

# 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 Halbunendlicher Körper . . . . .	144
5.1.7 Exakte Lösung für Platte, Zylinder und Kugel . . . . .	147
5.1.8 Näherungslösung für große Zeiten . . . . .	149
5.1.9 Kurzzeitnäherung 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 Parallel 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>