

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Einführung	15
1.1 Geschichte der Kernenergie	15
1.2 Kernkraft in der Energieversorgung	18
1.2.1 Elektrische Energie	19
1.2.2 Primärenergie	24
2 Grundlagen	27
2.1 Aufbau des Atoms	27
2.2 Massendefekt, Bindungsenergie	31
3 Ionisierende Strahlung	35
3.1 Kernumwandlungen und Radioaktivität	35
3.1.1 Verschiedene Arten von Kernumwandlungen	36
3.1.2 Nuklidkarte	40
3.1.3 Zerfallsreihen	43
3.1.4 Halbwertszeit	45
3.2 Aktivität	46
3.3 Wechselwirkungen von Strahlung mit Materie	48
3.3.1 Wechselwirkung von α -Strahlung	48
3.3.2 Wechselwirkung von β -Strahlung	49
3.3.3 Wechselwirkung von γ -Strahlung	50
3.3.4 Wechselwirkung von Neutronenstrahlung	51
3.4 Wirkung ionisierender Strahlung	53
3.4.1 Beschreibung der biologischen Strahlenwirkung	53
3.4.2 Bestrahlung, Kontamination und Inkorporation	54
3.4.3 Strahlendosis	55
3.4.3.1 Energiedosis, Ionendosis	56
3.4.3.2 Organdosis	56
3.4.3.3 Effektive Dosis	58
3.4.3.4 Dosisleistung	60
3.4.3.5 Dosisfaktor	60
3.4.3.6 Folgedosis	61
3.5 Strahlenschutz	62

3.5.1	Messung ionisierender Strahlung	63
3.5.1.1	Ionisationskammer	63
3.5.1.2	GEIGER-MÜLLER-Zählrohr	64
3.5.1.3	Stabdosisimeter	65
3.5.1.4	Filmdosisimeter	66
3.5.1.5	Neutronenmessung	67
3.5.1.6	Gamma-Spektroskopie	67
3.5.2	Quellen ionisierender Strahlung	68
3.5.2.1	Natürliche Quellen	68
3.5.2.2	Künstliche Quellen	70
3.5.3	Schutz vor ionisierender Strahlung	72
3.5.3.1	Maßnahmen zum Schutz vor Strahlungseinwirkungen	73
3.5.3.2	Strahlenschutzmaßnahmen in einem Kernkraftwerk	75
3.5.3.3	Kontrollierte Abgabe radioaktiver Stoffe	80
4	Brennstoffversorgung	83
4.1	Uranvorkommen und Uranerzgewinnung	83
4.1.1	Reichweite der Uranvorräte	85
4.1.2	Uranabbau und Vorbereitung zur Weiterverarbeitung	88
4.2	Urananreicherung, Brennstoffaufbereitung	89
4.2.1	Ausgangsmaterial für die Anreicherung	89
4.2.2	Grundlagen der Urananreicherung	90
4.2.3	Anreicherungsverfahren	93
4.2.3.1	Trenndüsenverfahren	93
4.2.3.2	Diffusionsverfahren	94
4.2.3.3	Zentrifugenverfahren	95
4.3	Brennstoffverarbeitung	99
4.4	Brennelemente	100
4.4.1	Allgemeiner Aufbau von Leichtwasserreaktor-Brennelementen	100
4.4.2	Brennelemente für Druckwasserreaktoren	101
4.4.3	Brennelemente für Siedewasserreaktoren	103
5	Reaktorphysik	105
5.1	Kernspaltung	105
5.1.1	Potentialwall	105
5.1.2	Tröpfchenmodell, Bindungsenergie	108
5.1.3	Spontane Kernspaltung	112
5.1.4	Induzierte Kernspaltung	112
5.1.4.1	Anregungsenergie	113
5.1.4.2	Klassifizierung von Neutronen	115

5.1.5	Wirkungsquerschnitt	116
5.2	Produkte der Kernspaltung	117
5.2.1	Spaltprodukte	117
5.2.2	Spaltneutronen	119
5.2.3	Effektive Neutronenausbeute	120
5.2.4	Energiebilanz der Kernspaltung	121
5.2.5	Nachzerfallswärme	122
5.3	Neutronenhaushalt	124
5.3.1	Kettenreaktion	124
5.3.2	Neutronenbilanz	125
5.3.3	Multiplikationsfaktor und 4-Faktoren-Formel	126
5.3.4	Reaktivität	129
5.4	Reaktorregelung	130
5.4.1	Verzögerte Neutronen	131
5.4.2	Steuer- oder Regelstäbe	132
5.4.2.1	Steuerelemente für Druckwasserreaktoren	133
5.4.2.2	Steuerelemente für Siedewasserreaktoren	137
5.4.3	Langzeitregelung	140
5.4.4	Streckbetrieb, Brennelementmanagement	141
5.4.5	Regelkreise im Reaktor	143
5.5	Moderator	145
5.5.1	Wirkungsweise des Moderators	145
5.5.2	Moderatorstoffe	146
5.5.3	Temperaturabhängigkeit der Moderation	149
5.6	Kühlmittel	149
5.6.1	Wasser als Kühlmittel	150
5.6.2	Gase als Kühlmittel	151
5.6.3	Flüssige Metalle als Kühlmittel	152
5.7	Homogener, heterogener Reaktor	153
5.8	Konversions- und Brutprozesse	154
5.8.1	Erzeugung von Plutonium	155
5.8.2	Erzeugung von $^{233}\text{Uran}$	157
5.9	Brennstoffabbbrand	157
6	Kernkraftwerke	159
6.1	Statistischer Überblick kerntechnischer Anlagen	160
6.1.1	Kerntechnische Anlagen in Deutschland	160
6.1.1.1	Deutsche Leistungsreaktoren	161
6.1.1.2	Deutsche Forschungs- und Schulungsreaktoren	161
6.1.1.3	Sonstige kerntechnische Anlagen	162
6.1.2	Überblick aller Kernkraftwerke weltweit	167
6.1.3	Deutsche Kernkraftwerke im internationalen Vergleich	168

6.2	Aufbau eines Kernkraftwerks	168
6.3	Kraftwerk-Kennzeichnungs-System	173
6.4	Sicherheitskonzepte	175
6.4.1	Sicherheitsphilosophien	176
6.4.1.1	Redundanz	177
6.4.1.2	Diversität	179
6.4.1.3	«2-aus-3»-Prinzip, Drahtbruchsicherung	180
6.4.1.4	Gebäude- und Geländekonzeptionierung	181
6.4.1.5	Fail-save-Prinzip	183
6.4.1.6	Sicherheitsabschließungen	184
6.4.1.7	Fachkunde des Personals	185
6.4.1.8	Wiederkehrende Prüfungen	186
6.4.1.9	Erfahrungsaustausch	186
6.4.2	Reaktorschutz	188
6.4.3	Ereignisbaum, Fehlerbaum	190
6.4.4	Auslegungstörfälle beim Druckwasserreaktor	192
6.4.4.1	Großes Primärleck	194
6.4.4.2	Mittelgroßes Primärleck	195
6.4.4.3	Kleines Primärleck	196
6.4.4.4	Dampferzeuger-Heizrohrleck	196
6.4.5	Kühlmittelverluststörfälle beim Siedewasserreaktor	196
6.5	Druckwasserreaktor	197
6.5.1	Aufbau des Druckwasserreaktors	198
6.5.2	Reaktordruckbehälter	200
6.5.3	Hauptkühlmittelpumpen	202
6.5.4	Dampferzeuger	205
6.5.5	Druckregelsystem	207
6.5.6	Volumenregelsystem	212
6.5.7	Nach- und Notkühlsysteme	213
6.5.7.1	Notspeisesystem	213
6.5.7.2	Nachkühlsystem	216
6.5.7.3	Sicherheitseinspeisesystem	218
6.5.7.4	Zusatzboriersystem	219
6.5.7.5	Druckspeicher	220
6.5.7.6	Beckenkühlsystem	220
6.5.8	Hilfssysteme	222
6.5.8.1	Lüftungssysteme	222
6.5.8.2	Kühlkreisläufe	223
6.5.8.3	Elektrizitätsversorgung im Kernkraftwerk	224
6.6	Siedewasserreaktor	229
6.6.1	Komponenten des Siedewasserreaktors	232
6.6.1.1	Reaktordruckbehälter	232

6.6.1.2	Kühlmittelumwälzpumpen	234
6.6.1.3	Wasserabscheidung und Dampftrocknung	236
6.6.2	Reaktorsteuerung und Reaktorregelung	236
6.6.3	Hilfssysteme	237
6.6.3.1	Druckentlastungssystem	237
6.6.3.2	Not- und Nachkühlsystem	239
6.6.3.3	Vergiftungssystem	240
6.6.3.4	Abdichtung der Turbinenwelle	240
6.7	Hochtemperaturreaktor	241
6.7.1	Aufbau des THTR	243
6.7.2	Brennelemente	243
6.7.3	Reaktorkomponenten	244
6.7.3.1	Reaktordruckbehälter und Einbauten	244
6.7.3.2	Gebälse	247
6.7.3.3	Dampferzeuger	248
6.7.4	Steuer- und Abschalteinrichtungen	249
6.7.5	Nachwärmeabfuhr und Sicherheitsaspekte	249
6.8	Kernfusionsreaktor	250
6.8.1	Grundlagen der Kernfusion	251
6.8.2	Fusionsprodukt	254
6.8.3	Plasmaeinschluss	257
6.8.4	Tokamak	261
6.8.5	Stellarator	262
6.8.6	Hilfssysteme	263
6.8.6.1	Heizung	264
6.8.6.2	Divertor-Vakuumsystem	266
6.8.6.3	Blanket	268
6.8.6.4	Tritiumkreislauf	270
6.8.6.5	Supraleitende Magnetspulen	271
6.8.6.6	Ports und Peripherie	273
6.8.7	Sicherheitsaspekte	273
6.8.8	Aktuelle Projekte zur Kernfusion	275
6.8.8.1	ITER – «Der Weg» zur Kernfusion	275
6.8.8.2	Wendelstein 7-X	278
7	Konventionelle Kraftwerkstechnik	281
7.1	Wasser-Dampf-Kreislauf	281
7.2	Komponenten des Sekundärkreises	284
7.2.1	Turbine	285
7.2.2	Kondensatoren, Kühlwasser	288
7.2.3	Wasserabscheider und Zwischenüberhitzer	294
7.2.4	Speisewasserbehälter	294
7.2.5	Speisewasserpumpen	296

7.2.6	Vorwärmstraßen	297
7.3	Generator, Maschinentransformator	297
8	Behandlung radioaktiver Reststoffe	299
8.1	Entladen der Brennelemente aus dem Reaktor	301
8.2	Transport- und Lagerbehälter für radioaktive Stoffe	304
8.3	Zwischenlager, Standortzwischenlager	307
8.4	Wiederaufarbeitung von ausgedienten Kernbrennstoffen	309
8.4.1	Verfahren zur Wiederaufarbeitung	310
8.4.2	Handhabung der Abfälle aus der Wiederaufarbeitung	312
8.5	Direkte Endlagerung, Konditionierung radioaktiver Reststoffe	314
8.6	Endlagerkonzepte	317
8.6.1	Endlagerung in tiefen geologischen Formationen	319
8.6.2	2-Endlager-Konzept in Deutschland	321
8.6.2.1	Schacht Konrad	322
8.6.2.2	Salzstock Gorleben	323
8.6.3	Barrierenkonzept, Langzeitsicherheit	325
	Weiterführende Literatur	329
	Quellenverzeichnis	330
	Stichwortverzeichnis	333