

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	IX
Die Herausgeber .....	XI
Die Autoren .....	XI
Abkürzungsverzeichnis .....	XXIX
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ammoniak.....	5
1.2 Kohlendioxid.....	7
1.3 Kohlenwasserstoffe.....	8
1.4 Wasser als Kältemittel .....	9
<b>2 Thermodynamische Eigenschaften natürlicher Kältemittel.....</b>	<b>11</b>
<b>3 Vergleich der natürlichen Kältemittel untereinander für eine Vorauswahl ...</b>	<b>15</b>
<b>4 Ammoniak als Kältemittel .....</b>	<b>17</b>
4.1 Einführung .....	17
4.1.1 Allgemeine Eigenschaften, Herstellung .....	17
4.1.2 Verwendung von Ammoniak .....	19
4.1.3 Einsatz und wirtschaftliche Bedeutung in der Kältetechnik.....	20
4.2 Thermodynamik .....	20
4.2.1 Kriterien für die Auswahl .....	20
4.2.2 Haupteigenschaften .....	21
4.2.2.1 Kritische Temperatur und Druck .....	24
4.2.2.2 Verdichtungsendtemperatur .....	25
4.2.2.3 Sättigungsdruck.....	25
4.2.2.4 Wärmeübertragung.....	25
4.2.2.5 Leistungszahl (EER bzw. COP) .....	27
4.2.2.6 Toxizität, Schwellenwerte .....	28
4.2.3 Auswirkung auf die Komponenten der Kälteanlage .....	28
4.2.3.1 Referenzkreislauf .....	28
4.2.3.2 Verdichter .....	31
4.2.3.3 Kühlung während oder nach der Verdichtung .....	31
4.2.3.4 Einsatztemperaturen und -drücke .....	32
4.2.3.5 Einsatzgrenzen Heißgastemperatur .....	32
4.2.3.6 Rohrleitungen.....	33
4.2.3.7 Wärmeübertrager .....	35

4.3	Anlagentechnische Aspekte .....	36
4.3.1	Anlagensysteme und Bauarten .....	36
4.3.1.1	Überflutete und trocken verdampfende Systeme/ Flüssigkeitsabscheider .....	36
4.3.1.2	Flüssigkeitsabscheider .....	37
4.3.1.3	Kältemittel Pumpen-Umlaufbetrieb .....	37
4.3.1.4	Zweistufige Anlagen .....	39
4.3.1.5	Zweistufige Entspannung .....	39
4.3.1.6	Schraubenverdichter mit ECO .....	40
4.3.2	Komponenten .....	42
4.3.2.1	Verdichter .....	42
4.3.2.2	Luftgekühlte Wärmeübertrager .....	43
4.3.2.3	Wärmeübertrager für flüssige Medien .....	46
4.3.2.4	Ölkreislauf .....	46
4.3.3	Leckageüberwachung .....	52
4.3.4	Verunreinigung durch Wasser und Inertgase .....	52
4.3.4.1	Entfernung von Wasser .....	52
4.3.4.2	Entfernung von Inertgas .....	53
4.3.5	Risiken durch hydraulische Druckstöße .....	54
4.3.6	Direkte und Indirekte Systeme .....	55
4.3.6.1	Indirekte Systeme für kleine Leistungen .....	56
4.3.6.2	Vor- und Nachteile von indirekten Systemen .....	57
4.4	Sicherheitsvorkehrungen im Umgang mit Ammoniak .....	58
4.4.1	Austritt in die Atmosphäre .....	59
4.4.2	Brennbarkeit .....	60
4.4.3	Auswirkungen auf Lebensmittel .....	60
4.4.4	Auswirkungen auf den Menschen .....	61
4.4.4.1	Physiologische Auswirkungen .....	61
4.4.4.2	Gesetzliche Grenzwerte .....	62
4.4.5	Unfälle .....	62
4.4.5.1	Unfallursachen und -reaktionen .....	62
4.4.5.2	Unfallgrade .....	63
4.4.5.3	Medizinische Versorgung .....	64
4.4.6	Technische Sicherheitsausrüstung .....	64
4.4.7	Persönliche Schutzausrüstung .....	65
4.4.8	Ausführung Maschinenraum .....	67
4.4.8.1	Elektrische Antriebe .....	67
4.4.8.2	Belüftung .....	67
4.4.8.3	Gaswarnanlage .....	68
4.4.8.4	Notausgänge und Fluchtwege .....	69
4.5	Konstruktionskriterien für Ammoniakanlagen .....	70
4.5.1	Allgemeine Grundlagen .....	70
4.5.2	Werkstoffe .....	70
4.5.3	Verbindungstechniken .....	72
4.5.3.1	Feste Verbindungen .....	72

4.5.3.2	Lösbare Verbindungen .....	73
4.5.3.3	Spannungsrissskorrosion .....	73
4.6	Anwendungsmöglichkeiten für Ammoniak .....	75
4.6.1	Lebensmittellager .....	75
4.6.2	Supermärkte .....	77
4.6.3	Großküchen .....	79
4.6.4	Eisbahnen .....	80
4.6.5	Klimaanlagen .....	80
4.6.6	Wärmepumpen/Wärmerückgewinnung .....	81
4.6.7	Flüssigkeitskühlsätze/Prozesskühlung .....	82
4.6.8	CO <sub>2</sub> - und NH <sub>3</sub> -Kaskadensysteme .....	83
4.6.9	Anlagen mit kleiner Leistung .....	84
4.6.10	Containerlösungen .....	84
4.7	Normen und Vorschriften .....	85
4.7.1	Europäische Vorschriften .....	86
4.7.2	Normen und Vorschriften in Deutschland .....	87
4.7.3	Sicherheitstechnische Ausbildung von Mitarbeitern .....	89
4.8	Zusammenfassung der Vor- und Nachteile von Ammoniak .....	89
4.9	Ausblick .....	90
4.10	Anlagenbeispiele .....	92
4.10.1	Kälteversorgung für einen Obst- und Gemüse-Großhandel .....	92
4.10.2	Kälteversorgung für die Großküche eines Automobilherstellers .....	93
4.10.3	Flüssigkeitskühlsatz für die Klimatisierung von Büro- und Serverräumen .....	95
4.10.4	Kälteversorgung für das Betriebsrestaurant eines Finanzdienstleisters .....	97
4.11	Weiterführende Links im Internet .....	98
4.12	Literatur .....	99
<b>5</b>	<b>Kohlendioxid als Kältemittel .....</b>	<b>101</b>
5.1	Geschichte des Kältemittels CO <sub>2</sub> .....	101
5.2	Einflüsse von CO <sub>2</sub> auf Gesundheit, Anlagensicherheit und Umwelt .....	103
5.3	Kältetechnische Eigenschaften und deren Bedeutung für die Auslegung und den Betrieb von R744-Anlagen .....	106
5.3.1	Einführung und Definitionen .....	106
5.3.2	Bedeutung der relativ niedrigen kritischen Temperatur .....	107
5.3.2.1	Transkritischer Prozess .....	107
5.3.2.2	Geringere effektive Leistungszahl .....	109
5.3.2.3	Andere Bedingungen .....	109
5.3.3	Bedeutung von hohem Druck im Tripelpunkt .....	110
5.3.4	Bedeutung des generell hohen Druckniveaus .....	111
5.3.4.1	Typische Drucklagen im Betrieb und im Stillstand .....	111
5.3.4.2	Druckauslegung .....	113

5.3.4.3	Hubvolumen und Wirkungsgrad des Verdichters .....	114
5.3.4.4	Druck- und Temperaturverluste im Gas- und Zweiphasengebiet .....	115
5.3.5	Bedeutung guter Wärmeübertragungseigenschaften .....	116
5.3.6	Bedeutung des hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Flüssigkeit .....	117
5.4	Transkritischer Kälte-/Wärmepumpenprozess .....	118
5.4.1	Der Prozess im Druck-Enthalpie-Diagramm .....	118
5.4.2	Temperaturverlauf im Gaskühler .....	120
5.4.2.1	Temperaturverläufe im Temperatur-Enthalpie-Diagramm (T,h-Diagramm) ...	120
5.4.2.2	Pinch-Punkt in Gaskühlern .....	121
5.4.2.3	Temperaturannäherung .....	122
5.4.2.4	Temperaturanpassung für Heizbedarf mit mehreren Temperaturstufen .....	123
5.4.2.5	Berechnungsmethoden .....	124
5.4.3	Bedeutung des Gaskühlerdrucks für die Kälteleistung .....	124
5.4.4	Die Bedeutung des Drucks im Gaskühler für die Leistungszahl .....	126
5.4.5	Optimale Hochdruckregelung von CO <sub>2</sub> -Prozessen .....	127
5.4.5.1	Grundlagen zur Optimierung .....	127
5.4.5.2	Regelungsstrategie .....	128
5.5	Technische Lösungen mit CO <sub>2</sub> .....	129
5.5.1	CO <sub>2</sub> als verdampfender Kälte-träger .....	129
5.5.2	CO <sub>2</sub> im konventionellen Kälteprozess – Kaskadenanlage .....	131
5.5.3	Der transkritische Prozess – grundlegende Lösungen .....	134
5.5.3.1	Anlage mit Niederdrucksammler und einfacher Entspannung .....	134
5.5.3.2	Anlage mit Zwischendrucksammler, zweistufige Entspannung .....	135
5.5.3.3	Anlagen mit sowohl Zwischendruck- als auch Niederdrucksammler .....	138
5.5.3.4	Transkritischer, zweistufiger Prozess .....	139
5.5.3.5	Lösungen mit Kältebedarf auf zwei Temperaturniveaus .....	139
5.6	Methoden zur Prozessverbesserung .....	141
5.6.1	Zwischenkühlung in zweistufigen Anlagen .....	141
5.6.2	Parallelverdichtung .....	141
5.6.3	Abkühlung des überkritischen Gases nach dem Gaskühler .....	142
5.6.4	Rückgewinn von Expansionsarbeit .....	143
5.7	Wärmerückgewinnung mit CO <sub>2</sub> -Anlagen .....	147
5.7.1	Einfache Lösung der Wärmerückgewinnung auf einem Temperaturniveau .....	148
5.7.2	Wärmerückgewinnung auf verschiedenen Temperaturniveaus .....	149
5.8	CO <sub>2</sub> -Wärmepumpen .....	152
5.8.1	Allgemeines .....	152
5.8.2	Produktion von warmem Nutzwasser .....	152
5.8.3	Kombinierte Raumheizung und Warmwasseraufbereitung .....	157
5.9	Sicherheit bei der Anwendung von CO <sub>2</sub> .....	157
5.9.1	Druck und Temperatur – Sicherheitsbedingungen .....	157
5.9.2	Trockeneis – Sicherheits- und Betriebsbedingungen .....	158

5.10	Anwendungsbeispiele für CO <sub>2</sub> -Kälteanlagen . . . . .	159
5.10.1	Kaskadenkälteanlagen mit CO <sub>2</sub> als Kältemittel . . . . .	160
5.10.1.1	Industrielle Anlagen . . . . .	160
5.10.1.2	Kunsteisbahnen . . . . .	161
5.10.1.3	Anlagen im Einzelhandel . . . . .	162
5.10.1.4	Fischerboote . . . . .	162
5.10.2	Transkritische Anlagen . . . . .	164
5.10.2.1	Kleine Anlagen für den Einzelhandel . . . . .	164
5.10.2.2	Leistungsstarke, zentrale Anlagen für den Einzelhandel und Industrie- kälteanlagen . . . . .	165
5.10.2.3	Warmwasser-Wärmepumpen . . . . .	175
5.10.2.4	Klimaanlagen . . . . .	177
5.10.2.5	Transport . . . . .	178
5.10.2.6	Mobile Klimaanlagen . . . . .	178
5.10.2.7	Meerwasserkühler für die Fischindustrie . . . . .	180
5.10.2.8	Fischerboote, Tiefkühlung . . . . .	180
5.10.2.9	Andere Anwendungsbereiche für CO <sub>2</sub> als Kältemittel . . . . .	181
5.11	Literatur . . . . .	182
<b>6</b>	<b>Kohlenwasserstoffe als Kältemittel . . . . .</b>	<b>185</b>
6.1	Einführung . . . . .	185
6.1.1	Kohlenwasserstoffe – Vorkommen und Eigenschaften . . . . .	185
6.1.2	Flüssiggase – Nebenprodukte der Erdöl- und Erdgas-Industrie . . . . .	188
6.1.3	Flüssiggase als Kältemittel . . . . .	189
6.2	Ökologische Eigenschaften . . . . .	189
6.3	Übersicht, Verfügbarkeit, Stoffeigenschaften, Verwendung als Kältemittel . . . . .	191
6.4	Thermodynamische und physikalische Eigenschaften . . . . .	194
6.4.1	Verdampfungswärme . . . . .	194
6.4.2	Verdampfungstemperatur . . . . .	195
6.4.3	Verflüssigungsdruck / Kritischer Punkt . . . . .	196
6.4.4	Isentropenexponent / Verdichtungsendtemperatur . . . . .	196
6.4.5	Theoretische Kälteleistungszahl . . . . .	198
6.4.6	Verdichter-Kenngrößen . . . . .	200
6.4.7	Druckverhältnis . . . . .	200
6.4.8	Druckdifferenz . . . . .	201
6.4.9	Volumetrische Kälteleistung . . . . .	201
6.4.10	Verdichtungsendtemperatur . . . . .	203
6.4.11	Dichte . . . . .	204
6.4.12	Viskosität . . . . .	205
6.4.13	Wärmeübertragungseigenschaften . . . . .	205
6.4.14	Wärmeleitfähigkeit . . . . .	206
6.4.15	Materialverträglichkeiten . . . . .	206

6.5	Anlagentechnik.....	206
6.5.1	Komponenten.....	206
6.5.2	Sicherheitstechnik, Normen und Vorschriften.....	209
6.5.2.1	Risikoanalyse, Schulung und Information.....	210
6.5.2.2	Kapselung und Dichtheit.....	211
6.5.2.3	Lüftung und Verdünnung.....	212
6.5.2.4	Vermeiden des Entzündens.....	214
6.5.2.5	Begrenzung des Schadensausmaßes.....	216
6.5.2.6	Normen und Richtlinien.....	217
6.5.2.7	DIN EN 378.....	219
6.5.3	Der praktische Umgang mit brennbaren Kältemitteln.....	231
6.5.4	Anlagenbeispiele.....	239
6.6	Zusammenfassung und Ausblick.....	244
6.7	Literatur.....	247
<b>7</b>	<b>Wasser als Kältemittel.....</b>	<b>249</b>
7.1	Einleitung.....	249
7.2	Eigenschaften und Einsatzbereich.....	250
7.2.1	Thermodynamische Eigenschaften und Vergleich zu gängigen Kältemitteln....	250
7.2.2	Verwendung als Kältemittel.....	254
7.2.3	Einsatz in Kompressionskältemaschinen.....	254
7.3	Funktionsweise von Kompressionskälteanlagen mit dem Kältemittel Wasser...	255
7.4	Anwendung im niedrigen Leistungsbereich.....	257
7.4.1	Kompakte Kaltwassersätze.....	257
7.4.2	Praxisbeispiele.....	258
7.5	Erzeugung von Temperaturen unterhalb von 0 °C.....	260
7.5.1	Beschreibung der Systeme.....	260
7.5.2	Mögliche Anwendungen.....	260
7.6	Fazit.....	261
7.7	Literatur.....	262
<b>8</b>	<b>Kälteanlagen für Temperaturen unter -50 °C.....</b>	<b>265</b>
8.1	Kohlenwasserstoffe und Mischungen mit CO <sub>2</sub> .....	265
8.2	Distickstoffmonoxid und Mischungen mit CO <sub>2</sub> .....	265
8.3	Luft.....	266
8.4	Literatur.....	269
<b>9</b>	<b>Schmierstoffe für natürliche Kältemittel.....</b>	<b>271</b>
9.1	Schmierstoffe für Ammoniak (NH <sub>3</sub> – R717).....	271

9.2	Schmierstoffe für Kohlenwasserstoffe (Propan – R290, Propen – R1270, Isobutan – R600a u. a.)	272
9.3	Schmierstoffe für Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> – R744)	274
9.3.1	Mischbarkeitseigenschaften mit flüssigem CO <sub>2</sub>	274
9.3.2	Thermische Stabilität	275
9.3.3	Schmierungseigenschaften	276
9.3.4	Wassergehalt	277
9.3.5	Einsatzbereiche von CO <sub>2</sub> -Kältemaschinenölen	278
9.4	Auswahltabelle – Kältemaschinenöltypen für natürliche Kältemittel	279
9.5	Literatur	279
<b>10</b>	<b>Kälte­trä­ger</b>	<b>281</b>
10.1	Anforderungen an Kälte­trä­ger	282
10.2	Kälte­trä­gerarten	282
10.3	Flüssige Kälte­trä­ger für Normal- und Tiefkühl-Anwendungen	284
10.3.1	Kühlen von Lebensmitteln	284
10.3.2	Gefrieren von Lebensmitteln	287
10.4	Kälte­trä­ger mit Phasenwechsel	290
10.4.1	Verdampfendes Kohlendioxid	290
10.4.2	Eisbrei	290
10.5	Korrosionsschutz	291
10.6	Anlagenbeispiel Propan-CO <sub>2</sub> -Kaskade mit Eisbrei als Kälte­trä­ger	293
10.7	Integrales System zur Warenkühlung, Klimatisierung und Beheizung in Supermärkten und Gewerbebetrieben	294
10.8	Literatur	299
Anhang	Normen und Vorschriften	301