

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1 Einleitung und Definitionen | 1 |
| 1.1 Arten der Wärmeübertragung | 3 |
| 1.2 Definitionen | 5 |
| 1.2.1 Wärmestrom und Wärmestromdichte | 5 |
| 1.2.2 Wärmeübergangszahl und Wärmedurchgangszahl | 5 |
| 1.2.3 Kinetische Kopplungsgleichungen | 7 |
| 1.2.4 Mittlere Temperaturdifferenz | 7 |
| 1.2.5 Energiebilanzgleichung | 9 |
| 1.2.6 Wärmeleitfähigkeit | 11 |
| 1.3 Problemlösungsmethodik | 11 |
| Literatur | 16 |
| 2 Wärmeleitung in ruhenden Stoffen | 17 |
| 2.1 Stationäre Wärmeleitung | 17 |
| 2.1.1 Wärmeleitung in einer ebenen Wand | 18 |
| 2.1.2 Wärmeübergang durch mehrschichtige ebene Wände | 23 |
| 2.1.3 Wärmeleitung in einem Hohlzylinder | 27 |
| 2.1.4 Hohlzylinder mit mehreren Schichten | 31 |
| 2.1.5 Wärmeleitung in einer Hohlkugel | 36 |
| 2.1.6 Wärmeleitung mit seitlichem Wärmetransfer (Rippen) | 39 |
| 2.1.6.1 Temperaturverlauf in der Rippe | 40 |
| 2.1.6.2 Temperatur am Ende der Rippe | 42 |
| 2.1.6.3 Wärmestrom am Anfang der Rippe | 42 |
| 2.1.6.4 Rippenwirkungsgrad | 43 |
| 2.1.6.5 Anwendbarkeit für andere Geometrien | 44 |
| 2.2 Instationäre Wärmeleitung | 50 |
| 2.2.1 Eindimensionale instationäre Wärmeleitung | 50 |
| 2.2.1.1 Bestimmung der zeitlichen Temperaturänderung | 50 |
| 2.2.1.2 Bestimmung der transferierten Wärme | 56 |
| 2.2.1.3 Spezielle Lösungen für kurze Zeiten | 64 |
| 2.2.2 Gekoppelte Systeme | 66 |
| 2.2.3 Sonderfälle bei $Bi = 0$ und $Bi = \infty$ | 68 |

| | | |
|---------------------|--|------------|
| 2.2.4 | Temperaturänderung bei kleinen Biotzahlen | 68 |
| 2.2.4.1 | Ein kleiner Körper taucht in ein Fluid großer Masse | 69 |
| 2.2.4.2 | Ein Körper taucht in ein Fluid mit vergleichbarer Masse | 72 |
| 2.2.4.3 | Wärmetransfer durch einen strömenden Wärmeträger | 74 |
| 2.2.5 | Numerische Lösung der instationären Wärmeleitungsgleichung | 77 |
| 2.2.5.1 | Diskretisierung | 77 |
| 2.2.5.2 | Numerische Lösung | 79 |
| 2.2.5.3 | Wahl der Gitterweite und des Zeitschritts | 81 |
| Literatur | | 81 |
| 3 | Erzwungene Konvektion | 83 |
| 3.1 | Kennzahlen | 85 |
| 3.1.1 | Kontinuitätsgleichung | 85 |
| 3.1.2 | Bewegungsgleichung | 86 |
| 3.1.3 | Energiegleichung | 87 |
| 3.2 | Bestimmung der Wärmeübergangszahlen | 89 |
| 3.2.1 | Rohrströmung | 89 |
| 3.2.1.1 | Turbulente Rohrströmung | 90 |
| 3.2.1.2 | Laminare Rohrströmung bei konstanter Wandtemperatur | 92 |
| 3.2.1.3 | Gleichungen für den Übergangsbereich | 92 |
| 3.2.1.4 | Rohre und Kanäle nicht kreisförmigen Querschnitts | 101 |
| 3.2.2 | Ebene Wand | 105 |
| 3.2.3 | Quer angeströmte Einzelkörper | 105 |
| 3.2.4 | Quer angeströmte Rohrbündel | 111 |
| 3.2.5 | Rohrbündel mit Umlenkblechen | 117 |
| 3.3 | Rippenrohre | 118 |
| 3.3.1 | Kreisrippenrohre | 120 |
| Literatur | | 125 |
| 4 | Freie Konvektion | 127 |
| 4.1 | Freie Konvektion an vertikalen, ebenen Wänden | 128 |
| 4.1.1 | Geneigte, ebene Flächen | 134 |
| 4.2 | Horizontale, ebene Flächen | 137 |
| 4.3 | Freie Konvektion an gekrümmten Flächen | 137 |
| 4.3.1 | Horizontaler Zylinder | 137 |
| 4.3.2 | Kugel | 139 |
| 4.4 | Überlagerung freier und erzwungener Konvektion | 139 |
| Literatur | | 140 |
| 5 | Kondensation reiner Stoffe | 141 |
| 5.1 | Filmkondensation reiner, ruhender Dämpfe | 141 |
| 5.1.1 | Laminare Filmkondensation | 142 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 5.1.1.1 | Kondensation gesättigten Dampfes an einer senkrechten Wand | 142 |
| 5.1.1.2 | Einfluss der veränderlichen Wandtemperatur | 146 |
| 5.1.1.3 | Kondensation nassen oder überhitzten Dampfes | 147 |
| 5.1.1.4 | Kondensation an geneigten Wänden..... | 147 |
| 5.1.1.5 | Kondensation an waagerechten Rohren | 147 |
| 5.1.2 | Turbulente Filmkondensation | 147 |
| 5.2 | Dimensionslose Darstellung..... | 148 |
| 5.2.1 | Lokale Wärmeübergangszahlen | 149 |
| 5.2.2 | Mittlere Wärmeübergangszahlen..... | 149 |
| 5.2.3 | Kondensation an waagerechten Rohren | 150 |
| 5.2.4 | Vorgehen bei der Berechnung der Wärmeübergangszahlen | 150 |
| 5.2.5 | Druckverlust in Rohrbündeln mit waagerechten Rohren | 158 |
| 5.3 | Kondensation strömender, reiner Dämpfe | 162 |
| 5.3.1 | Kondensation in senkrechten Rohren..... | 164 |
| 5.3.1.1 | Gleichgerichtete Dampf- und Kondensatströmung | 164 |
| 5.3.1.2 | Senkrechte Rohre mit Dampfeintritt unten (Gegenstrom) | 166 |
| 5.3.2 | Kondensation in waagerechten durchströmten Rohren..... | 167 |
| Literatur. | | 184 |
| 6 | Verdampfung | 185 |
| 6.1 | Behältersieden..... | 186 |
| 6.1.1 | Sieden bei freier Konvektion..... | 187 |
| 6.1.2 | Blasensieden..... | 188 |
| 6.2 | Sieden bei erzwungener Konvektion..... | 196 |
| 6.2.1 | Unterkühltes Sieden | 196 |
| 6.2.2 | Konvektives Strömungssieden | 197 |
| Literatur. | | 201 |
| 7 | Strahlung | 203 |
| 7.1 | Grundgesetz der Temperaturstrahlung | 204 |
| 7.2 | Bestimmung der Wärmestromdichte der Strahlung | 206 |
| 7.2.1 | Intensität und Richtungsverteilung der Strahlung..... | 207 |
| 7.2.2 | Emissionsverhältnisse technischer Oberflächen | 207 |
| 7.2.3 | Wärmetransfer zwischen Flächen | 208 |
| 7.2.3.1 | Gleich große, parallele graue Platten | 210 |
| 7.2.3.2 | Umschlossene Körper | 212 |
| 7.3 | Gasstrahlung..... | 222 |
| 7.3.1 | Emissionsverhältnisse von Rauchgasen..... | 222 |
| 7.3.1.1 | Emissionsverhältnisse des Wasserdampfes | 223 |
| 7.3.1.2 | Emissionsverhältnisse des Kohlendioxids..... | 223 |

| | |
|---|------------|
| 7.3.2 Wärmeaustausch zwischen Gas und Wand | 225 |
| Literatur..... | 228 |
| 8 Wärmeübertrager..... | 229 |
| 8.1 Definitionen und grundlegende Gleichungen..... | 229 |
| 8.2 Berechnungskonzepte | 232 |
| 8.2.1 Zellenmethode..... | 232 |
| 8.2.2 Berechnung mit der mittleren Temperatur | 237 |
| 8.3 Verschmutzungswiderstand..... | 251 |
| 8.4 Rohrschwingungen | 254 |
| 8.4.1 Kritische Rohrschwingungen | 254 |
| 8.4.2 Akustische Resonanz | 257 |
| 8.5 Optimierung von Wärmeübertragern | 259 |
| Literatur..... | 269 |
| Anhang..... | 271 |
| A1 Wichtige physikalische Konstanten | 271 |
| A2 Stoffwerte unterkühlten Wassers bei 1 bar Druck..... | 272 |
| A3 Stoffwerte gesättigten Wassers und Dampfes | 275 |
| A4 Stoffwerte des Wassers und Dampfes | 278 |
| A5 Stoffwerte des Frigens 134a auf der Sättigungslinie | 281 |
| A6 Stoffwerte der Luft bei 1 bar Druck..... | 283 |
| A7 Stoffwerte der Feststoffe | 285 |
| A8 Stoffwerte technischer Wärmeträger auf Mineralölbasis..... | 287 |
| A9 Stoffwerte der Kraftstoffe bei 1,013 bar..... | 289 |
| A10 Emissionskoeffizienten verschiedener Oberflächen | 290 |
| A11 Formelsammlung..... | 293 |
| Deutsch-Englisch-Glossar | 303 |
| Stichwortverzeichnis | 309 |