

Die Energieeffizienz einer solarabsorber-unterstützten Grundwasser – Elektro-Wärmepumpe Nr. 2403 in der Feuerwache der Stadt Weil am Rhein

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

Zusammenfassung:

Die zentrale Grundwasser-Wärmepumpe für die Feuerwache der Stadt Weil am Rhein arbeitete im ersten Betriebsjahr mit einer Jahresarbeitszahl in Höhe von 3,5, einer „ausreichenden“ bis „befriedigenden“ Energieeffizienz. Bei ihr sind 29 % Strom erforderlich, um zusammen mit 71 % Wärme aus dem Grundwasser und von der Sonne die Feuerwache zu beheizen.

1. Einführung und Aufgabenstellung

Im Hinblick auf die zunehmenden Anforderungen an den Klimaschutz hat sich die Stadt Weil am Rhein am Oberrhein entschlossen, eine solarabsorber-unterstützte Grundwasser-Wärmepumpe zu erproben.

Grundwasser-Wärmepumpen gehören wegen der hohen Kaltquellentemperatur im Vergleich zu Luft- und Erdreich-Wärmepumpen zu den Spitzenreitern bei der Energieeffizienz. Wie die Phasen 1 und 2 des "Feldtest Elektro-Wärmepumpen" am Oberrhein zeigen (Schlussbericht und Einzelberichte unter www.agenda-energie-lahr.de), sind Jahresarbeitszahlen um die 4 möglich (siehe INFO-BOX „Jahresarbeitszahl“ rechts). Das Mittel liegt in der Phase 1 jedoch nur bei 3. 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.

2. Feuerwache und Betriebshof

Südlich der Stadt Weil am Rhein liegen im Mündungsbereich der Wiese in den Rhein die im Jahre 2010 errichteten Neubauten in einer flachen Talau. Sie bestehen aus der Feuerwache mit einer zu beheizenden Fläche von 2428 m² bei Raumtemperaturen zwischen 7 °C und 20 °C; daraus ergibt sich eine maximale Heizlast von 130 kW. Der Betriebshof verfügt nur über eine Fläche von 540 m² mit Hallentemperaturen von 15 °C, was einer maximalen Heizlast von 22 kW entspricht.

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. Das sind schwache Energieeffizienzziele. Besorgte Klima- und Umweltschützer fordern eine JAZ = 4,0 – das verspricht schließlich auch die Werbung.

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.



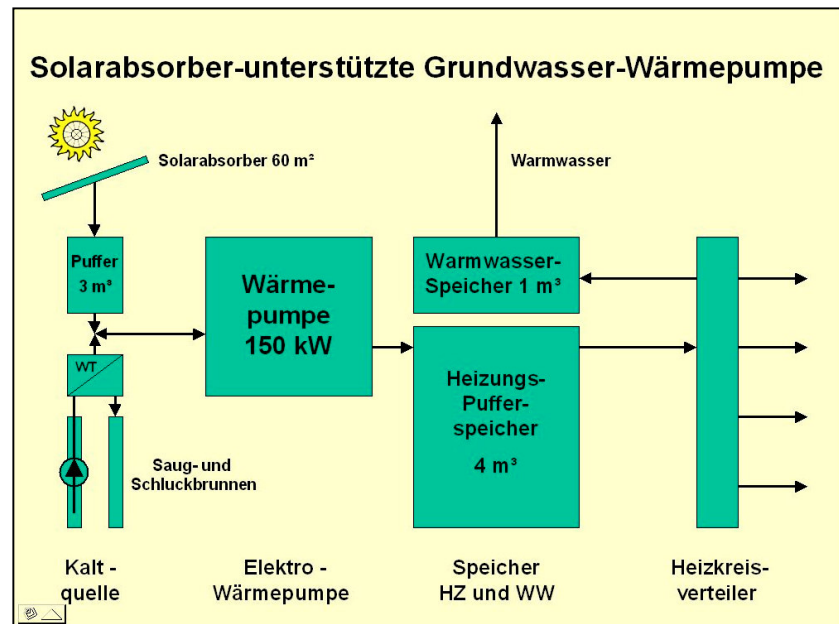
Die Wärmesenken bestehen aus Fußbodenheizungen, und großflächigen Radiatoren und Deckenstrahlern mit maximalen Vorlauftemperaturen von 35 °C bzw. 50 °C. Die Warmwasserbereitung erfolgt in der Feuerwache ebenfalls über die Wärmepumpe. Der Fuhrpark erhielt dagegen eine eigene, solar-unterstützte Warmwasserbereitung, die nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung ist.

3. Solarabsorber-unterstützte Grundwasser - Wärmepumpe

Wie die folgende Graphik zeigt dient als kalte Quelle für die Wärmepumpe im Wesentlichen das Grundwasser, das mittels Förder- und Schluckbrunnen einer wasserführenden Schicht in einer Tiefe zwischen 4,5 – 10 m entnommen wird. Darunter folgt eine mächtige Tonschicht, die das Wasser staut.

Der oberflächennahe Grundwasserleiter besteht aus quaritären Flussschottern der Wiese und des Rheins mit nassen Sanden und mittel- bis groben Kiesen. Damit liegen günstige Voraussetzungen für die Nutzung des Grundwassers vor.

Eine 4 kW starke Pumpe fördert das Grundwasser zur Wärmepumpe, die es um 4 Kelvin abkühlt und anschließend in den Schluckbrunnen leitet. Der Hersteller schrieb wegen der nicht vorhersehbaren Qualität des Wassers sicherheitshalber einen Wärmetauscher zwischen den Brunnen und der Wärmepumpe vor, was freilich die Energieeffizienz der Wärmepumpe negativ beeinträchtigt.



Als zweite, untergeordnete Wärmequelle dient eine 60 m² große Solarabsorberanlage, wie sie normalerweise in solar-erwärmten Freibädern eingesetzt wird. Als sog. „Energiedach“ erlebten diese, nicht mit Glas abgedeckten schwarzen Absorber Ende der Siebziger Jahre des letzten Jahrhunderts eine kurze Blütezeit. Zwei Pufferspeicher mit einer Größe von je 1,5 m³ bevorraten

vorübergehend die Sonnenenergie. Die Wärmepumpe hat somit je nach Temperaturhöhe die Wahl, die thermischen Energien aus den Solarspeichern oder dem Grundwasser zu nutzen.

Die elektrisch angetriebene Wärmepumpe verfügt über zwei Verdichter mit einer Gesamtleistung von 150 kW. Die zugehörige Leistungsziffer COP auf dem Teststand beträgt bei einer Eintrittstemperatur von 12 °C und Austrittstemperaturen von 35 °C und 50 °C COP = 5,4 bzw. 3,8. Die Wärmepumpe arbeitet auf einen 4 m³ Heizungspufferspeicher und zwei Warmwasserspeicher mit einem Volumen von je 500 Liter. Die Speichertemperaturen betragen 45-50 °C. Zwei Elektropatronen heizen die zwei Warmwasserspeicher einmal wöchentlich auf 65 °C auf, um einen Schutz vor Legionellen zu gewährleisten.



4. Messtechnik und Arbeitszahlen

Zur Ermittlung der Jahresarbeitszahl JAZ, der wichtigsten Kenngröße der Energieeffizienz von Wärmepumpen, sind Wärme- und Elektrozähler erforderlich. Die *Erzeuger*-Jahresarbeitszahl EJAZ und die System-Jahresarbeitszahl SJAZ berechnen sich wie folgt (Definition siehe INFO-BOX auf Seite 1):

$$EJAZ = Q_{WP} / (E_{HT} + E_{NT} + E_{UP-GW})$$

$$SJAZ = (\text{Summe } Q_{HZ} + \text{Summe } Q_{WW}) / (E_{HT} + E_{NT} + E_{UP-GW} + \text{Summe } E_{HZST} + \text{Summe } E_{UP-SP})$$

mit Q_{WP} = Wärme am Ausgang der Wärmepumpe (WMZ2/ W8)
 $\text{Summe } Q_{HZ}$ = Summe Wärme Ausgänge Heizkreis-Verteiler (Nutzenergien)
 (Summe WMZ3 bis 7/ W1 bis W5)
 $\text{Summe } Q_{WW}$ = Summe Wärme Ausgänge Warmwasserspeicher (Nutzenergien)
 (Summe W16 + W17)

E_{HT} = Elektrische Energie Sondertarifzähler Niedertarif (E9 HT)

E_{NT} = Elektrische Energie Sondertarifzähler Hochtarif (E9 NT)

E_{UP-GW} = Elektrische Energie Förderpumpe Grundwasser (E10)

$\text{Summe } E_{HZST}$ = Elektr. Energie Heizstäbe Warmwasserspeicher (E13+14)

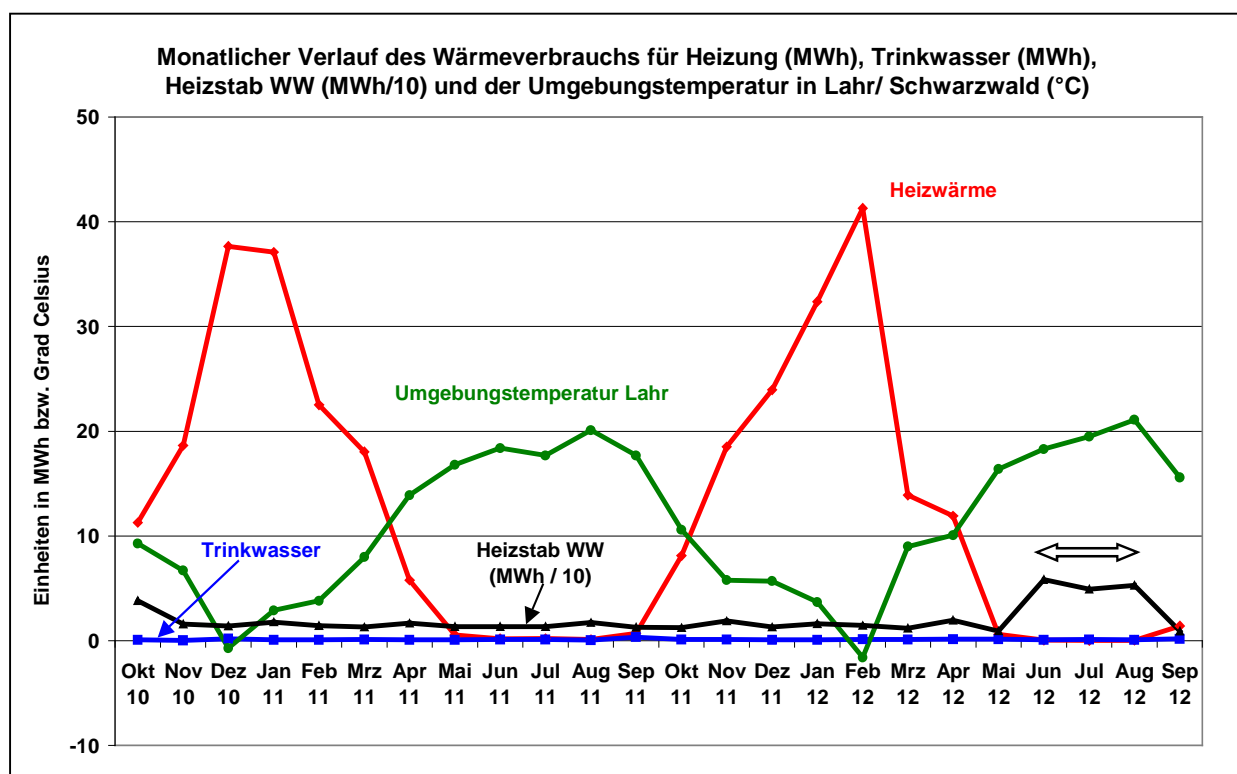
$\text{Summe } E_{UP-SP}$ = Elektr. Energien Umwälzpumpen Heizungspuffer- und Warmwasserspeicher (E15 + E16).

Die Umwälzpumpen für die Heizkreise finden keine Berücksichtigung, weil sie nicht Bestandteil des Wärmepumpensystems sind.

Der Umweltberater der Stadt Weil am Rhein meldet der Agenda-Gruppe die monatlichen Ableswerte der Wärme- und Elektrozähler. Zusätzlich steht der Agenda-Gruppe noch die Umgebungstemperatur einer automatischen Wetterstation in Lahr zur Verfügung sowie die langjährigen Werte der Umgebungstemperatur des Deutschen Wetterdienstes in Lahr. Alle Messwerte werden zeitnah auf Plausibilität überprüft und rechnerisch zu Arbeitszahlen verknüpft.

5. Ergebnisse

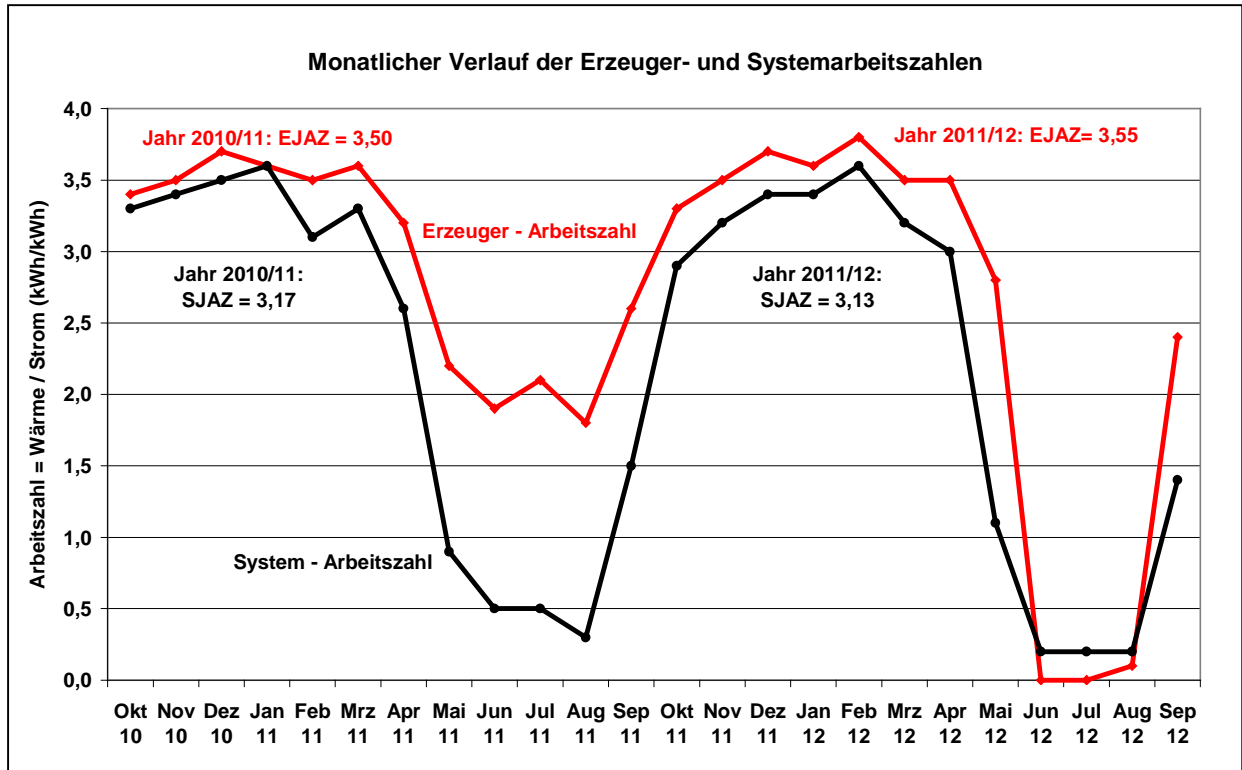
Die folgende Graphik zeigt den monatlichen Verlauf der Wärme für die Heizung, das Trinkwasser und der elektrischen Energie für die Heizstäbe in den Trinkwasserspeichern sowie die Umgebungstemperatur in Lahr (Schwarzwald) über die zwei Messjahre von Oktober 2010 bis September 2012. Die beiden Winter waren in Lahr zu warm gewesen gegenüber dem langjährigen Mittel von 1961 – 1990, und zwar um $+0,7^{\circ}\text{C}$ bzw. $+0,6^{\circ}\text{C}$.



Der jährliche Heizwärmeverbrauch betrug im Mittel 152,5 MWh und der Warmwasserverbrauch $35,6 \text{ m}^3$ oder 1,43 MWh-thermisch. Die elektrische Nachheizung in den zwei Trinkwasserspeichern mit je 500 l ist monatlich weitgehend gleichbleibend und summiert sich im ersten Jahr auf 2,0 MWh (schwarze Kurve in der Graphik). Die Gründe für die relativ hohe Zuheizung liegen im wöchentlichen Aufheizen der Speicher von der normalen Nutztemperatur in Höhe von 45°C auf 65°C (Legionellenschutz) und in technischen Problemen mit dem Solarabsorber.

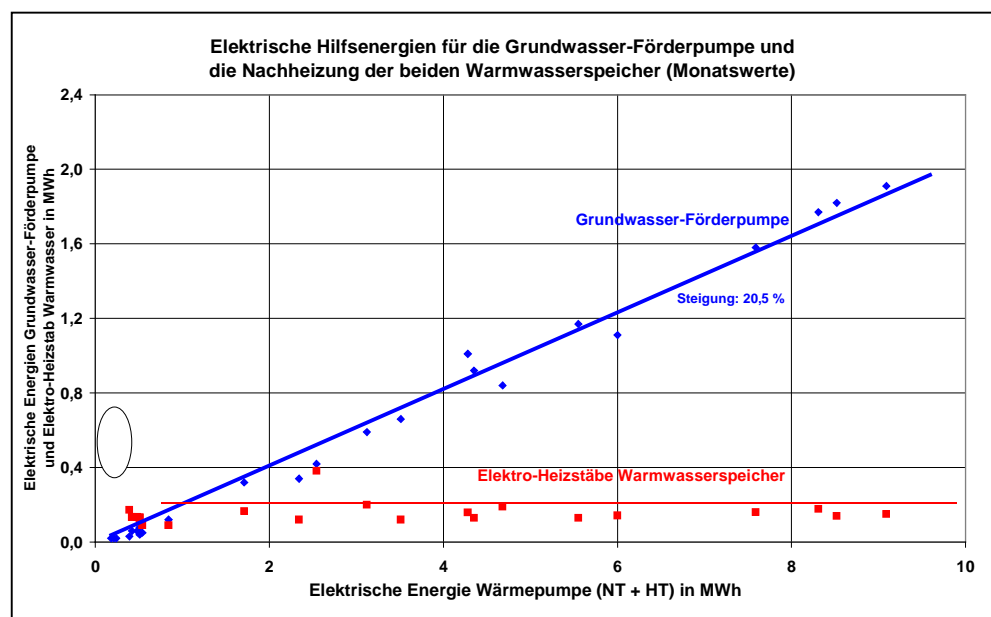
Im zweiten Messjahr stieg die elektrische Nachheizenergie sogar noch weiter an, und zwar auf 2,9 MWh. Der Grund liegt in einer veränderten Betriebsweise in den Sommermonaten zwischen Juni und August 2012 (siehe Doppelpfeil in der Graphik): Der Betreiber wollte untersuchen, ob der alleinige Betrieb der Heizstäbe nur für die Erwärmung des Trinkwassers vorteilhafter ist als die Wärmepumpe mit dem Solarabsorber. Wie der Verlauf der Energieeffizienzen in der nächsten Graphik zeigt ist das aber nicht der Fall.

Mit den Formeln in Kapitel 4 lassen sich die Erzeuger- und System-Jahresarbeitszahlen EJAZ bzw. SJAZ berechnen. Den monatlichen Verlauf zeigt die nächste Graphik. Auffallend sind die höheren Werte im Winter mit Arbeitszahlen um etwa 3,5. Im Sommer brechen dagegen die Arbeitszahlen beachtlich ein. Die Gründe: Die Wärmepumpe muss mit einer höheren Vorlauf-temperatur für das Warmwasser arbeiten, die Speicher- und langen Rohrverlusteverluste sind im Vergleich zum Verbrauch relativ hoch.



Die monatlichen Arbeitszahlen sind im Sommer recht niedrig und entsprechen bei den System-Arbeitszahlen einem Elektro-Standspeicher. Trotzdem kommt die Erzeuger-Jahresarbeitszahl über die zwei Messjahre auf EJAZ = 3,52 und die System-Jahresarbeitszahl auf SJAZ = 3,15.

Die ermittelte Erzeuger-Jahresarbeitszahl in Höhe von 3,5 liegt deutlich unter den Möglichkeiten einer Grundwasser-Wärmepumpe. Der Verdacht besteht, dass die elektrischen Hilfsenergien im Vergleich zur Energie der Wärmepumpe selbst zu hoch sind. Die Graphik rechts



zeigt deshalb die Stromverbräuche der Förderpumpe und der Elektro-Nachheizstäbe als Funktion des Stromverbrauchs der Wärmepumpe.

Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der elektrischen Energie der Grundwasser-Förderpumpe und der Wärmepumpe selbst (blaue Linie). Der Anteil der Hilfsenergie beträgt beachtliche 20,6 % (Steigung der Geraden). Die elektrische Energie der Heizstäbe (rote Linie) ist unabhängig vom Betrieb der Wärmepumpe. Lediglich die drei Sommermonate Juni bis August 2012 fallen wie schon zuvor erwähnt aus dem Rahmen (siehe Ellipse an der linken Achse).

Zum Vergleich: Eine Grundwasser-Wärmepumpe mit einer Heizleistung von 76 kW in Freiburg zur Beheizung eines Neubaugebietes mit 13 Reihenhäusern (Nahwärme), braucht nur eine Hilfsenergie zur Erschließung des Grundwassers von 12,4 % (Bericht Nr. 2202 unter www.agenda-energie-lahr.de mit EJAZ = 4,3). Da die Nennleistung der hier untersuchten Grundwasser-Wärmepumpe aber doppelt so hoch ist, müsste deren Hilfsenergie eigentlich noch unter 12,4 % liegen. Ließe sich der Anteil der Hilfsenergie in der Feuerwache von 20 % auf mögliche 10 % reduzieren, dann stiege die *Erzeuger*-Jahresarbeitszahl von 3,5 auf 3,8 an !

Auch die Hilfsenergien für die Elektro-Heizstäbe in den Warmwasserspeichern (Legionellenschaltung) sind nicht zu vernachlässigen. Sie betragen unabhängig vom Strom der Wärmepumpe (siehe rote Linie in der Graphik) im Mittel 2,4 MWh pro Jahr. Das entsprechen 6,4 % des gesamten Stromverbrauchs der Anlage. Ließen die sich vermeiden, dann stiege die *System*-Jahresarbeitszahl von 3,2 auf 3,6 an.

Eine weitere Steigerung der Arbeitszahlen wäre möglich, wenn man auf den Wärmetauscher zwischen dem Entnahmebrunnen und der Wärmepumpe verzichten könnte; die meisten Grundwasser-Wärmepumpen arbeiten ohne einen solchen Wärmetauscher. So aber liegt die Nutzttemperatur auf der kalten Seite der Wärmepumpe um etwa 2 °C tiefer, was gemäß deren Kennlinie einem Verlust von 0,1 – 0,2 – Arbeitszahlpunkten entspricht. Die *Erzeuger*-Jahresarbeitszahl könnte also bei fast 4 liegen. Und wären keine Vorlauftemperaturen bis zu 50 °C notwendig, dann erreichte die Grundwasser-Wärmepumpe der Stadt Weil am Rhein fast die *Erzeuger*-Jahresarbeitszahl EJAZ = 4,3 der oben erwähnten Freiburger Grundwasser-Wärmepumpe.

6. Bewertungen

Die über die zwei Jahre ermittelte Erzeuger-Jahresarbeitszahl in Höhe von 3,5 liegt gemäß der Klassifizierung der dena und des RWE (siehe INFO-BOX auf Seite 1) im Übergangsbereich zwischen einer „energieeffizienten“ und „nennenswert energieeffizienten“ Wärmepumpe. Bei der Bewertung der Agenda-Gruppe (siehe Anhang) ergibt sich eine Grenze zwischen „ausreichend“ und „befriedigend“.

Die Gründe der nur mittelmäßigen Energieeffizienz: Zu hohe und zum Teil notwendige Hilfsenergien für die Förder-, Heizungsumwälz- und Ladepumpen sowie die Legionellenschaltung. Darüber hinaus beeinträchtigen die Energieeffizienz negativ: Der Wärmetauscher auf der kalten Seite der Wärmepumpe, die hohe Vorlauftemperatur für die Heizkörper und die Wärmeverluste der insgesamt 5 m³ großen Speicher hinter der Wärmepumpe.

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

Im November 2012

Es folgt die Klassifizierung und Bewertung von Jahresarbeitszahlen
(siehe auch www.agenda-energie-lahr.de/JAZ-Klassifizierung.html)

Klassifizierung und Bewertung von Jahresarbeitszahlen

Die allgemeine Definition der Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe ist bekannt und unstrittig: Sie ist definiert als das Verhältnis von jährlich erzeugter Wärme am Ausgang zum notwendigen Strom an deren Eingang.

Die günstigere *Erzeuger*-Jahresarbeitszahl EJAZ wird direkt hinter der Wärmepumpe gemessen und berücksichtigt die Wärme am Ausgang der Wärmepumpe und die Abtauenergie bei Luft-Wärmepumpen sowie den Strom für die Wärmepumpe selbst und für die Erschließung der Kaltquellen Luft, Grundwasser oder Erdreich.

Die für die Energieeffizienz und den Klimaschutz maßgebliche *System*-Jahresarbeitszahl SJAZ berücksichtigt auch noch die folgenden Verlustquellen: Heizungspuffer- und Warmwasserspeicher, Notheizstab und Speicher-Ladepumpen. Die SJAZ bilanziert also die Nutzenergien des Wärmepumpensystems.

Fraglich und umstritten ist die Höhe der Jahresarbeitszahl, die mindestens erforderlich ist, um Elektro-Wärmepumpen als energieeffizient bezeichnen zu können. Je nach Interessenlage schwankt diese Zahl zwischen 2 und 4! Das hängt mit der Art der Stromerzeugung zusammen (hohe thermische Verluste) und dem Brennstoffmix (hoher Kohleanteil). Außerdem spielt auch noch der Bezug zu einem konventionellen Heizkessel eine Rolle (vielfach Erdgas-Brennwert-Therme).

Von den verschiedenen Interessengruppen sind die folgenden Mindest-Jahresarbeitszahlen für eine behauptete Energieeffizienz von Elektro-Wärmepumpen bekannt:

- JAZ = 2,0 Teile der Hersteller und Energieversorger
 Quellen: BWP Bundesverband Wärmepumpen (Hersteller) und IfE (München): 2,0; E-Werk Mittelbaden in Lahr (Schwarzwald): 2,2
- JAZ = 3,0 Mindest-Forderung in einer Wärmepumpen-Fibel für „Energieeffizienz“
 Quellen: dena Deutsche Energie-Agentur (Berlin), RWE Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk (Essen) und Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (Stuttgart)
- JAZ = 3,5 Mindest-Forderung in einer Wärmepumpen-Fibel für „Nennenswerte Energieeffizienz“ und das **Erneuerbaren-Energien-Wärme**gesetz
 Quellen wie zuvor und EEWärmeG
- JAZ = 4,0 Verantwortungsbewusste Umwelt- und Klimaschützer
 (falls Elektro-Wärmepumpen überhaupt eingesetzt werden sollen)
 Quellen: z.B. EWS Ökostromanbieter E-Werk Schönau (Schwarzwald), IWU Institut für Wohnen und Umwelt (Darmstadt) und Umwelt-und Klimaschutzverbände.

Die geforderten Mindest-Jahresarbeitszahlen JAZ für Elektro-Wärmepumpen schwanken um einen Faktor 2 ! Eine JAZ von etwa 2 ist freilich dem Lobbyismus geschuldet: Die Hersteller wollen Wärmepumpen und die Energieversorger Strom verkaufen. Bei einer solch niedrigen Jahresarbeitszahl handelt es sich um eine halbe Kohlestromheizung. Wie wollen da die Europäische Union und die Bundesregierung die ehrgeizigen Klimaschutzziele erreichen, bis zum Jahre 2020 30% des klimaschädlichen Treibhausgases Kohlendioxid einzusparen? Bei einer solch niedrigen Jahresarbeitszahl muss man noch Primärenergie mitbringen anstatt sie einzusparen !

Etwas realistischer sind da schon die geforderten Mindest-Jahresarbeitszahlen in der oben erwähnten Wärmepumpenfibel für „energieeffiziente“ und „nennenswert energieeffiziente“ Wärmepumpen von 3,0 bzw. 3,5. Noch etwas mehr verlangt das EEWärmeG (Erneuerbaren-Energien-Wärme-Gesetz), und zwar mindestens eine JAZ = 3,3 für Luft- und 3,8 für erdgekoppelte Wärmepumpen (Heizung und Brauchwasser). Warum die Luft-Wärmepumpe einen Bonus von 0,5-Punkten erhält hat mit Klimaschutz nichts zu tun, sondern ist dem Lobbyismus geschuldet.

Diese Mindest-Jahresarbeitszahlen reichen besorgten Umwelt- und Klimaschützer nicht aus. Sie kritisieren die Festlegungen der dena und des RWE sowie das EEWärmeG als zu schwach und fordern eine Jahresarbeitszahl von mehr als 4, das heißt: Es sind nur noch 25 % Strom erforderlich, um zusammen mit 75% Umweltwärme (Grundwasser und Erdreich) den Wärmebedarf von Häusern zu decken. Eine so hohe Jahresarbeitszahl erreichen Luft-Wärmepumpen in der Praxis aber nicht - deshalb der Bonus für Luft-Wärmepumpen im EEWärmeG !

Um der großen Unsicherheit unter Fachleuten und Laien bei der Beurteilung der Energieeffizienz von Elektro-Wärmepumpen zu begegnen, hat die Lokale Agenda 21 – Gruppe Energie Lahr (Schwarzwald) eine Klassifizierung und Bewertung von Jahresarbeitszahlen erstellt, die keine Marketing-Interessen, sondern den Beitrag zum Klimaschutz berücksichtigt:

Klassifizierung und Bewertung von Jahresarbeitszahlen JAZ

Jahresarbeitszahlen Bereich	Klassifizierung Schulnoten	Klassifizierung Bewertung
bis 2,5	6	ungenügend
2,6 – 3,0	5	mangelhaft
3,1 – 3,5	4	ausreichend
3,6 – 4,0	3	befriedigend
4,1 – 4,5	2	gut
4,6 – 5,0	1	sehr gut
ab 5,1	1+	ausgezeichnet

Bandbreite JAZ

- Wärmepumpen

Diese Klassifizierung ist **unabhängig von den Kaltquellen Luft, Grundwasser und Erdreich** und berücksichtigt nur den Beitrag zum Klimaschutz. Die Bewertungen liegen den Berichten der Phase2 „Innovative Wärmepumpensysteme“ des „Feldtests Wärmepumpen“ zugrunde unter [www. agenda-energie-lahr.de/WP_FeldtestPhase2.html](http://www.agenda-energie-lahr.de/WP_FeldtestPhase2.html)). Sie gelten nur für den deutschen Strommix. In Österreich und der Schweiz mit einem hohen Anteil an Wasserkraft und in der Schweiz zusätzlich an Kernenergie sähe die Beurteilungstabelle anders aus.

Lokale Agenda 21 – Gruppe Energie der Stadt Lahr (Schwarzwald)
Phase 2 „Innovative Wärmepumpensysteme“ des „Feldtests Wärmepumpen“

Dr. Falk Auer, nes-auer(at)t-online.de, www.agenda-energie-lahr.de

Im November 2012