

Inhalt

Teil I Energiewirtschaft, Elektrizitätswirtschaft

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	7
1.2 Verfügbarkeit der Primärenergie	7
1.2.1 Nicht erneuerbare Energien	8
1.2.2 Erneuerbare Energien	11
1.2.3 Potential und Nutzung der wichtigsten Solarenergiearten	14
1.2.4 Ökologische Probleme	19
1.3 Energiebedarf, CO ₂ -Emissionen, Indikatoren	21
1.3.1 Allgemeines	21
1.3.2 Endenergie und Verluste des Energiesektors	21
1.3.3 Weltweiter Primärenergiebedarf, Energiesektor	22
1.3.4 CO ₂ -Emissionen und Indikatoren	24
1.4 Energieverbrauch und CO ₂ -Emissionen in Europa	25
1.4.1 Bevölkerung und Bruttoinlandsprodukt	25
1.4.2 Energieverbrauch pro Kopf	25
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	29
1.5 Weltweiter Energieverbrauch	32
1.5.1 Energieverbrauch in der Vergangenheit	32
1.5.2 Energieverbrauch, Bevölkerung und BIP in 2007	33
1.5.3 Primär- und Endenergie und ihre Verteilung 2007	36

1.6	Zukünftige Entwicklung des Weltenergiebedarfs	46
1.6.1	Entwicklung der Weltbevölkerung	47
1.6.2	Zunahme des BIP (KKP) und Energienachfrage (IEA-Szenarien: WEO 2006, 450-Szenario)	49
1.7	CO ₂ -Emissionen und Klimaschutz	50
1.7.1	Weltweite Entwicklung der CO ₂ -Emissionen, IEA-Szenarien	50
1.7.2	Klimaschutz, mittel- und langfristige Maßnahmen	52
1.7.3	Elektrizitätsverbrauch und Klimaschutz	54
1.7.4	Transportbereich	57
1.7.5	Wärmebereich	58
2	Wirtschaftlichkeitsberechnungen	59
2.1	Investitionsrechnung, Diskontierungsverfahren	60
2.1.1	Kapitalwertmethode	60
2.1.2	Annuitätsmethode	62
2.2	Kosten der Energie	64
2.2.1	Kosten der elektrischen Energie	64
2.2.2	Spezifische Energiekosten an den Kraftwerksklemmen	65
2.2.3	Spezifische Jahreskosten der Kraftwerke	66
2.2.4	Kosten der elektrischen Energie am Verbraucher	67
2.2.5	Einfluss der Einspeisung von Windenergie	68
3	Elektrizitätswirtschaft, Liberalisierung	69
3.1	Verbrauch elektrischer Energie	69
3.1.1	Struktur des Energieverbrauchs	70
3.1.2	Schwankungen des Energiebedarfs	71
3.2	Deckung des Elektrizitätsbedarfs	73
3.2.1	Kraftwerkarten	73
3.2.2	Kraftwerkeinsatz	75
3.2.3	Wasserspeicherung	77
3.2.4	Energieaustausch	78
3.3	Wasserkraftwerke	79
3.4	Thermische Kraftwerke	81
3.5	Wettbewerb im Elektrizitätssektor	84
3.5.1	Einführung	84
3.5.2	Grundpfeiler des Wettbewerbs und Probleme	85
3.5.3	Reorganisationsmodelle	88
3.5.4	Privatisierung, Regulierung der Monopole	92
3.5.5	Konsequenzen der Marktöffnung	92
3.6	Strompreisgestaltung (Prof. Dipl.-Ing. Michael Höckel)	93
3.6.1	Verteilung der Selbstkosten	94
3.6.2	Stromtarife	101

3.7	Schweizer Variante der Liberalisierung (Niklaus Vontobel)	110
3.7.1	Argumente für Wettbewerb im Elektrizitätssektor	110
3.7.2	Voraussetzung für einen funktionierenden Elektrizitätsmarkt	114
3.7.3	Schweizer Spielart der Liberalisierung	121
3.8	Funktionsweise liberalisierter Elektrizitätsmärkte (Prof. Dr.-Ing. Jochen Kreusel)	135
3.8.1	Motivation für Privatisierung und Liberalisierung	136
3.8.2	Der Aufbau wettbewerblich organisierter Elektrizitätsmärkte	140
3.8.3	Dienstleistungsmarkt	146
3.8.4	Wettbewerbsmarkt	158
3.8.5	Besonderheiten internationaler Realisierungen liberalisierter Elektrizitätsmärkte	177
3.8.6	Erfahrungen in liberalisierten Märkten	182
3.8.7	Ausblick auf Anforderungen in Elektrizitätsversorgungssystemen mit sehr hohem Anteil erneuerbarer Energiequellen – Smart Grids in liberalisierten Märkten	192
3.9	Risikomanagement in der Elektrizitätswirtschaft (Dipl.-Ing. Thomas Putzi)	194
3.9.1	Anforderung an die Unternehmensführung	195
3.9.2	Enterprise Risk-Management (Theorie)	195
3.9.3	Enterprise Risk Management (Praxis) (Prof. Dipl.-Ing. Michael Höckel)	232

Teil II Kraftwerktechnik, Energieumwandlung

4	Wasserkraftwerke	253
4.1	Hydrologische Planungsgrundlagen	253
4.2	Laufkraftwerke	255
4.2.1	Wasserbewirtschaftung	258
4.2.2	Ausführung	258
4.2.3	Auslegung	258
4.3	Speicherkraftwerke	259
4.3.1	Tages- und Wochenspeicherwerke	259
4.3.2	Jahresspeicherwerke (Saisonspeicherwerke)	261
4.3.3	Pumpspeicherung	264
4.4	Wasserturbinen	265
4.4.1	Pelton-Turbine	266
4.4.2	Reaktionsturbinen	272
4.4.3	Turbinenwahl	281
4.4.4	Kleinwasserkraftwerke	283
4.5	Dynamik	284
4.5.1	Druckstollen	285
4.5.2	Wasserschloss	286

4.5.3	Starre Druckleitung	287
4.5.4	Gesamtmodell des hydraulischen Systems	287
4.5.5	Elastischer Druckstoß	290
4.5.6	Gesamtmodell des hydraulischen Systems mit Elastizität	294
4.5.7	Wasserturbinen- und Wasserkraftwerk-Modell	295
5	Thermische Kraftwerke, Wärmepumpe	303
5.1	Dampfkraftprozess	303
5.1.1	Rankine- und Clausius-Rankine-Kreisprozess	303
5.1.2	Zwischenüberhitzung und Speisewasservorwärmung	306
5.2	Gasturbinenprozess	307
5.2.1	Einfacher offener Gasturbinenprozess (Joule-Prozess)	308
5.2.2	Rekuperation	312
5.2.3	Carnotisierung	313
5.3	Kombiprozesse	314
5.4	Wärme-Kraft-Kopplung	317
5.4.1	Entnahme-Kondensationsschaltung	317
5.4.2	Gegendruckanlage	319
5.4.3	Gasturbinen	320
5.4.4	Blockheizkraftwerke	321
5.4.5	Wärme-Kraft-Kopplung und CO ₂ -Produktion	321
5.5	Fossilgefeuerte Dampfkraftwerke	322
5.5.1	Luft-Brennstoff-Rauchgas/Asche-Kreislauf	322
5.5.2	Wasser-Dampf-Kreislauf, Verluste	322
5.5.3	Kühlwasserkreislauf	324
5.5.4	Blockregelung	324
5.5.5	Dynamik	329
5.6	Kernkraftwerke	332
5.6.1	Energiegewinnung durch Kernspaltung	332
5.6.2	Reaktorkonzepte	335
5.6.3	Dampfkreisprozess und Regelung	339
5.6.4	Reaktorsicherheit und Brennstoffkreislauf	340
5.6.5	Risiken der Kernkraft	343
5.6.6	Wirkung der Radioaktivität	345
5.7	Kraftwerke mit kombiniertem Gas- und Dampfprozess	348
5.7.1	GUD-Kraftwerke	349
5.7.2	GUD- Kraftwerke mit Zusatzfeuerung im Abhitzekessel	351
5.7.3	Verbundkraftwerke	351
5.7.4	Kombikraftwerk mit nachgeschaltetem atmosphärischem Dampferzeuger	352
5.7.5	Kraftwerke mit Kohleumwandlung unter Druck	353
5.7.6	Dynamisches Verhalten	354

Inhalt	xvii
5.8 Kraftwerksleittechnik	355
5.8.1 Entwicklung	356
5.8.2 Aufbau	357
5.8.3 Ausblick	358
5.9 Die Wärmepumpe	359
5.9.1 Energiewirtschaftliche Bedeutung	359
5.9.2 Prinzip und Aufbau	364
5.9.3 Einsatz	369
Teil III Alternative Stromerzeugung, chemische Energiespeicher	
6 Windkraftwerke	375
6.1 Die kinetische Energie des Windes	375
6.1.1 Theoretische Windleistung	375
6.1.2 Windgeschwindigkeit	376
6.1.3 Energieangebot	377
6.1.4 Die Weibull-Verteilung	377
6.2 Windradtypen und ihre Leistung	380
6.3 Horizontalachsige Windrotoren	383
6.3.1 Theorie von Betz	383
6.3.2 Tragflügeltheorie	385
6.4 Moderne horizontalachsige Windturbinen	387
6.5 Andere Windradtypen	388
6.5.1 Der Darrieus-Rotor	388
6.5.2 Der Savoniusrotor	392
6.6 Betrieb und Regelung, Auslegung	395
6.6.1 Leistung und Betriebsarten	395
6.6.2 Leistungsregelung	397
6.6.3 Netzbetrieb	398
6.6.4 Inselbetrieb	399
7 Photovoltaik	401
7.1 Physikalische Grundlagen, photoelektrischer Effekt	401
7.1.1 Photoleitung	402
7.1.2 Der P-N-Übergang	404
7.2 Photovoltaischer Effekt, Photostrom	406
7.3 Solarzelle, Gesamtwirkungsgrad	413
7.3.1 Kennlinie und Ersatzschema	413
7.3.2 Leerlaufspannung	416
7.3.3 Füllfaktor	417
7.3.4 Gesamtwirkungsgrad	418
7.3.5 Möglichkeiten zur Wirkungsgradverbesserung	420
7.3.6 Solarzellentypen	421
7.4 Die Sonne als Energiequelle	423
7.4.1 Extraterrestrische Strahlungsintensität	423
7.4.2 Scheinbare Sonnenbewegung relativ zur Erde	424

7.4.3	Berechnung des Sonnenstands	427
7.4.4	Berechnung der Strahlungsintensität	427
7.4.5	Strahlungsenergie pro Tag	428
7.4.6	Wirkung der Atmosphäre	431
7.4.7	Strahlungsintensität mit Atmosphäre	433
7.5	Systemtechnik	434
7.5.1	Solarmodule und Solargeneratorate	434
7.5.2	Inselsysteme	436
7.5.3	Netzgekoppelte PV-Anlagen	436
7.5.4	Wechselrichter	437
7.5.5	Modellierung der Solarmodule	440
8	Brennstoffzellen	445
8.1	Aufbau und Typen	445
8.2	Prinzip und Modell	447
8.2.1	Elektrochemische Grundlagen	447
8.2.2	Lineares Modell	449
8.3	Brennstoffzellen für stationäre Anwendungen	451
8.3.1	Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC)	451
8.3.2	Keramik-Brennstoffzelle (SOFC)	452
8.3.3	Systemtechnik	453
8.4	Brennstoffzellen für mobile Anwendungen (Prof. Dipl.-Ing. Michael Höckel)	453
8.4.1	Alkalische Brennstoffzellen (AFC)	454
8.4.2	PEM-Brennstoffzellen (PEFC)	456
8.4.3	PEM – Brennstoffzellensysteme	459
9	Chemische Energiespeicher	
	(Prof. Dipl.-Ing. Michael Höckel/Prof. Dr.-Ing. Andrea Vezzini)	467
9.1	Funktionsweise eines elektrochemischen Energiewandlers (Prof. Dipl.-Ing. Michael Höckel)	467
9.2	Akkumulatortypen und ihre Einsatzbereiche (Prof. Dipl.-Ing. Michael Höckel)	472
9.2.1	Blei-Säure-Akkumulatoren	473
9.2.2	Nickelmetallhydrid-Akkumulatoren	474
9.2.3	Natrium-Nickelchlorid-Akkumulatoren	475
9.3	Lithiumionen-Akkumulatoren (Prof. Dr.-Ing. Andrea Vezzini)	476
9.3.1	Einleitung	477
9.3.2	Grundlagen der Lithiumionen-Technologie	477
9.3.3	Kennwerte der Lithiumionen-Technologie	479
9.3.4	Lebensdauer	479
9.3.5	Betriebsparameter	482
9.3.6	Sicherheit	485
9.3.7	Zusammenfassung	487

10 Kernfusion	489
10.1 Grundlagen des Fusionsprozesses	489
10.1.1 Fusionsreaktionen	489
10.1.2 Energieverteilung	490
10.2 Der Fusionsreaktor	491
10.2.1 Prinzip des (d,t)-Fusionsreaktors	491
10.2.2 Energiebilanz des Plasmas	494
10.2.3 Das Einschlussproblem	498
10.3 Stand und Perspektiven der Kernfusion	501
10.3.1 Internationales Forschungsprogramm Kernfusion	501
10.3.2 Vorzüge der Fusion und technologische Probleme	501
Anhang A Thermodynamik	503
Anhang B Kernphysikalische Grundlagen	519
Anhang C Energiewirtschaft der Schweiz, vergangene Entwicklung, Stand 2007 und Szenario 2030	531
Anhang D Energieverbrauch und CO₂-Emissionen 2007 der sechs größten Länder Europas	543
Anhang E Gamma-Funktion	551
Anhang F Lösung der Aufgaben	553
Anhang G Mollier-Diagramm, Kältemittel	559
Literatur	563
Sachverzeichnis	571