

# Inhalt

|          |                                                                                         |            |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1</b> | <b>Dampferzeugersysteme .....</b>                                                       | <b>1</b>   |
| 1.1      | Allgemeine Hinweise, Definitionen .....                                                 | 2          |
| 1.2      | Großwasserraumkessel .....                                                              | 2          |
| 1.3      | Wasserrohrkessel .....                                                                  | 7          |
| 1.3.1    | Naturumlaufkessel .....                                                                 | 7          |
| 1.3.2    | Zwangumlaufkessel .....                                                                 | 15         |
| 1.3.3    | Zwangdurchlaufkessel .....                                                              | 18         |
| <b>2</b> | <b>Energie- und Massebilanz der Dampferzeuger .....</b>                                 | <b>25</b>  |
| 2.1      | Dampferzeuger in Kernkraftwerken, Prozeß-Dampferzeuger, Abhitzeessel .....              | 26         |
| 2.2      | Dampferzeuger mit Feuerungen .....                                                      | 26         |
| 2.2.1    | Brennwert und Heizwert .....                                                            | 26         |
| 2.2.2    | Energie- und Massebilanz bei aschefreien Brennstoffen .....                             | 32         |
| 2.2.3    | Energie- und Massebilanz bei Brennstoffen mit einem Aschegehalt .....                   | 43         |
| 2.2.4    | Kalorifer und Zerstäuberndampf.....                                                     | 52         |
| 2.3      | Anwendung der Energiebilanz, Sonderfälle .....                                          | 55         |
| 2.3.1    | Dampferzeuger für einen Brennstoff .....                                                | 55         |
| 2.3.2    | Dampferzeuger für zwei und mehr Brennstoffe .....                                       | 63         |
| 2.3.3    | Dampferzeuger mit vorgeschalteter Gasturbine .....                                      | 67         |
| 2.3.4    | Energiebilanz und Wirkungsgrad bezogen auf den Brennwert $H_o$ .....                    | 70         |
| 2.3.5    | Direktentschwefelung .....                                                              | 73         |
| 2.3.5.1  | Definitionen, Zuschlagstoffe, Molare Massen .....                                       | 73         |
| 2.3.5.2  | Kalkverhältnis und Entschwefelungsgrad .....                                            | 75         |
| 2.3.5.3  | Verbrennungsluft- und Rauchgasmassen .....                                              | 76         |
| 2.3.5.4  | Aschebilanz .....                                                                       | 79         |
| 2.3.5.5  | Heizwert .....                                                                          | 80         |
| 2.3.5.6  | Verlust durch die Enthalpie und das Unverbrannte in der Asche beim Abnahmeversuch ..... | 81         |
| 2.4      | Energie- und Massebilanz innerhalb des Dampferzeugers .....                             | 82         |
| 2.4.1    | Asche-, Schlacke- und Flugstaubbilanz .....                                             | 82         |
| 2.4.2    | Energiebilanz des Feuerraumes .....                                                     | 90         |
| 2.4.3    | Energiebilanz der Kesselheizflächen .....                                               | 94         |
| 2.4.4    | Energiebilanz am Kesselende .....                                                       | 96         |
| 2.4.5    | Energiebilanz der Mühlen .....                                                          | 101        |
| <b>3</b> | <b>Strömungstechnik .....</b>                                                           | <b>105</b> |
| 3.1      | Allgemeine Grundlagen .....                                                             | 106        |
| 3.1.1    | Bernoullische Gleichung .....                                                           | 106        |
| 3.1.2    | Impulssatz .....                                                                        | 108        |
| 3.1.3    | Kontinuitätsgleichung .....                                                             | 109        |

|                                   |                                                                     |            |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.2                               | Strömung in Rohren und Kanälen .....                                | 110        |
| 3.2.1                             | Grundlagen, Reibungsbeiwert .....                                   | 110        |
| 3.2.2                             | Reibungsdruckverlust bei homogenen Fluiden .....                    | 113        |
| 3.2.2.1                           | Schubspannungsverlauf .....                                         | 113        |
| 3.2.2.2                           | Laminare Strömung .....                                             | 114        |
| 3.2.2.2.1                         | Reibungsbeiwert .....                                               | 114        |
| 3.2.2.2.2                         | Geschwindigkeitsprofil .....                                        | 115        |
| 3.2.2.3                           | Turbulente Strömung .....                                           | 115        |
| 3.2.2.3.1                         | Reibungsbeiwert für glatte und raue Rohre .....                     | 115        |
| 3.2.2.3.2                         | Geschwindigkeitsprofile .....                                       | 122        |
| 3.2.2.4                           | Der Reibungsbeiwert .....                                           | 128        |
| 3.2.3                             | Reibungsdruckverlust bei Zweiphasen-Strömungen .....                | 135        |
| 3.2.3.1                           | Schubspannungsverlauf und mittlere Gemischgeschwindigkeit .....     | 135        |
| 3.2.3.2                           | Reibungsbeiwert .....                                               | 137        |
| 3.2.3.3                           | Voreilung der Gasphase .....                                        | 139        |
| 3.2.3.4                           | Dichteverteilung .....                                              | 142        |
| 3.2.3.5                           | Mischungswegintegral .....                                          | 144        |
| 3.2.3.6                           | Re-Zahl bei der Zweiphasen-Strömung .....                           | 146        |
| 3.2.3.7                           | Berechnung der Druckdifferenz $\Delta p$ .....                      | 147        |
| 3.2.3.7.1                         | Druckdifferenz ohne Wärmezufuhr .....                               | 147        |
| 3.2.3.7.2                         | Druckdifferenz mit Wärmezufuhr .....                                | 149        |
| 3.3                               | Strömung bei Querschnittsänderungen und Formstücken .....           | 151        |
| 3.3.1                             | Allgemeines .....                                                   | 151        |
| 3.3.2                             | Querschnittserweiterung, Carnotscher Stoßverlust .....              | 155        |
| 3.3.3                             | Querschnittsverengung .....                                         | 161        |
| 3.3.4                             | Blenden, Düsen, Venturirohre .....                                  | 168        |
| 3.3.5                             | Drosselscheiben, Lochplatten, Gitter .....                          | 185        |
| 3.3.6                             | Rohrkrümmer, Kniestücke .....                                       | 191        |
| 3.3.7                             | Rohrverzweigungen, Verteilerstücke .....                            | 197        |
| 3.3.8                             | Ventile, Schieber, Klappen .....                                    | 222        |
| 3.3.8.1                           | Allgemeines .....                                                   | 222        |
| 3.3.8.2                           | Druckverlustbeiwerte .....                                          | 225        |
| 3.3.8.3                           | Druckverlustbeiwerte bei teilgeöffneten Absperrorganen .....        | 226        |
| 3.4                               | Strömung in beheizten Rohren .....                                  | 234        |
| 3.4.1                             | Erhaltungssätze für beheizte Rohre .....                            | 234        |
| 3.4.2                             | Strömungsstabilität in Zwangumlauf- und Zwangdurchlaufkesseln ..... | 238        |
| 3.4.2.1                           | Statische Instabilität .....                                        | 238        |
| 3.4.2.1.1                         | Allgemeines .....                                                   | 238        |
| 3.4.2.1.2                         | Erhaltungssätze stationärer Strömungen .....                        | 239        |
| 3.4.2.1.3                         | Reibungsdruckverlust .....                                          | 240        |
| 3.4.2.1.4                         | Geodätische Druckdifferenz, Beschleunigungs-Druckverlust .....      | 247        |
| 3.4.2.1.5                         | Statische Instabilität, Beispiele, Bedingungen .....                | 249        |
| 3.4.2.2                           | Dynamische Instabilität .....                                       | 255        |
| 3.4.3                             | Wasserumlauf in Naturumlaufkesseln .....                            | 257        |
| 3.4.3.1                           | Wasserumlaufgeschwindigkeit .....                                   | 257        |
| 3.4.3.2                           | Wasserumlaufdiagramm, Wasserumlaufzahl .....                        | 262        |
| 3.4.3.3                           | Wasserumlauf, Grenzen des Naturumlaufes .....                       | 272        |
| <b>Stichwortverzeichnis .....</b> |                                                                     | <b>279</b> |