

# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| Verzeichnis der Berechnungsbeispiele .....  | 13        |
| <b>1 Wärmetauscherauslegung .....</b>   | <b>19</b> |
| 1.1 Vorgehensweise bei der Wärmetauscherauslegung .....   | 19        |
| 1.2 Informationen zu Wärmetauschern .....   | 30        |
| 1.2.1 Rohranordnung .....   | 30        |
| 1.2.2 Beipass- und Leckageströmung .....  | 30        |
| 1.2.3 Umlenkbleche .....  | 31        |
| 1.2.4 Technische Hinweise .....   | 33        |
| 1.2.5 Auswahl eines Rohrbündelwärmetauschers .....  | 35        |
| <b>2 Ermittlung der wirksamen Temperaturdifferenzen<br/>LMTD und CMTD .....</b>   | <b>37</b> |
| 2.1 Logarithmische Temperaturdifferenz LMTD für idealen Gegenstrom .....  | 37        |
| 2.2 Temperaturdifferenz CMTD für mehrgängige Wärmetauscher TEMA-Typ E .....   | 38        |
| 2.3 Einfluss der Beipassströmung auf LMTD .....   | 45        |
| 2.4 Mittlere gewogene Temperaturdifferenz WMTD .....  | 46        |
| 2.5 Berechnung der Wärmetauscheraustrittstemperaturen für einen mehrgängigen<br>Wärmetauscher mit nichtidealem Gegenstrom und idealem Gegenstrom .....                          | 48        |
| 2.5.1 Berechnung der Austrittstemperaturen in einem mehrgängigen Wärmetau-<br>scher unter Berücksichtigung des Temperaturwirkungsfaktors F für nichtidealen<br>Gegenstrom ..... | 48        |
| 2.5.2 Berechnung der Austrittstemperatur $t_{w2}$ bei idealem Gegenstrom ohne F .....   | 49        |
| <b>3 Berechnung der Wärmeübergangszahlen und Druck-<br/>verluste beim konvektiven Wärmeübergang .....</b>   | <b>51</b> |
| 3.1 Rohrseitige Wärmeübergangszahl .....  | 55        |
| 3.2 Mantelseitige Wärmeübergangszahl .....  | 56        |
| 3.3 Vergleich verschiedener Rechenmodelle .....   | 68        |
| 3.4 Vergleich der Wärmeübergangszahlen bei Längs- und Querströmung auf der<br>Mantelseite von Wärmetauschern .....  | 70        |
| 3.5 Druckverlustberechnungen in Rohrbündelwärmetauschern .....  | 74        |
| 3.5.1 Rohrseitiger Druckverlust $\Delta P_R$ .....  | 74        |
| 3.5.2 Mantelseitiger Druckverlust .....   | 75        |
| 3.6 Wärmetauscherauslegung mit Wärmetauscher-Tabellen .....   | 79        |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| <b>4</b> | <b>Geometrische Wärmetauscherberechnungen</b>   | 89  |
| 4.1      | Berechnungsformeln  | 89  |
| 4.2      | Rohrseitige Berechnungen  | 92  |
| 4.3      | Mantelseitige Berechnungen  | 94  |
| <b>5</b> | <b>Dimensionslose Kennzahlen für den Wärmeübergang</b>  | 101 |
| 5.1      | Reynoldszahl $Re$ zur Kennzeichnung des Strömungszustandes  | 101 |
| 5.2      | Prandtlzahl $Pr$ zur Kennzeichnung der Stoffeigenschaften   | 101 |
| 5.3      | Nusseltzahl $Nu$ zur Berechnung der Wärmeübergangszahl  | 102 |
| 5.4      | Stantonzahl $St$ zur Berechnung der Wärmeübergangszahl  | 102 |
| 5.5      | Colburnfaktor $J_C$ zur Berechnung der Wärmeübergangszahl   | 103 |
| 5.6      | Kern-Wärmeübergangsfaktor $J_K$ zur Berechnung der Wärmeübergangszahl   | 103 |
| 5.7      | Graßhofzahl $Gr$ zur Bestimmung der Wärmeübergangszahl bei Eigenkonvektion  | 104 |
| <b>6</b> | <b>Wärmedurchgangszahl und Temperaturprofil</b>   | 105 |
| 6.1      | Berechnung der Wärmedurchgangszahl  | 105 |
| 6.2      | Berechnung des Temperaturgradienten beim Wärmedurchgang durch die<br>Wärmewiderstände im Wärmetauscher                      | 112 |
| 6.3      | Viskositätskorrektur und Ermittlung der Wandtemperaturen  | 114 |
| 6.4      | Berechnung der Wärmeübergangszahl aus der Wärmedurchgangszahl   | 117 |
| <b>7</b> | <b>Verfahrenstechnische Berechnungen</b>  | 119 |
| 7.1      | Dampfdruckberechnungen  | 119 |
| 7.2      | Phasengleichgewicht zwischen der Flüssig- und der Dampfphase nach den<br>Gesetzen von Dalton und Raoult für ideale Gemische | 120 |
| 7.3      | Siedepunktsberechnung   | 122 |
| 7.4      | Taupunktberechnung  | 123 |
| 7.5      | Berechnung von Tau- und Siedelinien idealer Binärgemische   | 125 |
| 7.6      | Flash-Berechnungen  | 127 |
| 7.7      | Kondensations- bzw. Flashkurve von Binärgemischen   | 128 |
| 7.8      | Berechnung unidealer Binärgemische  | 132 |
| 7.9      | Flashberechnungen für Mehrstoffgemische   | 134 |
| <b>8</b> | <b>Auslegung von Kondensatoren</b>  | 137 |
| 8.1      | Bauarten von Kondensatoren  | 139 |
| 8.2      | Berechnung der Wärmeübergangszahlen bei isothermer Kondensation   | 143 |
| 8.2.1    | Einflussgrößen auf die Wärmeübergangszahlen   | 168 |
| 8.3      | Vergleich verschiedener Berechnungsmodelle  | 170 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 8.4   | Kondensation mit Inertgas .....                                     | 175 |
| 8.5   | Kondensation von Mehrstoffgemischen .....                           | 178 |
| 8.6   | Verschiedenes .....   | 186 |
| 8.6.1 | Druckverlust im Kondensator .....                                   | 186 |
| 8.6.2 | Kondensatablaufröhr .....   | 187 |
| 8.6.3 | Schluckfähigkeit .....  | 188 |
| 8.6.4 | Kopfcondensatoren auf Kolonnen .....                                | 189 |
| 8.6.5 | Berechnung des Druckverlustes beim Kondensieren in den Röhren ..... | 191 |
| 8.6.6 | Maximale Kondensatbelastung in horizontalen Röhren .....            | 193 |
| 8.6.7 | Flutbelastung in Rückflusscondensatoren .....                       | 193 |

## **9 Auslegung von Verdampfern .....** 197

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 9.1     | Verdampfungsprozess .....                            | 197 |
| 9.1.1   | Behältersieden .....                                 | 197 |
| 9.1.2   | Strömungssieden .....                                | 198 |
| 9.1.3   | Entspannungsverdampfung .....                        | 198 |
| 9.2     | Verdampferbauarten .....                             | 198 |
| 9.2.1   | Thermosiphonverdampfer .....                         | 199 |
| 9.2.1.1 | Vertikaler Thermosiphonumlaufverdampfer .....        | 199 |
| 9.2.1.2 | Horizontaler Thermosiphonumlaufverdampfer .....      | 200 |
| 9.2.1.3 | Thermosiphondurchlaufverdampfer .....                | 201 |
| 9.2.2   | Zwangsumlaufverdampfer .....                         | 202 |
| 9.2.3   | Entspannungsverdampfer .....                         | 202 |
| 9.2.4   | Rohrbündelverdampfer (Kettle-Verdampfer) .....       | 204 |
| 9.2.5   | Interne Verdampfer .....                             | 204 |
| 9.2.6   | Fallfilmverdampfer .....                             | 205 |
| 9.3     | Auslegung von Verdampfern für Blasensieden .....     | 206 |
| 9.3.1   | Praktische Auslegung mit Beispielen .....            | 210 |
| 9.3.2   | Dimensionierung von Kettle-Reboilern .....           | 216 |
| 9.3.2.1 | Hydraulische Auslegung .....                         | 216 |
| 9.3.2.2 | Wärmetechnische Auslegung .....                      | 218 |
| 9.3.2.3 | Zulässige Blasenauftiegs-geschwindigkeit .....       | 219 |
| 9.3.2.4 | Zulässige Wärmestromdichte im Kettleverdampfer ..... | 220 |
| 9.3.2.5 | Tropfen-Mitreißen .....                              | 222 |
| 9.4     | Auslegung von Fallfilmverdampfern .....              | 223 |

## **10 Auslegung von Thermosiphonverdampfern .....** 231

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 10.1   | Wärmetechnische Berechnungen .....                          | 232 |
| 10.1.1 | Erforderliche Umlaufmenge W im Thermosiphonkreislauf .....  | 232 |
| 10.1.2 | Abschätzung der benötigten Reboilerfläche A .....           | 232 |
| 10.1.3 | Berechnung der Wärmeübergangszahl für die Verdampfung ..... | 233 |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 10.1.3.1 | Berechnung der Wärmeübergangszahl $\alpha_{\text{kon}}$ für das konvektive Sieden bei der durch die Verdampfung erhöhten Strömungsgeschwindigkeit des 2-Phasen-Gemisches ..... | 233 |
| 10.1.3.2 | Berechnung der Wärmeübergangszahl $\alpha_{\text{sied}}$ für das Blasensieden nach Mostinski mit dem Korrekturfaktor $S$ für unterdrücktes Blasensieden .....                  | 234 |
| 10.1.3.3 | Berechnungen für einen vertikalen Thermosiphonverdampfer .....   | 236 |
| 10.1.3.4 | Berechnungen für einen horizontalen Thermosiphonverdampfer Typ AJL oder AHL mit der Querströmung zwischen den Rohren von unten nach oben .....                                 | 238 |
| 10.1.3.5 | Berechnungen für einen horizontalen Thermosiphonverdampfer Typ AEL mit der Längsströmung um die Rohre ohne Umlenkbleche .....  | 240 |
| 10.2     | Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit $w$ im Verdampfer .....  | 242 |
| 10.3     | Berechnung der 2-Phasen-Dichte und der mittleren Dichte im Reboiler .....  | 243 |
| 10.3.1   | Berechnung der 2-Phasen-Dichte $\rho$ eines Dampf-Flüssigkeit-Gemisches: .....   | 243 |
| 10.3.2   | Berechnung der mittleren Dichte $\rho_3$ im Reboiler aus der Dichte der Flüssigkeit $\rho_F$ und der Dichte des 2-Phasen-Gemisches $\rho_{2\text{ph}}$ .....                   | 243 |
| 10.4     | Ermittlung der erforderlichen Höhe $H_1$ für den Thermosiphonumlauf bzw. des maximal zulässigen Druckverlustes $\Delta P$ im Thermosiphonumlauf .....                          | 245 |
| 10.4.1   | Berechnung der erforderlichen Höhe $H_1$ zur Überwindung des Druckverlustes $\Delta P$ mit dem Sicherheitsfaktor $S$ .....   | 245 |
| 10.4.2   | Berechnung des maximal zulässigen Druckverlustes $\Delta P_{\text{max}}$ im Thermosiphonumlauf bei vorgegebenen Höhen $H_1$ und $H_2$ und $H_4$ .....                          | 246 |
| 10.4.3   | Auswirkungen der Höhe $H_1$ auf Umlaufmenge, Druckverlust, Temperaturdifferenz und Wärmeleistung von Thermosiphonverdampfern .....   | 247 |
| 10.4.4   | Auslegung von Riser- und Downcomerdurchmesser .....  | 250 |
| 10.5     | Berechnung der Druckverluste im Thermosiphonumlauf .....   | 251 |
| 10.5.1   | Berechnung des Druckverlustes im Downcomer .....   | 252 |
| 10.5.2   | Berechnung des Reibungsdruckverlustes für 2-Phasen-Strömung $\Delta P_{2\text{ph}}$ im Verdampfer .....  | 253 |
| 10.5.3   | Berechnung des Beschleunigungsdruckverlustes im Verdampfer .....   | 253 |
| 10.5.4   | Reibungsdruckverlust im Riser für die 2-Phasen-Strömung .....  | 254 |
| 10.5.5   | Reboiler-Kennlinien .....  | 257 |
| 10.6     | Berechnung der benötigten Reboilerlänge bzw. -fläche für die Aufheizung auf Siedetemperatur und für die Verdampfung in vertikalen Thermosiphonverdampfern .....                | 258 |
| 10.6.1   | Berechnung der Rohrhöhe $L_{\text{Heiz}}$ bzw. der Austauschfläche $A_{\text{Heiz}}$ zur konvektiven Aufheizung des Produkts bis zur Siedetemperatur .....                     | 259 |
| 10.6.2   | Ermittlung der Rohrhöhe $L_{\text{verd}}$ bzw. der Austauschfläche $A_{\text{verd}}$ für das Verdampfen .....  | 260 |
| 10.6.3   | Benötigte Heizlänge für vertikale Thermosiphonverdampfer nach Fair .....   | 261 |
| 10.6.4   | Berechnung der Druck- und Siedepunkterhöhung im Verdampfer durch die treibende Höhe $H_1$ .....  | 264 |
| 10.6.5   | Mittlere Wärmedurchgangszahl für Aufheizen und Verdampfen .....  | 268 |
| 10.7     | Berechnung des Dampfanteils $x$ des Zweiphasengemisches im vertikalen Verdampfer .....   | 269 |
| 10.8     | Vollständiges Beispiel für die Auslegung eines Thermosiphonverdampfers .....   | 271 |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| <b>11</b> | <b>Doppelrohr-, Schlangenrohr- und Querstromwärmetauscher</b> .....   | <b>277</b> |
| 11.1      | Berechnung von Doppelrohr- und Multirohrwärmetauschern .....  | 277        |
| 11.2      | Schlangenrohr-Wärmetauscher .....   | 290        |
| 11.3      | Querstrombündel .....   | 300        |
| <b>12</b> | <b>Rippenrohrwärmetauscher</b> .....  | <b>303</b> |
| 12.1      | Warum nimmt man Rippenrohre? .....  | 303        |
| 12.2      | Was beeinflusst die Wirksamkeit von Rippenrohren? .....   | 304        |
| 12.3      | Rippenrohrberechnungen .....  | 307        |
| 12.3.1    | Berechnung des Rippenwirkungsgrads $\eta_R$ .....   | 307        |
| 12.3.2    | Berechnung des gewogenen Rippenwirkungsgrads $\eta_W$ .....   | 307        |
| 12.3.3    | Berechnung der Wärmedurchgangszahl $k_i$ für die Innenrohroberfläche $F_i$ ohne Verschmutzung .....   | 309        |
| 12.3.4    | Berechnung der Wärmedurchgangszahl $k_a$ bezogen auf die Außenrohroberfläche $F_a$ ohne Verschmutzung .....   | 310        |
| 12.3.5    | Berechnung der Wärmedurchgangszahl $k_a$ bezogen auf die berippte Außenoberfläche $F_a$ unter Berücksichtigung der Verschmutzungsbeiwerte $r_a$ und $r_i$ ..... | 312        |
| 12.3.6    | Berechnung der Wärmedurchgangszahl $k_i$ für die Innenrohroberfläche $F_i$ unter Berücksichtigung der Verschmutzungsbeiwerte $r_a$ und $r_i$ .....              | 312        |
| 12.3.7    | Verschmutzung und Temperaturgradient .....  | 313        |
| 12.3.8    | Vergleich der Wärmeleistungen $k_i \cdot F_i$ [W/m K] verschiedener Rohre .....   | 315        |
| 12.4      | Anwendungsbeispiele .....   | 316        |
| <b>13</b> | <b>Festigkeitsberechnungen von Wärmeaustauschern</b> ....   | <b>325</b> |
| 13.1      | Berechnung der Mantelwandstärke für Innendruckbelastung nach AD-Merkblatt B1 .....  | 325        |
| 13.2      | Berechnung der Wandstärke gewölbter Böden (Klöpfer- oder Korbbogenböden) für Innendruckbelastung nach AD-Merkblatt B3 .....                                     | 327        |
| 13.3      | Berechnung der Rohrbodenwandstärke für Druckbelastung nach AD-Merkblatt B5 .....  | 331        |
| 13.3.1    | Berechnung der Wandstärke für zwei feste Rohrböden .....  | 331        |
| 13.3.2    | Berechnung der Wandstärke für einen Rohrboden mit U-Rohren .....  | 335        |
| 13.4      | Berechnung der Wärmetauscherinnenrohre auf inneren und äußeren Überdruck nach AD-Merkblatt B11 .....  | 335        |
| 13.5      | Berücksichtigung der Stützen im Mantel nach AD-Merkblatt B9 .....   | 336        |
| 13.6      | Berechnung der Mantelwandstärke bei Außendruckbelastung nach AD-Merkblatt B6 .....  | 338        |
| 13.6.1    | Berechnung der Wandstärke gegen elastisches Einbeulen .....   | 339        |
| 13.6.2    | Berechnung gegen plastisches Verformen .....  | 340        |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 13.7 | Dimensionierung der Schrauben an den Flanschverbindungen nach AD-Merkblatt B7 ..... | 342 |
| 13.8 | Dimensionierung der Flansche nach AD-Merkblatt B8 .....                             | 344 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| <b>Schrifttum</b> ..... | 349 |
|-------------------------|-----|