

---

Kamprath-Reihe

Dipl.-Ing. Walter Wagner

# **Wärmeaustauscher**

Grundlagen, Aufbau und Funktion  
thermischer Apparate

4., überarbeitete und erweiterte Auflage

Vogel Buchverlag

---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Vorwort</b> .....	5
<b>1 Einführung</b> .....	11
1.1 Wärmeaustauscher .....	11
1.2 Trennwand-Wärmeaustauscher (Rekuperator) .....	11
1.3 Speicher-Wärmeaustauscher (Regenerator) .....	11
1.4 Stromführung .....	11
1.5 Größen zur Kennzeichnung von Wärmeaustauschern .....	11
1.6 Wärmeübertragung .....	12
1.7 Druckabfall .....	14
1.8 Grundlagen der wärmetechnischen Auslegung .....	15
<b>2 Wärmebilanzen</b> .....	17
2.1 Enthalpie .....	17
2.2 Gebrauchsgleichungen zur Bestimmung der Wärmeleistung .....	20
<b>3 Kennzahlen</b> .....	23
3.1 Erzwungene Strömung .....	23
3.2 Freie Strömung .....	24
3.3 Auftriebsströmung von Gasen .....	24
<b>4 Wärmeübertragung, Wärmeaustausch</b> .....	25
4.1 Wärmeleitung .....	25
4.2 Konvektion .....	26
4.2.1 Nußeltzahlen für die wichtigsten Anwendungen .....	27
4.3 Kondensation .....	30
4.4 Verdampfung .....	31
4.5 Wärmestrahlung .....	32
4.6 Wärmedurchgangskoeffizient .....	34
4.6.1 Ebene Wand .....	34
4.6.2 Rohr .....	34
4.7 Mittlere Temperaturdifferenz .....	41
4.7.1 Gegen- und Gleichstrom .....	43
4.7.2 Kreuzstrom .....	43
4.7.3 Kreuzgegenstrom .....	44
4.7.4 Mittlere Temperaturdifferenz in Wärmeaustauschern .....	44
4.7.4.1 Gegen- und Gleichstrom .....	44
<b>5 Projektierungsgleichungen für den Wärmeübergang</b> .....	53
5.1 Strömungsformen .....	54
5.2 Basisgleichungen für den konvektiven Wärmeübergang bei laminarer Strömung .....	55
5.2.1 Plattenströmung .....	55
5.2.2 Rohrrinnenströmung .....	55
5.2.2.1 Hydrodynamisch ausgebildete Strömung .....	55
5.2.2.2 Hydrodynamische Anlaufströmung .....	56
5.2.2.3 Einlaufstrecke bei laminarer Rohrströmung .....	56
5.3 Basisgleichungen für den konvektiven Wärmeübergang bei turbulenter Strömung .....	56
5.3.1 Überströmte Platte .....	56
5.3.2 Durchströmte glatte Rohre .....	57
5.3.3 Näherungsgleichungen .....	57
5.4 Basisgleichungen für den konvektiven Wärmeübergang bei quer angeströmten Rohren .....	59
5.5 Konvektiver Wärmeübergang in Rohrwindeln .....	60

5.6	Konvektiver Wärmeübergang mit Eigenkonvektion .....	61
5.6.1	Durchströmte waagrechte Rohre .....	61
5.6.2	Durchströmte senkrechte Rohre .....	61
5.6.3	Umströmte Körper .....	62
5.6.4	Freie Strömung .....	63
5.7	Anwendungsgleichungen und -diagramme für den konvektiven Wärmeübergang .....	63
5.7.1	Bereiche der <i>Pr</i> -Zahl in der Praxis .....	63
5.7.2	Gelöste Gleichungen .....	64
5.7.2.1	Umströmte Körper .....	65
5.7.2.2	Durchströmte Körper .....	65
5.7.3	Anwendungsgleichungen für die Praxis .....	65
5.7.3.1	Umströmte Körper .....	67
5.7.3.2	Durchströmte Körper .....	67
5.7.4	Weitere Vereinfachungen .....	68
5.7.4.1	Umströmte Körper .....	68
5.7.4.2	Durchströmte Körper .....	69
5.7.5	Rippenrohre .....	71
5.7.5.1	Wärmeübergangskoeffizient der Außenströmung .....	71
5.7.5.2	Scheinbarer Wärmeübergangskoeffizient am Rippenfuß .....	71
5.7.5.3	Näherungsgleichung .....	75
5.8	Berechnung quer angeströmter Rohrbündel-Wärmeaustauscher .....	77
5.8.1	Wärmeübergang $\alpha_a$ .....	77
5.8.2	Rohrbündel mit Umlenklechen .....	78
5.8.2.1	Geometriefaktor $f_G$ .....	78
5.8.2.2	Leckströmfaktor $f_L$ .....	79
5.8.2.3	Bypassströmung $f_b$ .....	79
<b>6</b>	<b>Strömungstechnische Auslegung</b> .....	<b>83</b>
6.1	Allgemeine Grundlagen .....	83
6.1.1	Durchströmte Systeme .....	83
6.1.2	Umströmte Rohrbündel .....	83
6.2	Druckverlust im Außenraum von Rohrbündel-Wärmeaustauschern .....	84
6.2.1	Wärmeaustauscher ohne Einbauten .....	84
6.2.2	Wärmeaustauscher mit Einbauten .....	85
6.2.2.1	Druckverlust im Mantelraum mit Umlenklechen .....	86
6.2.2.2	Druckverlust im Mantelraum mit Kreisscheiben und -ringen .....	87
<b>7</b>	<b>Schwingungstechnische Berechnungen</b> .....	<b>89</b>
7.1	Einleitung .....	89
7.2	Erregungsmechanismen .....	89
7.2.1	Wirbelerregung .....	89
7.2.2	Turbulenzregung (Buffeting) .....	93
7.2.3	Fluidelastisches Verhalten .....	95
7.2.3.1	Fluidelastische Instabilität .....	95
7.2.3.2	Dämpfung .....	96
7.2.3.3	Darstellung der kritischen Geschwindigkeiten .....	97
7.2.4	Akustische Schwingungen .....	97
7.3	Eigenfrequenzen von Wärmeaustauscherrohren .....	101
7.4	Resonanz .....	104
7.5	Abhilfemaßnahmen .....	105
7.6	Anwendungsgleichungen und Projektierungsdiagramm .....	105

<b>8</b>	<b>Bauformen</b>	111
8.1	Allgemeines	111
8.1.1	Anhaltswerte für die Auslegung von Wärmeaustauschern	112
8.2	Rohrbündel-Wärmeaustauscher	117
8.3	Doppelrohr-Wärmeaustauscher	136
8.4	Rippenrohr-Wärmeaustauscher	137
8.5	Kondensatoren	141
8.6	Verdampfer	143
8.6.1	Dampferzeuger	144
8.6.1.1	Indirekt beheizte Dampferzeuger	144
8.6.1.2	Befeuerte Dampferzeuger	144
8.6.2	Eindampfapparate	178
8.7	Spiralband-Wärmeaustauscher	180
8.8	Platten-Wärmeaustauscher	181
8.9	Sonderbauformen	183
8.9.1	Rührwerksbehälter	183
8.9.2	Glasrohr-Wärmeaustauscher	183
8.9.3	Grafit-Wärmeaustauscher	186
<b>9</b>	<b>Konstruktions- und Fertigungsrichtlinien</b>	199
<b>10</b>	<b>Betriebscharakteristik von Wärmeaustauschern</b>	201
10.1	Gleich- und Gegenstrom-Wärmeaustauscher	201
10.2	NTU-Methode für alle Bauarten	202
10.2.1	Definitionen	202
10.2.2	Beispiele für $\varepsilon$ -NTU-Beziehungen	205
10.2.3	$\varepsilon$ - $\psi$ -Methode (Apparate mit Phasenänderung)	207
10.3	Zellenmodell	218
10.4	Kaskadenschaltungen	220
10.4.1	Herleitung von $\varepsilon$ -Beziehungen	220
10.5	Instationäre Behälteraufheizung	222
10.5.1	Konstante Temperatur des Heiz-/Kühlmediums	222
10.5.2	Veränderliche Temperatur des Heiz-/Kühlmediums	223
10.5.3	Anordnung mit separatem Wärmeübertrager	224
10.6	Doppelrohrapparat als Einbauwärmeübertrager	225
10.7	Phasenänderung mit Überhitzung und Unterkühlung	229
<b>11</b>	<b>Gewährleistung</b>	239
11.1	Allgemeines	239
11.2	Gültigkeit	239
11.3	Auslegung und Spezifikation	239
<b>12</b>	<b>Kostenschätzung für Rohrbündel-Wärmeaustauscher</b>	243
<b>Anhang</b>	<b>Bilder von Wärmeaustauschern</b>	249
	<b>Bedeutung der wichtigsten Formelzeichen</b>	277
	<b>Literaturverzeichnis</b>	283
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	285