

---

# Inhaltsverzeichnis

---

## Teil I Grundlagen

---

<b>1 Einführung</b> .....	3
1.1 Energieströme der Erde .....	12
1.1.1 Das Energiesystem Erde .....	13
1.1.2 Kohlendioxidemission, Auswirkungen auf das Klima ..	17
1.2 Kraftwerke und Umwelt .....	22
1.3 Energieumwandlung .....	24
1.4 Energieverbrauch bei der Energiegewinnung .....	25
1.5 Verbundnetz, Anforderungen an Kraftwerke .....	27
1.6 Fazit .....	33
Literatur .....	34
<b>2 Energiequellen</b> .....	35
2.1 Fossile Brennstoffe .....	38
2.1.1 Kohlen .....	39
2.1.2 Erdöl .....	44
2.1.3 Erdgas .....	46
2.1.4 Umweltbelastung durch die Nutzung fossiler Brennstoffe	47
2.2 Nukleare Brennstoffe .....	51
2.2.1 Ressourcen an Kernbrennstoffen .....	52
2.2.2 Brennstoffkreislauf für Leichtwasserreaktoren .....	53
2.2.3 Umweltbelastungen durch die Nutzung der Kernenergie	55
2.3 Geothermie .....	56
2.3.1 Umweltbelastungen durch die Nutzung der Erdwärme ..	59
2.4 Sonnenenergie .....	60
2.4.1 Umweltbelastungen durch die Nutzung von Wind und Sonne .....	64
2.5 Fazit .....	64
Literatur .....	65

## X Inhaltsverzeichnis

<b>3 Umwandlung von Wärme in Arbeit . . . . .</b>	67
<b>3.1 Der Dampfkraftprozess . . . . .</b>	71
3.1.1 Der ideale Clausius-Rankine-Prozess . . . . .	71
3.1.2 Irreversible Zustandsänderungen . . . . .	76
<b>3.2 Maßnahmen zur Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades . . . . .</b>	78
3.2.1 Grundsätzliche Gesichtspunkte . . . . .	78
3.2.2 Erhöhung des Frischdampfzustandes . . . . .	79
3.2.3 Zwischenüberhitzung . . . . .	80
3.2.4 Regenerative Speisewasservorwärmung . . . . .	83
3.2.5 Einfluss des Kondensatordruckes . . . . .	87
3.2.6 Kraft-Wärme-Kopplung . . . . .	88
<b>3.3 Kreisprozesse mit homogenen Medien – Gasturbinenprozess . . . . .</b>	89
3.3.1 Der Joule-Prozess . . . . .	89
3.3.2 Verbesserungsmöglichkeiten für den Joule-Prozess . . . . .	92
3.3.3 Sonderformen des Gasturbinenprozesses . . . . .	96
<b>3.4 Fazit . . . . .</b>	97
<b>Literatur . . . . .</b>	98

---

## Teil II Nutzung fossiler Brennstoffe

---

<b>4 Dampfkraftwerke . . . . .</b>	101
<b>4.1 Stoff- und Energieströme in einem Dampfkraftwerk . . . . .</b>	105
<b>4.2 Aufbau eines Kraftwerksblocks . . . . .</b>	107
4.2.1 Aufgabenstellung . . . . .	107
4.2.2 Gesamtanordnung . . . . .	107
4.2.3 Ausführungsbeispiel eines Dampfkraftprozesses . . . . .	109
<b>4.3 Realisierung und Kosten . . . . .</b>	112
<b>4.4 Fazit . . . . .</b>	114
<b>Literatur . . . . .</b>	114
<b>5 Grundlagen der Verbrennungstechnik . . . . .</b>	115
<b>5.1 Energiebilanz der Verbrennung . . . . .</b>	117
<b>5.2 Stoffbilanz der Verbrennung . . . . .</b>	117
5.2.1 Elementare Verbrennungsrechnung . . . . .	117
5.2.2 Statistische Verbrennungsrechnung . . . . .	123
5.2.3 Stoffdaten für Rauchgas . . . . .	124
<b>5.3 Anmerkungen zum Verbrennungsablauf . . . . .</b>	128
<b>5.4 Fazit . . . . .</b>	132
<b>Literatur . . . . .</b>	132
<b>6 Feuerungssysteme und -anlagen . . . . .</b>	133
<b>6.1 Feuerungssysteme für feste Brennstoffe . . . . .</b>	135
6.1.1 Rostfeuerungen . . . . .	135
6.1.2 Staubfeuerungen . . . . .	140

6.1.3	Wirbelschichtfeuerungen . . . . .	170
6.2	Feuerungssysteme für Öl und Gas . . . . .	180
6.3	Verluste bei der Verbrennung . . . . .	183
6.4	Fazit . . . . .	183
	Literatur . . . . .	184
<b>7</b>	<b>Dampferzeuger . . . . .</b>	<b>185</b>
7.1	Dampferzeugersysteme . . . . .	186
7.1.1	Einleitung . . . . .	186
7.1.2	Naturumlauf . . . . .	186
7.1.3	Zwangsumlauf . . . . .	193
7.1.4	Zwangsdurchlauf . . . . .	194
7.1.5	Zwangsdurchlauf mit Vollastumwälzung . . . . .	198
7.2	Der Verdampfungsprozess . . . . .	200
7.2.1	Strömungsformen und Wärmeübergang in den Verdampferrohren . . . . .	200
7.2.2	Durchfluss und Massenstromdichte im Verdampfer . . . . .	205
7.2.3	Wasser/Dampftrennung . . . . .	206
7.3	Konvektivheizflächen . . . . .	211
7.3.1	Allgemeines . . . . .	211
7.3.2	Wärmetübergang . . . . .	212
7.3.3	Rohrwandtemperaturen . . . . .	214
7.3.4	Überhitzer . . . . .	215
7.3.5	Zwischenüberhitzer . . . . .	217
7.4	Überhitzeranordnung und Kesselbauart . . . . .	219
7.5	Energiebilanz und Wirkungsgrad . . . . .	222
7.5.1	Begriffsbestimmungen . . . . .	223
7.5.2	Wärmetechnische Auslegung . . . . .	227
7.6	Regelung von Dampferzeugeranlagen . . . . .	228
7.6.1	Einleitung . . . . .	228
7.6.2	Das Mehrgrößensystem Zwangsdurchlaufdampferzeuger .	229
7.6.3	Dampftemperaturregelung . . . . .	233
7.6.4	Besonderheiten beim Trommelkessel . . . . .	235
7.6.5	Andere Dampferzeuger-Regelkreise . . . . .	236
7.7	Festigungsberechnung von Druckteilen . . . . .	236
7.7.1	Werkstoffe . . . . .	236
7.7.2	Festigkeitsnachweis . . . . .	239
7.7.3	Wärmespannungen . . . . .	241
7.8	Fazit . . . . .	246
	Literatur . . . . .	247

<b>8 Dampfturbinen</b>	249
8.1 Elementare Theorie axialer Strömungsmaschinen	251
8.2 Optimale Geschwindigkeitsverhältnisse, Stufenzahl	258
8.3 Verluste und Wirkungsgrad	260
8.4 Betriebsweise und Regelung von Dampfturbinen	261
8.4.1 Festdruckbetrieb	262
8.4.2 Gleitdruckbetrieb	263
8.4.3 Modifizierter Gleitdruck	264
8.5 Aufbau einer Dampfturbine	265
8.6 Sicherheitseinrichtungen, Umleitstation, Anfahren	268
8.7 Fazit	269
Literatur	270
<b>9 Kühlsystem</b>	271
9.1 Systemaufbau einer Kondensatoranlage	272
9.2 Kondensatorbauarten	273
9.2.1 Mischkondensatoren	273
9.2.2 Oberflächenkondensatoren	275
9.3 Rückkühllanlagen	278
9.3.1 Ablaufkühlung	278
9.3.2 Kreislaufkühlung	282
Literatur	282
<b>10 Speisewasserversorgung</b>	283
10.1 Speisewasser	283
10.2 Schutzschichtbildung	286
10.3 Vorwärmer	287
10.4 Speisepumpen	291
Literatur	292
<b>11 Rauchgasreinigung</b>	293
11.1 Entstaubung	293
11.1.1 Kennzeichnung des Flugstaubes	293
11.1.2 Entstaubungssysteme	294
11.2 Entschwefelung	298
11.3 Stickoxidreduktion	302
11.4 Entsorgung der Rückstände	303
11.5 Fazit	304
Literatur	304
<b>12 Dynamik der MW-Erzeugung in Dampfkraftwerken</b>	305
12.1 Modellbildung	306
12.1.1 Allgemeines	306
12.1.2 $\kappa_D$ -Theorie	307
12.1.3 Kesselmodelle	312

12.1.4 Modell des Dampferzeugers mit Turbogruppe .....	319
12.2 Fazit .....	321
Literatur .....	322
<b>13 Die letzte Herausforderung für kohlegefeuerte Kraftwerke: CO<sub>2</sub>-Sequestrierung .....</b>	<b>323</b>
13.1 CO <sub>2</sub> -Abtrennung .....	324
13.1.1 Abscheideanlagen .....	324
13.1.2 Verbrennung mit Sauerstoff .....	326
13.1.3 Brennstoffumwandlung .....	327
13.2 Transport, Speicherung, Risiken .....	328
13.3 Fazit .....	331
Literatur .....	332
<b>14 Nutzung fossiler Brennstoffe in Gas- und Dampfturbinenkraftwerken .....</b>	<b>333</b>
14.1 Kohlevergasung .....	335
14.1.1 Aufbau einer Gasturbine .....	339
14.2 Kombinierte Kraftwerksprozesse mit Gas- und Dampfturbinen .....	343
14.2.1 Gas- und Dampfturbinenprozess mit nichtbefeuertem Abhitzekessel .....	343
14.3 Kombikraftwerke mit aufgeladener Feuerung und Heißgasreinigung .....	352
14.3.1 Allgemeines .....	352
14.3.2 Anlagen mit aufgeladener Wirbelschicht .....	353
14.3.3 Anlagen mit aufgeladenen Staubfeuerungen .....	354
14.4 Andere Vorschaltprozesse .....	354
14.4.1 Allgemeines .....	354
14.4.2 Zweistoff-Kraftwerksprozesse mit Kalium und Wasser ..	356
14.5 Energiespeicherung mit Luftspeicher-Gasturbinenkraftwerken .....	357
14.6 Fazit .....	359
Literatur .....	359
<b>15 Alternative Prozesse zur Nutzung fossiler Brennstoffe .....</b>	<b>361</b>
15.1 Brennstoffzellen .....	361
15.1.1 Grundlagen .....	361
15.1.2 Thermodynamik der Brennstoffzelle .....	363
15.1.3 Typenvielfalt .....	367
15.1.4 Aufbau eines Brennstoffzellenkraftwerks .....	372
15.1.5 Fazit .....	373
15.2 Magnetohydrodynamische Energiewandler .....	374
15.2.1 Grundlagen .....	374
15.2.2 MHD-Kraftwerke .....	381
15.2.3 Fazit .....	383
Literatur .....	383

---

**Teil III Nutzung nuklearer und regenerativer Energien**

---

<b>16 Kernspaltung</b>	387
16.1 Grundlagen	387
16.1.1 Kernaufbau, Kernreaktionen	387
16.1.2 Induzierte Kernspaltung	393
16.1.3 Kettenreaktion	396
16.1.4 Spaltreaktionen	397
16.1.5 Nachwärme	407
16.1.6 Konversion und Brüten	407
16.2 Aufbau von Kernreaktoren	408
16.2.1 Allgemeines	408
16.2.2 Reaktoren für Kraftwerke	410
16.3 Grundzüge der Reaktorwärm 技术	412
16.3.1 Leistungsdichte	412
16.3.2 Druckwasserreaktor	415
16.3.3 Siedewasserreaktor	417
16.3.4 Brutreaktoren	420
16.3.5 Hochtemperaturreaktoren	421
16.4 Entsorgung	423
16.5 Sicherheit und Risiken	425
16.5.1 Vorbemerkung	425
16.5.2 Reaktorsicherheit	425
16.6 Fazit	429
Literatur	430
<b>17 Kernfusion</b>	431
17.1 Fusionsreaktoren	434
17.1.1 Magnetischer Einschluss	434
17.1.2 Trägheitseinschluss	441
17.2 Fazit	442
Literatur	442
<b>18 Nutzung erneuerbarer Energiequellen</b>	443
18.1 Wasserkraft	444
18.1.1 Laufwasserkraftwerke und Speicherwerk	445
18.1.2 Gezeitenkraftwerke	449
18.1.3 Wellenenergie	452
18.1.4 Fazit	456
18.2 Sonnenenergie	456
18.2.1 Wärmetransport durch Strahlung	461
18.2.2 Technische Nutzung der Sonnenenergie	465
18.2.3 Thermische Solarkraftwerke	470
18.2.4 Photovoltaische Energieumwandlung	474

18.2.5 Fazit . . . . .	482
18.3 Windenergie . . . . .	482
18.3.1 Grundlagen . . . . .	484
18.3.2 Windenergienutzung . . . . .	486
18.3.3 Betrieb von Windanlagen . . . . .	491
18.3.4 Aufwindkraftwerk . . . . .	492
18.3.5 Fazit . . . . .	494
18.4 Folgerungen für die Nutzung regenerativer Energiequellen . . . . .	495
Literatur . . . . .	495

---

## Teil IV Zukunftsperspektiven

---

<b>19 Status unserer Energieversorgung . . . . .</b>	<b>499</b>
19.1 Gegenwärtiger Stand . . . . .	499
19.1.1 Bevölkerungsexplosion . . . . .	501
19.1.2 Warum verbrauchen moderne Gesellschaften soviel Energie? . . . . .	501
19.1.3 Die fossilen Energiequellen gehen ihrer Erschöpfung entgegen . . . . .	503
19.1.4 Gibt es Ersatz für die fossilen Energiequellen? . . . . .	504
19.1.5 Die Emission der Treibhausgase muss verminder werden. . . . .	507
19.2 Mögliche Entwicklungen . . . . .	508
Literatur . . . . .	511
<b>A Anhang . . . . .</b>	<b>513</b>
A.1 $h,s$ -Diagramm für Wasser . . . . .	514
A.2 $h,p$ -Diagramm für Wasser . . . . .	515
A.3 $T,s$ -Diagramm für Wasser . . . . .	516
A.4 Dezimalfaktoren . . . . .	517
A.5 Physikalische Konstanten . . . . .	517
A.6 Einheiten . . . . .	518
A.6.1 Basiseinheiten . . . . .	518
A.6.2 Abgeleitete Einheiten . . . . .	518
Sachverzeichnis . . . . .	519