

# Inhaltsverzeichnis

|   |     |
|---|-----|
| 1. Flammen und Teilvorgänge der Verbrennung .....                                 | 1   |
| 2. Brennstoffe und Verbrennung .....  | 8   |
| 2.1 Brennstoffe, feuerungstechnisch wichtige Eigenschaften .....                  | 8   |
| 2.1.1 Feste Brennstoffe .....   | 9   |
| 2.1.2 Flüssige Brennstoffe .....  | 12  |
| 2.1.3 Gasförmige Brennstoffe .....  | 14  |
| 2.2 Physik und Chemie der Verbrennung .....                                       | 18  |
| 2.2.1 Verbrennungsrechnung, Luftbedarf und Abgasmenge .....                       | 18  |
| 2.2.2 Taupunkt .....  | 28  |
| 2.2.3 Verbrennungstemperaturen .....  | 30  |
| 2.2.4 Homogene Reaktionen .....   | 33  |
| 2.2.5 Heterogene Reaktionen .....   | 40  |
| 2.2.6 Gleichgewichte, Dissoziation .....  | 43  |
| 2.2.7 Rußbildung und -verbrennung .....   | 47  |
| 2.2.8 Inhibitoren, Katalysatoren, Additive .....                                  | 52  |
| Literatur zu Kapitel 2 .....  | 57  |
| 3. Vormischflammen .....  | 58  |
| 3.1 Brenneigenschaften von Gemischen .....  | 58  |
| 3.1.1 Zündgrenzen .....   | 58  |
| 3.1.2 Zündtemperatur .....  | 64  |
| 3.1.3 Mindestzündenergie .....  | 65  |
| 3.1.4 Löschabstand .....  | 66  |
| 3.1.5 Flammengeschwindigkeit, Begriff und Deutung .....                           | 67  |
| 3.1.6 Meßverfahren .....  | 73  |
| 3.1.7 Meßwerte der Flammengeschwindigkeit .....                                   | 76  |
| 3.1.8 Turbulente Flammengeschwindigkeit (Mit Dipl.-Ing. R. Kleine) .....          | 82  |
| 3.2 Laminare Vormischflammen .....  | 90  |
| 3.2.1 Form und Störeinflüsse .....  | 90  |
| 3.2.2 Berechnung der Länge des Innenkegels .....                                  | 95  |
| 3.3 Doppelflammen (Innen- und Außenkegel) .....                                   | 97  |
| 3.4 Stabilität von Vormischflammen (unter Mitarb. v. Dipl.-Ing. G. Janisch) ..... | 98  |
| 3.5 Brenner für Vormischflammen .....   | 110 |

|   |            |
|---|------------|
| 3.5.1 Injektoren .....  | 110        |
| 3.5.2 Einfach- und Mehrfachbrenner .....                                | 113        |
| 3.5.3 Halteflammen und Flammenhalter .....                              | 115        |
| 3.5.4 Rückschlagsicherungen .....                                       | 117        |
| 3.5.5 Sonderformen: Strahlungsplatten, Tunnelbrenner .....              | 117        |
| 3.5.6 Betriebseigenschaften von Vormischbrennern .....                  | 120        |
| Literatur zu Kapitel 3 .....  | 123        |
| <b>4. Freistrahlen. Diffusionsflammen gasförmiger Brennstoffe .....</b> | <b>125</b> |
| 4.1 Freistrahlen .....  | 125        |
| 4.1.1 Geometrie und Eigenschaften von Freistrahlen .....                | 125        |
| 4.1.2 Laminare Freistrahlen .....                                       | 127        |
| 4.1.3 Turbulente Freistrahlen .....                                     | 127        |
| 4.2 Turbulenz von Strahlen .....  | 139        |
| 4.2.1 Definitionen und Grundgesetze .....                               | 139        |
| 4.2.2 Turbulenzeigenschaften von Strahlen .....                         | 145        |
| 4.3 Flammen drallfreier Einzelstrahlen .....                            | 147        |
| 4.3.1 Laminare Diffusionsflammen .....                                  | 147        |
| 4.3.2 Turbulente Flammen, Strömungsfeld .....                           | 150        |
| 4.3.3 Turbulente Flammen, Reaktionsfeld, Kontur, Länge .....            | 152        |
| 4.3.4 Mischung, Ausbrand, Ungemischtheit .....                          | 161        |
| 4.3.5 Turbulenzeigenschaften, Austauschgrößen .....                     | 165        |
| 4.3.6 Stabilisierung, Flammenhalter .....                               | 173        |
| 4.3.7 Strahlen und Flammen in umgrenzten Räumen, Rückströmung .....     | 182        |
| 4.4 Doppelstrahlen und deren Flammen .....                              | 188        |
| 4.4.1 Strömungsfeld .....   | 188        |
| 4.4.2 Flammen konzentrischer Doppelstrahlen .....                       | 192        |
| 4.5 Drallstrahlen und Drallflammen .....                                | 195        |
| 4.5.1 Strömungsfeld .....   | 195        |
| 4.5.2 Drallflammen .....  | 205        |
| 4.6 Gegeneinander geneigte Strahlen und Ströme und deren Flammen .....  | 210        |
| 4.7 Mehrfachstrahlen .....  | 214        |
| 4.8 Diffusionsbrenner .....   | 215        |
| 4.8.1 Konstruktive Merkmale .....                                       | 219        |
| 4.8.2 Beispiele technischer Brenner .....                               | 222        |
| 4.8.3 Zündung, Hilfseinrichtungen, Betriebssicherheit .....             | 228        |
| Literatur zu Kapitel 4 .....  | 228        |
| <b>5. Flamme und Feuerraum .....</b>                                    | <b>232</b> |
| 5.1 Geometrische Anordnungen .....                                      | 232        |
| 5.1.1 Wärmegut und Geometrie .....                                      | 232        |
| 5.1.2 Flammengeometrie .....  | 233        |
| 5.2 Temperaturverteilung, Verbrennungsdichte .....                      | 236        |
| 5.3 Gegenseitige Beeinflussung von Flammen .....                        | 241        |
| 5.4 Beispiele für die Anordnung von Flammen in Feuerräumen .....        | 243        |
| 5.4.1 Durchlaufofen .....   | 243        |
| 5.4.2 Glasschmelzofen .....   | 244        |

|   |     |
|---|-----|
| 5.4.3 Zementdrehofen .....                                    | 245 |
| 5.4.4 Röhrenofen zur Spaltgasherstellung .....                | 246 |
| 5.4.5 Dampfkessel .....                                       | 247 |
| 5.4.6 Zyklon- oder Drallbrennkammern, „Impulsbrenner“ .....   | 247 |
| 5.4.7 Umwälzfeuerung .....                                    | 249 |
| 5.4.8 Strahlrohre .....                                       | 250 |
| 5.5 Aufenthaltszeit .....                                     | 250 |
| 5.6 Strömung der Feuergase; Antrieb, Widerstände .....        | 255 |
| 5.6.1 Antrieb der Strömung .....                              | 255 |
| 5.6.2 Druckverluste .....                                     | 255 |
| 5.7 Verzweigungen .....                                       | 256 |
| Literatur zu Kapitel 5 .....                                  | 258 |
| 6. Ölverbrennung .....  | 260 |
| 6.1 Teilvorgänge der Tropfenverbrennung .....                 | 260 |
| 6.2 Zerstäubung .....   | 261 |
| 6.2.1 Zerstäubungsverfahren .....                             | 262 |
| 6.2.2 Tropfenverteilung .....                                 | 270 |
| 6.2.3 Bewegung von Tröpfchen im Luftstrom .....               | 272 |
| 6.3 Teilvorgänge der Verbrennung .....                        | 275 |
| 6.3.1 Verbrennung von Einzeltropfen .....                     | 275 |
| 6.3.2 Verbrennung im Tropfennebel .....                       | 280 |
| 6.3.3 Verlauf von Mischung und Reaktion .....                 | 280 |
| 6.3.4 Kohlenstoffiskelette .....                              | 283 |
| 6.4 Ölbrenner und Ölflammen .....                             | 283 |
| 6.4.1 Flammenform und -länge .....                            | 283 |
| 6.4.2 Stabilisierung .....                                    | 284 |
| 6.4.3 Konstruktion der Brenner .....                          | 286 |
| 6.4.4 Betriebseigenschaften .....                             | 288 |
| 6.4.5 Zerstäuberbrenner, Zusammenfassung .....                | 290 |
| 6.5 Vergasungsbrenner, Brennkammern .....                     | 291 |
| 6.6 Verdampfungsbrenner .....                                 | 292 |
| Literatur zu Kapitel 6 .....                                  | 293 |
| 7. Verbrennung fester Brennstoffe .....                       | 295 |
| 7.1 Besonderheiten gegenüber der Gas- und Ölverbrennung ..... | 295 |
| 7.1.1 Umwandlung der Kohle bei der Erwärmung, Entgasung ..... | 295 |
| 7.1.2 Trocknung, Rolle des Wasserdampfes .....                | 296 |
| 7.1.3 Homogene und heterogene Verbrennung .....               | 297 |
| 7.1.4 Bedeutung der Asche .....                               | 298 |
| 7.2 Kohlenstaubverbrennung .....                              | 299 |
| 7.2.1 Mahlung der Kohle .....                                 | 299 |
| 7.2.2 Einzeltorgänge der Kornverbrennung .....                | 300 |
| 7.2.3 Bewegung der Teilchen im Luftstrom .....                | 301 |
| 7.2.4 Zündung und Primärverbrennung .....                     | 301 |
| 7.2.5 Ablauf der Kornverbrennung .....                        | 303 |
| 7.2.6 Kohlenstaubbrenner .....                                | 306 |

|  |     |
|--|-----|
| 7.2.7 Schmelzfeuerungen .....  | 308 |
| 7.3 Rostfeuerung .....   | 311 |
| Literatur zu Kapitel 7 .....   | 314 |
| 8. Sonderformen von Feuerungen .....   | 315 |
| 8.1 Verbrennung mit reinem Sauerstoff .....                                      | 315 |
| Literatur zu Abschnitt 8.1 .....   | 316 |
| 8.2 Verbrennung unter erhöhtem Druck .....                                       | 317 |
| Literatur zu Abschnitt 8.2 .....   | 319 |
| 8.3 Verbrennung im Überschall (Prof. Dr.-Ing. H. Wilhelm).....                   | 319 |
| 8.3.1 Einleitung .....   | 319 |
| 8.3.2 Stoßinduzierte Überschallverbrennung vorgemischter Gase .....              | 320 |
| 8.3.3 Überschallverbrennung nicht vorgemischter Gase .....                       | 322 |
| 8.3.4 Überschallverbrennung flüssiger Brennstoffe .....                          | 325 |
| Literatur zu Abschnitt 8.3 .....   | 325 |
| 8.4 Auftreffende Flammen und Abgasstrahlen .....                                 | 327 |
| 8.4.1 Vorgänge, technische Bedeutung .....                                       | 327 |
| 8.4.2 Größe des Wärmeaustauschs .....  | 328 |
| Literatur zu Abschnitt 8.4 .....   | 331 |
| 8.5 Verbrennung in der Wirbelschicht .....                                       | 332 |
| Literatur zu Abschnitt 8.5 .....   | 334 |
| 8.6 Verbrennung in Füllkörpersäulen .....  | 334 |
| Literatur zu Abschnitt 8.6 .....   | 337 |
| 8.7 Tauchbrenner .....   | 338 |
| Literatur zu Abschnitt 8.7 .....   | 339 |
| 8.8 Elektrische Verstärkung von Flammen .....                                    | 340 |
| Literatur zu Abschnitt 8.8 .....   | 341 |
| 8.9 Pulsierende Verbrennung .....  | 341 |
| Literatur zu Abschnitt 8.9 .....   | 343 |
| 9. Wärmeübertragung in Feuerungen (unter Mitarb. v. Dipl.-Ing. H. Tietze) .      | 344 |
| 9.1 Gasstrahlung .....   | 344 |
| 9.2 Leuchtende Strahlung .....   | 352 |
| 9.3 Strahlungswärmeabgabe von Flammen und ihre Beeinflussung .....               | 358 |
| 9.3.1 Einflüsse auf die Rußstrahlung .....                                       | 359 |
| 9.3.2 Maßnahmen zur Steigerung der Strahlung (Karburierung) ..                   | 364 |
| 9.4 Wärmeaustausch zwischen Flammen und Feuerraumwänden .....                    | 368 |
| 9.4.1 Wärmeaustausch bei konstanten Temperaturen von Feuergasen und Wänden ..... | 368 |
| 9.4.2 Wärmeaustausch bei Temperaturunterschieden der Feuergase ..                | 373 |
| 9.5 Wärmerohre .....   | 376 |
| Literatur zu Kapitel 9 .....   | 377 |
| 10. Wärmewirtschaft der Feuerungen .....   | 379 |
| 10.1 Energiebilanz; Einzelposten, Definitionen .....                             | 379 |

|   |     |
|---|-----|
| 10.2 Wirkungsgrade .....  | 381 |
| 10.3 Wärmerückgewinnung .....                                     | 382 |
| 10.4 Bewertung von Brennstoffen .....                             | 383 |
| Literatur zu Kapitel 10 .....                                     | 383 |
| <br>  |     |
| 11. Schäden an Umwelt und Anlagen, Abfallverbrennung .....        | 385 |
| 11.1 Vom Verbrennungsvorgang ausgehende Wirkungen .....           | 385 |
| 11.1.1 Schädliche und lästige Bestandteile von Abgasen .....      | 385 |
| 11.1.2 Arten von Emissenden und deren Emissionen .....            | 387 |
| 11.1.3 Eigenschaften und Wirkung der Schadstoffe .....            | 390 |
| 11.1.4 Vorschriften zur Bemessung von Emission und Immission ..   | 391 |
| 11.1.5 Erfassung des Ist-Standes, Statistik .....                 | 392 |
| 11.2 Mittel zur Vermeidung der Schadwirkung .....                 | 393 |
| 11.2.1 Steuerung des Verbrennungsablaufs .....                    | 393 |
| 11.2.2 Abgasverdünnung und deren meteorologische Voraussetzungen  | 394 |
| 11.2.3 Abgasreinigung .....                                       | 397 |
| 11.2.4 Planungsmaßnahmen .....                                    | 402 |
| 11.3 Schäden an Feuerungsanlagen durch Rauchgasbestandteile ..... | 402 |
| 11.4 Abfallverbrennung .....                                      | 403 |
| 11.4.1 Arten und Eigenschaften brennbarer Abfälle .....           | 403 |
| 11.4.2 Verbrennungsanlagen für feste und flüssige Stoffe .....    | 404 |
| 11.4.3 Verbrennung flüssiger Abfälle .....                        | 406 |
| 11.4.4 Verbrennung gasförmiger Abfälle .....                      | 406 |
| Literatur zu Kapitel 11 .....                                     | 408 |
| <br>  |     |
| 12. Physikalische und mathematische Modelle von Feuerungen .....  | 410 |
| 12.1 Physikalische Modelle .....                                  | 410 |
| 12.2 Ähnlichkeitsgesetze .....                                    | 412 |
| 12.3 Formen physikalischer Modelle .....                          | 416 |
| 12.4 Mathematische Modelle .....                                  | 419 |
| 12.4.1 Grundlagen und Bestandteile .....                          | 419 |
| 12.4.2 Anwendung mathematischer Modelle .....                     | 422 |
| Literatur zu Kapitel 12 .....                                     | 424 |
| <br>  |     |
| Verzeichnis der wichtigsten Bücher .....                          | 426 |
| Sachverzeichnis .....   | 428 |