

## **Kälte - Wärme - Klima - Aktuell**

Berichte aus den Fachbereichen Kälte, Wärme, Klima, Lüftung, Energie,  
Regelung, Gebäudeautomation, Schallschutz

Band 28

# **Wärmepumpen**

**Band 3: Anwendung der Gas- und  
Dieselwärmepumpe in der Haustechnik**

**von Herbert Jüttemann  
Herausgeber Prof. Herbert Kim**



**Verlag C. F. Müller Karlsruhe**

# INHALTSVERZEICHNIS

	Zum Geleit/Vorwort . . . . .	V
1.	Allgemeines . . . . .	1
1.1	Einsparung von Energie . . . . .	1
1.2	Verfügbarkeit von Erdgas . . . . .	2
1.3	Verfügbarkeit von Mineralöl . . . . .	3
2.	Begriffe und Grundgrößen für Verbrennungsmotoren . . . . .	4
2.1	Einteilung der Verfahren. . . . .	4
2.2	Bauformen . . . . .	4
2.3	Einteilung nach Drehfrequenzbereichen . . . . .	5
2.4	Luftverhältnis . . . . .	6
2.5	Liefergrad des Verbrennungsmotors. . . . .	6
2.6	Mittlere Kolbengeschwindigkeit . . . . .	6
2.7	Wirkungsgrad . . . . .	7
2.8	Kolbendruck . . . . .	8
2.9	Wellenleistung . . . . .	8
2.10	Drehmoment an der Kupplung . . . . .	9
2.11	Kraftstoffverbrauch . . . . .	10
2.12	Spezifischer Wärmeverbrauch des Motors. . . . .	10
2.13	Leistungsgewicht . . . . .	11
2.14	Betriebsverhalten bei konstanter Kraftstoffzufuhr. . . . .	11
2.15	Betriebsverhalten bei konstanter Drehfrequenz . . . . .	13
3.	Arten der Verbrennungsmotoren zum Antrieb von Wärmepumpen . . . . .	14
3.1	Dieselmotor. . . . .	14
3.1.1	Arbeitsablauf . . . . .	14
3.1.2	Einspritzpumpe. . . . .	16
3.1.3	Zündung . . . . .	17
3.1.4	Luftverhältnis . . . . .	17
3.1.5	Gemischbildung . . . . .	18
3.1.6	Verdichtungsverhältnis . . . . .	21
3.1.7	Leistungssteuerung . . . . .	21
3.2	Ottomotor. . . . .	21
3.2.1	Merkmale . . . . .	21
3.2.2	Das Klopfen. . . . .	22
3.2.3	Luftverhältnis . . . . .	23
3.2.4	Verdichtungsverhältnis und Wirkungsgrad. . . . .	23
3.2.5	Leistungssteuerung . . . . .	23
3.3	Gas-Otto-Motor. . . . .	24
3.3.1	Umstellen eines Benzinmotors auf Gas-Otto-Betrieb. . . . .	24
3.3.2	Gemischbildung . . . . .	24
3.3.3	Entwicklung von Gas-Otto-Motoren auf der Grundlage von Dieselmotoren. . . . .	24

3.4	Gas-Diesel-Motor (Zündstrahlmotor) . . . . .	25
3.4.1	Arbeitsweise . . . . .	25
3.4.2	Vergleich von Gas-Otto-und Gas-Diesel-Verfahren . . . . .	25
4.	Abgasurboaufladung . . . . .	27
4.1	Allgemeines. . . . .	27
4.2	Ladeverfahren ohne Abgasausnutzung . . . . .	27
4.3	Abgasturboaufladung. . . . .	27
4.4	Staubetrieb. . . . .	28
4.5	Stoßbetrieb. . . . .	28
4.6	Ladeluftkühlung . . . . .	29
4.7	Ladeluftkühlung mit Kälteanlage . . . . .	30
4.8	Turbokühlung der Ladeluft . . . . .	31
4.9	Das Miller-Verfahren beim Gas-Otto-Motor. . . . .	32
4.10	Leistungssteigerung durch Turboaufladung . . . . .	33
4.11	Nutzung der Kühlwasserwärme des Ladeluftkühlers. . . . .	34
4.12	Die Bedeutung der Abgasturboaufladung der Antriebsmotoren für Wärmepumpen. . . . .	34
<b>5.</b>	<b>Kraftstoffarten und Kraftstoffverbrauch. . . . .</b>	<b>35</b>
<b>5.1</b>	Dieselmotorkraftstoff. . . . .	35
5.2	Gas als Kraftstoff. . . . .	36
5.2.1	Klopffestigkeit des Gases. . . . .	36
5.2.2	Motor und Gasart . . . . .	36
5.2.3	Erdgas . . . . .	38
5.2.4	Flüssiggas. . . . .	38
5.2.5	Biogas. . . . .	40
5.2.6	Klärgas. . . . .	40
5.3	Kraftstoffverbrauch. . . . .	41
5.3.1	Kraftstoffdurchsatz. . . . .	41
5.3.2	Spezifischer Kraftstoffverbrauch. . . . .	42
5.4	Bestimmung des Jahreskraftstoffbedarfs und des Jahres- energiebedarfs. . . . .	45
5.4.1	Der spezifische Kraftstoffbedarf ist bekannt. . . . .	45
5.4.2	Der spezifische Wärmeverbrauch ist bekannt. . . . .	46
5.4.3	Der effektive Wirkungsgrad ist bekannt. . . . .	46
5.5	Der Jahresenergieverbrauch. . . . .	47
<b>6.</b>	<b>Nutzungsdauer. . . . .</b>	<b>48</b>
6.1	Allgemeines. . . . .	48
6.2	Die Zeitdauer zwischen zwei Grundüberholungen. . . . .	48
6.3	Lebensdauer einzelner Bauteile. . . . .	49
<b>7.</b>	<b>Schallemission. . . . .</b>	<b>50</b>
7.1	Geräuschmessung . . . . .	50

7.2	Schalldruckpegel von Verbrennungsmotoren . . . . .	51
7.3	Geräuschminderung am Motor. . . . .	51
7.4	Schalldämpfer. . . . .	52
7.5	Vermindern des Luftschalls. . . . .	53
7.6	Vermindern des Körperschalls. . . . .	54
7.7	Erfüllen der Forderungen der TA-Lärm. . . . .	54
<b>8.</b>	<b>Schadstoffemission</b> . . . . .	<b>56</b>
8.1	Allgemeines. . . . .	56
8.2	Einheiten . . . . .	56
8.3	Kohlendioxid CO <sub>2</sub> . . . . .	58
8.4	Kohlenmonoxid CO. . . . .	58
8.5	Kohlenwasserstoffe C <sub>m</sub> H <sub>n</sub> . . . . .	59
8.6	Schwefeloxide SO. . . . .	60
8.7	Stickoxide NO <sub>x</sub> . . . . .	60
8.8	Aldehyde R • CHO. . . . .	61
8.9	Rauch und Ruß. . . . .	62
8.9.1	Allgemeines. . . . .	62
8.9.2	Messen der Rauchdichte. . . . .	62
8.10	Aussagen der TA-Luft. . . . .	64
8.10.1	Rußemission. . . . .	64
8.10.2	Immission und Emission von Stickoxiden. . . . .	64
<b>9.</b>	<b>Wärmeabgabe des Motors und seine Nutzung</b> . . . . .	<b>66</b>
9.1	Arten der Motorkühlung . . . . .	66
9.1.1	Allgemeines. . . . .	66
9.1.2	Normale Kühlung. . . . .	67
9.1.3	Heißwasserkühlung. . . . .	69
9.1.4	Heißwasserkühlung mit Entspannungsverdampfer. . . . .	70
9.1.5	Siedekühlung. . . . .	71
9.1.6	Luftkühlung . . . . .	71
9.2	Wärmenutzung des Abgases. . . . .	72
9.3	Die Ladeluftkühlung. . . . .	73
9.4	Wärmebilanz bei Vollast. . . . .	73
9.5	Wärmebilanz bei Teillast. . . . .	76
<b>10.</b>	<b>Kompressionswärmepumpen</b> . . . . .	<b>78</b>
10.1	Allgemeines. . . . .	78
10.2	Leistungszahl $\epsilon$ . . . . .	79
10.3	Die Arbeitszahl $\beta$ . . . . .	81
10.4	Die Heizzahl $\gamma$ . . . . .	82
10.5	Wärmeentnahmemenge aus der Wärmequelle. . . . .	83
10.6	Vergleich der Antriebsleistungen für die Wärmepumpen. . . . .	85
10.7	Heizwärmeabgabe. . . . .	85
10.7.1	Alleinige Heizwassererzeugung . . . . .	85

10.7.2	Gesonderte Nutzung der Motorabwärme. . . . .	87
10.8	Wärmequellen. . . . .	90
10.8.1	Grundwasser. . . . .	90
10.8.2	Außenluft. . . . .	92
10.8.2.1	Betriebsweisen der Wärmepumpen. . . . .	92
10.8.2.2	Antriebsarten des Außenluftgebläses. . . . .	97
10.8.3	Erdreich. . . . .	98
10.8.4	Sonnenenergie. . . . .	98
10.8.5	Oberflächenwasser. . . . .	99
10.9	Einsatz der Wärmepumpe auch als Kältemaschine. . . . .	99
10.10	Fortluftwärmepumpe. . . . .	101
10.11	Kombination einer Kompressionswärmepumpe mit einer Absorptionswärmepumpe. . . . .	103
10.12	Verdichter. . . . .	104
10.12.1	Kolbenverdichter. . . . .	104
10.12.2	Schraubenverdichter. . . . .	105
10.12.3	Turboverdichter. . . . .	108
10.13	Kopplung von Verbrennungsmotor und Wärme- pumpenverdichter. . . . .	109
10.14	Beanspruchung der Fundamente und Decken. . . . .	109
10.15	Anlagen mit mehreren Verbrennungsmotor- Wärmepumpen. . . . .	111
<b>11.</b>	<b>Möglichkeiten der Mitnutzung von Ersatzstromaggregaten</b> . . . . .	<b>112</b>
11.1	Ersatzstromaggregat in Kombination mit einer Wärmepumpe. . . . .	112
11.2	Antrieb der Wärmepumpe über eine elektrische Kraftübertragung . . . . .	116
11.3	Betrieb mehrerer Ersatzstromaggregate und Wärmepumpen. . . . .	117
11.4	Unabhängigkeit vom öffentlichen Stromnetz. . . . .	117
<b>12.</b>	<b>Wartung und Überwachung</b> . . . . .	<b>118</b>
12.1	Allgemeines. . . . .	118
12.2	Ölwechsel. . . . .	118
12.3	Ansaugluftfilter. . . . .	119
12.4	Filter des Schmierölsystems. . . . .	119
12.5	Filter des Kraftstoffsystems. . . . .	119
12.6	Zündeinrichtung. . . . .	119
12.7	Einspritzeinrichtung. . . . .	119
12.8	Ventile. . . . .	120
12.9	Kolben. . . . .	120
12.10	Abgasturbolader. . . . .	120
12.11	Weitere Wartungsarbeiten. . . . .	121
12.12	Wartungsintervalle. . . . .	121
12.13	Teilüberholung. . . . .	121
12.14	Grundüberholungen. . . . .	121
12.15	Überwachung. . . . .	122

13.	<b>Bestimmung des Jahreswärmebedarfs</b> . . . . .	123
13.1	Wärmeleistungskurven . . . . .	123
13.2	Bestimmung des durch eine Kesselanlage bereitgestellten Jahresenergiebedarfs unter Benutzung der Häufigkeits- verteilung der Außentemperatur. . . . .	127
13.3	Bestimmung des Jahresenergiebedarfs einer monovalent- parallel betriebenen Verbrennungsmotor-Wärmepumpe. . . . .	132
13.3.1	Leistungszahl in Abhängigkeit von der Außentemperatur. . . . .	132
13.3.2	Ansteigen der Verflüssigungstemperatur mit zunehmender Temperatur der Wärmequelle. . . . .	135
13.3.3	Tabellarische Bestimmung des Jahresenergiebedarfs. . . . .	136
13.4	Monovalent betriebene Verbrennungsmotor-Wärmepumpe ohne Zusatzkessel . . . . .	138
13.5	Minderung des Jahresenergiebedarfs für Wärme und Kälte. . . . .	140
<b>14.</b>	<b>Wirtschaftlichkeit</b> . . . . .	<b>141</b>
14.1	Investitionskosten. . . . .	141
14.1.1	Kesselanlage. . . . .	141
14.1.2	Gasmotorwärmepumpe. . . . .	141
14.1.3	Dieselmotor-Wärmepumpe. . . . .	143
14.1.4	Betrachtungen zu den Investitionskosten. . . . .	143
14.2	Unterhaltungs-sowie Wartungs-und Bedienungskosten. . . . .	144
14.2.1	Bedienungs-und Wartungskosten. . . . .	145
14.2.2	Vollwartungsverträge. . . . .	145
14.2.3	Kapitalabhängige Kosten. . . . .	145
14.3	Betriebskosten. . . . .	146
14.3.1	Ermittlung der Brennstoffkosten. . . . .	146
14.3.1.1	Erdgas. . . . .	146
14.3.1.2	Dieselmotorkraftstoff. . . . .	146
14.3.1.3	Elektrische Energie. . . . .	148
14.3.2	Energie für Hilfsantriebe. . . . .	149
14.3.3	Schmiermittel. . . . .	149
14.4	Die Vergleichskostenrechnung. . . . .	149
14.4.1	Aufbau. . . . .	149
14.4.2	Annuitätenmethode mit Berücksichtigung der jährlichen Energie- preissteigerung. . . . .	150
14.5	Investitionszulagengesetz. . . . .	156
<b>15.</b>	<b>Beispiele von ausgeführten Objekten mit Gasmotor-Wärme- pumpen</b> . . . . .	<b>157</b>
15.1	Freibäder und Hallenbäder. . . . .	157
15.1.1	Freibad Dortmund-Wellinghofen. . . . .	158
15.1.2	Dantebad München. . . . .	159
15.1.3	Freibad „Am Gesundbrunnen“ in Heilbronn. . . . .	159
15.1.4	Weitere Schwimmbäder (Frei-und Hallenbäder). . . . .	160

15.2	Kombination von Kunsteisbahn und Schwimmbad	161
15.2.1	Centre Nautique Dr. Duchesse in Rouen	161
15.3	Sportzentren	162
15.3.1	Schwimm-und Sporthalle Paderborn	162
15.3.2	Schul-und Sportzentrum Altenkunstadt	164
15.4	Mehrfamilien-Wohnhäuser	165
15.4.1	Wohnhaus in Bochum-Gerthe	166
15.4.2	Wohnhaus in Dortmund-Brackel	167
15.5	Verwaltungsgebäude	167
15.5.1	Verwaltungsgebäude der Westfälischen Ferngas AG in Dortmund	167
15.6	Ein-und Zweifamilien-Wohnhäuser	170
<b>16.</b>	<b>Absorptionswärmepumpe</b>	<b>173</b>
16.1	Allgemeines	173
16.2	Arbeitsweise der Absorptionswärmepumpe	173
16.3	Vergleichsprozeß für Absorptionswärmepumpe	175
16.4	Wärmeverhältnis	176
16.5	Das lgp, 1/r-Diagramm	178
16.6	Arbeitsstoffpaare	180
16.6.1	Ammoniak-Wasser	180
16.6.2	Wasser-Lithiumbromid	180
16.6.3	Weitere Stoffpaare	180
16.7	Verhalten der Absorptionswärmepumpe bei Außenluft als Wärmequelle	180
16.8	Heizzahl	180
16.9	Anwendung der Absorptions-Wärmepumpe für Wohnhäuser	182
16.10	Großanlagen	182
<b>17.</b>	<b>Antriebsmaschinen nach dem <i>Clausius-Rankine-Prozess</i></b>	<b>184</b>
<b>17.1</b>	Der <i>Clausius-Rankine-Prozess</i>	184
17.2	Arbeitsstoffe	185
17.3	Vergleich zwischen Wasser und einem organischen Arbeitsmittel	186
17.4	Hauptanwendungen	188
17.5	Kolbenmaschinen nach dem Clausius-Rankine-Prozeß	188
17.6	Turbinen nach dem Clausius-Rankine-Prozeß	189
<b>18.</b>	<b><i>Stirlingmotor</i> zum Antrieb einer Wärmepumpe</b>	<b>192</b>
18.1	Arbeitsprinzip des <i>Stirlingmotors</i>	192
18.1.1	Mechanische Kopplung von Kolben und Verdränger	192
18.1.2	Der Freikolbenmotor	195
18.2	Freikolbenmotor zum Antrieb von Wärmepumpen	196
18.3	Stirlingmotoren mit umlaufender Welle	197
18.4	Bewertung der <i>Stirlingmotor</i> -Wärmepumpe	199

<b>19.</b>	<b>Gasturbinen-Wärmepumpe</b> . . . . .	200
19.1	Allgemeines . . . . .	200
19.2	Arbeitsweise . . . . .	200
19.3	Leistungsbereich . . . . .	201
19.4	Einwellengasturbine . . . . .	201
19.5	Zweiwellengasturbine . . . . .	201
19.6	Schaltung . . . . .	201
19.7	Wärmebilanz . . . . .	202
<b>20.</b>	<b>Kohlenstaubmotoren</b> . . . . .	204
20.1	Geschichtliches . . . . .	204
20.2	Kohlenstaubmotor der Maschinenfabrik Kosmos . . . . .	204
20.3	Der Zündverzug . . . . .	205
20.4	Entwicklung seit dem Jahre 1975 . . . . .	205
	<b>Schrifttum</b> . . . . .	206-212
	<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	213