

# 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	22
2.1.4 Wärmeleitung durch eine Hohlkugel	24
2.1.5 Berücksichtigung von Wärme-Übergangswiderständen bei der Wärmeleitung	25
2.2 Wärmeleitung mit gleichzeitigem Wärmeübergang an der Oberfläche	26
2.2.1 Langer Stab	27
2.2.2 Kurzer Stab	28
2.2.3 Wärmestrom am Stabanfang	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 Energiezufuhr 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 NUSSELT-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 $Pr$ -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	Wärmeübertragung 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 Sattedampf . . . . .	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 Sattedampf . . . . .	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 Halbroherschlangen . . . . .	206
7.4	Rieselfilme . . . . .	208
7.5	Durchströmte ruhende Schüttungen . . . . .	210
7.6	Prallströmung aus einzelnen Rund- und Schlitzdüsen . . . . .	211
7.7	Wärmeübertragung im Vakuumbereich . . . . .	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>