

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Grundlagen, Kreisprozesse und Kennzahlen	13
1.1 Einführung	13
1.2 Angabe von technischen Daten für Wärmepumpen.....	15
1.3 Aufbau und Funktion einer Wärmepumpe am Beispiel einer einstufigen Kompressions-Wärmepumpe.....	15
1.3.1 Ergänzende Anmerkungen	17
1.4 Kältemittel.....	17
1.4.1 Allgemeines.....	17
1.4.2 Kältemittelleinteilung	19
1.4.3 Nomenklatur für Kältemittel.....	21
1.4.4 Ausgewählte Eigenschaften zu Kältemitteln.....	21
1.4.5 Kältemittel für Wärmepumpen.....	24
1.4.6 Low-GWP-Kältemittel für Wärmepumpen	25
1.4.7 Natürliche Kältemittel.....	25
1.4.8 Propan als Kältemittel	26
1.4.9 Kohlendioxid als Kältemittel.....	28
1.4.10 Wasser als Kältemittel.....	29
1.4.11 Ammoniak als Kältemittel	30
1.4.12 Kältemittel für Industrie-Wärmepumpen.....	32
1.5 Wärmequellenmedien.....	32
1.5.1 Alkohol-Wasser-Gemische	32
1.5.2 Wasser.....	33
1.5.3 Atmosphärische Luft.....	34
1.6 Kältemaschinenöle	34
1.7 Aufbau eines p, h-Diagramms.....	35
1.8 Vergleichsprozesse	37
1.8.1 Idealer Kreisprozess	37
1.8.2 Theoretischer Vergleichsprozess	39
1.8.3 Wirklicher Vergleichsprozess.....	39
1.8.4 Kreisprozess mit Druckverlusten.....	40
1.8.5 Kreisprozess für CO ₂ -Wärmepumpe im transkritischen Bereich	42
1.8.6 Kreisprozess für mechanische Brüdenverdichtung.....	43
1.8.7 Kreisprozess für thermische Brüdenverdichtung	44
1.9 Energiefluss im Elektromotor und im Wärmepumpenverdichter	45
1.10 Berechnungsgrundlagen und Kennzahlen	46
1.10.1 Druckverhältnis.....	46
1.10.2 Treibende Temperaturdifferenz	46
1.10.3 Verdampferleistung und Wärmequellenleistung.....	47
1.10.4 Verdichterleistung.....	47

1.10.5	Kondensatorleistung	49
1.10.6	Wirkliche spezifische Heizleistung.....	49
1.10.7	Volumetrische Heizleistung.....	50
1.10.8	Liefergrad eines Verdichters.....	50
1.11	Energiestrombilanz für eine Wärmepumpe	51
1.12	Sankey-Diagramm.....	52
1.12.1	Wärmepumpe mit Elektromotor.....	52
1.12.2	Wärmepumpe mit Verbrennungsmotor	52
1.13	Energetischer Wirkungsgrad.....	53
1.14	Leistungszahl	54
1.15	Arbeitszahl.....	54
1.16	Jahresarbeitszahl.....	54
1.17	Wärmepumpen mit brennbaren Kältemitteln	55
2	Verfahrensschemata für Kompressions-Wärmepumpen.....	57
2.1	Allgemeines.....	57
2.2	Luft/Wasser-Wärmepumpe	57
2.3	Sole/Wasser-Wärmepumpe	59
2.4	Wasser/Wasser-Wärmepumpe.....	60
2.5	Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Heißgasabtauung.....	62
2.6	Warmwasser-Wärmepumpe.....	63
2.7	Reversible Luft/Wasser-Wärmepumpe	64
2.8	Luft/Wasser-Wärmepumpe in Splitbauweise	65
2.9	Mechanische Brüdenverdichtungsanlage.....	65
2.10	Thermische Brüdenverdichtungsanlage	66
2.11	Wärmepumpe mit Verbrennungsmotor	67
3	Wärmepumpenkomponenten und Betriebsweisen	69
3.1	Wärmepumpenverdichter	69
3.1.1	Allgemeines.....	69
3.1.1.1	Verdrängermaschinen	70
3.1.1.2	Strömungsmaschinen.....	71
3.1.1.3	Vollhermetischer Verdichter	71
3.1.1.4	Halbhermetischer Verdichter.....	71
3.1.1.5	Offener Verdichter.....	71
3.1.2	Hubkolbenverdichter.....	71
3.1.3	Scrollverdichter.....	74
3.1.4	Rollkolbenverdichter	78
3.1.5	Leistungsregelung von Verdichtern.....	79
3.1.5.1	Heißgas-Bypass-Regelung.....	79
3.1.5.2	Invertertechnologie.....	79
3.1.5.3	Digital-Technologie	80
3.2	Kondensatoren	80
3.2.1	Allgemeines.....	80

3.3	Kondensatorbauarten	83
3.3.1	Plattenwärmeübertrager.....	83
3.3.2	Rohrbündel-Wärmeübertrager	84
3.4	Expansionsventile.....	85
3.4.1	Allgemeines.....	85
3.4.2	Thermostatisches Expansionsventil	87
3.4.3	Elektronisches Expansionsventil	88
3.4.4	Kapillarrohr	89
3.5	Verdampfer.....	89
3.5.1	Allgemeines.....	89
3.5.2	Verdampfer zur Flüssigkeitskühlung	91
3.5.2.1	Plattenverdampfer.....	91
3.5.2.2	Rohrbündelverdampfer	91
3.5.3	Verdampfer zur Luftkühlung	92
3.5.3.1	Rippenrohrverdampfer	92
3.5.3.2	Lamellenverdampfer.....	93
3.6	Reif- und Eisansatz.....	93
3.7	Abtauprozesse bei Wärmepumpen	96
3.7.1	Kreislaufumkehr.....	96
3.7.2	Heißgasabtauung	97
3.7.3	Elektrische Widerstandsheizung.....	97
3.8	Energiespeicher.....	97
3.8.1	Pufferspeicher	98
3.8.1.1	Reihenpufferspeicher.....	99
3.8.1.2	Parallelpufferspeicher	99
3.8.2	Warmwasserspeicher für Heizungswärmepumpen.....	101
3.9	Sicherheitseinrichtungen.....	102
3.10	Wärmemengenzähler	103
4	Weitere Wärmepumpenbauarten.....	105
4.1	Absorptions-Wärmepumpe.....	105
4.1.1	Aufbau und Funktion einer Absorptions-Wärmepumpe	106
4.1.1.1	Lösungswärmeübertrager.....	108
4.1.1.2	Kältetauscher.....	108
4.2	Adsorptions-Wärmepumpe.....	109
4.2.1	Adsorbentien	109
4.2.1.1	Zeolithe.....	109
4.2.1.2	Silicagel	110
4.2.2	Aufbau und Funktion einer Adsorptions-Wärmepumpe	111
4.2.3	Eigenschaften von Adsorptions-Wärmepumpen	113
5	Wärmepumpen im Vergleich zu anderen Wärmeerzeugern	115
5.1	Radiatorenheizung.....	115
5.2	Fußbodenheizung.....	117

5.3	Einbindung von Wärmepumpen in Gebäude	119
5.3.1	Festlegung des Bivalenzpunkts und des Auslegungspunkts.....	119
5.3.2	Heizleistungsdiagramm	119
5.3.3	Geordnete Jahresdauerlinie für die Außenlufttemperatur	121
5.4	Betriebsweisen von Wärmepumpen	122
5.4.1	Monovalenter Betrieb.....	123
5.4.2	Bivalent-alternativer Betrieb.....	123
5.4.3	Bivalent-paralleler Betrieb	124
5.4.4	Bivalent-teilparalleler Betrieb.....	125
5.4.5	Monoenergetischer Betrieb.....	125
5.5	Brennstoffe	126
5.6	Wärmepreise und Brennstoffnutzungsgrad.....	127
5.6.1	Brutto-Wärmepreis.....	127
5.6.2	Netto-Wärmepreis	128
5.6.2.1	Kesselanlage.....	128
5.6.2.2	Elektromotorisch angetriebene Kompressions-Wärmepumpe	128
5.6.2.3	Verbrennungsmotorisch angetriebene Kompressions-Wärmepumpe	129
5.6.3	Brennstoffnutzungsgrad	130
5.7	Kohlendioxidemissionen	132
6	Wärmepumpenanwendungen	135
6.1	Allgemeines.....	135
6.2	Häuslicher Bereich	135
6.2.1	Einfamilienhäuser	135
6.2.2	Mehrfamilienhäuser	136
6.3	Gewerbliche Gebäude.....	137
6.4	Gewerbe und Industrie.....	138
6.4.1	Eindampfung/Verdampfung	139
6.4.2	Trocknung	140
6.4.3	Destillation und Rektifikation	140
6.5	Anwendungen für thermisch angetriebene Wärmepumpen.....	141
6.6	Hybrid-Wärmepumpen.....	141
6.7	Wärmepumpen für Smart Grid	141
6.8	Wärmepumpen für Wärmenetze.....	142
7	Geothermie und andere Energiequellen.....	145
7.1	Verfügbare Wärmequellen.....	145
7.2	Auswahlkriterien für Wärmequellen	145
7.2.1	Verfügbarkeit.....	146
7.2.2	Wärmequellentemperatur	146
7.2.3	Nutzungserlaubnis.....	146
7.2.4	Kostengünstige Erschließung und Nutzung	146
7.2.5	Qualität (chemisch-physikalisch)	146
7.3	Außenluft	146

7.4	Erdwärme.....	147
7.4.1	Eigenschaften des Erdbodens.....	148
7.4.2	Ungestörte Erdreichtemperatur.....	149
7.4.3	Erdwärmekollektoren.....	150
7.4.3.1	Spezifische Entzugsleistung.....	151
7.4.4	Erdwärmesonden.....	151
7.4.4.1	Spezifische Entzugsleistung.....	151
7.4.4.2	Bauarten von Erdwärmesonden.....	152
7.4.4.3	Länge einer Erdwärmesonde.....	152
7.5	CO ₂ -Erdwärmesonden.....	153
7.6	Grundwasser als Wärmequelle.....	154
7.6.1	Auslegung der Wärmequellenanlage.....	155
7.7	Solarkollektoren.....	155
7.8	Sonstige Wärmequellen.....	156
7.9	Wärmepumpen und Photovoltaik.....	156
8	Nachhaltigkeit.....	159
8.1	Einführung.....	159
8.2	Nachhaltigkeit der Energieversorgung.....	160
8.3	Nachhaltigkeit von Kompressions-Wärmepumpen.....	160
8.4	TEWI-Wert.....	161
8.5	Nachhaltigkeit in der Vorkette.....	163
8.6	Nachhaltigkeit bei der Dimensionierung und Herstellung.....	163
8.7	Nachhaltigkeit beim Betrieb.....	164
8.8	Nachhaltigkeit bei Außerbetriebnahme.....	165
8.9	Ökobilanz für eine Wärmepumpe.....	166
9	Numerische Simulation von Kompressions-Wärmepumpen.....	169
9.1	Grundlagen.....	169
9.2	Modellbildung.....	169
9.3	Simulationsarten.....	170
9.4	Softwaretools.....	170
9.5	Anwendungen.....	171
9.5.1	Statische Kreislaufrechnung.....	171
9.5.2	Dynamische Kreislaufrechnung.....	171
9.6	Simulation Verdampfer.....	172
9.7	Simulation Verdichter.....	173
9.8	Simulation Kondensator.....	174
9.9	Simulation Expansionsventil.....	175
9.10	Simulation Kompressions-Wärmepumpe.....	176
9.11	Simulation Gebäude.....	177
9.12	Digitaler Zwilling.....	178
9.13	Hardware in the Loop.....	178

10 Digitalisierung	181
10.1 Definition und Einführung.....	181
10.2 Energieversorgung [10.2].....	181
10.3 Gebäudetechnik	183
10.4 Produktion von Wärmepumpen	188
10.5 Vertrieb und Service.....	188
10.6 Arten der Connectivity	189
10.7 Digitalisierung und Nachhaltigkeit	190
Stichwortverzeichnis	193