

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

Benutzte Formelzeichen (s. DIN 8941)	XXI
Einleitung (B. Slipčević)	1
Systematik der Wärmeübertragungsvorgänge	1
Ähnlichkeit, Kennzahlen	3
1 Strömungen ohne Änderung des Aggregatzustandes in kältetechnischen Apparaten (B. Slipčević; Abschn. 1.5 E. Hofmann)	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 Zylinderrohrschnüren, Rohrspiralen, gebogenen Rohren und Krümmern (E. Hofmann)	29
1.5.1 Druckabfall in Zylinderrohrschnüren, 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 Rauhigkeit	33
1.5.6 Druckabfall von Krümmern	33
1.5.7 Rechenbeispiele	40
1.6 Strömung in Umlenkhäuben	42
1.7 Strömung an berieselten Flächen	43
2 Wärmeübertragung durch Leitung und Konvektion (B. Slipčević)	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 querangestromte 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
3	Wärmeübergang bei Verdampfung in natürlicher Strömung und Bemessung von überfluteten Verdampfern (B. Slipčević)	76
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
4	Druckabfall und Wärmeübergang der Zweiphasenströmung in Verdampferrohren (E. Hofmann)	153
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
5	Wärmeübertragung bei Kondensation und Bemessung von Verflüssigern (P. Paikert)	242
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
6	Bereifung (S. Haaf)	287
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
7	Plattenwärmeaustauscher (H. Lotz)	308
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, Kühlschrank- und Gefriergeräteverflüssiger	316
7.2.3	Wärmeaustauschblöcke aus Platten	318
7.2.4	Konstruktion, Fertigung, Eigenschaften und Anwendung von Kühl- schrank- und Gefriergeräteverdampfern	320
7.2.5	Konstruktion, Fertigung, Eigenschaften und Anwendung von Kühl- schrank- und Gefriergeräteverflüssigern und von Wärmeaustauschblö- ken aus Platten	322
7.3	Apparate zur Wärmeübertragung bei Phasenübergang gasförmig/flüs- sig	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 Appara- ten zur Flüssigkeitskühlung	328
7.4.4	Konstruktion, Fertigung, Eigenschaften und Anwendung von Appara- ten 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 Appara- ten zum Gefrieren von Flüssigkeiten	333
8	Rohrbündelwärmeaustauscher (B. Slipčević)	335
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	Bauelemente und deren Gestaltung (A. Schuster; B. Slipčević)	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	Verschmutzung (H. Schnell)	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	Meßmethoden zur Wärmeübertragung und Leistungsabnahme (A. Schütz)	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
12	Wärmeübertragung in Luftkühlern (S. Haaf)	435
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
13	Rückkühlwerke und Verdunstungsverflüssiger (H. Schnell)	492
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 φ	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 Δp_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	Betriebserschwernisse	532
13.8.4	Wartung	533
13.8.5	Alternativen zur Rückkühlung	534
13.9	Technische Abnahme	534
14	Ventilatoren (H. Schnell)	536
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
15	Rührkessel (H. G. Hirschberg)	555
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	Doppelmantel	584
15.6.3	Wärmeleitwiderstände der Kesselwand	587
15.7	Temperiersysteme	588
16	Wärmeträger (H. G. Hirschberg)	590
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_2O	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	Pantan	648
16.5	Ringkohlenwasserstoffe	651
16.5.1	Methylcyclohexan	651
16.5.2	Toluol, Methylbenzol, Toluuen	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
	Literaturverzeichnis	691
	Sachverzeichnis	717