
Inhaltsverzeichnis

Teil I Das physikalische und technische Sicherheitskonzept gegenwärtiger deutscher und zukünftiger europäischer Leichtwasserreaktoren

1 In der Welt betriebene Kernkraftwerke im Jahre 2011	3
1.1 Uranerz-Vorkommen und Uran-Verbrauch	4
1.2 Uran-Verbrauch	5
1.3 Uran-Anreicherung	6
1.4 Brennstoff-Wiederaufarbeitung	7
Literatur	8
2 Einige reaktorphysikalische Grundlagen	9
2.1 Kernspaltung	9
2.2 Neutronen-Reaktionsraten	11
2.3 Kritikalität	14
2.4 Neutronengifte für die Regelung des Reaktors	14
2.5 Brennstoff-Abbrand, Spaltprodukte und Transmutation	15
2.5.1 Berechnung der Brennstoff-Abbrandeffekte	15
2.6 Regelung von Temperatureffekten	16
2.7 Nachwärme der Brennelemente nach Reaktorabschaltung	17
2.8 Instationäre Reaktor-Leistungszustände und inhärente negative Rückwirkungen auf den effektiven Multiplikationsfaktor k_{eff}	18
2.8.1 Brennstoff-Doppler-Temperaturkoeffizient	18
2.8.2 Moderator-Temperaturkoeffizient bei LWRs	19
2.9 Theorie des Verhaltens von KKWs bei Leistungsänderungen	21
Literatur	23
3 Kernkraftwerke in Deutschland	25
3.1 Deutsche Leichtwasserreaktoren bis März 2011	25
3.2 Druckwasserreaktor	26
3.2.1 Reaktorkern	27
3.2.2 Reaktor-Druckbehälter	30

3.2.3	Kühlkreisläufe des DWRs	30
3.2.4	Reaktor-Sicherheitsbehälter (Containment)	33
3.2.5	Regel- und Abschaltsysteme	34
3.2.6	Reaktorschutzsystem	35
3.2.7	Notstromversorgung	35
3.2.8	Noteinspeisesysteme für die Dampferzeuger	35
3.2.9	Nachwärme Kühlung	35
3.2.10	Notkühlung	35
3.3	Siedewasserreaktor	36
3.3.1	Reaktorkern	38
3.3.2	Reaktor-Druckbehälter	39
3.3.3	Regel- und Abschaltsysteme	40
3.3.4	Absperrsysteme durch Ventile	40
3.3.5	Druckunterdrückungssystem des SWR-72	41
3.3.6	SWR-1000 Reaktorsicherheitsbehälter (Containment) und passive Kühlsysteme	42
3.3.7	Containment-Kondensatoren	44
3.3.8	Nachwärme Abfuhr- und Kernflutsysteme	45
3.3.9	Schwere Unfälle	45
3.3.10	Äußeres Containment	45
	Literatur	46
4	Radioaktive Belastung durch Kernkraftwerke	47
4.1	Jährliche Abgabe von Radioaktivität durch druckwasser- und Siedewasser-Reaktoren	47
4.2	Strahlendosis	48
4.2.1	Strahlenbelastung aus natürlichen Quellen in Deutschland	51
4.2.2	Strahlendosis aufgrund menschlich verursachter Strahlung	52
4.3	Strahlenbelastung durch den Betrieb von Kernkraftwerken	53
4.3.1	Strahlenbelastung durch Emissionen von Kohlekraftwerken	53
4.3.2	Öffentliche und berufliche Gesundheitsschäden	54
4.3.3	Berufsbedingte Strahlenbelastung	55
4.4	Zulässige Strahlenbelastungen	55
4.4.1	Zulässige Strahlenbelastung der Bevölkerung durch kerntechnische Anlagen	55
4.4.2	Grenzen für die Belastungsdosis durch Strahlung bei beruflich mit Strahlung befassten Personen	56
4.4.3	Grenzen für die Belastungsdosis für Personen von Rettungsteams im Falle einer Reaktorkatastrophe	56
4.4.4	Schutz der Bevölkerung bei Reaktorunfällen	57
	Literatur	57

5	Sicherheitskonzept von Leichtwasserreaktoren	59
5.1	Einleitung	59
5.2	Sicherstellung der Schutzziele	60
5.2.1	Einschluss durch Aktivitätsbarrieren	60
5.2.2	Mehrstufenprinzip der sicherheitstechnischen Auslegung	60
5.3	Auslegungsstörfälle	63
5.4	Probabilistische Analysen	63
5.5	Stabiles Zeitverhalten der Leistung bei Herausziehen von Regel/Absorber-Stäben beim DWR	64
5.6	Selbstregelungsverhalten des SWR bei geforderten Leistungsänderungen	66
5.7	Instrumentierung, Regelung, Reaktorschutzsystem	67
5.8	Die mechanische Auslegung des primären Kühlsystems eines DWRs	68
5.8.1	Aufbau des Reaktor-Druckbehälters	68
5.8.2	Qualitätssicherung und wiederkehrende Prüfungen (Basis-Sicherheit)	70
5.8.3	Wasserdruckprobe des Reaktor-Druckbehälters	70
5.8.4	Leck-vor-Bruch Kriterium	71
5.9	Reaktor-Sicherheitsbehälter (Containment)	71
5.9.1	Sicherheitseinrichtungen im äußeren Sicherheitsbehälter (Containment)	71
5.9.2	Äußere Stahlbetonhülle	73
5.10	Analysen von Betriebstransienten (Sicherheitsebene 3)	73
5.11	Betriebstransienten von LWRs bei funktionierender Reaktor- Abschaltung (Sicherheitsebene 3)	74
5.11.1	Ausfall der elektrischen Eigenbedarfsversorgung (Notstromfall) bei funktionierender Schnellabschaltung	74
5.12	Betriebstransienten mit Versagen der Schnellabschaltung (Sicherheitsebene 3)	76
5.12.1	Ausfall der elektrischen Eigenbedarfsversorgung (Notstromfall) und Versagen der Schnellabschaltung	76
5.13	Störfälle durch Kühlmittelverlust	77
5.13.1	Kühlmittelverlust-Störfall durch 2F-Bruch der Hauptkühlmittelleitung	78
5.13.2	Kühlmittelverlust-Störfall durch kleinere Kühlmittlecks	79
	Literatur	80
6	Probabilistische Analysen und Risikostudien	81
6.1	Ereignisbaum-Analysen	81
6.2	Probabilistische Analyse für Druck- und Siedewasserreaktoren	83
6.2.1	Ergebnisse probabilistischer Sicherheitsanalysen	83

6.3	Freisetzung von Radioaktivität nach einem Kernschmelzunfall und Versagen der Dichtheit der Sicherheitsbehälters (Containment)	87
6.4	Ausbreitung der Radioaktivität nach einem schweren Reaktorunfall	88
6.5	Ergebnisse der amerikanischen und deutschen Risikostudie Phase A	89
	Literatur	90
7	Auslegung von Leichtwasserreaktoren gegen externe Ereignisse	93
7.1	Erdbeben	93
7.1.1	Festlegung des Bemessungserdbebens nach KTA2201	94
7.1.2	Erdbebenbelastungen der Komponenten im KKW	98
7.1.3	Vergleich zwischen Erdbeben-Auslegung und Erdbebenschäden bestehender Kernkraftwerke	100
7.2	Auslegung gegen Flugzeugabsturz	100
7.3	Chemische Explosionen	104
7.4	Überflutung durch Hochwasser	105
	Literatur	106
8	Vergleich des Risikos der Kernkraftwerke mit dem Risiko anderer Energiesysteme	109
8.1	Vergleich des Risikos von großen Unfällen	109
8.2	Naturkatastrophen und technische Systeme	111
	Literatur	112
9	Bewertung der Risikostudien und verbessertes (neues) Sicherheitskonzept für LWRs	113
9.1	Basis des neuen, verbesserten Sicherheitskonzepts	114
9.2	Dampfexplosion durch Kontakt heißer Kernschmelze mit Kühlwasser	116
9.2.1	Freigesetzte mechanische Energie bei einer Dampfexplosion	116
9.2.2	Theorie der Dampfexplosion	117
9.2.3	Dampfexplosion im Reaktor-Druckbehälter	118
9.2.4	Dynamisch-mechanische Analyse des Reaktor-Druckbehälters	120
9.3	Wasserstoff-Detonation nach einem Kernschmelzunfall	121
9.3.1	Mechanische Tragfähigkeit des Konvoi-DWR-Containments gegenüber Wasserstoff-Detonationen	122
9.3.2	Mechanische Tragfähigkeit des EPR-Containments gegenüber Wasserstoff-Detonationen	123
9.3.3	Wasserstoff-Freisetzung bei Siedewasserreaktoren	124
9.4	Andere Unfallsequenzen mit möglicher großer Radioaktivitätsfreisetzung (Deutsche Risikostudie Phase A (1979/1980))	124
9.4.1	Bruch einer Leitung des Nachkühlsystems im Ringraum	124

9.4.2	Kernschmelzen nach einem nicht beherrschten großen Dampferzeuger-Heizrohrleck.	125
9.4.3	Kernschmelzen unter hohem primärem Kühlmitteldruck.	125
9.4.4	Anlageninterne Notfallschutz-Maßnahmen: Druckentlastung.	126
9.5	Phänomene beim Durchschmelzen des Reaktorkerns bei niedrigem primären Druck.	127
9.5.1	Unterkritikalität des geschmolzenen LWR-Kerns.	127
9.5.2	Kühlung des geschmolzenen Kerns.	128
9.5.3	Möglichkeit der Kühlung des geschmolzenen Reaktorkerns durch Fluten des Reaktor-Druckbehälters von außen.	128
9.5.4	Chemo-physikalische Prozesse in der Kernschmelze.	129
9.6	Durchschmelzen der Kernschmelze beim Druckwasser-Reaktor (Reaktor-Druckbehälter wird nicht von außen geflutet).	131
9.7	Durchschmelzen des Reaktorkerns in den Untergrund unter dem Reaktorgebäude.	132
9.7.1	Mögliche Gegenmaßnahmen bei Vordringen der Kernschmelze in den Untergrund.	134
9.8	Kühlung des geschmolzenen Kerns.	134
9.8.1	Andere Core-Catcher Designs.	134
9.8.2	Direct Containment Heating Probleme (direkte Aufheizung der Containment Atmosphäre).	136
9.9	Zusammenfassung der Ergebnisse der Sicherheitsforschung zum KHE-Sicherheitskonzept.	136
9.10	Anlageninterne Notfallmaßnahmen.	137
9.10.1	Sicherstellung der Notstromversorgung.	138
9.10.2	Sicherstellung der Speisewasserversorgung für die Dampferzeuger.	138
9.10.3	Sicherstellung der Kernkühlung beim DWR.	138
9.10.4	Beispiele für anlageninterne Notfallschutzmaßnahmen beim SWR.	138
9.10.5	Sicherstellung der Notstromversorgung beim SWR.	139
9.10.6	Sicherstellung der Speisewasserversorgung beim SWR.	139
9.10.7	Überdruck im inneren Containment.	139
9.10.8	Katalytische Wasserstoff-Rekombinatoren.	139
9.11	Mobile Katastrophen-Einsatzteams.	139
9.12	Zukünftige Entwicklung der Sicherheitskonzepte in der Welt und Laufzeitverlängerung.	140
	Literatur.	140

10 Die schweren Reaktorunfälle von Three Mile Island,

Tschernobyl und Fukushima.	145
10.1 Der Three Mile Island Unfall.	145

10.2	Der Tschernobyl-Unfall	148
10.2.1	Strahlenbelastung der Betriebsmannschaft, Katastrophenhelfer und Bevölkerung	149
10.2.2	Tschernobyl Unfallbeseitigung	150
10.2.3	Kontaminierte Landflächen	151
10.3	Der Reaktorunfall von Fukushima (Japan)	152
10.3.1	Messungen der freigesetzten Radioaktivität	156
10.3.2	Gesundheitsschäden durch radioaktive Strahlung	156
10.3.3	Kontamination durch Cs-134 und Cs-137	157
	Literatur	159
Teil II Sicherheit deutscher Leichtwasserreaktoren bei postuliertem Flugzeugaufprall		
11	Einleitung	163
	Literatur	164
12	Übersicht über Anforderungen und derzeitige Auslegung	165
12.1	Mögliche Einwirkungen	165
12.2	Anforderungen an die Auslegung	166
12.3	Entwicklung der Auslegung in Deutschland	167
	Literatur	169
13	Einwirkungsszenarien	171
13.1	Zufälliger Flugzeugaufprall	171
13.2	Vorsätzlich herbeigeführter Flugzeugaufprall	174
13.2.1	Relevante Flugzeugtypen	175
13.2.2	Anflugwinkel und Anfluggeschwindigkeiten	178
	Literatur	181
14	Belastungsansätze für Flugzeugaufprall	183
14.1	Allgemeines	183
14.2	Rechenmodelle zur Bestimmung einer Stoßkraft-Zeit-Funktion	184
14.3	Belastungsansätze für schnell fliegende Militärmaschinen	187
14.3.1	Belastungsansatz für Starfighter	187
14.3.2	Belastungsansatz für Phantom	188
14.4	Belastungsansätze für große Passagierflugzeuge	191
14.4.1	Belastungsansatz für ein Langstreckenflugzeug vom Typ Boeing 747	193
14.4.2	Belastungsansatz für Mittelstreckenflugzeug Typ Airbus A320 ...	202
14.5	Zusammenstellung der Belastungsfunktionen	203
	Literatur	204
15	Nachweis des Strukturverhaltens bei Flugzeugaufprall	207
15.1	Allgemeines	207

15.2	Lokales Strukturverhalten: Widerstand gegen Eindringen.....	208
15.3	Globales Strukturverhalten: Standsicherheit	213
15.4	Induzierte Erschütterungen.....	214
	Literatur	218
16	Sonderbetrachtungen	219
16.1	Triebwerksaufprall	219
16.2	Wrackteile, Kleinflugzeuge und Trümmer	220
16.3	Treibstoffbrand	221
	Literatur	222
17	Bewertung des Schutzzustandes deutscher und ausländischer Anlagen.....	225
17.1	Schutzzustand deutscher Reaktoren	225
17.2	Auslegung ausländischer Reaktoren	227
18	Zusammenfassung	229
Teil III	RODOS als Beispiel für ein rechnergestütztes Entscheidungshilfesystem für den Notfallschutz nach kerntechnischen Unfällen ..	
19	Einleitung	233
	Literatur	234
20	Radiologische Grundlagen, Notfallschutz, Modellierung der radiologischen Lage	235
20.1	Von einer Aktivitätsfreisetzung in die Atmosphäre zur Strahlenexposition des Menschen.....	235
20.2	Gesundheitsschäden durch Strahlenexposition.....	238
20.3	Notfallschutz und Notfallschutzmaßnahmen.....	239
20.3.1	Grundlagen des Notfallschutzes	239
20.3.2	Phasen eines Unfalls aus dem Blickwinkel des Notfallschutzes ...	240
20.3.3	Mögliche Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung, und deren Einleitung.....	241
20.4	Modelle zur Erfassung der radiologischen Lage (terrestrische Pfade)	246
20.4.1	Modelle zur atmosphärischen Ausbreitung.....	246
20.4.2	Modelle zur Ablagerung von Radionukliden auf Oberflächen	248
20.4.3	Prozesse und Modelle der Aktivitätsausbreitung in der menschlichen Nahrungskette	249
20.5	Berechnung der Dosen durch Wolken- und Oberflächen- sowie Nahrungsmittelaktivität.....	251
20.5.1	Dosen aus der Wolke und von kontaminierten Flächen	252
20.5.2	Dosen aus der Nahrungskette	253
	Literatur	253

21 Das Entscheidungshilfesystem RODOS 255

 21.1 Historische Entwicklung 255

 21.2 Überblick über die Modelle in RODOS 256

 21.2.1 Die terrestrische Modellkette 256

 21.2.2 Die Modelle ERMIN und AGRICP für radiologische Folgen
 in kontaminierten bewohnten bzw. landwirtschaftlich
 genutzten Gebieten 259

 21.2.3 Die hydrologische Modellkette 260

 21.3 Darstellung ortsabhängiger Ergebnisse in RODOS 261

 21.4 Die RODOS Zentrale in Deutschland 262

 21.4.1 Daten- und Nutzerkonzept 262

 21.4.2 RODOS – Betriebsweisen in den drei Unfallphasen 264

 21.5 Die Anpassung an nationale Verhältnisse 264

 Literatur 265

22 RODOS und der Fukushima-Unfall 267

**23 Neuere Entwicklungen im radiologischen Notfall-Management
im Europäischen Rahmen** 271

 Literatur 272

Sachverzeichnis 273