

---

# Inhaltsverzeichnis

---

## Teil I Grundlagen

---

<b>1</b>	<b>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	26
1.5	Verbundnetz, Anforderungen an Kraftwerke	27
1.6	Fazit	33
	Literatur	35
<b>2</b>	<b>Energiequellen</b>	37
2.1	Fossile Brennstoffe	40
2.1.1	Kohlen	41
2.1.2	Erdöl	46
2.1.3	Erdgas	48
2.1.4	Umweltbelastung durch die Nutzung fossiler Brennstoffe	49
2.2	Nukleare Brennstoffe	53
2.2.1	Ressourcen an Kernbrennstoffen	54
2.2.2	Brennstoffkreislauf für Leichtwasserreaktoren	55
2.2.3	Umweltbelastungen durch die Nutzung der Kernenergie	57
2.3	Geothermie	58
2.3.1	Umweltbelastungen durch die Nutzung der Erdwärme	61
2.4	Sonnenenergie	62
2.4.1	Umweltbelastungen durch die Nutzung von Wind und Sonne	66
2.5	Fazit	66
	Literatur	67

<b>3</b>	<b>Umwandlung von Wärme in Arbeit</b>	69
3.1	Der Dampfkraftprozess	73
3.1.1	Der ideale Clausius-Rankine-Prozess	73
3.1.2	Irreversible Zustandsänderungen	78
3.2	Maßnahmen zur Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades	80
3.2.1	Grundsätzliche Gesichtspunkte	80
3.2.2	Erhöhung des Frischdampfzustandes	81
3.2.3	Zwischenüberhitzung	82
3.2.4	Regenerative Speisewasservorwärmung	85
3.2.5	Einfluss des Kondensatordruckes	89
3.2.6	Kraft-Wärme-Kopplung	90
3.3	Kreisprozesse mit homogenen Medien – Gasturbinenprozess	91
3.3.1	Der Joule-Prozess	91
3.3.2	Verbesserungsmöglichkeiten für den Joule-Prozess	94
3.3.3	Sonderformen des Gasturbinenprozesses	98
3.4	Fazit	99
	Literatur	100

---

## Teil II Nutzung fossiler Brennstoffe

---

<b>4</b>	<b>Dampfkraftwerke</b>	103
4.1	Stoff- und Energieströme in einem Dampfkraftwerk	107
4.2	Aufbau eines Kraftwerksblocks	109
4.2.1	Aufgabenstellung	109
4.2.2	Gesamtanordnung	109
4.2.3	Ausführungsbeispiel eines Dampfkraftprozesses	111
4.3	Realisierung und Kosten	114
4.4	Fazit	116
	Literatur	116
<b>5</b>	<b>Grundlagen der Verbrennungstechnik</b>	117
5.1	Energiebilanz der Verbrennung	119
5.2	Stoffbilanz der Verbrennung	119
5.2.1	Elementare Verbrennungsrechnung	119
5.2.2	Statistische Verbrennungsrechnung	125
5.2.3	Stoffdaten für Rauchgas	126
5.3	Anmerkungen zum Verbrennungsablauf	130
5.4	Fazit	134
	Literatur	134
<b>6</b>	<b>Feuerungssysteme und -anlagen</b>	135
6.1	Feuerungssysteme für feste Brennstoffe	137
6.1.1	Rostfeuerungen	137
6.1.2	Staubfeuerungen	142

6.1.3	Wirbelschichtfeuerungen	172
6.2	Feuerungssysteme für Öl und Gas	182
6.3	Verluste bei der Verbrennung	185
6.4	Fazit	185
	Literatur	186
<b>7</b>	<b>Dampferzeuger</b>	189
7.1	Dampferzeugersysteme	190
7.1.1	Einleitung	190
7.1.2	Naturumlauf	190
7.1.3	Zwangumlauf	197
7.1.4	Zwangdurchlauf	198
7.1.5	Zwangdurchlauf mit Vollastumwälzung	202
7.2	Der Verdampfungsprozess	204
7.2.1	Strömungsformen und Wärmeübergang in den Verdampferrohren	204
7.2.2	Durchfluss und Massenstromdichte im Verdampfer	209
7.2.3	Wasser/Dampftrennung	210
7.3	Konvektivheizflächen	215
7.3.1	Allgemeines	215
7.3.2	Wärmeübergang	216
7.3.3	Rohrwandtemperaturen	218
7.3.4	Überhitzer	219
7.3.5	Zwischenüberhitzer	221
7.4	Überhitzeranordnung und Kesselbauart	223
7.5	Energiebilanz und Wirkungsgrad	226
7.5.1	Begriffsbestimmungen	227
7.5.2	Wärmetechnische Auslegung	231
7.6	Regelung von Dampferzeugeranlagen	232
7.6.1	Einleitung	232
7.6.2	Das Mehrgrößensystem Zwangdurchlaufdampferzeuger	233
7.6.3	Dampfthermostattregelung	237
7.6.4	Besonderheiten beim Trommelkessel	239
7.6.5	Andere Dampferzeuger-Regelkreise	240
7.7	Festigkeitsberechnung von Druckteilen	240
7.7.1	Werkstoffe	240
7.7.2	Festigkeitsnachweis	243
7.7.3	Wärmespannungen	245
7.8	Fazit	250
	Literatur	251

<b>8</b>	<b>Dampfturbinen</b>	253
8.1	Elementare Theorie axialer Strömungsmaschinen	255
8.2	Optimale Geschwindigkeitsverhältnisse, Stufenzahl	262
8.3	Verluste und Wirkungsgrad	264
8.4	Betriebsweise und Regelung von Dampfturbinen	265
8.4.1	Festdruckbetrieb	266
8.4.2	Gleitdruckbetrieb	267
8.4.3	Modifizierter Gleitdruck	268
8.5	Aufbau einer Dampfturbine	269
8.6	Sicherheitseinrichtungen, Umleitstation, Anfahren	272
8.7	Fazit	273
	Literatur	274
<b>9</b>	<b>Kühlsystem</b>	275
9.1	Systemaufbau einer Kondensatoranlage	276
9.2	Kondensatorbauarten	277
9.2.1	Mischkondensatoren	277
9.2.2	Oberflächenkondensatoren	279
9.3	Rückkühlanlagen	282
9.3.1	Ablaufkühlung	282
9.3.2	Kreislaufkühlung	286
	Literatur	286
<b>10</b>	<b>Speisewasserversorgung</b>	287
10.1	Speisewasser	287
10.2	Schutzschichtbildung	290
10.3	Vorwärmer	291
10.4	Speisepumpen	295
	Literatur	296
<b>11</b>	<b>Rauchgasreinigung</b>	297
11.1	Entstaubung	297
11.1.1	Kennzeichnung des Flugstaubes	297
11.1.2	Entstaubungssysteme	298
11.2	Entschwefelung	302
11.3	Stickoxidreduktion	306
11.4	Entsorgung der Rückstände	307
11.5	Fazit	308
	Literatur	308
<b>12</b>	<b>Dynamik der MW-Erzeugung in Dampfkraftwerken</b>	309
12.1	Modellbildung	310
12.1.1	Allgemeines	310
12.1.2	$\kappa_D$ -Theorie	311
12.1.3	Kesselmodelle	316

12.1.4 Modell des Dampferzeugers mit Turbogruppe .....	323
12.2 Fazit .....	325
Literatur .....	326
<b>13 Die letzte Herausforderung für kohlegefeuerte</b>	
<b>Kraftwerke: CO<sub>2</sub>-Sequestrierung .....</b>	<b>327</b>
13.1 CO <sub>2</sub> -Abtrennung .....	328
13.1.1 Abscheideanlagen .....	328
13.1.2 Verbrennung mit Sauerstoff .....	330
13.1.3 Brennstoffumwandlung .....	331
13.2 Transport, Speicherung, Risiken .....	332
13.3 Fazit .....	335
Literatur .....	336
<b>14 Nutzung fossiler Brennstoffe in Gas- und</b>	
<b>Dampfturbinenkraftwerken .....</b>	<b>337</b>
14.1 Kohlevergasung .....	339
14.1.1 Aufbau einer Gasturbine .....	343
14.2 Kombinierte Kraftwerksprozesse mit Gas- und Dampfturbinen	347
14.2.1 Gas- und Dampfturbinenprozess mit nichtbefeuertem Abhitzeessel .....	347
14.3 Kombikraftwerke mit aufgeladener Feuerung und Heißgasreinigung .....	356
14.3.1 Allgemeines .....	356
14.3.2 Anlagen mit aufgeladener Wirbelschicht .....	357
14.3.3 Anlagen mit aufgeladenen Staubfeuerungen .....	358
14.4 Andere Vorschaltprozesse .....	358
14.4.1 Allgemeines .....	358
14.4.2 Zweistoff-Kraftwerksprozesse mit Kalium und Wasser ..	360
14.5 Energiespeicherung mit Luftspeicher-Gasturbinenkraftwerken	361
14.6 Fazit .....	363
Literatur .....	363
<b>15 Alternative Prozesse zur Nutzung fossiler Brennstoffe .....</b>	<b>365</b>
15.1 Brennstoffzellen .....	365
15.1.1 Grundlagen .....	365
15.1.2 Thermodynamik der Brennstoffzelle .....	367
15.1.3 Typenvielfalt .....	371
15.1.4 Aufbau eines Brennstoffzellenkraftwerks .....	376
15.1.5 Fazit .....	377
15.2 Magnetohydrodynamische Energiewandler .....	378
15.2.1 Grundlagen .....	378
15.2.2 MHD-Kraftwerke .....	385
15.2.3 Fazit .....	387
Literatur .....	387

---

**Teil III Nutzung nuklearer und regenerativer Energien**


---

<b>16 Kernspaltung</b> .....	391
16.1 Grundlagen .....	391
16.1.1 Kernaufbau, Kernreaktionen .....	391
16.1.2 Induzierte Kernspaltung .....	397
16.1.3 Kettenreaktion .....	400
16.1.4 Spaltreaktionen .....	401
16.1.5 Nachwärme .....	411
16.1.6 Konversion und Brüten .....	411
16.2 Aufbau von Kernreaktoren .....	412
16.2.1 Allgemeines .....	412
16.2.2 Reaktoren für Kraftwerke .....	414
16.3 Grundzüge der Reaktorwärmetechnik .....	416
16.3.1 Leistungsdichte .....	416
16.3.2 Druckwasserreaktor .....	419
16.3.3 Siedewasserreaktor .....	422
16.3.4 Brutreaktoren .....	424
16.3.5 Hochtemperaturreaktoren .....	426
16.4 Die einzigartigen Risiken der Kernenergie .....	428
16.4.1 Sicherheit beim Leichtwasserreaktor (LWR) .....	429
16.5 Entsorgung .....	432
16.5.1 Wiederaufbereitung .....	433
16.5.2 Direkte Endlagerung .....	435
16.6 Kernkraftwerke – von der Euphorie zur Ablehnung .....	435
16.7 Resümee .....	437
Literatur .....	440
<b>17 Kernfusion</b> .....	441
17.1 Fusionsreaktoren .....	444
17.1.1 Magnetischer Einschluss .....	444
17.1.2 Trägheitseinschluss .....	451
17.2 Fazit .....	452
Literatur .....	452
<b>18 Nutzung erneuerbarer Energiequellen</b> .....	453
18.1 Wasserkraft .....	454
18.1.1 Laufwasserkraftwerke und Speicherkraftwerke .....	455
18.1.2 Gezeitenkraftwerke .....	459
18.1.3 Wellenenergie .....	462
18.1.4 Fazit .....	465
18.2 Sonnenenergie .....	466
18.2.1 Wärmetransport durch Strahlung .....	472
18.2.2 Technische Nutzung der Sonnenenergie .....	474

18.2.3	Thermische Solarkraftwerke . . . . .	480
18.2.4	Photovoltaische Energieumwandlung . . . . .	484
18.2.5	Fazit . . . . .	492
18.3	Windenergie . . . . .	492
18.3.1	Grundlagen . . . . .	494
18.3.2	Windenergienutzung . . . . .	497
18.3.3	Betrieb von Windanlagen . . . . .	501
18.3.4	Aufwindkraftwerk . . . . .	502
18.3.5	Fazit . . . . .	504
18.4	Folgerungen für die Nutzung regenerativer Energiequellen . . . .	505
	Literatur . . . . .	505

---

## Teil IV Zukunftsperspektiven

---

<b>19</b>	<b>Konversion der Stromerzeugung . . . . .</b>	<b>509</b>
19.1	Wie es dazu kam . . . . .	509
19.1.1	Bevölkerungsexplosion . . . . .	510
19.1.2	Warum verbrauchen moderne Gesellschaften so viel Energie? . . . . .	512
19.1.3	Die Suche nach anderen Energiequellen . . . . .	513
19.2	Energiewende in Deutschland . . . . .	514
19.2.1	Stromerzeugung mit Wind- und Sonnenenergie in Deutschland . . . . .	516
19.2.2	Zusammenspiel: Erneuerbare Energien – Wärmekraftwerke . . . . .	518
19.2.3	Transformation der Stromerzeugungsstruktur . . . . .	523
19.2.4	Energiespeicher . . . . .	525
19.2.5	Chemische Energiespeicherung . . . . .	527
19.2.6	Biomasse . . . . .	532
19.3	Mögliche Entwicklungen . . . . .	533
19.3.1	Resümee . . . . .	535
	Literatur . . . . .	537
<b>A</b>	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>539</b>
A.1	$h,s$ -Diagramm für Wasser . . . . .	540
A.2	$h,p$ -Diagramm für Wasser . . . . .	541
A.3	$T,s$ -Diagramm für Wasser . . . . .	542
A.4	Dezimalfaktoren . . . . .	543
A.5	Physikalische Konstanten . . . . .	543
A.6	Einheiten . . . . .	544
A.6.1	Basiseinheiten . . . . .	544
A.6.2	Abgeleitete Einheiten . . . . .	544
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>545</b>

Kraftwerkstechnik  
zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativer  
Energiequellen  
Strauss, K.  
2016, XV, 548 S. 249 Abb., Hardcover  
ISBN: 978-3-662-53029-0