

Inhaltsverzeichnis

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 Kältemaschine 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	Bereitstellung von zwei unterschiedlichen Nutzttemperaturen	89
2.9.3	Anmerkungen zu Kaskadenkältemaschinen	91
2.9.4	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	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: NH_3 - H_2O -Absorptionskältemaschine mit Temperaturwechsler und Flüssigkeitsnachkühler (ohne Dephlegmator und Rektifikation)	148
3.2.5	Kontinuierliche H_2O -LiBr-Absorptionskältemaschinen	150
3.2.6	Beispiel: H_2O -LiBr-Absorptionskältemaschine mit Temperaturwechsler	152
3.3	Kontinuierliche Absorptionskältemaschinen mit Rektifikation	154
3.3.1	Wärmetechnische Berechnung der Rektifiziereinrichtung	158
3.3.2	Beispiel: NH_3 - H_2O -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 kontinuierlichen Absorptionskältemaschinen.	176
3.10	Adsorptionskältemaschine	178
3.10.1	Thermodynamik der periodischen Adsorptionskältemaschine	184
3.10.2	Hinweise zu den realisierten Adsorptionskältemaschinen	187
3.10.3	Beispiel: Adsorptionswärmepumpe mit dem Stoffpaar Wasser- Zeolith	190
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	203
4.5	Ausführungsbeispiele	208
4.5.1	Strahlkältemaschine	208
4.5.2	Strahlverdichter als „Booster“ (Vorverdichter)	212
4.5.3	Strahlverdichter als Expansionsorgan in Kaltdampfmaschinen	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	231
6.1	Zweck	231
6.2	Bauarten	232
6.3	Kühlturberechnung	237
6.3.1	Kühlturmleistung	237
6.3.2	Kühlturmauslegung	238
6.3.3	Weitere Hinweise	244
6.3.4	Berechnungsbeispiel	245

7	Gaskältemaschine	247
7.1	Einleitung	247
7.2	Thermodynamische Grundlagen der Gaskältemaschinen	250
7.2.1	Kälteerzeugung durch arbeitsleistende Entspannung	250
7.2.2	Thermodynamische Vergleichsprozesse für Gaskältemaschinen	251
7.3	Brayton-Gaskältemaschine	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-Gaskältemaschine	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-Gaskältemaschine zur Luftverflüssigung	280
7.5.8	Mit der Stirling-Gaskältemaschine verwandte Maschinen	283
8	Thermoelektrische Kälteerzeugung	287
8.1	Einleitung	287
8.2	Zugrundeliegende Effekte	288
8.3	Thermodynamik	290
8.4	Verdeutlichung der Gesetzmäßigkeiten an einem Peltier-Leiterpaar	296
8.5	Vergleichsprozess und Grenze der Leistungszahl	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	Magnetokalorische Kälteerzeugung	309
9.1	Thermodynamische Beschreibung des magnetokalorischen Effekts	309
9.2	Anwendung bei tiefen Temperaturen	314
9.3	Magnetokalorische Kälteerzeugung bei umgebungsnahen Temperaturen	315
9.4	Materialien	317
9.4.1	Magnetokalorische Materialien	317
9.4.2	Magnetmaterialien	319
9.4.3	Allgemeine Materialanforderungen für magnetokalorische Materialien	319
9.5	Einschätzung des Anwendungspotenzials bei umgebungsnahen Temperaturen ..	319
10	Tiefemperaturtechnik – Verflüssigung tiefsiedender Gase	323
10.1	Einleitung	323
10.2	Gasverflüssigung	324
10.2.1	Mindestarbeitsaufwand	324
10.2.2	Der Joule-Thomson-Effekt (JTE)	327
10.2.3	Linde-Verfahren	329
10.2.4	Berechnung und Kenngrößen des Linde-Verfahrens	331
	Beispiel	334
10.2.5	Linde-Verfahren mit Hochdruckkreislauf	335
10.3	Claude-Heylandt-Verfahren	336
10.4	Luftzerlegung	339
11	Kältemittel, EU F-Gase-Verordnung, Sicherheit und Kältemaschinenöle	343
11.1	Kältemittel	343
11.1.1	Stoffeigenschaften	343
11.1.2	Von Kältemitteln ausgehende Risiken und Gefahren	347
11.1.3	Kältemitteltypen und Bezeichnungen	351
11.1.4	Gebäuchliche Kältemittel	355
11.1.5	Auswahlkriterien für Kältemittel	358
11.2	EU F-Gase-Verordnung	364
11.2.1	Zielsetzungen und Vorgaben	364
11.2.2	Berechnung der Höchstmenge, der Referenzwerte und der Quoten für das Inverkehrbringen von teilfluorierten Kohlenwasserstoffen	365
11.2.3	Erzeugnisse und Einrichtungen	366
11.3	Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen an Kälteanlagen ...	367
11.3.1	Von Kälteanlagen ausgehende Gefahren und die zu treffenden Sicherheitsvorkehrungen	368
11.3.2	Sicherheitstechnische Einteilung von Kälteanlagen	369
11.3.3	Grenzwerte für die Kältemittel-Füllmenge	370

11.4	Kältemaschinenöle	371
11.4.1	Arten von Kältemaschinenölen	373
11.4.2	Eigenschaften von Kältemaschinenölen	375
11.4.3	Auswirkungen des Kältemaschinenöls im Kältemittelkreislauf	377
11.4.4	Ölabscheider	377
12	Kältemittelverdichter	379
12.1	Fluidenergiemaschinen in der Kältetechnik	379
12.2	Mechanische Kältemittelverdichter	381
12.2.1	Prozessablauf bei Verdichtern	382
12.2.2	Verdichterkenngößen	386
12.2.3	Anhaltswerte für den Liefergrad und den Gütegrad	392
12.2.4	Prüfung von Kältemittelverdichtern	394
12.3	Verdichterbauarten	395
12.3.1	Strömungsverdichter	395
12.3.2	Rotationskolbenverdichter	396
12.3.3	Hubkolbenverdichter	404
12.4	Hermetisierung der Verdichtergehäuse	408
12.4.1	Offene Verdichter	408
12.4.2	Hermetische Kältemittelverdichter	410
12.5	Weitere technische Details von Kältemittelverdichtern	412
12.5.1	Zusatzkühlung	412
12.5.2	Gaswechselventile bei Hubkolbenverdichtern	412
12.5.3	Ölversorgung von Hubkolbenverdichtern	414
12.5.4	Hinweise zum Massenausgleich	414
12.5.5	Selbstverstärkende Abdichtung	415
12.5.6	Hinweise zu Kapselverdichtern	416
12.6	Einsatzgrenzen von Kältemittelverdichtern	417
12.7	Katalog-Prozess und Ist-Prozess – Berechnungsbeispiel	418
12.8	Kältemittelverdichter für Fahrzeugklimaanlagen	424
12.8.1	Regelbare Verdichter	424
12.8.2	Funktionsweise der Hubregelung bei Axialkolbenmaschinen	425
12.8.3	Anmerkungen zum Betriebsverhalten der unterschiedlichen Verdichterbauweisen	428
13	Wärmeübertrager	431
13.1	Regeneratoren – Indirekte Wärmeübertrager mit thermischer Zwischenspeicherung	432
13.1.1	Regeneratoren für Stirling-Gaskältemaschinen	432
13.1.2	Regeneratoren für Kaltluftmaschinen	432
13.1.3	Regeneratoren zur Luftbehandlung	433

13.2	Rekuperatoren – Wärmeübertrager mit wärmeübertragenden Flächen	434
13.2.1	Lamellenwärmeübertrager	435
13.2.2	Koaxialwärmeübertrager	436
13.2.3	Plattenwärmeübertrager	438
13.2.4	Rohrbündelwärmeübertrager	440
13.2.5	Anmerkungen zur Auswahl und zur Dimensionierung von Verdampfern und Verflüssigern	443
13.2.6	Anmerkungen zu Wärmedurchgangskoeffizienten und zu Wärmeübergangskoeffizienten	445
13.2.7	Betriebsverhalten eines Trockenexpansionsverdampfers mit Überhitzungsregelung	448
14	Weitere Komponenten und Zubehör von Kältemaschinen	449
14.1	Filtertrockner	449
14.2	Schaugläser	450
14.3	Handventile	451
14.4	Elektromagnetische Ventile (Magnetventile)	451
14.5	Rückschlagventil NRV	453
14.6	Automatische Ventile für flüssige Wärme- und Kälte-träger	454
14.7	Sicherheitsventile und Berstscheiben	455
14.8	Temperatur- und Druckschalter	455
14.9	Druckregelventile	458
14.9.1	Verdampfungsdruckregler KVP	458
14.9.2	Verflüssigungsdruckregler KVR	459
14.9.3	Startregler KVL	459
14.9.4	Leistungsregler (Heißgasbypassregler) KVC	460
14.9.5	Sammlerdruckregler KVD	460
14.9.6	Überströmventile NRD (Differenzdruckregler)	461
14.10	Drosselorgane	462
14.10.1	Drosseln mit konstanten Durchflusswiderständen	462
14.10.2	Drosseln mit variablen Durchflusswiderständen	463
14.10.3	Automatische Drosselventile	463
14.10.4	Ventile für Trockenexpansionsverdampfer	464
15	Berechnung der Kältelast	473
15.1	Herleitung der Bilanzgleichung	473
15.2	Berechnung der Kältelast für einen Kühlraum	476
15.3	Beispiel zur Berechnung der Kältelast eines Kühlraums	485
15.4	Anmerkungen zur Bestimmung der Kältelast	487

16	Exergetische Betrachtungen	489
16.1	Einleitung – Exergiebegriff	489
16.2	Exergiebilanz und exergetischer Wirkungsgrad	491
16.3	Exergie einer thermischen Kraftmaschine	491
16.4	Exergie einer mechanisch angetriebenen Kältemaschine	493
16.5	Exergie einer thermisch angetriebenen Kältemaschine	494
16.6	Bestimmung von einzelnen Exergieverlusten	494
16.6.1	Exergieverlust bei Verdichtern	494
16.6.2	Exergieverlust bei der Wärmeübertragung	497
16.6.3	Exergieverluste durch Druckabfälle und Drosselung	499
16.7	Beispiele	500
16.7.1	Exergetische Verluste einer einstufigen Verdichterkältemaschine	500
16.7.2	Verdichter-Wärmepumpe mit innerem Wärmeübertrager	504
16.7.3	Absorptionskältemaschine	508
16.8	Unterschiedliche Nutzleistungen, unterschiedliche Temperaturen	509

A1	Thermodynamische Grundlagen und Begriffe	511
A1.1	Thermodynamisches System: die Bilanzgleichung	511
A1.1.1	Systemgrenzen	512
A1.1.1.1	Abgeschlossenes System	512
A1.1.1.2	Geschlossenes System	512
A1.1.1.3	Offenes System	513
A1.1.2	Zustandsgrößen	513
A1.1.2.1	Zustandsgrößen sind messbare Größen	513
A1.1.2.2	Intensive Zustandsgrößen	513
A1.1.2.3	Extensive Zustandsgrößen	513
A1.1.2.4	Spezifische Zustandsgrößen	514
A1.1.3	Zustandsänderungen	514
A1.1.3.1	Prozess, Kreisprozess	514
A1.1.3.2	Stationärer Zustand	514
A1.1.3.3	Instationäre Zustände und Prozesse	515
A1.1.3.4	Thermisches Gleichgewicht	515
A1.2	„Nullter Hauptsatz“ der Thermodynamik	515
A1.3	Massenbilanz	516
A1.4	Energiebilanz – der Erste Hauptsatz der Thermodynamik	516
A1.4.1	Zu den Begriffen Austausch, Übertragung und Transport	517
A1.4.2	Innere Energie, Wärme, Arbeit, Wärmestrahlung	517
A1.5	Zustandsänderungen	519
A1.5.1	Quasistatische Zustandsänderungen	519
A1.5.2	Reversible Zustandsänderungen	519
A1.5.3	Adiabate Zustandsänderungen	519
A1.5.4	Spezielle quasistatische Zustandsänderungen	519
A1.5.5	Zustandsänderungen am Beispiel: System Zylinder-Kolben mit einer konstanten Gasfüllung	521
A1.6	Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik	523
A1.7	Der 3. Hauptsatz der Thermodynamik	525
A1.8	Weitere Begriffe aus der Thermodynamik	526
A2	Bezeichnungen, Kenngrößen und Anhaltswerte	534
A2.1	Bezeichnungen	534
A2.2	Aufstellungsbereiche von Kälteanlagen	538
A2.3	Kenngrößen, Definitionen, Anhaltswerte	539
A2.3.1	Übliche Kenngrößen	539
A2.3.2	Überwiegend aus dem Englischen übernommene Definitionen	540
A2.3.3	Gebräuchliche Gerätebauarten (Wärmepumpen, Klimageräte)	542
A2.3.4	Anhaltswerte für Temperaturdifferenzen zur Wärmeübertragung	542

A2.3.5	Industriekälte	545
A2.3.6	Rohrleitungen	546
A3	Kurze Geschichte der Kältetechnik	548
A3.1	Verdichterkältemaschine	549
A3.2	Sorptionskältemaschinen	549
A3.3	Kaltgasmaschinen	550
A3.4	Weitere Entdeckungen und technische Entwicklungen	550
A3.5	Politische Entwicklungen	551
A3.6	Anwendungen	552
A4	Stoffwerte	553
A5	Symbole	562
Literatur	564
Stichwortverzeichnis	570