

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>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
1.7.7	3/4-Regel . . . . .	28
1.8	Beispiele . . . . .	29
1.9	Aufgaben zum Selbststudium . . . . .	45
<b>2</b>	<b>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>
<b>6.1 Grundlagen</b>	<b>185</b>
6.1.1 Arten von Konvektion	185
6.1.2 Ähnlichkeitstheorie und dimensionslose Kennzahlen	186
6.1.3 Erzwungene Konvektion	187
6.1.4 Längs angeströmte ebene Platte und Kreisscheibe	187
6.1.5 Quer und schräg angeströmte Zylinder und Profile	187
6.1.6 Quer angeströmte Profile	188
6.1.7 Umströmte Kugel	188
6.1.8 Einlaufproblematik bei der Rohr- und Kanalströmung	188
6.1.9 Vollständig ausgebildete laminare Rohrströmung	189
6.1.10 Thermischer Einlauf bei laminarer Rohrströmung	189
6.1.11 Hydrodynamischer und thermischer Einlauf bei laminarer Rohrströmung	190
6.1.12 Vollständig ausgebildete turbulente Rohrströmung	190
6.1.13 Ausgebildete Rohrströmung im Übergangsbereich	191
6.1.14 Nichtkreisförmige Querschnitte	191
6.1.15 Fluidtemperaturänderung in Strömungsrichtung	191
6.1.16 Freie Konvektion	192
6.1.17 Vertikale ebene Platte	193
6.1.18 Vertikaler Zylinder	193
6.1.19 Geneigte ebene Platte	193
6.1.20 Horizontale ebene Platte und Kreisscheibe	194
6.1.21 Horizontaler Zylinder	194
6.1.22 Kugel	194
6.1.23 Freie Konvektion in geschlossenen Fluidschichten	195
6.1.24 Horizontale ebene Schichten	195
6.1.25 Geneigte ebene Schichten	196
6.1.26 Vertikale ebene Schichten	196
6.1.27 Freie Konvektion in offenen Fluidschichten	197
6.1.28 Senkrechte Kanäle	197
6.1.29 Geneigte Kanäle	198
6.1.30 Parallele vertikale Platten	199
6.1.31 Mischkonvektion an umströmten Körpern	199
<b>6.2 Beispiele</b>	<b>201</b>
<b>6.3 Aufgaben zum Selbststudium</b>	<b>214</b>
<b>7 Wärmeübertrager</b>	<b>216</b>
<b>7.1 Grundlagen</b>	<b>216</b>
7.1.1 Begriffe und Nomenklatur	216
7.1.2 Bauformen von Wärmeübertragern	217
7.1.3 Einseitig konstante Fluidtemperatur	217
7.1.4 Beidseitige Temperaturänderung	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
<b>7.2 Beispiele</b>	<b>224</b>
<b>7.3 Aufgaben zum Selbststudium</b>	<b>236</b>

---

<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 Eigeneinstrahlzahlen . . . . .	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>317</b>
10.1 Gauß'sche Fehlerfunktion . . . . .	317
10.2 Bessel-Funktionen . . . . .	318
10.2.1 Bessel-Funktionen 1. Art . . . . .	318
10.2.2 Modifizierte Bessel-Funktionen 1. und 2. Art . . . . .	318
10.2.3 Zahlentafeln der Bessel-Funktionen . . . . .	320
10.3 Näherungslösung der eindimensionalen instationären Wärmeleitung . . . . .	324
10.4 Stoffwerte . . . . .	329
10.5 Lösungen der Übungsaufgaben . . . . .	auf CD
<b>Literatur</b>	<b>331</b>
<b>Arbeitshilfen</b>	<b>332</b>
<b>Index</b>	<b>337</b>