

Vorlesung

Radiologie

Physikalische Grundlagen – Teil 2

Dr. Claude Krantz

Marburger Ionenstrahl-Therapiezentrum

27. Oktober 2016

Inhalt

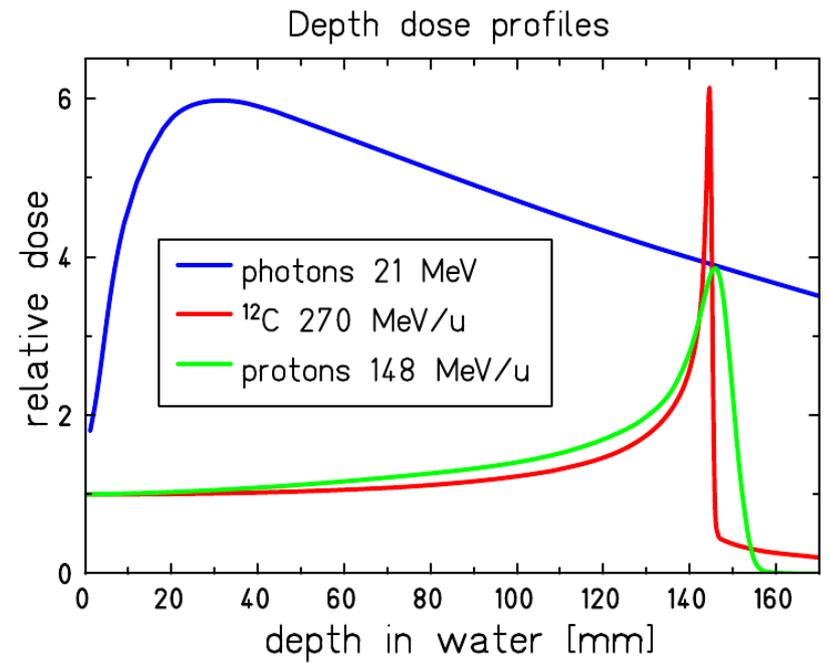
Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

Grundprinzipien des Strahlenschutzes

Messung von Strahlung, Dosisbegriffe

Einleitung

varian.com



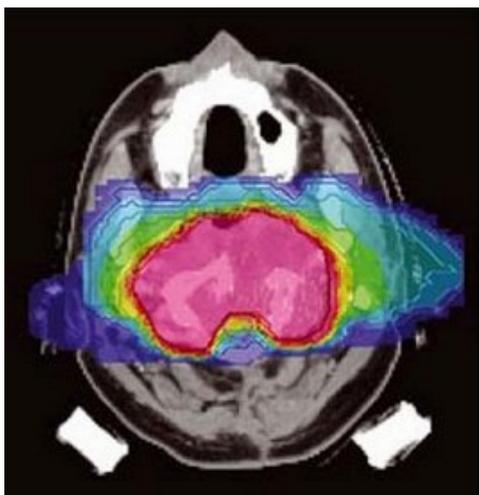
Krämer & Durante, Eur. Phys. J. D 60 (2010)

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

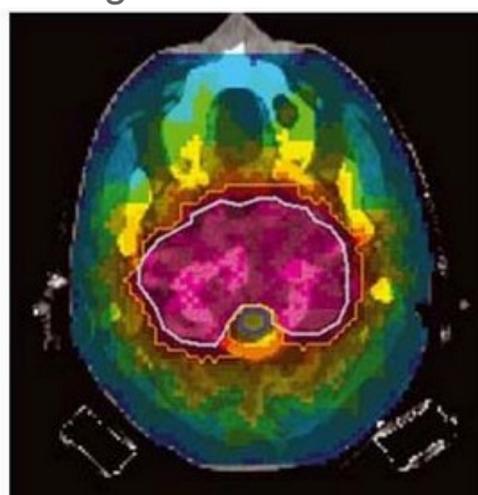
Abtöten bösartigen Gewebes durch hohe Dosen ionisierender Strahlung

Eine Anwendung technischer Strahlungsquellen

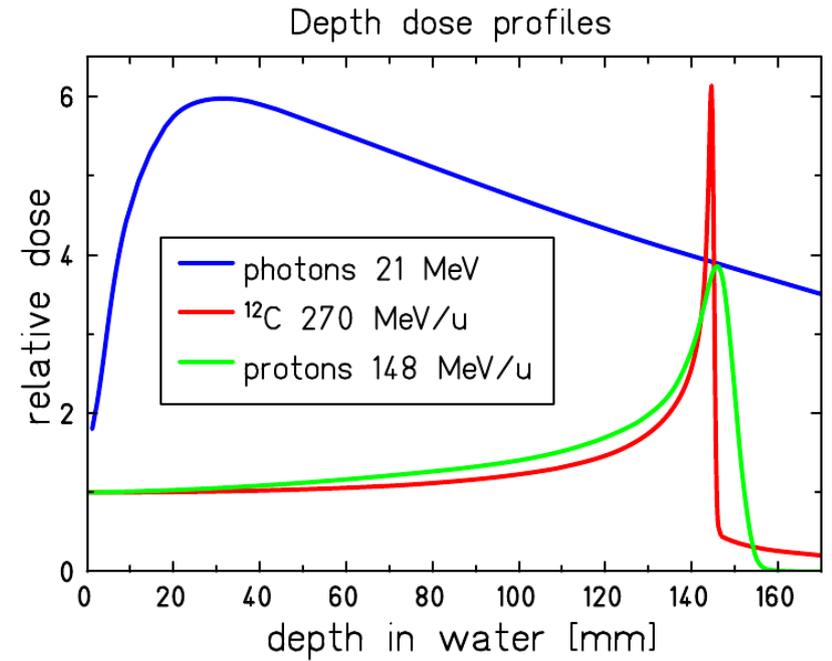
Schwere Ionen



Röntgenstrahlen

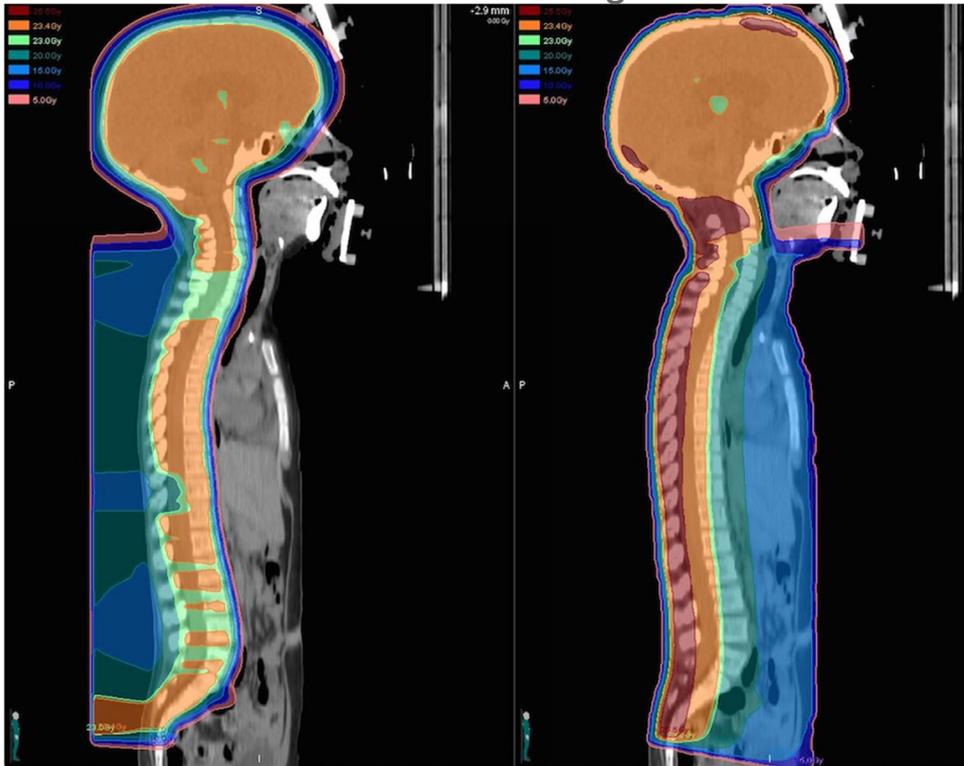


O. Jäkel, GSI



Schwere Ionen

Röntgenstrahlen



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

Abtöten bösartigen Gewebes durch
hohe Dosen ionisierender Strahlung

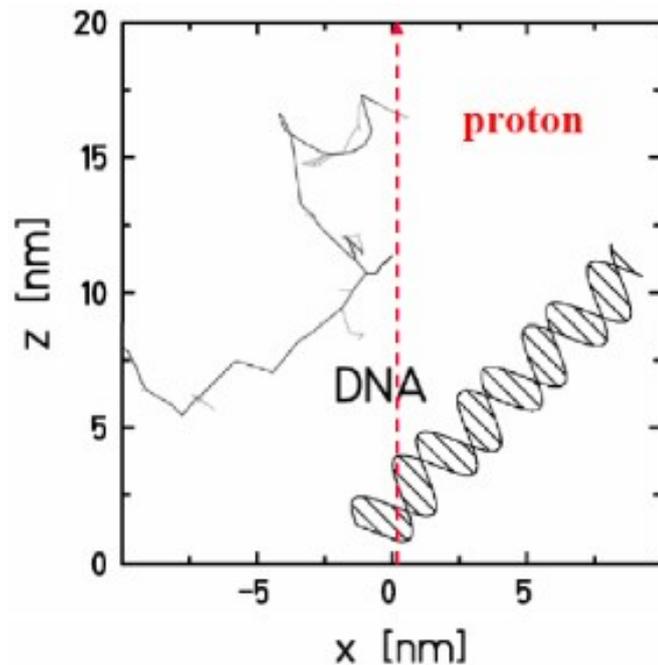
→ **Gesundes Gewebe muss nach
Möglichkeit geschont werden.**



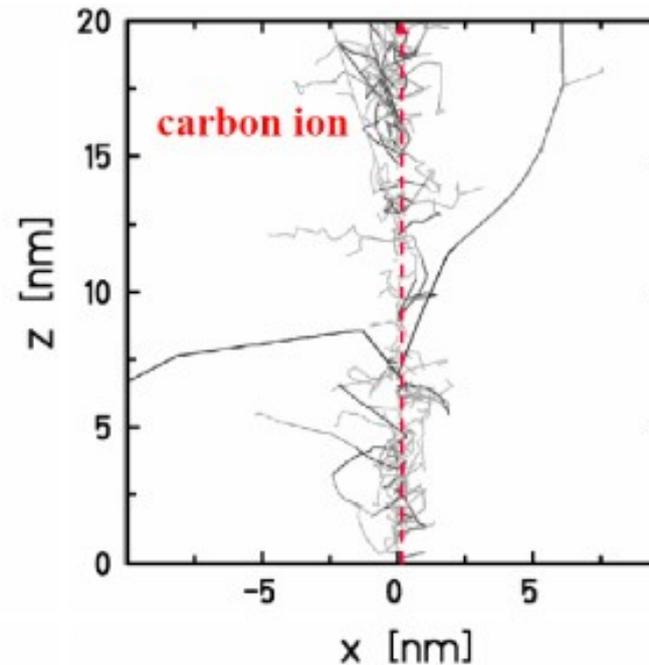
Unterschiedliche Teilchenarten haben unterschiedliche *“Biologische Wirksamkeit”*.

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

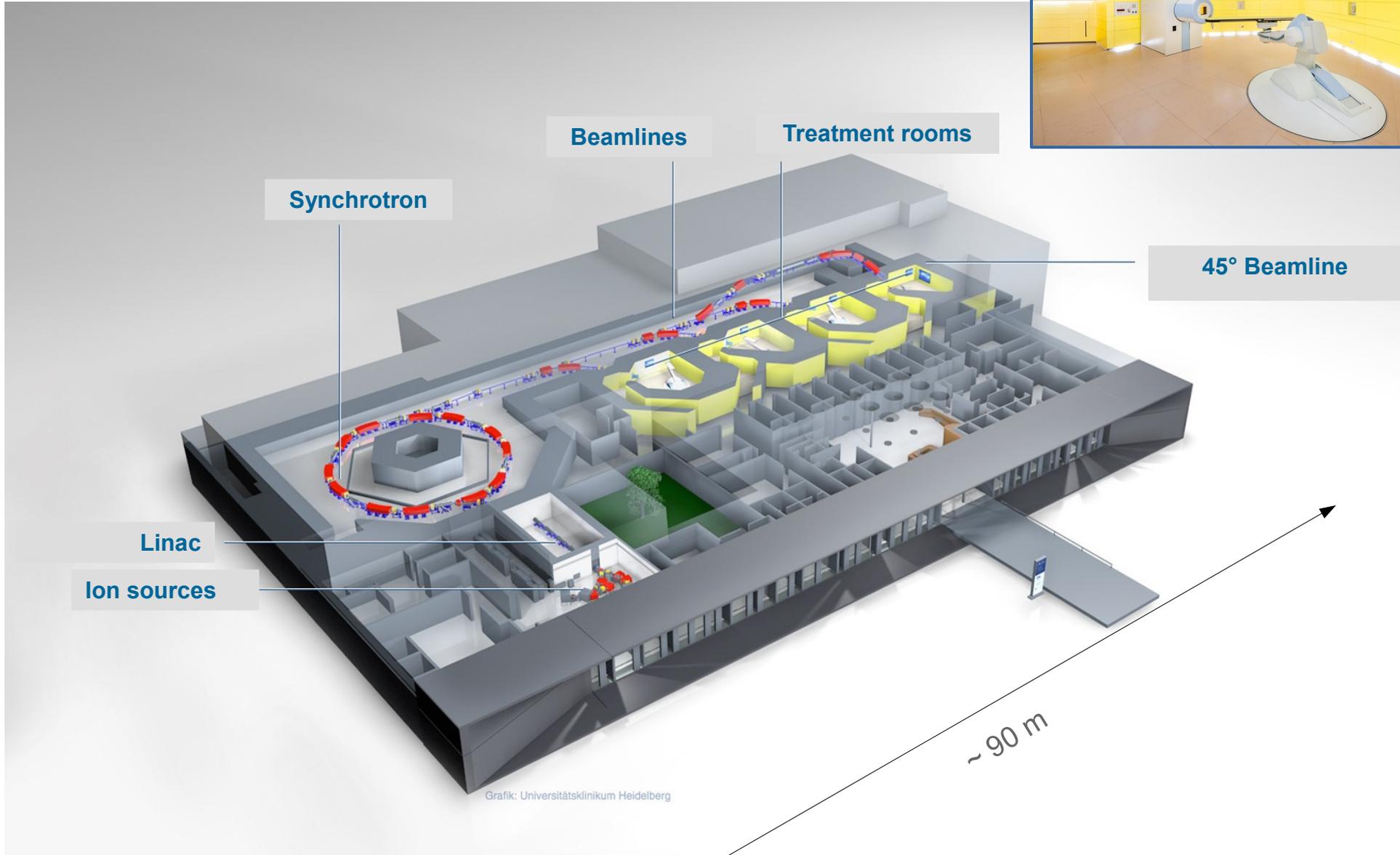
Protonen („leichte Ionen“)



C-Kerne („schwere Ionen“)

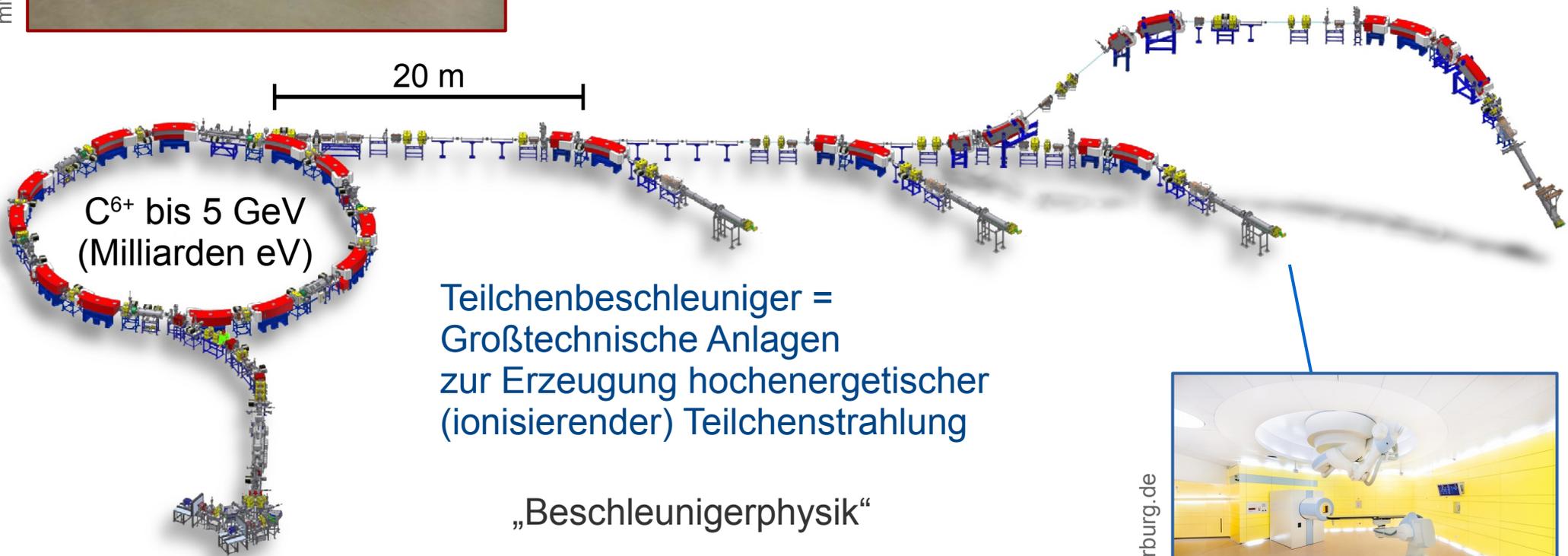


Marburger Ionenstrahl-Therapiezentrum



www.mit-marburg.de

Teilchenbeschleuniger



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

Anwendungen:

Grundlagenforschung,
Materialwissenschaft,
Medizin, Halbleitertechnik, ...





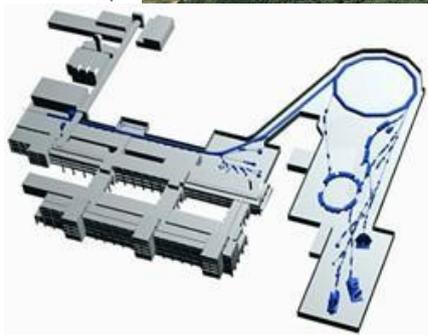
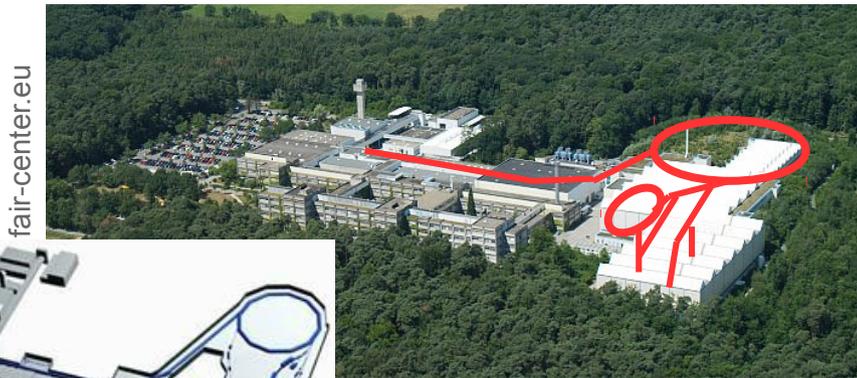
Ionenbeschleuniger, ~ 0.4 GeV/u, Umfang 65 m

MIT, Marburg



Ionenbeschleuniger, ~ 0.4 GeV/u, Umfang 65 m

SIS18 (GSI), Darmstadt



Ionenbeschleuniger, ~ 2 GeV/u, Umfang 216 m

MIT, Marburg



Ionenbeschleuniger, ~ 0.4 GeV/u, Umfang 65 m

PETRA III (DESY), Hamburg



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

SIS18 (GSI), Darmstadt



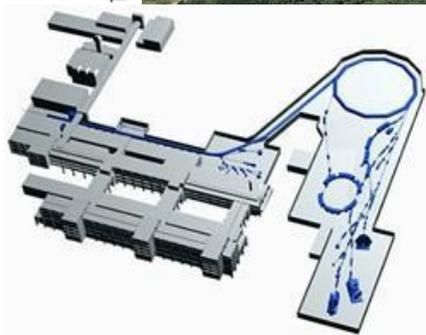
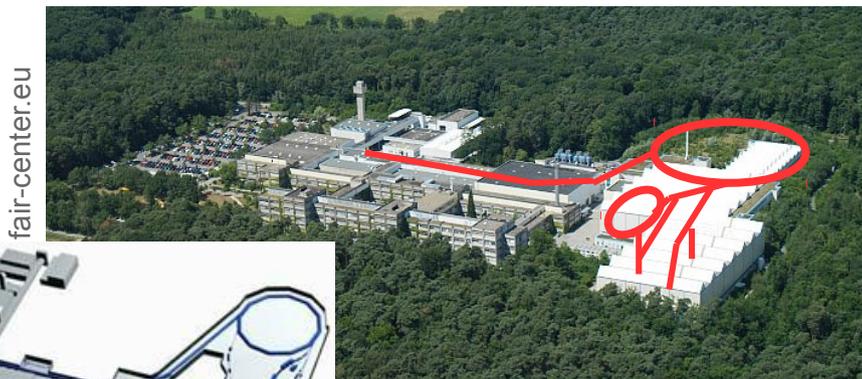
Ionenbeschleuniger, ~ 2 GeV/u, Umfang 216 m

MIT, Marburg



Ionenbeschleuniger, ~0.4 GeV/u, Umfang 65 m

SIS18 (GSI), Darmstadt



Ionenbeschleuniger, ~2 GeV/u, Umfang 216 m

PETRA III (DESY), Hamburg



Elektronenbeschleuniger, 6 GeV, Umfang ~ 2,3 km

Large Hadron Collider (CERN), Genf

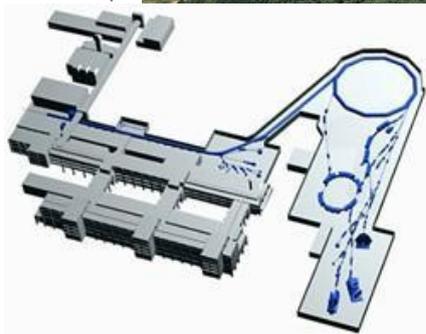
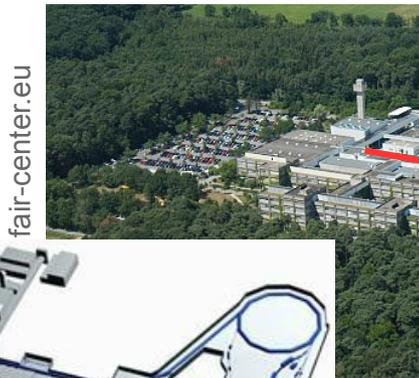


Ionenbeschleuniger, 6500 GeV (p), Umfang 27 km



Ionenbeschleuniger, ~0

SIS18 (GSI), Darmstadt



Ionenbeschleuniger, ~2 GeV/u,
Umfang 216 m



Ionenbeschleuniger, ~3 GeV, Umfang ~ 2,3 km

LHC (CERN), Genf



Ionenbeschleuniger, 6500 GeV (p),
Umfang 27 km

Wichtiges Thema:

Schutz der Bevölkerung und der Mitarbeiter vor ionisierender Strahlung.

Atomgesetz (AtG)

Strahlenschutzverordnung (StrSchV)

Röntgenverordnung (RöV)

Inhalt

Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

Grundprinzipien des Strahlenschutzes

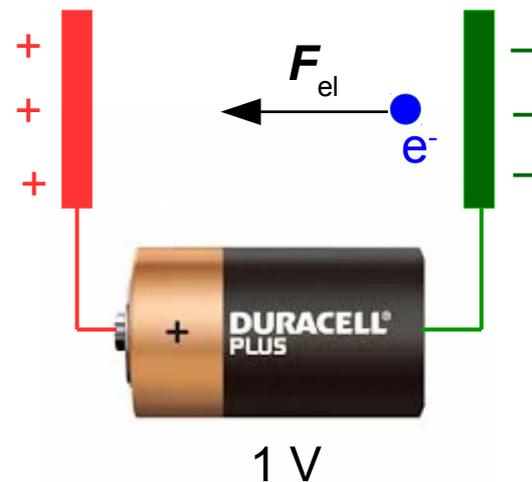
Dosisbegriffe, Messung von Strahlung

Bereits gesehen ...

Geeignete Einheit der Energie: eV („Elektronvolt“)

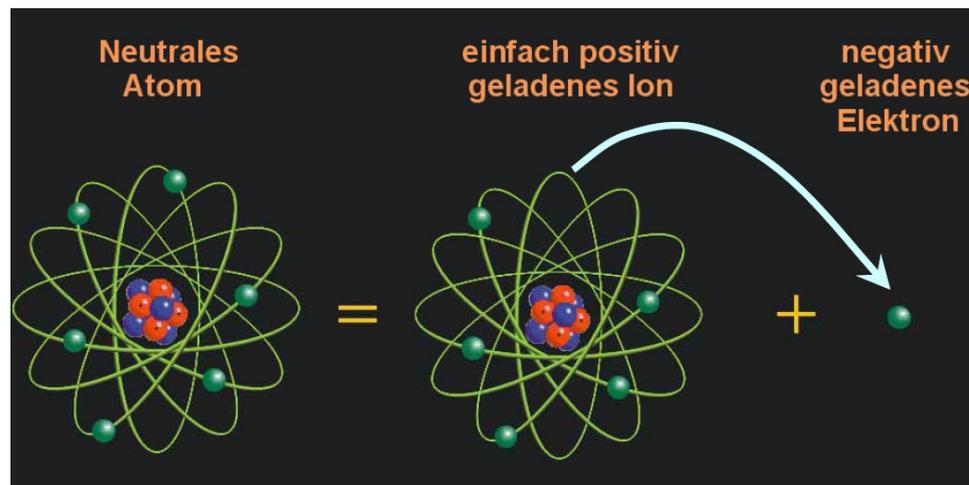
Kinetische Energie ($\sim \frac{1}{2} mv^2$) eines Elektrons, das mit einer elektrischen Spannung von 1 V beschleunigt wurde.

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

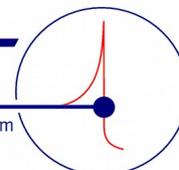


Energie, die zur Ionisation eines Atoms benötigt wird („Ionisationsschwelle“): ~ 5 bis 15 eV

z.B. Einfachionisation eines Kohlenstoffatoms:



Spruck, WS2016/17



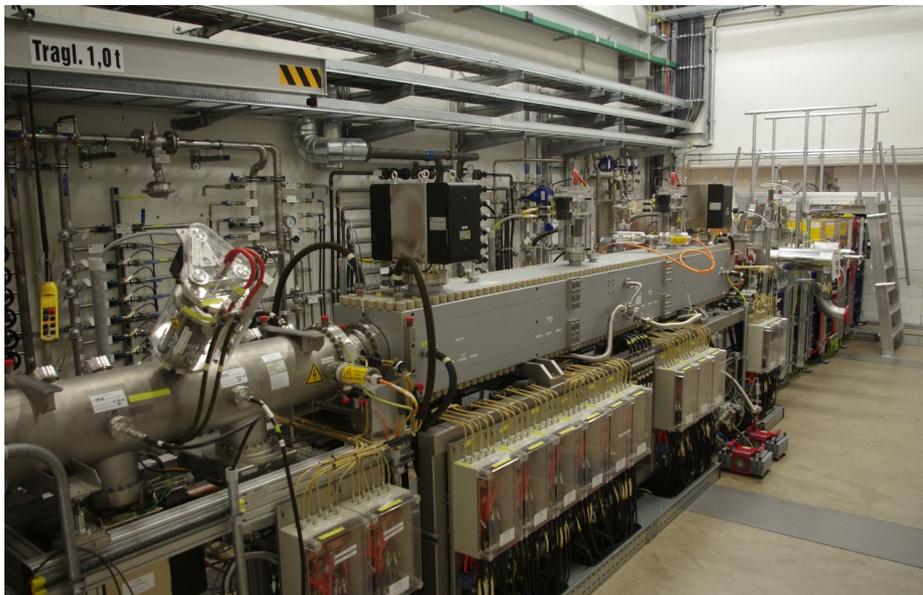
Bereits gesehen ...

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

α -Zerfall von Am-241: 5,4 MeV



Radiofrequenz-Vorbeschleuniger des MIT



^{241}Am -Quelle aus einem Rauchmelder.

wikimedia.org

Bereits gesehen ...

Es gibt unterschiedliche Arten von ionisierender Strahlung!

Schwere, geladene Teilchen

z.B. α -Strahlung oder Kernspaltung radioaktiver Stoffe,
Ionen aus Beschleunigeranlagen

Leichte, geladene Teilchen

z.B. Elektronen oder Positronen aus β^- oder β^+ -Zerfällen,
Elektronen aus Beschleunigeranlagen

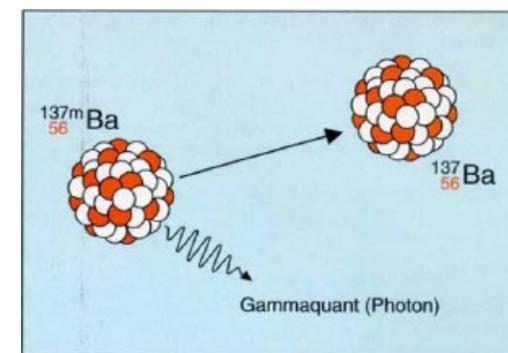
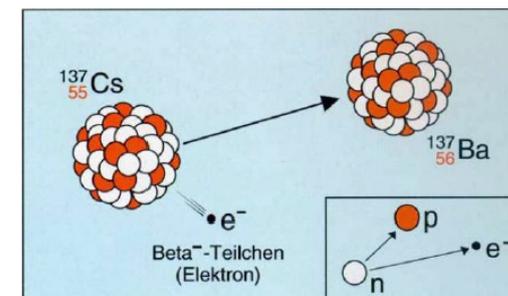
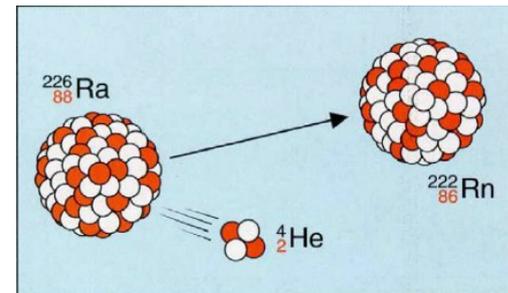
Hochfrequente elektromagnetische Strahlung (Photonenstrahlen)

z.B. γ -Strahlung aus radioaktiven Zerfällen,
Röntgenstrahlung aus Elektronenröhren

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

[Schwere, ungeladene Teilchen

Neutronen aus Kernreaktionen.]



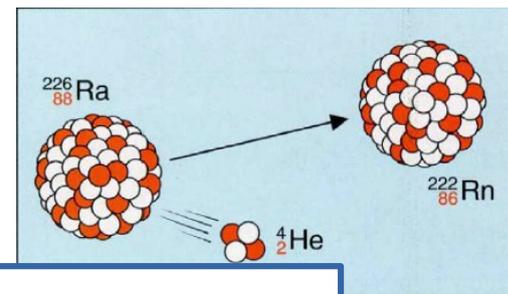
Volkmer, Kernenergie Basiswissen, DATF, 2013

Bereits gesehen ...

Es gibt unterschiedliche Arten von ionisierender Strahlung!

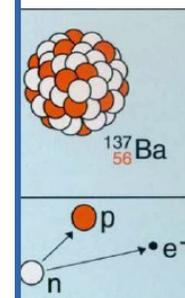
Schwere, geladene Teilchen

z.B. α -Strahlung oder Kernspaltung radioaktiver Stoffe,
Ionen aus Beschleuniger



Leichte, geladene Teilchen

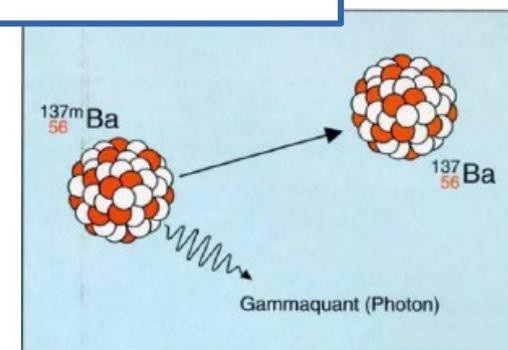
z.B. Elektronen oder Positronen
Elektronen aus Beschleuniger



Hochfrequente elektromagnetische Strahlung (Photonenstrahlung)

z.B. γ -Strahlung aus radioaktiven Zerfällen,
Röntgenstrahlung aus Elektronenröhren

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



[Schwere, ungeladene Teilchen

Neutronen aus Kernreaktionen.]

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

Volkmer, Kernenergie Basiswissen, DATF, 2013

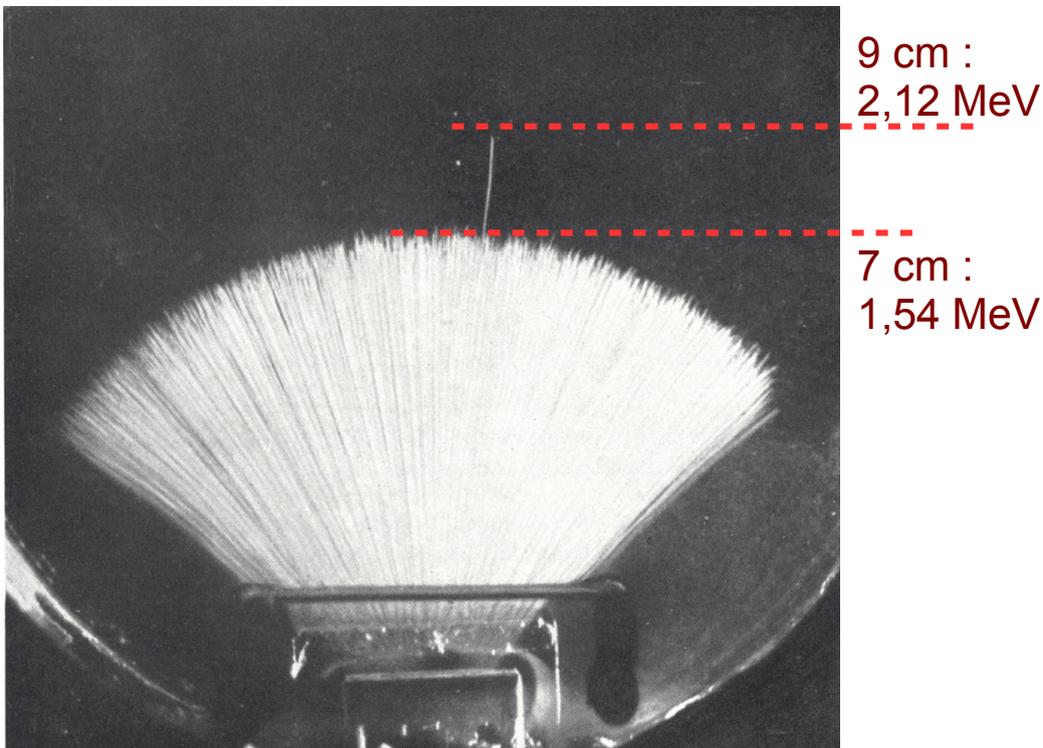
Schwere geladene Teilchen in Materie

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

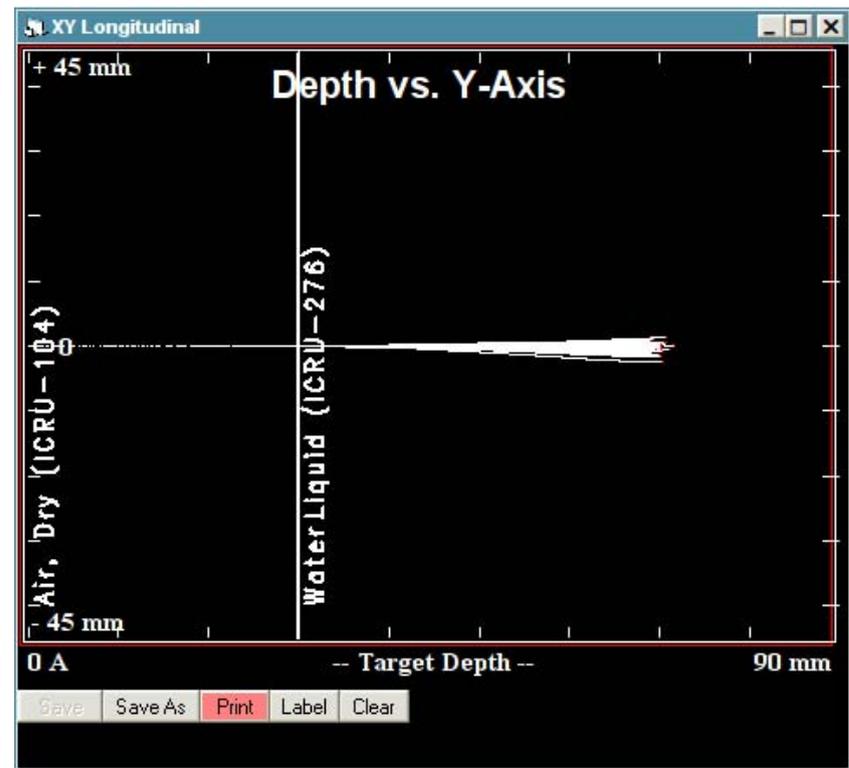
Elektrische Ladung Eine oder mehrere **Elementarladungen (e)**

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

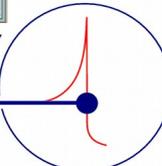
Alpha-Teilchen aus ^{214}Po in Nebelkammer



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

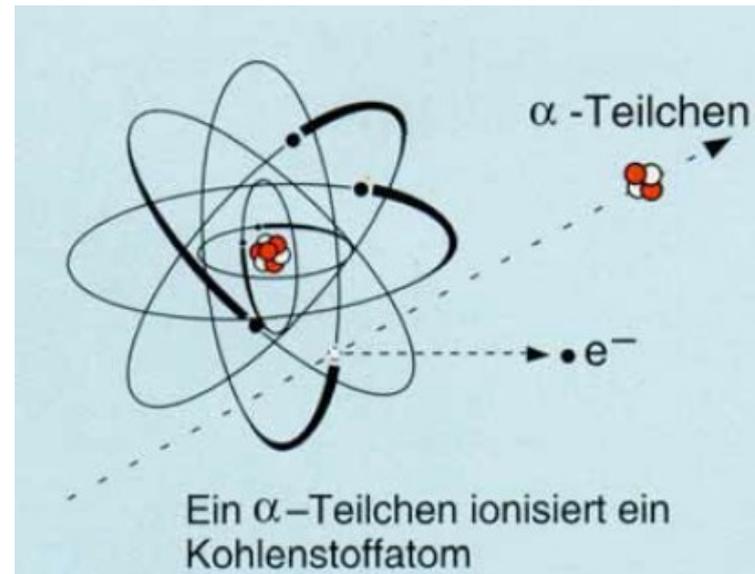
Beim Durchfliegen der Materie begegnen Sie **hauptsächlich den Elektronen** der „Target“-Atome.

→ wiederholte **Ionisation und Anregung**

→ Wegen **Masse_{Projektil} >> Masse_{Elektron}** ändert sich die Flugrichtung des schweren Teilchens kaum.

→ Es kommt aber **bei jeder Wechselwirkung** zu einem **kleinen Energieverlust ΔE** des Projektils.

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



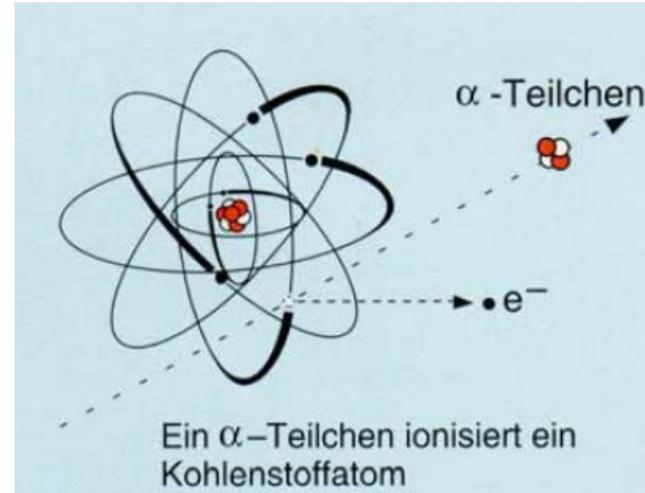
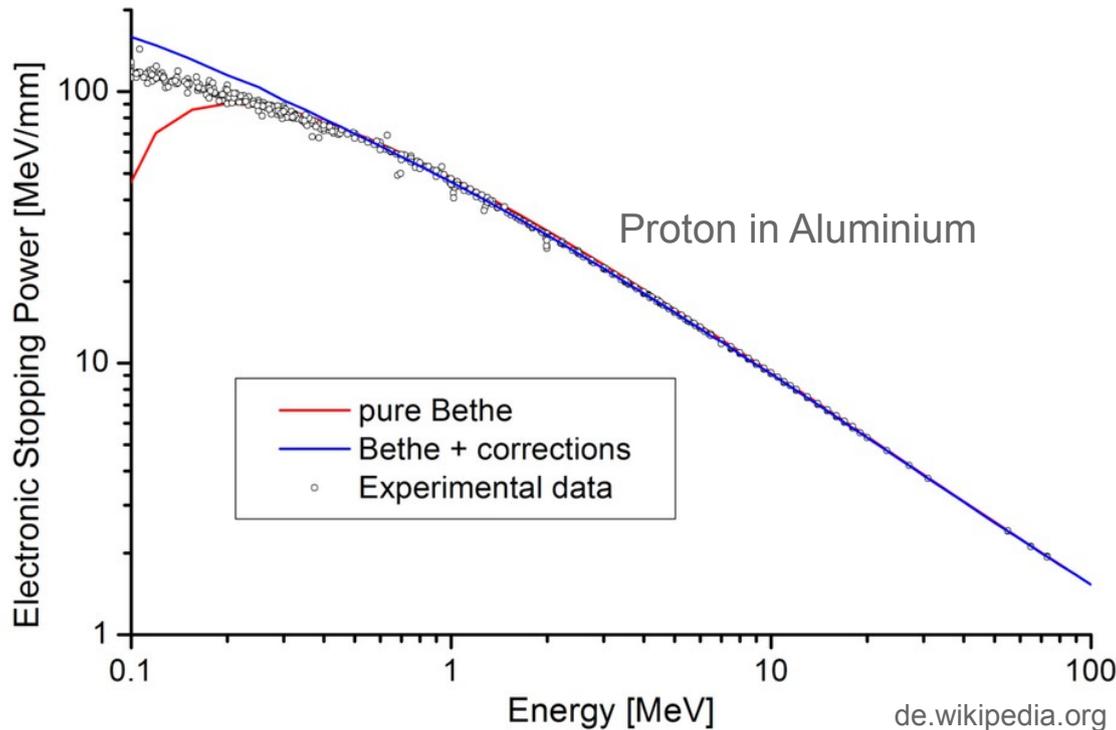
Volkmer, Kernenergie Basiswissen, DATF, 2013

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

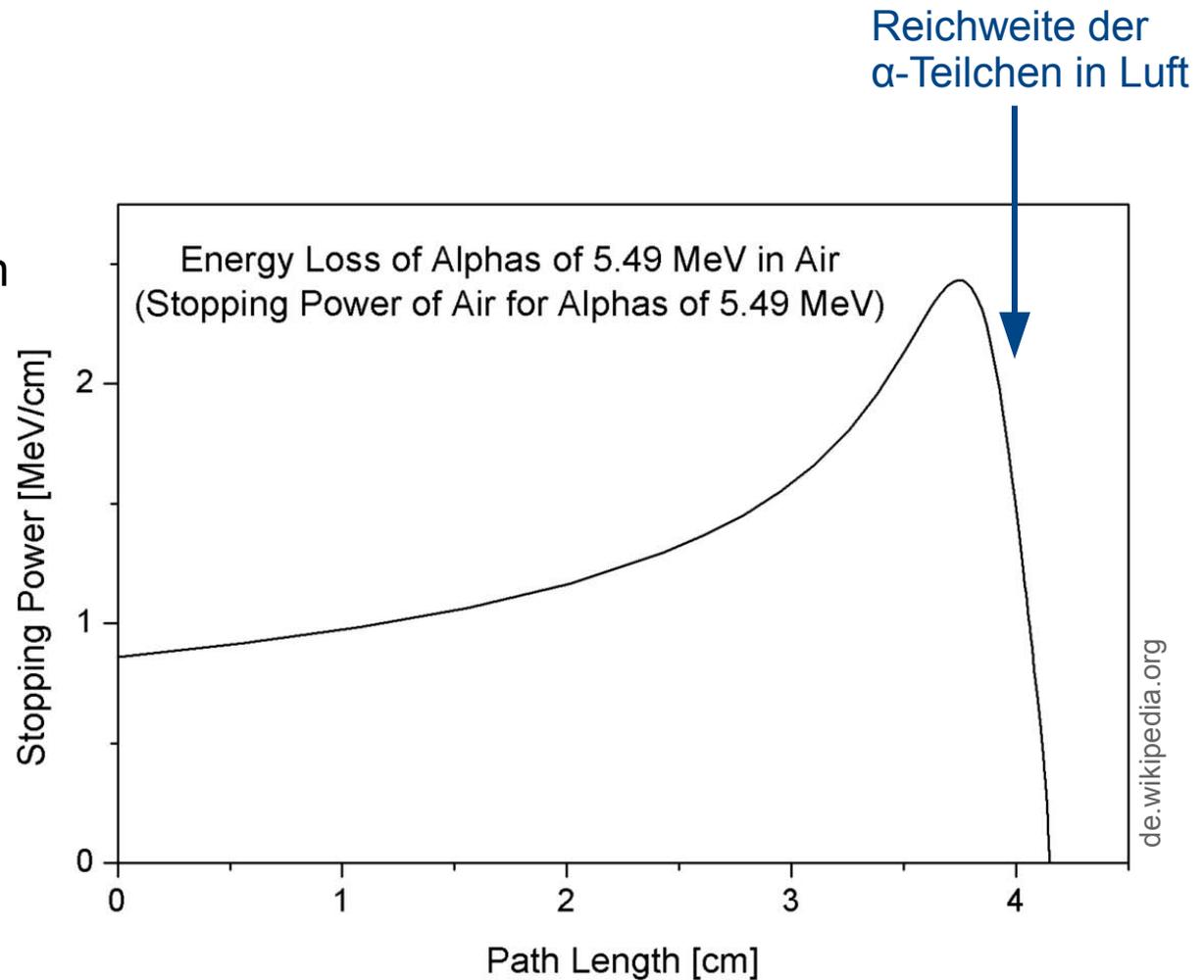
Schwere geladene Teilchen in Materie

Wichtige Konsequenz:

Schwere geladene Teilchen geben den größten Teil ihrer Energie am Ende ihrer Flugstrecke ab.

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

→ Definierte Reichweite bei gegebener Energie.

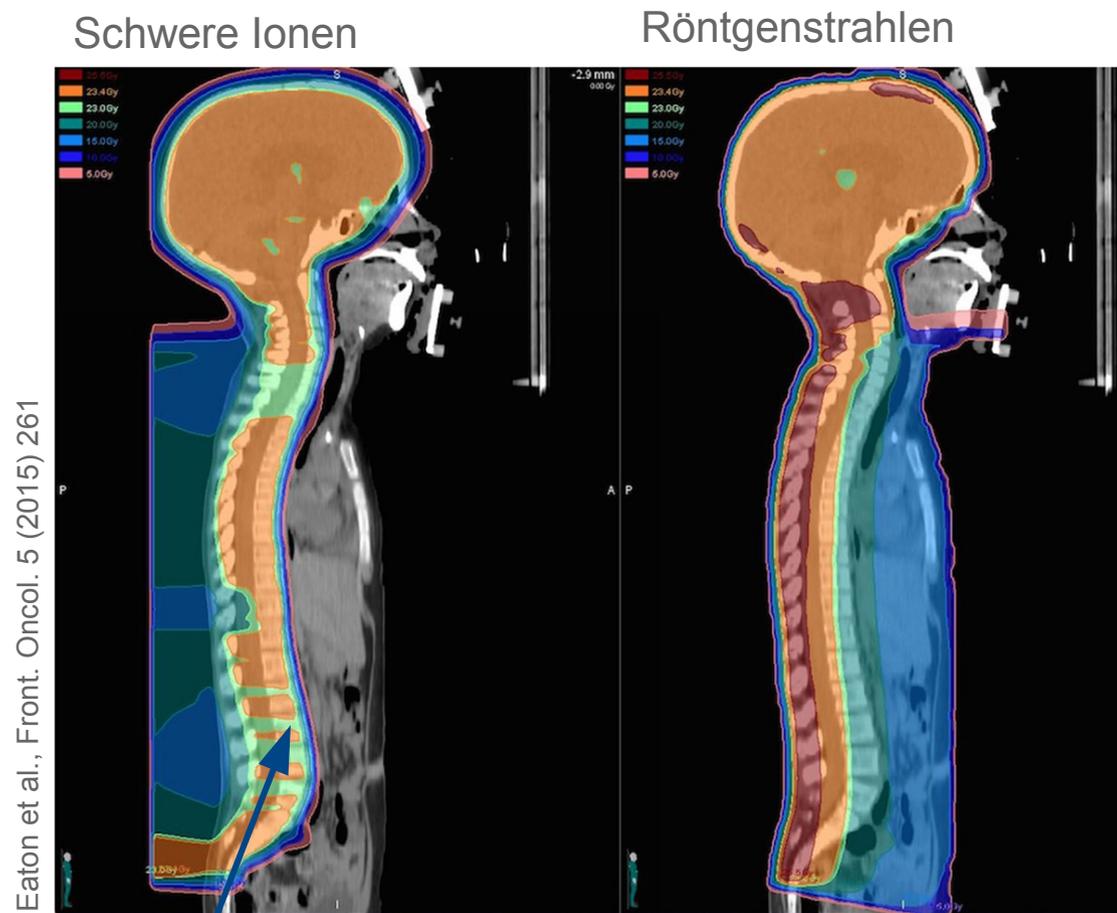


Schwere geladene Teilchen in Materie

Wichtige Konsequenz:

Schwere geladene Teilchen geben den größten Teil ihrer Energie am Ende ihrer Flugstrecke ab.

- „Bragg'sche Kurve“ oder „Bragg-Peak“
- Definierte Reichweite bei gegebener Energie.



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.

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

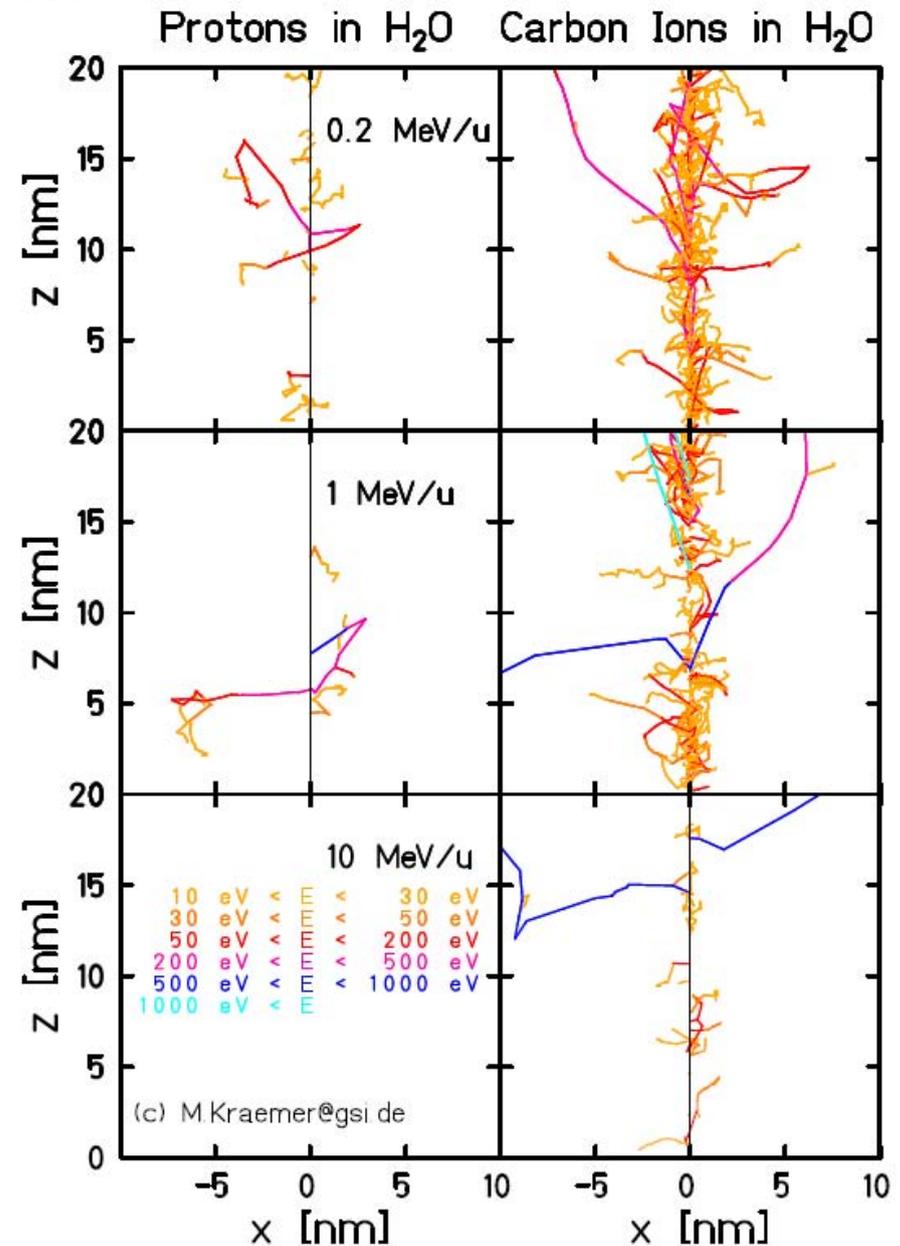
Die erzeugten freien Elektronen („Sekundärelektronen“) können um die Flugbahn herum weitere Atome ionisieren.

Man spezifiziert den lokal ionisierenden Anteil der deponierten Energie durch Angabe der größten „mitgezählten“ Elektronenenergie.

LET_{∞} = Alle Elektronen

LET_{100} = Nur Elektronen unter 100 eV

[Beachte: $LET_{\infty} = S$]



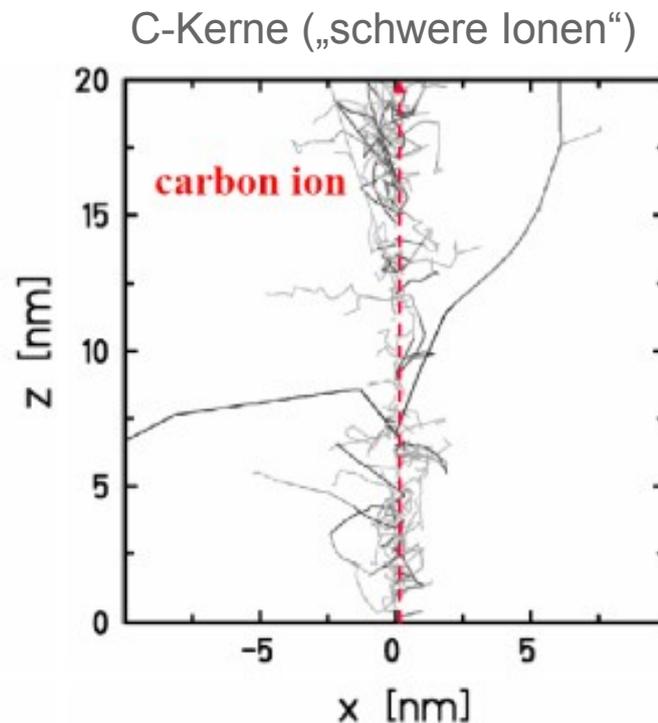
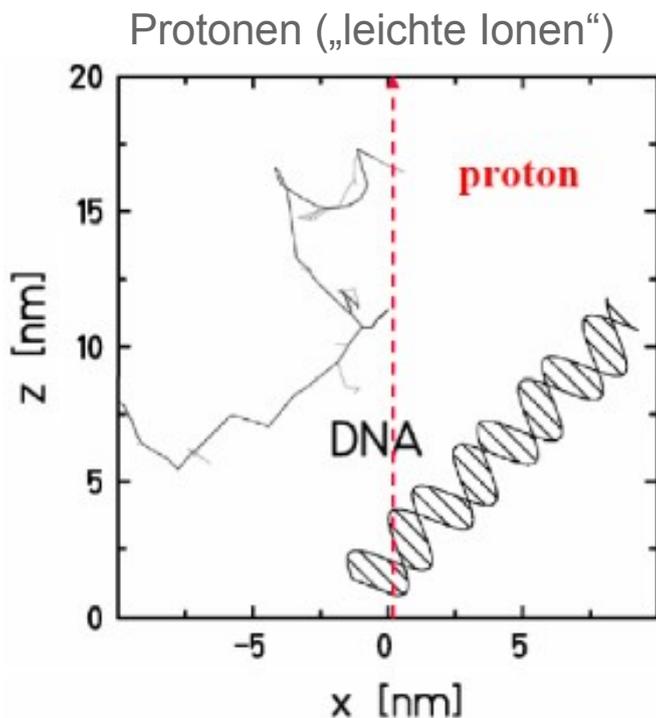
Schwere geladene Teilchen in Materie

Mikroskopische Bedeutung von $S = dE/dx$:

~ Anzahl der Ionisationsereignisse pro zurückgelegter Wegstrecke.

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

„Locker“ bzw. „dicht“
ionisierende Strahlung



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

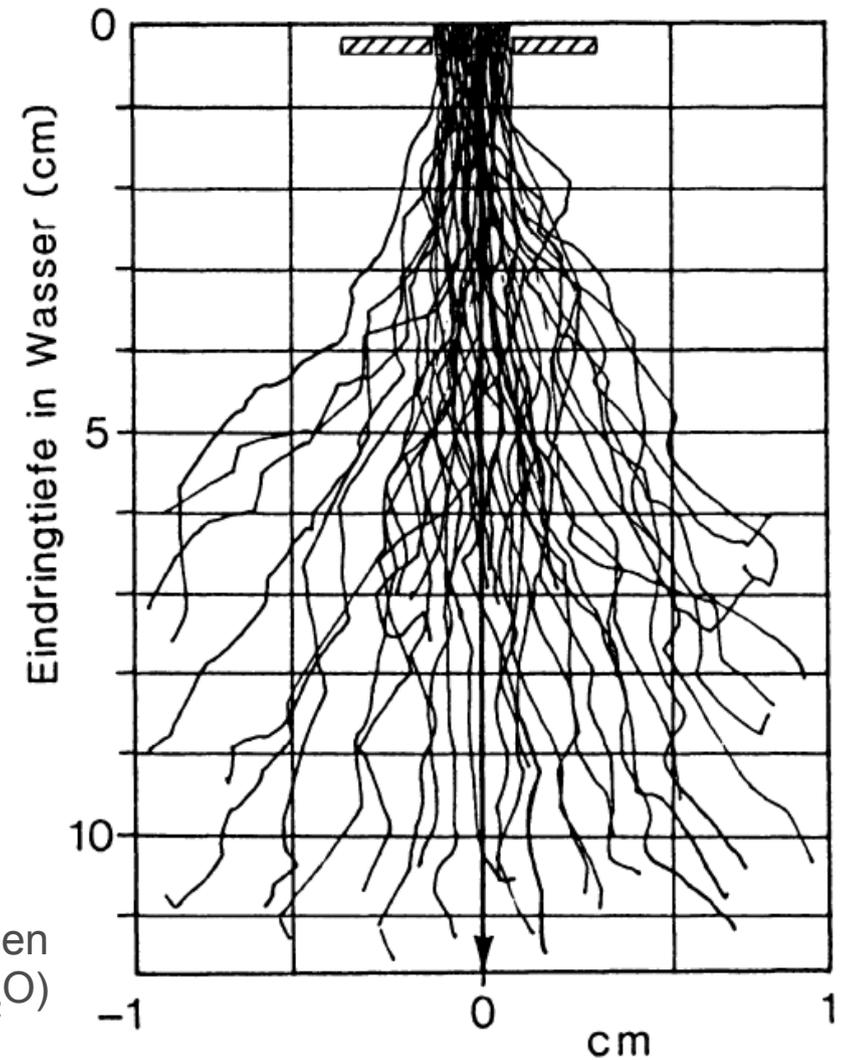
$$m_e \approx 1/1836 u$$

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

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

→ Begriff der „Reichweite“ ist nun unklar.

11 MeV Elektronen
in Wasser (H₂O)



Leichte geladene Teilchen in Materie

Elektronenstrahlen bestehen aus sehr leichten Teilchen

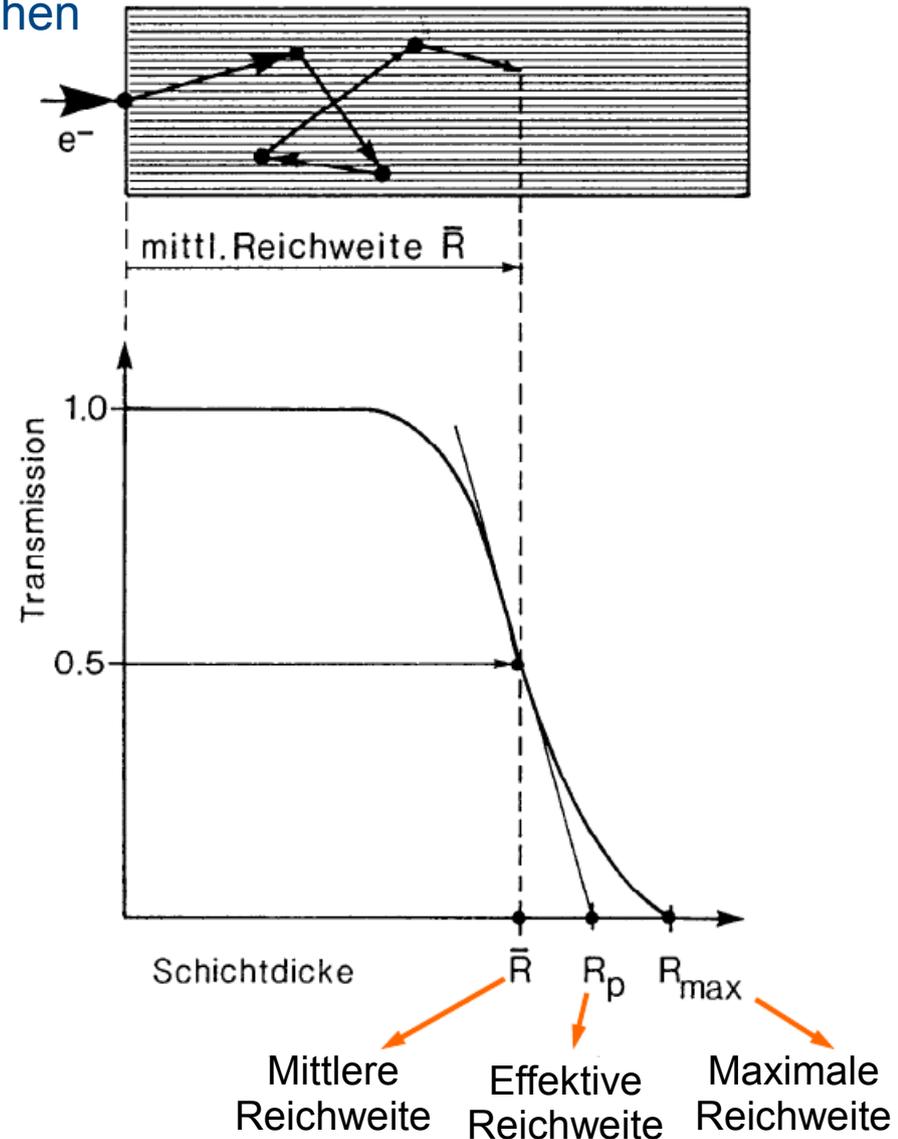
$$m_e \approx 1/1836 u$$

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 dick muss die Abschirmung sein?“)



Leichte geladene Teilchen in Materie

Elektronenstrahlen bestehen aus sehr leichten Teilchen

$$m_e \approx 1/1836 u$$

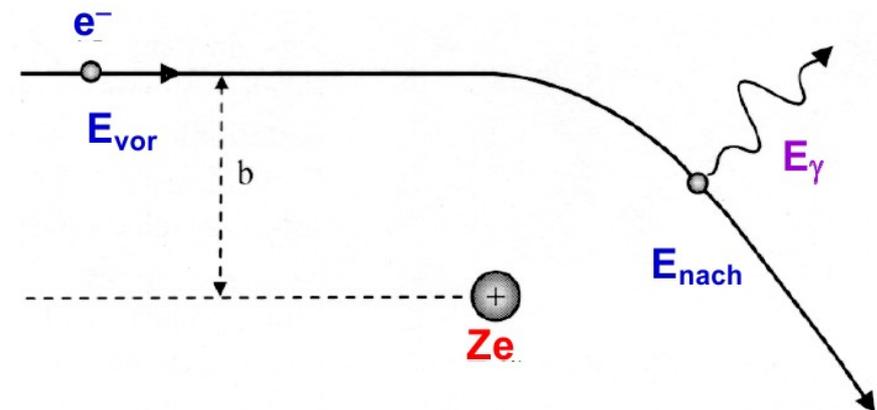
Dies führt zu **zusätzlichen Effekten** in Vergleich zu schweren geladenen Teilchen.

- 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

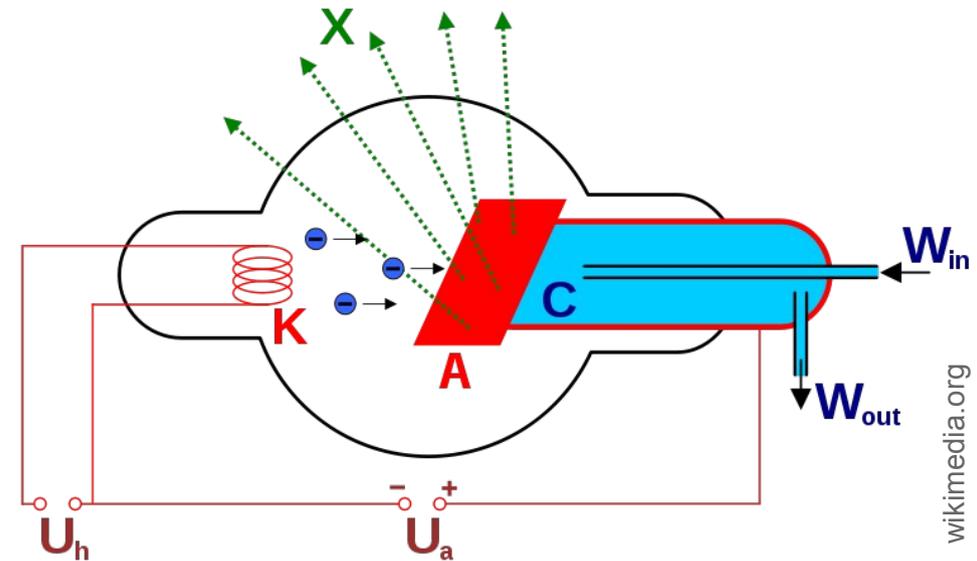
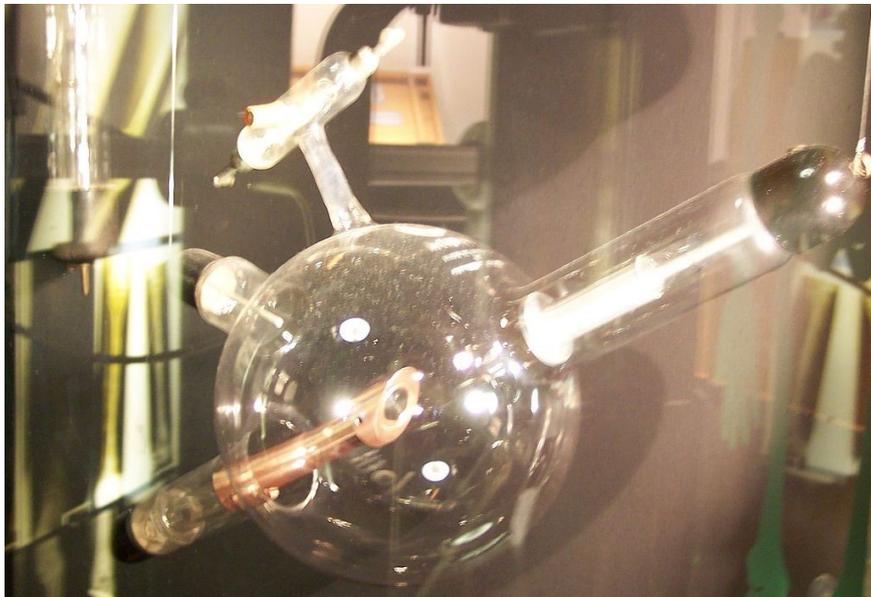
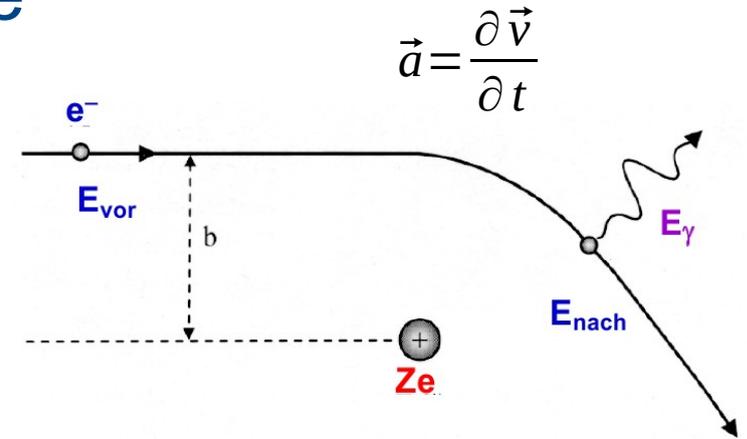
Anwendung der Bremsstrahlung:

Erzeugung von Röntgenstrahlung

Röntgenröhre:

Elektronen treffen mit der Energie eU_a auf eine Anode

→ Röhre produziert Röntgenstrahlung bis max. $h\nu = eU_a$.



(U_a typisch 20 kV bis einige 100 kV)

wikimedia.org

wikimedia.org

Leichte geladene Teilchen in Materie

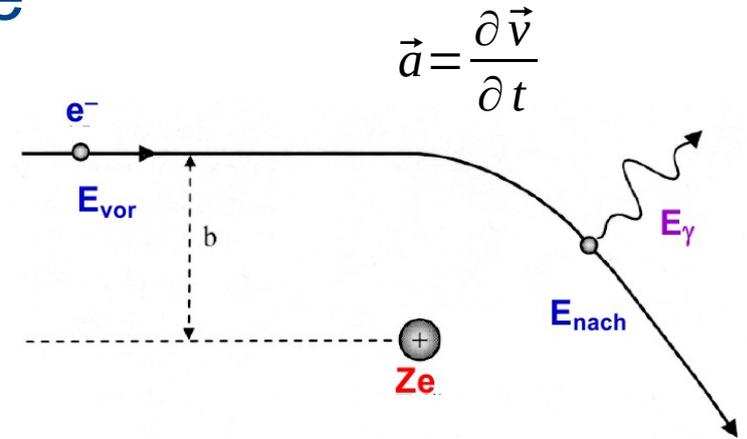
Anwendung der Bremsstrahlung:

Erzeugung von Röntgenstrahlung

Röntgenröhre:

Elektronen treffen mit der Energie eU_a auf eine Anode

→ Röhre produziert Röntgenstrahlung bis max. $h\nu = eU_a$.

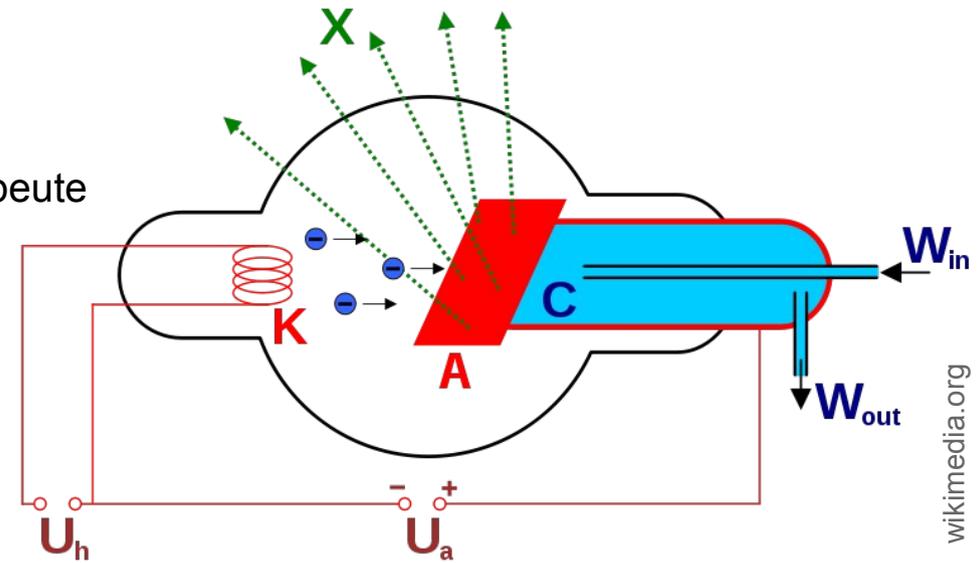
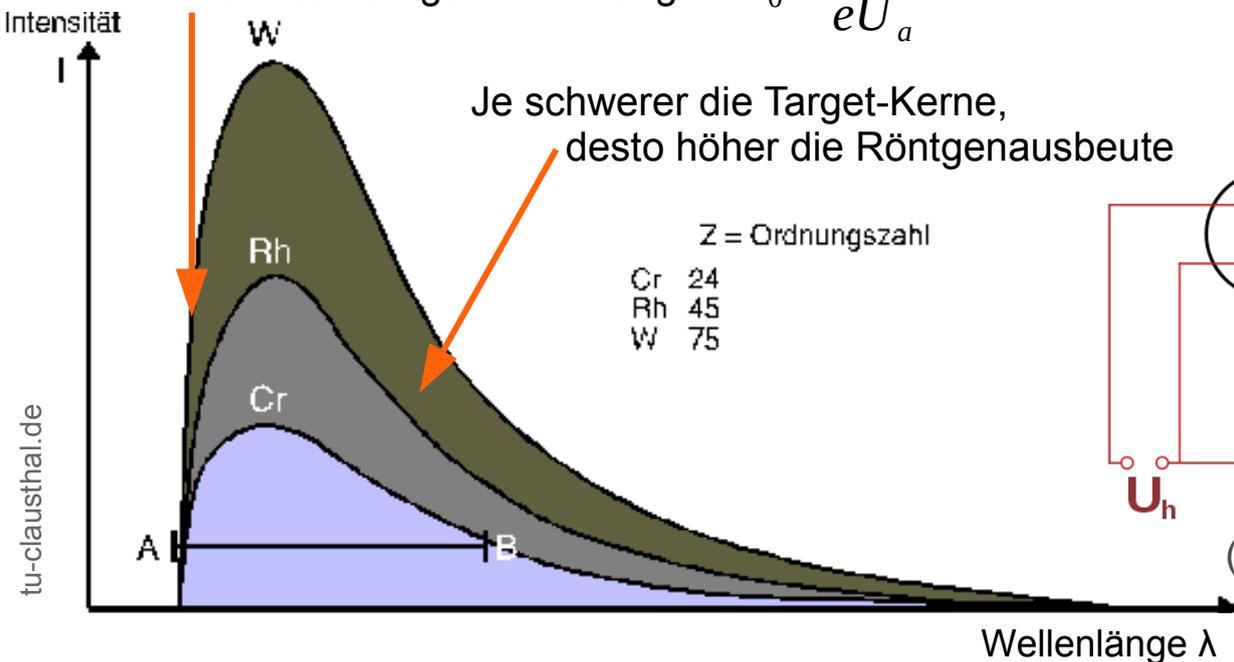


Kleinste Röntgenwellenlänge $\lambda_0 = \frac{hc}{eU_a}$

Je schwerer die Target-Kerne, desto höher die Röntgenausbeute

Z = Ordnungszahl

Cr	24
Rh	45
W	75



(U_a typisch 20 kV bis einige 100 kV)

wikimedia.org



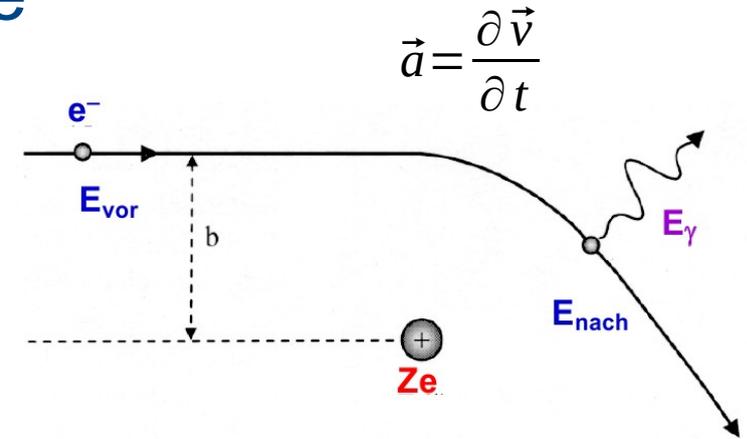
Leichte geladene Teilchen in Materie

Anwendung der Bremsstrahlung:

Erzeugung von Röntgenstrahlung

Moderne Ausführung:

Elektronen-Linearbeschleuniger zur Strahlentherapie
→ Röntgen-Energie $h\nu$ bis ca. 25 MeV



varian.com



varian.com

Leichte geladene Teilchen in ~~Materie~~

Anwendung der Bremsstrahlung:

Erzeugung von Röntgenstrahlung

Noch modernere Ausführung (ohne Target!):

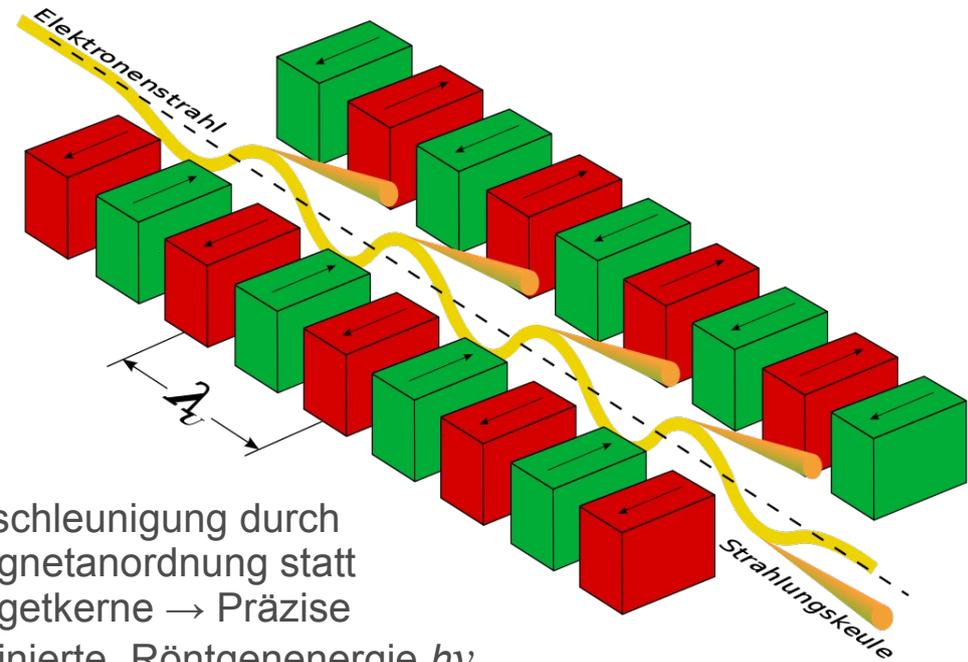
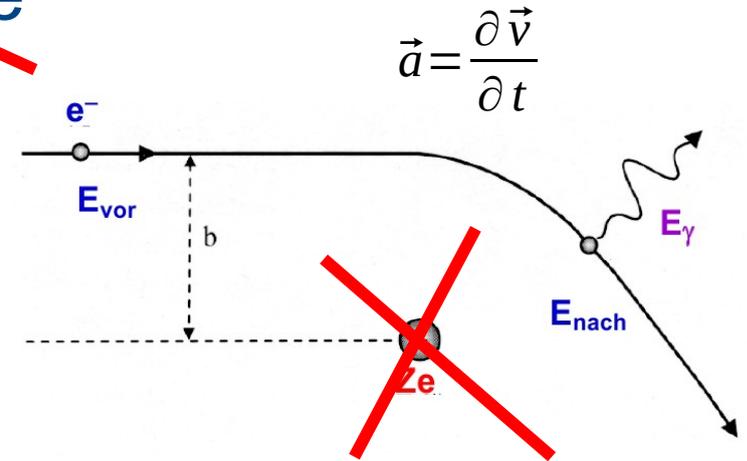
Synchrotron-Strahlungsquellen
für Grundlagenforschung und Materialwissenschaft.

PETRA III (DESY), Hamburg



desy.de

Elektronenbeschleuniger, 6 GeV, Umfang ~ 2,3 km



Beschleunigung durch
Magnetanordnung statt
Targetkerne → Präzise
definierte Röntgenenergie $h\nu$

de.wikipedia.org



Leichte geladene Teilchen in Materie

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

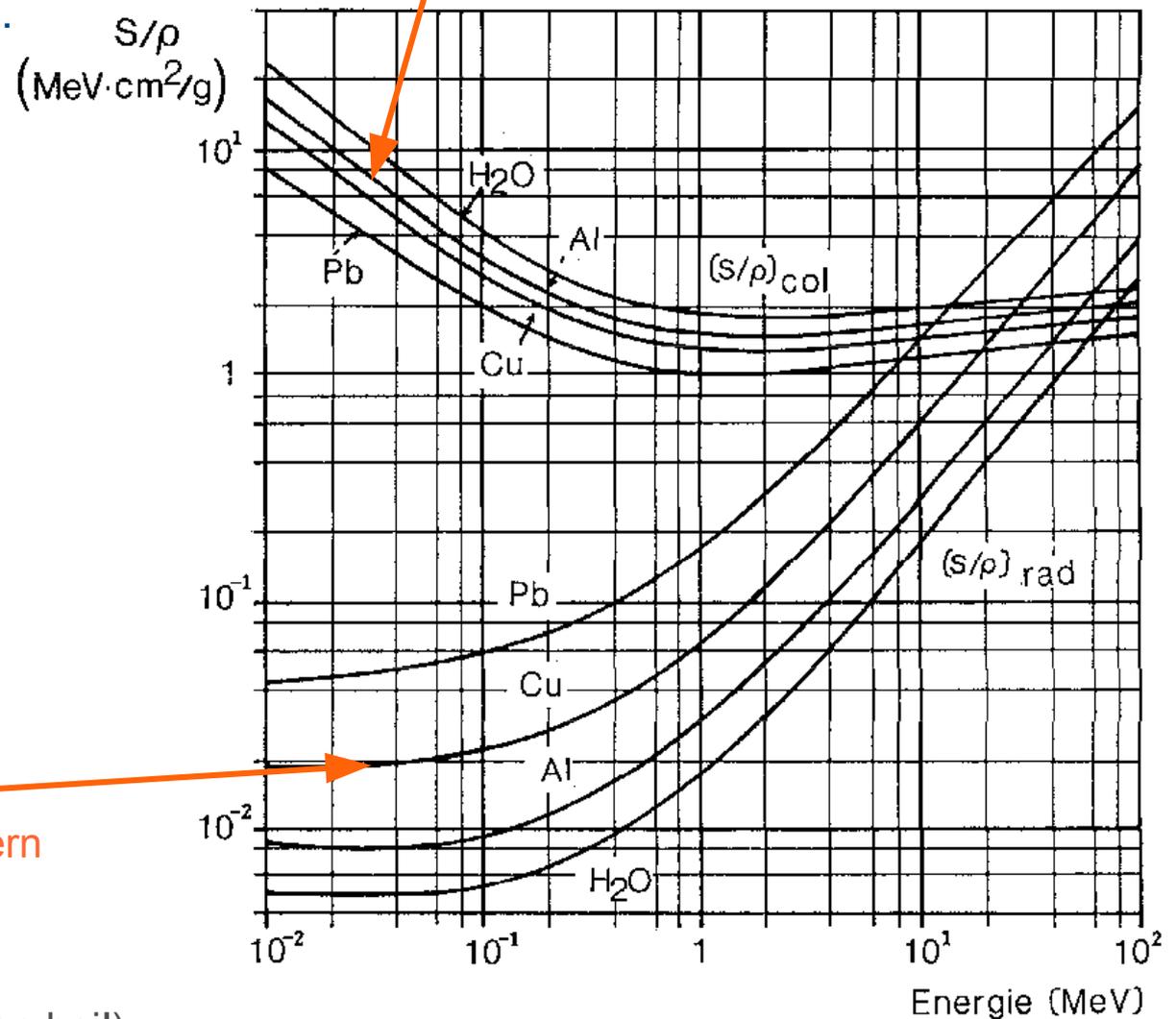
Hier $S = dE/dx$ auf Dichte ρ des Targetmaterials normiert:

S in MeV/cm

ρ in g/cm³

→ S/ρ in MeV·cm²/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

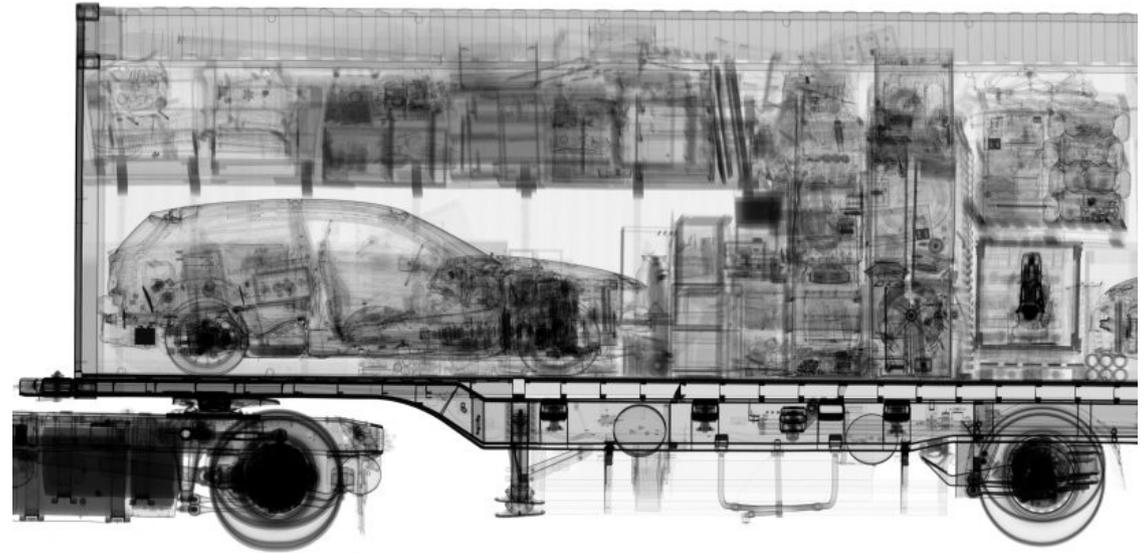
Photonenstrahlung in Materie

Bildgebung auf Grundlage von Durchleuchtung

Neben medizinischer Anwendung

Materialprüfung,
Durchsuchung (Zoll)

...



abendbaltt.de



journal.lu

Mobiler Röntgenscanner für LKW

Photonenenergien bis ~ 10 MeV
durchdringen bis ca. 30 cm Stahl.

Photonenstrahlung in Materie

Mathematische Beschreibung: Abschwächungsgesetz

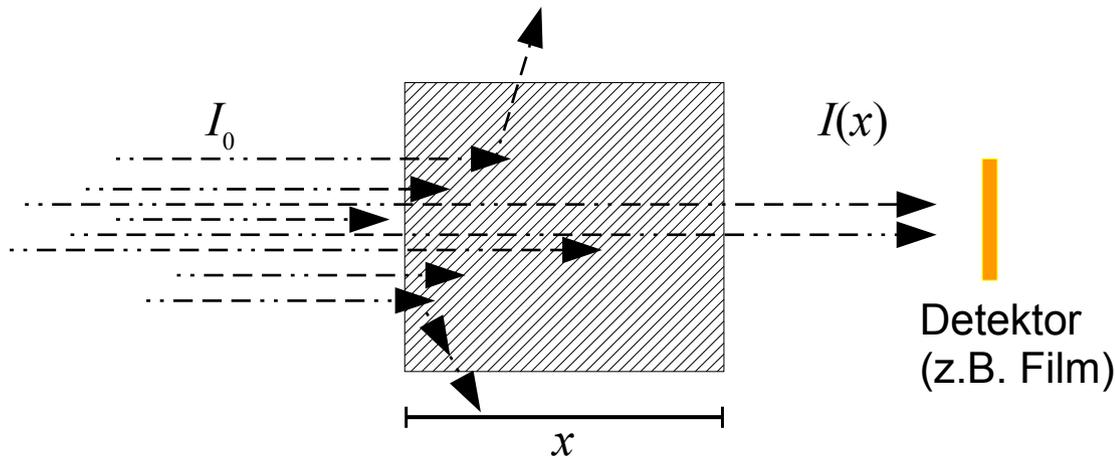
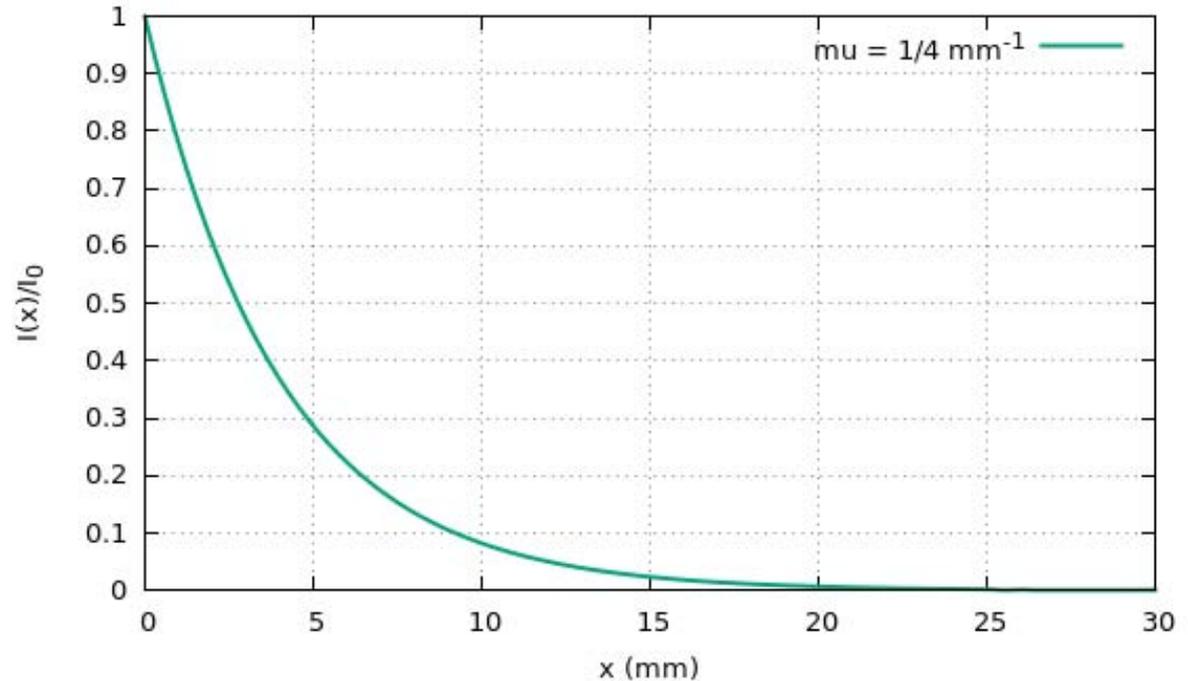
$$I(x) = I_0 \exp(-\mu x)$$

mit

μ = Abschwächungskoeffizient

I_0 = Anfangsintensität (Photonen/s)

$I(x)$ = Restintensität in Materialtiefe x

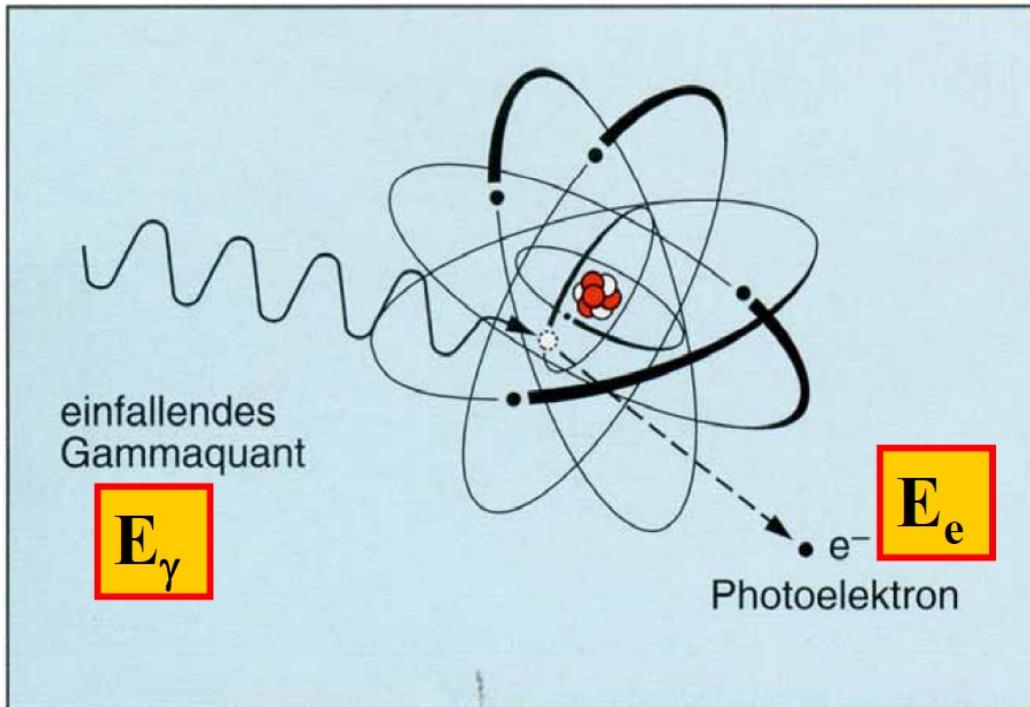


Photonenstrahlung in Materie

Mikroskopische Deutung von μ : Recht kompliziert, da mehrere Effekte eine Rolle spielen.

1. Photoeffekt

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



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

E_{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

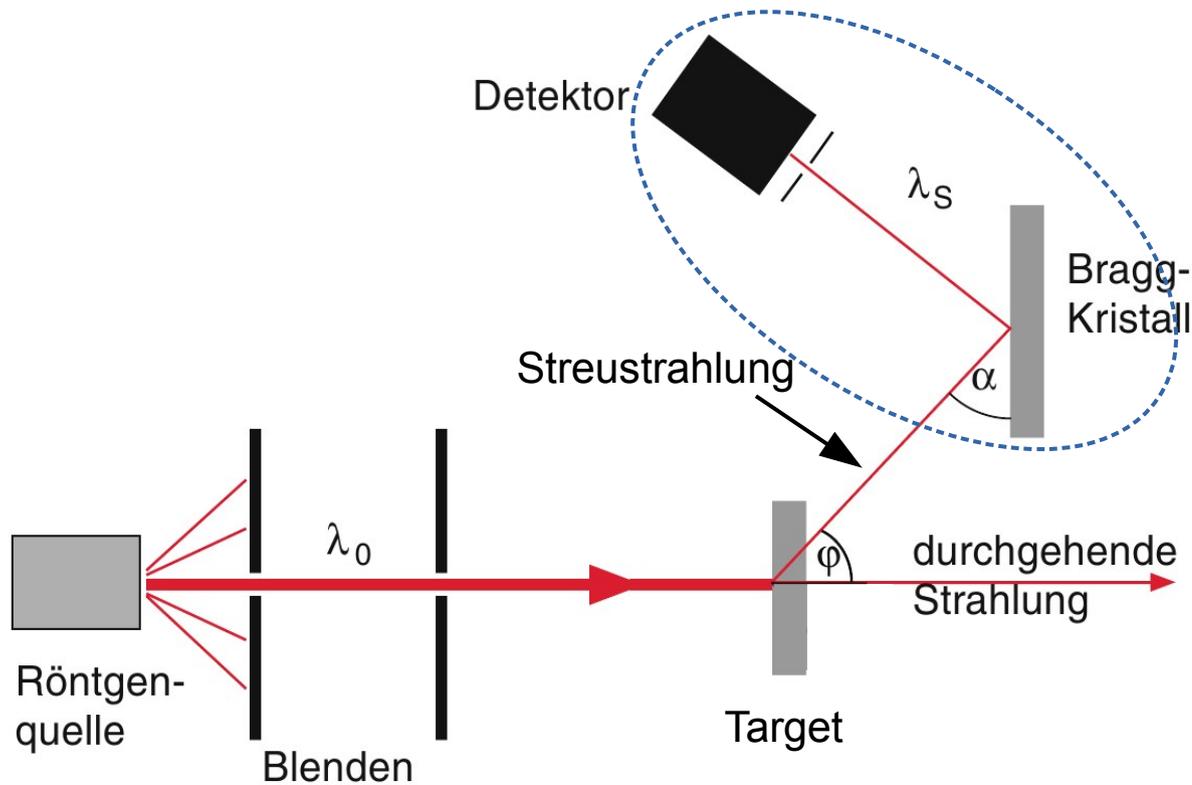
Photonenstrahlung in Materie

Mikroskopische Deutung von μ : Recht kompliziert, da mehrere Effekte eine Rolle spielen.

2. Compton-Effekt

Streuung von γ -Quanten an Target-Atomen.

Experiment von Arthur Compton (1922):



Demtröder, Experimentalphysik 3 (2010) S. 87

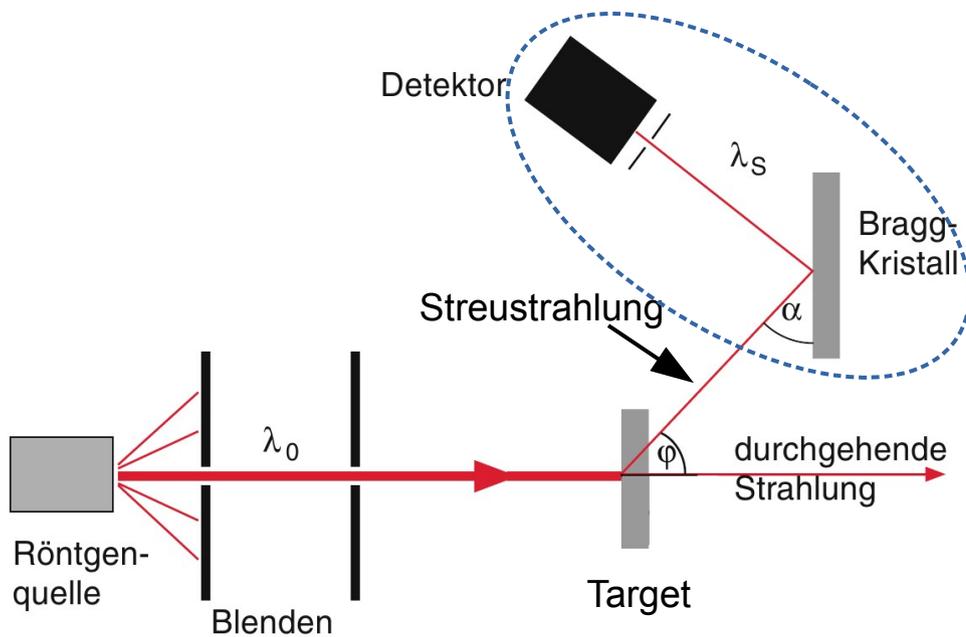
Photonenstrahlung in Materie

Mikroskopische Deutung von μ : Recht kompliziert, da mehr

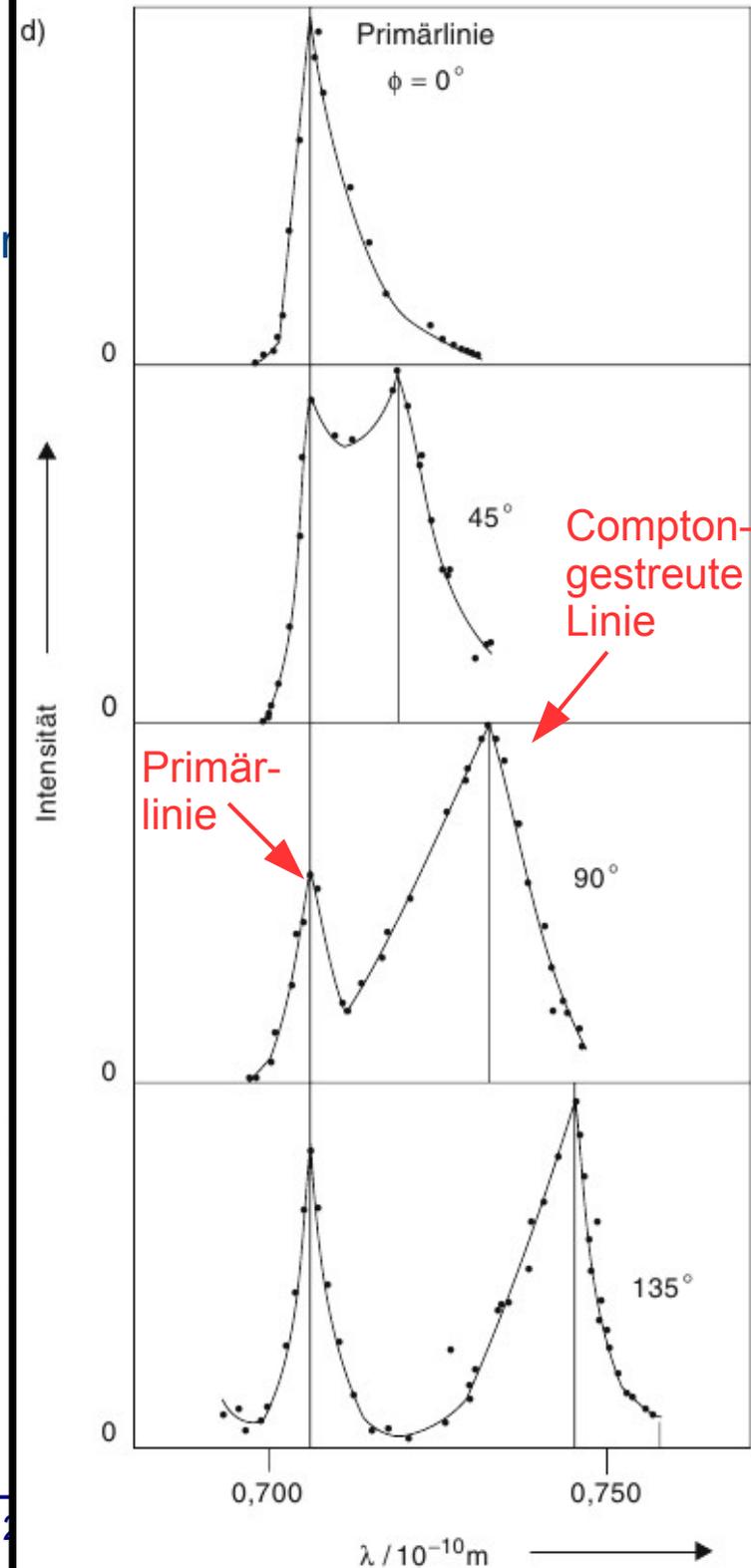
2. Compton-Effekt

Beobachtung: Streustrahlung hat zwei energetische Komponenten:

- Die ursprüngliche Röntgenlinie λ_0 ,
- und eine von Streuwinkel φ abhängige, verschobene Linie.



Demtröder, Experimentalphysik 3 (2010) S. 87



Demtröder, Experimentalphysik 3 (2010) S. 87

Photonenstrahlung in Materie

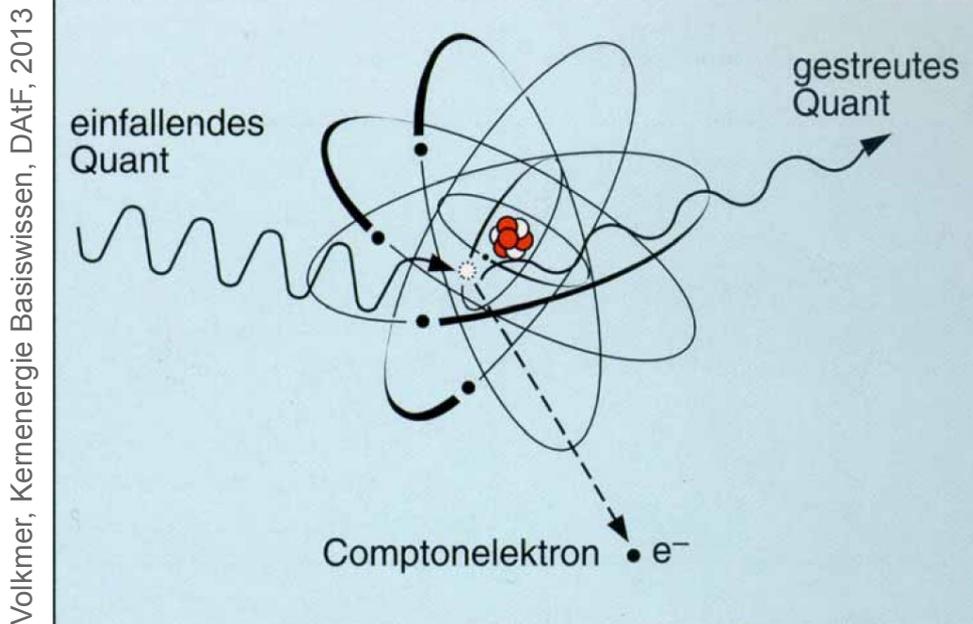
Mikroskopische Deutung von μ : Recht kompliziert, da mehrere Effekte eine Rolle spielen.

2. Compton-Effekt

Erklärung: Inelastischer Stoß zwischen γ -Quant und Hüllenelektron

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

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



→ Eine experimentelle Bestätigung des Welle-Teilchen-Dualismus!

Zugeordneter Abschwächungskoeffizient:

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

Photonenstrahlung in Materie

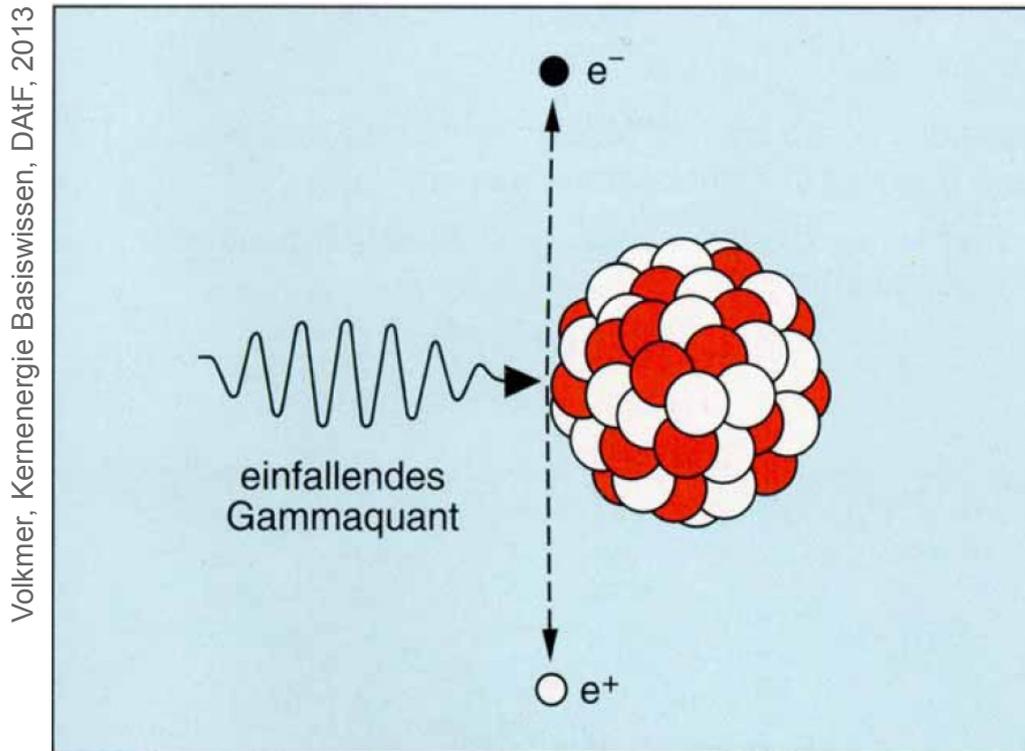
Mikroskopische Deutung von μ : Recht kompliziert, da mehrere Effekte eine Rolle spielen.

3. Paarbildung

Bei sehr hoher Energie des γ -Quants:

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

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



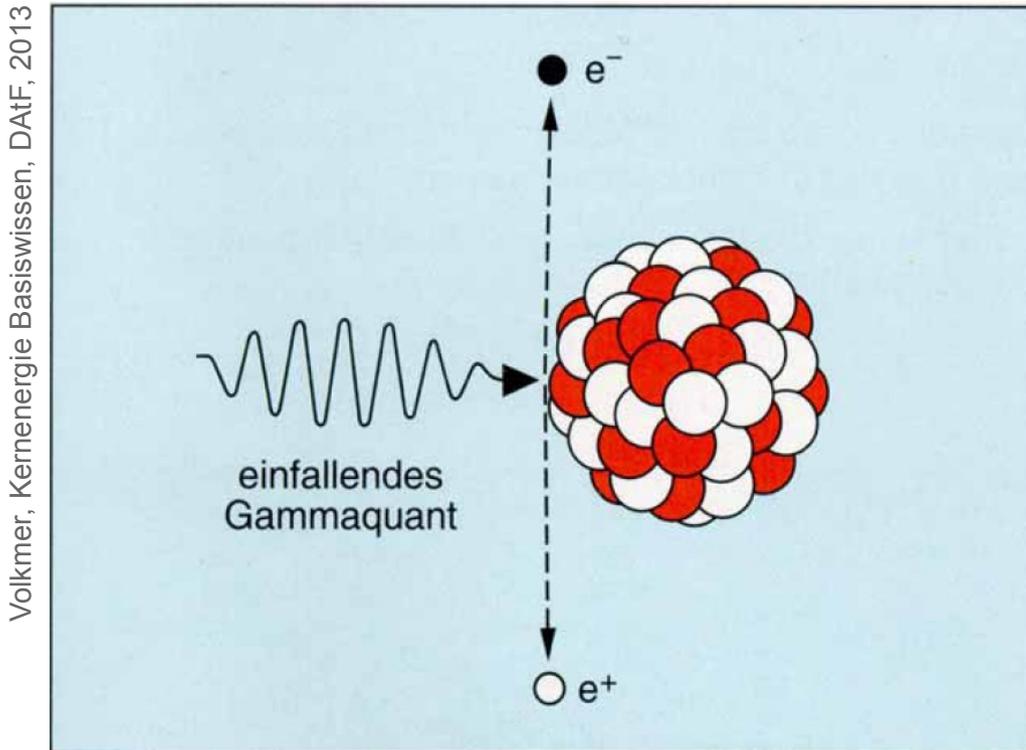
Photonenstrahlung in Materie

Mikroskopische Deutung von μ : Recht kompliziert, da mehrere Effekte eine Rolle spielen.

3. Paarbildung

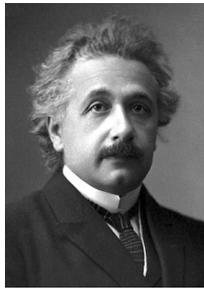
Bei sehr hoher Energie des γ -Quants:
Erzeugung eines e^+/e^- -Paares im elektrischen Feld eines Target-Kerns.

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



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

$$E_0 = mc^2$$



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

→ $Schwelle$ energie $E_\gamma > 1,02$ MeV

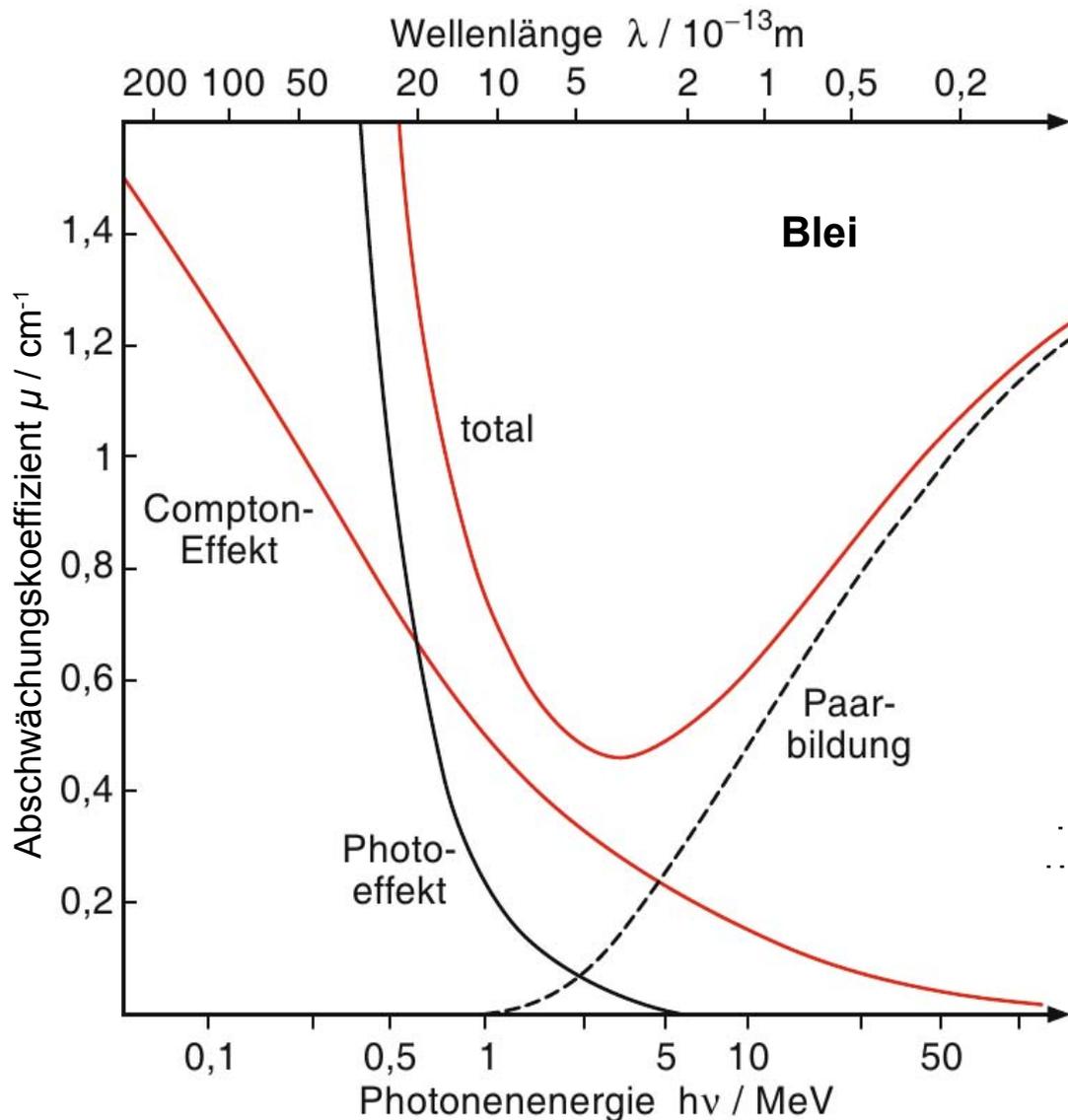
Schwächungskoeffizient:

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



Photonenstrahlung in Materie

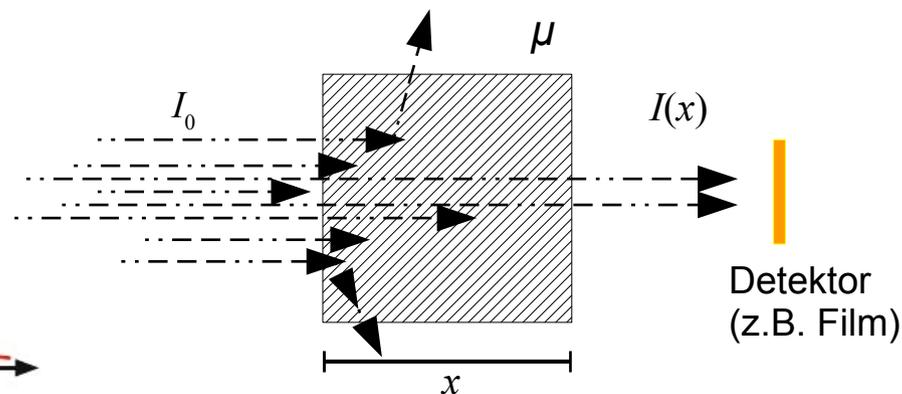
Mikroskopische Deutung von μ : Recht kompliziert, da mehrere Effekte eine Rolle spielen.



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

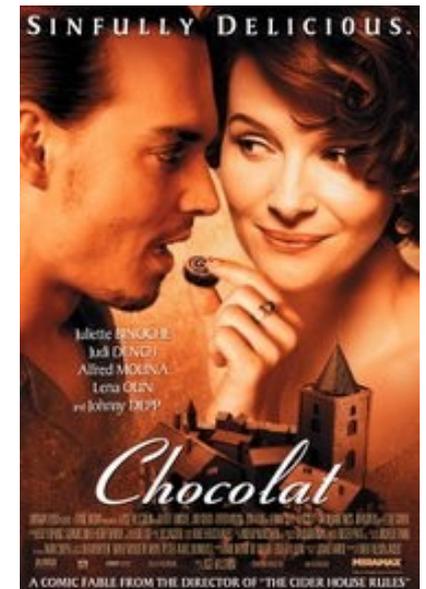
Wir haben gesehen:

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

$$1 \text{ MeV} = 1000000 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} \approx 0,0000000000000000004 \text{ kcal} \quad (4 \cdot 10^{-17} \text{ kcal})$$

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

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

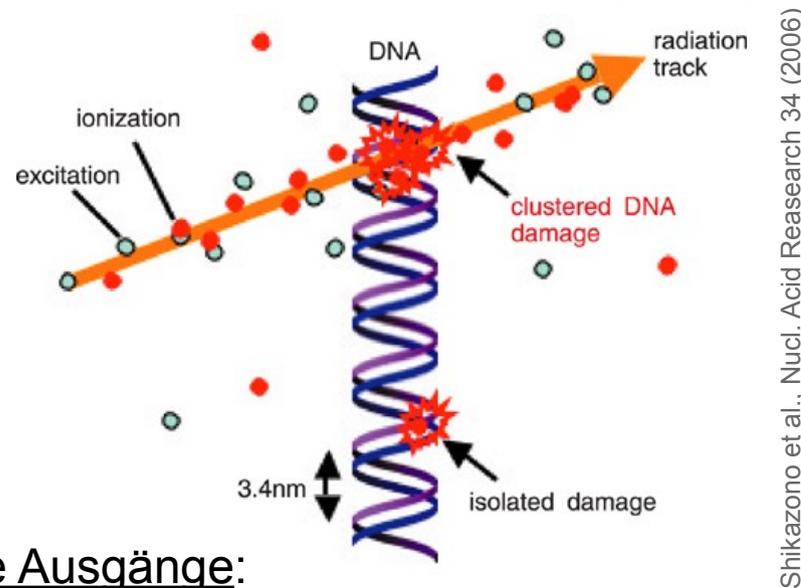


Internet Movie Database, imdb.org

Warum brauchen wir Strahlenschutz-Maßnahmen?

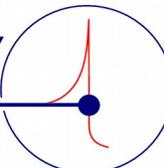
Ionisierende Strahlen schädigen einen Organismus auf grundsätzlich andere Art als übliche Verletzungen:

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. → Erhöhtes Krebsrisiko

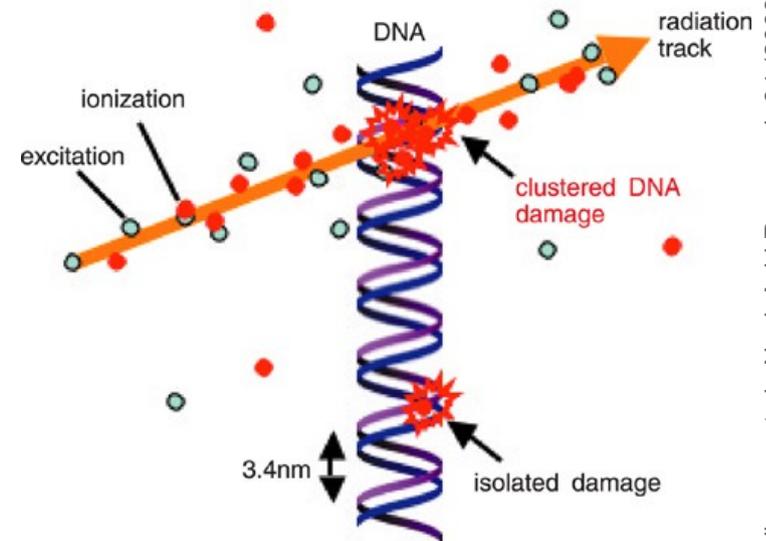
→ „Stochastischer Strahlenschaden“

3. Hohe Dosis:

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

→ Strahlenkrankheit

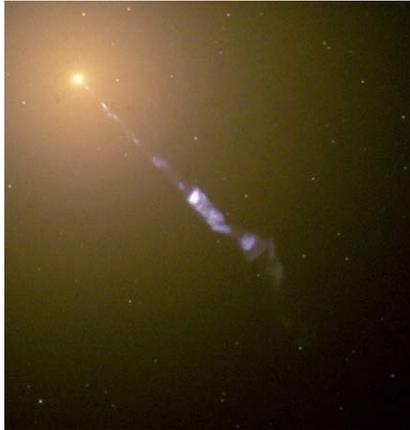
→ „Deterministischer Strahlenschaden“



Warum brauchen wir Strahlenschutz-Maßnahmen?

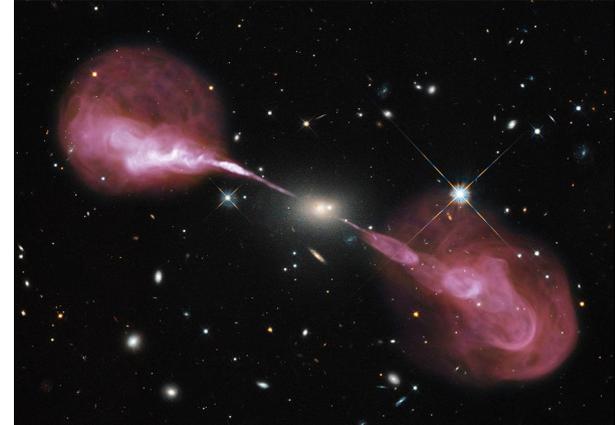
Ionisierende Strahlen sind ein natürliches Phänomen ...

Hubble Heritage, heritage.stsci.edu



Seyfert-Galaxien
(AGNs, Active Galactic Nuclei)
M87 ...

... Hercules A



Hubble Heritage, heritage.stsci.edu

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



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



Boeggemann (2006), wikimedia.org

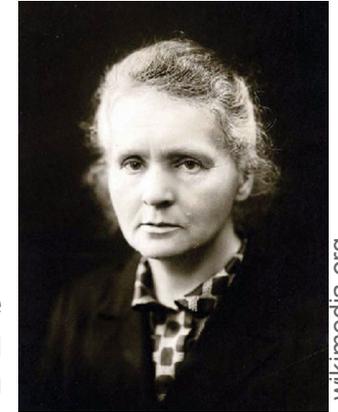
→ Evolutionäre Folge: Menschen (und Tiere) besitzen keine Sinnesorgane, die sie vor ionisierender Strahlung warnen!

Pionierzeit

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

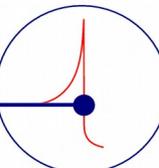
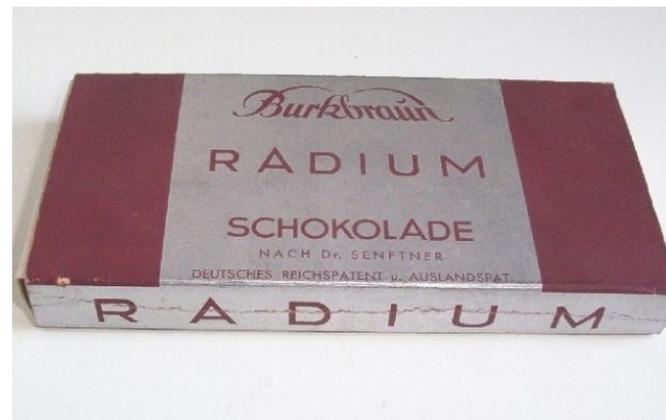


Erste Durchleuchtung der Hand von Wilhem C. Röntgens Frau Anna Bertha. (Nobelpreis 1901)



Marie Curie
Nobelpreis 1911 für die Entdeckung
von Radium und Polonium

„Radium-Hype“ Anfang des 20. Jahrhunderts



Erste Strahlenschäden



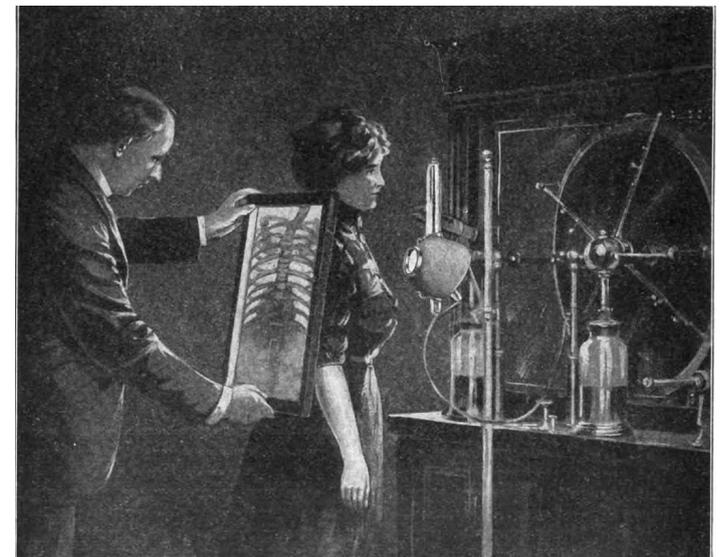
Marie Curie mit mobiler Röntgenstation (1915)

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

Frühe Röntengeräte arbeiten im Dauerstrichbetrieb.

Zudem: Keine Abschirmung einzelner Körperteile oder des behandelnden Personals.

→ Erste 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

3 2 1

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.



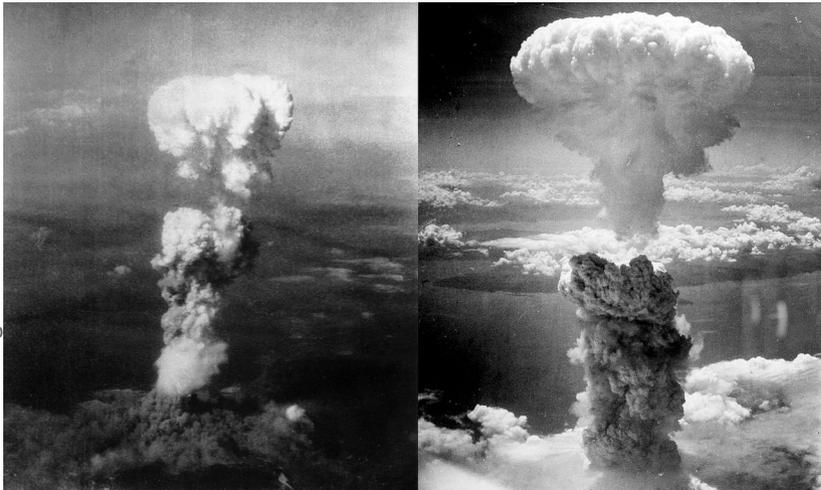
wikimedia.org

1. Weltkrieg: Uhren mit selbstleuchtenden Radium-Zifferblättern

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

→ Teilweise tödliche Dosen durch Ingestion.

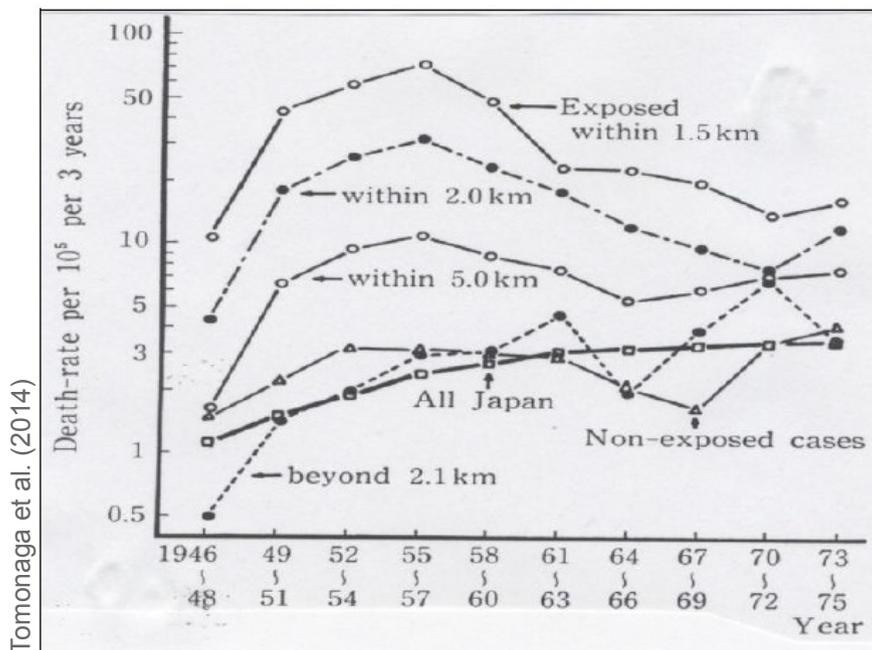
Das Umdenken



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



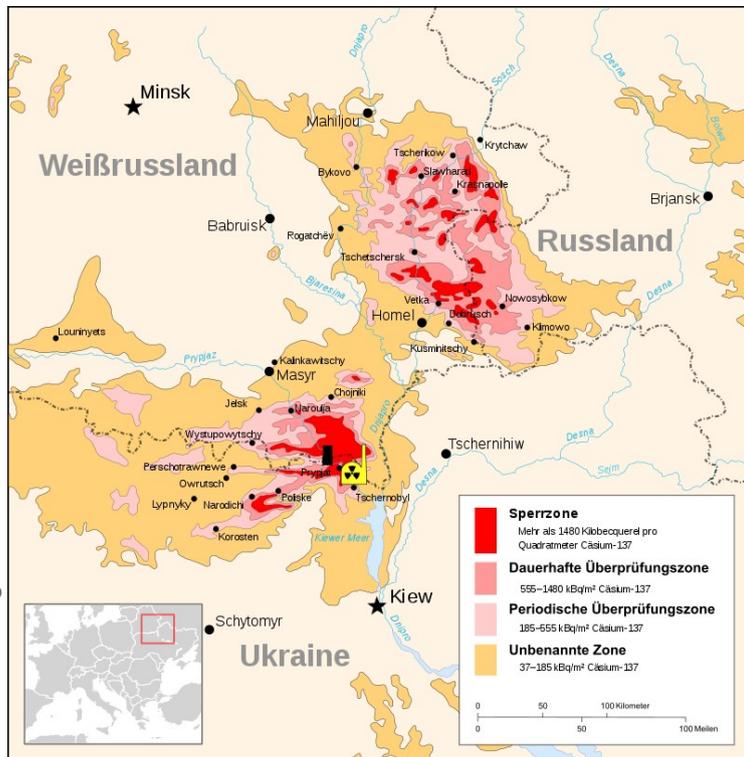
wikimedia.org

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.

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 minimieren („Teilchen pro Sekunde“)
und
2. Die Gesamtzahl an absorbierten Strahlungsteilchen minimieren.

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

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.

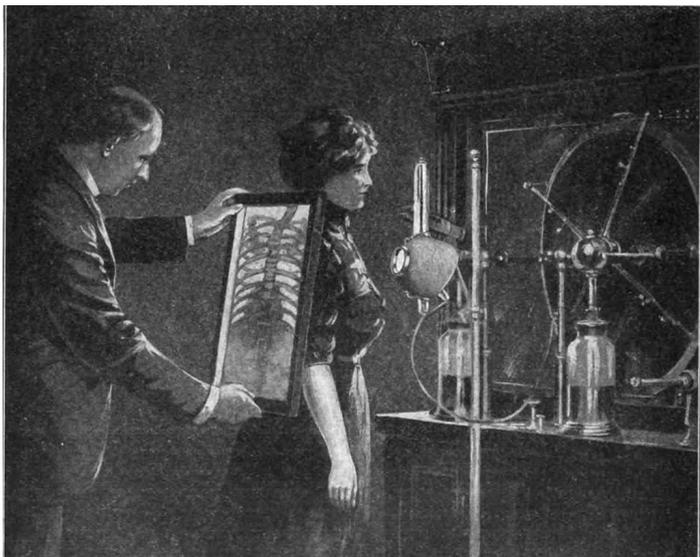
Grundprinzipien des Strahlenschutzes

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.



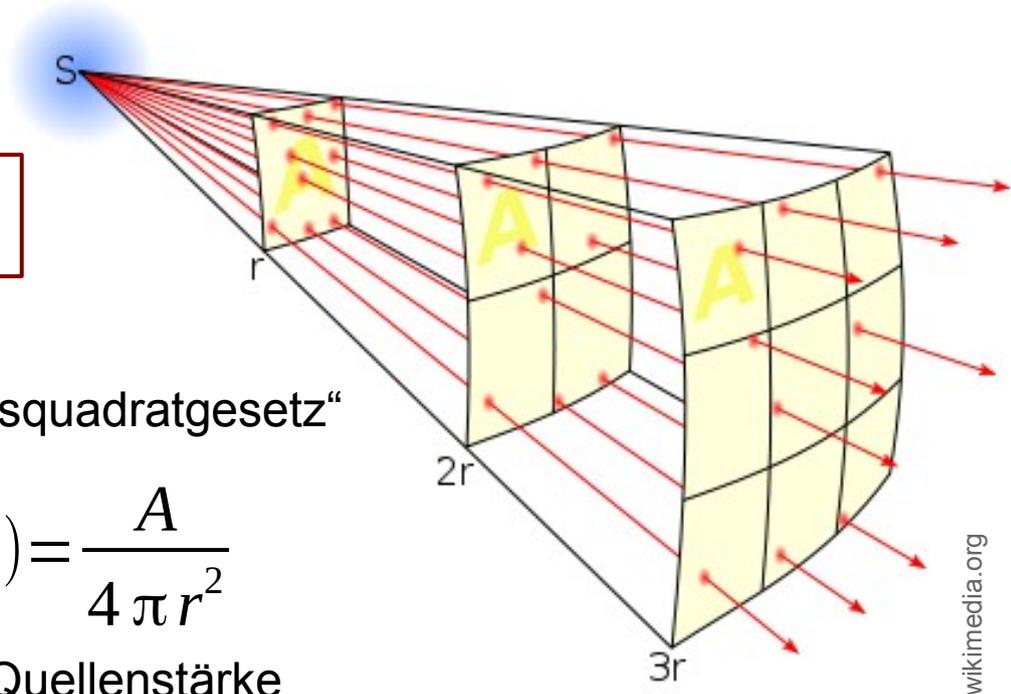
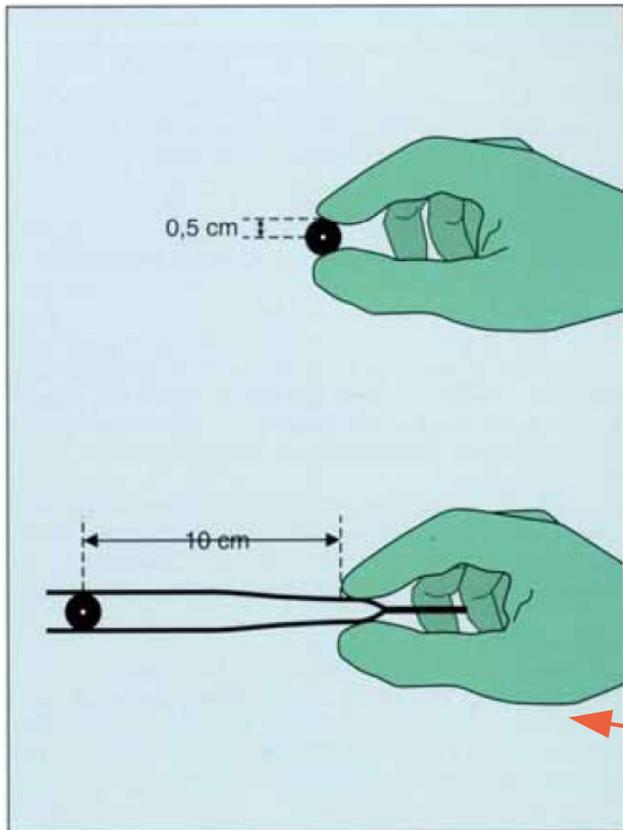
wikimedia.org

Grundprinzipien des Strahlenschutzes

Abstand

Für (näherungsweise) punktförmige Quelle:

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



„Abstandsquadratgesetz“

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

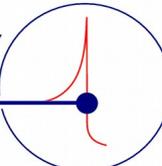
A = Quellenstärke

r = Abstand

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

Beispiel:

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

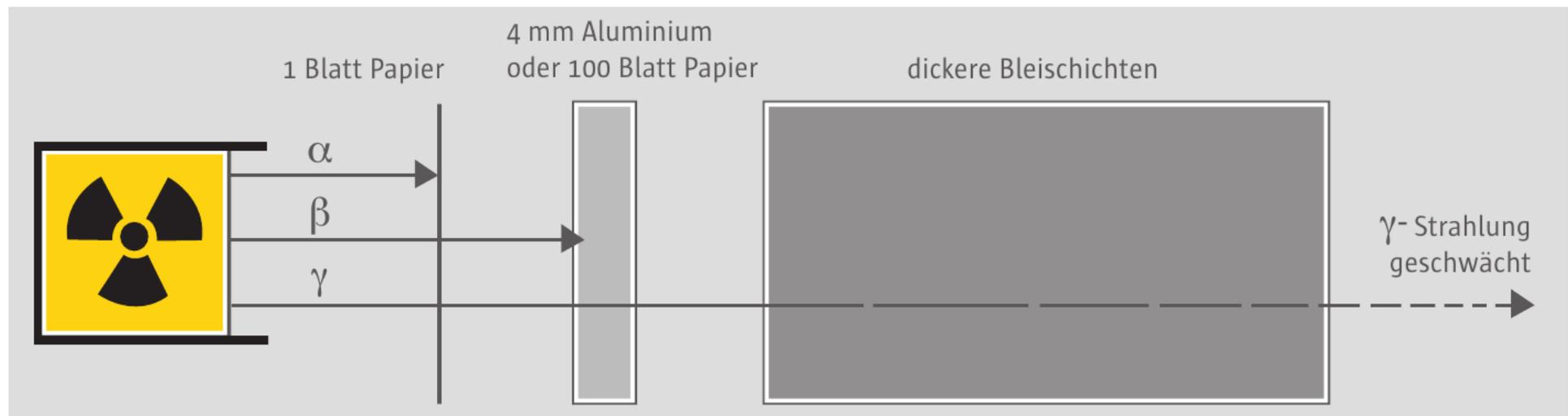


Grundprinzipien des Strahlenschutzes

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

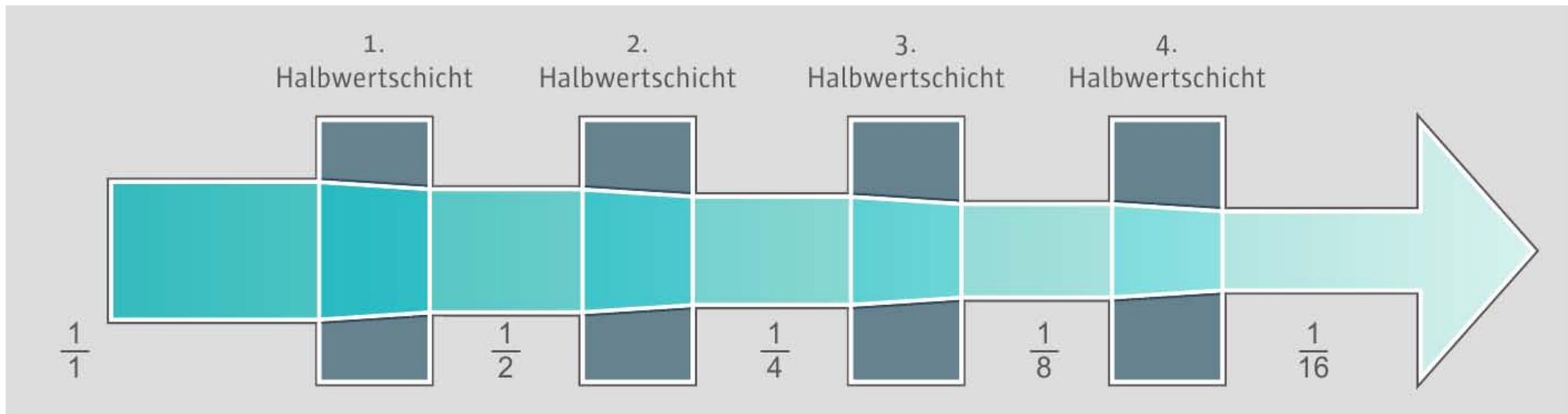
Da Strahlung mit Materie wechselwirkt, kann man sie durch geeignete Absorber stoppen oder Abschwächen.

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

Abschwächung von γ - oder Röntgenstrahlung:

→ „Halbwertsdicke“ $d_{1/2}$

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



Volkmer, Radioaktivität und Strahlenschutz, DAfF, 2012

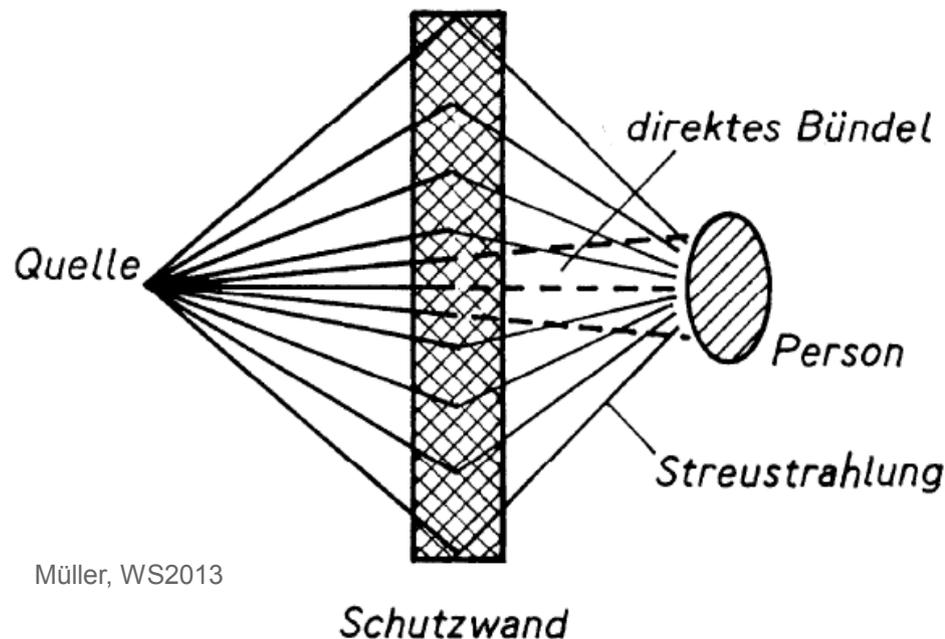
Grundprinzipien des Strahlenschutzes

Abschirmung

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!

Mögliche Komplikation bei γ - oder Röntgenstrahlen: Streuung in der Abschirmung



Müller, WS2013

Bei *ungeeigneter* Wahl von Material und Geometrie:

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

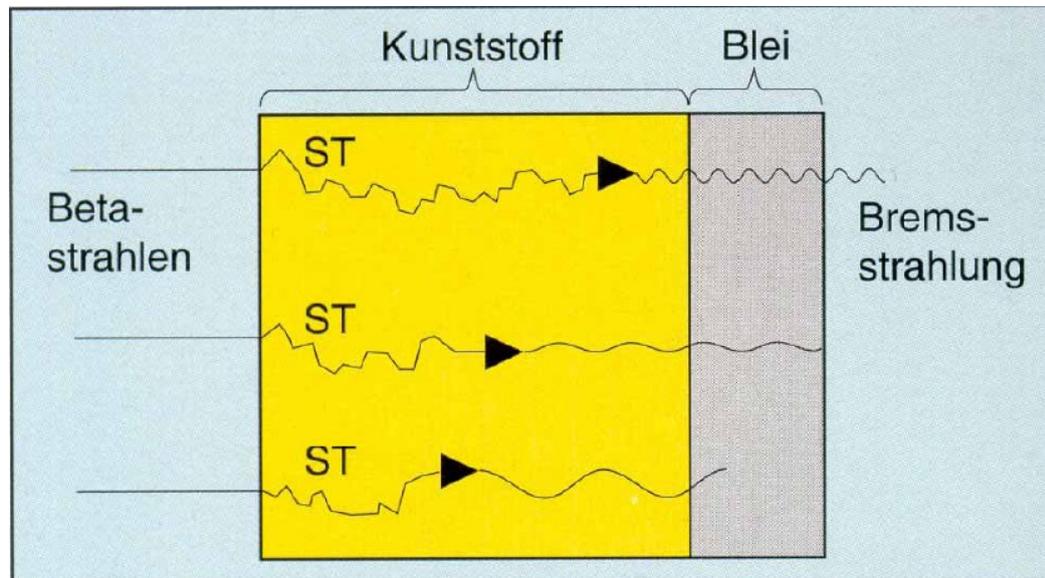
Grundprinzipien des Strahlenschutzes

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!

Problem bei β^- - oder β^+ -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.

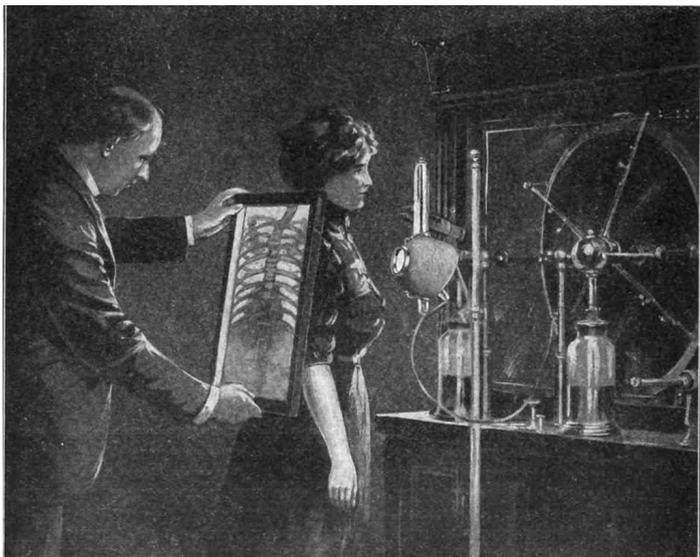
Grundprinzipien des Strahlenschutzes

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 uneingewiesene Personen dazu animieren, 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.

→ Wichtung der 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 (γ -Strahlen, Röntgen):	$w_R = 1$
Elektronen (β^- , β^+ -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	$w_T = 0,05$
Knochemark (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	$w_T = 0,05$	SUMME	1,00

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:

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

Keimdrüsen
Knochenmark (r)
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 $w_T = 0,01$

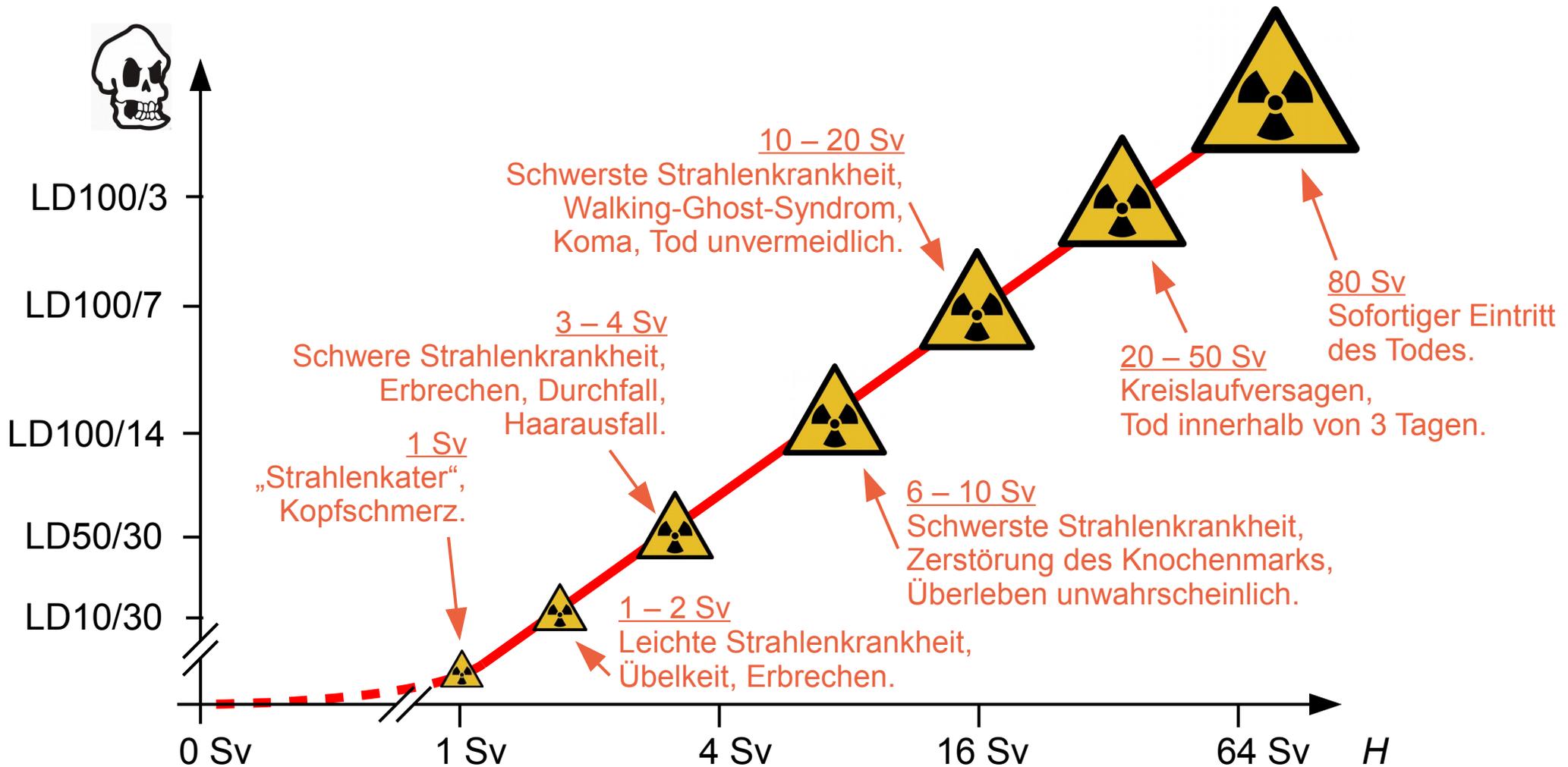
$$w_T = 0,05$$

SUMME

$$1,00$$

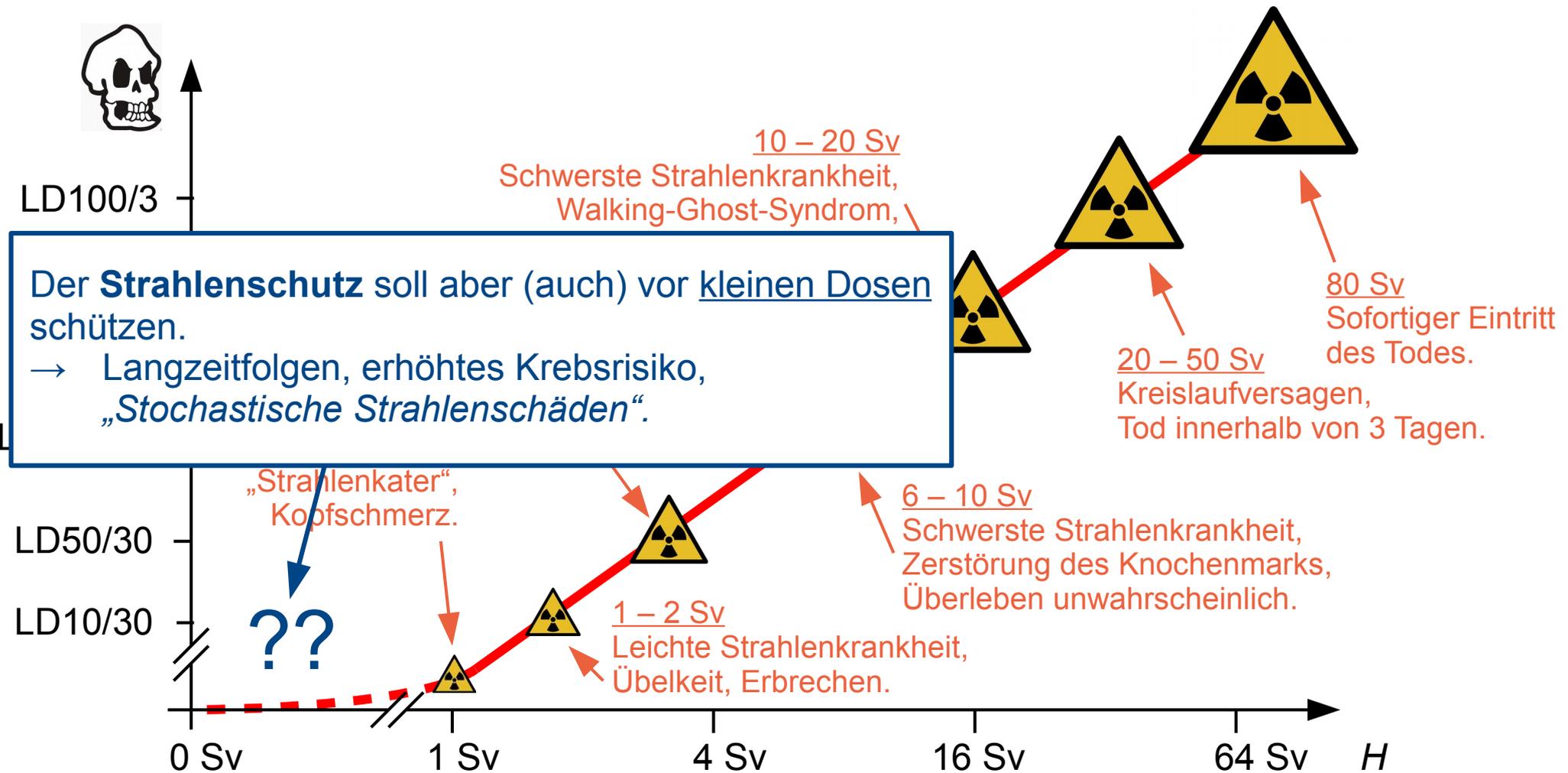
Wie hoch darf die Strahlendosis sein?

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:

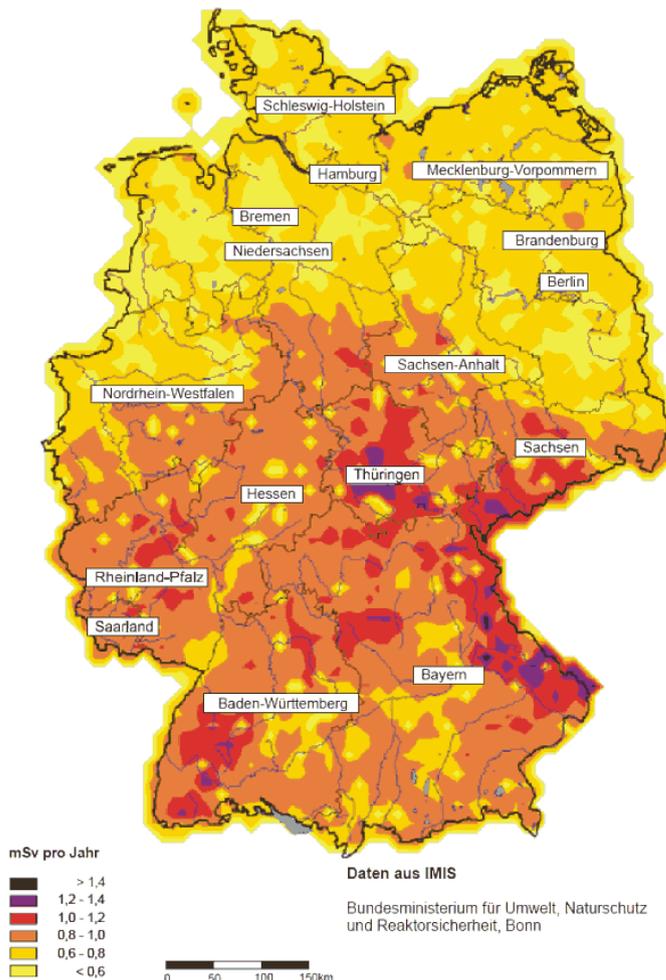
Die durch Anwendung von ionisierender Strahlung verursachte Belastung von unbeteiligten Personen (StrSchV: „Bevölkerung“) soll gegenüber der (ohnehin vorhandenen) natürlichen Strahlenexposition vernachlässigbar sein.

Mittlere natürliche Strahlenbelastung in Deutschland:

2,4 mSv/a (Millisievert pro Jahr, Stand 2009)

Davon ~ 1 mSv/a durch Radon-222 in Raumluft (Gebäude)
Rest: Höhenstrahlung, Bodenstrahlung

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



Nat. 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.

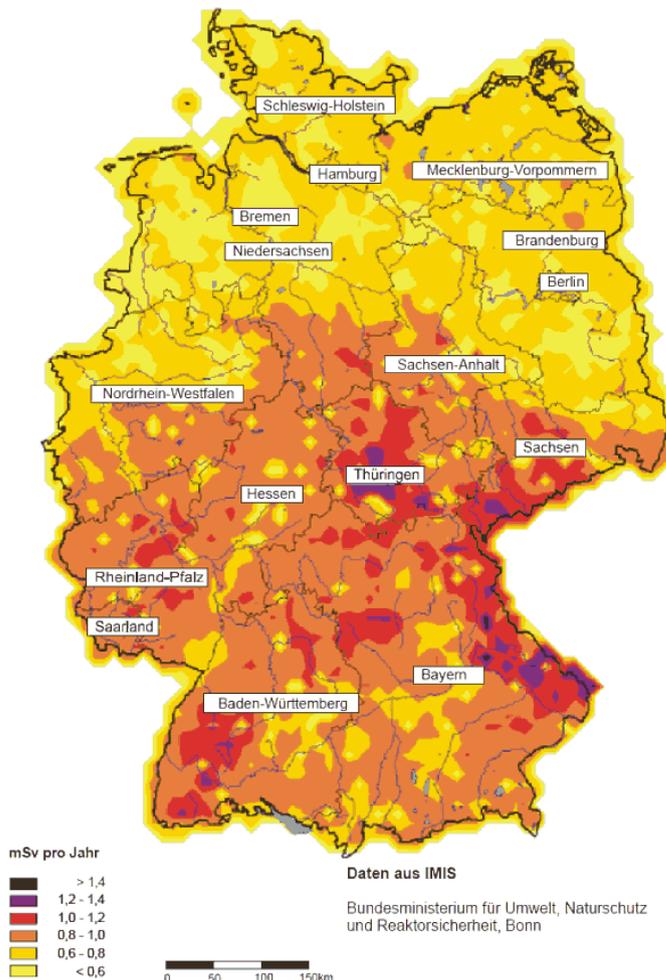
Mittlere natürliche Strahlenbelastung in Deutschland:

2,4 mSv/a (Millisievert pro Jahr, Stand 2009)

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

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

auf jeden Fall aber ≤ 1 mSv/a !



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: Nach Indikation (z.B. RÖV).

...



Messung von Strahlung

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

→ Spezialisierte Detektoren für verschiedene Strahlenarten.

→ Kombinierte Detektorsysteme.

Mögliche Detektionsverfahren

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

Photoeffekt → Filmschwärzung durch Entwicklung.

Lumineszenz, Szintillation → Energiedeposition führt zu Emission von sichtbarem Licht

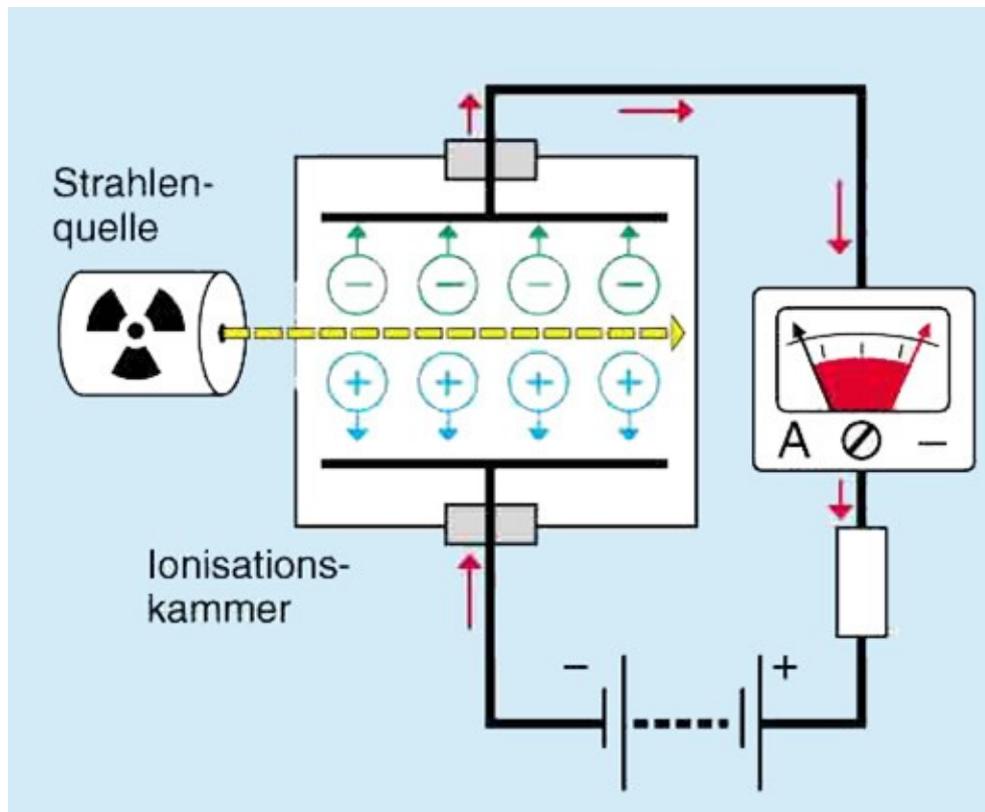
Mikrokalorimetrie → Messung der durch die Strahlung erzeugten Wärme.

Thermolumineszenz → Strahlung deponiert Energie in Kristallen.

Messung von Strahlung

Ionisationskammer

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



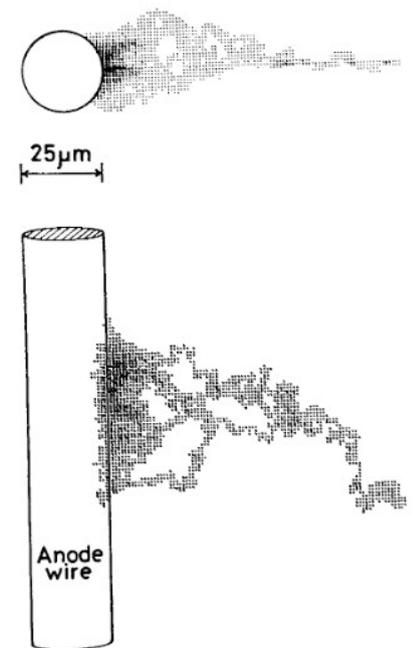
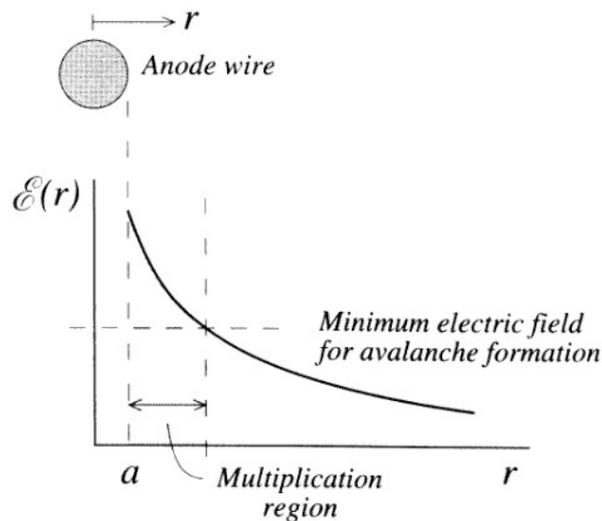
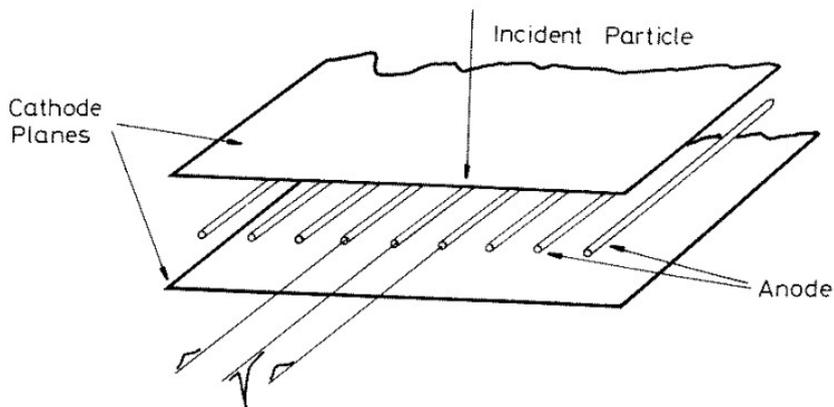
klinikum.uni-heidelberg.de

Messung von Strahlung

Ionisations-Zähler mit Ladungsverstärkung

Teilchendurchgang durch gasgefüllte Kammer erzeugt Elektron-Ion Paare,

Spannung zur Ladungstrennung so groß, dass es zu Ladungslawinen kommt (Stoßionisation).



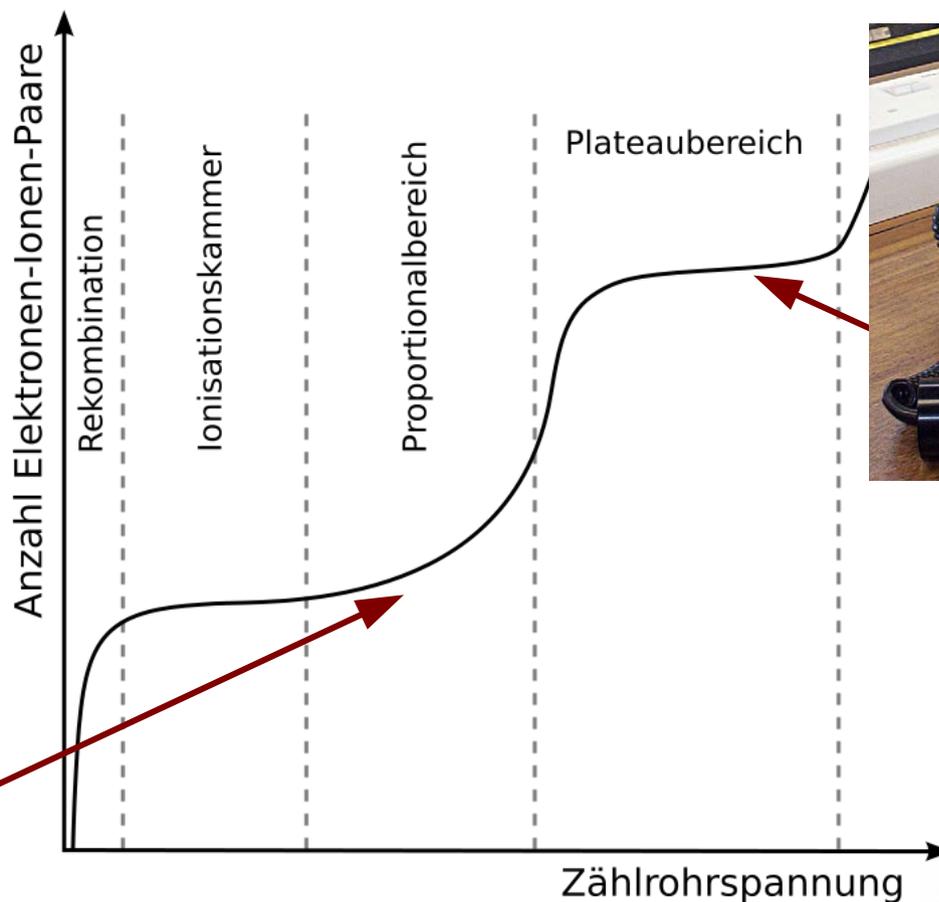
P. Forck, Lecture Notes, JUAS Lecture Notes (2011)

Messung von Strahlung

Zähler mit Ladungsverstärkung

Teilchendurchgang durch gasgefüllte Kammer erzeugt Elektron-Ion Paare,

Spannung zur Ladungstrennung so groß, dass es zu Ladungslawinen kommt (Stoßionisation).



de.wikipedia.org



Geiger-Müller-Zählrohr

„Kontamat“-Proportionalzähler



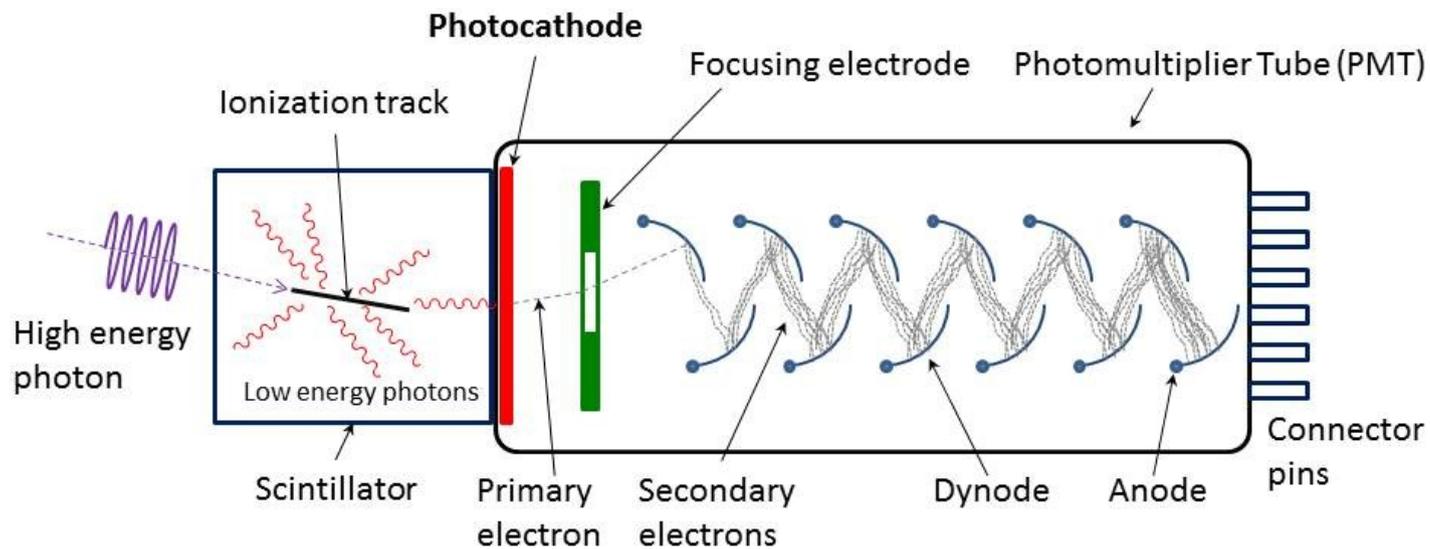
kllinikum.uni-heidelberg.de

Messung von Strahlung

Szintillations-Zähler

Teilchendurchgang durch Kristall erzeugt sichtbares Licht

Nachweis durch „Photomultiplier“



en.wikipedia.org

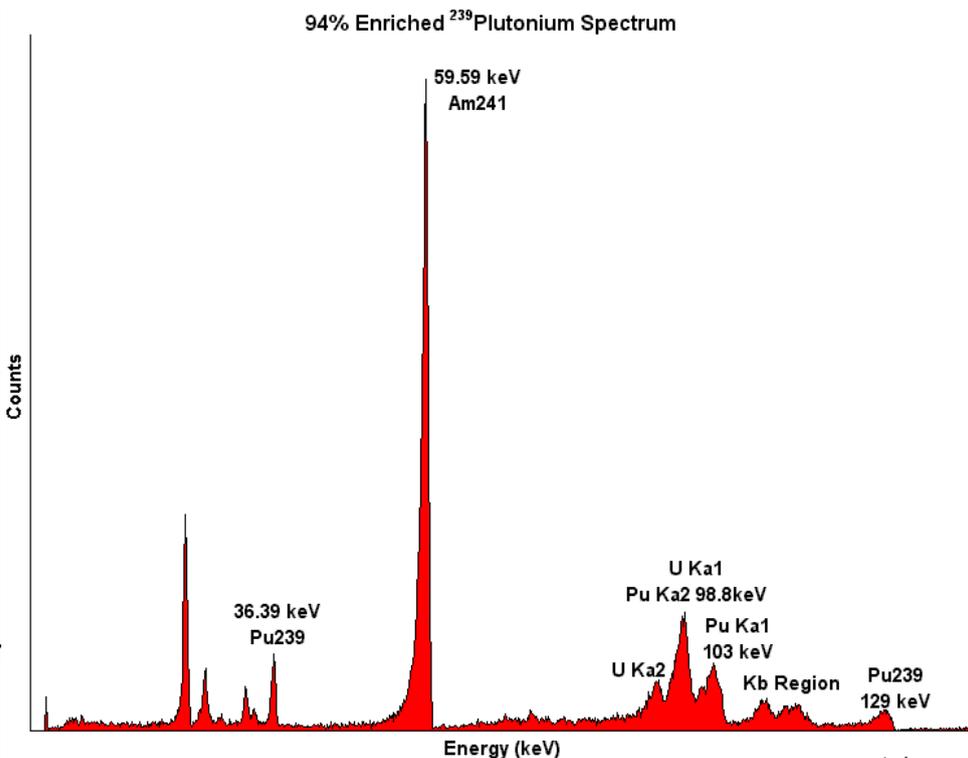
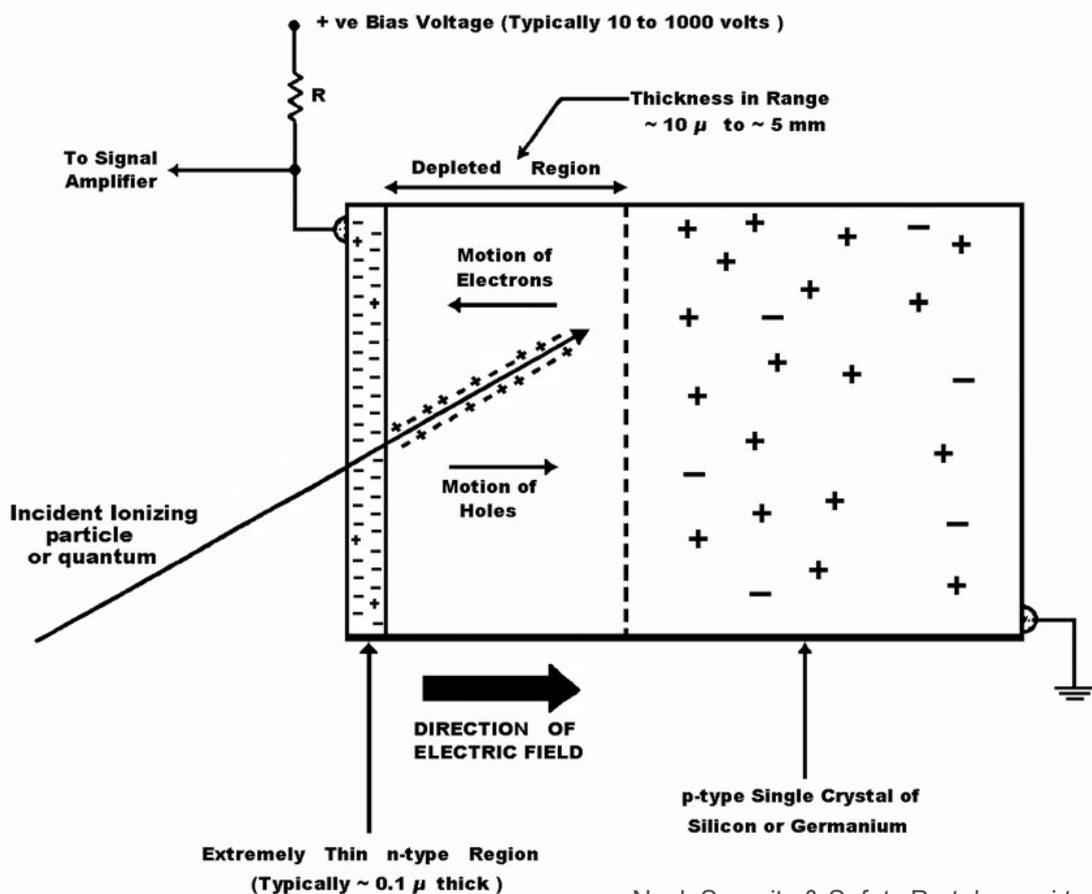
Messung von Strahlung

Halbleiter-Zähler

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

Sehr hohe Energieauflösung

→ Benutzung zur Identifikation von radioaktiven Proben durch γ -Spektroskopie.



amptek.com

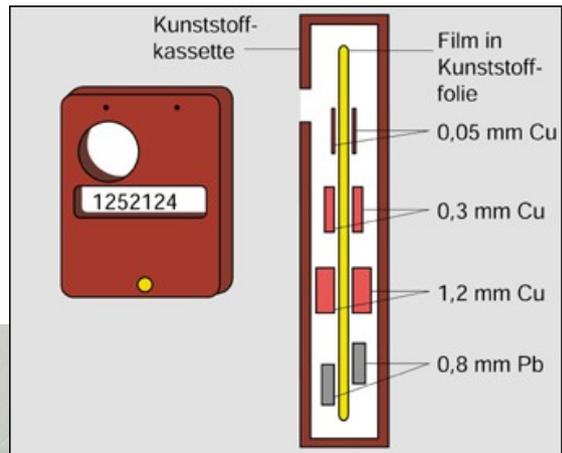
Nucl. Security & Safety Portal, nsspi.tamu.edu



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.



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