

Vorlesung

Radiologie

Physikalische Grundlagen – Teil 2

Dr. Claude Krantz

Marburger Ionenstrahl-Therapiezentrum

26. Oktober 2017

---

# Inhalt

Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

Grundprinzipien des Strahlenschutzes

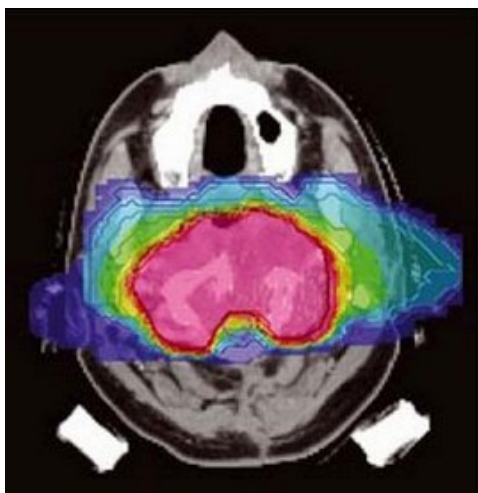
Dosisbegriffe, Messung von Strahlung

# Einleitung

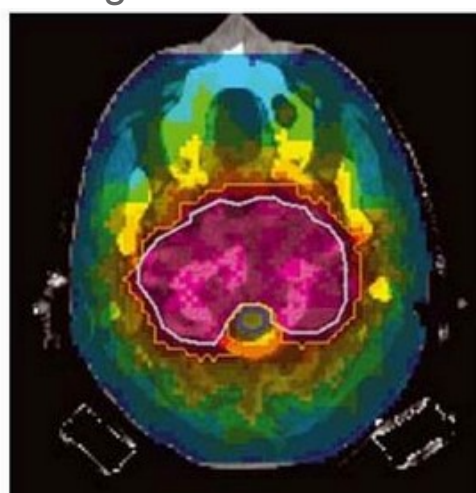
varian.com



Schwere Ionen



Röntgenstrahlen

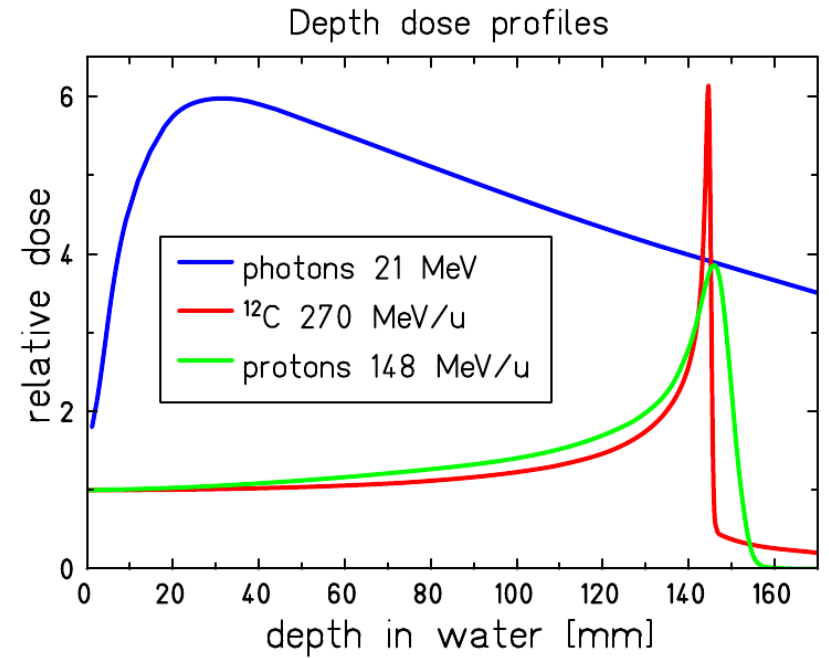


## Strahlentherapie mit Photonen (Röntgenstrahlung) und Ionen (“Partikelstrahlung”)

Abtöten bösartigen Gewebes durch  
hohe Dosen ionisierender Strahlung

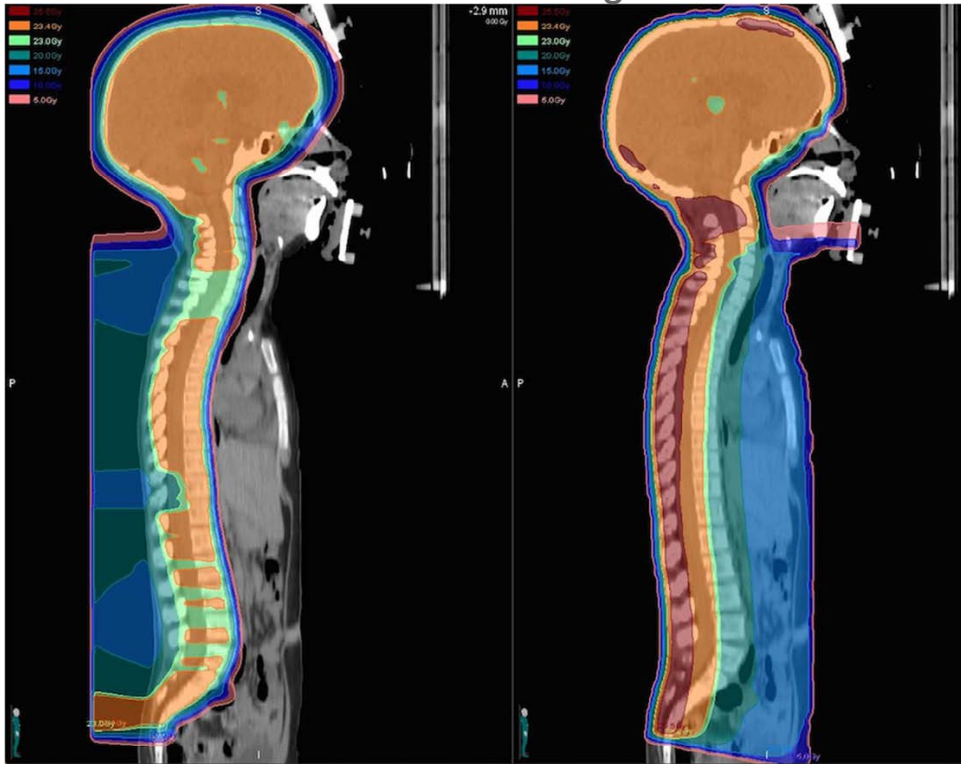
Eine Anwendung technischer  
Strahlungsquellen

O. Jäkel, GSI



Schwere Ionen

Röntgenstrahlen



## Strahlentherapie mit Photonen (Röntgenstrahlung) und Ionen ("Partikelstrahlung")

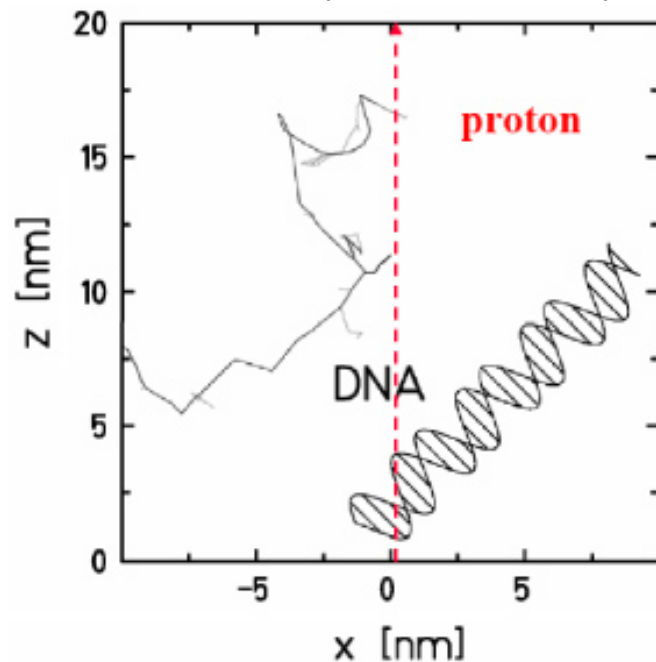
Gesundes Gewebe muss nach Möglichkeit geschont werden.



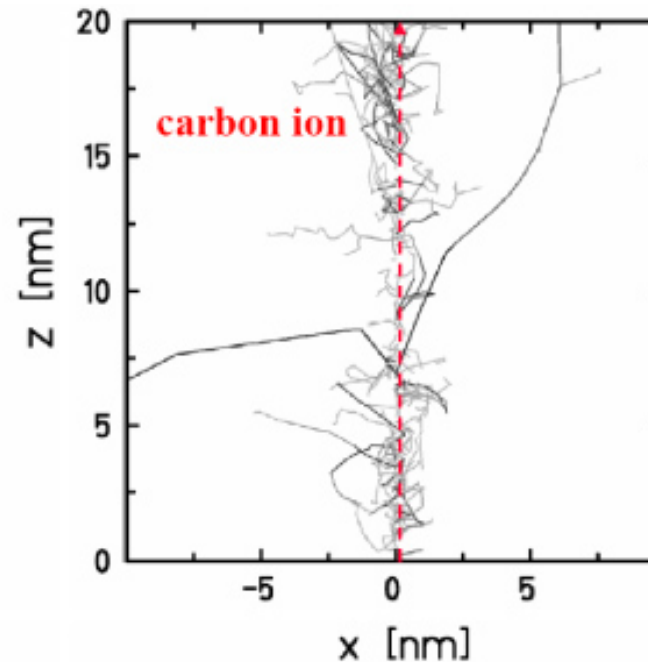
Unterschiedliche Teilchenarten haben unterschiedliche *“Biologische Wirksamkeit”*.

→ Details der *Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie* (hier: Gewebe) sind wichtig!

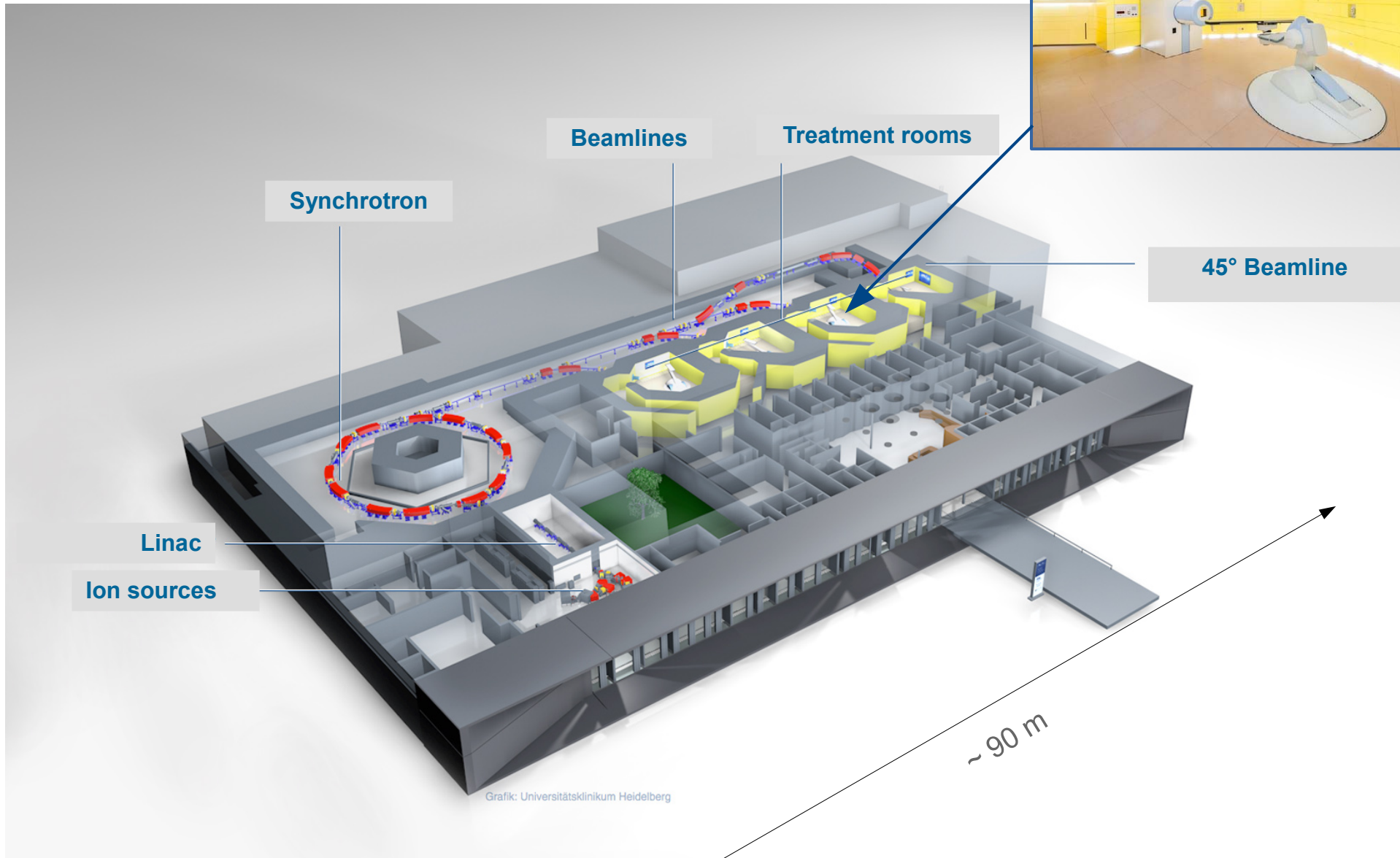
Protonen („leichte Ionen“)



C-Kerne („schwere Ionen“)

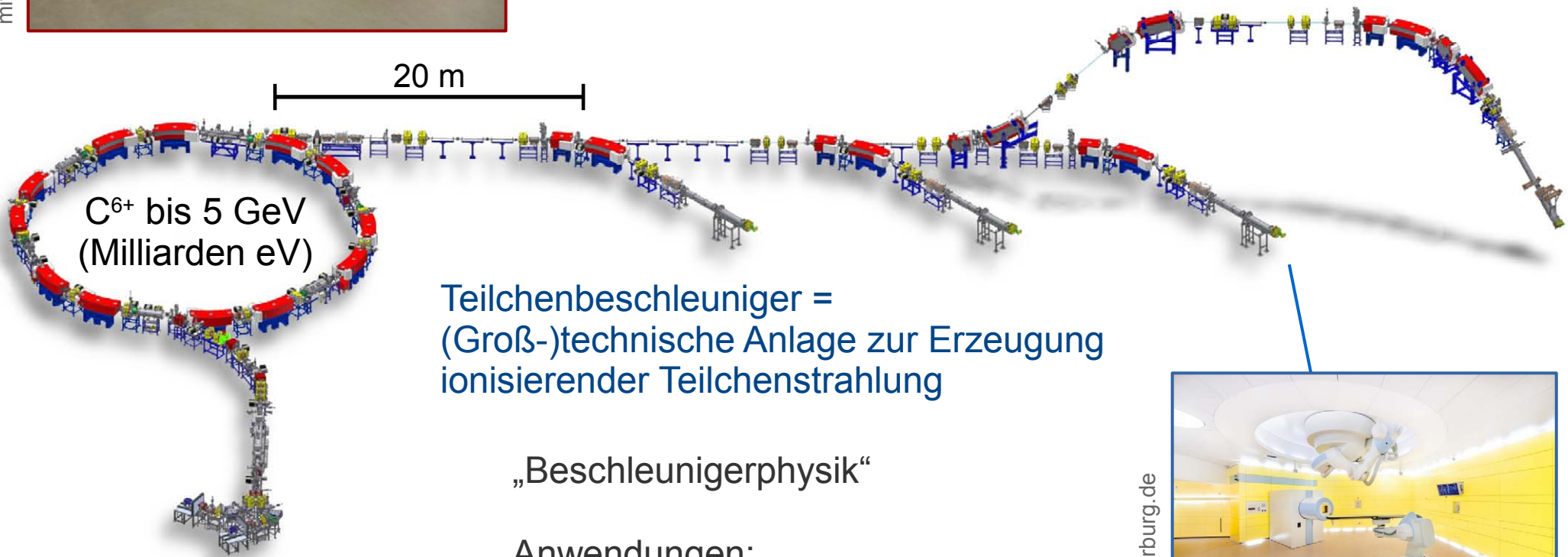


# Marburger Ionenstrahl-Therapiezentrum



www.mit-marburg.de

# Teilchenbeschleuniger



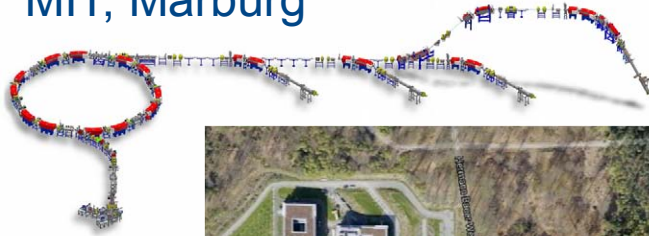
Lazarev et al., Proc. of IPAC 2011  
Scheeler et al., Proc. of IPAC 2016



Ionenbeschleuniger,  $\sim 0.4$  GeV/u, Umfang 65 m

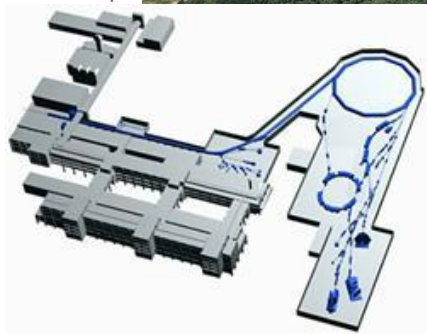
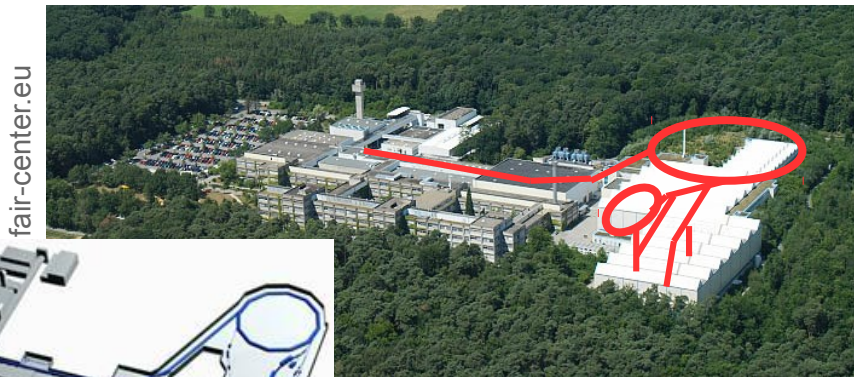


# MIT, Marburg



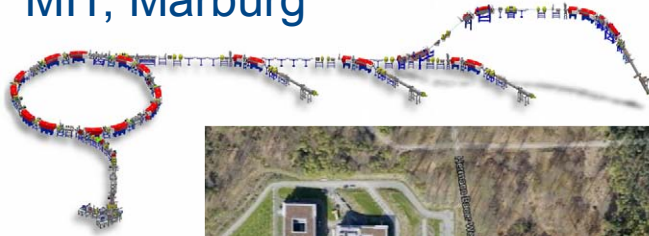
Ionenbeschleuniger,  $\sim 0.4$  GeV/u, Umfang 65 m

# SIS18 (GSI), Darmstadt



Ionenbeschleuniger,  $\sim 2$  GeV/u, Umfang 216 m

# MIT, Marburg



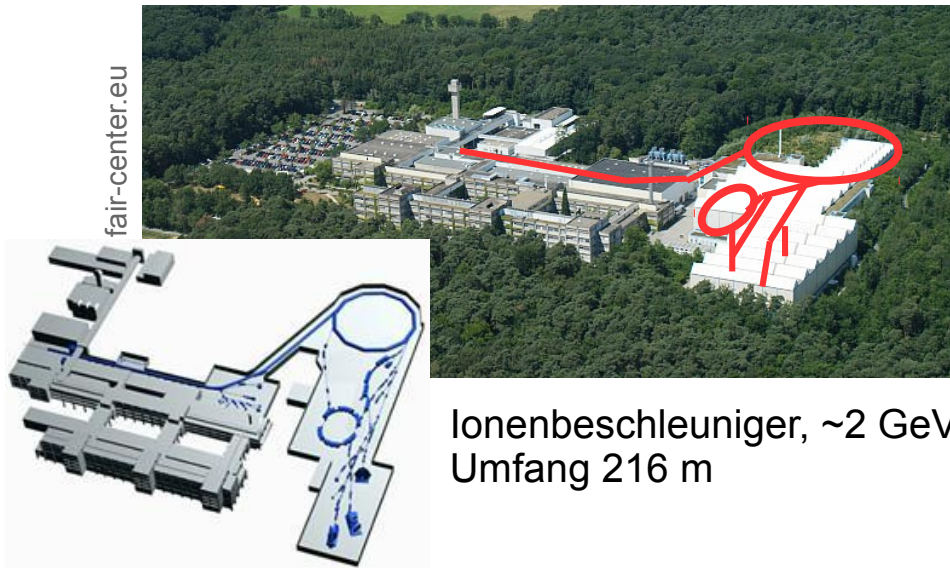
Ionenbeschleuniger,  $\sim 0.4$  GeV/u, Umfang 65 m

# PETRA III (DESY), Hamburg



Elektronenbeschleuniger, 6 GeV, Umfang  $\sim 2,3$  km

# SIS18 (GSI), Darmstadt



Ionenbeschleuniger,  $\sim 2$  GeV/u, Umfang 216 m

# MIT, Marburg



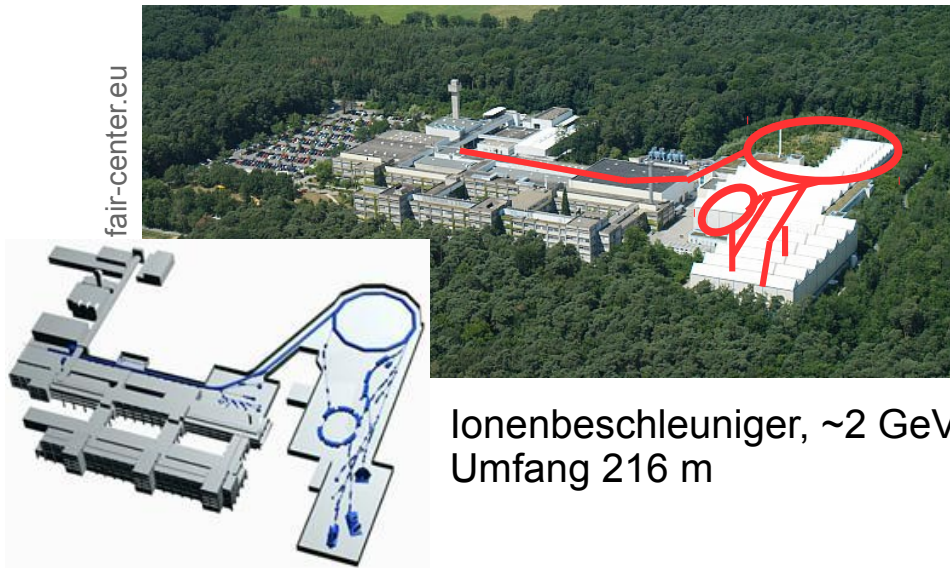
Ionenbeschleuniger, ~0.4 GeV/u, Umfang 65 m

# PETRA III (DESY), Hamburg



Elektronenbeschleuniger, 6 GeV, Umfang ~ 2,3 km

# SIS18 (GSI), Darmstadt

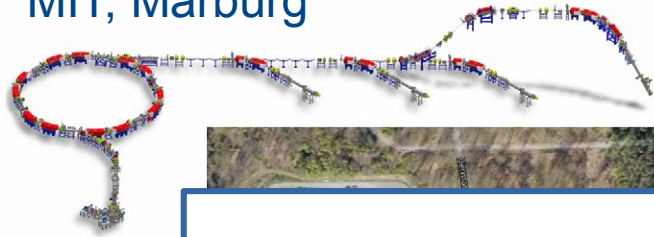


Ionenbeschleuniger, ~2 GeV/u, Umfang 216 m

# Large Hadron Collider (CERN), Genf



Ionenbeschleuniger, 6500 GeV (p), Umfang 27 km



## Wichtiges Thema:

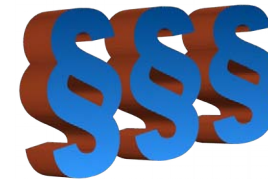
**Strahlenschutz:** Schutz der Bevölkerung und der Mitarbeiter vor schädlichen Auswirkungen ionisierender Strahlung.

Gesetzlicher Rahmen bis September 2017:

Atomgesetz (AtG)

→ Strahlenschutzverordnung (StrSchV)

→ Röntgenverordnung (RöV)



Aktuell: Übergang (bis Ende 2018) zu

Atomgesetz (AtG)

Strahlenschutzgesetz (StrSchG)

← Erste Bestimmungen seit Okt. 2017 in Kraft, übrige (z.B. bzgl. med. Diagnostik) ab Ende 2018.

2,3 km

enf

cern.ch

Umfang 27 km

Ionen

SIS18

fair-center.eu



# Inhalt

Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

Grundprinzipien des Strahlenschutzes

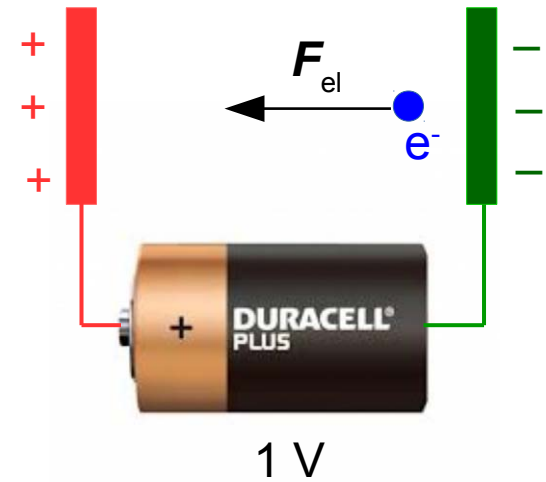
Dosisbegriffe, Messung von Strahlung

# Bereits gesehen ...

Geeignete Einheit der Energie: eV („Elektronvolt“)

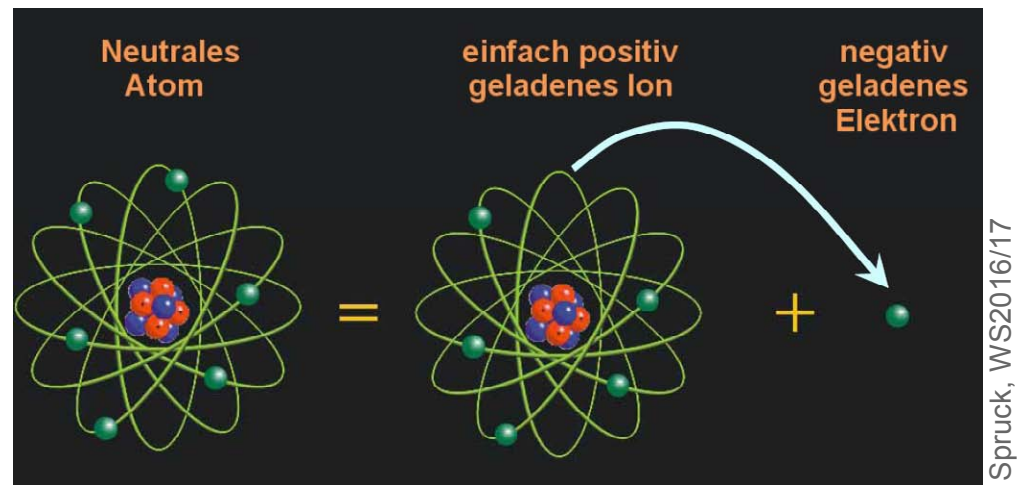
Kinetische Energie ( $\sim \frac{1}{2} m v^2$ ) eines Elektrons, das mit einer elektrischen Spannung von 1 V beschleunigt wurde.

$$1 \text{ eV} \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$



Energie, die zur Ionisation eines Atoms benötigt wird („Ionisationsschwelle“):  $\sim 5$  bis  $15$  eV

z.B. Einfachionisation eines Kohlenstoffatoms:

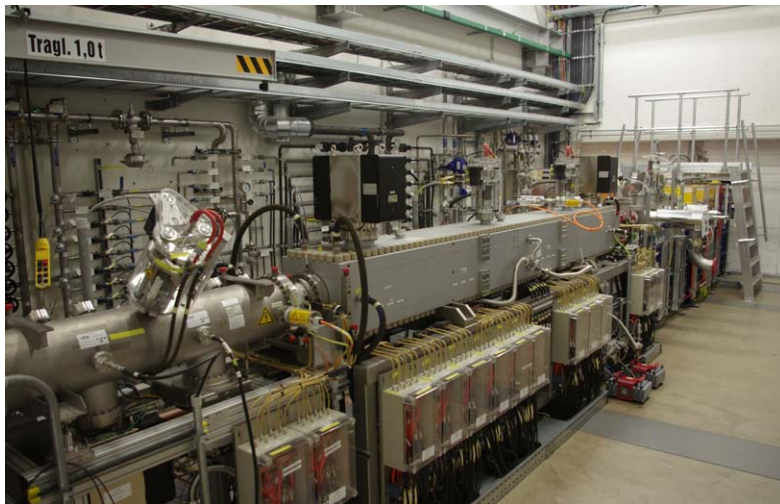
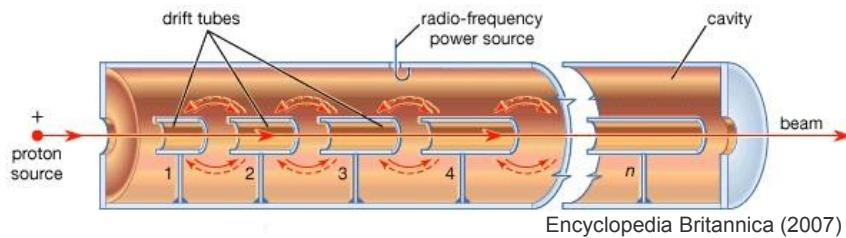


# Bereits gesehen ...

Oft haben wir es mit Strahlung zu tun, deren Teilchenenergien im **keV-** oder **MeV-Bereich** liegen!

(1 Kilo-Elektronvolt = 1000 eV, 1 Mega-Elektronvolt = 1000 keV = 1000000 eV)

z.B.: Protonenbeschleuniger: 7 MeV



Radiofrequenz-Vorbeschleuniger des MIT

$\alpha$ -Zerfall von Am-241: 5,4 MeV



$^{241}\text{Am}$ -Quelle aus einem Ionisations-Rauchmelder.

# Bereits gesehen ...

Es gibt unterschiedliche Arten von ionisierender Strahlung!

Schwere, geladene Teilchen

z.B.  $\alpha$ -Strahlung oder Kernspaltung radioaktiver Stoffe,  
Ionen aus Beschleunigeranlagen

Leichte, geladene Teilchen

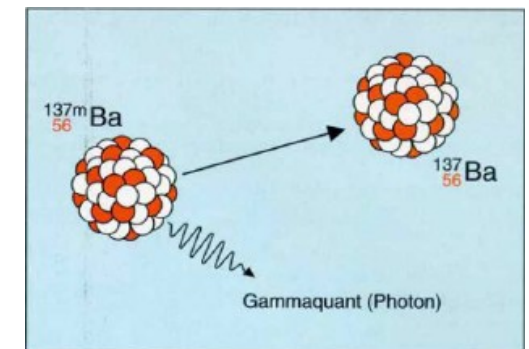
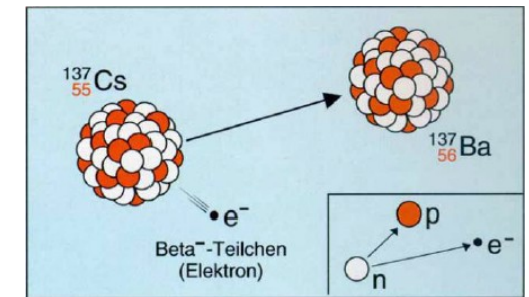
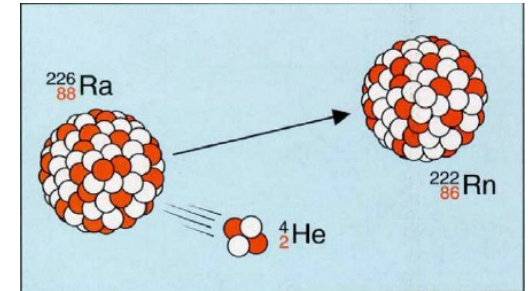
z.B. Elektronen oder Positronen aus  $\beta^-$  oder  $\beta^+$ -Zerfällen,  
Elektronen aus Beschleunigeranlagen

Hochfrequente elektromagnetische Strahlung (Photonenstrahlen)

z.B.  $\gamma$ -Strahlung aus radioaktiven Zerfällen,  
Röntgenstrahlung aus Elektronenröhren

**Achtung:** Auch hier redet man oft von „ $\gamma$ -Quanten“  
(s. Welle-Teilchen-Dualismus)!

Schwere, ungeladene Teilchen  
Neutronen aus Kernreaktionen.





# Bereits gesehen ...

Es gibt unterschiedliche Arten von ionisierender Strahlung!

Schwere, geladene Teilchen

z.B.  $\alpha$ -Strahlung oder Kernspaltung radioaktiver Stoffe,  
Ionen aus Beschleuniger

Leichte, geladene Teilchen

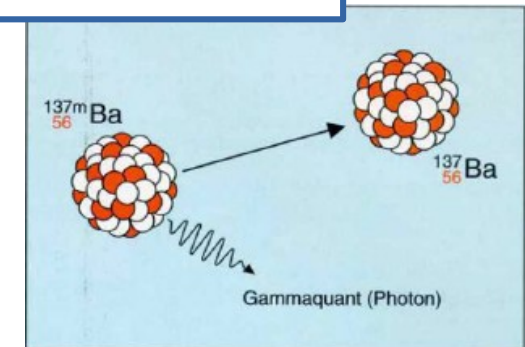
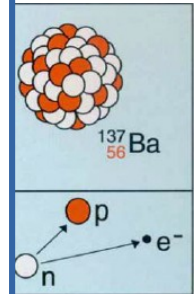
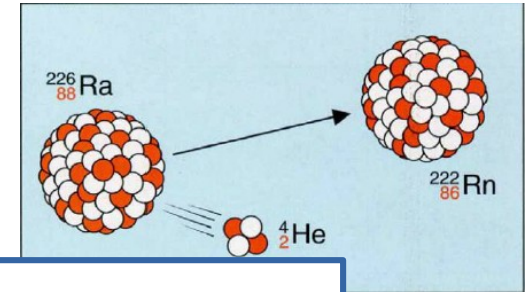
z.B. Elektronen oder Positronen  
Elektronen aus Beschleuniger

Hochfrequente elektromagnetische Strahlung (Photonen)

z.B.  $\gamma$ -Strahlung aus radioaktiven Zerfällen,  
Röntgenstrahlung aus Elektronenröhren

**Achtung:** Auch hier redet man oft von „ $\gamma$ -Quanten“  
(s. Welle-Teilchen-Dualismus)!

Die Wechselwirkung mit Materie hängt stark von der Art der Strahlung ab!



Schwere, ungeladene Teilchen  
Neutronen aus Kernreaktionen.

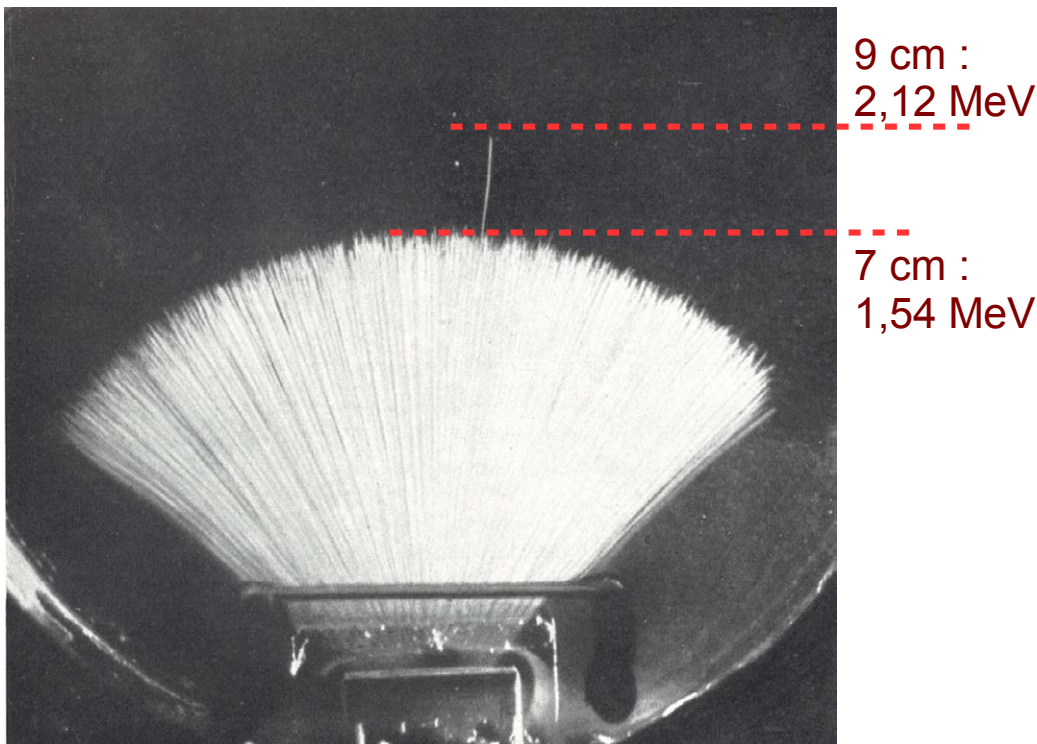
# Schwere geladene Teilchen in Materie

Träge Masse                    Masse eines Nukleons oder mehr:  $\geq 1 \text{ u}$  ( $1 \text{ u} = 1/12 m_C$ )

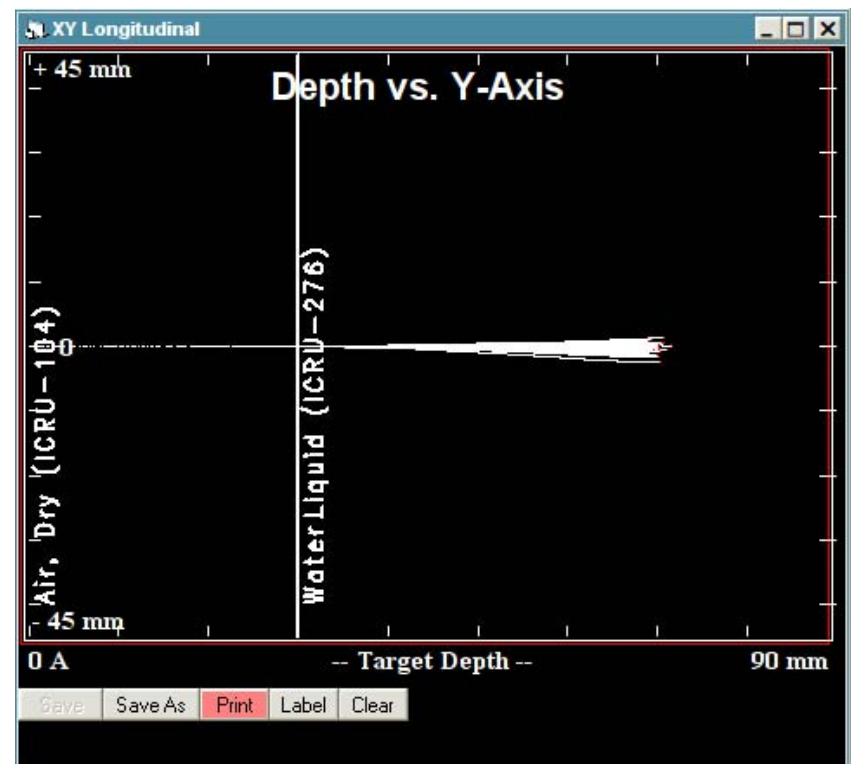
Elektrische Ladung        Eine oder mehrere **Elementarladungen (e)**

Beobachtung:                Teilchen werden in einem Medium (fest, flüssig oder gasförmig) **nur wenig abgelenkt**, und stoppen nach einer bestimmten **Reichweite**.

Alpha-Teilchen aus  $^{214}\text{Po}$  in Nebelkammer



70-MeV-Protonen in Wasser (SRIM-Simulation)



Ziegler, Nucl. Instrum. Methods B 219-220 (2004) 1027

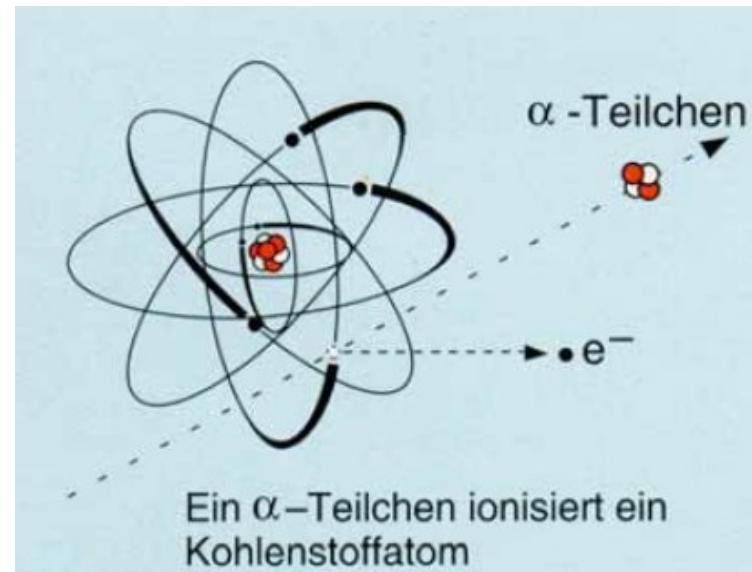
# Schwere geladene Teilchen in Materie

Teilchen wechselwirken über ihre **elektrische Ladung** mit den Atomen des Materials

Beim Durchfliegen der Materie begegnen Sie **hauptsächlich den Elektronen** der „Target“-Atome.

- wiederholte **Ionisation und Anregung** von getroffenen Atomen.
- Da  $\text{Masse}_{\text{Projektil}} \gg \text{Masse}_{\text{Elektron}}$ , ändert sich die **Flugrichtung** kaum.
- Es kommt aber bei jeder Wechselwirkung zu einem **kleinen Energieverlust  $\Delta E$**  des Projektils.

$$\Delta E = E_{\text{vorher}} - E_{\text{nachher}}$$

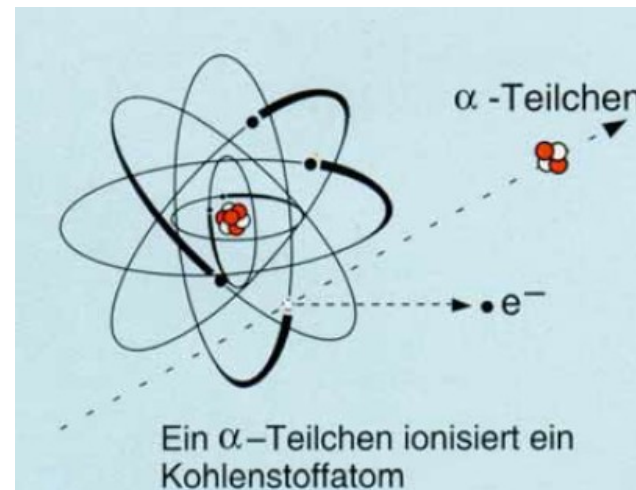
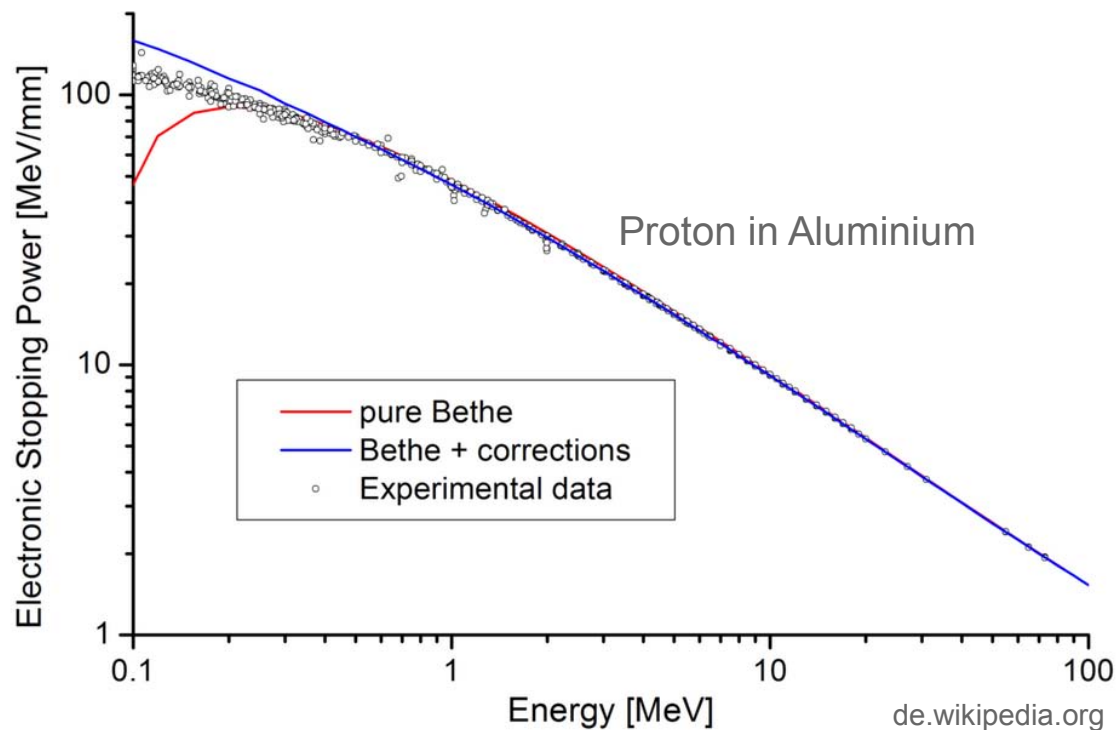


# Schwere geladene Teilchen in Materie

Mathematische Beschreibung:

Energieverlust  $dE$  pro  
(infinitesimaler) Flugstrecke  $dx$

→ „Lineares Bremsvermögen“  $S = dE/dx$   
(engl. „Stopping Power“)



Volkmer, Kernenergie Basiswissen,  
DATF, 2013

Genauere Berechnung mit  
physikalischen Stoßgesetzen zeigt:

$S$  ist am größten bei  
kleiner Projektilenergie  $E$

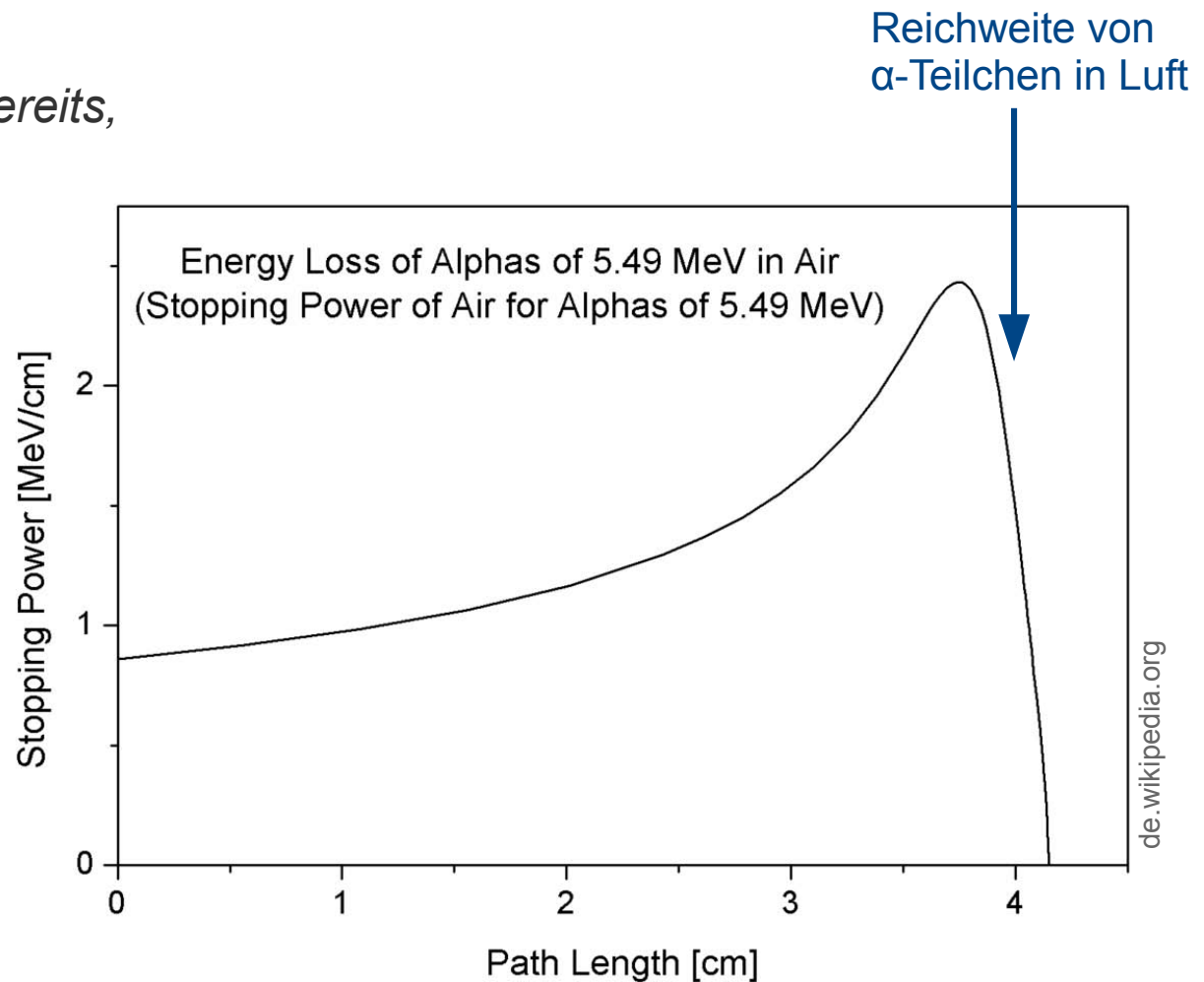
# Schwere geladene Teilchen in Materie

→ *Je mehr Energie das Teilchen bereits, verloren hat, desto größer ist  $S$  und desto schneller verliert es auch die restliche Energie!*

Schwere geladene Teilchen geben den größeren Teil ihrer Energie gegen Ende ihrer Flugstrecke ab.

→ „Bragg'sche Kurve“ oder „Bragg-Peak“

→ Definierte Reichweite bei gegebener Energie.



# Schwere geladene Teilchen in Materie

→ *Je mehr Energie das Teilchen bereits, verloren hat, desto größer ist  $S$  und desto schneller verliert es auch die restliche Energie!*

Schwere geladene Teilchen geben den größeren Teil ihrer Energie gegen Ende ihrer Flugstrecke ab.

→ „Bragg'sche Kurve“ oder „Bragg-Peak“

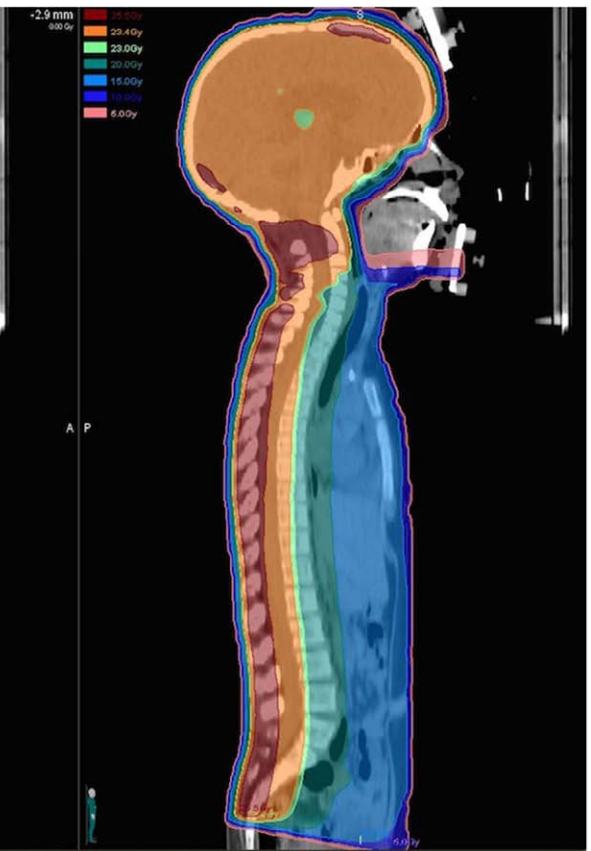
→ Definierte Reichweite bei gegebener Energie.

Schwere Ionen



Eaton et al., Front. Oncol. 5 (2015) 261

Röntgenstrahlen



In der Ionenstrahltherapie macht man sich diese Eigenschaft zunutze, um gesundes Gewebe zu schonen.

# Schwere geladene Teilchen in Materie

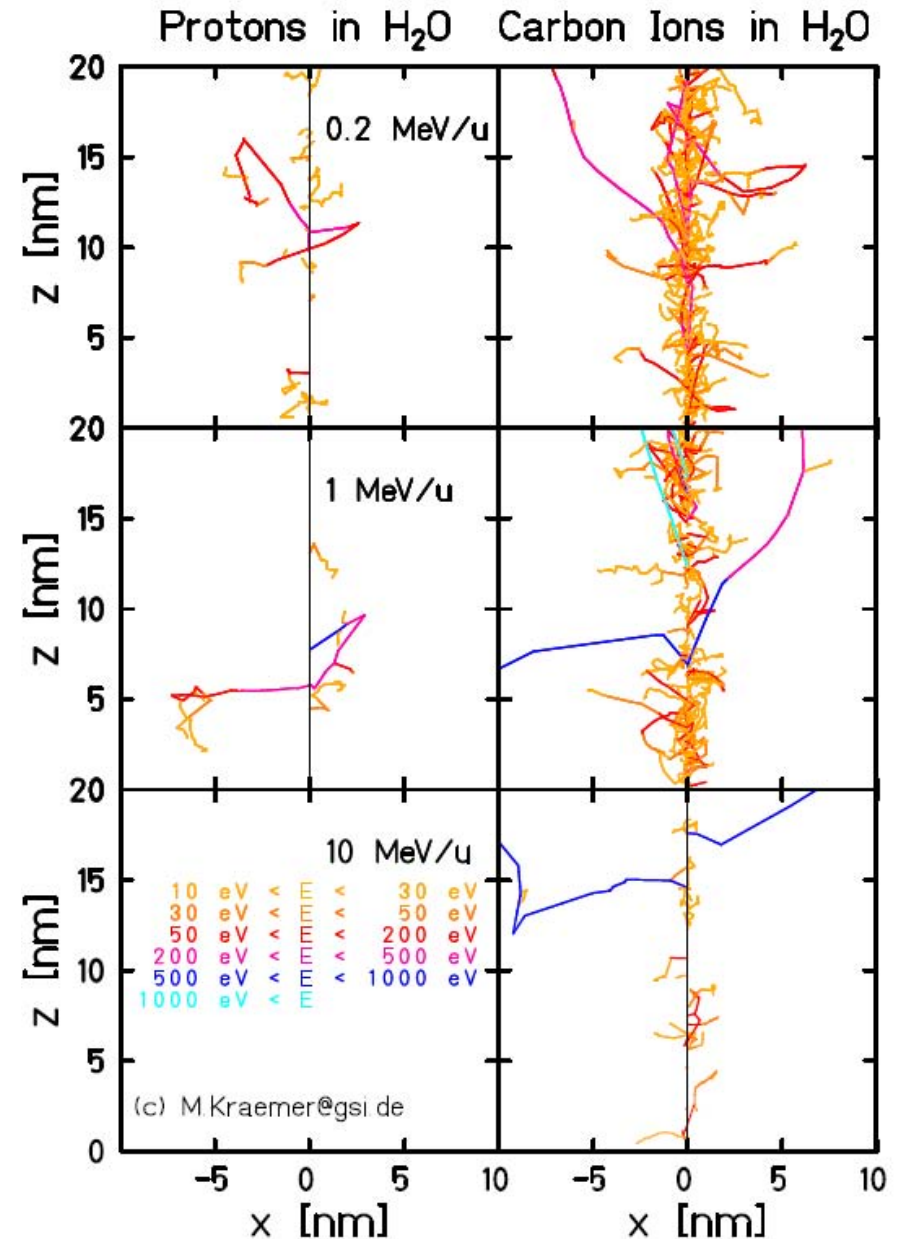
Mikroskopische Bedeutung von  $S = dE/dx$  :

~ Anzahl der Ionisationsereignisse pro zurückgelegter Wegstrecke des schweren Teilchens.

Die Wirkung auf das durchstrahlte Material wird oft als **LET** („Linear Energy Transfer“) bezeichnet.

Wichtig für genaue Berechnungen:

Die erzeugten freien Elektronen („Sekundärelektronen“) können selbst in der Umgebung der Flugbahn weitere Atome ionisieren!



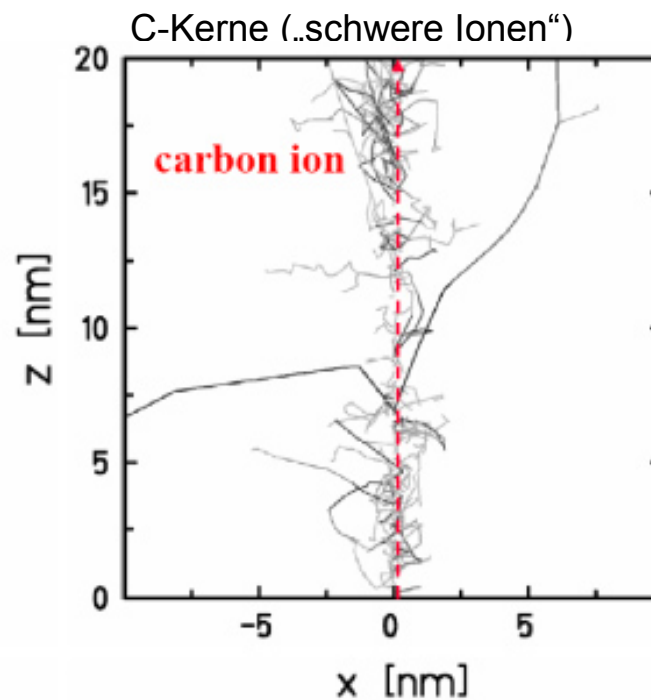
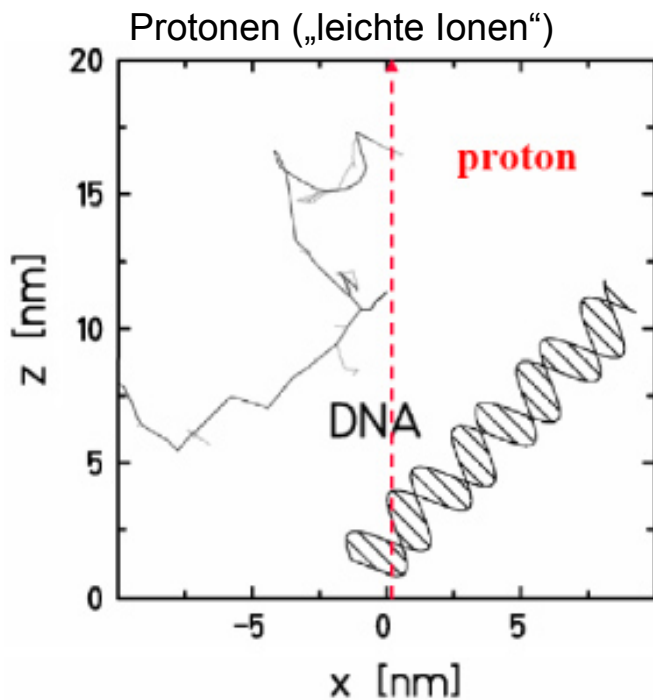
# Schwere geladene Teilchen in Materie

Mikroskopische Bedeutung von  $S = dE/dx$  :

~ Anzahl der Ionisationsereignisse pro zurückgelegter Wegstrecke des schweren Teilchens.

„Locker“ bzw. „dicht“  
ionisierende Strahlung

Die Wirkung auf das durchstrahlte Material wird oft als **LET** („Linear Energy Transfer“) bezeichnet.



## Strahlentherapie:

Dicht ionisierende Strahlung verursacht stärkere Schäden an DNA-Molekülen

→ Vorteile bei „strahlenharten“ Tumoren.



# Leichte geladene Teilchen in Materie

Elektronenstrahlen bestehen aus sehr leichten Teilchen

$$m_e \approx 1/1836 u$$

Dies führt zu **zusätzlichen Effekten** in Vergleich zu schweren geladenen Teilchen.

# Leichte geladene Teilchen in Materie

Elektronenstrahlen bestehen aus sehr leichten Teilchen

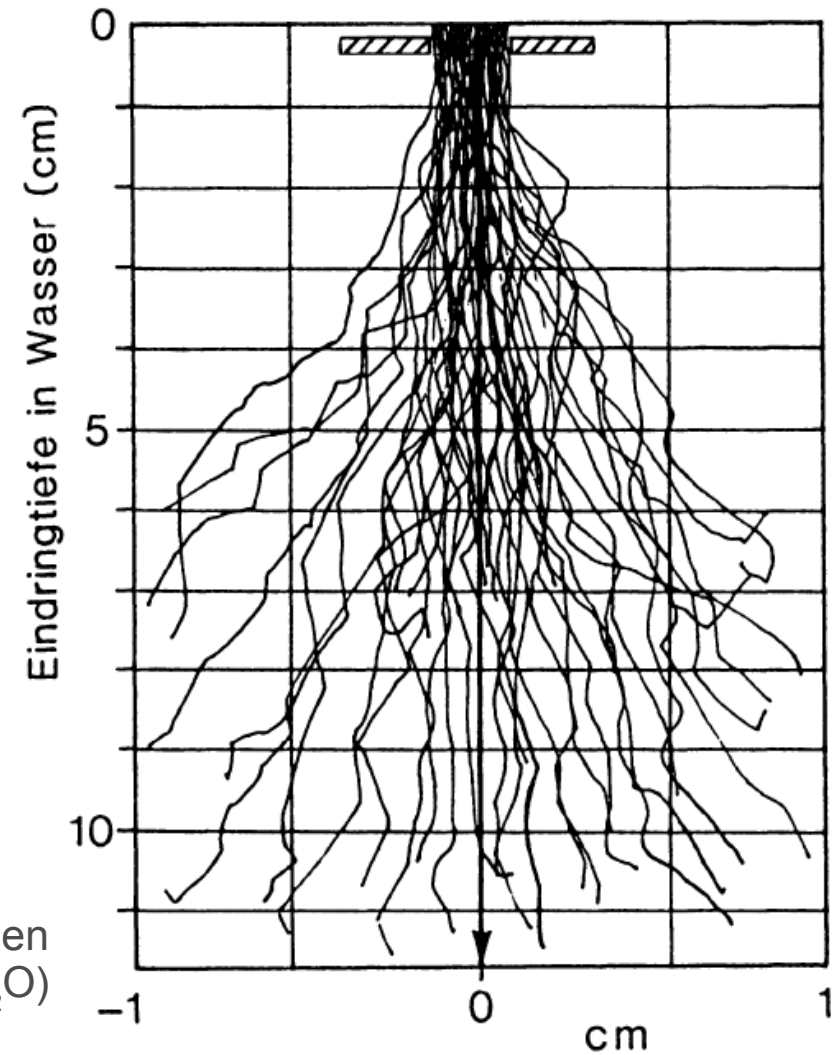
$$m_e \approx 1/1836 u$$

Dies führt zu **zusätzlichen Effekten** in Vergleich zu schweren geladenen Teilchen.

1. Die Elektronen werden beim Zusammenstoß mit Targetatomen stark abgelenkt.

→ Begriff der „Reichweite“ muss nun genau definiert werden.  
(≠ Länge der Spur)

11 MeV Elektronen  
in Wasser (H<sub>2</sub>O)



# Leichte geladene Teilchen in Materie

Elektronenstrahlen bestehen aus sehr leichten Teilchen

$$m_e \approx 1/1836 u$$

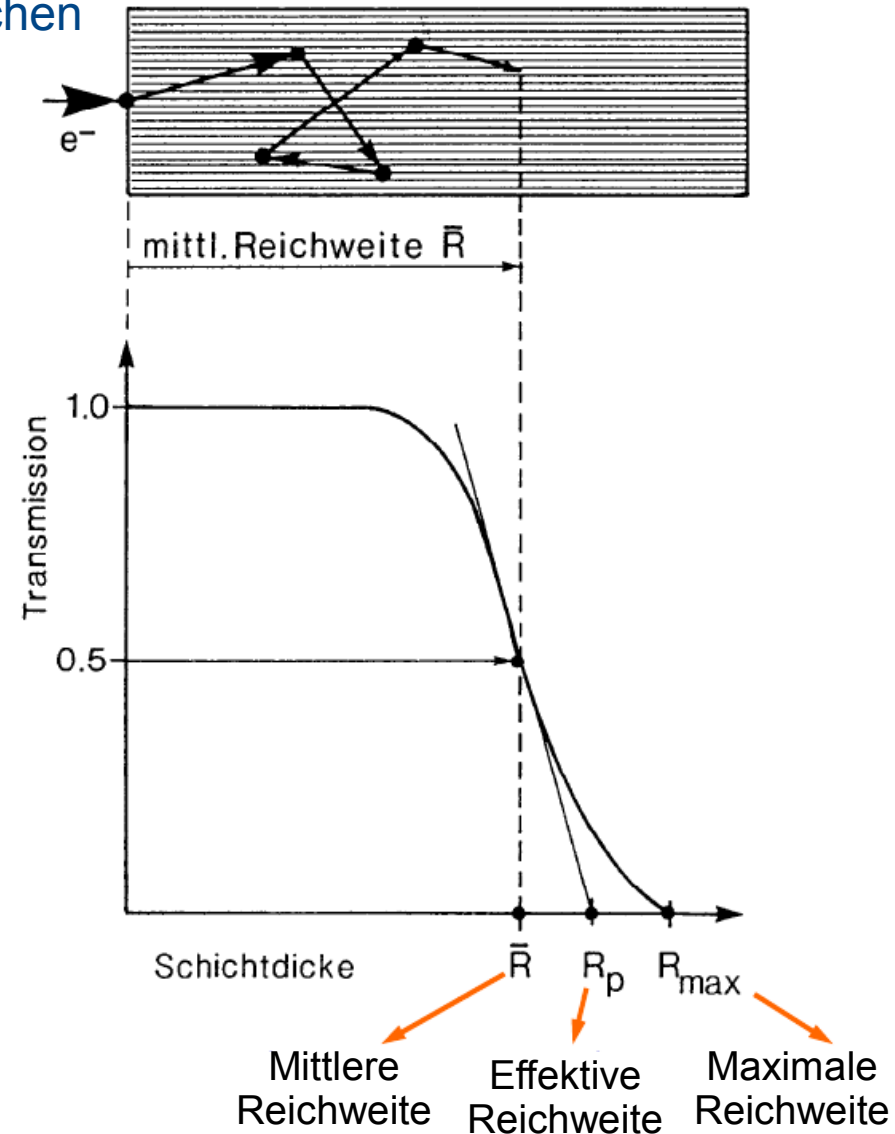
Dies führt zu **zusätzlichen Effekten** in Vergleich zu schweren geladenen Teilchen.

1. Die Elektronen werden beim Zusammenstoß mit Targetatomen stark abgelenkt.

Aus Sicht des Strahlenschutzes ist die **Projektion auf die ursprüngliche Strahlrichtung** sinnvoll.

„Wie viele Teilchen erreichen die Tiefe  $R$ ?“

„Wie dick muss eine Abschirmung sein?“



# Leichte geladene Teilchen in Materie

Elektronenstrahlen bestehen aus sehr leichten Teilchen

$$m_e \approx 1/1836 u$$

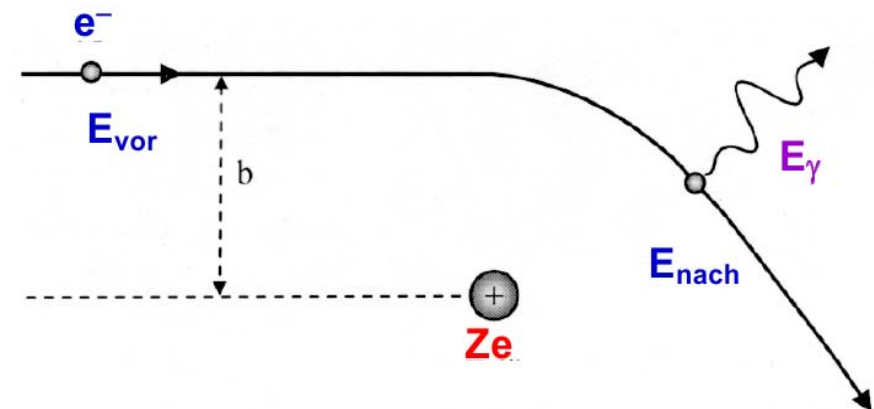
Dies führt zu **zusätzlichen Effekten** in Vergleich zu schweren geladenen Teilchen.

- Bei Annäherung an die Atomkerne des Targetmaterials werden die Elektronen stark beschleunigt, und senden dabei Röntgenstrahlung aus!

Es gilt

$$E_\gamma = E_{\text{vor}} - E_{\text{nach}} = h\nu$$

Man spricht auch von „Bremsstrahlung“.



Beschleunigung = Änderung des Geschwindigkeitsvektors in der Zeit (Ableitung).

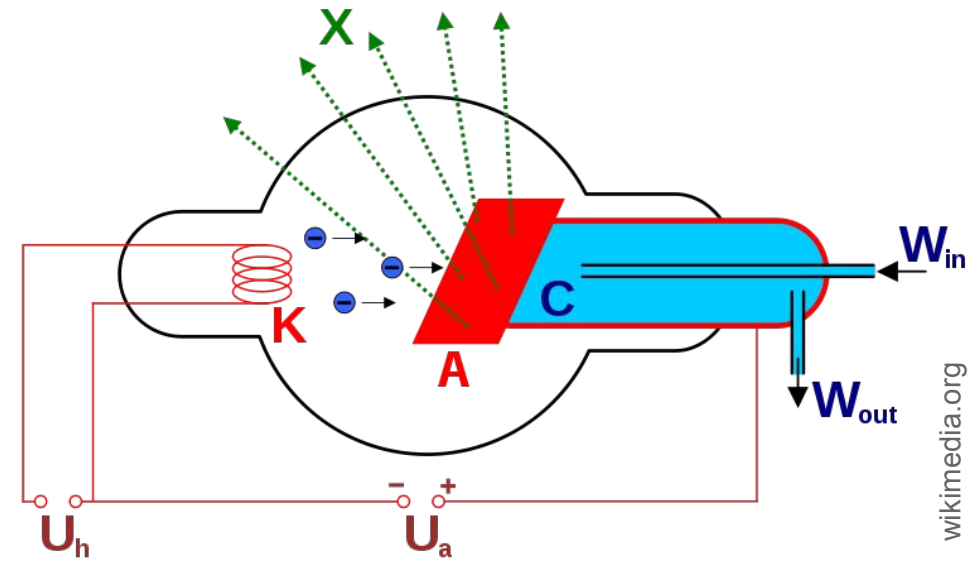
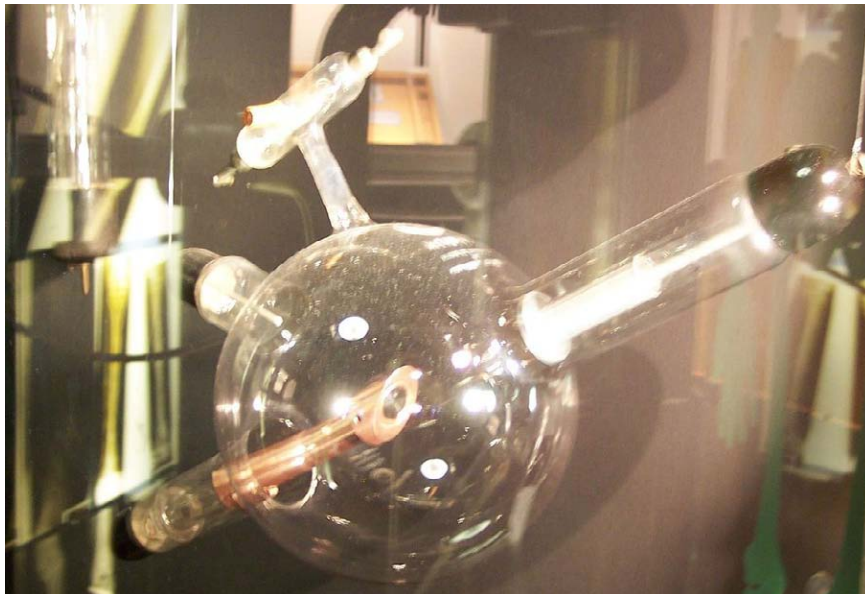
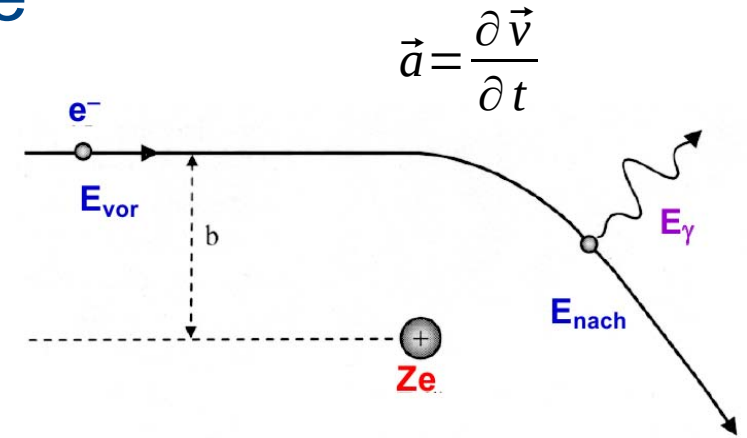
$$\vec{a} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$$

# Leichte geladene Teilchen in Materie

Anwendung der Bremsstrahlung:

Erzeugung von Röntgenstrahlung

Röntgenröhre: Elektronen treffen mit der Energie  $eU_a$  auf eine Anode

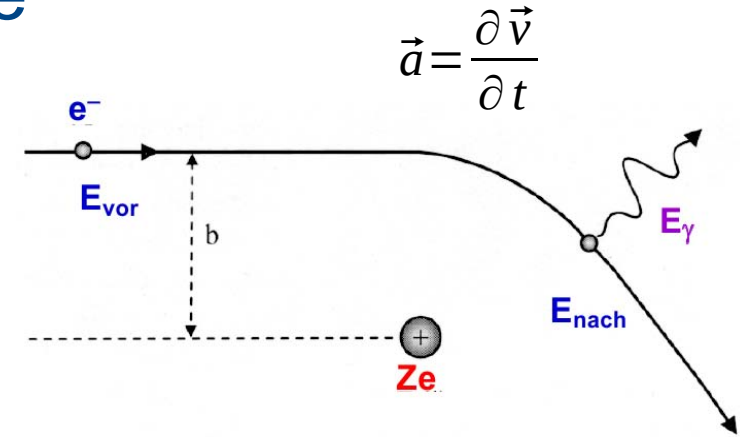


# Leichte geladene Teilchen in Materie

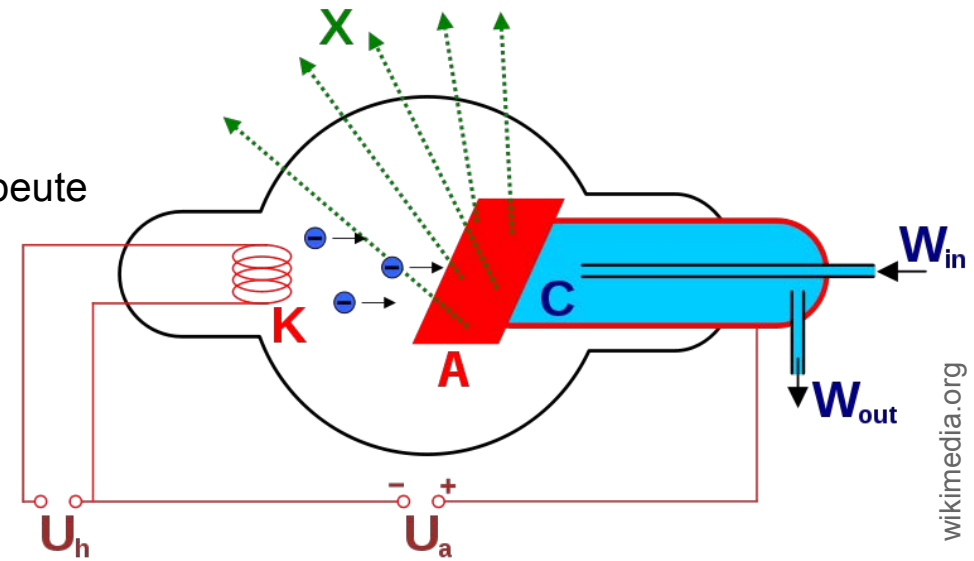
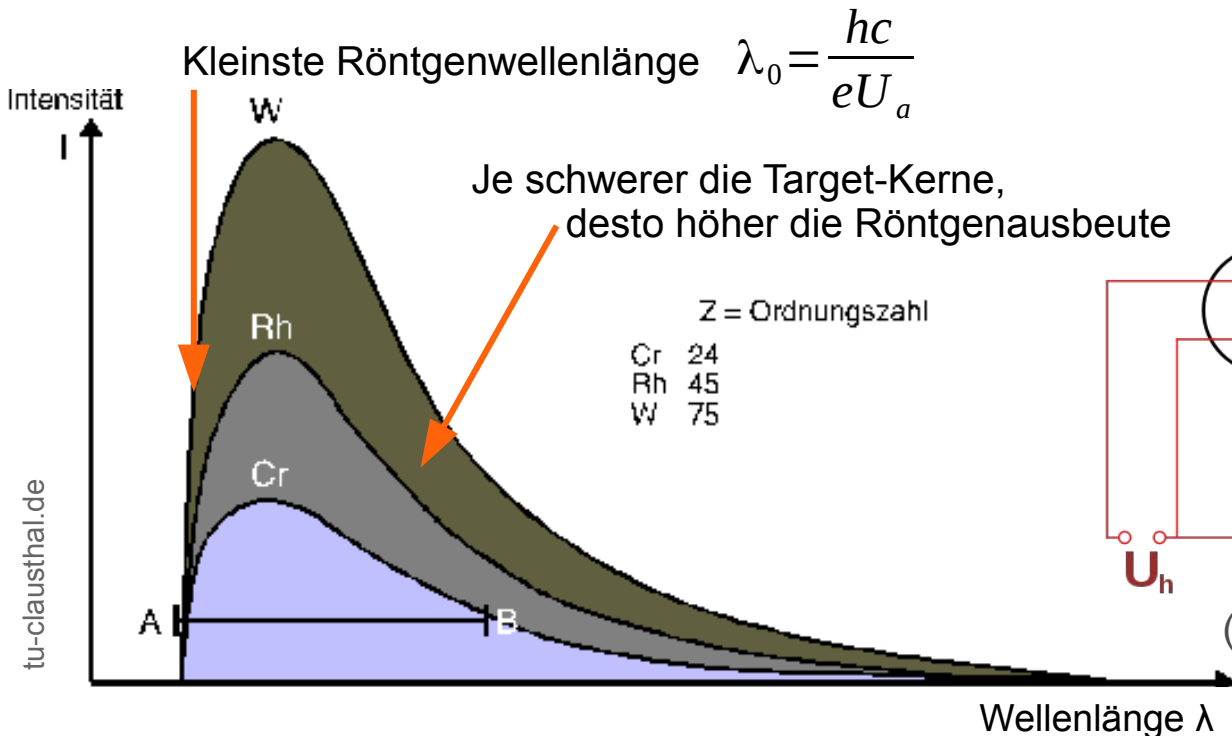
Anwendung der Bremsstrahlung:

## Erzeugung von Röntgenstrahlung

Röntgenröhre: Elektronen treffen mit der Energie  $eU_a$  auf eine Anode



→ Maximale Energie der Röntgen-Photonen:  $h\nu = eU_a$ .



( $U_a$  typisch 20 kV bis einige 100 kV)

wikimedia.org

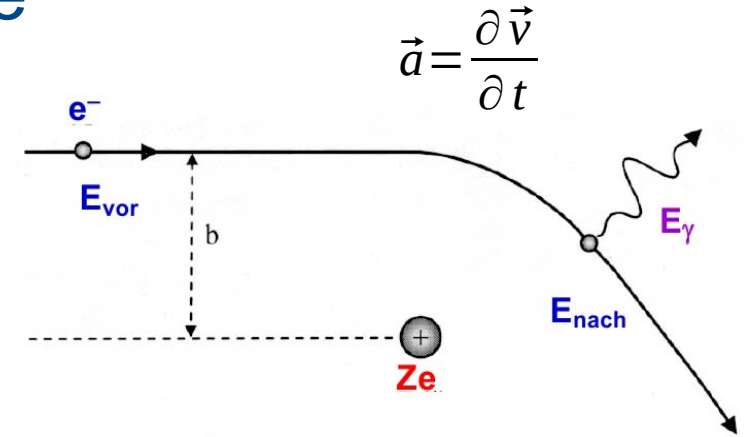
# Leichte geladene Teilchen in Materie

Anwendung der Bremsstrahlung:

Erzeugung von Röntgenstrahlung

Moderne Ausführung:

Elektronen-Beschleuniger zur Strahlentherapie  
mit harter Röntgenstrahlung  $\rightarrow h\nu$  bis ca. 25 MeV



varian.com



varian.com

# Leichte geladene Teilchen in Materie

Auch für Elektronen kann man das *lineare Bremsvermögen* definieren.

$$S = dE/dx$$

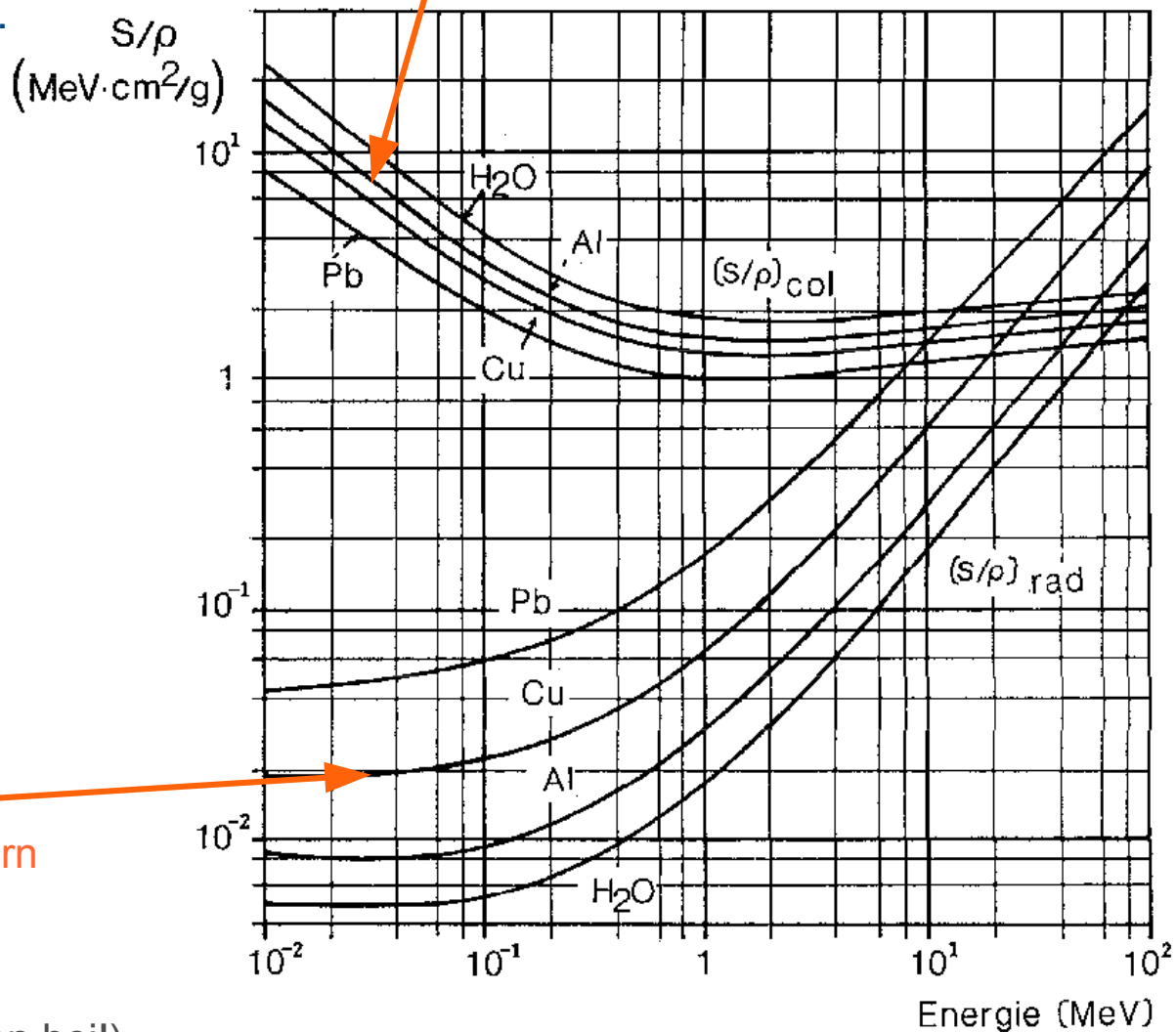
Oft wird  $S$  auf die Dichte  $\rho$  des Targetmaterials *normiert*:

$S$  in MeV/cm

$\rho$  in g/cm<sup>3</sup>

→  $S/\rho$  in MeV·cm<sup>2</sup>/g

Energieverlust durch direkte Ionisation  
(Elektronenstoß, wie schweres Teilchen)



Energieverlust durch  
Bremsstrahlung am Target-Kern

(Da Röntgenstrahlung auch ionisierend ist, trägt diese ebenfalls zum Strahlenschaden bei!)



# Photonenstrahlung in Materie

Bildgebung auf Grundlage von Durchleuchtung



Erste Durchleuchtung der Hand von Wilhelm C. Röntgens Frau Anna Bertha. (Nobelpreis 1901)

**Grundprinzip:**

Durchdringungsvermögen der Röntgenstrahlung ist materialabhängig.



Oberarmbruch

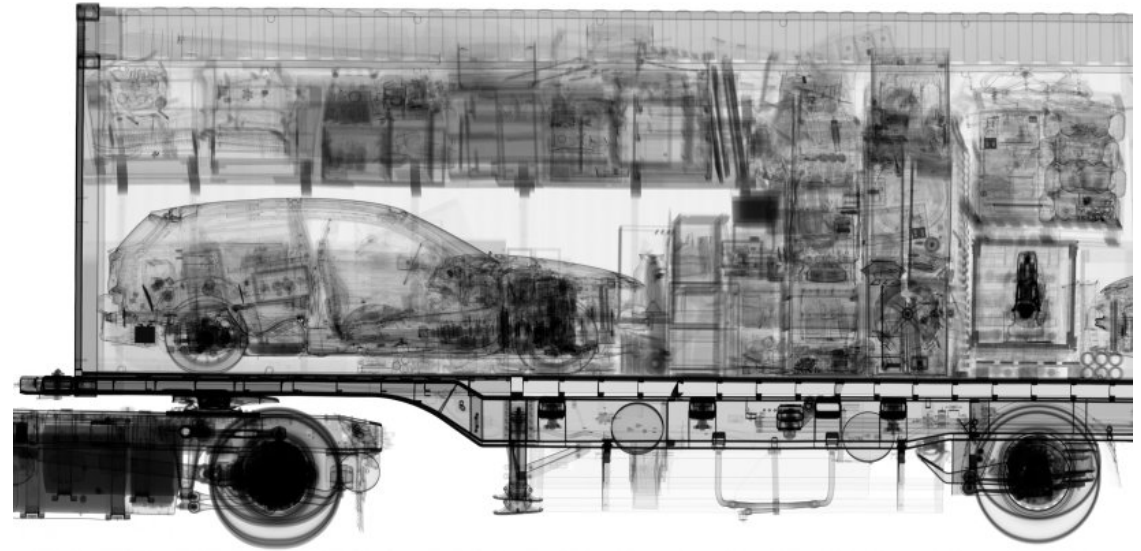
# Photonenstrahlung in Materie

Bildgebung auf Grundlage von Durchleuchtung

Neben medizinischer Anwendung

Materialprüfung,  
Durchsuchung (Zoll)

...



abendbaltt.de



journal.lu

Mobiler Röntgenscanner für LKW

Photonenenergien bis  $\sim 10$  MeV  
durchdringen bis ca. 30 cm Stahl.

# Photonenstrahlung in Materie

Mathematische Beschreibung: Abschwächungsgesetz

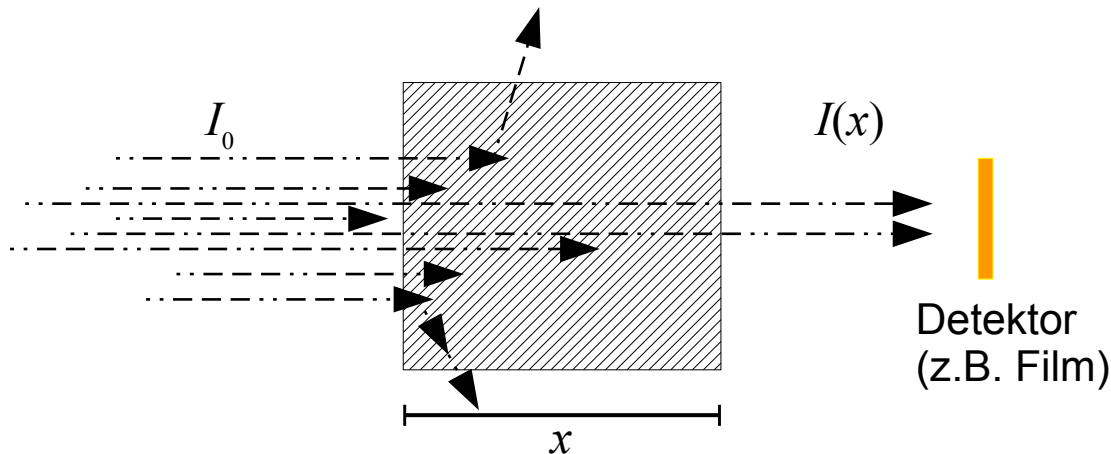
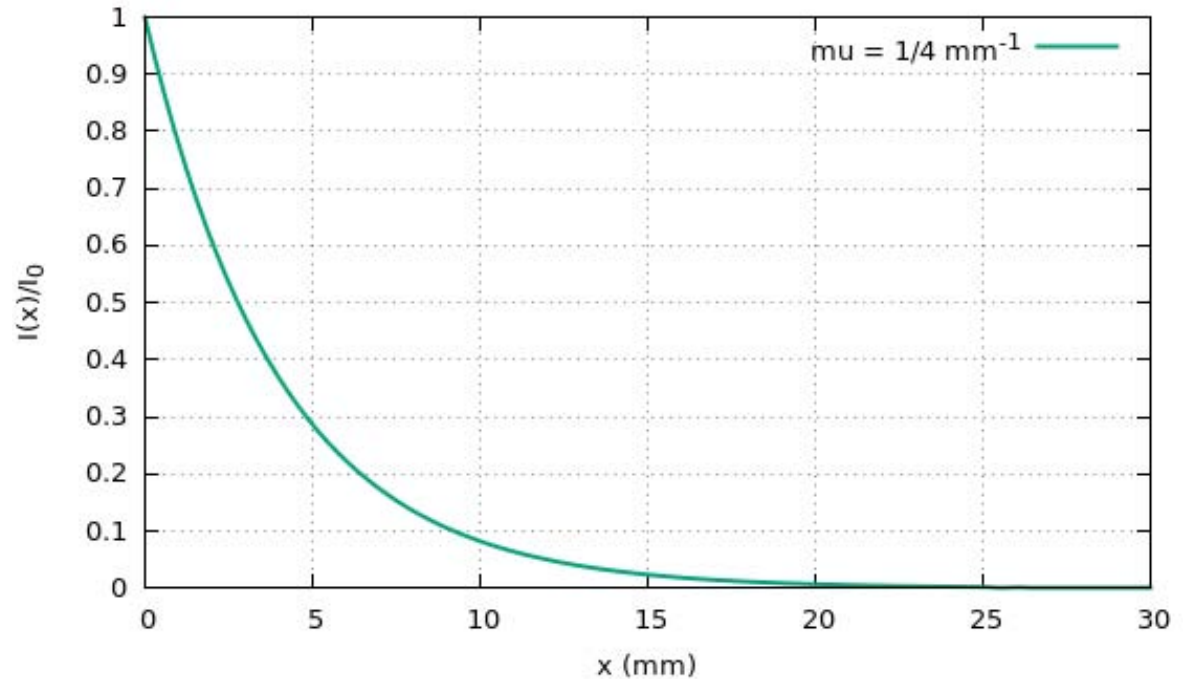
$$I(x) = I_0 \exp(-\mu x)$$

mit

$\mu$  = Abschwächungskoeffizient

$I_0$  = Anfangsintensität (Photonen/s)

$I(x)$  = Restintensität in Materialtiefe  $x$

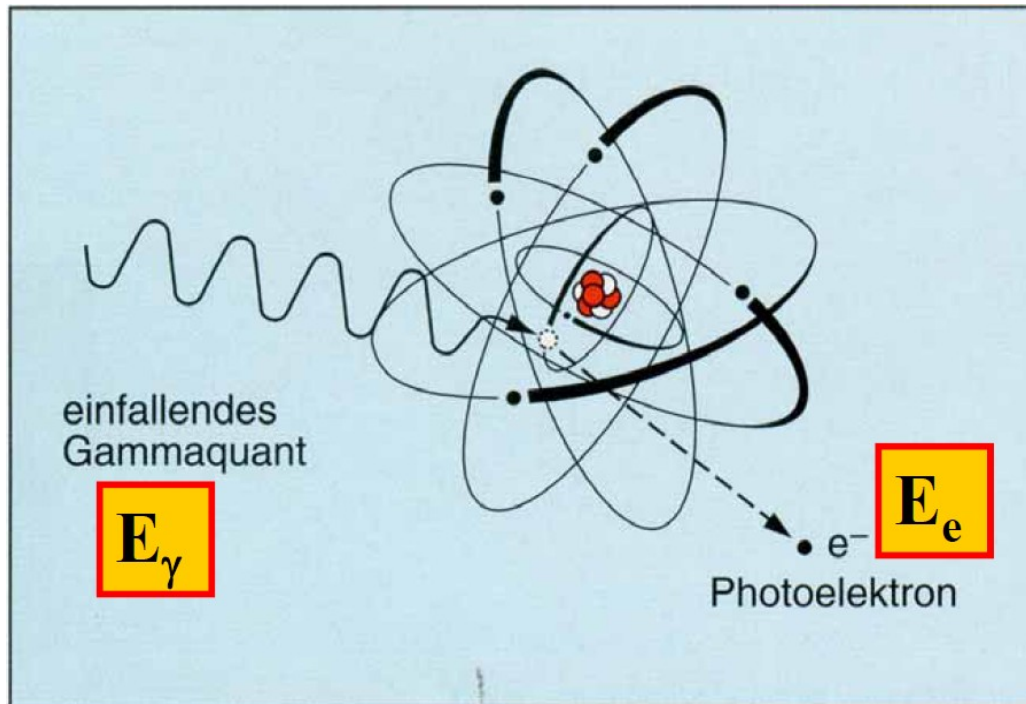


# Photonenstrahlung in Materie

Mikroskopische Deutung von  $\mu$ : Recht kompliziert, da mehrere Effekte eine Rolle spielen.

## 1. Photoeffekt

Absorption des  $\gamma$ -Quants (Röntgenphotons) in einer Atomhülle und Entsendung eines freien Elektrons („Photoelektron“).



$$E_e = E_\gamma - E_{\text{Bindung}}$$

$E_{\text{Bindung}}$  = Bindungsenergie des Elektrons

Zugeordneter Abschwächungskoeffizient:

$$\mu_{\text{Photo}} \sim Z^m E_\gamma^{-n}$$

mit  $m = 4 \dots 5$ ,  $n = 3 \dots 4$

$Z$  = Kernladungszahl des Target-Atoms

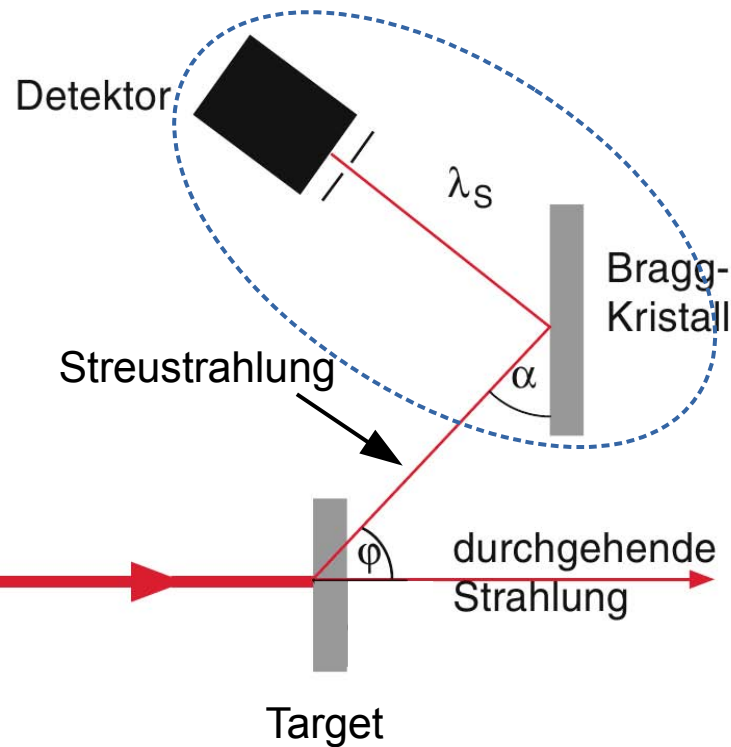
# Photonenstrahlung in Materie

Mikroskopische Deutung von  $\mu$ : Recht kompliziert, da mehrere Effekte eine Rolle spielen.

## 2. Compton-Effekt

Streuung von  $\gamma$ -Quanten an Target-Atomen.

Experiment von Arthur Compton (1922):



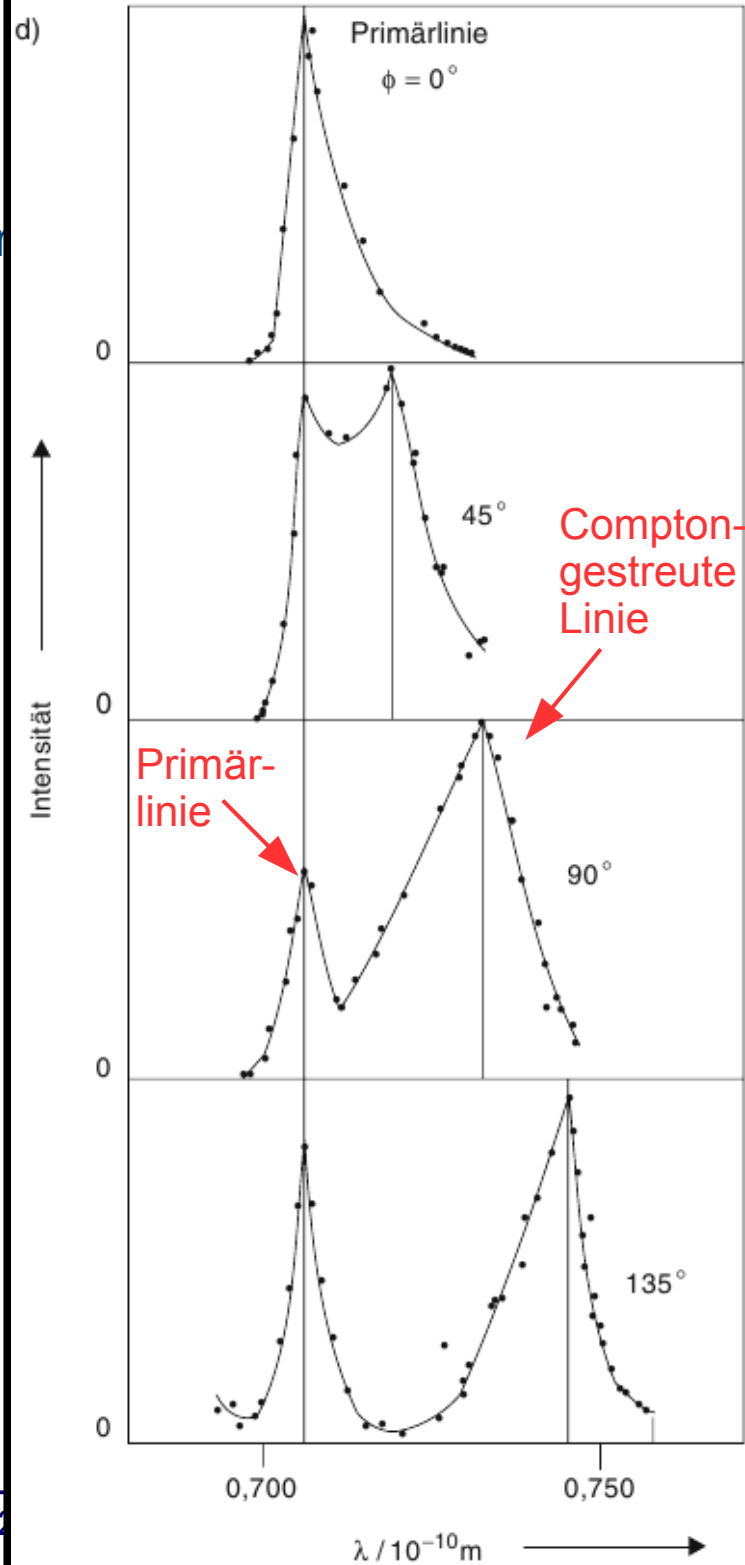
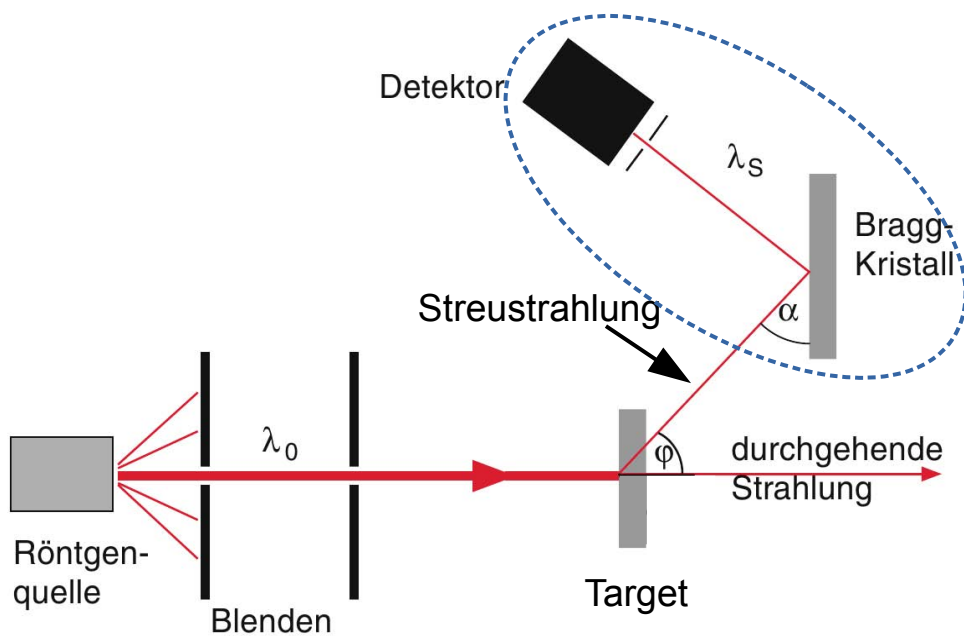
# Photonenstrahlung in Materie

Mikroskopische Deutung von  $\mu$ : Recht kompliziert, da mehr

## 2. Compton-Effekt

Beobachtung: Streustrahlung hat zwei energetische Komponenten:

- Die ursprüngliche Röntgenlinie  $\lambda_0$ ,
- und eine von Streuwinkel  $\varphi$  abhängige, verschobene Linie.



# Photonenstrahlung in Materie

Mikroskopische Deutung von  $\mu$ : Recht kompliziert, da mehrere Effekte eine Rolle spielen.

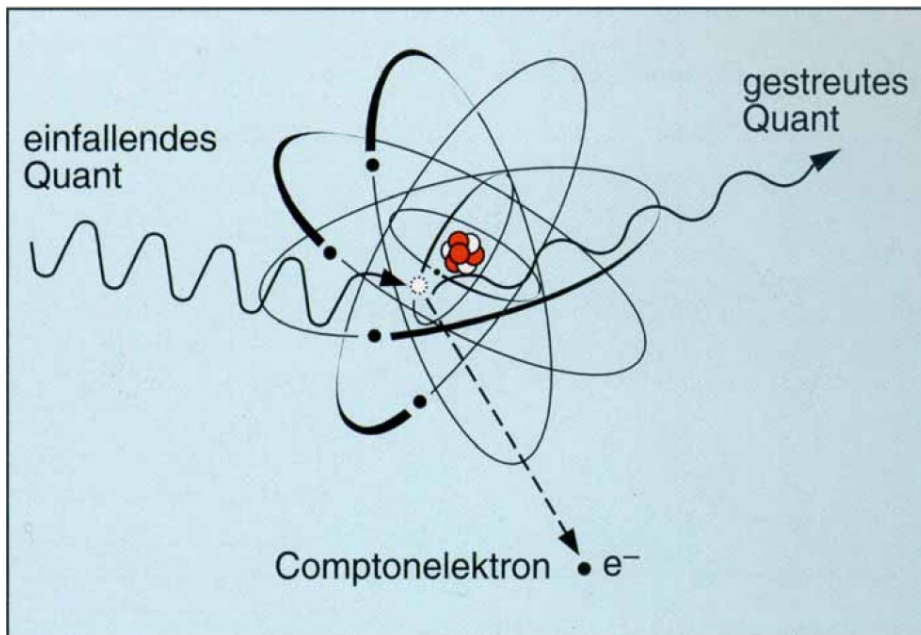
## 2. Compton-Effekt

Erklärung: Inelastischer Stoß zwischen  $\gamma$ -Quant und Hüllenelektron

Impuls des Photons wird *teilweise* auf das Elektron übertragen.

Die Energie des Photons ist anschließend **kleiner**, seine Wellenlänge **größer**.

Volkmer, Kernenergie Basiswissen, DATF, 2013



Zugeordneter Abschwächungskoeffizient:

$$\mu_{\text{Compton}} \sim Z$$

# Photonenstrahlung in Materie

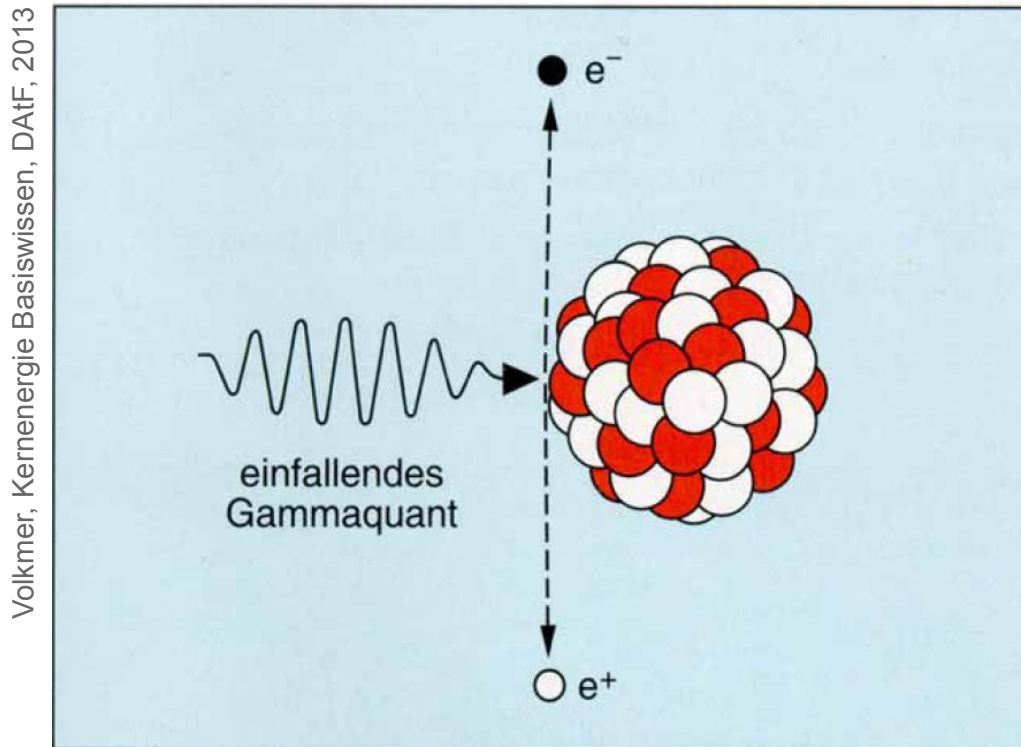
Mikroskopische Deutung von  $\mu$ : Recht kompliziert, da mehrere Effekte eine Rolle spielen.

## 3. Paarbildung

Bei sehr hoher Energie des  $\gamma$ -Quants:

Erzeugung eines  $e^+/e^-$ -Paares im elektrischen Feld eines Target-Kerns.

→ Erzeugung von gleichen Teilen Materie und Antimaterie. ( $e^+$  = Positron = Anti-Elektron)





# Photonenstrahlung in Materie

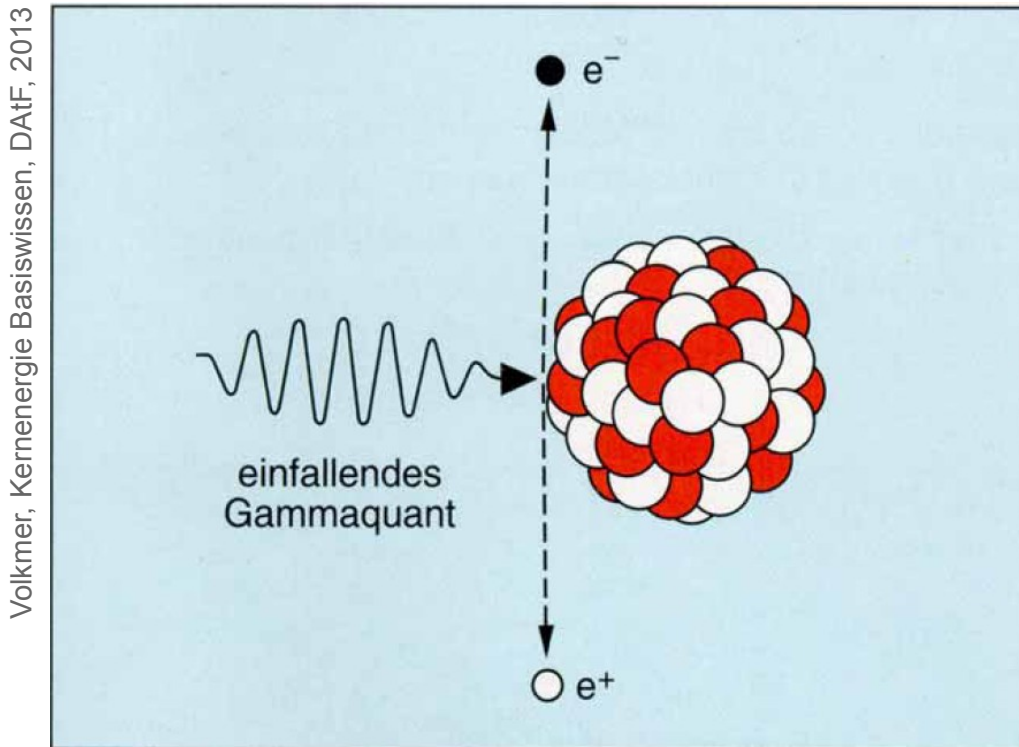
Mikroskopische Deutung von  $\mu$ : Recht kompliziert, da mehrere Effekte eine Rolle spielen.

## 3. Paarbildung

Bei sehr hoher Energie des  $\gamma$ -Quants:

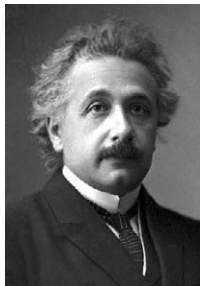
Erzeugung eines  $e^+/e^-$ -Paares im elektrischen Feld eines Target-Kerns.

→ Erzeugung von gleichen Teilen Materie und Antimaterie. ( $e^+$  = Positron = Anti-Elektron)



Energie des Photons muss größer als die doppelte „Ruheenergie“  $E_0$  eines Elektrons sein.

$$E_0 = mc^2 \quad c = 300000 \text{ km/s}$$



Elektron:  $m \approx 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \rightarrow E_0 \approx 511 \text{ keV}$

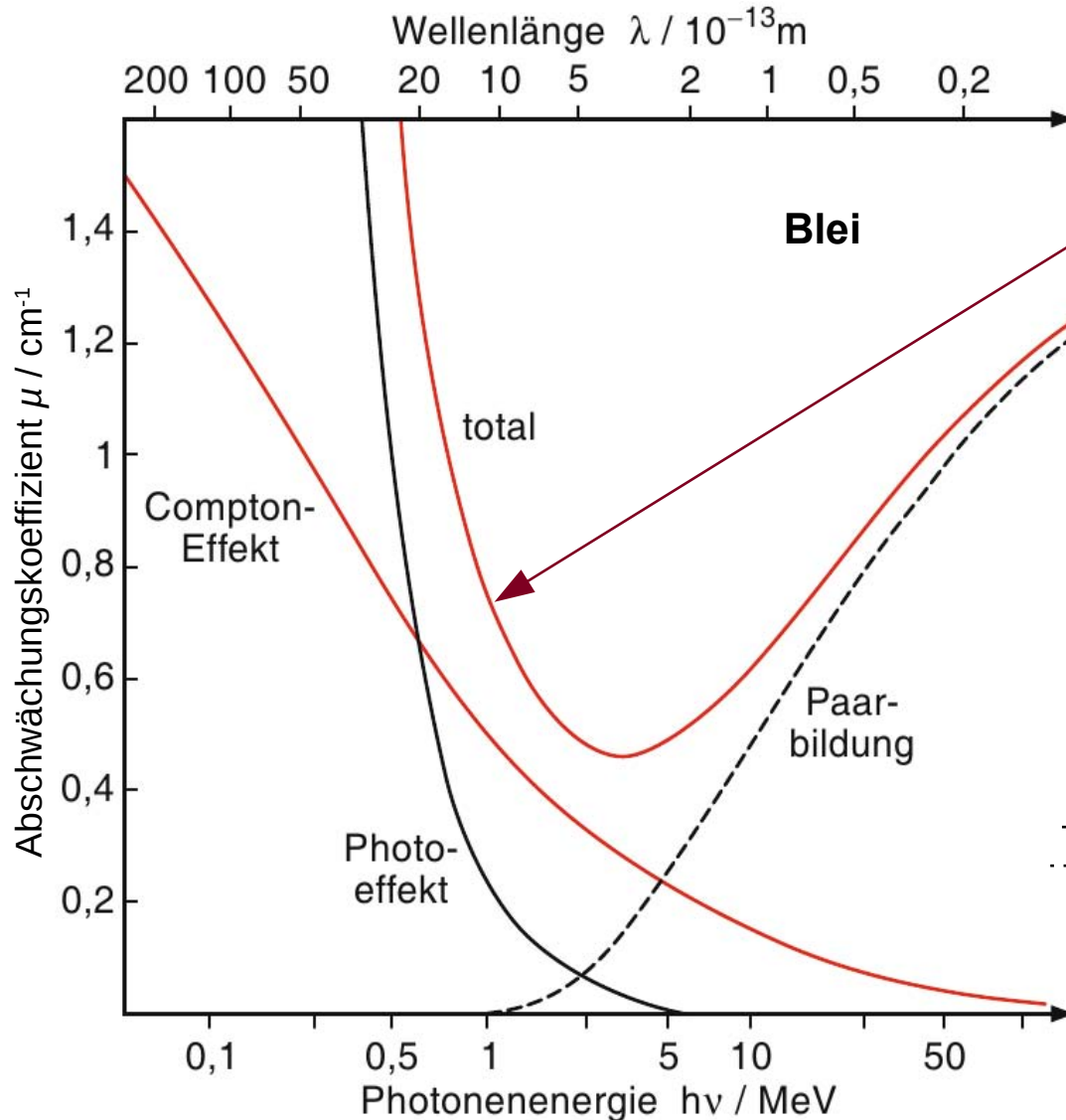
→ Schwellenergie  $E_\gamma > 1,02 \text{ MeV}$

Schwächungskoeffizient:

$$\mu_{\text{Paar}} \sim Z^2 \ln(E_\gamma)$$

# Photonenstrahlung in Materie

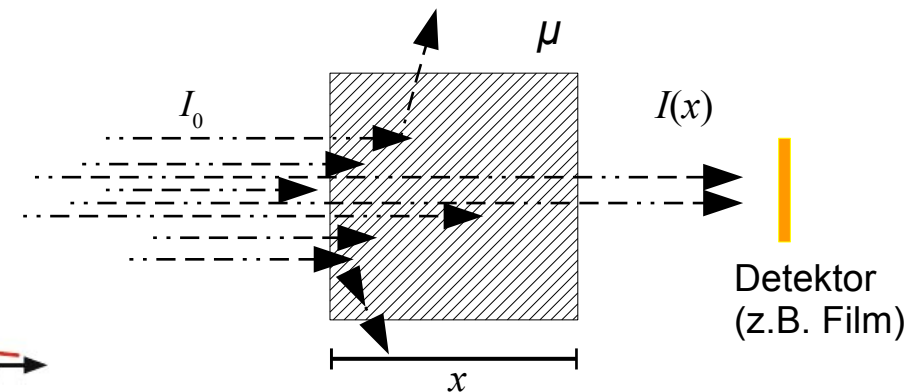
Mikroskopische Deutung von  $\mu$ : Recht kompliziert, da mehrere Effekte eine Rolle spielen.



Gesamteffekt:

$$\mu = \mu_{\text{Photo}} + \mu_{\text{Compton}} + \mu_{\text{Paar}}$$

$$\rightarrow I(x) = I_0 \exp(-\mu x)$$



# Inhalt

Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

Grundprinzipien des Strahlenschutzes

Dosisbegriffe, Messung von Strahlung

# Warum brauchen wir Strahlenschutz-Maßnahmen?

## Energie

Wir haben gesehen:

In der Regel haben wir es mit Teilchen/Photonen mit Energien von ca. 1 keV – 1 MeV zu tun.

$$\begin{aligned} 1 \text{ MeV} &= 1000000 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} \\ &\approx 4 \cdot 10^{-17} \text{ kcal} \\ &= 0,0000000000000000004 \text{ kcal} \end{aligned}$$

# Warum brauchen wir Strahlenschutz-Maßnahmen?

## Energie

Wir haben gesehen:

In der Regel haben wir es mit Teilchen/Photonen mit Energien von ca. 1 keV – 1 MeV zu tun.

$$\begin{aligned} 1 \text{ MeV} &= 1000000 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} \\ &\approx 4 \cdot 10^{-17} \text{ kcal} \\ &= 0,0000000000000000004 \text{ kcal} \end{aligned}$$

zum Vergleich: Verdauung einer Tafel Schokolade setzt  
~ 500 kcal an Energie frei!



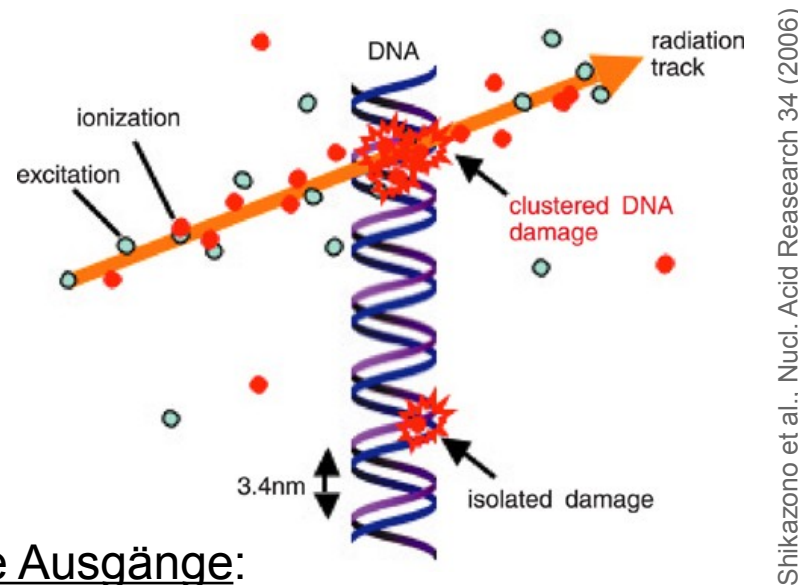
Internet Movie Database, imdb.org

→ Das Besondere an den ionisierenden Teilchen ist nicht die Energiemenge, sondern ihre *Energiedichte!*

# Warum brauchen wir Strahlenschutz-Maßnahmen?

Ionisierende Strahlen schädigen einen Organismus auf grundsätzlich andere Art als übliche Verletzungen:

Durchstrahlung eines Zellkerns kann zu Beschädigung des DNA-Moleküls führen. Die Zelle verliert (zumindest zeitweilig) ihre Fortpflanzungsfähigkeit.



Grundsätzlich drei mögliche Ausgänge:

1. Zellmechanismen reparieren den Schaden originalgetreu. → Zelle überlebt.
2. Zelle kann den Schaden nicht (rechtzeitig) reparieren. → Zelle stirbt („Apoptose“).
3. DNA-Schaden wird nicht originalgetreu repariert. → Mutation?



# Warum brauchen wir Strahlenschutz-Maßnahmen?

Mögliche Auswirkungen auf den Organismus:

1. Kleine Menge an ionisierender Strahlung (Kleine „Dosis“):

Geringe Anzahl an DNA-Schäden,  
Wahrscheinlichkeit einer lebensfähigen Mutation sehr klein. → „keine“ Auswirkung.

2. Mittlere Dosis:

Erhöhte Anzahl an DNA-Schäden,  
Erhöhte Wahrscheinlichkeit lebensfähiger Mutationen. → (langfristig) erhöhtes Krebsrisiko

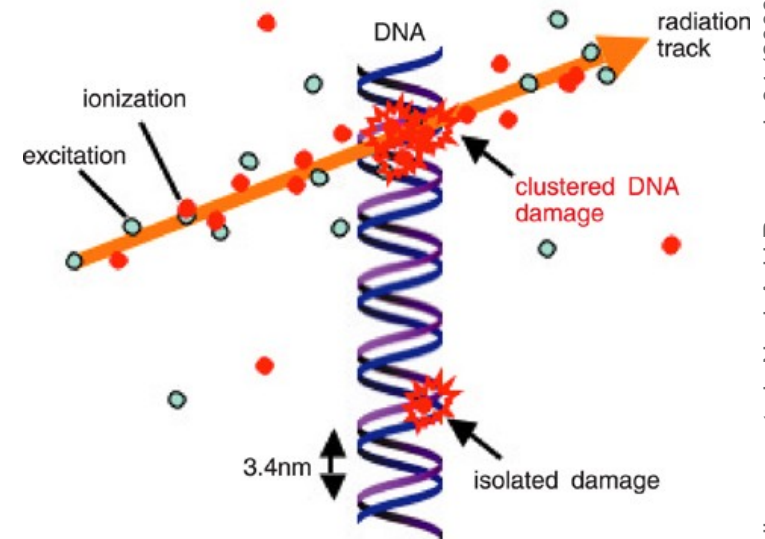
→ „Stochastischer Strahlenschaden“

3. Hohe Dosis:

Hohe Anzahl an DNA-Schäden,  
Stark vermehrter Zelltod,  
Hemmung der Zellteilung mit resultierendem Absterben des Gewebes.

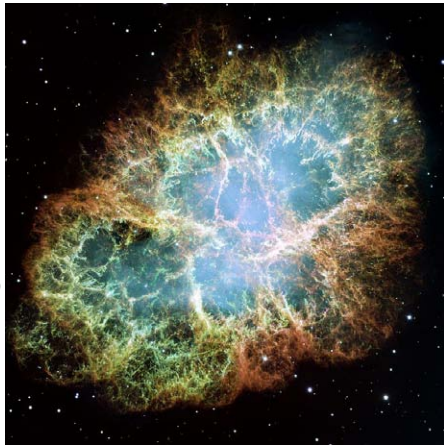
→ **Strahlenkrankheit**

→ „Deterministischer Strahlenschaden“

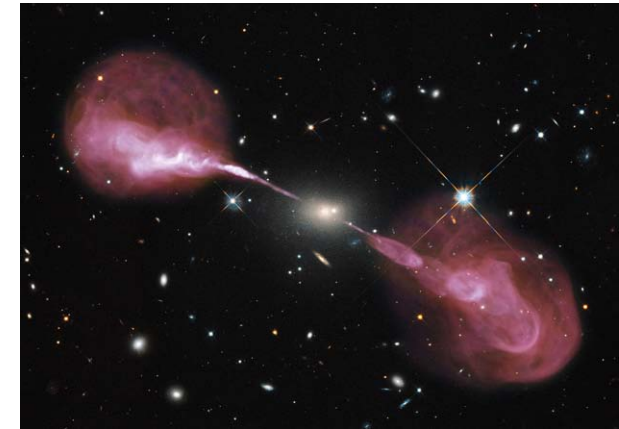


# Warum brauchen wir Strahlenschutz-Maßnahmen?

Ionisierende Strahlen sind natürliche Phänomene ...

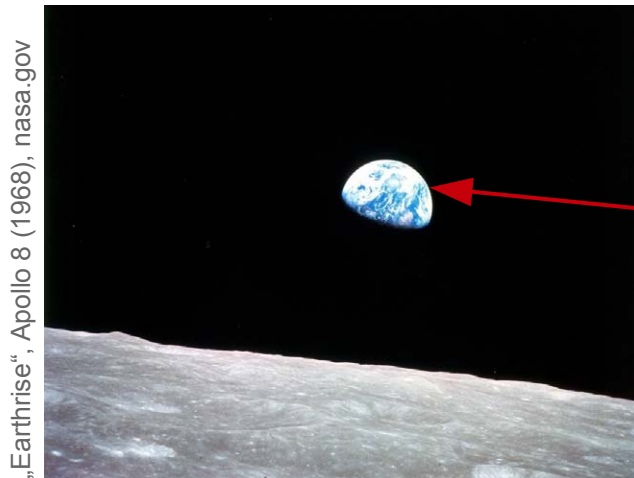


← SN1054 / Krabbennebel  
Die Mutterkerne der natürlichen  $^{235}\text{U}$ -,  $^{238}\text{U}$ - und  $^{232}\text{Th}$ -Zerfallsreihen entstanden in Supernovae.



Hercules A →  
Aktive Galaxienkerne (AGNs) sind die größten bekannten Teilchenbeschleuniger.

... kommen aber in der Biosphäre nur in sehr kleinen Mengen („Dosen“) vor.



„Earthrise“, Apollo 8 (1968), nasa.gov



Boeggemann (2006), wikimedia.org

→ Evolutionäre Folge: Menschen (und Tiere) besitzen keine Sinnesorgane, die sie vor ionisierender Strahlung warnen!



# Pionierzeit

Zunächst breite Akzeptanz angesichts der **technischen und medizinischen Möglichkeiten**, die die Erforschung von Röntgenstrahlen und Radioaktivität erschloss.

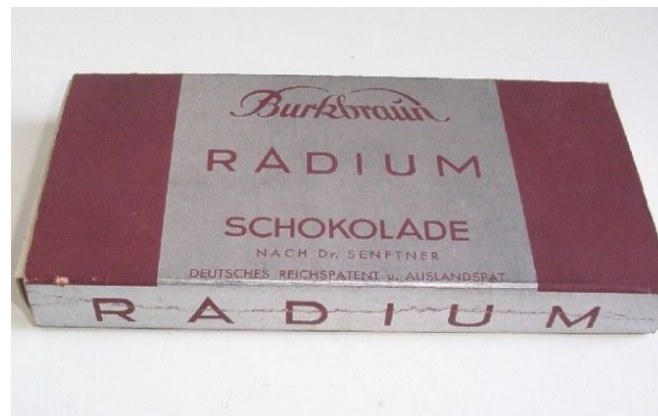


Erste Durchleuchtung der Hand von Wilhem C. Röntgens Frau Anna Bertha. (Nobelpreis 1901)



Marie Curie  
Nobelpreis 1911 für die Entdeckung von Radium und Polonium

„Radium-Hype“ Anfang des 20. Jahrhunderts



# Erste Strahlenschäden

**Marie Curie** starb 1934 im Alter von nur 66 Jahren, wahrscheinlich infolge ihres langjährigen Umgangs mit Röntgenstrahlung und radioaktiven Präparaten.

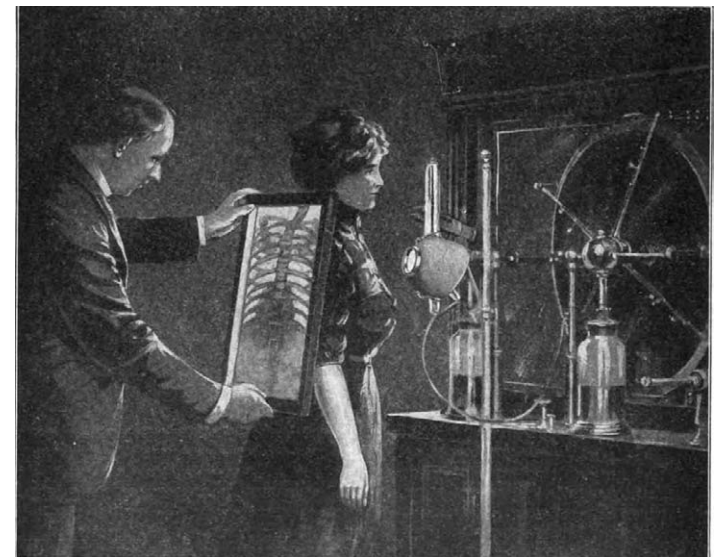


Marie Curie mit mobiler Röntgenstation (1915)

Frühe Röntengeräte arbeiten im Dauerstrichbetrieb.

Zudem: Keine Abschirmung einzelner Körperteile oder des behandelnden Personals.

→ **Hautverbrennungen bei Ärzten und Patienten.**



# Erste Strahlenschäden



**The Power of Radium at Your Disposal**

Twenty-three years ago radium was unknown. Today, thanks to constant laboratory work, the power of this most unusual of elements is at your disposal. Through the medium of Undark, radium serves you safely and surely.

Does Undark really contain radium? Most assuredly. It is radium, combined in exactly the proper manner with zinc sulphide, which gives Undark its ability to shine *continuously* in the dark.

Manufacturers have been quick to recognize the value of Undark. They apply it to the dials of watches and clocks, to electric push buttons, to the buckles of bed room slippers, to house numbers, flashlights, compasses, gasoline gauges, autometers and many other articles which you frequently wish to see in the dark.

The next time you fumble for a lighting switch, bark your shins on furniture, wonder vainly what time it is *because of the dark*—remember Undark. *It shines in the dark.* Dealers can supply you with Undarked articles.

For interesting little folder telling of the production of radium and the uses of Undark address

**RADIUM LUMINOUS MATERIAL CORPORATION**  
 58 PINE STREET NEW YORK CITY  
 Factories: Orange, N. J. Mines: Colorado and Utah

**UNDAIRK**  
*Radium Luminous Material*  
**Shines in the Dark**

**To Manufacturers**

The number of manufactured articles to which Undark will add increased usefulness is manifold. From a sales standpoint, it has many obvious advantages. We gladly answer inquiries from manufacturers and, when it seems advisable, will carry on experimental work for them. Undark may be applied either at your plant, or at our own.

The application of Undark is simple. It is furnished as a powder, which is mixed with an adhesive. The paste thus formed is painted on with a brush. It adheres firmly to any surface.



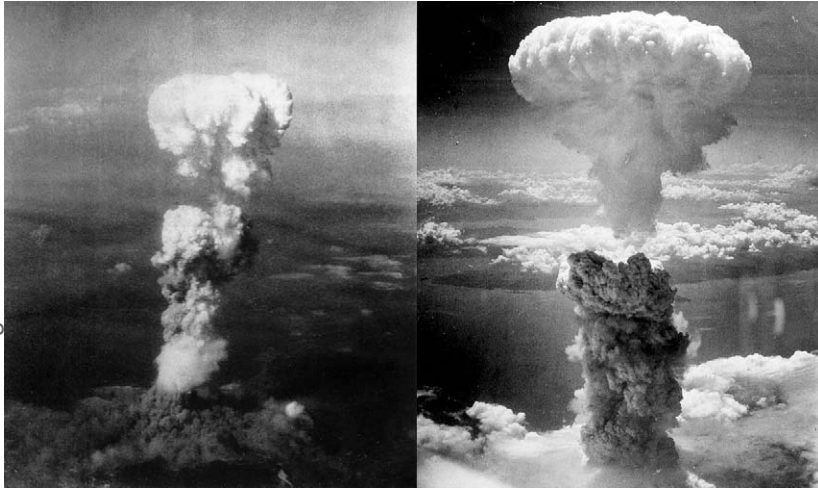
wikimedia.org

## 1. Weltkrieg: Uhren mit selbstleuchtenden Radium-Zifferblättern

„Radium Girls“: Zeichnerinnen spitzen den (Radium-haltigen) Pinsel mit dem Mund an

→ Teilweise tödliche Dosen durch Ingestion.

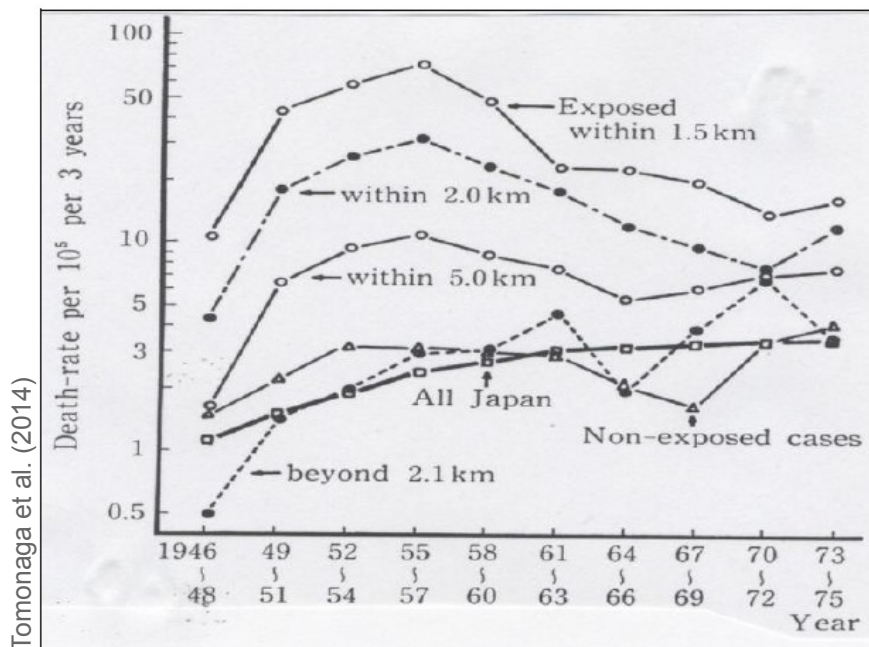
# Das Umdenken



August 1945: Atombomben auf Hiroshima und Nagasaki: 3 Kategorien von Bombenopfern.

1. **Unmittelbar** durch die Explosion **Getötete**
2. **Akut Strahlenkranke** (Tod innerhalb von Monaten)
3. Überlebende, aber **strahlenexponierte Personen** (*Hibakusha*).

Bis heute wichtigste Studiengruppe zu Langzeitfolgen ionisierender Strahlung.



Todesfälle durch Leukämie als Funktion des damaligen Aufenthaltsorts relativ zum „Bodennullpunkt“ von Hiroshima.

# Kerntechnische Unfälle



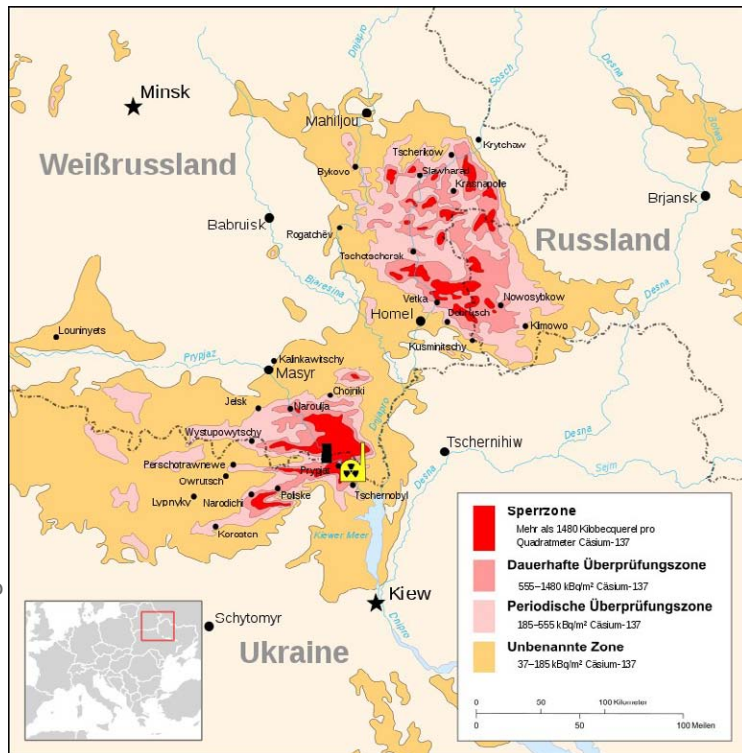
wikimedia.org

## K-19 (1961)

Erstes sowjetisches Unterseeboot mit nuklearem Antrieb (und nuklearer Bewaffnung).

**Juli 1961: Leck im Primärkühlkreis des Kernreaktors**

Nach Notreparatur sterben 8 Seeleute innerhalb von 2 Wochen, 17 weitere in den folgenden Jahren.



wikimedia.org

## Reaktorhavarie von Tschernobyl (1986)

Kernschmelze und Reaktorexlosion.

Bauartbedingt: Schwierig zu löschendes Feuer, Freisetzung von großen Mengen radioaktiven Materials.

Hohe Strahlenbelastung bei Rettungstrupps, **Kontamination** weiter Teile Europas durch radioaktiven „Fallout“.

Tragweite des Unglücks weiterhin kontrovers.

# Unfälle mit medizinischen Strahlenquellen



## Goiânia-Unfall, Brasilien (1987)

Entwendung einer hochaktiven Cs-137-Quelle zur Strahlenbehandlung aus stillgelegter Klinik.

4 Menschen sterben an akuter Strahlenkrankheit.  
einige hundert Krankheitsfälle.

Cäsiumchlorid → wasserlöslich:  
Kontamination großer Teile der Stadt



29. Bulla completely broken down and injury extended to index and middle fingers.

## Samut-Prakan-Unfall, Thailand (2000)

Illegale „Entsorgung“ einer hochaktiven Co-60-Quelle zur Strahlentherapie.

3 Tote durch akute Strahlenkrankheit,  
ca. 1000 exponierte Personen.



Allgemeines  
Gefahrensymbol für  
ionisierende Strahlung  
(ISO-361)



Zusätzliches  
Gefahrensymbol für  
gefährlich radioaktive Stoffe  
(ISO-21482)

# Grundprinzipien des Strahlenschutzes

Bereits ohne weitere Quantifizierung ist klar:

Das Krankheitsrisiko („*Stochastische Strahlenschäden*“) ...

... und die Schwere der Erkrankung („*Deterministische Strahlenschäden*“)

wachsen mit steigender Zahl an ionisierenden Teilchen die innerhalb einer gegebenen Zeit auf den Körper einwirken.

Ein effektiver Strahlenschutz muss daher

1. Die Bestrahlungsrate des Körpers („Teilchen pro Sekunde“)  
*und*
2. die Gesamtzahl an absorbierten Strahlungsteilchen kontrollieren.

# Grundprinzipien des Strahlenschutzes

## Die 4 As des Strahlenschutzes

<u>A</u> ktivität	... so gering wie möglich.
<u>A</u> bstand	... so groß wie möglich.
<u>A</u> bschirmung	... so stark wie nötig.
<u>A</u> ufenthaltsdauer	... so kurz wie möglich.

[ Englisch: „ALARA“-Prinzip – „As Low As Reasonably Achievable“. ]



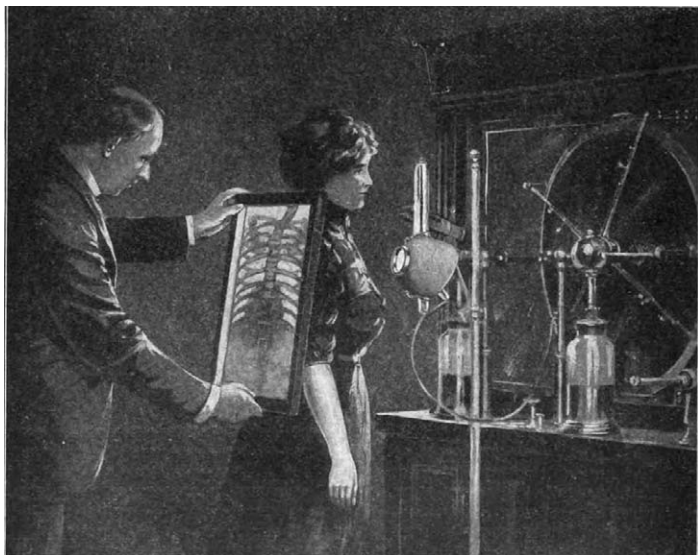
# Grundprinzipien des Strahlenschutzes

## Aktivität

Strahlungsquelle soll nicht stärker sein, als die Anwendung es erfordert.

Beispiel Röntgen:

Moderne bildgebende Verfahren haben es erlaubt, die zur Diagnose *notwendige* Strahlungsleistung drastisch zu reduzieren.

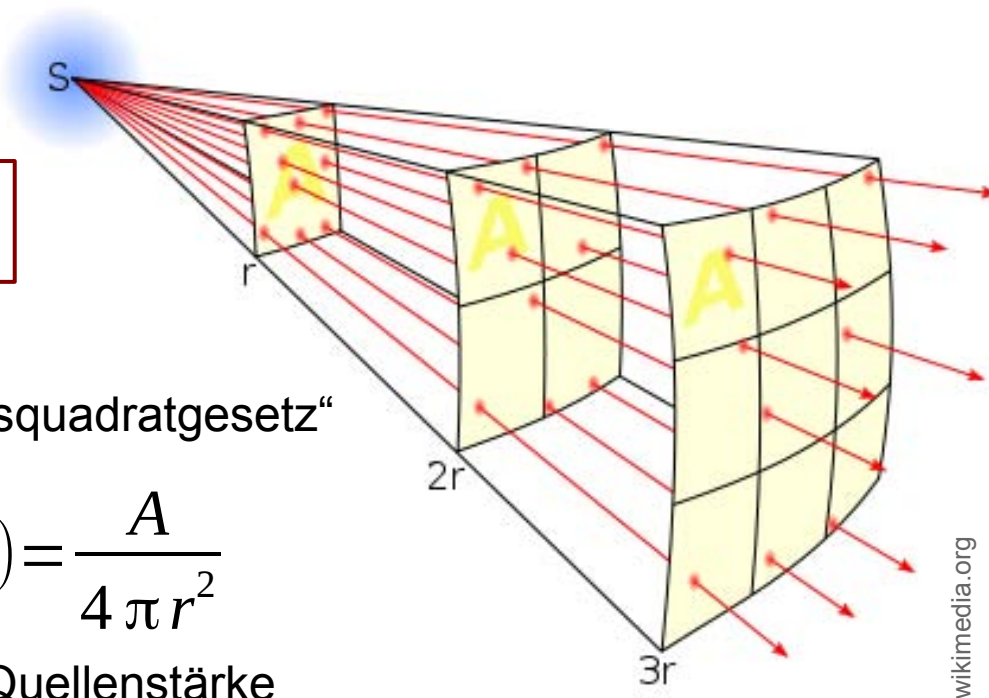
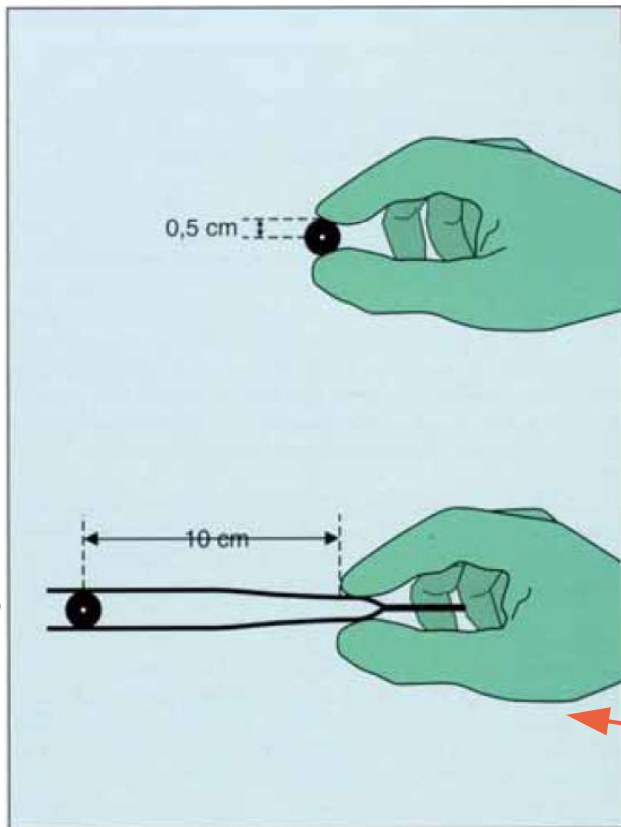


# Grundprinzipien des Strahlenschutzes

## Abstand

Für (näherungsweise) punktförmige Quelle:

Absorbierte Intensität  $\sim (1 / \text{Abstand})^2$



„Abstandsquadratgesetz“

$$I(r) = \frac{A}{4\pi r^2}$$

A = Quellenstärke

r = Abstand

(r „groß“ im Vergleich zur Ausdehnung der Quelle)

Beispiel:

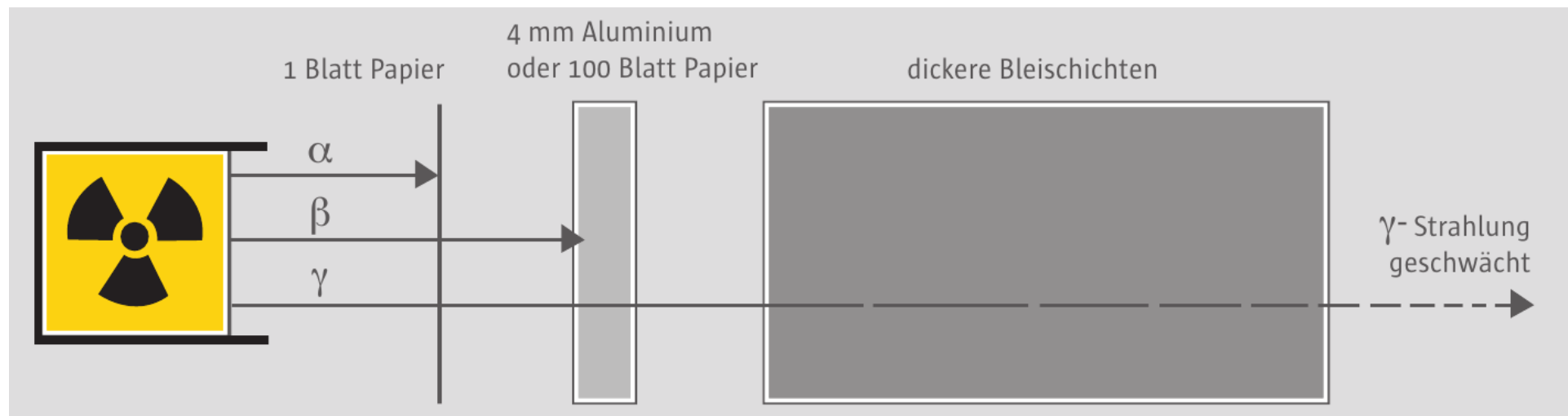
Benutzung von Pinzette zur Handhabung eines Strahlers.  
 $r = 0,5 \text{ cm} \rightarrow r = 10 \text{ cm} : \text{ ca. } 400 \text{ x geringere Exposition!}$

# Grundprinzipien des Strahlenschutzes

## Abschirmung

Da Strahlung mit Materie wechselwirkt, kann man sie durch geeignete Absorber stoppen oder Abschwächen.

→ Dicke und Beschaffenheit einer geeigneten Abschirmung hängen sehr stark von Art und Energie der Strahlung ab!



Volkmer, Radioaktivität und Strahlenschutz, DAfF, 2012

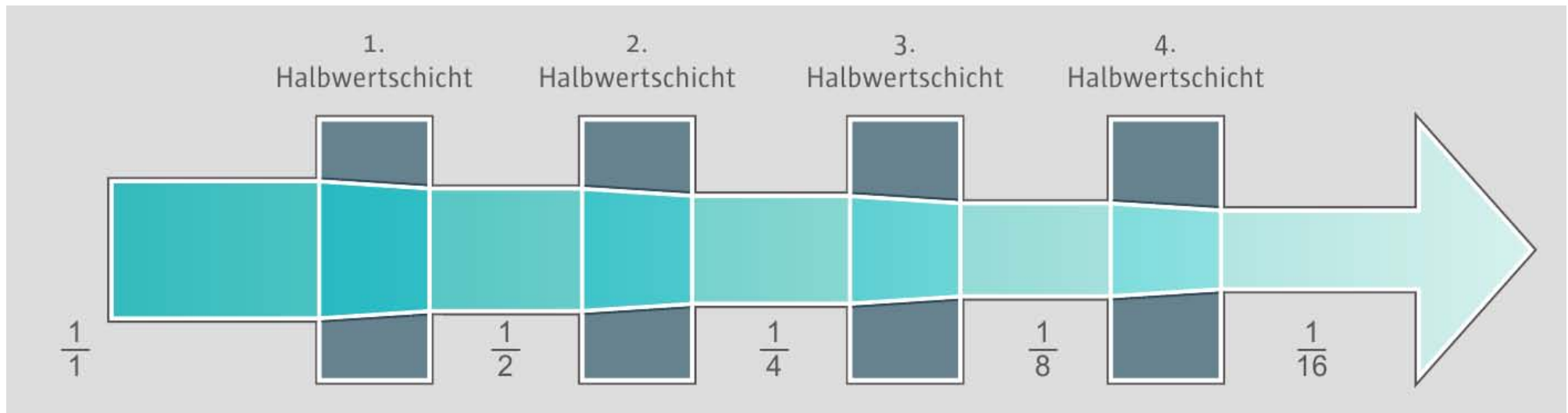
# Grundprinzipien des Strahlenschutzes

## Abschirmung

$\gamma$ - oder Röntgenstrahlung lässt sich nicht „stoppen“, sondern nur **abschwächen**.

→ „Halbwertsdicke“  $d_{1/2}$

$$I(x) = I_0 \exp\left(\frac{-\ln 2 x}{d_{1/2}}\right)$$

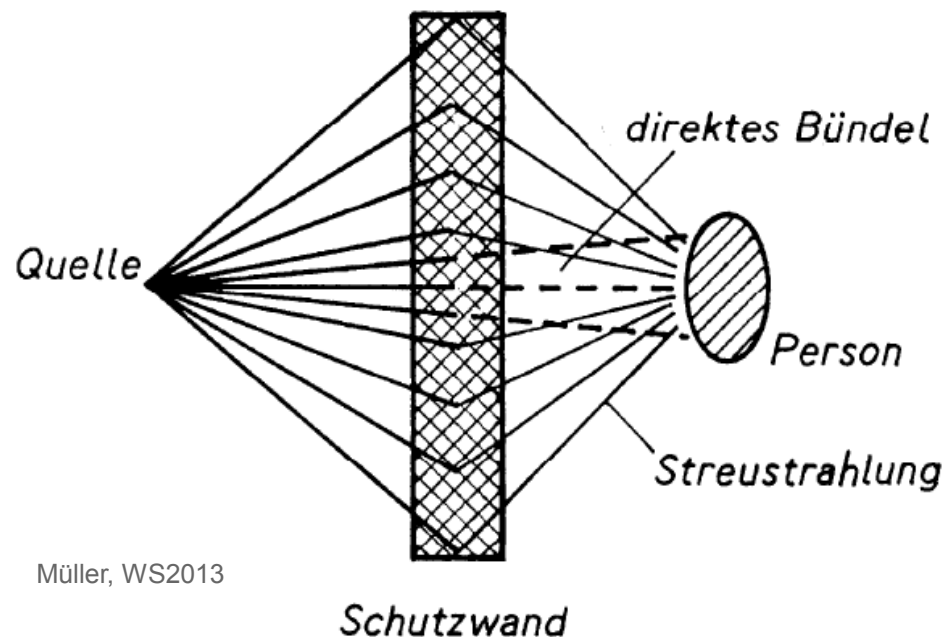


Volkmer, Radioaktivität und Strahlenschutz, DAfF, 2012

# Grundprinzipien des Strahlenschutzes

## Abschirmung

Mögliche Komplikation bei  $\gamma$ - oder Röntgenstrahlen: Streuung in der Abschirmung



Müller, WS2013

Klassische oder Compton-Streuung kann die Exposition hinter der Abschirmung vergrößern!

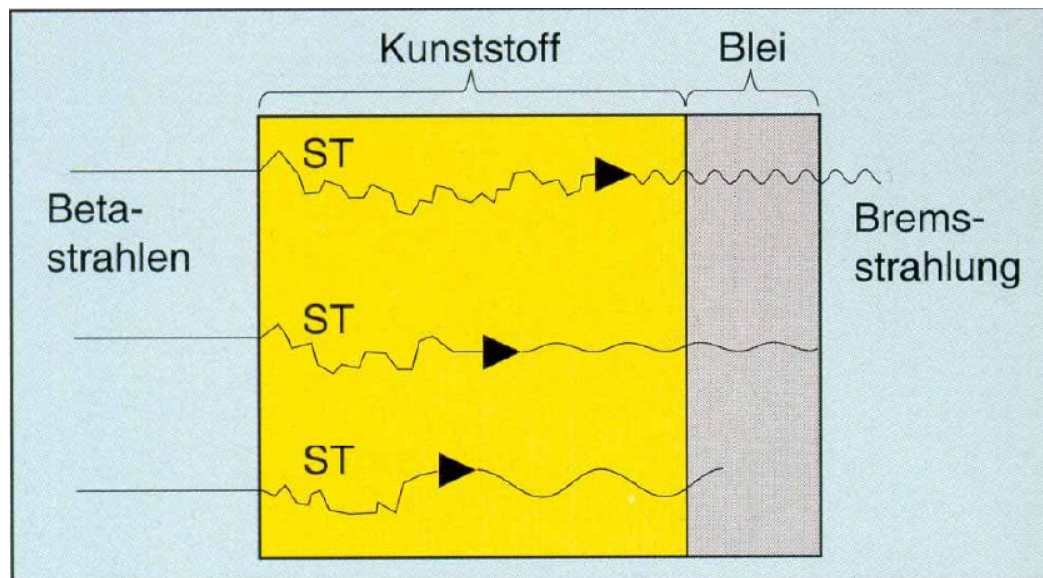
→ Geeignete Wahl von Material und Geometrie ist wichtig.

# Grundprinzipien des Strahlenschutzes

## Abschirmung

Problem bei  $\beta^-$ - oder  $\beta^+$ -Strahlung:

Bremsstrahlung in schweren Absorbern (große Kernladung  $Z$ ) konvertiert die Primärstrahlung in Röntgenstrahlung. (vgl. Röntgenröhre)



→ Übliche Anordnung:

1. Absorber mit kleinem  $Z$  (Kunststoff) zur Abbremsung der Elektronen
2. Abschirmung mit großem  $Z$  (Blei) zur Abschwächung der Röntgen-Photonen.

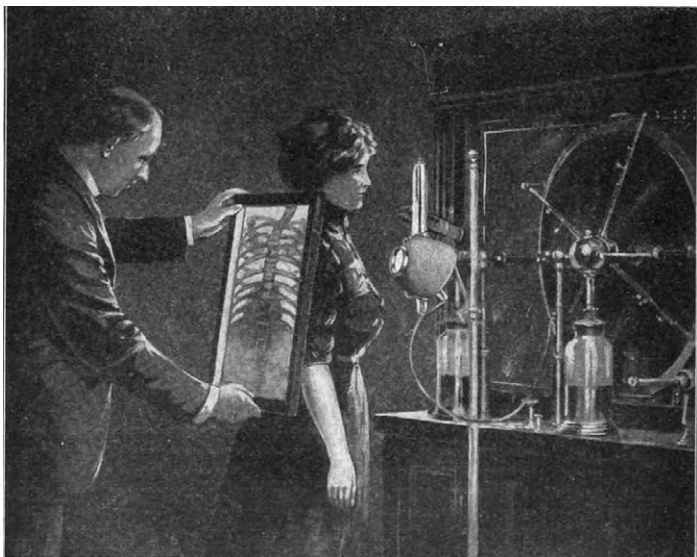
# Grundprinzipien des Strahlenschutzes

## Aufenthaltsdauer

Ein Mensch (oder Tier) soll sich nicht länger im Strahlungsfeld aufhalten, als es die Anwendung erfordert.

### Beispiel Röntgen (2):

Moderne Sensoren zur Bildgebung benötigen wesentlich *kürzere Belichtungszeiten*.



### Beispiel hochradioaktive Quelle:



Gefahrensymbol ISO-21482 soll auch nicht-eingewiesene Personen dazu bewegen, das Strahlungsfeld zügig zu verlassen.

# Inhalt

Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

Grundprinzipien des Strahlenschutzes

Dosisbegriffe, Messung von Strahlung



# Dosisbegriffe

Ziel: Quantifizierung der Strahlenexposition  
im Hinblick auf mögliche Gesundheitliche Folgen

## 1. Schritt

Es erscheint logisch, dass ein großer Organismus insgesamt mehr Strahlungsenergie absorbieren kann, als ein kleines Lebewesen.

→ Um vergleichbare Zahlen zu erhalten, normieren wir den Energieeintrag durch ionisierende Strahlung auf die Masse des exponierten Gewebes:

„Energiedosis“  $D = \text{Deponierte Energie} / \text{Gewebe-Masse}$

Einheit:  $1 \text{ Gray} = 1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$

Bemerkung: 1 Gy ist eine *sehr große* Dosis!

Beispiel: Sprung vom Küchentisch auf den Boden  $\sim 10 \text{ J/kg}$ .  
Dieselbe Strahlen-Energiedosis (10 Gy), auf den ganzen Körper appliziert, ist tödlich!

# Dosisbegriffe

## 2. Schritt

Wir haben gesehen, dass die Wechselwirkung von Strahlung mit Materie (also auch mit lebendem Gewebe) stark von der Art und Energie der Strahlung abhängt.

→ Multipliziere die Energiedosis  $D$  mit einem „Strahlenwichtungsfaktor“  $w_R$ :

$$\text{„Äquivalentdosis“} \quad H_T = D \cdot w_R$$

$$\text{Einheit:} \quad 1 \text{ Sievert} = 1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$$

$w_R$  berücksichtigt die unterschiedliche „Gefährlichkeit“ der verschiedenen Strahlenarten:

Photonen ( $\gamma$ -Strahlen, Röntgen):	$w_R = 1$
Elektronen ( $\beta^-$ , $\beta^+$ -Strahlung):	$w_R = 1$
Protonen $> 2$ MeV:	$w_R = 5$
Alphateilchen, Schwerionen:	$w_R = 20$
Neutronen:	$w_R = 5 \dots 20$ (je nach Energie)

# Dosisbegriffe

## 3. Schritt

Manche Organe sind empfindlicher gegenüber ionisierender Strahlung als andere.

→ Um die „effektive“ Schädigung des Organismus als ganzen zu beziffern, bilden wir einen gewichteten Mittelwert über alle Organe.

„Effektive Dosis“

$$H = \sum_T H_T w_T = \sum_T D w_R w_T$$

Einheit:

1 Sievert = 1 Sv = 1 J/kg  $w_T$  = „Gewebewichtungsfaktor“

Keimdrüsen	$w_T = 0,20$	Brust	$w_T = 0,05$
Knochenmark (rot)	$w_T = 0,12$	Leber	$w_T = 0,05$
Dickdarm	$w_T = 0,12$	Speiseröhre	$w_T = 0,05$
Lunge	$w_T = 0,12$	Schilddrüse	$w_T = 0,05$
Magen	$w_T = 0,12$	Haut	$w_T = 0,01$
Blase	$w_T = 0,05$	Knochenoberfläche	$w_T = 0,01$
Restliche Organe	$w_T = 0,05$	<b>SUMME</b>	<b>1,00</b>

# Dosisbegriffe

## 3. Schritt

Manche Organe sind empfindlicher gegenüber ionisierender Strahlung als andere.

→ Um die „effektive“ Schädigung des Organismus als ganzen zu beziffern, bilden wir einen gewichteten Mittelwert über alle Organe.

„Effektive Dosis“

$$H = \sum_T H_T w_T = \sum_T D w_R w_T$$

Einheit:

1 Sievert = 1 Sv = 1 J/kg  $w_T$  = „Gewebewichtungsfaktor“

Keimdrüsen  
Knochenmark  
Dickdarm  
Lunge  
Magen  
Blase  
Restliche Organe

### Achtung:

Oft wird nicht der gesamte Körper bestrahlt.  
Dann ist die Äquivalentdosis für das getroffene Organ die maßgebliche Größe!

$w_T = 0,12$

Haut

$w_T = 0,01$

$w_T = 0,05$

Knochenoberfläche  $w_T = 0,01$

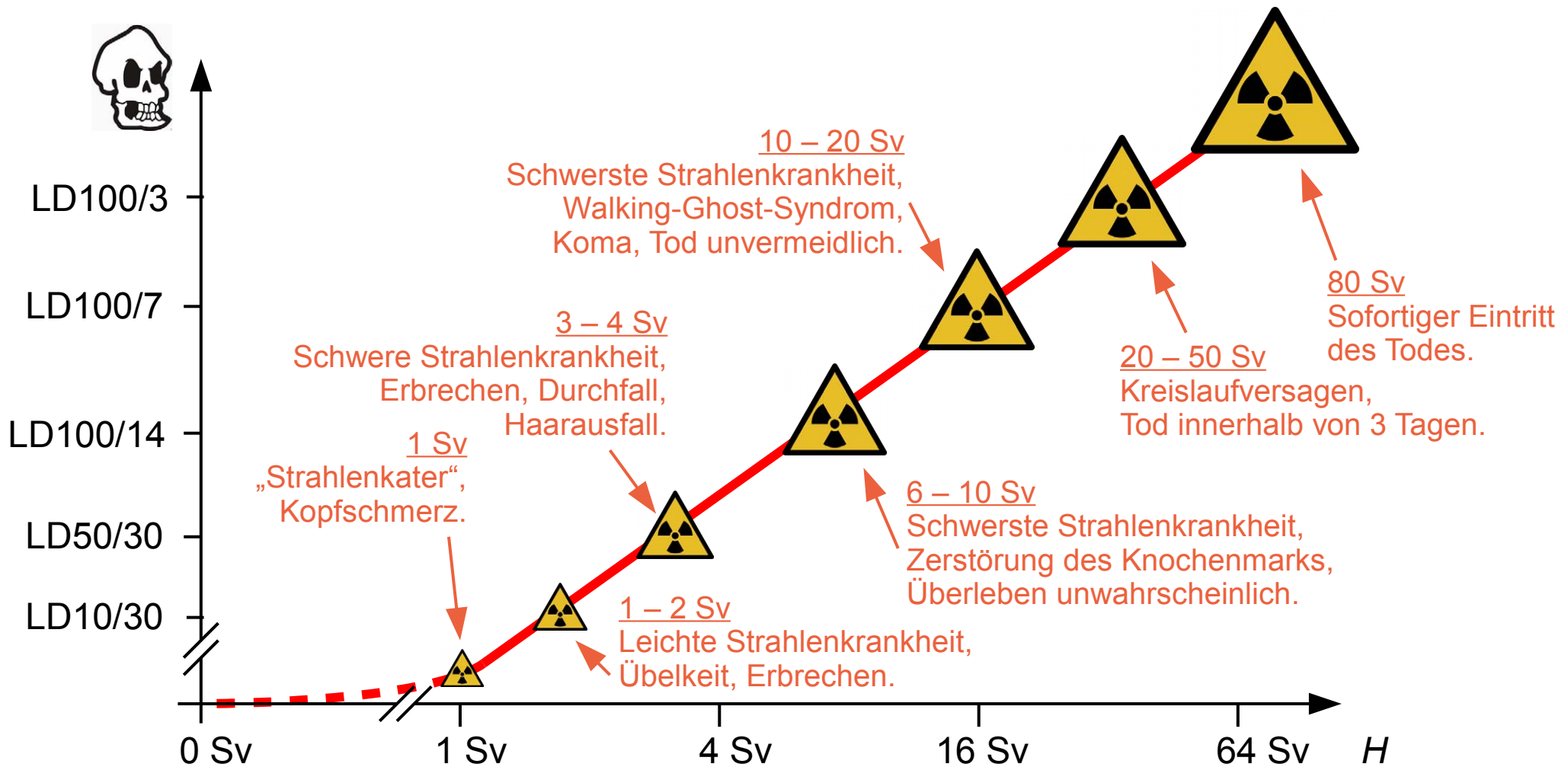
$w_T = 0,05$

**SUMME**

**1,00**

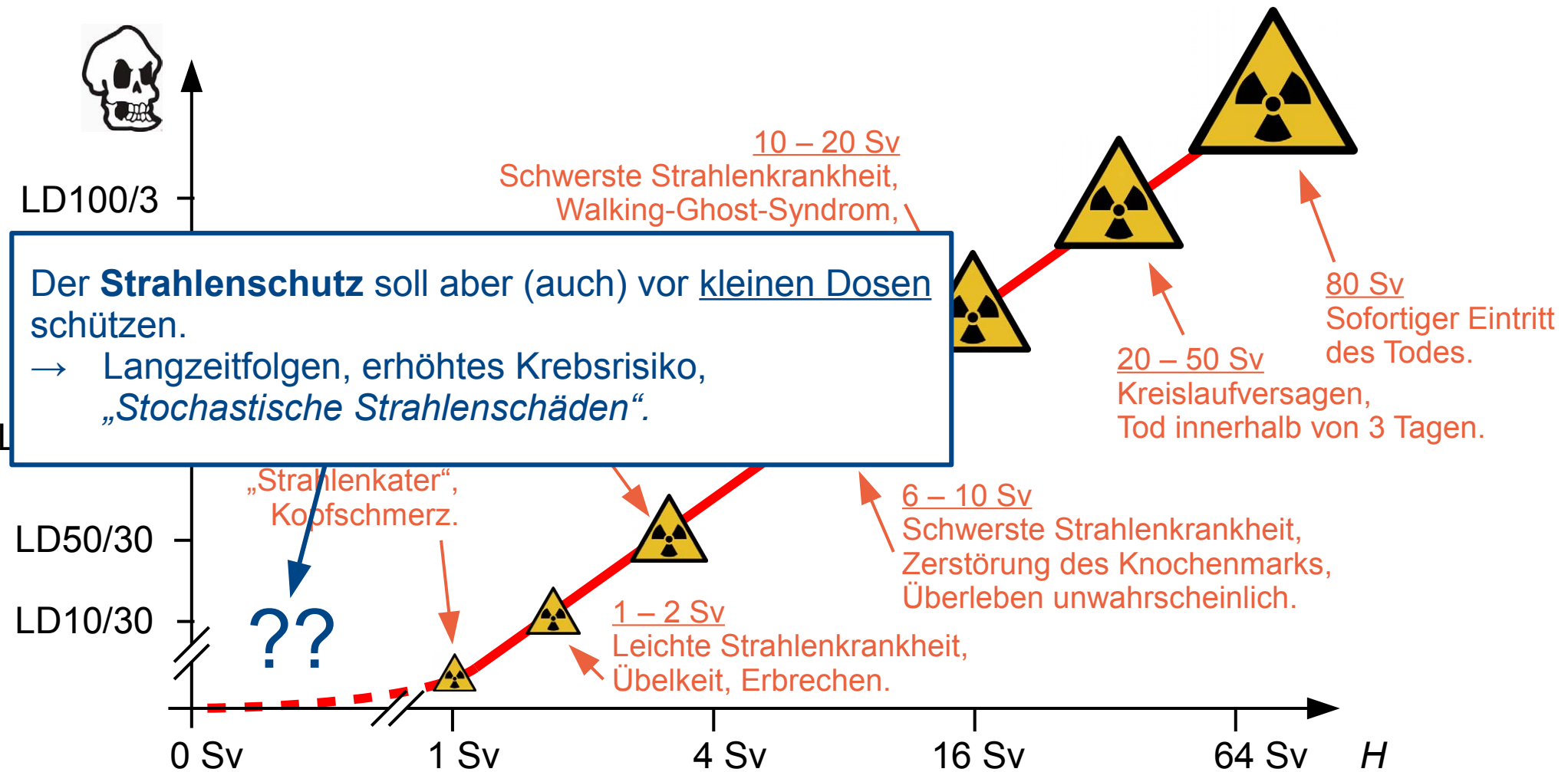
# Wie hoch darf die Strahlendosis sein?

**Großes Problem:** Präzise Daten zu den Folgen ionisierender Strahlung liegen nur im Bereich sehr hoher Dosen vor (Unfälle, Atombombenopfer). → „*Deterministische Schäden*“



# Wie hoch darf die Strahlendosis sein?

Großes Problem: Präzise Daten zu den Folgen ionisierender Strahlung liegen nur im Bereich sehr hoher Dosen vor (Unfälle, Atombombenopfer). → „*Deterministische Schäden*“



# Wie hoch darf die Strahlendosis sein?

## Grundlegende Argumentation:

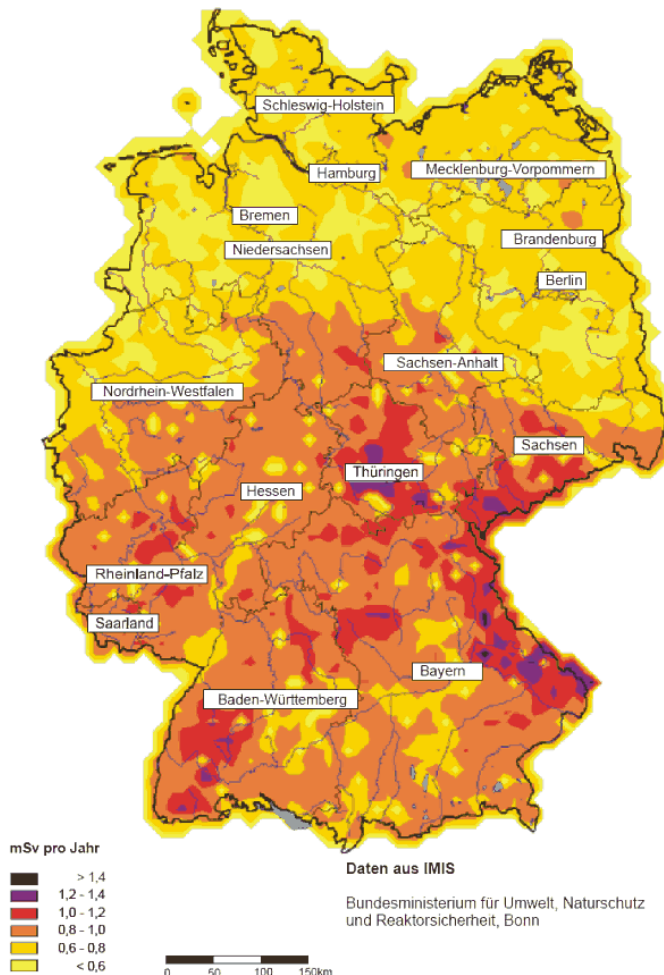
Die durch Anwendung von ionisierender Strahlung verursachte Belastung von unbeteiligten Personen (StrSchV: „Bevölkerung“) soll gegenüber der (ohnehin vorhandenen) natürlichen Strahlenexposition vernachlässigbar sein.

Mittlere natürliche Strahlenbelastung in Deutschland:

**2,1 mSv/a** (Millisievert pro Jahr, Stand 2016)

Davon ~ 1,1 mSv/a durch Radon-222 in Raumluft (Gebäude)  
~ 0,7 mSv/a Höhenstrahlung, Bodenstrahlung  
~ 0,3 mSv/a Nahrungsaufnahme (z.B.  $^{40}\text{K}$ )

Schwankungsbreite: **1 ... 5 mSv/a**  
(Süd-Nord-Gefälle)



Natürliche  
Strahlenbelastung  
im Freien

# Wie hoch darf die Strahlendosis sein?

## Grundlegende Argumentation:

Die durch Anwendung von ionisierender Strahlung verursachte Belastung von unbeteiligten Personen (StrSchV: „Bevölkerung“) soll gegenüber der (ohnehin vorhandenen) natürlichen Strahlenexposition vernachlässigbar sein.

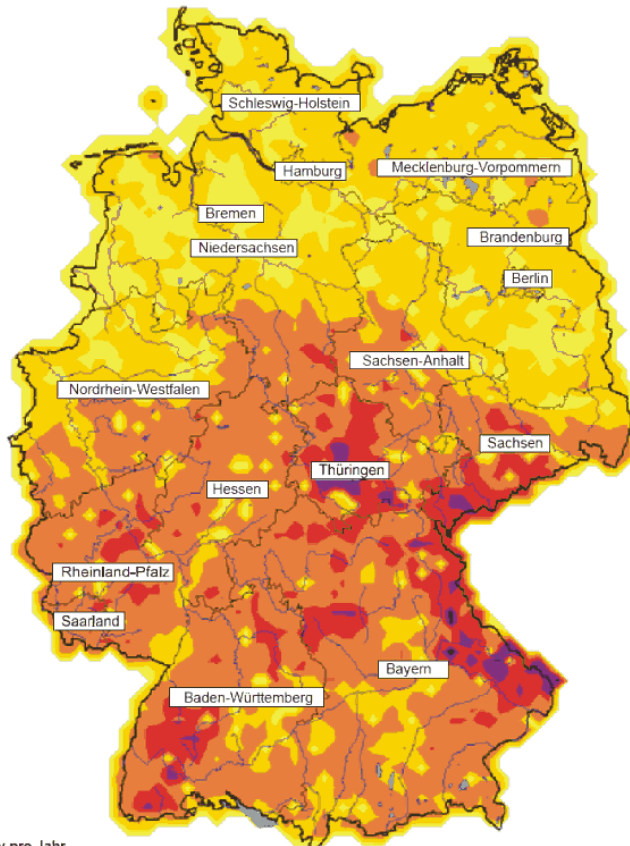
Mittlere natürliche Strahlenbelastung in Deutschland:

2,1 mSv/a (Millisievert pro Jahr, Stand 2016)

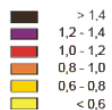
→ Die durch Anwendung von Strahlung verursachte Mehrbelastung einer beliebigen unbeteiligten Person muss

so gering wie technisch machbar sein („ALARA“),

auf jeden Fall aber  $\leq 1$  mSv/a !



mSv pro Jahr



Daten aus IMIS

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit, Bonn

0 50 100 150km



# Wie hoch darf die Strahlendosis sein?

Für beruflich mit Strahlenquellen tätige Personen gelten höhere Grenzwerte.

Beruflich strahlenexponierte Person (Kategorie B):

$\leq 6 \text{ mSv/a}$  (ca. 3-fache nat. Strahlenbelastung)

Beruflich strahlenexponierte Person (Kategorie A):

$\leq 20 \text{ mSv/a}$  (ca. 10-fache nat. Strahlenbelastung)



# Wie hoch darf die Strahlendosis sein?

Für beruflich mit Strahlenquellen tätige Personen gelten höhere Grenzwerte.

Beruflich strahlenexponierte Person (Kategorie B):

$\leq 6 \text{ mSv/a}$  (ca. 3-fache nat. Strahlenbelastung)

Beruflich strahlenexponierte Person (Kategorie A):

$\leq 20 \text{ mSv/a}$  (ca. 10-fache nat. Strahlenbelastung)



... Viele Sonderfälle ...

Minderjährige: Nur im Rahmen der Ausbildung.

Ungeborenes Leben:  $\leq 1 \text{ mSv}$  / Schwangerschaft.

Patienten, Probanden: Nur nach Indikation (z.B. RÖV).

...



# Messung von Strahlung

Macht sich die (bekannte) Wechselwirkung der Strahlung mit Materie zu nutze.

## Mögliche Detektionsverfahren

Photoeffekt, Ionisation → Strahlung erzeugt elektrische Ladungsträger (Strom).

Photoeffekt → Filmschwärzung durch Entwicklung.

Lumineszenz, Szintillation → Energiedeposition führt zu Emission von sichtbarem Licht

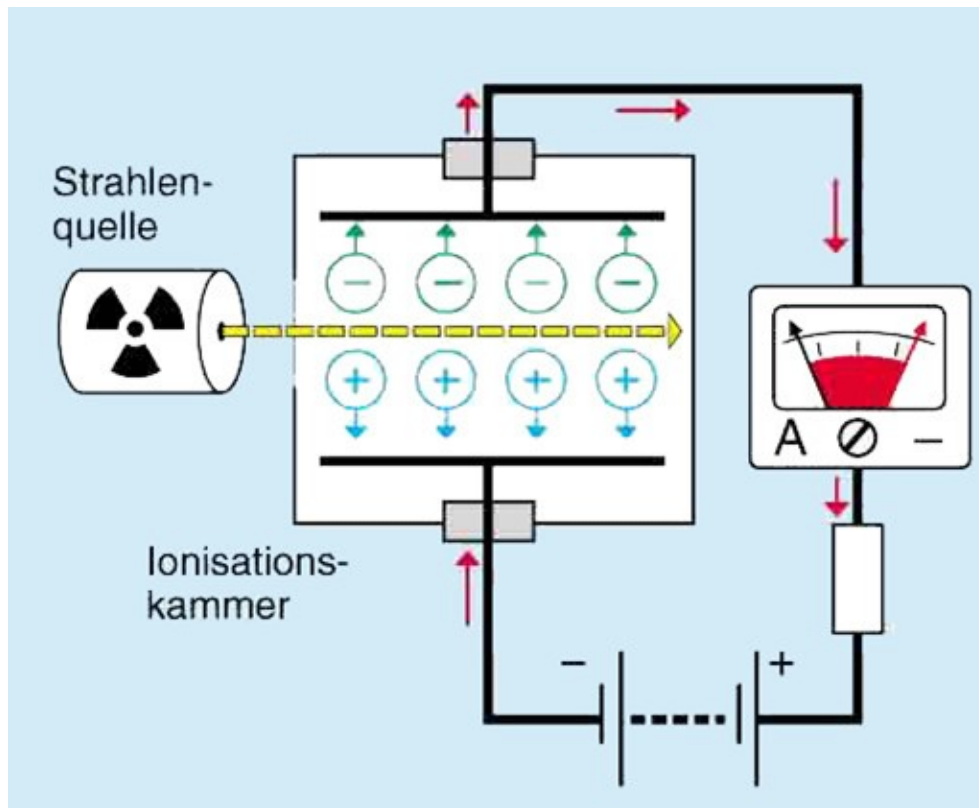
Mikrokalorimetrie → Messung der durch die Strahlung erzeugten Wärme.

Thermolumineszenz → Strahlung deponiert Energie in Kristallen.

# Messung von Strahlung

## Ionisationskammer

Teilchendurchgang durch gasgefüllte Kammer erzeugt Elektron-Ion Paare, Ladungstrennung durch el. Spannung → **Messbarer Strom**



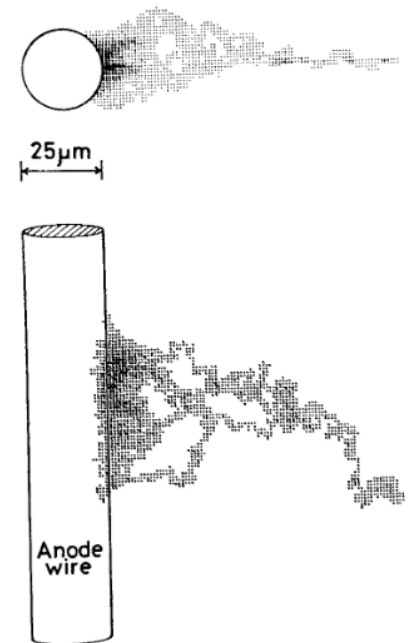
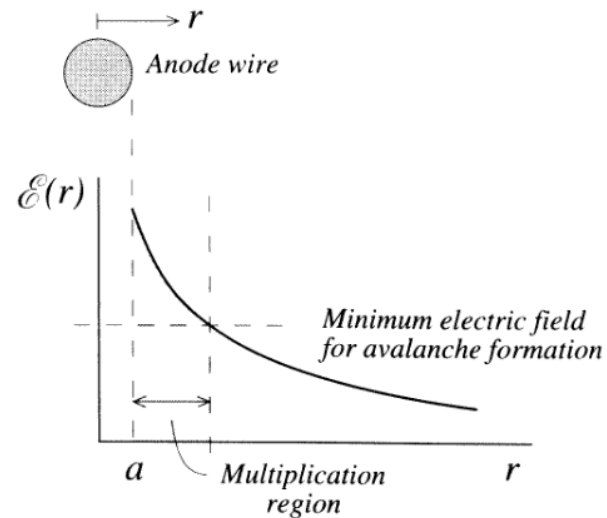
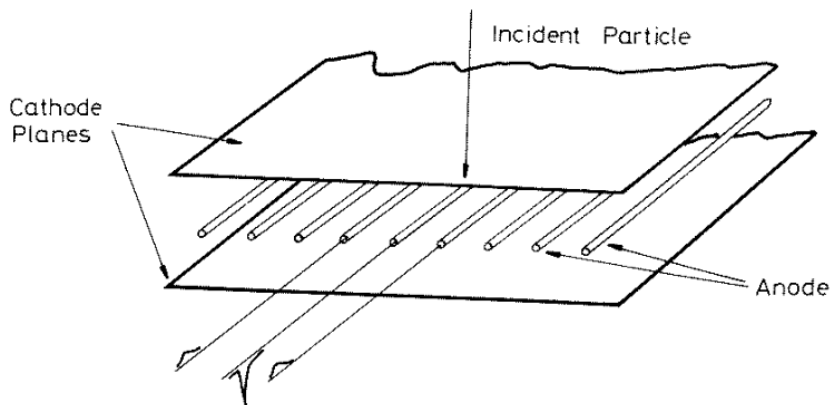
[klinikum.uni-heidelberg.de](http://klinikum.uni-heidelberg.de)

# Messung von Strahlung

## Ionisations-Zähler mit Ladungsverstärkung

Teilchendurchgang durch gasgefüllte Kammer erzeugt Elektron-Ion Paare,

Elektrische Spannung so groß, dass Sekundärteilchen selbst ionisierend werden („Ladungs-Lawine“).



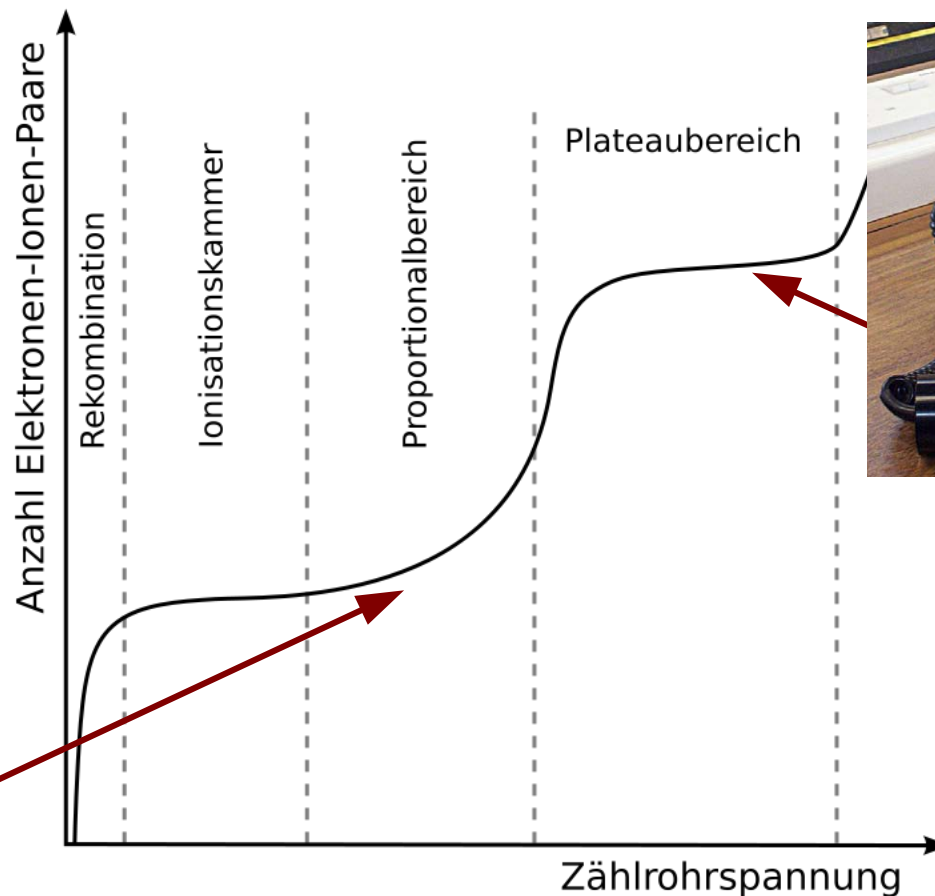
P. Forck, Lecture Notes, JUAS Lecture Notes (2011)

# Messung von Strahlung

## Zähler mit Ladungsverstärkung

Teilchendurchgang durch gasgefüllte Kammer erzeugt Elektron-Ion Paare,

Elektrische Spannung so groß, dass Sekundärteilchen selbst ionisierend werden („Ladungs-Lawine“).



de.wikipedia.org



Geiger-Müller-Zählrohr

„Kontamat“-Proportionalzähler

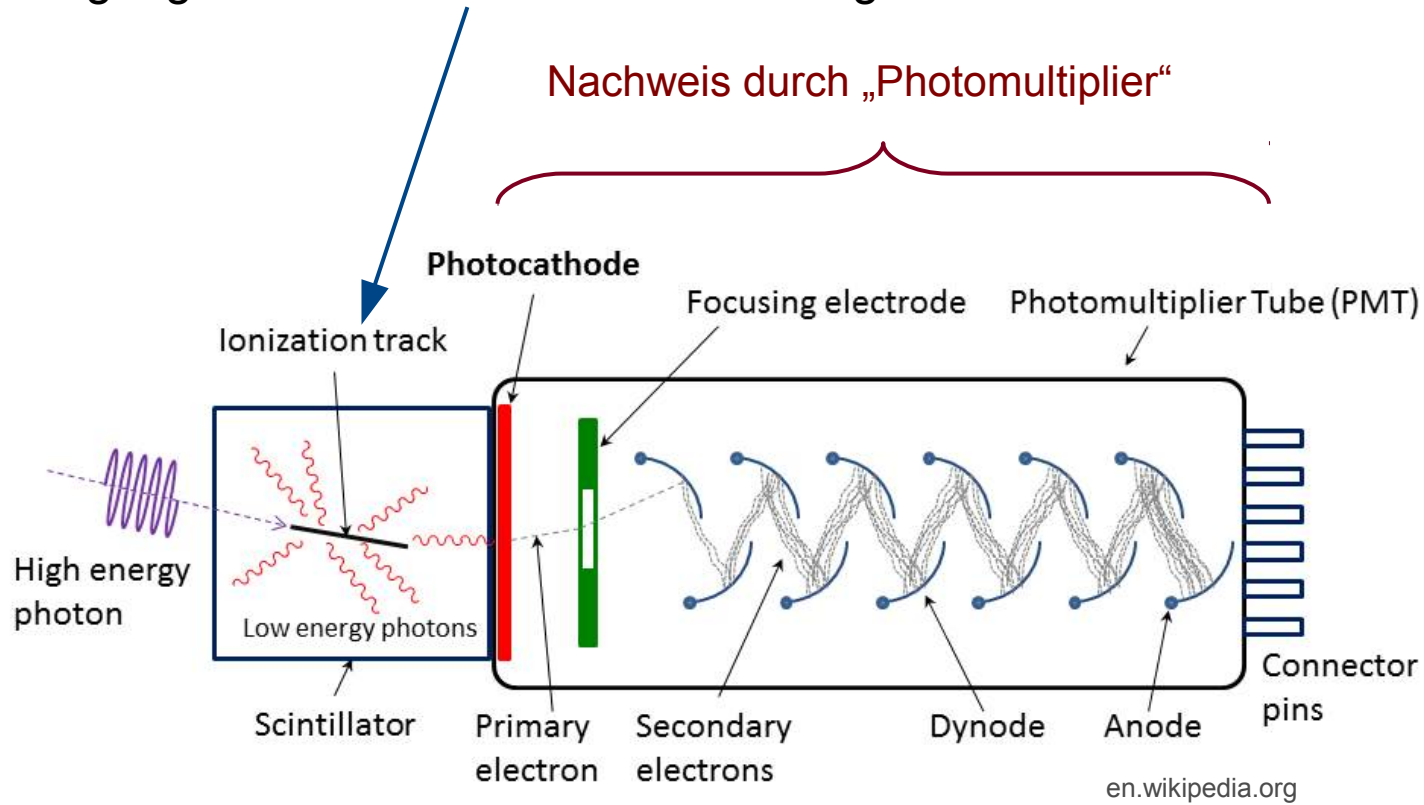


kllinikum.uni-heidelberg.de

# Messung von Strahlung

## Szintillations-Zähler

Teilchendurchgang durch **Szintillator-Kristall** erzeugt sichtbares Licht



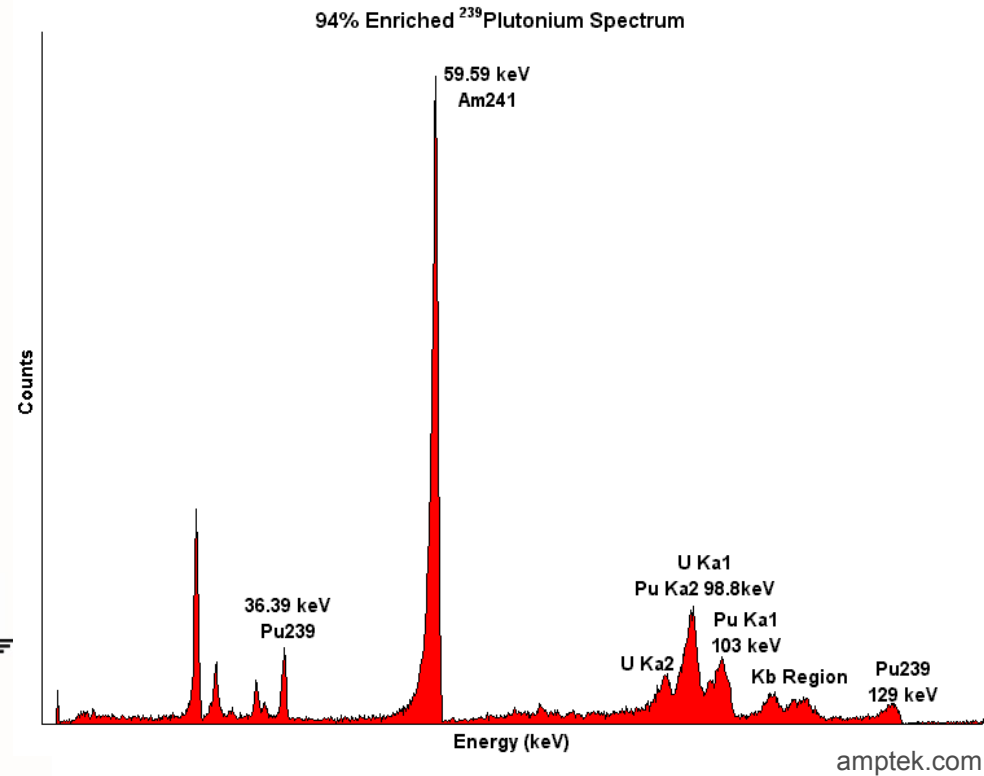
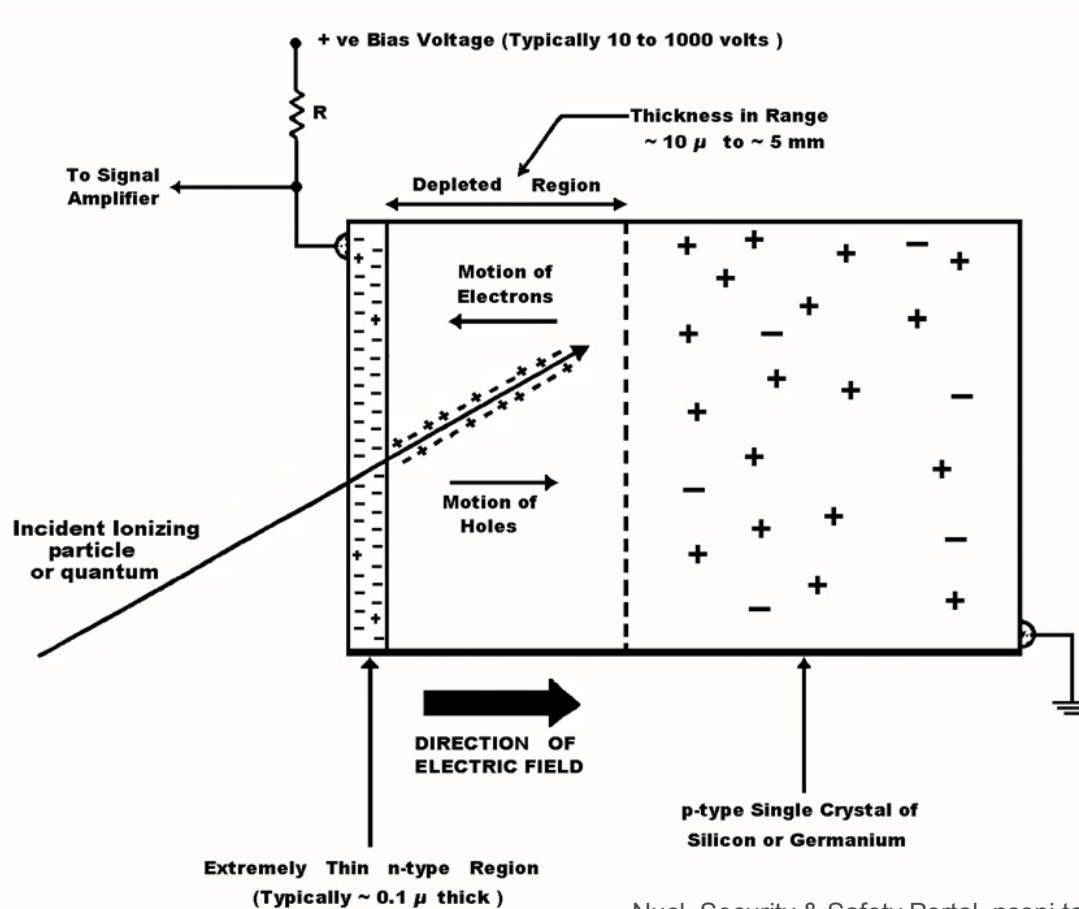
# Messung von Strahlung

## Halbleiter-Zähler

Teilchendurchgang durch Halbleiterdiode erzeugt freie Ladungsträger → **Messbarer Strom.**

**Sehr hohe Energieauflösung**

→ Benutzung zur Identifikation von radioaktiven Proben durch  $\gamma$ -Spektroskopie.



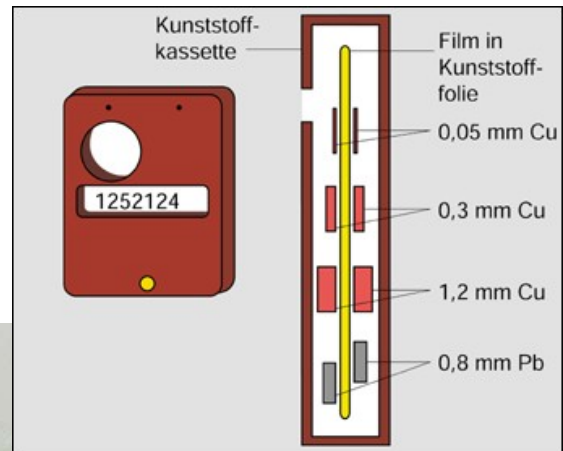
Nucl. Security & Safety Portal, nsspi.tamu.edu



# Messung von Strahlung

## Personen-Dosimeter

Zur Dokumentation der Dosisaufnahme von beruflich exponierten Personen.



Amtliches Filmdosimeter



# Messung von Strahlung

## Dosimeter für bestimmte Körperteile

Zur Dokumentation der Dosisaufnahme von beruflich exponierten Personen.



mirion.com



radcard.pl

Film- oder Thermolumineszenz-Dosimeter zur Überwachung von exponierten Körperteilen.

# Messung von Strahlung

## Personen-Dosimeter

Als Selbstschutz (Warnsystem) für beruflich Strahlenexponierte.



Elektronisches Dosimeter  
→ Anzeige der aktuellen  
Dosisleistung

Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit