

# Inhaltsverzeichnis

I	EINLEITUNG .....	1
<u>1.</u>	<u>Entwicklung der Dampferzeugung</u> .....	3
1.1	Formen der Energielieferung .....	3
1.2	Verdampfungsverfahren .....	6
1.3	Brennstoff und Abwärme als Wärmequellen .....	10
1.4	Belastungsweise .....	12
1.5	Dynamisches Verhalten .....	14
1.6	Computer und Kesselberechnung .....	15
<u>2.</u>	<u>Entwicklung des Kraftwerk-Wärmeschaltbildes</u> .....	17
2.1	Kondensationskraftwerk .....	17
2.1.1.	Der Grundkreislauf .....	17
2.1.2.	Maßnahmen zur Verbesserung des Dampfkreislaufes .....	18
2.2	Heizkraftwerk .....	22
2.3	Kombianlagen .....	24
<u>3.</u>	<u>Schaltung der Untersysteme des Dampfkraftwerkes und die Turbinenregelung</u> .....	26
3.1	Blockschaltung .....	26
3.2	Bypasse .....	27
3.3	Fest- und Gleitdruckbetrieb .....	28
3.3.1	Regelung der Kondensationsdampfturbinen .....	28
3.3.2	Gleitdruck mit Überstrom-Drosselventil .....	30
3.4	Sammelschienenschaltung .....	31
II	VERBRENNUNG UND FEUERUNG .....	33
<u>4.</u>	<u>Grundbegriffe der Verbrennungstechnik</u> .....	35
4.1	Verbrennung und deren Teilvorgänge .....	35
4.2	Feuerung und deren Leistung .....	36

4.3	Brennstoffe und ihre feuerungstechnisch wichtigen Eigenschaften .....	37
4.4	Verbrennungsreaktionen .....	37
4.5	Massenbilanz der Verbrennung .....	38
4.5.1	Sauerstoffbedarf und Brennstoffoxidation .....	38
4.5.2	Luftbedarf und Verbrennungsgasvolumen .....	40
4.5.3	Umrechnung der Dimensionen .....	42
4.5.4	Rauchgasanalyse und Luftzahlbestimmung .....	42
4.6	Stoffwerte von Luft und Rauchgasen .....	44
4.7	Optimale Luftzahl .....	45
4.8	Brennwert und Heizwert .....	46
<b>5.</b>	<b><u>Grenzschicht, Turbulenz und Mischung</u></b> .....	<b>47</b>
5.1	Turbulente Strömung .....	47
5.2	Turbulenz und Wärmeübertragung aus der Sicht der Wärmetechnik .....	48
5.3	Turbulenz im Kanal (Rohrströmung) .....	50
5.4	Scherströmung an der Ablaufkante eines Flügels .....	52
5.5	Scherströmung am Freistrahl .....	54
5.6	Doppelfreistrahl .....	57
5.7	Rückführung der Turbulenz .....	57
5.8	Freistrahl quer zum Hauptstrom (Querstrahl) .....	58
5.9	Gegeneinander geneigte Strahlen und Stoffströme und die dabei entstehenden Flammen .....	58
5.10	Scherströmung mit Drall .....	59
5.11	Flammen- und Turbulenzmodelle .....	62
<b>6.</b>	<b><u>Zündung der Flamme</u></b> .....	<b>63</b>
6.1	Zündtemperatur .....	63
6.2	Flammenfront .....	64
6.3	Flammengeschwindigkeit und Zündgrenzen .....	65
6.4	Turbulente Flammenfront .....	67
6.5	Zufuhr der Zündwärme .....	68
6.6	Stabilisierung der Zündung .....	69
<b>7.</b>	<b><u>Verbrennungsvorgang</u></b> .....	<b>71</b>
7.1	Homogene und heterogene Reaktionen .....	71
7.2	Reaktionskinetik .....	71
7.3	Massenwirkungsgesetz und Gleichgewichtskonstante .....	72
7.4	Zwischenstufenreaktionen .....	74
7.5	Dissoziation .....	77

<u>8. Schadstoffe</u> .....	78
8.1 Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid .....	78
8.2 Schwefel und Niedertemperaturkorrosion .....	78
8.2.1 Verhalten des Schwefels in Feuerungen .....	78
8.2.2 Taupunkterhöhung und Niedertemperaturkorrosion .....	79
8.3 Stickoxide .....	80
8.4 Feste Luftverunreinigungen .....	81
8.4.1 Ruß .....	81
8.4.2 Flugasche .....	82
<u>9. Brennraum</u> .....	83
9.1 Auftrieb der Flamme .....	83
9.2 Lage der Brenner im Feuerraum .....	85
9.3 Brenneranzahl und Teillastverhalten .....	86
9.4 Flammenwächter und Fernsehkameras .....	86
9.5 Druck im Feuerraum .....	87
<u>10. Vergleichszahlen für Dampferzeuger-Feuerräume</u> .....	88
<u>11. Merkmale der Kohlenstaubverbrennung</u> .....	91
11.1 Eigenschaften der Kohle .....	91
11.2 Asche .....	93
<u>12. Kohlenstaubmühlen und Mahlkreise</u> .....	96
12.1 Eigenschaften des Kohlenstaubes .....	96
12.2 Mahlkreis .....	98
12.3 Trocknungsmedium .....	99
12.4 Mühle und Siebter .....	101
12.5 Zuteiler .....	103
12.6 Einblasemühlen im geschlossenen Mahlkreis .....	104
12.7 Mühlenanzahl .....	107
<u>13. Teilvorgänge der Kohlenstaubverbrennung</u> .....	109
13.1 Mischen, Entmischen und Strahlenbildung .....	109
13.2 Wärmetransport und -bedarf .....	110
13.2.1 Wärme- und Stoffübergang bei Kohleteilchen .....	110
13.2.2 Temperatenausgleich in den Turbulenzballen der Flamme .....	113
13.2.3 Zündtemperatur, Flammengeschwindigkeit und Zündwärme .....	114
13.3 Chemisches Gleichgewicht und heterogene Verbrennung .....	115
13.3.1 Umwandlungsvorgänge der Kohle .....	115

13.3.2	Chemisches Gleichgewicht einer heterogenen Reaktion .....	116
13.3.3	Sauerstoffbedarf und Vermischung des Brennstoff-Luft-Gemisches mit der Flamme .....	117
13.3.4	Heterogene Verbrennung des Koksteilchens .....	118
13.4	Verminderung des NO <sub>x</sub> -Gehaltes .....	119
13.5	Vermutlicher Ablauf der Kohlenstaubverbrennung .....	120
13.6	Flamme als Kohlenstaubspeicher .....	121
<u>14.</u>	<u>Kohlenstaubbrenner</u> .....	122
14.1	Strahlbrenner .....	122
14.2	Mischbrenner .....	124
14.3	Untere Zündgrenze der Kohlenstaubflamme .....	125
<u>15.</u>	<u>Kohlenstaubfeuerungen</u> .....	126
15.1	Asche und Schlacke .....	126
15.2	Trockenfeuerung .....	127
15.3	Emissionsverhältnis der Kohlenstaubflamme .....	130
15.4	Schmelzfeuerung .....	130
15.4.1	Großraum-Schmelzfeuerung .....	130
15.4.1.1	Aufbau der Schmelzkessel .....	130
15.4.1.2	Mindestlast mit Schmelzfluß .....	133
15.4.1.3	Schlackenabfuhr .....	135
15.4.1.4	Anwendungsbereich der Großraum-Schmelzfeuerung .....	136
15.4.2	Kleinraum-Zyklonfeuerung (Wirbelfeuerung) .....	137
<u>16.</u>	<u>Verbrennung stückiger Kohle</u> .....	140
<u>17.</u>	<u>Wirbelschichtfeuerung</u> .....	142
17.1	Eigenschaften einer Wirbelschicht .....	142
17.2	Kessel mit Wirbelschichtfeuerung .....	143
17.3	Einfluß der Wirbelschichtfeuerung auf den Kesselaufbau .....	147
17.4	Regelung .....	147
17.5	Zirkulierende Wirbelschicht .....	148
17.6	Aufgeladene Wirbelschichtfeuerung .....	149
<u>18.</u>	<u>Rostfeuerung</u> .....	150
18.1	Merkmale und Wirkungsweise .....	150
18.2	Wanderrost .....	151
18.3	Schürrost .....	152
18.3.1	Vorschubrost .....	152

18.3.2 Rückschubrost .....	153
<u>19. Vorgänge bei der Ölverbrennung .....</u>	<u>155</u>
<u>20. Ölzerstäubung, Ölbrenner und Ölfeuerung .....</u>	<u>157</u>
20.1 Druckzerstäuber .....	157
20.2 Injektionszerstäuber .....	158
20.3 Drehzerstäuber .....	159
20.4 Blaubrenner .....	160
20.5 Ölfeuerung .....	161
<u>21. Luftvorwärmung .....</u>	<u>163</u>
21.1 Zweck der Luftvorwärmung .....	163
21.2 Luvo mit beweglichem Wärmespeicher .....	164
21.3 Luvo mit festem Wärmespeicher .....	165
21.4 Zweistromluvo .....	166
21.5 Dampf luvo .....	166
III DAMPFERZEUGER .....	167
<u>22. Wärmezufuhr in den Kessel .....</u>	<u>169</u>
22.1 Wärmebilanz des Kessels .....	169
22.1.1 Zugeführter Wärmestrom .....	169
22.1.2 Bestimmung des Kesselwirkungsgrades .....	170
22.2 Wärmeübertragung im Feuerraum .....	173
22.2.1 Abstrahlung der Flamme .....	173
22.2.2 Beheizungsprofil .....	175
22.2.3 Formfaktor des Feuerraumes.....	177
22.2.4 Abstand der Brennebenen .....	179
22.2.5 Rauchgasumwälzung .....	181
22.3 Wärmeübertragung an Rohrbündel .....	182
22.4 Beziehungen zwischen der Kesselgröße und Feuer- raumgeometrie .....	185
<u>23. Wasser im Kesselbetrieb .....</u>	<u>187</u>
23.1 Sinn der Wasseraufbereitung .....	187
23.2 Bewertungsmaßstäbe für Wassergüte /46/ .....	188
23.2.1 Härte .....	188
23.2.2 pH-Wert .....	189
23.2.3 Salzgehalt .....	189
23.3 Anforderungen an Dampf und Wasser .....	189
23.4 Herstellung des Zusatzwassers für den Dampfkreis .....	192

23.5 Konditionierung - alkalische und neutrale Betriebsweise .....	193
<u>24. Trommelkessel mit Naturumlauf</u> .....	195
24.1 Großwasserraumkessel und Entstehung des Trommelkessels .....	195
24.2 Schrägrohrkessel .....	196
24.3 Steilrohrkessel .....	198
24.3.1 Industrie-Steilrohrkessel .....	198
24.3.2 Kraftwerk-Steilrohrkessel .....	200
<u>25. Vorgänge im Verdampfer</u> .....	203
25.1 Strömungsformen, Wärmeübergang und Druckabfall im Siederohr .....	203
25.1.1 Strömungsformen .....	203
25.1.2 Der Schlupf .....	204
25.1.3 Wärmeübergangskoeffizienten .....	205
25.1.4 Siedekrisen .....	207
25.1.5 Druckverlust bei Blasenströmung in den beheizten Siederohren .....	210
25.2 Der Naturumlauf .....	211
25.2.1 Dampfleistung des Verdampfers .....	211
25.2.2 Einfluß der Brennerlage .....	212
25.2.3 Ermittlung der Lage des Verdampfungsanfanges .....	213
25.2.4 Größe des Naturumlaufes .....	215
25.2.5 Analyse des Naturumlaufes .....	218
25.2.6 Teillastverhalten und ungleiche Rohrbeheizung .....	219
25.3 Verhalten der Salze .....	220
25.3.1 Salze und Gase im Trommelkessel .....	220
25.3.2 Auflösen der Salze im Dampf .....	222
<u>26. Verdampfer</u> .....	223
26.1 Rauchgasseitige Vorgänge als Randbedingung für die Gestalt von Kesselheizflächen .....	223
26.2 Berohrung des Verdampfers .....	224
26.3 Kesseltrommel .....	226
26.3.1 Aufgabe der Trommel .....	226
26.3.2 Rohranschlüsse an die Trommel und die Speisewasserzufuhr .....	227
26.3.3 Feuchtigkeitsabscheidung .....	228
26.3.4 Statische und dynamische Beanspruchung der Trommel .....	230

<u>27. Überhitzer</u> .....	232
27.1 Temperatursteuerung am Überhitzeraustritt .....	232
27.2 Schaltung der Überhitzerstufen .....	234
27.3 Überhitzer-Bauformen .....	235
27.3.1 Liegender Überhitzer .....	235
27.3.2 Hängender Überhitzer .....	238
27.3.3 Wandüberhitzer .....	239
<u>28. Zwischenüberhitzer (ZÜ)</u> .....	240
<u>29. Ekonomiser (Wasservorwärmer)</u> .....	242
<u>30. Einfluß der Dampfparameter auf den Kesselaufbau</u> .....	244
30.1 Wärmeübertragung entlang des Rauchgasweges .....	244
30.2 Auslegung und Lage der Heizfläche im Kessel .....	245
<u>31. Steilrohrkessel im Kernkraftwerk</u> .....	248
<u>32. Dynamik und Regelung</u> .....	250
32.1 Naturumlaufverdampfer .....	250
32.1.1 Verhalten bei Druckänderung .....	250
32.1.2 Speicherwert des Verdampfers .....	252
32.2 Überhitzer .....	254
32.2.1 Einspritzkühler .....	254
32.2.2 Überhitzer als Regelstrecke .....	255
32.2.3 Dynamisch optimale Schaltung der Über- hitzerstufen .....	255
32.3 Zwischenüberhitzer .....	257
32.3.1 Lastabhängigkeit der Zwischenüberhitzung .....	257
32.3.2 Regelung .....	257
32.3.3 Zwischenüberhitzer als Dampfspeicher .....	260
32.3.4 Schaltung der ZÜ-Stufen .....	260
32.4 Regelkreise des Trommelkessels .....	261
<u>33. Zwangsumlauf</u> .....	264
33.1 Grenzen des Naturumlaufes .....	264
33.1.1 Einfluß der Kesselgröße .....	264
33.1.1.1 Dampfgehalt am Siederohraustritt .....	264
33.1.1.2 Kritische Wärmezufuhr.....	265
33.1.2 Einfluß des Druckes und der Beheizung .....	266
33.2 Merkmale des Zwangsumlaufverdampfers .....	267
33.3 Druckverlust beim Zwangsumlauf .....	268
33.3.1 Reibungsverlust im Rohr .....	268

33.3.2	Zusammensetzung des Reibungsverlustes .....	269
33.3.3	Einfluß der Drosselung .....	271
33.3.4	Senkrechte Siederohre .....	273
33.4	Mindestumlaufzahl beim Zwangsumlauf .....	274
33.5	Zwangsumlauf-Verdampfer .....	276
33.6	Anwendungsgebiete .....	278
<b>34.</b>	<b>Anfahren von Trommelkesseln .....</b>	<b>280</b>
34.1	Ablauf des Anfahrvorganges .....	280
34.2	Natur- und Zwangsumlauf beim Anfahren - ein Vergleich .....	281
34.3	Amerikanische Anfahrweise .....	282
<b>35.</b>	<b>Durchlaufdampferzeuger .....</b>	<b>284</b>
35.1	Arbeitsweise und Aufbau .....	284
35.2	Innere Vorgänge im Durchlaufverdampfer .....	286
35.2.1	Wärmeübergang in den Durchlauf-Siederohren .....	286
35.2.2	Druckabfall im Siederohr .....	287
35.3	Stabilisierung der Durchlaufströmung .....	288
35.3.1	Stabilitätsfaktor als Kriterium der Strömungsstabilität .....	288
35.3.2	Siederohre mit Drossel .....	290
35.3.3	Einfluß des statischen Druckes .....	290
35.3.4	Einfluß von Druck und Eintrittsenthalpie .....	290
35.4	Die Rohrströmung beeinträchtigende Faktoren .....	292
35.4.1	Ungleiche Rohrbeheizung .....	292
35.4.2	Rohrdurchmesser und Rohrrauigkeit .....	293
35.5	Einfluß des Verdampferaufbaues .....	294
35.6	Auswirkung des Druckabfalls im Kessel auf den spezifischen Wärmeverbrauch des Blockes .....	295
35.7	Verhalten der Salze im Durchlauf-Siederohr .....	296
35.8	Verdampfer mit überkritischem Druck .....	298
<b>36.</b>	<b>Aufbau des Durchlaufkessels .....</b>	<b>300</b>
36.1	Entwicklung der Verdampferausführung .....	300
36.2	Derzeitiger Durchlaufkessel .....	303
36.2.1	Turmkessel .....	303
36.2.2	Schraubenförmig gewickelter vollverschweißter Verdampfer .....	304
36.2.3	Wasserabscheider .....	305
36.2.4	Anfahr- und Schwachlastumwälzung .....	306
36.3	Gleitdruckbetrieb des Durchlaufkessels.....	307

<u>37. Dynamik des Durchlaufverdampfers</u> .....	311
37.1 Charakteristische Merkmale des Durchlaufverdampfers .....	311
37.2 Verdampfer als Regelstrecke .....	312
37.3 Regelung .....	313
<u>38. Sonderbauarten des Durchlaufkessels</u> .....	315
38.1 Durchlaufkessel mit überlagertem Umlauf .....	315
38.1.1 Anlagen mit unterkritischem Druck .....	315
38.1.2 Überkritische Variante .....	317
38.2 Geradrohrkessel für Kernkraftwerke .....	318
<u>39. Abwärme verwertende Kessel</u> .....	321
39.1 Abhitzekeessel .....	321
39.1.1 Aufgaben eines Abhitzekeessels .....	321
39.1.2 Verbesserte Nutzung der Abwärme .....	322
39.1.2.1 Abhitzekeessel mit Zusatzbrennern .....	322
39.1.2.2 Anlage mit Zweidruckturbine .....	323
39.2 Abhitzekeessel mit Zusatzfeuerung .....	325
39.2.1 Kombinierte Gas-Dampf-Anlagen (Kombiblöcke) .....	325
39.2.1.1 Eigenschaften des GT-Abgases und .....	325
dessen Verwendung .....	326
39.2.1.2 Verbrennung des Kesselbrennstoffes .....	326
39.2.1.3 Konvektiver Verdampfer und das .....	326
Betriebsverhalten des Kombikessels .....	326
39.2.2 Kombianlage mit Kohlenstaub und Wirbel- .....	329
schichtfeuerung .....	329
39.3 Wirkungsgrad des Kombiblockes .....	329
<u>40. Großwasserraumkessel</u> .....	332
40.1 Aufbau, Einsatzweise und Brennstoff .....	332
40.2 Salzbilanz und Absalzung .....	334
40.3 Heißwasserkessel .....	334
<u>41. Belastung, Bemessung und Erschöpfung von</u> <u>Kesselbauteilen</u> .....	336
41.1 Belastungsfälle bei einem Dampfkessel .....	336
41.2 Dauer- und Zeitfestigkeit .....	337
41.3 Zügige Beanspruchung .....	339
41.3.1 Kennwerte der Zeitfestigkeit .....	339
41.3.2 Rohrbemessung nach zügiger Belastung .....	339
41.4 Wechselbeanspruchung .....	341
41.4.1 Natur der Lastspiele bei Kesseln .....	341
41.4.2 Kennzahlen der Wechselfestigkeit .....	342

41.5 Erschöpfung der Kesselelemente .....	343
41.6 Durch den Werkstoff gestellte Parametergrenzen .....	344
Anhang 1 Sinnbilder in Wärmekraftanlagen .....	345
Anhang 2 Verzeichnis der verwendeten Symbole .....	347
Literaturverzeichnis .....	352
Sachverzeichnis .....	357