

8563758

R. Doležal

Dampf- erzeugung

Verbrennung, Feuerung,
Dampferzeuger



Hochschultext



Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York Tokyo

TK243-43
DI

8563758

R. Doležal

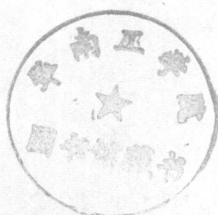
Dampferzeugung

Verbrennung, Feuerung, Dampferzeuger



E8563758

Mit 300 Abbildungen



Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York Tokyo

Dr. techn. RICHARD DOLEŽAL

o. Professor, Direktor des Instituts für Verfahrenstechnik
und Dampfkesselwesen an der Universität Stuttgart

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek:

Doležal, Richard:

Dampferzeugung: Verbrennung, Feuerung, Dampferzeuger / R. Doležal.

Berlin; Heidelberg; New York; Tokyo: Springer, 1985.

(Hochschultext)

ISBN 3-540-13771-8 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo

ISBN 0-387-13771-8 Springer-Verlag New York Heidelberg Berlin Tokyo

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funk-sendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Die Vergütungsansprüche des § 54, Abs. 2 UrhG werden durch die »Verwertungsgesellschaft Wort«, München, wahrgenommen.

© Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1985

Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Druck: Mercedes-Druck, Berlin; Buchbindarbeiten: B. Helm, Berlin
2362/3020-543210

Hochschultext



Vorwort

Der vorliegende Hochschultext "Dampferzeugung" ist eine Niederschrift der Vorlesungen "Verbrennung und Feuerungstechnik" sowie "Dampferzeuger" des Hauptfaches "Kraftwerkstechnik" an der Universität Stuttgart.

Obwohl der Dampfantrieb 200 Jahre alt ist, ist er noch immer aktuell, da sich Einheitsleistungen über 200 MW nur mit einer Dampfturbine erzielen lassen. In den letzten 20 Jahren haben die Kesselfeuerungen merkbare Fortschritte gemacht. Das Wachstum der Feuerungsleistung bis auf über 3000 MW_{th} gab den notwendigen Anstoß dazu, ebenso wie die derzeitige Rückkehr zur Kohle als vorherrschender Kraftwerksbrennstoff. Dabei sind neue Themen wie die Wirbelschichtfeuerung, kombinierte Kreisläufe mit einer der Kesselfeuerung vorgeschalteten Gasturbine, Nutzung der Abgaswärme, Schadstoffbildung u.ä. in den Vordergrund getreten. Eine ähnliche Situation liegt auch beim Dampfsystem vor. Die Blockschaltung im Kraftwerk, die vorherrschende Anwendung des häufig mit Gleitdruck betriebenen Durchlaufkessels, Zweischichtbetrieb im Verbundsystem mit Kernkraftwerken als Grundlastanlagen usw. haben neue Fragen aufgeworfen und den Aufbau des Kessels stark beeinflußt.

Das vorliegende Buch ist für die Studenten des oben angeführten Hauptfaches bestimmt. Auch dem Ingenieuranfänger auf dem Gebiet der Wärme-kraftwerke sowie in der Kraftanlagenindustrie sollte dies als Einführung in sein Arbeitsgebiet dienen. Für ein tieferes Studium sind an entsprechenden Stellen Literaturhinweise gegeben.

Den Mitarbeitern des von mir geleiteten Institutes, Herrn Dipl.-Ing. K. Görner und Herrn Dipl.-Ing. G. Riemenschneider danke ich für ihre Hilfe bei der Korrektur sowie für eigene Vorschläge. Beim Schreiben des Textes und Zeichnen von Abbildungen haben mich Frau U. Docter und Frau B. Vlahov unterstützt. Auch dem Springer Verlag möchte ich für die angenehme Mitarbeit danken.

Stuttgart im Herbst 1984

R. Doležal

Inhaltsverzeichnis

I	EINLEITUNG	1
1.	<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
2.	<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
3.	<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
4.	<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
5.	Grenzschicht, Turbulenz und Mischung	47
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 Freistrahle	54
5.6	Doppelfreistrahle	57
5.7	Rückführung der Turbulenz	57
5.8	Freistrahle 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
6.	Zündung der Flamme	63
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
7.	Verbrennungsvorgang	71
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>14.</u>
<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	<u>15.</u>
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	<u>16.</u>
12.4 Mühle und Sieb	101	
12.5 Zuteiler	103	<u>17.</u>
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	<u>18.</u>
13.2.3 Zündtemperatur, Flammgeschwindigkeit und Zündwärme	114	
13.3 Chemisches Gleichgewicht und heterogene Verbrennung	115	
13.3.1 Umwandlungsvorgänge der Kohle	115	

78	13.3.2 Chemisches Gleichgewicht einer	
78	heterogenen Reaktion	116
78	13.3.3 Sauerstoffbedarf und Vermischung des	
78	Brennstoff-Luft-Gemisches mit der Flamme	117
78	13.3.4 Heterogene Verbrennung des Koksteilchens	118
79	13.4 Verminderung des NO_x -Gehaltes	119
80	13.5 Vermutlicher Ablauf der Kohlenstaubverbrennung	120
81	13.6 Flamme als Kohlenstaubspeicher	121
81		
82	<u>14. Kohlenstaubbrenner</u>	122
	14.1 Strahlbrenner	122
83	14.2 Mischbrenner	124
83	14.3 Untere Zündgrenze der Kohlenstaubflamme	125
85		
86	<u>15. Kohlenstaubfeuerungen</u>	126
86	15.1 Asche und Schlacke	126
87	15.2 Trockenfeuerung	127
	15.3 Emissionsverhältnis der Kohlenstaubflamme	130
88	15.4 Schmelzfeuerung	130
	15.4.1 Großraum-Schmelzfeuerung	130
91	15.4.1.1 Aufbau der Schmelzkessel	130
91	15.4.1.2 Mindestlast mit Schmelzfluß	133
93	15.4.1.3 Schlackenabfuhr	135
	15.4.1.4 Anwendungsbereich der Großraum-	
96	Schmelzfeuerung	136
96	15.4.2 Kleinraum-Zyklonfeuerung (Wirbelfeuerung)	137
98		
99	<u>16. Verbrennung stückiger Kohle</u>	140
101		
103	<u>17. Wirbelschichtfeuerung</u>	142
104	17.1 Eigenschaften einer Wirbelschicht	142
107	17.2 Kessel mit Wirbelschichtfeuerung	143
	17.3 Einfluß der Wirbelschichtfeuerung auf den	
109	Kesselaufbau	147
109	17.4 Regelung	147
110	17.5 Zirkulierende Wirbelschicht	148
110	17.6 Aufgeladene Wirbelschichtfeuerung	149
113	<u>18. Rostfeuerung</u>	150
	18.1 Merkmale und Wirkungsweise	150
114	18.2 Wanderrost	151
115	18.3 Schürrost	152
115	18.3.1 Vorschubrost	152

18.3.2 Rückschubrost	153
<u>19. Vorgänge bei der Ölverbrennung</u>	155
<u>20. Ölzerstäubung, Ölbrenner und Ölfeuerung</u>	157
20.1 Druckzerstäuber	157
20.2 Injektionszerstäuber	158
20.3 Drehzerstäuber	159
20.4 Blaubrenner	160
20.5 Ölfeuerung	16
<u>21. Luftvorwärmung</u>	1
21.1 Zweck der Luftvorwärmung	16
21.2 Luvo mit beweglichem Wärmespeicher	16
21.3 Luvo mit festem Wärmespeicher	16
21.4 Zweistromluvo	16
21.5 Dampf luvo	166
III DAMPFERZEUGER	167
<u>22. Wärmezufuhr in den Kessel</u>	169
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 Brennerebenen	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>	187
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

153	23.5 Konditionierung - alkalische und neutrale Betriebsweise	193
155		
157	<u>24. Trommelkessel mit Naturumlauf</u>	195
157	24.1 Großwasserraumkessel und Entstehung des Trommelkessels	195
158	24.2 Schrägrohrkessel	196
159	24.3 Steilrohrkessel	198
160	24.3.1 Industrie-Steilrohrkessel	198
16	24.3.2 Kraftwerk-Steilrohrkessel	200
2		
1	<u>Vorgänge im Verdampfer</u>	203
6	25.1 Strömungsformen, Wärmeübergang und Druckabfall im Siederohr	203
6	25.1.1 Strömungsformen	203
5	25.1.2 Der Schlupf	204
6	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 Temperaturstreuung 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
<u>34. Anfahren von Trommelkesseln</u>	280
34.1 Ablauf des Anfahrvorganges	280
34.2 Natur- und Zwangsumlauf beim Anfahren - ein Vergleich	281
34.3 Amerikanische Anfahrweise	282
<u>35. Durchlaufdampferzeuger</u>	284
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
<u>36. Aufbau des Durchlaufkessels</u>	300
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 Kombikeessels	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

I Einleitung

