

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Definitionen	1
1.1 Arten der Wärmeübertragung	3
1.2 Definitionen	5
1.2.1 Wärmestrom und Wärmestromdichte	5
1.2.2 Wärmeübergangszahl und Wärmedurchgangszahl	5
1.2.3 Kinetische Kopplungsgleichungen	7
1.2.4 Mittlere Temperaturdifferenz	7
1.2.5 Energiebilanzgleichung	9
1.2.6 Wärmeleitfähigkeit	11
1.3 Problemlösungsmethodik	11
2 Wärmeleitung in ruhenden Stoffen	17
2.1 Stationäre Wärmeleitung	17
2.1.1 Wärmeleitung in einer ebenen Wand	18
2.1.2 Wärmeübergang durch mehrere ebene Wände	22
2.1.3 Wärmeleitung in einem Hohlzylinder	25
2.1.4 Hohlzylinder mit mehreren Schichten	29
2.1.5 Wärmeleitung in einer Hohlkugel	33
2.1.6 Wärmeleitung mit seitlichem Wärmetransfer (Rippen)	36
2.1.6.1 Temperaturverlauf in der Rippe	37
2.1.6.2 Temperatur am Ende der Rippe	39
2.1.6.3 Wärmestrom am Anfang der Rippe	39
2.1.6.4 Rippenwirkungsgrad	40
2.1.6.5 Anwendbarkeit für andere Geometrien	41
2.2 Instationäre Wärmeleitung	45
2.2.1 Eindimensionale instationäre Wärmeleitung	45
2.2.1.1 Bestimmung der zeitlichen Temperaturänderung	45
2.2.1.2 Bestimmung der transferierten Wärme	49
2.2.1.3 Spezielle Lösungen für kurze Zeiten	60
2.2.2 Gekoppelte Systeme	62
2.2.3 Sonderfälle bei $Bi = 0$ und $Bi = \infty$	64
2.2.4 Temperaturänderung bei kleinen Biotzahlen	65
2.2.4.1 Ein kleiner Körper taucht in ein Fluid großer Masse	65
2.2.4.2 Ein Körper taucht in ein Fluid mit vergleichbarer Masse	68
2.2.4.3 Wärmetransfer durch einen strömenden Wärmeträger ...	70

2.2.5	Numerische Lösung der instationären Wärmeleitungsgleichung	73
2.2.5.1	Diskretisierung	73
2.2.5.2	Numerische Lösung	75
2.2.5.3	Wahl der Gitterweite und des Zeitschritts	77

3 Erzwungene Konvektion **79**

3.1	Kennzahlen	81
3.1.1	Kontinuitätsgleichung	81
3.1.2	Bewegungsgleichung	82
3.1.3	Energiegleichung	83
3.2	Bestimmung der Wärmeübergangszahlen	86
3.2.1	Rohrströmung	86
3.2.1.1	Turbulente Rohrströmung	86
3.2.1.2	Laminare Rohrströmung bei konstanter Wandtemperatur	88
3.2.1.3	Gleichungen für den Übergangsbereich	89
3.2.1.3	Rohre und Kanäle nicht kreisförmigen Querschnitts	96
3.2.2	Ebene Wand	100
3.2.3	Quer angeströmte Einzelkörper	101
3.2.4	Quer angeströmte Rohrbündel	105
3.2.5	Rohrbündel mit Umlenkblechen	112
3.3	Rippenrohre	113
3.3.1	Kreisrippenrohre	115

4 Freie Konvektion **121**

4.1	Freie Konvektion an vertikalen, ebenen Wänden	122
4.1.1	Geneigte, ebene Flächen	127
4.2	Horizontale, ebene Flächen	129
4.3	Freie Konvektion an gekrümmten Flächen	130
4.3.1	Horizontaler Zylinder	130
4.3.2	Kugel	132
4.4	Überlagerung freier und erzwungener Konvektion	132

5 Kondensation reiner Stoffe **133**

5.1	Filmkondensation reiner, ruhender Dämpfe	133
5.1.1	Laminare Filmkondensation	134
5.1.1.1	Kondensation gesättigten Dampfes an einer senkrechten Wand	134
5.1.1.2	Einfluss der veränderlichen Wandtemperatur	137
5.1.1.3	Kondensation nassen oder überhitzten Dampfes	138
5.1.1.4	Kondensation an geneigten Wänden	139
5.1.1.5	Kondensation an waagerechten Rohren	139
5.1.2	Turbulente Filmkondensation	139

5.2	Dimensionslose Darstellung	139
5.2.1	Lokale Wärmeübergangszahlen	140
5.2.2	Mittlere Wärmeübergangszahlen	141
5.2.3	Kondensation an waagerechten Rohren	142
5.2.4	Vorgehen bei der Berechnung der Wärmeübergangszahlen	142
5.2.5	Druckverlust in Rohrbündeln mit waagerechten Rohren	149
5.3	Kondensation strömender, reiner Dämpfe	154
5.3.1	Kondensation innerhalb senkrechter Rohre	155
5.3.1.1	Gleichstrom (abwärts gerichtete Dampfströmung)	155
5.3.1.2	Gegenstrom (Dampfströmung nach oben)	157
5.3.2	Kondensation in durchströmten, waagerechten Rohren	160
6	Verdampfung	173
6.1	Behältersieden	173
6.1.1	Sieden bei freier Konvektion	175
6.1.2	Blasensieden	175
6.2	Sieden bei erzwungener Konvektion	184
6.2.1	Unterkühltes Sieden	184
6.2.2	Konvektives Strömungssieden	185
7	Strahlung	191
7.1	Grundgesetz der Temperaturstrahlung	192
7.2	Bestimmung der Wärmestromdichte der Strahlung	194
7.2.1	Intensität und Richtungsverteilung der Strahlung	194
7.2.2	Emissionsverhältnisse technischer Oberflächen	195
7.2.3	Wärmetransfer zwischen Flächen	196
7.2.3.1	Gleich große, parallele graue Platten	198
7.2.3.2	Umschlossene Körper	200
7.3	Gasstrahlung	208
7.3.1	Emissionsverhältnisse von Rauchgasen	209
7.3.1.1	Emissionsverhältnisse des Wasserdampfes	210
7.3.1.2	Emissionsverhältnisse des Kohlendioxids	210
7.3.2	Wärmeaustausch zwischen Gas und Wand	210
8	Wärmeübertrager	217
8.1	Definitionen und grundlegende Gleichungen	217
8.2	Berechnungskonzepte	220
8.2.1	Zellenmethode	220
8.2.2	Berechnung mit der mittleren Temperatur	225
8.3	Verschmutzungswiderstand	238
8.4	Rohrschwingungen	242
8.4.1	Kritische Rohrschwingungen	242
	244	
8.4.2	Akustische Resonanz	244

Anhang	247
A1: Wichtige physikalische Konstanten	247
A2: Stoffwerte unterkühlten Wassers bei 1 bar Druck	248
A3: Stoffwerte gesättigten Wassers und Dampfes	250
A4: Stoffwerte des Wassers und Dampfes	252
A5: Stoffwerte des Wassers und Dampfes (Fortsetzung)	253
A6: Stoffwerte des Frigens 134a auf der Sättigungslinie	254
A7: Stoffwerte der Luft bei 1 bar Druck	256
A8: Stoffwerte der Feststoffe	257
A9: Stoffwerte technischer Wärmeträger auf Mineralölbasis	258
A10: Stoffwerte der Kraftstoffe bei 1,013 bar	259
A11: Emissionskoeffizienten verschiedener Oberflächen	260
A12: Formelsammlung	263
 Sachverzeichnis	 273
 Literatur	 277
 Deutsch-Englisch-Glossar	 281