
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
	Literatur	16
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 mehrschichtige ebene Wände	23
2.1.3	Wärmeleitung in einem Hohlzylinder	27
2.1.4	Hohlzylinder mit mehreren Schichten	31
2.1.5	Wärmeleitung in einer Hohlkugel	36
2.1.6	Wärmeleitung mit seitlichem Wärmetransfer (Rippen)	39
2.1.6.1	Temperaturverlauf in der Rippe	40
2.1.6.2	Temperatur am Ende der Rippe	42
2.1.6.3	Wärmestrom am Anfang der Rippe	42
2.1.6.4	Rippenwirkungsgrad	43
2.1.6.5	Anwendbarkeit für andere Geometrien	44
2.2	Instationäre Wärmeleitung	50
2.2.1	Eindimensionale instationäre Wärmeleitung	50
2.2.1.1	Bestimmung der zeitlichen Temperaturänderung	50
2.2.1.2	Bestimmung der transferierten Wärme	56
2.2.1.3	Spezielle Lösungen für kurze Zeiten	64
2.2.2	Gekoppelte Systeme	66
2.2.3	Sonderfälle bei $Bi = 0$ und $Bi = \infty$	68

2.2.4	Temperaturänderung bei kleinen Biotzahlen.....	68
2.2.4.1	Ein kleiner Körper taucht in ein Fluid großer Masse	69
2.2.4.2	Ein Körper taucht in ein Fluid mit vergleichbarer Masse...	72
2.2.4.3	Wärmetransfer durch einen strömenden Wärmeträger....	74
2.2.5	Numerische Lösung der instationären Wärmeleitungsgleichung....	77
2.2.5.1	Diskretisierung	77
2.2.5.2	Numerische Lösung	79
2.2.5.3	Wahl der Gitterweite und des Zeitschritts	81
	Literatur.....	81
3	Erzwungene Konvektion.....	83
3.1	Kennzahlen.....	85
3.1.1	Kontinuitätsgleichung	85
3.1.2	Bewegungsgleichung	86
3.1.3	Energiegleichung	87
3.2	Bestimmung der Wärmeübergangszahlen.....	89
3.2.1	Rohrströmung.....	89
3.2.1.1	Turbulente Rohrströmung	90
3.2.1.2	Laminare Rohrströmung bei konstanter Wandtemperatur	92
3.2.1.3	Gleichungen für den Übergangsbereich	92
3.2.1.4	Rohre und Kanäle nicht kreisförmigen Querschnitts	101
3.2.2	Ebene Wand	105
3.2.3	Quer angeströmte Einzelkörper	105
3.2.4	Quer angeströmte Rohrbündel.....	111
3.2.5	Rohrbündel mit Umlenklechen	117
3.3	Rippenrohre	118
3.3.1	Kreisrippenrohre.....	120
	Literatur.....	125
4	Freie Konvektion	127
4.1	Freie Konvektion an vertikalen, ebenen Wänden.....	128
4.1.1	Geneigte, ebene Flächen	134
4.2	Horizontale, ebene Flächen	137
4.3	Freie Konvektion an gekrümmten Flächen	137
4.3.1	Horizontaler Zylinder	137
4.3.2	Kugel.....	139
4.4	Überlagerung freier und erzwungener Konvektion	139
	Literatur.....	140
5	Kondensation reiner Stoffe	141
5.1	Filmkondensation reiner, ruhender Dämpfe.....	141
5.1.1	Laminare Filmkondensation	142

5.1.1.1	Kondensation gesättigten Dampfes an einer senkrechten Wand	142
5.1.1.2	Einfluss der veränderlichen Wandtemperatur	146
5.1.1.3	Kondensation nassen oder überhitzten Dampfes	147
5.1.1.4	Kondensation an geneigten Wänden	147
5.1.1.5	Kondensation an waagerechten Rohren	147
5.1.2	Turbulente Filmkondensation	147
5.2	Dimensionslose Darstellung	148
5.2.1	Lokale Wärmeübergangszahlen	149
5.2.2	Mittlere Wärmeübergangszahlen	149
5.2.3	Kondensation an waagerechten Rohren	150
5.2.4	Vorgehen bei der Berechnung der Wärmeübergangszahlen	150
5.2.5	Druckverlust in Rohrbündeln mit waagerechten Rohren	158
5.3	Kondensation strömender, reiner Dämpfe	162
5.3.1	Kondensation in senkrechten Rohren	164
5.3.1.1	Gleichgerichtete Dampf- und Kondensatströmung	164
5.3.1.2	Senkrechte Rohre mit Dampfeintritt unten (Gegenstrom)	166
5.3.2	Kondensation in waagerechten durchströmten Rohren	167
	Literatur	184
6	Verdampfung	185
6.1	Behältersieden	186
6.1.1	Sieden bei freier Konvektion	187
6.1.2	Blasensieden	188
6.2	Sieden bei erzwungener Konvektion	196
6.2.1	Unterkühltes Sieden	196
6.2.2	Konvektives Strömungssieden	197
	Literatur	201
7	Strahlung	203
7.1	Grundgesetz der Temperaturstrahlung	204
7.2	Bestimmung der Wärmestromdichte der Strahlung	206
7.2.1	Intensität und Richtungsverteilung der Strahlung	207
7.2.2	Emissionsverhältnisse technischer Oberflächen	207
7.2.3	Wärmetransfer zwischen Flächen	208
7.2.3.1	Gleich große, parallele graue Platten	210
7.2.3.2	Umschlossene Körper	212
7.3	Gasstrahlung	222
7.3.1	Emissionsverhältnisse von Rauchgasen	222
7.3.1.1	Emissionsverhältnisse des Wasserdampfes	223
7.3.1.2	Emissionsverhältnisse des Kohlendioxids	223

7.3.2	Wärmeaustausch zwischen Gas und Wand	225
	Literatur	228
8	Wärmeübertrager	229
8.1	Definitionen und grundlegende Gleichungen	229
8.2	Berechnungskonzepte	232
8.2.1	Zellenmethode	232
8.2.2	Berechnung mit der mittleren Temperatur	237
8.3	Verschmutzungswiderstand	251
8.4	Rohrschwingungen	254
8.4.1	Kritische Rohrschwingungen	254
8.4.2	Akustische Resonanz	257
8.5	Optimierung von Wärmeübertragern	259
	Literatur	269
Anhang	271
A1	Wichtige physikalische Konstanten	271
A2	Stoffwerte unterkühlten Wassers bei 1 bar Druck	272
A3	Stoffwerte gesättigten Wassers und Dampfes	275
A4	Stoffwerte des Wassers und Dampfes	278
A5	Stoffwerte des Frigens 134a auf der Sättigungslinie	281
A6	Stoffwerte der Luft bei 1 bar Druck	283
A7	Stoffwerte der Feststoffe	285
A8	Stoffwerte technischer Wärmeträger auf Mineralölbasis	287
A9	Stoffwerte der Kraftstoffe bei 1,013 bar	289
A10	Emissionskoeffizienten verschiedener Oberflächen	290
A11	Formelsammlung	293
Deutsch-Englisch-Glossar	303
Stichwortverzeichnis	309