Inhaltsverzeichnis

1 Historie und aktuelle Tendenzen in der Indirekten Kühlung 7
1.1 Historische Entwicklung 7
1.1.1 Entwicklungsschritte Indirekter Kühlsysteme 8
1.1.2 Indirekte Kühlung in raumlufttechnischen Anlagen 11
1.1.3 Kälteträgersysteme in der Lebensmittelkühlung 15
1.1.4 Optimierung der Funktionalität und Regelungstechnik 26
1.1.5 Gestaltungslösungen am Beginn der Entwicklung von Kälteträgersystemen 34
1.1.6 Entwicklung der Systeme mit zweiphasigen Kälteträgern (Binäreis- und FLO-ICE) 35
1.2 Aktuelle Tendenzen bei Indirekten Kühlsystemen 39
1.2.1 Ursache und Wirkung der Verordnungen im Geltungsbereich der Europäischen Union 41
1.2.2 Waterloop-Systeme 45

2 Strömungs- und thermodynamische Grundlagen indirekter Kühlsysteme . . . 49
2.1 Technische Strömungslehre 49
2.1.1.1 Der Energieerhaltungssatz für stationäre inkompressible Fadenströmungen ohne äußere Energiezufuhr 54
2.1.1.2 Der Energieerhaltungssatz für stationäre inkompressible Fadenströmungen, mit vernachlässigbarer Reibung und ohne äußere Energiezufuhr 58
2.1.1.3 Der Energieerhaltungssatz für instationäre reibungsfreie inkompressible Strömungen ohne äußere Energiezufuhr 61
2.2 Die Druckverluste 65
2.2.1 Allgemeines 65
2.2.2 Druckverluste durch die reibungsbehaftete Strömung 67
2.2.3 Druckverluste durch Impulsströme 70
2.2.4 Der Kv-Wert als Besonderheit bei Druckverlusten durch Impulsströme . . 78
2.2.5 Druckverluste in Anlagensystemen 79
2.2.5.1 Behandlung der Einzelwiderstände 81
2.3 Strömungstechnische Behandlung von hydraulischen Anlagensystemen 92
2.3.1 Kennlinienverhalten von Rohrnetzen 92
2.3.2 Fluidförderung durch Kreiselpumpen 99
2.3.2.1 Kennzahlen 100
2.3.2.2 Pumpenkennlinien 103
2.3.3 Zusammenwirken von Pumpen- und Anlagesystemen 106
2.3.4 Zusammenwirken von Anlagen- und Pumpenkennlinien 117
2.4 Auswirkungen der Kälte- und Wärmeträger auf hydraulische Systeme 120
2.5 Ausgewählte Aspekte aus der Thermodynamik von Kühlmittelkreisläufen 124
2.5.1 Wärmeübertragungsprozesse 124
2.5.2 Grundlagen der Wärmeübertragung 125
2.5.3 Wärmedurchgang als Kombination aus Wärmeleitung und Konvektion . 139

2.5.4 Gesetzmäßigkeiten der Feuchten Luft (Psychometrie) 144
2.5.4.1 Abkühlung von feuchter Luft 148
2.5.5 Verdunstungskühlung 157
2.5.5.1 Luftabkühlung im Verdunstungskühlturm 161
2.5.6 Grundlagen der Wärmeübertrager (Luftkühler, Platten- und Rohrbündel) 168

3 Verfahren der Kälteerzeugung 175
3.1 Flüssigkeitskühler mit Kompressionskälteanlagen 175
3.1.1 Flüssigkeitskühler mit einstufigen Kompressionskälteanlagen (Wirkungsweise) 177
3.1.2 Arbeitsweise der Kompressionskältemaschine 179
3.1.3 Der Carnot-Prozess 181
3.1.4 Theoretischer Vergleichsprozess einer verlustlosen Kältemaschine 182
3.1.5 Beschreibung des Arbeitsprozesses 184
3.1.6 Darstellung des Arbeitsprozesses im log p,h-Diagramm 185
3.1.7 Definitionen und Berechnungsformeln des praktischen, einstufigen Prozesses 187
3.1.8 Maßnahmen zur Verbesserung der Leistungszahl 200
3.1.9 Kältekreisläufe in Flüssigkeitskühlern mit zwei- bzw. mehrstufiger Verdichtung 213
3.1.10 Die Verdichtungsendtemperatur 216
3.1.11 Zweistufige Verdichtung mit Zwischenkühlung und einstufiger Entspannung 216
3.1.12 Zweistufige Verdichtung mit Zwischenkühlung, zusätzlicher Flüssigkeitsunterkühlung und einstufiger Entspannung 220
3.1.13 Zweistufige Verdichtung mit Zwischenkühlung, zusätzlicher Flüssigkeitsunterkühlung und zweistufiger Entspannung 228
3.1.14 Varianten für Anlagen mit Kältemittelpumpen 230
3.1.15 Verfahren bei Anwendung von CO_2-Technologien 232
3.2 Flüssigkeitskühler mit thermischen Verdichtern (sorptive Verfahren) 235
3.2.1 Grundlagen 235
3.2.2 Das Energiekonzept 235
3.2.3 Funktionsweise des Sorptions- und Desorptionsprozesses 236
3.2.4 Anforderungen an Arbeitsstoffe für Sorptionskälteanlagen 239
3.2.5 Gemische für Absorptionsanlagen 240
3.2.6 Absorptions-Kältemaschine (AKM) 243
3.3 Verfahren zur Herstellung von Eisbrei 251
3.3.1 Eisbrei-Anwendungen 252
3.3.2 Fließverhalten von Eisbrei 254
3.3.3 Kälteanlage 255
3.3.4 Stoffdaten und Eigenschaften von Eisbrei 255

4 Hauptbauteile der Kälteerzeugung und -anwendung 257
4.1 Verdampfer als Wärmesenke der Kälteanlage 257
4.1.1 Drosselorgane 268
4.1.2 Festlegung der Verdampfungstemperatur 282
4.1.3 Auslegung der Trockenexpansionsverdampfer zur Flüssigkeitsabkühlung 283
4.1.4 Wärmeübertrager zur Flüssigkeitsabkühlung mit überfluteter Arbeitsweise 291
4.1.5 Auslegung der Verdampfer für die überflutete Arbeitsweise 295
4.1.6 Niveauregler (Schwimmerventile) 297
4.2 Verflüssiger als Wärmesenke der Kälteanlage 300
4.2.1 Bauarten 302
4.2.2 Wärmeübergang bei Verflüssigung 305
4.2.3 Rückkühlwerke 307
4.3 Verdichter 316
4.4 Systeme der Eisbrei-Technologien 319
4.4.1 Kältezentrale 319
4.4.2 Der Eisbreigenerator 320
4.4.2.1 Kratzverdampfer 320
4.4.2.2 Schleuderstab-Eisbreigenerator 321
4.4.2.3 Vakuumeis 321
4.4.3 Eisbreispeicher 322
4.4.4 Kälteverteilsystem 323
4.4.5 Rohrleitungen 324
4.4.6 Pumpen 324
4.4.7 Wärmeübergang und Wärmeübertrager 325
4.5 Latent-Wärmespeicher mit Phasentrennung 326
4.6 Wärmeübertrager in Kälteanwendungen 335
4.6.1 Raumlufttechnik und Luftgekoppelte Anwendungen 336
4.6.2 Gestaltung der Temperaturverhältnisse in Luftkühlern 339
4.6.3 Wärmeübertrager an der Schnittstelle Kälteträger und Produktkühlung . . 350

5 Hydraulische Systeme 353
5.1 Methoden zur Auftrennung in Primär- und Sekundärkreisläufe 353
5.1.1 Die hydraulische Weiche 355
5.1.2 Die Pufferspeicher und hydraulischen Weichen in Kombination 362
5.1.2.1 Bemessung der Behältergröße für Pufferspeicher mit hydraulischer Weichenfunktion 370
5.1.3 Wärmeübertrager zur Systemtrennung 374
5.2 Gestaltung der Primärkreisläufe 374
5.2.1 Schaltungen der Rückkühlkreisläufe 377
5.2.2 Einbindung der Elemente der freien Kühlung 378
5.2.3 Waterloop-Systeme 380
5.2.3.1 Schaltung zur Regelung der Kühlmittel-Vorlauftemperatur 381
5.2.3.2 Leistungsregelung an den Verflüssigern 383

5.3 Hydraulik an Latent-Wärmespeichern 384
5.4 Schaltungsvarianten an den Verbrauchern 390
5.5 Anordnung der Umwälzpumpen in hydraulischen Schaltungen 399
5.6 Kälteträger als Betriebsstoffe 403
5.6.1 Arten der flüssigen Kälteträger 405
5.6.1.1 Wasser 405
5.6.1.2 Solen (Salz-/Wassergemische) 406
5.6.1.3 Wässrige Alkohollösungen 407
5.6.1.4 Organische Kohlenwasserstoffverbindungen 408
5.6.1.5 Perfluorierte Kohlenstoffverbindungen 408
5.6.1.6 Silikonöle 408
5.6.1.7 Mineralöle (zum Beispiel Dieselöle) 408
5.6.1.8 Biologische Öle (zum Beispiel D-Limonene) 409
5.6.2 Unterschiede bei der Energieübertragung durch Kälteträger 409
5.6.3 Grundlagen der Chemie und Biologie für Wasser als Kälteträger 410
5.6.4 Grundlegende Bedingungen bei Solen (Salz-/Wassergemische) 424
5.6.5 Grundzüge wässriger Alkohollösungen 427
5.6.6 Organische Kühlmittel und Emulsionen 428
5.6.7 Richtlinien zur sicheren Handhabung der Kälteträger 431
5.6.8 Inhibitoren 438
5.6.9 Systemgestaltung zur Qualitätssicherung der Kälteträger 439
5.7 Förderpumpen 442
5.7.1 Nassläuferpumpen 443
5.7.2 Kreiselpumpe, Trockenläufer-Inline- oder Blockpumpe 444
5.7.3 Doppel-Inlinepumpen 448
5.7.4 Normpumpen DIN EN 733 448
5.7.5 Leistungsverhalten von Umwälzpumpen 451
5.7.6 Parallel- und Reihenschaltungen von Pumpen 453
5.7.7 Kriterien zur Auswahl von Förderpumpen 456
5.8 Druckhaltung 458
5.8.1 Membran-Druckausdehnungsgefäße in Kälteträgersystemen 458
5.8.1.1 Einbindung in die hydraulischen Kreisläufe 461
5.8.2 Planungshinweise für die Druckabsicherung 461
5.9 Ausblick 463

6 Planungsarbeit bei Kälteträgersystemen 465
6.1 Struktur des Planungsablaufs 465
6.1.1 Ermittlung der Lasten für die Raumlufttechnik 466
6.1.2 Praktische Ermittlung der Kühllast bei Lagerräumen für Lebensmittel . . 469
6.1.3 Lastberechnungen bei Abkühlprozessen von Produkten 480
6.1.4 Der Zusammenhang Last und Leistung 481
6.1.5 Festlegung der notwendigen Kühleroberflächen- und Verdampfungstemperatur 482
6.1.6 Verflüssigungstemperatur des Flüssigkeitskühlsatzes 488
6.1.7 Auswahl des Flüssigkeitskühlsatzes 491

6.2 Gestaltung der Anlagenhydraulik innerhalb der Kälteerzeugung 495
6.3 Planungsarbeit im Bereich der Kälteanwendungen 504
6.3.1 Planung der Kühlstellen und deren Leistungsregelung 505
6.3.2 Gestaltung der Anlagenhydraulik zwischen Erzeugung und Anwendung 517
6.3.3 Druckverlustbilanz und Auswahl der Förderpumpen. 525
6.4 Planungsbeispiel 531
6.4.1 Zusammenstellung der Randbedingungen 532
6.4.2 Die Elemente der Planungsarbeit 533
6.4.3 Ausblick und Fazit des Planungsprozesses 537

7 Diagramme und Tabellen 539
7.1 Einzelwiderstandsbeiwerte. 539
7.2 Arbeitshilfen für die Rohrleitungsplanung und Druckverlustberechnung 554
7.3 Diagramme für die feuchte Luft 558
7.4 log p,h-Diagramme für ausgewählte Kältemittel 561

Literatur 565