

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 7. Auflage .....	V
1 Hinweise für die Benutzung des Buchs .....	1
2 Warum kühlen wir Lebensmittel? .....	2
3 Veränderungen der Lebensmittel .....	3
3.1 Veränderung durch Mikroorganismen .....	3
3.2 Veränderungen durch chemische Umsetzungen .....	4
3.3 Veränderungen durch physikalische Einflüsse .....	5
4 Alte Verfahren der Haltbarmachung von Lebensmitteln .....	6
5 Kälteanlagen schon im Altertum .....	8
6 Neue Erkenntnisse .....	9
7 Kälteanlagen überall .....	10
8 Thermodynamik für Kälteanlagenbauer .....	10
9 Basiseinheiten .....	11
10 Abgeleitete Einheiten .....	14
11 Masse als Basisgröße .....	15
12 Dichte .....	16
13 Kräfte .....	18
14 Geschwindigkeit .....	19
14.1 Geradlinige Bewegung .....	19
14.2 Mittlere Geschwindigkeit bei Kurbeltrieben .....	19
14.3 Gleichmäßig beschleunigte Bewegung .....	20
14.4 Das Geschwindigkeits-Zeitgesetz .....	20
15 Dynamisches Grundgesetz .....	23
16 Druck und Druckausbreitung .....	24
16.1 Druck auf feste Unterlagen .....	24
16.2 Hydraulischer Druck .....	24
16.3 Schweredruck in Flüssigkeiten .....	26

---

16.4	Hydrostatisches Paradoxon .....	28
16.5	Auftrieb in Flüssigkeiten .....	29
16.6	Druckmessung .....	29
17	Manometer und Mano-Vakuummeter .....	32
17.1	Manometerarten .....	32
17.2	Zusammenfassung .....	33
17.3	Manometeranzeige .....	34
18	Wärmeenergie .....	37
18.1	Feste Stoffe .....	37
18.2	Flüssigkeiten .....	38
18.3	Gase .....	38
19	Unterschied zwischen Wärmeenergie und Temperatur .....	40
20	Temperaturskala .....	42
21	Die Celsius-Temperatur .....	43
22	Längenausdehnung fester Körper .....	45
23	Volumenausdehnung fester Körper .....	49
24	Volumenausdehnung von Flüssigkeiten .....	50
24.1	Flüssigkeiten (außer Wasser) .....	50
24.2	Anomalie von Wasser .....	51
24.3	Relative Volumenzunahme .....	52
25	Temperaturmessverfahren .....	55
25.1	Flüssigkeitsthermometer .....	55
25.2	Bimetallthermometer .....	55
25.3	Elektrisches Widerstandsthermometer .....	56
25.4	Thermoelement .....	56
26	Wasser als Energiequelle .....	58
27	Energie und Leistung .....	59
27.1	Leistung .....	59
27.2	Verdampfungsleistung der Kälteanlage .....	60
28	Spezifische Wärmekapazität von festen und flüssigen Stoffen .....	61

---

29	Verschiedene Arbeiten . . . . .	66
29.1	Arbeiten verrichten . . . . .	66
29.2	Auch Maschinen können arbeiten . . . . .	66
29.2.1	Umschreibung des Begriffes Arbeit . . . . .	66
29.2.2	Große und kleine Arbeiten. . . . .	67
29.3	Arbeit und Energie . . . . .	67
29.4	Potenzielle-, Spannungs- und Wärmeenergie . . . . .	68
29.5	Chemische Energie . . . . .	69
29.6	Potenzielle Energie . . . . .	70
29.7	Kinetische Energie . . . . .	71
30	Energie und Energieumwandlung. . . . .	72
30.1	Grundlagen zur Umwandlung mechanischer Energie in Wärmeenergie . . . . .	72
30.2	Ergänzungen zum Begriff der Energie . . . . .	75
31	Brennwert – Heizwert . . . . .	78
32	Wärmeübertragung . . . . .	80
32.1	Wärmeleitung . . . . .	81
32.2	Wärmeübergang durch Konvektion . . . . .	81
32.3	Wärmestrahlung . . . . .	82
33	Wärmeleitung. . . . .	84
33.1	Wärmeleitung in einer ebenen einschichtigen Wand . . . . .	84
33.2	Leitung des Wärmestroms in einer ebenen mehrschichtigen Wand . . . . .	87
33.3	Leitung des Wärmestroms in einer Rohrwand . . . . .	90
33.4	Zusammenfassung . . . . .	92
34	Wärmeübergang . . . . .	94
35	Wärmedurchgang. . . . .	96
35.1	Wärmedurchgang durch eine ebene Wand . . . . .	96
35.2	Wärmedurchgang durch eine mehrschichtige Rohrwand . . .	100
35.3	Zusammenfassung . . . . .	103
36	Zusammenhänge der Wärmeübergangskoeffizienten. . . . .	105
37	Wärmestrahlung. . . . .	113
37.1	Strahlung . . . . .	113
37.2	Wärmeübertragung durch Strahlung . . . . .	113
37.3	Reflexion, Absorption und Durchlässigkeit . . . . .	113
37.4	Abhängigkeit der Gesamtstrahlung von der Temperatur . . .	114

38	Schmelzpunkt und spezifische Schmelzenthalpie . . . . .	117
38.1	Schmelzen von Eis . . . . .	117
38.2	spezifische Schmelzenthalpie von Eis . . . . .	118
39	Siedepunkt und spezifische Verdampfungsenthalpie . . . . .	120
39.1	Siedepunkt – Sieden von Wasser . . . . .	120
39.2	spezifische Verdampfungsenthalpie . . . . .	120
40	Vergleich zwischen der spezifischen Schmelz- und Verdampfungsenthalpie. . . . .	122
41	Abhängigkeit der Siedetemperatur vom Atmosphärendruck – Dampfdruckkurve von Wasser . . . . .	123
42	Verdunstung von Flüssigkeiten . . . . .	125
43	Sublimieren von festen Stoffen . . . . .	125
44	Siedeverzug . . . . .	126
45	Wasserdampf. . . . .	127
46	Siedepunkt des Wassers bei variablem Druck. . . . .	129
47	Mischungstemperatur. . . . .	130
47.1	Temperaturgleichgewicht zwischen zwei unterschiedlichen erwärmten Flüssigkeiten . . . . .	130
47.2	Messung der Mischungstemperatur . . . . .	130
47.3	Temperaturerhöhung, erwärmte Masse und zugeführte Wärmeenergie . . . . .	132
48	Wärmestrom des Kühlguts . . . . .	133
48.1	Wärmestrom zum Abkühlen von Kühlgut . . . . .	133
48.2	Wärmestrom zum Gefrieren von Kühlgut . . . . .	134
48.3	Wärmestrom zum Unterkühlen von Kühlgut . . . . .	134
48.4	Wärmestrom durch Atmung von Kühlgut . . . . .	135
48.4.1	Atmung des Kühlguts . . . . .	135
48.4.2	CA-Lagerung . . . . .	135
49	Verdampfung und Verflüssigung bei gleicher Temperatur . . . . .	138
50	Verflüssigung bei höherer Temperatur als bei der Verdampfung . . . . .	139
51	Hauptteile der Kälteanlage . . . . .	140

---

52	Der Kältemittelkreislauf . . . . .	142
53	Zustandsänderungen von Gasen . . . . .	149
53.1	Wärmeausdehnung von Gasen . . . . .	149
53.2	Volumenausdehnung von Gasen . . . . .	150
53.3	Volumenausdehnung von Gasen bei konstantem Druck . . . . .	152
53.4	Verhalten der Gase bei konstanter Temperatur . . . . .	154
54	Vereinigtes Gasgesetz . . . . .	156
55	Normzustand . . . . .	156
55.1	Normvolumen . . . . .	156
55.2	Spezifisches Volumen . . . . .	156
56	Gasdichte . . . . .	157
57	Die Gaskonstante, allgemeine Zustandsgleichung . . . . .	158
58	Innere Energie und Enthalpie . . . . .	163
59	Spezifische Wärmekapazität von Gasen . . . . .	164
60	Die mittlere spezifische Wärmekapazität von Gasen . . . . .	167
61	Isobare . . . . .	168
62	Isochore . . . . .	170
63	Isotherme . . . . .	172
64	Isentrope . . . . .	175
65	Polytrope . . . . .	179
66	Kreisprozesse . . . . .	182
66.1	Begriff des Kreisprozesses . . . . .	182
66.2	Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .	184
66.3	Carnot-Prozess im Arbeitsdiagramm . . . . .	185
66.4	Praktischer Kreisprozess . . . . .	186
67	Das Indikatordiagramm . . . . .	187
68	Das Wärmediagramm . . . . .	188
69	Tatsächliche Kreisprozesse im T,s-Diagramm . . . . .	192
69.1	Carnot-Prozess . . . . .	192
69.2	Idealer Kreisprozess . . . . .	195

69.3	Praktischer Kreisprozess .....	196
69.4	Kreisprozess mit Unterkühlung und Überhitzung .....	198
70	Das lg p,h-Diagramm .....	200
70.1	Grundlagen .....	200
70.2	Aufbau des lg p,h-Diagramms .....	200
70.3	Berechnungen im lg p,h-Diagramm .....	211
70.3.1	Berechnung der Kälte-, Wärmezahl im Carnot-Vergleichsprozess .....	211
70.3.2	Praktische Kältezah .....	211
70.3.3	Kältezah des isentropen Vergleichsprozesses .....	212
70.3.4	Kältezah des isentropen Vergleichsprozesses mit Unterkühlung durch Kühlmittel .....	213
70.3.5	Kältezah des isentropen Vergleichsprozesses mit Unterkühlung in einem zusätzlichen Wärmeübertrager .....	214
70.3.6	Kältezah des praktischen Vergleichsprozesses .....	215
70.3.7	Effektiver Gütegrad .....	217
71	Kolbenverdichter – Berechnungsgrundlagen .....	218
71.1	Zustandsänderungen und Austausch von Wärmeenergie im Kältemittelverdichter .....	220
71.2	Liefergrad $\lambda$ und volumenstrombezogener Kältegewinn $q_{vol}$ .....	221
71.3	Volumenstrombezogener Gütegrad $\eta_v$ .....	221
71.4	Wandungsgütegrad $\eta_w$ .....	222
71.5	Lässigkeitsgrad $\eta_\lambda$ .....	222
71.6	Erfahrungswerte und DKV Arbeitsblatt 3-01 .....	223
71.7	Energiebilanz und innerer Gütegrad .....	223
71.8	Kälteleistung für Norm- und Anlagenbedingungen .....	225
72	Theoretischer volumenstrombezogener Kältegewinn .....	228
73	Antriebsleistung des offenen Kältemittelverdichters bei isentroper Verdichtung .....	230
73.1	Antriebsleistung des Motorverdichters .....	231
73.2	Energiebilanz einer Kälteanlage .....	232
74	Kälteanlagen im lg p,h-Diagramm .....	234
74.1	Heißdampfbypass-Regelung .....	234
74.2	Heißdampfbypass zur Aufrechterhaltung des Saugdrucks .....	235
74.3	Kältemittelmangel .....	236
74.4	Fremdgase in der Kälteanlage .....	236
74.5	Wärmeübertrager .....	237
74.6	Verflüssigungsdruck ist zu hoch .....	238
74.7	Druckdifferenz in der Saugleitung .....	239

75	Berechnung im lg p,h-Diagramm .....	240
75.1	Einstufige Kälteanlage mit offenem Kältemittelverdichter .....	240
75.2	Einstufige Kälteanlage mit Motorverdichter .....	243
76	Zweistufige Kälteanlagen .....	250
76.1	Zwischenkühlung durch Kühlmittel und Unterkühlung durch Saugdämpfe .....	250
76.2	Einstufige Entspannung und Zwischenkühlung durch Kältemittel .....	252
76.3	Zweistufige Entspannung und Zwischenkühlung durch Kältemittel in offener Mitteldruckflasche .....	259
76.4	Betriebsverhalten .....	267
76.5	Überprüfung einer Versuchskälteanlage .....	268
76.5.1	Beschreibung der Kälteanlage und des Messgerätes .....	268
76.5.2	Bedeutung der gemessenen Temperaturen und deren Aufgabe .....	268
76.5.3	Besondere Hinweise für die Überprüfung von Kälteanlagen .....	269
77	Kaskadenkälteanlage .....	272
78	Pumpenbetrieb .....	278
79	Kälteanlagen mit R-744 .....	285
79.1	Zur Geschichte .....	285
79.2	Grundlagen .....	286
79.3	Berechnungen im lg p,h-Diagramm für <i>R-744</i> .....	288
79.3.1	Berechnung der Kälteleistung ohne saugseitige Überhitzung mit Unterkühlung .....	289
79.3.2	Berechnung der Verdichtungsleistung ohne saugseitige Überhitzung mit Unterkühlung .....	290
79.3.3	Berechnung der Verflüssigungsleistung ohne saugseitige Überhitzung mit Unterkühlung .....	290
79.3.4	Berechnung der Kälteleistung mit saugseitiger Überhitzung und Unterkühlung .....	292
79.3.5	Berechnung der Verdichtungsleistung mit saugseitiger Überhitzung und Unterkühlung .....	293
79.3.6	Berechnung der Verflüssigungsleistung mit saugseitiger Überhitzung und Unterkühlung .....	293
79.4	Einstufig subkritisch arbeitende Kälteanlage mit Motor- verdichter – mit saugseitiger Überhitzung und Unterkühlung	294
79.5	Berechnung für eine subkritische Kälteanlage .....	294
79.6	Einstufig transkritisch arbeitende Kälteanlage mit Motorverdichter – mit saugseitiger Überhitzung ohne Unterkühlung .....	300

---

79.6.1	Betrieb im transkritischen Bereich . . . . .	300
79.6.2	Berechnung für eine transkritische Kälteanlage. . . . .	301
79.6.3	Transkritische Anlage mit Mitteldruckabscheider. . . . .	308
80	Psychrometrie . . . . .	317
80.1	Physikalische Eigenschaften trockener Luft . . . . .	317
80.1.1	Zusammensetzung trockener Luft . . . . .	317
80.1.2	Spezifisches Volumen trockener Luft . . . . .	317
80.1.3	Spezifische Wärmekapazität trockener Luft. . . . .	318
80.2	Enthalpie trockener Luft . . . . .	318
80.3	Physikalische Eigenschaften des Wasserdampfes . . . . .	318
80.3.1	Spezifisches Volumen des Wasserdampfes. . . . .	318
80.3.2	Dichte des Wasserdampfes. . . . .	319
80.3.3	Spezifisches Volumen des Luft-Wasserdampfgemisches. . . . .	320
80.3.4	Spezifische Wärmekapazität des Wasserdampfes . . . . .	321
80.3.5	Enthalpie des Wasserdampfes . . . . .	321
80.3.6	Gaskonstante des Wasserdampfes. . . . .	321
80.4	Physikalische Eigenschaften der Luft-Wasserdampfgemische . . . . .	321
80.4.1	Gasmischungen. . . . .	322
80.4.2	Verhalten der Einzelgase innerhalb einer Gasmischung. . . . .	323
80.4.3	Dalton'sches Gesetz . . . . .	324
80.5	Gesättigte und überhitzte Luft-Wasserdampfgemische . . . . .	324
80.6	Taupunkt . . . . .	325
80.7	Absolute Feuchte . . . . .	325
80.8	Relative Feuchte und Sättigungsverhältnis . . . . .	326
80.9	Isentrope Sättigung . . . . .	327
80.10	Feuchtkugeltemperatur . . . . .	328
81	Praxis des h,x-Diagramms im Kälteanlagenbau . . . . .	330
81.1	Praktische Anwendung der relativen Feuchte in der Luft . . . . .	335
81.2	Praktische Anwendung der Enthalpie . . . . .	341
82	Kältemittel. . . . .	349
82.1	Grundlegendes . . . . .	349
82.2	Umweltrelevanz . . . . .	349
82.3	TEWI-Kennwert . . . . .	350
82.4	Thermodynamische Eigenschaften . . . . .	352
82.4.1	Druck. . . . .	352
82.4.2	Sättigungstemperatur. . . . .	353
82.4.3	Spezifisches Volumen . . . . .	354
82.4.4	Enthalpie. . . . .	354
82.5	Kältemittelgemische . . . . .	357
82.5.1	Azeotrope Kältemittelgemische . . . . .	357
82.5.2	Nahezu azeotrope Kältemittelgemische. . . . .	357
82.5.3	Zeotrope Kältemittelgemische . . . . .	358

82.6	Temperaturgleit .....	358
82.7	Bezeichnung der chlorierten und fluorierten Methanderivate .....	359
82.8	Physikalische Eigenschaften .....	360
82.8.1	Mischbarkeit .....	361
82.8.2	Neigung zu Undichtigkeiten .....	362
82.8.3	Geruch .....	363
82.8.4	Verhalten gegen Feuchtigkeit .....	363
82.8.5	Giftigkeit .....	364
82.8.6	Brennbarkeit .....	365
82.8.7	Lecksuche – Einsatzbereich .....	367
83	Gebräuchliche Kältemittel .....	369
83.1	Kältemittel <i>R-134a</i> .....	369
83.2	Kältemittel <i>R-1234ze</i> .....	369
83.3	Kältemittel <i>R-404A</i> .....	370
83.4	Kältemittel <i>R-407C</i> .....	370
83.5	Kältemittel <i>R-410A</i> .....	371
83.6	Kältemittel <i>R-290</i> und <i>R-600a</i> .....	372
83.7	Kältemittel <i>R-717</i> .....	375
83.7.1	Herstellung .....	375
83.7.2	Eigenschaften .....	375
83.7.3	Gefährdungsgrad .....	378
83.7.4	Betriebsverhalten .....	380
83.7.5	Erste Hilfe .....	380
83.7.6	Vorschriften zur Sicherheit und Umweltschutz .....	381
83.7.7	Wassergefährdung durch <i>R-717</i> .....	381
83.8	Kältemittel <i>R-1270</i> .....	382
83.9	Kältemittel <i>R-744</i> .....	382
83.10	Einsatzkriterien von <i>R-717</i> und <i>R-744</i> in Kälteanlagen .....	385
83.10.1	Thermodynamische Eigenschaften von <i>R-717</i> und <i>R-744</i> .....	385
83.10.2	Kältemittelverluste .....	386
83.10.3	Kältemittelfüllmasse und Kosten .....	387
83.10.4	Schmieröl und Ölrückführung .....	387
83.10.5	Expansionseinrichtungen .....	387
83.10.6	Abtauen der Luftkühler .....	388
83.10.7	Kältemittelpumpenbetrieb .....	388
83.10.8	Abwärmenutzung .....	388
83.10.9	Vergleich der Investitionskosten .....	388
84	Umgang und Handhabung von Kältemitteln .....	390
84.1	Grundsätzliches .....	390
84.2	Handhabung von Kältemittelgemischen .....	390
84.3	Verunreinigungen und ihre Folgen .....	391
84.3.1	Feuchtigkeit .....	391
84.3.2	Fluor- und Chlorwasserstoffsäure .....	391

84.3.3	Organische Säuren	392
84.3.4	Öschlamm	392
84.3.5	Metallische Verunreinigungen	392
84.3.6	Nicht verflüssigbare Dämpfe	393
84.3.7	Ausbrennungen	393
85	Aktuelle Gesetze und Verordnungen für Betreiber von Kälteanlagen, Wärmepumpen und Klimaanlage	395
85.1	Grundlagen	395
85.2	Gesetze, Verordnungen und Normen	396
85.3	Geltungsbereich	397
85.4	Sicherheitstechnische Anforderungen und Regeln	397
85.5	Produktsicherheitsgesetz	397
85.6	Herstellung von Kälteanlagen	397
85.7	Betrieb von Kälteanlagen	398
85.8	Umwelttechnische Anforderungen und Regeln	398
85.9	Gesetze zum Schutz von Mensch, Tier und Umwelt	398
85.10	Verordnung zu Stoffen mit Ozon-Abbau-Potenzial – EG 1005/2009	399
85.11	Kennwert für das Ozongefährdungspotenzial (ODP)	399
85.12	Verordnung zu Stoffen mit Treibhauspotenzial – EG 517/2014	400
85.13	Kennwert für das Treibhauspotenzial (GWP)	400
85.14	Emissionen aus Klimaanlage in Kraftfahrzeugen – EG 40/2006	401
85.15	Normen zur Konformitätserklärung	401
86	Begriffe/Glossar	403
87	Tabellen und Diagramme	408
87.1	Dichtetabellen	408
87.2	Belegungsmassen	411
87.3	Belegungskoeffizienten	413
87.4	Spezifische Enthalpie von Kühlgütern	414
87.5	Lagerbedingungen und Stoffeigenschaften	416
87.6	Kälteleistung für Bierkühlung	441
87.7	Umgebungstemperaturen	442
87.8	Personenwärmestrom	443
87.9	Luftwechselraten	444
87.10	Wärmedurchgangskoeffizienten	445
87.11	Enthalpie der Luft	446
87.12	Zustandsgrößen feuchter Luft	448
87.13	Dampftafel R-718	454
87.14	Wärmeleitkoeffizienten	456

---

88	Lösungen zu den Übungen .....	459
88.1	Kapitel 10 .....	459
88.2	Kapitel 17 .....	459
88.3	Kapitel 21 .....	461
88.4	Kapitel 24 .....	462
88.5	Kapitel 30 .....	463
88.6	Kapitel 31 .....	463
88.7	Kapitel 36 .....	464
88.8	Kapitel 52 .....	470
88.9	Kapitel 57 .....	472
88.10	Kapitel 60 .....	473
88.11	Kapitel 65 .....	474
88.12	Kapitel 67 .....	476
88.13	Kapitel 81 .....	477
89	Dampf tafeln für R-134a, R-290, R-404A, R-410A, R-600a, R-717 und R-744 (Auszüge) .....	479
89.1	Verwendete Einheiten .....	479
89.2	Vergleich mit anderen Dampf tafeln oder den <i>Mollier</i> -Diagrammen .....	479
89.3	Nassdampf <i>R-134a</i> .....	480
89.4	Überhitzter Dampf <i>R-134a</i> .....	484
89.5	Nassdampf <i>R-290</i> .....	490
89.6	Überhitzter Dampf <i>R-290</i> .....	493
89.7	Nassdampf <i>R-404A</i> .....	501
89.8	Überhitzter Dampf <i>R-404A</i> .....	504
89.9	Nassdampf <i>R-410A</i> .....	516
89.10	Überhitzter Dampf <i>R-410A</i> .....	519
89.11	Nassdampf <i>R-600a</i> .....	527
89.12	Überhitzter Dampf <i>R-600a</i> .....	530
89.13	Nassdampf <i>R-717</i> .....	533
89.14	Überhitzter Dampf <i>R-717</i> .....	537
89.15	Nassdampf <i>R-744</i> .....	548
	Literaturverzeichnis .....	550
	Bildnachweis .....	551
	Stichwortregister .....	552