

Tabellen und Diagramme zu Kapitel 7		
Ionisierende Strahlung und Radioaktivität		
– <i>Ionizing radiation and radioactivity</i>		
Redakteur: G. Dietze		
7.01	Energien und relative Emissionswahrscheinlichkeiten der K-Röntgenstrahlung, Bindungsenergien von K-Elektronen sowie K-Schalen-Fluoreszenzausbeuten von Elementen mit $Z \geq 5$ – <i>Energies and relative emission probabilities of K X-rays, binding energies of K electrons, and K-shell fluorescence yields of elements with $Z \geq 5$</i> (K. Debertin)	467
7.02	Erzeugung monoenergetischer Röntgenstrahlung (Röntgen-Fluoreszenzstrahlung) zur Kalibrierung von Dosimetern – <i>Production of monoenergetic X-rays (fluorescence radiation) for calibrating dosimeters</i> (B. Großwendt)	469
7.03	Strahlungsqualitäten für Photonenstrahlung – <i>Radiation qualities for photon radiation</i> (H.M. Kramer)	470
7.03a	Strahlungsqualitäten zur Kalibrierung von Strahlenschutzdosimetern	470
7.03b	Strahlungsqualitäten zur Kalibrierung von Diagnostikdosimetern	472
7.03c	Strahlungsqualitäten zur Kalibrierung von Therapiedosimetern	473
7.04	β -Strahler zur Kalibrierung von Strahlenschutzdosimetern – <i>β-ray sources for calibrating radiation protection dosimeters</i> (J. Böhm)	474
7.05	Röhrenspannungen und Halbwertdicken für Kupfer und Aluminium zur Kalibrierung von Therapiedosimetern und zur Bestimmung der Korrektionsfaktoren k_Q – <i>Tube voltages and halfvalue thicknesses of copper and aluminium for calibrating therapy level dosimeters and determining the correction factors k_Q</i> (H. Reich)	474
7.06	Diagramme der Photonen-Wechselwirkungskoeffizienten für einige Stoffe im Energiebereich von 10 keV bis 100 MeV – <i>Diagrams of photon interaction coefficients for some materials in the energy range from 10 keV to 100 MeV</i> (H. Reich)	475
7.07	Massen-Schwächungskoeffizienten und Massen-Energieabsorptionskoeffizienten einiger Stoffe für Photonenstrahlung von 10 keV bis 100 MeV – <i>Mass attenuation and mass energy absorption coefficients of some materials for photon radiation</i> (H. Reich)	477
7.07a	Phantommaterial, Wasser, Luft und Gewebe	478
7.07b	Elemente; Eisensulfat und Lithiumfluorid für Dosimeter	479
7.07c	Werte der Koeffizienten bei den Absorptionskanten einiger Elemente für Photonenenergien größer als 5 keV	480
7.08a	Dosischwächungsgrade für Röntgenstrahlung in Blei und für Gammastrahlung in verschiedenen Materialien – <i>Dose attenuation rates for X-rays in lead and for gamma radiation in several materials</i> (H. Reich)	480

464	Ionisierende Strahlung und Radioaktivität	
7.08b	Bestimmung der Schutzdicken aus verschiedenen Baustoffen für breite Strahlenbündel – <i>Determination of protection layers of different building materials for broad radiation beams</i> (H. Reich)	482
7.09	Dosisabschwächungsgrade für Photonen- und Neutronenstrahlen hoher Energie; Zehntelwertdicken – <i>Dose attenuation rates for high energy photon and neutron radiation; tenth value layers</i> (H. Reich)	483
7.10	Bremsstrahlungskorrektionen g und Kerma-Umrechnungsfaktoren – <i>Correction factors g for bremsstrahlung production and conversion coefficients for kerma</i> (H. Reich)	485
7.11	Zusammensetzung einiger Gewebe und dazu äquivalenter Materialien – <i>Composition of various tissues and tissue-equivalent materials</i> (H. Reich)	486
7.12	Dosisleistungskonstanten – <i>Dose rate constants</i> (K. Debertin)	487
7.12a	Dosisleistungskonstanten $\Gamma(E)$ für die Luftkermaleistung	487
7.12b	Dosisleistungskonstanten für die Luftkermaleistung für einige gebräuchliche Radionuklide unter Berücksichtigung von Photonenergien $E \geq 20$ keV (Γ_{20})	488
7.13	Fluenz- und Luftkerma-Äquivalentdosis-Umrechnungsfaktoren für Photonen – <i>Fluence and air kerma-to-dose equivalent conversion coefficients for photons</i> (G. Dietze)	488
7.14	α -, γ - und Elektronenstrahler zur Kalibrierung von Spektrometern – <i>α-ray, γ-ray and electron-ray sources for calibrating spectrometers</i> (K. Debertin)	489
7.15	Energie und Wellenlänge von Photonenstrahlung, magnetische Ablenkung von Elektronen und Protonen – <i>Energy and wave length of photon radiation, magnetic deflection of electrons and photons</i> (B. Großwendt)	491
7.16	Diagramme des Massen-Bremsvermögens für Elektronen, Protonen und α -Teilchen in einigen Stoffen – <i>Diagrams of the mass stopping power for electrons, protons and α-particles</i> (B. Großwendt)	492
7.17	Massen-Stoßbremsvermögen und gesamtes Massen-Bremsvermögen für Elektronen – <i>Mass collision stopping power and total mass stopping power for electrons</i> (H. Reich)	493
7.18	Massen-Reichweiten und Bremsstrahlungsausbeuten bei vollständiger Abbremsung von Elektronen – <i>Mass ranges and bremsstrahlung efficiencies for the total slowing down of electrons</i> (H. Reich)	494
7.19	Massen-Reichweiten von Elektronen und Protonen in Luft, Wasser und Aluminium – <i>Mass ranges of electrons and protons in air, water and aluminium</i> (B. Großwendt)	495
7.20	Reichweiten von Elektronen, Protonen und α -Teilchen in Detektormaterialien – <i>Ranges of electrons, protons and α-particles in detector materials</i> (B. Großwendt)	496
7.21	Erzeugung von Neutronen mit Radionuklidquellen – <i>Production of neutrons by radionuclide sources</i> (H. Kluge)	497
7.22	Erzeugung von gefilterten Reaktorneutronen – <i>Production of filtered reactor neutrons</i> (W.G. Alberts)	497
7.23	Energie und Ausbeute von Neutronen aus Kernreaktionen – <i>Neutron energy and yield of some nuclear reactions</i> (M. Cosack)	498
7.24	Aktivierungsquerschnitte für thermische Neutronen – <i>Activation cross sections for thermal neutrons</i> (M. Matzke)	498

7.25	Neutronenindikatoren und Neutronenwirkungsquerschnitte – <i>Neutron indicators and neutron cross sections</i> (M. Matzke)	500
7.26	Kermafaktoren und Fluenz-Äquivalentdosis-Umrechnungsfaktoren für monoenergetische Neutronen – <i>Kerma factors and fluence-to-dose equivalent conversion coefficients for monoenergetic neutrons</i> (G. Dietze)	502
7.26a	Kermafaktoren für einige Materialien	502
7.26b	Fluenz-Äquivalentdosis-Umrechnungsfaktoren für monoenergetische Neutronen	502
7.27	Mittlere Fluenz-Äquivalentdosis-Umrechnungsfaktoren und mittlere gewichtete Energien für Neutronen aus Radionuklidquellen – <i>Mean fluence-to-dose equivalent conversion factors and weighted mean energies for neutrons from radioactive sources</i> (H. Kluge)	503
7.28	Stabile Nuklide – <i>Stable nuclides</i> (K. Debertin)	504
7.29	Radionuklide – <i>Radionuclides</i> (K. Debertin)	507
7.30	Radionuklidstrahlen (Energien, Emissionswahrscheinlichkeiten) – <i>Radiations from radionuclides (energies, emission probabilities)</i> (K. Debertin)	510
7.31	Zerfallsreihen von natürlichen Radionukliden – <i>Decay series of natural radionuclides</i> (K. Debertin)	522
7.31a	Diagramme	522
7.31b	Zeitlicher Anstieg der Aktivität von Folgeprodukten	523

No.	0.006	0.013	
11	No	1.041	1.081
12	Mg	1.294	1.294
13	Al	1.487	1.486
14	Si	1.739	1.740
15	P	2.009	2.010
16	S	2.307	2.308
17	Cl	2.671	2.672
18	Ar	2.953	2.957
19	K	3.311	3.314
20	Ca	3.688	3.692
21	Sc	4.086	4.091
22	Ti	4.503	4.511
23	V	4.943	4.953
24	Cr	5.405	5.415
25	Mn	5.888	5.899
26	Fe	6.391	6.404
27	Co	6.915	6.920
28	Ni	7.461	7.478
29	Cu	8.028	8.048
30	Zn	8.618	8.639
31	Ga	9.235	9.252
32	Ge	9.855	9.866
33	As	10.508	10.544
34	Se	11.182	11.232
35	Br	11.878	11.924
36	Kr	12.598	12.651
37	Rb	13.326	13.395
38	Sc	14.098	14.163
39	Y	14.863	14.938
40	Zr	15.691	15.775
41	No	16.521	16.615
42	Mo	17.374	17.479
43	Te	18.251	18.387
44	Ru	19.130	19.278

7.01 Energien und relative Emissionswahrscheinlichkeiten der K-Röntgenstrahlung, Bindungsenergien von K-Elektronen sowie K-Schalen-Fluoreszenzausbeuten von Elementen mit $Z \geq 5$ – Energies and relative emission probabilities of K X-rays, binding energies of K electrons, and K-shell fluorescence yields of elements with $Z \geq 5$ (K. Debertin)

Z Ordnungszahl; El Element; E Energie der Röntgenstrahlung; E_B Bindungsenergie der K-Elektronen; p_r Verhältnis von Emissionswahrscheinlichkeiten; ω_K K-Schalen-Fluoreszenzausbeute; K_α Übergang $L \rightarrow K$; $K_{\alpha 1}$ Übergang $L_3 \rightarrow K$; $K_{\alpha 2}$ Übergang $L_2 \rightarrow K$; K_β Übergang $M, N, \dots \rightarrow K$

Literatur:

zu Energien: Browne, E.; Firestone, R. B. (1986): Table of Radioactive Isotopes. New York: John Wiley & Sons;
 p_r : Salem, S. I.; Panossian, S. L.; Krause, R. A. (1974): Atomic Data and Nuclear Data Tables 14, 91–109;
 ω_K nach Bambaynek, W. (1984): New Evaluation of K-Shell Fluorescence Yields. In: Proc. Int. Conf. on X-Ray and Inner-Shell Processes in Atoms, Molecules and Solids (Hrsg. A. Meisel), Leipzig. VEB Druckerei Thomas Münzer, Langensalza

Z	El	E in keV			E_B in keV	p_r $K_{\alpha 2}/K_{\alpha 1}$	ω_K
		$K_{\alpha 2}$	$K_{\alpha 1}$	K_β		K_β/K_α	
5	B	0,183	0,183		0,188		0,0014
6	C	0,277	0,277		0,284		0,0026
7	N	0,392	0,392		0,402		0,0044
8	O	0,525	0,525		0,532		0,0069
9	F	0,677	0,677		0,685		0,0105
10	Ne	0,848	0,849		0,870		0,015
11	Na	1,041	1,041		1,072		0,021
12	Mg	1,254	1,254		1,305	0,013	0,029
13	Al	1,486	1,487	1,554	1,560		0,039
14	Si	1,739	1,740	1,836	1,839	0,027	0,050
15	P	2,009	2,010	2,136	2,145		0,065
16	S	2,307	2,308	2,464	2,472	0,059	0,080
17	Cl	2,621	2,622	2,816	2,822		0,099
18	Ar	2,955	2,957	3,190	3,206	0,105	0,120
19	K	3,311	3,314	3,590	3,607		0,143
20	Ca	3,688	3,692	4,013	4,038	0,502	0,128
21	Sc	4,086	4,091	4,461	4,493		0,196
22	Ti	4,505	4,511	4,932	4,966	0,503	0,134
23	V	4,945	4,952	5,427	5,465		0,256
24	Cr	5,405	5,415	5,947	5,989	0,504	0,135
25	Mn	5,888	5,899	6,490	6,539		0,321
26	Fe	6,391	6,404	7,058 – 7,108	7,112	0,506	0,135
27	Co	6,915	6,930	7,649 – 7,706	7,709		0,388
28	Ni	7,461	7,478	8,265 – 8,329	8,333	0,508	0,135
29	Cu	8,028	8,048	8,905 – 8,977	8,979		0,454
30	Zn	8,616	8,639	9,572 – 9,651	9,659	0,510	0,138
31	Ga	9,225	9,252	10,260 – 10,366	10,367		0,517
32	Ge	9,855	9,886	10,975 – 11,101	11,103	0,513	0,147
33	As	10,508	10,544	11,720 – 11,864	11,867		0,575
34	Se	11,182	11,222	12,490 – 12,652	12,658	0,515	0,157
35	Br	11,878	11,924	13,284 – 13,469	13,474		0,627
36	Kr	12,598	12,651	14,104 – 14,311	14,326	0,517	0,172
37	Rb	13,336	13,395	14,952 – 15,185	15,200		0,674
38	Sr	14,098	14,165	15,825 – 16,085	16,105	0,520	0,180
39	Y	14,883	14,958	16,726 – 17,013	17,038		0,715
40	Zr	15,691	15,775	17,653 – 17,969	17,998	0,523	0,190
41	Nb	16,521	16,615	18,607 – 18,982	18,986		0,751
42	Mo	17,374	17,479	19,590 – 19,998	20,000	0,525	0,197
43	Tc	18,251	18,367	20,599 – 21,042	21,044		0,782
44	Ru	19,150	19,279	21,634 – 22,115	22,117	0,527	0,204

Fortsetzung T 7.01

Z	El	E in keV		K _β	E _B in keV	p _r K _{α2} /K _{α1}	K _β /K _α	ω _K
		K _{α2}	K _{α1}					
45	Rh	20,074	20,216	22,699 – 23,217	23,220			0,809
46	Pd	21,020	21,177	23,791 – 24,349	24,350	0,529	0,210	0,820
47	Ag	21,990	22,163	24,912 – 25,511	25,514			0,831
48	Cd	22,984	23,174	26,060 – 26,702	26,711	0,532	0,213	0,841
49	In	24,002	24,210	27,238 – 27,939	27,940			0,851
50	Sn	25,044	25,271	28,444 – 29,199	29,200	0,534	0,220	0,860
51	Sb	26,111	26,359	29,679 – 30,489	30,491			0,868
52	Te	27,202	27,472	30,944 – 31,812	31,814	0,537	0,225	0,875
53	I	28,317	28,612	32,239 – 33,166	33,169			0,882
54	Xe	29,461	29,782	33,562 – 34,552	34,564	0,539	0,232	0,888
55	Cs	30,625	30,973	34,920 – 35,972	35,985			0,894
56	Ba	31,817	32,194	36,304 – 37,425	37,441	0,543	0,237	0,900
57	La	33,034	33,442	37,720 – 38,910	38,925			0,905
58	Ce	34,279	34,720	39,170 – 40,423	40,443	0,546	0,242	0,910
59	Pr	35,550	36,026	40,653 – 41,968	41,991			0,914
60	Nd	36,847	37,361	42,166 – 43,548	43,569	0,549	0,247	0,918
61	Pm	38,171	38,725	43,713 – 45,162	45,184			0,922
62	Sm	39,522	40,118	45,293 – 46,813	46,834	0,552	0,250	0,926
63	Eu	40,902	41,542	46,905 – 48,497	48,519			0,929
64	Gd	42,309	42,996	48,551 – 50,219	50,239	0,556	0,255	0,932
65	Tb	43,744	44,482	50,228 – 51,970	51,996			0,935
66	Dy	45,208	45,998	51,947 – 53,762	53,789	0,560	0,257	0,938
67	Ho	46,700	47,547	53,695 – 55,597	55,618			0,940
68	Er	48,221	49,128	55,480 – 57,456	57,486	0,564	0,260	0,942
69	Tm	49,773	50,742	57,300 – 59,357	59,390			0,945
70	Yb	51,354	52,389	59,159 – 61,309	61,332	0,567	0,264	0,947
71	Lu	52,965	54,070	61,050 – 63,286	63,314			0,949
72	Hf	54,611	55,790	62,985 – 65,316	65,351	0,572	0,267	0,950
73	Ta	56,280	57,535	64,948 – 67,376	67,416			0,952
74	W	57,981	59,318	66,950 – 69,484	69,525	0,576	0,269	0,954
75	Re	59,718	61,141	68,995 – 71,636	71,676			0,955
76	Os	61,486	63,000	71,079 – 73,819	73,871	0,580	0,273	0,957
77	Ir	63,287	64,896	73,202 – 76,054	76,111			0,958
78	Pt	65,122	66,831	75,368 – 78,337	78,395	0,583	0,275	0,959
79	Au	66,991	68,806	77,577 – 80,660	80,725			0,960
80	Hg	68,894	70,818	79,824 – 83,028	83,102	0,588	0,278	0,961
81	Tl	70,832	72,873	82,115 – 85,530	85,530			0,962
82	Pb	72,805	74,969	84,450 – 88,003	88,005	0,593	0,280	0,963
83	Bi	74,815	77,107	86,830 – 90,522	90,526			0,964
84	Po	76,863	79,290	89,256 – 93,095	93,100	0,597	0,283	0,965
85	At	78,948	81,517	91,730 – 95,717	95,724			0,966
86	Rn	81,069	83,787	94,247 – 98,389	98,397	0,602	0,286	0,967
87	Fr	83,231	86,105	96,815 – 101,118	101,130			0,967
88	Ra	85,431	88,471	99,432 – 103,899	103,915	0,608	0,287	0,968
89	Ac	87,675	90,886	102,101 – 106,738	106,756			0,969
90	Th	89,957	93,350	104,819 – 109,630	109,650	0,613	0,288	0,970
91	Pa	92,282	95,863	107,595 – 112,575	112,596			0,970
92	U	94,654	98,434	110,421 – 115,580	115,602	0,619	0,289	0,971
93	Np	97,069	101,059	113,303 – 118,646	118,669			0,971
94	Pu	99,525	103,734	116,244 – 121,768	121,791	0,625	0,291	0,971
95	Am	102,030	106,472	119,243 – 124,955	124,982			0,971
96	Cm	104,590	109,271	122,304 – 128,210	128,241	0,632	0,293	0,972
97	Bk	107,185	112,121	125,418 – 131,524	131,556			0,972
98	Cf	109,831	115,032	128,594 – 134,908	134,939	0,642	0,295	0,972
99	Es	112,531	118,012	131,838 – 138,363	138,396			0,972

7.02 Erzeugung monoenergetischer Röntgenstrahlung (Röntgen-Fluoreszenzstrahlung) zur Kalibrierung von Dosimetern – Production of monoenergetic X-rays (fluorescence radiation) for calibrating dosimeters (B. Großwendt)

Versuchsanordnung hierzu s. Bd. 2, 7.2.1.3

Literatur: International Standard ISO 4037-1/DIS-1992 (E): X and γ reference radiations for calibrating dosimeters and dose ratemeters and for determining their response as a function of photon energy

Strahlungsqualität (ISO)	Erzeugung der Fluoreszenzstrahlung Röhrenspannung in kV	Energie der K _{α1} -Linie in keV	Chemisches Element	Empfohlene Zusammensetzung	Empfohlene flächenbezogene Masse in g/cm ²	Erstes Filter Stoff, flächenbezogene Masse (Minimalwert) in g/cm ²	Zweites Filter Stoff, flächenbezogene Masse (Minimalwert) in g/cm ²
F-Ge	60	9,9	Germanium	GeO ₂	0,180	Al	0,135
F-Zr	80	15,8	Zirconium	Zr	0,180	Al	0,27
F-Cd	100	23,2	Cadmium	Cd	0,150	Al	0,27
F-Cs	100	31	Caesium	Cs ₂ SO ₄	0,190	Al	0,27
F-Sm	120	40,1	Samarium	Sm ₂ O ₃	0,175	Al	0,27
F-Er	120	49,1	Erbium	Er ₂ O ₃	0,230	Al	0,27
F-W	170	59,3	Wolfram	W	0,600	Al	0,27
F-Au	170	68,8	Gold	Au	0,600	Al	0,27
F-Pb	190	75	Blei	Pb	0,700	Al	0,27
F-U	210	98,4	Uran	U	0,800	Al	0,27

) Der Wert bezieht sich auf den Galliumanteil.

7.03 Strahlungsqualitäten für Photonенstrahlung – Radiation qualities for photon radiation (H.M. Kramer)

7.03a Strahlungsqualitäten zur Kalibrierung von Strahlenschutzdosimetern

Die Strahlungsqualitäten werden zum Prüfen des Ansprechvermögens und zum Kalibrieren von Strahlenschutzdosimetern benutzt (s. auch Tab. T 7.02).

Literatur: Engelke, B.A., Oetzmann, W. (1977): Strahlenschutzdosimeter für Photonenstrahlung mit Energien zwischen 5 keV und 3 MeV. PTB-Prüfregeln Bd. 11, Braunschweig: Phys.-Tech. Bundesanstalt; DIN 6818 Teil 1 (1992): Strahlenschutzdosimeter. Allgemeine Regeln; ISO 4037 (1996): X and γ reference radiations for calibrating dosimeters and dose ratemeters and for determining their response as a function of photon energy. Part 1: Characteristics of the radiations and their methods of production

Erläuterungen:

U : Röhrenspannung

Zusatzfilter: Um die im Filtermaterial angeregte Eigenstrahlung möglichst vom Prüfling fernzuhalten, werden Kombinationsfilter verwendet. Diese sind so in den Strahlengang zu bringen, daß die Röntgenstrahlung die Filtermaterialien in Richtung abnehmender Ordnungszahl durchdringt. Der Reinheitsgrad des Filtermaterials muß besser als 99,9% sein s_1 : Halbwertdicke. Die angegebenen Werte sind Richtwerte und beziehen sich auf einen Abstand von 1 m zwischen Brennfleck und Meßort. Die wahren Werte der Halbwertdicke können je nach verwendeter Röntgeneinrichtung um einige Prozent von den Richtwerten abweichen

$$\bar{E}: \text{mittlere Photonenergie}; \bar{E} = \int_0^{E_{\max}} \phi_E(E) E dE / \left(\int_0^{E_{\max}} \phi_E(E) dE \right)$$

E : Photonenergie

E_{\max} : maximale Photonenergie

$\phi_E(E)$ ist die spektrale (nach E differenzierte) Photonenfluenz als Funktion von E

Serie A: Röntgenstrahlung, Standardserie, starke Filterung (ISO 4037: narrow spectra)

Kurz-zeichen	U in kV	Zusatzfilter in mm				s_1 in mm		\bar{E} in keV
		Al	Cu	Sn	Pb	Al	Cu	
A 7,5	7,5	keine				0,025		6,5
A 10	10	0,1				0,05		9
A 15	15	0,5				0,15		12
A 20	20	1,0				0,35		17
A 30	30	4,0				1,2		26
A 40	40		0,21				0,09	33
A 60	60		0,6				0,24	48
A 80	80		2,0				0,59	65
A 100	100		5,0				1,1	83
A 120	120		5,0	1,0			1,7	100
A 150	150			2,5			2,4	118
A 200	200		2,0	3,0	1,0		3,9	161
A 250	250			2,0	3,0		5,2	205
A 300	300			3,0	5,0		6,2	248
Cs	Caesium-137-Gammastrahlung						10,8	662
Co	Kobalt-60-Gammastrahlung						14,6	1250

Eigenfilterung: Angepaßt an 2 mm Beryllium für Röhrenspannung < 40 kV; angepaßt an 4 mm Aluminium für Röhrenspannung ≥ 40 kV.

Dosisleistung in 1 m Abstand vom Brennfleck der Röntgenröhre für einen Röhrenstrom von 10 mA: etwa 10 bis 100 mSv/h.

Fortsetzung T 7.03a

Serie B: Röntgenstrahlung, mittlere Filterung (ISO 4037: wide spectra) (Anwendung, wenn die Dosisleistung bei Serie A nicht ausreicht)

Kurz-zeichen	U in kV	Zusatzfilter in mm			s_1 in mm Al	\bar{E} in keV
		Al	Cu	Sn		
B 7,5	7,5	keine			0,025	6,5
B 10	10	0,1			0,05	9
B 15	15	0,5			0,15	12
B 20	20	1,0			0,35	17
B 30	30	2,0			0,88	23
B 40	40	4,0			1,7	31
B 60	60		0,3			0,18
B 80	80		0,5			0,35
B 110	110		2,0			0,94
B 150	150			1,0		1,8
B 200	200			2,0		3,1
B 250	250			4,0		4,3
B 300	300			6,5		5,0
						202

Eigenfilterung: Angepaßt an 2 mm Beryllium für Röhrenspannung < 60 kV; angepaßt an 4 mm Aluminium für Röhrenspannung ≥ 60 kV.

Dosisleistung in 1 m Abstand vom Brennfleck der Röntgenröhre für einen Röhrenstrom von 10 mA: etwa 0,1 bis 1 Sv/h.

Serie C: Röntgenstrahlung, schwache Filterung (ISO 4037: High air kerma rate spectra) (Anwendung, wenn die Dosisleistungen bei den Serien A oder B nicht ausreichen)

Kurz-zeichen	U in kV	Zusatzfilter in mm			s_1 in mm Al	\bar{E} in keV
		Al	Cu	Cu		
C 7,5	7,5	keine			0,025	6,5
C 10	10	keine			0,04	7,5
C 20	20	0,15			0,11	12
C 30	30	0,5			0,35	19
C 40	40	1,0			0,80	25
C 60	60	3,9			2,4	37
C 80	80	3,2			5,0	49
C 100	100		0,15			0,29
C 150	150		0,50			0,92
C 200	200		1,0			1,7
C 250	250		1,6			2,6
C 300	300		2,2			3,4
						147

Eigenfilterung: Angepaßt an 2 mm Beryllium für Röhrenspannung < 80 kV; angepaßt an 4 mm Aluminium für Röhrenspannung ≥ 80 kV.

Dosisleistung in 1 m Abstand vom Brennfleck der Röntgenröhre für einen Röhrenstrom von 10 mA: etwa 0,1 Sv/h für Röhrenspannung von 7,5 kV und 1 bis 5 Sv/h für Röhrenspannungen > 7,5 kV.

7.03b Strahlungsqualitäten zur Kalibrierung von Diagnostikdosimetern

Von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt benutzte Strahlungsqualitäten zur Kalibrierung von Diagnostikdosimetern.

Literatur: DIN 6872 (1983): Strahlenqualitäten für Messungen in der Radiologischen Technik, Patientdurchlaßstrahlung ohne Streustrahlenanteil in der Röntgendiagnostik. IEC 1267 (1994): X-ray Equipment operating up to 400 kV; Radiation conditions for use in the determination of characteristics of diagnostic X-ray equipment.

Kurz-zeichen	Röhrengleich-spannung in kV	Feste Filterung in mm	Zusatzfilterung in mm	Abstand Brennfleck Meßort in cm	1. Halbwertdicke mm Al	mm Cu
--------------	-----------------------------	-----------------------	-----------------------	---------------------------------	------------------------	-------

Ungeschwächte Nutzstrahlung (IEC 1267: RQR-Serie)

DV 30	30	1,0 Be	2,5 Al	100	1,05	0,031
DV 40	40	1,0 Be	2,5 Al	100	1,42	0,045
DV 50	50	1,0 Be	2,5 Al	100 bis 300	1,82	0,059
DV 60	60	1,0 Be	2,5 Al	100 bis 300	1,95	0,065
DV 70	70	7,0 Be	2,5 Al	100 bis 300	2,45	0,081
DV 80	80	7,0 Be	2,5 Al	100 bis 300	2,75	0,092
DV 90	90	7,0 Be	2,5 Al	100 bis 300	3,10	0,112
DV 100	100	7,0 Be	2,5 Al	100 bis 300	3,60	0,126
DV 120	120	7,0 Be	2,5 Al	100 bis 300	4,30	0,165
DV 150	150	7,0 Be	2,5 Al	100 bis 300	5,40	0,231

Nutzstrahlung hinter dem Phantom (IEC 1267: RQA-Serie)

DN 40	40	1,0 Be	6,5 Al	100	2,15 Al	0,07
DN 50	50	1,0 Be	12,5 Al	100 bis 300	3,40 Al	0,123
DN 60	60	1,0 Be	18,5 Al	100 bis 300	5,00 Al	0,207
DN 70	70	7,0 Be	23,5 Al	100 bis 300	6,20 Al	0,289
DN 80	80	7,0 Be	28,5 Al	100 bis 300	7,80 Al	0,403
DN 90	90	7,0 Be	32,5 Al	100 bis 300	9,00 Al	0,501
DN 100	100	7,0 Be	36,5 Al	100 bis 300	—	0,609
DN 120	120	7,0 Be	42,5 Al	100 bis 300	—	0,839
DN 150	150	7,0 Be	47,5 Al	100 bis 300	—	1,245

Mammographie ungeschwächte Nutzstrahlung

MV 25	25	1,0 Be + 0,03 Mo	—	100	0,282	—
MV 30	30	1,0 Be + 0,03 Mo	—	100	0,337	—
MV 35	35	1,0 Be + 0,03 Mo	—	100	0,374	—

Mammographie Nutzstrahlung hinter dem Phantom

MH 25	25	1,0 Be + 0,03 Mo	2,0 Al	100	0,58	—
MH 30	30	1,0 Be + 0,03 Mo	2,0 Al	100	0,67	—
MH 35	35	1,0 Be + 0,03 Mo	2,0 Al	100	0,75	—

7.03c Strahlungsqualitäten zur Kalibrierung von Therapiedosimetern

Von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt benutzte Strahlungsqualitäten.

Literatur: DIN 6817 (1984): Dosimeter mit Ionisationskammern für Photonen- und Elektronenstrahlung zur Verwendung in der Strahlentherapie. Regeln für die Herstellung, Anforderungen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt an Therapiedosimeter mit Ionisationskammern für die Zulassung zur Eichung und Anlage 15.10 zur Eichordnung (1990); Engelke, B.A.; Oetzmann, W. (1984): Therapiedosimeter mit Ionisationskammern für Photonenstrahlungen mit Energien unterhalb von 3 MeV, PTB Prüfregeln, Band 16.

Röntgenstrahlung

Kurz-zeichen	Röhren-gleich-spannung in kV	Feste Filter ¹⁾ in mm	Zusatz-filter in mm	Abstand Brennfleck-Meßort in cm	1. Halbwertdicke ²⁾ in mm	
					Al	Cu
T 7,5	7,5	1,5 Be		30	0,02	
T 10	10	1,5 Be		30	0,03	
T 15	15	1,5 Be	0,05 Al	30	0,07	
T 20	20	1,5 Be	0,15 Al	30	0,11	
T 30	30	1,5 Be	0,5 Al	30	0,36	
T 40	40	1,5 Be	0,8 Al	30	0,71	
T 50	50	1,5 Be	1,0 Al	30	0,94	
T 70	70	4,0 Al		30, 100	2,8	0,09
T 100	100	4,0 Al	0,5 Al	30, 100	4,4	0,17
T 120	120	4,0 Al	2,0 Al	100		0,28
T 140	140	4,0 Al	5,0 Al	100		0,50
T 150	150	4,0 Al	0,5 Cu	100		0,85
T 200	200	4,0 Al	1,0 Cu	100		1,65
T 250	250	4,0 Al	1,6 Cu	100		2,5
T 280	280	4,0 Al	3,0 Cu	100		3,4

Gammastrahlung

Nuklid	Energie in keV					
¹³⁷ Cs	662			ca. 50 bis 150		
⁶⁰ Co	1170 + 1332			ca. 50 bis 150		

¹⁾ Einschließlich Eigenfilterung von Röntgenröhre und Röhrenschutzgehäuse.

²⁾ Die angegebenen Werte sind Richtwerte. Die wahren Werte der Halbwertdicke können je nach verwendeter Röntgeneinrichtung um einige Prozente von den Richtwerten abweichen.

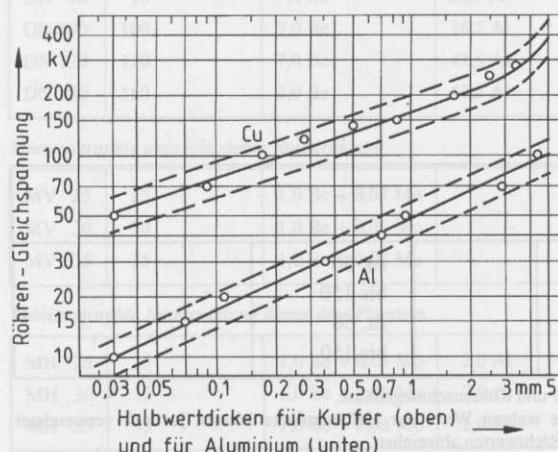
7.04 β-Strahler zur Kalibrierung von Strahlenschutzdosimetern – β -ray sources for calibrating radiation protection dosimeters (J. Böhm)

$T_{1/2}$ Halbwertszeit; E_{\max} Maximalenergie des Betaspektrums des Nuklids; E_r Mindestwert, den die Maximalenergie des Betaspektrums am Ort der Kalibrierung haben muß (residual maximum energy). Erzeugung von homogenen Betastrahlungsfeldern s. Bd. 2, 7.2.3. In der letzten Spalte sind die Energien der wichtigsten Photonenstrahlungen (in Klammern die Emissionswahrscheinlichkeiten) angegeben.

Nuklid	$T_{1/2}$ in Tagen	E_{\max} in keV	E_r in keV	Photonen, Energien in keV
^{14}C	2 093 000	156	90	
^{147}Pm	957	225	130	γ 121 (0,01%)
^{204}Tl	1 381	763	530	Hg-Röntgenstrahlen: 9,9 bis 13,8; 68,9 bis 82,5
$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$	10 483	2274	1800	
$^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh}$	372,6	3541	2800	$^{106}\text{Rh}-\gamma$, 512 (21%) 622 (11% Dublett) 1050 (1,5% Dublett) 1128 (0,5% Dublett) 1550 (0,2%) und andere

7.05 Röhrenspannungen und Halbwertdicken für Kupfer und Aluminium zur Kalibrierung von Therapiedosimetern und zur Bestimmung der Korrektionsfaktoren k_Q – Tube voltages and halfvalue thicknesses of copper and aluminium for calibrating therapy level dosimeters and determining the correction factors k_Q (H. Reich)

Zu jeder Röhrenspannung soll durch geeignete Filterung eine Halbwertdicke erzielt werden, die in dem durch die gestrichelten Linien begrenzten Bereich liegt. Die Punkte deuten die Strahlungsqualitäten nach Tab. T 7.03c an (nach DIN 6817 (1984)).



100 bis 200	9,00	0,501
100 bis 200	—	0,602
100 bis 200	—	0,839
100 bis 200	—	1,243

Corresponding values

100	sigmarad 100	bildung
100	—	—
100	—	—

100	sigmarad 100	bildung
100	—	—
100	—	—

100	sigmarad 100	bildung
100	—	—
100	—	—

100	sigmarad 100	bildung
100	—	—
100	—	—

100	sigmarad 100	bildung
100	—	—
100	—	—

100	sigmarad 100	bildung
100	—	—
100	—	—

100	sigmarad 100	bildung
100	—	—
100	—	—

100	sigmarad 100	bildung
100	—	—
100	—	—

100	sigmarad 100	bildung
100	—	—
100	—	—

7.06

Diagramme der Photonen-Wechselwirkungskoeffizienten für einige Stoffe im Energiebereich von 10 keV bis 100 MeV – Diagrams of photon interaction coefficients for some materials in the energy range from 10 keV to 100 MeV (H. Reich)

Literatur: s. bei Tab. T 7.07

Die Diagramme (a) für Wasser, b) für Blei und c) für vier Stoffe nebeneinander) geben in Abhängigkeit von der Photonenergie folgende jeweils auf die Masse bezogenen (d.h. durch die Dichte ρ des Streukörpers oder Absorbers dividierten) Koeffizienten wieder:

μ/ρ für die Gesamtschwächung, τ/ρ für den Photoeffekt, σ_{coh}/ρ für kohärente (Rayleigh-)Photonenstreuung, σ/ρ für inkohärente (Compton-)Photonenstreuung und κ/ρ für die Paarerzeugung. Nicht enthalten in μ/ρ ist die Schwächung durch den Kernphotoeffekt (Emission eines Neutrons oder Protons), der im Gebiet zwischen 10 und 30 MeV bis zu mehreren Prozent beitragen kann (s. Hubbel (1982), zitiert bei Tab. T 7.07).

Ferner deuten mit dem Index tr versehene Koeffizienten den Bruchteil der Photonenergie an, der in kinetische Energie sekundärer Elektronen umgewandelt wird (in Wasser: 92,5 % bei 10 keV und 15 % bei 100 keV). Es gilt

$$\mu/\rho = \tau/\rho + \sigma_{coh}/\rho + \sigma/\rho + \kappa/\rho$$

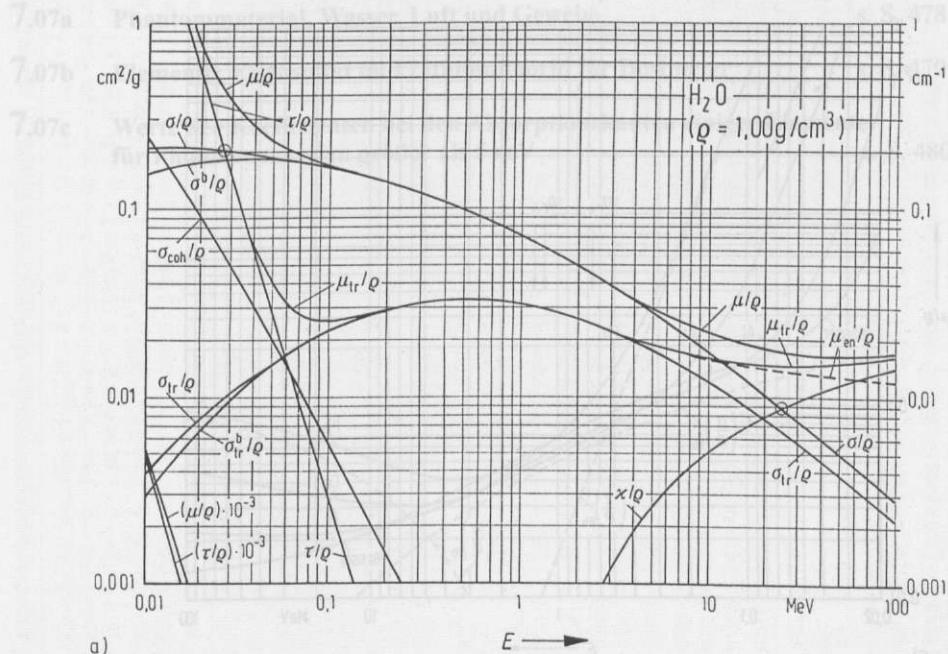
und

$$\mu_{tr}/\rho = \tau_{tr}/\rho + \sigma_{tr}/\rho + \kappa_{tr}/\rho$$

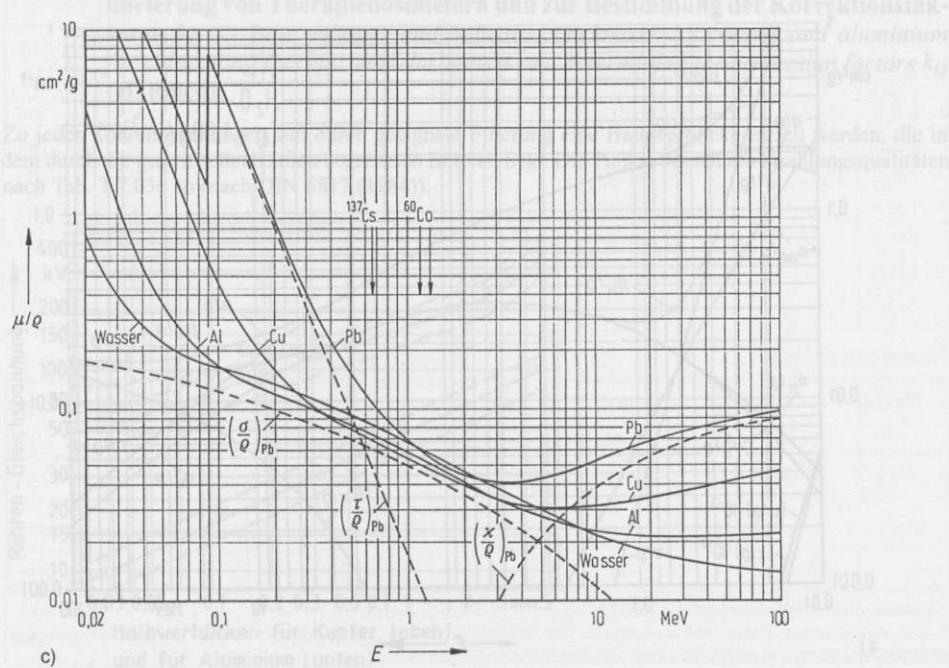
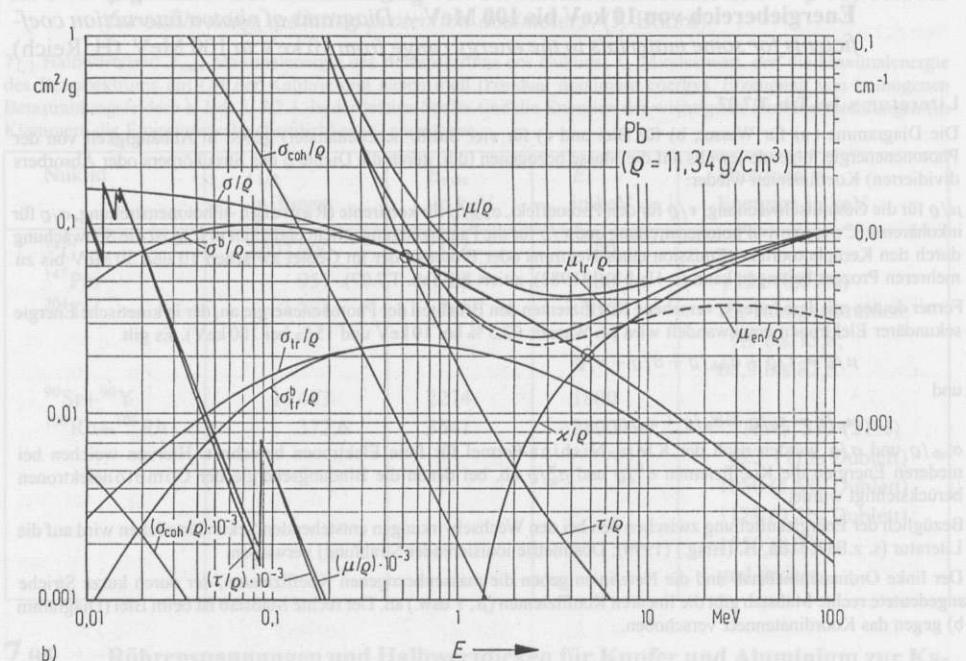
σ_{coh}/ρ und σ/ρ wurden nach der Klein-Nishina-Formel für freie Elektronen berechnet. Hiervon weichen bei niederen Energien die Koeffizienten σ^b/ρ und σ_{tr}^b/ρ ab, bei denen die Bindungsenergie der Comptonelektronen berücksichtigt wurde.

Bezüglich der Energieaufteilung zwischen den bei den Wechselwirkungen entstehenden Sekundärteilchen wird auf die Literatur (s. z.B. Reich, H. (Hrsg.) (1990): Dosimetrie ionisierender Strahlung) verwiesen.

Der linke Ordinatenmaßstab und die Netzebenen geben die massenbezogenen Koeffizienten, der durch kurze Striche angedeutete rechte Maßstab gibt die linearen Koeffizienten (μ , τ usw.) an. Der rechte Maßstab ist beim Blei (Diagramm b) gegen das Koordinatennetz verschoben.



Fortsetzung T 7.06



7.07 Massen-Schwächungskoeffizienten und Massen-Energieabsorptionskoeffizienten einiger Stoffe für Photonenstrahlung von 10 keV bis 100 MeV – Mass attenuation and mass energy absorption coefficients of some materials for photon radiation (H. Reich)

Literatur: Hubbell, J.H. (1977): Photon mass attenuation and mass energy absorption coefficients for H, C, N, O, Ar, and seven mixtures from 0,1 keV to 20 MeV. Rad. Res. **70**, 58–81, und (1982): Photon mass attenuation and energy absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV. Int. J. Appl. Radiat. Isot. **33**, 1269–1290. Johns, H.E.; Cunningham, J.R. (1983): The Physics of Radiology, Charles C. Thomas, Springfield/Ill./USA. Higgins, P.D.; Attix, F.H.; Hubbell, J.H.; Seltzer, S.M.; Berger, M.J.; Sibata, C.H. (1992): Mass energy transfer and mass energy absorption coefficients including in-flight positron annihilation for photon energies from 1 keV to 100 MeV. NISTIR 92-4812, 66 S., Internal Report, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899, USA. S. Kohlrausch Bd. 2, 7.1.3.2.

E Photonenenergie in MeV, μ/ρ Massen-Schwächungskoeffizient, μ_{en}/ρ Massen-Energieabsorptionskoeffizient, beide Koeffizienten in cm^2/g , Z Ordungszahl, ρ Dichte in g/cm^3 bei 20°C , ρ_{NTP} (e: normal temperature and pressure) Dichte der Gase bei 20°C , 101,3 kPa.

Die Massen-Schwächungskoeffizienten gelten einschließlich der kohärenten Streustrahlung (außer bei Polyethylen und PMMA in Tab. T 7.07a und Wasserstoff in Tab. T 7.07b). Die Werte für die Kunststoffe beziehen sich auf das reine Polymerisationsprodukt ohne Füllstoffe.

Die (hier nicht aufgenommenen) Massen-Energieumwandlungskoeffizienten μ_{tr}/ρ unterscheiden sich von den Massen-Energieabsorptionskoeffizienten μ_{en}/ρ nur um den dicht bei 1 liegenden Faktor ($1 - g$) (Werte für g s. Tab. T 7.10). Die Zahlen der Tabelle sind durch 10 zu dividieren, um μ/ρ und μ_{en}/ρ in der Einheit m^2/kg zu erhalten.

Die μ/ρ - und μ_{en}/ρ -Werte für Materialmischungen und Verbindungen können nach der Formel $\mu/\rho = \sum_i w_i (\mu/\rho)_i$ berechnet werden, wobei w_i den Quotienten aus der Masse des i -ten Bestandteiles und der Gesamtmasse des Materials bedeutet.

7.07a Phantommaterial, Wasser, Luft und Gewebe	s. S. 478
7.07b Elemente; Eisensulfat und Lithiumfluorid für Dosimeter	s. S. 479
7.07c Werte der Koeffizienten bei den Absorptionskanten einiger Elemente für Photonenenergien größer als 5 keV	s. S. 480

7.07a Phantommaterial, Wasser, Luft und Gewebe

Kleine Zahlen: Exponenten des Faktors 10

E in MeV	Polyethylen			PMMA (Plexiglas)			$H_2O, \bar{Z} = 7,51$			Luft, $\bar{Z} = 7,78$			Fett, $\bar{Z} = 6,46$			Muskel, $\bar{Z} = 7,64$			Knochen, $\bar{Z} = 12,31$		
	$\bar{Z} = 5,53, Q = 0,92$			$\bar{Z} = 6,56, Q = 1,18$			$Q(20^\circ C) = 0,9982$			$Q_{NTP} = 1,204 \cdot 10^{-3}$			$Q = 0,92$			$Q = 1,04$			$Q = 1,65$		
	μ/Q	μ_{en}/Q	μ/Q	μ_{en}/Q	μ/Q	μ_{en}/Q	μ/Q	μ_{en}/Q	μ/Q	μ_{en}/Q	μ/Q	μ_{en}/Q	μ/Q	μ_{en}/Q	μ/Q	μ_{en}/Q	μ/Q	μ_{en}/Q	μ/Q	μ_{en}/Q	
0,010	2,023+0	1,717+0	3,273+0	2,944+0	5,223+0	4,840+0	5,016+0	4,640+0	3,048+0	2,716+0	5,284+0	4,895+0	2,690+1	2,524+1	2,690+1	2,524+1	2,690+1	2,524+1	2,690+1	2,524+1	
0,015	7,279-1	4,661-1	1,077+0	8,083-1	1,639+0	1,340-0	1,581+0	1,300+0	1,022+0	7,499-1	1,668+0	1,371+0	8,524+0	7,897+0	8,524+0	8,524+0	8,524+0	8,524+0	8,524+0	8,524+0	
0,02	4,247-1	1,868-1	5,616-1	3,232-1	7,958-1	5,367-1	7,643-1	5,255-1	5,437-1	3,014-1	8,099-1	5,531-1	3,782+0	3,389+0	3,389+0	3,389+0	3,389+0	3,389+0	3,389+0	3,389+0	
0,03	2,689-1	5,758-2	3,006-1	9,391-2	3,718-1	1,520-1	3,501-1	1,501-1	3,004-1	8,881-2	3,754-1	1,579-1	1,267+0	1,009+0	1,009+0	1,009+0	1,009+0	1,009+0	1,009+0	1,009+0	
0,04	2,269-1	3,128-2	2,340-1	4,500-2	2,668-1	6,803-2	2,471-1	6,649-2	2,377-1	4,344-2	2,674-1	7,067-2	6,400-1	4,250-1	4,250-1	4,250-1	4,250-1	4,250-1	4,250-1	4,250-1	
0,05	2,081-1	2,410-2	2,069-1	3,020-2	2,262-1	4,155-2	2,073-1	4,031-2	2,118-1	2,980-2	2,257-1	4,288-2	4,121-1	2,207-1	2,207-1	2,207-1	2,207-1	2,207-1	2,207-1	2,207-1	
0,06	1,968-1	2,218-2	1,921-1	2,504-2	2,055-1	3,152-2	1,871-1	3,004-2	1,974-1	2,514-2	2,045-1	3,224-2	3,087-1	1,327-1	1,327-1	1,327-1	1,327-1	1,327-1	1,327-1	1,327-1	
0,08	1,822-1	2,258-2	1,750-1	2,292-2	1,835-1	2,583-2	1,661-1	2,393-2	1,805-1	2,344-2	1,822-1	2,601-2	2,215-1	6,621-2	6,621-2	6,621-2	6,621-2	6,621-2	6,621-2	6,621-2	
0,10	1,719-1	2,420-2	1,640-1	2,363-2	1,707-1	2,539-2	1,541-1	2,318-2	1,694-1	2,434-2	1,693-1	2,538-2	1,857-1	4,468-2	4,468-2	4,468-2	4,468-2	4,468-2	4,468-2	4,468-2	
0,15	1,534-1	2,788-2	1,456-1	2,656-2	1,504-1	2,762-2	1,356-1	2,494-2	1,506-1	2,747-2	1,491-1	2,743-2	1,492-1	3,175-2	3,175-2	3,175-2	3,175-2	3,175-2	3,175-2	3,175-2	
0,2	1,401-1	3,029-2	1,328-1	2,842-2	1,370-1	2,966-2	1,234-1	2,642-2	1,374-1	2,972-2	1,358-1	2,942-2	1,322-1	3,023-2	3,023-2	3,023-2	3,023-2	3,023-2	3,023-2	3,023-2	
0,3	1,216-1	3,275-2	1,152-2	3,099-2	1,187-1	3,192-2	1,068-1	2,872-2	1,192-1	3,209-2	1,176-1	3,164-2	1,126-1	3,066-2	3,066-2	3,066-2	3,066-2	3,066-2	3,066-2	3,066-2	
0,4	1,089-1	3,367-2	1,031-1	3,185-2	1,061-1	3,279-2	9,548-2	2,949-2	1,067-1	3,298-2	1,052-1	3,250-2	1,003-1	3,107-2	3,107-2	3,107-2	3,107-2	3,107-2	3,107-2	3,107-2	
0,6	9,198-2	3,375-2	8,701-2	3,191-2	8,957-2	3,284-2	8,056-2	2,953-2	9,008-2	3,304-2	8,876-2	3,254-2	8,436-2	3,090-2	3,090-2	3,090-2	3,090-2	3,090-2	3,090-2	3,090-2	
0,8	8,079-2	3,295-2	7,642-2	3,115-2	7,866-2	7,075-2	3,205-2	7,075-2	2,882-2	7,912-2	3,226-2	7,795-2	3,176-2	7,400-2	3,010-2	3,010-2	3,010-2	3,010-2	3,010-2	3,010-2	
1,0	7,263-2	3,188-2	6,869-2	3,014-2	7,070-2	3,100-2	6,359-2	2,787-2	7,112-2	3,121-2	7,006-2	3,072-2	6,648-2	2,909-2	2,909-2	2,909-2	2,909-2	2,909-2	2,909-2	2,909-2	
1,25*	6,489-2	3,046-2	6,137-2	2,879-2	6,317-2	2,961-2	5,681-2	2,662-2	6,36-2	2,98-2	6,26-2	2,93-2	5,94-2	2,78-2	2,78-2	2,78-2	2,78-2	2,78-2	2,78-2	2,78-2	
1,5	5,909-2	2,911-2	5,590-2	2,751-2	5,755-2	2,831-2	5,176-2	2,545-2	5,787-2	2,850-2	5,702-2	2,805-2	5,413-2	2,654-2	2,654-2	2,654-2	2,654-2	2,654-2	2,654-2	2,654-2	
2	5,065-2	2,674-2	4,796-2	2,530-2	4,940-2	2,604-2	4,447-2	2,342-2	4,963-2	2,619-2	4,895-2	2,580-2	5,413-2	2,447-2	2,447-2	2,447-2	2,447-2	2,447-2	2,447-2	2,447-2	
4	3,444-2	2,088-2	3,286-2	1,992-2	3,403-2	2,063-2	3,079-2	1,866-2	3,390-2	2,055-2	3,370-2	2,043-2	3,289-2	1,990-2	1,990-2	1,990-2	1,990-2	1,990-2	1,990-2	1,990-2	
6	2,761-2	1,792-2	2,659-2	1,729-2	2,771-2	1,804-2	2,523-2	1,644-2	2,732-2	1,775-2	2,743-2	1,754-2	2,754-2	1,796-2	1,796-2	1,796-2	1,796-2	1,796-2	1,796-2	1,796-2	
10	2,146-2	1,504-2	2,105-2	1,481-2	2,219-2	1,566-2	2,045-2	1,446-2	2,147-2	1,508-2	2,196-2	1,548-2	2,320-2	1,641-2	1,641-2	1,641-2	1,641-2	1,641-2	1,641-2	1,641-2	
15	1,819-2	1,342-2	1,819-2	1,348-2	1,941-2	1,442-2	1,810-2	1,349-2	1,840-2	1,361-2	1,918-2	1,424-2	2,129-2	1,573-2	1,573-2	1,573-2	1,573-2	1,573-2	1,573-2	1,573-2	
20	1,658-2	1,261-2	1,684-2	1,285-2	1,813-2	1,386-2	1,705-2	1,308-2	1,693-2	1,290-2	1,790-2	1,367-2	2,059-2	1,553-2	1,553-2	1,553-2	1,553-2	1,553-2	1,553-2	1,553-2	
30	1,51-2	1,18-2	1,57-2	1,23-2	1,71-2	1,32-2	1,63-2	1,28-2	1,57-2	1,22-2	1,68-2	1,30-2	2,05-2	1,53-2	1,53-2	1,53-2	1,53-2	1,53-2	1,53-2	1,53-2	
50	1,43-2	1,11-2	1,51-2	1,18-2	1,67-2	1,28-2	1,61-2	1,24-2	1,51-2	1,17-2	1,64-2	1,26-2	2,11-2	1,51-2	1,51-2	1,51-2	1,51-2	1,51-2	1,51-2	1,51-2	
100	1,41-2	1,03-2	1,54-2	1,11-2	1,73-2	1,21-2	1,68-2	1,19-2	1,53-2	1,11-2	1,69-2	1,19-2	2,26-2	1,43-2	1,43-2	1,43-2	1,43-2	1,43-2	1,43-2	1,43-2	

*) 1,25 MeV ist die mittlere Energie der beiden Quanten des Nuklids ^{60}Co (1,1731 und 1,3325 MeV)

7.07b Elemente; Eisensulfat und Lithiumfluorid für Dosimeter

Horizontaler Strich bei Pb: K-Kante

E in MeV	H, $Z = 1$		C, $Z = 6$ $\varrho = 1.8$ bis 2.25		N, $Z = 7$ $\varrho_{\text{NTB}} =$ 1,165–3		O, $Z = 8$ $\varrho_{\text{NTB}} =$ 1,331–3		Ca, $Z = 20$ $\varrho = 1.55$		Cu, $Z = 29$ $\varrho = 8.96$		Pb, $Z = 82$ $\varrho = 11.34$		FeSO ₄ , $\bar{Z} =$ 7.83, $\varrho = 1.024$		LiF, $\bar{Z} =$ 8.31 $\varrho = 2.675$	
	μ/ϱ	μ_{en}/ϱ	μ/ϱ	μ_{en}/ϱ	μ/ϱ	μ_{en}/ϱ	μ/ϱ	μ_{en}/ϱ	μ/ϱ	μ_{en}/ϱ	μ/ϱ	μ_{en}/ϱ	μ/ϱ	μ_{en}/ϱ	μ/ϱ	μ_{en}/ϱ	μ/ϱ	μ_{en}/ϱ
0.010	0.385	0.00985	2.298	2.003	3.779	3.446	5.832	5.449	92.34	86.26	214.0	151.4	130.6	125.6	5.812	5.413	5.970	5.607
0.015	0.377	0.0110	0.787	0.545	1.207	0.942	1.798	1.508	29.47	27.73	73.43	58.53	111.6	89.39	1.821	1.517	1.847	1.576
0.02	0.370	0.0136	0.434	0.216	0.606	0.375	0.850	0.603	12.92	12.07	33.52	28.10	86.36	69.23	0.873	0.611	0.865	0.635
0.03	0.357	0.0186	0.254	0.0641	0.304	0.107	0.374	0.169	4.040	3.637	10.83	9.382	30.32	25.50	0.394	0.174	0.369	0.179
0.04	0.346	0.0232	0.207	0.0327	0.228	0.0493	0.257	0.0737	1.814	1.525	4.828	4.173	14.36	12.21	0.276	0.0769	0.247	0.0774
0.05	0.335	0.0271	0.187	0.0236	0.197	0.0316	0.212	0.0434	0.011	0.776	2.595	2.196	8.041	6.796	0.231	0.0459	0.201	0.0447
0.06	0.326	0.0305	0.175	0.0208	0.181	0.0252	0.190	0.0317	0.6553	0.4448	1.583	1.290	5.020	4.177	0.208	0.0340	0.179	0.0318
0.08	0.309	0.0362	0.161	0.0203	0.164	0.0220	0.168	0.0245	0.364	0.194	0.759	0.559	2.419	1.936	0.184	0.0268	0.156	0.0237
0.10	0.294	0.0406	0.151	0.0214	0.153	0.0223	0.155	0.0235	0.256	0.108	0.456	0.295	5.550	2.229	0.171	0.0258	0.144	0.0222
0.15	0.265	0.0481	0.135	0.0245	0.135	0.0247	0.136	0.0247	0.167	0.0486	0.221	0.103	0.014	1.135	0.150	0.0277	0.126	0.0233
0.2	0.243	0.0525	0.123	0.0266	0.123	0.0266	0.124	0.0268	0.137	0.0364	0.156	0.0581	0.999	0.623	0.137	0.0296	0.115	0.0248
0.3	0.211	0.0569	0.107	0.0287	0.107	0.0287	0.107	0.0288	0.112	0.0315	0.112	0.0364	0.403	0.258	0.118	0.0318	0.0990	0.0266
0.4	0.189	0.0586	0.0955	0.0295	0.0956	0.0295	0.0957	0.0295	0.0978	0.0306	0.0941	0.0314	0.232	0.144	0.106	0.0327	0.0885	0.0273
0.6	0.160	0.0588	0.0806	0.0296	0.0806	0.0296	0.0807	0.0296	0.0815	0.0298	0.0762	0.0284	0.125	0.0713	0.0893	0.0327	0.0747	0.0274
0.8	0.140	0.0574	0.0708	0.0289	0.0708	0.0289	0.0709	0.0289	0.0712	0.0289	0.0661	0.0269	0.0887	0.0484	0.0784	0.0320	0.0656	0.0267
1.0	0.126	0.0556	0.0636	0.0279	0.0637	0.0279	0.0637	0.0279	0.0639	0.0278	0.0590	0.0256	0.0710	0.0379	0.0705	0.0309	0.0589	0.0258
1.5	0.103	0.0507	0.0518	0.0255	0.0518	0.0255	0.0519	0.0255	0.0521	0.0253	0.0480	0.0231	0.0522	0.0271	0.0574	0.0282	0.0480	0.0236
2	0.0877	0.0465	0.0444	0.0234	0.0445	0.0235	0.0446	0.0235	0.0453	0.0235	0.0420	0.0216	0.0461	0.0241	0.0493	0.0260	0.0412	0.0217
4	0.0581	0.0352	0.0305	0.0185	0.0307	0.0186	0.0310	0.0188	0.0340	0.0204	0.0332	0.0198	0.0420	0.0246	0.0340	0.0206	0.0286	0.0173
6	0.0450	0.0290	0.0247	0.0161	0.0251	0.0164	0.0255	0.0167	0.0303	0.0199	0.0311	0.0202	0.0439	0.0273	0.0277	0.0180	0.0234	0.0153
10	0.0325	0.0225	0.0196	0.0138	0.0202	0.0143	0.0209	0.0148	0.0284	0.0201	0.0310	0.0217	0.0497	0.0311	0.0222	0.0157	0.0190	0.0135
15	0.0254	0.0184	0.0170	0.0126	0.0178	0.0133	0.0187	0.0139	0.0284	0.0207	0.0325	0.0229	0.0566	0.0335	0.0195	0.0145	0.0169	0.0125
20	0.0215	0.0161	0.0158	0.0120	0.0167	0.0128	0.0177	0.0136	0.0290	0.0214	0.0341	0.0238	0.0621	0.0344	0.0182	0.0139	0.0159	0.0122
30	0.0175	0.0136	0.0147	0.0115	0.0159	0.0126	0.0171	0.0135	0.0307	0.0225	0.0371	0.0255	0.0700	0.0378	0.0172	0.0335	0.0152	0.0119
50	0.0142	0.0114	0.0143	0.0111	0.0157	0.0124	0.0171	0.0133	0.0333	0.0226	0.0412	0.0254	0.0807	0.0363	0.0169	0.0311	0.0151	0.0116
100	0.0119	0.0098	0.0145	0.0104	0.0162	0.0119	0.0179	0.0129	0.0371	0.0208	0.0467	0.0227	0.0937	0.0304	0.0174	0.0124	0.0158	0.0110

7.07c Werte der Koeffizienten bei den Absorptionskanten einiger Elemente für Photonenenergien größer als 5 keV

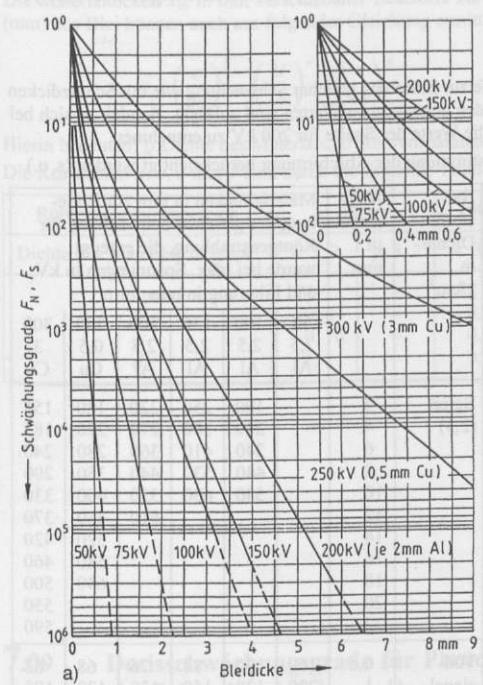
Element Z	Kante	E in keV	μ/ρ in cm^2/g		μ_{en}/ρ in cm^2/g	
			von	auf	von	auf
Fe, 26	K	7,112	49,0	442	47,2	329
Cu, 29	K	8,981	36,0	302	34,2	284
Sn, 50	K	29,20	7,61	44,9	6,70	16,2
Pb, 82	L _{III}	13,04	64,8	162	61,0	113
	L _{II}	15,20	110	151	80,8	109
	L _I	15,86	135	157	98,8	114
	K	88,00	1,85	7,65	1,45	2,31

7.08a Dosisschwächungsgrade für Röntgenstrahlung in Blei und für Gammastrahlung in verschiedenen Materialien – Dose attenuation rates for X-rays in lead and for gamma radiation in several materials (H. Reich)

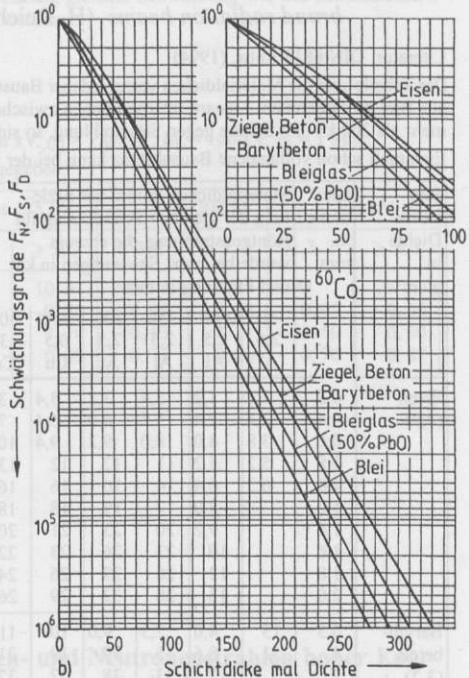
Literatur: Daten: Wachsmann, F.; Drexler, G. (1976): Kurven und Tabellen für die Radiologie; 2. Aufl. Berlin: Springer. Normen: DIN 6812 E(1994): Medizinische Röntgenanlagen bis 300 kV; Strahlenschutzregeln für die Errichtung. DIN 54113, T. 3 (1995): Zerstörungsfreie Prüfung – Strahlenschutzregeln für die technische Anwendung von Röntgeneinrichtungen bis 500 kV; Formeln und Diagramme für Strahlenschutzberechnungen. DIN 6845 T. 1 (1980): Prüfung von Strahlenschutzstoffen für Röntgen- und Gammastrahlung; Röntgenstrahlung bis 400 kV. Göttel, K.; Kraft, A. (1972): Einfluß der Bestrahlungsfeldgröße auf die Schwächung von Röntgenstrahlung; GSF-Bericht, S 209; Oberschleißheim: GSF-Forschungszentrum, Inst. f. Strahlenschutz. DIN 6844: Nuklearmedizinische Betriebe; T. 3 (1989): Strahlenschutzberechnungen. DIN 6846: Medizinische Gammabestrahlungsanlagen; T. 2 (1983): Strahlenschutzberechnungen für die Errichtung. DIN 54115: Medizinische Strahlenschutzregeln für die technische Anwendung umschlossener radioaktiver Stoffe; T. 5 (1992): Errichtung von Anlagen für die Gammaradiographie. Dimitrijevic, D. (1972): Praktische Berechnung der Abschirmung von radioaktiver und Röntgenstrahlung; Weinheim: VCH Verlag. Chilton, A. B., u. a. (1984): Principles of Radiation Shielding; Englewood Cliffs: Prentice Hall. Sauermann, P. F. (1985): Abschirmungspraxis – aus 25 Jahren Erfahrung; Jülich: Kernforschungsanlage, Inst. f. Chemie – Strahlenschutz.

F_N , F_S , F_D Schwächungsgrade für Nutzstrahlung, für Streustrahlung und für Durchlaßstrahlung; die letztere (bei den Diagrammen b) bis d)) ist die von der Wand der Strahlerköpfe von Gamma-Bestrahlungseinrichtungen hindurchgelassene Strahlung. Diagramm a) gilt für Röntgenstrahlung hinter Bleischichten. Die Kurven gelten für ausgedehnte Strahlenfelder (z. B. 50 cm × 50 cm) und Aufstellung der Dosimeter dicht hinter der Schutzwand.

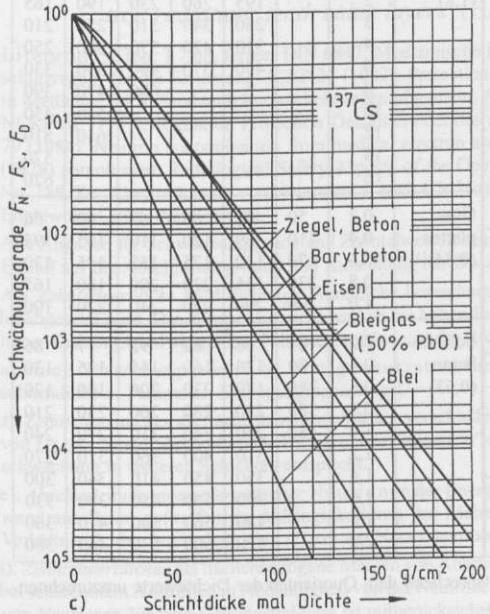
Fortsetzung T 7.08a



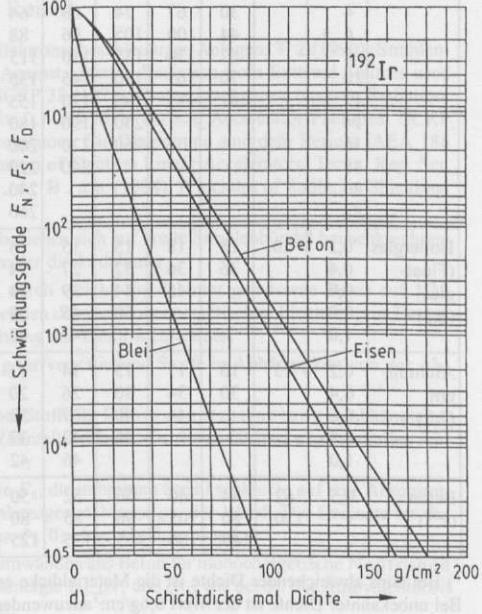
a)



b)



c)



d)

7.08b Bestimmung der Schutzdicken aus verschiedenen Baustoffen für breite Strahlbündel – *Determination of protection layers of different building materials for broad radiation beams* (H. Reich)

Literatur: DIN 6812 Entw. (1994)

Der Tabelle sind die Materialdicken verschiedener Baustoffe zur Erzielung gleicher Schwächung wie mit Schutzdicken aus Blei zu entnehmen. Lineare Interpolationen zwischen den angegebenen Werten sind zulässig. Handelt es sich bei mehr als 200 kV um Schutz gegen Störstrahlung, so sind die Werte der Spalte für 200 kV zu entnehmen.

Eventuell schon vorhandene Bausubstanz kann bei der Bestimmung der Abschirmung berücksichtigt werden (s. u.).

Baustoffe Dichte in g/cm ³	Blei- dicke in mm	Materialdicken in mm zur Erzielung der gleichen Schwächung für Röntgenstrahlung, die erzeugt wurde bei max. Spannungen in kV und Filterung in mm						Baustoffe Dichte in g/cm ³	Blei- dicke in mm	Materialdicken in mm zur Erzielung der gleichen Schwächung für Röntgenstrahlung, die erzeugt wurde bei max. Spannungen in kV und Filterung in mm					
		50 2,5 Al	100 2,5 Al	150 2,5 Al	200 2,5 Al	250 0,5 Cu	300 3 Cu			50 2,5 Al	100 2,5 Al	150 2,5 Al	200 2,5 Al	250 0,5 Cu	300 3 Cu
Eisen (7,9)	0,2	1,1	1,2	2,4	3,2	3,4	3,8	Beton (2,3)	3	190	250	220	180	155	
	0,4	2,4	2,4	5,2	6,0	6,4	7,2		4	240	300	270	220	185	
	0,6	3,8	4,0	8,0	9,2	9,4	10		6	340	410	360	280	240	
	0,8	5,2	5,2	11	12	12	13		8	440	530	440	350	290	
	1,0	6,5	6,4	14	16	16	16		10	540	630	530	400	330	
	1,2		8,0	17	19	18	18		12			610	460	370	
	1,4		9,2	20	23	21	20		14				520	420	
	1,6		10	23	26	23	22		16				580	460	
	1,8		12	26	29	26	24		18				640	500	
	2,0		13	28	32	29	26		20				550	590	
Baryth- beton (3,2)	0,5	15	4,0	7,3	9,0	10	11	Voll- ziegel (1,8)	22						
	1	31	8,6	15	19	19	21		0,5	100	70	84	76	68	62
	2		17	33	38	37	37		1	200	120	150	130	120	105
	3		24	51	57	53	50		2	195	260	230	190	165	
	4		30	67	74	68	64		3	260	340	310	250	210	
	6		44	100	105	96	88		4	330	420	370	300	250	
	8		57	130	135	120	115		6	450	570	490	390	330	
	10		70	165	170	145	135		8		600	470	390		
	12		82	195	195	170	155		10			540	450		
	14				230	190	180		12			610	510		
	16				260	220	200		14				570		
	18				240	220	220		16				620		
	20					240									
	22						260								
Isolierglas (Float- glas) (2,5)	0,2	20	18	18	15	15	15	Gips- platten (0,84) ¹⁾	0,2	50	48	63	62	60	56
	0,4		36	36	32	27	24		0,4	110	89	120	110	105	95
	0,6			45	44	39	34		0,6	170	130	175	155	145	130
	0,8				50	45	38		0,8	230	165	220	200	180	165
	1,0					47	42		1,0	290	200	270	240	220	190
Alumini- um (2,7)	0,2	15	16	17	15	14	12	Schaum- beton (0,63)	0,2	84	66	82	92	77	86
	0,4		30	34	30	26	20		0,4	180	120	160	145	135	130
	0,6			44	40	37	32		0,6	280	170	230	200	180	170
	0,8				46	42	37		0,8	380	220	280	260	230	210
	1,0					46	42		1,0	480	270	340	310	270	240
									1,2	310	400	360	310	270	
Beton (2,3)									1,4	350	450	410	340	300	
	0,5	62	44	60	56	52	50		1,6		390	500	450	380	330
	1	130	80	105	96	85	80		1,8		430	560	500	410	360
	2		140	180	165	135	125		2,0		470	600	530	440	380

¹⁾ Bei Gips abweichender Dichte ist die Materialdicke entsprechend dem Quotienten der Dichtewerte umzurechnen. Bei unbekannter Dichte ist der Wert 0,6 g/cm³ anzuwenden.

Fortsetzung T 7.08b

Die Materialdicken x_m in mm verschiedener Baustoffe zur Erzielung gleicher Schwächung wie mit Schutzdicken x (mm) aus Blei können auch aus folgender Gleichung ermittelt werden:

$$x_m = a \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^b \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right)^c \cdot \left(\frac{x}{x_0} \right)^d$$

Hierin bedeuten: ρ Dichte des Materials, U Röhrenspannung in kV, $\rho_0 = 1 \text{ g/cm}^3$, $U_0 = 100 \text{ kV}$, $x_0 = 1 \text{ mm}$.

Die Konstanten a, b, c und d sind durch die folgende Tabelle gegeben:

Röhrenspannungsbereich	< 100 kV		100 bis 175 kV		> 175 bis 200 kV		> 200 kV	
Dichte des Materials in g/cm ³	< 3, 2	≥ 3, 2	< 3, 2	≥ 3, 2	< 3, 2	≥ 3, 2	< 3, 2	≥ 3, 2
a in mm	177	—	177	10, 5	290	9, 3	290	25
b	-0, 83	—	-0, 95	-0, 20	-0, 95	-0, 22	-0, 95	-0, 20
c	-0, 70	—	0, 69	2, 10	-0, 53	1, 31	-0, 50	0, 00
d	1, 1	—	0, 82	0, 90	0, 75	0, 96	0, 70	0, 87

7.09 Dosisschwächungsgrade für Photonen- und Neutronenstrahlen hoher Energie; Zehntelwertdicken – Dose attenuation rates for high energy photon and neutron radiation; tenth value layers (H. Reich)

Literatur: s. Tab. T 7.08, ferner: DIN 6847: Medizinische Elektronenbeschleuniger-Anlagen; T. 2 (1990): Strahlenschutzzregeln für die Errichtung. ICRP 33 (1982): Protection Against Ionizing Radiation from External Sources used in Medicine; 74 S. Strahlenschutzvorkehrungen allgemein: NCRP 38 (1971): Protection Against Neutron Radiation. NCRP 51 (1977): Radiation Protection Design Guidelines for 0.1-100 MeV Particle Accelerator Facilities. NCRP 79 (1984): Neutron contamination from medical electron accelerators. Die Diagramme sind dem Bericht IAEA 188 (1979) entnommen: Radiological Safety Aspects of the Operation of Electron Linear Accelerators, Techn. Rep. Ser. No. 188. Zur Abschwächung von Neutronen s. auch Chilton, A. B., u.a. (1984): Principles of Radiation Shielding. Englewood Cliffs: Prentice Hall.

Alle Angaben für Schwächungsgrade und Zehntelwertdicken beziehen sich auf breite Strahlenbündel bei senkrechtem Einfall auf die Abschirmungswand und Aufstellung der Dosimeter direkt dahinter.

Als **Zehntelwertdicke** wird diejenige Wanddicke bezeichnet, durch welche die dahinter gemessene Dosis auf 1/10 herabgesetzt wird. Die **Röntgennutzstrahlung** ist bei hohen Energien die von monoenergetischen Elektronen in Targets hoher Ordnungszahl ausgelöste Photonenstrahlung in der Richtung des Elektronenstrahles.

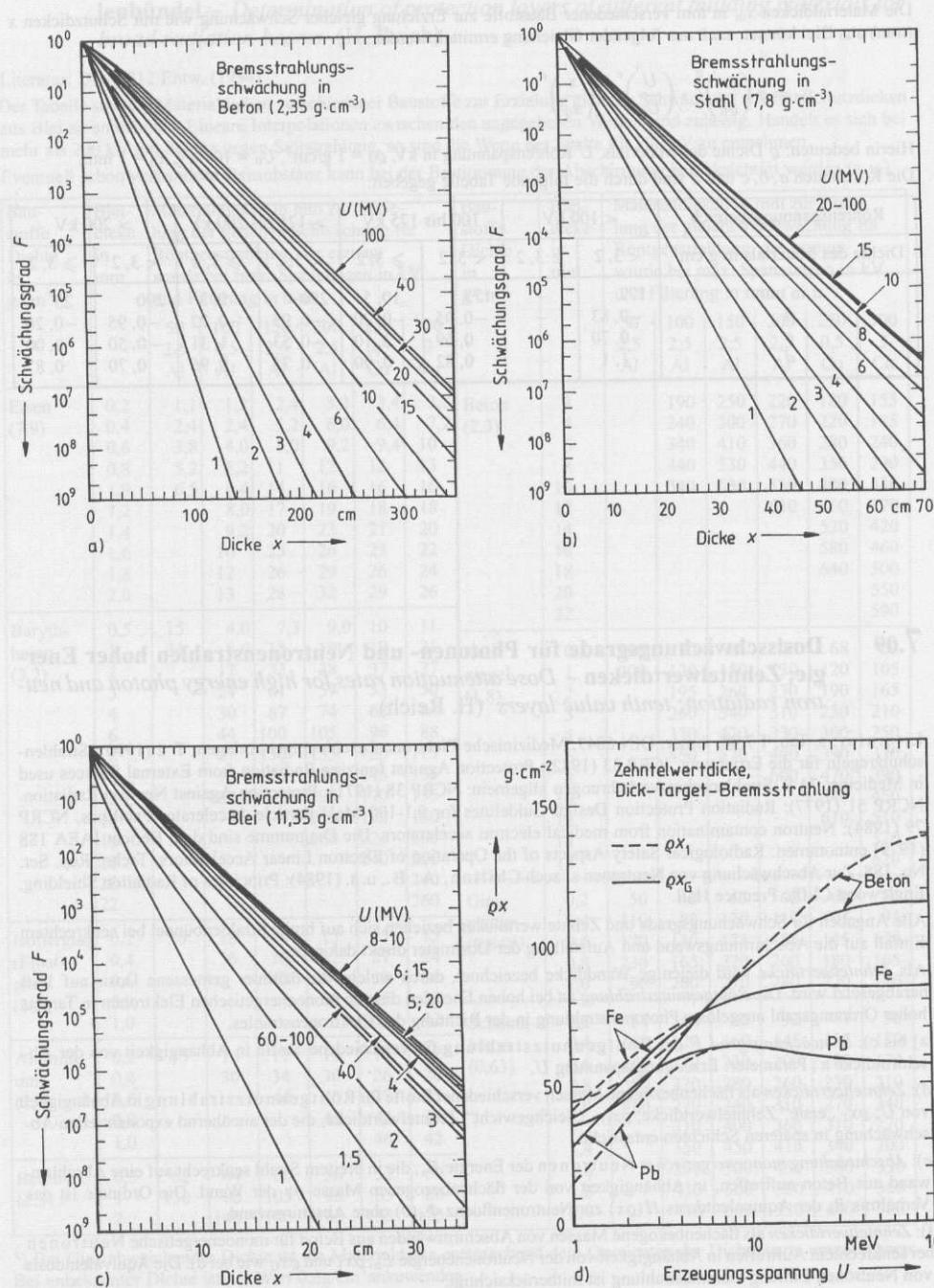
a) bis c): **Schwächungsgrad** F der Röntgennutzstrahlung für verschiedene Stoffe in Abhängigkeit von der Abschirmdicke x ; Parameter: Erzeugungsspannung U .

d): **Zehntelwertdicken** als flächenbezogene Massen verschiedener Stoffe für Röntgennutzstrahlung in Abhängigkeit von U ; ρx_1 „erste“ Zehntelwertdicke; ρx_G „Gleichgewicht“-Zehntelwertdicke, die der annähernd exponentiellen Abschwächung in späteren Schichten entspricht.

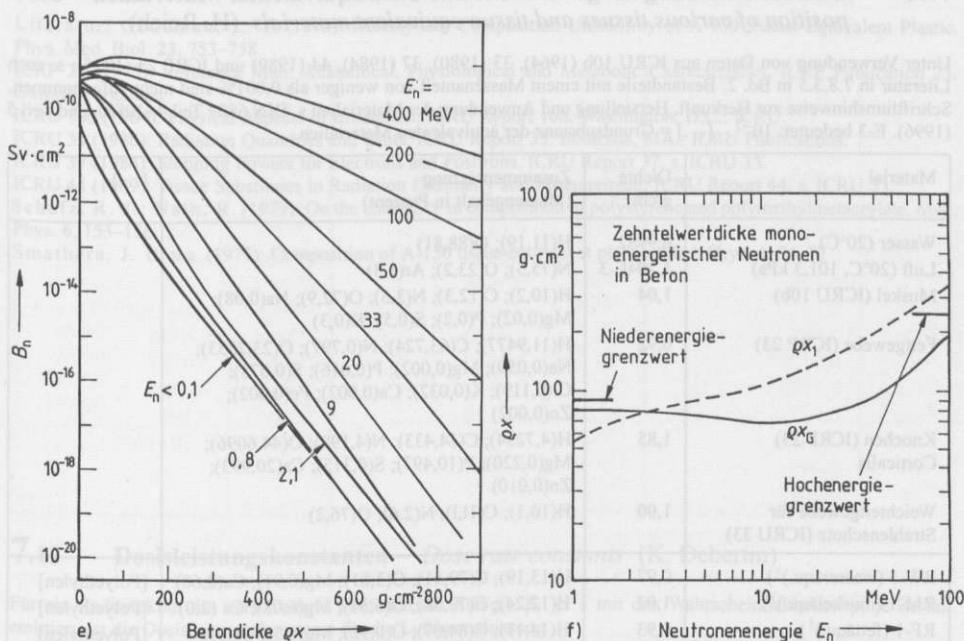
e): **Abschwächung monoenergetischer Neutronen** der Energie E_n , die in breitem Strahl senkrecht auf eine Abschirmwand aus Beton auftreffen, in Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse ρx der Wand. Die Ordinate ist das Verhältnis B_n der Äquivalentdosis $H(x)$ zur Neutronenfluenz $\Phi_n(0)$ ohne Abschirmwand.

f): **Zehntelwertdicken** als flächenbezogene Massen von Abschirmwänden aus Beton für monoenergetische Neutronen bei senkrechtem Auftreffen in Abhängigkeit von der Neutronenenergie E_n , ρx_1 und ρx_G wie bei d). Die Äquivalentdosis von Neutronen-Einfang-Gammastrahlung ist mitberücksichtigt.

Fortsetzung Tab. T 7.09



Fortsetzung Tab. T 7.09



7.10 Bremsstrahlungskorrektionen g und Kerma-Umrechnungsfaktoren – Correction factors g for bremsstrahlung production and conversion coefficients for kerma (H. Reich)

Literatur: s. Kohlrausch. Bd. 2, 7.1.3.2, 7.8.1.3, 7.8.1.7 und 7.8.3.1

g Bruchteil der Anfangsenergie, der von Sekundärelektronen bei Abbremsung in Luft (g_a), in Wasser (g_w) und in Graphit (g_c) in Bremsstrahlung umgewandelt wird, berechnet nach Daten von M. Roos (private Mitteilung) nach Daten von Hubbell, J. H. (1977) (s. Zitat bei Tab. T 7.07) und ICRU 37 (1984), Stopping Powers for Electrons and Positrons.

K_a/J_s , K_w/K_a Konversionsfaktoren zur Umrechnung der Standard-Ionendosis in die Luftkerma und der Luftkerma (in Wasser) in die Wasser-Kerma (s. 7.8.3.1 und 7.8.3.3 in Bd. 2) unter Benutzung der Faktoren g_a , $W/e = 33,97$ V, und $t_{wa}^{en} = (\mu_{en}/\varrho)_w / (\mu_{en}/\varrho)_a$ (letztere Werte s. Tab. T 7.07a). Die Wasserkerma K_w in Wasser kann jenseits des Tiefendosismaximums bis zu hohen Energien der dort erzeugten Wasser-Energiedosis D_w näherungsweise gleichgesetzt werden (s. Nilsson, B.; Brahma, A. (1983): Relation between kerma and absorbed dose in photon beams. Acta Radiol. Oncol. 22, 77–85). Bei Messungen der Dosisgrößen mit einer Kammer in Luft und in Wasser sind Korrekturen nach 7.8.4.3 in Bd. 2 zu berücksichtigen. E Photonenergie.

E keV	g_a 10^{-3}	g_w 10^{-3}	g_c 10^{-3}	K_a/J_s mGy/R	K_w/K_a	E keV	g_a 10^{-3}	g_w 10^{-3}	g_c 10^{-3}	K_a/J_s mGy/R	K_w/K_a
50	0,28	0,24	0,16	8,77	1,031	1,00	2,49	2,22	2,05	8,79	1,112
100	0,24	0,21	0,16	8,77	1,095	1,25*)	3,15	2,82	2,61	8,79	1,112
200	0,45	0,40	0,36	8,77	1,110	1,50	3,84	3,44	3,20	8,80	1,112
400	0,97	0,86	0,78	8,77	1,112	2,00	5,25	4,75	4,45	8,81	1,112
600	1,48	1,31	1,20	8,78	1,112	3,00	8,20	7,55	7,12	8,84	1,109

*) Als Mittelwert der beiden Gammalinen des ^{60}Co . Für Spektren ausgedehnter Quellen ergeben sich ein wenig niedrigere Werte (s. Großwendt, B.; Roos, M. (1984): Spektren von Cobaltquellen für die Strahlentherapie. In: Med. Physik 84 (Th. Schmidt Hrsg.), 391–394. DGMP).

7.11 Zusammensetzung einiger Gewebe und dazu äquivalenter Materialien – Composition of various tissues and tissue-equivalent materials (H. Reich)

Unter Verwendung von Daten aus ICRU 10b (1964), 33 (1980), 37 (1984), 44 (1989) und ICRP 23 (1975); s. auch Literatur in 7.8.3.5 in Bd. 2. Bestandteile mit einem Massenanteil von weniger als 0,001% sind nicht aufgenommen. Schriftumshinweise zur Herkunft, Herstellung und Anwendung der Materialien s. DIN 6809 Teil 4 (1988), und Teil 5 (1996). E-3 bedeutet: 10^{-3} . [...] = Grundsubstanz der äquivalenten Materialien.

Material	Dichte g/cm ³	Zusammensetzung (Massengehalt in Prozent)	[...]
Wasser (20°C)	0,9982	H(11,19); O(88,81)	
Luft (20°C, 101,3 kPa)	1,204E-3	N(75,5); O(23,2); Ar(1,3)	
Muskel (ICRU 10b)	1,04	H(10,2); C(12,3); N(3,5); O(72,9); Na(0,08); Mg(0,02); P(0,2); S(0,5); K(0,3)	
Fettgewebe (ICRP 23)	0,92	H(11,9477); C(63,724); N(0,797); O(23,2333); Na(0,050); Mg(0,002); P(0,016); S(0,073); Cl(0,119); K(0,032); Ca(0,002); Fe(0,002); Zn(0,002)	
Knochen (ICRP 23) Corticalis	1,85	H(4,7234); C(14,433); N(4,199); O(44,6096); Mg(0,220); P(10,497); S(0,315); Ca(20,993); Zn(0,010)	
Weichteilgewebe für Strahlenschutz (ICRU 33)	1,00	H(10,1); C(11,1); N(2,6); O(76,2)	
RW-1 (wasseräqu. ¹⁾	0,97	H(13,19); C(79,41); O(3,81); Mg(0,91); Ca(2,68)	[Polyethylen]
RM-1 (muskeläqu. ¹⁾	1,03	H(12,24); C(73,36); O(6,37); Mg(6,03); Ca (2,0)	[Polyethylen]
RF-1 (fettäqu. ¹⁾	0,93	H(14,11); C(84,07); O(0,92); Mg(0,3); Ca(0,6)	[Polyethylen]
RS-1 (gewebeäqu., für Strahlenschutz) ¹⁾	0,98	H(13,11); C(78,53); O(4,01); Mg(2,23); Ca(2,12)	[Polyethylen]
RW-2 (muskeläqu. ²⁾)	1,112	H(6,97); C(83,03); O(4,0); Ti(6,0)	[Polystyrol]
RW-3 (wasseräqu. ²⁾)	1,045	H(7,59); C(90,41); O(0,80); Ti(1,20)	[Polystyrol]
M3 (muskeläqu.)	1,055	H(11,43); C(65,58); O(9,22); Mg(13,48); Ca(0,29)	[Paraffin]
WT/SR 6 (muskeläqu.)	1,015	H(8,09); C(67,22); N(2,40); O(19,84); Cl(0,13); Ca(2,32)	[Epoxidharz]
A-150 (muskeläqu. ³⁾)	1,12	H(10,20); C(76,80); N(3,60); O(5,90); F(1,70); Ca(1,80)	[Polyethylen, Nylon]
AP6 (fettäqu.)	0,92	H(8,36); C(69,14); N(2,36); O(16,93); F(3,07); Cl(0,14)	[Epoxidharz]
Triolein (fettäqu., flüssig)	0,92	H(11,84); C(77,32); O(10,84)	
SB4 (knochenäqu.)	1,75	H(3,72); C(32,46); N(0,53); O(36,12); Cl(0,3); Ca(26,87)	[Epoxidharz]
C 552 (Shonka, luftäqu.)	1,760	H(2,468); C(50,161); O(0,4527); F(46,521); Si(0,3973)	[Polyvinyliden- fluorid]
Polyethylen (CH_2 , fettäqu. ²⁾)	0,92	H(14,37); C(85,63)	
Polystyrol, rein (C_8H_8) ⁴⁾	1,024	H(7,74); C(92,26)	
Paraffin ($\text{C}_{25}\text{H}_{52}$)	0,88	H(14,86); C(85,14)	
PMMA ($\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$) ⁵⁾	1,18	H(8,05); C(59,99); O(31,96)	

¹⁾ für Röntgenstrahlung bis 200 kV Erzeugungsspannung.

²⁾ für Photonenstrahlung ab 1 MeV und Elektronenstrahlung ab 5 MeV.

³⁾ A-150 ist elektrisch leitend und wird i. allg. als Granulat (geeignet zum Schmelzen) oder in Stabform geliefert (Adresse: Exradin, 1950 University Lane, Lisle, Illinois 60532, USA). Weitere Angaben s. Smathers u.a. (1977), Goodman (1978).

⁴⁾ Handelsname Vestyron 628-31 der Chemischen Werke Hüls.

⁵⁾ Polymethylmethacrylat. Handelsnamen: Plexiglas, Perspex, Lucite. Die Dichte des PMMA weicht bei verschiedenen Proben z. T. um mehrere Prozent nach oben und unten von dem angegebenen Wert ab (s. Schulz u. Nath (1979)).

Fortsetzung T 7.11

Literatur: Goodman, L. J. (1978): Density and Composition Uniformity of A-150 Tissue-Equivalent Plastic. *Phys. Med. Biol.* **23**, 753–758.

ICRP 23 (1975): Reference Man: Anatomical, Physiological and Metabolic Characteristics. ICRP Publication 23. Oxford: Pergamon.

[ICRU 10b (1964); Physical Aspects of Irradiation, ICRU Report 10b, Washington, D.C.: ICRU]

ICRU 33 (1980). Radiation Quantities and Units. ICRU Report 33. Bethesda, MD: ICRU Publications.

ICRU 35 (1980). Radiation Quantities and Units. ICRU Report 35, Bethesda, MA.: ICRU Publishing Committee.

ICRU 37 (1984); Stopping Powers for Electrons and Positrons. ICRU Report 37, s. ICRU 33.

Schulz, R. J.; Nath, R. (1979): On the constancy in composition of polystyrene and polymethylmethacrylate. *Med. Phys.* **6**, 153-156.

Smathers, J. B., et al. (1977): Composition of A-150 tissue-equivalent plastic. *Med. Phys.* **4**, 74-77.

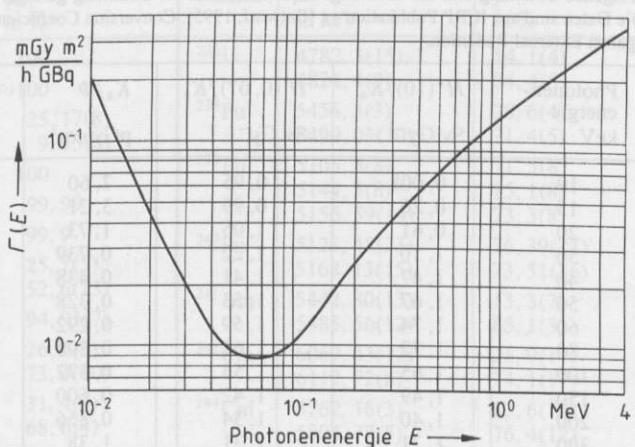
7.12 Dosisleistungskonstanten – Dose rate constants (K. Debertin)

Für ein Radionuklid, das verschiedene Photonen der Energie $E_i \geq \delta$ mit den Wahrscheinlichkeiten p_i je Zerfall emittiert, ist die Dosisleistungskonstante für die Luftkernaleistung

$$\Gamma_\delta = \sum_{E_i > \delta} p_i \cdot \Gamma(E_i) \quad (\Gamma(E_i) \text{ s. Fig. 7.12a})$$

Es gilt $\Gamma(E) = 4,59 \cdot E \cdot [\mu_{\text{tr}}(E)/\varrho]$ (Z. W.: Γ in $\text{mGym}^2\text{h}^{-1}\text{GBq}^{-1}$, E in MeV, μ_{tr}/ϱ in cm^2g^{-1}). μ_{tr}/ϱ ist der Massen-Energieumwandlungskoeffizient für Luft. Bis 1 MeV ist μ_{tr}/ϱ für Luft um weniger als 1% größer als der Massen-Energieabsorptionskoeffizient μ_{abs}/ϱ , dessen Werte in Tab. T 7.07 wiedergegeben sind.

7.12a Dosisleistungskonstanten $\Gamma(E)$ für die Luftkermaleistung



7.12b Dosisleistungskonstanten für die Luftkermaleistung für einige gebräuchliche Radionuklide unter Berücksichtigung von Photonenenergien $E \geq 20$ keV (Γ_{20})

Radio-nuklid	Γ_{20} mGy m ² h ⁻¹ GBq ⁻¹	Radio-nuklid	Γ_{20} mGy m ² h ⁻¹ GBq ⁻¹	Radio-nuklid	Γ_{20} mGy m ² h ⁻¹ GBq ⁻¹
²² Na	0,281	⁸⁸ Y	0,314	¹³⁹ Ce	0,0284
²⁴ Na	0,433	⁹⁹ Mo	0,0341	¹⁴¹ Ce	0,0102
⁵¹ Cr	$4,19 \cdot 10^{-3}$	⁹⁹ Tc ^m	0,0146	¹⁵³ Gd	0,0193
⁵⁴ Mn	0,110	¹⁰⁹ Cd	0,0373	¹⁶⁹ Yb	0,0428
⁵⁷ Co	0,0132	¹¹¹ In	0,0759	¹⁸² Ta	0,162
⁵⁸ Co	0,129	¹¹³ Sn ¹⁾	0,0648	¹⁹² Ir	0,109
⁵⁹ Fe	0,147	¹¹³ In ^m	0,0418	¹⁹⁷ Hg	$7,69 \cdot 10^{-3}$
⁶⁰ Co	0,307	¹²³ I	0,0382	¹⁹⁸ Au	0,0546
⁶⁵ Zn	0,0729	¹²⁵ I	0,0340	²⁰¹ Tl	0,0103
⁶⁷ Ga	0,0190	¹³¹ I	0,0522	²⁰³ Hg	0,0308
⁶⁸ Ge ¹⁾	0,129	¹³³ Xe	0,0126	²²⁶ Ra ¹⁾	0,199
⁷³ Se	0,0481	¹³³ Ba	0,0705	²⁴¹ Am	$5,78 \cdot 10^{-3}$
⁸² Br	0,344	¹³⁴ Cs	0,208		
⁸⁵ Sr	0,0689	¹³⁷ Cs ¹⁾	0,0772		

¹⁾ im Gleichgewicht mit Folgeprodukten

Für Zwecke des Strahlenschutzes wird die Dosisleistungskonstante für die Photonen-Äquivalentdosisleistung Γ_H angegeben. Zahlenwerte für Γ_H in mSv m²h⁻¹ GBq⁻¹ erhält man durch Multiplikation der o. a. Tabellenwerte mit 1,141.

Tabellen weiterer Dosisleistungskonstanten für 200 Radionuklide s. Tschurlovits, M.; Leitner, A.; Daverda, G. (1992): Dose rate constants for new dose quantities. Radiat. Prot. Dosim. **42**, 77–82.

7.13 Fluenz- und Luftkerma-Äquivalentdosis-Umrechnungsfaktoren für Photonen – Fluence and air kerma-to-dose equivalent conversion coefficients for photons (G. Dietze)

Die Tabelle enthält Daten für die Umrechnung von der Photonenfluenz Φ bzw. Luftkerma K_a frei-in-Luft auf die Strahlenschutz-Meßgrößen zur Messung der Ortsdosis, d.h. auf die Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ für durchdringende Strahlung und die Richtungs-Äquivalentdosis für Strahlung geringer Eindringtiefe (s. 7.8.1.10 in Bd. 2). Die Daten sind aus ICRP Publikation xx (Entwurf, 1995): Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation.

Photonen-energie keV	$H^*(10)/K_a$ Sv Gy ⁻¹	$H'(0, 07)/K_a$ Sv Gy ⁻¹	K_a/Φ pGy cm ²	$H^*(10)/\Phi$ pSv cm ²	$H'(0, 07)/\Phi$ pSv cm ²
10	0,008	0,95	7,60	0,061	7,2
15	0,26	0,99	3,21	0,83	3,19
20	0,61	1,05	1,73	1,05	1,81
30	1,10	1,22	0,739	0,81	0,90
40	1,47	1,41	0,438	0,64	0,62
50	1,67	1,53	0,328	0,55	0,50
60	1,74	1,59	0,292	0,51	0,47
80	1,72	1,61	0,308	0,53	0,49
100	1,65	1,55	0,372	0,61	0,58
150	1,49	1,42	0,600	0,89	0,85
200	1,40	1,34	0,856	1,20	1,15
300	1,31	1,31	1,38	1,80	1,80

Fortsetzung T 7.13

Photonen-energie keV	$H^*(10)/K_a$ Sv Gy ⁻¹	$H'(0,07)/K_a$ Sv Gy ⁻¹	K_a/Φ pGy cm ²	$H^*(10)/\Phi$ pSv cm ²	$H'(0,07)/\Phi$ pSv cm ²
400	1,26	1,26	1,89	2,38	2,38
500	1,23	1,23	2,38	2,93	2,93
600	1,21	1,21	2,84	3,44	3,44
800	1,19	1,19	3,69	4,38	4,38
1 000	1,17	1,17	4,47	5,2	5,2
1 500	1,15	1,15	6,12	6,9	6,9
2 000	1,14	1,14	7,51	8,6	8,6
3 000	1,13	1,13	9,89	11,1	11,1
4 000	1,12	1,12	12,0	13,4	13,4
5 000	1,11	1,11	13,9	15,5	15,5
6 000	1,11	1,11	15,8	17,6	17,6
8 000	1,11	1,11	19,5	21,6	21,6
10 000	1,10	1,10	23,2	25,6	25,6

7.14 **α -, γ - und Elektronenstrahler zur Kalibrierung von Spektrometern – α -ray, γ -ray and electron-ray sources for calibrating spectrometers (K. Debertin)**

E Energie; p Emissionswahrscheinlichkeit; Zahlen in Klammern: Unsicherheit (Standardabweichung) der letzten angegebenen Ziffern.

Literatur:

Zu α -Strahlern: Rytz, A. (1991): Recommended Energy and Intensity Values of Alpha Particles from Radioactive Decay. Atomic Data and Nuclear Data Tables 47, 205–239

Zu γ -Strahlern: International Atomic Energy Agency (1991): X-ray and gamma-ray standards for detector calibration. IAEA-TECDOC-619, Wien

Zu Elektronenstrahlern: Legrand, J.; Perolat, J.-P.; Lagoutine, F.; Le Gallic, Y. (1982–1987): Table de Radionucléides. Laboratoire de Métrologie des Rayonnements Ionisants, CEA und BNM. Gif-sur-Yvette, Frankreich. Browne, E.; Firestone, R. B. (1986): Table of Radioactive Isotopes, John Wiley & Sons, New York.

 α -Strahler

Nuklid	E in keV	p in %	Nuklid	E in keV	p in %
¹⁴⁸ Gd	3182, 680(24)	100	²³³ U	4782, 3(15)	14, 1(4)
²¹⁰ Po	5304, 33(7)	≈100		4824, 4(9)	84, 4(5)
²¹² Bi	6050, 776(26)	25, 17(8)	²³⁸ Pu	5456, 3(3)	28, 6(4)
	6089, 879(34)	9, 75(6)		5499, 03(20)	71, 4(5)
²¹² Po	8784, 86(12)	100	²³⁹ Pu	5105, 8(8)	11, 5(8)
²¹⁴ Po	7686, 82(7)	99, 99		5144, 3(8)	15, 1(8)
²¹⁸ Po	6002, 35(9)	99, 9		5156, 59(14)	73, 3(8)
²²³ Ra	5606, 73(30)	25, 7(5)	²⁴⁰ Pu	5123, 45(23)	26, 39(21)
	5716, 23(29)	52, 6(13)		5168, 13(15)	73, 51(36)
²²⁴ Ra	5685, 37(15)	94, 91(7)	²⁴¹ Am	5442, 80(13)	13, 3(7)
²²⁸ Th	5340, 36(15)	26, 6(3)		5485, 56(12)	85, 1(3)
	5423, 15(22)	73, 4(10)	²⁴² Cm	6069, 43(12)	25, 9(17)
²³² U	5262, 36(9)	31, 4(4)		6112, 72(8)	74, 1(17)
	5320, 12(14)	68, 6(4)	²⁴⁴ Cm	5762, 16(3)	23, 6(12)
				5804, 77(5)	76, 4(12)

Fortsetzung T 7.14

 γ -Strahler

Nuklid	E in keV	p in %	Nuklid	E in keV	p in %
^{22}Na	1274, 542(7)	99, 935(15)	^{139}Ce	165, 857(6)	79, 87(6)
^{24}Na	1368, 633(6)	99, 9936(15)	^{152}Eu	121, 7824(4)	28, 37(13)
	2754, 030(14)	99, 855(5)		244, 6989(10)	7, 53(4)
^{54}Mn	834, 843(6)	99, 9758(24)		344, 2811(19)	26, 57(11)
^{57}Co	14, 4127(4)	9, 16(15)		411, 126(3)	2, 238(10)
	122, 0614(3)	85, 60(17)		443, 965(4)	3, 125(14)
	136, 4743(5)	10, 68(8)		778, 903(6)	12, 97(6)
^{60}Co	1173, 238(4)	99, 857(22)		964, 055(4)	14, 63(6)
	1332, 502(5)	99, 983(6)		1085, 842(4)	10, 13(5)
^{65}Zn	1115, 546(4)	50, 60(24)		1112, 087(6)	13, 54(6)
^{85}Sr	514, 0076(22)	98, 4(4)	^{198}Au	1408, 022(4)	20, 85(9)
^{88}Y	898, 042(4)	94, 0(3)	^{203}Hg	411, 8044(11)	95, 57(47)
	1836, 063(13)	99, 36(3)	^{207}Bi	279, 1967(12)	81, 48(8)
^{109}Cd	88, 0341(11)	3, 63(2)		569, 702(2)	97, 74(3)
^{113}Sn	391, 702(4)	64, 89(13)	$^{228}\text{Th}/^{208}\text{Tl}$	1063, 662(4)	74, 5(2)
^{134}Cs	604, 720(3)	97, 63(6)	^{241}Am	2614, 533(13)	35, 86(6)
	795, 859(5)	85, 4(3)		59, 537(1)	36, 0(4)
^{137}Cs	661, 660(3)	85, 1(2)			

Elektronen-Strahler

Nuklid	E in keV	p in %	Nuklid	E in keV	p in %
^{57}Co	114, 950(2)	1, 63(10)	$^{137}\text{Cs}/^{137}\text{Ba}^m$	624, 213(3)	7, 60(10)
	129, 362(2)	1, 43(4)		655, 67–656, 41	1, 42(5)
$^{109}\text{Cd}/^{109}\text{Ag}^m$	62, 520(2)	41, 2(8)	^{192}Ir	217, 563(1)	1, 92(9)
	84, 228–84, 683	45, 3(8)		230, 062(1)	1, 88(13)
	87, 317–88, 031	9, 8(2)		238, 113(1)	4, 50(15)
$^{113}\text{Sn}/^{113}\text{In}^m$	363, 762(4)	28, 4(5)		389, 677(1)	1, 02(3)
	387, 46–387, 97	5, 3(3)	^{198}Au	328, 702(2)	2, 88(3)
$^{114}\text{In}^m$	162, 34(3)	39, 4(13)		396, 96–399, 52	1, 03(2)
	186, 04–186, 55	32, 2(10)	^{203}Hg	193, 666(1)	13, 46(20)
$^{123}\text{Te}^m$	56, 64(7)	41, 9(5)		263, 85–266, 54	3, 92(9)
	83, 52–84, 12	45, 0(5)	^{207}Bi	481, 680(10)	1, 57(3)
	127, 15(7)	13, 70(8)		553–569	0, 580(6)
$^{125}\text{Te}^m$	77, 460(8)	50, 5(15)		975, 637(21)	7, 33(21)
	104, 33–104, 93	38, 0(10)		1047, 8–1050, 6	1, 86(5)
	108, 26–109, 27	11, 1(12)			

7.15 Energie und Wellenlänge von Photonenstrahlung, magnetische Ablenkung von Elektronen und Protonen – Energy and wave length of photon radiation, magnetic deflection of electrons and photons (B. Großwendt)

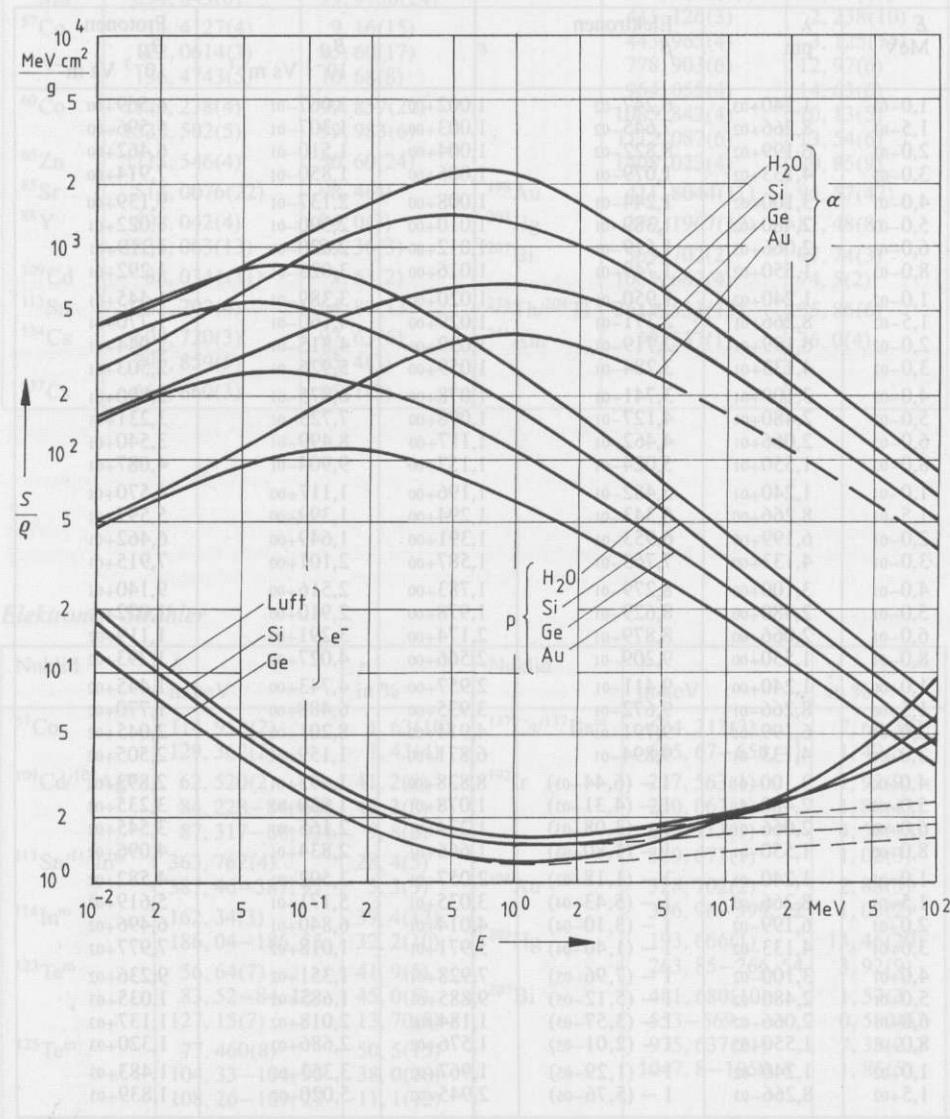
$\lambda = hc/E$ bzw. als Z. W. G.: $\lambda = 1,2399/E$ (λ Wellenlänge in pm ($= 10^{-2}$ Å) eines Photons mit der Energie E in MeV). Für Elektronen: $\beta = v/c$, v Geschwindigkeit, c Lichtgeschwindigkeit im Vakuum; $\varepsilon = (E + E_0)/E_0 = m/m_0 = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$, E kinetische Energie, $E_0 = m_0 c^2$ Ruhenergie, m Masse, m_0 Ruhmasse. Für Elektronen und Protonen: ϱ Krümmungsradius der Bahn eines Teilchens mit der Ladung ze und der Ruhenergie E_0 , das sich senkrecht zu einem Magnetfeld mit der Induktion B bewegt: $B\varrho = \sqrt{E^2 + 2EE_0}/zec$ bzw. $B\varrho = 3,3356 \cdot 10^{-3} z^{-1} \sqrt{E^2 + EE_0}$ (B in Vs m $^{-2}$, ϱ in m (10^{-6} Vs m $^{-1}$ $\hat{=} 1$ G cm), E und E_0 in MeV). (Zahlen in Kleindruck: Exponenten zur Basis 10.)

E MeV	λ pm	Elektronen β	ε	$B\varrho$ 10^{-3} Vs m $^{-1}$	Protonen $B\varrho$ 10^{-3} Vs m $^{-1}$
1,0-03	1,240+03	6,247-02	1,002+00	1,067-01	4,569+00
1,5-03	8,266+02	7,645-02	1,003+00	1,307-01	5,596+00
2,0-03	6,199+02	8,822-02	1,004+00	1,510-01	6,462+00
3,0-03	4,133+02	1,079-01	1,006+00	1,850-01	7,914+00
4,0-03	3,100+02	1,244-01	1,008+00	2,137-01	9,139+00
5,0-03	2,480+02	1,389-01	1,010+00	2,390-01	1,022+01
6,0-03	2,066+02	1,519-01	1,012+00	2,620-01	1,119+01
8,0-03	1,550+02	1,749-01	1,016+00	3,028-01	1,292+01
1,0-02	1,240+02	1,950-01	1,020+00	3,389-01	1,445+01
1,5-02	8,266+01	2,371-01	1,029+00	4,160-01	1,770+01
2,0-02	6,199+01	2,719-01	1,039+00	4,815-01	2,044+01
3,0-02	4,133+01	3,284-01	1,059+00	5,926-01	2,503+01
4,0-02	3,100+01	3,741-01	1,078+00	6,875-01	2,890+01
5,0-02	2,480+01	4,127-01	1,098+00	7,723-01	3,231+01
6,0-02	2,066+01	4,462-01	1,117+00	8,499-01	3,540+01
8,0-02	1,550+01	5,024-01	1,157+00	9,904-01	4,087+01
1,0-01	1,240+01	5,482-01	1,196+00	1,117+00	4,570+01
1,5-01	8,266+00	6,343-01	1,294+00	1,399+00	5,597+01
2,0-01	6,199+00	6,953-01	1,391+00	1,649+00	6,462+01
3,0-01	4,133+00	7,765-01	1,587+00	2,101+00	7,915+01
4,0-01	3,100+00	8,279-01	1,783+00	2,516+00	9,140+01
5,0-01	2,480+00	8,629-01	1,978+00	2,910+00	1,022+02
6,0-01	2,066+00	8,879-01	2,174+00	3,291+00	1,119+02
8,0-01	1,550+00	9,209-01	2,566+00	4,027+00	1,293+02
1,0+00	1,240+00	9,411-01	2,957+00	4,743+00	1,445+02
1,5+00	8,266-01	9,672-01	3,935+00	6,488+00	1,770+02
2,0+00	6,199-01	9,791-01	4,914+00	8,201+00	2,045+02
3,0+00	4,133-01	9,894-01	6,871+00	1,159+01	2,505+02
4,0+00	3,100-01	1 - (6,44-03)	8,828+00	1,495+01	2,893+02
5,0+00	2,480-01	1 - (4,31-03)	1,078+01	1,830+01	3,235+02
6,0+00	2,066-01	1 - (3,08-03)	1,274+01	2,165+01	3,545+02
8,0+00	1,550-01	1 - (1,80-03)	1,666+01	2,834+01	4,096+02
1,0+01	1,240-01	1 - (1,18-03)	2,057+01	3,502+01	4,582+02
1,5+01	8,266-02	1 - (5,43-04)	3,035+01	5,171+01	5,619+02
2,0+01	6,199-02	1 - (3,10-04)	4,014+01	6,840+01	6,496+02
3,0+01	4,133-02	1 - (1,40-04)	5,971+01	1,018+02	7,977+02
4,0+01	3,100-02	1 - (7,96-05)	7,928+01	1,351+02	9,236+02
5,0+01	2,480-02	1 - (5,12-05)	9,885+01	1,685+02	1,035+03
6,0+01	2,066-02	1 - (3,57-05)	1,184+02	2,018+02	1,137+03
8,0+01	1,550-02	1 - (2,01-05)	1,576+02	2,686+02	1,320+03
1,0+02	1,240-02	1 - (1,29-05)	1,967+02	3,353+02	1,483+03
1,5+02	8,266-03	1 - (5,76-06)	2,945+02	5,020+02	1,839+03

7.16 Diagramme des Massen-Bremsvermögens für Elektronen, Protonen und α -Teilchen in einigen Stoffen – *Diagrams of the mass stopping power for electrons, protons and α -particles* (B. Großwendt)

Literatur zu Tab. T 7.16 bis T 7.20: ICRU 37 (1984): Stopping Powers and Ranges for Electrons and Positrons. ICRU Report 37. Bethesda, MA.: ICRU Publications; ICRU 49 (1993): Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles. ICRU Report 49. Bethesda, MA.: ICRU Publications

S/ρ Massen-Bremsvermögen für Elektronen (e^-), Protonen (p) und α -Teilchen (α); E kinetische Teilchenenergie; das Massen-Stoßbremsvermögen für Elektronen ist gestrichelt gezeichnet.



7.17 Massen-Stoßbremsvermögen und gesamtes Massen-Bremsvermögen für Elektronen – *Mass collision stopping power and total mass stopping power for electrons* (H. Reich)

Massen-Stoßbremsvermögen und gesamtes Massen-Bremsvermögen (einschließlich Massen-Strahlungsbremsvermögen) in MeV cm²/g, E kinetische Energie der Elektronen

E MeV	C		Al		Si		Ge		Pb	
	Stoß	ges.								
0,01	20,14	20,14	16,49	16,50	16,89	16,90	12,43	12,44	8,428	8,448
0,02	11,77	11,77	9,845	9,851	10,10	10,11	7,641	7,655	5,453	5,480
0,04	6,950	6,953	5,909	5,916	6,067	6,075	4,685	4,701	3,463	3,497
0,07	4,652	4,655	3,999	4,006	4,107	4,116	3,213	3,213	2,426	2,466
0,1	3,674	3,677	3,178	3,186	3,265	3,274	2,572	2,591	1,964	2,008
0,2	2,485	2,489	2,175	2,184	2,236	2,245	1,783	1,918	1,387	1,442
0,4	1,896	1,901	1,681	1,692	1,729	1,741	1,395	1,422	1,102	1,175
0,7	1,679	1,687	1,508	1,524	1,551	1,568	1,263	1,300	1,009	1,110
1	1,617	1,627	1,466	1,487	1,507	1,531	1,234	1,283	0,994	1,123
2	1,597	1,619	1,475	1,518	1,518	1,567	1,250	1,347	1,024	1,256
4	1,647	1,697	1,539	1,636	1,591	1,699	1,314	1,523	1,095	1,553
7	1,706	1,804	1,600	1,788	1,657	1,865	1,376	1,771	1,160	1,983
10	1,745	1,896	1,638	1,924	1,697	2,013	1,416	2,009	1,201	2,407
20	1,816	2,157	1,707	2,343	1,769	2,472	1,492	2,786	1,277	3,830
40	1,877	2,627	1,770	3,149	1,837	3,360	1,561	4,342	1,345	6,747
70	1,922	3,313	1,816	4,352	1,888	4,686	1,611	6,704	1,395	11,23
100	1,950	3,996	1,845	5,559	1,918	6,017	1,640	9,085	1,423	15,78

E MeV	Luft (trocken)		Wasser (flüssig)		Polymethyl- methacrylat ¹⁾		Muskelgewebe ²⁾	
	Stoß	ges.	Stoß	ges.	Stoß	ges.	Stoß	ges.
0,01	19,75	19,76	22,56	22,57	21,98	21,98	22,37	22,38
0,02	11,57	11,58	13,17	13,18	12,83	12,84	13,06	13,07
0,04	6,848	6,852	7,777	7,781	7,573	7,576	7,711	7,715
0,07	4,593	4,597	5,207	5,211	5,070	5,073	5,163	5,167
0,1	3,633	3,637	4,115	4,120	4,006	4,010	4,080	4,084
0,2	2,470	2,242	2,793	2,798	2,719	2,723	2,769	2,774
0,4	1,902	1,908	2,145	2,152	2,090	2,096	2,129	2,136
0,7	1,706	1,715	1,910	1,919	1,856	1,864	1,898	1,907
1	1,661	1,674	1,844	1,857	1,788	1,799	1,830	1,842
2	1,684	1,711	1,825	1,851	1,762	1,785	1,804	1,830
4	1,790	1,850	1,877	1,937	1,809	1,862	1,851	1,910
7	1,902	2,020	1,936	2,055	1,868	1,972	1,909	2,026
10	1,979	2,159	1,976	2,157	1,908	2,067	1,949	2,127
20	2,134	2,539	2,051	2,459	1,982	2,342	2,026	2,428
40	2,282	3,167	2,120	3,015	2,049	2,840	2,097	2,977
70	2,369	4,006	2,171	3,828	2,098	3,563	2,148	3,777
100	2,417	4,822	2,203	4,637	2,128	4,284	2,180	4,574

¹⁾ Handelsname: Plexiglas; ($C_5H_8O_2$)_n, Dichte $\rho=1,19 \text{ g/cm}^3$

²⁾ Massenanteile in %: H 10,2, C 12,3, N 3,5, O 72,9, Na 0,08, Mg 0,02, P 0,2, S 0,5, K 0,3

7.18

Massen-Reichweiten und Bremsstrahlungsausbeuten bei vollständiger Abbremsung von Elektronen – Mass ranges and bremsstrahlung efficiencies for the total slowing down of electrons (H. Reich)

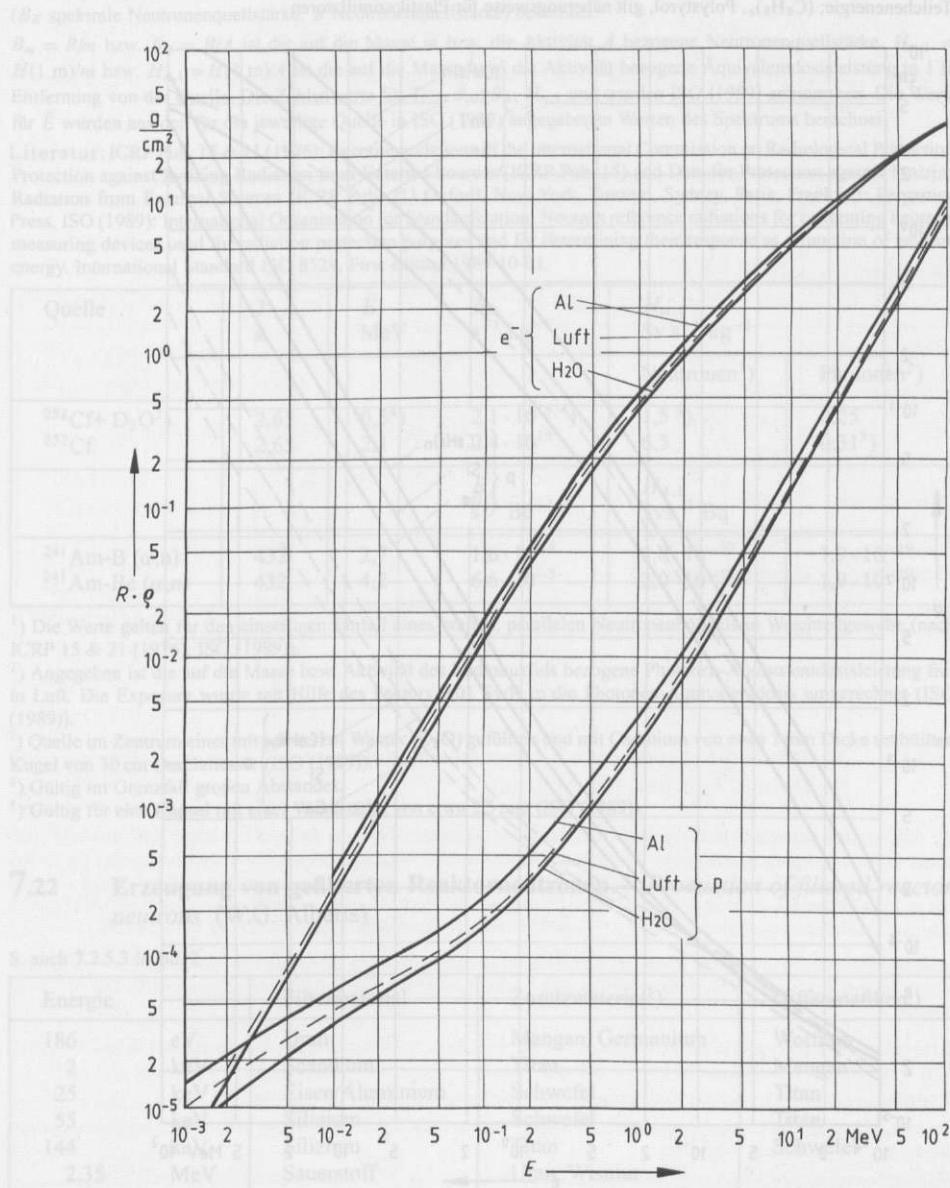
Massen-Reichweite ϱR in der Näherung für kontinuierliche Abbremsung und Bremsstrahlungsausbeuten B bei vollständiger Abbremsung der Elektronen in Abhängigkeit von der Anfangsenergie E_0 (nach ICRU 37 (1984)). Den Zahlen, die mit einem Komma beginnen, ist eine Null voranzustellen.

E_0 MeV	Luft		Wasser		Knochen		Graphit		Aluminium	
	ϱR g/cm ²	B								
,01	,0003		,0003		,0003		,0003		,0004	
,015	,0006	,0002	,0005	,0001	,0006	,0002	,0006	,0001	,0007	,0003
,02	,0010	,0002	,0009	,0002	,0010	,0003	,0010	,0002	,0012	,0004
,03	,0020	,0003	,0018	,0002	,0020	,0004	,0020	,0002	,0024	,0005
,04	,0033	,0003	,0029	,0003	,0033	,0005	,0033	,0003	,0039	,0007
,05	,0049	,0004	,0043	,0003	,0049	,0006	,0048	,0003	,0057	,0008
,06	,0067	,0004	,0059	,0004	,0067	,0007	,0066	,0004	,0079	,0009
,07	,0088	,0005	,0078	,0004	,0087	,0007	,0087	,0004	,0102	,0010
,08	,0111	,0006	,0098	,0005	,0110	,0008	,0109	,0004	,0128	,0011
,09	,0136	,0006	,0119	,0005	,0135	,0009	,0134	,0005	,0157	,0013
,1	,0162	,0007	,0143	,0006	,0161	,0010	,0160	,0005	,0187	,0014
,15	,0319	,0009	,0282	,0008	,0316	,0013	,0316	,0007	,0366	,0018
,2	,0508	,0011	,0449	,0010	,0502	,0016	,0503	,0009	,0580	,0022
,3	,0953	,0015	,0842	,0013	,0939	,0022	,0946	,0012	,1083	,0030
,4	,1456	,0019	,1288	,0017	,1433	,0027	,1450	,0015	,1651	,0037
,5	,1995	,0022	,1767	,0020	,1964	,0032	,1993	,0018	,2259	,0043
,6	,2558	,0026	,2268	,0023	,2519	,0037	,2561	,0021	,2893	,0050
,7	,3135	,0029	,2783	,0026	,3090	,0042	,3147	,0024	,3543	,0057
,8	,3722	,0033	,3308	,0029	,3673	,0047	,3745	,0027	,4203	,0063
,9	,4315	,0036	,3841	,0033	,4262	,0052	,4352	,0030	,4871	,0070
1	,4912	,0040	,4378	,0036	,4857	,0058	,4964	,0033	,5542	,0076
2	,1,085	,0077	,9,801	,0071	1,085	,0111	1,116	,0067	1,223	,0145
3	,1,658	,0117	1,514	,0109	1,671	,0169	1,727	,0103	1,869	,0217
4	,2,208	,0158	2,037	,0149	2,241	,0229	2,323	,0141	2,491	,0292
5	,2,740	,0200	2,547	,0191	2,795	,0290	2,906	,0180	3,029	,0368
6	,3,255	,0242	3,048	,0233	3,335	,0351	3,476	,0220	3,675	,0444
7	,3,757	,0285	3,539	,0276	3,862	,0413	4,036	,0261	4,242	,0520
8	,4,246	,0327	4,021	,0319	4,377	,0475	4,585	,0302	4,794	,0595
9	,4,724	,0369	4,496	,0362	4,880	,0537	5,125	,0343	5,333	,0671
10	,5,192	,0411	4,963	,0406	5,375	,0598	5,657	,0385	5,859	,0745
20	,9,446	,0817	9,295	,0833	9,850	,1180	10,59	,0792	10,56	,1436
30	,13,15	,1186	13,14	,1230	13,69	,1694	14,98	,1173	14,49	,2025
40	,16,46	,1520	16,62	,1592	17,07	,2143	18,97	,1522	17,89	,2526
50	,19,48	,1825	19,80	,1920	20,08	,2538	22,62	,1841	20,88	,2957
60	,22,27	,2104	22,72	,2220	22,80	,2888	25,98	,2133	23,55	,3332
70	,24,86	,2361	25,43	,2494	25,29	,3199	29,11	,2401	25,96	,3661
80	,27,27	,2598	27,95	,2745	27,57	,3480	32,03	,2648	28,16	,3953
90	,29,54	,2818	30,32	,2976	29,68	,3733	34,77	,2875	30,18	,4214
100	,31,67	,3022	32,54	,3190	31,64	,3964	37,35	,3087	32,04	,4449

7.19 Massen-Reichweiten von Elektronen und Protonen in Luft, Wasser und Aluminium – Mass ranges of electrons and protons in air, water and aluminium
 (B. Großwendt)

Literatur (ausführl. Zitate s. Tab. T 7.16): Elektronen nach ICRU 37 (1984); Protonen nach ICRU 49 (1993).

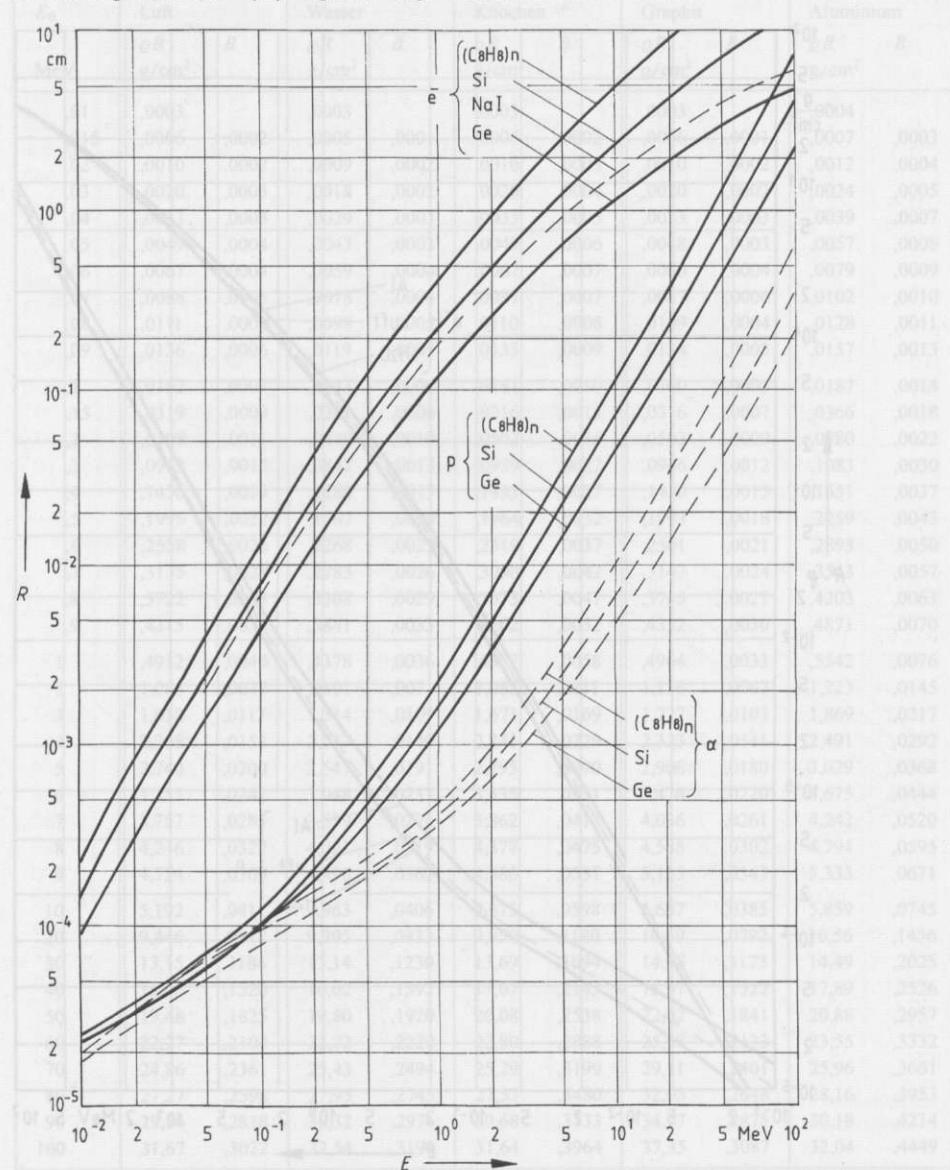
$R \cdot \rho$ Massenreichweite für Elektronen (e^-) und Protonen (p) bei kontinuierlicher Abbremsung; E kinetische Teilchenenergie



7.20 Reichweiten von Elektronen, Protonen und α -Teilchen in Detektormaterialien – Ranges of electrons, protons and α -particles in detector materials (B. Großwendt)

Literatur (ausführl. Zitate s. Tab. T 7.16): Elektronen nach ICRU 37 (1984); Protonen und α -Teilchen nach ICRU 49 (1993).

R Reichweite für Elektronen (e^-), Protonen (p) und α -Teilchen (α) bei kontinuierlicher Abbremsung; E kinetische Teilchenenergie; $(C_8H_8)_n$, Polystyrol, gilt näherungsweise für Plastiksintillatoren



7.21 Erzeugung von Neutronen mit Radionuklidquellen – Production of neutrons by radionuclide sources (H. Kluge)

$T_{1/2}$ Halbwertszeit des Radionuklids. Die mittlere Energie \bar{E} der emittierten Neutronen wurde aus der Beziehung

$$\bar{E} = 1/B \int_0^{\infty} EB_E dE \quad \text{mit} \quad B = \int_0^{\infty} B_E dE$$

(B_E spektrale Neutronenquellstärke, B Neutronenquellstärke) berechnet.

$B_m = B/m$ bzw. $B_A = B/A$ ist die auf die Masse m bzw. die Aktivität A bezogene Neutronenquellstärke. $\dot{H}_{m,1} = \dot{H}(1 \text{ m})/m$ bzw. $\dot{H}_{A,1} = \dot{H}(1 \text{ m})/A$ ist die auf die Masse bzw. die Aktivität bezogene Äquivalentdosisleistung in 1 m Entfernung von der Quelle. Die Zahlenwerte für $T_{1/2}$, B_m , B_A , $\dot{H}_{m,1}$ und wurden ISO (1989) entnommen. Die Werte für \bar{E} wurden aus den für die jeweilige Quelle in ISO (1989) angegebenen Werten des Spektrums berechnet.

Literatur: ICRP Pub. 15 & 21 (1976): Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Protection against Ionizing Radiation from External Sources (ICRP Pub. 15) and Data for Protection against Ionizing Radiation from External Sources (ICRP Pub. 21) Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt: Pergamon Press. ISO (1989): International Organization for Standardization: Neutron reference radiations for calibrating neutron-measuring devices used for radiation protection purposes and for determining their response as a function of neutron energy. International Standard ISO 8529, First edition 1989-10-01.

Quelle	$T_{1/2}$ a	\bar{E} MeV	B_m $\text{s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$	$\dot{H}_{m,1}$ $\text{Sv s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$	
				Neutronen ¹⁾	Photonen ²⁾
$^{252}\text{Cf} + \text{D}_2\text{O}^3)$	2,65	0,5 ⁴⁾	$2,1 \cdot 10^{15}$ ⁴⁾	1,5 ⁴⁾	0,25
^{252}Cf	2,65	2,1	$2,4 \cdot 10^{15}$	6,5	0,31 ⁵⁾
			B_A $\text{s}^{-1} \text{ Bq}^{-1}$	$\dot{H}_{A,1}$ $\text{Svs}^{-1} \text{ Bq}^{-1}$	
$^{241}\text{Am-B}$ (α, n)	432	2,7	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-20}$	$1,9 \cdot 10^{-19}$
$^{241}\text{Am-Be}$ (α, n)	432	4,2	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-19}$	$1,9 \cdot 10^{-19}$

¹⁾ Die Werte gelten für den einseitigen Einfall eines breiten, parallelen Neutronenbündels in Weichteilgewebe (nach ICRP 15 & 21 (1976); ISO (1989)).

²⁾ Angegeben ist die auf die Masse bzw. Aktivität des Radionuklids bezogene Photonens-Äquivalentdosisleistung frei in Luft. Die Exposure wurde mit Hilfe des Faktors 0,01 Sv/R in die Photonens-Äquivalentdosis umgerechnet (ISO (1989)).

³⁾ Quelle im Zentrum einer mit schwerem Wasser (D_2O) gefüllten und mit Cadmium von etwa 1 mm Dicke umhüllten Kugel von 30 cm Durchmesser (ISO (1989)).

⁴⁾ Gültig im Grenzfall großen Abstandes.

⁵⁾ Gültig für eine Kapsel mit einer Wandstärke von etwa 2,5 mm (ISO (1989)).

7.22 Erzeugung von gefilterten Reaktorneutronen – Production of filtered reactor neutrons (W.G. Alberts)

S. auch 7.2.5.3 in Bd. 2

Energie	Filtermaterial	Zusatzmaterial ¹⁾	Differenzfilter ²⁾
186 eV	Uran	Mangan, Germanium	Wolfram
2 keV	Scandium	Titan	Mangan
25 keV	Eisen/Aluminium	Schwefel	Titan
55 keV	Silizium	Schwefel	Titan
144 keV	Silizium	Titan	Schwefel
2,35 MeV	Sauerstoff	Uran, Wismut	

Fortsetzung T 7.22

¹⁾ Mit den Zusatzmaterialien werden die Flußdichten der Photonen oder der Neutronen mit anderer als der angegebenen Energie herabgesetzt.

²⁾ Die Differenzfilter absorbieren Neutronen der genannten Energien stärker als die anderer Energien. Die im Strahl gemessene Differenz aus zwei Detektoranzeigen ohne und mit Differenzfilter entspricht dann einer Messung in einem Strahl mit reduziertem Untergrund.

7.23 Energie und Ausbeute von Neutronen aus Kernreaktionen – Neutron energy and yield of some nuclear reactions (M. Cosack)

E_n ist die Neutronenergie, E_g die Energie der Geschoßteilchen, die erforderlich ist, damit die in Vorwärtsrichtung emittierten Neutronen die kinetische Energie E_n erreichen. S ist der Differentialquotient der Anzahl der emittierten Neutronen nach dem Raumwinkel, geteilt durch die Ladung der Geschoßteilchen und die flächenbezogene Masse des Targets.

Reaktion	E_n keV	E_g keV	S (sr C μg) ⁻¹ cm ² *	Reaktion	E_n keV	E_g keV	S (sr C μg) ⁻¹ cm ² *
$^{45}\text{Sc}(\text{p}, \text{n})^{45}\text{Ti}$	25	2924	1 (+08)	$\text{D}(\text{d}, \text{n})^3\text{He}$	2800	80	2 (+08)
$^7\text{Li}(\text{p}, \text{n})^3\text{Be}$	144	1935	3 (+10)	$\text{T}(\text{d}, \text{n})^4\text{He}$	5000	1774	4 (+09)
	250	2015	1 (+10)		14800	110	4 (+10)
	570	2297	6 (+10)				
$\text{T}(\text{p}, \text{n})^3\text{He}$	1200	1997	7 (+09)				
	2500	3282	1 (+10)				

* In Klammern: Exponent zur Basis 10

Literatur: Chartier, J.J., u.a. (1981): In: Fourth Symp. on Neutron Dosimetry, Neuherberg, Hrsg. CEC, EUR 7448 EN, S. 387–394. Brüssel: Europäische Gemeinschaft. Huynh, V.D. (1980): Metrologia **16**, 31–49

7.24 Aktivierungsquerschnitt für thermische Neutronen – Activation cross sections for thermal neutrons (M. Matzke)

σ_a Aktivierungsquerschnitt eines Nuklids für thermische Neutronen bei einer Energie von 0,0253 eV. Im Falle einer zusätzlichen Anregung von isomeren Zuständen sind kumulative Wirkungsquerschnitte angegeben (Index c); I_R Resonanzintegral (vgl. Tab. T 7.25); $T_{1/2}$ Halbwertszeit des gebildeten Nuklids. Bei mehreren Zerfallskanälen ist meist die größere Halbwertszeit angegeben (vgl. Tab. T 7.29); \dot{n}_R spezifische Reaktionsrate (Sättigungsaktivität) des Nuklids für eine thermische Flußdichte von $10^{15} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$; H relative Isotopenhäufigkeit in % (vgl. Tab. T 7.28).

Angegeben ist eine Auswahl der in der Praxis für die Neutronenaktivierung benutzten Isotope. Daten über γ -Strahlen-Energien und -Emissionswahrscheinlichkeiten sind für die meisten der hier aufgeführten Reaktionen in Tab. T 7.30 zu finden.

Literatur: Mughabghab, S.F.; Divadeenam, M.; Holden, N.E.: Neutron Cross Sections, Vol. I, Part A (1981), Part B (1984), New York, London usw.: Academic Press.

Erdtmann, G. (1976): Neutron Activation Tables, Weinheim, New York: Verlag Chemie

Baard, J.H.; Zijp, W.L.; Nolthenius, H.J. (1989): Nuclear Data Guide for Neutron Metrology, Dordrecht, Niederlande: Kluwer Academic Publishers

Handbook on Nuclear Activation Data (1987): Techn. Rep. Ser. No. 273. Wien: International Atomic Energy

Fortsetzung T 7.24

Bestrahltes Nuklid mit Häufigkeit H	σ_a 10^{-24} cm^2	I_R 10^{-24} cm^2	Erzeugtes Nuklid	$T_{1/2}$	\dot{n}_R $(\mu\text{g})^{-1} \text{ s}^{-1}$
^{23}Na (100)	0,530 ^c	0,320	$^{24}\text{Na}^c$	14,96 h	$1,4 \cdot 10^5$
^{26}Mg (11,01)	0,0382	0,027	^{27}Mg	9,45 min	$1,0 \cdot 10^3$
^{27}Al (100)	0,232	0,175	^{28}Al	2,246 min	$5,1 \cdot 10^4$
^{37}Cl (24,23)	0,433 ^c	0,30	$^{38}\text{Cl}^c$	37,21 min	$1,8 \cdot 10^4$
^{40}Ar (99,60)	0,660	0,42	^{41}Ar	1,822 h	$9,9 \cdot 10^4$
^{41}K (6,730)	1,46	1,40	^{42}K	12,36 h	$1,5 \cdot 10^4$
^{48}Ca (0,187)	1,09	0,89	^{49}Ca	8,72 min	$3,1 \cdot 10^3$
^{45}Sc (100)	27,2 ^c	11,5	^{46}Sc	83,80 d	$3,6 \cdot 10^6$
^{50}Ti (5,4)	0,179	0,118	^{51}Ti	5,76 min	$1,2 \cdot 10^3$
^{51}V (99,75)	4,93	2,6	^{52}V	3,755 min	$5,8 \cdot 10^5$
^{50}Cr (4,35)	15,9	8,1	^{51}Cr	27,705 d	$8,0 \cdot 10^4$
^{55}Mn (100)	13,3	14,0	^{56}Mn	2,578 h	$1,5 \cdot 10^6$
^{58}Fe (0,28)	1,28	1,7	^{59}Fe	44,53 d	$3,9 \cdot 10^2$
^{59}Co (100)	37,18 ^c	74	$^{60}\text{Co}^c$	5,272 a	$3,8 \cdot 10^6$
^{64}Ni (0,91)	1,58	1,19	^{65}Ni	2,520 h	$1,4 \cdot 10^3$
^{63}Cu (69,17)	4,50	4,97	^{64}Cu	12,70 h	$3,0 \cdot 10^5$
^{68}Zn (18,8)	1,072 ^c	3,6	$^{69}\text{Zn}^c$	13,9 h	$1,9 \cdot 10^4$
^{71}Ga (39,9)	4,71 ^c	31,1	$^{72}\text{Ga}^c$	14,1 h	$1,6 \cdot 10^5$
^{74}Ge (36,5)	0,51 ^c	1,0	$^{75}\text{Ge}^c$	82,8 min	$1,5 \cdot 10^4$
^{75}As (100)	4,48	61	^{76}As	26,32 h	$3,6 \cdot 10^5$
^{80}Se (49,8)	0,61 ^c	1,7	$^{81}\text{Se}^c$	57,3 min	$2,3 \cdot 10^4$
^{79}Br (50,69)	11,0 ^c	131	$^{80}\text{Br}^c$	17,4 min	$4,2 \cdot 10^5$
^{87}Rb (27,83)	0,120	2,2	^{88}Rb	17,8 min	$2,3 \cdot 10^3$
^{86}Sr (9,86)	0,84	4,79	$^{87}\text{Sr}^m$	2,81 h	$5,7 \cdot 10^3$
^{96}Zr (2,80)	0,0229	5,6	^{97}Zr	16,90 h	$4,2 \cdot 10^1$
^{93}Nb (100)	1,15 ^c	8,5	$^{94}\text{Nb}^c$	6,26 min	$7,4 \cdot 10^4$
^{100}Mo (9,63)	0,199	4,2	^{101}Mo	14,6 min	$1,2 \cdot 10^3$
^{103}Rh (100)	145,0 ^c	1100	$^{104}\text{Rh}^c$	4,35 min	$8,4 \cdot 10^6$
^{108}Pd (26,46)	8,48 ^c	227	$^{109}\text{Pd}^c$	13,453 h	$1,3 \cdot 10^5$
^{107}Ag (51,84)	37,6 ^c	100	$^{108}\text{Ag}^c$	2,37 min	$1,1 \cdot 10^6$
^{114}Cd (28,73)	0,336 ^c	23	$^{115}\text{Cd}^c$	53,5 h	$5,2 \cdot 10^3$
^{115}In (95,7)	162,3 ^m	2650	$^{116}\text{In}^m$	54,15 min	$8,6 \cdot 10^6$
^{121}Sb (57,3)	5,9 ^c	202	$^{122}\text{Sb}^c$	2,70 d	$1,7 \cdot 10^5$
^{130}Te (33,80)	0,27 ^c	0,446	$^{131}\text{Te}^c$	25,0 min	$4,6 \cdot 10^3$
^{127}J (100)	6,2	148	^{128}J	25,0 min	$2,9 \cdot 10^5$
^{133}Cs (100)	29 ^c	437	^{134}Cs	2,9 h	$1,3 \cdot 10^6$
^{138}Ba (71,70)	0,360	0,32	^{139}Ba	83,3 min	$1,1 \cdot 10^4$
^{139}La (99,91)	8,93	11,8	^{140}La	40,27 h	$3,9 \cdot 10^5$
^{141}Pr (100)	11,5 ^c	17,4	$^{142}\text{Pr}^c$	19,13 h	$4,9 \cdot 10^5$
^{152}Sm (26,7)	206	2960	^{153}Sm	46,7 h	$2,2 \cdot 10^6$

Fortsetzung T 7.24

Bestrahltes Nuklid mit Häufigkeit H	σ_a 10^{-24} cm^2	I_R 10^{-24} cm^2	Erzeugtes Nuklid	$T_{1/2}$	\dot{n}_R $(\mu\text{g})^{-1} \text{ s}^{-1}$
^{154}Sm (22,7)	5,5	29	^{155}Sm	22,2 min	$5,0 \cdot 10^4$
^{151}Eu (47,8)	3211^m	1823	$^{152}\text{Eu}^m$	9,3 h	$6,3 \cdot 10^7$
^{151}Eu (47,8)	5935^g	3552	$^{152}\text{Eu}^g$	12,7 a	$1,1 \cdot 10^8$
^{158}Gd (24,84)	2,5	80	^{159}Gd	18,6 h	$2,4 \cdot 10^4$
^{164}Dy (28,2)	2700^c	650	$^{165}\text{Dy}^c$	2,35 h	$2,8 \cdot 10^7$
^{165}Ho (100)	66,5 ^c	700	$^{166}\text{Ho}^c$	26,8 h	$2,4 \cdot 10^6$
^{170}Er (14,9)	5,7	24	^{171}Er	7,52 h	$3,0 \cdot 10^4$
^{169}Tm (100)	103	1720	^{170}Tm	128,6 d	$3,7 \cdot 10^6$
^{174}Yb (31,8)	65 ^c	33	$^{175}\text{Yb}^c$	4,19 d	$7,2 \cdot 10^5$
^{175}Lu (97,40)	22,1 ^c	725	$^{176}\text{Lu}^c$	3,69 h	$7,8 \cdot 10^5$
^{176}Lu (2,60)	2100^c	1017	$^{177}\text{Lu}^c$	6,71 d	$1,9 \cdot 10^6$
^{181}Ta (99,99)	21,0 ^c	710	$^{182}\text{Ta}^c$	114,43 d	$7,0 \cdot 10^5$
^{186}W (28,6)	37,9	485	^{187}W	23,83 h	$3,5 \cdot 10^5$
^{187}Re (62,60)	74 ^c	305	$^{188}\text{Re}^c$	16,7 h	$1,5 \cdot 10^6$
^{193}Ir (62,7)	112,5 ^c	1362	$^{194}\text{Ir}^c$	19,38 h	$2,2 \cdot 10^6$
^{198}Pt (7,2)	3,7	56	^{199}Au	3,139 d	$8,2 \cdot 10^3$
^{197}Au (100)	98,65	1550	^{198}Au	2,695 d	$3,0 \cdot 10^6$
^{196}Hg (0,15)	3080	413	^{197}Hg	64,1 d	$1,4 \cdot 10^5$
^{196}Hg (0,15)	120^m	58,9	$^{197}\text{Hg}^m$	23,8 h	$5,4 \cdot 10^3$
^{232}Th (100)	7,40	82,4	^{233}Pa	27,0 d	$1,9 \cdot 10^5$
^{238}U (99,275)	2,70	275	^{239}U	23,5 min	$6,8 \cdot 10^4$

7.25 Neutronenindikatoren und Neutronenwirkungsquerschnitte – Neutron indicators and neutron cross sections (M. Matzke)

σ_0 Einfangquerschnitt für die Neutronenergie $E_0 = 0,0253 \text{ eV}$; g Korrektionsfaktor für Abweichung vom $1/v$ pro-

portionalen Verlauf des Wirkungsquerschnitts (v Neutronengeschwindigkeit); $g\sigma_0$ über ein thermisches Maxwellspektrum gemittelter Wirkungsquerschnitt; $T_{1/2}$ Halbwertszeit des gebildeten Nuklids; \downarrow innerer Übergang; E_R Energie

der tiefsten Resonanz; $I_R = \int_{0.5 \text{ eV}}^{\infty} \sigma(E) \cdot E^{-1} \text{ d}E$ Resonanzintegral; E_S Schwellenenergie, oberhalb der in einem ^{235}U -

Spaltneutronenspektrum 95 % der Reaktionen stattfinden (Werte für Spaltreaktionen sind eingeklammert, da diese Reaktionen keine echten Schwellwertreaktionen sind); $\langle \sigma \rangle$ spektrumsgemittelter Wirkungsquerschnitt für ^{235}U -Spaltneutronen.

Literatur: Wirkungsquerschnitte s. Baard, J.H.; Zijp, W.L.; Nolthenius, H.J. (1989): Nuclear Data Guide for Neutron Metrology, Dordrecht, Niederlande: Kluwer Academic Publishers

Handbook on Nuclear Activation Data (1987): Techn. Rep. Ser. No. 273. Wien: International Atomic Energy Agency Mughabghab, S.F.; Divadeenam, M.; Holden, N.E. (1981): Neutron Cross Sections, Vol. I. Part A (1981), Part B (1984) New York, London usw.: Academic Press

Fortsetzung T 7.25

Ausgangsnuklid	Einfang thermischer Neutronen			Resonanzeinfang		Schwellwertindikatoren			
	σ_0 10^{-24} cm^2	g	$T_{1/2}$	E_R eV	I_R 10^{-24} cm^2	Reaktion	$T_{1/2}$	E_S MeV	$\langle \sigma \rangle$ 10^{-27} cm^2
²³ Na	0,530	1	15,0 h	2850	0,311				
²⁴ Mg	0,51		stabil			(n,p)	15,0 h	6,5	1,50
²⁷ Al	0,231	1	2,24 min		0,17	(n, α) (n,p)	15,0 h 9,46 min	6,4 3,4	0,720 3,95
³¹ P	0,172	1	14,3 d	27000	0,085	(n,p)	157 min	2,1	33,5
³² S	0,53		stabil		0,08	(n,p)	14,3 d	2,2	64,6
⁴⁶ Ti	0,59		stabil		0,3	(n,p)	83,8 d	3,8	11,8
⁴⁷ Ti	1,7		stabil		1,5	(n,p)	3,35 d	1,8	18,0
⁴⁸ Ti	7,84		stabil		3,9	(n,p)	43,7 h	5,9	0,307
⁵⁵ Mn	13,3	1	2,58 h	337	14,0	(n,2n)	312 d	11	0,258
⁵⁴ Fe	2,25		2,7 a		1,2	(n,p)	312 d	2,3	81,7
⁵⁶ Fe	2,59		stabil		1,4	(n,p)	2,58 h	5,4	1,09
⁵⁸ Fe	1,28	1	44,5 d	230	1,7				
⁵⁹ Co	37,18	1	5,27 a	132	74	(n, α)	2,58 h	5,9	0,161
⁵⁸ Ni	4,6		$7,5 \cdot 10^4$ a		2,2	(n,p) (n,2n)	70,82 d 35,9 h	2,1 13	111 0,0042
⁶³ Cu	4,5	1	12,7 h	577	4,97	(n, α) (n,2n)	5,27 a 9,74 min	4,7 12	0,60 0,122
⁹³ Nb	1,15		6,3 min	36	8,5	(n,n')	16,1 a	1,0	146
¹⁰³ Rh	10	1,02	4,4 min	1,26		(n,n')	56,1 min	0,72	724
			↓42 s		1100				
¹⁰⁹ Ag	4,7	1	250 d	5,19	72,3				
			↓25 s						
¹¹⁵ In	162,3	1,03	54,1 min	1,46	2650	(n,n')	4,49 h	1,1	190
	40		↓14,1 s						
¹³⁹ La	8,93		40,3 h	72	11,8				
¹⁶⁴ Dy	1610	0,9876	75,5 s	145	340				
	1040		↓2,33 h						
¹⁷⁶ Lu	2090	1,747	6,71 d	0,14	1087				
¹⁸⁶ W	37,9	1,0014	23,9 h	18,8	485				
¹⁹⁷ Au	98,65	1,0051	2,696 d	4,91	1550	(n,2n)	6,18 d	8,9	3,50
²³² Th	7,37	0,9982	22,3 min	21,8	85	(n,Sp)		1,5	82,9
²³⁵ U	582,6	0,9761	Sp. Prod.	0,28	275	(n,Sp)		(0,2)	1200
²³⁸ U	2,68	1,0009	23,5 min	6,67	277	(n,Sp)		(1,5)	312
²³⁷ Np	175,9	0,982	50,81 h	0,489	640	(n,Sp)		(0,7)	1359
²³⁹ Pu	269,3	1,137	$6,5 \cdot 10^3$ a		200	(n,Sp)		(0,3)	1818
	748,1	1,0553	Sp. Prod.		301				

7.26 Kermafaktoren und Fluenz-Äquivalentdosis-Umrechnungsfaktoren für monoenergetische Neutronen – Kerma factors and fluence-to-dose equivalent conversion coefficients for monoenergetic neutrons (G. Dietze)

7.26a Kermafaktoren für einige Materialien

Umfangreiche berechnete Datensätze s. Caswell u.a. (1980): Kerma factors for Neutron Energies below 30 MeV. Radiat. Res. 83, 217–254

E Neutronenenergie, Kermafaktoren gemittelt über das Energieintervall ΔE

E MeV	ΔE MeV	Kermafaktor in 10^{-13} Gy cm ²				
		Muskel ¹⁾	H ₂ O	A-150	TE-Gas ²⁾	Mg
0,01	0,006	10,6	11,5	10,7	10,7	0,11
0,1	0,01	67	73	69	68	2,2
0,5	0,04	160	174	165	163	5,1
1,0	0,1	246	270	232	240	5,2
2,0	0,1	307	332	318	313	10,5
5,0	0,4	455	492	449	452	24
10,0	0,4	572	614	574	573	66
15,0	1,0	678	715	712	697	144
20,0	1,0	732	761	802	772	151

¹⁾ ICRU Standardmuskelgewebe, s. Tab. T 7.11

²⁾ Gewebeäquivalentes Gas (Methan+CO₂+N₂; relative Massenanteile: 10,2 % H, 45,6 % C, 3,5 % N, 40,7 % O).

7.26b Fluenz-Äquivalentdosis-Umrechnungsfaktoren für monoenergetische Neutronen

Fluenz-Äquivalentdosis-Umrechnungsfaktoren $\hat{h}_\phi(E) = H/\Phi(E)$ werden benutzt, um die Äquivalentdosis zu ermitteln, die durch Neutronen der Fluenz Φ und der Energie E unter festgelegten Bedingungen in einem Phantom erzeugt wird.

\hat{h}_ϕ ist der Umrechnungsfaktor für die maximale Äquivalentdosis, die bei Einfall eines breiten Parallelbündels von Neutronen auf ein zylindrisches Phantom (30 cm Durchmesser, 60 cm Höhe) aus Weichteilgewebe senkrecht zur Zylinderachse erzeugt wird (alte Maßgröße, s. DIN 6814 Teil 3 (1985), ICRP 21 (1976)). h_ϕ^* ist der Umrechnungsfaktor für die Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ (s. 7.8.1.10 in Bd. 2, DIN 6814 Teil 3 A1 (1994), Alberts u.a. (1994)). Zwischenwerte können mit Hilfe der Lagrangeschen 4-Punkte-Interpolationsformel für beliebige Stützstellen (Jordan-Engeln u. Reutter (1981)) ermittelt werden (s. auch Fig. 7.94 in Bd. 2).

Literatur: ICRP 21 (1976): Data for Protection against Ionizing Radiation from External Sources. ICRP Publication 21. Oxford: Pergamon; Alberts, W.G. u.a. (1994): Neue Dosismaßgrößen im Strahlenschutz. PTB-Bericht DOS-23. Braunschweig: PTB. Jordan-Engeln, G.; Reutter, F. (1981): Formelsammlung zur Numerischen Mathematik mit Standard-FORTRAN-Programmen. Mannheim, Wien, Zürich: B. I. Hochschultaschenbücher Bd. 106

E eV	$\hat{h}_\phi^1)$ pSv cm ²	h_ϕ^* pSv cm ²	E eV	$\hat{h}_\phi^1)$ pSv cm ²	h_ϕ^* pSv cm ²
$2,5 \cdot 10^{-2}$	10,7	10,6	$1 \cdot 10^5$	57,9	88,0
$1 \cdot 10^{-1}$	11,6	12,9	$5 \cdot 10^5$	198	322
$1 \cdot 10^0$	12,6	13,3	$1 \cdot 10^6$	327	416
$1 \cdot 10^1$	12,1	11,3	$2 \cdot 10^6$	397	420
$1 \cdot 10^2$	11,6	9,4	$5 \cdot 10^6$	409	405
$1 \cdot 10^3$	10,3	7,9	$1 \cdot 10^7$	409	440
$5 \cdot 10^3$	9,1	8,0	$2 \cdot 10^7$	427	600
$1 \cdot 10^4$	9,9	10,5	$5 \cdot 10^7$	455	400
$2 \cdot 10^4$	16,3	16,6	$1 \cdot 10^8$	496	285
$5 \cdot 10^4$	32,7	41,1			

¹⁾ Daten nach ICRP 21 (1976)

7.27 Mittlere Fluenz-Äquivalentdosis-Umrechnungsfaktoren und mittlere gewichtete Energien für Neutronen aus Radionuklidquellen – Mean fluence-to-dose equivalent conversion factors and weighted mean energies for neutrons from radioactive sources (H. Kluge)

Der mittlere Fluenz-Äquivalentdosis-Umrechnungsfaktor $\bar{h}_\Phi = H/\Phi$ ist das Verhältnis aus der Äquivalentdosis H , die von den Neutronen mit dem Energiespektrum $\Phi_E(E)$ (Φ_E spektrale Neutronenfluenz, E Neutronenergie) unter festgelegten Bedingungen erzeugt wird, und der Fluenz Φ der Neutronen. \bar{h}_Φ und die über das „Äquivalentdosisspektrum“ $\Phi_E h_\Phi(E)$ gemittelte Neutronenenergie \bar{E}_H wurden aus den Beziehungen

$$\bar{h}_\Phi = 1/\Phi \int_0^\infty \Phi_E h_\Phi(E) dE \quad \text{mit} \quad \Phi = \int_0^\infty \Phi_E dE \quad \text{und}$$

$$\bar{E}_H = 1/H \int_0^\infty \Phi_E h_\Phi(E) E dE \quad \text{mit} \quad H = \int_0^\infty \Phi_E h_\Phi(E) dE$$

berechnet.

Für punktförmige Quellen und isotrope, im Meßzeitintervall T konstante Emission kann die im Abstand r im Vakuum erzeugte spektrale Fluenz aus der spektralen Quellstärke B_E der Neutronen nach $\Phi_E = T B_E / (4\pi r^2)$ bestimmt werden.

Literatur: ICRP Pub. 15 und 21 (1976): Protection against Ionizing Radiation from External Sources (ICRP Pub. 15). Data for Protection against Ionizing Radiation from External Sources (ICRP Pub. 21). Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt: Pergamon Press.

ICRP Pub. 60 (1991): 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP, 21 No. 1–3. Oxford, New York, Frankfurt, Seoul, Sydney, Tokyo: Pergamon Press.

Siebert, B.R.L.; Schumacher, H. (1995): Quality Factors, Ambient and Personal Dose Equivalent for Neutrons Based on the New ICRU Stopping Power Data for Protons and Alpha Particels. Rad. Prot. Dos. 58, 177–183.

ICRU Rep. 49 (1993): Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles. Bethesda, MD: ICRU.

Quelle	$\bar{h}_\Phi^{(2)}$ 10^{-10}	$\bar{E}_H^{(2)}$ MeV	ICRP 21 ⁴⁾		ICRP 60 ⁵⁾	
			$\bar{h}_\Phi^{*(2)}$ 10^{-10} Sv cm ²	\bar{E}_{H*} MeV	$\bar{h}_\Phi^{*(2)}$ 10^{-10} Sv cm ²	\bar{E}_{H*} MeV
²⁵² Cf+D ₂ O ¹⁾	0,91 ³⁾	2,2 ³⁾	0,93 ³⁾	2,2 ³⁾	1,05 ³⁾	2,0 ³⁾
²⁵² Cf	3,4	2,4	3,4	2,4	3,8	2,3
²⁴¹ Am-B(α ,n)	3,9	2,8	3,9	2,8	4,1	2,8
²⁴¹ Am-Be(α ,n)	3,8	4,4	3,8	4,5	3,9	4,3

¹⁾ Quelle im Zentrum einer mit schwerem Wasser (D₂O) gefüllten und mit Cadmium umhüllten Kugel von 30 cm Durchmesser (ISO (1989)).

²⁾ Werte nach ISO (1989). \bar{h}_Φ ist der mittlere Umrechnungsfaktor für die maximale Äquivalentdosis, die bei einseitigem Einfall eines Parallelbündels in Weichteilgewebe unter Bedingungen nach ICRP Pub. 15 und 21 (1976) erzeugt wird.

³⁾ Gültig im Grenzfall großen Abstandes.

⁴⁾ $Q(L)$ -Beziehung (Q Qualitätsfaktor, L lineares Energieübertragungsvermögen L_∞ in Wasser) nach ICRP Pub. 15 und 21 (1976). \bar{h}_Φ^* bezieht sich auf die Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$.

⁵⁾ $Q(L)$ -Beziehung nach ICRP Pub. 60 (1991). Für die Berechnung der \bar{h}_Φ^* -Werte wurden die von Siebert u. Schuhmacher (1995) unter Berücksichtigung neuer Werte für Bremsvermögen und Reichweiten von Protonen und Alphateilchen nach ICRU Rep. 49 (1993) angegebenen h_Φ^* -Werte für monoenergetische Neutronen und die in ISO (1989) für die jeweilige Quelle angegebenen Werte des Spektrums benutzt.

7.28 Stabile Nuklide – Stable nuclides (K. Debertin)

Z Ordnungszahl, Protonenzahl; A Massenzahl, Nukleonenzahl; El Elementsymbol; H relative Isotopenhäufigkeit; I, P Kernspin-Quantenzahl, Parität; Δ Massenüberschuss; $\Delta = (A_r - A)m_u$; (A_r relative Atommasse; $A_r = m_a/m_u$; m_a Atommasse; m_u Atommassenkonstante; $m_u = m_a$ (^{12}C)/12 = 1u = $(1,66005655 \pm 0,0000086) \cdot 10^{-27} \text{ kg} = (931,5016 \pm 0,0026) \text{ MeV}$).

Literatur: Zu H: International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) (1991): Pure and Appl. Chem. **63**, 991–1002.

Zu I, P: Browne, E.; Firestone, R.B. (1986): Table of Radioactive Isotopes. John Wiley and Sons, New York.

Zu Δ : Wapstra, A.H.; Audi, G. (1985): The 1983 Atomic Mass Evaluation. Nucl. Phys. A **432**, 1–54. Nach Redaktionsschluß wurde 1993 in Nucl. Phys. A **565**, 1–66, eine Überarbeitung veröffentlicht.

Z	El	A	H in %	I, P	Δ in MeV	Z	El	A	H in %	I, P	Δ in MeV
1	H	1	99,985	1/2+	7,289030	20	Ca	40	96,941	0+	-34,8469
		2	0,015	1+	13,135824			42	0,647	0+	-38,5478
2	He	3	0,000137	1/2+	14,93132			43	0,135	7/2-	-38,4094
		4	99,999863	0+	2,42492			44	2,086	0+	-41,4699
3	Li	6	7,5	1+	14,0856	21	Sc	46	0,004	0+	-43,138
		7	92,5	3/2-	14,9068			48	0,187	0+	-44,216
4	Be	9	100	3/2-	11,3477	22	Ti	45	100	7/2-	-41,0699
5	B	10	19,9	3+	12,05078			46	8,0	0+	-44,1257
		11	80,1	3/2-	8,6680			47	7,3	5/2-	-44,9319
6	C	12	98,90	0+	0	23	V	48	73,8	0+	-48,4871
		13	1,10	1/2-	3,125025			49	5,5	7/2-	-48,5581
7	N	14	99,634	1+	2,863436	24	Cr	50	0,250	6+	-49,2197
8	O	15	0,366	1/2-	0,10150			51	99,750	7/2-	-52,1997
		16	99,762	0+	-4,73703			50	4,345	0+	-50,2579
9	F	17	0,038	5/2+	-0,8093	25	Mn	52	83,789	0+	-55,4152
		18	0,200	0+	-0,7822			53	9,501	3/2-	-55,2834
		19	100	1/2+	-1,48740			54	2,365	0+	-56,9310
10	Ne	20	90,48	0+	-7,0462	26	Fe	55	100	5/2-	-57,7092
		21	0,27	3/2+	-5,7354			54	5,8	0+	-56,2508
		22	9,25	0+	-8,0266			56	91,72	0+	-60,6041
11	Na	23	100	3/2+	-9,5314	27	Co	57	2,2	1/2-	-60,1789
12	Mg	24	78,99	0+	-13,9331			58	0,28	0+	-62,1522
		25	10,00	5/2+	-13,1925			59	100	7/2-	-62,2265
13	Al	26	11,01	0+	-16,2140	28	Ni	60	26,223	0+	-64,4707
		27	100	5/2+	-17,1968			61	1,140	3/2-	-64,2196
14	Si	28	92,23	0+	-21,4924	29	Cu	62	3,634	0+	-66,7457
		29	4,67	1/2+	-21,8950			64	0,926	0+	-67,0980
		30	3,10	0+	-24,4332			63	69,17	3/2-	-65,5787
15	P	31	100	1/2+	-24,4407	30	Zn	65	30,83	3/2-	-67,2610
		32	95,02	0+	-26,01618			64	48,6	0+	-66,0017
		33	0,75	3/2+	-26,58651			66	27,9	0+	-68,8987
		34	4,21	0+	-29,93225			67	4,1	5/2-	-67,8793
17	Cl	36	0,02	0+	-30,66444	31	Ga	68	18,8	0+	-70,0061
		35	75,77	3/2+	-29,01372			70	0,6	0+	-69,560
		37	24,23	3/2+	-31,76175			71	39,892	3/2-	-70,1415
18	Ar	36	0,337	0+	-30,23139	32	Ge	70	21,23	0+	-70,5615
		38	0,063	0+	-34,7147			72	27,66	0+	-72,5836
		40	99,600	0+	-35,0396			73	7,73	9/2+	-71,2947
19	K	39	93,2581	3/2+	-33,8066	32	Ge	74	35,94	0+	-73,4234
		40	0,0117	4-	-33,5348			76	7,44	0+	-73,2145
41		6,7302	3/2+	-35,5597							

Fortsetzung T 7.28

Z	El	A	H in %	I, P	Δ in MeV	Z	El	A	H in %	I, P	Δ in MeV
33	As	75	100	3/2-	-73,0351	48	Cd	106	1,25	0+	-87,132
34	Se	74	0,89	0+	-72,2150			108	0,89	0+	-89,260
		76	9,36	0+	-75,2541			110	12,49	0+	-90,351
		77	7,63	1/2-	-74,6016			111	12,80	1/2+	-89,255
		78	23,78	0+	-77,0281			112	24,13	0+	-90,5823
		80	49,61	0+	-77,7621			113	12,22	1/2+	-89,0511
		82	8,73	0+	-77,5961			114	28,73	0+	-90,0229
35	Br	79	50,69	3/2-	-76,0700	49	In	116	7,49	0+	-88,721
		81	49,31	3/2-	-77,977			113	4,3	9/2+	-89,367
36	Kr	78	0,35	0+	-74,151	50	Sn	115	95,7	9/2+	-89,534
		80	2,25	0+	-77,892			112	0,97	0+	-88,654
		82	11,6	0+	-80,591			114	0,65	0+	-90,557
		83	11,5	9/2+	-79,983			115	0,34	1/2+	-90,032
		84	57,0	0+	-82,431			116	14,53	0+	-91,523
		86	17,3	0+	-83,262			117	7,68	1/2+	-90,3964
37	Rb	85	72,165	5/2-	-82,1644			118	24,23	0+	-91,6516
		87	27,835	3/2-	-84,5923			119	8,59	1/2+	-90,0657
38	Sr	84	0,56	0+	-80,640	51	Sb	120	32,59	0+	-91,1017
		86	9,86	0+	-84,5177			122	4,63	0+	-89,9454
		87	7,00	9/2+	-84,8746			124	5,79	0+	-88,2371
		88	82,58	0+	-87,9162			121	57,36	5/2+	-89,5907
39	Y	89	100	1/2-	-87,7022	52	Te	123	42,64	7/2+	-89,2229
40	Zr	90	51,45	0+	-88,7697			120	0,096	0+	-89,380
		91	11,22	5/2+	-87,8928			122	2,603	0+	-90,309
		92	17,15	0+	-88,4566			123	0,908	1/2+	-89,1717
		94	17,38	0+	-87,2679			124	4,816	0+	-90,5252
		96	2,80	0+	-85,442			125	7,139	1/2+	-89,0250
41	Nb	93	100	9/2+	-87,2098			126	18,95	0+	-90,0673
42	Mo	92	14,84	0+	-86,808	53	I	128	31,69	0+	-88,993
		94	9,25	0+	-88,4132	54	Xe	130	33,80	0+	-87,348
		95	15,92	5/2+	-87,7092			127	100	5/2+	-88,984
		96	16,68	0+	-88,7921			124	0,10	0+	-87,6596
		97	9,55	5/2+	-87,5421			126	0,09	0+	-89,162
		98	24,13	0+	-88,1132			128	1,91	0+	-88,8608
		100	9,63	0+	-86,186			129	26,4	1/2+	-88,6974
44	Ru	96	5,52	0+	-86,071			130	4,1	0+	-89,8811
		98	1,88	0+	-88,225			131	21,2	3/2+	-88,426
		99	12,7	5/2+	-87,6180			132	26,9	0+	-89,290
		100	12,6	0+	-89,2199			134	10,4	0+	-88,125
		101	17,0	5/2+	-87,9506	55	Cs	136	8,9	0+	-86,431
		102	31,6	0+	-89,0995	56	Ba	133	100	7/2+	-88,093
		104	18,7	0+	-88,098			130	0,106	0+	-87,299
								132	0,101	0+	-88,453
45	Rh	103	100	1/2-	-88,027			134	2,417	0+	-88,972
46	Pd	102	1,02	0+	-87,902			135	6,592	3/2+	-87,873
		104	11,14	0+	-89,397			136	7,854	0+	-88,909
		105	22,33	5/2+	-88,419			137	11,23	3/2+	-87,736
		106	27,33	0+	-89,910			138	71,70	0+	-88,276
		108	26,46	0+	-89,522	57	La	138	0,0902	5+	-86,531
		110	11,72	0+	-88,337			139	99,9098	7/2+	-87,238
47	Ag	107	51,839	1/2-	-88,407	58	Ce	136	0,19	0+	-86,500
		109	48,161	1/2-	-88,720			138	0,25	0+	-87,575

Fortsetzung T 7.28

Z	Ei	A	H in %	I, P	Δ in MeV	Z	Ei	A	H in %	I, P	Δ in MeV
58	Ce	140	88,48	0+	-88,089	72	Hf	174	0,162	0+	-55,849
		142	11,08	0+	-84,542			176	5,206	0+	-54,581
59	Pr	141	100	5/2+	-86,027			177	18,606	7/2-	-52,8932
60	Nd	142	27,13	0+	-85,959			178	27,297	0+	-52,4474
		143	12,18	7/2-	-84,012			179	13,629	9/2+	-50,4760
		144	23,80	0+	-83,757			180	35,100	0+	-49,7928
		145	8,30	7/2-	-81,441	73	Ta	180	0,012	9-	-48,940
		146	17,19	0+	-80,935			181	99,988	7/2+	-48,445
		148	5,76	0+	-77,418	74	W	180	0,13	0+	-49,648
		150	5,64	0+	-73,694			182	26,3	0+	-48,250
62	Sm	144	3,1	0+	-81,974			183	14,3	1/2-	-46,370
		147	15,0	7/2-	-79,276			184	30,67	0+	-45,710
		148	11,3	0+	-79,346			186	28,6	0+	-42,517
		149	13,8	7/2-	-77,147	75	Re	185	37,40	5/2+	-43,826
		150	7,4	0+	-77,061			187	62,60	5/2+	-41,224
		152	26,7	0+	-74,773	76	Os	184	0,02	0+	-44,257
		154	22,7	0+	-72,466			186	1,58	0+	-43,007
63	Eu	151	47,8	5/2+	-74,663			187	1,6	1/2-	-41,227
		153	52,2	5/2+	-73,379			188	13,3	0+	-41,145
64	Gd	152	0,20	0+	-74,719			189	16,1	3/2-	-38,995
		154	2,18	0+	-73,718			190	26,4	0+	-38,717
		155	14,80	3/2-	-72,082			192	41,0	0+	-35,893
		156	20,47	0+	-72,547	77	Ir	191	37,3	3/2+	-36,716
		157	15,65	3/2-	-70,835			193	62,7	3/2+	-34,543
		158	24,84	0+	-70,702	78	Pt	190	0,01	0+	-37,338
		160	21,86	0+	-67,954			192	0,79	0+	-36,311
65	Tb	159	100	3/2+	-69,544			194	32,9	0+	-34,787
66	Dy	156	0,06	0+	-70,536			195	33,8	1/2-	-32,821
		158	0,10	0+	-70,419			196	25,3	0+	-32,671
		160	2,34	0+	-69,683			198	7,2	0+	-29,930
		161	18,9	5/2+	-68,065	79	Au	197	100	3/2+	-31,165
		162	25,5	0+	-68,190	80	Hg	196	0,15	0+	-31,851
		163	24,9	5/2-	-66,390			198	9,97	0+	-30,979
		164	28,2	0+	-65,977			199	16,87	1/2-	-29,571
67	Ho	165	100	7/2-	-64,908			200	23,10	0+	-29,529
68	Er	162	0,14	0+	-66,347			201	13,18	3/2-	-27,687
		164	1,61	0+	-65,952			202	29,86	0+	-27,370
		166	33,6	0+	-64,935			204	6,87	0+	-24,716
		167	22,95	7/2+	-63,299	81	Tl	203	29,524	1/2+	-25,784
		168	26,8	0+	-62,999			205	70,476	1/2+	-23,846
		170	14,9	0+	-60,118	82	Pb	204	1,4	0+	-25,132
69	Tm	169	100	1/2+	-61,282			206	24,1	0+	-23,809
70	Yb	168	0,13	0+	-61,578			207	22,1	1/2-	-22,476
		170	3,05	0+	-60,772			208	52,4	0+	-21,772
		171	14,3	1/2-	-59,315	83	Bi	209	100	9/2-	-18,282
		172	21,9	0+	-59,264	90	Th	232	100	0+	35,4444
		173	16,12	5/2-	-57,560	92	U	234	0,0055	0+	38,1420
		174	31,8	0+	-56,953			235	0,7200	7/2-	40,9155
		176	12,7	0+	-53,502			238	99,2745	0+	47,3060
71	Lu	175	97,41	7/2+	-55,173						
		176	2,59	7-	-53,3946						

7.29 Radionuklide – Radionuclides (K. Debertin)

Erz. Methode zur Erzeugung des Radionuklids: n neutroneninduzierte Reaktion, p Kernreaktion mit geladenen Teilchen, Sp Kernspaltung, M Zerfall des Mutternuklids, N natürliches Vorkommen. Bei mehreren Erzeugungsmethoden ist die häufigere zuerst genannt. Ein + Zeichen zwischen zwei Methoden bedeutet, daß beide sukzessiv angewandt werden.

$T_{1/2}$ Halbwertszeit

U Umwandlungsart (α α -Zerfall, β^- β^- -Zerfall, β^+ β^+ -Zerfall, ε Elektroneneinfang, IÜ isomerer Übergang, Sp spontane Spaltung). Verzweigungsverhältnisse können aus Tab. T 7.30 entnommen werden. Ist die Umwandlungsart eingeklammert, so beträgt ihr Anteil weniger als 0,1 %.

TN Tochternuklid (*kursiv*, falls $T_{1/2} < 10^5$ a)

Die Tabelle enthält etwa 200 Radionuklide, die in der Praxis häufig vorkommen oder verwendet werden. In der Regel wurden nur Nuklide mit $T_{1/2} > 1$ h aufgenommen. Kurzlebigere Nuklide sind dann aufgeführt, wenn das Mutternuklid langlebig ist. Bei der Umrechnung von Jahren (a) in Tage (d) gilt 1 a = 365,24 d. Zu den Eigenschaften der von den Radionukliden emittierten Strahlen s. Tab. T 7.30. Die natürlichen radioaktiven Zerfallsreihen enthält Tab. T 7.31. Für die Kalibrierung von Detektoren besonders geeignete Nuklide sind in Tab. T 7.14 zusammengestellt.

Literatur: Browne, E.; Firestone, R.B. (1986) Table of Radioactive Isotopes. New York: Wiley. IAEA (1986): Decay Data of the Transactinium Nuclides. Technical Reports Series No. 261. Wien: International Atomic Energy Agency. IAEA (1991): X-ray and gamma-ray standards for detector calibration. IAEA-TECDOC-619, Wien: International Atomic Energy Agency. Schötzig, U.; Schrader, H. (1993): Halbwertszeiten und Photonen-Emissionswahrscheinlichkeiten von häufig verwendeten Radionukliden. Bericht PTB-Ra-16/4. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Nuclear Data Sheets (1977–1992). New York, London: Academic Press.

Nuklid	Erz.	$T_{1/2}$	U	TN	Nuklid	Erz.	$T_{1/2}$	U	TN
H-3	n	12,35 a	β^-	He-3	Sc-44	M, p	3,927 h	β^+, ε	Ca-44
Be-7	p	53,29 d	ε	Li-7	Ti-44	p	47,3 a	ε	Sc-44
C-11	p	20,39 min	β^+, ε	B-11	Ca-45	n	163 d	β^-	Sc-45
N-13	p	9,965 min	β^+, ε	C-13	Sc-46	n	83,79 d	β^-	Ti-46
C-14	n, N	5730 a	β^-	N-14	Ca-47	n	4,536 d	β^-	Sc-47
O-15	p	2,037 min	β^+, ε	N-15	Sc-47	n	3,351 d	β^-	Ti-47
F-18	p, n	1,828 h	β^+, ε	O-18	V-49	p	330 d	ε	Ti-49
Na-22	p, n	950,8 d	β^+, ε	Ne-22	Cr-51	n	27,706 d	ε	V-51
Na-24	n	14,96 h	β^-	Mg-24	Mn-52	p	5,591 d	ε, β^+	Cr-52
Al-26	p	$7,2 \cdot 10^5$ a	β^+, ε	Mg-26	Mn-52m	p+M	21,1 min	β^+, ε	Cr-52
Si-31	n	2,622 h	β^-	P-31				IÜ	Mn-52
Si-32	p	104 a	β^-	P-32	Fe-52	p	8,275 h	β^+, ε	Mn-52m
P-32	n	14,29 d	β^-	S-32	Mn-54	p, n	312,3 d	ε	Cr-54
P-33	n	25,34 d	β^-	S-33	Fe-55	n, p	999 d	ε	Mn-55
S-35	n	87,44 d	β^-	Cl-35	Mn-56	n	2,5785 h	β^-	Fe-56
Cl-36	n	$3,01 \cdot 10^5$ a	β^- $\varepsilon, (\beta^+)$	Ar-36	Co-56	p	77,31 d	ε, β^+	Fe-56
Ar-37	n, p	35,04 d	ε	Cl-37	Co-58	n, p	70,86 d	ε, β^+	Fe-58
K-40	N, n	$1,277 \cdot 10^9$ a	β^- $\varepsilon, (\beta^+)$	Ca-40	Fe-59	n	44,51 d	β^-	Co-59
				Ar-40	Co-60	n	5,272 a	β^-	Ni-60
Ar-41	n	1,827 h	β^-	K-41	Ni-63	n	100,1 a	β^-	Cu-63
Ca-41	n	$1,03 \cdot 10^5$ h	ε	K-41	Cu-64	n	12,701 h	ε, β^+	Ni-64
K-42	n	12,36 h	β^-	Ca-42				β^-	Zn-64
K-43	p	22,3 h	β^-	Ca-43	Zn-65	n	244,26 d	ε, β^+	Cu-65

Fortsetzung T 7.29

Nuklid	Erz.	$T_{1/2}$	U	TN	Nuklid	Erz.	$T_{1/2}$	U	TN
Ga-66	p	9,49 h	β^+, ε	Zn-66	Ag-110	n+M	24,6 s	β^-	Cd-110
Ga-67	p	3,261 d	ε	Zn-67	Ga-68	Ag-110m	n	β^-	Pd-110
Ge-68	p	270,8 d	ε	Ga-68	Ag-110m	n	249,76 d	β^-	Cd-110
Ga-68	n, p, M	68,0 min	β^+, ε	Zn-68	Ag-111	n+M	7,45 d	(IÜ)	Ag-110
Se-75	n	119,64 d	ε	As-75	In-111	p	2,8047 d	β^-	Cd-111
As-76	n	26,32 h	β^-	Se-76	As-77	Cd-113m	Sp, n	13,7 a	In-113
Ge-77	n	11,30 h	β^-	As-77	Cd-113m	Sp, n	13,7 a	β^-	(IÜ)
Br-82	n	35,34 h	β^-	Kr-82	Rb-82	In-113m	M	1,658 h	In-113
Sr-82	p	25,55 d	ε	Rb-82	Kr-82	Sn-113	n, p	115,09 d	In-113m
Rb-82	M	1,273 min	β^+, ε	Kr-82	Sn-113	In-114	n+M	71,9 s	Sn-114
Kr-85	n, Sp	10,72 a	β^-	Rb-85	Rb-85	In-114	n+M	49,51 d	Cd-114
Sr-85	n, p	64,849 d	ε	Rb-85	Rb-86	In-114m	n	49,51 d	(IÜ)
Rb-86	n	18,66 d	β^-	(ε)	Kr-86	Rb-86	n	ε	Cd-114
Rb-87	N	$4,80 \cdot 10^{10}$ a	β^-	Sr-87	Sr-87	Cd-115m	n	44,6 d	In-115
Kr-88	Sp	2,84 h	β^-	Rb-88	In-115m	n+M	4,486 h	(IÜ)	In-115
Rb-88	n, M	17,8 min	β^-	Sr-88	Sb-122	n	2,70 d	β^-	Sn-115
Y-88	p	106,630 d	ε, β^+	Sr-88	Sb-122	n	Te-122		
Sr-89	Sp, n	50,5 d	β^-	Y-89	Y-90	Te-123m	n	2,70 d	Sn-122
Sr-90	Sp	28,7 a	β^-	Y-90	Te-123m	n	119,7 d	(IÜ)	Te-123
Y-90	M, n	64,0 h	β^-	Zr-90	I-123	p	13,2 h	ε	Te-123
Y-91	Sp	58,51 d	β^-	Zr-91	Sb-124	n	60,20 d	β^-	Te-124
Sr-92	Sp	2,71 h	β^-	Y-92	I-124	p	4,18 d	ε, β^+	Te-124
Y-92	M, n, p	3,54 h	β^-	Zr-92	Sb-125	n+M	1007,7 d	β^-	Te-125m
Y-93	Sp	10,25 h	β^-	Zr-93	Te-125m	n, M	58 d	(IÜ)	Te-125
Zr-93	Sp	$1,53 \cdot 10^6$ a	β^-	Nb-93	I-125	p	59,43 d	ε	Te-125
Nb-93m	n, M	16,1 a	(IÜ)	Nb-93	I-126	p	13,02 d	ε, β^+	Te-126
Nb-94	n	$2,0 \cdot 10^4$ a	β^-	Mo-94				β^-	Xe-126
Zr-95	Sp, n	64,02 d	β^-	Nb-95	Xe-127	p	36,41 d	ε	I-127
Nb-95	n+M	34,975 d	β^-	Mo-95	I-129	Sp, n+M	$1,57 \cdot 10^7$ a	β^-	Xe-129
Zr-97	Sp, n	16,90 h	β^-	Nb-97	I-130	p, n	12,36 h	β^-	Xe-130
Nb-97	Sp, M	72,1 min	β^-	Mo-97	I-131	Sp, n+M	8,021 d	β^-	Xe-131
Tc-97	n+M	$2,6 \cdot 10^6$ a	ε	Mo-97	Te-131m	n, M	11,9 d	(IÜ)	Xe-131
Mo-99	Sp, n	2,7477 d	β^-	Tc-99m	Cs-131	n+M	9,69 d	ε	Xe-131
Tc-99	Sp, n+M	$2,13 \cdot 10^5$ a	β^-	Ru-99	Te-132	Sp	3,26 d	β^-	I-132
Tc-99m	Sp, n+M	6,006 h	(IÜ)	Tc-99	I-132	Sp	2,284 h	β^-	Xe-132
			(β^-)	Ru-99	I-133	Sp	20,8 h	β^-	Xe-133
Ru-103	Sp, n	39,26 d	β^-	Rh-103m	Xe-133	n, Sp	5,245 d	β^-	Cs-133
Rh-103m	n+M	56,12 min	(IÜ)	Rh-103	Xe-133m	n, Sp	2,19 d	(IÜ)	Xe-133
Pd-103	n, p	16,97 d	ε	Rh-103m	Ba-133	n, p	10,57 a	ε	Cs-133
Rh-105	n, Sp	35,36 h	β^-	Pd-105	Cs-134	n	754,28 d	β^-	Ba-134
Ru-106	Sp	372,6 d	β^-	Rh-106				(ε)	Xe-134
Ag-108	n+M	2,37 min	β^-	Cd-108	I-135	Sp	6,55 h	β^-	Xe-135
			ε, β^+	Pd-108	Xe-135	n, Sp	9,104 h	β^-	Cs-135
Ag-108m	n	418 a	ε, β^+	Pd-108	Cs-137	Sp	30,2 a	β^-	Ba-137
			(IÜ)	Ag-108	Xe-138	Sp	14,08 min	β^-	Cs-138
Cd-109	n, p	462,6 d	ε	Ag-109	Ce-139	p, n	137,640 d	ε	La-139

Fortsetzung T 7.29

Nuklid	Erz.	$T_{1/2}$	U	TN	Nuklid	Erz.	$T_{1/2}$	U	TN
Ba-140	Sp	12,75 d	β^-	<i>La-140</i>	Pb-210	N, M	22,3 a	β^-	<i>Bi-210</i>
La-140	n, Sp	1,678 d	β^-	Ce-140	Bi-210	N, M	5,013 d	β^-	<i>Po-210</i>
Ce-141	n, Sp	32,50 d	β^-	Pr-141	Po-210	N, M	138,4 d	α	<i>Pb-206</i>
Pr-142	n	19,13 h	β^-	Nd-142	Pb-211	N, M	36,1 min	β^-	<i>Bi-211</i>
			(ε)	Ce-142	Bi-211	N, M	2,17 min	α	<i>Tl-207</i>
Ce-143	n, Sp	33,0 h	β^-	<i>Pr-143</i>	Pb-212	N, M	10,64 h	β^-	<i>Bi-212</i>
Pr-143	n+M	13,58 d	β^-	Nd-143	Bi-212	N, M	60,55 min	β^-	<i>Po-212</i>
Ce-144	Sp	284,9 d	β^-	<i>Pr-144</i>				α	<i>Tl-208</i>
Pr-144	Sp, M	17,28 min	β^-	Nd-144	Pb-214	N, M	26,8 min	β^-	<i>Bi-214</i>
Nd-147	n, Sp	10,98 d	β^-	<i>Pm-147</i>	Bi-214	N, M	19,9 min	β^-	<i>Po-214</i>
Pm-147	n+M, Sp	2,62 a	β^-	Sm-147	Po-214	N, M	165 μ s	α	<i>Pb-210</i>
Gd-148	p	75 a	α	Sm-144	Po-218	N, M	3,05 min	α	<i>Pb-214</i>
Pm-151	n+M, Sp	28,40 h	β^-	<i>Sm-151</i>	Rn-220	N, M	55,6 s	α	<i>Po-216</i>
Sm-151	Sp, M	90 a	β^-	Eu-151	Rn-222	N, M	3,8235 d	α	<i>Po-218</i>
Eu-152	n	13,51 a	$\varepsilon, (\beta^+)$	Sm-152	Ra-223	N, M	11,43 d	α	<i>Rn-219</i>
			β^-	Gd-152	Ra-224	N, M	3,66 d	α	<i>Rn-220</i>
Gd-153	n	241,6 d	ε	Eu-153	Ra-225	M	14,8 d	β^-	<i>Ac-225</i>
Eu-154	n	8,59 a	β^-	Gd-154	Ac-225	M	10,0 d	α	<i>Fr-221</i>
			(ε)	Sm-154	Ra-226	N, M	1600 a	α	<i>Rn-222</i>
				Gd-155	Ac-227	N, M	21,77 a	β^-	<i>Th-227</i>
Eu-155	n+M, Sp	4,85 a	β^-	Dy-160				α	<i>Fr-223</i>
Tb-160	n	72,3 d	β^-	Er-166	Th-227	N, M	18,72 d	α	<i>Ra-223</i>
Ho-166m	n	$1,2 \cdot 10^3$ a	β^-	Tm-169	Ra-228	N, M	5,75 a	β^-	<i>Ac-228</i>
Er-169	n	9,40 d	β^-	Tm-169	Ac-228	N, M	6,15 h	β^-	<i>Th-228</i>
Yb-169	n	32,032 d	ε	Hf-176	Th-228	N, M	1,912 a	α	<i>Ra-224</i>
Lu-176	N, n	$3,59 \cdot 10^{10}$ a	β^-	Hf-180	Th-229	M	7340 a	α	<i>Ra-225</i>
Hf-180m	n	5,519 h	I \ddot{U}	Ta-181	Th-230	N, M	$7,538 \cdot 10^4$ a	α	<i>Ra-226</i>
Hf-181	n	42,39 d	β^-	W-182	Th-231	N, M	25,52 h	β^-	<i>Pa-231</i>
Ta-182	n	114,43 d	β^-	Re-185	Pa-231	N, M	$3,276 \cdot 10^4$ a	α	<i>Ac-227</i>
W-185	n	75,1 d	β^-	Os-186	Th-232	N	$1,405 \cdot 10^{10}$ a	$\alpha, (\text{Sp})$	<i>Ra-228</i>
Re-186	n	3,718 d	β^-	W-186	U-232	n, p	69,8 a	$\alpha, (\text{Sp})$	<i>Th-228</i>
Ir-192	n	73,831 d	β^-	Pt-192	Pa-233	N+M, p	27,0 d	β^-	U-233
			ε	Os-192	U-233	n+M	$1,592 \cdot 10^5$ a	$\alpha, (\text{Sp})$	<i>Th-229</i>
Au-195	p	186,09 d	ε	Pt-195	Th-234	N, M	24,10 d	β^-	<i>Pa-234m</i>
Hg-195m	p	1,73 d	I \ddot{U}	Hg-195	Pa-234m	N, M	1,17 min	β^-	U-234
			ε	Au-195m	U-234	N, M	$2,454 \cdot 10^5$ a	$\alpha, (\text{Sp})$	<i>Th-230</i>
Au-195m	M	30,5 s	I \ddot{U}	Au-195	U-235	N	$7,037 \cdot 10^8$ a	$\alpha, (\text{Sp})$	<i>Th-231</i>
Hg-197	p, n	64,14 h	ε	Au-197	U-236	M	$2,342 \cdot 10^7$ a	$\alpha, (\text{Sp})$	<i>Th-232</i>
Hg-197m	n, p	23,8 h	I \ddot{U}	Hg-197	Np-237	n+M	$2,14 \cdot 10^6$ a	$\alpha, (\text{Sp})$	<i>Pa-233</i>
			ε	Au-197	U-238	N	$4,468 \cdot 10^9$ a	$\alpha, (\text{Sp})$	<i>Th-234</i>
Au-198	n	2,6943 d	β^-	Hg-198	Pu-238	n+M	87,7 a	$\alpha, (\text{Sp})$	U-234
Au-199	n+M, n+n	3,139 d	β^-	Hg-199	Np-239	M	2,350 d	β^-	<i>Pu-239</i>
Tl-201	p	3,043 d	ε	Hg-201	Pu-239	n+M	$2,411 \cdot 10^4$ a	$\alpha, (\text{Sp})$	U-235
Hg-203	n	46,595 d	β^-	Tl-203	Pu-240	n	6563 a	$\alpha, (\text{Sp})$	U-236
Pb-203	p, n	52,06 h	ε	Tl-203	Pu-241	n	14,35 a	β^-	<i>Am-241</i>
Tl-204	n	3,78 a	β^-	Pb-204				(α)	U-237
			ε	Hg-204	Am-241	n+M	432,2 a	$\alpha, (\text{Sp})$	<i>Np-237</i>
Tl-207	N, M	4,77 min	β^-	Pb-207	Pu-242	n	$3,735 \cdot 10^5$ a	$\alpha, (\text{Sp})$	U-238
Bi-207	p	31,8 a	$\varepsilon, (\beta^+)$	Pb-207	Cm-242	n	162,94 d	$\alpha, (\text{Sp})$	<i>Pu-238</i>
Tl-208	N, M	3,053 min	β^-	Pb-208	Am-243	n	$7,37 \cdot 10^3$ a	$\alpha, (\text{Sp})$	<i>Np-239</i>
Po-208	p	2,898 a	α	Pb-204	Cm-244	n	18,10 a	$\alpha, (\text{Sp})$	<i>Pu-240</i>
			(ε)	Bi-208	Cf-252	n	2,645 a	$\alpha, (\text{Sp})$	<i>Cm-248</i>

7.30 Radionuklidstrahlen (Energien, Emissionswahrscheinlichkeiten) – *Radiations from radionuclides (energies, emission probabilities)* (K. Debertin)

Typ: Strahlentyp (α Alphastrahlen, β^- , β^+ Betastrahlen, γ Gammastrahlen, e Konversionselektronen und/oder Augerelektronen, X–K, X–L K–, L–Röntgenstrahlen).

E Energie. Bei β -Strahlen ist die über das gesamte Energiespektrum gemittelte Energie, in Klammern zusätzlich die Maximalenergie angegeben. Bei Röntgenstrahlen sowie Konversions- und Augerelektronen sind häufig mehrere Energien zu Energiebereichen zusammengefaßt.

p Emissionswahrscheinlichkeit (Anzahl der emittierten Teilchen oder Quanten pro Zerfall).

Die Tabelle enthält die gleichen Radionuklide wie Tab. T 7.29. Es sind in der Regel nur die Energien solcher Strahlen angegeben, deren Emissionswahrscheinlichkeit größer als 5% ist. Übergänge mit β -Emissionswahrscheinlichkeiten kleiner als 5% sind bei der Energie-Mittelwertbildung berücksichtigt, nicht aber bei dem Maximalwert in Klammern. Teilchenenergien kleiner als 10 keV und Photonenergien kleiner als 5 keV wurden nicht aufgenommen. Die Strahlen kurzlebiger Tochterprodukte sind beim Mutternuklid aufgeführt (Tochternuklide in Klammern). Die Energien sind dann durch ein T gekennzeichnet, die p-Werte beziehen sich auf einen Zerfall des Mutternuklids im Gleichgewicht mit den Tochterprodukten. Ein T in Klammern bedeutet, daß sowohl Mutter- als auch Tochternuklid diese Strahlung emittieren. Nuklide der natürlichen radioaktiven Zerfallsreihen sind hinter dem Mutternuklid aufgeführt. Zu Daten von α -, Elektronen- und γ -Strahlern zur Kalibrierung von Spektrometern s. auch Tab. T 7.14.

Literatur: Browne, E.; Firestone, R.B. (1986): Table of Radioactive Isotopes. New York: Wiley. Rytz, A. (1991): Recommended Energy and Intensity Values of Alpha Particles from Radioactive Decay. Atomic Data and Nuclear Data Tables 47, 205–239. IAEA (1986): Decay Data of the Transactinium Nuclides. Technical Reports Series No. 261, Wien: International Atomic Energy Agency. IAEA (1991): X-ray and gamma-ray standards for detector calibration. IAEA-TECDOC-619, Wien: International Atomic Energy Agency. Schötzig, U.; Schrader, H. (1993): Halbwertszeiten und Photonenemissionswahrscheinlichkeiten von häufig verwendeten Radionukliden. Bericht PTB-Ra-16/4. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Nuclear Data Sheets (1977–1992). New York, London: Academic Press. Kocher, D.C. (1981): Radioactive Decay Data Tables, US Department of Energy, Bericht DOE/TIC-11026. Verschiedene Originalveröffentlichungen.

Radionuklid	Typ	E keV	p %	Radionuklid	Typ	E keV	p %
H-3	β^-	5,7 (18,7)	100	K-41	X–K	3,3	12,5
Be-7	γ	477,6	10,39			bis 3,6	
C-11	β^+	386 (960)	99,76	K-42	β^-	1425 (3525)	100
N-13	β^+	492 (1199)	99,81		γ	1524,6	18,8
C-14	β^-	49,5 (156)	100	K-43	β^-	314 (827)	100
O-15	β^+	736 (1732)	99,89		γ	372,8	86,7
F-18	β^+	250 (633)	96,9		γ	396,9	11,36
Na-22	β^+	218 (546)	89,4		γ	593,4	11,0
	γ	1274,5	99,935		γ	617,5	80,0
Na-24	β^-	554 (1391)	100	Sc-44	β^+	635 (1476)	94
	γ	1368,6	100		γ	1157,0	99,9
	γ	2754,0	99,86	Ti-44	e	63	10,6
Al-26	β^+	487 (1173)	82			bis 78	
	γ	1808,7	99,76		X–K	4,1	18,5
						bis 4,5	
Si-31	β^-	595 (1491)	100		γ	67,9	93,5
Si-32	β^-	69 (225)	100		γ	78,4	97,4
P-32	β^-	695 (1710)	100		β^-	77 (257)	100
P-33	β^-	76 (249)	100	Ca-45	β^-	112 (357)	100
S-35	β^-	48,6 (167)	100	Sc-46	β^-	889,3	99,98
Cl-36	β^-	251 (709)	98,1		γ	1120,5	99,99
Ar-37	e	<5	82		γ	345 (1988)	100
	X–K	<5	8,7	Ca-47	β^-	489,2	6,7
K-40	β^-	510 (1312)	89,33		γ	807,9	6,9
	γ	1460,8	10,67		γ	1297,1	74,9
Ar-41	β^-	464 (1199)	100		β^-	162 (601)	100
	γ	1293,6	99,16	Sc-47			

Fortsetzung T 7.30

Radionuklid	Typ	<i>E</i> keV	<i>p</i> %	Radionuklid	Typ	<i>E</i> keV	<i>p</i> %
V-48	γ	159,4	69,0	Ni-63	γ	1332,5	99,983
	e	4	69		β^-	17,1 (66)	100
	X-K	4,5	19,0		β^+	277 (653)	18
Cr-51		bis 4,9		Cu-64	β^-	191 (578)	37,1
	X-K	4,9	22,8		X-K	7,5	16,2
		bis 5,5				bis 8,3	
Mn-52	γ	320,1	9,86	Zn-65	X-K	8,0	38,7
	β^+	245 (576)	29			bis 9,0	
	X-K	5,4	17,1		γ	1115,5	50,60
Fe-52		bis 6,0		Ga-66	β^+	1730 (4153)	57
	γ	744,2	90,0		X-K	8,6	18,3
	γ	935,5	94,5			bis 9,6	
(Mn-52m)	γ	1434,1	100	Ga-67	γ	833,6	6,03
	β^+	804	56,0		γ	1039,4	37,9
	X-K	5,9	13,0		γ	2190,0	5,71
Mn-54		bis 6,5			γ	2752,3	23,2
	γ	168,7	99,2		γ	4295,7	3,5
	β^+	1168 (2633) T	97		e	82	31,5
Fe-55	γ	1434,1 T	98,2	Ga-67		bis 93	
	X-K	5,4	25,6		X-K	8,6	55,4
		bis 6,0				bis 9,6	
Mn-56	γ	834,8	99,98	Ge-68	γ	93,3	37,0
	X-K	5,9	28,3		γ	184,6	20,4
		bis 6,5			γ	300,2	16,6
Co-56	β^-	830 (2849)	56,2	(Ga-68)	β^+	831 (1899)	89
	γ	846,8	98,9		X-K	9,2	43,9
	γ	1810,8	27,2			bis 10,4	
Co-57	γ	2113,2	14,3	Se-75	e	10	14,7
	β^+	600 (1459)	20			bis 13	
	X-K	6,4	24,3		e	85	5,4
Co-58		bis 7,1				bis 124	
	γ	846,8	99,93		X-K	10,5	56,8
	γ	1037,8	14,13			bis 12,0	
Fe-59	γ	1238,3	66,07	Ge-77	γ	121,1	17,1
	γ	1360,2	4,256		γ	136,0	58,8
	γ	1771,4	15,49		γ	264,7	59,0
Co-57	γ	2034,8	7,77		γ	279,5	25,0
	γ	2598,5	16,96		γ	400,7	11,5
	γ	3253,4	7,62		As-76	1068 (2964)	100
Co-58	e	14	7,3	Ge-77	β^-	559,1	45
	X-K	6,4	57,9		γ	657,1	6,2
		bis 7,1			γ	1216,1	3,42
Fe-59	γ	14,4	9,2		β^-	664 (2488)	100
	γ	122,1	85,60		γ	211,0	29,2
	γ	136,5	10,68		γ	215,5	27,1
Co-58	β^+	201 (475)	14,9	Br-82	γ	264,4	51,0
	X-K	6,4	26,7		γ	367,4	13,3
		bis 7,1			γ	416,3	20,6
Fe-59	γ	810,8	99,45		γ	558,0	15,2
	β^-	118 (466)	100		γ	631,8	6,59
	γ	1099,3	56,1		γ	714,3	6,77
Co-60	γ	1291,6	43,6		γ	1085,1	5,72
	β^-	96 (318)	100	Br-82	β^-	137 (444)	100
	γ	1173,2	99,857		γ	554,4	70,9

Fortsetzung T 7.30

Radionuklid	Typ	E keV	p %	Radionuklid	Typ	E keV	p %
(Rb-82)	γ	619,1	43,1	Nb-94	e	28	85,9
	γ	698,4	28,2		β-	bis 30	
	γ	776,5	83,6		X-K	19 (60)	100
	γ	827,8	24,0		X-K	16,5	10,5
	γ	1044,1	27,4			bis 19,1	
	γ	1317,5	26,9		β-	146 (472)	100
	γ	1474,9	16,63		γ	702,6	99,79
	β+	776,5	13,4		γ	871,1	99,86
	e	11	28,7		β-	116 (400)	100
		bis 15			γ	724,2	44,0
Sr-82	X-K	13,3	57,5		γ	756,7	54,3
		bis 15,3		Nb-95	β-	43 (160)	100
Kr-85	β-	229 (687)	100	Zr-97	γ	765,8	99,81
Sr-85	γ	514,0	0,43	(Nb-97)	β-	696 (1915)	100
	e	11	29,2	(Nb-97m)	γ	507,7	5,1
Rb-86		bis 15		Tc-97	β-	467 (1276) T	5,2
	X-K	13,3	58,7		γ	658,2 T	5,2
Rb-87		bis 15,3			γ	743,3 T	92,8
	β-	514,0	98,4		e	14	19,7
Kr-88	β-	667 (1774)	100		bis 17		
	γ	1076,7	8,78		X-K	17,4	65,8
(Rb-88)	β-	82 (282)	100		bis 20,0		
	e	11	15	Mo-99/ Tc-99m	β-	390 (1214)	100
Y-88		bis 13			e	119 (T)	11,1
	β-	359 (2913)	100		bis 142		
Sr-89	X-K	13,3	8,16		X-K	18,3	11,2
		bis 15,2			bis 21,1		
Sr-90	β-	2068 (5316) T	100		γ	140,5 (T)	90,7
	γ	898,0 T	14,1		γ	181,1	6,07
(Y-90)	γ	1836,1 T	21,4		γ	739,5	12,14
	e	12	26,9		γ	777,9	4,35
Y-91	X-K	14,1	61,6	Tc-99	β-	85 (294)	100
		bis 16,2		Tc-99m	e	119	10,9
Sr-92	γ	898,0	94,0		bis 142		
	γ	1836,1	99,36		X-K	18,3	7,2
Y-92	β-	583 (1492)	100		bis 21,1		
	β-	196 (546)	100		γ	140,5	89,0
Nb-93m	(Y-90)	934 (2282) T	100	Ru-103/ Rh-103m	β-	69 (229)	100
	β-	603 (1546)	100		e	17 (T)	105,0
Y-93	β-	177 (1888)	100		bis 40		
	γ	1384,1	90		X-K	20,1 (T)	8,6
Zr-93	β-	1435 (3612)	100		bis 23,3		
	γ	934,5	13,9		γ	497,1	90,9
Nb-93m	e	11	17,7		γ	610,3	5,65
		bis 18		Pd-103/ Rh-103m	e	16 (T)	117,2
Y-93	e	28	85		bis 40		
		bis 30			X-K	20,0 (T)	77,0
Y-93	X-K	16,5	11,04		bis 23,2		
		bis 19,1		Rh-105	β-	152 (566)	100
Zr-93	β-	1171 (2884)	100		γ	306,3	5,13
	γ	266,9	6,8		γ	319,2	19,0
Nb-93m	e	11	17,6	Ru-106	β-	10,0 (39,4) T	100
		bis 16		(Rh-106)	β-	1411 (3540) T	100
Y-93					γ	511,9 T	20,47

Fortsetzung T 7.30

Radionuklid	Typ	E keV	p %	Radionuklid	Typ	E keV	p %
Ag-108m	γ	621,9 T	9,95	Cd-115m	e	162	79,5
	e	18	20,7		X-K	bis 190	
		bis 30				23,0	36,9
	X-K	21,0	66,2			bis 28,0	
		bis 25,6			γ	190,3	15,4
	γ	79,2	6,6		γ	558,4	4,4
	γ	433,9	90,5		γ	725,2	4,3
	γ	614,4	89,8		β^-	788 (1986) T	98,1
	γ	723,0	90,8		β^-	Cd-115m	602 (1623)
	β^-	626 (1655) T	8,5		γ	933,8	2,00
(Ag-108) Cd-109/ Ag-109m	e	18	20,0	In-115m	β^-	282 (833)	5,0
		bis 25			e	19	5,9
	e	63 T	96,3			bis 27	
		bis 88			e	308	50,2
	X-K	22,0 (T)	99,4			bis 336	
Ag-110m	γ	bis 25,6		Sb-122	X-K	24,0	33,9
	γ	88,0 T	3,63			bis 28,0	
	β^-	70 (530)	100		γ	336,3	45,8
	γ	657,8	94,6		β^-	577 (1983)	97,6
	γ	677,6	10,7		γ	564,4	70,0
	γ	687,0	6,47		e	22	7,1
	γ	706,7	16,6			bis 31	
	γ	763,9	22,4		e	57	103,6
	γ	818,0	7,30			bis 88	
	γ	884,7	73,4		e	127	16,2
Ag-111	γ	937,5	34,6	Te-123m		bis 159	
	γ	1384,3	24,7		X-K	27,2	50,3
	γ	1505,0	13,16			bis 31,9	
	β^-	354 (1037)	100,0		γ	159,0	84,0
	γ	342,1	6,7		e	22	12,2
	e	19	15,1			bis 31	
		bis 23			e	127	15,9
	e	145	8,5			bis 158	
	e	219	6,0		X-K	27,2	87,0
		bis 245				bis 31,9	
In-111	X-K	23,0	83,0	Sb-124	γ	159,0	83,3
		bis 26,8			β^-	386 (2303)	100
	γ	171,3	90,78		γ	602,7	97,8
	γ	245,4	94,16		γ	645,9	7,4
	β^-	183 (580)	99,9		γ	722,8	10,9
	e	364	35,9		γ	1691,0	47,1
		bis 392			e	22	7,9
	X-K	24,0	15,9			bis 27	
		bis 28,0			β^+	817 (2135)	23
	γ	391,7	64,8		X-K	27,2	58,0
Sn-113/ In-113m	e	19 (T)	17,1			bis 31,9	
		28,0		γ	602,7	60,5	
	X-K	24,0 (T)	96,8	γ	722,8	9,96	
		bis 28		γ	1691,0	10,41	
	e	364 T	35,9	e	22 (T)	23,4	
In-114m		bis 392			bis 35		
	γ	391,7 T	64,89	e	77 (T)	24,4	
	e	19	6,3		bis 108		
		bis 27		β^-	86 (622)	100	

Fortsetzung T 7.30

Radionuklid	Typ	<i>E</i> keV	<i>p</i> %	Radionuklid	Typ	<i>E</i> keV	<i>p</i> %
Te-125m	X-K	27,2 (T) bis 31,9	75,1	Xe-131m Cs-131 Te-132 I-132 I-132 I-126	e	24 bis 33	6,6
	γ	35,5	6,01		e	129 bis 164	98,1
	γ	176,3	6,79		X-K	29,5 bis 34,6	54,0
	γ	427,9	29,4		e	24 bis 33	9,1
	γ	463,4	10,45		X-K	29,5 bis 34,6	74,2
	γ	600,6	17,8		e	17 bis 32	80
	γ	636,0	11,32		X-K	45 bis 50	11,8
	e	22 bis 35	30		e	195 bis 228	8,8
	e	77 bis 109	102,4		X-K	28,3 bis 33,2	100
	X-K	27,2 bis 31,9	116,9		β^-	59 (215)	70,9
I-125	γ	35,5	6,58	I-132	e	49,8 228,3	5,02
	e	22	19,2		β^-	486 (2140)	14,4
I-126	γ	bis 27			γ	505,9	88,2
	e	30 bis 35	14,1		γ	522,7	16,1
	X-K	27,2 bis 31,9	139,0		γ	630,3	13,8
	γ	35,5	6,58		γ	667,7	98,7
	e	22 bis 33	5,8		γ	671,6	5,2
	β^-	307 (1251)	43,7		γ	772,7	76,2
	X-K	27,2 bis 34,6	41,9		γ	812,3	5,6
	γ	388,6	34,1		γ	954,6	18,1
	γ	666,4	33,1		γ	1398,6	7,1
	e	22 bis 24	11,3		β^-	406 (1230)	83,5
Xe-127	e	139 bis 198	12,1	I-133 Xe-133 Xe-133m Ba-133	β^-	529,9 875,3 24 bis 34	86
	X-K	28,3 bis 33,2	87,7		γ	74 bis 80	4,47
	γ	172,1	23,5		e	100 (346)	5,9
	γ	202,9	68		X-K	30,6 bis 36,0	100
	γ	375,0	15,9		γ	81,0 24	48,9
	e	24 bis 40	22,3		e	bis 33 bis 233	37,0
	β^-	41,5 (154)	100		β^-	199 29,5	6,8
	X-K	29,5 bis 34,6	70,8		γ	bis 34,6 233,2	89,7
	γ	39,6	7,5		e	17 bis 35	56,3
	β^-	285 (1040)	100		X-K	44 bis 81	10,3
I-130	γ	418,0	34,2	Ba-133	e	17 bis 35	10,7
	γ	536,1	99		X-K	44 bis 81	70
	γ	668,6	96,1		e	17 bis 35	
	γ	739,5	82,3		γ	44 bis 81	
	γ	1157,5	11,31		e	17 bis 35	
	β^-	182 (606)	100		γ	44 bis 81	
I-131	γ	284,3	6,06				
	γ	364,5	81,2				
	γ	637,0	7,27				

Fortsetzung T 7.30

Radionuklid	Typ	E keV	p %	Radionuklid	Typ	E keV	p %
	X-K	30,6	121,0		β^-	276 (1004)	100
		bis 36,0			γ	30,0	13,7
	γ	79,6	2,61		γ	162,7	6,21
	γ	81,0	34,11		γ	304,9	4,30
	γ	276,4	7,147		γ	537,3	24,39
	γ	302,9	18,30		β^-	525 (2164) (T)	115
	γ	356,0	61,94		γ	328,8 T	23,9
	γ	383,9	8,905		γ	487,0 T	52,9
Cs-134	β^-	157 (658)	100		γ	815,8 T	27,2
	γ	563,2	8,36		γ	867,8 T	6,44
	γ	569,3	15,39		γ	925,2 T	8,12
	γ	604,7	97,63		γ	1596,5 T	109,9
	γ	795,9	85,4	La-140	β^-	525 (2164)	100
	γ	801,9	8,69		γ	328,8	20,74
	γ	1365,2	3,016		γ	487,0	45,9
I-135	β^-	358 (1436)	100		γ	815,8	23,64
	γ	546,6	7,13		γ	867,8	5,59
	γ	836,8	6,67		γ	925,2	7,05
	γ	1038,8	7,9		γ	1596,5	95,40
	γ	1131,5	22,5	Ce-141	e	103	22,3
	γ	1260,4	28,6			bis 145	
	γ	1457,6	8,6		β^-	145 (581)	100
	γ	1678,1	9,5		X-K	35,6	17,4
	γ	1791,2	7,70			bis 42,0	
(Xe-135m)	γ	526,6 T	13,3		γ	145,4	48,4
Xe-135	e	214	6,8	Pr-142	β^-	809 (2160)	100
		bis 249			γ	1575,5	3,70
	β^-	303 (910)	100	Ce-143	e	15	66
	X-K	30,6	5,2		e	28	17,3
		bis 36,0				bis 56	
	γ	249,8	90		β^-	409 (1404)	100
Cs-137	β^-	188 (1175)	100		X-K	35,6	63,2
(Ba-137m)	e	624 T	9,73			bis 42	
		bis 662			γ	57,4	11,8
	X-K	31,8 T	7,00		γ	293,3	42
		bis 37,5			γ	664,6	5,3
	γ	661,7 T	85,1		γ	722,0	5,1
Xe-138	β^-	628 (2759)	100	Pr-143	β^-	315 (935)	100
	γ	153,9	5,95	Ce-144	e	92	6,5
	γ	258,4	31,5			bis 134	
	γ	396,6	6,30		β^-	82 (319)	100
	γ	434,6	20,3		X-K	35,6	8,4
	γ	1768,4	16,7			bis 42,0	
	γ	2004,8	5,35		γ	133,5	11,1
	γ	2015,9	12,25	(Pr-144)	β^-	1209 (2997) T	100
Ce-139	e	26	8,2	Nd-147	γ	696,5 T	1,34
		bis 38			e	46	57,8
	e	127	20,2			bis 89	
		bis 164			β^-	233 (804)	100
	X-K	33,0	79,7		X-K	38,2	46,3
		bis 38,9				bis 45,2	
Ba-140	γ	165,9	79,87		γ	91,1	28
	e	12	93		γ	531,0	13,1
		bis 30		Pm-147	β^-	62 (224)	100

Fortsetzung T 7.30

Radionuklid	Typ	E keV	p %	Radionuklid	Typ	E keV	p %
Gd-148	α	3182,7	100		β^-	204 (870)	100
Pm-151	e	18	34		X-K	45,2	20,9
		bis 58				bis 53,7	
	β^-	281 (1187)	100		γ	86,8	13,2
	X-K	39,5	29,2		γ	197,0	5,15
		bis 46,8			γ	298,6	26,8
	γ	167,7	7,8		γ	879,4	29,8
	γ	275,2	6,6		γ	962,3	9,8
	γ	340,1	22		γ	966,2	25,0
Sm-151	β^-	20 (76)	100		γ	1177,9	15,2
Eu-152	e	33	6		γ	1271,9	7,49
		bis 50		Ho-166m	e	23	21,1
	e	75	32,5		e	71	63,6
		bis 120				bis 79	
	β^-	297 (1478)	27,92		e	127	23,2
	X-K	39,5	74			bis 176	
		bis 50,2			β^-	16,5 (72)	100
	γ	121,8	28,37		X-K	48,2	39,0
	γ	244,7	7,51			bis 57,4	
	γ	344,3	26,58		γ	80,6	12,8
	γ	778,9	12,96		γ	184,4	75
	γ	964,1	14,62		γ	280,4	30,4
	γ	1085,8	10,16		γ	410,9	11,8
	γ	1112,1	13,56		γ	529,8	10,5
	γ	1408,0	20,85		γ	571,0	5,9
Gd-153	e	21	55,6		γ	670,5	5,9
		bis 55			γ	711,7	60
	e	62	9,4		γ	752,3	13,4
		bis 145			γ	810,2	64
Xe-127	X-K	40,9	120,1		γ	830,6	10,8
		bis 48,5		Er-169	β^-	99,6 (351)	100
	γ	97,4	27,6	Yb-169	e	11	28,8
	γ	103,2	19,6			bis 49	
Eu-154	e	73	48,4		e	50	54,2
		bis 123				bis 97	
	β^-	227 (1846)	100		e	100	43,7
	X-K	42,3	25,6			bis 188	
		bis 50,2			X-K	49,8	185,6
	γ	123,1	41,2			bis 59,3	
	γ	247,9	6,95		γ	63,1	44,7
	γ	723,3	20,2		γ	109,8	17,5
	γ	873,2	12,24		γ	130,5	11,3
	γ	996,3	10,48		γ	177,2	22,4
	γ	1004,7	18,2		γ	198,0	36,0
	γ	1274,4	35,0		γ	307,7	10,1
Eu-155	e	10	43	Lu-176	e	23	16,8
		bis 36			e	77	67,9
	β^-	47 (253)	100			bis 88	
	X-K	42,3	24,0		e	136	22,0
		bis 50,2				bis 202	
	γ	86,5	30,9		e	241	6,9
	γ	105,3	20,6			bis 307	
Tb-160	e	33	62,8		β^-	? (589)	100
		bis 86					

Fortsetzung T 7.30

Radionuklid	Typ	E keV	p %	Radionuklid	Typ	E keV	p %
Hf-180m	X-K	54,6	32,7	Au-195	e	218	8,1
		bis 65,2				bis 238	
	γ	88,4	14,5		β^-	179 (669)	95,4
	γ	201,9	78,0		X-K	61,5	13,2
	γ	306,9	93,0			bis 78,1	
	e	28	18,2		γ	296,0	28,6
	e	46	96,5		γ	308,5	29,8
		bis 93			γ	316,5	82,8
	e	150	22,5		γ	468,1	47,7
		bis 267			γ	604,4	8,19
Hf-181	X-K	54,6	34,9		γ	612,5	5,31
		bis 65,0			e	12	161
	γ	57,5	48,4			bis 20	
	γ	93,3	17,0		e	28	11,2
	γ	215,2	81,7			bis 75	
	γ	332,3	94,4		e	85	15,7
	γ	443,1	85			bis 133	
	γ	500,7	12,8		X-L	8,3	52
	e	66	26,1			bis 13,1	
		bis 69			X-K	65,1	101
Ta-182	e	121	30,2			bis 78,1	
		bis 137			γ	98,9	10,9
	β^-	131 (409)	100		e	12 (T)	147
	X-K	56,3	26,9			bis 42	
		bis 67,3			e	43 (T)	99
	γ	132,9	35,9			bis 122	
	γ	136,2	5,80		e	181 (T)	14,6
	γ	345,8	15,1			bis 297	
	γ	482,0	80,6		X-L	8,5 (T)	59,5
	e	10	88			bis 14,1	
W-185 Re-186		bis 49			X-K	67,0 (T)	32,2
	e	54	66,6			bis 82,8	
		bis 100			γ	261,8 (T)	32,4
	β^-	126 (524)	100		γ	560,3	7,5
	X-K	58,0	35,5		e	12	61
		bis 69,1				bis 14	
	γ	65,7	3,24		e	52	75
	γ	67,7	46,3			bis 77	
	γ	100,1	14,23		X-L	8,5	44
	γ	152,4	6,95			bis 13,5	
Ir-192	γ	222,1	7,50		X-K	67,0	71
	γ	1121,3	35,30			bis 80,4	
	γ	1189,1	16,44		γ	77,3	18,0
	γ	1221,4	27,17		e	12	68
	γ	1231,0	11,58			bis 49	
Re-186	β^-	127 (433)	100		e	50	35,8
	e	63	11,8			bis 82	
		bis 137			e	116	123,4
	β^-	350 (1075)	92,2			bis 164	
	X-K	58,0	9,7		X-L	8,5	43
Ir-192		bis 73,6				bis 13,5	
	γ	137,1	9,45		X-K	67,0	39,5
	e	11	10,1			bis 82,8	
		bis 60			γ	134,0	34,1

Fortsetzung T 7.30

Radionuklid	Typ	E keV	p %	Radionuklid	Typ	E keV	p %
Au-198	β^-	406 (961)	100	Po-208 Th-229	γ	1063,7	74,5
	γ	411,8	95,57		γ	1770,2	6,87
	e	12	23,1		α	5114,9	100
		bis 59			e	12	95
	e	75,3	10,8			bis 39	
	e	125	29,6		e	49	68
		bis 158				bis 90	
	β^-	87 (453)	100		e	102	16,2
	X-L	8,7	12,5			bis 174	
		bis 13,9			α	4814,6	9,6
Au-199	X-K	68,9	16,5		α	4845,1	58,2
		bis 82,8			α	4900,9	10,6
	γ	158,4	36,9		α	4967,6	7,0
	γ	208,2	8,37		α	5051,2	6,6
	e	12	75		X-L	10,6	90
		bis 32				bis 18,0	
	e	52	36,0		γ	31,4	2,45
		bis 84			X-K	85,4	49
	X-L	8,7	40,1			bis 103,0	
		bis 14,0			γ	193,5	4,41
Tl-201	X-K	68,9	93,4	(Ra-225)	γ	210,8	3,18
		bis 82,8			e	16 T	49
	γ	167,4	10,6			bis 40	
	e	10	7,8		β^-	94 (362) T	28
		bis 15			X-L	10,9 T	13,4
	e	194	18,3			bis 18,6	
		bis 279			γ	40,3 T	29
	β^-	58 (212)	100		e	15 T	57
	X-L	9,0	6,0			bis 46	
		bis 14,4			α	5731,9 T	8,2
Hg-203	X-K	70,8	13,0		α	5790,9 T	8,6
		bis 85,2			α	5793,1 T	18,3
	γ	279,2	81,48		α	5829,6 T	50,7
	e	10	48		X-L	10,4 T	20,1
		bis 15				bis 17,4	
	e	194	18,0		α	6126,3 T	15,1
		bis 279			α	6341,0 T	83,3
	X-L	9,0	33,2		γ	218,0 T	10,9
		bis 14,4			α	7066,9 T	99,9
	X-K	70,8	86,4		β^-	454 (1420) T	97,84
Pb-203		bis 85,2			γ	440,3 T	16,5
	γ	279,2	80,1		α	8375,9 T	100
	β^-	244 (763)	97,45		β^-	198 (645) T	100
	e	13	43		e	40	22,8
		bis 62				bis 58	
	e	481	2,15		α	3950	23
		bis 569			α	4013	77
	e	975	9,78		X-L	10,6	8,4
		bis 1063				bis 18,0	
	X-L	9,2	32,5		β^-	7,5 (39) T	100
Tl-204		bis 14,9			e	16 T	120
	X-K	72,8	77,7			bis 57	
		bis 87,6			e	75 T	22
	γ	569,7	97,74			bis 113	
Bi-207							

Fortsetzung T 7.30

Radionuklid	Typ	E keV	p %	Radionuklid	Typ	E keV	p %
(Th-228)	β^-	391 (2079) T	100	U-233	e	155 bis 290	41
	X-L	11,1 T	41		β^-	64 (260)	100
		bis 19,1			X-L	11,6 bis 20,4	35,5
	X-K	90,0 T	11,7		X-K	94,6 bis 114,9	31,2
		bis 109,0			γ	300,1	6,63
	γ	338,4 T	11,26		γ	312,0	38,63
	γ	911,2 T	26,6		γ	340,5	4,50
	γ	964,6 T	5,05		e	11 bis 41	18
	γ	969,0 T	16,23		α	4782,3	14,1
	γ	1588,2 T	3,26		α	4824,0	83,3
(Ra-224)	e	65 T	24,4		X-L	11,1 bis 19,1	6,9
		bis 84			α	4214,7	6,4
	α	5340,4 T	26,6		α	4366,1	17
	α	5423,2 T	73,4		α	4397,8	57,0
	X-L	10,6 T	9,1		α	4596,4	5,6
(Rn-220)		bis 18,0			X-L	11,1	41
	α	5448,6 T	5,07		X-K	90,0 bis 109,0	11,5
	α	5685,4 T	94,91		γ	143,8	10,96
(Po-216)	γ	241,0 T	4,10		γ	163,3	5,08
	α	6288,1 T	99,9		γ	185,7	57,2
	α	6778,3 T	100		γ	205,3	5,01
(Pb-212)	e	148 T	39,4		e	12 T bis 38	>188
		bis 225			e	42 T bis 79	76
	β^-	101 (573) T	100		β^-	79 (306) T	100
	X-L	9,4 T	14,2		X-L	11,4 T bis 19,8	96
		bis 15,4			γ	25,6 T	14,6
	X-K	74,8 T	8,1		γ	84,2 T	6,71
		bis 90,1			e	10 T bis 38	174
	γ	238,6 T	43,5		α	4736,0 T	8,4
	γ	300,1 T	3,25		α	4951,3 T	22,8
	e	24 T	25,5		α	5013,8 T	25,4
(Bi-212)		bis 36			α	5028,4 T	20,0
	β^-	768 (2246) T	64,07		α	5058,6 T	11,0
	X-L	8,9 T	7,6		X-L	10,9 T bis 18,6	54
		bis 15,9			γ	27,4 T	11,1
	γ	727,3 T	6,69		e	10 T bis 15	9,1
	α	6050,8 T	25,12		β^-	9,6 (44) T	98,62
	α	6089,9 T	9,74		e	11 T bis 42	142
	α	8784,9 T	64,07				
	α	560 (1796) T	35,93				
	β^-	510,8 T	8,18				
(Po-212)	γ	583,2 T	30,6	(Pa-231)			
	γ	2614,5 T	35,86				
	e	37	31,5				
		bis 56					
	α	5264,4	31,4				
(Tl-208)	α	5320,1	68,6				
	X-L	11,1	12,0				
		bis 19,1			γ	27,4 T	
	usw. s. unter Th 232				e	10 T	
	e	18	21			bis 15	
U-232		bis 40		(Ac-227)	β^-	9,6 (44) T	98,62
	e	53	35		e	11 T	142
		bis 104					
(Th-228)							
Pa-233							

Fortsetzung T 7.30

Radionuklid	Typ	E keV	p %	Radionuklid	Typ	E keV	p %
(Ra-223)	e	43 T bis 147	20	U-238	e	16 bis 46	29
	α	5708,8 T	8,2		α	4151	23
	α	5756,9 T	20,1		α	4198	77
	α	5977,7 T	23,2		X-L	11,1 bis 19,1	8,3
	α	6038,0 T	23,9				
	X-L	10,6 T bis 18,0	44	(Th-234)	e	71 T bis 91	15,6
	γ	50,1 T	8,4		β^-	44 (207) T	100
	γ	236,0 T	11,0		X-L	11,4 T bis 19,8	9,7
	γ	256,2 T	6,6				
	e	15 T bis 18	25		γ	63,3 T	4,47
	e	24 T	39,0		γ	92,4 T	2,60
		bis 56		(Pa-234m)	γ	92,8 T	2,56
	e	126 T bis 251	21,6		β^-	820 (2281) T	99,87
					γ	1001,0 T	0,839
				(U-234)	e	33 T	27,6
	α	5539,8 T	9,2			bis 52	
	α	5606,7 T	25,7		α	4722,4 T	27,5
	α	5716,2 T	52,6		α	4774,6 T	72,5
	α	5747,0 T	9,2		X-L	11,1 T bis 19,1	10,5
	X-L	10,1 T bis 16,9	22,6				
	X-K	81,1 T bis 97,9	49,1	(Th-230)	e	49 T bis 67	23,1
	γ	154,2 T	5,59		α	4620,5 T	23,4
	γ	269,4 T	13,6		α	4687,0 T	76,3
(Rn-219)	α	6425,0 T	7,5		X-L	10,6 T	8,4
	α	6552,6 T	12,9	(Ra-226)	α	bis 18,0	
	α	6819,1 T	79,4		α	4601 T	5,55
	γ	271,1 T	9,9		α	4784,3 T	94,45
	γ	401,7 T	6,64	(Rn-222)	γ	186,2 T	3,51
(Po-215)	α	7386,1 T	100	(Po-218)	α	5489,5 T	99,92
(Pb-211)	β^-	447 (1373) T	100	(Pb-214)	α	6002,4 T	99,9
(Bi-211)	α	6278,2 T	16,2		e	13 T	13,7
	α	6622,9 T	83,8			bis 16	
	γ	351,1 T	12,94		e	37 T	15,1
(Tl-207)	β^-	493 (1422) T	100			bis 87	
U-236	e	16 bis 45	33		e	151 T bis 279	25,6
	α	4445	26		β^-	220 (1024) T	100
	α	4493,5	74		X-L	9,4 T bis 15,4	13,0
	X-L	11,1 bis 19,1	9,4		X-K	74,8 T bis 90,1	21,6
Np-237	e	17 bis 66	137		γ	241,9 T 351,9 T	7,12 35,1
	α	4644	5,9	(Bi-214)	β^-	641 (3270) T	18,15 99,98
	α	4769,2	14,3		β^-	3270 T	17,2
	α	4774,2	18,1		γ	609,3 T	44,6
	α	4789,8	47,6		γ	768,4 T	4,76
	X-L	11,4 bis 21,6	54,5		γ	1120,3 T	14,7
	γ	29,4	15,3		γ	1238,1 T	5,78
	γ	86,5	12,3		γ	1764,5 T	15,1

Fortsetzung T 7.30

Radionuklid	Typ	E keV	p %	Radionuklid	Typ	E keV	p %
(Po-214) (Pb-210)	γ	2204,1 T	4,98	Pu-241 Am-241	β^-	5,2 (20,8)	100
	γ	2447,7 T	1,55		e	11	100
	α	7686,8 T	99,99			bis 54	
	e	30 T	72,4			5442,8	13,3
		bis 43				5485,6	85,1
	β^-	6,5 (63) T	100		X-L	11,9	38,4
	X-L	9,4 T	22,7			bis 21,0	
		bis 15,5				26,3	2,4
	γ	46,5 T	4,24			59,5	36,0
	β^-	389 (1161) T	100		e	23	25,5
(Bi-210) (Po-210) Pu-238	α	5304,3 T	100	Pu-242		bis 45	
	e	22	29,1			4858,1	21
		bis 34				4902,3	79
	α	5456,3	28,6		X-L	11,6	8,7
	α	5499,0	71,4			bis 21,6	
	X-L	11,6	10,7		e	21	26,1
		bis 21,6				bis 44	
	e	18	110			6069,4	25,9
		bis 87				6112,7	74,1
	e	88	35,7		X-L	12,1	11
Np-239		bis 106		Am-243		bis 22,9	
	e	156	31,4		e	21	51
		bis 304				bis 76	
	β^-	118 (714)	100			5233,3	11,0
	X-L	12,1	56			5275,3	87,4
		bis 21,6			X-L	11,9	39
	X-K	99,5	50,5			bis 21,0	
		bis 121,0				43,5	5,94
	γ	106,1	26,7			74,7	67,4
	γ	228,2	11,12		e	20	23,3
Pu-239	γ	277,6	14,31			bis 43	
	α	5105,8	11,5	Cm-244	α	5762,2	23,6
	α	5144,3	15,1		α	5804,8	76,4
	α	5156,6	73,3		X-L	12,1	9,4
	X-L	11,6	4,6			bis 22,9	
		bis 21,6			e	19	18,3
	e	23	26,6			bis 39	
		bis 45				6075,6	15,5
	α	5123,5	26,39			6118,1	84,3
	α	5168,1	73,51		X-L	12,1	6,3
Pu-240	X-L	11,6	10,5			bis 22,9	
		bis 21,6					

7.31 Zerfallsreihen von natürlichen Radionukliden – Decay series of natural radio-nuclides (K. Debertin)

7.31a Diagramme

52	Thorium-Reihe ($A = 4n$)					Ra-228 5,75 a	←	Th-232 $1,4 \cdot 10^{10}$ a
50						Ac-228 6,15 h	←	
48	Pb-212 10,6 h	←	Po-216 0,15 s	←	Rn-220 55,6 s	←	Ra-224 3,66 d	←
46	Tl-208 3,05 min	36% ←	Bi-212 60,6 min	64%				Th-228 1,91 a
44	Pb-208 stabil	←	Po-212 0,3 μs					

7.31b Zeitlicher Anstieg der Aktivität von Folgeprodukten

Die Formeln gelten für den Fall, daß zur Zeit $t = 0$ nur das jeweilige Ausgangsnuklid vorliegt; handelt es sich bei der Ausgangsstanz um ein Gemisch, so sind die aus jedem einzelnen Nuklid entstandenen Aktivitäten des betreffenden Folgeprodukts gesondert zu berechnen und zu addieren. Die Aktivitäten der Ausgangsnuklide beziehen sich auf den Zeitpunkt $t = 0$. Die Indizes von A und λ entsprechen der lfd. Nr. in der Halbwertszeittabelle der Zerfallsreihe. Es gilt $\lambda = (\ln 2)/T_{1/2} = 0,639/T_{1/2}$.

Uran-Radium-Reihe:

lfd. Nr.	Nuklid	$T_{1/2}$	lfd. Nr.	Nuklid	$T_{1/2}$
1	U-238	$4,468 \cdot 10^9$ a	8	Po-218	3,05 min
2	Th-234	24,10 d	9	Pb-214	26,8 min
3	Pa-234	1,17 min	10	Bi-214	19,9 min
4	U-234	$2,454 \cdot 10^5$ a	11	Po-214	$1,65 \cdot 10^{-4}$ s
5	Th-230	$7,538 \cdot 10^4$ a	12	Pb-210	22,3 a
6	Ra-226	$1,60 \cdot 10^3$ a	13	Bi-210	5,013 d
7	Rn-222	3,8235 d	14	Po-210	138,4 d

$${}^{230}\text{Th} \text{ aus } {}^{238}\text{U}): \quad A_5 = A_1 (1 - e^{-\lambda_5 t}) \quad 1) \text{ U} = {}^{238}\text{U} \text{ und } {}^{234}\text{U} \text{ im Gleichgewicht.}$$

$${}^{226}\text{Ra} \text{ aus } {}^{230}\text{Th}: \quad A_6 = A_5 \cdot 1,022(e^{-\lambda_5 t} - e^{-\lambda_6 t})$$

$${}^{226}\text{Ra} \text{ aus } {}^{238}\text{U}): \quad A_6 = A_1 (1 - 1,022 e^{-\lambda_5 t} + 0,022 e^{-\lambda_6 t})$$

$${}^{222}\text{Rn} \text{ aus } {}^{226}\text{Ra}: \quad A_7 = A_6 (1 - e^{-\lambda_7 t})$$

$${}^{218}\text{Po} \text{ aus } {}^{222}\text{Rn}: \quad A_8 = A_7 \cdot 1,0006(e^{-\lambda_7 t} - e^{-\lambda_8 t})$$

$${}^{214}\text{Pb} \text{ aus } {}^{222}\text{Rn}: \quad A_9 = A_7 (1,0055 e^{-\lambda_7 t} + 0,1285 e^{-\lambda_8 t} - 1,134 e^{-\lambda_9 t})$$

$${}^{214}\text{Bi} \text{ aus } {}^{222}\text{Rn}: \quad A_{10} = A_7 (1,009 e^{-\lambda_7 t} - 0,0233 e^{-\lambda_8 t} - 4,404 e^{-\lambda_9 t} + 3,418 e^{-\lambda_{10} t})$$

$${}^{214}\text{Bi} \text{ aus } {}^{218}\text{Po}: \quad A_{10} = A_8 (0,023 e^{-\lambda_8 t} + 0,499 e^{-\lambda_9 t} - 0,522 e^{-\lambda_{10} t})$$

$${}^{214}\text{Bi} \text{ aus } {}^{214}\text{Pb}: \quad A_{10} = A_9 \cdot 3,88(e^{-\lambda_9 t} - e^{-\lambda_{10} t})$$

$${}^{210}\text{Pb} \text{ aus } {}^{222}\text{Rn}: \quad A_{12} = A_7 \cdot 0,00047(e^{-\lambda_{12} t} - e^{-\lambda_7 t})$$

$${}^{210}\text{Pb} \text{ aus } {}^{226}\text{Ra}: \quad A_{12} = A_6 (1,0141 e^{-\lambda_6 t} + 0,0005 e^{-\lambda_7 t} - 1,0146 e^{-\lambda_{12} t})$$

$${}^{210}\text{Pb} \text{ aus } {}^{230}\text{Th}: \quad A_{12} = A_5 (1,022 e^{-\lambda_5 t} - 1,036 e^{-\lambda_6 t} + 0,014 e^{-\lambda_{12} t})$$

$${}^{210}\text{Pb} \text{ aus } {}^{238}\text{U}): \quad A_{12} = A_1 (1 - 1,022 e^{-\lambda_5 t} + 0,022 e^{-\lambda_6 t})$$

$${}^{210}\text{Po} \text{ aus } {}^{210}\text{Pb}: \quad A_{14} = A_{12} (1,0179 e^{-\lambda_{12} t} + 0,0376 e^{-\lambda_{13} t} - 1,0555 e^{-\lambda_{14} t})$$

$${}^{210}\text{Po} \text{ aus } {}^{222}\text{Rn}: \quad A_{14} = A_7 \cdot 10^{-4} (-0,429 e^{-\lambda_7 t} + 4,780 e^{-\lambda_{12} t} + 0,744 e^{-\lambda_{13} t} - 5,095 e^{-\lambda_{14} t})$$

$${}^{210}\text{Po} \text{ aus } {}^{226}\text{Ra}: \quad A_{14} = A_6 (1,0144 e^{-\lambda_6 t} - 1,0317 e^{-\lambda_{12} t} + 0,0173 e^{-\lambda_{14} t})$$

Uran-Actinium-Reihe:

lfd. Nr.	Nuklid	$T_{1/2}$	lfd. Nr.	Nuklid	$T_{1/2}$
1	U-235	$7,037 \cdot 10^8$ a	7	Rn-219	3,96 s
2	Th-231	25,5 h	8	Po-215	1,78 ms
3	Pa-231	$3,276 \cdot 10^4$ a	9	Pb-211	36,1 min
4	Ac-227	21,77 a	10	Bi-211	2,17 min
5	Th-227	18,72 d	11	Tl-207	4,77 min
6	Ra-223	11,43 d			

Fortsetzung T 7.31b

^{231}Pa aus ^{235}U :	$A_3 = A_1 (1 - e^{-\lambda_3 t})$
^{227}Ac aus ^{231}Pa :	$A_4 = A_3 \cdot 1,001 (e^{-\lambda_3 t} - e^{-\lambda_4 t})$
^{227}Ac aus ^{235}U :	$A_4 = A_1 (1 - 1,001 e^{-\lambda_3 t} + 0,001 e^{-\lambda_4 t})$
^{227}Th aus ^{227}Ac :	$A_5 = A_4 \cdot 0,988 (e^{-\lambda_4 t} - e^{-\lambda_5 t})$
^{227}Th aus ^{231}Pa :	$A_5 = A_3 \cdot 0,986 (1,001 e^{-\lambda_3 t} - 1,003 e^{-\lambda_4 t} + 0,002 e^{-\lambda_5 t})$
^{223}Ra aus ^{227}Th :	$A_6 = A_5 \cdot 2,57 (e^{-\lambda_5 t} - e^{-\lambda_6 t})$
^{223}Ra aus ^{227}Ac :	$A_6 = A_4 (1,004 e^{-\lambda_4 t} - 2,574 e^{-\lambda_5 t} + 1,570 e^{-\lambda_6 t})$
^{211}Pb aus ^{219}Rn :	$A_9 = A_7 \cdot 0,00183 (1 - e^{-\lambda_7 t})$
^{211}Pb aus ^{223}Ra :	$A_9 = A_6 (1,002 e^{-\lambda_6 t} + 0,002 e^{-\lambda_7 t} - 1,004 e^{-\lambda_9 t})$
^{211}Bi aus ^{211}Pb :	$A_{10} = A_9 \cdot 1,064 (e^{-\lambda_9 t} - e^{-\lambda_{10} t})$
^{211}Bi aus ^{223}Ra :	$A_{10} = A_6 (1,002 e^{-\lambda_6 t} - 1,066 e^{-\lambda_9 t} + 0,064 e^{-\lambda_{10} t})$

Thorium-Reihe:

Ifd. Nr.	Nuklid	$T_{1/2}$	Ifd. Nr.	Nuklid	$T_{1/2}$
1	Th-232	$1,405 \cdot 10^{10}$ a	7	Po-216	0,15 s
2	Ra-228	5,75 a	8	Pb-212	10,64 h
3	Ac-228	6,15 h	9	Bi-212	60,55 min
4	Th-228	1,912 a	10	Po-212	0,298 μ s
5	Ra-224	3,66 d	11	Tl-208	3,053 min
6	Rn-220	55,6 s			

^{228}Ra aus ^{232}Th :	$A_2 = A_1 (1 - e^{-\lambda_2 t})$
^{228}Th aus ^{228}Ra :	$A_4 = A_2 \cdot 1,499 (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_4 t})$
^{228}Th aus ^{232}Th :	$A_4 = A_1 (1 - 1,499 e^{-\lambda_2 t} + 0,499 e^{-\lambda_4 t})$
^{224}Ra aus ^{228}Th :	$A_5 = A_4 \cdot 1,005 (e^{-\lambda_4 t} - e^{-\lambda_5 t})$
^{224}Ra aus ^{228}Ra :	$A_5 = A_2 (1,501 e^{-\lambda_2 t} - 1,506 e^{-\lambda_4 t} + 0,005 e^{-\lambda_5 t})$
^{212}Pb aus ^{220}Rn :	$A_8 = A_6 \cdot 0,00145 (1 - e^{-\lambda_6 t})$
^{212}Pb aus ^{228}Th :	$A_8 = A_4 (1,006 e^{-\lambda_4 t} - 1,144 e^{-\lambda_5 t} + 0,138 e^{-\lambda_8 t})$
^{212}Bi aus ^{212}Pb :	$A_9 = A_8 \cdot 1,105 (e^{-\lambda_8 t} - e^{-\lambda_9 t})$
^{212}Bi aus ^{220}Rn :	$A_9 = A_6 \cdot 0,001 (0,022 e^{-\lambda_6 t} + 1,607 e^{-\lambda_8 t} - 1,629 e^{-\lambda_9 t})$
^{212}Bi aus ^{228}Th :	$A_9 = A_4 (1,006 e^{-\lambda_4 t} - 1,157 e^{-\lambda_5 t} + 0,152 e^{-\lambda_8 t} - 0,001 e^{-\lambda_9 t})$
^{208}Tl aus ^{212}Bi :	$A_{11} = A_9 \cdot 0,378 (e^{-\lambda_9 t} - e^{-\lambda_{11} t})$
^{208}Tl aus ^{212}Pb :	$A_{11} = A_8 \cdot 0,359 (1,110 e^{-\lambda_8 t} - 1,163 e^{-\lambda_9 t} + 0,053 e^{-\lambda_{11} t})$
^{208}Tl aus ^{224}Ra :	$A_{11} = A_5 \cdot 0,359 (1,151 e^{-\lambda_5 t} - 1,257 e^{-\lambda_8 t} + 0,106 e^{-\lambda_9 t})$