

Inhaltsverzeichnis

1	Situation der Kernenergie in Deutschland	1
2	Struktur der Materie und Kernreaktionen	3
2.1	Strukturbereiche und ihre Physik	3
2.1.1	Struktur der Atomkerne	7
2.1.2	Struktur der Nukleonen	9
2.1.3	Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik	10
2.1.4	Kernaufbau	13
2.1.5	Bindungsenergie	15
2.1.6	Schalenmodell	17
2.1.7	Tröpfchenmodell	23
2.1.8	Stabilität der Atomkerne	25
2.2	Radioaktivität	27
2.2.1	α -Strahlung	28
2.2.2	β -Strahlung	30
2.2.3	γ -Strahlung	32
2.2.4	Nachweis von α -, β - und γ -Strahlung	34
2.3	Kernumwandlungen	35
	Literatur	38
3	Kernspaltung	39
3.1	Auslösung der Kernspaltung	39
3.2	Spaltprodukte	42
3.3	Energiefreisetzung bei der Spaltung	45
3.4	Neutronenerzeugung	47
3.4.1	Neutronenausbeute	47
3.4.2	Verzögerte Neutronen	47
3.4.3	Energiespektrum der Spaltneutronen	53
	Literatur	55

4 Neutronenreaktionen	57
4.1 Wechselwirkung von Neutronen mit Materie	57
4.1.1 Neutronenstrom und Neutronenflussdichte	57
4.1.2 Schwächung eines Neutronenstrahles	58
4.1.3 Wirkungsquerschnitt	59
4.2 Wirkungsquerschnitte für Einzelprozesse	60
4.3 Reaktionswahrscheinlichkeit	61
4.3.1 Makroskopischer Wirkungsquerschnitt	61
4.3.2 Reaktionsrate	64
4.4 Energieabhängigkeit der Wirkungsquerschnitte	65
4.4.1 $1/v$ -Bereich	66
4.4.2 Resonanzbereich	66
4.4.3 Schneller Bereich	67
4.4.4 Korrektur der thermischen Wirkungsquerschnitte	68
4.5 Differentieller Wirkungsquerschnitt	73
4.5.1 Differentieller Streuquerschnitt der Energieverteilung	73
4.5.2 Isotrope Streuung	74
4.6 Bremsung von Neutronen	76
4.6.1 Der Bremsstoß	77
4.6.2 Energieverteilung nach dem Stoß	78
4.6.3 Lethargie	79
4.6.4 Mittlerer Energieverlust pro Stoß	80
4.6.5 Bremszeit	83
4.6.6 Stoßdichte und Bremsdichte	84
4.7 Resonanzabsorption	85
Literatur	90
5 Unendlich ausgedehnter Reaktor	93
5.1 Kettenreaktionen	93
5.2 Multiplikation in homogenen Medien	95
5.3 Generationszyklus	97
5.4 Vier-Faktoren-Formel	98
5.5 Reaktivität	99
5.6 Homogene und heterogene Anordnungen	101
5.7 Berechnung der Vier Faktoren	102
5.7.1 Berechnung von η	103
5.7.2 Berechnung von f	104
5.7.3 Berechnung von ε	105
5.7.4 Berechnung von p in homogener Anordnung	109
5.7.5 Berechnung von p in heterogener Anordnung	110
5.7.6 Berechnung von p in quasihomogener Anordnung	112
Literatur	113

6 Neutronentransport	115
6.1 Bewegung der Neutronen	115
6.2 Allgemeine Transportgleichung	118
6.3 Monte-Carlo	122
6.4 Vereinfachungen der Transportgleichung	123
6.4.1 P_N -Näherung der Transportgleichung	123
6.4.2 Diffusionsgleichung	126
6.4.3 Das Ficksche Gesetz	126
6.4.4 Lösung der Diffusionsgleichung	132
6.4.5 Grenzbedingungen	132
6.4.6 Fermi-Alter-Theorie	136
Literatur	138
7 Diffusionsgleichung für den endlichen Reaktor	139
7.1 Multiplikationsfaktor für ein endlich ausgedehntes System	139
7.2 Konzept einer kritischen Anordnung	141
7.3 Kritische Abmessungen eines endlichen Systems	145
7.3.1 Kugelförmige Reaktoren	145
7.3.2 Reaktoren mit Quaderform	147
7.3.3 Reaktoren mit Zylinderform	148
7.4 Neutronenphysikalische Optimierung von Reaktoren	151
7.5 Heterogene Reaktoren	153
7.5.1 Berechnung des Neutronenflusses in der Einheitszelle	154
7.5.2 Berechnung des heterogenen Reaktors	162
7.6 Multigruppenrechnung	164
7.6.1 Bestimmung der Mehrgruppenkonstanten	166
7.6.2 Mehrgruppendiffusionsgleichung	168
7.7 Thermischer Reaktor mit Reflektor	172
Literatur	176
8 Reaktordynamik	177
8.1 Charakterisierung der relevanten Phänomene	177
8.2 Punktkinetische Gleichungen	178
8.2.1 Kinetik der verzögerten Neutronen	178
8.2.2 Einfache Lösung der punktkinetischen Gleichungen	180
8.3 Reaktivitätseffekte durch Temperaturänderung	181
8.4 Mittel- und langfristige Effekte	185
8.4.1 Brennstoffabbrand	185
8.4.2 Aufbau höherer Isotope	188
8.4.3 Aufbau von Spaltprodukten	188
8.4.4 Spaltproduktvergiftung	191
Literatur	196

9	Reaktorwärmetechnik	197
9.1	Grundsätzliche Fragen des technischen Reaktordesigns	197
9.1.1	Brennstoffvarianten	197
9.1.2	Moderatoren	198
9.1.3	Kühlmittel	199
9.1.4	Brennstoffhülle	199
9.1.5	Leistungsreaktortypen	199
9.2	Brennelemente	200
9.2.1	Brennstabauslegung	201
9.2.2	Formänderungen des Brennstoffs	202
9.2.3	Formänderungen des Hüllrohrs	204
9.2.4	Spaltprodukte	205
9.2.5	Abbrandverhalten des Brennstabs	209
9.2.6	Brennstabauslegung	210
9.2.7	Brennelementeinsatz im Reaktor	213
9.2.8	Spaltprodukte	214
9.3	Leistungsdichteverteilung	214
9.4	Temperaturfeld im Brennstoff	215
9.5	Wärmeübertragung im Spalt zwischen Brennstoff und Hülle	221
9.6	Temperaturverlauf in der Brennstoffhülle	223
9.7	Axiale Temperaturverteilung	224
9.8	Wärmeübergang an der Brennelementoberfläche	228
9.8.1	Wärmeübergang ohne Sieden	229
9.8.2	Wärmeübergang beim Sieden	231
9.9	Druckverlust im Reaktorkern	237
	Literatur	241
10	Moderne Leichtwasserreaktoren	243
10.1	Druckwasserreaktor (Typ Konvoi)	243
10.1.1	Brennelemente	244
10.1.2	Reaktoraufbau	252
10.1.3	Hauptförderpumpen	261
10.1.4	Dampfzeuger	263
10.1.5	Druckhalter	265
10.1.6	Rohrleitungen	266
10.1.7	Kreislaufauslegung	268
10.2	Siedewasserreaktor	269
10.2.1	Brennelemente	271
10.2.2	Reaktoraufbau	272
10.2.3	Kühlmittelumwälzpumpen	284
10.2.4	Dampfkreislauf	286
10.2.5	Abschlussarmaturen	287

10.2.6	Druckentlastungssystem	287
10.2.7	Kreislaufauslegung	288
10.3	Reaktormesstechnik	289
10.3.1	Ionisierende Strahlung	290
10.3.2	Neutronenfluss	300
	Literatur	309
11	Entwicklungen im Rahmen der Generation III+	311
11.1	Passive Sicherheitseigenschaften	311
11.2	Prinzip der räumlichen Trennung	312
11.3	Passive Primärkreiskühlung	313
11.3.1	Kerena Notkondensator	313
11.3.2	AP1000 Passives System zur Nachwärmeabfuhr	315
11.3.3	ESBWR Isolation Condenser	315
11.4	Passive Containmentkühlsysteme	316
11.4.1	AP1000 Containmentkühlsystem	317
11.4.2	Kerena Gebäudekondensator	319
11.4.3	ESBWR containmentkühlsystem	320
11.5	Sonstige Beispiele neuartiger passiver Systeme	321
11.5.1	Reaktordruckbehälterkühlung (Kerena und AP1000)	322
11.5.2	EPR Kernfänger	323
11.5.3	WWER-1000 Kernfänger	326
11.5.4	Kerena Passive druckgesteuerte Pulsgeber	327
11.6	Beispiele fortschrittlicher westlicher Reaktorkonzepte	328
11.6.1	Europäischer Druckwasserreaktor (EPR)	328
11.6.2	AP1000	330
11.6.3	KERENA	331
	Literatur	333
12	Weitere Reaktorkonzepte	335
12.1	Schwerwassermoderierter Druckröhrenreaktor	335
12.1.1	Grundlagen	336
12.1.2	Referenzanlage CANDU-6	337
12.1.3	Weiterentwicklung zum Advanced CANDU Reactor	341
12.2	Schneller Natriumgekühlter Reaktor	342
12.2.1	Grundlagen	342
12.2.2	Referenzanlage Loop-Typ: SNR-300	345
12.2.3	Referenzanlage Pool-Typ: Super Phénix	350
12.3	Hochtemperaturreaktor	353
12.3.1	Grundlagen	353
12.3.2	Referenzanlage HTR-Modul	356
12.4	Generation IV	360

12.4.1	Übersicht	361
12.4.2	Schnelle Reaktorkonzepte	362
12.4.3	Thermische Reaktorkonzepte	372
	Literatur	380
13	Werkstoff- und Integritätskonzept für druckführende Komponenten	383
13.1	Sicherheitstechnische Anforderungen; Weiterentwicklung	383
13.1.1	Regulatorische Anforderungen für wichtige Komponenten ...	384
13.1.2	Entwicklung und Einführung der Basissicherheit	385
13.1.3	Analyse des strukturmechanischen Verhaltens	389
13.1.4	Integritätskonzept	395
13.1.5	Sicherheitstechnische Einstufung von Systemen	398
13.2	Druckführende Komponenten mit höchsten Anforderungen	399
13.2.1	Betrachtungsumfang für eine 1300 MWe DWR-Anlage	399
13.3	Das Werkstoffkonzept in deutschen Leichtwasser-Reaktoren	400
13.3.1	Grundzüge des deutschen Werkstoffkonzepts	401
13.4	Beispielhafte Darstellung komponentenspezifischer Details	404
13.4.1	DWR-Anlage Baulinie Konvoi (Siemens/KWU)	404
13.4.2	Deutsche SWR-Anlagen	416
	Literatur	426
14	Betrieb	431
14.1	Brennelement-Einsatzplanung	431
14.1.1	Beladestrategien	432
14.1.2	Randbedingungen	433
14.1.3	Brennelement-Einsatz	436
14.1.4	Ergebnisse	437
14.1.5	Reaktivitätskoeffizienten	443
14.2	Handhabung von Brennelementen	446
14.2.1	Aufbau und Funktion der BE-Lademaschine	447
14.2.2	Bedienung der BE-Lademaschine	451
14.3	Aufbau, Funktion und Fahrkonzept von Steuerelementen	455
14.3.1	Mechanischer Aufbau	456
14.3.2	Aufgaben der Steuerelemente – Fahrkonzept	459
14.3.3	Neutronenphysikalische Wirksamkeit	462
14.3.4	Auslegung von Steuerelementen	467
14.4	Anfahren eines Reaktors	469
14.4.1	Aufheizen des Primärkreises auf ≥ 295 °C	470
14.4.2	Erreichen der Kritikalität	473
14.4.3	Überführen des Reaktors in den Leistungsbetrieb	476
14.4.4	Leistungsbetrieb	480
14.5	Lastfolgebetrieb	483
14.5.1	Arten der Leistungsregelung	484

14.5.2	Neutronenphysikalisches Verhalten	486
14.5.3	Einflussfaktoren auf die Lastwechselflexibilität	488
14.5.4	Einschränkungen der Lastwechselfähigkeit	490
14.6	Streckbetrieb	492
14.6.1	Stationäres Teillastdiagramm	493
14.6.2	Streckbetriebsfahrweisen	494
14.6.3	Reaktorphysikalische Auswirkungen des Streckbetriebs	496
	Literatur	499
15	Betriebsüberwachung druckführender Komponenten	501
15.1	Hintergrund	501
15.1.1	Alterungs-/integritätsrelevante Begriffsdefinitionen	502
15.2	Gruppenklassifizierung; Integritätsabsicherung	503
15.2.1	Sicherheitstechnisch orientierte Klassifizierung	503
15.2.2	Vorgehensweise zur Integritätsabsicherung	504
15.3	Komponentenspezifische Erkenntnisse im bisherigen Betrieb	506
15.3.1	Ursachen möglicher Schädigungsmechanismen	506
15.3.2	Folgen möglicher Schädigungsmechanismen	509
15.4	Prinzipielle Vorgehensweise zur Integritätsabsicherung	509
15.4.1	Ursachenüberwachung von Schädigungsmechanismen	509
15.4.2	Folgenüberwachung von Schädigungsmechanismen	511
15.5	Sprödbbruch-Sicherheitsanalyse des Reaktordruckbehälters	516
15.5.1	Bruchzähigkeiten im unbestrahlten und bestrahlten Zustand	516
15.5.2	Bruchmechanikkonzept zum RDB-Sicherheitsnachweis	518
15.5.3	Bestrahlungseinfluss auf die Werkstoffeigenschaften	519
15.5.4	Grundzüge des RT_{NDT} - und T_0 -Konzeptes	519
15.5.5	Bestrahlungs-Überwachungsprogramm	522
15.5.6	Fortschrittliche Sprödbrechtsicherheitsnachweise	522
	Literatur	527
16	Brennstoffzyklus	531
16.1	Uranvorkommen	531
16.1.1	Entstehung der Uranvorkommen	531
16.1.2	Uranvorkommen auf der Erde	533
16.1.3	Das Oklo-Phänomen	534
16.1.4	Uranabbau und Erzaufbereitung	535
16.1.5	Derzeitige Uranförderung	536
16.1.6	Weitere Möglichkeiten der Urangewinnung	536
16.1.7	Reichweite der Kernbrennstoffe	538
16.2	Vom Erz zum Kernbrennstoff	539
16.2.1	Weiterverarbeitung der Urankonzentrate	539
16.2.2	Aktuelle Verfahren zur Urananreicherung	540

16.2.3	Weiterverarbeitung zu Brennstoffpellets	550
16.3	Entsorgung radioaktiver Abfälle	550
16.3.1	Das aktuelle Entsorgungskonzept Deutschlands	551
16.3.2	Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen	552
16.3.3	Partitionierung und Transmutation	555
16.3.4	Zwischenlagerung	560
16.3.5	Endlagerung	575
	Literatur	580
Anhang A.		583
Sachverzeichnis		623