

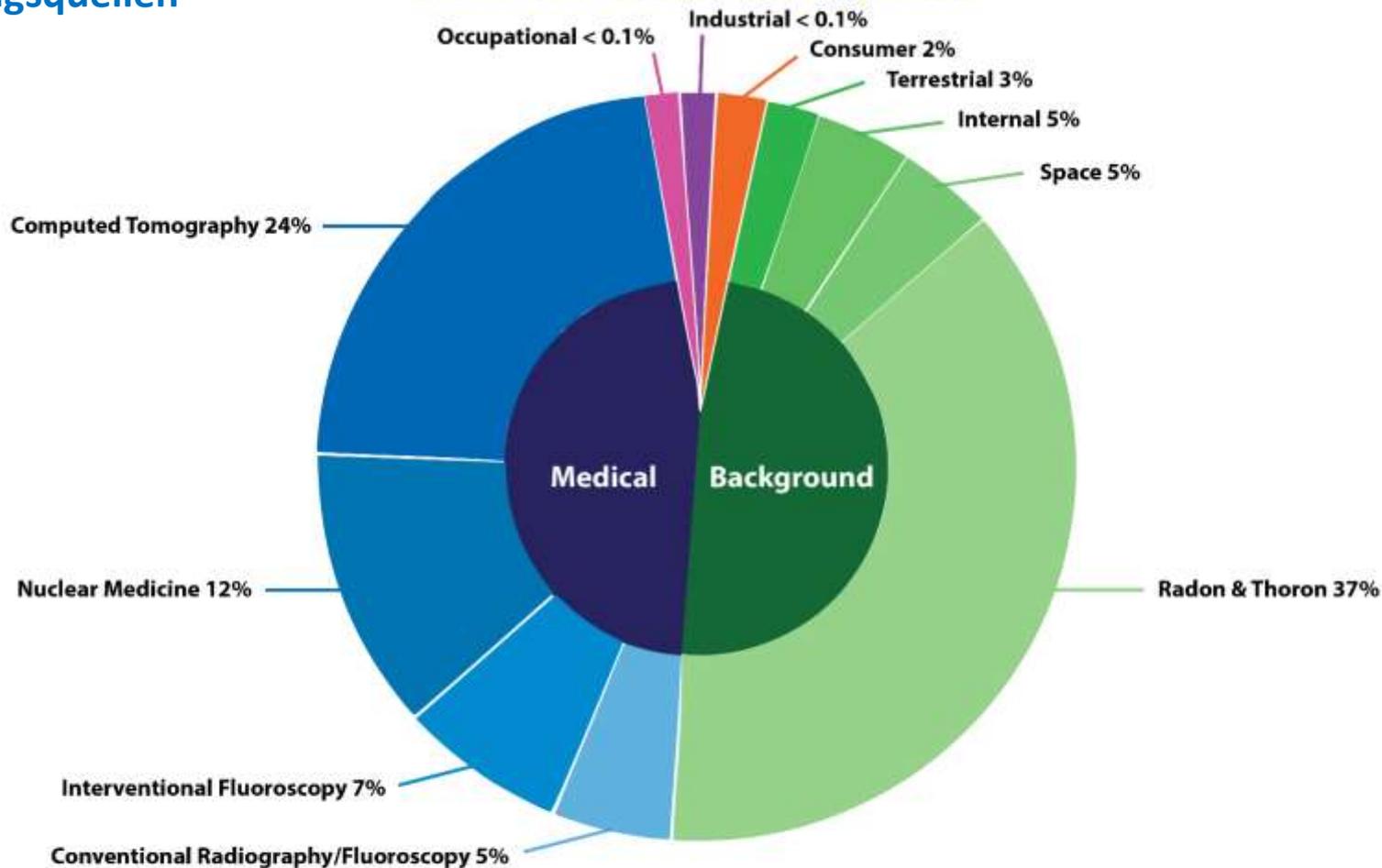
Dosimetrie – 2

Messung

Therapie

Strahlenschutz

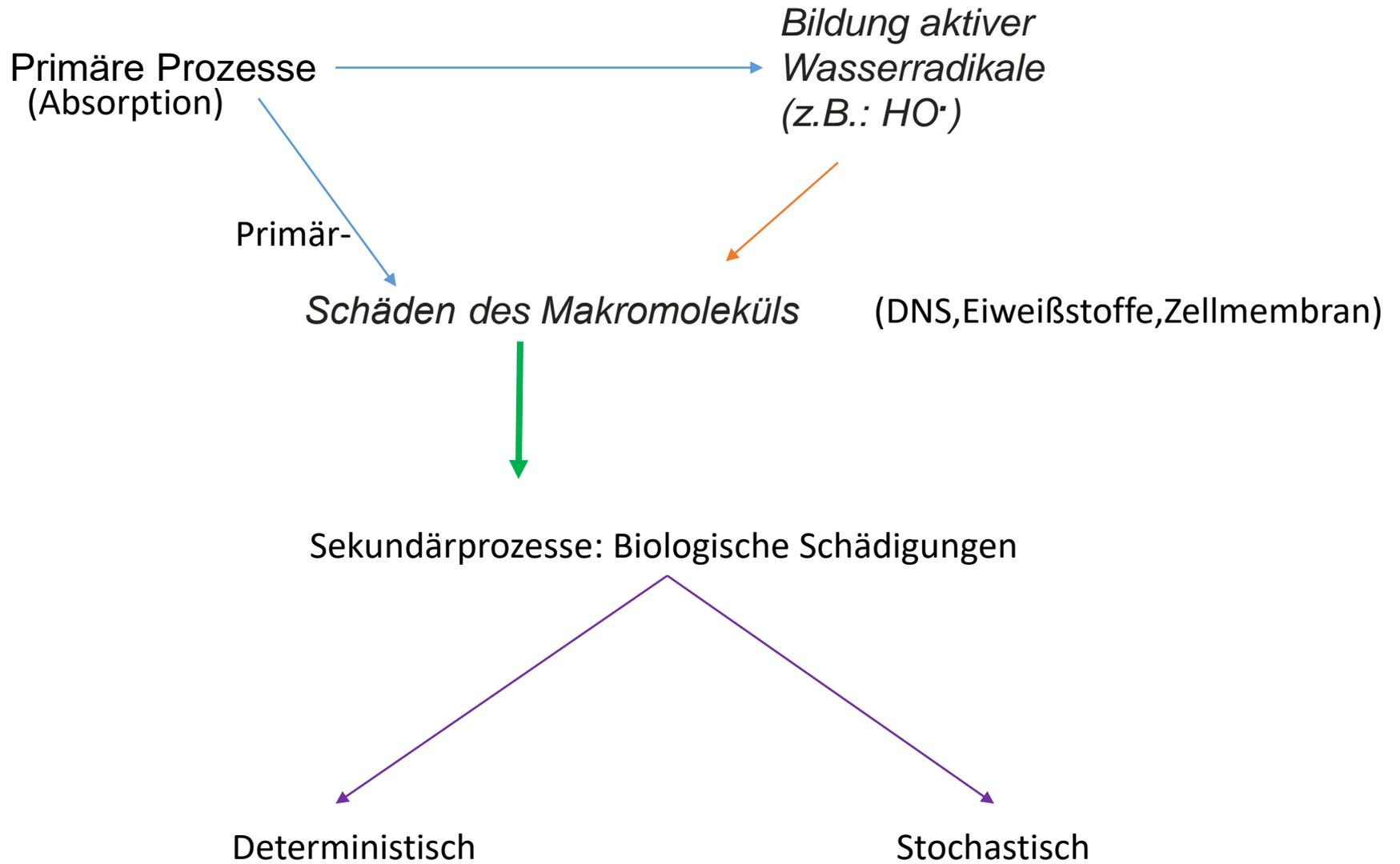
Sources of Radiation Exposure



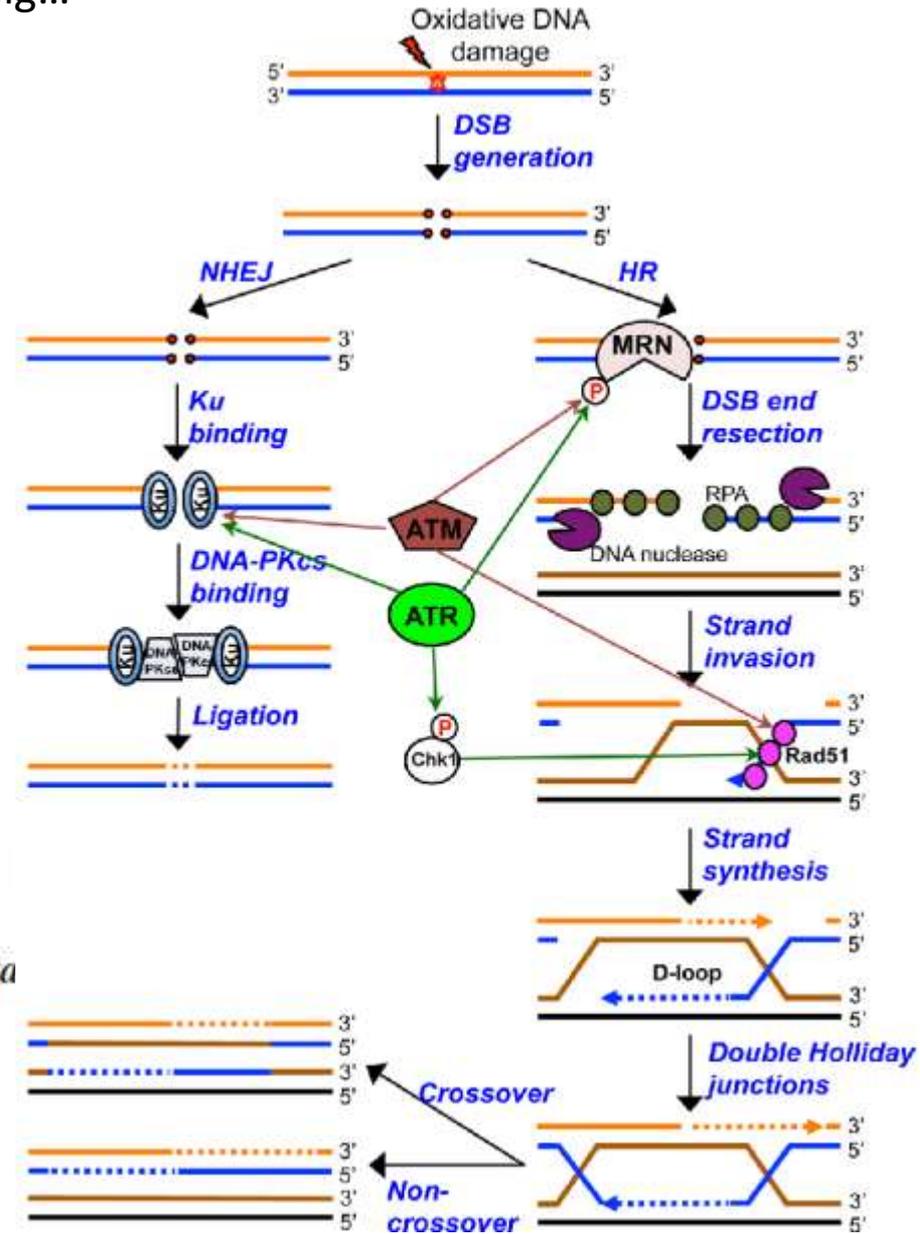
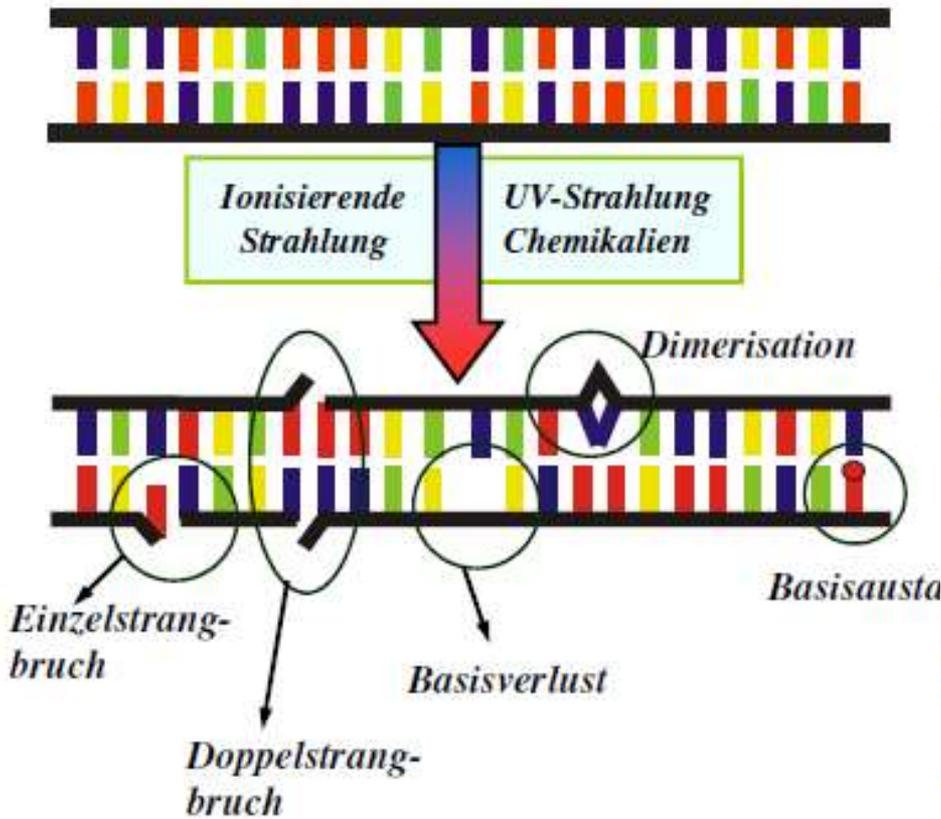
Average Annual Radiation Dose

Sources	Radon & Thoron	Computed Tomography	Nuclear Medicine	Interventional Fluoroscopy	Space	Conventional Radiography/Fluoroscopy	Internal	Terrestrial	Consumer	Occupational	Industrial
Units											
mrem (United States)	228 mrem	147 mrem	77 mrem	43 mrem	33 mrem	33 mrem	29 mrem	21 mrem	13 mrem	0.5 mrem	0.3 mrem
mSv (International)	2.28 mSv	1.47 mSv	0.77 mSv	0.43 mSv	0.33 mSv	0.33 mSv	0.29 mSv	0.21 mSv	0.13 mSv	0.005 mSv	0.003 mSv

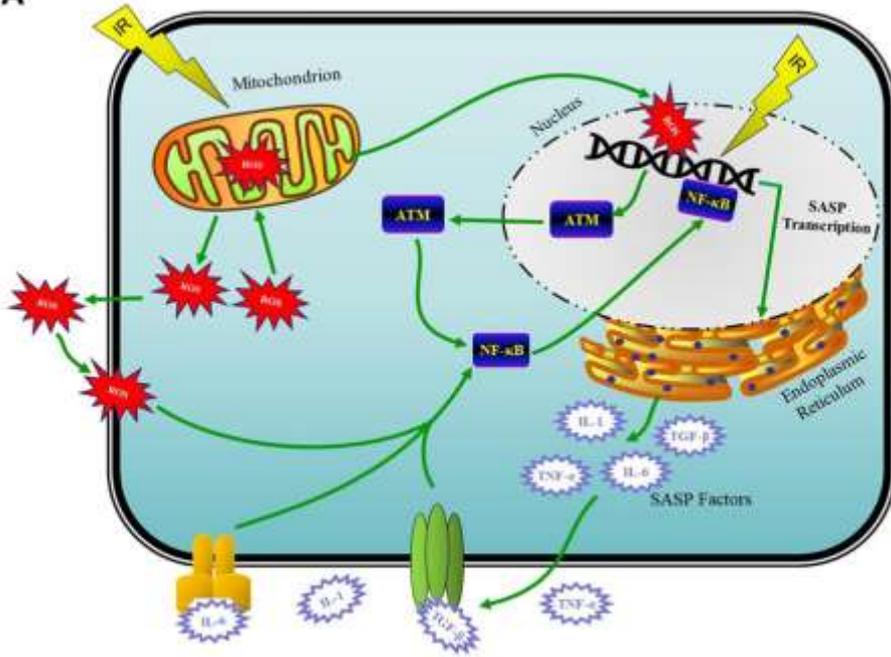
(Source: National Council on Radiation Protection & Measurements, Report No. 160)



Reparatur ist möglich, aber sehr umständig...



A

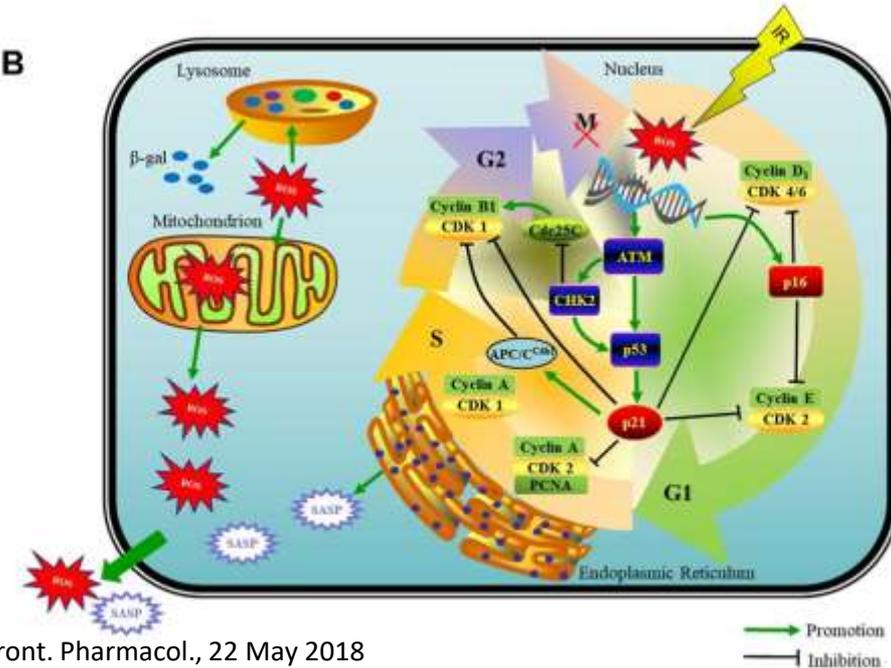


Nicht nur DNS kann beschädigt werden...



Nachbarzellen werden auch benachrichtigt!

B



Dosisleistung (Dosisrate):

$$P_D = \frac{\Delta D}{\Delta t}$$

$$[P_D] = \frac{mGy}{h}, \frac{\mu Gy}{h}$$

Für *punktförmige γ -Strahlungsquellen in Luft*:

$$P_D = K_\gamma \frac{A}{r^2} \Rightarrow D = K_\gamma \frac{A \cdot t}{r^2}$$

Quelle	$K_\gamma \frac{\mu Gy_{Luft} \cdot m^2}{GBq \cdot h}$
^{60}Co	305
^{131}I	54
^{137}Cs	80

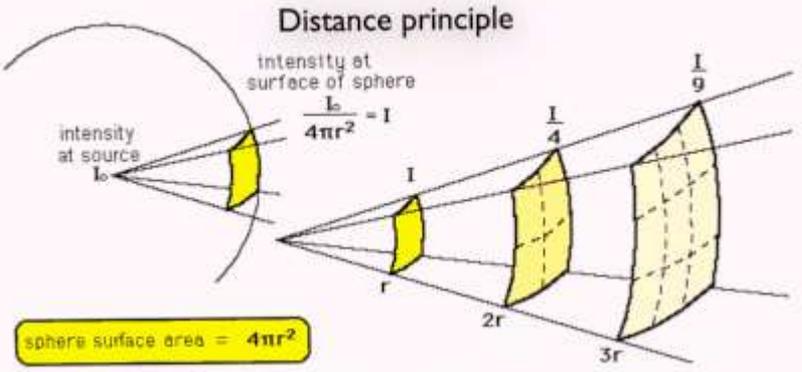
Siehe Praktikum:
Dosimetrie

Bedeutung: Strahlenschutz

Dosisleistung = Dosis Expositionszeit

$$D_{\text{Luft}} = K_{\gamma} \cdot \frac{A \cdot t}{r^2}$$

$$[K_{\gamma}] = \frac{\mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{GBq}}$$



Chemisches Element und seine Ordnungszahl	Symbol des Isotops	Physikalische Halbwertszeit	Zerfallstyp	Maximale Teilchenenergie (MeV)	γ -Energie (MeV)	K_{γ} Dosiskonstante ($\frac{\mu\text{Gy}_{\text{Luft}} \cdot \text{m}^2}{\text{GBq} \cdot \text{h}}$)
Wasserstoff	1 ^3H	12,33 Jahre	β^-	0,0186	-	
Kohlenstoff	6 ^{11}C	20,4 Minuten	β^+	0,96	-	
	^{14}C	5760 Jahre	β^-	0,155	-	
Stickstoff	7 ^{15}N	10 Minuten	β^+	1,19	-	
Sauerstoff	8 ^{15}O	2 Minuten	β^+	1,73	-	
Fluor	9 ^{18}F	109,8 Minuten	β^+	0,633	-	
Natrium	11 ^{24}Na	15,02 Stunden	β^-, γ	1,392	2,754 1,369	444
Phosphor	15 ^{32}P	14,28 Tage	β^-	1,710	-	
Schwefel	16 ^{35}S	87,2 Tage	β^-	0,167	-	
Kalium	19 ^{40}K	1,28·10 ⁹ Jahre	β^-, K (10%)	1,31	1,46 nach K	
	^{42}K	12,36 Stunden	β^-, γ	3,52 (75%) 1,99 (25%)	1,525	
Calcium	20 ^{45}Ca	163 Tage	β^-	0,257	-	
Chrom	24 ^{51}Cr	27,7 Tage	K, e^-, γ	0,315 (e^-)	0,320	
Eisen	26 ^{54}Fe	8,2 Stunden	β^+, γ	0,8	0,5	160
	^{59}Fe	44,6 Tage	β^-, γ	1,566	1,30 1,10	
Kobalt	27 ^{60}Co	5,272 Jahre	β^-, γ	0,318	1,33 1,17	305
Kupfer	29 ^{64}Cu	12,74 Stunden	β^- (39%) β^+ (19%) K (42%) γ (1%)	0,575 0,656	1,34	
Krypton	36 ^{85}Kr	10,73 Jahre	β^-, γ	0,687	0,514	
Rubidium	37 ^{81}Rb	4,7 Stunden	β^+, γ	0,99	1,93 0,95	
	^{86}Rb	18,65 Tage	β^-, γ	1,78	1,078	
Strontium	38 ^{90}Sr	29 Jahre	β^-	0,546	-	
Yttrium	39 ^{90}Y	64 Stunden	β^-, γ (0,4%)	2,29	1,761	
Technetium	43 $^{99\text{m}}\text{Tc}$	6,02 Stunden	γ	-	0,140	
Indium	49 $^{115\text{m}}\text{In}$	1,658 Stunden	γ	-	0,391	
Jod	53 ^{125}I	13,3 Stunden	K, γ	-	0,16	
	^{125}I	59,7 Tage	K, γ	-	0,0355	
	^{131}I	8,04 Tage	β^-, γ	0,606 0,25 0,81	0,364 0,080 0,723	54
Xenon	54 ^{133}Xe	5,29 Tage	β^-, γ	0,346	0,081	
Cäsium	55 ^{137}Cs	30,1 Jahre	β^-, γ	0,512 (92,6%) 1,173 (7,4%)	0,661	80
Gold	79 ^{198}Au	2,695 Tage	β^-, γ	0,961	0,411	
Quecksilber	80 ^{203}Hg	46,6 Tage	β^-, γ	0,212	0,279	
Radon	86 ^{222}Rn	3,824 Tage	α	5,489	-	
Radium	88 ^{226}Ra	1600 Jahre	α, γ (6%)	4,784	0,186 0,260 0,609	
Uran	92 ^{238}U	4,47·10 ⁹ Jahre	α, γ	4,2	0,048	



2.120. Es ist die Dosis auf der Hand zu berechnen, wenn man ein Probierglas mit einer ^{24}Na -Lösung mit einer Aktivität von 680 MBq 30 Sekunden lang in der Hand hält. Die Entfernung zwischen Hand und Flüssigkeit beträgt 1 cm. Es soll auch die Dosis für den Fall berechnet werden, wenn das Probierglas mit einer ca. 20 cm langen Zange angefasst wird. Welche Lehre kann man aus der Rechnung ziehen?

2.121. Wie groß ist die in der Luft erwartete Dosisleistung 30 cm von einem ^{24}Na -Isotop entfernt, das eine Aktivität von 0,6 GBq besitzt?

2.122. Wie fern sollte man sich in der Umgebung eines ^{131}I -Isotops mit einer Aktivität von 0,56 GBq aufhalten, um eine Dosisleistung von $20 \mu\text{Gy}_{\text{Luft}}/\text{h}$ nicht zu überschreiten?

2.123. Wie lange dürfen wir uns in 30 cm Entfernung von einem ^{59}Fe -Präparat aufhalten, dessen Aktivität 0,75 GBq beträgt, ohne die für eine Woche erlaubte Dosis (1 mSv) zu überschreiten?

2.124. Wir legen ein ^{24}Na -Isotop mit einer Aktivität von 0,5 GBq hinter eine 2 cm dicke Bleiwand. Wie groß ist die Dosisleistung an der anderen Seite der Bleiwand in einer Entfernung von 30 cm?



Grundprinzipien:

- a. *Rechtfertigung einer Tätigkeit*
- b. *Optimierung des Schutzes*
- c. *Individuelle Dosisbeschränkung*

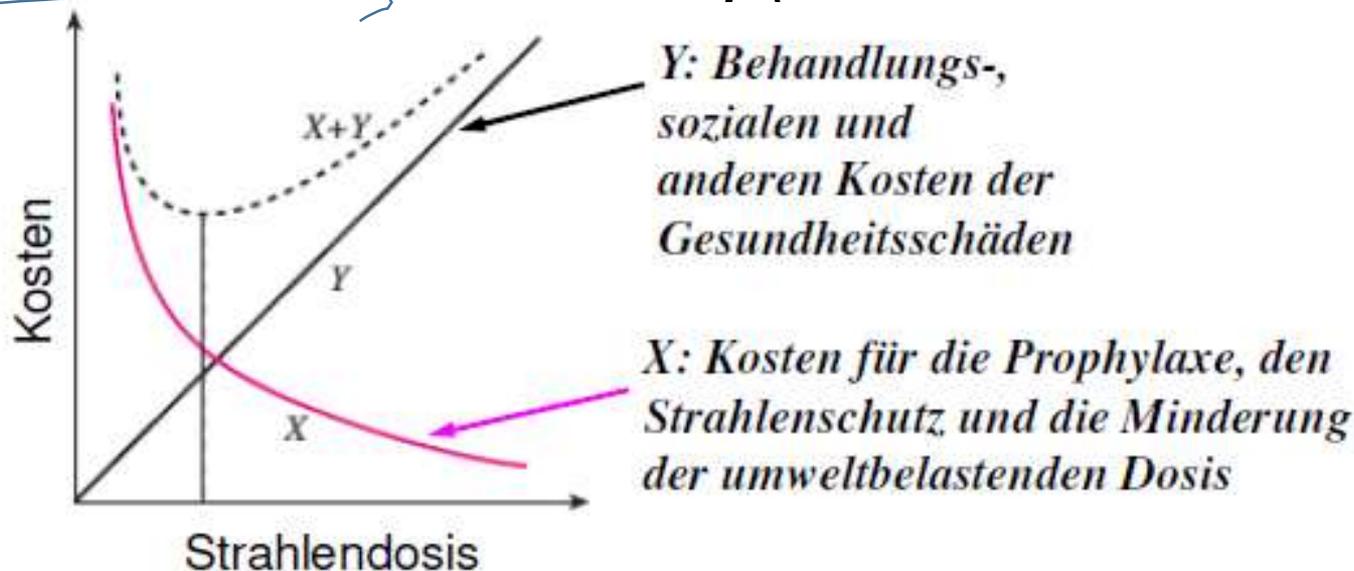
Das Risiko der stochastischen Schäden durch die berufliche Belastung sollte \leq das allgemeine Risiko von Berufsunfällen (10-4 Todesfälle/Jahr),
(in der Bevölkerung 10-5 Todesfälle/Jahr)

ad. a.: Der zu erwartende medizinische Nutzen $>$ das Risiko von Schädigung

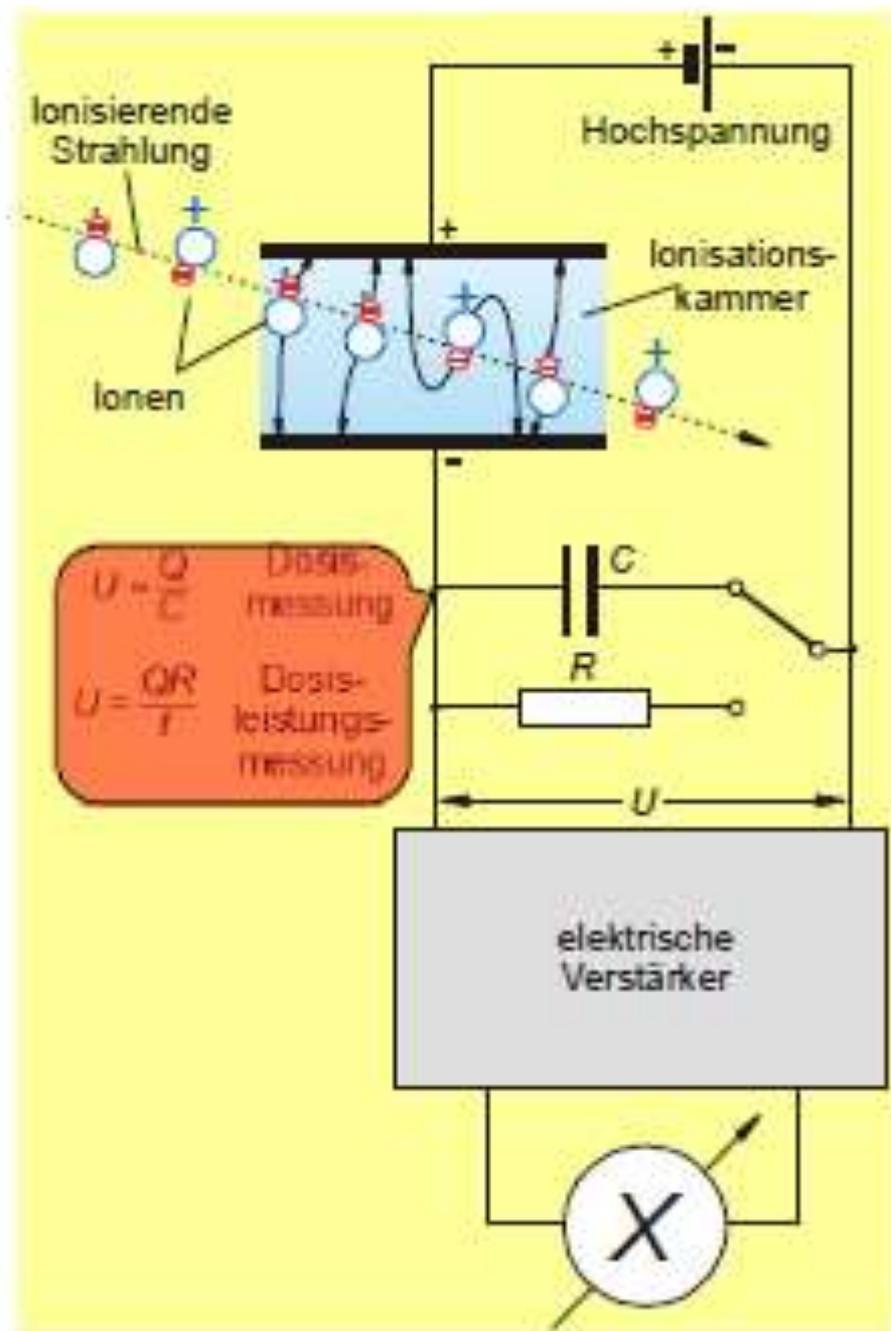
ad. b.:

- *Kosten des Strahlenschutzes \leftrightarrow Gesundheitsrisiko*
- *ALARA-Prinzip*

ALARA-Prinzip (As Low As Reasonable Achievable)



Ionisationskammer

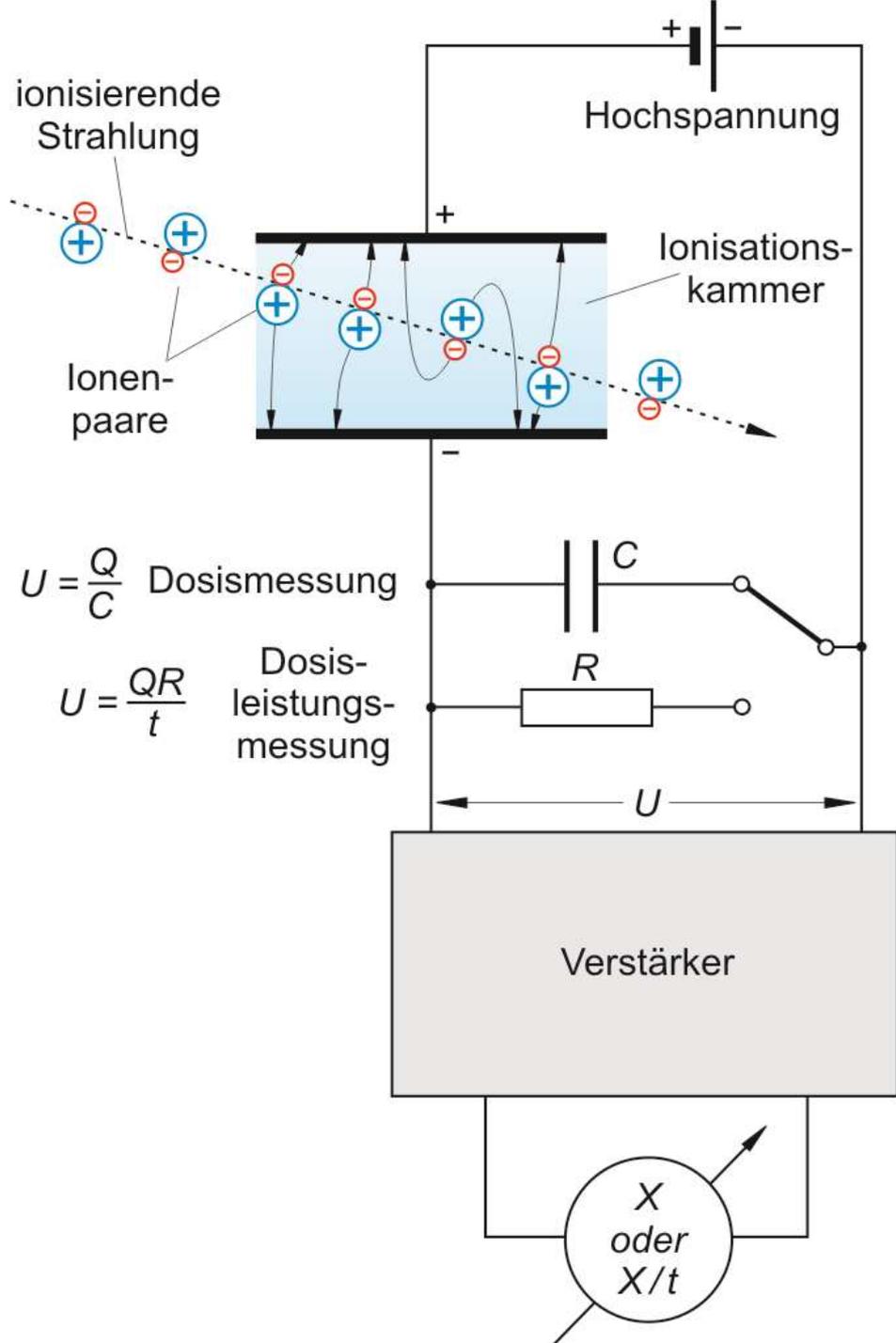


Vorteile:

- seit mehr als 100 Jahren sind die Ionisationsvorgänge untersucht — ausführliche theoretische und praktische Kenntnisse;
- Messvolumen von mm^3 – Liter;
- ermöglicht absolute Messung — Kalibrationsmessungen der anderen

Detektoren/Dosimeter;

- Messung der sehr großen Dosiswerten;
- **Schließen zur Energiedosis in Geweben.**
- Echtzeitmessung bei der Strahlentherapie!!



Dosis-, und Dosisleistungsmesser



Fingerhut-kammer

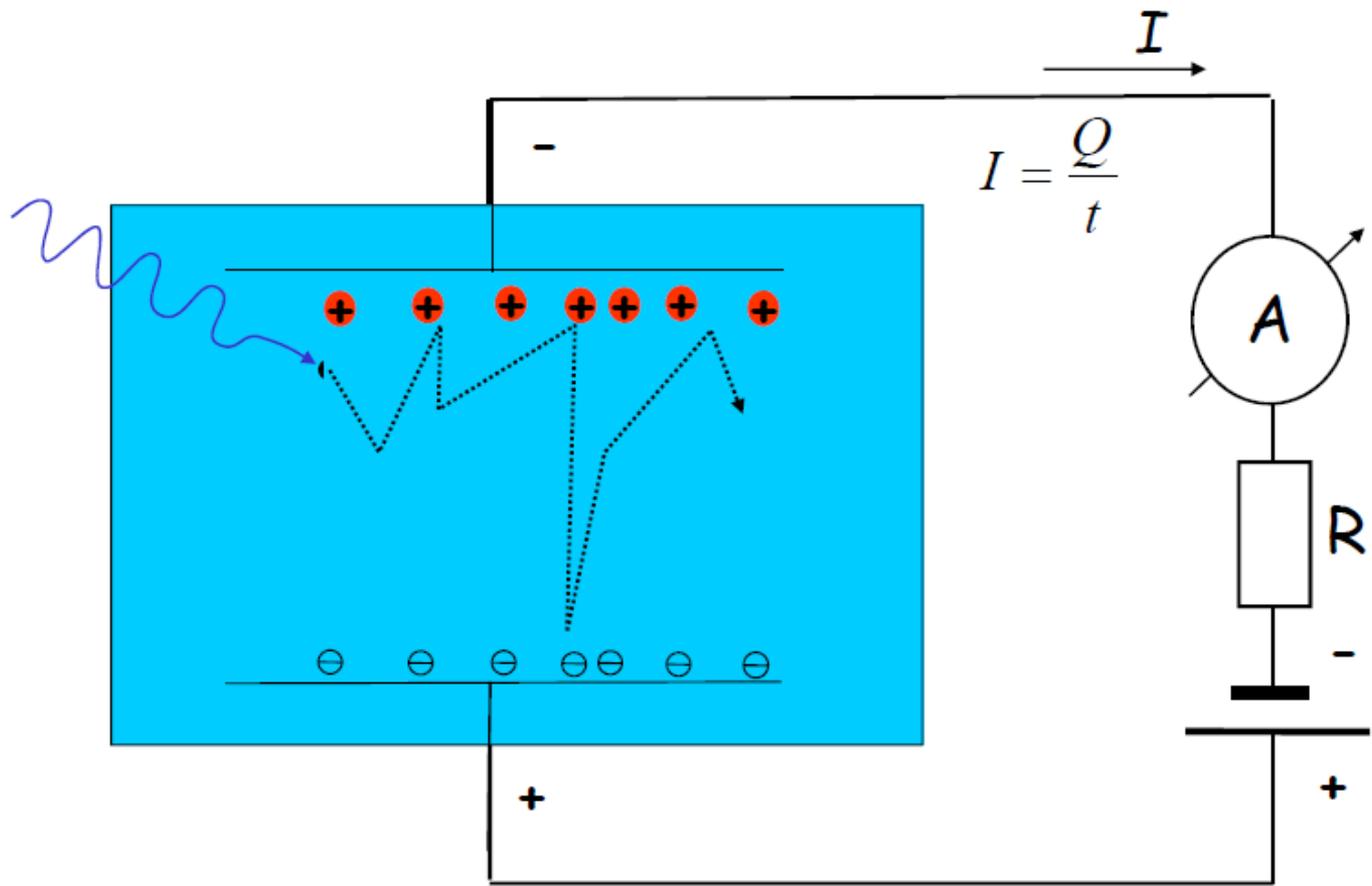
Ladegerät

Füllhalterdosimeter

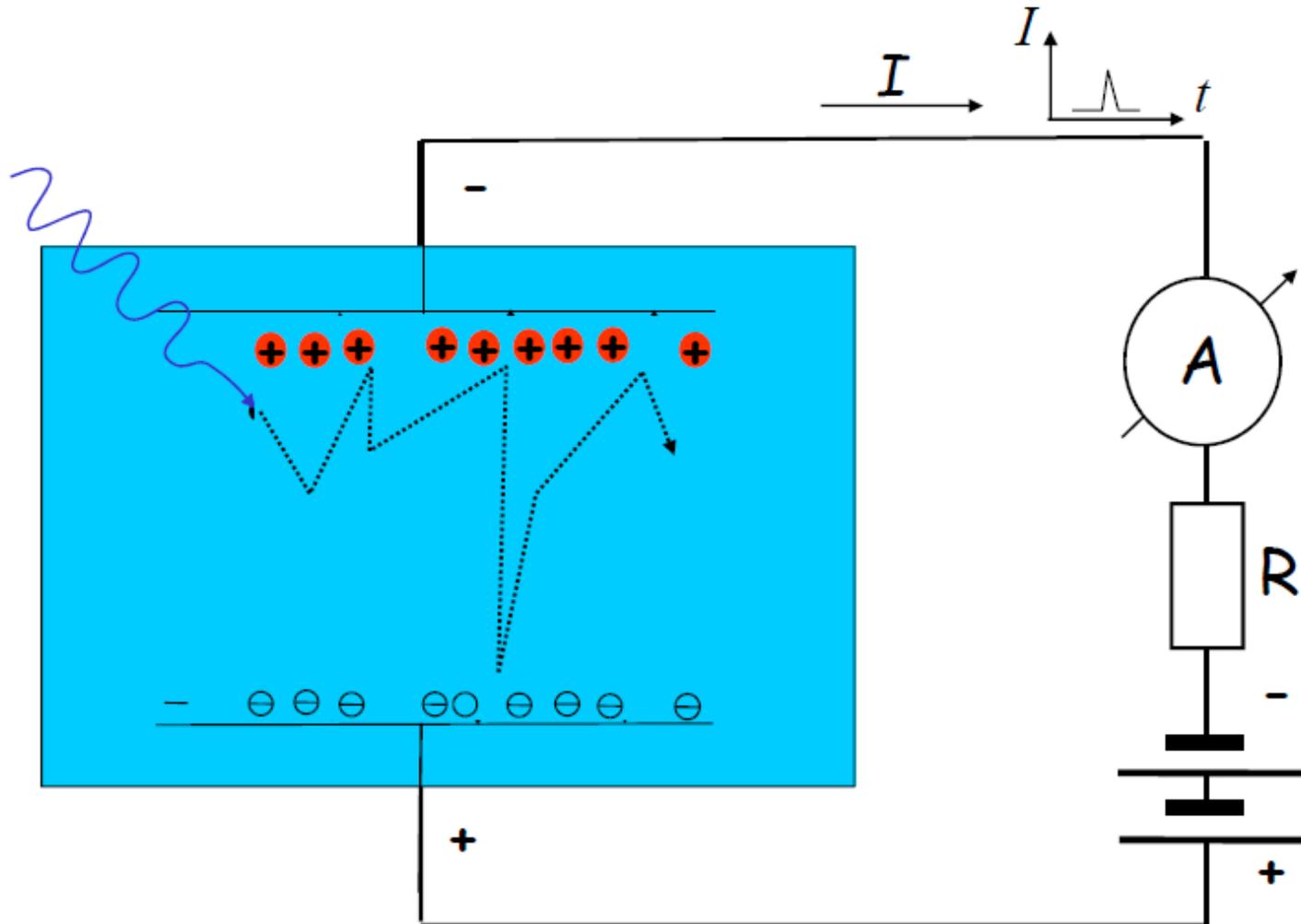


Skala

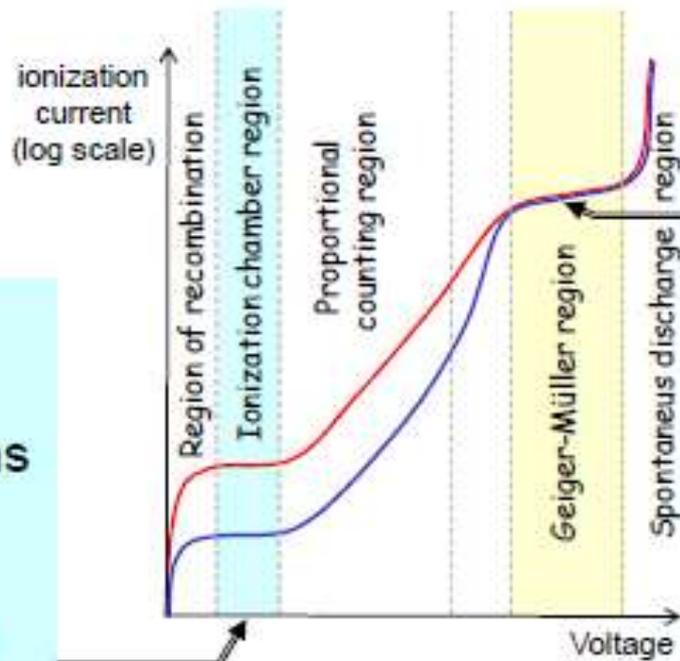
Quarzfaden



Höhere Spannung -> Impulse

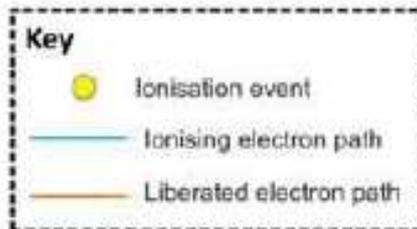
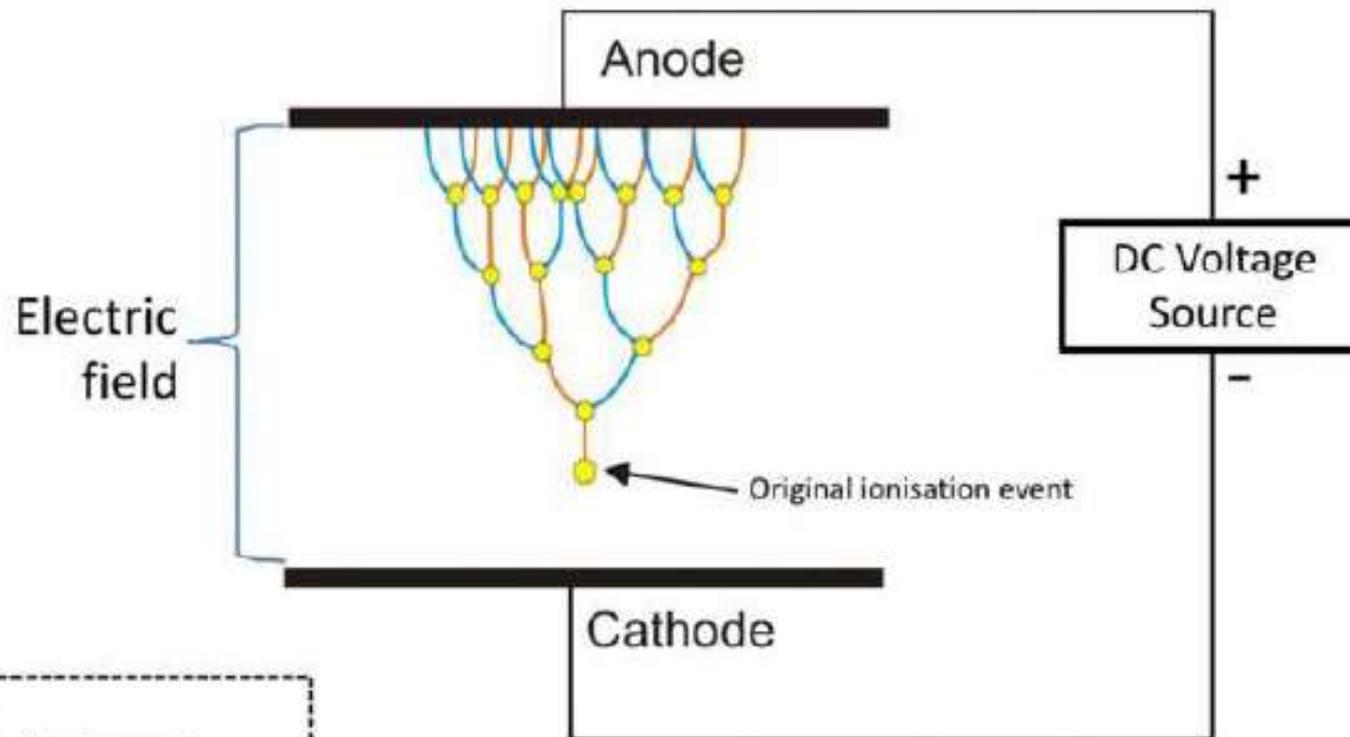


Ionization chamber:
collects all the ions
Measures the ionizing effect of the radiation
see: dosimetry

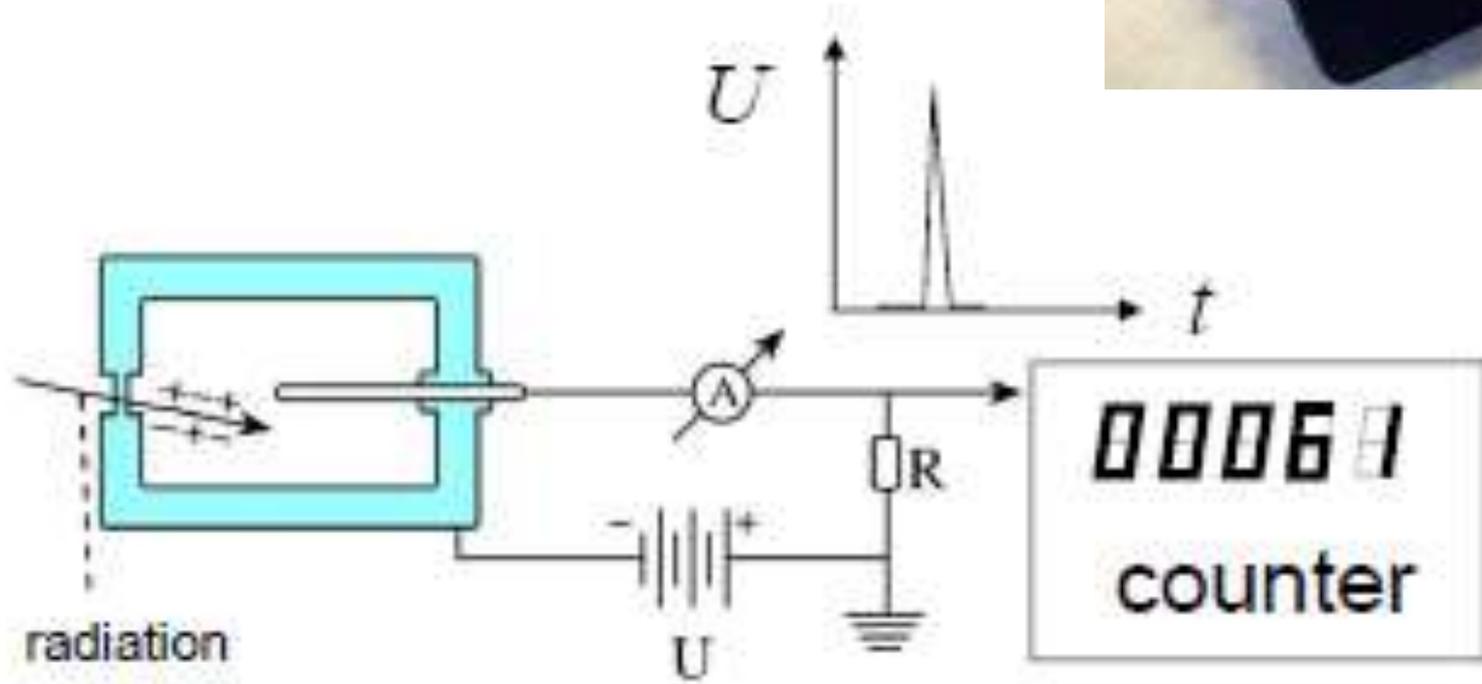


Geiger-Müller range:
avalanche-effect:
particle
↓
voltage pulse

Visualisation of a Townsend Avalanche



Not to scale



Multidrahtkammer

Lokalisierte Elektronenlavine

Energieselektiv
Räumliche Auflösung

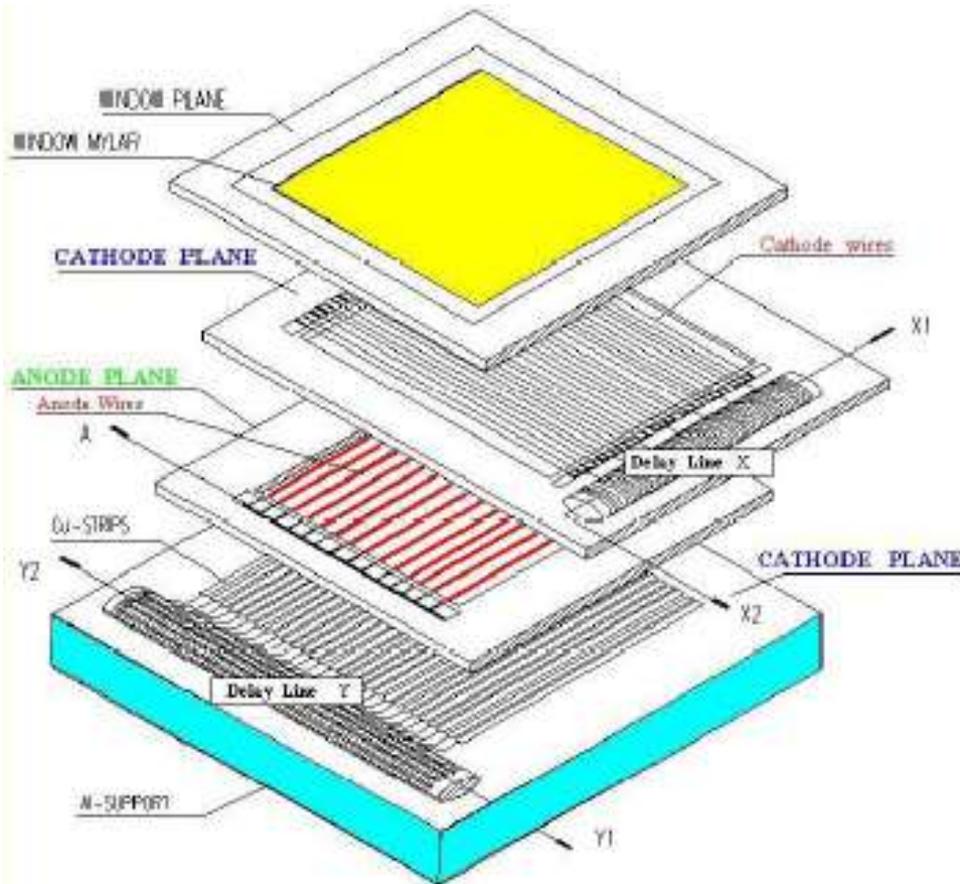
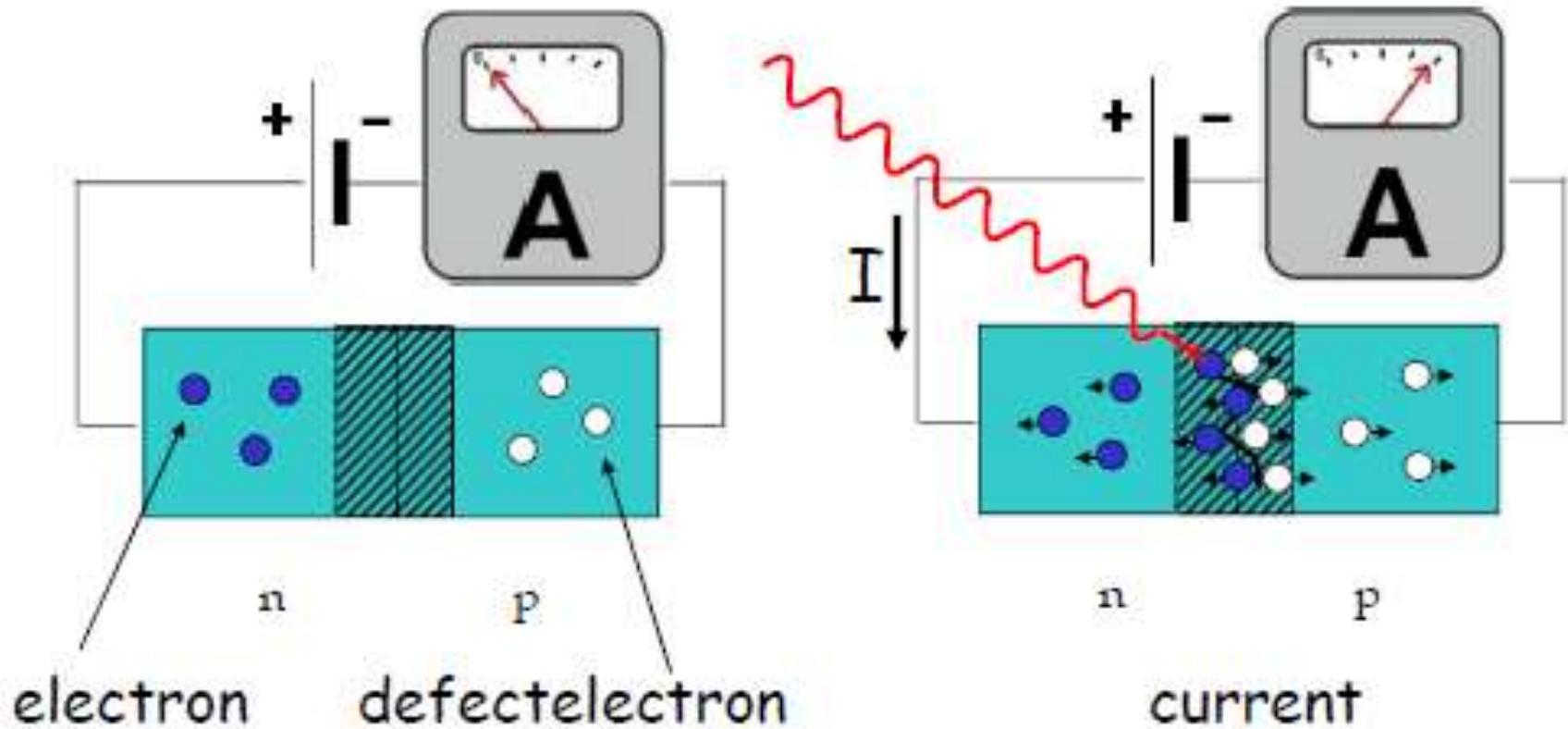


Fig.1 Common view of the 2-D MWPC with delay line readout.

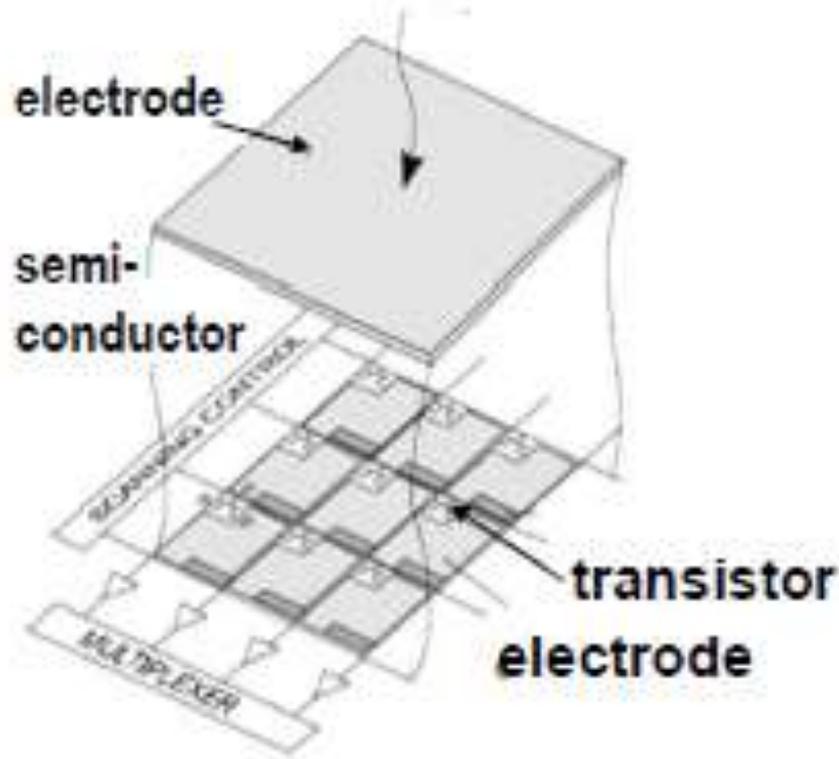
Halbleiterdetektoren



Halbleiterdetektoren -> Kameras



radiation



TLD



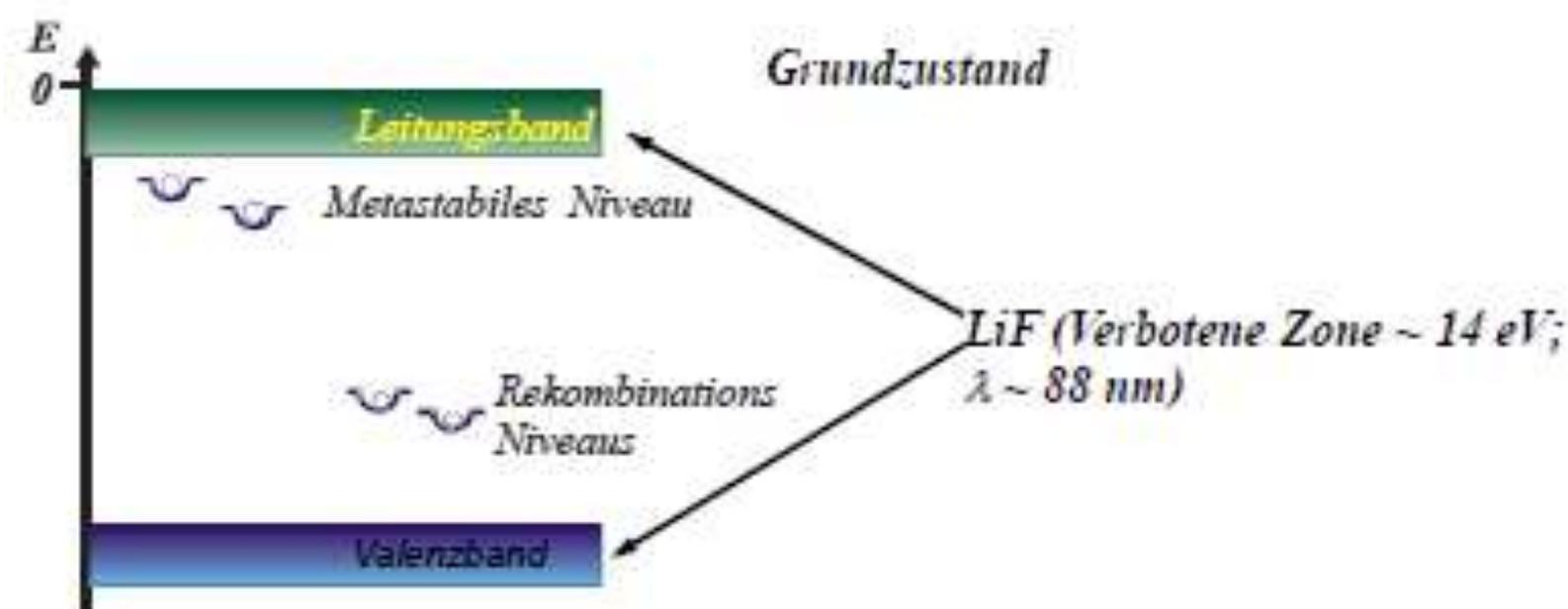
Thermolumineszenz



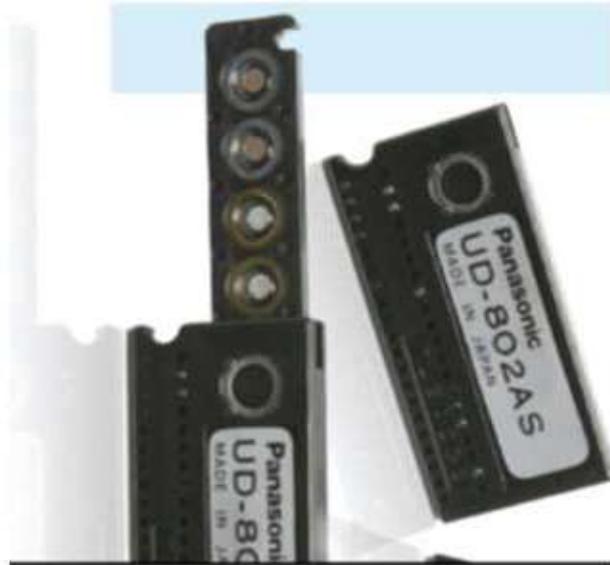
Am häufigsten angewandten TL Kristalle:

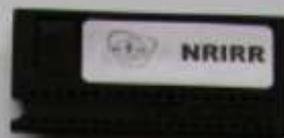
$\text{LiF}(\text{Mg}, \text{Ti}); \text{CaF}_2(\text{Dy}); \text{CaF}_2(\text{Mn});$

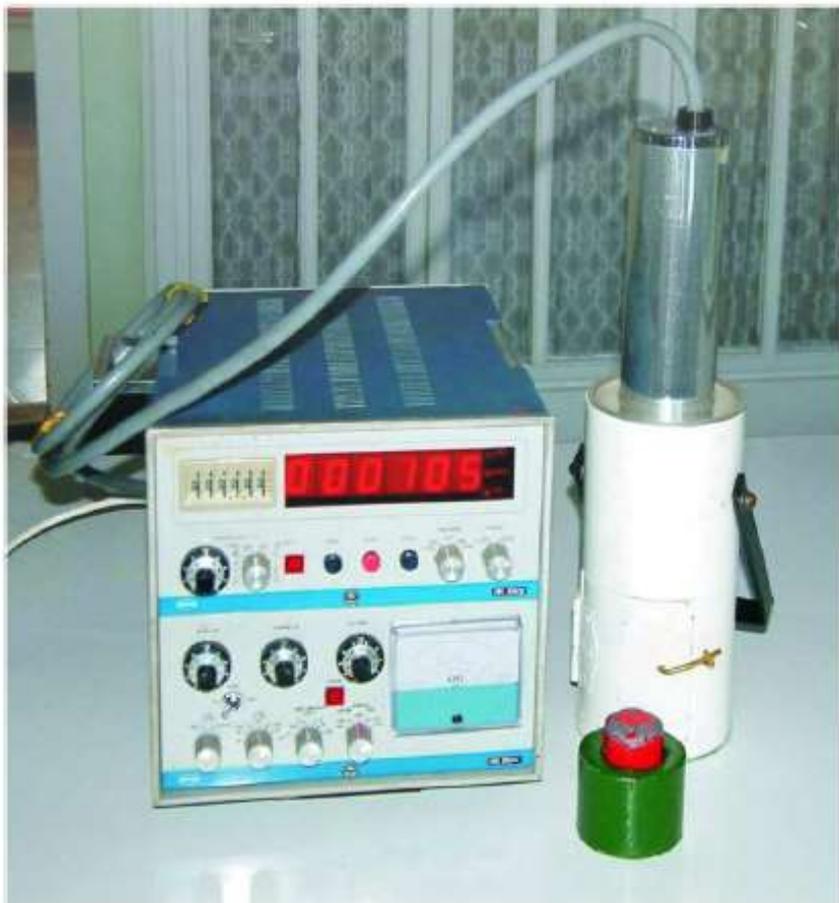
$\text{CaSO}_4(\text{Dy}); \text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Mn})$



$$\Delta E_{m-LB} \sim 30 \sim 60 \text{ meV}$$







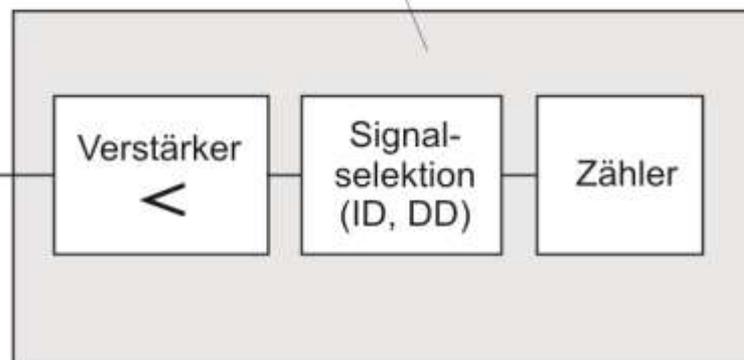
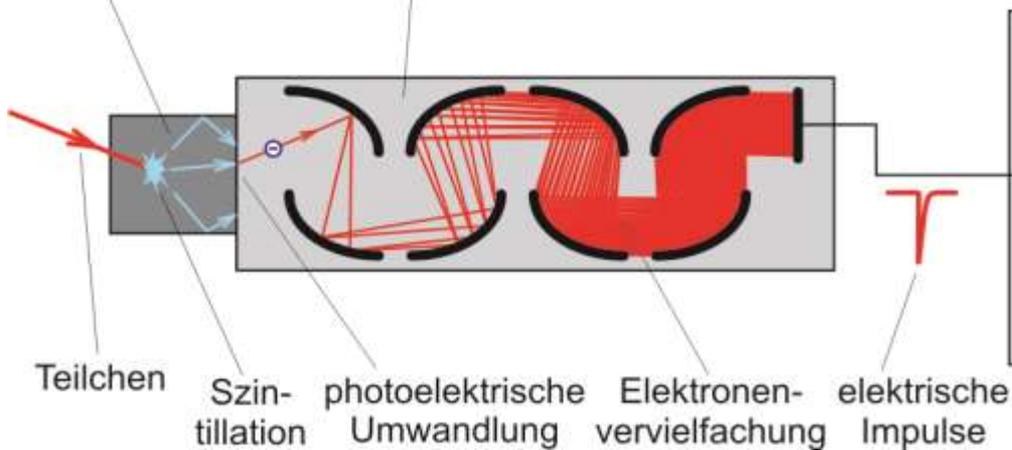
Szintillationsmesskopf

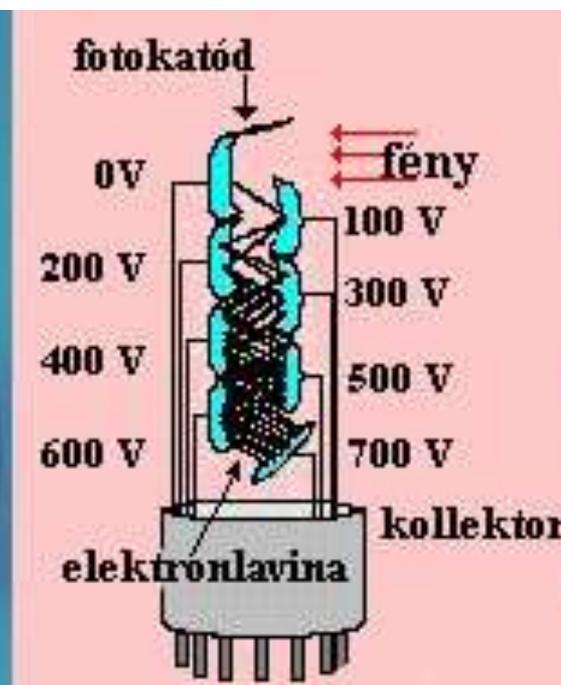
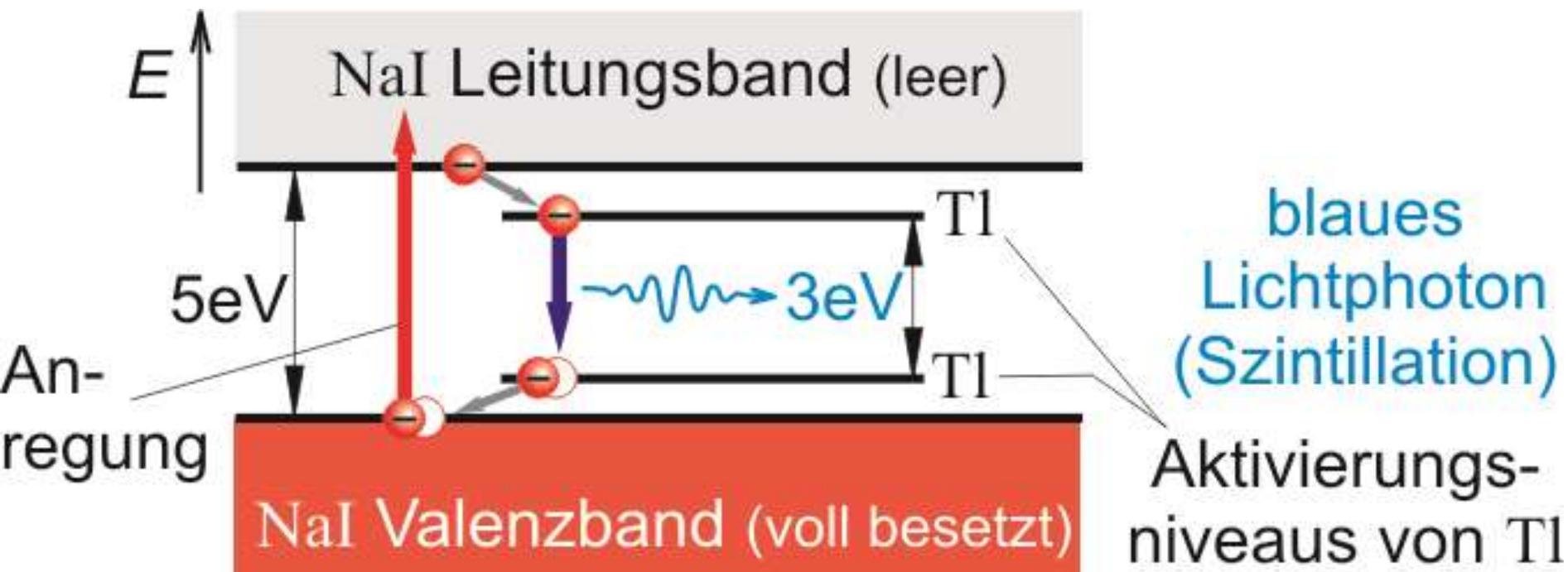


Szintillator

Photomultiplier

Elektronik für Analyse und Zählung

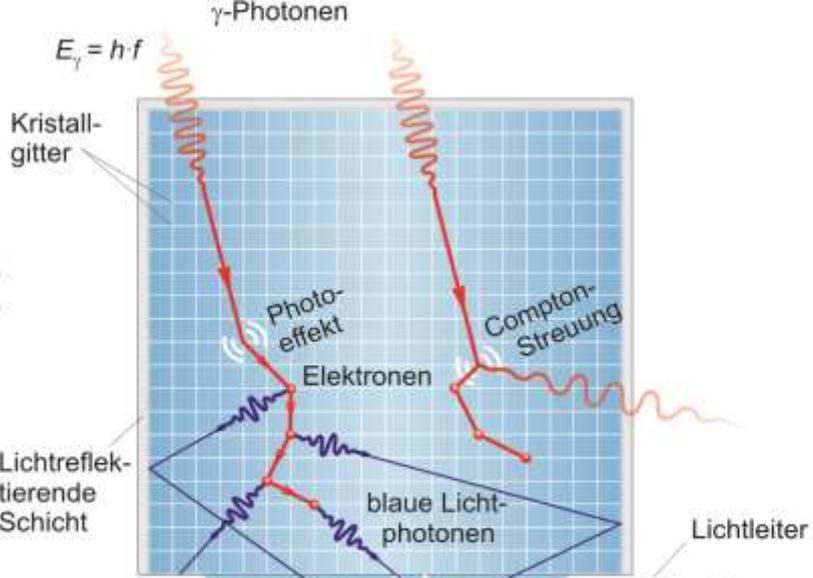




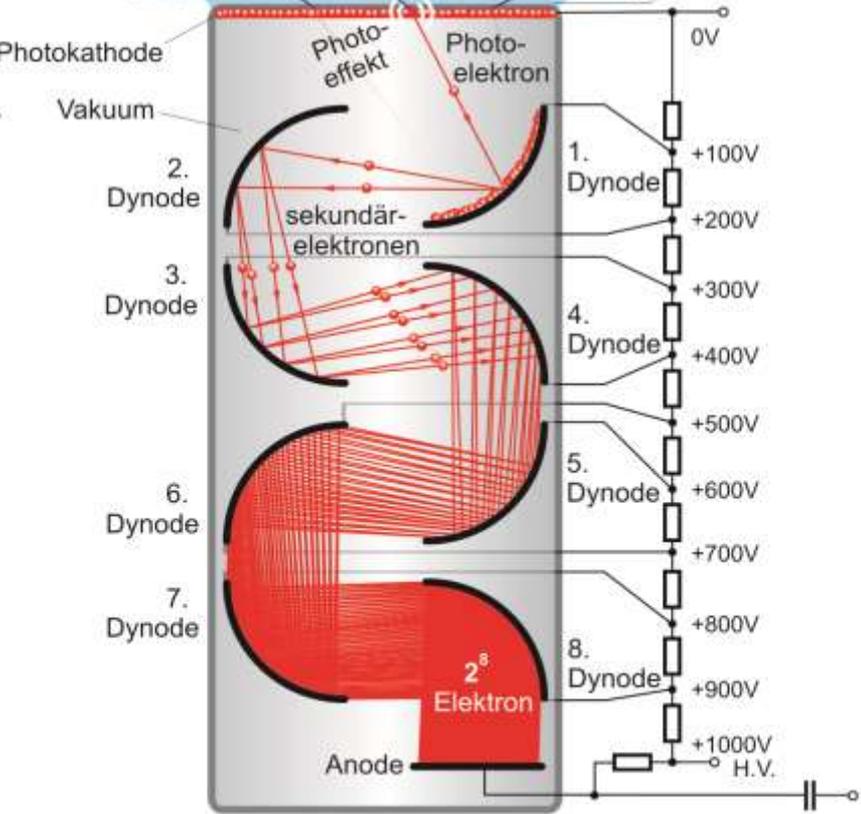
Bay Zoltán
 1900-1992

SZINTILLATOR

Na I (TI)



PHOTOMULTIPLIER (SEKUNDÄRELEKTRONENVERVIELFACHER)



γ-Photonen

Photoeffekt, Compton-Streuung

Lichtphoton Szintillation

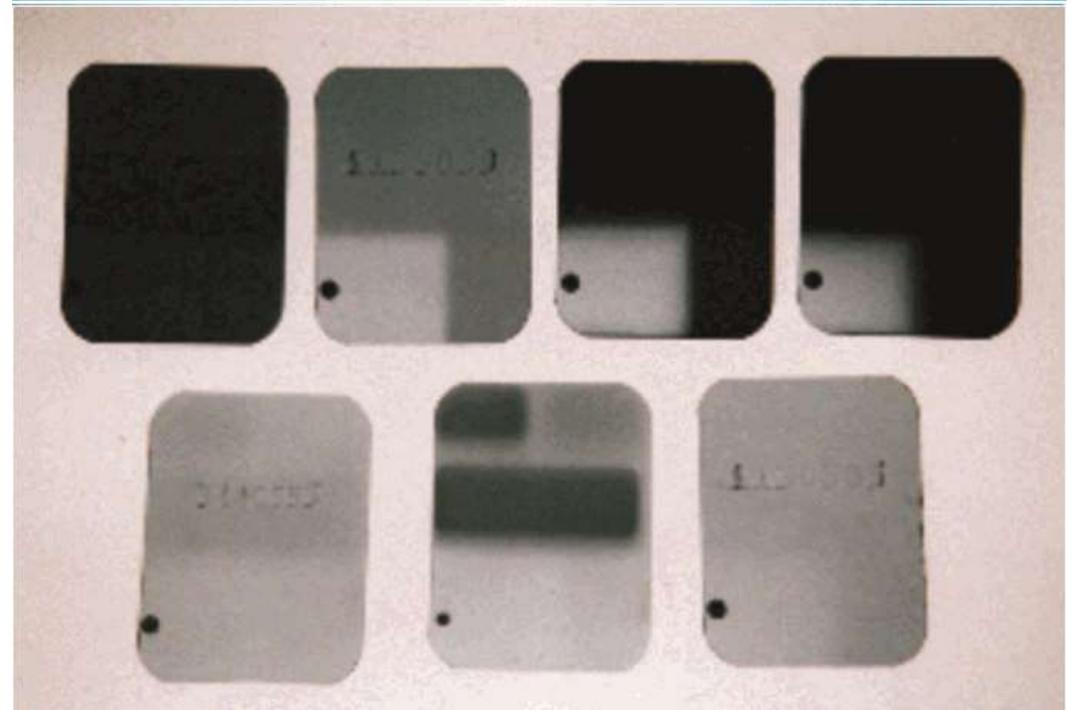
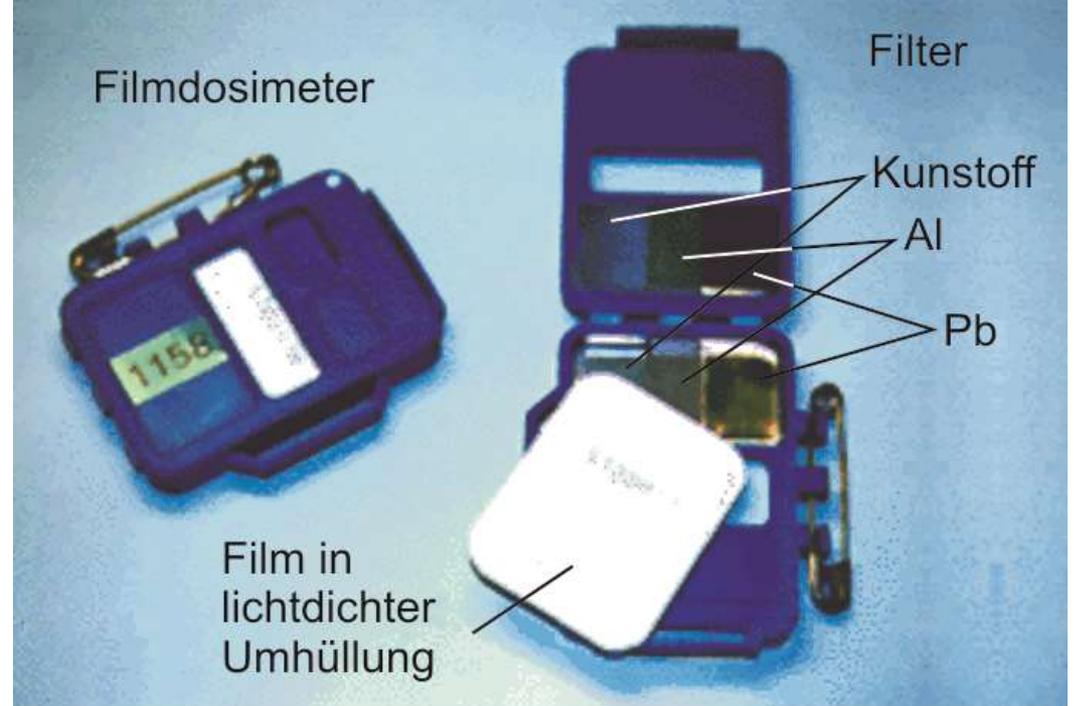
"klassischer" Photoeffekt

lawinenartige Vervielfachung der Elektronen

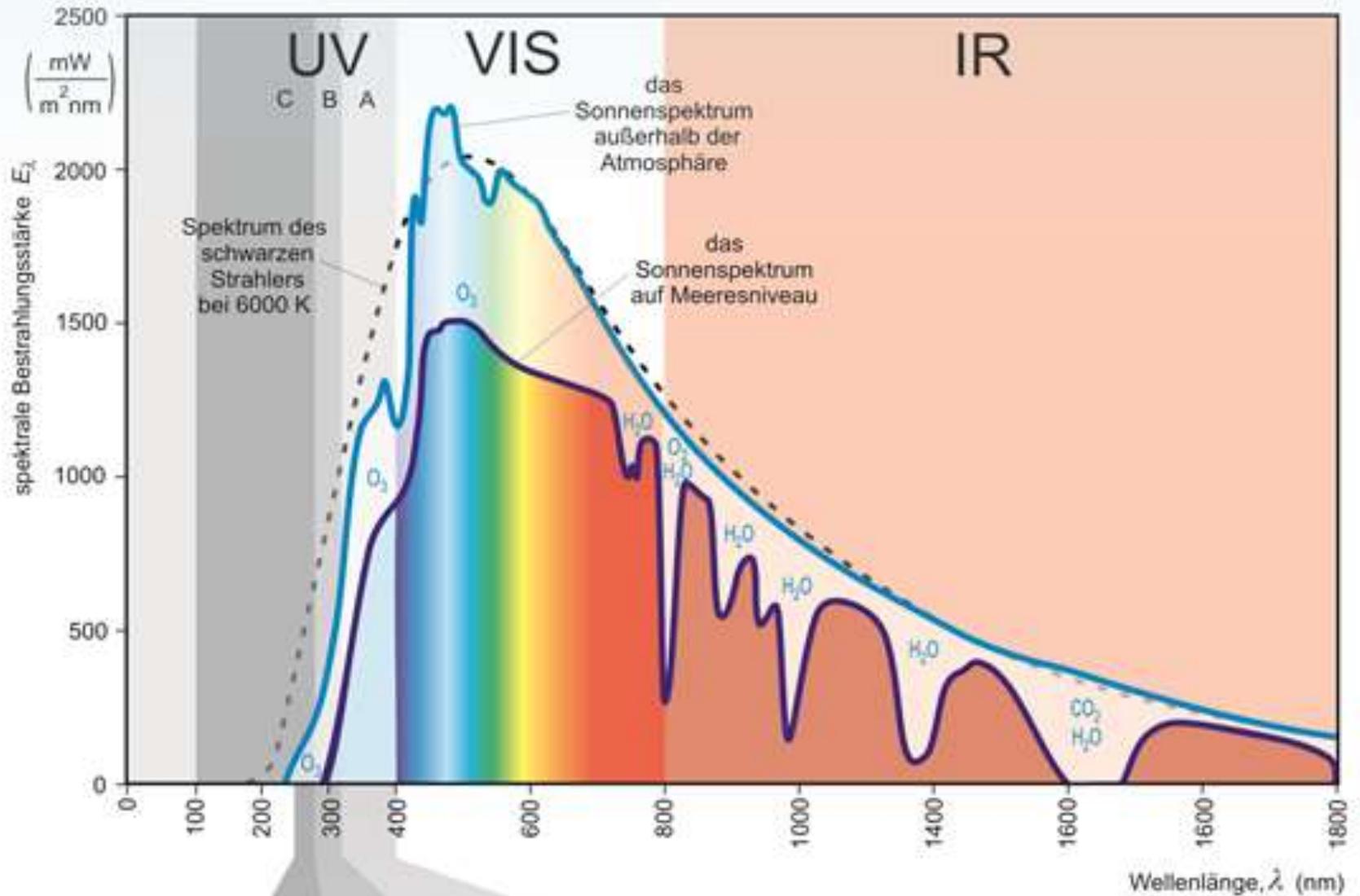
el. Spannungsimpuls

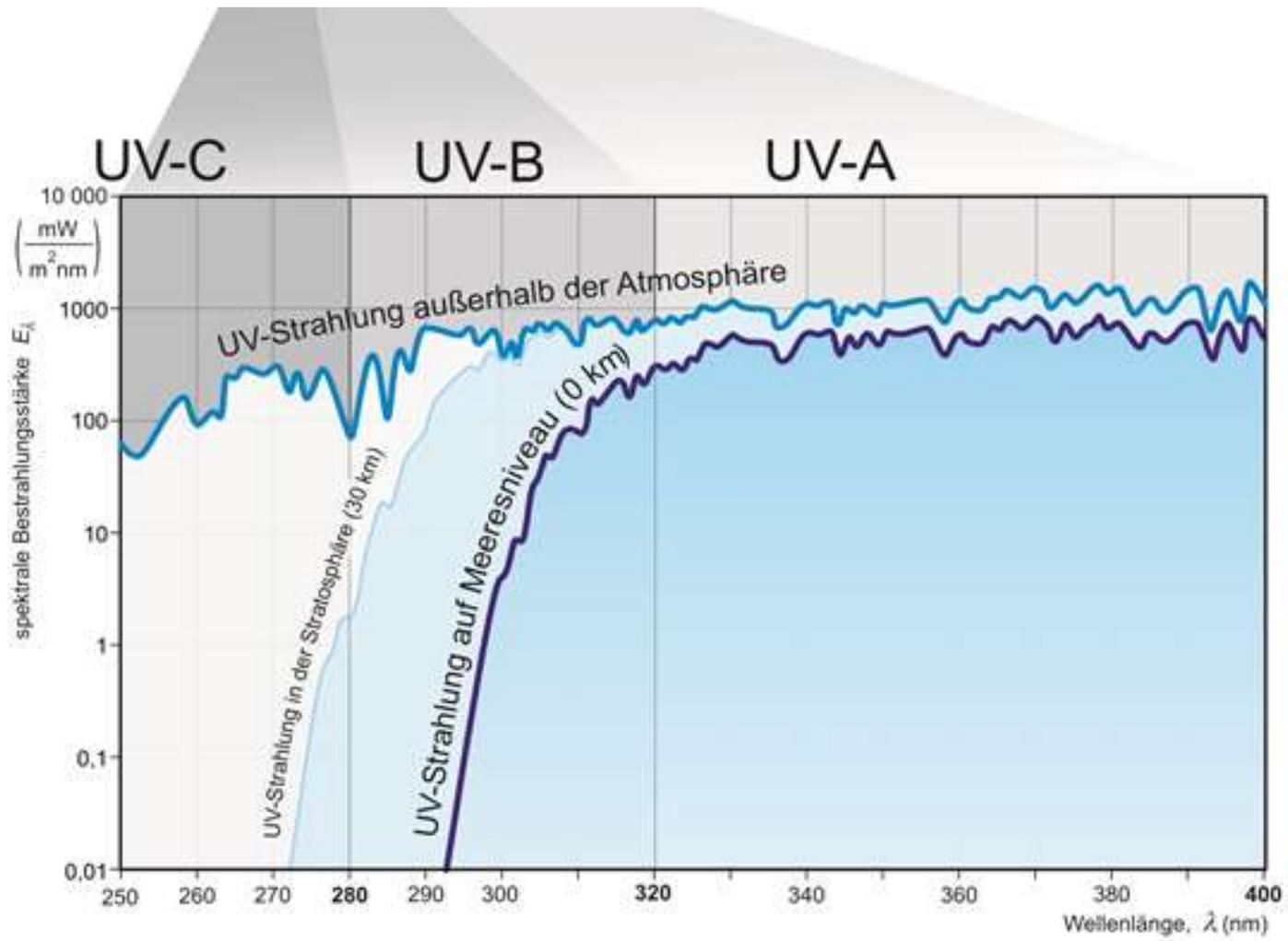
$U \sim E_\gamma$

Veraltet

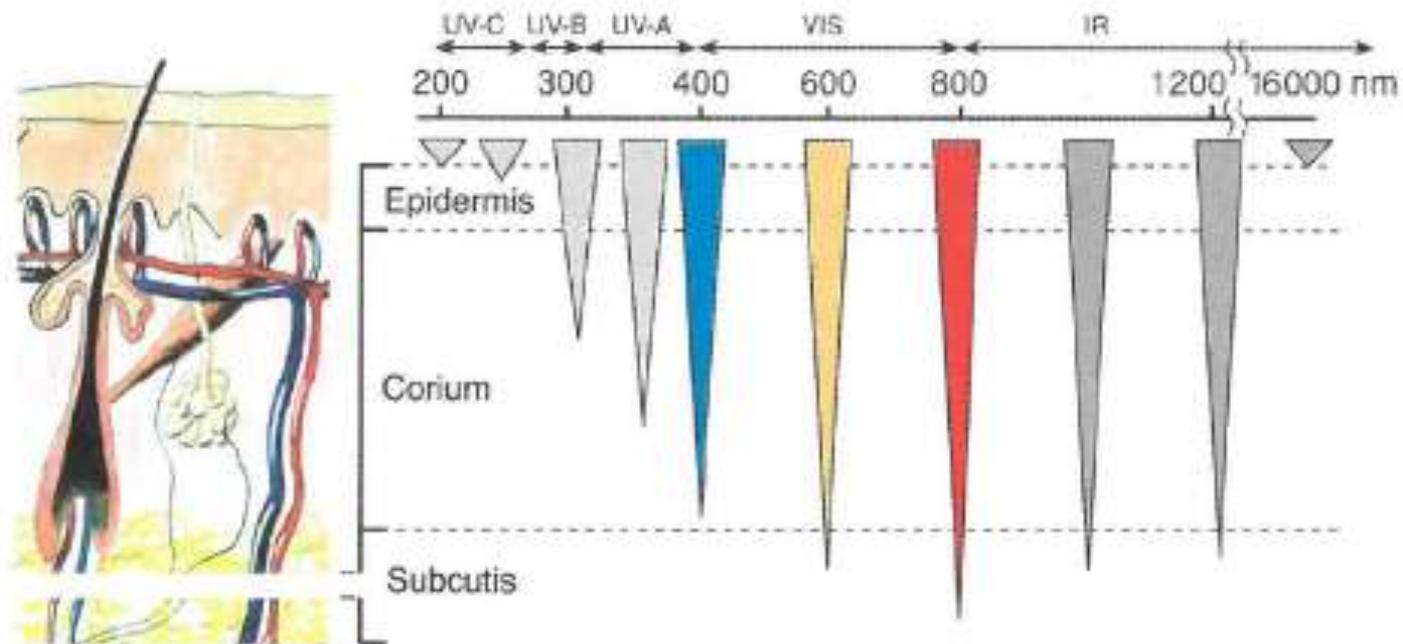


UV Dosimetrie



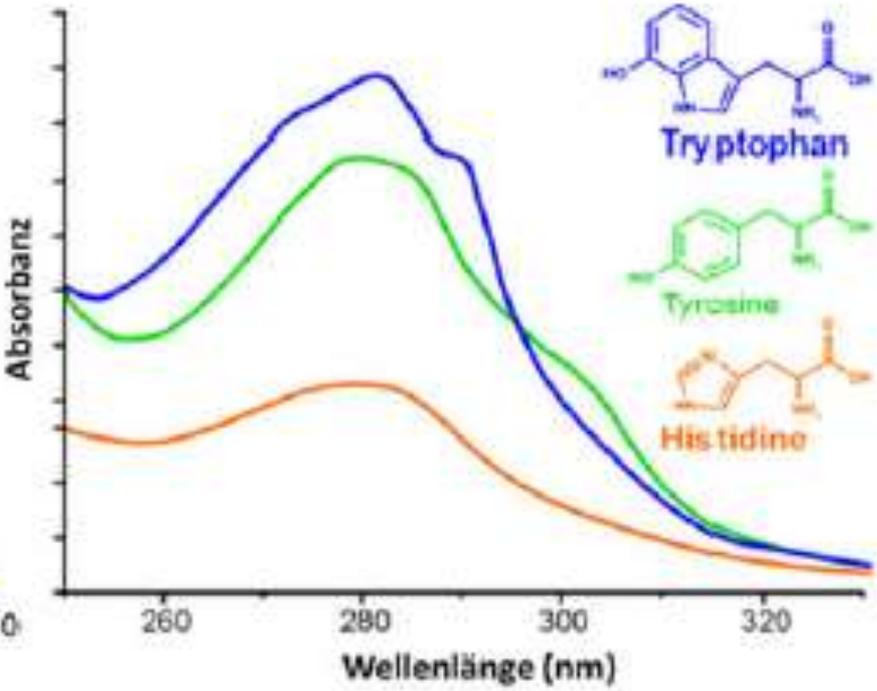
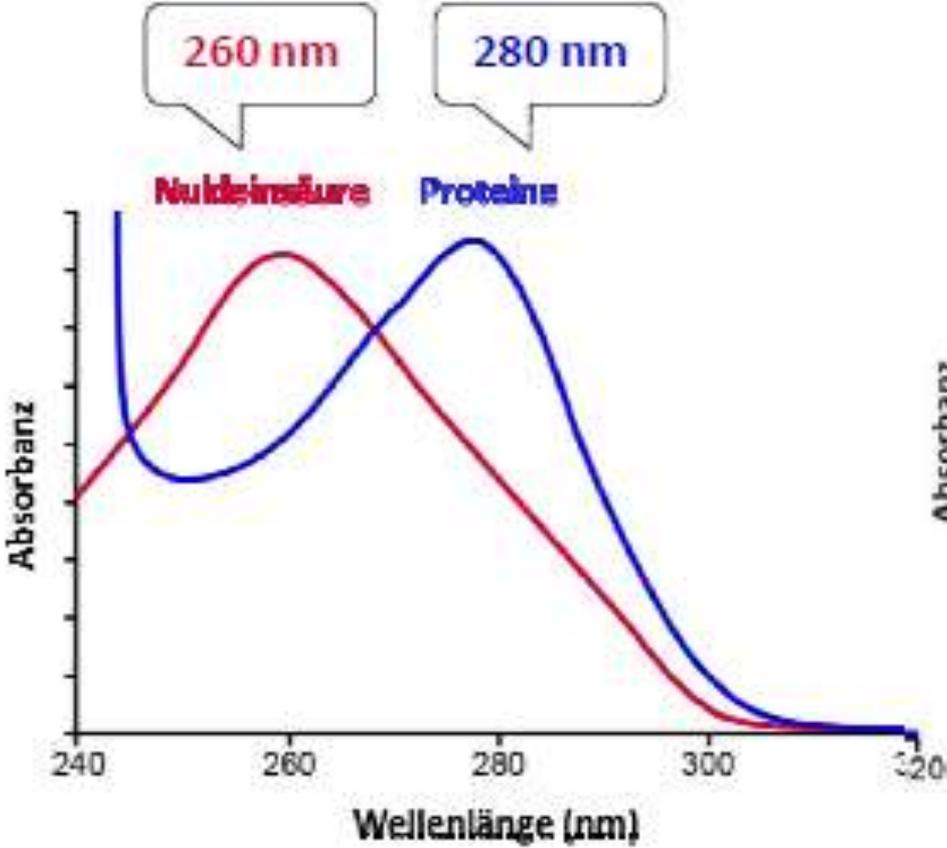


Eindringtiefen in der Haut



- Die Eindringtiefe hängt von der Wellenlänge des Lichtes ab
 - Absorption: $A(\lambda)$
 - Reflexion: $\rho(\lambda)$
- Maximale Eindringtiefe: **rotes Licht**

Endogene Chromophore: Nukleinsäuren, Proteine, Melanin, Opsin, Urocaninsäure, ...



ULTRAVIOLETTE STRAHLUNG: nichtionisierende elektromagnetische Strahlung. Der Wellenlängenbereich umfasst ca. 100 nm - 400 nm, er wird in drei Teile aufgeteilt: UV-A (320 nm - 400 nm), UV-B (280 nm - 320 nm) und UV-C (100 nm - 280 nm).

DIE ROLLE DER OZONSCHICHT: Die natürliche **UV-Strahlung** kommt von der Sonne. Die Ozonschicht der Stratosphäre absorbiert den UV-C Teil vollkommen, den UV-B Teil schwächt sie deutlich. Für das Leben auf der Erde spielt sie eine tragende Rolle.

PHYSIKALISCHE DOSIS: Produkt aus Bestrahlungsstärke (E , Leistung pro Flächeneinheit des bestrahlten Körpers) und Bestrahlungsdauer. Maßeinheit: J/m².

SPEKTRALE BESTRAHLUNGSSTÄRKE (E_λ): Leistung pro Flächeneinheit des bestrahlten Körpers und Einheit des Wellenlängenbereichs. Maßeinheit: W/(m²·nm).

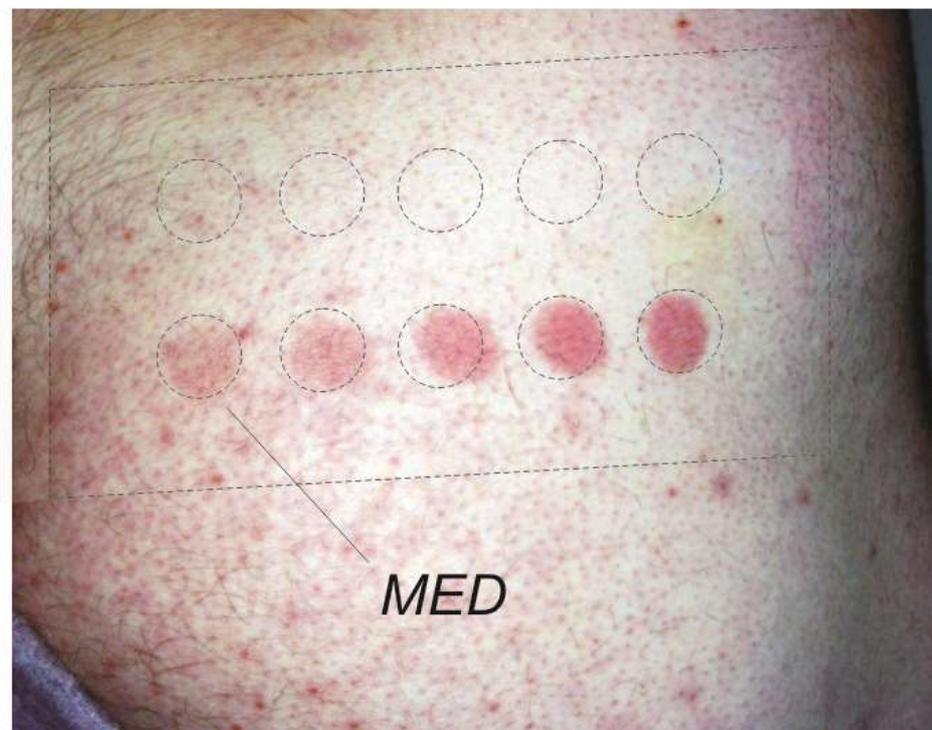
SPEKTRALE EMPFINDLICHKEIT ($S(\lambda)$): Bei einer gegebenen biologischen Wirkung ist die Empfindlichkeit des biologischen Systems (Haut, DNA usw.) der Reziprok der **physikalischen Dosis**, welche die gegebene Wirkung gerade bewirkt.

WIRKUNGSSPEKTRUM: Die Wellenlängenfunktion der **spektralen Empfindlichkeit**.

BIOLOGISCH EFFEKTIVE DOSIS (BED, H): Die mit der spektralen Empfindlichkeit gewichtete Summe der für die einzelnen Wellenlängenbereiche gültigen **physikalischen Dosen**.

MINIMALE ERYTHEMDOSIS (MED): Die geringste physikalische Dosis, die ein gerade noch wahrnehmbares Erythem an der menschlichen Haut verursacht. Ihr Wert ist individuell in Abhängigkeit vom Hauttyp sehr verschieden.

URACILDOSIMETER: Ein auch als Personendosimeter nutzbares UV-Dosimeter mit einem ähnlichen **Wirkungsspektrum** wie die DNA.

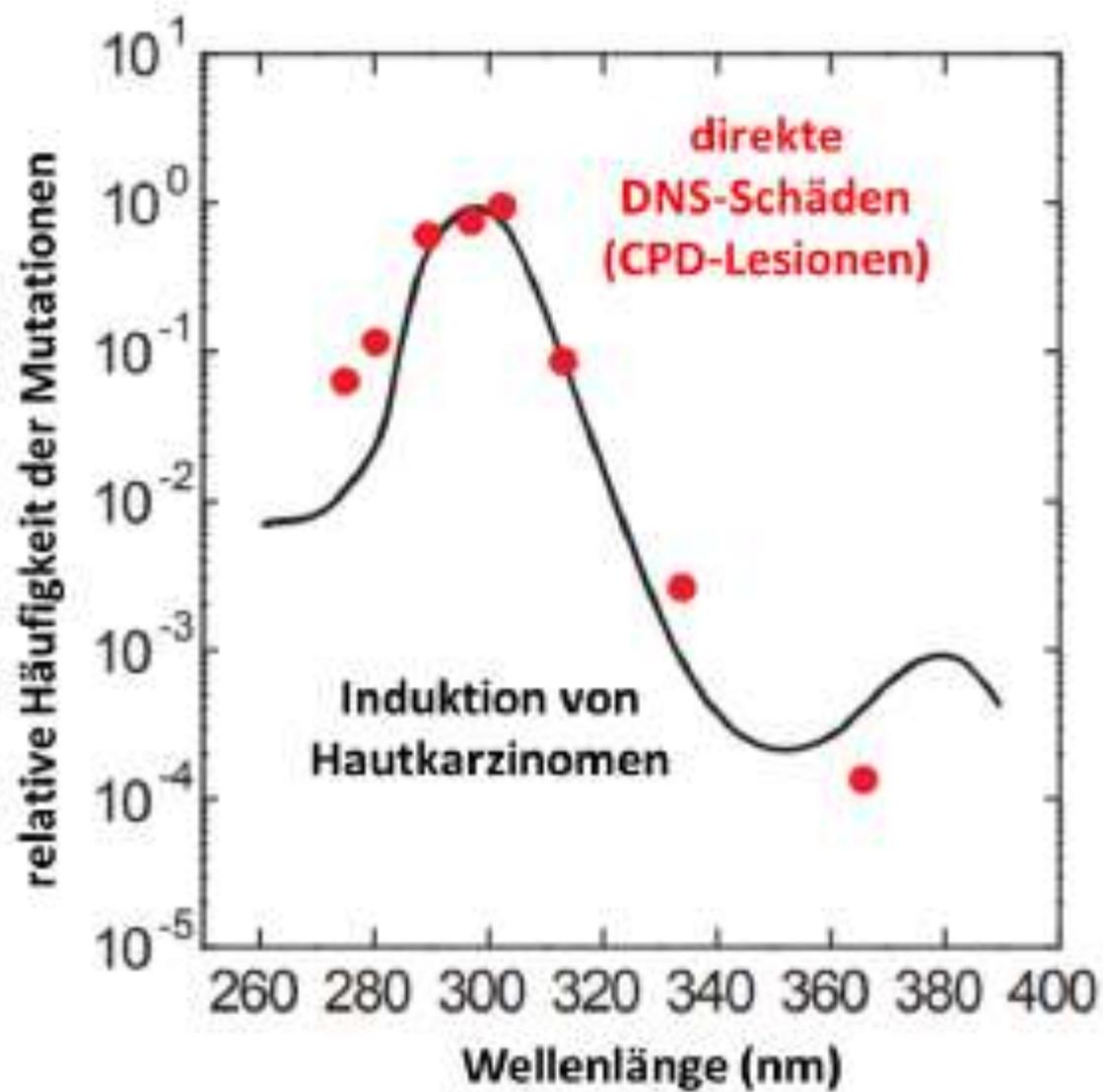


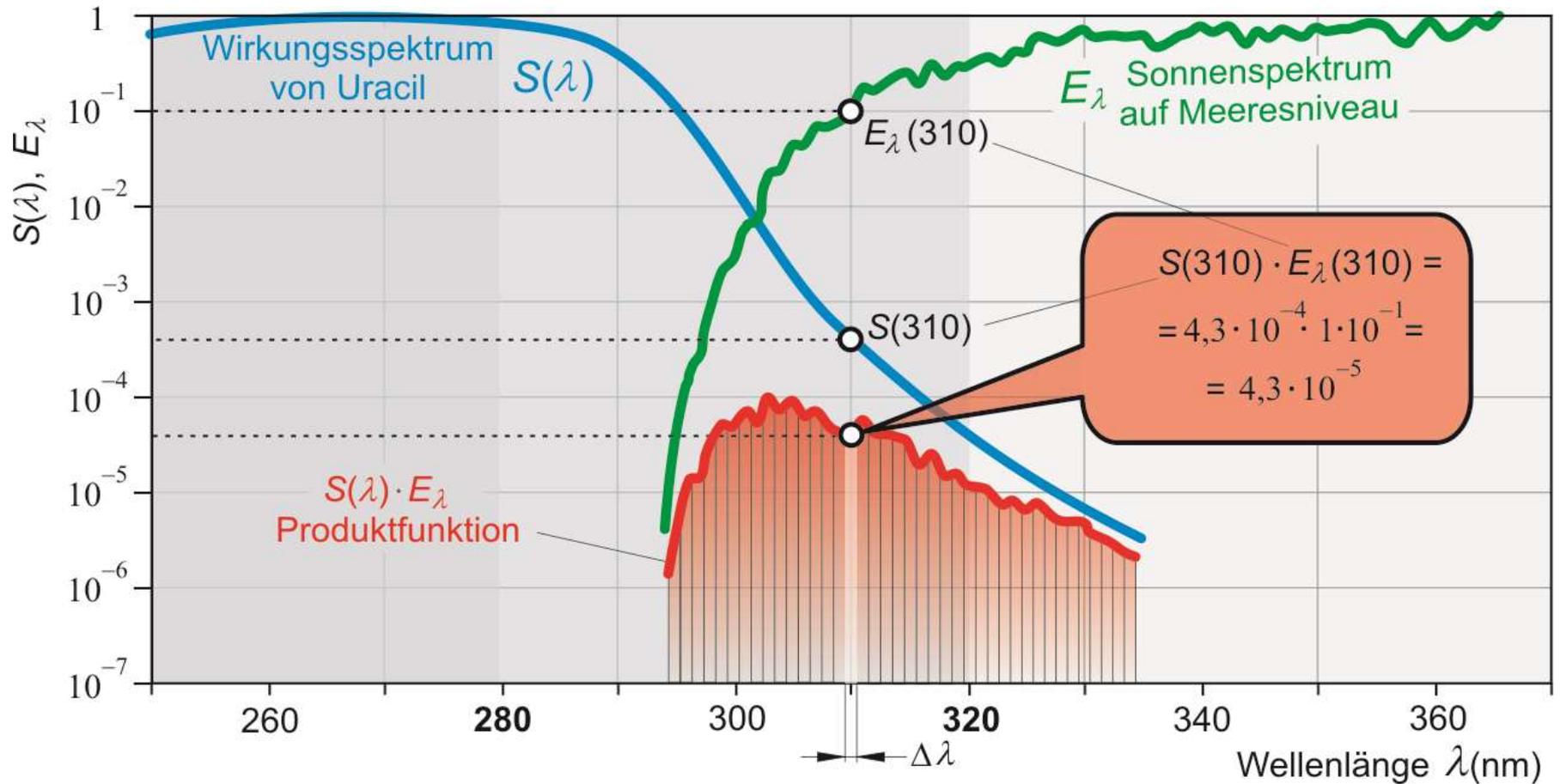
$$H = S \cdot E \cdot t \quad \text{biologisch wirksame Dosis}$$

$$E_{\lambda} = \frac{\Delta E}{\Delta \lambda} \quad \text{spektrale Bestrahlungsstärke}$$

$$H = t \cdot \sum_{i=1}^n S(\lambda_i) \cdot E_{\lambda}(\lambda_i) \cdot \Delta \lambda$$

Empfindlichkeit





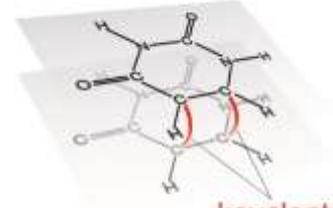
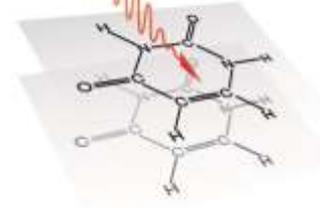
S passt!

UV- Photon
($\lambda = 240 - 350 \text{ nm}$)

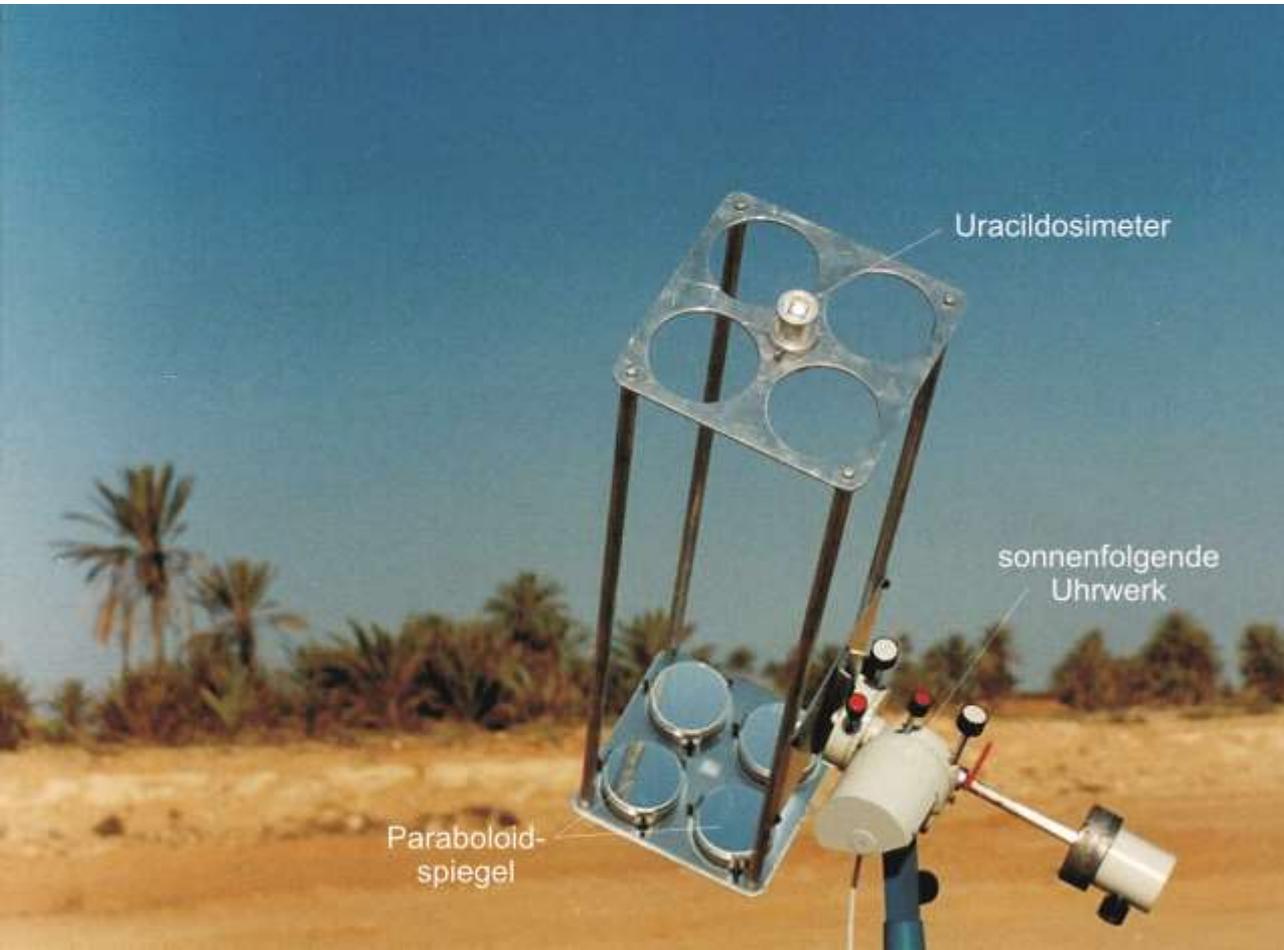
+
URACIL-
MONO-
MERE



URACIL-
DIMER



kovalente
Bindungen

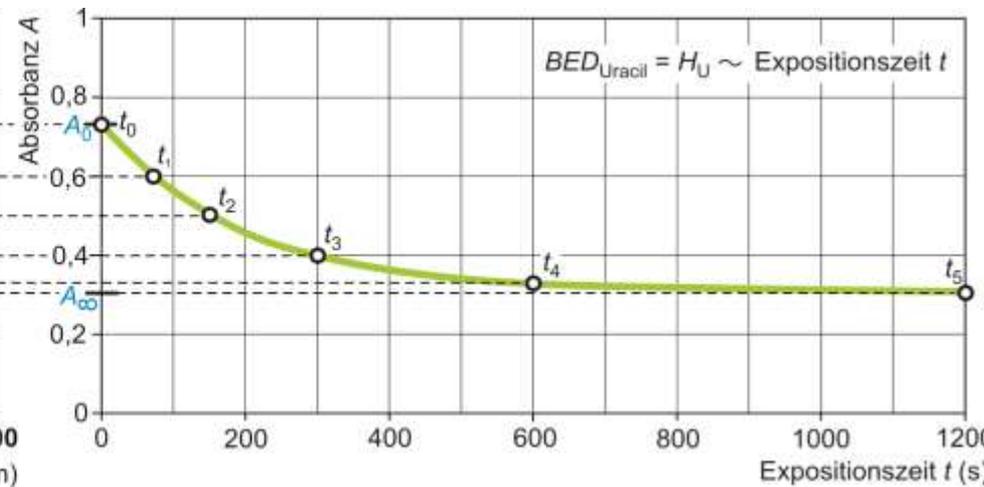
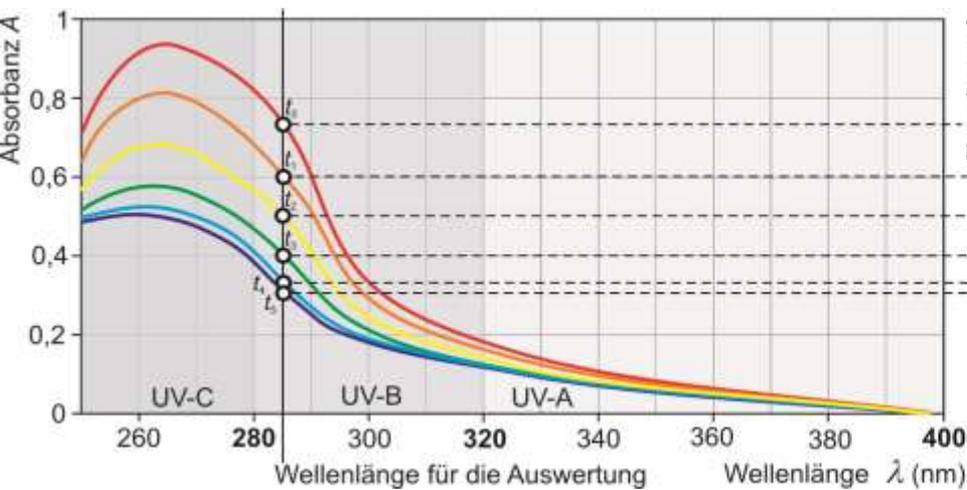


Uracildosimeter

sonnenfolgende
Uhrwerk

Paraboloid-
spiegel

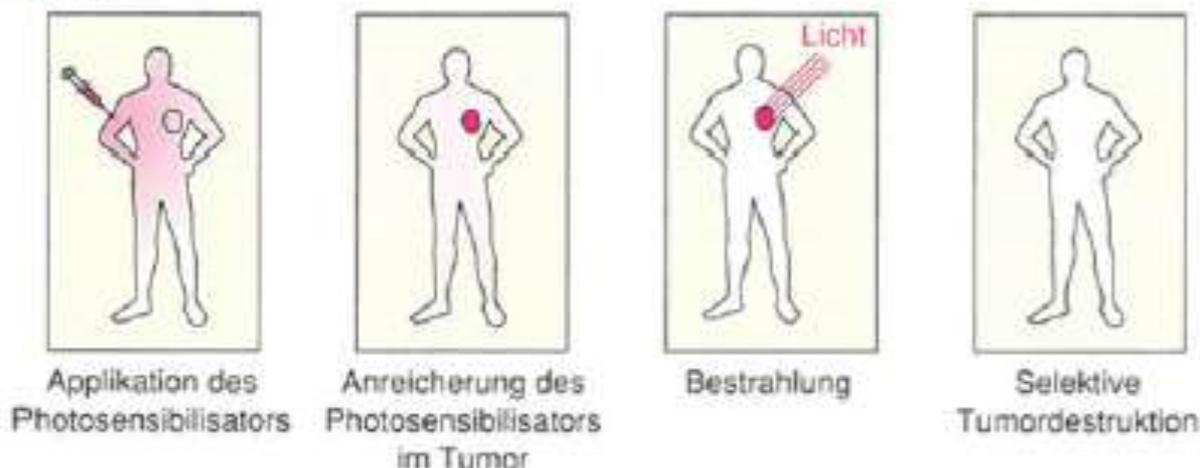
$$H_U = \ln \frac{A_0 - A_\infty}{A(t) - A_\infty}$$



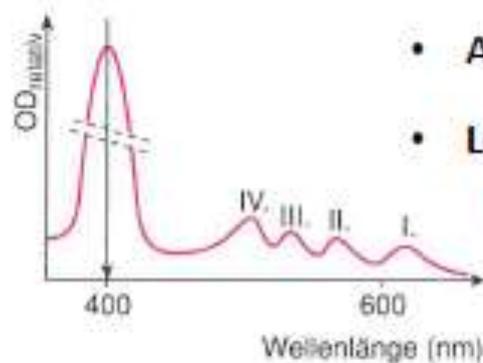
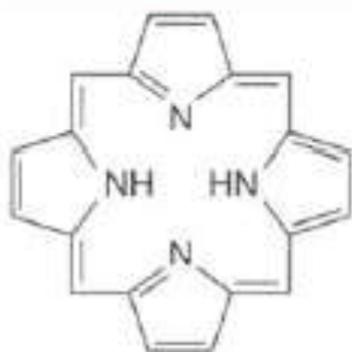
Therapie

PDT: Photodynamische Therapie

Hauptschritte:



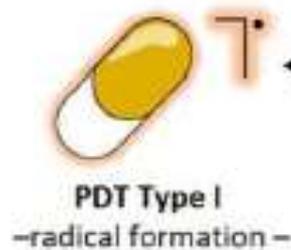
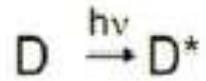
Struktur und Absorptionsspektrum der Porphyrine:



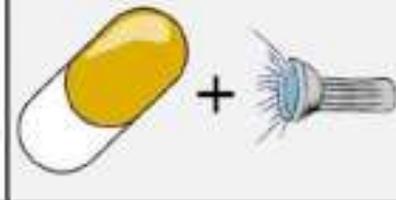
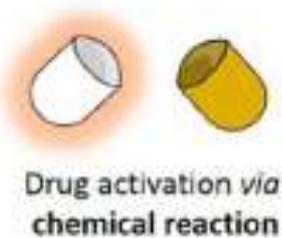
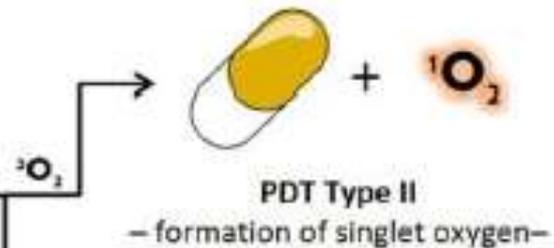
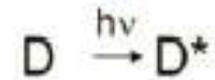
- Absorptionsmaximum bei ~ 400 nm
- Lokale Maxima im VIS-Bereich
- **maximale Eindringtiefe**

PDT: Basis der biologischen Wirkung

Übergabe von
Elektronen



Übermittlung von
Energie





Strahlentherapie

Strahlentherapie: Anwendung der schädigende Wirkung der ionisierenden Strahlungen für Zerstörung der (hauptsächlich Tumor-) Geweben.

Fragen zu besprechen:

1. Welcher Strahlungstyp soll angewendet werden?
2. Welche Dosis anzuwenden?
3. Wie kann diese Strahlung hergestellt werden?
4. Wie kann die Strahlung das Zielorgan erreichen (so daß die andere Gewebe nicht beschädigen)?

1. Art der Strahlung

α ,	β , e^- ,	γ , Rtg,	n,	p ...
	Elektron	Photon		

α : Kleine Reichweite (in Geweben $\approx \mu\text{m}$)

Direkt in das Tumorgewebe eingegebene
 α -strahlendes Isotop (zB. zum Antikörper gebunden)

β^- , beschleunigtes e^- : beide sind Elektronen, aber:

Kontinuierliche
Energieverteilung
 E_{max} hängt von Isotopart

mit gleicher und leicht
kontrollierbarer Energie

β^-

beschleunigtes e^-

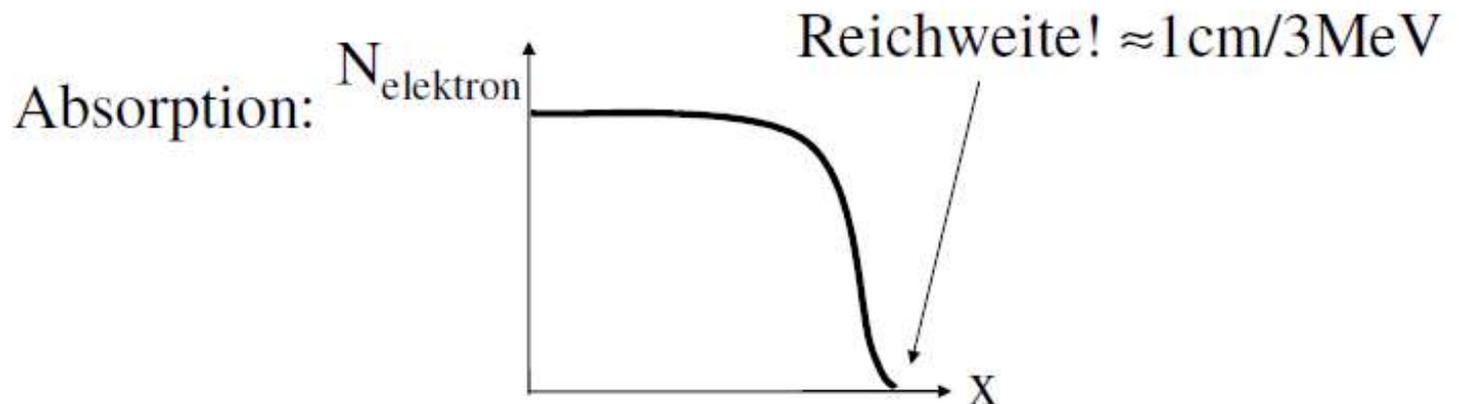
Typische Energie

einige MeV
(zu niedrig)

10-20 MeV

Herstellung der Elektronenstrahlung:

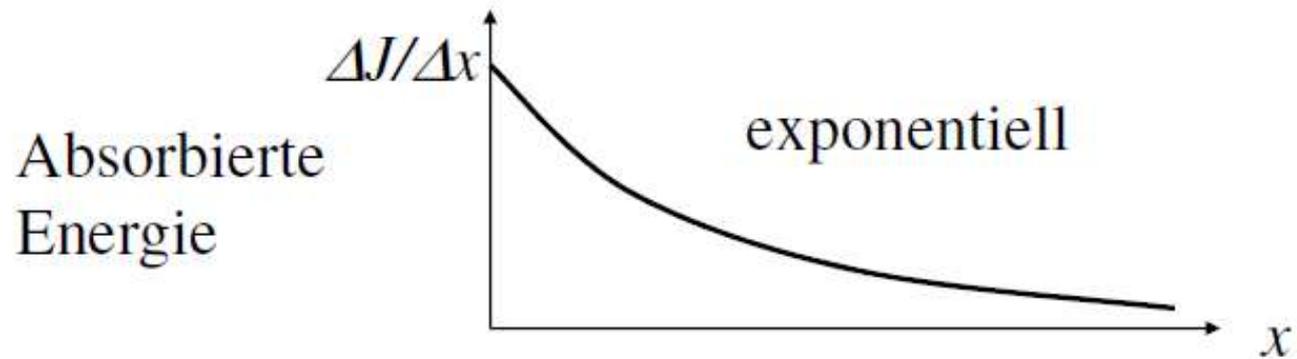
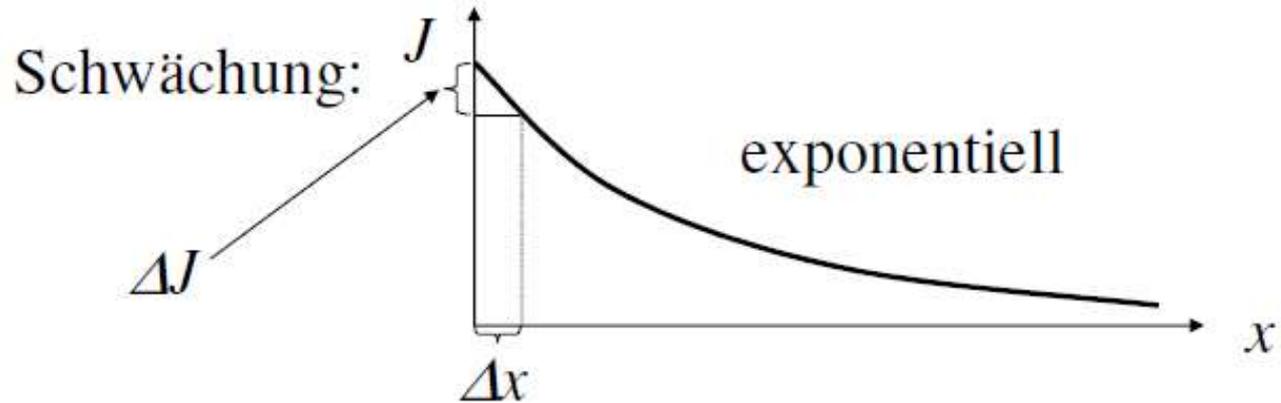
- Betatron
- Linearbeschleuniger



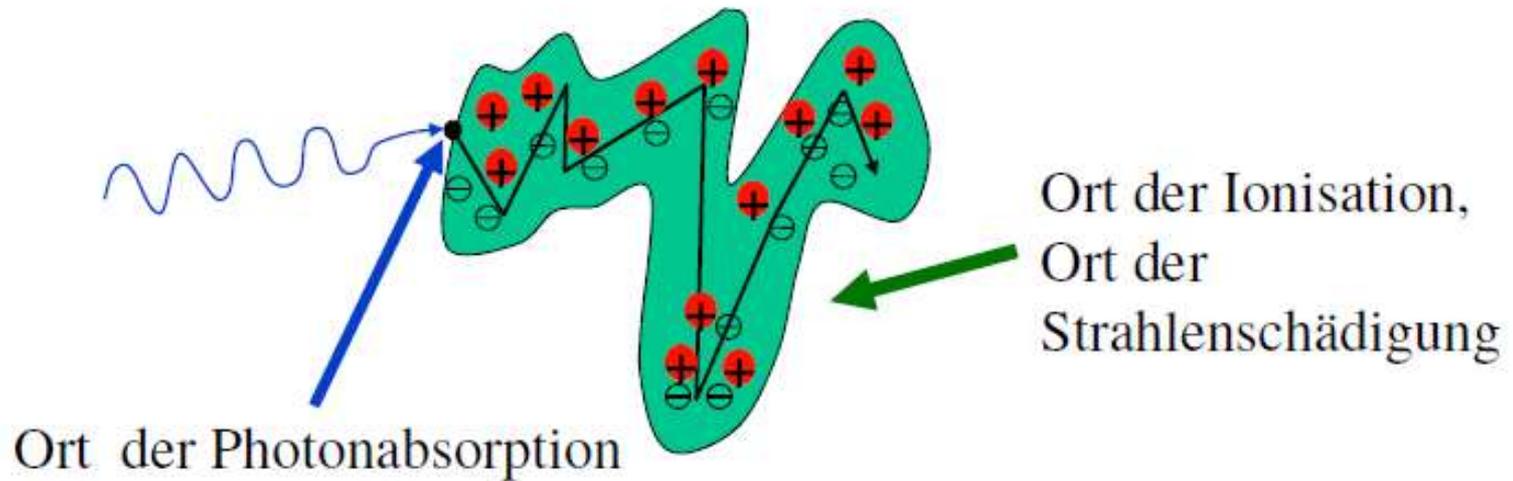
6-21 MeV \Rightarrow 2-7 cm Tumoren nahe der Körperoberfläche

γ -Strahlung und Röntgenstrahlung

ihre Herstellungen und Spektren sind unterschiedlich!

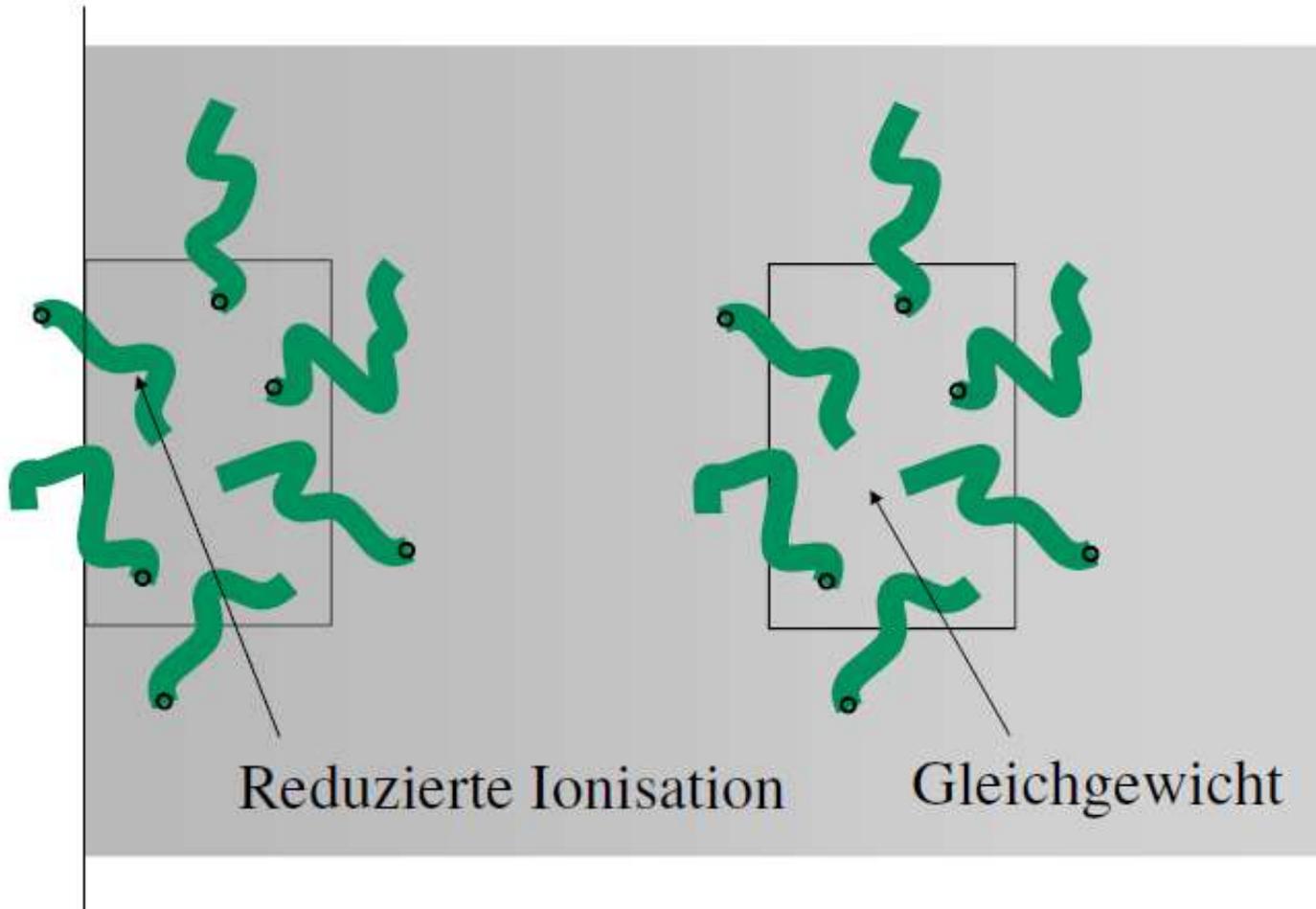


Strahlenschädigung: Ionisation => unerwünschte Ionen =>
schädigende biochemische Prozesse
=> Ort der Strahlenschädigung = Ort der Ionisation



Körperoberfläche

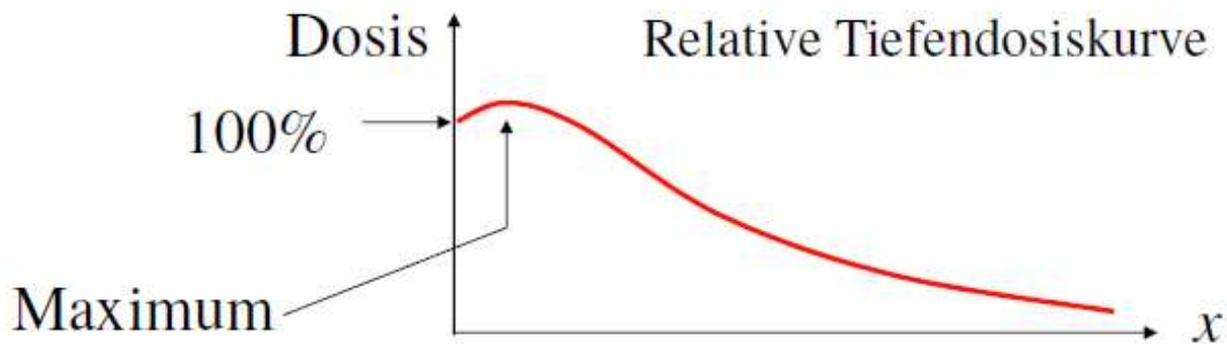
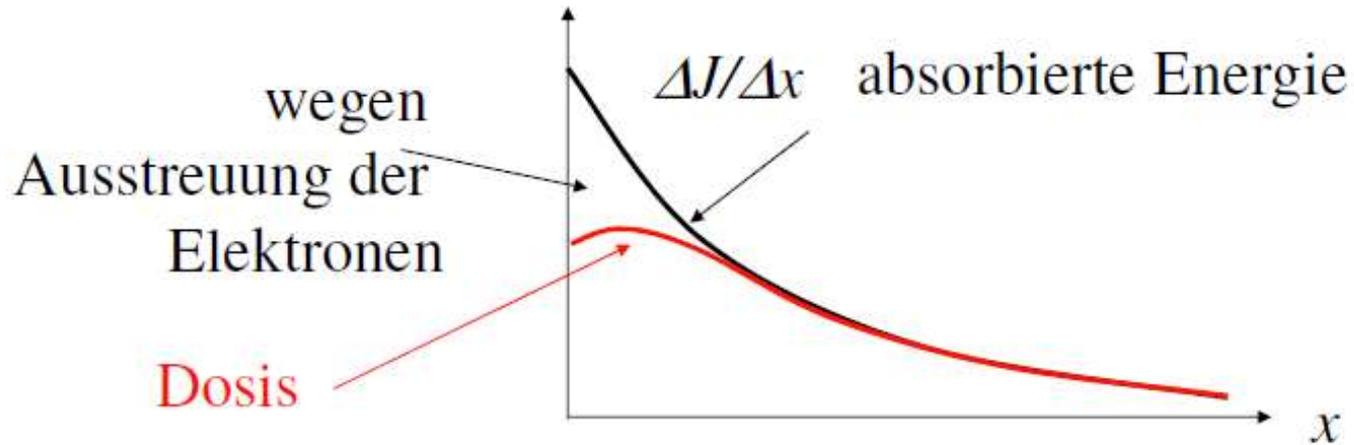
Gewebe



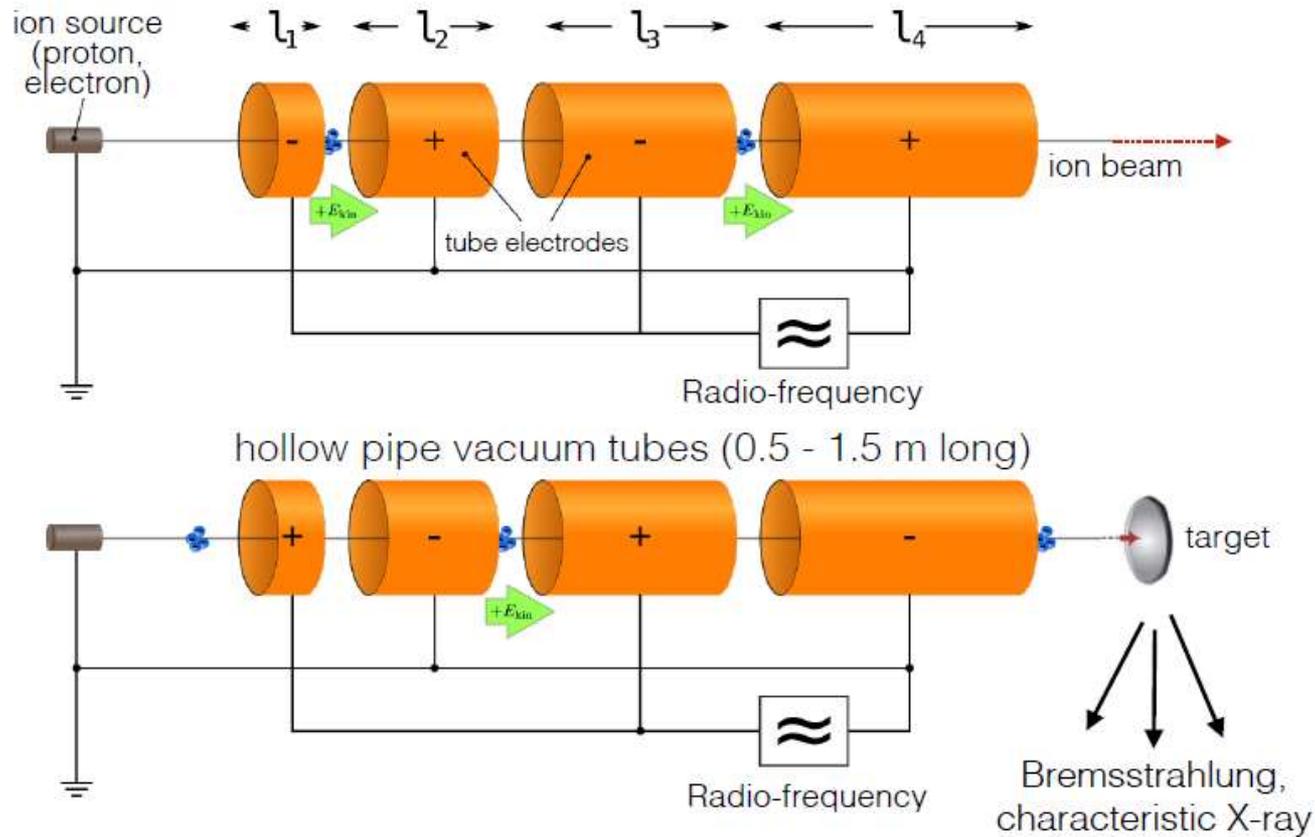
Reduzierte Ionisation

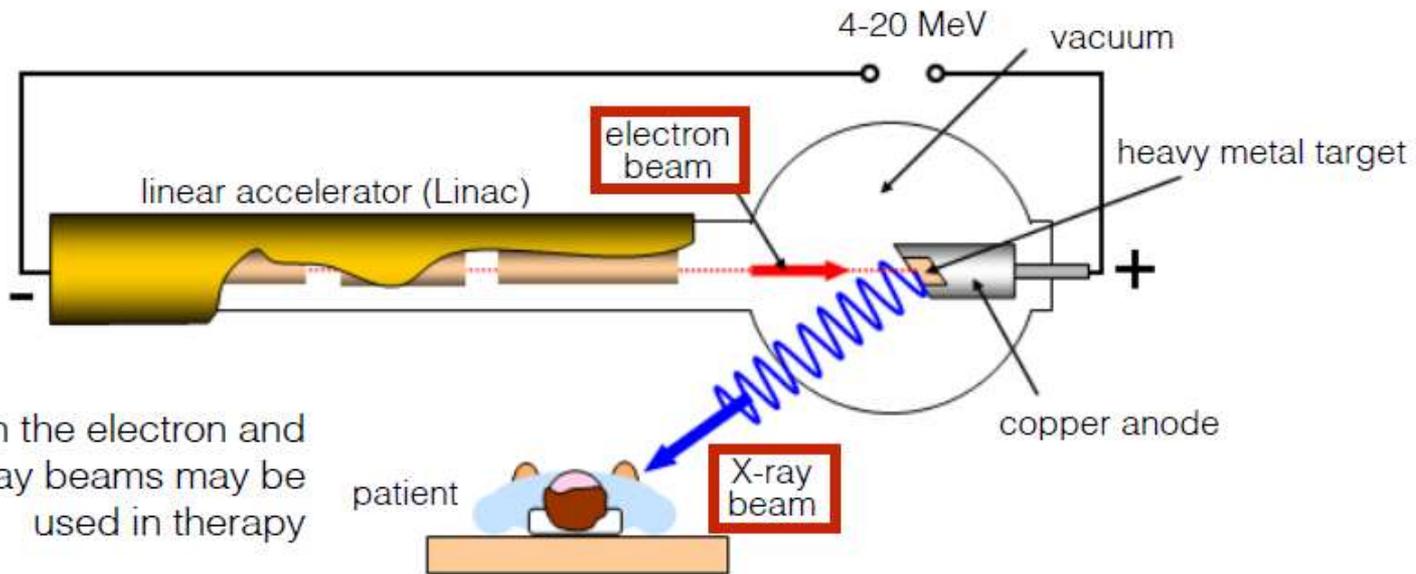
Gleichgewicht

Relative Tiefendosis

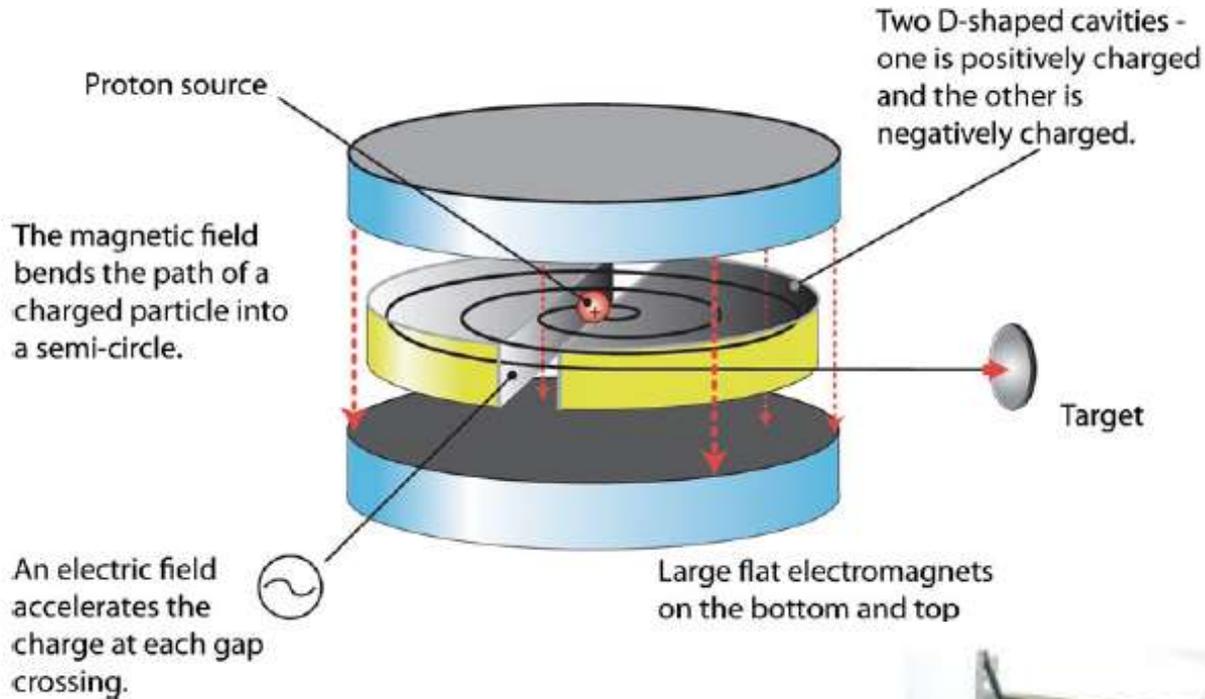


Linearbeschleuniger





Cyclotron

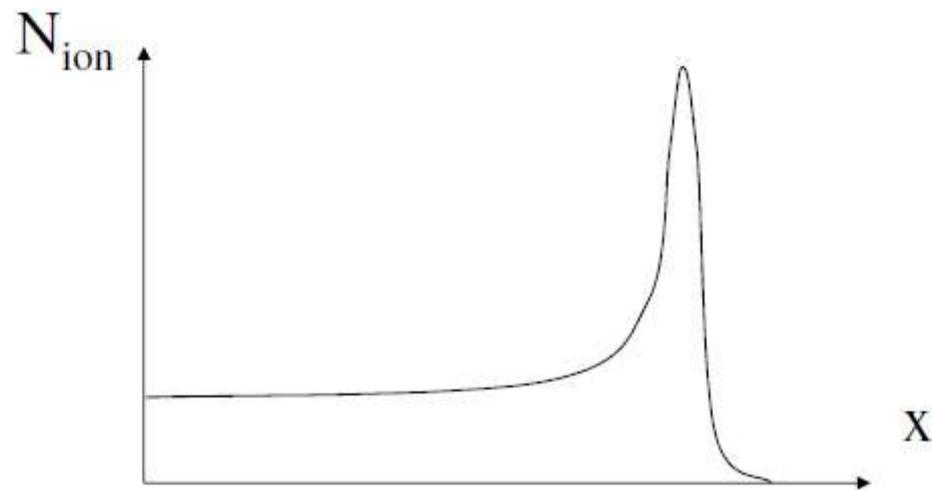


11 MeV medical cyclotron

Protonenstrahlung

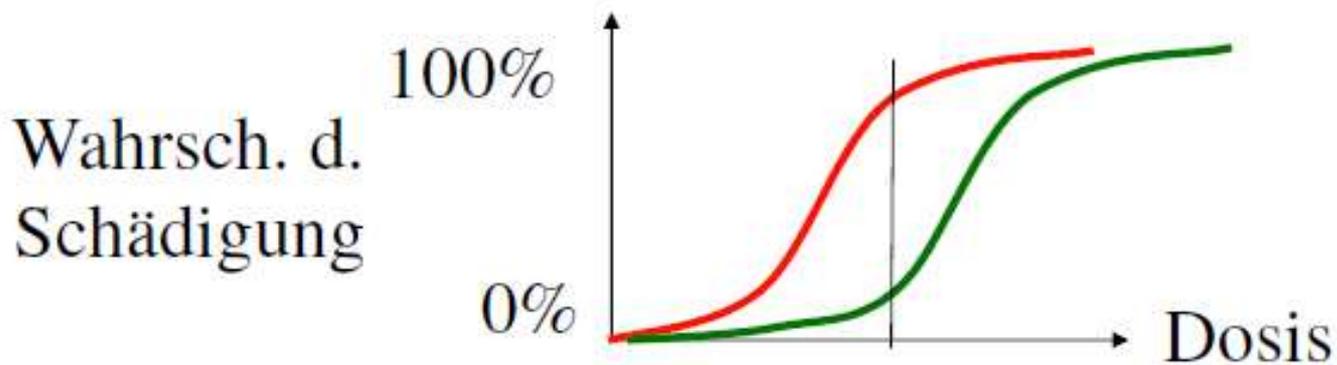
Ideal, aber sehr teuer

Teilcheneschleuniger => variierbare Teilchenenergie
mehrere 100 MeV => Eindringtiefe ~ 10-20 cm



10x der Dosis was bei einer Ganzkörperbestrahlung tödlich wäre.

- Aber:
- Lokalisiert!
 - Fraktionierung
 - Die schnell wachsende Gewebe sind empfindlicher gegen Strahlenschädigung.



Strahlentherapeutische Behandlungstypen

Teletherapie

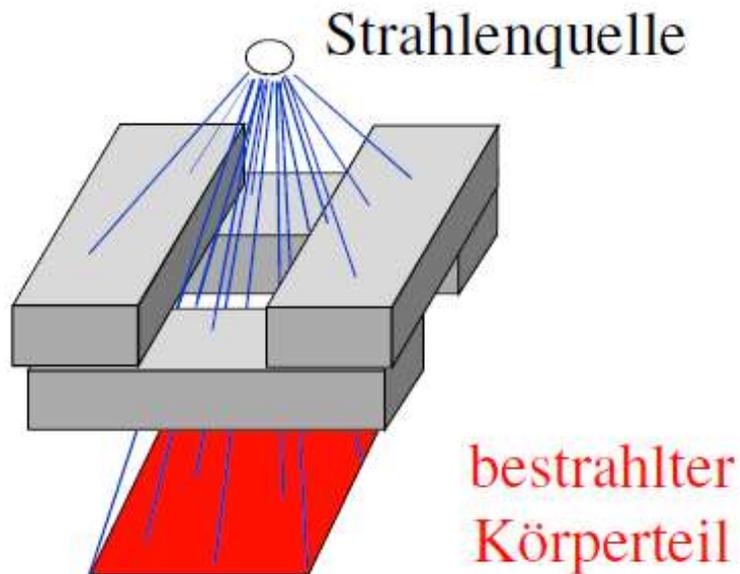
Kontakt Therapie
(Brachytherapie)

Afterloading
(Nachladen)

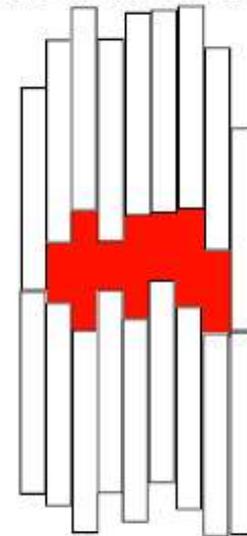
Implantations-
verfahren

Teletherapie

Kollimator

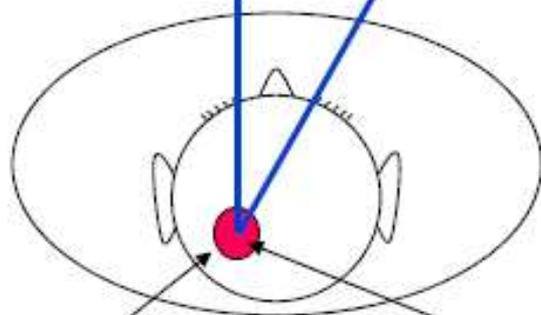
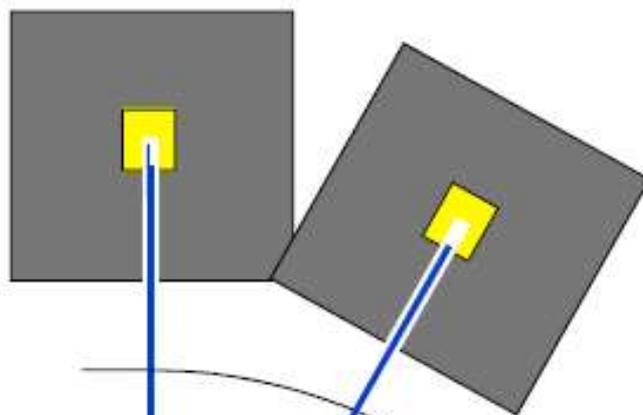


Kollimator aus Lamellen
(multileafkollimator)



Die Lamellen sind bewegbar: IMRT (Intensitätsmodulierte Radiotherapie)

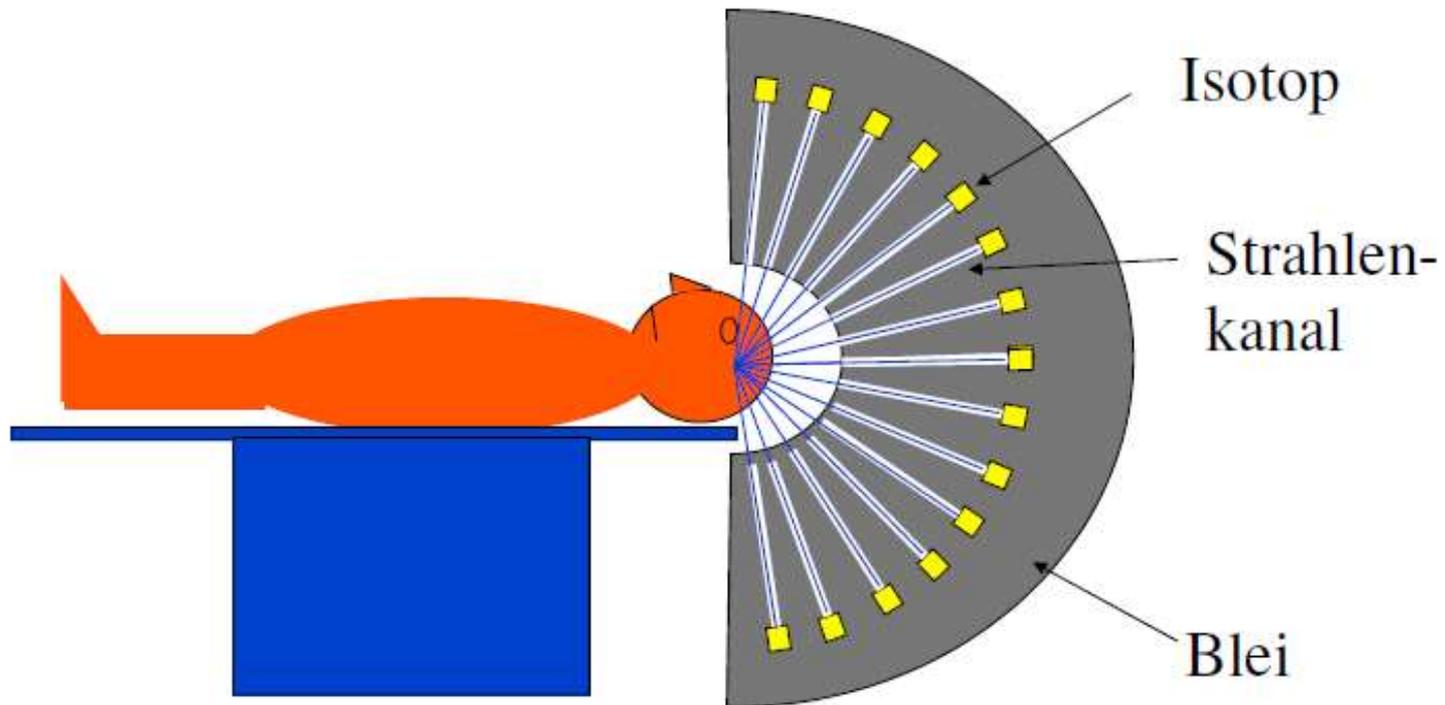
Strahlenquelle
Kollimator



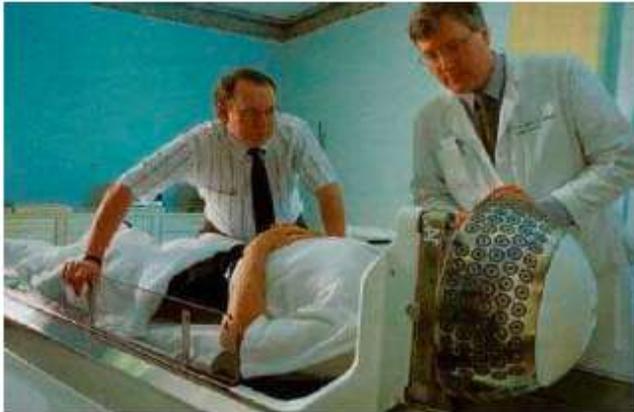
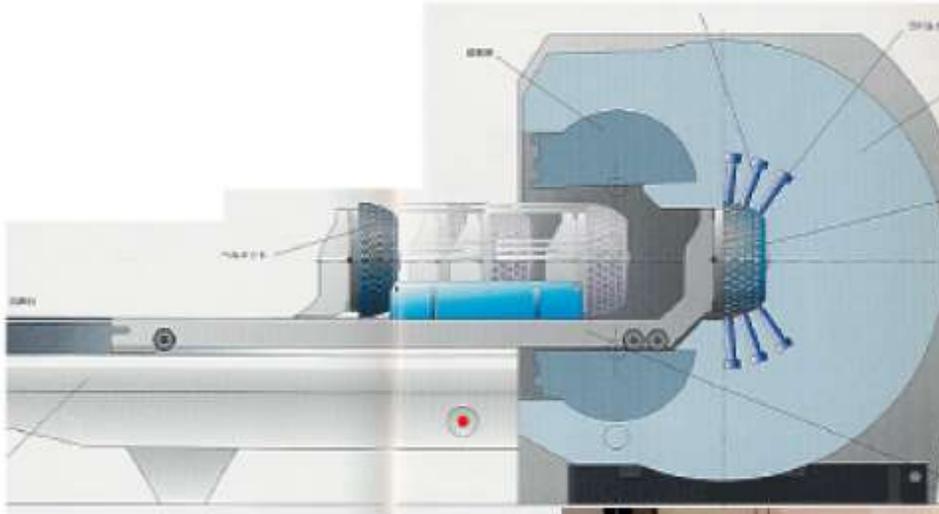
zu bestrahlendem Herd

Drehachse
(Isozentrum)

Statt Umdrehung von einer Strahlenquelle: viele Strahlenquellen (Isotope) strahlen gleichzeitig aus unterschiedlichen Richtungen auf ein kleines Zielvolumen: **Gamma-Messer (Gamma Knife)**



Gamma-Messer (Gamma-Knife):
200 Isotope
Gesamtaktivität ~100 TBq
Nur der Patient wird bewegt (mit Bett)
Schießen mit mm Genauigkeit.
Enwickelt für Gehirntumoren

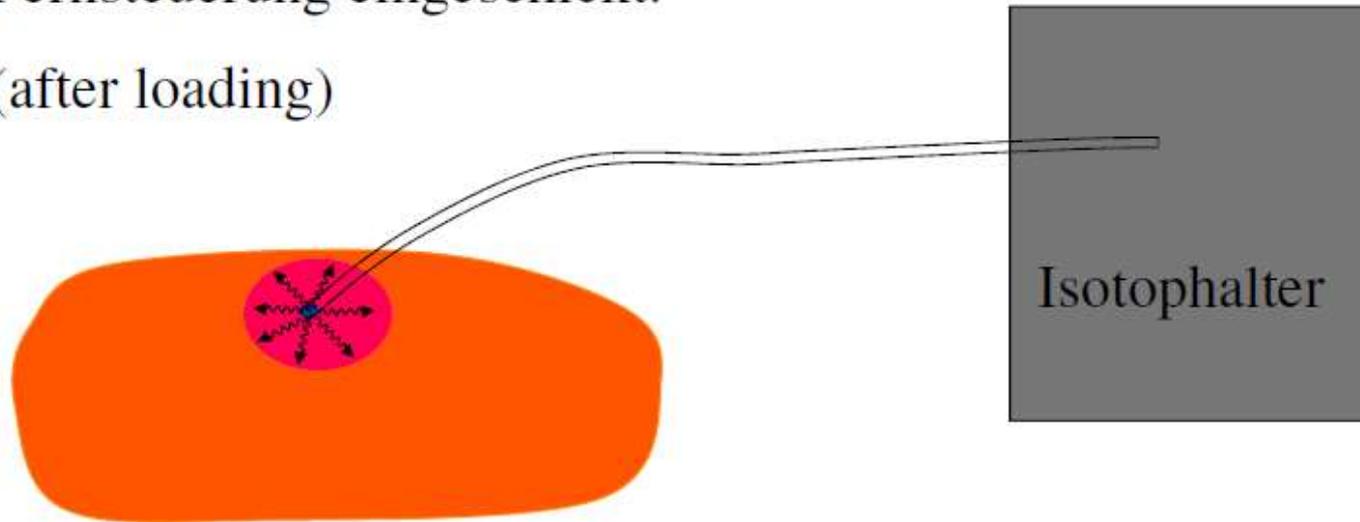


Kontakttherapie (Brachytherapie)

$$D \sim J \sim \frac{1}{r^2}$$

Das Isotop wird in den Körper mit Fernsteuerung eingeschickt.

(after loading)



Brachytherapie mit Isotopimplantate

- Prostata
- ^{125}I
 $T_{1/2}=60\text{Tage}$
Photonen-
energie=35 keV

