

Die Energieeffizienz einer
Grundwasser – Elektro-Wärmepumpe für die Heizwärme
in 13 Reihenhäusern in Freiburg - St. Georgen
und fünf Warmwasser – Wärmepumpen

Ein Bericht von Dr. Falk Auer und Herbert Schote, Lahr (Schwarzwald)

Zusammenfassung:

Die zentrale Grundwasser-Wärmepumpe für die Reihenhäuser arbeitet nach einer Ertüchtigung im ersten Betriebsjahr jetzt mit einer Jahresarbeitszahl von 4,3 mit „guter“ Energieeffizienz. Bei ihr sind nur noch 23 % Strom erforderlich, um zusammen mit 77 % Wärme aus dem Grundwasser die Häuser zu beheizen.

Anders dagegen die dezentralen Warmwasser-Wärmepumpen: Sie kommen auf eine Jahresarbeitszahl von nur 1,4 und verfehlen damit die Mindest-Energieeffizienz mit einer Jahresarbeitszahl von 3,0 beträchtlich. Bei der Erwärmung des Brauchwassers hat der Strom einen Anteil von 71 %! Eine Sonnenkollektoranlage für Warmwasser ist eine ökologisch bessere Alternative.

1. Einführung und Aufgabenstellung

Im Hinblick auf die zunehmenden Anforderungen an den Klimaschutz hat sich die Freiburger Stadtbau GmbH entschlossen, eine Grundwasser-Wärmepumpe im Neubaugebiet „Innere Elben“ im Freiburger Stadtteil Sankt Georgen (Breisgau) zu erproben. Darüber hinaus war es auch von Interesse, ob kleine Warmwasser-Wärmepumpen zum Klimaschutz beitragen können.

Grundwasser-Wärmepumpen gehören wegen der hohen Kaltquellentemperatur im Vergleich zu Luft- und Erdreich-Wärmepumpen zu den Spitzenreitern bei der Energieeffizienz. Wie die Phase 1 des "Feldtests Elektro-Wärmepumpen" am Oberrhein zeigte (Schlussbericht: www.agenda-energie-lahr.de), sind Jahresarbeitszahlen bis zu 4 möglich (siehe INFO-BOX „Jahresarbeitszahl“ rechts). Das Mittel bewegt sich jedoch nur um die 3 herum. Die Gründe liegen bei Einfamilienhäusern in einer zu hohen Leistung der Grundwasser-Förderpumpe und in zu kleinen Durchmessern für die Saug- und Schluckbrunnen. Die Hoffnung war bei diesem Großprojekt, dass sich durch ein günstigeres Verhältnis der Nennleistung von Förder- zu Wärmepumpe die Energieeffizienz erhöht.

INFO-BOX: Jahresarbeitszahl

Die Jahresarbeitszahl JAZ einer Wärmepumpe ist definiert als das Verhältnis von jährlich erzeugter Wärme am Ausgang zum notwendigen Strom an deren Eingang.

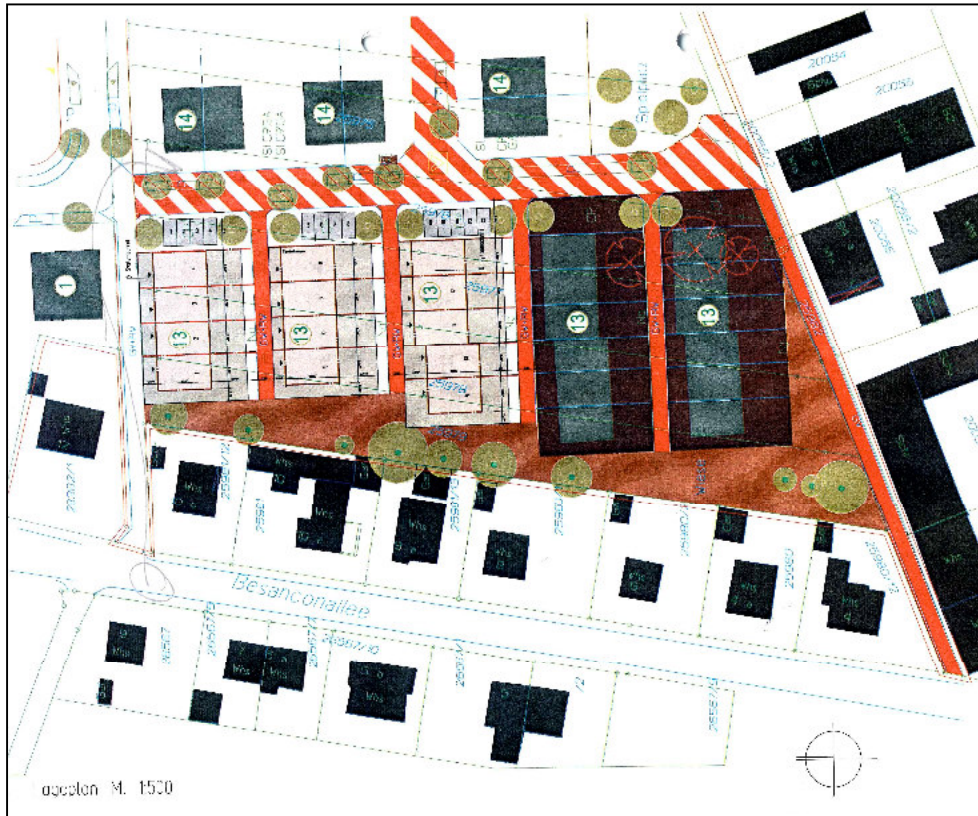
Laut der Deutschen Energieagentur (dena) in Berlin und des Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerkes (RWE) in Essen muss die Jahresarbeitszahl größer als $JAZ = 3$ sein, um Wärmepumpen als "energieeffizient" und größer als $JAZ = 3,5$ sein, um sie als "nennenswert energieeffizient" bezeichnen zu können.

Die günstigere *Erzeuger*-Jahresarbeitszahl EJAZ wird direkt hinter der Wärmepumpe gemessen: Die für die Energieeffizienz maßgebliche *System*-Jahresarbeitszahl SJAZ berücksichtigt zusätzlich noch die folgenden periphere Verlustquellen: Heizungspuffer- und Trinkwasserspeicher, Abtauenergie eines ev. vorhandenen Lamellenverdampfers (Luft-Wärmepumpen) sowie Förderpumpe bzw. Ventilator, Notheizstab und Speicher-Ladepumpen.

2. Reihenhaussiedlung

Die Neubausiedlung liegt im Süden Freiburgs. Wie der Lageplan und das Foto zeigen besteht sie aus drei Reihenhausszeilen (drei hell eingezeichnete Rechtecke) mit je 4-5 Wohneinheiten. Es handelt sich insgesamt um dreizehn Reihenhäuser mit je 150 m² Wohnfläche (KfW 60). Die Eigentümer bezogen die Siedlung im Laufe des Winters 2008/09 mit je 2-5 Personen.

Die *berechnete* Gesamt-Wärmelast beträgt 86 kW und die spezifische Heizwärme 40 kWh/m² Wohnfläche und Jahr. Die *gemessene* Wärmeerzeugung belief sich auf knapp 90 MWh, was bei einer Gesamt-Wohnfläche von 1963 m² einen spezifischen Heizwärmeverbrauch 45 kWh/m² und Jahr ergibt.

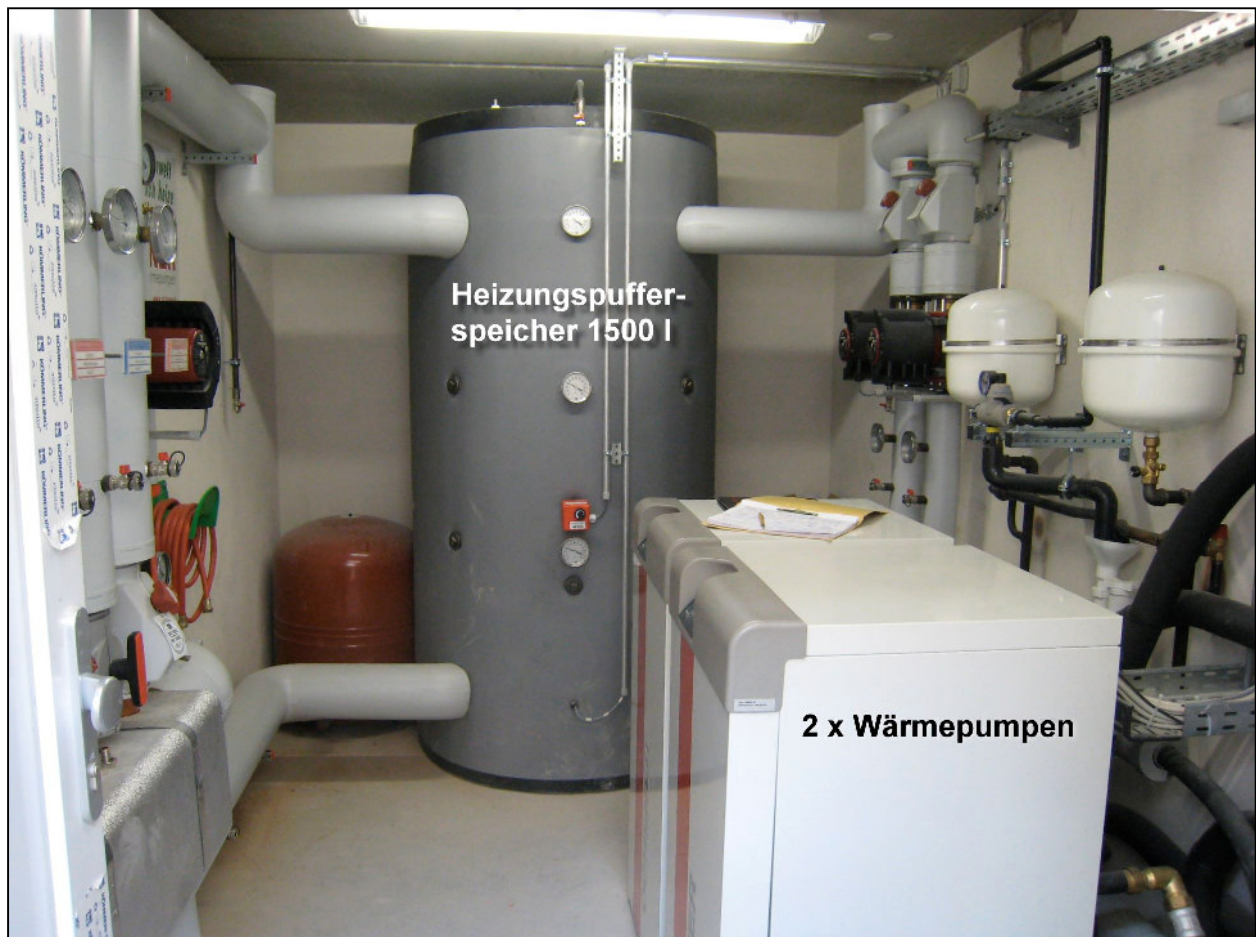


3. Grundwasser - Wärmepumpe

Zwei Elektro - Grundwasser-Wärmepumpen mit Scrollverdichtern und einer Nennleistung von je 38 kW-thermisch liefern die Heizwärme für die dreizehn Reihenhäuser. Bei einer elektrischen Leistungsaufnahme von 6,6 kW beträgt der COP = 5,7 (Coefficient of Performance = Leistungszahl bei W10/W35).

Der Grundwasserspiegel steht in nur 3-4 m Tiefe an. Mächtige, quartäre Schotter der Dreisam sorgen für eine starke Durchlässigkeit des Wassers, das die Wärmepumpen über einen Saug- und Schluckbrunnen mit einem Durchmesser von 30 cm um etwa 4 K abkühlen. Es liegen gute Voraussetzungen für die Nutzung des Grundwassers als Kaltquelle für eine Wärmepumpe vor.

Die beiden abwechselnd aktiven Wärmepumpen arbeiten in der Heizzentrale im Keller der mittleren Hauszeile und puffern die erzeugte Wärme in einem 1,5 m³ großen Speicher (siehe Bilder auf dieser und der nächsten Seite), ehe diese über ein kleines Nahwärmenetz zu den Fußbodenheizungen gelangt. Die maximale Vorlauftemperatur der Fußbodenheizungen beträgt 36°C. Sollte die Heizleistung einmal nicht ausreichen oder ein Defekt vorliegen, dann schaltet sich ein Notheizstab ein.



4. Warmwasser - Wärmepumpen

Getrennt von der zentralen Grundwasser-Wärmepumpe steht im Keller eines jeden Reihenhauses eine Warmwasser-Wärmepumpe. Die Heizungsrohre des Nahwärmesystems sorgen für eine leichte Vorerwärmung der Zuluft. Die Abluft geht in einen Nachbarraum.

Es handelt sich um eine Kompakt-Wärmepumpe mit einer elektrischen Leistung von 500 Watt, einen 300 Liter Speicher und der Möglichkeit, die Nutztemperatur auf 42 – 55 °C einzustellen.

Laut Datenblatt beträgt die Heizleistung 2,2 kW, was einem COP von 4,4 bei L21/W15-55 entspricht. Ein elektrischer Heizstab erwärmt das Brauchwasser, wenn die Heizleistung der Wärmepumpe nicht ausreichend sein sollte, z.B. bei einer vorübergehenden Aufheizung auf 65 °C (Le-gionellenschaltung), hoher Warmwasserentnahme oder bei einem Defekt.

5. Messtechnik

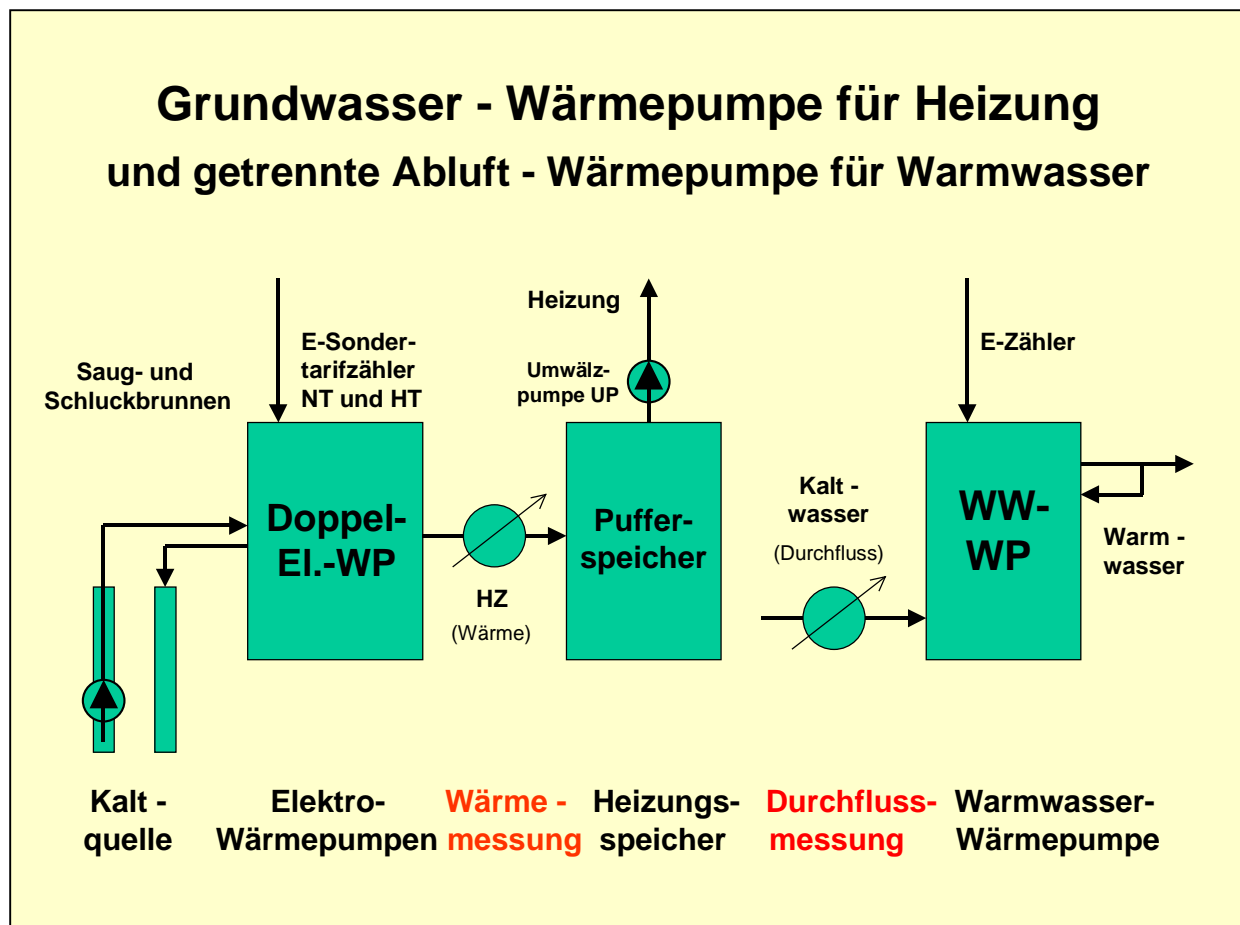
Wie die graphische Darstellung unten zeigt, verfügt die Heiz-Wärmepumpe über einen Wärmeh-zähler. Er sitzt direkt an deren Ausgang und misst die günstigere *Erzeuger*-Jahresarbeitszahl.

Auf der elektrischen Seite erfasst ein Sonderzähler mit Nieder- und Hochtarifen nicht nur den Stromverbrauch der Wärmepumpen selbst, sondern auch noch die Hilfsenergien für die Grundwasser-Förderpumpen, Not-Heizstab, Speicherladepumpen, Regelung und Steuerung sowie die Umwälzpumpe für das Nahwärmesystem. Die *Erzeuger*-Jahresarbeitszahl berechnet sich wie folgt:

$$EJAZ = Q_{WP} / (NT + HT - UP_{Sp} - UP_{HK})$$

mit Q_{WP} Erzeugte Wärme am Ausgang der Wärmepumpen 1 +2
 NT und HT Wärmepumpen Sondertarifzähler (Nieder- und Hochtarif)
 UP_{Sp} und UP_{HK} Umwälzpumpen für Speicherladung und Heizkreis (Nahwärme).

Die Ladepumpe für den Heizungspufferspeicher geht bei der *Erzeuger*-Jahresarbeitszahl nicht in die Energiebilanz ein; ebenso auch nicht die Umwälzpumpe des Heizkreises, weil sie nicht Bestandteil des Wärmepumpensystems ist. Ein Not-Heizstab deckt den Wärmebedarf der Reihenhäuser ab, wenn die Leistung der beiden Wärmepumpen einmal nicht ausreichen sollte oder technische Probleme auftreten.



Die Autoren erfassten die Energieeffizienz nicht nur bei der zentralen Grundwasser-Wärmepumpe, sondern auch noch bei ausgewählten Warmwasser-Wärmepumpen. Das Kriterium: Eine große Bandbreite bei der Anzahl der Personen. Die Wahl fiel auf fünf der dreizehn Wärmepumpen mit je zwei bis fünf Nutzern.

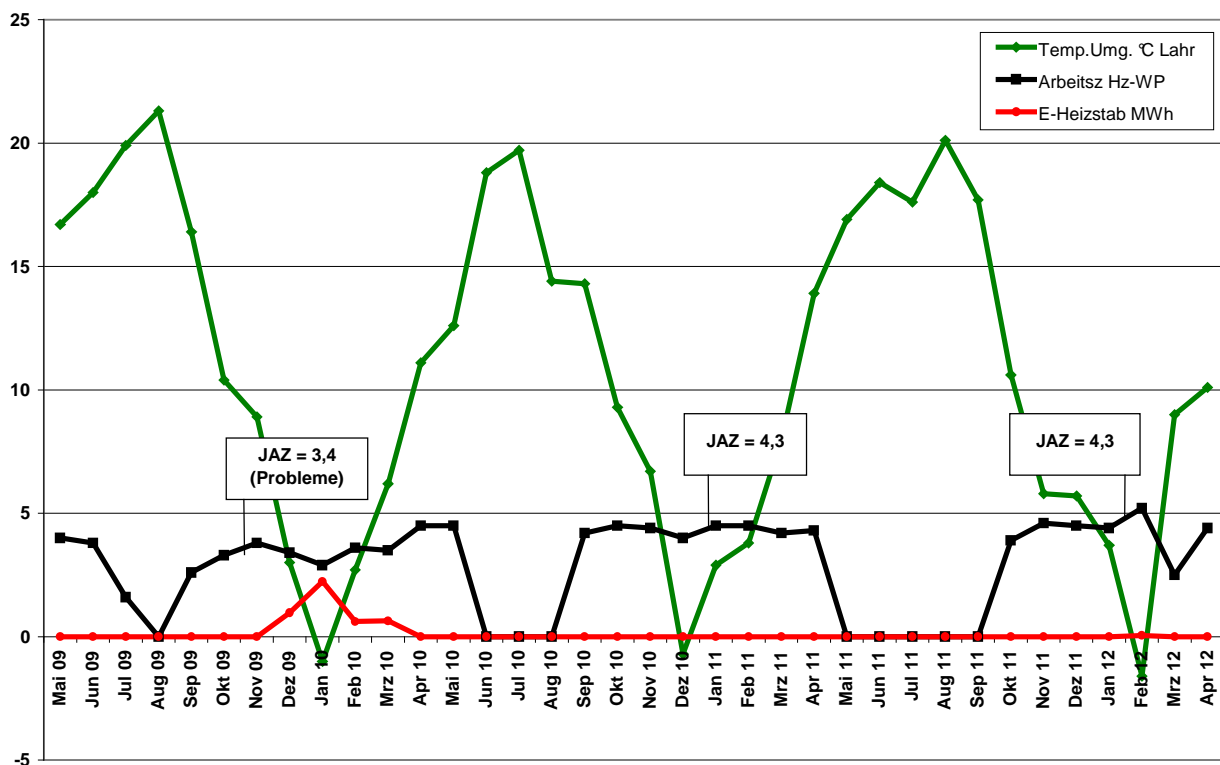
Ein Warmwasserzähler misst den Verbrauch in Kubikmeter; eine Umrechnung in kWh-thermisch über die fest eingestellte Nutzertemperatur ist wie bei jeder Mieterabrechnung leicht möglich. Das Verhältnis dieses Ergebnisses zu der abgelesenen Energie des Elektrozählers ist dann die *System-Jahresarbeitszahl*.

Ein Eigentümer meldet der Auswertezentrale monatlich die Ablesewerte der Wärme- und Elektrozähler. Zusätzlich steht noch die Umgebungstemperatur einer eigenen, automatischen Wetterstation in Lahr zur Verfügung. Alle Messwerte werden zeitnah auf Plausibilität überprüft und rechnerisch zu Arbeitszahlen verknüpft.

6. Ergebnisse

6.1 Zentrale Grundwasser-Wärmepumpen

Die folgende Graphik zeigt den monatlichen Verlauf der Umgebungstemperatur, der elektrischen Energie für den Not-Heizstab und die *Erzeuger*-Arbeitszahl. Alle drei Winter zwischen 2009 und 2012 waren in Lahr (Schwarzwald) zu warm gegenüber dem langjährigen Mittel von 1961 – 1990, und zwar um $+0,3^{\circ}\text{C}$, $+0,7^{\circ}\text{C}$ bzw. $+0,6^{\circ}\text{C}$.



Die Heizwärmeerzeugung betrug in diesen Wintern 88, 85 bzw. 76 MWh. Die entsprechenden *Erzeuger*-Jahresarbeitszahlen lauten 3,4, 4,3 und 4,3.

Die Ursache für die erheblich geringere Energieeffizienz im ersten Jahr lag in Problemen mit der Steuerung und Regelung. Die Wärmepumpe 1 ging öfters auf Störung, der Not-Heizstab musste zwischen Dezember 2009 und März 2010 (siehe rote Kurve in der Graphik) die fehlende elektrische Energie in Höhe von 4,5 MWh liefern und die beiden Förderpumpen zur Erschließung der

Kaltquelle „Grundwasser“ waren teilweise gleichzeitig in Betrieb, obwohl nur eine Wärmepumpe arbeitete. Die Reparaturarbeiten zogen sich über mehrere Heizmonate hin.

Im zweiten Winter konnten die Wärmepumpen die Heizlast alleine decken; es war kein Notheizstab erforderlich. Die Jahresarbeitszahl stieg deshalb von 3,4 auf 4,3 an! Nur im Februar 2012, während der kältesten Zeit des dritten Winters, musste der Notheizstab noch eine geringe Strommenge in Höhe von 52 kWh liefern. Der Grund: Es war anlässlich einer Wartung eine Neueinstellung der beiden Wärmepumpen notwendig. Das erklärt auch die vom Mittel abweichenden Arbeitszahlen im Februar und März 2012.

Die folgende Tabelle fasst die Ergebnisse in einer Übersicht zusammen.

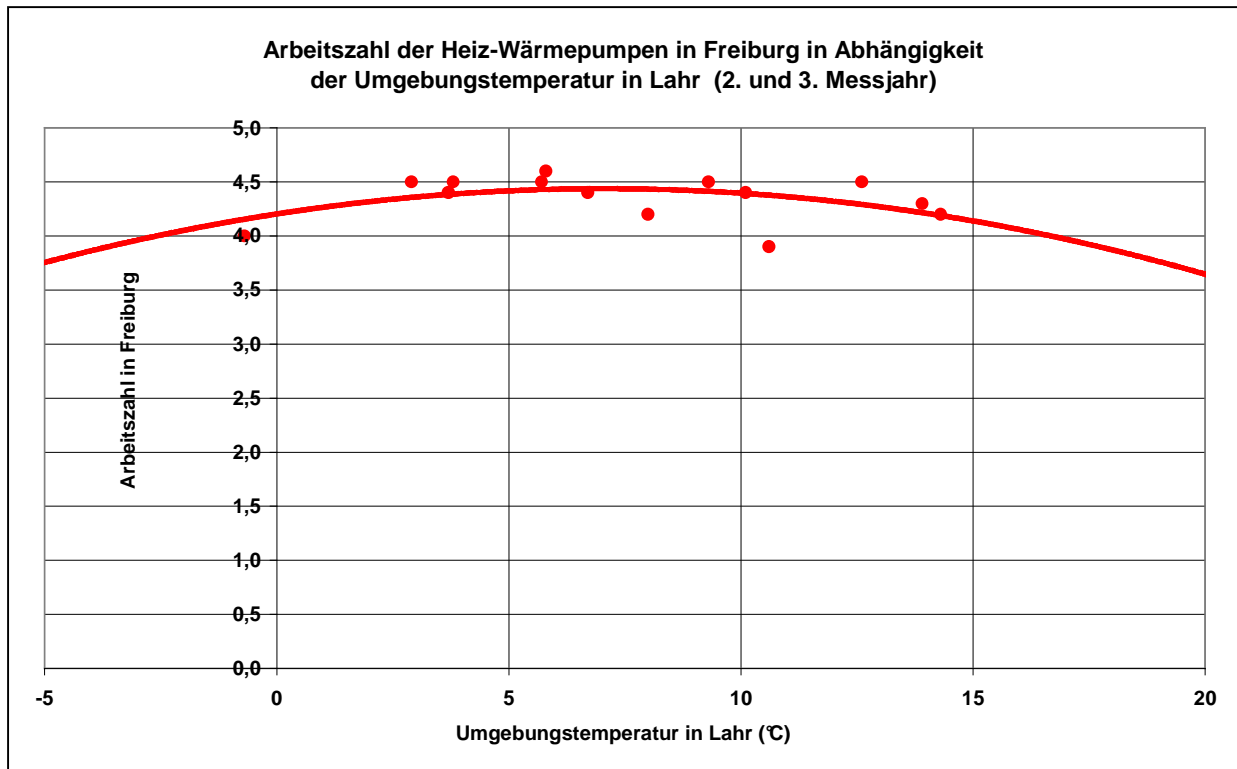
	Winter 2009/ 2010	Winter 2010/ 2011	Winter 2011/ 2012
Wärmeerzeugung (MWh-therm.) der Wärmepumpen:			
- Wärmepumpe 1	29,4 (33%)	79,2 (93%)	65,8 (86%)
- Wärmepumpe 2	<u>58,6 (67%)</u>	<u>05,9 (07%)</u>	<u>10,5 (14%)</u>
	88,0 (100%)	85,1 (100%)	76,3 (100%)
Strom für Grundwasser-Förderpumpen (MWh-elekt.)			
- Förderpumpe 1	2,4 (59%)	2,2 (93%)	1,8 (86%)
- Förderpumpe 2	<u>1,7 (41%)</u>	<u>0,2 (07%)</u>	<u>0,3 (14%)</u>
	4,1 (100%)	2,4 (100%)	2,1 (100%)
Not – Heizstab (MWh-elekt.)	4,50	0,00	0,05
Erzeuger-Jahresarbeitszahl	3,4	4,3	4,3

Es fällt auf, dass im zweiten und dritten Winter die Wärmepumpen 1 und 2 und die dazugehörigen Förderpumpen im Gegensatz zum ersten Jahr wieder synchron mit einem Anteil von um die 90% bzw. 10% arbeiten. Außerdem war der Heizstab nicht mehr aktiv. Beides führt zu den hohen Jahresarbeitszahlen von EJAZ = 4,3.

Die Wärmepumpe 1 hat freilich fast die gesamte Wärmeerzeugung allein übernommen. Hier erinnert die Agenda-Gruppe erneut daran, zukünftig einen alternativen Betrieb anzustreben: Nach einer bestimmten Betriebsstundenzahl kommt die zweite Wärmepumpe dran, um beide Wärmepumpen gleichmäßig zu beanspruchen und abzunutzen, so wie das auch bei konventionellen Heizkesseln üblich ist.

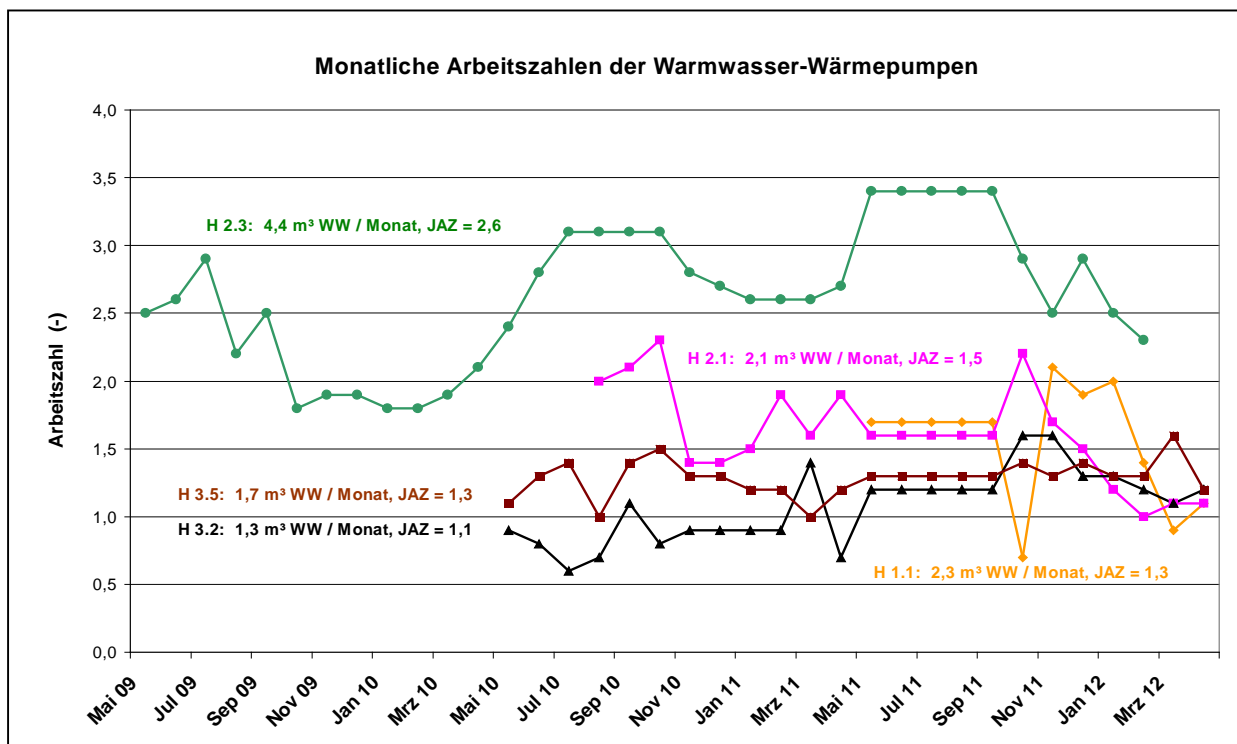
Die Graphik auf der nächsten Seite stellt die Abhängigkeit der monatlichen *Erzeuger*-Arbeitszahlen von der Umgebungstemperatur dar. Die Arbeitszahlen sind, wie bei Grundwasser-Wärmepumpen üblich, weitgehend konstant und bewegen sich zwischen AZ = 3,9 und 4,6. Lediglich in den Randbereichen der Temperatur-Bandbreite verringern sie sich etwas. Die Gründe: Mit abnehmender Umgebungstemperatur nimmt die Temperaturdifferenz zwischen dem Grundwas-

ser und der Vorlauftemperatur der Fußbodenheizung zu und bei hoher Umgebungstemperatur und damit geringem Heizwärmeverbrauch geht der instationäre Betrieb (Takten der Wärmepumpen: EIN/AUS) zunehmend negativ in die Energiebilanz ein.



6.2 Separate Warmwasser-Wärmepumpen

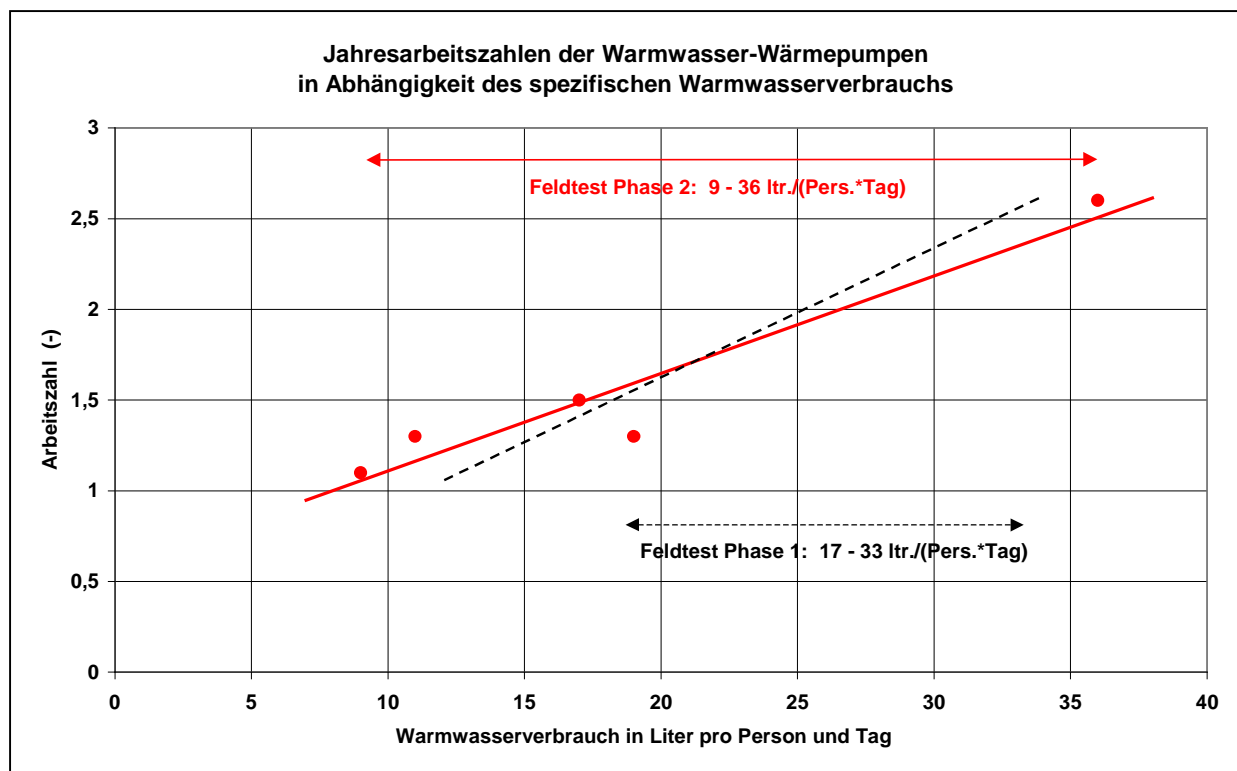
Wie in Kapitel 5 erwähnt hat die Agenda-Gruppe nur fünf der dreizehn Warmwasser-Wärmepumpen vermessen. Wegen defekter Zähler, zu geringem Warmwasserverbrauch oder fehlender Plausibilität war nur ein Teil der Monatswerte auswertbar. Die folgende Graphik zeigt den monatlichen Verlauf der Arbeitszahlen.



Eingetragen sind zusätzlich als Text die durchschnittlichen monatlichen Warmwasserverbräuche und die dazugehörigen Jahresarbeitszahlen. **Es fällt auf, dass mit zunehmendem Warmwasserverbrauch auch die Arbeitszahl wächst.** Aber auch bei dem hohen Verbrauch in Haus H 2.3 (grüne Kurve) erreicht die System-Jahresarbeitszahl in Höhe von 2,6 nicht den erforderlichen Mindestwert von 3,0 für einen energieeffizienten Betrieb.

Das Mittel der System-Jahresarbeitszahl aller fünf Warmwasser-Wärmepumpen beträgt nur 1,4, das heißt: Zur Warmwasserbereitung sind 71% des teuren und hochwertigen Stroms erforderlich, und nur 29 % stammen aus dem Energieinhalt der Kellerluft. Zum Vergleich: In der Phase 1 des „Feldtests Wärmepumpen“ waren es 1,5 bis 2,4 je nach Standort und Nutzungseinsatz (siehe Schlussbericht Kapitel 5.3.4 auf Seite 17 unter www.agenda-energie-lahr.de/WP_Feldtest_Phase1.html).

Wegen der fehlenden Energieeffizienzen lotet die nächste Graphik einmal aus, ab welchem Warmwasserverbrauch die Wärmepumpen in der Lage sind, energieeffizient zu arbeiten. Aufgetragen ist der spezifische Verbrauch in Litern pro Person und Tag gegen die System-Jahresarbeitszahl (rote dicke Linie). Zum Vergleich: Die schwarze, gestrichelte Linie; sie stellt die Ausgleichsgerade von fünf Warmwasser-Wärmepumpen in der Phase 1 des „Feldtests Wärmepumpen“ dar (siehe ebenfalls den zuvor genannten Schlussbericht).



Ergebnis: Verlängert man die Geraden nach rechts oben, dann ist ein Warmwasserverbrauch von rund 40 Liter pro Person und Tag notwendig, um auf eine System-Jahresarbeitszahl von über 3 zu kommen. Ein solch hoher Verbrauch ist heutzutage aber nicht mehr realitätsnah. Etwas spitz lässt sich deshalb sagen: Nur bei einer Warmwasserverschwendung sind Warmwasser-Wärmepumpen energieeffizient. Und fällt der Verbrauch unter 10 Liter pro Person und Tag, dann ist die Wärmepumpe nicht mehr notwendig: Ein Elektro-Durchlauferhitzer ist dann primärenergetisch und preislich günstiger.

Die vorliegende Untersuchung beschränkt sich auftragsgemäß auf die Ermittlung der Energieeffizienz und damit auf den Beitrag zum Klimaschutz. Die Wirtschaftlichkeit war nicht Gegenstand des Praxistests. Ebenso auch nicht das Nutzerverhalten: Urlaubzeiten und deren Dauer, Höhe der Speichertemperatur und die Anforderungen an die Hygiene (Legionellenschaltung).

7. Bewertungen

7.1 Zentrale Grundwasser-Wärmepumpen

Die im ersten Messjahr ermittelte *Erzeuger*-Jahresarbeitszahl in Höhe von 3,4 war für eine Grundwasser-Wärmepumpe mangelhaft. Der Grund: Regelungsprobleme verursachten einen unnötigen Doppellauf der Förderpumpen und eine hohe Aktivität des Not-Heizstabes. Beides erhöhte die elektrischen Hilfsenergien beachtlich, was sich in einer relativ geringeren Jahresarbeitszahl niederschlug.

Nach einer längeren Reparatur zu Beginn des Jahres 2010 verbesserte sich die Situation jedoch beachtlich. Die Jahresarbeitszahl stieg im zweiten Messjahr auf 4,3 an und blieb auch bis heute so hoch. Ohne eine messtechnische Überwachung wäre die zu Beginn geringe Energieeffizienz der Grundwasser-Wärmepumpe nicht aufgefallen. Der vorliegende Fall zeigt deshalb erneut die große Bedeutung eines Monitorings: Vom ersten auf das zweite Betriebsjahr ließ sich der Anteil des Stromverbrauchs an der erzeugten Heizwärme von 29% auf 23% senken, was einer jährlichen Einsparung von 5,5 MWh-elektrisch entspricht (Stromverbrauch von zwei Haushalten). Das kommt dem Geldbeutel und der Umwelt zu Gute.

Die ermittelten *Erzeuger*-Jahresarbeitszahlen in Höhe von jetzt stabil EJAZ = 4,3 sind laut der Deutschen Energieagentur und des Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerkes als „nennenswert energieeffizient“ einzustufen (siehe INFO-BOX auf Seite 1). Gemäß der Klassifizierungstabelle der Lokalen Agenda 21 – Gruppe Energie Lahr (Schwarzwald) unter www.agenda-energie-lahr.de/JAZ-Klassifizierung.html) sind die Wärmepumpen als „gut“ zu bewerten. Positiv bemerkbar macht sich unter anderem das günstigere Verhältnis der Nennleistungen von Förder- zu Wärmepumpen im Vergleich zu Ein- und Zweifamilienhäusern (siehe Anmerkung in Kapitel 1). Es sind nur 12% der gesamten elektrischen Energie als Hilfsenergie für die beiden Förderpumpen notwendig.

Die Agenda-Gruppe empfiehlt eine Überprüfung der beiden Wärmepumpen-Einheiten im Hinblick auf eine alternative Betriebsweise, um gleichmäßige Laufzeiten und damit Abnutzungen der zwei Aggregate zu erreichen.

7.2 Dezentrale Warmwasser-Wärmepumpen

Die mittlere *System*-Jahresarbeitszahl SJAZ der fünf Warmwasser-Wärmepumpen betrug nur 1,4. Ein solcher Wert ist bei weitem nicht als energieeffizient zu bezeichnen (siehe INFO-BOX auf Seite 1). Er ist vergleichbar mit den Ergebnissen aus der Phase 1 des „Feldtests Wärmepumpen mit einer durchschnittlichen Arbeitszahl von SJAZ = 1,5 (siehe Schlussbericht auf Seite 17 unter www.agenda-energie-lahr.de). Die Ursache für die fehlende Energieeffizienz liegt in der Aufstellung im Keller mit einer relativ niedrigen Raumlufttemperatur.

Arbeiten die Warmwasser-Wärmepumpen dagegen als sog. Abluft-Wärmepumpen (Nutzung der Abluft von Küche, Bad oder Wohnräumen), dann sind natürlich höhere Arbeitszahlen erreichbar. Die SJAZ liegt zwischen 2,4 und 2,5 (siehe Schlussbericht der Phase 1 und ein Projekt mit Mehrfamilienhäusern in Lahr unter www.agenda-energie-lahr.de/Ph2_3LuftWP-LRZ.html). Für beide Varianten gilt freilich: Die Jahresarbeitszahlen liegen deutlich bis extrem unter dem schwachen Energieeffizienzziel in Höhe von 3,0 der dena und des RWE. Der Wohnbereich ist somit für die Brauchwasser-Wärmepumpe kein geeigneter Einsatzfall. Eine Sonnenkollektoranlage für Warmwasser ist eine ökologisch bessere Alternative.

Die Lokale Agenda 21 – Gruppe Energie Lahr empfiehlt deshalb der Freiburger Stadtbau GmbH, bei zukünftigen Projekten keine Warmwasser-Wärmepumpen mehr einzusetzen.

Gez. Dr. Falk Auer und Herbert Schote, nes-auer@t-online.de, www.agenda-energie-lahr.de

Im Juni 2012