

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Zusammenfassung „Strahlenphysik“

- **Physikalische Grundlagen** (Radioaktiver Zerfall, Eigenschaften der Strahlung, Wechselwirkungsmechanismen, Zerfallsgesetz)
- **Messgrößen** (Aktivität, Energiedosis, Äquivalentdosis, effektive Dosis)
- **Messtechnik und Bildgebung** (Sonden, Szintillationsprinzip, Gammakameras, Tomographie)
- **Strahlenschutz** (Personendosimetrie, Bereiche)
- **Beispielaufgaben** (Zerfallsgesetz, Uptake)

Dr. H. Köhnter: Unterricht für MTRA

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Modell des Atomkerns (Tröpfchenmodell)

Nukleonen:
 Teilchen des Atomkerns
 = Protonen+Neutronen
 = Massezahl A

Ordnungszahl Z = Protonen im Kern

Isotope eines Elements haben gleiche **Protonenzahl**, aber verschiedene **Neutronenzahl** im Kern

Es gibt etwa 50 stabile Atomkerne und über 1000 instabile Atomkerne → **Radioaktive Nuklide**

Dr. H. Köhnter: Unterricht für MTRA

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Was ist Radioaktivität ?

Eigenschaft energetisch instabiler **Atomkerne**, sich spontan umzuwandeln: **Radionuklid**
 ca. 50 natürliche und weit über 1000 künstliche Nuklide

Was sind Isotope ?

Isotope eines Elements haben gleiche Ordnungszahl (Protonen), aber verschiedene Massenzahlen (Protonen+Neutronen)

Maßeinheit der Radioaktivität:

Aktivität: Umwandlungen pro Sekunde = Becquerel (Bq)
 Alte Einheit Curie (Ci): 1 Ci = 37 GBq (Giga-Becquerel)

Halbwertszeit (HWZ)

Zeit, in der sich die **Halfte** der Kerne **umwandelt**

Nach 10 HWZ ist nur noch 0,1% der Ausgangsaktivität vorhanden

Dr. H. Köhnter: Unterricht für MTRA

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Arten radioaktiver Kernstrahlung

Alpha-Strahlen
 Heliumkerne
 $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{222}_{86}\text{Rn} + ^4_2\text{He}$

Beta-Strahlen
 Elektronen oder Positronen
 $^{137}_{55}\text{Cs} \rightarrow ^{137}_{56}\text{Ba} + e^-$
 Elektron (oder Positron)

Gamma-Strahlen
 Quanten, Photonen
 $^{137m}_{56}\text{Ba} \rightarrow ^{137}_{56}\text{Ba} + \gamma$
 Gamma-Quant

Energie der Strahlung:
 $\frac{1}{2} m_{\text{He}} v^2$ (Masse)
 $\frac{1}{2} m_e v^2$ (Geschwindigkeit)
 $h \nu$ (Frequenz)

Dr. H. Köhnter: Unterricht für MTRA

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Energieeinheiten

Mechanische Energie: 1 Nm = 100 g 1 m hochheben

Elektrische Energie: 1 Ws = Strom von 1 A fließt 1 s durch einen Verbraucher (z.B. Widerstand)

Wärmeenergie: 1 J = 1g Wasser von 10°C auf 10,24°C erwärmen

Elektronenvolt: Energie die ein Elektron aufnimmt, wenn es mit einer Spannung von 1V beschleunigt wird

Umrechnung: 1 eV = 1,602 10⁻¹⁹ J
 1 J = 6,242 10¹⁸ eV = 6,242 10¹² MeV

Dr. H. Köhnter: Unterricht für MTRA

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Übersicht: Radioaktive Strahlung

	Energie	Wechselwirkung	QF
Heliumkerne α Teilchenstrahlung	Diskrete Energien um 5 MeV	Ionisierung Anregung	20
Positronen β ⁺ Elektronen β ⁻ Elektronenstrahlung	Kontinuierliche Energien bis 1,5 MeV	Ionisierung Anregung Streuung Bremsstrahlung	1
Photonen γ Quanten	Diskrete Energien 0,003 ... 17 MeV	Fotoeffekt Comptoneffekt Paarbildung	1

Spontane, nicht vorhersagbare Kernumwandlung durch Abgabe von Teilchen (α- oder β-Teilchen) oder Aussenden von Photonen (γ-Strahlung)

Nur Wahrscheinlichkeits-Aussagen
 ↓
 Statistik

Dr. H. Köhnter: Unterricht für MTRA

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Eigenschaften von radioaktiven Nukliden der Nuklearmedizin

Alpha-Strahler **Beta-Strahler** **Gamma-Strahler**

β⁻ **β⁺**
Elektronen Positronen

Einsatzgebiete

Therapie	Therapie	Diagnostik	Diagnostik
----------	----------	------------	------------

Typische Nuklide

²²³Ra HWZ: 11 d α: 6,9 MeV	¹³¹I HWZ: 8 d β ⁻ : 606 keV γ: 364 keV	¹⁸F HWZ: 110 m β ⁺ : 633 keV γ: 511 keV	^{99m}Tc HWZ: 6 h γ: 140 keV
--	--	---	---

Gamma-Komponenten bzw. sekundäre Gamma-Quanten sind wichtig für die Aktivitätsmessungen und bildgebende Verfahren (Kontrolluntersuchungen)

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Halbwertszeit (HWZ)

Zerfallsgesetz der Aktivität
λ: Zerfallskonstante
 $A_t = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$

Beispiele für physikalische HWZ:
¹³¹I → 8 Tage
^{99m}Tc → 6 Stunden
¹⁸F → 109 min

effektive HWZ
 $T_{1/2 \text{ eff}} = \frac{T_{1/2 \text{ biol}} \cdot T_{1/2 \text{ phys}}}{T_{1/2 \text{ biol}} + T_{1/2 \text{ phys}}}$

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Zerfallsberechnungen

$A_t = A_0 \cdot e^{-\lambda t} = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln(2)}{HWZ} t}$

Umstellung nach t:
 $\frac{A_t}{A_0} = e^{-\frac{\ln 2}{HWZ} t}$
beidseitig log arithmieren!
 $\ln\left(\frac{A_t}{A_0}\right) = -\frac{\ln 2}{HWZ} t$

Jetzt leicht nach t umstellbar!

Normale Darstellung, beide Achsen linear

Halblogarithmische Darst., X-Achsen linear Y-Achse logarithmisch (ln)

Berechnung der Exponentialfunktion mit dem Taschenrechner → alles klar?

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Anwendung des Zerfallsgesetzes

Aufgabe: Ein Abfallbehälter mit I-131-Abfällen muss vor seiner Freigabe zur Entsorgung so weit abklingen, dass die spezifische Oberflächenaktivität einen Grenzwert von **5 Bq/cm²** unterschritten hat. Zum Zeitpunkt der Einlagerung wurde eine maximale Oberflächenaktivität von **5 kBq/cm²** gemessen.

Frage:
A) Wie viele HWZ und/oder wie viele Tage muss dieser Abfallbehälter im Abklingraum eingelagert werden, bis er zur Entsorgung freigegeben werden kann?
B) Welche Oberflächenaktivität wird nach 1 Monat (30 Tage) zu messen sein?

A $t = -\ln(A_t/A_0) \cdot HWZ / \ln(2)$
 $t \approx 80$ Tage

B Nach 1 Monat: 370 Bq/m²

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Wechselwirkung von α- und β-Strahlen

Ionisation → **α-Strahlen:** dichte Ionisation längs der Bahn
Starke Wirkung auf umgebende Materie → kurze Reichweite
Aber auch: Anregung der Hüllenelektronen und daraus folgend Abgabe eines Photons

„Strahlung“ gibt kinetische Energie an Hüllenelektronen ab, so dass diese vom Atom gelöst werden

→ **β-Strahlen:** lose Ionisation längs der Bahn
geringere Wirkung auf umgebende Materie → längere Reichweite
Aber auch Anregung, Streuung und Erzeugung von Bremsstrahlung

Anregung → „Hüllenelektronen werden in höhere Schale gehoben. Beim zurückspringen auf innere Schale wird elektromagn. Strahlung frei“

Bremsstrahlung → Abbremsung der Teilchen im Kernfeld erzeugt Röntgenstrahlung

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Wechselwirkung von Gamma-Strahlung

Fotoeffekt **Comptoneffekt** **Paarbildung**

Wechselwirkung mit Hüllenelektronen **Wechselwirkung mit Atomkern**

Fühlt sich wohl bei niedrigen Energien und hohen Ordnungszahlen

Sind Energie und Ordnungszahl ziemlich egal

Braucht Energien >1,02 MeV und liebt hohe Ordnungszahlen

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Reichweite radioaktiver Strahlung

Reichweite von Strahlung

Strahlungsart	in Materialien	in Gewebe
Alphastrahlung	durchdringt Papier nicht	durchdringt kaum die Haut
Betastrahlung	wird im Aluminium absorbiert	wird im Gewebe absorbiert
Gammastrahlung	wird im Blei abgeschwächt	durchdringt das Gewebe, wird teilweise absorbiert

Achtung! Je nach Material entsteht unterschiedliche sekundäre Gamma-Strahlung

Dr. H. Künster, Unterricht für MTRA

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Grundbegriffe und ihr Zusammenhang

Aktivität
Bei spontanen Kernumwandlungen wird Energie frei

Als **Quant/Foton**: Röntgen-, γ -Strahlung
Als **Teilchen**: α -, β -Strahlung

Strahlung
Freigesetzte Energie wird transportiert

Dosis
Transportierte Energie wird in Materie übertragen
Energieumwandlung in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern durch **Ionisation, Streuung, Absorption**

Biologische Strahlenwirkung
Übertragene Energie verändert Zellen
Keimzellen: genetische Schäden somatische Schäden
Stochast. Wirkung: Wahrscheinlichkeitsaussagen Keimzellen, Krebsauslösung von Dosis abhängig
Determin. Wirkung:

Strahlenschaden
Veränderte Körperzellen schädigen Organismus sofort (**akut**) und verzögert (**latent**)

Strahlenrisiko
Schäden werden mit höherer Dosis häufiger
Strahlenrisiko steigt

Dr. H. Künster, Unterricht für MTRA

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Dosis: Art, Messgrößen, Einheiten

Übertragene Energie pro Masseneinheit: **Joule/kg [J/kg]**

Durch welche **Strahlenart**? aber: **beliebig** → **Energie-Dosis D**
An welches **Material**? → **1 J/kg = 1 Gray [Gy]**

Bewertung der biologischen Wirkung einer Strahlenart durch Faktor W_R → **Äquivalent-Dosis**
 $D \cdot W_R = \text{Sievert [Sv]}$
 $W_R = 1$ für X, γ und β
 $W_R = 20$ für α
 $W_R = 0,03$ für Schilddrüse

Bestrahlung **von innen** (Einzelorgane) oder **von außen** (Körper: Ganzkörper) → **Effektiv-Dosis**
Bewertung der Strahlenempfindlichkeit eines Organs durch Faktor W_T → $D \cdot W_R \cdot W_T = \text{Sievert}$

Dr. H. Künster, Unterricht für MTRA

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Aktivitäts- oder Dosisleistungsmessung: Ionisationskammer

Kontaminationssonde LB1231
Gasfüllung, Elektron, Ion, Elektroden, dazwischen Hochspannung

Dosisleistungssonde LB 1236
dünnwandiges Fenster mit Schutzgitter, Gamma-Quanten oder β -Teilchen

Auswertelektronik mit Anzeige und Warnung (24 IPS)
Schaltet automatisch um, wenn Sonde gewechselt wird

Dr. H. Künster, Unterricht für MTRA

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Szintillationszähler: Energieabhängige Zählung

γ -Quanten → Sekundär-Elektronen-Vervielfacher (SEV) → hohe Verstärkung: ca. 1 Mio.-fach → Auswertelektronik

Szintillationskristall aus NaJ mit Spuren von Thallium

Intensität des Lichtblitzes ist proportional zur Energie des Quants
→ Einteilung in Intensitätsbereiche → **Energiespektrum**

Dr. H. Künster, Unterricht für MTRA

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Gamma-Kamera: Aufbau und Funktion

Elektronik, **Sekundär-Elektronen-Vervielfacher**, **Szintillationskristall (NaJ mit Spuren von Thallium)**, **Kollimator (Blei)**

Strahlenquelle (z.B. Schilddrüse, in der ^{99m}Tc angereichert wurde)

Dr. H. Künster, Unterricht für MTRA

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Kollimatoren für die Bildgebung

Spezielle Bleiabschirmungen mit „Löchern“, durch die die Gammastrahlung hindurch treten kann

Pinhole-Kollimator **Vielloch-Kollimatoren**

parallel konvergierend divergierend Fan-Beam

vergrößert verkleinert

Kombination aus parallel+konvergierend

Durch ein oder mehrere kleine Löcher in der Abschirmung treten die γ -Strahlen hindurch und treffen auf den Kristall (Lochkamera)

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Bildentstehung in der Gammakamera

im Vergleich mit Digitalkamera

Objekt „Linse“ „Bildsensor“ Speicherkarte Bild

Objekt mit Anreicherung von Aktivität in SD und Blase

Kollimator Szintillations-Kristall und SEV-Feld

In der Realität mehrere Aufnahmen Nacheinander und zusammensetzen

Elektronik/PC

Signal-Verarbeitung und Auswertung

Digitales Pixelbild

Anzahl registrierte Counts bestimmt die Farbe/Grauwert jedes Pixels

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

SPECT Tomographie PET

Singel-Photon-Emissions-Computer-Tomographie Positronen-Emissions-Tomographie

Aufnahmeserie in Winkelschritten um den Patienten

Einzelne Photonen werden vom Kern abgestrahlt, (meist in Verbindung mit Teilchenzerfall) und können im Kamerakopf orts- und energieaufgelöst registriert werden.

Positronenstrahler (positiver Beta-Strahler) Nur **Koinzidenzen** zweier 511-keV-Quanten in beiden Köpfen werden registriert

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Energie-Spektrum

Energieachse (x) wird in kleine Bereiche (Kanäle) eingeteilt. Jedes registrierte Quant wird seiner Energie nach in einen solchen Kanal eingeordnet (gezählt).

Comptoneffekt im Detektor und in Materialien im Strahlenweg

Fotopeaks Quanten, die ohne Streuverluste zur Registrierung gelangen

z.B. Kanal n: 139 – 141 keV
12534 Counts (registrierte Ereignisse)

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Strahlenschutz in der Nuklearmedizin

Patient **Personal** **Umgebung**

Muss erhöhte Strahlenbelastung erdulden, damit diagnostische oder therapeutische Ziele erreicht werden.

Zusätzliche Strahlenbelastung durch die Tätigkeit darf Grenzwerte nicht überschreiten

Eine zusätzliche Belastung der Umwelt und damit unbeteiligter Personen darf nicht erfolgen

Nutzen muss höher sein als der Schaden

Personendosimetrie Arbeitsanweisungen

Baulicher Strahlenschutz und Vorschriften für den Umgang mit offenen Radionukliden

Kontrolle der appl. Aktivität Arbeitsanweisungen Dokumentation

Vorschriften Beachten!

MTRA

Strahlenphysiker

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Strahlenschutzbereiche nach Strahlenschutzverordnung

Bei allen in diesem Bereich ständig tätigen Mitarbeiter wird die Dosis überwacht.

Maximum/Jahr: 20 mSv
Berufslifedosis: 400 mSv
Schwangere: 1 mSv

Bereich, in dem sich die therapierten Patienten aufhalten. Das dort tätige Personal unterliegt einer ständigen Dosiskontrolle

Teil des Kontrollbereiches, in dem die Ortsdosisleistung > 3 mSv/h sein kann

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Strahlenbelastung

Natürliche Belastung in D: **2,1 mSv/Jahr**
Zuschläge durch Radon oder Flüge möglich

max. Belastung der Bevölkerung durch Umgang mit ionisierender Str.: **1 mSv/Jahr**

max. Belastung überwachter Personen: **20 mSv/Jahr**
überwachte Schwangere: **1 mSv/Schwangers.**

Patientenbelastung Diagnostik: bis 30 mSv/Unters.
Therapie: kann wesentl. mehr

Dr. H. Künshner, Unterricht für MTRA

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Strahlenschutz

- Einwirkzeit gering halten
- Entfernung zum Radionuklid groß
- Quelle abschirmen

Dr. H. Künshner, Unterricht für MTRA

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Iod-Uptake: Was bedeutet das ?

Prozentuales Aufnahmevermögen der Schilddrüse für ¹³¹I oder anderes Iod-Nuklid

Ausgangs-Aktivität

- Anteil in der Schilddrüse
- Anteil im Körper
- Ausgeschiedener Anteil

Diagnostik:
Geringe Aktivität, um den Uptake zu bestimmen

Marinelli-Formel → Therapieaktivität

Therapie:
Kontrolle, ob der diagnostische Uptake unter Therapiebedingungen eintritt und somit die geplante Herddosis erreicht wird, (ggf. korrigieren)

Dr. H. Künshner, Unterricht für MTRA

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Verfahrensanleitung zum Radioiodtest

Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin und Deutsche Gesellschaft für Medizinische Physik, 2003

Unter Bestimmung des **Radioioduptakes (RIU)** versteht man die Quantifizierung des Anteils an appliziertem Radioiod, der zu einer definierten Zeit nach der Applikation in der Schilddrüse (SD) gespeichert ist.

Verfahrensanleitung beinhaltet:

- Zielstellung
- Indikation
- Patientenvorbereitung
- **Datenerkennung** Geräte
- **Zeitpunkt der Messung**
- **Durchführung der Messung**
- **Datenauswertung**
- Befundung und Dokumentation
- Qualitätssicherung

Berechnung der Aktivität der SD:

- Nettozählrate und Nachweiseffizienz und Vergleich mit der Aktivimetermessung der Aktivität
- oder
- Vergleich der Nettozählraten über der SD und über der applizierten Aktivität im Phantom
- oder
- Vergleich der Nettozählrate über der SD und über der applizierten Aktivität frei Luft unter Anwendung des Korrekturfaktors zw. Messung im Phantom und frei Luft

RIU = $\frac{\text{Aktivität der Schilddrüse}}{\text{Applizierte Aktivität}} \cdot 100\%$

Dr. H. Künshner, Unterricht für MTRA

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Bestimmung des Iod-Uptake

Verfahren 1: Sondenmessung (Diagnostik)

Übungsaufgabe

Einem Patienten wurde eine NaI-Lösung mit einer Aktivität von 2 MBq ¹³¹I appliziert. Die Messung im Phantom ergab 20000 Impulse. 22 h nach Applikation wurden 10000 Impulse gemessen.

1. Berechnen Sie den Uptake.
2. Welchen Wert hat die Vergleichsaktivität (Standard) nach 22 h.

Uptake[%] = $\frac{\text{Impulse von SD}}{\text{Impulse der appl. Aktivität im Phantom}} \cdot 100\%$

$RIU_{22h} = \frac{10000}{20000} \cdot 100\% = 50\%$

$A_{22h} = A_0 e^{-\frac{\ln(2)}{HWZ} \cdot t} = 2MBq \cdot e^{-\frac{\ln(2)}{8 \cdot 24} \cdot 22} = 2MBq \cdot 0,924 = 1,85MBq$

Dr. H. Künshner, Unterricht für MTRA

Zusammenfassung: „Strahlenphysik“ KNuk Uni Rostock

Bestimmung des Iod-Uptake

Verfahren 2: Gamma-Kamera und ROI-Auswertung

Übung:

Patient B wurde eine Aktivität von 420 MBq ¹³¹I appliziert. Nach 20 h wurde eine szintigrafische Aufnahme der SD über 100 s gemacht. Die ROI-Auswertung ergab 84000 Impulse. Die Gammakamera besitzt eine Effizienz von 10 cps je MBq ¹³¹I.

RIU = $\frac{\text{Gesamtimpulszahl in ROI} \cdot 100\%}{\text{Messzeit[s]} \cdot \text{Effizienz[cps/MBq]} \cdot \text{appl. Aktivität[MBq]}}$

$RIU = \frac{84000}{100s \cdot 10cps/MBq \cdot 420MBq} \cdot 100\% = 33\%$

Dr. H. Künshner, Unterricht für MTRA