



Anwendungen von Radioaktivität

Institut für Kernchemie
Universität Mainz

Markus Piel



Anwendungsberiche

➤ Technisch

- ↪ Energieerzeugung
- ↪ Kernwaffen
- ↪ Zerstörungsfreie Messungen und Untersuchungsverfahren
- ↪ Ionisations-Rauchmelder

➤ Medizinisch

- ↪ Diagnostik (Tracerprinzip; molekulare Sonden)
- ↪ Therapie
- ↪ Sterilisierung medizinischer Instrumente

➤ Wissenschaftliche Forschung

- ↪ Untersuchung von Reaktionsmechanismen
- ↪ ^{14}C -Altersbestimmung
- ↪ Assays
- ↪ NAA



Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung

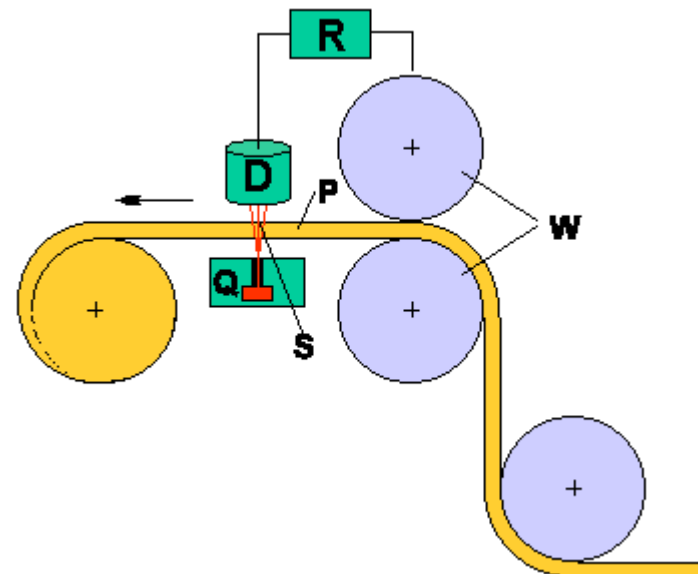
- Durchstrahlungen mit radioaktiven Nukliden werden bei der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung angewendet.
- Strahleneigenschaften müssen der Dicke und dem Material des Prüflings angepaßt sein.
- Aus wirtschaftlichen Gründen darf zum einen die Halbwertszeit nicht zu kurz sein, zum andern muß die Strahlung so hart sein, daß das untersuchte Werkstück noch genügend stark durchstrahlt wird, und wiederum so weich, daß Strukturfehler gut erkennbar sind
- Häufig eingesetzte Nuklide:

Anwendungsgebiet	Radionuklid	T _{1/2}	Strahlung	Energie
Schichtdicke: unter 6 mm	¹⁷⁰ Tm	127 d	β ⁻	0,084 MeV
bis 25 mm	¹⁹² Ir ¹³⁷ Cs + ^{137m} Ba	74 d 30 a	β ⁻ β ⁻ , γ	1,4 MeV 1,17 MeV
über 25 mm	⁶⁰ Co	5,24 a	β ⁻ , γ	2,824 MeV



Schichtdickenmessungen

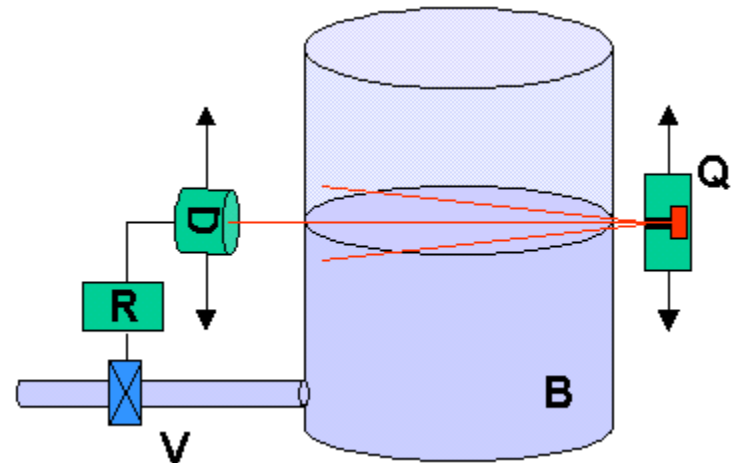
- Mit Hilfe von Strahlen geringer Durchdringungsfähigkeit (z.B. β -Strahlung) können Dickenmessungen bis zu einigen mm Stärke durchgeführt werden.
- Es wird die Schwächung der Strahlung beim Durchgang durch das zu untersuchende Material gemessen.
- Beim Absorptionsverfahren wird die Probe P mit einer β -Strahlenquelle Q bestrahlt. Der von ihr emittierte Strahl S wird teilweise von der Probe absorbiert. Der nicht absorbierte Anteil gelangt in den Detektor D (Zählrohr). Treten Unterschiede in der Materialstärke auf, so ist die Absorption verschieden und in gleicher Weise die Detektoranzeige. Diese ist mit einer Regelvorrichtung R gekoppelt, die die Dickenregulierung der beiden Druckwalzen W bewerkstelligt.





Füllstandsmessungen

- Durch die stark unterschiedliche Absorption des leeren und gefüllten Behälterteils kann mittels Durchstrahlung von außen der Füllstand festgestellt werden.
- An einem Behälter B wird eine β -Strahlenquelle Q und gegenüber ein Zählrohr D angebracht. Erreicht das Füllgut diese Verbindungslinie, so wird die Strahlung stärker absorbiert wodurch eine automatische Regelung die mit dem Zähler gekoppelt ist, den Zulauf in diesem Augenblick sperrt. Im Bedarfsfall ist es möglich, die Meßvorrichtung am Behälter auf- und abzubewegen, um den jeweiligen Füllstand feststellen zu können.
- Da die Strahlung möglichst ungeschwächt durch die Behälterwand hindurchgehen muß, kommt dafür nur β -Strahlung in Frage. Häufig wird deshalb ^{60}Co verwendet.





Ionisations-Rauchmelder

- Ein kleines Luftvolumen wird mit einem α -Strahler bestrahlt, dadurch ionisiert und dessen Leitfähigkeit gemessen.
- Befindet sich Rauch in der Luft, so treffen häufig Ionen auf Rauchpartikel und lagern sich dort an. Die Leitfähigkeit der Luft verringert sich.
- Anhand der Leitfähigkeitsabnahme kann auf die Rauchkonzentration geschlossen werden. Bei Verringerung des Stromflusses schlägt der Ionisationsmelder Alarm
- Verwendete Strahler: früher Ra (hoher γ -Anteil), heute ^{241}Am
- Problematik:
 - ↪ Entsorgung der Quellen (im angloamerikanischen Raum können diese Rauchmelder im Hausmüll entsorgt werden)
 - ↪ Korrosion der Quellen (wegen α -Strahlung sind die Quellen nur durch eine dünne Goldschicht geschützt)



Rauchmelder



Bildgebende Verfahren in der Medizin

- Registrierung von der Strahlung außerhalb des Körpers
- PET: Positronenemitter
- Szintigraphie, SPECT: γ -Emitter
- Unterschiede: Detektoren, Ortsauflösung, Produktion, Kosten,...

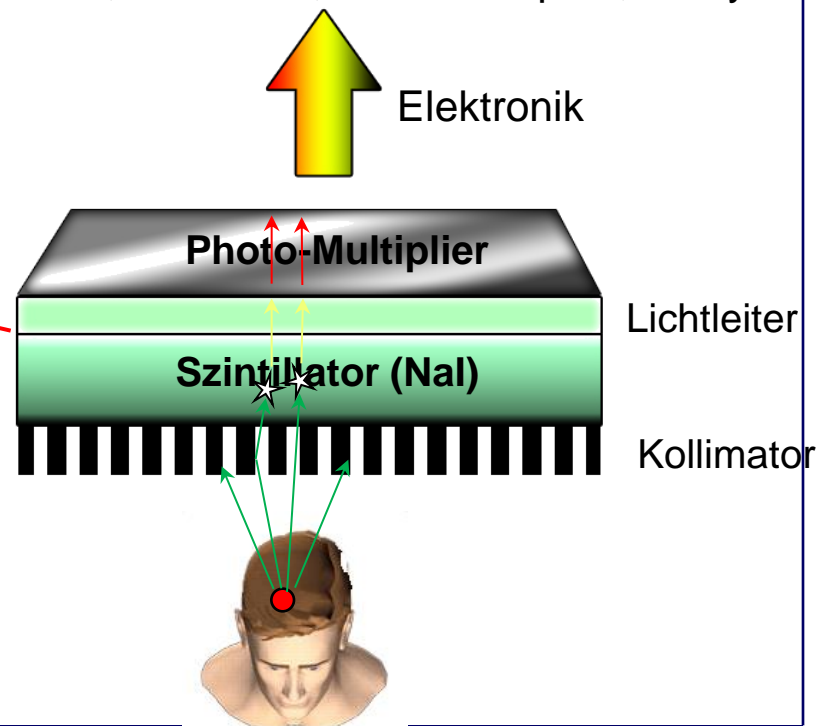




Szintigraphie

- nicht-invasives, bildgebendes Verfahren in der Nuklearmedizin
- Registrierung von γ -Strahlen außerhalb des Körpers
- **2-dimensionale** Projektion zur Bild-Generierung
- Einsatz einer Gammakamera

↳ Kollimator, Szintillator, Lichtleiter, Photomultiplier, Analysator

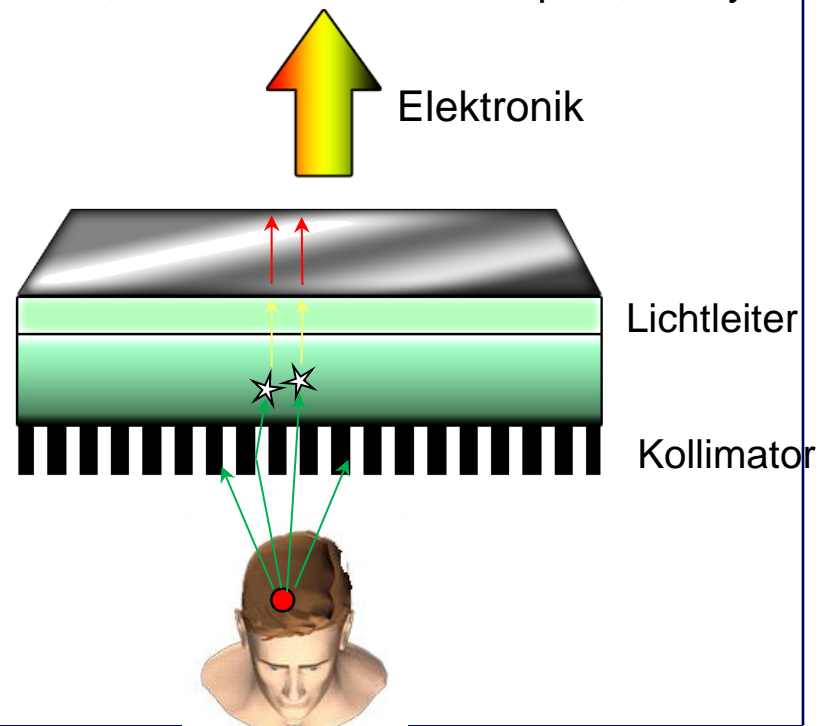
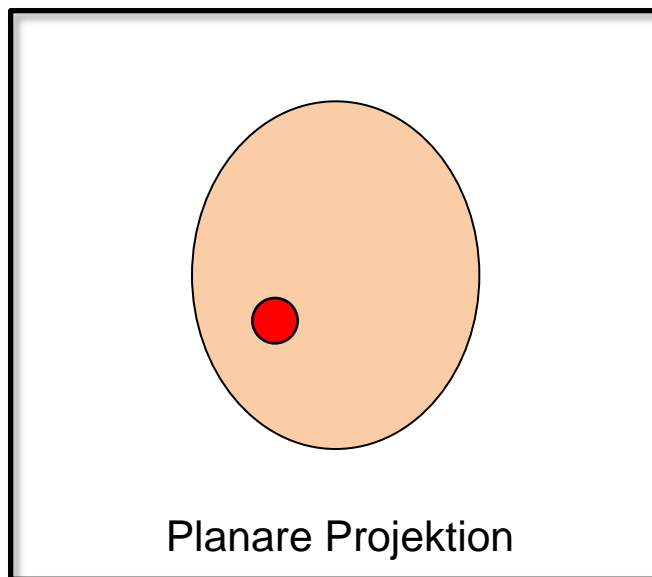




Szintigraphie

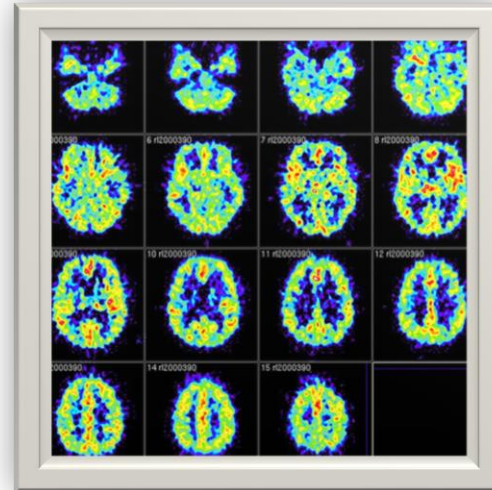
- nicht-invasives, bildgebendes Verfahren in der Nuklearmedizin
- Registrierung von γ -Strahlen außerhalb des Körpers
- **2-dimensionale** Projektion zur Bild-Generierung
- Einsatz einer Gammakamera

↳ Kollimator, Szintillator, Lichtleiter, Photomultiplier, Analysator



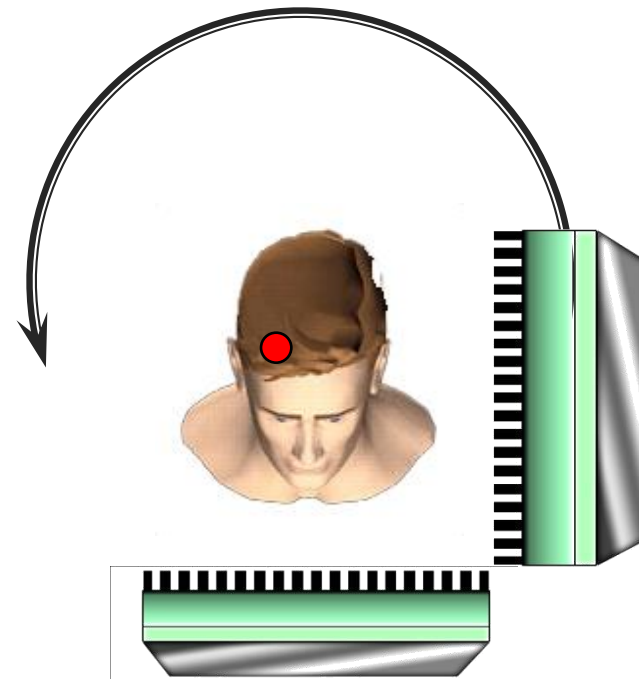


SPECT





SPECT





Relevante Radionuklide

	SPE	$T_{1/2}$	E_{γ}	Anteil
→	^{123}I	13,20 h	159 keV	83,3 %
	^{131}I	8,04 d	364,5 keV	81,2 %
→	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6,01 h	140,5 keV	87,2 %
	^{201}Tl	3,05 d	68,9 keV 70,82 keV 80,12 keV	26,9 % 46 % 16,1 %
	^{67}Ga	3,26 d	184,6 keV	20,4 %
	^{111}In	2,82 d	171,3 keV 245,4 keV	90,24 % 94,0 %



[^{99m}Tc]Technetium

- niedrige γ -Energie von **140 keV**: theoretisch beste Szintillationsausbeute bei NaI(Tl)-Detektoren
 - **$t_{1/2} = 6,01$ h**: gut bezüglich Synthese, Reinigung, Qualitätskontrolle
 - sehr hohe spezifische Aktivität
 - sehr bequeme Verfügbarkeit: ⁹⁹Mo/^{99m}Tc-Generator
 - ↳ optimal für Routine-Synthese mittels Markierungs-Kits,
 - ↳ Synthese vor Ort, kein Zyklotron notwendig
- ! ~ 80% aller Diagnosen mit ^{99m}Tc: Das ROUTINE-Nuklid
- ! Jahres-Verbrauch: ca. 150000 Ci (5550 TBq !)



^{14}C -Altersbestimmung

- Von kosmischen Neutronen induziert finden in der Atmosphäre Kernprozesse statt, die für ein konstantes Verhältnis zwischen ^{14}C und ^{12}C sorgen:



- ^{14}C -Kerne ($T_{1/2}$: 5568 a) gehen in einem β -Prozeß in Stickstoff über



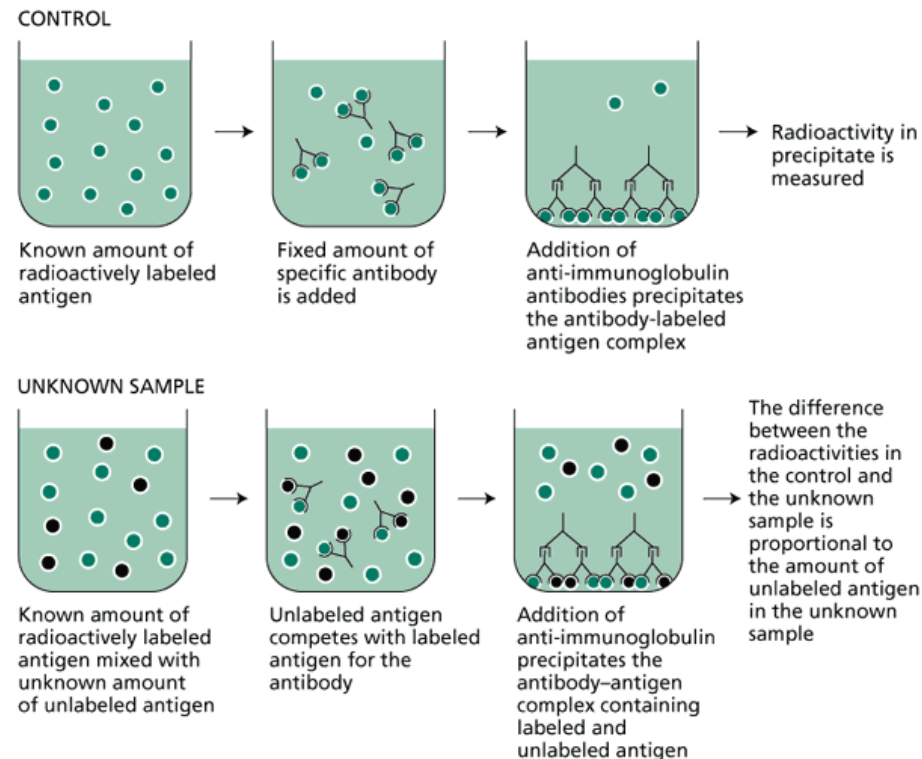
- In lebenden Organismen erfolgt ein ständiger Austausch von Kohlenstoff (in Form von CO_2) mit der Luft, so daß das Verhältnis $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ konstant ist.
- Beim Tod des Lebewesens jedoch hört dieser Austausch von CO_2 mit der Umgebung auf, weshalb die Radioaktivität im toten Organismus abklingt.
- Daher wird der Kohlenstoff im zu bestimmenden Objekt zu CO_2 verbrannt und seine Strahlungsintensität mit der Intensität des CO_2 verglichen, das man aus lebender Materie erhält





Radioimmunoassay

- Beim Radioimmunoassay (RIA) konkurrieren ein radioaktiv markiertes Antigen mit dem entsprechenden nichtmarkierten Antigen um Bindungsstellen an einem Antikörper.
- Messprinzip:

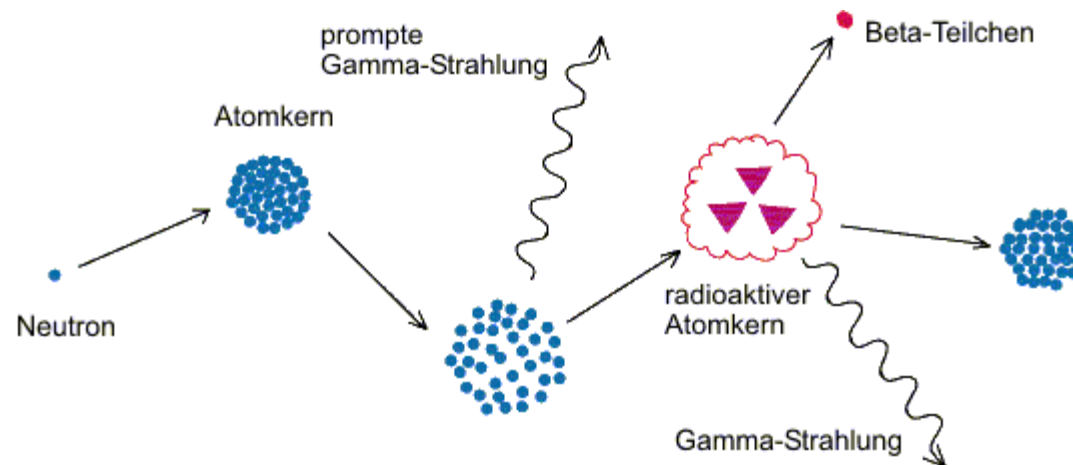


- Verwendete Isotope: ^3H , ^{131}I , ^{125}I , ^{32}P , ^{35}P



Neutronenaktivierungsanalyse

- Die Neutronenaktivierungsanalyse (NAA) ist ein Verfahren zur qualitativen und quantitativen Bestimmung von Elementen.
- Dazu wird die Probe durch Wechselwirkung mit Neutronen aktiviert.
- Durch Messung der Intensität der charakteristischen Strahlung, die beim Zerfall der erzeugten Radionuklide emittiert wird, kann die Konzentration der jeweils entsprechenden Elemente berechnet werden:

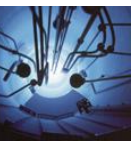


- Die NAA stellt eine Multielementanalyse mit hoher Nachweiswahrscheinlichkeit dar
- Anwendungsgebiete sind die Halbleitertechnik, Spurenanalyse in Wasser, biologischen Proben und Mineralien
- Beispiel: $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na} \rightarrow ^{24}\text{Mg} (\beta^-, t_{1/2} = 15 \text{ h})$

Neutronenaktivierungsanalyse (NAA)

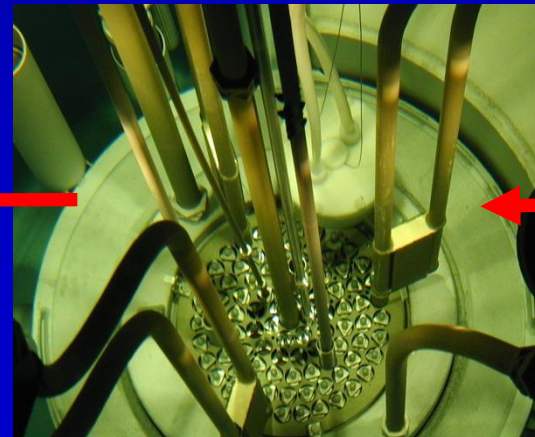
- **INAA (Instrumentelle NAA) und RNAA (Radiochemische NAA):**
 - Spurenelementbestimmung
 - Edelmetalle in Gestein, Erzen und Mineralien
 - Multielementanalysen mit Luftfiltern, Schlämmen, Wasser- und Bodenproben sowie biologischen und kosmischen Proben (Meteoriten)
 - Migrationsstudien von Platinelementen im Boden
 - Zertifizierung von Materialien für industrielle Anwendungen (mit der BAM, Berlin)
- **DNAA (Delayed Neutron Activation Analysis):**
 - Bestimmung von Uran und Plutonium in verschiedensten Proben

1/18/2017





		Al 27 100 σ 0,230	Al 28 2,246 m β^- 2,9 γ 1779	Al 29 6,6 m β^- 2,5... γ 1273; 2426; 2028...
Mg 24 78,99 σ 0,053	Mg 25 10,00 σ 0,17	Mg 26 11,01 σ 0,037	Mg 27 9,46 m β^- 1,8... γ 844; 1014... σ 0,07	Mg 28 20,9 h β^- 0,5; 0,9... γ 31; 1342; 401; 942...
Na 23 100 σ 0,43 + 0,1	Na 24 20 ms γ 472 β^- ~ 6	Na 25 14,96 h β^- 1,4... γ 2754; 1369...	Na 26 59,6 s β^- 3,8... γ 975; 390; 585; 1612...	Na 27 1,07 s β^- 7,4... γ 1809...
				Na 28 304 ms β^- 8,0... γ 985; 1698... β_n 0,46...





Bestrahlungspositionen	Neutronenfluss $n/(cm^2 \cdot s)$	Typische Bestrahlungs- zeiten	Typische Probenmengen
Zentrales Bestrahlungsrohr	$4.2 \cdot 10^{12}$	≥ 6 Std.	100 mg
Bestrahlungskarussell	$0.7 \cdot 10^{12}$	≤ 6 Std.	100 mg
Rohrpostsystem	$1.7 \cdot 10^{12}$	≤ 10 Min.	10 mg

INAA an Mineralien

Korund

Ir-192



Topas



Zirkon



Rubmar



INAA an archäologischen Proben





Tracerproduktion

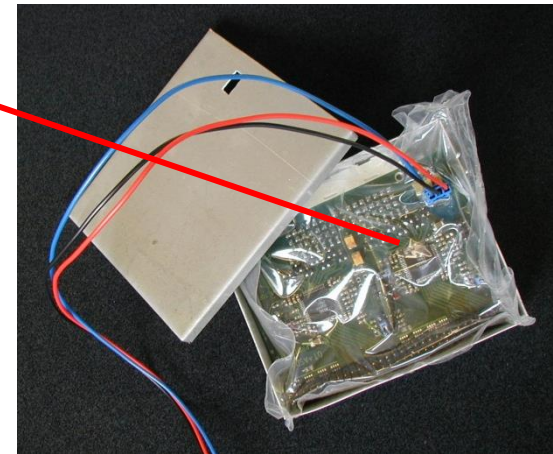
- ^{32}P zur Kalibration eines β -Spektrometers
- ^{71}Ge und ^{76}As zur Ausbeutebestimmung bei Synthesen im Bereich der radiopharmazeutischen Chemie
- ^{239}Np für Migrationsstudien

- Isotopenlabor BASF 2002-2004:

Nuklid	Probe	Position	Anzahl	Zeitraum
^{41}Ar	Ar-Gas	ZB	3	08/2004
^{24}Na	Na-Acetat	ZB	3	07/2004
^{41}Ar	Ar-Gas	ZB	3	05/2004
^{41}Ar	Ar-Gas	ZB	3	06 - 07/2003
^{56}Mn	Mn(IV)-Oxid	K	3	06/2003
^{24}Na	Na-Acetat	ZB	1	05/2003
^{41}Ar	Ar-Gas (ZB)	ZB	9	02 - 04/2003
^{82}Br	Tetrabrombenzol	K	2	09 - 10/2002
^{56}Mn	Mn(IV)-Oxid	K	3	09/2002

Spezielle Bestrahlungen

- Bestrahlung von elektronischen Baugruppen in spez. PE-Behälter auf dem Reflektor



- Bestrahlung von Wischproben zur Spaltspuranalyse für ITU / IAEA
- Kalibrierung von Neutronendetektoren für KKW (Framatome)
- Bestrahlung von Pflanzensamen (Universität Gießen)
- Test von Thermolumineszenz-Detektoren (FZ Karlsruhe)

1/18/2017

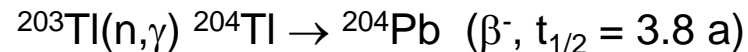


Praktikumsversuch: Elektronenaustausch

Messung der Austauschhalbwertszeit von Tl^+/Tl^{3+}



eine Wertigkeitsstufe wird markiert (Tl^{3+}) und die Einstellung des dynamischen Gleichgewichts beobachtet:



Gleiche Mengen Tl^+ und ${}^*Tl^{3+}$ werden gemischt, nach bestimmter Zeit Tl^+ gefällt. $Tl(I)$ fällt als Chromat Tl_2CrO_4 , $Tl(III)$ wird als Komplex in Lösung gehalten. Für den Reaktionsumsatz gilt daher:

$$d[{}^*Tl^+]/dt = k_1 [Tl^+][{}^*Tl^{3+}] - k_2 [{}^*Tl^+][Tl^{3+}]$$

dabei ist $k_1=k_2$ und $[Tl^+] = [Tl^{3+}] \gg [{}^*Tl^+]$, $[{}^*Tl^{3+}]$

$$d[{}^*Tl^+]/dt = k [{}^*Tl^{3+}] - k [{}^*Tl^+]$$

wobei $[{}^*Tl^{3+}] = [{}^*Tl^{3+}]_0 - [{}^*Tl^+]$



Praktikumsversuch: Elektronenaustausch

$$d[*\text{TI}^+]/dt = k ([*\text{TI}]_0 - [*\text{TI}^+]) - k[*\text{TI}^+]$$

$$d[*\text{TI}^+]/dt = k ([*\text{TI}]_0 - 2 [*\text{TI}^+])$$

Die Integration der Gleichung liefert

$$[*\text{TI}^+] = 1/2 [*\text{TI}]_0 (1 - e^{-2kt})$$

⇒ für $t \rightarrow \infty$

$$[*\text{TI}^+]_{\infty} = 1/2 [*\text{TI}]_0$$

mit der Arrheniusgleichung kann aus der Temperaturabhängigkeit von k die Aktivierungsenergie der Elektronenaustauschreaktion berechnet werden:

$$k = k_0 e^{-E_a/RT}$$

(Auftrag von $\ln k$ gegen $1/T$ ergibt eine Gerade mit Achsenabschnitt $\ln k_0$ und der Steigung $-E_a/R$)