
Peter von Böckh · Thomas Wetzel

Wärmeübertragung

Grundlagen und Praxis

5., überarbeitete und erweiterte Auflage 2014

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 |