

## Inhaltsverzeichnis

1	Verdampfer .....	1
1.1	Grundlegendes .....	1
1.2	Energetische Vorgänge im Verdampfer .....	2
2	Verdampferarten .....	4
3	Verdampfer für Flüssigkeitskühlung – „trockene Verdampfung“	5
3.1	Bündelrohrverdampfer .....	5
3.2	Koaxialverdampfer .....	9
3.3	Plattenverdampfer .....	9
3.3.1	Aufbau und Funktion des Plattenverdampfers .....	11
3.3.1.1	Plattenverdampfer mit gedichteten Platten .....	12
3.3.1.2	Plattenverdampfer mit geschweißten Modulen .....	12
3.3.1.3	Dichtungsbefestigung .....	13
3.3.1.4	Plattenstrukturen .....	14
3.3.2	Druckprüfung .....	15
3.3.3	Führung der Stoffe im Plattenverdampfer .....	15
3.3.3.1	Parallelschaltung .....	16
3.3.3.2	Reihenschaltung .....	16
3.3.4	Werkstoff .....	17
3.3.5	Plattenverdampfer in Kälteanlagen .....	17
3.3.6	Plattenwärmeübertrager als Ölkühler .....	19
3.4	Glattrohrverdampfer .....	20
3.5	Rührwerk .....	21
3.6	Eisspeicher .....	21
4	Verdampfer für Flüssigkeitskühlung – „überflutete Verdampfung“ .....	22
4.1	Rohrbündelverdampfer .....	23
4.2	Steilrohrverdampfer .....	24
4.3	Berieselungsverdampfer .....	25
5	Luftkühler .....	27
5.1	Luftkühler aus Glattrohr .....	27
5.2	Plattenverdampfer .....	28
5.3	Luftkühler mit Lamellen .....	28
5.4	Verdampfungstemperatur unter und Lufttemperatur über 0 °C .....	30
5.5	Verdampfungs- und Lufttemperatur unter 0 °C .....	31
5.6	Verdampfungs- und Lufttemperatur über 0 °C .....	31
5.7	Leitwände bei Wandanordnung .....	32
5.8	Zusammenfassung .....	33
6	Plattenkühler mit Eutektikum .....	34
7	Anordnung der Luftkühler für „stille Kühlung“ .....	36
8	Zwangsbelüftete Luftkühler .....	42
9	Grundlegendes zu Hochleistungskühlern .....	48

10	Hochleistungskühler mit Kältemittel betrieben . . . . .	48
11	Anordnung von Hochleistungskühlern . . . . .	51
12	Befestigung von Luftkühlern . . . . .	54
13	Hochleistungskühler zur Luftkühlung . . . . .	56
13.1	Trocken arbeitende Luftkühler . . . . .	56
13.2	Nass arbeitende Luftkühler . . . . .	57
14	Wärmestrom der Lüfter . . . . .	60
15	Abtauen von Luftkühlern . . . . .	62
15.1	Abtauen durch Nachlauf des Lüfters . . . . .	63
15.2	Abtauen durch elektrische Heizung . . . . .	64
15.2.1	Grundlegendes . . . . .	64
15.2.2	Einschalten des Abtauvorganges . . . . .	65
15.2.2.1	Temperaturdifferenz . . . . .	65
15.2.2.2	Vorbestimmte Abtauzeit . . . . .	65
15.2.2.3	Mikroprozessor . . . . .	66
15.2.3	Abtau-Begrenzungsverfahren . . . . .	69
15.2.3.1	Thermische Begrenzung . . . . .	69
15.2.3.2	Zeitbegrenzung . . . . .	69
15.2.4	Abtauen und Pump-down . . . . .	69
15.3	Abtauen durch Heiß- und Kaltdampf . . . . .	70
15.3.1	Abtauen durch Heißdampfbypassregler . . . . .	73
15.3.2	Abtauen durch Umkehrventile . . . . .	74
15.4	Abtauen durch Thermobank . . . . .	77
15.5	Abtauen durch warmes Wasser . . . . .	78
16	Mittlere logarithmische Temperaturdifferenz . . . . .	80
16.1	Berücksichtigung örtlich veränderlicher Temperaturen der Stoffströme im Kühler . . . . .	80
16.2	Einfluss der Strömungsrichtung der Stoffe auf die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz . . . . .	80
16.2.1	Gleichstrom – beide Stoffe strömen gleich . . . . .	80
16.2.2	Gegenstrom – beide Stoffe strömen entgegengesetzt . . . . .	81
16.2.3	Kreuzstrom – beide Stoffe strömen über Kreuz . . . . .	81
16.3	Kühler und die mittlere Temperaturdifferenz . . . . .	85
16.4	Definition der logarithmischen Temperaturdifferenz . . . . .	87
17	Einfache Kühlerberechnungen . . . . .	89
17.1	Grundlegendes . . . . .	89
17.2	Betrachtungen zum Abtauen . . . . .	89
17.3	Die Kühlerleistung . . . . .	90
17.3.1	Die Kühlerfläche . . . . .	91
17.3.2	Der Wärmedurchgangskoeffizient von Kühlern . . . . .	92
18	Kühlraumtemperatur und relative Feuchte . . . . .	107
19	Praktische Bestimmung von Luftkühlern . . . . .	112
20	Bestimmung von Flüssigkeitskühlern . . . . .	118

20.1	Grundlegendes . . . . .	118
20.2	Auswahl der Kühler . . . . .	120
20.3	Parallel- oder Reihenbetrieb von Flüssigkeitskühlern . . . . .	123
20.3.1	Parallelbetrieb mit gleichem Kühlmittelvolumenstrom . . . . .	123
20.3.2	Parallelbetrieb mit variablem Kühlmittelvolumenstrom . . . . .	124
20.3.3	Reihenschaltung mit gleichem Kühlmittelvolumenstrom . . . . .	124
20.3.4	Reihenschaltung mit variablem Kühlmittelvolumenstrom. . . . .	124
20.4	Bestimmung von Koaxialkühlern . . . . .	125
20.5	Bestimmung von Bündelrohrverdampfern <i>APL Apparatebau GmbH</i> . . . . .	129
21	Abstimmen der Kälteleistung auf Verdampfer und Kältemittelverdichter . . . . .	130
21.1	Umrechnung der Kühlerleistung – Arbeitsüberhitzung . . . . .	136
21.2	Betriebspunkt der Kälteanlage in der Praxis. . . . .	138
21.3	Angebotsleistung einer Kälteanlage . . . . .	140
22	Einfache Entfeuchtung im Kühlraum . . . . .	141
23	Einfache Befeuchtung im Kühlraum . . . . .	143
23.1	Befeuchtungseinrichtungen . . . . .	143
23.2	Luftbefeuchter . . . . .	144
23.2.1	Adiabate Befeuchtung . . . . .	144
23.2.2	Zerstäubung durch Düsen . . . . .	146
23.2.3	Befeuchtung durch Ultraschall. . . . .	148
24	Verflüssiger . . . . .	150
24.1	Grundlegendes zum Verflüssiger . . . . .	150
24.2	Energetische Vorgänge im Verflüssiger . . . . .	151
24.3	Wärmestrom in den Verflüssigungszonen. . . . .	153
24.4	Bauarten von Verflüssigern . . . . .	154
24.5	Luftgekühlte Verflüssiger . . . . .	155
24.5.1	Statisch belüftete Verflüssiger . . . . .	155
24.5.2	Lamellenverflüssiger mit Axiallüfter . . . . .	157
24.5.3	Aufstellen von Verflüssigern . . . . .	162
24.5.4	Lamellenverflüssiger mit Radiallüfter . . . . .	162
24.5.5	Verschmutzung . . . . .	164
24.5.6	Ausbreitung von Schall . . . . .	165
25	Wassergekühlte Verflüssiger . . . . .	166
25.1	Gegenstrom-Doppelrohrverflüssiger . . . . .	167
25.2	Gegenstrom-Bündelrohrverflüssiger . . . . .	169
25.3	Koaxialverflüssiger . . . . .	171
25.4	Röhrenkesselverflüssiger . . . . .	175
25.5	Verdunstungsverflüssiger mit Radiallüfter . . . . .	176
25.5.1	Arbeitsweise des Verdunstungsverflüssigers. . . . .	177
25.5.2	Anwendung des Verdunstungsverflüssigers . . . . .	177
25.5.2.1	Ein- und Ausschalten der Lüfter . . . . .	178
25.5.2.2	Modulierende Klappen. . . . .	178
25.5.2.3	Umluftbetrieb . . . . .	178
25.5.2.4	Trockener Betrieb . . . . .	178
25.5.3	Schaltungen von Verdunstungsverflüssigern . . . . .	179
25.6	Hybride Trockenkühler (Verflüssiger) . . . . .	181
25.6.1	Allgemeines . . . . .	181

25.6.2	Aufbau . . . . .	181
25.6.3	Funktion . . . . .	183
25.6.4	Hybrider Trockenkühler als Verflüssiger . . . . .	184
25.6.5	Auswahl eines hybriden Trockenkühlers . . . . .	187
25.6.5.1	Grundlagen zur Auswahl eines geeigneten Kühlsystems . . . . .	188
25.6.5.2	Grundlagen für die Berechnung der Jahreskosten . . . . .	189
25.6.5.3	Bestimmen des Betriebsverhaltens der Kälteanlage . . . . .	190
25.6.5.4	Jahreskosten des hybriden Trockenkühlers HTK 1.8/3.9 . . . . .	192
25.6.5.5	Jahreskosten des hybriden Trockenkühlers HTK 2.4/3.75 . . . . .	193
25.6.5.6	Vergleich der Jahreskosten für die beiden Trockenkühler . . . . .	194
25.6.5.7	Variable Kälteleistung durch die Temperatur der Luft . . . . .	195
25.6.5.8	Verkürzte Abschreibungszeit . . . . .	195
26	Druckregelung von Verflüssigern . . . . .	196
26.1	Regelung luftgekühlter Verflüssiger . . . . .	198
26.1.1	Kältemittel seitige Regelung . . . . .	198
26.1.2	Luft seitige Regelung . . . . .	201
26.1.2.1	Druckgesteuerte Lüfter . . . . .	201
26.1.2.2	Drehfrequenzgeregelte Lüfter . . . . .	203
26.2	Regelung von wassergekühlten Verflüssigern (Frischwasserbetrieb) . . . . .	204
26.3	Regelung bei Kühl turmbetrieb . . . . .	205
26.4	Regelung für hybride Trockenkühler . . . . .	206
27	Flüssigkeitssammler . . . . .	208
27.1	Anordnung von Flüssigkeitssamm lern in Kälteanlagen mit luftgekühlten Verflüssigern . . . . .	210
27.2	Anordnung der Verflüssigungsleitung für luftgekühlte Verflüssiger . . . . .	212
27.3	Probleme bei Flüssigkeitssamm lern in Kälteanlagen mit wassergekühltem Verflüssiger . . . . .	212
27.4	Anordnung der Verflüssigungsleitung für wassergekühlte Verflüssiger . . . . .	213
27.5	Minimale Füllmasse im Flüssigkeitssammler . . . . .	214
28	Kältemittelfüllmasse für Kälteanlagen . . . . .	215
28.1	Füllungsgrad . . . . .	216
28.2	Füllungsgrad in Rohrleitungen . . . . .	217
28.3	Füllungsgrad im Verflüssiger . . . . .	217
28.4	Füllungsgrad im Unterkühler . . . . .	217
28.5	Füllungsgrad im Verdampfer . . . . .	218
28.5.1	Überflutete Verdampfer . . . . .	218
28.5.2	Trockenexpansionsverdampfer . . . . .	219
29	Verflüssigerleistung und mittlere Temperaturdifferenz . . . . .	222
30	Einfache Berechnung von Verflüssigern . . . . .	225
30.1	Verflüssigerleistung . . . . .	225
30.2	Wärmedurchgangskoeffizient . . . . .	225
31	Praktische Bestimmung von Verflüssigern . . . . .	231
31.1	Luftgekühlte Verflüssiger . . . . .	231
31.2	Aufstellung luftgekühlter Verflüssiger . . . . .	233
31.3	Wassergekühlte Verflüssiger . . . . .	234

31.3.1	Verschmutzungsfaktor . . . . .	234
31.3.2	Wasserwege im Verflüssiger . . . . .	235
31.3.3	Wasservolumenstrom . . . . .	237
31.3.4	Frischwasserbetrieb . . . . .	238
31.3.5	Kühlturmbetrieb . . . . .	239
31.3.6	Zusatzwasservolumenstrom im Kühlturmbetrieb . . . . .	239
31.3.7	Überlegungen zur Bestimmung wassergekühlter Verflüssiger . . . . .	240
31.4	Praktische Verflüssigungstemperatur . . . . .	242
32	Bestimmung von Verflüssigern nach dem Herstellerkatalog . . . . .	243
32.1	Luftgekühlte Verflüssiger . . . . .	243
32.2	Wassergekühlte Verflüssiger . . . . .	246
32.3	Koaxialverflüssiger . . . . .	248
32.4	Verdunstungsverflüssiger . . . . .	249
32.4.1	Frischwasservolumenstrom . . . . .	249
32.4.2	Änderung der Drehfrequenz . . . . .	249
32.4.3	Verdunstungsbetrieb ohne Wasservolumenstrom . . . . .	250
32.4.4	Berechnung . . . . .	250
33	Kühlturm . . . . .	253
33.1	Bauarten . . . . .	256
33.2	Aufstellung . . . . .	256
33.3	Leistungsangaben . . . . .	256
33.4	Leistung der Lüfter . . . . .	257
33.5	Wasseraufbereitung . . . . .	257
33.6	Ablaufregelung . . . . .	258
33.7	Winterbetrieb . . . . .	258
33.8	Bemessung nach Gohl GmbH . . . . .	258
34	Hubkolbenverdichter . . . . .	261
34.1	Wechselstrom-Tauchkolbenverdichter . . . . .	262
34.2	Anordnung der Zylinder . . . . .	265
34.3	Antriebe für offene Kältemittelverdichter . . . . .	265
34.3.1	Direktkupplung . . . . .	265
34.3.2	Flanschglocke . . . . .	266
34.3.3	Keilriemenantrieb . . . . .	267
34.4	Verdichtergehäuse . . . . .	268
34.5	Kolben, Kolbenringe und Kolbenstange . . . . .	269
34.6	Zylinderkopf . . . . .	272
34.7	Ventilplatte und Arbeitsventile . . . . .	273
34.8	Wellenabdichtung . . . . .	276
34.9	Kurbelwelle . . . . .	277
34.10	Kurbelschleife . . . . .	280
34.11	Schmierölhaushalt . . . . .	282
34.12	Dichtungen . . . . .	286
34.13	Zylinderkühlung . . . . .	286
34.14	Anlaufentlastung . . . . .	286
34.15	Gleichstromausführung . . . . .	287
34.16	Heizung im Kurbelwellengehäuse . . . . .	288
34.17	Geregelte Kälteleistung . . . . .	289
34.17.1	Aussetzbetrieb . . . . .	290
34.17.2	Saugdrosselung . . . . .	290
34.17.3	Gedrosseltes Überströmen . . . . .	291
34.17.4	Saugstromregelung . . . . .	292

34.17.5	Rückströmen (Zylinderentlastung) . . . . .	295
34.18	Hermetische Kolbenverdichter . . . . .	298
34.18.1	Kapsel . . . . .	298
34.18.2	Halb hermetische Kolbenverdichter . . . . .	300
34.18.3	Halb hermetische Kolbenverdichter <i>GEA Bock GmbH</i> . . . . .	301
34.18.4	Halb hermetische Kolbenverdichter <i>HKT Huber-Kälte-Technik GmbH</i> . . . . .	304
35	Geräuschkämper . . . . .	306
36	Rotationskolbenverdichter . . . . .	309
36.1	Rollkolbenverdichter . . . . .	309
36.2	Umlaufverdichter . . . . .	312
36.3	Spiralkältemittelverdichter (Scroll) . . . . .	313
36.3.1	Grundsätzlicher Aufbau und Funktion . . . . .	314
36.3.1.1	Ansaugen – erste Umlaufbahn . . . . .	317
36.3.1.2	Verdichten – zweite Umlaufbahn . . . . .	318
36.3.1.3	Ausschieben – dritte Umlaufbahn . . . . .	319
36.3.2	Arbeitsweise . . . . .	324
36.3.3	Kälteleistung . . . . .	325
37	Schraubenverdichter . . . . .	330
37.1	Grundlagen . . . . .	331
37.1.1	Verdichtung . . . . .	332
37.1.2	Verstellung des variablen inneren Volumenverhältnisses . . . . .	334
37.1.3	Regelung der Kälteleistung . . . . .	334
37.1.4	Schmierölsystem . . . . .	336
37.1.5	Schmierölkreislauf . . . . .	336
37.1.6	Kühlung des Schmierölvolumenstromes . . . . .	337
37.1.6.1	Installationshinweise für Kühler von Schmieröl . . . . .	339
37.1.6.2	Wassergekühlte Kühler für Schmieröl . . . . .	339
37.1.6.3	Luftgekühlte Kühler für Schmieröl . . . . .	339
37.1.6.4	Kühlung des Schmieröles durch direkte Einspritzung von Kältemittel . . . . .	340
37.1.6.5	Kühlung des Schmieröles durch Thermosifon . . . . .	341
37.1.7	Economizer ECO . . . . .	342
37.2	Schraubenverdichter in offener Bauart . . . . .	342
37.2.1	Gehäuse . . . . .	342
37.2.2	Läufer . . . . .	342
37.2.3	Lager . . . . .	343
37.2.4	Gleitringdichtung . . . . .	343
37.2.5	Geregelte Kälteleistung, Vi-Verstell- und Anzeigeeinrichtung . . . . .	343
37.3	Offener Schraubenverdichter mit Standard-Flanschmotor . . . . .	346
37.4	Halbhermetischer Schraubenverdichter . . . . .	346
37.4.1	Schmierölkreislauf . . . . .	347
37.4.2	Leistungsverhalten . . . . .	349
37.4.3	Liefergrad . . . . .	349
37.4.4	Kältezahl . . . . .	350
38	Turboverdichter . . . . .	352
38.1	Betriebseigenschaften . . . . .	352
38.2	Auswahl von Kältemitteln . . . . .	352

---

38.3	Stufenzahl . . . . .	353
38.4	Berechnung der Stufenzahl . . . . .	354
38.5	Geregelte Kälteleistung . . . . .	355
38.6	Funktion des Turboverdichters – vereinfacht . . . . .	356
38.7	Turboverdichter Turbocor . . . . .	357
38.7.1	Verdichterentwicklung . . . . .	358
38.7.2	Einsatz- und Anwendungsbereich / Abmessungen und Gewicht . . . . .	359
38.7.3	Aufbau und Funktion . . . . .	360
38.7.4	Verdichtermagnetlager . . . . .	361
38.7.5	Verdichtermotor und geregelte Kälteleistung . . . . .	363
38.7.6	Zweistufige Zentrifugalverdichtung . . . . .	367
38.7.7	Auswahl des Kältemittels . . . . .	368
38.7.8	Leistungs- und Steuerelektronik . . . . .	368
38.7.9	Energieeffizienz . . . . .	371
38.7.10	Vorteile des Verdichters – Zusammenfassung . . . . .	373
38.8	Vergleich der Kältemittelverdichter . . . . .	373
39	Antriebsmotor für Kältemittelverdichter . . . . .	374
39.1	Motoranlauf . . . . .	375
39.2	Motorleistung und Verdichterkälteleistung . . . . .	377
39.3	Motorschutz . . . . .	378
40	Verflüssigungssätze . . . . .	379
41	Kälteleistung von Kältemittelverdichtern (Tauchkolbenbauart) . . . . .	382
41.1	Drehfrequenz . . . . .	382
41.2	Verdampfungstemperatur . . . . .	383
41.3	Verflüssigungstemperatur . . . . .	384
41.4	Kältemittel und Verdichterleistung . . . . .	386
41.5	Einsatzgrenzen für Kältemittelverdichter . . . . .	387
42	Verdichternutzkälteleistung . . . . .	390
42.1	Verdichterkälteleistung und Wärmestrom der Saugleitung . . . . .	390
42.2	Leistungsangabe nach EN 12900 . . . . .	390
42.3	Parameter für die Kälteleistung . . . . .	391
42.4	Wärmestrom in der Saugleitung . . . . .	392
42.5	Nutzkälteleistung (Luftkühler) . . . . .	392
42.6	Berechnung der Verdichternutzkälteleistung . . . . .	394
43	Schmieröl in Kältemittelverdichtern . . . . .	396
43.1	Allgemeines . . . . .	396
43.1.1	Löslichkeit von Kältemittel in Schmieröl . . . . .	398
43.1.2	Viskosität von Schmieröl im Verdampfer . . . . .	399
43.2	Rückführung von Schmieröl . . . . .	399
43.2.1	Direktverdampfung . . . . .	399
43.2.2	Überflutete Kühler . . . . .	400
43.2.3	Flüssigkeitsschichten . . . . .	400
43.3	Schmieröl im Kurbelwellengehäuse . . . . .	402
43.4	Kältemittelmasse und Schmieröl . . . . .	404
43.5	Maßnahmen . . . . .	404
43.5.1	Heizung im Kurbelwellengehäuse . . . . .	404

43.5.2	Abpumporschaltung . . . . .	404
44	Kältemittelverdichter im Verbundbetrieb . . . . .	405
44.1	Allgemeines . . . . .	405
44.1.1	Kälteleistung . . . . .	406
44.1.2	Geregelte Kälteleistung . . . . .	406
44.1.3	Not- bzw. Reservebetrieb . . . . .	406
44.2	Schmieröl- und Dampfausgleich, kombiniert . . . . .	406
44.2.1	Dampfausgleich . . . . .	407
44.2.2	Kontrolle des Ölstands . . . . .	407
44.2.3	Saugsammelleitung . . . . .	408
44.2.4	Drucksammelleitung . . . . .	408
44.3	Abpumporschaltung . . . . .	409
44.4	Ölabscheider . . . . .	409
44.4.1	Arbeitsweise . . . . .	410
44.4.2	Montage . . . . .	410
44.4.3	Auswahl . . . . .	411
44.4.4	Auswahl für Verbundkälteanlagen . . . . .	412
44.5	Regelsystem für Schmieröl . . . . .	416
44.5.1	Verlegen der Rückleitung zwischen Ölsammler und Regler . . . . .	419
44.5.2	Verbundkälteanlagen mit Kapseln . . . . .	421
44.6	Flüssigkeitsabscheider . . . . .	424
44.6.1	Allgemeines . . . . .	424
44.6.2	Anwendung . . . . .	425
44.6.3	Kältemittelaufnahme . . . . .	426
44.6.4	Minimale Verdampfungstemperatur . . . . .	426
44.6.5	Maximale Leistung . . . . .	427
44.6.6	Flüssigkeitsabscheider im Verbundbetrieb . . . . .	427
44.6.7	Auswahl . . . . .	428
44.6.8	Montagetipps . . . . .	430
45	Druckdifferenzen in Kälteanlagen . . . . .	430
45.1	Bemessung und Installation . . . . .	431
45.2	Luftgekühlte Wärmeübertrager . . . . .	432
45.3	Druckdifferenzen einer einstufig arbeitenden Kälteanlage im $lg\ p, h$ -Diagramm . . . . .	432
45.4	Druckdifferenz und Angebot . . . . .	434
46	Aqua Turbo Wasserkühlmaschine . . . . .	435
46.1	Grundsätzliches . . . . .	435
46.2	Bauweise . . . . .	435
46.3	Eigenschaften-Kälteleistung . . . . .	436
46.4	Geregelte Kälteleistung . . . . .	437
46.5	Kältezahl der Aqua Turbo Wasserkühlmaschine . . . . .	437
46.6	Arbeitsweise . . . . .	438
46.7	Hydraulische Einbindung der Wasserkühlmaschine in den Kalt- und Kühlwasserkreislauf . . . . .	439
47	Binäreis – ein zweiphasiger Kälteträger . . . . .	440
47.1	Grundlegendes . . . . .	440
47.2	Binäreis . . . . .	440
47.3	Erzeugung von Binäreis . . . . .	440
47.3.1	FLO-ICE-Verfahren . . . . .	441
47.3.2	Vakuum Eis-Verfahren . . . . .	442
47.4	Einsatzgebiete für Binäreisanlagen . . . . .	444

---

47.5	Vor- und Nachteile von Binäreis .....	445
47.5.1	Vorteile .....	445
47.5.2	Nachteile von Binäreis .....	447
47.6	Anwendungen .....	448
47.6.1	Grundschaltungen .....	448
47.6.2	Eis- und Pufferspeicher .....	449
47.6.2.1	Eisspeicher .....	449
47.6.2.2	Pufferspeicher .....	449
47.6.3	Binäreis in der Klimatechnik .....	450
47.6.4	Supermarkt .....	451
47.6.5	Lebensmittelindustrie .....	451
48	Steuern und Regeln in der Kälteanlage .....	452
48.1	Steuerung .....	454
48.2	Steuerung einer elektrischen Abtauung in einem Luftkühler (Zeitplansteuerung) .....	455
48.3	Regelung .....	456
48.3.1	Regelgröße .....	458
48.3.2	Stellgröße .....	458
48.3.3	Störgröße .....	458
48.3.4	Führungsgröße .....	458
48.3.5	Regelstrecke .....	458
48.3.6	Regler .....	459
48.3.7	Stellglied .....	459
48.3.8	Regelkreis .....	459
48.4	Regeleinrichtungen .....	460
48.4.1	Unstetig wirkende Regeleinrichtungen .....	460
48.4.1.1	Regelverhalten einer unstetigen Zweipunktregelstrecke in einem Kühlraum bei einem Einstellverhältnis 0,5 .....	461
48.4.1.2	Regelung im einfachen Kältemittelkreislauf .....	462
48.4.2	Stetig wirkende Regeleinrichtungen .....	463
48.4.2.1	Proportionalregler .....	463
48.4.2.2	Integralregler .....	465
48.4.2.3	Proportional-Integral-Regler .....	467
48.4.2.4	Regeleinrichtungen .....	468
48.5	Regelstrecke .....	469
48.5.1	Regelstrecke mit Verzögerung erster Ordnung .....	469
48.5.2	Regelstrecke mit Verzögerung zweiter Ordnung .....	470
48.5.3	Regelstrecke ohne Ausgleich .....	471
48.6	Regelkreis .....	471
48.6.1	Verknüpfter Regelkreis .....	472
48.6.1.1	Folgeschaltung von Störgrößen .....	473
48.6.1.2	Kaskadenregelung mit dem elektronischen Expansionsventil ..	474
48.7	Regelung von Kältemittelverdichtern .....	476
48.7.1	Kolbenverdichter .....	476
48.7.1.1	Ein-Aus-Regelung .....	476
48.7.1.2	Regelung der Drehfrequenz .....	477
48.7.1.3	Aufteilung auf Kältemittelverdichter .....	477
48.7.1.4	Regelbare Kälteleistung bei Kolbenverdichtern .....	477
48.7.2	Umlaufkältemittelverdichter .....	481
48.7.2.1	Zellenverdichter .....	481
48.7.2.2	Schraubenverdichter .....	481
48.7.3	Turboverdichter .....	482
48.7.3.1	Saugdrosselregelung .....	482

48.7.3.2	Vordrallregelung . . . . .	482
48.7.3.3	Diffusorregelung . . . . .	482
48.7.3.4	Bypassregelung . . . . .	482
48.8	Regelung von Verflüssigern . . . . .	482
48.8.1	Verflüssigungsdruckregelung . . . . .	483
48.8.2	Regelung von wassergekühlten Verflüssigern . . . . .	483
48.8.2.1	Druckgeregelte Kühlwasserregler . . . . .	483
48.8.2.2	Temperaturgeregelter Kühlwasserregler . . . . .	484
48.8.3	Regelung von luftgekühlten Verflüssigern . . . . .	485
48.8.3.1	Regelung des Luftvolumenstromes durch Lüfter . . . . .	485
48.8.3.2	Regelung des Luftvolumenstromes durch Klappen . . . . .	486
48.8.3.3	Kältemittel seitige Regelung . . . . .	486
48.9	Regelung von Verdampfern . . . . .	487
48.9.1	Regelung der Flüssigkeitszufuhr . . . . .	488
48.9.2	Regelung überfluteter Verdampfer . . . . .	488
48.9.2.1	Niederdruckschwimmerregler – mechanisch arbeitend . . . . .	488
48.9.2.2	Hochdruckschwimmerregler – mechanisch arbeitend . . . . .	489
48.9.2.3	Elektronischer Schwimmerregler . . . . .	490
48.9.2.4	Elektronische Regelung für überfluteten Betrieb . . . . .	491
48.9.2.5	Pilot-ND-Schwimmerregelung mit Expansionsventil . . . . .	495
48.9.2.6	Pilot-HD-Schwimmerregelung mit Expansionsventil . . . . .	496
48.10	Hochdruckschwimmerregler . . . . .	496
48.10.1	Aufbau . . . . .	497
48.10.2	Bemessen des Schwimmerreglers . . . . .	499
48.11	Regelung für trockenen Betrieb . . . . .	501
48.11.1	Automatisches Expansionsventil . . . . .	501
48.11.2	Thermostatisches Expansionsventil . . . . .	501
48.11.3	Elektronisches Expansionsventil . . . . .	502
48.11.4	Regelung der Verdampfungstemperatur . . . . .	503
48.11.5	Druckregler . . . . .	503
48.12	Regelung der Kühlguttemperatur . . . . .	505
48.12.1	Unstetige Regelung . . . . .	505
48.12.2	Stetige Regelung . . . . .	507
48.12.3	Stellglieder . . . . .	508
49	Grundlagen der Strömung . . . . .	509
49.1	Grundlagen für die Berechnung . . . . .	510
49.1.1	$k_v$ -Wert . . . . .	512
49.1.2	Inkompressibler Volumenstrom . . . . .	514
49.1.3	Kompressibler überkritischer Volumenstrom . . . . .	514
49.1.4	Kompressibler unterkritischer Volumenstrom . . . . .	514
49.2	Berechnung der Kälteleistung mit dem $k_v$ -Wert . . . . .	516
50	Magnetventile . . . . .	521
50.1	Grundsätzlicher Aufbau . . . . .	521
50.2	Funktion . . . . .	521
50.3	Direkte Steuerung . . . . .	523
50.4	Servosteuerung . . . . .	524
50.4.1	Servosteuerung mit Membrane . . . . .	524
50.4.2	Servosteuerung mit Kolben . . . . .	525
50.5	Funktionsstörungen . . . . .	528
50.5.1	Magnetventil öffnet trotz erregter Spule nicht . . . . .	528
50.5.2	Magnetventil schließt trotz unterbrochenem Stromkreis nicht . . . . .	528
50.5.3	Magnetisierbare Verunreinigungen im Kältemittel . . . . .	529

50.5.4	Verunreinigung hängend eingebauter Magnetventile . . . . .	529
51	Stellantriebe . . . . .	529
51.1	Elektrischer Stellantrieb . . . . .	529
51.2	Elektrisches/hydraulisches Schnellschließsystem . . . . .	532
51.3	Pneumatischer Stellantrieb. . . . .	534
51.4	Motorgesteuerte Regelventile <i>Danfoss GmbH</i> . . . . .	534
51.4.1	Grundsätzliches . . . . .	534
51.4.2	Funktion . . . . .	535
51.4.3	Berechnung . . . . .	536
51.5	Kühlstellenregelung <i>Danfoss GmbH</i> . . . . .	536
51.5.1	Vorteile (Auszug) der Kühlstellenregelung . . . . .	536
51.5.2	Arbeitsweise . . . . .	537
51.5.3	Funktionen . . . . .	537
51.5.4	Anwendungen. . . . .	537
51.5.5	Kühlbetrieb . . . . .	538
51.5.6	Temperaturregelung. . . . .	538
51.5.7	Temperaturüberwachung. . . . .	538
51.5.8	Abtauung . . . . .	539
51.5.9	Heißdampfabtauung . . . . .	539
51.5.10	Regelung von zwei Kältemittelverdichtern. . . . .	539
51.5.11	Lüfter . . . . .	540
51.5.12	Beleuchtungsfunktion . . . . .	540
52	Handgeregeltes Expansionsventil . . . . .	541
52.1	Aufgaben und Funktion . . . . .	541
52.2	Arbeitsweise in der Kälteanlage . . . . .	542
53	Automatisches Expansionsventil . . . . .	544
53.1	Grundsätzlicher Aufbau . . . . .	545
53.2	Funktion . . . . .	546
53.3	Arbeitsweise in der Kälteanlage . . . . .	548
53.4	Automatisches Expansionsventil mit Bypass . . . . .	549
54	Thermostatisches Expansionsventil . . . . .	549
54.1	Grundsätzlicher Aufbau . . . . .	550
54.2	Funktion . . . . .	551
54.2.1	Arbeitsüberhitzung. . . . .	553
54.2.2	Expansionsventil mit innerem Druckausgleich . . . . .	562
54.2.3	Expansionsventil mit äußerem Druckausgleich. . . . .	566
54.2.4	Expansionsventil mit Druckbegrenzung . . . . .	569
54.2.5	Anbringen von Fühlern. . . . .	570
54.3	Arbeitsweise in der Kälteanlage . . . . .	573
54.4	Ventilleistung . . . . .	575
54.5	Nacheinspritzventil . . . . .	580
54.6	Flüssigkeitsverteiler. . . . .	582
54.6.1	Staudruckverteiler. . . . .	582
54.6.2	Venturiverteiler . . . . .	584
54.6.3	Verteiler in Kälteanlagen . . . . .	586
54.6.4	Auswahl des Flüssigkeitsverteilers . . . . .	587
54.6.5	Auswahl eines Flüssigkeitsverteilers für Heißdampf. . . . .	589
55	Elektronisches Expansionsventil . . . . .	590
55.1	Einspritzung durch Pulsbreitenmodulation. . . . .	590
55.1.1	Grundsätzlicher Aufbau . . . . .	590

55.1.2	Regelgerät . . . . .	591
55.1.3	Regelsystem in Kälteanlagen . . . . .	593
55.1.4	Ventilleistung . . . . .	594
55.1.5	Leistungsbestimmung des elektronischen Expansionsventils AKV . . . . .	595
55.2	Einspritzung durch stetige Regelung . . . . .	598
55.2.1	Funktion . . . . .	598
55.2.2	Regelkreis Kühler-Expansionsventil . . . . .	599
55.2.3	Anforderungen an das praktische Regelverhalten . . . . .	600
55.2.3.1	Elektronisches Expansionsventil bei schnellen Änderungen der Kälteleistung . . . . .	600
55.2.3.2	Elektronisches Expansionsventil bei geringer Kühlerleistung . . . . .	602
55.2.3.3	Elektronische Expansionsventile zur Anpassung an andere Betriebsbedingungen . . . . .	603
55.2.3.4	Elektronisches Expansionsventil zur Erzielung kleiner Temperaturdifferenzen im Kühler . . . . .	603
55.2.4	Grundsätzlicher Aufbau des Expansionsventils ETS mit Schrittmotor . . . . .	604
55.2.5	Elektrisch betriebene Expansionsventile in Kälteanlagen . . . . .	605
55.2.6	Leistungen des Expansionsventils ETS . . . . .	606
56	Druckregelung . . . . .	607
56.1	Verdampfungsdruckregler . . . . .	607
56.1.1	Grundsätzlicher Aufbau . . . . .	607
56.1.2	Funktion des direkt gesteuerten Reglers . . . . .	608
56.1.3	Verdampfungsdruckregler in Kälteanlagen . . . . .	611
56.1.4	Leistungsbestimmung eines Verdampfungsdruckreglers . . . . .	612
56.2	Saugdruckregler . . . . .	614
56.2.1	Grundsätzlicher Aufbau . . . . .	615
56.2.2	Funktion des direkt gesteuerten Reglers . . . . .	615
56.2.3	Saugdruckregler in Kälteanlagen . . . . .	618
56.2.4	Leistungsbestimmung eines Saugdruckreglers . . . . .	618
56.3	Leistungsregler . . . . .	620
56.3.1	Grundsätzlicher Aufbau . . . . .	620
56.3.2	Funktion des Leistungsreglers . . . . .	621
56.3.3	Betriebspunkt der Reglerleistung . . . . .	626
56.3.4	Leistungsregler in Kälteanlagen . . . . .	627
56.3.5	Bestimmen der isentropen Verdichtungsendtemperatur . . . . .	629
56.3.6	Leistungsregler im Regelkreis . . . . .	629
56.3.7	Bestimmen des Leistungsreglers . . . . .	631
56.4	Verflüssigungsdruckregler . . . . .	633
56.4.1	Grundsätzlicher Aufbau . . . . .	633
56.4.2	Funktion des direkt gesteuerten Reglers . . . . .	633
56.4.3	Verflüssigungsdruckregler in Kälteanlagen . . . . .	635
56.4.4	Bestimmung des Verflüssigungsdruckreglers . . . . .	636
56.5	Druckgesteuerter Kühlwasserregler . . . . .	637
56.5.1	Grundsätzlicher Aufbau . . . . .	637
56.5.2	Funktion des druckgesteuerten Kühlwasserreglers . . . . .	637
56.5.3	Druckgesteuerte Kühlwasserregler in Kälteanlagen . . . . .	638
56.5.4	Bestimmen eines druckgesteuerten Kühlwasserreglers . . . . .	641
56.6	Elektrisch betätigtes Regler für die Verdampfungsleistung (Siemens AG) . . . . .	643
56.6.1	Elektrisch betätigtes Regelventile für Heißdampfbypass . . . . .	643
56.6.2	Grundsätzlicher Aufbau . . . . .	644

---

56.6.3	Montagetipps . . . . .	645
56.6.4	Regler MVL661 für Regelung der Verdampfungsleistung . . . . .	646
56.6.5	Regelung der Verdampfungsleistung durch Heißdampfbypass und Verteilventil. . . . .	647
56.6.6	Regelung für Wärmenutzung . . . . .	648
56.6.7	Regelventil für Regelung des Saugdruckes. . . . .	648
56.6.8	Bestimmen eines Regelventils für Heißdampfbypass . . . . .	650
57	Temperaturregelung. . . . .	653
57.1	Saugseitige Temperaturregelung. . . . .	653
57.1.1	Pilotgesteuerter Temperaturregler . . . . .	656
57.1.2	Servogesteuerte Temperaturregler . . . . .	656
57.1.3	Das Hauptventil. . . . .	657
57.1.4	Die thermostatische Pilotregelung . . . . .	659
57.2	Elektronische Temperaturregelung . . . . .	661
57.2.1	Grundsätzlicher Aufbau . . . . .	662
57.2.1.1	Verdampfungsdruckventil KVS. . . . .	662
57.2.1.2	Regelgerät EKC 368. . . . .	662
57.2.2	Funktion des elektronischen Regelsystems . . . . .	663
57.2.3	Elektronisches Regelsystem in Kälteanlagen. . . . .	664
57.3	Thermostate . . . . .	665
57.3.1	Grundsätzlicher Aufbau . . . . .	665
57.3.2	Funktion. . . . .	666
57.3.2.1	Fühler mit Dampffüllung . . . . .	666
57.3.2.2	Fühler mit Adsorptionsfüllung. . . . .	668
57.3.2.3	Fühler mit Massenfüllung. . . . .	669
57.3.2.4	Die thermische Differenz . . . . .	670
57.3.3	Thermostate in Kälteanlagen. . . . .	670
57.3.4	Thermostate mit neutraler Zone . . . . .	672
57.3.4.1	Grundsätzlicher Aufbau . . . . .	672
57.3.4.2	Funktion. . . . .	672
57.3.4.3	Thermostate mit neutraler Zone in Kälteanlagen . . . . .	673
58	Absperrventile. . . . .	674
58.1	Handbetätigtes Absperrventil . . . . .	674
58.1.1	Absperrventil mit Membran. . . . .	674
58.1.2	Grundsätzlicher Aufbau . . . . .	674
58.1.3	Kugelabsperrventil . . . . .	675
58.1.4	Handbetätigtes Absperrventil in Kälteanlagen . . . . .	676
58.2	Rückschlagventile . . . . .	679
58.2.1	Grundsätzlicher Aufbau . . . . .	679
58.2.2	Rückschlagventile in Kälteanlagen . . . . .	680
59	Sichern von Kälteanlagen. . . . .	685
59.1	Sicherheitsventile . . . . .	685
59.1.1	Grundsätzlicher Aufbau . . . . .	686
59.1.2	Bemessen von Sicherheits- und Überströmventilen . . . . .	688
59.1.2.1	Sicherheitsventile zum Schutz von Behältern . . . . .	688
59.1.2.2	Sicherheitsventile zum Schutz von Kältemittelverdichtern . . . . .	689
59.1.2.3	Sicherheitsventile in Kälteanlagen. . . . .	689
59.2	Sicherheitsdruckwächter. . . . .	691
59.2.1	Grundsätzlicher Aufbau . . . . .	691
59.2.2	Funktion. . . . .	691
59.2.3	Sicherheitsdruckwächter in Kälteanlagen. . . . .	693

59.3	Patronen-Druckschalter .....	694
59.4	Niederdruckschalter .....	695
59.4.1	Grundsätzlicher Aufbau .....	695
59.4.2	Niederdruckschalter in Kälteanlagen .....	695
59.5	Druckdifferenzschalter .....	696
59.5.1	Grundsätzlicher Aufbau .....	697
59.5.2	Druckdifferenzschalter in Kälteanlagen .....	697
60	Zubehör – Kontrollieren und Überwachen .....	700
60.1	Filtertrockner .....	700
60.1.1	Grundsätzlicher Aufbau .....	700
60.1.2	Funktion .....	700
60.1.3	Filtertrockner in Kälteanlagen .....	701
60.2	Schauglas .....	703
60.2.1	Grundsätzlicher Aufbau .....	703
60.2.2	Funktion .....	703
60.2.3	Schauglas in Kälteanlagen .....	704
60.3	Überhitzer (Wärmeübertrager) .....	705
60.3.1	Grundsätzlicher Aufbau .....	705
60.3.2	Funktion .....	706
60.3.3	Überhitzer in Kälteanlagen .....	709
61	Kältemittel führende Rohrleitungen .....	712
61.1	Grundlagen .....	712
61.2	Planung .....	713
61.2.1	Druckdifferenz .....	714
61.2.2	Rückführung von Schmieröl .....	715
61.2.3	Schutz des Kältemittelverdichters .....	716
61.3	Berechnung Kältemittel führender Rohrleitungen .....	716
61.4	Rohrmaterial .....	718
61.5	Druckdifferenz .....	718
61.6	Geschwindigkeit .....	719
61.7	Kältemittelvolumenstrom .....	720
61.8	Berechnung der Saugleitung .....	721
61.9	Doppelsteigleitung .....	724
61.10	Berechnung der Druckleitung .....	728
61.11	Berechnung der Flüssigkeitsleitung .....	731
61.12	Berechnung der Verflüssigerleitung .....	735
61.13	Anordnung der Rohrleitungen .....	736
61.14	Schlussbemerkung .....	744
61.15	Tabellen .....	745
61.16	Berechnungsvordrucke .....	766
61.17	Berechnungen .....	769
62	Lösungen zu den Übungen .....	773
62.1	Kapitel 17 .....	773
62.2	Kapitel 30 .....	776
62.3	Kapitel 56 .....	778
62.4	Kapitel 61 .....	784
	Bildnachweis .....	793
	Literaturverzeichnis .....	794
	Stichwortregister .....	796