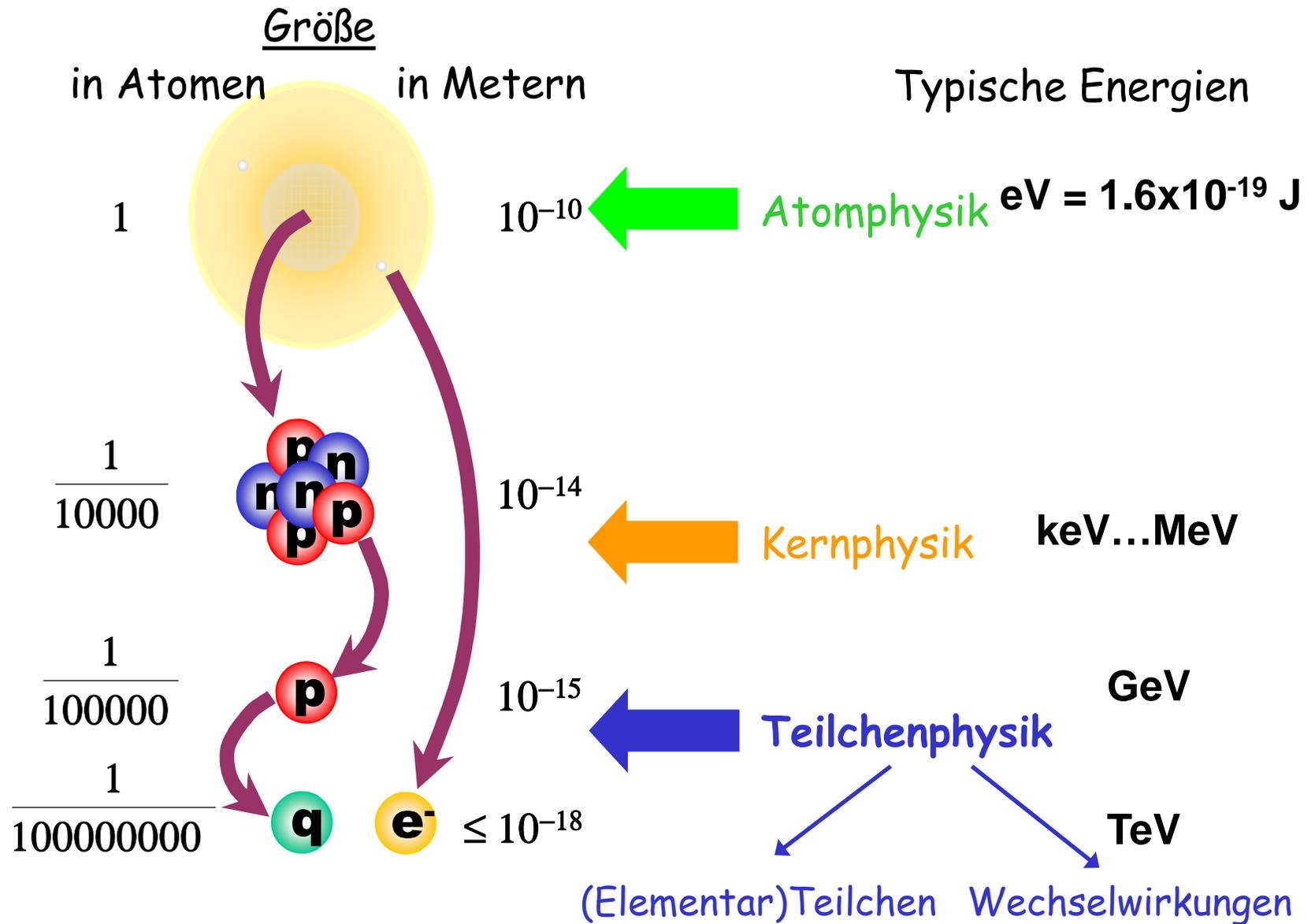


# Vorlesung 8: Atome, Kerne, Strahlung

**Georg Steinbrück,**  
[georg.steinbrueck@desy.de](mailto:georg.steinbrueck@desy.de)

**Folien/Material zur Vorlesung auf:  
[www.desy.de/~steinbru/PhysikZahnmed](http://www.desy.de/~steinbru/PhysikZahnmed)**

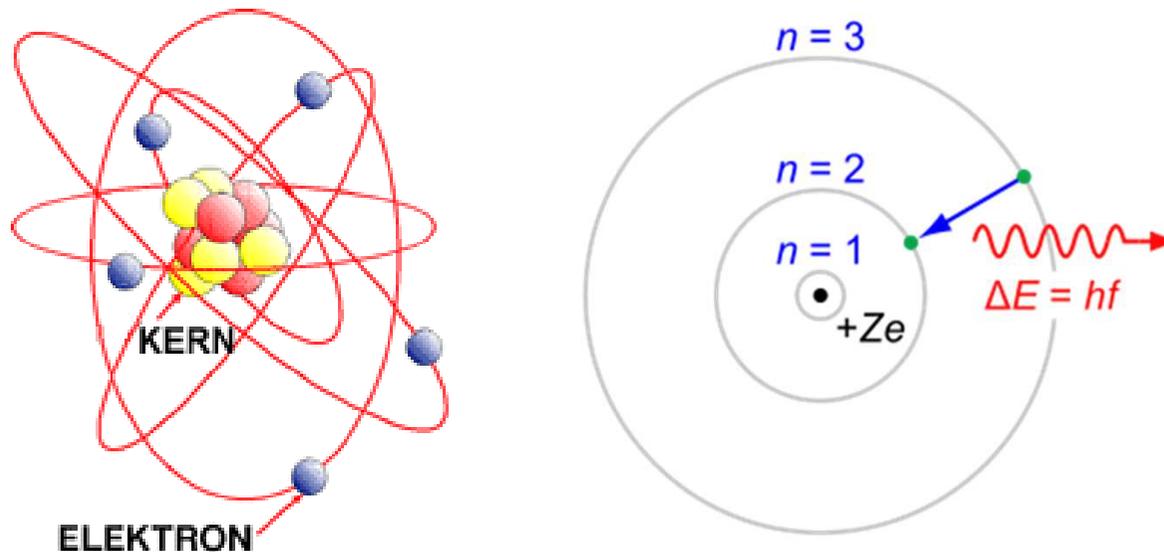
# Größenordnungen



# Atome/ Kerne: Überblick

## Atome:

- elektrisch neutral, Durchmesser  $\sim 10^{-10}$  m
- bestehen aus sehr kleinem **Kern** ( $d \sim 10^{-15}$  m) mit **Z Protonen** (positiv geladen) und **N Neutronen** (elektrisch neutral) und Hülle aus **Z Elektronen**
- **Bohrsches Atommodell:**
  - Elektronen bewegen sich auf **Bahnen** um den Kern, die bestimmten Energiezuständen entsprechen. Dies entspricht allerdings so nicht der Wirklichkeit...



- Praktisch die gesamte **Masse** der Atome **ist im Kern** konzentriert.



## Atome/ Kerne: Überblick

Praktisch die gesamte Masse der Atome ist im Kern konzentriert.

- Kerne werden charakterisiert durch die **Kernladungszahl Z** und die **Massenzahl A**:

$$A = N + Z$$

wobei **N** die **Anzahl der Neutronen** ist. Die Masse von Protonen und Neutronen ist fast gleich.

- Schreibweise  ${}^A_Z X$  z.B.  ${}^{12}_6 C$  Mit 6 Protonen und 6 Neutronen.

- I.A. gibt es zu einem **chemischen Element** (mit einer bestimmten **Ladungszahl Z**) unterschiedliche **Isotope** mit **unterschiedlicher Massenzahl A** bzw. Neutronenzahl N.

- Es gibt **stabile** und **instabile** Isotope. Letztere zerfallen spontan „**radioaktiver Zerfall**“ und bilden so neue Elemente.

- **Beispiel**  ${}^{12}_6 C$ ,  ${}^{13}_6 C$  (beide stabil, kommen in der Natur vor)  ${}^{14}_6 C$  (radioaktiv, kommt in der Natur vor)

${}^{10}_6 C$   ${}^{11}_6 C$   ${}^{15}_6 C$   ${}^{16}_6 C$  radioaktiv, nur künstlich hergestellt.

Die Elektronen der Atome können durch **Energiezufuhr** auf **höhere Bahnen** gebracht werden.

Möglich durch:

- **Erwärmung**
- **Elektronenstoß**
- **Lichtabsorption**, wenn die Frequenz des Lichts mit der Übergangsfrequenz übereinstimmt.

• Danach i.A. spontanes Zurückfallen auf unteres Niveau „**Abregung**“. Dabei wird die Energiedifferenz zwischen angeregtem Niveau und Grundniveau als **elektromagnetische Strahlung** frei.

• **äußere Hüllenelektronen**: Geringe Energieunterschiede → **Sichtbares Licht**

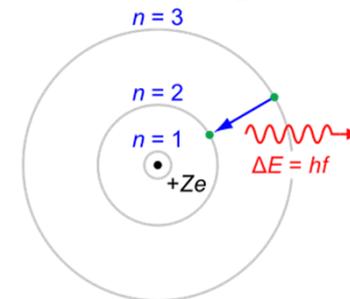
• Übergänge der **innersten Bahnen** → größere Energieunterschiede → **Röntgenstrahlung**:  
Höhere Energie, Frequenz.

• Zusammenhang zwischen Energie und Frequenz:

$$\Delta W = h \cdot f$$

Wobei  $\Delta W$  der Energieunterschied der betrachteten Elektronenbahnen ist, **f die Frequenz** der Strahlung und h das **Plancksche Wirkungsquantum**:

$$h = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$



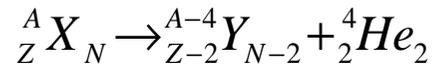


# Radioaktivität

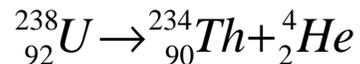
Viele Isotope (sowohl natürlich vorkommende als auch künstlich hergestellte) sind **instabil** und zerfallen mit einer charakteristischen **Halbwertszeit** unter Aussendung **radioaktiver Strahlung**. Dabei wird unterschieden zwischen  **$\alpha$ -  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung**.

- **$\alpha$ -Strahlung:**

Aussenden eines  **$\alpha$ -Teilchens: Helium Kern**  ${}^4_2\text{He}$ . Hierbei **verringert** sich die **Massenzahl A um 4** und die **Ordnungszahl Z um 2** gemäß



Beispiel Zerfall von Uran-238:



- **$\beta$ -Strahlung:**

Aussenden eines **Elektrons** ( $\beta^-$ ) oder **Positrons** ( $\beta^+$ ). Diese werden im Kern erzeugt durch **Umwandlung eines Neutrons in ein Proton bzw umgekehrt:**

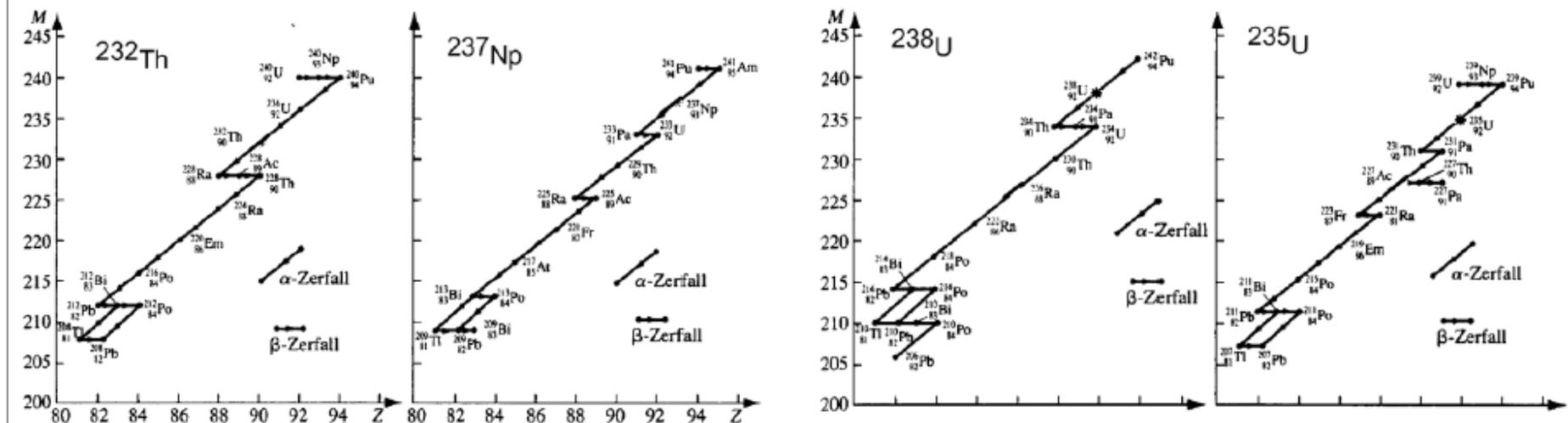


Die **Massenzahl ändert sich** beim  $\beta$ -Zerfall **nicht**, die **Kernladungszahl Z erhöht** bzw **erniedrigt** sich um **1**.



# $\alpha$ -Zerfallreihen

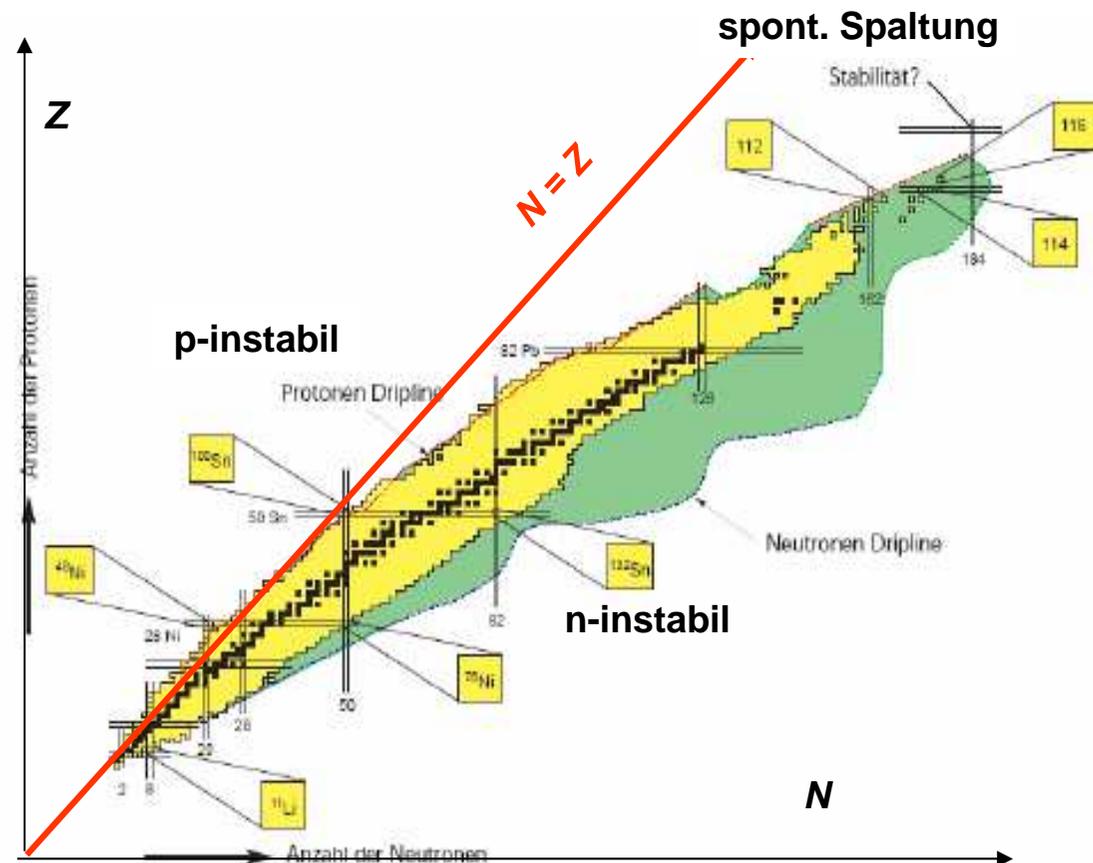
$A$	Reihe	Mutterkern	$t_{1/2}$
$4n$	Thorium	$^{232}\text{Th}$	$1,40 \cdot 10^{10}$ a
$4n + 1$	Neptunium	$^{237}\text{Np}$	$2,14 \cdot 10^6$ a
$4n + 2$	Uranium	$^{238}\text{U}$	$4,47 \cdot 10^9$ a
$4n + 3$	Aktinium	$^{235}\text{U}$	$7,04 \cdot 10^8$ a





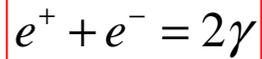
# Stabilität von Kernen

- schmales Band stabiler Kerne
- $Z=N$  leichte K.
- $Z < N$  schwere K.
- Energiegewinnung durch Spaltung und Fusion
- keine stabilen Kerne  $A > 209$



## Radioaktivität 2

- Bemerkung zur  $\beta^+$ -Strahlung: Die Positronen (Antimaterie!) reagieren sehr schnell mit den Elektronen der Materie und **zerstrahlen** gemäß

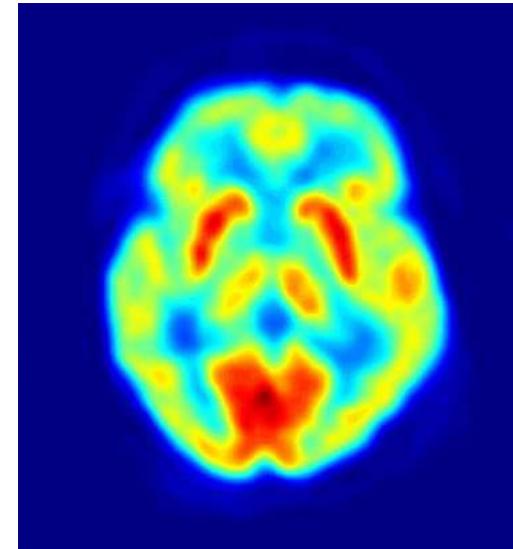


Dieser Effekt wird in der **Positronen-Emissions-Tomographie (PET)** zur Lokalisierung des Emissionsorts benutzt.



PET-Einrichtung (links)

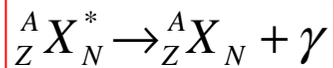
Bild eines PET-scans des menschlichen Gehirns (rechts)



- **$\gamma$ -Strahlung**: Angeregte Kerne gehen unter Aussendung von  $\gamma$ -Strahlung in einen niedrigeren Energiezustand über. (Analog zu Elektronen in der Atomhülle: Röntgenstrahlung).

Oft in nach  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Zerfall.

Das Isotop bleibt dasselbe, es ändert sich weder die Massen- noch die Kernladungszahl.



## Exponentielles Zerfallsgesetz

- Radioaktiver Zerfall ist ein rein **statistischer Prozess**. Man kann nicht sagen, wann genau ein bestimmter Kern  $x$  zerfällt. Man kann aber die Wahrscheinlichkeit angeben, mit der innerhalb eines Zeitintervalls ein Kern zerfällt. Daraus ergibt sich das **exponentielle Zerfallsgesetz** für die zum Zeitpunkt  $t$  noch vorhandenen Kerne, wenn zum Zeitpunkt  $T=0$   $N_0$  Kerne vorhanden waren.

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

mit  $N_0$  :Anzahl der Kerne zum Zeitpunkt  $t = 0$

$N(t)$  : Anzahl der Kerne zum Zeitpunkt  $t$

$\lambda$  : die für das Isotop charakteristische Zerfallskonstante

Wichtige Größe: Die **Halbwertszeit**: Zeit, nach der noch die Hälfte der ursprünglichen Kerne vorhanden ist.

Es gilt:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Die **Aktivität  $A$**  eines radioaktiven Präparats bezeichnet die Zahl der Zerfälle pro Zeiteinheit.

Achtung:  $A$  wird mit der Zeit kleiner!

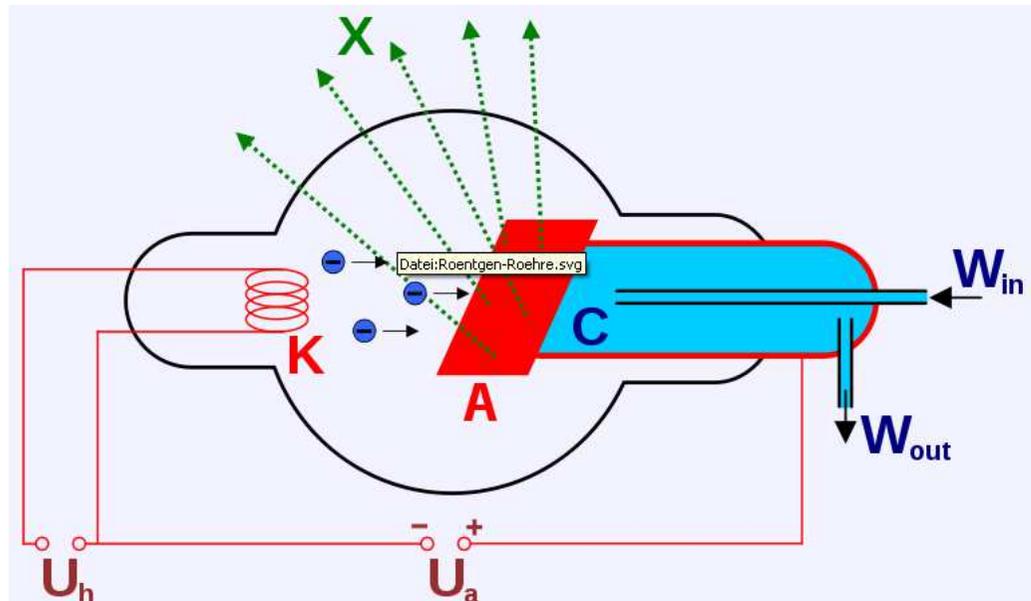
$$A(t) = \left| \frac{dN}{dt} \right| = N(t) \cdot \lambda = \lambda \cdot N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{mit SI - Einheit } [A] = 1 \text{ Bequerel (Bq)} = 1 \text{ s}^{-1}$$

alte Einheit Curie (Ci) :  $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$

# Röntgenstrahlung

Funktionsweise einer **Röntgenröhre**:

- Heizstrom setzt in evakuierter Röhre Elektronen aus **Glühkathode** frei.
- **Beschleunigung der Elektronen** auf dem Weg von Kathode zu **Anode**:  $e \cdot U = \frac{1}{2} m v^2$
- Abbremsen beim Auftreffen auf die Anode.
- **Ablenkung im Coulomb-Feld der Kerne**: Zentrifugalbeschleunigung  
 → **Abstrahlung von Röntgenstrahlen!** (Beschleunigte Ladungen strahlen elektromagnetische Wellen ab, siehe vorletzte Vorlesung).



**Hohe Anodenspannung: typisch 100 kV**

## Röntgenstrahlung II

Die in der Röntgenröhre emittierten Röntgenquanten haben ein **kontinuierliches Spektrum**. Die **maximale Frequenz bzw. minimale Wellenlänge** wird erreicht, wenn die gesamte kinetische Energie eines Elektrons an ein Röntgenquant abgegeben wird.

$$\text{Es gilt also: } E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 = eU \quad \text{und} \quad E_{kin} = E_{\gamma}^{\max} = h \cdot f_{\max}$$

$$\rightarrow f_{\max} = \frac{eU}{h} \rightarrow \lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\max}} = \frac{ch}{eU}$$

### Erhöhung der Anodenspannung:

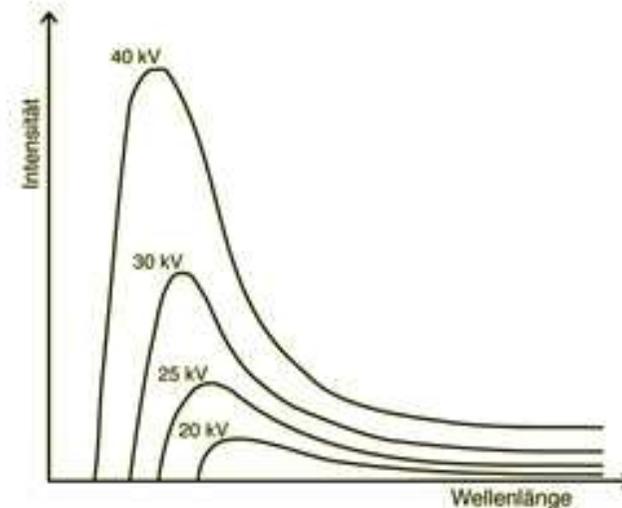
- Erhöhung der **Intensität** der Röntgenstrahlung
- **Verschiebung zu kleineren Wellenlängen**.  
→ Strahlung wird **energiereicher** und damit **durchdringungsfähiger**

### Erhöhung des Heizstroms:

- Nur höhere **Intensität**

### Charakteristische Röntgenstrahlung:

Wenn beschleunigte Elektronen Elektronen aus den inneren (Atom)-Bahnen herausstoßen, fallen Elektronen aus den höheren Bahnen nach. → Die Energiedifferenz wird als  $\gamma$ -Quant abgestrahlt. → **charakteristisches Linienspektrum** für das Anodenmaterial.



Intensität der Strahlung einer Röntgenröhre in Abhängigkeit von der Wellenlänge bei verschiedenen Beschleunigungsspannungen

## Röntgenstrahlung in der Medizin

Röntgenbilder beruhen auf der **unterschiedlichen Absorption von Röntgenstrahlen** in Knochen im Vergleich zu umgebendem Gewebe.

Grund: Der **hohe Kalzium-Anteil in Knochen**. Ca ( $Z=20$ ) absorbiert Röntgenstrahlen wesentlich stärker als Elemente mit kleinerem  $Z$  wie z.B. H ( $Z=1$ ), C ( $Z=6$ ), O ( $Z=8$ ), die im Gewebe schwerpunktmäßig vorkommen.

Röntgenbilder sind also **Schatten** und keine optischen Abbildungen.

Es gibt übrigens keine optischen Röntgenlinsen, die die Bilder verbessern: Der Brechungsindex  $n$  ist ca 1 für Röntgenstrahlen für alle Materialien.

Historische Aufnahme einer Hand mit Ring  
(Röntgen, 23. Januar 1896)





## Wechselwirkung von Teilchen- und $\gamma$ -Strahlung mit Materie

**Geladene Teilchen** ( $\alpha$ -,  $\beta$ -Teilchen) verlieren ihre Energie hauptsächlich durch **Anregung und Ionisation der Moleküle** der Materie. Energieverlust in vielen kleinen Schritten

### **Reichweite in Gewebe:**

$\alpha$ -Teilchen (4 MeV): nur 30  $\mu\text{m}$ !

$\beta$ -Teilchen (2 MeV): 10mm

**Neutronen** wechselwirken mit der Materie über **Kernreaktionen**. Die dabei entstehenden geladenen Teilchen ionisieren anschließend die Materie.

# Exponentielles Schwächungsgesetz für $\gamma$ -Strahlung

Beim Durchgang durch Materie wird die **Intensität** der  $\gamma$ -Strahlung geschwächt gemäß

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

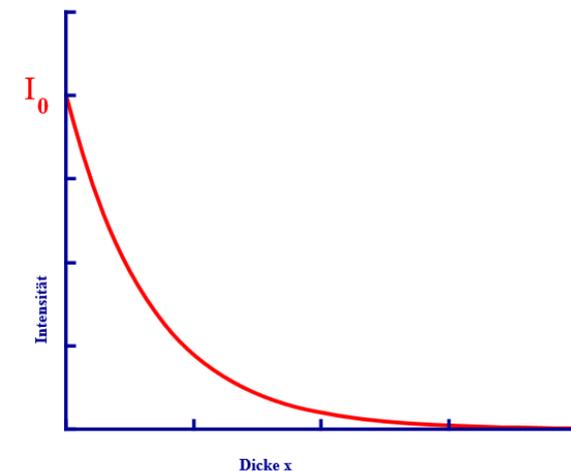
Dabei ist  $I_0$  die Anfangsintensität

$x$  die Schichtdicke

$\mu$  der Absorptionskoeffizient -  $\mu$  ist abhängig von der  $\gamma$ -Energie, bzw.  $Z$  und Dichte des absorbierenden Materials.

Beispiele für **Halbwertsdicken** (Materialdicke, nach der die Intensität auf die Hälfte abgeschwächt ist).

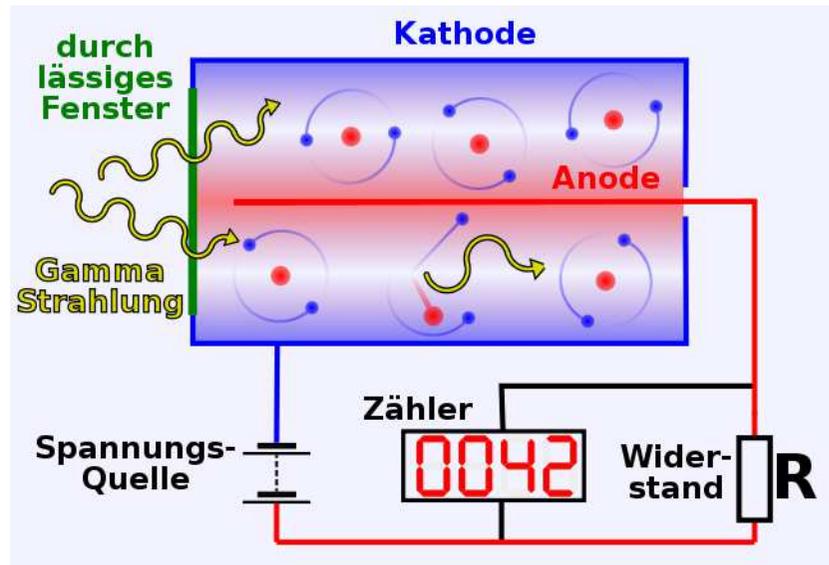
	Blei	Wasser ~Gewebe
100 keV Röntgenstrahlung	0.1mm	40mm
1 MeV $\gamma$ - Strahlung	10mm	100mm



# Nachweis von Teilchen und $\gamma$ -Strahlung

Nachweis von  $\gamma$ -Quanten mit den gleichen Detektoren wie für geladene Teilchen: Zunächst Erzeugung von Elektronen durch Photoeffekt, Comptoneffekt, Paarbildung. Diese sekundären Elektronen **ionisieren** dann das **Füllgas**, etc.

## Geiger-Müller- Zähler



Die **Dosimetrie** beschreibt die Wirkung von Quanten- oder Teilchenstrahlung auf Materie (den Organismus). Eine Reihe von Größen sind hierfür von Bedeutung:

Energiedosis

$$D = \frac{\text{absorbierte Energie}}{\text{Masse der Bestrahlten Materie}}$$

$$\text{Einheit [D]} = 1 \frac{J}{kg} = 1 \text{ Gray (Gy) veraltet: } 1 \text{ Rad} = 0.01 \text{ Gy}$$

Die **Wirkung** der verschiedenen Strahlungsarten auf den **Organismus** ist **unterschiedlich**.  **$\alpha$ -Teilchen** und durch Neutronenreaktionen erzeugte Sekundärteilchen **verlieren viel Energie auf kurzem Wege**, richten also viel Schaden auf kleinem Raum ein.

Folge: Die Reparaturmechanismen des Körpers funktionieren nicht mehr so gut, die Strahlung hat eine höhere **relative biologische Wirksamkeit RBW**.

Um diese höhere relative biologische Wirksamkeit zu berücksichtigen, wird die **Äquivalentdosis**  $H = q \cdot D$  eingeführt.

$$\text{Einheit [H]} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 1 \text{ Sievert (Sv)} \quad \text{veraltet : } 1 \text{ rem} = 0.01 \text{ Sv}$$

**q-Werte:**

Röntgen-, $\gamma$ -Strahlung	: 1
$\beta$ -Strahlung	: 1
$\alpha$ -Strahlung	: 20
Neutronen	: 2-10

Die pro Zeiteinheit absorbierte Dosis ist die **Äquivalentdosisleistung**  $dH/dt$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\text{absorbierte Äquivalentdosis}}{\text{Zeiteinheit}} \quad \text{Einheit} \left[ \frac{dH}{dt} \right] = 1 \frac{\text{Sv}}{\text{s}}$$

Mögliche **Wirkungen von ionisierender Strahlung: Zellschädigung. Veränderung von Genen. Auftreten von Karzinomen und Mutationen.** Zellen können **inaktiv** werden.

Problem: Statistische Prozesse. **Schon ein  $\gamma$ -Quant oder Teilchen kann Schädigung hervorrufen.** In dem Sinne gibt es keine absolut unbedenkliche Dosis.

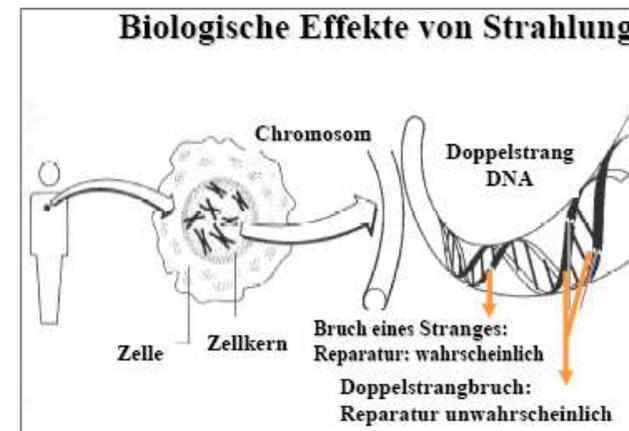
Allerdings: Die Strahlenbelastung durch natürliche Ursachen (z.B. kosmische und terrestrische Strahlung) ist im Mittel 2.5 mSv/Jahr.

Hinzu kommt im Mittel 1.5 mSv/Jahr durch künstliche Quellen (hauptsächlich Röntgendiagnostik)

Allgemein sollte man beim Umgang mit Strahlungsquellen (z.B. radioaktiven Präparaten oder auch einer Röntgenquelle) folgende **drei Grundsätze** des Strahlenschutzes beachten:

- **Abstand** halten: Dosis nimmt mit  $1/r^2$  ab
- **Aufenthaltsdauer** kurz halten: Dosis ist proportional zur Expositionszeit
- **Abschirmung**: Strahlung kann durch Absorption in Materie stark geschwächt werden.

Bsp. **Bleischürze beim Röntgen**



# Grenzwerte im Strahlenschutz



**Tabelle der Dosisgrenzwerte (mSv pro Kalenderjahr)**

Organ *)	Beruflich strahlenexponierte Personen	Bevölkerung
Ganzkörper	20 mSv	1 mSv
Augenlinse	150 mSv	15 mSv
Haut	500 mSv	50 mSv
Keimdrüsen, Gebärmutter, rotes Knochenmark	50 mSv	-
Schilddrüse, Knochenoberfläche	300 mSv	-
Lunge, Magen, Blase	150 mSv	-

\*) Weitere Organe siehe Strahlenschutzverordnung § 55

Der Dosisgrenzwert für die Bevölkerung wurde auf der Grundlage der Schwankungsbreite der natürlichen Strahlung ohne Radonexposition in Höhe von 1 mSv pro Kalenderjahr festgelegt.

<http://www.bfs.de/DE/themen/ion/strahlenschutz/grenzwerte/grenzwerte.html>

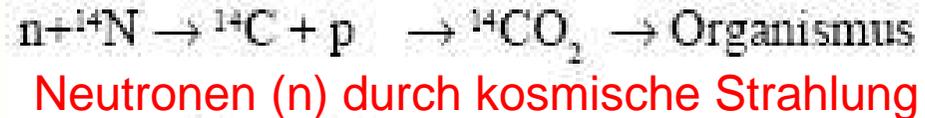
# Kernphysikalische Anwendungen: $^{14}\text{C}$ -Methode

## $^{14}\text{C}$ Datierungsmethode:

für organische Materialien (Holz, Knochen, Zähne, Muscheln, Pflanzen)



### • Atmosphäre



### • Zerfall: ${}^{14}\text{C} \rightarrow {}^{14}\text{N} + e^- + \nu$

Atmosphäre  $A_0 = {}^{14}\text{C}/{}^{12}\text{C} = \text{konstant}$

kein Austausch:  $A(t) = A_0 \exp(-\lambda t)$

$$t = 1/\lambda \ln(A_0/A)$$

$$\lambda = \ln 2 / t_{1/2}, t_{1/2} = 5730 \text{ Jahre}$$

### • 1946 Willard Libby (Nobelpreis 1960)

W.F. Libby  
Nobelpreis in Chemie  
1960



In Atmosphäre:  $n + {}^{14}\text{N} \rightarrow p + {}^{14}\text{C}$

Altersbestimmung aus  ${}^{14}\text{C}/{}^{12}\text{C}$  Verhältnis.

Beispiele: Ötzi 3350-3100 BC

Turiner Grabtuch Christi 14. Jahrhundert





# Zusätzliche Folien nicht prüfungsrelevant



## Wechselwirkung von $\gamma$ -Strahlung mit Materie: Details

**Röntgen- und  $\gamma$ -Strahlung** (Photonen) wechselwirken mit Materie hauptsächlich über folgende **drei Prozesse**. Welcher überwiegt ist energieabhängig.

**Photoeffekt:** Stoß des  $\gamma$ -Quants mit einem Hüllenelektron. Das Hüllenelektron bekommt dabei die kinetische Energie

**Compton-Effekt:** Streuung des  $\gamma$ -Quants an einem Hüllenelektron. Ein Teil der Energie des  $\gamma$ -Quants geht als kinetische Energie auf das Elektron über

**Paarbildung:** Wenn die Energie des  $\gamma$ -Quants  $W > 2m_e c^2$  kann aus einem  $\gamma$ -Quant ein **Elektron-Positron-Paar** entstehen.

Die bei den oben genannten Prozessen entstehenden Elektronen ionisieren dann weiter die absorbierende Materie.



## Nachweis von Teilchen und $\gamma$ -Strahlung

Hier werden die vorher erwähnten Eigenschaften der primären oder sekundären geladenen Teilchen genutzt, Materie zu ionisieren und anzuregen.

**Ionisationskammern:** Plattenkondensator oder **dünnere Draht in metallischem Rohr, darin Gas**. Durch Ionisation werden Elektron-Ion Paare erzeugt, die im elektrischen Feld der Kammer beschleunigt werden und dann zu den Elektroden gelangen  $\rightarrow$  Messung eines **Stromimpulses**, der abhängt von der **Intensität** und **Art** der einfallenden Strahlung. Direkte Messung der Ionendosis.

**Geiger-Müller-Zählrohr:** Erhöhung der angelegten Spannung sorgt dafür, dass die Elektronen so weit beschleunigt werden, dass sie selbst durch Stöße Gasatome ionisieren  $\rightarrow$  **Elektronenlawine**. Vervielfachung der ursprünglichen Ladung. Strom nicht mehr proportional zur Intensität der Strahlung. Geeignet als **Zähler** für die primären Ionisationsereignisse.

Des Weiteren:

**Szintillationszähler:** Szintillierende Materialien werden beim Durchgang von ionisierender Strahlung zum Leuchten angeregt. Empfindliche Photomultiplier wandeln dann die kleinen Lichtpulse in elektrische Pulse um.

**Halbleiterdetektoren:** Prinzip wie bei Zählrohren, nur mit Festkörper (z.B. Si, Ge) statt Gas.  $\rightarrow$  Wesentlich höhere Ladungsausbeute.

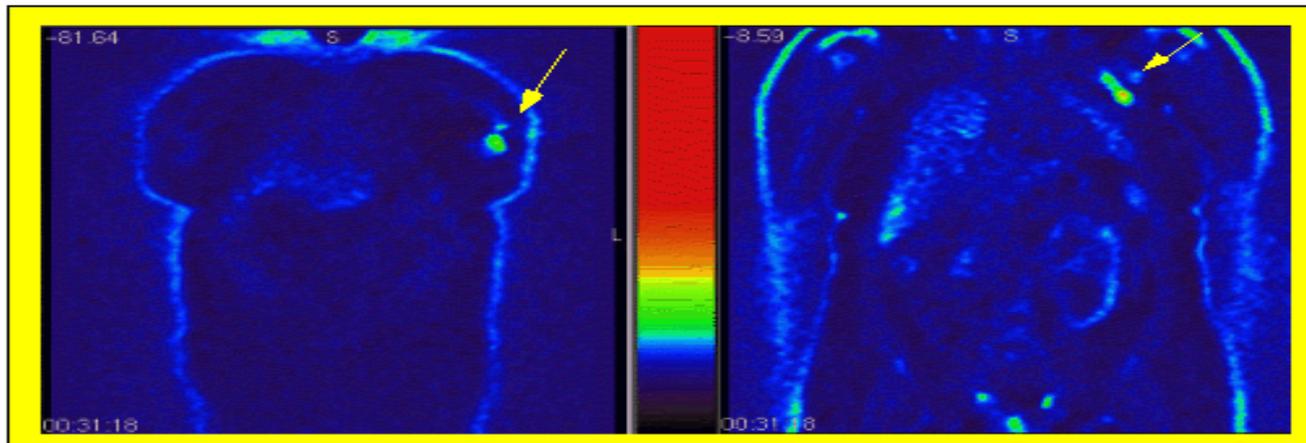
## Künstliche Radioaktive Isotope

Neben natürlich vorkommenden Isotopen können weitere Isotope **künstlich hergestellt** werden durch Beschuss von Atomkernen mit Protonen oder Neutronen. Beispiel: Fluor-18, was in der PET viel verwendet wird.



Funktionsweise PET:

- Injektion des mit  ${}^{18}_9\text{F}$  markierten Pharmazeutikums Fluodeoxyglukose.
- Verstärkte Aufnahme z.B. von Tumoren im Vergleich zum umgebenen, gesunden Gewebe.
- **$\beta^+$ -Zerfall des F** (Halbwertszeit 110 min).
- Positronen vernichten mit Elektronen zu **2 diametral emittierten  $\gamma$ -Quanten von jeweils 511 keV.**  
→ Bildrekonstruktion!
- Vorteil solcher künstlicher Isotope ist auch ihre oftmals kurze Lebensdauer → Minimierung der Strahlenbelastung des Organismus.

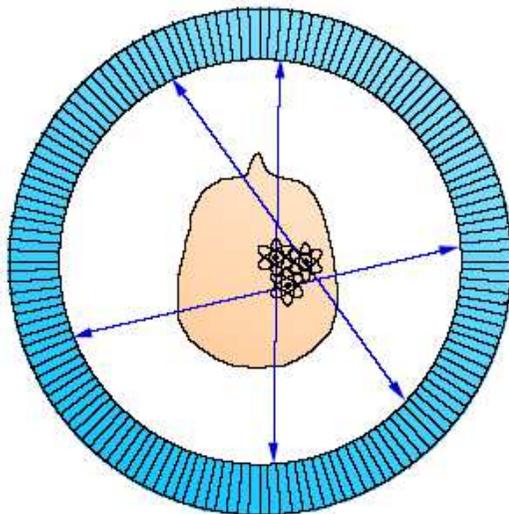


# Diagnose mit PET (Positron-Emission-Tomographie)

- Patient erhält Medikament, das  $e^+$ -Strahler enthält
- Medikament sammelt sich an Ort mit hohem Metabolismus bzw. nicht an abgestorbenem Gewebe
- $e^+e^-$  Vernichtung in 511keV Photonen
- Rekonstruktion der „**Vernichtungsorte**“

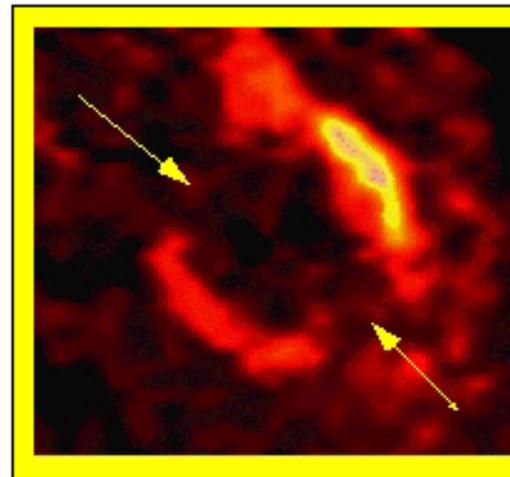
## PET Parameter:

- 30cm  $\emptyset$  (Kopf)
- 50cm  $\emptyset$  (Körper)
- 500 Detektoren (BGO-Kristalle)
- Kosten: einige M\$

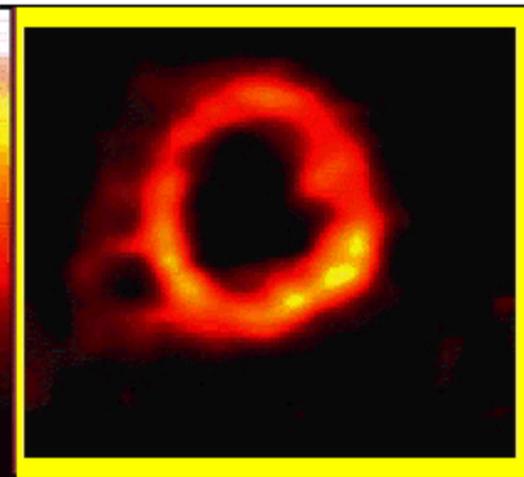


WS 2017/18

nach Herzattacke



gesundes Herz



PET (Pfeile) zeigt, dass Grund für die Herzattacke „totes“ myocardiales Gewebe ist → eine **Herzoperation kann da nicht helfen**

—————→ Mittlere Strahlendosis / Jahr: 2 - 4 mSv

---

**Kosmische Strahlung:** 0.3 mSv/Jahr

(abhängig von der Höhe des Ortes, z.B. 3000 m Höhe  
3.0 mSv/Jahr)

**Terrestrische Strahlung:** 0.5 mSv/Jahr

(abhängig von der Bodenbeschaffenheit; z.B. Wien 0.8  
mSv/Jahr;

Brasilianische Atlantikküste 87 mSv/Jahr;

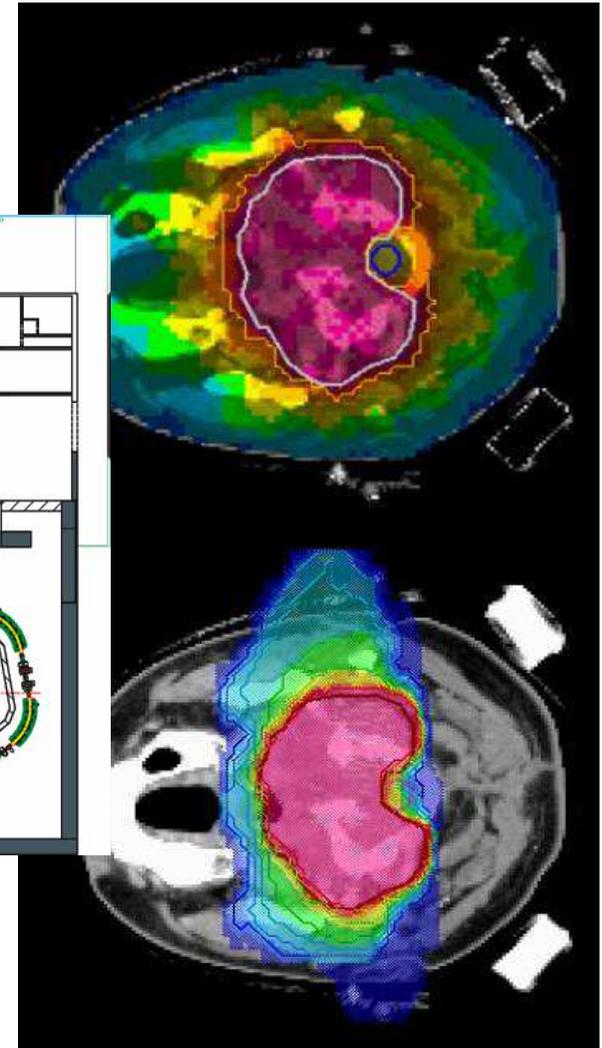
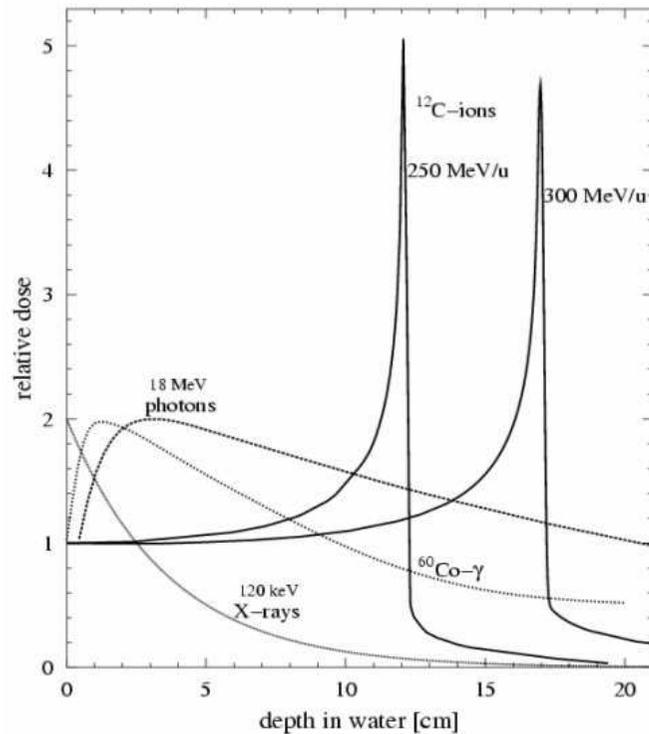
Kerala, Indien 26 mSv/Jahr)

**Aufnahme von natürlichen radioaktiven Stoffen,**  
insbesondere Radon: 1.6 mSv/Jahr

**Künstliche Strahlendosis:** 1.6 mSv (hauptsächlich  
medizinisch bedingt 1.5 mSv, Rest Fallout, ...)

## Weitere Anwendungen: Tumorthherapie mit geladenen Teilchen

- Energieverlust von Teilchen: C gibt Großteil der Energie am Ende der Reichweite ab
- **gezielte Bestrahlung Krebs, geringere Schädigung des gesunden Gewebes**



- Tumore z.T. 100% geheilt – Neue Anlage am DKFZ-Heidelberg (für 2000 Patienten/Jahr)