

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 Kältezahl	211
70.3.3	Kältezahl des isentropen Vergleichsprozesses	212
70.3.4	Kältezahl des isentropen Vergleichsprozesses mit Unterkühlung durch Kühlmittel	213
70.3.5	Kältezahl des isentropen Vergleichsprozesses mit Unterkühlung in einem zusätzlichen Wärmeübertrager	214
70.3.6	Kältezahl 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 λ und volumenstrombezogener Kältegewinn q_{vol}	221
71.3	Volumenstrombezogener Gütegrad η_v	221
71.4	Wandungsgütegrad η_w	222
71.5	Lässigkeitsgrad η_λ	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	Temperaturleit	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