

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	5
<b>1 Einführung .....</b>	<b>15</b>
1.1 Geschichte der Kernenergie .....	15
1.2 Kernkraft in der Energieversorgung .....	18
1.2.1 Elektrische Energie .....	19
1.2.2 Primärenergie .....	24
<b>2 Grundlagen .....</b>	<b>27</b>
2.1 Aufbau des Atoms .....	27
2.2 Massendefekt, Bindungsenergie .....	31
<b>3 Ionisierende Strahlung .....</b>	<b>35</b>
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 $\alpha$ -Strahlung .....	48
3.3.2 Wechselwirkung von $\beta$ -Strahlung .....	49
3.3.3 Wechselwirkung von $\gamma$ -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	Stabdosimeter .....	65
3.5.1.4	Filmdosimeter .....	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
<b>4</b>	<b>Brennstoffversorgung .....</b>	<b>83</b>
4.1	Uranvorkommen und Uranerzgewinnung .....	83
4.1.1	Reichweite der Uranserreserven .....	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
<b>5</b>	<b>Reaktorphysik .....</b>	<b>105</b>
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	Brennstoffabbrand . . . . .	157
<b>6</b>	<b>Kernkraftwerke . . . . .</b>	<b>159</b>
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-safe-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	Auslegungsstörfälle 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	Zusatzzboriersystem . . . . .	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	Gebläse .....	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
<b>8</b>	<b>Behandlung radioaktiver Reststoffe .....</b>	<b>299</b>
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