

Prof. Dr. Markus Hoth

markus.hoth@uks.eu

06841-1626266

Biophysikalische Grundlagen

1. Struktur der Materie/Ionisierende Strahlung
2. Röntgen(strahlung)

Aufbau der Atome und Atomkerne

1.2 Symbolschreibweise der Atome im Periodensystem:



Im Periodensystem werden die einzelnen Elemente wie folgt bezeichnet:

A = **Massenzahl** (obere Zahl) Anzahl der Kernteilchen
(**Nukleonenzahl**)

Z = **Ordnungszahl** (untere Zahl) Anzahl der Protonen
Bei Atomen auch Anzahl der Elektronen.

B = **Buchstaben-Code** Kennbuchstabe des Elements

Nukleonenzahl = = A Nukleon = Kernteilchen	Protonenzahl = = Z	Neutronenzahl = = A - Z	Elektronenzahl = = Z <i>bei Atomen</i>
---	------------------------------	-----------------------------------	---

1.3 Aufgabe zur Symbolschreibweise der Atome:

	Elektronen e^-	Protonen p^+	Neutronen n	Nukleonen p^+n	Elementname
$^{12}_6\text{C}$	6	6	6	12	Kohlenstoff
$^{40}_{18}\text{Ar}$	18	18	22	40	Argon
$^{235}_{92}\text{U}$	92	92	143	235	Uran
$^{232}_{90}\text{Th}$	90	90	142	232	Thorium
$^{73}_{32}\text{Ge}$	32	32	41	73	Germanium

Periodensystem der Elemente

Periode	Gruppe																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H Wasserstoff 1,0079 1																	2 He Helium 4,0026 2
2	3 Li Lithium 6,941 2/1	4 Be Beryllium 9,0122 2/2											5 B Bor 10,81 2/3	6 C Kohlenstoff 12,011 2/4	7 N Stickstoff 14,007 2/5	8 O Sauerstoff 15,999 2/6	9 F Fluor 18,998 2/7	10 Ne Neon 20,179 2/8
3	11 Na Natrium 22,99 2/8/1	12 Mg Magnesium 24,305 2/8/2											13 Al Aluminium 26,982 2/8/3	14 Si Silicium 28,086 2/8/4	15 P Phosphor 30,974 2/8/5	16 S Schwefel 32,06 2/8/6	17 Cl Chlor 35,453 2/8/7	18 Ar Argon 39,948 2/8/8
4	19 K Kalium 39,098 2/8/8/1	20 Ca Calcium 40,08 2/8/8/2	21 Sc Scandium 44,956 2/8/9/2	22 Ti Titan 47,90 2/8/10/2	23 V Vanadium 50,942 2/8/11/2	24 Cr Chrom 51,996 2/8/13/1	25 Mn Mangan 54,938 2/8/13/2	26 Fe Eisen 55,847 2/8/14/2	27 Co Cobalt 58,933 2/8/15/2	28 Ni Nickel 58,71 2/8/16/2	29 Cu Kupfer 63,546 2/8/18/1	30 Zn Zink 65,38 2/8/18/2	31 Ga Gallium 69,735 2/8/18/3	32 Ge Germanium 72,59 2/8/18/4	33 As Arsen 74,922 2/8/18/5	34 Se Selen 78,966 2/8/18/6	35 Br Brom 79,904 2/8/18/7	36 Kr Krypton 83,80 2/8/18/8
5	37 Rb Rubidium 85,458 2/8/18/8/1	38 Sr Strontium 87,62 2/8/18/8/2	39 Y Yttrium 88,906 2/8/18/9/2	40 Zr Zirkonium 91,22 2/8/18/10/2	41 Nb Niob 92,906 2/8/18/12/1	42 Mo Molybdän 95,94 2/8/18/13/1	43 Tc Technetium 98,91 2/8/18/13/2	44 Ru Ruthenium 101,07 2/8/18/15/1	45 Rh Rhodium 102,91 2/8/18/16/1	46 Pd Palladium 106,4 2/8/18/16	47 Ag Silber 107,87 2/8/18/18/1	48 Cd Cadmium 112,41 2/8/18/18/2	49 In Indium 114,82 2/8/18/18/3	50 Sn Zinn 118,69 2/8/18/18/4	51 Sb Antimon 121,75 2/8/18/18/5	52 Te Tellur 127,60 2/8/18/18/6	53 I Iod 126,90 2/8/18/18/7	54 Xe Xenon 131,30 2/8/18/18/8
6	55 Cs Cäsium 132,91 2/8/18/18/8/1	56 Ba Barium 137,33 2/8/18/18/8/2	57-71 siehe unten	72 Hf Hafnium 178,49 2/8/18/32/10/2	73 Ta Tantal 180,95 2/8/18/32/11/2	74 W Wolfram 183,85 2/8/18/32/12/2	75 Re Rhenium 186,21 2/8/18/32/13/2	76 Os Osmium 190,2 2/8/18/32/14/2	77 Ir Iridium 192,22 2/8/18/32/15/2	78 Pt Platin 195,09 2/8/18/32/17/1	79 Au Gold 196,97 2/8/18/32/18/1	80 Hg Quecksilber 200,59 2/8/18/32/18/2	81 Tl Thallium 204,37 2/8/18/32/18/3	82 Pb Blei 207,19 2/8/18/32/18/4	83 Bi Bismut 208,98 2/8/18/32/18/5	84 Po Polonium 209 2/8/18/32/18/6	85 At Astat (210) 2/8/18/32/18/7	86 Rn Radon (222) 2/8/18/32/18/8
7	87 Fr Francium (223) 2/8/18/32/18/8/1	88 Ra Radium 226,03 2/8/18/32/18/8/2	89-103 siehe unten	104 Rf Rutherfordium (261) 2/8/18/32/32/10/2	105 Db Dubnium (262) 2/8/18/32/32/11/2	106 Sg Seaborgium (263) 2/8/18/32/32/12/2	107 Bh Bohrium (262) 2/8/18/32/32/13/2	108 Hs Hassium (265) 2/8/18/32/32/14/2	109 Mt Meitnerium (266) 2/8/18/32/32/15/2	110 Ds Darmstadtium (269) 2/8/18/32/32/17/1	111 Rg Röntgenium (272) 2/8/18/32/32/18/1	112 Uub Ununbium (277) 2/8/18/32/32/18/2	113 Uut Ununtrium (287) 2/8/18/32/32/18/3	114 Uuq Ununquadium (289) 2/8/18/32/32/18/4	115 Uup Ununpentium (288) 2/8/18/32/32/18/5	116 Uuh Ununhexium (289) 2/8/18/32/32/18/6	118 Uuo Ununoctium (293) 2/8/18/32/32/18/8	

Legende

Ordnungszahl: schwarz = nicht radioaktiv, gelb = radioaktiv
 Serie: Alkalimetalle, Erdalkalimetalle, Übergangsmetalle, Lanthanoide, Actinoide, Metalle, Halbmetalle, Nichtmetalle, Halogene, Edelgase
 durchgehend = natürliches Element, schraffiert = künstliches Element

Atomgewicht, Elektronenkonfiguration, Name, Symbol, Ordnungszahl, Serie

Periode



Lanthanoide	57 La Lanthan 138,91 2/8/18/18/9/2	58 Ce Cer 140,12 2/8/18/19/9/2	59 Pr Praseodym 140,91 2/8/18/21/9/2	60 Nd Neodym 144,24 2/8/18/22/9/2	61 Pm Promethium 144,90 2/8/18/23/9/2	62 Sm Samarium 150,35 2/8/18/24/9/2	63 Eu Europium 151,96 2/8/18/25/9/2	64 Gd Gadolinium 157,25 2/8/18/25/9/2	65 Tb Terbium 158,93 2/8/18/27/9/2	66 Dy Dysprosium 162,50 2/8/18/28/9/2	67 Ho Holmium 164,93 2/8/18/29/9/2	68 Er Erbium 167,26 2/8/18/30/9/2	69 Tm Thulium 168,93 2/8/18/31/9/2	70 Yb Ytterbium 173,04 2/8/18/32/9/2	71 Lu Lutetium 174,97 2/8/18/32/9/2
Actinoide	89 Ac Actinium (227) 2/8/18/32/18/9/2	90 Th Thorium 232,04 2/8/18/32/18/10/2	91 Pa Protaktinium 231,04 2/8/18/32/20/9/2	92 U Uran 238,03 2/8/18/32/21/9/2	93 Np Neptunium 237,05 2/8/18/32/22/9/2	94 Pu Plutonium (244,10) 2/8/18/32/24/8/2	95 Am Americium (243,10) 2/8/18/32/25/8/2	96 Cm Curium (247,10) 2/8/18/32/25/9/2	97 Bk Berkelium (247,10) 2/8/18/32/25/10/2	98 Cf Californium (251,10) 2/8/18/32/28/8/2	99 Es Einsteinium (254,10) 2/8/18/32/29/8/2	100 Fm Fermium (257,10) 2/8/18/32/30/8/2	101 Md Mendelevium (258) 2/8/18/32/31/8/2	102 No Nobelium (259) 2/8/18/32/32/8/2	103 Lr Lawrencium (260) 2/8/18/32/32/9/2

Stoffmenge und Konzentration

Um die Konzentration eines Moleküls/Proteins etc. anzugeben, benötigt man ein Maß für sein **Menge**. Diese kann als Masse (kg), Stoffmenge (mol) oder Volumen (m^3 oder Liter = $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$) angegeben werden.

Dabei gilt: **$1 \text{ mol} = 6,022 \times 10^{23}$ Teilchen (Avogadro-Konstante)**
(entspricht der Masse von ^{12}C Atomen in 12 g reinem Kohlenstoff).

Die **atomare Masseneinheit** ist definiert als $1/12$ des ^{12}C Atoms:
 $1 \text{ u} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$.



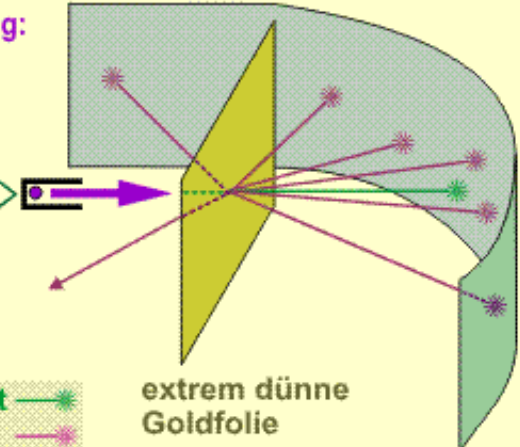


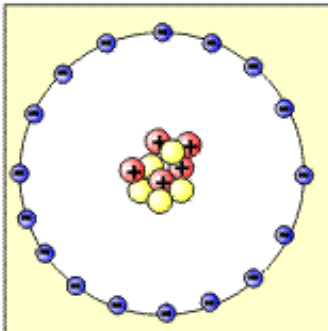
Die **relative Atom- oder Molekülmasse** wird auf diese Masseneinheit bezogen, d.h. ^{12}C hat die relative Atommasse 12 (u).

(in dem Beispiel gibt es Rundungsfehler !)

Beispiel: relative Atommasse von NaCl ist 58,44 (u)
das heißt: 58.44 g/l von NaCl entspricht einer 1 M (= 1 mol/l) NaCl Lösung

Weil: $58,44 \times 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg} \times 6,022 \times 10^{23} / \text{mol} = 58,44 \text{ g/mol}$

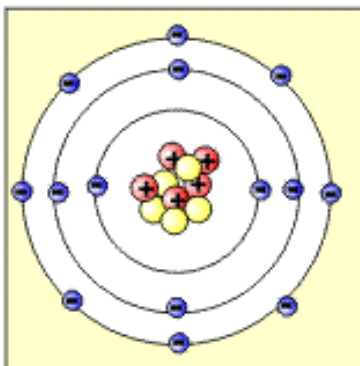
(12 g ^{12}C entspricht 1 mol, $12 \text{ u} =$ Masse von einem $^{12}\text{C} \gg 12\text{g}/12\text{u} = 6,022 \times 10^{23}$)

Forscher / Zeit	Beschreibung des Atommodells	neuer Begriff
<p>Rutherford ca 1900 England Ernest Rutherford * 1871 + 1937 gilt als Begründer der modernen Kernphysik</p>	<p>Der Streuversuch:</p> <p>radioaktive Strahlung:</p> <p>α-Strahlung (Heliumkerne) ${}^4_2\text{He}^{++}$ </p> <p>β-Strahlung (Elektronen) e^{-} </p>  <p>nicht abgelenkt </p> <p>abgelenkt </p> <p>extrem dünne Goldfolie</p> <p>Filmschicht</p>	<p>Atomkern mit Protonen und Neutronen*, Atomhülle mit um den Kern kreisenden Elektronen.</p> <p>* Der Nachweis des Neutrons erfolgte erst 1932 durch James Chadwick.</p>
<p>Das Rutherford'sche Atommodell enthält folgende Aussagen:</p>  <ol style="list-style-type: none"> 1. Größenverhältnisse: <u>Der Atomkern ist wesentlich kleiner als das Gesamtatom.</u> 2. Leere: <u>Zwischen Atomkern und Atomhülle ist materielose Leere.</u> 3. Masse: <u>Fast die gesamte Masse des Atoms ist im Atomkern vereinigt.</u> 4. Ladung: <u>Der Atomkern ist mehrfach positiv elektrisch geladen, die Elektronen jeweils 1fach negativ.</u> 		

Bohr

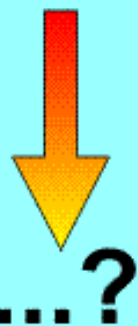
ca 1915
Dänemark
Nils Bohr
* 1885 + 1962

Die Bohr'sche Erweiterung enthält folgende Aussagen:



1. Schalen: Elektronen umkreisen den Atomkern in ganz bestimmten Abständen.
2. Energie: Elektronen haben auf äußeren Schalen mehr Energie als auf den weiter innen liegenden Schalen..

seit 1982



Die Forschung arbeitet in der Atomphysik mittlerweile mit wesentlich komplizierteren Atommodellen, da sich auch mit dem Rutherford-/Bohr'schen Atommodell viele physikalische Phänomene nicht mehr erklären lassen.

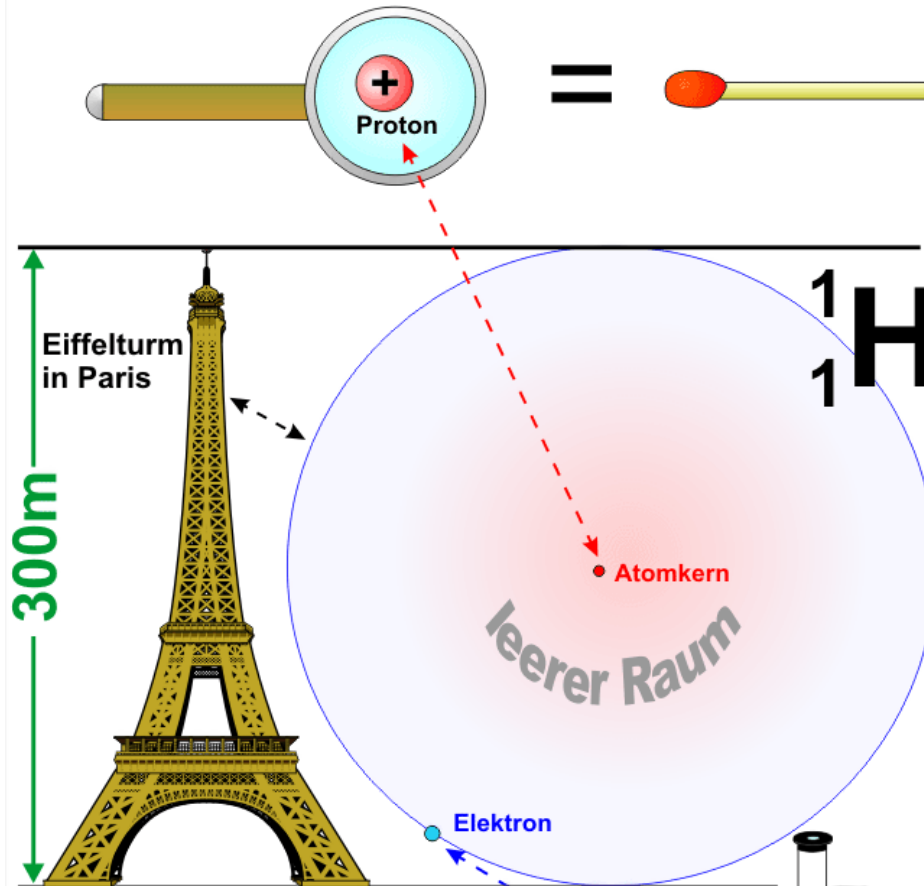
Quarks

als

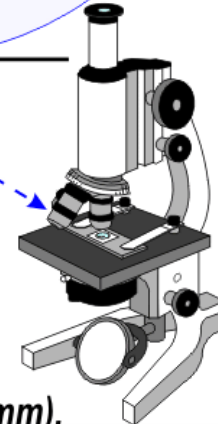
Elementar- teilchen

der Materie.

Der Streuversuch von Ernest Rutherford hat ergeben, dass es zwischen dem Atomkern und der Atomhülle viel Raum materieloser Leere geben muss.



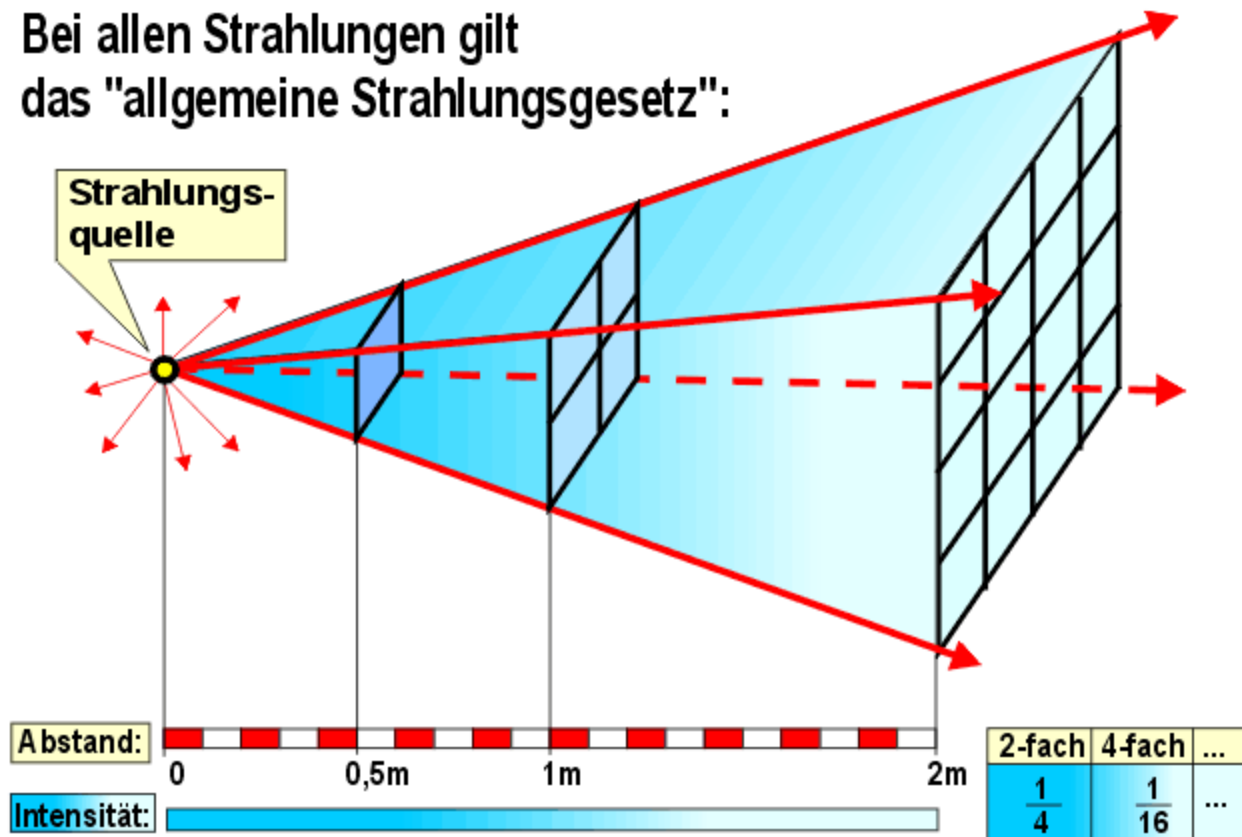
Stellt man sich den **Atomkern** eines Wasserstoff-Atomes auf Zündholzkopf-Größe vergrößert vor, so wäre das Gesamtatom so groß wie der Eiffelturm (300m). Das um den Atomkern kreisende **Elektron** wäre dann so groß wie ein Staubkorn (ca 0,1mm).





Warum nimmt die Intensität einer Strahlung ab, wenn man sich von der Strahlungsquelle entfernt ?

Bei allen Strahlungen gilt das "allgemeine Strahlungsgesetz":



**Die selbe Strahlung durchdringt in größerem Abstand a eine größere Fläche A.
Dabei nimmt die Intensität (Strahlungsstärke) mit dem Quadrat des Abstandes a ab.**

Radioaktivität

Radioaktivität

Radioaktivität ist die Eigenschaft bestimmter Atomkerne, sich von selbst, ohne Einwirkung von außen, unter der Emission von Strahlung umzuwandeln. Dabei wird die Anzahl der sich pro Zeiteinheit umwandelnden (zerfallenden) Atomkerne als **Aktivität A** genannt. Die Aktivität ist zu jedem Zeitpunkt proportional der Anzahl der noch nicht umgewandelten Atomkerne.

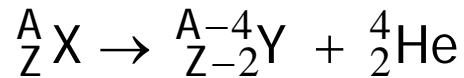
Einheit der Aktivität: 1 Becquerel (1 Bq = 1 Zerfall pro Sekunde)

Strahlungsarten

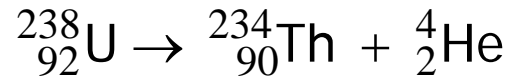
Alpha	α
Beta ⁻	β^{-}
Beta ⁺	β^{+}
Gamma	γ

Alphazerfall (α-Zerfall)

Beim Alphazerfall wird aus dem Kern ein alpha-Teilchen (He-Kern) ausgestoßen

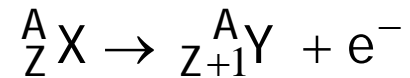


Die Anzahl der Nukleonen (Massenzahl = Protonen + Neutronen) A nimmt um 4 ab
Die Anzahl der Protonen Z nimmt um 2 ab. Das Element ändert sich. Beispiel:

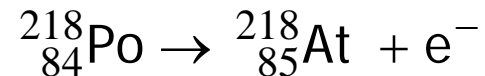


Betazerfall (β^- -Zerfall)

Beim Betazerfall (β^-) wird im Kern ein Neutron in ein Proton und ein Elektron umgewandelt

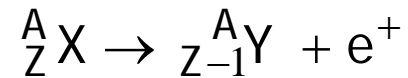


Die Anzahl der Nukleonen (Massenzahl = Protonen + Neutronen) bleibt gleich
Die Anzahl der Protonen Z nimmt um 1 zu. Das Element ändert sich. Beispiel:

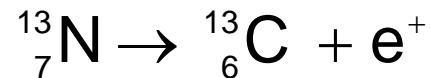


Betazerfall (β^+ -Zerfall)

Beim Betazerfall (β^+) wird im Kern ein Proton in ein Neutron und ein Positron umgewandelt

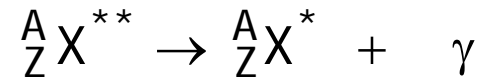


Die Anzahl der Nukleonen (Massenzahl = Protonen + Neutronen) bleibt gleich
Die Anzahl der Protonen Z nimmt um 1 ab. Das Element ändert sich. Beispiel:

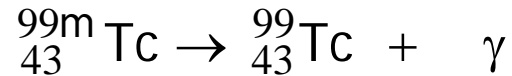


Gammazerfall (γ -Zerfall)

Gammazerfall (γ) kann auftreten, wenn ein Atomkern (z.B.) nach einem Zerfall noch in einem energetisch angeregten (nicht stabilen) Zustand vorliegt.

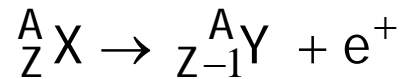


Die Anzahl der Nukleonen (Massenzahl = Protonen + Neutronen) bleibt gleich
Die Anzahl der Protonen bleibt gleich. Das Element ändert sich nicht. Beispiel:

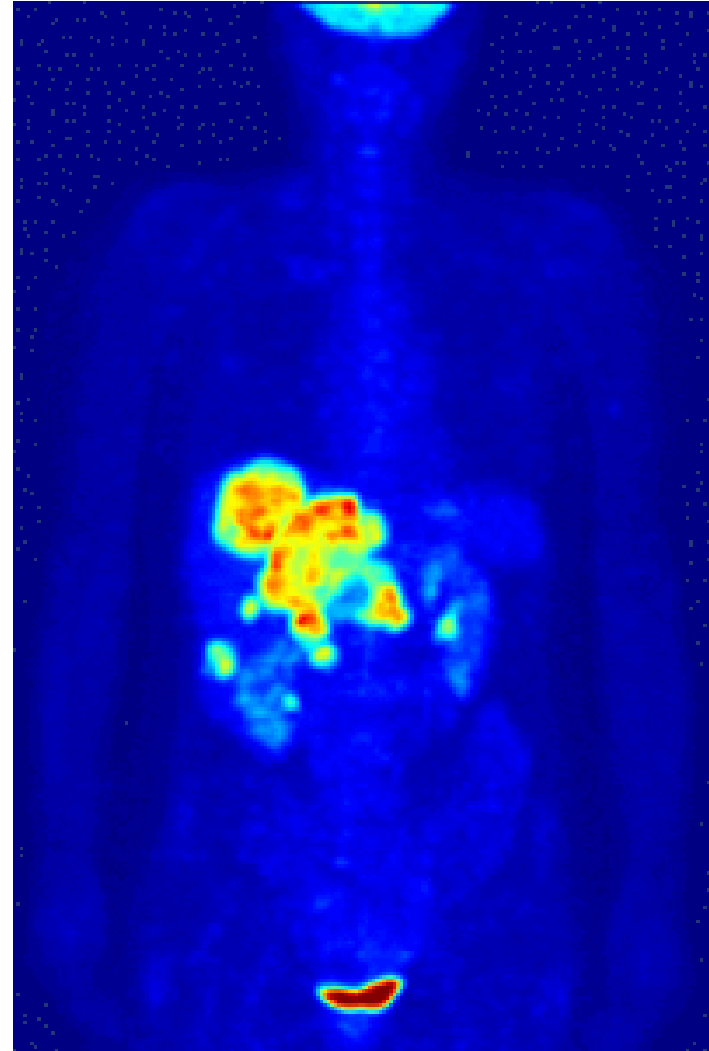


Positrons-Emmission-Tomographie

Ein nach β^+ - Zerfall

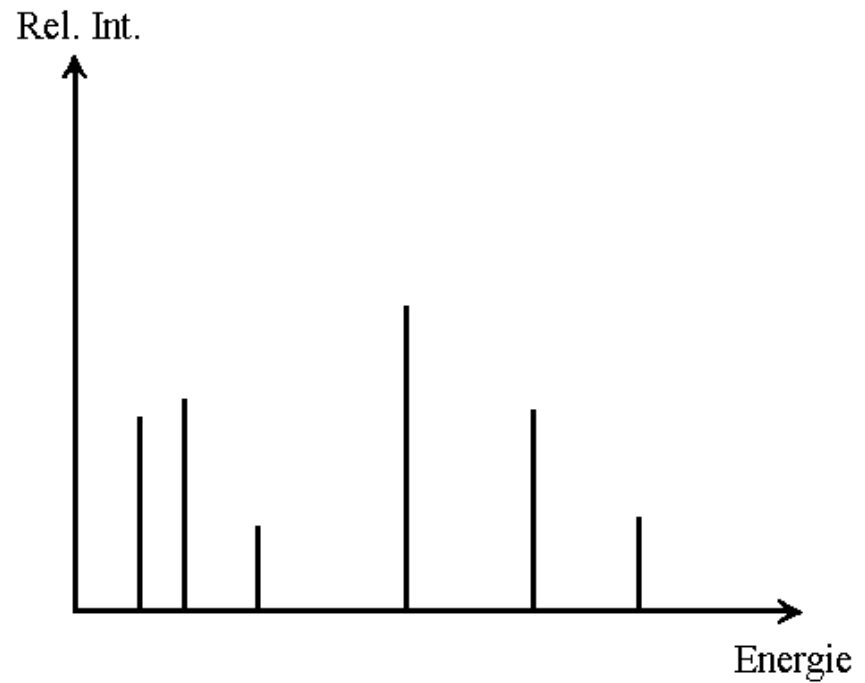
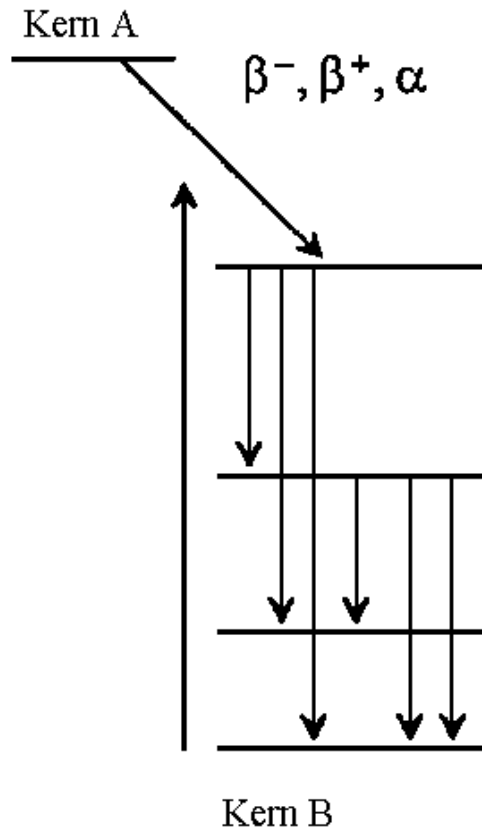


entstehendes Positron wechselwirkt mit einem Elektron, wobei 2 γ Quanten entstehen, die im 180-Grad-Winkel voneinander wegfliegen und mit Koinzidenzdetektoren registriert werden.



2-Fluor-2-deoxy-D-glucose (FDG oder 2-FDG) markiert mit radioaktivem ^{18}F (häufigstes Radiopharmakon für PET). $^{18}\text{F} > ^{18}\text{O} + e^+$

γ -Strahlung (Photonen)



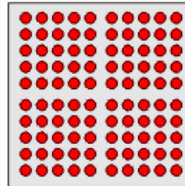
Bezeichnung	α -Strahlung	β -Strahlung	γ -Strahlung
Strahlungsteilchen	 ${}^4_2\text{He}^{++}$ <i>Heliumkern</i>	 ${}^0_{-1}\text{e}^-$ <i>Elektron</i>	 <i>elektromagnetische Wellenstrahlung</i>
mittlere Reichweite	<i>nur wenige cm</i>	<i>ca. 10cm</i>	<i>sehr weit</i>
magnetisch ablenkbar 	<i>schwach</i> <i>magnetisch ablenkbar</i> <i>(Gegenrichtung zu β)</i>	<i>stark</i> <i>magnetisch ablenkbar</i> <i>(Gegenrichtung zu α)</i>	<i>nicht</i> <i>magnetisch ablenkbar</i>
Durchdringbarkeit von Materialien	<i>relativ gering</i>	<i>besser als bei der α-Strahlung</i>	<i>ziemlich groß</i>
Abschirmbarkeit (Schutz vor dieser Strahlung)	<i>bereits mit dünnen Schichten der meisten Materialien möglich</i>	<i>durch "mittlere" Schichtstärken vieler Materialien</i>	<i>große Schichtstärken von "schweren" Materialien erforderlich</i>

Die Halbwertszeit:

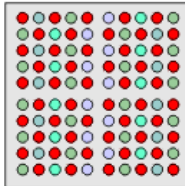


Als Halbwertszeit bezeichnet man die Zeit, die es dauert, bis von einer Menge eines radioaktiven Stoffs die Hälfte in andere Elemente zerfallen ist. Die Folgeprodukte können ebenfalls radioaktiv sein und somit zusätzlich ihre "eigene" Halbwertszeit haben.

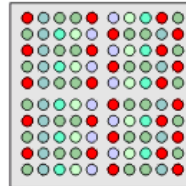
Beispiel: **Aktinium-227** mit einer Halbwertszeit von ca 22 Jahren



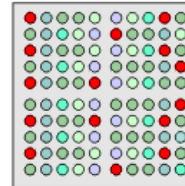
heute
100% ●



nach 22 Jahren
1 Halbwertszeit
50% ●

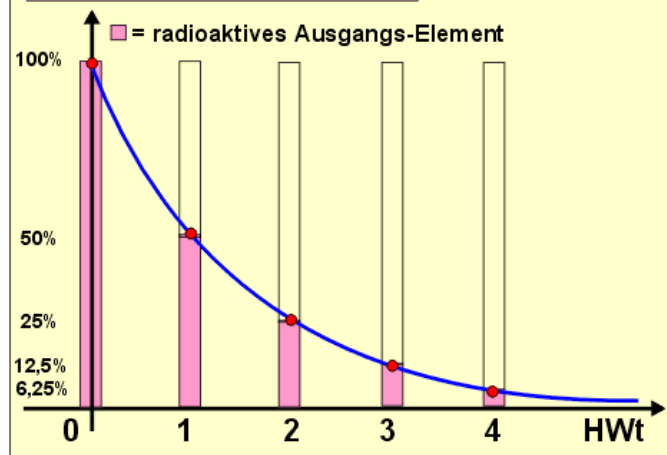


nach 44 Jahren
2 Halbwertszeiten
25% ●

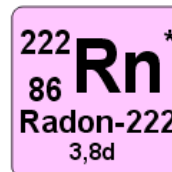
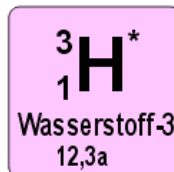
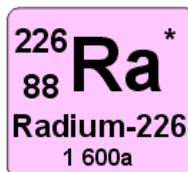
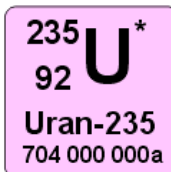
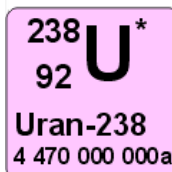


nach 66 Jahren
3 Halbwertszeiten
12,5% ●

Halbwertszeiten (HWt):



Halbwertszeiten einiger radioaktiver Isotope:



Zerfallsgesetz (1)

n sei die Anzahl der instabilen Kerne zum Zeitpunkt t

λ sei der Proportionalitätsfaktor

\dot{n} sei dn/dt

$$dn/dt = - \text{Proportionalitätsfaktor} \cdot n(t)$$

$$\dot{n}(t) + \lambda \cdot n(t) = 0 \quad (\text{Differentialgleichung I. Grades})$$

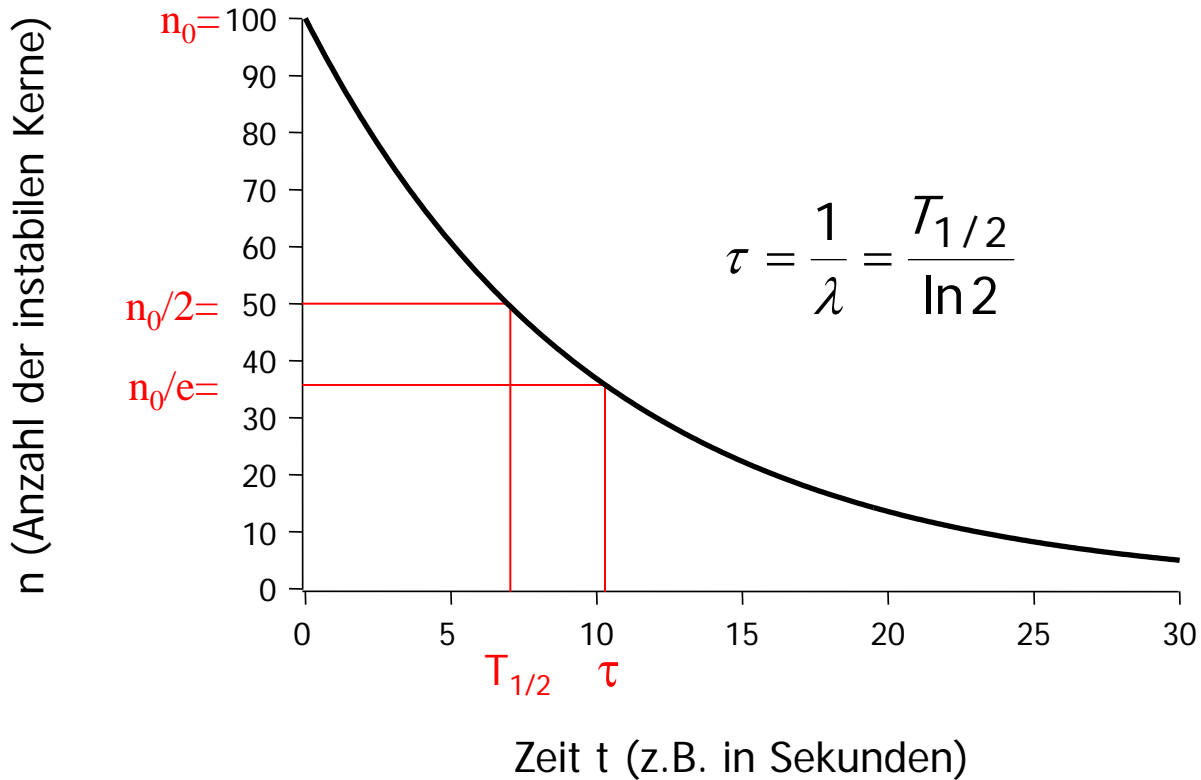
$$\text{Lösung: } n(t) = n_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Dabei ist die Aktivität A gegeben als $A(t) = - \dot{n}(t)$

$$A(t) = \lambda \cdot n_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad A(0) = A_0 = \lambda \cdot n_0$$
$$A(t) = \lambda \cdot n(t)$$

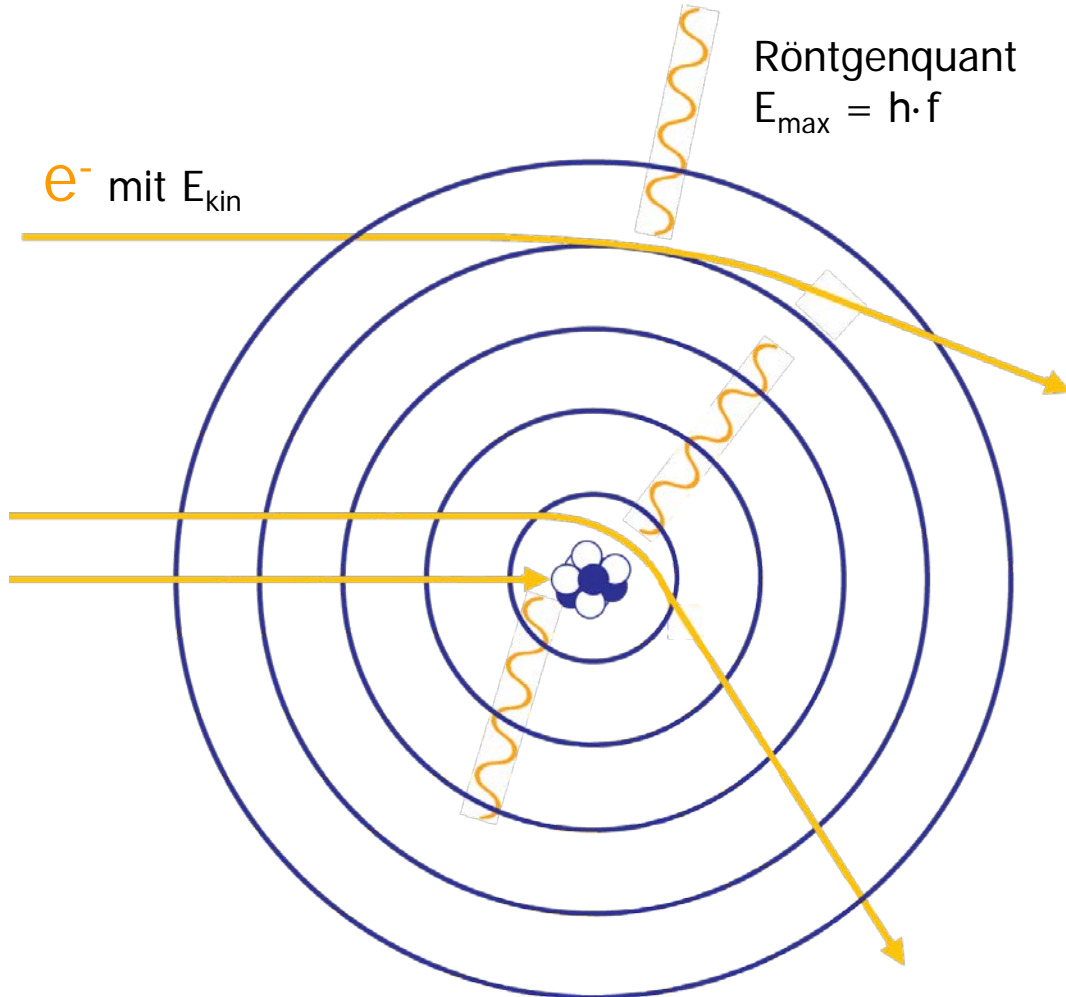
Zerfallsgesetz (2)

$$n(t) = n_0 \cdot e^{-\lambda t}$$



Röntgenstrahlung

Röntgenstrahlung



Röntgenquant
 $E_{max} = h \cdot f$

e^- mit E_{kin}

Energiebilanz:

$$E_{kin} = e \cdot UA$$

($e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)

$$E_{kin} = h \cdot f + q$$

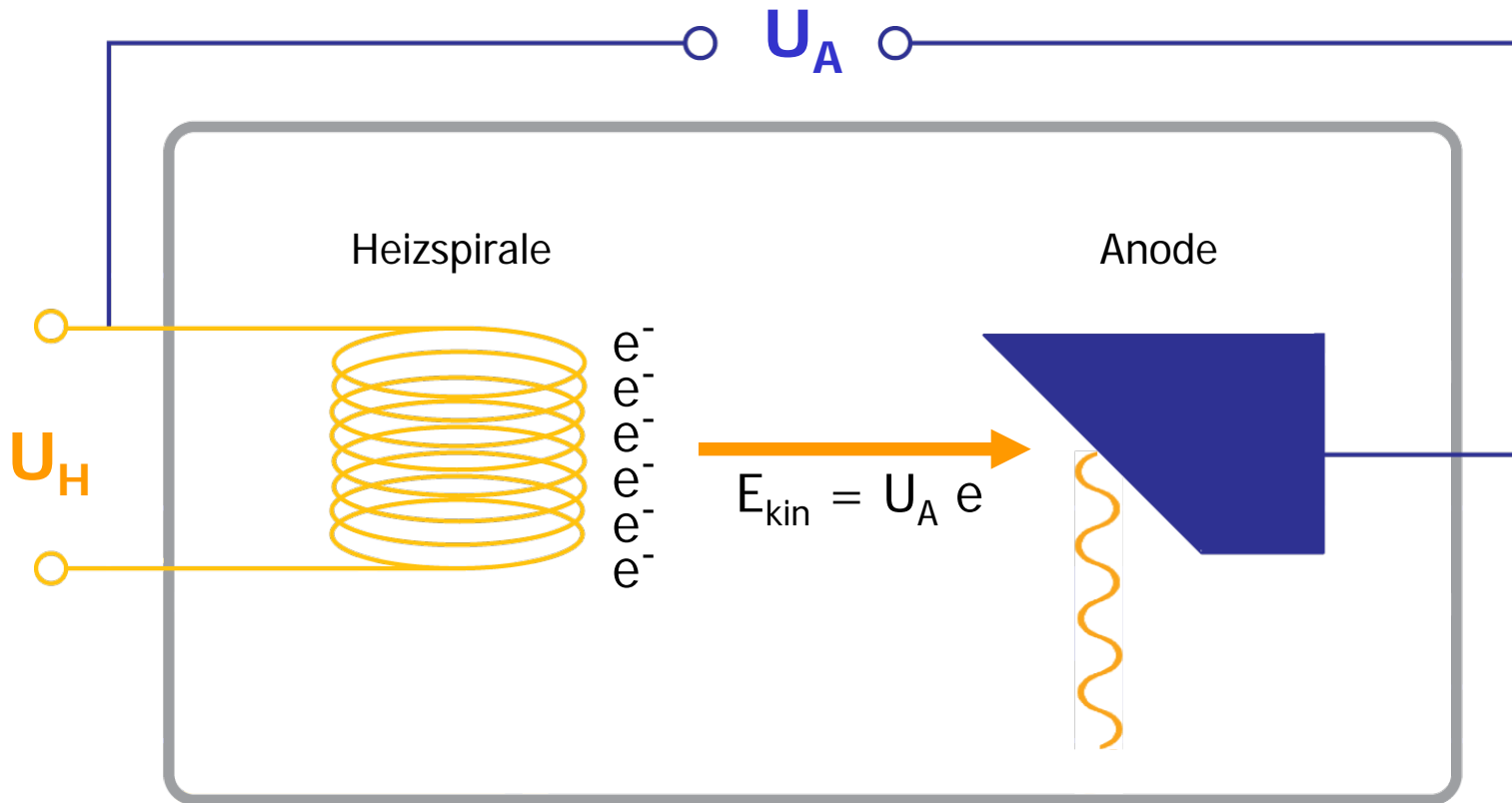
ca. 1% Röntgenstrahlung
ca. 99% Wärme etc.

Maximale Röntgenenergie:

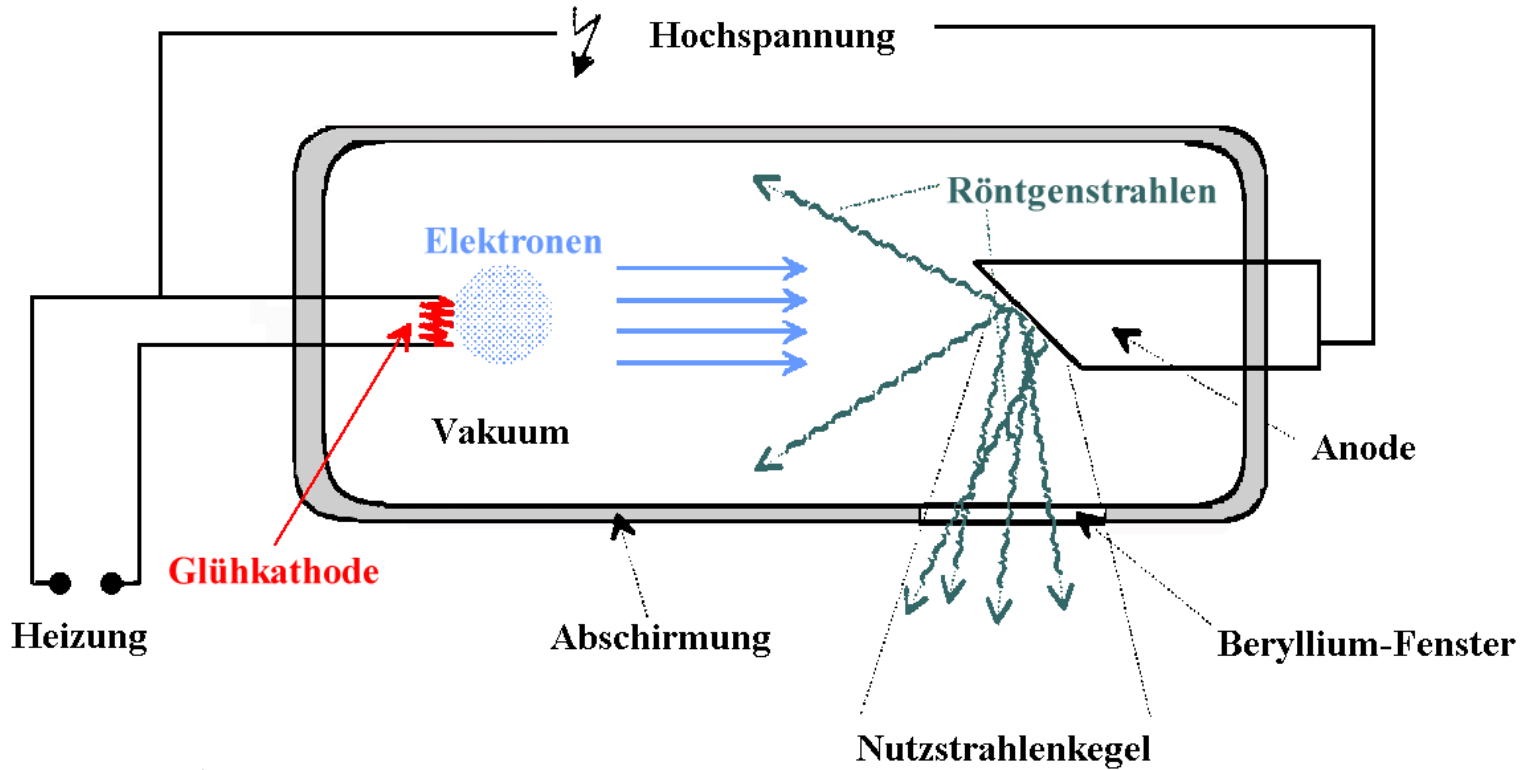
$$E_{max} = h \cdot f_{max} = h \cdot c / \lambda$$

$$\lambda = h \cdot c / E_{max}$$

Röntgenröhre

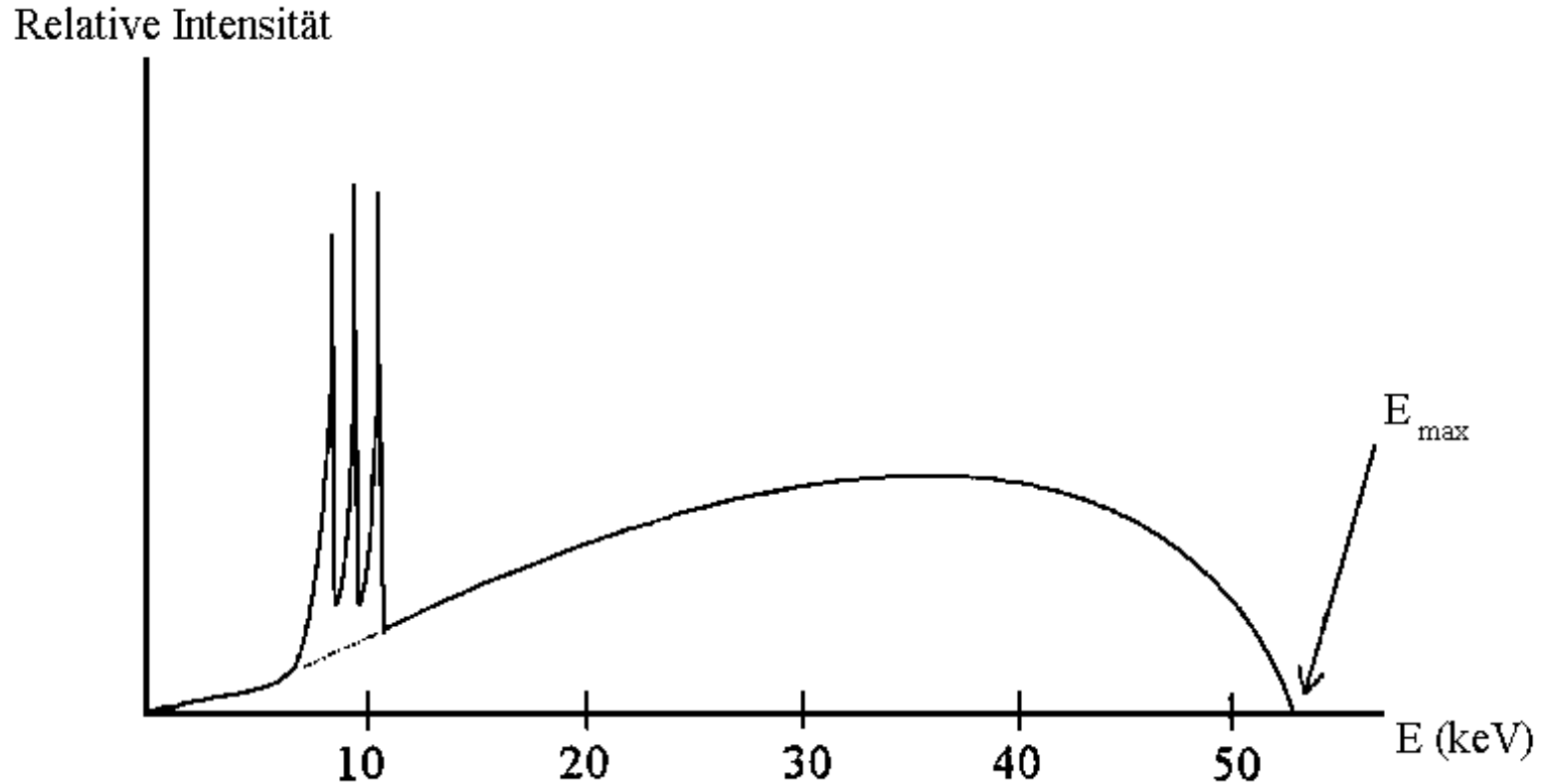


Schema einer Röntgenröhre



- Röntgenbremsstrahlung (kontinuierliches Spektrum)
- Charakteristisches Spektrum
- Wärmeentwicklung

Röntgenbremsstrahlung mit charakteristischen Linien

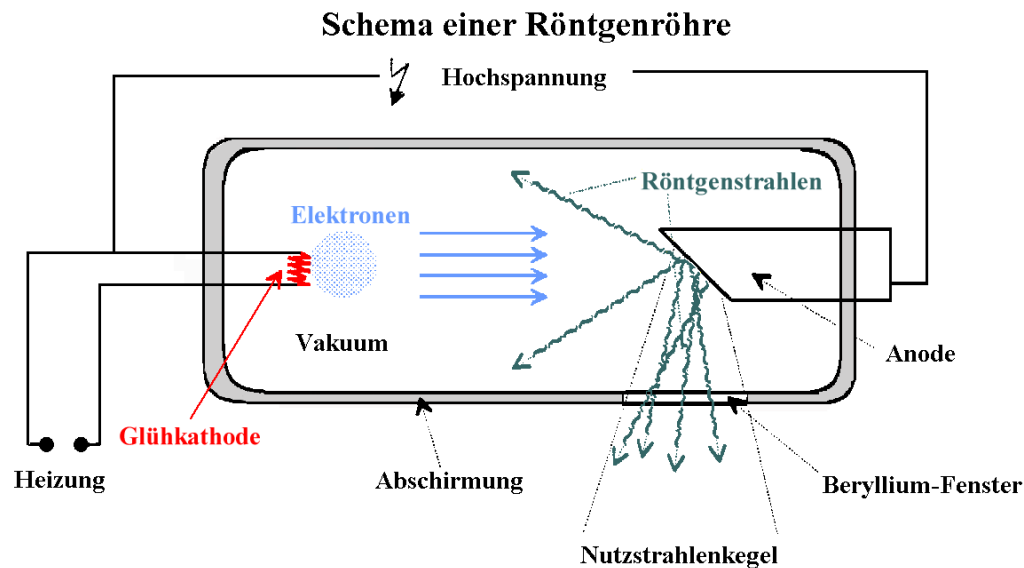


Eigenschaften der Röntgenröhre

Die Intensität der Strahlung kann gesteigert werden, wenn man den Heizstrom an der Kathode erhöht > mehr Elektronen treten an der Glühkathode aus-

Die Röntgenstrahlung wird energiereicher (= härter), wenn man die Anodenspannung U erhöht > das Energie-Maximum der Bremsstrahlung verschiebt sich nach rechts (zu höheren Werten). Größenordnung der Anodenspannung 10-150 kV.

Das charakteristische Röntgenspektrum hängt vom Anodenmaterial ab.



Abschwächung der Röntgenstrahlung durch Wechselwirkung von Röntgenstrahlung mit Materie

- Klassische Streuung
- Photoeffekt/Photoionisation
- Comptoneffekt
- Paarbildungseffekt
- Kernreaktion

Klassische Streuung

- „Rayleigh-Streuung“
- Keine Änderung der Energie des einstrahlenden Photons, lediglich der **Richtung der Bewegung**
- Auftreten normalerweise **bei niedrigenergetischer Strahlung**
- Scharfe **Bündelung** der Photonenstrahlung → Anstieg der Wahrscheinlichkeit der Streuung
- Auch hier gilt: höhere Energie → weniger Ablenkung
- Zumindest bei der „normalen“ Röntgenstrahlung noch als Streustrahlung wahrnehmbar

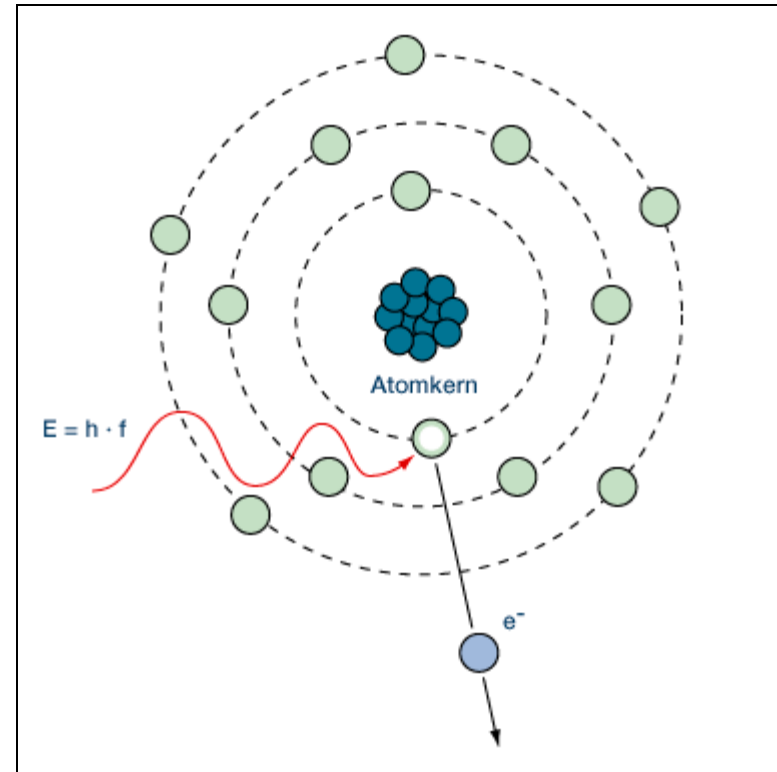
Photoeffekt / Photoionisation

- Übertragung der gesamten Photonenenergie auf ein Elektron, das an ein Atom/Molekül gebunden ist
 - Absorption des Photons
- Photonenenergie → Auslösearbeit + kinetische Energie des Elektrons
$$E_{kin,e} = h \cdot f_{Ph} - W_A$$
- Ist die Photonenenergie/-frequenz hoch genug, so trennt sich das Elektron vom Atom/Molekül → **Photoionisation**
- Der Photoeffekt tritt oft im Bereich der unteren **Schalen K und L** auf

Photoeffekt / Photoionisation

Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Photoeffekts:

- besonders groß bei kleinen und mittleren Photonenenergien
- nimmt mit höheren Photonenenergien stark ab
- nimmt mit der Kernladungszahl Z zu



Comptoneffekt

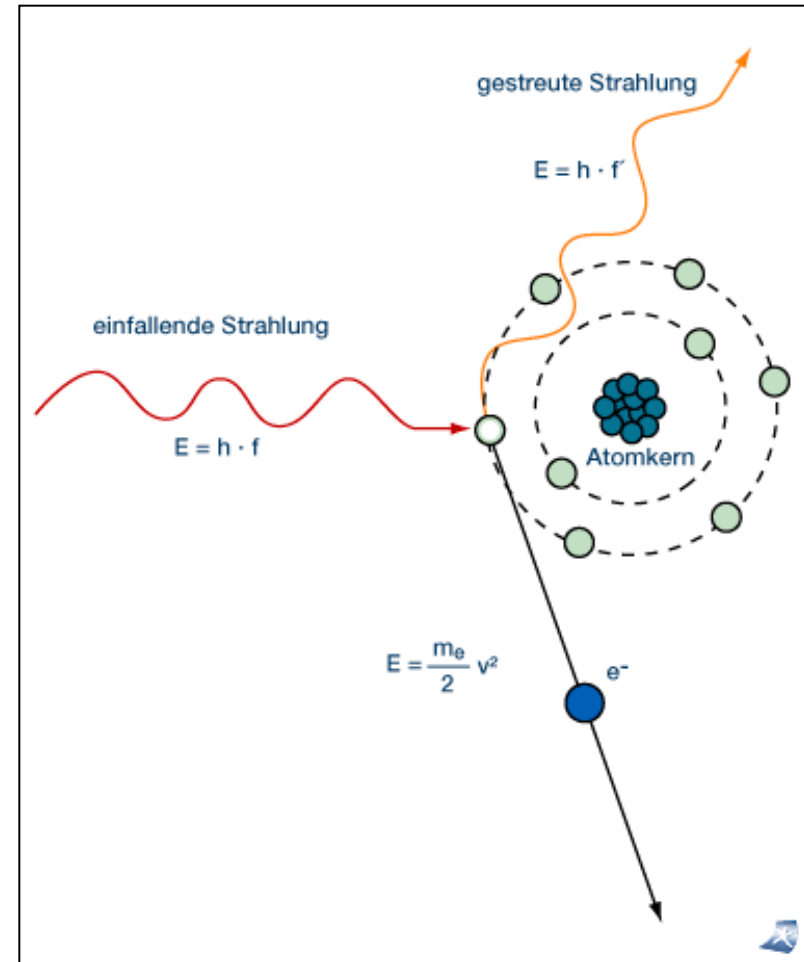
Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Compton-Effekts:

- groß bei mittleren Energien
- Abnahme bei höheren Energien

Photonenenergie $h \cdot f$

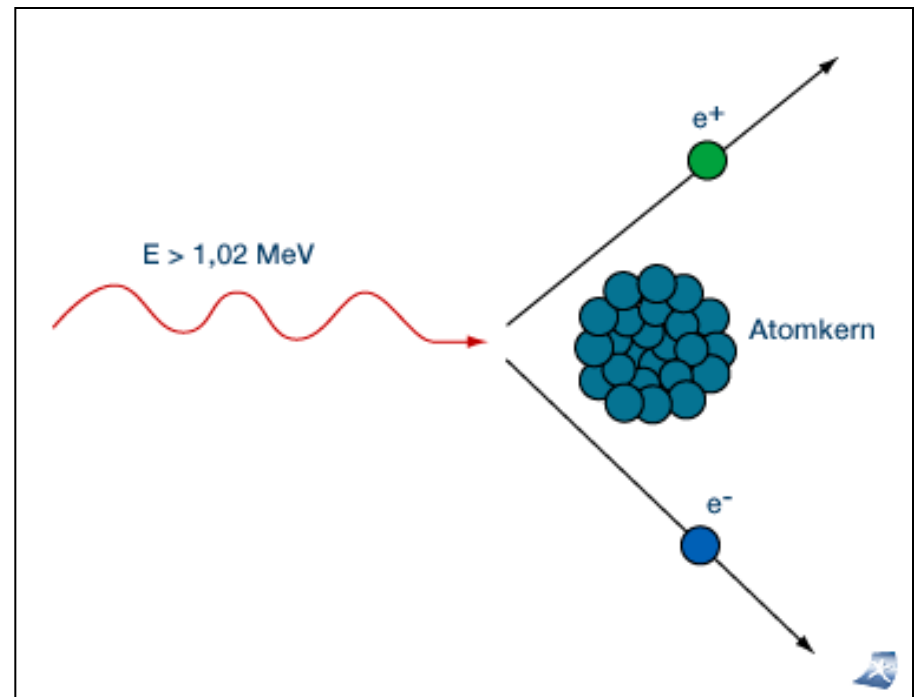
→ Streustrahlung $h \cdot f' + E_{\text{kin,e}}$

Ausschlagen von Elektronen aus den äußersten Hüllen



Paarbildungseffekt

- Auftreten nicht in der Röntgendiagnostik, sondern nur in der Strahlentherapie
- **gesamte Energie** des einfallenden Photons geht auf das Elektron-Positron-Paar über
- Energien $\geq 1,022 \text{ MeV}$
→ $m_e = 511 \text{ keV}$
- Energieüberschuss
→ kinetische Energie der e^- & e^+
- Wahrscheinlichkeit steigt mit Photonenenergie an

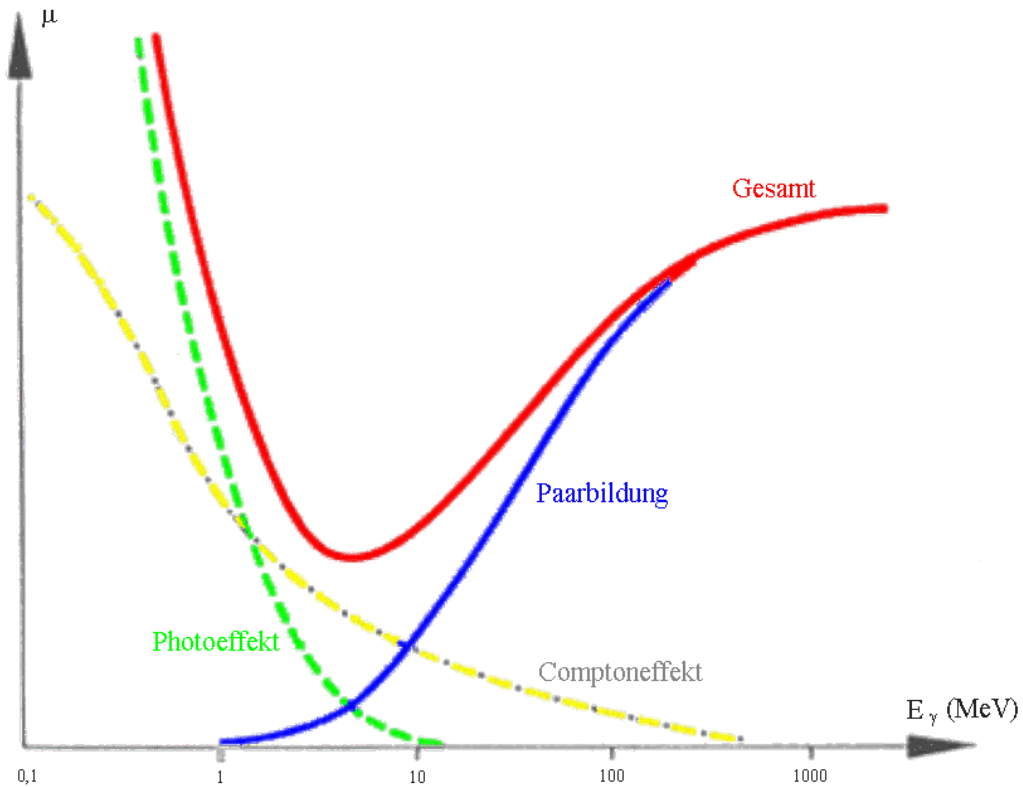


Kernreaktion

- Art einer Kernreaktion ist von der **Art der Reaktionspartner** sowie der **Energie** der auftreffenden Photonenstrahlung abhängig
- Energien im **MeV Bereich** notwendig
- Erhöhte Strahlenbelastung durch Entstehen von **Radionukliden**
- 2 Reaktionstypen:
 - $(\gamma ; n)$ – Reaktion
 - $(\gamma ; p)$ – Reaktion

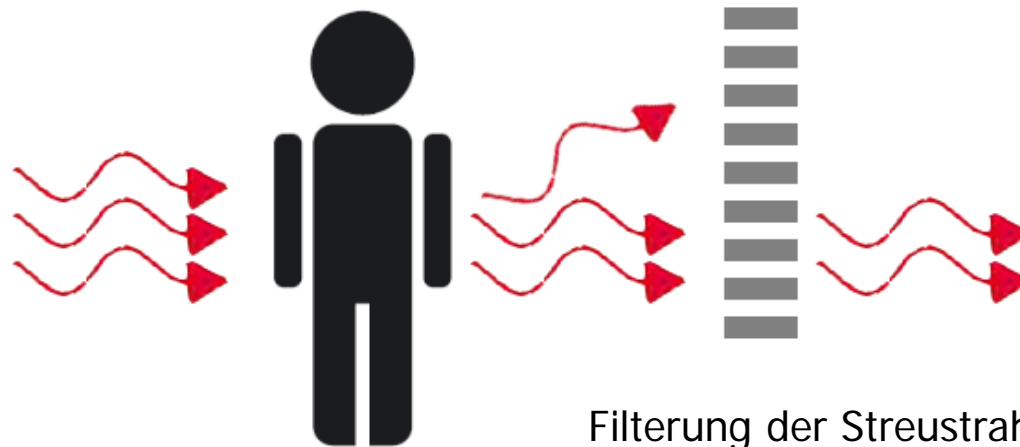
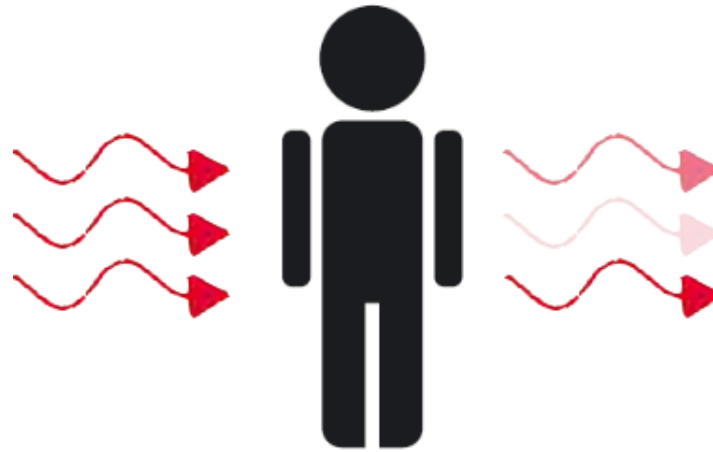
→ kleinste mögliche Energie = 2,18 MeV: ${}^2\text{H} (\gamma, n) {}^1\text{H}$

Massenschwächungskoeffizient $\mu = f(\text{Energie})$



Verlauf des Schwächungskoeffizienten μ als Summe seiner Anteile aus dem Photoeffekt, dem Comptoneffekt und der Paarbildung

Filterung und Durchleuchtung



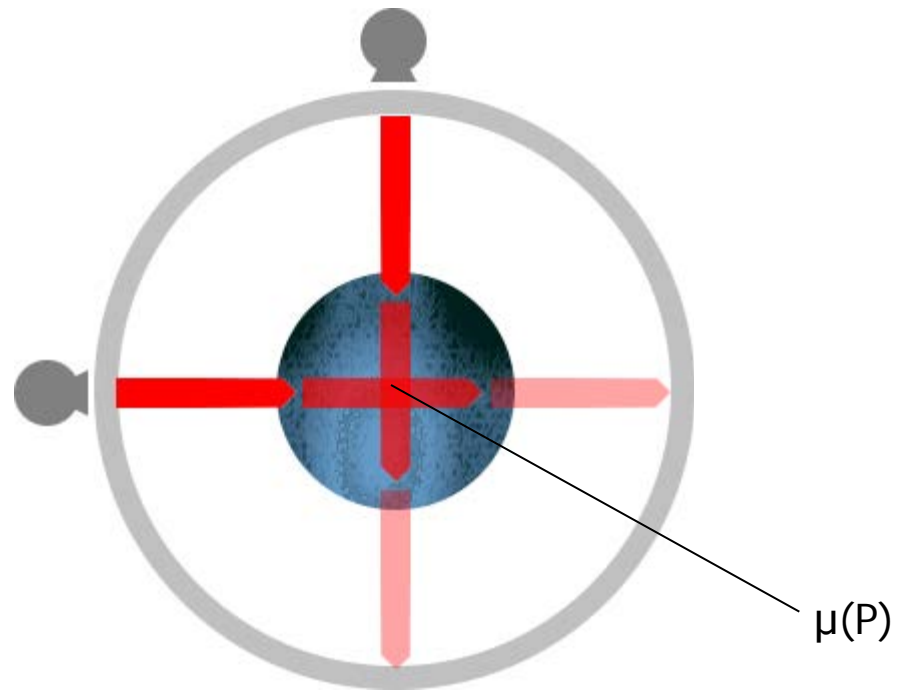
Filterung der Streustrahlung
durch Comptoneffekt mittels Bleilamellen

Bildgebung mit Röntgenfilmen, Verstärkerfolien, Speicherfolien und Festkörperdetektoren

Festkörperdetektor:

- Umwandlung der Röntgenstrahlung in sichtbares Licht
- Umwandlung des Lichtes in Elektronen durch Photodiode
- Gemessener Strom proportional zu Intensität

Ermittlung der individuellen Einzelabschwächung



CT-Zahl und Hounsfield Skala

- Schwächungskoeffizient abhängig von Gewebe
- Jedem μ wird eine CT-Zahl zugeordnet
- CT-Zahl in Hounsfield-Skala:

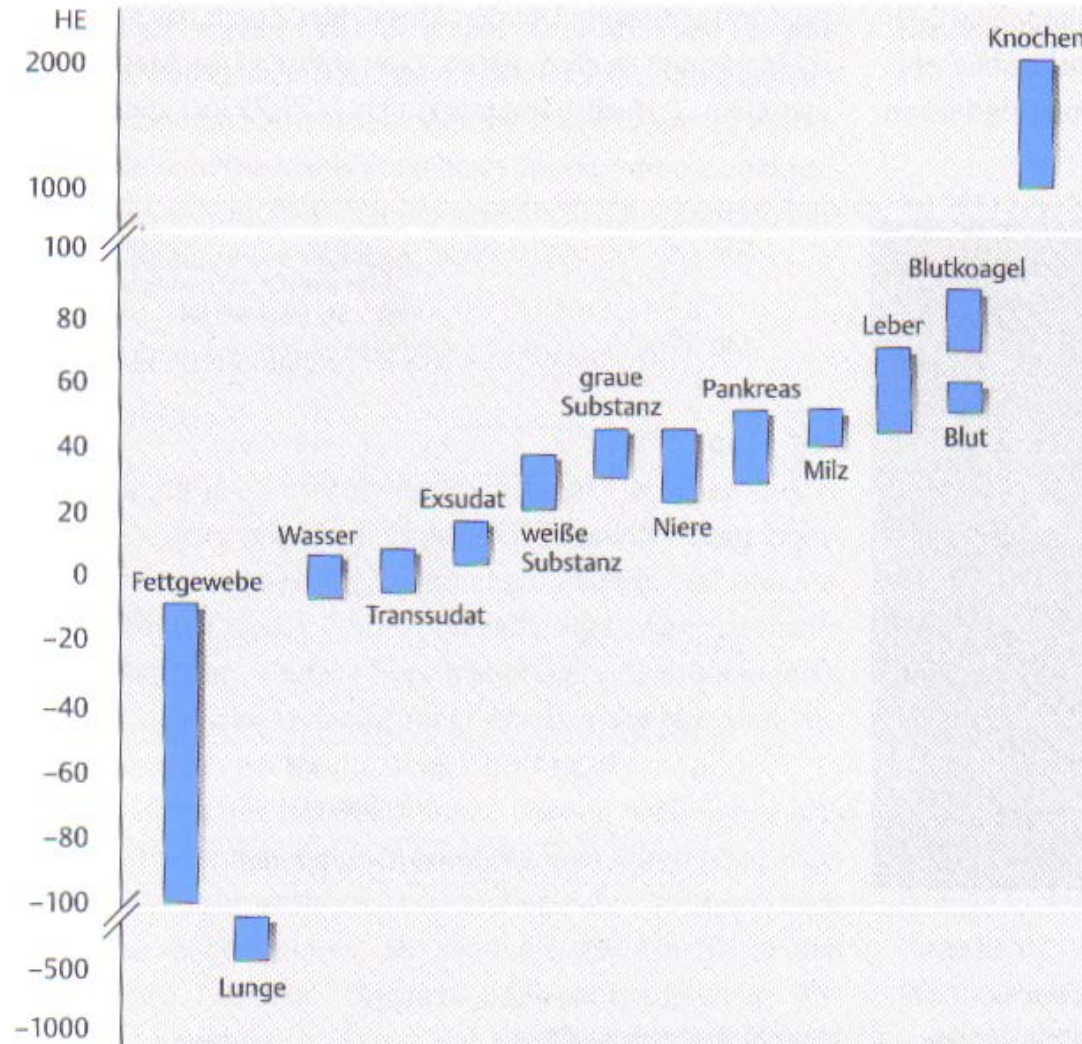
-1000	HE	\Leftrightarrow	μ von Luft
0	HE	\Leftrightarrow	μ von Wasser
2000	HE	\Leftrightarrow	μ von kompaktem Knochen

Berechnung der CT-Zahl:

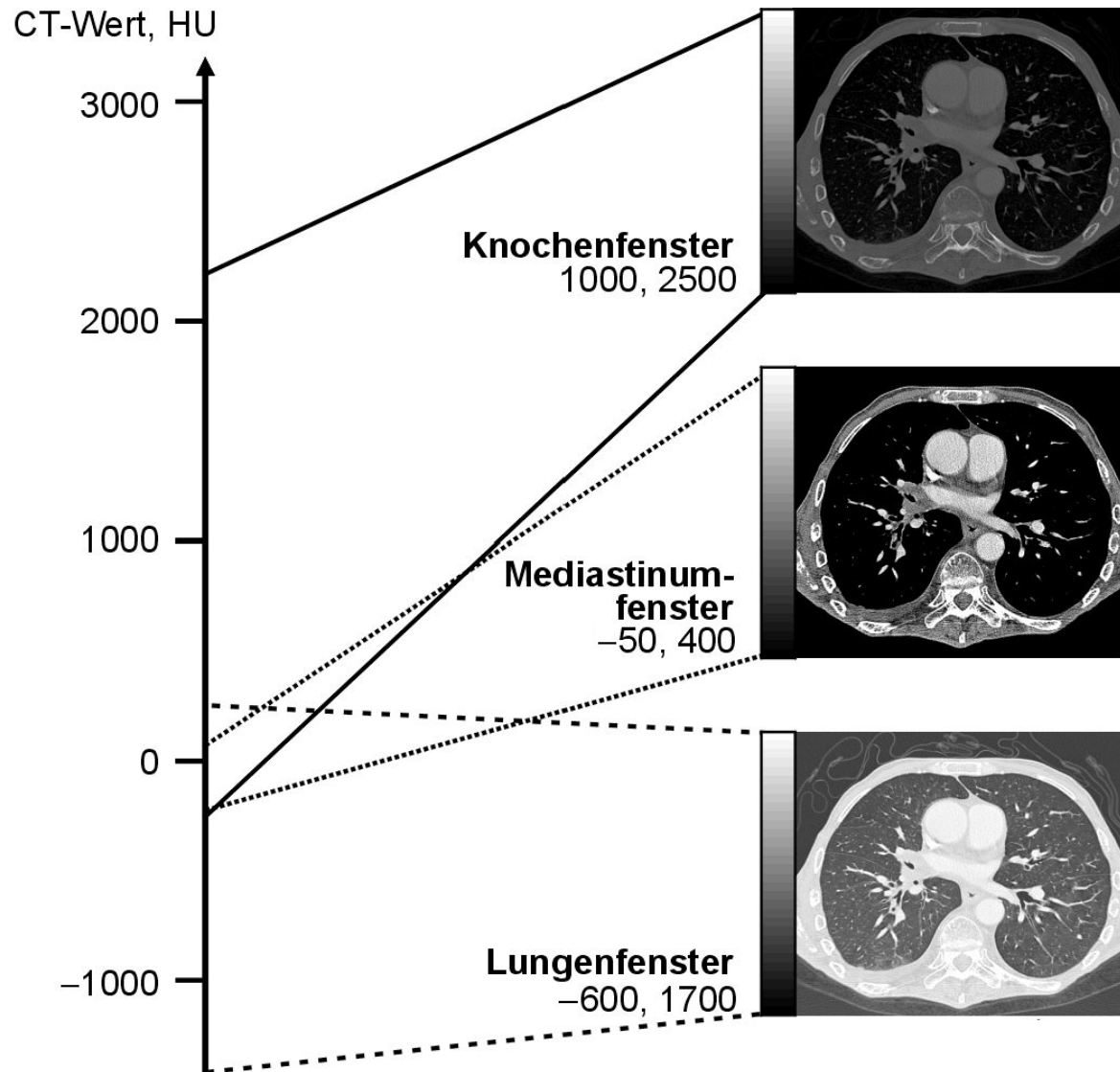
$$\text{CT-Zahl} = 1000 * \frac{(\mu \text{ Objekt} - \mu \text{ Wasser})}{(\mu \text{ Wasser})}$$

\Rightarrow über 2000 verschiedene Dichtewerte

CT-Werte menschlichen Gewebes



Beispiel verschiedener CT-Werte Fenster



Computertomographie

Gantry:

- Röntgenröhre
- Detektor
- Schutzverkleidung

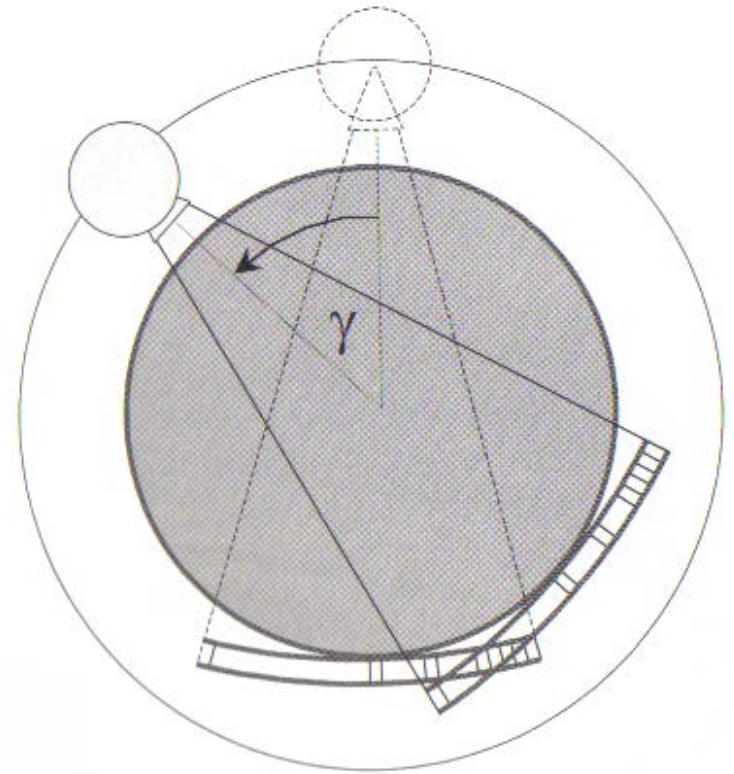


Patientenlagerungstisch

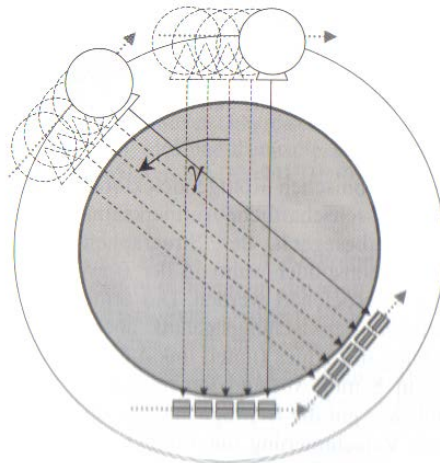
Bedienpult, Computer

Moderne CT Geräte (3. Generation)

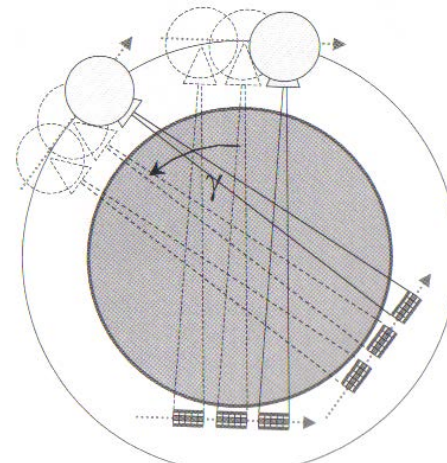
- Weitere Aufweitung des Strahls (40-60°)
- Längere Detektorarrays (bis zu 1000)
- Keine Translation mehr erforderlich
- Weitere Reduktion der Aufnahmezeit
- Heute meist verwendete CT



1. Generation

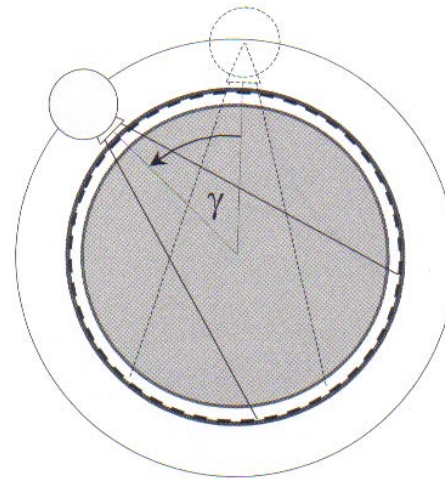


2. Generation



4. Generation

- Fester Detektorring (bis zu 5000 Elemente)
- Rotierende Röntgenquelle
- Aufnahmedauer: 1-4s pro Schicht
- Hohe Anschaffungskosten



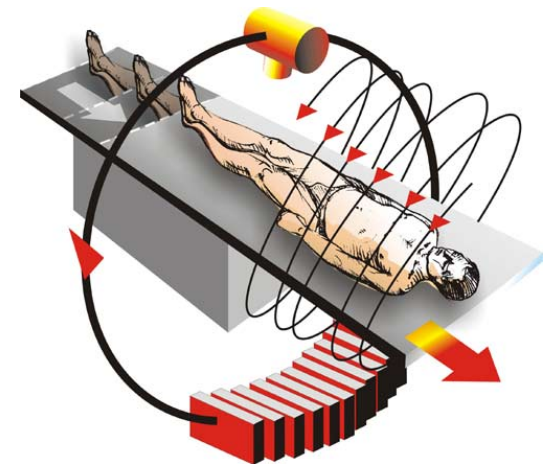
Weitere Entwicklungsschritte:

Elektronenstrahl-CT:

- Verwendung einer Elektronenkanone
- Fokussierung auf einen Wolframtargetring
- Erzeugung des erwünschten Röntgenfächers
- Aufnahmedauer: 50ms pro Schicht

Spiral-CT:

- fortlaufende Drehung der Röntgenröhre
- Patient wird kontinuierlich durch Gerät geschoben
- Kürzere Scanzeit
- Dreidimensionale Darstellung möglich



Geschichte der Röntgenstrahlung

1895: Röntgen veröffentlicht erste Experimente mit Strahlung



Eigenschaften:

Fähigkeit Stoffe zu durchdringen

Schwärzt Fotoplatten

Anregung zu Fluoreszenz

Ionisierende Wirkung

1896: erste Versuche in der Medizin



Entdeckung der Röntgenstrahlung

1895: Entdeckung der Röntgenstrahlung durch
Wilhelm Conrad Röntgen am Physikalischen
Institut der Universität Würzburg

1901: Erster Nobelpreis für Physik für Röntgen



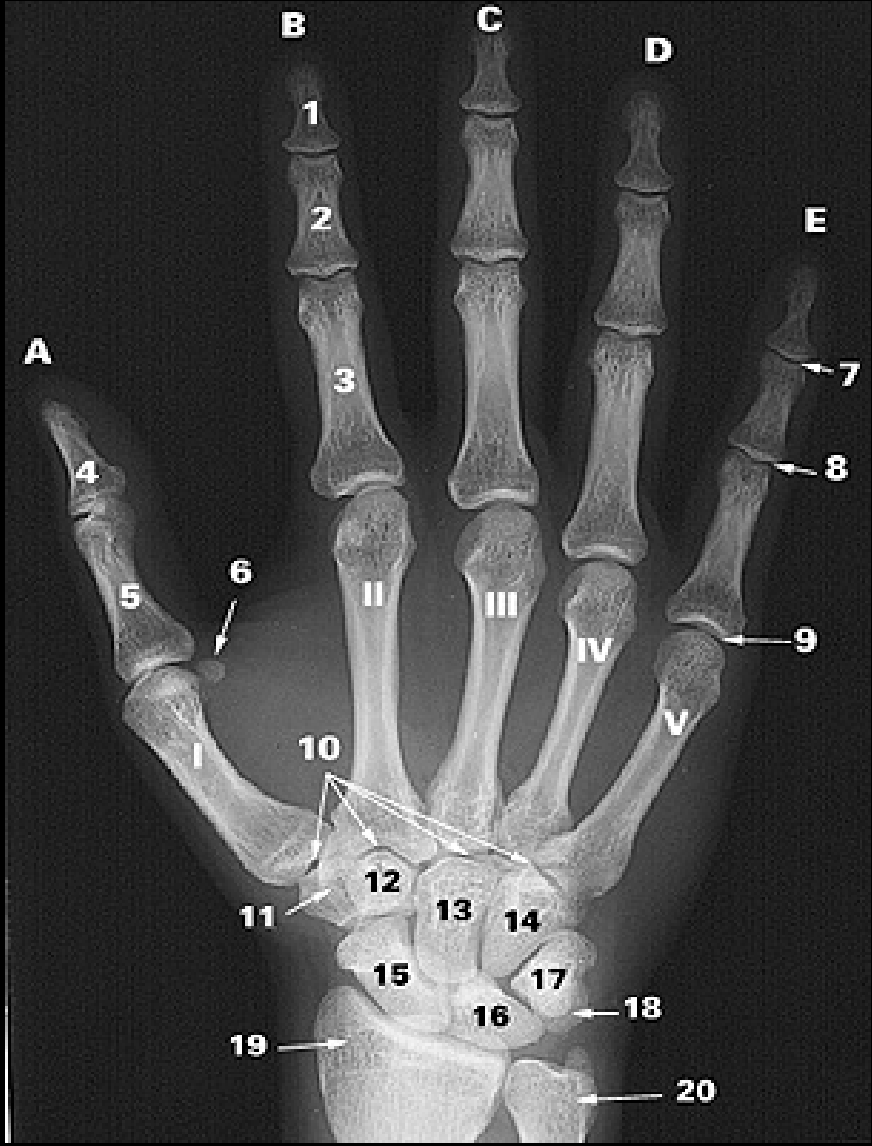
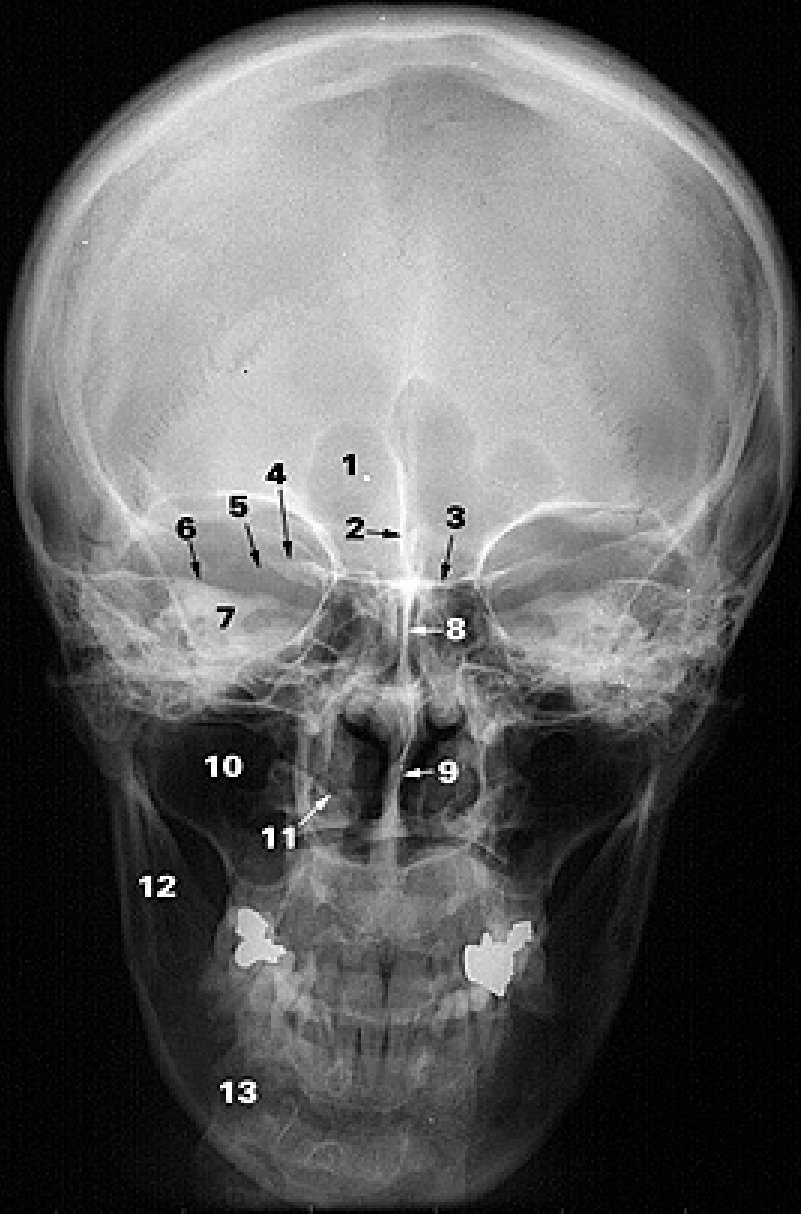
Erste
Röntgenaufnahme



Heutige
Röntgenaufnahme



Beispiele



Geschichte des CT

- Computergestütztes Röntgenverfahren zur Erzeugung transversaler Schnitte
- Anwendung: v.a. Onkologie, Traumatologie

Geschichte der Computertomographie

1917: Johann Radon entwickelt mathematisches Verfahren („Radontransformation“)

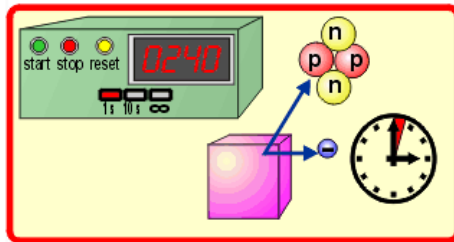
1960: Allan Cormack und Godfrey Hounsfield realisieren Prototypen

1971: Erste Aufnahmen des Menschen

1979: Nobelpreis für Medizin

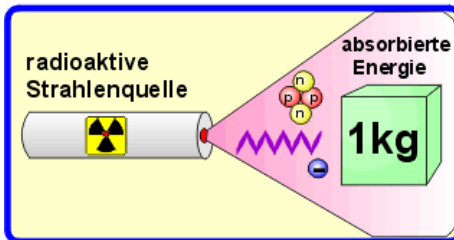
Nachweis ionisierender Strahlung

1. Die Aktivität A:



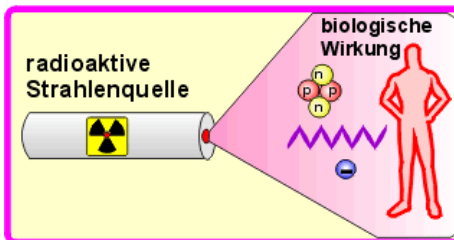
Die Anzahl der Kernzerfälle pro Sekunde wird in der Maßeinheit **Becquerel** angegeben.
1 Bq = 1 Zerfall pro Sekunde
früher übliche Maßeinheit "Curie".

2. Die Energiedosis D:



Die von 1kg Material aufgenommene Energie wird in der Maßeinheit **Gray** angegeben.
1 Gy = 1 Joule pro kg
früher übliche Maßeinheit "Rad".

3. Die Äquivalentdosis H:



Die biologische Wirkung auf 1kg Material wird in der Maßeinheit **Sievert** angegeben.
1 Sv = 1 Joule · Wertungsfaktor pro kg
früher übliche Maßeinheit "Rem".

Durch den Bewertungsfaktor wird die Tatsache berücksichtigt, dass die einzelnen Strahlungen unterschiedliche Schädigungswirkungen haben.

Bewertungsfaktoren einiger Strahlungen:

1	Röntgenstrahlen, Gammastrahlen
1	Beta- und Elektronenstrahlungen
2,3	thermische Neutronen ("langsame" Neutronen)
10	schnelle Neutronen und Protonen
20	α-Strahlen

4. Hautrötungsdosis HRD

Die im Gewebe absorbierte Dosis wird mit einer geeichten Farbtabelle gemessen.

5. Ionendosis J

Ionisierung von Atomen in 1 kg Luft

(Einheit Coulomb/kg)

6. Effektive Äquivalentdosis

Die Äquivalentdosis wird um einen Wichtungsfaktor W ergänzt, der die Empfindlichkeit der Organe berücksichtigt

Gonaden $W = 0.25$

Brust $W = 0.15$

Rotes Knochenmark $W = 0.12$

Lunge $W = 0.12$

Schilddrüse $W = 0.03$

Restkörper $W = 0.30$

($H = D \cdot W$, Einheit ist ebenfalls Sievert)

Mittlere effektive Jahresäquivalentdosis der einzelnen Komponenten der natürlichen Strahlenexposition der Bevölkerung

natürliche Strahlenexposition	eff. Äquiv. Dosis (mSv/a)	Anteil (%)
unverändert - kosmische Komponente - terrestrische Komponente - "innere" Komponente	0,30 0,35 <u>0,35</u> 1,00	14,0 16,5 <u>16,5</u> 47,0
verändert - Verwendung von Baustoffen - sonstige	0,10 <u>0,03</u> 0,13	4,7 <u>1,3</u> 6,0
Inhalation - ²²² Rn- Folgeprod. in Häusern - ²²⁰ Rn- Folgeprod. in Häusern - ²²² Rn- Folgeprod. im Freien - ²²⁰ Rn- Folgeprod. im Freien	0,73 0,15 0,12 <u>0,004</u> 1,00	34,2 7,0 5,6 <u>0,2</u> 47,0
gesamte natürliche Strahlenexposition	2,13	100

Bundesjustizministerium

Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen

(http://bundesrecht.juris.de/strlsv_2001/index.html)

§ 46 Begrenzung der Strahlenexposition der Bevölkerung

- (1) Für Einzelpersonen der Bevölkerung beträgt der Grenzwert der effektiven Dosis durch Strahlenexpositionen
aus Tätigkeiten nach § 2 Abs. 1 Nr. 1 **ein Millisievert im Kalenderjahr**.
- (2) Unbeschadet des Absatzes 1 beträgt der Grenzwert der Organdosis für die Augenlinse 15 Millisievert im Kalenderjahr und der Grenzwert der Organdosis für die Haut 50 Millisievert im Kalenderjahr.

§ 55 Schutz bei beruflicher Strahlenexposition

- (1) Für beruflich strahlenexponierte Personen beträgt der Grenzwert der effektiven Dosis **20 Millisievert** im Kalenderjahr. § 58 bleibt unberührt.
Die zuständige Behörde kann im Einzelfall für ein einzelnes Jahr eine effektive Dosis von **50 Millisievert** zulassen, wobei für fünf aufeinander folgende Jahre 100 Millisievert nicht überschritten werden dürfen.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen

(http://www.bmu.de/strahlenschutz/strahlenschutzrecht/novelle_der_roentgenverordnung/doc/6896.php)

§ 23 Rechtfertigende Indikation

Röntgenstrahlung darf unmittelbar am Menschen in Ausübung der Heilkunde oder Zahnheilkunde nur angewendet werden, wenn eine Person nach § 24 Abs. 1 Nr. 1 oder 2 hierfür die rechtfertigende Indikation gestellt hat. Die rechtfertigende Indikation erfordert die Feststellung, dass der gesundheitliche Nutzen der Anwendung am Menschen gegenüber dem Strahlenrisiko überwiegt.

Andere Verfahren mit vergleichbarem gesundheitlichen Nutzen, die mit keiner oder einer geringeren Strahlenexposition verbunden sind, sind bei der Abwägung zu berücksichtigen.

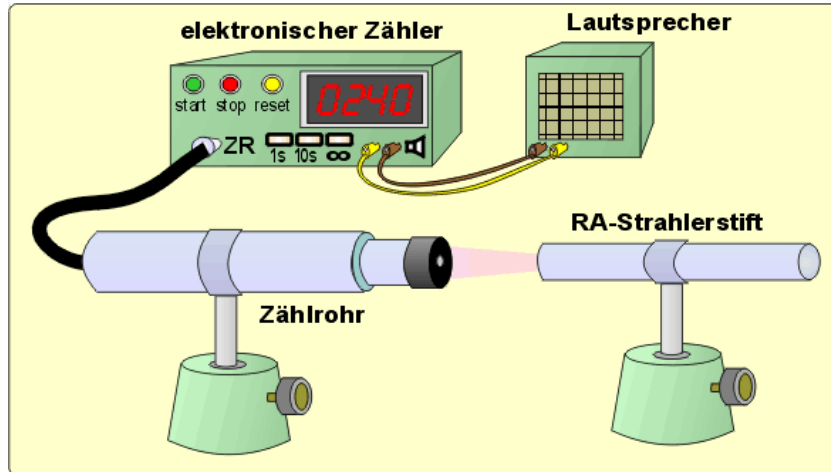
Eine rechtfertigende Indikation nach Satz 1 ist auch dann zu stellen, wenn die Anforderung eines überweisenden Arztes vorliegt. 5Die rechtfertigende Indikation darf nur gestellt werden, wenn der die rechtfertigende Indikation stellende Arzt den Patienten vor Ort persönlich untersuchen kann, es sei denn, es liegt ein Anwendungsfall des § 3 Abs. 4 vor. 6§ 28a bleibt unberührt.

Typische Dosen:

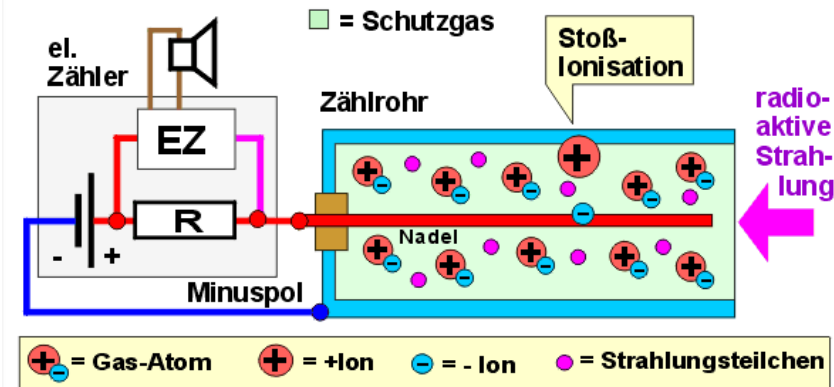
1. Röntgen-Thorax: ca. 1 mSv
2. CT-Abdomen: ca. 10-15 mSv

1. Der Versuch:

Erfinder: Hans Geiger (*1882 +1945)
und W. Müller (*1905)



2. Funktionsbeschreibung:



Das Zählrohr ist mit einem Schutzgas gefüllt. Sein Metallgehäuse ist mit dem Minuspol verbunden, die Metallnadel im Zählrohr mit dem Pluspol (ca 500V). Treten durch das Einlassfenster (aus Glimmer) Strahlungsteilchen einer radioaktiven Strahlung ein, so werden einzelne Gas-Atome ionisiert (Stoß-Ionisation). Das Plus-Ion besorgt sich am Minuspol ein Elektron und wird wieder zum Atom. Das Minus-Ion gibt am Pluspol ein Elektron ab, und wird ebenfalls wieder zum Atom. Es fließt dabei ein kurzer Stromimpuls, der vom Widerstand R an den elektronischen Zähler "weitergemeldet" wird (Spannungsimpuls). Dieser zählt dann eine Zahl weiter. Der Lautsprecher macht sich dabei durch ein Knacken bemerkbar.

„Triviale Strahlenschutzregeln“

- Vermeidung jeder unnötigen Strahlenexposition oder Kontamination von Personen, Sachgütern oder der Umwelt.
- Begrenzung jeder unvermeidbaren Strahlenexposition oder Kontamination von Personen, Sachgütern oder der Umwelt unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalles (“so gering wie vernünftigerweise erreichbar“ auch unterhalb der Grenzwerte von Strahlenschutz- und Röntgenverordnung).

ALARA-Prinzip: As Low As Reasonalbe Achievable

- Schutzmaßnahmen

- Begrenzung der Quellstärke
- Beschränkung der Aufenthaltsdauer
- Einhaltung von Abständen
- Verwendung von Abschirmwänden