

Neutronenphysik

Prof. Dr. Sabine Prys

Physikalische Grundlagen Reaktorvorlesung II

@designed by ps

Skripte etc.

<http://webuser.hs-furtwangen.de/~neutron/lehrveranstaltungen.html>



The screenshot shows a web browser window with the URL <http://webuser.hs-furtwangen.de/~neutron/lehrveranstaltungen.html>. The page has a purple header with the text "Herzlich willkommen zu Neutron" and a logo of a neutron. A navigation menu on the left lists: Home, Prof. Dr. Sabine Prys, Lehrveranstaltungen, Bücher, Fortbildung, Exkurse, Meetings, Publikationen, News, and Impressum. The main content area is titled "Chemie fuer SSE" and contains a table with two rows of documents:

01 Atomphysik Proto-decosystem 04 11 10	
02 Nuklidkarte Kernphysik 04 11 10	

[Literatur](#)

[Übungsfragen](#)

3 Radioaktivität



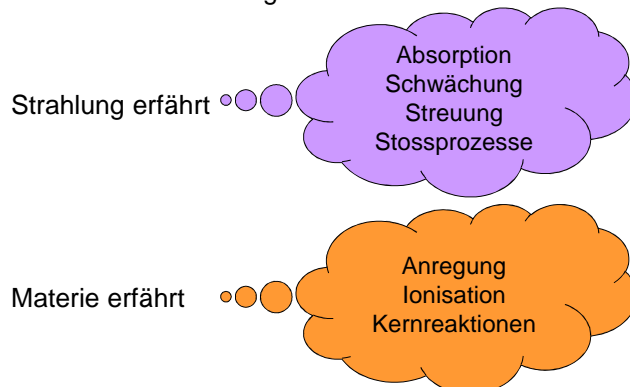
Eigenschaft bestimmter Stoffe, sich **ohne äußere Einwirkung umzuwandeln** und dabei **charakteristische Strahlung** auszusenden

Alpha-Zerfälle	Aussenden von He^{2+} - Teilchen
Beta-Zerfälle	Aussenden von e^- , e^+ aus dem Kern
Gamma-Zerfälle	Aussenden von Photonen aus dem Kern
Röntgenstrahlung	Aussenden von Photonen aus inneren Elektronenschalen
Spontanspaltung	Spaltung eines Atomkernes
Spallation	Zertrümmerung eines Atomkernes
u.a.	

3.2 Strahlung–Materie Wechselwirkung

„Ionisationsbremsung“

Zwischen Strahlung und Materie bestehen Wechselwirkungen



Die Wechselwirkung ist abhängig von Strahlenart und -energie

3.3 Strahlungsenergie



eV

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws}$$

1 eV ist die Energie, die ein Elektron aufnimmt, wenn es beim freien Durchlaufen einer Spannung von 1 V beschleunigt wird

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

3.3.1 Energieeinheiten

Energieeinheiten			
J	Joule		1 J = 1 N.m
eV	Elektronenvolt		
kWh	Kilowattstunde		1 W = 1 kg.m ² /s ³ = 1 J/s
cal	Kalorie		
erg	Energieeinheit		
kg	Kilogramm		
u	atomare Masseneinheit		

3.3.2 Umrechnungsfaktoren

	J	MeV	kWh	cal	erg	kg
1 J	1	6,250E+12	2,778E-07	2,389E-01	1,000E+07	1,113E-17
1 MeV	1,600E-13	1	4,450E-20	3,827E-14	1,602E-06	1,783E-30
1 kWh	3,600E+06	2,247E+19	1	8,600E+05	3,600E+13	4,007E-11
1 cal	4,186E+00	2,613E+13	1,163E-06	1	4,168E+07	4,660E-17
1 erg	1,000E-07	6,242E+05	2,778E-14	2,389E-08	1	1,113E-24
1 kg	8,985E+16	5,610E+29	2,497E+10	2,146E+16	8,987E+23	1
1 u	1,492E-10	9,320E+02	4,146E-17	3,546E-11	1,492E-03	1,661E-27

Quelle: Halliday, Resnik, Walker - Physik, Wiley-VCH Verlag

3.4 Strahlendosis

- Ionendosis
- Energiedosis
- Ortsdosis
- Personendosis

- Dosisleistung
- Abstandsgesetz

3.5 Das Abstandsgesetz



Dosisleistung einer **punktförmigen** γ -Strahlungsquelle

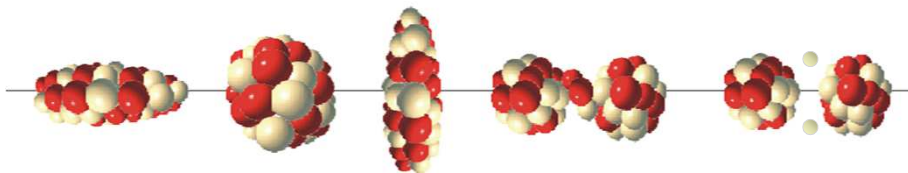
$$\dot{H} = \frac{dH}{dt} = \Gamma_H \cdot \frac{A}{r^2} \quad \left[\frac{\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2}{\text{GBq} \cdot \text{h}} \right]$$

Nuklid	Γ_H
Co-60	351
Cs-137	88
I-131	59

- dH/dt = Gammadosisleistung
- Γ_H = Gammadosisleistungskonstante (tabelliert)
- A = Aktivität
- r = Abstand zur Strahlungsquelle

4.6 Zerfall durch Spontanspaltung

Uran + 1 Neutron \rightarrow Zerfall



Kerne mit $M \geq 232$ können durch Einwirkung kosmischer Neutronen spontan zerfallen
 2 Tochterkerne mit Massenverhältnis 1,4 oder mehrere Bruchstücke (=Spallation)
 Freisetzung von Neutronen

4.6.1 Neutronen

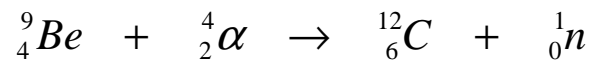
- Begriffe und Einheiten
- Neutronenquellen
- Neutroneneigenschaften
- Messungen
- Rechnungen

4.6.1.1 Begriffe und Einheiten

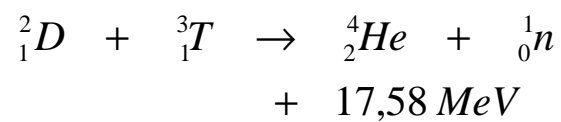
- | | | |
|----------------------------|--------|------------------------|
| • Neutronenquellestärke | S | [n/s] |
| • Neutronenfluenz | F | [n/cm ²] |
| • Neutronenfluss | Φ | [n/s.cm ²] |
| • Neutronenenergie | E | [MeV] |
| • Dosiskonversionsfaktoren | ?? | |

4.6.1.2 Entstehung freier Neutronen

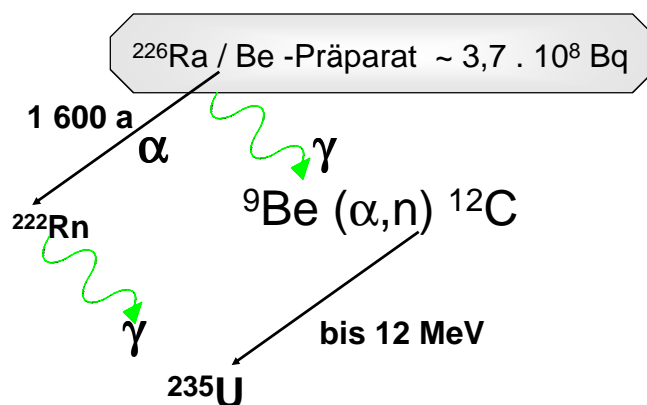
- Entstehung bei Ra-Be-Quellen:



- Entstehung bei Fusionsreaktionen



4.6.1.3 Neutronenquelle SUR-100



4.6.1.4 Neutronenstrahlen

• Teilchenart	Neutronen
• Radionuklide	spaltbare Nuklide
• Energie	eV ... MeV
• Reichweite	energieabhängig
• Energieabgabe	durch Moderation
• Wechselwirkungen	Moderation, Konversion
• Gefahren	Ganzkörperexposition
• Schutz	Abschirmung mit B, Gd, Pb

4.6.1.5 thermische und schnelle Neutronen

Freie Neutronen $\tau_{1/2}$ = ca. 11,5 min

thermische Neutronen

thermisches Gleichgewicht mit umgebendem Medium,
Energie ca. $2,5 \cdot 10^{-2}$ eV,
Geschwindigkeit ca. $2,2 \cdot 10^3$ m/s

schnelle Neutronen

Energie > 0,1 MeV bis ca. 2 MeV,
Geschwindigkeit bis ca. $2 \cdot 10^7$ m/s

Hohe biologische Wirksamkeit!

4.6.1.6 Neutronenenergien

Neutronen	Energiebereich	Geschwindigkeit [km / s]
Subthermisch	< 0,02 eV	< 2,2
Thermisch	0,0252 eV	2,2
Epithermisch	< 0,5 eV	< 9,8
Intermediär	0,5 eV – 10 keV	9,8 - 1400
Schnell	> 10 keV	> 1400
Relativistisch	> 5 MeV	

4.6.1.7 Neutronengruppen

MCNP

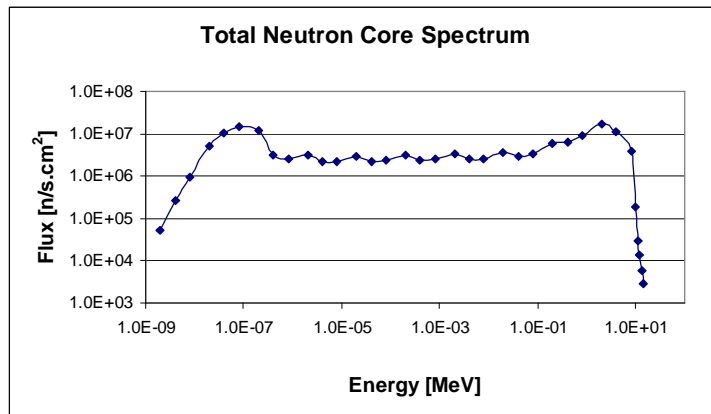
Energiegruppen nach Foehn:

- Thermische Neutronen
0 - 0.625E-06 MeV
- Epithermische Neutronen
0.625E-06 - 5.5E-03 MeV
- Intermediäre Neutronen
5.5E-03 - 8.21E-01 MeV
- Schnelle Neutronen
8.21E-01 - 10 MeV

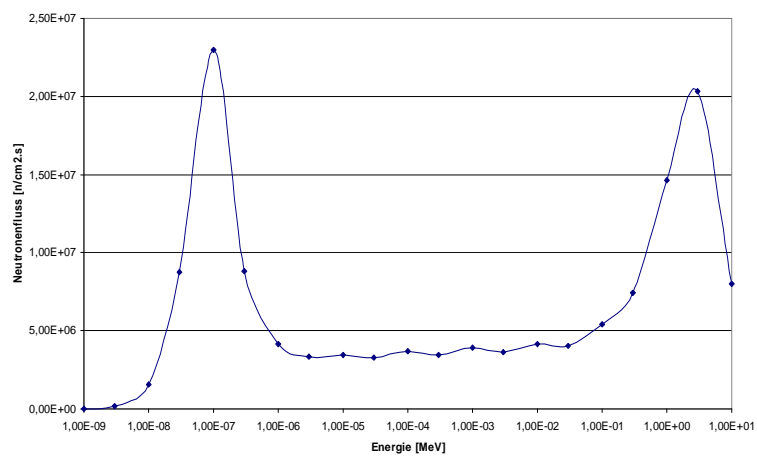
- DIN

- Thermische Neutronen
- Epithermische Neutronen
- Intermediäre Neutronen
- Schnelle Neutronen

4.6.1.8 Neutronenspektrum des Reaktors SUR-100 (log/log)



4.6.1.9 Neutronenspektrum des Reaktors SUR-100 (lin/log)



4.6.1.10 Neutronenwechselwirkungen

Die **wichtigsten Wechselwirkungen** zwischen Neutronenstrahlen und ihrer Umgebung sind

- Streuung $\sigma_{\text{scattering}}$
 - Elastische Streuung (10 keV - 1 MeV) $\sigma_{\text{scat, el}}$
 - Inelastische Streuung (1 MeV - 10 MeV) $\sigma_{\text{scat, inel}}$
- Absorption $\sigma_{\text{absorption}}$
 - Einfang (→ Neutronenaktivierung) σ_{capture}
 - Spaltung (→ Kettenreaktion) σ_{fission}

4.6.1.11 Wirkungsquerschnitte I

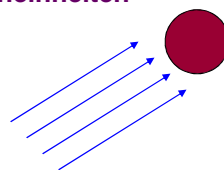


Der Wirkungsquerschnitt σ ist ein Maß für die **Wahrscheinlichkeit** des Auftretens einer (nuklearen) Reaktion

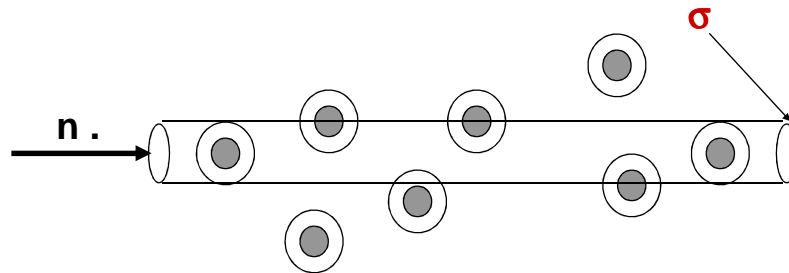
Scheinbare Angriffsfläche eines Zielkerns für ein ankommendes Teilchen

Dimension: **Flächeneinheiten**

$$1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$



4.6.1.12 Wirkungsquerschnitte II



Scheinbare Angriffsfläche eines Zielkerns für ein ankommendes Teilchen

kernartabhängig

energieabhängig, temperaturabhängig

reaktionsabhängig

4.6.1.13 Spaltbare Materialien

α - Strahler:

Isotop	$\tau_{1/2}$	Häufigkeit	σ_{ther} [barn]
U-234	$2,446 \cdot 10^5$ a	0,005 %	
U-235	$7,038 \cdot 10^8$ a	0,720 %	582
U-238	$4,468 \cdot 10^9$ a	99,275 %	< 0,0005
Pu-239	$2,411 \cdot 10^4$ a		743
Pu-240	$6,55 \cdot 10^3$ a		0,03
Pu-241	14,4 a		1009
Pu-242	$3,763 \cdot 10^5$ a		< 0,2
Pu-243	4,956 h		196

4.6.1.14 Spaltquerschnitte für Uran-235

thermische Neutronen:

$$E = 2.5 \cdot 10^{-2} \text{ eV} \quad \sigma_{\text{spalt}} \sim 1000 \text{ b}$$

$$E \sim 10^{-1} \text{ eV} \quad \sigma_{\text{spalt}} \sim 250 \text{ b}$$

schnelle Neutronen:

$$E > 10^6 \text{ eV} \quad \sigma_{\text{spalt}} \sim 1-2 \text{ b}$$



U-235

thermische Spaltung

4.6.1.15 Spaltquerschnitte für Uran-238

thermische Neutronen:

$$E = 2.5 \cdot 10^{-2} \text{ eV} \quad \sigma_{\text{spalt}} \sim 0,0005 \text{ b}$$

schnelle Neutronen:

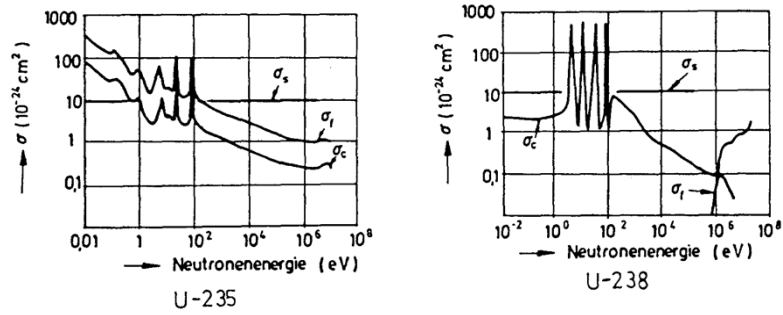
$$E \sim 2-3 \cdot 10^6 \text{ eV} \quad \sigma_{\text{spalt}} \sim 0,5 \text{ b}$$



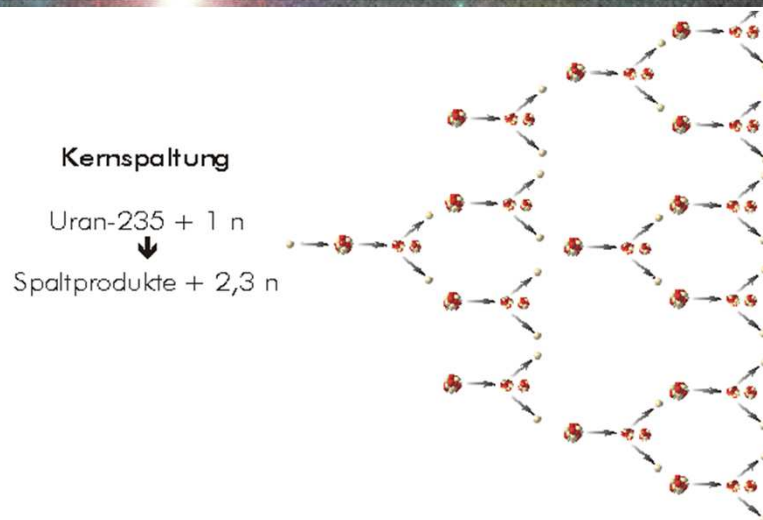
U-238

schnelle Spaltung

4.6.1.16 σ für U-235 und U-238



4.6.1.18 Kettenreaktion



4.6.1.19 Neutronenabsorber

Regelstäbe / -platten

Cd
In / Ag
Hf

B_4C , B_2O_3

Kernschutz

Biologische Abschirmung

(Kernreaktorsteuerung)

$^{113}Cd (n, \gamma) ^{114}Cd$

$^{10}B (n, \alpha) ^7Li$

(Kernreaktorstörfall)

$Na_2B_{10}O_{16} \cdot 10 H_2O$

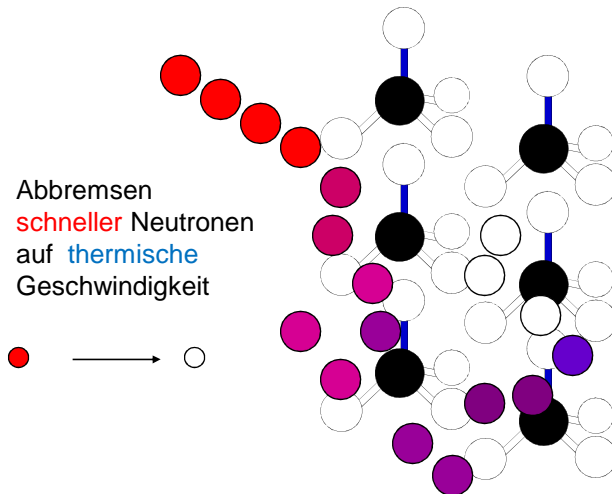
(SUR-100):

H_3BO_4

4.6.1.20 Neutronenstreuung

- Als Neutronenstreuung bezeichnet man den Zusammenstoß eines Neutrons mit einem Kern, wenn es zu keiner Absorption kommt. Die vom Neutron an den Kern abgegebene Energie ist am größten, wenn der Kern dieselbe Masse wie ein Neutron hat. Das ist bei Wasserstoff der Fall. Wasserstoffhaltige Materialien, wie H_2O , PE, etc können deshalb als **Neutronenmoderator** eingesetzt werden um schnelle Neutronen auf die Geschwindigkeit thermischer Neutronen abzubremesen D_2O , Graphit und Be haben ebenfalls große Streuquerschnitte

4.6.1.21 Neutronenmoderation



4.6.1.22 Beispiele

Element	σ_{einf}	σ_{streu}
H-1	0,33	38 (Gas)
H-2	0,00046	7
B-10	755	4
Gd-64	46 000	-

4.6.1.23 Wirkungsquerschnitte III

$$\sigma_{\text{ges}} = \sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{el}} + \sigma_{\text{inel}} + \sigma_{\text{einf}} + \sigma_{\text{spalt}}$$

Streuquerschnitt σ_s : $\sigma_{\text{scattering}}$

Streuquerschnitt für elastische Streuung

Streuquerschnitt für inelastische Streuung

Absorptionsquerschnitt σ_{einf} : $\sigma_{\text{absorption}}$, σ_{capture}

Einfangquerschnitt ohne Spaltung

Spaltquerschnitt σ_{spalt} : σ_{fission}

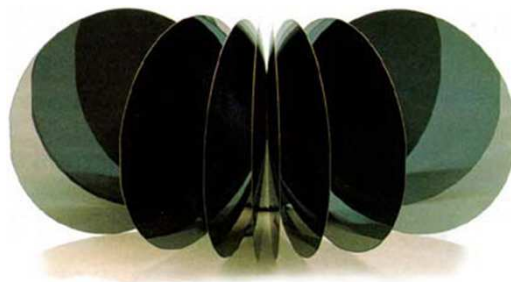
4.6.1.24 Neutronenaktivierung

- **Neutronenaktivierungsanalyse**

⇒ Zerstörungsfrei Materialanalysen

⇒ Qualitätssicherung

⇒ Aber auch: Strahlenbelastungen



4.6.1.25 Aktivierungsarten

Aktivierung durch

- Neutronenquellen, z.B.
 - Cf-252
 - $t_{1/2} = 2,638 \text{ a}$
 - 96,8 % α und 3,1 % sf
 - 3,8 n / sf
 - $2,34 \cdot 10^{12} \text{ Neutronen / s} \cdot \text{g}$
 - Moderator
 - Spaltprodukte
- Kernreaktoren
- Spaltprodukte
- Beschleunigte Teilchen

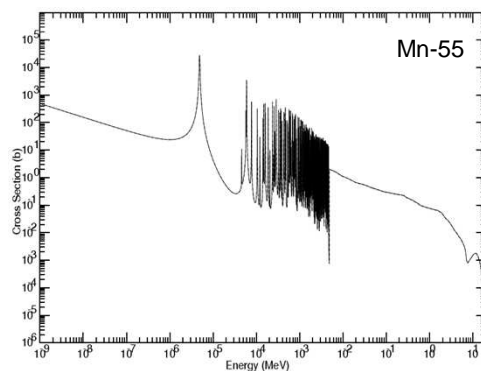
$$^{16}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}$$
- Hochenergetische Photonen

$$^{14}\text{N}(\lambda,n)^{13}\text{N}$$

$$\sigma \sim 1 \text{ mbarn}$$

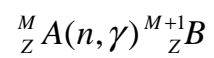
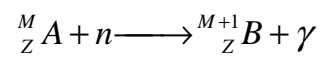
4.6.1.26 Thermische Neutronenaktivierung Wirkungsquerschnitte

	$\sigma_{n,\text{th}}$ [barn]
Fe-56	2,8
Cu-63	4,5
Cu-65	2,2
Mn-55	13,4
As-75	4,5



4.6.1.27 Nukliderzeugung

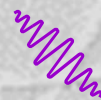
thermische Neutronenaktivierung



Beispiele

Mo-98	(n, γ)	Mo-99
Te-130	(n, γ)	Te-131

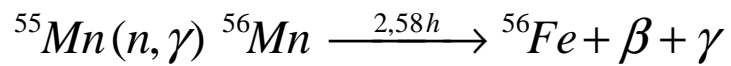
4.6.1.28 Neutronenaktivierung mit anschließendem β -Zerfall



Masse = M + 1
Ordnungszahl = Z + 1

4.6.1.29 Mn-55 Aktivierung

Aktivierung durch thermische n:



γ -Energie
Intensität

0,84660 MeV
1,81120 MeV
2,11260 MeV

γ -

99,00
30,00
15,5

4.6.1.30 Beispiel 1



γ -Energie

0,55910 MeV
0,56280 MeV
0,65710 MeV

γ -Intensität

44,6
1,60
6,40

4.6.1.31 Beispiel 3

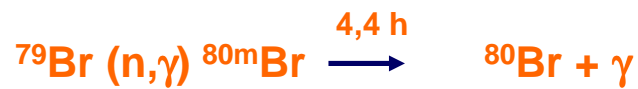


γ - Energie

0,00756 MeV
1,34576 MeV

γ - Intensität

14,0
0,48



γ - Energie

0,03700 MeV
0,04890 MeV

γ - Intensität

40
0,3

4.6.1.32 Beispiel 4



γ - Energie

0,00999 MeV
0,07082 MeV
0,41180 MeV

γ - Intensität

1,27
1,38
95,53



4.6.1.33 Spezifische Aktivität nach Probenbestrahlung

$$A(t, t') = \frac{m \cdot H \cdot \sigma \cdot N_L \cdot \Phi}{M} \cdot e^{-\lambda t'} \cdot (1 - e^{-\lambda t})$$

A	= erzeugte Aktivität (Bq)
t	= Bestrahlungszeit (s)
t'	= Zerfallszeit (s)
m	= Masse des Mutternuklids (g)
H	= Isotopenhäufigkeit des Mutternuklids (%)
N _L	= Avogadro's Zahl (mol ⁻¹)
σ	= Wirkungsquerschnitt (barn)
Φ	= Neutronenflussdichte (n.cm ⁻² .s ⁻¹)
M	= Atommasse des Mutternuklids (g.mol ⁻¹)
λ	= ln2 / t _{1/2}

4.6.1.34 Sättigungsaktivität bei konstantem Φ

Bestrahlung mit thermischen Neutronen während t / t_{1/2}

$$A = \frac{m \cdot H \cdot \sigma \cdot N_L \cdot \Phi}{M} \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{t/t_{1/2}} \right)$$

