Inhalt

Vorwort 5

1 Grundlagen, Kreisprozesse und Kennzahlen 13
1.1 Systemgrenzen und Bezeichnungen 14
1.2 Angabe von technischen Daten für Kälteanlagen 15
1.3 Eingesetzte/umlaufende Fluide in Kälteanlagen 15
1.4 Aufbau und Funktion einer einstufigen Kompressions-Kälteanlage 16
1.5 Kältemittel 19
1.5.1 Kältemitteleinteilung 20
1.5.2 Nomenklatur für Kältemittel 22
1.5.3 Ausgewählte Eigenschaften zu Kältemitteln 23
1.5.4 Kältemittelverwendung 25
1.5.5 Kältemittel mit niedrigem GWP 27
1.5.6 Natürliche Kältemittel 27
1.5.7 Propan 28
1.5.8 Propen 30
1.5.9 Isobutan 31
1.5.10 Kohlendioxid 32
1.5.11 Wasser 33
1.5.12 Ammoniak 34
1.6 Kälteträger 35
1.6.1 Alkohol-Wasser-Gemische 35
1.6.2 Wasser 36
1.6.3 Atmosphärische Luft 37
1.6.4 Kohlendioxid 38
1.7 Kühlmittel 38
1.8 Kältemaschinenöle 38
1.9 Aufbau des p,h-Diagramms 39
1.10 Vergleichsprozesse 41
1.10.1 Idealer Vergleichsprozess 41
1.10.2 Theoretischer Vergleichsprozess 43
1.10.3 Wirklicher Vergleichsprozess 44
1.10.4 Kreisprozess mit Druckverlusten 44
1.10.5 Kreisprozess für CO_2-Kälteanlage im transkritischen Bereich 46
1.10.6 Mehrstufige Kompressions-Kälteanlagen 47
1.11 Energiefluss im Elektromotor und im Kältemittelverdichter 48
1.12 Berechnungsgrundlagen und Kennzahlen 49
1.12.1 Druckverhältnis 49
1.12.2 Treibende Temperaturdifferenz 49
1.12.3 Kälteleistung und Nutzkälteleistung 50
1.12.4 Verdichterleistung 50

1.12.5 Verflüssigerleistung . . . 52
1.12.6 Wirkliche spezifische Kälteleistung . . . 53
1.12.7 Volumetrische Kälteleistung . . . 53
1.12.8 Liefergrad eines Verdichters . . . 54
1.13 Energiestrombilanz für eine Kälteanlage . . . 55
1.14 Sankey-Diagramm . . . 55
1.14.1 Kälteanlage mit Elektromotor . . . 55
1.14.2 Kältemaschine . . . 57
1.15 Energetischer Wirkungsgrad . . . 57
1.16 Leistungszahl . . . 57
1.17 Seasonal Energy Performance Ratio . . . 58
1.18 Literatur . . . 59

2 Prinzipschaltbilder für Kompressions-Kälteanlagen . . . 61
2.1 Aktive Kühlung, passive Kühlung und freie Kühlung . . . 61
2.2 Energiesparschaltung . . . 62
2.3 Temperaturen, Aufstellungen und Schaltungen . . . 63
2.4 Zentrale und dezentrale Kälteanlagen . . . 64
2.5 Verfahrenstechnische Schaltungen . . . 65
2.6 Einstufige Kompressions-Kälteanlage mit indirekter Kühlung . . . 65
2.7 Einstufige Kompressions-Kälteanlage mit direkter Verdampfung . . . 66
2.8 Kombination – direkte Verdampfung und indirekte Kühlung . . . 68
2.9 Mehrstufige Kompressions-Kälteanlagen . . . 68
2.10 Kompressions-Kälteanlagen in Kaskadenschaltung . . . 68
2.11 Heiz-Kühl-Anlage mit Verbrennungsmotor . . . 69
2.12 Kompressions-Kälteanlagen mit Gaskühler . . . 70
2.13 Einkreis- und Zweikreissystem . . . 71
2.14 Literatur . . . 72

3 Kälteanlagenkomponenten . . . 73
3.1 Kältemittelverdichter . . . 73
3.1.1 Übersicht . . . 73
3.1.2 Hubkolbenverdichter . . . 76
3.1.3 Scrollverdichter . . . 77
3.1.4 Schraubenverdichter . . . 81
3.1.5 Turboverdichter . . . 83
3.1.6 Leistungsregelung von Verdichtern . . . 85
3.2 Verflüssiger . . . 86
3.3 Verflüssigerbauarten . . . 88
3.3.1 Plattenwärmeübertrager . . . 89
3.3.2 Rohrbündelwärmeübertrager . . . 90
3.3.3 Verdunstungsverflüssiger . . . 91
3.3.4 Luftgekühlter Verflüssiger . . . 94
3.4 Rückkühlanlagen . . . 95
3.4.1 Trockene Rückkühler . . . 95
3.4.2 Hybride Trockenkühler . . . 96

3.4.3 Verdunstungskühler . . . 96
3.5 Expansionsventile . . . 96
3.5.1 Thermostatisches Expansionsventil . . . 97
3.5.2 Elektronisches Expansionsventil . . . 99
3.5.3 Kapillarrohr . . . 100
3.6 Verdampfer . . . 100
3.6.1 Verdampferbauarten zur Flüssigkeitskühlung . . . 102
3.6.1.1 Plattenverdampfer . . . 102
3.6.1.2 Rohrbündelverdampfer . . . 103
3.6.2 Verdampferbauarten zur Luftkühlung . . . 104
3.6.2.1 Rippenrohrverdampfer . . . 104
3.6.2.2 Lamellenverdampfer . . . 104
3.7 Reif- und Eisansatz . . . 105
3.8 Abtauprozesse bei Kälteanlagen . . . 107
3.8.1 Heißgasabtauung . . . 108
3.8.2 Elektrische Widerstandsheizung . . . 108
3.9 Sicherheitseinrichtungen . . . 108
3.10 Literatur . . . 109

4 Kälteerzeugungsverfahren und Kühlungsarten . . . 111
4.1 Indirekte adiabate Verdunstungskälte . . . 111
4.2 Sorptionsgestützte Klimatisierung . . . 113
4.3 Peltier-Kühlanlagen . . . 114
4.3.1 Funktionsbeschreibung . . . 115
4.3.2 Energietechnik zur Peltier-Kühlanlage . . . 116
4.3.3 Eigenschaften von Peltier-Kühlanlagen . . . 117
4.4 Magnetokalorische Kühlanlagen . . . 118
4.4.1 Magnetismus und Materialien . . . 118
4.4.2 Magnetische Eigenschaften der Elemente . . . 119
4.4.3 Magnetisierung und Entropie . . . 120
4.4.4 Magnetokalorische Materialien . . . 120
4.4.5 Idealisierter Kreisprozess mit magnetokalorischem Material . . . 121
4.4.6 Eigenschaften von magnetokalorischen Kühlanlagen . . . 122
4.4.7 Physikalische Größen Magnetokalorik – Kompression . . . 122
4.5 Thermoakustische Kühlung . . . 123
4.6 Absorptions-Kälteanlage . . . 126
4.6.1 Allgemeines . . . 126
4.6.2 Aufbau und Funktion einer Absorptions-Kälteanlage . . . 126
4.7 Adsorptions-Kälteanlage . . . 129
4.7.1 Adsorbentien . . . 129
4.7.1.1 Zeolithe . . . 130
4.7.1.2 Silicagel . . . 131
4.7.2 Aufbau und Funktion einer Adsorptions-Kälteanlage . . . 131
4.7.3 Eigenschaften von Adsorptions-Kälteanlagen . . . 133
4.8 Literatur . . . 134

5 Energiespeicher ... 137
5.1 Sensible Energiespeicher ... 139
5.1.1 Kennzahlen ... 139
5.1.2 Dynamisches Verhalten von sensiblen Energiespeichern ... 140
5.1.3 Reihenpuffertank ... 141
5.1.4 Parallelpufferspeicher ... 142
5.1.5 Auslegung eines sensiblen Kältespeichers ... 145
5.2 Latentspeicher ... 146
5.2.1 Speichermedien ... 147
5.2.2 Anforderungen an Speichermedien ... 147
5.2.3 Auslegung von Latentspeichern ... 148
5.2.4 Dynamisches Verhalten von Eiswasserspeichern ... 149
5.3 Literatur ... 153

6 Anwendungen ... 155
6.1 Flüssigkeitskühlsatz mit luftgekühltem Verflüssiger ... 155
6.2 Luftgekühlter Flüssigkeitskühlsatz in Modulbauweise ... 156
6.3 Flüssigkeitskühlsatz mit wassergekühltem Verflüssiger ... 157
6.4 Anwendungsgebiete ... 158
6.5 Industrieanwendungen ... 158
6.5.1 Herstellung von PET-Kunststoffflaschen ... 158
6.5.2 Elektrolyseure zur Wasserstofferzeugung ... 161
6.5.3 Laserstrahlschneiden ... 163
6.6 Anwendungen in der Medizintechnik ... 164
6.6.1 Computertomographie ... 165
6.6.2 Magnetresonanztomographie ... 166
6.7 Kühlung im gewerblichen Bereich ... 168
6.8 Elektrothermische Kühlung ... 170
6.9 Gebäudeklimatisierung ... 172
6.10 Prinzipielle Vorgehensweise bei der Planung von Kälteanlagen ... 173
6.11 Anlagensicherheit ... 174
6.12 Literatur ... 177

7 Nachhaltigkeit ... 179
7.1 Allgemeines ... 179
7.2 Nachhaltigkeit der Energieversorgung ... 180
7.3 Nachhaltigkeit von Kälteanlagen ... 180
7.4 TEWI-Wert ... 181
7.5 Nachhaltigkeit in der Vorkette ... 183
7.6 Nachhaltigkeit bei der Dimensionierung und Herstellung ... 183
7.7 Nachhaltigkeit beim Betrieb ... 184
7.8 Nachhaltigkeit bei Außerbetriebnahme ... 188
7.9 Ökobilanz für eine Kälteanlage ... 189
7.10 Literatur ... 190

8 Numerische Simulation ... 191
8.1 Grundlagen ... 191
8.2 Modellbildung ... 191
8.3 Simulationsarten ... 192
8.4 Softwaretools ... 193
8.5 Anwendungen ... 193
8.5.1 Statische Kreislaufrechnung ... 193
8.5.2 Dynamische Kreislaufrechnung ... 194
8.6 Abweichungen zwischen Simulation und Messungen ... 196
8.7 Rohrmodell ... 197
8.8 Gegenstrom-Wärmeübertrager ... 198
8.9 Verdampfer ... 200
8.10 Verdichter ... 201
8.10.1 Scrollverdichter ... 201
8.10.2 Hubkolbenverdichter ... 203
8.11 Verflüssiger ... 204
8.12 Expansionsventil ... 206
8.13 Sensibler Energiespeicher ... 206
8.14 Kompressions-Kälteanlage ... 208
8.14.1 Allgemeines ... 208
8.14.2 Modell einer einfachen Kältemaschine ... 209
8.15 Kälteverbraucher ... 212
8.16 Literatur ... 214

9 Digitalisierung ... 215
9.1 Energieversorgung ... 215
9.2 Produktion von Kälteanlagen ... 217
9.3 Vertrieb und Service ... 217
9.4 Sensoren ... 218
9.5 Dimensionierung, Betrieb und Regelung ... 219
9.6 Digitalisierung und Nachhaltigkeit ... 221
9.7 Cloud – Cloud Computing ... 222
9.8 Digitaler Zwilling ... 223
9.8.1 Definition Digitaler Zwilling ... 223
9.8.2 Praktische Umsetzung für kältetechnische Erzeugnisse ... 225
9.9 Hardware in the Loop ... 227
9.10 Arten der Connectivity ... 227
9.11 Literatur ... 229

Stichwortverzeichnis ... 231