

Wärmepumpen und oberflächennahe Geothermie

Einführung

Die aktuellen Zuwachsraten der Wärmepumpenbranche sind beachtlich: mit fast 30 % im Jahr 2004 baute sie den Anteil am deutschen Wärmeversorgungsmarkt stetig aus (Abb. 1). Zurückzuführen ist die Entwicklung auf eine vergleichsweise einfache, ausgereifte Technik, die vermehrte Öffentlichkeitsarbeit der Branche und drastisch ansteigende Kosten für konkurrierende fossile Energieträger. Von den über 16.000 gebauten Anlagen des Jahres 2004 waren gut die Hälfte (ca. 58 %) geothermiebasiert zum Wärmeentzug aus dem Boden oder hydrothermal basiert zum Wärmeentzug aus dem Grundwasser. Insbesondere die Geothermie trägt mit Steigerungsraten von einigen hundert installierten Systemen p.a. Mitte der 90er Jahre auf ca. 10.000 Anlagen im Jahr 2004 überproportional zu dieser Entwicklung bei.

In Abhängigkeit vom baulichen Standard des zu versorgenden Objektes, der lokalen geologi-

schen Situation und der Auslegung der Geothermieanlage beziehen Wärmepumpen zwischen 65 und 80 % ihrer abgegebenen Heizenergie kostenfrei aus der Erde. Der zum eigentlichen Betrieb der Wärmepumpe benötigte Rest kommt – je nach Antriebsart der Wärmepumpe – aus dem Strom- oder Gasnetz. Die weitaus größte Verbreitung besitzen mit Erdwärmesonden gekoppelte Wärmepumpen sowie Anlagen mit hydrothermaler Grundwasserzirkulation. Erdwärmesonden sind Wärmetauscher in denen innerhalb eines geschlossenen Rohrsystems ein Wärmeträgermedium zirkuliert. Je nach Bemessung der Anlage wird hierfür reines Wasser oder – in der Mehrzahl der Fälle – ein mit Frostschutzmittel auf Glykolbasis versetztes Wasser verwendet. Grundwasserzirkulationsanlagen fördern natürlich warmes Wasser aus einem oder mehreren Brunnen und reinfiltrieren das Wasser nach erfolgtem Wärmeentzug wieder über (einen) weitere(n) Brunnen oder – bei Einbohrlochsystemen – im Ringraum des Entnahmebrunnens.

Prof. Dr. Rolf Bracke
FH Bochum –
GeothermieZentrum
Bochum
geothermie@fh-bochum.de

Dr. Andreas Bühring
Fraunhofer ISE
buehring@ise.fraunhofer.de

Prof. Dr. Peter Müller
FH Dortmund
pressestelle@
fh-dortmund.de

Michael Wigbels
Fraunhofer UMSICHT
(Institut für Umwelt-,
Sicherheits- und
Energietechnik)
michael.wigbels@umsicht.
fraunhofer.de

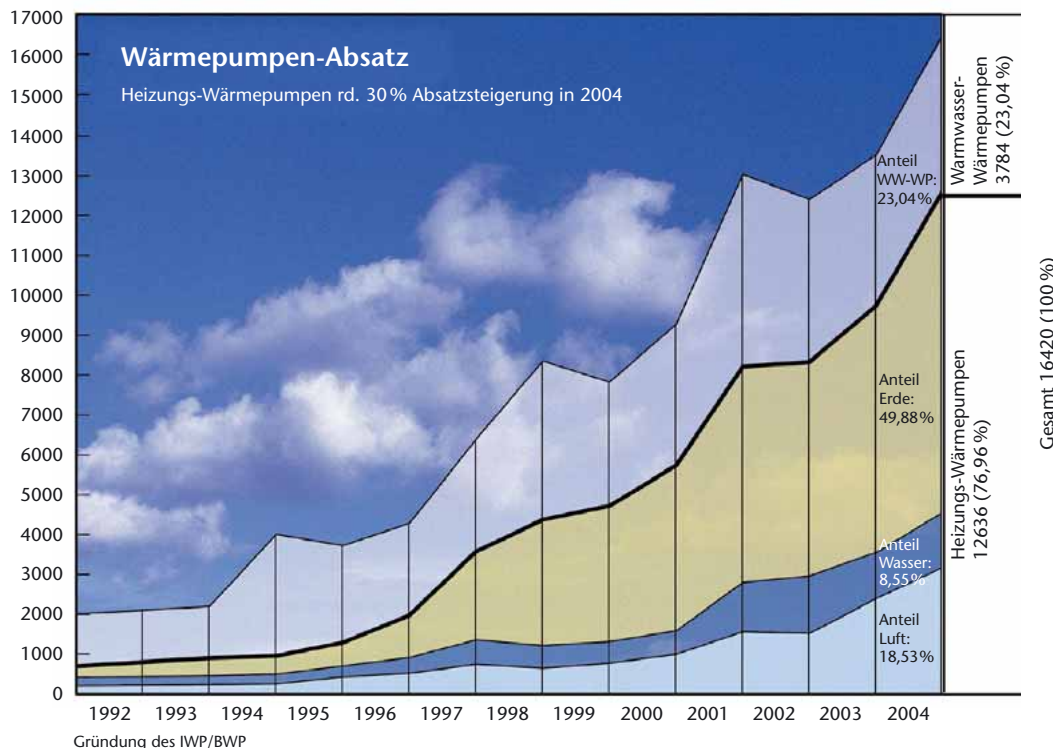


Abbildung 1
Entwicklung des Wärmepumpenmarktes und Darstellung der geothermischen Anteile aus Erde und Wasser

Quelle: Bundesverband Wärmepumpe BWP e.V.

Die Nutzungstiefe der oberflächennahen Geothermie reicht per Definition nach VDI 4640 („Thermische Nutzung des Untergrundes“) bis 400 m unter Gelände. Der Übergang in mitteltiefe Anlagen bis z. B. 1000 m ist in der Praxis jedoch fließend.

Mit ihrer günstigen Leistungszahl, d. h. dem Verhältnis von aufgenommener zu abgegebener Energie, besitzen geothermiebasierte Wärmepumpenanlagen – neben der zunehmenden Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu Öl- oder Gasheizungen – einen erheblichen Klimaschutzevorteil. Berücksichtigt man die Tatsache, dass nahezu 80 % des Energieverbrauchs in Deutschland im Bereich Bauen und Wohnen für das Heizen (ca. 78 %) und die Warmwasserbereitung (10,5 %) benötigt wird (Elektrogeräte 6,6 %, Kochen 3,7 %, Beleuchtung 1,4 %), ersparen die über 90.000 in Deutschland installierten Heizungswärmepumpen aufgrund ihres geringeren Primärenergieverbrauchs der Umwelt im Vergleich zu einem modernen Niedertemperatur-Heizölkessel jährlich etwa 170.000 Tonnen Kohlendioxid.

Wärmepumpensysteme, die mit geothermischer Energie arbeiten, besitzen in einigen Ländern ohne fossile Energievorkommen (wie z. B. der Schweiz) eine Marktverbreitung von 36 % im Neubaubereich. Diese Anlagen machen den überwiegenden Teil der Geothermienutzung aus und werden in konventionellen und Niedrigenergiebauten eingesetzt. Darüber hinaus finden sich solche Anlagen vermehrt im Objektbau zur kombinierten Heizung und Kühlung. Insbesondere Versorgungssysteme für Verwaltungsgebäude mit einer großen Kühllast machen sich den Vorteil zunutze, dass Wärmepumpen in den Sommermonaten im Umkehrbetrieb laufen können. Dabei wird die Wärme über aktivierte Bauteile (z. B. Betondecken) oder Flächenheizungen aus dem Gebäude abgezogen und im Erdreich zwischengespeichert.

Weitergehende Entwicklungen im Passivhausbereich (d. h. hochisolierte Häuser mit einem Maximalwärmebedarf von $< 10 \text{ W/m}^2$ und aufwändiger Gebäudetechnik) basieren auf Systemen mit einer Kombination von Wärmepumpe und kontrollierter Wärmerückgewinnung aus der Wohnungslüftung. In diesen Gebäude-

typen haben Lüftungswärmepumpen zu Heizzwecken gegenwärtig noch eine höhere Effektivität als erdgekoppelte Wärmepumpen [1].

Betriebsbeispiele für geothermische Nahwärmenetze mit Wärmepumpenkopplung

Langzeituntersuchungen zum Betriebsverhalten von Geothermieanlagen in Kopplung mit Wärmepumpen zeigen, dass die Technologie seit vielen Jahren gut entwickelt ist. Vorgestellt werden nachstehend die Besonderheiten und Betriebscharakteristika für unterschiedliche Konzepte von geothermischen Nahwärmeversorgungen. Die Nutzungstiefe der untersuchten Anlagen reicht von 45 m bis 500 m.

Variante 1: Mehrbrunnenprinzip

In Wulfen wurden für 71 Wohngebäude mit 117 Wohnungen und 12.240 m^2 Wohnnutzfläche sowie ein kommunales Gemeinschaftshaus (4036 m^2 NFI) mit Hallenbad 1975 insgesamt 73 Wärmepumpenanlagen errichtet [2]. Der Gesamtwärmebedarf des Versorgungsgebietes liegt bei 1,1 MW. Zur Wärmeversorgung wird Grundwasser über zwei Förderbrunnen à 91 m und drei Schluckbrunnen à 71 m zirkuliert (Abb. 2). Die Verteilung erfolgt über ein 1.200 m langes, nicht wärmegeprägtes Ringleitungsnetz. In jeder Anlage wird das Grundwasser von 10°C um 5°C mengengeregelt gleichmäßig abgekühlt. Die Rückführung zu den Schluckbrunnen erfolgt über eine zweite Ringleitung.

Die Langzeitstudie ergab folgendes Resultat: Nach 20 Betriebsjahren waren von 71 Wärmepumpen noch 68 in Betrieb; drei Wärmepumpen wurden erneuert – die zwei Wärmepumpen in kommunalen Gebäuden wurden aus nicht-technischen Gründen außer Betrieb genommen. Nach 30 Betriebsjahren sind immer noch $> 50\%$ der alten Anlagen in Betrieb. Über den gesamten Betrachtungszeitraum hatten 13 % keine Reparaturen, 7 % hatten mehr als 10 Reparaturen in zehn Jahren und über 70 % hatten 1-5 Reparaturen. Der Großteil der Reparaturen betrafen Regelung (64 %), Kältekreislauf (51 %), Verdichter (9 %), Kondensator und Verdampfer (je 5 %) – jeweils bezogen auf 59 näher be-

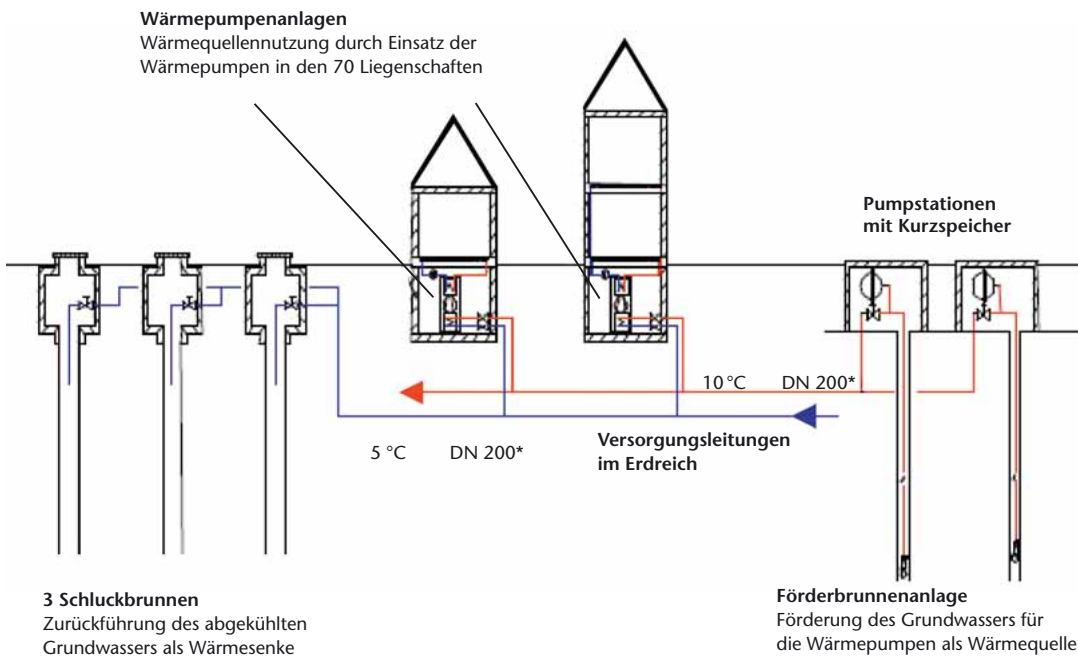


Abbildung 2
Prinzip der Geothermieanlage Wulfen [2],
*DN 200 = Rohrdurchmesser

trachtete Anlagen. Die spezifischen Wartungskosten lagen im Durchschnitt bei 0,08 – 0,15 EUR / m² / a und die spezifischen Reparaturkosten bei 0,25 – 0,48 EUR / m² / a.

Die durchschnittliche Grundwasserförderung betrug zwischen 1979 bis 1996 je qm Wohnfläche bei einer mittleren Gradtagszahl¹ von 3,8 Kd etwa 37 m³/m²/a. Der Gesamtenergieverbrauch, zusammengesetzt aus der Grundwasserförderung und dem Elektrowärmepumpen-Betrieb, liegt witterungsbereinigt aktuell bei 72 kWh/m²/a. Der elektrische Energieverbrauch und die Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen (3,2) ergeben im Langjahresmittel einen Wärmeverbrauch von 230 kWh / m²/a.

Von dieser Wärmemenge wurden 69% dem Erdreich entzogen (d. h. Umweltwärmemenge: 1.950 MWh/a). Die Primärenergieeinsparung nach dem „Globalen Emissionsmodell Integrierter Systeme“ (GEMIS) liegt damit im Vergleich zu herkömmlichen Heiztechniken auf Öl- und Gasbasis bei über 35%.

Variante 2: Einbrunnenprinzip

In verschiedenen Ortschaften des schweizerischen Kantons Zug werden größere Einzelobjekte oder Ortsteile seit ca. 20 Jahren geothermisch nach dem sogenannten Einbrunnenprinzip versorgt. Bei diesen gebirgsöffenen, d. h. unverrohrten Geothermieanlagen erfolgt die Wasserentnahme über ein wärmeisoliertes Steigrohr und die Reinfiltration des abgekühlten Wassers im kiesverfüllten Ringraum der gleichen Bohrung. Das Geothermie-Zentrum Bochum führt eine Messkampagne zur Überprüfung des Langzeitverhaltens und Leistungsvermögens von 25 solcher Geothermieanlagen durch. Unterschieden wurde dabei nach Anlagen in

- a) hydraulisch gut leitenden und
- b) gering leitenden geologischen Formationen.

Im Fall a) werden die natürlichen Formationswässer in größerem Umfang mit in den Wärmeaustausch einbezogen. Im Fall b) wird zum weitaus überwiegenden Teil Wasser innerhalb des Brunnens beziehungsweise Bohrlochs zirkuliert und es kommt nur zu geringen Vermischungen mit dem umgebenden Grundwasser. Zum Zeitpunkt der Messung waren alle Wärmepumpen aus den Erstinstallationen noch im Betrieb.

¹ Die Gradtagszahl [Kd/a] ist nach VDI 2067 das Produkt aus der Zahl der Heiztage und dem Unterschied zwischen der mittleren Raumtemperatur und der mittleren Außentemperatur. Die Gradtagszahl (Gtz) stellt eine Beziehung zwischen Außentemperatur und Energieverbrauch dar und gibt so Aufschluss über die Heizkosten. Sie zeigt den Unterschied zwischen der durchschnittlichen Außentemperatur eines Tages und der üblichen Raumtemperatur von 20 °C. Gemessen wird nur, wenn es draußen kälter als 15 °C ist.

Für die geringen Temperaturunterschiede der Vorlauf- / Rücklauftemperaturen kann die spezifische Wärmekapazität c_p und die Dichte als ρ konstant angenommen werden. Dadurch ergibt sich für die Quellenleistung bzw. den Wärmestrom in einem definierten Zeitintervall $\Delta \tau$

aus dem Integral (mit $\frac{m}{\tau} = \frac{V}{\tau} \cdot \rho$)

folgende Formel: $\dot{Q} = c_p \cdot \dot{V} \cdot \rho \cdot \Delta T$

Die Entzugsleistung der Quelle ist abhängig vom Temperaturunterschied und dem Volumenstrom des zirkulierenden Wassers in der Bohrung. Für die Ermittlung der Quellenleistung der einzelnen Anlagen wurden folgende Parameter erhoben (Tab.1):

Für die beiden Fälle a) und b) wird in (Tab. 2) je ein exemplarisches Objekt vorgestellt.

Unter Zugrundelegung der o. a. Randbedingungen wurden für die betrachteten Anlagen die mittlere Gesamt-Quellenleistung (Q_{mittel}) und die mittlere spezifische Wärmeentzugsleistung (P_{Entz}) pro Meter Geothermieanlage ermittelt. (Tab. 3)

Vergleichsrechnungen mit einem Simulationsprogramm (EWS) haben gezeigt, dass die spezifischen Entzugsleistungen dieser gebirgsoffenen Einbrunnenanlagen damit deutlich über denen konventioneller geschlossener (Koaxial-) Erdwärmesonden liegt. Setzt man für einen anderen untersuchten Fall die Ausbautiefe (280 m),

Tabelle 1

spezifische Wärmekapazität (H₂O):	$c_p = 4,187 \text{ kJ/kgK}$
Dichte (H ₂ O):	$\rho = 0,998 \text{ kg/dm}^3$
Volumenstrom:	$V = \text{gemessen}$
Quellentemperaturdifferenz:	$T = t_{\text{VL}} - t_{\text{RL}} \text{ (gemessen)}$

Tabelle 2

Fall / Ort	Anlage / Objekt	Betrieb	Heizleistung	Bohrung	Wärmepumpen	Geologie
Fall a) Steinen	Wohnsiedlung 20 EFH und 6 MFH Objekt Hausmatt	seit 1988	215 kW	445 m	4	<ul style="list-style-type: none"> • 0-20 m Kies, schluffig • 20-45 m Grobkies (schluffig-sandig) • Grundwasser: 8 m unter Geländekante
Fall b) Rüti	MFH mit 60 WE	seit 1997	270 kW	5500 m	4	<ul style="list-style-type: none"> • 0-20 m Quartär • 20-420 m (P = 5%) Mergel, sandig; • 420-500 m Obere Meeresmolasse; (P = 12%) • Grundwasser: 30 m unter Geländekante

Ortschaft / Objekt	Geothermische Anlage (Tiefe)	t _{VL} [°C]	t _{RL} [°C]	V [m ³ /h]	Q [kW]	Q _{mittel} [kW]	P _{Entz} [W/m]
Steinen / Hausmatt	1 (45 m)	11,5-12,1	7,6-8,5	1,7-1,8	6,9-8,6	7,7	172
	2 (45 m)	9,3-9,9	5,7-6,1	2,4-2,4	9,8-10,6	10,3	228
	3 (45 m)	11,9-12,5	7,5-9,6	1,8-3,2	8,2-10,8	9,8	217
	4 (45 m)	11,5-12,1	7,6-8,5	1,7-1,8	6,9-8,6	7,7	172
Rüti	1 (500 m)	7,6-8,8	4,0-5,6	8,3-8,5	29,7-35,7	33,8	68
	2/3 (500m)	8,1-8,6	4,2-4,9	10,0-10,2	81,4-99,6	88	88
	4 (500 m)	11,8-13,1	6,2-7,4	6,8-7,0	44,3-46,4	45,3	90
	5 (500 m)	9,9-10,6	5,3-6,5	7,2-7,2	34,3-38,5	37,1	74

Tabelle 3
Ermittlung der mittleren Gesamt-Quellenleistung (Q_{mittel}) und der mittleren spezifischen Wärme-entzugsleistung (P_{Entz}) pro Meter Geothermieanlage

Laufzeit (8 Jahre), Volumenstrom (4,3 m³/h) und die Gesamt-Quellenleistung (18 kW) beider Systeme rechnerisch gleich, so sinken die Vorlauftemperaturen des Arbeitsmediums von Erdwärmesonden im direkten Vergleich deutlich ab (ca. 9,6 K). Aufgrund der Energiedifferenz ist dabei die Verdampferleistung in offenen Systemen höher; d. h. es wird ca. 26 % weniger technische Arbeit für die Wärmepumpe erforderlich.

Variante 3: Erdwärmesonden

Das Versorgungsprinzip auf der Basis von Erdwärmesonden besitzt in Deutschland die mit Abstand weiteste Verbreitung. Hier haben sich am Markt Duplex-Sonden mit jeweils zwei Vorlauf- und zwei Rücklaufrohren aus HD-Polyethylen (Durchmesser DN 25 bis DN 40) durchgesetzt. In Kombination mit Niedrigenergiehäusern sind Wärmepumpen-Leistungszahlen > 4 inzwischen Standard. Bereits in mäßig geeigneten geologischen Milieus laufen die Anlagen wirtschaftlich. Am Geothermie-Zentrum Bochum werden Langzeitstudien an verschiedenen Anlagen in NRW durchgeführt. Exemplarisch werden die Betriebskosten für eine

Entwicklung von Verbrauch / Betriebskosten der Wärmepumpe + Geothermieanlage				
2001	2002	2003	2004	Einheit
4720	5906	5619	5831	kwh
23,6	29,5	28,1	29,1	kwh / m ² Jahr
464	535	596	673	Euro netto
2,32	2,67	2,98	3,36	Euro netto; m ² Jahr;
39,-	44,-	49,-	56,-	Euro netto / Monat
0,20	0,22	0,25	0,28	Euro netto / m ² Monat

Geothermieanlage in Aachen vorgestellt zur Versorgung eines Einfamilienhauses mit ca. 200 m² beheizter Nutzfläche. Die Anlage läuft seit 1998 störungsfrei mit folgenden Verbrauchs- und Kostenkenngrößen:

Wärmepumpe 11 KW Heizleistung bei 0/35; drei Erdwärmeduplexsonden à 60 m; Geologie: Feinsand, schluffig; Grundwasser: ca. 30 m unter Geländeoberkante. (Tab 4)

Tabelle 4

Tiefe der geothermischen Erschließung Feld Nordlicht	Kälteleistung Sondenanlage	Vorlauf- / Rücklauf-Sondenanlage **	Heizleistung Wärmepumpe	Leistungs-aufnahme WP	Leistungszahl WP (COP)	Anzahl der anschließbaren Wohneinheiten (WE)
250 m	14 kW (12,8kW)*	7°C / 4,5°C	16 kW	ca. 3,2 kW	5,3	3 - 5 (4)*
400 m	28 kW (29 kW)*	8°C / 5°C	35,5 kW	ca. 6,5 kW	5,9	8 - 11 (10)*
1000 m	70 kW (66 kW)*	23°C / 13°C	78 kW	ca. 12 kW	7,3	18 - 25 (22)*
2300 m	200 kW	33°C / 24°C	WW-WP	ca. 12 kW	> 7,5	46 - 66 (56)*

* Rechenwert; ** Simulation mit den Programmen SHERAT und EWS

*Tabelle 5
Ergebnis geothermischer und gebäudetechnischer Simulationen*

Städtebauliche Großprojekte in NRW

Gegenwärtig befinden sich mehrere städtebauliche Vorhaben in NRW mit geothermischer Nahwärmeversorgung auf Wärmepumpenbasis in der Vorbereitung (Bottrop-Nordlicht 750 WE; Dortmund-Phoenixsee 1500 WE; Hattingen-Südstadt 1200 WE). Exemplarisch wird an dieser Stelle das Bottroper Vorhaben vorgestellt:

Bottrop-Nordlicht

In Bottrop-Kirchhellen soll ab dem Jahr 2006 auf 25 ha ein Neubaugebiet mit ca. 750 Wohneinheiten sowie ein Einkaufszentrum und eine Kulturstätte entstehen. Der Stadtteil wird geothermisch versorgt. Dazu wurden geothermische Entzugsleistungen simuliert für je zwei oberflächennahe Erdwärmesysteme (250 m und 400 m) und je zwei mitteltiefe bis tiefe Geothermieanlagen (1000 m und 2300 m) durchgeführt. Um das Energieversorgungskonzept hinsichtlich der bauzeitlichen Stadtentwicklung möglichst praktikabel zu gestalten, wurde ein „mitwachsendes“ Wärmenetz für Baugruppen von je fünf Wohneinheiten gewählt. Diese können hinsichtlich der Gebäudeenergieversorgung mit unterschiedlichen Heizungs- / Lüftungssystemen sowie mit aktivierten Bauteilen (im Sinne von Heiz- / Kühldecken) ausgestattet werden. Die Baugruppen lassen sich in beliebiger Größe miteinander verknüpfen. Je heterogener die Gebäudetechnik innerhalb der Baugruppen ist, desto besser können

Lastspitzen ausgeglichen werden. Jede geothermische Einzelanlage kann teufenabhängig unterschiedlich viele Wohneinheiten versorgen. Durch die Kombination von Einzelsonden zu ganzen Sondenfeldern lassen sich bedarfsabhängige Kleinwärmenetze unterschiedlicher Größenordnung aufbauen. Die geothermischen und gebäudetechnischen Simulationen ergaben folgende Zusammenhänge: (Tab. 5)

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zeigen, dass Geothermieanlagen zur Wärmeversorgung im oberflächennahen und mitteltiefen Bereich bereits unter konservativer Zugrundelegung der Energiepreise von 2004 für Gas, Öl und Strom problemlos wettbewerbsfähig zu fossilen Versorgungsträgern sind. 250 m und 400 m Geothermieanlagen sind bereits signifikant wirtschaftlicher. Hier liegen die jährlichen Energiekosten etwa bei 50% von gas- und ölbetriebenen Anlagen (einschließlich Wärme- oder Gasnetze); gleiches gilt für die CO₂-Emissionen. Auch die jährlichen Gesamtkosten liegen einschließlich Kapitaldienst ca. 10-20% unter Öl und Gas. Der Preisvorteil nimmt bohrkostenbedingt mit der Teufe bis in Bereiche von 600 - 800 m weiter zu und ab 1000 m wieder deutlich ab.

Fazit

Wärmepumpengekoppelte Geothermieanlagen sind europaweit verbreitet und bewegen sich auch in Deutschland aus dem Nischendasein heraus. Langzeituntersuchungen belegen, dass die Verfahrenstechnik störungsarm ist. Die Wirtschaftlichkeit ist für oberflächennahe und mitteltiefe Geothermieanlagen bis ca. 1000 m im Vergleich zu Gas und Öl in nahezu allen betrachteten Fällen gegeben. Bis 400 m gilt das auch für Strom. Dabei ist – u. a. durch eine Vereinfachung des bergrechtlichen Genehmigungsverfahrens – bei größeren Bauvorhaben ein Trend hin zu mitteltiefen Anlagen zu beobachten.

Literatur

- [1] Development and measurements of Compact Heating and Ventilation Devices with integrated exhaust air heat pump for High Performance Houses - Contributions IEA Heat Pump Conference, Las Vegas, 2005; (www.ise.fraunhofer.de).
- [2] 30 Jahre Betriebserfahrung mit 73 Wärmepumpen und der „Kalten“ Nahwärmeversorgung Wulfen.- Bericht des Europäischen Testzentrum für Wohnungslüftungsgeräte (TZWL), Dortmund (2005)
- [3] Bracke, R.; Höfker, G; Bußmann, G.; Winkler, K.; Sysk, U.; Exner, S.; Zwingel, T.; Clauser, C; Pechnig, R. (2004): Machbarkeitsstudie zur Erschließung des geothermischen Feldes „Nordlicht“ - Jahrestagung der Geothermischen Vereinigung; Landau.