

Inhaltsverzeichnis

Teil I	Energiewirtschaft, Elektrizitätswirtschaft	1
1	Energiewirtschaft und Klimaschutz	3
1.1	Grundbegriffe, geschichtlicher Rückblick	3
1.1.1	Energiesektor	3
1.1.2	Nutzprozesse	5
1.1.3	Geschichtlicher Rückblick	5
1.1.4	Perspektiven und Probleme	6
1.2	Verfügbarkeit der Primärenergie	7
1.2.1	Nicht erneuerbare Energien	7
1.2.2	Erneuerbare Energien	12
1.2.3	Potential und Nutzung der wichtigsten Solarenergiearten	14
1.2.4	Ökologische Probleme	19
1.3	Energiebedarf, CO ₂ -Emissionen, Indikatoren	22
1.3.1	Allgemeines	22
1.3.2	Endenergie und Verluste des Energiesektors	22
1.3.3	Weltweiter Primärenergiebedarf, Energiesektor	23
1.3.4	CO ₂ - Emissionen und Indikatoren	25
1.4	Energieverbrauch und CO ₂ -Emissionen in Europa	26
1.4.1	Bevölkerung und Bruttoinlandsprodukt	26
1.4.2	Energieverbrauch pro Kopf	27
1.4.3	Energieintensität und CO ₂ -Emissionen	27
1.4.4	Endenergie und Verluste des Energiesektors in der EU-15	29
1.4.5	Länder mit mehr als 30 Mio. Einwohner	32
1.5	Weltweiter Energiebedarf	34
1.5.1	Energieverbrauch in der Vergangenheit	34
1.5.2	Energiebedarf, Bevölkerung und BIP in 2013	35
1.5.3	Primär- und Endenergie und ihre Verteilung 2013	39

1.6	Zukünftige Entwicklung des Weltenergiebedarfs	50
1.6.1	Entwicklung der Weltbevölkerung	53
1.6.2	Zunahme des BIP (KKP) und Energienachfrage	54
1.7	CO ₂ -Emissionen und Klimaschutz	55
1.7.1	Klimaschutz, mittel- und langfristige Maßnahmen	55
1.7.2	Elektrizitätsverbrauch und Klimaschutz	57
1.7.3	Transportbereich	60
1.7.4	Wärmebereich	62
	Literatur	62
2	Wirtschaftlichkeitsberechnungen	65
2.1	Investitionsrechnung, Diskontierungsverfahren	66
2.1.1	Kapitalwertmethode	66
2.1.2	Annuitätsmethode	68
2.2	Kosten der Energie	70
2.2.1	Kosten der elektrischen Energie	70
2.2.2	Spezifische Energiekosten an den Kraftwerksklemmen	72
2.2.3	Spezifische Jahreskosten der Kraftwerke	73
2.2.4	Kosten der elektrischen Energie am Verbraucher	74
2.2.5	Einfluss der Einspeisung von Windenergie und Solarenergie	75
2.3	Strompreisgestaltung	76
2.3.1	Verteilung der Selbstkosten	76
2.3.2	Stromtarife	85
	Literatur	92
3	Elektrizitätswirtschaft, Liberalisierung	93
3.1	Verbrauch elektrischer Energie	93
3.1.1	Struktur des Energieverbrauchs	94
3.1.2	Schwankungen des Energiebedarfs	95
3.2	Deckung des Elektrizitätsbedarfs	97
3.2.1	Kraftwerkarten	97
3.2.2	Kraftwerkeinsatz	98
3.2.3	Wasserspeicherung	101
3.2.4	Energieaustausch	102
3.3	Wasserkraftwerke	103
3.4	Thermische Kraftwerke	105
3.5	Wettbewerb im Elektrizitätssektor	109
3.5.1	Einführung	109
3.5.2	Grundpfeiler des Wettbewerbs und Probleme	110
3.5.3	Reorganisationsmodelle	112
3.5.4	Privatisierung, Regulierung der Monopole	116
3.5.5	Konsequenzen der Markttöfnung	117

3.6	Der liberalisierte Strommarkt in der Schweiz	118
3.6.1	Allgemeine Voraussetzung für einen funktionierenden Elektrizitätsmarkt	118
3.6.2	Daten zur schweizerischen Elektrizitätsversorgung	124
3.6.3	Entwicklung zum Strommarkt CH	128
3.6.4	Kernthemen des Strommarkts CH	130
3.6.5	Transparenz durch Sunshine-Regulierung	144
3.6.6	2. Stufe der Marktöffnung/Anreizregulierung	144
3.7	Funktionsweise liberalisierter Elektrizitätsmärkte	146
3.7.1	Motivation für Privatisierung und Liberalisierung	146
3.7.2	Der Aufbau wettbewerblich organisierter Elektrizitätsmärkte	151
3.7.3	Dienstleistungsmarkt	157
3.7.4	Wettbewerbsmarkt	168
3.7.5	Besonderheiten internationaler Realisierungen liberalisierter Elektrizitätsmärkte	186
3.7.6	Erfahrungen in liberalisierten Märkten	191
3.7.7	Ausblick auf Anforderungen in Elektrizitätsversorgungssystemen mit sehr hohem Anteil erneuerbarer Energiequellen – Smart Grids in liberalisierten Märkten	201
3.8	Risikomanagement in der Elektrizitätswirtschaft	204
3.8.1	Anforderung an die Unternehmensführung	204
3.8.2	Enterprise Risk-Management (Theorie)	205
3.8.3	Enterprise Risk Management (Praxis)	240
	Literatur	258

Teil II Kraftwerktechnik, Energieumwandlung 261

4	Wasserkraftwerke	263
4.1	Hydrologische Planungsgrundlagen	263
4.2	Laufkraftwerke	266
4.2.1	Wasserbewirtschaftung	267
4.2.2	Ausführung	267
4.2.3	Auslegung	269
4.3	Speicherkraftwerke	270
4.3.1	Tages- und Wochenspeicherwerke	270
4.3.2	Jahresspeicherwerke (Saisonspeicherwerke)	272
4.3.3	Pumpspeicherung	275
4.4	Wasserturbinen	276
4.4.1	Pelton-Turbine	277
4.4.2	Reaktionsturbinen	283
4.4.3	Turbinenwahl	293
4.4.4	Kleinwasserkraftwerke	295

4.5	Dynamik	296
4.5.1	Druckstollen	297
4.5.2	Wasserschloss	298
4.5.3	Starre Druckleitung	299
4.5.4	Gesamtmodell des hydraulischen Systems	300
4.5.5	Elastischer Druckstoß	302
4.5.6	Gesamtmodell des hydraulischen Systems mit Elastizität	307
4.5.7	Wasserturbinen- und Wasserkraftwerk-Modell	308
	Literatur	314
5	Thermische Kraftwerke	317
5.1	Dampfkraftprozess	317
5.1.1	Rankine- und Clausius-Rankine-Kreisprozess	317
5.1.2	Zwischenüberhitzung und Speisewasservorwärmung	320
5.2	Gasturbinenprozess	322
5.2.1	Einfacher offener Gasturbinenprozess (Joule-Prozess)	322
5.2.2	Rekuperation	327
5.2.3	Carnotisierung	328
5.3	Kombiprozesse	329
5.4	Wärme-Kraft-Kopplung	332
5.4.1	Entnahme-Kondensationsschaltung	332
5.4.2	Gegendruckanlage	334
5.4.3	Gasturbinen	335
5.4.4	Blockheizkraftwerke	336
5.4.5	Wärme-Kraft-Kopplung und CO ₂ -Produktion	337
5.5	Fossilgefeuerte Dampfkraftwerke	337
5.5.1	Luft-Brennstoff-Rauchgas/Asche-Kreislauf	337
5.5.2	Wasser-Dampf-Kreislauf, Verluste	337
5.5.3	Kühlwasserkreislauf	339
5.5.4	Blockregelung	341
5.5.5	Dynamik	345
5.6	Kernkraftwerke	348
5.6.1	Energiegewinnung durch Kernspaltung	348
5.6.2	Reaktorkonzepte	351
5.6.3	Dampfkreisprozess und Regelung	355
5.6.4	Reaktorsicherheit und Brennstoffkreislauf	355
5.6.5	Risiken der Kernkraft	358
5.6.6	Wirkung der Radioaktivität	361
5.7	Kraftwerke mit kombiniertem Gas- und Dampfprozess	364
5.7.1	GUD-Kraftwerke	365
5.7.2	GUD- Kraftwerke mit Zusatzfeuerung im Abhitzeessel	367
5.7.3	Verbundkraftwerke	367
5.7.4	Kombikraftwerk mit nachgeschaltetem atmosphärischem Dampferzeuger	368

5.7.5	Kraftwerke mit Kohleumwandlung unter Druck	369
5.7.6	Dynamisches Verhalten	370
5.8	Kraftwerksleittechnik	371
5.8.1	Entwicklung	372
5.8.2	Aufbau	373
5.8.3	Ausblick	374
	Literatur	375
6	Die Wärmepumpe	377
6.1	Energiewirtschaftliche Bedeutung	377
6.1.1	Exergetischer Vergleich	378
6.1.2	Vergleich der Energie-Nutzungsgrade	380
6.2	Prinzip und Aufbau	383
6.2.1	Der idealisierte Kreisprozess	383
6.2.2	Der reale Kreisprozess	385
6.2.3	Leistungsziffer und Arbeitszahl	387
6.3	Einsatz	387
6.3.1	Verlauf der Aussentemperatur	388
6.3.2	Art und Bemessung der Wärmeverteilungsanlage	389
	Literatur	391
Teil III	Alternative Stromerzeugung, chemische Energiespeicher	393
7	Windkraftwerke	395
7.1	Die kinetische Energie des Windes	395
7.1.1	Theoretische Windleistung	395
7.1.2	Windgeschwindigkeit	396
7.1.3	Energieangebot	397
7.1.4	Die Weibull-Verteilung	398
7.2	Windradtypen und ihre Leistung	400
7.3	Horizontalachsige Windrotoren	403
7.3.1	Theorie von Betz	403
7.3.2	Tragflügeltheorie	405
7.4	Moderne horizontalachsige Windturbinen	408
7.5	Andere Windradtypen	409
7.5.1	Der Darrieus-Rotor	409
7.5.2	Der Savoniusrotor	414
7.6	Betrieb und Regelung, Auslegung	417
7.6.1	Leistung und Betriebsarten	417
7.6.2	Leistungsregelung	418
7.6.3	Netzbetrieb	419
7.6.4	Inselbetrieb	420
	Literatur	421

8	Photovoltaik	423
8.1	Physikalische Grundlagen, fotoelektrischer Effekt	423
8.1.1	Photoleitung	425
8.1.2	Der P-N-Übergang	427
8.2	Photovoltaischer Effekt, Photostrom	428
8.3	Solarzelle, Gesamtwirkungsgrad	435
8.3.1	Kennlinie und Ersatzschema	435
8.3.2	Leerlaufspannung	439
8.3.3	Füllfaktor	440
8.3.4	Gesamtwirkungsgrad	442
8.3.5	Möglichkeiten zur Wirkungsgradverbesserung	442
8.3.6	Solarzellentypen	444
8.4	Die Sonne als Energiequelle	446
8.4.1	Extraterrestrische Strahlungsintensität	446
8.4.2	Scheinbare Sonnenbewegung relativ zur Erde	447
8.4.3	Berechnung des Sonnenstands	450
8.4.4	Berechnung der Strahlungsintensität	451
8.4.5	Strahlungsenergie pro Tag	452
8.4.6	Wirkung der Atmosphäre	455
8.4.7	Strahlungsintensität mit Atmosphäre	456
8.5	Systemtechnik	459
8.5.1	Solarmodule und Solargeneratoren	459
8.5.2	Inselsysteme	459
8.5.3	Netzgekoppelte PV-Anlagen	460
8.5.4	Wechselrichter	461
8.5.5	Modellierung der Solarmodule	464
	Literatur	467
9	Brennstoffzellen	469
9.1	Aufbau und Typen	469
9.2	Prinzip und Modell	471
9.2.1	Elektrochemische Grundlagen	471
9.2.2	Lineares Modell	474
9.3	Brennstoffzellen für stationäre Anwendungen	475
9.3.1	Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC)	475
9.3.2	Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC)	476
9.3.3	Oxidkeramische-Brennstoffzelle (SOFC)	477
9.3.4	Systemtechnik	478
9.4	Brennstoffzellen für mobile Anwendungen	479
9.4.1	Alkalische Brennstoffzellen (AFC)	479
9.4.2	PEM-Brennstoffzellen (PEFC)	481
9.4.3	PEM – Brennstoffzellensysteme	484
	Literatur	492

10 Batterien	493
10.1 Funktionsweise eines elektrochemischen Energiewandlers	493
10.2 Akkumulatortypen und ihre Einsatzbereiche	499
10.2.1 Blei-Säure-Akkumulatoren	499
10.2.2 Nickelmetallhydrid-Akkumulatoren	501
10.2.3 Natrium-Nickelchlorid-Akkumulatoren	502
10.3 Lithiumionen-Akkumulatoren	503
10.3.1 Einleitung	503
10.3.2 Grundlagen der Lithiumionen-Technologie	504
10.3.3 Kennwerte der Lithiumionen-Technologie	506
10.3.4 Lebensdauer	506
10.3.5 Betriebsparameter	508
10.3.6 Sicherheit	511
10.3.7 Zusammenfassung	514
11 Kernfusion	515
11.1 Grundlagen des Fusionsprozesses	515
11.1.1 Fusionsreaktionen	515
11.1.2 Energieverteilung	516
11.2 Der Fusionsreaktor	518
11.2.1 Prinzip des (d,t)-Fusionsreaktors	518
11.2.2 Energiebilanz des Plasmas	521
11.2.3 Das Einschlussproblem	524
11.3 Stand und Perspektiven der Kernfusion	527
11.3.1 Internationales Forschungsprogramm Kernfusion	527
11.3.2 Vorzüge der Fusion und technologische Probleme	528
Literatur	529
Anhang A Thermodynamik	531
Anhang B Kernphysikalische Grundlagen	547
Anhang C Energiewirtschaft der Schweiz, vergangene Entwicklung, Stand 2013 und Szenario 2050	559
Anhang D Energieverbrauch und CO₂-Emissionen 2013 der sechs größten Länder Europas	573
Anhang E Gamma-Funktion	581
Anhang F Lösung der Aufgaben	585
Anhang G Mollier-Diagramm, Kältemittel	589
Literatur	593
Sachverzeichnis	595