

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Situation der Kernenergie in Deutschland .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Struktur der Materie und Kernreaktionen .....</b>	<b>3</b>
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	$\alpha$ -Strahlung .....	28
2.2.2	$\beta$ -Strahlung .....	30
2.2.3	$\gamma$ -Strahlung .....	32
2.2.4	Nachweis von $\alpha$ -, $\beta$ - und $\gamma$ -Strahlung .....	34
2.3	Kernumwandlungen .....	35
Literatur	.....	38
<b>3</b>	<b>Kernspaltung .....</b>	<b>39</b>
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

<b>4 Neutronenreaktionen</b> .....	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 $1/\nu$ -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
<b>5 Unendlich ausgedehnter Reaktor</b> .....	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 $\eta$ .....	103
5.7.2 Berechnung von $f$ .....	104
5.7.3 Berechnung von $\epsilon$ .....	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

---

<b>6 Neutronentransport</b> .....	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
<b>7 Diffusionsgleichung für den endlichen Reaktor</b> .....	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
<b>8 Reaktordynamik</b> .....	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

<b>9</b>	<b>Reaktorwärmetechnik</b>	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
<b>10</b>	<b>Moderne Leichtwasserreaktoren</b>	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	Dampferzeuger	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
<b>11</b>	<b>Entwicklungen im Rahmen der Generation III+</b> .....	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
<b>12</b>	<b>Weitere Reaktorkonzepte</b> .....	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
<b>13</b>	<b>Werkstoff- und Integritätskonzept für druckführende Komponenten .....</b>	<b>383</b>
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
<b>14</b>	<b>Betrieb .....</b>	<b>431</b>
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 $\geq 295$ °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
<b>15</b>	<b>Betriebsüberwachung druckführender Komponenten</b> . . . . .	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	Sprödbruch-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 <sub>NDT</sub> - und T <sub>0</sub> -Konzeptes . . . . .	519
15.5.5	Bestrahlungs-Überwachungsprogramm . . . . .	522
15.5.6	Fortschrittliche Sprödbruchsicherheitsnachweise . . . . .	522
Literatur	.....	527
<b>16</b>	<b>Brennstoffzyklus</b> . . . . .	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
<b>Anhang A.</b> .....		<b>583</b>
<b>Sachverzeichnis</b> .....		<b>623</b>