

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Grundlagen der Wärmeübertragung</b>	<b>15</b>
1.1 Praktische Bedeutung . . . . .	15
1.2 Wärme, Wärmestrom, Wärmestromdichte . . . . .	16
1.3 Temperatur und Temperaturfelder . . . . .	17
1.4 Wärmetransportmechanismen . . . . .	18
1.4.1 Arten des Wärmetransports . . . . .	19
1.4.2 Wärmeleitung . . . . .	19
1.4.3 Konvektion . . . . .	20
1.4.4 Wärmestrahlung . . . . .	21
1.5 Fourier'sche Wärmeleitungsgleichung . . . . .	22
1.5.1 Mehrdimensionale instationäre Wärmeleitung mit inneren Wärmequellen . . . . .	22
1.5.2 Koordinatenunabhängige Schreibweise . . . . .	23
1.5.3 Eindimensionale instationäre Wärmeleitung . . . . .	23
1.5.4 Stationäre Wärmeleitung mit Wärmequellen . . . . .	23
1.5.5 Stationäre Wärmeleitung ohne Wärmequellen . . . . .	23
1.6 Anfangs- und Randbedingungen . . . . .	24
1.6.1 Anfangsbedingungen . . . . .	24
1.6.2 Randbedingungen . . . . .	24
1.6.3 Koppelbedingungen . . . . .	25
1.7 Elektrische Analogie . . . . .	25
1.7.1 Thermische Widerstände und Leitwerte . . . . .	26
1.7.2 Spezifische thermische Widerstände und Leitwerte . . . . .	26
1.7.3 Wärmedurchgangskoeffizient und Wärmedurchgangswiderstand . . . . .	27
1.7.4 Reihenschaltung thermischer Widerstände . . . . .	27
1.7.5 Parallelschaltung thermischer Widerstände . . . . .	28
1.7.6 Thermischer Kontaktwiderstand . . . . .	28
1.8 Beispiele . . . . .	29
1.9 Aufgaben zum Selbststudium . . . . .	45
<b>2 Massen- und Energiebilanzen</b>	<b>49</b>
2.1 Grundlagen . . . . .	49
2.1.1 System . . . . .	49
2.1.2 Kontinuitätsgleichung . . . . .	49
2.1.3 Erster Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .	50
2.1.4 Hinweise zur Aufstellung von Energiebilanzen . . . . .	57
2.1.5 Innere Energie und Enthalpie . . . . .	59
2.1.6 Enthalpieströme . . . . .	59
2.2 Beispiele . . . . .	61
2.3 Aufgaben zum Selbststudium . . . . .	94

<b>3 Stationäre Wärmeleitung</b>	<b>99</b>
3.1 Grundlagen	99
3.1.1 Péclet-Gleichungen für mehrschichtige Bauteile	99
3.1.2 Mehrschichtige ebene Platte	99
3.1.3 Zylinderschalen	99
3.1.4 Kugelschalen	100
3.1.5 Oberflächen- und Schichttemperaturen	101
3.1.6 Stationäre eindimensionale Wärmeleitung mit inneren Wärmequellen	101
3.1.7 Ebene Platte mit Wärmequellen	101
3.1.8 Vollzylinder und Zylinderschale mit Wärmequellen	101
3.1.9 Vollkugel und Kugelschale mit Wärmequellen	102
3.1.10 Stationäre zweidimensionale Wärmeleitung ohne innere Wärmequellen	102
3.2 Beispiele	106
3.3 Aufgaben zum Selbststudium	117
<b>4 Rippen und Nadeln</b>	<b>120</b>
4.1 Grundlagen	120
4.1.1 Kenngrößen von Rippen	120
4.1.2 Universelle Rippendifferenzialgleichung	121
4.1.3 Rechteckrippen	121
4.1.4 Zylindrische Nadeln	122
4.1.5 Kreisringrippen	122
4.1.6 Weitere Formen von Rippen und Nadeln	122
4.1.7 Optimale Rippen	124
4.1.8 Thermischer Widerstand von Rippen und Nadeln	124
4.2 Beispiele	125
4.3 Aufgaben zum Selbststudium	136
<b>5 Instationäre Wärmeleitung</b>	<b>138</b>
5.1 Grundlagen	138
5.1.1 Dimensionslose Kennzahlen	138
5.1.2 Dimensionslose Grundgleichung	139
5.1.3 Dimensionslose Anfangs- und Randbedingungen	140
5.1.4 Modelle der instationären Wärmeleitung	141
5.1.5 Ideal gerührter Behälter	143
5.1.6 Halibunendlicher Körper	144
5.1.7 Exakte Lösung für Platte, Zylinder und Kugel	147
5.1.8 Näherungslösung für große Zeiten	149
5.1.9 Kurzzeitznäherung des erweiterten ideal gerührten Behälters für RB 3. Art	151
5.1.10 Produktansatz bei mehrdimensionaler Wärmeleitung	155
5.2 Beispiele	158
5.3 Aufgaben zum Selbststudium	181

<b>6 Konvektion</b>	<b>185</b>
6.1 Grundlagen	185
6.1.1 Arten von Konvektion	185
6.1.2 Ähnlichkeitstheorie und dimensionslose Kennzahlen	186
6.1.3 Längs angeströmte ebene Platte	187
6.1.4 Quer und schräg angeströmte Zylinder	187
6.1.5 Quer angeströmte Profile	188
6.1.6 Umströmte Kugel	188
6.1.7 Einlaufproblematik bei der Rohr- und Kanalströmung	188
6.1.8 Vollständig ausgebildete Laminarströmung	189
6.1.9 Thermischer Einlauf bei laminarer Strömung	189
6.1.10 Hydrodynamischer und thermischer Einlauf bei laminarer Strömung	190
6.1.11 Vollständig ausgebildete turbulente Rohrströmung	190
6.1.12 Ausgebildete Rohrströmung im Übergangsbereich	191
6.1.13 Nichtkreisförmige Querschnitte	191
6.1.14 Fluidtemperaturänderung in Strömungsrichtung	191
6.1.15 Freie Konvektion	192
6.1.16 Vertikale ebene Platte	193
6.1.17 Vertikaler Zylinder	193
6.1.18 Geneigte ebene Platte	193
6.1.19 Horizontale ebene Platte	194
6.1.20 Horizontaler Zylinder	194
6.1.21 Kugel	194
6.1.22 Freie Konvektion in geschlossenen Fluidschichten	195
6.1.23 Horizontale ebene Schichten	195
6.1.24 Geneigte ebene Schichten	196
6.1.25 Vertikale ebene Schichten	196
6.1.26 Freie Konvektion in offenen Fluidschichten	197
6.1.27 Senkrechte Kanäle	197
6.1.28 Geneigte Kanäle	198
6.1.29 Parallele vertikale Platten	199
6.1.30 Mischkonvektion an umströmten Körpern	199
6.2 Beispiele	201
6.3 Aufgaben zum Selbststudium	214
<b>7 Wärmeübertrager</b>	<b>216</b>
7.1 Grundlagen	216
7.1.1 Begriffe und Nomenklatur	216
7.1.2 Bauformen von Wärmeübertragern	217
7.1.3 Einseitig konstante Fluidtemperatur	217
7.1.4 Dimensionslose Kennzahlen	218
7.1.5 Wärmeübertrager-Hauptgleichung	219
7.1.6 Gleichstrom-Wärmeübertrager	219
7.1.7 Gegenstrom-Wärmeübertrager	220
7.1.8 Kreuzstrom-Wärmeübertrager	221
7.1.9 Wärmewirkungsgrade von Wärmeübertragern	222
7.1.10 Korrekturfaktor	223
7.1.11 Wärmeübertrager mit Phasenübergang	223
7.1.12 Ablagerungen (Fouling)	223
7.2 Beispiele	224
7.3 Aufgaben zum Selbststudium	236

<b>8 Wärmestrahlung</b>	<b>238</b>
8.1 Grundlagen	238
8.1.1 Wellenlängenbereiche der Strahlung	238
8.1.2 Modell des schwarzen Körpers	239
8.1.3 Strahlungsfunktion des schwarzen Körpers	240
8.1.4 Strahlungsintensität und emittierte Strahlung	241
8.1.5 Auftreffende Strahlung	242
8.1.6 Helligkeit	242
8.1.7 Spektrale Kenngrößen	243
8.1.8 Emissionsgrad	244
8.1.9 Absorption, Reflexion und Transmission	245
8.1.10 Graue und selektive Strahler	246
8.1.11 Kirchhoff'sches Gesetz	248
8.1.12 Helligkeit grauer opaker Oberflächen	249
8.1.13 Oberflächenwiderstand für Strahlung	249
8.1.14 Raumwiderstand zweier strahlender Oberflächen	250
8.1.15 Helligkeitsverfahren für Wärmestrahlungsprobleme	251
8.1.16 Wärmestrahlung zwischen zwei Oberflächen	252
8.1.17 Wärmestrahlung zwischen drei Oberflächen	253
8.1.18 Wärmeübergangskoeffizient für Strahlung	254
8.1.19 Strahlungsaustauschkoeffizient	255
8.1.20 Einstrahlzahlen	255
8.1.21 Einstrahlzahlen zwischen zwei Flächen	255
8.1.22 Einstrahlzahlen einer Fläche zu sich selbst	257
8.1.23 Einstrahlzahlen-Algebra	257
8.1.24 Methode der gekreuzten Fäden	259
8.1.25 Einstrahlzahlen einfacher Konfigurationen	259
8.1.26 Strahlungsschutzschirme	263
8.2 Beispiele	266
8.3 Aufgaben zum Selbststudium	283
<b>9 Aufgaben aus verschiedenen Themengebieten</b>	<b>286</b>
<b>10 Anhang</b>	<b>318</b>
10.1 Gauß'sche Fehlerfunktion	318
10.2 Bessel-Funktionen	319
10.2.1 Bessel-Funktionen 1. Art	319
10.2.2 Modifizierte Bessel-Funktionen 1. und 2. Art	319
10.2.3 Zahlentafeln der Bessel-Funktionen	321
10.3 Näherungslösung der eindimensionalen instationären Wärmeleitung	325
10.4 Stoffwerte	330
10.5 Lösungen der Übungsaufgaben	auf CD
<b>Literatur</b>	<b>332</b>
<b>Index</b>	<b>337</b>