

# Inhaltsverzeichnis

---

## Teil I Grundlagen

---

<b>1 Einführung</b> .....	<b>3</b>
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> .....	<b>35</b>
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 Erdwärmee..	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>	<b>67</b>
<b>3.1 Der Dampfkraftprozess .....</b>	<b>71</b>
<b>3.1.1 Der ideale Clausius-Rankine-Prozess .....</b>	<b>71</b>
<b>3.1.2 Irreversible Zustandsänderungen .....</b>	<b>76</b>
<b>3.2 Maßnahmen zur Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades .....</b>	<b>78</b>
<b>3.2.1 Grundsätzliche Gesichtspunkte .....</b>	<b>78</b>
<b>3.2.2 Erhöhung des Frischdampfzustandes .....</b>	<b>79</b>
<b>3.2.3 Zwischenüberhitzung .....</b>	<b>80</b>
<b>3.2.4 Regenerative Speisewasservorwärmung .....</b>	<b>83</b>
<b>3.2.5 Einfluss des Kondensatordruckes .....</b>	<b>87</b>
<b>3.2.6 Kraft-Wärme-Kopplung .....</b>	<b>88</b>
<b>3.3 Kreisprozesse mit homogenen Medien – Gasturbinenprozess .....</b>	<b>89</b>
<b>3.3.1 Der Joule-Prozess .....</b>	<b>89</b>
<b>3.3.2 Verbesserungsmöglichkeiten für den Joule-Prozess .....</b>	<b>92</b>
<b>3.3.3 Sonderformen des Gasturbinenprozesses .....</b>	<b>96</b>
<b>3.4 Fazit .....</b>	<b>97</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>98</b>
 <b>Teil II Nutzung fossiler Brennstoffe</b>	
<b>4 Dampfkraftwerke .....</b>	<b>101</b>
<b>4.1 Stoff- und Energiestrome in einem Dampfkraftwerk .....</b>	<b>105</b>
<b>4.2 Aufbau eines Kraftwerksblocks .....</b>	<b>107</b>
<b>4.2.1 Aufgabenstellung .....</b>	<b>107</b>
<b>4.2.2 Gesamtanordnung .....</b>	<b>107</b>
<b>4.2.3 Ausführungsbeispiel eines Dampfkraftprozesses .....</b>	<b>109</b>
<b>4.3 Realisierung und Kosten .....</b>	<b>112</b>
<b>4.4 Fazit .....</b>	<b>114</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>114</b>
<b>5 Grundlagen der Verbrennungstechnik .....</b>	<b>115</b>
<b>5.1 Energiebilanz der Verbrennung .....</b>	<b>117</b>
<b>5.2 Stoffbilanz der Verbrennung .....</b>	<b>117</b>
<b>5.2.1 Elementare Verbrennungsrechnung .....</b>	<b>117</b>
<b>5.2.2 Statistische Verbrennungsrechnung .....</b>	<b>123</b>
<b>5.2.3 Stoffdaten für Rauchgas .....</b>	<b>124</b>
<b>5.3 Anmerkungen zum Verbrennungsablauf .....</b>	<b>128</b>
<b>5.4 Fazit .....</b>	<b>132</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>132</b>
<b>6 Feuerungssysteme und -anlagen .....</b>	<b>133</b>
<b>6.1 Feuerungssysteme für feste Brennstoffe .....</b>	<b>135</b>
<b>6.1.1 Rostfeuerungen .....</b>	<b>135</b>
<b>6.1.2 Staubfeuerungen .....</b>	<b>140</b>

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	Zwangdurchlauf . . . . .	194
7.1.5	Zwangdurchlauf 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	Wärmeübergang . . . . .	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 Zwangdurchlaufdampferzeuger . . . . .	229
7.6.3	Dampftemperaturregelung . . . . .	233
7.6.4	Besonderheiten beim Trommelkessel . . . . .	235
7.6.5	Andere Dampferzeuger-Regelkreise . . . . .	236
7.7	Festigkeitsberechnung von Druckteilen . . . . .	236
7.7.1	Werkstoffe . . . . .	236
7.7.2	Festigkeitsnachweis . . . . .	239
7.7.3	Wärmespannungen . . . . .	241
7.8	Fazit . . . . .	246
	Literatur . . . . .	247

## XII Inhaltsverzeichnis

<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>	<b>387</b>
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>	<b>431</b>
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>	<b>443</b>
18.1 Wasserkraft . . . . .	444
18.1.1 Laufwasserkraftwerke und Speicherkraftwerke . . . . .	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 vermindert 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
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>519</b>