Vorlesung

Radiologie

Physikalische Grundlagen – Teil 2

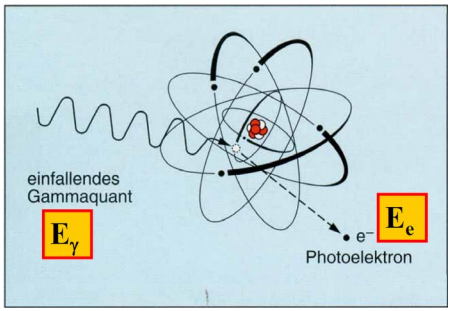
Dr. Claude Krantz

Marburger Ionenstrahl-Therapiezentrum

1. November 2018

Inhalt

Einleitung



Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

Grundprinzipien des Strahlenschutzes

Dosisbegriffe, Messung von Strahlung

Inhalt

Einleitung

Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

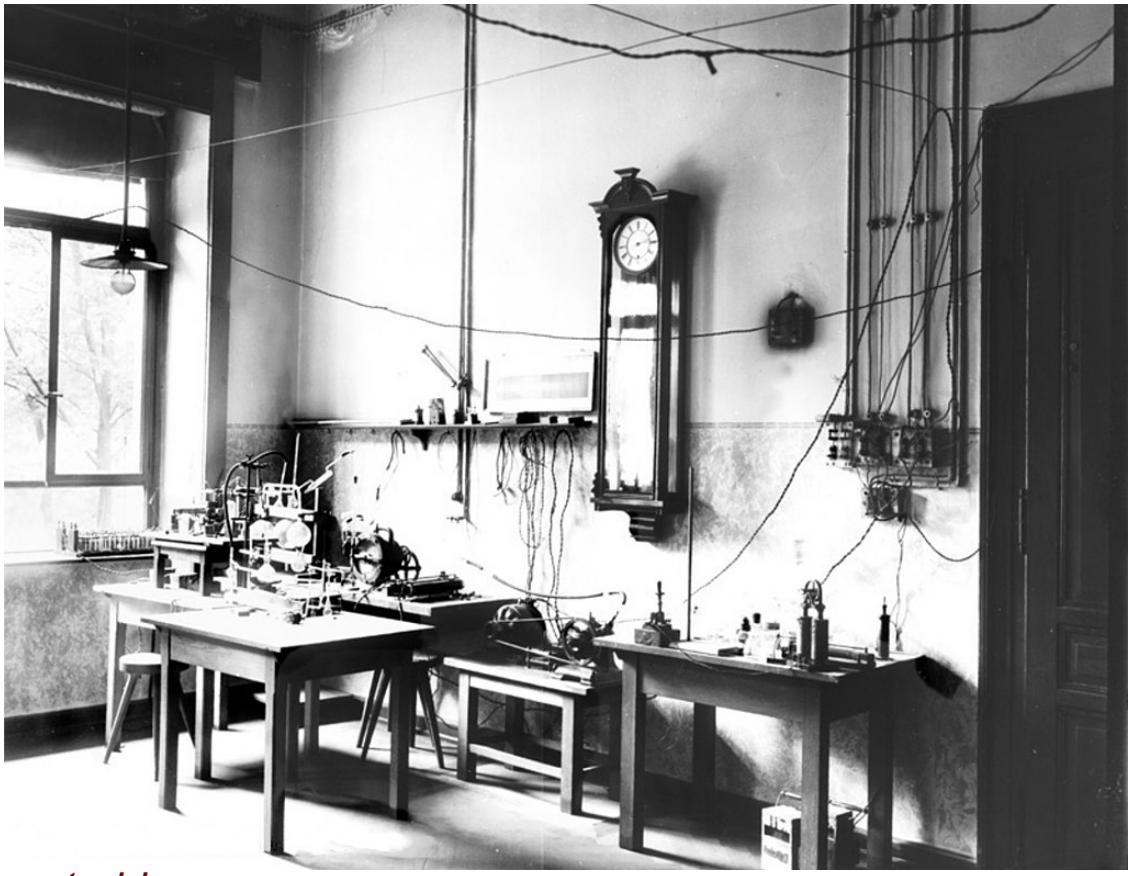
Grundprinzipien des Strahlenschutzes

Dosisbegriffe, Messung von Strahlung

Etwas Geschichte ...

1895 W. C. Röntgen entdeckt in Würzburg die (von ihm sogenannte) X-Strahlung, welche im Deutschen anschließend in „Röntgenstrahlung“ umbenannt wurde.

W. C. Röntgen



W. C. Röntgens Labor in Würzburg

Heute ist bekannt, dass viele andere Physiker des 19. Jhds. bereits zuvor Röntgenstrahlung unbewusst erzeugt und beobachtet hatten, ohne sie jedoch wissenschaftlich zu beschreiben oder ihren Nutzen zu erkennen ...

Etwas Geschichte ...

1895 W. C. Röntgen entdeckt in Würzburg die (von ihm sogenannte) X-Strahlung, welche im Deutschen anschließend in „Röntgenstrahlung“ umbenannt wurde.

1896 Röntgen präsentiert eine X-Aufnahme der Hand seiner Frau Anna Bertha Röntgen und demonstriert damit den medizinischen Nutzen der neuen Strahlung.

→ **Geburtsstunde der Radiologie**

Röntgen erhält 1901 den ersten Nobelpreis für Physik

wikimedia.org

Etwas Geschichte ...

1895 W. C. Röntgen entdeckt in Würzburg die (von ihm sogenannte) X-Strahlung, welche im Deutschen anschließend in „Röntgenstrahlung“ umbenannt wurde.

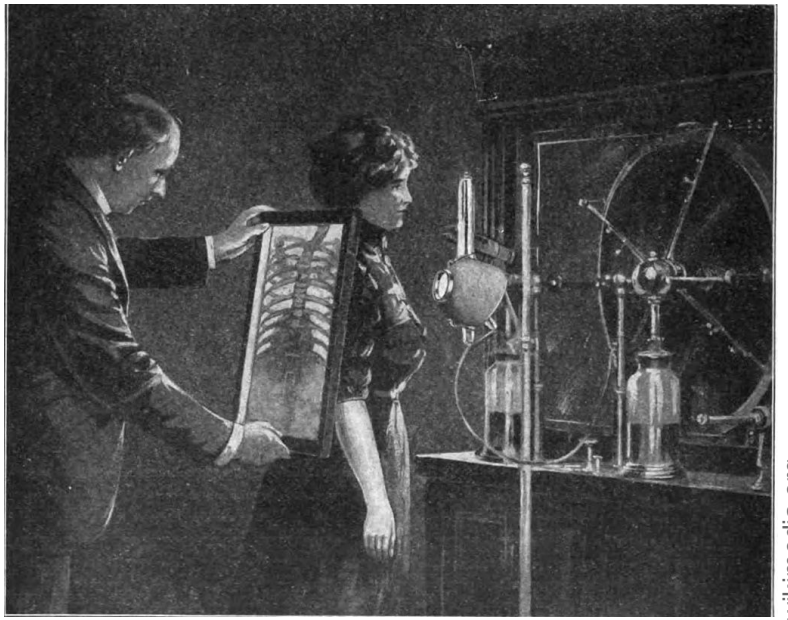
1896 Röntgen präsentiert eine X-Aufnahme der Hand seiner Frau Anna Bertha Röntgen und demonstriert damit den medizinischen Nutzen der neuen Strahlung.

ab 1896 Die Akzeptanz des neuen Verfahrens ist sprunghaft.

Röntgen verzichtet auf Patentanmeldung, die nötige Technik (Elektronenröhre) ist bereits weit verbreitet.

1. klinische Bildgebung im Januar 1896.

Mai 1896: Entwicklung des „Fluoroskops“, das Dauer-Durchleuchtung ermöglicht.

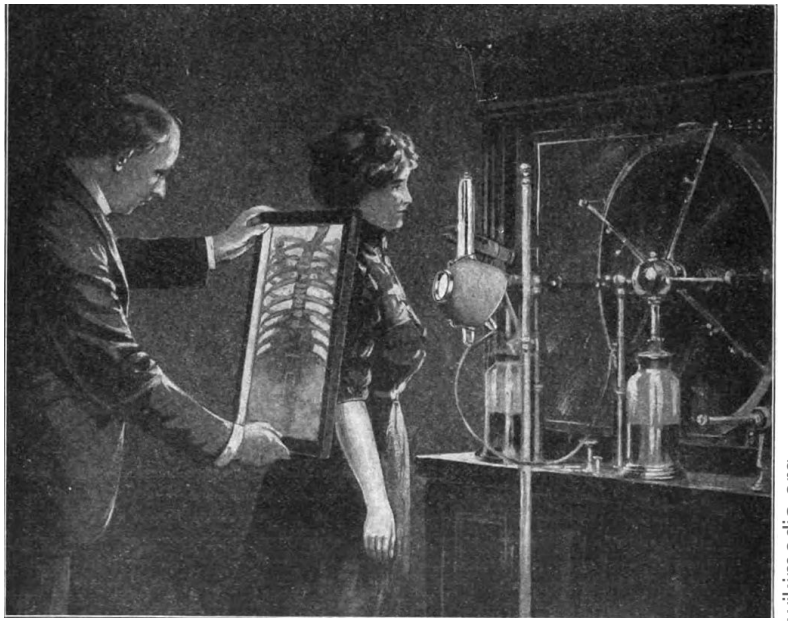


wikimedia.org

Etwas Geschichte ...

bis 1900 Schnell wird klar, dass Röntgenstrahlung Effekte im Gewebe (z.B. Hautrötung) hervorrufen kann. Diese werden aber noch nicht als gefährlich erkannt.

Nach heutiger Sichtweise: Viele Anwender (Ärzte) ziehen sich bei der Handhabung ihrer Röntgengeräte schwere Strahlenschäden zu!



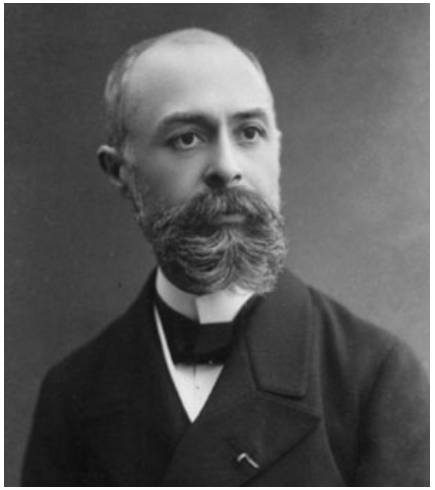
wikimedia.org

Etwas Geschichte ...

bis 1900 Schnell wird klar, dass Röntgenstrahlung Effekte im Gewebe (z.B. Hautrötung) hervorrufen kann. Diese werden aber noch nicht als gefährlich erkannt.

Nach heutiger Sichtweise: Viele Anwender (Ärzte) ziehen sich bei der Handhabung ihrer Röntgengeräte schwere Strahlenschäden zu!

Zugleich wird erkannt, dass die ab 1896 (z.B. durch H. Becquerel, M. und P. Curie) erforschte ***Radioaktivität*** ähnliche Strahlung erzeugt (Gamma-Strahlen).



Henri Becquerel

Marie Curie

Pierre Curie

Etwas Geschichte ...

bis 1900 Schnell wird klar, dass Röntgenstrahlung Effekte im Gewebe (z.B. Hautrötung) hervorrufen kann. Diese werden aber noch nicht als gefährlich erkannt.

Nach heutiger Sichtweise: Viele Anwender (Ärzte) ziehen sich bei der Handhabung ihrer Röntgengeräte schwere Strahlenschäden zu!

Zugleich wird erkannt, dass die ab 1896 (z.B. durch H. Becquerel, M. und P. Curie) erforschte ***Radioaktivität*** ähnliche Strahlung erzeugt (Gamma-Strahlen).

→ **Erste Versuche, die Effekte therapeutisch zu nutzen:**

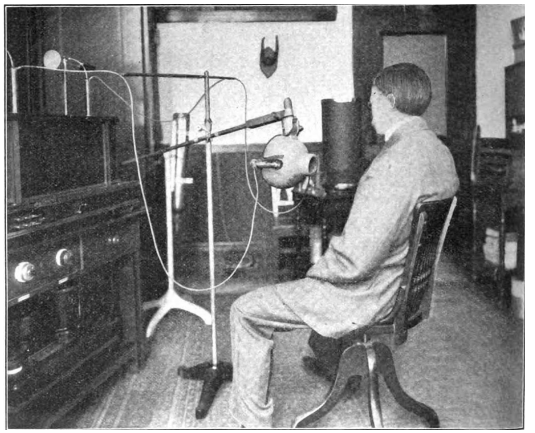
1897 L. Freud (Wien): Behandlung eines Muttermals mit Röntgenstrahlen.

1898 O. Walkhoff (Pionier der zahnärztlichen Radiologie) bestrahlt im Tierversuch krebskranke Mäuse mit ***Radium*** und weist verminderte Sterberate nach.

1899 Stenbeck/Sjögren (Stockholm):
Erste humanmedizinische Behandlung eines Karzinoms mit Röntgenstrahlen.

→ Geburtsstunde der Strahlentherapie

Auch hier: Anfangs kaum Schutzmaßnahmen! →



wikimedia.org

Etwas Geschichte ...

ab ca. 1920 War die schädigende Wirkung von Röntgen- und Gamma-Strahlung wissenschaftlich eindeutig erwiesen.

wikimedia.org

Strahlenschäden an den Händen von M. Kassabian (Vizepräsident der American Roentgen Ray Society, um 1908).

wikimedia.org

Ehrenmal der Radiologie am St.-Georg Krankenhaus (Hamburg, 1936)

Etwas Geschichte ...

ab ca. 1920 War die schädigende Wirkung von Röntgen- und Gamma-Strahlung wissenschaftlich eindeutig erwiesen.

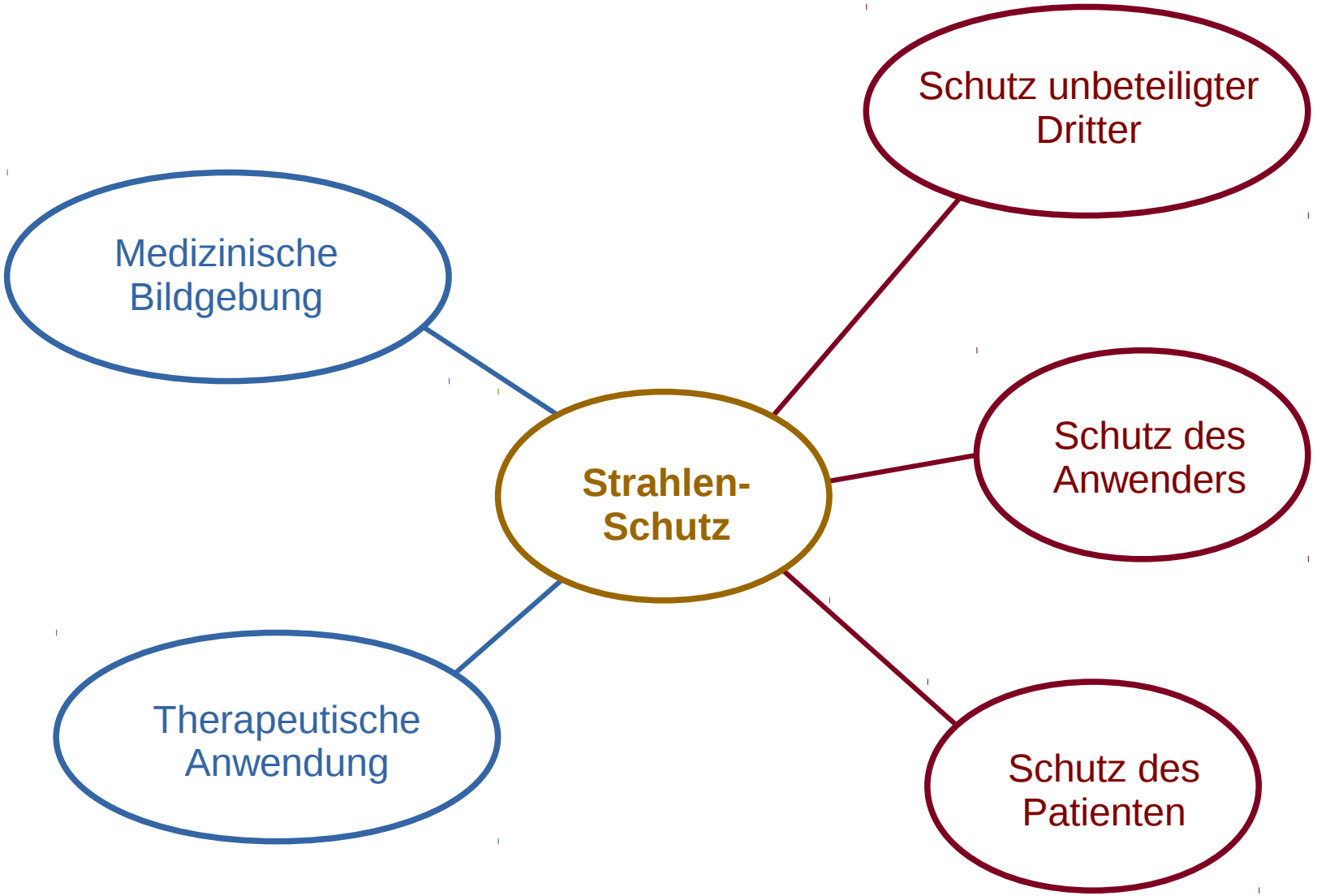
→ Damit war eigentlich klar, dass vor jeder therapeutischen oder bildgebenden Anwendung ionisierender Strahlung stets eine

Abwägung von Nutzen und Gefahren

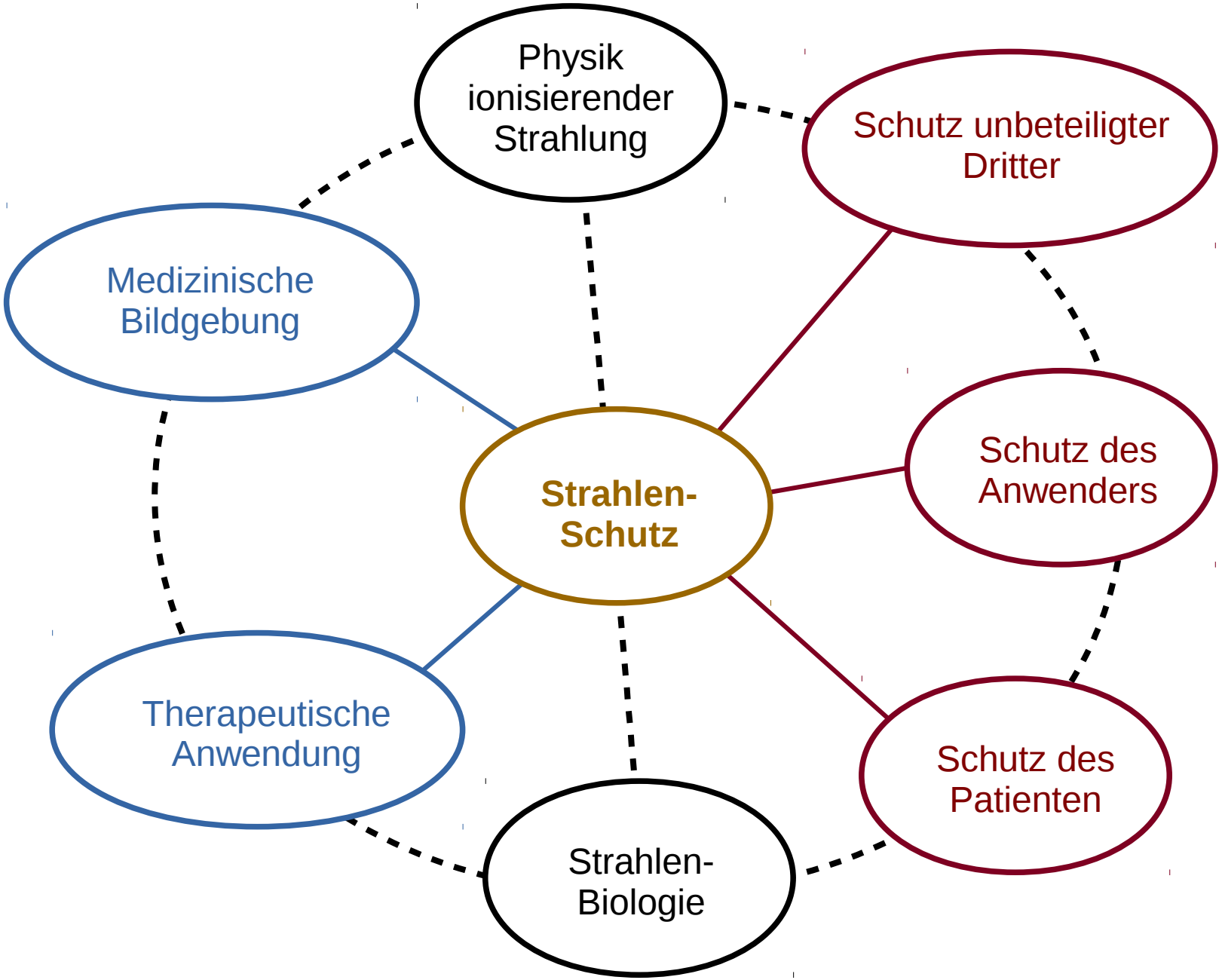
nötig ist.

Dennoch wird ein **konsequenter Strahlenschutz** erst seit etwa Ende des II. Weltkriegs praktiziert!

Strahlenschutz in der (Human-) Medizin



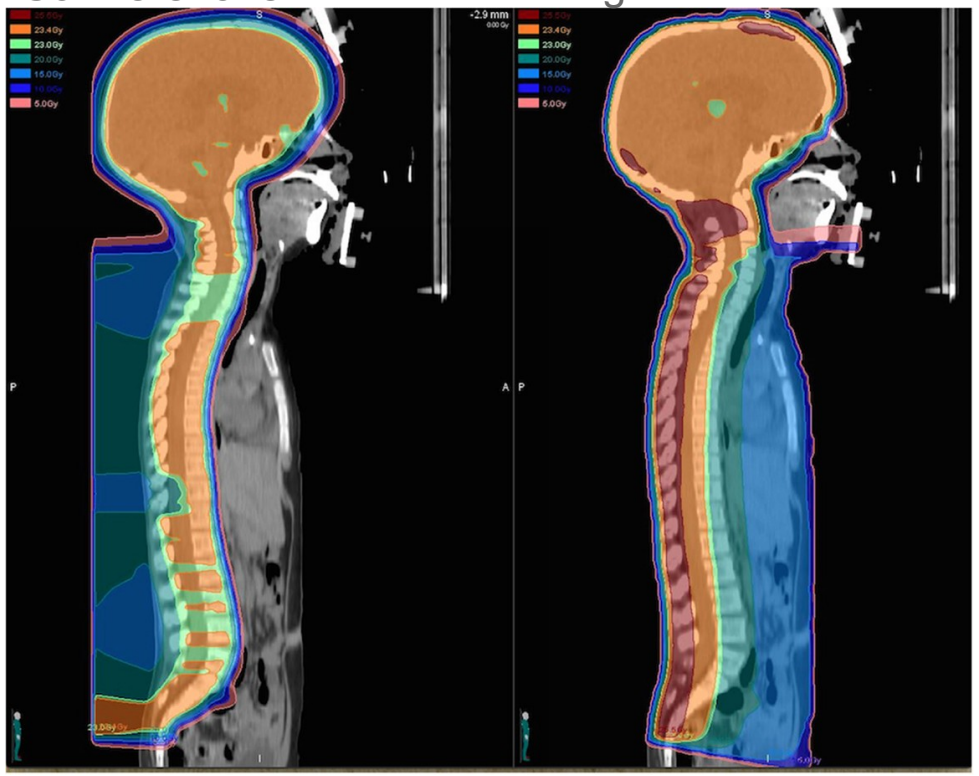
Strahlenschutz in der (Human-) Medizin



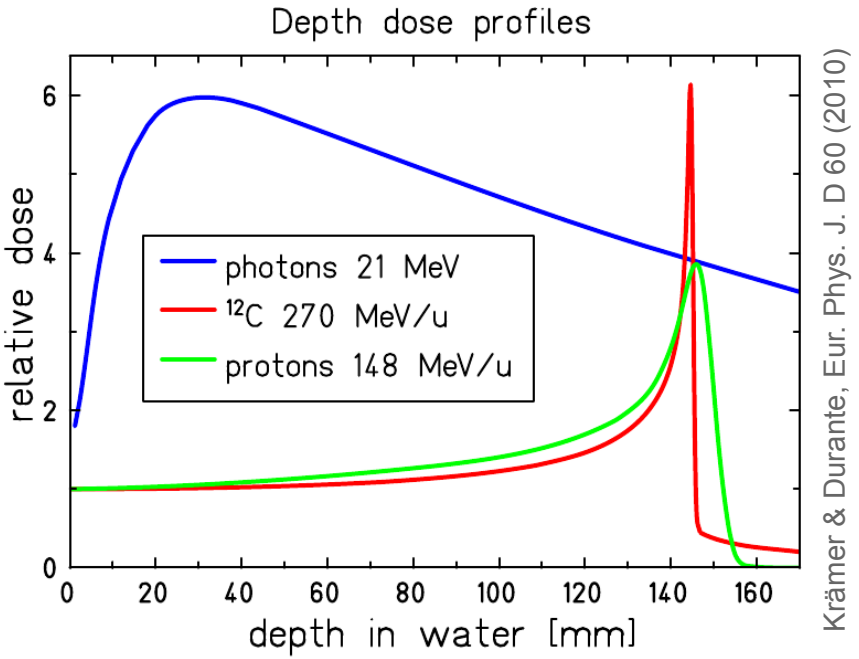
Strahlenschutz in der (Human-) Medizin

Beispiel Strahlentherapie: Nutzung verschiedener Strahlen***arten*** erlaubt es (im Idealfall), nur die ***gewünschten*** Körperregionen zu bestrahlen.

Schwere Ionen Röntgenstrahlen



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



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

Gesetzlicher Rahmen

Bis September 2017:

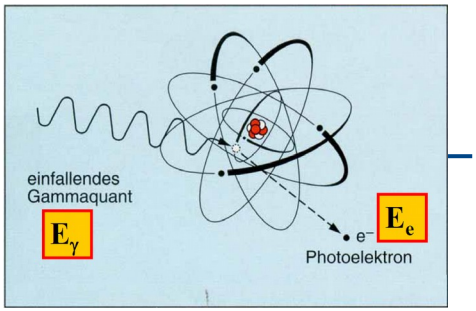
- Atomgesetz (AtG)
  - → Strahlenschutzverordnung (StrSchV)
  - → Röntgenverordnung (RöV)
- Strahlenschutzvorsorgegesetz (StrVG)

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.
  - → Strahlenschutzverordnung (StrSchV)
  - → Röntgenverordnung (RöV)

Inhalt

Einleitung



Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

Grundprinzipien des Strahlenschutzes

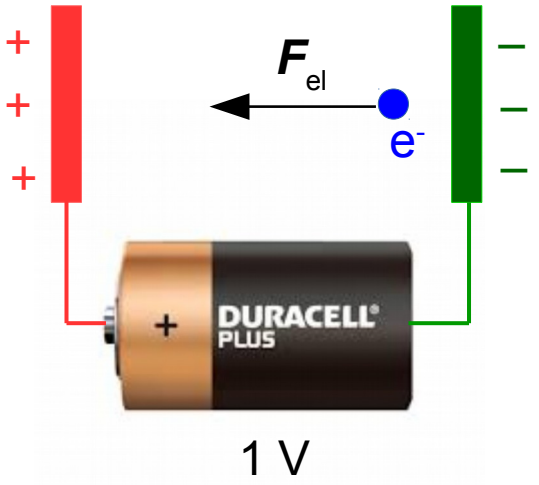
Dosisbegriffe, Messung von Strahlung

Bereits gesehen ...

Geeignete Einheit der Energie: eV („Elektronvolt“)

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

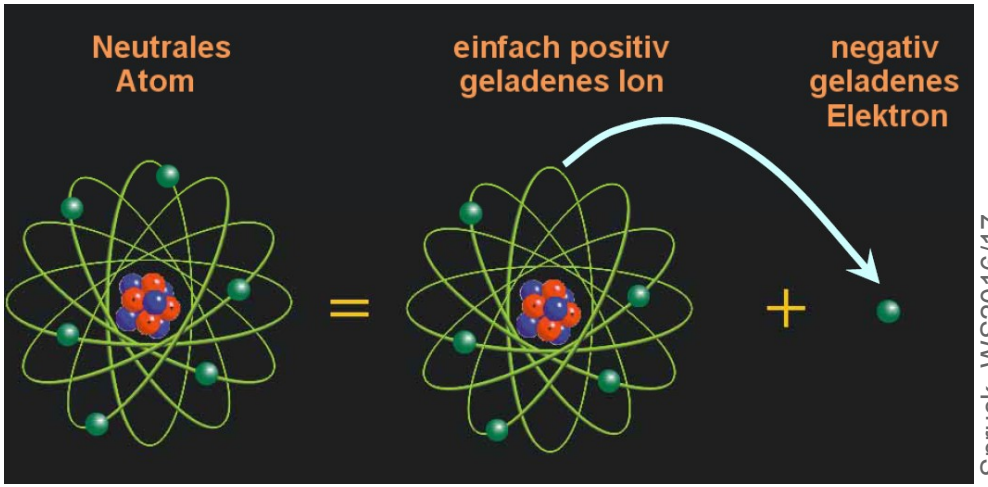
$1\ \text{eV} \approx 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$



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

z.B. Einfachionisation eines Kohlenstoffatoms:

$C + 12{,}3\ \text{eV} \rightarrow C^+ + e^-$



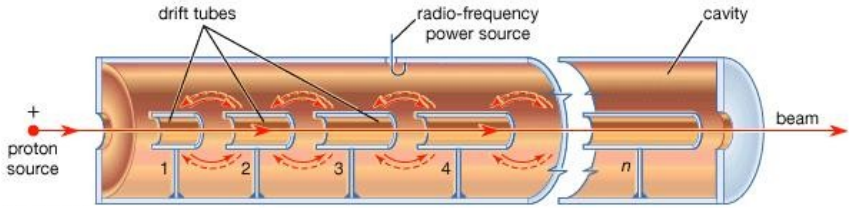
Spruck, WS2016/17

Bereits gesehen ...

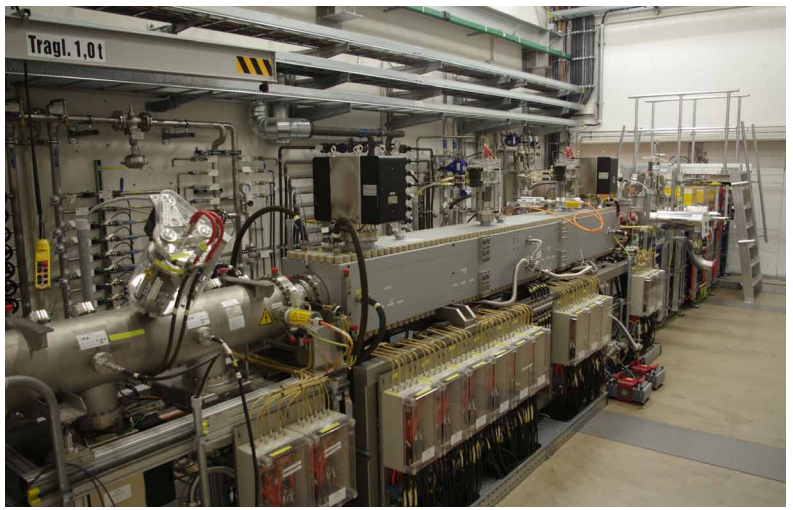
Oft haben wir es mit Strahlung zu tun, deren Teilchenenergien im keV- oder MeV-Bereich liegen!

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

z.B.: Protonenbeschleuniger: 7 MeV



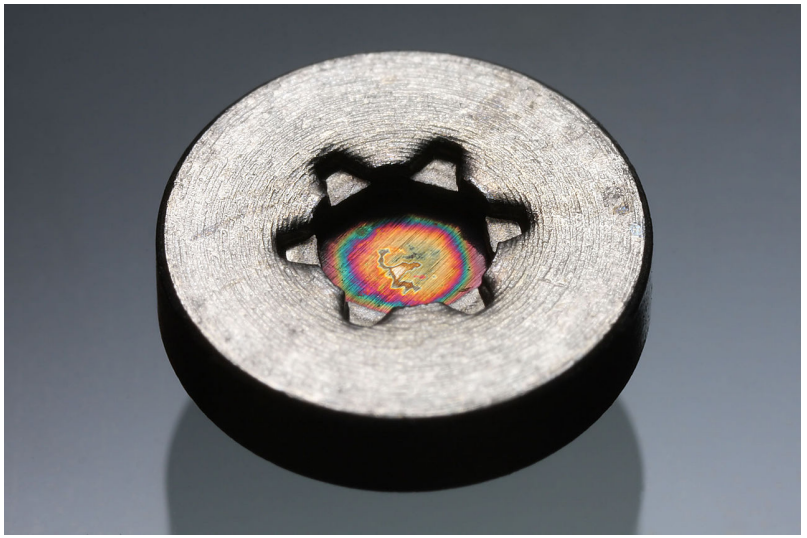
Encyclopedia Britannica (2007)



Radiofrequenz-Vorbeschleuniger des MIT

α-Zerfall von Am-241: 5,4 MeV

$$^{241}\mathrm{Am} \rightarrow {}^{237}\mathrm{Np} + \alpha\ (5{,}4\ \mathrm{MeV}) + \gamma\ (56\ \mathrm{keV})$$



wikimedia.org

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

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

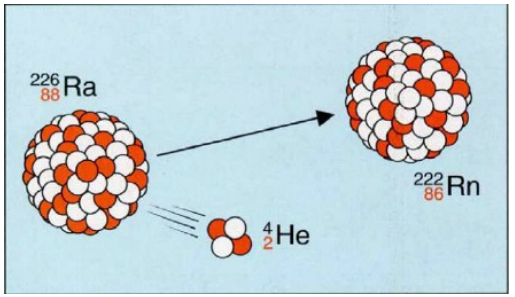
Hochfrequente elektromagnetische Strahlung (Photonenstrahlen)

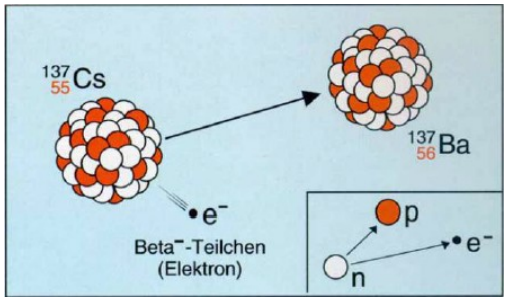
z.B. γ-Strahlung aus radioaktiven Zerfällen,
Röntgenstrahlung aus Elektronenröhren

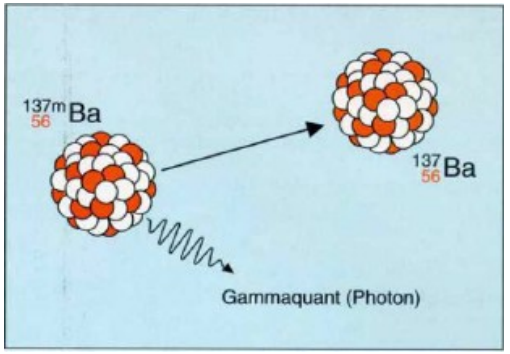
Achtung: Auch hier redet man oft von „γ-Quanten“
(s. Welle-Teilchen-Dualismus)!

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 Beschleunige

Leichte, geladene Teilchen

z.B. Elektronen oder Positro
Elektronen aus Beschle

Hochfrequente elektromagnet

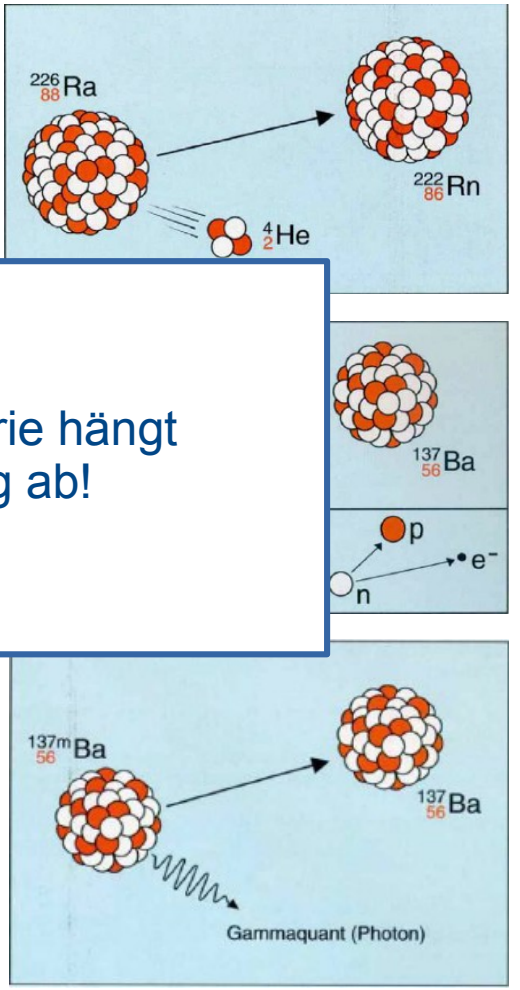
z.B. γ-Strahlung aus radioaktiven Zerfällen,
Röntgenstrahlung aus Elektronenröhren

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

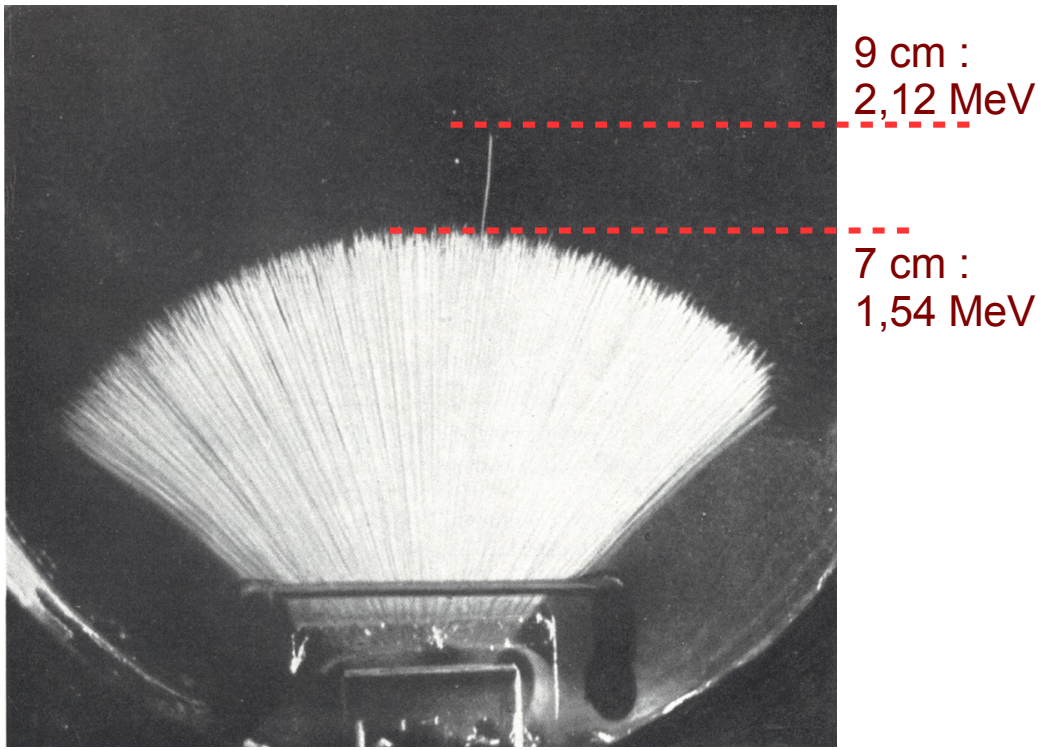
Schwere geladene Teilchen in Materie

Träge Masse — Masse eines Nukleons oder mehr: ≥ 1 u (1 u = 1/12 m_C)

Elektrische Ladung — Eine oder mehrere Elementarladungen (e)

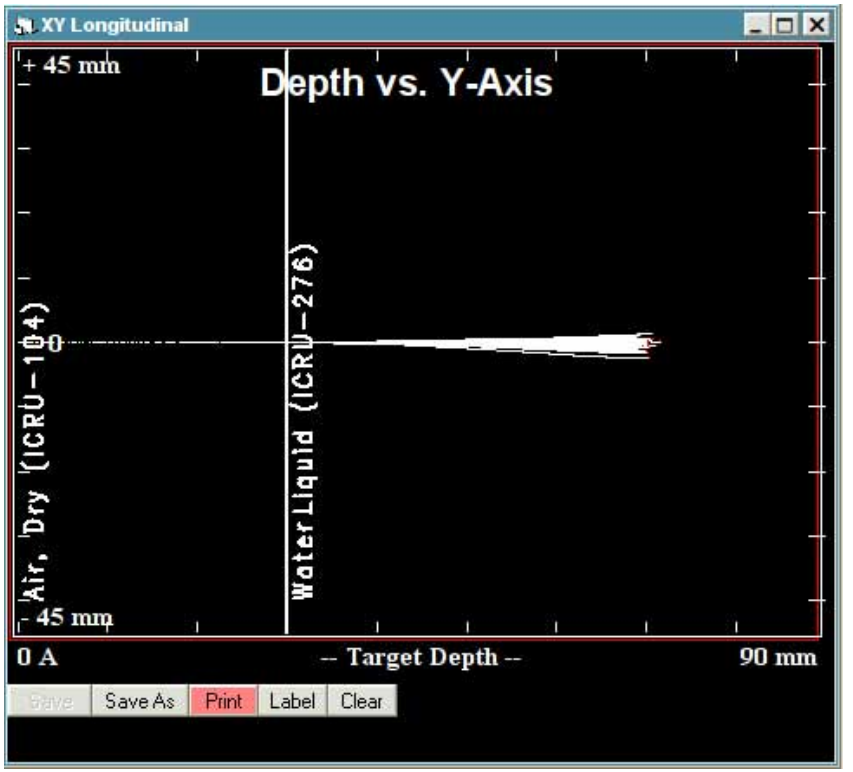
Beobachtung: — Teilchen werden in einem Medium (fest, flüssig oder gasförmig) nur wenig abgelenkt, und stoppen nach einer bestimmten Reichweite.

Alpha-Teilchen aus ^{214}Po in Nebelkammer



Bothe, Gentner & Maier-Leibniz, An Atlas of Typical Expansion Chamber Photographs

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

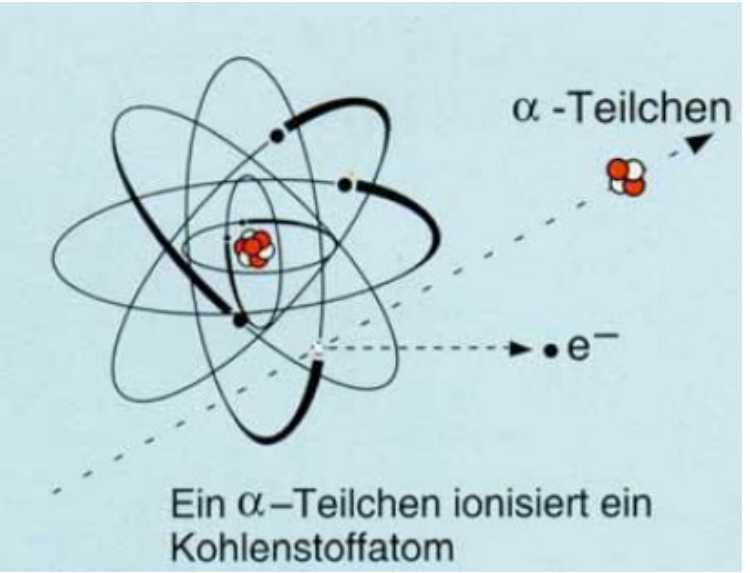
Beim Durchfliegen der Materie begegnen Sie hauptsächlich den Elektronen der „Target“-Atome.

→ wiederholte Ionisation und Anregung von getroffenen Atomen.

→ Da $\text{Masse}_{\text{Projektil}} >> \text{Masse}_{\text{Elektron}}$, ändert sich die Flugrichtung kaum.

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

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



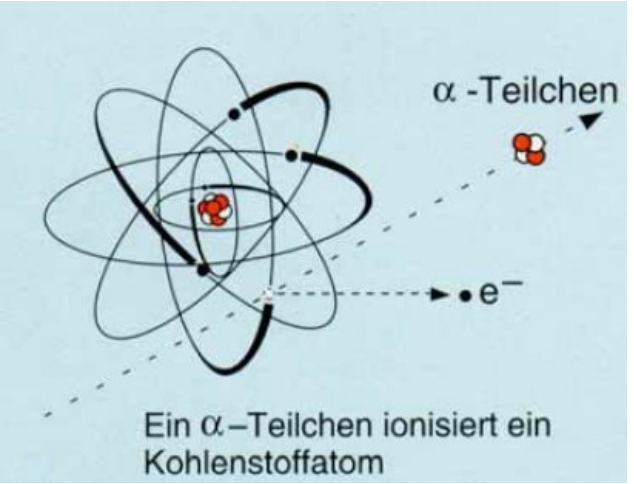
Volkmer, Kernenergie Basiswissen, DAtF, 2013

Schwere geladene Teilchen in Materie

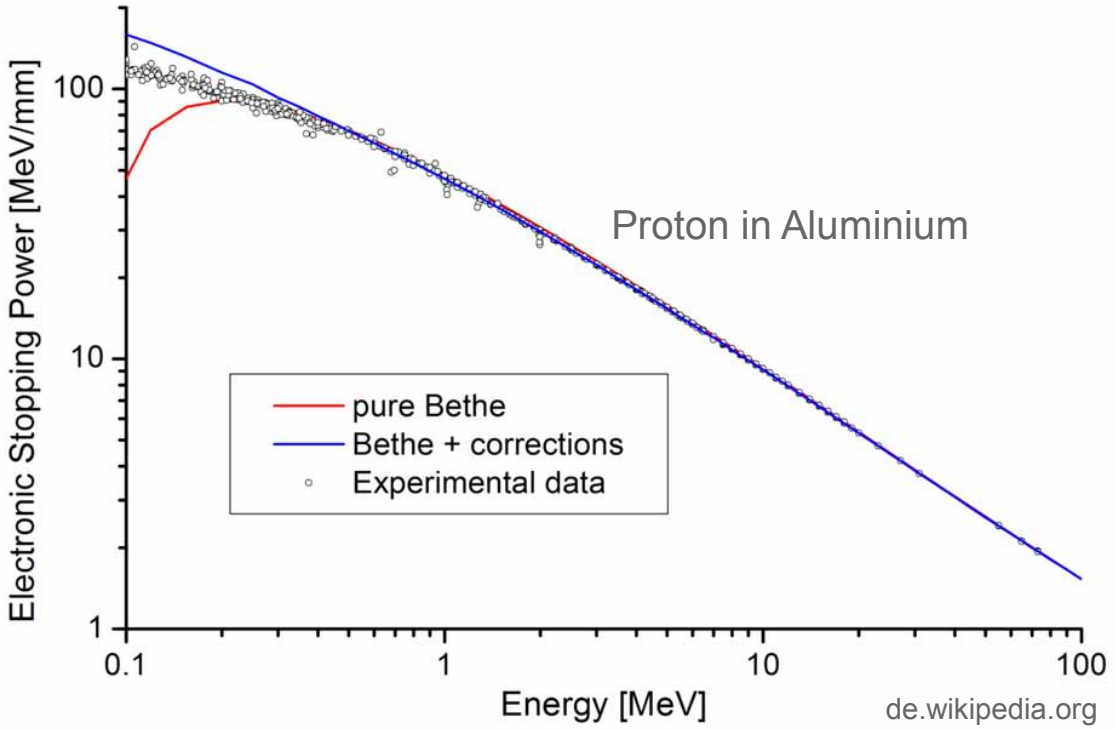
Mathematische Beschreibung:

Energieverlust dE pro
(infinitesimaler) Flugstrecke dx

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



Volkmer, Kernenergie Basiswissen, DAtF, 2013



Genaue Berechnung zeigt:

S ist am größten bei
kleiner Projektilenergie E

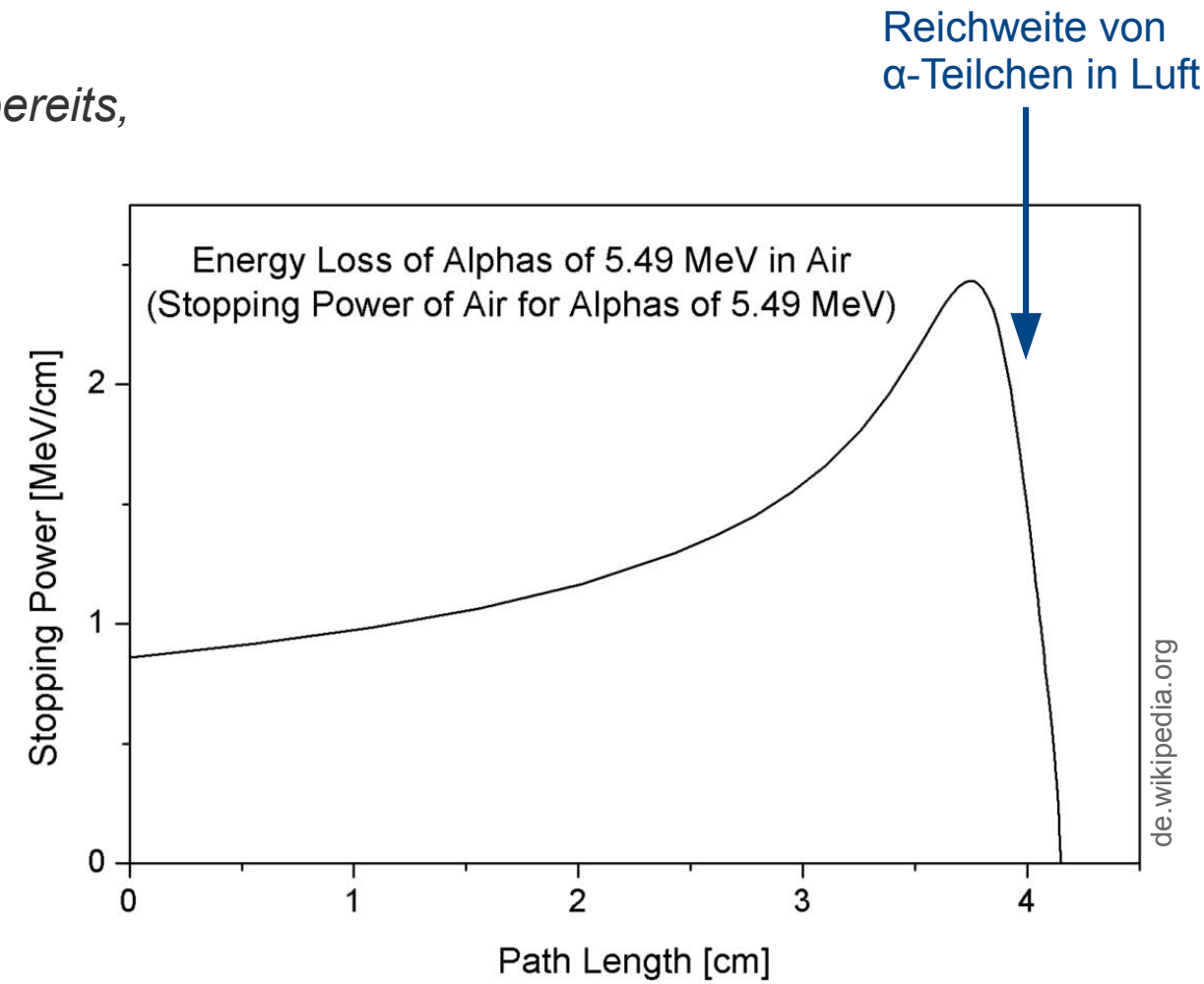
Schwere geladene Teilchen in Materie

→ *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

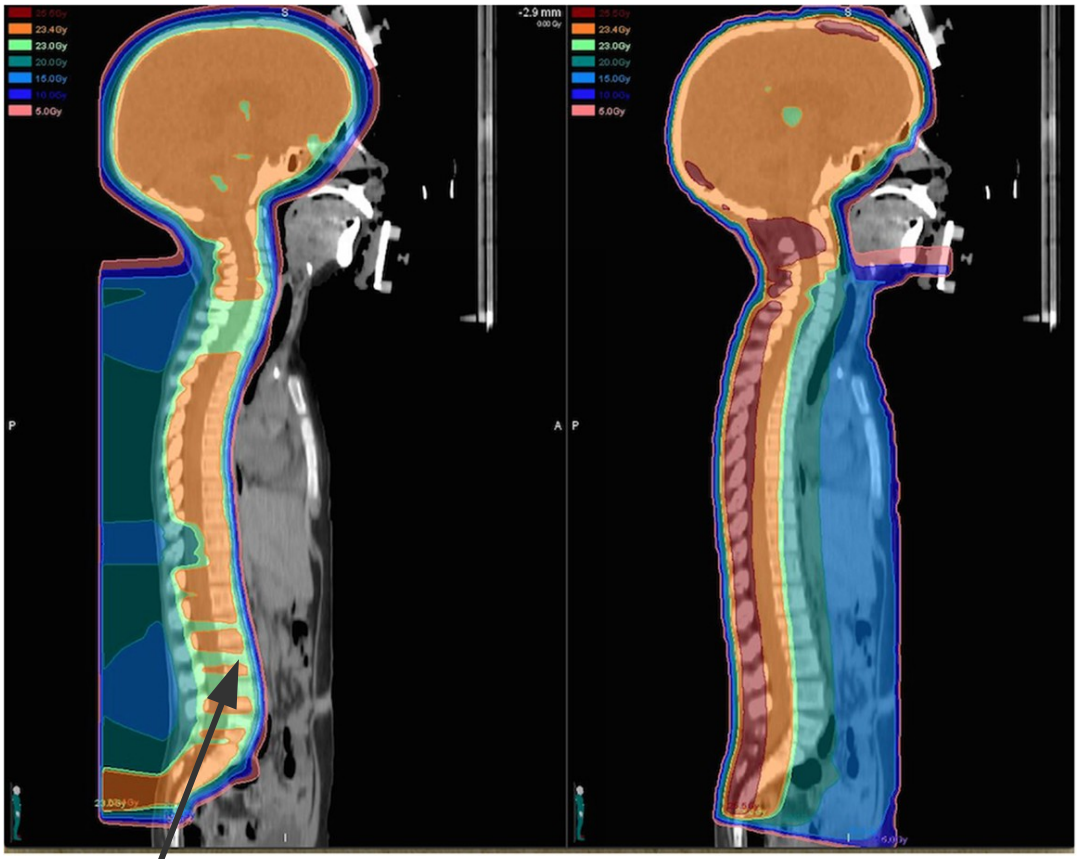
→ *Je mehr Energie das Teilchen bereits, verloren hat, desto größer ist S und desto schneller verliert es auch die restliche Energie!*

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 Röntgenstrahlen



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

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

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

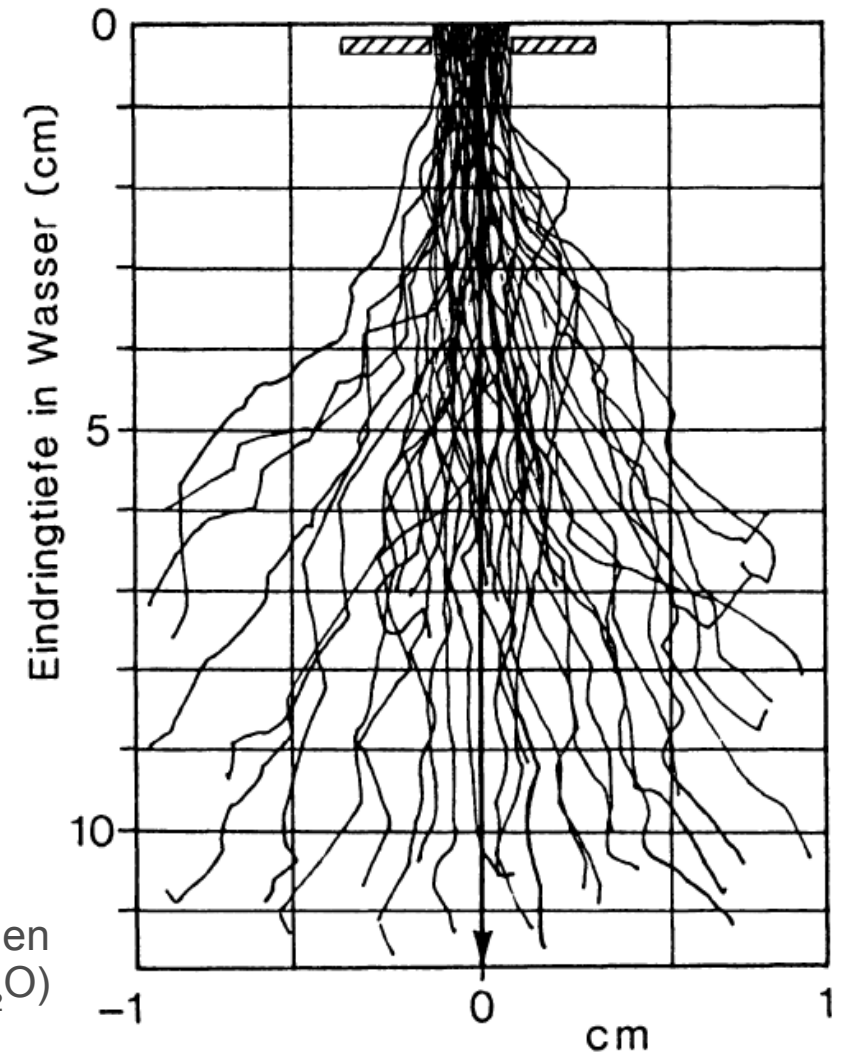
Elektronenstrahlen bestehen aus sehr leichten Teilchen

$m_e \approx 1/1836$ 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_2O)

Leichte geladene Teilchen in Materie

Elektronenstrahlen bestehen aus sehr leichten Teilchen

$m_e \approx 1/1836$ u

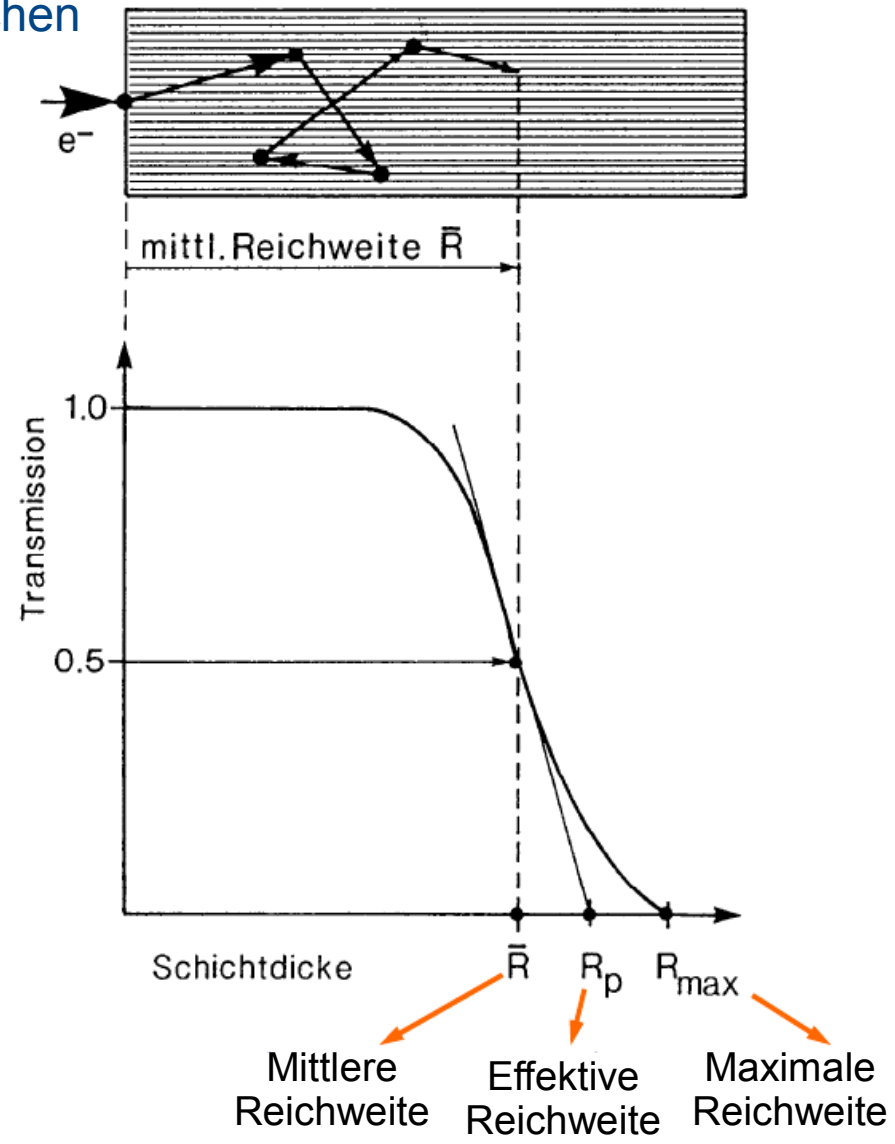
Dies führt zu zusätzlichen Effekten in Vergleich zu schweren geladenen Teilchen.

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

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

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

„Wie dick muss eine Abschirmung sein?“



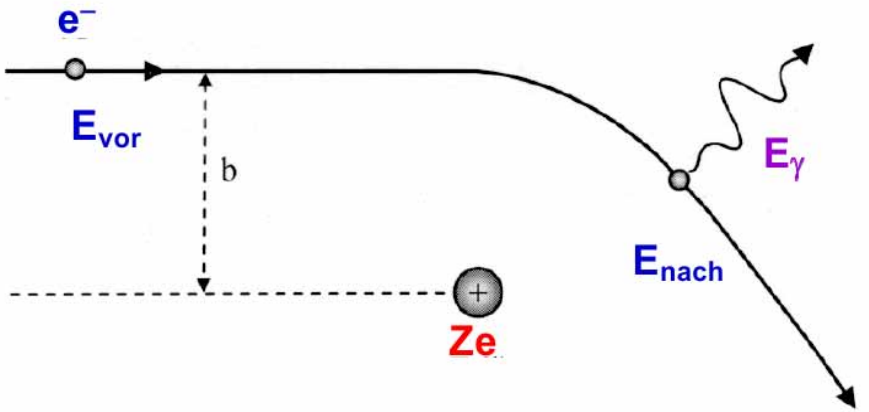
Leichte geladene Teilchen in Materie

Elektronenstrahlen bestehen aus sehr leichten Teilchen

$m_e \approx 1/1836$ u

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

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



Es gilt

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

Man spricht auch von „Bremsstrahlung“.

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

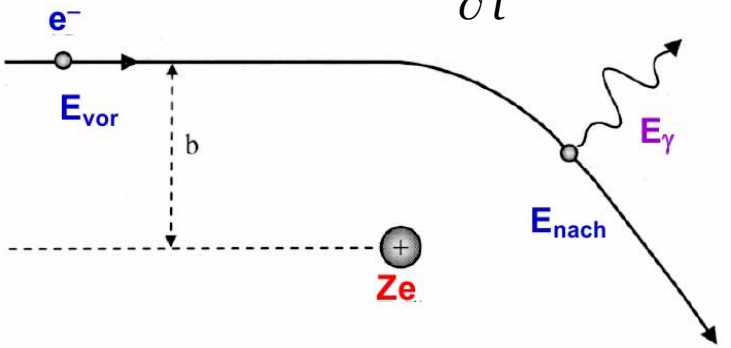
$$\vec{a} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$$

Leichte geladene Teilchen in Materie

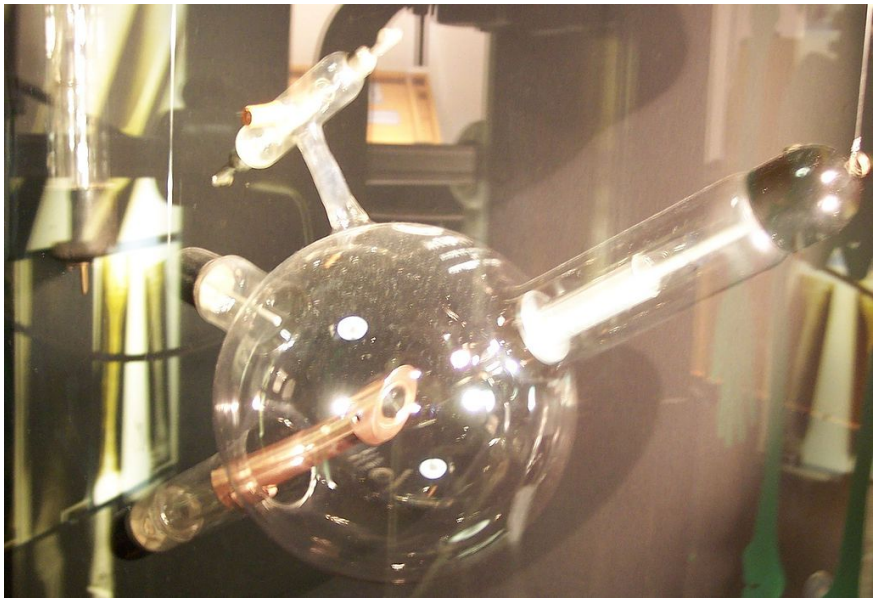
$$\vec{a} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$$

Anwendung der Bremsstrahlung:

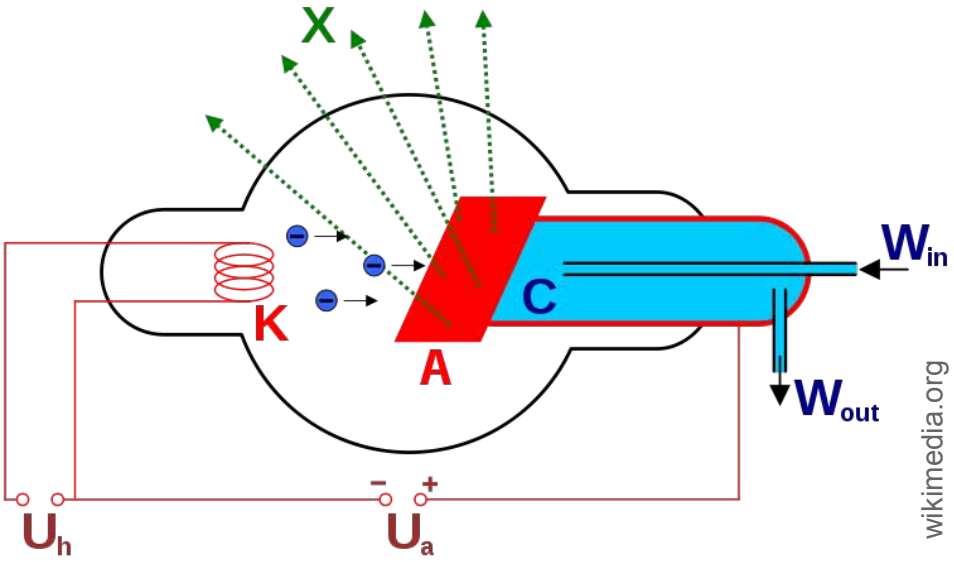
Erzeugung von Röntgenstrahlung



Röntgenröhre: Elektronen treffen mit der Energie eU_a auf eine Anode



wikimedia.org



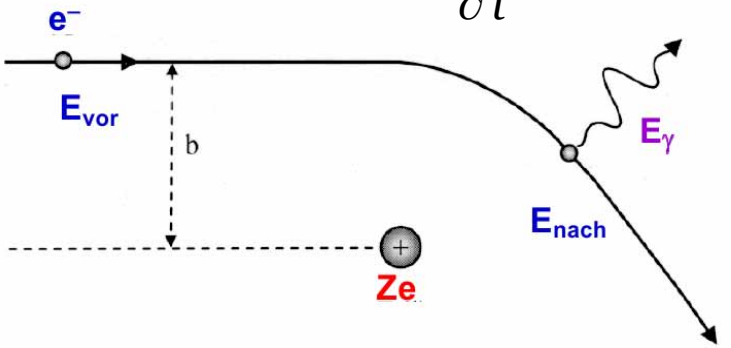
wikimedia.org

(U_a typisch 20 kV bis einige 100 kV)

Leichte geladene Teilchen in Materie

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

Anwendung der Bremsstrahlung:

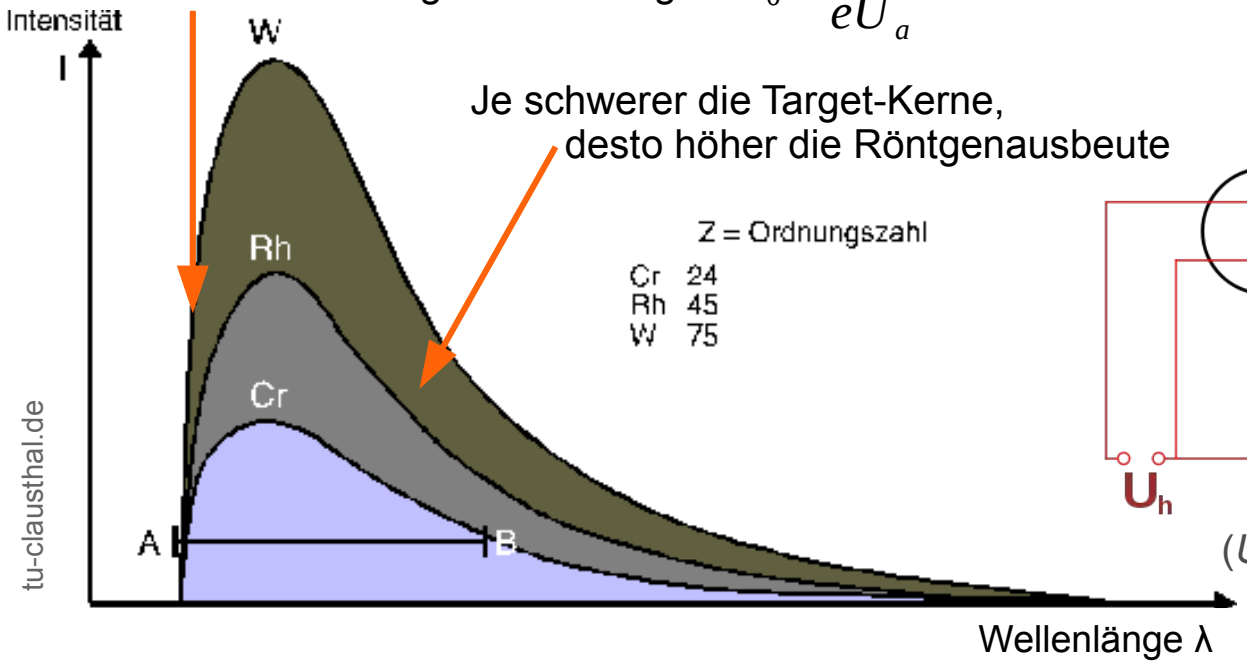


Erzeugung von Röntgenstrahlung

Röntgenröhre: Elektronen treffen mit der Energie eU_a auf eine Anode

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

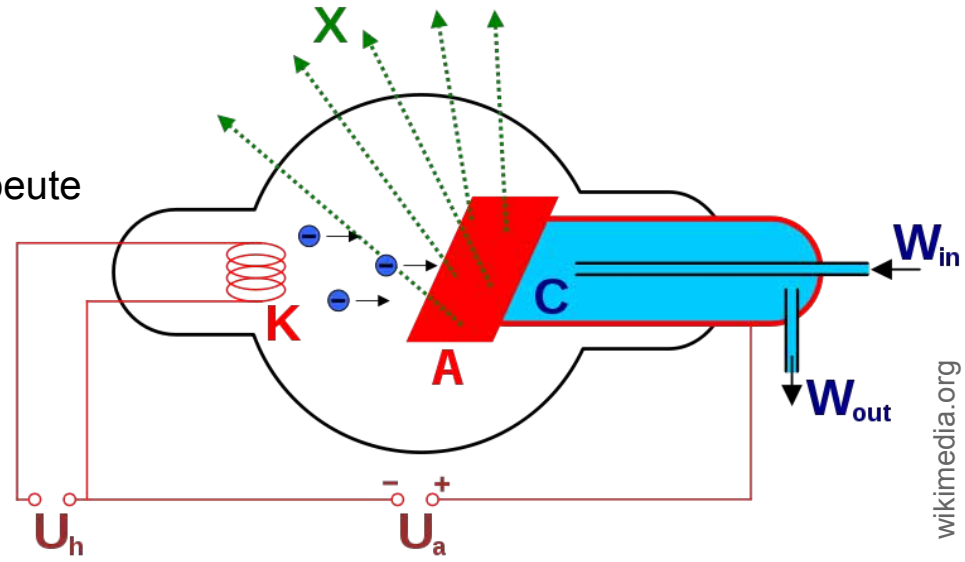
Kleinste Röntgenwellenlänge $\lambda_0 = \frac{hc}{eU_a}$



Je schwerer die Target-Kerne, desto höher die Röntgenausbeute

Z = Ordnungszahl

Cr	24
Rh	45
W	75

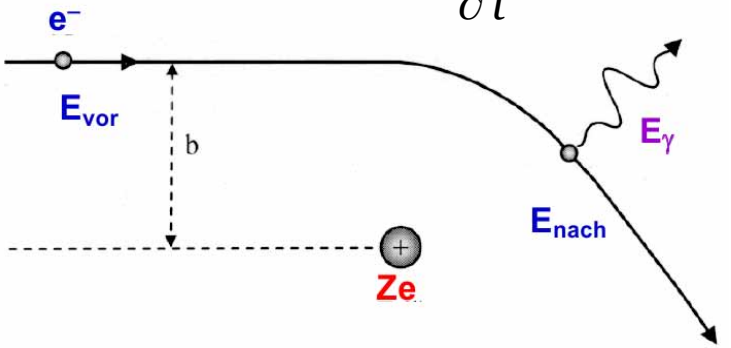


(U_a typisch 20 kV bis einige 100 kV)

Leichte geladene Teilchen in Materie

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

Anwendung der Bremsstrahlung:



Erzeugung von Röntgenstrahlung

Moderne Ausführung:

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

varian.com

varian.com

Leichte geladene Teilchen in Materie

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

$S = dE/dx$

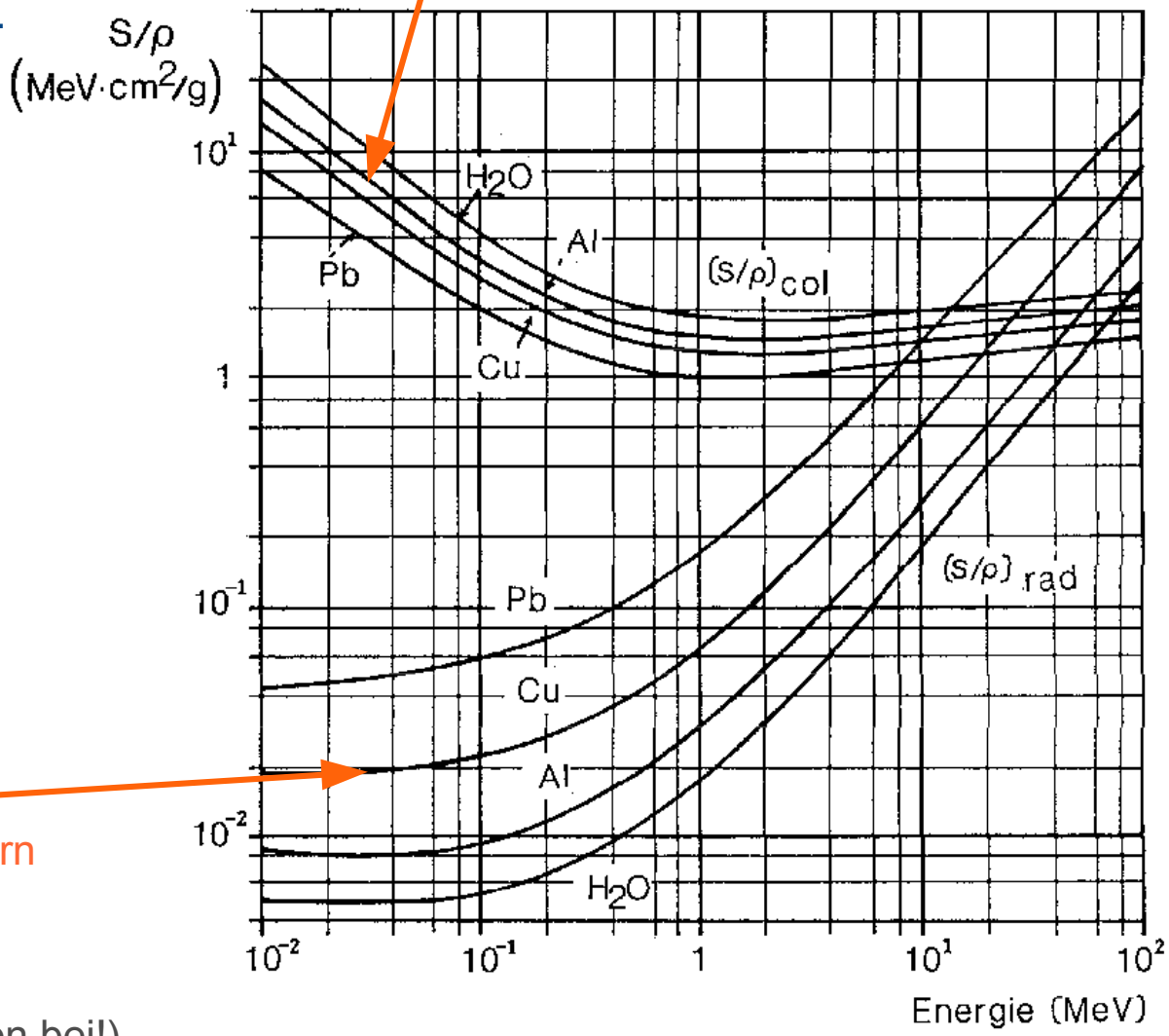
Oft wird S auf die Dichte ρ des Targetmaterials *normiert*:

S in MeV/cm

ρ in g/cm^3

→ S/ρ in MeV·cm^2/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 Wilhem C. Röntgens Frau Anna Bertha. (Nobelpreis 1901)

Grundprinzip:

Durchdringungsvermögen der Röntgenstrahlung ist materialabhängig.

de.wikipedia.org

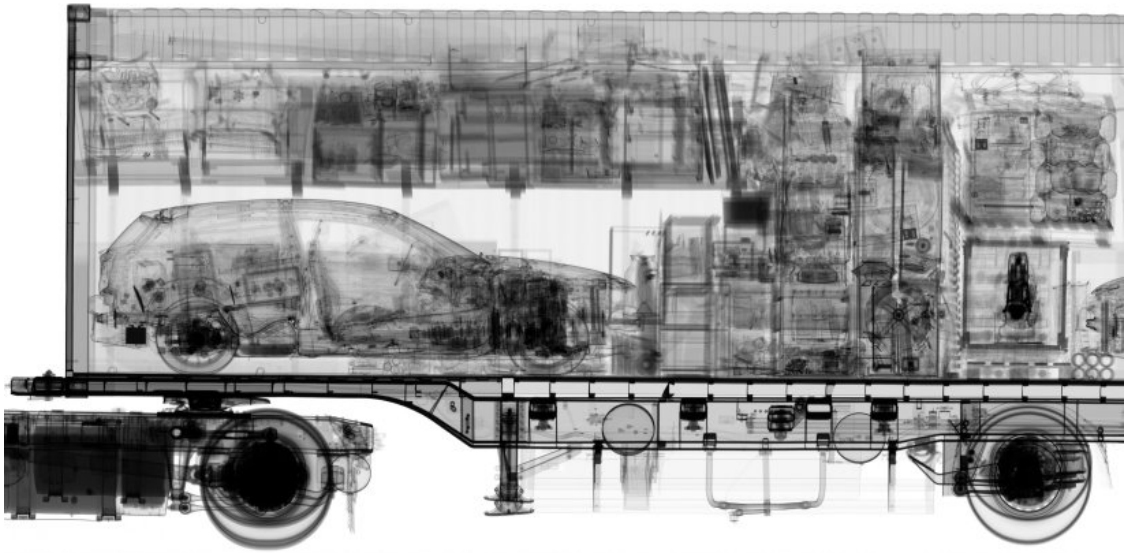
Oberarmbruch

Photonenstrahlung in Materie

Bildgebung auf Grundlage von Durchleuchtung

Neben medizinischer Anwendung

Materialprüfung,
Durchsuchung (Zoll)
...



abendblatt.de

journal.lu

Mobiler Röntgenscanner für LKW

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

Photonenstrahlung in Materie

Mathematische Beschreibung: Abschwächungsgesetz

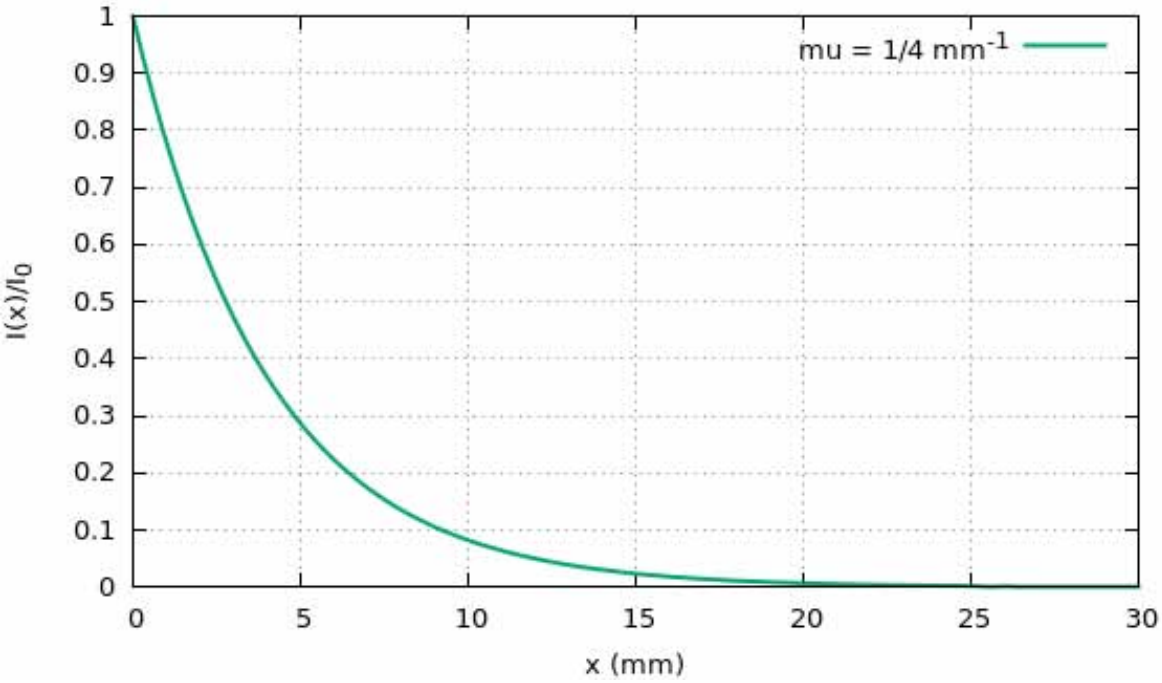
$I(x) = I_0 \exp(-\mu x)$

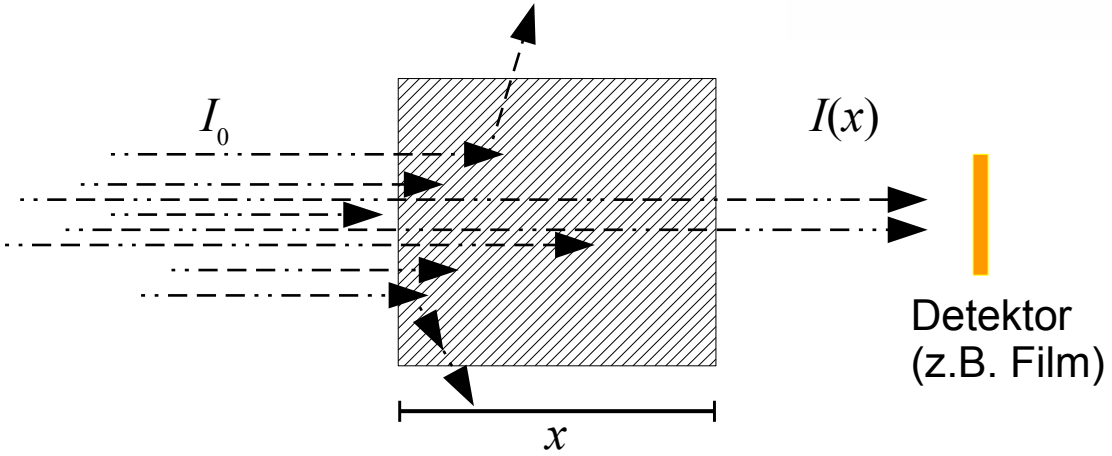
mit

μ = Abschwächungskoeffizient

I_0 = Anfangsintensität (Photonen/s)

$I(x)$ = Restintensität in Materialtiefe x



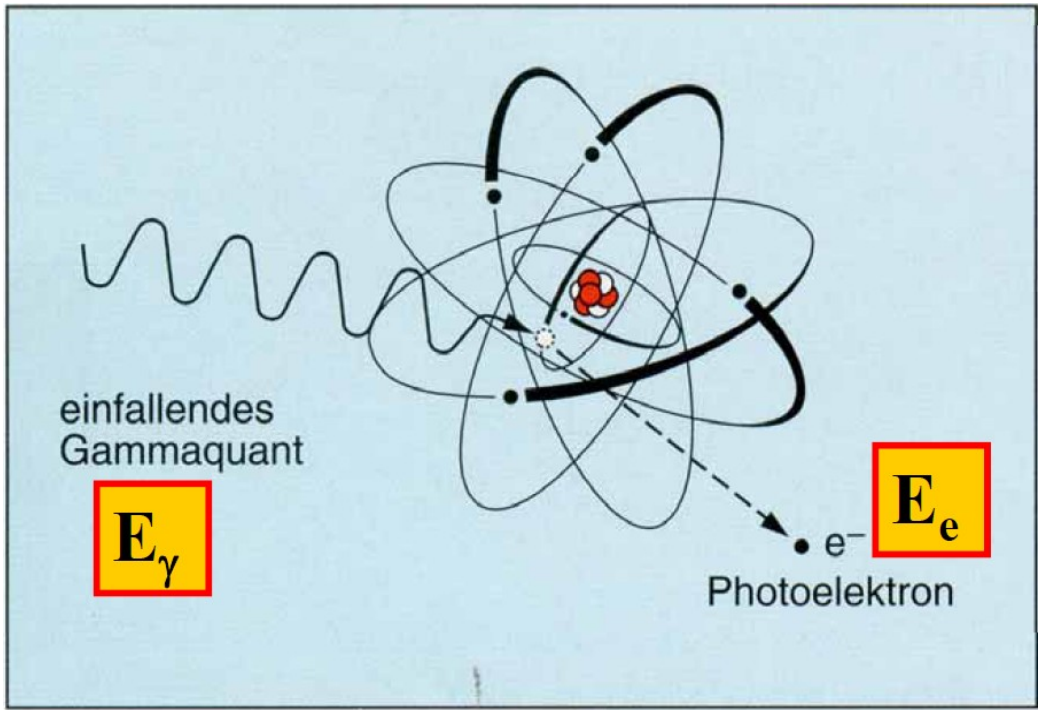


Photonenstrahlung in Materie

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

1. Photoeffekt

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



Volkmer, Kernenergie Basiswissen, DAtF, 2013

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

$E_{Bindung}$ = Bindungsenergie des Elektrons

Zugeordneter Abschwächungskoeffizient:

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

mit m = 4...5, n = 3...4

Z = Kernladungszahl des Target-Atoms

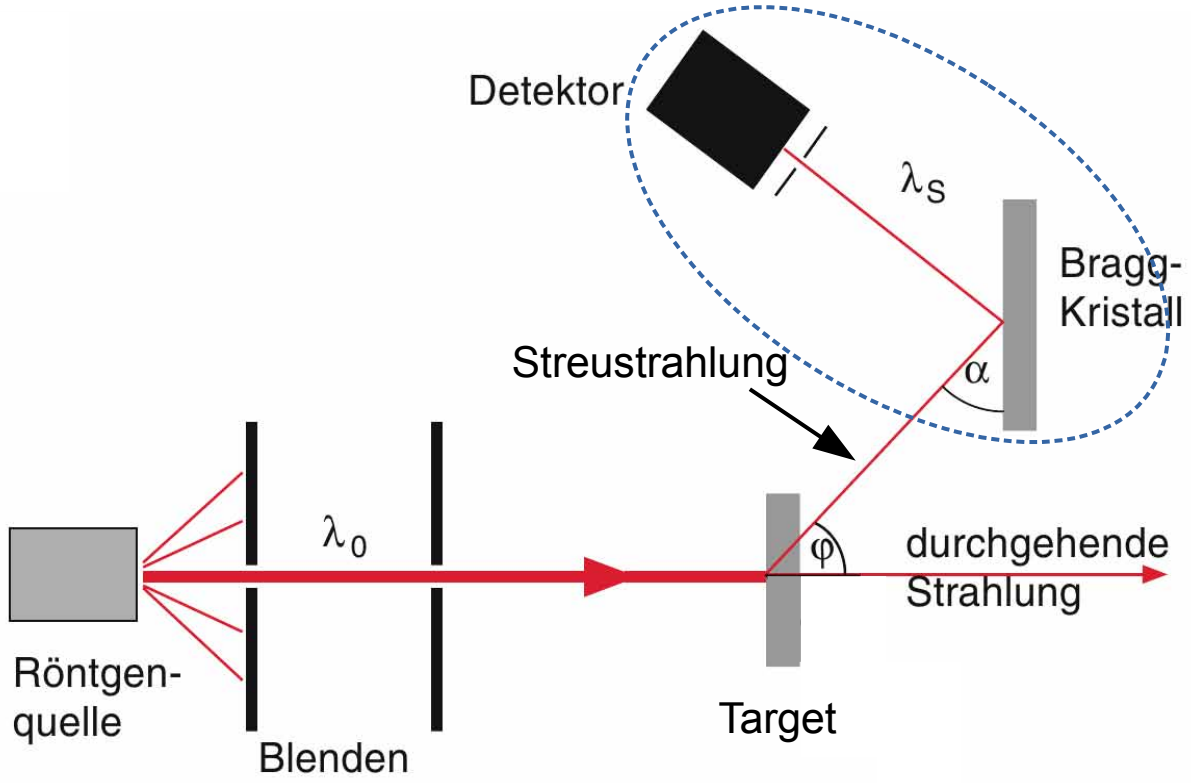
Photonenstrahlung in Materie

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

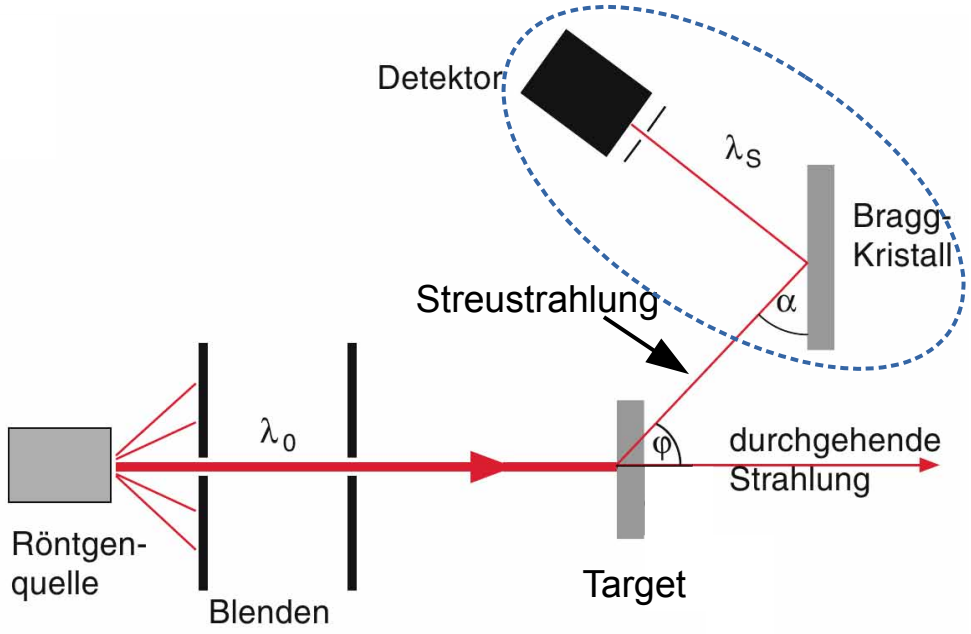
Mikroskopische Deutung von μ: Recht kompliziert, da mehr

2. Compton-Effekt

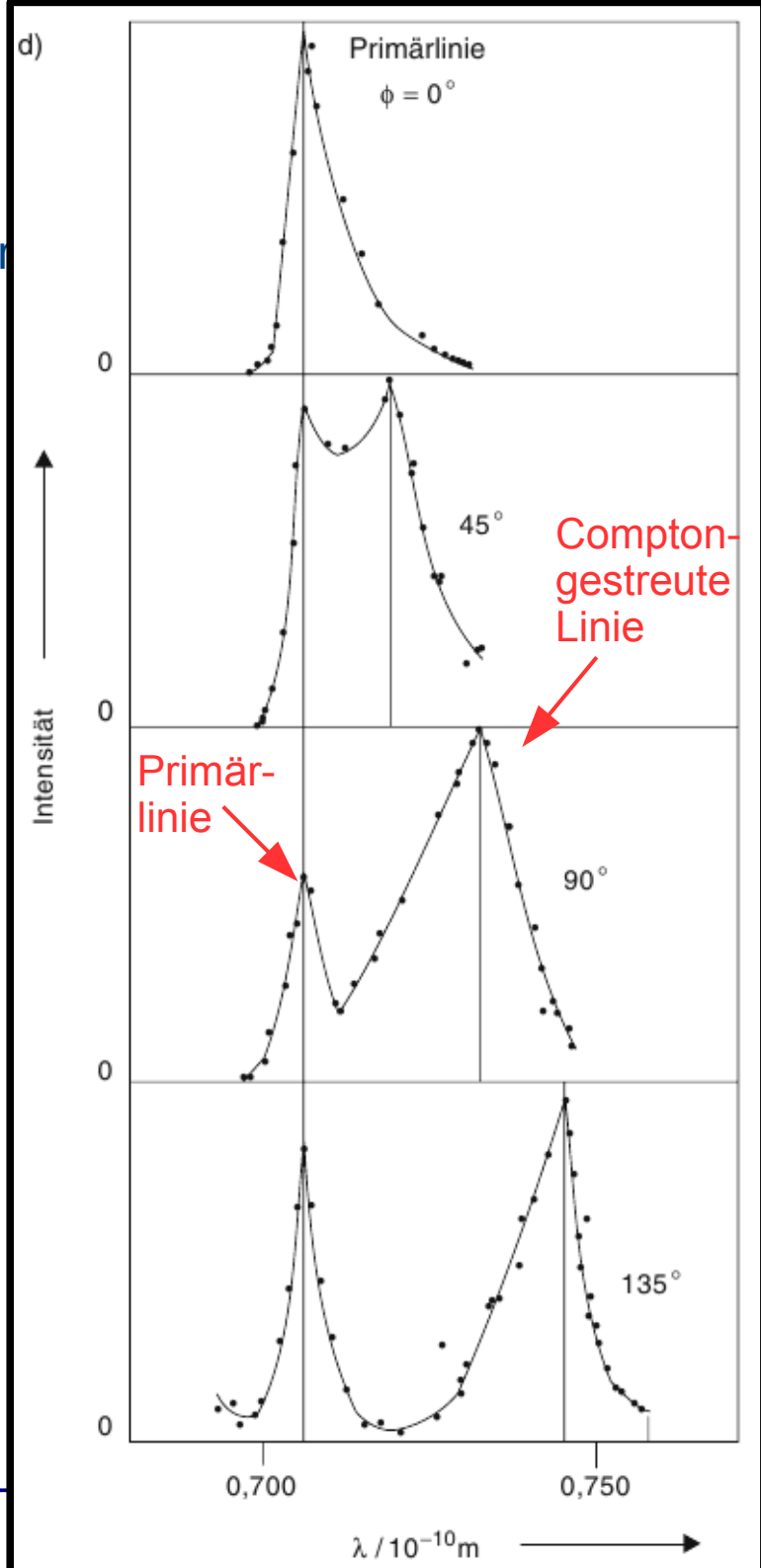
Beobachtung: Streustrahlung hat zwei energetische Komponenten:

→ 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

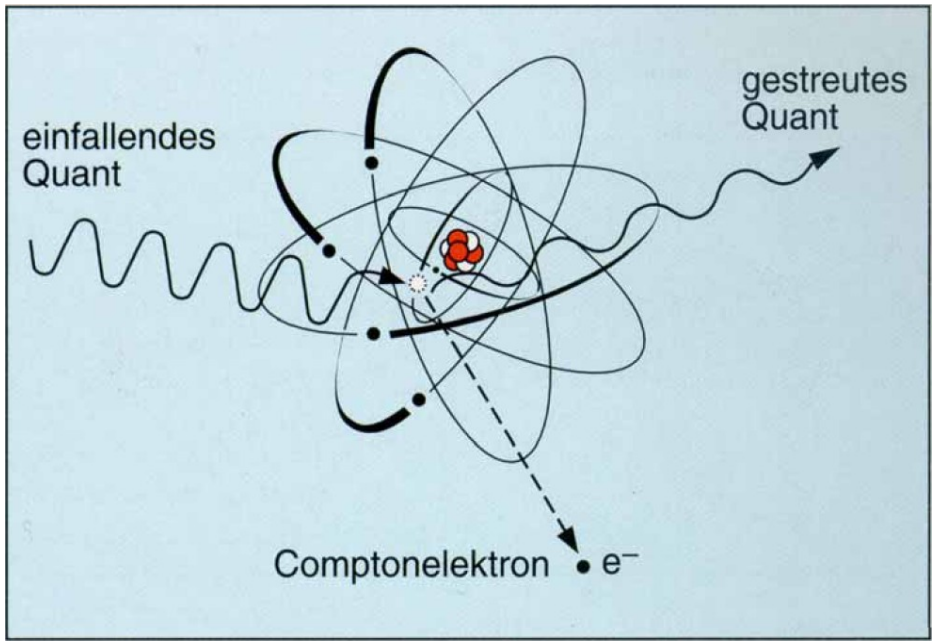
Mikroskopische Deutung von μ: Recht kompliziert, da mehrere Effekte eine Rolle spielen.

2. Compton-Effekt

Erklärung: Inelastischer Stoß zwischen γ-Quant und Hüllenelektron

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

Die Energie des gestreuten Photons ist kleiner, seine Wellenlänge größer.



Volkmer, Kernenergie Basiswissen, DAtF, 2013

Zugeordneter Abschwächungskoeffizient:

$$\mu_{\text{Compton}} \sim Z\, E_{\gamma}^{-1}\, \ln(E_{\gamma})$$

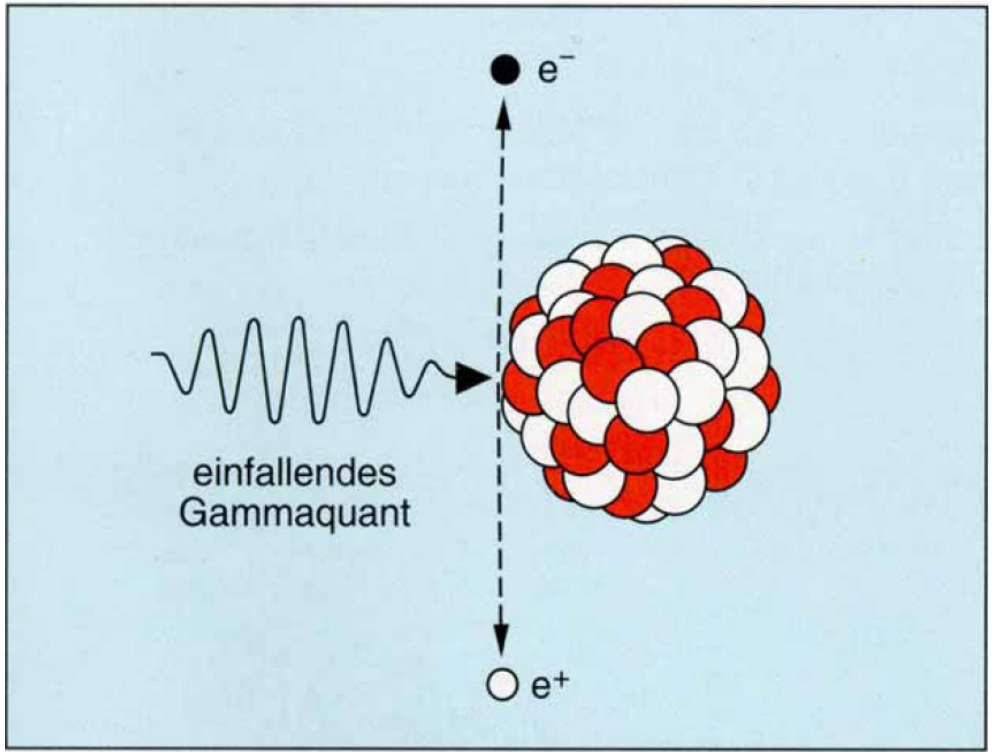
Photonenstrahlung in Materie

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)



Volkmer, Kernenergie Basiswissen, DAtF, 2013

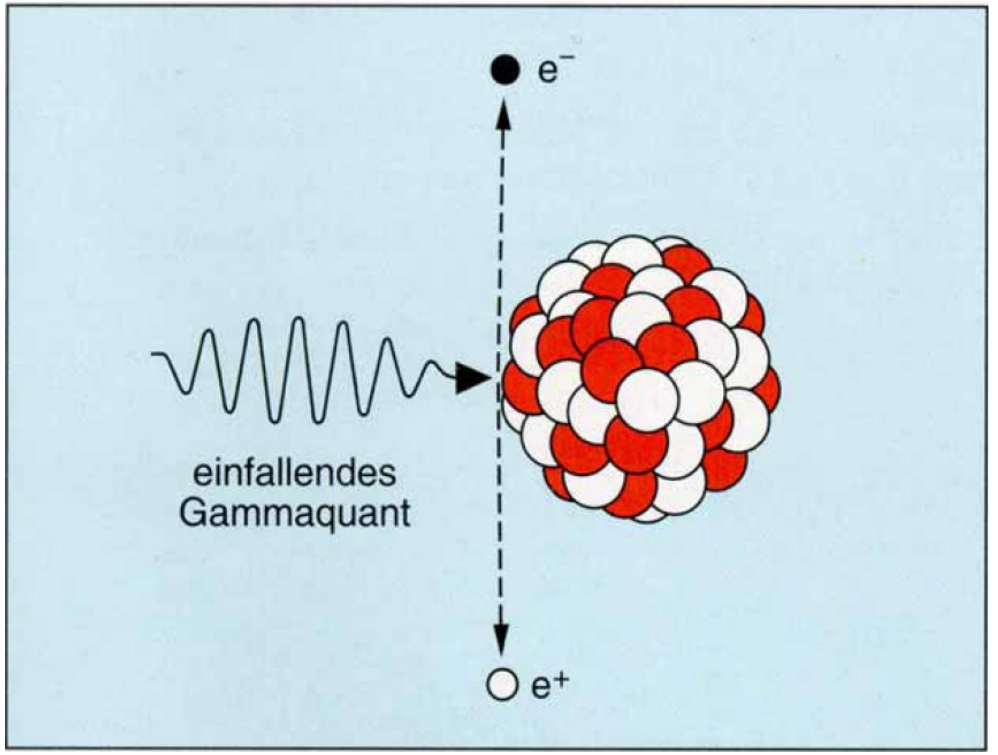
Photonenstrahlung in Materie

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

3. Paarbildung

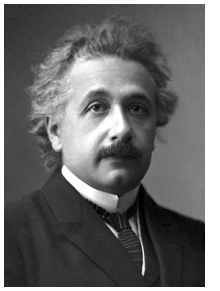
Bei sehr hoher Energie des γ-Quants:
Erzeugung eines e^+/e^--Paares im elektrischen Feld eines Target-Kerns.

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



Volkmer, Kernenergie Basiswissen, DAtF, 2013

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



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

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

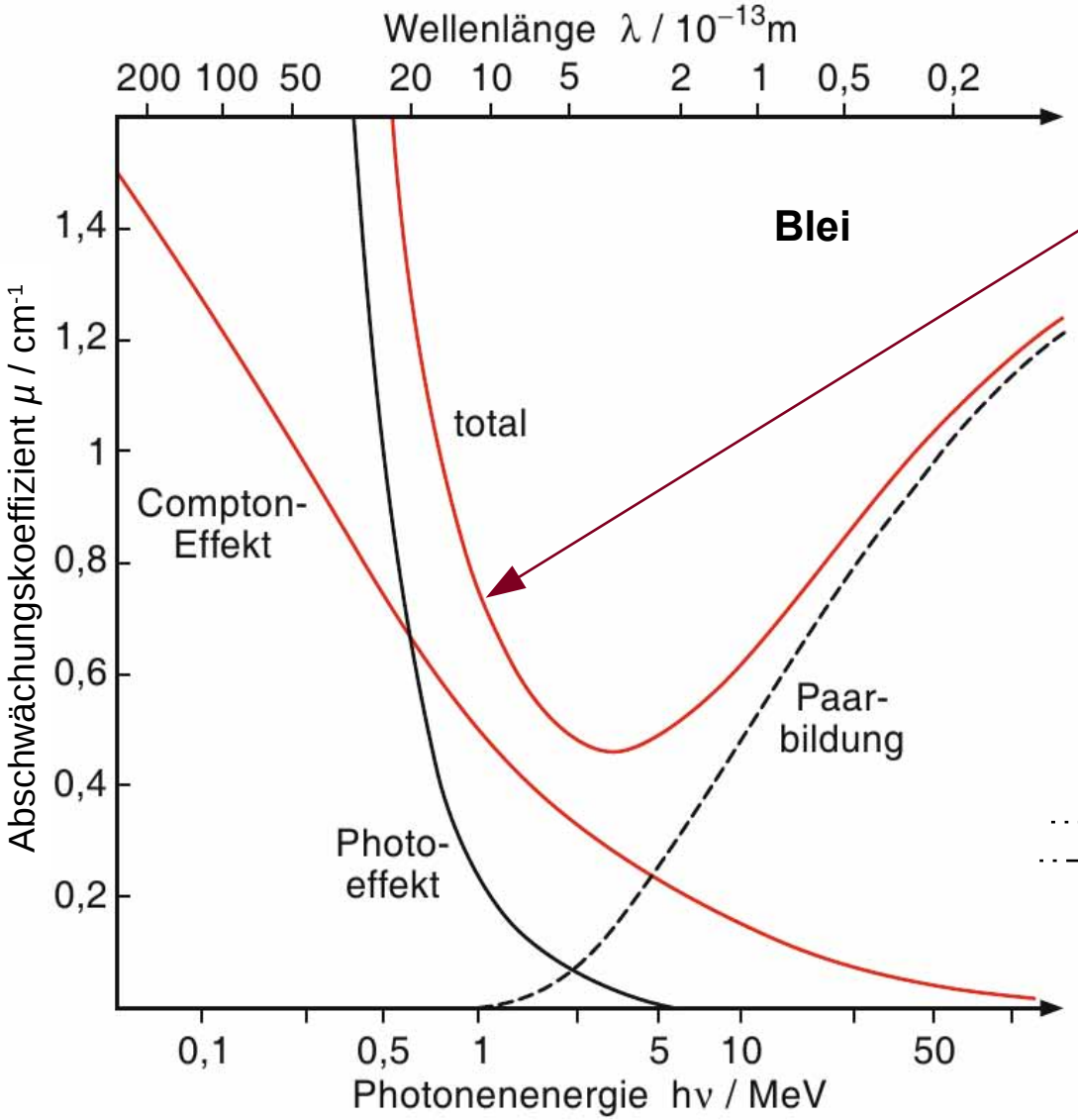
→ Schwellenenergie $E_\gamma > 1{,}02$ MeV

Schwächungskoeffizient:

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

Photonenstrahlung in Materie

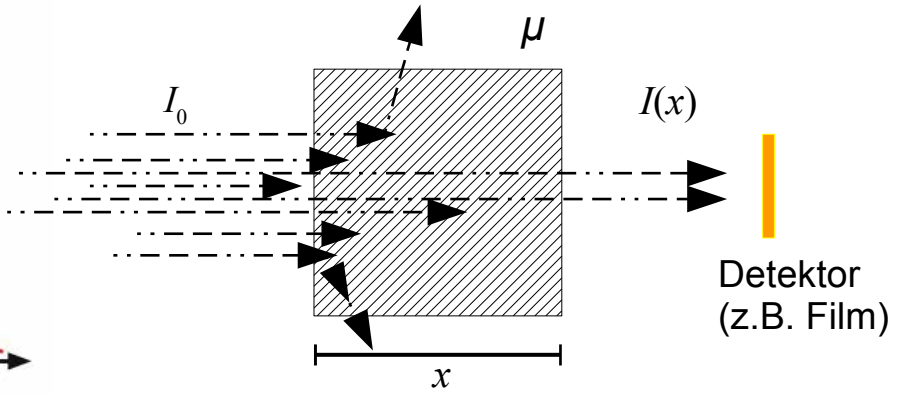
Mikroskopische Deutung von μ: Recht kompliziert, da mehrere Effekte eine Rolle spielen.



Gesamteffekt:

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

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



Demtröder, Experimentalphysik 3 (2010) S. 258

Inhalt

Einleitung

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.

$$1\ \text{MeV} = 1000000 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$$
$$\approx 4 \cdot 10^{-17}\ \text{kcal}$$
$$= 0{,}00000000000000004\ \text{kcal}$$

Warum brauchen wir Strahlenschutz-Maßnahmen?

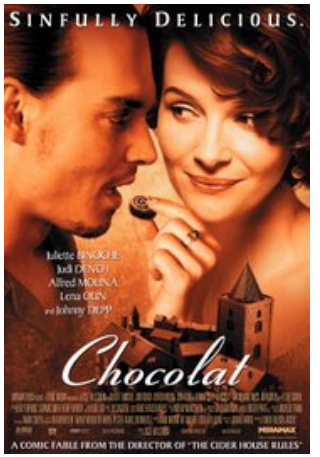
Energie

Wir haben gesehen:

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

1 MeV = $1000000 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ J
≈ $4 \cdot 10^{-17}$ kcal
= 0,0000000000000004 kcal

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



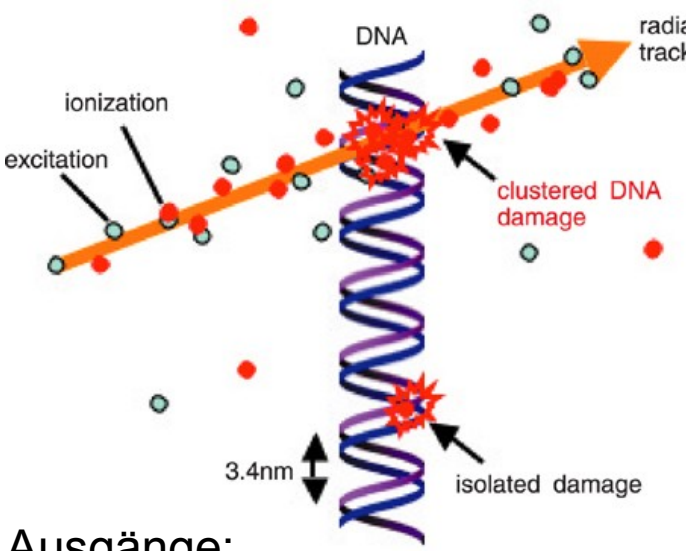
Internet Movie Database, imdb.org

→ Das Besondere an den ionisierenden Teilchen ist nicht die Energie*menge*, 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.



Shikazono et al., Nucl. Acid Reasearch 34 (2006)

Grundsätzlich drei <u>mögliche Ausgänge</u>:

1. Zellmechanismen reparieren den Schaden orginalgetreu. → Zelle überlebt.

2. Zelle kann den Schaden nicht (rechtzeitig) reparieren. → Zelle stirbt („Apoptose“).

3. DNA-Schaden wird nicht orginalgetreu repariert. → Mutation?

Warum brauchen wir Strahlenschutz-Maßnahmen?

Mögliche Auswirkungen auf den Organismus:

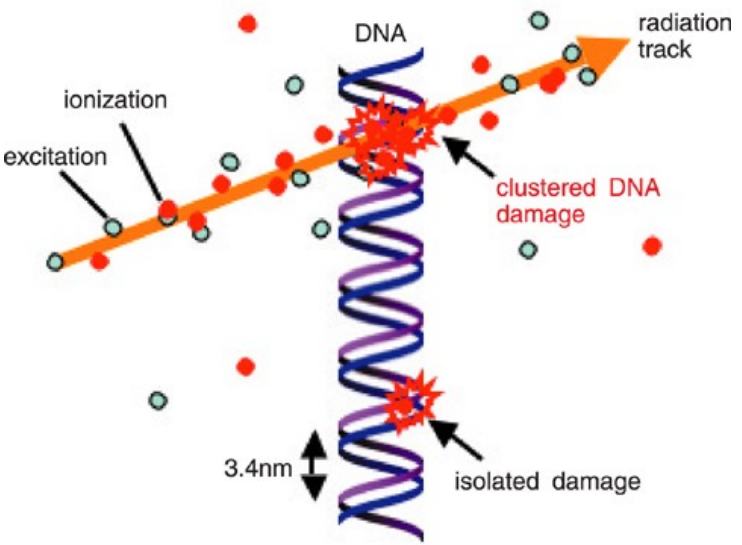
1. Kleine Menge an ionisierender Strahlung (Kleine „Dosis“):
   Geringe Anzahl an DNA-Schäden,
   Wahrscheinlichkeit einer lebensfähigen Mutation sehr klein. → „keine“ Auswirkung.

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

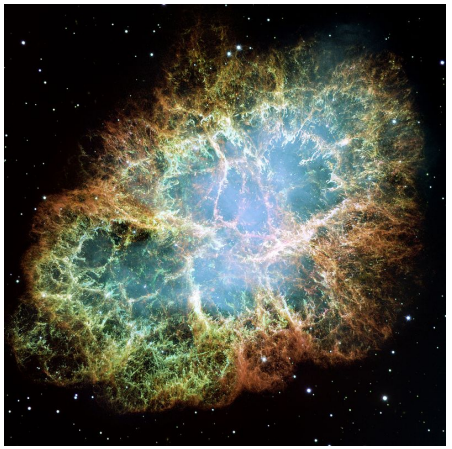
   → „Deterministischer Strahlenschaden“



Shikazono et al., Nucl. Acid Reasearch 34 (2006)

Warum brauchen wir Strahlenschutz-Maßnahmen?

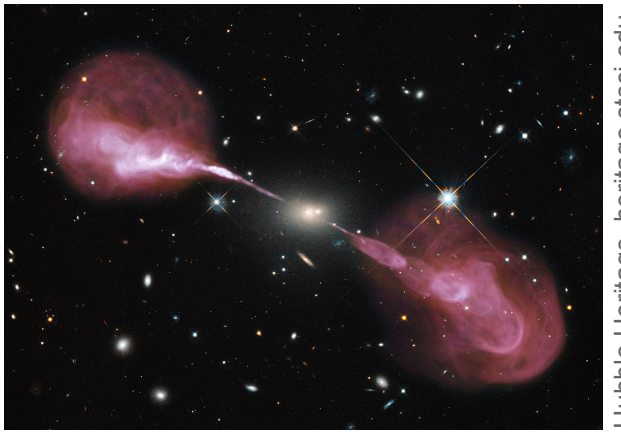
Ionisierende Strahlen sind natürliche Phänomene …



wikimedia.org

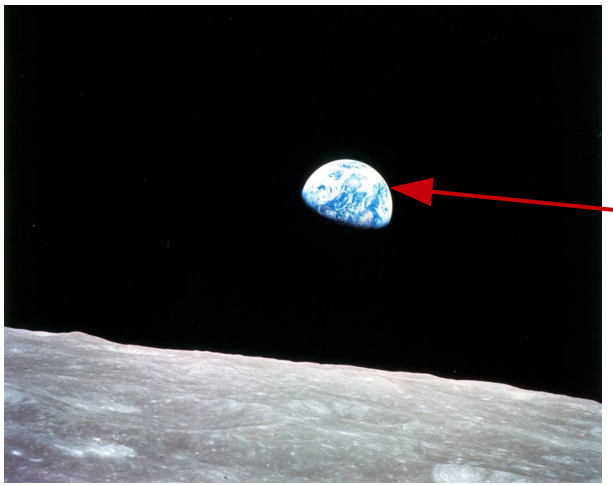
← SN1054 / Krabbennebel
Die Mutterkerne der natürlichen ^{235}U-, ^{238}U- und ^{232}Th-Zerfallsreihen entstanden in Supernovae.

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



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.

wikimedia.org

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

wikimedia.org

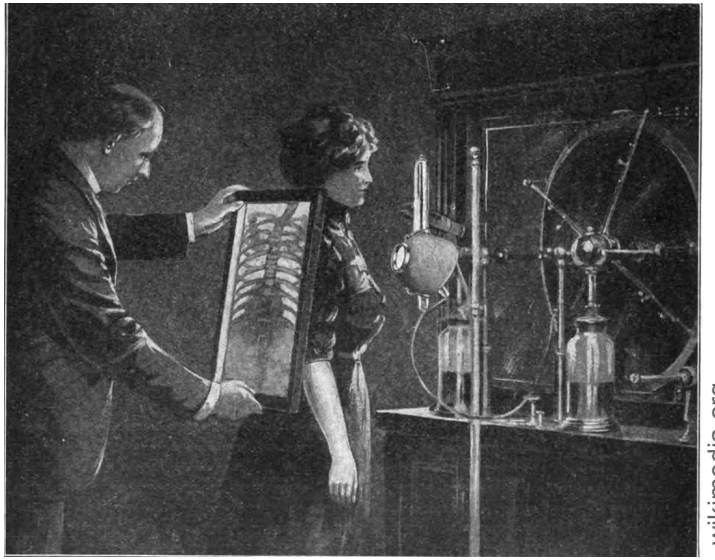
Marie Curie
Nobelpreis 1911 für die Entdeckung
von Radium und Polonium

„Radium-Hype“ Anfang des 20. Jahrhunderts

Erste Strahlenschäden

Frühe Röntgengeräte arbeiten im Dauerstrichbetrieb.
Zudem: Keine Abschirmung einzelner Körperteile oder des behandelnden Personals.

→ Hautverbrennungen bei Ärzten und Patienten.


wikimedia.org

wikimedia.org

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.

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

UNDARK
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

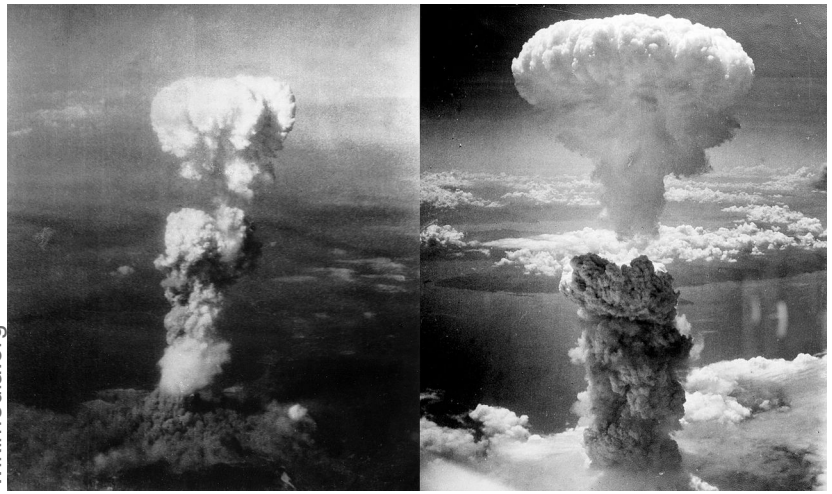
wikimedia.org

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

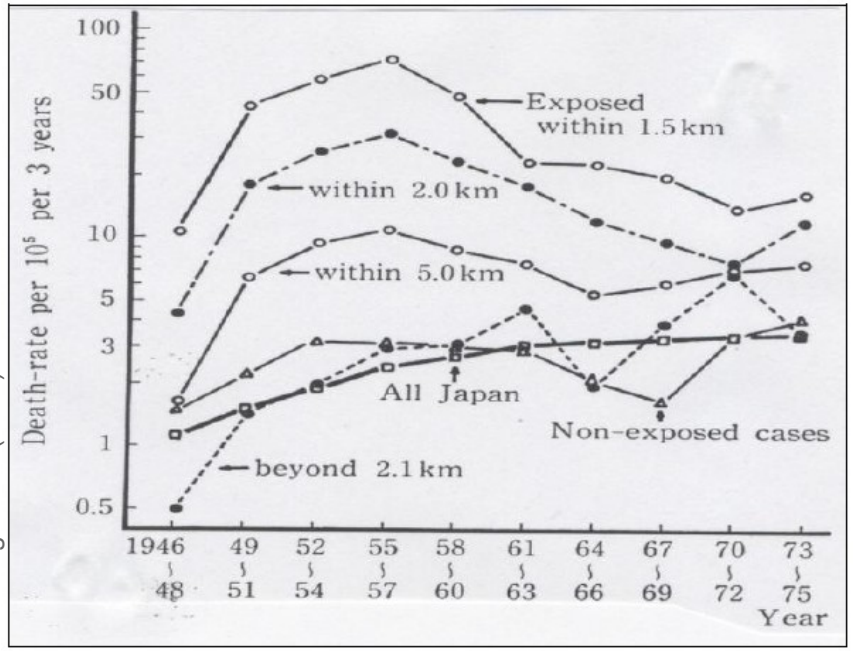


wikimedia.org

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.



Tomonaga et al. (2014)

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

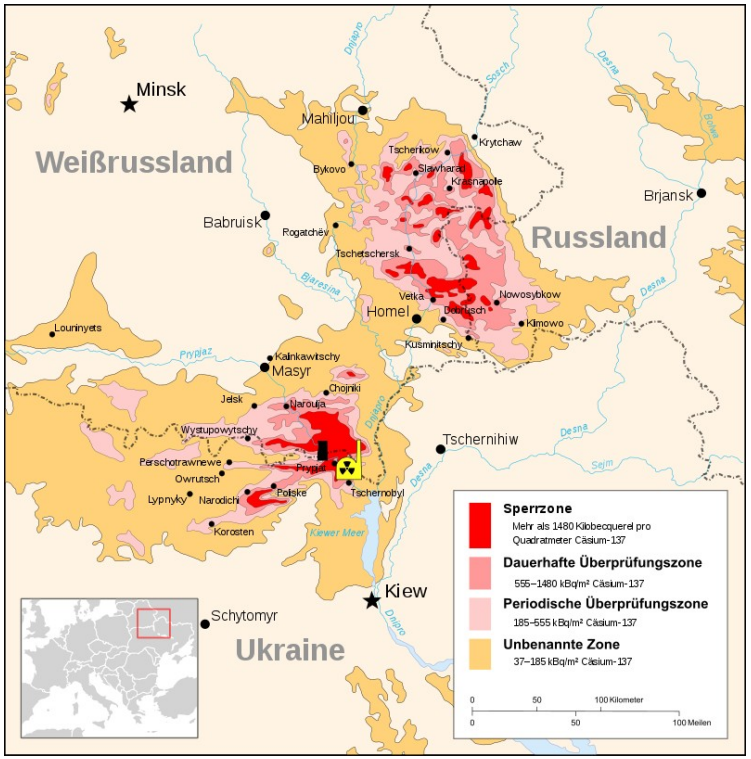
Kerntechnische Unfälle

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 Reaktorexplosion.

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

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.

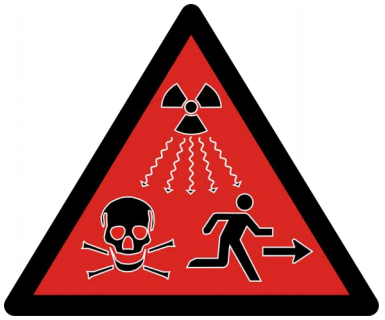
Goiânia-Unfall, Brasilien (1987)

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

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

Aktivität	… so gering wie möglich.
Abstand	… so groß wie möglich.
Abschirmung	… so stark wie nötig.
Aufenthaltsdauer	… so kurz wie möglich.

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

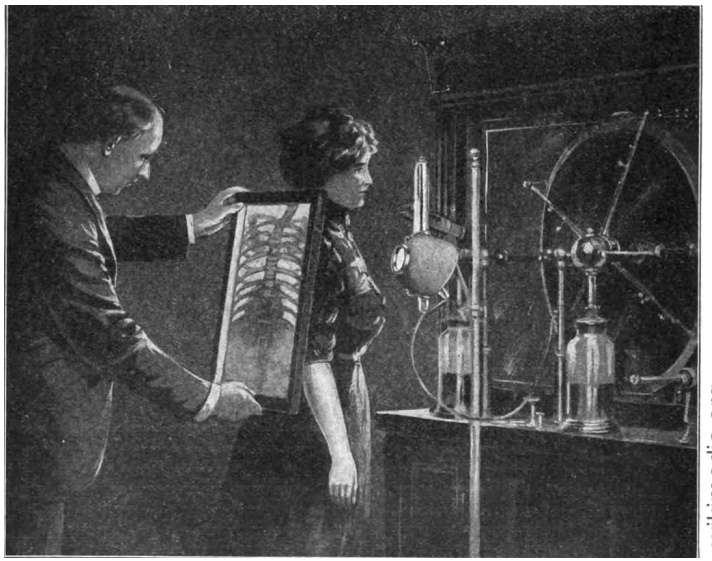
Grundprinzipien des Strahlenschutzes

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.

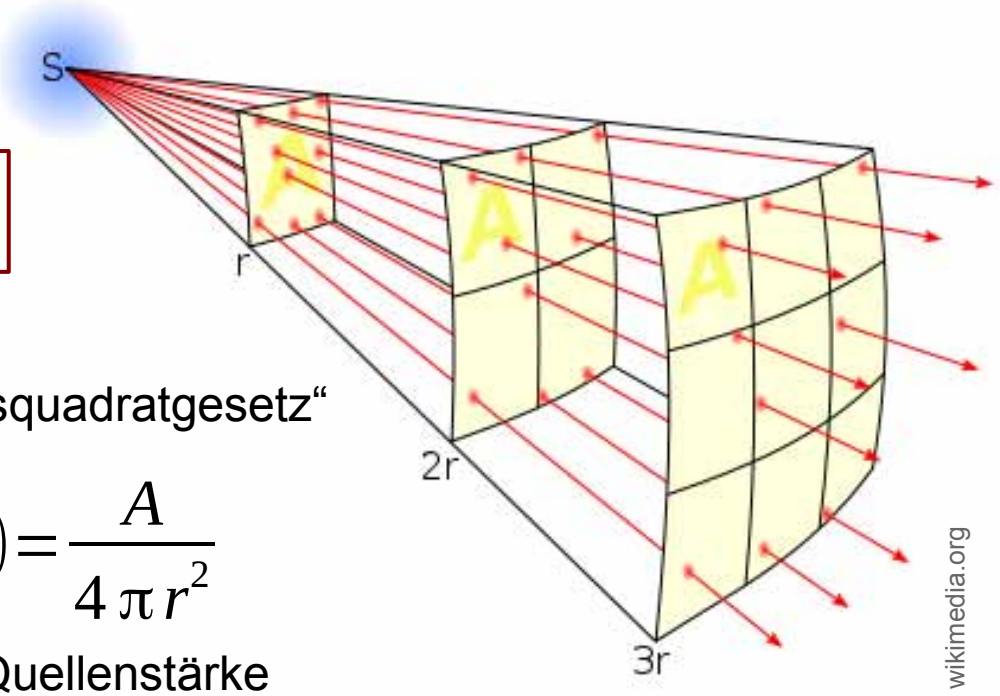


wikimedia.org

Grundprinzipien des Strahlenschutzes

Abstand

Für (näherungsweise) punktförmige Quelle:



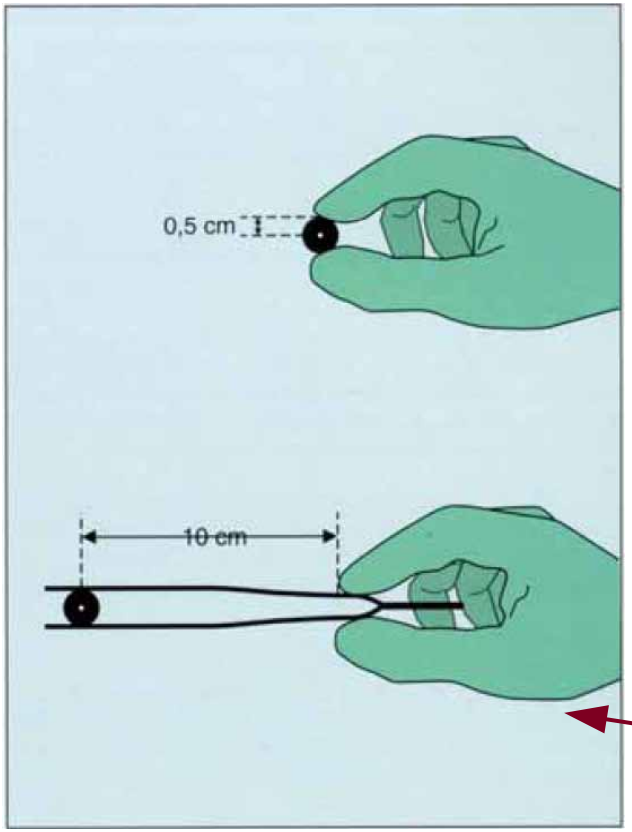
wikimedia.org

Absorbierte Intensität ~ (1 / Abstand)^2

„Abstandsquadratgesetz“

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

A = Quellenstärke
r = Abstand
(r „groß“ im Vergleich zur Ausdehnung der Quelle)



Volkmer, Kernenergie Basiswissen, DAtF, 2013

Beispiel:

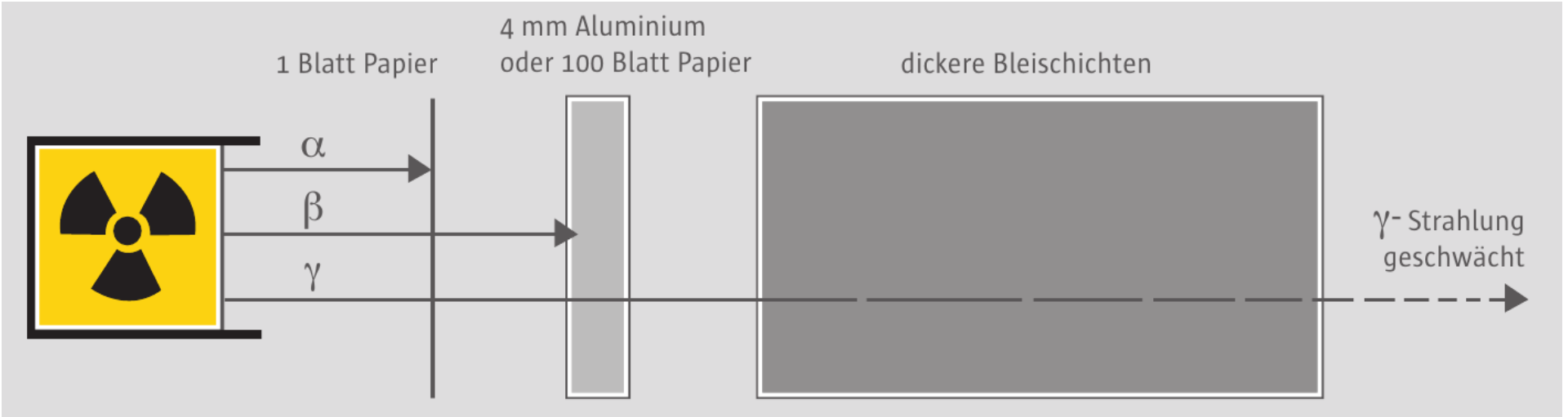
Benutzung einer Pinzette zur Handhabung eines Strahlers.
r = 0,5 cm → r = 10 cm : **ca. 400 x geringere Exposition!**

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, DAtF, 2012

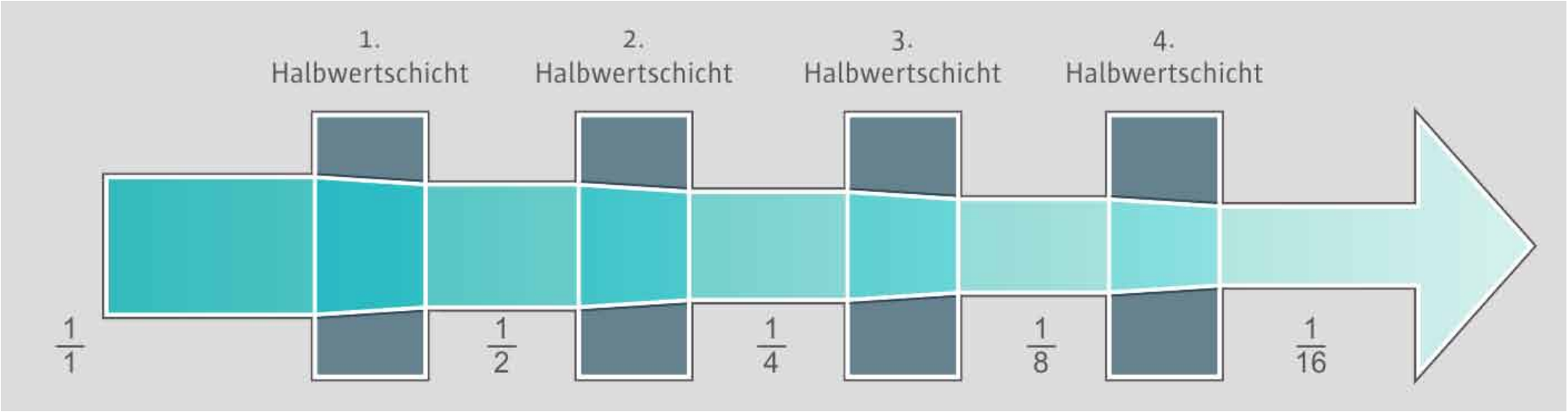
Grundprinzipien des Strahlenschutzes

Abschirmung

γ- oder Röntgenstrahlung lässt sich nicht „stoppen“, sondern nur abschwächen.

→ „Halbwertsdicke“ $d_{½}$

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

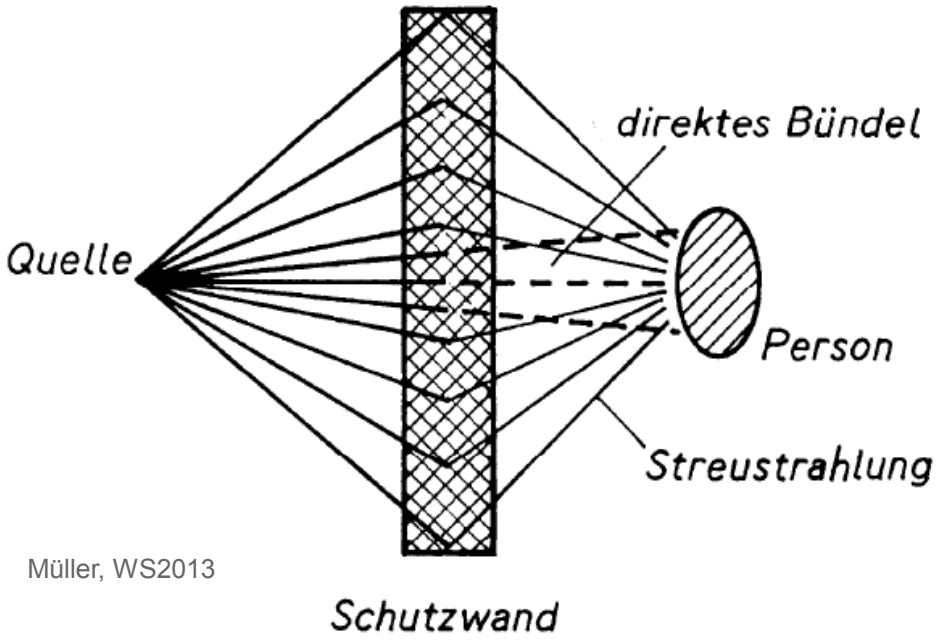


Volkmer, Radioaktivität und Strahlenschutz, DAtF, 2012

Grundprinzipien des Strahlenschutzes

Abschirmung

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



Müller, WS2013

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

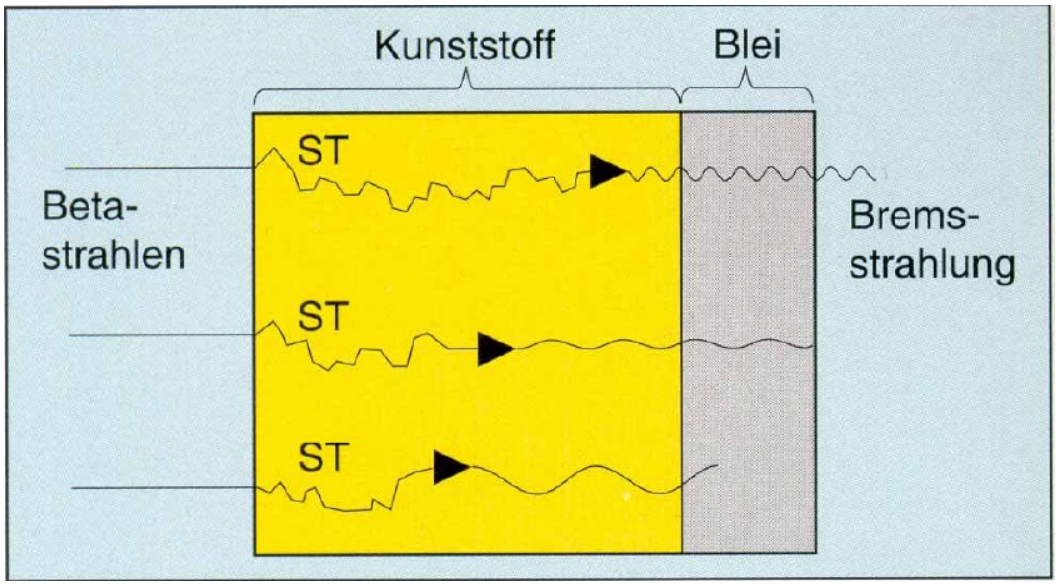
→ Geeignete Wahl von Material und Geometrie ist wichtig.

Grundprinzipien des Strahlenschutzes

Abschirmung

Problem bei β^-- oder β^+-Strahlung:

Bremsstrahlung in schweren Absorbern (große Kernladung *Z*) konvertiert die Primärstrahlung in Röntgenstrahlung. (vrgl. Röntgenröhre)



→ Übliche Anordnung:

1. Absorber mit kleinem *Z* (Kunststoff) zur Abbremsung der Elektronen

2. Abschirmung mit großem *Z* (Blei) zur Abschwächung der Röntgen-Photonen.

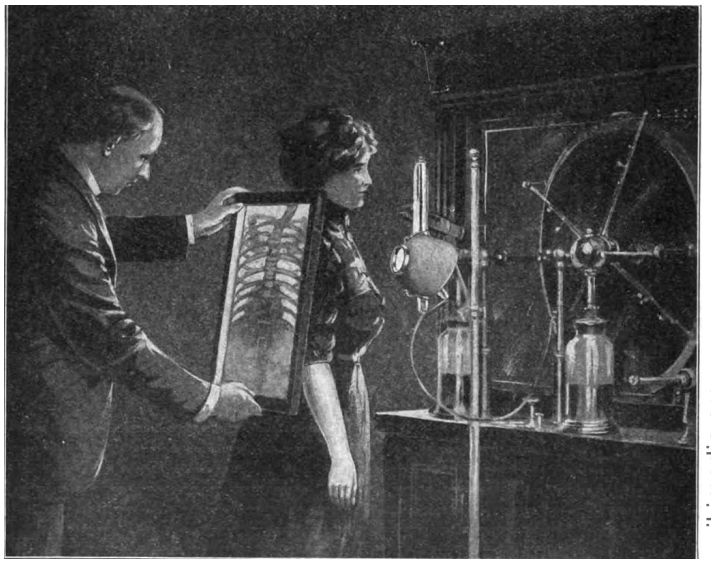
Grundprinzipien des Strahlenschutzes

Aufenthaltsdauer

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

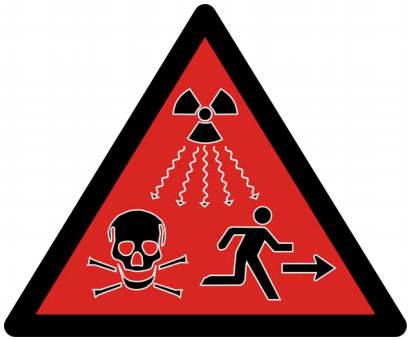
Beispiel Röntgen (2):

Moderne Sensoren zur Bildgebung benötigen wesentlich *kürzere Belichtungszeiten*.



wikimedia.org

Beispiel hochradioaktive Quelle:



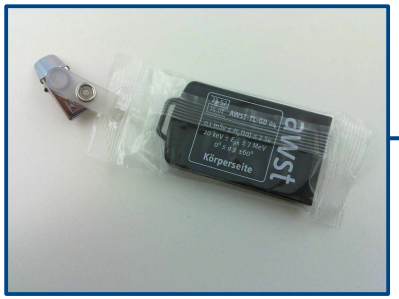
Gefahrensymbol ISO-21482 soll auch nicht-eingewiesene Personen dazu bewegen, das Strahlungsfeld zügig zu verlassen.

Inhalt

Einleitung

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 = Deponierte Energie / Gewebe-Masse

Einheit: 1 Gray = 1 Gy = 1 J/kg

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

Beispiel: Sprung vom Küchentisch auf den Boden ~ 10 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:

„Äquivalentdosis“ $H_T = D \cdot w_R$

Einheit: 1 Sievert = 1 Sv = 1 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:	$w_R = 5 \ldots 20$ (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	$w_T = 0{,}05$	**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“ $H = \sum_T H_T\, w_T = \sum_T D\, w_R\, w_T$

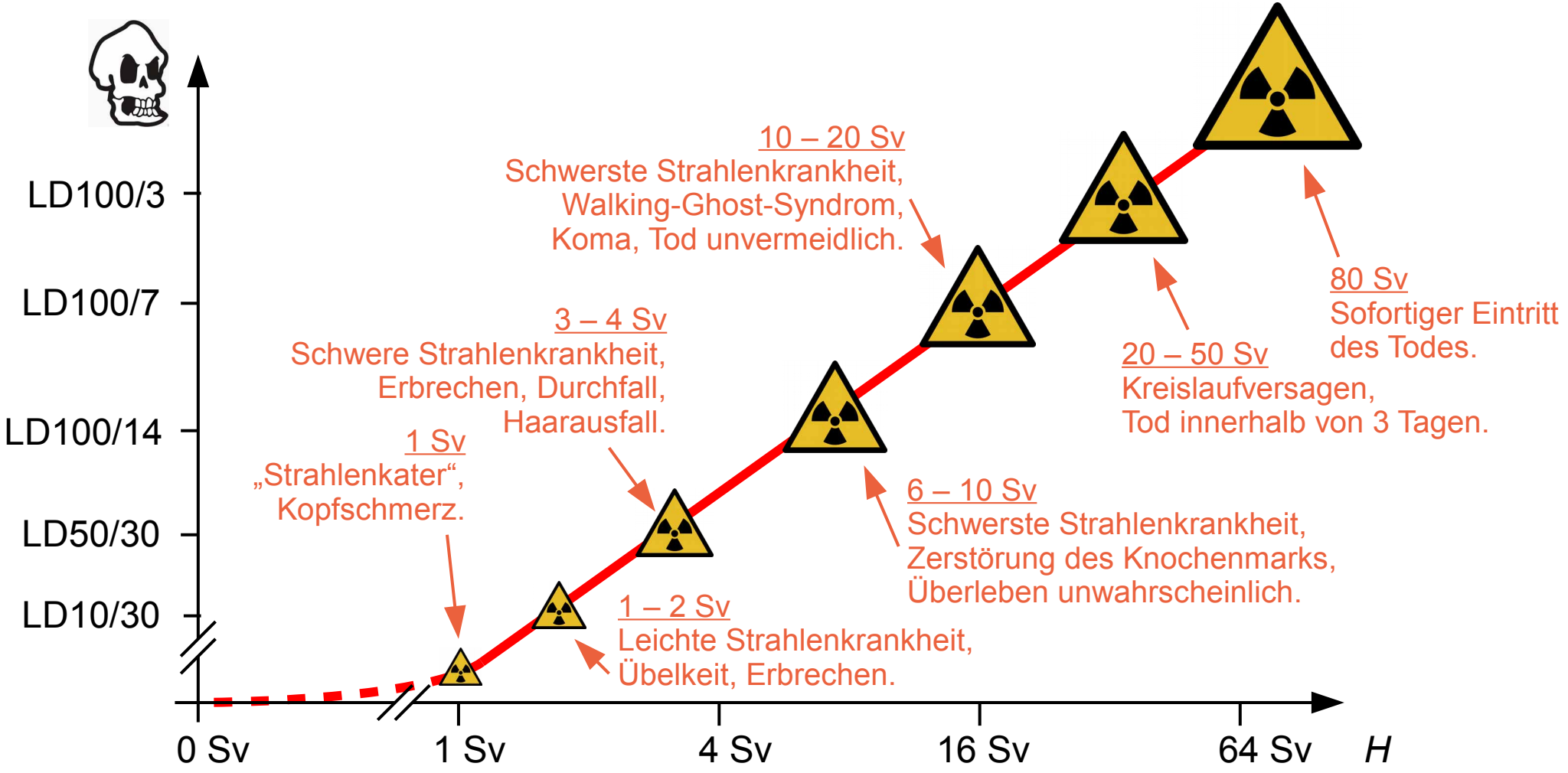
Einheit: 1 Sievert = 1 Sv = 1 J/kg w_T = „Gewebewichtungsfaktor“

Keimdrüsen			
Knochenmark			
Dickdarm			
Lunge			
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**

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

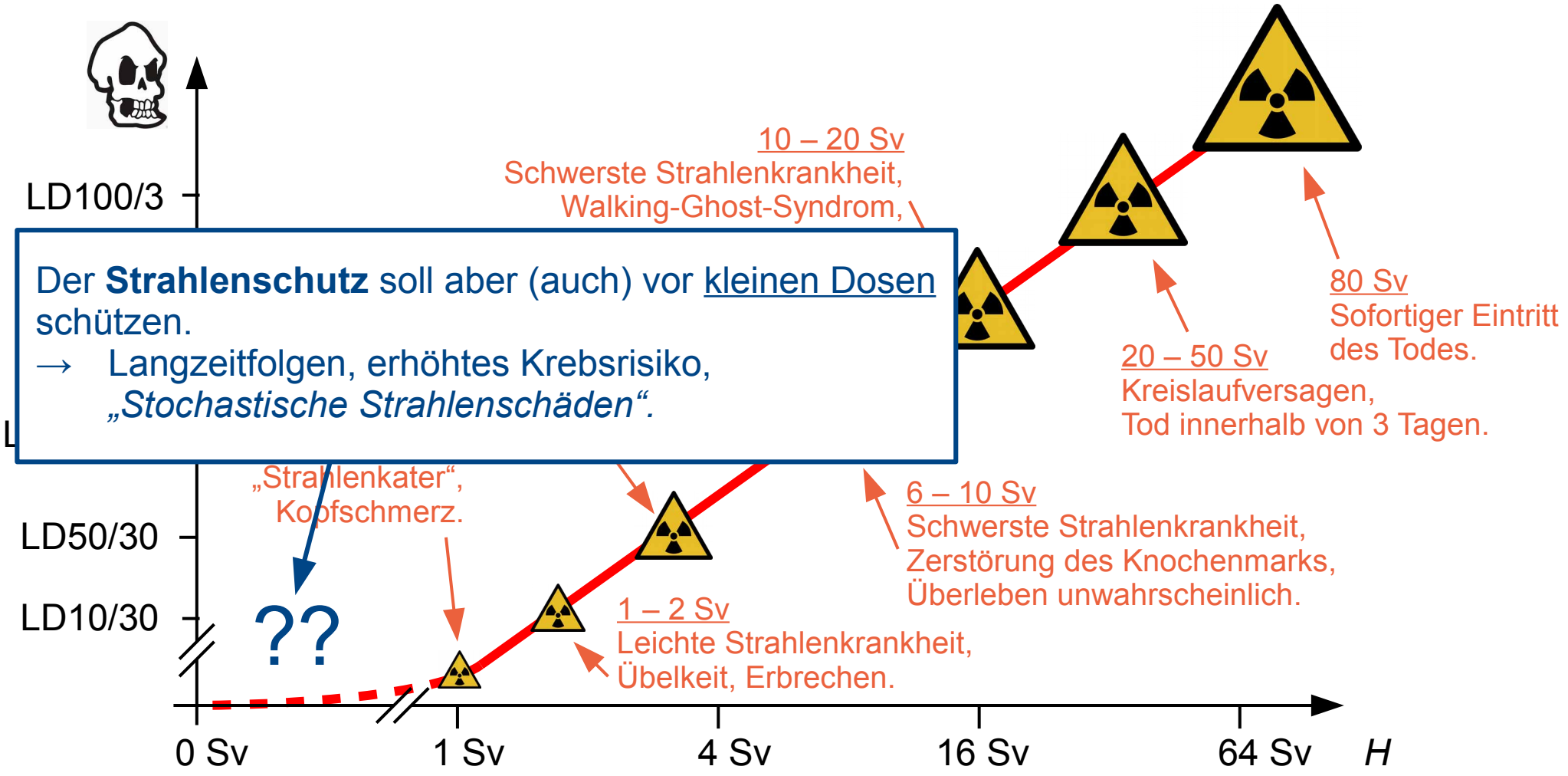
Wie hoch darf die Strahlendosis sein?

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“*

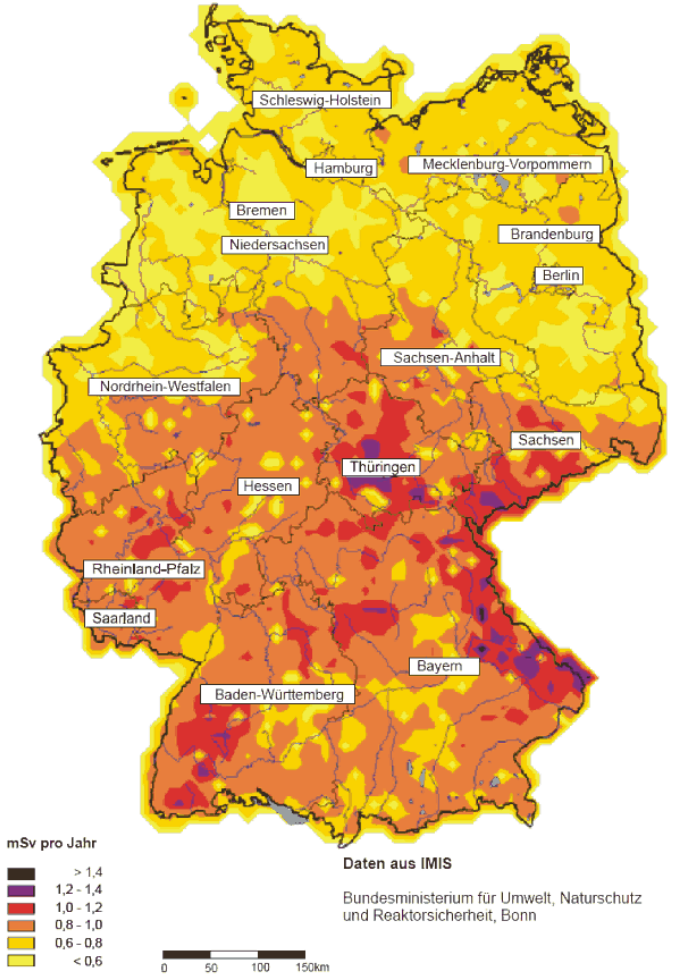


Der **Strahlenschutz** soll aber (auch) vor kleinen Dosen schützen.
→ Langzeitfolgen, erhöhtes Krebsrisiko,
„Stochastische Strahlenschäden“.

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.



Natürliche Strahlenbelastung im Freien

Mittlere natürliche Strahlenbelastung in Deutschland:

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

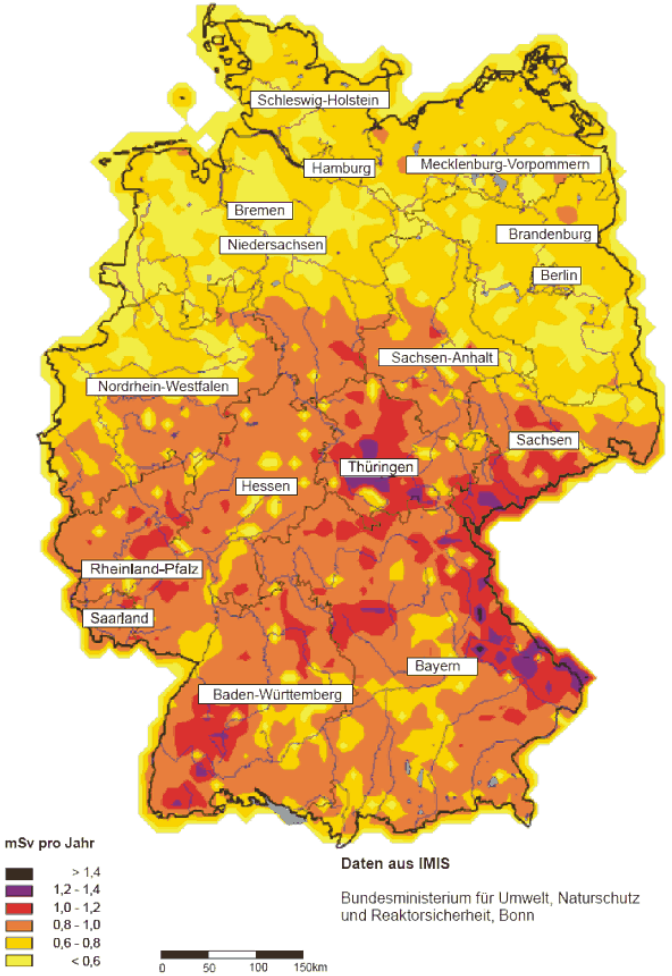
Davon ~ 1,1 mSv/a durch Radon-222 in Raumluft (Gebäude)
~ 0,7 mSv/a Höhenstrahlung, Bodenstrahlung
~ 0,3 mSv/a Nahrungsaufnahme (z.B. ^{40}K)

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

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 ≤ 1 mSv/a !

Wie hoch darf die Strahlendosis sein?

Für beruflich mit Strahlenquellen tätige Personen gelten höhere Grenzwerte.

Beruflich strahlenexponierte Person (Kategorie B):

≤ 6 mSv/a (ca. 3-fache nat. Strahlenbelastung)

Beruflich strahlenexponierte Person (Kategorie A):

≤ 20 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):

≤ 6 mSv/a (ca. 3-fache nat. Strahlenbelastung)

Beruflich strahlenexponierte Person (Kategorie A):

≤ 20 mSv/a (ca. 10-fache nat. Strahlenbelastung)

… Viele Sonderfälle …

Minderjährige: Nur im Rahmen der Ausbildung.

Ungeborenes Leben: ≤ 1 mSv / Schwangerschaft.

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

...

Messung von Strahlung

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

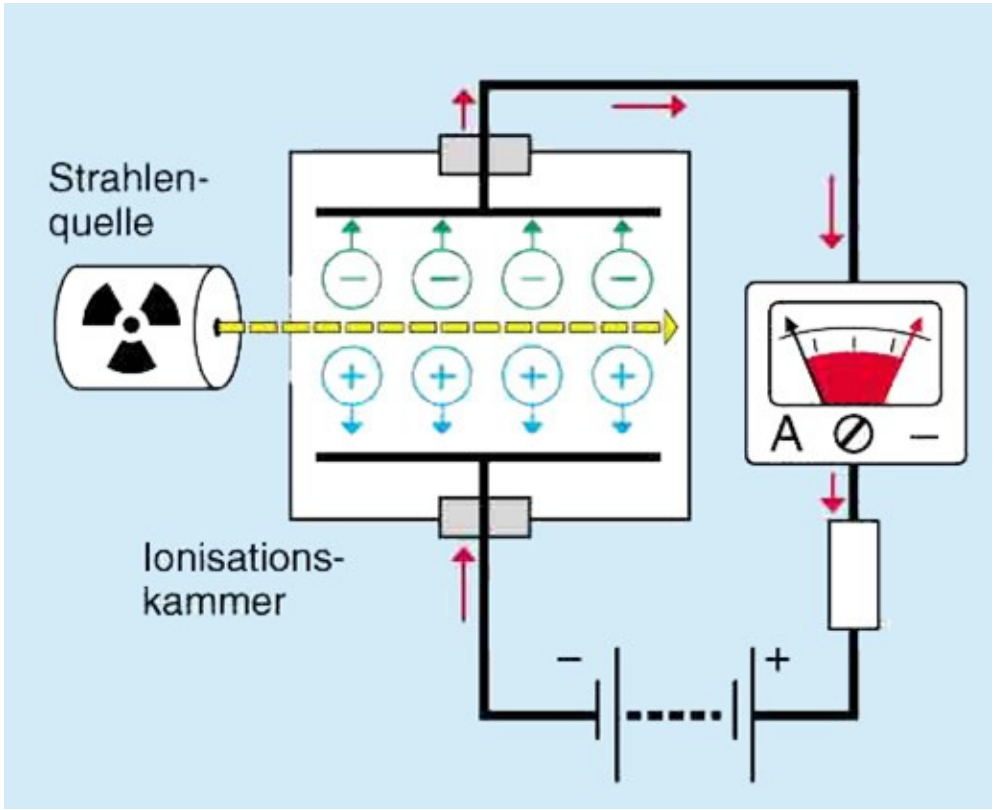
Mögliche Detektionsverfahren

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 speichert Energie in Kristallen.

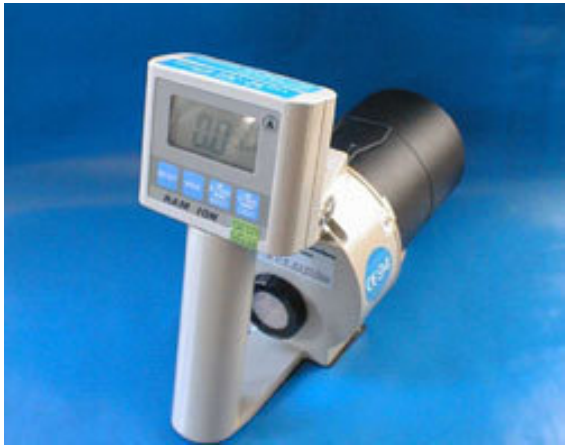
Messung von Strahlung

Ionisationskammer

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



Volkmer, Kernenergie Basiswissen, DAtF, 2013



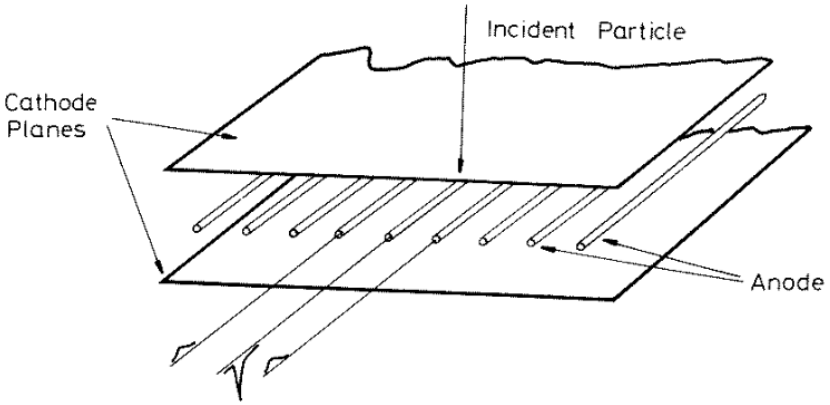
klinikum.uni-heidelberg.de

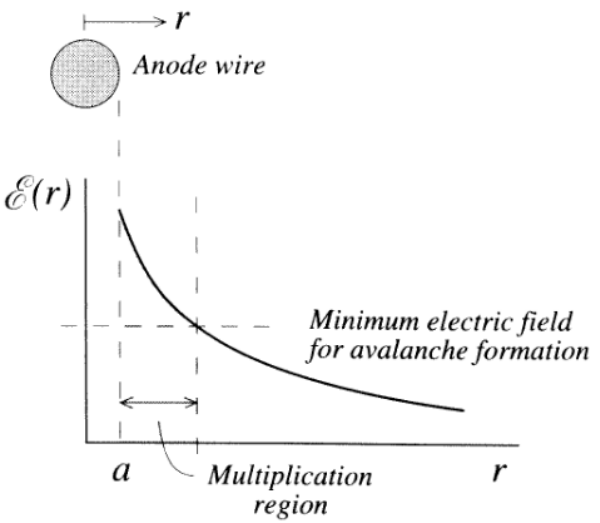
Messung von Strahlung

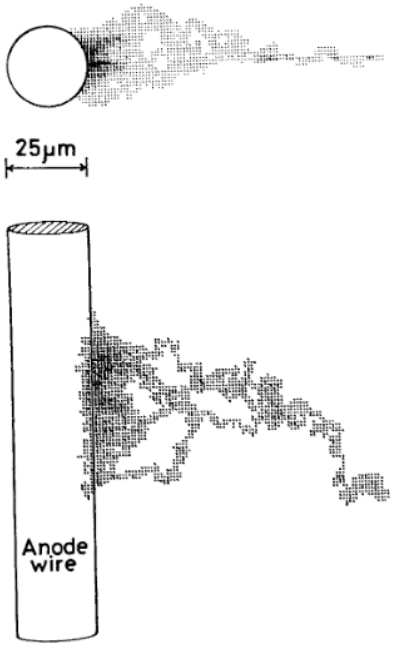
Gas-Ionisations-Zähler mit Ladungsverstärkung

Teilchendurchgang durch gasgefüllte Kammer erzeugt Elektron-Ion Paare,

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







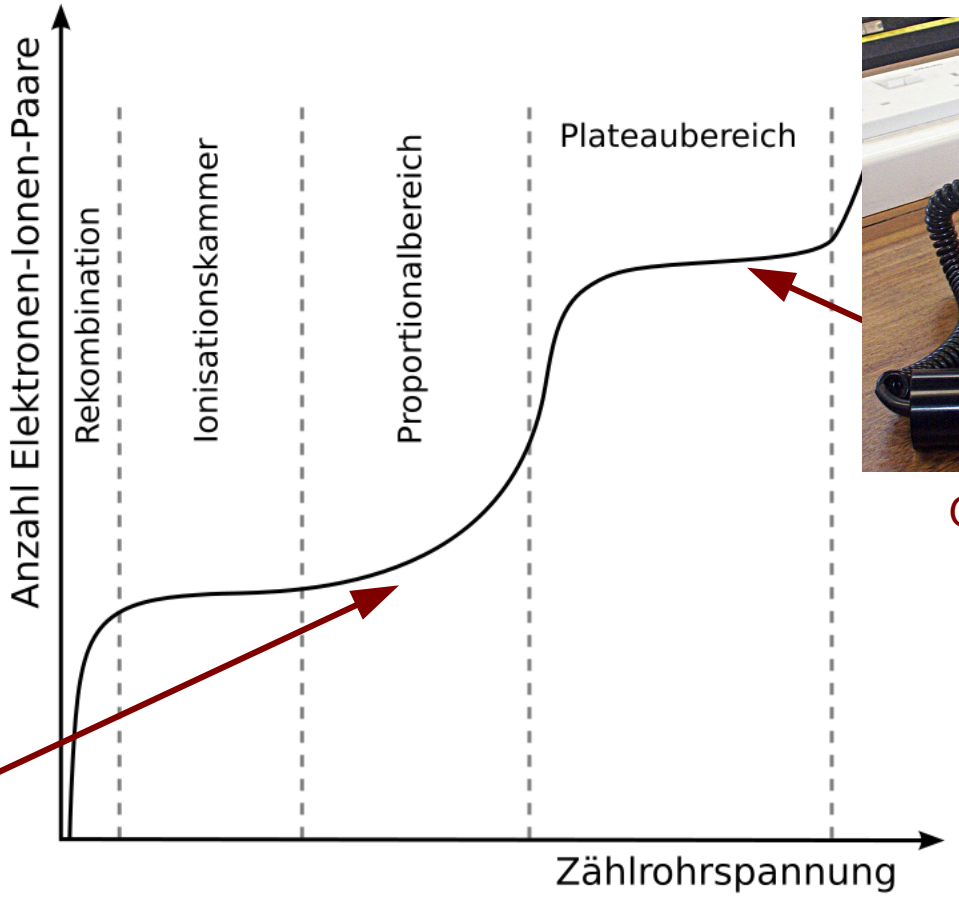
P. Forck, JUAS Lecture Notes (2011)

Messung von Strahlung

Gas-Ionisations-Zähler mit Ladungsverstärkung

1) Proportionalzähler: Anzahl Sekundärteilchen ~ Energie des Primärteilchens

2) Geiger-Müller-Zähler: Lawineneffekt führt zur vollständigen Ionisation des Gases
→ „Sättigungseffekt“.



de.wikipedia.org

Geiger-Müller-Zählrohr

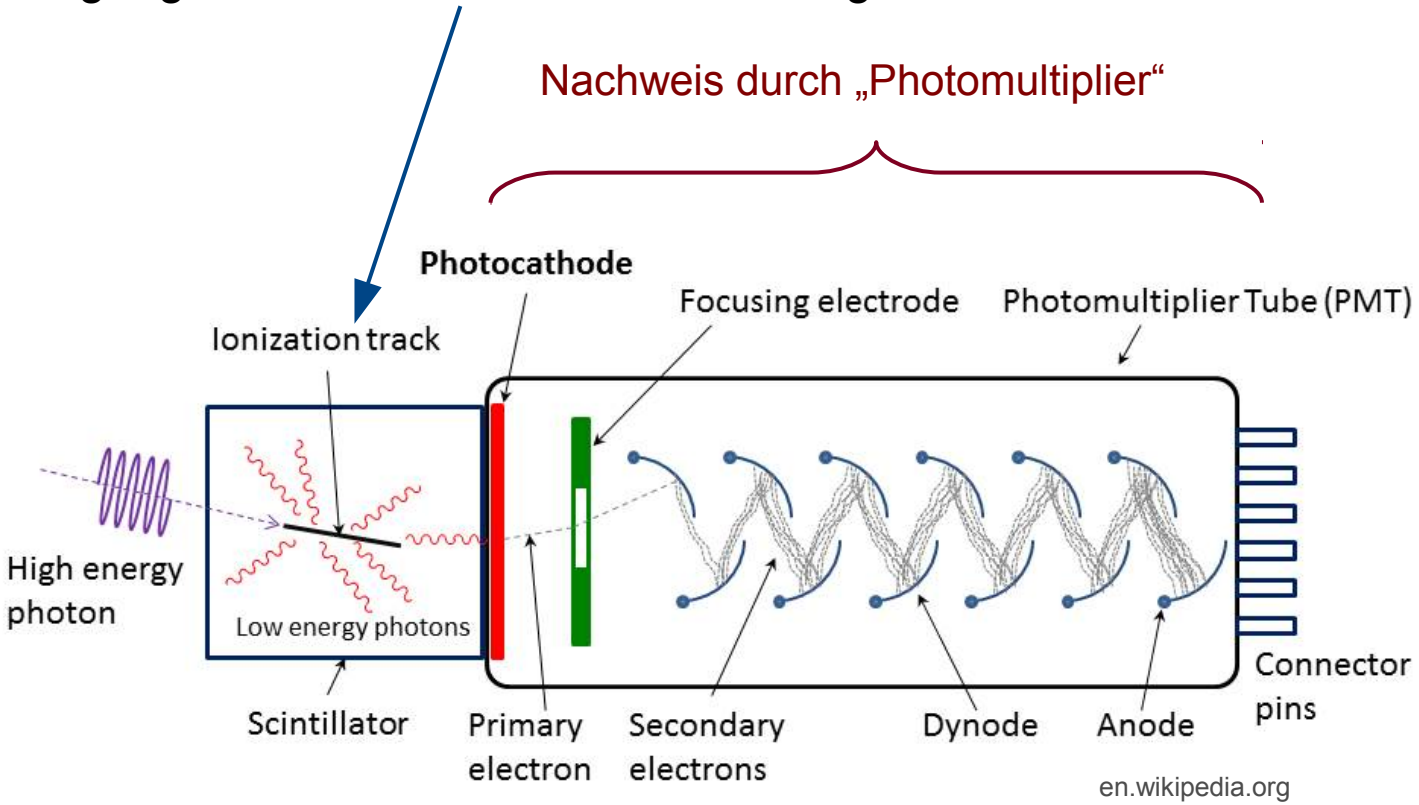
„Kontamat“-Propotionalzähler

klinikum.uni-heidelberg.de

Messung von Strahlung

Szintillations-Zähler

Teilchendurchgang durch Szintillator-Kristall erzeugt sichtbares Licht

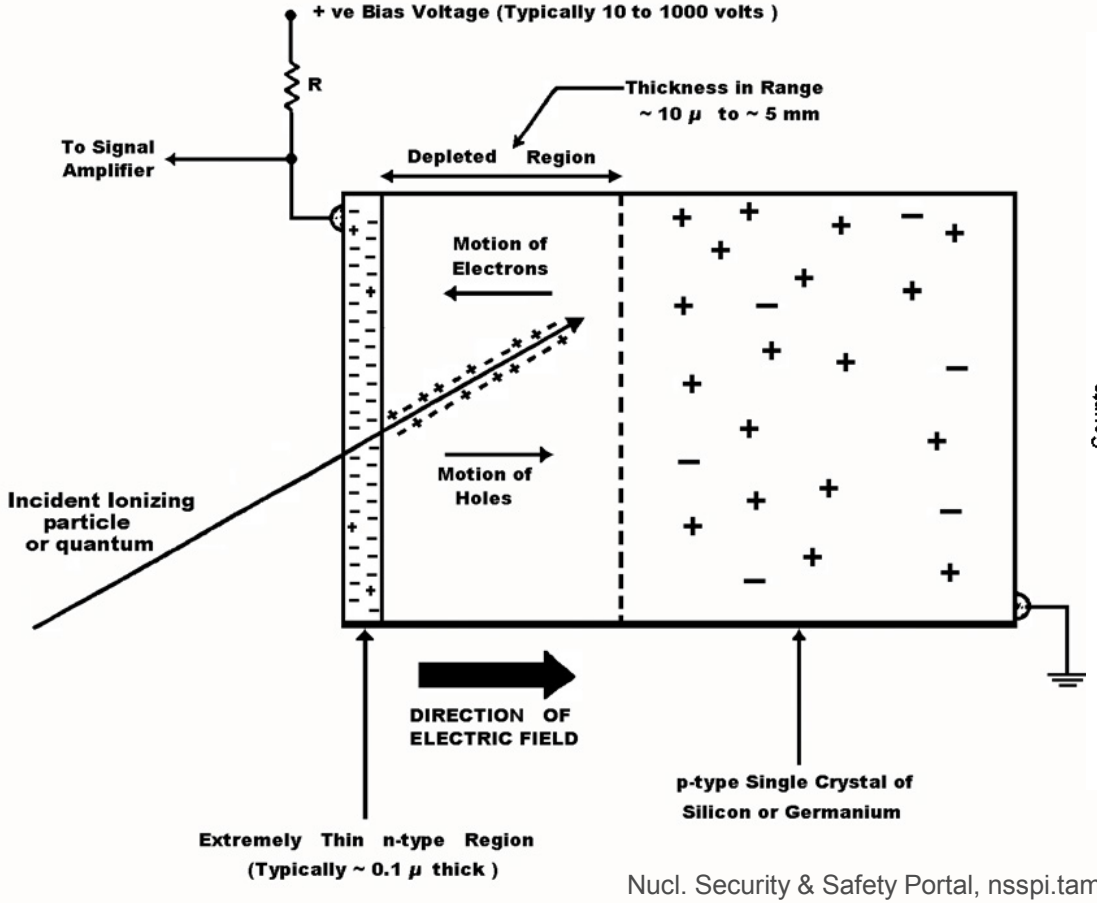


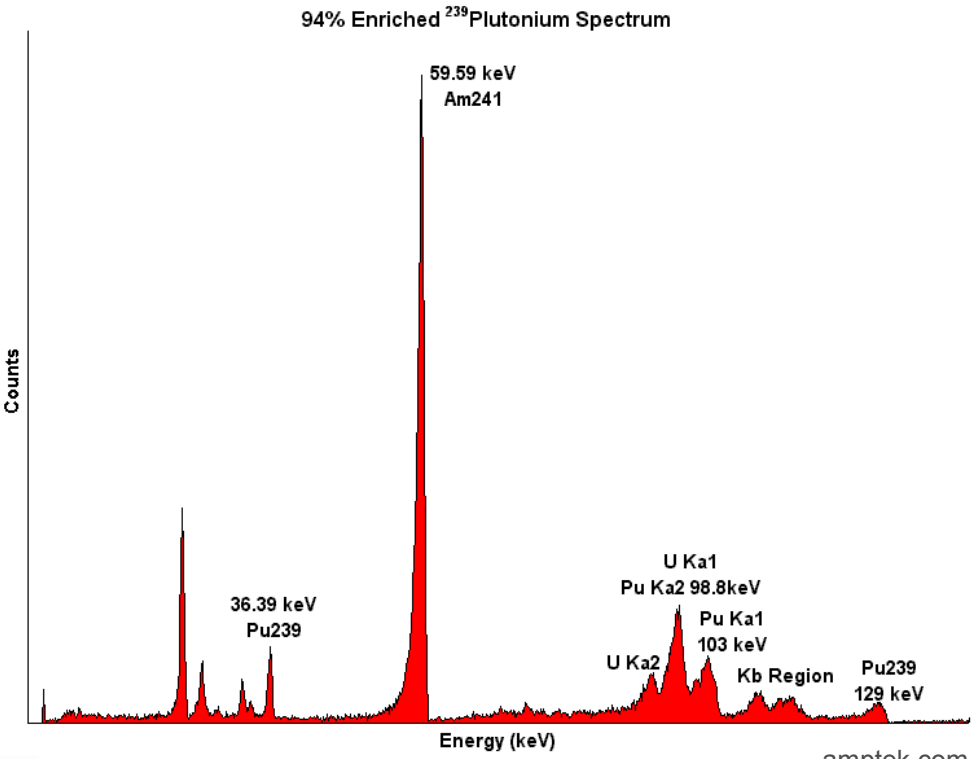
Messung von Strahlung

Halbleiter-Zähler

Teilchendurchgang durch Halbleiterdiode erzeugt freie Ladungsträger → Messbarer Strom.

Besonders hohe Energieauflösung
→ Benutzung zur Identifikation von radioaktiven Proben durch **γ-Spektroskopie**.



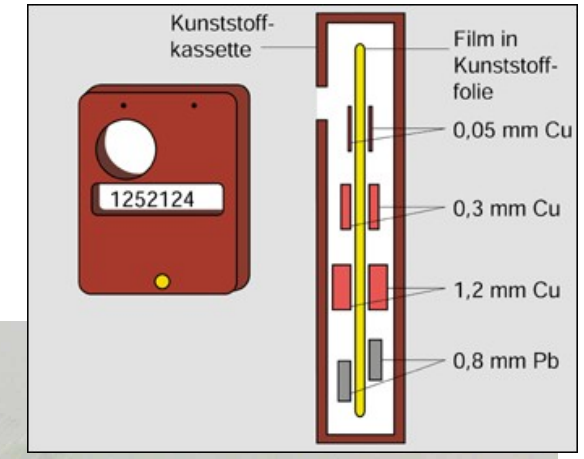


Nucl. Security & Safety Portal, nsspi.tamu.edu

Messung von Strahlung

Personen-Dosimeter

Zur Dokumentation der Dosisaufnahme von beruflich exponierten Personen.



Amtliches Filmdosimeter

Akkumulierte Dosis wird aus Schwärzung eines fotografischen Films bestimmt.

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