

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen	XV
1 Einleitung	1
Literatur	4
2 Energietechnische Grundlagen (von Prof. Dr.-Ing. U. Schelling)	5
2.1 Energieformen	5
2.2 Energieerhaltung	6
2.3 Thermodynamische Kreisprozesse	7
2.3.1 Carnot-Prozess	8
2.3.2 Technisch realisierbare Kreisprozesse	9
2.3.3 Irreversibilitäten	10
2.4 Erschöpfbares und nicht erschöpfbares (regeneratives) Energieangebot	10
2.5 Primär- und Sekundärenergien	11
2.6 Weltenergiebedarf	12
Übungsaufgaben	12
Literatur	13
Anhang	14
3 Überblick	17
3.1 Nutz- und Prozesswärme	18
3.2 Erzeugung elektrischer Energie	19
3.3 Kraft-Wärme-Kopplung	21
3.4 Kombinations-Kraftwerke	21
3.5 Erneuerbare (regenerative) und unerschöpfbare Energiequellen	22
3.6 Entwicklungen in der Energietechnik	25
Übungsaufgaben	26
Literatur	27
4 Konventionelle Dampfkraftwerke	28
4.1 Thermodynamische Grundlagen	29
4.1.1 Clausius-Rankine-Vergleichsprozess	29
4.1.2 Überhitzung des Frischdampfes	30
4.1.3 Zwischenüberhitzung	31
4.1.4 Regenerative Speisewasser-Vorwärmung	31
4.1.5 Exergetische Betrachtung	33
4.1.6 Wärmeauskopplung	34
4.1.7 Regelung von Dampfkraftwerken	34
4.2 Aufbau von Dampfkraftwerken DKW	35
4.3 Wasserqualitäten in Dampfkraftwerken	37
4.3.1 Arbeitsfluid (Speisewasser)	39
4.3.2 Rückkühlwasser	39
4.3.3 Kühlwasser	40
4.3.4 Heizwasser	40
4.3.5 Wasseraufbereitung	40

4.4	Dampferzeuger	42
4.4.1	Allgemeine Zusammenhänge	43
4.4.2	Feuerung	45
4.4.3	Strömungsformen	45
4.4.4	Siedekrise 1. Art	47
4.4.5	Großwasserraumkessel GWRK	48
4.4.6	Naturumlauf-Dampferzeuger	48
4.4.7	Zwangumlauf-Dampferzeuger	51
4.4.8	Zwangdurchlauf-Dampferzeuger	51
4.4.9	Entwicklungstendenzen bei Dampferzeugern	54
4.5	Regenerative Speisewasservorwärmung/Vorwärmstrecke	55
4.5.1	Niederdruckvorwärmer	55
4.5.2	Mischvorwärmer (Speisewasserbehälter)	55
4.5.3	Hochdruckvorwärmer	56
4.6	Rauchgasreinigung	57
4.6.1	Entstickung	58
4.6.2	Entstaubung	59
4.6.3	Rauchgasentschwefelungsanlage REA	60
4.6.4	CO ₂ -Abtrennung und Sequestrierung	61
4.7	Kühlsystem	63
4.7.1	Kondensator	63
4.7.2	Kälteturme	64
4.7.2.1	Nasskühlturm (Naturzug-Kühlturm)	64
4.7.2.2	Trockenkühlturm	64
4.7.2.3	Hybridkühlturm	64
4.8	Turbinen	64
4.9	Pumpen	66
4.10	Generatoren, Frequenzhaltung	66
4.11	Weitere Komponenten	67
4.12	Leittechnik in Kraftwerken	67
4.13	Entwicklungen	69
	Übungsaufgaben	70
	Literatur	73
5	Kernkraftwerke (von Prof. Dr. rer. nat. H. J. Allelein)	75
5.1	Kerntechnische Grundlagen	76
5.1.1	Kernreaktionen	76
5.1.2	„Nutzbare“ Energie bei Kernreaktionen	78
5.1.3	Thermische und schnelle Neutronen	82
5.1.4	Moderation der Neutronen	84
5.1.5	Kernbrennstoffe	87
5.1.6	Radionuklidbildung in Reaktoren	88
5.2	Prinzipieller Aufbau des Reaktors	89
5.2.1	Brennelement	89
5.2.2	Leistungsverteilung	91
5.2.3	Reaktordruckbehälter für Leichtwasserreaktoren	94
5.3	Reaktorsicherheit	95
5.3.1	Einführung	95
5.3.2	Sicherheitskonzept	96

5.3.3	Sicherheitsvorkehrungen	99
5.3.4	Reaktorsicherheitsforschung	100
5.4	Reaktortypen	101
5.4.1	Übersicht der Reaktortypen	101
5.4.2	Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor	102
5.4.3	Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor	106
5.4.4	CANDU-Reaktor	109
5.4.5	Schnelle Brüter	110
5.4.6	Gasgekühlte Reaktoren, Hochtemperaturreaktor	111
5.4.7	Kernkraftwerke der 4. Generation	113
5.5	Entsorgung, Wiederaufarbeitung, Transport	115
5.5.1	Wiederaufarbeitung	115
5.5.2	Entsorgung	116
5.5.3	Transport	117
5.6	Fusionskonzepte	118
	Übungsaufgaben	121
	Literatur	124
6	Gasturbinen-Kraftwerke	125
6.1	Thermodynamische Grundlagen	125
6.1.1	Gasturbine mit isochorer Wärmezufuhr	125
6.1.2	Gasturbine mit isobarer Wärmezufuhr	128
6.1.3	Thermodynamische Varianten	130
6.1.3.1	Zwischenkühlung	130
6.1.3.2	Zwischenerhitzung	130
6.1.3.3	Luftvorwärmung	131
6.1.4	Realer Gasturbinen-Prozess	133
6.1.5	Umwelteinflüsse	134
6.2	Aufbau moderner stationärer Gasturbinen	134
6.3	Verdichter	136
6.4	Turbine in der Gasturbinenanlage	136
6.5	Brennkammer	138
6.5.1	Silobrennkammer	138
6.5.2	Ringbrennkammer	139
6.5.3	Schadstoffminimierung	139
6.6	Sonstige Komponenten	141
6.7	Jet-Gasturbinen, Aeroderivate	141
6.8	Mikro-Gasturbinen	142
6.9	Gasturbine mit getrennter Nutzleistungsturbine	143
6.10	Gasturbinen mit geschlossenem Kreislauf	143
6.11	Gasturbinen-Pumpspeicher-Kraftwerk	144
6.12	Gasturbine mit interner Kohleverbrennung	145
6.12.1	Gasturbine mit Kohlestaubfeuerung	145
6.12.2	Gasturbine mit Kohlevergasung	145
6.13	Betriebsverhalten	146
6.14	Entwicklungen	146
	Übungsaufgaben	146
	Literatur	149
	Anhang	150

7 Kombinationskraftwerke	152
7.1 Gas- und Dampfkraftwerke	152
7.1.1 Schaltungsmöglichkeiten	153
7.1.2 Prinzipielle Zusammenhänge	154
7.1.3 Eindruckprozess	156
7.1.4 Zwei- und Mehrdruckprozesse	159
7.1.5 Abhitzekessel	160
7.1.6 Regelung, Betriebsverhalten	163
7.1.7 Entwicklungen	164
7.2 Gasturbine mit interner Abwärmenutzung (Cheng-Cycle)	166
7.3 Kombination von zwei Dampf-Kraftwerken	168
7.4 Verbrennungsmotor und Dampfkraftwerk	169
7.5 Kombinationen mit ORC-Kraftwerk	169
Übungsaufgaben	169
Literatur	171
8 Stationäre Kolbenmotoren für energetischen Einsatz	173
8.1 Otto-Motor	173
8.2 Diesel-Motor	178
8.3 Stirling-Motor	181
8.4 Gasmotoren	184
8.4.1 Brenngase	184
8.4.2 Technische Besonderheiten des Gasmotors	186
8.5 Dual Fuel (Zweistoff-Motor, Feuerstrahl-Motor)	189
8.6 Hybride Motoren	189
8.7 Notstromaggregate	193
8.8 Emissionsminderung	194
8.8.1 Otto-Motor	194
8.8.2 Diesel-Motor	195
8.8.3 Gasmotoren	195
8.9 Motorregelung für energetische Zwecke	198
Übungsaufgaben	199
Literatur	201
9 Brennstoffzellen (von Prof. Dr.-Ing. U. Schelling)	203
9.1 Historie der Brennstoffzellen	203
9.2 Funktionsprinzip und Klassifizierung	204
9.3 Thermodynamische Grundlagen	205
9.4 Wirkungsgrad von Brennstoffzellen	207
9.5 Typisches Betriebsverhalten	209
9.6 Anwendungsgebiete und Stand der Entwicklung	210
9.6.1 Die Alkalische Brennstoffzelle, Typ AFC	213
9.6.2 Die Polymer-Elektrolyt Brennstoffzelle, Typ PEFC	214
9.6.3 Die Phosphorsaure Brennstoffzelle, Typ PAFC	219
9.6.4 Die Schmelzkarbonat Brennstoffzelle, Typ MCFC	221
9.6.5 Die Oxidkeramische Brennstoffzelle, Typ SOFC	223
Übungsaufgaben	227
Literatur	228

10 Kraft-Wärmekopplung und Blockheiz-Kraftwerke BHKW	229
10.1 Wärmeauskopplung bei Dampfkraftwerken	230
10.1.1 Gegendruckbetrieb	230
10.1.2 Entnahme- und Anzapfbetrieb	232
10.2 Wärmeauskopplung bei Gasturbinen	234
10.3 Wärmeauskopplung bei Kombikraftwerken (GuD)	235
10.4 Wärmeauskopplung bei Kolbenmotoren	236
10.5 Wärmeauskopplung bei anderen Prozessen	238
10.6 Dimensionierung von BHKW	239
10.7 Klimatisierung (Kälteerzeugung) durch Abwärme und Wärmepumpen	241
10.7.1 Kompressions-Kältemaschinen	243
10.7.2 Absorptions-Kältemaschinen	243
10.8 Wärmepumpen	245
10.9 Kraft-Wärme-Kälte-Verbund	247
Übungsaufgaben	248
Literatur	251
11 Wasserkraftwerke	252
11.1 Nutzbare Wasserenergie	253
11.2 Laufwasserkraftwerke	255
11.3 Speicherkraftwerke	256
11.4 Pumpspeicher-Kraftwerke	258
11.5 Kraftwerksketten	260
11.6 Turbinen für Wasserkraftwerke	260
11.6.1 Kaplan-Turbinen	261
11.6.2 Ossberger-Turbinen (Banki-Turbinen)	263
11.6.3 Francis-Turbinen	264
11.6.4 Dériaz-Turbinen	264
11.6.5 Pelton-Turbinen	264
11.6.6 Turgo-Turbine	266
11.7 Gezeiten-Kraftwerke	267
11.8 Meereswellen-Kraftwerke	269
11.9 Ozeanthermische Kraftwerke	271
Übungsaufgaben	272
Literatur	273
Anhang 11.1 Herleitung Euler'sche Turbinenhauptgleichung	274
Anhang 11.2 Herleitung der Energie von Meereswellen	275
12 Solartechnik (von Prof. Dipl.-Ing. E. Bollin)	277
12.1 Überblick	277
12.2 Solare Strahlung	279
12.2.1 Grundlagen	279
12.2.2 Das Strahlungsangebot auf die Erde	279
12.2.3 Wichtige Begriffe und Größen im Umgang mit Solarstrahlung	282
12.2.4 Messgeräte zur Erfassung der Globalstrahlung	283
12.3 Solarthermische Energienutzung	285
12.3.1 Übersicht	285
12.3.2 Sonnenkollektoren	286

12.3.3 Charakterisierung von Kollektoren oder die Bestimmung der Nutzleistungen und des Wirkungsgrades von Kollektoren	288
12.3.4 Kollektortestverfahren	290
12.3.5 Bauarten von Sonnenkollektoren	290
12.3.6 Solarthermische Systeme	291
12.3.7 Solarthermische Großanlagen zur Trinkwarmwasserbereitung	291
12.3.8 Spezifische Kennwerte von solarthermischen Anlagen zur Trinkwarmwasserbereitung	293
12.3.9 Beispiel einer solarthermischen Großanlage zur Trinkwasserbereitung	295
12.4 Photovoltaik	298
12.4.1 Einführung	298
12.4.2 Aufbau und Funktionsweise einer Solarzelle	299
12.4.3 Solarzellentechnologie	299
12.4.4 Leistungsfähigkeit von Solarzellen	300
12.4.5 Verschalten von Solarzellen	302
12.4.6 Photovoltaische Systeme	306
12.4.7 Netzparallele PV-Anlagen	306
12.4.8 Evaluation von PV-Systemen	307
12.5 Solarthermische Kraftwerke	308
12.5.1 Zur Einführung	308
12.5.2 Solarturmkraftwerke	309
12.5.3 Parabolrinnenkraftwerke	310
12.5.4 Fresnel-Kollektoren	311
12.5.5 Dish-Stirling-Systeme	311
12.5.6 Aufwindkraftwerke	312
12.5.7 Projekt DESERTEC	312
Übungsaufgaben	315
Literatur	316
13 Windenergie	317
13.1 Grundlagen	317
13.2 Windleistung und nutzbare Leistung	319
13.3 Bauarten von Windkonvertern	319
13.3.1 Widerstandsläufer	319
13.3.2 Auftriebsläufer	320
13.3.3 Darrieus-Rotor	323
13.4 Charakteristik von Windturbinen	324
13.5 Regelung und Netzeinbindung	325
13.5.1 Windnachführung	325
13.5.2 Optimaler Betrieb	326
13.5.3 Sicherheitsabregelung	326
13.5.4 Teillastbetrieb	327
13.5.5 Energiewandlung – Netzeinbindung	327
13.6 Windparks	329
13.6.1 Landgebundene Windparks	330
13.6.2 Off-Shore-Windparks	331
13.6.3 Netzanbindung von Windparks	332
13.7 Sonstige Konzepte zur Windenergienutzung	333
Übungsaufgaben	334

Literatur	337
Anhang	338
14 Energetische Verwertung von Biomasse	340
14.1 Thermische Verfahren	341
14.1.1 Pyrolyse	342
14.1.2 Verbrennung	342
14.1.3 Thermische Vergasung	343
14.2 Bakterielle Vergasung	345
Übungsaufgaben	347
Literatur	348
15 Geothermie	350
15.1 Potenzial der Geothermie	350
15.2 Geothermische Kraftwerkskonzepte, Überblick	352
15.3 Direkte Dampfentspannung	354
15.4 Flushprinzip	354
15.5 Binärprinzip: ORC und KALINA	355
15.5.1 Organic Rankine Cycles ORC	355
15.5.2 Kalina-Prozess	358
15.6 Hot Dry Rock-Verfahren, HDR	360
15.7 Geokomprimierte nasse Felder	361
15.8 Kraft-Wärme-Kopplung mit geothermischer Energiequelle	362
15.9 Hybridsysteme	362
15.10 Rein geothermische Nutzung	363
15.11 Umweltaspekte	363
15.12 Risiken	363
Übungsaufgaben	364
Literatur	366
16 Energetische Müllverwertung	368
16.1 Müllkraftwerke mit traditionellen Öfen	369
16.2 Pyrolyse	370
16.3 Thermoselect-Verfahren	371
16.4 Schmelz-Brenn-Verfahren	372
16.5 Deponiegas/Klärgas-Kraftwerke	373
Übungsaufgaben	375
Literatur	376
17 Energieverteilung, Energiespeicherung	377
17.1 Energieverteilung	377
17.1.1 Mineralöltransporte	377
17.1.2 Erdgastransporte	378
17.1.3 Elektrische Netze	380
17.1.4 Intelligentes Stromnetz (Smart Grid)	381
17.1.5 Wärmetransporte	383
17.2 Energiespeicherung	385
17.2.1 Speicherung der Brennstoffe	385
17.2.1.1 Kohlelagerung	385

17.2.1.2 Flüssige Brennstoffe (Erdöl und Mineralölprodukte)	385
17.2.1.3 Gasförmige Brennstoffe	387
17.2.2 Wärmespeicher	389
17.2.2.1 Speicherung fühlbarer Wärme	389
17.2.2.2 Speicherung latenter Wärme	390
17.2.3 Elektrische Speicher	391
Übungsaufgaben	392
Literatur	395
18 Liberalisierung der Energiemarkte (von Dipl.-Ing. H. Oehler)	396
18.1 Rahmenbedingungen	396
18.1.1 Die Struktur der Stromversorgung in Deutschland bis 1998	396
18.1.2 Änderungen der Rahmenbedingungen seit der Liberalisierung	398
18.1.3 Liberalisierung des Messwesens	402
18.1.4 Binnenmarktpaket Strom und Gas der EU	402
18.2 Entwicklung seit dem Jahr 1998	403
18.2.1 Preisentwicklung	403
18.2.2 Konsequenzen für die Unternehmen	405
18.3 Entwicklung auf dem Gasmarkt	407
18.4 Ausblick	409
Übungsaufgaben	409
Literatur	410
19 Kyoto-Protokoll	411
19.1 Globale Erwärmung und Treibhausgase GHG	411
19.2 Geschichte des Kyoto-Protokolls	413
19.3 Maßnahmen zur GHG Minderung	415
19.3.1 Emissionshandel	416
19.3.2 Allokation der Emissionen	416
19.3.3 Preis der Emissionszertifikate	416
19.3.4 Joint Implementation (JI)	416
19.3.5 Clean Development Mechanism (CDM)	417
19.3.6 CO ₂ -Senken, Landnutzung: LULUCF	418
19.4 Kontrolle und Zertifizierung	419
19.4.1 Compliance Committee	419
19.4.2 Ernannte Nationale Autoritäten „Designated National Authorities“ DNA	419
19.4.3 Ernannte Operative Organisationen „Designated Operational Entities“ DOE	419
19.4.4 Rolle der Weltbank	419
19.5 Diskussion	419
Übungsaufgaben	421
Literatur	421
Anhang	422
Lösungen der Übungsaufgaben	423
Sachwortverzeichnis	472