

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	5
<b>1 Grundlagen, Kreisprozesse und Kennzahlen</b> .....	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 <sub>2</sub> -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
<b>2</b>	<b>Verfahrensschemata für Kompressions-Wärmepumpen.....</b>	<b>57</b>
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
<b>3</b>	<b>Wärmepumpenkomponenten und Betriebsweisen .....</b>	<b>69</b>
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
<b>4</b>	<b>Weitere Wärmepumpenbauarten.....</b>	<b>105</b>
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
<b>5</b>	<b>Wärmepumpen im Vergleich zu anderen Wärmeerzeugern .....</b>	<b>115</b>
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
<b>6</b>	<b>Wärmepumpenanwendungen .....</b>	<b>135</b>
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
<b>7</b>	<b>Geothermie und andere Energiequellen.....</b>	<b>145</b>
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 <sub>2</sub> -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
<b>8</b>	<b>Nachhaltigkeit.....</b>	<b>159</b>
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
<b>9</b>	<b>Numerische Simulation von Kompressions-Wärmepumpen.....</b>	<b>169</b>
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

<b>10 Digitalisierung</b> .....	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
<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	193