

# WÄRMEAUSTAUSCHER

HERAUSGEGEBEN VON  
F. STEIMLE UND K. STEPHAN

BEARBEITET VON  
S. HAAF, KÖLN · H. G. HIRSCHBERG, PFUNGEN  
E. HOFMANN, BAD VILBEL · H. LOTZ, GIENGEN  
H. NAWOTHNIG, ESSEN · P. PAIKERT, HERNE  
B. SLIPČEVIĆ, LINDAU · H. SCHNELL, LANGENARGEN  
A. SCHUSTER, KÖLN · A. SCHÜTZ, LINDAU

MIT 382 ABBILDUNGEN



SPRINGER-VERLAG  
BERLIN / HEIDELBERG / NEW YORK / LONDON / PARIS / TOKYO  
1988

# Inhaltsverzeichnis

<b>Benutzte Formelzeichen (s. DIN 8941)</b>	XXI
<b>Einleitung (B. Slipčević)</b>	1
Systematik der Wärmeübertragungsvorgänge	1
Ähnlichkeit, Kennzahlen	3
 <b>1 Strömungen ohne Änderung des Aggregatzustandes in kältetechnischen Apparaten (B. Slipčević; Abschn. 1.5 E. Hofmann)</b>	 7
1.1 Strömung längs einer ebenen Platte	7
1.1.1 Erzwungene Strömung	7
1.1.2 Freie Strömung	9
1.2 Strömung in Rohren und Kanälen	10
1.2.1 Ausgebildete laminare Strömung	10
1.2.2 Ausgebildete turbulente Strömung	11
1.2.3 Strömung im Übergangsbereich (laminar-turbulent)	14
1.2.4 Vorgänge in der Einlaufstrecke	15
1.3 Querströmung um einzelne Rohre und Rohrbündel	16
1.3.1 Einzelrohre	16
1.3.2 Glattrohrbündel	17
1.3.3 Rippenrohrbündel	22
1.4 Strömung im Mantelraum von Rohrbündelwärmeaustauschern	23
1.4.1 Wärmeaustauscher ohne Umlenkeinbauten	23
1.4.2 Wärmeaustauscher mit Umlenksegmenten	24
1.4.3 Berechnungsbeispiel	27
1.5 Druckabfall in Zylinderrohrschlangen, Rohrspiralen, gebogenen Rohren und Krümmern (E. Hofmann)	29
1.5.1 Druckabfall in Zylinderrohrschlangen, Rohrspiralen und gebogenen Rohren	29
1.5.2 Die kritische Reynolds-Zahl	30
1.5.3 Formeln für den Reibungsbeiwert	30
1.5.4 Rohrspiralen	33
1.5.5 Einfluß der Rauigkeit	33
1.5.6 Druckabfall von Krümmern	33
1.5.7 Rechenbeispiele	40
1.6 Strömung in Umlenkhauben	42
1.7 Strömung an berieselten Flächen	43
 <b>2 Wärmeübertragung durch Leitung und Konvektion (B. Slipčević)</b>	 46
2.1 Wärmetransport durch Leitung	46
2.2 Wärmeübergang in Fluiden	47
2.2.1 Allgemeines	47
2.2.2 Wärmeübergang an ebene Platten	49

2.2.3	Wärmeübergang in Rohren und Kanälen . . . . .	51
2.2.4	Wärmeübergang an querangeströmte Rohre und Rohrbündel . . . . .	57
2.2.5	Wärmeübergang im Mantelraum von Rohrbündelwärmeaustauschern . . . . .	62
2.3	Wärmedurchgang in Apparaten . . . . .	68
2.3.1	Der Wärmedurchgangskoeffizient . . . . .	68
2.3.2	Der mittlere Temperaturstand . . . . .	70
<b>3</b>	<b>Wärmeübergang bei Verdampfung in natürlicher Strömung und Bemessung von überfluteten Verdampfern (B. Slipčević)</b> . . . . .	<b>76</b>
3.1	Sieden von Kältemitteln in Behältern (Behältersieden) . . . . .	76
3.1.1	Erscheinungsformen beim Sieden . . . . .	76
3.1.2	Überflutete einzelne Glattrohre . . . . .	81
3.1.3	Überflutete Glattrohrverdampfer . . . . .	88
3.1.4	Überflutete einzelne Rippenrohre . . . . .	99
3.1.5	Überflutete Rippenrohrverdampfer . . . . .	104
3.1.6	Sieden ölhaltiger Kältemittel . . . . .	112
3.1.7	Verbesserung des Wärmeübergangs beim Blasensieden . . . . .	121
3.1.8	Berieselte Rohre in Verdampfern . . . . .	125
3.2	Bemessung von überfluteten Verdampfern . . . . .	126
3.2.1	Meßergebnisse an überfluteten Glattrohrverdampfern . . . . .	126
3.2.2	Meßergebnisse an überfluteten Rippenrohrverdampfern . . . . .	127
3.2.3	Meßergebnisse an Berieselungsverdampfern . . . . .	130
3.2.4	Thermodynamische Auslegung . . . . .	131
3.2.5	Berechnungsbeispiele . . . . .	136
3.3	Hinweise für die Konstruktion von überfluteten Verdampfern . . . . .	142
3.3.1	Allgemeines . . . . .	142
3.3.2	Flüssigkeitsabscheidung . . . . .	145
3.3.3	Ölrückführung . . . . .	147
3.3.4	Bauarten . . . . .	148
<b>4</b>	<b>Druckabfall und Wärmeübergang der Zweiphasenströmung in Verdampferrohren (E. Hofmann)</b> . . . . .	<b>153</b>
4.1	Grundlegende Merkmale der Zweiphasenströmung in Rohren . . . . .	155
4.1.1	Querschnittsanteile von Dampf und Flüssigkeit bei Zweiphasenströmung im Rohr . . . . .	161
4.1.2	Beschleunigungsdruckverlust und Verzögerungsdruckgewinn . . . . .	164
4.1.3	Der hydrostatische Druckabfall . . . . .	166
4.2	Reibungsdruckverlust einphasiger Strömungen in geraden Rohren . . . . .	167
4.3	Reibungsdruckabfall der Zweiphasenströmung . . . . .	168
4.3.1	Reibungsdruckabfall der Zweiphasenströmung in geraden Rohren . . . . .	168
4.3.1.1	Verfahren von LOCKHART und MARTINELLI . . . . .	169
4.3.1.2	Verfahren von BANDEL und SCHLÜNDER . . . . .	171
4.3.1.3	Verfahren von CHAWLA und BANKOFF . . . . .	174
4.3.1.4	Verfahren von GRØNNERUD . . . . .	176
4.3.1.5	Vergleich zwischen Rechen- und Meßwerten des Reibungsdruckabfalls . . . . .	178
4.3.2	Reibungsdruckverlust in gebogenen Rohren und Krümmern . . . . .	180
4.3.2.1	Reibungsdruckabfall der Zweiphasenströmung in Zylinderrohrschlangen und gebogenen Rohren . . . . .	180
4.3.2.2	Einfluß des Krümmungswinkels auf den Druckabfall in Krümmern . . . . .	183
4.3.2.3	Druckabfall in 180°-Krümmern nach Meßergebnissen von PIERRE . . . . .	184
4.3.2.4	Druckabfall in 180°-Krümmung nach Meßergebnissen von GRØNNERUD . . . . .	185

4.3.3	Rechenbeispiele . . . . .	186
4.3.3.1	Druckabfall in einer Zylinderrohrschlange eines Ammoniakverdampfers . . . . .	186
4.3.3.2	Druckabfall in einem Rohrsystem mit 180°-Krümmern eines Einspritzverdampfers . . . . .	188
4.3.3.3	Druckabfall in Rohren mit 180°-Krümmern eines Zwangsumlaufverdampfers mit R 12 . . . . .	191
4.4	Wärmeübertragung in Rohren . . . . .	193
4.4.1	Wärmeübergangskoeffizienten beim Blasensieden . . . . .	193
4.4.2	Wärmeübergangskoeffizienten bei konvektivem Sieden . . . . .	204
4.4.3	Vergleich der Wärmeübergangskoeffizienten am Einzelrohr mit Meßwerten am Verdampfer . . . . .	208
4.4.3.1	Vergleich zwischen Wärmeübergangskoeffizienten am Einzelrohr mit Meßwerten an Verdampfern bei Blasenverdampfung . . . . .	210
4.4.3.2	Vergleich zwischen Wärmeübergangskoeffizienten am Einzelrohr mit Meßwerten an Verdampfern bei konvektivem Sieden . . . . .	210
4.5	Wärmeübergang und Druckabfall in Einspritzverdampfern . . . . .	211
4.5.1	Formeln für den Wärmeübergang in Einspritzverdampfern . . . . .	211
4.5.2	Messungen der Wärmeübergangskoeffizienten an Versuchseinspritzverdampfern . . . . .	217
4.5.3	Das Einspritzverdampfer-Diagramm (EV-Diagramm) . . . . .	226
4.5.3.1	Einige Rechenbeispiele . . . . .	230
4.5.4	Abschnittsweise Berechnung von Einspritzverdampfern . . . . .	233
4.5.4.1	Vergleich von Rechenergebnissen mit Meßwerten an Versuchsverdampfern . . . . .	237
4.5.4.2	Leistungstabelle Verdampfer-Typenreihe, Berechnung der Fläche bei gegebener Verdampfertemperatur . . . . .	238
4.5.4.3	Beispiele für abschnittsweise Berechnung von Einspritzverdampfern . . . . .	239
4.5.5	Einige Angaben über die Berechnung des kältemittelseitigen Druckabfalls von Verdampfern . . . . .	241
<b>5</b>	<b>Wärmeübertragung bei Kondensation und Bemessung von Verflüssigern (P. Paikert)</b> . . . . .	<b>242</b>
5.1	Theorie der Kondensation . . . . .	242
5.1.1	Kondensationsformen . . . . .	242
5.1.1.1	Filmkondensation . . . . .	243
5.1.2	Kondensation reiner gesättigter Dämpfe in Rohren, Spalten und zylindrischen Kanälen . . . . .	244
5.1.2.1	Ermittlung der Reynolds-Zahl der Kondensation . . . . .	244
5.1.2.2	Berechnung örtlicher und mittlerer Wärmeübergangskoeffizienten für Filmkondensation . . . . .	245
5.1.3	Kondensation reiner gesättigter Dämpfe auf der Außenseite horizontaler Rohre oder Rohrbündel . . . . .	260
5.1.3.1	Schwerkraftkondensation . . . . .	261
5.1.3.2	Schubkraftkondensation . . . . .	263
5.1.4	Kondensation an horizontalen Rippenrohren . . . . .	263
5.1.4.1	Schwerkraftkondensation . . . . .	264
5.1.4.2	Einfluß der Oberflächenspannung bei Schwerkraftkondensation . . . . .	266
5.1.4.3	Schubkraftkondensation . . . . .	266
5.1.5	Druckverlust bei Kondensation um Rohre und Rohrbündel . . . . .	267
5.2	Berechnung und Bemessung von Verflüssigern . . . . .	268
5.2.1	Wassergekühlte Verflüssiger . . . . .	271

5.2.1.1	Doppelrohrverflüssiger . . . . .	271
5.2.1.2	Röhrenkesselverflüssiger . . . . .	272
5.2.2	Luftgekühlte Verflüssiger . . . . .	275
5.2.2.1	Typische Bauformen zwangsbelüfteter Ventilatorverflüssiger . . . . .	275
5.2.2.2	Rippenrohrsysteme für luftgekühlte Verflüssiger . . . . .	276
5.2.2.3	Wärmetechnische Dimensionierung . . . . .	277
5.2.2.4	Energiebedarf der Kühlluftventilatoren . . . . .	280
5.2.3	Ausführungsbeispiele . . . . .	280
5.2.3.1	Dimensionierung eines wassergekühlten Verflüssigers . . . . .	280
5.2.3.2	Dimensionierung eines luftgekühlten Verflüssigers . . . . .	284
<b>6</b>	<b>Bereifung (S. Haaf) . . . . .</b>	<b>287</b>
6.1	Die Vorgänge bei der Bereifung . . . . .	288
6.1.1	Reifstruktur, Transportmechanismen . . . . .	288
6.1.2	Zeitlicher Verlauf der Reifschichtbildung . . . . .	289
6.2	Rechnerische Behandlung von Bereifungsvorgängen . . . . .	290
6.2.1	Reifdickenwachstum . . . . .	291
6.2.2	Strömungswiderstand bereifender Oberflächen . . . . .	294
6.2.3	Reifmassenstrom . . . . .	296
6.2.4	Wärmestrom . . . . .	298
6.2.5	Wärmeleitfähigkeit von Reifschichten und Reifoberflächentemperatur . . . . .	301
6.2.6	Zahlenbeispiele . . . . .	304
<b>7</b>	<b>Plattenwärmeaustauscher (H. Lotz) . . . . .</b>	<b>308</b>
7.1	Allgemeines . . . . .	308
7.2	Apparate zur Wärmeübertragung an Luft oder Gas . . . . .	310
7.2.1	Apparate zur Kühlung . . . . .	310
7.2.2	Apparate zur Erwärmung, Kühlschranks- und Gefriergeräteverflüssiger . . . . .	316
7.2.3	Wärmeaustauschblöcke aus Platten . . . . .	318
7.2.4	Konstruktion, Fertigung, Eigenschaften und Anwendung von Kühlschranks- und Gefriergeräteverdampfern . . . . .	320
7.2.5	Konstruktion, Fertigung, Eigenschaften und Anwendung von Kühlschranks- und Gefriergeräteverflüssigern und von Wärmeaustauschblöcken aus Platten . . . . .	322
7.3	Apparate zur Wärmeübertragung bei Phasenübergang gasförmig/flüssig . . . . .	323
7.4	Apparate zur Wärmeübertragung an Flüssigkeiten . . . . .	324
7.4.1	Flüssigkeitskühler . . . . .	324
7.4.2	Apparate zur Flüssigkeitserwärmung . . . . .	327
7.4.3	Konstruktion, Fertigung, Eigenschaften und Anwendung von Apparaten zur Flüssigkeitskühlung . . . . .	328
7.4.4	Konstruktion, Fertigung, Eigenschaften und Anwendung von Apparaten zur Flüssigkeitserwärmung . . . . .	330
7.5	Apparate zur Wärmeübertragung bei Phasenübergang fest/flüssig . . . . .	332
7.5.1	Apparate zum Gefrieren von Flüssigkeiten . . . . .	332
7.5.2	Konstruktion, Fertigung, Eigenschaften und Anwendung von Apparaten zum Gefrieren von Flüssigkeiten . . . . .	333
<b>8</b>	<b>Rohrbündelwärmeaustauscher (B. Slipčević) . . . . .</b>	<b>335</b>
8.1	Einteilung nach Fluiden . . . . .	335
8.1.1	Wärmeaustauscher ohne Änderung des Aggregatzustands . . . . .	335

8.1.2	Wärmeaustauscher mit Änderung des Aggregatzustands bei nur einem Fluid . . . . .	335
8.1.3	Wärmeaustauscher mit Änderung des Aggregatzustands der beiden Fluide . . . . .	337
8.2	Einteilung nach Bauarten . . . . .	337
8.2.1	Rohrbündelwärmeaustauscher mit zwei festen Rohrböden . . . . .	337
8.2.2	Rohrbündelwärmeaustauscher mit Kompensatoren . . . . .	338
8.2.3	Rohrbündelwärmeaustauscher mit Mantelstoffbüchse . . . . .	338
8.2.4	Rohrbündelwärmeaustauscher mit schwimmendem Kopf . . . . .	338
8.2.5	Rohrbündelwärmeaustauscher mit Haarnadelrohren . . . . .	338
9	<b>Bauelemente und deren Gestaltung (A. Schuster; B. Slipčević)</b> . . .	341
9.1	Bauelemente von Rohrbündelwärmeaustauschern . . . . .	342
9.1.1	Mantelrohr . . . . .	342
9.1.2	Innenrohre . . . . .	342
9.1.3	Einbauten im Mantelraum . . . . .	346
9.1.4	Hauben . . . . .	350
9.1.5	Rohrböden . . . . .	351
9.1.6	Rohrspiegel . . . . .	352
9.1.7	Verbindung Rohr/Rohrboden . . . . .	356
9.1.8	Sonstige Bauelemente . . . . .	359
9.2	Festigkeitsberechnung . . . . .	359
9.2.1	Allgemeines . . . . .	359
9.2.2	Bauvorschriften und Regelwerke . . . . .	363
9.2.3	Mantelrohr . . . . .	364
9.2.4	Gewölbte Böden . . . . .	369
9.2.5	Ausschnitte an Behältern und Böden . . . . .	372
9.2.6	Rohrböden . . . . .	379
9.2.7	Rohrspiegel . . . . .	381
9.2.8	Flanschverbindungen . . . . .	384
9.2.9	Schrauben . . . . .	387
9.2.10	Dichtungen . . . . .	392
10	<b>Verschmutzung (H. Schnell)</b> . . . . .	394
10.1	Einführung . . . . .	394
10.2	Verschmutzungsursachen . . . . .	397
10.2.1	Verschmutzung durch Sedimentation . . . . .	398
10.2.2	Verschmutzung durch Kristallisation . . . . .	398
10.2.3	Verschmutzung durch chemische Reaktion . . . . .	400
10.2.4	Verschmutzung durch Korrosion . . . . .	401
10.2.5	Biologische Verschmutzung . . . . .	402
10.3	Verschmutzungsmodelle . . . . .	403
10.3.1	Verschmutzung-Zeit-Funktion . . . . .	403
10.3.2	Analytisches Verschmutzungsmodell . . . . .	404
10.4	Konstruktionsempfehlungen . . . . .	407
10.5	Reinigungsmethoden . . . . .	408
11	<b>Meßmethoden zur Wärmeübertragung und Leistungsabnahme (A. Schütz)</b> . . . . .	411
11.1	Zusammenstellung von Normen und Richtlinien für Abnahme- und Leistungsversuche . . . . .	411
11.1.1	Deutsche Normen und Richtlinien . . . . .	412

11.1.1.1	Betriebsfertige Anlagen . . . . .	412
11.1.1.2	Anschlußfertige Seriengeräte . . . . .	413
11.1.1.3	Apparate des inneren und äußeren Kreislaufs . . . . .	414
11.1.2	Einschlägige Normen und Richtlinien des Auslands . . . . .	415
11.1.2.1	Amerikanische Standards der ASHRAE . . . . .	415
11.1.2.2	Britische Standards . . . . .	415
11.1.2.3	Französische Normen der AFNOR . . . . .	416
11.2	Meßgeräte . . . . .	416
11.2.1	Übersicht über gebräuchliche Meßgeräte und deren Einsatzgebiete . . . . .	416
11.2.2	Spezielle Meßwertgeber und -anordnungen . . . . .	416
11.3	Meßmethoden . . . . .	420
11.3.1	Lokale Messungen . . . . .	420
11.3.2	Globale Messungen . . . . .	424
11.4	Auswerten von Messungen . . . . .	428
11.4.1	Meßgenauigkeit . . . . .	428
11.4.2	Auswertmethoden . . . . .	431
11.4.3.	Umrechnung auf Sollbedingungen . . . . .	433
<b>12</b>	<b>Wärmeübertragung in Luftkühlern (S.Haaf)</b> . . . . .	<b>435</b>
12.1	Wärmeübergang und Druckabfall auf der Luftseite . . . . .	436
12.1.1	Luftkühlung ohne Entfeuchtung . . . . .	437
12.1.1.1	Glatte Rohre . . . . .	437
12.1.1.2	Rippen- und Lamellenrohre . . . . .	440
12.1.2	Luftkühlung mit Tauwasserbildung . . . . .	452
12.1.2.1	Zusammenhang zwischen Wärme- und Stoffübergang bei Kühlung feuchter Luft . . . . .	452
12.1.2.2	Berechnung des Zustandsverlaufs feuchter Luft bei Kühlung mit Rippen- und Lamellenrohrkühlern . . . . .	456
12.1.2.3	Einfluß der Tauwasserbildung auf Wärmeübergang und Druckabfall bei Rippen- und Lamellenrohrkühlern . . . . .	460
12.1.3	Luftkühlung mit Reifbildung . . . . .	463
12.2	Wärmeübergang und Druckabfall auf der Kühlmittelseite . . . . .	468
12.2.1	Verdampfende Kältemittel . . . . .	468
12.2.1.1	Einspritzbetrieb . . . . .	468
12.2.1.2	Umpump- und Schwerkraftbetrieb . . . . .	472
12.2.2	Flüssige Kälteträger . . . . .	474
12.3	Wärmeübertragungsleistung . . . . .	474
12.3.1	Luftkühler ohne Feuchtigkeitsausscheidung, Kältemitteleinspritzbetrieb . . . . .	476
12.3.2	Luftkühler mit Feuchtigkeitsausscheidung, Kältemitteleinspritzbetrieb . . . . .	481
12.3.3	Luftkühler mit Feuchtigkeitsausscheidung, Kühlung durch flüssigen Kälteträger . . . . .	484
12.3.4	Luftkühler mit Bereifung . . . . .	488
<b>13</b>	<b>Rückkühlwerke und Verdunstungsverflüssiger (H.Schnell)</b> . . . . .	<b>492</b>
13.1	Definitionen . . . . .	493
13.2	Kühlverfahren . . . . .	493
13.3	Theorie der Rückkühlung . . . . .	498
13.4	Auslegungsbedingungen . . . . .	502
13.4.1	Prozeßdaten . . . . .	502
13.4.1.1	Wärmestrom bzw. Kühlleistung $Q$ . . . . .	502

13.4.1.2	Wassermassenstrom $\dot{M}_w$	503
13.4.1.3	Warmwassertemperatur $t_{w,1}$	503
13.4.1.4	Kaltwassertemperatur $t_{w,2}$	503
13.4.1.5	Mittlere Wassertemperatur $t_{w,m}$	504
13.4.1.6	Kühlzonenbreite $z$	504
13.4.1.7	Kühlgrenzabstand $a$	505
13.4.2	Klimadaten	505
13.4.2.1	Feuchtlufttemperatur $t_f$	505
13.4.2.2	Umgebungsluftzustand $t_L$ und $\varphi$	505
13.4.2.3	Ablufttemperatur $t_{f,2}$	508
13.4.3	Betriebsdaten	508
13.4.3.1	Beregnete Fläche $S_r$	508
13.4.3.2	Luftvolumenstrom $\dot{V}_L$	508
13.4.3.3	Druckverlust $\Delta p_L$	508
13.4.3.4	Ventilatorleistungsbedarf $P_m$	509
13.5	Bauformen	509
13.6	Funktioneller Aufbau	515
13.6.1	Bautechnischer Teil	515
13.6.1.1	Becken	515
13.6.1.2	Mantel	516
13.6.1.3	Unterstützungs- und Hilfskonstruktion	517
13.6.2	Kühltechnischer Teil	517
13.6.2.1	Kühleinbau oder Verflüssiger	517
13.6.2.2	Wasserverteilung	520
13.6.2.3	Tropfenabscheider	521
13.6.3	Maschineller Teil	522
13.6.3.1	Ventilator	522
13.6.3.2	Antrieb	523
13.6.3.3	Elektromotor	523
13.7	Kühlwasserkreislauf	523
13.8	Betriebsbedingungen	530
13.8.1	Energieeinsparung	530
13.8.2	Umweltschutz	530
13.8.3	Betriebserschwerisse	532
13.8.4	Wartung	533
13.8.5	Alternativen zur Rückkühlung	534
13.9	Technische Abnahme	534
<b>14</b>	<b>Ventilatoren (H. Schnell)</b>	<b>536</b>
14.1	Einleitung	537
14.2	Grundlagen	537
14.3	Bauformen und konstruktiver Aufbau	540
14.3.1	Axialventilatoren	540
14.3.2	Radialventilatoren	543
14.4	Auslegung und Betrieb	546
14.4.1	Technische Daten	547
14.4.2	Kennzahlen	548
14.4.2.1	Lieferzahl	548
14.4.2.2	Druckzahl	549
14.4.2.3	Betriebs- oder Drosselzahl	549
14.4.2.4	Leistungszahl	549
14.4.2.5	Durchmesserzahl	549

14.4.2.6	Laufzahl . . . . .	550
14.4.3	Beispiele . . . . .	550
14.4.4	Betriebsverhalten . . . . .	552
14.4.5	Gewährleistung und technische Abnahme . . . . .	553
14.5	Ventilatoranlagen . . . . .	554
14.5.1	Volumenstrom . . . . .	554
14.5.2	Nutzdruck . . . . .	554
<b>15</b>	<b>Rührkessel (H.G.Hirschberg) . . . . .</b>	<b>555</b>
15.1	Kesselbauarten und Rührerformen . . . . .	557
15.2	Wärmeübergang und Rührleistung . . . . .	559
15.3	Tangentialrührer . . . . .	564
15.3.1	Wärmeübergang . . . . .	564
15.3.2	Rührleistung . . . . .	566
15.4	Radial- und Axialrührer . . . . .	569
15.4.1	Wärmeübergang . . . . .	569
15.4.2	Rührleistung . . . . .	574
15.5	Sonderformen von Kesseln und Rührern . . . . .	576
15.5.1	Kessel mit innenliegenden Rohren . . . . .	576
15.5.2	Sonderformen von Rührern . . . . .	581
15.5.3	Begaste Rührbehälter . . . . .	583
15.6	Wärmeübergang an der Mantelaußenseite . . . . .	584
15.6.1	Voll- und Halbrohrschlangen . . . . .	584
15.6.2	Doppelmäntel . . . . .	584
15.6.3	Wärmeleitwiderstände der Kesselwand . . . . .	587
15.7	Temperiersysteme . . . . .	588
<b>16</b>	<b>Wärmeträger (H.G. Hirschberg) . . . . .</b>	<b>590</b>
16.1	Allgemeines . . . . .	590
16.1.1	Definition . . . . .	590
16.1.2	Auswahl von Stoffen . . . . .	591
16.1.2.1	Wärme- und strömungstechnische Eigenschaften . . . . .	591
16.1.2.2	Dampfdruck . . . . .	592
16.1.2.3	Sicherheitstechnische Daten . . . . .	593
16.1.2.4	Physiologische Eigenschaften . . . . .	594
16.1.2.5	Chemische und thermische Eigenschaften . . . . .	594
16.1.3	Interpolationsgleichungen . . . . .	595
16.1.4	Anmerkungen zu den Stoffwerttabellen . . . . .	598
16.2	Gase . . . . .	599
16.2.1	Stickstoff . . . . .	600
16.2.2	Luft . . . . .	601
16.2.3	Helium . . . . .	606
16.2.4	Argon . . . . .	610
16.3	Anorganische Stoffe . . . . .	610
16.3.1	Wasser H <sub>2</sub> O . . . . .	610
16.3.2	Calciumchloridsole . . . . .	616
16.3.3	Ammoniak . . . . .	617
16.3.3.1	Ammoniak, wasserfrei . . . . .	617
16.3.3.2	Ammoniak-Wasser-Gemische . . . . .	620
16.3.4	Kohlendioxid . . . . .	624
16.3.5	Schwefeldioxid . . . . .	628
16.3.6	Schwefelhexafluorid . . . . .	630

16.4	Aliphatische Kohlenwasserstoffe . . . . .	632
16.4.1	Methan . . . . .	634
16.4.2	Ethan . . . . .	637
16.4.3	Ethen, Ethylen . . . . .	639
16.4.4	Propan . . . . .	641
16.4.5	Propen, Propylen . . . . .	643
16.4.6	Butane . . . . .	645
16.4.6.1	Normalbutan . . . . .	645
16.4.6.2	Isobutan . . . . .	648
16.4.7	Pentan . . . . .	648
16.5	Ringkohlenwasserstoffe . . . . .	651
16.5.1	Methylcyclohexan . . . . .	651
16.5.2	Toluol, Methylbenzol, Toluol . . . . .	654
16.5.3	Xylole . . . . .	654
16.6	Alkohole . . . . .	660
16.6.1	Methanol . . . . .	661
16.6.1.1	Methanol, wasserfrei . . . . .	661
16.6.1.2	Methanol-Wasser-Gemische . . . . .	662
16.6.2	Ethanol, Ethylalkohol . . . . .	667
16.6.2.1	Ethanol, wasserfrei . . . . .	667
16.6.2.2	Ethanol-Wasser-Gemische . . . . .	669
16.6.3	Ethylenglykol . . . . .	671
16.7	Halogenkohlenwasserstoffe . . . . .	675
16.7.1	Fluortrichlormethan, R 11 . . . . .	675
16.7.2	Dichlormethan, Methylenchlorid, R 30 . . . . .	677
16.8	Kommerzielle Wärmeträger . . . . .	679
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>		<b>691</b>
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>		<b>717</b>