



Kernenergie Basiswissen





Informationskreis
KernEnergie

Kernenergie Basiswissen

Martin Volkmer

Herausgeber: Informationskreis KernEnergie
Robert-Koch-Platz 4
10115 Berlin

ISBN: 3-926956-44-5

Juni 2007

Alle Rechte vorbehalten.
Darf für Unterrichtszwecke vervielfältigt werden.

Titelbild: Arbeitstisch des Forschers und Nobelpreisträgers
Otto Hahn im Deutschen Museum in München

Inhalt

1 Das Atom			
1.1 Chemische Elemente und ihre kleinsten Teilchen	5	7.4 Druckdifferenz als Sicherheitsbarriere	59
1.2 Aufbau der Atomhülle und des Atomkerns	5	7.4.1 Unterdruckzonen	60
1.3 Eigenschaften der Kernkräfte	9	7.4.2 Personenschleuse	60
1.4 Massendefekt und Bindungsenergie	10	7.4.3 Wellendichtung und Sperrmedium	60
7.4.4 Kondensator		7.4.4 Kondensator	61
		7.5 Notkühlsystem	61
		7.6 Hypothetische Unfälle	62
2 Kernumwandlungen und Radioaktivität			
2.1 Alphastrahlen	13	8 Der Brennstoffkreislauf – die Ver- und Entsorgung eines Kernkraftwerks	
2.2 Betastrahlen	13	8.1 Der Brennstoffkreislauf	65
2.3 Gammastrahlen	14	8.1.1 Uranvorkommen	66
2.4 Der Elektroneneinfang	15	8.1.2 Urangewinnung	66
2.5 Protonen- und Neutronenstrahlen	15	8.1.3 Anreicherung von Uran-235	66
2.6 Halbwertzeit	16	8.1.4 Herstellung von Brennelementen	66
2.7 Aktivität und spezifische Aktivität	18	8.1.5 Entladen der Brennelemente aus dem Reaktor	67
		8.1.6 Wiederaufarbeitung	68
		8.1.7 Direkte Endlagerung	70
		8.1.8 Konditionierung radioaktiver Abfälle	70
		8.1.9 Endlagerung	71
		8.2 Transporte im Brennstoffkreislauf	71
		8.3 Behandlung radioaktiver Betriebsabfälle in einem Kernkraftwerk	73
		8.3.1 Behandlung gasförmiger Reaktorbetriebsabfälle	73
		8.3.2 Behandlung flüssiger Reaktorbetriebsabfälle	74
		8.3.3 Behandlung fester Reaktorbetriebsabfälle	74
3 Das Wesen der Energie			
3.1 Energiearten und Energieumwandlungen	20	9 Strahlennutzung und die Strahlenexposition des Menschen	
3.2 Energieumwandlungen bei Kohlekraftwerk und Kernkraftwerk	20	9.1 Ionisationskammer	75
3.3 Beschreibung der Wärme im Teilchenmodell	21	9.2 Energiedosis	75
3.4 Energieeinheit Elektronvolt	23	9.3 Organdosis	76
3.5 Energie der Teilchenstrahlung	23	9.4 Effektive Dosis	77
3.5.1 Alphateilchen	23	9.5 Folgedosis	77
3.5.2 Betateilchen	24	9.6 Somatische und genetische Schäden	77
3.5.3 Neutronen	24	9.7 Natürliche Strahlenexposition des Menschen	79
3.6 Energie und Wellenlänge der Gammastrahlen	26	9.7.1 Kosmische Strahlung und durch sie erzeugte Radionuklide	79
3.7 Erzeugung von Wärme durch radioaktive Stoffe	26	9.7.2 Terrestrische Strahlung	79
		9.7.3 Eigenstrahlung des Körpers	81
		9.7.4 Gesamtbetrag der natürlichen Strahlenexposition	81
		9.8 Zivilisatorisch bedingte Strahlenexposition des Menschen	81
		9.8.1 Strahlenexposition durch Anwendung ionisierender Strahlen und radioaktiver Stoffe in der Medizin	82
		9.8.2 Strahlenexposition durch den Reaktorunfall von Tschernobyl	82
		9.8.3 Strahlenexposition durch Kernwaffentests	83
		9.8.4 Strahlenexposition durch Flugverkehr	84
		9.8.5 Strahlenexposition durch Bildschirmgeräte	84
		9.8.6 Strahlenexposition durch Kernkraftwerke	84
		9.9 Zusammenfassung der Strahlenexposition	85
4 Kernspaltung und Kettenreaktion			
4.1 Entdeckung der Kernspaltung	27	10 Übungsaufgaben zu den Kapiteln 1 - 9	
4.2 Kernspaltung und Spaltprodukte	27	10.1 Das Atom	86
4.3 Energiebilanz bei der Kernspaltung	30	10.2 Kernumwandlungen und Radioaktivität	87
4.4 Kettenreaktion im Uran-235	31	10.3 Das Wesen der Energie	88
4.5 Erzeugung von Plutonium-239 und von Uran-233	33	10.4 Kernspaltung und Kettenreaktion	89
5 Kontrollierte Kernspaltung		10.5 Kontrollierte Kernspaltung	90
5.1 Aufbau eines Kernreaktors	35	10.6 Kernkraftwerke	92
5.2 Spaltneutronen	35	10.7 Sicherheitseinrichtungen bei Kernkraftwerken	93
5.3 Moderator	37	10.8 Der Brennstoffkreislauf – die Ver- und Entsorgung eines Kernkraftwerks	95
5.4 Temperaturabhängigkeit des Moderatoreffekts	38	10.9 Strahlennutzung und die Strahlenexposition des Menschen	96
5.5 Steuerung der Kettenreaktion	39	10.10 Lösungen zu den Übungsaufgaben	98
5.6 Homogener und heterogener Reaktor	41		
5.7 Verfahren zur Anreicherung von U-235	41		
5.8 Naturreaktor von Oklo	42		
6 Kernkraftwerke			
6.1 Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor (Beispiel: Kernkraftwerk Krümmel)	44	Sachwortverzeichnis	99
6.2 Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor (Beispiel: Kernkraftwerk Brokdorf)	45		
6.3 Kernkraftwerk mit Schnellem Brutreaktor	45		
6.4 Kernkraftwerk mit Thorium-Hochtemperaturreaktor (Beispiel: THTR-300)	48		
6.5 Kernkraftwerk mit Siedewasser-Druckröhrenreaktor (Beispiel: RBMK 1000)	50		
7 Sicherheitseinrichtungen bei Kernkraftwerken			
7.1 Strahlenquellen in einem Kernkraftwerk	52		
7.2 Grundlegendes Sicherheitskonzept	52		
7.3 Sicherheitsbarrieren gegen das Austreten radioaktiver Stoffe	55		
7.3.1 Brennstab	56		
7.3.2 Reaktordruckgefäß	57		
7.3.3 Sicherheitsbehälter	57		
7.3.4 Rückhalteinrichtungen für flüssige und gasförmige radioaktive Stoffe (Beispiel für einen Siedewasserreaktor)	58		
7.3.5 Kontrollierte Abgabe radioaktiver Stoffe	59		



1 Das Atom

1.1 Chemische Elemente und ihre kleinsten Teilchen

Zurzeit sind 117 chemische Elemente (Tab. 1-1) bekannt. Alle Elemente mit der Ordnungszahl 95 und höher sind künstlich hergestellt. Einige Elemente – Technetium, Promethium, Astat, Neptunium und Plutonium – wurden zuerst künstlich hergestellt und erst danach auch ihr natürliches Vorkommen nachgewiesen.

In der Erdkruste einschließlich Wasser und Luft sind Sauerstoff (49,2 %), Silizium (25,7 %) und Aluminium (7,5 %) die häufigsten Elemente. Der Mensch besteht im Wesentlichen aus Sauerstoff (65 %), Kohlenstoff (18 %) und Wasserstoff (10 %) (Angaben in Gewichtsprozent).

Die kleinsten Teilchen der chemischen Elemente werden Atome genannt. Die kleinsten Teilchen des Wasserstoffs, Kohlenstoffs oder Urans, die noch die charakteristischen Eigenschaften dieser Elemente besitzen, nennt man also Wasserstoffatome, Kohlenstoffatome bzw. Uranatome.

Der Durchmesser der Atome beträgt etwa 10^{-7} mm. Erst 10 Millionen Atome aneinander gereiht ergeben etwa 1 mm. Die Atome sind also für das menschliche Auge unsichtbar. Mit speziellen Mikroskopen ist es aber gelungen, sie schemenhaft zu erkennen. In Abb. 1.1 (Quelle: Bergman/Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Band III, 8. Auflage, Walter de Gruyter, 1987) zeigen die dunklen Flecken die Stellen an, an denen sich die einzelnen Atome eines größeren Moleküls befinden. Über den inneren Aufbau der Atome gibt es keine mikroskopischen Aufnahmen.

Um dennoch eine Vorstellung über den inneren Aufbau zu erhalten, hat man Modelle entwickelt. Es sind anschauliche Bilder, mit denen Beobachtungen und Messergebnisse in übersichtlicher Weise beschrieben und gedeutet werden. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass Modelle immer nur

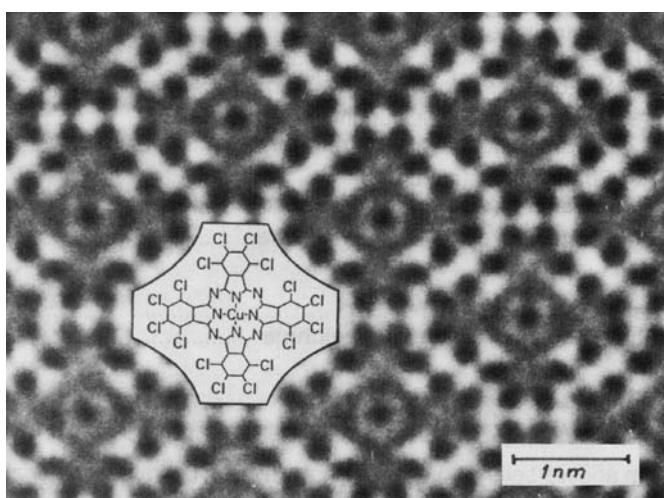


Abb. 1.1: Atome in einem Kupfer-Chlor-Phthalocyanin-Kristall

einen Teil der Erfahrungstatsachen beschreiben können. Nach einem im Wesentlichen von Rutherford und Bohr zu Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelten Modell besteht das Atom aus einem sehr kleinen Kern, in dem fast die gesamte Masse vereinigt ist, und einer Hülle.

Der Kern baut sich aus elektrisch positiv geladenen Protonen (p^+) und elektrisch neutralen Neutronen (n) auf. Sie werden auch als Kernteilchen oder Nukleonen bezeichnet. Die Atome eines jeden Elements haben in ihren Kernen jeweils eine charakteristische Anzahl von Protonen (Tab. 1-1). Jedes Element wird also durch die Protonenzahl eindeutig bestimmt. Bis zum Element Calcium (20 Protonen) stimmt die Protonenzahl etwa mit der Neutronenzahl überein, von da ab überwiegt die Anzahl der Neutronen.

In der Atomhülle befinden sich in der Regel ebenso viel negativ geladene Elektronen (e^-) wie im Kern Protonen vorhanden sind. Da das Elektron eine negative Elementarladung und das Proton eine positive Elementarladung trägt, gleichen sich die Ladungen aus. Das Atom ist dann nach außen elektrisch neutral. Verliert ein Atom ein Elektron aus seiner Hülle, überwiegen die positiven Ladungen im Kern (positives Ion). Nimmt ein Atom ein weiteres Elektron in seine Hülle auf, überwiegen die negativen Ladungen (negatives Ion) (Abb. 1.2).

1.2 Aufbau der Atomhülle und des Atomkerns

Die in einem Kern vorhandenen Protonen müssten sich eigentlich aufgrund ihrer positiven Ladungen gegenseitig abstoßen und dadurch den Kern zum Zerplatzen bringen. Da aber stabile Atomkerne mit z.T. recht vielen Protonen existieren, kann daraus geschlossen werden, dass es andere Kräfte geben muss, die die Kernteilchen aneinander binden. Diese anziehenden Kernkräfte sind stärker als die im Kern wirkenden abstoßenden elektrischen Kräfte.

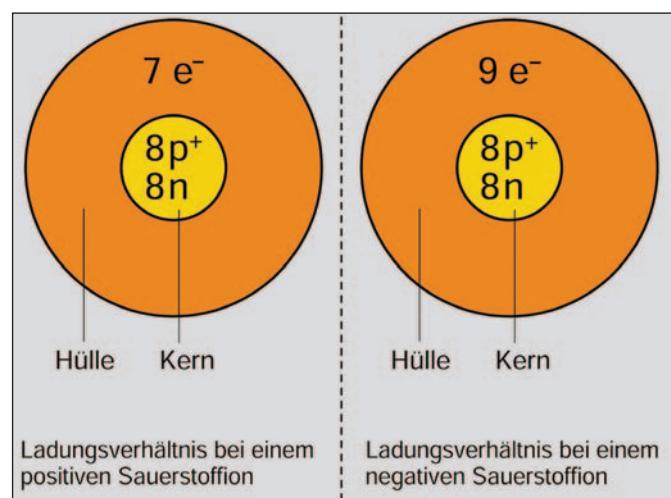


Abb. 1.2: Ladungsverhältnisse bei Ionen (Kerne übertrieben groß dargestellt)

Element	Symbol	Ordnungszahl	Element	Symbol	Ordnungszahl	Element	Symbol	Ordnungszahl
Wasserstoff	H	1	Zirkonium	Zr	40	Gold	Au	79
Helium	He	2	Niob	Nb	41	Quecksilber	Hg	80
Lithium	Li	3	Molybdän	Mo	42	Thallium	Tl	81
Beryllium	Be	4	Technetium	Tc	43	Blei	Pb	82
Bor	B	5	Ruthenium	Ru	44	Wismut	Bi	83
Kohlenstoff	C	6	Rhodium	Rh	45	Polonium	Po	84
Stickstoff	N	7	Palladium	Pd	46	Astat	At	85
Sauerstoff	O	8	Silber	Ag	47	Radon	Rn	86
Fluor	F	9	Cadmium	Cd	48	Francium	Fr	87
Neon	Ne	10	Indium	In	49	Radium	Ra	88
Natrium	Na	11	Zinn	Sn	50	Actinium	Ac	89
Magnesium	Mg	12	Antimon	Sb	51	Thorium	Th	90
Aluminium	Al	13	Tellur	Te	52	Protactinium	Pa	91
Silizium	Si	14	Iod	I	53	Uran	U	92
Phosphor	P	15	Xenon	Xe	54	Neptunium	Np	93
Schwefel	S	16	Cäsium	Cs	55	Plutonium	Pu	94
Chlor	Cl	17	Barium	Ba	56	Americium	Am	95
Argon	Ar	18	Lanthan	La	57	Curium	Cm	96
Kalium	K	19	Cer	Ce	58	Berkelium	Bk	97
Calcium	Ca	20	Praseodym	Pr	59	Californium	Cf	98
Scandium	Sc	21	Neodym	Nd	60	Einsteinium	Es	99
Titan	Ti	22	Promethium	Pm	61	Fermium	Fm	100
Vanadium	V	23	Samarium	Sm	62	Mendelevium	Md	101
Chrom	Cr	24	Europium	Eu	63	Nobelium	No	102
Mangan	Mn	25	Gadolinium	Gd	64	Lawrencium	Lw	103
Eisen	Fe	26	Terbium	Tb	65	Rutherfordium	Rf	104
Kobalt	Co	27	Dysprosium	Dy	66	Dubnium	Db	105
Nickel	Ni	28	Holmium	Ho	67	Seaborgium	Sb	106
Kupfer	Cu	29	Erbium	Er	68	Bohrium	Bh	107
Zink	Zn	30	Thulium	Tm	69	Hassium	Hs	108
Gallium	Ga	31	Ytterbium	Yb	70	Meitnerium	Mt	109
Germanium	Ge	32	Lutetium	Lu	71	Darmstadtium	Ds	110
Arsen	As	33	Hafnium	Hf	72	Roentgenium	Rg	111
Selen	Se	34	Tantal	Ta	73	Entdeckung veröffentlicht; offizielle Bestätigung und Namensgebung steht noch aus.	112	
Brom	Br	35	Wolfram	W	74		113	
Krypton	Kr	36	Rhenium	Re	75		114	
Rubidium	Rb	37	Osmium	Os	76		115	
Strontium	Sr	38	Iridium	Ir	77		116	
Yttrium	Y	39	Platin	Pt	78		118	

Tab. 1-1: Tabelle der chemischen Elemente, nach der Kernladungszahl (Protonenzahl) geordnet

In der Atomhülle befinden sich negativ geladene Elektronen. Elektronen und Protonen müssten sich aufgrund ihrer unterschiedlichen elektrischen Ladungen anziehen, die Hüllenelektronen also auf den Kern fallen. Da das aber nicht eintritt, ist anzunehmen, dass auch hier andere Kräfte wirksam sind. Sie sorgen dafür, dass Kern und Hülle nicht aufeinander fallen.

Um ein Elektron aus der Atomhülle abzutrennen, benötigt man Energie. Dabei zeigt sich, dass für die einzelnen Elektronen einer Hülle unterschiedlich viel Energie aufgewendet werden muss. Die Elektronen sind also unterschiedlich fest an den Kern gebunden bzw. sie besitzen gegenüber dem Atomkern unterschiedliche Energie. Diese Energiewerte der Elektronen unterscheiden sich aber nicht kontinuierlich, sondern stufenartig voneinander (Energieniveaus). Um diese Tatsache im Modell zu veranschaulichen, weist man den einzelnen Elektronen bestimmte Bahnen bzw. Schalen zu, die um den Kern angeordnet sind (K-, L-, M-, N-, O-, P- und Q-Schale, am Kern beginnend) (Abb. 1.3).

Elektronen mit geringerer Energie und damit festerer Bindung an den Kern werden auf kernnahen Bahnen oder Schalen gezeichnet, Elektronen mit größerer Energie und damit weniger fester Bindung an den Kern auf kernferneren Bahnen oder Schalen. Diese Bahnen oder Schalen existieren nicht wirklich. Es sind lediglich Hilfsvorstellungen zur Veranschaulichung der unterschiedlichen Energieniveaus. Das Größenverhältnis von Atomhülle zu Atomkern ist bemerkenswert. Der Durchmesser der Hülle beträgt etwa 10^{-10} m, der Durchmesser des Kerns etwa 10^{-14} m. Der Kern ist also etwa 10.000-mal kleiner als die Hülle. Zur Veranschaulichung dieses Verhältnisses kann man das Atom in Gedanken auf das 10^{12} -fache vergrößern. Die Hülle hätte dann einen Durchmesser von 100 m, der Kern wäre aber nur 1 cm groß (Abb. 1.4).

Proton und Neutron haben fast die gleiche Masse. Die Masse des Elektrons beträgt aber nur $1/1.836$ der Masse des Protons. Das ist ein so geringer Betrag, dass man ihn bei Betrachtung der Atommassen vernachlässigen kann. Praktisch ist die gesamte Masse eines Atoms in seinem Kern vereinigt (Tab. 1-2).

Da fast die gesamte Masse eines Atoms in seinem Kern vereinigt ist, besteht die Materie also überwiegend aus fast leerem Raum. Selbst bei festen Körpern ist nur ein verschwindend kleiner Volumenanteil von Materie erfüllt.

Wenn man die Atome eines großen Ozeandampfers in Gedanken so zusammenpresst, dass sich die Elektronen dicht an den Atomkernen befinden, erhielte man nur eine winzige Menge an Materie in der Größe eines Stecknadelkopfes. Die Masse des Ozeandampfers würde aber erhalten bleiben.

Die Massen von Proton und Neutron liegen im Bereich von 10^{-27} kg. Da das Rechnen mit so kleinen Werten ungünstig ist, gibt man zur Beschreibung der Masse eines Atomkerns lediglich an, wie viele Protonen und Neutronen er enthält. Das ist seine Massenzahl.

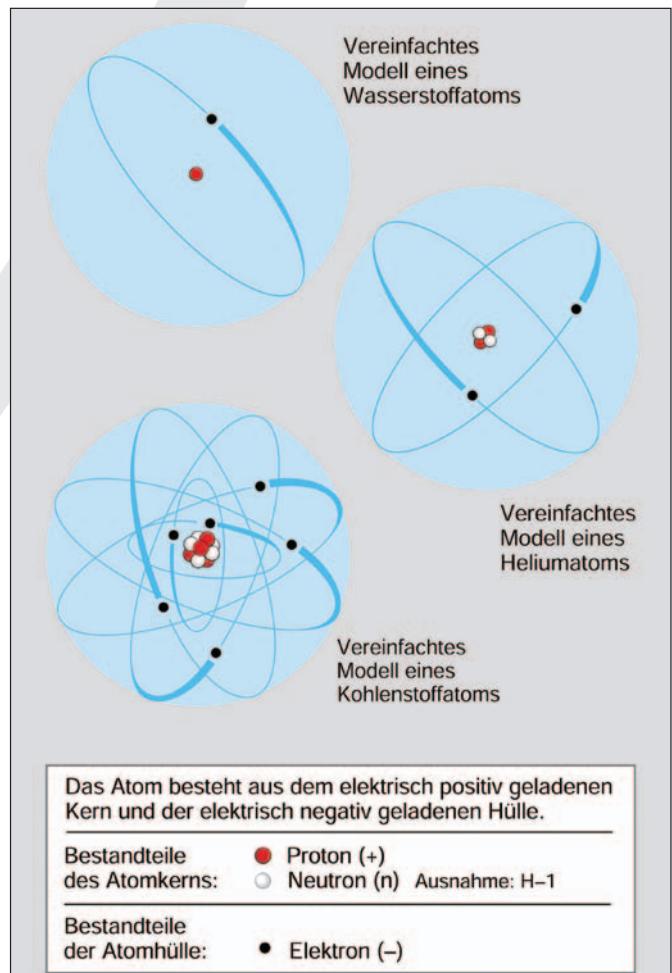


Abb. 1.3: Atome in vereinfachter Modelldarstellung

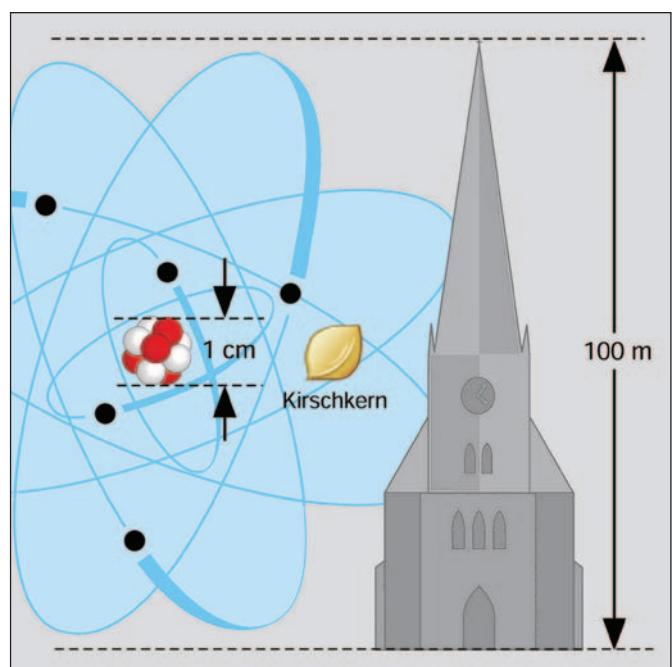


Abb. 1.4: Größenverhältnis in einem Atom (Atomhülle zu Atomkern wie Kirchturm zu Kirschkern)

Elementarteilchen	Masse (Ruhemasse)		Ladung	
	in kg	in Elektronenmassen	in Coulomb	in Elementarladungen
Elektron	$9,10938 \cdot 10^{-31}$	1	$-1,6022 \cdot 10^{-19}$	- 1
Proton	$1,67262 \cdot 10^{-27}$	1.836,15	$1,6022 \cdot 10^{-19}$	+ 1
Neutron	$1,67493 \cdot 10^{-27}$	1.838,68	0	0

Tab. 1-2: Masse und elektrische Ladung der drei wichtigsten Elementarteilchen

Neben der Masse ist die elektrische Ladung die zweite wichtige Eigenschaft des Atomkerns. Jedes Proton besitzt die kleinste bisher nachgewiesene positive Ladungsmenge, die deshalb auch Elementarladung genannt wird. Die Anzahl der Protonen ist also gleich der Anzahl der Elementarladungen. Das wird durch die Kernladungszahl beschrieben. Sie entspricht der Ordnungszahl der chemischen Elemente.

Zur Kennzeichnung des Kernaufbaus wird die Massenzahl (Anzahl der Protonen und Neutronen) oben links, die Kernladungszahl (Anzahl der Protonen) unten links neben das chemische Symbol gesetzt (Tab. 1-3 und Abb. 1.5).

Für die Elementarteilchen gilt:



Eine Atomart, die durch Protonenzahl und Neutronenzahl charakterisiert ist, wird als Nuklid bezeichnet.

Kern eines Heliumatoms	Kern eines Kohlenstoffatoms	Kern eines Uranatoms
${}^4_2 He$	${}^{12}_6 C$	${}^{235}_{92} U$
Massenzahl: 4 Kernladungszahl: 2	Massenzahl: 12 Kernladungszahl: 6	Massenzahl: 235 Kernladungszahl: 92

Tab. 1-3: Kennzeichnung des Kernaufbaus

Die Atome eines Elements können bei gleicher Protonenzahl eine unterschiedliche Neutronenzahl besitzen. Solche Atome mit gleicher Kernladungszahl (Ordnungszahl), aber mit unterschiedlicher Massenzahl, bezeichnet man als Isotope. Sie unterscheiden sich nicht in ihren chemischen, wohl aber in ihren kernphysikalischen Eigenschaften.

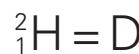
Da es von jedem der 117 Elemente zahlreiche Isotope gibt, existieren insgesamt rund 2.950 Nuklide. Davon sind 257 stabil, alle anderen zerfallen spontan, d. h. sie sind radioaktiv. Man nennt sie deshalb Radionuklide.

Proton, Neutron und Elektron gehören zu den Elementarteilchen. Es sind kleinste Teilchen, aus denen sich die Materie aufbaut oder die beim radioaktiven Zerfall entstehen, bei der kosmischen Strahlung auftreten bzw. durch Kernreaktionen künstlich erzeugt werden können. Elementarteilchen stellen keine unwandelbaren Gebilde dar, sondern können auf verschiedene Weise umgewandelt, erzeugt und vernichtet werden.

Im natürlichen Wasserstoff treten drei Isotope auf (Abb. 1.6):



Wasserstoff, leichter Wasserstoff
Der Kern besteht aus einem Proton (${}^1_1 p$).



Schwerer Wasserstoff oder Deuterium (D)
Der Kern besteht aus einem Proton und einem Neutron; er wird auch Deuteron genannt.

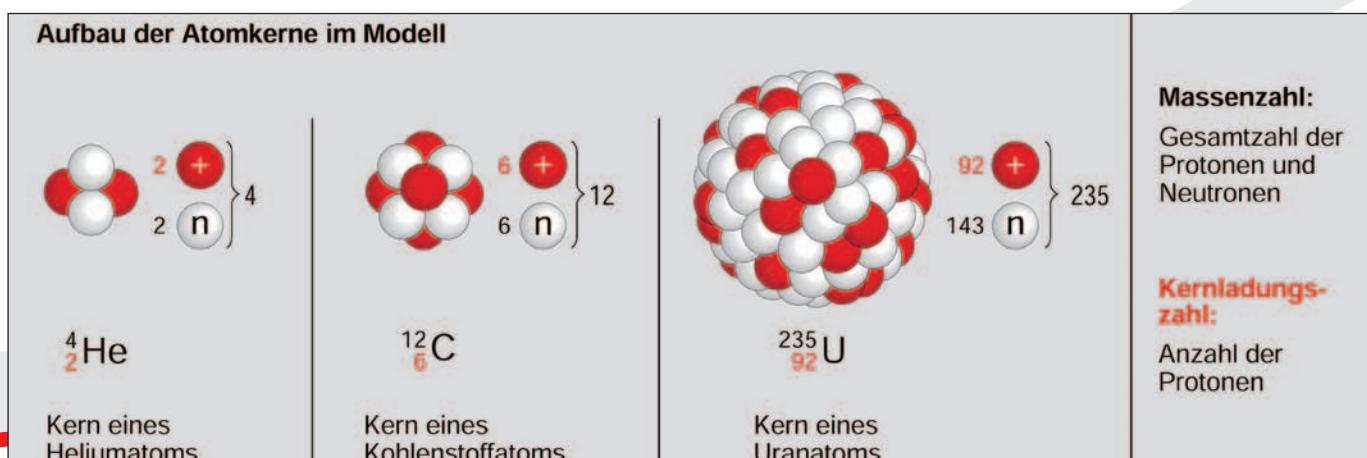


Abb. 1.5: Atomkerne im Modell

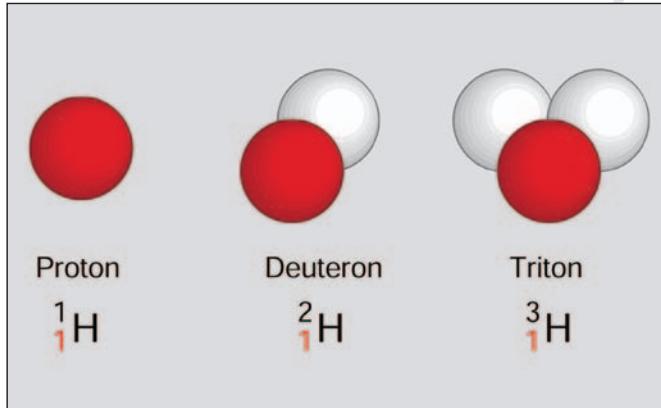
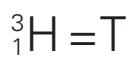


Abb. 1.6: Die Kerne der Wasserstoffisotope (Modelldarstellung)

kleinste Mengen



Überschwerer Wasserstoff oder Tritium (T)

Der Kern besteht aus einem Proton und zwei Neutronen und heißt Triton. Tritium wird in den oberen Schichten der Atmosphäre durch die kosmische Strahlung ständig neu gebildet und entsteht auch in Kernkraftwerken. Tritium ist radioaktiv.

Ein Wassermolekül, das z.B. die Wasserstoffisotope H-1 und H-3 (T) enthält, wird deshalb HTO abgekürzt. Enthält das Molekül nur das Isotop H-2, kürzt man es D_2O ab.

Abb. 1.7 gibt für die ersten zehn Elemente des Periodensystems die Isotope an.

Da die Kernladungszahl für jedes Element festliegt, die Massenzahl aber verschieden sein kann, wird bei einer abgekürzten Schreibweise lediglich die Massenzahl rechts neben den Namen oder das Symbol des betreffenden Elements geschrieben, z.B.: H-3, He-4, C-12, U-235, U-238.

1.3 Eigenschaften der Kernkräfte

In den Atomkernen werden Protonen und Neutronen auf kleinstem Raum zusammengehalten. Das bewirken sehr starke Kernkräfte, die den abstoßenden Kräften zwischen den positiv geladenen Protonen entgegenwirken.

Die Kernkräfte F_k haben eine sehr geringe Reichweite. Erst wenn die Kernteilchen so dicht beieinander liegen, dass sie sich fast berühren, beginnen die Kräfte zu wirken. Es ist so ähnlich wie bei klebrigen Bonbons, die erst aneinander haften, wenn sie sich berühren.

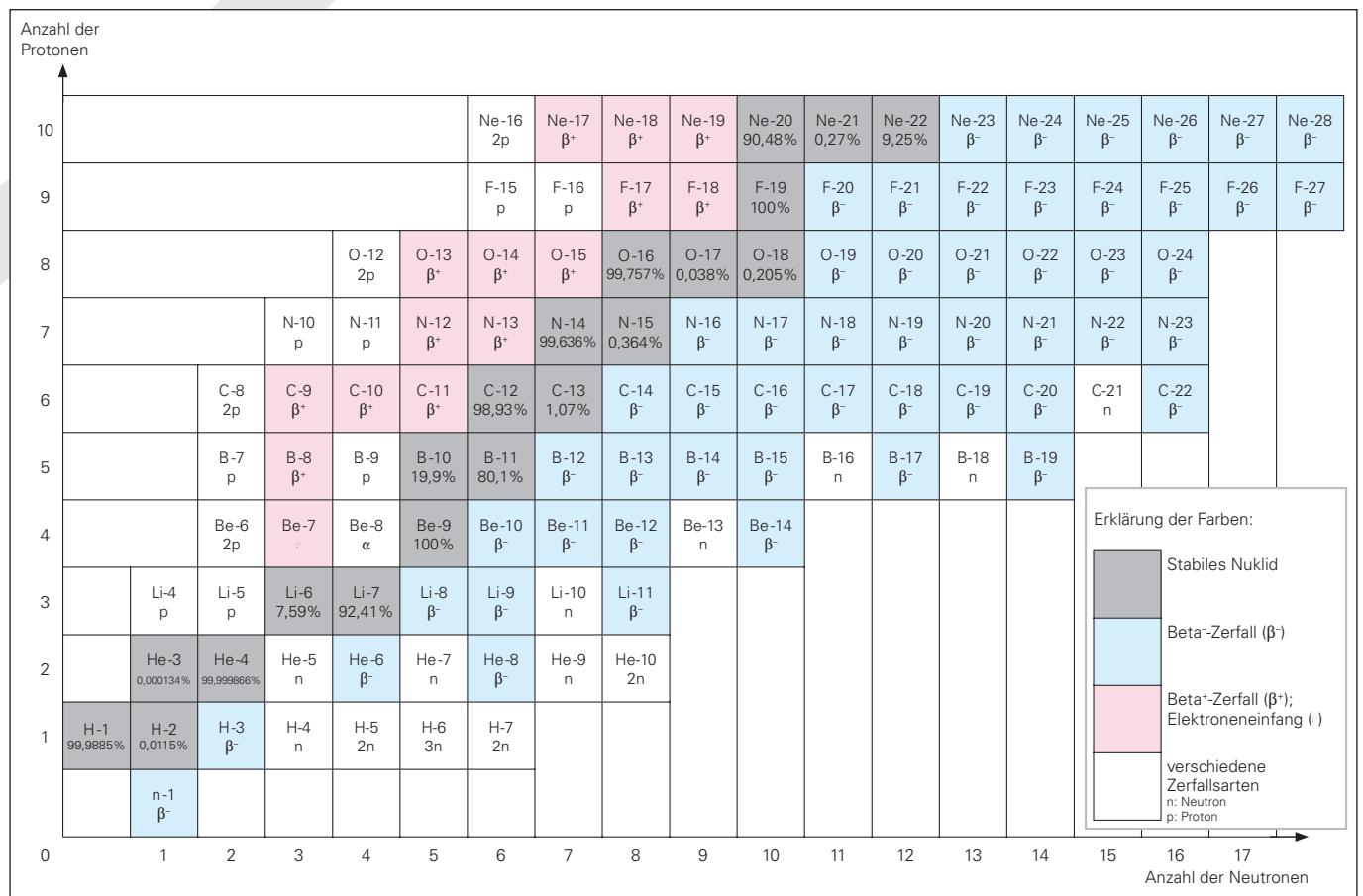


Abb. 1.7: Die Isotope der Elemente mit den Kernladungszahlen 1 bis 10 (Auszug aus der Karlsruher Nuclidkarte)

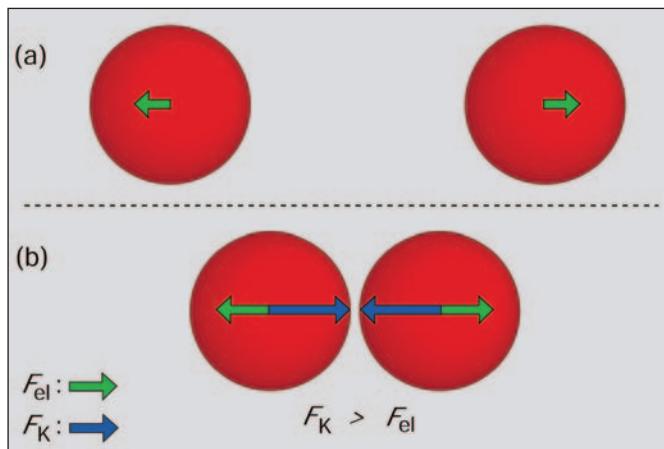


Abb. 1.8: Bei größerer Entfernung zwischen zwei Protonen wirken nur die abstoßenden elektrischen Kräfte (a). Bei geringer Entfernung werden die Kernkräfte wirksam (b). Sie sind stärker als die elektrischen Kräfte.

Die elektrischen Kräfte F_{el} , die zwischen den Protonen wirken, haben im Prinzip eine unendliche Reichweite. Ihre Stärke nimmt jedoch mit der Entfernung r gemäß $1/r^2$ ab (Abb. 1.8).

Wegen der geringen Reichweite werden die Kernkräfte nur zwischen unmittelbar benachbarten Kernteilchen wirksam. Das ist immer nur zwischen einer begrenzten Anzahl von Teilchen der Fall. Besteht ein Atomkern aus nur einigen wenigen Teilchen, ist jedes Teilchen mit jedem anderen in Kontakt, so dass die Kernkräfte wirksam werden können (Abb. 1.9).

Ist die Teilchenzahl größer, kann nicht mehr jedes Kernteilchen über Kernkräfte mit jedem anderen in Wechselwirkung treten. Anders ist es bei den im Kern auftretenden elektrischen Kräften. Sie stoßen sich alle untereinander ab, auch über die Entfernung vieler Kernteilchen hinweg (Abb. 1.10).

Eine weitere Eigenschaft der Kernkräfte ist, dass sie zwischen allen Teilchen wirken, unabhängig von ihrer Ladung. Die Kernkräfte haben also gleiche Größe zwischen den Teilchenpaaren Proton/Proton, Proton/Neutron und Neutron/Neutron.

1.4 Massendefekt und Bindungsenergie

Wie stark die Kernteilchen im Kern zusammengehalten werden, lässt sich berechnen. Das ist am einfachsten am Kern des Heliumatoms darzustellen. Er besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Die Masse des Kerns müsste sich eigentlich aus zwei Protonenmassen und zwei Neutronenmassen ergeben:

$$2 \cdot m_p = 2 \cdot 1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 3,34524 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$2 \cdot m_n = 2 \cdot 1,67493 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 3,34986 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_{2p+2n} = 6,69510 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

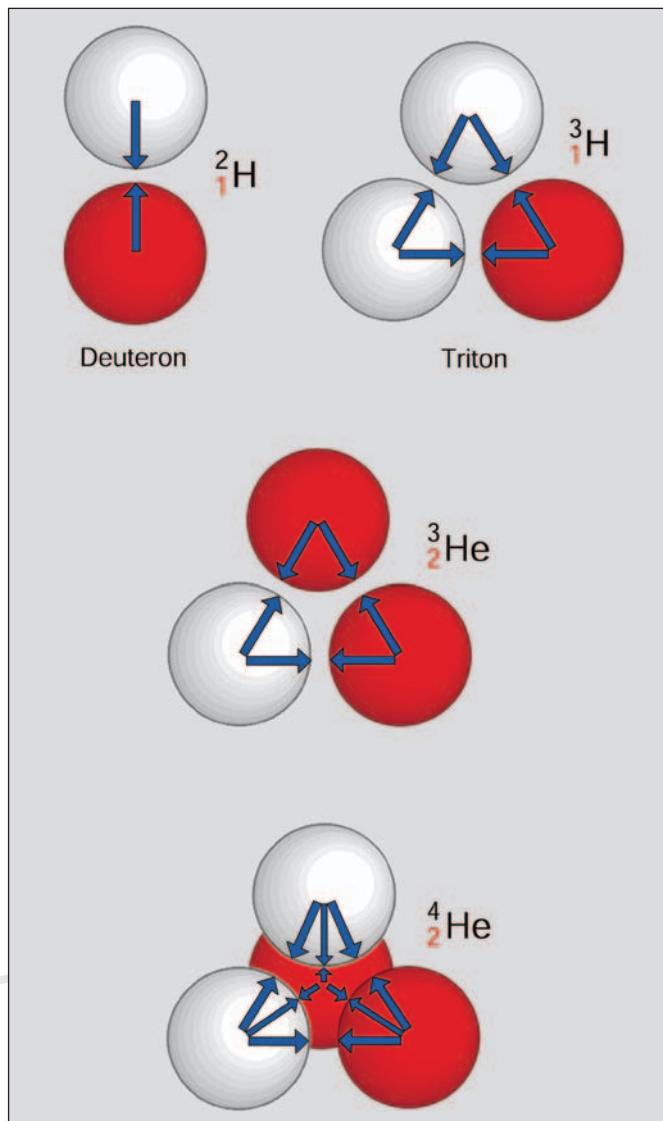


Abb. 1.9: Kernkräfte können nur zwischen benachbarten Kernteilchen wirken

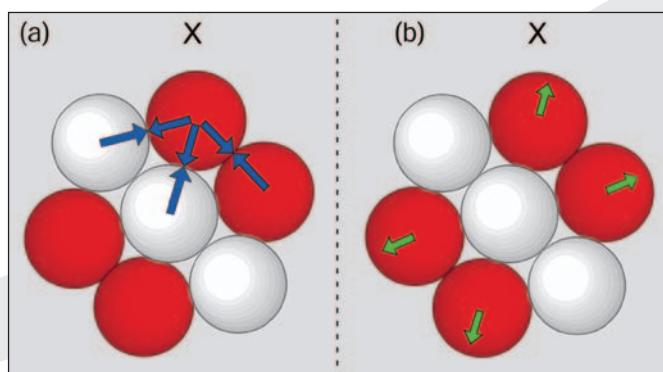


Abb. 1.10: Kernkräfte (blaue Pfeile) und elektrische Kräfte (grüne Pfeile) sind nur für das mit (X) bezeichnete Proton angegeben. „Anziehende“ Kernkräfte sind nur zwischen benachbarten Kernteilchen wirksam, „abstoßende“ elektrische Kräfte wirken auch über größere Entfernungen.

Sehr genaue Massenbestimmungen des Heliumkerns haben aber ergeben, dass seine Masse $m_{\text{He}} = 6,644656 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ beträgt. Die Masse des Heliumkerns ist also um $0,050444 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ geringer als die Summe der Massen der einzeln existierenden Teilchen. Dieser Verlust macht etwa 0,8 % aus (Abb. 1.11).

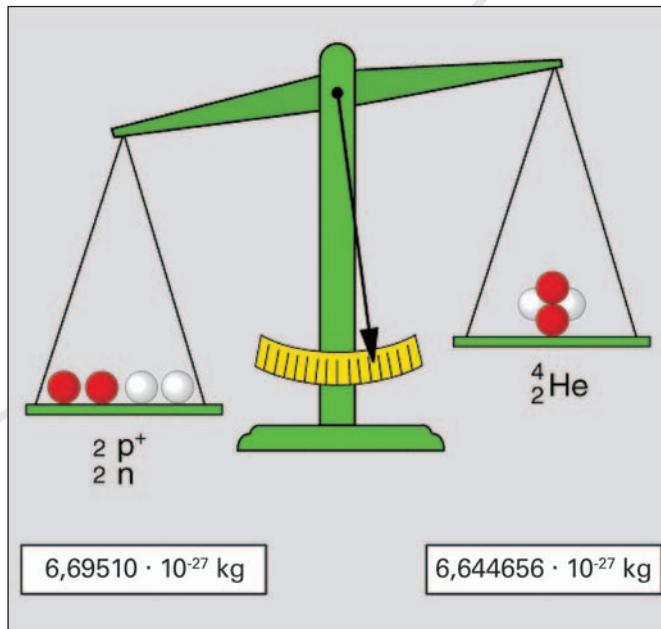


Abb. 1.11: Bei der Entstehung eines Atomkerns aus Nukleonen tritt ein Massenverlust auf

Der Massenverlust (auch Massendefekt genannt) kommt dadurch zustande, dass beim Zusammenschluss von Protonen und Neutronen zu einem Kern ein kleiner Teil ihrer Massen in Energie umgewandelt wird. Diese Energie wird in Form einer unsichtbaren energiereichen Lichtart (Gammastrahlung) abgegeben und tritt auch z.T. als Bewegungsenergie des entstandenen Kerns auf. Würde der Heliumkern wieder in seine Bestandteile zerlegt werden, müsste genau die verloren gegangene Energie dem Kern wieder zugeführt werden. Der Massenverlust (und damit die abgegebene Energie) ist also für das Zusammenhalten der Kernteilchen verantwortlich.

Dass durch Energieabgabe Teilchen zu einer stabilen Einheit zusammengefügt werden können, lässt sich anhand eines mechanischen Modells veranschaulichen (Abb. 1.12).

(a) Vier Kugeln liegen getrennt voneinander auf einer Ebene (indifferentes Gleichgewicht). Sie haben gegenüber der unteren Ebene potentielle Energie E_{p1} („Höhenenergie“). (Die vier Kugeln entsprechen den zwei Protonen und den zwei Neutronen.)

(b) Fallen die vier Kugeln anschließend in die Vertiefung, liegen sie dicht beieinander im stabilen Gleichgewicht. Da sie nun gegenüber der ursprünglichen Position niedriger liegen, haben sie potentielle Energie („Höhenenergie“) verloren bzw. abgegeben. (Das entspricht der Energieabgabe beim Auftreten der Kernkräfte.)

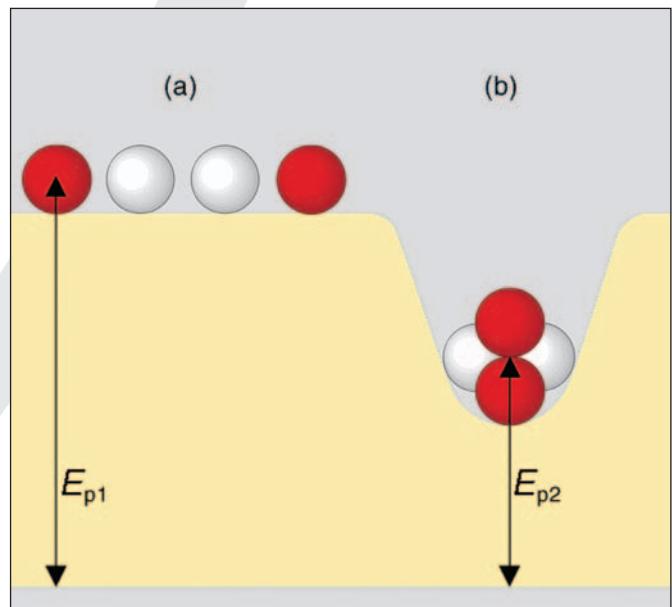


Abb. 1.12: Zusammenfügen von Kugeln zu einer stabileren Einheit durch Energieabgabe (Vergleich zur Entstehung eines Atomkerns aus Kernteilchen)

Wie viel Energie aus einer bestimmten Masse entsteht, kann nach dem von Einstein formulierten Gesetz berechnet werden:

$$E = m \cdot c^2$$

(E : Energie; m : Masse; c : Lichtgeschwindigkeit).

So ergibt 1 kg Masse, die völlig in Energie umgewandelt wird, eine Energie von $E = 9 \cdot 10^{16} \text{ J}$. Stünde dieser Betrag als elektrische Energie zur Verfügung, könnte damit die Stadt Hamburg zwei Jahre lang mit elektrischer Energie versorgt werden.

Beim Heliumkern ergibt sich aus dem Massenverlust von $m = 0,050444 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ eine Energie von $E = 0,4536 \cdot 10^{-11} \text{ J} = 28,3 \text{ MeV}$ (1 eV = $1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). Dieser Energiebetrag wurde bei der Kernentstehung abgegeben. Auf jedes einzelne Kernteilchen entfällt dann rechnerisch eine Energie von $E \approx 7,1 \text{ MeV}$.

Je größer bei einer Kernentstehung der Massenverlust und damit die Energieabgabe ist, desto fester sind die Kernteilchen aneinander gebunden. Man nennt diese Energie deshalb auch Bindungsenergie. Genaue Messungen haben ergeben, dass die Bindungsenergie pro Kernteilchen bei den Kernen der einzelnen Elemente bzw. deren Isotopen unterschiedlich ist (Tab. 1-4). Die Bindungsenergie je Nukleon ist in Abb. 1.13 graphisch dargestellt.

Abgesehen von den sehr leichten Atomkernen liegt die Bindungsenergie je Nukleon zwischen 7 MeV und fast 9 MeV. Die Energie, mit der die äußeren Elektronen der Atomhülle gebunden sind, liegt dagegen nur bei 2 bis 3 eV.

Nuklid	Gesamt-Bindungsenergie in MeV	mittlere Bindungsenergie je Nukleon in MeV
H-2	2,225	1,113
He-3	7,7118	2,573
He-4	28,296	7,074
Li-7	39,244	5,606
O-16	127,620	7,976
Cl-35	298,20	8,520
Fe-57	499,90	8,770
Ag-107	915,387	8,555
Lu-176	1.418,40	8,059
Pb-208	1.636,455	7,868
U-235	1.783,889	7,591

Tab. 1-4: Bindungsenergie bei einigen Nukliden

Die mittlere Bindungsenergie je Nukleon hat bei Kernen mit den Massenzahlen 40 bis 100 (z. B. Fe-57, Kr-87) ihren höchsten Wert und nimmt zu den leichteren und den schwereren Kernen hin ab. Für die Nutzung der Kernbindungsenergie stehen also grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

- Es werden sehr leichte Kerne (z. B. ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H}$) miteinander verschmolzen. Daraus entstehen dann schwerere Kerne, deren Kernteilchen stärker aneinander gebunden sind. Das ist mit einem Massenverlust und somit einer Energieabgabe verbunden. Nach diesem Prinzip arbeiten die Energiefreisetzung im Innern der Sonne und der Fusionsreaktor.
- Schwere Kerne werden in mittelschwere gespalten. Da die Bindungsenergie je Nukleon bei mittelschweren Kernen größer ist als bei schweren Kernen, tritt auch dabei Massenverlust und damit Energiefreisetzung auf. Auf diesem Prinzip beruht die Energiegewinnung in Kernkraftwerken.

Dass die Bindung der Nukleonen bei den schweren Kernen lockerer wird, ist darauf zurückzuführen, dass bei Vergrößerung der Nukleonenzahl die Kernkräfte insgesamt zwar zunehmen, aber eben nur zwischen den benachbarten Teilchen wirken. Die abstoßenden Kräfte zwischen den Protonen nehmen ebenfalls zu, sie wirken aber zwischen allen Protonen. Dadurch wird der Zusammenhalt zwischen den Kernteilchen wieder etwas gelockert. Von einer bestimmten Protonenzahl an sind die Kerne nicht mehr stabil, sondern instabil (radioaktiv).

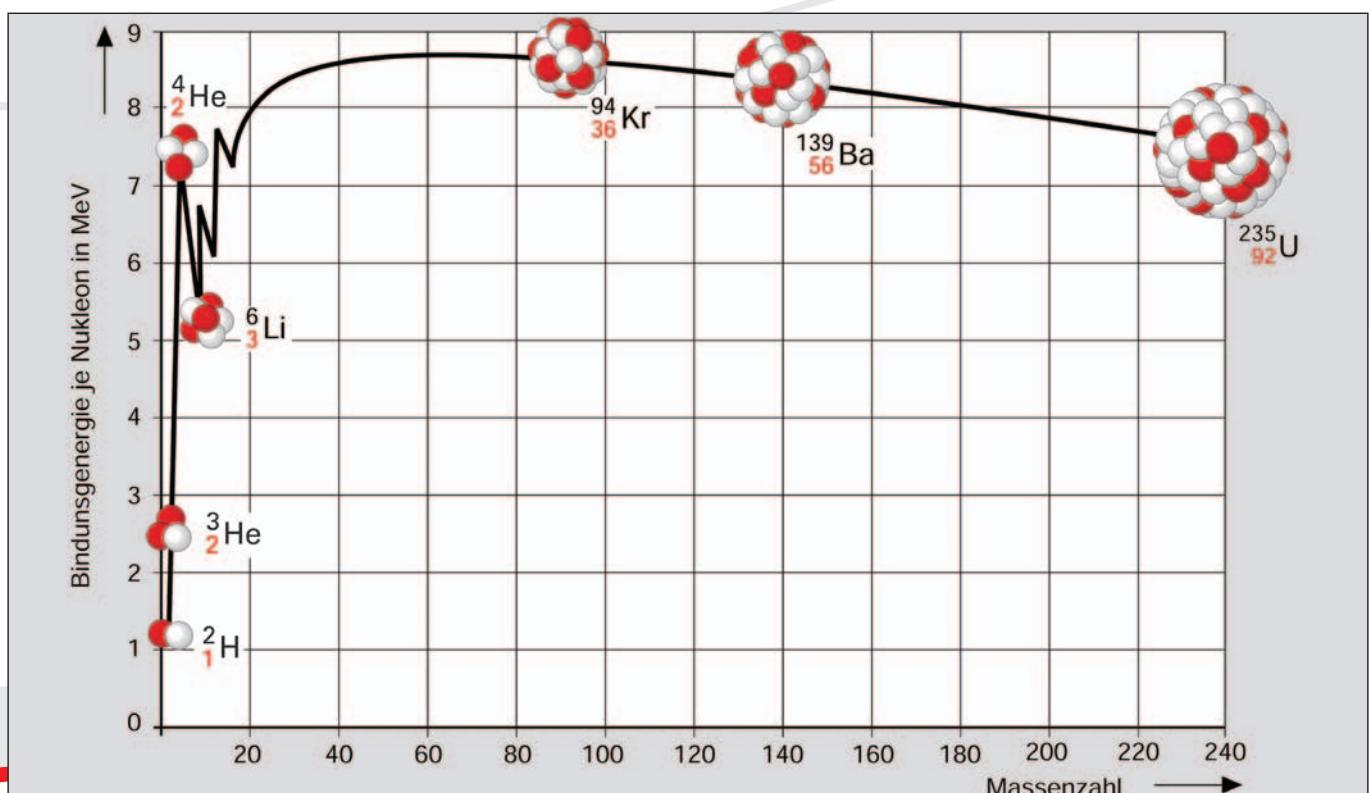


Abb. 1.13: Mittlere Bindungsenergie je Nukleon in Abhängigkeit von der Massenzahl

2 Kernumwandlungen und Radioaktivität

1896 entdeckte der französische Physiker Antoine Henri Becquerel, dass Uransalze eine unsichtbare Strahlung aussenden, die lichtdicht verpackte Fotoplatten schwärzte und ein geladenes Elektroskop entladen konnte. Die Eheleute Marie und Pierre Curie untersuchten solche Strahlen aussendenden Mineralien genauer. Dabei fanden sie 1898 die Elemente Polonium und das sehr viel stärker strahlende Radium. Im selben Jahr wurde die Strahlung von G. C. Schmidt auch bei Thorium nachgewiesen.

Die neu entdeckten Strahlen ließen sich durch physikalische Einwirkungen auf den strahlenden Stoff oder durch chemische Prozesse nicht beeinflussen. Daraus schloss man, dass die Strahlenaussendung nicht durch chemische Vorgänge verursacht wird. Heute weiß man, dass die Strahlen aus den Kernen instabiler Atome ausgesandt werden. Diese Gesamterscheinung wird Radioaktivität genannt. Die Kerne radioaktiver Atome heißen Radionuklide.

Bei den in der Natur vorkommenden Radionukliden spricht man von natürlicher Radioaktivität; bei den durch künstliche Kernumwandlung erzeugten Radionukliden von künstlicher Radioaktivität. Von den bisher bekannten über 2.950 verschiedenen Nukliden, die Isotope der 117 chemischen Elemente sind, sind nur 257 stabil, alle anderen zerfallen spontan. Beim Zerfall wird eine „Strahlung“ ausgesandt. Nach der Haupteigenschaft der Strahlung, Stoffe zu ionisieren, bezeichnet man sie als ionisierende Strahlung. Die Strahlung entsteht dadurch, dass die Kerne radioaktiver Atome Masse- und Energieportionen mit hoher Geschwindigkeit ausschleudern. Diesen Vorgang nennt man radioaktiven Zerfall.

2.1 Alphastrahlen

Die beim radioaktiven Zerfall von Atomkernen ausgesandten Heliumkerne (2 Protonen, 2 Neutronen) werden Alphateilchen genannt (Abb. 2.1). Als Teilchenstrom bilden sie die Alphastrahlen. Die Anfangsgeschwindigkeit der austretenden Alphateilchen beträgt etwa 15.000 km/s.

Der Kern des Radium-226 hat 88 Protonen und 138 Neutronen. Seine Kernladungszahl beträgt demnach 88, seine Massenzahl 226. Der Kern ist nicht stabil, da die Kernkräfte die abstoßenden Kräfte der Protonen untereinander nicht vollständig aufheben können. Der Kern hat deshalb das Bestreben, in einen stabileren Zustand überzugehen. Das geschieht in mehreren Stufen, von denen hier nur eine dargestellt ist. Der Kern schleudert einen Heliumkern heraus, wodurch die Kernladungszahl um 2, die Massenzahl um 4 sinkt. Es entsteht das neue Element Radon (Rn). Dieser Vorgang wird auch Alphazerfall genannt.

Er kann durch eine Kernreaktionsgleichung beschrieben werden:



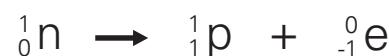
In der Gleichung wird links vom Reaktionspfeil der Kernaufbau des Ausgangatoms, rechts davon das Ergebnis des Zerfalls geschrieben. Dabei müssen auf beiden Seiten die Summe der Kernladungszahlen ($86 + 2 = 88$) und die Summe der Massenzahlen ($222 + 4 = 226$) übereinstimmen. Das beim Zerfall entstandene Radon-222 ist ebenfalls radioaktiv und zerfällt weiter. Das entstandene Radon gibt zwei Hüllenelektronen an die Umgebung ab. Die ausgesandten Alphateilchen nehmen aus der Umgebung zwei Elektronen auf, wodurch Heliumatome entstehen.

Bei alphastrahlenden Substanzen, die sich in geschlossenen Behältern befinden, kann deshalb nach einiger Zeit Heliumgas nachgewiesen werden. 1 g Radium und seine Folgeprodukte erzeugen in einem Jahr insgesamt $0,156 \text{ cm}^3$ Heliumgas (Angaben bezogen auf 0°C und Atmosphärendruck). Das entspricht etwa $4,29 \cdot 10^{18}$ Heliumatomen.

2.2 Betastrahlen

Beim Betazerfall wird aus dem Kern eines Radionuklids ein Elektron abgegeben. Seine Geschwindigkeit kann zwischen Null und nahezu Lichtgeschwindigkeit liegen. Diese Elektronen bilden dann die Betastrahlen (Abb. 2.2). Das ausgeschleuderte Elektron stammt nicht aus der Atomhülle! Es entsteht, wenn sich im Kern ein Neutron in ein Proton und ein Elektron umwandelt.

Reaktionsgleichung:



Beispiel eines Beta-Zerfalls:



Cäsium-137 wandelt sich unter Aussenden eines Elektrons in Barium-137 um.

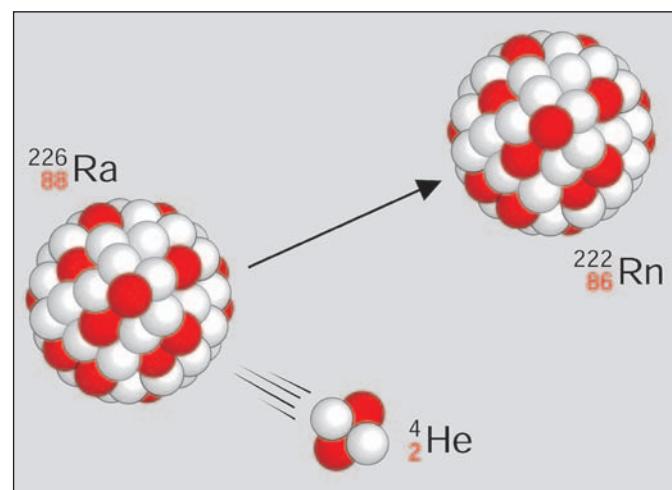


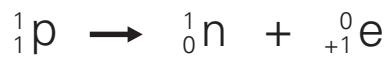
Abb. 2.1: Alphazerfall in Modelldarstellung

Da die Elektronen je eine negative Elementarladung tragen, werden die Strahlen auch als Beta⁻-Strahlen bezeichnet.

Da nach dem Aussenden eines Betateilchens (eines Elektrons) der Kern ein Proton mehr besitzt, muss auch die Kernladungszahl des neu entstandenen Elements um eins höher liegen. Die Anzahl der Kernteilchen hat sich jedoch insgesamt nicht verändert, wodurch die ursprüngliche Massenzahl erhalten bleibt. Beta⁻-Strahlen bilden einen Elektronenstrom, der die gleichen Eigenschaften zeigt wie der elektrische Strom in metallischen Leitern. So erzeugen z.B. beide ein Magnetfeld, das in konzentrischen Kreisen um den Elektronenstrom liegt.

Bei manchen natürlichen und künstlich hergestellten Radionukliden tritt eine Strahlung auf, bei der Teilchen von der Masse eines Elektrons, aber mit einer positiven Ladung ausgeschleudert werden. Es sind Positronen. Die Strahlung wird deshalb Positronenstrahlung oder Beta⁺-Strahlung genannt (Abb. 2.3). Das Positron entsteht im Kern, wenn sich ein Proton in ein Neutron und ein Positron umwandelt.

Reaktionsgleichung:



Beispiel eines Beta⁺-Zerfalls:



Natrium-22 wandelt sich unter Aussenden eines Positrons in Neon-22 um.

Beim Beta⁺-Zerfall nimmt die Kernladungszahl um eine Einheit ab, während sich die Massenzahl nicht verändert.

Beim Betazerfall wird außerdem ein weiteres Teilchen ausgesandt, das eine sehr, sehr kleine Ruhemasse (2 eV oder weniger) und keine elektrische Ladung besitzt. Bei der Umwandlung des Neutrons in ein Proton und ein Elektron entsteht zusätzlich ein Antineutrino, bei der Umwandlung

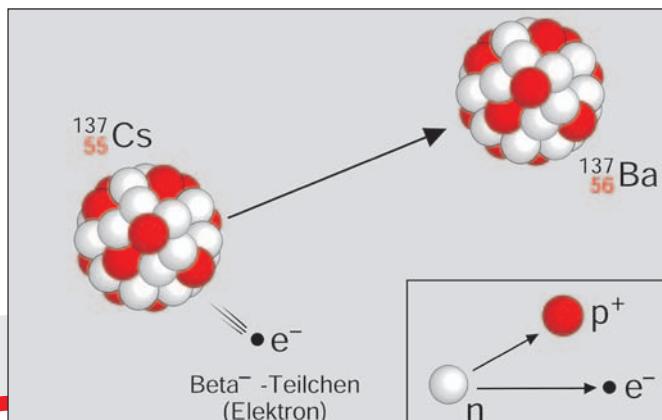


Abb. 2.2: Modell zur Entstehung der Beta⁻-Strahlen

des Protons in ein Neutron und ein Positron entsteht ein Neutrino. Neutrinos und Antineutrinos besitzen ein großes Durchdringungsvermögen, weil sie mit Materie kaum in Wechselwirkung treten. Sie sind deshalb schwer nachzuweisen. (Bei den Kernreaktionsgleichungen werden hier aus Gründen der Vereinfachung Neutrino oder Antineutrino nicht mit angegeben.)

2.3 Gammastrahlen

Bei den Kernumwandlungen kann eine energiereiche Strahlung auftreten, die die gleiche Natur wie das sichtbare Licht hat, nur energiereicher als dieses ist. Sie trägt den Namen Gammastrahlung. Abgesehen von der Art des Entstehens ist sie praktisch identisch mit der Röntgenstrahlung. Die Gammastrahlung wird – wie auch das sichtbare Licht – in einzelnen „Portionen“ (Quanten, Photonen) abgegeben (Abb. 2.4).

Die Gammaquanten bewegen sich mit einer konstanten Geschwindigkeit $c_0 = 299.792.458$ m/s (Vakuumlichtgeschwindigkeit). Gammastrahlen treten häufig bei Alpha- oder Betazerfall auf. Nach dem Ausschleudern eines Alpha- oder Betateilchens gibt der Atomkern noch vorhandene überschüssige Energie in Form eines oder mehrerer Gammaquanten ab. Durch den Gammazerfall ändert sich der Energieinhalt des Kerns, nicht jedoch dessen Kernladungs- und Massenzahl.

Beispiel:



Ein energiereicherer, angeregter (metastabiler) Bariumkern gibt ein Gammaquant ab und geht dadurch in einen niedrigeren und gleichzeitig stabileren Energiezustand über.

Gammaquanten treten außer bei Kernumwandlungen auch noch bei anderen Reaktionen zwischen Elementarteilchen (Bausteinen des Atoms) auf.

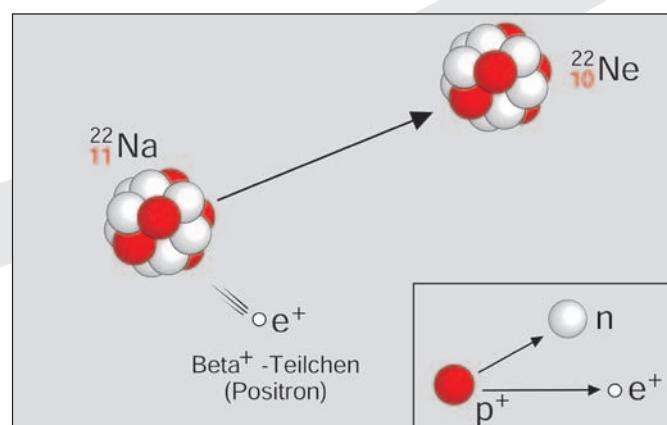


Abb. 2.3: Modell zur Entstehung der Beta⁺-Strahlen

2.4 Der Elektroneneinfang

Bei natürlichen und künstlich erzeugten Radionukliden kann noch eine weitere Umwandlungsart auftreten, der so genannte Elektroneneinfang. Der Kern eines neutronenarmen Atoms fängt meist aus der innersten Schale der Elektronenhülle – der K-Schale, daher auch der Name K-Einfang – ein Elektron ein, wodurch sich ein Proton in ein Neutron umwandelt (Abb. 2.5). Der in der Atomhülle frei gewordene Platz wird von einem äußeren Elektron wieder aufgefüllt. Dabei entsteht eine charakteristische Röntgenstrahlung.

Reaktionsgleichung:



Beispiel:



Das in der Natur vorkommende Isotop Kalium-40 wandelt sich zum Teil unter Elektroneneinfang in das Isotop Argon-40 um. Beim Elektroneneinfang nimmt die Kernladungszahl um eine Einheit ab, während die Massenzahl unverändert bleibt. Der Elektroneneinfang führt also zu dem gleichen Ergebnis wie die Abgabe eines Positrons.

2.5 Protonen- und Neutronenstrahlen

Die erste künstliche Kernumwandlung wurde in einer mit Stickstoff gefüllten Nebelkammer beobachtet. Aus den Untersuchungen ergab sich folgende Erklärung: Ein Alphateilchen (Heliumkern) dringt in den Kern eines Stickstoffatoms

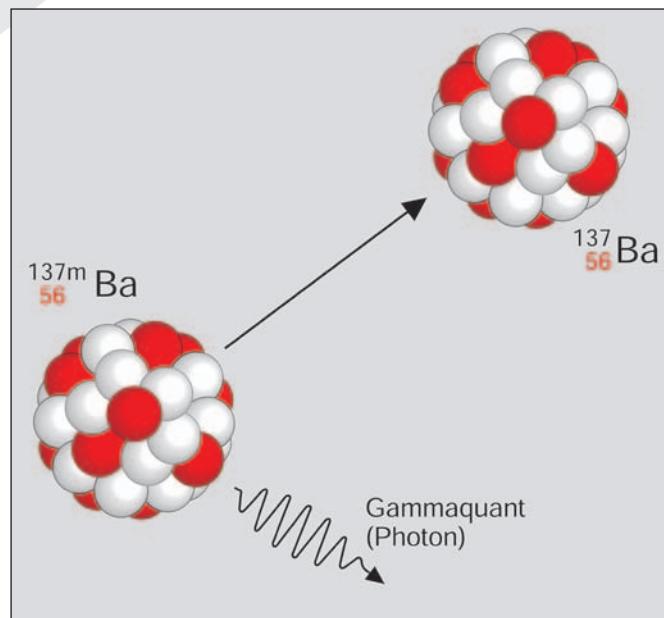


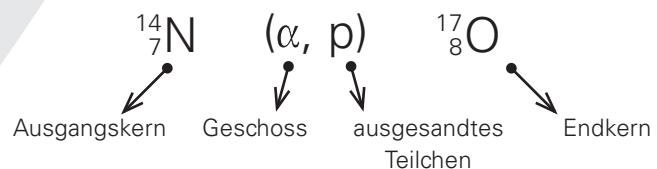
Abb. 2.4: Emission eines Gamma-Quants aus einem angeregten Kern in Modelldarstellung

ein und verschmilzt mit ihm für kurze Zeit zu einem hochangeregten Zwischenkern des Elements Fluor. Der Fluorkern zerfällt in einen Sauerstoffkern und ein Proton (Abb. 2.6).

Kernreaktionsgleichung:



Bei Kernreaktionen wird auch die folgende abgekürzte Schreibweise benutzt:



Nach der Kernreaktion erfolgt ein Elektronenausgleich, d.h. es werden aus der Umgebung so viele Elektronen aufgenommen (oder in anderen Fällen an sie abgegeben), dass die beteiligten Atome wieder elektrisch neutral sind.

Werden Neutronen aus einem Atomkern herausgeschlagen oder herausgeschleudert, entsteht dadurch eine Neutronenstrahlung. Das kann z.B. in den oberen Schichten der Atmosphäre durch Zusammenprall der kosmischen Primärteilchen mit den Luftmolekülen geschehen oder bei Kernspaltungen in einem Kernkraftwerk. Der Nachweis freier Neutronen gelang erstmal dem Engländer Chadwick 1932 beim Beschuss von Beryllium mit Alphateilchen (Abb. 2.7).

Kernreaktionsgleichung:

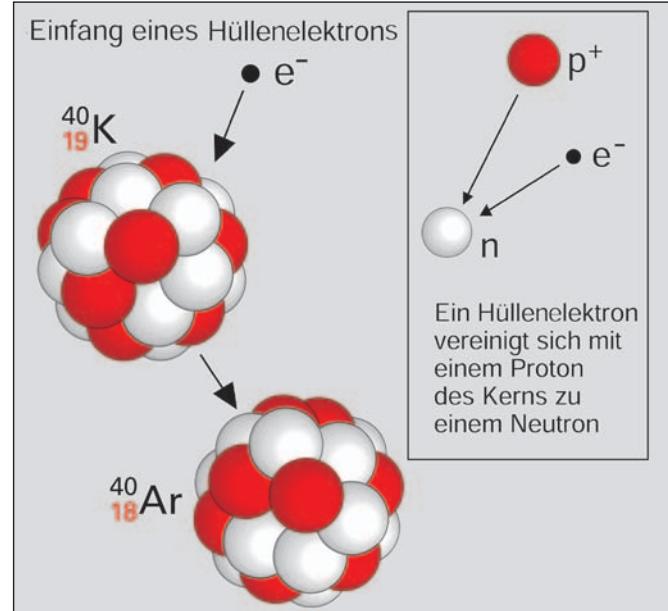


Abb. 2.5: K-Einfang in Modelldarstellung

Ein freies Neutron ist radioaktiv. Es zerfällt in ein Proton und ein Elektron sowie ein Antineutrino (in der Reaktionsgleichung weggelassen).

Reaktionsgleichung:



Ein im Kern gebundenes Neutron ist dagegen stabil und zerfällt nicht. Eine Ausnahme bildet der Beta⁻-Zerfall.

2.6 Halbwertzeit

Bei einem einzelnen radioaktiven Atomkern kann man nicht vorhersagen, zu welchem Zeitpunkt er zerfallen wird. Er kann in der nächsten Sekunde oder erst in Tausenden von Jahren zerfallen. Bei einer großen Anzahl von Atomen lässt sich aber eine Wahrscheinlichkeitsaussage über den Ablauf des Zerfalls machen. Es zerfallen zum Beispiel von einer Menge Wasserstoff-3 (Tritium) in ca. 12,3 Jahren die Hälfte der Atome, nach weiteren 12,3 Jahren ist von dem Rest wiederum die Hälfte zerfallen usw.

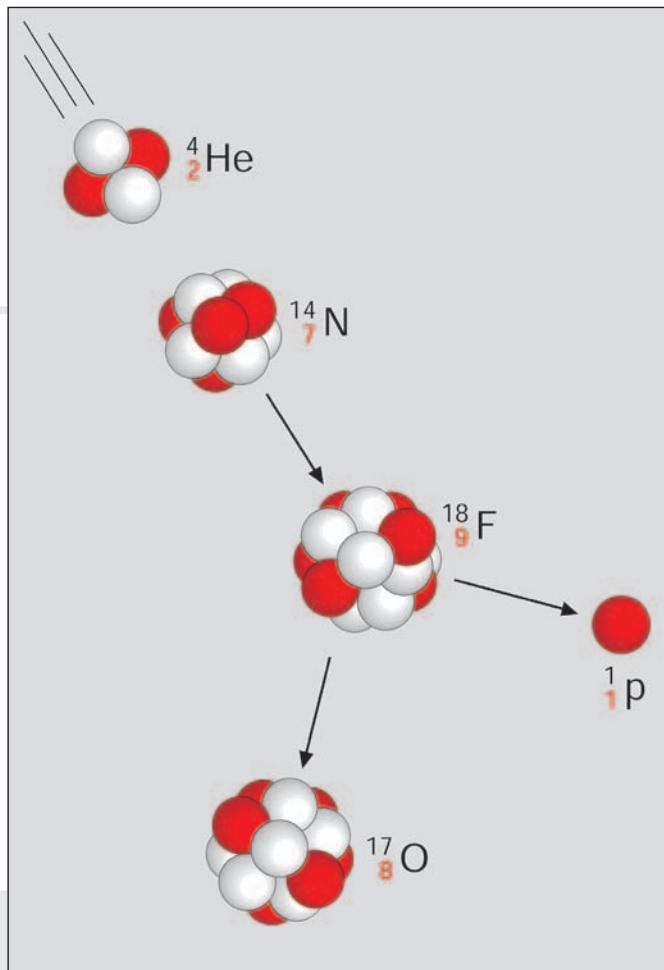
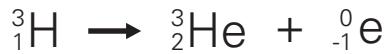


Abb. 2.6: Nachweis freier Protonen durch Rutherford (1919) in Modelldarstellung

Kernreaktionsgleichung:



Die Zeit, nach der die Hälfte einer bestimmten Anzahl von Atomkernen zerfallen ist, wird Halbwertzeit ($T_{1/2}$) genannt. Sie ist für jedes Radionuklid eine charakteristische Größe (Abb. 2.8).

Die Halbwertzeiten liegen zwischen vielen Milliarden Jahren und Sekundenbruchteilen (siehe Tab. 2-1 und Tab. 2-2). Eine sehr große Halbwertzeit besitzt beispielsweise Tellur-128 mit $7,7 \cdot 10^{24}$ Jahren, während für Radium-216m eine sehr kurze Halbwertzeit von nur $7 \cdot 10^{-9}$ s ermittelt wurde.

Bei einer angenommenen Anzahl von 12.000.000 radioaktiven Atomkernen kann man sich den Ablauf des Zerfalls anhand einer Auflistung (Tab. 2-3) deutlich machen. Als Radionuklid ist auch hier wieder Wasserstoff-3 (Tritium) gewählt worden. Es zerfällt mit einer Halbwertzeit von etwa 12,3 a unter Aussenden eines Betateilchens zu dem nicht mehr radioaktiven Heliumisotop He-3 (Abb. 2.9).

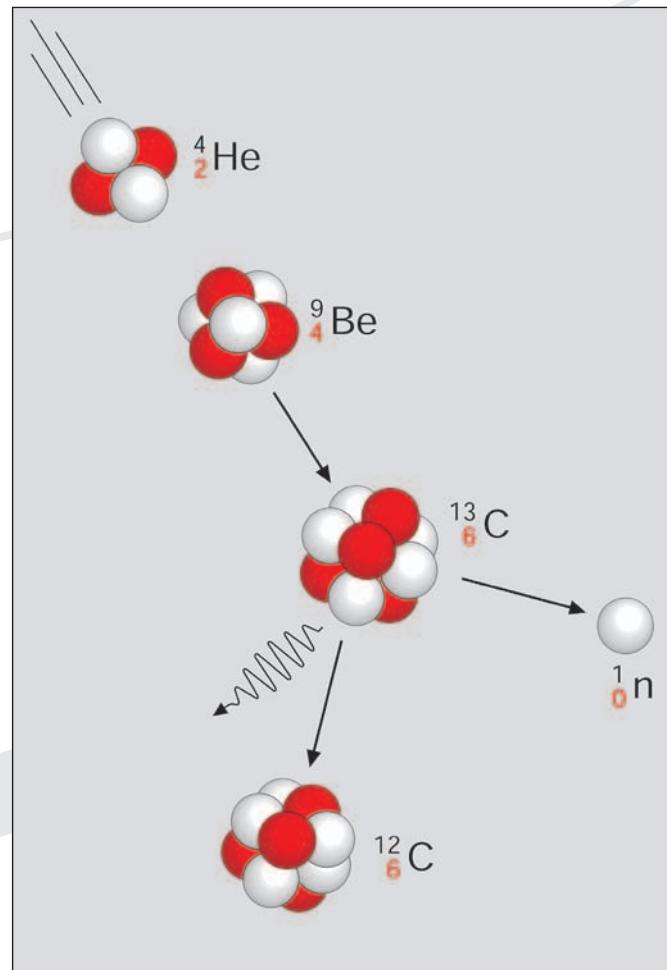


Abb. 2.7: Nachweis freier Neutronen durch Chadwick (1932) in Modelldarstellung

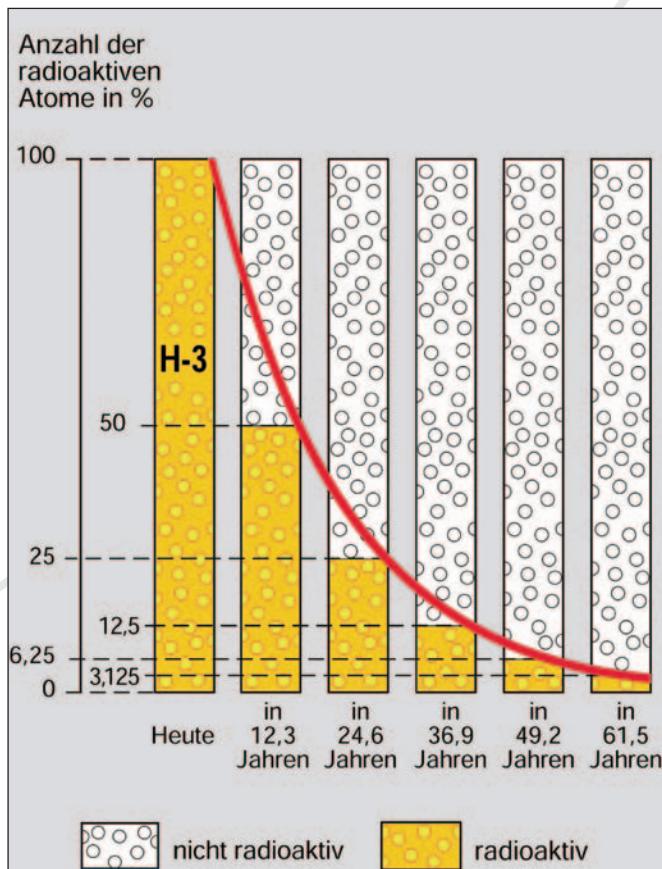


Abb. 2.8: Abklingen der Aktivität bei Tritium (Wasserstoff-3)

Radionuklid	Halbwertzeit	Zerfallsart
H-3	12,33 a	Beta-Minus
C-14	5.730 a	Beta-Minus
K-40	$1,277 \cdot 10^9$ a	Beta-Minus, K-Einfang
Te-128	$7,7 \cdot 10^{24}$ a	Beta-Minus
Bi-214	19,9 min	Alpha, Beta-Minus
Po-210	138,376 d	Alpha
Po-214	$1,643 \cdot 10^{-4}$ s	Alpha
Rn-222	3,8235 d	Alpha
Ra-226	$1,6 \cdot 10^3$ a	Alpha
Th-232	$1,405 \cdot 10^{10}$ a	Alpha
U-235	$7,038 \cdot 10^8$ a	Alpha
U-238	$4,468 \cdot 10^9$ a	Alpha

a: Jahr; d: Tag; min: Minute; s: Sekunde

Tab. 2-1: Beispiele für natürliche Radionuklide und ihre Halbwertzeiten

Die Auflistung (Tab. 2-3) lässt Folgendes erkennen:

- In jeder Halbwertzeit wandelt sich stets die Hälfte der jeweils zu Beginn noch vorhandenen radioaktiven Atomkerne um.
- Die Anzahl der radioaktiven Kerne nimmt erst schnell, dann immer langsamer ab. Die Anzahl der nicht mehr radioaktiven Kerne nimmt erst schnell, dann immer langsamer zu.
- Nach vier Halbwertzeiten ist das Radionuklid zu mehr als 90 % zerfallen, nach zehn Halbwertzeiten zu mehr als 99,9 %.

Wird die Anzahl der zu Beginn eines Zerfalls vorhandenen radioaktiven Kerne mit N_0 , die am Ende der Abklingzeit t noch vorhandenen Kerne mit N_t und die Halbwertzeit mit $T_{1/2}$ bezeichnet, so ergibt sich die Anzahl dann noch radioaktiver Kerne nach der Gleichung:

$$N_t = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

Radionuklid	Halbwertzeit	Zerfallsart
N-16	7,13 s	Beta-Minus
Kr-85	10,756 a	Beta-Minus
Sr-90	28,79 a	Beta-Minus
Te-132	3,204 d	Beta-Minus
I-131	8,0207 d	Beta-Minus
Cs-134	2,0648 a	Beta-Minus
Cs-135	$2,3 \cdot 10^6$ a	Beta-Minus
Cs-137	30,07 a	Beta-Minus
Ba-140	12,752 d	Beta-Minus
La-147	4,015 s	Beta-Minus
Pu-239	24.110 a	Alpha
Cm-242	162,8 d	Alpha

a: Jahr; d: Tag; min: Minute; s: Sekunde

Tab. 2-2: Beispiele für künstlich erzeugte Radionuklide und ihre Halbwertzeiten

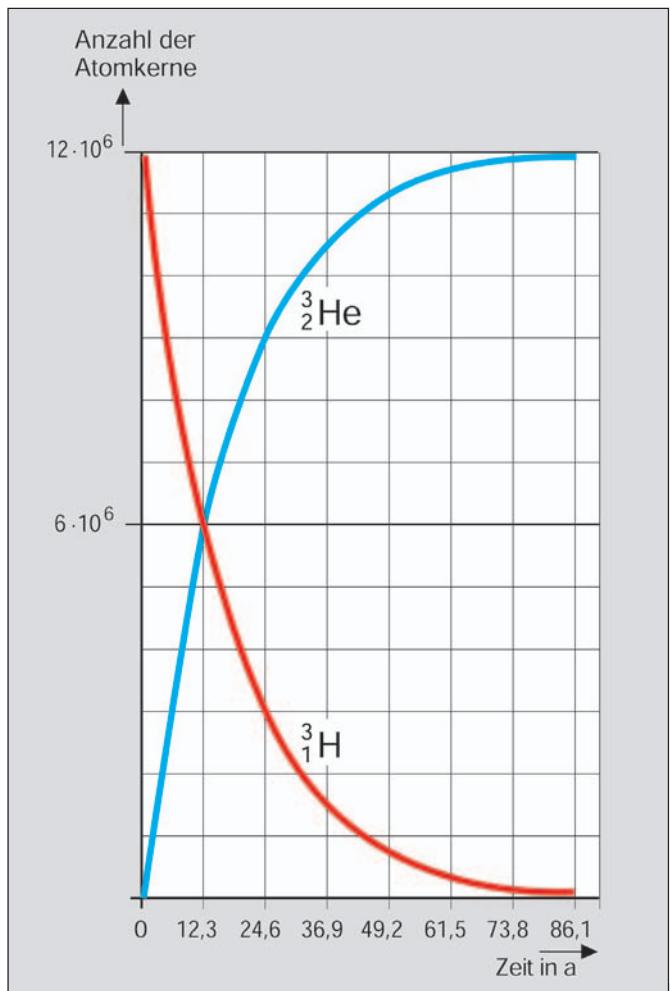


Abb. 2.9: Anzahl radioaktiver Ausgangskerne (H-3) und nicht mehr radioaktiver Tochterkerne (He-3) in Abhängigkeit von der Zeit

Rechenbeispiel: Wie viele radioaktive Kerne des Wasserstoff-3 sind nach 98,4 Jahren (acht Halbwertzeiten) noch vorhanden, wenn es am Anfang 12.000.000 waren?

$$N_t = 12.000.000 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{98,4}{12,3}} = 12.000.000 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^8 = 12.000.000 \cdot \left(\frac{1}{256}\right) = 46.875$$

2.7 Aktivität und spezifische Aktivität

Die Zeit, in der die Hälfte einer großen Anzahl von radioaktiven Atomkernen sich umwandelt, wird Halbwertzeit genannt. Sie hat für jedes Radionuklid einen charakteristischen Wert. Für den Umgang mit radioaktiven Substanzen ist es aber oftmals wichtiger zu wissen, wie viele radioaktive Atomkerne sich in einer bestimmten Zeit umwandeln (z.B. in 1 Sekunde). Beim Vergleich mehrerer Substanzen weiß man dann, welche Substanz stärker aktiv ist, d.h. in welcher Substanz mehr Kernumwandlungen pro Zeiteinheit stattfinden. Zur Beschreibung dieses Sachverhaltes hat man

Zeit in Jahren	Anzahl der abgelaufenen Halbwertzeiten	Anzahl der radioaktiven Kerne	Anzahl der nicht mehr radioaktiven Tochterkerne
0	0	12.000.000 (100 %)	0 (0 %)
12,3	1	6.000.000 (50 %)	6.000.000 (50 %)
24,6	2	3.000.000 (25 %)	9.000.000 (75 %)
36,9	3	1.500.000 (12,5 %)	10.500.000 (87,5 %)
49,2	4	750.000 (6,25 %)	11.250.000 (93,75 %)
61,5	5	375.000 (ca 3,12 %)	11.625.000 (96,88 %)
73,8	6	187.500 (ca 1,56 %)	11.812.500 (98,44 %)
86,1	7	93.750 (ca 0,78 %)	11.906.250 (99,22 %)
98,4	8	46.875 (ca 0,39 %)	11.953.125 (99,61 %)
110,7	9	23.438 (ca 0,20 %)	11.976.562 (99,80 %)
123	10	11.719 (ca 0,10 %)	11.988.281 (99,90 %)

Tab. 2-3: Zahlenmäßige Beschreibung des radioaktiven Zerfalls bei H-3

die Aktivität oder Zerfallsrate festgelegt. Sie gibt die Anzahl der Kernumwandlungen pro Zeiteinheit an:

$$\text{Aktivität} = \frac{\text{Anzahl der Kernumwandlungen}}{\text{Zeit}} ; A = \frac{\Delta N}{\Delta t}$$

Die Anzahl der Kernumwandlungen wird als Zahlenwert ohne Einheit angegeben. Für die Zeit wird als Einheit die Sekunde gewählt. Die Einheit der Aktivität ist also $1/\text{s} = \text{s}^{-1}$ (reziproke Sekunde). Als besonderer Einheitenname für die Aktivität wurde das Becquerel (Bq) eingeführt:

$$1 \text{ Bq} = 1 \cdot \text{s}^{-1}$$

Die Zahlenangabe in Becquerel gibt also die Anzahl der Kernumwandlungen pro Sekunde an. In Abb. 2.10 wird davon ausgegangen, dass in einer bestimmten Menge radioaktiver Atome (nur die Atomkerne sind in der Abbildung dargestellt) in vier Sekunden vier Kernumwandlungen stattfinden. Die Aktivität beträgt dann:

$$A = \frac{4}{4 \text{ s}} = \frac{1}{1 \text{ s}} = 1 \cdot \text{s}^{-1} = 1 \text{ Bq}$$

Bei zehn Kernumwandlungen pro Sekunde ergibt sich eine Aktivität von 10 Bq, bei 1.000 Kernumwandlungen pro Sekunde eine Aktivität von 1.000 Bq = 1 kBq.

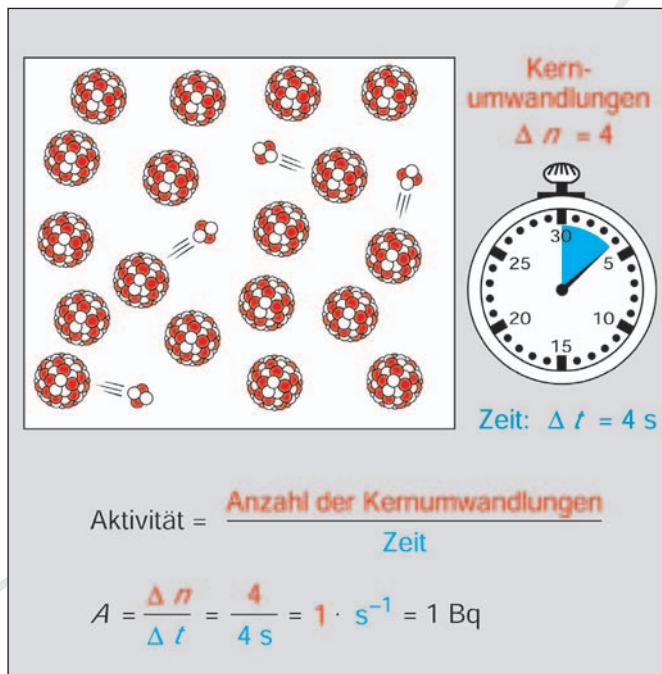


Abb. 2.10: Definition der Aktivität

Radionuklid	spezifische Aktivität in Bq/g
H-3	$3,6 \cdot 10^{14}$
C-14	$1,7 \cdot 10^{11}$
K-nat (K-40)	$3,1 \cdot 10^1$
Fe-59	$1,8 \cdot 10^{15}$
Co-60	$4,1 \cdot 10^{13}$
Kr-85	$1,4 \cdot 10^{13}$
Sr-90	$5,3 \cdot 10^{12}$
I-131	$4,6 \cdot 10^{15}$
Xe-133	$6,8 \cdot 10^{15}$
Cs-134	$4,8 \cdot 10^{13}$
Cs-137	$3,2 \cdot 10^{12}$
U-nat	$2,5 \cdot 10^4$
Pu-239	$2,3 \cdot 10^9$

Tab. 2-4: Spezifische Aktivität einiger Radionuklide (gerundet)

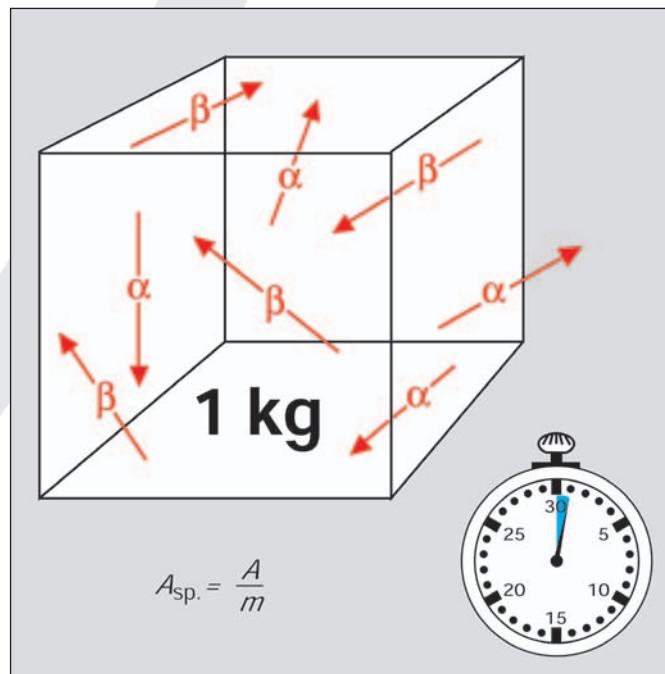


Abb. 2.11: Definition der spezifischen Aktivität

Viele Radionuklide bilden nach ihrer Umwandlung Tochterkerne, die wiederum radioaktiv sind. So wandelt sich z.B. Ra-226 in das radioactive Edelgas Rn-222 um. Aktivitätsangaben für ein Radionuklid beziehen sich aber immer auf die Ausgangssubstanz, nicht auf die angesammelten Folgeprodukte.

Abgeleitete Aktivitätseinheiten:

- Spezifische Aktivität (Bq/kg, Bq/g usw.) (Tab. 2-4) In Abb. 2.11 wird davon ausgegangen, dass in einer Masse von 1 kg acht Kernumwandlungen in 1 s stattfinden. Die spezifische Aktivität beträgt dann 8 Bq/kg.
- Aktivitätskonzentration (Bq/m³, Bq/l usw.)
- Flächenaktivität (Bq/m², Bq/cm² usw.)
- Aktivitätsrate: Bildung, Zufuhr oder Abgabe von Aktivität pro Zeitintervall (Bq/a, Bq/h, Bq/s usw.)

Bis Ende 1985 durfte im amtlichen Verkehr noch die Einheit Curie (Ci) verwendet werden. Für die Umrechnung gilt:

$$1 \text{ Curie} \quad (\text{Ci}) = 10^0 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ Millicurie} \quad (\text{mCi}) = 10^3 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^7 \text{ Bq}$$

$$1 \text{ Mikrocurie} \quad (\mu\text{Ci}) = 10^{-6} \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^4 \text{ Bq}$$

$$1 \text{ Nanocurie} \quad (\text{nCi}) = 10^{-9} \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^1 \text{ Bq}$$

$$1 \text{ Pikocurie} \quad (\text{pCi}) = 10^{-12} \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ Bq}$$

3 Das Wesen der Energie

3.1 Energiearten und Energieumwandlungen

Um Lasten hochzuheben, Maschinen anzutreiben, Werkstücke zu verformen, elektrische Geräte zu betreiben sowie zum Erwärmen und Beleuchten benötigt man Energie. Sie muss den Geräten und Maschinen zugeführt werden, wenn sie die gewünschten Arbeiten verrichten sollen. Energie kommt in verschiedenen Formen vor, als Bewegungsenergie, potentielle Energie (Lageenergie, Spannenergie), Wärmeenergie, Lichtenergie, elektrische Energie, chemische Energie und Kernenergie. So wird z.B. zum Antrieb eines Autos die chemische Energie des Treibstoffs eingesetzt, bei einem Wasserkraftwerk die potentielle Energie des gestauten Wassers, bei einem Windkraftwerk die Bewegungsenergie des Windes, beim Generator eines Kernkraftwerks die Kernenergie und zum Erwärmen einer Kochplatte elektrische Energie.

Wenn mit Hilfe von Energie eine Arbeit verrichtet wird, wandelt sich immer die zugeführte Energie in eine andere Energieform um. Es gilt nämlich allgemein, dass Energie nicht vernichtet und nicht neu geschaffen werden kann. Man vermag lediglich eine Energieform in eine andere umzuwandeln. Dabei entstehen aber stets Verluste. Nur

ein Teil wird in eine neue, nutzbare Energieform, ein anderer Teil in eine nicht oder nur schwer nutzbare Energieform umgewandelt. Zum Beispiel wandelt ein Elektromotor die zugeführte elektrische Energie nicht nur in nutzbare Bewegungsenergie, sondern zu einem kleinen Teil auch in nicht nutzbare Wärmeenergie um. Man merkt es daran, dass sich der Motor beim Betrieb erwärmt.

Wie groß bei Energieumwandlungen der Anteil nutzbarer Energie ist, wird durch den Wirkungsgrad η ausgedrückt (η : griechischer Buchstabe „eta“). Der Wirkungsgrad ist stets kleiner als 1.

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{nutzbare Energie}}{\text{aufgewendete Energie}} \quad ; \eta = \frac{E_2}{E_1}$$

3.2 Energieumwandlungen bei Kohlekraftwerk und Kernkraftwerk

Bei großen technischen Anlagen finden meist mehrere Energieumwandlungen statt, so dass sich eine Umwandlungsreihe bzw. Umwandlungskette ergibt. Zwischen Ausgangs- und Endenergie treten dann weitere Energieformen auf. Bei einem Kohlekraftwerk sind es vier Energieumwandlungsstufen (Abb. 3.1):

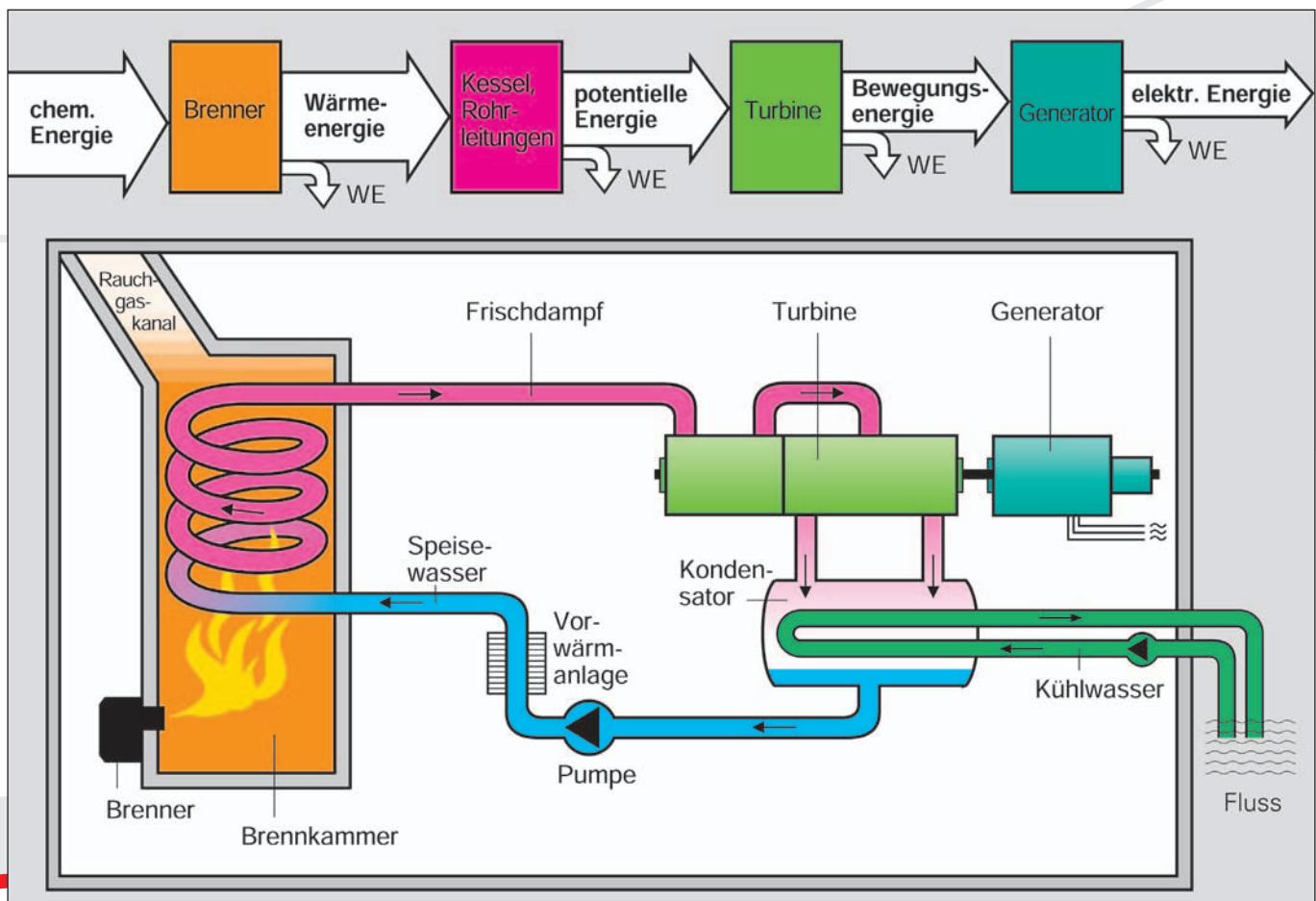


Abb. 3.1: Energieumwandlungen bei einem Kohlekraftwerk (WE: Wärmeenergieverluste)

- Im Brenner wird die zu Staub zermahlene Kohle verbrannt und dabei die chemische Energie der Kohle in Wärmeenergie umgewandelt.
- Im Kessel führt die Wärme zum Verdampfen des Wassers. Da der Dampf unter hohem Druck gehalten wird, ist die Wärmeenergie in potenzielle Energie des hochgespannten Dampfes umgewandelt worden.
- Lässt man den hochgespannten Dampf aus den Düsen gegen die Schaufeln der Dampfturbine strömen, wandelt sich die potenzielle Energie in Bewegungsenergie um.
- Die letzte Energieumwandlung findet im Generator statt, der an die Dampfturbine gekoppelt ist. Bewegungsenergie wird in elektrische Energie umgewandelt.

Bei fast jeder Umwandlungsstufe wird Wärmeenergie ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Diese Verluste führen dazu, dass der Gesamtwirkungsgrad von Kohlekraftwerken heute bei etwa 0,38 liegt.

In Kernkraftwerken finden ebenfalls vier Energieumwandlungen statt (Abb. 3.2). Dabei ist lediglich die erste Energieumwandlung anders als in Kohlekraftwerken. In den

Brennelementen werden die Kerne bestimmter Uranatome gespalten, wodurch sich die Brennelemente erhitzen. Es findet also eine Umwandlung von Kernenergie in Wärmeenergie statt. Alle anderen Energieumwandlungsstufen stimmen mit denen der Kohlekraftwerke überein. Der Gesamtwirkungsgrad eines Kernkraftwerks beträgt etwa 0,34.

3.3 Beschreibung der Wärme im Teilchenmodell

Sowohl bei Kohlekraftwerken als auch bei Kernkraftwerken wird durch eine erste Energieumwandlung Wärme erzeugt. Damit lässt sich die Temperatur des Wassers erhöhen und Wasserdampf erzeugen. Diese Vorgänge können mit dem Teilchenmodell genauer beschrieben werden:

- Alle festen, flüssigen und gasförmigen Stoffe sind aus kleinsten Teilchen aufgebaut. Es können Moleküle, Atome oder Ionen sein. Wasser besteht z.B. aus Wassermolekülen, Eisen aus Eisenatomen und Kochsalz aus Natrium- und Chloridionen.
- Oberhalb des absoluten Nullpunktes (-273,15 °C) befinden sich die Teilchen in dauernder ungeordneter Bewegung.

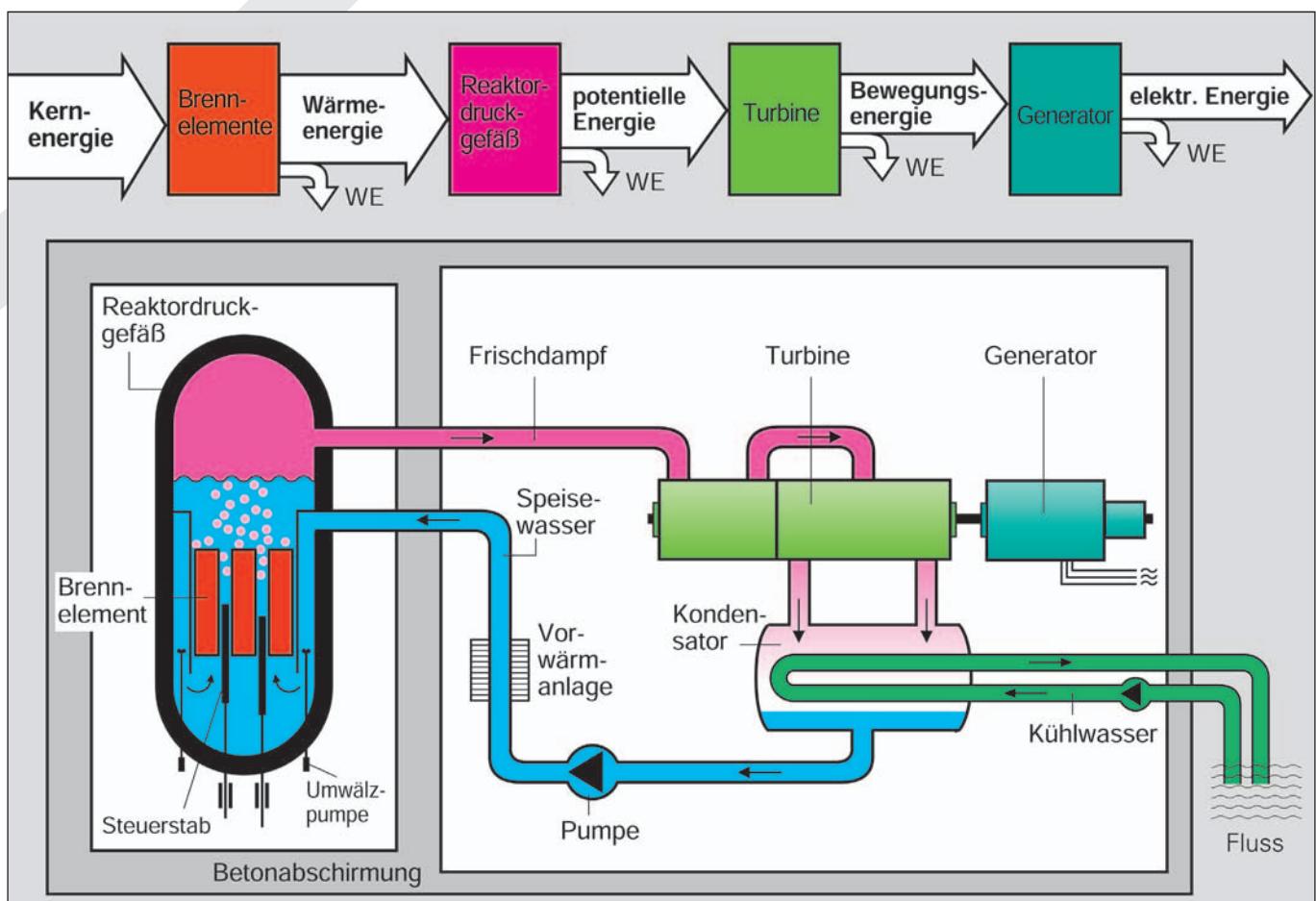


Abb. 3.2: Energieumwandlungen bei einem Kernkraftwerk (hier mit Siedewasserreaktor)

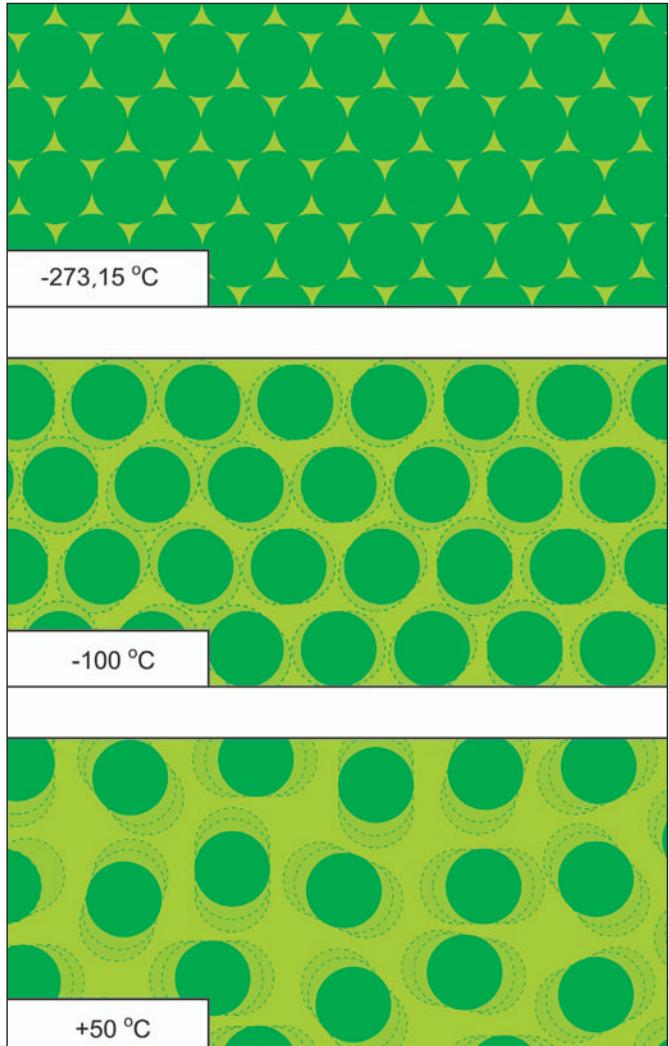


Abb. 3.3: Teilchenmodell eines festen Körpers bei unterschiedlichen Temperaturen

Je heftiger sich die Teilchen bewegen (je größer ihre mittlere Geschwindigkeit ist), desto höher ist die Temperatur des Stoffs. Bei festen Stoffen führen die Teilchen Schwingungen um ihre Position im Kristallgitter aus (siehe Abb. 3.3). Kommen die Teilchen zur Ruhe, ist die tiefstmögliche Temperatur erreicht. Das ist der absolute Nullpunkt von $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- Die Geschwindigkeit der Teilchen kann auf zweierlei Weise erhöht werden:
 - Durch mechanische Arbeit (Reibung) steigt die mittlere Geschwindigkeit der Teilchen. Die mechanische Energie ist dann in Bewegungsenergie der Teilchen umgewandelt worden. Die Energie, die in Form der Teilchenbewegung vorliegt, wird innere Energie genannt.
 - Ein Körper höherer Temperatur hat Kontakt mit einem Körper niedrigerer Temperatur. Es stoßen dann die schnelleren Teilchen des heißen Körpers die langsame-

ren Teilchen des kälteren Körpers an. Dadurch werden die schnelleren Teilchen langsamer und die langsamen Teilchen schneller. Die innere Energie des einen Körpers wird dabei erniedrigt und die des anderen Körpers erhöht.

Bei einem Kohlekraftwerk sind die heißen Verbrennungsgase in Kontakt mit den kälteren Rohrleitungen des Kessels und diese wiederum in Kontakt mit dem Wasser. Die Energieübertragung erfolgt von den schnelleren Gasteilchen zu den langsameren Eisen- bzw. Wasserteilchen. Besitzen die Wasserteilchen eine genügend große Geschwindigkeit, können sie die Flüssigkeit verlassen, d.h. Wasser verdampft.

Bei einem Kernkraftwerk werden Kerne des Uran-235 gespalten. Die Spaltprodukte fliegen mit großer Geschwindigkeit auseinander und versetzen die umgebenden UO_2 -Moleküle in heftigere Schwingungen. Die Temperatur steigt daraufhin bis auf etwa $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ an. Die Bewegungsenergie der UO_2 -Moleküle wird dann durch Stöße auf die Atome der Brennstabhülle und letztlich auf die Wassermoleküle übertragen (Abb. 3.4). Daraufhin steigt die Wassertemperatur an, und es entsteht Dampf.

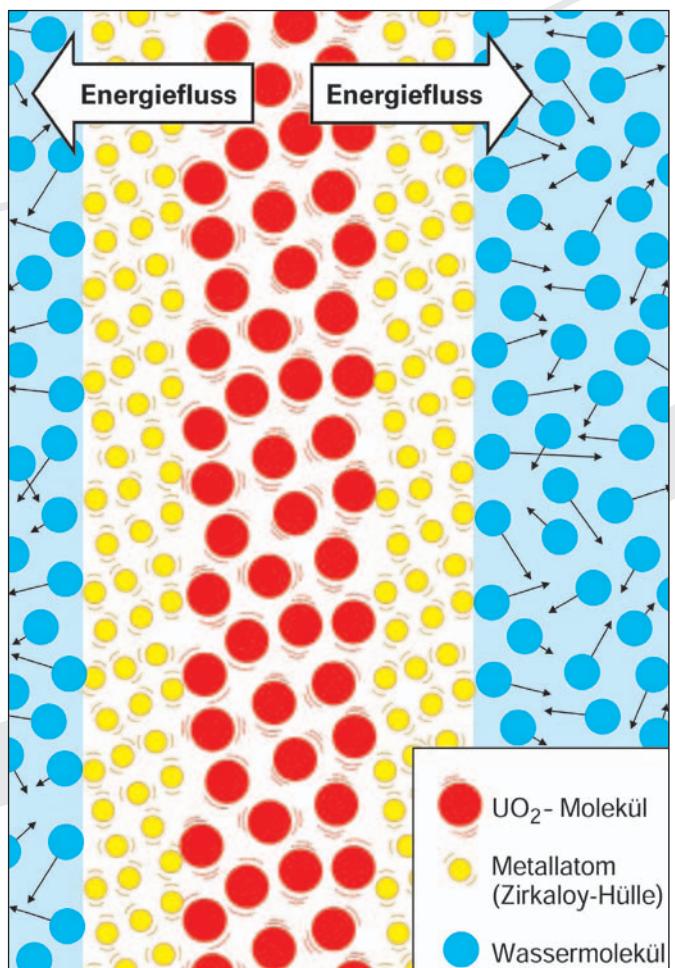


Abb. 3.4: Darstellung eines Brennstabes im Teilchenmodell

3.4 Energieeinheit Elektronvolt

Als Energieeinheiten werden das Newtonmeter (Nm), das Joule (J) und die Wattsekunde (Ws) verwendet. Dabei gilt:

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

- 1 Nm Energie ist erforderlich, wenn eine Kraft von 1 N längs eines Weges von 1 m wirken soll.
- Bei 1 V Spannung und einer Stromstärke von 1 A wird in 1 s die Energie von 1 Ws z.B. in Wärme umgewandelt.

Bei einzelnen Kernumwandlungen treten sehr viel kleinere Energiewerte auf. Deshalb ist zusätzlich die Einheit Elektronvolt (eV) festgelegt worden. 1 eV ist die Energie, die ein Elektron aufnimmt, wenn es beim freien Durchlaufen einer Spannung von 1 V beschleunigt wird (Abb. 3.5).

Vielfache von 1 eV:

1 Kiloelektronvolt (keV)	=	10^3 eV
1 Megaelektronvolt (MeV)	=	10^6 eV
1 Gigaelektronvolt (GeV)	=	10^9 eV

Für Umrechnungen gilt:

1 eV	=	$1,602 \cdot 10^{-19}$ J
1 J	=	$6,242 \cdot 10^{18}$ eV

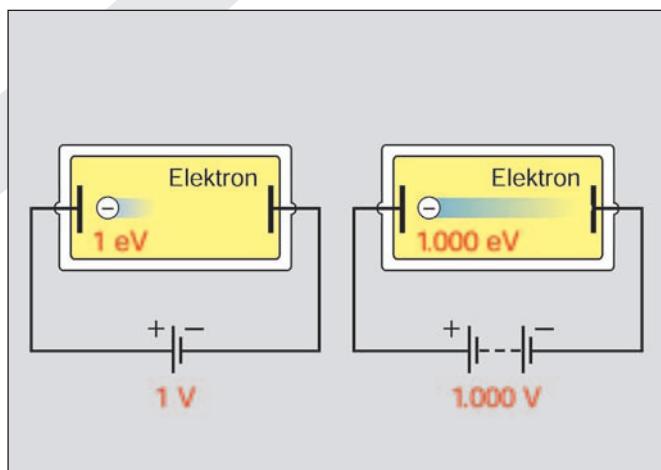


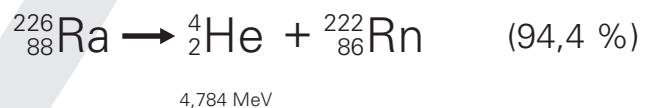
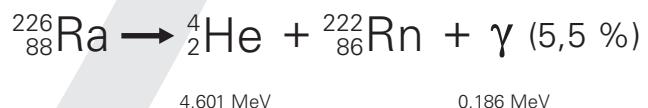
Abb. 3.5: Veranschaulichung der Energieeinheit Elektronvolt

3.5 Energie der Teilchenstrahlung

3.5.1 Alphateilchen

Die von einem radioaktiven Atomkern ausgesandten Alphateilchen besitzen alle dieselbe Energie oder beim Zerfall in mehrere Gruppen unterschiedliche Energien. Die Alphateilchen einer Gruppe haben aber immer dieselbe Energie.

Beispiel für einen Gruppenzerfall:



Hat das ausgesandte Alphateilchen die Maximalenergie erhalten, ist der Kern in den Grundzustand übergegangen. Ist die Energie des Alphateilchens kleiner, befindet sich der Kern noch in einem angeregten Zustand (metastabil). Die restliche Energie des angeregten Kerns wird in Form eines Gammaquants abgegeben.

Die Tab. 3-1 zeigt Beispiele für die Energie von Alphateilchen einiger Radionuklide:

Radionuklid	Energie der Alphateilchen in MeV in der Reihenfolge abnehmender Häufigkeit
Rn-222	5,48952; ...
Ra-226	4,78434; 4,601; ...
U-238	4,198; 4,151; ...
Pu-239	5,1566; 5,1443; ...

Tab. 3-1: Beispiele für Energien der Alphateilchen einiger Alphazerfälle (Die Punkte hinter den Energiewerten weisen auf weitere Alphateilchen hin, die mit geringerer Häufigkeit auftreten.)

3.5.2 Betateilichen

Die beim Betazerfall auftretenden Elektronen und Positronen besitzen alle unterschiedliche Energien. Sie können zwischen Null und einem Maximalwert liegen, wobei die größte Häufigkeit für jedes Radionuklid bei einem bestimmten Energiewert liegt (Abb. 3.6).

Die kontinuierliche Energieverteilung führt daher, dass beim Betazerfall außer dem Elektron ein Antineutrino bzw. außer dem Positron ein Neutrino entsteht (ν griechischer Buchstabe „nū“).

Beta⁻-Zerfall:



Beta⁺-Zerfall:



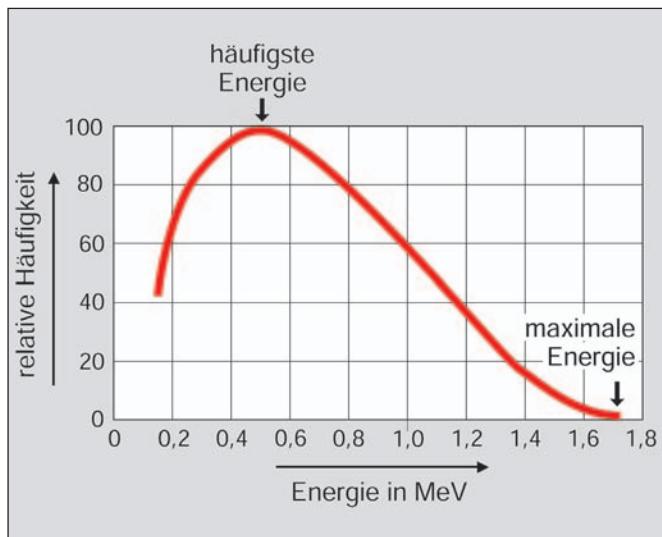
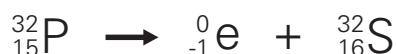


Abb. 3.6: Energieverteilung beim Beta-Zerfall des P-32

Neutrinos und Antineutrinos besitzen keine Ruhemasse und keine Ladung. Sie stellen also eine Portion besonderer Energie dar. Da sie kaum mit Materie wechselwirken, besitzen sie ein außerordentlich hohes Durchdringungsvermögen und lassen sich deshalb nur schwer nachweisen.

Die frei werdende Zerfallsenergie verteilt sich dann nach Zufall in beliebigen Bruchteilen der Maximalenergie auf die beiden Elementarteilchen. Wird durch Elektron und Antineutrino bzw. Positron und Neutrino nicht die gesamte Zerfallsenergie verbraucht, entstehen zusätzlich noch ein Gammaquant oder mehrere Gammaquanten.

Die Tab. 3-2 gibt Beispiele für die maximale Energie von Beta-Teilchen einiger Radionuklide. In Kernreaktionsgleichungen und Tabellen wird nur die Maximalenergie angegeben. Beispiel:



1,7 MeV

Radionuklid	Maximalenergie von Beta -Teilchen in MeV
H-3	0,0186
P-32	1,71
Pb-210	0,016; 0,063
Bi-214	3,275; 1,542; ...

Tab. 3-2: Maximale Beta-Energie einiger Radionuklide

3.5.3 Neutronen

Abhängig von der Entstehungsart haben die bei Kernprozessen erzeugten Neutronen eine einheitliche Energie oder ihre Energie liegt zwischen fast Null und einem Höchstwert.

Die bei Kernspaltungen entstehenden Neutronen besitzen eine kontinuierliche Energieverteilung. Ihre mittlere Energie beträgt etwa 1,5 MeV. Zur Spaltung weiterer Kerne des Uran-235 werden aber Neutronen mit einer Energie von etwa 0,025 eV benötigt. Das entspricht etwa einer Geschwindigkeit von 2.200 m/s. Die Tab. 3-3 gibt die Neutronengeschwindigkeiten für verschiedene Neutronenenergien an.

Energie in eV	100.000	100	0,1	0,025
Geschwindigkeit in m/s	$4,4 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^5$	$4,4 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^3$

Tab. 3-3: Energie und Geschwindigkeit von Neutronen

3.6 Energie und Wellenlänge der Gammastrahlen

Alphateilchen, Betateilchen, Protonen und Neutronen, die bei Kernumwandlungen ausgeschleudert werden, ergeben eine Teilchenstrahlung. Ausgeschleuderte Gammaquanten bilden eine elektromagnetische Wellenstrahlung. Sie hat dieselbe Natur wie z.B. die Rundfunkwellen, das sichtbare Licht oder die Röntgenstrahlen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen beträgt im Vakuum $c_0 = 299.792.458$ m/s ≈ 300.000 km/s. Sie ist unabhängig von der Energie der einzelnen Gammaquanten (Photonen).

Die Energie eines einzelnen Quants ist nur von seiner Wellenlänge bzw. seiner Frequenz abhängig. Je kleiner die Wellenlänge (bzw. je größer die Frequenz) eines Quants, desto größer ist auch seine Energie (Abb. 3.7).

Die Abb. 3.8 zeigt, dass die Energie der Gammaquanten bis zu 10^7 -mal so groß sein kann wie die Energie der Lichtquanten.

Gammaquanten werden u.a. nach einem Alpha- oder Betazerfall von einem Kern abgestrahlt, wenn dieser noch überschüssige Energie besitzt. Das kann in einer oder in mehreren Stufen geschehen. Die Quanten einer bestimmten Stufe haben alle dieselbe Energie. Die Anzahl der ausgesandten Quanten kann also größer sein als die Anzahl der umgewandelten Atomkerne. Die Tab. 3-4 gibt Beispiele für die Energie von Gammaquanten einiger Radionuklide.

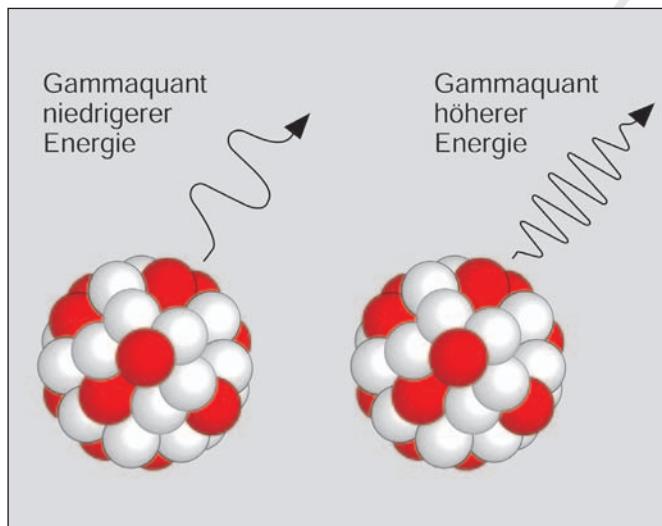


Abb. 3.7: Wellenlänge oder Frequenz eines Quants bestimmen seine Energie

Radionuklid	Umwandlungsart	Energie der häufigsten Gammaquanten (in MeV) in der Reihenfolge abnehmender Häufigkeit
Be-7	K-Einfang	0,478
N-16	Beta-Minus	6,129; 7,115;
Na-22	Beta-Plus	1,275
U-235	Alpha	0,186; 0,144;

Tab. 3-4: Gammaenergie einiger Radionuklide

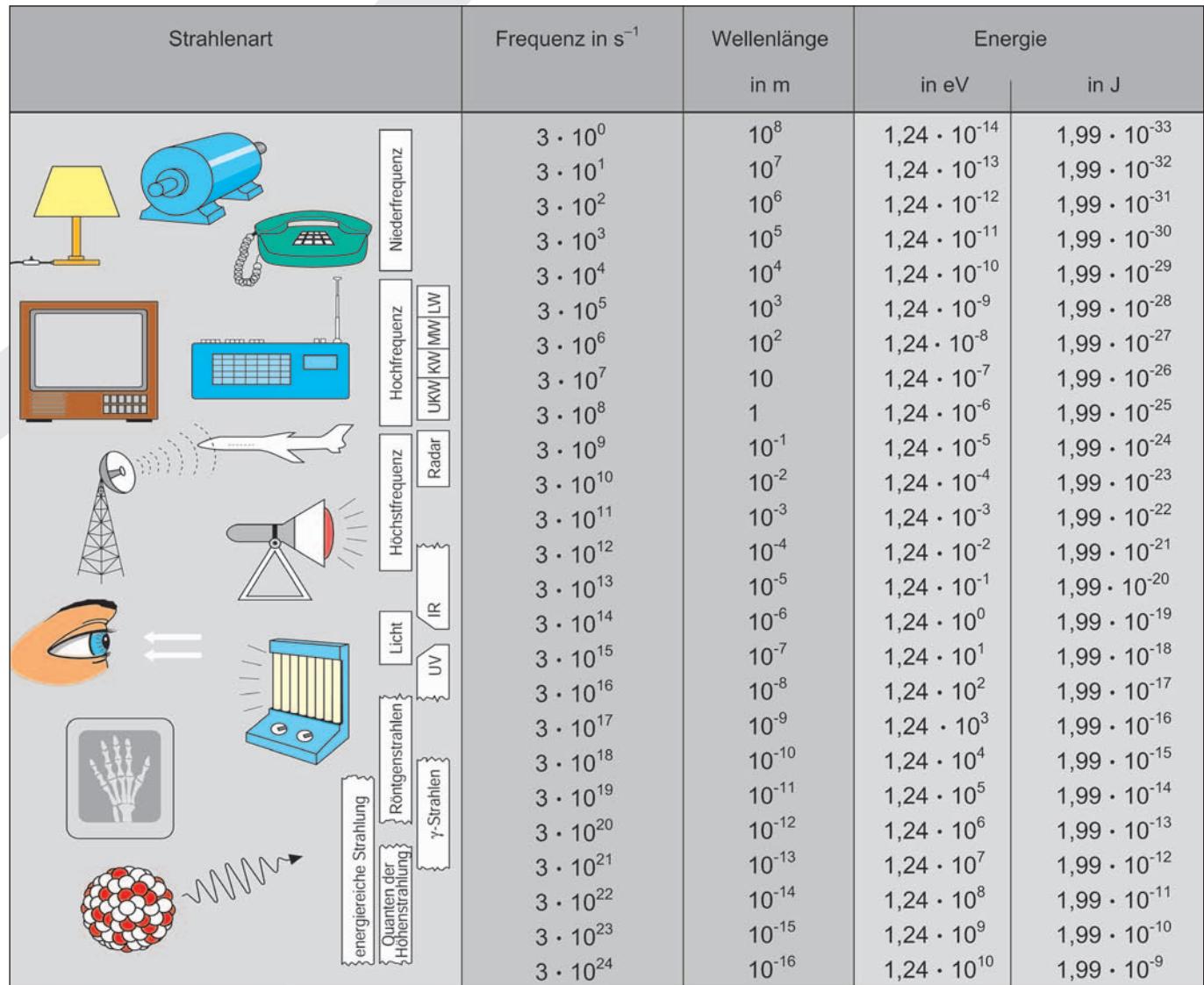


Abb. 3.8: Beziehung zwischen Frequenz, Wellenlänge und Energie elektromagnetischer Wellen

3.7 Erzeugung von Wärme durch radioaktive Stoffe

Alpha- und Betateilchen, die aus radioaktiven Atomkernen ausgeschleudert werden, besitzen aufgrund ihrer Masse und ihrer Geschwindigkeit Bewegungsenergie. Je größer Masse und Geschwindigkeit sind, desto größer ist die Bewegungsenergie. Da der radioaktive Atomkern beim Ausschleudern eines Teilchens einen Rückstoß erfährt, besitzt er ebenfalls Bewegungsenergie (Abb. 3.9).

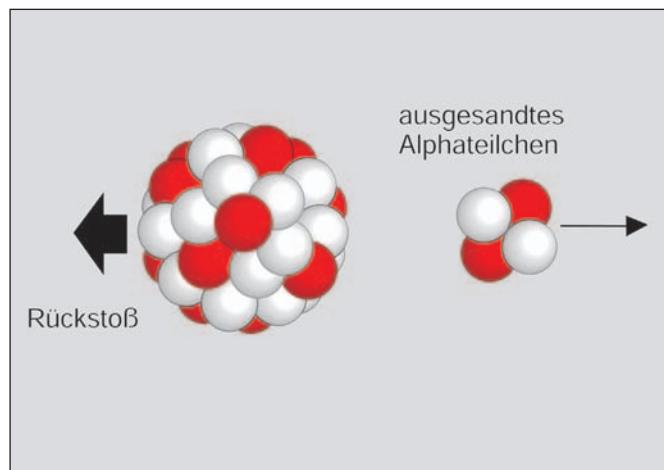


Abb. 3.9: Beim Ausschleudern eines Alphateilchens erfährt der Kern einen Rückstoß

Ausgesandte Teilchen und Rückstoßkerne stoßen mit den in unmittelbarer Umgebung vorhandenen Atomen zusammen und versetzen diese in heftigere Bewegungen. Das macht sich als Temperaturerhöhung bemerkbar. Eine radioaktive Substanz hat also immer eine höhere Temperatur als die in der Nähe befindlichen nichtradioaktiven Substanzen.

1 g Radium einschließlich aller radioaktiver Folgeprodukte gibt in jeder Stunde etwa 711,8 J an die Umgebung ab. Dabei wird der bei weitem überwiegende Anteil der Energie von den Alphateilchen abgegeben. Dieser je Stunde abgegebene Energiebetrag würde ausreichen, die Temperatur von etwa 1,7 g Wasser von 0 °C auf 100 °C zu erhöhen.

Bei größeren Massen radioaktiver Stoffe, deren spezifische Aktivität sehr hoch ist, kann die Erwärmung so stark sein, dass sich der Stoff bis zum Glühen erhitzt. Die Abb. 3.10 (Quelle: Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA) zeigt eine glühende Säule aus Curiumoxid. Das Radionuklid ist Cm-242, das Alphateilchen mit recht hohen Anfangsenergien von 6,113 MeV und 6,069 MeV aussendet. Auch die bei Kernkraftwerken in den Brennstäben anfallenden radioaktiven Spaltprodukte erwärmen die Brennstäbe so stark, dass diese nach Entnahme aus dem Reaktor zur ständigen Kühlung in einem Wasserbecken aufbewahrt werden müssen. Die Wärmeproduktion klingt im Laufe der Zeit ab.

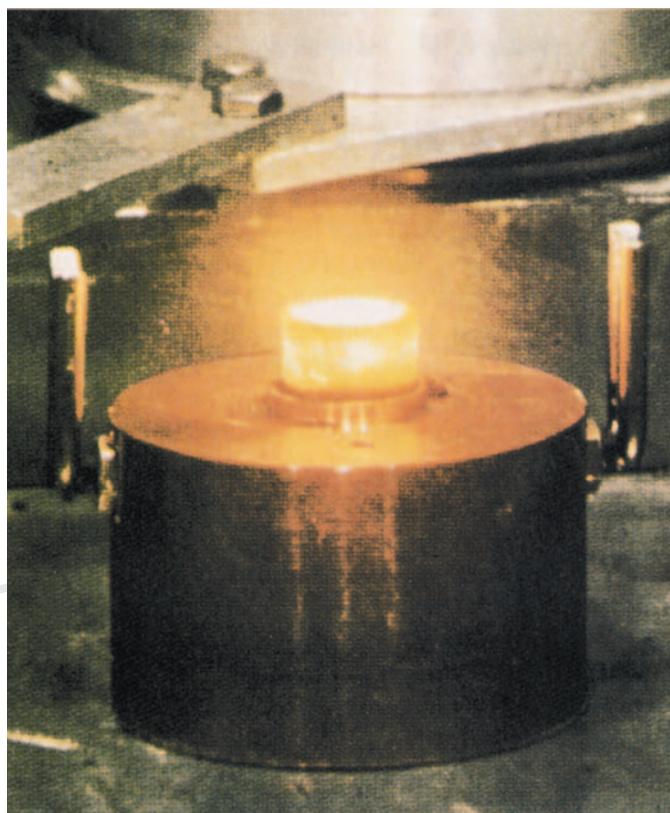


Abb. 3.10: „Selbsterhitzung“ eines Zylinders aus Curiumoxid. Die Wärmeleistung dieser Probe beträgt etwa 300 W.

4 Kernspaltung und Kettenreaktion

4.1 Entdeckung der Kernspaltung

Im Jahr 1932 gelang dem Engländer Chadwick, die sehr durchdringenden Strahlen richtig zu deuten, die beim Beschuss von Beryllium mit Alphateilchen entstehen.



Die dabei auftretenden Teilchen nannte er wegen ihres elektrisch neutralen Charakters Neutronen.

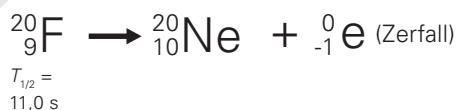
Nachdem das Proton bereits 1919 durch Rutherford entdeckt worden war, konnte man nun endlich den Aufbau der Atomkerne aus Protonen und Neutronen erklären.

Gleichzeitig hatte man ein Teilchen zur Verfügung, das sich relativ leicht in andere Atomkerne einbauen ließ, da ein Neutron von den positiven Ladungen der Protonen nicht abgestoßen wird, weil es ungeladen ist. Die freien Neutronen wurden zunächst zur Erzeugung künstlicher Isotope benutzt.

Beispiel einer Isotopenerzeugung mit stabilem Endkern:



Beispiel einer Isotopenerzeugung mit radioaktivem Endkern:



Beim Beschuss von Uran und Thorium mit Neutronen wurde 1934 erstmals die Vermutung geäußert, es könnten Elemente mit einer Kernladungszahl über 92 entstehen (Transurane).

Gleichzeitig tauchte im selben Jahr die Vermutung auf, dass bei der Beschießung schwerer Kerne mit Neutronen die Kerne in mehrere Bruchstücke zerfallen könnten. Diese Annahme wurde aber nicht weiter überprüft.

In Berlin waren die Chemiker Otto Hahn (Abb. 4.1) und Fritz Strassmann (bis 1938 zusammen mit der Physikerin Lise Meitner) damit beschäftigt, die geringen Mengen der erzeugten Isotope zu identifizieren. Chemische Untersuchungen legten die Annahme nahe, dass beim Beschuss von Uran mit Neutronen Radiumisotope entstanden seien. In einem Aufsatz, den Otto Hahn und Fritz Strassmann im Dezember 1938 der Zeitschrift „Naturwissenschaften“ zur Publikation eingereicht hatten und der im Januar 1939 erschien, heißt es: „Unsere Radium-Isotope haben die Eigenschaften des Bariums; als Chemiker müssten wir eigentlich sagen, bei den neuen Körpern handelt es sich nicht um Radium, sondern um Barium.“

Durch Gedankenaustausch mit anderen Forschern, vor allem mit der nach Schweden emigrierten Lise Meitner, festigte sich die Überzeugung, dass beim Beschuss von Uran mit Neutronen tatsächlich radioaktives Barium entstanden war. Das konnte dann aber nichts anderes bedeuten, als dass Urankerne gespalten worden waren. Eine zweite Arbeit von Hahn und Strassmann, die im Januar 1939 zur Veröffentlichung eingereicht worden war, trägt bereits den Titel: „Nachweis der Entstehung aktiver Bariumisotope aus Uran und Thorium durch Neutronenbestrahlung; Nachweis weiterer aktiver Bruchstücke bei der Kernspaltung“.

In diesem Aufsatz wird also erstmals das Wort Kernspaltung veröffentlicht, das von Lise Meitner und ihrem Mitarbeiter Max Frisch geprägt worden war. Es wird darin gleichzeitig aufgezeigt, dass als Spaltprodukte nicht nur Barium, sondern auch radioaktive Isotope des Strontiums und Yttriums entstanden waren.

4.2 Kernspaltung und Spaltprodukte

Es ist nachgewiesen worden, dass grundsätzlich alle Atomkerne gespalten werden können. Bei bestimmten Uran- und Plutoniumisotopen ist aber die Spaltung mit Hilfe von Neutronen besonders leicht durchzuführen. Außerdem wird bei der Spaltung dieser Kerne mehr Energie frei als dafür aufgewendet werden muss (exotherme Reaktion). In der Natur kommen drei Uranisotope vor, U-234, U-235 und U-238. Sie sind Alphastrahler mit unterschiedlichen Halbwertzeiten (Tab. 4-1).



Abb. 4.1: Nobelpreisträger Otto Hahn (1879 - 1968)

Isotop	Halbwertzeit	Isotopenhäufigkeit
U-234	$2,455 \cdot 10^5$ a	0,005 %
U-235	$7,038 \cdot 10^8$ a	0,720 %
U-238	$4,468 \cdot 10^9$ a	99,275 %

Tab. 4-1: Die natürlichen Uranisotope

Alle drei Uranisotope haben zusätzlich die Eigenschaft (wie die meisten Transurane auch), sich spontan zu spalten. Die Spontanspaltung ergibt sich aus der Tatsache, dass bei schweren Atomkernen die Abstoßung zwischen den Protonen etwa so groß ist wie die zusammenhaltenden Kernkräfte. Die Stabilität solcher Kerne ist dadurch sehr geschwächt. Da Spontanspaltungen bei Uran sehr selten vorkommen, spielen sie für die Kerntechnik praktisch keine Rolle. Es werden deshalb hier nur Kernspaltungen beschrieben, die durch Neutronenbeschuss künstlich ausgelöst werden. Dabei verhalten sich die Uranisotope gegenüber Neutronenbeschuss unterschiedlich. Bei Uran-238 wird eine Spaltung nur selten erreicht und dann nur bei hoher Energie (Geschwindigkeit) der Neutronen. Die Kerne des Uran-235 lassen sich dagegen sehr viel leichter sowohl durch schnelle als auch durch thermische (langsame) Neutronen spalten. Mit langsamen Neutronen gelingt die Spaltung aber besonders leicht. Uran-234 spielt für Kernspaltungen wegen seines geringen Vorkommens in der Natur praktisch keine Rolle.

Bei den in der Bundesrepublik Deutschland betriebenen Kernkraftwerken werden Kerne des Uran-235 (und z.T. auch des Plutonium-239) gespalten. Dafür braucht das Uran nicht als Element vorzuliegen. Es ist auch in Form chemischer Verbindungen (z. B. als UO_2) spaltbar. Eine Kernspaltung lässt sich durch eine Kernreaktionsgleichung beschreiben.

Beispiel:



Trifft ein langsames (thermisches) Neutron auf einen Atomkern des Uran-235, wird es in den Kern aufgenommen. Es entsteht ein hochangeregter Zwischenkern des Isotops Uran-236. Seine Lebensdauer beträgt nur etwa 10^{-14} s (Abb. 4.2). Der neue Kern versucht, seine Anregungsenergie abzugeben. In etwa sechs von sieben Fällen tritt eine Spaltung ein, in einem Fall geht der Atomkern durch Aussenden eines Gammaquants in das langlebige Isotop Uran-236 über (Alphastrahler, $T_{1/2} = 2,342 \cdot 10^7$ a).

Die Spaltung kann man sich im Modell so vorstellen, dass nach dem Einfang des Neutrons der Uranskern zu schwingen beginnt, sich ellipsenförmig verformt, hantelförmig einschnürt und letztlich in zwei mittelschwere Trümmerkerne sowie in zwei bis drei Neutronen zerfällt. An der Stelle der Einschnürung berühren sich nur wenige Nukleonen, so dass nur noch geringe Kernkräfte für den Zusammenhalt zur Verfügung stehen. Die abstoßenden elektrischen Kräfte zwischen den Protonen werden zwar mit zunehmender Entfernung etwas kleiner, sie bleiben aber insgesamt bestehen. Von einer bestimmten Einschnürung ab überwiegen sie schließlich und treiben die beiden Teile des Kerns auseinander. Außerdem überwiegt die Tendenz der Kernteilchen, sich zu kleineren Kernen zusammenzuballen, weil das energetisch günstiger ist.

Die Spaltung eines Uran-235-Kerns kann verschiedene Trümmerkerne (Spaltprodukte) ergeben. Dabei muss die Summe der Kernladungszahlen der Spaltprodukte gleich der Kernladungszahl des Urans sein. Die Massenzahlen der Trümmerkerne und der frei gewordenen Neutronen betragen stets 236.

Die Massenzahlen der Spaltprodukte liegen etwa zwischen 70 und 160. Ein Maximum liegt bei der Massenzahl 95, ein zweites Maximum bei der Massenzahl 140. Die Massenzahlen liegen am häufigsten im Verhältnis 2:3 zueinander.

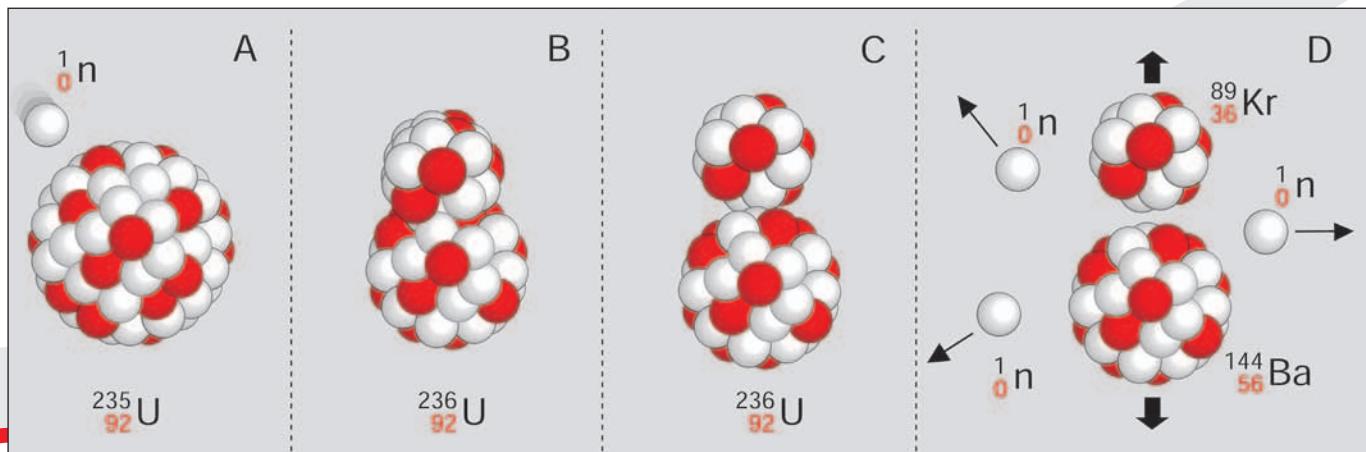


Abb. 4.2: Vier-Phasen-Modell zur Kernspaltung

Abb. 4.3 zeigt die Häufigkeitsverteilung der bei der Spaltung von Uran-235 entstehenden Spaltprodukte. Man kennt heute über 300 verschiedene Spaltprodukte des Uran-235, die sich auf 54 verschiedene Elemente beziehen, von Titan bis zum Ytterbium; hinzu kommen noch die Elemente Wasserstoff bis Kohlenstoff, die bei der ternären Spaltung – Spaltung des Uran in drei Spaltprodukte – entstehen.

Beispiele:



Aufgrund des Neutronenüberschusses sind die Spaltprodukte zum großen Teil radioaktiv. Sie wandeln sich unter Aussen- den von Betastrahlen in stabile Kerne um. Dabei werden ganze Zerfallsreihen durchlaufen. Es ist aber auch Neutronenemission möglich.

Neben den Spaltprodukten entstehen durch Neutroneneinfang im Uran Plutonium und andere Actinoide (Actinoide ist eine Bezeichnung für die Elemente mit den Kernladungszahlen 89 [Actinium] bis 103). Die Tab. 4-2 gibt die Zusammensetzung von Kernbrennstoff vor und nach dem Reaktoreinsatz bei einem Abbrand von 33.000 MWd/t an. Ein Abbrand von 33.000 MWd/t bedeutet, dass der Kernbrennstoff so lange im Reaktor eingesetzt war, dass pro Tonne Kernbrennstoff eine Energie von 33.000 MWd gewonnen wurden (1 MWd = 24.000 kWh).

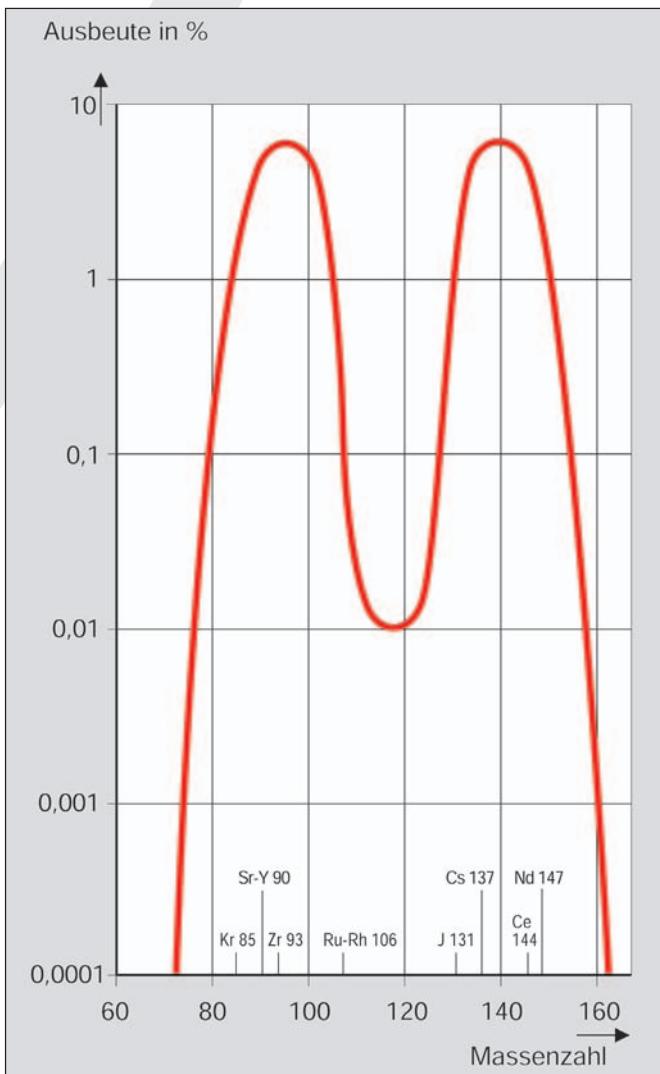


Abb. 4.3: Häufigkeitsverteilung der bei der Spaltung von Uran-235 entstehenden Spaltprodukte

Natururan	99,3 % U-238 0,7 % U-235
Kernbrennstoff vor dem Reaktoreinsatz	96,5 % U-238 3,3 % U-235
Kernbrennstoff nach dem Reaktoreinsatz (Abbrand 33.000 MWd/t)	94,5 % U-238 0,4 % U-236 0,9 % U-235 3,2 % Spaltprodukte 0,9 % Pu 0,1 % übrige Actinoide

Tab. 4-2: Radionuklide im Kernbrennstoff vor und nach dem Einsatz im Reaktor

4.3 Energiebilanz bei der Kernspaltung

Im Urankern sind die Nukleonen (Protonen und Neutronen) mit einer mittleren Energie von etwa 7,6 MeV pro Nukleon gebunden. In den kleineren Spaltprodukten mit Massenzahlen zwischen 80 und 150 beträgt die mittlere Bindungsenergie je Nukleon aber etwa 8,5 MeV. Die Differenz von 0,9 MeV je Nukleon wird bei der Kernspaltung freigesetzt. Da der Urankern 235 Nukleonen besitzt, ergibt sich bei jeder Spaltung ein Energiebetrag von $235 \cdot 0,9 \text{ MeV}$, also rund 210 MeV. Er setzt sich aus folgenden Teilbeträgen zusammen (Tab. 4-3):

Art der Energie	Energie
Bewegungsenergie der Spaltprodukte	175 MeV
Bewegungsenergie der Neutronen	5 MeV
bei der Kernspaltung auftretende Gammastrahlung	7 MeV
Energie aus dem Betazerfall der Spaltprodukte	7 MeV
Energie der Gammaquanten der Spaltprodukte	6 MeV
Energie der Neutrinos	10 MeV
Summe	210 MeV

Tab. 4-3: Energiefreisetzung bei der Kernspaltung

Von dem Energiebetrag 210 MeV können in einem Kernreaktor nur etwa 190 MeV = $1,9 \cdot 10^8 \text{ eV}$ genutzt werden, das sind rund 90 %, da die Energie der Gammastrahlen nur z.T. im Innern des Reaktors absorbiert und die Zerfallsenergie der Spaltprodukte z.T. erst im radioaktiven Abfall außerhalb des Reaktors frei wird. Die Energie der Neutrinos kann praktisch gar nicht genutzt werden, da sie mit Materie kaum wechselwirken. Die pro Kernspaltung nutzbare Energie von $1,9 \cdot 10^8 \text{ eV}$ ist ein sehr kleiner Betrag. Um 1 J Wärme zu erzeugen, müssen rund 33 Mrd. Urankerne gespalten werden:

$$1 \text{ J} = 6,242 \cdot 10^{18} \text{ eV}$$

$$N = \frac{6,242 \cdot 10^{18} \text{ eV}}{1,9 \cdot 10^8 \text{ eV}} \approx 3,3 \cdot 10^{10} = 33 \text{ Mrd.}$$

Um bei 1 kg Wasser die Temperatur von 0 °C auf 100 °C zu erhöhen, sind $E_{th} = 4,2 \cdot 10^5 \text{ J}$ erforderlich. Um diese

Wärmemenge aus Kernenergie zu erzeugen, wären $N = 4,2 \cdot 10^5 \cdot 3,3 \cdot 10^{10} \approx 1,4 \cdot 10^{16}$ Kerne des Uran-235 zu spalten. Das entspricht einer Masse an reinem Uran-235 von etwa $m = 5,5 \mu\text{g}$.

Wie viele Urankerne gespalten werden müssten, wenn der Jahresbedarf an elektrischer Energie einer europäischen Stadt mit 1,5 Mio. Einwohnern vollständig aus Kernenergie gedeckt werden sollte, zeigt folgende Rechnung:

- Angenommener Jahresbedarf an elektrischer Energie:

$$E_{el} = 10^{10} \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^{16} \text{ Ws}$$

- Da der Wirkungsgrad von Kernkraftwerken etwa 0,34 ist, muss im Kraftwerk zunächst rund dreimal soviel Wärmeenergie erzeugt werden:

$$E_{th} = 3 \cdot 3,6 \cdot 10^{16} \text{ Ws} = 10,8 \cdot 10^{16} \text{ Ws} = 10,8 \cdot 10^{16} \text{ J}$$

- Umrechnung der Einheit J in die Einheit eV (1 J = $6,242 \cdot 10^{18} \text{ eV}$):

$$E_{th} = 10,8 \cdot 10^{16} \text{ J} = 6,242 \cdot 10^{18} \text{ eV} \cdot 10,8 \cdot 10^{16} \approx 6,74 \cdot 10^{35} \text{ eV}$$

Für den gesamten Energiebetrag von $6,74 \cdot 10^{35} \text{ eV}$ ergibt sich eine sehr große Anzahl N von Kernspaltungen:

$$N = \frac{6,74 \cdot 10^{35} \text{ eV}}{1,9 \cdot 10^8 \text{ eV}} \approx 3,6 \cdot 10^{27}$$

Es bedeutet also, dass in einem Kernkraftwerk $N = 3,6 \cdot 10^{27}$ Urankerne gespalten werden müssen, um eine Wärmeenergie von $E_{th} = 10,8 \cdot 10^{16} \text{ J}$ zu erhalten, die dann zu 34 % in $E_{el} = 3,6 \cdot 10^{16} \text{ Ws} = 10 \cdot 10^9 \text{ kWh}$ elektrische Energie umgewandelt wird.

- Die $N = 3,6 \cdot 10^{27}$ gespaltenen Atomkerne haben vor der Spaltung eine bestimmte Masse. Sie kann über die Loschmidtsche Zahl berechnet werden.

$6,023 \cdot 10^{23}$ U-235-Atome haben eine Masse von 235 g. $3,6 \cdot 10^{27}$ Uranatome haben eine Masse m :

$$m = \frac{3,6 \cdot 10^{27} \cdot 235 \text{ g}}{6,023 \cdot 10^{23}} = 1,39 \cdot 10^6 \text{ g} = 1,39 \text{ t}$$

Da die Dichte von Uran $\rho = 19 \text{ g/cm}^3$ beträgt, hätten 1,39 t Uran ein Volumen von $V = 73.158 \text{ cm}^3$. Das entspräche einem Würfel mit der Kantenlänge von etwas weniger als 0,42 m.

- Würde man dieselbe Menge an Wärmeenergie $E_{th} = 10,8 \cdot 10^{16} \text{ J}$ durch Verfeuern von Steinkohle erzeugen wollen, wäre eine Masse von $m = 3,4 \cdot 10^6 \text{ t}$ erforderlich (das 2,5 Millionenfache des Urans). Der Heizwert von Steinkohle beträgt $E_h = 31,8 \cdot 10^6 \text{ J/kg} \approx 32 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$. Daraus errechnet sich:

$$m = \frac{10,8 \cdot 10^{16} \text{ J} \cdot \text{kg}}{32 \cdot 10^6 \text{ J}} \approx 3,4 \cdot 10^9 \text{ kg} = 3,4 \cdot 10^6 \text{ t}$$

Da die Schütteldichte von Steinkohle $\rho \approx 1 \text{ kg/dm}^3$ beträgt, hätte der Kohleberg ein Volumen von $V = 3,4 \cdot 10^9 \text{ dm}^3 = 3,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Das entspräche einem Würfel mit der Kantenlänge von etwas mehr als 150 m.

4.4 Kettenreaktion im Uran-235

Hahn und Strassmann äußerten bereits in ihren beiden ersten Aufsätzen über die Kernspaltung die Vermutung, dass neben den beiden Spaltprodukten noch einige Neutronen entstehen müssten. Dies wurde von dem französischen Forscher Joliot im März 1939 experimentell bestätigt. Damit hatte man die Möglichkeit erkannt, einen sich selbst erhaltenden Kernspaltungsprozess ablaufen zu lassen. Unter geeigneten Bedingungen können nämlich die freigesetzten Neutronen sofort weitere Uranatome spalten, so dass ein lawinenartig ablaufender Spaltprozess entsteht. Er wird allgemein als Kettenreaktion bezeichnet.

Abb. 4.4 zeigt den Beginn einer solchen Kettenreaktion im Modell. Geht man davon aus, dass nach jeder Spaltung zwei freie Neutronen zur Verfügung stehen (tatsächlich sind

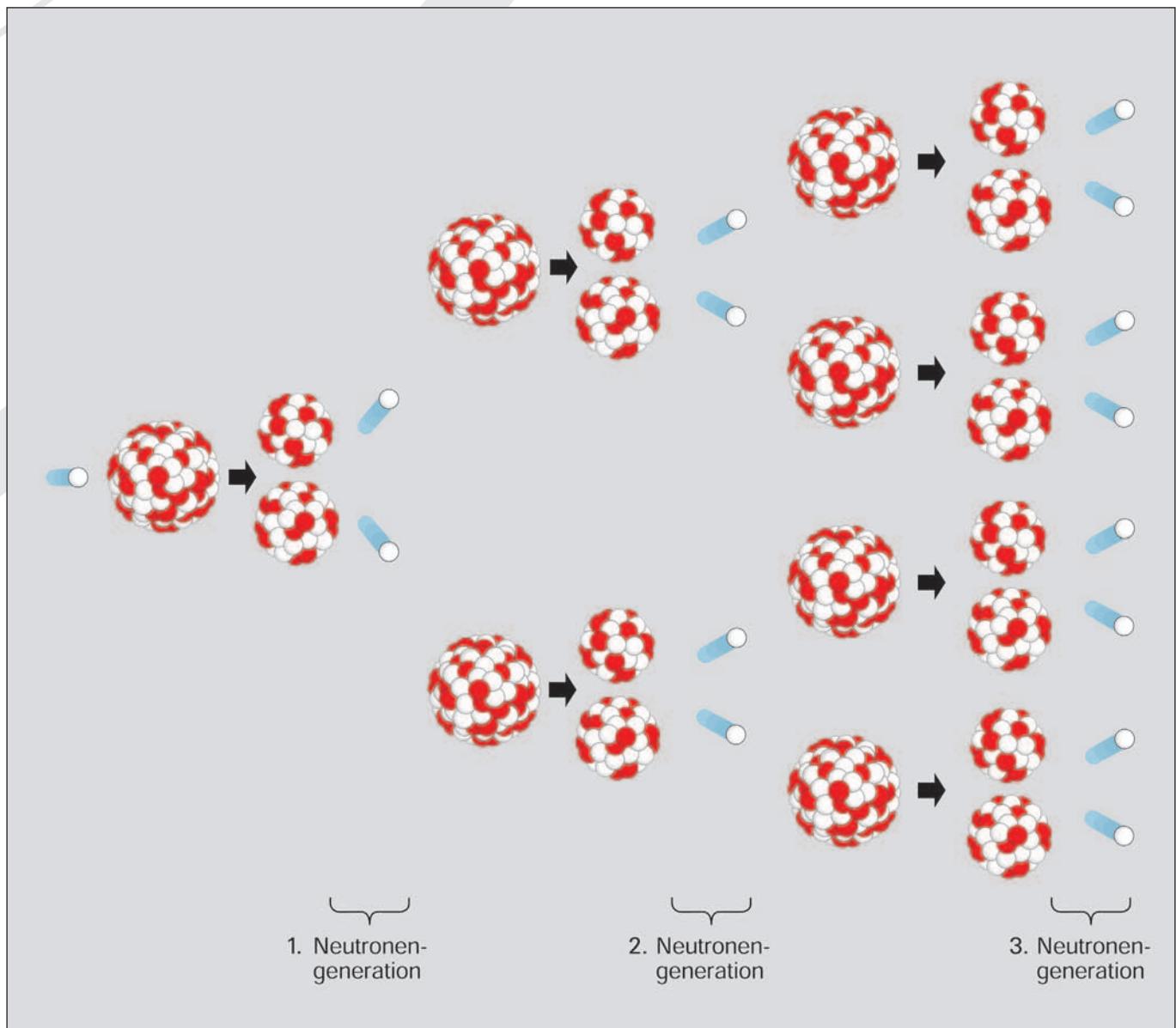


Abb. 4.4: Kettenreaktion im Uran-235

es im Mittel 2,3), sind es in den weiteren Schritten 4, 8, 16, 32, 64, 128 usw. Wenn genügend Urankerne vorhanden sind, keine Neutronen nach außen verloren gehen oder von Fremdatomen eingefangen werden, verdoppelt sich die Anzahl der Kernspaltungen von Neutronengeneration zu Neutronengeneration, der gesamte Vorgang läuft lawinenartig ab. Dabei werden ungeheure Mengen an Energie in kürzester Zeit frei.

Bei reinem Uran-235 liegt die Lebensdauer einer Neutronengeneration im Bereich von milliardstel Sekunden (10^{-9} s). 100 Neutronengenerationen wären dann – wenn jedes Neutron eine weitere Kernspaltung auslöst – nach $t = 100 \cdot 10^{-9} \text{ s} = 10^{-7} \text{ s} = 0,1 \mu\text{s}$ entstanden. Geht man davon aus, dass pro Spaltung zwei Neutronen freigesetzt werden, wären in der 100. Generationen $2^{100} \approx 10^{30}$ Neutronen entstanden. Das sind theoretisch mehr Neutronen, als zur Spaltung auch größerer Massen Uran benötigt würden (0,235 kg U-235 enthalten $6,023 \cdot 10^{23}$ Atome, 1 t U-235 besteht aus etwa $2,56 \cdot 10^{27}$ Atomen).

Nimmt man an, dass reines Uran-235 in Würfelform vorliegt und dass keine neutronenabsorbierenden Fremdatome vorhanden sind, ist für die Auslösung einer Kettenreaktion entscheidend, dass möglichst wenige Neutronen entweichen. Man erreicht dies dadurch, dass eine genügend große, möglichst kugelförmige Masse gewählt wird. Das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen dieser Masse ist dann klein. Diese Mindestmasse, in der eine Kettenreaktion in Gang gesetzt werden kann, wird kritische Masse genannt. Sie

Radio-nuklid	kleinste kritische Masse bei Kugelform			
	für Metall (schnelle, unmoderierte Systeme)		für wässrige Lösung bei optimaler Moderation	
	unreflek-tiert	durch Stahl reflektiert	unreflek-tiert	durch Waser reflektiert
U-233	15,8 kg	6,1 kg	1,08 kg	0,57 kg
U-235	46,7 kg	16,8 kg	1,42 kg	0,78 kg
Pu-239	10,0 kg	4,5 kg	0,88 kg	0,49 kg
Pu-241	12,3 kg	5,0 kg	0,51 kg	0,25 kg
Am-242 m	8,8 kg	3,0 kg	0,04 kg	0,02 kg
Cf-251	5,5 kg	2,3 kg	0,05 kg	0,03 kg

Tab. 4-4: Kritische Massen für einige Radionuklide

beträgt bei Uran-235 etwa 50 kg, wenn das Uran als festes Metall in Kugelform vorliegt und die Neutronen unmoderiert und unreflektiert sind. Der Radius einer Kugel liegt dann bei etwa 8,5 cm. Die kritische Masse lässt sich verkleinern, wenn der spaltbare Stoff von einem Reflektor (z.B. Graphit, Beryllium, Schweres Wasser) umgeben ist, der einen Teil der austretenden Neutronen wieder in das Uran zurücklenkt und wenn die Neutronen moderiert werden (Tab. 4-4).

Da in der natürlichen Umgebungsstrahlung stets freie Neutronen vorhanden sind, würde in einer kritischen Masse immer sofort eine Kettenreaktion ausgelöst.

Wenn man die Masse der Kernteilchen des Uran-235 und des primären Neutrons mit der Summe der Massen der Spaltprodukte und der sekundären Neutronen vergleicht, so ist nach der Kernspaltung ein geringer Massenverlust festzustellen. Dieser Verlust entspricht der bei der Spaltung frei werdenden Energie. Nach einem von Einstein 1905 formulierten Gesetz sind Masse und Energie einander äquivalent. Es sind zwei Formen eines und desselben Phänomens. Masse lässt sich in Energie und Energie in Masse überführen. Das Gesetz lautet:

$$E = m \cdot c^2$$

(E: Energie, m: Masse, c: Lichtgeschwindigkeit)

Bei einer vollständigen Spaltung von 1 kg Uran-235 tritt ein Massenverlust von 1 g auf. Die Spaltprodukte und sekundären Neutronen haben nur noch eine Masse von 999 g. Dieses 1 g wird in Energie umgewandelt:

$$1 \text{ g} = 10^{-3} \text{ kg} \quad c \approx 300.000 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$E = 10^{-3} \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$E = 9 \cdot 10^{13} \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}$$

Es gilt:

$$1 \text{ N} = \frac{1 \text{ kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \Rightarrow 1 \text{ kg} = \frac{1 \text{ N} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

Daraus folgt:

$$E = 9 \cdot 10^{13} \frac{\text{N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^2}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$$

$$E = 9 \cdot 10^{13} \text{ Nm} = 9 \cdot 10^{13} \text{ J}$$

4.5 Erzeugung von Plutonium-239 und von Uran-233

Uran-235 wird am effektivsten von langsamen Neutronen gespalten. Neutronen mittlerer sowie höherer Geschwindigkeit können aber auch von Uran-238 aufgenommen werden. Dabei tritt keine Kernspaltung, sondern eine Umwandlung in das Uran-Isotop U-239 ein. Es wandelt sich in zwei Schritten unter Aussenden von Betateilchen zu Pu-239 um (Abb. 4.5). Pu-239 ist ein Alphastrahler und zerfällt mit einer Halbwertzeit von 24.110 Jahren in Uran-235. Pu-239 wird durch langsame, günstiger aber durch schnelle Neutronen gespalten und ist deshalb für Kernspaltung geeignet.



Durch Aufnahme weiterer Neutronen bilden sich aus Pu-239 weitere Plutonium-Isotope: Pu-240, Pu-241, Pu-242 und Pu-243. Je länger die Uran-Brennelemente im Reaktor verbleiben, desto mehr Plutonium bildet sich. Bei der üblichen Einsatzdauer der Brennelemente sind das etwa 10 g Plutonium pro 1 kg Uran.

Isotop	Bereitschaft für Spaltung durch thermische Neutronen in relativen Einheiten
Pu-239	17.100
Pu-240	1
Pu-241	22.950
Pu-242	5
Pu-243	4.500

Tab. 4-5: Daten für verschiedene Pu-Isotope, der Wert von Plutonium-240 wurde gleich 1 gesetzt

Plutonium ist das einzige künstliche Element, das in größeren Mengen erzeugt wird. In einem Leichtwasserreaktor mit einer elektrischen Leistung von 1.300 MW entstehen jährlich insgesamt etwa 313 kg Plutonium. Davon sind 176 kg Pu-239, 74 kg Pu-240, 46 kg Pu-241 und 17 kg Pu-242. Die Isotope Pu-239 und Pu-241 sind durch thermische Neutronen leicht spaltbar. Das nicht im Reaktor selbst gespaltene Plutonium kann bei der Wiederaufarbeitung der Brennelemente isoliert und in Brennelementen erneut eingesetzt werden. (Die Entsorgung abgebrannter Brennelemente ist in Deutschland seit Juli 2005 nur noch auf die direkte Endlagerung beschränkt.) In den so genannten Mischoxid-Brennelementen wird neben UO_2 bis zu 5% PuO_2 verwendet.

Plutonium kommt in extrem kleinen Mengen auch in der Natur vor. In Uranerzlagern findet man Spuren von Pu-239, das durch die Neutronen der kosmischen Strahlung ständig neu gebildet wird. Es kann auch durch Neutronen erzeugt werden, die bei der Spontanspaltung von U-238 oder U-235 entstehen. Spuren von Pu-244 ($T_{1/2} = 8,26 \cdot 10^7$) stammen wahrscheinlich aus der Entstehungszeit der Erde. In 1 g natürlichem Uran sind 10^{-11} bis 10^{-12} g Plutonium enthalten. Dies bedeutet, dass für die Gewinnung von 1 mg natürlichem Plutonium 1.000 t natürliches Uran chemisch aufgearbeitet werden müssten.

Das in der Natur vorkommende Element Thorium-232 kann durch einen ähnlichen Umwandlungsprozess in Uran-233 verwandelt werden, welches durch langsame Neutronen spaltbar ist. Ein Thoriumkern absorbiert ein Neutron, so dass das Thoriumisotop-233 entsteht ($T_{1/2} = 22,3$ min). Dieses geht unter Aussenden eines Betateilchens in das Element Protaktinium-233 über ($T_{1/2} = 27,0$ d). Durch eine weitere Beta-Emission wandelt sich Protaktinium-233 in Uran-233 um (Abb. 4.6). Uran-233 ist ein Alphastrahler und zerfällt mit einer Halbwertzeit von $1,592 \cdot 10^5$ Jahren in Thorium-229.



Die gezielte Gewinnung von Plutonium-239 und Uran-233 bezeichnet man allgemein als „breeding“ (Brüten). Auf diesem Vorgang beruht die Funktion eines so genannten Brutreaktors.

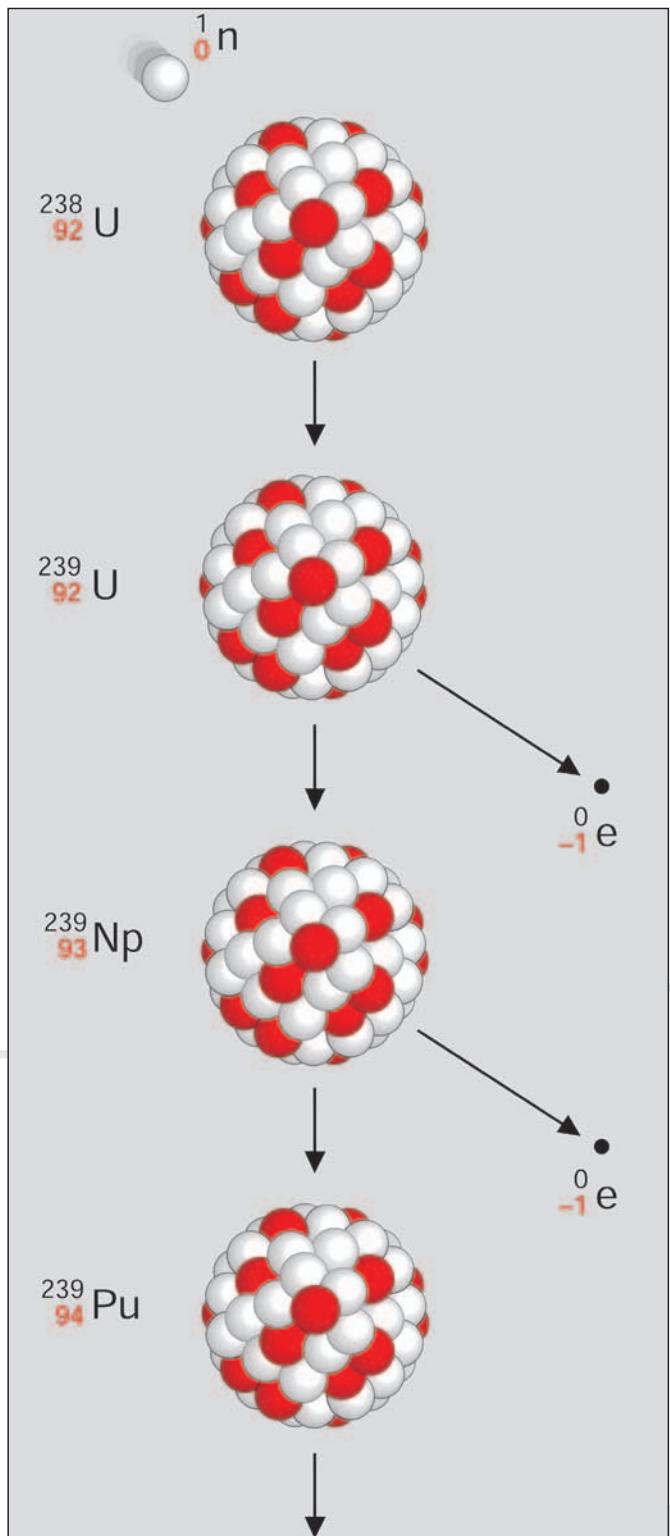


Abb. 4.5: Entstehung von Pu-239 aus U-238

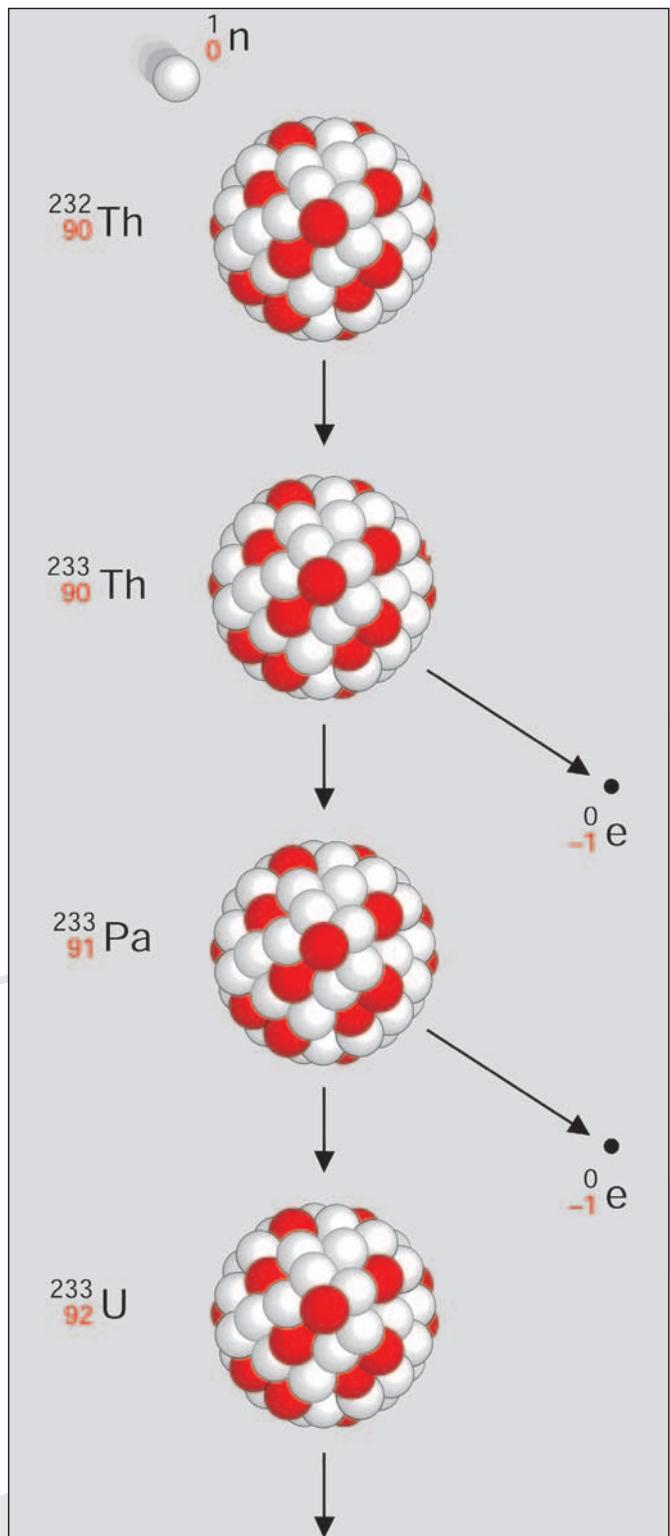


Abb. 4.6: Entstehung von U-233 aus Th-232

5 Kontrollierte Kernspaltung

5.1 Aufbau eines Kernreaktors

Anlagen, bei denen Kettenreaktionen kontrolliert ablaufen, bezeichnet man als Kernreaktoren oder kurz als Reaktoren. Sie bestehen im Prinzip aus fünf Komponenten (Abb. 5.1):

- Ausreichende Masse an spaltbarem Material,
- Stoff zur Abbremsung der Neutronen (Moderator), Ausnahme: Schneller Brutreaktor,
- Vorrichtungen zum Einfang von Neutronen (Steuer- bzw. Regelstäbe),
- Medium zur Wärmeabführung,
- Barrieren für den Strahlenschutz und die Rückhaltung radioaktiver Stoffe.

Nach dem Verwendungszweck können folgende Reaktortypen unterschieden werden:

- Forschungsreaktoren dienen der wissenschaftlichen Forschung sowie für Unterrichtszwecke. Dabei ist häufig nur die Neutronenstrahlung von Interesse.
- Leistungsreaktoren werden zur Erzeugung elektrischer Energie und als Brutreaktoren zusätzlich zur Erzeugung des Spaltstoffs Pu-239 aus U-238 verwendet.

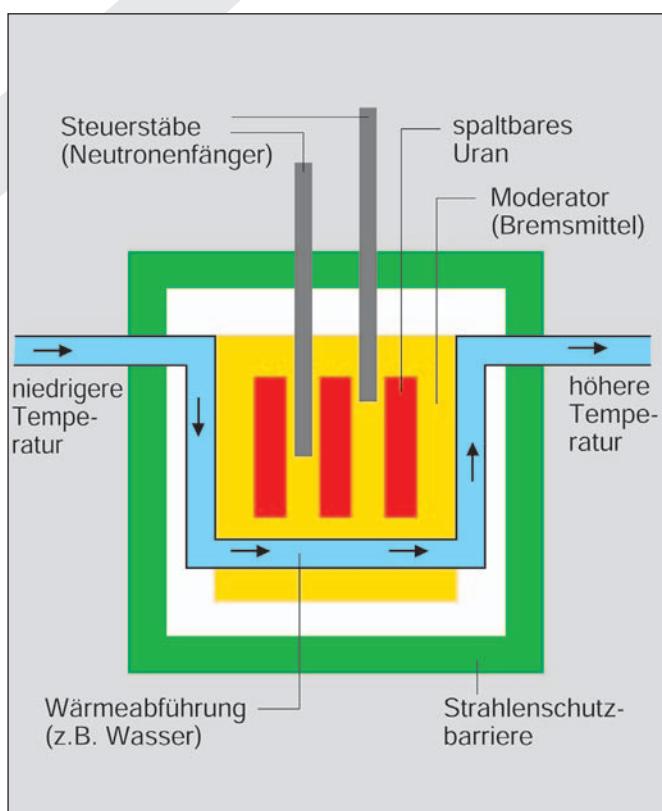


Abb. 5.1: Prinzip eines Kernreaktors

5.2 Spaltneutronen

Eine kontrollierte Kettenreaktion lässt sich nur entwickeln, wenn eine ausreichende Anzahl von Neutronen zur Verfügung steht. Bei der Spaltung eines Kerns U-235 entstehen zwei mittelschwere Trümmerkerne sowie zwei bis drei Neutronen. Diese Spaltneutronen haben unterschiedliche Energien (Geschwindigkeiten). Am häufigsten tritt der Wert von 0,7 MeV auf, im Mittel liegt ihre Energie bei etwa 1,5 MeV (Abb. 5.2).

Zur Charakterisierung der Neutronen nach ihrer Energie bzw. ihrer Geschwindigkeit wird die Einteilung nach Tab. 5-1 verwendet. Die angegebenen Energiebeträge stellen Richtwerte dar, die Übergänge sind fließend. Die bei der Spaltung von U-235-Kernen auftretenden Neutronen gehören also praktisch ausschließlich zu den schnellen Neutronen ($E > 0,1 \text{ MeV}$).

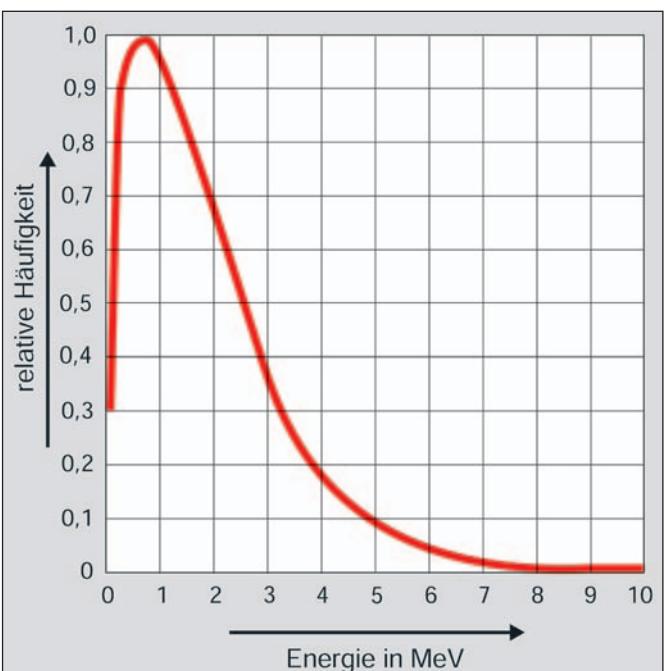


Abb. 5.2: Energieverteilung der Neutronen, die bei der Spaltung von U-235 durch thermische Neutronen entstehen

Bezeichnung	Energie
langsame (thermische) Neutronen	< 10 eV
mittelschnelle (epithermische oder intermediäre) Neutronen	10 eV bis 0,1 MeV
schnelle Neutronen	> 0,1 MeV

Tab. 5-1: Einteilung der Neutronen nach ihrer kinetischen Energie

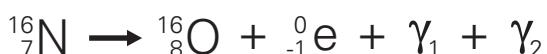
In einem Reaktor kann mit den Spaltneutronen grundsätzlich Folgendes geschehen:

- Sie verlassen die Spaltzone und gehen dadurch für weitere Spaltungen verloren.
- Sie werden von U-238, von den für die Reaktorfunktionen notwendigen Materialien oder von stets vorhandenen Verunreinigungen aufgenommen, wodurch künstliche Isotope entstehen.

Sauerstoff-16, der im Kühlmittel eines Siedewasserreaktors enthalten ist, wandelt sich z.T. durch Neutroneneinfang in Stickstoff-16 um (Abb. 5.3). Er ist radioaktiv ($T_{1/2} = 7,13$ s).



Stickstoff-16 zerfällt unter Aussendung eines Betateilchens zu Sauerstoff-16. Gleichzeitig werden sehr energiereiche Gammaquanten abgegeben.



$$T_{1/2}= \\ 7,13 \text{ s}$$

$$6,129 \text{ MeV} \quad 7,115 \text{ MeV}$$

Die Wahrscheinlichkeit für einen Neutroneneinfang ist von der Bewegungsenergie der Neutronen abhängig. Die Wahrscheinlichkeit ist meist desto größer, je langsamer die Neutronen sind. Das Neutron kann dann längere Zeit in Kernnähe verweilen, wodurch die Wahrscheinlichkeit für eine Einfangreaktion größer wird. Daneben gibt es noch den so genannten Resonanzeneinfang, bei dem Neutronen ganz bestimmter Energie bevorzugt eingefangen werden:

- Es finden elastische oder unelastische Zusammenstöße mit Atomkernen statt, wodurch die Neutronen Energie verlieren. Ihre Geschwindigkeit wird dadurch verringert. Elastische Zusammenstöße finden im Energiebereich 10 keV bis 1 MeV statt. Die Summe der Bewegungsenergien der Stoßpartner vor und nach dem Stoß ist dann gleich (Abb. 5.4). Zu unelastischen Zusammenstößen kommt es vorwiegend im Energiebereich zwischen 1 MeV und 10 MeV. Dabei ist die Summe der Bewegungsenergien vor und nach dem Stoß nicht gleich. Das Neutron hat den Atomkern angeregt, der die Anregungsenergie in Form eines Gammaquants wieder abgibt (Abb. 5.5).
- Neutronen werden von Kernen des U-235 aufgenommen und lösen dadurch weitere Kernspaltungen aus. Wenn in einem Reaktor eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion abläuft, sagt man, der Reaktor ist kritisch. Was dann im Einzelnen mit einer Neutronengeneration geschieht, lässt sich in vereinfachter Form zahlenmäßig angeben. Dabei wird hier von 2,3 Neutronen pro Spaltung ausgegangen (Tab. 5-2).

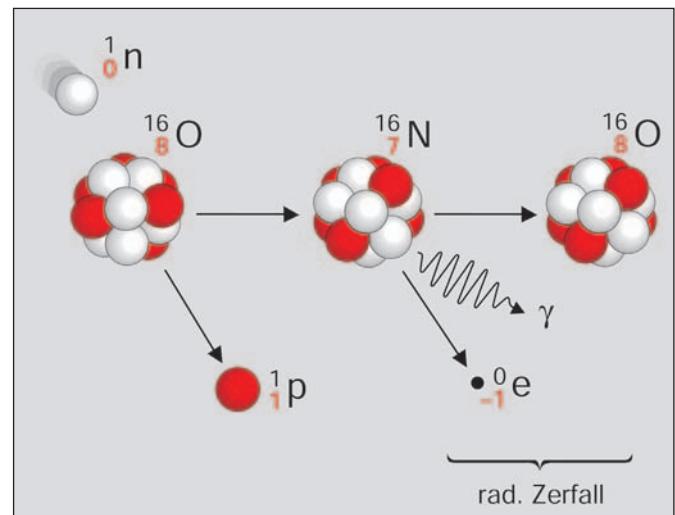


Abb. 5.3: Aktivierung von Sauerstoff durch Neutronen im Modell

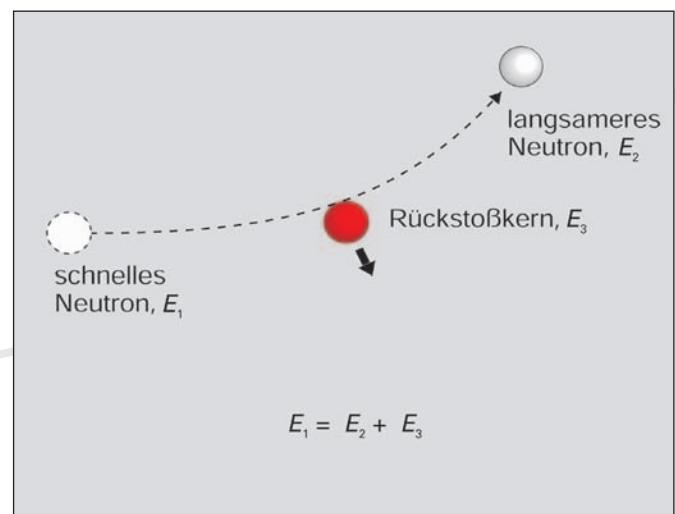


Abb. 5.4: Elastischer Stoß (E_1, E_2, E_3 ; Bewegungsenergien)

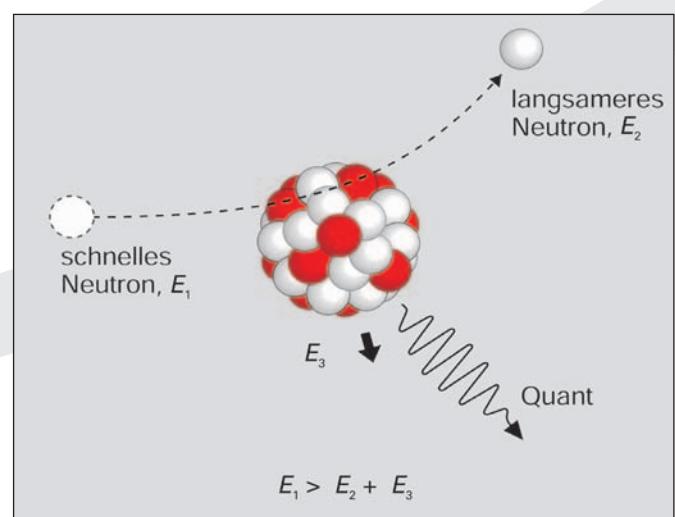
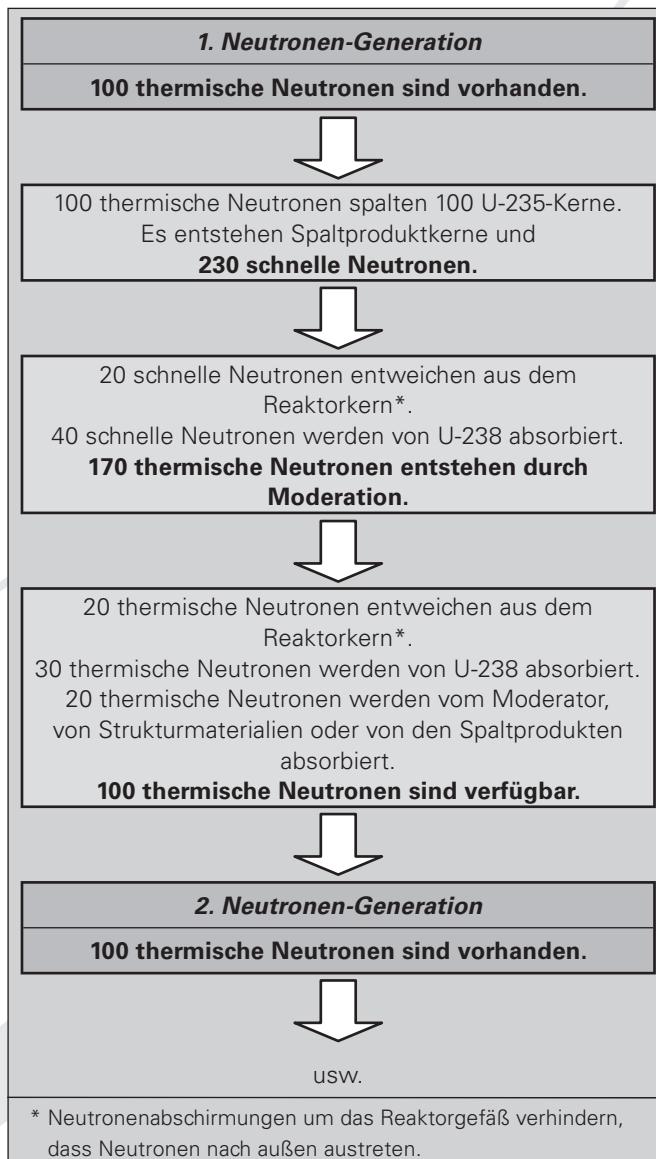


Abb. 5.5: Unelastischer Stoß (E_1, E_2, E_3 ; Bewegungsenergien)



Tab. 5-2: Neutronen in einem kritischen Reaktor

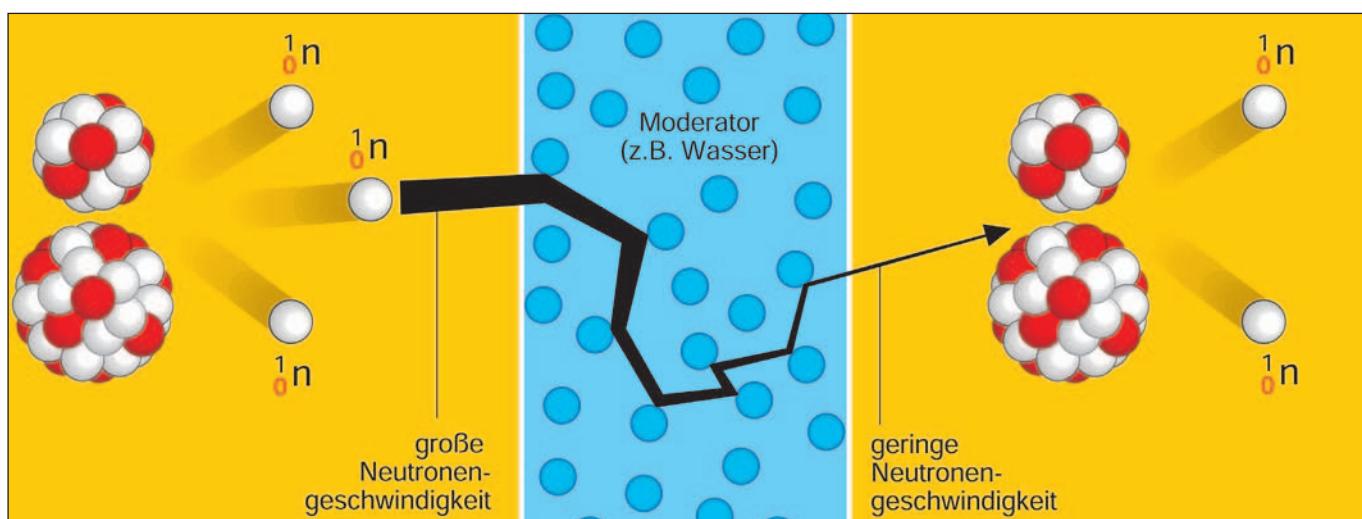


Abb. 5.6: Abbremsung schneller Neutronen durch einen Moderator im Modell

5.3 Moderator

Neutronen, die bei der Spaltung von Kernen des U-235 freigesetzt werden, haben eine relativ hohe Geschwindigkeit. Damit ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie weitere Kernspaltungen hervorrufen, sehr gering. Wenn dennoch mit den schnellen Neutronen eine Kettenreaktion in Gang gehalten werden soll, muss man eine hohe U-235-Konzentration wählen und eine aufwendige Reaktortechnik anwenden. Man beschreitet diesen Weg ausschließlich, wenn nicht nur U-235-Kerne gespalten, sondern aus nicht spaltbarem Material mit Hilfe von schnellen Neutronen neuer Spaltstoff erzeugt werden soll.

Langsame Neutronen führen mit sehr viel größerer Wahrscheinlichkeit im U-235 zu Spaltungen. Die bei jeder Kernspaltung entstehenden schnellen Neutronen müssen deshalb durch geeignete Substanzen auf niedrige Geschwindigkeiten abgebremst werden. Das geschieht mit Hilfe so genannter Moderatoren (Bremsmittel). Die Neutronen werden an den Kernen des Moderators durch Stöße abgebremst (Abb. 5.6). Beim Einsatz eines Moderators kommt man mit niedrigen Spaltstoffkonzentrationen aus. Im Prinzip reicht dann der im natürlichen Uran vorhandene Anteil von etwa 0,7 % U-235.

Gute Moderatoren müssen zwei Bedingungen erfüllen:

- Die schnellen Neutronen sollen möglichst schnell durch wenige Stöße ihre Energie verlieren und so abgebremst werden. Dadurch kommen sie in großer Zahl über den Geschwindigkeitsbereich hinweg, bei dem sie verstärkt von U-238 absorbiert werden. Diese Bedingung ist dann erfüllt, wenn die Masse der Atomkerne des Moderators etwa so groß ist wie die Masse des Neutrons. Tab. 5-3 zeigt, wie viele Zusammenstöße zwischen Neutronen und Atomkernen im Mittel notwendig sind, um schnelle Neutronen ($E = 1,75 \text{ MeV}$) auf langsame Geschwindigkeiten ($E = 0,025 \text{ eV}$) abzubremsen.

Moderator	mittlere Stoßzahl für eine Abbremsung von 1,75 MeV auf 0,025 eV	Neigung zum Einfang thermischer Neutronen in relativen Einheiten
Wasserstoff H-1	18	650
Deuterium H-2	25	1
Beryllium Be-9	86	7
Kohlenstoff C-12	114	10
Uran U-238	2.172	5.601

Tab. 5-3: Eigenschaften verschiedener Moderatorstoffe, Uran zum Vergleich

- Der Moderator darf nur eine geringe Neigung zum Einfang von Neutronen besitzen, denn vom Moderator absorbierte Neutronen gehen für weitere Kernspaltungen verloren. In Tab. 5-3 ist die Neigung zum Einfang thermischer Neutronen in relativen Einheiten angegeben worden. Für Deuterium wurde der Wert 1 festgelegt. Beryllium hat dann eine siebenmal so große Neigung, Wasserstoff eine 650-mal so große Neigung, Neutronen in die Atomkerne aufzunehmen. Deuterium in Form von Schwerem Wasser (D_2O) ist der beste Moderator, seine Herstellung ist jedoch sehr teuer. (Natürliches Wasser enthält ein H-2-Atom auf 6.500 H_2O -Moleküle.) Als Moderator wird vielfach auch Graphit (reiner Kohlenstoff) eingesetzt, da es gute mechanische und thermische Eigenschaften besitzt. Für eine Verwendung im Reaktor muss es jedoch absolut rein sein. Wasserstoff in Form von Leichtem Wasser (H_2O) ist zwar das beste Bremsmittel, es hat jedoch eine sehr große Neigung zum Einfang von Neutronen. Dabei entsteht Deuterium:



Die absorbierten Neutronen gehen für weitere Kernspaltungen verloren. Da Wasser aber sehr preiswert ist und zusätzlich günstige Eigenschaften besitzt (die Sicherheit des Reaktors betreffend), wird es in der Bundesrepublik Deutschland ausschließlich als Moderator verwendet. Außerdem kann Leichtes Wasser gleichzeitig als Kühlmittel verwendet werden. Bei Verwendung von Wasser als Moderator muss der Neutronenverlust ausgeglichen werden. Dazu erhöht man den Anteil von U-235 von 0,7% auf 3 bis 5%. Man erhält dann mehr Spaltungen sowie mehr Neutronen. Uran mit einem über 0,7% liegenden Anteil von U-235 nennt man angereichertes Uran.

5.4 Temperaturabhängigkeit des Moderatoreffekts

Die Temperatur in den Brennstäben eines Reaktors schwankt in Abhängigkeit von der verlangten Reaktorleistung. Sie liegt bei Vollast im Innern der Brennstäbe bei etwa 800 °C. Die Temperatur hat Einfluss auf die Wirksamkeit des Moderators. Ein Vergleich zwischen den Moderatoren Graphit und Wasser macht das deutlich.

Bei dem Reaktor vom Typ Tschernobyl sind der Moderator (Graphit) und das Kühlmittel (Wasser) unterschiedliche Stoffe. Wenn die Anzahl der Kettenreaktionen und damit die Leistung ansteigen, entstehen im Kühlmittel Wasser mehr Dampfblasen.

Da Wasserdampf pro Volumen weniger Moleküle enthält als Wasser, werden weniger Neutronen absorbiert. Am Moderator Graphit kann nun eine höhere Anzahl von Neutronen abgebremst werden, so dass auch die Anzahl der Kernspaltungen steigt.

Durch eine erhöhte Anzahl von Kernspaltungen steigt dann aber auch die Leistung an, die zu noch mehr Dampfblasen führt usw. Man sagt, der Dampfblasenkoeffizient des Moderators ist positiv. Nur durch geeignete Sicherheitseinrichtungen wird verhindert, dass der Leistungsanstieg außer Kontrolle gerät.

In den Leichtwasserreaktoren (speziell Siedewasserreaktoren) ist das Wasser Kühlmittel und Moderator. Steigt die Anzahl der Kernspaltungen und damit auch die Leistung an, erhöht sich auch hier der Dampfblasenanteil. Da das Wasser aber gleichzeitig Moderator ist, bedeuten mehr Dampfblasen eine „Verdünnung“ des Moderators. Es werden jetzt zwar weniger Neutronen absorbiert, noch weniger aber abgebremst (Moderatoreffekt ist von größerem Gewicht als der Absorptionseffekt) (Abb. 5.7). Dadurch sinkt die Anzahl der

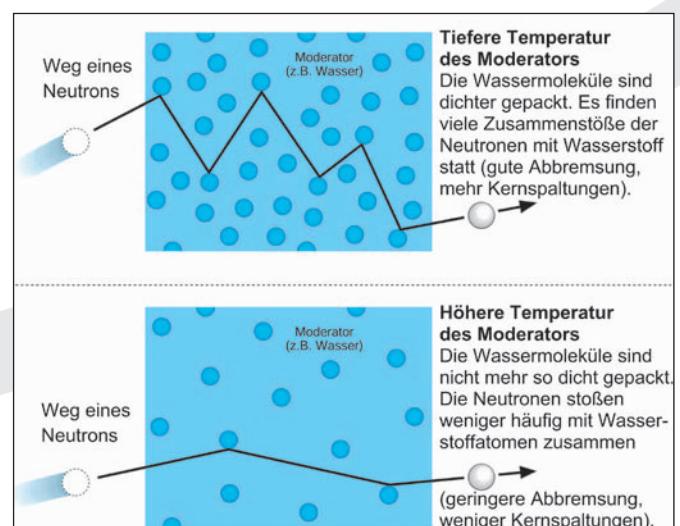


Abb. 5.7: Bei Wasser ist die Moderation von der Temperatur abhängig

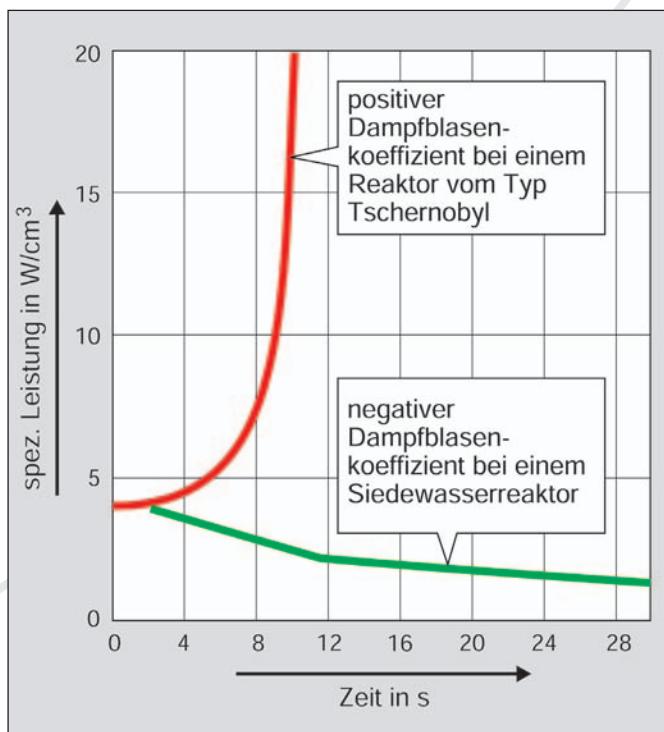


Abb. 5.8: Leistungsentwicklung bei Reaktoren mit positivem bzw. negativem Dampfblasenkoeffizienten
(angenommenes Szenario: Ausdrehen der Hauptkühlmittelpumpe)

Kernspaltungen von selbst. Der Dampfblasenkoeffizient ist hier also negativ. Bei dieser Art von Selbststabilisierung spricht man deshalb von inhärenter (innewohnender) Stabilität.

Abb. 5.8 gibt für einen Reaktor vom Tschernobyl-Typ und einen Siedewasserreaktor an, welche Wärmeleistung sich ergeben würde, wenn die Hauptkühlmittelpumpen nach dem Abschalten ausliefern (Rotation klingt ab) und die Wärme von den Brennstäben nicht mehr abgeführt würde.

Der negative Dampfblasenkoeffizient bei Leichtwasserreaktoren war in den 1950er Jahren ausschlaggebend für die Wahl dieses Reaktortyps für die Bundesrepublik Deutschland.

Unabhängig vom verwendeten Moderator gilt für alle Reaktortypen, dass das U-238 bei hoher Temperatur mehr, bei niedriger Temperatur weniger Neutronen absorbiert. Dieser Effekt wirkt also einem Anstieg der Anzahl freier Neutronen und damit auch einem Anstieg der Kernspaltungen entgegen. Kleine Leistungsänderungen werden dadurch selbsttätig ausgeglichen.

Zum anderen bedeutet grundsätzlich eine Erhöhung der Moderatortemperatur, dass die Bewegungsenergie der Moderatoratome bzw. Moderatormoleküle zunimmt. Sie überträgt sich dann auch auf die Neutronen, die nun nicht mehr so schnell abgebremst werden.

5.5 Steuerung der Kettenreaktion

In einem Reaktor wird die Kettenreaktion dadurch gesteuert, dass man von außen in den Neutronenhaushalt eingreift. Das geschieht mit Hilfe von Stoffen, die eine große Neigung zur Absorption von Neutronen besitzen (z. B. Bor, Indium, Silber, Cadmium). Werden diese Steuerstäbe tief in die Spaltzone geschoben, absorbieren sie viele Neutronen. zieht man sie wieder heraus, ist die Neutronenabsorption entsprechend geringer.

So kann z. B. eine 6,5 mm starke Schicht aus Boral (Legierung aus Aluminium und Borcarbid/B₄C) die Anzahl freier Neutronen um den Faktor 10¹⁰ verringern. Der Einfang von Neutronen durch Bor oder Cadmium geschieht durch eine Kernreaktion, bei der eine Sekundärstrahlung ausgesandt wird (Abb. 5.9).



Das entstehende Lithium gelangt zum Teil in das Kühlmittel des Reaktors und wird – zusammen mit anderen Verunreinigungen – durch die Kühlmittelreinigungsanlage fortlaufend entfernt. Die Alphateilchen wandeln sich durch Aufnahme von Elektronen in Helium um, das in den Röhrchen der Steuerstäbe einen beachtlichen Gasdruck erzeugt. Die Abnahme der Borkonzentration und der Druckaufbau begrenzen die Lebensdauer der Steuerstäbe. Der Austauschrhythmus beträgt etwa sechs Jahre.

Der Zustand eines Reaktors kann durch den Multiplikationsfaktor k beschrieben werden. Er gibt das Verhältnis der Anzahl der Spaltungen einer Neutronengeneration zur Anzahl der Spaltungen der vorhergehenden Neutronengenerationen an:

$$k = \frac{\text{Zahl der Spaltungen einer Neutronengeneration}}{\text{Zahl der Spaltungen der vorhergehenden Neutronengeneration}}$$

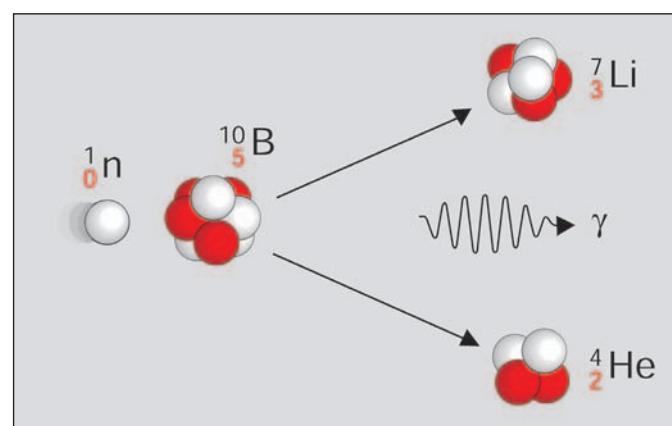


Abb. 5.9: Kernreaktion bei Neutroneneinfang mittels Bor in den Steuerstäben eines Reaktors

Beispiel für ein sehr kleines Volumen der Spaltzone:

1. Neutronengeneration: 3.750 Spaltungen

2. Neutronengeneration: 3.773 Spaltungen

$$k = \frac{3.773}{3.750} \approx 1,006$$

Beim so genannten Anfahren eines Reaktors muss der Multiplikationsfaktor größer als 1 sein ($k > 1$, überkritischer Reaktor), damit die Anzahl der Kettenreaktionen ansteigt. Ist ein bestimmtes Leistungs niveau erreicht, wird dafür gesorgt, dass $k = 1$ gilt (kritischer Reaktor).

Bei der Leistungsverringerung oder dem Abschalten eines Reaktors werden die Steuerstäbe zur Absorption der Neutronen zwischen die Brennstäbe eingefahren.

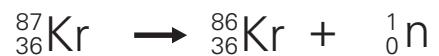
Die Kettenreaktion nimmt ab bzw. hört ganz auf ($k < 1$, unterkritischer Reaktor) (Abb. 5.10).

Bei starken Abweichungen vom normalen Reaktorbetrieb oder bei Störfällen kann der Reaktor durch schnelles Einfahren der Absorberstäbe innerhalb weniger Sekunden abgeschaltet werden.

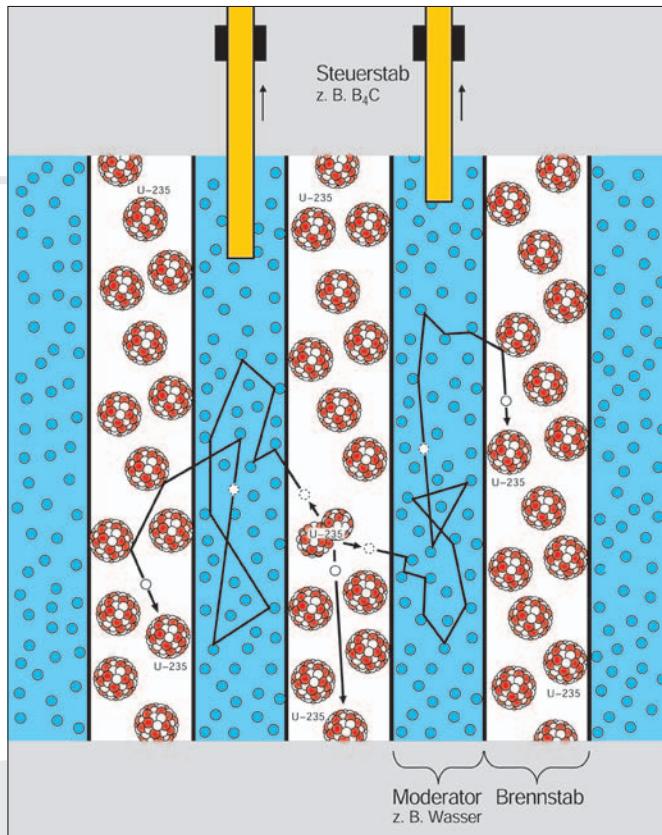
Dieser „Schnellschuss“ wird automatisch ausgelöst, kann aber auch durch Betätigen eines Notschalters herbeigeführt werden.

Bei einer Kettenreaktion tritt die Neutronenvermehrung in Bruchteilen von Sekunden auf. Bei der Inbetriebnahme eines Reaktors oder der Steigerung seiner Leistung wäre eine Steuerung mit mechanischen Vorrichtungen nicht möglich, weil sie viel zu langsam wären.

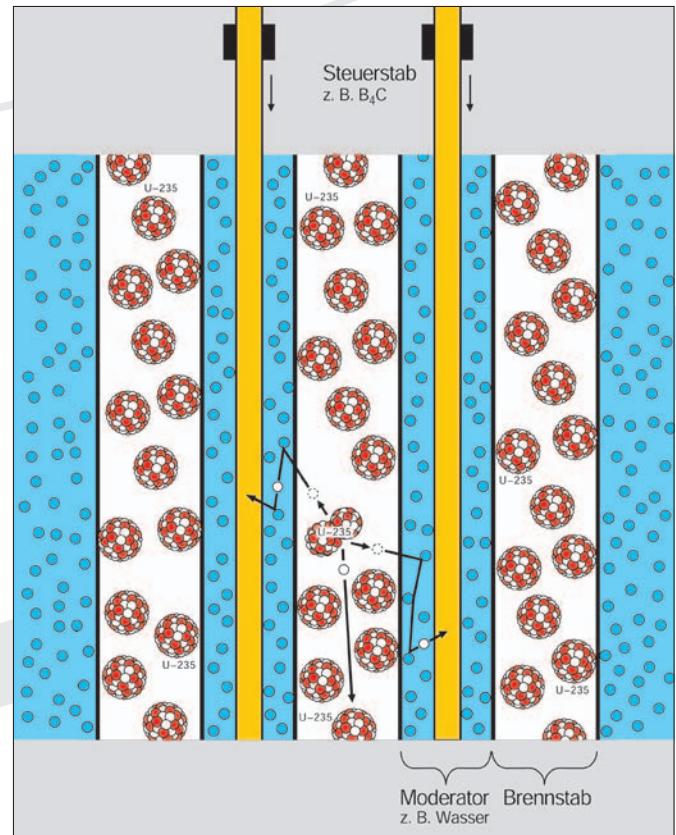
Der Ablauf des Spaltungsvorganges selbst kommt den Menschen aber zu Hilfe. Etwa 0,75 % der bei der Spaltung frei werdenden Neutronen werden erst mit einer Verzögerung von durchschnittlich 10 bis 20 s durch die Spaltprodukte abgegeben.



Stellt man bei einer Leistungserhöhung den Reaktor so ein, dass sich die Neutronen von Generation zu Generation nicht mehr als um 0,75 % vermehren, wird der Zuwachs nur durch diese verzögerten Neutronen bewirkt. Die Zeit von 20 s reicht aus, um neutronenabsorbierende Steuerstäbe zwischen die Uran-Brennstäbe zu schieben.



a) Anfahren eines Reaktors ($k > 1$)



b) Abschalten eines Reaktors ($k < 1$)

Abb. 5.10: Stellung der Steuerstäbe beim Anfahren und beim Abfahren eines Reaktors

5.6 Homogener und heterogener Reaktor

Uran und Moderator lassen sich entweder miteinander mischen (homogener Reaktor) oder räumlich getrennt voneinander anordnen (heterogener Reaktor).

Bei einer homogenen Mischung beider Stoffe gibt es ein optimales Verhältnis, bei dem der Moderator seine maximale Wirkung hat. Der Multiplikationsfaktor (Neutronenvermehrungsfaktor) k ist dann am größten. Tab. 5-4 gibt für optimale homogene Mischungen von Natururan und Moderator den maximal erreichbaren Wert für k an.

Moderator	Maximaler Multiplikationsfaktor
Wasser (H_2O)	0,62
Beryllium (Be)	0,66
Graphit (C)	0,84
Schweres Wasser (D_2O)	1,33

Tab. 5-4: Maximaler Multiplikationsfaktor für Natururan und verschiedene Moderatoren (Homogene Mischung)

Bei einem homogenen Reaktor, der mit Natururan (0,7 % U-235) betrieben wird, ist also eine Kettenreaktion nur bei Verwendung von Schwerem Wasser möglich. Nur dann kann der Multiplikationsfaktor $k > 1$ sein. Das ist der Grund, weshalb heute in Uranerzlagerstätten mit Hilfe von Regenwasser keine Kettenreaktion entstehen kann. Das wäre erst bei einem höheren Anteil an U-235 möglich.

Die bei Kernspaltungen entstehenden Neutronen werden in einem geringeren Maß von Kernen des U-238 eingefangen, wenn Uran und Moderator getrennt angeordnet sind, der Moderator also das Uran umgibt (heterogener Reaktor). Dann gelingt es auch, mit Natururan und Graphit als Moderator einen Neutronenvermehrungsfaktor $k > 1$ zu erreichen.

Der erste Reaktor, der von Enrico Fermi 1942 in Chicago (USA) gebaut wurde, hatte diesen Aufbau. Dazu wurden etwa 30 t Natururan benötigt. Bei Verwendung von Schwerem Wasser hätten bereits 3 t Natururan ausgereicht.

Die Neutronenbilanz lässt sich durch Verwendung eines Neutronenreflektors (z.B. Graphit, Beryllium, Schweres Wasser) verbessern. Dadurch wird ein Teil der aus der Oberfläche der Brennstäbe austretenden Neutronen in das Uran zurückgeworfen.

Bei einem Kernreaktor setzt die Kettenreaktion nur ein, wenn eine Mindestmenge an U-235 (oder Pu-239) vorhanden ist. Da während des Reaktorbetriebs der Anteil an U-235 ständig geringer wird und der größer werdende Anteil an Spaltprodukten immer mehr Neutronen absorbiert, muss der

Reaktor mit einem Überschuss an spaltbarem U-235 betrieben werden. Dieser Überschuss darf jedoch nicht zu groß sein, weil sonst die Reaktorsteuerung sehr schwierig wird.

Nach etwa einem Jahr sind die zusätzlichen Reserven an U-235 aufgebraucht. Das U-235 ist dann zwar noch nicht vollständig gespalten, im Reaktor kann aber keine Kettenreaktion mehr herbeigeführt werden. Der Reaktor wird deshalb abgeschaltet und nach einer Abkühlzeit geöffnet, um neue Brennelemente einzusetzen bzw. die bereits benutzten in andere Positionen umzusetzen.

5.7 Verfahren zur Anreicherung von U-235

Im natürlichen Uran befinden sich etwa 99,3 % U-238 und etwa 0,7 % U-235. Dieses Natururan ist für Leichtwasserreaktoren nicht geeignet. Es wird Uran mit einem Gehalt an U-235 von mindestens 2 % benötigt.

Die Anreicherung geschieht in Urananreicherungsanlagen. Für alle Anreicherungsverfahren muss das Uran in Form von Uranhexafluorid (UF_6) vorliegen. Diese chemische Verbindung verdampft bereits bei 56 °C, so dass also in den Anlagen Gasanteile voneinander getrennt werden:

- Beim Gasdiffusionsverfahren (Abb. 5.11) wird die Tatsache ausgenutzt, dass leichtere Atome oder Moleküle schneller durch eine poröse Wand (Porendurchmesser etwa 10^{-5} mm) wandern als schwerere. Die Anreicherung bei einer Trennstufe ist sehr gering.

Es müssen bis zu 2.500 Stufen hintereinander geschaltet werden, um eine Anreicherung von bis zu 4 % zu erreichen. Da das Gas nach jeder Trennstufe erneut komprimiert werden muss, ist der Energieaufwand sehr hoch. Das Gasdiffusionsverfahren wird in den USA, Frankreich und China eingesetzt.

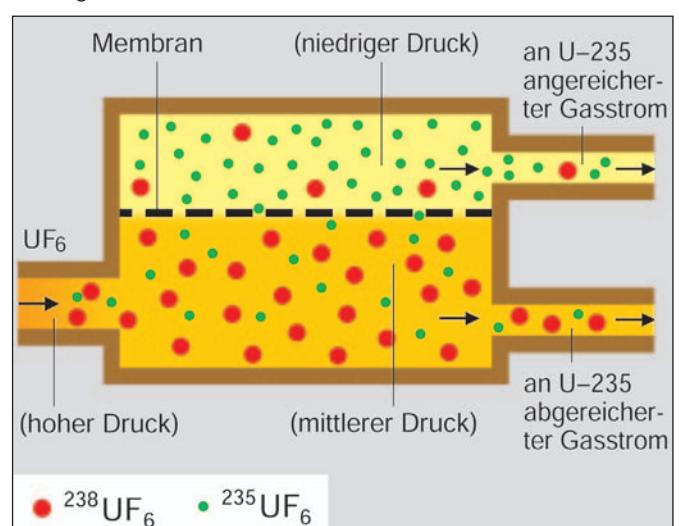


Abb. 5.11: Prinzip des Gasdiffusionsverfahrens

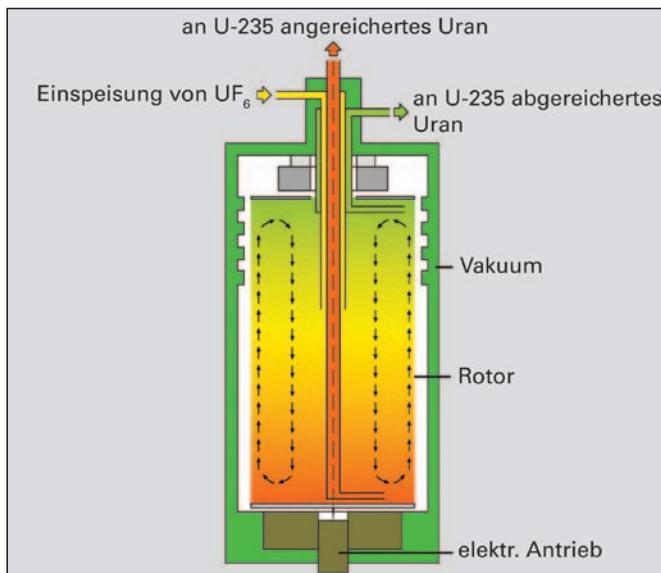


Abb. 5.12: Prinzip des Zentrifugenverfahrens

- Das Zentrifugen-Trennverfahren nutzt die Tatsache aus, dass die schwereren Moleküle bevorzugt an die Außenwand getrieben werden, während sich die leichteren Moleküle in der Nähe der Rotorachse aufhalten (Abb. 5.12). Die Geschwindigkeit an der Peripherie solcher Zentrifugen beträgt bis zu 700 m/s.

Bei diesem Verfahren müssen 10 bis 30 Trennstufen hintereinander geschaltet werden, um die gewünschte Anreicherung zu erhalten. Zentrifugenanlagen existieren z.B. in den Niederlanden, Deutschland und Großbritannien. Sie benötigen deutlich weniger Energie als Gasdiffusionsanlagen.

Da der Gasdurchsatz einer Zentrifuge sehr gering ist, müssen viele Zentrifugen parallel geschaltet werden, um eine genügend große Kapazität zur Verfügung zu haben. Insgesamt sind dann etwa 150.000 Zentrifugen im Einsatz.

- Beim Trenndüsenvorfahren wird ein Gasgemisch aus UF₆ und He mit hohem Druck in eine Düse gepresst, aus der es dann mit hoher Geschwindigkeit austritt. Danach wird der Gasstrom um 180° umgelenkt (Abb. 5.13). Da die schweren Moleküle eine größere Trägheit besitzen als die leichten, ist ihre Richtungsänderung geringer. An U-235 angereichertes und abgereichertes UF₆ lassen sich dann trennen. Um das U-235 auf 2 bis 4 % anzureichern, muss dieser Vorgang 400 bis 500-mal wiederholt werden. Technisch wird dieses Verfahren zurzeit nicht genutzt.

Das an U-235 angereicherte Uranhexafluorid besteht z.B. aus 4 % ²³⁵UF₆ und aus 96 % ²³⁸UF₆. Es wird anschließend in UO₂-Pulver umgewandelt, das dann zu Tabletten verarbeitet wird (UO₂-Pellets). Sie bilden den so genannten Kernbrennstoff. (Dieser Name ist eigentlich irreführend, denn in einem Reaktor findet keine Verbrennung statt. Der exaktere Ausdruck wäre Spaltstoff.)

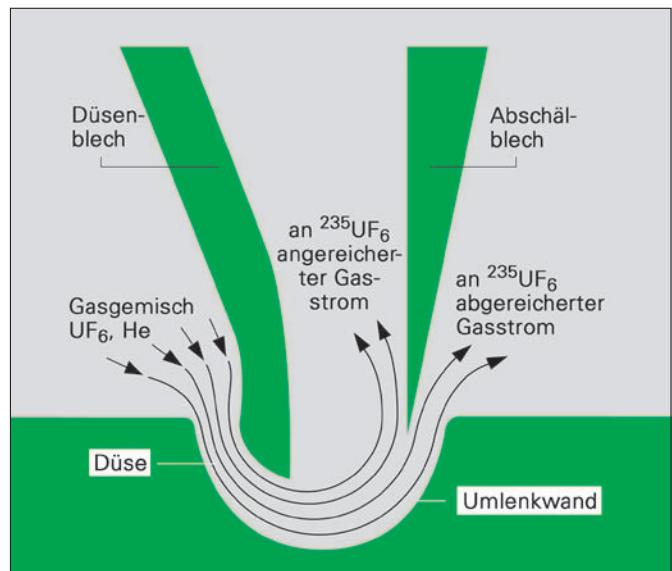


Abb. 5.13: Prinzip des Trenndüsenvorfahrens

5.8 Naturreaktor von Oklo

In Gabun (Westafrika) gibt es ergiebige Uranerzvorkommen, die seit Ende der 1960er Jahre abgebaut werden. Zur Qualitätskontrolle wird ständig die Zusammensetzung des gewonnenen Erzes sowie vor allem der Anteil an Uran-235 bestimmt. Bei der Analyse einer solchen Probe aus dem Tagebau Oklo stellte der Analysentechniker im Mai 1972 fest, dass der Uran-235-Gehalt nicht wie üblich 0,7202 Atomprozent, sondern nur 0,7171 Atomprozent betrug. Das waren 0,003 Atomprozent weniger als sonst bei allen anderen Uranerzvorkommen auf der Welt festgestellt worden war. Eine Wiederholung der Analyse ergab denselben Wert, so dass ein Messfehler ausgeschlossen werden konnte.

Bei der Untersuchung weiterer Proben stellte man Abreicherungen bis herab zu 0,296 Atomprozent fest. Dabei zeigte sich, dass die Abreicherung desto größer war, je mehr Uran das Erz enthielt, d.h. je höher die Gesamt-Urankonzentration lag. Bei Urangehalten unter etwa 1 % waren dagegen die Anteile von U-238 und U-235 wie sonst üblich verteilt.

Im August 1972 wurde erstmals die Hypothese formuliert, dass in der Erzlagerstätte in Oklo ein natürlicher Reaktor in Betrieb gewesen sein könnte. Der Gehalt an U-235 wäre dann durch Kernspaltungen bzw. eine längere Zeit in Gang gehaltene Kettenreaktion verringert worden. Einen eindeutigen Beweis für die stattgefundenen Kettenreaktion erhielt man durch den Nachweis der dabei entstandenen Spaltprodukte. Die Tab. 5-5 zeigt als Beispiel die Werte für das Edelgas Xenon, von dem sich noch etwa 1 % der ursprünglich entstandenen Menge im Erz befindet. Da die Erzlagerstätte sehr alt ist, sind die relativ kurzlebigen Spaltprodukte nicht mehr vorhanden, wohl aber die stabilen Endglieder ihrer Zerfallsreihen. An insgesamt 13 Stellen fand man dadurch Hinweise auf prähistorische Reaktortätigkeit.

Herkunft	Massenzahl									
	124	126	128	129	130	131	132	134	136	
Xe-Gehalt in Atomprozent bei	natürl. Xe	0,10	0,09	1,9	26,4	3,3	21,2	27,0	10,5	8,9
	Spalt-Xe			0,00017	3,07	0,0015	13,08	19,45	35,45	28,95
	Oklo			0,0028	3,46	0,0346	12,38	20,35	35,38	28,48

Tab. 5-5: Isotopenzusammensetzung von Xenon aus natürlichen Vorkommen, als Spaltprodukt in Kernkraftwerken und einer Probe aus Oklo

Wie konnte es aber in der Natur zu einer kontrollierten Kettenreaktion kommen? Damit eine Kettenreaktion in Gang kommt, müssen drei Bedingungen erfüllt sein. Es müssen eine hohe Urankonzentration mit einem genügend großen Anteil an U-235 vorliegen, ein Moderator zur Abbremsung der Neutronen zur Verfügung stehen und Stoffe fehlen, die zuviel Neutronen einfangen.

Die Urankonzentration beträgt in Oklo an einigen Stellen bis über 60 Gewichtsprozent. Solche besonders uranreiche Zonen sind etwa 0,6 bis 1 m dick und wenige Meter breit (Abb. 5.14). Da die Uranerzlagerstätte etwa 1,8 Milliarden Jahre alt ist, lag zur Zeit ihres Entstehens auch der Gehalt an U-235 höher, und zwar über 3 % (U-235: $T_{1/2} = \text{ca. } 0,7 \cdot 10^9 \text{ a}$). Unter diesen Bedingungen konnte dann auch Wasser ein geeigneter Moderator sein.

Die Kettenreaktion hielt sich vermutlich mehrere hunderttausend Jahre selbst in Gang. Dabei traten Temperaturen zwischen etwa 180 °C und etwa 450 °C auf. Wie es über so

lange Zeit zu einer kontrollierten Kettenreaktion kommen konnte, ist noch nicht bekannt.

Man nimmt an, dass zwei unterschiedliche Kontrollmechanismen wirksam waren:

- Geringe Beimengungen von Li-6, B-10 und Cd-113 sowie die entstandenen Spaltprodukte haben gerade so viel Neutronen eingefangen, dass die Kettenreaktion nicht lawinenartig abließ.
- Das als Moderator wirkende Wasser bildete einen zweiten Regelmechanismus. Je nachdem, ob Regenwasser in das Uran eindrang oder aus ihm verdampfte, nahm die Anzahl der Kernspaltungen zu oder ab. Verdampfte Wasser aus dem Erdreich, konnten die Neutronen nicht mehr ausreichend abgebremst werden. Die Anzahl der Kernspaltungen ging zurück und die Temperatur sank. Sickerte Wasser ein, stieg die Anzahl der Kernspaltungen wieder usw.

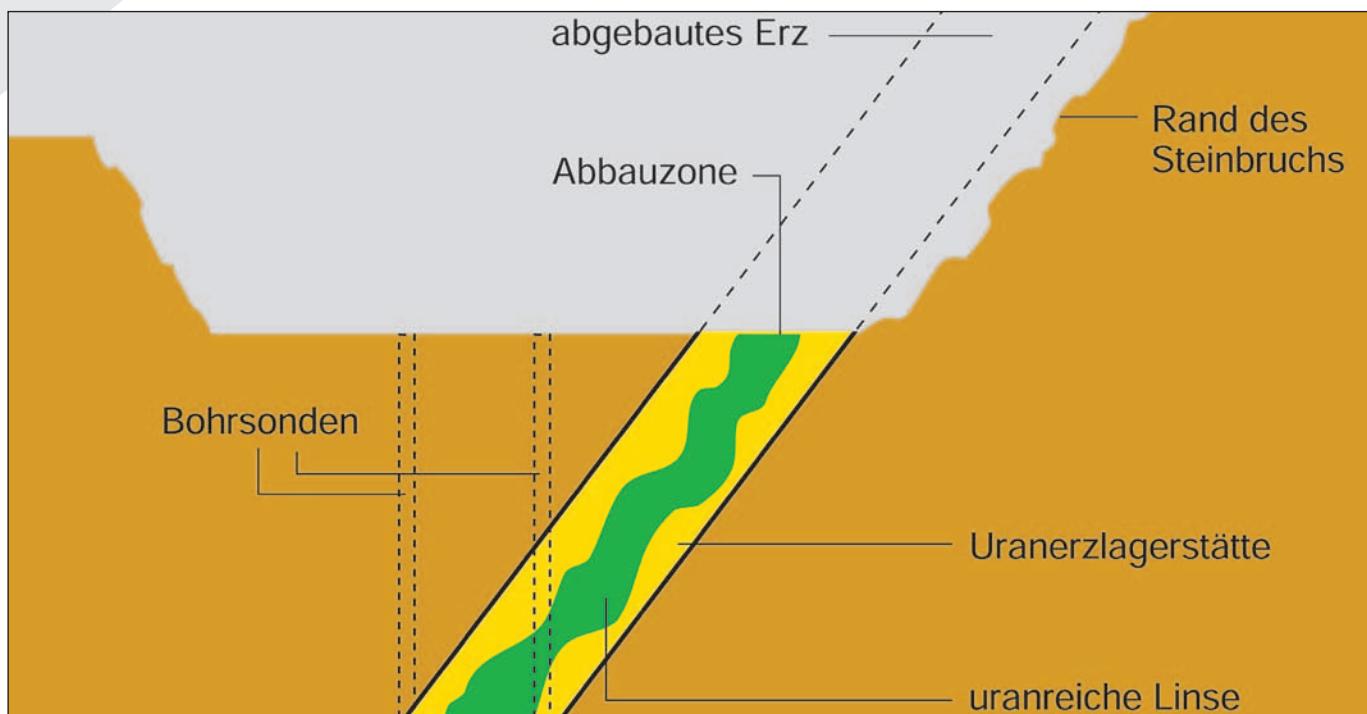


Abb. 5.14: Senkrechter Schnitt durch einen Teil der Uranerzlagerstätte Oklo

6 Kernkraftwerke

6.1 Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor (Beispiel: Kernkraftwerk Krümmel)

Die Brennelemente, die das Uranidoxid enthalten, befinden sich in dem zu etwa zwei Dritteln mit Wasser gefüllten Druckbehälter. Das Wasser strömt von unten nach oben durch den Reaktorkern und führt die in den Brennstäben entwickelte Wärme ab. Ein Teil des Wassers verdampft. Nach einer Dampf-Wasser-Trennung im oberen Teil des Druckbehälters wird dieser Satt dampf mit einer Temperatur von 286,4 °C und einem Druck von ca. 70,6 bar direkt der Turbine zugeführt. Die Dampfmenge beträgt bis zu 7.186 t Dampf pro Stunde. Die Turbine ist mit einem Drehstromgenerator gekoppelt, der eine Leistung von 1.402 Megawatt (Wirkleistung) bei einer Spannung von 27 kV liefert. Die Frequenz beträgt 50 Hz.

Das im Druckbehälter nicht verdampfte Wasser fließt in dem Ringraum zwischen Druckbehälter und Reaktorkern wieder nach unten, wobei es sich mit dem aus dem Kondensator zurückgepumpten Speisewasser vermischt. Die im Druckbehälter vorhandenen Pumpen wälzen das Kühlmittel um. Durch eine Veränderung der Drehzahl dieser Pumpen kann die Umlaufmenge des Kühlmittels

geändert und dadurch die Reaktorleistung gesteuert werden. Bei der Nennleistung des Reaktors strömen pro Stunde rund 57.200 t Kühlmittel durch seinen Kern.

Der aus der Turbine austretende Dampf wird im Kondensator verflüssigt. Dazu sind pro Stunde etwa 205.000 m³ Kühlwasser erforderlich, die der Elbe entnommen werden. Das Speisewasser wird durch Vorwärm anlagen auf eine Temperatur von 215 °C gebracht und dem Reaktor wieder zugeführt.

Die 205 Steuerstäbe, die das neutronenabsorbierende Material (Borcarbid) enthalten, werden elektromotorisch (Normalantrieb) oder hydraulisch (Schnellabschaltung) von unten in den Reaktorkern eingefahren oder wieder herausgezogen.

Aus dem Sicherheitsbehälter führen die Rohrleitungen nach außen in das Maschinenhaus. Da der Dampf nicht frei von radioaktiven Verunreinigungen ist, muss auch das Maschinenhaus in eine Sicherheitsabschirmung einbezogen sein. Außerdem sind eine Reihe weiterer Sicherheitsvorrichtungen eingebaut, um bei einer Störung eine sofortige Unterbrechung des Dampfstromes zum Maschinenhaus zu erreichen.

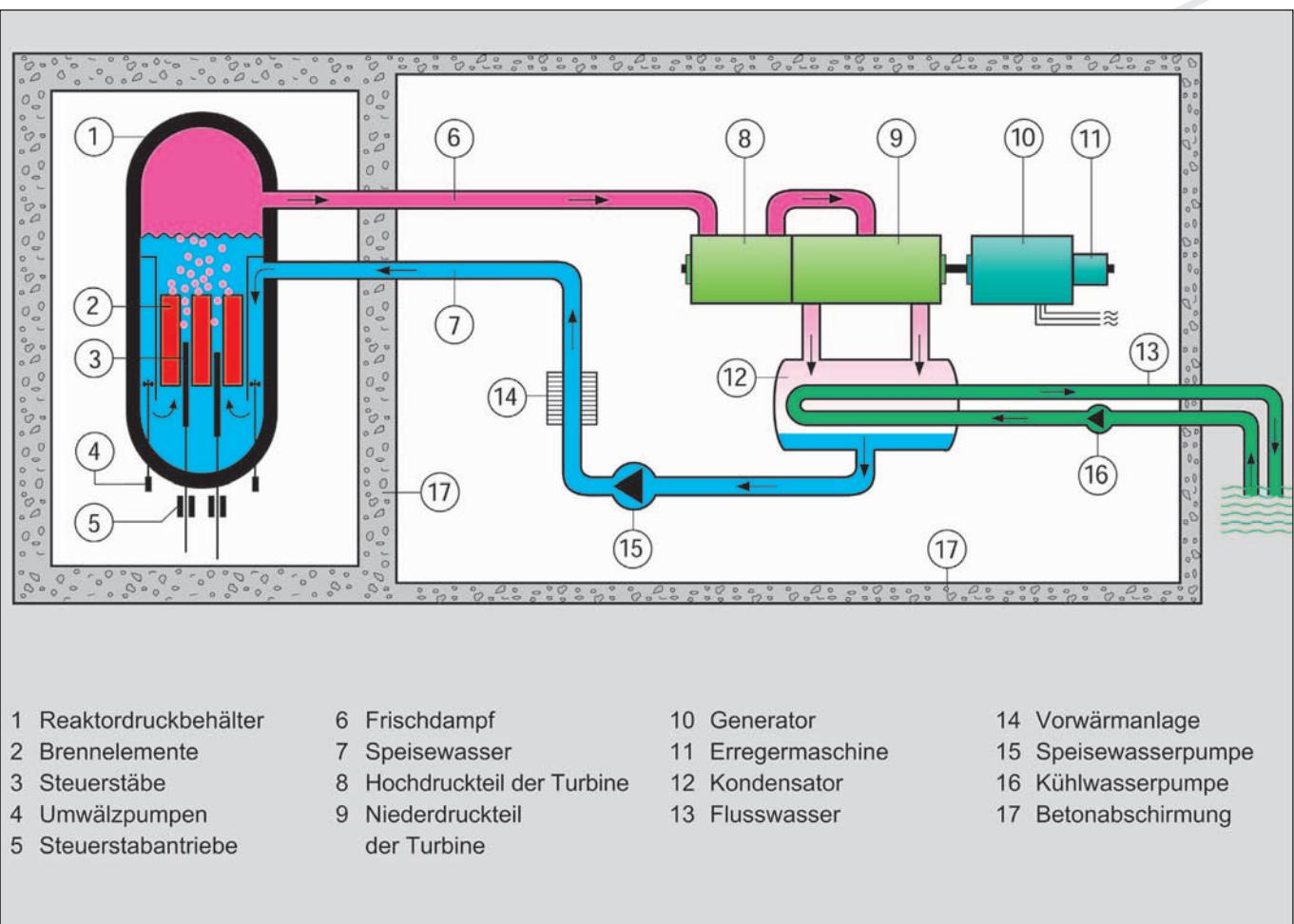


Abb. 6.1: Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor (vereinfachte Schemazeichnung)

Kernbrennstoff	UO_2	Kühlmittel und Moderator	H_2O , voll entsalzt
Anreicherung an U-235	bis zu 4,02 %	thermische Reaktorleistung	3.690 MW
Kernbrennstoffmenge	156 t	elektrische Bruttolleistung	1.402 MW
Anzahl der Brennelemente	840	elektrische Nettoleistung	1.346 MW
Anzahl der Brennstäbe je Brennelement	9x9QA-72	Nettowirkungsgrad	36,5 %
Brennstablänge	4,17 m	mittlere Leistungsdichte im Reaktorkern	51,6 kW/dm ³
Brennstabdurchmesser	12,5 mm	Entlad-Abbrand (Gleichgewichtskern)	55.000 MWd/t U
Anzahl der Steuerstäbe	205	Wärmeübertragungsfläche im Reaktorkern	7.710 m ²
Absorbermaterial	Borcarbid	Kondensator-Kühlfläche	3 x 18.475 m ²

Tab. 6-1: Technische Daten zum Kernkraftwerk Krümmel

Das Reaktordruckgefäß mit den Brennelementen ist ein zylindrischer Stahlbehälter. Er ist mit einem Betonschild abgeschirmt und befindet sich zusammen mit einer Reihe weiterer Anlagenteile und Sicherheitseinrichtungen in einem kugelförmigen Sicherheitsbehälter, der in der Abbildung jedoch nicht dargestellt ist (Abb. 6.1 und Tab. 6-1).

6.2 Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor (Beispiel: Kernkraftwerk Brokdorf)

Durch das Wasser wird die in den Brennelementen erzeugte Wärme abgeführt. Um ein Sieden zu verhindern, wird der Betriebsdruck im Hauptkühlkreis auf 157 bar (15,7 MPa) heraufgesetzt und durch einen Druckhalter geregelt. Das Kühlmittel tritt mit einer Temperatur von 291 °C in den Reaktor ein und verlässt ihn mit einer Temperatur von 326 °C. Etwa 67.680 t Kühlmittel werden je Stunde durch den Reaktor bewegt.

Das erhitzte Wasser gibt seine Wärme in vier Dampferzeugern (davon nur einer in Abb. 6.2 dargestellt) an das Wasser eines Sekundärkreises ab. Aufgrund der hohen Temperatur und des niedrigeren Druckes verdampft es im Sekundärkreis und liefert pro Sekunde 2,1 t Satt dampf von 285 °C und einem Druck von 66 bar (6,6 MPa). Durch ein solches Zweikreissystem wird erreicht, dass die im Reaktorkühlmittel auftretenden radioaktiven Stoffe auf den ersten Kühlkreislauf beschränkt bleiben und nicht in die Turbine und den Kondensator gelangen. Mit Hilfe des erzeugten Dampfes wird eine Turbine (Hochdruckteil, Niederdruckteil)

betrieben, die direkt mit einem Drehstrom-Synchrongenerator gekoppelt ist. Der Generator liefert an den Klemmen eine Leistung von 1.395 Megawatt (Wirkleistung) bei einer Spannung von 27 kV. Die Frequenz beträgt 50 Hz.

Im Kondensator wird der aus der Turbine austretende Dampf wieder verflüssigt. Dazu sind etwa 208.000 m³ Kühlwasser pro Stunde erforderlich, die der Elbe entnommen werden. Das Kondensat wird durch eine Vorwärm anlage zugeführt, auf 218 °C vorgewärmt und anschließend in den Dampferzeuger zurückgeleitet.

Für die Steuerstäbe des Reaktors wird z. B. eine Legierung aus Silber, Indium und Cadmium als Absorbersubstanz verwendet. Für schnelle Steuervorgänge können 61 Steuerstäbe ganz oder teilweise in den Reaktor eingefahren und wieder heraus gezogen werden. Für langsame oder langfristige Regelvorgänge wird Borsäure als Neutronenabsorber dem Reaktorkühlwasser zugesetzt.

Die Brennelemente befinden sich in einem Druckbehälter aus Spezialstahl (Wandstärke 25 cm), der zusammen mit dem Primärkreislauf in einem doppelwandigen Sicherheitsbehälter untergebracht ist.

6.3 Kernkraftwerk mit Schnellem Brutreaktor

In Siede- und Druckwasserreaktoren kann von den in der Natur vorhandenen Uranisotopen nur das Uran-235 gespalten

Kernbrennstoff	UO_2/MOX	Kühlmittel und Moderator	H_2O , voll entsalzt
Anreicherung an U-235	bis zu 4 %	thermische Reaktorleistung	3.765 MW
Kernbrennstoffmenge	103 t	elektrische Bruttoleistung	1.440 MW
Anzahl der Brennelemente	193	elektrische Nettoleistung	1.370 MW
Anzahl der Brennstäbe je Brennelement	236	Nettowirkungsgrad	36,4 %
Brennstablänge	4,83 m	mittlere Leistungsdichte im Reaktorkern	93,2 kW/dm ³
Brennstabdurchmesser	10,75 mm	Entlad-Abbrand (Gleichgewichtskern)	ca. 53.000 MWd/t U
Anzahl der Steuerstäbe	61	Wärmeübertragungsfläche im Reaktorkern	6.036 m ²
Absorbermaterial	In, Ag, Cd	Kondensator-Kühlfläche	3 x 20.781 m ²

Tab. 6-2: Technische Daten zum Kernkraftwerk Brokdorf

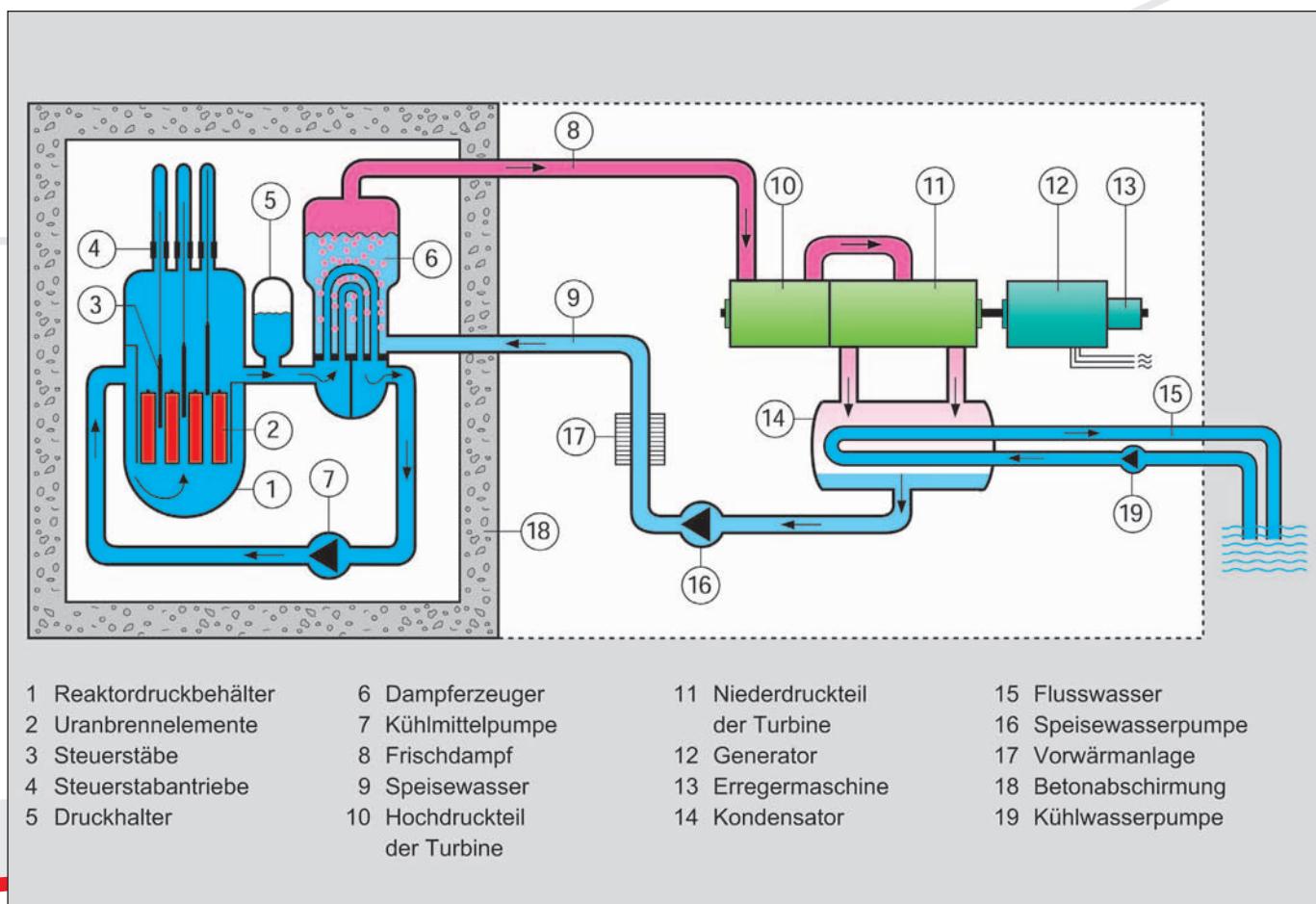


Abb. 6.2: Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor (vereinfachte Schemazeichnung)

werden. Es ist im natürlichen Uran mit 0,7 % enthalten und in den Brennelementen auf bis zu 3,5 % angereichert. Das Uran-238 ist in diesen Reaktortypen als Spaltstoff nicht zu verwenden. Der Kern eines Atoms Uran-238 kann aber ein Neutron aufnehmen und sich anschließend in mehreren Stufen zu Plutonium-239 umwandeln. Dies wird am effektivsten durch schnelle Neutronen gespalten und ist deshalb als Spaltstoff geeignet. In Schnellen Brutreaktoren werden beide Vorgänge gezielt herbeigeführt:

- Es finden Kernspaltungen statt, wodurch Energie freigesetzt wird.
- Ein Teil des Uran-238 wird in spaltbares Plutonium-239 umgewandelt (Brutvorgang).

Bei Brutreaktoren ist eine hohe Konzentration an spaltbarem Plutonium notwendig, weil schnelle Neutronen verwendet werden. Sie führen mit geringerer Wahrscheinlichkeit zu Kernspaltungen als Langsame. Der Reaktorkern ist deshalb kompakter gebaut und besitzt eine Spaltstoffkonzentration, die deutlich höher liegt als bei den Leichtwasserreaktoren. In Brutreaktoren kann der Prozess so gesteuert werden, dass aus Uran-238 mehr spaltbares Plutonium-239 erzeugt wird, als durch Kernspaltungen verbraucht wird. Da sowohl bei

der Kernspaltung als auch bei der Erbrütung von Plutonium schnelle Neutronen eingesetzt werden, nennt man diesen Reaktortyp „Schneller Brüter“ oder „Schneller Brutreaktor“.

In dem französischen Brutreaktor Phénix konnte nachgewiesen werden, dass auf 100 Plutoniumkerne, die gespalten werden, 115 Plutoniumkerne neu erbrütet werden. Es entsteht also ein Überschuss an spaltbarem Material, das in anderen Leichtwasser- oder Brutreaktoren als Spaltstoff eingesetzt werden kann. Da aber bei der Aufbereitung der Spalt- und Brutstoffe Verluste entstehen, kann durch den Einsatz von 100 g Plutonium letztlich nicht 115 g Plutonium gewonnen werden. Nach dem heutigen Stand der Technik ist es aber möglich, das Natururan etwa 60-mal besser auszunutzen als in den Leichtwasserreaktoren.

Da Brutreaktoren nur mit schnellen Neutronen betrieben werden, darf kein Moderator vorhanden sein. Als Kühlmittel kommt deshalb auch kein Wasser in Frage. Es würde die Neutronen zu schnell auf geringe Geschwindigkeiten abbremsen (moderieren). Außerdem könnte Wasser die große Menge an Wärmeenergie, die aufgrund der hohen Spaltstoffkonzentration erzeugt wird, nicht schnell genug abführen. Als Kühlmittel wird deshalb flüssiges Natrium verwendet. Sein Schmelzpunkt liegt bei 98 °C, sein Siedepunkt

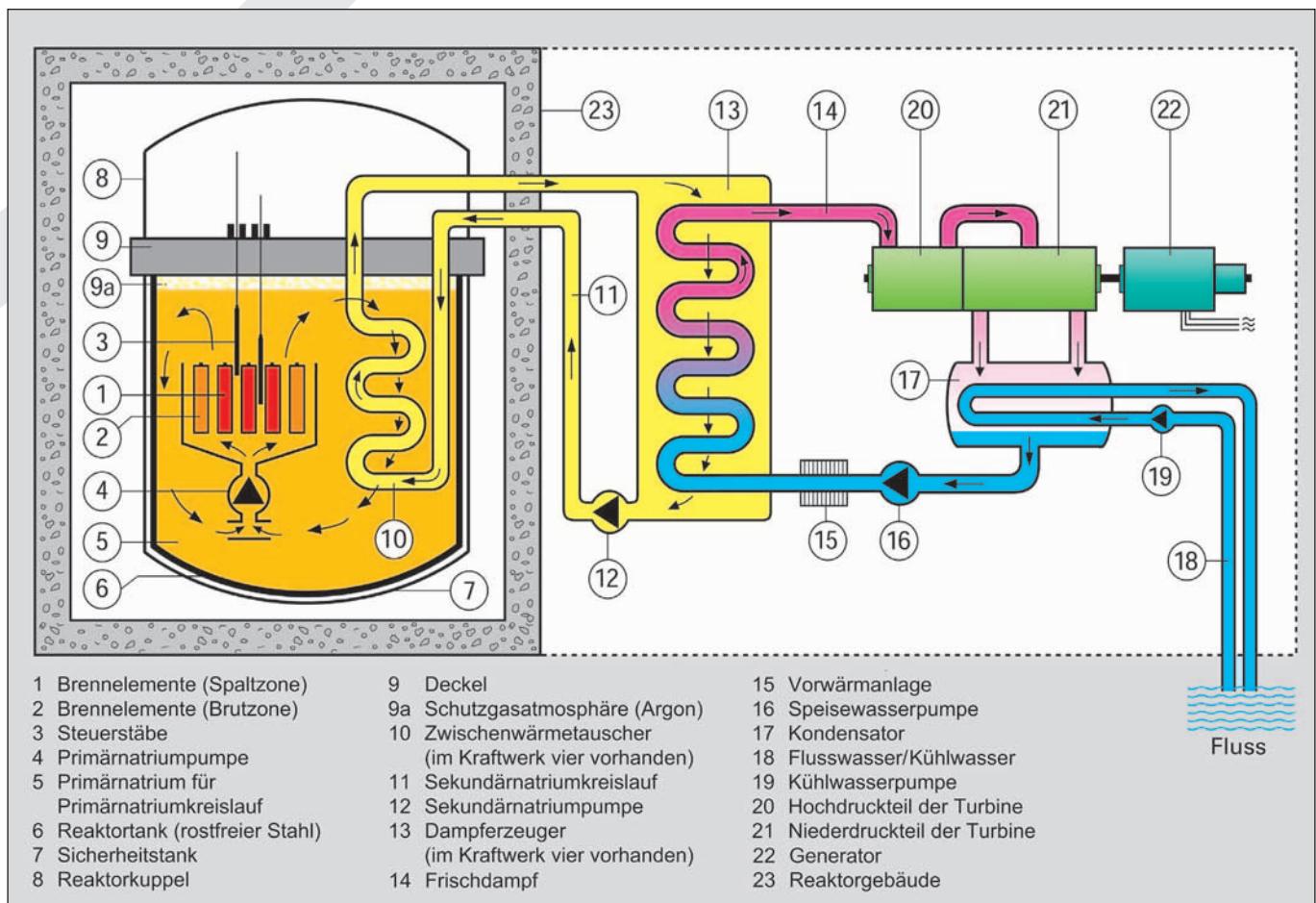
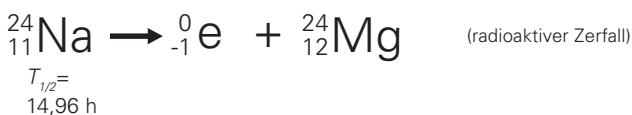
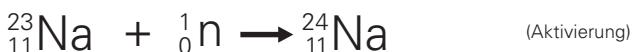


Abb. 6.3: Kernkraftwerk mit Schnellem Brutreaktor (vereinfachte Schemazeichnung)

bei 883 °C. Mit einer Temperatur von rund 400 °C tritt es von unten in den Reaktorkern ein und verlässt ihn wieder mit etwa 550 °C. Da das Natrium dabei nicht siedet, ist auch der entstehende Druck relativ niedrig. Im Primärkreislauf liegt er bei etwa 10 bar (1 Mpa).

In einem Zwischenwärmetauscher gibt das flüssige Natrium des Primärkreislaufs seine Wärme an das Natrium eines Sekundärkreislaufs ab. Ein weiterer Wärmetauscher bildet den Dampferzeuger. In ihm erzeugt das flüssige Natrium des Sekundärkreislaufs Wasserdampf von rund 500 °C (bei rund 180 bar), der dann einer Dampfturbine zugeführt wird (Abb. 6.3).

Die Verwendung von drei Kreisläufen ist aus sicherheitstechnischen Gründen notwendig. Das Natrium, das im Reaktor strömt, wird durch die freien Neutronen radioaktiv. Es entsteht radioaktives Na-24, das unter Aussenden eines Betateilchens zu Magnesium zerfällt:



Um das radioaktive Natrium in der Sicherheitszone des Reaktorgebäudes zu halten, wird die Wärme über einen sekundären Natriumkreislauf dem Wasser-Dampf-Kreislauf zugeführt. Das Natrium in dem sekundären Kreislauf ist nicht mehr radioaktiv. Der zweite Natrium-Kühlkreislauf verhindert also, dass bei Störfällen das radioaktive Natrium des Primärkreislaufs mit dem Wasser-Dampf-Kreislauf in Berührung kommt.

6.4 Kernkraftwerk mit Thorium-Hochtemperaturreaktor (Beispiel: THTR-300)

Eine weitere Möglichkeit, Kernenergie zur Erzeugung elektrischer Energie zu nutzen, bietet der Hochtemperaturreaktor. Wie im Namen ausgedrückt wird, können mit diesem Reaktortyp relativ hohe Temperaturen erzeugt werden. Während Leichtwasserreaktoren Kühlmitteltemperaturen bis etwa 330 °C und Schnelle Brüter bis 550 °C erreichen, liegt bei Hochtemperaturreaktoren die Kühlmitteltemperatur bei 750 °C und darüber. Es kann dann nicht nur Dampf zum Antrieb von Turbinen, sondern auch Prozesswärme (z. B. zur Kohlevergasung) erzeugt werden.

In der Nähe von Hamm (Westfalen) ist von 1985 bis 1989 ein Hochtemperaturreaktor betrieben worden, um technische Erfahrungen mit dieser Technologie zu gewinnen. Aus wirtschaftlichen Gründen wird die Reaktorlinie jedoch zurzeit

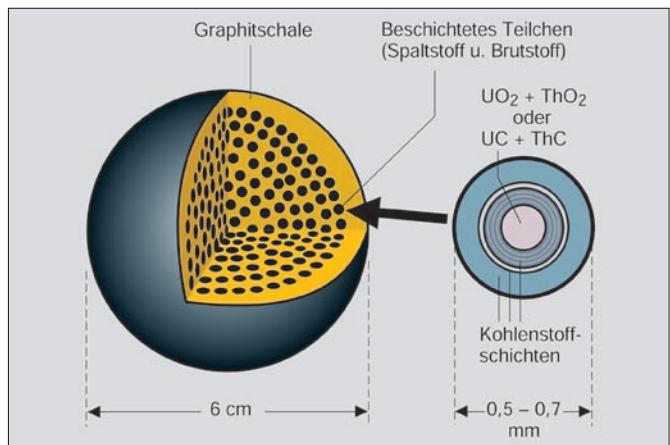


Abb. 6.4: Kugelförmiges Brennelement des THTR-300

nicht weiter verfolgt. Da sie aber eine technisch sehr interessante Lösung darstellt, wird das Demonstrationskraftwerk von Hamm hier beschrieben.

Die Brennelemente in dem bei Hamm errichteten Hochtemperaturreaktor THTR-300 waren Graphitkugeln mit einem Durchmesser von 6 cm. Sie enthielten als Spaltstoff etwa 1 g Uran-235 und als Brutstoff etwa 10 g Thorium-232 in Form beschichteter Teilchen von 0,5 bis 0,7 mm Durchmesser. Etwa 35.000 solcher umhüllten Teilchen waren in einer Kugel untergebracht (Abb. 6.4).

Uran-235 wird durch langsame Neutronen gespalten und dabei aus Thorium-232 Uran-233 erbrütet, das ebenfalls durch langsame Neutronen spaltbar ist. Während des Betriebs erzeugte der Thorium-Hochtemperaturreaktor also einen Teil des Spaltstoffs selbst. Bei diesem Reaktortyp wurde Graphit als Moderator verwendet.

Rund 675.000 kugelförmige Betriebselemente waren in dem Reaktor untergebracht. Diese Erstbeladung bestand aus ca. 360.000 Brennelementkugeln, ca. 280.000 Graphitkugeln (zusätzlicher Moderator) und ca. 35.000 borhaltigen Kugeln (Absorber). Die Brennelementkugeln befanden sich in einem Behälter aus Graphitblöcken mit einem Durchmesser von 5,6 m und einer Höhe von 6 m. Er stützte den Kugelhaufen ab und diente gleichzeitig als Neutronenreflektor. Um die bei den Kernprozessen auftretende Gammastrahlung abzuschirmen, war der Graphitbehälter von einem eisernen Schild umgeben (Abb. 6.5).

Die im Reaktor erzeugte Wärme wurde durch das Edelgas Helium nach außen geführt (Heliumkühlkreis). Es strömte von oben mit einer Temperatur von 250 °C in den Reaktor und verließ ihn unten mit einer Temperatur von 750 °C. In sechs Dampferzeugern (in der Abbildung nur zwei dargestellt) gab das Helium seine Wärme an einen Wasser-Dampf-Kreislauf ab. Zur Steuerung und Abschaltung des Reaktors konnten 42 Regelstäbe von oben in den Kugelhaufen eingefahren werden (Tab. 6-3).

Reaktordaten		Primärkühlkreislauf	
thermische Leistung	759,5 MW	Kühlmittel	He
elektrische Leistung	307,5 MW	Eintrittstemperatur	250 °C
Wirkungsgrad	40,49 %	Austrittstemperatur	750 °C
Spaltstoff	U-235	Druck	39,2 bar (3,92 MPa)
Masse des Spaltstoffs U-235	344 kg	Wasser-Dampf-Kreislauf	
Brutstoff	Th-232	Arbeitsmittel	H ₂ O
Masse des Brutstoffs	6.400 kg	Speisewassertemperatur	180 °C
Spaltstoffanteil am Schwermetall-Einsatz	5,4 %	Frischdampftemperatur	530 °C
Absorbermaterial	B ₄ C	Frischdampfdruck	177,5 bar (17,75 MPa)

Tab. 6-3: Technische Daten zum THTR-300

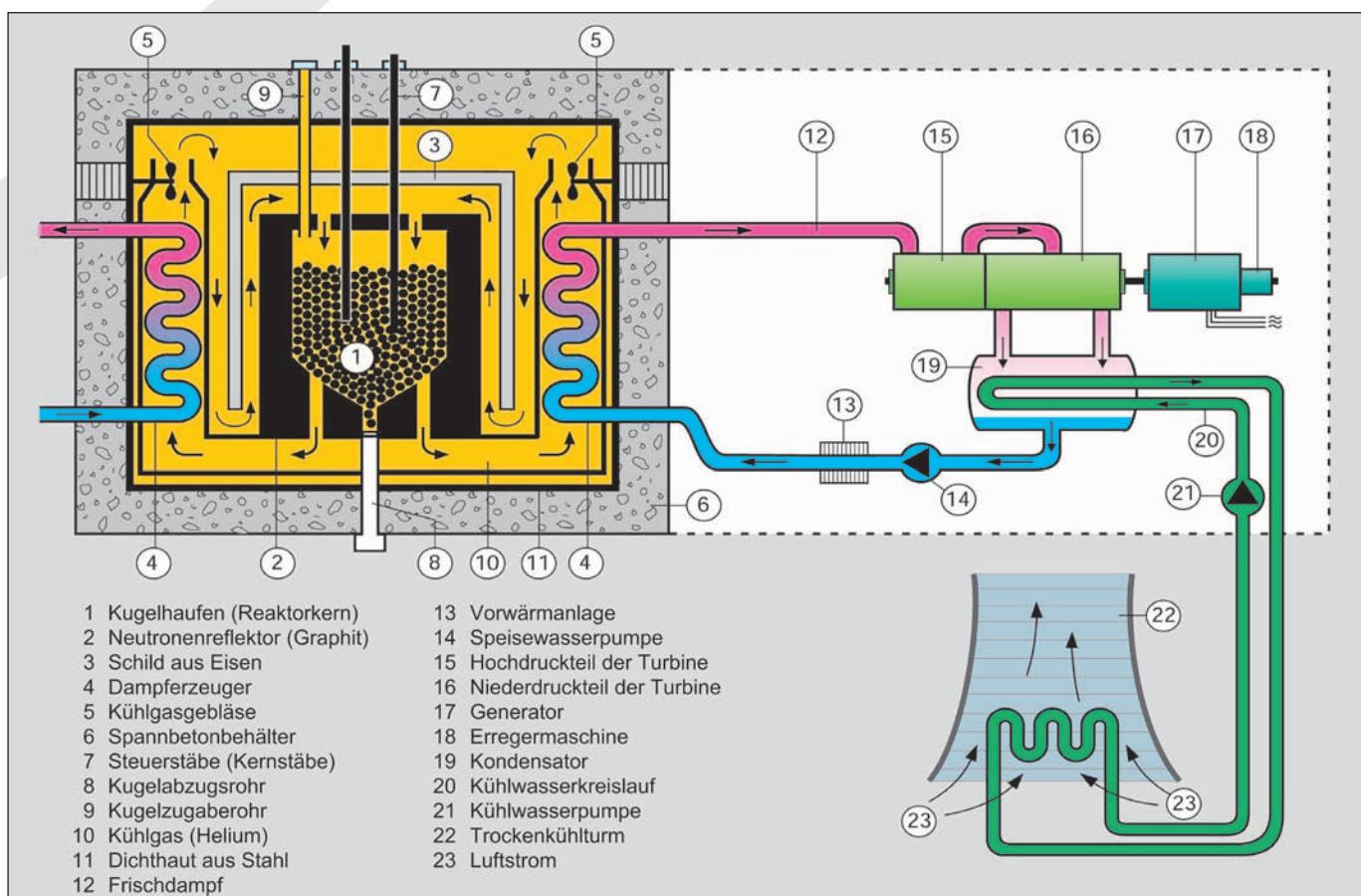


Abb. 6.5: Kernkraftwerk mit Thorium-Hochtemperaturreaktor (vereinfachte Schemazeichnung)

Die Hauptkomponenten (Kugelhaufen, Neutronenreflektor, Schild aus Eisen, Dampferzeuger, Kühlmittelgebläse sowie Einrichtungen zur Reaktorsteuerung und Reaktorabschaltung) waren in einem berstsicheren Spannbetonbehälter mit einer Wandstärke von 4,5 bis 5 m untergebracht. Er hielt dem Innendruck von etwa 40 bar (4 MPa) stand und diente gleichzeitig zur Abschirmung der Neutronen- und Gammastrahlung.

Im Reaktordruckbehälter befand sich auch die Beschickungsanlage. Sie ermöglichte eine fortlaufende Entnahme und Zugabe der kugelförmigen Brennelemente. Bei Vollast wurden an einem Tag 3.700 Kugeln umgesetzt und etwa 620 abgebrannte Brennelemente durch neue ersetzt. Die Brennelemente sollten im Mittel ungefähr drei Jahre im Reaktor bleiben und ihn in dieser Zeit rund sechsmal durchlaufen.

Mit dem in den Wärmetauschern erzeugten Dampf wurde eine Turbine angetrieben, die mit einem Generator gekoppelt war. Zur Kondensatorkühlung wurde bei dem Thorium-Hochtemperaturreaktor ein Kühlkreislauf mit einem Naturzug-Trockenkühlturm verwendet. Die durch den Turm emporsteigende Luft führte die Wärme des Kondensatorkühlkreises ab. Die Wärme wurde also nicht an einen Fluss, sondern an die Luft abgegeben.

Der Thorium-Hochtemperaturreaktor zeichnete sich durch besondere Sicherheit aus. Das Kühlmittel Helium wird durch Neutronenbestrahlung praktisch nicht aktiviert. Außerdem verhält es sich auch bei hohen Temperaturen chemisch neutral. Der in den Brennelementkugeln eingesetzte Graphit mit einer Schmelztemperatur von 3.650 °C konnte bei den im Reaktor auftretenden Temperaturen nicht schmelzen.

6.5 Kernkraftwerk mit Siedewasser-Druckröhrenreaktor (Beispiel: RBMK 1000, Kursk-1)

RBMK ist die Abkürzung der russischen Bezeichnung für einen heterogenen, wassergekühlten, graphitmoderierten Druckröhrenreaktor. Die Zahl 1000 gibt die elektrische Leistung in MW an. Der Reaktorkern besteht aus etwa 1.700 Graphitziegeln, die zu einem zylindrischen Block von 7 m Höhe und 12 m Durchmesser aufgeschichtet sind. Das Volumen des Reaktorkerns ist mehr als 10-mal größer als bei einem Siedewasserreaktor der Bundesrepublik Deutschland.

In dem Block aus Graphitziegeln befinden sich senkrechte Bohrungen für die 1.693 Druckröhren. In ihnen befindet sich je ein Brennelement mit zwei hintereinander angeordneten Brennstabbundles mit jeweils 18 Brennstäben. Jedes Brennstabbundle ist 3,65 m lang und enthält 64,8 kg Uran-Dioxyd mit einem Anteil von 2,4 % U-235. Insgesamt enthält der Reaktor rund 193 t Uran. Weitere Bohrungen im Graphitblock enthalten die 191 Regel- und Abschaltstäbe.

Die 33 Schnellabschaltstäbe lassen sich in 2,5 bis 7 s in den Reaktorkern einfahren.

Der Graphitblock mit den Druckröhren ist von einem Stahlbehälter umkleidet, der jedoch nicht als Druckbehälter konstruiert ist. Der freie Raum im Behälter ist mit einem Schutzgas ausgefüllt (Verhinderung von Graphitbränden). In den Brennelementen finden Kernspaltungen statt. Die dabei erzeugte Wärme wird vom Wasser aufgenommen, das dadurch z.T. verdampft. Das Wasser-Dampf-Gemisch gelangt aus den Druckröhren zu Dampfabscheidern, in denen eine Trennung von Wasser und Dampf herbeigeführt wird. Der Dampf strömt zu zwei Turbinen, das Wasser wird wieder in den Reaktor zurück gepumpt (Abb. 6.6 und Tab. 6-4).

Für die Entwicklung des RBMK-Typs in der ehemaligen UdSSR gab es mehrere Gründe:

- Die technische Fertigung von Druckröhren ist wesentlich einfacher als die von Druckbehältern.
- Die Entwicklung von Reaktoren größerer Leistung ist bei diesem Typ leicht möglich, da gleiche Komponenten lediglich in ihrer Anzahl vermehrt zu werden brauchen.
- Ein Brennelementwechsel ist während des Betriebs möglich, was Stillstandzeiten vermeidet.
- Um Plutonium zu gewinnen, können die Brennelemente nach der optimalen Brutzeit während des Betriebs entnommen werden.

Den ökonomischen Vorteilen stehen jedoch eine Reihe reaktortechnischer Nachteile gegenüber:

- Der Dampfblasenkoeffizient ist positiv. Der Reaktor neigt dadurch zu instabilem Verhalten.
- Das Volumen des Reaktorkerns ist mehr als 10-mal so groß wie bei Leichtwasserreaktoren. Es ist eine aufwendige und komplizierte Steuerung der Kettenreaktion notwendig.
- Fast 1.900 Druckröhren müssen überwacht werden.
- Ein Sicherheitsbehälter fehlt.

Am Standort Tschernobyl in der Ukraine wurden vier Kernkraftwerksblöcke vom Typ RBMK 1000 betrieben. Im Block 4 kam es am 26. April 1986 durch eine Reihe von Bedienungsfehlern im Zusammenhang mit einem technischen Experiment auf Grund von prinzipiellen Mängeln in der reaktorphysikalischen Auslegung zu einem katastrophalen Unfall. Die Anzahl der Kernspaltungen nahm in wenigen Sekunden rapide zu, so dass die Brennstofftemperatur etwa 3.000 °C erreichte. Der daraus resultierende starke Anstieg des Dampfdruckes führte zum Bersten von etwa 30 % der Druckröhren. Radioaktive Stoffe gelangten in die Umwelt.

thermische Leistung	3.200 MW	Brennstab bündel je Druckrohr	2
elektrische Leistung	1.000 MW	Brennstäbe je Brennstab bündel	18
Wirkungsgrad	31 %	Länge des Brennstab bündels	3,65 m
Kernbrennstoff	UO ₂	Anzahl der Führungsrohre mit Regel- und Abschaltstäben	191
Gesamtmasse Uran	ca. 193 t	Kühlmittel	H ₂ O
Anreicherung U-235	2,4 %	Kühlmitteltemperatur Kerneintritt	270 °C
Moderator	Graphit	Kühlmitteltemperatur Kernaustritt	284 °C
Gesamtmasse Moderator	ca. 1.700 t	Frischdampfdruck	68,6 bar (6,86 MPa)
Anzahl der Druckrohre für Brennelemente	1.693	Frischdampfdurchsatz	5.600 t/h

Tab. 6-4: Technische Daten zum RBMK 1000, Kursk-1

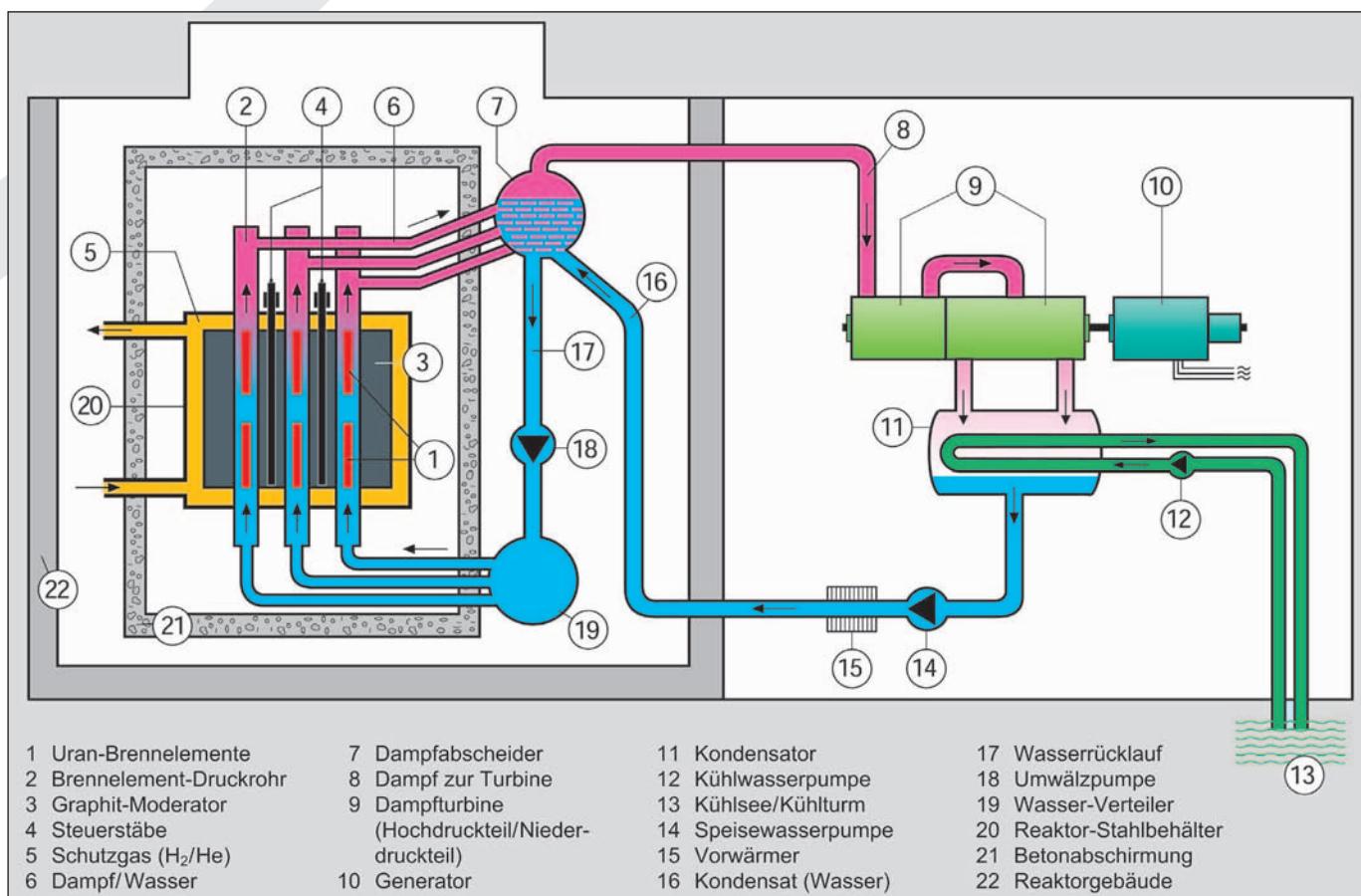


Abb. 6.6: Kernkraftwerk mit Siedewasser-Druckröhrenreaktor (RBMK 1000) (vereinfachte Schemazeichnung)

7 Sicherheitseinrichtungen bei Kernkraftwerken

7.1 Strahlenquellen in einem Kernkraftwerk

Die von einem Kernreaktor ausgehende Strahlung hat verschiedene Ursachen:

- Bei der Spaltung der Kerne des U-235 mit Hilfe langsamer Neutronen tritt eine Neutronen- und Gammastrahlung auf.
Beispiel:

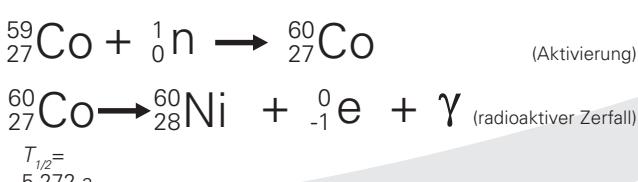
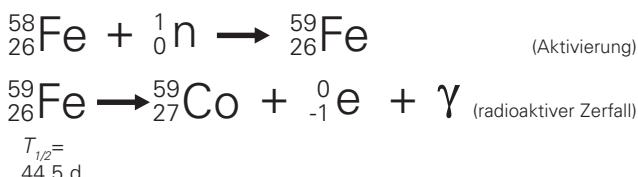


Beide Strahlenarten haben ein hohes Durchdringungsvermögen. Sie müssen deshalb durch eine Reihe von Barrieren abgeschirmt werden.

- Die bei der Kernspaltung entstehenden Spaltprodukte sind aufgrund ihres Neutronenüberschusses meist radioaktiv. Man kennt heute über 300 verschiedene Spalt-Radionuklide, die sich auf 54 verschiedene Elemente verteilen (vom Titan mit der Kernladungszahl 22 bis zum Ytterbium mit der Kernladungszahl 70 sowie die bei einer Spaltung in drei Bruchstücke entstehenden Elemente vom Wasserstoff bis zum Kohlenstoff).

Die Spaltprodukte wandeln sich unter Aussenden von Betastrahlen in stabile Kerne um. Dabei werden zum Teil Zerfallsreihen durchlaufen (Abb. 7.1 und Abb. 7.2). Es ist aber auch Neutronenemission möglich. Radioaktive Isotope eines bestimmten Elements (z. B. radioaktives Iod) können direkt bei der Kernspaltung oder beim nachträglichen Zerfall eines Spaltproduktes entstehen.

- Eine weitere Quelle bilden die Aktivierungsprodukte. Zunächst inaktive Nuklide können sich durch Aufnahme eines freien Neutrons in Radionuklide umwandeln. Hier zwei Beispiele:



Materialien im Bereich der Neutronenstrahlung, wie z. B. das Kühlmittel Wasser, der Beton, Stahl und seine Legierungsbestandteile, Korrosionsprodukte oder die Luft können auf diese Weise radioaktiv werden und dann über eine mehr oder weniger lange Zeit Strahlung aussenden.

- Neben den Spalt- und Aktivierungsprodukten entstehen durch Neutroneneinfang im U-238 das Plutonium-Isotop Pu-239 und in geringerem Umfang weitere Plutonium- und Transplutonium-Isotope (siehe Kap. 4.5). Pu-239 ist auch durch langsame Neutronen spaltbar und trägt insofern zu den Kernspaltungsprozessen im Reaktor bei.
- Einen gegenüber diesen Strahlenquellen nur sehr geringen Beitrag liefert die Aktivität der als Kernbrennstoff verwendeten Uranisotope U-235 und U-238. Insofern liegt auch vor der Inbetriebnahme eines Reaktors bereits eine Strahlenquelle vor.

7.2 Grundlegendes Sicherheitskonzept

Bei Kernspaltungen und von den künstlich erzeugten Radionukliden werden ionisierende Strahlen ausgesandt. Sie stellen für Lebewesen eine Gefahr dar. In Kernkraftwerken werden deshalb die Strahlen abgeschirmt und die strahleaussendenden Radionuklide sicher eingeschlossen. Diese grundlegenden Anforderungen müssen sowohl bei normalem Reaktorbetrieb als auch im Störfall erfüllt sein:

- Ein störungsfreier Normalbetrieb wird durch Qualitätsicherung gewährleistet (Abb. 7.3). Es erfordert die Verwendung qualitativ hochwertiger Komponenten und Anlagenteile (optimale Werkstoffe, gewissenhafte Fertigung, umfassende Kontrollen und Wiederholungsprüfungen während der gesamten Lebensdauer der Anlage), die Einplanung hoher Sicherheitsreserven, eine schonende Betriebsweise und den Einsatz fachkundigen Betriebspersonals.
- Um Betriebsstörungen (z. B. geringer Druckanstieg in den Kühlmittelleitungen über den Regelbereich hinaus) feststellen und beherrschen zu können, sind Störungsmelder und Begrenzungseinrichtungen vorhanden. Werden bestimmte Grenzwerte überschritten, wird automatisch eine Korrektur vorgenommen, damit es nicht zu einem Störfall kommt. Leichtwasserreaktoren besitzen zusätzlich ein selbstabilisierendes Betriebsverhalten.
- Auslegungsstörfälle (z. B. Bruch einer Hauptkühlmittelleitung) sind zwar aufgrund der vielen sicherheitstechnischen Vorkehrungen unwahrscheinlich, können im Prinzip aber dennoch eintreten. Sie müssen dann sicher beherrscht werden. Bei einem Auslegungsstörfall garantiert das Reaktorschutzsystem ein Abschalten des Reaktors, die Abfuhr der Nachwärme und den sicheren Einschluss des radioaktiven Inventars. Die Schäden in der Reaktoranlage werden dadurch begrenzt und in der Umgebung des Kernkraftwerks keine Schäden verursacht.

Die Spaltprodukte sind radioaktiv und erzeugen auch nach dem Abschalten des Reaktors große Wärmemengen. Diese so genannte Nachwärme beträgt anfangs etwa 5 %

der Ausgangsleistung und nimmt mit der Zeit auf etwa 2 % ab. Bei einem Kraftwerk mit einer thermischen Leistung von 3.000 MW wären das 150 bis 60 MW. Bei fehlender Wärmeabfuhr würde die Temperatur bis weit über das Schmelzen der Brennstäbe hinaus ansteigen. Radioaktive Spaltprodukte könnten dann freigesetzt werden. Es muss also in jeder Situation sichergestellt sein, dass die Nachwärme abgeführt wird.

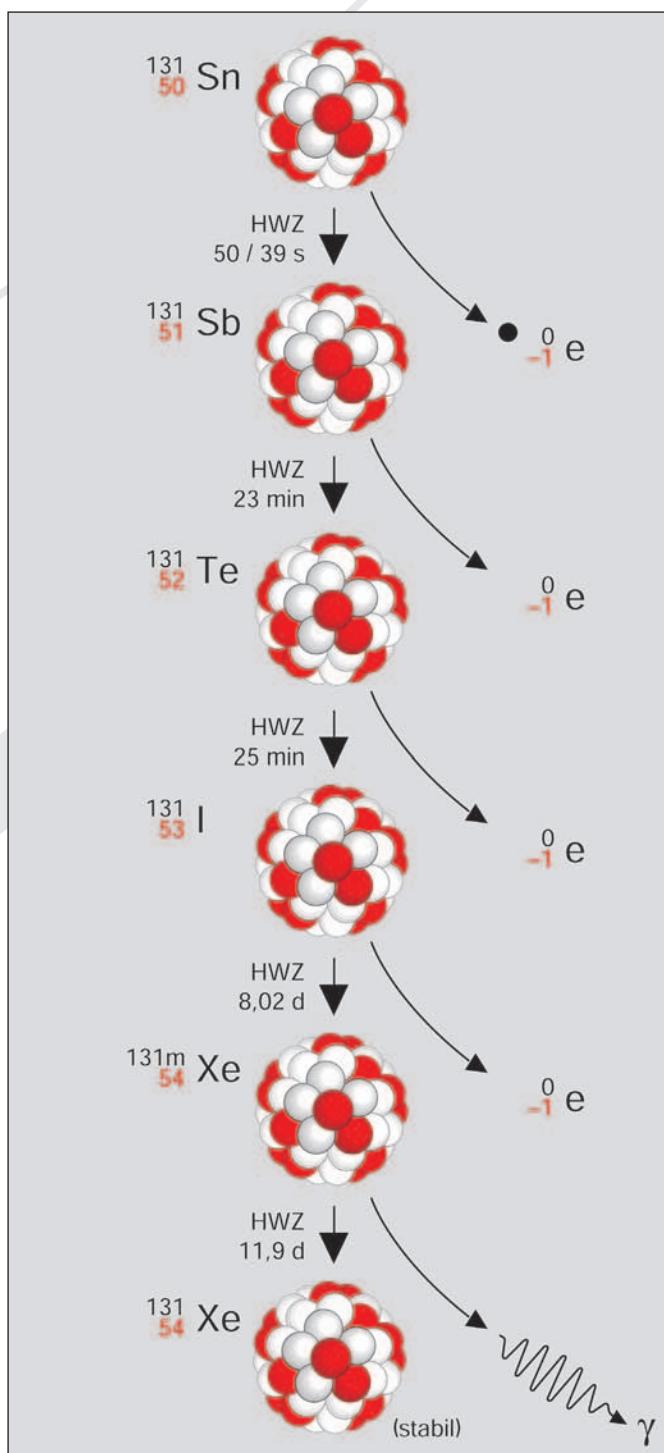


Abb. 7.1: Radioaktiver Zerfall des Sn-131

Die künstlich erzeugten Radionuklide (Spaltprodukte, Aktivierungsprodukte, Actinoide) werden durch mehrere, gezielt hintereinander angeordnete Schutzbarrieren eingeschlossen. Die Radionuklide dürfen niemals unkontrolliert und in unzulässigen Mengen in die Biosphäre gelangen. Die Barrierefunktion muss unter allen Störfallbedingungen aufrecht erhalten werden. Der Einschluss der in den Brennstäben vorhandenen Spaltprodukte ist oberstes Ziel der Reaktorsicherheitstechnik.

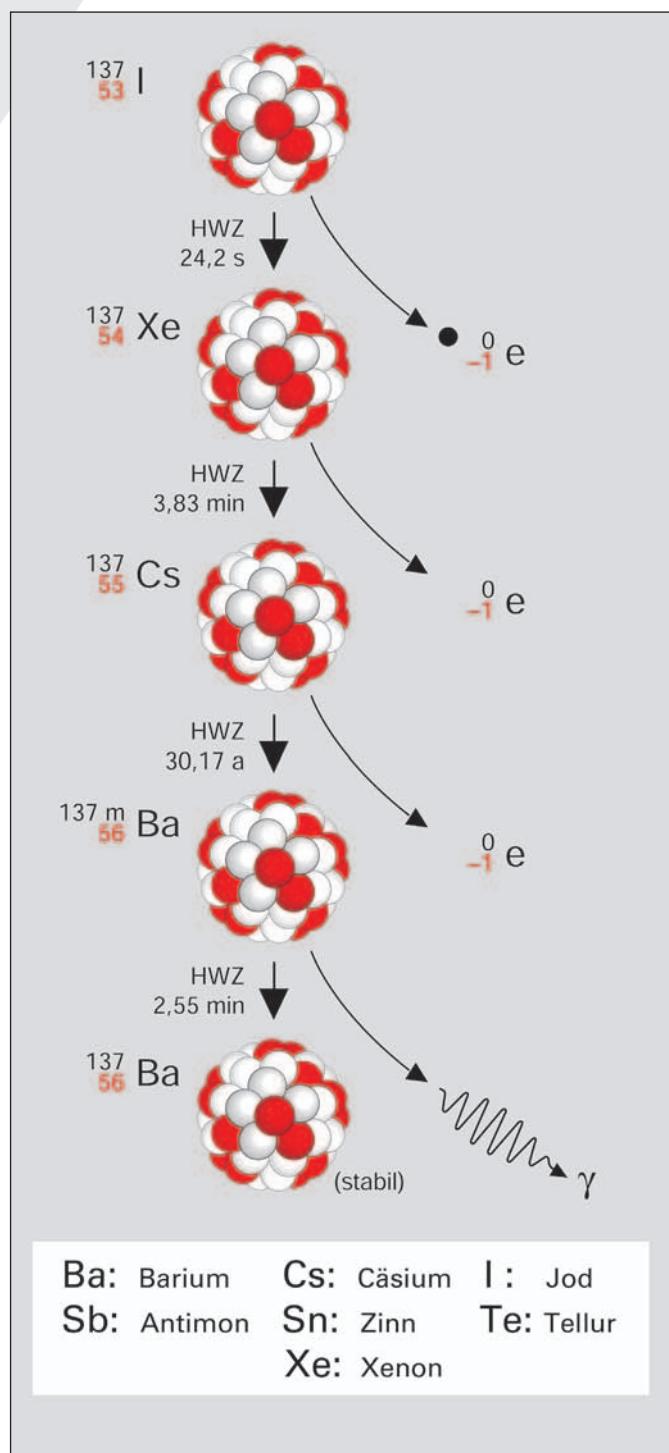


Abb. 7.2: Radioaktiver Zerfall des I-137

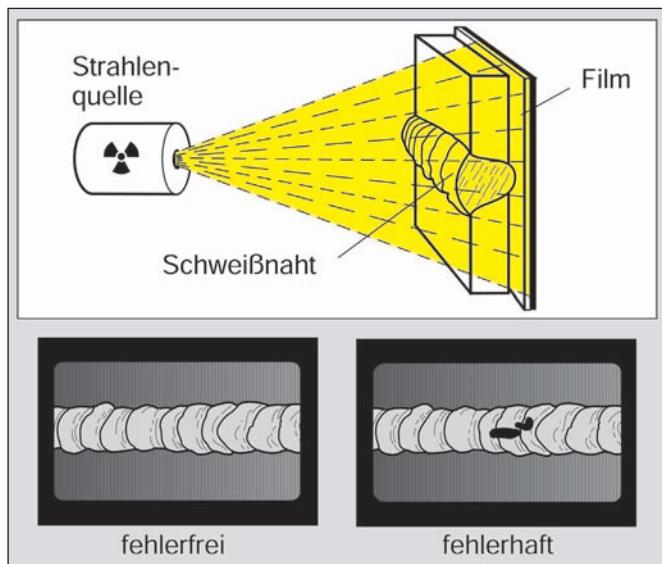


Abb. 7.3: Prüfung einer Schweißnaht mit Hilfe von Gammastrahlen

- Das umfassende Reaktorsicherheitssystem (Abb. 7.4) macht einen Unfall, bei dem radioaktive Stoffe unkontrolliert in größeren Mengen austreten, sehr unwahrscheinlich. Er ist aber nicht grundsätzlich auszuschließen, denn bei Kernkraftwerken kann man – wie bei allen anderen technischen Systemen auch – niemals eine 100%ige Sicherheit erreichen.

Für solche theoretisch nicht auszuschließenden, aber höchst unwahrscheinlichen Ereignisse werden für das einzelne Kernkraftwerk zusätzliche Notfallschutzmaßnahmen geplant. Ihr Ziel ist es, Kernschäden zu verhindern und die Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung soweit wie möglich zu begrenzen. Risikountersuchungen haben gezeigt, dass in deutschen Leichtwasserreaktoren einige Stunden bis zu einigen Tagen vergehen würden, bis aus einem Auslegungsstörfall bei angenommenem Versagen von Schutz- und Sicherheitseinrichtungen ein Unfall mit der Gefahr einer Aktivitätsfreisetzung wird. Diese Zeit reicht aber aus, um die anlageninternen Notfallschutzmaßnah-



Abb. 7.4: Technische Grundsätze zur Erhöhung der Sicherheit eines Kernkraftwerks

men einzuleiten. Das sind im Wesentlichen die Wiederherstellung der Kernkühlung, die Bereitstellung weiterer Wasserreserven zur Kühlung und die gefilterte Druckentlastung des Sicherheitsbehälters.

Um die Sicherheit von Kernkraftwerken weiter zu verbessern, wird eine umfassende Sicherheitsforschung betrieben. Man versucht, einzelne Komponenten zu verbessern, vorhandene Sicherheitsreserven zu bestimmen, einzelne Schutz- und Sicherheitssysteme in ihrem Zusammenspiel unter immer neuen Bedingungen zu beurteilen sowie den Ablauf möglicher bzw. hypothetischer Störfälle zu analysieren. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse können zur Verbesserung der bestehenden Sicherheitssysteme beitragen. Neben den technisch denkbaren Störfällen sind auch solche Fälle vorstellbar, die sich einem technischen Zugriff des Menschen entziehen. So kann man z.B. gegen den Einschlag eines großen Meteoriten keine Sicherheitseinrichtungen schaffen. Für solche Fälle muss ermittelt werden, ob die Eintrittswahrscheinlichkeit so groß und die Auswirkungen so katastrophal sind, dass ein Risiko nicht mehr akzeptiert werden kann.

In den folgenden Abschnitten werden beispielhaft einige besonders wichtige Sicherheitseinrichtungen vorgestellt.

7.3 Sicherheitsbarrieren gegen das Austreten radioaktiver Stoffe

Kernkraftwerke besitzen eine Reihe von Barrieren, die zwei Funktionen erfüllen. Sie schirmen die Direktstrahlung ab und sie verhindern wirksam das Austreten radioaktiver Stoffe (Abb. 7.5).

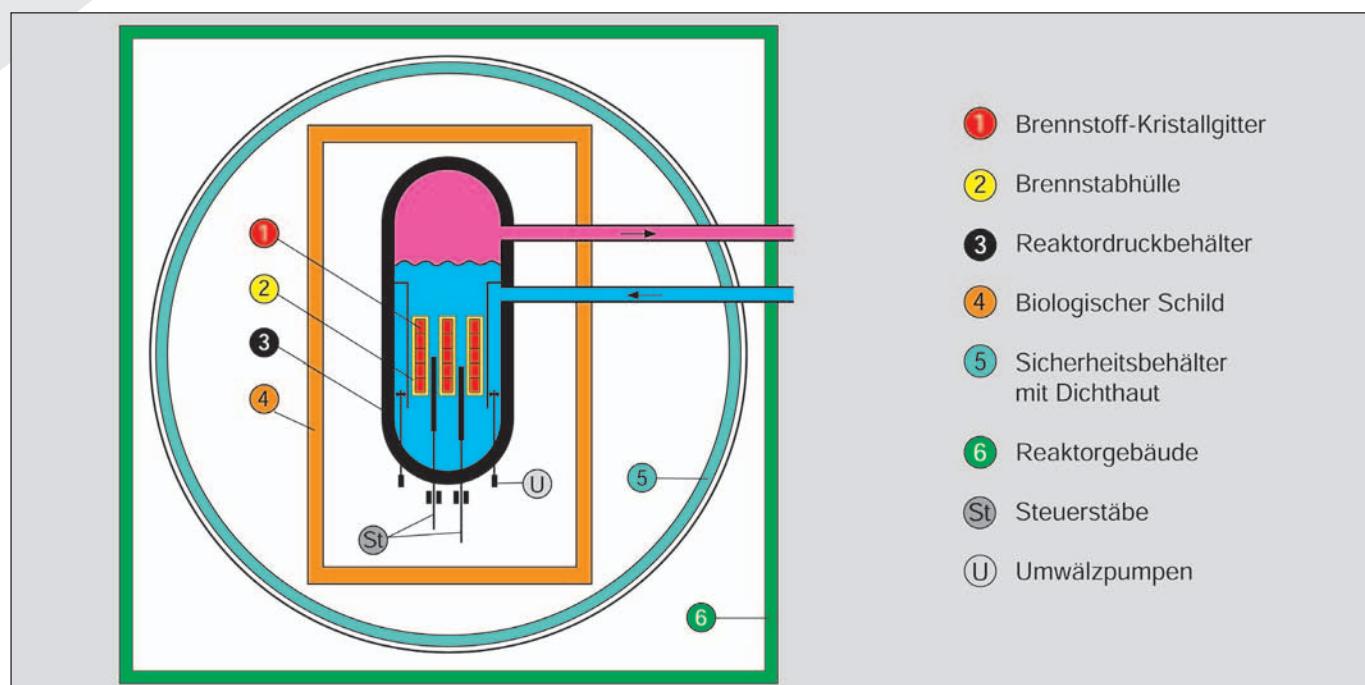


Abb. 7.5: Sicherheitsbarrieren gegen das Austreten radioaktiver Stoffe

Alpha- und Betastrahlen werden durch das Kühlwasser vollständig abgeschirmt. Das Reaktordruckgefäß verringert die Gammastrahlung auf den 100.000sten Teil der Strahlung im Reaktorkern. Eine fast vollständige Abschirmung der verbleibenden Gammastrahlung und der Neutronenstrahlung geschieht durch einen 2 m dicken Schild aus Stahlbeton, der das Reaktordruckgefäß umgibt. Sicherheitsbehälter und Reaktorgebäude bilden weitere Barrieren, so dass außerhalb des Reaktors kaum direkte Strahlung aus dem Reaktor auftritt. Das Reaktorgebäude übernimmt gleichzeitig den Schutz des Reaktors gegen äußere Einwirkungen (z.B. Erdbeben, Flugzeugabsturz, Druckwellen).

Einige der Barrieren zur Strahlenabschirmung sind gleichzeitig Sicherheitsbarrieren gegen das Austreten radioaktiver Stoffe. Sie sind bei Siedewasser- und bei Druckwasserreaktoren vorhanden. Im Einzelnen sind dies:

- das Kristallgitter des Brennstoffs selbst,
- die Brennstabhülle,
- das Reaktordruckgefäß mit dem angeschlossenen Rohrsystem des Primärkühlkreises,
- der Sicherheitsbehälter mit Dichthaut,
- Rückhalteinrichtungen für flüssige und gasförmige radioaktive Stoffe.

Im Folgenden werden die Barrieren, die das sichere Einschließen der radioaktiven Stoffe garantieren, näher beschrieben.

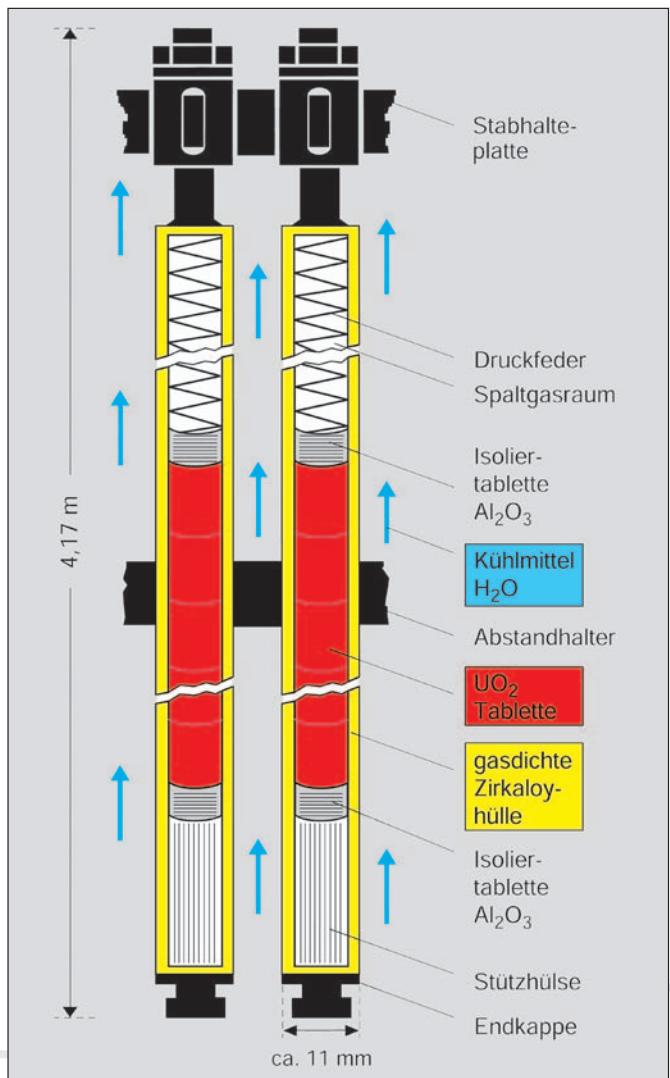


Abb. 7.6: Längsschnitt durch einen Brennstab
(Prinzipdarstellung)

7.3.1 Brennstab

Für die Kernspaltung in Leichtwasserreaktoren wird heute fast ausschließlich Uran-235 verwendet. Es ist in dem in der Natur vorkommenden Uran mit einem Anteil von etwa 0,7 % enthalten. Dieser Anteil wird in dem so genannten Kernbrennstoff auf 3 bis 5 % angereichert.

In Abb. 7.6 ist der Aufbau zylinderförmiger Brennstäbe im Längsschnitt wiedergegeben. Die Stäbe haben z. B. bei einem der heute üblichen Siedewasserreaktoren eine Länge von 4,17 m und einen äußeren Durchmesser von ca. 11 mm. Die Umhüllung besteht aus Zirkaloy (Zirkonium-Legierung) mit einer Wandstärke von 0,65 mm. Das Material der Brennstäbe soll den Kernbrennstoff von dem Kühlmittel des Primärkreislaufes trennen und außerdem verhindern, dass die bei der Kernspaltung entstehenden Spaltprodukte in das Kühlmittel gelangen. Weitere Anforderungen sind mechanische Festigkeit, Korrosions- und Hitzebeständigkeit sowie eine geringe Neigung zur Neutronenabsorption.

Die aus Urandioxid (UO_2) gepressten, gesinterten (durch Erhitzen zusammengebackenen) und geschliffenen Pellets werden in das mit Endkappen verschlossene Rohr eingebracht. Eine Druckfeder drückt von oben auf die Pellets und hält sie in einer Säule fest zusammen. Dadurch wird gleichzeitig oberhalb des Kernbrennstoffs ein Raum für die bei der Kernspaltung entstehenden Edelgase und die leicht flüchtigen Spaltprodukte geschaffen. Der Spaltgasraum verhindert somit ein unzulässiges Anwachsen des Gasdruckes im Brennstoff bei der sehr starken Erwärmung.

Eine größere Anzahl von Brennstäben wird zu einem quadratischen Brennelement mit Hilfe von Abstandhaltern zusammengefasst. Beim Kernkraftwerk Krümmel sind 72 Brennstäbe in einem Element angeordnet (Abb. 7.7). Insgesamt befinden sich bei diesem Kernreaktor 840 Brennelemente mit

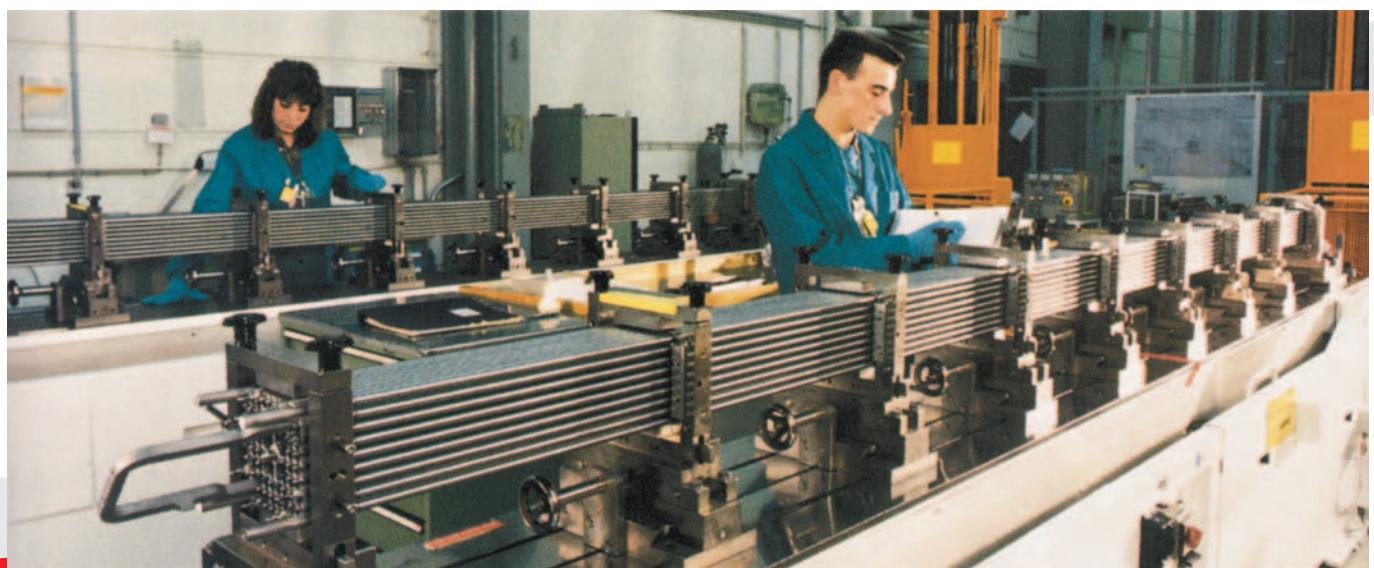


Abb. 7.7: Fertigung eines Brennelementes für einen Siedewasserreaktor, bestehend aus 72 Brennstäben mit einer Brennstablänge von 4,17 m

einer Gesamtmenge von 150 t Urandioxid im Reaktorkern. Das als Kühlmittel und Moderator dienende Wasser strömt von unten an den durch die Kernspaltung erhitzten Brennstäben vorbei und führt somit die Wärme ab.

7.3.2 Reaktordruckgefäß

Das Reaktordruckgefäß mit dem angeschlossenen Rohrsystem für das Kühlmittel bildet die dritte Barriere. Das Reaktordruckgefäß eines modernen Druckwasserreaktors (z.B. Neckar II) ist ein zylindrischer Stahlbehälter mit einer Höhe von 12 m und einem Innendurchmesser von 5 m. Seine Wandstärke beträgt 25 cm und sein Leergewicht rund 520 t. Die Abb. 7.8 zeigt das etwas kleinere Reaktordruckgefäß des Kernkraftwerks Biblis A.

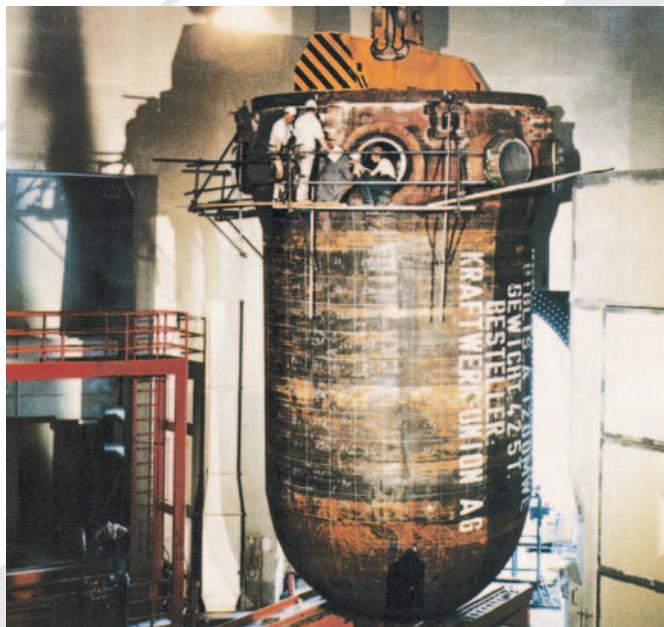


Abb. 7.8: Reaktordruckgefäß eines Druckwasserreaktors

Typbedingt ist das Reaktordruckgefäß eines Siedewasserreaktors größer als das eines Druckwasserreaktors. Beim Kernkraftwerk Krümmel beträgt die lichte Höhe des Reaktordruckgefäßes 22,38 m, der Innendurchmesser 6,78 m, die Wandstärke 17,1 cm und das Leergewicht 790 t.

Das Druckgefäß steht in einer Betonkammer (mit besonderer Kühlung), die die Funktion einer Strahlenabschirmung hat (biologischer Schild). Bei der Vielzahl der Brennstäbe, die in einem Kernreaktor enthalten sind, können vereinzelte Undichtigkeiten nicht ausgeschlossen werden. Ein geringer Anteil der im Brennstoff entstandenen radioaktiven Substanzen kann so in das Kühlmittel gelangen. Außerdem befinden sich im Wasser z.T. durch Neutronen aktivierte Korrosionsprodukte. Ein Austreten dieser Aktivitäten wird durch das Reaktordruckgefäß und die Wandungen des Kühlmittelkreises verhindert. Darüber hinaus wird dem Reaktorkühlkreislauf fortlaufend Wasser entnommen, von Korrosions- und Spaltprodukten befreit und dann gereinigt dem Kreislauf wieder zugeführt.

Die einzelnen Teile des Kühlmittelkreises sind im Allgemeinen durch Schweißnähte miteinander verbunden. Ihre Dichtigkeit wird durch besondere Prüfverfahren (Ultraschall, Röntgenstrahlen) in regelmäßigen Zeitabständen nachgewiesen. Sind an einzelnen Stellen des Kühlmittelkreislaufes Durchführungen nach außen erforderlich, z.B. für Pumpen, Ventile, Absperrschieber oder Turbinenwellen, so werden geeignete technische Maßnahmen vorgesehen, damit das Kühlmittel nicht austreten kann. Hierzu gehört beispielsweise die Verwendung spezieller Stopfbuchsen.

7.3.3 Sicherheitsbehälter

Der Sicherheitsbehälter mit den dazugehörigen Einrichtungen, wie z.B. schnellschließende Armaturen in den aus dem Sicherheitsbehälter herausführenden Rohrleitungen, stellt die vierte Sicherheitsbarriere in einem Kernkraftwerk dar. Sie umschließt das Reaktordruckgefäß und den unmittelbar daran anschließenden Teil des Kühlmittelkreislaufes.

Bei Siedewasserreaktoren wird ein Sicherheitsbehälter mit Druckabbausystem verwendet. Dadurch wird erreicht, dass der Behälter für einen niedrigeren Druck, als er sich beim völligen Ausdampfen des Kühlmittels ergeben würde, ausgelegt bzw. kleiner ausgeführt werden kann. Dies wird dadurch ermöglicht, dass der z.B. aus einem Leck möglicherweise austretende Dampf über Rohrleitungen in Wasserbecken geleitet wird und dort kondensiert. Neben dem Sicherheitsbehälter mit Druckabbausystem gibt es den Volldrucksicherheitsbehälter. Er hält dem Druck stand, der beim völligen Ausdampfen des Kühlmittels entsteht.

Der Sicherheitsbehälter eines heutigen Siedewasserreaktors hat die Form einer Kugel mit einem Innendurchmesser – z.B. beim Kernkraftwerk Krümmel – von 29,6 m (Abb. 7.9). Seine

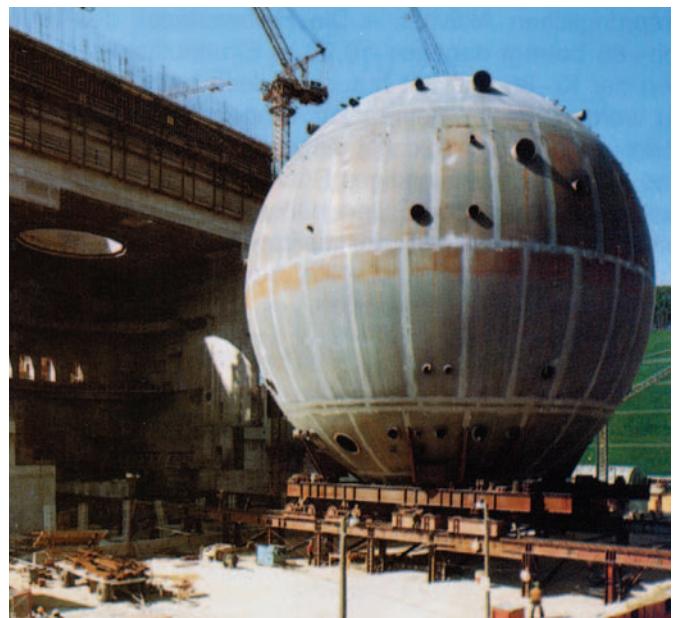


Abb. 7.9: Der fertige Sicherheitsbehälter eines Siedewasserreaktors wird in das Reaktorgebäude gefahren

Wandstärke beträgt max. 25 - 70 mm. Da Behälter von solcher Größe nicht absolut gasdicht hergestellt werden können, befindet sich meist in einigen Zentimeter Abstand von der Außenwand des Sicherheitsbehälters noch eine Dichthaut aus Stahl von etwa 4 mm Wandstärke.

Der Zwischenraum wird durch Absaugung ständig auf Unterdruck gehalten. Dadurch wird eine unkontrollierte Aktivitätsabgabe verhindert. An geeigneten Stellen sind Personen- und Materialschleusen vorgesehen. Damit bei einem Unfall die Innenwand des Sicherheitsbehälters durch das Platzen druckführender Anlagenteile nicht beschädigt werden kann, sind diese Komponenten innerhalb des Behälters noch besonders gesichert.

7.3.4 Rückhalteeinrichtungen für flüssige und gasförmige radioaktive Stoffe (Beispiel für einen Siedewasserreaktor)

Beim Normalbetrieb eines Kernkraftwerks fallen gasförmige, flüssige und feste radioaktive Substanzen an. Für die Beseitigung dieser „Abfälle“ sind eine Reihe von Maßnahmen und Verfahren entwickelt worden, von denen hier zunächst nur die Rückhalteeinrichtungen beschrieben werden, die vor der zulässigen Abgabe bestimmter gasförmiger, leichtflüchtiger und flüssiger radioaktiver Stoffe an die Umgebung eingesetzt werden.

Von den bei der Kernspaltung entstehenden über 300 verschiedenen Spaltprodukten sind 20 % Edelgase. Weitere radioaktive Gase entstehen durch Neutronenbestrahlung der Luft im Raum zwischen dem Reaktordruckgefäß und dem biologischen Schild. Leicht flüchtig sind außerdem Iod, Rubidium und Cäsium. Ihr Anteil an der Gesamtaktivität der Abluft ist zwar relativ gering, doch können diese Substanzen im Gegensatz zu den Edelgasen chemische Verbindungen

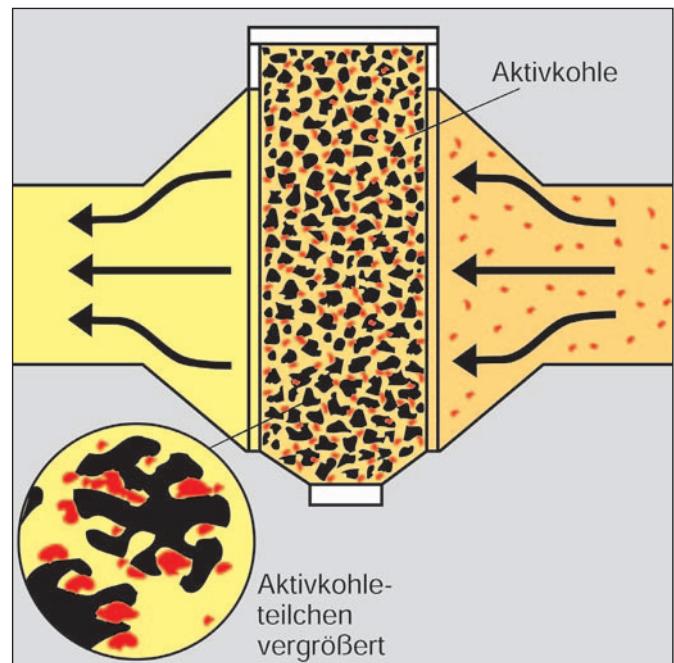


Abb. 7.11: Aktivkohlefilter

eingehen und sich deshalb im menschlichen Körper einzulagern.

Bei einem Siedewasserreaktor strömen die im Reaktorwasser gelösten Gase und leichtflüchtigen Substanzen mit dem Dampf über die Turbine in die Kondensatoren. Von dort führt man sie einer Abgasauftbereitungsanlage zu. Dort werden die Gase über eine Verzögerungsleitung (Sandfilter), eine Aktivkohle-Verzögerungsanlage und einen Absolutfilter (Abb. 7.10) geleitet, ehe sie zusammen mit der Gebäudeluft über den Kamin abgegeben werden.

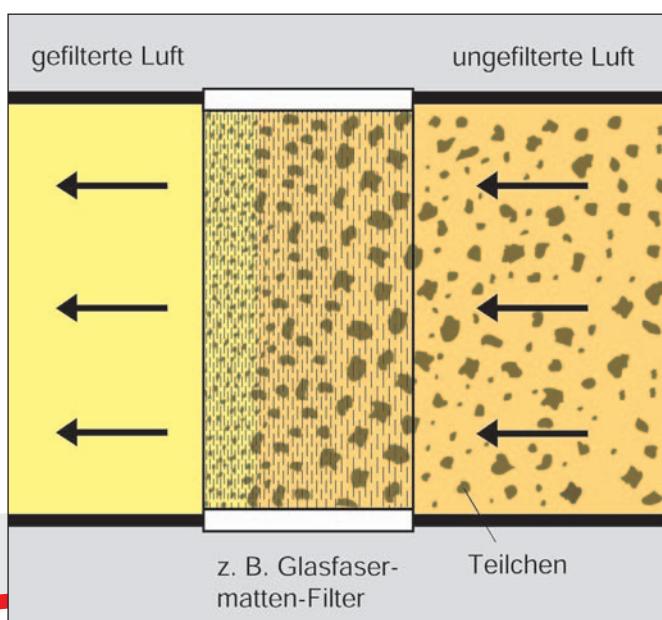


Abb. 7.10: Feinstfilter

Die Aktivkohle-Verzögerungsanlage besteht aus mehreren hintereinander geschalteten, tiefgekühlten Aktivkohlefiltern. Die Gase werden zunächst in der ersten Filterschicht adsorbiert. Im Laufe der Zeit bewegen sie sich durch Austausch langsam durch die Kohlefilterstrecke (Abb. 7.11). Der überwiegende Teil der radioaktiven Substanzen zerfällt innerhalb der Verzögerungsstrecken, z.B. Xenon-133 bei einer Verzögerungszeit von 40 bis 60 Tagen auf 0,1 % der ursprünglichen Aktivität.

Die radioaktiven Gase und leichtflüchtigen Substanzen aus dem Primärkühlkreis können durch Undichtigkeiten der Rohrleitungssysteme in die Gebäude des Kernkraftwerks gelangen. Die Raumluft kann deshalb ebenfalls radioaktive Substanzen in Form von Gasen und Aerosolen enthalten. Auch sie wird nach weitgehendem Abbau ihrer Aktivität kontrolliert über den Kamin abgeführt.

Für das in Kernkraftwerken anfallende Abwasser gibt es Sammel- und Aufbereitungsanlagen. Zur Beseitigung zu hoher Konzentrationen radioaktiver Substanzen werden phy-

Radionuklidgruppe	Genehmigungs-wert in Bq/a	Abgabewert in Prozent des Genehmigungs-wertes
Abluft:		
Edelgase, H-3, C-14	$1,48 \cdot 10^{15}$	0,28
Radioaktive Aerosole (ohne I-131)	$1,48 \cdot 10^{10}$	0,07
Iod-131	$9,6 \cdot 10^9$	0,45
Abwasser:		
Tritium	$1,85 \cdot 10^{13}$	3,2
Sonstige Radionuklide	$5,0 \cdot 10^{10}$	< 0,04

Tab. 7-1: Genehmigungs- und Abgabewerte eines Siedewasserreaktors (Krümmel, 2005)

sikalische und chemische Reinigungsverfahren angewandt, z.B. Filtern, Eindampfen, Fällen, Einsatz von Ionenaustauschern. Nach Anwendung dieser Verfahren wird das aufbereitete Wasser zum größten Teil in den Primärkühlkreis zurückgepumpt, während das überschüssige gereinigte Abwasser von Zeit zu Zeit und nach vorheriger mehrfacher Untersuchung zusammen mit dem Kondensatorkühlwasser in den Vorfluter (Fluss) geleitet wird.

7.3.5 Kontrollierte Abgabe radioaktiver Stoffe

Bei der Freisetzung von Radionukliden mit Abluft und Abwasser unterscheidet man zwischen Genehmigungswerten und Abgabewerten. Die Genehmigungswerte legt die Aufsichtsbehörde fest. Sie dürfen auch unter ungünstigen Verhältnissen nicht überschritten werden. Die Genehmigungswerte garantieren, dass die Bevölkerung keiner unzumutbaren Strahlenexposition ausgesetzt ist.

Der Genehmigungswert wird aufgrund von Betriebserfahrungen bei anderen Kernkraftwerken und von Berechnungen für die neue Anlage festgelegt. Die tatsächlichen Abgabewerte, die während des Betriebs ermittelt werden, ergeben meist nur wenige Prozent der Genehmigungswerte.

Welche Mengen radioaktiver Stoffe letztlich an die Umgebung abgegeben werden, ist vom Reaktortyp, der Reaktorleistung und der Betriebsweise abhängig. In Tab. 7-1 und Tab. 7-2 sind die Genehmigungswerte und die tatsächlichen Abgabewerte eines Siedewasserreaktors und eines Druckwasserreaktors einander gegenübergestellt. Die Pfade Abluft und Abwasser sind separat ausgewiesen.

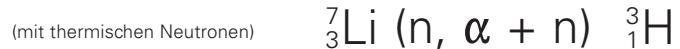
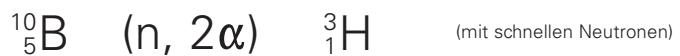
Die gasförmigen und leichtflüchtigen Radionuklide gelangen kontrolliert über den Abluftkamin ins Freie. Welche Radionuklidkonzentration am Boden auftritt, hängt von mehreren Faktoren ab: freigesetzte Menge, Höhe des Abluftkamins, Entfernung zum Kraftwerk, Wetterbedingungen und Art der Ablagerung (trockene oder nasse Ablagerung).

Radionuklidgruppe	Genehmigungs-wert in Bq/a	Abgabewert in Prozent des Genehmigungs-wertes
Abluft:		
Edelgase	$1 \cdot 10^{15}$	0,01
Radioaktive Aerosole (ohne I-131)	$1 \cdot 10^{10}$	unter Nachweisgrenze
Iod-131	$6 \cdot 10^9$	unter Nachweisgrenze
Abwasser:		
Tritium	$3,5 \cdot 10^{13}$	51
Sonstige Radionuklide	$5,55 \cdot 10^{10}$	unter Nachweisgrenze

Tab. 7-2: Genehmigungs- und Abgabewerte eines Druckwasserreaktors (Brokdorf, 2005)

Das Konzentrationsmaximum der Ablagerung auf dem Boden liegt etwa 1 bis 2 km in Hauptwindrichtung vom Kernkraftwerk entfernt. Dort ist auch die Strahlenexposition am größten. Sie darf jedoch die Maximalwerte, die die Strahlenschutzverordnung festlegt, nicht überschreiten.

Abwässer werden in großen Behältern gesammelt und die Gesamtaktivität sowie die Aktivität einzelner Radionuklide bestimmt. Wenn die spezifische Aktivität bestimmte Werte nicht überschreitet, wird der Abfluss freigegeben. Bei Überschreiten der zulässigen Werte schließt sich der Abfluss automatisch. Beim Druckwasserreaktor wird die höhere Tritiumabgabe durch Borsäure verursacht, die dem Kühlmittel des Reaktors zur Langzeitregelung zugesetzt ist. Tritium entsteht dabei über folgende Reaktionen:



Die Radionuklidkonzentration, die im Flusswasser auftritt, ist von der abgegebenen Radionuklidmenge, der Wasserführung des Flusses, der Fließgeschwindigkeit sowie von Sedimentationsvorgängen abhängig.

7.4 Druckdifferenz als Sicherheitsbarriere

Bei der großen Anzahl von Brennstäben treten vereinzelt Undichtigkeiten auf. Man geht heute davon aus, dass jeder 100.000ste Brennstab feinste Haarrisse oder Poren aufweist, durch die vor allem gasförmige und leicht flüchtige Radionuklide in das umgebende Wasser gelangen. Das Kühlmittel und die in ihm vorhandenen Stoffe werden durch die Neutronenstrahlung z.T. aktiviert und dadurch radioaktiv. Auf diese Weise entstehen z. B. Fe-59 und Co-60.

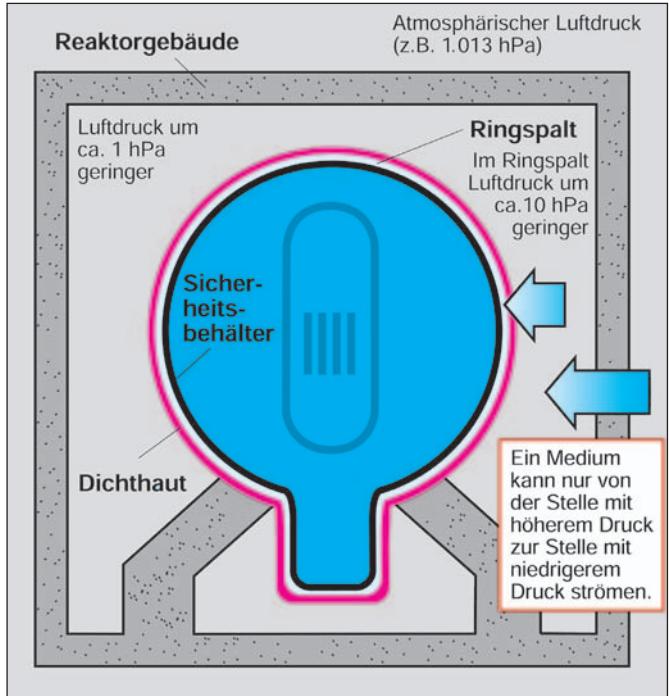


Abb. 7.12: Unterdruck im Reaktorgebäude und Ringspalt

Durch kleinste Undichtigkeiten an verschiedenen Stellen des Kühlmittelkreises (z.B. bei Dichtungen von Pumpen, Ventilen oder von Durchführungen der Turbinenwelle) treten geringe Mengen radioaktiver Stoffe aus und befinden sich dann im Reaktorgebäude.

7.4.1 Unterdruckzonen

Damit die Spalt- und Aktivierungsprodukte das Reaktorgebäude auf keinen Fall unkontrolliert verlassen, werden verschiedene Unterdruckzonen eingerichtet (Abb. 7.12). Da Luft immer von der Stelle mit höherem Druck zur Stelle mit niedrigerem Druck strömt, kann erreicht werden, dass bei normalem Betrieb Luft immer nur von weniger aktiven zu stärker aktiven Räumen strömt (also von außen nach innen).

Der Luftdruck im Reaktorgebäude ist etwa 1 hPa (1 mbar) geringer als außerhalb des Gebäudes. In dem häufig vorhandenen Ringspalt zwischen Sicherheitsbehälter und Dichthaut herrscht ein um 10 hPa (10 mbar) geringerer Druck. Im Sicherheitsbehälter selbst schwankt der Druck in Abhängigkeit von verschiedenen Betriebsbedingungen.

Radioaktive Stoffe, die sich im Reaktorgebäude befinden, gelangen mit der Luft in die Unterdruckzonen bzw. die Absaugvorrichtungen. Dort können sie kontrolliert weiterbehandelt werden. Bei Störungen in der Reaktoranlage wird die Luft aus den Unterdruckzonen in den Sicherheitsbehälter zurück gepumpt.

7.4.2 Personenschleuse

Für das Begehen des Sicherheitsbehälters und das Ein- und Ausbringen von Betriebsmaterial sind besondere Personen-



Abb. 7.13: Personenschleuse in einem Kernkraftwerk

und Materialschleusen vorgesehen (Abb. 7.13). Die Schleusen garantieren, dass beim Betrieb des Reaktors keine direkten Verbindungen zwischen dem Innenraum des Sicherheitsbehälters und den äußeren Räumen der Anlage bestehen. Die Tore der Schleusen sind dicht abschließend und halten den bei einer möglichen Störung auftretenden maximalen Druckbelastungen stand. Die Schleusen stellen darüber hinaus sicher, dass die Unterdruckzonen auch beim Begehen des Sicherheitsbehälters aufrecht erhalten bleiben. Beim Betrieb der Schleuse findet zunächst ein Druckausgleich zwischen dem Inneren der Schleuse und der Umgebung statt, von der aus eine Person die Schleuse betreten will. Dann wird eine der Türen geöffnet.

7.4.3 Wellendichtung und Sperrmedium

Bei einem Siedewasserreaktor wird der im Reaktor erzeugte Dampf, der immer auch Radionuklide enthält, direkt der Turbine zugeführt. Die aus dem Turbinengehäuse heraus tretende Welle muss deshalb an der Durchführungsstelle besonders abgedichtet sein, damit der radioaktive Dampf nicht in die Maschinenhalle entweichen kann. Unabhängig von der jeweiligen Praxis wird hier folgende Konstruktion beschrieben (Abb. 7.14):

Eine erste Abdichtung wird erreicht, indem der Raum um die Welle in seiner Längsrichtung in mehrere kleine Kammern unterteilt wird, in denen sich Spezialdichtungen befinden. Die vollständige Abdichtung geschieht durch die Zuführung eines Sperrmediums (Dampf oder eine Flüssigkeit) in die einzelnen Kammern oder durch Absaugen der Kammern. Beide Verfahren lassen sich auch, wie die Abbildung zeigt, miteinander kombinieren. Der Druck des Sperrmediums ist

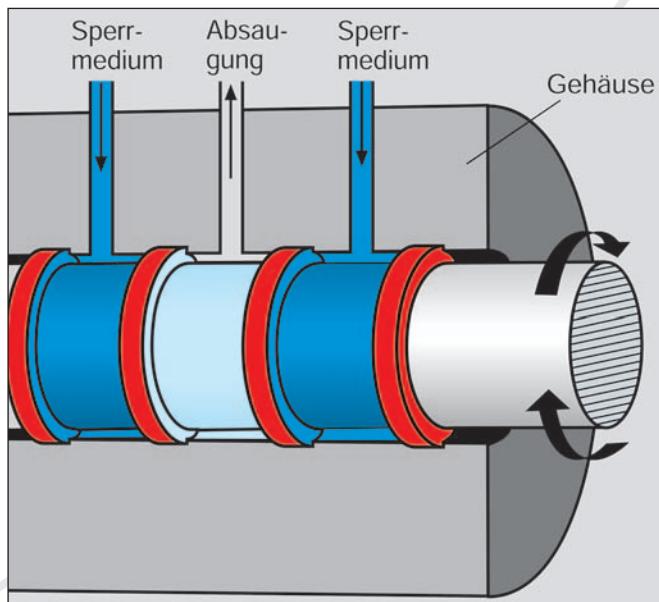


Abb. 7.14: Wellendichtung mit Sperrmedium (Gehäuse aufgeschnitten)

dabei höher als der Druck des Dampfes in der Turbine. Ein Entweichen des Kühlmittels wird dadurch verhindert. Auch das Sperrmedium kann nicht austreten, da weiter außerhalb eine weitere Kammer liegt, die fortlaufend abgesaugt wird (Unterdruck).

7.4.4 Kondensator

Unterdruckzonen treten auch bei einem Kondensator auf, in dem über einen Wärmetauscher Energie an die Umgebung abgegeben wird (Abb. 7.15). Das Kühlwasser, das beispielsweise einem Fluss entnommen wird, steht unter einem Druck $> 1.000 \text{ hPa} (> 1.000 \text{ mbar})$, während im Kondensator ein Unterdruck von nur 40 hPa (40 mbar) herrscht. Bei einem angenommenen Riss im Wärmetauscher kann zwar Flusswasser in den Kondensator, aber niemals radioaktiver Dampf in das Flusswasser gelangen.

7.5 Notkühlsystem

In einem Kernkraftwerk sind Störfälle und Defekte denkbar, deren Auswirkungen sicher beherrscht werden müssen. Das Kraftwerk muss sicherheitstechnisch dafür ausgelegt sein. Bei solchen Störfällen spricht man von Auslegungsstörfällen.

Als ein schwerwiegender Störfall bei einem Leichtwasserreaktor gilt der Bruch einer Hauptkühlmittelleitung innerhalb des Sicherheitsbehälters. Wasser und Dampf treten dann aus der Bruchstelle aus. Der Druckabfall wird vom Reaktorschutzsystem erkannt und führt dazu, dass die Steuer- und Abschaltstäbe automatisch in den Reaktor „geschossen“ werden, so dass die Kettenreaktion zum Erliegen kommt. Durch redundante Schnellschlussventile werden die aus

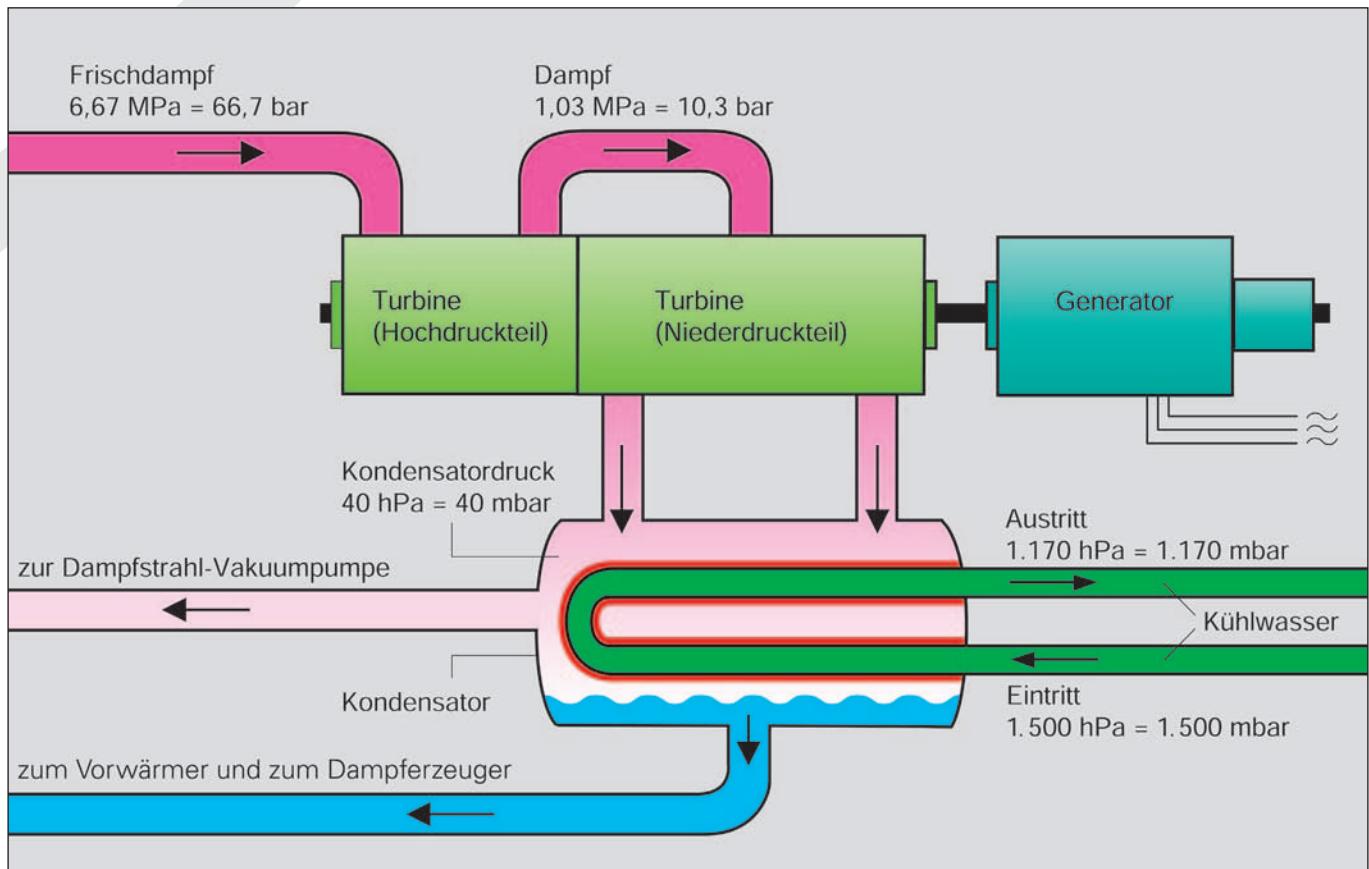


Abb. 7.15: Beispiel für die Druckverhältnisse in Turbine und Kondensator

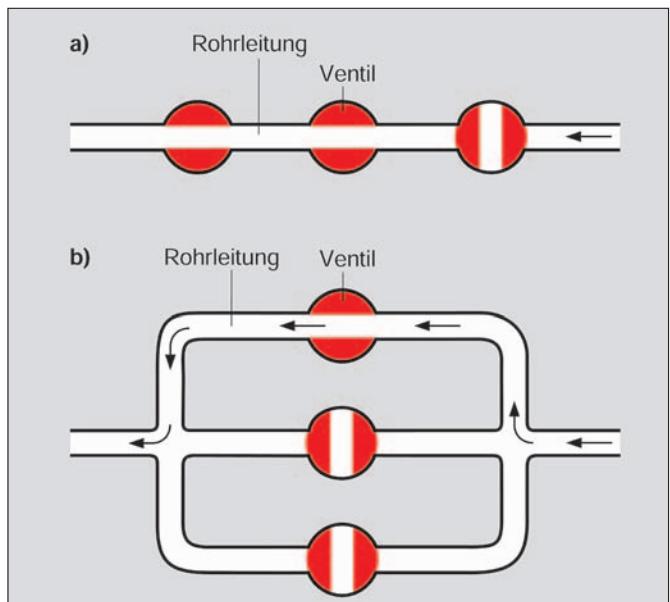


Abb. 7.16: Redundanz in der Schließfunktion a) und in der Öffnungsfunktion b)

dem Sicherheitsbehälter herausführenden Dampfleitungen abgesperrt. Für diesen Zweck sind mehrere Ventile in Reihe angeordnet, damit beim Versagen von einem oder zwei Ventilen das dritte Absperrventil die jeweilige Leitung sicher schließt (Abb. 7.16). Die Auswirkungen des Störfalls bleiben so auf den Sicherheitsbehälter beschränkt. Gleichzeitig ist der Reaktor nun aber von dem Kühlkreis über Turbine und Kondensator abgetrennt.

Bei Druckwasserreaktoren wird ein Volldrucksicherheitsbehälter verwendet. Er hält dem Druck stand, der beim völligen Ausdampfen des Kühlmittels entsteht. Bei Siedewasserreaktoren verwendet man dagegen einen Sicherheitsbehälter mit Druckabbausystem. Austretender Dampf wird über Rohrleitungen in Wasserbecken geleitet, wo er kondensiert. Im Sicherheitsbehälter steigt der Dampfdruck deshalb nur geringfügig an. Der Behälter kann für einen niedrigeren Druck ausgelegt sein, als er sich beim völligen Ausdampfen des Kühlmittels ergeben würde. In einem Siedewasserreaktor ist die Kondensationskammer ringförmig um das Reaktordruckgefäß angelegt. Sie ist teilweise mit Wasser gefüllt, in das eine Vielzahl von Röhren hineinragt.

Die entscheidende sicherheitstechnische Maßnahme besteht nun darin, die Nachzerfallswärme abzuführen, damit sich die Brennstäbe nicht überhitzen und dadurch möglicherweise zerstört werden. Das Reaktorsicherheitssystem sieht dafür Notkühlssysteme vor. Sie bestehen im Prinzip aus drei Komponenten:

- Es sind ausreichende Wasservorräte sowohl innerhalb als auch außerhalb des Sicherheitsbehälters vorhanden. Mit Hilfe von Rohrleitungen, Pumpen und Ventilen wird das Wasser in den Reaktordruckbehälter gepumpt.

- Wasser, das aus der Bruchstelle austritt und in den so genannten Sumpf des Sicherheitsbehälters gelangt, wird in das Reaktordruckgefäß oder eines der Wasserreservoirs zurückgepumpt. Dadurch entstehen Notkühlkreisläufe.
- Die Nachzerfallswärme, die das Wasser aufnimmt, kann über einen Wärmetauscher an die Umgebung abgeführt werden. Dadurch ist eine langfristige Kühlung des Reaktors möglich.

Die Notkühlssysteme sind mindestens vierfach vorhanden. Jedes einzelne System besitzt mehrere parallel angeordnete Pumpen bzw. Ventile. Auch die Stromversorgung ist mehrfach sichergestellt. Ein Leitungsstrang mit nur einer Pumpe reicht bereits aus, um die sichere Abfuhr der Nachzerfallswärme zu gewährleisten. Die Wahrscheinlichkeit, dass alle Notkühlssysteme mit redundant angeordneten Pumpen gleichzeitig ausfallen, ist theoretisch extrem gering, praktisch nahezu Null. Die Notkühlungen laufen automatisch, d.h. unabhängig vom Betriebspersonal, an. Zur weiteren Erhöhung der Sicherheit können zusätzliche Notkühlssysteme auch von Hand in Betrieb gesetzt werden.

Die Notkühlssysteme für einen Siedewasser- und einen Druckwasserreaktor sind in den Abb. 7.17 und Abb. 7.18 in stark vereinfachter Form dargestellt. Anlagenteile und Komponenten sind nur einfach eingezeichnet worden, um die Übersichtlichkeit der Abbildungen zu erhalten.

7.6 Hypothetische Unfälle

Obwohl bei den in der Bundesrepublik Deutschland gebauten Leichtwasserreaktoren ein gleichzeitiges Versagen aller Notkühlssysteme praktisch ausgeschlossen werden kann, besteht theoretisch dennoch die Möglichkeit für den Eintritt eines solchen Ereignisses. Hundertprozentige Sicherheit ist nämlich bei keinem technischen System zu erreichen. Aber auch bei einem Unfall lässt sich eine Freisetzung größerer Spaltproduktmengen verhindern. Dabei ist von entscheidender Bedeutung, dass die Barrierenfunktion des Sicherheitsbehälters erhalten bleibt, d.h. der Sicherheitsbehälter nicht durch Überdruck zerstört wird.

Ein Druckaufbau im Sicherheitsbehälter über den Auslegungsdruck hinaus (bei Siedewasserreaktoren etwa 3,5 bar) wäre möglich, wenn die Nachzerfallswärme nicht aus dem Sicherheitsbehälter nach draußen abgeführt werden kann oder wenn die Wassereinspeisung aller Notkühlssysteme versagt. Im letztgenannten Fall käme es nicht nur zu einem Anstieg des Dampfdruckes, sondern auch zur Entstehung von Wasserstoff aufgrund einer chemischen Reaktion zwischen schmelzendem Hüllrohrmetall und Wasser. Der Druck würde verstärkt, wenn es zu einer Verbrennung des Wasserstoffs mit dem Sauerstoff der Atmosphäre käme. Um den Sicherheitsbehälter vor einem Überdruckversagen

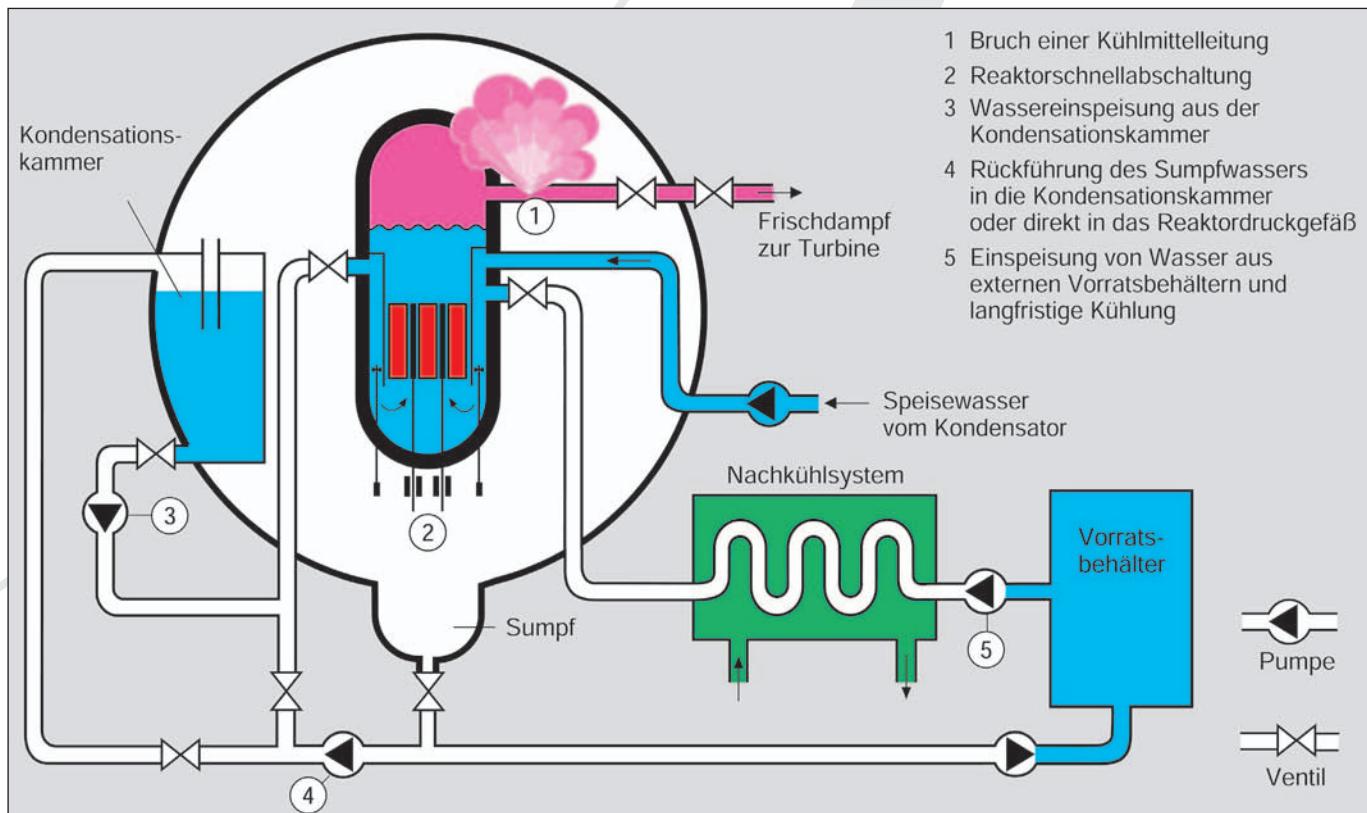


Abb. 7.17: Funktion der Notkühlsysteme beim Bruch einer Hauptkühlmittelleitung in einem Siedewasserreaktor
(Notkühlsysteme stark vereinfacht und ohne Redundanz dargestellt)

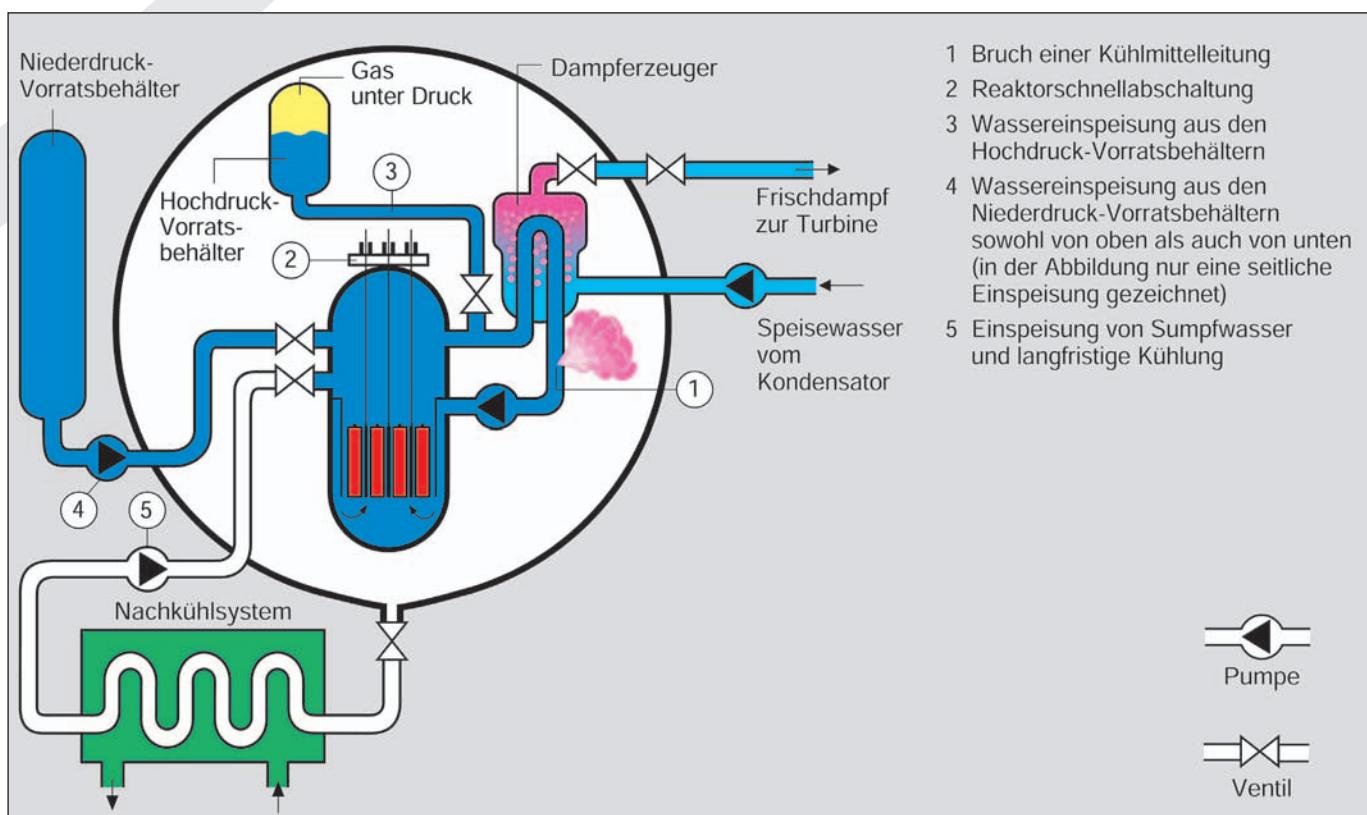


Abb. 7.18: Funktion der Notkühlsysteme beim Bruch einer Hauptkühlmittelleitung in einem Druckwasserreaktor
(Notkühlsysteme stark vereinfacht und ohne Redundanz dargestellt)

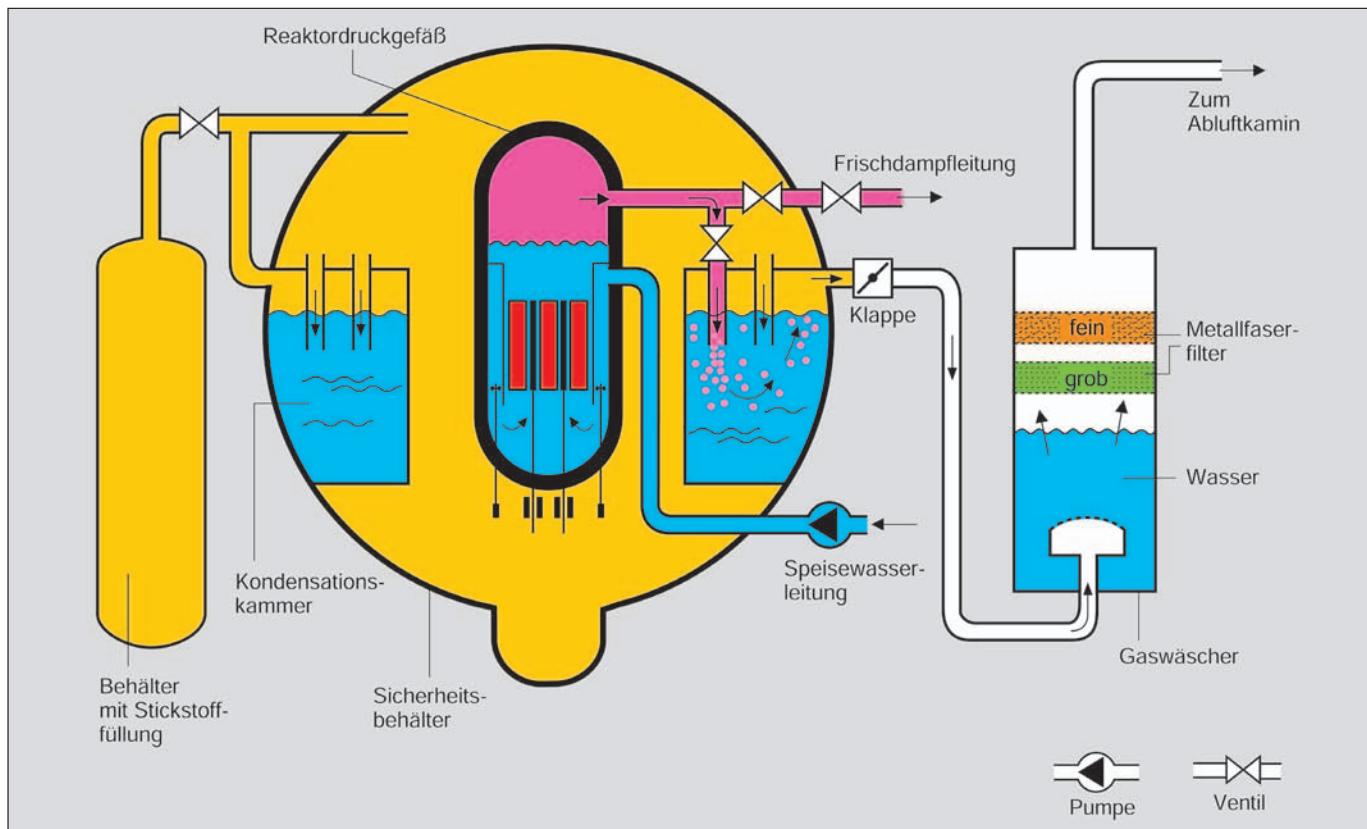


Abb. 7.19: Stickstofffüllung des Sicherheitsbehälters und gefilterte Druckentlastung

zu schützen, müssen also eine Verbrennung des entstandenen Wasserstoffs verhindert und die Möglichkeit zu einer Druckentlastung geschaffen werden. Im Kernkraftwerk Krümmel (Siedewasserreaktor) sind dafür eine Stickstofffüllung und eine gefilterte Druckentlastung vorgesehen (Abb. 7.19).

Wasserstoff kann nur verbrennen, wenn Sauerstoff zugegen ist. Der Sauerstoffgehalt im Sicherheitsbehälter wird deshalb während des normalen Kraftwerkbetriebs von 20 % auf < 5 % verringert. Ein Verbrennungsvorgang, gleich welcher Art, ist dann nicht mehr möglich. Bei Arbeiten im Sicherheitsbehälter beseitigt man den erhöhten Stickstoffanteil wieder, so dass der Behälter gefahrlos betreten werden kann.

Durch Absaugen des Dampf-Gas-Gemisches, das bei einem solchen Störfall anfiele, ließe sich der Druck im Sicherheitsbehälter verringern. Das geschieht automatisch beim Überschreiten des Auslegungsdruckes. Der Entlastungs-Gasstrom würde dann über Aerosolfilter geleitet und dadurch von radioaktiven Stoffen weitestgehend gereinigt. Das wird durch eine Gaswäsche und nachgeschaltete Feinstfilter erreicht. Nach der Reinigung kann der Gasstrom über den Abluftkamin kontrolliert an die Umgebung abgegeben werden.

Bei gleichzeitigem Ausfall aller Notkühlsysteme käme es nicht nur zu einem Druckanstieg im Sicherheitsbehälter, sondern auch zu einem Temperaturanstieg im Reaktorkern. Nach kurzer Zeit wäre die Schmelztemperatur der Brennelementhüllrohre

erreicht (ca. 1.900 °C). Der geschmolzene Reaktorkern befände sich dann im unteren Teil des Reaktordruckbehälters, wo er sich bis auf 2.400 °C aufheizen könnte. Da Stahl bereits bei 1.700 °C schmilzt, würde – wenn keines der ausgefallenen Notkühlsysteme wieder aktiviert werden könnte – der Boden des Reaktordruckbehälters durchschmelzen. Anschließend könnte es auch zum Schmelzen des Betons kommen (Schmelztemperatur ca. 1.400 °C). Je mehr Beton aber geschmolzen würde, desto niedriger läge die Temperatur der Schmelze, da sich nun die Nachzerfallswärme auf eine größere Masse mit größerer Oberfläche verteile. Man geht deshalb davon aus, dass nach etwa 3 Stunden die Temperatur der Schmelze auf 1.500 °C abgesunken wäre. Unter der Annahme, dass auf Dauer keines der vier Notkühlsysteme erneut in Betrieb gesetzt werden könnte und die Schmelze sich selbst überlassen wäre, würde es Monate dauern, bis das 5 m starke Betonfundament zerstört wäre. Wahrscheinlich käme es aber zum Erstarren der Schmelze im Fundament.

Nach der deutschen Risikostudie können Kernschmelzunfälle einmal in 10.000 Reaktorbetriebsjahren vorkommen. Nur bei 1 % dieser Ereignisse (also einmal in 1 Million Reaktorbetriebsjahren) müsste dabei mit Todesfällen gerechnet werden. Das aus Kernschmelzunfällen resultierende Risiko ist also extrem klein. Trotzdem ist man im Rahmen der Sicherheitsforschung bemüht, weitere Kenntnisse über solche hypothetischen Störfälle zu erhalten (Simulationsexperimente) und das Reaktorschutzsystem weiter zu verbessern.

8 Der Brennstoffkreislauf – die Ver- und Entsorgung eines Kernkraftwerks

8.1 Der Brennstoffkreislauf

Mit dem Begriff Brennstoffkreislauf werden zusammenfassend alle Arbeitsschritte und Prozesse bezeichnet, die der Versorgung und Entsorgung von Kernkraftwerken dienen (Abb. 8.1).

Zur Versorgung gehören die Suche und der Abbau von Uranerzen (Tagebau oder Untertagebau), die Gewinnung des Urans aus den Erzen, die Anreicherung von Uran-235, die Herstellung von Brennelementen und ihre Anlieferung in den Kernkraftwerken.

Die Entsorgung umfasst den Abtransport abgebrannter Brennelemente aus Kernkraftwerken, die Trennung wieder verwertbaren Spaltstoffs von nicht verwertbaren radioaktiven Abfällen, die Herstellung neuer Brennelemente aus den zurückgewonnenen Spaltstoffen, die Verpackung bzw. den sicheren Einschluss der Abfälle und ihreendlagerung sowie alle dafür notwendigen Transporte. Alternativ zur Trennung des wieder verwertbaren Spaltstoffs von nicht verwertbaren radioaktiven Abfällen und der Herstellung neuer Brennelemente aus den zurückgewonnenen Spaltstoffen wird der Entsorgungsweg über die direkte Endlagerung der abgebrannten Brennelemente eingeführt. In Deutschland ist die Entsorgung seit Juli 2005 nur noch auf die direkte Endlagerung beschränkt.

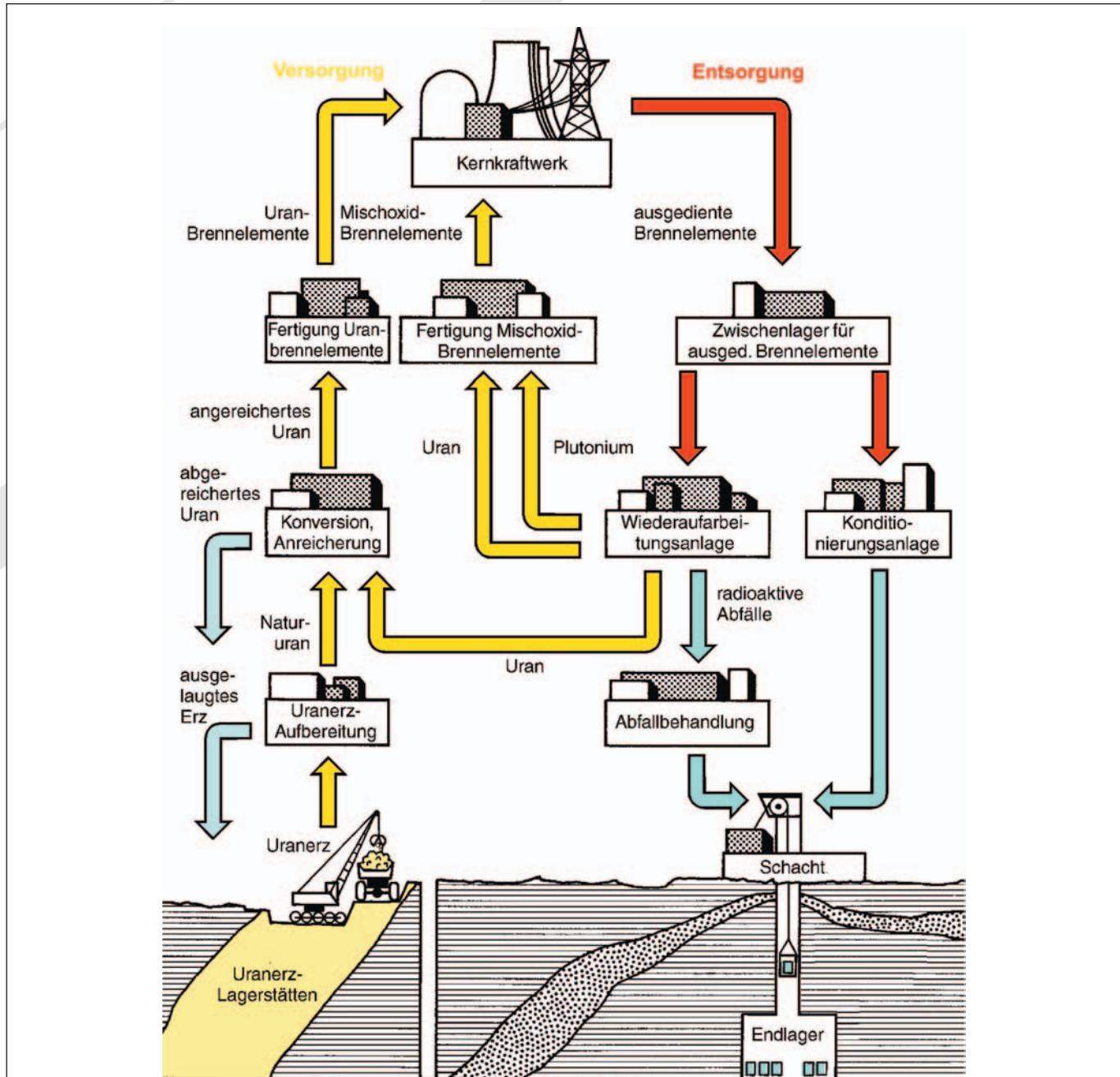


Abb. 8.1: Brennstoffkreislauf bei Leichtwasserreaktoren



Abb. 8.2: Uranerztagebau

8.1.1 Uranvorkommen

Die Erdrinde enthält in 1 t Gestein im Mittel etwa 3 g Uran. Damit ist das Element Uran etwa 100-mal häufiger in der Erdrinde anzutreffen als Silber oder Gold. Heute werden Erze wirtschaftlich genutzt, die mindestens zwischen 0,1 und 0,5 % Uran enthalten. Solche Lagerstätten (Abb. 8.2) finden sich in Kanada, USA, Brasilien, Süd- und Mittelafrika, Australien, Frankreich, Schweden oder Russland. Tritt Uran im Verbund mit anderen Metallen auf (z. B. Gold oder Vanadium), lassen sich auch an Uran ärmere Erze wirtschaftlich verwertern. Das geschieht z. B. in Südafrika. Die Welturanreserven mit Gewinnungskosten bis zu 80 US-\$/kg betragen rund 2 Millionen Tonnen. Diese Reserven entsprechen bei Einsatz in Leichtwasserreaktoren einem Energieäquivalent in der Größenordnung von 28 Millionen Tonnen Steinkohle. Mit diesen Uranreserven können die 437 (Stand: 12/2006) weltweit betriebenen Kernkraftwerke mehrere Jahrzehnte lang versorgt werden. Bei Gewinnungskosten bis zu 130 US-\$/kg erhöhen sich die Welturanreserven um weitere 3 Millionen Tonnen.

8.1.2 Urangewinnung

Das im Erz vorhandene Uran wird durch physikalische und chemische Verfahren vom übrigen Gestein getrennt. Dazu wird das Erz gebrochen, fein zermahlen und mit Säure (oder Lauge) unter Anwesenheit eines Oxidationsmittels (z. B. MnO_2 oder Na_2ClO_3) ausgelaugt. Die Oxidation ist notwendig, um das Uran von der im Erz vorliegenden vierwertigen, schlecht löslichen Form in die sechswertige, gut lösliche Form zu überführen.



(vierwertig)

(sechswertig)

Die chemische Verbindung $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2$ trägt den Namen Uraniylsulfat.

Durch Herauslösen mit Hilfe von Säure kann bis zu 90 % des Urans aus dem Erz gewonnen werden. Das Uraniylsulfat enthält jedoch eine Reihe von Begleitstoffen, die in weiteren Reinigungsprozessen entfernt werden (Dekantieren, Filtern, Flüssigextraktion, Ionenaustausch usw.). Durch Zugabe von MnO_2 , NaOH oder NH_3 wird das Uran aus der uranhaltigen Flüssigkeit abgeschieden. Beim Einsatz von NH_3 ergibt sich Ammoniumuranat, das meist in Form von Ammoniumdiuranat $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$ vorliegt. Es wird eingedickt, gefiltert, gewaschen und getrocknet. Wegen seiner gelben Farbe hat es den Namen „Yellow Cake“ erhalten. Das in modernen Anlagen gewonnene Konzentrat besteht zu rund 80 % aus U_3O_8 und ist braun/schwarz.

8.1.3 Anreicherung von Uran-235

Das Produkt „Yellow Cake“ besitzt nur technische Reinheit. Außerdem liegt darin das Uran in seiner natürlichen Isotopenzusammensetzung vor (ca. 99,3 % U-238, ca. 0,7 % U-235). Um das Uran in Kernkraftwerken einsetzen zu können, ist eine wesentlich höhere Reinheit erforderlich, und der Anteil von U-235 muss von 0,7 % auf 3 bis 5 % erhöht werden. Verureinigungen würden zu einer erhöhten Neutronenabsorption und zu störenden Reaktionen mit dem Hüllrohrmaterial der Brennstäbe führen.

Zur Anreicherung und weiteren Reinigung wird das „Yellow Cake“ in die gasförmige Verbindung Uranhexafluorid UF_6 umgewandelt (Konversion). Dazu sind eine Reihe chemischer Reaktionen erforderlich, bei denen gleichzeitig Reinigungsprozesse ablaufen. Uranhexafluorid ist eine farblose, kristalline Substanz. Bei Normaldruck geht sie bei einer Temperatur von 56,5 °C von der festen Phase in die Gasphase über (Sublimation). Als Gas lässt sich UF_6 durch Filter von noch enthaltenen Feststoffen und durch Ausfrieren von anderen Gasen befreien. Mit einer Reinheit von mindestens 99,5 % wird es in Stahlbehältern gelagert bzw. zur Anreicherungsanlage transportiert. Für die Anreicherung stehen das Diffusions-, Zentrifugen- und Trenndüsenverfahren zur Verfügung.

8.1.4 Herstellung von Brennelementen

In der Brennelementefabrik wird das an U-235 angereicherte UF_6 in UO_2 umgewandelt. Dazu verwendet man ein nass-chemisches Verfahren. Das UF_6 lässt man in einem Behälter mit Wasser, Ammoniak und Kohlenstoffdioxid reagieren. Es entsteht dann Ammonium-Uranyl-Carbonat (AUC):



Das gelbe AUC fällt aus der Lösung aus und kann durch Filter abgetrennt werden. Durch Erhitzen wird es in

Ammoniak, Kohlenstoffdioxid, Fluorwasserstoff und Urantrioxid (UO_3) getrennt. Anschließend reduziert man es in einer Wasserstoffatmosphäre bei hohen Temperaturen zu Urandioxid (UO_2).

Das UO_2 liegt zunächst als graues Pulver vor. Für Leichtwasserreaktoren presst man es zu Tabletten, die anschließend in einer Wasserstoffatmosphäre bei $1.700\text{ }^\circ\text{C}$ gesintert und dadurch weiter verdichtet werden. (Unter Sintern versteht man das Zusammenbacken feinkörniger Substanzen durch Erhitzen bis auf eine Temperatur, bei der die Substanz weich wird.) Da die UO_2 -Tabletten (engl. UO_2 -Pellets) sehr maßgenau sein müssen, werden sie noch geschliffen. Anschließend füllt man sie in Hüllrohre aus Zirkaloy. Diese werden dann mit Helium geflutet (1 bis 30 bar) und durch Aufschweißen der Endkappen gasdicht verschlossen. Dadurch entsteht ein Brennstab. Mehrere zu einem Bündel zusammengefasste Brennstäbe bilden ein Brennelement.

8.1.5 Entladen der Brennelemente aus dem Reaktor

Man setzt Brennelemente bis zu einigen Jahren in einen Reaktor ein. In dieser Zeit werden sie innerhalb des Reaktors nach einem genau festgelegten Plan mehrfach in andere Positionen gebracht, um einen möglichst hohen Abbrand zu erreichen. Wegen der Abnahme des Spaltstoffs und der Zunahme Neutronen absorzierender Spaltprodukte müssen die Brennelemente nach mehrjährigem Einsatz ausgetauscht werden. Daher werden beim jährlichen Brennelementwechsel solche Brennelemente entnommen, in

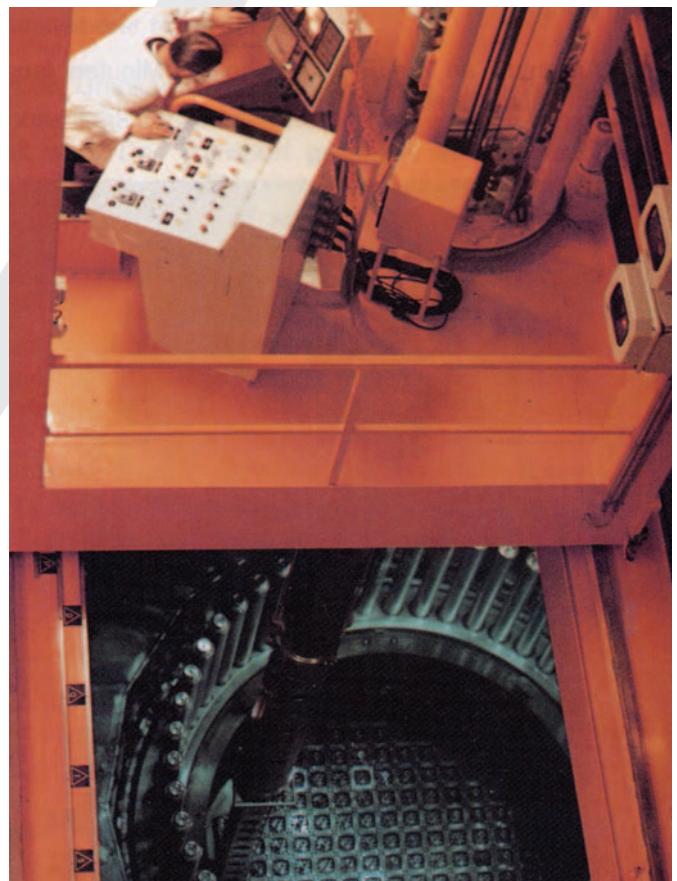


Abb. 8.3: Entladen abgebrannter Brennelemente aus einem Kernreaktor

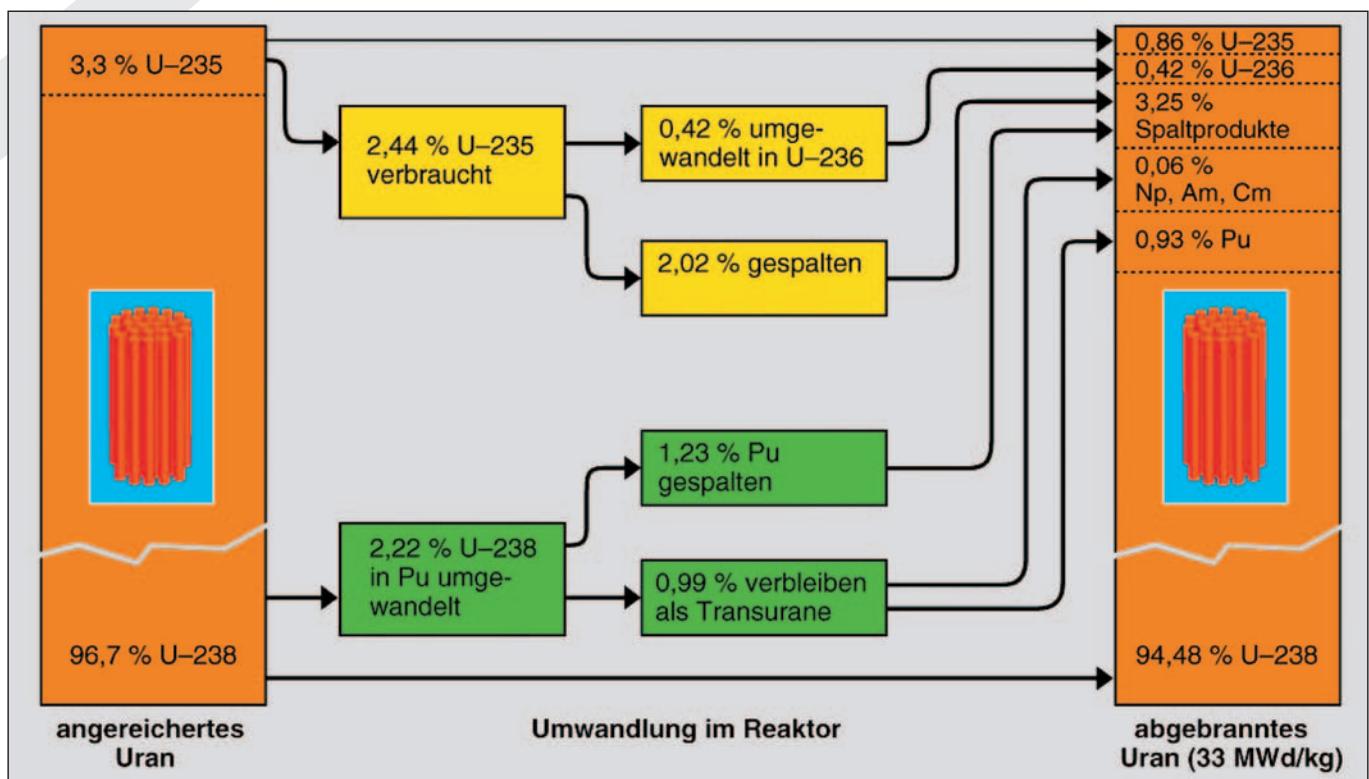


Abb. 8.4: Zusammensetzung des Kernbrennstoffs bei Leichtwasserreaktoren vor und nach dem Einsatz im Reaktor

einem Wasserbecken außerhalb des Reaktors zwischengelagert und dafür dann neue Brennelemente in den Reaktor eingesetzt. Im Kernkraftwerk Krümmel werden dadurch jährlich von 840 Brennelementen 120 ausgetauscht (Abb. 8.3). Das entspricht etwa 21 t Uran.

Nach dem Einsatz der Brennelemente in einem Reaktor hat sich die Zusammensetzung der Uran-Tabletten geändert (Abb. 8.4):

- Der Spaltstoff U-235 wird z. T. durch Kernspaltungen, z. T. durch Umwandlung in U-236 verbraucht. Die bei den Kernspaltungen entstehenden Spaltprodukte sind radioaktiv. Dieser Verbrauch an Spaltstoff wird Abbrand genannt (obwohl im Reaktor keine Verbrennung stattfindet). Der Grad des Abbrandes wird in erzeugter thermischer Energie pro Masse Brennstoff angegeben. Bei Leichtwasserreaktoren werden mittlere Abbrandwerte von 45 MWd/kg erreicht (1 MWd = 24.000 kWh).
- Durch Neutroneneinfang entsteht aus U-238 das Plutoniumisotop Pu-239 (sowie in geringem Umfang weitere Plutonium- und Transplutoniumisotope). Pu-239 wird durch langsame Neutronen gespalten oder es wandelt sich zu verschiedenen Actinoiden um.

Abgebrannte Brennelemente haben eine hohe spezifische Aktivität und damit auch eine hohe Wärmeproduktion. Daher lagert man die Brennelemente zunächst in einem mit Wasser gefüllten Becken innerhalb des Kernkraftwerks. Das Wasser schirmt die Strahlung fast vollständig ab und nimmt gleichzeitig die erzeugte Nachzerfallswärme auf. Bei einer Lagerzeit von zwölf Monaten gehen die Aktivität und damit auch die Wärmeproduktion auf etwa 0,1 % der Anfangswerte zurück (Abb. 8.5).

8.1.6 Wiederaufarbeitung

In der Wiederaufarbeitungsanlage werden die Brennstäbe aufgesägt, der Kernbrennstoff in heißer Säure aufgelöst und durch weitere chemische Verfahren eine Trennung in drei Komponenten vorgenommen: Uran, Plutonium, Spaltprodukte/Actinoide. Zur chemischen Trennung dieser drei Komponenten setzt man das so genannte PUREX-Verfahren ein (PUREX: Plutonium-Uranium-Recovery by Extraction).

Zunächst werden die Brennstäbe in etwa 5 cm lange Stücke zersägt und ihr Inhalt in siedender Salpetersäure (HNO_3) herausgelöst. Dabei entstehen Uranylnitrat $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ und Plutonium-IV-Nitrat $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ sowie die Nitrate der Spaltprodukte und Actinoide. Reaktionsgleichung für UO_2 :

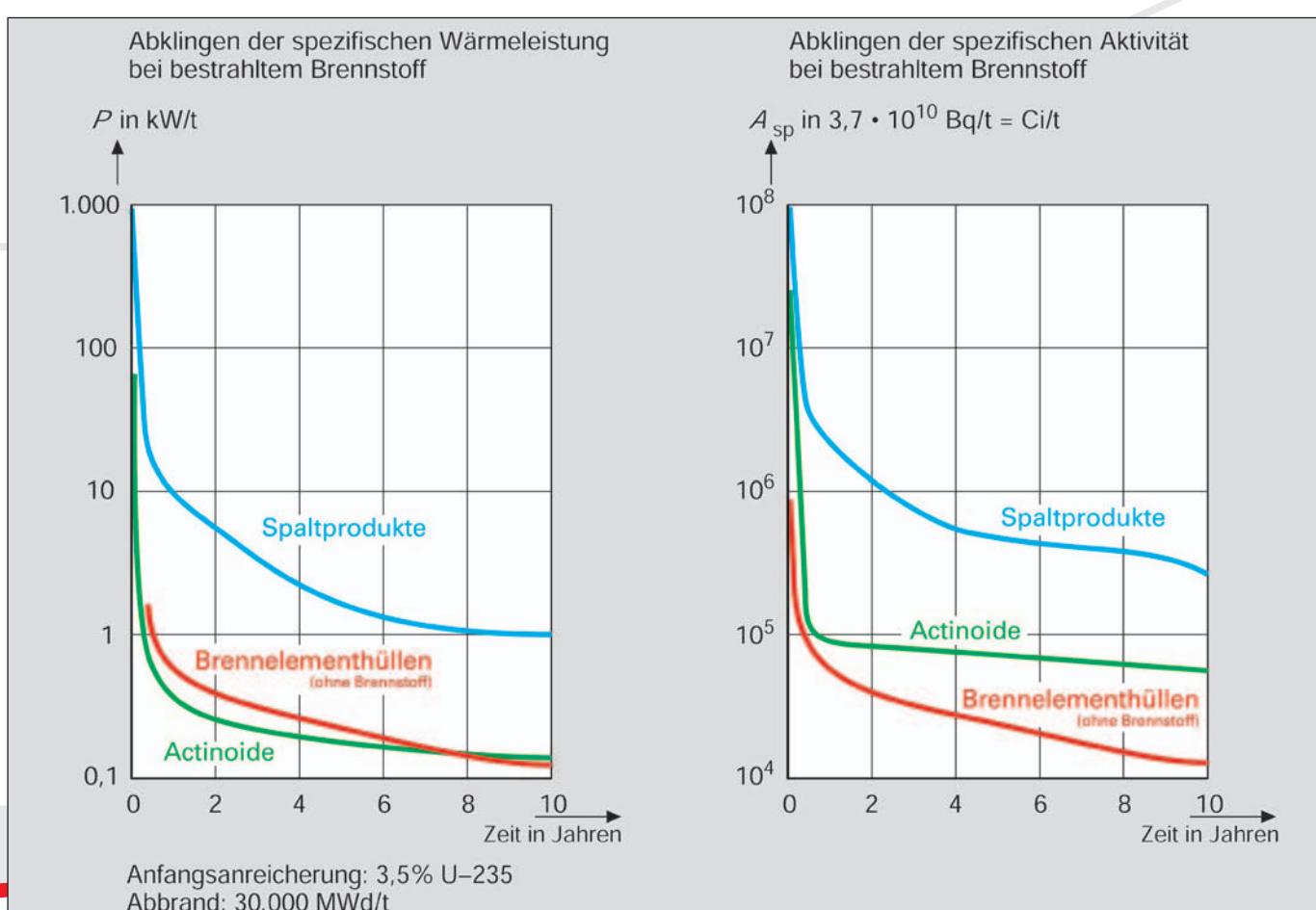


Abb. 8.5: Abklingen von Wärmeleistung und Aktivität bei bestrahltem Kernbrennstoff



Durch physikalisch-chemische Verfahren wird dann eine Trennung der drei Komponenten Uran, Plutonium, Spaltprodukte/Actinoide durchgeführt. Das geschieht mit Hilfe eines besonderen Extraktionsmittels, dem Tri-n-Butyl-Phosphat ($\text{C}_4\text{H}_9\text{O}_3\text{PO}$), das mit 70 % Kerosin (Reinstpetroleum) verdünnt ist. Die Lösung trägt die Bezeichnung TBP 30.

Die Abtrennung der Spaltprodukte und Actinoide, ein erster und wichtiger Schritt des Trennverfahrens, kann vereinfacht folgendermaßen erklärt werden (Abb. 8.6).

Das TBP 30 löst bei Anwesenheit von Salpetersäure die Nitrate des Urans und des Plutoniums (Komplexbildung), während die Spaltprodukte und die anderen Actinoide im wässrigen Teil der Lösung zurückbleiben. Da sich die wässrige Lösung wieder von dem Extraktionsmittel absetzt, können die Spaltprodukte leicht abgetrennt werden. Um Uran, Plutonium sowie Spaltprodukte und Actinoide fast 100%ig voneinander zu trennen, wird dieser Extraktionszyklus mehrfach hintereinander durchgeführt. Dabei sind eine Reihe zusätzlicher chemischer Aufarbeitungsschritte notwendig, die hier nicht dargestellt sind (Abb. 8.7).

Beim Zerschneiden der Brennelemente und besonders beim Lösen des Brennstoffs in Salpetersäure entweichen gasförmige und leichtflüchtige Spaltprodukte, außerdem werden Stickstoffoxide frei. Sie müssen aus den Abgasen abgetrennt werden. Die Stickstoffoxide werden in Salpetersäure überführt und in den Prozess zurückgeleitet. Radioaktives Iod lässt sich mit Hilfe hochwirksamer Filter zurückhalten, die mit Silber imprägniert sind. Es entsteht dann das schwer lösliche Silberiodid (AgI).

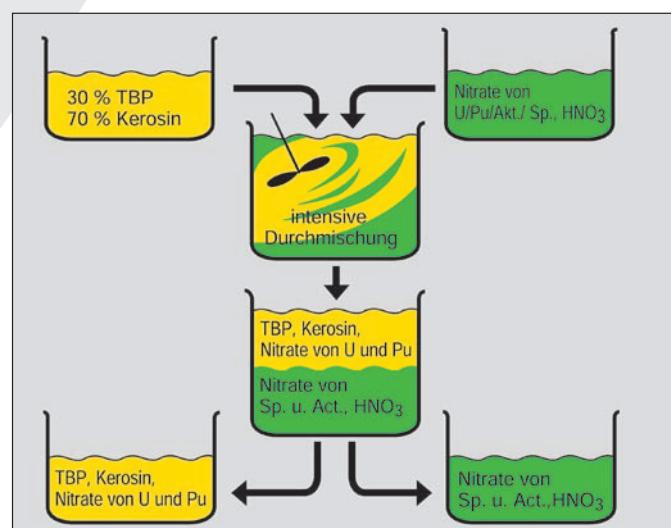


Abb. 8.6: Vereinfachte Darstellung des PUREX-Verfahrens

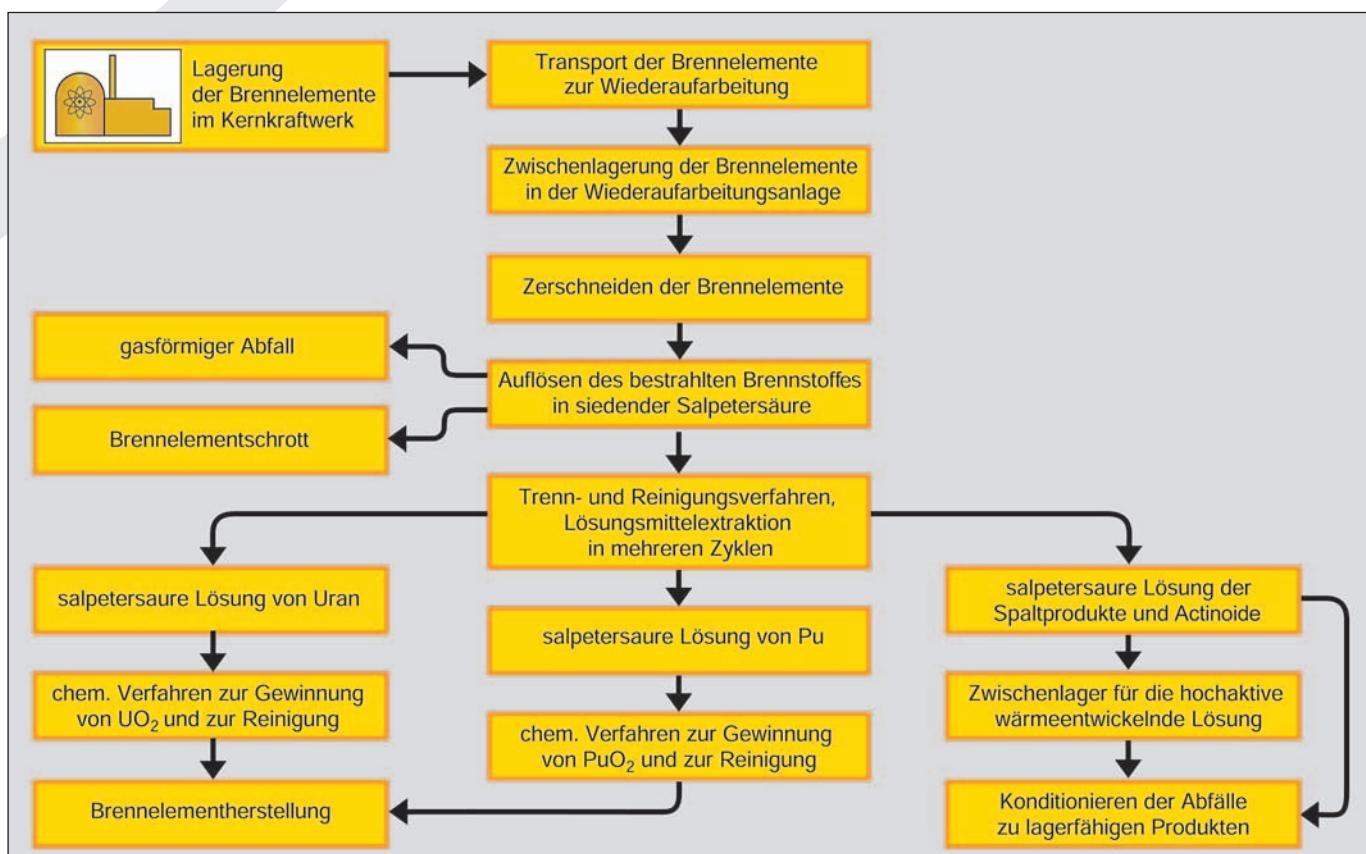


Abb. 8.7: Vereinfachtes Schema der Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente

Besondere Sicherheitsmaßnahmen sind bei der Handhabung der Lösungen von Plutonium notwendig. Es muss verhindert werden, dass sie ein Volumen bzw. eine Konzentration erreichen, bei der selbständig eine Kettenreaktion einsetzen könnte. Zur Verhinderung dieser Kritikalität werden nur geringe Mengen schwach konzentrierter Lösungen verarbeitet oder den Lösungen so genannte Neutronengifte zur Neutronenabsorption beigemengt. Außerdem lassen sich die Behälter so formen, dass aufgrund der großen Oberfläche die Neutronenverluste stets sehr hoch sind und deshalb keine Kettenreaktion einsetzen kann.

Da die abgebrannten Brennelemente hochaktiv sind, muss man die Wiederaufarbeitung in Zellen vornehmen, die durch dicke Betonwände abgeschirmt sind (so genannte Heiße Zellen, Wandstärke bis 2 m). Die Arbeiten werden mit Hilfe fernbedienter Werkzeuge (so genannter Telemanipulatoren) durchgeführt; sie können durch ein Strahlenschutzfenster aus dickem Bleiglas beobachtet werden.

Abgetrenntes Plutonium kann direkt als neuer Spaltstoff eingesetzt werden (U-Pu-Mischoxidbrennstäbe). Das im Uran entstandene U-236 erschwert dagegen einen erneuten Einsatz des Urans in Leichtwasserreaktoren. In Brutreaktoren wäre es dagegen besser verwendbar.

Die radioaktiven Spaltprodukte bzw. Actinoide müssen verpackt und sicher endgelagert werden, damit sie auf Dauer aus der Biosphäre ausgeschlossen sind. Das Hüllrohrmaterial, das durch Neutronenbestrahlung radioaktiv geworden ist, wird ebenfalls endgelagert.

Neben der Wiederaufarbeitung wird auch die direkte Endlagerung kompletter Brennelemente untersucht. Der Vorteil läge darin, dass ein Entweichen radioaktiver Spaltprodukte in der Wiederaufarbeitungsanlage ausgeschlossen werden könnte und Plutonium nicht frei anfiele. Andererseits würden U-235 und Pu-239 einer weiteren Nutzung in Kernkraftwerken verloren gehen, und es können für die einzelnen Gruppen von Spaltstoffen keine spezifischen Verpackungen und Endlagerungsmöglichkeiten geschaffen werden.

8.1.7 Direkte Endlagerung

Bei der direkten Endlagerung wird das gesamte Brennelement einschließlich der Wertstoffe Uran und Plutonium nach einer Zwischenlagerung zum Zerfall der kurzlebigen Radioisotope und damit verbundener Reduzierung der zerfallsbedingten Wärmeentwicklung als radioaktiver Abfall entsorgt. In einer Konditionierungsanlage werden die Brennelemente zerlegt, in spezielle endlagerfähige Gebinde verpackt und dann als radioaktiver Abfall endgelagert. In Deutschland wird dieser Entsorgungsweg seit 1979 in Ergänzung zur Entsorgung mit Wiederaufarbeitung entwickelt. Mit dem Bau einer Pilot-Konditionierungsanlage in Gorleben sollte die technische Machbarkeit der Konditionierung ausgedienter Brennelemente nachgewiesen werden. Parallel dazu wurde

in einem Demonstrationsprogramm die sichere Handhabung und der sichere Einschluss konditionierter Brennelemente in einem Endlager nachgewiesen. Durch die Änderung des Atomgesetzes 1994 wurden in Deutschland auch die rechtlichen Voraussetzungen für die direkte Endlagerung geschaffen. Mit der AtG-Novelle vom 27. April 2002 wurde die Entsorgung ausgedienter Brennelemente aus dem Betrieb von Kernkraftwerken ab dem 01. Juli 2005 nur noch auf die direkte Endlagerung beschränkt.

8.1.8 Konditionierung radioaktiver Abfälle

Radioaktive Abfälle wurden bisher abhängig von der Aktivitätskonzentration in schwach-, mittel- und hochaktive Abfälle unterteilt. Für Zwecke der Endlagerung ist eine Unterscheidung der radioaktiven Abfälle nach der Wärmeentwicklung zweckmäßiger:

- Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung. Die Wärmeabgabe pro Gebinde liegt im Milliwattbereich.
- Gering Wärme entwickelnde Abfälle. Die Wärmeabgabe pro Gebinde liegt im Watt-Bereich.
- Stark Wärme entwickelnde Abfälle. Die Wärmeabgabe pro Gebinde liegt im Kilowatt-Bereich. Bei Endlagerung in Gesteinsschichten können sie die Temperatur des umgebenden Gesteins um bis zu 200 °C erhöhen.

Konditionieren bedeutet, die radioaktiven Abfälle in eine endlagerungsfähige Form zu überführen. Bei Abfällen mit vernachlässigbarer oder geringer Wärmeentwicklung werden Metallfässer, Bitumen- oder Betonummantelungen verwendet. Stark wärmeentwickelnde Abfälle werden zu flüssigem Glas gemischt, aus dem dann Glasblöcke hergestellt werden.

Während Uran und Plutonium aus der Wiederaufarbeitung wieder der Brennelementherstellung zugeführt werden, lagert man die hochaktive Lösung mit Spaltprodukten und Actinoiden in gekühlten Edelstahltanks. Die konzentrierte Spaltproduktlösung hat eine spezifische Aktivität von etwa $4 \cdot 10^{13}$ Bq/l.

Die entstehende Zerfallswärme muss deshalb durch Kühl-systeme abgeführt werden. Nach etwa fünfjähriger Abklingzeit kann eine Volumenverminderung und eine Überführung in eine wasserunlösliche Form durch Verglasung vorgenommen werden.

Nach fünfjähriger Lagerzeit ist die spezifische Wärmeleistung pro kg Spaltprodukt von 1 kW auf weniger als 0,06 kW abgesunken. Eine Überführung der dann immer noch hochaktiven Spaltproduktlösung in eine endlagerungsfähige Form ist dadurch besser möglich. Dabei werden an den Endlagerkörper eine Reihe von Anforderungen gestellt: Gute mechanische Festigkeit, hohe Resistenz gegenüber

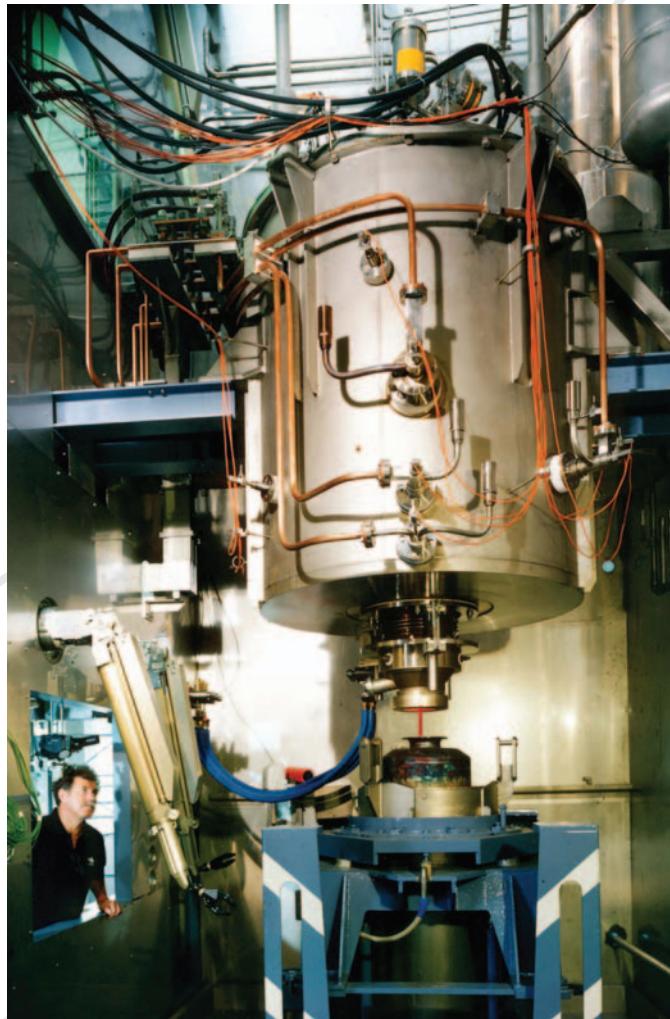


Abb. 8.8: Prototypverglasungsanlage im Forschungszentrum Karlsruhe

Auslaugung, gute Wärmebeständigkeit und Wärmeleitfähigkeit, hohe Beständigkeit gegenüber ionisierenden Strahlen.

Glas erfüllt diese Bedingungen am besten. Hochaktive Spaltprodukte mit starker Wärmeentwicklung werden deshalb mit glasbildenden Stoffen gemischt und daraus Glasblöcke geschmolzen (Abb. 8.8). Zusätzlich mit Edelstahl umkleidet, lassen sie sich dann sehr gut endlagern.

Die hochaktiven Spaltprodukte müssen sehr lange Zeit sicher im Glas eingeschlossen bleiben. In dieser Zeit darf der Glaskörper durch Temperaturerhöhung und Bestrahlung seine Beständigkeit nicht verlieren. Die Strahlungsbeständigkeit prüft man dadurch, dass in einer Art Zeitrafferexperiment das Glas in kurzer Zeit mit sehr hohen Strahlendosen geprüft wird.

8.1.9 Endlagerung

Bei derendlagerung radioaktiver Abfälle muss sicher gestellt sein, dass sie auf Dauer aus der Biosphäre ausgeschlossen sind. Dies erreicht man durch Überführung des Abfalls in eine

stabile Lagerform und durch Mehrfacheinschluss. Bei der Lagerung in tieferen Erdschichten bilden der Lagerbehälter, das umgebende Gesteinsmaterial und Deckgebirge die notwendigen Umschließungen.

In Deutschland soll die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Strukturen vorgenommen werden. Für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung ist dafür das ehemalige Eisenerzbergwerk Schacht Konrad bei Salzgitter vorgesehen. 2002 wurde die Genehmigung zur Errichtung desendlagers erteilt und 2007 abschließend höchstrichterlich bestätigt. Für die Endlagerung radioaktiver Abfälle aller Art einschließlich hochaktiver Wärme entwickelnder Abfälle wird seit 1979 der Salzstock Gorleben auf seine Eignung untersucht. Dass die geologische Stabilität von Steinsalzlagerstätten den Abschluss radioaktiver Abfälle über sehr lange Zeiträume sichern kann, geht aus ihrer Geschichte hervor. Es ist bekannt, dass die Salzformationen eine hohe geologische Stabilität aufweisen. Während der vergangenen über 100 Millionen Jahre stand das darüber liegende Land im Tertiär dreimal für Millionen von Jahren unter Wasser. Im Quartär war das Gebiet von Eis und Wasser bedeckt, trotzdem existieren die Salzlagerstätten noch heute. Eine endgültige Eignungsaussage für den Salzstock Gorleben wird erst nach Abschluss der untertägigen Erkundungen möglich sein. Die Bewertung aller bisherigen Erkundungsergebnisse bestätigt seine Eignungshöufigkeit.

8.2 Transporte im Brennstoffkreislauf

Die im Brennstoffkreislauf notwendigen Transporte sind unterschiedlich zu bewerten:

- Der Transport des Uranerzes zur Erzaufbereitungsanlage ist unproblematisch. Dafür werden offene Lastwagen verwendet. Aus Kostengründen legt man die Anlage in unmittelbarer Nähe der Mine an.
- Das Urankonzentrat „Yellow Cake“ wird zur Umwandlung in UF_6 zur Konversionsanlage transportiert. Der Transport geschieht in handelsüblichen Stahlfässern von 200 oder 400 l Fassungsvermögen. Da weltweit nur wenige Konversionsanlagen bestehen, sind die Transportwege z.T. sehr lang.
- Das Uranhexafluorid wird von der Konversionsanlage zur Anreicherungsanlage gebracht. Da UF_6 bei 56,5 °C gasförmig wird, muss das Material in Druckbehältern untergebracht werden (Abb. 8.9). Die spezifische Aktivität von UF_6 ist gering, die chemische Toxizität aber sehr hoch. Es muss deshalb sichergestellt sein, dass die Behälter beim Transport und bei möglichen Unfällen dicht bleiben. Nach der Anreicherung besitzt das UF_6 eine höhere U-235-Konzentration. Deshalb müssen beim Transport und der Lagerung Anordnungen gewählt werden, bei denen eine



Abb. 8.9: Transport von Uranhexafluorid-Behältern

Kettenreaktion nicht von selbst in Gang kommen kann (unterkritische Anordnung).

- Die Umwandlung von UF_6 in UO_2 sowie die Herstellung von Brennelementen sind jeweils an einem Ort zusammengefasst, so dass keine Transportwege außerhalb der Fabrikationsräume entstehen. Die fertigen Brennelemente verpackt man in Transportbehälter und transportiert sie auf Lastwagen zum Kernkraftwerk. Besonderheiten bezüglich der Strahlenabschirmung treten dabei nicht auf, da auch angereichertes Uran nur eine geringe spezifische Aktivität besitzt.
- Der Transport von Brennelementen, die in einem Reaktor eingesetzt worden sind, verlangt höchste Sicherheitsvorkehrungen. Durch die in den Brennstäben enthaltenen Spaltprodukte sind die spezifische Aktivität und damit auch die Wärmeleitung außerordentlich hoch. Der Transportbehälter für abgebrannte Brennelemente ist ein Stahlbehälter, der außen mit Kühlrippen oder Kühlstiften versehen ist. Seine Länge beträgt 5 bis 7 m und sein Durchmesser 1,8 bis 2,5 m. Er kann 1 bis 6 t Transportgut aufnehmen. Das Gesamtgewicht liegt zwischen 32 t und 105 t (Abb. 8.10).

Die Anforderungen an einen Transportbehälter sind in Bezug auf mechanische Stabilität, Dichtheit und Temperaturfestigkeit sehr hoch. Selbst bei schwersten Verkehrsunfällen müssen sie einen sicheren Einschluss des radioaktiven Materials garantieren. Transportbehälter der Typ-B-Verpackung, wie sie für abgebrannte Brennele-



Abb. 8.10: Transportbehälter für abgebrannte Brennelemente

mente eingesetzt werden, müssen folgenden Prüfungen standhalten:

- Freier Fall des Behälters aus 9 m Höhe auf ein unnachgiebiges Fundament.
- Freier Fall des Behälters aus 1 m Höhe auf einen Stahldorn mit einem Durchmesser von 15 cm und einer Höhe von mindestens 20 cm.
- Feuertest von 30 Minuten bei mindestens 800 °C.
- Eintauchen des Behälters in Wasser für 15 Stunden und einer Wassertiefe von 15 m oder bei Zulassung für besonders große Gesamtaktivität für 1 Stunde und einer Wassertiefe von 200 m.

In den USA, Großbritannien und Deutschland sind noch weitergehende Belastungstests durchgeführt worden, ohne dass dabei die Behälter undicht wurden: Fall eines Behälters aus 600 m Höhe auf harten Wüstenboden, Zusammenprall von Brennelementtransporter und Lokomotive (Relativgeschwindigkeit 130 km/h) und Aufprall eines tonnenschweren Projektils mit einer Geschwindigkeit von fast 1.100 km/h auf den Behälter.

- Bei der Wiederaufarbeitung fallen Spaltprodukte als radioaktive Abfälle sowie Uran und Plutonium an. Für die Endlagerung konditionierte, in eine Glasmatrix gebundene Spaltprodukte werden in gleichartigen Transportbehältern befördert wie die ausgedienten Brennelemente. Bei Plutoniumtransporten ist neben den Sicherheitsmaßnahmen aufgrund der Radioaktivität das Eintreten einer Kritikalität durch eine spezifische Behälterauslegung auszuschließen.

8.3 Behandlung radioaktiver Betriebsabfälle in einem Kernkraftwerk

In einem Kernkraftwerk mit einer elektrischen Leistung von 1.300 MW fallen jährlich etwa 50 m³ konditionierte radioaktive Betriebsabfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung an, sowie Abfälle aus der Entsorgung der jährlichen Entlademenge der abgebrannten Brennelemente, deren Mengen vom Entsorgungsweg abhängen: Bei einer Wiederaufarbeitung entstehen 10 m³ radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung und 3 m³ wärmeentwickelnde Abfälle – die verglasten hochaktiven Spaltprodukte. Bei der direkten Endlagerung der abgebrannten Brennelemente fallen 45 m³ wärmeentwickelnde Abfälle an (Abb. 8.11).

Abhängig vom Aggregatzustand, der spezifischen Aktivität, der Radiotoxizität (strahlenbedingte Gefährlichkeit) sowie der Wärmeentwicklung werden zur Konditionierung unterschiedliche Verfahren angewandt.

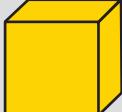
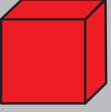
	radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung	wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle
Betriebs-abfälle Kernkraftwerk	 50 m ³	–
Entsorgung der abgebrannten Brennelemente ... direkte Endlagerung	–	 45 m ³
Wiederaufarbeitung	 10 m ³	 3 m ³

Abb. 8.11: Jährliche konditionierte Mengen radioaktiver Abfälle eines 1.300-MWe-Kernkraftwerks (Betriebsabfälle und Abfälle aus der Brennelemententsorgung je nach Entsorgungsvariante)

Beim Reaktorbetrieb entstehen durch Leckagen und Neutronenaktivierung gasförmige, flüssige und feste Reaktorbetriebsabfälle, die soweit wie möglich zurückgehalten werden. Um die Aktivität der Abluft und des Abwassers zu verringern, gibt es zwei unterschiedliche Verfahren.

- Verzögerte Abgabe, damit die Radioaktivität von selbst abklingt.
- Abtrennen der Radionuklide durch physikalische sowie chemische Verfahren und Endlagerung dieser Radionuklide.

8.3.1 Behandlung gasförmiger Reaktorbetriebsabfälle

Einige der wichtigsten gasförmigen und leichtflüchtigen Radionuklide, die sich in der Luft des Kraftwerksgebäudes befinden, sind die durch Leckagen entwichenen Spaltprodukte Xe-133 und I-131. Xe-133 hat eine Halbwertzeit von 5,25 d. Es wird in einer Verzögerungsstrecke bis zu 60 d zurückgehalten, die ursprüngliche Aktivität ist auf weniger als 0,1 % abgeklungen (Abb. 8.12).

Verzögerungsstrecken bestehen z.B. aus Aktivkohlefiltern. Das Gas wird zunächst in der ersten Filterschicht adsorbiert (Gasmoleküle lagern sich an der Oberfläche von Kohlenstoffpartikeln an). Im Laufe der Zeit bewegen sie sich durch Austausch langsam durch die Kohlefilterstrecke bis zum Abluftkamin.

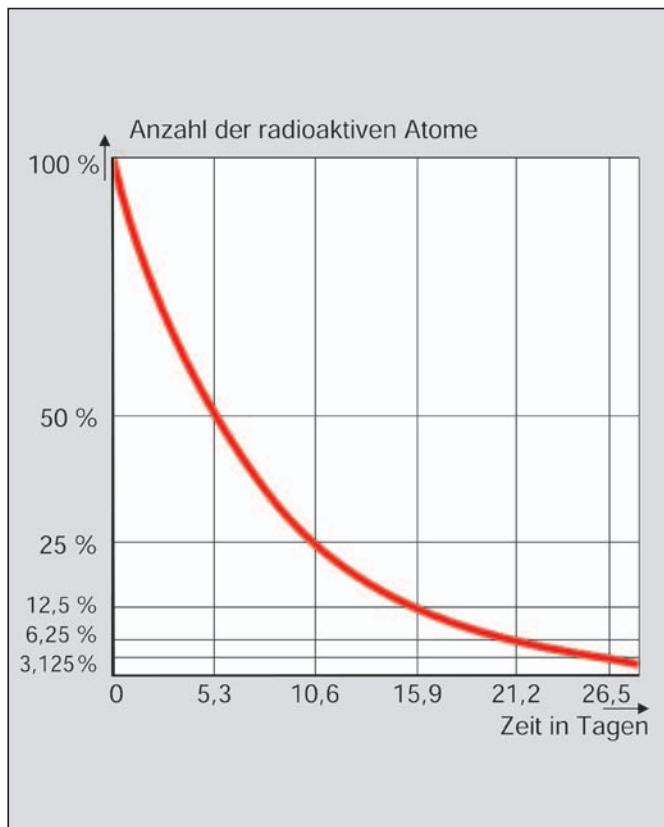


Abb. 8.12: Abklingen der Aktivität bei Xenon-133

Der Anteil des I-131 in der Gebäudeluft ist gering. Da dieses Element aber im Gegensatz zu den Edelgasen chemische Verbindungen eingehen kann und außerdem zu den physiologisch bedeutsamen Elementen gehört, wird es durch mehrere hintereinander angeordnete Absolutfilter zurückgehalten. Eine Rückhaltung zu mehr als 99,9 % wird dadurch erreicht, dass die Filter zusätzlich mit Silbernitrat getränkt sind. Bei Kontakt mit Iod entsteht dann Silberiodid, das in den Filtern verbleibt. In ähnlicher Weise verfährt man mit den Aerosolen, bei denen sich radioaktive Teilchen an Staubpartikel oder Wassertröpfchen angelagert haben.

8.3.2 Behandlung flüssiger Reaktorbetriebsabfälle

Aus Undichtigkeiten des Kühlmittelkreises austretendes Wasser sowie Wasser aus Labors, Dekontaminationsanlagen und Waschräumen bilden die flüssigen Reaktorbetriebsabfälle. Auch bei der Abgabe von radioaktiven Flüssigkeiten an die Umgebung ist die Strahlenexposition der Menschen so gering wie möglich zu halten. Die wichtigste Maßnahme besteht darin, der Flüssigkeit die radioaktiven Stoffe zu entziehen. Das geschieht durch Eindampfen (Abdestillieren der Flüssigkeit), Ionenaustausch, Filtration oder chemische Fällung. Eine Sonderstellung nimmt das Tritium (H-3) ein. Es entsteht bei einem geringen Prozentsatz der Kernspaltungen als drittes Teilchen (außer den beiden Spaltprodukten) und durch Neutronenbestrahlung des Kühlmittels sowie anderer Materialien.

Das Tritium liegt im Wesentlichen als HTO vor (Wasser-molekül, dessen Wasserstoffatome die Isotope H-1 und H-3 = T sind). Wegen der relativ langen Halbwertzeit von 12,323 a können keine Verzögerungsstrecken eingesetzt werden. Da die maximale Energie der vom Tritium ausgesandten Betateilchen aber nur 0,02 MeV beträgt und keine Gammaquanten auftreten, entsteht durch die Abgabe des Tritium an die Umgebung nur eine geringe zusätzliche Strahlenexposition der Bevölkerung.

8.3.3 Behandlung fester Reaktorbetriebsabfälle

Radioaktive Reaktorbetriebsabfälle fallen in Form von Filtern, Ionenaustauschern, Putzlappen, kontaminierte Kleidung, Abfällen von Reparaturen u. Ä. an. Sie werden – falls erforderlich – verbrannt oder verdichtet, um ihr Volumen zu verkleinern. Anschließend schließt man sie in Behältern sicher ein (Abb. 8.13). Nach Zwischenlagerung im Kernkraftwerk ist für sie eineendlagerung in einem Endlager vorgesehen. Menge und Zusammensetzung der Abfälle hängen u.a. vom Typ des Kernkraftwerks und der Betriebsweise ab. Bei einem Siedewasserreaktor mit einer elektrischen Leistung von 1.300 MW fallen pro Betriebsjahr etwa folgende Rohabfallmengen an:

- 250 m³ Festabfälle (Papier, Kunststoffe, kontaminierte Arbeitskleidung, Bauschutt),
- 20 m³ Verdampferkonzentrate aus der Abwasseraufbereitung,
- 7 m³ Ionentauscherharze aus der Kühlmittelreinigung,
- 6 m³ Metallteile,
- 3 m³ Filterhilfsmittel, Schlämme, Öle.



Abb. 8.13: Lagerung von in Stahlfässern verpacktem radioaktivem Abfall in einem Kernkraftwerk

9 Strahlenmessung und die Strahlenexposition des Menschen

Der Mensch besitzt kein Sinnesorgan für ionisierende Strahlen. Sie lassen sich nur mit Hilfe besonderer Messinstrumente nachweisen. Strahlenmessungen sind nur möglich, wenn Wechselwirkungen der Strahlung mit Materie stattfinden. Erst wenn die Strahlung eine nachweisbare Veränderung hervorruft, kann diese erfasst werden. Der Grad der Veränderung ist dann ein Maß für die Intensität der verursachenden Strahlung. Einige besonders wichtige Messverfahren werden hier in vereinfachter Form vorgestellt.

9.1 Ionisationskammer

Eine Ionisationskammer besteht im einfachsten Fall aus einem luftgefüllten Behälter, in dem sich zwei Elektroden befinden. Sie sind über einen Strommesser mit einer Gleichspannungsquelle verbunden. Gelangt Strahlung in das Innere, werden Ionen erzeugt, und die Luft zwischen den Elektroden wird elektrisch leitend. Daraufhin kommt es zu einem Stromfluss, der durch ein Messgerät angezeigt wird (Abb. 9.1).

In der Ionisationskammer werden positives Ion und herausgelöstes Elektron zur jeweils entgegengesetzt geladenen Elektrode hin beschleunigt. Die Spannung wird gerade so hoch gewählt, dass einerseits Ion und Elektron nicht mehr rekombinieren (sich wieder vereinigen) können, andererseits aber die Beschleunigung zu den Elektroden nicht so stark ist, dass durch Zusammenstöße mit Stickstoff- und Sauerstoffmolekülen der Luft weitere Ionisationen ausgelöst werden. Die Stromstärke ist dann allein der Anzahl der primär erzeugten Ionen bzw. Elektronen proportional. Die Stromstärken werden verstärkt und an einem Messgerät angezeigt.

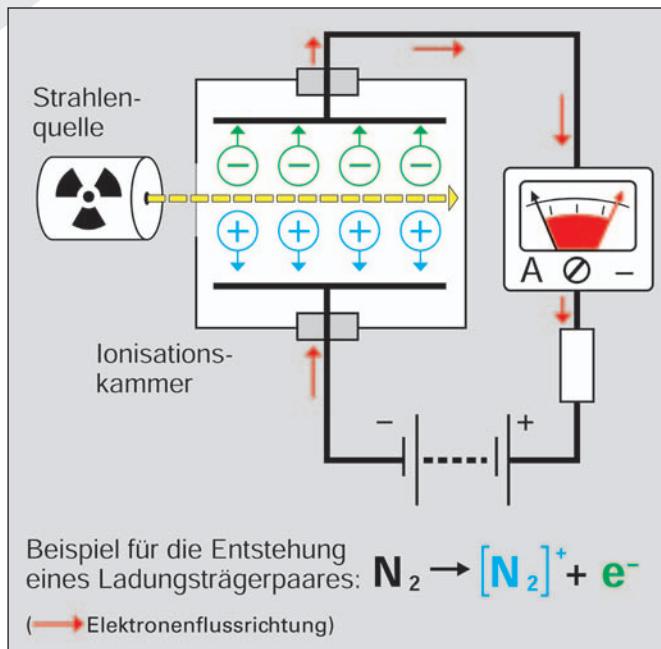


Abb. 9.1: Prinzipieller Aufbau einer Ionisationskammer

Zum Nachweis von Alpha- und Betateilchen werden die Wände der Ionisationskammer aus sehr dünnem Material hergestellt, damit die Teilchen möglichst ungehindert in das Innere gelangen können. Bei Gammaquanten wählt man dagegen dicke Wände, damit die Gammaquanten aus den Atomen der Kammerwand Elektronen herauslösen, die dann in der Luft weitere Ionisationen hervorrufen. Soll die Kammer näherungsweise den Verhältnissen in einem organischen Gewebe angepasst werden, verwendet man für den Aufbau spezielle Kunststoffe. Die durch Strahlung erzeugten Elektronen stellen eine Ladungsmenge dar. Daraus wurde die früher benutzte Größe der Ionendosis hergeleitet.

Die Ionendosis (D) gibt die erzeugte Ladung pro Masse der durchstrahlten Luft an ($t = 0^\circ\text{C}$; $p = 1.013 \text{ hPa}$). Wenn in 1 kg Luft durch ionisierende Strahlen so viele Ionen bzw. freie Elektronen erzeugt werden, dass im angeschlossenen Leiterkreis 1 Sekunde lang ein Strom von 1 A fließt, beträgt die Ionendosis $D = 1 \text{ C/kg}$. Das entspricht $6,2 \cdot 10^{18}$ Elektronen bzw. Ionen pro 1 kg Luft oder $8,07 \cdot 10^{12}$ Ladungsträgerpaare pro 1 cm^3 Luft. Für die Ionendosis wurde die Einheit Röntgen R verwendet. Für Umrechnungen gilt: $1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$.

9.2 Energiedosis

In Luft wird zur Bildung eines Ladungsträgerpaars die Energie von 34 eV benötigt. Da der Quotient 1 C/1 kg Auskunft darüber gibt, wie viele Paare erzeugt worden sind, lässt sich auch die Energie berechnen, die dafür notwendig war. Statt die erzeugte Ladung oder die erzeugten Ladungsträgerpaare anzugeben, kann man also auch die Energie betrachten, die bei der Ionisation auf die Luftpoleküle übertragen worden ist. Die von einem Stoff aufgenommene Energie kann ebenfalls als Maß für die physikalische Strahlenwirkung verwendet werden. Dafür ist die Energiedosis definiert. Die Energiedosis einer ionisierenden Strahlung gibt die pro Masse eines durchstrahlten Stoffs absorbierte Energie an:

$$\text{Energiedosis} = \frac{\text{absorbierte Strahlungsenergie}}{\text{Masse}} ; D = \frac{E}{m}$$

Der Quotient 1 J/1 kg wird als Einheit für die Energiedosis verwendet (Abb. 9.2). Der besondere Einheitenname für die Energiedosis ist das Gray (Gy):

$$1 \text{ Gy} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ kg}}$$

Die Energiedosis wurde bisher in der Einheit Rad (rd oder rad) gemessen. Das Wort Rad ergibt sich aus den Anfangsbuchstaben der englischen Wörter „radiation absorbed dose“. Für Umrechnungen gilt: $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rd}$.

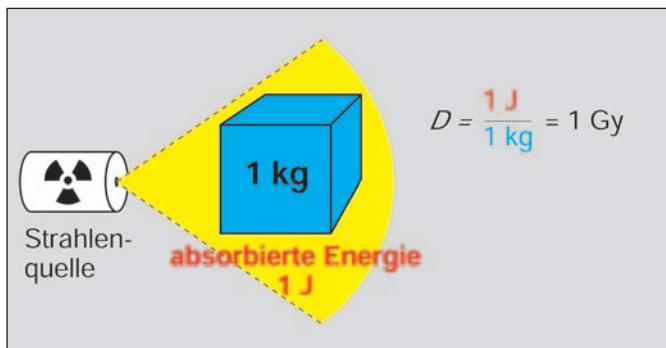


Abb. 9.2: Veranschaulichung der Einheit für die Energiedosis

9.3 Organdosis

Mit der Energiedosis allein kann jedoch die biologische Strahlenwirkung nicht beurteilt werden. Es zeigt sich nämlich, dass bei gleichen Energiedosen, aber unterschiedlichen Strahlenarten, die hervorgerufenen Effekte unterschiedlich sein können. Wird z.B. von zwei gleichen Geweben des Menschen das eine mit Alphastrahlen, das andere mit Betastrahlen bestrahlt und nehmen beide Gewebe gleich viel Energie auf, so sind die durch die Alphastrahlen hervorgerufenen biologischen Strahlenwirkungen etwa 20-mal größer (Abb. 9.3).

Die größere biologische Wirkung von Alphastrahlen kann durch die größere Anzahl erzeugter Ionen bzw. Anregungen pro Weglänge erklärt werden. Ein Alphateilchen führt in einem Zellgewebe auf einer bestimmten Strecke zu etwa 1000-mal mehr Wechselwirkungen als ein Betateilchen. Eine dichtere Ionisierung in einem kleinen Bereich ist viel schädlicher als eine gleich große Anzahl von Ionisationen, die auf einen größeren Bereich verteilt sind.

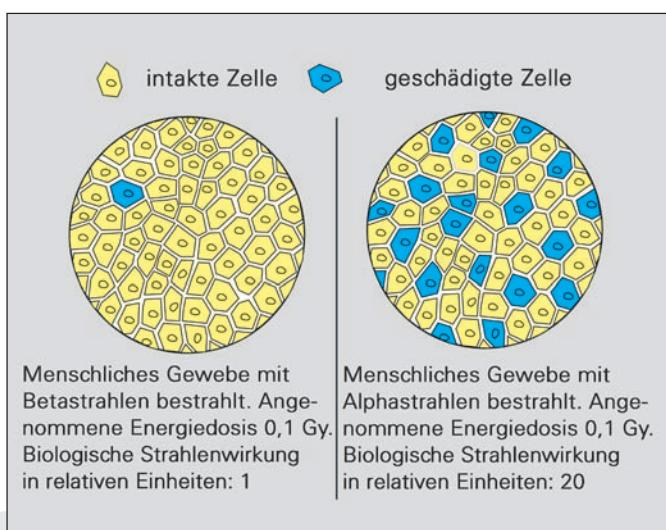


Abb. 9.3: Bei gleicher Energiedosis verursacht Alphastrahlung eine 20-mal größere biologische Wirkung als Betastrahlung (stark vereinfachte Darstellung einer Zellstruktur)

Strahlenart und Energiebereich	Strahlungs-Wichtungsfaktor w_R
Photonen, alle Energien	1
Elektronen, Myonen, alle Energien	1
Neutronen	
< 10 keV	5
10 keV bis 100 keV	10
> 100 keV bis 2 MeV	20
> 2 MeV bis 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protonen, außer Rückstoßprotonen, Energie > 2 MeV	5
Alphateilchen, Spaltfragmente, schwere Kerne	20

Tab. 9-1: Strahlungs-Wichtungsfaktoren

Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen biologischen Wirkung der verschiedenen Strahlenarten galten bisher so genannte effektive Qualitätsfaktoren. Die Internationale Strahlenschutzkommission (ICRP) hat 1991 statt dieser Qualitätsfaktoren die Strahlungs-Wichtungsfaktoren w_R (Tab. 9-1) eingeführt (der Buchstabe R im Index stammt von der englischen Bezeichnung radiation = Strahlung). Diese Strahlungs-Wichtungsfaktoren sind aus strahlenepidemiologischen Untersuchungen gewonnene Werte. Im Juli 2001 wurden diese Strahlungs-Wichtungsfaktoren in die deutsche Strahlenschutzverordnung übernommen.

Die Organdosis $H_{T,R}$ ist das Produkt aus der über das Gewebe/Organ T (der Buchstabe T stammt von der englischen Bezeichnung tissue = Gewebe) gemittelten Organ-Energiedosis $D_{T,R}$, die durch die Strahlung R erzeugt wird, und dem Strahlungs-Wichtungsfaktor w_R . Besteht die Strahlung aus Arten und Energien mit unterschiedlichen Werten von w_R , so werden die einzelnen Beiträge addiert. Für die Organdosis H_T gilt dann:

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

Da die Strahlungs-Wichtungsfaktoren Zahlenwerte ohne Einheit sind, ergibt sich als Einheit der Organdosis der Quotient J/kg (dieselbe Einheit wie für die Energiedosis). Als besonderer Einheitenname für die Organdosis ist das Sievert (Sv) festgelegt worden. Die bisher übliche Bezeichnung für diese Dosisart war „Äquivalentdosis“, ebenfalls angegeben in Sievert. Statt des Einheitennamens Sievert wurde früher das Rem (röntgen equivalent man) benutzt. Für Umrechnungen gilt: 1 Sv = 100 rem.

Die Organdosis wird nur für Personen und nur im Strahlenschutzverwendet. Die Strahlungs-Wichtungsfaktoren wurden nur für einen Bezug zu Spätschäden hergeleitet. Daher ist eine Nutzung der Organdosis nur bis zu etwa 1 Sv gerechtfertigt. Darüber hinausgehende Strahlenexpositionen sind als Energiedosis anzugeben. Bei vereinfachenden Darstellungen wird häufig auf diese Differenzierung verzichtet.

9.4 Effektive Dosis

Da die Strahlenempfindlichkeit einzelner Organe und Gewebe z.T. erhebliche Unterschiede aufweist, liefern die einzelnen Organdosen unterschiedliche Beiträge zum strahlenbedingten Gesamtrisiko des Menschen bezüglich der Wahrscheinlichkeit für das Eintreten von Krebs und Leukämie. Zur Berechnung der effektiven Dosis E , die ein Maß für das gesamte Strahlenrisiko darstellt, wurden deshalb von der Internationalen Strahlenschutzkommission für verschiedene Gewebe und Organe die Gewebe-Wichtungsfaktoren w_T eingeführt und in die deutsche Strahlenschutzverordnung übernommen.

Die effektive Dosis E ist die Summe der Organdosen H_T , jeweils multipliziert mit dem zugehörigen Gewebe-Wichtungsfaktor w_T . Dabei ist über alle in der Tab. 9-2 aufgeführten Organe und Gewebe zu summieren. Die Einheit der effektiven Dosis ist das Sievert (Einheitenzeichen Sv).

$$E = \sum_T w_T H_T$$

Angenommenes Beispiel: Durch Aufnahme von Iod-131 hat die Schilddrüse einer Person eine Organdosis von 100 mSv erhalten. Die effektive Dosis beträgt dann $E = H_T \cdot w_T = 100 \text{ mSv} \cdot 0,05 = 5 \text{ mSv}$.

Die effektive Dosis ist die geeignete Größe zur Angabe eines einheitlichen Dosiswertes bei unterschiedlicher Exposition verschiedener Körperbereiche zur Bewertung des Risikos für Strahlenspätschäden.

9.5 Folgedosis

Die Bestrahlung von Gewebe oder Organen durch inkorporierte Radionuklide ist von der Verweilzeit der radioaktiven Stoffe im jeweiligen Gewebe oder Organ abhängig. Diese Verweilzeit ergibt sich aus dem Zusammenwirken des radioaktiven Zerfalls einerseits und dem Ausscheiden des Stoffs aus dem Körper aufgrund der Stoffwechselvorgänge andererseits. Die Folgedosis ist das Zeitintegral der Dosisleistung in einem Gewebe oder Organ über die Zeit. Die Organ-Folgedosis $H_T(\tau)$ bei einer Inkorporation zum Zeitpunkt t_0 ist das Zeitintegral der Organ-Dosisleistung \dot{H}_T im Gewebe oder Organ T . Wird kein Integrationszeitraum τ

Gewebe oder Organe	Gewebe-Wichtungsfaktoren w_T
Gonaden	0,20
Dickdarm	0,12
Knochenmark (rot)	0,12
Lunge	0,12
Magen	0,12
Blase	0,05
Brust	0,05
Leber	0,05
Schilddrüse	0,05
Speiseröhre	0,05
Haut	0,01
Knochenoberfläche	0,01
andere Organe oder Gewebe*	0,05

* Für Berechnungszwecke setzen sich „andere Organe oder Gewebe“ wie folgt zusammen: Bauchspeicheldrüse, Dünndarm, Gebärmutter, Gehirn, Milz, Muskel, Nebennieren, Niere und Thymusdrüse. In den außergewöhnlichen Fällen, in denen ein einziges der „anderen Organe oder Gewebe“ eine Äquivalentdosis erhält, die über der höchsten Dosis in einem der 12 Organe liegt, für die ein Wichtungsfaktor angegeben ist, sollte ein Wichtungsfaktor von 0,025 für dieses Organ oder Gewebe und ein Wichtungsfaktor von 0,025 für die mittlere Organdosis der restlichen „anderen Organe oder Gewebe“ gesetzt werden.

Tab. 9-2: Gewebe-Wichtungsfaktoren

angegeben, ist für Erwachsene ein Zeitraum von 50 Jahren und für Kinder ein Zeitraum vom jeweiligen Alter bis zum Alter von 70 Jahren zu Grunde zu legen:

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \dot{H}_T(t) dt$$

9.6 Somatische und genetische Schäden

Bei den Schäden, die ionisierende Strahlen an Organismen hervorrufen, unterscheidet man zwischen somatischen und genetischen (vererbaren) Schäden. Die somatischen Schäden (Körperschäden) unterteilt man in Früh- und Spätschäden, letztere noch einmal in maligne (bösartig wuchernde) und nichtmaligne (nicht bösartig wuchernde) Spätschäden (Abb. 9.4).

Für das Auftreten von Frühschäden muss der Organismus von einer Mindestmenge an Strahlung getroffen werden. Diese Schwellendosis für den Menschen liegt bei einmaliger Ganzkörperbestrahlung zwischen 200 und 300 mSv. Es zeigen sich z.B. kurzzeitige Veränderungen des Blutbildes. Je größer die Strahlungsmenge wird, desto gravierender sind auch diese Strahlenschäden. Frühschäden beim Menschen sind z.B. außer Veränderungen des Blutbildes Unwohlsein,

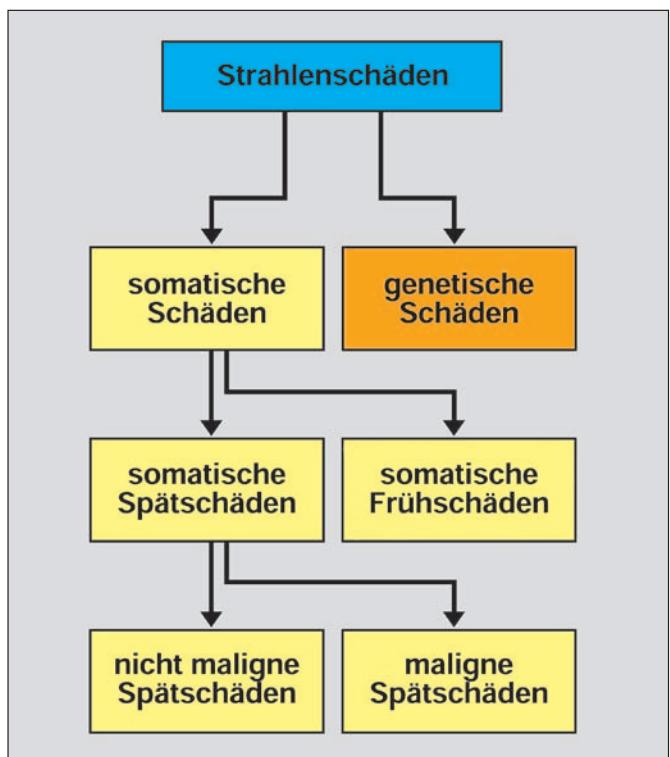


Abb. 9.4: Einteilung der Strahlenschäden

Erbrechen, Entzündungen der Schleimhäute und Fieber. Eine einmalige Ganzkörperbestrahlung mit einer Dosis von 7.000 mSv gilt als tödlich, wenn keine Therapiemaßnahmen ergriffen werden (Abb. 9.5).

Somatische Spätschäden treten erst nach Jahren oder Jahrzehnten auf. Bei Spätschäden (z. B. Krebs, Leukämie) ist es strittig, ob eine Schwellendosis für das Eintreten der Erkrankung besteht; jedenfalls wäre diese Mindestmenge an Strahlung sehr klein. Mit steigender Strahlungsmenge nimmt bei den Strahlenspätschäden nicht die Schwere der Erkrankung zu, sondern die Wahrscheinlichkeit zu erkranken.

Bei genetischen Schäden treten Veränderungen an den Chromosomen der Keimzellen auf. Sie wirken sich erst bei den Nachkommen aus. Auch bei genetischen Schäden ist eine Reparatur möglich oder es kann die nach einem falschen genetischen Code aufgebaute Zelle, das daraus entstandene Gewebe bzw. der nicht lebensfähige Embryo abgestoßen werden. Ein genetischer Schaden würde dann nicht an die nächste Generation weitergegeben. Grundsätzlich sind Mutationen natürliche Ereignisse, die bei Menschen, Tieren und Pflanzen immer wieder vorkommen. Sie können spontan auftreten oder gezielt durch chemische bzw. physikalische Einflüsse herbeigeführt werden.

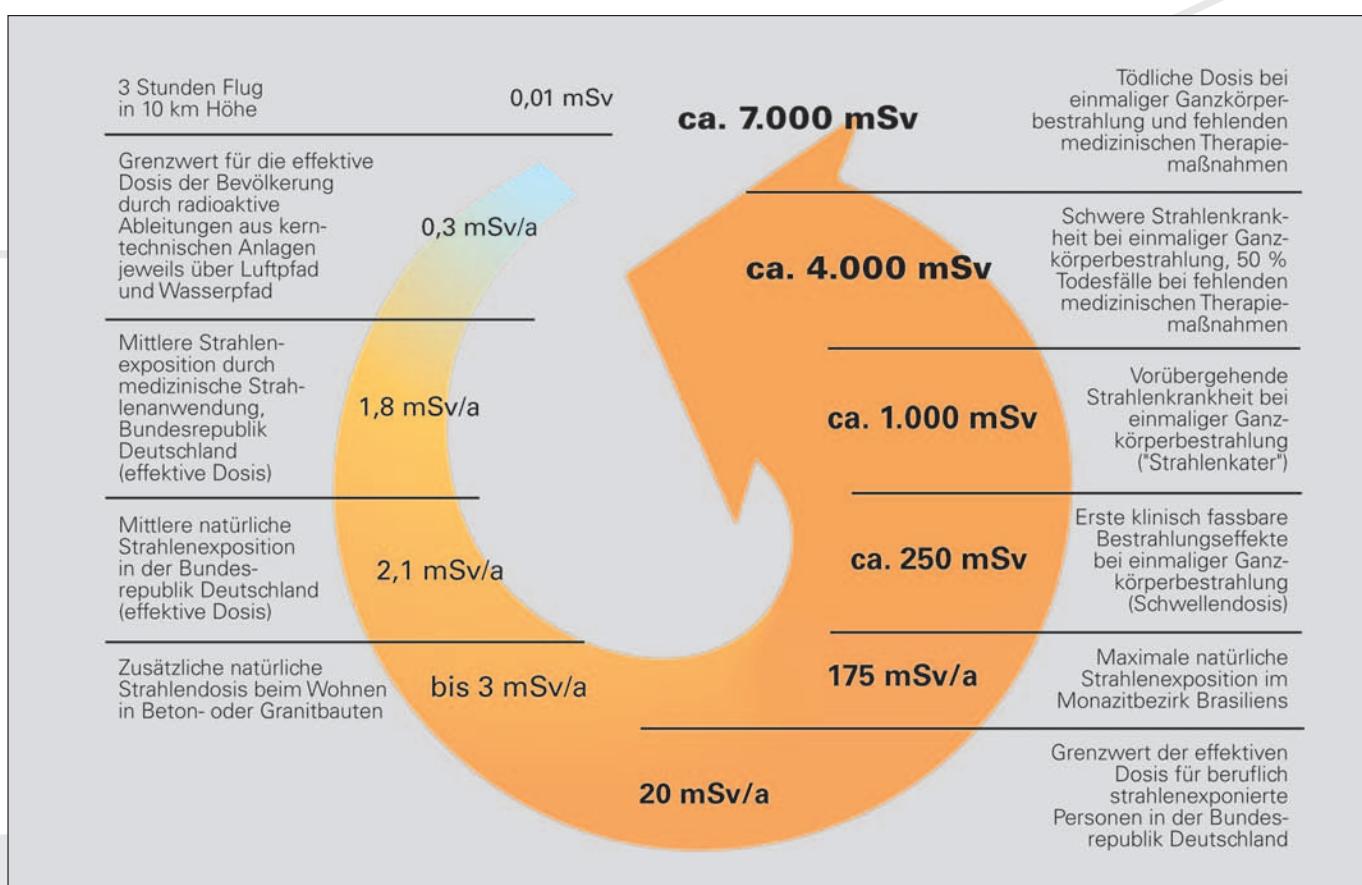


Abb. 9.5: Beispiele für Körperdosis-Leistungen und Körperdosen
(Die Angaben zu den Werten von 250 bis 7.000 mSv beschreiben somatische Strahlenfrühschäden. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit sind vereinfachend auch diese Dosen in der Einheit Sievert statt Gray angegeben.)

9.7 Natürliche Strahlenexposition des Menschen

Die ionisierende Strahlung, die in der Natur vorkommt, lässt sich auf verschiedene Quellen zurückführen:

- Aus dem Weltall trifft eine Teilchenstrahlung und energiereiche Photonenstrahlung auf die Erde (kosmische Strahlung).
- In der Erdatmosphäre werden durch die kosmische Strahlung ständig Radionuklide mit relativ kurzer Halbwertzeit neu gebildet.
- In der Erdmaterie sind natürliche Radionuklide mit langer Halbwertzeit vorhanden, die sich durch einen Zerfallschritt in inaktive Nuklide umwandeln.

9.7.1 Kosmische Strahlung und durch sie erzeugte Radionuklide

Von der Sonne und anderen Sternen trifft eine energiereiche Teilchenstrahlung auf die Lufthülle unserer Erde. Diese Strahlung besteht im Wesentlichen aus Protonen, also aus Wasserstoffkernen. Beim Zusammenprall mit den Molekülen der Lufthülle werden Atomkerne zertrümmert. Dabei entstehen neue Kerne und Teilchen, die weiterfliegen und z.T. weitere Kerne zertrümmern, bis ihre ursprüngliche Energie aufgebraucht ist. Am Erdboden ist nur die Strahlung zu beobachten, die durch vielfältige Sekundärprozesse entsteht. Sie besteht im Wesentlichen aus Protonen, Neutronen, Elektronen, Positronen, Gammaquanten (Photonen), Neutrinos und Mesonen. Mesonen sind Elementarteilchen, deren Masse zwischen der von Elektronen und Protonen liegt.

Die kosmische Strahlung wird von der Atmosphäre z.T. absorbiert. Daher nimmt ihre Intensität mit steigender Höhe

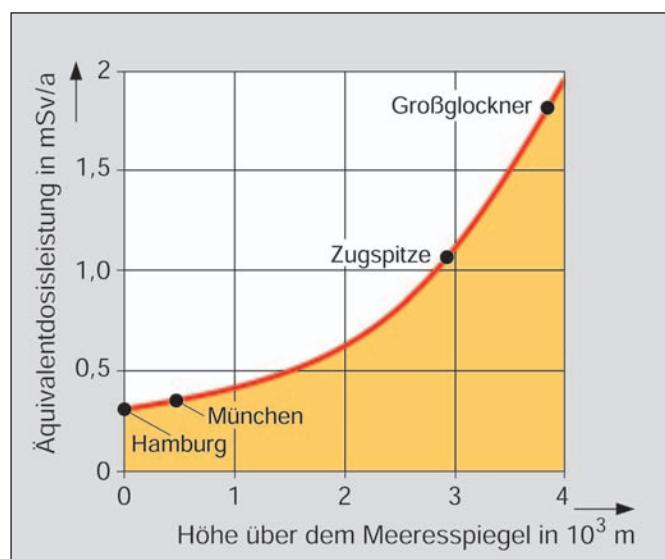


Abb. 9.6: Dosisleistung kosmischer Strahlung in Abhängigkeit von der Höhe über dem Meeresspiegel

über dem Meeresspiegel zu. Die Dosisleistung liegt in 1.000 m Höhe bei 0,4 mSv/a, in 3.000 m Höhe bei 1,1 mSv/a (Abb. 9.6).

In den oberen Schichten der Atmosphäre werden durch die sehr energiereiche kosmische Strahlung ständig radioaktive Isotope neu gebildet. Dies sind u.a. der radioaktive Wasserstoff ($H-3$) und der radioaktive Kohlenstoff ($C-14$), die durch Sedimentation, Konvektion oder Niederschläge auf die Erdoberfläche gelangen und zur Strahlenexposition des Menschen beitragen. $C-14$ entsteht in den oberen Schichten der Atmosphäre über eine Kernreaktion mit Neutronen aus $N-14$:



9.7.2 Terrestrische Strahlung

Die terrestrische Strahlung wird durch die in der Umgebung des Menschen vorhandenen natürlichen Radionuklide hervorgerufen. Dabei handelt es sich vor allem um radioaktive Nuklide, deren Halbwertzeiten größer als 10^9 Jahre sind oder um deren Folgeprodukte mit kürzeren Halbwertzeiten. Die wichtigsten Radionuklide, die in der Erde vorkommen, sind Thorium-232, Uran-238 und U-235. Sie zerfallen in mehreren Stufen zu inaktiven Bleisotopen (Tab. 9-3 und Abb. 9.8). Das wichtigste Radionuklid ohne Zerfallsreihe ist K-40, das sich zu 0,0117 % in jeder Kaliumverbindung befindet (Abb. 9.7).

Zerfallsreihe	Beginn	Ende
Thorium-Reihe	$^{232}_{90}Th$	$^{208}_{82}Pb$
Uran-Actinium-Reihe	$^{235}_{92}U$	$^{207}_{82}Pb$
Uran-Radium-Reihe	$^{238}_{92}U$	$^{206}_{82}Pb$

Tab. 9-3: Natürliche Radioaktivitätszerfallsreihen

In den drei Zerfallsreihen durchlaufen die Radionuklide die Kernladungszahl 86. Es treten damit verschiedene Radon-Isotope auf. Radon ist ein Edelgas, das teilweise aus dem Erdboden und aus dem Mauerwerk von Gebäuden austritt und dann in der Luft weiter zerfällt. Radon und seine Folgeprodukte führen vor allem zu einer erhöhten Strahlenexposition der Lunge.

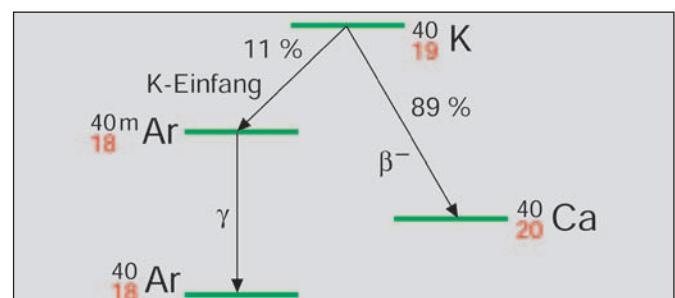


Abb. 9.7: Zerfallsschema für K-40

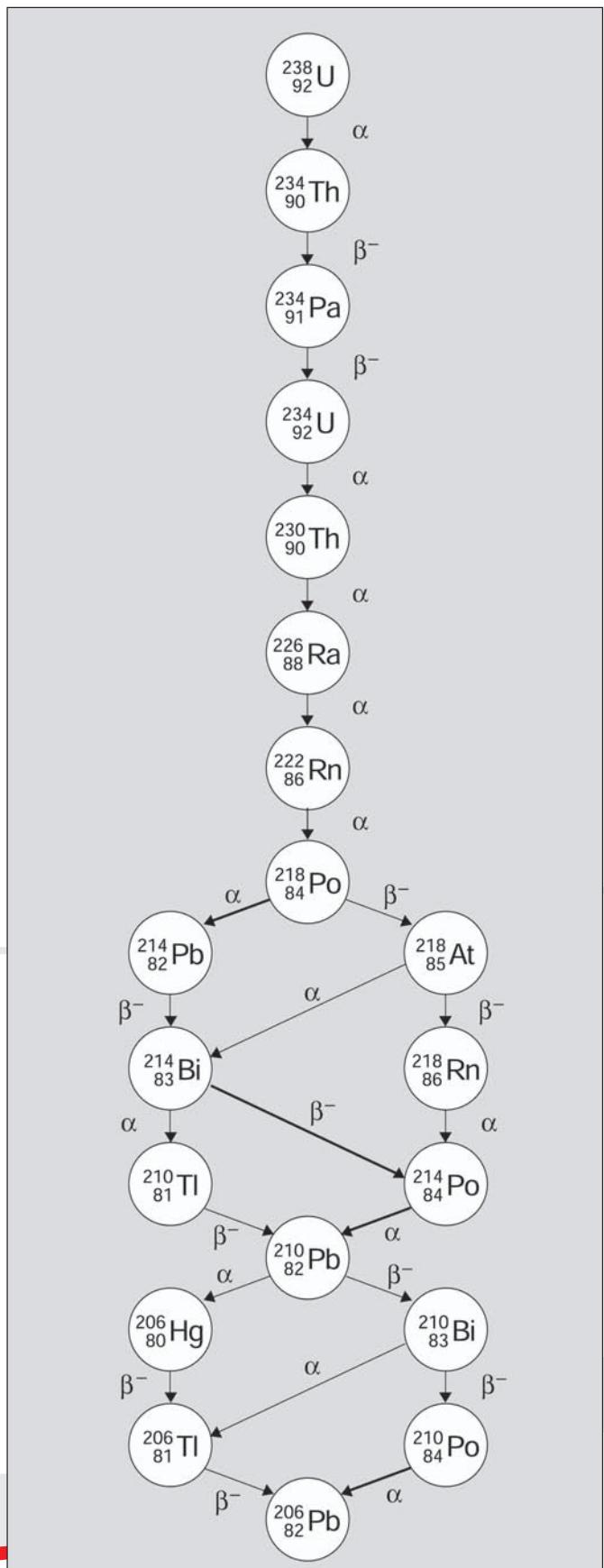


Abb. 9.8: Uran-Radium-Zerfallsreihe

Die Bestrahlung des Menschen durch die terrestrische Strahlung ist vom geologischen Untergrund und den verwendeten Baumaterialien abhängig. Die Tab. 9-4 gibt die Mittelwerte der terrestrischen Strahlenexposition bei einem Aufenthalt im Freien für die Bundesländer wieder. Die effektive Dosis liegt bei der äußeren Bestrahlung einschließlich der Strahlenexposition durch das Baumaterial unserer Häuser im Mittel bei 0,4 mSv/a.

Bundesland	Ortsdosisleistung in mSv
Baden-Württemberg	0,38
Bayern	0,42
Berlin	0,19
Brandenburg	0,18
Bremen	0,26
Hamburg	0,35
Hessen	0,37
Mecklenburg-Vorpommern	0,22
Niedersachsen	0,29
Nordrhein-Westfalen	0,36
Rheinland-Pfalz	0,42
Saarland	0,49
Sachsen	0,35
Sachsen-Anhalt	0,27
Schleswig-Holstein	0,32
Thüringen	0,39

Tab. 9-4: Ländermittelwerte der terrestrischen Strahlendosis im Freien

Es gibt Gebiete der Erde, in denen die terrestrischen Strahlendosen weit über den höchsten Werten der Bundesrepublik Deutschland liegen. Dabei handelt es sich um Gebiete, in denen der Boden oder das Gestein eine hohe Konzentration an Thorium bzw. Uran und deren Folgeprodukten aufweist. Solche Gebiete finden sich in Brasilien, Indien und Iran (Tab. 9-5).

Gebiet	Mittlere effektive Jahresdosis in mSv	Maximale Jahresdosis im Freien in mSv
Deutschland	0,4	5
Indien: Teilbereiche von Kerala und Tamil Nadu	4	55
Brasilien: Teilbereiche von Espírito Santo	6	175
Iran: Ramsar	6	860

Tab. 9-5: Terrestrische Strahlung in verschiedenen Gebieten

Nuklid	Aktivität in Bq
H-3	25
Be-7	25
C-14	3.800
K-40	4.200
Rb-87	650
U-238, Th-234, Pa-234m, U-234	4
Th-230	0,4
Ra-226	1
kurzlebige Rn-222-Zerfallsprodukte	15
Pb-210, Bi-210, Po-210	60
Th-232	0,1
Ra-228, Ac-228, Th-228, Ra-224	1,5
kurzlebige Rn-220-Zerfallsprodukte	30

Tab. 9-6: Natürliche radioaktive Stoffe im Menschen

9.7.3 Eigenstrahlung des Körpers

Das Trinkwasser, die pflanzliche und tierische Nahrung sowie die Luft enthalten natürliche Radionuklide, die vom Körper aufgenommen, aber auch durch den Stoffwechsel wieder ausgeschieden werden, so dass sich im Körper ein Gleichgewicht einstellt.

Die Gesamtaktivität des menschlichen Körpers (Standardmensch) beträgt etwa 9.000 Bq (Tab. 9-6). Das bedeutet, dass in 1 Sekunde etwa 9.000 Kernumwandlungen stattfinden und dabei 9.000 Strahlungsteilchen oder Energiequanten ausgesandt werden. Am Tag sind es über 700 Millionen. Da sich die resorbierten Radionuklide an unterschiedlichen Stellen im Körper ablagern, ist die Aktivität nicht gleichmäßig im Körper verteilt.

Die Strahlenexposition von innen wird im Wesentlichen durch das inkorporierte Kalium-40 und das inhalierte Radon (einschließlich seiner Folgeprodukte) verursacht. Die effektive Dosis beträgt im Jahr im Mittel 1,4 mSv.

9.7.4 Gesamtbetrag der natürlichen Strahlenexposition

Für Einwohner der Bundesrepublik Deutschland beträgt die natürliche Strahlenexposition im Mittel 2,1 mSv/a. Bei der natürlichen Strahlenexposition macht die äußere Bestrahlung des Menschen ein Drittel, die innere Bestrahlung zwei Drittel aus. Dabei liefern das eingearmete Radon und seine Folgeprodukte den größten Beitrag (Tab. 9-7).

Exposition durch	jährliche effektive Dosis in mSv		
	Bestrahlung von außen	Bestrahlung von innen	gesamt
kosmische Strahlung			
ionisierende Komponente	0,26		
Neutronen	0,04		
			{ 0,3
kosmogene Radionuklide*		0,02	0,02
primordiale Radionuklide**	0,16	0,17 0,005	{ 0,33
K-40			
Rb-87			
U-238-Reihe:			
U-238 → Ra-226		0,02	
Rn-222 → Po-214		1,1	
Pb-210 → Po-210		0,05	
	{ 0,12		{ 1,3
Th-232-Reihe:			
Th-232 → Ra-224		0,01	
Rn-220 → Tl-208		0,05	
	{ 0,14		{ 0,2
Summe (gerundet)	0,7	1,4	2,1

* Radionuklide, die durch die kosmische Strahlung in der Atmosphäre ständig erzeugt werden

** Radionuklide, die seit der Erdentstehung existieren

Tab. 9-7: Mittlere natürliche Strahlenexposition in Deutschland

9.8 Zivilisatorisch bedingte Strahlenexposition des Menschen

Außer der natürlichen Strahleneinwirkung sind die Menschen einer zivilisatorisch bedingten Strahleneinwirkung ausgesetzt. Sie kommt im Wesentlichen durch folgende Anwendungen zustande:

- Strahleneinsatz in der Medizin,
- Reaktorunfall von Tschernobyl,
- Kernwaffenversuche,
- Anwendungen ionisierender Strahlen in Wissenschaft, Technik und Haushalt,
- Flugverkehr,
- Betrieb von Kernkraftwerken und anderen kerntechnischen Anlagen.

9.8.1 Strahlenexposition durch Anwendung ionisierender Strahlen und radioaktiver Stoffe in der Medizin

Die Anwendung der Röntgenstrahlen in der medizinischen Diagnostik führt zu einer Strahlenexposition des Menschen. Sie ist von der Art und dem Umfang der durchgeführten Untersuchung abhängig. Tab. 9-8 gibt dafür einige Orientierungswerte. In Deutschland werden im Mittel etwa zwei Röntgenuntersuchungen pro Person und Jahr durchgeführt. Daraus ist eine mittlere effektive Jahresdosis für den einzelnen Einwohner von etwa 2 mSv errechnet worden.

Untersuchungsart	effektive Dosis, mSv
CT Bauchraum	30
CT Brustkorb	20
CT Wirbelsäule	9
CT Kopf	2,5
Dickdarm	20
Schlagaderdarstellung	20
Dünndarm	16
Magen	9
Harntrakt	5
Lendenwirbelsäule	2
Becken	1
Brustkorb	0,3
Zahn	0,01
CT = Computer-Tomographie	

Tab. 9-8: Gerundete Mittelwerte der effektiven Dosis für einige Röntgenuntersuchungen

In der Therapie werden Röntgenstrahlen eingesetzt, um z. B. die Zellen bösartiger Tumore zu bestimmen und dadurch abzutöten. Die Dosis wird dabei so hoch gewählt, dass die kranken Zellen abgetötet werden (Abb. 9.9). Die Energiedosis im Zielgewebe ist sehr viel höher als bei der Diagnostik und beträgt bis zu 60 Gy.

Bei nukleärmedizinischen Untersuchungen wird dem Patienten eine radioaktive Substanz verabreicht, die vom Körper resorbiert und in bestimmte Organe transportiert wird. Da die Substanz Strahlen aussendet, ist ihr Weg im Körper und die Stellen erhöhter Konzentration von außen gut zu verfolgen. Aus der Aufnahmefähigkeit und der Konzentration im Organ oder Teilen davon lassen sich Rückschlüsse auf die Organfunktion ziehen oder auch Tumore erkennen.

Die verabreichten Substanzen enthalten radioaktive Isotope, die eine möglichst kurze Halbwertzeit besitzen, nicht zu lange im Körper gespeichert werden und deren Strahlung nicht zu energiereich ist. Dies setzt voraus, dass besonders empfindliche Messverfahren zur Verfügung stehen.

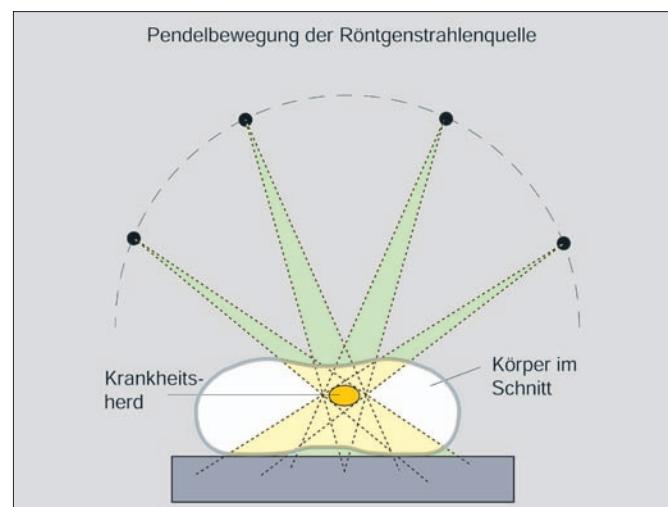


Abb. 9.9: Prinzip der Pendelbestrahlung

In welches Organ ein bestimmtes Radionuklid transportiert wird, ist davon abhängig, in welche chemische Verbindung es eingebaut worden ist.

Der Dosisbeitrag durch die Nuklearmedizin für die Bevölkerung ist gering und beträgt nur wenige Prozent des Wertes, der für die Röntgendiagnostik gilt.

Nach dem gleichen Verfahren lassen sich auch Therapiemaßnahmen durchführen. Da elementares Iod fast ausschließlich in der Schilddrüse gespeichert wird, kann durch verabreichtes radioaktives Iod z. B. ein Schilddrüsentumor zerstört werden. Die von radioaktivem Iod ausgesandten Beta-Teilchen haben im Gewebe nur eine geringe Reichweite, so dass sie praktisch nur auf die Schilddrüse selbst einwirken.

9.8.2 Strahlenexposition durch den Reaktorunfall von Tschernobyl

Der Reaktorunfall von Tschernobyl am 26. April 1986 wurde durch Fehlbedienungen der Reaktorregelung ausgelöst. Dabei kam es zu einem so großen Temperaturanstieg in den Brennelementen, dass diese schmolzen. Der dadurch entstehende sehr hohe Wasserdampfdruck ließ die Druckrohre, in denen sich auch die Brennelemente befanden, platzen. Der Moderator Graphit geriet in Brand.

Aus dem zerstörten Reaktor gelangten Radionuklide ins Freie. Ein Großteil der Radionuklide hat zu einer hohen Kontamination der Umwelt in einer 30-km-Zone um den Reaktor geführt. Durch die Brände wurden radioaktive Stoffe in Höhen von 1 bis 2 km transportiert und z. T. über weite Gebiete verteilt.

Durch meteorologische Einflüsse bedingt sind die aus der radioaktiven Wolke abgelagerten Aktivitätsmengen in den Regionen der Bundesrepublik sehr unterschiedlich – im Norden und Westen deutlich geringer als im Süden und Südosten. Daher ist keine bundeseinheitliche Darstellung

hinsichtlich der resultierenden Strahlendosis, die zudem noch stark von der individuellen Ernährungsgewohnheit abhängt, möglich.

Die Strahlenexposition in Deutschland betrug für Kleinkinder, für die sich gegenüber Erwachsenen generell höhere Dosiswerte errechnen, für das Jahr des Unfalls zwischen 0,1 mSv in Gebieten nördlich der Donau und 1,5 mSv für Bereiche des Voralpengebietes.

Berechnet man die entsprechende Dosis für die nächsten 50 Jahre, so ergibt sich ein Gesamtbetrag von 0,4 mSv im Norden und 2,3 mSv in den Voralpen. Für Einzelpersonen mit extremen Lebens- und Verzehrgewohnheiten können sich maximale Dosiswerte bis zum Zwei- oder Dreifachen dieser Werte ergeben.

In den durch den Unfall betroffenen Gebieten der Ukraine und Belarus zeigte sich bei Kindern und Jugendlichen ein deutlicher Anstieg der Schilddrüsenkrebskrankungen, der auf die Strahlenexposition zurückzuführen ist. Verantwortlich dafür ist vor allem die Aufnahme von Iod-131 über die Nahrungskette, das zu hohen Strahlendosen in der Schilddrüse führte. In den betroffenen Gebieten sind bisher ungefähr viertausend Fälle von Schilddrüsenkrebskrankungen, vor allem bei Kindern und Jugendlichen zur Zeit des Unfalls, aufgetreten. Die Heilungschancen bei dieser Erkrankung sind sehr hoch, nach dem Bericht der Weltgesundheitsorganisation (WHO) von 2006 sind bis heute neun Personen an dieser Erkrankung verstorben.

9.8.3 Strahlenexposition durch Kernwaffentests

Kernwaffenexplosionen erzeugen sehr große Radioaktivitätsmengen an Spalt- und Aktivierungsprodukten. Neben diesen Spalt- und Aktivierungsprodukten haben für die Strahlenexposition auch noch die bei der Explosion aus dem Uran-238 entstehenden Plutoniumisotope Pu-239, Pu-240 und Pu-241 sowie der Teil des ungespalten gebliebenen Bombenmaterials Pu-239 eine Bedeutung.

Bis heute wurden 543 Kernwaffen oberirdisch, d. h. mit einer Freisetzung der radioaktiven Stoffe in die Atmosphäre, gezündet. Die nach Zahl und Sprengkraft größten Versuchsserien wurden in den Jahren 1961/62 durch die USA und die Sowjetunion mit 128 Explosionen durchgeführt.

Die Strahlenexposition der Bevölkerung durch den radioaktiven Fallout folgt aus einer externen Bestrahlung durch die auf dem Boden abgelagerte Radioaktivität und durch die interne Strahlendosis infolge Inhalation oder den Verzehr von kontaminierten Nahrungsmitteln.

Für Personen in Mitteleuropa ergibt sich für den Zeitraum von 1960 bis 2050 im Mittel eine effektive Dosis von rund 2 mSv; rund 80 % dieser Dosis sind in den Jahren von 1960 bis 1970 angefallen.

Die Abb. 9.10 zeigt die Ergebnisse von Messungen des Cs-137-Gehaltes im Körper, die an einer Referenzpersonengruppe mit dem Ganzkörperzähler des Forschungszentrums Karlsruhe ermittelt wurden.

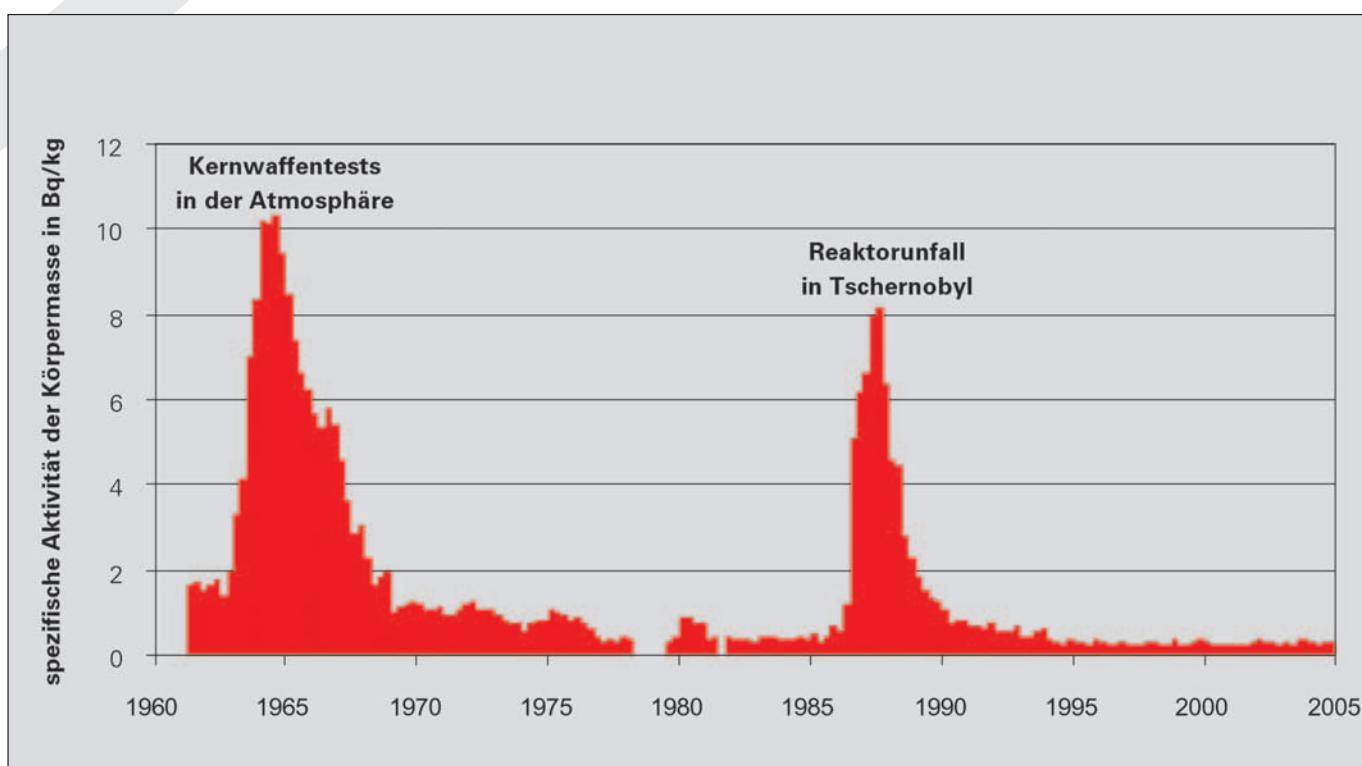


Abb. 9.10: Cs-137-Körperaktivität der Karlsruher Referenzgruppe

9.8.4 Strahlenexposition durch Flugverkehr

Eine erhöhte Strahlenexposition durch die kosmische Strahlung tritt bei Flügen in größeren Höhen auf. Zurzeit findet der Massenlufttransport in Höhen von 7 bis 12 km statt. Dadurch erhöht sich die durch kosmische Strahlung hervorgerufene Exposition der westeuropäischen Bevölkerung im Mittel um 0,005 mSv/a. Für einzelne Flugstrecken können folgende Werte als Anhaltspunkt dienen:

Frankfurt – New York – Frankfurt	0,1	Millisievert
Frankfurt – Singapur – Frankfurt	0,06	Millisievert
Frankfurt – Palma de Mallorca – Frankfurt	0,006	Millisievert

Die Strahlenexposition der Crew von Düsenflugzeugen durch kosmische Strahlung für die üblichen Flughöhen und die verschiedenen Flugrouten wird zurzeit intensiv untersucht.

Bei Flugrouten in geomagnetischen Breiten von 50° N und mehr, Flugzeiten des Personals von 600 h pro Jahr und durchschnittlichen Flughöhen von 10 km wird eine effektive Dosis von unter 3 mSv pro Jahr abgeschätzt.

9.8.5 Strahlenexposition durch Bildschirmgeräte

Beim Betrieb von Bildschirm- und Fernsehgeräten entsteht betriebsbedingt in der Bildröhre Röntgenstrahlung. Der größte Teil dieser Strahlung wird vom Glas der Bildröhre absorbiert. Der außerhalb des Gerätes noch vorhandene Anteil dieser Strahlung ist sehr gering.

Messungen des Forschungszentrums Karlsruhe ergaben, dass dieser Teil der betriebsbedingten Röntgenstrahlung viel geringer ist als die Strahlung der Geräte aufgrund der natürlichen radioaktiven Stoffe im Bildschirm selbst.

Natürliche Umgebungsstrahlung (im Mittel)		100.000 pSv/h
Bildschirmgerät (Arbeitsabstand 0,5 m)		
– betriebsbedingte Röntgenstrahlung		6 pSv/h
– Gammastrahlung natürlicher radioaktiver Stoffe in Bildröhre und Leuchtstoffen		1.200 pSv/h
Farbfernseher (Betrachtungsabstand 3 m)		
– betriebsbedingte Röntgenstrahlung		2 pSv/h
– Gammastrahlung natürlicher radioaktiver Stoffe in Bildröhre und Leuchtstoffen		100 pSv/h
Zeitschriften (Leseabstand 0,35 m)		
– Gammastrahlung von Ra- und Th-Folgeprodukten		30 pSv/h

(pSv = Piko-Sievert, 1pSv = 10^{-12} Sv)

Tab. 9-9: Strahlenexposition durch Bildschirmgeräte, Fernsehgeräte und Zeitschriften, die Exposition durch die natürliche Umgebungsstrahlung ist zum Vergleich angegeben

Die Ergebnisse sind zusammen mit Messwerten über die Strahlenexposition durch Zeitschriften infolge der natürlich radioaktiven Stoffe im Papier in Tab. 9-9 zusammengefasst.

9.8.6 Strahlenexposition durch Kernkraftwerke

Bei den in einem Kernkraftwerk arbeitenden Personen kommt es im Wesentlichen zu einer äußeren Strahleneinwirkung. Für die übrige Bevölkerung ist praktisch nur die Strahleneinwirkung von Bedeutung, die aufgrund inkorporierter Radionuklide aus radioaktiven Ableitungen der Kernkraftwerke entsteht. Es kommt also im Wesentlichen zu einer internen Strahlenexposition.

Zum Schutz des Kraftwerkspersonals und der Bevölkerung hat der Gesetzgeber in der Strahlenschutzverordnung Dosisgrenzwerte festgelegt, die nicht überschritten werden dürfen. Diese Grenzwerte schließen die natürliche und die medizinische Strahlenexposition nicht ein.

Für beruflich strahlenexponierte Personen beträgt der Grenzwert der effektiven Dosis 20 Millisievert je Jahr. Für Personen, die außerhalb der Strahlenschutzbereiche eines Kernkraftwerks leben oder arbeiten, darf die effektive Körperdosis durch die Ableitung radioaktiver Stoffe für jeden der Expositionspfade Wasser und Luft den Wert von 0,3 mSv/a nicht überschreiten.

Die tatsächlich für die Bevölkerung durch den Betrieb der Kernkraftwerke in Deutschland auftretenden Strahlenexpositionen (Abb. 9.11 und 9.12) liegen deutlich unter diesen Grenzwerten.

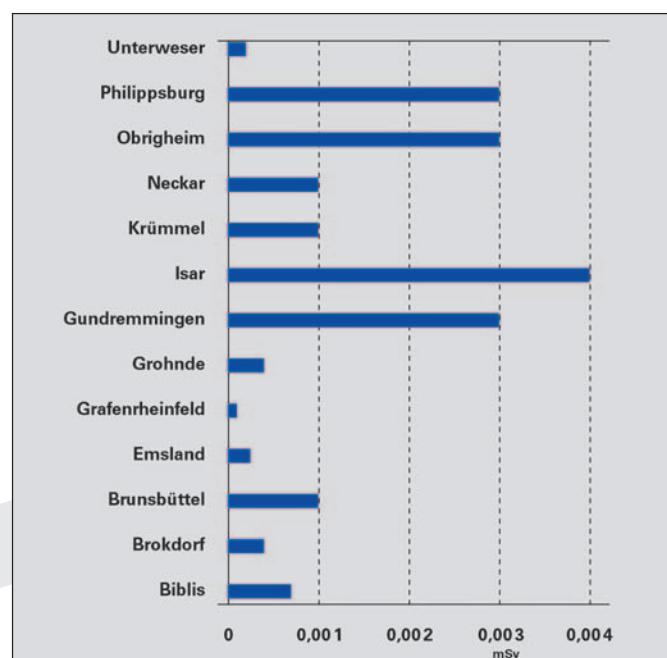


Abb. 9.11: Effektive Folgedosis an der ungünstigsten Einwirkungsstelle außerhalb von Kernkraftwerken durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft im Jahr 2005

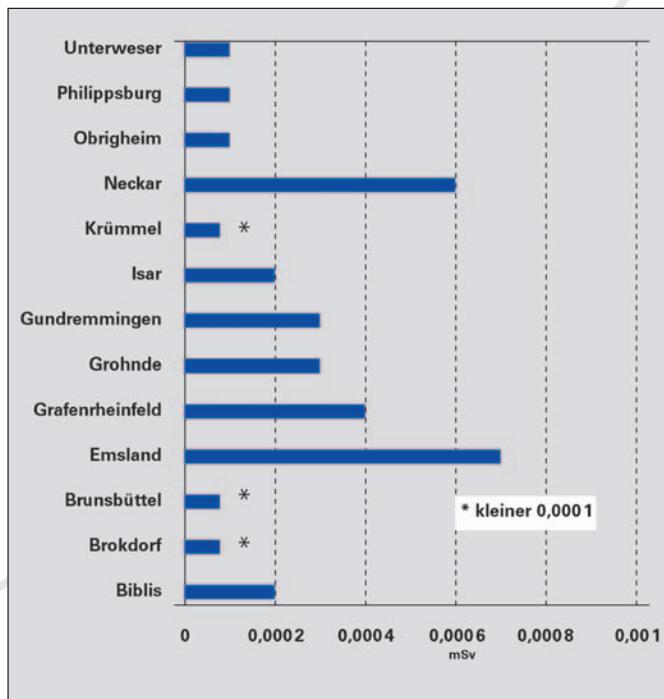


Abb. 9.12: Effektive Folgedosis an der ungünstigsten Einwirkungsstelle außerhalb von Kernkraftwerken durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser im Jahr 2005

9.9 Zusammenfassung der Strahlenexposition

Die natürliche Strahlenexposition des Menschen setzt sich aus der externen Exposition durch die kosmische und terrestrische Strahlung und der internen Exposition durch inkorporierte Radionuklide zusammen.

Die zivilisatorische Strahlenexposition wird fast ausschließlich durch die Anwendung ionisierender Strahlen und radioaktiver Stoffe in der Medizin – überwiegend durch die Röntgendiagnostik – bestimmt.

Weitere Beiträge stammen von nuklearen Unfällen, Kernwaffentests, Flugreisen, beruflicher Strahlenexposition, Kernkraftwerken, fossilen Energieträgern und Industrieprodukten.

Die effektive Dosis aus allen natürlichen und künstlichen Strahlenquellen beträgt für einen Einwohner in Deutschland im Mittel 3,9 mSv/a (siehe Abb. 9.13 und Tab. 9-10). Diese Dosis stammt etwa jeweils zur Hälfte aus der natürlichen und medizinischen Strahlenexposition.

Gegenüber den Beiträgen zur Strahlendosis durch natürliche Exposition und Medizin und insbesondere unter Berücksichtigung der nicht unerheblichen Streuung dieser Dosiswerte sind alle anderen Dosisbeiträge faktisch zu vernachlässigen.

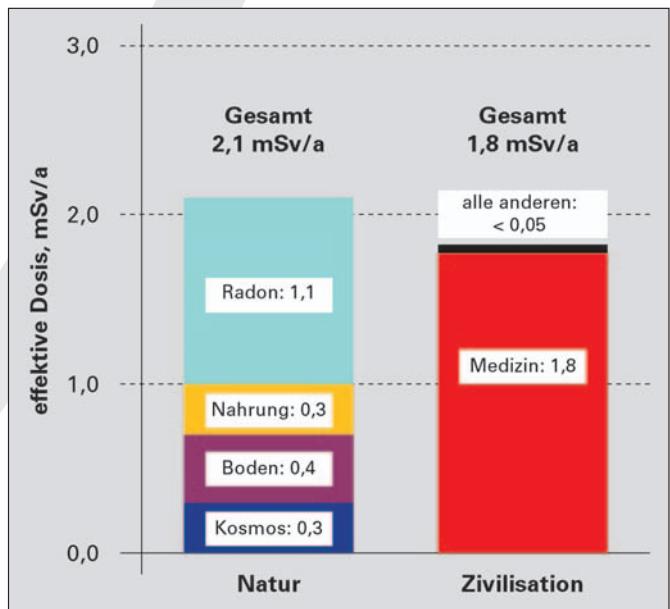


Abb. 9.13: Mittlere natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition in Deutschland

Ursachen der Strahlendosis	effektive Dosis in mSv/a Mittelwert für Bevölkerung	typ. Wertebereich für exponierte Einzelpersonen
Natur:		
kosmische Strahlung	0,3	0,3 bis 0,5
terrestrische Strahlung	0,4	0,2 bis 3
innere Bestrahlung	1,4	0,5 bis 8
Natur gesamt	2,1	
Zivilisation:		
Medizin	1,8	0,01 bis 30
Erhöhung der natürlichen Dosis durch industrielle Tätigkeit	0,01	0,1 bis 2
Tschernobyl-Unfall	0,01	0,005 bis 0,04
Kernwaffentests	0,005	0,002 bis 0,01
Flugreisen	0,005	0,01 bis 5
Industrieprodukte	0,001	0,1 bis 1
fossile Energieträger	0,002	0,001 bis 0,01
Kernkraftwerke	0,001	0,001 bis 0,01
Beruf	0,3*	0,2 bis 15
Zivilisation gesamt	1,8	
gesamt	3,9	

* nur bezogen auf die beruflich exponierten Personen

Tab. 9-10: Strahlenexposition der Bevölkerung in Deutschland

10 Übungsaufgaben zu den Kapiteln 1 - 9

10.1 Das Atom

1. Wie nennt man die kleinsten Teilchen eines chemischen Elements?

- Moleküle
- Atome
- Protonen

10. Wodurch unterscheiden sich die Atomkerne verschiedener chemischer Elemente voneinander?

- Durch die Neutronenzahl
- Durch die Massenzahl
- Durch die Kernladungszahl

2. Wie viele Wasserstoffatome würden aneinander gereiht eine Strecke von etwa 1 mm ergeben?

Etwa

- 1.000 Wasserstoffatome
- 10.000 Wasserstoffatome
- 10.000.000 Wasserstoffatome

3. Woraus besteht der Kern eines Atoms?

- Elektronen und Neutronen
- Protonen und Elektronen
- Protonen und Neutronen

4. Welche Teilchen bilden die Hülle des Atoms?

- Elektronen
- Protonen
- Neutronen

5. Durch die Massenzahl wird angegeben, wie viele Neutronen, Protonen, Neutronen und Protonen, ein Atomkern enthält.

6. Die Kernladungszahl gibt die Anzahl der Neutronen,

- Anzahl der Protonen,
- Anzahl der Protonen und Neutronen an.

7. Was gilt für die Anzahl der positiv geladenen Protonen und der negativ geladenen Elektronen, wenn sich ein Atom im ungeladenen Zustand befindet?

- Protonenzahl größer als Elektronenzahl
- Protonenzahl kleiner als Elektronenzahl
- Protonenzahl gleich Elektronenzahl

8. Was geschieht, wenn aus der Hülle eines Atoms ein Elektron entfernt wird?

- Das Atom wird zum positiven Ion.
- Das Atom wird zum negativen Ion.
- Das Atom zerfällt.

9. Was geschieht, wenn ein Atom ein zusätzliches Elektron in seine Hülle aufnimmt?

- Das Atom gibt dafür ein Proton ab.
- Das Atom wird zum positiven Ion.
- Das Atom wird zum negativen Ion.

10. Wodurch unterscheiden sich die Atomkerne verschiedener chemischer Elemente voneinander?

- Durch die Neutronenzahl
- Durch die Massenzahl
- Durch die Kernladungszahl

11. Worin unterscheiden sich die Isotope eines Elements?

- In der Anzahl der Neutronen
- In der Anzahl der Protonen
- In der Anzahl der Elektronen

12. Die positiv geladenen Protonen eines Atomkerns stoßen einander ab. Wodurch wird verhindert, dass der Kern auseinander fällt?

- Die negativen Ladungen der Elektronenhülle wirken dagegen.
- Zwischen den Nukleonen (Kernteilchen) sind starke Kernkräfte wirksam.
- Die Neutronen neutralisieren die Ladungen der Protonen.

13. Die Reichweite der Kernkräfte

- ist im Prinzip unendlich groß,
- erfasst gerade eben noch den äußeren Bereich der Elektronenhülle ($\approx 10^{-10}$ m),
- ist extrem kurz ($\approx 10^{-15}$ m).

14. Was geschieht, wenn z. B. zwei Protonen und zwei Neutronen zu einem Heliumkern zusammengefügt werden?

- Zur Stabilisierung fängt der Kern zusätzlich Hüllenelektronen ein.
- Ein kleiner Teil der Nukleonenmasse wird in Energie umgewandelt und diese wird abgestrahlt.
- Der Kern nimmt aus der Umgebung Energie auf, um die Teilchen zusammenhalten zu können.

15. Was gibt der Massendefekt an, der beim Zusammenschluss von Nukleonen zu einem Atomkern auftritt?

- Energie, mit der die Nukleonen im Kern gebunden sind.
- Die Masse des Atoms, abzüglich der Masse der Hüllenelektronen.
- Die Masse der bei der Ionisation verloren gegangenen Elektronen.

16. Bei welchen Nukliden ist die Bindungsenergie je Nukleon am geringsten?

- Bei den leichtesten Nukliden
- Bei den schwersten Nukliden
- Bei den mittelschweren Nukliden

- 17. In welcher Größenordnung liegt die Bindungsenergie je Nukleon (von den leichtesten Nukliden abgesehen)?**
- Sie liegt zwischen
- 7 eV und 9 eV,
1 MeV und 3 MeV,
7 MeV und 9 MeV.
-
- 18. Durch welche Gleichung wird die Äquivalenz von Masse und Energie beschrieben?**
- $E = m \cdot c$
 $E = m \cdot c^2$
 $E = \frac{m}{c^2}$
-
-

10.2 Kernumwandlungen und Radioaktivität

- 1. Wie nennt man Atome, die ohne Einwirkung von außen Strahlen aussenden?**
- Ionisiert
Radioaktiv
Elektrisch geladen
-
- 2. Wie nennt man die Kerne radioaktiver Atome?**
- Radionuklide
Isotope
Nuklide
-
- 3. Welche Eigenschaft der Strahlen, die von radioaktiven Atomkernen ausgesandt werden, benutzt man zu ihrer genaueren Bezeichnung? Die Eigenschaft,**
- dünne Materialschichten zu durchdringen,
Stoffe zu ionisieren,
durch ein Magnetfeld abgelenkt zu werden.
-
- 4. Woraus bestehen Alphateilchen? Aus**
- 2 Protonen,
2 Neutronen,
2 Protonen und 2 Neutronen.
-
- 5. Wie groß ist die Anfangsgeschwindigkeit der aus radioaktiven Atomkernen austretenden Alphateilchen?**
- Etwa 1.500 km/s
Etwa 15.000 m/s
Etwa 15.000 km/s
-
- 6. In welche Teilchen kann ein Neutron zerfallen?**
- In 2 Elektronen
In 1 Proton und 1 Elektron
In 2 Protonen
-
- 7. Was sind Betaeilchen?**
- Protonen
Neutronen
Elektronen
-
- 8. In welchem Bereich liegt die Austrittsgeschwindigkeit von Betateilchen, die aus Kernen radioaktiver Atome ausgesandt werden?**
- 10.000 m/s bis 15.000 m/s
10.000 km/s bis 15.000 km/s
0 m/s bis fast 300.000 km/s
-
- 9. Gammastrahlen sind elektromagnetische Wellen. Wie werden sie aus dem Atomkern abgegeben?**
- In einzelnen Energieportionen (Quanten)
Als fortlaufender (kontinuierlicher) Energiestrom
Als elektrische Entladung
-
- 10. Wie groß ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Gammaquanten?**
- Ungenaehr
300.000 m/s
300.000 km/s
300.000 km/h
-
- 11. Beim K-Einfang wird**
- ein Proton von der Atomhülle eingefangen,
ein Hüllenelektron vom Kern eingefangen,
ein Hüllenelektron von einem Nachbaratom eingefangen.
-
- 12. Die Halbwertzeit gibt die Zeit an, in der**
- die Hälfte,
ein Viertel,
ein Zehntel
- der zu Beginn vorhandenen radioaktiven Atome zerfallen sind.**
-
- 13. Zu Beginn eines Versuchs sind 12.000.000 Atome radioaktiv. Wie viele Atome sind nach Ablauf zweier Halbwertzeiten insgesamt zerfallen?**
- 6.000.000 Atome
3.000.000 Atome
9.000.000 Atome
-
- 14. Was wird durch die Aktivität angegeben?**
- Anzahl der Kernumwandlungen
Anzahl der Kernumwandlungen pro Zeit
Anzahl der Kernumwandlungen pro Masse
-
- 15. In welcher Einheit misst man die Aktivität?**
- Ampere (A)
Joule (J)
Becquerel (Bq)
-

- 16. Ein radioaktiver Strahler besitzt eine Aktivität von 5.000 Bq. Wie viele Kernumwandlungen finden in 1 min statt?**
- 300.000
5.000
60
- 17. 1 µg Cs-137 hat eine Aktivität von etwa $3,2 \cdot 10^6$ Bq. Welche spezifische Aktivität ergibt sich, wenn dieses 1 µg in 1 t Wasser aufgelöst wird?**
- $3,2 \cdot 10^6$ Bq/g
 $3,2 \cdot 10^6$ Bq/kg
3,2 Bq/g

10.3 Das Wesen der Energie

- 1. Was benötigt man, um eine physikalische Arbeit zu verrichten?**
- Elektrische Spannung
Energie
Geschwindigkeit
- 2. In welcher Einheit misst man die Energie?**
- Ampere (A)
Newton (N)
Joule (J)
- 3. In welcher Einheit misst man die Energie bei Kernreaktionen?**
- Joule (J)
Kilowattstunden (kWh)
Elektronvolt (eV)
- 4. Was geschieht beim Verrichten einer physikalischen Arbeit?**
- Ein Stoff wandelt sich in einen anderen um.
Die beteiligten Körper laden sich elektrisch auf.
Es wird eine Energieform in eine andere umgewandelt.
- 5. Durch den Wirkungsgrad wird angegeben:**
- | | | |
|-------------------------|--|-----------------------------|
| <u>nutzbare Energie</u> | | <u>aufgewendete Energie</u> |
|-------------------------|--|-----------------------------|
- 6. Welche Aussage über den Wirkungsgrad von Geräten und Maschinen ist richtig? Der Wirkungsgrad ist immer**
- größer als 1,
gleich 1,
kleiner als 1.
- 7. Wie groß ist etwa der Gesamtwirkungsgrad eines Kernkraftwerks?**
- 0,95
0,61
0,34
- 8. Welche Energie steht bei einem Kohlekraftwerk am Anfang der Energieumwandlungskette?**
- Wärmeenergie
Kernenergie
Chemische Energie
- 9. Welche Energie steht bei einem Kernkraftwerk am Anfang der Energieumwandlungskette?**
- Wärmeenergie
Kernenergie
Chemische Energie
- 10. In welchem Teil eines Kohle- oder Kernkraftwerks wird potenzielle Energie (Spannenergie) in Bewegungsenergie umgewandelt?**
- Turbine
Kondensator
Generator
- 11. In welchem Teil eines Kohle- oder Kernkraftwerks wird Bewegungsenergie in elektrische Energie umgewandelt?**
- Turbine
Kondensator
Generator
- 12. In welcher Form treten in Kohle- und Kernkraftwerken Energieverluste auf?**
- Als elektrische Energie
Als Wärmeenergie
Als Bewegungsenergie
- 13. In welchem Zustand befinden sich die kleinsten Teilchen eines Stoffs bei -273,15 °C?**
- Sie sind
in dauernder Bewegung,
in Ruhe,
in innerer Umwandlung.
- 14. Was geschieht mit den kleinsten Teilchen eines Stoffs, wenn seine Temperatur steigt?**
- Die kleinsten Teilchen
ziehen sich stärker an,
verformen sich stärker,
bewegen sich heftiger.

- 15. Die innere Energie eines Stoffs ist**
 die chemische Energie des Stoffs,
 die Energie, die in Form
 der Teilchenbewegung vorliegt,
 die Energie der Atomkerne.
- 16. Wie gelangt bei einem Kernkraftwerk die Wärme aus den heißen Brennstäben in das Kühlmittel Wasser?**
 Durch Wärmestrahlung
 Durch Stöße zwischen den kleinsten Teilchen von UO₂, Brennstabhülle und Wasser
 Durch Gammastrahlung
- 17. Ausgeschleuderte Alphateilchen werden an den umgebenden Atomen abgebremst. Was tritt dabei ein?**
 Die Atome werden elektrisch aufgeladen.
 Die Atome zerplatzen in mehrere Bruchstücke.
 Die Atome bewegen sich heftiger (Temperaturanstieg).
- 18. Welcher Zusammenhang besteht bei Alphateilchen zwischen ihrer Geschwindigkeit und ihrer Energie?**
 Die Teilchenenergie steigt mit wachsender Geschwindigkeit.
 Die Teilchenenergie sinkt mit wachsender Geschwindigkeit.
 Die Teilchenenergie ist unabhängig von der Geschwindigkeit.
- 19. Wie groß ist etwa die Geschwindigkeit thermischer Neutronen, die bei der Kernspaltung eingesetzt werden?**
 2.000 m/s
 2.000 m/min
 2.000 km/s
- 20. Was geschieht mit einem Atomkern, der ein Alphateilchen aussendet?**
 Er verformt sich.
 Er lädt sich elektrisch auf.
 Er erfährt einen Rückstoß.

10.4 Kernspaltung und Kettenreaktion

- 1. Welches natürliche Uranisotop wird für Kernspaltungen in Reaktoren verwendet?**
 Uran-234
 Uran-235
 Uran-238
- 2. Wie hoch ist der Gehalt an Uran-235 im natürlichen Uran?**
 0,7 %
 10,0 %
 50,0 %
- 3. Welchen Anteil an Uran-235 besitzt angereichertes Uran, das in Kernkraftwerken verwendet wird?**
 1 – 2 %
 3 – 4 %
 8 – 10 %
- 4. Durch welches Teilchen wird die Spaltung eines Urankerns ausgelöst?**
 Elektron
 Proton
 Neutron
- 5. Was geschieht mit einem Urankern bei der Spaltung?**
 Zerfall in 2 Trümmerkerne und Neutronen
 Zerfall in viele Trümmerkerne
 Zerfall in Protonen und Neutronen
- 6. In welchem Jahr wurde durch die beiden deutschen Chemiker Hahn und Strassmann die Spaltung eines Kerns U-235 erstmals nachgewiesen?**
 1932
 1938
 1945
- 7. Bei einer Kernspaltung entstehen zwei Trümmerkerne. Welche Teilchen werden zusätzlich frei?**
 Neutronen
 Protonen
 Alphateilchen
- 8. Wie viele Neutronen werden im Mittel bei jeder Kernspaltung frei?**
 1 Neutron
 2 bis 3 Neutronen
 10 Neutronen
- 9. Durch welche Neutronen wird Uran-235 am effektivsten gespalten?**
 Langsame Neutron
 Mittelschnelle Neutronen
 Schnelle Neutronen
- 10. Ein Neutron löst eine Kernspaltung aus. Dabei entstehen z.B. 2 Neutronen. Wie viele Neutronen entstehen in der 10. Generation, wenn alle Neutronen der vorangegangenen Generationen Kernspaltungen ausgelöst haben?**
 20 Neutronen
 1.024 Neutronen
 1.000.000 Neutronen

- 11. Wie groß ist bei der Spaltung eines Kerns U-235 die Summe der Massenzahlen von Trümmerkernen und frei gewordenen Neutronen?**
- Massenzahl 235
Massenzahl 236
Massenzahl 238
- 12. Wie heißt bei der folgenden Kernreaktionsgleichung die fehlende Massenzahl des Xenon-Isotops?**
- $$^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{?}_{54}\text{Xe} + {}^{90}_{38}\text{Sr} + 3 {}^1_0\text{n}$$
- Massenzahl 90
Massenzahl 236
Massenzahl 143
- 13. Wie viele verschiedene Spaltprodukte (Radionuklide) entstehen bei der Kernspaltung? Etwa**
- 100 verschiedene Spaltprodukte,
200 verschiedene Spaltprodukte,
300 verschiedene Spaltprodukte.
- 14. Wie viel Energie wird bei einer einzigen Kernspaltung frei?**
- 210 eV
210 keV
210 MeV
- 15. Wie groß ist bei Uran-235 die kritische Masse (System in Kugelform sowie unreflektiert und unmoderiert)?**
- Etwa 1 kg
Etwa 10 kg
Etwa 50 kg
- 16. Was geschieht mit der Masse von 1 kg U-235, wenn alle Uranatome gespalten werden?**
- Durch die Vielzahl unterschiedlicher Spaltprodukte nimmt die Masse um 10 g zu.
1 g der Gesamtmasse wird in Energie umgewandelt (Massenverlust).
Die Massen sind vor und nach der Spaltung gleich.
- 17. Neutronen mittlerer Geschwindigkeit werden von Uran-238 aufgenommen. Was geschieht dadurch letztlich?**
- Der Kern zerplatzt.
Es entsteht Pu-239.
Es entsteht U-235.
- 18. Wodurch werden in der Natur sehr geringe Mengen von Pu-239 ständig neu gebildet?**
- Einige Urankerne spalten sich spontan und erzeugen dabei Plutonium.
Neutronen der natürlichen kosmischen Strahlung wandeln U-238 in drei Stufen zu Pu-239 um.
Plutonium tritt in den natürlichen Uran-Zerfallsreihen auf.
- 19. Das in der Natur vorkommende Thorium-232 kann mit Hilfe von Neutronen in ein spaltbares Uranisotop umgewandelt werden. Um welches Isotop handelt es sich?**
- Uran-233
Uran-235
Uran-238
- 20. Wie nennt man die gezielte Gewinnung von Pu-239 und U-233?**
- Ionisierung
Kernspaltung
Brüten (breeding)
- 21. Was versteht man unter Mischoxid-Brennelementen? Sie enthalten**
- U-235 und U-238,
die Spaltstoffe UO_2 und PuO_2 ,
Uran in zwei verschiedenen Oxidationsstufen (UO_2 , UO_3).

10.5 Kontrollierte Kernspaltung

- 1. Wie nennt man eine Anlage, in der eine kontrollierte Kettenreaktion abläuft?**
- Reaktor
Moderator
Absorber
- 2. Was entsteht bei der Spaltung eines Kerns U-235 außer den beiden Trümmerkernen?**
- 2 bis 3 Alphateilchen
2 bis 3 Protonen
2 bis 3 Neutronen
- 3. Welche Energie haben die bei der Kernspaltung frei werdenden Neutronen im Mittel?**
- Etwa 1,5 eV (langsame Neutronen)
Etwa 1,5 keV (mittelschnelle Neutronen)
Etwa 1,5 MeV (schnelle Neutronen)
- 4. Mit welchen Neutronen lassen sich die Kerne des U-235 am effektivsten spalten?**
- Mit schnellen Neutronen,
mittelschnellen Neutronen,
langsamen Neutronen.

- 5. Wie nennt man den Stoff, mit dem in einem Reaktor die schnellen Neutronen gezielt abgebremst werden?**
- Spaltstoff
 Moderator
 Reflektor
- 6. Welcher Stoff wird in Leichtwasserreaktoren als Moderator verwendet?**
- Wasser
 Bor
 Kohlenstoff (Graphit)
- 7. Bei welchem Stoff müssen Neutronen die geringste Anzahl von Zusammenstößen ausführen, um auf niedrige Geschwindigkeiten abgebremst zu werden?**
- Wasserstoff (^1_1H)
 Deuterium (^2_1H)
 Kohlenstoff ($^{12}_6\text{C}$)
- 8. Ein Moderator soll die schnellen Neutronen durch möglichst wenige Zusammenstöße auf niedrige Geschwindigkeiten abbremsen. Welche zweite Eigenschaft soll ein Moderator auch besitzen?**
- Geringe Neigung zum Einfang von Neutronen
 Große mechanische Festigkeit
 Möglichst hoher Schmelzpunkt
- 9. Bei welchem Stoff ist die Neigung, Neutronen zu absorbieren, besonders klein?**
- Wasserstoff (^1_1H)
 Deuterium (^2_1H)
 Kohlenstoff ($^{12}_6\text{C}$)
- 10. Wird Wasser als Kühlmittel und Moderator verwendet, werden relativ viele Neutronen durch den Wasserstoff absorbiert. Wie gleicht man diesen Neutronenverlust aus?**
- Durch
- den Einsatz von Absorberstäben,
 Erhöhung des Anteils von U-235 auf über 2 %,
 Erhöhung der Temperatur des Kühlmittels Wasser.
- 11. Wodurch lässt sich die Kettenreaktion in einem Reaktor steuern?**
- Veränderung der Anzahl der Brennstäbe
 Absorption einer mehr oder minder großen Anzahl von Neutronen
 Veränderung der durchlaufenden Kühlmittelmenge
- 12. Welcher der genannten Stoffe eignet sich für die Herstellung von Steuerstäben?**
- Bor
 Blei
 Graphit
- 13. Was geschieht, wenn Neutronen durch Bor absorbiert werden?**
- Neutronen werden abgebremst.
 Neutronen werden vernichtet.
 Neutronen werden von den Atomkernen des Bor aufgenommen und wandeln es in Lithium um.
- 14. Wie verhält sich ein Reaktor, wenn die Steuerstäbe in ihrer ganzen Länge in den Reaktor gesenkt werden?**
- Die Kettenreaktion schwächt an.
 Die Kettenreaktion erlischt.
 Die Neutronen werden verstärkt abgebremst.
- 15. In einem Leichtwasserreaktor kann es zu keiner unkontrollierten Kettenreaktion kommen, weil bei einem zu starken Temperaturanstieg das Wasser (der Moderator) verstärkt verdampft und dann der Wasserdampf die Kernspaltung löscht, der Wasserdampf die Neutronen verstärkt absorbiert, pro Volumeneinheit nicht mehr genug Wasser zum Abbremsen der Neutronen vorhanden ist.**
-
- 16. Wie viel Prozent der Spaltneutronen werden bis zu 20 Sekunden verzögert von den Trümmerkernen abgegeben?**
- 0,75 %
 3 %
 10 %
- 17. Bei der Steuerung eines Reaktors lässt man die Neutronenzahl von Neutronengeneration zu Neutronengeneration um weniger als ansteigen.**
- 10 %,
 3 %,
 0,75 %,
- 18. Wie nennt man Reaktoren, bei denen Spaltstoff und Moderator räumlich getrennt angeordnet sind?**
- Homogener Reaktor
 Heterogener Reaktor
 Kritischer Reaktor
- 19. Wie nennt man Reaktoren, bei denen Spaltstoff und Moderator miteinander gemischt sind?**
- Homogener Reaktor
 Heterogener Reaktor
 Kritischer Reaktor
- 20. Unter welcher Voraussetzung lässt sich auch mit Natururan (0,7 % U-235) ein heterogener Reaktor betreiben?**
- Einstellen nicht zu hoher Reaktortemperaturen
 Einsatz geringer Uranmengen
 Verwendung von Schwerem Wasser (D_2O) oder Graphit als Moderator

- 21. Wie konnte in Gabun (Westafrika) vor mehr als 1 Milliarde Jahren ein Naturreaktor mit Wasser als Moderator mehrere hunderttausend Jahre lang in Betrieb sein?**
- Das als Moderator wirkende Wasser stand im Erdreich unter sehr hohem Druck.
Das Uran war von einer sehr dicken Eisenerzschicht umgeben.
Vor so langer Zeit waren im Natururan etwa 3 % U-235 enthalten.
- 22. In welcher Form liegt das Uran in Anreicherungsanlagen vor, in denen der Anteil an U-235 von 0,7 % auf 3 bis 4 % erhöht wird?**
- Metallisches Uran
Gas Uranhexafluorid (UF_6)
Urandioxid (UO_2)

10.6 Kernkraftwerke

- 1. Welchem Teil eines herkömmlichen Kohlekraftwerks entspricht der Reaktor eines Kernkraftwerks?**
- Dampfkessel
Dampfturbine
Generator
- 2. Wie groß ist die Menge an Uran in einem Kernkraftwerk (z. B. Siedewasserreaktor Krümmel, Druckwasserreaktor Brokdorf)?**
- Etwa 10 - 20 t
Etwa 100 - 150 t
Etwa 500 - 800 t
- 3. In welcher chemischen Form wird das Uran in Leichtwasserreaktoren verwendet?**
- Metallisches Uran
Urandioxid (UO_2)
Uranhexafluorid (UF_6)
- 4. Wie lang sind die Brennstäbe von Leichtwasserreaktoren (Bundesrepublik Deutschland)?**
- Etwa 0,5 - 1 m
Etwa 3,5 - 4,5 m
Etwa 8 - 10 m
- 5. Wie viele Brennstäbe befinden sich in den Reaktoren der Kernkraftwerke Krümmel bzw. Brokdorf?**
- Etwa 5.000 - 10.000
Etwa 10.000 - 20.000
Etwa 45.000 - 65.000
- 6. Welcher Stoff wird in heutigen Leichtwasserreaktoren als Kühlmittel eingesetzt?**
- Heliumgas
Wasserdampf
Wasser
- 7. Wie viele Kühlkreisläufe (außer Kondensatorkreislauf) besitzt ein Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor?**
- 3 Kühlkreisläufe
2 Kühlkreisläufe
1 Kühlkreislauf
- 8. Wie viele Kühlkreisläufe (außer Kondensatorkreislauf) besitzt ein Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor?**
- 3 Kühlkreisläufe
2 Kühlkreisläufe
1 Kühlkreislauf
- 9. In Brutreaktoren finden Kernspaltungen statt (Energiegewinnung). Gleichzeitig wird**
- aus U-238 das Isotop U-235 erbrütet,
aus U-238 das Isotop U-233 erbrütet,
aus U-238 Pu-239 erbrütet.
- 10. Welche Neutronen werden in Brutreaktoren verwendet?**
- Schnelle Neutronen
Mittelschnelle Neutronen
Langsame Neutronen
- 11. Welche Kühlmittel werden heute in Brutreaktoren verwendet?**
- a) Primärkühlkreis
Natrium
Helium
Wasser
- b) Sekundärkühlkreis
Natrium
Helium
Wasser
- c) Tertiärkühlkreis (Arbeitsmittel)
Natrium
Helium
Wasser
- 12. Welcher Spaltstoff (Erstkern) wurde im Thorium-Hochtemperaturreaktor THTR 300 verwendet?**
- U-233
U-235
Pu-239

- 13. Im THTR 300 wurde aus Thorium-232 neuer Spaltstoff erbrütet. Es handelte sich um**
- U-233,
 - U-235,
 - Pu-239.
- 14. Welche Form hatten die Brennelemente des THTR 300?**
- Metallröhren
 - Graphitkugeln
 - Metallquader
- 15. Welche Temperatur erreichte das Gas, das den Reaktorkern des THTR 300 durchströmte?**
- Etwa 280 °C
 - Etwa 550 °C
 - Etwa 750 °C
- 16. Wie viele Kühlkreise (außer Kondensatorkühlkreis) besaß der THTR 300?**
- 1 Kühlkreis
 - 2 Kühlkreise
 - 3 Kühlkreise
- 17. Wie viele Brennelementkugeln befanden sich im Reaktor des THTR 300?**
- 6.000
 - 360.000
 - 6.000.000
- 18. Um welchen Reaktortyp handelte es sich beim RBMK 1000?**
- Siedewasserreaktor
 - Druckwasserreaktor
 - Schneller Brüter
- 19. Welcher Spaltstoff (Erstkern) wird beim RBMK 1000 verwendet?**
- U-233
 - U-235
 - Pu-239
- 20. Mit welchem Moderator werden beim RBMK 1000 die schnellen Neutronen auf langsame Geschwindigkeiten abgebremst?**
- Mit Leichtem Wasser (H_2O)
 - Mit Schwerem Wasser (D_2O)
 - Mit Kohlenstoff (Graphit)
- 21. Der RBMK 1000 hat statt eines einzelnen Reaktordruckgefäßes**
- 2 getrennt angeordnete Reaktordruckgefäße,
 - 10 getrennt angeordnete Reaktordruckgefäße,
 - über 1.600 Druckröhren, in denen sich die Brennelemente befinden.
- 22. Wie verhält sich ein Reaktor vom Typ RBMK 1000, wenn durch Temperaturanstieg mehr Dampfblasen entstehen? Die Anzahl der Kernspaltungen**
- ändert sich dadurch nicht,
 - nimmt ab,
 - nimmt zu.

10.7 Sicherheitseinrichtungen bei Kernkraftwerken

- 1. Bei der Kernspaltung entstehen zwei Trümmerkerne und zwei bis drei Neutronen. Welche Strahlung wird zusätzlich ausgesandt?**
- Alphastrahlen
 - Betastrahlen
 - Gammastrahlen
- 2. Die bei der Kernspaltung entstehenden Trümmerkerne sind**
- nicht radioaktiv,
 - meist radioaktiv,
 - nur in den ersten 10 Sekunden radioaktiv.
- 3. Auch ursprünglich nicht radioaktive Materialien, die sich im Reaktor oder in seiner unmittelbaren Nähe befinden, können durch die radioaktiv werden.**
- Gammastrahlen,
 - Neutronenstrahlen,
 - Betastrahlen
- 4. Wodurch entsteht auch in einem abgeschalteten Kernreaktor Wärme?**
- Die Regelstäbe geben die gespeicherte Wärme langsam ab.
 - Die Spaltprodukte zerfallen weiter und erzeugen Wärme.
 - Es finden noch vereinzelt Kernspaltungen statt.
- 5. Sicherheitsbarrieren verhindern das Austreten radioaktiver Stoffe.**
- a) Die erste Sicherheitsbarriere ist**
- die Kristallstruktur der UO_2 -Tabletten, das Kühlmittel, das die Brennstäbe umgibt, die Brennstabhülle.
- b) Die zweite Sicherheitsbarriere ist**
- die Brennstabhülle, der biologische Schild, das Reaktorgebäude.

- c) Die dritte Sicherheitsbarriere ist**
die Brennstabhülle,
das Reaktordruckgefäß,
das Reaktorgebäude.
- d) Die vierte Sicherheitsbarriere ist**
das Reaktordruckgefäß,
der Sicherheitsbehälter,
das Reaktorgebäude.
- 6. Wie stark ist die Wand eines Reaktordruckgefäßes?**
- Etwa 2 - 3 cm
 - Etwa 15 - 25 cm
 - Etwa 40 - 50 cm
- 7. Warum besitzt der Sicherheitsbehälter eine zusätzliche Dichthaut?**
- Weil dadurch das Rosten des Sicherheitsbehälters verringert werden kann.
 - Weil durch die „Haut“ eine zusätzliche Abdichtung erreicht wird (Behälter dieser Größe lassen sich nicht absolut gasdicht herstellen).
 - Weil die Dichthaut das Eindringen von Regenwasser verhindert.
- 8. Welche Aufgabe hat der biologische Schild?**
- Neutronenmoderator
 - Abstützen des Reaktordruckgefäßes
 - Abschirmung der Neutronen- und Gammastrahlung
- 9. Unter welcher Voraussetzung dürfen Kernkraftwerke radioaktive Stoffe an die Umgebung abgeben?**
- Es dürfen nur genehmigte Mengen kontrolliert abgegeben werden.
 - Eine Abgabe ist nur bei geeigneten Wetterbedingungen erlaubt.
 - Die abgegebenen Radionuklide müssen eine Halbwertzeit haben, die kleiner als ein Jahr ist.
- 10. Bei der kontrollierten Abgabe radioaktiver Stoffe unterscheidet man zwischen Genehmigungswert und Abgabewert.
In der Praxis gilt:**
- Der Abgabewert ist stets so groß wie der Genehmigungswert.
 - Der Abgabewert ist stets kleiner als der Genehmigungswert.
 - Der Abgabewert ist stets größer als der Genehmigungswert.
- 11. Einige gasförmige radioaktive Stoffe durchlaufen eine Verzögerungsstrecke, ehe sie in genehmigten Mengen über den Abluftkamin abgegeben werden. Die Verzögerungsstrecke bewirkt,**
dass nicht zuviel radioaktive Gase auf einmal abgegeben werden,
dass die radioaktiven Gase zurückgehalten werden, bis eine ausreichende Windstärke herrscht,
dass die Aktivität einiger Radionuklide beim langsamen Durchlaufen abklingt (mehrere Halbwertzeiten vergehen).
- 12. Worauf beruhen die guten Filtereigenschaften von Aktivkohle?**
- Kohlenstoff geht mit den Verunreinigungen der Luft eine chemische Verbindung ein.
 - Durch ihre Porosität besitzen Kohlenstoffteilchen eine sehr große Oberfläche, an der sich gasförmige Stoffe anlagern können.
 - Aktivkohle ist für radioaktive Gase undurchdringlich.
- 13. Warum ist der Luftdruck im Reaktorgebäude etwas niedriger als der äußere Luftdruck?**
- Es ist für das Bedienungspersonal angenehmer.
 - Die Gebäudewände brauchen dann nur einem geringeren Druck standzuhalten.
 - Bei Undichtigkeiten kann keine Gebäudeluft nach außen gelangen.
- 14. Bei einem Siedewasserreaktor ist der Dampf, der durch die Turbine strömt, mit radioaktiven Stoffen verunreinigt. Damit er nicht aus den Dichtungen der Turbinenwelle austritt,**
werden besonders gut abgedichtete Schmiermittel verwendet,
werden um die Welle Kammern angeordnet, in denen sich Unter- und Überdruckzonen aufbauen lassen,
wird der Dampf am Wellenende kondensiert.
- 15. Radioaktive Stoffe aus der Turbine können nicht mit dem Kühlwasser in den Fluss gelangen, weil**
die Rohrleitungen für das Kühlwasser niemals reißen können,
der Druck in der Kühlwasserleitung sehr viel größer ist als der Druck im Kondensator,
Dampf sich immer von Wasser getrennt hält.
- 16. Wie müssen drei Ventile angeordnet werden, die bei einem Störfall das Absperren einer Dampfleitung sicherstellen sollen (Redundanz in der Schließfunktion)?**
- Ventile in Reihe (Serie)
 - Ventile parallel
 - Jeweils nur 1 Ventil

- 17. Wie müssen drei Ventile angeordnet werden, die im Störfall zusätzlich Kühlwasser in den Reaktor strömen lassen sollen (Redundanz in der Öffnungsfunktion)?**
- Ventile in Reihe (Serie)
 - Ventile parallel
 - Jeweils nur 1 Ventil
- 18. Mit welchem Namen bezeichnet man die sicherheitstechnische Mehrfachanordnung eines Systems?**
- Redundanz
 - Diversität
 - Kritikalität
- 19. Wie wird der unterschiedliche technische Aufbau von Anlagen, die dem gleichen sicherheitstechnischen Zweck dienen, genannt (z. B. Pumpen elektrisch, hydraulisch und pneumatisch betrieben)?**
- Redundanz
 - Diversität
 - Kritikalität
- 20. Durch die Notkühlsysteme eines Reaktors soll sichergestellt werden, dass**
- keine zusätzliche Strahlung in die Umgebung eines Kernkraftwerks gelangt,
 - die Neutronen durch Wasser weiter moderiert werden,
 - die Brennelemente auch bei einem großen Störfall mit Kühlmittel versorgt werden.
- 21. Wie viele voneinander unabhängige Notkühlsysteme besitzt ein Kernkraftwerk?**
- Zwei Notkühlsysteme
 - Drei Notkühlsysteme
 - Vier Notkühlsysteme
- 22. Wie kann eine Notkühlung fortgesetzt werden, auch wenn die Wasservorräte innerhalb und außerhalb des Sicherheitsbehälters verbraucht sind?**
- Die Notkühlung wird mit einem Gebläse fortgesetzt.
 - Die Brennelemente werden mit Tiefkühlaggregaten gekühlt.
- 23. Warum besitzt das Notkühlsystem einen Wärmetauscher außerhalb des Sicherheitsbehälters?**
- Bei einer Notkühlung wird das Wasser erwärmt, ehe es in den Reaktor gepumpt wird.
 - Nachzerfallswärme, die das Wasser aufnimmt, wird über den Wärmetauscher an die Umgebung abgegeben.
 - Über den Wärmetauscher wird das Wasser aller Notkühlleitungen auf gleiche Temperatur gebracht.
- 24. Warum wird im Kernkraftwerk Krümmel der Sicherheitsbehälter während des Betriebs mit Stickstoff gefüllt?**
- Stickstoff wirkt sich günstig auf die kontrollierte Kettenreaktion aus.
 - Stickstoff schützt den Sicherheitsbehälter vor Korrosion.
 - In einer Stickstoffatmosphäre kann der bei einem Störfall möglicherweise entstehende Wasserstoff nicht verbrennen.
- 25. Wodurch wird bei einem Kernkraftwerk ein störungsfreier Normalbetrieb gewährleistet?**
- Der Reaktor wird mehrmals jährlich zur Revision abgeschaltet.
 - Es findet ein möglichst häufiger Brennelementwechsel statt.
 - Qualitätssicherung/hohe Sicherheitsreserven/fachkundiges Personal
- 26. Worin liegt die Hauptaufgabe bei der Bewältigung eines Störfalls?**
- Kettenreaktion möglichst schnell wieder in Gang bringen.
 - Brennelemente weiter kühlen (Nachzerfallswärme abführen).
 - Den Sicherheitsbehälter luft leer pumpen.

10.8 Der Brennstoffkreislauf – die Ver- und Entsorgung eines Kernkraftwerks

- 1. Wie viel Gramm Uran enthält im Mittel 1 t Gestein der Erdrinde?**
 - 0,1 g
 - 3 g
 - 100 g
- 2. Bei der Urangewinnung wird durch chemische Verfahren ein Stoff hergestellt, der wegen seiner gelben Farbe „Yellow Cake“ genannt wird. Es ist**
 - Urandioxid/UO₂,
 - Uranylulfat/UO₂(SO₄)₂,
 - Ammoniumdiuranat/(NH₄)₂ U₂O₇.
- 3. Bei der Anreicherung wird der Gehalt an**
 - U-233,
 - U-234,
 - U-235**erhöht.**
- 4. In welcher chemischen Form liegt das Uran in der Anreicherungsanlage vor?**
 - Urandioxid/UO₂,
 - Urantrioxid/UO₃,
 - Uranhexafluorid/UF₆.

5. Zur Herstellung von Brennelementen wird das an U-235 angereicherte Uranhexafluorid wieder umgewandelt zu
- Urandioxid/ UO_2 ,
 - Urantrioxid/ UO_3 ,
 - Uranylsulfat/ $\text{UO}_2(\text{SO}_4)$.
6. Mehrere Brennstäbe, die zu einem Bündel zusammengefasst sind, nennt man
- Brennstab-Aggregat,
 - Brennelement,
 - Brennstab-Satz.
7. Welches chemische Element tritt bei Kernspaltungen als häufigstes Spaltprodukt auf (größter prozentualer Anteil)?
- Xenon
 - Jod
 - Cäsium
8. Warum werden ausgebrannte Brennelemente nach der Entladung aus dem Reaktor zunächst in einem Wasserbecken des Kernkraftwerks gelagert?
- Sie müssen vor dem Abtransport gründlich gereinigt werden.
 - Es stehen nicht genügend Transportbehälter zur Verfügung.
 - Die Spaltprodukte mit kurzen Halbwertzeiten zerfallen in dieser Zeit fast vollständig (spez. Aktivität der Brennstäbe nimmt sehr stark ab).
9. Die Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente läuft in mehreren Schritten ab.
- a) In einem ersten Schritt werden die Brennstäbe in offener Flamme erhitzt, in 5 cm lange Stücke zersägt, in Salpetersäure gereinigt.
 - b) Der zweite Verarbeitungsschritt sieht vor, dass der abgebrannte Brennstoff aus den offenen Brennstababschnitten mit Hilfe von Pressluft herausgeblasen, Hitze herausgeschmolzen, heißer Salpetersäure herausgelöst wird.
 - c) Beim dritten wichtigen Verarbeitungsschritt wird eine organische Flüssigkeit (Tri-n-Butyl-Phosphat + Kerosin) eingesetzt. Damit lassen sich Uran und Plutonium von den Spaltprodukten + Actinoide abtrennen, Uran-235 von Uran-238 trennen, die Edelgase von den festen Stoffen trennen.
10. Welche Endlagerung ist für radioaktive Abfälle vorgesehen?
- Oberirdische Lagerung in Gebäuden mit besonders dicken Wänden
 - Lagerung auf dem Meeresgrund
 - Lagerung in geeigneten Erdschichten (Salzstock, ausgedientes Eisenerzbergwerk)

10.9 Strahlenmessung und die Strahlenexposition des Menschen

1. Was wird durch die Energiedosis angegeben?
- Absorbierter Strahlungsenergie
 - Absorbierter Strahlungsenergie pro Zeit
 - Absorbierter Strahlungsenergie pro Masse
2. In welcher Einheit misst man die Energiedosis?
- J/kg
 - Bq/kg
 - Sv/a
3. Die biologische Wirkung ionisierender Strahlen kann nicht allein durch die pro Masse absorbierte Energie angegeben werden. Es ist notwendig, den Quotienten mit dem Faktor 2,5 zu multiplizieren, mit einem Strahlungs-Wichtungsfaktor zu multiplizieren, mit der Bestrahlungszeit zu multiplizieren.
4. Zwei biologische Objekte A und B besitzen die gleiche Masse. A wird mit Gammastrahlen, B mit Alphastrahlen solange bestrahlt, bis beide gleich viel Energie absorbiert haben. Dann ist die biologische Wirkung
- bei A 20-mal größer als bei B,
 - bei B 20-mal größer als bei A,
 - bei A so groß wie bei B.
5. In welcher Einheit misst man die Organdosis?
- Sievert (Sv)
 - Becquerel (Bq)
 - Joule (J)
6. Die Dosisleistung gibt die Dosis pro Zeit an. In welcher Einheit wird sie gemessen?
- Bq/a,
 - J/a,
 - Sv/a.

- 7. Wie werden die Strahlenschäden unterteilt?**
- Schäden, hervorgerufen durch Teilchenstrahlung und durch Wellenstrahlung
Somatische und genetische Schäden
Schäden < 50 mSv und Schäden > 50 mSv
-
- 15. Bei der natürlichen Strahlenexposition des Menschen ist die Bestrahlung**
- von außen so groß wie die von innen,
von außen größer als von innen,
von innen größer als von außen.
-
- 8. Bei welcher einmaligen Ganzkörperbestrahlung treten im menschlichen Organismus erste klinisch fassbare Bestrahlungseffekte auf?**
- Ab etwa 250 mSv
Ab etwa 50 mSv
Ab etwa 0,30 mSv
-
- 16. Die Organe des Menschen werden durch die natürliche Strahlung unterschiedlich stark belastet.**
- Die stärkste Belastung ergibt sich für**
- die Keimdrüsen,
die Knochen,
die Lungen.
-
- 9. Welcher Grenzwert der effektiven Dosis pro Kalenderjahr gilt in der Bundesrepublik Deutschland für beruflich strahlenexponierte Personen?**
- 20 mSv
50 mSv
250 mSv
-
- 17. Wie groß ist die mittlere effektive Jahresdosis durch natürliche Strahlenexposition in der Bundesrepublik?**
- 2,1 mSv
1,5 mSv
0,3 mSv
-
- 10. Welcher Grenzwert für die effektive Dosis der Bevölkerung durch radioaktive Ableitungen aus kerntechnischen Anlagen (jeweils über Luftpfad und Wasserpfad) gilt in der Bundesrepublik Deutschland?**
- 30 mSv/a
3 mSv/a
0,3 mSv/a
-
- 18. Die zivilisatorisch bedingte Strahlenexposition wird im Wesentlichen durch**
- das Fernsehen,
die Kernkraftwerke,
die medizinischen Strahlenanwendungen
- verursacht.**
-
- 11. Die Intensität der kosmischen Strahlung ist von der Höhe über dem Meeresspiegel abhängig. Sie**
- steigt mit zunehmender Höhe,
sinkt mit zunehmender Höhe,
steigt und sinkt abwechselnd alle 1.000 m.
-
- 19. Die zivilisatorisch bedingte Strahlenexposition des Menschen beträgt im Mittel etwa**
- 180 mSv/a,
18 mSv/a,
1,8 mSv/a.
-
- 12. Wodurch wird die terrestrische Strahlung verursacht?**
- Durch besonders hartes Gestein
Durch die gesamte Erdmaterie
Durch Lava von Vulkanausbrüchen
-
- 20. Der Anteil der Kernkraftwerke an der zivilisatorisch bedingten Strahlenexposition beträgt weniger als**
- 1 mSv/a,
0,1 mSv/a,
0,01 mSv/a.
-
- 13. Die terrestrische Strahlung**
- ist überall auf der Erde gleich,
schwankt in Abhängigkeit vom geologischen Untergrund,
tritt nur im Gebirge oberhalb 1.000 m auf.
-
- 14. Der menschliche Körper besitzt eine Eigenstrahlung. Sie tritt auf, weil**
- der Mensch durch die kosmische Strahlung dauernd bestrahlt wird,
natürliche radioaktive Elemente mit der Nahrung und der Atmung in den Körper aufgenommen werden,
die Haut des Menschen durch radioaktiven Staub verunreinigt ist.
-

10 Lösungen zu den Übungsaufgaben

Zu 10.1:

1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8.

9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16.

17. 18.

Zu 10.2:

1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8.

9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16.

17.

Zu 10.3:

1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8.

9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16.

17. 18. 19. 20.

Zu 10.4:

1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8.

9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16.

17. 18. 19. 20. 21.

Zu 10.5:

1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8.

9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16.

17. 18. 19. 20. 21. 22.

Zu 10.6:

1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8.

9. 10. 11.a 11.b 11.c 12. 13. 14.

15. 16. 17. 18. 19. 20. 21. 22.

Zu 10.7:

1. 2. 3. 4. 5.a 5.b 5.c 5.d

6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. 13.

14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 21.

22. 23. 24. 25. 26.

Zu 10.8:

1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8.

9.a 9.b 9.c 10.

Zu 10.9:

1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8.

9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16.

17. 18. 19. 20.

Sachwortverzeichnis

Abbrand	29, 68
Abfälle, wärmeentwickelnde	70, 71, 73
Abgabewerte	59
Abluft	59
Absolutfilter	58
Abwasser	59
Actinoide	29, 69
Aktivierung	27, 52
Aktivität	18
Aktivität, spezifische	18, 68
Aktivitätskonzentration	19
Aktivkohlefilter	58
Alphastrahlen	13
Alphateilchen	13, 23, 76
Alphazerfall	13
Anreicherung	41, 66
Antineutrino	14, 23
Äquivalenz von Masse und Energie	32
Atom	5, 7
Atomhülle	5, 7
Atomkern	5, 7
Atommasse	5, 7
Atommodell	7
Auslegungsstörfall	52, 61
Bahn	7
Becquerel	18
Beryllium	15, 27, 38
Betastrahlen	13
Betateilchen	14, 23
Beta-Zerfall	13
Beta ⁺ -Zerfall	14
Bindungsenergie	10, 30
Bindungsenergie je Nukleon	11, 12
Bor	39
Brennelement	56, 66
Brennelementkugel	48
Brennelementwechsel	67
Brennstab	22, 56, 66
Brennstabhülle	22, 55
Brennstoffkreislauf	65
Brüter, Schneller	47
Brutreaktor	47
Brutvorgang	33, 47
Cäsium	83
Curie	19
Dampfblasenoeffizient	38
Dampferzeuger	45
Deuterium	8, 38
Deuteron	9
Diffusionsverfahren	41
Diversität	54
Dosis, effektive	77
Druckbehälter	57
Druckdifferenz	59
Drucklastung, gefilterte	64
Druckwassereaktor	45
Durchmesser eines Atoms	7
Elektron	5, 7
Elektroneneinfang	15
Elektronenhülle	15
Elektronvolt	11, 23
Element	5
Elementarladung	5, 8
Elementarteilchen	8
Endlagerung	70, 71
Energie	20
Energie von	
– Alphateilchen	23
– Betateilchen	23
– Gammaquanten	24
– Neutronen	24
Energiebilanz bei der Kernspaltung	30
Energiedosis	75
Energieumwandlungen	20
Entsorgung	65
Fail safe	54
Feinstfilter	58
Flächenaktivität	19
Folgedosis	77
Frühenschäden	77
Gammaquant	14
Gammastrahlen	14
Genehmigungswerte	59
Geschwindigkeit von	
– Alphateilchen	13
– Betateilchen	13
– Gammaquanten	14
– Neutronen	24
Gewebe-Wichtungsfaktor	77
Graphit	38, 41, 48, 50
Gray	75
Größenverhältnis im Atom	7
Halbwertzeit	16
Helium	11, 13
Heliumkühlkreis	48
Hochtemperaturreaktor	48
Ion	5
Ionisationskammer	75
Isotop	8
Isotopenpentafel	9
Joule	23
Kalium-40	15, 79
K-Einfang	15
Kernaufbau	5, 7
Kernkräfte	10
Kernkraftwerk	20, 44
Kernladungszahl	8, 13
Kernschmelzunfall	62
Kernspaltung	27, 52
Kernteilchen	5, 10
Kernumwandlung	13
Kernwaffentest	83
Kettenreaktion	31
Kondensator	44, 61
Konditionierung radioaktiver Abfälle	70
Konversion	66
Kugelhaufenreaktor	48
Ladung, elektrische	5, 8
Lagerbecken	68
Leistungsreaktor	35
Masse, kritische	32
Massenverlust	11, 32
Massenzahl	8, 13
metastabil	14

Mischoxidbrennelement	33, 70	Sicherheitskonzept	52
Moderator	37	Siedewasserreaktor	44
Multiplikationsfaktor	39	Siedewasser-Druckröhrenreaktor	50
Nachzerfallswärme	68, 71	Sievert	77
Natriumkühlkreis	48	Spaltgasraum	56
Naturreaktor	42	Spaltneutronen	35
Neutrino	14, 24, 30	Spaltprodukte	28, 68, 70
Neutron	5, 7, 15	Spaltproduktlösung, hochaktive	70
Neutron		Spätschaden	77
– langsames (thermisches)	24, 28, 33, 35, 48, 52, 68	Sperrmedium	60
– mittelschnelles (epithermisches, intermediäres)	35	Spontanspaltung	28
– schnelles	28, 33, 35, 37, 47	Steuerstab	35, 40
– verzögertes	40	Steuerung der Kettenreaktion	39
Neutronenabsorption	39	Störfall	52
Neutronenbilanz	41	Stoß, elastischer	36
Neutroneneinfang	36	Stoß, unelastischer	36
Neutronengeneration	31, 37, 39	Strahlenexposition, natürliche	79
Neutronenreflektor	32, 41, 48, 50	Strahlenexposition, zivilisatorische	81
Neutronenstrahlen	24	Strahlenquellen im Kernkraftwerk	52
Neutronenzahl	5, 8	Strahlenschäden, genetische	77
Notfallschutzmaßnahmen	54	Strahlenschäden, somatische	77
Notkühlkreisläufe	61	Strahleneffekt, biologische	76
Notkühlsystem	61	Strahlung, ionisierende	13
Nukleon	5, 11	Strahlung, kosmische	8, 9, 33, 79, 81, 84, 85
Nuklid	8	Strahlung, terrestrische	79, 80, 85
Ordnungszahl	8	Strahlungs-Wichtungsfaktor	76
Organdosis	76	Teilchenmodell	5, 8, 21
Pellet	56	Thorium	33, 48
Personenschleuse	60	Thoriumhochtemperaturreaktor	48
Photon	14	Transportbehälter	72
Plutonium	32, 47, 68	Tensurane	27, 67
Positron	14	Trenndüsenverfahren	42
Proton	5, 7	Tritium	9, 16, 17, 59, 74
Protonenstrahlen	15	Triton	9
Protonenzahl	5, 8	Trümmerkern	28
PUREX-Verfahren	68	Tschernobyl	50, 82
Qualitätskontrolle	52	Unterdruckzone	60
Rad	75	Uran	8, 27
Radioaktivität	13	Urananreicherung	41
Radionuklid	8, 13	Urangewinnung	66
Radionuklide, künstliche	17	Uranhexafluorid	41, 71
Radionuklide, natürliche	17	Uranisotope	28
Reaktor	35	Uranvorkommen	66
Reaktor, überkritischer	40	Verglasung	71
Reaktor, unterkritischer	40	Verzögerungsstrecke	58
Reaktorbetriebsabfälle	73	Wasser, Schweres	32, 38, 41
Reaktordruckgefäß	57	Wasserstoff, natürlicher	8
Reaktorsteuerung	50	Wasserstoffatom	7, 9
Redundanz	54, 62	Wasserstoffisotope	9
Reichweite von elektr. Kräften	10	Wellendichtung	60
Reichweite von Kernkräften	10	Wellenlänge von Gammaquanten	24
Rem	76	Wiederaufarbeitung	68
Ringspalt	60	Wirkungsgrad	20
Röntgen	75	Xenon-133	74
Röntgenstrahlung	82	Yellow Cake	66
Rückhalteeinrichtungen für radioaktive Stoffe	58	Zentrifugen-Verfahren	42
Rückstoß	26	Zerfall, radioaktiver	8, 13, 16
Schale	7	Zerfallsreihen	53, 80
Schild, biologischer	55	Zirkaloy	56
Schutzbarrieren	55	Zwischenkern	28
Sicherheitsbarrieren	55		
Sicherheitsbehälter	55, 57		

kernenergie.de
kernfragen.de

