

Inhalt

1 Einleitung.....	1
1.1 Literatur und Quellen	10
1.2 Grundlegende Merkmale deutscher Leistungskernkraftwerke.....	13
1.2.1 Das Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor.....	13
1.2.2 Unterschiede bei Siedewasser- und Druckwasserreaktoren	18
2 Die Anfänge der Kernspaltung	25
2.1 Erste Erkenntnisse	25
2.1.1 Die grundlegende Entdeckung und ihre physikalische Deutung	25
2.1.2 Die Ursachen der Gefahren der Kernenergie	28
2.1.3 Erste Überlegungen zur Nutzung der Kernenergie	29
2.1.4 Wie nahe kam Deutschland an die Entwicklung atomarer Waffen?	31
2.2 Forschung und Erfahrungen in den USA	32
2.2.1 Der Anfang des amerikanischen Atombomben-Projekts	32
2.2.2 Das Plutonium-Projekt.....	33
2.2.3 Die Strahlenschutz-Problematik.....	35
2.2.4 CP-1, der erste Kernreaktor der Welt.....	36
2.2.5 Forschung in den Laboratorien Argonne und Clinton/Oak Ridge	37
2.2.6 Die Hanford-Plutonium-Fabriken und ihre Spaltprodukte	40
3 Die Anfänge der friedlichen Kernenergienutzung und ihre Sicherheitsprobleme.....	43
3.1 Das amerikanische Atomgesetz von 1946 und seine Neufassung 1954.....	43
3.1.1 Das <i>Reactor Safeguards Committee</i> und die Reaktorsicherheits-Frage	44
3.1.2 Erste öffentliche Diskussionen über die Gefahren der friedlichen Atomenergie-Nutzung	46
3.1.3 Die frühe amerikanische Standortpolitik	48

3.2	UN-Konferenz zur friedlichen Nutzung der Kernenergie 1955 und ihre Wirkung in Deutschland	51
3.2.1	Hochstimmung für „Atome für den Frieden“.....	51
3.2.2	Gefahrenpotenzial und Reaktorsicherheit.....	52
3.2.3	Öffentliche Berichterstattung und Rezeption.....	55
4	Schadensereignisse, extreme Tests und Unfälle in Reaktoranlagen, ihre öffentliche Wahrnehmung und ihre Folgen	59
4.1	Vereinigte Staaten.....	59
4.1.1	Erste amerikanische Resümeees über Reaktorsicherheit	59
4.1.2	BORAX-1 1954	59
4.1.3	EBR-1 1955	61
4.1.4	SL-1 1961	62
4.2	Kanada	64
4.3	Großbritannien.....	64
4.4	Sowjetunion	65
4.5	Erste öffentliche Risikodiskussionen in der Bundesrepublik	66
4.5.1	Wissenschaft und Politik zu Aspekten der Atomenergie.....	66
4.5.2	Die staatliche Organisation des wissenschaftlich- technischen Sachverständs.....	68
4.5.3	Das Kernforschungszentrum Karlsruhe	82
4.5.4	Die KfK-Debatte im Landtag von Baden- Württemberg.....	87
4.5.5	Anhaltender Widerstand in Linkenheim und Friedrichstal	88
4.5.6	Der Standort BASF/Ludwigshafen	91
4.5.7	Der Standort Breisach/Wyhl und der Freiburger Wyhl-Prozess	94
4.5.8	Der Grafenrheinfeld-Prozess vor dem VG Würzburg....	113
4.5.9	Das Kalkar-Urteil des Bundesverfassungsgerichts	116
4.5.10	Der Mannheimer Wyhl-Prozess	118
4.6	Der Canvey-Island-Report 1978.....	120
4.7	Der Unfall im Three Mile Island Block 2, 1979	123
4.8	Die Reaktorkatastrophe in Tschernobyl, 1986	136
4.8.1	Der Unglücksreaktor RBMK-1000, Block 4	137
4.8.2	Ereignisablauf und Ursachen.....	142
4.8.3	Öffentliche Wahrnehmung und Schadensfolgen.....	148
4.8.4	Konsequenzen für die Reaktorsicherheit	158
4.9	Das Reaktorunglück in Fukushima-Daiichi 2011	166
4.9.1	Das Containment Mark I.....	171
4.9.2	Der Ablauf der Ereignisse in Fukushima-Daiichi.....	176
4.9.3	Die radiologischen Folgen des Unfalls am Standort Fukushima-Daiichi	188

4.9.4	Die öffentliche Wahrnehmung der Ereignisse in Fukushima-Daiichi und die politischen Konsequenzen für die Kernenergienutzung	198
4.9.5	Die Überprüfung der deutschen Kernkraftwerke und erste Schlussfolgerungen	204
5	Die Suche nach der richtigen Sicherheits-Konzeption	209
6	Die Deterministik bei Auslegung, Konstruktion und Herstellung	215
6.1	Das Regelwerk zur Kodifizierung der sicherheitstechnischen Tatbestände und Anforderungen zur Schadensvorsorge	215
6.1.1	Die BMI-Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke.....	217
6.1.2	BMI/BMU-Richtlinien	222
6.1.3	Die RSK-Leitlinien	225
6.1.4	Die Störfall-Leitlinien	232
6.1.5	Das KTA-Regelwerk.....	240
6.1.6	RSK/GPR-Sicherheitsanforderungen für Druckwasserreaktoren.....	243
6.1.7	ILK-Empfehlungen	247
6.2	Die Sicherheitsebenen, die Auslegungsprinzipien für Sicherheitseinrichtungen und die Klassifizierung der Stör- und Unfälle.....	249
6.3	Der „Größte Anzunehmende Unfall“ (GAU)	258
6.3.1	Das Konzept des „maximum credible accident“ (mca) in den USA	258
6.3.2	Internationale Kritik am mca-Konzept	262
6.3.3	Die Anwendung des mca/GAU-Konzeptes in der Bundesrepublik.....	262
6.3.4	Die Auseinandersetzung um das mca/GAU- Konzept und seine Weiterentwicklung.....	266
6.4	Standortwahl und Reaktorsicherheitstechnik	269
6.4.1	Die Standortkriterien der USAEC und deren Kritik....	269
6.4.2	Die deutsche Position	273
6.5	Die Begrenzung potenzieller Unfallfolgen durch die Sicherheitshülle.....	275
6.5.1	Die Containment-Konzepte in den USA	275
6.5.2	Containments der Leistungskernkraftwerke in der Bundesrepublik mit Siedewasserreaktor.....	316
6.5.3	Containments der Leistungskernkraftwerke in der Bundesrepublik mit Druckwasserreaktor.....	339
6.5.4	Die weitere Entwicklung der DWR-Containments – Konstruktion und Werkstoffe	354
6.5.5	Der Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter – Erdbeben, Flugzeugabsturz, Explosionsdruckwellen, Sabotage... ..	363

6.5.6	BMwF/BMBW/BMFT- und BMI-Forschungsvorhaben zur Untersuchung von Reaktorsicherheitsbehältern und -gebäuden.....	386
6.5.7	Nationale und internationale Forschungsvorhaben zum Schutz gegen Einwirkungen von außen (EVA) – unterirdische Bauweise, Explosionsdruckwellen, Erdbeben, Flugzeugabsturz.....	401
6.5.8	Weiterentwicklung der Containment-Konzepte	426
6.6	Das Konzept der Berstsicherheit von Druckwasser-reaktoren (DWR)	446
6.6.1	Das Sicherheitskriterium „Leck-vor-Bruch“.....	446
6.6.2	Die Forderungen des ACRS	464
6.6.3	Cottrell-Memorandum und Marshall-Bericht	465
6.6.4	Berstsicherung beim geplanten BASF-Kernkraftwerk.....	466
6.7	Die Kernnotkühlung.....	476
6.7.1	Die LOFT-Versuchsanlage der USAEC/USNRC und ihr technisch-wissenschaftliches Umfeld	477
6.7.2	Das BMFT-Projekt Kernnotkühlung	514
6.7.3	Notkühlsysteme mit „Heißeinspeisung“	529
6.7.4	Das LOFT-Programm 1976–1989	535
6.7.5	Die Versuchsanlage PKL von Siemens/KWU.....	542
6.7.6	Das LOBI-Projekt von EURATOM und BMFT	556
6.7.7	Das 2D/3D-Projekt von USNRC/JAERI/BMFT, UPTF im GKM.....	562
6.7.8	Das UPTF-TRAM-Forschungsvorhaben des BMFT/BMBF.....	589
6.8	Die Entwicklung der Leittechnik.....	603
6.8.1	Die Anfänge in den USA	604
6.8.2	Die Entwicklung der betrieblichen Leittechnik in der Bundesrepublik.....	617
6.8.3	Reaktorschutzfunktion und Reaktorschutzsystem in deutschen Kernkraftwerken	641
7	Die Probabilistik und die Frage nach dem Restrisiko	651
7.1	Die Einführung der probabilistischen Methode	651
7.2	Reaktorsicherheits-Studien in den USA 1957–1990.....	655
7.2.1	Der Brookhaven-Bericht WASH-740, 1957	655
7.2.2	Der Rasmussen-Report WASH-1400, 1975	658
7.2.3	Die Risiko-Studie NUREG-1150, 1990	669
7.3	Die Deutsche Risikostudie Phase A, B	674
8	Mensch – Technik – Organisation – Umfeld.....	685
8.1	Simulatorschulung	685
8.2	Die Sicherheitskultur	691
8.3	Die Nukleare Sicherheitsarchitektur (NSA)	708

9 Die Sicherheit des Reaktordruckbehälters (RDB) von Druckwasserreaktoren	715
9.1 Die Regelwerke	715
9.1.1 Der konventionelle Kesselbau im 20. Jahrhundert	718
9.1.2 Der nukleare Kesselbau.....	722
9.1.3 Schwere Schadensfälle im nichtnuklearen Bereich und ihre Konsequenzen.....	723
9.1.4 Anforderungen an die RDB für Großkernkraftwerke....	738
9.2 Alternativen zu Vollwandbehältern aus Schmiedestücken ...	748
9.2.1 RDB aus Spannbeton	748
9.2.2 Mehrlagen-Stahlbehälter	753
9.2.3 Das Elektroschlacke-Umschmelzverfahren (MHKW)	764
9.2.4 Vorgespannte Guss-Druckbehälter (VGD).....	769
9.2.5 Formgeschweißte Großbehälter	780
9.3 Das amerikanische RDB-Vorbild.....	786
9.3.1 Die ASTM-Reaktorwerkstoffe	786
9.3.2 Konstruktionsbeispiele Shippingport, Indian Point, Yankee Rowe, Trino, Haddam Neck	790
9.4 Reaktordruckbehälter deutscher Anlagen.....	798
9.4.1 Die Reaktorbaustähle	798
9.4.2 RDB-Beispiele MZFR, Atucha-2, NS Otto Hahn, KWO, KWB-A, KMK, KKP-2.....	804
9.5 Reaktordruckbehälter russischer Bauart - WWER-440/1.000.....	820
10 Forschungen zur Qualitätssicherung und Quantifizierung des Sicherheitsabstands für druckführende Umschließungen	825
10.1 Frühe internationale Vorhaben und Kooperationen.....	825
10.1.1 Das amerikanische HSST-Programm.....	825
10.1.2 Die EURATOM-Forschungsprogramme	832
10.2 Anfänge deutscher Forschungsvorhaben „Reaktordruckbehälter“.....	835
10.2.1 Forschungsprojekte in den 1960er Jahren (national/international)	835
10.2.2 RSK-Ad-hoc-Ausschuss RDB.....	838
10.2.3 Der MPA-Statusbericht 1970/1971 und der IRS-Statusbericht 1973/1976.....	841
10.2.4 Das Aktionskomitee Unterplattierungsrisse (AK UPR) 1971	851
10.2.5 Das Sofortprogramm 22 NiMoCr 3 7, RS 84.....	856
10.2.6 Das Dringlichkeitsprogramm 22 NiMoCr 3 7, RS 101.....	864
10.2.7 Schadenphänomene/Fehleratlas	871
10.2.8 Die BMI-Krisensitzung 1975	875
10.2.9 Das Sofortprogramm 20 MnMoNi 5 5.....	877
10.3 Das Forschungsprogramm Reaktorsicherheit der Bundesregierung	880

10.4 Das BMFT-Projekt Qualitätssicherung	882
10.4.1 Die Anfänge der Ultraschall-Prüfung	883
10.4.2 Die Ultraschallprüfung der Druckführenden Umschließung	885
10.5 Das BMFT-Forschungsvorhaben Komponentensicherheit (FKS).....	888
10.5.1 Die FKS-Zielsetzung	890
10.5.2 Die FKS-Organisationsstruktur.....	894
10.5.3 Die Stellung der MPA Stuttgart.....	896
10.5.4 Durchführung und Ergebnisse des FKS Phase I und II.....	903
10.5.5 Das Gesamtkonzept Komponentensicherheit	911
10.5.6 Das Forschungsvorhaben Großbehälter (FV-GB)...	912
10.5.7 Das HDR-Sicherheitsprogramm.....	917
10.5.8 Phänomenologische Behälterberstversuche (BV)...	928
10.5.9 RDB-Notkühlssimulationen (NKS).....	935
10.5.10 Bestrahlung (BE).....	938
11 Die Basissicherheit und das Basissicherheitskonzept für die druckführende Umschließung	943
11.1 Die Basissicherheit und ihre Vorgeschichte	943
11.1.1 Die Bedingungen der „primären“ RDB-Berstsicherheit	943
11.1.2 Das Thesenpapier	945
11.2 Die Übernahme der Basissicherheit in das Regelwerk	948
11.2.1 Die RSK-Leitlinien für DWR vom 24.1.1979	948
11.2.2 Die Anwendung der Basissicherheit auf die „Äußenen Systeme“	949
11.2.3 Die Rahmenspezifikation Basissicherheit.....	950
11.2.4 Die Basissicherheit im KTA-Regelwerk	953
11.3 Das Basissicherheitskonzept.....	953
11.3.1 Umrüstungen.....	957
11.3.2 Internationale Beachtung.....	961
12 Neue fortschrittliche Ansätze für Leichtwasserreaktoren.....	965
12.1 Entwicklungen in Deutschland	975
12.2 Das deutsch-französische Projekt EPR.....	977
13 Zukunftsoption Kernenergie in Deutschland?	983
14 Schlussbetrachtung	991
Anhang	999
Glossar	1053
Literatur	1057
Namenverzeichnis	1103
Sachverzeichnis	1107