

Inhalt

1. Einleitung	1
2. Einsatzmöglichkeiten, Klassifikation	3
2.1. Wärmequellen	3
2.2. Bauarten von Wärmepumpen und Wärmepumpenanlagen	3
2.3. Anwendung von Wärmepumpen	5
2.4. Klassifikation	7
3. Thermodynamische Grundlagen	10
3.1. Innere Energie, Enthalpie, Wärme, Entropie	10
3.2. Energie, Exergie, Anergie	12
3.3. Exergiebedarf beim Heizen	14
3.4. Möglichkeiten des Wärmetransports entgegen dem natürlichen Temperaturgefälle	16
3.5. Kompressionswärmepumpe	17
3.5.1. Idealprozeß	17
3.5.2. Funktion der Kaltdampfkomppressionsmaschine	20
3.5.3. Abweichungen vom Idealprozeß	21
3.5.4. Verbesserungen durch Unterkühlung	21
3.5.5. Exergie-Anergie-Flußbild	23
3.5.6. Leistungszahl	24
3.5.7. Kältemittel	27
3.5.8. Kaltluftkompressionsmaschine	32
3.6. Absorptionswärmepumpe	33
3.6.1. Funktion der Absorptionswärmepumpe	33
3.6.2. Darstellung des Prozesses	34
3.6.3. Kenngrößen des Absorptionsprozesses	38
3.6.4. Verbesserung des Wärmeverhältnisses durch inneren Wärmeaustausch	41
3.6.5. Arbeitsmittel	42
3.7. Dampfstrahlwärmepumpe	46
3.8. Thermoelektrische Wärmepumpe	47
3.8.1. Grundlagen	47
3.8.2. Aufbau	48
3.8.3. Kenngrößen des thermoelektrischen Prozesses	49

4. Wärmequellen	54
4.1. Natürliche Wärmequellen	57
4.1.1. Luft	57
4.1.2. Erdboden	65
4.1.2.1. Eigenschaften des Erdbodens	66
4.1.2.2. Jährlicher Temperaturverlauf im ungestörten und gestörten Erdbreich	67
4.1.2.3. Bemessungsrichtlinien für horizontal verlegte Rohr- schlangen	69
4.1.2.4. Vertikale Erdwärmesonden	71
4.1.3. Wasser	72
4.1.3.1. Grundwasser	72
4.1.3.2. Oberflächenwasser	74
4.1.4. Sonnenstrahlung	76
4.1.4.1. Meteorologische Daten über Solarstrahlung [4-33]	77
4.1.4.2. Solarkollektoren	78
4.1.4.3. Wärmeabsorber (Energiedächer u. ä.)	82
4.1.4.4. Kombinierte Systeme	84
4.1.4.5. Solar-Abluftfassade	86
4.2. Energiespeicher	87
4.2.1. Temperatur- und Heizleistungsverteilung während einer Heiz- periode	87
4.2.2. Verbesserung durch Einsatz thermischer Speicher	88
4.2.3. Auslegung eines thermischen Speichers	90
4.2.4. Speicher zum Ausgleich von Kühl- und Heizlast	94
5. Grundsätzliches zur Betriebskosten- und Wirtschaftlichkeitsberechnung	95
5.1. Wirtschaftlichkeitsberechnungen in Zeiten rascher Kostenänderungen	95
5.1.1. Die Kapitalrückflußdauer	95
5.1.2. Annuitätsberechnung (gemäß VDI 2067 [5-3])	95
5.1.3. Methode des inneren Zinssatzes (Discounted-Cash-Flow/DCF)	96
5.1.4. Dynamische Annuitätsmethode [5-4]	97
5.1.5. Hochrechnungsverfahren	98
5.1.6. Wirtschaftlichkeitsbeurteilung	99
5.2. Energie-(Betriebs-)kosten	99
5.2.1. Stromversorgung	100
5.2.2. Gasversorgung	102
5.2.3. Energieverbrauch, Wärmepreis, Wärmekosten	102
5.3. Wirtschaftlichkeitsvergleiche	105
5.3.1. Faktoren	105
5.3.2. Kapital- und Erhaltungskosten	106
5.3.2.1. Investitionskosten	106
5.3.2.2. Wartungs- und Instandhaltungskosten	106
5.3.2.3. Lebensdauer und Abschreibung	107

5.3.3. Eine Vergleichsrechnung als Beispiel	107
5.3.3.1. Kapitalkosten und daraus abgeleitete Kosten	108
5.3.3.2. Wärmequellenkosten	108
5.3.3.3. Betriebskosten	110
5.3.3.4. Spezifische Gesamtkosten für Wärme	110
5.3.4. Wärmepumpen im Ein- und Mehrfamilienhaus bis 50 kW Wärme- bedarf	111
5.3.4.1. Investitionskosten	111
5.3.4.2. Betriebskosten	113
5.3.4.3. Wirtschaftlichkeit	113
5.4. Erfahrungen des Autors	114
5.4.1. Gesamtinvestitionskosten	114
5.4.2. Betriebskosten von Wärmepumpen	114
5.4.2.1. Jahresarbeitszahl	114
5.4.2.2. Kapital- und Erhaltungskosten	115
5.4.3. Ergebnis	116
5.5. Optimierungsrechnung	116
5.5.1. Wärmebedarfsberechnung	119
5.5.2. Systemwahl	120
5.5.3. Schrittweise Berechnung	120
Wärmepumpen in der Energiewirtschaft	125
6.1. Allgemeine Energiesituation	125
6.2. Fernheizung und Wärmepumpe	130
6.3. Bivalente Heizsysteme	131
Aufbau von Wärmepumpen – Wärmepumpensysteme	136
7.1. Verdichter-Kaltdampf-Wärmepumpe	137
7.1.1. Einstufiger Prozeß	137
7.1.2. Annäherung an den Lorenz-Prozeß	138
7.1.3. Zweistufiger Prozeß	140
7.2. Bauteile der Wärmepumpe und deren Optimierung	141
7.2.1. Verdichter	142
7.2.1.1. Hubkolbenverdichter	144
7.2.1.2. Rollkolben- und Wankelverdichter	146
7.2.1.3. Sonstige Verdrängungsverdichter, Schraubenverdichter	147
7.2.1.4. Turboverdichter	148
7.2.2. Wärmeübertrager	149
7.2.2.1. Berechnung der Wärmeübertrager	150
7.2.2.2. Wärmeübergangskoeffizienten	150
7.2.2.3. Strömungswiderstand	151
7.2.2.4. Optimierungsberechnungen	151
7.2.2.5. Rotierende Wärmeübertrager	153

7.2.3.	Besondere Geräte zur Regelung des Wärmepumpenkreislaufs	153
7.2.3.1.	Regelung der umlaufenden Flüssigkeitsmenge	153
7.2.3.2.	Kältemittel-Umschaltventil	155
7.2.3.3.	Elektrische Steuer- und Kontrollgeräte, Sicherheitsschalter	156
7.2.3.4.	Abtauautomatik	157
7.2.4.	Antriebe	158
7.2.4.1.	Elektromotore	158
7.2.4.2.	Verbrennungsmotore	160
7.3.	Kompaktgeräte	160
7.3.1.	Kleinwärmepumpen	161
7.3.1.1.	Warmwasserbereiter	161
7.3.1.2.	Raum-Heiz-Klimageräte	164
7.3.1.3.	Kleinwärmepumpen für einen geschlossenen Wasserkreislauf	164
7.3.2.	Hausheizwärmepumpen	166
7.3.2.1.	Luft/Luft-Wärmepumpen	167
7.3.2.2.	Wasser/Luft-Wärmepumpen	171
7.3.2.3.	Wasser/Wasser-Wärmepumpen	172
7.3.2.4.	Erdreich/Wasser- oder Absorber/Wasser-Wärmepumpen	175
7.3.2.5.	Luft/Wasser-Wärmepumpen	176
7.3.2.6.	Hausheizwärmepumpen mit Verbrennungsmotor-Antrieb	181
7.3.2.7.	Absorptions-Wärmepumpen	182
7.4.	Wärmepumpen-Sätze	184
7.4.1.	Kaltwasser-Heizwasser-Sätze mit Elektromotor-Antrieb	184
7.4.2.	Wärmepumpensätze mit Antrieb durch Verbrennungsmotoren (Gasmotor-Wärmepumpe)	188
7.4.3.	Luft/Wasser-Wärmepumpensätze	191
7.5.	Absorptionswärmepumpen	193
7.5.1.	Überblick	193
7.5.2.	Technische Eigenschaften	193
7.5.2.1.	Leistungsbereich, Einsatzgrenzen	194
7.5.2.2.	Wärmeverhältnis und Jahresheizzahl	194
7.5.2.3.	Regelung	195
7.5.2.4.	Der Gütegrad	196
7.5.2.5.	Betriebsverhalten	197
7.5.3.	Anlagentechnik	197
7.5.3.1.	Bemessungsgrundsätze	197
7.5.3.2.	Apparate	199
7.5.3.3.	Ausgeführte Anlagen	201
7.5.4.	Weiterentwicklungen	205
7.5.4.1.	Methanol-Lithiumbromid-Absorptionswärmepumpe	205
7.5.4.2.	Die R22-E181-Absorptionswärmepumpe	205
7.5.4.3.	Verbundschaltungen	206
7.5.4.4.	Periodisch arbeitende Systeme	206
7.5.4.5.	Wärmetransformatoren	207

7.5.5. Wirtschaftlichkeit von Absorptionswärmepumpen	208
7.5.5.1. Lebensdauer, Wartung	208
7.5.5.2. Investitionskosten	208
7.5.5.3. Vergleich mit anderen Wärmepumpen-Systemen	209
7.6. Kaltluftwärmepumpen	209
7.6.1. Luftwärmepumpen mit Expansionsmaschine	209
7.6.2. Luftwärmepumpen mit Zellenraddruckaustauscher	209
7.7. Thermoelektrische Wärmepumpen	211
7.7.1. Anwendungsbeispiele thermoelektrischer Wärmepumpen	211
8. Geschichtliche Entwicklung der Wärmepumpe	214
8.1. Pionierzeit	214
8.2. Auswirkungen der ersten Energiekrise während des Zweiten Weltkrieges	217
8.3. Erster Entwicklungsboom in den USA und das „dark age“	220
8.4. Entwicklung in anderen Ländern bis Mitte der 70er Jahre	223
8.4.1. Belgien	224
8.4.2. Frankreich	224
8.4.3. Bundesrepublik Deutschland	225
8.4.4. England	227
8.4.5. Schweiz	228
8.5. Entwicklung nach der Ölkrise 1973	228
8.5.1. Bundesrepublik Deutschland	228
8.5.2. Vereinigte Staaten von Amerika	232
8.5.3. Schweden	233
9. Beispiele aus der Praxis	234
9.1. Wärmepumpen für die Beheizung von Ein- und Zweifamilienhäusern	234
9.1.1. Entwicklung der Heizanlagen	234
9.1.2. Einflüsse durch energie- und tarifpolitische Maßnahmen	237
9.1.3. Hausheizwärmepumpen mit Luft als Wärmequelle	238
9.1.3.1. Luft/Luft-Wärmepumpen	238
9.1.3.2. Monovalente Luft/Wasser-Wärmepumpen	240
9.1.3.3. Bivalente Luft/Wasser-Wärmepumpen	240
9.1.4. Hausheizwärmepumpen mit Wasser als Wärmequelle	244
9.1.4.1. Wasser/Wasser-Wärmepumpen	244
9.1.4.2. Wasser/Luft-Wärmepumpen	249
9.1.5. Hausheizwärmepumpen mit Erdreich als Wärmequelle	250
9.1.6. Hausheizwärmepumpen mit Solarkollektoren als Wärmequelle	254
9.1.7. Sonderanlagen	255
9.1.7.1. Lüftungswärmepumpe [9-18]	255
9.1.7.2. Wärmegewinn aus den Hausumschließungen	255
9.1.8. Zusammenfassung	255

9.2. Private Hallenschwimmbäder	256
9.2.1. Physikalische Vorgänge, Verbrauchszahlen	256
9.2.2. Kompaktwärmepumpen zur Entfeuchtung und Beheizung	260
9.2.3. Beispiele ausgeführter Anlagen	263
9.3. Klimaanlage in Großgebäuden mit Kleinwärmepumpenanlagen	265
9.3.1. Systembeschreibung	265
9.3.2. Beispiele ausgeführter Anlagen	267
9.3.3. Betriebserfahrungen, Betriebskosten	269
9.4. Klimaanlage in Großgebäuden mit Wärmerückgewinn durch zentrale Wärmepumpen	272
9.4.1. Beispiele reiner Fortluft-Wärmerückgewinnungs-Wärmepumpen	277
9.4.1.1. Deutsche Klinik für Diagnostik in Wiesbaden	277
9.4.1.2. Wärme-Kälte-Zentrale der Universität Bayreuth (allelek- trische Anlage)	279
9.4.1.3. Verwaltungsgebäude der Westfälischen Ferngas-AG	280
9.4.1.4. Möbelhaus Janes in Gladbeck	281
9.4.2. Beispiele für Kombinationen von Wärmerückgewinnung mit Wärme- pumpe und externer Wärmequelle (Ganzjahresklimaanlagen mit Wärmepumpe)	282
9.4.2.1. Luft/Wasser-Wärmepumpe im Bürogebäude der Columbus and Southern Electric Comp. in Columbus (Ohio)	284
9.4.2.2. Allelektrische Oberflächen/Wasser-Wärmepumpen für das Kultur- und Verwaltungszentrum Ahlen	285
9.4.2.3. Absorptions-Wärmepumpe für ein Verwaltungsgebäude in Meckenheim-Merl	287
9.4.2.4. Wasser/Wasser-Wärmepumpe im Zahlerprüfamt Kettwig	291
9.4.3. Kombinationen von Wärmepumpen und Wärmerückgewinnungs- systemen	294
9.5. Großheizwärmepumpen zur Gebäudeheizung mit äußerer Wärmequelle und ohne Wärmerückgewinn	297
9.5.1. Heizwärmepumpen mit Wasser (auch Laufwasser) als Wärmequelle	297
9.5.1.1. Die erste Heizanlage dieser Art im Werksgelände der Escher- Wyss AG in Zürich	297
9.5.1.2. Siedlungsheizzentrale in Balzers (Liechtenstein)	298
9.5.1.3. Wohnanlage Schelztorstraße in Esslingen (Laufwasser- Wärmepumpen)	298
9.5.1.4. Krankenhaus in Altdorf (Schweiz)	300
9.5.1.5. Beispiel einer bivalent-parallelen Grundwasser-Wärmepumpe in einem Verwaltungs- und Laborgebäude	302
9.5.2. Heizwärmepumpen mit Luft als Wärmequelle	304
9.5.2.1. Luft/Wasser-Wärmepumpe in Dortmund [9-67]	304
9.5.2.2. Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Gasmotor [9-68]	304
9.5.2.3. Luft/Wasser-Elektrowärmepumpe mit Nachtstromspeicher	307

9.5.3. Verwendung von Abwärme benachbarter Betriebe	308
9.5.3.1. Abwärmenutzung einer Glashütte	309
9.5.3.2. Abwärmenutzung aus einem Gefrierbetrieb	309
9.5.3.3. Heiz-Kühl-Zentrale der Chemischen Werke CIBA in Basel . .	309
9.5.3.4. Kühlhausheizwärmepumpe	310
9.5.3.5. Kombinationen von Kunsteisbahnen und Sportstätten . . .	311
9.6. Gebäude mit hohem technischen Aufwand	313
9.6.1. Öffentliche Frei- und Hallenbäder	313
9.6.1.1. Freibäder	313
9.6.1.2. Kombination von Freibädern und Eisbahnen	315
9.6.1.3. Hallenbäder	317
9.6.2. Wasserwerke	324
9.6.3. Wärmepumpenklimaanlagen in Rechenzentren	327
9.6.3.1. Energiebilanz eines Rechenzentrums	328
9.6.3.2. Beispiele	329
9.6.4. Wärmepumpen in Fernheizsystemen	330
9.6.4.1. Die Einbindung in bestehende Netze	330
9.6.4.2. Die kleine Fernheizzentrale mit Wärmepumpe	331
9.7. Wärmepumpen in der Industrie	333
9.7.1. Trocknungsverfahren	334
9.7.2. Destillations- und Eindampfprozesse	335
9.7.3. Wärmerückgewinnung	340
9.7.4. Integrierte Energieversorgung	341
Schrifttum	343
Sachwortverzeichnis	361