

Die Energieeffizienz eines

## **Erdgas-Brennwertkessels mit solarer Warmwasserbereitung**

Nr. 3001 in einem Einfamilienhaus in Lahr (Schwarzwald) vom Mai 2010 bis April 2012

von Dr. Falk Auer, Lokale Agenda 21 – Gruppe Energie Lahr  
im Rahmen der Phase 2 des „Feldtests Elektro-Wärmepumpen“ (Referenzgerät)

### **Zusammenfassung**

Die untersuchte Erdgas-Brennwerttherme modernster Bauart mit einer variablen Leistung von 2,7 – 15,0 kW arbeitete die ersten zwei Jahre in einem Niedrigenergie-Einfamilienhaus mit einem Nutzungsgrad von 101,3 % bezogen auf den Heizwert - ein „sehr gutes“ Ergebnis. Unter Berücksichtigung der Sonnenkollektoranlage für die Trinkwassererwärmung und des Ökostroms für die Hilfsenergien beträgt der Nutzungsgrad sogar 105,6 %.

### **1. Einleitung**

In einem sechsjährigen "Feldtest Elektro-Wärmepumpen" untersucht die Lokale Agenda 21 – Gruppe Energie Lahr in zwei Phasen an rund 50 Wärmepumpen den Stand heutiger Wärmepumpentechnik, deren Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit. Ziel ist es, nicht nur den Teilnehmern der Praxisuntersuchung, sondern auch den Planern, Energieberatern und Handwerkern verlässliche Daten über die energieeffizientesten Wärmepumpensysteme an die Hand zu geben. Der Schlussbericht der Phase 1 steht unter [www.agenda-energie-lahr.de/leistungwaermepumpen.html](http://www.agenda-energie-lahr.de/leistungwaermepumpen.html) Unter der gleichen Adresse sind auch die Berichte der Phase 2 "Innovative Wärmepumpensysteme" zu finden.

Als Referenzgerät diente ein neuer Erdgas-Brennwertkessel in einem Einfamilienhaus in Lahr (Schwarzwald) mit einer variablen Leistung. Die vorliegende Arbeit berichtet über dessen Energieeffizienz in Verbindung mit einer Sonnenkollektoranlage für die Trinkwassererwärmung unter realistischen Betriebsbedingungen über zwei Jahre.

### **2. Niedrigenergiehaus und Sonnenkollektoranlage**

Das Einfamilienhaus mit einer Wohnfläche von 160 m<sup>2</sup> stammt aus dem Jahr 2001. Es verfügt über einen Niedrigenergiehaus-Standard mit einer maximalen Heizleistung von 6 kW bei einer Außentemperatur von -12 °C. Zur Wärmeabgabe an die Wohnräume dienen Radiator-Heizkörper, die mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 60 °C auskommen.

Eine Vakuumröhren-Sonnenkollektoranlage mit einer Aperturfläche von 4 m<sup>2</sup> sorgt für warmes Trinkwasser, und ein 300 Liter-Speicher bevorratet die Solarwärme für ein paar Tage; eine Zirkulationsleistung ist nicht vorhanden. Von Mai bis September benötigen die zwei Bewohner keinen Gaskessel, weil die Solaranlage den Warmwasserbedarf zu 100 % deckt.

### **3. Erdgas-Brennwertkessel**

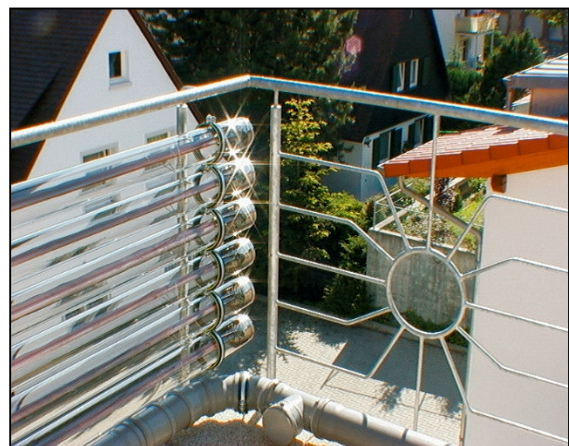
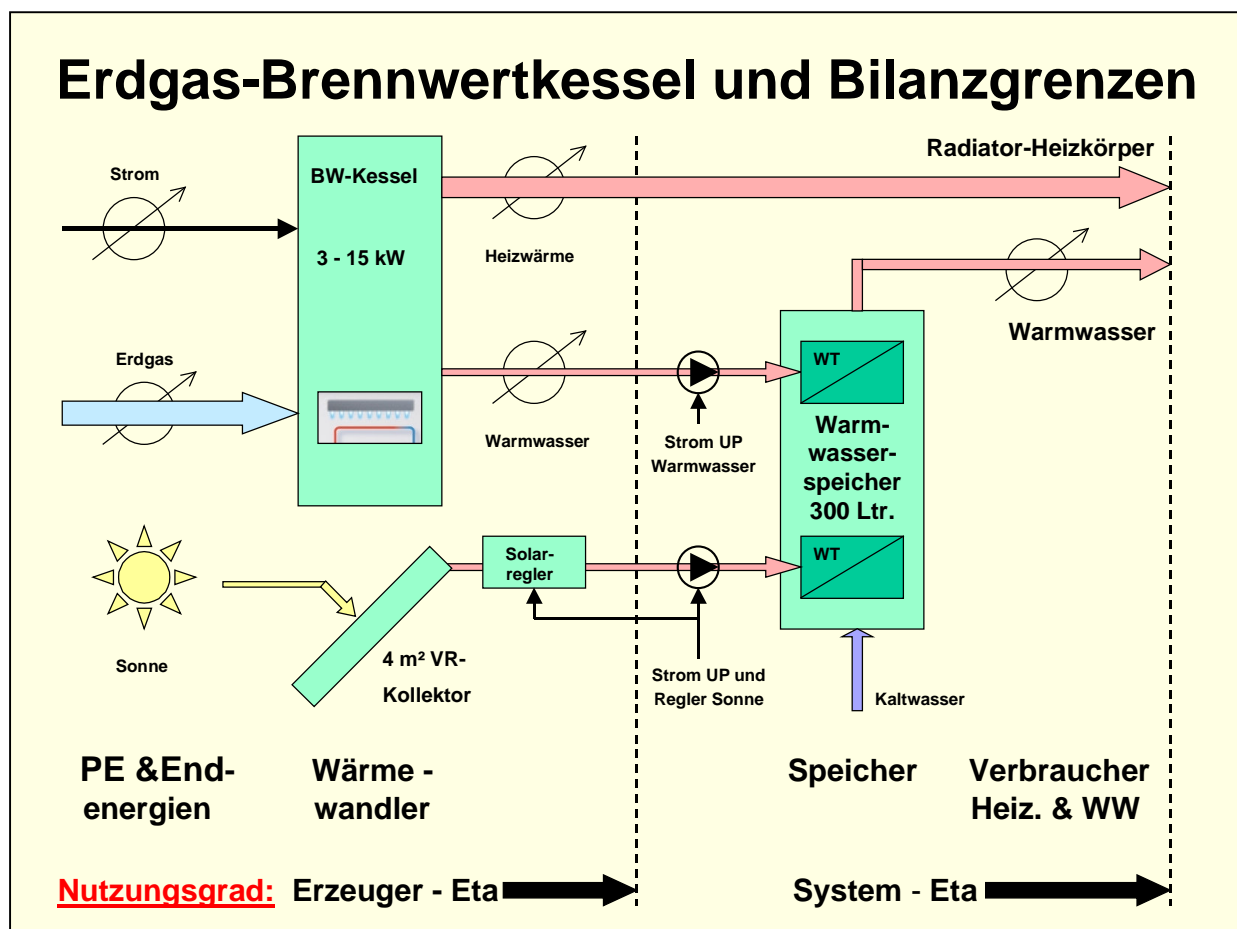
Bei der erdgasbetriebenen Wandtherme handelt es sich um einen neu entwickelten Typ aus dem Jahr 2010 mit einem hohen Anspruch an die Energieeffizienz - das galt es zu überprüfen. Die

Heizleistung variiert zwischen 2,7 – 15,0 kW. Der geringe untere Wert ermöglicht einen längeren, stationären Betrieb; das Takten des Gaskessels reduziert sich dadurch beachtlich.

Gegenüber einem Vorgängermodell hat sich die elektrische Bereitschaftsleistung von 11 auf 4,5 Watt erniedrigt. Darüber hinaus ist wegen des hocheffizienten Ventilators und der Umwälzpumpe auch mit einer deutlichen Einsparung der elektrischen Hilfsenergien zu rechnen.

#### 4. Energiebilanz und Messtechnik

Die folgende Graphik zeigt einen vereinfachten hydraulischen Schaltplan, zusammen mit den Energieströmen und der Messtechnik. Auf der linken Seite stehen die Primär- und Endenergien Strom, Erdgas und Sonne zur Verfügung und auf der rechten Seite die Nutzenergien für Heizung und Trinkwasser.



Die Brennwert-Wandtherme und eine 4 m<sup>2</sup> - Sonnenkollektoranlage (Aperturfläche; siehe Fotos auf der Seite zuvor) wandeln die Energiequellen Erdgas und Sonne in Wärme um. Ein 300 Liter-Speicher bevorratet das solar erwärmte Trinkwasser für ein paar Tage. Bei nicht ausreichender Einstrahlung erwärmt der Gaskessel im Winter das Speicherwasser auf die geforderte Nutztemperatur von 45 °C nach. In der Nicht-Heizperiode ist kein Erdgas mehr erforderlich, weil die Sonnenkollektoren den Warmwasserverbrauch zu 100% abdecken.

Ähnlich wie bei Wärmepumpen (siehe Schlussberichte im Internet) lassen sich auch bei einem Erdgas-Brennwertkessel Bilanzgrenzen ziehen, und zwar für den *Erzeuger*-Nutzungsgrad ( $E_{\text{nutz}}$ ; entspricht der Erzeuger-Jahresarbeitszahl EJAZ bei Wärmepumpen) und den *System*-Nutzungsgrad ( $S_{\text{nutz}}$ ; entspricht der System-Jahresarbeitszahl SJAZ bei Wärmepumpen). Der Unterschied: Der zuerst genannte Nutzungsgrad ermittelt nur die *erzeugten* Wärmeenergien direkt hinter dem Erdgaskessel und der zweite bilanziert das gesamte System, berücksichtigt also auch noch die Verluste des Speichers und der elektrischen Hilfsenergien. Der *System*-Nutzungsgrad ist ähnlich wie auch bei Wärmepumpen die für den Klimaschutz wichtigere Kenngröße. Die Formeln lauten:

$$E_{\text{nutz}} = (Q_{\text{Hz}} + Q_{\text{WwSp}}) / (V * F + \text{PEF} * \text{BE}) \text{ und}$$

$$S_{\text{nutz}} = (Q_{\text{Hz}} + Q_{\text{WwVerbr}}) / (V * F + \text{PEF} * (\text{BE} + \text{LP} + \text{SO})), \text{ mit}$$

$Q_{\text{Hz}}$	Erzeugte Heizwärme (kWh-thermisch)
$Q_{\text{WwSp}}$	Erzeugte Wärme <u>vor</u> dem Trinkwasserspeicher (kWh-thermisch)
$Q_{\text{WwVerbr}}$	Nutzwärme Trinkwasser <u>nach</u> dem Speicher (kWh-thermisch)
V	Volumen Erdgas (m <sup>3</sup> )
F	Umrechnungsfaktor von Volumen Erdgas via Heizwert vor Ort auf die thermische Energie des Erdgases; Umrechnungsformeln siehe Anhang
PEF	Primärenergiefaktor Strom; in 2011 und 2012 in Deutschland PEF = 2,6, bei Ökostrom PEF = 0
BE	Elektrische Hilfsenergie „Bereitschaft“ des Gaskessels (kWh-elektrisch); ohne Umwälzpumpe Heizung wie auch bei Wärmepumpen
LP	Elektrische Hilfsenergie „Ladepumpe“ des Warmwasserspeichers (kWh-elekt.)
SO	Elektrische Hilfsenergie Solarregler und Solarpumpe (kWh-elektrisch).

Die Formel für den solaren Deckungsanteil der Sonnenkollektoranlage lautet:

$$f = 100\% * (1 - (Q_{\text{WwSp}} + \text{PEF} * (\text{LP} + \text{SO})) / Q_{\text{WwVerbr}}).$$

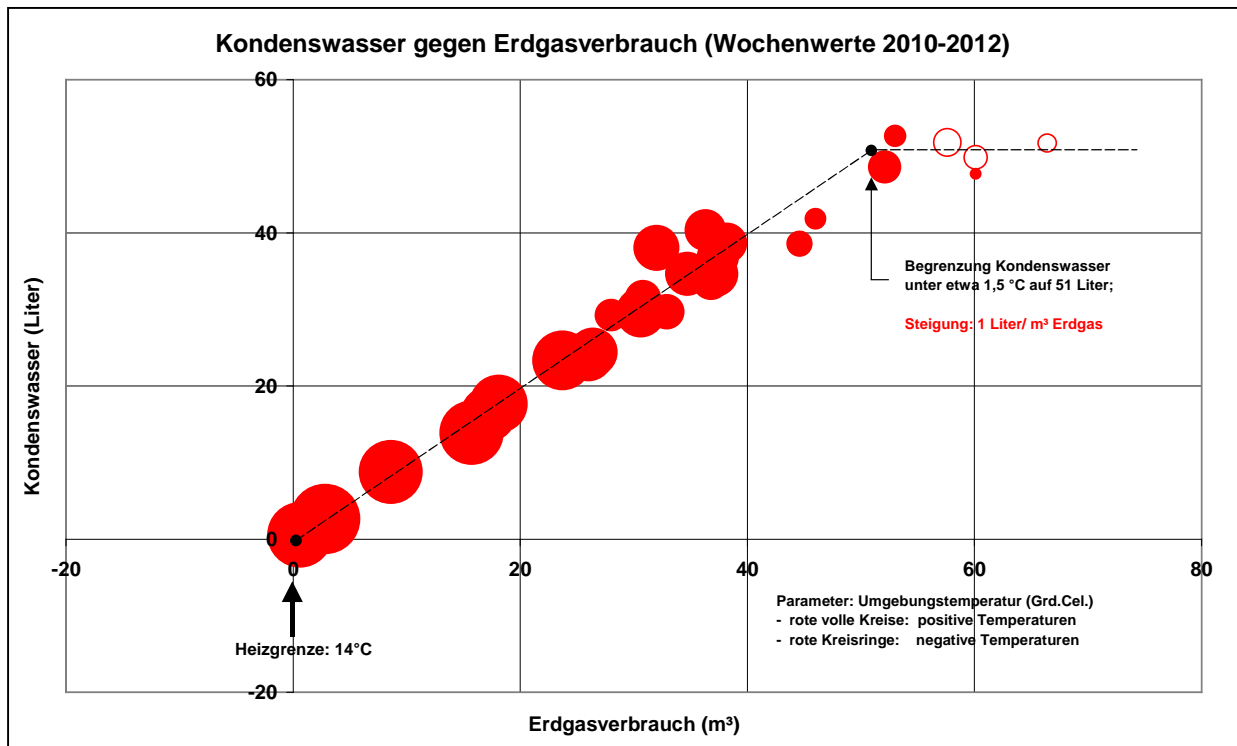
## 5. Ergebnisse

Die Auswertungen erfolgen auf Wochen- und Monatsbasis. Der Grund: Die Tageswerte schwanken zu sehr wegen der Wärmekapazität des Hauses. Ein plötzlicher Wechsel der Umgebungstemperatur und der Sonneneinstrahlung führt zu einer Wärmeverschleppung in den nächsten Tag, die die Ergebnisse verfälscht. Es stehen die Messwerte über zwei Jahre von Mai 2010 bis April 2012 zur Verfügung.

### 5.1 Wasserdampf im Erdgas

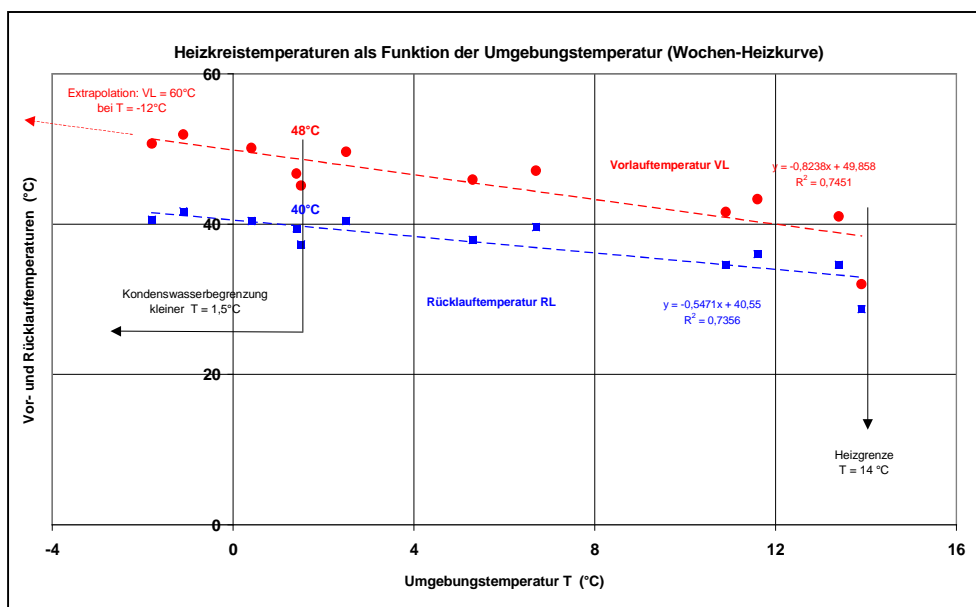
Wichtig für die Nutzung der Brennwerteffektes ist die Wasserdampfmenge, die im Erdgas enthalten ist. Theoretisch können bei einer Abkühlung des Abgases 1,6 Liter Wasser pro Kubikme-

ter Erdgas kondensieren. In einem acht Jahre alten Vorgängermodell fiel nur knapp die Hälfte dieses Wertes an. Wie die folgende Graphik zeigt, kommt die neu entwickelte Wandtherme auf 1,0 Liter/m<sup>3</sup> Erdgas (Steigung der Ausgleichsgeraden). Das ist eine deutliche Verbesserung. Die Fläche der roten Wochen-Messwerte ist ein Maß für die Umgebungstemperatur (siehe Legende in der Graphik).



Unter einer Umgebungstemperatur von etwa 1,5 °C wächst die Kondensationsmenge trotz zunehmenden Erdgasverbrauches nicht mehr weiter linear an. Offensichtlich wird bei tieferen Umgebungstemperaturen und damit höherer Rücklauftemperatur die Kondensationstemperatur zeitweise nicht mehr unterschritten.

Über welcher Rücklauftemperatur die Kondensationstemperatur zeitweise nicht mehr unterschritten wird zeigt die Graphik unten: Bei einer Umgebungstemperatur von 1,5 °C beträgt die Rücklauftemperatur 40 °C. Das ist ein recht niedriger Wert. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass bei der Nutzung des Brennwertes nicht nur die Vor- und Rücklauftemperaturen Einfluss auf den

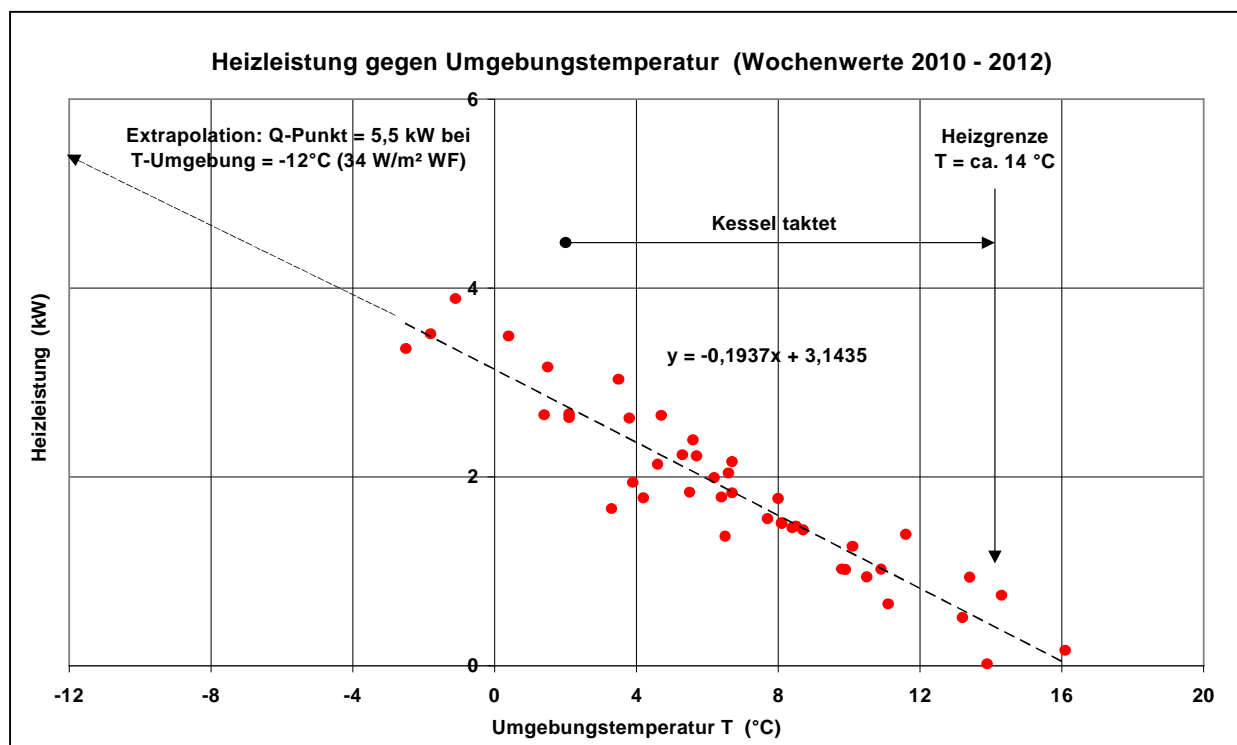


Wasserdampf-Taupunkt haben, sondern wesentlich auch noch der Luftüberschuss bei der Verbrennung, also die Luftzahl. Hier ist ein Kompromiss einzugehen zwischen der Energieeffizienz und auf der einen und niedrigen Emissionswerten auf der anderen Seite.

## 5.2 Heizleistung bei Auslegungs-Umgebungstemperatur

Die nächste Graphik zeigt die Heizleistung als Funktion der Umgebungstemperatur auf der Basis von Wochenwerten. Mit abnehmender Umgebungstemperatur steigt erwartungsgemäß die mittlere Kesselleistung linear an. Der Grund für die Abweichung der Heizleistung von der Ausgleichsgeraden liegt in der unterschiedlichen Globalstrahlung der Sonne in den einzelnen Wochen. Tendenziell befinden sich die Wochenwerte mit geringer Sonnenscheindauer oberhalb und die mit hoher Sonnenscheindauer unterhalb der Geraden. Die Extrapolation auf die Auslegungstemperatur von  $-12^{\circ}\text{C}$  am Oberrhein ergibt 5,5 kW. Damit stimmt die Messung recht gut mit der Berechnung in Höhe von 6 kW überein. Der spezifische Heizwärmeverbrauch beträgt  $59 \text{ kWh/m}^2$  Wohnfläche und Jahr über die zweijährige Messperiode.

Unter einer Umgebungstemperatur von etwa  $2^{\circ}\text{C}$  entsprechend einer Leistung von knapp 3 kW tritt kein Takten der Erdgastherme mehr auf. Der Grund: Die Heizlast liegt jetzt im Modulationsbereich des Kessels zwischen 2,7 kW – 15,0 kW.



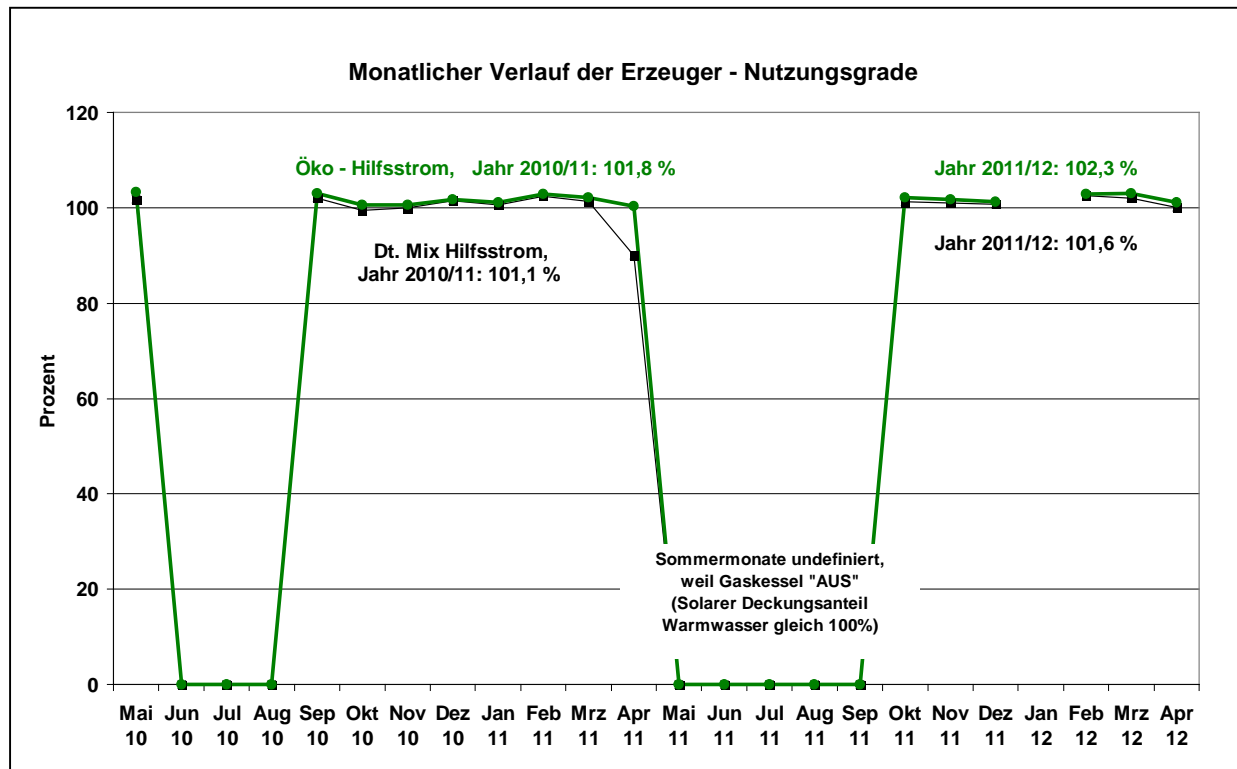
## 5.3 Takten des Erdgas-Brennwertkessels

Ein Vorgänger-Modell modulierte nur bis zu einer Leistung von 5 kW herunter. Bei einem maximalen Heizwärmebedarf des Niedrigenergiehauses von 5,5 kW ( $-12^{\circ}\text{C}$  Umgebungstemperatur) taktete die Erdgas-Wandtherme deshalb über fast die gesamte Zeit: Der Brenner ging alle 10 min an und kam kaum in einen stationären Zustand. Die Folge: Der Nutzungsgrad betrug nur etwa 93 % bezogen auf den Heizwert.

Das neue Gerät moduliert dagegen bis herunter zu 2,7 kW was eine längere Betriebszeit und damit eine bessere Ausnutzung der Kondensationswärme erlaubt. Die Gastherme arbeitet jetzt etwas mehr im stationären Betrieb und damit mit verbessertem Wirkungsgrad. Die Folge: Der Nutzungsgrad übers Jahr steigt auf 101 % an (siehe nächster Abschnitt).

## 5.4 Nutzungsgrade Erdgas-Brennwertkessel

Die nächste Graphik stellt die monatlichen *Erzeuger*-Nutzungsgrade gemäß der Definition in Kapitel 4 dar. In Monaten mit einem Heizwärmebedarf liegen die Werte bei gut 100%. Sie beziehen sich auf den Heizwert und nicht Brennwert, weshalb Zahlen von mehr als 100% möglich sind. Die elektrische Leistungsaufnahme der Gastherme für den Bereitschaftsbetrieb in Höhe von 4,5 Watt ist berücksichtigt.

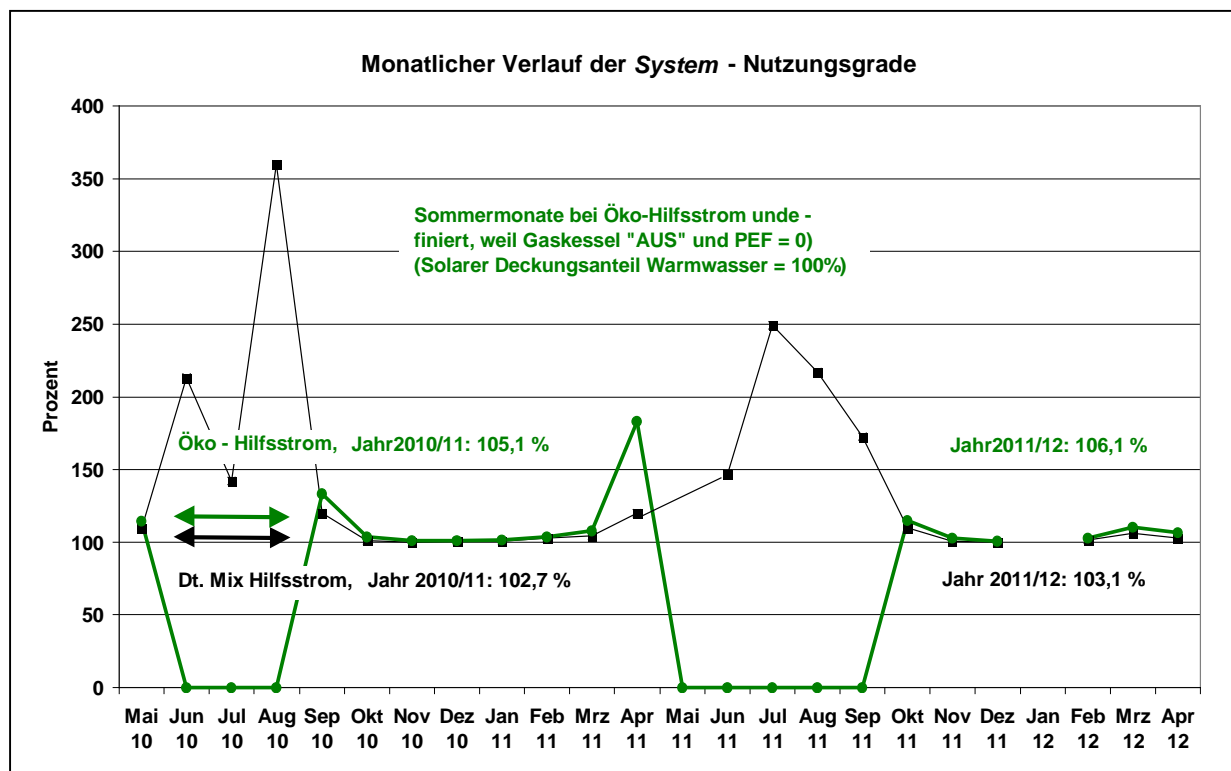


In den Sommermonaten ist wegen der solaren Warmwasseranlage überhaupt kein Erdgasverbrauch notwendig. Der Nutzungsgrad ist deswegen in dieser Zeit undefiniert (x/0). Unabhängig davon gehen diese Sommermonate natürlich auch in die Jahresbilanz ein.

Einen Punkt gilt es noch zu klären, nämlich *wie* die elektrischen Hilfsenergien für den Erdgaskessel, die Speicherladepumpe und die Sonnenkollektoranlage erzeugt werden. Im Normalfall beziehen die Betreiber den Strom aus dem bundesdeutschen Mix. Für den gilt zur Zeit der Primärenergiefaktor  $PEF = 2,6$ , d.h. es ist zur Erzeugung des Stroms an der Steckdose (Endenergie) vor dem Kraftwerk 2,6mal mehr Energie aufzuwenden (Primärenergie). Nutzen die Betreiber aber 100% qualifizierten Ökostrom von einem externen Anbieter oder wie im vorliegenden Fall aus einer eigenen Solarstrom-Inselanlage, dann ist der Primärenergiefaktor  $PEF = 0$ .

In der Graphik sind deshalb zwei Nutzungsgrad-Kurven eingetragen: Eine schwarze mit Jahreswerten zwischen 101,1 % und 101,6 % ( $PEF = 2,6$ ) und eine grüne mit entsprechenden Werten zwischen 101,8 % und 102,3 % ( $PEF = 0$ ). Der Unterschied ist wegen des fast vernachlässigbaren Bereitschaftsstromes des Gaskessels gering.

Die Graphik auf der nächsten Seite zeigt die monatlichen *System*-Nutzungsgrade. Auffallend sind die hohen Werte in den Sommermonaten bei Berücksichtigung des deutschen Strommixes mit einem Primärenergiefaktor  $PEF = 2,6$ . Es sind Werte bis zu 360 % möglich. Das liegt daran, dass für den Warmwasserverbrauch nur ein relativ geringer Hilfsstrom für die Sonnenkollektoranlage notwendig ist. Bei Berücksichtigung von Ökostrom mit  $PEF = 0$  ist der Nutzungsgrade im Sommer wie auch beim Erzeuger-Nutzungsgrad nicht mehr definiert (x/0).



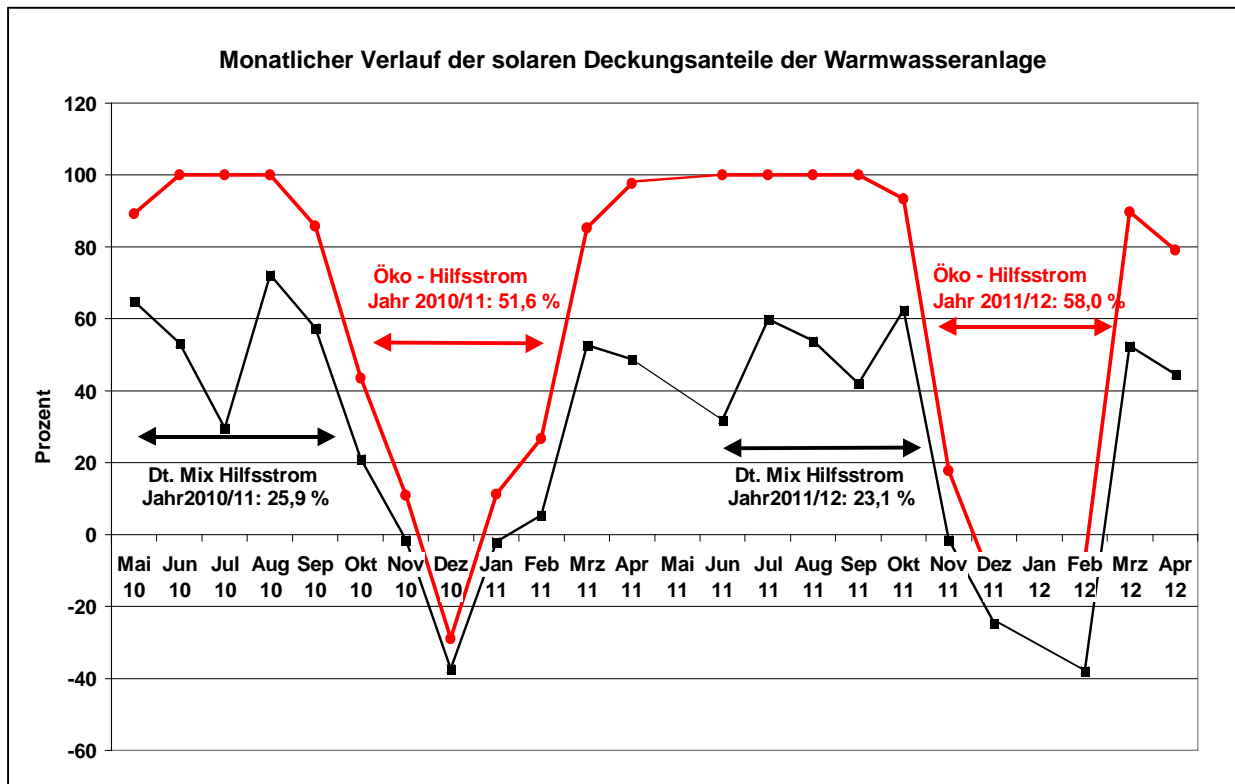
Über die zwei Messjahre ergeben sich System-Nutzungsgrade unter Berücksichtigung des deutschen Strommixes zwischen 102,7 % und 103,1 % und beim qualifizierten Ökostrom zwischen 105,1 und 106,1 %. Der Unterschied fällt im Gegensatz zum *Erzeuger-Nutzungsgrad* deutlicher aus, weil beim *System-Nutzungsgrad* zu dem elektrischen Hilfsstrom des Erdgaskessels auch noch der für die Speicherladepumpe sowie die thermischen Verluste des Solarspeichers dazu kommen.

Die folgende Tabelle fasst die Ergebnisse über die zwei Messjahre von Mai 2010 bis April 2012 zusammen.

Bezeichnung	Wert
<i>Erzeuger-Nutzungsgrad</i> (nur Brennwertkessel)	
- Elektrische Hilfsenergie: <b>Ökostrom</b>	102,0 %
- Elektrische Hilfsenergie: Deutscher Strommix	101,3 %
<i>System-Nutzungsgrad</i> (Brennwertkessel, solarthermische Anlage und Verluste Trinkwasserspeicher)	
- Elektrische Hilfsenergie: <b>Ökostrom</b>	105,6 %
- Elektrische Hilfsenergie: Deutscher Strommix	102,9 %
<i>Solarthermischer Deckungsanteil</i> am Warmwasserverbrauch (siehe nächstes Kapitel 5.5)	
- Elektrische Hilfsenergie: <b>Ökostrom</b>	54,8 %
- Elektrische Hilfsenergie: Deutscher Strommix	24,5 %

## 5.5 Solarer Deckungsanteil der Sonnenkollektoranlage für Warmwasser

Der monatliche Verlauf des solaren Deckungsanteiles (Definition siehe Kapitel 4) der Sonnenkollektoranlage mit Vakuumröhren und einer Aperturfläche von 4m<sup>2</sup> (siehe Fotos Seite 2) gehen aus der folgenden Graphik hervor.



In den Sommermonaten (Nichtheizperiode) deckt die Solaranlage den Warmwasserverbrauch vollständig (rote Kurve:  $f = 100\%$ ); in den Wintermonaten kann sie jedoch die Speicherverluste nicht mehr ausgleichen (negative Solaranteile). *Ohne* Berücksichtigung der elektrischen Energien für den Regler und die Solarpumpe zwischen den Sonnenkollektoren und dem Speicher ergeben sich solarere Deckungsanteile zwischen 52% und 58% (Ökostrom:  $PEF = 0$ ). Das sind übliche Auslegungswerte, die einen Kompromiss zwischen Ökologie und Ökonomie darstellen. Der höhere Wert im Messjahr 2011/12 rührt von einer um 7 % höheren solaren Einstrahlung gegenüber dem Vorjahr. Über die gesamte Messdauer kann die Sonne rund 55 % des Warmwasserverbrauchs decken.

Berücksichtigt man noch die elektrischen Hilfsenergien für die Sonnenkollektoranlage und bewertet sie mit dem deutschen Strommix ( $PEF = 2,6$ ) dann sinkt der solare Deckungsanteil auf etwa die Hälfte (schwarze Kurve). Der niedrigere Wert im zweiten Messjahr -trotz höherer Globalstrahlung- rührt von einer längeren Abwesenheit und damit verbundenen Hilfsenergien bei fehlendem Nutzen.

Die Solaranlage ist schon über 10 Jahre alt. Heutige Anlagen verfügen über Regler mit geringem Bereitschaftsstrom sowie über geregelte und hocheffiziente Umwälzpumpen zwischen den Kollektoren und dem Speicher. Beides erniedrigt die elektrischen Hilfsenergien deutlich und lässt auch bei einem Betrieb mit konventionellem Strom höhere solare Deckungsanteile erwarten.

Der Warmwasserverbrauch beträgt über die zwei Messjahre durchschnittlich 25 Liter pro Person und Tag, ein Wert, der im mittleren Bereich der Verbräuche zwischen 17 und 33 Liter pro Person und Tag in der Phase 1 des „Feldtests Wärmepumpe“ liegt. Er entspricht 6,2 % des gesamten Wärmeverbrauchs im Haus für Heizung und Trinkwasser.



## **6. Zusammenfassung und Bewertung**

Der *System*-Nutzungsgrad ist die wichtigste Kenngröße zur Beurteilung des Beitrages von Wärmeerzeugern zum Klimaschutz, weil er die Nutzenergien für Heizung und Warmwasser bilanziert, und zwar unter Berücksichtigung der solarthermischen Anlage für Warmwasser und der Speicherverluste. Er beträgt bei der untersuchten Anlage „Erdgas-Brennwertkessel + Solar“ über die zwei Messjahre **105,6 %** bezogen auf den Heizwert. Wer keinen Ökostrom beziehen kann oder will, der kommt nur auf 102,9 %.

Die gemessenen Nutzungsgrade liegen deutlich über denen eines acht Jahre alten Vorgängermodells und sind als „**sehr gut**“ zu bezeichnen.

Lokale Agenda 21 -Gruppe Energie Lahr (Schwarzwald)

Phase 2 „Innovative Wärmepumpensysteme“  
des „Feldtests Wärmepumpen“:

### **Referenz-Wärmeerzeuger**

Bearbeiter: Dr. Falk Auer

Tel. 07821 991601, eMail: [nes-auer@t-online.de](mailto:nes-auer@t-online.de)

Im November 2012

Es folgt der Anhang: „Umrechnung des Heizwertes von Erdgas von  
Norm- auf Vor-Ort-Betriebsbedingung.“

## Anhang:

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

Mittelwert des *Brennwertes*  $H_{o,n}$  über die Heizperiode 2010/11 zwischen Oktober und April gemäß der Angabe des Lieferanten badenova für Lahr: 11,3 kWh/Nm<sup>3</sup>

*Heizwert*  $H_{u,n} = \text{Brennwert } H_{o,n} / 1,108 =$  10,2 kWh/Nm<sup>3</sup>

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 10,20 kWh/Nm<sup>3</sup> 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 Lahr/Schwarzwald 190 m über Meereshöhe

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

$f3 = 1 / (1 - (0,0065 * h / 288))^{5,256}$ , mit  $h = 190$  m geographische Höhe Lahr (Schwarzwald)  
==>  $f3 = 1,0228$

==>  $p_{umg} = p_n / f3 = 1013,5 / 1,0228 = 990,9$  mbar.

Daraus folgen:

- Druck-Korrekturfaktor  $f2 = (23 + 990,9) / 1013,5 = 1,0004$
- Temperatur-Korrekturfaktor  $f1 = 273,15 / (273,15 + 15) = 0,9479$ .

Mit diesen Korrekturfaktoren ergibt sich schließlich der gesuchte *Heizwert* unter der Vor-Ort-Bedingung für Lahr (Schwarzw.) für die erste Messjar:

$H_u = 10,2 \text{ kWh/Nm}^3 * 0,9479 * 1,0004 =$  **9,67 kWh/m<sup>3</sup>**

und für die zweite Messjahr:

$H_u = 10,1 \text{ kWh/Nm}^3 * 0,9479 * 1,0004 =$  **9,58 kWh/m<sup>3</sup>**

Die Lokale Agenda 21 – Gruppe Energie Lahr dankt Herrn Sommerhalter vom Erdgas-Lieferanten badenova in Freiburg für die regelmäßige Bereitstellung der Erdgas-Brenn- und -Heizwerte.