

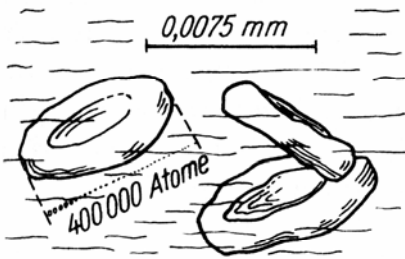
Kernphysik und ionisierende Strahlung

21. Atomkerne

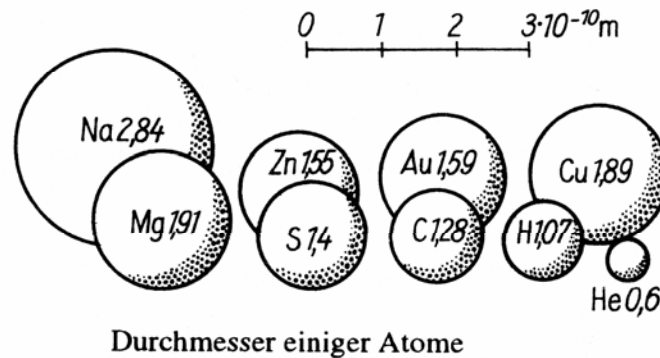
21.1 Elementarteilchen

- Materie besteht aus Elementarteilchen; alle Atome sind daraus aufgebaut; Elektronen in Atomhülle und Nukleonen im Kern
- Nukleonen: **Neutronen** und **Protonen**; auch zu den Elementarteilchen gerechnet: Photonen, d.h. γ -Quanten (Ruhemasse Null); auch Neutrinos
- diese Teilchen sind stabil (zerfallen nicht weiter)

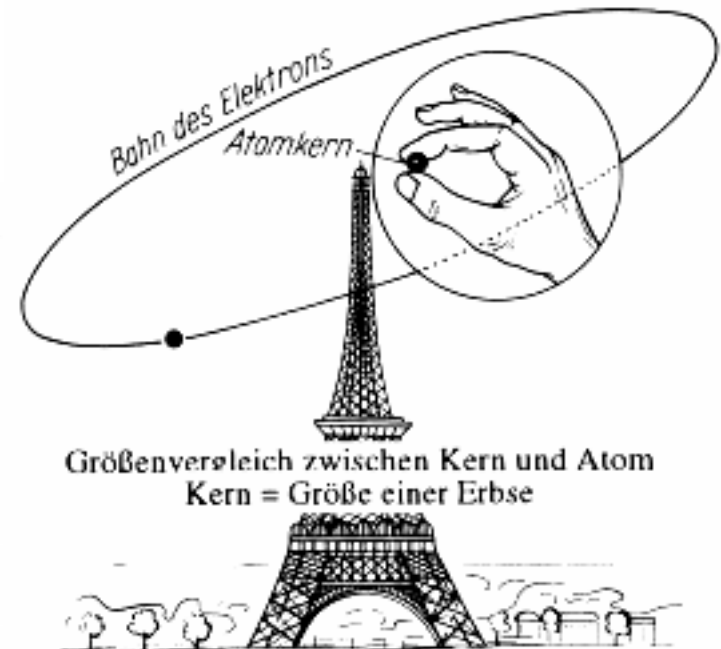
Der Radius der Atome liegt in der Größenordnung von 10^{-10} m.



Auf den Durchmesser eines roten Blutkörperchens entfallen 400 000 Atome.



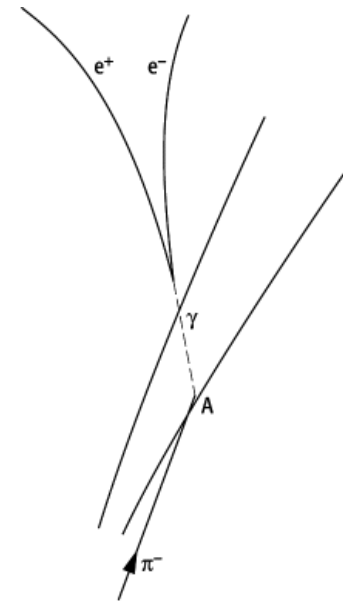
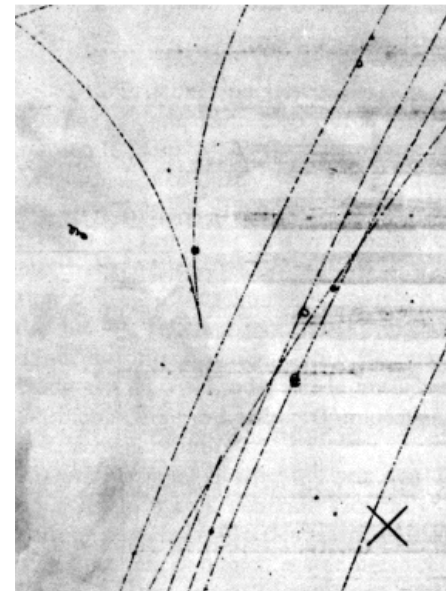
Durchmesser einiger Atome



- Es gibt ca. 200 weitere **Elementarteilchen** (Lebensdauer begrenzt, d.h. spontaner Zerfall); Umwandlung in andere Elementarteilchen
- auch **Kerne** reagieren miteinander
- **Beispiel:** ${}^2\text{D} + {}^2\text{D} \rightarrow {}^1\text{n} + {}^3\text{He}$ (zwei stabile Deuteriumkerne reagieren zu Neutron und He-Kern); hochgestellte Zahl ist Anzahl der Nukleonen (Protonen + Neutronen)
- weiterhin: **Paarbildung** $\gamma_{E>1,022\text{ MeV}} \rightarrow e^+ + e^-$; Gamma-Quant wird zu Elektron-Positron-Paar
Umwandlung von Energie in Masse; 511 keV entsprechen Elektronenmasse m_e nach:

$$E = mc^2 \quad \text{Einstein'sche Masse-Energie-Beziehung}$$

- **C.D. Anderson** entdeckte mit Wilson-Kammer 1932 das Positron in der Höhenstrahlung (Nobelpreis 1936) Anderson C.D. (1932): Science 76, 238
- 1933 exakter Nachweis der Paarerzeugung von Elektronen und Positronen durch Gammaquanten

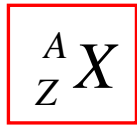


Blasenkammeraufnahme



Aufbau der Atomkerne

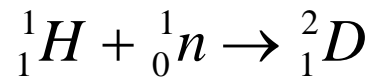
- Protonen und Neutronen haben etwa die gleiche Masse ($1,67 \times 10^{-27}$ kg); Proton ist positiv, Neutron ungeladen; Zahl der Protonen ist **Ordnungszahl Z**; bestimmt chemisches Element
- Kern eines Elementes kann unterschiedliche Zahl von Neutronen haben: z.B. Wasserstoff
- ^1H (**Hydrogenium**: nur Proton), ^2D (**Deuterium**: Proton und 1 Neutron) und ^3T (**Tritium** : Proton und 2 Neutronen, ist instabil); beim He gibt es 6 verschiedene Kerne (2 Protonen und von 1-6 Neutronen); man nennt unterschiedliche Kerne eines Elementes: **Isotope**
- Kennzeichnung eines Kerns bzw. **Nuklids**:



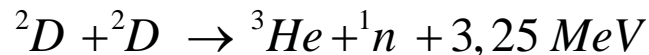
A ... Zahl der Nukleonen (Massenzahl)
Z ... Ordnungszahl
X ... Element

- Z und X enthalten dieselbe Information, daher **häufig einfach**: ^{12}C oder ^{22}Na
- **fast alle Elemente** sind **Gemische** von natürlich vorkommenden **Isotopen**, z.B. Kalium besteht zu 93,1% aus ^{39}K , 6,88% aus ^{41}K und zu 0,02% aus ^{40}K
- es gibt neben **stabilen** auch viele **instabile Isotope** (meist nur künstlich herstellbar, auf der Erde nicht natürlich vorkommend); Karlsruher **Nuklidtabelle** listet alle Isotope in grafischer Form in einem Plot: Zahl der Protonen gegen Zahl der Neutronen

- bestimmt man exakt die Masse eines Kerns, so ist Masse etwas kleiner als Summe der Massen von Protonen und Neutronen (einige hundertstel %): heißt **Massendefekt**
- **Bindungsenergien vermindern Masse** nach: $E_B = \Delta mc^2$ Einstein'sche Masse-Energie-Beziehung
- Elektronenmasse entspricht 511 keV
- Beispiel: Bildung eines Deuterium-Atoms aus Wasserstoff und Neutron



- Massendefekt berechnet sich: $\Delta m = m_H + m_n - m_D = 2,4 \cdot 10^{-3} m_H$
- **Energieäquivalent** von m_H ist: $E = m_H c^2 = 0,94 \text{ GeV}$
- also wird bei Bildung eines Deuterium-Atoms frei: $0,94 \cdot 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ GeV} = 2,25 \text{ MeV}$
- Nukleonen im **Kern sehr fest gebunden**; sind größte Energien, die man kennt; aber **sehr kurze Reichweite**
- Energien viele Größenordnungen größer als bspw. chemische Bindungsenergien
- **Kernfusion:**



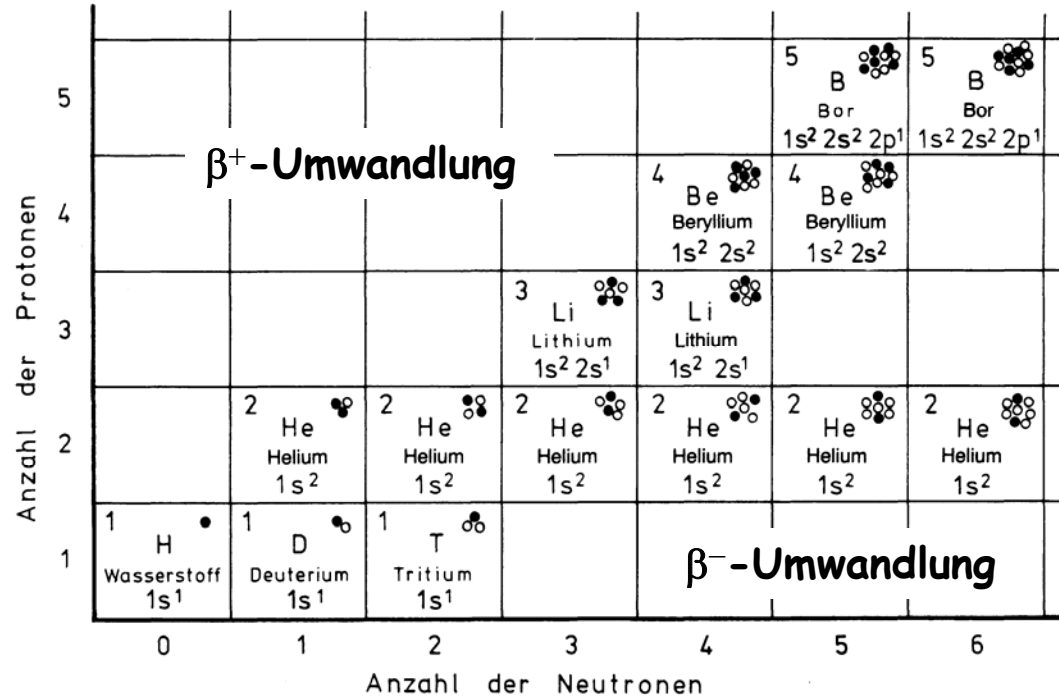
- entspricht bei Erzeugung von 1 Mol 3He : $3 \times 10^{10} \text{ Ws} = 86 \text{ MWh}$
- bei Kernumwandlung bleibt Zahl der Nukleonen erhalten (kein Nukleon wird in Energie umgewandelt): **Nukleonenerhaltungssatz**

21.2 Radioaktivität

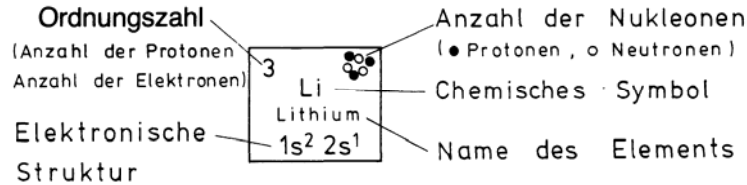
Kernumwandlungen

- nicht jede Kombination von Protonen mit Neutronen ist stabil; instabile Isotope heißen auch **Radionuklide**
- zerfallen **ohne** äußere Einwirkung
- Halbwertszeit** $t_{1/2}$ lässt sich von außen **nicht beeinflussen** (Zeit, nach der Hälfte der Kerne zerfallen ist)
- nennt man **radiaktiven Zerfall** oder **Radioaktivität**; ist nicht Kernspaltung, sondern es entsteht **ähnlicher Kern** mit gleicher oder ähnlicher Massenzahl

Nuklidkarte



Radioaktivität



α-Umwandlung
Emission eines α-Teilchens (ist He-Kern ${}^4_2\text{He}$)

β⁻-Umwandlung
(aus Neutron wird Proton; Elektron und Antineutrino werden emittiert)

Positronenumwandlung
(β⁺ Umwandlung; Proton wird in Neutron umgewandelt; Positron und Neutrino entsteht)

K-Einfang
(aus Proton wird Neutron durch Elektroneneinfang aus der K-Schale)

α -Zerfall

Zahl der Protonen

β^+ -Zerfall

Zahl der Neutronen

β^- -Zerfall

86

Rn	Rn 197 18 ms 51 ms	Rn 198 64 ms	Rn 199 0,32 s 0,62 s	Rn 200 1,06 s	Rn 201 3,8 s 7,0 s	Rn 202 9,85 s	Rn 203 28 s 45 s	Rn 204 1,24 m	Rn 205 2,83 m	Rn 206 5,67 m	Rn 207 9,3 m	Rn 208 24,4 m	Rn 209 28 s	
At 194	At 195	At 196 0,3 s	At 197 3,7 s 0,35 s	At 198 1,0 s 4,2 s	At 199 7,2 s	At 200 3,5 s 47 s 43 s	At 201 1,5 m	At 202 0,46 s 182 s 184 s	At 203 7,4 m	At 204 9,2 m	At 205 26,2 m	At 206 29,4 m	At 207 1,8 h	At 208 1,6 s
Po 193 0,24 s	Po 194 0,45 s	Po 195 1,9 s 4,6 s	Po 196 5,8 s	Po 197 26 s 56 s	Po 198 1,76 m	Po 199 4,2 m 5,2 m	Po 200 11,5 m	Po 201 6,9 m 15,3 m	Po 202 44,7 m	Po 203 45 s 36 m	Po 204 3,53 h	Po 205 1,66 h	Po 206 8,8 d	Po 207 2,8 s
Bi 192	Bi 193 34,6 s 3,2 s 67 s	Bi 194 115 s 95 s	Bi 195 87 s 3,0 m	Bi 196 4,0 m 0,6 s 5,1 m	Bi 197 4,9 m 9,3 m	Bi 198 7,7 s 11,6 m 10,3 m	Bi 199 24,7 m 27 m	Bi 200 31 m 36,4 m	Bi 201 59,1 m 1,8 h	Bi 202 1,72 h	Bi 203 11,76 h	Bi 204 11,22 h	Bi 205 15,31 d	Bi 206 6,2 d
Pb 191	Pb 192 3,5 m	Pb 193 5,6 m 4,0 m	Pb 194 12,0 m	Pb 195 15,0 m 15 m	Pb 196 36,4 m	Pb 197 43 m 8 m	Pb 198 2,40 h	Pb 199 12,2 m 1,5 h	Pb 200 21,5 h	Pb 201 61 s 9,4 h	Pb 202 3,53 h 5,25 · 10 ⁴ a	Pb 203 6,2 s 51,9 h	Pb 204 67,2 m 1,4	Pb 205 1,5 s
Tl 190	Tl 191 2,6 m 5,4 m ?	Tl 192 10,8 m 9,6 m	Tl 193 2,1 m 22,6 m	Tl 194 32,8 m 33 m	Tl 195 3,6 s 1,13 h	Tl 196 1,4 h 1,8 h	Tl 197 2,84 h	Tl 198 1,87 h 5,3 h	Tl 199 7,42 h	Tl 200 26,1 h	Tl 201 73,1 h	Tl 202 12,23 d	Tl 203 29,524 d	Tl 204 3,7 d
Hg 189	Hg 190 7,7 m 20,0 m	Hg 191 50,8 m 50 m	Hg 192 4,9 h	Hg 193 11,1 h 3,5 h	Hg 194 520 a	Hg 195 40 h 9,5 h	Hg 196 0,15	Hg 197 23,8 h 64,1 h	Hg 198 9,97	Hg 199 42,6 m 16,87	Hg 200 23,10	Hg 201 13,18	Hg 202 29,86	Hg 203 46,3 d
Au 188	Au 189	Au 190 0,0 m 4,0 m 26,3 m	Au 191 42,8 m	Au 192 1 s 3,18 h	Au 193 3,9 s 17,65 h	Au 194 38,0 h	Au 195 30,5 s 186,1 d	Au 196 9,7 h 8,2 s 6,2 d	Au 197 7,73 s 100	Au 198 2,30 d 2,6943 d	Au 199 3,139 d	Au 200 18,7 h 48,4 m	Au 201 26,4 m	Au 202 28,6 d
Pt 187 2,35 h	Pt 188 10,2 d	Pt 189 11 h	Pt 190 0,01 6,5 · 10 ¹¹ a	Pt 191 2,8 d	Pt 192 0,79	Pt 193 4,33 d 50 a	Pt 194 32,9	Pt 195 4,02 d 33,8	Pt 196 25,3	Pt 197 94,4 m 18,3 h	Pt 198 7,2	Pt 199 13,6 s 30,8 m	Pt 200 12,5 h	Pt 201 2,5 s
Ir 186 1,9 h 16,64 h	Ir 187 10,5 h	Ir 188 41,5 h	Ir 189 13,3 d	Ir 190 3,1 h 1,2 h 11,8 d	Ir 191 4,94 s 37,3	Ir 192 241 a 1,4 m 73,83 d	Ir 193 10,53 d 62,7	Ir 194 171 d 19,15 h	Ir 195 3,8 h 2,5 h	Ir 196 1,40 h 52 s	Ir 197 8,9 m 5,8 m	Ir 198 8 s	Ir 199 4,0 s	Ir 200 607; 407
Os 185 94 d	Os 186 1,58 2,0 · 10 ¹⁵ a	Os 187	Os 188	Os 189	Os 190	Os 191 10 h 15,4 d	Os 192 6,1 s 41,0	Os 193 30,11 h	Os 194 6,0 a	Os 195	Os 196	Os 197	Os 198	Os 199

β^+ -Zerfall

stabiles Isotop

Häufigkeit im natürlichen Element

Halbwertszeit des Isotops

Zahl der Protonen

5

4

3

Zahl der Neutronen

3

4

5

6

7

8

<p>B 8 770 ms</p> <p>β^+ 14,1... $\beta 2\alpha \sim 1,6; 8,3$</p>	<p>B 9</p> <p>p</p>	<p>B 10 19,9</p> <p>σ 0,5 $\sigma_{n, \alpha}$ 3840</p>	<p>B 11 80,1</p> <p>σ 0,005</p>	<p>B 12 20,20 ms</p> <p>β^- 13,4... γ 4439... $\beta\alpha$ 0,2...</p>	<p>B 13 17,33 ms</p> <p>β^- 13,4... γ 3684 βn 3,6; 2,4...</p>
<p>Be 7 53,29 d</p> <p>ϵ γ 478 $\sigma_{n, p}$ 39000</p>	<p>Be 8</p> <p>2α</p>	<p>Be 9 100</p> <p>σ 0,008</p>	<p>Be 10 $1,6 \cdot 10^6$ a</p> <p>β^- 0,6 no γ</p>	<p>Be 11 13,8 s</p> <p>β^- 11,5... γ 2125; 6791... $\beta\alpha$ 0,77...</p>	<p>Be 12 23,6 ms</p> <p>β^- 11,7... βn</p>
<p>Li 6 7,5</p> <p>σ 0,039 $\sigma_{n, \alpha}$ 940</p>	<p>Li 7 92,5</p> <p>σ 0,045</p>	<p>Li 8 840,3 ms</p> <p>β^- 12,5 $\beta 2\alpha \sim 1,6$</p>	<p>Li 9 178,3 ms</p> <p>β^- 13,6... βn 0,7... $\beta\alpha$</p>	<p>Li 10</p> <p>n</p>	<p>Li 11 8,5 ms</p> <p>$\beta^- \sim 18,5; 20,4$ γ 3368*; 320... $\beta n; \beta 2n; \beta 3n;$ $\beta\alpha; \beta t$</p>

Maximal-Energie der β -Strahlung in MeV

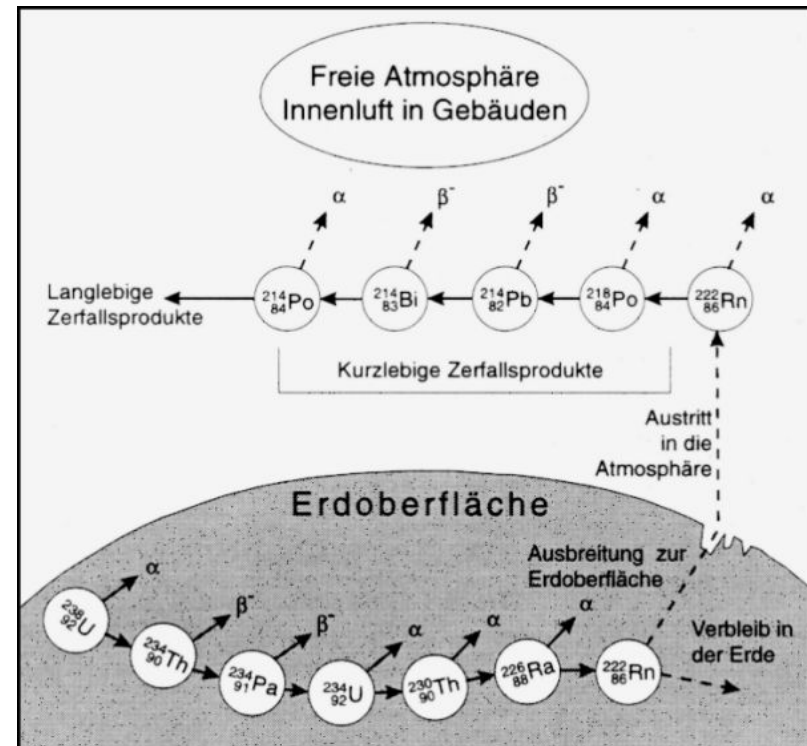
β^- -Zerfall

Energie auftretender γ -Quanten in keV

- es gibt **reine** α -, β^- -, γ - und **Positronenstrahler**, d.h. gesamte Energiedifferenz ΔE geht direkt auf emittierte Teilchen über; häufig aber Restenergie im Kern (angeregter Kern-zustand), die durch γ -**Quant** emittiert wird; es gibt aber **keinen reinen γ -Strahler**, d.h. γ -Strahlung ist immer Indiz für vorangegangenen radioaktiven Zerfall unter Änderung der Ordnungszahl

Natürliche Radionuklide

- es gibt komplette **Zerfallsreihen**, d.h. es entsteht beim Zerfall immer wieder ein Radionuklid, bis auf das letzte Element, das stabil ist; z.B. Uran-Reihe führt von ^{238}U über ^{234}Th ... (weitere 13 Radionuklide) ... zum ^{206}Pb (stabiles Isotop)
- Radionuklide werden aber auch durch kosmische Höhenstrahlung neu gebildet
- keine stabilen Isotope oberhalb von $z=83$ (letztes: ^{209}Bi)
- Summe aller auf Menschen einwirkende Strahlung: **natürliche Strahlenexposition**
- in BRD ca. **2 mSv/a** (milli-Sievert pro Jahr, s. unten); entspricht ca. zwei med. Lungenaufnahmen
- Belastungsniveau durch radioaktive Anlagen für Bevölkerung ist gesetzlich **< 1 mSv/a**
- in höheren Schichten der Atmosphäre ist Strahlung erheblich intensiver (ca. **50 mSv/a** in 10 km Höhe)



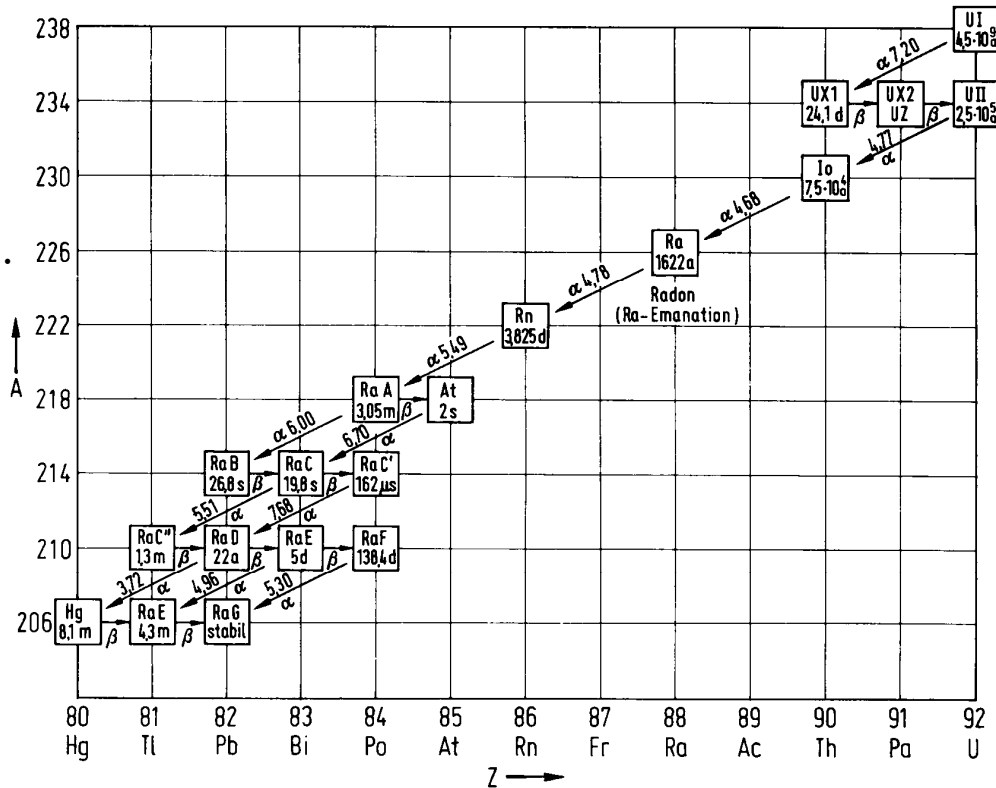
radioaktives Zerfallsgesetz

- wurde bei mathematischen Vorbereitungen hergeleitet (vgl. Kap. 0.9)
- $-(dn/dt) = \lambda n = A$... $n =$ Zahl der instabilen Kerne im Präparat

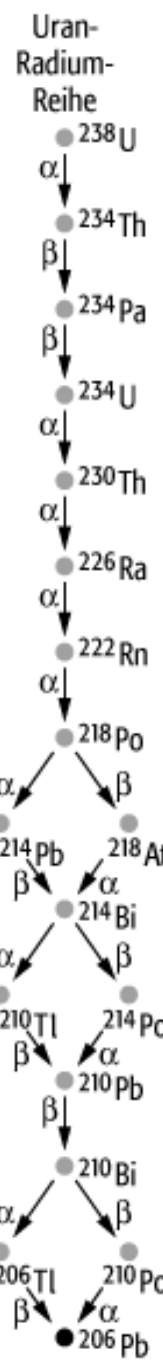
$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

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

λ ... Zerfallskonstante
 A ... Aktivität
 $t_{1/2}$... Halbwertszeit



Zerfallsreihe (radioaktive Familie) von $^{238}_{92}\text{U}_{146}$



- Aktivität sind Zerfälle pro Sekunde mit der Einheit: **Becquerel (Bq)**; $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$, früher auch Ci (Curie); $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$
- Oberflächenkontaminationen** werden in Bq/m^2 gemessen (sonst auch Bq/kg , Bq/l)
- Aktivität hat nur indirekt mit biologischer Wirkung zu tun**: Dosis und Dosisleistung (s.u.)

Typische Aktivitätswerte:

- Der erwachsene Mensch: 3000 Bq ... 20000 Bq
- 1 Kg Kaffee: 1000 Bq
- 1 Kg Uran: 10 MBq
- K40 im menschl. Körper: 5000 Bq
- K40 im Meerwasser: 11 Bq / Liter
- Radon in Raumlufte: Mittelwert 50 Bq/m³, Spitze > 600000 Bq/m³
- Trinkwasser in Berlin: 0,1 ... 1 Bq / Kubikmeter
- Thermalwasser (Bad Gastein und Bad Hofgastein): Radon 740.000 Bq/Kubikmeter und Radium (Ra226) 780 Bq/Kubikmeter.

21.2 Dosimetrie

- Messung der (physikalischen) **Energiedosis** D von hochenergetischer Strahlung unter besonderer Berücksichtigung der Wirkung auf den menschlichen Organismus

$$D = \frac{\text{absorbierte Strahlungsenergie}}{\text{Masse des bestrahlten Gewebes}} \quad \text{Einheit: } \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ auch Gray (Gy)}$$

- da nicht jede Strahlung gleich schädigt gibt es Qualitätsfaktoren Q ; daraus resultiert die **Äquivalentdosis** H (ist für verschiedene Strahlungsarten vergleichbar):

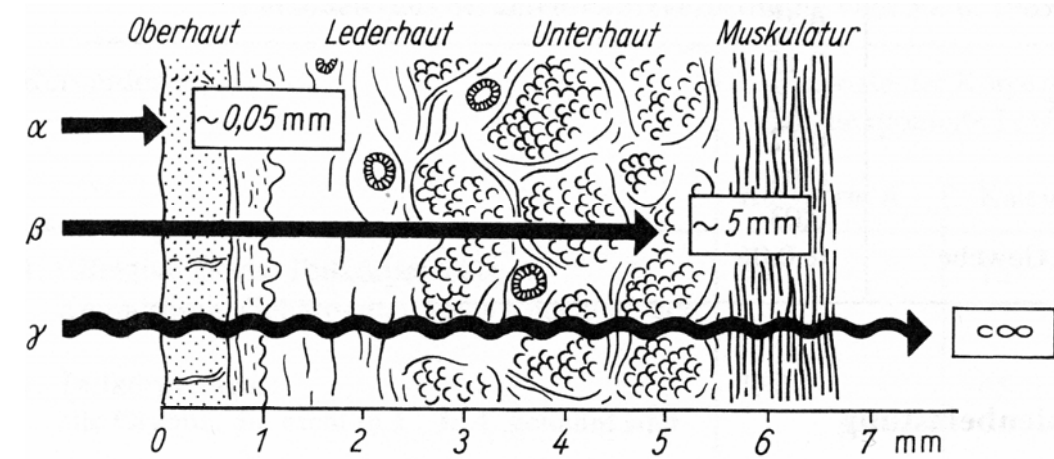
$$H = Q \cdot D \quad \text{Einheit: Sievert (Sv) ist auch } \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

- für **Gammastrahlen** ist $Q = 1$ für β und α -Strahlung viel höher; es werden für bestimmte **Körperteile** weitere **Wichtungsfaktoren** w_T eingeführt: z.B. für Keimdrüsen $w_T = 0,2$ für Haut $=0,01$ (s. nächste Seite); daraus wird schließlich die **effektive Äquivalentdosis** E berechnet:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T$$

- kann also nicht direkt gemessen werden, sondern wird berechnet
- **natürliche Strahlenexposition** besteht aus terrestrischer Strahlung und kosmischer Strahlung; es werden auch Isotope inkorporiert, z.B. ^{222}Rn (ist interne Strahlung); externe Strahlung nur ca. 50% der internen; Weltmittel der natürlichen Strahlenexposition ist ca. 2,4 mSv/a (2002)

- **medizinische Wirkung** unterschiedlich; bei α -Strahlung wird gesamte Energie in sehr kleinem *Gewebe-Volumen* absorbiert; hochenergetische γ -Strahlung wird kaum geschwächt

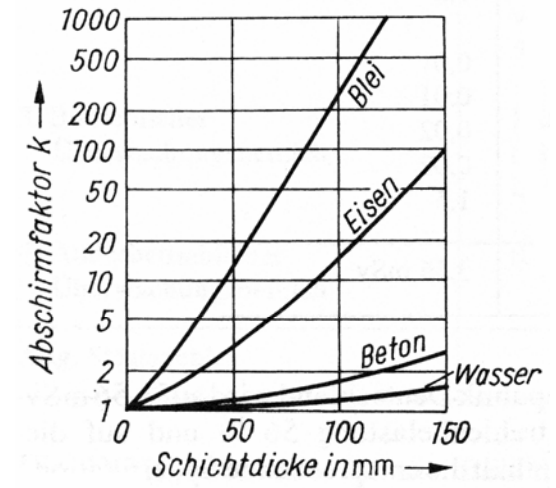


Gewebeeindringtiefe für α -, β - und γ -Strahlung mit jeweils 1 MeV Energie

- Dosisleistung für γ -Strahlung hinter einer Wand:

$$P = \frac{P_0}{k}$$

k ... Abschirmfaktor; P / P_0 ... Dosisleistung mit / ohne Wand



Abschirmfaktoren in Abhängigkeit von der Trennwanddicke für verschiedene Materialien (Gammastrahlung von Co 60)

**Wichtungsfaktoren zur Bestimmung der effektiven Dosis bei Ganz- oder Teilexposition
(aus Strahlenschutzverordnung vom 30. 6. 1989)**

Organe und Gewebe	Wichtungsfaktoren
Keimdrüse	0,25
Brust	0,15
Rotes Knochenmark	0,12
Lunge	0,12
Schilddrüse	0,03
Knochenoberfläche	0,03
Andere Organe und Gewebe	je 0,06

Zusammenfassung natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition:

Strahlungsquelle	mittlere Effektive Dosis (mSv/a)	individueller Bereich (mSv/a)
natürl. Strahlenexp.	2.4	1 - 5
Mediz. Röntgendiagn.	0.4 - 1.0	0.1 - 10
Nuklearmed. Diagnostik	0.01 - 0.03	bis 1000
Nuklearmed. Therapie	0.01	bis 800 Gy/Therapie
Berufliche Exposition	0.002	0.5 - 5
Kernenergieproduktion	0.0002	0.001 - 0.1
fossile Energie BRD	0.001	0.001 - 0.7
Kernenergie BRD	0.001	
Tschernobyl-Unfall*	0.2 - 1.2	
Kernwaffentests	0.01	0.01
Industrieprodukte	0.001	0.02 - 0.5
Summe zivilisatorisch:	≈ 0.5 - 1	
Total:	2.9 - 3.4	

* mittlere Strahlenexposition in Deutschland West im ersten Jahr nach dem Unfall.

- **medizinische Strahlenexposition:** über gesamte Bevölkerung gemittelt ergibt sich eine effektive Äquivalentdosis von ca. 1,8 mSv/a (75% der natürlichen Belastung)
- z.B. **Röntgenaufnahme** des Schädels ca. 25 μ Sv, des Beckens ca. 600 μ Sv; eine CT-Aufnahme dagegen bis ca. 8 mSv
- **letale Dosis** von 50% innerhalb von 30 Tagen (ohne Therapieversuche); hängt aber auch noch von der Dosisleistung ab, d.h. von Zeit der Exposition
- es existiert aber keine untere Schwelle; genetische Schäden auch durch Einzelereignis
- gültige Strahlenschutzverordnung: Bundesgesetzblatt Teil I, Nr. 38 vom 26.7.2001

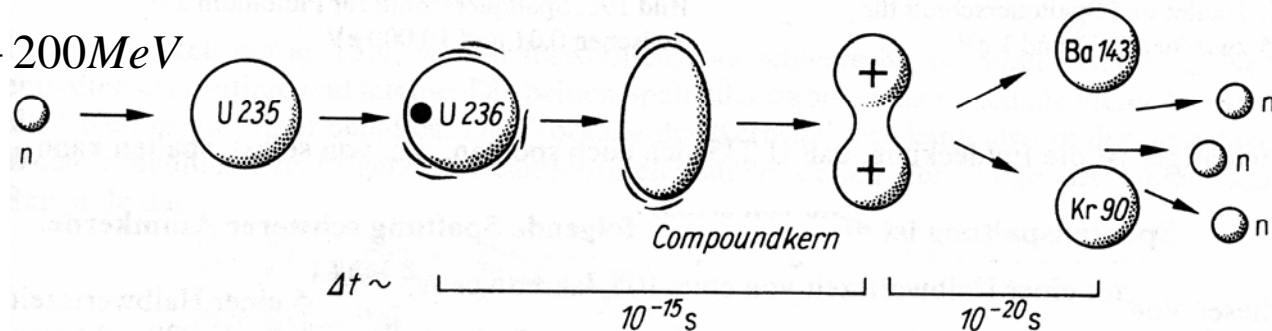
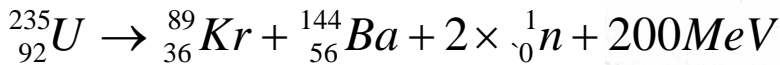
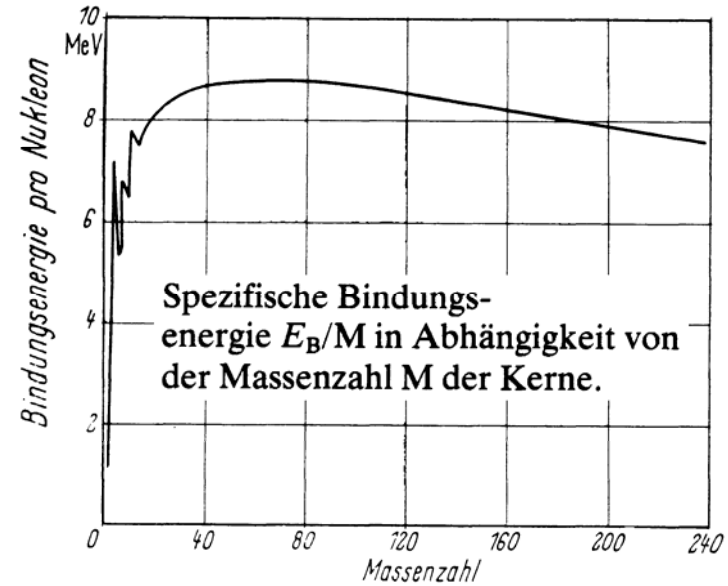
Organismus	LD _{50/30} (Gy)
Tabak-Mosaik-Virus	2000
Amöben, Wespen	1000
Schnecke	200
Fledermaus	150
Escherichia Coli	50
Forelle	15
Hamster	9-11
Goldfisch	8.5
Kaninchen, Ratte	6
Rhesusaffe	5.5
Hund	4-5.5
Mensch	3-4.5
Schwein	4-5.5
Ziege	3.5
Meerschweinchen	2.5-4

Weitere Dosisleistungen

- natürliche Strahlenbelastung: 0,83 - 3,88 mSv / Jahr
- Flug Frankfurt/Australien/Frankfurt 0,2 mSv
- Flugzeugpilot: 5 mSv / Jahr zusätzlich bei 480 Flugstd. / Jahr
- Astronaut: 250 mSv / Jahr
- 30 Zigaretten / Tag: 80 mSv / Jahr Belastung (50 mSv = Verdoppelung des Leukämierisikos)
- Castor in 2m Entfernung: 50 μ Sv / h

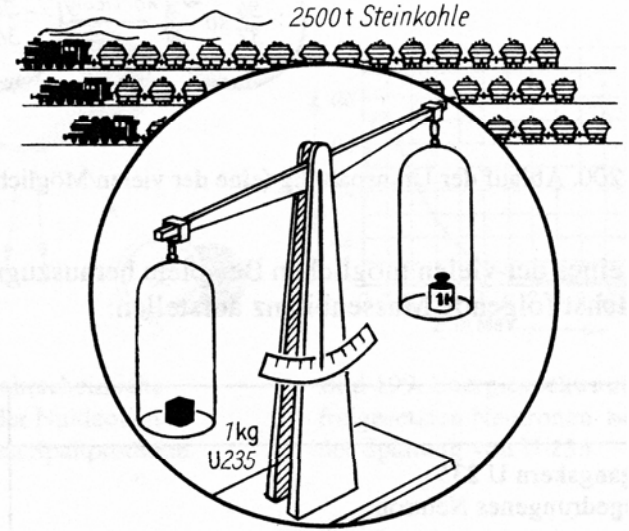
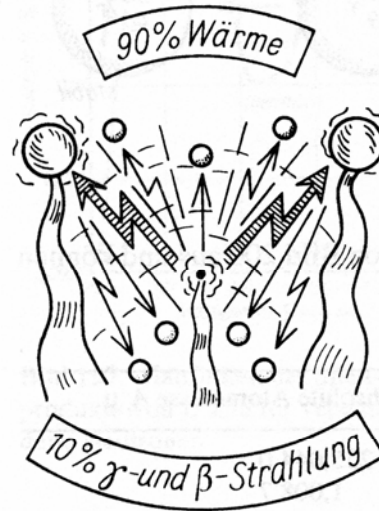
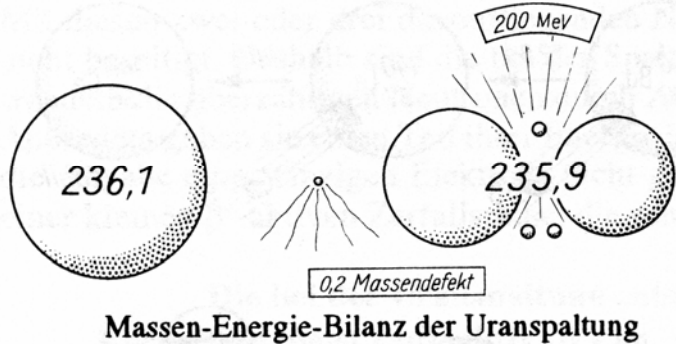
Kernspaltung und Kernfusion

- beim Zusammenbau von Nukleonen zum Atomkern wird Energie frei; diese ist aber für ^{235}U kleiner, als für zwei Kerne mit Massenzahl von ca. 115; daher: bei **Kernspaltung** großer Kerne wird Energie frei (**Achtung:** Kernspaltung \neq radioaktiver Zerfall)
- aber auch beim Zusammenbau von zwei Kernen des schweren Wassers (Deuteriums) ^2D zum He-Kern ^3He wird Energie frei: ist **Kernfusion**; hier ist Energie bezogen auf beteiligte Masse 10x höher
- **Kernspaltung** von z.B. ^{235}U geschieht im Reaktor nicht spontan, wird durch **Neutronenbeschuss ausgelöst**; dabei werden wieder 2 Neutronen frei, die ihrerseits Spaltung auslösen können; ab kritischer Masse kommt es zur **Kettenreaktion** (viele unterschiedliche möglich)

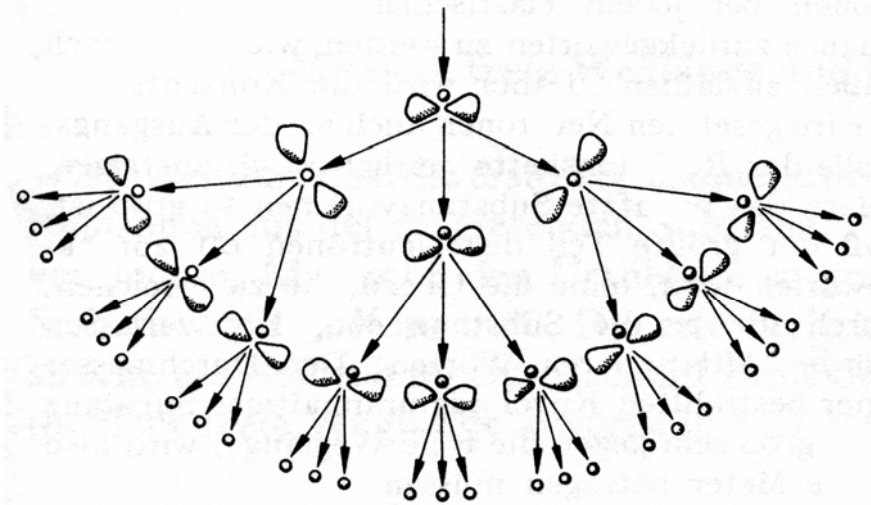


zwei Beispiele

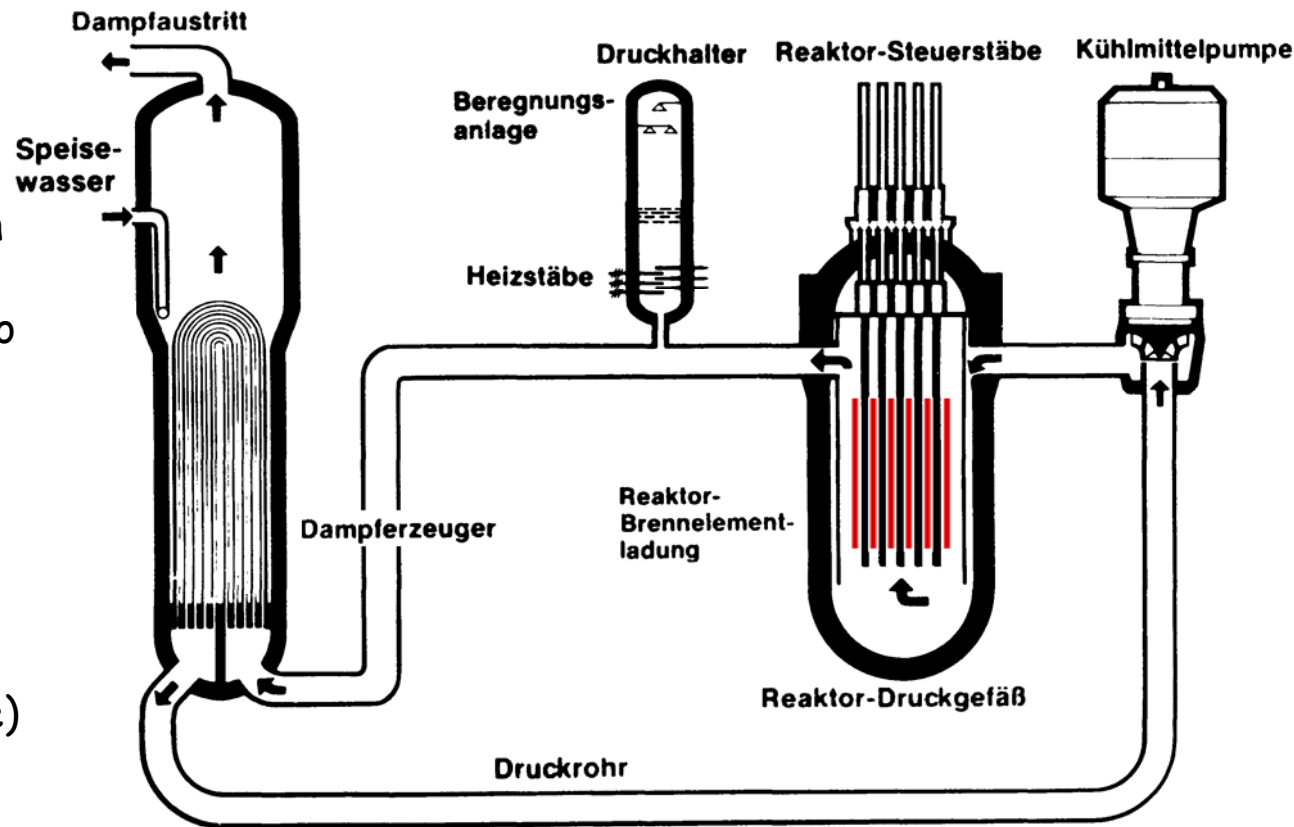
Die Kernspaltungsenergie setzt sich hauptsächlich in Wärmeenergie um.



- 1g natürliches Uran enthält 2×10^{19} spaltbare ^{235}U -Atome, ergibt Energie von 170 kWh/g (Verhältnis $^{238}\text{U} : ^{235}\text{U}$ ist 140:1 im natürlichen Uran; $1\text{g } ^{235}\text{U} \rightarrow 23,8\text{ MWh}$)
- Kernspaltung wird in Kernreaktoren genutzt; für Kettenreaktion müssen frei werdende Neutronen abgebremst (moderiert) werden; häufig wird Wasser dafür benutzt

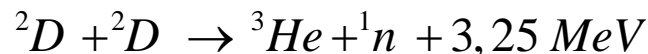


- **Steuerung** der Spaltprozesse mit **Cd-Stäben** (haben hohes Absorptionsvermögen für Neutronen); in Form von Steuerstäben zwischen Brennelementen; so kann freigesetzte Energie geregelt werden
- Energie wird als **Wärme** im **primären Kühlkreislauf** an Dampferzeuger abgegeben; Dampf treibt Turbine und Generator (Dynamomaschine)
- kann bis zu 1000 MW erzeugen (2% des Energiebedarfs der BRD)



Schematischer Aufbau eines Kernreaktors

- wesentliches Probleme: **Wiederaufarbeitung der Brennstäbe** (Anreicherung mit ^{235}U) und Gefahr eines **Unfalles** (überkritischer Reaktorzustand) und Kontamination der Umgebung
- **Kernfusion** benötigt sehr hohe Annäherung der Kerne aneinander, d.h. hohe **Plasmatemperatur** (ca. 10^8 K), **große technische Probleme** bei Realisierung; Isolation von Reaktorwand durch Magnetfelder; Deuterium ist zu 0,015% Bestandteil von natürlichem Wasser, damit im Gegensatz zu ^{235}U praktisch beliebig verfügbar

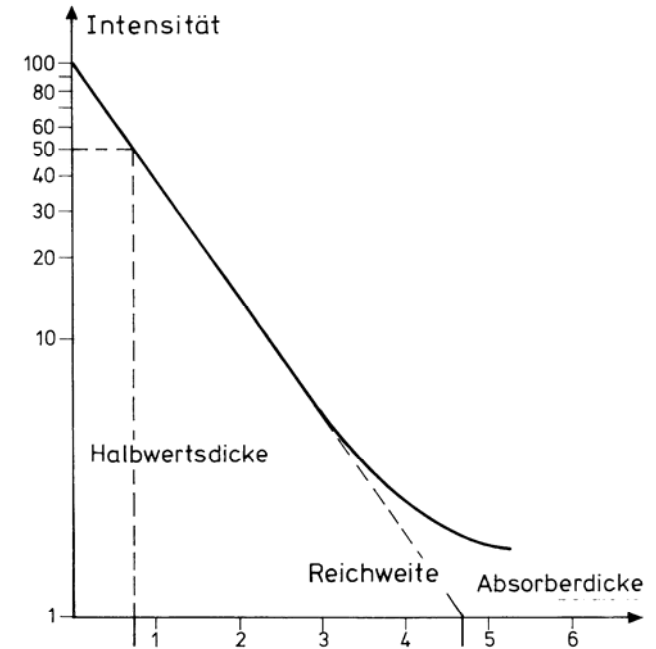


Wechselwirkung energiereicher Teilchen mit Materie

- Energieabgabe in Materie von geladenen Teilchen (α oder β -Teilchen) vor allem durch Coulomb-Wechselwirkung; sehr **begrenzte Reichweite**
- Energie der β - und α -Teilchen aus Kernzerfall ist ca. 100 keV bis 10 MeV, d.h. ein Teilchen kann **viele Atome verschieben** ($E_A=10...30$ eV) bzw. **ionisieren** ($E_i=4...15$ eV)
- α -Teilchen haben hohe Wechselwirkung mit Materie (**geringe Eindringtiefe**); in biologischem Gewebe ist Eindringtiefe von 5 MeV-Teilchen:
 α -Teilchen: 0,06 mm β -Teilchen: 10 cm
- **Intensität der β -Strahlung** nimmt exponentiell ab
- Halbwertsschichtdicke: nachzuweisende Strahlung hat nur noch Intensität von 50%

$$I = I_0 e^{-\alpha d}$$

α ... Schwächungskoeffizient
 d ... Dicke der absorbierenden Schicht



Intensitätsverlauf der β^- -Strahlung eines Radionuklids in Abhängigkeit von der Absorberdicke

- Halbwertsdicke von **Blei** für γ -Strahlung von 1.27 MeV: ca. 1 cm

- **Strahlenintensität** einer **punktförmigen Quelle** nimmt mit dem Abstand quadratisch ab
- α - und β -**Strahlung** wird aber auch schon an **Luft** schnell geschwächt:
bei $E = 0.5 \text{ MeV}$ ist mittlere Reichweite für Elektronen 1,4 m; für α -Teilchen nur 0,32 mm
- **Neutronen** haben **keine Ladung**, deshalb geringere Wechselwirkung mit Materie (**nur Stöße mit Atomkernen**: Stoßgesetze der klassischen Mechanik gelten, vgl. Kap. 4.3); Neutronen werden dann am besten abgebremst, wenn **Impulsübertragung** am größten ist: gestoßener Kern muss möglichst ähnliche Masse haben; beste Abschirmung von Neutronenstrahlung durch Paraffin o.ä. (**viele H-Atome**), nicht mit Blei (ist aber ideal für α -, β - und γ -Strahlung)
- γ -**Strahlung** wird beim Durchgang durch Materie ebenfalls **exponentiell abgeschwächt** (ähnlich wie β -Strahlung), aber sehr viel schwächer als β -Strahlung (daher größere Reichweite)

Maximale lineare Reichweite der β -Strahlung

Energie E in MeV	Luft d_{\max} in m	Aluminium d_{\max} in mm	Wasser d_{\max} in mm
0,2	0,407	0,214	0,448
0,4	1,17	0,611	1,29
0,6	2,05	1,07	2,27
0,8	2,98	1,56	3,31
1,0	3,94	2,06	4,38
1,4	5,86	3,07	6,56
2,0	8,73	4,59	9,85

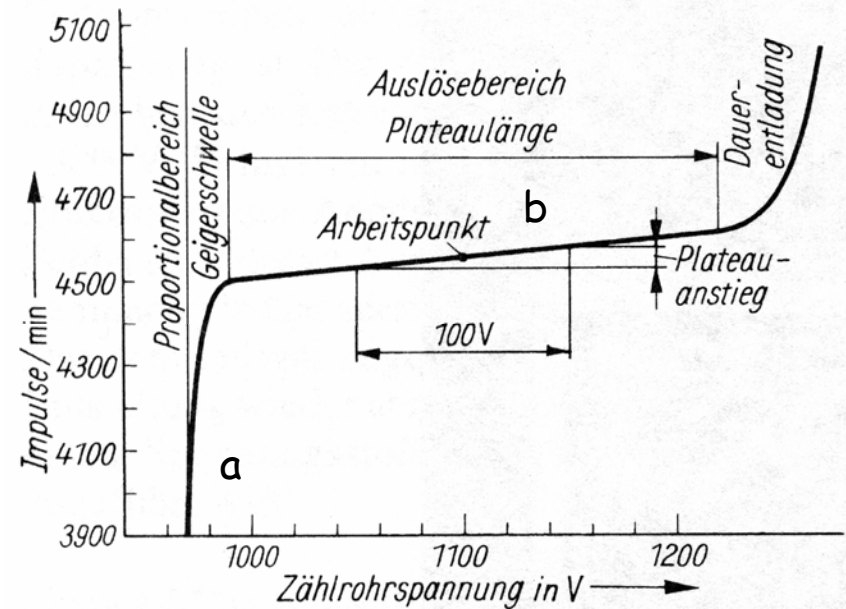
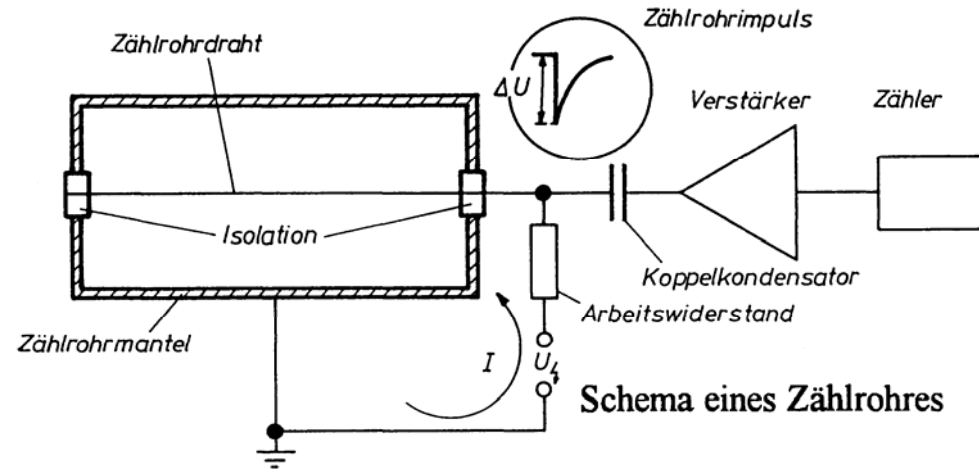
Halbwertsschichtdicke $x_{1/2}$ in mm für γ -Strahlung

Material	$E_\gamma = 0,1 \text{ MeV}$	$E_\gamma = 1 \text{ MeV}$
Pb	0,12	8,8
Cu	1,8	13
Fe	2,5	16
Al	16	42
Beton	17	49
Wasser	41	98

Strahlungsdetektoren

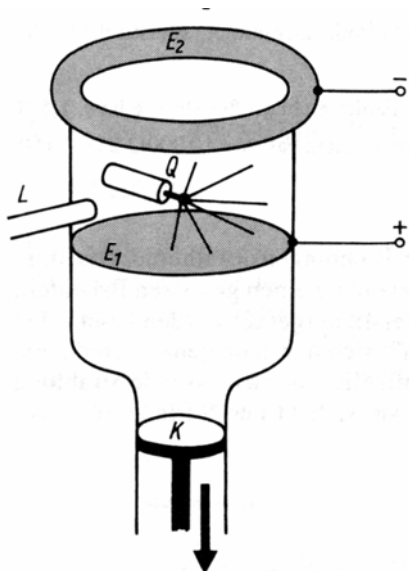
- **Ionisationskammer:** Ionisation des Gases in Kammer wird benutzt; **Strom** \propto **Strahlendosis**; bei genügend hoher Spannung: unselbstständige Gasentladung: führt zur erheblichen Verstärkung des Impulses bis hin zum Einzelereignis-nachweis
- **Proportionalzählrohr:** Größe des elektrischen Impulses \propto Energie der absorbierten Strahlungsleistung (a)
- **Geiger-Müller-Zählrohr** bei noch höherer Spannung: keine Abhängigkeit von Energie (**Arbeitspunkt bei b**), nur Registrierung (Zählung) der Ereignisse möglich; auch als kleine tragbare Geräte verfügbar; teilweise amtlich eichfähig

Versuch Demonstration Geiger-Müller-Zählrohr



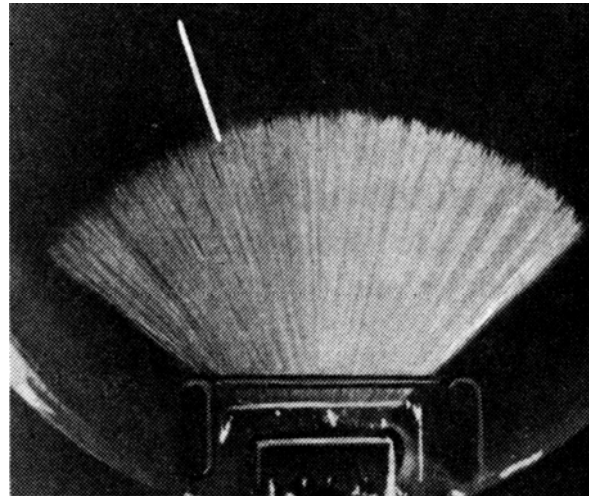
Charakteristik des Zählrohres

- **Nebelkammer:** Bahnspuren von ionisierenden Teilchen lassen sich direkt beobachten
- Luft im Inneren hat **100% Luftfeuchte**; bei **plötzlichem Unterdruck** -> Abkühlung; dadurch überschreitet Luftfeuchtigkeit Sättigung; ionisierende Teilchen hinterlassen **Nebelspur**; Kondensation an Ionen, die durch einfliegende Teilchen hinterlassen werden
- **angelegtes Magnetfeld** erlaubt Aussagen zu Ladung und Masse (Lorentzkraft bei senkrechtem Feld: $F=qvB$)

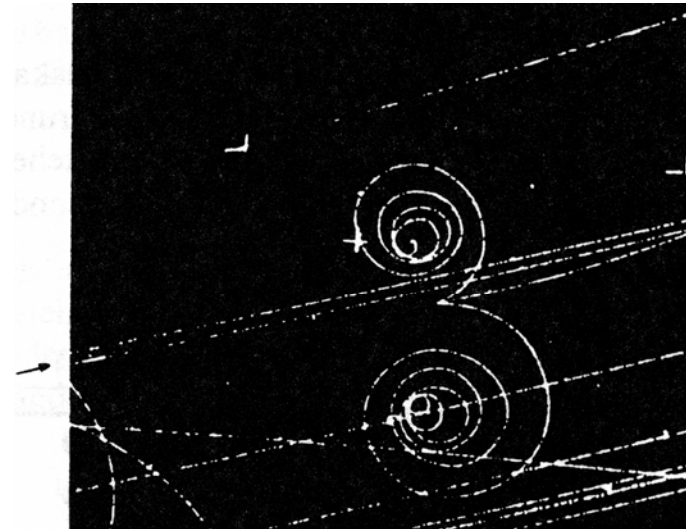


WILSONSche Nebelkammer

E_1 geschwärztes Blech, E_2 Gegenelektrode,
 Q radioaktive Quelle, L seitliche Beleuchtung,
 K Kolben zur Evakuierung



Aufnahme von α -Teilchen in der Nebelkammer



Blasenkammeraufnahme (Paarbildungsprozeß)

Wechselwirkung von Röntgen- und Gammastrahlung mit Materie

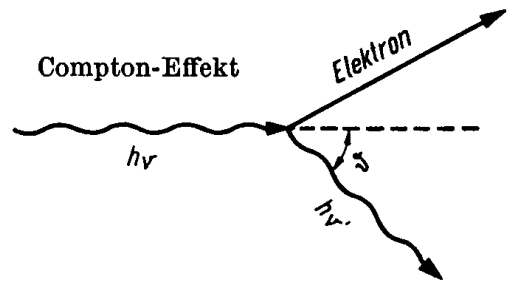
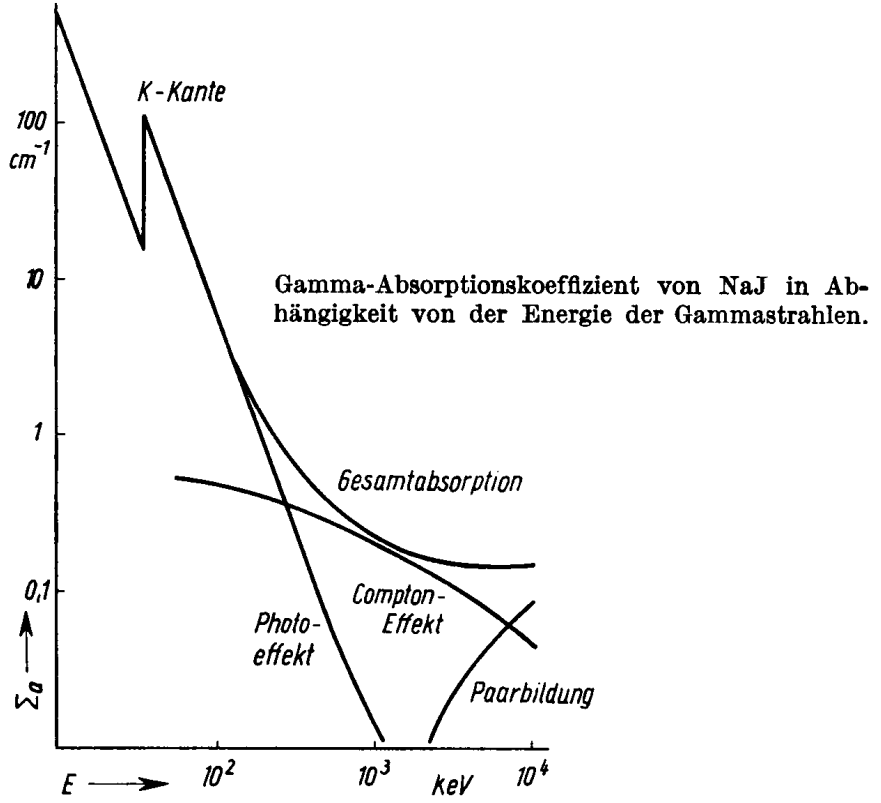
- Abschwächung erfolgt wie die von Licht oder β -Teilchen entsprechend:

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

μ ... Schwächungskoeffizient
 d ... Dicke der absorbierenden Schicht

- μ ist Funktion der Wellenlänge; Abschwächung erfolgt durch:

- Elastische Streuung:** Schwächung des Primärstrahls; im Energiebereich von 0,1 bis 50 MeV nicht von wesentlicher Bedeutung
- Der Photoeffekt:** Elektron aus Atomhülle nimmt Energie des Quants auf; es wird aus Atomverband ausgelöst und hat dann erhebliche kinetische Energie
- Der Compton-Effekt:** nur ein Teil der Quantenenergie wird auf ein Hüllenelektron übertragen; d.h. Quant mit geringerer Energie entsteht; hat auch andere Richtung; mehrere weitere Compton-Streuungen möglich



- Die Paarbildung:** ist Bildung von Materie aus Strahlung; Quanten von Energien $> 1,022$ MeV können ein Elektron-Positron-Paar bilden entsprechend $E = m_0 c^2$; dominiert für sehr große Quantenenergien (> 3 MeV)

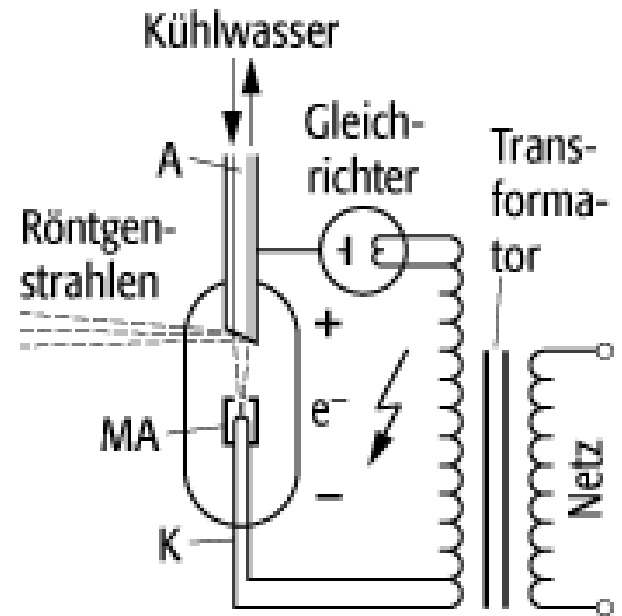
21.3 Röntgenstrahlen

Bremsstrahlung, charakteristische Strahlung

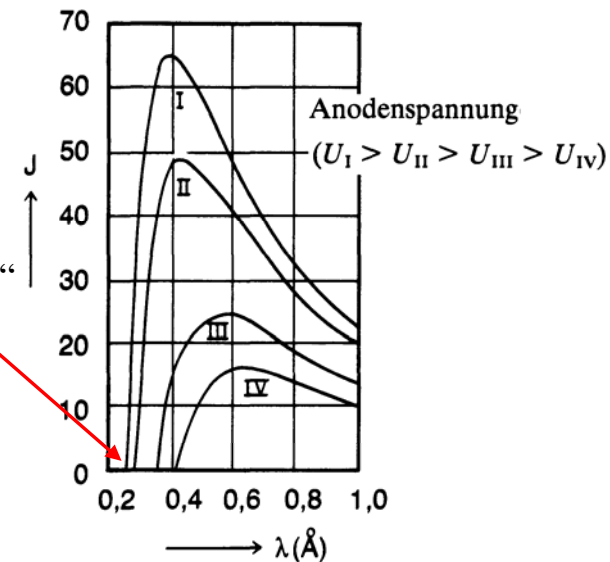
- **Röntgenstrahlen** entstehen z.B. wenn **Elektronen abgebremst** werden; Elektronen werden durch Glühkathode erzeugt und zur Anode beschleunigt (40 bis 300 kV); bei 100 kV haben Elektronen ca. 50% der Lichtgeschwindigkeit; in **Anode** werden Elektronen schnell **abgebremst**; die meiste kinetische Elektronenenergie wandelt sich in Wärme um; nur ca. **1% wird in elektromagnetische Strahlung** umgewandelt
- heißt **Bremsstrahlung**; ist unabhängig vom Anodenmaterial; größte Quantenenergie, d.h. kleinste Wellenlänge hängt nur von Beschleunigungsspannung ab:

$$\lambda_G = \frac{hc}{eU}$$

- neben Bremsstrahlung entsteht in der Anode: **charakteristische Strahlung**; indem hochenergetische Elektronen von der Kathode im Anodenmaterial Elektronen von **inneren Schalen** herausschlagen; ist instabiler Zustand: Elektronen aus höheren Schalen „springen“ herunter unter Aussendung definierter Röntgenstrahlung



Röntgenröhre: Schematischer Aufbau (A: Anode, K: geheizte Kathode, MA: Metallabschirmung)

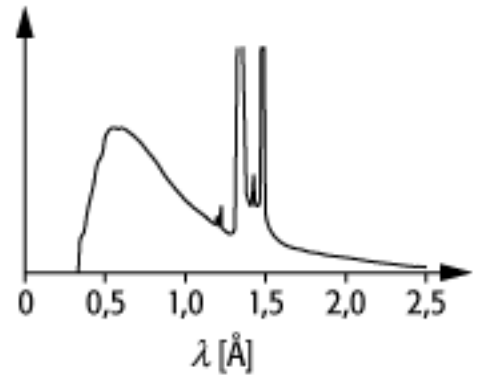
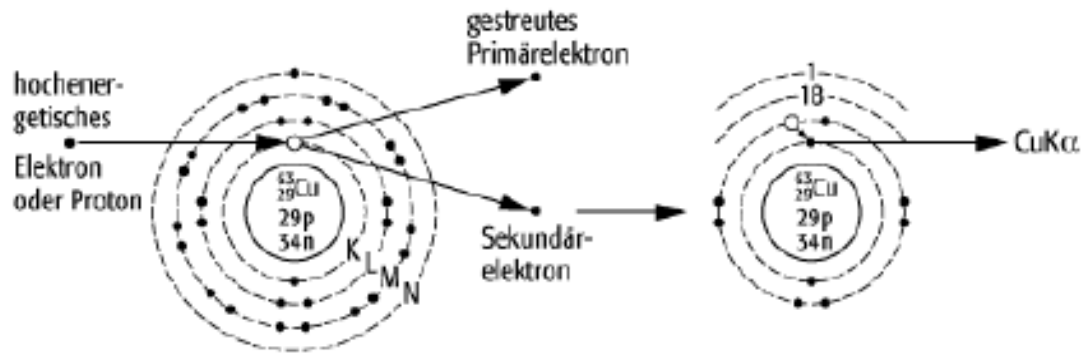


Intensität der Bremsstrahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge

- ist für **Anodenmaterial** charakteristisch; wird zur **Strukturaufklärung** in den **Materialwissenschaften** verwendet; in **Medizin** hauptsächlich **Bremsstrahlung**
- **harte** (energiereiche) **Röntgenstrahlung** wird mit **Teilchenbeschleunigern** erzeugt, z.B. mit **Linearbeschleuniger** oder **Zyklotron** ($E_\gamma=1$ MeV bis 1 GeV)
- es werden auch Teilchen für die **medizinische Therapie** eingesetzt, z.B. **Elektronen** und **Protonen**

K-Serie verschiedener Anodenmaterialien

Element	Ordnungszahl Z	Quantenenergie in keV	Wellenlänge in nm
Al	13	1,55	83
Cu	29	8,9	15,4
Ag	47	25	5,6
W	74	69	2,1
Pb	82	88	1,65



- **charakteristische Röntgenstrahlung** ist **elementspezifisch**
- kann zur **chemischen Analyse** benutzt werden

Übungsaufgaben zur Kernphysik

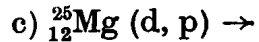
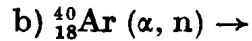
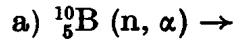
1147. Wieviel Zerfallsakte finden je Sekunde in 1 g reinem Radiokobalt ^{60}Co statt? ($T_{1/2} = 5,3 \text{ a}$)

1156. Die Aktivitäten zweier Radionuklide, die sich anfangs wie 2:1 verhalten, sind nach Ablauf von 6 Tagen gleich groß. Wie groß ist die Halbwertszeit des zweiten Nuklides, wenn die des ersten 4 Tage beträgt?

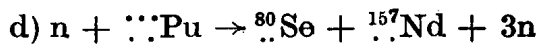
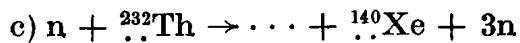
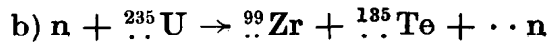
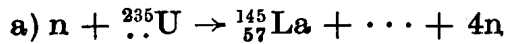
1158. Nach wieviel Halbwertszeiten beträgt die Aktivität einer radioaktiven Substanz nur noch $1/100$ ihres Anfangswertes?

1164. Die Dosisleistung eines punktförmigen Gamma-Strahlers beträgt in 0,6 m Abstand vom Präparat 0,5 mSv/h. In welchem Abstand beträgt sie nur noch 0,1 mSv/h?

1169. Es sind folgende Reaktionsgleichungen zu ergänzen:



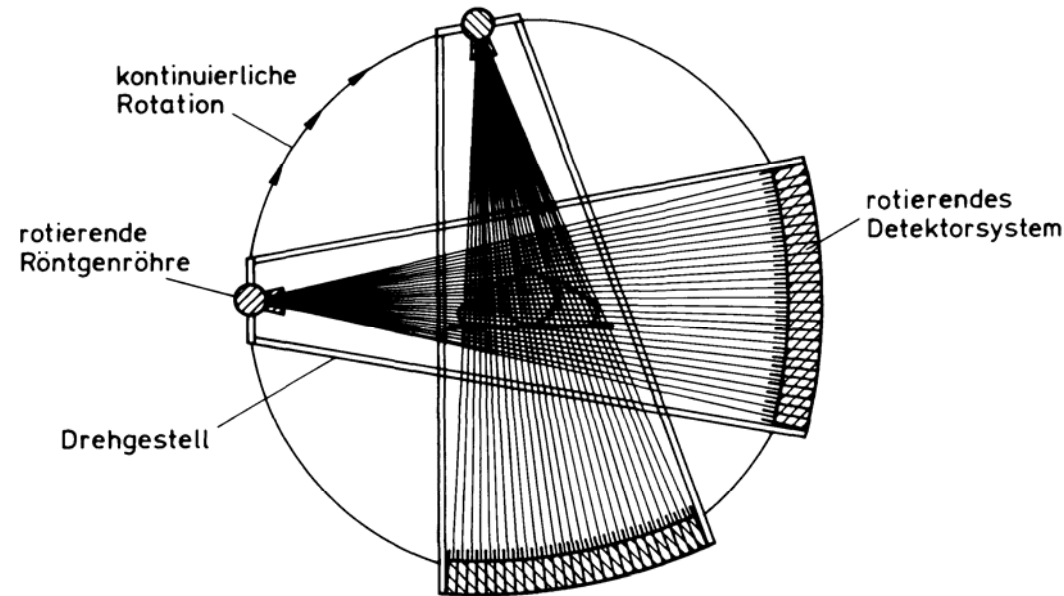
1170. Es sind folgende Reaktionsgleichungen zu ergänzen:



1173. Welchem Massendefekt entspricht eine frei werdende Energie von 10000 kWh?

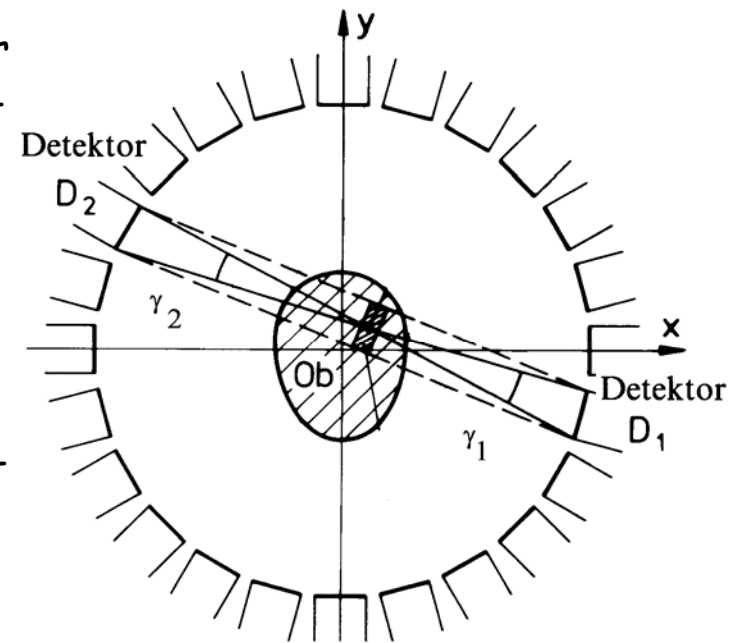
1183. Wieviel Kilowattstunden würden bei der vollständigen Fusion von 1 g Wasserstoff zu Helium frei werden?

- **Computertomographie (CT):** ortsaufgelöste Detektion auftreffender Röntgen-Quanten
- in Bildebene wird Röntgenabsorption **2-dimensional** aufgelöst
- durch **schrittweises Bewegen** (senkrecht zur Zeichenebene) des **Patienten** können so **3-dimensionale Bilder** rekonstruiert werden
- auch mit **internen γ -Quellen:** kurzlebige Isotope werden injiziert, die an Stellen mit hoher Stoffwechselrate besonders intensiv eingebaut werden: z.B. Karzinom-Gewebe

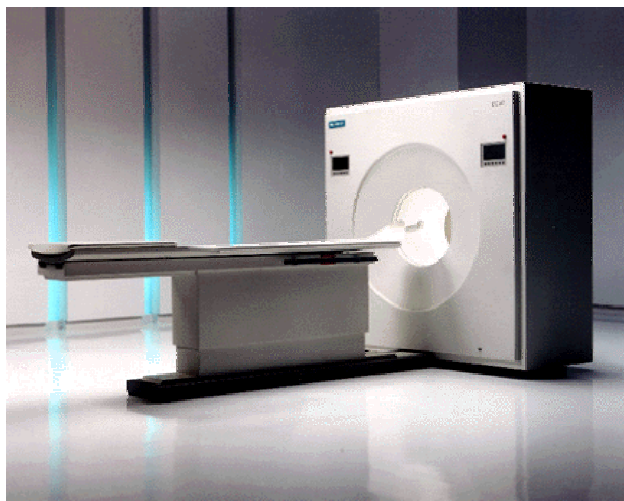


Tomographie-Einrichtung der Röntgen-CT mit Strahlenfächer

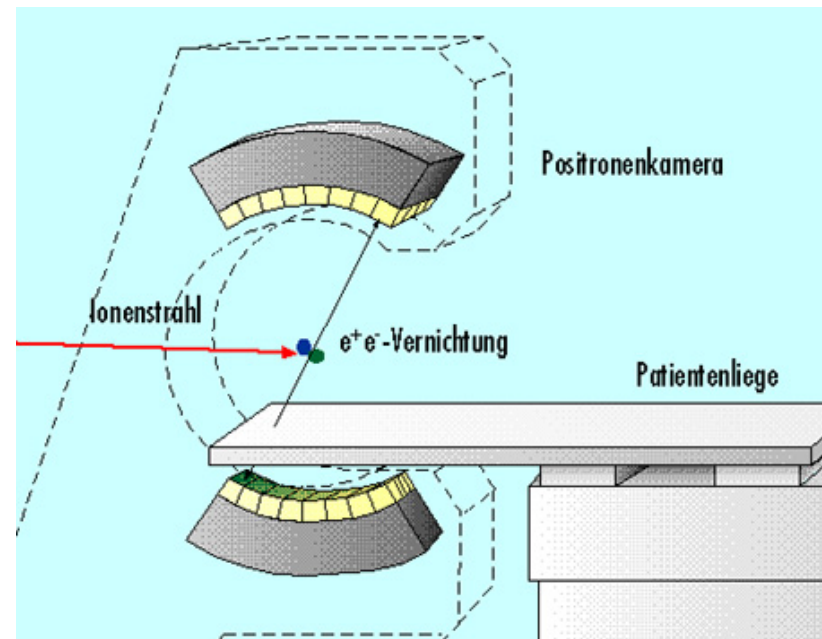
- wenn Positronen-Emitter (β^+ -Zerfall) injiziert wird: sehr genau Lokalisierung möglich, da die beiden Annihilations- γ -Quanten praktisch antiparallel (mit 180°) emittiert werden; ist **Positronen-Emissions-Tomographie (PET)**; Messung in Koinzidenz (gleichzeitige Ereignisse)
- auch hier **kurzlebige Isotope**, z.B. ^{15}O ($t_{1/2} = 122 \text{ s}$) oder ^{18}F ($t_{1/2} = 110 \text{ min}$)
- **^{18}F -Deoxyglukose**, wird von Zellen wie Glukose aufgenommen und reichert sich in **Tumorzellen** mit hoher Stoffwechselaktivität an
- Isotope müssen am Ort produziert werden (mit Mini-Zyklotron)
- in BRD gab es 2001 32 PET-Zentren



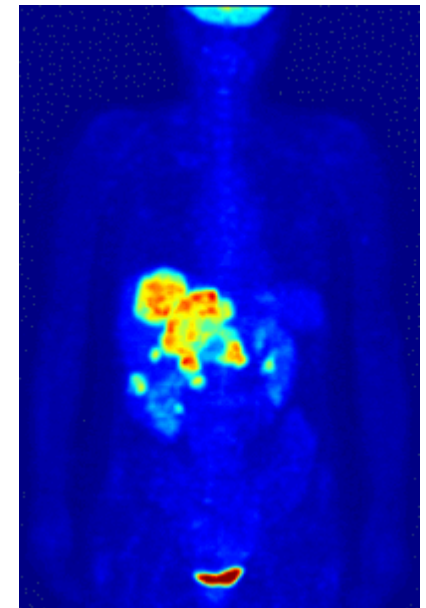
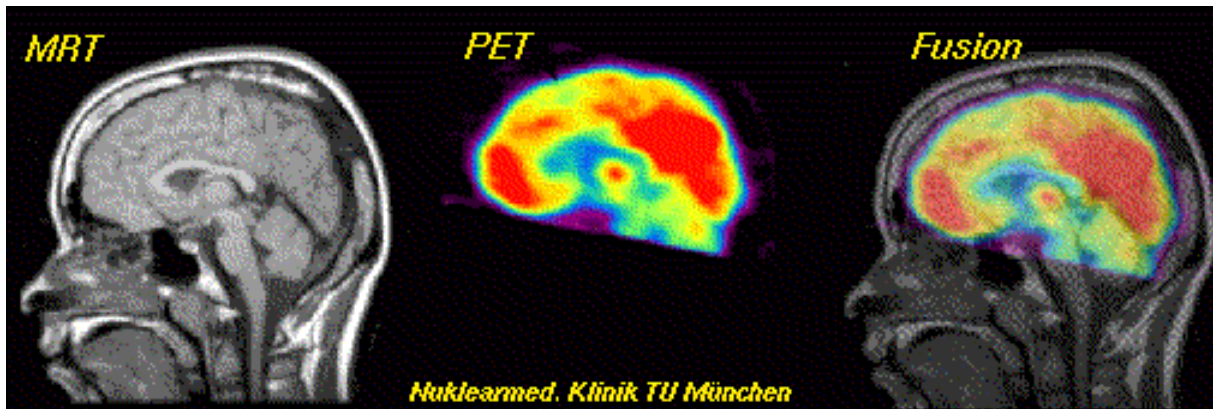
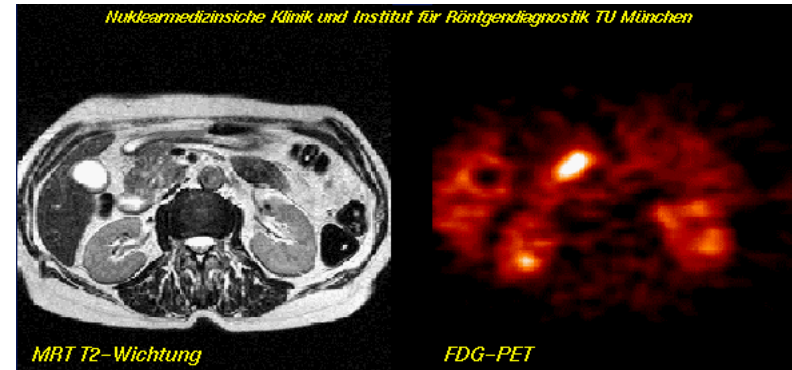
Schema der Positronentomographie (PET)



PET-Scanner der Firma Siemens



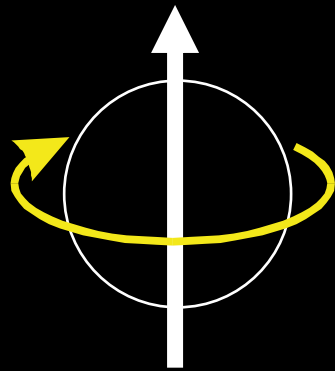
- Kombination mit anderen Techniken liefert gesicherte Aussagen (in den Beispielen Kombination mit: MRT - **Magnetische Resonanz-Tomographie** heißt auch **Kernspinresonanz-Tomographie** s. unten)



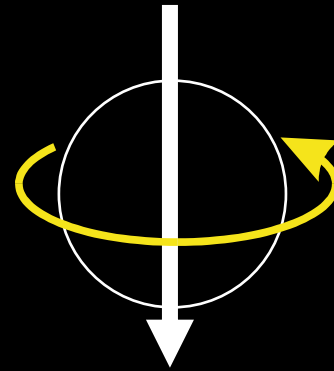
Kernresonanz

- wenn Kern aus **ungerader** Zahl von Nukleonen (z.B. Wasserstoff): Kern hat Spin (magnetisches Moment)
- zu einem von außen angelegten **Magnetfeld** stellt sich der Spin **parallel** oder **antiparallel** ein

Atomkerne haben einen Kernspin

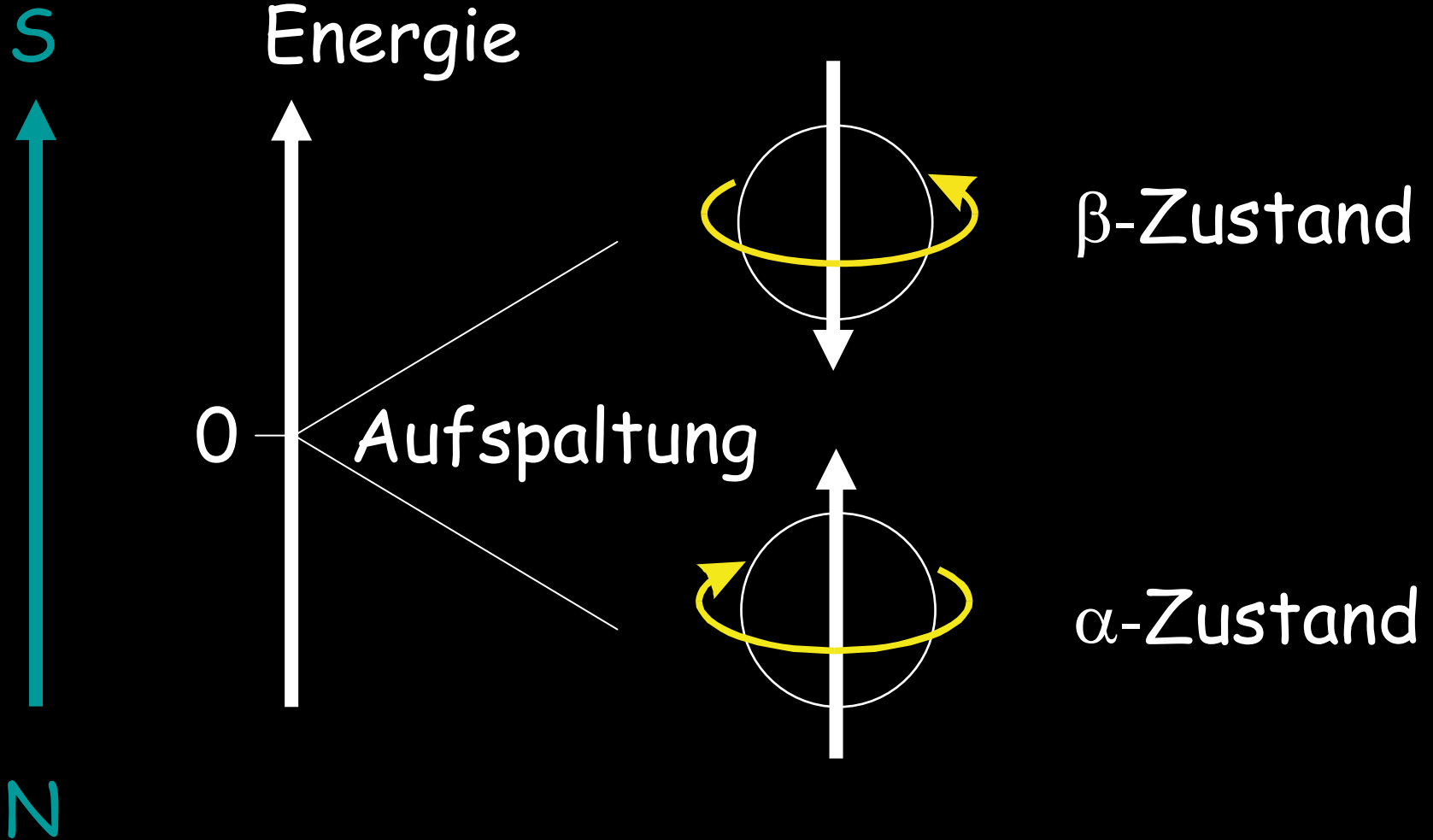


α -Zustand

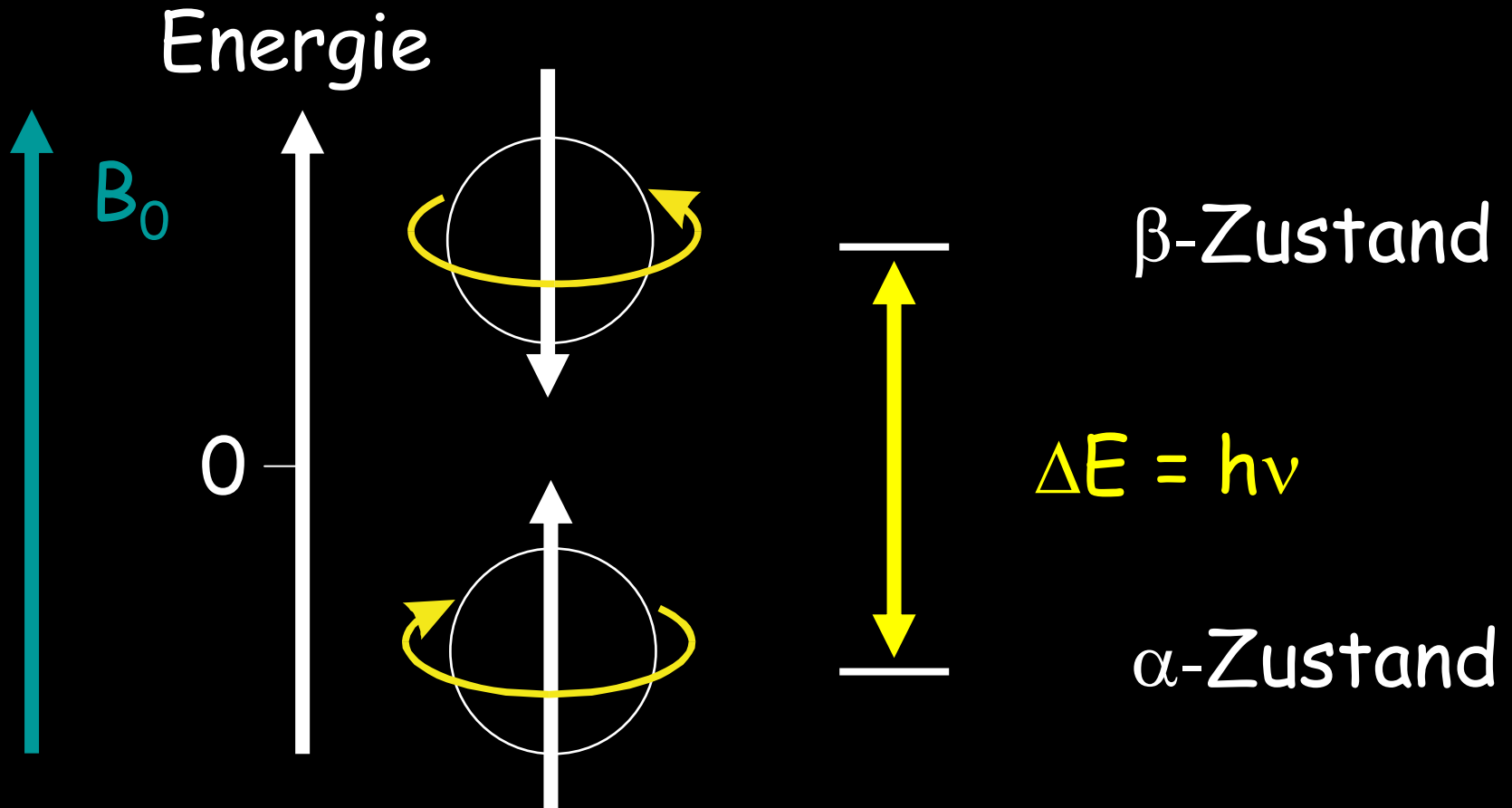


β -Zustand

Energien im Magnetfeld



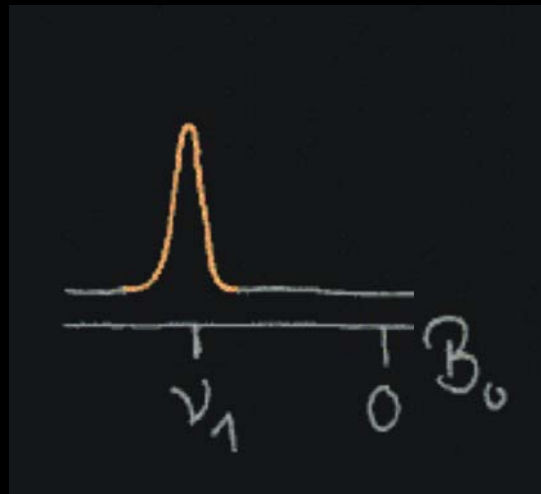
Die Resonanzbedingung



Kernresonanz

Kernmagnetische Resonanz

NMR (nuclear magnetic resonance)



Entdeckung 1946



Tomographie

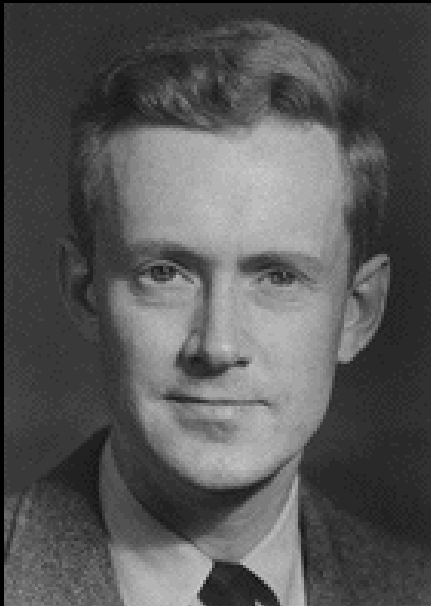


Proteinstruktur



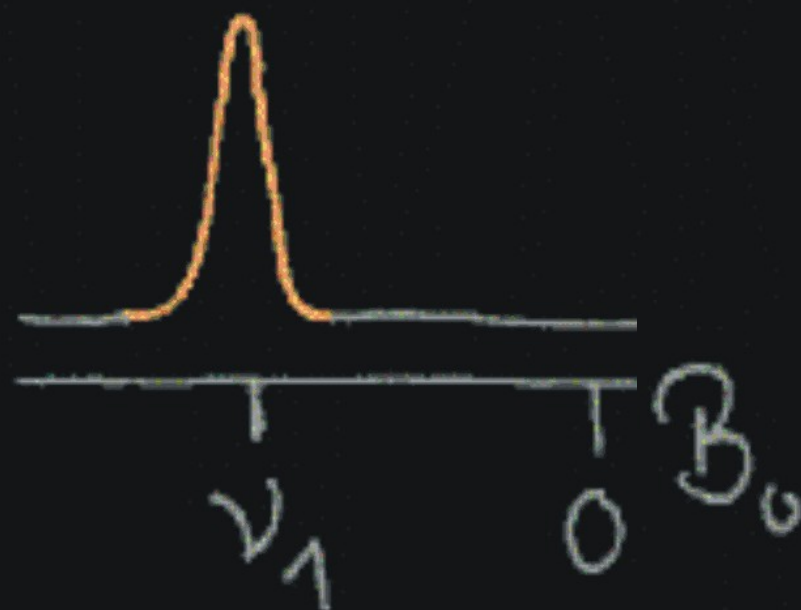
Felix Bloch

Nobelpreis für Physik 1952

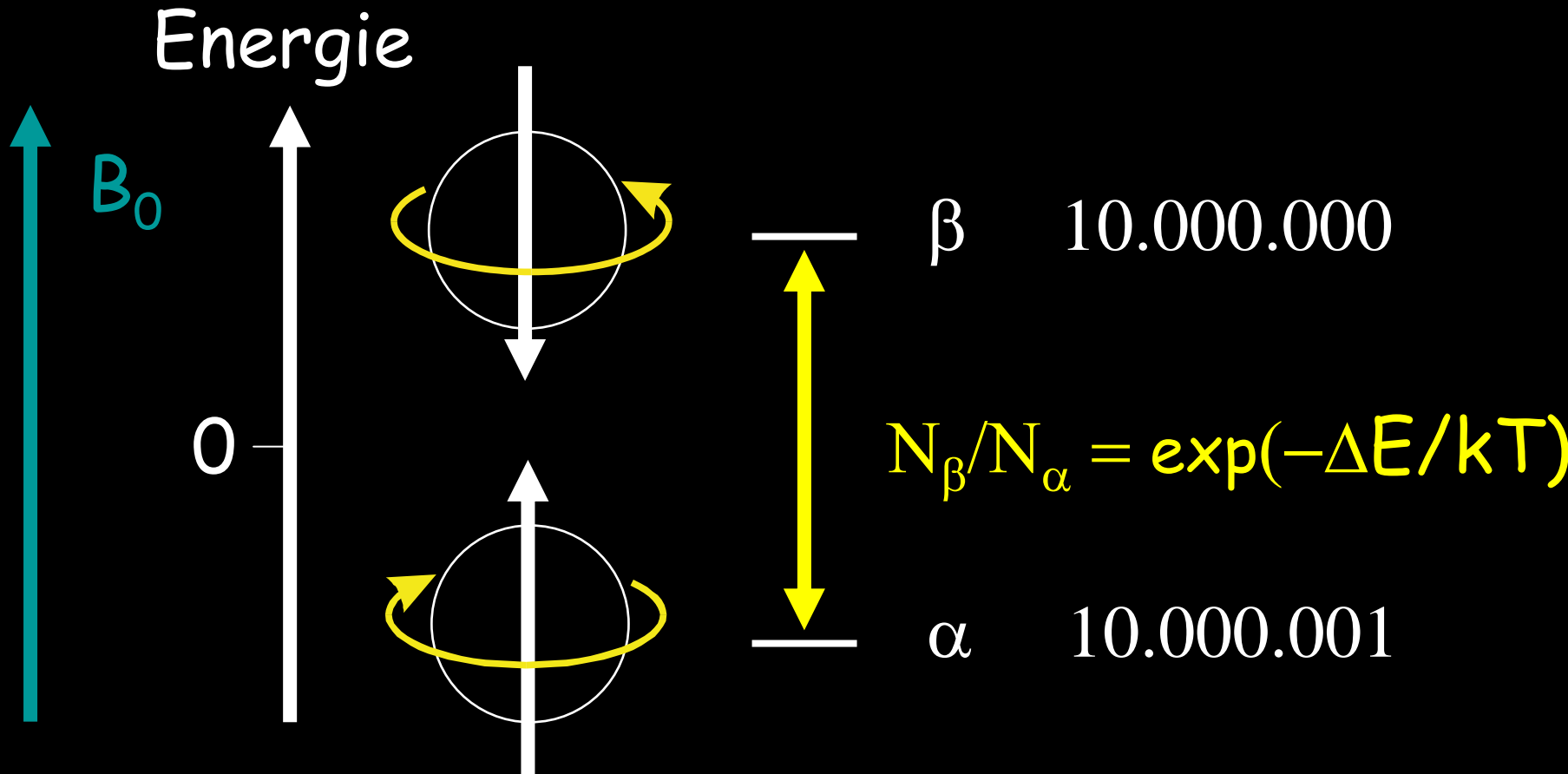


Edward M. Purcell

... für die Entdeckung und die
Entwicklung neuer Methoden für
präzise NMR-Spektroskopie



Die Empfindlichkeit



Magnetfeld:

Erdmagnetfeld: 30-60 μT (10^{-6} Tesla)

stärkster Eisenmagnet: 2 T

stärkster Magnet in Halle: 14 T
= 300.000 x Erdmagnetfeld

NMR-Spektrometer in Halle:

14 Tesla, 600 MHz



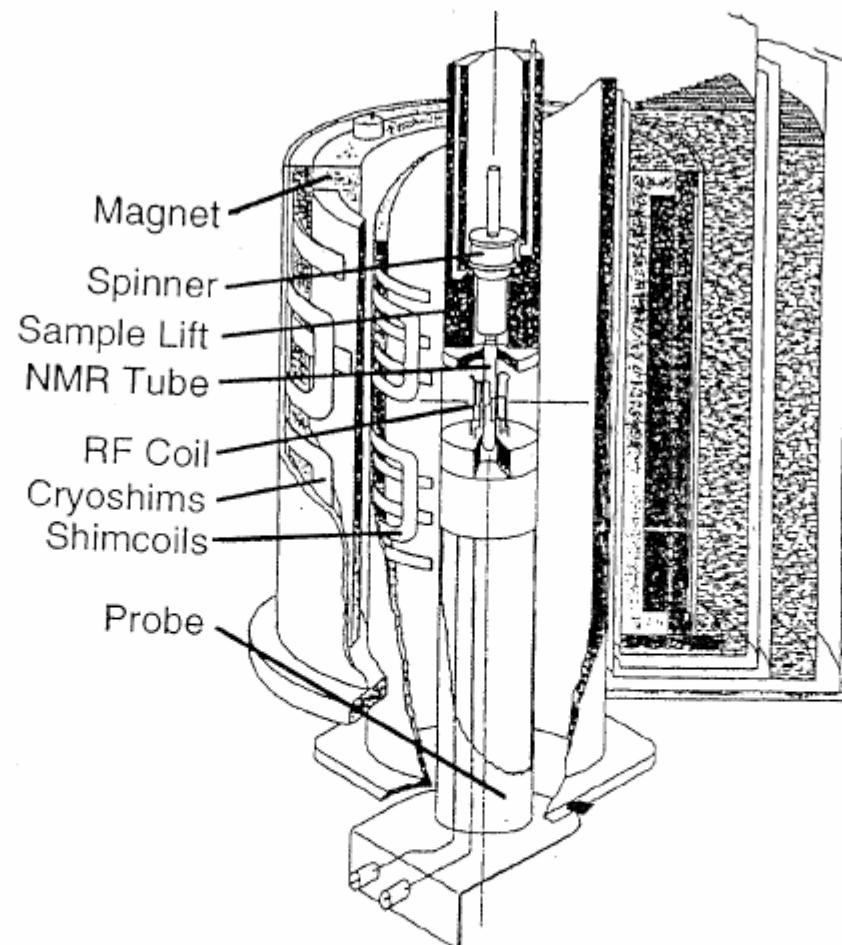
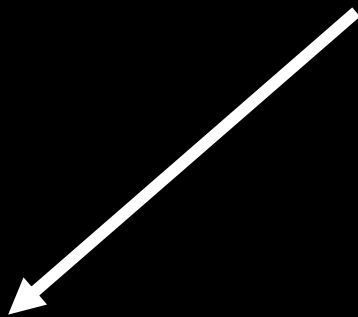


FIGURE 3.2 Cutaway diagram of a superconducting magnet. The probe, sample spinner, and room-temperature shim coils are positioned coaxially in the room-temperature bore of the magnet. The solenoid and cryoshim coils are immersed in liquid helium. The helium dewar is surrounded by a radiation shield and a liquid nitrogen dewar. Diagram courtesy of Bruker Instruments, Inc.

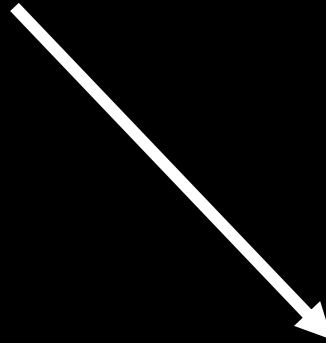
Physik



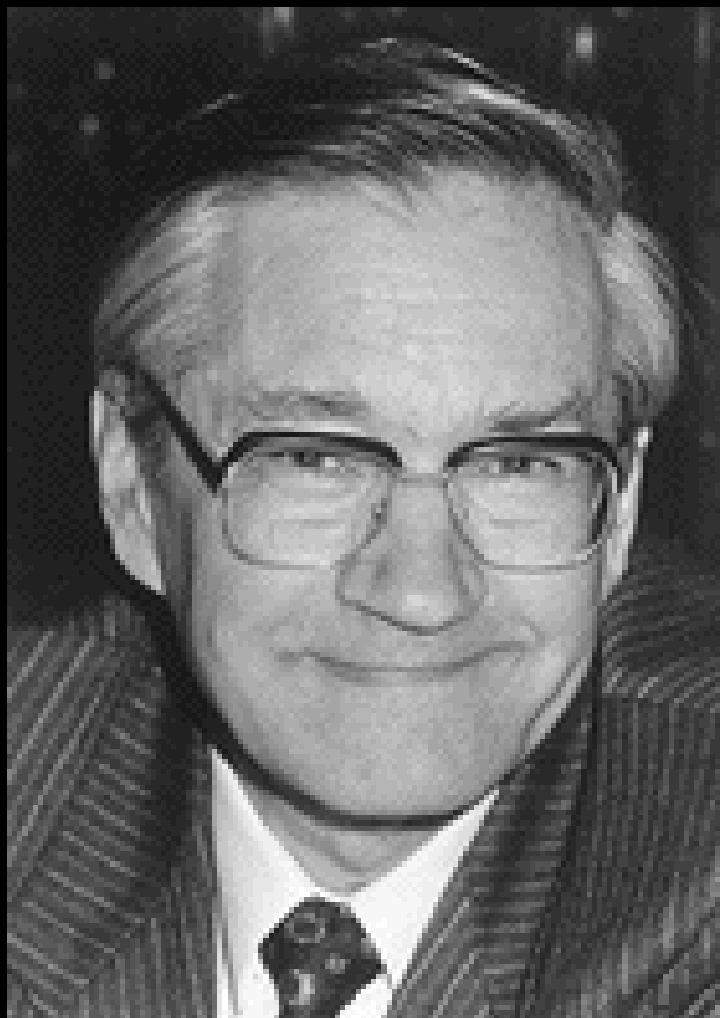
Chemie



Medizin



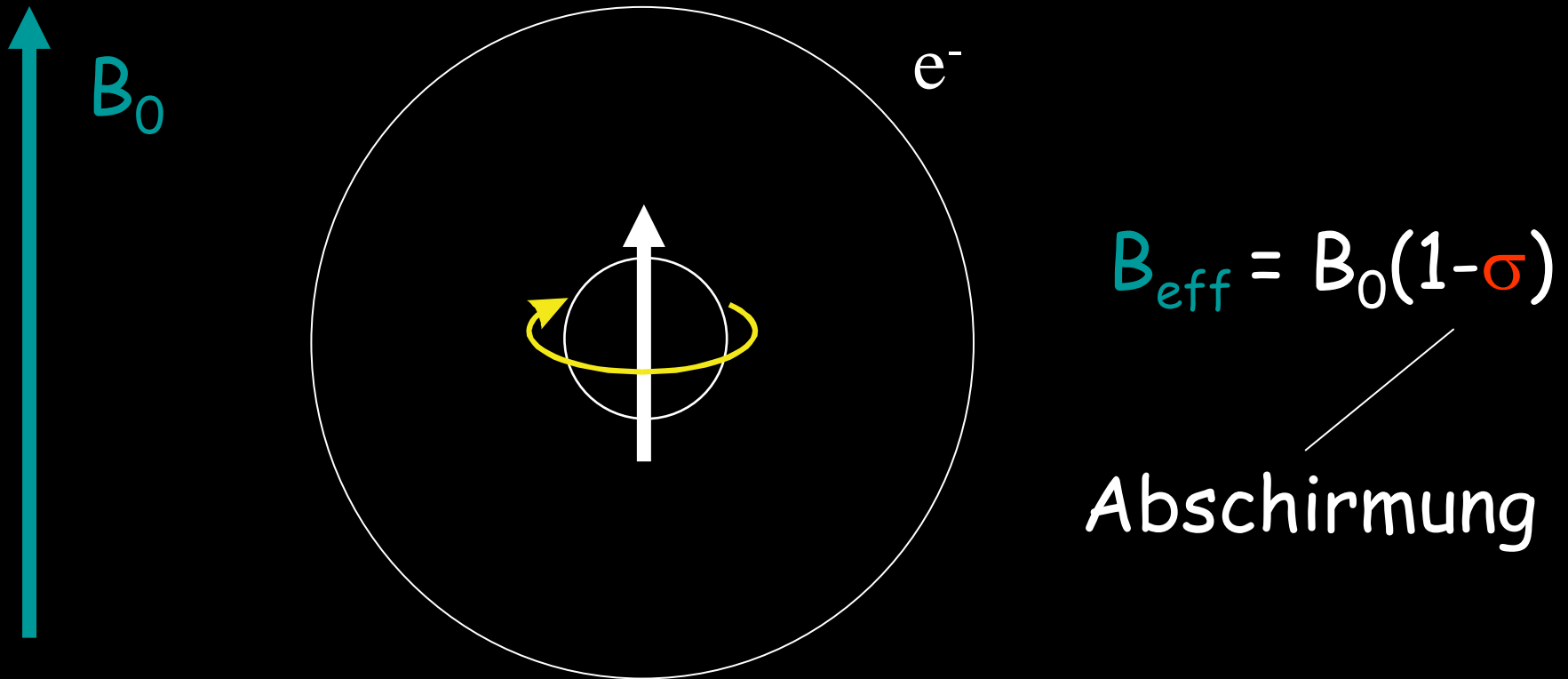
Biowissenschaften



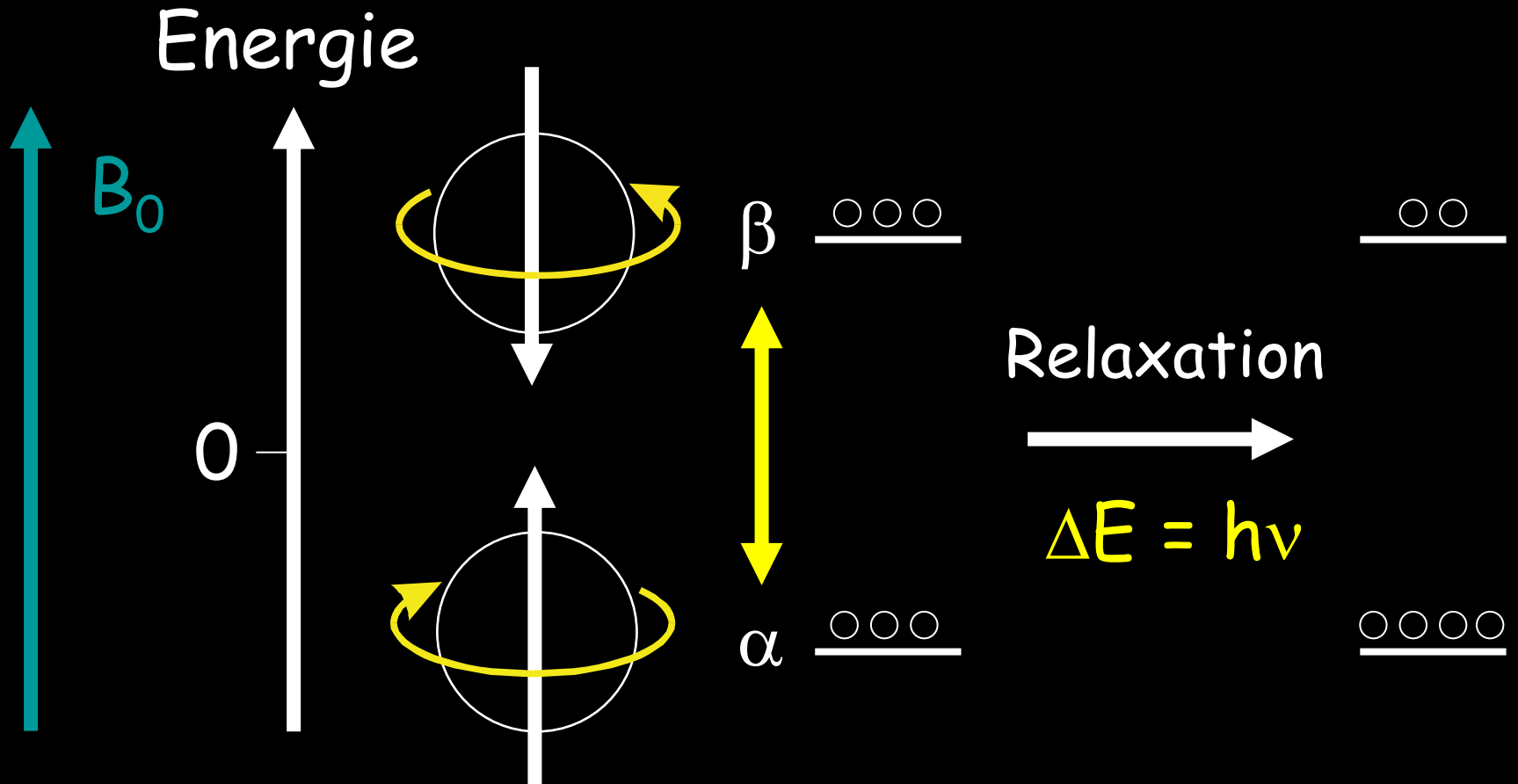
Richard R. Ernst
Nobelpreis für Chemie 1991

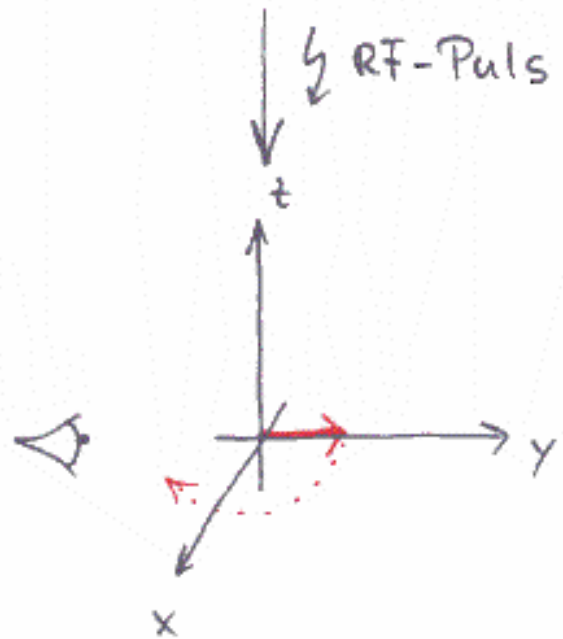
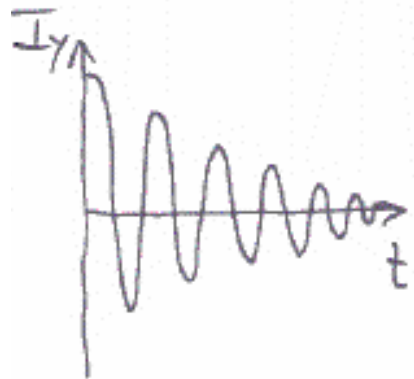
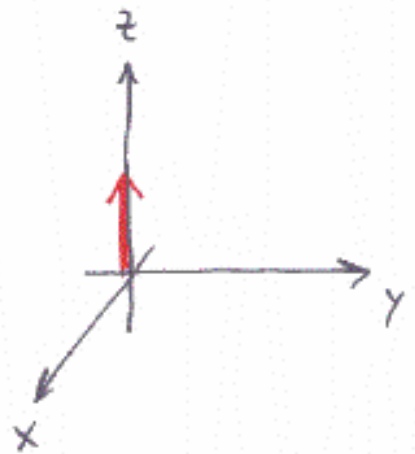
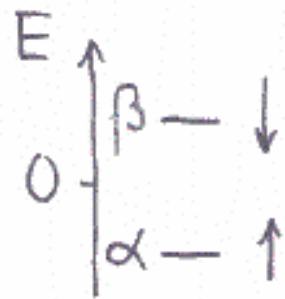
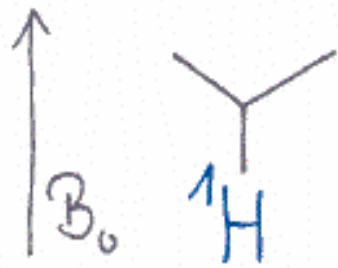
... für seine Beiträge zur
Entwicklung der hochauf-
lösenden NMR-Spektroskopie

Einfluss der Elektronen

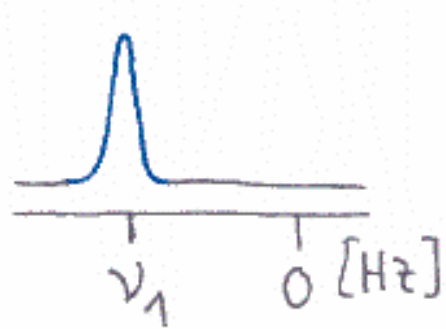
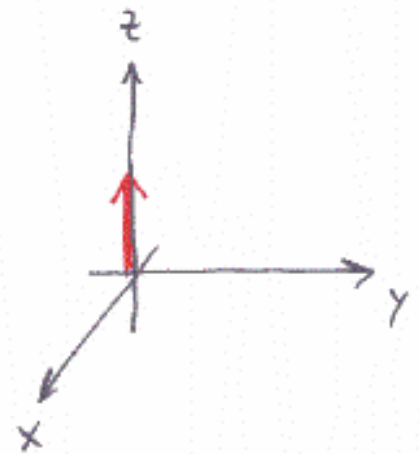
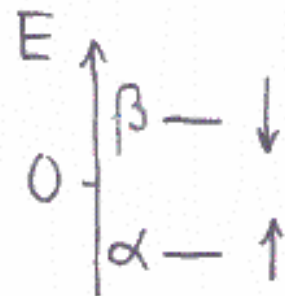
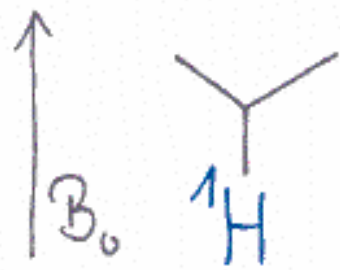


Anregung und Relaxation

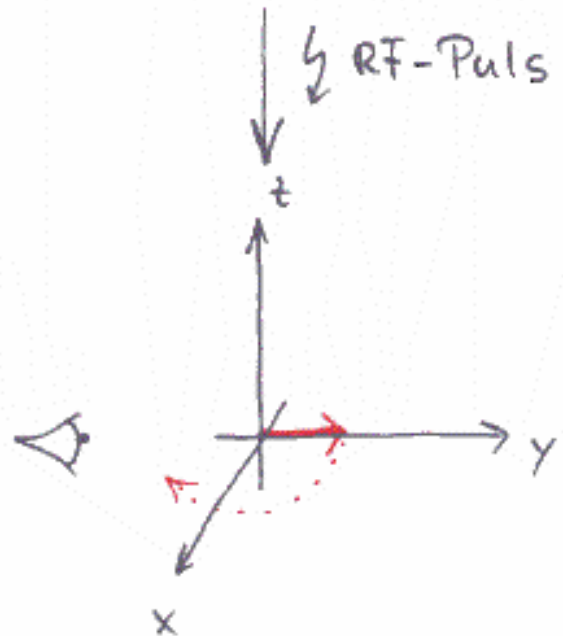
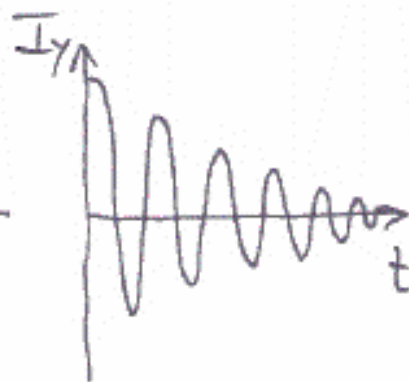


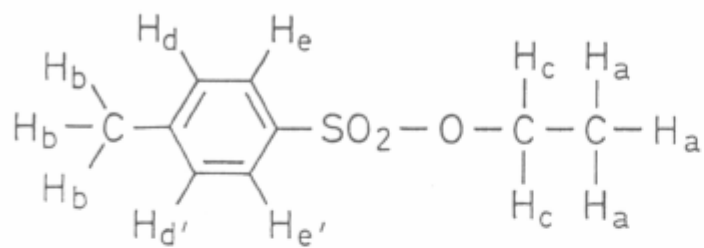


Die chemische Verschiebung

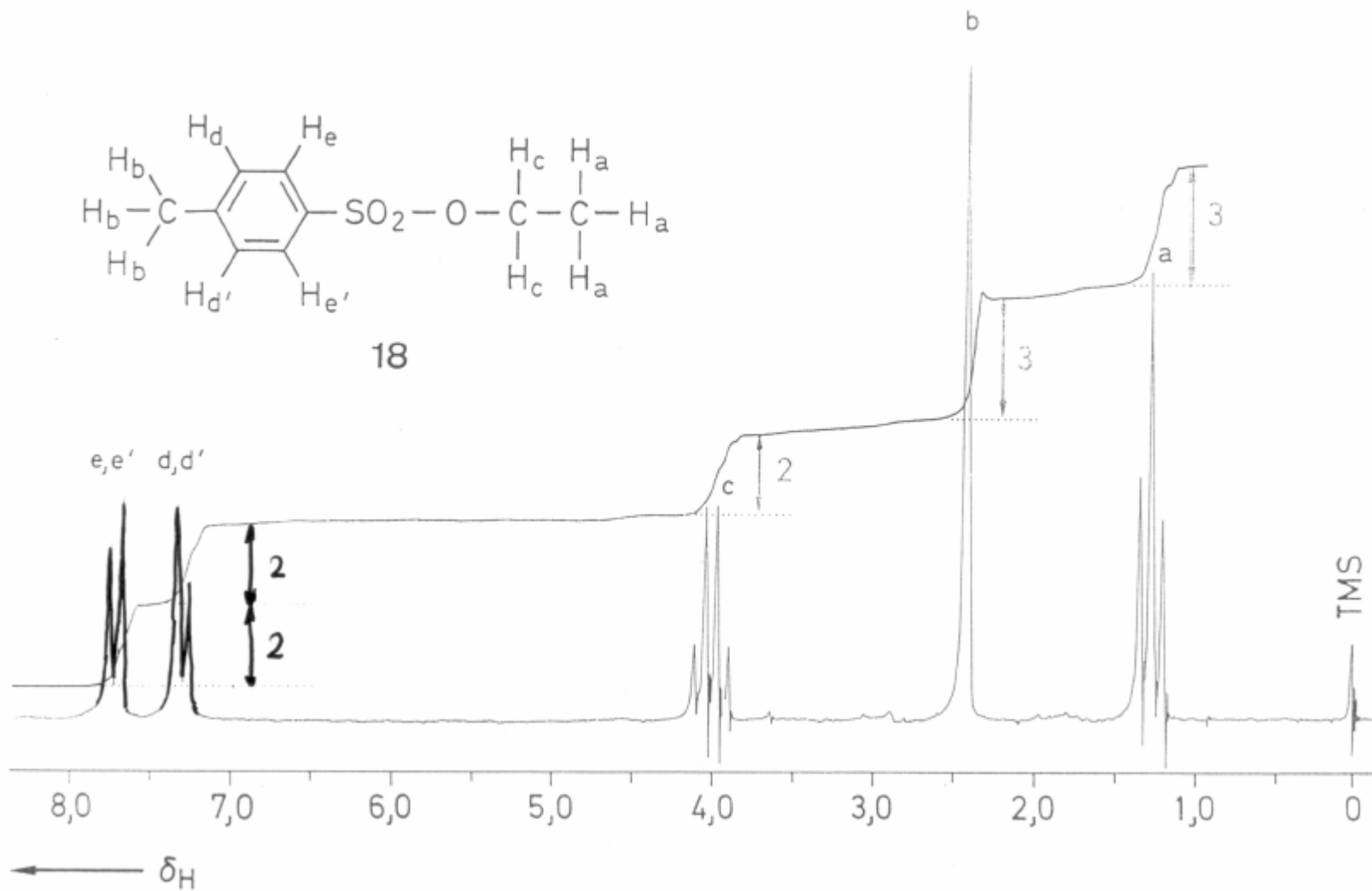


FT

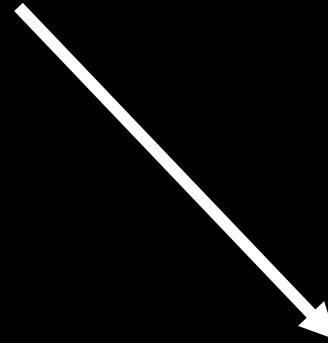
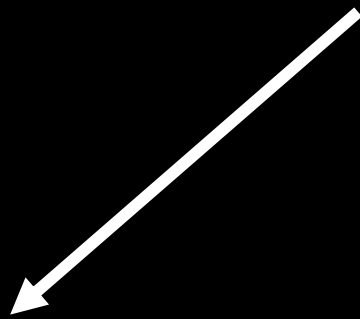




18



Physik



Chemie

Medizin

Biowissenschaften



Paul C. Lauterbur

Nobelpreis für Medizin 2003



Sir Peter Mansfield

... für ihre Entdeckungen zur
Bildgebung mittels magnetischen
Resonanz

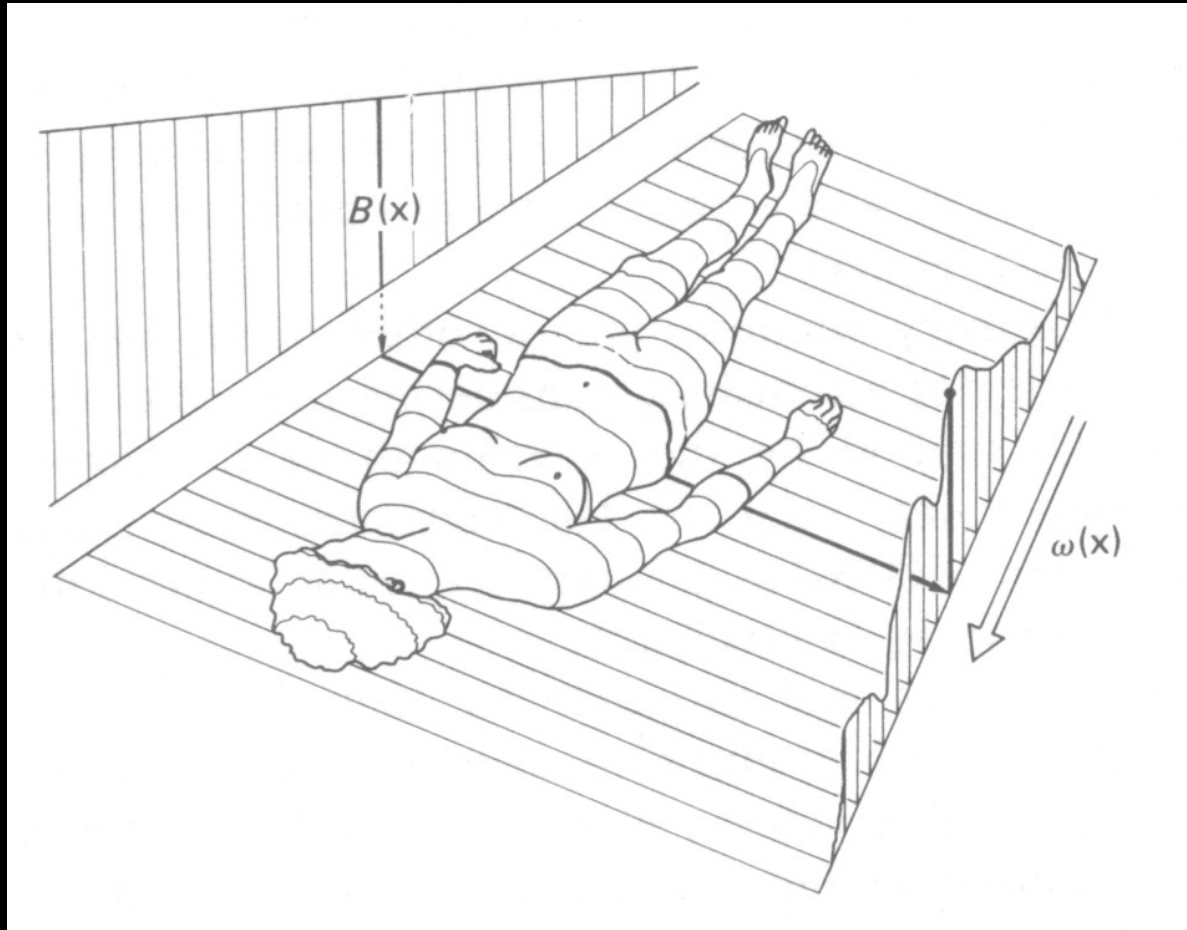
Kernspintomographie = Magnetische Resonanz Tomographie (MRT)



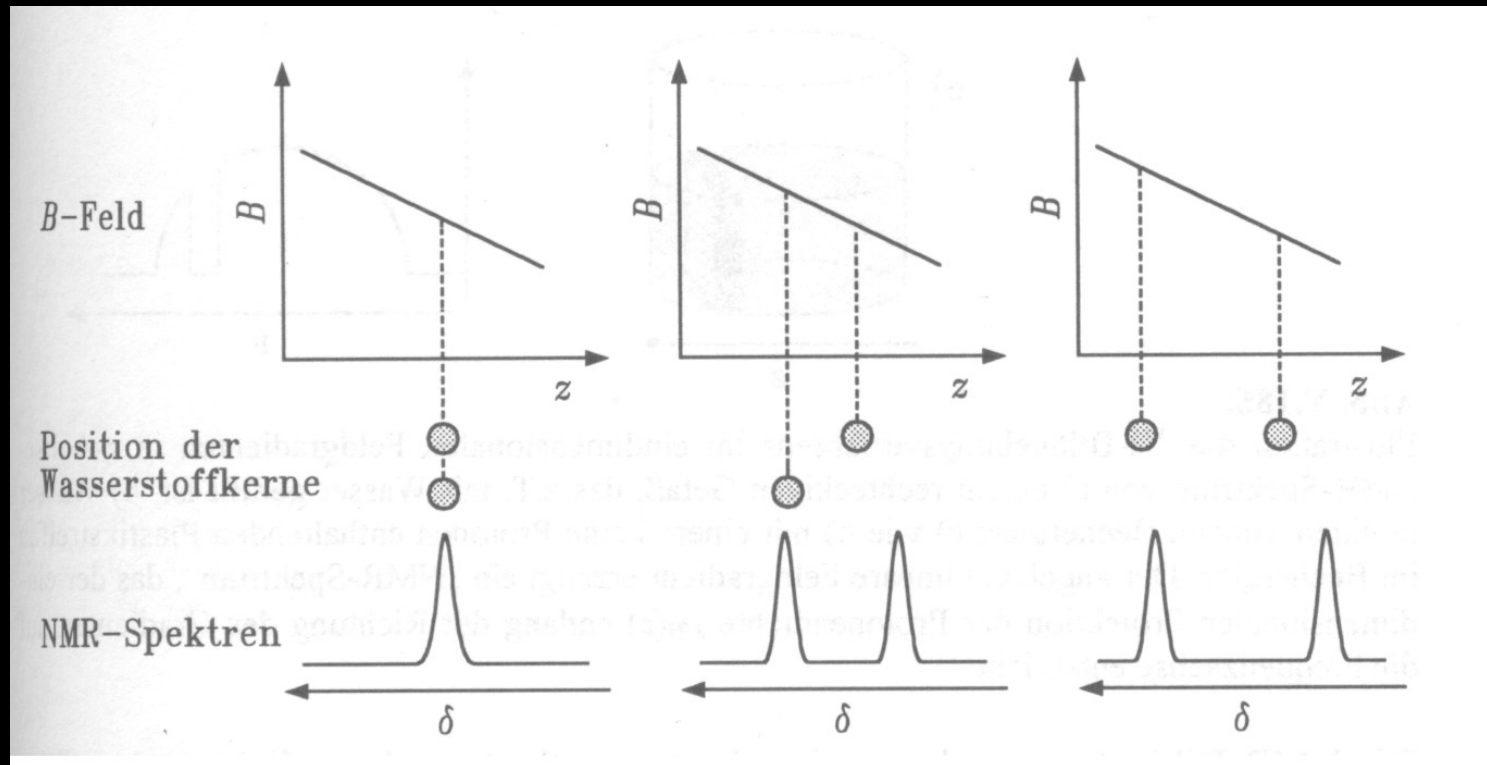
Vorteile:

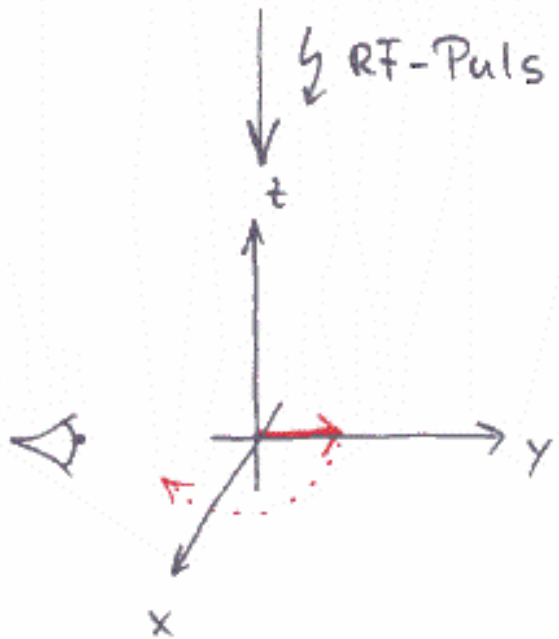
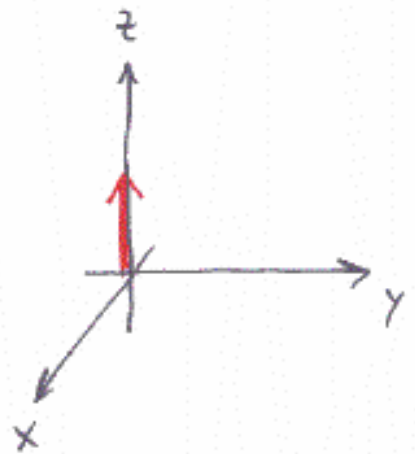
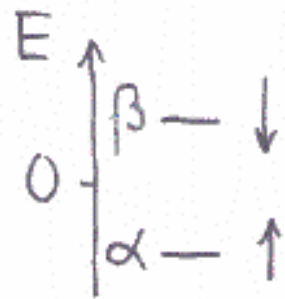
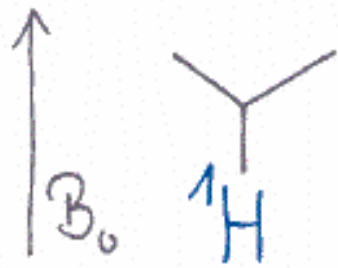
- weiche Materie
- schonend
- 3-dimensionales Bild
- keine Kontrastmittel

Magnetische Resonanz Tomographie (MRT)



Magnetische Resonanz Tomographie (MRT)

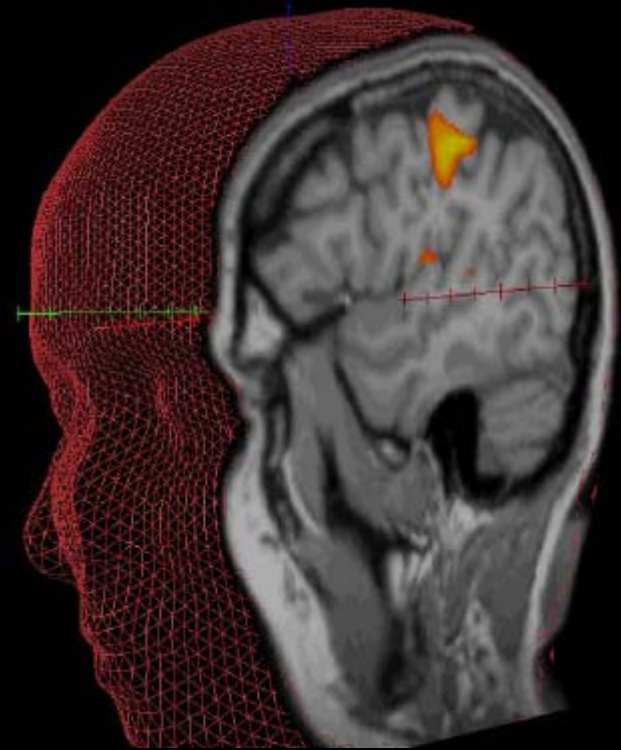




Kernspintomographie = Magnetische Resonanz Tomographie (MRT)

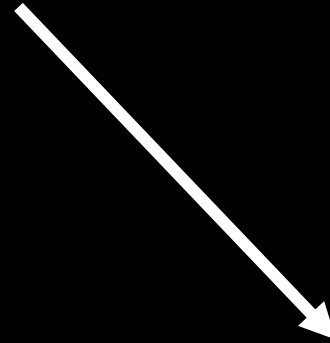
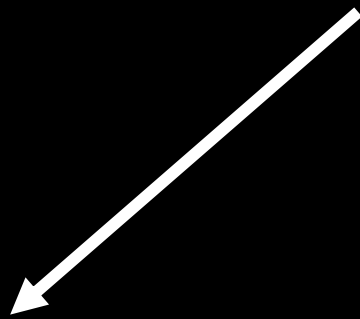


Bildgebung



funktionelle MRT

Physik



Chemie

Medizin

Biowissenschaften



Kurt Wüthrich Nobelpreis für Chemie 2002

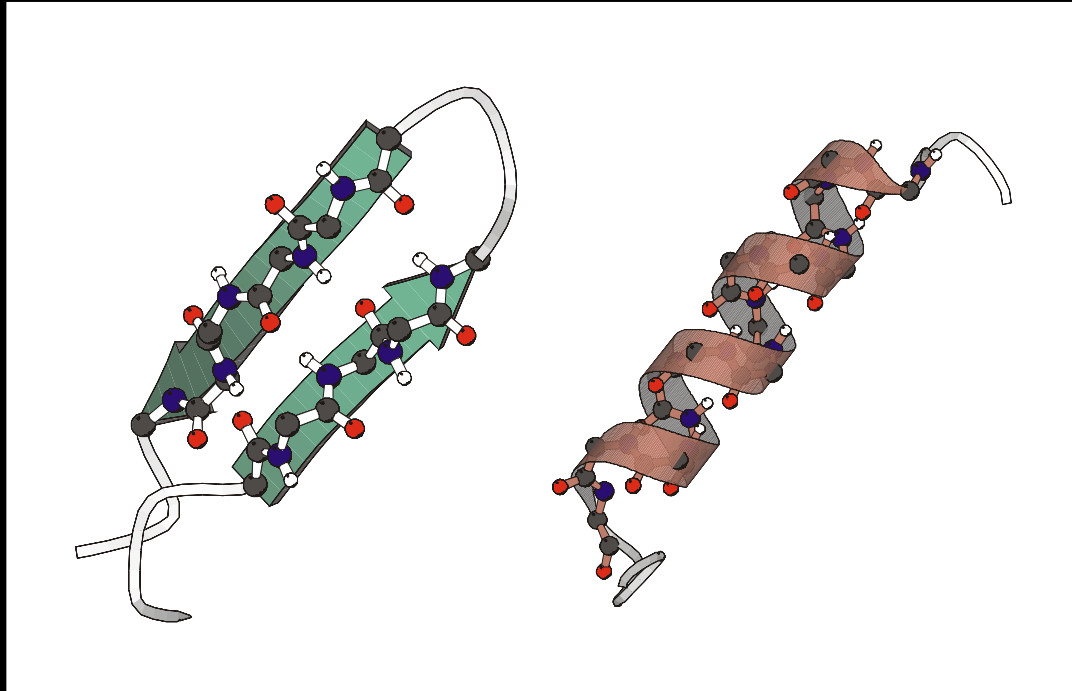
... für die Entwicklung der
NMR-Spektroskopie zur
Bestimmung der drei-
dimensionalen Struktur von
biologischen Makromolekülen
in Lösung

Aufbau der Proteine



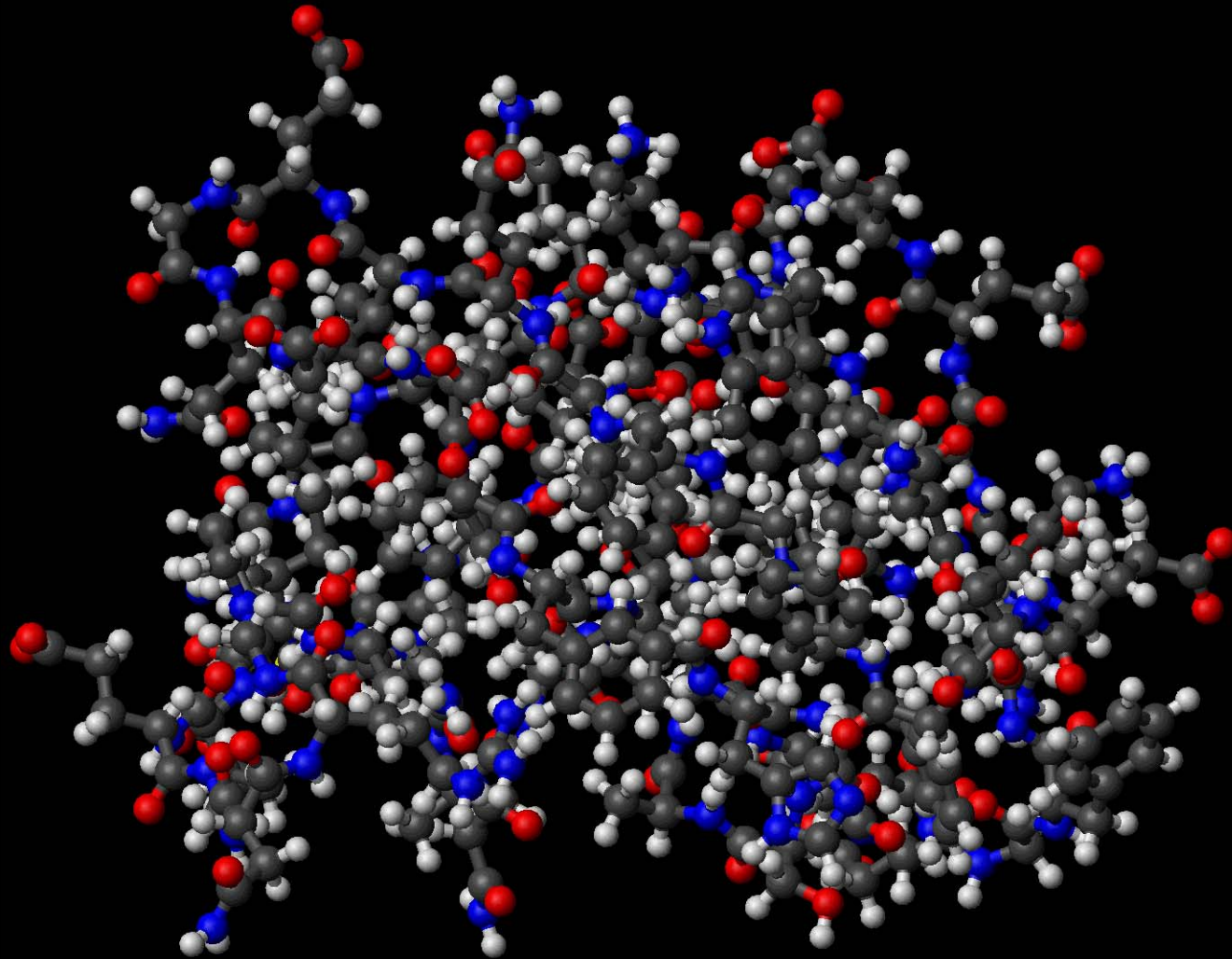
Tertiärstruktur

Aufbau der Proteine



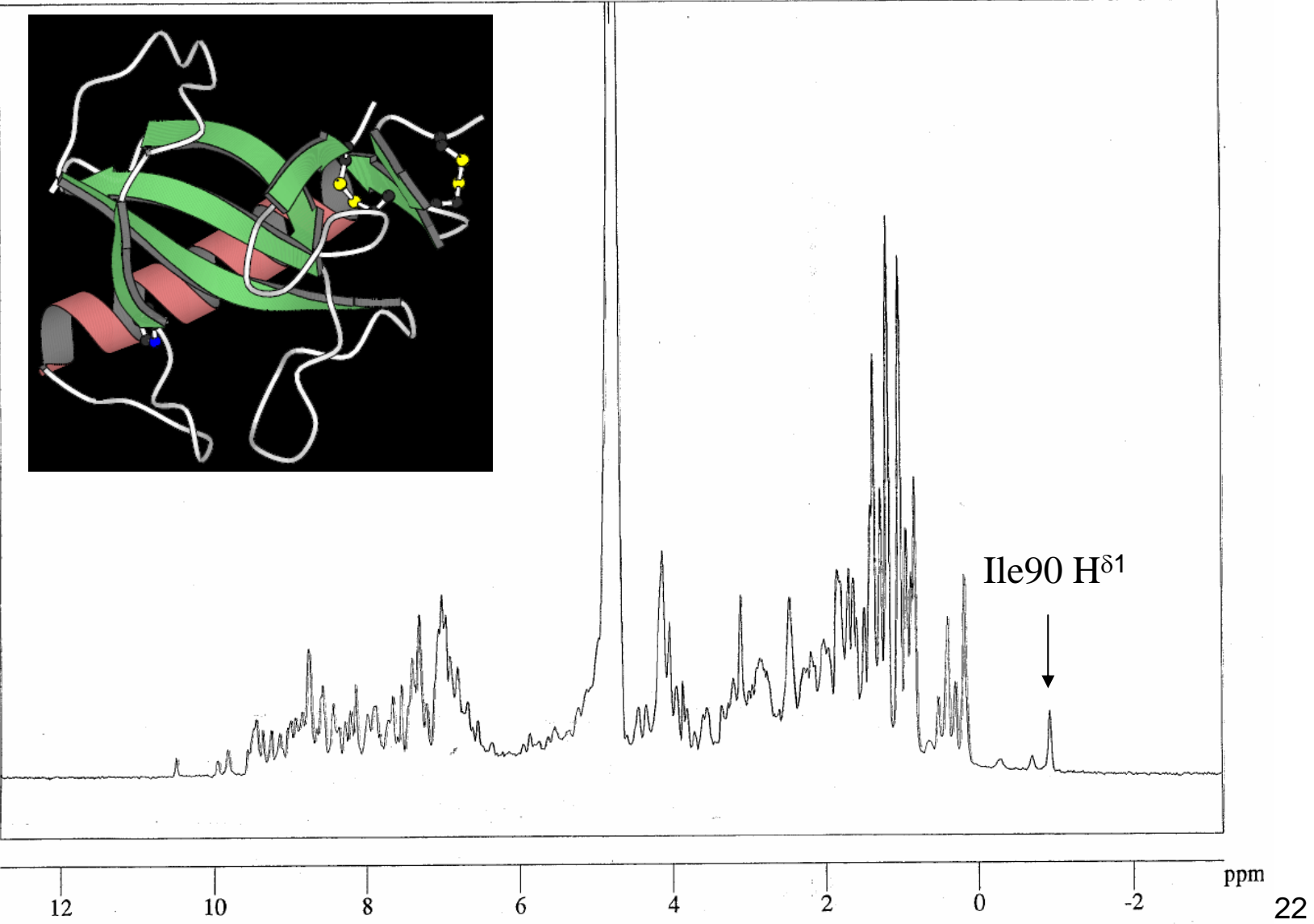
Sekundärstruktur

$20 \text{ \AA} = 2 \text{ nm} = 2 \times 10^{-9} \text{ m}$

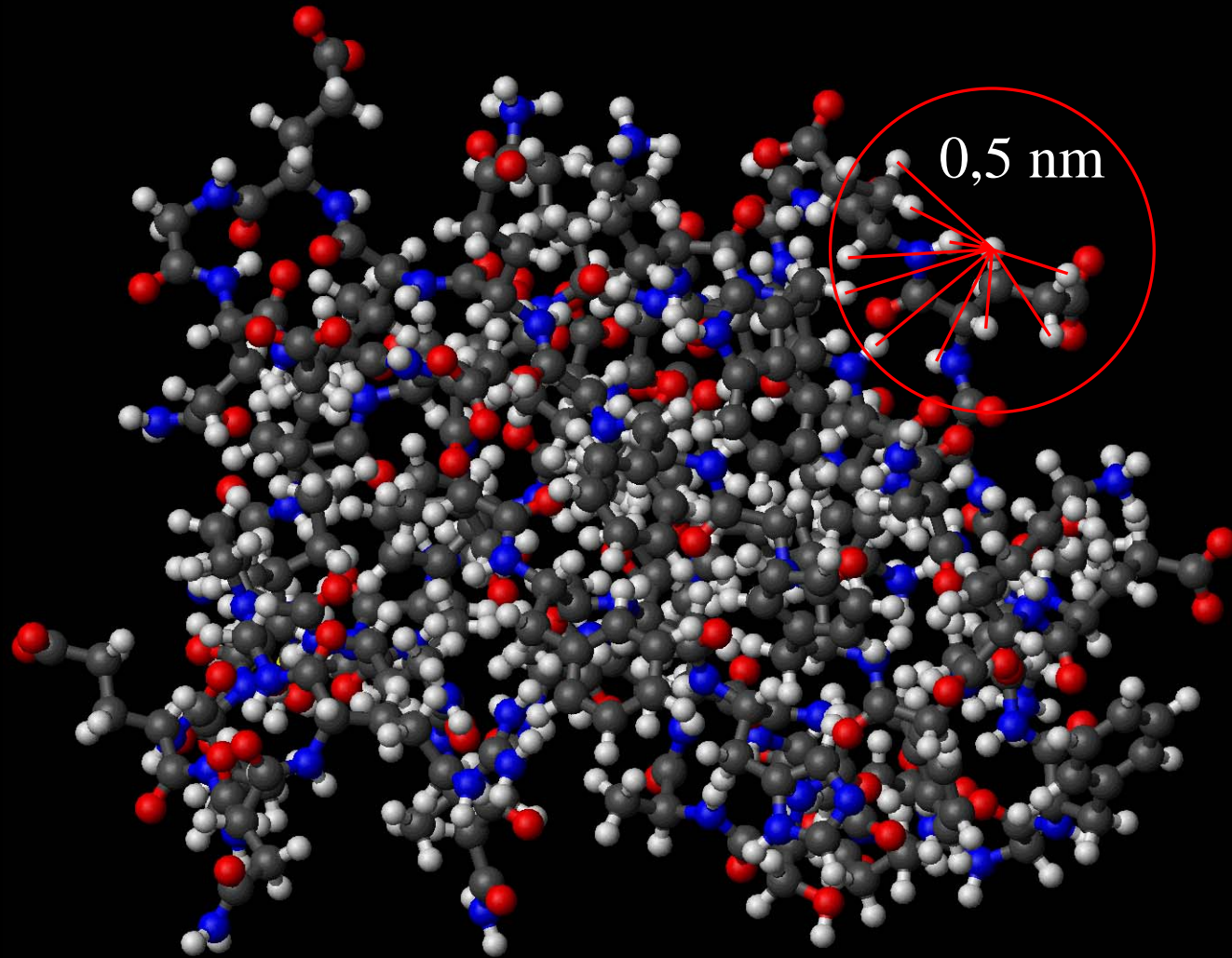


1020 Atome ($C_{331}H_{499}N_{85}O_{104}S_1$)
Molekulargewicht: 7365 Aminosäuren: 67

^1H NMR Spektrum von Ribonuclease T1 in H_2O (0.7mM, 547 ^1H -Kerne), 40°C, 32 scans



$20 \text{ \AA} = 2 \text{ nm} = 2 \times 10^{-9} \text{ m}$



1020 Atome ($C_{331}H_{499}N_{85}O_{104}S_1$)
Molekulargewicht: 7365 Aminosäuren: 67