

---

Kamprath-Reihe

Dipl.-Ing. Walter Wagner

# **Wärmeaustauscher**

Grundlagen, Aufbau und Funktion  
thermischer Apparate

3. 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 Wärmeaustausch .....	12
1.7 Druckabfall .....	13
1.8 Grundlagen der wärmetechnischen Auslegung .....	13
<b>2 Wärmebilanzen</b> .....	15
2.1 Enthalpie .....	15
2.2 Gebrauchsgleichungen zur Bestimmung der Wärmeleistung .....	17
<b>3 Kennzahlen</b> .....	19
3.1 Erzwungene Strömung .....	19
3.2 Freie Strömung .....	20
3.3 Auftriebsströmung von Gasen .....	20
<b>4 Wärmeübertragung, Wärmeaustausch</b> .....	21
4.1 Wärmeleitung .....	21
4.2 Konvektion .....	22
4.2.1 Nußeltzahlen für die wichtigsten Anwendungen .....	23
4.3 Kondensation .....	26
4.4 Verdampfung .....	27
4.5 Wärmestrahlung .....	28
4.6 Wärmedurchgangskoeffizient .....	30
4.6.1 Ebene Wand .....	30
4.6.2 Rohr .....	30
4.7 Mittlere Temperaturdifferenz .....	37
4.7.1 Gegen- und Gleichstrom .....	39
4.7.2 Kreuzstrom .....	39
4.7.3 Kreuzgegenstrom .....	39
4.7.4 Mittlere Temperaturdifferenz in Wärmeaustauschern .....	40
4.7.4.1 Gegen- und Gleichstrom .....	40
4.7.4.2 Kreuzstrom .....	40
4.7.4.3 Korrektur für Strömungen in mehreren Durchgängen .....	40
<b>5 Projektierungsgleichungen für den Wärmeübergang</b> .....	49
5.1 Strömungsformen .....	50
5.2 Basisgleichungen für den konvektiven Wärmeübergang bei laminarer Strömung .....	51
5.2.1 Plattenströmung .....	51
5.2.2 Rohrrinnenströmung .....	51
5.2.2.1 Hydrodynamisch ausgebildete Strömung .....	51
5.2.2.2 Hydrodynamische Anlaufströmung .....	52
5.2.2.3 Einlaufstrecke bei laminarer Rohrströmung .....	52
5.3 Basisgleichungen für den konvektiven Wärmeübergang bei turbulenter Strömung .....	52
5.3.1 Überströmte Platte .....	52
5.3.2 Durchströmte glatte Rohre .....	52
5.3.3 Näherungsgleichungen .....	53
5.4 Basisgleichungen für den konvektiven Wärmeübergang bei quer angeströmten Rohren .....	55

5.5	Konvektiver Wärmeübergang in Rohrwendeln	56
5.6	Konvektiver Wärmeübergang mit Eigenkonvektion	57
5.6.1	Durchströmte waagrechte Rohre	58
5.6.2	Durchströmte senkrechte Rohre	58
5.6.3	Umströmte Körper	58
5.6.4	Freie Strömung	59
5.7	Anwendungsgleichungen und -diagramme für den konvektiven Wärmeübergang	59
5.7.1	Bereiche der $Pr$ -Zahl in der Praxis	59
5.7.2	Gelöste Gleichungen	60
5.7.2.1	Umströmte Körper	61
5.7.2.2	Durchströmte Körper	61
5.7.3	Anwendungsgleichungen für die Praxis	63
5.7.3.1	Umströmte Körper	63
5.7.3.2	Durchströmte Körper	63
5.7.4	Weitere Vereinfachungen	64
5.7.4.1	Umströmte Körper	64
5.7.4.2	Durchströmte Körper	65
5.7.5	Rippenrohre	68
5.7.5.1	Wärmeübergangskoeffizient der Außenströmung	68
5.7.5.2	Scheinbarer Wärmeübergangskoeffizient am Rippenfuß	69
5.7.5.3	Näherungsgleichung	70
5.8	Berechnung quer angeströmter Rohrbündel-Wärmeaustauscher	72
5.8.1	Wärmeübergang $\alpha_c$	72
5.8.2	Rohrbündel mit Umlenklechen	76
5.8.2.1	Geometriefaktor $f_G$	76
5.8.2.2	Leckströmfaktor $f_L$	76
5.8.2.3	Bypassströmung $f_B$	77
<b>6</b>	<b>Strömungstechnische Auslegung</b>	<b>79</b>
6.1	Allgemeine Grundlagen	79
6.1.1	Durchströmte Systeme	79
6.1.2	Umströmte Rohrbündel	79
6.2	Druckverlust im Außenraum von Rohrbündel-Wärmeaustauschern	80
6.2.1	Wärmeaustauscher ohne Einbauten	80
6.2.2	Wärmeaustauscher mit Einbauten	81
6.2.2.1	Druckverlust im Mantelraum mit Umlenklechen	82
6.2.2.2	Druckverlust im Mantelraum mit Kreisscheiben und -ringen	83
<b>7</b>	<b>Schwingungstechnische Berechnungen</b>	<b>85</b>
7.1	Einleitung	85
7.2	Erregungsmechanismen	85
7.2.1	Wirbelerregung	85
7.2.2	Turbulenzregung (Buffeting)	90
7.2.3	Fluidelastisches Verhalten	91
7.2.3.1	Fluidelastische Instabilität	91
7.2.3.2	Dämpfung	91
7.2.3.3	Darstellung der kritischen Geschwindigkeiten	93
7.2.4	Akustische Schwingungen	94
7.3	Eigenfrequenzen von Wärmeaustauscherrohren	97
7.4	Resonanz	100
7.5	Abhilfemaßnahmen	101
7.6	Anwendungsgleichungen und Projektierungsdiagramm	102
<b>8</b>	<b>Bauformen</b>	<b>107</b>
8.1	Allgemeines	107
8.1.1	Anhaltswerte für die Auslegung von Wärmeaustauschern	108
8.2	Rohrbündel-Wärmeaustauscher	113
8.3	Doppelrohr-Wärmeaustauscher	128
8.4	Rippenrohr-Wärmeaustauscher	130

8.5	Kondensatoren .....	133
8.6	Verdampfer .....	135
8.6.1	Dampferzeuger .....	135
8.6.1.1	Indirekt beheizte Dampferzeuger .....	136
8.6.1.2	Befeuerte Dampferzeuger .....	136
8.6.2	Eindampfapparate .....	170
8.7	Spiralband-Wärmeaustauscher .....	172
8.8	Platten-Wärmeaustauscher .....	172
8.9	Sonderbauformen .....	175
8.9.1	Rührwerksbehälter .....	175
8.9.2	Glasrohr-Wärmeaustauscher .....	175
8.9.3	Grafit-Wärmeaustauscher .....	177
<b>9</b>	<b>Konstruktions- und Fertigungsrichtlinien .....</b>	<b>191</b>
<b>10</b>	<b>Betriebscharakteristik von Wärmeaustauschern .....</b>	<b>193</b>
10.1	Gleich- und Gegenstrom-Wärmeaustauscher .....	193
10.2	NTU-Methode für alle Bauarten .....	194
10.2.1	Definitionen .....	194
10.2.2	Beispiele für $\epsilon$ -NTU-Beziehungen .....	196
10.2.3	$\epsilon$ - $\psi$ -Methode (Apparate mit Phasenänderung) .....	209
10.3	Zellenmodell .....	210
10.4	Kaskadenschaltungen .....	212
10.4.1	Herleitung von $\epsilon$ -Beziehungen .....	212
10.5	Instationäre Behälteraufheizung .....	214
10.5.1	Konstante Temperatur des Heiz-/Kühlmediums .....	214
10.5.2	Veränderliche Temperatur des Heiz-/Kühlmediums .....	215
10.5.3	Anordnung mit separatem Wärmeübertrager .....	216
10.6	Doppelrohrapparat als Einbauwärmeübertrager .....	219
10.7	Phasenänderung mit Überhitzung und Unterkühlung .....	220
<b>11</b>	<b>Gewährleistung .....</b>	<b>231</b>
11.1	Allgemeines .....	231
11.2	Gültigkeit .....	231
11.3	Auslegung und Spezifikation .....	231
<b>Anhang</b>	<b>Bilder von Wärmeaustauschern .....</b>	<b>235</b>
<b>Bedeutung der wichtigsten Formelzeichen .....</b>		<b>243</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>		<b>249</b>
<b>Stichwortverzeichnis .....</b>		<b>251</b>