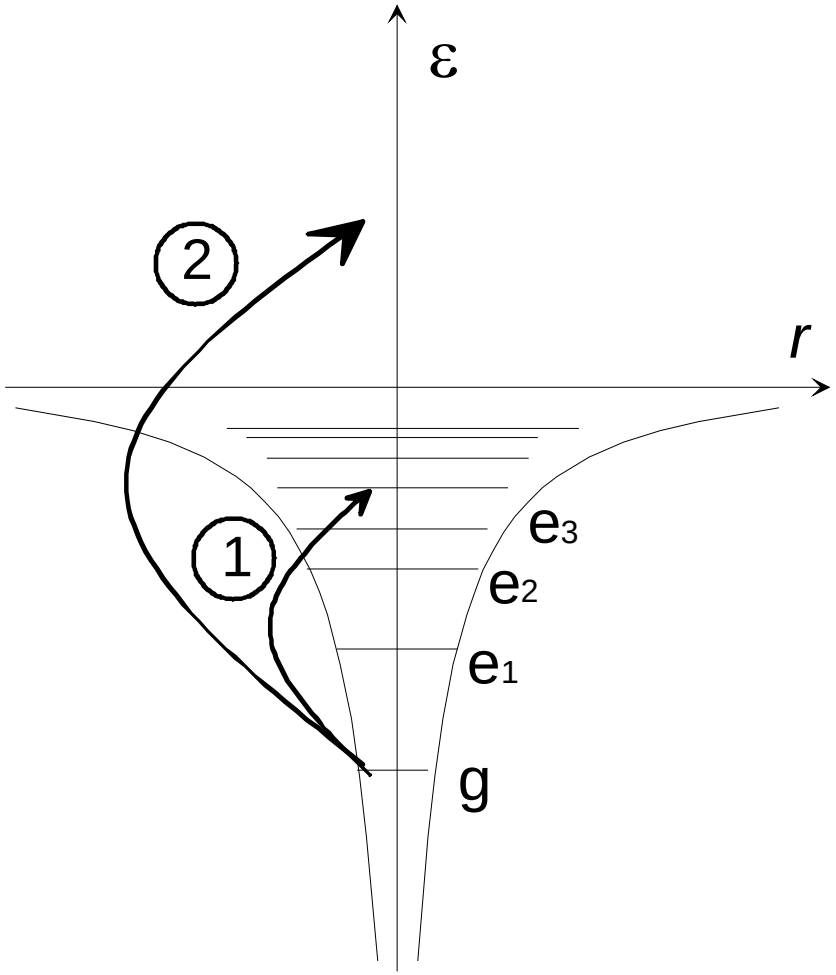
5. Eigenschaften ionisierender Strahlung



Inhalt

- Ionisation und Anregung
- Strahleneffekte im Wasser
- Energie von Photonenstrahlung und Fluenz
- Absorption von Photonen
- Absorption von Elektronen

Ionisation und Anregung



(1) Anregung

(2) Ionisation

Strahleneffekte im Wasser

$$H_2O \rightarrow H_2O^+ + e^-_{aq}$$

$$H_2O \longrightarrow OH^\bullet + H^\bullet$$

- Spaltung oder Ionisation von Wasser

$$H_2O^+ + H_2O \longrightarrow OH^\bullet + H_3O^+$$

$$OH^\bullet + OH^\bullet \longrightarrow H_2O_2$$

- Folgereaktionen: Radikalbildung

Energie von Photonenstrahlung und Fluenz

$$E_\gamma = \frac{hc}{\lambda}$$

Tab.1. Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums.

Wellenlängenbereich	Strahlung
m - dm	Radiowellen
cm	Radarwellen
mm - µm	Mikrowellen
µm – 780 nm	Infrarot
780 nm – 380 nm	sichtbares Licht
380 nm – 320 nm	UV A
320 nm – 280 nm	UV B
unter 280 nm	UV C
unter 100 nm	Röntgenstrahlung

Energie von Photonenstrahlung und Fluenz

$$E_\gamma = \frac{hc}{\lambda}$$

Wellenlängenbereich	Energie
Sichtbares Licht	1.5 – 3.3 eV
Röntgenstrahlung für Röntgenanalytik	5 – 20 keV
Röntgenstrahlung für med. Diagnostik	20 – 125 keV
Röntgenstrahlung für Hautbestrahlung	bis 300 keV
Gammastrahlung:	140 keV
^{99m}Tc	662 keV
^{137}Cs	1.2 MeV
^{60} Co	
Ultraharte Röntgenstrahlung für Krebs-Therapie	5 – 20 MeV

Photonenfluss und Fluenz

$$\phi = \frac{dN}{dA}$$

Fluss: (dN/dt) durch dA

→ Fluenz

Photonenfluss und Fluenz

$$\phi = \frac{dN}{dA}$$

$$\psi = E_\gamma \cdot \phi$$

Fluss: (*dN*/*dt*) durch *dA*

→ Fluenz

→ Energiefluenz

Photonenfluss und Fluenz

$$\phi = \frac{dN}{dA}$$

$$\psi = E_\gamma \cdot \phi$$

$$\psi_{\text{int}} = \int \phi(E) \cdot dE$$

Fluss: (*dN*/*dt*) durch *dA*

→ Fluenz

→ Energiefluenz

→ Integrale Energiefluenz

Absorption von Photonen

$$\frac{dN}{dz} = -\mu \cdot N$$

$$\frac{d\phi}{dz} = -\mu \cdot \phi$$

Beer-Lambertsches Gesetz, gilt für

- monoenergetische Strahlung (sonst Strahlaufhärtung)
- gebündelte Parallelstrahlung (sonst Streustrahlung!)
- oder bezüglich ungestreuten Photonen

Absorption von Photonen

$$N(z) = N(z=0) \cdot e^{-\mu z}$$

$$\phi(z) = \phi(z=0) \cdot e^{-\mu z}$$

Beer-Lambertsches Gesetz, gilt für

- monoenergetische Strahlung (sonst Strahlaufhärtung)
- gebündelte Parallelstrahlung (sonst Streustrahlung!)
- oder bezüglich ungestreuten Photonen

Absorption von Photonen

r > *p*

$$s(z+\Delta z) = s(z) - 1$$

r < *p*

$$s(z+\Delta z) = s(z)$$

Berechnung über MC-Verfahren

- Jedem Photon Zustandsvariabel *s* zuordnen
- Zufallszahl *r* im Intervall [0,1]
- Wenn *r* > *p* ist, so tritt eine Wechselwirkung ein

Absorption von Photonen

r > *p*

$$s(z+\Delta z) = s(z) - 1$$

r < *p*

$$s(z+\Delta z) = s(z)$$

$$p = e^{-\mu \cdot \Delta z}$$

Berechnung über MC-Verfahren

- Jedem Photon Zustandsvariabel *s* zuordnen
- Zufallszahl *r* im Intervall [0,1]
- Wenn *r* > *p* ist, so tritt eine Wechselwirkung ein

Absorption von Photonen

r > *p*

$$s(z+\Delta z) = s(z) - 1$$

r < *p*

$$s(z+\Delta z) = s(z)$$

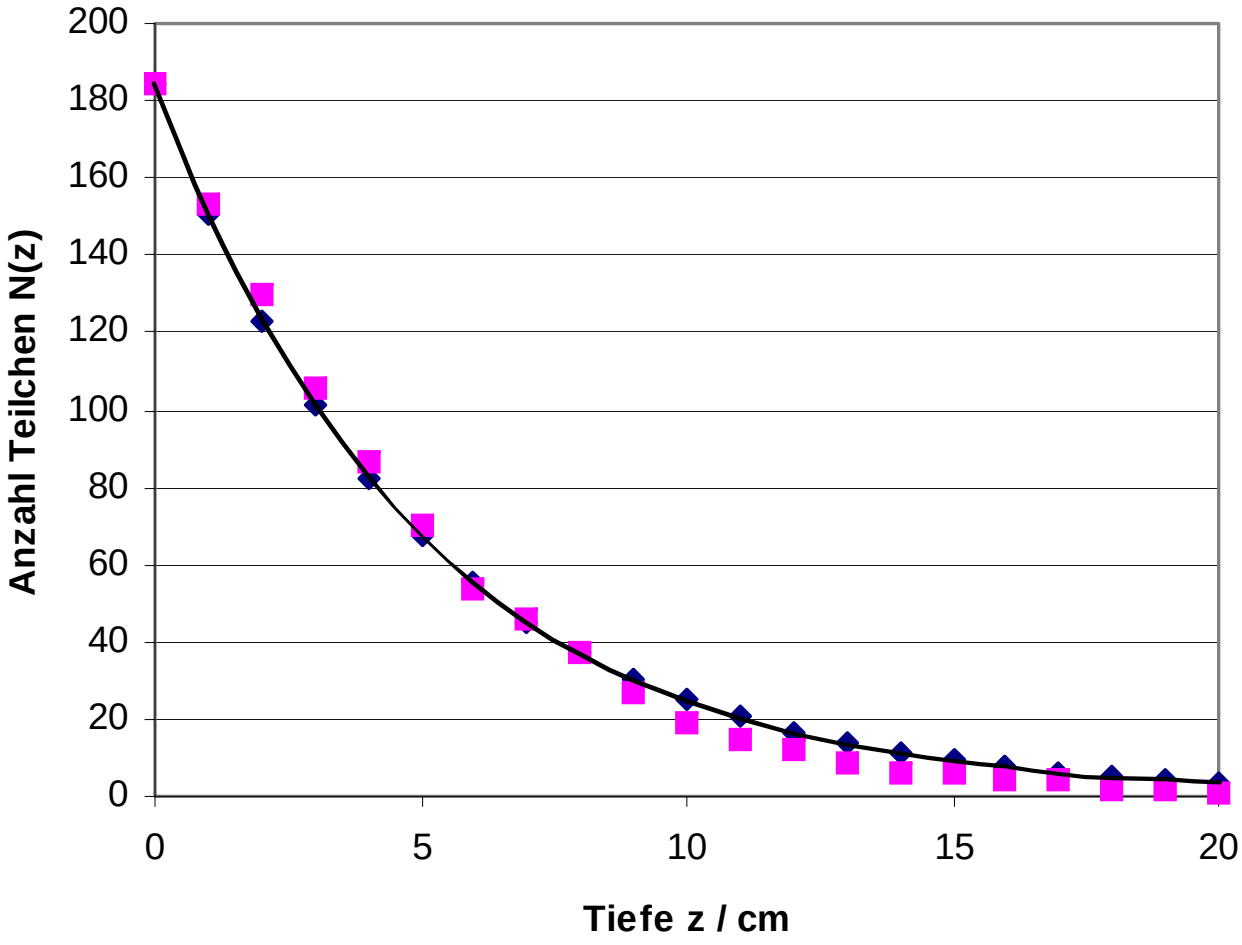
$$p = e^{-\mu \cdot \Delta z}$$

$$\boxed{\Delta z = -\frac{\ln(p)}{\mu}}$$

Berechnung über MC-Verfahren

- Jedem Photon Zustandsvariabel *s* zuordnen
- Zufallszahl *r* im Intervall [0,1]
- Wenn *r* > *p* ist, so tritt eine Wechselwirkung ein

Absorption von Photonen



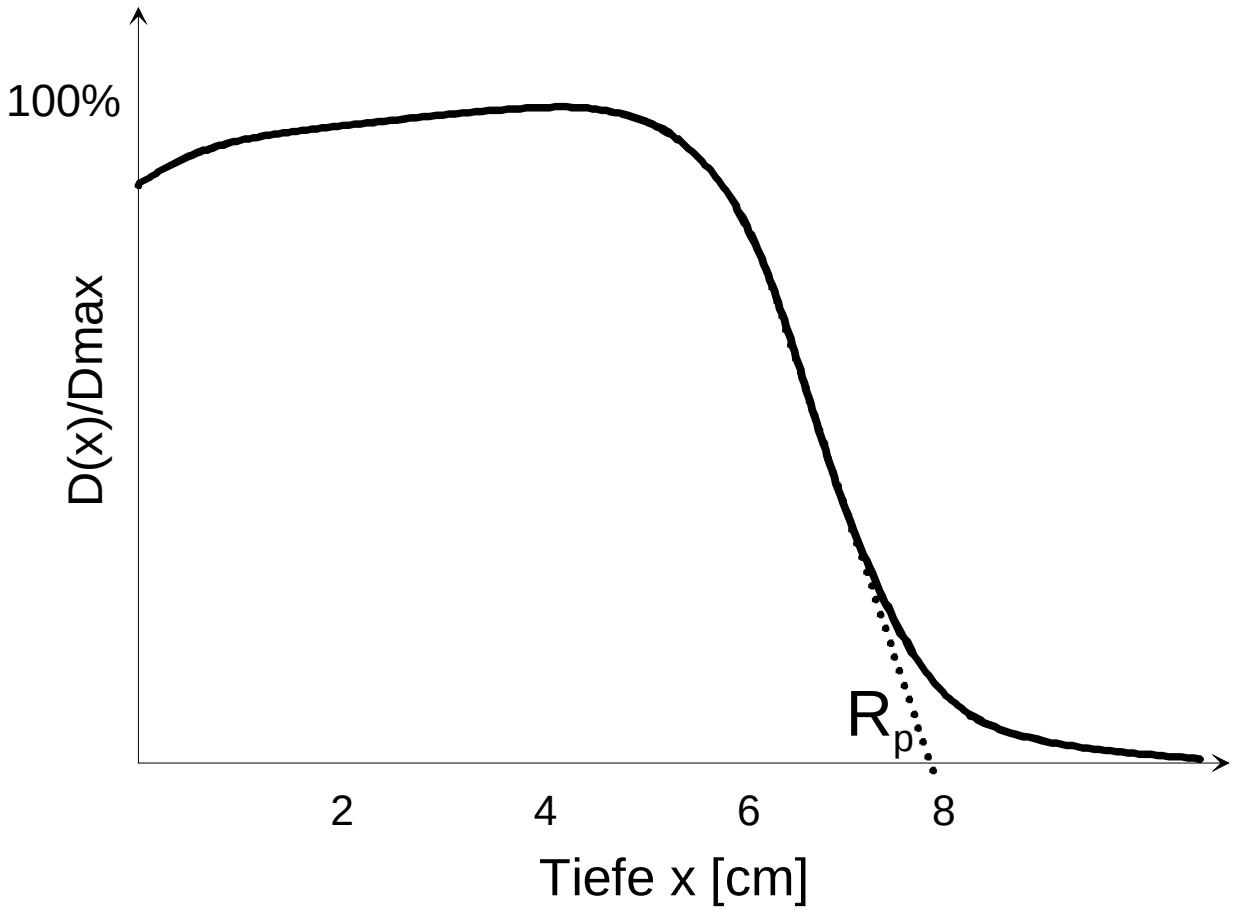
Absorption Elektronen

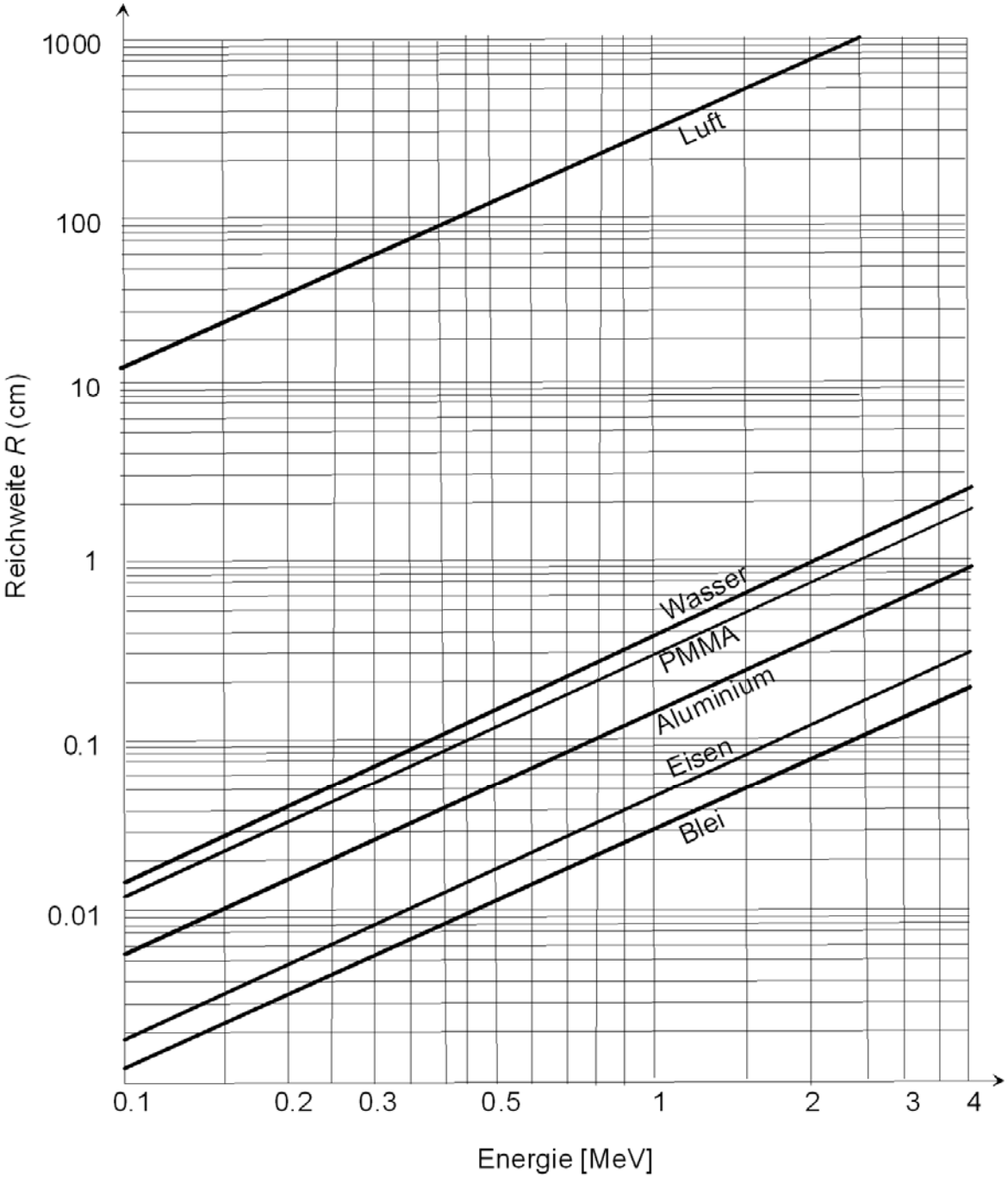
Bremsvermögen (stopping power) *S*. : pro Weglängenelement *ds* auf die Materie übertragene Energie *dE*.

zwei Anteile:Kollisionsanteil und Bremsstrahlungsanteil

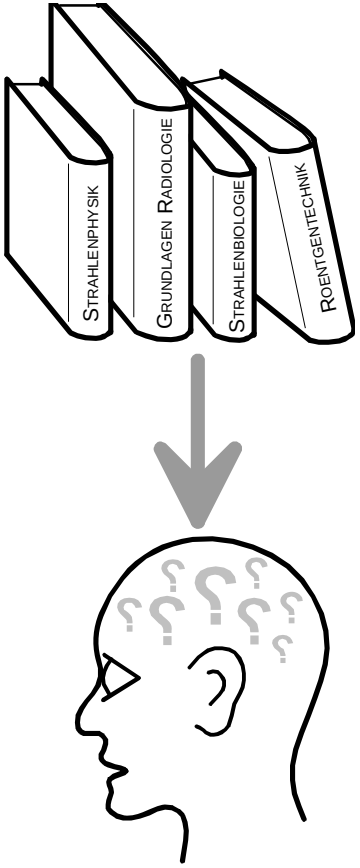
$$S = \left[\frac{dE}{ds}\right]_{col} + \left[\frac{dE}{ds}\right]_{rad} = S_{col} + S_{rad}$$

Absorption Elektronen




1000
100
10
1
0.1
0.01
Reichweite R (cm)
Luft
Wasser
PMMA
Aluminium
Eisen
Blei
0.1
0.2
0.3
0.5
1
2
3
4
Energie [MeV]

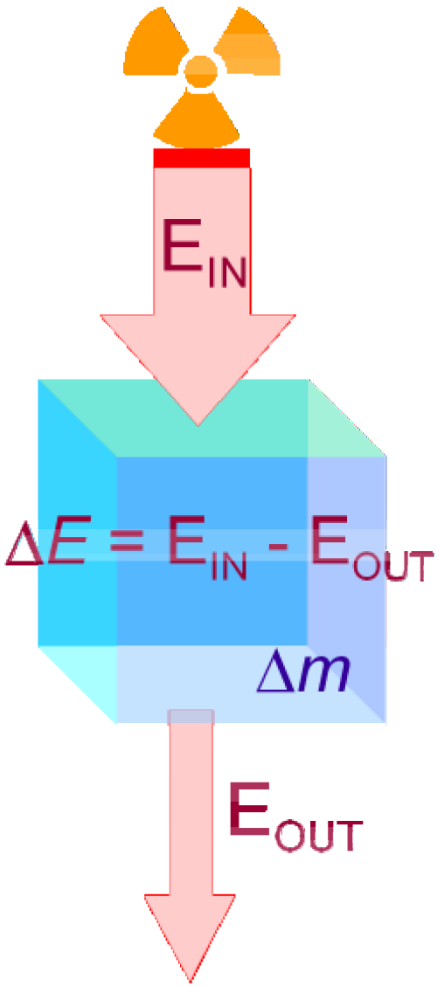
6. LET, Dosis und Dosisbegriffe



Inhalt

- Absorbierte Dosis und Kerma
- Linearer Energietransfer LET

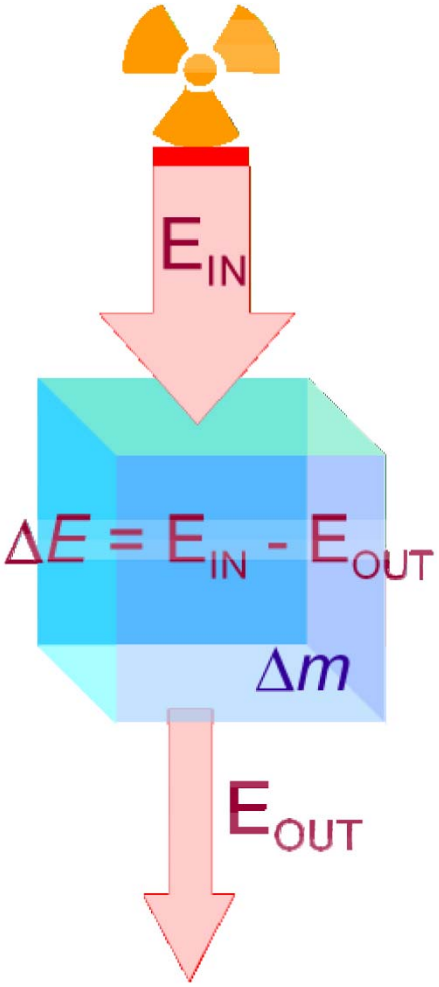
absorbierte Dosis



$$D = \frac{d\bar{E}}{dm}$$

$$D = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\bar{E}}{dV}$$

KERMA



$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

$$E_{tr} = (R_{in})_u - (R_{out})_u^{nonr} + \sum Q$$

KERMA, Energiefluenz und Dosis

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

$$K = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot E_{tr} \cdot \phi = \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right) \cdot E \cdot \phi = \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right) \cdot \psi$$

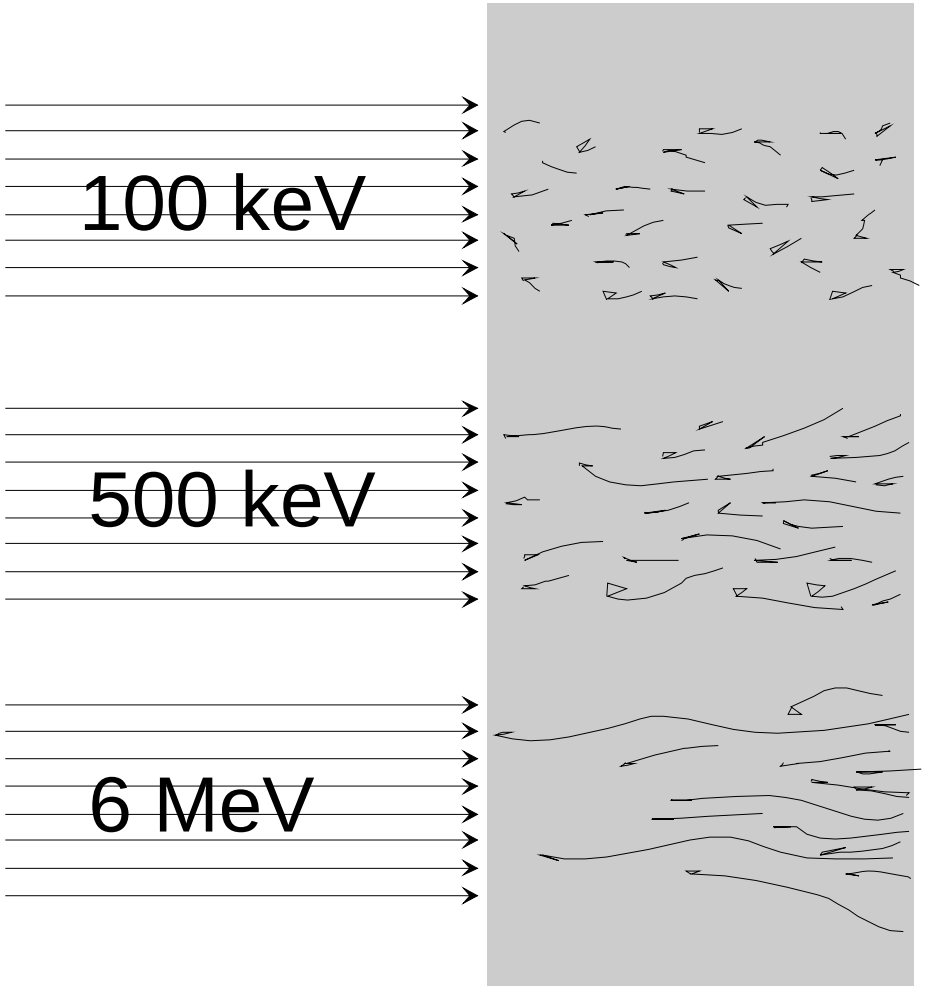
KERMA, Energiefluenz und Dosis

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

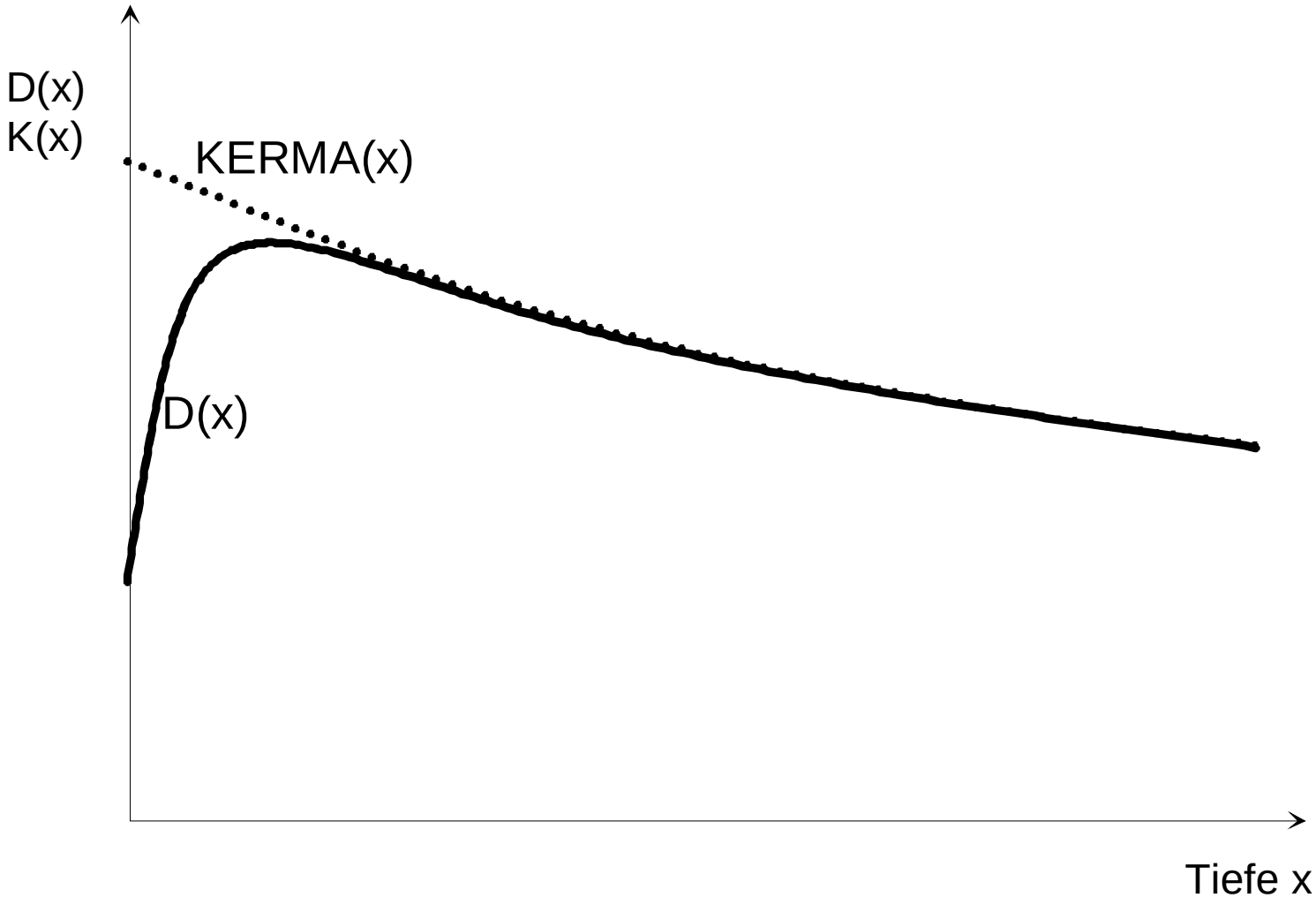
$$K = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot E_{tr} \cdot \phi = \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right) \cdot E \cdot \phi = \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right) \cdot \psi$$

$$K = K_{col} + K_{rad} \longrightarrow K_{col} = \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right) \cdot \psi$$

KERMA, Energiefluenz und Dosis



KERMA, Energiefluenz und Dosis



Linearer Energietransfer LET

Strahlenart	LET_{100} [keV/μm]
Photonen	6.9
-60Co (1.2 MeV	6.0
-Röntg. (22 MeV)	
Elektronen (2 MeV)	6.1
α-Teilchen (5.3 MeV)	63.0

LET: pro Weglänge *ds* absorbierte Energie *dE*

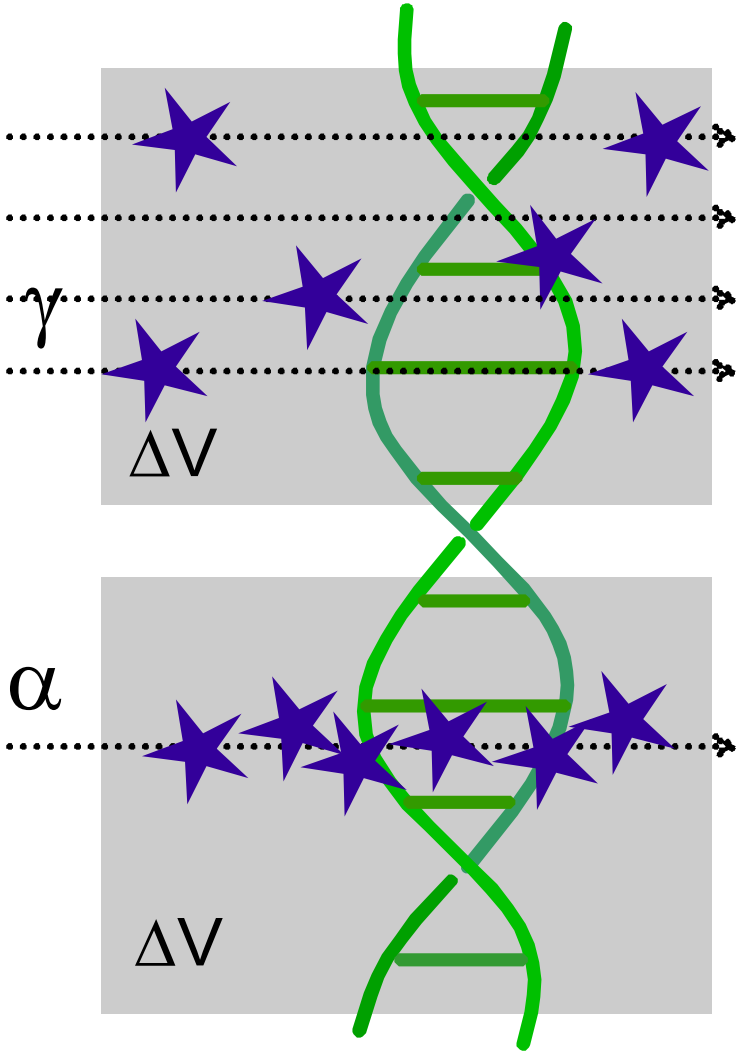
$$LET_{\Delta} = \frac{dE}{ds}$$

LET und RBW (RBE)

$$RBE = \frac{D_{Test}}{D_{\mathrm{Ref}}}$$

Relative biologische Wirksamkeit: Verhältnis aus Dosis bei teststrahlung zur Dosis bei einer Referenzstrahlung bei gleichem biologischem Effekt

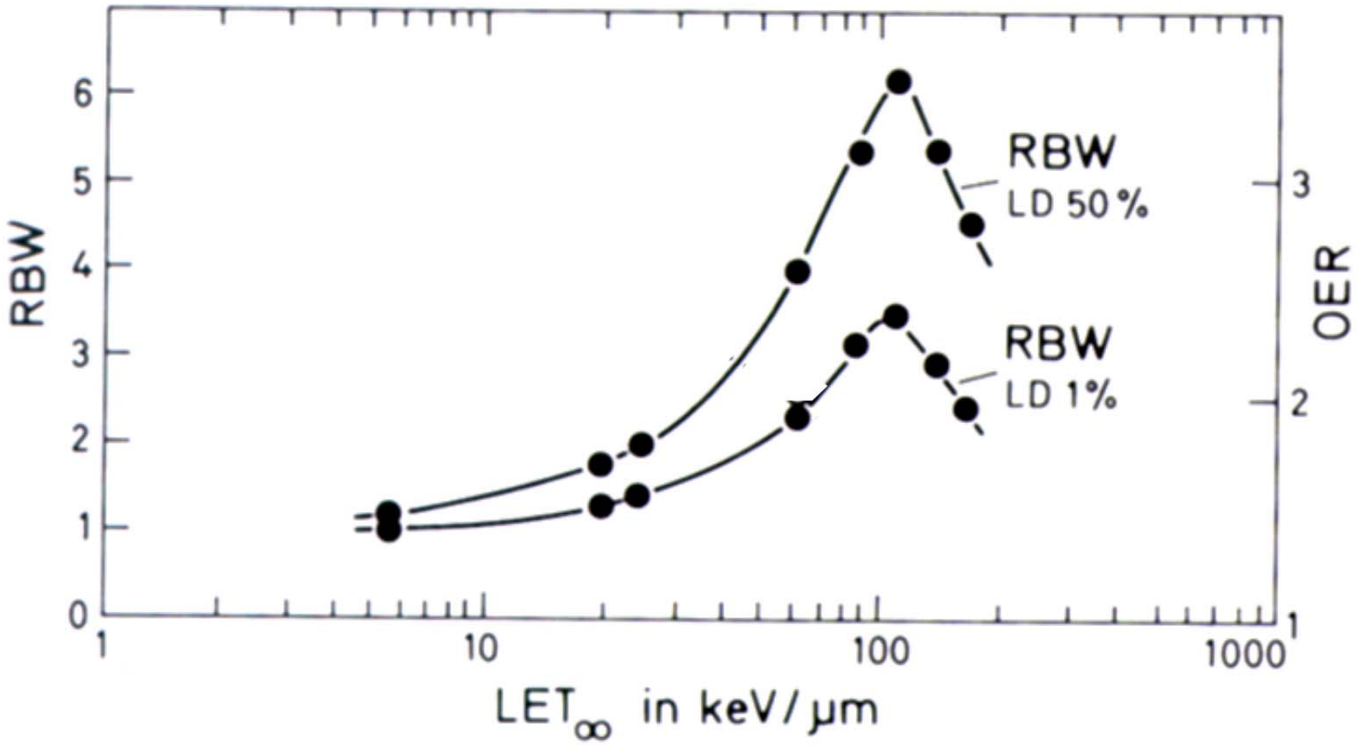
Linearer Energie-Transfer



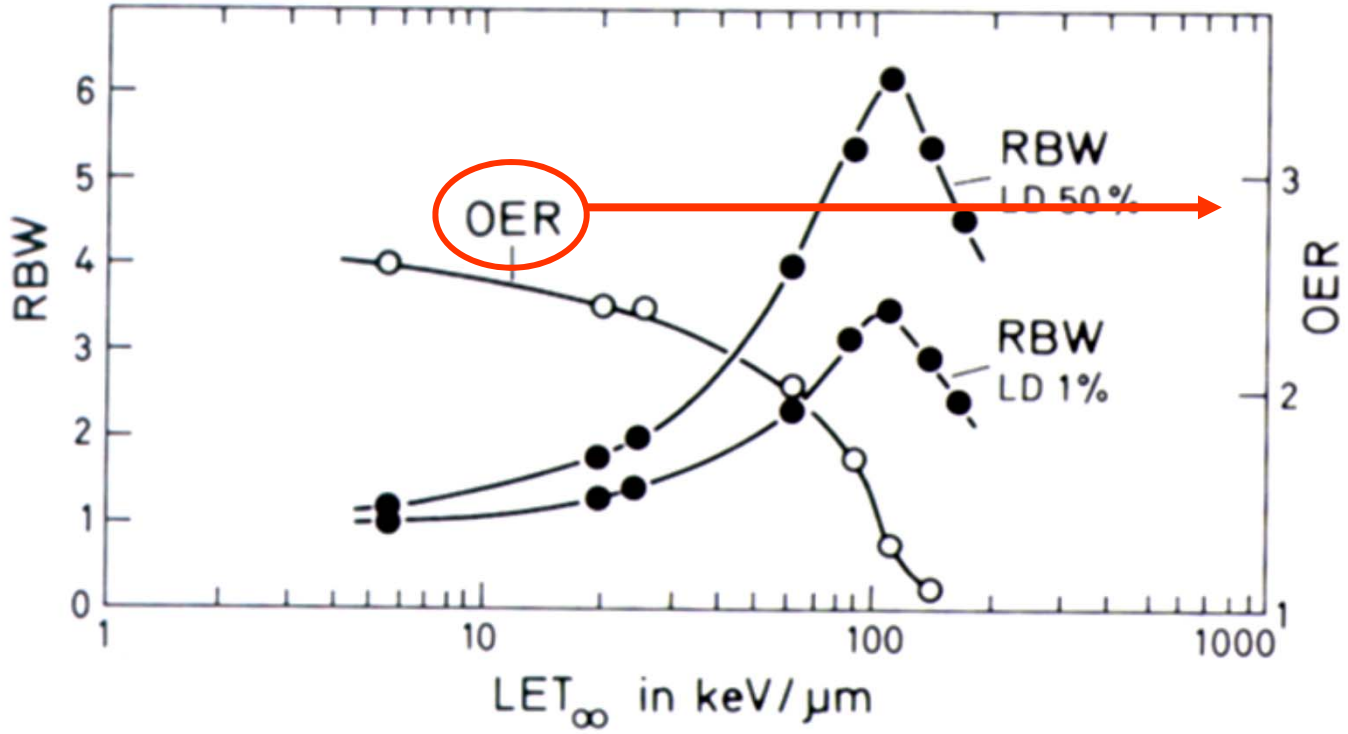
- Strahlenarten: Bei gleicher Energiedosis unterschiedliche Wirkung

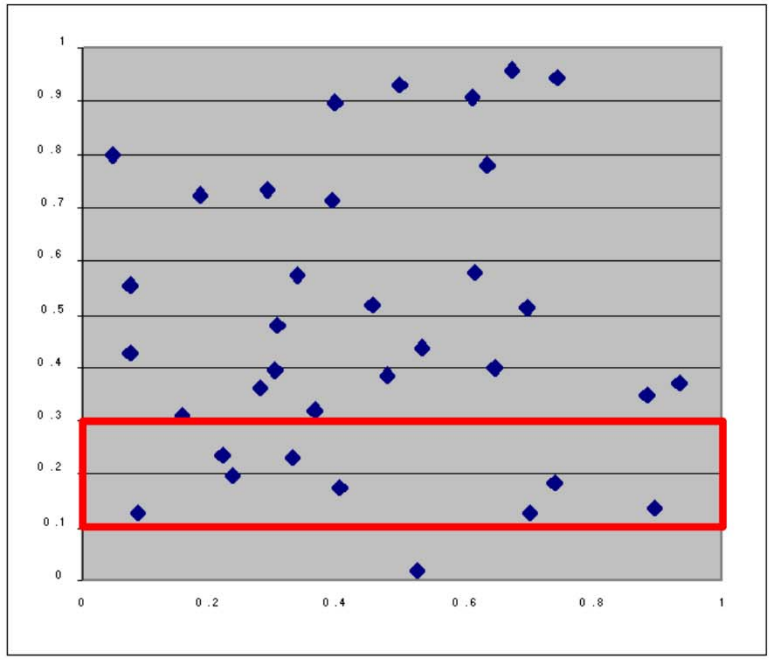
- niedriger LET: γ-, Röntgenstrahlung
- hoher LET: α-Strahlung

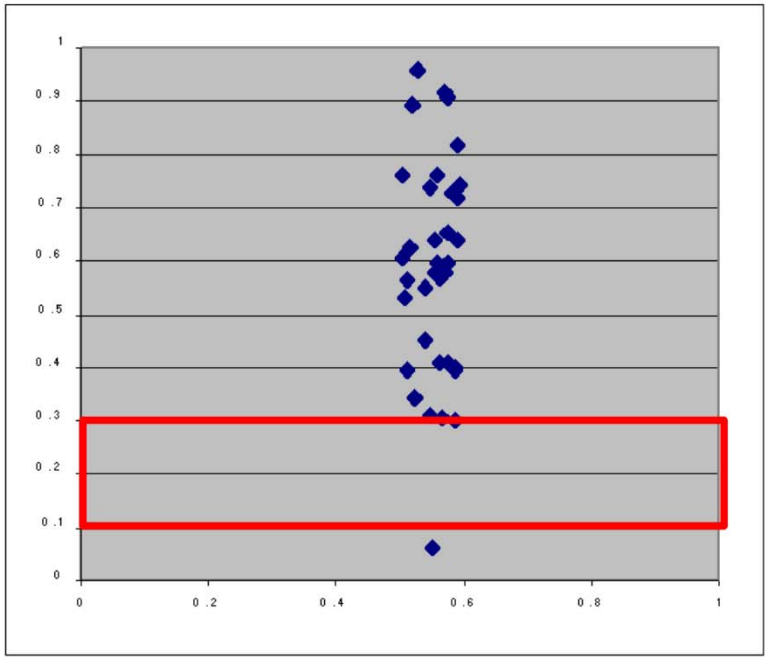
LET und RBW (RBE)

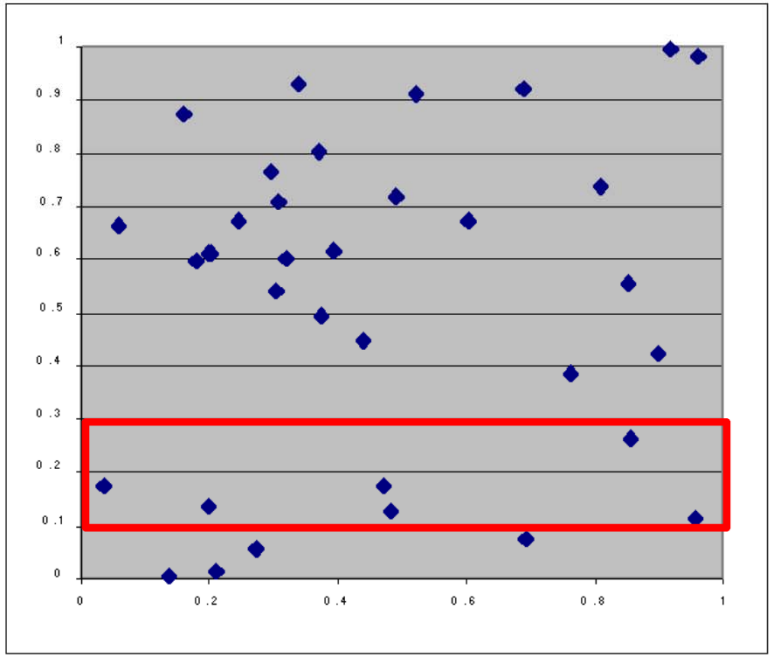


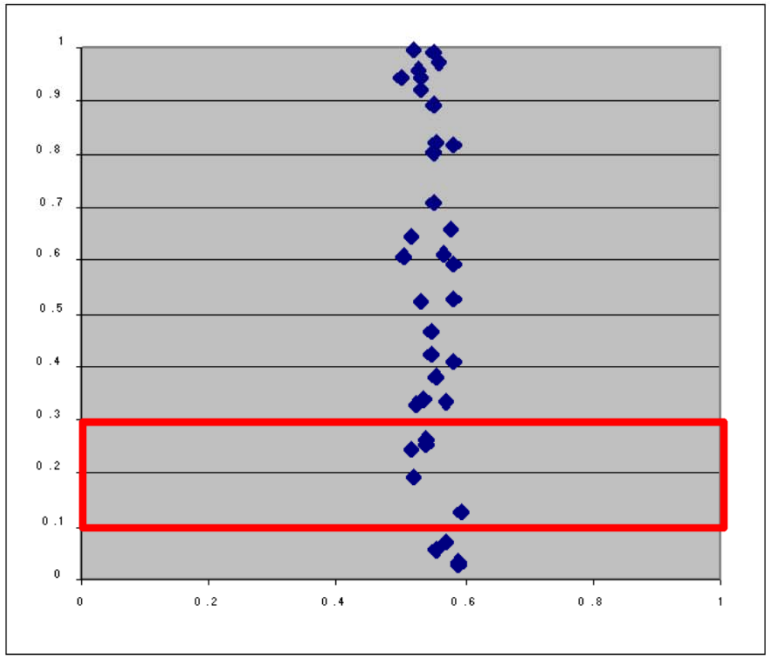
LET und RBW (RBE)




1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1


1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1


1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1


1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1