

# Physik für Studierende der Medizin im 1. Fachsemester

(PFMF-V); 09410100

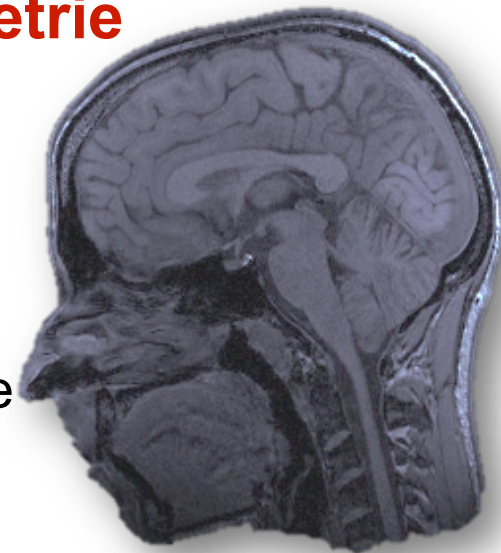
Dienstag mit Freitag 8.15-9.00

## Atomphysik - Teil 4

Atommodell, Atomspektren, Röntgenstrahlung  
Kernphysik, Radioaktivität, Dosimetrie

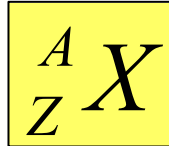


Dr. Simon Moser  
Lehrstuhl für Exp. Physik IV,  
Universität Würzburg  
[simon.moser@physik.uni-wuerzburg.de](mailto:simon.moser@physik.uni-wuerzburg.de)



# Wdh.: Der Atomkern

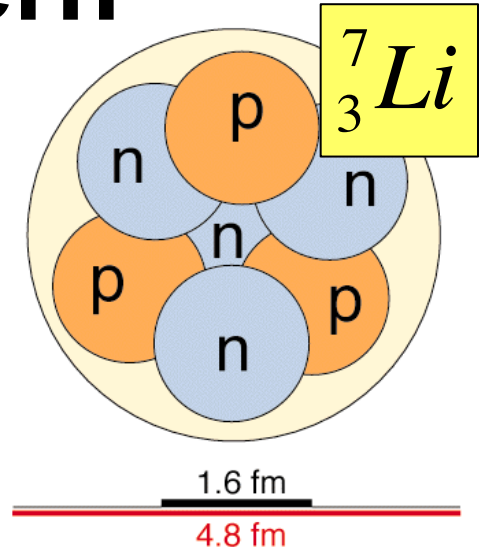
Nuklid X (Atomkern)



**Z** = Anzahl der Protonen/**Ordnungszahl** des Atoms  
im Periodensystem

**N** = Anzahl der Neutronen

**A** = **Z+N** = Nukleonenzahl (**Massenzahl**)



I																	VIII				
1,01 H 1																	4,00 He 2				
6,94 Li 3	9,01 Be 4															10,81 B 5	12,01 C 6	14,01 N 7	16,00 O 8	19,00 F 9	20,18 Ne 10
22,99 Na 11	24,31 Mg 12	III a	IV a	V a	VI a	VII a	VIII a		I a	II a	26,98 Al 13	28,09 Si 14	30,97 P 15	32,06 S 16	35,45 Cl 17	39,95 Ar 18					
39,10 K 19	40,08 Ca 20	44,96 Sc 21	47,87 Ti 22	50,94 V 23	52,00 Cr 24	54,94 Mn 25	55,85 Fe 26	58,93 Co 27	58,69 Ni 28	63,55 Cu 29	65,39 Zn 30	69,72 Ga 31	72,61 Ge 32	74,92 As 33	78,96 Se 34	79,90 Br 35	83,8 Kr 36				

Atommasse in u (molare Masse)

Elementsymbol

Ordnungszahl

- Wasserstoff
- radioaktiv
- Erdalkalimetalle
- Metalle
- Halbmetalle
- Edelgase
- Nichtmetalle
- Alkalimetalle

# Wdh.: Der Atomkern

Atommasse in u (molare Masse)

Elementsymbol

Ordnungszahl

Wasserstoff (blau)    Halbmetalle (grau)  
 radioaktiv (rot)    Edelgase (hellblau)  
 Erdalkalimetalle (gelb)    Nichtmetalle (hellgrün)  
 Metalle (grün)    Alkalimetalle (dunkelgrün)

1,01 H 1																	4,00 He 2
6,94 Li 3	9,01 Be 4											10,81 B 5	12,01 C 6	14,01 N 7	16,00 O 8	19,00 F 9	20,18 Ne 10
22,99 Na 11	24,31 Mg 12	III a	IV a	V a	VI a	VII a	VIII a		I a	II a	26,98 Al 13	28,09 Si 14	30,97 P 15	32,06 S 16	35,45 Cl 17	39,95 Ar 18	
39,10 K	40,08 Ca	44,96 Sc	47,87 Ti	50,94 V	52,00 Cr	54,94 Mn	55,85 Fe	58,93 Co	58,69 Ni	63,55 Cu	65,39 Zn	69,72 Ga	72,61 Ge	74,92 As	78,96 Se	79,90 Br	83,8 Kr

Atommasse in u (molare Masse)

Elementsymbol

Ordnungszahl

Wasserstoff (blau)    Halbmetalle (grau)  
 radioaktiv (rot)    Edelgase (hellblau)  
 Erdalkalimetalle (gelb)    Nichtmetalle (hellgrün)  
 Metalle (grün)    Alkalimetalle (dunkelgrün)

1,01 H 1																	4,00 He 2
6,94 Li 3	9,01 Be 4											10,81 B 5	12,01 C 6	14,01 N 7	16,00 O 8	19,00 F 9	20,18 Ne 10
22,99 Na 11	24,31 Mg 12	III a	IV a	V a	VI a	VII a	VIII a		I a	II a	26,98 Al 13	28,09 Si 14	30,97 P 15	32,06 S 16	35,45 Cl 17	39,95 Ar 18	
39,10 K 19	40,08 Ca 20	44,96 Sc 21	47,87 Ti 22	50,94 V 23	52,00 Cr 24	54,94 Mn 25	55,85 Fe 26	58,93 Co 27	58,69 Ni 28	63,55 Cu 29	65,39 Zn 30	69,72 Ga 31	72,61 Ge 32	74,92 As 33	78,96 Se 34	79,90 Br 35	83,8 Kr 36

# Wdh.: Der Atomkern

I										VIII											
1,01 H 1																					4,00 He 2
6,94 Li 3	9,01 Be 4											10,81 B 5	12,01 C 6	14,01 N 7	16,00 O 8	19,00 F 9	20,18 Ne 10				
22,99 Na 11	24,31 Mg 12	III a	IV a	V a	VI a	VII a	VIII a			I a	II a	26,98 Al 13	28,09 Si 14	30,97 P 15	32,06 S 16	35,45 Cl 17	39,95 Ar 18				
39,10 K 19	40,08 Ca 20	44,96 Sc 21	47,87 Ti 22	50,94 V 23	52,00 Cr 24	54,94 Mn 25	55,85 Fe 26	58,93 Co 27	58,69 Ni 28	63,55 Cu 29	65,39 Zn 30	69,72 Ga 31	72,61 Ge 32	74,92 As 33	78,96 Se 34	79,90 Br 35	83,8 Kr 36				
85,47 Rb 37	87,62 Sr 38	88,91 Y 39	91,22 Zr 40	92,91 Nb 41	95,94 Mo 42	97,91 Tc 43	101,0 Ru 44	102,9 Rh 45	106,4 Pd 46	107,9 Ag 47	112,4 Cd 48	114,8 In 49	118,7 Sn 50	121,8 Sb 51	127,6 Te 52	126,9 I 53	131,3 Xe 54				
132,9 Cs 55	137,3 Ba 56	175,0 Lu 71	178,5 Hf 72	180,9 Ta 73	183,8 W 74	186,2 Re 75	190,2 Os 76	192,2 Ir 77	195,1 Pt 78	197,0 Au 79	200,6 Hg 80	204,4 Tl 81	207,2 Pb 82	209,0 Bi 83	209,0 Po 84	210,0 At 85	222,0 Rn 86				
223,0 Fr 87	226,0 Ra 88	262,0 Lr 103	261,1 Rf 104	262,1 Db 105	266,1 Sg 106	264,1 Bh 107	269,1 Hs 108	268,1 Mt 109	273,1 Ds 110	272,1 Rg 111											

Atommasse in u (molare Masse)

Elementsymbol

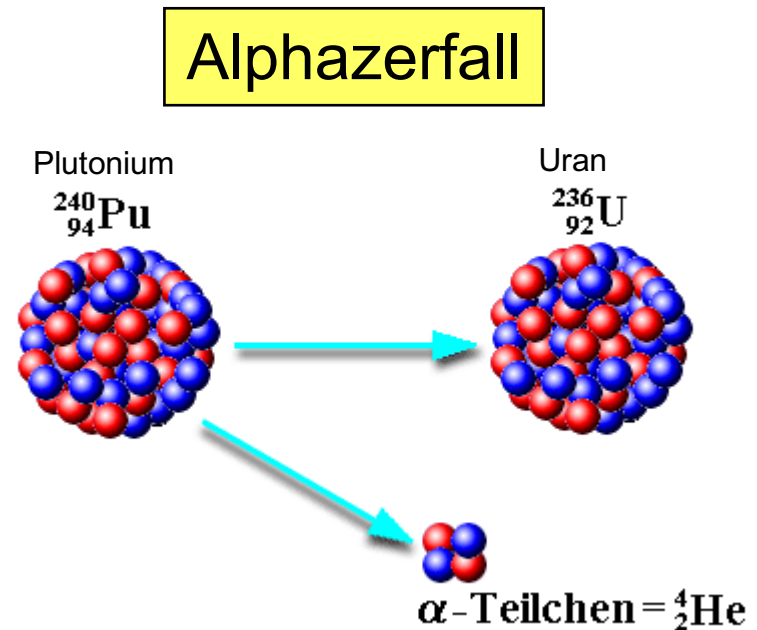
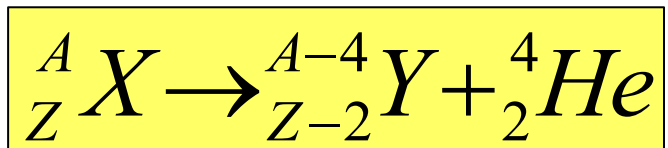
Ordnungszahl

Halbmethalle  
 Edelgase  
 radioaktiv  
 Erdalkalimetalle  
 Nichtmetalle  
 Alkalimetalle  
 Metalle

# AG: Der Atomkern

## Alphastrahlung

- $\alpha$ -Strahlung besteht aus zweifach positiv geladenen Heliumkernen
- Geschwindigkeit der Teilchen:  $10^7$  m/s

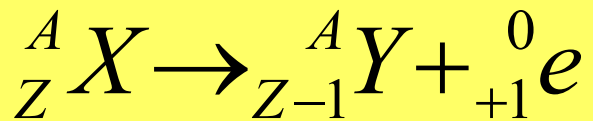
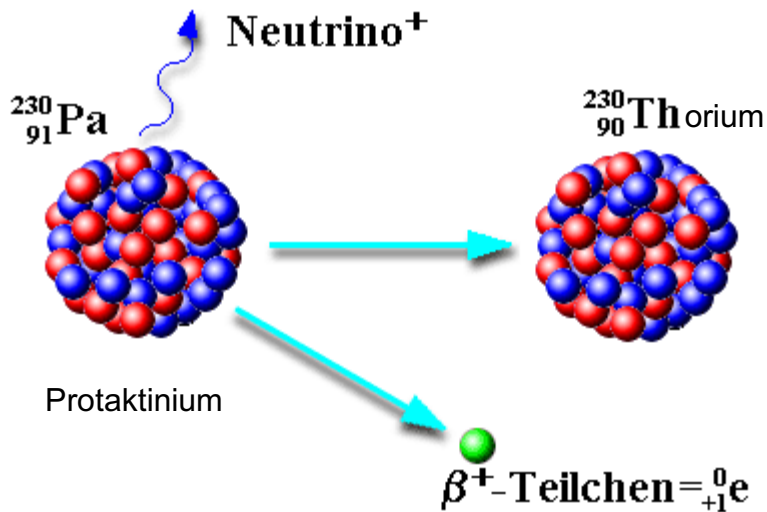


# AG: Der Atomkern

## Betastrahlung

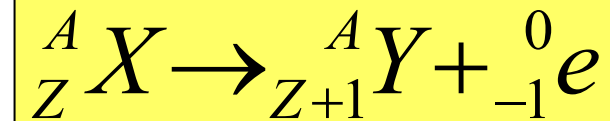
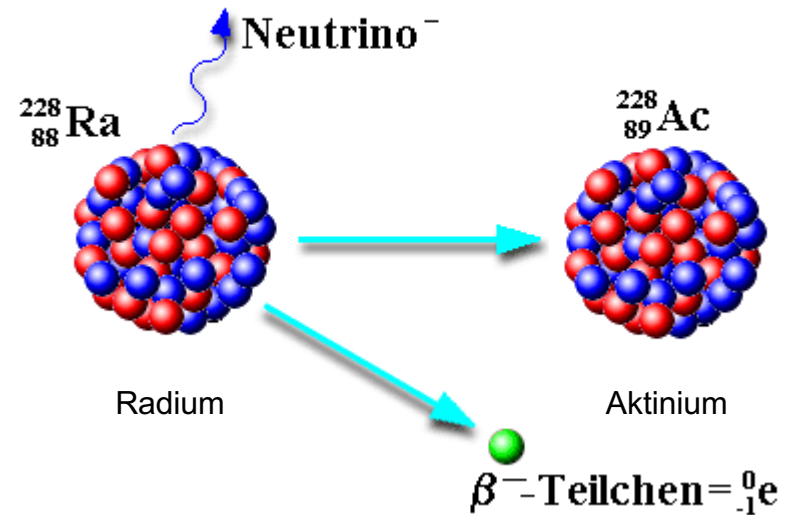
- $\beta$ -Strahlung besteht aus Elektronen ( $e^-$ ) oder Positronen ( $e^+$ )

### Beta-plus-Zerfall



Zerfall eines Protons in Neutron und Positron

### Beta-minus-Zerfall



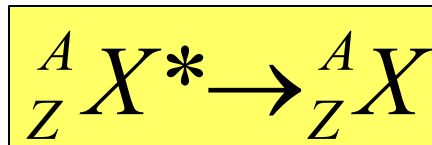
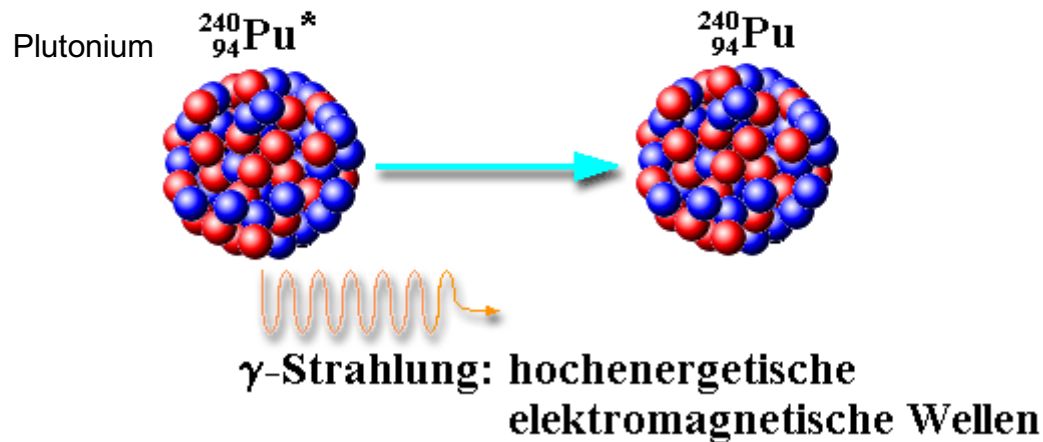
Zerfall eines Neutrons in Proton & Elektron

# AG: Der Atomkern

## Gammastrahlung

- Gammastrahlung ist energiereiche Photonenstrahlung
- Kern geht von angeregten Zustand in Grundzustand über

### Gammazerfall



# AG: Reichweite radioaktiver Strahlung

## Alpha-Strahlung ( $\alpha$ )

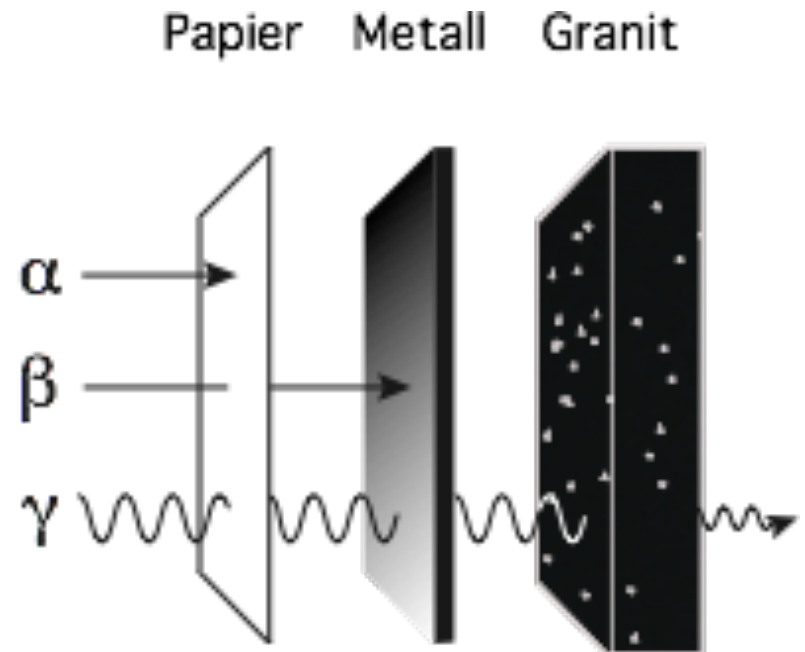
- Wenige cm in Luft
- Abschirmung durch Blatt Papier, Kleidung
- Bei Verschlucken maximale Ionisierung (sehr gefährlich!)

## Beta-Strahlung ( $\beta$ )

- Bis 1 m in Luft
- Abschirmung durch Aluminiumblech

## Gamma-Strahlung ( $\gamma$ )

- Sehr weit in Luft
- Abschirmung durch Blei (mehrere cm)



# AG: Reichweite radioaktiver Strahlung

## Reichweite verschiedener Strahlungstypen

Energie/ MeV	R/cm in Luft			R/mm in Wasser oder Weichgewebe		
	Beta-	Beta+	Alpha	Beta-	Beta+	Alpha
0,1	12	0,13	0,12	0,14	0,0016	0,0014
0,2	33	0,25	0,18	0,40	0,0030	0,0022
0,5	140	0,80	0,32	1,7	0,0098	0,0039
1,0	330	2,3	0,50	4,0	0,028	0,0061
2,0	790	7,0	1,0	9,5	0,086	0,012
5,0	2100	33	3,2	25	0,4	0,039
10	4150	120	9,5	50	1,47	0,12
20	8300	400	32	100	4,9	0,39
50		2000	160	250	24	1,9
100		6500	550	400	78	6,6

**Reichweite von Alpha- und Beta-Strahlen in Luft und Wasser**

# AG: Radioaktiver Zerfall

Zerfallsgesetz:

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$$



$N(t)$	= Anzahl der noch nicht zerfallenen Kerne
$N_0$	= Ursprüngliche Anzahl der Kerne
$t$	= Zeit
$\lambda$	= Zerfallskonstante [1/s]

**Halbwertszeit**

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

**e-tel-Zeit**

$$t_{\frac{1}{e}} = \frac{1}{\lambda}$$

**Halbwertszeit** bzw. **e-tel-Zeit** ist die Zeit  $t$ , bei der die Anzahl der Kerne, die ursprünglich vorhanden waren, auf die Hälfte bzw. ein e-tel gefallen ist

# AG: Radioaktiver Zerfall

**Aktivität A:**

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda \cdot N(t) = A_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$$

**= Anzahl radioaktiver Zerfälle pro Zeiteinheit**

**Einheiten:**

$$1 \text{ Becquerel [Bq]} = 1 \text{ Zerfall/s}$$

$$1 \text{ Curie [Ci]} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

$A(t)$	= Aktivität
$A_0$	= Anfangsaktivität bei $t = 0$
$N(t)$	= Anzahl der noch nicht zerfallenen Kerne
$t$	= Zeit
$\lambda$	= Zerfallskonstante [1/s]



# AG: Radioaktiver Zerfall

Aktivität: Anzahl zerfallender Kerne pro Zeit

$$A = -dN/dt$$

$$A = \lambda \cdot N$$

N: Anzahl Kerne

$\lambda$ : Zerfallskonstante

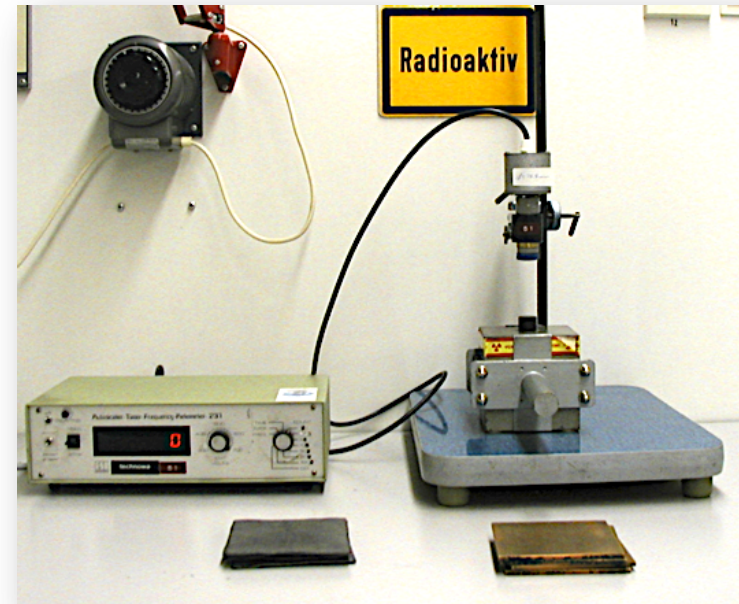
$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$$



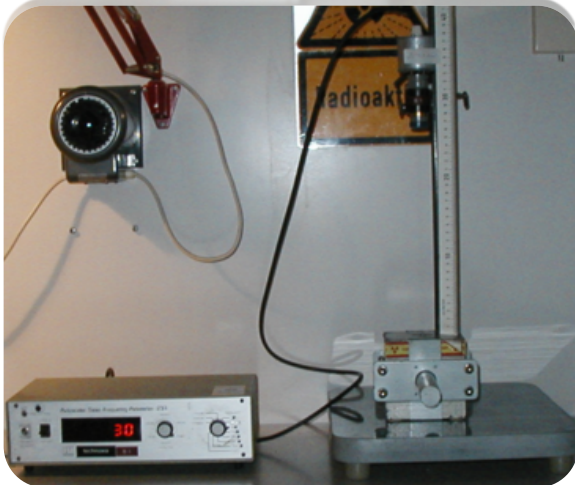
Halbwertszeit:  $t_{1/2} = 30,2$  Jahre

$$A_0 = 3.70 \text{ MBq (20.6.1966)}$$

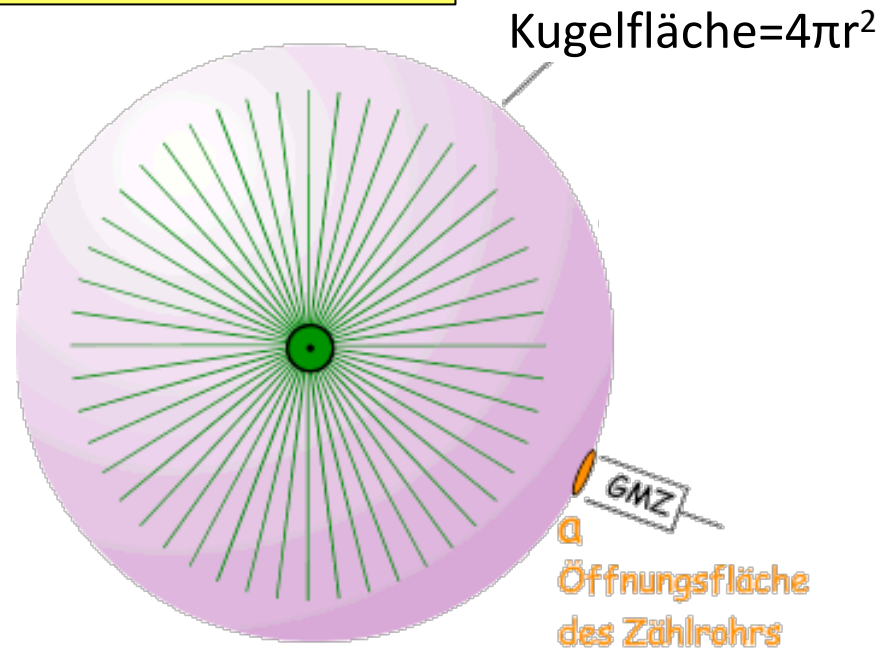


# AG: Radioaktiver Zerfall

Abstandsquadrat-Gesetz: Verhältnis der gemessenen Aktivitäten



$$\frac{A_{gem2}}{A_{gem1}} = \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2$$



# AG: Radioaktiver Zerfall

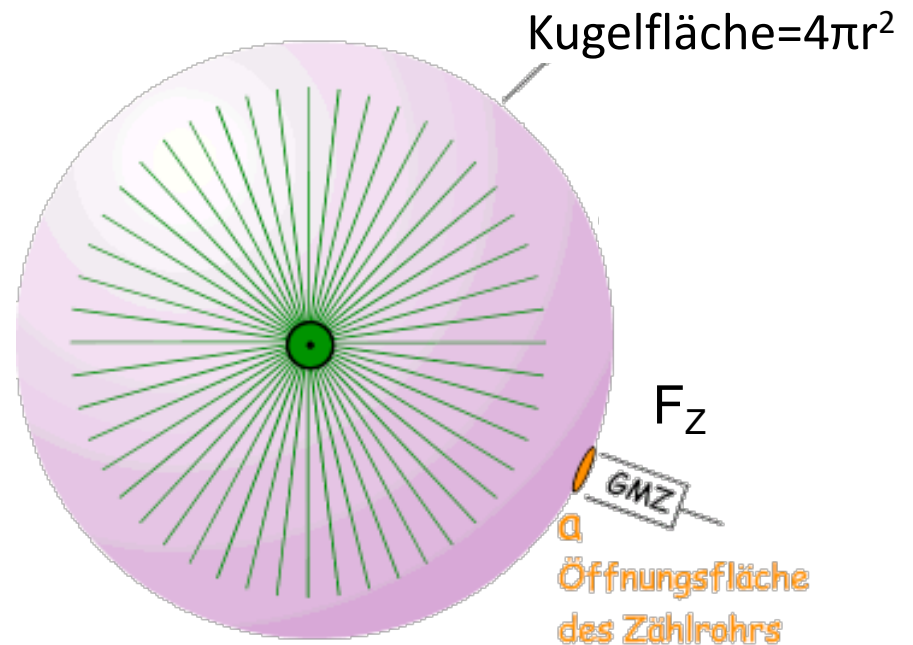
Messung der Aktivität eines Präparats mit einem Zählrohr

$$A_{\text{Real}} = A_{\text{gemessen}} \left( \frac{4\pi r^2}{F_Z} \right)$$

$A_{\text{Real}}$  = Echte Aktivität der Probe

$A_{\text{gemessen}}$  = Aktivität im Abstand „ $r$ “

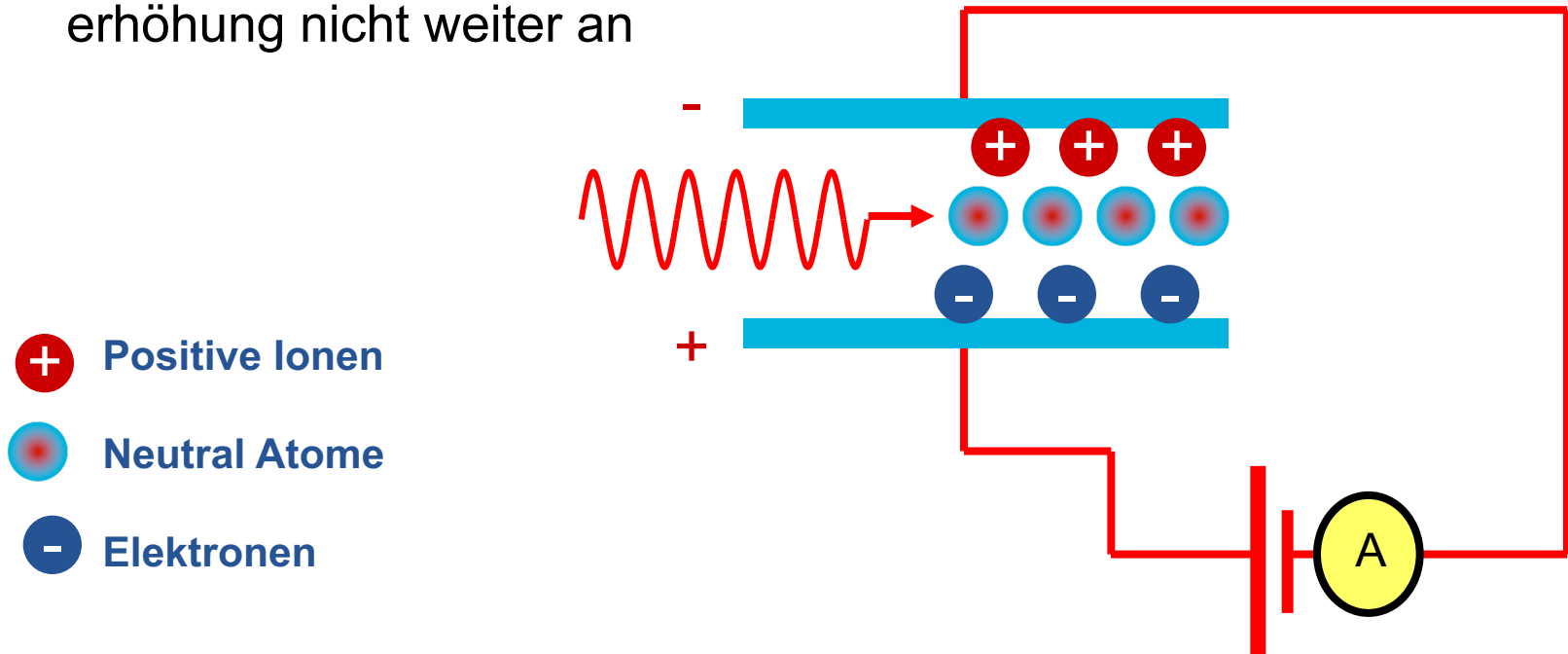
$F_Z$  = Fläche des Zählrohrs



# AG: Nachweis radioaktiver Strahlung

## Ionisationskammer

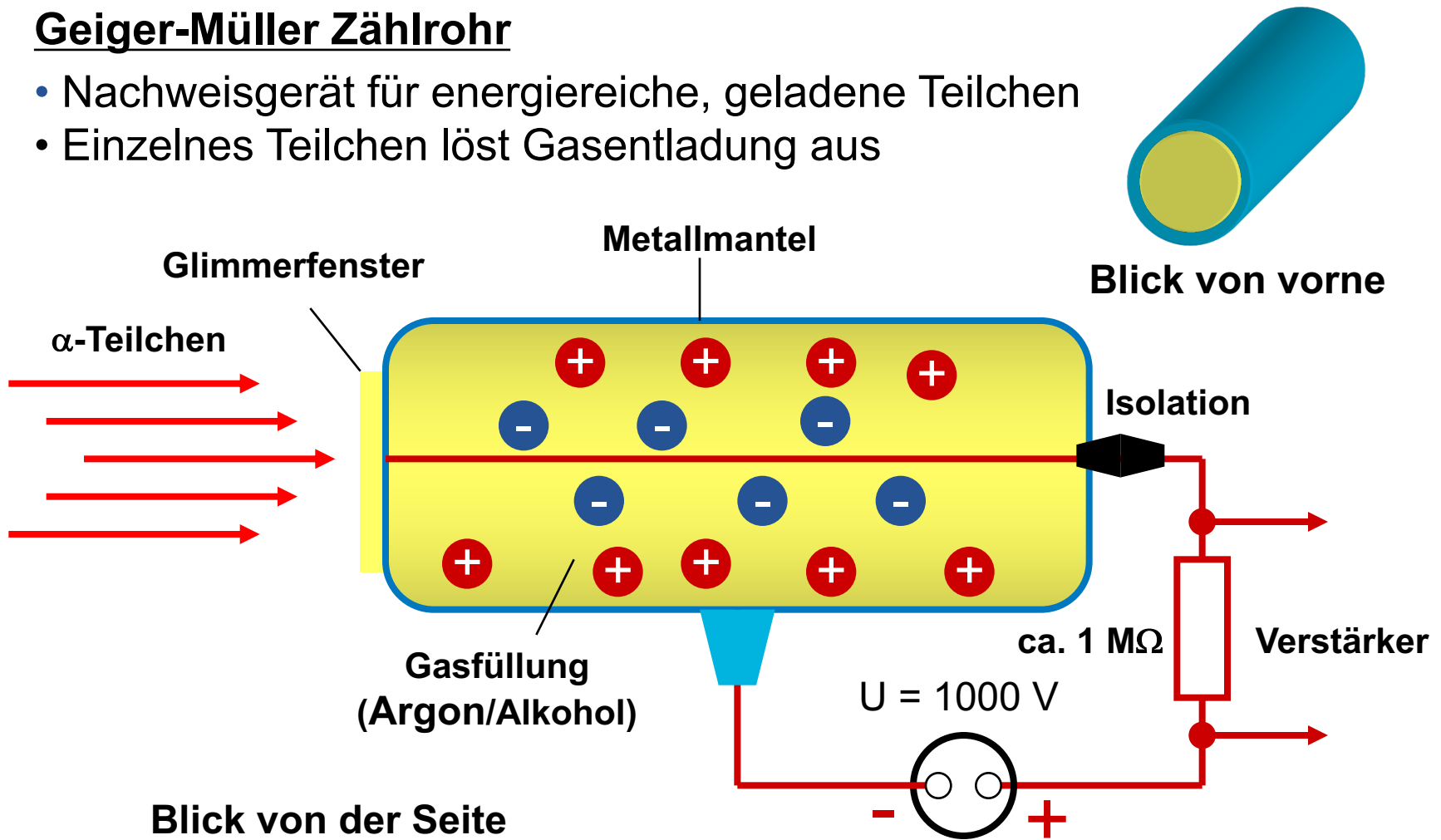
- Kondensator mit elektrischem Feld
- Nach Ionisierung fließen die erzeugten Ladungen zu den Platten
- Mit zunehmender Spannung erreichen immer mehr Ladungen die Platten (ohne Rekombination)
- Kommen alle Ladungen an, so steigt der Strom bei Spannungserhöhung nicht weiter an



# AG: Nachweis radioaktiver Strahlung

## Geiger-Müller Zählrohr

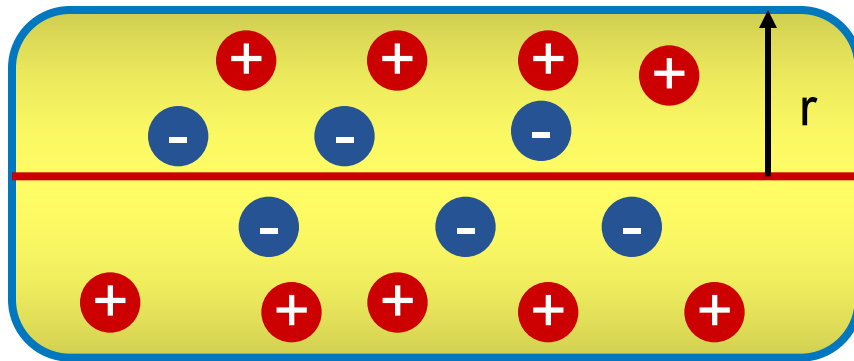
- Nachweisgerät für energiereiche, geladene Teilchen
- Einzelnes Teilchen löst Gasentladung aus



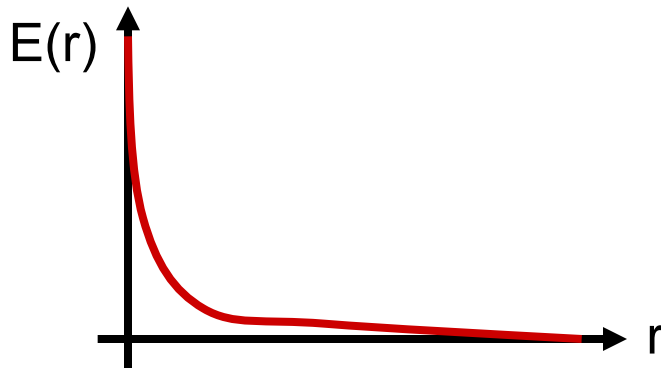
# AG: Nachweis radioaktiver Strahlung

## Geiger-Müller Zählrohr

Ionisationskammer in Zylinderform, die mit hoher (lokaler) elektrischer Feldstärke  $E$  ( $\approx 40$  kV/cm) arbeitet:  $\rightarrow$  Stoßionisation & Elektronenlawine



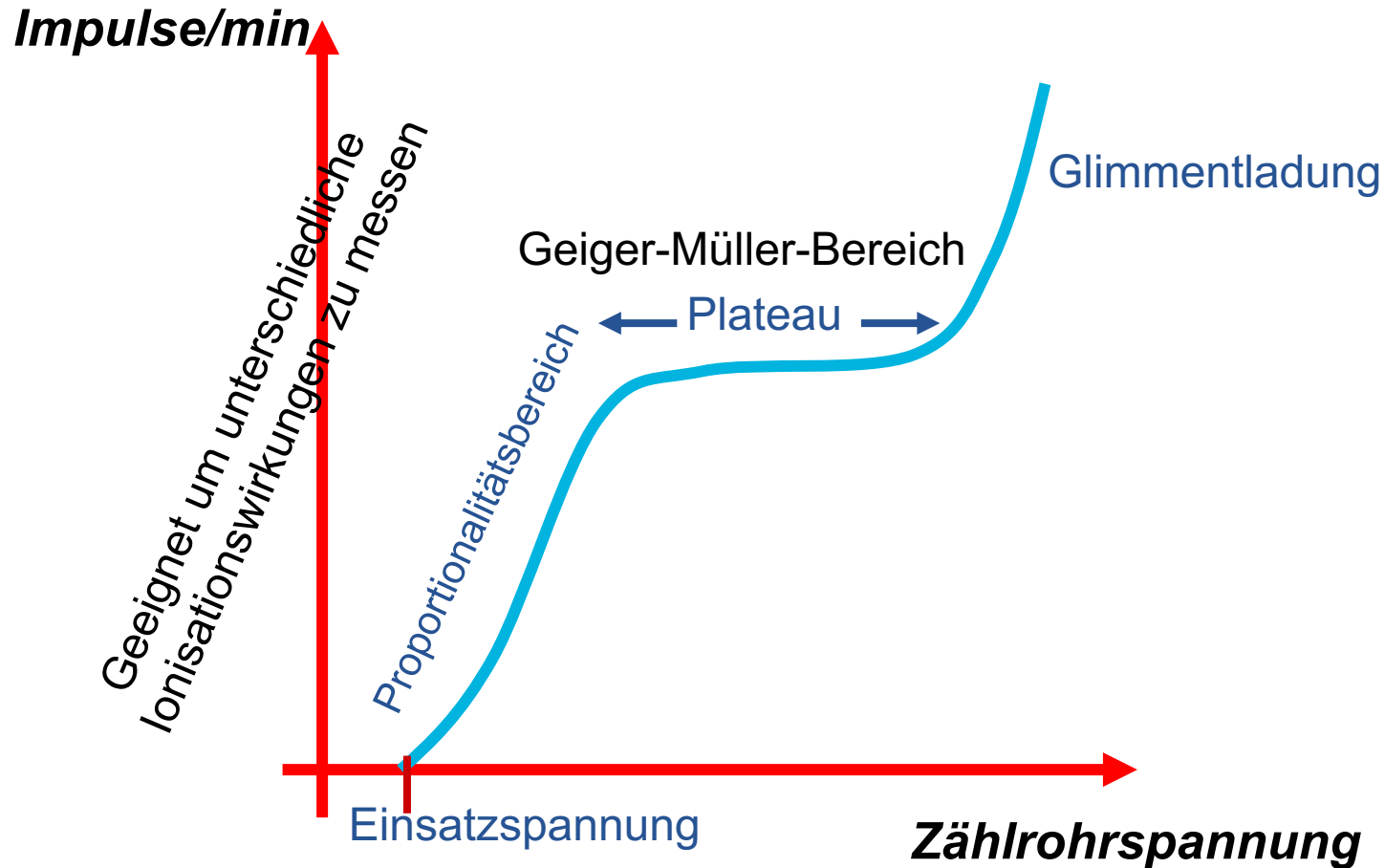
$$E(r) \propto \frac{U}{r}$$



**E = inhomogenes E-Feld**  
**U = Zählrohrspannung**  
**r = Abstand von Zähldraht**

# AG: Nachweis radioaktiver Strahlung

## Geiger-Müller Zählrohr: Zählrohrcharakteristik

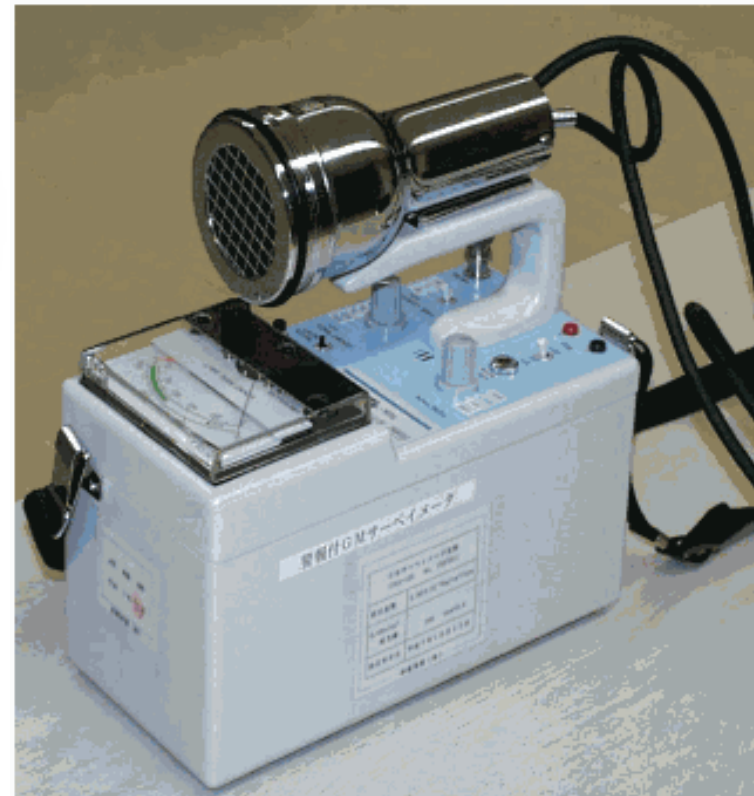


Stichwort: Nulleffekt

# AG: Nachweis radioaktiver Strahlung

## Geiger-Müller Zählrohr

- Nachweisgerät für energiereiche, geladene Teilchen
- Einzelnes Teilchen löst Gasentladung aus



# AG: Nachweis radioaktiver Strahlung

## Dosimeter

Meßgeräte zur Messung der kumulativen Strahlendosis ionisierender Strahlung

Film-D.: Schwärzung eines strahlungsempfindlichen Films ist Maß für die Dosis ist



Füllhalter-D.: Entladung eines aufgeladenen Kondensators ist Maß für die Dosis



Personen, die der Strahlenüberwachung unterliegen (**Strahlenschutzverordnung**) müssen während der Arbeit Film-D. tragen, die monatlich ausgewertet & mit den erlaubten Grenzwerten verglichen werden

# AG: Dosimetrie

**Dosis** = die Energiemenge, die von 1 kg bestrahlter Materie aufgenommen wurde

**Dosimetrie** = quantitative Strahlungsmessung

**Absorbierte Energie im Gewebe**

## Physikalische Wirkung

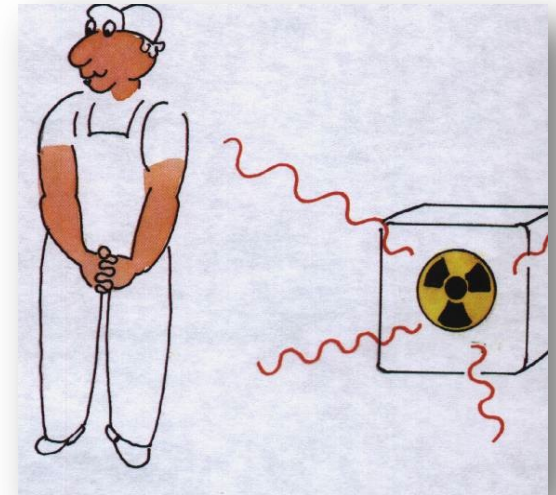
- Energieabsorption, Ionisation, Anregung

## Chemische Wirkung

- Erzeugung von Radikalen, Molekülspaltung

## Biologische Wirkung

- Zellschädigung, Zerstörung der Erbsubstanz DNS



# AG: Dosimetrie

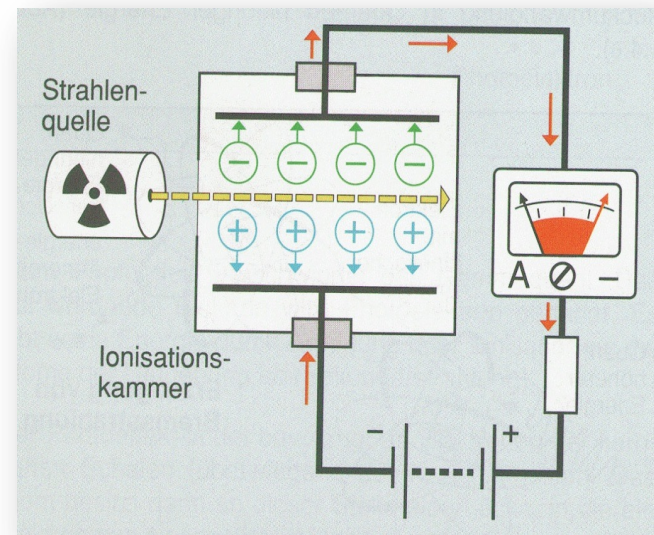
Eine wesentliche Wirkung von Strahlung auf Materie ist die Auslösung von Ionisationen (z.B. Strahlenwirkung auf Luft). Zahl der erzeugten Ladungsträger kann als Maß für die Strahlenintensität dienen

## Ionendosis J

*Ionendosis J* ist definiert durch die Menge positiver Ladungen  $Q$ , die ionisierende Strahlung in einem Massenelement  $m$  erzeugt

Einheit:

$$1 \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$



# AG: Dosimetrie

## Energiedosis D

Energiedosis  $D$  ist die Energie  $E$ , die von der Strahlung auf ein Massenelement  $m$  übertragen wird

oder

Die von der ionisierenden Strahlung an die absorbierende Materie (z.B. Gewebe) pro  $kg$  der absorbierenden Masse abgegebene Energie

Einheit:

$$1 \text{ Gray [Gy]} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$



Louis Gray (1905-65)

# AG: Dosimetrie

## Äquivalentdosis H

Die Äquivalentdosis in einem bestrahlten Gewebe oder Organ ergibt sich aus der **Energiedosis D** durch Multiplikation mit einem **Wichtungsfaktor q** für die betreffende **Strahlenart**:

$$H = q \cdot D$$

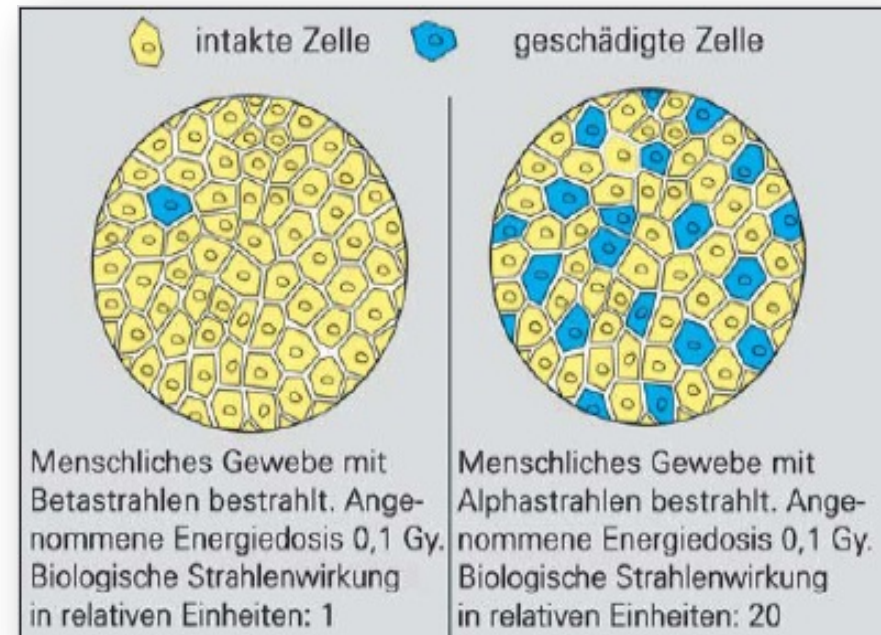
$q$  berücksichtigt die unterschiedlichen **biologischen Wirkungen** der verschiedenen Strahlenarten:

$$q_{\gamma} = 1$$

$$q_{\alpha} = 20$$

Einheit:

$$1 \text{ Sievert [Sv]} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$



# AG: Dosimetrie

## Körperdosis $H$ / Effektive Dosis $E$

**Effektive Dosis** ergibt sich durch Summation der gewichteten Äquivalentdosen der einzelnen bestrahlten Gewebe und Organe

$$H_{eff} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot H_i$$

**Wichtungsfaktoren  $w_i$**  berücksichtigen die **unterschiedliche Strahlenempfindlichkeit der einzelnen Organe** in Bezug auf das Krebsrisiko und genetische Veränderungen

Eine gleichmässige Bestrahlung des ganzen Körpers oder einzelner Organe ergibt bei gleicher effektiver Dosis dasselbe Strahlenrisiko

# AG: Dosimetrie

## Körperdosis H/Effective Dosis E

1	Keimdrüse	0,25
2	Brust	0,15
3	rotes Knochenmark	0,12
4	Lunge	0,12
5	Schilddrüse	0,03
6	Knochenoberfläche	0,03
7	Blase, oberer Dickdarm, Dünndarm, Gehirn, Leber, Magen, Milz, Nebenniere, Niere, Bauchspeicheldrüse, Thymus, Gebärmutter	je 0,06

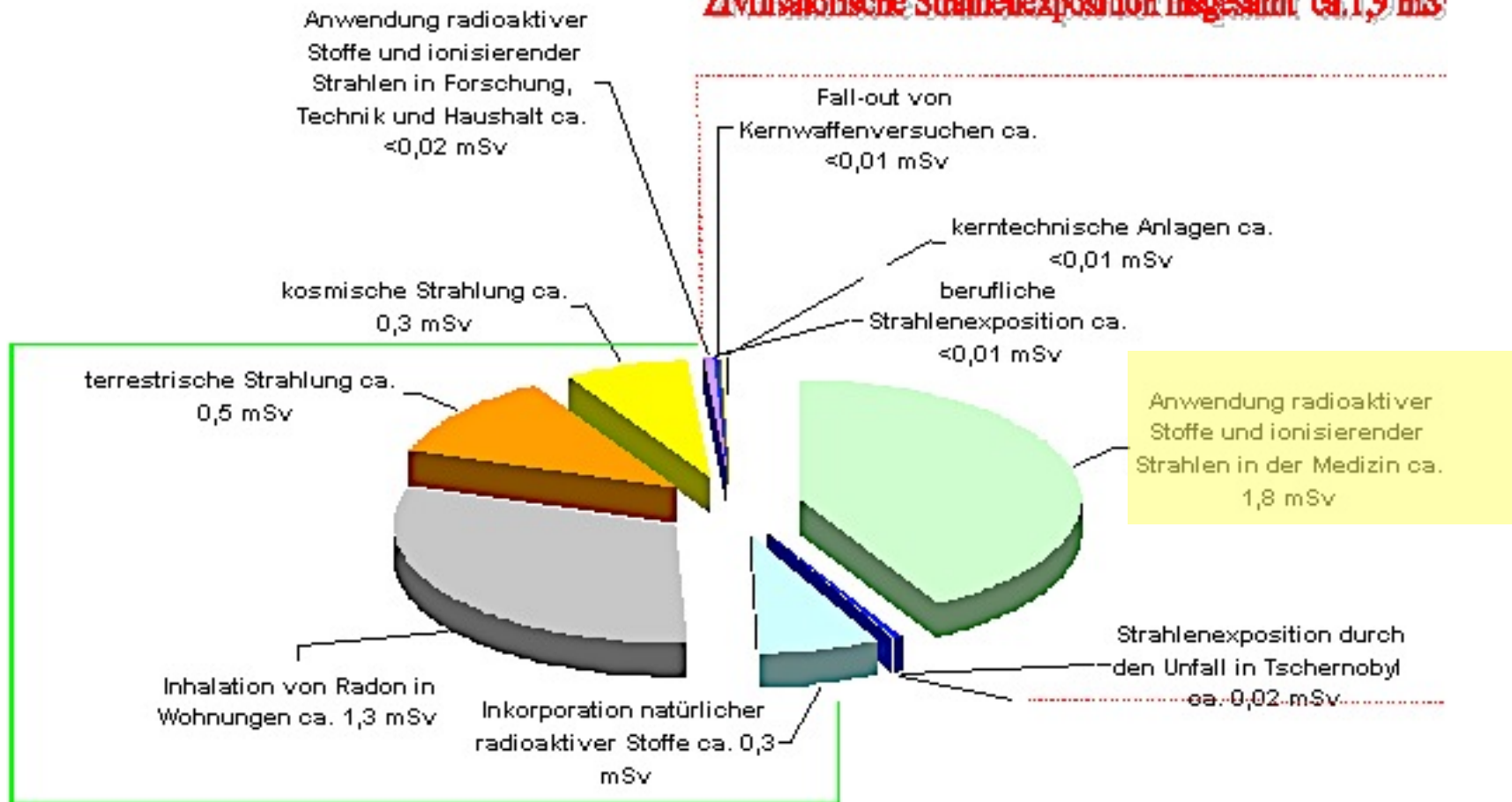
$$H_{eff} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot H_i$$

***Wichtungsfaktoren  $w_i$  einiger Organe***

# AG: Dosimetrie

## Körperdosis H/Effective Dosis E

**Zivilisatorische Strahlendosis insgesamt ca. 1,9 mSv**

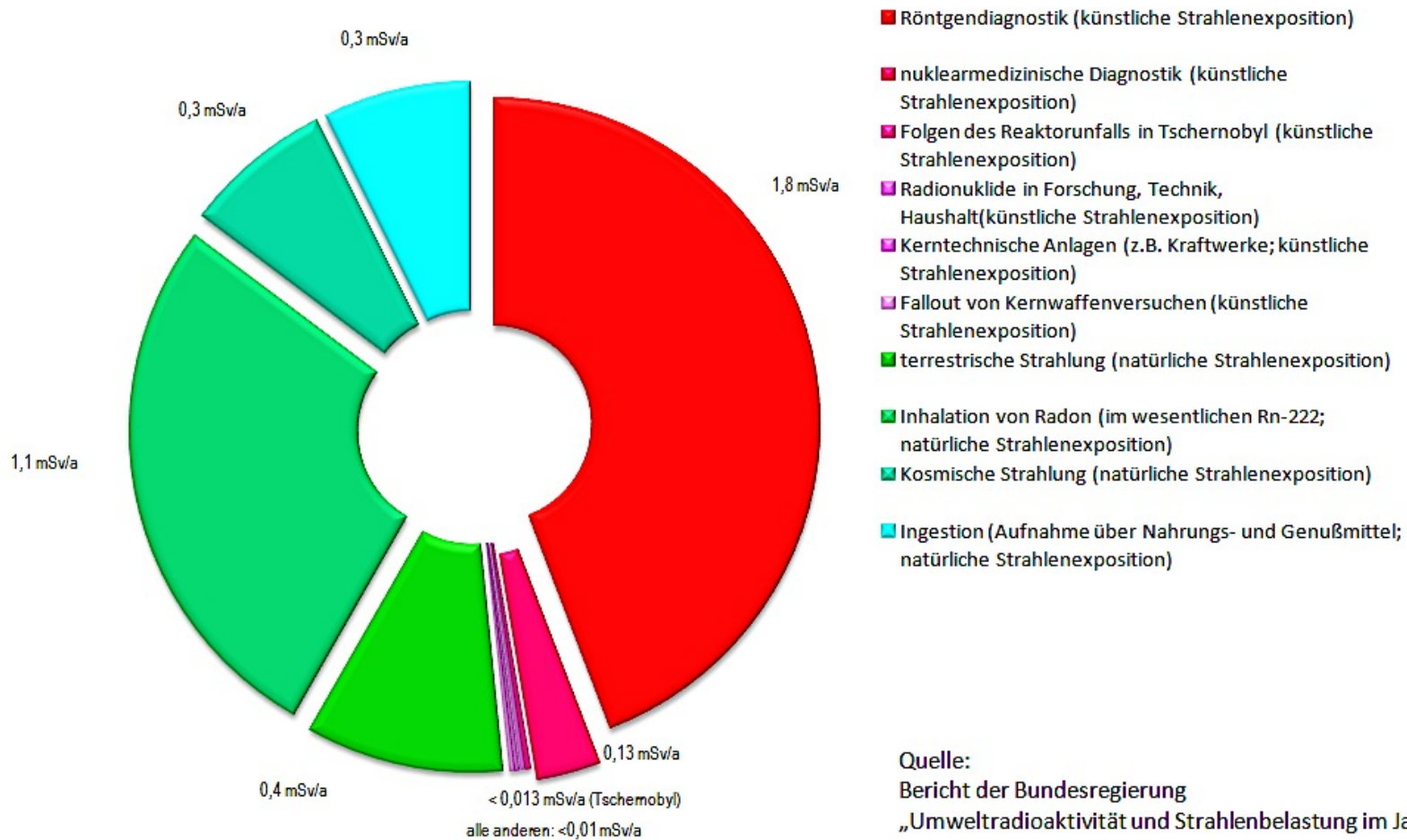


**Natürliche Strahlendosis insgesamt ca. 2,4 mSv**

**Durchschnittliche Strahlendosis in Deutschland: insgesamt ca. 4,3 mSv/a**

# AG: Dosimetrie

## Herkunft der mittleren Strahlenexposition der Bevölkerung



# AG: Dosimetrie

Höhenstrahlung 8000 m:	15 mSv / Jahr
Flug Frankf/New York/Frankf	0,1 mSv insgesamt
Flugpersonal 875 Std/Jahr:	6 mSv / Jahr
Fernsehen:	1 - 30 MikroSv / Jahr
Radiol. Diag. + Therapie:	1,5 mSv / Jahr
Radiolog. Diagnostik:	0,2 - 2 mSv / Jahr / Person
Thorax Röntgen AP:	0,2 mSv pro Aufnahme
CT-Thorax:	4,3 mSv Knochenmarkdosis pro Aufnahme
CT-Abdomen:	9,8 mSv Knochenmarkdosis pro Aufnahme
Mammographie:	1,65 - 65 mSv
Herzkatheter:	90 mSv Knochenmarkdosis pro Aufnahme



## LD Werte

Sofortiger Tod (Mensch):	100 Sv einmalig
tödliche Dosis Mensch	> 10 Sv
LD50 Mensch:	4,5 Sv einmalig

## Risikoberechnungen \*\*\*\*\*

10 mSv einmalig:           Krebstod 1 zu 10000

**Zuerst haben die Menschen das Atom gespalten, jetzt spaltet das Atom die Menschen**

# AG: Strahlentherapie

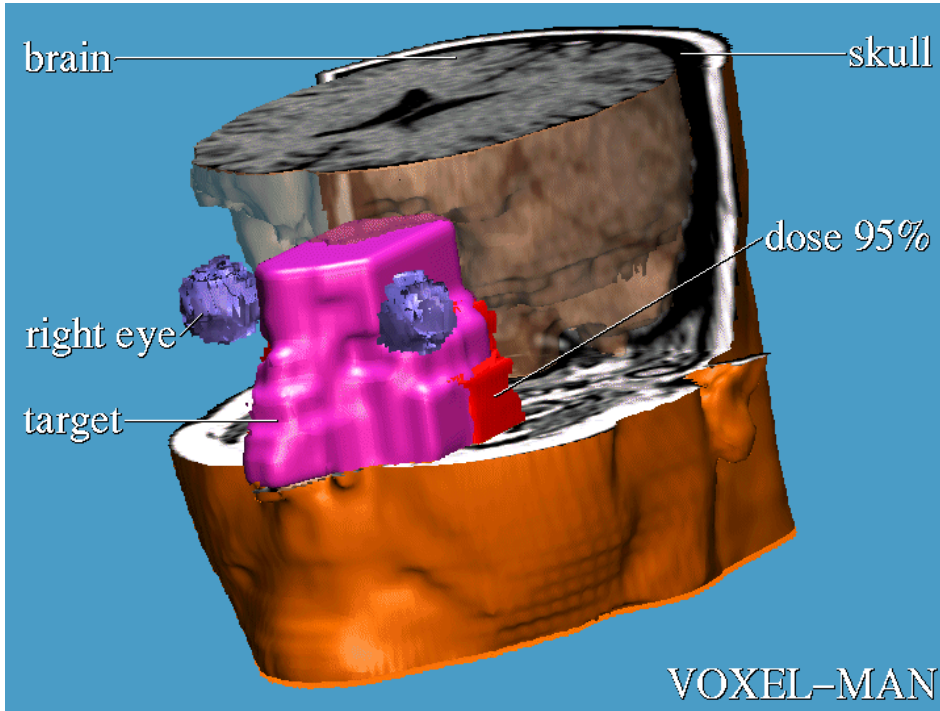


Linearbeschleuniger:  
Elektronen  
(mehr für Oberflächennahe Tumoren)

Telekobaltgerät:  
Gamma-Rays  
(Oberflächenferne Tumoren)



# AG: Strahlentherapie & Bestrahlungsplanung



Volumendatensätze (CT&MR):  
Zur Bestrahlungsplanung

Einzeichnen von Bestrahlungsfeldern

