

Schlussbericht über die Energieeffizienz der **Kohlendioxid/CO₂-Erdsonden – Elektro-Wärmepumpe Nr. 2301** in einem Einfamilienhaus in Offenburg (Oberrhein)

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

1. Einführung und Aufgabenstellung

Im Hinblick auf die zunehmenden Anforderungen an den Klimaschutz hat sich eine vierköpfige Familie aus Offenburg entschlossen, eine Kohlendioxid/CO₂-Erdsonden - Wärmepumpe in einem Einfamilienhaus in Offenburg zu erproben.

Erdreich-Wärmepumpen gehören wegen der höheren Kaltquellentemperatur des Erdreichs im Vergleich zu Luft-Wärmepumpen zu den Spitzenreitern bei der Energieeffizienz. Wie die Phase 1 des "Feldtests Elektro-Wärmepumpen" am Oberrhein zeigte (siehe Schlussbericht: www.agenda-energie-lahr.de), sind bei Erdreich-Wärmepumpen Jahresarbeitszahlen von über 4 möglich.

Die Erklärung der Jahresarbeitszahl geht aus der INFO-BOX rechts hervor. Die Mindest-Jahresarbeitszahl von 3 ist ein schwaches Kriterium, der kleinste gemeinsame Nenner, der die unterschiedlichen Interessen der dena und des RWE berücksichtigt. Besorgte Umwelt- und Klimaschützer fordern eine Mindest-Jahresarbeitszahl von 4. Dann sind nämlich immer noch 25% des hochwertigen und teuren Stroms erforderlich, um zusammen mit 75% Umweltwärme ein Haus zu erwärmen.

Das Mittel der vermessenen Erdreich-Wärmepumpen liegt mit einer JAZ = 3,4 deutlich unter den gemessenen zwei Spitzenwerten mit Jahresarbeitszahlen von über 4. Die Gründe liegen in einer nicht-optimalen Auslegung, unzureichender Anpassung der Kaltquellen und Wärmesenken an die Wärmepumpe und deren nicht-fachgerechter Einbau und Betrieb.

Wegen der nur mäßigen bis schlechten Ergebnisse der Phase 1 entschloss sich die Lokale Agenda 21 – Gruppe Energie Lahr (Schwarzwald) zu einer Phase 2 mit dem Titel „Innovative Wärmepumpensysteme“. Die Hoffnung war, dass jetzt die Planer, Hersteller und Handwerker mit neuester Technik und verbessertem Wissen bei der Systemoptimierung antreten.

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 energie-effizient" bezeichnen zu können.

Die günstigere *Erzeuger*-Jahresarbeitszahl EJAZ wird direkt hinter der Wärmepumpe gemessen und berücksichtigt die Wärme am Ausgang der Wärmepumpe sowie den Strom für die Wärmepumpe selbst und für die Erschließung der Kaltquellen.

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

Die CO₂-Erdsonden – Wärmepumpe ist eine von fünfzehn Wärmepumpen der zweijährigen, messtechnische Überwachung (Monitoring). Die Agenda-Gruppe untersucht bei ihr unter realistischen Betriebsbedingungen die folgenden Punkte:

- Energieeffizienz (Jahresarbeitszahl)
- Primärenergie- und Kohlendioxideinsparung
- Betriebszuverlässigkeit und Einsatz in Wasserschutzgebieten
- Kosten und Betriebswirtschaftlichkeit im Vergleich zu einem Referenz-Erdgas-Kessel.

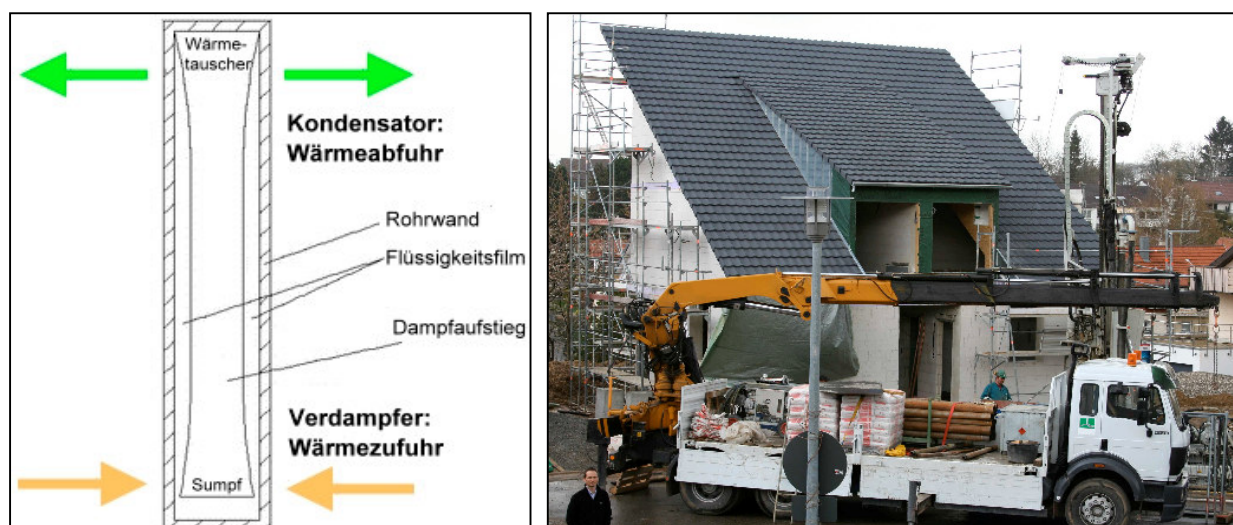
Der innovative Charakter der CO₂-Erdsonden – Wärmepumpe liegt nicht nur darin, dass der Hersteller das Gas Kohlendioxid als Wärmeträger für die Abkühlung des Erdreichs benutzt und damit keine Umwälzpumpe für das sonst erforderliche Wasser-Glykolgemisch braucht (keine Hilfsenergie zur Erschließung der Erdwärme erforderlich), sondern auch in einer variablen Verdichterleistung, die eine bessere Anpassung der Heizleistung an den veränderlichen Wärmebedarf des Niedrigenergiehauses ermöglicht (längere Laufzeit der Wärmepumpe und weniger Takt). Beides könnte, zusammen mit einem elektronischen Einspritzsystem und einer verbesserten Regelstrategie, die Jahresarbeitszahl im Vergleich zu bisherigen Erdreich-Wärmepumpen erhöhen.

2. Kohlendioxid/CO₂-Erdsonden – Wärmepumpe und Niedrigenergiehaus

2.1 CO₂ – Erdsonde

Um dem Erdreich Wärme zu entziehen, ist entweder ein horizontales Erdregister in etwa 1,2 m Tiefe erforderlich oder eine vertikale Erdsonde. Im vorliegenden Fall handelt es sich um zwei Bohrungen mit einer Tiefe von je 99 m und insgesamt sechs Erdsonden. Normalerweise treibt eine Umwälzpumpe den geschlossenen, mit einem Wasser-Glykolgemisch gefüllten Kreislauf, an. Dieser Wärmeträger dient als Frostschutzmittel und wird fälschlicherweise oft als „Sole“ bezeichnet – ist es jedoch nicht, denn Sole bezeichnet ein Wasser-Salzgemisch, das den Wärmetauscher der Wärmepumpe bald zerstören würde.

Bei einer CO₂-Erdsonde ist es möglich, auf die so genannte Solepumpe zu verzichten, weil der Kreislauf selbsttätig, also ohne elektrische Hilfsenergie, nach dem Wärmerohr- oder Heat-Pipe-Prinzip funktioniert. In der gleichen Weise arbeitet auch ein Teil der Vakuum-Röhrenkollektoren bei Solaranlagen.



Wie das Bild oben zeigt, sammelt sich im Sumpf, dem unteren Teil der unter hohem Druck stehenden Erdsonde, das flüssige Kohlendioxid. Die Erdwärme verdampft es und treibt das Gas in der Mitte des Rohres in die Höhe. Oben angekommen, gibt es seine Kondensationswärme am

kühleren Kopf über einen Wärmetauscher direkt an den Kältemittelkreislauf der Wärmepumpe ab. Das CO₂-Kondensat läuft an der Innenwand des Rohres wieder zurück in die Tiefe, und der Kreislauf beginnt von neuem.

Weil es sich bei dem Wärmeträger um natürliches Kohlendioxid handelt, das in jeder Sprudelflasche enthalten ist, lässt sich eine solche CO₂-Erdsonde auch in Wasserschutzgebieten einsetzen. Auf eine fachgerechte Abdichtung beim Durchbohren einer grundwasserführenden Schicht ist jedoch nach wie vor zu achten, um einen Austausch von Trinkwasser zwischen den verschiedenen Grundwasser-Stockwerken zu verhindern.

Eine Sommerkühlung des Hauses wie bei einer Erdsonde mit einem Wasser-Glykolegemisch ist bei einer CO₂-Erdsonde nicht möglich. Es sind jedoch auch Fälle bekannt, in denen der Planer und Bauherr parallel zu dieser Sonde Kunststoffrohre für die Sommerkühlung verlegt hat.

2.2 Wärmepumpe

Die Wärmepumpe hat eine Nennleistung von 13 kW-thermisch und laut Datenblatt eine Leistungsziffer von 5,5; daraus folgt eine elektrische Leistung von knapp 2,4 kW. Besondere Merkmale sind der Scrollverdichter mit variabler Leistung (modulierend 4-12 kW) und ein elektronisches Einspritzsystem.



Sie versorgt ohne einen Heizungspufferspeicher direkt die Fußbodenheizung (siehe Graphik auf der nächsten Seite); einen Notheizstab gibt es nicht. Die Warmwasserversorgung erfolgt mit einer Vorrangschaltung über einen 300 Liter Speicher und eine externe Frischwassereinheit (keine Legionellengefahr).

2.3 Baukörper

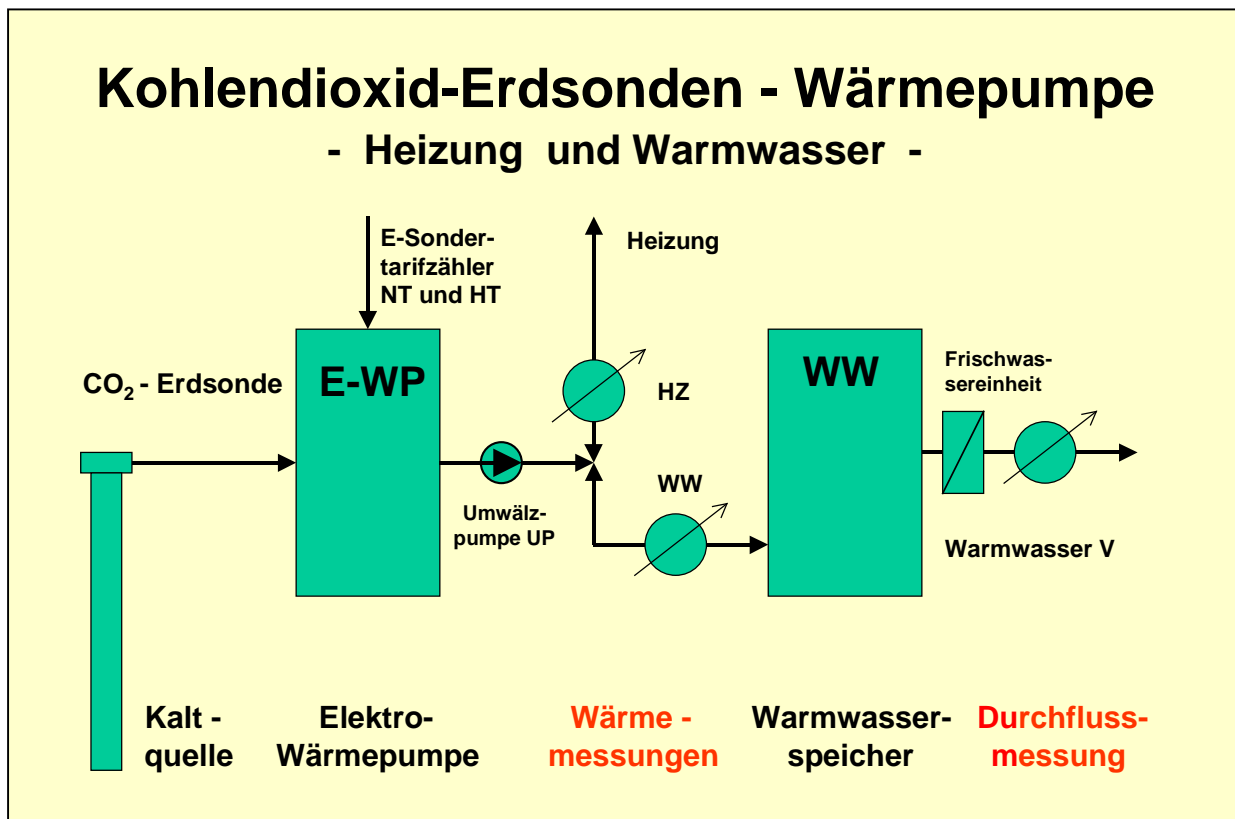
Die Wärmepumpe beheizt ein Einfamilienhaus mit einer Fußbodenheizung in Offenburg am Oberrhein. Es handelt sich um einen Neubau aus dem Jahre 2008 mit dem Niedrigenergiehaus-Standard KfW60 und einer beheizten Fläche von 250 m². Das Haus bewohnen zwei Erwachsene und zwei Kinder.

Der gemessene Heiz-Wärmeverbrauch betrug 20,3 MWh im ersten Jahr von Oktober 2008 bis September 2009 und 20,8 MWh im zweiten Messjahr von Oktober 2009 bis September 2010. Daraus folgt ein spezifischer Verbrauch von 82 kWh/m² beheizte Wohnfläche und Jahr. Die Umgebungstemperaturen lagen um -0,1 bzw. +0,3°C über dem langjährigen Mittel Lahrs von 1961 – 1990. Die Familie verbrauchte über die zwei Jahre Warmwasser in Höhe von durchschnittlich 31 Liter pro Person und Tag. Dieser Wert liegt im oberen Bereich einer gemessenen Bandbreite von

17 – 33 Litern pro Person und Tag in der Phase 1 des „Feldtests Wärmepumpen“. Der Warmwasseranteil am gesamten Wärmeverbrauch des Hauses beträgt rund 8 %.

3. Messtechnik

Das Wärmepumpensystem verfügt über zwei Wärmezähler und einen Durchflussmesser für das Warmwasser (siehe unten). Zusammen mit den Sondertarifzählern und eines Unterzählers für die Umwälzpumpe des Heizkreises (geht nicht in die Energiebilanz ein) ist die Bestimmung der *Erzeuger-* und *System* – Arbeitszahlen möglich (siehe INFO-BOX „Jahresarbeitszahl“ auf Seite 1 und „Ergebnisse“ im folgenden Kapitel 4).



Vorteilhaft beim vorliegenden Wärmepumpensystem ist der nicht erforderliche Notheizstab, der fehlende Heizungspufferspeicher und die nicht erforderliche Abtauenergie für einen Lamellenverdampfer wie bei Luft-Wärmepumpen, die sonst auch noch mit berücksichtigt werden müssten.

Der Betreiber meldete der Agenda-Gruppe monatlich die Ablesewerte der Wärme- und Elektrozähler. Zusätzlich steht noch die Umgebungstemperatur einer automatischen Wetterstation in Lahr zur Verfügung. Alle Messwerte sind zeitnah auf Plausibilität überprüft worden.

4. Energieeffizienz - Ergebnisse

4.1 Monatswerte

Die Graphik auf der nächsten Seite zeigt den monatlichen Verlauf der Umgebungstemperaturen und der Arbeitszahlen. Der erste Winter 2008/09 entsprach mit $-0,1^{\circ}\text{C}$ etwa dem langjährigen Mittel. Der zweite Winter 2009/10 war mit $+0,3^{\circ}\text{C}$ etwas wärmer. Das wirkt sich auch auf die saisonalen Arbeitszahlen aus (siehe Kapitel 4.2).

Mit Hilfe der abgelesenen Werte der Wärme- und Stromzähler sowie des Durchflussmessers lassen sich die Erzeuger- und System – Jahresarbeitszahlen wie folgt berechnen:

Erzeuger-Jahresarbeitszahl $EJAZ = (Q-Hz + Q-Ww) / (NT + HT - UP)$ und

System-Jahresarbeitszahl $SJAZ = (Q-Hz + (F * V)) / (NT + HT - UP)$,

mit $Q-Hz$ = Wärmeabgabe an Verbraucher Heizung (kWh-thermisch)

$Q-Ww$ = Wärmeabgabe an Warmwasserspeicher (kWh-thermisch)

NT = Sonder-Elektrozähler mit Niedertarif (kWh-elektrisch)

HT = Sonder-Elektrozähler mit Hochtarif (kWh-elektrisch)

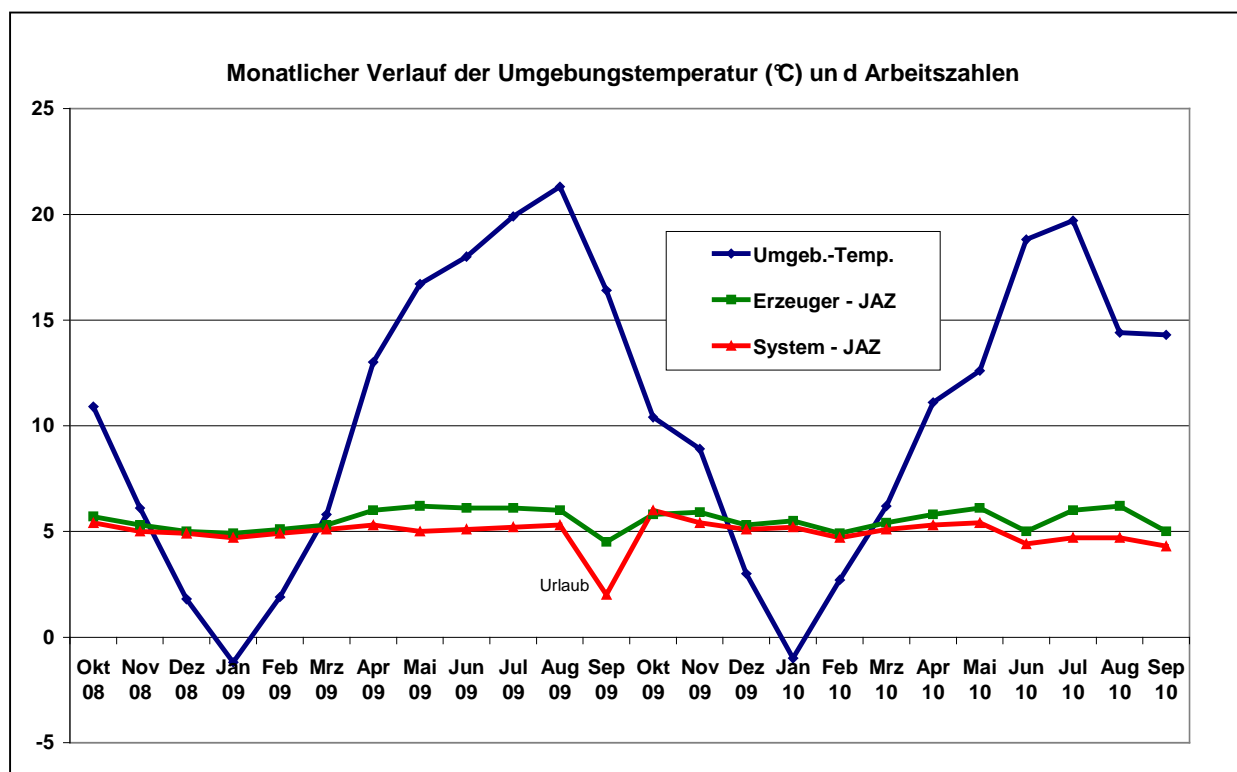
UP = Stromverbrauch Umwälzpumpe Heizkreis (kWh-elektrisch)

V = Volumen Warmwasserverbrauch (m^3) und

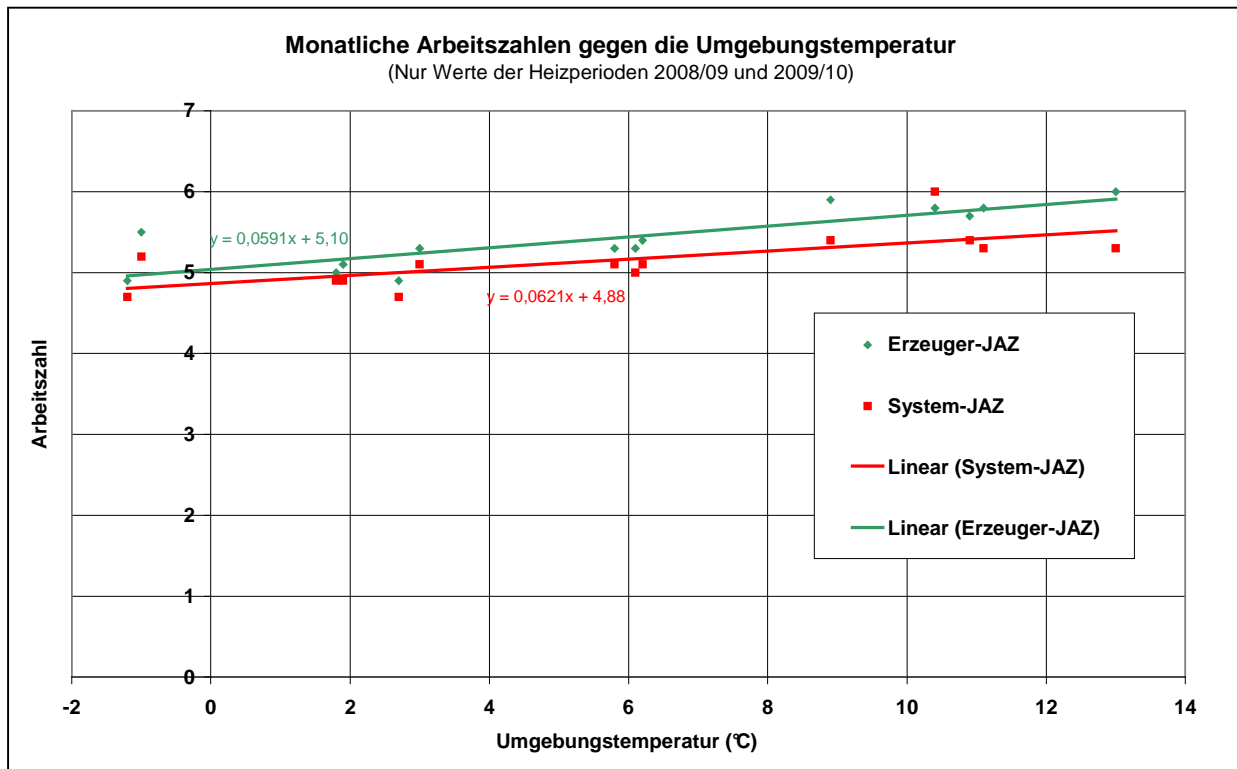
F = 39; Umrechnungsfaktor von Durchfluss zu kWh-thermisch

($Kw = 11^\circ C$, $Ww = 45^\circ C$).

Sie variieren nur geringfügig um die sehr hohe Arbeitszahl von 5. Lediglich während der Urlaubszeiten gibt es mehr oder weniger starke Einbrüche bei den Jahresarbeitszahlen.

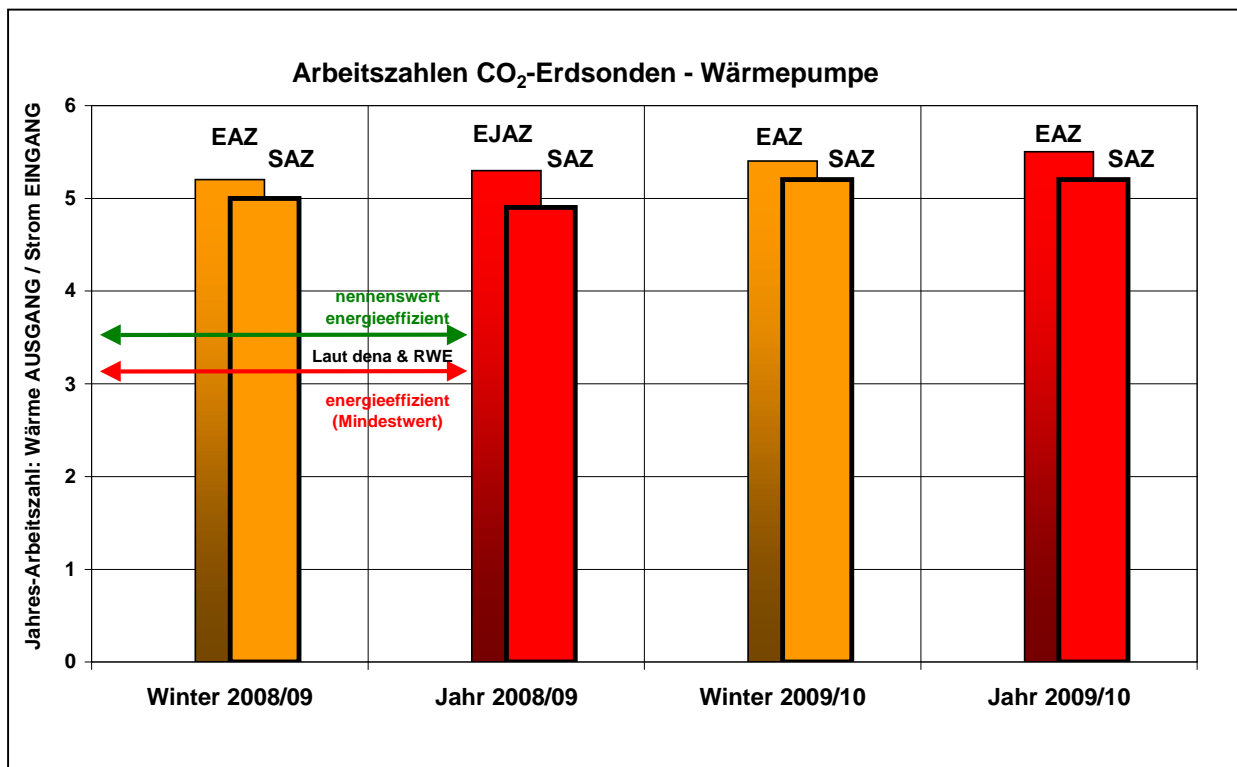


Trägt man die Arbeitszahlen gegen die Umgebungstemperaturen auf (siehe Graphik auf der nächsten Seite), dann ist deutlich zu sehen, dass sie mit zunehmend kalter Witterung abnehmen. Das liegt an den notwendig höheren Vorlauftemperaturen der Fußbodenheizung und an der insbesondere gegen Ende des Winters geringeren Erdreichtemperaturen um die CO_2 -Sonden. In den beiden Winterhalbjahren erniedrigten sich die *Erzeuger*- (grün) und *System*- (rot) Arbeitszahlen vom wärmsten zum kältesten Monat um 17 % bzw. 13 %.



4.2 Saisonale- und Jahreswerte

Die nächste Graphik zeigt die saisonalen Arbeitszahlen. Die günstigeren *Erzeuger*-Arbeitszahlen, gemessen direkt hinter der Wärmepumpe, betragen in den Wintern 2008/09 und 2009/10 5,2 bzw. 5,4 und die *System*-Arbeitszahlen, die auch noch die Verluste des Warmwasser-Speichers und dessen Ladepumpe berücksichtigen, 5,0 bzw. 5,2. Die etwas höheren Werte in der zweiten Heizperiode beruhen auf den leicht höheren Umgebungstemperaturen in dieser Zeit.



Über die volle zweijährige Messperiode ermittelte die Agenda-Gruppe eine

Erzeuger - Jahresarbeitszahl	EJAZ = 5,4 und eine
System - Jahresarbeitszahl	SJAZ = 5,1.

Die gemessenen *System*-Jahresarbeitszahl von gut 5 liegt nicht nur beträchtlich über den Mindest-Vorgaben der Deutschen Energieagentur und des Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerkes für eine „nennenswerte Energieeffizienz“ in Höhe von 3,5 (siehe INFO-BOX auf Seite 1), sondern auch noch beachtlich über den zwei höchsten Einzelwerten der *Erzeuger*-Jahresarbeitszahlen von 4,3 bzw. 4,4, die die Lokale Agenda 21 – Gruppe Energie der Stadt Lahr unter 13 Erdreich-Wärmepumpen in der Phase 1 des „Feldtests Wärmepumpen“ ermittelte.

Auch bei der Bewertung gemäß der Klassifizierung von Jahresarbeitszahlen der Agenda-Gruppe, die unabhängig von der Art der Kaltquellen Luft, Grundwasser oder Erdreich erfolgt, lautet das Ergebnis „Ausgezeichnet“ (siehe Schaltfläche unter [www.agenda-energie-lahr.de/WP_Feldtest Phase2.html](http://www.agenda-energie-lahr.de/WP_Feldtest_Phase2.html)).

5. Wirtschaftlichkeit

Eine „ausgezeichnete“ Energieeffizienz ist im allgemeinen nicht zu gleichen Kosten zu haben wie Durchschnitts – Erdreich-Wärmepumpen. Die Frage erhebt sich nun, welche Mehrkosten eine CO₂-Erdsonden - Wärmepumpe gegenüber anderen Heizwärmeerzeugern verursacht und ob die zu rechtfertigen sind. Wenn nicht: Wie hoch dürfen die Investitionskosten maximal sein, damit die Gesamtkosten mit denen von normalen Erdreich-Wärmepumpen gleich sind (Grenzkostenbetrachtung).

Die Agenda-Gruppe hat zur Beantwortung dieser Frage fünf verschiedene Heizwärmeerzeuger verglichen. Die Tabelle auf der nächsten Seite zeigt als Referenz einen Erdgas-Brennwertkessel mit einer Sonnenkollektoranlage für die Brauchwassererwärmung, zwei Luft- und zwei Erdreich-Wärmepumpen. Die Berechnung der Betriebswirtschaftlichkeit lehnt sich an die Vorgehensweise im Schlussbericht der Phase 1 an (siehe die Seiten 35 und 36 unter www.agenda-energie-lahr.de); die mit einem Stern * versehenen Werte sind daraus entnommen. Neu sind die Daten von zwei Wärmepumpen der Phase 2:

- Die Luft-Wärmepumpe Nr. 2102 mit der bisher höchsten System-Jahresarbeitszahl von SJAZ = 3,4 unter den Luft-Wärmepumpen und
- die in diesem Bericht untersuchte CO₂ -Erdsonden – Wärmepumpe Nr. 2301 mit SJAZ=5,1.

Aus den Investitionskosten in Zeile 1 lassen sich mit Hilfe der Annuitäten-Methode die kapitalgebundenen Jahreskosten in Zeile 2 berechnen. Zusammen mit den Betriebskosten in Zeile 5 ergeben sich dann die Gesamtkosten. Teilt man diese durch einen Jahreswärmeverbrauch in Höhe von 23 280 kWh dann erhält man die spezifischen Wärmekosten in Euro-cent pro kWh-thermisch.

Die Ergebnisse:

Die geringsten Gesamtkosten mit rund 11,5 c/kWh verursachen die beste Luft-Wärmepumpe (Phase 2) und das Mittel aller normalen Erdreich-Wärmepumpen (Phase 1). Danach folgt mit knapp 12 c/kWh der Erdgas-Brennwertkessel mit einer Sonnenkollektoranlage und -deutlich abgeschlagen- die hoch-energieeffiziente CO₂-Erdsonden - Wärmepumpe. Deren Investitionskosten müssten von 36400 Euro auf 30500 Euro und 29000 Euro sinken, um mit normalen Erdreich-Wärmepumpen. bzw. mit dem solar-unterstützten Erdgas-Brennwertkessel konkurrieren zu können

	Nutzfläche 240 m ² Wärme Heiz. 90 kWh/m ² a Wärme WW <u>7 kWh/m²a</u> Wärme gesamt 97 kWh/m ² a Wärmeverbrauch 23280 kWh/a	Erdgas-Brennwertkessel und solare Brauchwassererwärmung	Luft-Wärmepumpen (Mittel Phase 1)	Luft-Wärmepumpe (Best-Wert Phase 2)	Erdsonden Wärmepumpen (Mittel Phase 1)	CO ₂ -Erds. Wärmepumpe Nr. 2301 Phase 2
1	Investitionskosten einschließl. Montage und Umsatzst. (Euro)	12 300 *	16 800 *	19 300	23 500 *	36 400
2	Jahreskosten Investition (Euro) Annuität *: 20 Jahre Lebensdauer (Erdsonden-WP 29 J. *)	905	1236	1420	1384	2143
3	Energieeffizienz: Nutzungsgrad bzw. Jahresarbeitszahl	0,96	2,3 *	3,4	3,4 *	5,1
4	Jahres-Brennstoffverbrauch: Erdgas + 5% Solaranteil (MWh-therm.) u. Strom (MWh-elekt.)	23,0	10,1	6,8	6,8	4,6
5	Jahres-Betriebskosten (Euro) a. Energie: Erdgas 6,5 c/kWh, Sondertarif WP 14,5 c/kWh b. Wartung und Reparatur *	1495 370	1465 250	986 250	986 310	667 310
6	Summe Jahreskosten (Euro) Zeilen 2 und 5a und 5b	2770	2951	2656	2680	3120
7	Spezifische Wärmekosten (c/kWh)	11,9	12,7	11,4	11,5	13,4
* Anmerkung: In Anlehnung an die Betriebskostenrechnung der Phase 1 des „Feldtests Wärmepumpen“ unter www.agenda-energie-lahr.de/WP_FeldtestPhase1.html (Schlussbericht).						

6. Zusammenfassung

Die untersuchte Kohlendioxid/CO₂-Ersonden – Wärmepumpe erreicht mit einer Erzeuger- und System-Jahresarbeitszahl von EJAZ = 5,4 bzw. SJAZ = 5,1 die bisher mit Abstand höchsten Energieeffizienzen in den Phasen 1 und 2 des „Feldtests Wärmepumpen“. Diese Werte sind gemäß der Klassifizierung der Jahresarbeitszahlen der Agenda-Gruppe, die unabhängig von der Art der Kaltquellen Luft, Grundwasser oder Erdreich ist (siehe www.agenda-energie-lahr.de/WP_FeldtestPhase2.html), ein „ausgezeichnetes“ Ergebnis mit einem großen Beitrag zum Klimaschutz. Nicht unerwähnt bleiben sollte jedoch, dass man auch bei einer so hohen Energieeffizienz immer noch 20% des teuren und hochwertigen Stroms braucht, um zusammen mit 80% Erdwärme das Haus zu beheizen und mit warmem Wasser zu versorgen.

Die hohe Energieeffizienz verursacht in diesem Fall erhöhte Kosten. Das ist wie auch im „normalen“ Leben: Qualität ist nicht zum Schnäppchenpreis erhältlich. Wem jedoch der Schutz des Klimas für sich und seine Kinder ein hohes Anliegen ist, der liegt mit einer Jahresarbeitszahl von 5 richtig. Hersteller, Bohrfirmen und Handwerker müssen jedoch noch einiges tun, um von den hohen Kosten herunter zu kommen.

Dr. Falk Auer und Herbert Schote
 nes-auer(at)t-online.de und www.agenda-energie-lahr.de
 Lahr (Schwarzwald), im Dezember 2010