

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> . . . . .	5
<b>Formelzeichen und Einheiten</b> . . . . .	11
<b>1 Einleitung</b> . . . . .	17
<b>2 Wärmeleitung</b> . . . . .	19
2.1 Stationäre Wärmeleitung . . . . .	19
2.1.1 Wärmeleitfähigkeit . . . . .	20
2.1.2 Wärmeleitung durch eine ebene Wand . . . . .	20
2.1.3 Wärmeleitung durch einen Hohlzylinder <sup>22</sup> . . . . .	
2.1.4 Wärmeleitung durch eine Hohlkugel . . . . .	24
2.1.5 Berücksichtigung von Wärme-Übergangswiderständen bei der Wärmeleitung . . . . .	25
2.2 Wärmeleitung mit gleichzeitigem Wärmetransfer an der Oberfläche . . . . .	26
2.2.1 Langer Stab . . . . .	27
2.2.2 Kurzer Stab . . . . .	28
2.2.3 Wärmestrom am Stabansatz . . . . .	30
2.2.4 Rippenwirkungsgrad . . . . .	31
2.3 Instationäre Wärmeleitung . . . . .	32
2.3.1 Ableitung der Grundgleichung . . . . .	32
2.3.2 Differentialgleichung des Temperaturfeldes . . . . .	33
2.3.3 Mathematische Lösung des Temperaturfeldes . . . . .	34
2.3.3.1 Grenzbedingungen für die größtmöglichen Temperaturunterschiede . . . . .	39
2.3.3.2 Asymptotische Näherungsgleichungen für die praktische Berechnung . . . . .	42
2.3.4 Zeichnerische Lösung des Temperaturfeldes . . . . .	43
2.4 Gekoppelte Systeme . . . . .	45
2.5 Wärmeausgleichsprobleme . . . . .	47
2.5.1 Ein Körper mit kleiner Abmessung taucht in ein großes Fluidbecken . . . . .	47
2.5.2 Ein Körper mit kleinen Abmessungen taucht in ein kleines, gedämmtes Fluidbecken . . . . .	47
2.5.3 Energiezufluss unter Abkühlung des Wärmeträgers . . . . .	49
2.6 2-dimensionale Wärmeleitung . . . . .	50
2.7 Aufgaben und Lösungen . . . . .	51
<b>3 Konvektion</b> . . . . .	67
3.1 Wärmeübergang . . . . .	67
3.2 NuëLT-Kennzahl . . . . .	68
3.3 Grenzschicht . . . . .	68
3.3.1 Wärmestromgleichung der Temperaturgrenzschicht . . . . .	68
3.3.2 Strömungsgrenzschicht . . . . .	70
3.3.3 Temperaturgrenzschicht . . . . .	71
3.3.4 Bestimmung der Grenzschichtdicken aus dem Druckverlust . . . . .	72
3.3.5 Turbulente Grenzschicht . . . . .	74
3.4 Randbedingungen . . . . .	80
3.4.1 REYNOLDS-Zahl . . . . .	80
3.4.2 PRANDTL-Zahl . . . . .	80
3.4.3 Bezugstemperatur für Stoffwerte . . . . .	81
3.4.4 Richtung des Wärmestroms . . . . .	81
3.4.5 Anlaufbedingungen . . . . .	82
3.4.6 Rauigkeit . . . . .	87
3.4.7 Gekrümmte Rohre . . . . .	88
3.4.8 Nichtkreisförmige Querschnitte . . . . .	89
3.4.8.1 Strömung durch Ringspalte . . . . .	90
3.4.8.2 Ebener Spalt . . . . .	91

3.5	Medien mit sehr kleinen <i>Pr</i> -Zahlen (flüssige Metalle) . . . . .	91
3.6	Überströmter Einzelkörper . . . . .	92
3.6.1	Wärmeübergang im Staupunkt . . . . .	95
3.7	Quer angeströmte Rohrreihen und Rohrbündel . . . . .	97
3.7.1	Rohrbündel mit Umlenkblechen . . . . .	99
3.8	Berippte Oberflächen . . . . .	100
3.8.1	Wärmeübergang bezogen auf den Rohraußendurchmesser $d_a$ . . . . .	100
3.8.2	Wärmetübertragung bezogen auf die äußere Gesamtoberfläche $A$ . . . . .	104
3.9	Freie Konvektion . . . . .	108
3.9.1	Freie Konvektion in Fluidschichten . . . . .	111
3.9.2	Freie Konvektion bei Luft . . . . .	112
3.9.3	Überlagerung von erzwungener und freier Strömung . . . . .	112
3.9.3.1	Überlagerung von freier und erzwungener Konvektion bei Luft . . . . .	113
3.10	Aufgaben und Lösungen . . . . .	115
<b>4</b>	<b>Kondensation</b> . . . . .	<b>127</b>
4.1	Filmkondensation bei ruhendem Sattdampf . . . . .	127
4.1.1	Filmdicke . . . . .	127
4.2	Dimensionslose Darstellung . . . . .	129
4.3	Turbulente Kondensatströmung . . . . .	130
4.4	Geneigte Wand und waagerechte Rohre . . . . .	130
4.5	Kondensation von strömendem Sattdampf . . . . .	131
4.6	Kondensation von überhitztem Dampf (Heißdampf) . . . . .	132
4.7	Kondensation vom Dämpfen mit inerten Gasen . . . . .	132
4.8	Aufgaben und Lösungen . . . . .	134
<b>5</b>	<b>Verdampfung</b> . . . . .	<b>141</b>
5.1	Sieden bei freier Konvektion . . . . .	143
5.2	Blasensieden . . . . .	143
5.3	Kritische Wärmestromdichte . . . . .	146
5.4	Filmsieden . . . . .	146
5.5	Verdampfung mit erzwungener Strömung in Rohren . . . . .	147
5.5.1	1-phasige Flüssigkeitsströmung . . . . .	149
5.5.2	Unterkühltes Sieden . . . . .	149
5.5.3	Blasensieden (Sättigungssieden) . . . . .	149
5.5.4	Stilles Sieden . . . . .	151
5.5.5	Filmsieden . . . . .	152
5.5.6	Kritische Wärmestromdichte . . . . .	152
5.6	Aufgaben und Lösungen . . . . .	154
<b>6</b>	<b>Strahlung</b> . . . . .	<b>159</b>
6.1	Grundgesetz der Temperaturstrahlung . . . . .	160
6.2	Das STEFAN-BOLTZMANNSCHE Gesetz . . . . .	161
6.3	Die LAMBERTSchen Gesetze . . . . .	164
6.3.1	Spektrale Strahldichte einer schwarzen Fläche . . . . .	165
6.4	Strahlungsaustausch . . . . .	168
6.4.1	Strahlungsaustausch in einem offenen System . . . . .	168
6.4.2	Strahlungsaustausch in einem umschlossenen System . . . . .	176
6.4.3	Strahlungsaustausch zwischen mehreren Oberflächen . . . . .	176
6.4.4	Strahlung an Rohrreihen . . . . .	178
6.5	Strahlung von Gasen . . . . .	179
6.5.1	Strahlungsaustausch zwischen Gas und Wand . . . . .	183
6.6	Staubstrahlung . . . . .	185
6.6.1	Gas- und Staubstrahlung . . . . .	187
6.7	Wärmestrahlung von Flammen . . . . .	188
6.7.1	Flammenabmessungen . . . . .	188
6.7.2	Flammentemperaturen . . . . .	189
6.7.3	Wärmeübertragung im Flammenraum . . . . .	190
6.7.4	Emissionsgrad $\epsilon_F$ der Flamme . . . . .	190

6.8	Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung . . . . .	191
6.9	Aufgaben und Lösungen . . . . .	193
<b>7</b>	<b>Spezialformen der Wärmeübertragung . . . . .</b>	<b>201</b>
7.1	Wirbelschicht . . . . .	201
7.1.1	Druckverlust der wirbelnden Partikelmasse . . . . .	201
7.1.2	Grenzgeschwindigkeiten . . . . .	202
7.1.3	Wärmeübergang . . . . .	202
7.2	Wärmerohr . . . . .	203
7.2.1	Kapillardruck . . . . .	203
7.3	Rührkessel . . . . .	205
7.3.1	Wärmeübertragung durch aufgeschweißte Halbrohrschenkel . . . . .	206
7.4	Rieselfilme . . . . .	208
7.5	Durchströmte ruhende Schüttungen . . . . .	210
7.6	Prallströmung aus einzelnen Rund- und Schlitzdüsen . . . . .	211
7.7	Wärmeübertragung im Vakumbereich . . . . .	212
7.7.1	Wärmeübergang im Gebiet mäßig verdünnter Gase . . . . .	213
<b>8</b>	<b>Wärmeübertragung durch Stofftransport . . . . .</b>	<b>215</b>
8.1	Diffusion . . . . .	215
8.2	Stoffübergang . . . . .	218
8.3	Verdunstung von Wasserdampf in Luft . . . . .	221
8.4	Wärmeübertragung mittels Stoffstrom am Beispiel feuchter Luft . . . . .	223
8.4.1	Physikalische Vorgänge bei der Entfeuchtung von Luft . . . . .	224
8.4.2	Befeuchtung von Luft (Trocknung) . . . . .	226
8.5	Aufgaben und Lösungen . . . . .	230
<b>9</b>	<b>Wärmedurchgang . . . . .</b>	<b>237</b>
9.1	Beeinflussung des Wärmedurchgangs mit Schutzschichten und Verschmutzung . . . . .	237
9.1.1	Foulingwiderstand . . . . .	238
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung der wichtigsten Gleichungen . . . . .</b>	<b>241</b>
<b>11</b>	<b>Stoffwerte . . . . .</b>	<b>263</b>
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>281</b>
	<b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>283</b>