
Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
	Richard Zahoransky	
	Literatur	4
2	Energietechnische Grundlagen	7
	Udo Schelling	
	2.1 Energieformen	7
	2.2 Energieerhaltung	8
	2.3 Thermodynamische Kreisprozesse	10
	2.3.1 Carnot-Prozess	11
	2.3.2 Technisch realisierbare Kreisprozesse	12
	2.3.3 Irreversibilitäten	13
	2.4 Erschöpfbares und nicht erschöpfbares (regeneratives) Energieangebot	14
	2.5 Primär- und Sekundärenergien	15
	2.6 Weltenergiebedarf	15
	Literatur	20
3	Überblick	21
	Richard Zahoransky	
	3.1 Nutz- und Prozesswärme	23
	3.2 Erzeugung elektrischer Energie	23
	3.3 Kraft-Wärme-Kopplung	26
	3.4 Kombinations-Kraftwerke	27
	3.5 Erneuerbare (regenerative) und unerschöpfbare Energiequellen	28
	3.6 Entwicklungen in der Energietechnik	30
	Literatur	32
4	Konventionelle Dampfkraftwerke	35
	Richard Zahoransky	
	4.1 Thermodynamische Grundlagen	36
	4.1.1 Clausius-Rankine-Vergleichsprozess	36

4.1.2	Überhitzung des Frischdampfes	38
4.1.3	Zwischenüberhitzung	39
4.1.4	Regenerative Speisewasser-Vorwärmung	40
4.1.5	Exergetische Betrachtung	42
4.1.6	Wärmeauskopplung	43
4.1.7	Regelung von Dampfkraftwerken	44
4.2	Aufbau von Dampfkraftwerken DKW	44
4.3	Wasserqualitäten in Dampfkraftwerken	47
4.3.1	Arbeitsfluid (Speisewasser)	49
4.3.2	Rückkühlwasser	49
4.3.3	Kühlwasser	50
4.3.4	Heizwasser	50
4.3.5	Wasseraufbereitung	50
4.4	Dampferzeuger	53
4.4.1	Allgemeine Zusammenhänge	54
4.4.2	Feuerung	57
4.4.3	Strömungsformen	57
4.4.4	Siedekrise 1. Art	59
4.4.5	Großwasserraumkessel GWRK	60
4.4.6	Naturumlauf-Dampferzeuger	61
4.4.7	Zwangumlauf-Dampferzeuger	63
4.4.8	Zwangdurchlauf-Dampferzeuger	64
4.5	Regenerative Speisewasservorwärmung/Vorwärmstrecke	67
4.5.1	Niederdruckvorwärmer	67
4.5.2	Mischvorwärmer (Speisewasserbehälter)	68
4.5.3	Hochdruckvorwärmer	69
4.6	Rauchgasreinigung	70
4.6.1	Entstickung (DeNO _x Anlage)	71
4.6.2	Entstaubung	72
4.6.3	Rauchgasentschwefelungsanlage REA	74
4.6.4	CO ₂ -Abtrennung und Sequestrierung	75
4.7	Kühlsystem	78
4.7.1	Kondensator	78
4.7.2	Kühltürme	79
4.7.2.1	Nasskühlturm (Naturzug-Kühlturm)	79
4.7.2.2	Trockenkühlturm	79
4.7.2.3	Hybridkühlturm	79
4.8	Turbinen	80
4.9	Pumpen	82
4.10	Generatoren, Frequenzhaltung	82
4.11	Weitere funktionelle Systeme	83
4.12	Leittechnik in Kraftwerken	83

4.13	Entwicklungen	85
	Literatur	90
5	Kernkraftwerke	93
	Hans-Josef Allelein	
5.1	Kerntechnische Grundlagen	94
5.1.1	Kernreaktionen	94
5.1.2	„Nutzbare“ Energie bei Kernreaktionen	98
5.1.3	Thermische und schnelle Neutronen	101
5.1.4	Moderation der Neutronen	105
5.1.5	Kernbrennstoffe	107
5.1.6	Radionuklidbildung in Reaktoren	110
5.2	Prinzipieller Aufbau des Reaktors	111
5.2.1	Brennelement	111
5.2.2	Leistungsverteilung	114
5.2.3	Reaktordruckbehälter	117
5.3	Reaktorsicherheit	118
5.3.1	Einführung	118
5.3.2	Sicherheitskonzept	121
5.3.3	Fukushima	124
5.3.4	Sicherheitsvorkehrungen	130
5.3.5	Räumliche Trennung	133
5.3.6	Reaktorsicherheitsforschung	133
5.4	Reaktortypen	134
5.4.1	Übersicht der Reaktortypen	134
5.4.2	Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor	135
5.4.3	Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor	141
5.4.4	CANDU Reaktor	146
5.4.5	Schnelle Brüter	147
5.4.6	Gasgekühlte Reaktoren, Hochtemperaturreaktor	148
5.4.7	Kernkraftwerke der 4. Generation	150
5.5	Entsorgung, Wiederaufbereitung, Transport	153
5.5.1	Wiederaufbereitung	153
5.5.2	Entsorgung	155
5.5.3	Transport	156
5.6	Fusionskonzepte	157
	Literatur	167
6	Gasturbinen-Kraftwerke	171
	Richard Zahoransky	
6.1	Thermodynamische Grundlagen	172
6.1.1	Gasturbine mit isochorer Wärmezufuhr	172

6.1.2	Gasturbine mit isobarer Wärmezufuhr	175
6.1.3	Thermodynamische Varianten	177
6.1.3.1	Zwischenkühlung	177
6.1.3.2	Zwischenerhitzung	178
6.1.3.3	Luftvorwärmung	178
6.1.4	Realer Gasturbinen-Prozess	181
6.1.5	Umwelteinflüsse	182
6.2	Aufbau moderner stationärer Gasturbinen	182
6.3	Verdichter	184
6.4	Turbine in der Gasturbinenanlage	185
6.5	Brennkammer	186
6.5.1	Silobrennkammer	187
6.5.2	Ringbrennkammer	187
6.5.3	Schadstoffminimierung	188
6.6	Sonstige Komponenten	190
6.7	Jet-Gasturbinen, Aero-derivate	190
6.8	Mikro-Gasturbinen	191
6.9	Gasturbine mit getrennter Nutzleistungsturbine	192
6.10	Gasturbinen mit geschlossenem Kreislauf	193
6.11	Gasturbine mit interner Kohleverbrennung	194
6.11.1	Gasturbine mit Kohlestaubfeuerung	194
6.11.2	Gasturbine mit Kohlevergasung	195
6.12	Betriebsverhalten	196
6.13	Entwicklungen	196
	Literatur	202
7	Kombinationskraftwerke	205
	Richard Zahoransky	
7.1	Gas- und Dampfkraftwerke	205
7.1.1	Schaltungsmöglichkeiten	207
7.1.2	Prinzipielle Zusammenhänge	208
7.1.3	Eindruckprozess	210
7.1.4	Zwei- und Mehrdruckprozesse	215
7.1.5	Einwellenanlagen	215
7.1.6	Abhitzeessel	216
7.1.7	Regelung, Betriebsverhalten	218
7.1.8	Entwicklungen	221
7.2	Gasturbine mit interner Abwärmenutzung (Cheng-Cycle)	222
7.3	Kombination von zwei Dampf-Kraftwerken	225
7.4	Verbrennungsmotor und Dampfkraftwerk	226
7.5	Kombinationen mit ORC-Kraftwerk	226
	Literatur	229

8	Stationäre Kolbenmotoren für energetischen Einsatz	231
	Richard Zahoransky	
8.1	Otto-Motor	232
8.2	Diesel-Motor	237
8.3	Stirling-Motor	241
8.4	Gasmotoren	245
	8.4.1 Brenngase	245
	8.4.2 Technische Besonderheiten des Gasmotors	247
8.5	Dual Fuel (Zweistoff-Motor, Feuerstrahl-Motor)	251
8.6	Hybridmotoren	252
8.7	Notstromaggregate	256
8.8	Emissionsminderung	257
	8.8.1 Otto-Motor	259
	8.8.2 Diesel-Motor	259
	8.8.3 Gasmotoren	261
8.9	Motorregelung für energetische Zwecke	263
	Literatur	266
9	Brennstoffzellen	269
	Udo Schelling	
9.1	Historie der Brennstoffzellen	269
9.2	Funktionsprinzip und Klassifizierung	271
9.3	Thermodynamische Grundlagen	273
9.4	Wirkungsgrad von Brennstoffzellen	274
9.5	Typisches Betriebsverhalten	276
9.6	Anwendungsgebiete und Stand der Entwicklung	279
	9.6.1 Die Alkalische Brennstoffzelle, Typ AFC	281
	9.6.2 Die Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle, Typ PEFC	283
	9.6.3 Die Phosphorsaure Brennstoffzelle, Typ PAFC	288
	9.6.4 Die Schmelzkarbonat Brennstoffzelle, Typ MCFC	291
	9.6.5 Die Oxidkeramische Brennstoffzelle, Typ SOFC	293
	Literatur	300
10	Blockheiz-Kraftwerke BHKW, Kälteanlagen, Wärmepumpen und Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung	303
	Richard Zahoransky	
10.1	Wärmeauskopplung bei Dampfkraftwerken	304
	10.1.1 Gegendruckbetrieb	305
	10.1.2 Entnahme- und Anzapfbetrieb	307
10.2	Wärmeauskopplung bei Gasturbinen	309
10.3	Wärmeauskopplung bei Kombikraftwerken (GuD)	310
10.4	Wärmeauskopplung bei Kolbenmotoren	312

10.5	Wärmeauskopplung bei anderen Prozessen	314
10.6	Dimensionierung von BHKW	315
10.7	Klimatisierung (Kälteerzeugung) durch Abwärme und Wärmepumpen	317
10.7.1	Kompressions-Kältemaschinen	319
10.7.2	Absorptions-Kältemaschinen	320
10.7.3	Adsorptions-Kälteanlagen	322
10.8	Wärmepumpen	324
10.9	Kraft-Wärme-Kälte-Verbund	327
	Literatur	331
11	Wasserkraftwerke	333
	Richard Zahoransky	
11.1	Nutzbare Wasserenergie	334
11.2	Laufwasserkraftwerke	337
11.3	Turbinen für Wasserkraftwerke	339
11.3.1	Kaplan-Turbinen	341
11.3.2	Ossberger-Turbinen (Banki-Turbinen)	343
11.3.3	Francis-Turbinen	343
11.3.4	Dériaz-Turbinen	344
11.3.5	Pelton-Turbinen	344
11.3.6	Turgo-Turbine	346
11.3.7	Schrauben- oder Kegelturbine	347
11.4	Gezeiten-Kraftwerke	347
11.5	Meereswellen-Kraftwerke	350
11.6	Meeresströmungs-Kraftwerke	352
11.7	Ozeanthermische Kraftwerke	353
	Literatur	357
12	Solartechnik	359
	Elmar Bollin	
12.1	Überblick	359
12.2	Solare Strahlung	360
12.2.1	Grundlagen	360
12.2.2	Das Strahlungsangebot auf die Erde	361
12.2.3	Wichtige Begriffe und Größen im Umgang mit Solarstrahlung	364
12.2.4	Messgeräte zur Erfassung der Globalstrahlung	365
12.3	Solarthermische Energienutzung	366
12.3.1	Übersicht	366
12.3.2	Sonnenkollektoren	367
12.3.3	Charakterisierung von Kollektoren oder die Bestimmung der Nutzleistungen und des Wirkungsgrades von Kollektoren	369
12.3.4	Kollektortestverfahren	371

12.3.5	Bauarten von Sonnenkollektoren	372
12.3.6	Solarthermische Systeme	373
12.3.7	Solarthermische Großanlagen zur Trinkwarmwasserbereitung	373
12.3.8	Spezifische Kennwerte von solarthermischen Anlagen zur Trinkwarmwasserbereitung	375
12.3.9	Beispiel einer solarthermischen Großanlage zur Trinkwasser- bereitung	377
12.4	Photovoltaik	379
12.4.1	Einführung	379
12.4.2	Aufbau und Funktionsweise einer Solarzelle	381
12.4.3	Solarzellentechnologie	382
12.4.4	Leistungsfähigkeit von Solarzellen	383
12.4.5	Verschalten von Solarzellen	385
12.4.6	Photovoltaische Systeme	386
12.4.7	Netzparallele PV-Anlagen	388
12.4.8	Evaluation von PV-Systemen	390
12.5	Solarthermische Kraftwerke	390
12.5.1	Zur Einführung	390
12.5.2	Solarturmkraftwerke	391
12.5.3	Parabolrinnenkraftwerke	392
12.5.4	Fresnel-Kollektoren	394
12.5.5	Dish-Stirling-Systeme	394
12.5.6	Aufwindkraftwerke	395
12.5.7	Projekt DESERTEC	395
	Literatur	399
13	Windenergie	401
	Richard Zahoransky	
13.1	Grundlagen	402
13.2	Windleistung und nutzbare Leistung	404
13.3	Bauarten von Windkonvertern	405
13.3.1	Widerstandsläufer	405
13.3.2	Auftriebsläufer	406
13.3.3	Darrieus-Rotor	411
13.4	Charakteristik von Windturbinen	412
13.5	Regelung und Netzeinbindung	413
13.5.1	Windnachführung	413
13.5.2	Optimaler Betrieb	414
13.5.3	Sicherheitsabregelung	415
13.5.4	Teillastbetrieb	416
13.5.5	Energiewandlung – Netzeinbindung	416
13.6	Windparks	419

13.6.1	Landgebundene Windparks	419
13.6.2	Off-Shore-Windparks	420
13.6.3	Netzanbindung von Windparks	422
13.7	Sonstige Konzepte zur Windenergienutzung	422
	Literatur	430
14	Energetische Verwertung von Biomasse	433
	Richard Zahoransky	
14.1	Thermische Verfahren	434
14.1.1	Pyrolyse	435
14.1.2	Verbrennung	435
14.1.3	Thermische Vergasung	437
14.2	Bakterielle Vergasung	439
	Literatur	443
15	Nutzung geothermischer Energie	445
	Richard Zahoransky	
15.1	Potenzial der Geothermie	445
15.2	Geothermische Kraftwerkskonzepte, Überblick	448
15.3	Direkte Dampfentspannung	450
15.4	Flushprinzip	451
15.5	Binärprinzip: ORC und KALINA	452
15.5.1	Organic Rankine Cycles ORC	452
15.5.2	Kalina-Prozess	454
15.6	Hot-Dry-Rock-Verfahren, HDR	456
15.7	Geokomprimierte nasse Felder	458
15.8	Kraft-Wärme-Kopplung mit geothermischer Energiequelle	459
15.9	Hybridsysteme	459
15.10	Rein geothermische Nutzung	460
15.11	Umweltaspekte	461
15.12	Risiken	461
	Literatur	464
16	Energetische Müllverwertung	465
	Richard Zahoransky	
16.1	Müllkraftwerke mit traditionellen Öfen	466
16.2	Pyrolyse	468
16.3	Thermoselect-Verfahren	468
16.4	Schwel-Brenn-Verfahren	469
16.5	Deponiegas/Klärgas-Kraftwerke	470
	Literatur	473

17	Energieverteilung	475
	Harald Schwarz	
17.1	Elektrische Netze	476
17.1.1	Grundlagen elektrischer Netze	476
17.1.2	Netzbetrieb vor Liberalisierung des Strommarktes	483
17.1.3	Netzbetrieb nach Liberalisierung des Strommarktes	484
17.1.4	Netzbetrieb bei hohem Anteil von EEG-Einspeisungen	486
17.1.5	Netzbetrieb bei hohem Anteil von Elektromobilität	488
17.1.6	Zukünftige Herausforderungen für den Netzbetrieb: Netzausbau	489
17.1.7	Speicherung und steuerbare Lasten: Aktuelle Situation und Ausblick	490
17.1.8	Ausbildung für Systemführer und Training des Operativ- personals	492
17.1.9	Der Beitrag von Hybrid- oder virtuellen Kraftwerken bzw. SMART- oder Micro-Grids	493
17.1.10	Anforderungen an die konventionelle Erzeugung	497
17.2	Mineralöltransporte	498
17.3	Erdgastransporte	499
17.4	Wärmetransporte	501
	Literatur	506
18	Energiespeicherung	509
	Hans-Josef Allelein und Richard Zahoransky	
18.1	Speicherung elektrischer Energie	510
18.1.1	Übersicht und Anwendungsbereiche	510
18.1.2	Systeme und Strukturen der Energiespeicherung	512
18.1.3	Systeme für Tageslastausgleich	513
18.1.3.1	Pumpspeicherkraftwerk	513
18.1.3.2	Diabater Druckluftspeicher	517
18.1.3.3	Adiabater Druckluftspeicher	521
18.1.3.4	Batteriespeicher	524
18.1.4	Systeme für Wochen- und Jahreslastausgleich	526
18.1.4.1	Elektrolyse und Wasserstoffspeicher	526
18.1.4.2	Power-to-Gas und Methanisierung	527
18.1.5	Systeme zur Bereitstellung der Wirkleistungssekundenreserve	530
18.1.5.1	Schwungradspeicher	530
18.1.5.2	Supraleitender magnetischer Energiespeicher SMES	531
18.1.6	Systeme zur Sicherung der unterbrechungsfreien Strom- versorgung	534
18.1.6.1	Batteriespeicher	534
18.1.6.2	Kondensatoren	534

18.1.7	Vergleich relevanter Speichertechnologien: Leistungs- und Energiespeicher	535
18.2	Speicherung der Brennstoffe	537
18.2.1	Kohlelagerung	537
18.2.2	Flüssige Brennstoffe (Erdöl und Mineralölprodukte)	538
18.2.3	Gasförmige Brennstoffe	540
18.2.3.1	Oberirdische Gasspeicher	540
18.2.3.2	Unterirdische Gasspeicher	541
18.2.3.3	Flüssiggas-Speicher	542
18.3	Wärmespeicher	542
18.3.1	Speicherung fühlbarer Wärme	542
18.3.2	Speicherung latenter Wärme	544
18.3.2.1	Ruths-Speicher	544
18.3.2.2	Fest-Flüssig Latentwärmespeicher (Schmelzwärmespeicher)	544
18.3.2.3	Chemische Speicher	544
	Literatur	546
19	Liberalisierung der Energiemärkte	549
	Michael Rimmler	
19.1	Struktur der Stromversorgung	549
19.2	Entwicklung der gesetzlichen Rahmenbedingungen	552
19.2.1	Entwicklung des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG)	552
19.2.2	Entwicklung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG)	558
19.3	Entwicklung auf dem Strommarkt	561
19.3.1	Preisentwicklung	561
19.3.2	Konsequenzen für die Energieversorgungsunternehmen	564
19.4	Entwicklung auf dem Gasmarkt	566
	Literatur	569
20	Kyoto-Protokoll	573
	Richard Zahoransky	
20.1	Globale Erwärmung und Treibhausgase GHG	573
20.2	Geschichte des Kyoto-Protokolls	575
20.3	Maßnahmen zur GHG Minderung	578
20.3.1	Emissionshandel	578
20.3.2	Allokation der Emissionen	579
20.3.3	Preis der Emissionszertifikate	580
20.3.4	Joint Implementation (JI)	580
20.3.5	Clean Development Mechanism (CDM)	580
20.3.6	CO ₂ -Senken, Landnutzung: LULUCF	582
20.4	Kontrolle und Zertifizierung	583

20.4.1	Compliance Committee	583
20.4.2	Ernannte Nationale Autoritäten „Designated National Authorities“ DNA	583
20.4.3	Ernannte Operative Organisationen „Designated Operational Entities“ DOE	583
20.4.4	Rolle der Weltbank	584
20.5	Diskussion	584
	Literatur	587
21	Lösungen der Übungsaufgaben	589
	Richard Zahoransky	
21.1	Lösungen Kap. 2	589
21.2	Lösungen Kap. 3	591
21.3	Lösungen Kap. 4	592
21.4	Lösungen Kap. 5	600
21.5	Lösungen Kap. 6	605
21.6	Lösungen Kap. 7	610
21.7	Lösungen Kap. 8	617
21.8	Lösungen Kap. 9	621
21.9	Lösungen Kap. 10	623
21.10	Lösungen Kap. 11	626
21.11	Lösungen Kap. 12	628
21.12	Lösungen Kap. 13	630
21.13	Lösungen Kap. 14	634
21.14	Lösungen Kap. 15	637
21.15	Lösungen Kap. 16	642
21.16	Lösungen Kap. 17	643
21.17	Lösungen Kap. 18	646
21.18	Lösungen Kap. 19	649
21.19	Lösungen Kap. 20	650
	Sachverzeichnis	653