



Inhaltsverzeichnis

1	Energie und Klimaschutz	13
1.1	Der Begriff Energie	13
1.2	Entwicklung des Energiebedarfs	18
1.2.1	Entwicklung des Weltenergiebedarfs.....	18
1.2.2	Entwicklung des Energiebedarfs in Deutschland.....	20
1.3	Reichweite konventioneller Energieträger	23
1.4	Der Treibhauseffekt	24
1.5	Kernenergie contra Treibhauseffekt	30
1.5.1	Kernspaltung	30
1.5.2	Kernfusion	33
1.6	Nutzung erneuerbarer Energien	34
1.6.1	Geothermische Energie.....	35
1.6.2	Planetenergie	36
1.6.3	Sonnenenergie	36
1.6.3.1	Nutzung der direkten Sonnenenergie.....	37
1.6.3.2	Nutzung der indirekten Sonnenenergie.....	40
1.7	Energiewende und Klimaschutz	44
1.7.1	Szenarien für den globalen Klimawandel	44
1.7.2	Internationaler Klimaschutz	48
1.7.3	Energiewende und Klimaschutz in Deutschland.....	50
1.7.3.1	Entwicklung der Kohlendioxidemissionen in Deutschland	50
1.7.3.2	Regenerative Energieversorgung in Deutschland	52
1.7.3.3	Umbau der Energieversorgung	56
2	Sonnenstrahlung	58
2.1	Einleitung	58
2.2	Der Fusionsreaktor Sonne.....	59
2.3	Sonnenstrahlung auf der Erde	63
2.4	Bestrahlungsstärke auf der Horizontalen	69
2.5	Sonnenposition und Einfallswinkel	72
2.6	Bestrahlungsstärke auf der geneigten Ebene	76
2.6.1	Direkte Strahlung auf der geneigten Ebene	76
2.6.2	Diffuse Strahlung auf der geneigten Ebene.....	77
2.6.3	Bodenreflexion.....	78
2.6.4	Strahlungsgewinn durch Neigung oder Nachführung	79
2.7	Berechnung von Abschattungsverlusten	82
2.7.1	Aufnahme der Umgebung.....	82
2.7.2	Bestimmung des direkten Abschattungsgrades	84
2.7.3	Bestimmung des diffusen Abschattungsgrades	85
2.7.4	Gesamtermittlung der Abschattungen.....	86

	2.7.5	Optimaler Abstand bei aufgeständerten Solaranlagen	87
2.8		Solarstrahlungsmesstechnik und Sonnensimulatoren	91
	2.8.1	Messung der globalen Bestrahlungsstärke	91
	2.8.2	Messung der direkten und der diffusen Bestrahlungsstärke	93
	2.8.3	Satellitenmessungen	93
	2.8.4	Künstliche Sonnen	96
3		Nicht konzentrierende Solarthermie	97
3.1		Grundlagen	97
3.2		Solarthermische Systeme	100
	3.2.1	Solare Schwimmbadbeheizung	100
	3.2.2	Solare Trinkwassererwärmung	101
	3.2.2.1	Schwerkraft- oder Thermosiphonanlagen	103
	3.2.2.2	Anlagen mit Zwangsumlauf	104
	3.2.3	Solare Heizungsunterstützung	107
	3.2.4	Rein solare Heizung	108
	3.2.5	Solare Nahwärmeversorgung	109
	3.2.6	Solares Kühlen	110
3.3		Solarkollektoren	111
	3.3.1	Speicherkollektoren	112
	3.3.2	Flachkollektoren	114
	3.3.3	Vakuurröhrenkollektoren	117
3.4		Kollektorabsorber	118
3.5		Kollektorleistung und Kollektorwirkungsgrad	121
3.6		Rohrleitungen	126
	3.6.1	Leitungsaufheizverluste	129
	3.6.2	Zirkulationsverluste	129
3.7		Speicher	131
	3.7.1	Trinkwasserspeicher	132
	3.7.2	Schwimmbekken	135
3.8		Anlagenauslegung	138
	3.8.1	Nutzwärmebedarf	138
	3.8.2	Solarer Deckungsgrad und Nutzungsgrad	139
	3.8.3	Solare Trinkwasseranlagen	141
	3.8.4	Anlagen zur solaren Heizungsunterstützung	142
	3.8.5	Rein solare Heizung	144
3.9		Aufwindkraftwerke	144
4		Konzentrierende Solarthermie	147
4.1		Einleitung	147
4.2		Konzentration von Solarstrahlung	147
4.3		Konzentrierende Kollektoren	150
	4.3.1	Linienkollektoren	151
	4.3.1.1	Kollektorarten und Kollektorgeometrie	151
	4.3.1.2	Kollektornutzleistung und Kollektorwirkungsgrad	153
	4.3.1.3	Längenausdehnung	157
	4.3.1.4	Parabolrinnenkollektorfelder	157
	4.3.2	Punkt-konzentratoren	160
4.4		Wärme-kraftmaschinen	161
	4.4.1	Carnot-Prozess	161
	4.4.2	Clausius-Rankine-Prozess	161
	4.4.3	Joule-Prozess	164

4.4.4	Stirling-Prozess	165
4.5	Konzentrierende solarthermische Anlagen.....	165
4.5.1	Parabolrinnenkraftwerke	165
4.5.2	Solarturmkraftwerke.....	170
4.5.2.1	Offener volumetrischer Receiver.....	171
4.5.2.2	Druck-Receiver.....	172
4.5.3	Dish-Stirling-Anlagen.....	173
4.5.4	Sonnenöfen und Solarchemie	174
4.6	Stromimport	175
5	Photovoltaik	178
5.1	Einleitung	178
5.2	Funktionsweise von Solarzellen	180
5.2.1	Atommodell nach Bohr	180
5.2.2	Photoeffekt	181
5.2.3	Funktionsprinzip einer Solarzelle	183
5.3	Herstellung von Solarzellen und Solarmodulen	190
5.3.1	Solarzellen aus kristallinem Silizium.....	190
5.3.2	Solarmodule mit kristallinen Zellen.....	195
5.3.3	Solarzellen aus amorphem Silizium.....	196
5.3.4	Solarzellen aus anderen Materialien.....	197
5.3.5	Modultests und Qualitätskontrolle	199
5.4	Elektrische Beschreibung von Solarzellen.....	200
5.4.1	Einfaches Ersatzschaltbild	200
5.4.2	Erweitertes Ersatzschaltbild (Eindiodenmodell).....	201
5.4.3	Zweidiodenmodell.....	204
5.4.4	Zweidiodenmodell mit Erweiterungsterm	204
5.4.5	Weitere elektrische Zellparameter	206
5.4.6	Temperaturabhängigkeit.....	208
5.4.7	Parameterbestimmung	211
5.5	Elektrische Beschreibung von Solarmodulen.....	212
5.5.1	Reihenschaltung von Solarzellen.....	212
5.5.2	Reihenschaltung unter inhomogenen Bedingungen	214
5.5.3	Parallelschaltung von Solarzellen	218
5.5.4	Technische Daten von Solarmodulen.....	218
5.6	Solargenerator und Last.....	220
5.6.1	Widerstandslast	220
5.6.2	Gleichspannungswandler	221
5.6.3	Tiefsetzsteller.....	222
5.6.4	Hochsetzsteller.....	225
5.6.5	Weitere Gleichspannungswandler	225
5.6.6	MPP-Tracker.....	226
5.7	Akkumulatoren	228
5.7.1	Akkumulatorarten	228
5.7.2	Bleiakkumulator	229
5.7.3	Andere Akkumulatortypen.....	234
5.7.4	Akkumulatorsysteme	235
5.7.5	Andere Speichermöglichkeiten	239
5.8	Wechselrichter.....	239
5.8.1	Wechselrichtertechnologie	239
5.8.1.1	Rechteckwechselrichter.....	240

5.8.1.2	Moderne Wechselrichtertopologien	243
5.8.2	Wechselrichter in der Photovoltaik.....	244
5.8.2.1	Funktionen und Aufgaben des Wechselrichters	244
5.8.2.2	Wechselrichterwirkungsgrade	246
5.8.2.3	Anlagenkonzepte	249
5.9	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme.....	250
5.9.1	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme mit Speicher	250
5.9.2	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme mit Heizung	253
5.10	Planung und Auslegung.....	255
5.10.1	Inselnetzsysteme.....	255
5.10.2	Rein Netzgekoppelte Systeme.....	258
5.10.3	Eigenverbrauchssysteme.....	260
5.10.3.1	Eigenverbrauchssysteme ohne Speicher	260
5.10.3.2	Eigenverbrauchssysteme mit Batteriespeicher	265
6	Windkraft	272
6.1	Einleitung	272
6.2	Dargebot von Windenergie.....	273
6.2.1	Entstehung des Windes.....	273
6.2.2	Angabe der Windstärke.....	274
6.2.3	Windgeschwindigkeitsverteilungen	275
6.2.4	Einfluss der Umgebung und Höhe.....	277
6.3	Nutzung der Windenergie.....	280
6.3.1	Im Wind enthaltene Leistung	280
6.3.2	Widerstandsläufer.....	282
6.3.3	Auftriebsläufer	284
6.4	Bauformen von Windkraftanlagen.....	288
6.4.1	Windkraftanlagen mit vertikaler Drehachse	288
6.4.2	Windkraftanlagen mit horizontaler Drehachse	289
6.4.2.1	Anlagenaufbau.....	289
6.4.2.2	Rotorblätter	290
6.4.2.3	Windgeschwindigkeitsbereiche	292
6.4.2.4	Leistungsbegrenzung und Sturmabschaltung	293
6.4.2.5	Windnachführung	295
6.4.2.6	Turm, Fundament, Getriebe und Generator.....	296
6.4.2.7	Offshore-Windkraftanlagen	297
6.5	Elektrische Maschinen	298
6.5.1	Elektrische Wechselstromrechnung.....	299
6.5.2	Drehfeld	302
6.5.3	Synchronmaschine	306
6.5.3.1	Aufbau	306
6.5.3.2	Elektrische Beschreibung	307
6.5.3.3	Synchronisation	310
6.5.4	Asynchronmaschine	310
6.5.4.1	Aufbau und Betriebszustände.....	310
6.5.4.2	Ersatzschaltbilder und Stromortskurven	312
6.5.4.3	Leistungsbilanz.....	314
6.5.4.4	Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien und typische Generatordaten.....	315
6.6	Elektrische Anlagenkonzepte.....	317
6.6.1	Asynchrongenerator mit direkter Netzkopplung	317
6.6.2	Synchrongenerator mit direkter Netzkopplung	320

6.6.3	Synchrongenerator mit Umrichter und Zwischenkreis.....	321
6.6.4	Drehzahlregelbare Asynchrongeneratoren.....	323
6.6.5	Inselnetzanlagen.....	323
6.7	Netzbetrieb.....	324
6.7.1	Anlagenertrag.....	324
6.7.2	Netzanschluss.....	325
7	Wasserkraft.....	327
7.1	Einleitung.....	327
7.2	Dargebot der Wasserkraft.....	328
7.3	Wasserkraftwerke.....	332
7.3.1	Laufwasserkraftwerke.....	332
7.3.2	Speicherwasserkraftwerke.....	334
7.3.3	Pumpspeicherkraftwerke.....	335
7.4	Wasserturbinen.....	338
7.4.1	Turbinenarten.....	338
7.4.1.1	Kaplan-Turbine und Rohr-Turbine.....	339
7.4.1.2	Ossberger-Turbine.....	340
7.4.1.3	Francis-Turbine.....	340
7.4.1.4	Pelton-Turbine.....	341
7.4.2	Turbinenwirkungsgrad.....	341
7.5	Weitere technische Anlagen zur Wasserkraftnutzung.....	343
7.5.1	Gezeitenkraftwerke.....	343
7.5.2	Meeresströmungskraftwerke.....	344
7.5.3	Wellenkraftwerke.....	345
8	Geothermie.....	347
8.1	Geothermievorkommen.....	347
8.2	Geothermische Heizwerke.....	351
8.3	Geothermische Stromerzeugung.....	352
8.3.1	Kraftwerksprozesse.....	352
8.3.2	Geothermische Kraftwerke.....	354
8.4	Wärmepumpen.....	356
8.4.1	Kompressions-Wärmepumpen.....	356
8.4.2	Absorptions-Wärmepumpen.....	358
8.4.3	Adsorptions-Wärmepumpen.....	359
8.4.4	Einsatzgebiete, Planung und Ertragsberechnung.....	360
9	Nutzung der Biomasse.....	365
9.1	Vorkommen an Biomasse.....	365
9.1.1	Feste Bioenergieträger.....	367
9.1.2	Flüssige Bioenergieträger.....	371
9.1.2.1	Pflanzenöl.....	371
9.1.2.2	Biodiesel.....	372
9.1.2.3	Bioalkohole.....	372
9.1.2.4	Biomass-to-Liquid (BtL)-Brennstoffe.....	373
9.1.3	Gasförmige Bioenergieträger.....	374
9.1.4	Flächenerträge und Umweltbilanz.....	376
9.2	Biomasseanlagen.....	377
9.2.1	Biomasseheizungen.....	377
9.2.2	Biomassekraftwerke.....	380

10	Wasserstofferzeugung, Brennstoffzellen und Methanisierung	381
10.1	Wasserstofferzeugung und -speicherung	381
10.2	Brennstoffzellen.....	384
10.2.1	Einleitung	384
10.2.2	Brennstoffzellentypen	385
10.2.3	Wirkungsgrade und Betriebsverhalten	388
10.3	Methanisierung und Untertagespeicherung.....	390
11	Wirtschaftlichkeitsberechnungen	394
11.1	Einleitung.....	394
11.2	Energiegestehungskosten	395
11.2.1	Berechnungen ohne Kapitalverzinsung.....	395
11.2.1.1	Solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung	396
11.2.1.2	Solarthermische Kraftwerke	397
11.2.1.3	Photovoltaikanlagen	398
11.2.1.4	Windkraftanlagen	398
11.2.1.5	Wasserkraftanlagen.....	399
11.2.1.6	Geothermieanlagen.....	400
11.2.1.7	Holzpelletsheizungen.....	401
11.2.2	Berechnungen mit Kapitalverzinsung.....	402
11.2.2.1	Solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung	405
11.2.2.2	Solarthermische Kraftwerke	405
11.2.2.3	Photovoltaikanlagen	405
11.2.2.4	Windkraftanlagen	406
11.2.3	Vergütung für regenerative Energieanlagen	406
11.2.4	Zukünftige Entwicklung der Kosten für regenerative Energien.....	406
11.2.5	Kosten konventioneller Energiesysteme	409
11.3	Externe Kosten des Energieverbrauchs.....	411
11.3.1	Subventionen im Energiemarkt.....	412
11.3.2	Ausgaben für Forschung und Entwicklung	414
11.3.3	Kosten für Umwelt- und Gesundheitsschäden.....	415
11.3.4	Sonstige externe Kosten.....	416
11.3.5	Internalisierung der externen Kosten.....	416
11.4	Kritische Betrachtung der Wirtschaftlichkeitsberechnungen	418
11.4.1	Unendliche Kapitalvermehrung.....	418
11.4.2	Die Verantwortung des Kapitals.....	419
12	Simulation und die DVD zum Buch.....	421
12.1	Allgemeines zur Simulation.....	421
12.2	Die DVD zum Buch	422
12.2.1	Start und Überblick	422
12.2.2	Abbildungen	423
12.2.3	Software	423
12.2.4	Vermischtes.....	424
	Literaturverzeichnis	426
	Sachwortverzeichnis.....	434