

Inhalt

Vorwort	V
Vorwort zur vollständig überarbeiteten 4. Auflage	VII
1 Einführung	1
1.1 Strukturen der Strom- und Wärmeerzeugung.....	1
1.2 Gesellschaftliche, wirtschaftliche und ökologische Randbedingungen der Energiewandlung.....	5
1.2.1 Energiebedarf und Weltbevölkerung.....	5
1.2.2 Reichweite und Risiken fossiler Energieträger.....	8
1.2.3 Der Treibhauseffekt.....	13
1.2.4 Die Entwicklung der internationalen Strommärkte	19
1.2.5 Die deutsche Energiewende	20
1.2.6 Die CO ₂ -Emissionen Deutschlands	24
1.3 Probleme beim dezentralen Einsatz konventioneller Technologien	26
1.3.1 Technologien für die dezentrale Stromerzeugung	26
1.3.2 Einfluss der Anlagengröße auf die Wirtschaftlichkeit.....	27
1.3.3 Einfluss der Anlagengröße auf die thermodynamische Effizienz.....	28
1.3.4 Einfluss der Anlagengröße auf die Flexibilität.....	29
1.3.5 Einfluss der Anlagengröße auf die Ökologie	29
2 Thermodynamische Grundlagen der Energiewandlung	31
2.1 Wirkungsgrade bei der Energiewandlung	31
2.1.1 Die Energiebilanz.....	34
2.1.2 Der thermische und elektrische Wirkungsgrad.....	35
2.1.3 Der Brennstoffausnutzungsgrad	35
2.1.4 Der Wirkungsgrad einer Wärmepumpe oder Kältemaschine	38
2.1.5 Der Wirkungsgrad von Fluidenergiemaschinen	39
2.1.6 Der Wirkungsgrad bei der Nutzung von Solarenergie	42
2.1.7 Wirkungsgrade bei der Energiespeicherung.....	44
2.2 Energiewandlung in Kreisprozessen	46
2.2.1 Der ideale Kreisprozess.....	46
2.2.2 Die Exergiebilanz.....	49

2.2.3	Die thermodynamische Berechnung thermischer Prozesse.....	56
2.2.4	Zustandsänderungen in Energiesystemen	57
2.2.5	Numerische Berechnung thermischer Prozesse	67
2.2.6	Thermodynamische Bewertung der Energiewandlung	77
2.3	Die thermische Konversion von Brennstoffen	82
2.3.1	Modellierung chemischer Reaktionen.....	83
2.3.2	Verbrennung und Verbrennungsrechnung	85
2.3.3	Vergasung von Festbrennstoffen.....	102
2.4	Energiewandlung in stationären Fließprozessen	120
2.4.1	Die Impulsbilanz in stationären Fließprozessen.....	120
2.4.2	Energiewandlung in thermischen Strömungsmaschinen.....	122
2.4.3	Energiewandlung in Pumpen und Verdichtern	124
2.4.4	Energiewandlung in frei umströmten Turbinen	126
3	Energiesysteme für die Wärmeerzeugung	129
3.1	Wärmeerzeugung mit Verbrennungsanlagen	129
3.1.1	Konzepte zur Nutzwärmeerzeugung und Verteilung	130
3.1.2	Wärmeerzeugung mit Öl- und Gasfeuerungen.....	136
3.1.3	Wärmeerzeugung mit Feststofffeuerungen	138
3.1.4	Wirkungsgrade bei der Erzeugung von Nutzwärme mit Verbrennungsanlagen	146
3.1.5	Emissionsminderung in Verbrennungsanlagen	159
3.1.6	Verbrennung biogener Festbrennstoffe	167
3.2	Solarthermische Wärmeerzeugung	177
3.2.1	Solarkollektoren	177
3.2.2	Parabolrinnenkollektoren	179
3.3	Geothermische Wärmeerzeugung	181
3.3.1	Nutzung der Geothermie weltweit	181
3.3.2	Nutzung der Geothermie in Deutschland	182
3.3.3	Oberflächennahe Geothermie.....	183
3.3.4	Tiefe Geothermie	184
3.4	Wärmepumpen	186
3.4.1	Wärmepumpenprozesse	186
3.4.2	Wärmepumpensysteme für dezentrale Verbraucher	193
3.4.3	Industrielle Prozesswärmeerzeugung mit Wärmepumpen	195
4	Energiesysteme für die Stromerzeugung	199
4.1	Stromerzeugung in Wärmekraftwerken	199
4.1.1	Das klassische Dampfkraftwerk.....	202
4.1.2	ORC-Prozesse	214
4.1.3	Gasturbinen-Kraftwerke.....	219
4.1.4	Stationäre Gasmotoren	231
4.1.5	Kombinierte Kraftwerke	240

4.2	Kraft-Wärme-Kopplung	244
4.2.1	Energiebilanz der Kraft-Wärme-Kopplung	244
4.2.2	Thermodynamische Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung	253
4.2.3	Wirtschaftliche Vorteile der Kraft-Wärme-Kopplung	264
4.2.4	Arbeitsmaschinen für die Kraft-Wärme-Kopplung	266
4.3	Stromerzeugung mit integrierter Vergasung	276
4.3.1	Die Vergasung von Festbrennstoffen	276
4.3.2	Die Pyrolyse	279
4.3.3	Die Vergärung	281
4.3.4	Thermochemische Vergasung	287
4.3.5	Brenngasaufbereitung und Systemintegration	305
4.3.6	Die stoffliche Nutzung von Biomasse	312
4.4	Brennstoffzellen	318
4.4.1	Funktionsweise von Brennstoffzellen	318
4.4.2	Wirkungsgrade von Brennstoffzellen	322
4.4.3	Brennstoffzellen-Systeme	342
4.5	Windkraftanlagen	345
4.5.1	Technische und wirtschaftliche Potenziale der Windenergie	345
4.5.2	Bauformen von Windkraftanlagen	353
4.5.3	Leistungsbeiwerte realer Windkraftanlagen	356
4.5.4	Die Regelung von Windkraftanlagen	357
4.6	Wasserkraftwerke	358
4.6.1	Laufwasserkraftwerke	358
4.6.2	Speicher- und Pumpspeicher-Kraftwerke	359
4.6.3	Gezeiten- und Wellen-Kraftwerke	359
4.6.4	Turbinen für Wasserkraftwerke	360
4.7	Photovoltaik	361
4.7.1	Entwicklung der Solarzelle	361
4.7.2	Aufbau und Funktionsweise einer Solarzelle	361
4.7.3	Die U-I-Kennlinie einer Solarzelle	363
4.7.4	Verschaltung von PV-Modulen	368
4.7.5	Dimensionierung von PV-Anlagen	369
5	Energiespeicherung und Speichertechnologien	375
5.1	Wärmespeicher	377
5.1.1	Speicherung von Niedertemperatur-Wärme	377
5.1.2	Speicherung von Hochtemperatur-Wärme	380
5.2	Speicherung elektrischer Energie	381
5.2.1	Speicheraufgaben	381
5.2.2	Pumpspeicherkraftwerke	384
5.2.3	Speicherung elektrischer Energie in Batterien	384
5.2.4	Druckluftspeicher	388

5.2.5	Carnot-Batterien.....	390
5.3	Erzeugung und Speicherung von Wasserstoff.....	396
5.3.1	Wasserstoff aus Methan	396
5.3.2	Wasserstoff aus fester Biomasse	400
5.3.3	Wasserstoff aus der Elektrolyse	404
5.3.4	Speicherung von reinem Wasserstoff.....	407
5.4	Synthese und Nutzung von Wasserstoffderivaten	410
5.4.1	Energiedichte chemischer Wasserstoffspeicher	410
5.4.2	Power-to-Power-Wirkungsgrade chemischer Wasserstoffspeicher	411
5.4.3	Speicherung elektrischer Energie als Methan	412
5.4.4	Speicherung von Wasserstoff mit Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHCs) ...	416
5.4.5	Speicherung elektrischer Energie mit flüssigen Kohlenwasserstoffen („e-Fuels“).	417
5.4.6	Speicherung elektrischer Energie mit Ammoniak.....	418
6	Grundsätze für die Optimierung dezentraler Energiesysteme	421
6.1	Prinzipien für die thermodynamische Optimierung dezentraler Energiesysteme ...	421
6.1.1	Optimierung des Carnot-Faktors.....	421
6.1.2	Minimierung von Rauchgasverlusten.....	427
6.1.3	Optimierung der thermodynamischen Systemintegration	449
6.2	Prinzipien für die Flexibilisierung dezentraler Energiesysteme.....	460
6.2.1	Bedeutung der Flexibilität eines Energiesystems für die Versorgungssicherheit...	460
6.2.2	Versorgungssicherheit in Stromnetzen	462
6.2.3	Lastmanagement und Anlageneinsatzplanung	468
6.2.4	Energiesysteme mit günstigem Teillastverhalten	471
6.2.5	Leistungssteigernde Maßnahmen bei Dampfturbinen-Prozessen.....	483
6.2.6	Leistungssteigernde Maßnahmen bei Gasturbinen.....	485
6.2.7	Flexibilisierung durch die Kraft-Wärme-Kopplung	488
6.2.8	Virtuelle Kraftwerke und „Smart Grids“.....	492
6.2.9	Erweiterung des Brennstoffbandes.....	494
6.3	Prinzipien für die ökonomische Optimierung dezentraler Energiesysteme.....	497
6.3.1	Wirtschaftliche Randbedingungen dezentraler Anlagen	497
6.3.2	Kostenstrukturen der Strom und Wärmeerzeugung	512
6.3.3	Maßnahmen zur Minimierung der Energieerzeugungskosten.....	529
6.3.4	Maßnahmen zur Erhöhung der Anlagenauslastung.....	534
6.3.5	Peak-Shaving	538
6.3.6	Wirtschaftliche Vorteile der Kraft-Wärme-Kopplung	540
6.3.7	Erwirtschaftung von Zusatzerlösen	541
6.3.8	Vermeidung von Planungsfehlern.....	543
6.3.9	Vermeidung von Planungsrisiken	551
6.4	Prinzipien für ökologische Optimierung dezentraler Energiesysteme	556
6.4.1	Minderung der spezifischen CO ₂ -Emissionen fossiler Brennstoffe	557
6.4.2	Das Schließen von Kohlenstoffkreisläufen	562
6.4.3	Minimierung der Umweltbelastung durch Schadstoff-Emissionen.....	575

6.4.4	Globalisierung erneuerbarer Energien.....	577
7	Zusammenfassung und Ausblick	579
7.1	Die Notwendigkeit der Entwicklung dezentraler Energiesysteme	579
7.2	Zusammenfassung der Prinzipien für die Entwicklung dezentraler Energiesysteme	581
7.3	Lösungsansätze für die Umsetzung notwendiger Entwicklungsarbeiten.....	584
8	Literatur	587
9	Anhang	601
9.1	Tabellenverzeichnis.....	601
9.2	Abbildungsverzeichnis	603
	Stichwortverzeichnis	613