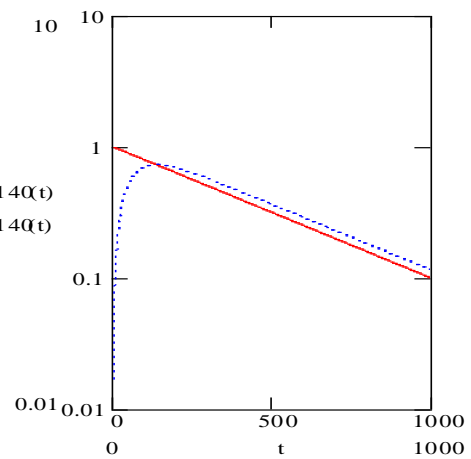
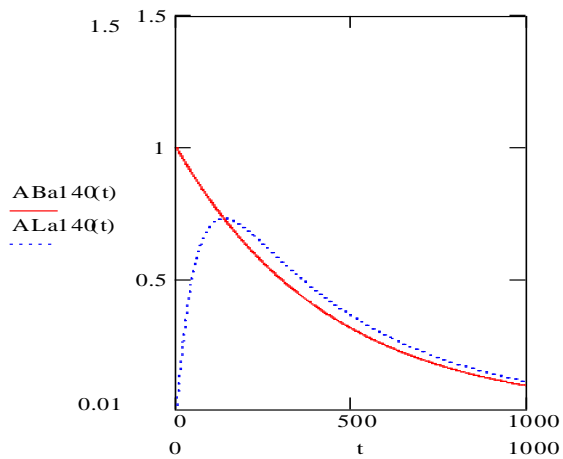
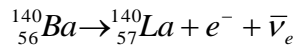
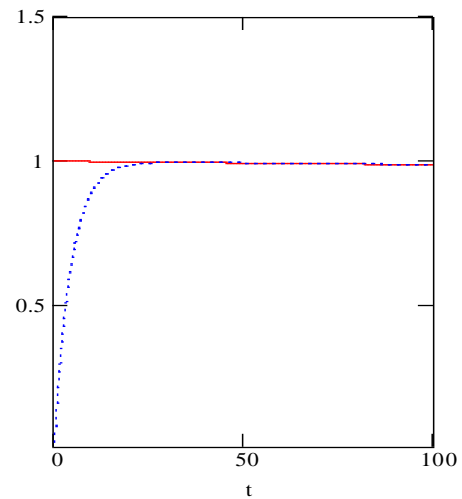
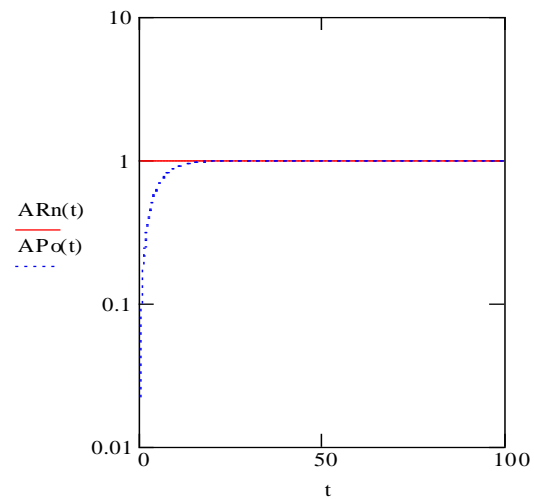
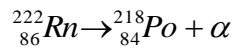
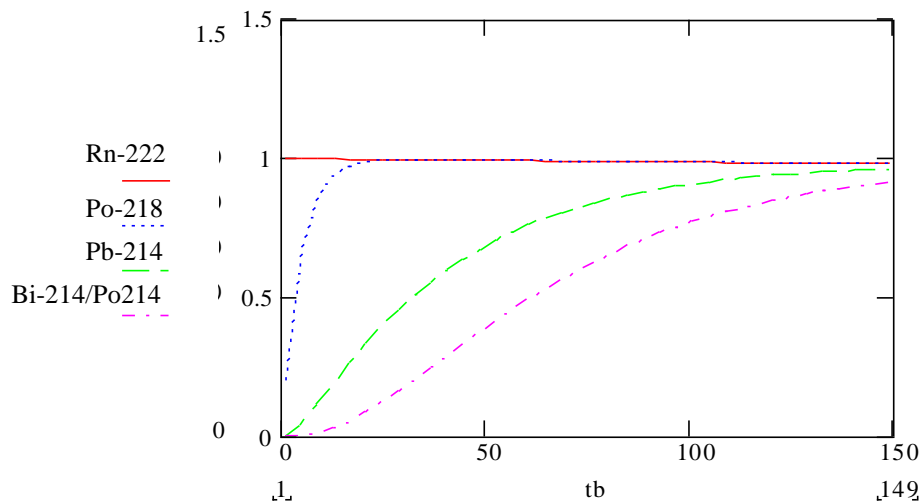
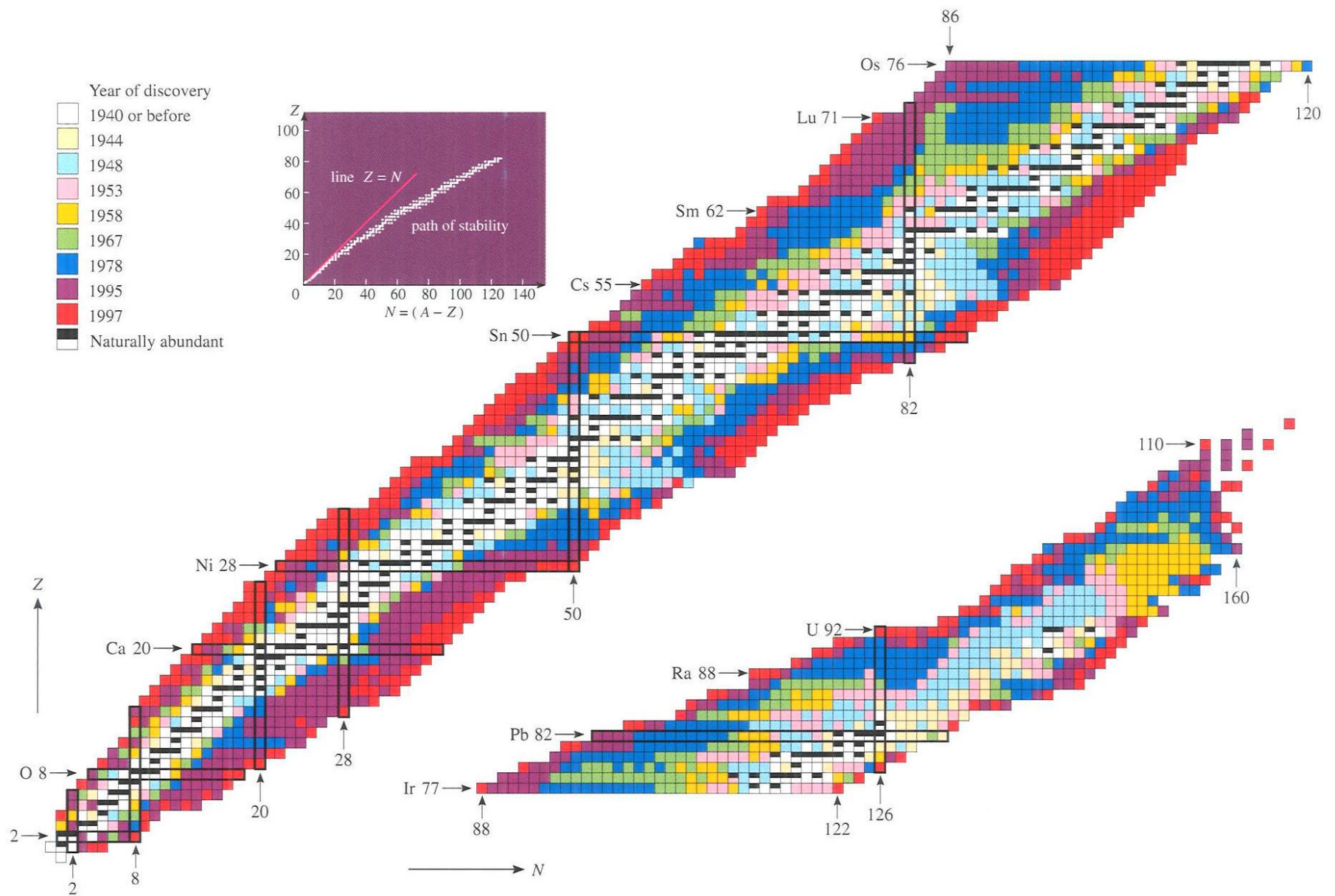


Transientes Gleichgewicht, ^{140}Ba 12,75d; ^{140}La 1,67d**Säkulares Gleichgewicht,** ^{222}Rn 3,825d; ^{218}Po 3,05min**Komplexe Zerfallskette,** $^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{218}\text{Po} \rightarrow ^{214}\text{Pb} \rightarrow ^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{214}\text{Po} \rightarrow ^{210}\text{Pb}$

^{222}Rn 3,825d; ^{218}Po 3,05min, ^{214}Pb 26,8min, ^{214}Bi 19,9min, ^{214}Po 0.16msec





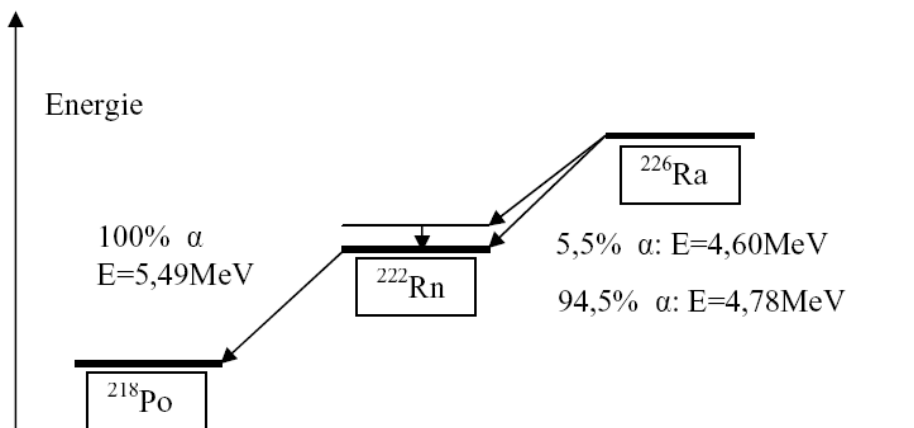
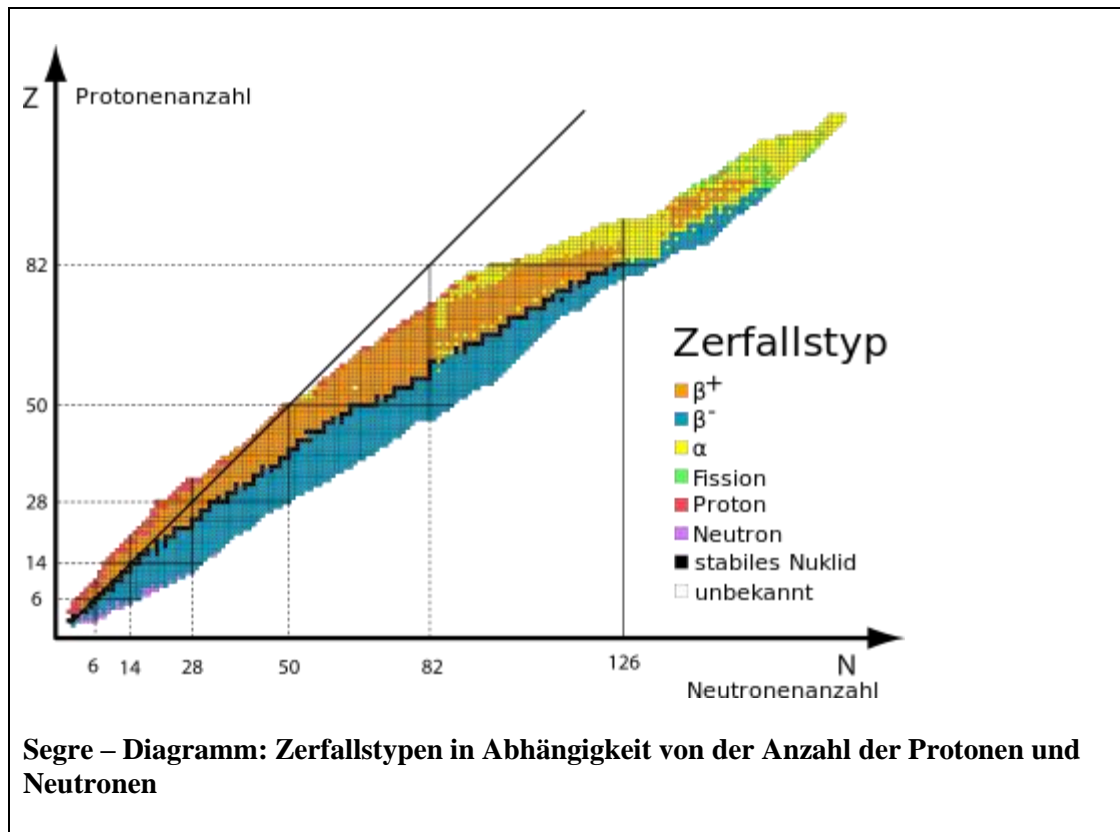


Abbildung 4: Der Zerfall von ^{226}Ra in ^{222}Rn erfolgt zu 94,5% durch α -Emission mit einer Energie von 4,78 MeV in den Grundzustand von ^{222}Rn und zu 5,5% mit einer Energie von 4,60 MeV in den angeregten Zustand von ^{222}Rn (Anregungsenergie 0,18 MeV). Der Übergang in den Grundzustand erfolgt über Emission eines (z. T. konvertierten*) γ -Quants der Energie 0,18 MeV (Rückstoß vernachlässigt).

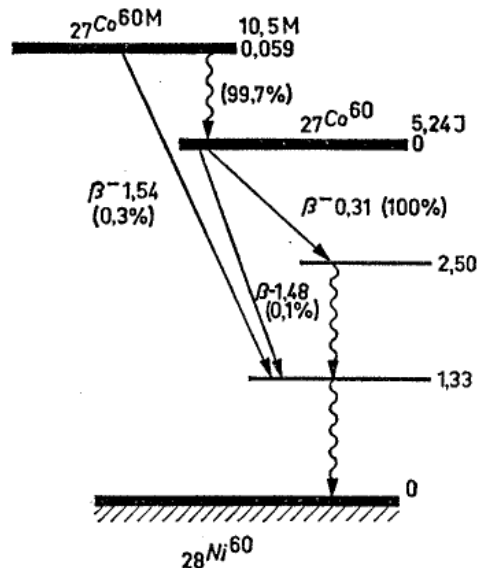
^{238}U Zerfallskette ($A = 4n + 2$)										^{234}Th 24.1d	100% ← α	^{238}U 4.5E9y
											^{234}Pa 1.2m	
		^{214}Pb 26.8m	99.98% ← α	^{218}Po 3.05m	100% ← α	^{222}Rn 3.825d	100% ← α	^{226}Ra 1600y	100% ← α	^{230}Th 7.5E4y	100% ← α	^{234}U 2.5E5y
	^{210}Tl 1.30m	0.4% ← α	^{214}Bi 19.9m	100% ← α	^{218}At 2s							
^{206}Hg 8.15m	75E-6% ← α	^{210}Pb 22.3y	100% ← α	^{214}Po 0.16ms								
	^{206}Tl 4.2m	5E-5% ← α	^{210}Bi 5.0d									
		^{206}Pb stable	100% ← α	^{210}Po 138.4d								

^{232}Th Zerfallskette ($A = 4n$)										^{228}Ra 5.75y	100% ← α	^{232}Th 14E9y
											^{228}Ac 6.13h	
		^{212}Pb 10.6h	100% ← α	^{216}Po 0.15s	100% ← α	^{220}Rn 55.6s	100% ← α	^{224}Ra 3.66d	100% ← α	^{228}Th 1.91y		
	^{208}Tl 3.1m	36.2% ← α	^{212}Bi 60.6m									
		^{208}Pb stable	100% ← α	^{212}Po 0.3E-6s								

^{235}U Zerfallskette ($A = 4n + 3$)										^{231}Th 25.5h	100% ← α	^{235}U 7E8y
			^{215}Bi 7.4m	97% ← α	^{219}At 0.9m	4E-3% ← α	^{223}Fr 21.8m	1.2% ← α	^{227}Ac 21.8y	100% ← α	^{231}Pa 3.3E4y	
		^{211}Pb 36.1m	>99.9% ← α	^{215}Po 1.8ms	100% ← α	^{219}Rn 3.96s	100% ← α	^{223}Ra 11.4d	100% ← α	^{227}Th 18.7d		
	^{207}Tl 4.8m	99.68% ← α	^{211}Bi 2.13m	100% ← α	^{215}At 0.1ms							
		^{207}Pb stable	100% ← α	^{211}Po 0.52s								

Z=80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92

Abbildung 3: Die natürlichen Zerfallsreihen: Pfeile nach links bedeuten α -Zerfälle mit in Prozent angegebenen Häufigkeiten, Pfeile nach rechts unten stellen β -Zerfälle dar. Die Halbwertszeiten der Nuklide sind unter ihren Symbolen notiert. Dicke Pfeile symbolisieren die bevorzugten Zerfallsverläufe.

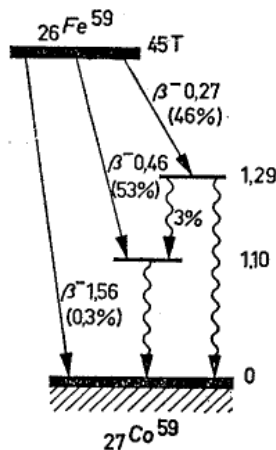
Abb. 7. Zerfallsschema von Co^{60} (Kobalt).

Co^{60} geht durch das Aussenden von Negatronen in praktisch 100% der Fälle auf ein Energieniveau von 2,50 MeV über und zerfällt weiter durch kaskadenförmige Emission zweier aufeinanderfolgender Gammaquanten von 1,17 bzw. 1,33 MeV.

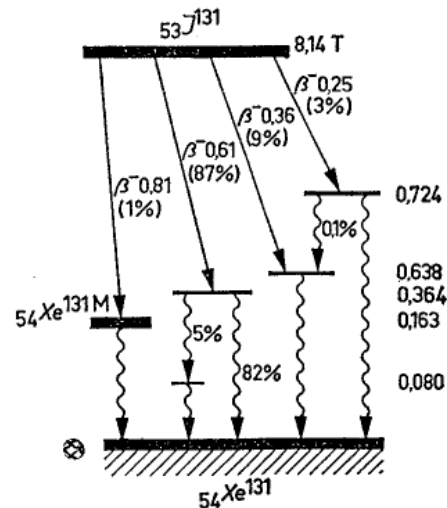
Daneben besteht eine geringe Möglichkeit, daß das Energieniveau von 1,33 MeV durch die Emission eines Negatrons direkt erreicht wird. Auf diesen Vorgang folgt dann die Aussendung eines Gammaquants von 1,33 MeV.

In beiden Fällen ist das Endprodukt Ni^{60} , ein stabiles Isotop von Nickel.

Vollständigkeitshalber wurde das Isomer Co^{60m} in das Schema aufgenommen. Auch dieses Isomer kennt zwei Zerfallsmöglichkeiten: mit der größten Wahrscheinlichkeit bildet es durch Aussenden eines Gammaquants Co^{60} , oder das oben erwähnte Energieniveau von 1,33 MeV wird durch die Emission eines Negatrons erreicht.

Abb. 8. Zerfallsschema von Fe^{59} (Eisen).

Die beiden zur Stabilität führenden Zerfallsmöglichkeiten treten mit gleicher Wahrscheinlichkeit auf. Das Gammaskpektrum von Fe^{59} zeigt deshalb sowohl „Linien“ von 1,1 als auch von 1,3 MeV.

Abb. 9. Zerfallsschema von J^{131} (Jod)

Dieses Isotop besitzt vier – und zusätzlich noch einige weitere, seltener vorkommende – Zerfallsmöglichkeiten.

In einem der Fälle wird ein Isomer von Xe^{131} (Xenon) gebildet. Meist findet die Emission eines Gammaquants von 0,364 MeV statt.

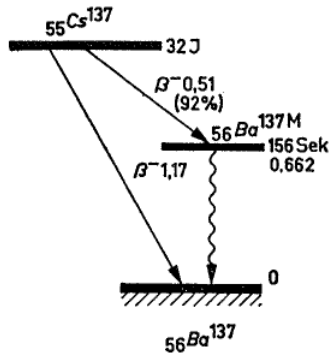


Abb. 4. Zerfallsschema von Cs^{137} (Cäsium)
92% der anwesenden Kerne bilden zunächst das Isomer $\text{Ba}^{137\text{m}}$ (Barium), das unter Aussendung eines Gammaquants mit einer Energie von 662 keV in stabiles Ba^{137} übergeht. Die übrigen Kerne bilden durch Beta-Zerfall direkt Ba^{137} .

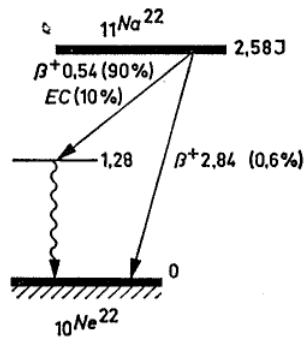


Abb. 5. Zerfallsschema von Na^{22} (Natrium)
Bei der mit der höchsten Wahrscheinlichkeit auftretenden Zerfallsart wird über die Emission eines Positrons (β^+) oder durch Elektroneneinfang mit anschließender Aussendung eines Gammaquants (Energie 1,28 MeV) Ne^{22} , ein stabiles Isotop von Neon, gebildet.

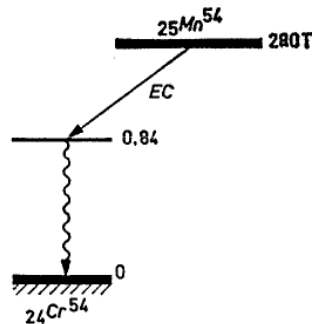


Abb. 6. Zerfallsschema von Mn^{54} (Mangan)
Durch Einfangen eines Elektrons (EC) und Emission eines Gammaquants mit 0,84 MeV wird das stabile Isotop Cr^{54} von Chrom gebildet.

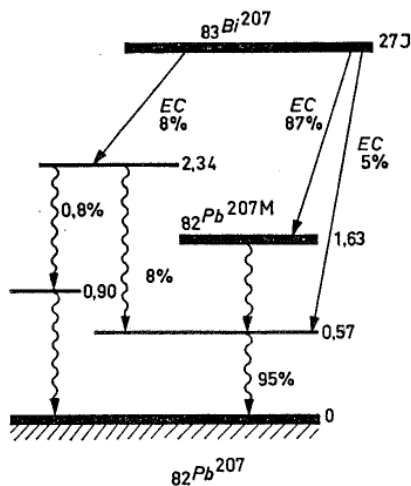


Abb. 10. Zerfallsschema von Bi^{207} (Wismut).
In allen drei Fällen handelt es sich um Elektroneneinfang. Bei der mit der größten Wahrscheinlichkeit auftretenden Zerfallsart wird das Isomer $\text{Pb}^{207\text{m}}$ von Blei gebildet.

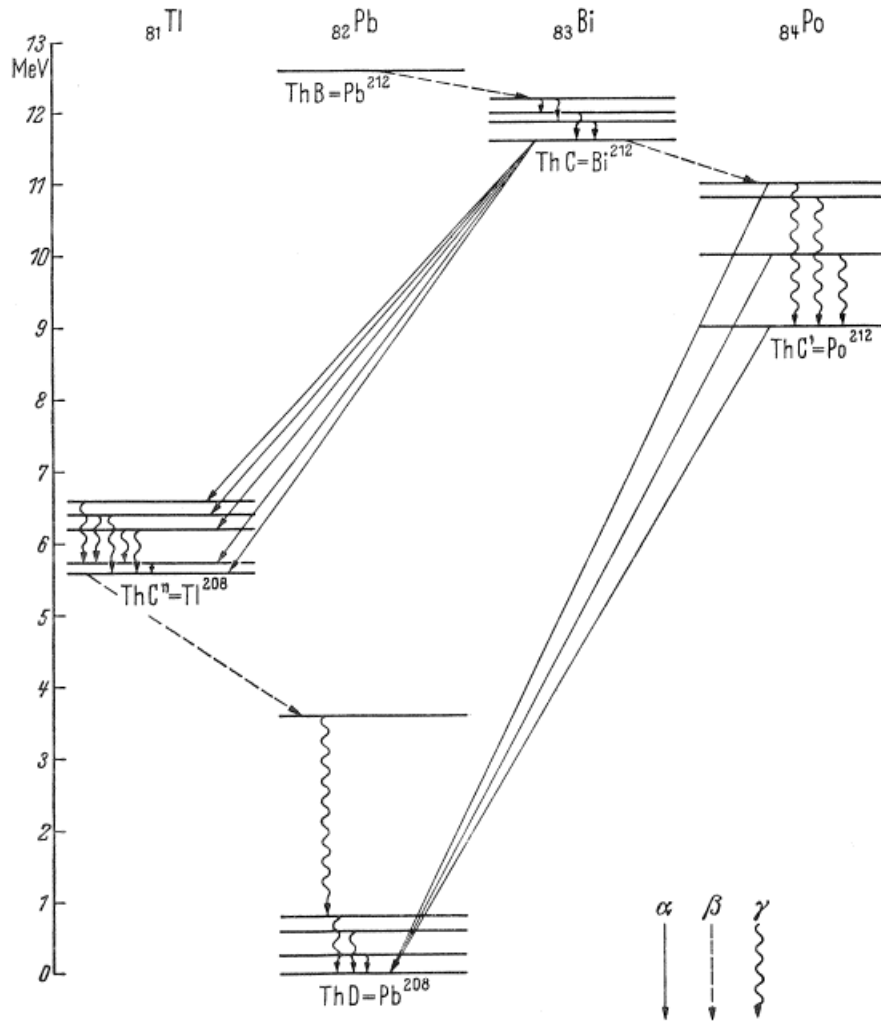


Abb.134. Die Zusammenhänge von α -, β - und γ -Übergängen zwischen vier instabilen Kernen am Ende der radioaktiven Thoriumreihe und deren stabilem Endkern $^{82}\text{Pb}^{208}$.

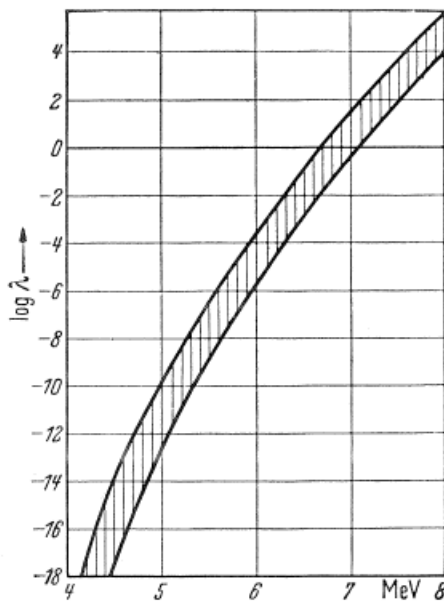


Abb.132. Schematische Darstellung der GEIGER-NUTTALL-Beziehung. Die gegen die Energie aufgetragenen Logarithmen der Zerfallskonstanten aller bekannten α -aktiven Kerne liegen in dem schraffiert gezeichneten Streifen.

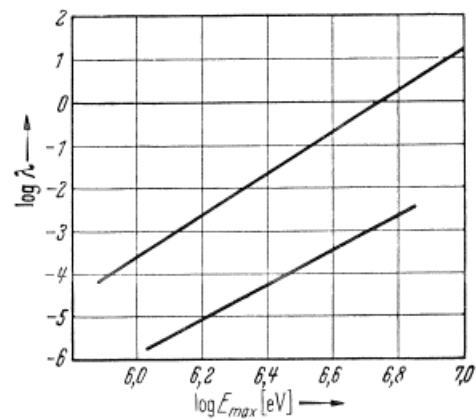


Abb. 133. SARGENT-Diagramm. Im doppelt-logarithmischen Maßstab liegen die gegen die Energie aufgetragenen Zerfallskonstanten der natürlich radioaktiven β -Strahler auf den beiden angedeuteten Kurven.

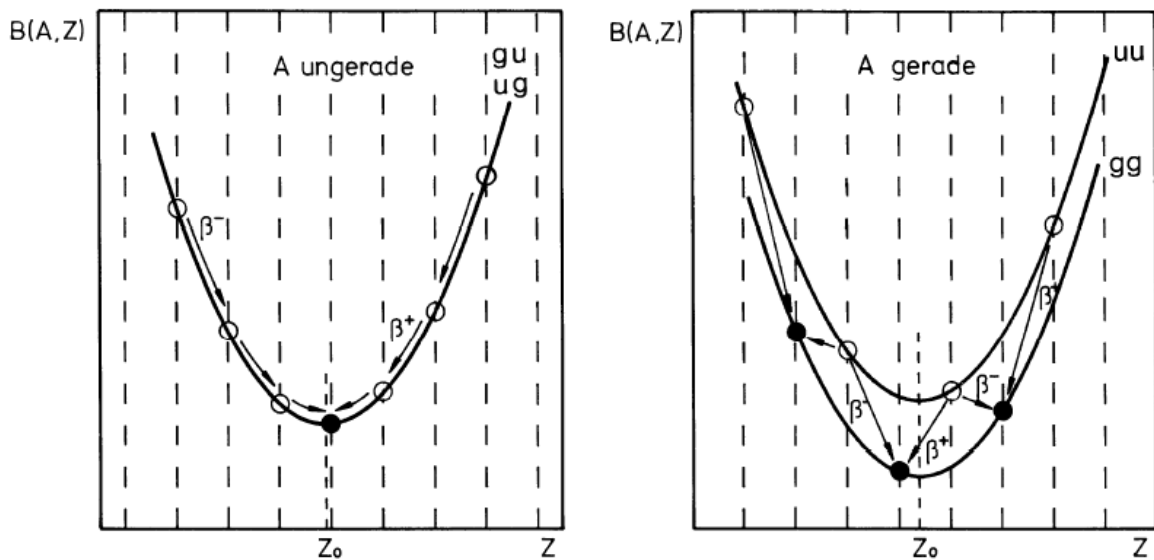


Fig. 3.6: Energieparabeln für isobare Kerne nach der Weizsäckerschen Bindungsenergieformel (Gl. 2.34). Links: Isobarenparabel für Kerne mit ungerader Massenzahl, also für ug- oder gu-Kerne, bei denen nur jeweils eine Nukleonenart ungepaart ist. Der Paarungsterm der Energieformel ist deshalb Null. Nach der Isobarenparabel existiert dann nur ein stabiles Nuklid. Rechts: Isobarenparabeln für uu- bzw. gg-Kerne, also Kerne mit gerader Massenzahl. Bei ihnen unterscheidet sich die absolute Lage der Parabeln um den doppelten Beitrag der Paarungsenergie. Es existieren also zwei energetisch übereinander liegende Parabeln und mehrere stabile Endnuklide. Aus der Grafik ist auch unmittelbar zu ersehen, warum einige gerade Nuklide alternativ über Betaminus- oder Betaplus-Umwandlung unter Energiegewinn zerfallen können.

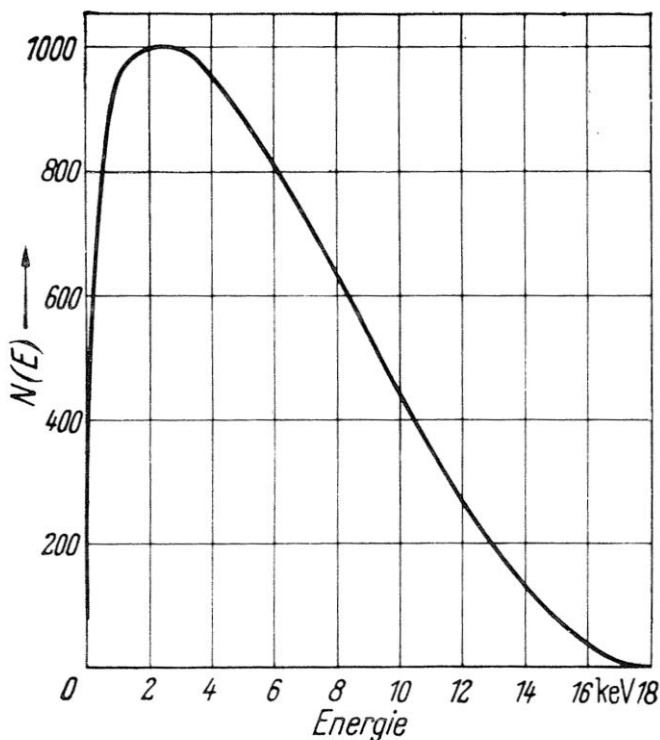
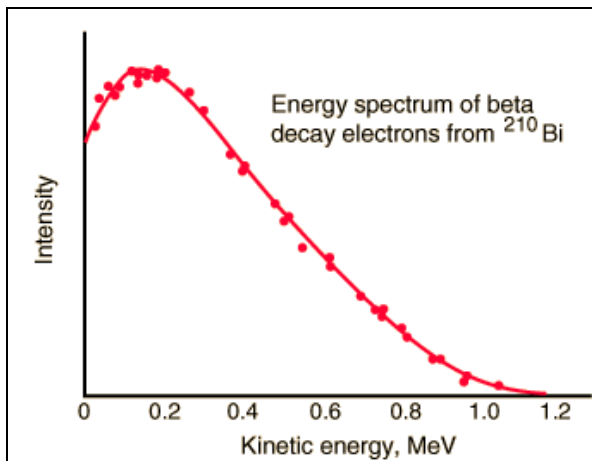


Abb. 131. Das kontinuierliche β -Spektrum des Tritiums ${}^3_1\text{H}$.



Typisches Energiespektrum eines Betastrahlers mit einfachem Betazerfall

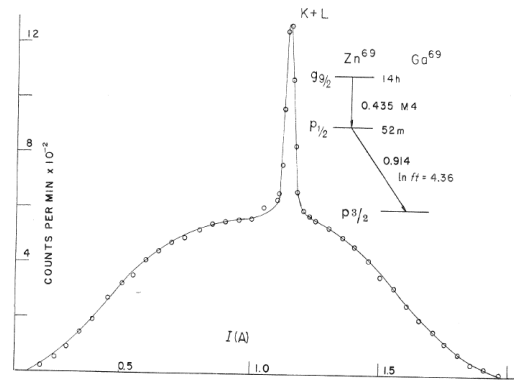
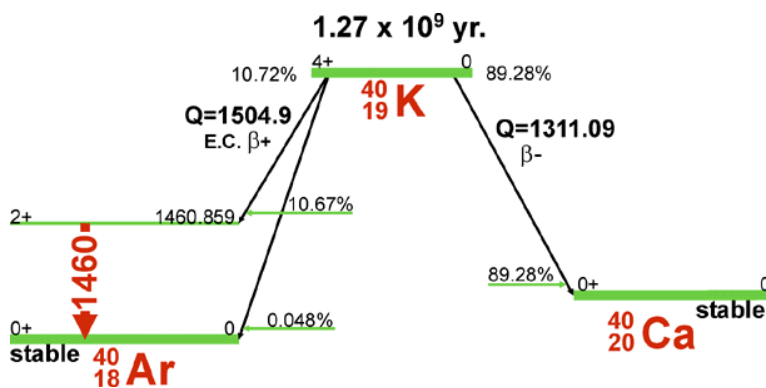


Fig. 10. Beta-ray spectrum of Zn^{69} showing conversion line

Impulsspektrum des ^{69}Zn mit Konversionselektronenlinie

Natürliche Isotope des Kalium					
Isotop	Hfgkt.	t _{1/2}	Zerfallsart	ZE (MeV)	ZP
³⁹ K	93,26 %	Stabil			
⁴⁰ K	0,012 %	1,277 · 10 ⁹ a	β− (89,28)	1,311	⁴⁰ Ca
			ε (10,72)	1,505	⁴⁰ Ar
			β+ (0.001)	1,505	⁴⁰ Ar
⁴¹ K	6,73 %	Stabil			
Dosisleistungskonstante: 2.11.10 ^{−2} mSv.m²/(h.GBq)					



Zerfallschema K-40
(Idaho National Laboratory)

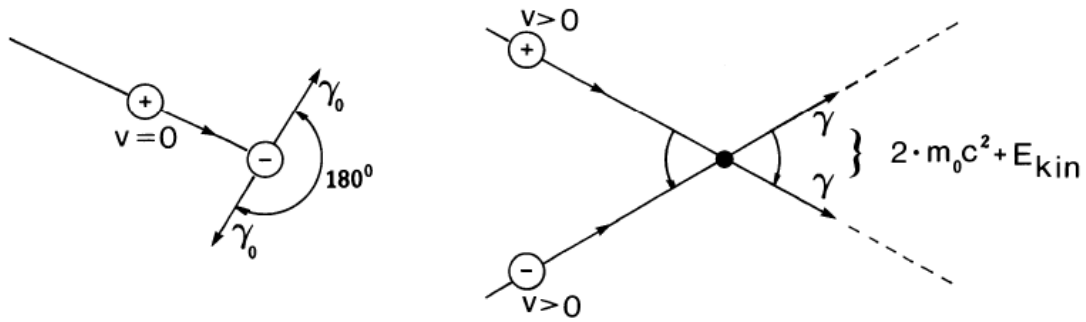


Fig. 3.11: Die Entstehung der Vernichtungsstrahlung bei der Vernichtung des Teilchen-Antiteilchenpaares Elektron-Positron. Die beiden 511-keV-Vernichtungsquanten werden, wenn Elektron und Positron unmittelbar vor der Vernichtung in Ruhe waren, unter 180° zueinander abgestrahlt. Dadurch wird der Impulserhaltung Rechnung getragen (Impuls vor und nach der Vernichtung ist Null, links). Die Energie der Vernichtungsquanten bei der Vernichtung in Ruhe entspricht der Ruheenergie der beiden Leptonen. Findet die Paarvernichtung im Fluge statt (rechts), ist die Emissionsrichtung der beiden Vernichtungsquanten entsprechend dem Impuls der Teilchen vor der Vernichtung nach vorne gerichtet. Die Summe der Photonenenergien erhöht sich um die Bewegungsenergie des Teilchenpaares vor der Vernichtung.

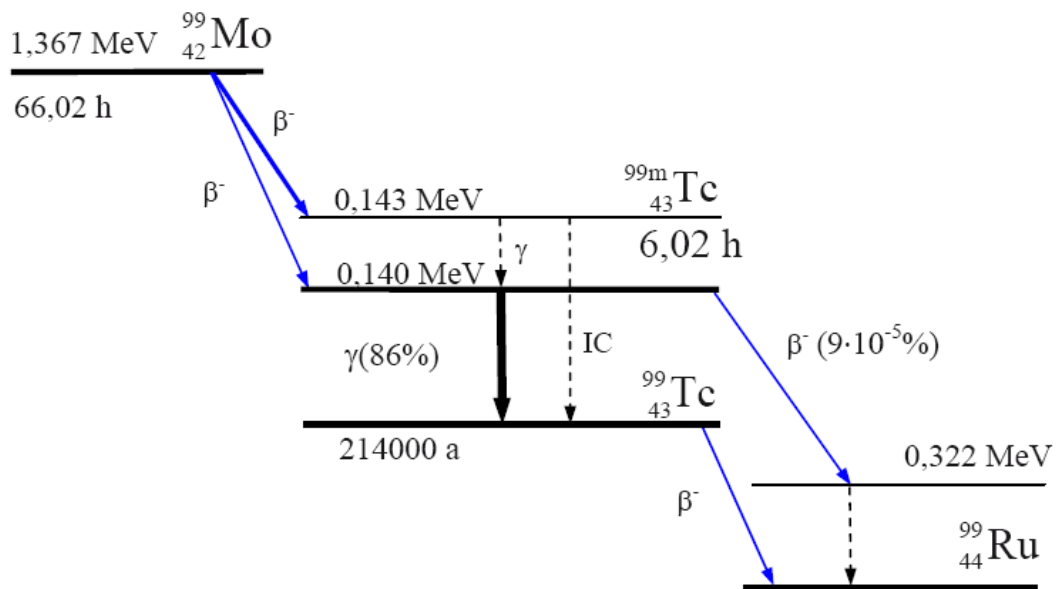


Fig. 3.16: Vereinfachtes Zerfallsschema des Molybdän-99. Es zerfällt mit 66,02 h Halbwertszeit in angeregte Zustände des Technetium-99. Die Betaübergänge bevölkern zu etwa 14% den Anregungszustand des ^{99}Tc bei 140 keV und zu ca. 86% den metastabilen Zustand $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Dieser hat eine Anregungsenergie von 143 keV und zerfällt über einen Zwischenzustand durch Gammaemission und Innere Konversion mit einer Halbwertszeit von 6,02 h in den instabilen Grundzustand des ^{99}Tc (β⁻-Zerfall in Ruthenium-99 mit der Halbwertszeit von 214000 a).

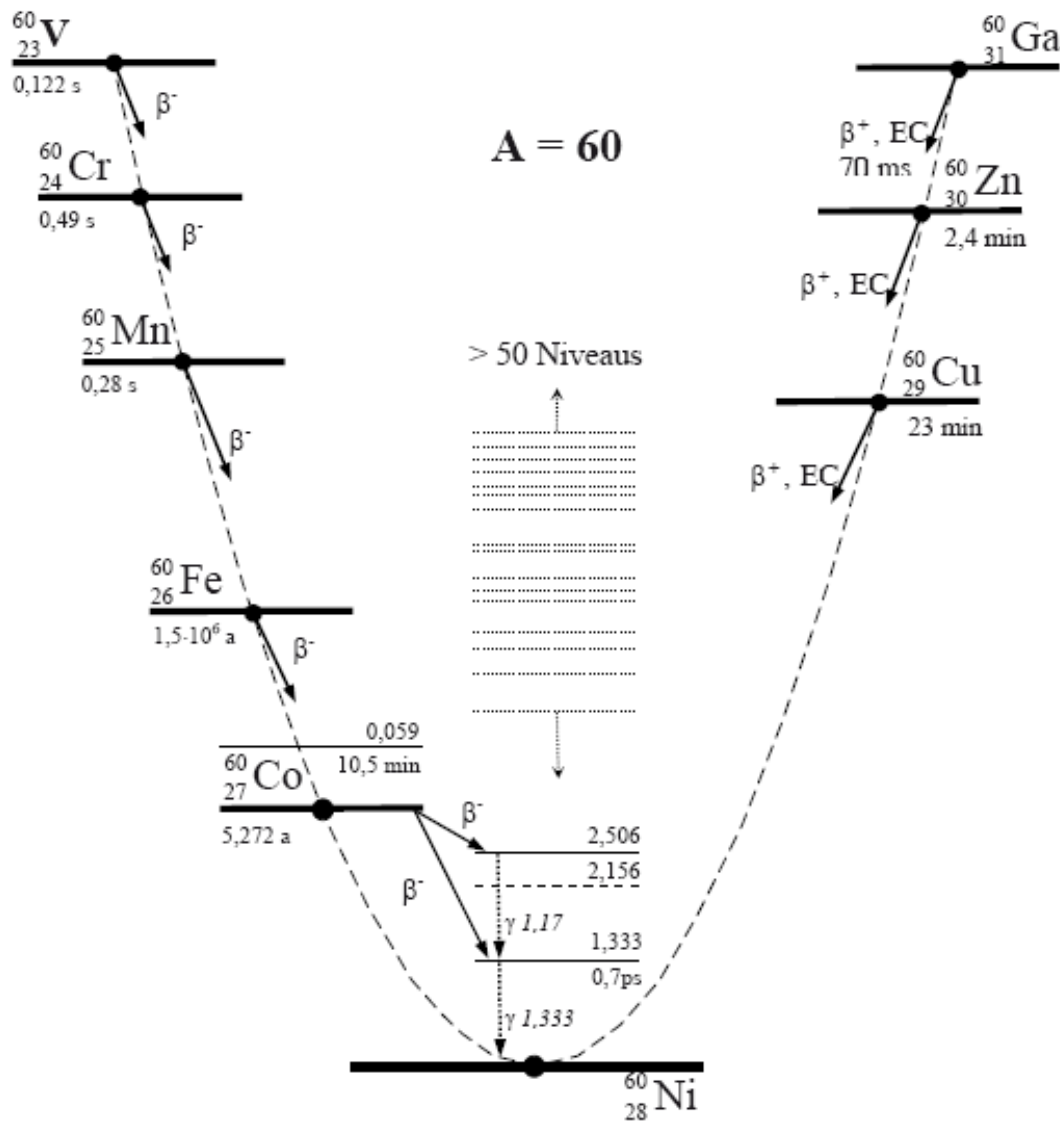


Fig. 3.14: Isobarenparabel für $A=60$ mit schematischem Termschema des stabilen Nuklids ^{60}Ni und Zerfall der zugehörigen isobaren Kerne ^{60}Cr , ^{60}Mn , ^{60}Fe , ^{60}Co , ^{60}Ga , ^{60}Zn und ^{60}Cu (vereinfacht nach [Lederer], [ICRP38], [Karlsruher Nuklidkarte]). β^+ -Umwandlungen sind auf der rechten Parabelseite, β^- -Umwandlungen auf der linken Seite der Isobarenparabel angezeigt. Die Zeitangaben an den Termschemata sind gerundete Halbwertszeiten und umfassen den Zeitbereich von $1,5 \cdot 10^6$ Jahren (^{60}Fe) bis zu den nahezu prompten Gammaübergängen in weniger als 1 ps (1,33 MeV-Niveau des ^{60}Ni). Die Energieangaben sind in MeV angegeben. Für das ^{60}Co sind im Energiebereich bis etwa 4 MeV über 70 Anregungszustände bekannt. Für das ^{60}Ni sind über 50 Niveaus bis zur Anregungsenergie von 5 MeV experimentell bestimmt. Sie sind in dieser Zeichnung nur schematisch angedeutet. Aus Darstellungsgründen sind außerdem die energetischen Abstände der einzelnen isobaren Grundzustände, insbesondere der des ^{60}Fe zum ^{60}Co gespreizt eingezeichnet. Letzterer beträgt tatsächlich nur etwa 0,14 MeV.

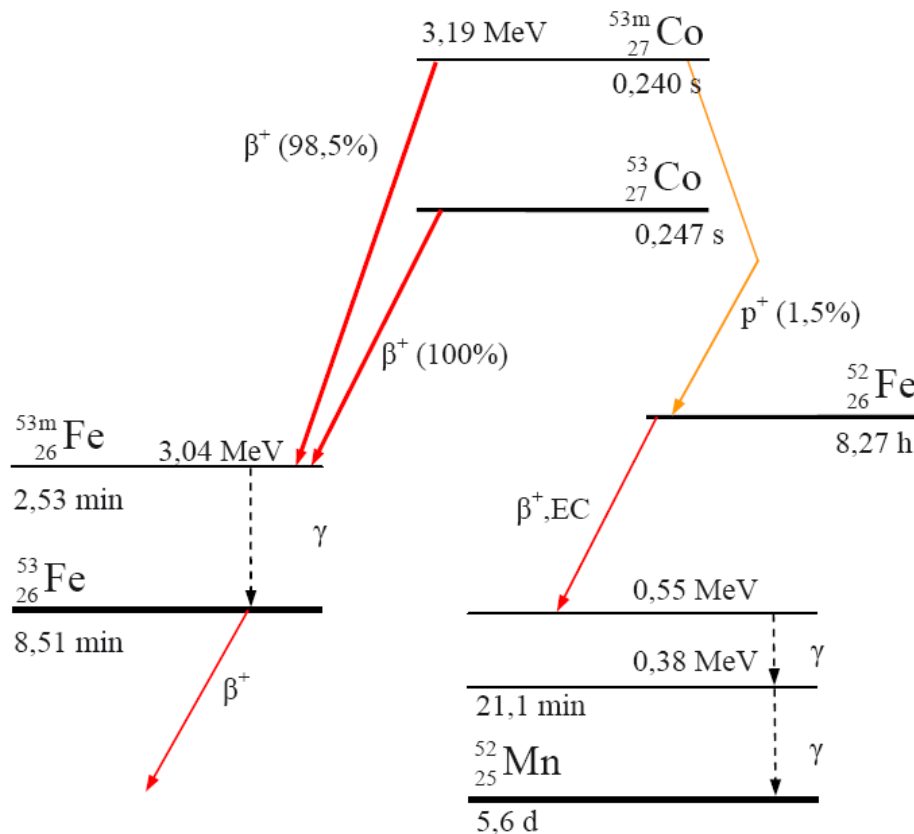


Fig. 3.18: Zerfallsschema des Positronen- und Protonenstrahlers ^{53}Co . Der instabile Grundzustand des ^{53}Co zerfällt zu nahezu 100%, der metastabile Anregungszustand $^{53\text{m}}\text{Co}$ zu 98,5% über einen β^+ -Zerfall in den instabilen Grundzustand des ^{53}Fe (Halbwertszeit 8,51 min). Daneben besteht mit 1,5% eine kleine Wahrscheinlichkeit für den metastabilen $^{53\text{m}}\text{Co}$ -Zustand, über Protonenemission in ^{52}Fe zu zerfallen. ^{52}Fe ist ebenfalls instabil (Halbwertszeit 8,27 h) und zerfällt über β^+ -Zerfall und Elektroneneinfang in angeregte Zustände des instabilen ^{52}Mn (Halbwertszeit 5,59 d).

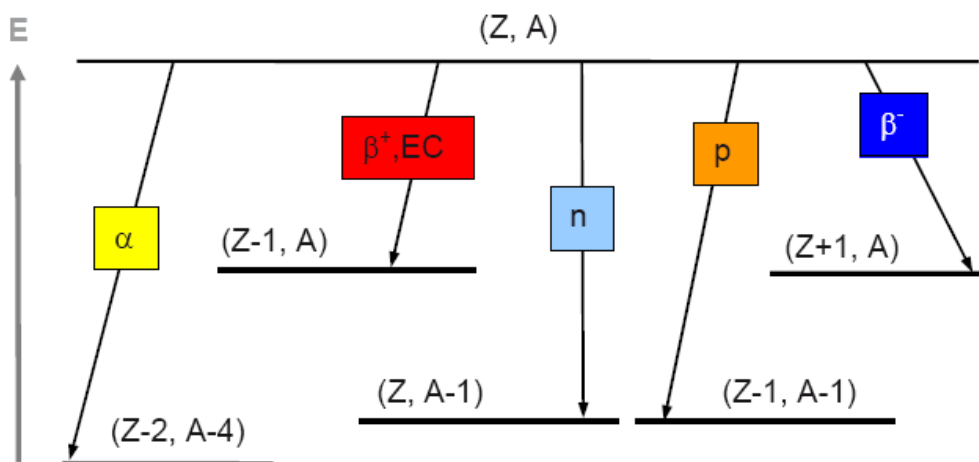
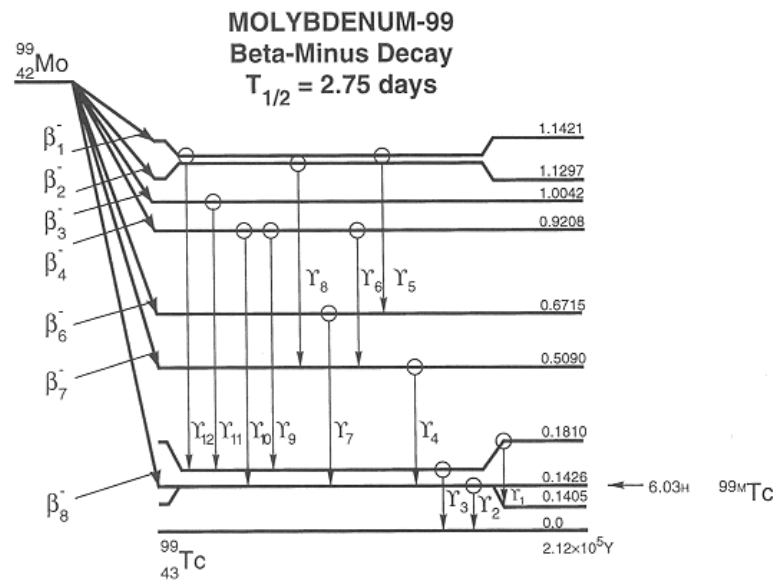
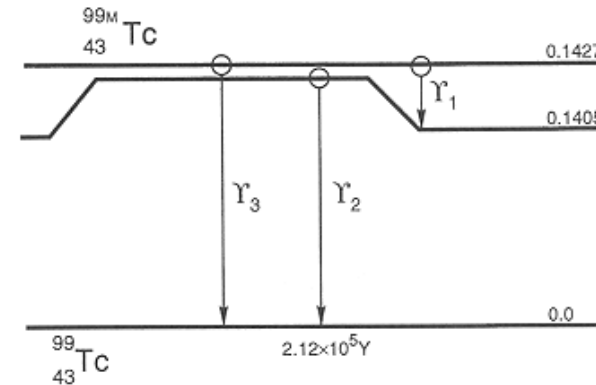


Fig. 3.3: Darstellung radioaktiver Umwandlungen mit Hilfe von Zerfallsschemata. Die vertikale Achse steht für die Energieskala, die wegen der bei radioaktiven Umwandlungen manchmal auftretenden großen Energiedifferenzen oft nicht maßstäblich ist. Betaminus-Zerfälle werden durch schräg nach rechts unten gerichtete Pfeile, Betaplus-Umwandlungen, Elektroneneinfang und Alphazerfälle durch schräg nach links gerichtete Pfeile dargestellt (s. Beispiele). Nach rechts weisen also die Übergänge für zunehmende Ordnungszahl der Tochterkerne, nach links alle Übergänge, bei denen die Ordnungszahl abnimmt. Die Farben entsprechen denen der Nuklidkarte.



Decay Data Table

		Mean	Mean Energy			Mean	Mean Energy
		Number per	per Particle			Number per	per Particle
Radiation		Disintegration	(MeV)	Radiation		Disintegration	(MeV)
Beta Minus	1	0.0012	0.0658	Gamma	4	0.0143	0.3664
Beta Minus	3	0.0014	0.1112	Gamma	5	0.0001	0.3807
Beta Minus	4	0.1850	0.1401	Gamma	6	0.0002	0.4115
Beta Minus	6	0.0004	0.2541	Gamma	7	0.0005	0.5289
Beta Minus	7	0.0143	0.2981	Gamma	8	0.0002	0.6207
Beta Minus	8	0.7970	0.4519	Gamma	9	0.1367	0.7397
Gamma	1	0.0130	0.0405	K Int Con Elect		0.0002	0.7186
K Int Con Elect		0.0428	0.0195	Gamma	10	0.0479	0.7782
L Int Con Elect		0.0053	0.0377	K Int Con Elect		0.0000	0.7571
M Int Con Elect		0.0017	0.0401	Gamma	11	0.0014	0.8231
Gamma	2	0.0564	0.1405	Gamma	12	0.0011	0.9610
K Int Con Elect		0.0058	0.1194	K Alpha-1 X-Ray		0.0253	0.0183
L Int Con Elect		0.0007	0.1377	K Alpha-2 X-Ray		0.0127	0.0182
Gamma	3	0.0657	0.1810	K Beta-1 X-Ray		0.0060	0.0206
K Int Con Elect		0.0085	0.1600	KLL Auger Elect		0.0087	0.0154
L Int Con Elect		0.0012	0.1782	KLX Auger Elect		0.0032	0.0178
M Int Con Elect		0.0004	0.1806	LMM Auger Elect		0.0615	0.0019
				MXY Auger Elect		0.1403	0.0004



Decay Data Table

Radiation		Mean Number per Disintegration	Mean Energy per Particle (MeV)
Gamma	1	0.0000	0.0021
M Int Con Elect		0.9860	0.0016
Gamma	2	0.8787	0.1405
K Int Con Elect		0.0913	0.1194
L Int Con Elect		0.0118	0.1377
M Int Con Elect		0.0039	0.1400
Gamma	3	0.0003	0.1426
K Int Con Elect		0.0088	0.1215
L Int Con Elect		0.0035	0.1398
M Int Con Elect		0.0011	0.1422
K Alpha-1 X-Ray		0.0441	0.0183
K Alpha-2 X-Ray		0.0221	0.0182
K Beta-1 X-Ray		0.0105	0.0206
KLL Auger Elect		0.0152	0.0154
KLX Auger Elect		0.0055	0.0178
LMM Auger Elect		0.1093	0.0019
MX Y Auger Elect		1.2359	0.0004



Tabelle: Kenndaten häufig verwendeter Radionuklide

Radionuklid (alphabetisch sortiert))	Halbwertszeit	$E_i(p_i \cdot 100)$ Teilchenenergie ^a in MeV (relative Ausbeute mal 100 in s ⁻¹ Bq ⁻¹) ^b	f_H $\frac{\mu\text{Sv} \cdot \text{cm}^2}{\text{h} \cdot \text{Bq}}$	Γ_γ $\frac{\text{mSv} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{GBq}}$	Γ_X / Z $\frac{\text{mSv} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{GBq}}$
Am-241	432,2 a	α : 5,388(1,6) 5,443(13) 5,486(84,5) 23L e : 0,037(33) 0,054(8,2) 0,058(3,4) 0,093(0,06) γ : 0,0263(2,4) 0,0595(35,9) 0,103(0,02) 0,335(0,0005) 0,722(0,0002) 33L	0,015	$7,30 \cdot 10^{-3}$	
Co-60	1925,3 d 5,2712 a	e, β^- : 0,318(99,88) 1,49(0,12) γ : 1,173(100) 1,332(100) 2,158(1,2 $\cdot 10^{-3}$) 2,505(2 $\cdot 10^{-6}$) 6L	1,1	0,354	
Cs-137+	30,13 a	e, β^-, γ : (wesentliche Energiekomponente der Tochter) 0,6617 (85) 6L	1,5	$9,25 \cdot 10^{-2}$	
H-3	12,33 a	β^- : 0,01858(100)	0,0	0	
K-40	1,277 Ga	e, β^- : 1,311(89,1) γ : 1,46(10,7) 1L	1,4	$2,11 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$
Kr-85	10,719 a	e, β^- : 0,687(99,6) γ : 0,514(0,43) 2L		$3,73 \cdot 10^{-4}$	
Na-22	950,5 d	e, β^+ : 0,546(90) γ^+ : 0,511(180) γ : 1,275(100) 3L	1,5	0,333	
Po-210	138,376 d	α : 5,304(100) 1L γ : 0,803(0,0012) 1L	$5,2 \cdot 10^{-7}$	$1,54 \cdot 10^{-6}$	
Pu-238	87,7 a	α : 5,357(0,1) 5,456(28,9) 5,499(70,9) 15L e : 0,022(21) 0,038(6) γ : 0,044(0,04) 0,1(7 $\cdot 10^{-3}$) 0,15(9 $\cdot 10^{-4}$) 0,77(2 $\cdot 10^{-5}$) 1,09(9 $\cdot 10^{-8}$) 35 L	0,0029	$8,39 \cdot 10^{-6}$	
Pu-239	24,11 ka	α : 5,105(11,9) 5,144(17) 5,156(71) 52L e : 0,046(1,7) γ : 0,039(0,01) 0,052(0,027) 0,129(0,006) 0,414(0,0015) 1,06(5 $\cdot 10^{-8}$) 178L	$8,1 \cdot 10^{-4}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$	
Ra-226+	1600 a	e, α, β^-, X : 0,075(7) 0,077(11) 0,053(41) γ : 0,242(7) 0,295(18) 0,35(35) 0,609(44,6) 0,77(5) 1,12(15) 1,24(6) 1,38(4) 1,41(2) 1,76(15) 2,2(5) 2,45(1,6) 319L	790	0,298	
Sr-90+	28,81 a	β^- : 0,519(0,012) 0,546(100) 2,280(99,98) γ : 2,186(1,4 $\cdot 10^{-6}$) 1L	3,0	$3,63 \cdot 10^{-9}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
Tl-204	1381 d	e, e, β^- : 0,764(97,1) X : 0,070(1,3) 0,081(0,4) 0,087(7 $\cdot 10^{-4}$) 9L	1,4	$2,44 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$
U-238	4,470 Ga	α : 4,151(21) 4,198(79) 3L e : 0,029(15) γ : 0,0496(0,06) 0,114(0,01) 6L	0,0019	$9,79 \cdot 10^{-5}$	

Legende zur Tabelle: Kenndaten häufig verwendeter Radionuklide

a häufigste oder wesentlich zum Energiespektrum beitragende Energiekomponente, letzter Energiewert ist jeweils die höchste (wesentliche) Teilchenenergie
b einige Linien sind schwerpunktmäßig zusammengefasst

α	Alphastrahlung	+	einschließlich der nachfolgenden Tochter-Radionuklide im Gleichgewicht
β^-, β^+	Betastrahlung	f_H	Dosisleistungsfaktor für eine oberflächliche Hautkontamination, umfasst Alpha-, Beta- und Photonenstrahlung (lokale Hautdosis)
γ	Gammastrahlung	Γ_γ	Dosisleistungskonstante, umfasst Gamma-, Vernichtungs- und Röntgenstrahlung mit Photonenenergien ≥ 20 keV
e	Konversionselektron	Γ_X / Z	Dosisleistungskonstante für externe Bremsstrahlung mit Photonenenergien ≥ 20 keV, bezogen auf die Ordnungszahl der die Betastrahlung „abbremsenden“ Substanz
ϵ	Elektroneneinfang		
γ^+	Vernichtungsstrahlung		
X	Röntgenstrahlung		

Datenquelle: [dun99, ptb00c, ssk00a]; Online-Datenbank: iaea, kaeri, lund, nist;

Zusammenstellung aus: Hans Gerrit Vogt, Heinrich Schultz:

Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes, 4., aktualisierte Auflage, 2007

Bezugsquelle: <http://www.hanser.de/buch.asp?isbn=978-3-446-40978-1&area=Technik>

Weitere Hinweise zum Strahlenschutz finden Sie auch beim ZSR im Internet:

<http://www.strahlenschutzkurse.de>