

Grundlagen der Strahlenphysik

Andreas A. Schönfeld

Medizinische Strahlenphysik, Carl-von-Ossietzky Universität Oldenburg

I. Wechselwirkungen von Strahlung und Materie

I. Strahlungsarten

II. Wechselwirkungen indirekt ionisierender Strahlung

III. Wechselwirkungen direkt ionisierender Strahlung

IV. Wechselwirkung mit Magnetfeldern

II. Dosisbegriffe

III. Dosisverteilung in klinischen Strahlungsfeldern

- Um die **Wechselwirkungen** von Strahlung und Materie zu verstehen, müssen wir wissen wie Strahlung funktioniert.
- Das Verständnis der **Wechselwirkungsmechanismen** von ionisierender Strahlung ist von zentraler Bedeutung für
 - Die Definition von **Dosisbegriffen**.
 - **Strahlenschutzfragen**.
 - die **Bilderzeugung** in der Röntgendiagnostik.
 - die physikalischen Mechanismen der **Strahlentherapie**.
 - ...



- Bevor wir Wechselwirkung mit Materie diskutieren, wollen wir uns die **Strahlungsarten** anschauen.
- Die medizinisch relevanten, ionisierenden **Strahlungsarten** sind
 - Photonenstrahlung
 - Elektronenstrahlung
 - Protonenstrahlung
 - Neutronenstrahlung
- Die **Eigenschaften** dieser Strahlungsarten sind sehr verschieden.

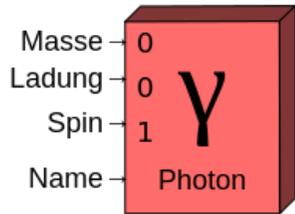


Strahlung

- Alle genannten Strahlungsarten sind im **Standardmodell** der Elementarteilchenphysik zu finden.

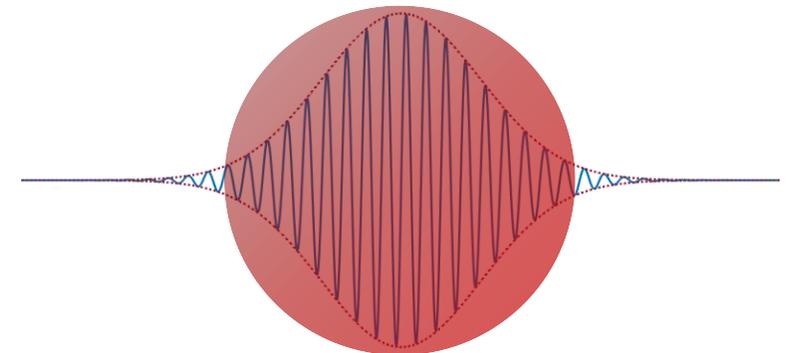
| | I | II | III | | |
|----------|---|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| Masse | 2,3 MeV | 1,275 GeV | 173,07 GeV | 0 | 125,9 GeV |
| Ladung | $\frac{2}{3}$ | $\frac{2}{3}$ | $\frac{2}{3}$ | 0 | 0 |
| Spin | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 | 0 |
| Name | u up | c charm | t top | γ Photon | H Higgs Boson |
| | | | | | |
| | 4,8 MeV | 95 MeV | 4,18 GeV | 0 | |
| | $-\frac{1}{3}$ | $-\frac{1}{3}$ | $-\frac{1}{3}$ | 0 | |
| | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 | |
| Quarks | d down | s strange | b bottom | g Gluon | |
| | | | | | |
| | <2 eV | <0,19 MeV | <18.2 MeV | 91,2 GeV | |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 | |
| | ν_e Elektron-Neutrino | ν_μ Myon-Neutrino | ν_τ Tau-Neutrino | Z⁰ Z Boson | |
| | | | | | |
| | 0,511 MeV | 105,7 MeV | 1,777 GeV | 80,4 GeV | |
| | -1 | -1 | -1 | ±1 | |
| | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 | |
| Leptonen | e Elektron | μ Myon | τ Tau | W[±] W Boson | Eichbosonen |

| | |
|--------|--------|
| Masse | 0 |
| Ladung | 0 |
| Spin | 1 |
| Name | Photon |



• Photonen

- Röntgen- und Gammaphotonen sind, wie sichtbares Licht und Radiowellen, Teil des **elektromagnetischen Spektrums**.
- Genauer: Photonen sind die **Übermittler** der elektromagnetischen Feldkraft.
- Photonen tragen einen festen, frequenzabhängigen **Energiebetrag**.
- Photonen sind **ladungsfrei und masselos**.
- Photonen gehören zu den **Bosonen**.

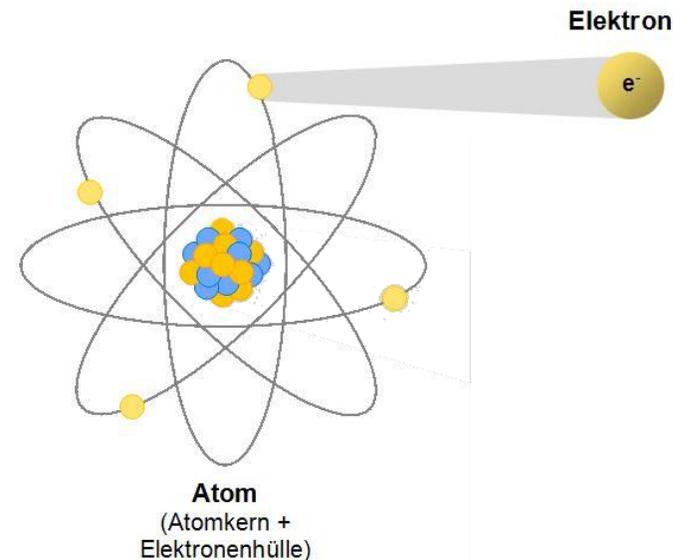


| | |
|----------|---------------|
| Masse → | 0,511 MeV |
| Ladung → | -1 |
| Spin → | $\frac{1}{2}$ |
| Name → | Elektron |

e

• Elektronen

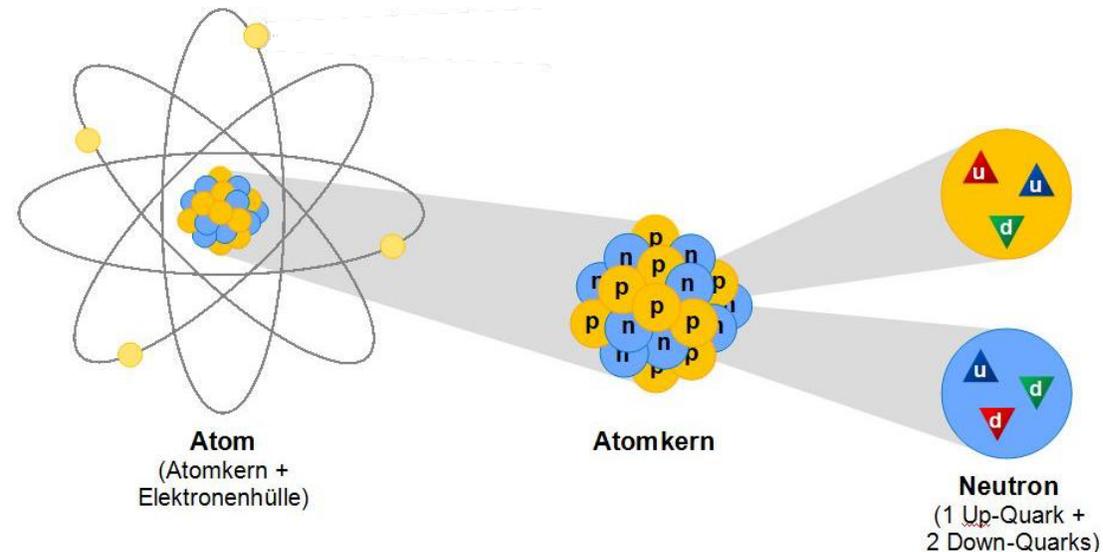
- Sind leichte, **negativ** geladene **Elementarteilchen**.
- Die **Ruhemasse** beträgt 511 keV.
- Elektronen gehören zu den **Fermionen**.
- Deswegen ist die Elektronenwolke eines Atoms räumlich ausgedehnt.



| | |
|----------|------------------|
| Masse → | 2,3 MeV |
| Ladung → | $\frac{2}{3}$ |
| Spin → | $\frac{1}{2}$ |
| Name → | u up |
| Masse → | 4,8 MeV |
| Ladung → | $-\frac{1}{3}$ |
| Spin → | $\frac{1}{2}$ |
| Name → | d down |

• Protonen

- Sind schwere, **positiv** geladene **Hadronen**.
- Der **Ladungsbetrag** gleicht dem der Elektronen.
- bestehen aus drei Quarks: Up + Up + Down
- Protonen gehören zu den **Fermionen**.

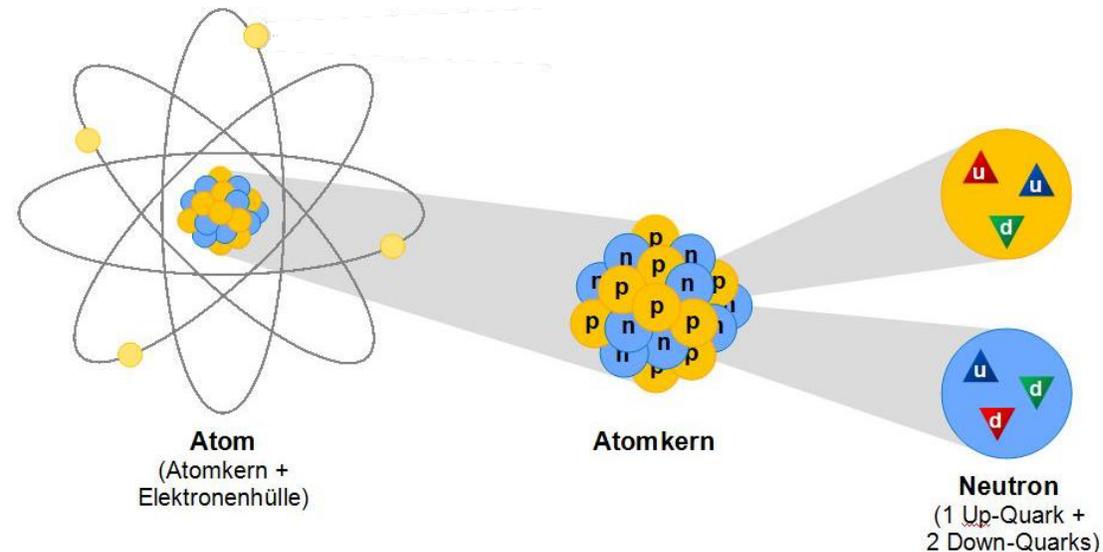


| | |
|--------|----------------|
| Masse | 2,3 MeV |
| Ladung | $\frac{2}{3}$ |
| Spin | $\frac{1}{2}$ |
| Name | u up |

| | |
|--------|------------------|
| Masse | 4,8 MeV |
| Ladung | $-\frac{1}{3}$ |
| Spin | $\frac{1}{2}$ |
| Name | d down |

• Neutronen

- Sind schwere, **neutral** geladene **Hadronen**.
- bestehen aus drei Quarks: Up + Down + Down
- Neutronen gehören zu den **Fermionen**.



Zusammenfassung I

- Die **Kerncharakteristika** der ionisierenden Strahlungsarten sind
 - **Ladung**
 - **Energie** (kinetische oder Photonenenergie)
 - Energie (**Masse**, mit $E = mc^2$)
- Diese Größen entscheiden über die Art der **Wechselwirkungen** mit Materie.

Strahlungsarten

Wechselwirkungen

Dosis

Dosimetrie

I. Wechselwirkungen von Strahlung und Materie

I. Strahlungsarten

II. Wechselwirkungen indirekt ionisierender Strahlung

III. Wechselwirkungen direkt ionisierender Strahlung

IV. Wechselwirkung mit Magnetfeldern

II. Dosisbegriffe

III. Dosisverteilung in klinischen Strahlungsfeldern

Wechselwirkung

- Die **Ladung** lässt zwischen direkt und indirekt ionisierender Strahlung unterscheiden.
 - Nur geladene Strahlung kann mit den **elektrischen Feldern** von Atomkernen und Elektronenhüllen interagieren.
 - Indirekt ionisierende Strahlung löst direkt ionisierende Strahlung als **Sekundärstrahlung** aus.

| Indirekt ionisierend | Direkt ionisierend |
|---------------------------|--------------------|
| Photonen (per Definition) | Elektronen |
| Neutronen | Protonen |

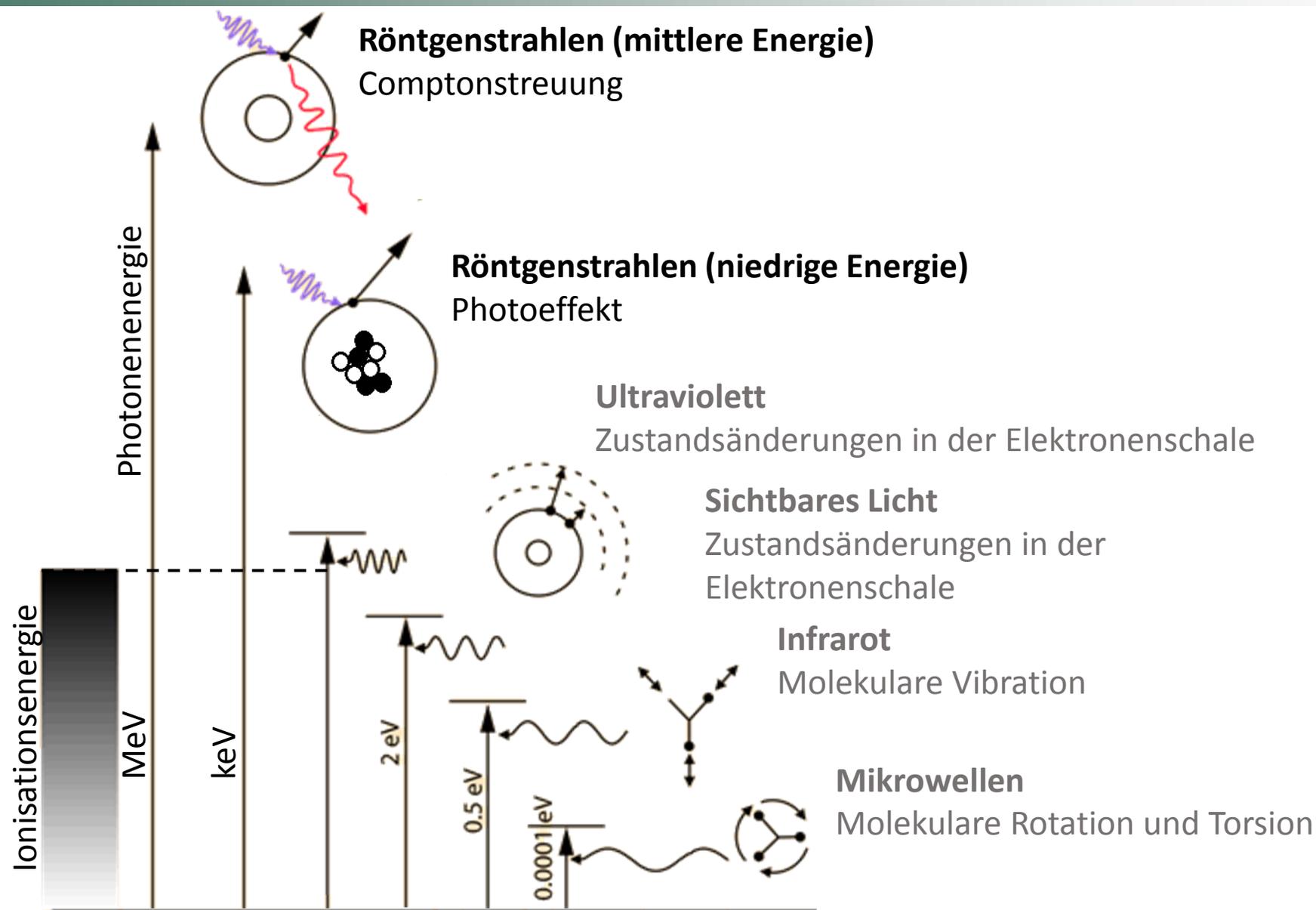


- Die **Masse** zeigt ihre Wirkung in Form von **Trägheit**.
 - Dies hat auf die Streubreite der Strahlung Einfluss (Elektronen, Protonen).
- Die **Energie** entscheidet über
 - das **Ausmaß** an Sekundärstrahlung.
 - die **Art** der Wechselwirkung (Photonen).
 - Beim überschreiten gewisser **Energieschwellen** sind neue Wechselwirkungen möglich (Teilchenproduktion, Kernaktivierung, ...)

Wechselwirkung

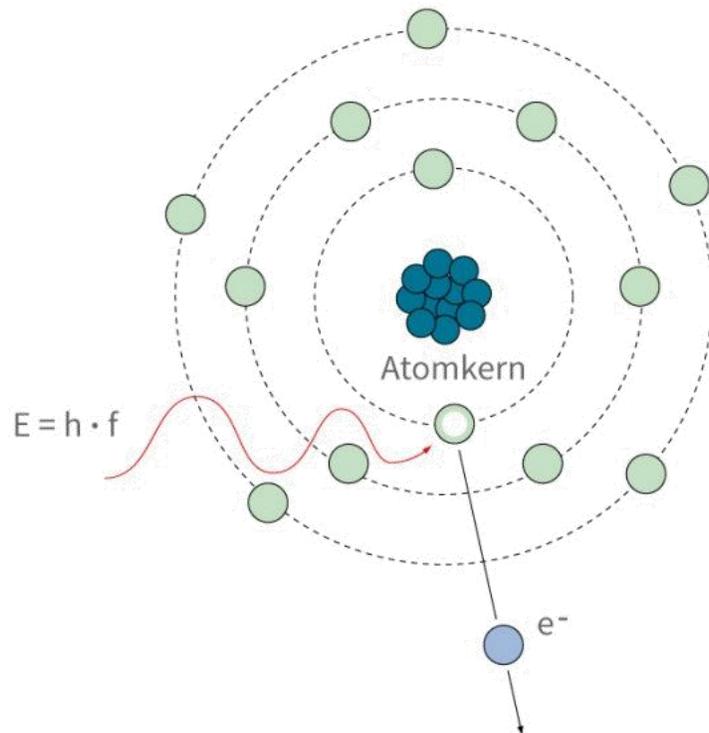
- Zunächst sollen die Wechselwirkungen von **Photonenstrahlung** diskutiert werden.
- *Erinnerung:* Bezüglich der **Kerngrößen** haben Photonen folgende Eigenschaften:
 - Ladung: neutral (daher indirekt ionisierend)
 - Energie: klinisch genutzt keV – MeV Photonenenergie
 - Masse: 0 eV
- Die entscheidende Größe bei Photonen ist die **Energie**.

Wechselwirkung



Wechselwirkung

- Der **Photoeffekt** tritt bei niedrigen ($E \lesssim 200 \text{ keV}$) Photonenenergien des Röntgenspektrums auf.
- Eine hohe Ordnungszahl des Absorbers erhöht die Wahrscheinlichkeit des Photoeffekts.

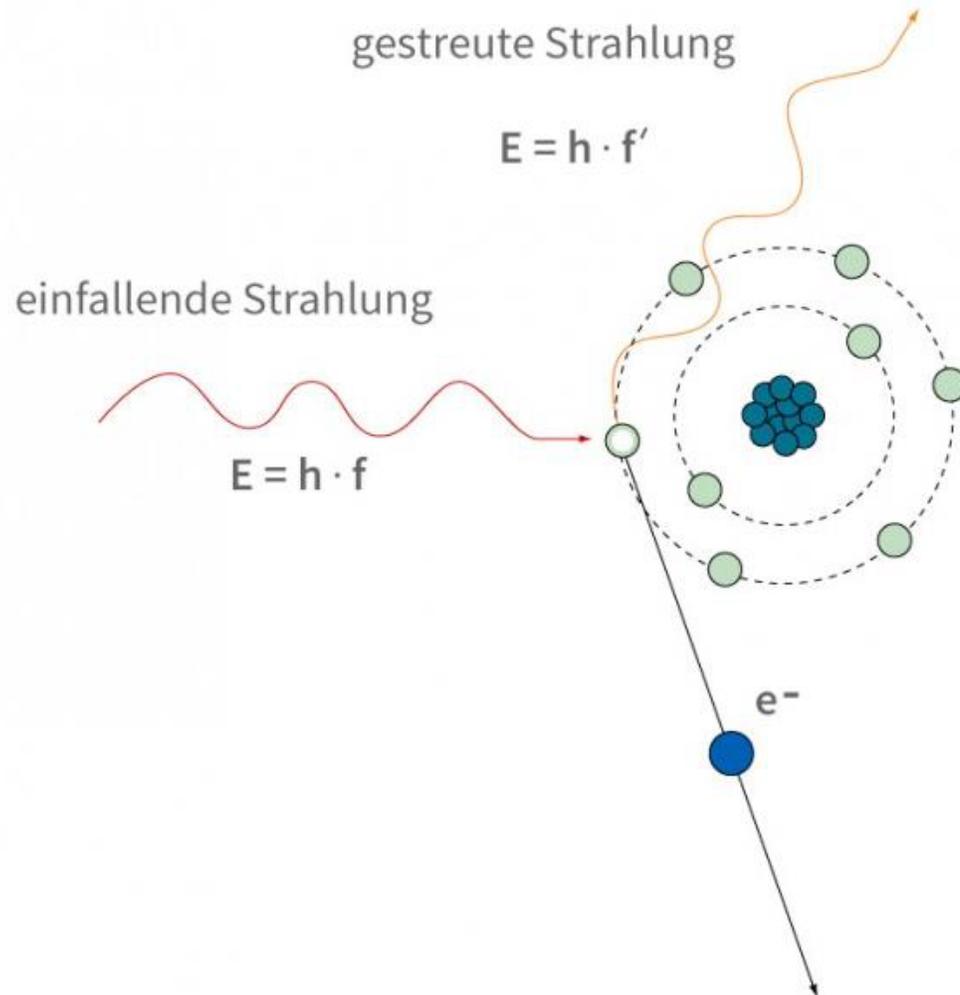


Photoeffekt:

Absorption des einfallenden Photons und Freisetzung eines Photoelektrons aus einer inneren Schale des absorbierenden Atoms.

Wechselwirkung

- Der **Compton Effekt** tritt bei mittleren Photonenenergien des Röntgenspektrums auf.



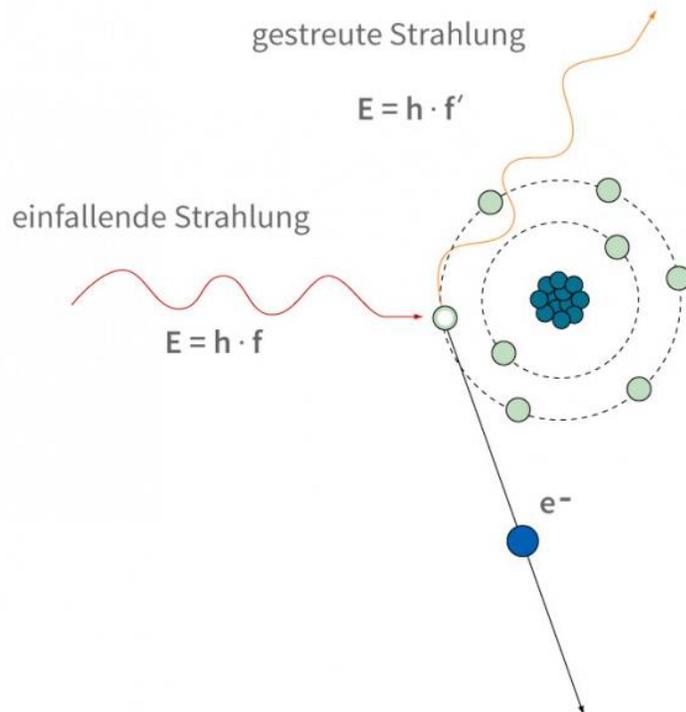
Compton Effekt:

Unelastische Streuung von Photonen an schwach gebundenen Hüllenelektronen mit Energieübertrag vom Photon auf das Elektron.

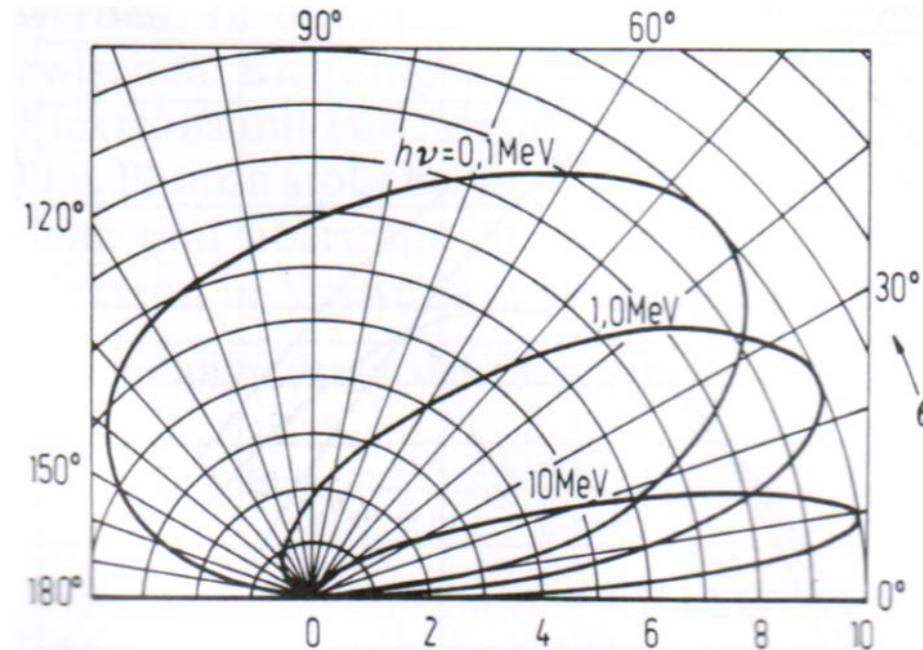


Wechselwirkung

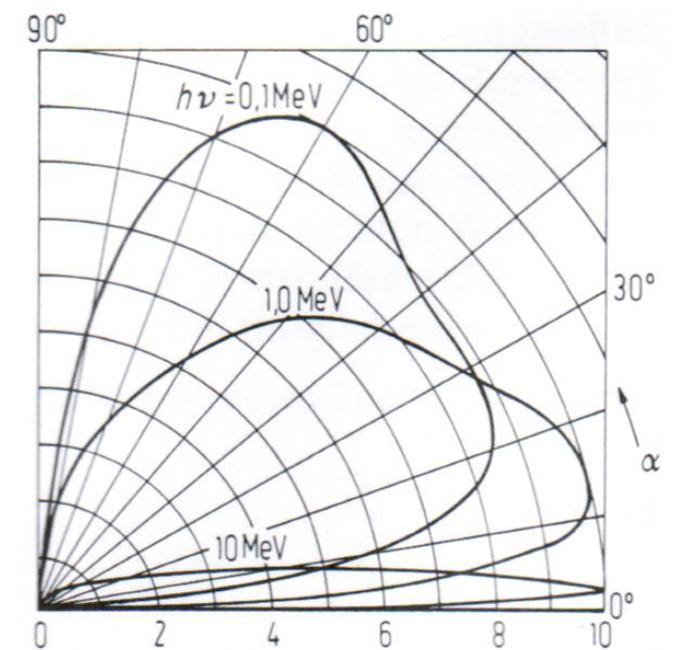
- Bei hohen Photonenenergien wird fast die gesamte Energie auf das Elektron übertragen.
- Die Winkelverteilung der gestreuten Photonen und Elektronen:



Compton-Photonen

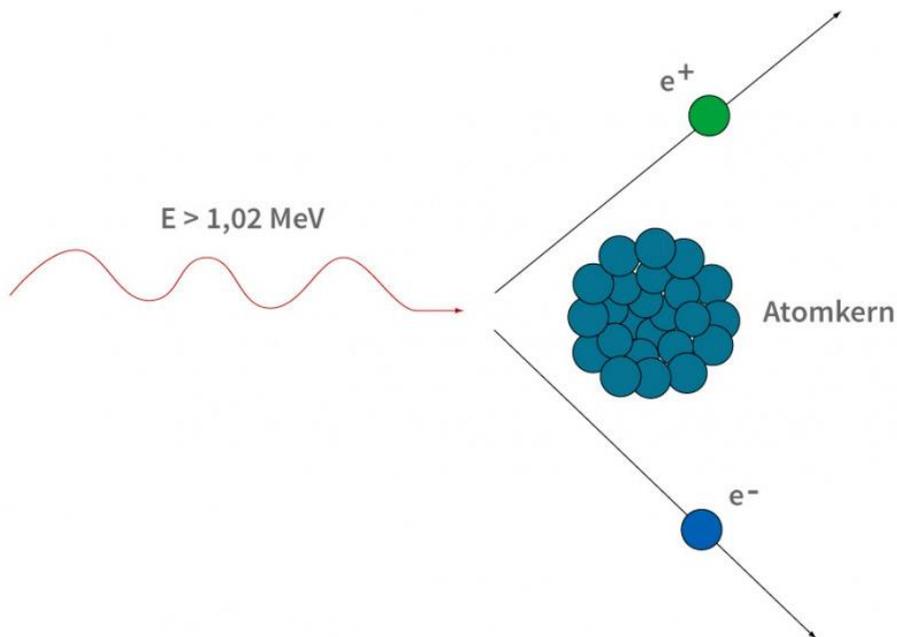


Compton-Elektronen



Wechselwirkung

- Ab $E \geq 1.022 \text{ MeV}$ reicht die Photonenenergie aus, um in **Masse** gewandelt zu werden.
- Dabei entstehen ein **Elektron** und ein **Positron** mit einer **Ruhemasse** von jeweils 0.511 MeV .
- Bei höheren Energien können weitere Teilchen produziert werden (CERN).

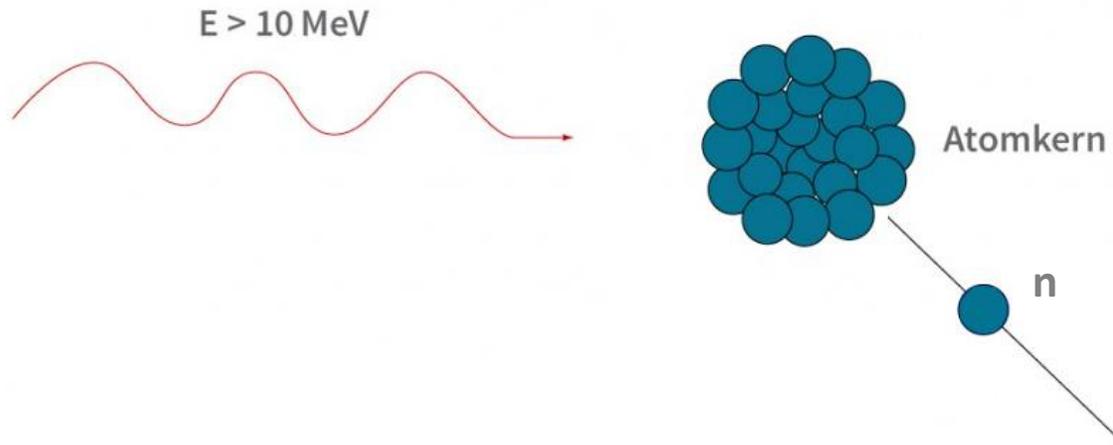


Paar-Produktion:

Spontane Bildung eines Elektron-Positron-Paares im elektrischen Feld eines Atomkerns

Wechselwirkung

- Der **Kernphotoeffekt** tritt bei sehr hohen Photonenenergien ($E \gtrsim 10 \text{ MeV}$) auf.

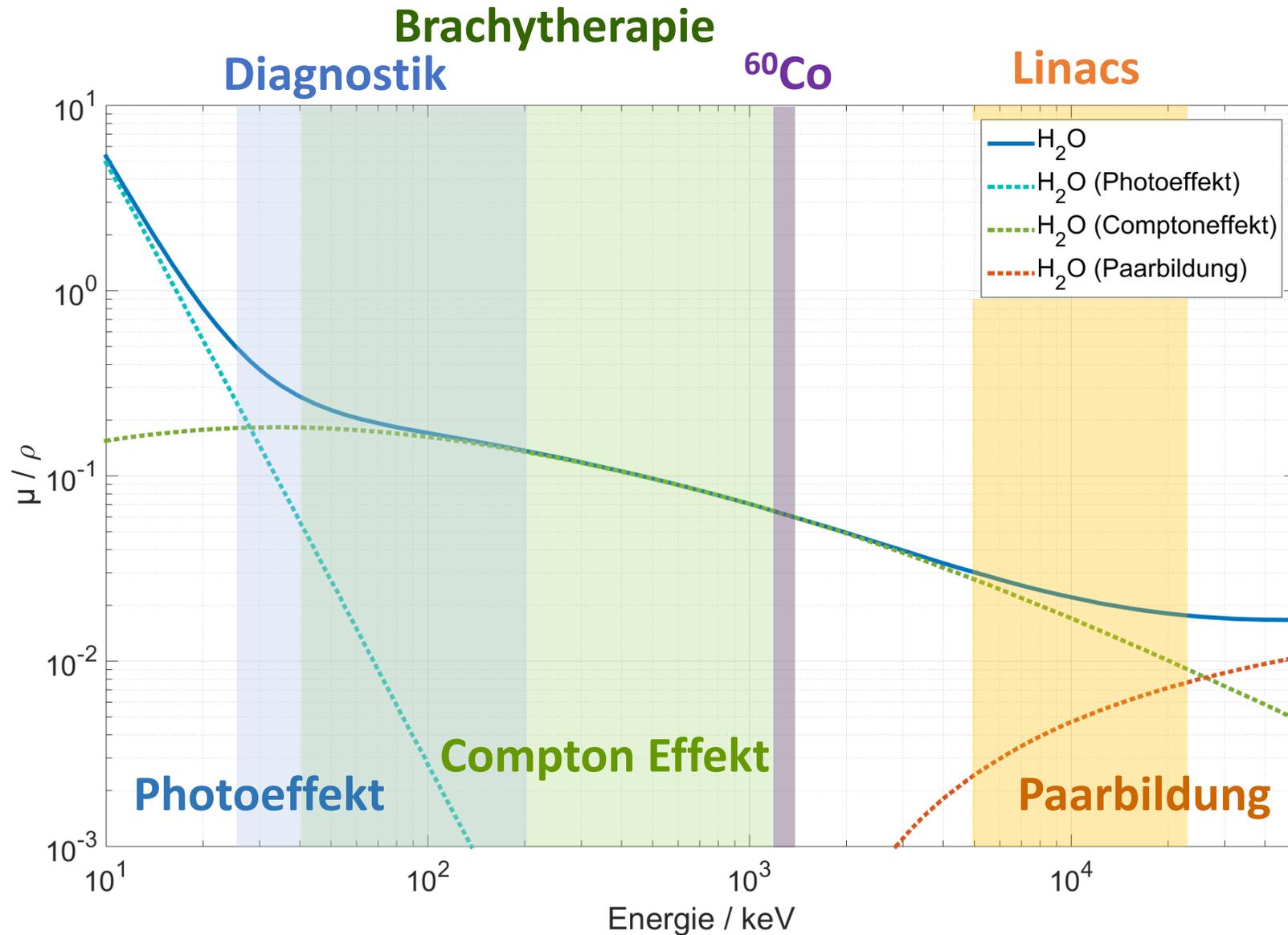


Kernphotoeffekt:

Absorption des einfallenden Photons und Freisetzung eines Neutrons (oder Protons) aus dem Atomkern des absorbierenden Atoms. Es verbleibt ein Radioisotop.

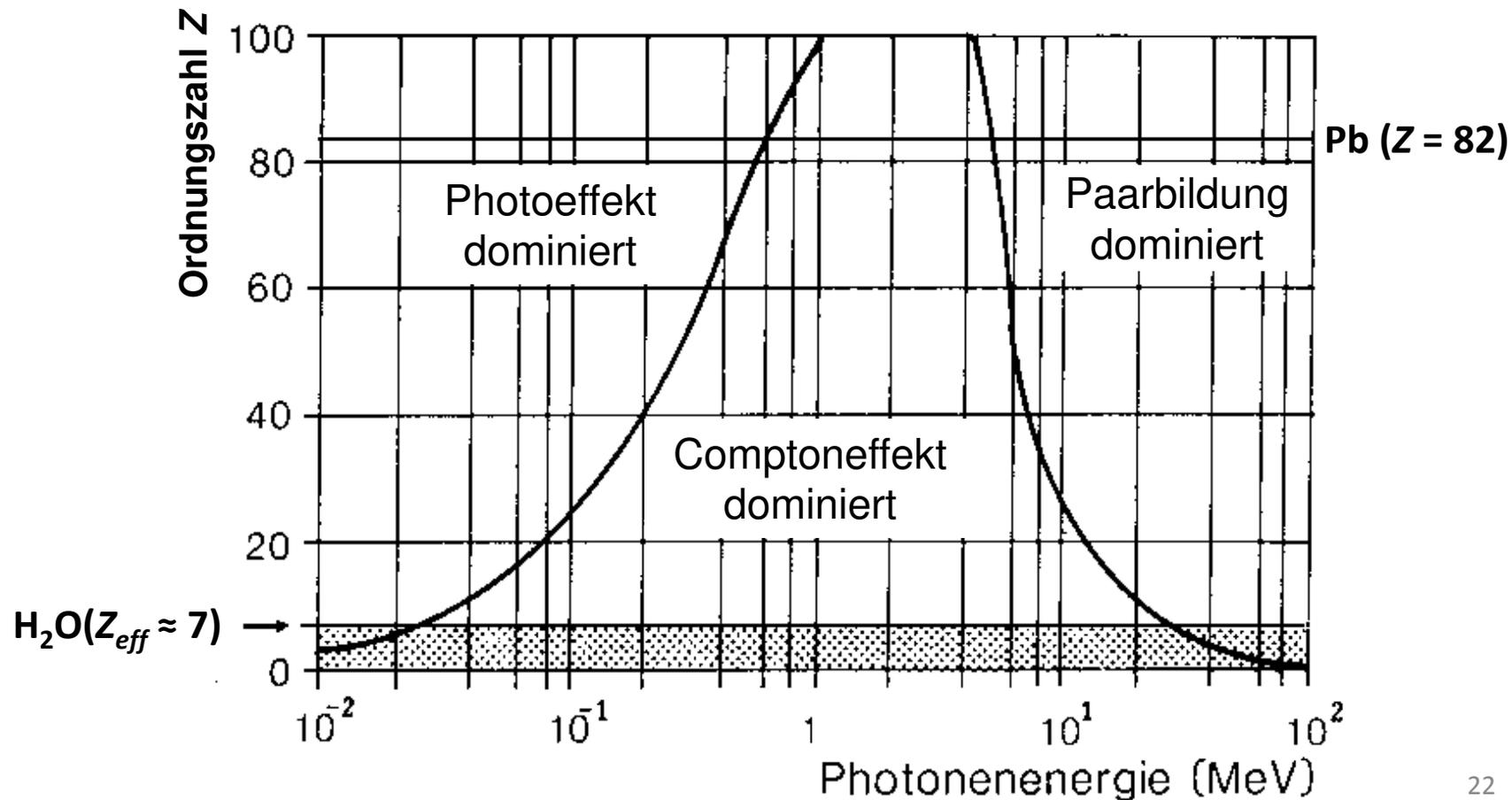
| Ausgangsnuklid | Kernreaktion | Schwellenenergie / MeV | Zerfallsart des entstandenen Nuklids |
|-----------------------------|---|------------------------|--------------------------------------|
| Deuterium ^2H | $^2\text{H} (\gamma, n) ^1\text{H}$ | 2,18 | stabil |
| Kohlenstoff ^{12}C | $^{12}\text{C} (\gamma, n) ^{11}\text{C}$ | 10,6 | β^+ |
| Sauerstoff ^{16}O | $^{16}\text{O} (\gamma, n) ^{15}\text{O}$ | 15,7 | β^+ |
| Stickstoff ^{14}O | $^{14}\text{N} (\gamma, n) ^{13}\text{N}$ | 10,6 | β^+ |

Wechselwirkung



Wechselwirkungen

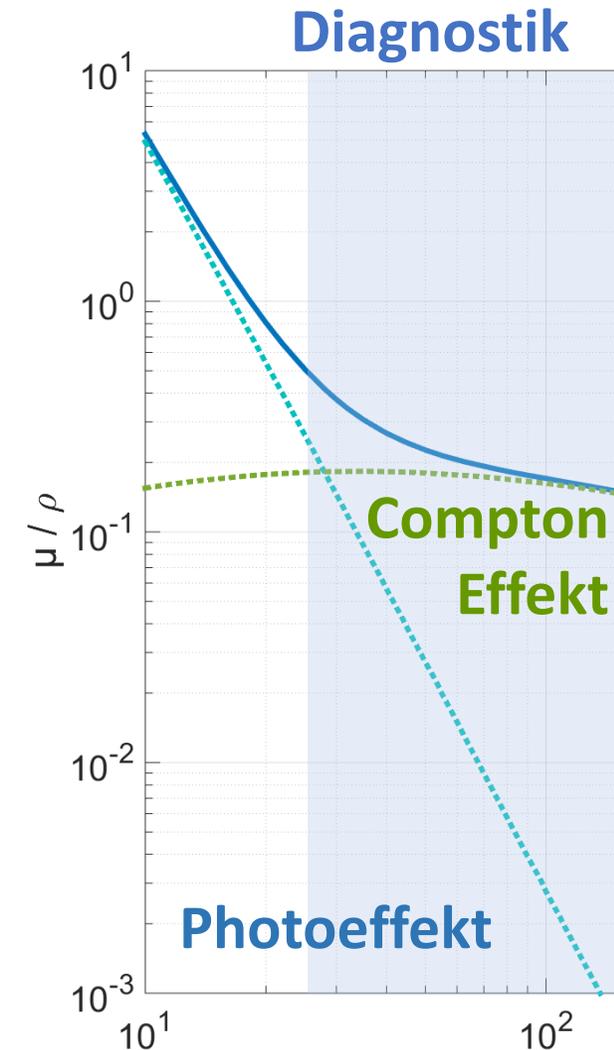
- Mit der **Ordnungszahl Z** des absorbierenden Materials verschiebt sich die Häufigkeit der Effekte.



Wechselwirkungen

• Beispiel 1: Strahlenschutz Röntgen-Diagnostik

- Niedrigste Energien
 - *Problem:* Extrem starke Absorption durch Photoeffekt
 - Kein Beitrag zur Bildgebung
 - Ausschließlich Strahlenbelastung
 - *Lösung:* Filtern der niederenergetischen Anteile
- Genutzte Energien
 - *Problem:* Ungerichtete Streustrahlung durch überwiegenden Compton Effekt
 - Strahlenbelastung außerhalb Nutzstrahlenbündel
 - *Lösung:* Bleischürze, Bleiglas mit hohem Z, denn dort überwiegt Photoeffekt. Das gilt NICHT für Strahlentherapie-Energien!



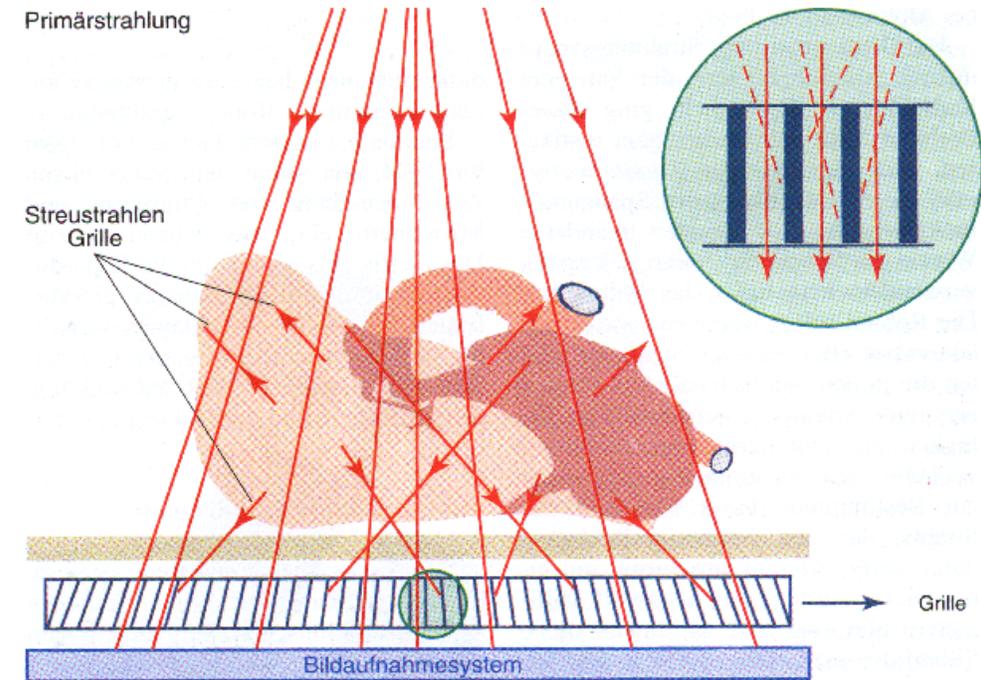
Wechselwirkungen

- **Beispiel 2:** Bildqualität Röntgen-Diagnostik

- *Problem:* Compton Effekt überwiegt
 - Ungerichtete Streustrahlung
 - Bild bekommt „Grauschleier“
- *Lösung:* Streustrahlenraster

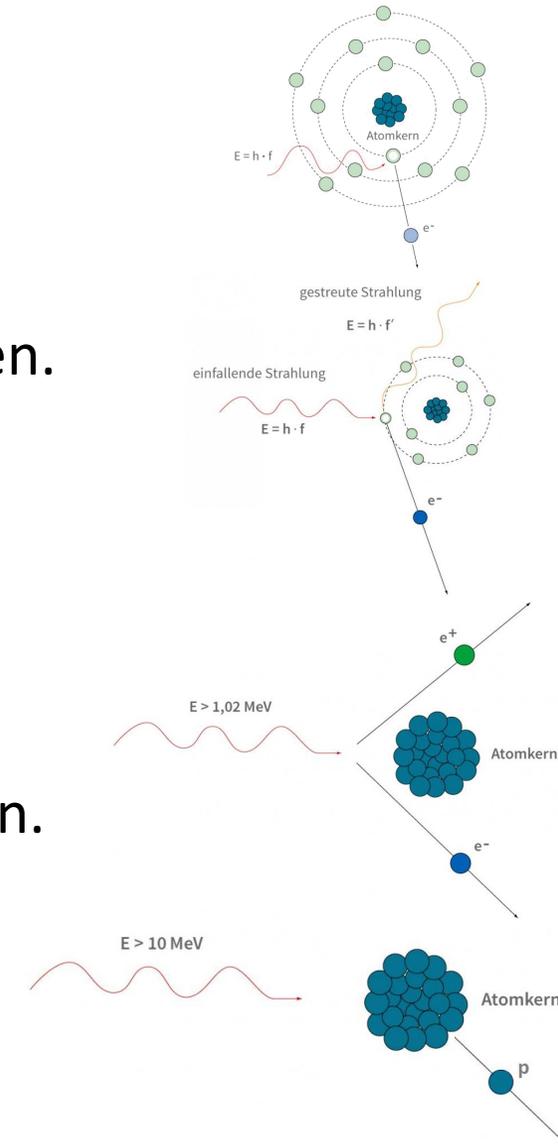
- **Beispiel 3:** Kontrastmittel

- *Problem:* Die interessante Struktur hat ähnliche Ordnungszahl Z wie Umgebung.
 - Absorption durch Photoeffekt zu ähnlich, Struktur nicht erkennbar.
- *Lösung:* Durch Kontrastmittel starke Zunahme des Photoeffekts durch höhere Ordnungszahl Z .



Zusammenfassung II

- **Indirekt ionisierende Strahlung:**
- Photoeffekt
 - Das Photon wird vernichtet.
 - Dominiert bei niedrigen Photonenenergien und hohen Ordnungszahlen.
- Compton Effekt
 - Verursacht Ungerichtete Streustrahlung.
 - Dominiert bei mittleren Photonenenergien.
- Paarbildung
 - Dominiert bei hohen Photonenenergien und hohen Kernladungszahlen.
- Kern-Photoeffekt
 - Sorgt für Neutronenkontamination und Aktivierung bei Photonenenergien über 10 MeV.



I. Wechselwirkungen von Strahlung und Materie

I. Strahlungsarten

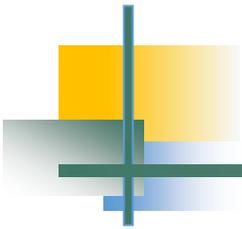
II. Wechselwirkungen indirekt ionisierender Strahlung

III. Wechselwirkungen direkt ionisierender Strahlung

IV. Wechselwirkung mit Magnetfeldern

II. Dosisbegriffe

III. Dosisverteilung in klinischen Strahlungsfeldern



Wechselwirkung

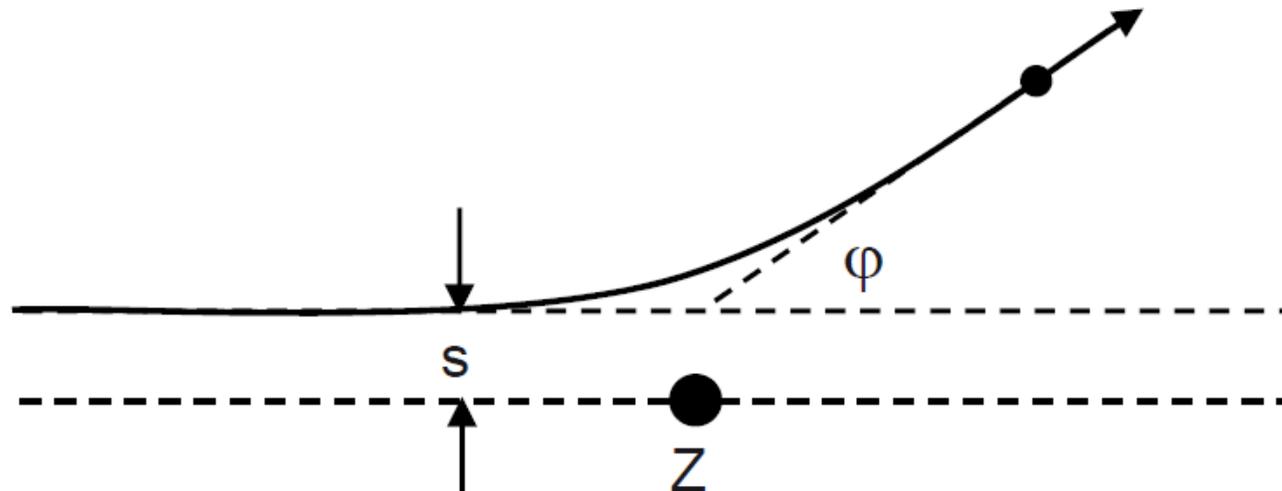
- Durch indirekt ionisierende Strahlung wird **direkt ionisierende Sekundärstrahlung** freigesetzt.
- Bei Photonen (indirekt) ist dies meist Elektronenstrahlung (direkt). Bei Neutronenstrahlung (indirekt) werden auch Protonen (direkt) durch Nukleonenstoß freigesetzt.
- Die Sekundärstrahlung hat **Ladung** und **Masse**.
- Zunächst sollen die Wechselwirkungen von **Elektronen** diskutiert werden.

Wechselwirkung

- *Erinnerung:* Bezüglich der **Kerngrößen** haben Elektronen folgende Eigenschaften:
 - Ladung: negativ (daher direkt ionisierend)
 - Energie: klinisch genutzt keV – MeV kinetische Energie (relativistisch)
 - Masse: 511 keV

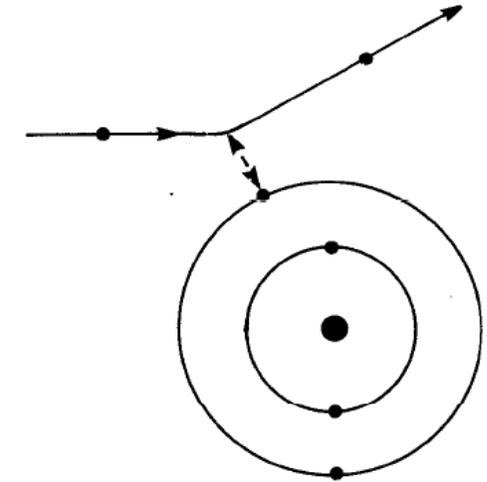
Wechselwirkung

- Durch die Ladung kommt es zu Wechselwirkungen mit den **elektrischen Feldern** von Atomkernen und Atomhüllen.
- Die Art der Wechselwirkung hängt vom **Abstand s** der initialen Flugbahn des Elektrons vom Atomkern ab.

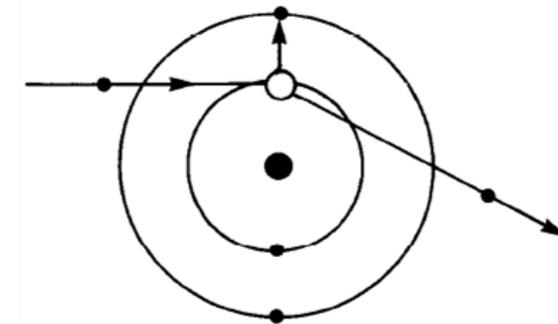


Wechselwirkung

- Bei großen Abständen ($s \gg r_{\text{Atom}}$) kommt es zu **weichen Kollisionen** mit der Elektronenhülle.
 - Diese können **elastisch** sein: Das geladene Teilchen wird ohne Energieübertragung gestreut.
 - Bei **unelastischen** Stößen wird ein Elektron der äußeren Elektronenhülle angeregt und so einige eV an das Atom übertragen.
- Weiche Kollisionen erwirkten etwa 50 % des Energieverlusts geladener Teilchen und sorgen für einen **kontinuierlichen Bremsprozess**.
- Diese Feldwechselwirkung ist ein entscheidender **Unterschied** zu ungeladener Strahlung.



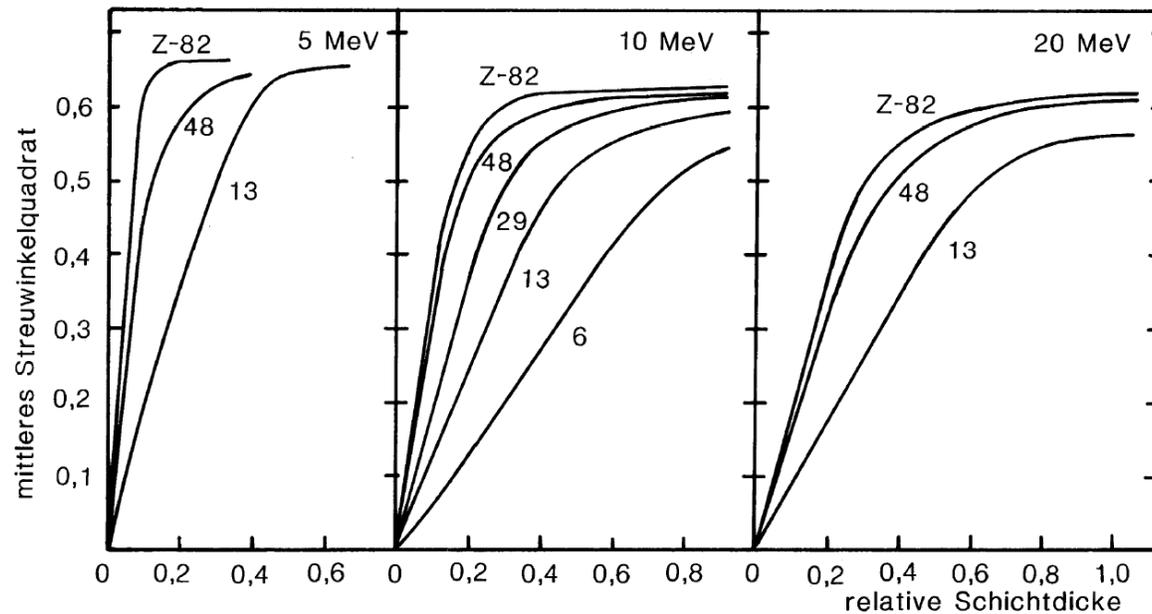
Elastische Kollision



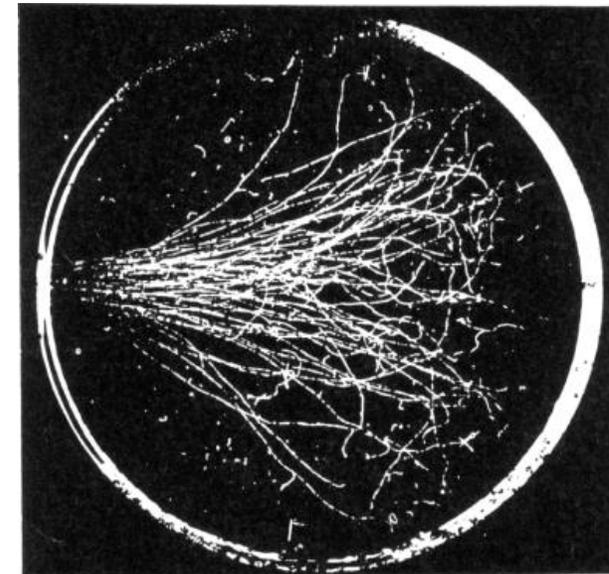
Unelastische Kollision

Wechselwirkung

- Elektronenbündel werden durch weiche Kollisionen aufgestreut.



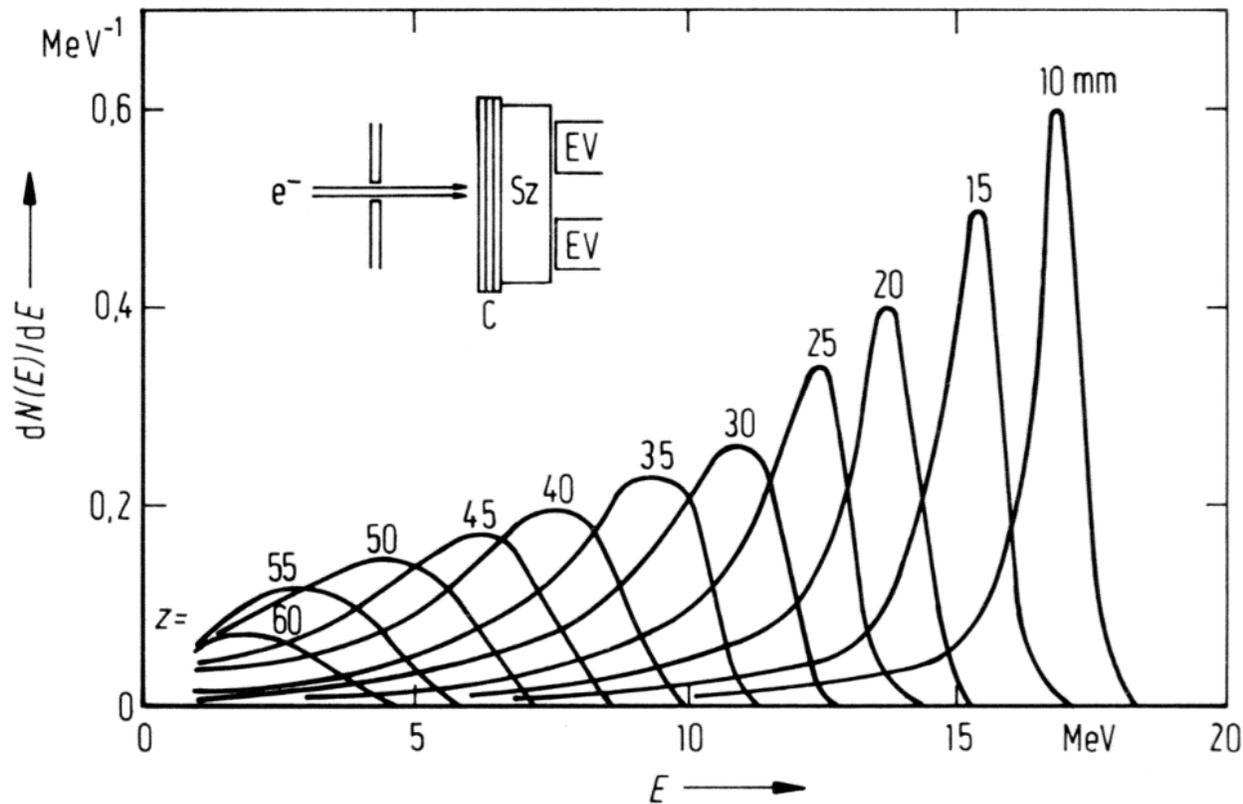
Mittleres Streuwinkelquadrat in Abhängigkeit der Tiefe und Ordnungszahl des Absorbers



Nebulakammeraufnahme von 9.3 MeV Elektronen

Wechselwirkung

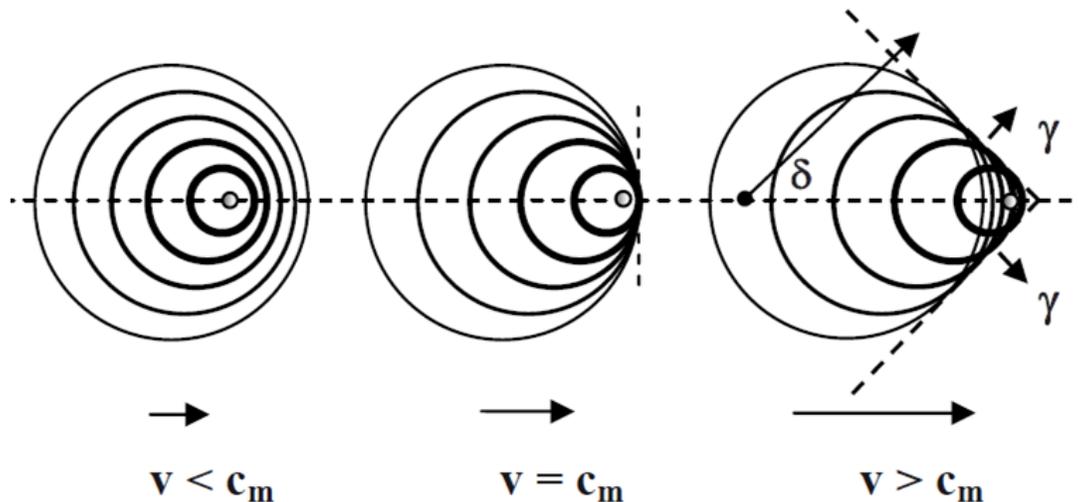
- Durch den **kontinuierlichen Energieverlust** verbreitert sich das Energiespektrum des Elektronenstrahls.



Energiespektren von Elektronen mit 20 MeV Anfangsenergie (Monoenergetisch) hinter verschieden dicken Kohlenstoffschichten

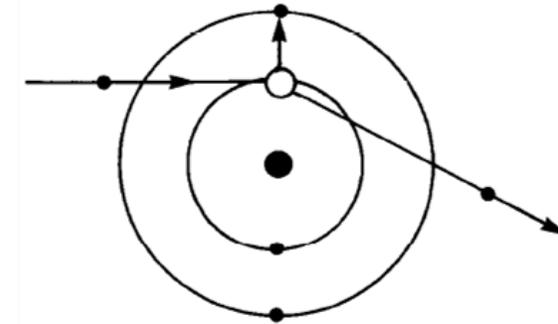
Wechselwirkung

- Tritt ein geladenes Teilchen mit großem Stoßparameter s in ein Medium ein und ist dessen Geschwindigkeit v größer als die dort gültige Lichtgeschwindigkeit c_m , kommt es zu **Cerenkov Licht**.
- Dieser Effekt ist ähnlich dem akustischen **Überschallknall**.
- Dieses Licht kann bei **Patienten** im Augapfel entstehen und als **blaue Lichtblitze** wahrgenommen werden.

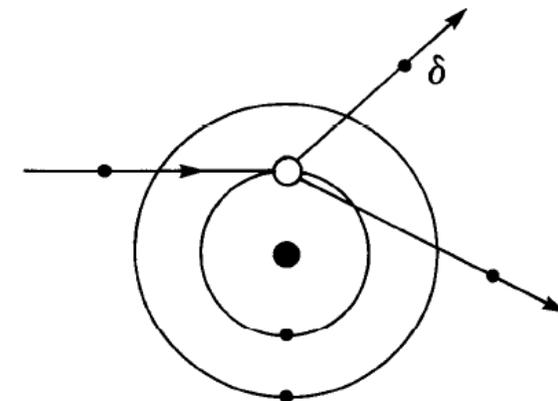


Wechselwirkung

- Bei mittleren Abständen ($s \approx r_{\text{Atom}}$) kommt es zu **harten Kollisionen** mit der Elektronenhülle.
 - Innere Elektronen werden direkt getroffen.
 - Es kann zur Anregung eines inneren Elektrons kommen. *Folge: Charakteristische Röntgenstrahlung.*
 - Das getroffene Elektron kann das Atom mit hoher kinetischer Energie verlassen (**δ -Elektron**)



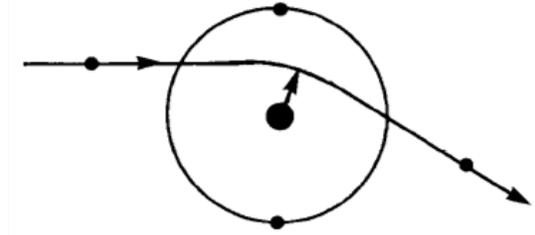
Anregung eines inneren Elektrons



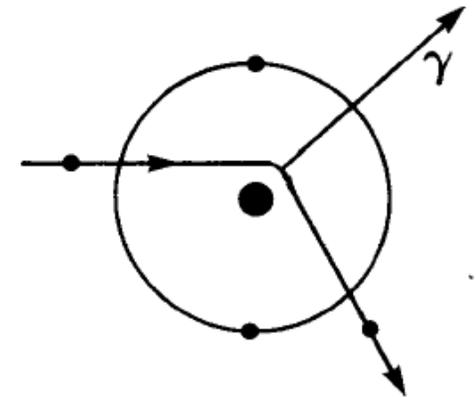
Emission eines δ -Elektron

Wechselwirkung

- Bei kleinen Abständen ($s < r_{\text{Atom}}$) kommt es zur Streuung am **elektrischen Feld des Atomkerns**.
 - Diese kann **elastisch** sein: Das geladene Teilchen wird ohne Energieübertragung gestreut.
 - Wird das geladene Teilchen gebremst oder mit Energieverlust umgelenkt entsteht **Bremstrahlung**.
- Wird der Kern direkt getroffen, kann es zu Kernreaktionen (Aktivierung, Neutronenfreisetzung, etc.) kommen.



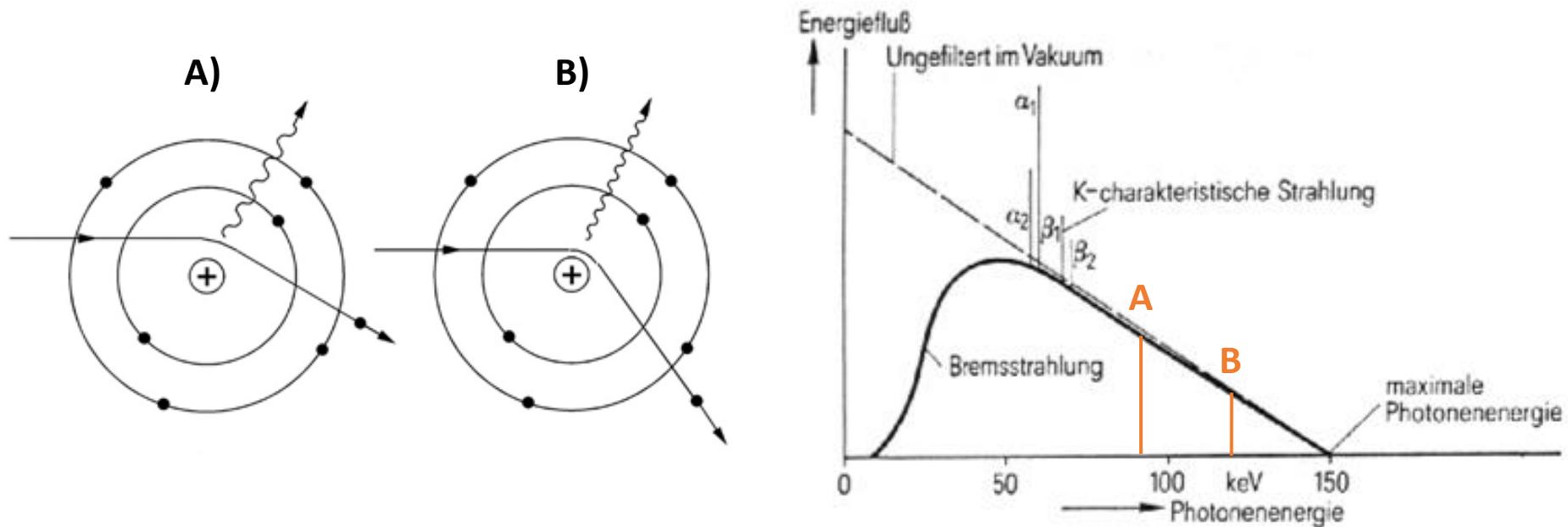
Elastische Kernstreuung
ohne Energieübertragung



Bremstrahlung

Wechselwirkung

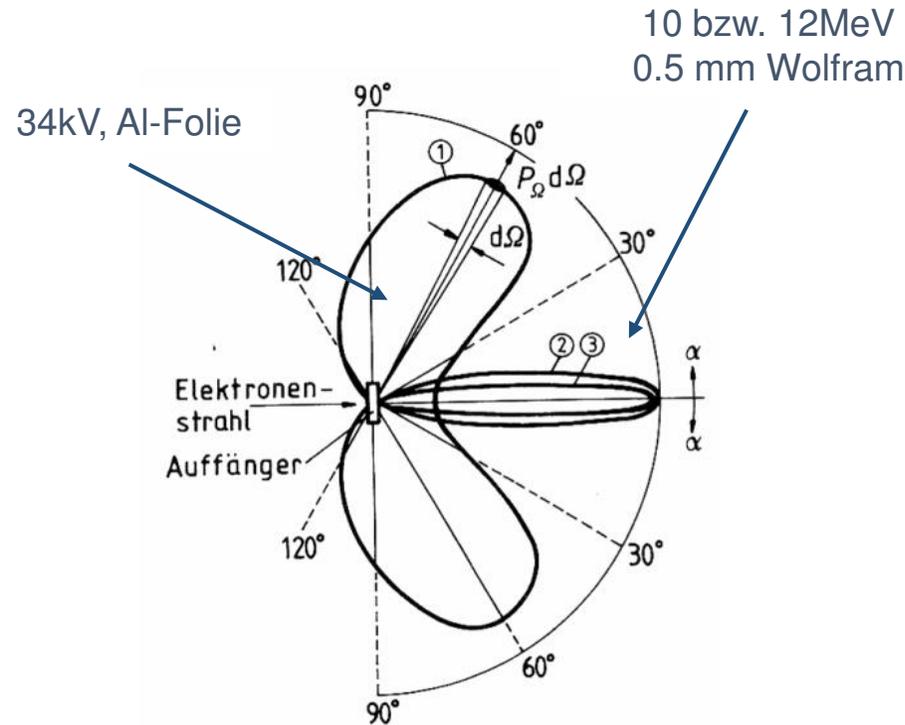
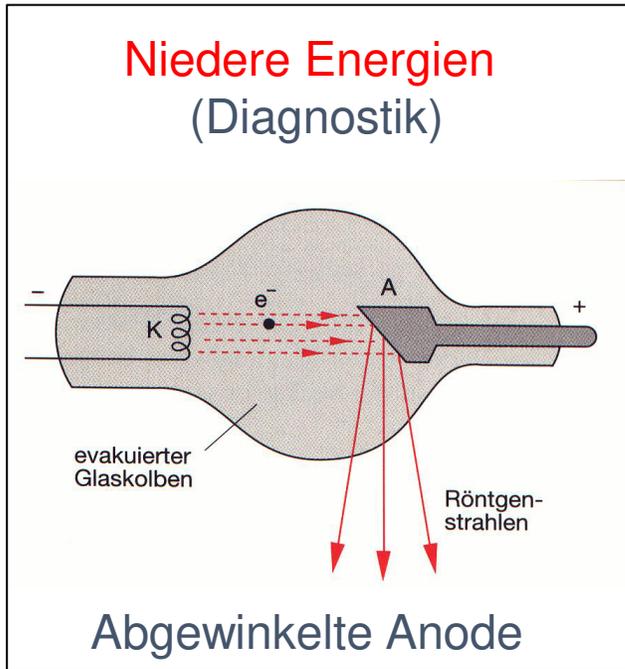
- Die Energie des bei der **Bremsstrahlung** freigesetzten Photons hängt ebenfalls vom Stoßparameter ab.
- Daher ist das **Bremsstrahlungsspektrum** (im Vakuum) kontinuierlich.



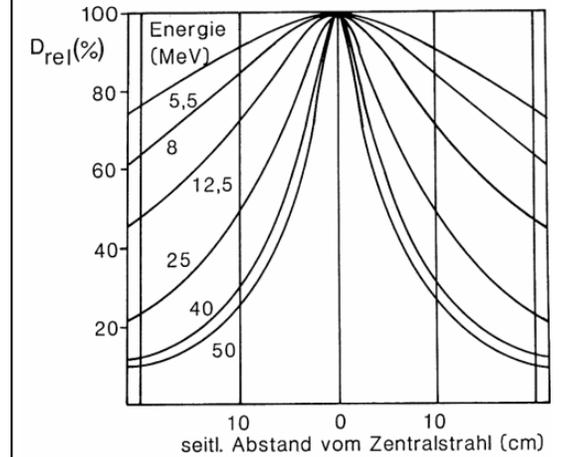
Bremsstrahlungsspektrum

Wechselwirkung

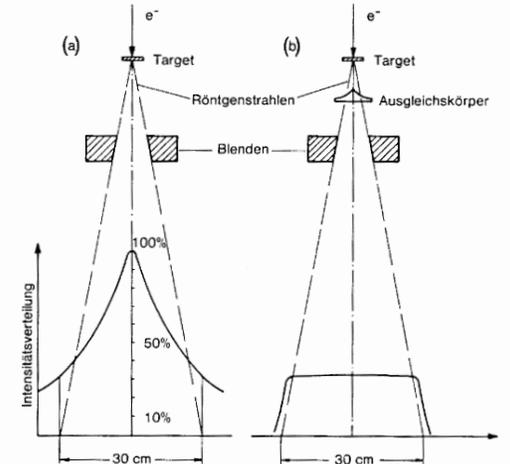
- Die Vorzugsrichtung der **Bremsstrahlung** ist Energieabhängig.



Hohe Energien (Strahlentherapie)

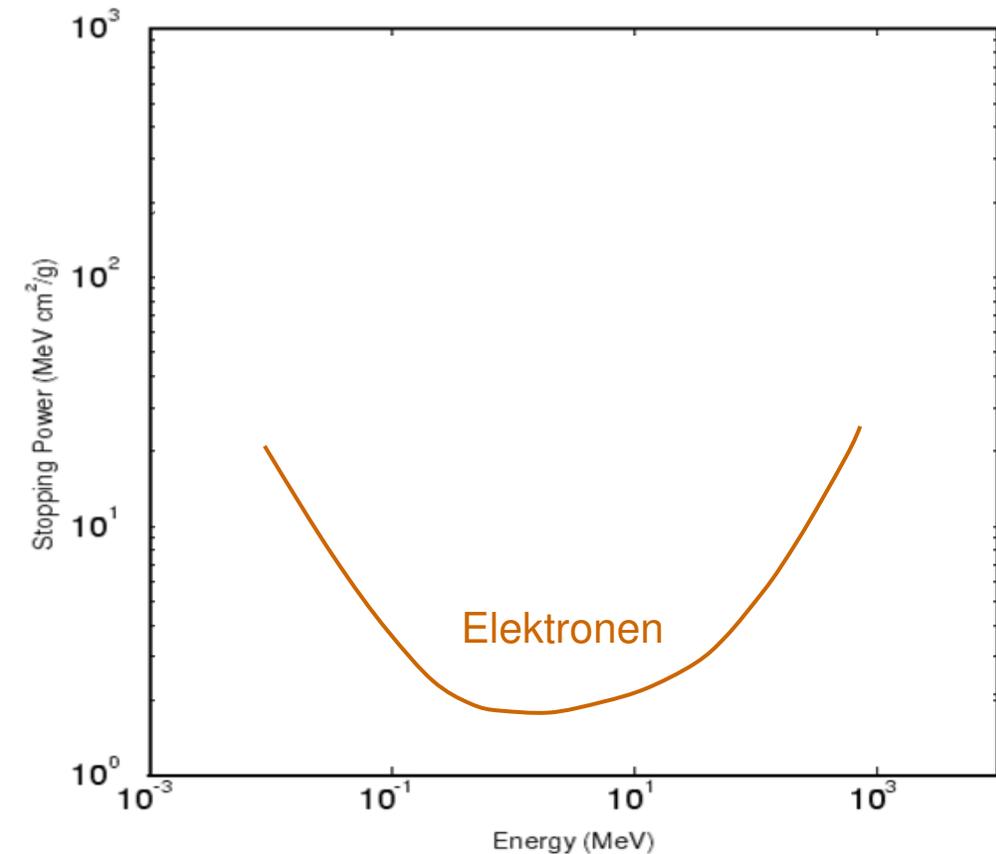


Homogenisierung durch Ausgleichsfilter



Wechselwirkung

- Das **Bremsvermögen** gegenüber geladenen Teilchen fasst den Effekt der Wechselwirkungen als Energieverlust pro Weglänge zusammen.
- Das Bremsvermögen ist **Energieabhängig**.
 - Es nimmt bei kleineren Energien zu.
 - Dadurch und durch die kontinuierlichen Bremsung haben Elektronen eine **endliche Reichweite** im Gewebe.

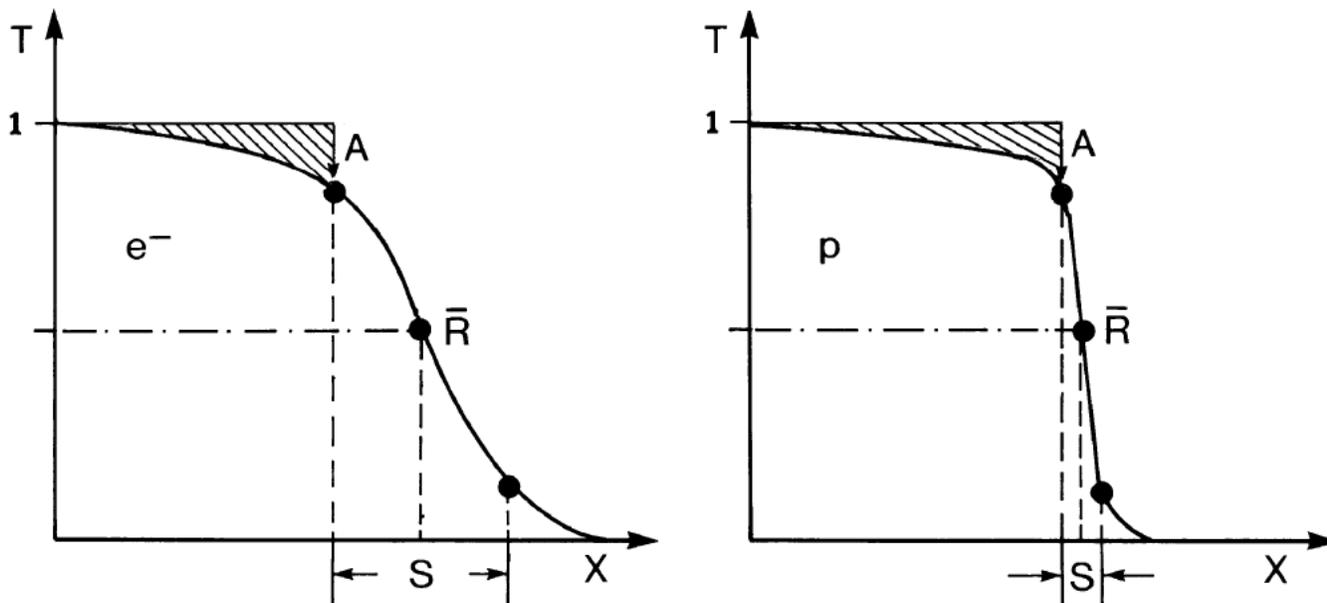


Wechselwirkung

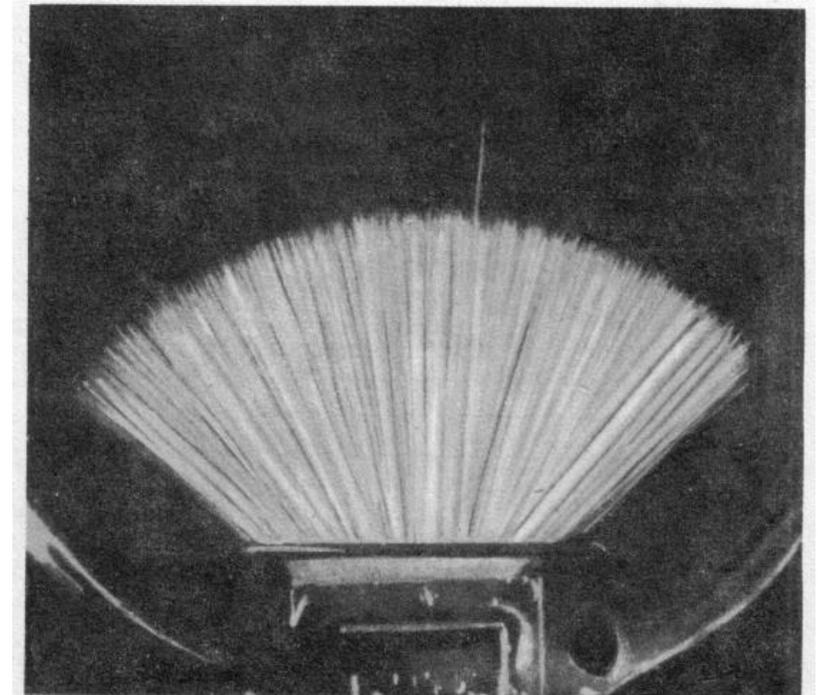
- Die Wechselwirkungen von **Protonen** mit Materie funktioniert denen der Elektronen sehr ähnlich.
- Protonen unterscheiden sich von Elektronen in ihrem Ladungsvorzeichen und der **Masse (Trägheit)**.
- *Erinnerung:* Bezüglich der **Kerngrößen** haben Protonen folgende Eigenschaften:
 - Ladung: positiv (daher direkt ionisierend)
 - Energie: klinisch genutzt MeV kinetische Energie (nicht-relativistisch)
 - Masse: ca. 1836 Elektronenmassen

Wechselwirkung

- Aufgrund ihrer **Massenträgheit** werden Protonen kaum aus ihrer Bahn ausgelenkt: Sie werden kaum gestreut.
- Dadurch ist die Reichweite der Protonen eines Protonenbündels deutlich **konsistenter** als es bei Elektronen der Falls ist.

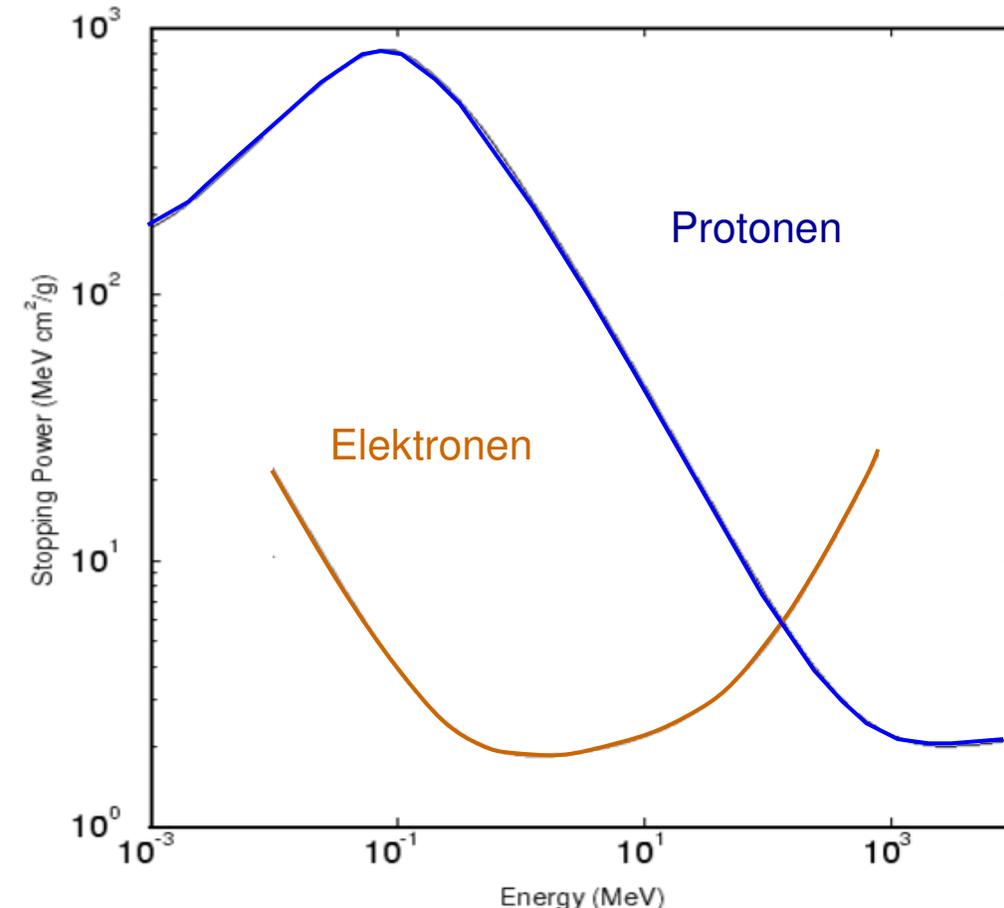


Schematische Transmissionskurven für Elektronen (links) und Protonen (rechts).



Wechselwirkung

- Ebenfalls aufgrund ihrer **Massenträgheit** wechselwirken schnelle Protonen schwächer mit Materie.
- Das **Bremsvermögen** nimmt mit niedrigen Energien stark zu.
- Dadurch **häufen** sich die Wechselwirkungen am Ende der Flugbahnen.



I. Wechselwirkungen von Strahlung und Materie

- I. Strahlungsarten
- II. Wechselwirkungen indirekt ionisierender Strahlung
- III. Wechselwirkungen direkt ionisierender Strahlung

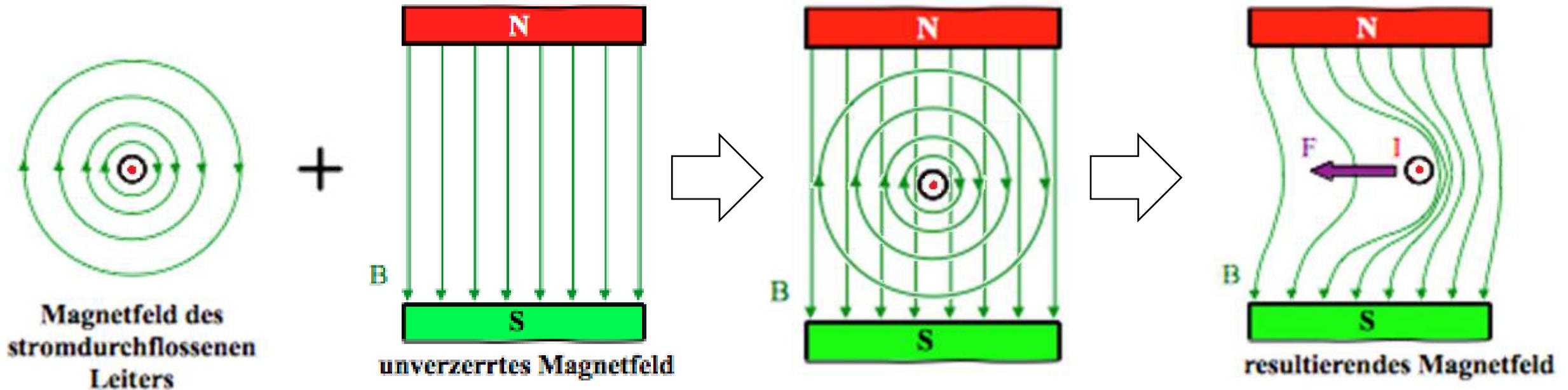
IV. Wechselwirkung mit Magnetfeldern

II. Dosisbegriffe

III. Dosisverteilung in klinischen Strahlungsfeldern

Wechselwirkung

- Auf bewegte, *geladene* Teilchen wirkt in Magnetfeldern die **Lorentzkraft**.



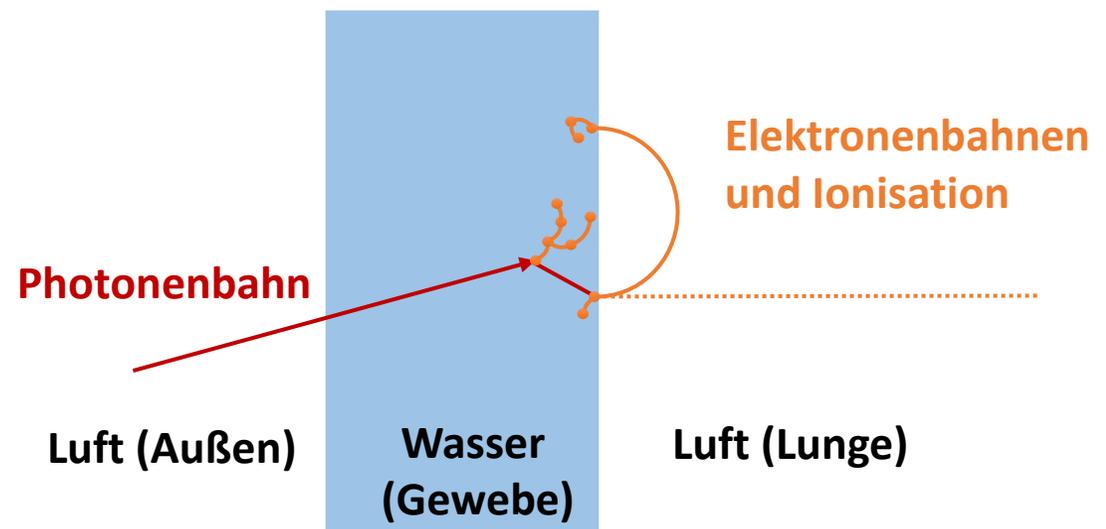
Wechselwirkung

- Die Lorentzkraft wirkt stets orthogonal zur Bewegungsrichtung (Zentripetalkraft), sodass die Teilchen auf **Kreisbahnen** gelenkt werden.
- Der Bahnradius hängt von der **Masse** und von der **Geschwindigkeit** der Teilchen ab.
- Leichte Elektronen sind daher besonders stark betroffen (Electron Return Effect).

$$F_Z = F_L$$

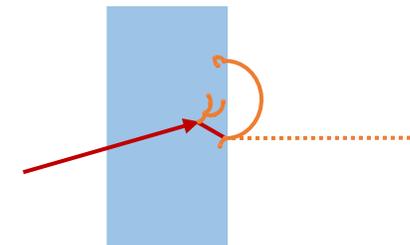
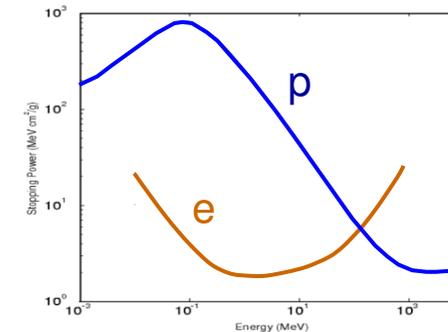
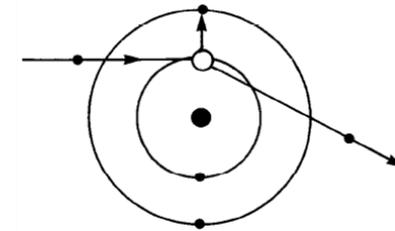
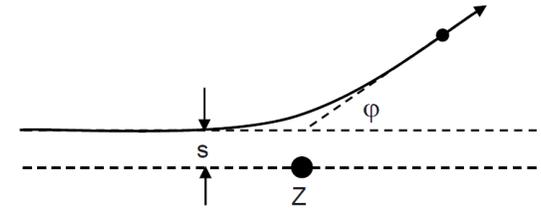
$$m \cdot \frac{v^2}{r} = q \cdot v \times \vec{B}$$

$$r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$$



Zusammenfassung III

- Die Art der Wechselwirkung hängt vom **Stoßparameter** ab.
- Durch weiche Kollisionen verlieren geladene Teilchen **kontinuierlich** Energie.
- Der kontinuierliche Energieverlust durch Wechselwirkungen wird durch das **Bremsvermögen** beschrieben.
- Direkt ionisierende Strahlung hat eine endliche **Reichweite**.
- Geladene, bewegte Teilchen werden in **Magnetfeldern** auf Kreisbahnen gelenkt



I. Wechselwirkungen von Strahlung und Materie

I. Strahlungsarten

II. Wechselwirkungen indirekt ionisierender Strahlung

III. Wechselwirkungen direkt ionisierender Strahlung

IV. Wechselwirkung mit Magnetfeldern

II. Dosisbegriffe

III. Dosisverteilung in klinischen Strahlungsfeldern

- Aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungen ist eine **Messgröße** zur quantitativen Beschreibung der Wirkungen ionisierender Strahlung wichtig.
- Es gibt verschiedene Wirkungen, z.B.
 - Biologische Wirkungen
 - Thermische Erwärmung
 - Erzeugung von schnellen Elektronen
 - ...
- Folglich gibt es **verschiedene Dosisgrößen**.

- Von einer auf ein Objekt treffenden Strahlung wird nur der absorbierte Teil wirksam. (Grotthus-Draper-Gesetz)
- Daher basieren alle Dosisbegriffe auf einer genauen **Analyse der Absorptionsvorgänge**.
 - Die Dosisbegriffe quantifizieren die verschiedenen Formen der **Energieübertragung**.
 - Einige Dosisbegriffe quantifizieren zusätzlich die **Empfindlichkeit des Absorbers**.

Dosisbegriffe

Energiedosis

Einheit: Gray (Gy)

Gibt die durch Strahlung auf das Gewebe übertragene Energie an.

Äquivalentdosis

Einheit: Sievert (Sv)

Wichtet die Energiedosis anhand der biologischen Wirksamkeit der Strahlungsart. Misst die mikroskopische Verteilung der übertragene Energie

Effektivdosis

Einheit: Sievert (Sv)

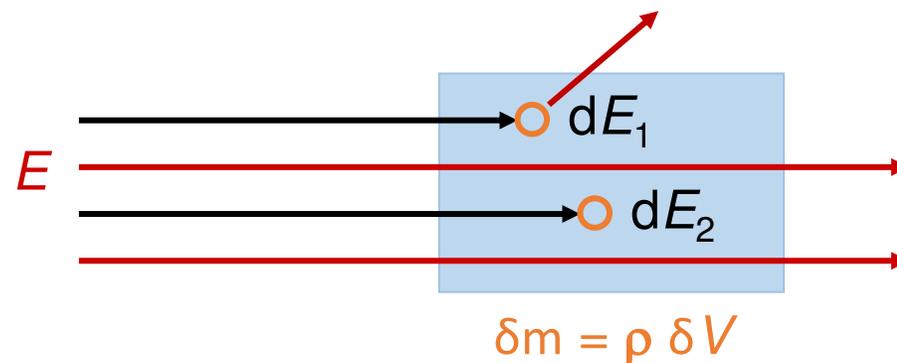
Wichtet die Äquivalentdosis anhand der Strahlungsempfindlichkeit des bestrahlten Gewebes.

Dosisbegriffe

- Die **Energiedosis** misst die lokal absorbierte Energie E_{abs} pro Masse m des bestrahlten Volumens V .

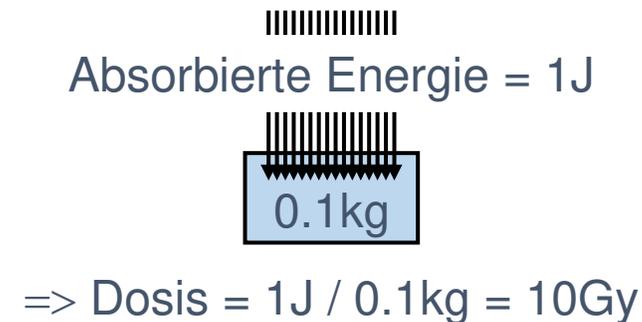
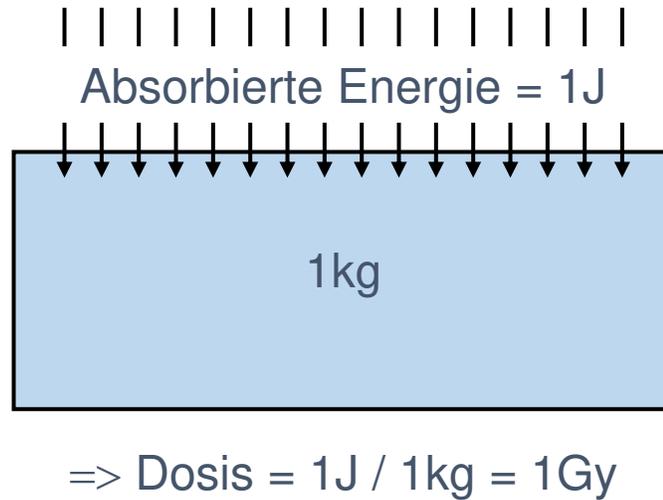
$$D = \frac{\delta E_{abs}}{\delta m} = \frac{1}{\rho} \frac{\delta E_{abs}}{\delta V}$$

- Die Einheit 1 Joule pro 1 Kilogramm, das Gray (Gy).



Dosisbegriffe

- Der Quotient bedeutet, dass die gleiche Energie bei weniger Masse wirksamer ist.
- Deshalb die Normierung auf Masse bei der Definition der Dosisgröße



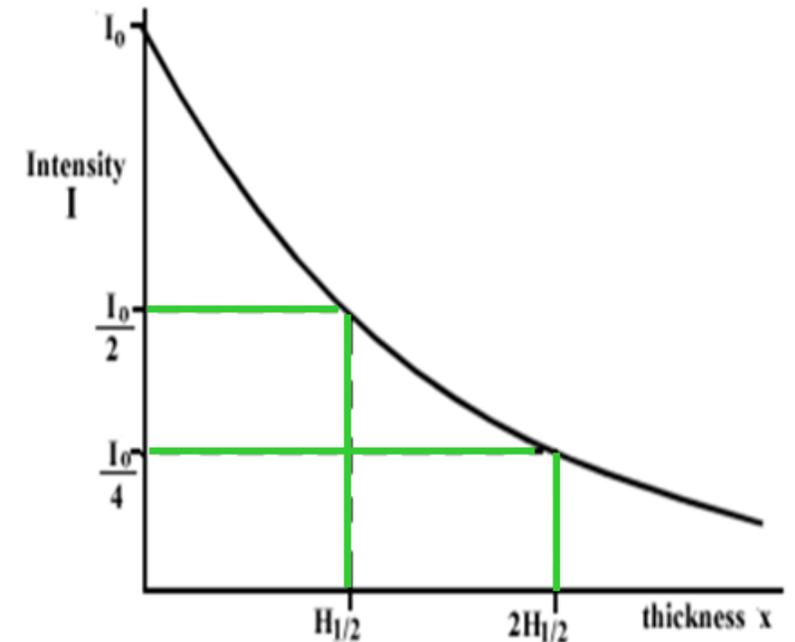
- Die Definition der Energiedosis ignoriert die **Herkunft** der energiedeponierenden Teilchen.
- Sie beschreibt das **Endergebnis** des Energiedeponierungsprozesses
- Für indirekt ionisierende Strahlung wird für theoretische Zwecke das **KERMA** als Beschreibende Größe verwendet.
 - Kerma = “kinetic energy released per unit mass”
 - Es beschreibt den 1. Wechselwirkungsschritt (Energieabgabe an Sekundärelektronen)
 - Die Einheit ist ebenfalls das Gray.

- I. Wechselwirkungen von Strahlung und Materie
 - I. Strahlungsarten
 - II. Wechselwirkungen indirekt ionisierender Strahlung
 - III. Wechselwirkungen direkt ionisierender Strahlung
 - IV. Wechselwirkung mit Magnetfeldern
- II. Dosisbegriffe
- III. **Dosisverteilung in klinischen Strahlungsfeldern**

- *Erinnerung*: Die **Energieübertragung** an Materie (Dosiserzeugung) geschieht vorwiegend über **geladene Teilchen**.
- **Ungeladene Teilchen** sind indirekt ionisierend. Sie erzeugen geladene Sekundärstrahlung.
- Zum Verständnis der **Dosisverteilungen** geladener und ungeladener Strahlungsfelder sind die geladenen Teilchen entscheidend.

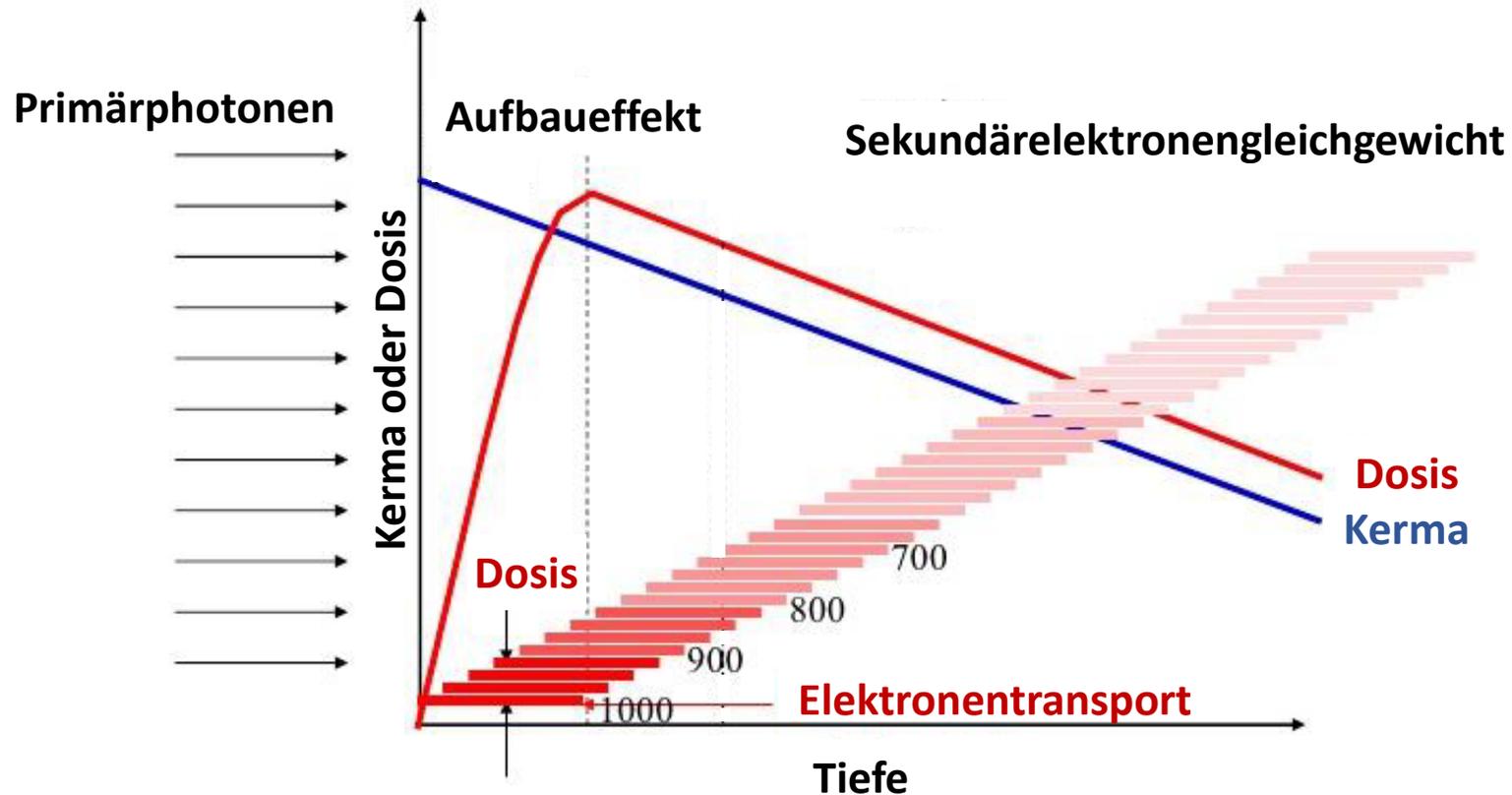
Dosisverteilung

- Durch Photonenstrahlung wird zunächst **Sekundärelektronenstrahlung** freigesetzt.
- Die Energiemenge, die auf Sekundärelektronen übertragen wird, misst das **KERMA**.
- Durch diese Energieübertragung nimmt die Photonenfluenz mit der Tiefe ab (**Lambert-Beer**).



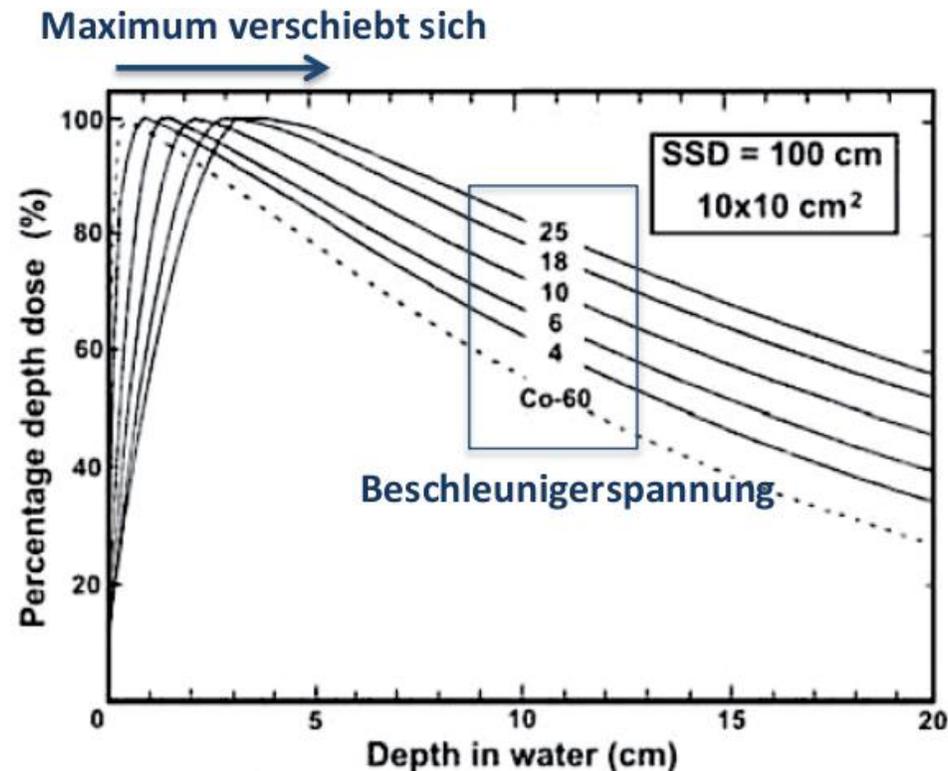
Dosisverteilung

- Dadurch, dass die Dosisdeposition Maßgeblich durch die Sekundärelektronen geschieht, gleicht die Dosisverteilung nicht der Kermaverteilung (**Aufbaueffekt**).



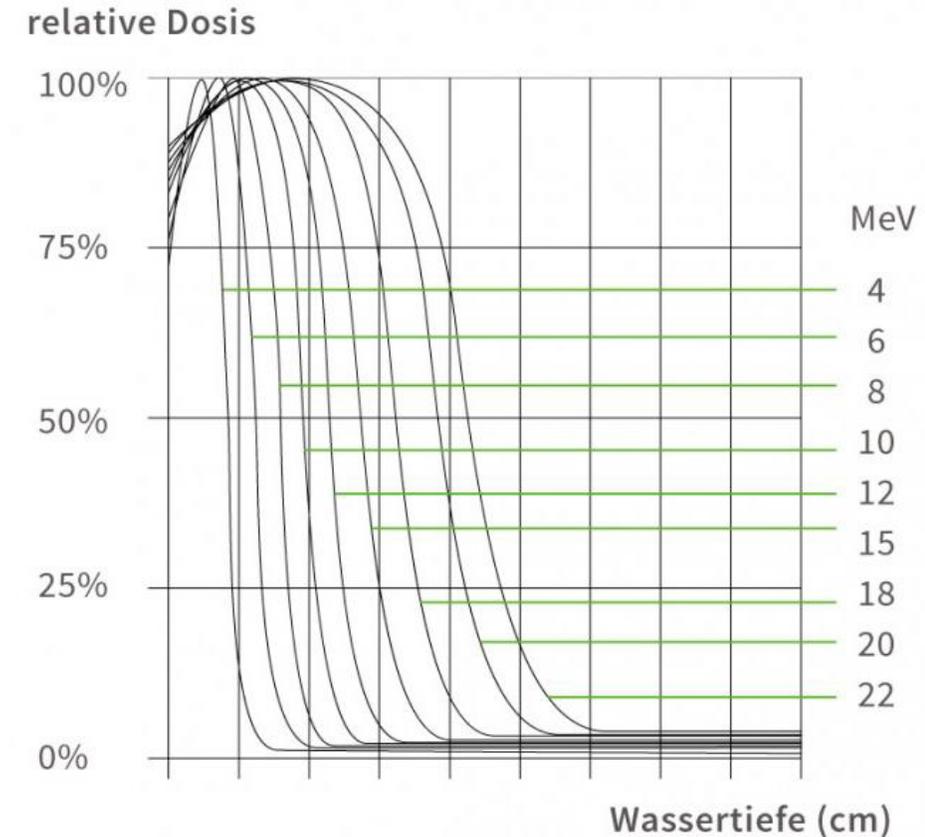
Dosisverteilung

- Die Lage des Dosismaximums ist von der Reichweite der Sekundärelektronen abhängig.
- Deswegen verschiebt sich das Dosismaximum bei höheren Photonenenergien in die Tiefe.



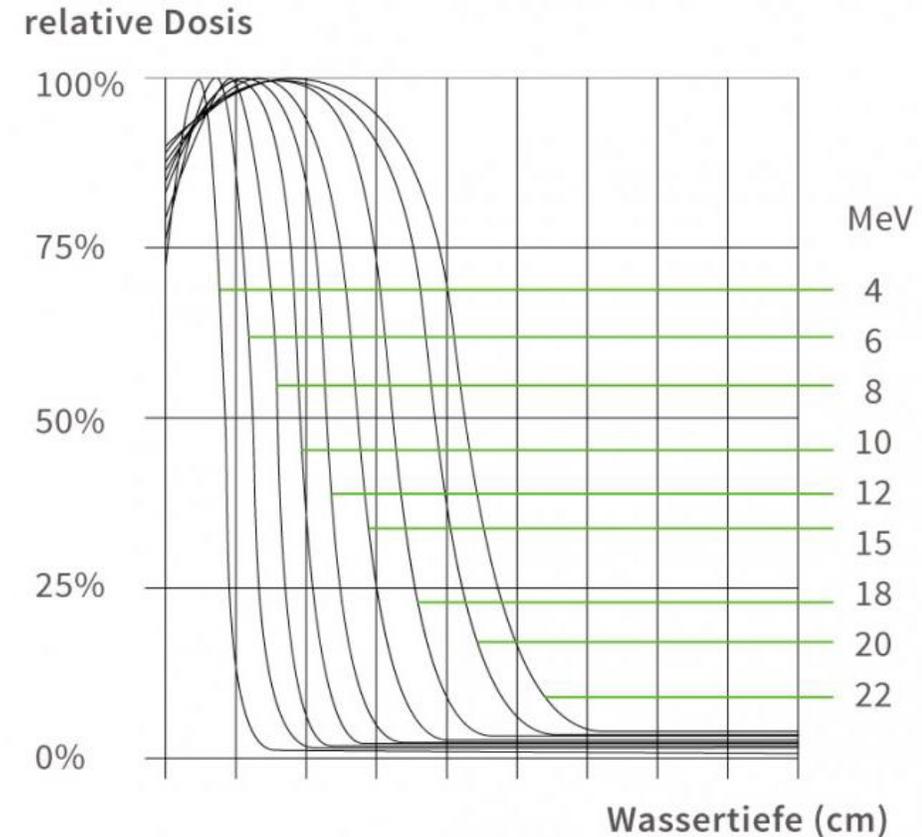
Dosisverteilung

- Der Tiefendosisverlauf von **Elektronen** ist geprägt durch die kontinuierliche Energieabgabe und Streuung.
- Der **Dosisaufbau** ist durch Streuung bedingt und
 - Abhängig von Feldgröße und Beschleuniger
 - Abhängig vom Tubus und Fokus-Oberflächenabstand



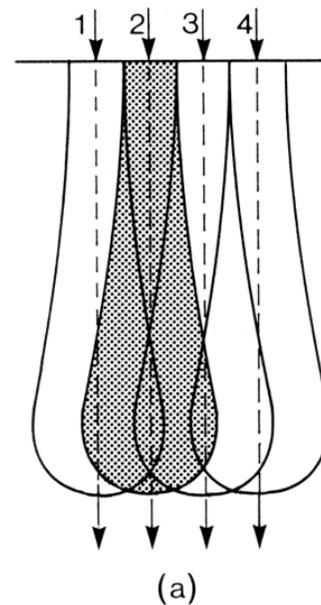
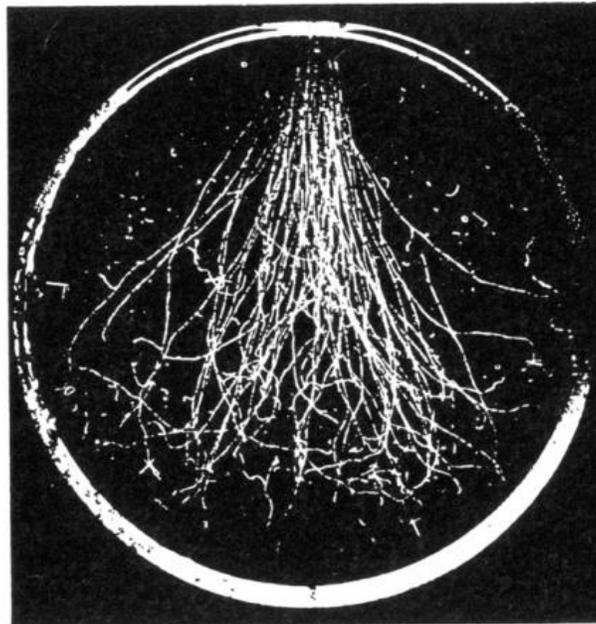
Dosisverteilung

- Der **Dosisabfall** ist durch das “unscharfe” Ende der Eindringtiefe durch Streuung bedingt.
- Bei hohen Energien kommt es zu **Ausläufern** durch Bremsstrahlung



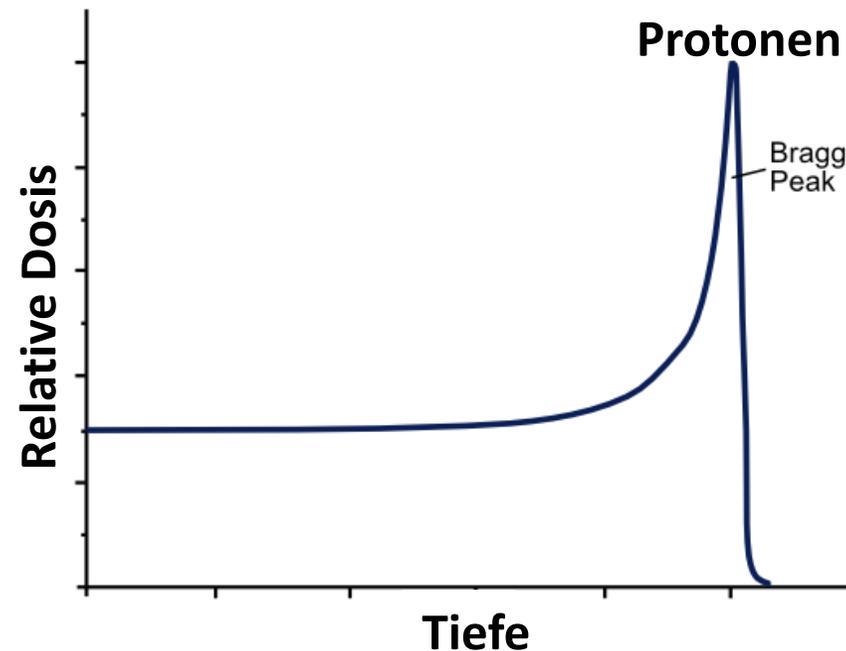
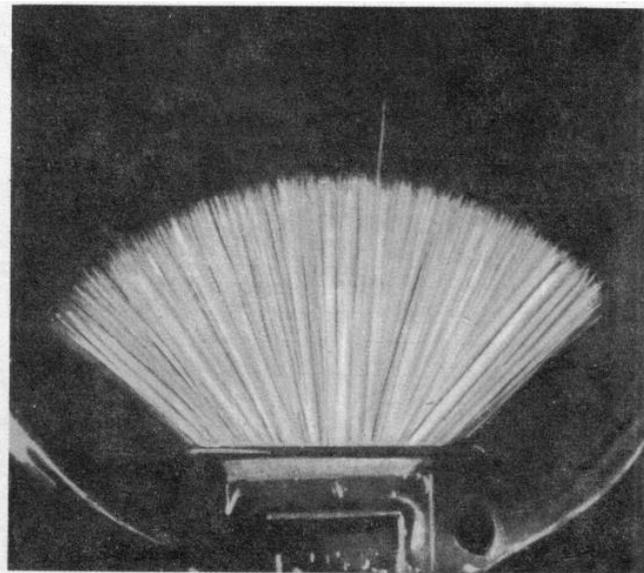
Dosisverteilung

- Durch die starke seitliche Streuung mit zunehmender Tiefe ist die geometrische Feldgröße bei Elektronen oft $< 50\%$ der Isodose.



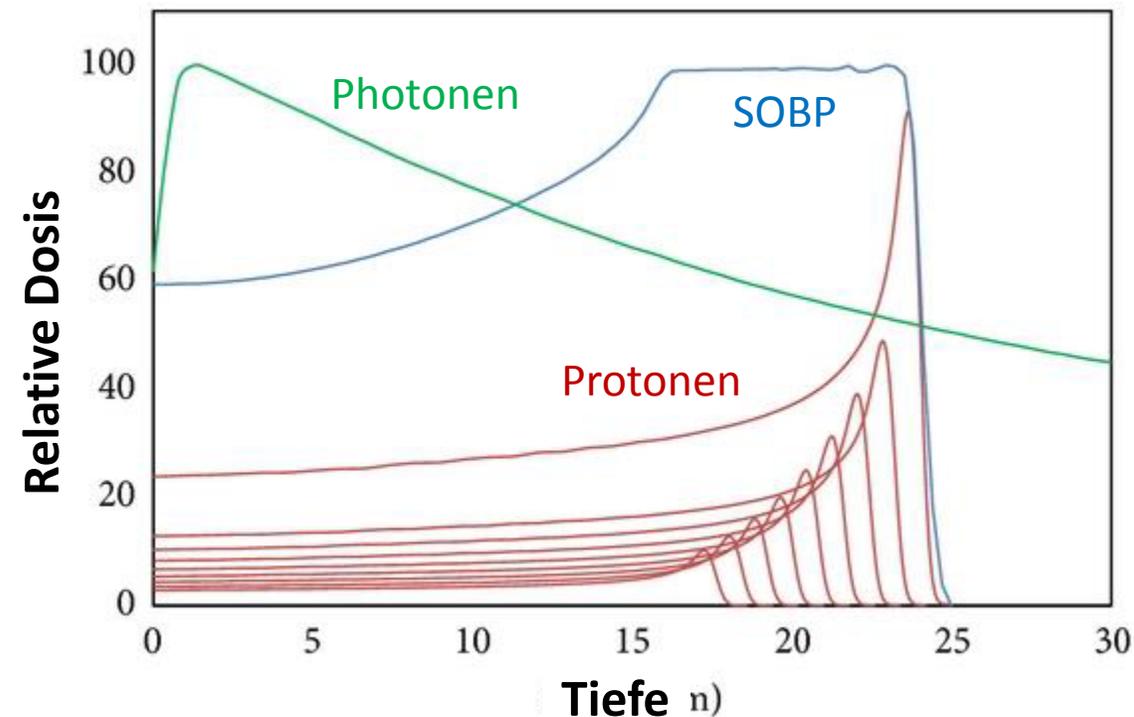
Dosisverteilung

- Bei **Protonen** sind zwei Effekte additiv wichtig für die Dosisverteilung
 - Geringe Streuung aufgrund der **Massenträgheit**.
 - **Zunahme der Bremswirkung** bei geringeren Geschwindigkeiten
- Dadurch kommt es zu einer sehr großen Ionisationsdichte am Ende der Teilchenbahnen (Bragg Peak)



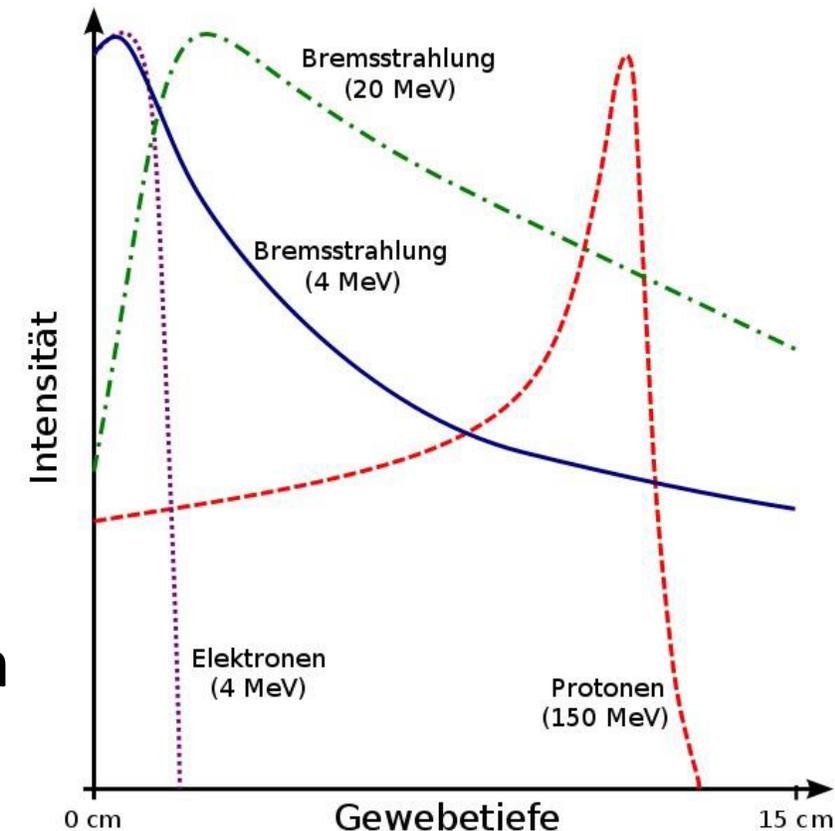
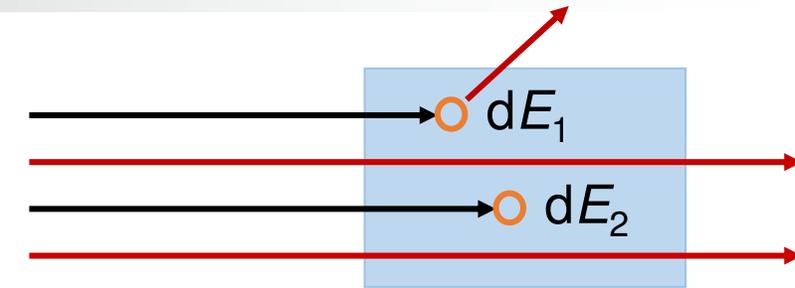
Dosisverteilung

- Um ein Zielvolumen homogen abzudecken werden durch Energievariation mehrere Bragg-Peaks überlagert (spread-out Bragg Peak SOBP)



Zusammenfassung IV

- Die energiedeponierende Wirkung von ionisierender
- Strahlung wird als **Dosis** gemessen.
- Es gibt verschiedene **Dosisgrößen**, die alle auf den Wechselwirkungsmechanismen zwischen Strahlung und Materie basieren.
- Die **Dosisverteilungen** der verschiedenen Strahlungsqualitäten ist wegen unterschiedlicher Ladung, Masse und Energie verschieden.
- **Photonen** haben theoretisch eine unendliche Reichweite und produzieren direkt ionisierende Sekundärstrahlung, die für den Großteil der Ionisation verantwortlich ist.



Zusammenfassung IV

- **Geladene Strahlung** (Elektronen, Protonen) hat eine endliche Reichweite.
- **Elektronen** streuen stark, daher ist die Eindringtiefe verschmiert.
- **Protonen** zeigen stärkere Wechselwirkung, wenn sie langsamer sind und haben eine scharf definierte Reichweite.
 - Das Zusammenspiel dieser Effekte führt zum **Bragg Peak**.

