

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbolverzeichnis .....</b>	<b>XI</b>
<b>1      Grundformen des thermischen Energietransportes .....</b>	<b>1</b>
<b>2      Wärmeleitung .....</b>	<b>3</b>
2.1    Fourier'sches Erfahrungsgesetz der Wärmeleitung .....	3
2.1.1   Wärmeleitkoeffizient .....	6
2.1.2   Wärmestrom .....	10
2.2    Fourier'sche Differentialgleichung für das Temperaturfeld .....	14
2.3    Grenzbedingungen .....	18
2.4    Eindimensionale stationäre Wärmeleitung ohne Wärmequellen mit konstantem Wärmeleitkoeffizienten .....	22
2.4.1   Temperaturfeld .....	22
2.4.2   Wärmestrom .....	25
2.5    Eindimensionaler stationärer Wärmedurchgang .....	34
2.6    Wärmedurchgang durch berippete Wände .....	45
2.6.1   Äquivalenter Wärmeübergangskoeffizient .....	46
2.6.2   Temperaturverlauf in der Rippe .....	49
2.6.3   Berechnung von Rippen .....	53
2.7    Eindimensionale Wärmeleitung mit Wärmequellen .....	61
2.8    Stationäre Wärmeleitung mit temperaturabhängigen Wärmeleitkoeffizienten .....	67
2.9    Mehrdimensionale stationäre Wärmeleitung .....	72
2.10   Zusammenfassung .....	76
<b>3      Instationäre Wärmeleitung .....</b>	<b>78</b>
3.1    Quasistatische instationäre Wärmeleitung .....	79
3.2    Analytische Lösung für die eindimensionale instationäre Wärmeleitung ohne Wärmequellen .....	83
3.2.1   Temperaturausgleich in Platten, Zylindern und Kugeln bei sprunghafter Veränderung der Umgebungstemperatur. Die Lösung von Gröber .....	83

3.2.2	Unendlich ausgedehnte ebene Wand .....	94
3.2.2.1	Sprung der Umgebungstemperatur an der Oberfläche .....	94
3.2.2.2	Periodische Änderungen der Umgebungstemperatur .....	103
3.3	Näherungslösung für das instationäre Verhalten von Vollkörpern .....	110
3.4	Numerische Lösung der Fourierschen Differentialgleichung .....	116
3.4.1	Differenzenverfahren für die eindimensionale Wärmeleitung .....	116
3.4.2	Numerische Lösung für diskontinuierliche Systeme .....	129
3.5	Mehrdimensionale instationäre Wärmeleitung.	
	Das Superpositionsprinzip .....	140
3.6	Wärmeleitung mit Phasenübergang fest – flüssig.....	147
3.7	Zusammenfassung .....	153
<b>4</b>	<b>Konvektion .....</b>	<b>156</b>
4.1	Mechanismus des Wärmeüberganges .....	156
4.1.1	Strömungsgrenzschicht .....	156
4.1.2	Temperaturgrenzschicht .....	160
4.2	Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten .....	163
4.3	Differentialgleichungssystem zur Beschreibung des Wärmeüberganges .....	167
4.3.1	Massenbilanz .....	167
4.3.2	Impulsbilanz .....	169
4.3.3	Energiebilanz .....	172
4.4	Lösung des Differentialgleichungssystems .....	174
4.5	Ähnlichkeitstheorie des Wärmeüberganges .....	180
4.5.1	Ermittlung der Ähnlichkeitskennzahlen aus den Differentialgleichungen .....	181
4.5.2	Dimensionsanalyse .....	186
4.5.3	Einführung von Eigenmaßstäben .....	189
4.5.4	Physikalische Bedeutung wichtiger Kennzahlen .....	190
4.5.5	Voraussetzungen der Ähnlichkeitstheorie des Wärmeüberganges .....	193
4.6	Berechnungsgleichungen für die freie und erzwungene Konvektion .....	195
4.6.1	Wärmeübergang bei freier Konvektion .....	203
4.6.1.1	Freie Konvektion an Wänden und Einzelkörpern .....	203
4.6.1.2	Freie Konvektion in Spalten und Behältern .....	206
4.6.2	Wärmeübergang bei erzwungener Konvektion .....	213
4.6.2.1	Strömung längs einer ebenen Wand .....	213
4.6.2.2	Strömung in Rohren .....	215
4.6.2.3	Strömung in Kanälen .....	219
4.6.2.4	Umströmung von Einzelkörpern .....	222
4.6.2.5	Strömung durch Rohrbündel .....	225

4.6.3	Wärmeübergang bei gemischter Konvektion .....	229
4.7	Wärmeübergang beim Kondensieren und Verdampfen .....	233
4.7.1	Kondensation .....	234
4.7.1.1	Filmkondensation von ruhenden Dämpfen .....	237
4.7.1.2	Filmkondensation von strömenden Dämpfen in Rohren .....	241
4.7.2	Verdampfung .....	242
4.7.2.1	Behältersieden .....	243
4.7.2.2	Strömungssieden .....	245
4.7.2.3	Entspannungsverdampfung .....	248
4.7.2.4	Wärmeübertragung beim Blasensieden .....	248
4.7.2.5	Wärmeübergang beim Strömungssieden .....	251
4.8	Zusammenfassung .....	260
<b>5</b>	<b>Temperatur- oder Wärmestrahlung .....</b>	<b>262</b>
5.1	Einordnung der Temperaturstrahlung .....	262
5.2	Energiebilanz der Strahlung .....	265
5.3	Schwarzer Strahler .....	268
5.4	Kirchhoffsches Gesetz .....	269
5.5	Strahlungsgesetze des Schwarzen Strahlers .....	271
5.5.1	Lambertsches Kosinus-Gesetz und Raumstrahlung .....	271
5.5.2	Plancksches Gesetz .....	273
5.5.3	Stefan-Boltzmannsches Gesetz .....	276
5.5.4	Wiensches Verschiebungsgesetz .....	277
5.5.5	Anteil der Schwarzen Strahlung .....	280
5.6	Strahlungsverhalten von realen Strahlern .....	284
5.6.1	Metalle .....	284
5.6.2	Nichtmetalle .....	286
5.6.3	Gase .....	287
5.6.4	Grauer Strahler. Berechnung realer Strahler .....	289
5.7	Strahlungsaustausch .....	301
5.7.1	Einstrahlzahl .....	301
5.7.2	Strahlungsaustausch ohne strahlungsaktives Zwischenmedium ..	309
5.7.2.1	Netzwerkmethode .....	309
5.7.2.2	Zweiflächenstrahlungsaustausch .....	312
5.7.2.3	Mehrflächenstrahlungsaustausch .....	316
5.7.3	Strahlungsaustausch mit strahlungsaktiven Zwischenmedien ..	326
5.7.4	Kopplung des Energieaustausches durch Strahlung mit Leitung und Konvektion .....	336
5.8	Solarstrahlung .....	343
5.8.1	Astronomisch-geografische Zusammenhänge .....	344
5.8.2	Solarenergie an der Erdoberfläche .....	348
5.9	Zusammenfassung .....	357

<b>6</b>	<b>Wärmeübertrager</b> .....	360
6.1	Systematik der Wärmeübertrager .....	361
6.2	Berechnung von Rekuperatoren .....	364
6.2.1	Parallelströmer .....	364
6.2.2	Kreuzströmer .....	382
6.2.3	Kompliziertere Bauarten .....	390
6.2.4	Gekoppelte Rekuperatoren .....	391
6.3	Berechnung des Rührkessels .....	400
6.4	Berechnung von Regeneratoren mit feststehender Speichermasse .....	407
6.5	Vergleich verschiedener Wärmeübertrager .....	421
6.6	Zusammenfassung .....	424
 <b>Anhang</b> .....		427
A 3.1	Wand-, Kern- und Mitteltemperatur bei der ebenen Platte .....	427
A 3.2	Wand-, Kern- und Mitteltemperatur beim unendlichen Zylinder .....	430
A 3.3	Wand-, Kern- und Mitteltemperatur bei der Kugel .....	433
A 3.4	Pascal-Programm für die Eigenwertberechnung ebene Platte .....	436
A 3.5	Koeffizienten der Matrix $K$ und des Vektors $R$ für das implizite Differenzenverfahren .....	438
A 3.6.1	Pascal-Programm zur Lösung eines Gleichungssystems mit Tridiagonalmatrix .....	439
A 3.6.2	Pascal-Programm für die Berechnung der Matrixelemente für das Gleichungssystem für das Differenzenverfahren .....	440
A 3.7	Vereinfachtes Pascal-Programm für die Netzwerkmethode .....	441
A 4.1	Stoffwerte für trockene Luft bei $p=0,1 \text{ MPa}$ .....	455
A 4.2	Stoffwerte für Wasserflüssigkeit im Sättigungszustand .....	456
A 5.1	Pascal-Programm zur Berechnung des Strahlungsanteils des Schwarzen Körpers .....	457
A 5.2	Pascal-Programm zur Berechnung des Strahlungsaustausches nach dem Matrix-Verfahren .....	458
A 5.3	Vereinfachtes Pascal-Programm zur Berechnung des Strahlungsaustausches mit Leitung, Konvektion und direkter Energiezufuhr nach einem iterativen Verfahren .....	462
 <b>Literaturverzeichnis</b> .....		471
 <b>Sachwortverzeichnis</b> .....		476