

RC - 06



2.2 Gesetzliche Grundlagen des Strahlenschutzes

- Grundsätze und Schutzmaßnahmen im Strahlenschutz

Strahlenschutzgrenzwerte

- **in Gesetzen und Verordnungen niedergelegt**
- **Strahlenschutzgrundsätze und Regelungen von internationalen Gremien (IAEO, WHO, EURATOM) basieren meist auf Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (International Commission on Radiological Protection, ICRP)**
- **Weg zu Grenzwerten**
 - **1925 bei Röntgenpersonal, 1 % der Dosis innerhalb von 30 d die eine Hautrötung hervorrufen**
 - **1934 ICRP 0,2 Röntgen (2 m Sv) pro Tag**
 - **1950 ICRP 0,6 Rem / Woche (6 mSv / Woche oder 0,5 Sv / a) für Haut, andere Organe (z. B. Gonaden, Augenlinse geringer)**
 - **heute: ICRP 0,5 mSv / a für Bevölkerung resultierend aus Einsatz ionisierender Strahlung nicht zu überschreiten**

Voraussetzungen für Strahlenschutzempfehlungen

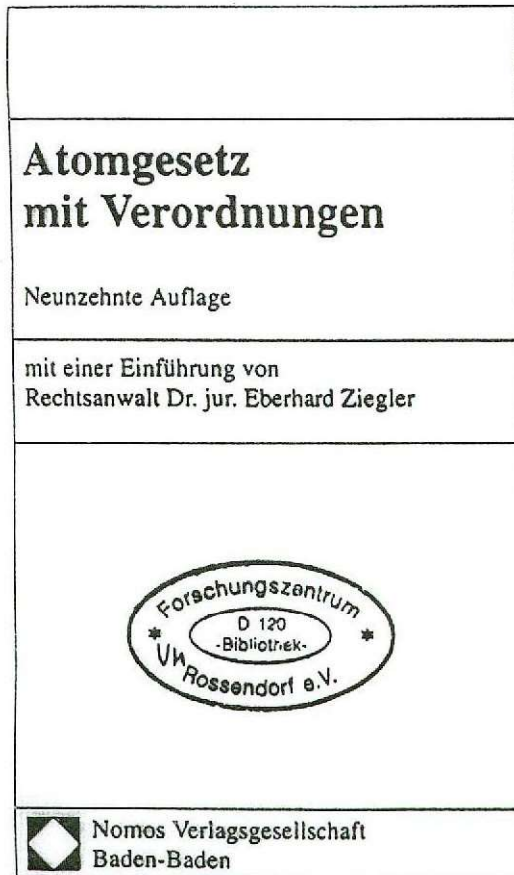
- kein Umwelteinfluss, der Spätschäden verursachen kann, ist so genau untersucht wie die Einwirkung ionisierender Strahlung
- Erfahrungen der Strahlenschädigungen auf Menschen sind bei hoher Dosis gemacht worden, Vorbehalt bei Tier-Mensch-Übertragung
- im Dosisbereich der natürlichen Strahlenexposition konnten keine statistisch gesicherten Auswirkungen bei unterschiedlichen Belastungen gemacht werden (BRD: 500 – 800 μGy / a Indien Kerala (Monazit CePO_4 , [Th]) 10 mGy / a durch terrestrische Strahlung)

... im 1980 erschienenen Bericht des Komitees zur Beurteilung biologischer Effekte durch ionisierende Strahlung der nationalen Akademie der Wissenschaften in den Vereinigten Staaten von Amerika zum Problem niedriger Dosis:

„Das Komitee weiß nicht, ob Gamma- oder Röntgenstrahlung von etwa 1 mGy pro Jahr für den Menschen schädlich ist. Jede somatische Wirkung bei dieser Dosisrate würde von Umwelt- und anderen Faktoren überdeckt, die dieselbe somatische Wirkung wie ionisierende Strahlen hervorrufen können. Für höhere Dosisraten, beispielsweise einige zehn mGy / a über eine lange Zeitspanne, könnte sich ein erkennbarer karzinogener Effekt manifestieren.“

Gesetzliche Grundlagen

StrlSchV



Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV)

Vom 13. Oktober 1976 (BGBl. I S. 2905, 1977 S. 184, 269)
in der Fassung der Bekanntmachung vom 30. Juni 1989 (BGBl. I
S. 1321, ber. S. 1926)¹⁾ (BGBl. III 751-I-1)
zuletzt geändert durch Medizinproduktegesetz vom 2. August 1994
(BGBl. I S. 1963, 1981)

1) Bekanntmachung der Neufassung der Strahlenschutzverordnung

Vom 30. Juni 1989

Auf Grund des Artikels 2 der Zweiten Verordnung zur Änderung der Strahlenschutzverordnung vom 18. Mai 1989 (BGBl. I S. 943) wird nachstehend der Wortlaut der Strahlenschutzverordnung in der ab 1. November 1989 geltenden Fassung bekanntgemacht. Die Neufassung berücksichtigt:

1. die am 1. April 1977 in Kraft getretene Verordnung vom 13. Oktober 1976 (BGBl. I S. 2905; 1977 I S. 184, 269),
2. den am 1. Januar 1978 in Kraft getretenen Artikel 2 der Verordnung vom 12. Dezember 1977 (BGBl. I S. 2537),
3. den am 1. September 1979 in Kraft getretenen § 19 der Verordnung vom 23. August 1979 (BGBl. I S. 1509),
4. den am 1. Oktober 1981 in Kraft getretenen Artikel 2 der Verordnung vom 8. Mai 1981 (BGBl. I S. 422),
5. den am 1. Juni 1981 in Kraft getretenen Artikel 1 der Verordnung vom 22. Mai 1981 (BGBl. I S. 445),
6. den mit Wirkung vom 6. Juni 1986 in Kraft getretenen Artikel 15 der Verordnung vom 26. November 1986 (BGBl. I S. 2089),
7. den am 1. Januar 1988 in Kraft getretenen § 44 der Verordnung vom 8. Januar 1987 (BGBl. I S. 114),
8. den am 1. November 1989 in Kraft tretenden Artikel 1 der eingangs genannten Verordnung.

Die Rechtsvorschriften wurden erlassen auf Grund

- zu 1. der §§ 10 bis 12 und 54 Abs. 1, Abs. 2 Satz 1 und Abs. 3 des Atomgesetzes vom 23. Dezember 1959 (BGBl. I S. 814), wovon § 11 durch Artikel 1 Nr. 6 und 7 des Vierten Gesetzes zur Änderung des Atomgesetzes vom 30. August 1976 (BGBl. I S. 2573),

Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission
Band 31

Herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit

Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 1992/93

Recommendations and Statements of the Commission on Radiological Protection 1992/93



Stuttgart Jena Lübeck Ulm

Bezüge zu Gesetzen und Verordnungen

- **Atomgesetz:**

§ 9 a: Verwertung radioaktiver Reststoffe und Beseitigung radioaktiver Abfälle

(1) Wer Anlagen, in denen mit Kernbrennstoffen umgegangen wird, ... betreibt ..., hat dafür zu sorgen, dass anfallende radioaktive Reststoffe ... schadlos verwertet oder als radioaktive Abfälle geordnet beseitigt werden (direkte Endlagerung).

(2) Wer radioaktive Abfälle besitzt, hat diese an eine Anlage nach Absatz 3 abzuliefern ...

(3) Die Länder haben Landessammelstellen für die Zwischenlagerung der radioaktiven Abfälle, der Bund hat Anlagen zur Sicherstellung der Endlagerung radioaktiver Abfälle einzurichten ...

- **Strahlenschutzverordnung**

Vierter Teil: Ablieferung radioaktiver Abfälle

§ 81 Ablieferung an Anlagen des Bundes

§ 82 Ablieferung an Landessammelstellen

§ 83 Ausnahme und Befreiung von der Ablieferungspflicht

§ 86 ... bis zur Inbetriebnahme der Anlagen des Bundes § 81 - Zwischenlagerungspflicht

Strahlenschutzverordnung

Strahlenschutz- verordnung

Textausgabe mit Anmerkungen
von Ministerialrat a.D. Dipl.-Ing. Ernst Witt,
und Ministerialrat a.D. Dipl.-Phys. Erich Jäger
und Regierungsdirektor Dr. Lorenz Kasper

11. Auflage 2001

Carl
Heymanns
Verlag

Bestell-Nr. CHV 10 (ZH 1/241)

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort.....	4
Strahlenschutzverordnung mit Anlagen I bis XIV.....	6
Übersicht 1	
Zuständige Landesbehörden für den Umgang mit radioaktiven Stoffen.....	215
Übersicht 2	
Zuständige Landesbehörden für die Beförderung radioaktiver Stoffe	216
Übersicht 3	
Landessammelstellen für radioaktive Abfälle	217
Übersicht 4	
Grenzwerte der Körperdosen im Kalenderjahr durch Tätigkeiten.....	218
Übersicht 5	
Strahlenschutzbereiche	219
Übersicht 6	
Übersicht über die Strahlenschutzbereiche.....	220
Stichwortverzeichnis.....	221

Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV)

- vom 20. Juli 2001 (BGBl I S. 1714)
- Inhaltsübersicht
 - Teil 1 Allgemeine Vorschriften
 - Teil 2 Schutz von Mensch und Umwelt vor radioaktiven Stoffen oder ionisierender Strahlung aus der zielgerichteten Nutzung bei Tätigkeiten
 - Kapitel 1 Strahlenschutzgrundsätze, Grundpflichten und allgemeine Grenzwerte
 - Kapitel 2 Genehmigungen, Zulassungen, Freigabe
 - Kapitel 3 Anforderungen bei der Nutzung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung
 - Kapitel 4 Besondere Anforderungen bei der medizinischen Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung
 - Teil 3 Schutz von Mensch und Umwelt vor natürlichen Strahlungsquellen bei Arbeiten
 - Kapitel 1 Grundpflichten
 - Kapitel 2 Anforderungen bei terrestrischer Strahlung an Arbeitsplätzen
 - Kapitel 3 Schutz der Bevölkerung bei natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen
 - Kapitel 4 Kosmische Strahlung
 - Kapitel 5 Betriebsorganisation
 - Teil 4 Schutz des Verbrauchers beim Zusatz radioaktiver Stoffe zu Produkten
 - Teil 5 Gemeinsame Vorschriften
 - Kapitel 1 Berücksichtigung der Strahlenexposition
 - Kapitel 2 Befugnisse der Behörde
 - Kapitel 3 Formvorschriften
 - Kapitel 4 Ordnungswidrigkeiten
 - Kapitel 5 Schlussvorschriften

Anlagen

-
-
-
- | | |
|---------------|---|
| - Anlage I | Genehmigungsfreie Tätigkeiten |
| - Anlage II | Erforderliche Unterlagen zur Prüfung von Genehmigungsanträgen |
| - Anlage III | Freigrenzen, Freigabewerte ..., Liste der Radionuklide im radioaktiven Gleichgewicht |
| - Anlage IV | Festlegungen zur Freigabe |
| - Anlage V | Voraussetzungen für die Bauartzulassung von Vorrichtungen |
| - Anlage VI | Dosimetrische Größen, Gewebe- und Strahlungswichtungsfaktoren |
| - Anlage VII | Annahmen bei der Ermittlung der Strahlungsexposition |
| - Anlage VIII | Ärztliche Bescheinigung |
| - Anlage IX | Strahlenzeichen |
| - Anlage X | Radioaktive Abfälle: Benennung, Buchführung, Transportmeldung |
| - Anlage XI | Arbeitsfelder bei denen erheblich erhöhte Expositionen durch natürlich terrestrische Strahlungsquellen auftreten können |
| - Anlage XII | Verwertung und Beseitigung überwachungsbedürftiger Rückstände |
| - Anlage XIII | Information der Bevölkerung |
| - Anlage XIV | Leitstellen des Bundes für die Emissions- und Immissionsüberwachung |

Betriebliche Anordnungen

HZDR HELMHOLTZ ZENTRUM DRESDEN ROSSENDORF	Labor- und Strahlenschutzordnung für den Raum 16.1 im KB RCL	Datum: 28.02.2013 Revisions-Nr.: 7 Seite: 1
--	---	---

1 Geltungsbereich: Radiochemisches Laborgebäude, Gebäude 850, Kontrollbereich RCL
Raum 16.1, Radiochemisches Labor

2 Nutzer: Institut für Ressourcenökologie, Abtg. FWOG

3 Strahlenschutzverantwortlichkeit:

- Strahlenschutzverantwortlicher: Prof. P. Joehnk Tel. 3374, Geb. 10, Z. 209
- Strahlenschutzbevollmächtigter: A. Beutmann Tel. 3695, Geb. 613, Z. 135
- Strahlenschutzbeauftragter (SSB): H. Heim Tel. 2886, Geb. 801, Z. P216
- Vertreter des " : Dr. T. Arnold Tel. 2432, Geb. 801, Z. P253
Dr. V. Brendler Tel. 3210, Geb. 801, Z. P245
Dr. H. Foerstendorf Tel. 3664, Geb. 801, Z. P251
Dr. G. Geipel Tel. 2306, Geb. 801, Z. P248
K. Gückel Tel. 2895, Geb. 801, Z. P205
Dr. K. Müller Tel. 2438, Geb. 801, Z. P205
Dr. S. Sachs Tel. 2436, Geb. 801, Z. P208
Dr. K. Schmeide Tel. 2436, Geb. 801, Z. P208
S. Weiß Tel. 2434, Geb. 801, Z. P201
Dr. H. Zänker Tel. 3209, Geb. 801, Z. P217

- Strahlenschutztechniker (SST): A. Rumpel Tel. 2429, Geb. 801, Z. P203
Tel. 2550, Geb. 850, Z. 05.3

- Vertreter des " : S. Henke, Ch. Müller, A. Ritter, S. Gürtler, S. Weiß
C. Eckardt, K. Gückel

- für KB RCL zuständiger Strahlenschutzingenieur:
N. Fröhlich Tel. 3406, Geb. 801, Z. P126

4 Genehmigungsnummer: O/1731/04/2, vom LFUG am 05.12.2006 erteilt

5 Raumverantwortlicher: Dr. R. Steudtner Schreibraum Z. P205, Geb. 801, Tel. 2895

6 Zutrittsberechtigte: Dr. N. Jordan
Dr. K. Müller

7 Angaben zum Brand-/Arbeitsschutz: Standort Feuerlöscher
Brandmelder
Löschbrause
Erste-Hilfe-Kasten
Augendusche

alle Angaben s. Anlage 1

Sicherheitsingenieur: Herr S. Seifert Tel. 3366
Brandschutzbeauftragter: Herr H.-G. Last Tel. 2845

Ersthelfer: C. Müller, Labor 15.1, Schreibraum Z. P203 Geb. 801
I. Zirnstein, Labor 115.1, Schreibraum Z. P254 Geb. 801
C. Eckardt, Labor 102.1, Schreibraum Z. P219 Geb. 801
S. Gürtler, Labor 15.1, Schreibraum Z. P203 Geb. 801
A. Ritter, Labor 101.1, Schreibraum Z. P203 Geb. 801

Ermächtigter Arzt: Frau Dr. med. B. Dietrich, (Anmeldung über Tel. 2600)
Fluchtweg: siehe Anlage 2

HZDR	Strahlenschutzanweisung Nr. 12	Datum: 06.05.2011 Rev.: 3 Seite: 1 von 5
-------------	---	--

Thema:

STRALENSCHUTZANWEISUNG NR. 12

**Zur Beschäftigung von Mitarbeitern des HZDR am Forschungsstandort
Rossendorf in fremden Einrichtungen**

Registriernummer: SSA 12

	erstellt	geändert	geprüft	geprüft
OE	KSB	VKTA / KSI	SSBV	HZDR / FKTS
Name	Dr. G. Gehre	D. Löhnert	Prof. Dr. P. Sahre	Dr. T. Jentsch
Datum	11.01.1993	06.05.2011	10.6.11	14. JUN. 2011
Unterschrift	gez. Gehre	<i>v. 20</i>	<i>Sal</i>	<i>M. J.</i>

	geprüft	geprüft	freigegeben	in Kraft gesetzt
OE	HZDR / FS		HZDR / SSV	HZDR / SSV
Name	G. Zwicker		Prof. Dr. Dr. h.c. P. Joehnk	Prof. Dr. Dr. h.c. P. Joehnk
Datum	15.06.2011		17.6.11	1.8.2011
Unterschrift	<i>P. 20</i>		<i>Joehnk</i>	<i>Joehnk</i>

HZDR

Bearbeitung von radioaktiven Stoffen



HZDR



- Radiochemische Arbeiten werden in kontrollierten Laborbereichen unter Abzügen, in Handschuh-Boxen und abgeschirmten Zellen durchgeführt
- Ausmass und Art der Radioaktivität kann die chemische/biologische Reaktion beeinflussen

Einteilung Strahlenschutzbereiche

(E= effektive Dosis)

Betriebsgelände, allgemeines Staatsgebiet; $E \leq 1 \text{ mSv/a}$

Überwachungsbereich; $E > 1 \text{ mSv/a}$

Kontrollbereich; $E > 6 \text{ mSv/a}$

Sperrbereich; $E > 3 \text{ mSv/h}$

11.)

Quelle:

Schutzmaßnahmen beim Umgang mit radioaktiven Stoffen

Grundsatz:

Schutz des Mensch und Umwelt vor radioaktiven Stoffen oder ionisierender Strahlung aus der zielgerichteten Nutzung bei Tätigkeiten

Aktivitätsmenge - optimieren	Abstand - einhalten Strahlungsintensität nimmt mit dem Quadrat des Abstandes von der Quelle ab d.h. bei doppelter Entfernung – Verringerung auf 1/4	Abschirmung - optimieren Reichweite α -Strahler β -Strahler γ -Strahler beachten.
Aufenthaltszeit - möglichst kurz		

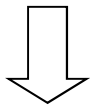


wichtige Arbeitsschritte vorher (ohne radioaktive Substanzen) testen

Schutzmaßnahmen beim Umgang mit radioaktiven Stoffen

Personenüberwachung lt. §40 StrlSchV

Ermittlung der Körperdosis nach §41 StrlSchV (Personendosis messen)

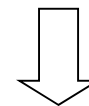


Inkorporationsmessung

Messung der im Körper gespeicherten oder ausgeschiedenen Aktivität

Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle zur Ermittlung der Körperdosen, Teil 1: Ermittlung der Körperdosis bei äußerer Strahlenexposition (§§40, 41, 42 StrlSchV; § 35 RöV)

- γ -spektrometrische Schilddrüsen- oder Ganzkörpermessung
- Ausscheidungsanalyse (α - und β -Strahler)



Dosimeter

Messung der externen Strahlendosis (Körperdosis); § 41 StrlSchV

- Amtliches Dosimeter
- Nichtamtliches Dosimeter

- Freigrenze (FG) lt. Strahlenschutzverordnung (StrlSchV):

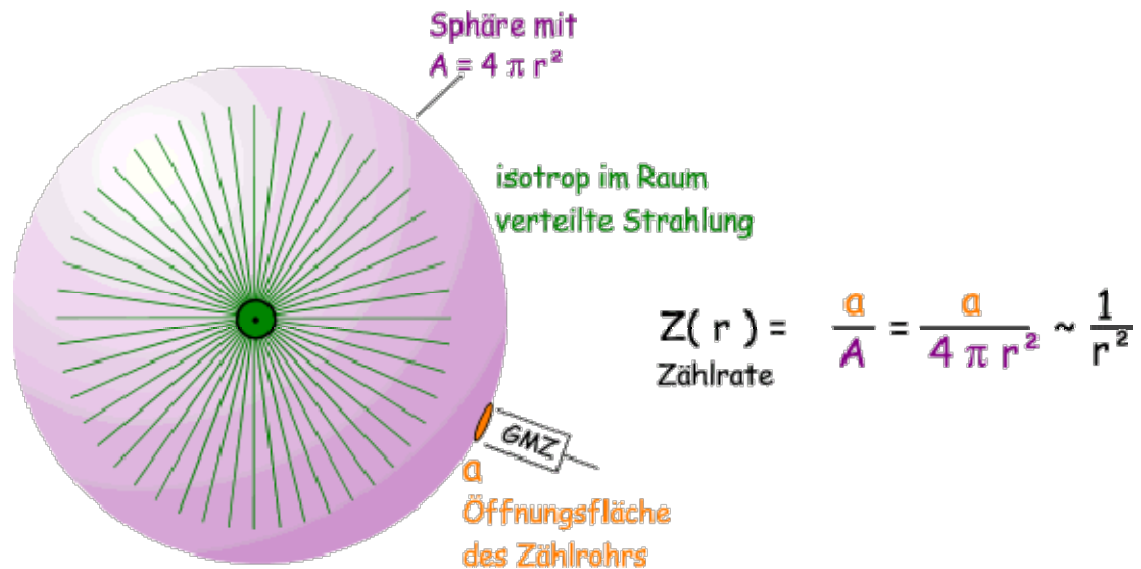
Aktivität bzw. spezifische Aktivität nach Anlage III Tabelle 1 Spalte 1 und 2 StrlSchV, bei deren Überschreitung → Überwachung /Genehmigung → Strahlenschutz erforderlich ist.

Wenn Aktivitätsmenge <FG sind keine Schutzmaßnahmen bezüglich des radioaktiven Stoffes notwendig (gesetzlich gefordert).

Beispiele für FG U nat 1E+4 Bq ca. 400 mg Uran
U-233 1E+4 Bq
C-14 1E+11Bq / 1E+7 Bq/g (als Dioxid)

Bestrahlung vs. Abstand

Abstandsgesetz gilt für punktförmige isotrope Strahler

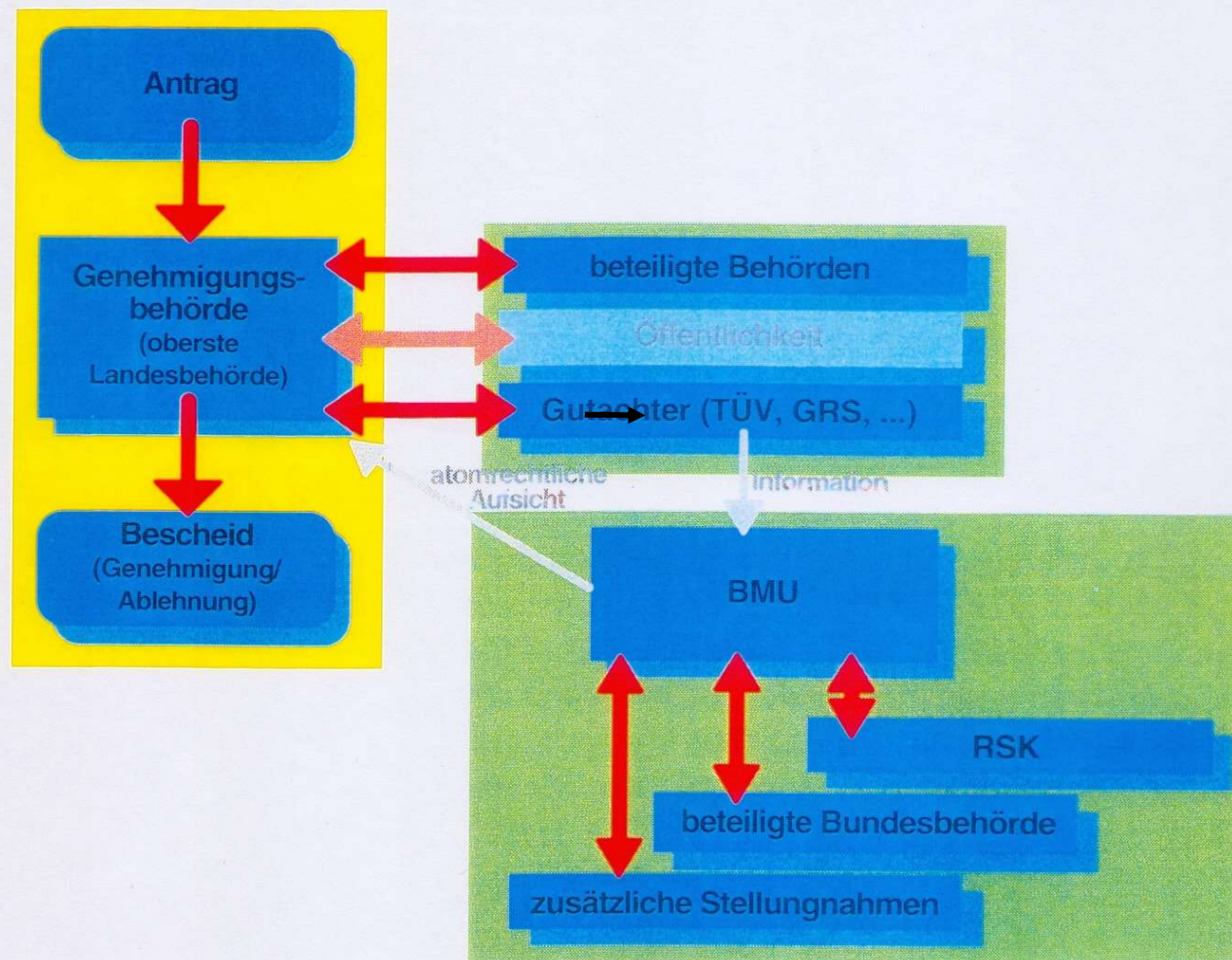


Schutzmaßnahmen beim Umgang mit radioaktiven Stoffen

Unterweisung zum strahlenschutzgerechtem Verhalten im Kontrollbereich lt. §38 StrlSchV

- Zutrittsverbot für Personen < 18 Jahre,
- Zutrittsverbot für Schwangere und Stillende und Personen nach medizinischem Einsatz von radioaktiven Stoffen (radiologische Untersuchungen)
- Strahlenschutzkleidung und Dosimeter tragen (Schutzbrille)
- nicht Essen, Rauchen, Trinken, keine Kosmetika anwenden
- Ausgangsmessung auf Kontamination der Körperoberflächen
(bei Kontamination – kein Ausgang!...Dekontamination)
- Anweisungen des Strahlenschutzpersonals Folge leisten

Wechselwirkungen zwischen Antragsteller, Behörden, Öffentlichkeit, anderen Beteiligten im Genehmigungsverfahren



11.)

Wechselwirkungen zwischen Antragsteller, Behörden, der Öffentlichkeit und anderen Beteiligten im Genehmigungsverfahren

2.3 Wechselwirkung Strahlung - Materie

- Grundprozesse

Strahlung – Stoff I

Ionisierende Strahlung

- Strahlung ausgehend von radioaktiven Nukliden, Röntgenanlagen und Teilchenbeschleunigern vermag beim Durchgang durch Stoffe, Atome und Moleküle anzuregen und zu ionisieren → **Ionisierende Strahlung**
- **direkt ionisierend**
geladene Teilchen mit nicht vernachlässigbarer Ruhemasse
kinetische Energie reicht aus, um durch Stoß Ionen zu erzeugen
 α -, β^+ -, β^- -Teilchen, p
- **indirekt ionisierend**
ungeladene Teilchen mit nicht vernachlässigbarer Ruhemasse (Neutronen) oder Photonen (Quanten der Röntgen und γ -Strahlung) mit Ruhemasse 0, die im durchstrahlten Stoff energiereiche Teilchen freisetzen oder Kernumwandlungen auslösen

Strahlung - Stoff II

- Wechselwirkungsprozess

durchdringt ionisierende Strahlung Stoffe, tritt diese mit Atomen in Wechselwirkung, durch die Wechselwirkung werden durchstrahlter Stoff und Strahlung beeinflusst

Strahlung:

erleidet **Energieverlust und Streuung**

Stoff:

auf den durchstrahlten Stoff wird **Energie** übertragen,
Auftreten von Erwärmung oder / und Veränderung der physikalischen, chemischen und biologischen Stoffeigenschaften



*...fundamentale Bedeutung für Nachweis und Anwendung
ionisierender Strahlung*

Strahlung – Stoff III

- **Um Wechselwirkung mit Stoffen/Materialschichten zu erklären, ist Verständnis der Wechselwirkung auf atomarer Ebene (Elementarprozesse) notwendig**
- **Unterschiedlichkeit der Wechselwirkung mit geladenen und ungeladenen Teilchen**

Wechselwirkung *geladener* Teilchen mit Atomen I

- *Direkte Ionisation* -

...geladene Teilchen können mit Hüllenelektronen oder Atomkernen in Wechselwirkung treten, wobei vier Wechselwirkungsarten zur Abbremsung beitragen...

Wechselwirkungsarten:

- *Elastische und unelastische Stöße*
mit Atomkernen
mit Hüllenelektronen

Wechselwirkung *geladener* Teilchen mit Atomen II

- Direkte Ionisation -

Elementarprozesse:

- **Unelastische Stöße mit Hüllenelektronen**

Anregung oder Ionisation der Atome (Abbremsung der Teilchen = *Ionisationsbremsung*, auftretender Energieverlust = Ionisationsverlust der Teilchen, Richtungsänderung der Teilchenbahnen bei Teilchen geringer Masse)

- **Elastische Stöße mit Hüllenelektronen**

spielen nur bei kleinen Teilchenenergien eine Rolle, Teilchenenergie wird gering verändert, da am Stoßprozess gesamtes Atom beteiligt ist

- **Unelastische Stöße mit Atomkernen**

durch Wechselwirkung mit Coulombfeldern Änderung der Teilchengeschwindigkeit nach Betrag und Richtung, Teilchen emittieren dabei eine elektromagnetische Strahlung = Bremsstrahlung, Energieverlust infolge von Photoemission =

Bremsstrahlverlust

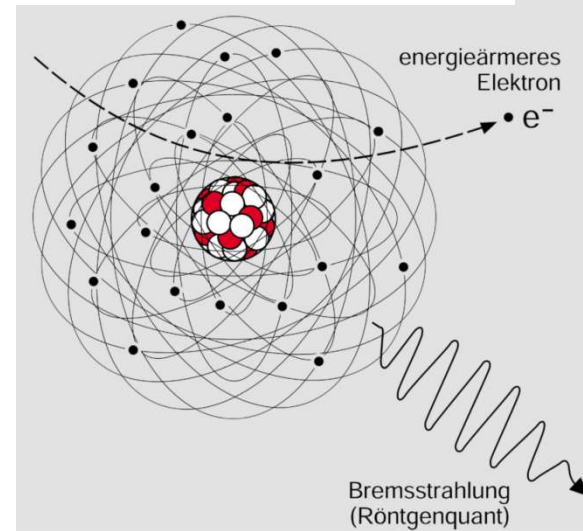
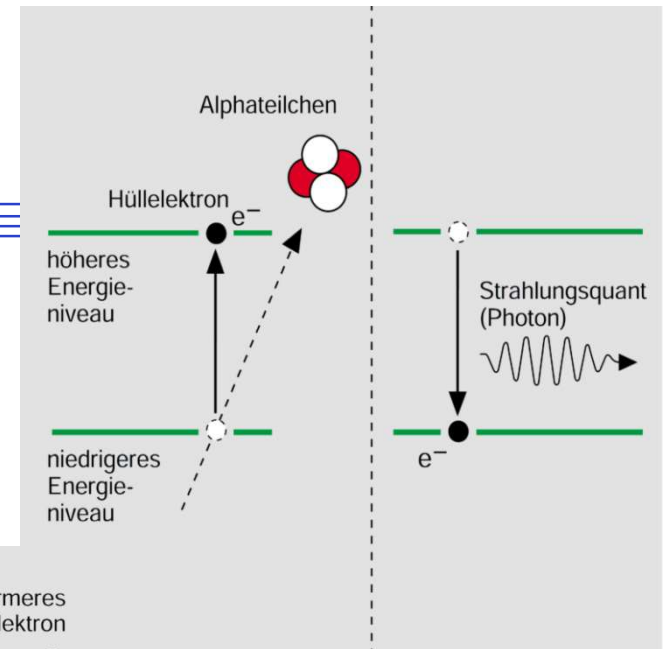
- **Elastische Stöße mit Atomkernen**

Ablenkung der Teilchen aus ihren Teilchenbahnen, infolge Impulsübertragung verlieren die Teilchen einen Teil ihrer Energie, Streuwinkel bei schw. Teilchen klein,

Energieverlust geladener Teilchen I

auf zwei Wegen:

- Ionisationsbremsung
- Strahlungsbremsung



11.)

Quelle:  Internationale Kernenergie

Energieverlust ist charakterisiert durch:

- mittleren differentiellen Energieverlust je Wegelement – (dE/dx) ,
- Größe wird auch als lineares Bremsvermögen bezeichnet. $S = - (dE/dx)$
- Division durch Dichte des Stoffes ρ ergibt das Massebremsvermögen S/ρ

Energieverlust geladener Teilchen II

- Ionisationsbremsung

- schwere geladene Teilchen (p, d, α , T, FP) verlieren Energie durch Ionisationsbremsung = durch sehr große Anzahl unelastischer Stöße mit den Hüllenelektronen, Abgabe von kleinen Energieteilbeträgen, Elektronen und Positronen verlieren ebenfalls durch unelastische Stöße mit den Hüllenelektronen ihre Energie, werden aber aufgrund ihrer kleinen Masse abgelenkt

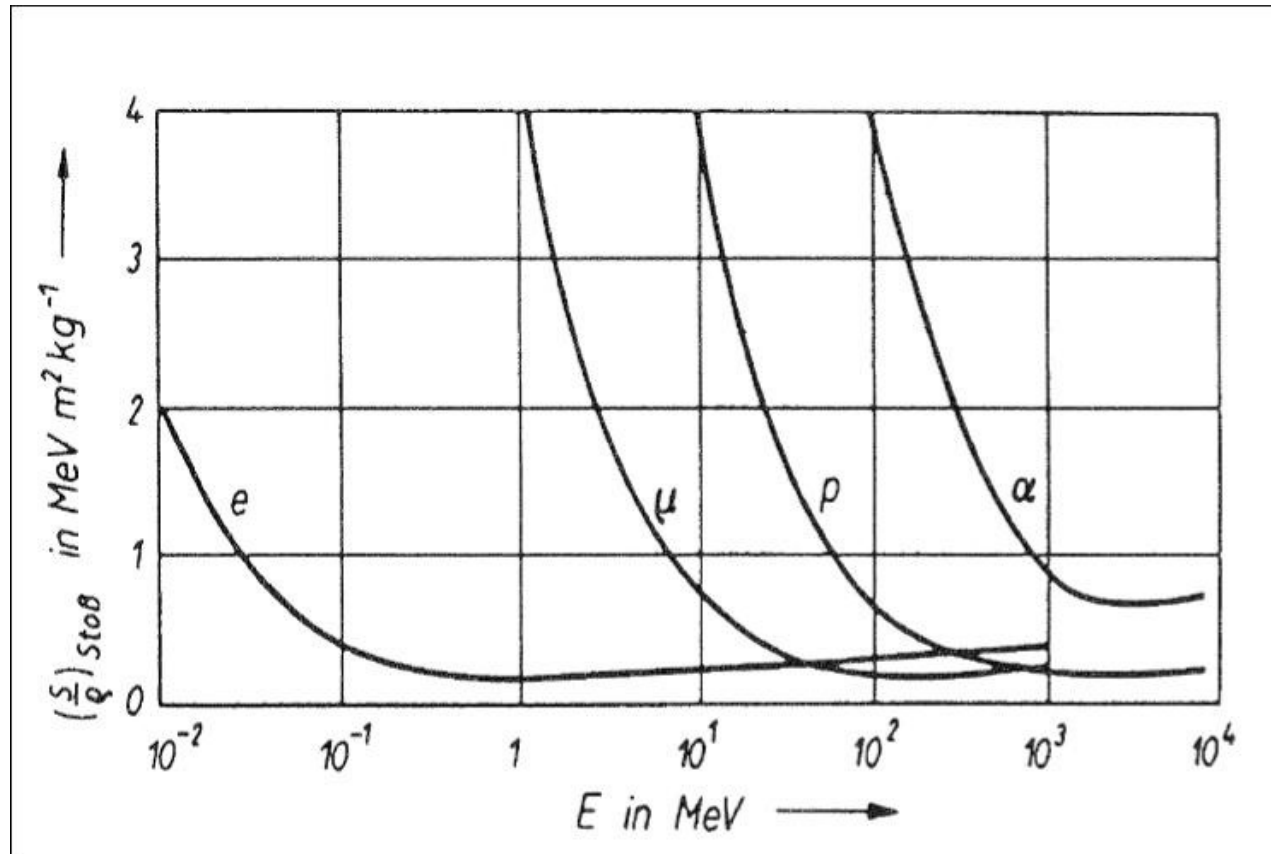
Der mittlere differentielle Energieverlust je Wegstrecke durch Ionisation und Anregung (= Ionisationsverlust) ist berechenbar nach der (Bethe-Bloch-Gleichung)

(Ionisationsverlust ist in erster Näherung der Anzahl der gebildeten Ionenpaare je Weglänge proportional. Der mittlere Energieaufwand zur Bildung eines Ladungsträgerpaares in einem Festkörper (z.B. Halbleiter) beträgt 1/10 des Wertes für ein Gas.)

- Wird in erster Linie von Geschwindigkeit und Ladung, nicht von Masse beeinflusst.

Energieverlust hängt von Dichte des durchstrahlten Materials ab.

Massen-Bremsvermögen infolge Anregung und Ionisation von Elektronen, Myonen, Protonen und α -Teilchen in Luft in Abhängigkeit der Teilchenenergie - Ionisationsbremsung



8.)

Massenbremsvermögen (S/ρ) in Luft vs. Teilchenenergie
- Minima bei Dreifachem der Ruheenergie der Teilchen

Energieverlust geladener Teilchen III

- Strahlungsbremmung

* Energieverlust durch Bremsstrahlung:

geladene Teilchen mit Masse m und Kernladungszahl Z erfahren im Coulombfeld der Atomkerne Richtungsänderungen, es wird elektromagnetische Strahlung emittiert die „**Bremsstrahlung**“, der auftretende Energieverlust je Wegelement ist proportional dem Quadrat der Beschleunigung und steigt mit der Teilchenenergie an,

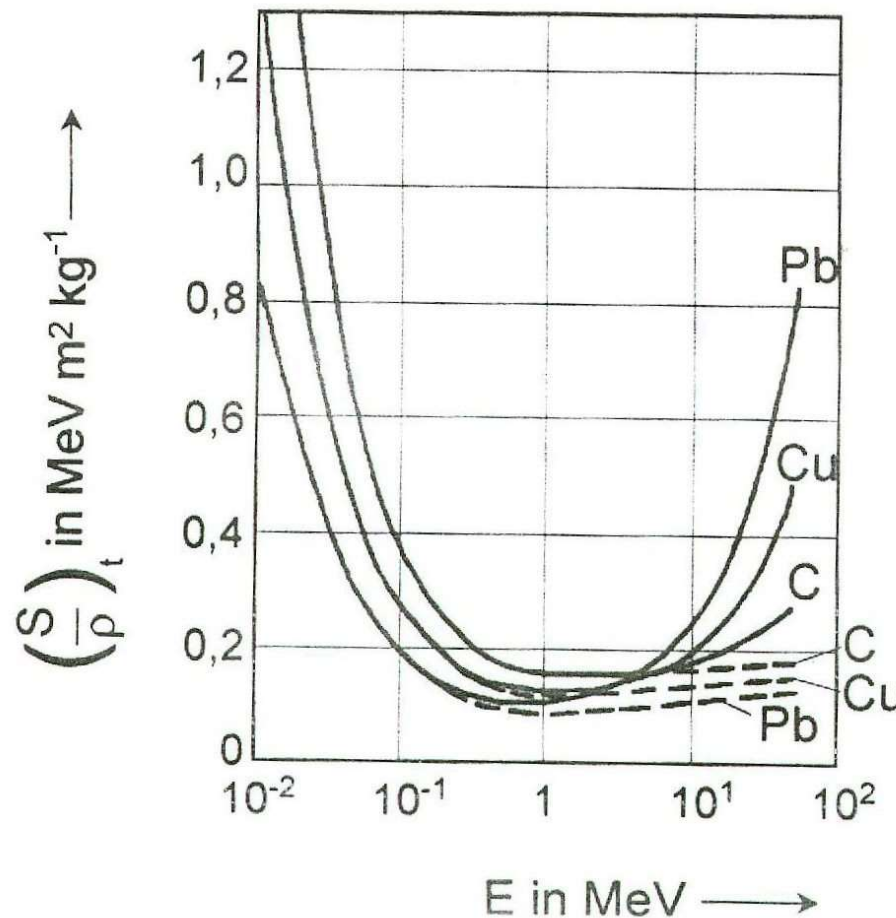
$$\overline{\left(\frac{dE}{dx}\right)}_{\text{str.}} \sim \frac{z^2 Z^2}{m^2}$$

- für schwere geladene Teilchen spielen Energieverluste durch Bremsstrahlung keine Rolle, d.h.
- Bremsstrahlverluste müssen nur bei Elektronen mit Energien $E > m_e c_0^2$ berücksichtigt werden.
- Bremsstrahlverluste wachsen mit zunehmender Energie

Totales Massen-Bremsvermögen von Kohlenstoff, Kupfer und Blei für Elektronen als Funktion der kinetischen Anfangsenergie von Elektronen

- Strahlungsbremung

(Massen-Bremsvermögen ohne Bremsstrahlungsverluste, d. h. nur infolge von Anregung und Ionisation – gestrichelt)



Niedrige Energien
Ionisationsverluste überwiegen

Hohe Energien
Bremsstrahlverluste überwiegen,

gestrichelt:
Massen Bremsvermögen ohne
Bremsstrahlungsverluste
(nur Anregung und Ionisation)

8.)

Totales Massen-Bremsvermögen = Summe Energieverlust durch Bremsstrahlerzeugung und Ionisation

Strahlungsbremmung (spezieller Fall)

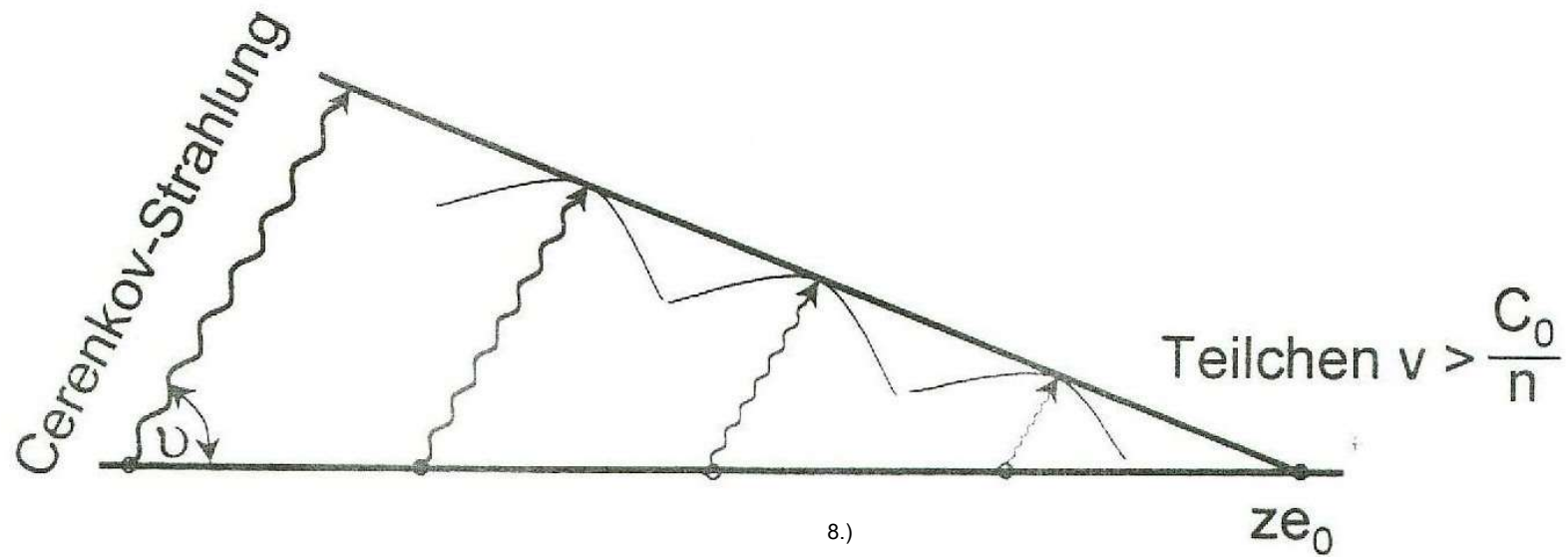
- **Energieverlust durch Cerenkov-Strahlung**

bewegen sich Teilchen mit der Ladung (ze_0) durch ein dielektrisches Medium, indem die Phasengeschwindigkeit des Lichtes (c_0/n) (n = Brechzahl) kleiner als die Teilchengeschwindigkeit v ist so erleiden sie zusätzlich zum Ionisations- und Bremsstrahlverlust einen Energieverlust infolge der Emission einer *elektromagnetischen Stoßwelle*

- Cerenkov-Strahlung fällt z. T. in den **sichtbaren Spektralbereich**, optisches Analogon zur Machschen Kopfwelle bei Überschallgeschwindigkeit in Luft, Intensitätsmaximum im Blau oder nahen UV-Bereich, bleibt auf Kegel beschränkt, Lichtemission ist auf die unsymmetrische Polarisation des Dielektrikums in nächster Umgebung der Teilchenbahn beschränkt (siehe Abb.),

...ist nur 1/100 bis 1/1000 des gesamten Energieverlustes

Emission von Cerenkov-Strahlung



Energieverlust geladener Teilchen

- Zusammenfassung -

- Ionisationsbremsung

schwere geladene Teilchen (p, d, α -T, FP) verlieren Energie durch Ionisationsbremsung = durch sehr große Anzahl unelastischer Stöße Abgabe von kleinen Energieteilbeträgen

Elektronen und Positronen verlieren ebenfalls durch unelastische Stöße mit den Hüllenelektronen ihre Energie, werden aber aufgrund ihrer kleinen Masse abgelenkt

- Strahlungsbremsung

Energieverlust durch Bremsstrahlung:

geladene Teilchen mit Masse m und Kernladungszahl Z erfahren im Coulombfeld der Atomkerne Richtungsänderungen

es wird elektromagnetische Strahlung emittiert „**Bremsstrahlung**“

der auftretende Energieverlust je Wegelement ist proportional der Beschleunigung und steigt mit der Teilchenenergie an,

$$\overline{\left(\frac{dE}{dx}\right)}_{\text{Str.}} \sim \frac{z^2 Z^2}{m^2}$$

- Bremsstrahlverluste müssen nur bei Elektronen mit Energien $E > m_e c_0^2$ berücksichtigt werden, bei schweren Teilchen spielen diese keine Rolle

Wechselwirkung von *ungeladenen* Teilchen mit Atomen I

- *Indirekte Ionisation* -

...Wechselwirkung von Neutronen und Photonen mit Materie durch verschiedene Prozesse gekennzeichnet,

- Wechselwirkungen z.B.

Streuung, Absorption,

und andere Effekte,

wie Photo-, Compton-, Paarbildung-, Kernphotoeffekt

Wechselwirkung von *ungeladenen* Teilchen mit Atomen II

- Indirekte Ionisation -

Neutronen

sie verlieren keine Energie durch Ionisations- oder Strahlungsbremmung, sondern ausschließlich durch Wechselwirkungsprozesse mit Atomkernen, erst dadurch werden geladene Sekundärteilchen erzeugt

- **Elastische Streuung**

führt zur Änderung der Bewegungsrichtung und Energie der Neutronen (Summe Neutronen und Energie des Kernes bleibt konstant)

- **Unelastische Streuung**

Veränderung der Energie und Richtung der Neutronen, Kernanregungen führen zu Energieverlusten, angeregte Kerne kehren unter Emission von γ -Strahlung in den Grundzustand zurück

- **Neutronenabsorption**

Neutronen können in Atomkerne des absorbierenden Mediums eindringen und Kernreaktionen verursachen (Einfang-, Austausch- und Spaltungsreaktionen)

Wechselwirkung von ungeladenen Teilchen mit Atomen (II)

Photonen

Wechselwirkungspartner der Photonen (Quanten der Röntgen- und Gammastrahlung) sind die Elektronen der Atomhülle, die Coulombfelder im Atom und die Nukleonen des Kernes

- die wichtigsten Wechselwirkungsprozesse sind:

- * **Photoeffekt**

- * **Comptoneffekt**

- * **Paarbildungseffekt**

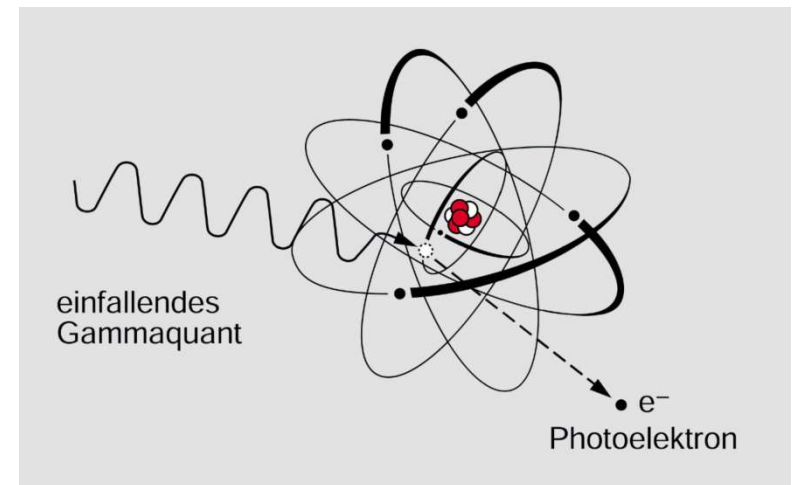
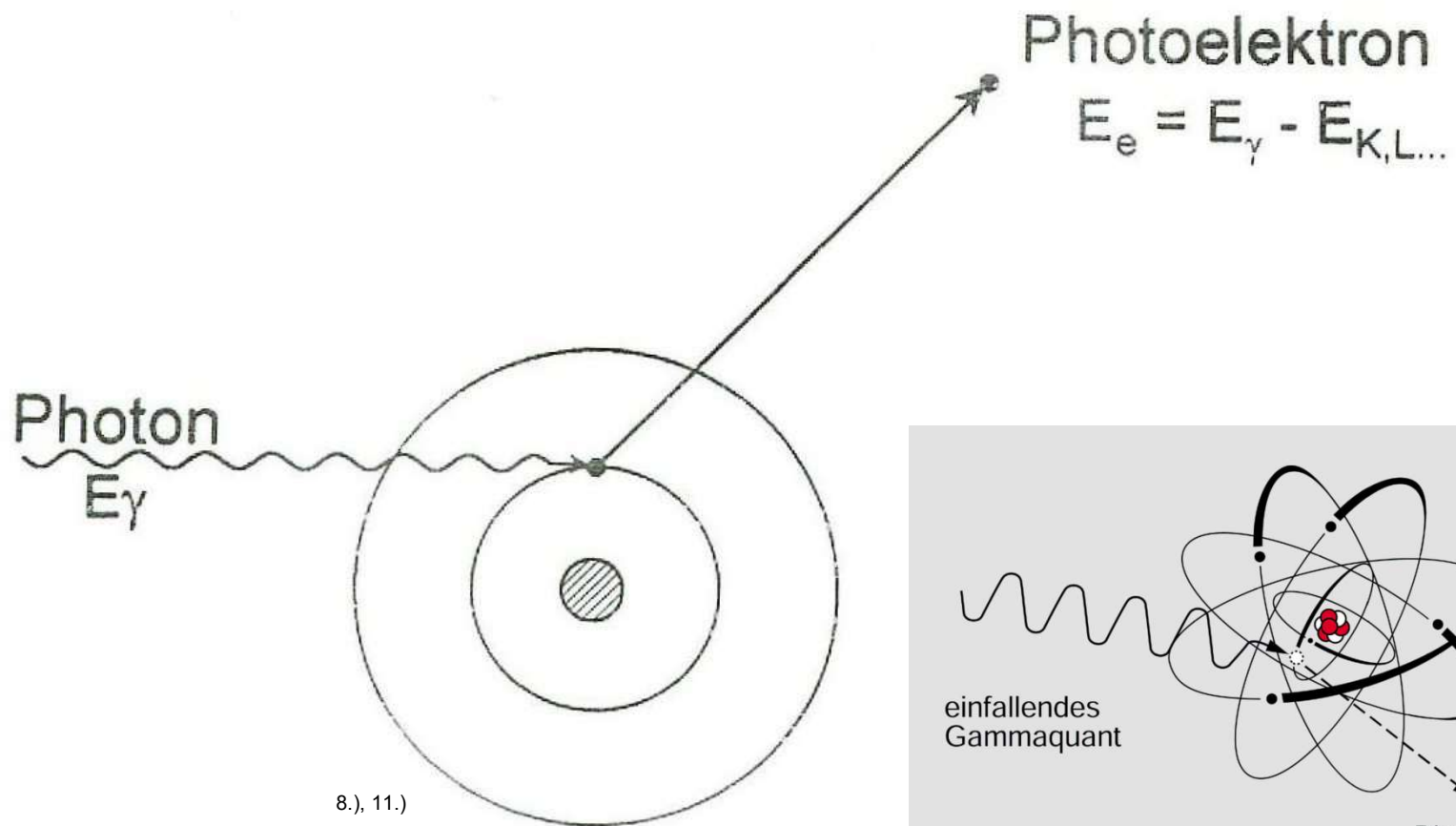
- * **Kernphotoeffekt**

Photoeffekt

- bei dieser Wechselwirkungsart wird die gesamte Energie des Photons $E_\gamma = h \times f$ auf ein Hüllenelektron übertragen, niederenergetische Photonen mit Atomen mit hohem Z
- das Elektron wird aus der Hülle herausgeschlagen und das Photon vollständig absorbiert und das Atom ionisiert
- Photonenenergie muss die Bindungsenergie der Elektronen der Elektronen in den jeweiligen Schalen (K, L, M ...) übertreffen
- Photonenimpuls wird beim Photoeffekt immer von zwei Partnern aufgenommen: vom Photoelektron, vom ionisierten Atom
- kinetische Anfangsenergie des Photoelektrons $E_e = E_\gamma - E_{K, L, M \dots}$
- Bindungsenergie wächst mit steigender Ordnungszahl Z und zunehmender Kernnähe (ist Photonenenergie größer als die Bindungsenergie der Elektronen in der K-Schale werden ca. 80 % der Photonen in dieser Schale absorbiert und ca. 20 % in äußerer Elektronenschale)
- nachfolgend auf die Photonenabsorption erfolgt die Auffüllung der Lücke durch Elektronen höherer Schalen
 - a) die freiwerdende Energie ist charakteristische Röntgenfluoreszenzstrahlung
 - b) strahlungslos, aus L-Schale wird Elektron (Auger-Elektron) emittiert mit der kinetischen Energie
$$E_{\text{Auger}} = E_K - 2 E_L$$

Schematische Darstellung des Photoeffektes

- Photonenenergie muss die Bindungsenergie der Elektronen in den jeweiligen Schalen (K, L, M ...) übertreffen

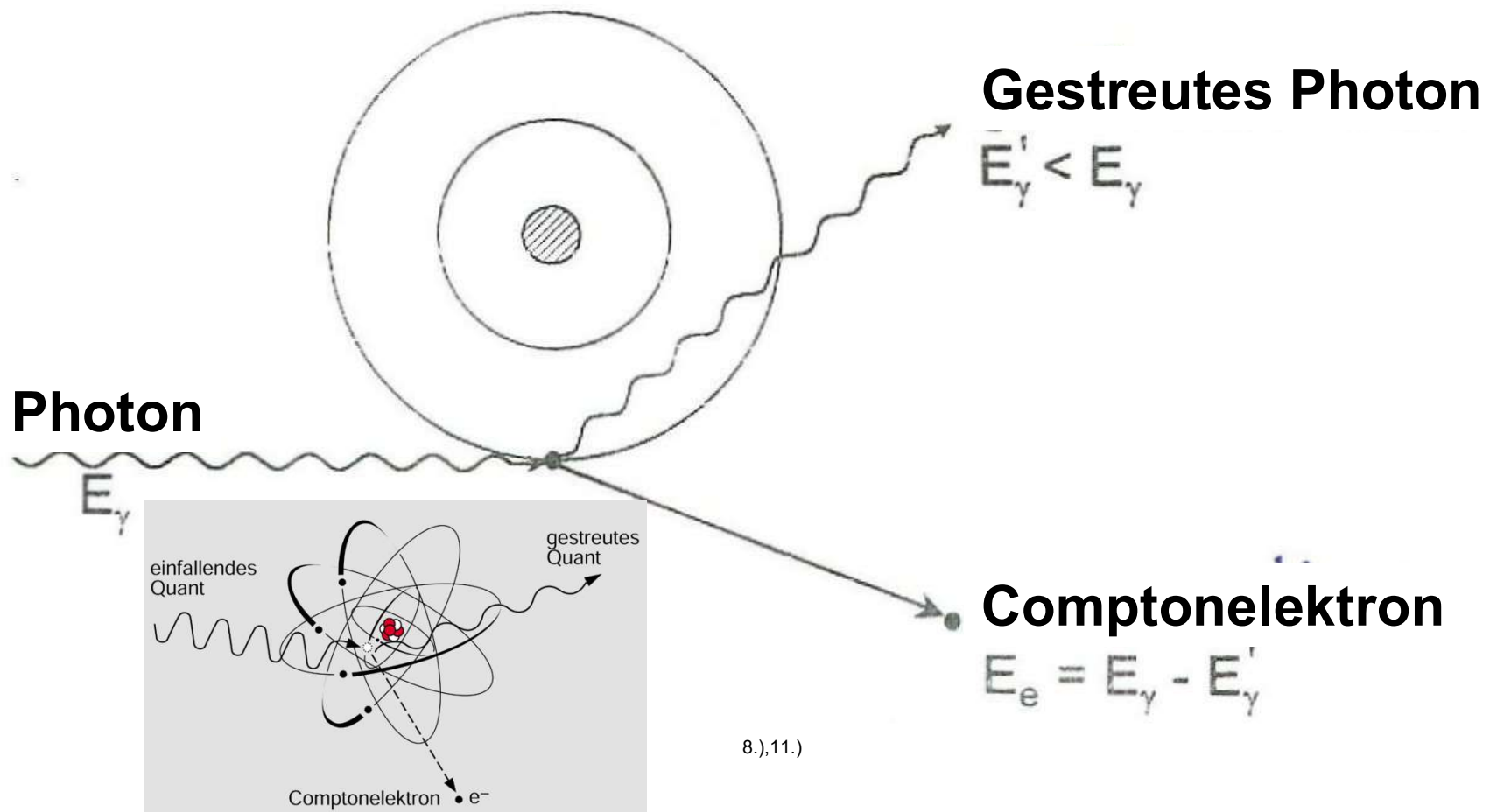


Comptoneffekt

- mit zunehmender Photonenenergie ($E_\gamma > E_{K, L, M, \dots}$) gibt das Photon nur einen Teil der Energie auf ein lockeres oder freies Elektron ab und erfährt selbst eine Richtungsänderung
- das Rückstoßelektron (Comptonelektron) bewegt sich mit hoher Geschwindigkeit
- die Gesamtenergie und der Gesamtimpuls bleiben beim Comptoneffekt erhalten
- die Wahrscheinlichkeit für den Comptoneffekt ist bei Elementen mit kleinen Ordnungszahlen zwischen 50 keV und 15 MeV und bei Elementen mit hoher Ordnungszahl zwischen 0,5 MeV und 5 MeV sehr hoch

Schematische Darstellung des Comptoneffektes

- mit zunehmender Photonenenergie ($E_\gamma > E_K, L, M \dots$) gibt das Photon nur einen Teil der Energie auf ein lockeres oder freies Elektron ab und erfährt selbst eine Richtungsänderung



Paarbildungseffekt

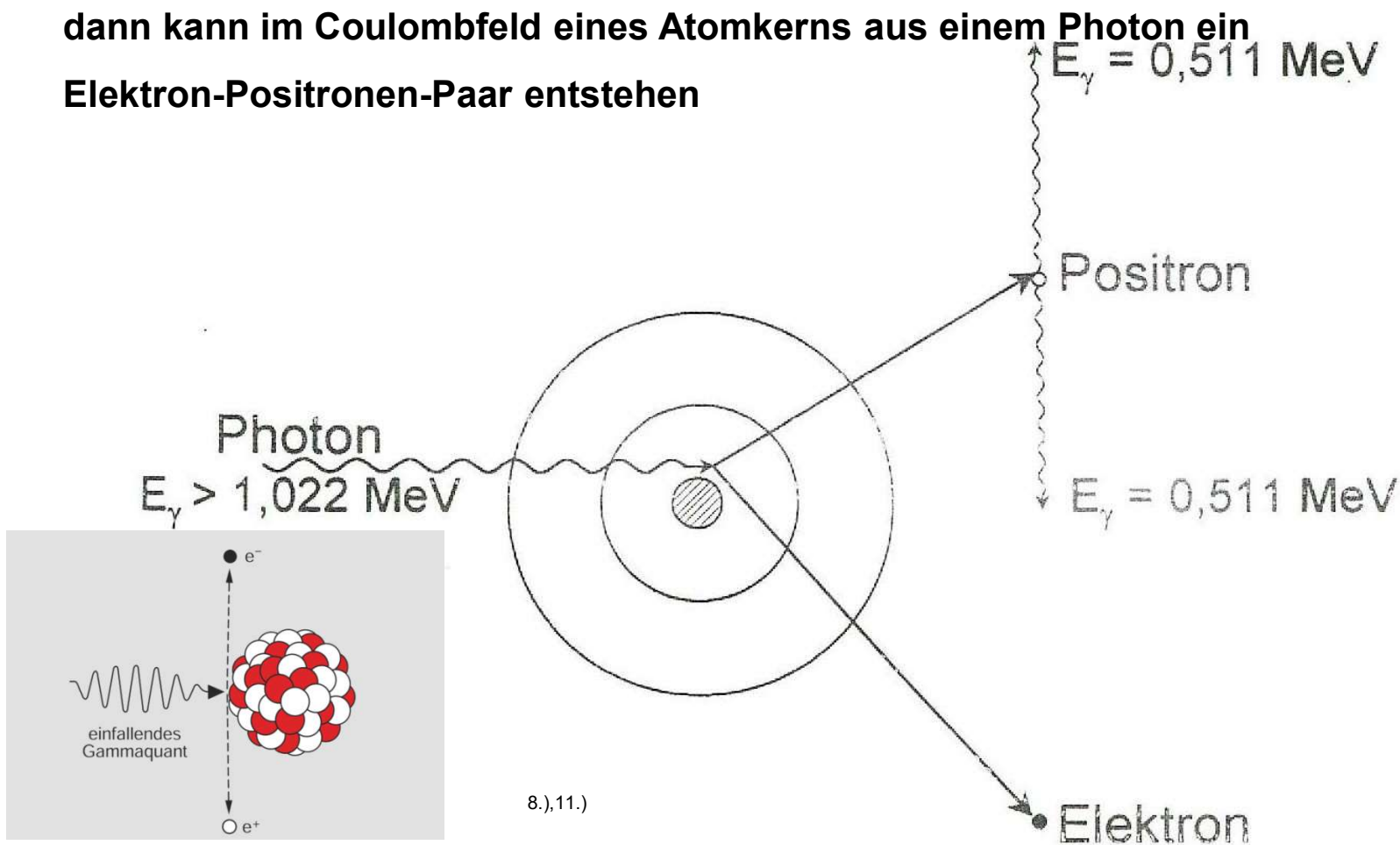
- überschreitet die Photonenenergie die doppelte Ruheenergie eines Elektrons $E_\gamma \geq 2 m_e c_0^2 = 1,022 \text{ MeV}$, dann kann im Coulombfeld eines Atomkerns aus einem Photon ein Elektron-Positronen-Paar entstehen
- dritter Stoßpartner ist meist ein Atomkern, der den Impuls übernimmt, aber wegen der großen Masse praktisch keine Rückstoßenergie
$$E_{e^-} + E_{e^+} = E_\gamma - 2 m_e c_0^2$$
Energieverteilung auf Elektron und Positron ist nahezu symmetrisch
- der Paarbildung folgt die Zerstrahlung des erzeugten Positrons
- Paarbildung ist bei Elementen mit niedriger Ordnungszahl für $E_\gamma > 15 \text{ MeV}$ und bei Elementen mit großer Ordnungszahl $E_\gamma > 5 \text{ MeV}$ der vorherrschende Wechselwirkungsprozess
- bei radioaktiver Umwandlung wird selten γ –Strahlung mit Energien größer als 2 MeV emittiert, deshalb Paarbildungseffekt hierbei sehr geringe Bedeutung

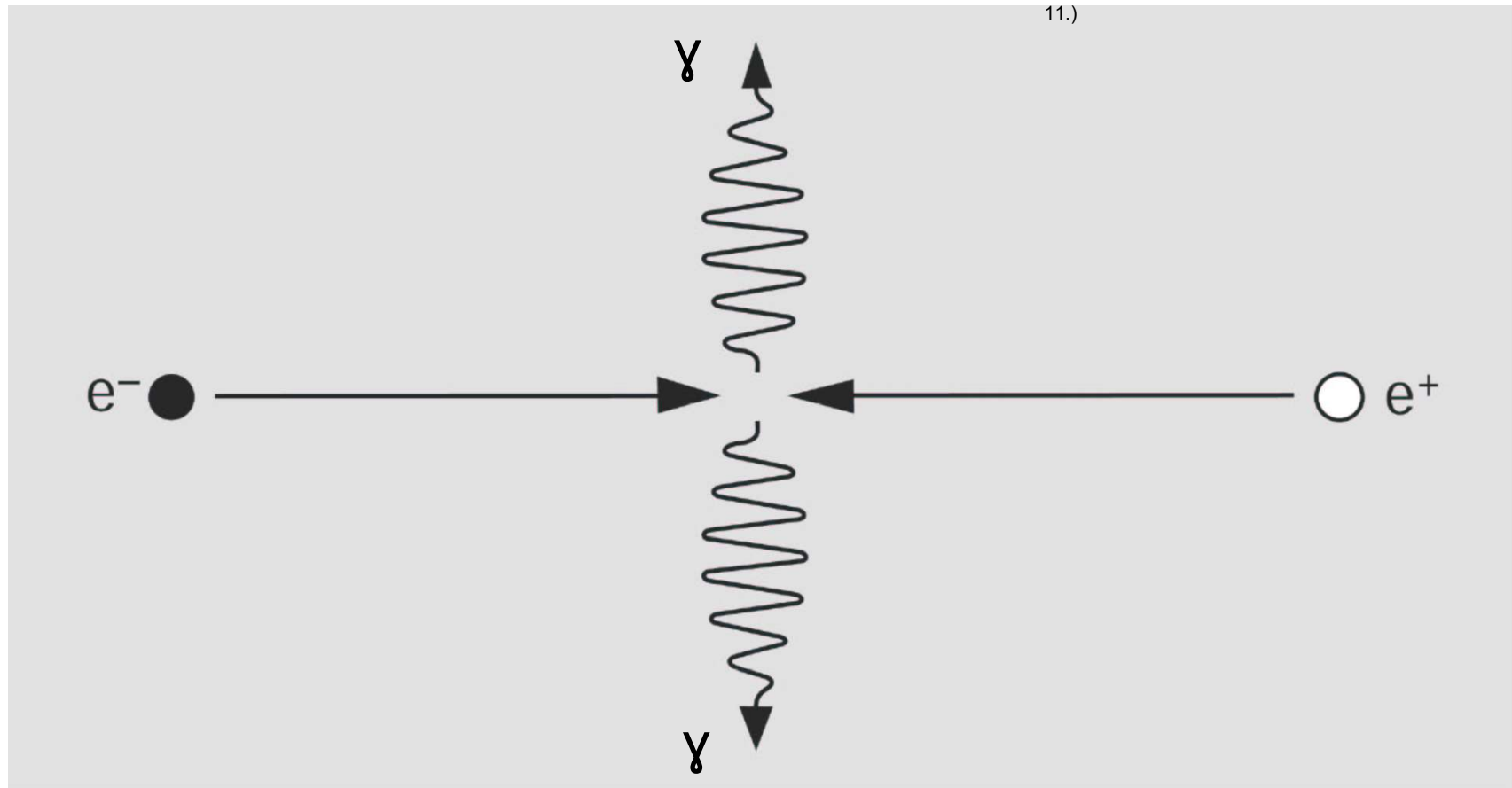
Schematische Darstellung des Paarbildungseffektes

- überschreitet die Photonenenergie die doppelte Ruheenergie eines Elektrons

$$E_\gamma \geq 2 m_e c_0^2 = 1,022 \text{ MeV},$$

dann kann im Coulombfeld eines Atomkerns aus einem Photon ein Elektron-Positronen-Paar entstehen





Elektron und Positron... **Vereinigung** ...2 Gammaquanten (0,511 MeV)

Kernphotoeffekt

- bei sehr hohen Photonenenergien kann aus dem Kern ein Nukleon herausgelöst werden, diese Kernumwandlung wird als Kernphotoeffekt bezeichnet,

Beispiel:

(γ, n) , (γ, p) – Reaktion

${}^2\text{H}(\gamma, n) {}^1\text{H}$

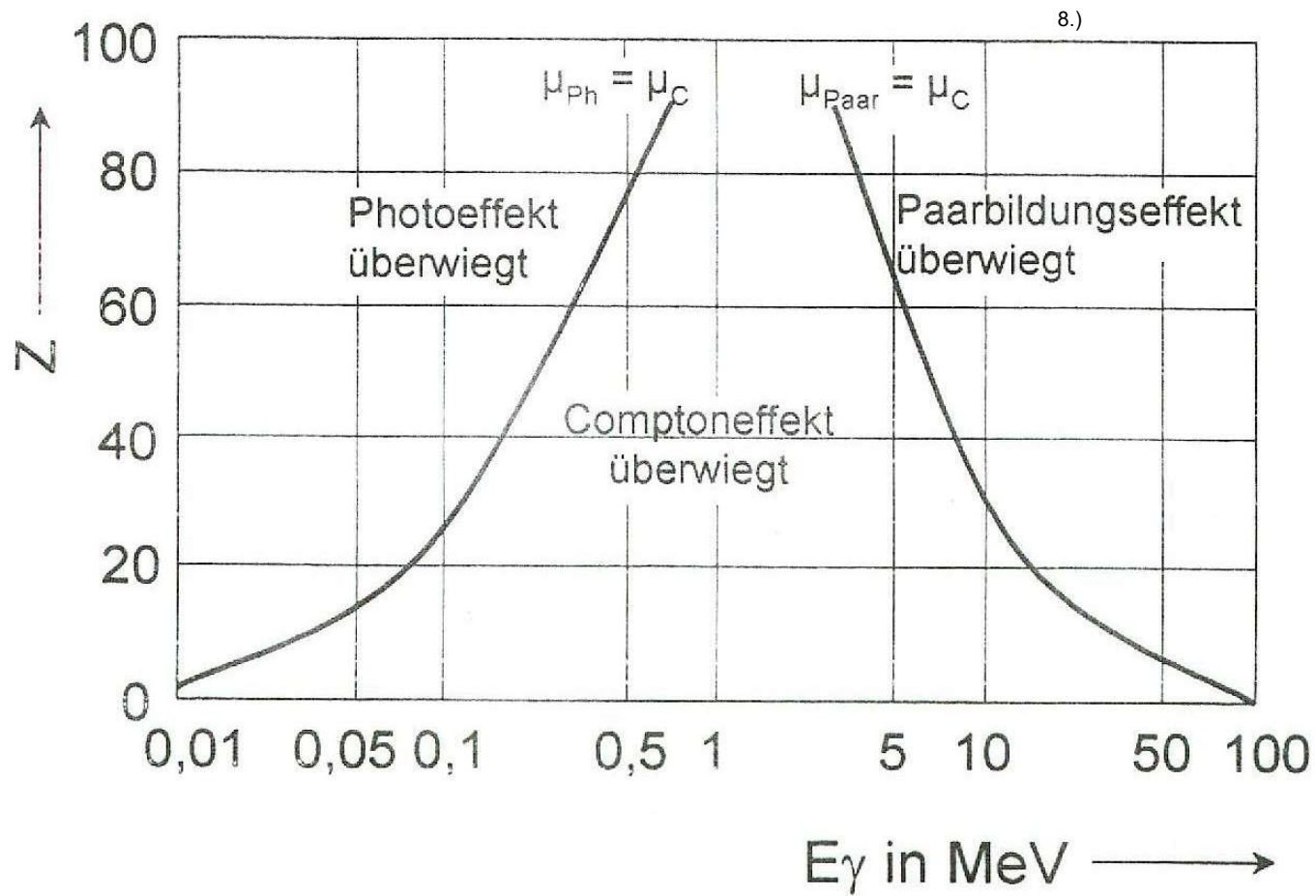
(notwendige Photonenenergie $> 2,225 \text{ MeV}$)



Photoeffekt, Comptoneffekt, Paarbildungseffekt

*Welcher der Wechselwirkungsprozesse vorherrscht,
hängt von der Photonenenergie und der Ordnungszahl der Atome ab!*

Wirkungsbereich von Photoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildungseffekt



- Wechselwirkung Strahlung - Material

Strahlung und Material

Material, um Strahlungswirkung zu verringern (Abschirmung)

Bestrahlung von Material, um Materialeigenschaften zu verändern



Studium der Wechselwirkung von Strahlung und Material

Wechselwirkung ionisierender Strahlung mit Materialschichten

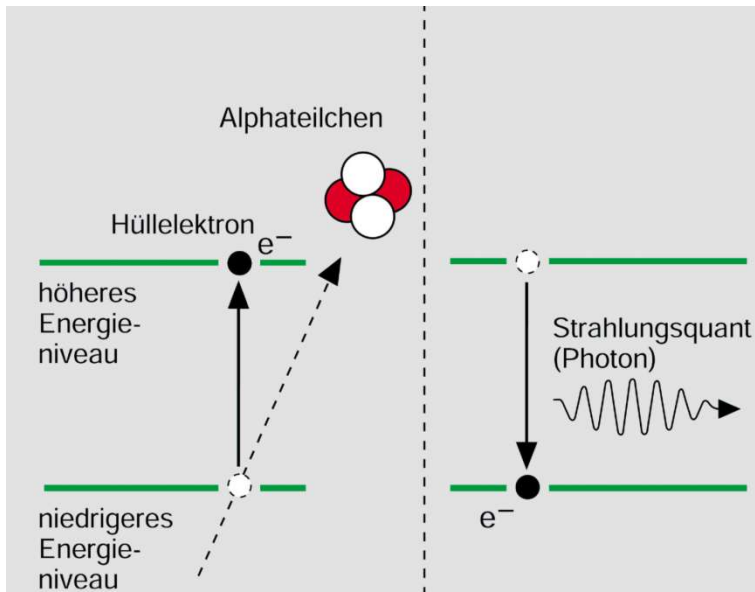
Wechselwirkung von *geladenen* Teilchen I

- **α -Strahlung**

durch unelastische Stöße verlieren α -Teilchen ihre Bewegungsenergie, Bahnen nahezu geradlinig

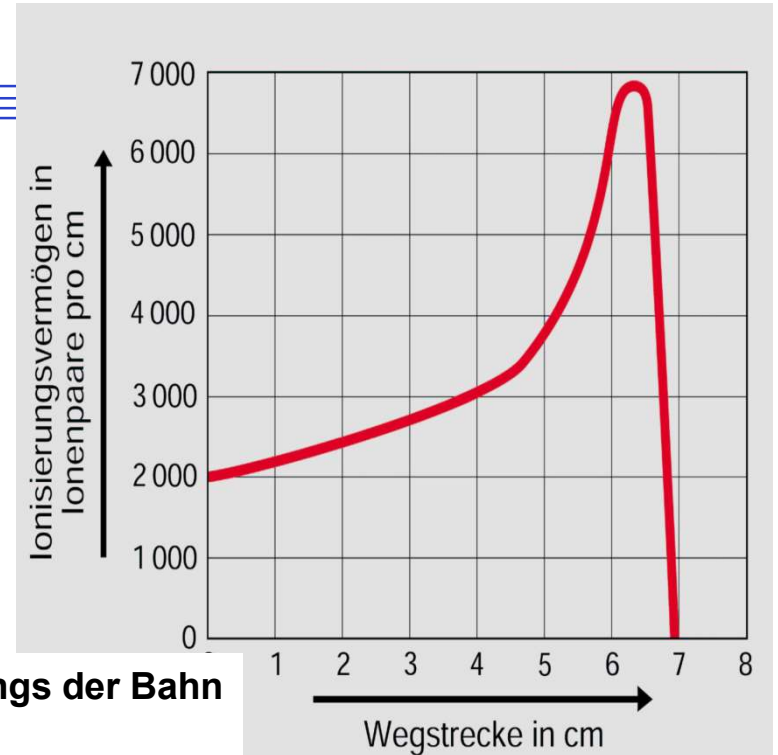
- **Reichweite (R):** Bezeichnung für die Wegstrecke, die von Strahlung bis zur vollständige Abbremsung zurückgelegt wird
- α -Teilchen mit gleicher Anfangsenergie legen auch ungefähr (3 % Unterschied) die gleiche Strecke zurück
- die Reichweite streut um einen Mittelwert, da Weglängen und Stoßanzahl unterschiedlich und damit auch Energieverlust unterschiedlich (statistischer Prozess)

Anregung und Ionenbildung entlang der Bahn des α -Teilchens (Modell)



Anregung eines Atoms durch Alpha-Teilchen

11.)



Ionenbildung längs der Bahn

<p>Kern: 6 p^+ 6 n</p> <p>Hülle: 6 e^-</p> <p>Modell eines Kohlenstoffatoms</p>	<p>α-Teilchen</p> <p>e^-</p> <p>Ein α-Teilchen ionisiert ein Kohlenstoffatom</p>	<p>e^-</p> <p>Aufnahme eines freien Elektrons durch die Hülle eines Kohlenstoffatoms</p>
<p>6⁻</p> <p>6⁺</p> <p>Hülle</p> <p>Kern</p> <p>Das Atom ist nach außen elektrisch neutral</p>	<p>5⁻</p> <p>6⁺</p> <p>Die positiven Ladungen des Kerns</p>	<p>7⁻</p> <p>6⁺</p> <p>Die negativen Ladungen der Hülle</p>

Ladungsverhältnisse bei der Bildung eines Ionenpaares

Absorption von α -Strahlung

- Bestimmung der Reichweite:

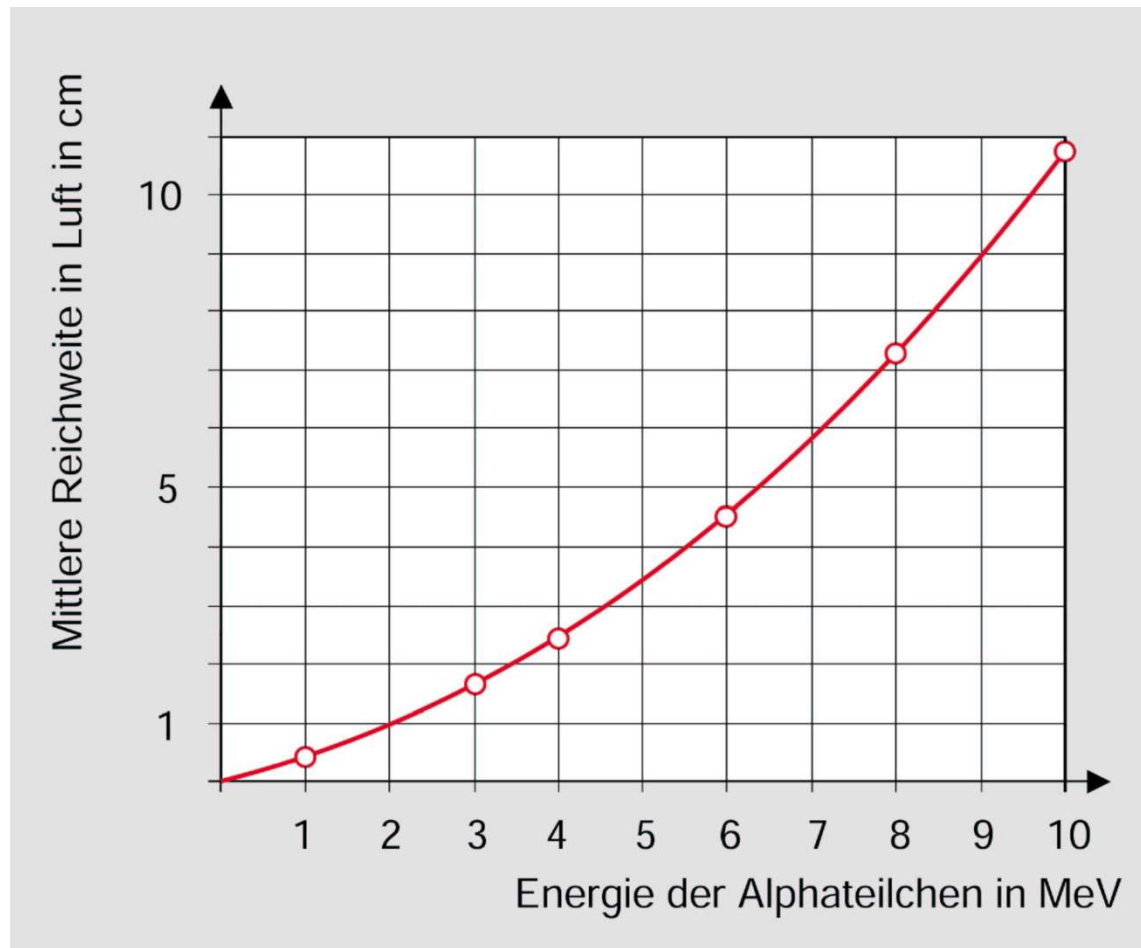
Aufnahme von Absorptionskurven (Messung der Teilchenflussdichte ϕ hinter Absorbern verschiedener Dicke messen und die Durchlässigkeit $\phi(x)/\phi(0)$ in Abhängigkeit von der Schichtdicke auftragen

- Durchlässigkeit bleibt zunächst unverändert und fällt erst gegen Ende der Bahn auf Null ab
- Reichweiten lassen sich in Gasen sehr genau experimentell bestimmen
- empirische Energie-Reichweite-Beziehungen

z. B. $R_m = 3,1 \times E_a^{3/2}$ R_m in mm; E in MeV

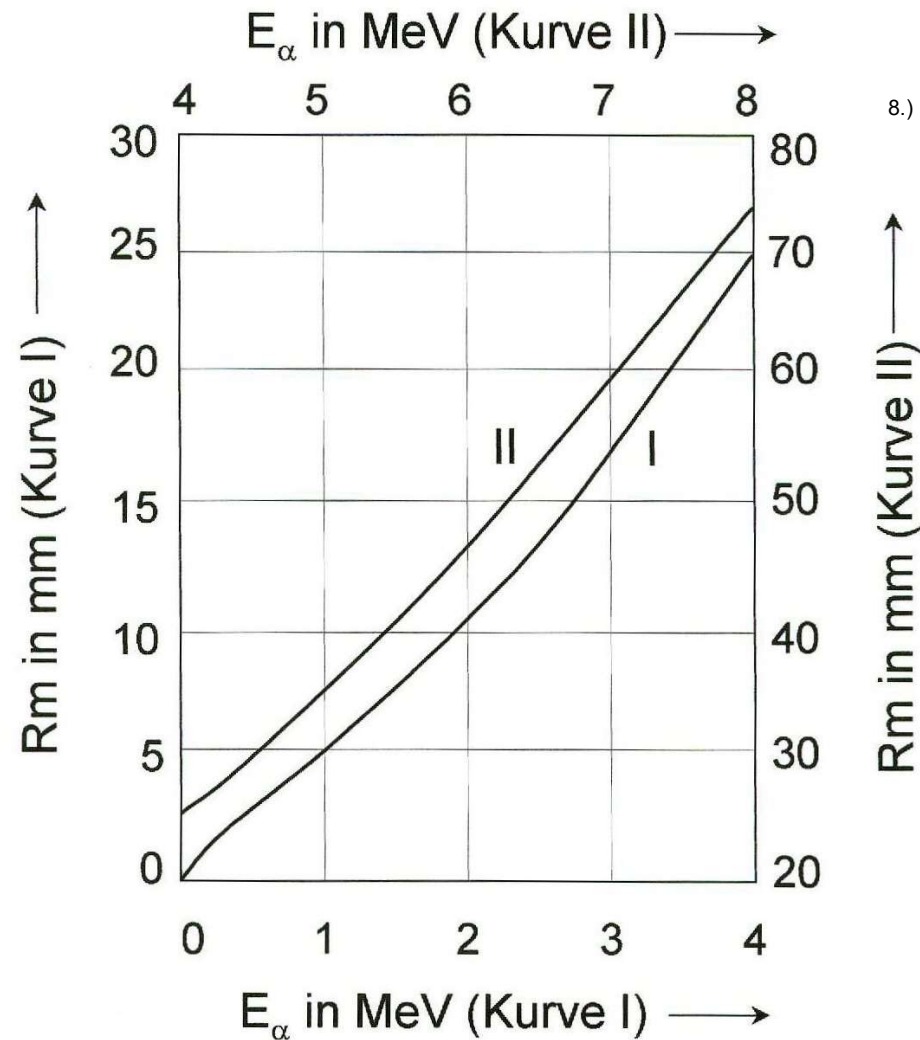
- Reichweite von α -Strahlung in Gasen ist der Dichte umgekehrt proportional und hängt von Temperatur und Druck ab

Mittlere Reichweite R_m von α -Strahlung in Luft (15°C, 1,01325 x 10⁵ Pa) in Abhängigkeit von der Anfangsenergie E_α

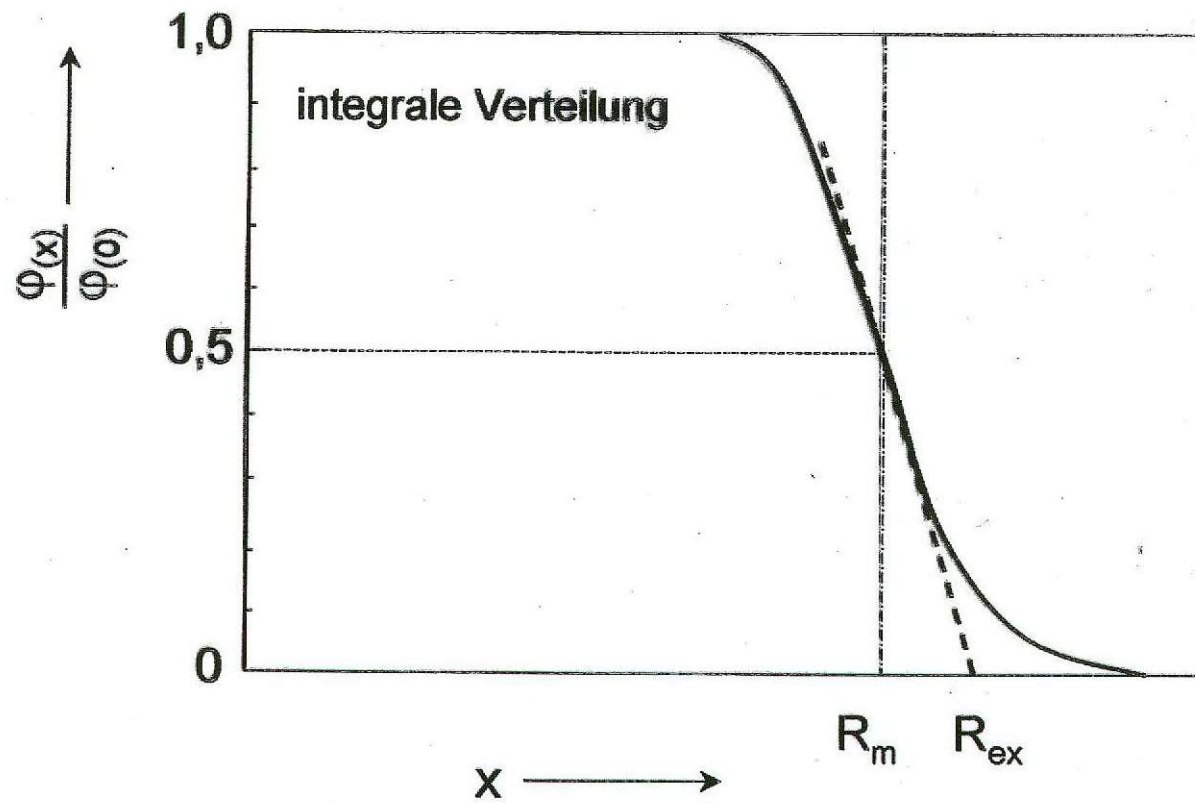


11.)

Mittlere Reichweite R_m von α -Strahlung in Luft (15° C, 1,01325 x 10⁵ Pa) in Abhängigkeit von der Anfangsenergie E_α



Schematische Darstellung der Absorptionskurve und Reichweitenstreuung w_R für α -Strahlung



8.)

Wechselwirkung ionisierender Strahlung mit Materialschichten

Wechselwirkung von *geladenen* Teilchen I

- β -Strahlung (Elektronen/Positronen)

- Bahnen der Elektronen wegen der Streuung unregelmäßig gekrümmt
- Absorptionskurven sind charakterisiert durch schwach abfallenden Anfangsteil, ausgedehntes lineares Mittelstück und ein flaches Auslaufen bei großen Schichtdicken, Extrapolation der linearen Kurventeile bis zur Abszisse = praktische Reichweite R_p
- kinetische Energie nimmt mit wachsender Absorberdicke ab
- bereits kleine Schichtdicke absorbiert Strahlung, da Strahlungsbündel energiearme Teilchen hat

Wechselwirkung ionisierender Strahlung mit Materialschichten

Wechselwirkung von *geladenen* Teilchen II

- Teilchenflussdichte φ bzw. die Zählrate n nimmt mit der Schichtdicke exponentiell ab:

Absorptionsgesetz: $\varphi(x) = \varphi(0)e^{-\mu x}$ bzw. $n(x) = n(0)e^{-\mu x}$

daraus folgt: $\varphi(d) = \varphi(0)e^{-\mu d/\rho}$

(μ = linearer Absorptionskoeffizient, anstatt x = Schichtdicke wird häufig verwendet $d = \rho x$ Flächenmasse, μ/ρ = Massenabsorptionskoeffizient)

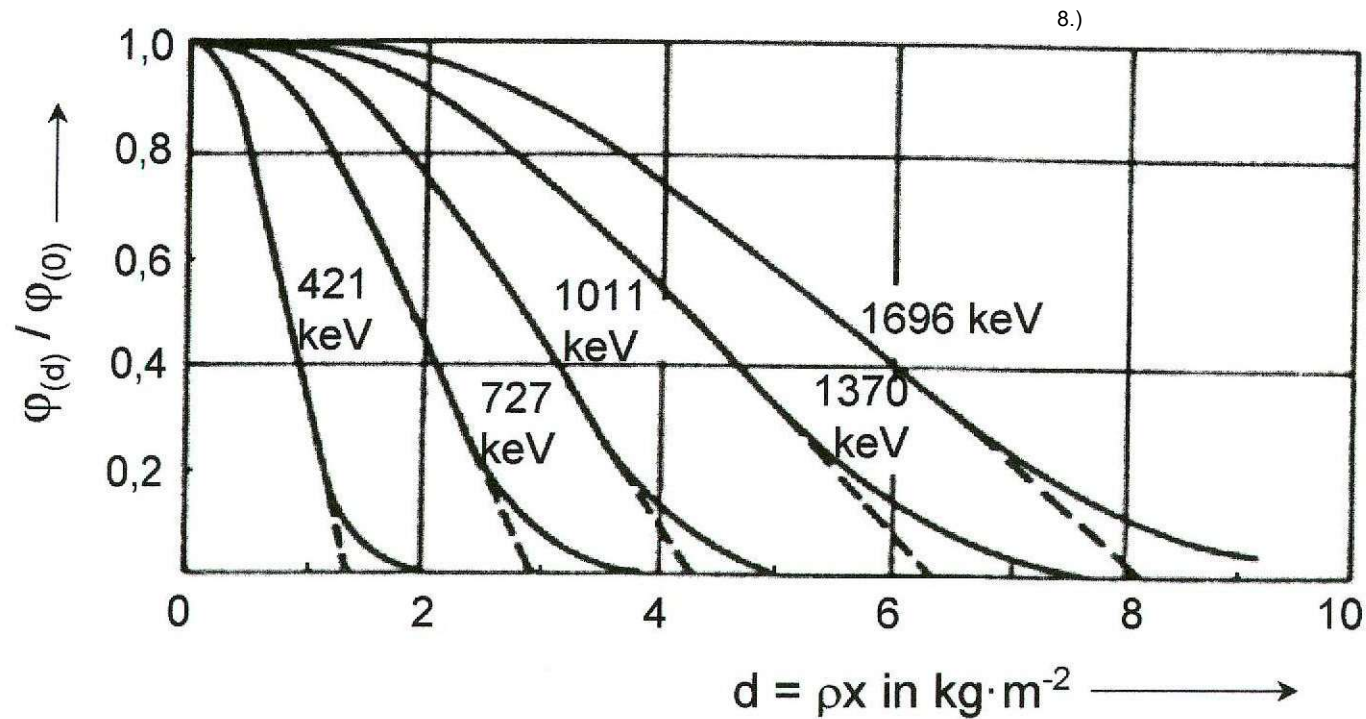
- Halbwertdicke (Reduzierung der Teilchenflussdichte auf die Hälfte)
 $x_{1/2} = \ln 2/\mu$

Wenn Halbwertsdicke durch Messung bestimmt, kann linearer Absorptionskoeffizient berechnet werden. Im Energiebereich der Strahlung von $0,1 \text{ MeV} < E_{\beta\text{max}} < 3,5 \text{ MeV}$ gilt empirische Näherungsformel:

$\mu/\rho = 1,7 E_{\beta\text{max}}^{-1,43}$ (μ/ρ in $\text{m}^2 \text{ kg}^{-1}$; E in MeV)

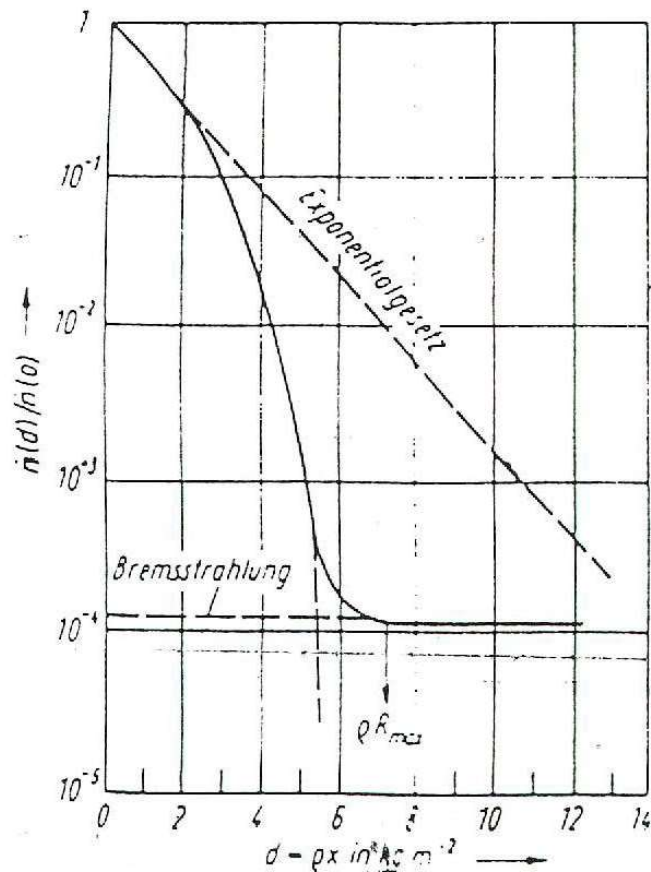
Absorptionskurven für monoenergetische Elektronen verschiedener Anfangsenergie

Absorber: Aluminium



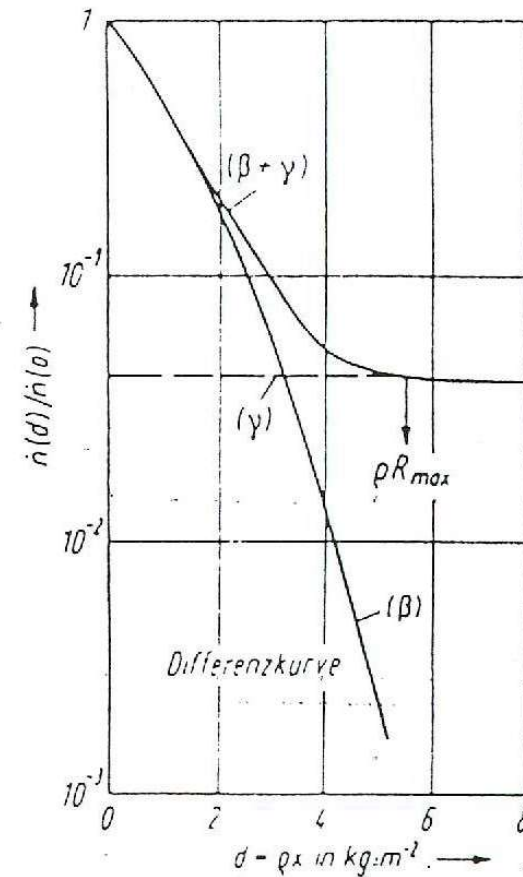
Absorptionskurven für β -Strahlung

Absorber: Aluminium



reine β -Strahlung mit einfachem Energiespektrum

8.)



β -Strahlung mit einfachem Energiespektrum und γ -Anteil

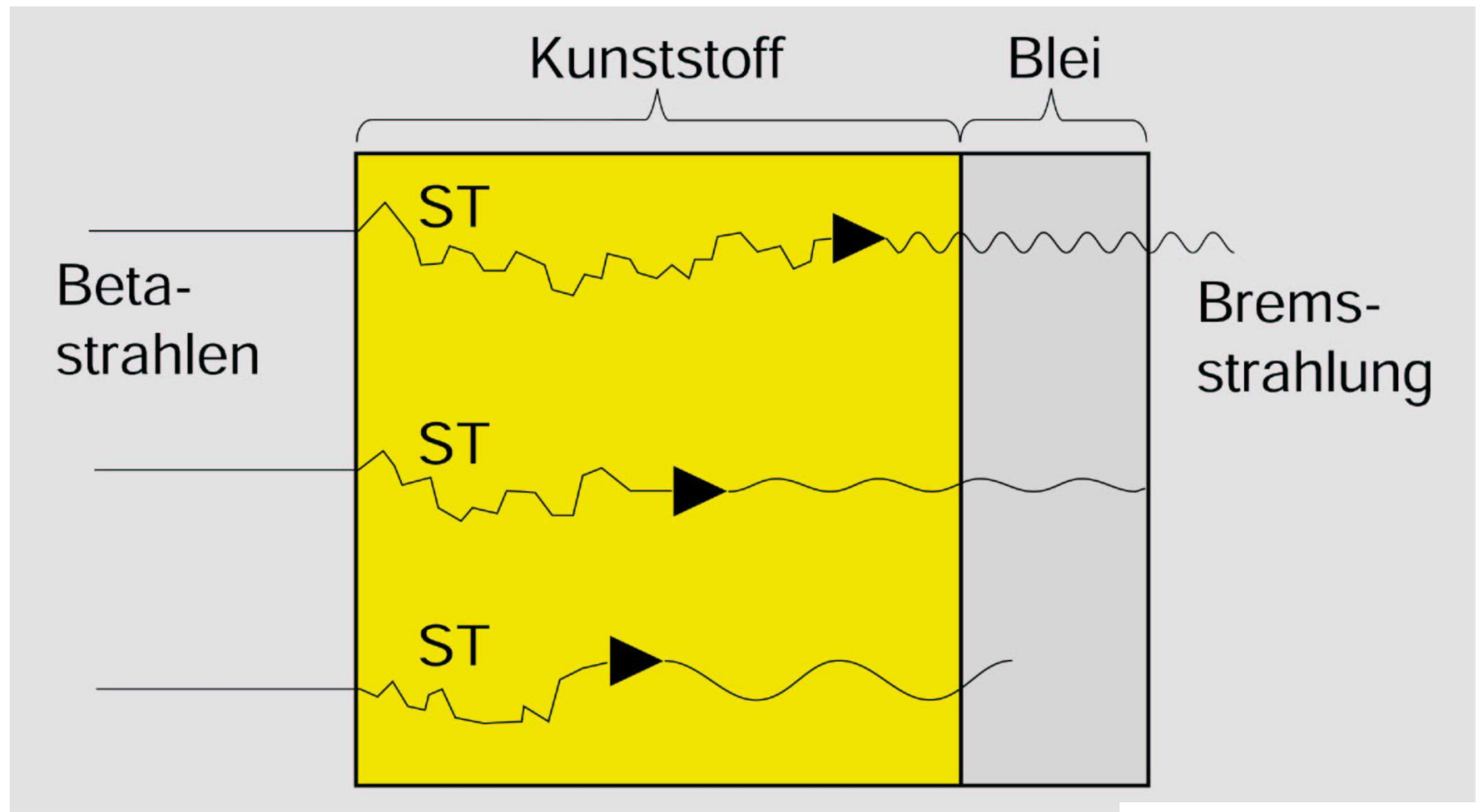
Reichweite von Betateilchen verschiedener Energien in Luft, Körpergewebe und Aluminium

11.)

Teilchen- energie in MeV	Reichweite in		
	Luft (1013hPa)	Körpergewebe	Aluminium
0,01	0,003 m	0,0025 mm	0,0009 mm
0,1	0,10 m	0,16 mm	0,050 mm
0,5	1,20 m	1,87 mm	0,60 mm
1,0	3,06 m	4,75 mm	1,52 mm
2	7,10 m	11,14 mm	4,08 mm
5	19,0 m	27,8 mm	9,90 mm
10	39,0 m	60,8 mm	19,2 mm
20	78,0 m	123,0 mm	39,0 mm

Materialkombination zur optimalen Abschirmung von β -Strahlen

11.)



ST: Streueffekte

Wechselwirkung ionisierender Strahlung mit Materialschichten

Wechselwirkung von *ungeladenen* Teilchen

Photonen:

Durchdringt ein schmales Photonenstrahlungsbündel einheitlicher Energie eine Materialschicht der Dicke x so verringert sich durch Wechselwirkungsprozesse mit den Atomen des Materials die Photonenflussdichte φ .

- Schwächung von Photonenstrahlen
Schwächungsgesetz (für β -Strahlen nur für kleine Schichtdicken erfüllt, für schmale Photonenstrahlbündel voll erfüllt)
- allgemeines Schwächungsgesetz:

$$\varphi(x) = \varphi(0)e^{-N\sigma x}$$

N : Anzahldicke der Atome, σ : totaler atomarer Wirkungsquerschnitt

$N\sigma$: linearer Schwächungskoeffizient μ

$$\varphi(x) = \varphi(0)e^{-\mu x}$$

(auch Umrechnung unter Verwendung des Massen-Schwächungskoeffizienten)

Da maximale Reichweitenangabe nicht möglich, wird häufig Halbwertsschichtdicke benutzt

Photonen

für Photonen maximale Reichweite nicht angebbbar

Halbwertschichtdicke (HWS) = $x_{1/2} = \ln 2 / \mu$

- **Linearer Schwächungskoeffizient setzt sich aus drei Anteilen zusammen:
dem Photoabsorptionskoeffizienten,
dem Schwächungskoeffizienten des Comptoneffektes,
dem Paarbildungskoeffizienten**

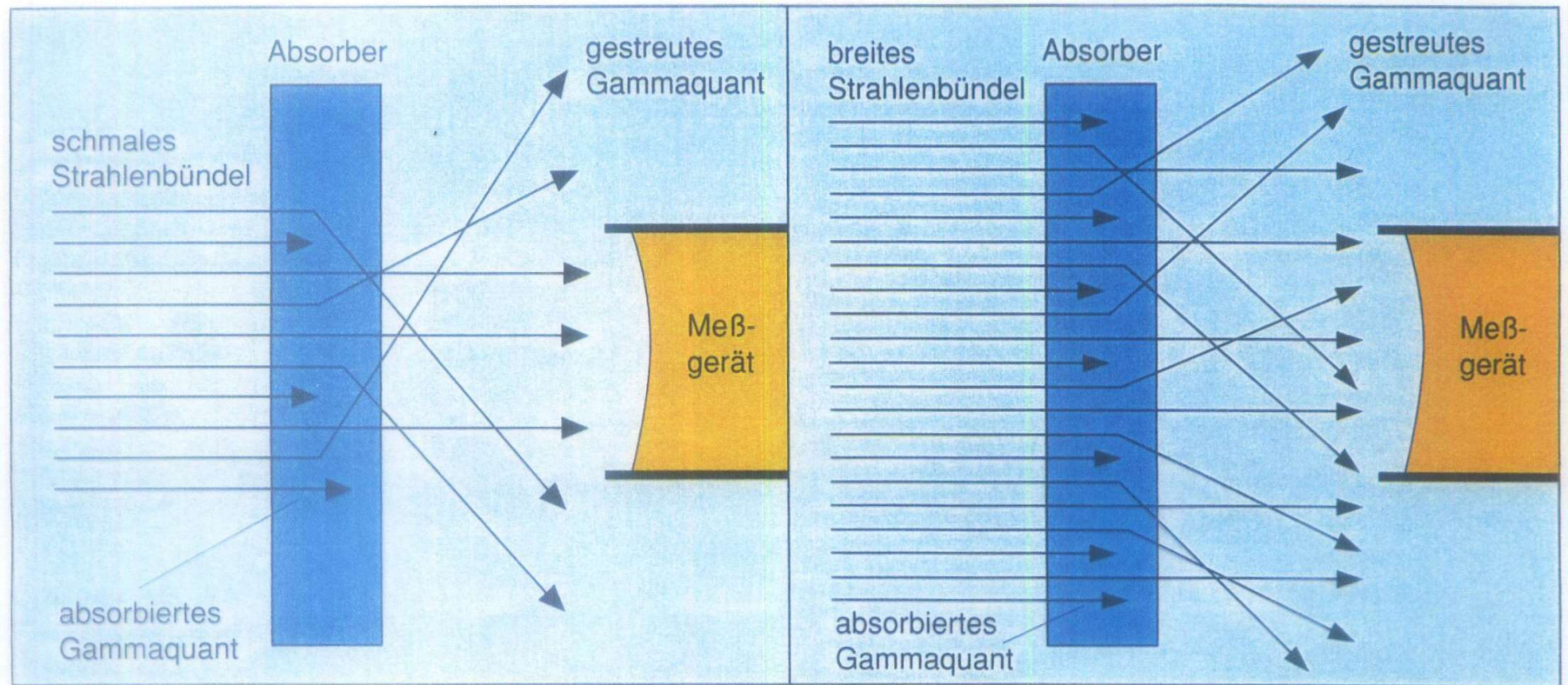
$$\mu = \mu_{Ph} + \mu_c + \mu_{paar}$$

Schwächung abhängig von Photonenenergie und Ordnungszahl des Wechselwirkungsmaterials!



Schwächung eines schmalen und eines breiten Strahlenbündels durch einen Absorber

11.)



Durch jede Halbwertschicht wird die Strahlungsintensität um den Faktor 2 geschwächt (schematische Darstellung: Streuung nicht berücksichtigt)

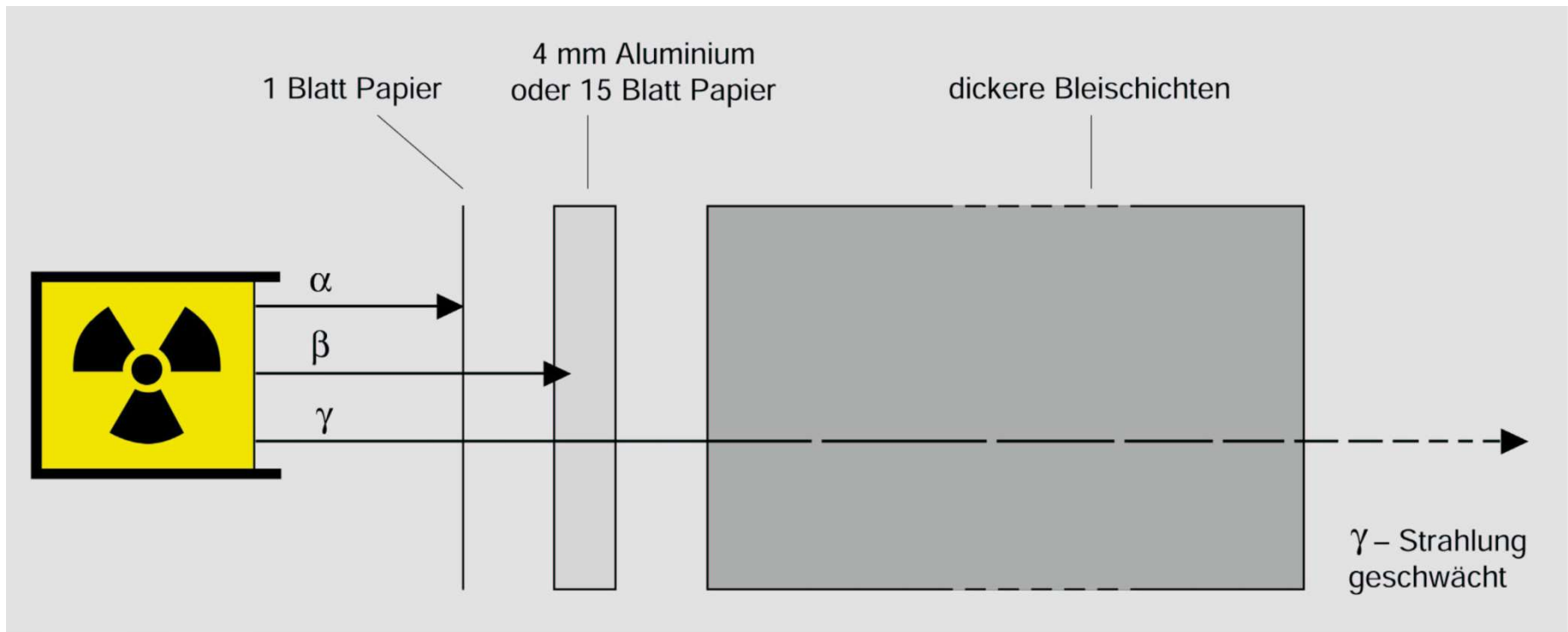
Da Reichweite von Photonenstrahlen nicht angebbbar ist, deshalb Charakterisierung durch Halbwertsschichtdicke



Halbwerts- und Zehntelwertsschicht für Gammaquanten unterschiedlicher Energie

<div> <div>Energie in MeV</div> <div>Materie-schicht in cm</div> </div>	0,1	0,5	1	5	10	100
Wasser:						
Halbwertsschicht	4,15	7,18	9,85	23,1	31,6	40,2
Zehntelwertsschicht	13,8	28,8	32,7	76,6	105,0	133,0
Beton:						
Halbwertsschicht	1,75	3,41	4,66	10,3	12,9	12,5
Zehntelwertsschicht	5,81	11,4	15,5	34,0	43,0	40,6
Eisen:						
Halbwertsschicht	0,257	1,06	1,47	2,82	3,02	2,10
Zehntelwertsschicht	0,855	3,54	4,91	9,40	10,0	6,96
Blei:						
Halbwertsschicht	0,0118	0,422	0,893	1,43	1,21	0,642
Zehntelwertsschicht	0,0386	1,41	2,97	4,78	4,05	2,03

Unterschiedliche Absorption von Alpha-, Beta- und Gammastrahlung

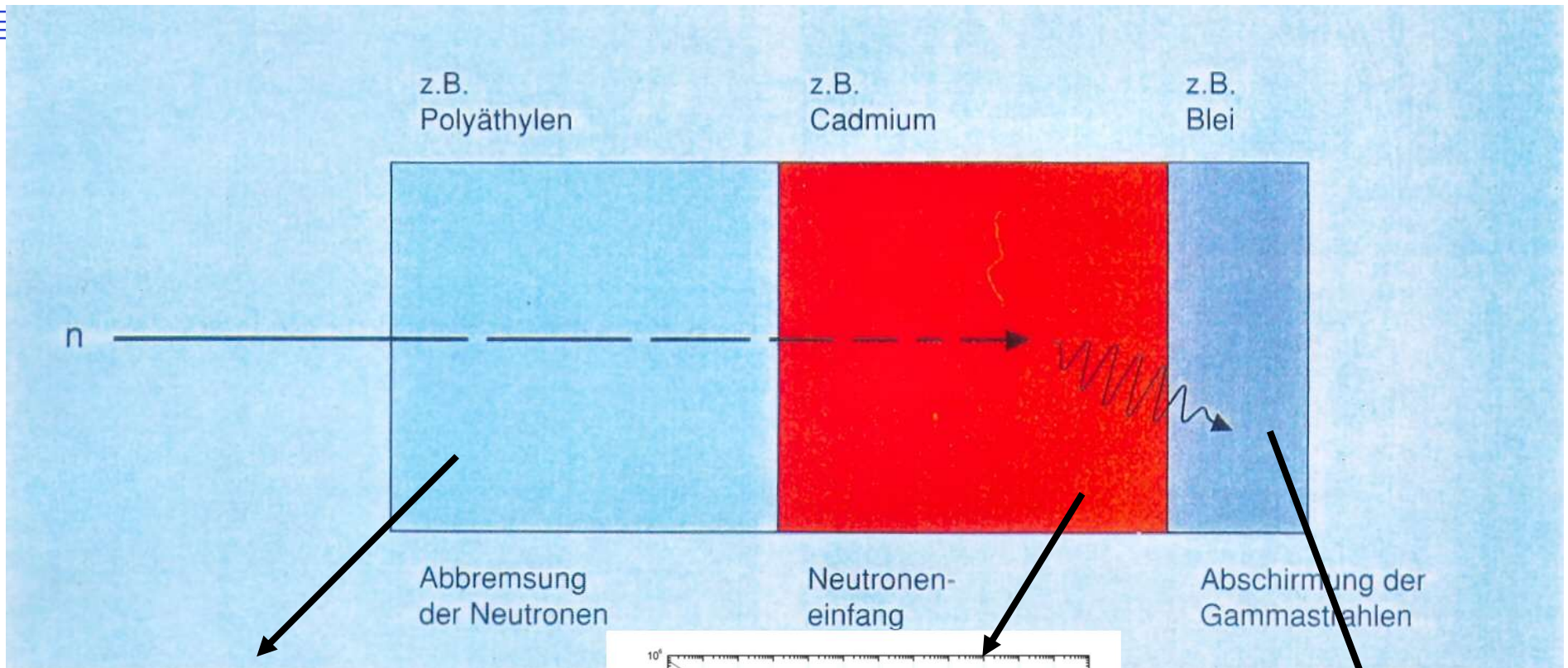


Bremung/Schwächung von Neutronen

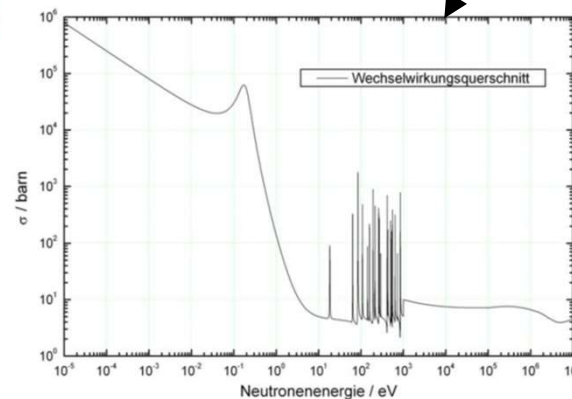
- z.B. radioaktive Neutronenquellen und Neutronengeneratoren emittieren primär schnelle Neutronen
- durchdringen Neutronen eine Substanz, so verlieren sie infolge von elastischen Streuprozessen an den Atomkernen schrittweise ihre kinetische Energie, bis die thermische Energie erreicht ist
- *Wasser bremst schnelle Neutronen stärker als Graphit*

Grundsätzlicher Aufbau eines Neutronenschildes

11.)



Schnelle Neutronen verlieren Energie durch Stöße und werden thermalisiert Paraffin, Kunststoffen, Wasser als Moderator



y werden abgeschirmt, die durch Kernreaktion entstanden sind

