Die Energieeffizienz einer

Abwasser - Erdgasabsorptions – Wärmepumpe Nr. 2501 in einer Schule in Tübingen

Ein Bericht von Dr. Falk Auer und Herbert Schote (beide LA21-Gruppe Energie Lahr)
und Bernd Hartmann (Stadtwerke Tübingen)

Zusammenfassung:

Die Abwasser - Erdgasabsorptions – Wärmepumpe arbeitet im bivalent-parallelen Betrieb zusammen mit einem Erdgaskessel. Die Jahresarbeitszahl beträgt 1,13 (113%), ein Wert, der schon als „mangelhaft“ zu bezeichnen ist (siehe INFO-BOX „Jahresarbeitszahl“). Umgerechnet auf Elektro-Wärmepumpen ergäbe sich bei einem Primärenergiefaktor von zur Zeit 2,6 eine Jahresarbeitszahl von 2,9. Die Gründe für den nicht-optimalen Betrieb liegen in einer relativ geringen Abwassertemperatur (Mischsystem) und in zu hohen Vorlauftemperaturen für die Wärmesenken.

Auch der Erdgas-Brennwertkessel für die Spitzenlast kann seine Möglichkeiten nur selten ausnutzen. Die Gründe: Er ist in Serie zur Wärmepumpe eingebaut und versorgt die Heizwasserkreisläufe und den Trinkwasserspeicher mit Vorlauftemperaturen bis zu 70 °C. Er kann den Brennwerteffekt nur selten ausnutzen und kommt deswegen auf einen Nutzungsgrad von nur 86 %, bezogen auf den Heizwert.

1. Einführung und Aufgabenstellung

Im Hinblick auf die zunehmenden Anforderungen an den Klimaschutz hat sich die Universitätsstadt Tübingen im Rahmen der Klimaschutzkampagne „Tübingen macht blau“ entschlossen, eine Abwasser - Erdgasabsorptions – Wärmepumpe in einer Schule zu erproben. Dieser Wärmepumpentyp lässt theoretisch eine höhere Energieeffizienz erwarten als eine Elektro-Wärmepumpe. Der Grund: Er nutzt direkt die Primärenergie Erdgas – eine Umwandlung dieser Energie in Kraftwerken mit den damit verbundenen Verlusten ist nicht notwendig. Ob das auch in der Praxis der Fall ist, war Gegenstand der Untersuchung.

2. Schule und Kindergarten

Die Aischbachschule liegt im Westen Tübingens. Es handelt sich um einen einen Altbau aus dem Jahr 1970; seine energetische Sanierung erfolgte im Jahr 2008. 20 Lehrer unterrichten 181 Schüler in 8 Klassenzimmer zuzüglich der Nebenräume. Die beheizte Nettogrundfläche beträgt rund 2700 m². Der Schule angegliedert ist ein Kindergarten, den die Wärmepumpe über Nahwärme mit versorgt.

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 bei *Elektro*-Wärmepumpen 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.

Bei *Erdgas*-Wärmepumpen sind die genannten Werte durch den zur Zeit geltenden Primärenergiefaktor 2,6 zu teilen. Er stellt das Verhältnis der Primärenergien Kohle, Uran und Gas zu der Endenergie Strom dar, und zwar unter Berücksichtigung der Energiekette Gewinnung, Umwandlung und Verteilung.

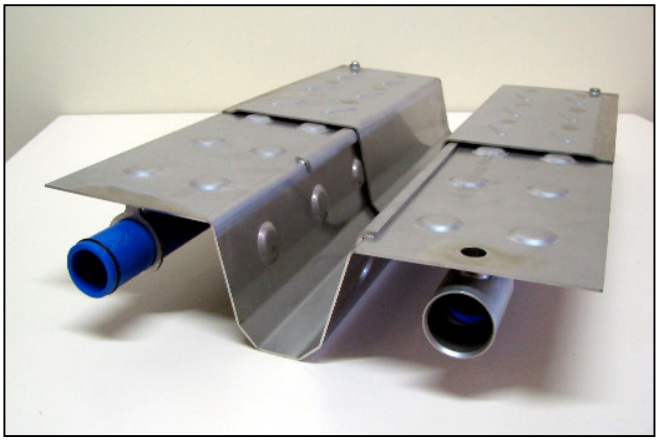
Die entsprenden Mindestwerte lauten deshalb bei *Erdgas*- Wärmepumpen JAZ = 1,15 für „energieeffizient“ arbeitende Wärmepumpen und JAZ = 1,35 für „nennenswert energieeffizient“ arbeitende Wärmepumpen.

Die Wärmeverteilung erfolgt über Radiatorheizkörper, die wegen des später angeschlossenen Kindergartens eine Vorlauftemperatur von bis zu 70 °C benötigen. Der Abwasserkanal verläuft in unmittelbarer Nähe der Schule. Es handelt sich um ein Mischsystem, in dessen Rohren das wärmere Abwasser und der kältere Regen zusammen fließen.

3. Bivalent-paralleles Wärmepumpensystem

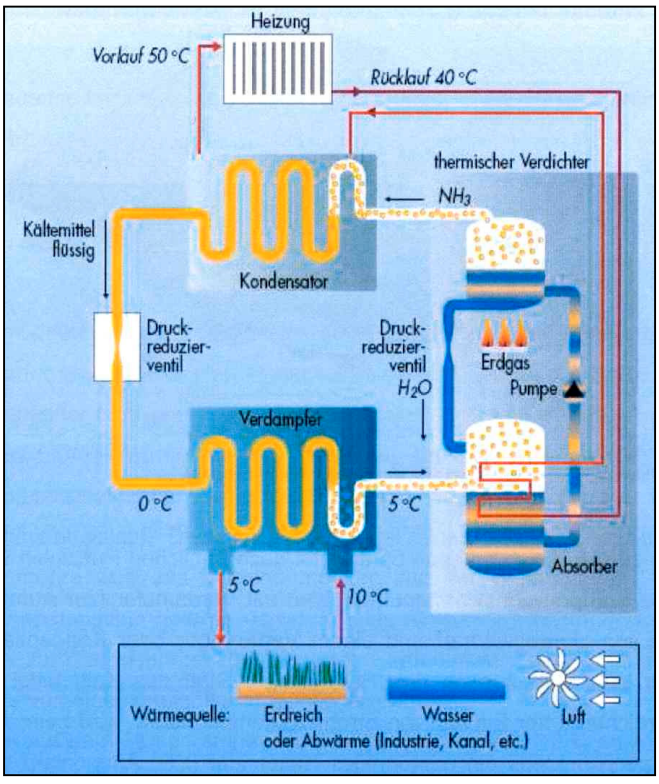
3.1 Abwasserkanal und Wärmetauscher

Der Abwasserkanal liegt in einer Tiefe von 4 m; sein Durchmesser beträgt 1,5 m. Der Wärmetauscher aus Edelstahl mit einer Länge von 18 m ist am Boden des Kanals befestigt (siehe Foto).



Die Temperatur des durchströmenden Abwassers variiert wegen des zusätzlichen Regenwassers (Mischsystem) in den Wintermonaten nur zwischen 5 °C und 10 °C und in den Sommermonaten zwischen 10°C und 15 °C. Die Leistung des Wärmetauschers beträgt 22 kW bei einer Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf von 4 K.

3.2 Erdgasabsorptions-Wärmepumpe und Spitzenlastkessel



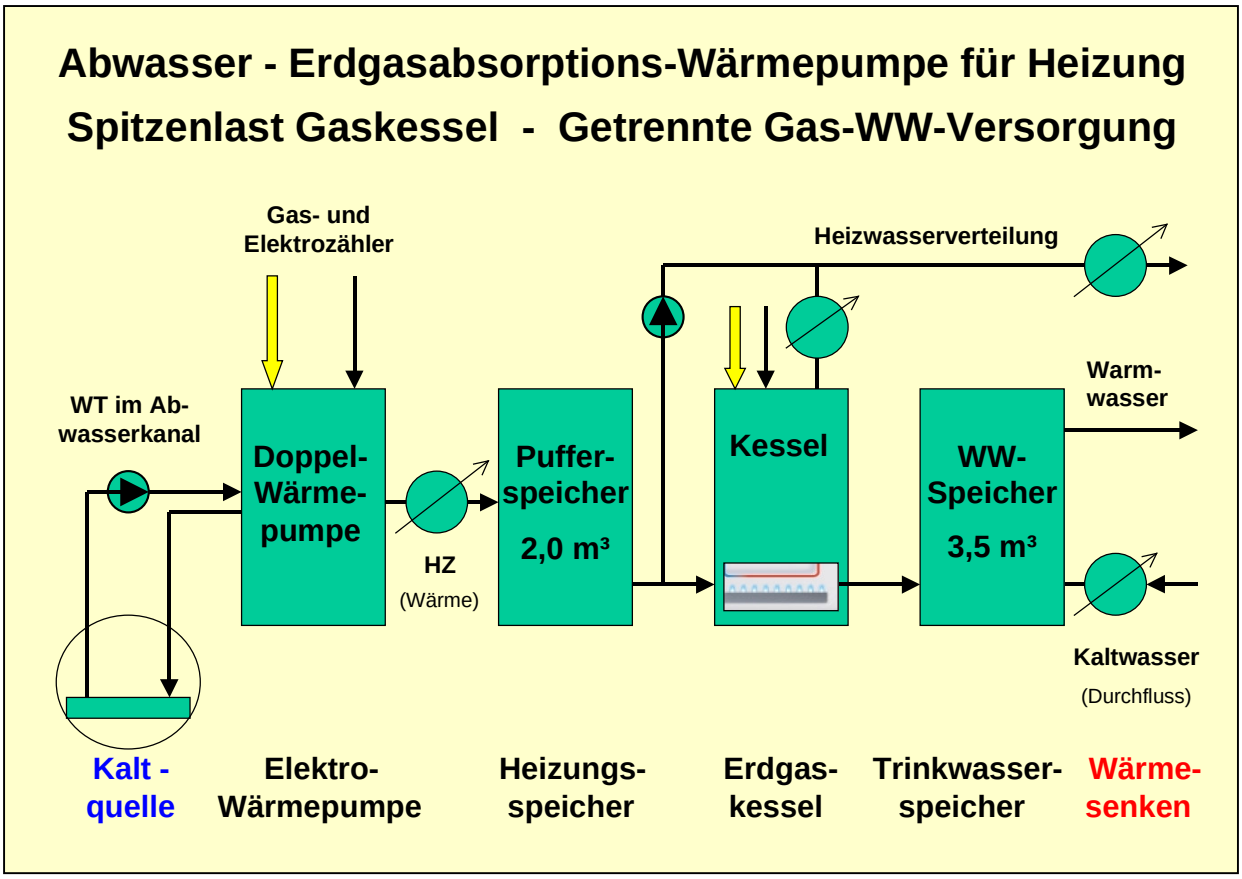
Bei Wärmepumpen hält vielfach ein mechanisch angetriebener Verdichter den Kältemittelkreislauf in Gang. Bekannt ist dieses Prinzip vom Kühlschrank. Der schafft Wärme aus seinem Inneren ins Äußere. Die Wärmepumpe arbeitet genauso, jedoch mit umgekehrtem Nutzen: Sie „pumpt“ die Wärme von außen in das Innere des Hauses und stellt diese für die Heizung und das Brauchwasser zur Verfügung.

Zum Antrieb des Verdichters ist bei Ein- und Zweifamilienhäusern Strom erforderlich, weil es für kleine Wohneinheiten keine Erdgas-Wärmepumpen gibt. Für größere Verbraucher, wie im vorliegenden Fall, ist es möglich, den mechanisch angetriebenen Verdichter durch einen thermischen zu ersetzen (siehe linke Graphik im rechten Teil): Die Energie des Erdgases trennt in einem so genannten Austreiber

das Kältemittel Ammoniak NH_3 von der Wasserlösung und bringt dadurch den Kältemittelkreislauf auf einen höheren Druck und damit auch höhere Temperatur.

Mit einem solchen Verfahren könnte sich die Energieeffizienz verbessern, weil die Kraftwerksverluste bei der Umwandlung von Erdgas in Strom entfallen und die Wärmepumpe die in der Umgebung enthaltene „Wärme“ nutzt.

In der Schule ist ein solcher Wärmepumpentyp für die Abdeckung der Grundlast eingebaut, und zwar zwei parallel arbeitende Aggregate mit einer Nennleistung von je 40 kW. Der Hersteller gibt für eine primärseitige Temperatur von 0 °C und eine sekundärseitige von 50 °C eine Arbeitszahl von 1,49 (149 %) an; bei 65 °C sind es 1,25 (125 %). Die Mindestwerte für eine Energieeffizienz gehen aus der INFOX auf Seite 1 hervor. Ein 2 m³ – Pufferspeicher entkoppelt hydraulisch die Wärmepumpen von der Heizwasserverteilung (siehe vereinfachter Schaltplan unten).



Die Spitzenlast liefert ein Erdgas-Brennwertkessel. Er kann seine Leistung zwischen 43 kW und 170 kW variieren und arbeitet in Serie mit den Wärmepumpen. Der Kessel bringt die Temperatur des Wärmepumpen-Vorlaufes auf den notwendigen Sollwert für die Radiatorheizkörper. Darüber hinaus versorgt er wegen der hohen geforderten Nutztemperatur für das Trinkwasser von 60 °C (Legionellengefahr) den 3,5 m³ - Speicher allein und ganzjährig mit thermischer Energie.

4. Messtechnik

Das Wärmepumpensystem verfügt über zahlreiche Wärme-, Elektro- und Erdgaszähler, um die *Erzeuger*-Jahresarbeitszahl direkt hinter der Wärmepumpe und die *System*-Jahresarbeitszahl zu ermitteln. Letztere berücksichtigt noch die thermischen und elektrischen Verluste zwischen der Wärmepumpe und den Verbrauchern (siehe INFO-BOX auf Seite 1 und hydraulischer Schaltplan) sowie den Beitrag des Erdgas-Spitzenlastkessels.

Die *Erzeuger*-Jahresarbeitszahl berechnet sich wie folgt:

$$\mathbf{EJAZ = Q_{Wp} / (V_{Wp} * F + PEF * HE_{Wp})}$$

mit	Q_{Wp}	Erzeugte Wärme am Ausgang der Wärmepumpe in kWh-thermisch
	V_{Wp}	Volumen des Erdgases in Kubikmeter für die Wärmepumpen
	F	Umrechnungsfaktor von Volumen Erdgas via Heizwert unter Normbedingung auf den Heizwert vor Ort (Betriebsbedingung). Einheit in kWh-thermisch pro Kubikmeter Erdgas; die Umrechnungsformeln und das Ergebnis sind in Kapitel 7 (Anhang) zu finden.
	PEF	Primärenergiefaktor Strom; zur Zeit in Deutschland PEF = 2,6
	HE_{Wp}	Elektrische Hilfsenergien für die beiden Wärmepumpen (Lösungsmittelpumpen und Regelung).

Die Formeln für die Ermittlung der *System*-Jahresarbeitszahl lauten:

$$\mathbf{SJAZ = (Q_{Hz} + Q_{Ww}) / (((V_{Wp} + V_{Ks})* F) + (PEF * HE_{Wp+Ks+La}))}$$

mit	Q_{Hz}	Nutzwärmen Heizung am Ausgang des Wärmepumpensystems (Wärmepumpen und Gaskessel)
	Q_{Ww}	Nutzwärme nach dem Trinkwasserspeicher
	V_{Wp} & V_{Ks}	Volumen des Erdgases in Kubikmeter für Wärmepumpen und Gaskessel
	F und PEF	Faktoren wie unter EJAZ
	$HE_{Wp+Ks+La}$	Elektrische Hilfenergien für Wärmepumpen, Kessel und Ladepumpen Anmerkung: Der Strom für die Umwälzpumpen in den Heizkreisen findet keine Berücksichtigung, weil die Pumpen kein Bestandteil des Wärmepumpensystems sind.

Der Nutzungsgrad des Erdgaskessels bestimmt sich wie folgt:

$$\mathbf{ETA_{Ks} = Q_{Ks} / ((V_{Ks} * F) + (PEF * HE_{Ks}))}$$

mit	Q_{Ks}	Wärme am Ausgang des Erdgaskessels
	V_{Ks}	Volumen des Erdgases für den Kessel
	F und PEF	Faktoren wie unter EJAZ
	HE_{Ks}	Elektrische Hilfenergie für den Kessel.

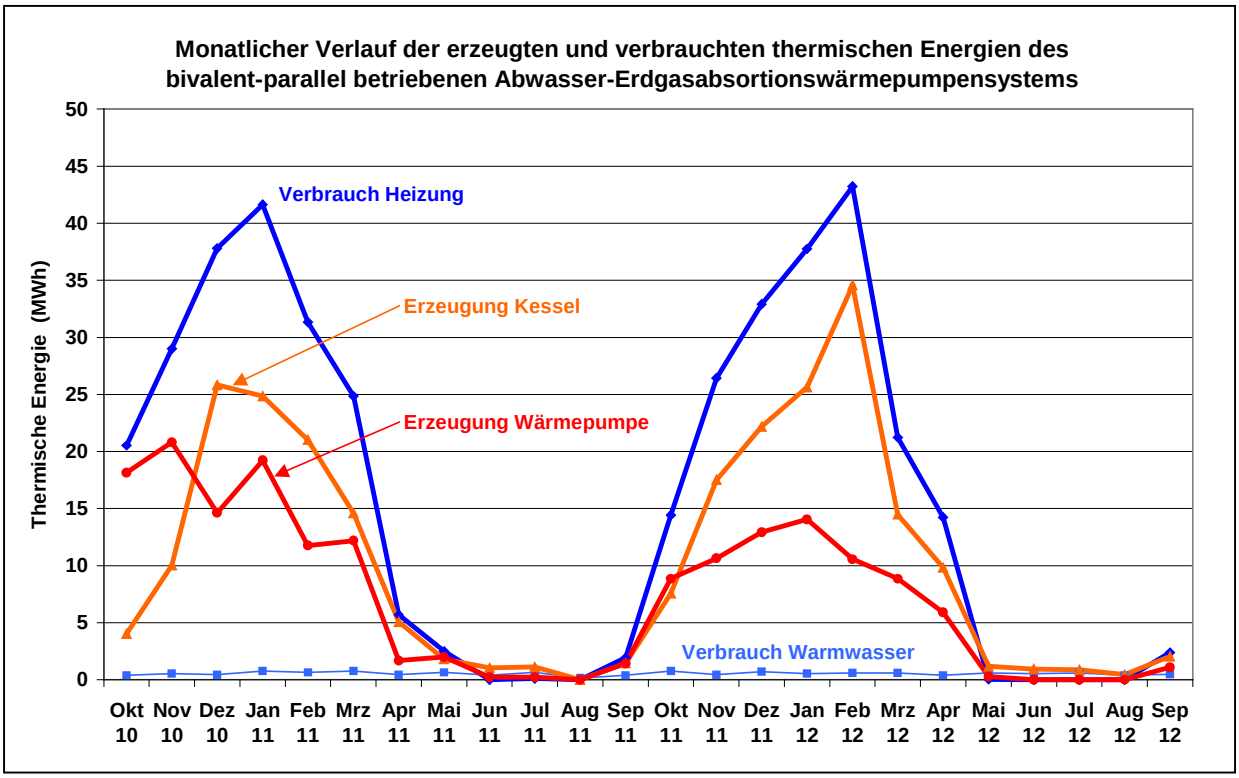
Die Agenda-Gruppe erhielt monatlich die Ablesewerte der Wärme- und Elektrozähler. Auf dieser Basis und den zuvor erwähnten Formeln erfolgte die Auswertung.

5. Ergebnisse

Die Graphik auf der nächsten Seite zeigt den monatlichen Verlauf der erzeugten thermischen Energien der Wärmepumpe und des Gaskessels sowie die Verbräuche für Heizung und das warme Trinkwasser, und zwar über die zweijährigen Messdauer von Oktober 2010 bis September 2012. Die beiden Heizperioden waren in Lahr (Schwarzwald) zu warm gewesen gegenüber dem langjährigen Mittel von 1961 – 1990, und zwar um +0,7°C bzw. +0,6°C.

Bemerkenswert: Der Kessel übernimmt ab Dezember 2010 einen beträchtlichen Teil der Heizlast. Offensichtlich kann dann die Wärmepumpe nicht mehr für eine ausreichend hohe Vorlauf-

temperatur sorgen. Der Grund: Zur Schule wurde noch der benachbarte Kindergarten angeschlossen.

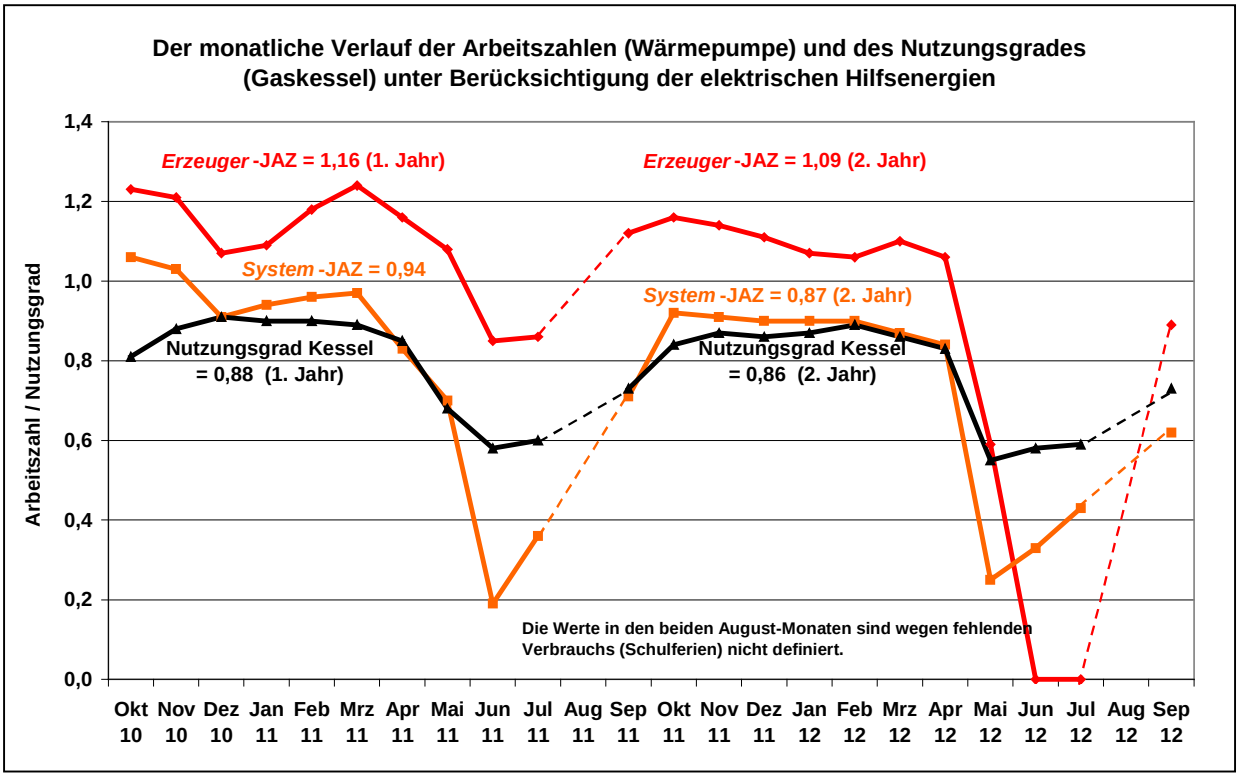


Aus der nächsten Tabelle gehen die Ergebnisse der Praxisuntersuchung auf Jahresbasis hervor, aufgeteilt in das erste Messjahr 2010/2011 und das zweite 2011/2012.

Bezeichnung	Einheit		1. Messjahr	2. Messjahr
Erzeugte Wärme Wärmepumpe	MWh-therm.		102,4	73,3
Erzeugte Wärme Erdgaskessel	MWh-therm.		110,9	137,3
Anteil Wärmepumpe an Gesamterzeugung	Prozent		48,0	34,8
Elektrische Hilfsenergien	MWh-elektr.		3,5	3,3
Anteil elektr. Hilfsen. an Wärmeerzeugung	Prozent		1,6	1,6
Verbrauchte Wärme Heizung	MWh-therm.		195,4	192,7
Verbrauchte Wärme Trinkwasser	MWh-therm.		6,3	6,7
Erzeuger – Jahresarbeitszahl			**1,16** (entspr. bei Elektro-WP: 3,02)	**1,09** (entspr. bei Elektro-WP: 2,83)
System – Jahresarbeitszahl			**0,94** (entspr. bei Elektro-WP: 2,44)	**0,87** (entspr. bei Elektro-WP: 2,26)
Nutzungsgrad Erdgaskessel			**0,88**	**0,86**

Wie schon in der Graphik bei den Monatswerten zu sehen war zeigt die Tabelle auch quantitativ, dass der Beitrag der Wärmepumpe an der Deckung der Gesamt-Heizlast von rund der Hälfte im ersten Messjahr auf etwa ein Drittel im zweiten abgesunken ist. Das liegt an dem später zugeschalteten Kindergarten, der wegen der Nahwärme nach einer höheren Vorlauftemperatur verlangt, die die Wärmepumpe nicht mehr liefern kann.

Die elektrischen Hilfsenergien für die Wärmepumpe und den Gaskessel sind mit 1,6 % bezogen auf die erzeugten Gesamt-Wärmeenergien erfreulich gering. Die Nutzwärmen für die Heizung unterscheiden sich wegen der nahezu gleichen Umgebungstemperaturen in den beiden Wintern nur geringdügig; auch die Trinkwasserverbräuche sind vergleichbar. Auf die Jahresarbeitszahlen geht die folgende Graphik ein.



Der monatliche Verlauf der Jahresarbeitszahlen und des Nutzungsgrades berücksichtigt die elektrischen Hilfsenergien für die Wärmepumpe und des Kessels unter Berücksichtigung des zur Zeit geltenden Primärenergiefaktors von 2,6. Im ersten Winter liegen die *Erzeuger*- und *System*-Jahresarbeitszahlen in einer Bandbreite zwischen 1,10 und 1,25 bzw. 0,85 und 1,15; im zweiten erniedrigen sie sich wegen des geringeren Anteils der Wärmepumpe an der gesamten Wärmeerzeugung auf etwa 1,1 bzw. 0,9.

Bei geringem oder fehlendem Heizbedarf sinken die Jahresarbeitszahlen gegen Null oder sie sind wie in den beiden Augustmonaten gar nicht mehr definiert. Der Grund: Das Verhältnis der Verlustwärme in dem Pufferspeicher zur abnehmenden Nutzwärme wird immer größer. Darüber hinaus taktet die Wärmepumpe immer häufiger und arbeitet damit in einem ungünstigem Betriebspunkt.

Der Nutzungsgrad des Erdgas-Brennwertkessels beträgt in den beiden Wintern rund 0,9 oder 90%, in den Sommermonaten dagegen nur 0,6 oder 60%.

Zusammenfassend ergeben sich über die zwei Messjahre die folgenden Erzeuger- und System – Jahresarbeitszahlen:

***Erzeuger*-Jahresarbeitszahl EJAZ:**	**= 1,13 (113 %),**
entspricht mit Primärenergiefaktor PEF = 2,6 (siehe INFO-BOX auf Seite 1) bei Elektro-Wärmepumpen EWP einer EJAZ von 2,94	
***System*-Jahresarbeitszahl SJAZ:**	**= 0,91 (91 %)**
entspricht mit Primärenergiefaktor PEF = 2,6 (siehe INFO-BOX auf Seite 1) bei Elektro-Wärmepumpen EWP einer SJAZ von 2,13	
Nutzungsgrad Erdgas-Brennwertkessel:	**= 0,86 (86 %)**

6. Bewertungen und Empfehlungen

Die *Erzeuger*-Jahresarbeitszahl liegt mit einer EJAZ = 1,13 unter den Möglichkeiten einer Abwasser – Absorptions-Wärmepumpe. Das rührt her von der relativ geringen Abwassertemperatur von 5 – 10 °C im Winter in dem Mischsystem (Abwasser und Regen) und an den hohen geforderten Nutztemperaturen von bis zu 70 °C für die Heizung (Kindergarten im zweiten Jahr über Nahwärme) und für das Trinkwasser (Legionellen).

Zum Vergleich: Im Erneuerbaren-Energien-Wärme-Gesetz (EEWärmeG) ist eine Jahresarbeitszahl von mindestens 1,2 vorgeschrieben, die Bundesregierung fördert finanziell erst ab 1,3 und der Hersteller gibt zwischen 1,3 und 1,5 an (siehe Kapitel 3.2).

Die für den Klimaschutz wichtigere Kenngröße ist aber die *System*-Jahresarbeitszahl SJAZ. Die Gründe für die Differenz zwischen der EJAZ und SJAZ liegen hauptsächlich in den thermischen Verlusten der zwei Pufferspeicher mit einem Volumen von 2,0 m³ bzw. 3,5 m³. Sie beträgt 0,22 – Arbeitszahlpunkte, was umgerechnet auf Elektro-Wärmepumpen etwa 0,6 – Arbeitszahlpunkten entspricht. Dieser Wert liegt deutlich über den Messergebnissen bei kleinen Elektro-Wärmepumpen, die freilich mit wesentlich niedrigeren Vorlauf- bzw. Pufferspeichertemperaturen arbeiten. Verantwortlich für die Differenz zwischen der EJAZ und SJAZ sind aber auch noch die hohen Rücklauftemperaturen aus den Heizkreisen. Liegen Sie über 45 °C, dann schaltet die Wärmepumpe ab und der Kessel muss die Heizlast allein übernehmen.

Die Erzeuger-Jahresarbeitszahl in Höhe von EJAZ = 1,13 (entspricht 2,9 bei EWP) ist laut der Deutschen Energieagentur (dena) und des Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerkes (RWE) als „nicht-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) lautet die Bewertung „mangelhaft“ (EJAZ zwischen 2,6 und 3,0, bezogen auf EWP).

Auch der Brennwertkessel bleibt mit einem Nutzungsgrad von 0,86 hinter den Erwartungen zurück. Das liegt an zwei Punkten:

- Wie der vereinfachte hydraulische Schaltplan zeigt, arbeitet er in Serie mit der Wärmepumpe und erhält damit bereits vorerwärmtes Wasser von mehr als 45 °C.
- Der Kessel muss für den später mit versorgten Kindergarten oft und für die Trinkwassererwärmung immer eine Temperatur von bis zu 70 °C zur Verfügung stellen (Legionellengefahr).

Beides führt dazu, dass der Brennwerteffekt, also die bei der Abkühlung des Erdgases frei werdende Kondensationswärme, kaum nutzbar ist.

Trotz der nur mäßigen Ergebnisse im vorliegenden Pilot- und Demonstrationsobjekt der Stadt Tübingen haben Abwasser-Wärmepumpen durchaus noch ein Energieeffizienz-Potential, wenn die folgenden Rahmenbedingungungen möglich sind:

- Lage und Größe: Es muss sich um größere Objekte handeln, die nahe an einem Abwasserkanal liegen (ist im vorliegenden Fall gegeben)
- Kaltseite: Abwassertemperaturen von ganzjährig mehr als 10 °C notwendig. Das bevorzugt reine Abwasserkanäle. In einem Mischsystemen (einschließlich Regen) müsste dazu ein Gewerbe- oder Industriebetrieb im Oberlauf vorhanden sein, der den Winter über wärmeres Abwasser einspeist.
- Warmseite: Niedertemperatur-Heizkreise vorsehen mit einer Vorlauftemperatur von maximal 40 °C. Bei der Forderung nach einer Trinkwassertemperatur von 60 °C (Legionellen) die Warmwasserversorgung von der Heizung entkoppeln (ist im vorliegenden Fall gegeben). Darüber hinaus prüfen, ob eine dezentrale Trinkwasserbereitstellung vorteilhafter ist.
- System: Prüfen, ob ein bivalent-alternatives System (entweder Wärmepumpe oder Kessel) im Vergleich zu einem bivalent-parallen (Wärmepumpe und Kessel) Vorteile bringt (bessere Ausnutzung des Brennwerteffektes).

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

Im November 2012

Es folgt Kapitel 7 (Anhang):

Umrechnung des Erdgas – Heizwertes von Norm- auf Vor-Ort - Betriebsbedingung

Umrechnung des Heizwertes von Erdgas von Norm- auf Vor-Ort-Betriebsbedingung

Mittelwert des *Brenn*wertes $H_{o,n}$ über die zwei Heizperioden von Oktober 2010 bis September 2012 laut Angabe der Lieferanten Stadtwerke Tübingen: 11,26 kWh/Nm³

*Heiz*wert $H_{u,n}$ = Brennwert $H_{o,n}$ /1,108 = 10,16 kWh/Nm³

Für trockene Gase gilt allgemein:

$H_u = H_{u,n} * f1 * f2 * 1/K$, mit

- H_u gesuchter Heizwert unter Vor-Ort-Betriebsbedingungen
- $H_{u,n}$ Heizwert 10,16 kWh/Nm³ unter Normalbedingungen bei einem Luftdruck von 1013,5 mbar und einer Umgebungstemperatur von 0°C
- K = 1 bei Effektiv-Erdgasdruck im Gaszähler < 1000 mbar
- f1 = 273,15/(273,15 + t) Temperatur-Korrekturfaktor mit t = 15 °C Erdgastemperatur (Norm) am Gaszähler im Keller
- $f2 = (p_{eff} + p_{umg}) / p_n$ Druck-Korrekturfaktor mit
  - p_{eff} = 23 mbar Erdgasdruck Vor-Ort-Betriebsbedingung
  - p_n = 1013,5 mbar Normaldruck in Meereshöhe
  - $p_{umg} = p_n / f3$ mittlerer Luftdruck in Tübingen 341 m über Meereshöhe

Für die Umrechnung des Luftdrucks von Meereshöhe auf Vor-Ort-Betriebsbedingungen gilt:

f3 = 1 / (1-(0,0065*h / 288))exp5,256, mit h = 341 m geographische Höhe Tübingen
==> f3= 1,0414
==> $p_{umg} = p_n / f3$ = 1013,5 / 1,0414 = 973,2 mbar.

Daraus folgen:

- Druck-Korrekturfaktor f2 = (23+973,2) / 1013,5 = 0,9829
- Temperatur-Korrekturfaktor f1 = 273,15/(273,15 + 15) = 0,9479.

Mit diesen Korrekturfaktoren ergibt sich schließlich der gesuchte *Heiz*wert unter Vor-Ort-Bedingungen für Tübingen:

H_u = 10,16 kWh/Nm³ * 0,9479 * 0,9829 = **9,47 kWh/m³**