

Inhalt

Vorwort	5
Formelzeichen und Indizes	17
1 Einleitung	23
1.1 Temperaturabhängige Stoffeigenschaften und die zur Kälteerzeugung nutzbaren Effekte	23
1.1.1 Vorbemerkung	23
1.1.2 Temperaturabhängige Eigenschaften.....	25
1.1.3 Bewegungsenergie und Temperatur	26
1.1.4 Zur Kälteerzeugung verwendete Effekte.....	27
1.2 Offene und geschlossene Verfahren zur Kälteerzeugung.....	28
1.3 Nutzung des Phasenwechsels zur Kälteerzeugung.....	29
1.3.1 Phasenwechsel flüssig – dampfförmig.....	29
1.3.2 Phasenwechsel fest – gasförmig bei Trockeneis	30
1.3.3 Phasenwechsel fest – flüssig.....	33
2 Verdichterkältemaschinen	41
2.1 Der ideale Vergleichsprozess für die Kältemaschine	41
2.2 Prozesse mit Verdichtung im Gasgebiet und isenthalper Entspannung.....	45
2.2.1 Das Grundkonzept einer Verdichterkältemaschinen mit großer Leistung	49
2.2.2 Das Grundkonzept einer Verdichterkältemaschine mit mittlerer Leistung.....	51
2.2.3 Das Grundkonzept einer Verdichterkältemaschine mit kleiner Leistung	53
2.3 Auslegung des Kältemaschinenprozesses mit dem lg p,h-Diagramm	54
2.3.1 Aufbau des lg p,h-Diagramms	55
2.3.2 Prozessdarstellung im lg p,h-Diagramm.....	57
2.4 Theoretischer und realer Prozessablauf	62
2.5 Verdichterkältemaschinen mit innerem Wärmeübertrager.....	65
2.5.1 Zweck von inneren Wärmeübertragern	65
2.5.2 Beispiel	71
2.6 Anlagen mit Pumpbetrieb	73
2.7 Anlagen mit Naturumlauf (Anlagen mit selbstüberflutetem Betrieb)	75
2.8 Transkritische Verdichterkältemaschine mit dem Kältemittel Kohlendioxid	76
2.8.1 Prozessführung.....	76
2.8.2 Bestimmung des optimalen Hochdrucks	80
2.8.3 Anlagenkomponenten.....	82
2.8.4 Anmerkungen zu den Entwicklungen.....	84
2.8.5 Näherungsgleichungen zur Bestimmung des optimalen Hochdrucks	85

2.9	Kaskadenkältemaschinen	86
2.9.1	Zweistufige Kaskadenkältemaschine	88
2.9.2	Kaskadenkältemaschine zur Aufrechterhaltung einer tiefen Temperatur	89
2.9.3	Kaskadenkältemaschine zur Abkühlung auf eine tiefe Temperatur	90
2.9.4	Anmerkungen zu Kaskadenkältemaschinen	91
2.9.5	Gemischkaskaden	92
2.10	Zwei- und mehrstufige Verdichterkältemaschinen	94
2.10.1	Grenzen der einstufigen Verdichtung	94
2.10.2	Zwei- und mehrstufige Verdichtung	96
2.10.3	Zwei- und mehrstufige Entspannung	97
2.10.4	Äußere Zwischenkühlung	98
2.10.5	Prozessführungen mit dem Primärziel einer Reduktion der Verdichtungsendtemperatur	99
2.10.6	Prozessführungen mit dem Primärziel einer Verbesserung der Leistungszahl ..	105
2.10.7	Wahl des Mitteldrucks	109
2.10.8	Zweistufige Verdichterkältemaschinen für Normalkühlung (NK) und Tiefkühlung (TK)	110
2.10.9	Das Carba-Verfahren	111
2.11	Berechnungsbeispiel Prozessvergleich	114
3	Absorptionskältemaschinen und Adsorptionskältemaschinen	117
3.1	Kontinuierliche Absorptionskältemaschinen	119
3.1.1	Stoffpaare	119
3.1.2	Standardschaltung der kontinuierlichen Absorptionskältemaschine	120
3.1.3	Funktionsbeschreibung	122
3.2	Thermodynamische Grundlagen der Sorptionskältemaschinen	124
3.2.1	Energiebilanz und thermodynamischer Vergleichsprozess	124
3.2.2	Eigenschaften von Zweistoffgemischen	128
3.2.3	Berechnung der kontinuierlichen einstufigen Absorptionskältemaschine	140
3.2.4	Beispiel: $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -Absorptionskältemaschine mit Temperaturwechsler und Flüssigkeitsnachkühler (ohne Dephlegmator und Rektifikation)	148
3.2.5	Kontinuierliche $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ -Absorptionskältemaschinen	150
3.2.6	Beispiel: $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ -Absorptionskältemaschine mit Temperaturwechsler	152
3.3	Kontinuierliche Absorptionskältemaschinen mit Rektifikation	154
3.3.1	Wärmetechnische Berechnung der Rektifiziereinrichtung	158
3.3.2	Beispiel: $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -Absorptionskältemaschine mit Rektifiziereinrichtung, Temperaturwechsler und Flüssigkeitsnachkühler	163
3.4	Kontinuierliche Resorptionskältemaschinen	165
3.5	Nutzung von niedrigen Austreibertemperaturen	167
3.6	Absorptionskältemaschine mit druckausgleichendem Gas	169
3.7	Die „Reversible Absorptionskältemaschine“	170

3.8	Mehrstufige Absorptionskältemaschinen	172
3.8.1	Übergreifen der Temperaturen	172
3.8.2	Zweistufige Absorptionskältemaschine	174
3.9	Weitere Beispiele für kontinuierliche Absorptionskältemaschinen	176
3.10	Adsorptionskältemaschinen	179
3.10.1	Thermodynamik der periodischen Adsorptionskältemaschine	184
3.10.2	Hinweise zu den realisierten Adsorptionskältemaschinen	188
3.10.3	Beispiel: Adsorptionswärmepumpe mit dem Stoffpaar Wasser-Zeolith	191
3.11	Begriffe, Näherungsgleichungen und h, ξ -Diagramme	194
3.11.1	Begriffsdefinitionen und Erläuterungen	194
3.11.2	Näherungsgleichungen für die Dichte von flüssigen Gemischen	197
3.11.3	Näherungsgleichung für die temperaturabhängige Verdampfungsenthalpie von Wasser	197
3.11.4	Enthalpie, Konzentration-(h, ξ)-Diagramme	198
4	Strahlkältemaschinen und Strahlapparate als Expansionsorgane in Kältemaschinen	201
4.1	Einleitung	201
4.2	Bezeichnungen	201
4.3	Anwendungen	201
4.4	Funktion des Strahlapparats und Berechnungsgrundlagen	202
4.5	Ausführungsbeispiele	208
4.5.1	Strahlkältemaschine	208
4.5.2	Strahlverdichter als „Booster“ (Vorverdichter)	212
4.5.3	Strahlverdichter als Expansionsorgan in Kaldampfmaschinen	213
5	Feuchte Luft	217
5.1	Stoffliche und thermische Eigenschaften	217
5.2	Kalorische Eigenschaften von feuchter Luft	220
5.3	Beispielrechnungen	224
6	Kühltürme (Verdunstungskühlanlagen)	231
6.1	Zweck	231
6.2	Bauarten	232
6.3	Kühlturmberchnung	237
6.3.1	Kühlturmleistung	237
6.3.2	Kühlturmauslegung	238
6.3.3	Berechnungsbeispiel	245

Inhaltsverzeichnis

7	Kaltgasmaschine	247
7.1	Einleitung.....	247
7.2	Thermodynamische Grundlagen der Kaltgasmaschinen	250
7.2.1	Kälteerzeugung durch arbeitsleistende Entspannung	250
7.2.2	Thermodynamische Vergleichsprozesse für Kaltgasmaschinen	251
7.3	Brayton-Kaltgasmaschine.....	256
7.3.1	Geschlossenes System ohne inneren Wärmeübertrager.....	256
7.3.2	Prozessverbesserung durch einen inneren Wärmeübertrager	260
7.3.3	Prozessverbesserung durch isotherme Verdichtung	264
7.3.4	Anwendungen.....	264
7.4	Wirbelrohr nach Ranque und Hilsch	266
7.4.1	Funktionsweise	267
7.4.2	Leistungsfähigkeit.....	268
7.4.3	Anwendungen.....	270
7.5	Stirling-Kaltgasmaschine	271
7.5.1	Allgemeine Hinweise.....	271
7.5.2	Stirling-Prozess	271
7.5.3	Abweichungen von der idealisiert dargestellten Prozessführung.....	275
7.5.4	Arbeitsgas.....	276
7.5.5	Konstruktiver Aufbau	278
7.5.6	Hinweise zur Einschätzung der zukünftigen Einsatzchancen.....	280
7.5.7	Beispiel: Stirling-Kaltgasmaschine zur Luftverflüssigung	280
7.5.8	Mit der Stirling-Kaltgasmaschine verwandte Maschinen	283
8	Thermoelektrische Kälteerzeugung	287
8.1	Einleitung.....	287
8.2	Zugrunde liegende Effekte	288
8.3	Thermodynamik.....	290
8.4	Verdeutlichung der Gesetzmäßigkeiten an einem Peltier-Leiterpaar	296
8.5	Vergleichsprozess und Grenze der Kälteleistungszahl	300
8.6	Zahlenbeispiel.....	302
8.7	Exergetische Betrachtung.....	303
8.8	Peltier-Elemente in Kaskadenschaltung	304
8.9	Zum Stand der Anwendungen und Entwicklungen	304
8.10	Thermoelektrik zur Elektrizitätsgenerierung	306
8.11	Thermoelektrische Spannungsreihe	307

9	Festkörperbasierte Kälteerzeugung unter Nutzung kalorischer Effekte	309
9.1	Einführung	310
9.2	Elastokalorische Kälteerzeugung	313
9.3	Barokalorische Kälteerzeugung	317
9.4	Elektrokalorische Kälteerzeugung	317
9.5	Magnetokalorische Kälteerzeugung	318
9.5.1	Thermodynamische Beschreibung des magnetokalorischen Effekts	318
9.5.2	Anwendung bei tiefen Temperaturen	323
9.5.3	Magnetokalorische Kälteerzeugung bei umgebungsnahen Temperaturen	324
9.5.4	Materialien	326
9.5.5	Einschätzung des Anwendungspotenzials bei umgebungsnahen Temperaturen	328
10	Tieftemperaturtechnik – Verflüssigung tiefsiedender Gase	333
10.1	Einleitung	333
10.2	Gasverflüssigung	334
10.2.1	Mindestarbeitsaufwand	334
10.2.2	Der Joule-Thomson-Effekt (JTE)	337
10.2.3	Linde-Verfahren	339
10.2.4	Berechnung und Kenngrößen des Linde-Verfahrens	341
	Beispiel	344
10.2.5	Linde-Verfahren mit Hochdruckkreislauf	345
10.3	Claude-Heylandt-Verfahren	346
10.4	Luftzerlegung	349
11	Kältemittel, EU-F-Gase-Verordnung, Sicherheit und Kältemaschinenöle	353
11.1	Kältemittel	353
11.1.1	Stoffeigenschaften	353
11.1.2	Kältemitteltypen und Bezeichnungen	357
11.1.3	Von Kältemitteln ausgehende Risiken und Gefahren	361
11.1.4	Gebräuchliche Kältemittel	366
11.1.5	Auswahlkriterien für Kältemittel	369
11.2	EU-F-Gase-Verordnung	377
11.2.1	Zielsetzungen und Vorgaben	377
11.2.2	Berechnung der Höchstmenge, der Referenzwerte und der Quoten für das Inverkehrbringen von teifluorierten Kohlenwasserstoffen	379
11.2.3	Erzeugnisse und Einrichtungen	379
11.3	Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen an Kälteanlagen	381
11.3.1	Von Kälteanlagen ausgehende Gefahren und die zu treffenden Sicherheitsvorkehrungen	381

Inhaltsverzeichnis

11.3.2	Sicherheitstechnische Einteilung von Kälteanlagen.....	382
11.3.3	Grenzwerte für die Kältemittel-Füllmenge	384
11.4	Kältemaschinenöle	385
11.4.1	Arten von Kältemaschinenölen.....	386
11.4.2	Eigenschaften von Kältemaschinenölen.....	388
11.4.3	Auswirkungen des Kältemaschinenöls im Kältemittelkreislauf	390
11.4.4	Ölabscheider	390
12	Kältemittelverdichter.....	393
12.1	Fluidenergiemaschinen in der Kältetechnik	393
12.2	Mechanische Kältemittelverdichter	395
12.2.1	Prozessablauf bei Verdichtern.....	396
12.2.2	Verdichterkenngrößen	400
12.2.3	Anhaltswerte für den Liefergrad und den Gütegrad.....	406
12.2.4	Prüfung von Kältemittelverdichtern	409
12.3	Verdichterbauarten	409
12.3.1	Strömungsverdichter	409
12.3.2	Rotationskolbenverdichter.....	410
12.3.3	Hubkolbenverdichter.....	418
12.4	Hermetisierung der Verdichtergehäuse	422
12.4.1	Offene Verdichter	422
12.4.2	Hermetische Kältemittelverdichter	424
12.5	Weitere technische Details von Kältemittelverdichtern	426
12.5.1	Zusatzkühlung.....	426
12.5.2	Gaswechselventile bei Hubkolbenverdichtern	426
12.5.3	Ölversorgung von Hubkolbenverdichtern	428
12.5.4	Hinweise zum Massenausgleich	428
12.5.5	Selbstverstärkende Abdichtung.....	429
12.5.6	Hinweise zu Kapselverdichtern.....	430
12.6	Einsatzgrenzen von Kältemittelverdichtern.....	431
12.7	Katalog-Prozess und Ist-Prozess – Berechnungsbeispiel	432
12.8	Kältemittelverdichter für Fahrzeugklimaanlagen.....	438
12.8.1	Regelbare Verdichter	438
12.8.2	Funktionsweise der Hubregelung bei Axialkolbenmaschinen	439
12.8.3	Anmerkungen zum Betriebsverhalten der unterschiedlichen Verdichterbauweisen	442
13	Wärmeübertrager	445
13.1	Regeneratoren – Indirekte Wärmeübertrager mit thermischer Zwischenspeicherung	446
13.1.1	Regeneratoren für Stirling-Kaltgasmaschinen	446

13.1.2	Regeneratoren für Kaltluftmaschinen	446
13.1.3	Regeneratoren zur Luftbehandlung	447
13.2	Rekuperatoren – Wärmeübertrager mit wärmeübertragenden Flächen	448
13.2.1	Lamellenwärmeübertrager	449
13.2.2	Koaxialwärmeübertrager	450
13.2.3	Plattenwärmeübertrager	452
13.2.4	Rohrbündelwärmeübertrager	454
13.2.5	Anmerkungen zur Auswahl und zur Dimensionierung von Verdampfern und Verflüssigern	457
13.2.6	Anmerkungen zu Wärmedurchgangskoeffizienten und zu Wärmeübergangskoeffizienten	459
13.2.7	Betriebsverhalten eines Trockenexpansionsverdampfers mit Überhitzungsregelung	462
14	Weitere Komponenten und Zubehör von Kältemaschinen	463
14.1	Filtertrockner	463
14.2	Schaugläser	464
14.3	Handventile	465
14.4	Elektromagnetische Ventile (Magnetventile)	465
14.5	Rückschlagventil NRV	467
14.6	Automatische Ventile für flüssige Wärme- und Kälteträger	468
14.7	Sicherheitsventile und Berstscheiben	469
14.8	Temperatur- und Druckschalter	469
14.9	Druckregelventile	472
14.9.1	Verdampfungsdruckregler KVP	472
14.9.2	Verflüssigungsdruckregler KVR	473
14.9.3	Startregler KVL	473
14.9.4	Leistungsregler (Heißgasbypassregler) KVC	474
14.9.5	Sammlerdruckregler KVD	474
14.9.6	Überströmventile NRD (Differenzdruckregler)	475
14.10	Drosselorgane	476
14.10.1	Drosseln mit konstanter Geometrie	476
14.10.2	Drosseln mit variabler Geometrie	477
14.10.3	Automatische Drosselventile	477
14.10.4	Ventile für Trockenexpansionsverdampfer	478
15	Berechnung der Kälteleistung	487
15.1	Herleitung der Bilanzgleichung	487
15.2	Berechnung der Kälteleistung für einen Kühlraum	490

Inhaltsverzeichnis

15.3	Beispiel zur Berechnung der Kälteleast eines Kühlraums.....	499
15.4	Anmerkungen zur Bestimmung der Kälteleast.....	501
16	Exergetische Betrachtungen	503
16.1	Einleitung – Exergiebegriff	503
16.2	Exergiebilanz und exergetischer Wirkungsgrad.....	505
16.3	Exergie einer thermischen Kraftmaschine.....	505
16.4	Exergie einer mechanisch angetriebenen Kältemaschine.....	507
16.5	Exergie einer thermisch angetriebenen Kältemaschine	508
16.6	Bestimmung von einzelnen Exergieverlusten	508
16.6.1	Exergieverlust bei Verdichtern	508
16.6.2	Exergieverlust bei der Wärmeübertragung	511
16.6.3	Exergieverluste durch Druckabfälle und Drosselung	513
16.7	Beispiele	514
16.7.1	Exergetische Verluste einer einstufigen Verdichterkältemaschine	514
16.7.2	Verdichter-Wärmepumpe mit innerem Wärmeübertrager	518
16.7.3	Absorptionskältemaschine	522
16.8	Unterschiedliche Nutzleistungen, unterschiedliche Temperaturen	523

A1	Thermodynamische Grundlagen und Begriffe	525
A1.1	Thermodynamisches System: die Bilanzgleichung	525
A1.1.1	Systemgrenzen	526
A1.1.1.1	Abgeschlossenes System	526
A1.1.1.2	Geschlossenes System	526
A1.1.1.3	Offenes System	526
A1.1.2	Zustandsgrößen	527
A1.1.2.1	Zustandsgrößen sind messbare Größen	527
A1.1.2.2	Intensive Zustandsgrößen	527
A1.1.2.3	Extensive Zustandsgrößen	527
A1.1.2.4	Spezifische Zustandsgrößen	528
A1.1.3	Zustandsänderungen	528
A1.1.3.1	Prozess, Kreisprozess	528
A1.1.3.2	Stationärer Zustand	528
A1.1.3.3	Instationäre Zustände und Prozesse	529
A1.1.3.4	Thermisches Gleichgewicht	529
A1.2	„0. Hauptsatz“ der Thermodynamik	529
A1.3	Massenbilanz	530
A1.4	Energiebilanz – der 1. Hauptsatz der Thermodynamik	530
A1.4.1	Zu den Begriffen Austausch, Übertragung und Transport	531
A1.4.2	Innere Energie, Wärme, Arbeit, Wärmestrahlung	531
A1.5	Zustandsänderungen	533
A1.5.1	Quasistatische Zustandsänderungen	533
A1.5.2	Reversible Zustandsänderungen	533
A1.5.3	Adiabate Zustandsänderungen	533
A1.5.4	Spezielle quasistatische Zustandsänderungen	533
A1.5.5	Zustandsänderungen am Beispiel: System Zylinder-Kolben mit einer konstanten Gasfüllung	535
A1.6	Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik	537
A1.7	Der 3. Hauptsatz der Thermodynamik	539
A1.8	Weitere Begriffe aus der Thermodynamik	540
A2	Bezeichnungen, Kenngrößen und Anhaltswerte	548
A2.1	Bezeichnungen	548
A2.2	Aufstellungsbereiche von Kälteanlagen	552
A2.3	Kenngrößen, Definitionen, Anhaltswerte	553
A2.3.1	Übliche Kenngrößen	553
A2.3.2	Überwiegend aus dem Englischen übernommene Definitionen	554
A2.3.3	Gebräuchliche Gerätebauarten (Wärmepumpen, Klimageräte)	556
A2.3.4	Anhaltswerte für Temperaturdifferenzen zur Wärmeübertragung	556

Inhaltsverzeichnis

A2.3.5	Industriekälte.....	559
A2.3.6	Rohrleitungen	560
A3	Kurze Geschichte der Kältetechnik.....	562
A3.1	Verdichterkältemaschine	563
A3.2	Sorptionskältemaschinen.....	563
A3.3	Kaltgasmaschinen.....	564
A3.4	Weitere Entdeckungen und technische Entwicklungen	564
A3.5	Politische Entwicklungen.....	565
A3.6	Anwendungen.....	566
A4	Daten von Kältemitteln.....	567
A5	Symbole	577
Literatur.....		579
Stichwortverzeichnis		587