

Erwin Münch (Hrsg.)

TATSACHEN ÜBER KERNENERGIE

Dritte, überarbeitete Auflage



Verlag W. Girardet · Essen



ENERGIEWIRTSCHAFT UND TECHNIK
VERLAGSGESELLSCHAFT MBH · GRÄFELFING

Inhalt

Allgemeiner Studentenausschuß
Fachschaft Maschinenbau
Technische Hochschule Darmstadt
Hochschulstraße 1

Geleitwort	XI
Vorwort	XIII
1. Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland – mit oder ohne Kernenergie?	1
1.1. Einleitung	1
1.2. Entwicklungsperspektiven der Energienachfrage – ein nationales oder internationales Problem?	2
1.3. Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland	7
1.4. Energieversorgungsalternativen	10
1.5. Versuch einer zusammenfassenden Wertung	16
2. Energieerzeugung durch Kernspaltung	18
2.1. Einleitung	18
2.2. Kernphysikalische Prozesse	19
2.2.1. Prinzip der Kernspaltung	19
2.2.2. Energiefreisetzung	19
2.2.3. Kettenreaktion	20
2.2.4. Moderation	22
2.2.5. Steuerung und Selbststabilisation	22
2.2.6. Brutvorgang	24
2.3. Die wichtigsten Leistungsreakortypen	25
2.3.1. Der Druckwasserreaktor	25
2.3.2. Der Siedewasserreaktor	28
2.3.3. Der Hochtemperaturreaktor	28
2.3.4. Der Schnelle Brutreaktor	29
2.3.5. Andere Reaktortypen	31
2.3.6. Diskussion der Reaktortypen	31
2.4. Wirkungsgrad, Abwärme	33
2.5. Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland	
3. Die Sicherheit von Kernkraftwerken	37
3.1. Einleitung	37
3.2. Quellen der Radioaktivität im Reaktor	38
3.3. Barrieren gegen Spaltprodukte	38

3.4.	Qualitätskontrolle und Prüfung	39
3.5.	Störfälle und GaU	39
3.6.	Hypothetische Störfälle	42
3.7.	Sicherheitsanalyse	43
3.8.	Rasmussen-Studie	46
3.9.	Die deutsche Risikostudie	48
3.10.	Sicherheitsforschung	50
3.11.	Zusammenfassung	50
4.	Der Brennstoffkreislauf von Kernkraftwerken	53
4.1.	Einleitung	53
4.2.	Die Kernenergie und ihr Brennstoffkreislauf	54
4.3.	Urangewinnung	54
4.4.	Erzaufbereitung	57
4.5.	Urananreicherung	58
4.6.	Brennelement-Herstellung	61
4.7.	Transport radioaktiver Materialien	62
4.8.	Das integrierte Entsorgungskonzept	63
4.9.	Wiederaufarbeitung	64
4.9.1.	Aufgaben und Ziele	64
4.9.2.	Warum Wiederaufarbeitung?	66
4.9.3.	Die verschiedenen Schritte der Wiederaufarbeitung	67
4.10.	Refabrikation neuer Kernbrennstoffe	68
4.11.	Behandlung radioaktiver Abfälle, Endlagerung	68
4.12.	Zusammenfassung	71
5.	Die Wiederaufarbeitung und Behandlung radioaktiver Abfälle	73
5.1.	Einleitung	73
5.2.	Verfahrensbeschreibung	75
5.2.1.	Die Wiederaufarbeitung von Brennelementen nach dem PUREX-Prozeß	75
5.2.2.	Abfallbehandlung	79
5.3.	Das Risiko der Wiederaufarbeitung	83
5.3.1.	Strahlenexposition beim bestimmungsgemäßen Betrieb einer Wiederaufarbeitungsanlage	83
5.3.2.	Sicherheitsmaßnahmen zur Vermeidung größerer Freisetzungen bei Störfällen	84
5.3.3.	Störfälle bei Wiederaufarbeitungsanlagen	85
5.4.	Gegenwärtige Situation in der Bundesrepublik	87
5.5.	Zusammenfassung	88
6.	Die Tieflagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen der Bundesrepublik Deutschland	90
6.1.	Einleitung	90
6.2.	Versuchsanlage Asse	92
6.2.1.	Geologische und Grubensituation	92
6.2.2.	Bisher gesammelte Erfahrungen	95
6.2.2.1.	Niedrigaktive Abfälle	95
6.2.2.2.	Mittelaktive Abfälle	98
6.2.3.	Absehbare Weiterentwicklung	98
6.2.3.1.	Forschungskaverne	99

6.2.3.2	Erprobung der Einlagerungstechnik in tiefen Bohrlöchern	99
6.2.4	Spätere Einlagerung hochaktiver Abfälle	101
6.2.5	Grenzen der Versuchsanlage Asse	103
6.3	Zur Sicherung eines Salzbergwerkes	103
6.3.1	Erdbeben	103
6.3.2	Gebirgsmechanisch bedingter Störfall	104
6.3.3	Größter anzunehmender Unfall (GaU)	105
6.3.4	Gorleben	106
6.3.5	Stilllegungskonzept	106
6.4	Zusammenfassung	107
7.	Der Hochtemperaturreaktor	108
7.1	Einleitung	108
7.2	Funktionsweise des Hochtemperaturreaktors	108
7.2.1	Physikalische Prinzipien und Konstruktionsmerkmale	108
7.2.2	Der Brennstoffkreislauf des Hochtemperaturreaktors	110
7.2.3	Prototypen und Demonstrationsanlagen	112
7.3	Nukleare Sicherheit von Hochtemperaturreaktoren	116
7.3.1	Sicherheitsaspekte des Hochtemperaturreaktors	116
7.3.2	Charakteristisches Störfallverhalten	117
7.3.3	Die ALPA-Studie	119
7.4	Möglichkeiten der Nutzung des Hochtemperaturreaktors	119
7.4.1	Der HTR zur Stromerzeugung	119
7.4.2	Der Hochtemperaturreaktor als Prozeßwärmeerzeuger	120
7.5	Zusammenfassung	125
8.	Schnelle Brutreaktoren	127
8.1	Einleitung	127
8.2	Urananutzung beim LWR und beim SBR	127
8.3	Technisches Konzept der Brüter-Kraftwerke	129
8.3.1	Energieerzeugung und Brutprozeß	129
8.3.2	Wärmeübertragung	131
8.4	Das Kühlmittel Natrium	132
8.4.1	Betriebseigenschaften	132
8.4.2	Verhalten bei Störfällen	133
8.5	Die nukleare Sicherheit Schneller Brutreaktoren	134
8.5.1	Das Barrierenprinzip	134
8.5.2	Sicherheitsmaßnahmen	135
8.5.3	Präventive Maßnahmen beim SNR-300	136
8.5.4	Containmentmaßnahmen beim SNR-300	138
8.6	Bau- und Betriebserfahrungen	140
8.7	Zusammenfassung	141
9.	Plutonium – Eigenschaften und Möglichkeiten	143
9.1	Einleitung	143
9.2	Die Rolle des Plutoniums im Kernbrennstoffkreislauf	144
9.3	Der offene Brennstoffkreislauf	145
9.4	Die gegenwärtigen und zukünftigen Plutoniummengen	145
9.5	Der geschlossene Brennstoffkreislauf	147

3.4.	Qualitätskontrolle und Prüfung	39
3.5.	Störfälle und GaU	39
3.6.	Hypothetische Störfälle	42
3.7.	Sicherheitsanalyse	43
3.8.	Rasmussen-Studie	46
3.9.	Die deutsche Risikostudie	48
3.10.	Sicherheitsforschung	50
3.11.	Zusammenfassung	50
4.	Der Brennstoffkreislauf von Kernkraftwerken	53
4.1.	Einleitung	53
4.2.	Die Kernenergie und ihr Brennstoffkreislauf	54
4.3.	Urangewinnung	54
4.4.	Erzaufbereitung	57
4.5.	Urananreicherung	58
4.6.	Brennelement-Herstellung	61
4.7.	Transport radioaktiver Materialien	62
4.8.	Das integrierte Entsorgungskonzept	63
4.9.	Wiederaufarbeitung	64
4.9.1.	Aufgaben und Ziele	64
4.9.2.	Warum Wiederaufarbeitung?	66
4.9.3.	Die verschiedenen Schritte der Wiederaufarbeitung	67
4.10.	Refabrikation neuer Kernbrennstoffe	68
4.11.	Behandlung radioaktiver Abfälle, Endlagerung	68
4.12.	Zusammenfassung	71
5.	Die Wiederaufarbeitung und Behandlung radioaktiver Abfälle	73
5.1.	Einleitung	73
5.2.	Verfahrensbeschreibung	75
5.2.1.	Die Wiederaufarbeitung von Brennelementen nach dem PUREX-Prozeß	75
5.2.2.	Abfallbehandlung	79
5.3.	Das Risiko der Wiederaufarbeitung	83
5.3.1.	Strahlenexposition beim bestimmungsgemäßen Betrieb einer Wiederaufarbeitungsanlage	83
5.3.2.	Sicherheitsmaßnahmen zur Vermeidung größerer Freisetzungen bei Störfällen	84
5.3.3.	Störfälle bei Wiederaufarbeitungsanlagen	85
5.4.	Gegenwärtige Situation in der Bundesrepublik	87
5.5.	Zusammenfassung	88
6.	Die Tieflagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen der Bundesrepublik Deutschland	90
6.1.	Einleitung	90
6.2.	Versuchsanlage Asse	92
6.2.1.	Geologische und Grubensituation	92
6.2.2.	Bisher gesammelte Erfahrungen	95
6.2.2.1.	Niedrigaktive Abfälle	95
6.2.2.2.	Mittelaktive Abfälle	98
6.2.3.	Absehbare Weiterentwicklung	98
6.2.3.1.	Forschungskaverne	99

6.2.3.2	Erprobung der Einlagerungstechnik in tiefen Bohrlöchern	99
6.2.4	Spätere Einlagerung hochaktiver Abfälle	101
6.2.5	Grenzen der Versuchsanlage Asse	103
6.3	Zur Sicherung eines Salzbergwerkes	103
6.3.1	Erdbeben	103
6.3.2	Gebirgsmechanisch bedingter Störfall	104
6.3.3	Größter anzunehmender Unfall (GaU)	105
6.3.4	Gorleben	106
6.3.5	Stilllegungskonzept	106
6.4	Zusammenfassung	107
7.	Der Hochtemperaturreaktor	108
7.1	Einleitung	108
7.2	Funktionsweise des Hochtemperaturreaktors	108
7.2.1	Physikalische Prinzipien und Konstruktionsmerkmale	108
7.2.2	Der Brennstoffkreislauf des Hochtemperaturreaktors	110
7.2.3	Prototypen und Demonstrationsanlagen	112
7.3	Nukleare Sicherheit von Hochtemperaturreaktoren	116
7.3.1	Sicherheitsaspekte des Hochtemperaturreaktors	116
7.3.2	Charakteristisches Störfallverhalten	117
7.3.3	Die AIPA-Studie	119
7.4	Möglichkeiten der Nutzung des Hochtemperaturreaktors	119
7.4.1	Der HTR zur Stromerzeugung	119
7.4.2	Der Hochtemperaturreaktor als Prozeßwärmeerzeuger	120
7.5	Zusammenfassung	125
8.	Schnelle Brutreaktoren	127
8.1	Einleitung	127
8.2	Uranausnutzung beim LWR und beim SBR	127
8.3	Technisches Konzept der Brüter-Kraftwerke	129
8.3.1	Energieerzeugung und Brutprozeß	129
8.3.2	Wärmeübertragung	131
8.4	Das Kühlmittel Natrium	132
8.4.1	Betriebseigenschaften	132
8.4.2	Verhalten bei Störfällen	133
8.5	Die nukleare Sicherheit Schneller Brutreaktoren	134
8.5.1	Das Barrierenprinzip	134
8.5.2	Sicherheitsmaßnahmen	135
8.5.3	Präventive Maßnahmen beim SNR-300	136
8.5.4	Containmentmaßnahmen beim SNR-300	138
8.6	Bau- und Betriebserfahrungen	140
8.7	Zusammenfassung	141
9.	Plutonium – Eigenschaften und Möglichkeiten	143
9.1	Einleitung	143
9.2	Die Rolle des Plutoniums im Kernbrennstoffkreislauf	144
9.3	Der offene Brennstoffkreislauf	145
9.4	Die gegenwärtigen und zukünftigen Plutoniummengen	145
9.5	Der geschlossene Brennstoffkreislauf	147

9.6.	Sicherung von Plutonium	149
9.6.1.	Schutz vor Plutonium als Radiotoxin	149
9.6.2.	Schutz vor Kritikalität	154
9.6.3.	Sicherung gegen Diebstahl	155
9.7.	Zusammenfassung	156
10.	Die Sicherung kerntechnischer Anlagen und spaltbarer Materialien	158
10.1.	Einleitung	158
10.2.	Schutzbedürftige Stationen des Brennstoffkreislaufs	159
10.3.	Schutz von Kernkraftwerken gegen Sabotage	160
10.4.	Schutz gegen Sprengstoffe und Geschosse	162
10.5.	Katastrophenschutzpläne	164
10.6.	Mißbrauch von spaltbarem Material	164
10.7.	Zusammenfassung	169
11.	Kernenergie und Strahlenrisiko	171
11.1.	Natürliche und künstliche Umgebungsstrahlung	171
11.1.1.	Natürliche Umgebungsstrahlung	171
11.1.2.	Künstliche (zivilisatorische) Strahlenbelastung	174
11.2.	Emissionen der Kernkraftwerke	177
11.2.1.	Dosisgrenzwerte und Ermittlung der Strahlenbelastung	177
11.2.2.	Relationen zur natürlichen Strahlenbelastung	179
11.3.	Die strahlenbiologische Wirkungskette	179
11.4.	Somatische Strahlenwirkungen	181
11.4.1.	Somatischer Strahlenfrühschaden	181
11.4.2.	Somatische Strahlenspätchäden	188
11.5.	Genetische Strahlenwirkungen	192
11.5.1.	Mutationsarten	193
11.5.2.	Faktorenabhängigkeit genetischer Strahlenwirkungen	194
11.5.3.	Die Wirkung von Mutationen	194
11.5.4.	Das bevölkerungsgenetische Strahlenrisiko	195
11.6.	Abwehrmechanismen	197
11.6.1.	DNA-Reparatur	197
11.6.2.	Immunabwehr	198
11.7.	Zusammenfassung	199
12.	Radioökologie — Die Emission von Radionukliden und ihr Verhalten in der Nahrungskette und im menschlichen Körper	204
12.1.	Einleitung	204
12.2.	Abgabe und Ausbreitung von Radionukliden	204
12.2.1.	Betriebliche Freisetzung	204
12.2.2.	Gasförmige radioaktive Stoffe (atmosphärische Ausbreitung)	206
12.2.2.1.	Meteorologische und nichtmeteorologische Parameter, die die Ausbreitung beeinflussen	206
12.2.2.2.	Mathematische Beschreibung der Ausbreitung von Schadstoffen	207
12.2.2.3.	Experimentelle Ergebnisse	209

12.2.2.4.	Anwendung der Ausbreitungsrechnung: Kurzzeit- und Langzeitausbreitungsfaktoren	209
12.2.2.5.	Atmosphärische Ablagerung	209
12.2.2.6.	Mathematische Beschreibung der Ablagerung	213
12.2.3.	Flüssige radioaktive Ableitungen	213
12.3.	Radionuklide in Ökosystemen	215
12.3.1.	Das Verhalten im lebenden Organismus	215
12.3.2.	Die möglichen Wege der Strahlenbelastung für den Menschen	217
12.3.3.	Der Begriff der Nahrungskette	217
12.3.4.	Die wichtigsten Pfade der Ingestionsbelastung	219
12.3.5.	Faktoren, die die Wanderung der Radionuklide beeinflussen	220
12.3.6.	Der Transferfaktor – Produkt aus ökologischen Gegebenheiten und der Physiologie des Organismus	220
12.3.7.	Von der Aktivität zur Organdosis	221
12.3.8.	Die relevanten Nuklide und ihre kritischen Belastungspfade	222
12.4.	Zusammenfassung	224
13.	Die Beeinflussung von Wetter und Klima durch Wärmekraftwerke	226
13.1.	Einleitung	226
13.2.	Klimatologische Umweltprobleme der schwefel- und kohlendioxidhaltigen Luft	226
13.3.	Abwärme und Kühltürme	228
13.4.	Ventilierte und Naturzug-Kühltürme	230
13.5.	Hybrid-Kühltürme	232
13.6.	Technische und wirtschaftliche Aspekte der verschiedenen Kühlverfahren	232
13.7.	Wetter, Klima, Stadtklima	233
13.8.	Physikalisch denkbare Effekte des Kühlturbetriebs	235
13.9.	Die atmosphärischen Ausbreitungsverhältnisse	236
13.10.	Ausbreitungsrechnungen	237
13.11.	Indirekte Auswirkungen des Kühlturbetriebs	242
13.12.	Zusammenfassung	249
14.	Energie und Umwelt	251
14.1.	Einleitung	251
14.2.	Schadstoffbelastung der Gewässer	252
14.3.	Schadstoffbelastung der Luft	253
14.3.1.	Luftschadstoffe und ihre Wirkungen	255
14.3.1.1.	Schwefeldioxid (SO ₂)	255
14.3.1.2.	Staub	255
14.3.1.3.	Stickoxide	256
14.3.1.4.	Kohlenmonoxid (CO)	256
14.3.1.5.	Kohlenwasserstoffe (C _m H _n)	257
14.3.1.6.	Radioaktivität	257
14.3.2.	Übersicht über emittierte chemische Schadstoffe	257
14.3.3.	Immissionsgrenzwerte	260
14.3.4.	Vergleich der Schadstoffbelastung bei verschiedenen Methoden der Energieerzeugung	260
14.4.	Die Risiken verschiedener Energietechnologien	263

14.4.1.	Ein Risikovergleich Kohle – Kernenergie	263
14.4.2.	Risikovergleich alternativer Energieerzeugungstechnologien	264
14.5.	Die Wärmebelastung der Atmosphäre	267
14.6.	Zusammenfassung	268
15.	Nutzungsmöglichkeiten regenerativer Energiequellen in der Bundesrepublik Deutschland	272
15.1.	Einleitung	272
15.2.	Überblick über die der Menschheit zugänglichen Energieströme	272
15.3.	Potentiale der in der Bundesrepublik Deutschland nutzbaren Energieströme	276
15.4.	Technik und Wirtschaftlichkeit ausgewählter Nutzungsmöglichkeiten regenerativer Energieströme	279
15.4.1.	Windenergiekonverter (WEK)	279
15.4.2.	Niedertemperatur-Kollektoranlagen	281
15.4.3.	Wärmepumpen	284
15.5.	Zusammenfassung	286
16.	Kontrollierte Kernfusion: eine Alternative der künftigen langfristigen Energieversorgung	289
16.1.	Einleitung	289
16.2.	Bedingungen für die Freisetzung der Fusionsenergie	291
16.3.	Der Tokamak	293
16.3.1.	Plasmaeinschluß	293
16.3.2.	Heizung	295
16.3.3.	Weitere Entwicklung	296
16.4.	Der technische Weg zum Reaktor	299
16.4.1.	Tritium und Blanket	300
16.4.2.	Materialfragen	301
16.5.	Zusammenfassung	304
	Autorenverzeichnis	307
	Stichwortverzeichnis	309