

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 Kältemittelleinteilung	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 Kälte Träger	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 Zweikreisssystem	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