

## **Förderprogramm "Solarthermie2000plus"**

### **4. Zwischenbericht für das Projekt**

### **Solaranlage im Wohngebiet ehemaliger Schlachthof in Speyer**

**Förderkennzeichen 032 9604 B**

**Berichtszeitraum: 4.7.2005 bis 30.9.2009**

**vorgelegt durch**

**ZfS – Rationelle Energietechnik GmbH  
Verbindungsstraße 19, 40723 Hilden  
[www.zfs-energietechnik.de](http://www.zfs-energietechnik.de)**

**Reiner Croy  
Hans Peter Wirth**

**Hilden  
September 2009**

## INHALTSVERZEICHNIS

|              |                                                                                                |           |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>     | <b>EINLEITUNG</b>                                                                              | <b>3</b>  |
| <b>2</b>     | <b>OBJEKTBESCHREIBUNG</b>                                                                      | <b>4</b>  |
| <b>3</b>     | <b>AUFBAU DES SOLARSYSTEMS</b>                                                                 | <b>6</b>  |
| <b>3.1</b>   | <b>Prinzipielle Funktion der Solaranlage</b>                                                   | <b>6</b>  |
| <b>3.2</b>   | <b>Regelung</b>                                                                                | <b>7</b>  |
| <b>3.2.1</b> | <b>Allgemeines zur Regelung</b>                                                                | <b>7</b>  |
| <b>3.2.2</b> | <b>Absicherung des Kollektorkreises</b>                                                        | <b>7</b>  |
| <b>3.2.3</b> | <b>Regelparameter</b>                                                                          | <b>9</b>  |
| <b>3.3</b>   | <b>Aufbau der Wärmeübergabestationen</b>                                                       | <b>12</b> |
| <b>4</b>     | <b>MESSTECHNIK</b>                                                                             | <b>14</b> |
| <b>4.1</b>   | <b>Messstellen im Solarsystem</b>                                                              | <b>14</b> |
| <b>4.2</b>   | <b>Definition der solaren Nutzenergie und Kennzahlen des Solarsystems</b>                      | <b>16</b> |
| <b>5</b>     | <b>BETRIEBSERFAHRUNGEN</b>                                                                     | <b>19</b> |
| <b>5.1</b>   | <b>Netztemperaturen</b>                                                                        | <b>20</b> |
| <b>5.2</b>   | <b>Kollektorkreiswirkungsgrad</b>                                                              | <b>21</b> |
| <b>5.2.1</b> | <b>Östliches Feld auf dem ehemaligen Schlachthofgebäude</b>                                    | <b>21</b> |
| <b>5.2.2</b> | <b>Östliches und westliches Feld auf dem ehemaligen Schlachthofgebäude</b>                     | <b>24</b> |
| <b>6</b>     | <b>BILANZ UND SYSTEMKENNZAHLEN</b>                                                             | <b>25</b> |
| <b>6.1</b>   | <b>Messperiode 2 mit 544,8 m<sup>2</sup><sub>Abs</sub> (21.6.2007 bis 19.6.2008; 365 Tage)</b> | <b>25</b> |
| <b>6.2</b>   | <b>Messperiode 3 mit 544,8 m<sup>2</sup><sub>Abs</sub> (11.7.2008 bis 10.7.2009; 365 Tage)</b> | <b>29</b> |
| <b>7</b>     | <b>GARANTIERTER SOLARER ERTRAG</b>                                                             | <b>30</b> |
| <b>8</b>     | <b>SYSTEMKOSTEN UND GARANTIERTER ERTRAG</b>                                                    | <b>37</b> |
| <b>9</b>     | <b>LITERATUR</b>                                                                               | <b>38</b> |
| <b>10</b>    | <b>ADRESSEN</b>                                                                                | <b>39</b> |
|              | <b>ANHANG I: TECHNISCHES DATENBLATT DER HAUPTKOMPONENTEN DES SOLARSYSTEMS</b>                  | <b>40</b> |

## 1 Einleitung

Im Rahmen des Programms Solarthermie2000plus soll eine begrenzte Anzahl solarthermischer Pilot- sowie Forschungs- und Demonstrationsanlagen zur Teildeckung des Wärmebedarfs unterschiedlicher Verbraucher im Niedertemperaturbereich modellhaft gefördert werden.

Ausgehend von den bisher erreichten Ergebnissen im vorausgegangenen Programm Solarthermie-2000, in dem große solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung zur Marktreife geführt wurden, konzentriert sich die Fördermaßnahme "Solarthermie2000plus" auf weitere und neue Lösungen in der Solartechnik und den Abbau von rechtlichen und organisatorischen Markteintrittsbarrieren. Insbesondere sollen die folgenden Konzepte der solarthermischen Nutzung mit dem Bau von größeren Pilot- und Demonstrationsanlagen erprobt werden:

- Solaranlagen zur kombinierten Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung (solare Kombianlagen) mit mittleren solaren Deckungsanteilen am Gesamtwärmebedarf der versorgten Gebäude.
- Solar unterstützte Wärmenetze und zentrale Wärmespeicherungen einschließlich deren Kombination mit anderen umweltfreundlichen Wärmequellen (wie Biomasse, Geothermie, Abwärme aus hocheffizienten Kraft-Wärme-Kopplungen) zur weitgehend CO<sub>2</sub>-neutralen Wärmeversorgung.
- Neue Anwendungsgebiete für die Solarthermie, wie z.B. die solar unterstützte Klimatisierung von Gebäuden (solares Kühlen) oder deren Einsatz für Prozesswärme im niedrigen Temperaturbereich.

Die Solaranlage muss eine Kollektorfläche von mindestens 100 m<sup>2</sup> haben, der solare Deckungsanteil am Gesamtwärmebedarf des Objektes darf nicht geringer als 10 % sein.

Weitere Informationen können unter [www.solarthermie2000plus.de](http://www.solarthermie2000plus.de) abgerufen oder den dort aufgeführten Informationsschriften /1/ bis /3/ entnommen werden. Dort werden die Förderziele sowie die Voraussetzungen für eine Förderung im Detail beschrieben.

## 2 Objektbeschreibung

Das Baugebiet auf dem ehemaligen Schlachthof in Speyer wurde 2001 vom Land Rheinland-Pfalz im Rahmen des experimentellen Wohnungs- und Städtebaus als Modellvorhaben für das kinder- und familienfreundliche Bauen ausgewählt. In dem Gebiet (Abbildung 1) entstehen 49 Reihenhäuser und 12 Doppelhäuser (alles Einfamilienhäuser) mit einer Gesamtwohnfläche von ca. 9.300 m<sup>2</sup>. Die Wohnfläche der Häuser variiert zwischen ca. 120 und 200 m<sup>2</sup>. Das Neubaugebiet soll den Bewohnern anspruchsvolle Architektur sowie ein innovatives Energie- und Regenwasser-Nutzungskonzept bieten. Alle Gebäude sind in Niedrigenergiebauweise ausgeführt und werden von einem eigenen, neu angelegten Nahwärmenetz mit Wärme versorgt.

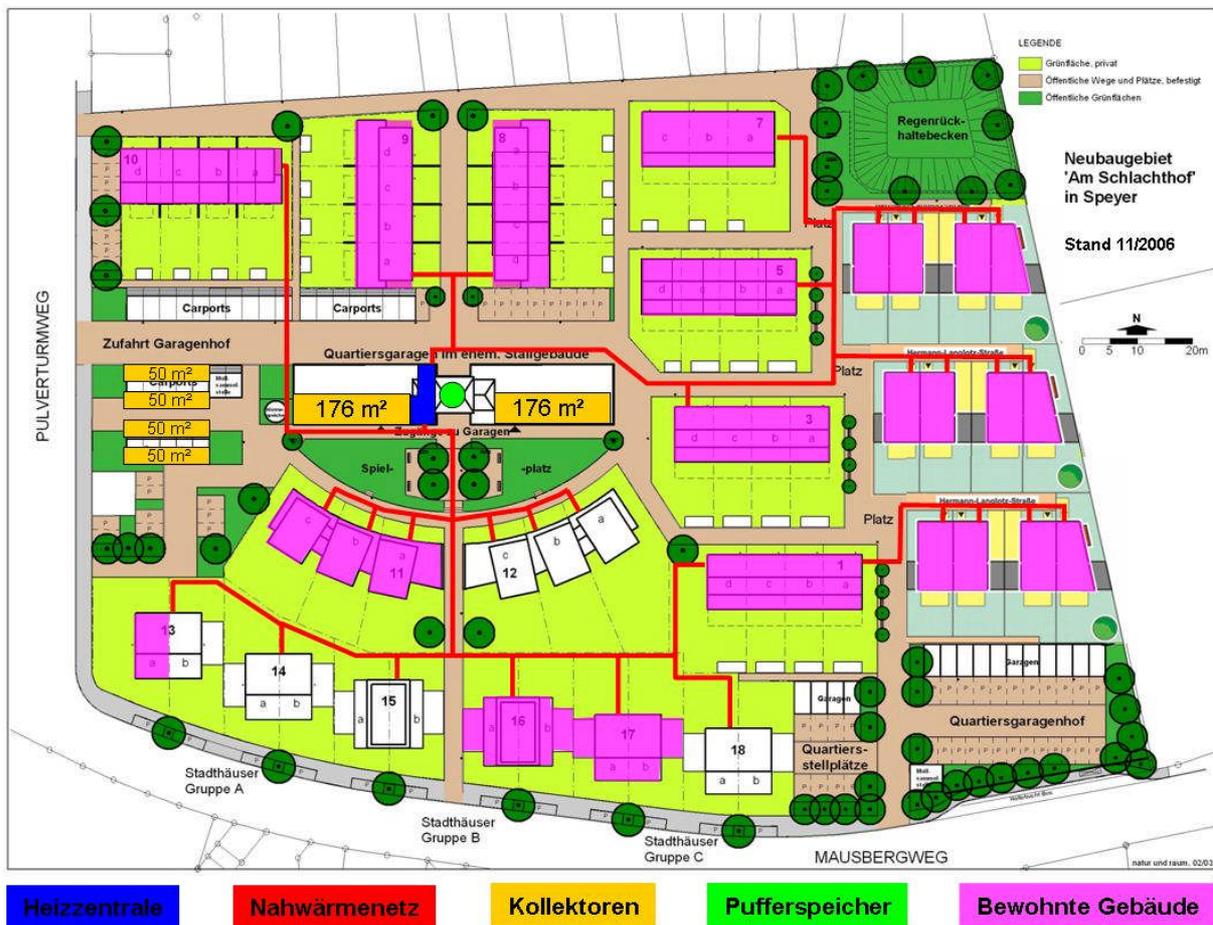


Abbildung 1: Lageplan Wohngebiet ehemaliger Schlachthof Speyer  
(Quelle: Stadtwerke Speyer und EGS-plan)

Das Kesselhaus des alten Schlachthofes blieb erhalten, dort befinden sich jetzt die Heizzentrale mit einem 599-kW-Gas-Brennwertkessel und der 100 m<sup>3</sup> große Solar- und Kesselpufferspeicher des Nahwärmenetzes. Die beiden Seitenflügel (ehemals Stallungen) des Schlachthofgebäudes wurden abgerissen und als Garagen neu aufgebaut. Auf den Garagendächern sind zwei je 176 m<sup>2</sup><sub>Abs</sub> große Solar Roof-Kollektorfelder installiert. Ein weiteres knapp 194 m<sup>2</sup><sub>Abs</sub> großes Kollektorfeld wurde auf Carports installiert.



*Abbildung 2: Kollektorfeld auf den Seitenflügeln des ehemaligen Schlachthofgebäudes*

Baubeginn der Wohnsiedlung war im Jahre 2003. Die ersten Häuser wurden von einer mobilen Fernwärmestation mit Wärme versorgt. Im Frühjahr 2005 waren die Heizzentrale und das Kollektordach auf den ehemaligen Stallungen installiert. Ende Mai 2007 wurde das Feld auf den Carports in Betrieb genommen. Im Sommer 2007 waren 49 Einfamilienhäuser an das Nahwärmenetz angeschlossen. Der Endausbau mit 61 Wohnhäusern wird Mitte 2009 abgeschlossen sein.

Bei der Planung wurde ein Jahres-Gesamtwärmebedarf von 762 MWh berechnet, davon 501 MWh für die Gebäudeheizung, 152 MWh für Warmwasserbereitung mit Warmwasserzirkulation und 109 MWh für Netzverluste. Geplant war, den Großteil des Nahwärmenetzes in den Untergeschossen der Gebäude zu verlegen und nur die Gebäudegruppen durch erdverlegte Leitungen zu verbinden, da dies die günstigste Lösung in Bezug auf Kosten und Netzwärmeverluste gewesen wäre. Voraussetzung dafür wäre gewesen, dass der Baufortschritt der Häuser auf die Verlegung des Netzes abgestimmt wird, indem z.B. die Häuser am Ende eines Netzstranges zuletzt gebaut werden. Dieses Konzept konnte jedoch nur in einigen Häusern umgesetzt werden, da die Bebauung des Wohngebietes entgegen der Ursprungsplanung nicht mit einem Bauträger erfolgte, sondern auf mehrere Bauträger aufgeteilt wurde und auf die Reihenfolge der Errichtung der Gebäude nur begrenzt Einfluss genommen werden konnte. Dadurch wurden mehr Leitungen erdverlegt als ursprünglich vorgesehen, wodurch die Netzverluste nach Berechnungen des Planers auf schätzungsweise 150 MWh/a anstiegen.

Die Solaranlage soll im Endausbau (545 m<sup>2</sup><sub>Abs</sub>) jährlich rd. 177 MWh liefern. Dies ergibt einen geplanten solaren Deckungsanteil von 22 % am Gesamtwärmebedarf (bei 150 MWh Netzverlusten). Inwieweit die geplanten Werte erreicht werden, ist in Kapitel 6 dieses Berichtes ausführlich beschrieben.

### 3 Aufbau des Solarsystems

#### 3.1 Prinzipielle Funktion der Solaranlage

Die Solarstrahlung wird in den Kollektoren in Wärme umgewandelt und mit Hilfe eines Gemisches aus Wasser mit Frost-/Korrosionsschutzmittel (Wärmeträger) über die Kollektorkreispumpe P4, den Kollektorkreis-Wärmetauscher und die Ladepumpe P5 in den oberen oder mittleren Bereich des insgesamt 100 m<sup>3</sup> fassenden Solar- und Kesselpuffers transportiert.

Der obere ca. 13 m<sup>3</sup> große Bereich des Puffers wird vom Kessel auf einer mittleren Bereitschaftstemperatur von ca. 68 °C gehalten. Die Wärmeentnahme aus dem Puffer erfolgt durch das Nahwärmenetz (Netzpumpe P1), wobei der Netzurücklauf in den Puffer entweder unten oder in ein Drittel der Höhe einströmt.

Falls der Puffer oben wärmer ist als die Solltemperatur des Netzurücklaufs, wird über die Netzurücklaufbeimischung dem Pufferaustritt kälteres Heizwasser aus dem Netzurücklauf zugemischt.

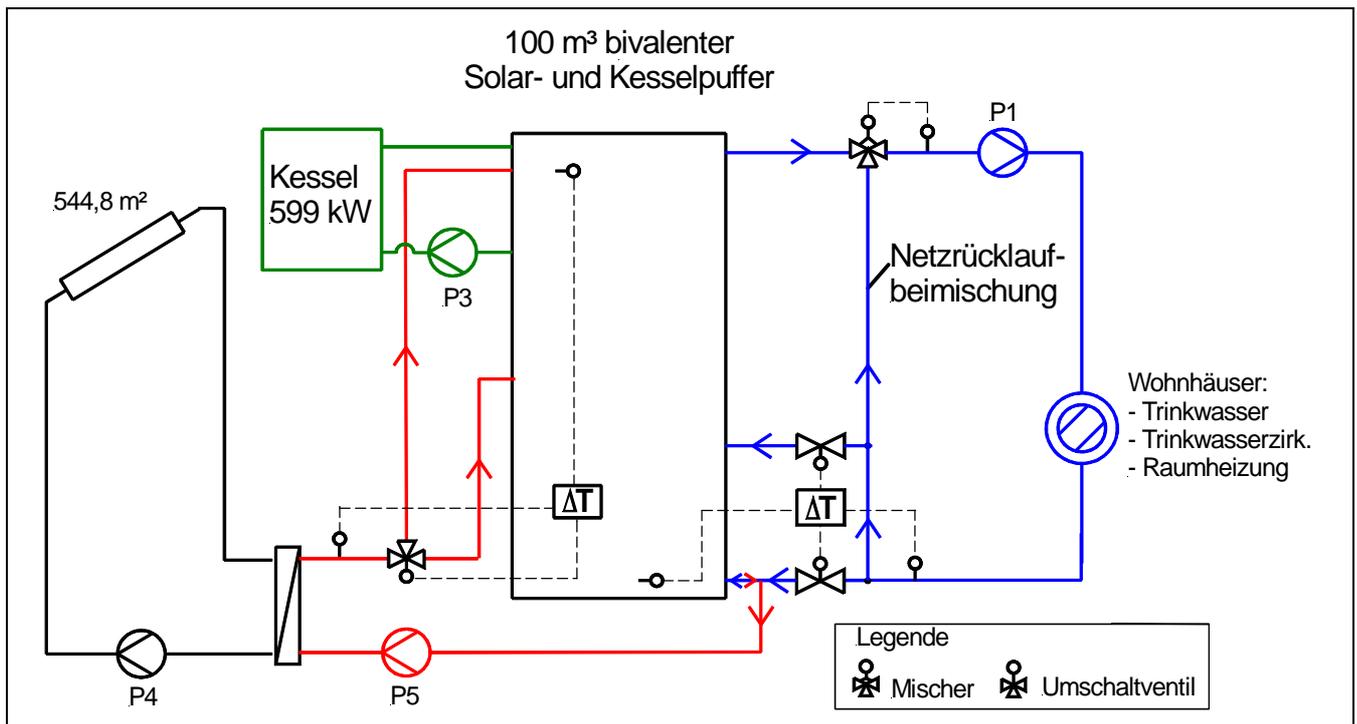


Abbildung 3: Vereinfachtes Prinzipschaltbild der Solaranlage

Ein Datenblatt mit den wichtigsten Komponenten des Solarsystems und deren Kennwerten befindet sich im Anhang.

## **3.2 Regelung**

Teile der folgenden Regelbeschreibung wurden der Regelbeschreibung des Planungsbüros (EGS-Plan) entnommen. Einige Formulierungen wurden dabei redaktionell verändert. Abbildung 4 zeigt ein detailliertes Schaltbild mit Bezeichnung der Regel- und Messfühler.

### **3.2.1 Allgemeines zur Regelung**

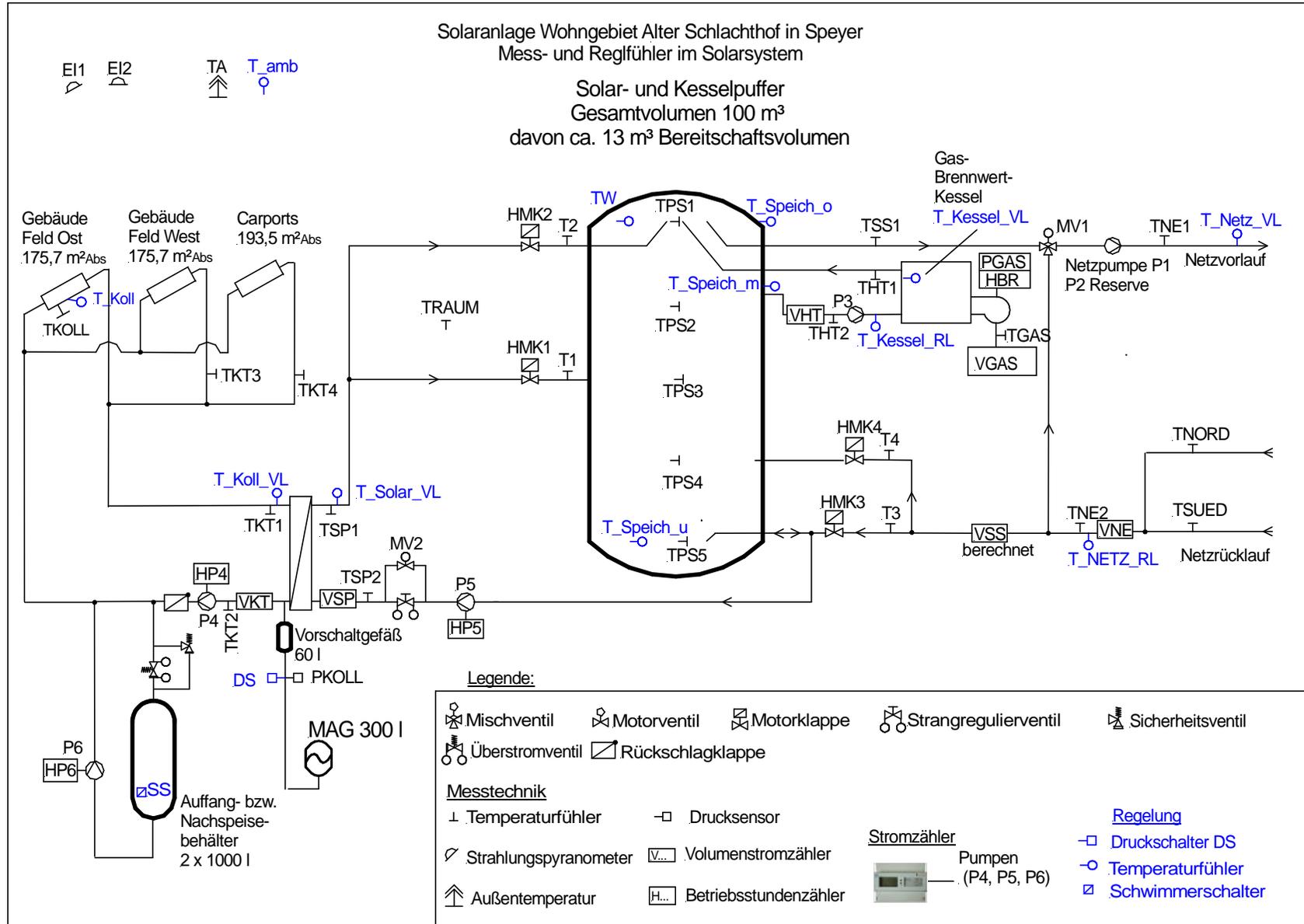
Für die Regelung wird eine DDC-Anlage eingesetzt. Bei dem Betreiber (TDG-Technik und Dienstleistungs-GmbH) steht eine Leitstation, auf der alle Regelgrößen, einige Messwerte (nicht die Messwerte der ZfS-Forschungsmesstechnik), Betriebszustände und Störmeldungen zur Fernüberwachung und Datenarchivierung aufgeschaltet sind. Dazu ist in der Heizzentrale eine Unterstation mit Modem installiert, über das die Daten an die Leitstation übertragen werden. Alle Stör- und Betriebsmeldungen, die zur Leitstation übertragen werden, sind mittels potenzialfreier Kontakte auf die Unterstation aufgeschaltet.

### **3.2.2 Absicherung des Kollektorkreises**

Es werden die Betriebszustände Normalbetrieb und Stagnationsbetrieb unterschieden. Solange die Wärme der Kollektorfelder an den Puffer abgegeben werden kann, läuft die Anlage im Normalbetrieb und das 300-l-Ausdehnungsgefäß (MAG) nimmt das thermische Ausdehnungsvolumen des Wasser-Glykol-Gemisches auf. Sobald jedoch die Maximaltemperatur von 98 °C im Pufferspeicher oben erreicht ist, schalten die Kollektorkreispumpe P4 und die Solarspeicherladepumpe P5 ab. Bei starker Einstrahlung geht die Solaranlage in diesem Fall in den Stagnationsbetrieb, bei dem der Wärmeträger im Kollektorfeld verdampfen kann. Verdampfung kann auch dann eintreten, wenn eine der beiden Pumpen P4 oder P5 bei starker Einstrahlung ausfällt.

Die Dampfbildung führt zu einer Drucksteigerung im Solarkreis. Ist ein Überdruck von 5,5 bar<sub>ü</sub> erreicht (der Überdruck ist einstellbar am Überstromventil in der Ausblasleitung zu den 2 x 1.000 l großen drucklosen Nachspeisebehältern), wird die vom Dampf verdrängte Flüssigkeit über die Ausblasleitung in die Nachspeisebehälter ausgeblasen. Das Überstromventil schließt bei ca. 4,5 bar<sub>ü</sub> (1 bar Hysterese). Das zum Überstromventil parallel geschaltete Sicherheitsventil ist auf 6,0 bar<sub>ü</sub> Überdruck eingestellt und dient nur zur Absicherung der Anlage, falls das Überstromventil schadhaft ist. Bei zurückgehender Einstrahlung kondensiert der Dampf in den Kollektoren, sodass der Druck im Kollektorkreis absinkt und durch automatisches Nachspeisen aus den Nachspeisebehältern mittels der Pumpe P6 wieder aufgebaut wird.

Abbildung 4: Detailliertes Prinzipschaltbild mit Regel- und Messfühlern



### 3.2.3 Regelparameter

#### Regelparameter der Solaranlage

- Die Kollektorkreispumpe P4 schaltet ein, wenn die Differenz  $T_{\text{Koll}} - T_{\text{Speich\_u}}$  größer als der Anschaltwert  $DT_{\text{an1}} = 10 \text{ K}$  ist.  
**P4 ein, wenn  $T_{\text{Koll}} - T_{\text{Speich\_u}} > 10 \text{ K}$**
- Die Ladekreispumpe P5 schaltet ein, wenn die Differenz  $T_{\text{Koll\_VL}} - T_{\text{Speich\_u}}$  größer als der Anschaltwert  $DT_{\text{an2}} = 5 \text{ K}$  ist und die Kollektorkreispumpe P4 in Betrieb ist.  
**P5 ein, wenn  $T_{\text{Koll\_VL}} - T_{\text{Speich\_u}} > 5 \text{ K}$  und P4 ein**
- Die Kollektorkreispumpe P4 schaltet aus, wenn die Differenz  $T_{\text{Koll\_VL}} - T_{\text{Speich\_u}}$  unter den Ausschaltwert  $DT_{\text{aus1}} = 5 \text{ K}$  sinkt (Hysterese).  
**P4 aus, wenn  $T_{\text{Koll\_VL}} - T_{\text{Speich\_u}} < 5 \text{ K}$**
- Übersteigt die Kollektortemperatur  $T_{\text{Koll}}$   $130 \text{ }^\circ\text{C}$ , schaltet die Kollektorkreispumpe ab. Die Freigabe erfolgt, wenn die Kollektortemperatur unter  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  sinkt.  
**P4 aus, wenn  $T_{\text{Koll}} > 130 \text{ }^\circ\text{C}$**   
**P4 in Einschaltbereitschaft, wenn  $T_{\text{Koll}} < 120 \text{ }^\circ\text{C}$**
- Die Ladekreispumpe P5 schaltet aus, wenn die Differenz  $T_{\text{Solar\_VL}} - T_{\text{Speich\_u}}$  unter den Ausschaltwert  $DT_{\text{aus2}} = 2 \text{ K}$  sinkt (Hysterese).  
**P5 aus, wenn  $T_{\text{Solar\_VL}} - T_{\text{Speich\_u}} < 2 \text{ K}$**
- Das Motorventil MV2 regelt den Volumenstrom im Bypass des Ladekreis-Rücklaufs (und damit im gesamten Ladekreis) so, dass am Solarfühler Vorlauf  $T_{\text{Solar\_VL}}$  die eingestellte Zieltemperatur von  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  erreicht und wenn möglich eingehalten wird.  
**MV2 regelt  $T_{\text{Solar\_VL}}$  auf  $70 \text{ }^\circ\text{C}$**
- Die Motorabsperrklappe MK2 wird geöffnet und die Motorabsperrklappe MK1 geschlossen, wenn die Differenz  $T_{\text{Solar\_VL}} - T_{\text{Speich\_o}}$  größer als der Anschaltwert  $DT_{\text{an3}} = 2 \text{ K}$  ist.  
**MK2 auf und MK1 zu, wenn  $T_{\text{Solar\_VL}} - T_{\text{Speich\_o}} > 2 \text{ K}$**
- Die Motorabsperrklappe MK2 wird geschlossen und die Motorabsperrklappe MK1 geöffnet, wenn die Differenz  $T_{\text{Solar\_VL}} - T_{\text{Speich\_o}}$  unter den Ausschaltwert  $DT_{\text{aus3}} = 0 \text{ K}$  sinkt (Hysterese).  
MK2 zu und MK1 auf, wenn  $T_{\text{Solar\_VL}} - T_{\text{Speich\_o}} < 0 \text{ K}$   
**MK2 zu und MK1 auf, wenn  $T_{\text{Solar\_VL}} < T_{\text{Speich\_o}}$**
- Beim Anlauf der Kollektorkreispumpe kann es nach längeren Standzeiten an kalten Wintertagen dazu kommen, dass im Kollektorkreis am Vorlauffühler Vorlauf  $T_{\text{Koll\_VL}}$  kurzfristig Frosttemperaturen auftreten. Um ein Einfrieren des Solarwärmetauschers auf der Speicherseite zu vermeiden, wird die Ladekreispumpe P5 unabhängig von den obigen Kriterien auch gestartet, wenn der Messwert vom Kollektorkreisvorlauffühler  $T_{\text{Koll\_VL}}$  den Wert  $T_{\text{an1}} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$  unterschreitet. Dieser Start hat Priorität gegenüber den anderen Kriterien.  
**P5 ein, wenn  $T_{\text{Koll\_VL}} < 5 \text{ }^\circ\text{C}$**
- Als Überhitzungsschutz des Pufferspeichers werden die Pumpen P4 und P5 ausgeschaltet, wenn der Messwert vom Speicherfühler oben  $T_{\text{Speich\_o}}$  den Wert  $T_{\text{aus1}} = 98 \text{ }^\circ\text{C}$  überschreitet. Dadurch wird die Wärmezufuhr beendet. Durch das Ansprechen des Überhitzungsschutzes wird ein Zeitprogramm aktiviert, das einen Neustart von P4 erst abends frei gibt (alternative Einstellung nach einer Zeitdifferenz  $DZ1$  ist möglich), damit gewährleistet ist, dass sich beim Neustart kein Dampf im Solarkreis befindet. P5 wird freigegeben, sobald der Messwert vom Speicherfühler oben  $T_{\text{Speich\_o}}$  den Wert  $T_{\text{an3}} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$  unterschreitet.

**P4 und P5 aus, wenn  $T_{\text{Speich}_o} > 98 \text{ °C}$**

**Freigabe P4 abends**

**Freigabe P5, wenn  $T_{\text{Speich}_o} < 90 \text{ °C}$**

- Als übergeordneter Überhitzungsschutz unterbricht der Temperaturwächter TW im Pufferspeicher die Stromversorgung der Pumpen von P4 und P5, wenn die am Temperaturwächter eingestellte Temperatur  $TW = 105 \text{ °C}$  überschritten wird. Die Pumpen P4 und P5 werden freigegeben, sobald das Schaltsignal des Temperaturwächters wieder erlischt.

**P4 und P5 aus, wenn  $TW > 105 \text{ °C}$**

**Freigabe P4 und P5, wenn  $TW < 105 \text{ °C}$**

- Sinkt der Messwert des Druckschalters DS im Kollektorkreis unter den Anschaltwert  $Pan1 = 1,8 \text{ bar}_ü$ , schaltet die Nachspeisepumpe P6 ein. Erreicht der Druck im Kollektorkreis wieder den Ausschaltwert  $Paus1 = 2,2 \text{ bar}_ü$ , wird P6 abgeschaltet (Hysterese). Die Kollektorpumpe P4 wird abgeschaltet, solange P6 in Betrieb ist. Wenn P6 einschaltet, wird eine Meldung ausgegeben.

**P6 ein, wenn  $DS < 1,8 \text{ bar}_ü$**

**P6 aus, wenn  $DS > 2,2 \text{ bar}_ü$**

**P4 aus, wenn P6 ein**

- Um die Nachspeisepumpe P6 vor Trockenlauf zu schützen, ist im Nachspeisetank ein Schwimmerschalter SS eingebaut. Der Schwimmerschalter ist so montiert, dass er bei Unterschreiten eines Mindestfüllstandes von 15 cm oberhalb des Saugleitungsanschlusses am Behälter anspricht. Sobald die Wärmeträgervorlage im Behälter nicht mehr ausreicht, spricht der Schwimmerschalter an. P6 wird dann gesperrt. Der Nachspeisetank muss dann manuell mit Wasser-Glykol-Gemisch über einen verschließbaren Stutzen aufgefüllt werden, und es wird eine Störmeldung ausgegeben.

**P6 aus, wenn an SS der Mindestfüllstand angezeigt wird.**

### Regelparameter der Netzvorlauftemperatur und des Kessels

- Entsprechend einer einstellbaren Heizkennlinie kann der Sollwert der Netzvorlauftemperatur  $T_{\text{Netz\_VL\_soll}}$  in Abhängigkeit der Außentemperatur  $T_{\text{amb}}$  geregelt werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, den Sollwert der Netzvorlauftemperatur um den Wert  $DT1$  zu erhöhen. Die Heizkennlinie ist gemäß der Temperaturanforderung für die Warmwasserbereitung so eingestellt, dass unabhängig von der Außentemperatur eine konstante Netzvorlauf-Solltemperatur von  $67 \text{ °C}$  gefahren wird. Die Überhöhung  $DT1$  wurde auf Null gesetzt.

**$T_{\text{Netz\_VL\_soll}} = 67 \text{ °C}$**

- Zur Berechnung des Sollwertes für die Kesselvorlauftemperatur  $T_{\text{Kessel\_VL\_soll}}$  wird zum Sollwert für die Netzvorlauftemperatur  $T_{\text{Netz\_VL\_soll}}$  ( $67 \text{ °C}$ ) die Überhöhung  $DT2 = 3 \text{ K}$  addiert.

$T_{\text{Kessel\_VL\_soll}} = T_{\text{Netz\_VL\_soll}} + 3 \text{ K}$

**$T_{\text{Kessel\_VL\_soll}} = 70 \text{ °C}$**

- Brenner und Kessel schalten ein, wenn die Differenz  $T_{\text{Netz\_VL\_soll}} - T_{\text{Speich}_o}$  den Anschaltwert  $DTan4 = 0 \text{ K}$  überschreitet.

Kessel und Brenner ein, wenn  $T_{\text{Netz\_VL\_soll}} - T_{\text{Speich}_o} > 0 \text{ K}$

**Kessel und Brenner ein, wenn  $T_{\text{Speich}_o} < 67 \text{ °C}$**

- Die Kesselpumpe P3 schaltet ein, wenn die Differenz  $T_{\text{Kessel\_VL\_soll}} - T_{\text{Kessel\_VL}}$  den Anschaltwert  $DTan5 = -5 \text{ K}$  unterschreitet und der Kessel in Betrieb ist.

P3 ein, wenn  $T_{\text{Kessel\_VL\_soll}} - T_{\text{Kessel\_VL}} < -5 \text{ K}$

**P3 ein, wenn  $T_{\text{Kessel\_VL}} > 65 \text{ °C}$**

- Die Leistung des Brenners wird durch die Kesselregelung so eingestellt, dass am Kesselfühler Vorlauf T\_Kessel\_VL eine Temperatur von T\_Kessel\_VL\_soll (67 °C) erreicht wird.<sup>1</sup>  
**Leistung Brenner so, dass T\_Kessel\_VL = 67 °C**  
<sup>1</sup> Aufgrund der Kessel-Mindestleistung und des eingestellten Volumenstroms der Kesselpumpe beträgt der Temperaturhub zwischen Kesselvor- und -rücklauf ca. 8 K. Dadurch wird die Vorlauftemperatur **T\_Kessel\_VL** in Realität oft überschritten (bis zu 73 °C).
- Brenner und Kessel schalten ab, wenn die Differenz T\_Netz\_VL\_soll – T\_Speich\_m den Ausschaltwert DTaus4 = 1 K unterschreitet.  
Brenner und Kessel aus, wenn T\_Netz\_VL\_soll – T\_Speich\_m < 1 K bzw.  
**Brenner und Kessel aus, wenn T\_Speich\_m > 66 °C**
- Die Kesselpumpe P3 schaltet ab, wenn die Differenz T\_Kessel\_VL\_soll – T\_Kessel\_VL den Ausschaltwert DTaus5 = 0 K überschreitet und der Kessel ausgeschaltet ist (Nachlaufzeit nach dem Ausschalten des Kessels: 10 sec).  
P3 aus, wenn T\_Kessel\_VL\_soll – T\_Kessel\_VL > 0 K bzw.  
**P3 aus, wenn T\_Kessel\_VL < 70 °C**

### Regelparameter für die Wärmeverteilung

- Falls im Pufferspeicher eine höhere Temperatur herrscht, als im Netzvorlauf benötigt wird, mischt das Motor-Dreiwegeventil MV1 kaltes Netzurücklaufwasser in den Vorlauf bei, wobei die Temperatur im Netzvorlauf T\_Netz\_VL auf den Sollwert T\_Netz\_VL\_soll begrenzt wird.  
**MV1 mischt T\_Netz\_VL auf 67 °C**
- Die Motorabsperrklappe MK4 wird geöffnet und die Motorabsperrklappe MK3 geschlossen, wenn die Differenz T\_Netz\_RL – T\_Speich\_u über dem Anschaltwert DTan6 = 2 K liegt.  
**MK4 auf und MK3 zu, wenn T\_Netz\_RL – T\_Speich\_u > 2 K**
- Die Motorabsperrklappe MK4 wird geschlossen und die Motorabsperrklappe MK3 geöffnet, wenn die Differenz T\_Netz\_RL – T\_Speich\_u unter den Ausschaltwert DTaus6 = 0 K sinkt (Hysterese).  
MK4 zu und MK3 auf, wenn T\_Netz\_RL – T\_Speich\_u < 0 K  
**MK4 zu und MK3 auf, wenn T\_Netz\_RL < T\_Speich\_u**
- Überschreitet die Differenz T\_Netz\_VL\_soll – T\_Netz\_VL den Wert DTan7 = 10 K, wird eine Störmeldung ausgegeben.  
Störmeldung, wenn T\_Netz\_VL\_soll – T\_Netz\_VL > 10 K bzw.  
**Störmeldung, wenn T\_Netz\_VL < 55 °C**
- Die Reserve-Netzpumpe P2 wird eingeschaltet, wenn die Netzpumpe P1 eine Störmeldung an die DDC gibt.  
**P2 ein, wenn Störmeldung von P1**

### Blockierschutz

- Als Blockierschutz gegen längere Stillstandszeiten werden die Pumpen P2, P3, P4, P5 und P6 jeden 2. Tag für die Dauer von DZ2 = 10 sec um 16:20 Uhr in Betrieb genommen.

### 3.3 Aufbau der Wärmeübergabestationen

Das Nahwärmenetz besteht aus einem Nord- und Südstrang. Welche Häuser an welchen Strang angeschlossen sind, ist Abbildung 1 zu entnehmen. Jedes der bis zum Sommer 2007 gebauten 49 Einfamilienhäuser (Endausbau 61 Häuser) ist mit einer Wärmeübergabestation an das Wärmeverteilnetz angeschlossen. In einem Haus befinden sich zwei Wärmeübergabestationen.

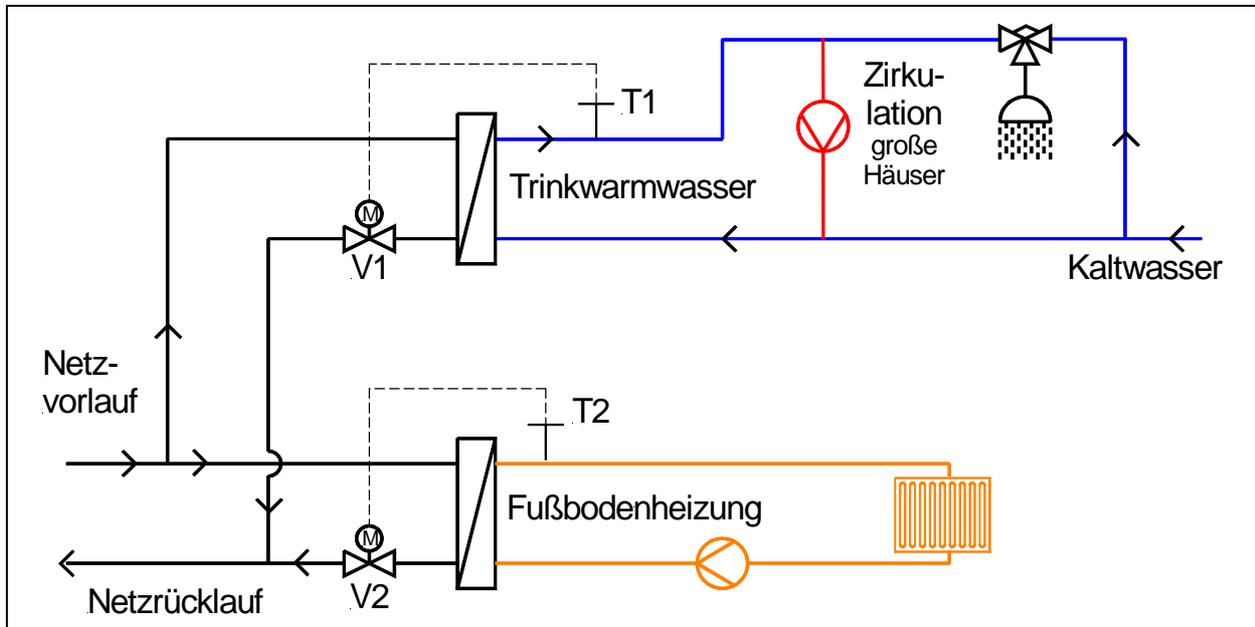


Abbildung 5: Wärmeübergabestation mit Fußbodenheizung

Die Trinkwarmwasserbereitung erfolgt im Durchlaufprinzip (oberer Wärmetauscher in Abbildung 5). Der netzseitige Volumenstrom am Trinkwarmwasser-Wärmetauscher wird durch das Ventil V1 so geregelt, dass die notwendige Trinkwassertemperatur (ca. 50 °C) eingehalten wird. Vorteil dieser Trinkwassererwärmung ist, dass der Wärmetauscher sekundärseitig immer mit Kaltwassertemperatur betrieben wird, was zu niedrigen Rücklauftemperaturen auf der Netzseite führt. In den größeren Häusern ist aus Komfortgründen zumeist auch eine Warmwasserzirkulation vorhanden, deren Wärmeverluste ebenfalls über diesen Wärmetauscher gedeckt werden. Der Zirkulationsrücklauf ist in diesen Häusern an die Kaltwasserleitung angeschlossen. Je nachdem ob die Zirkulation in diesen Häusern ständig oder nur temperaturorientiert betrieben wird (z.B. Zirkulationspumpe nur dann ein, wenn im Rücklauf eine bestimmte Temperatur unterschritten wird), wird dieser Vorteil jedoch mehr oder weniger stark aufgehoben, da der Zirkulationsrücklauf die Trinkwasser-Eintrittstemperatur in den Wärmetauscher anhebt, was wiederum zu höheren Netzurücklauftemperaturen führt. Die kleineren Gebäude haben zumeist keine Trinkwasserzirkulation.

Obwohl die Trinkwassertemperatur nur 50 °C beträgt, wird die Netzvorkauftemperatur (gemessen am Netzaustritt der Heizzentrale) ganzjährig mit 67 °C gefahren, da die Trinkwasser-Wärmetauscher auf 65 °C Vorkauftemperatur ausgelegt sind (2 K Temperaturdifferenz werden für Netzverluste berücksichtigt). Die Wärmetauscher waren ursprünglich auf 65/23 °C primär und 10/50 °C sekundär (logarithmische Temperaturdifferenz  $\Delta T = 15$  K) ausgelegt. Um niedrigere Rücklauftemperaturen zu errei-

chen, hatte die ZfS bereits im Jahr 2003 während der Planungsphase auf größere Wärmetauscher mit maximal  $\Delta T = 8 \text{ K}$  gedrängt, was aus Platzgründen in den Stationen aber nicht umsetzbar war. Letztendlich kamen Wärmetauscher zum Zuge, die auf  $16 \text{ °C}$  Netz-Rücklaufemperatur ausgelegt waren ( $\log \Delta T = 10 \text{ K}$ ). Sechs der ursprünglich vorgesehenen Stationen waren aber schon bestellt und wurden auch eingebaut.

An die Wärmeübergabestationen sind Fußboden- und/oder Radiatorenheizungen angeschlossen. 13 Stationen haben eine Fußbodenheizung (Auslegung  $40/20 \text{ °C}$  bei einer Außentemperatur von  $-12 \text{ °C}$ ), deren Heizkreis durch einen Wärmetauscher vom Netz getrennt ist (Abbildung 5, unterer Wärmetauscher). Der netzseitige Volumenstrom am unteren Heizungswärmetauscher wird durch das Ventil V2 so geregelt, dass die erforderliche Heizungsvorlaufemperatur  $T_2$  eingehalten wird. Die Heizungsvorlaufemperatur wird über die Heizkurve vorgegeben.

An 30 Stationen der insgesamt 50 Stationen ist eine Radiatorenheizung (Auslegung  $60/40 \text{ °C}$ , ohne Abbildung) angeschlossen. Bei diesen Systemen entfällt der Heizungswärmetauscher, und die Heizkörper werden direkt vom Netz durchströmt. Sieben Stationen haben Radiatoren- und Fußbodenheizung. Dort ist die Fußbodenheizung durch einen Wärmetauscher vom Netz getrennt, und die Radiatoren werden direkt vom Netz durchströmt.

Ob in den Häusern Fußboden- und/oder Radiatorenheizung eingebaut wurde, richtete sich nach unseren Recherchen weniger nach Typ und Größe der Häuser, sondern eher nach den Bauträgern und den finanziellen Möglichkeiten der Bauherren.

## 4 Messtechnik

### 4.1 Messstellen im Solarsystem

Abbildung 4 und Tabelle 1 zeigen eine Übersicht über die erfassten Messgrößen. Im Datenerfassungsgerät (Logger) werden Leistungen (in kW), Volumenströme (in m<sup>3</sup>/h), Temperaturen (in °C), Absolutdruck (in bar<sub>abs</sub>) und Betriebsstunden (in h) ca. alle 2 sec erfasst und diese Werte als 5-Minuten-Mittelwert gespeichert. Kürzere Speicherintervalle (< 5 min) sind möglich, um so das dynamische Anlagenverhalten über begrenzte Zeiträume kontrollieren zu können.

Von vielen Messgrößen werden zusätzlich die Maximum- und/oder Minimumwerte innerhalb des Mittelungsintervalls gespeichert, da sie zusätzliche Informationen zum Anlagenverhalten geben und zur Kontrolle der Messdaten herangezogen werden. Bei einem eventuellen Defekt an einem Messsensor kann anhand der dann gemessenen Maximum- oder Minimumwerte festgestellt werden, dass die abgespeicherten Mittelwerte falsch sind und korrigiert werden müssen.

| <b>spezifische Strahlungsleistungen</b> |                                                                                        |                         |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| EI1                                     | spez. Gesamtstrahlungsleistung in die Kollektorebene (30° geneigt; Ausrichtung 0° Süd) | W/m <sup>2</sup>        |
| EI2                                     | spezifische Gesamtstrahlungsleistung horizontal                                        | W/m <sup>2</sup>        |
| <b>Leistungen</b>                       |                                                                                        |                         |
|                                         |                                                                                        | <u>berechnet aus:</u>   |
| PKT                                     | Wärmeleistung Kollektorkreis                                                           | (VKT; TKT1; TKT2)       |
| PSP                                     | Wärmeleistung Beladung Pufferspeicher                                                  | (VSP; TSP1; TSP2)       |
| PHT                                     | Wärmeleistung Kessel                                                                   | (VHT; THT1; THT2)       |
| PNE                                     | Wärmeleistung Nahwärmenetz                                                             | (VNE; TNE1; TNE2)       |
| PST                                     | elektrische Leistung Strombedarf Solarsystem; gemessen werden: Leistung P4, P5; P6     |                         |
| PGAS                                    | Leistung Brenner                                                                       |                         |
| <b>Volumenströme</b>                    |                                                                                        |                         |
| VKT                                     | Volumenstrom Kollektorkreis                                                            | m <sup>3</sup> /h       |
| VSP                                     | Volumenstrom Pufferspeicher-Ladekreis                                                  | m <sup>3</sup> /h       |
| VHT                                     | Volumenstrom Kesselkreis                                                               | m <sup>3</sup> /h       |
| VNE                                     | Volumenstrom Netz                                                                      | m <sup>3</sup> /h       |
| VSS                                     | Volumenstrom Netz durch Puffer                                                         | (VNE; TSS1; TNE1; TNE2) |
| VGAS                                    | Gasvolumenstrom                                                                        | m <sup>3</sup> /h       |
| <b>Temperaturen</b>                     |                                                                                        |                         |
| TKOLL                                   | Temperatur in einem Kollektor des Feldes Ost (neben Regelfühler T_Koll)                | °C                      |
| TKT1                                    | Temperatur Kollektorkreis gesamt Warmseite (Eintrittstemperatur in den Wärmetauscher)  | °C                      |
| TKT2                                    | Temperatur Kollektorkreis gesamt Kaltseite (Austrittstemperatur aus dem Wärmetauscher) | °C                      |
| TKT3                                    | Temperatur Kollektorkreis Warmseite Gebäude Feld West                                  | °C                      |
| TKT4                                    | Temperatur Kollektorkreis Warmseite Feld Carports                                      | °C                      |
| TSP1                                    | Temperatur Ladekreis Pufferspeicher Warmseite                                          | °C                      |
| TSP2                                    | Temperatur Ladekreis Pufferspeicher Kaltseite                                          | °C                      |
| TSS1                                    | Temperatur Entladekreis Austritt Solarspeicher Warmseite                               | °C                      |
| THT1                                    | Temperatur Kesselkreis Warmseite                                                       | °C                      |
| THT2                                    | Temperatur Kesselkreis Kaltseite                                                       | °C                      |
| TNE1                                    | Temperatur Netzvorlauf Gesamtnetz                                                      | °C                      |
| TNE2                                    | Temperatur Netzurücklauf Gesamtnetz                                                    | °C                      |
| TNORD                                   | Temperatur Netzurücklauf Wohngebiet Nord                                               | °C                      |
| TSUED                                   | Temperatur Netzurücklauf Wohngebiet Süd                                                | °C                      |
| TPS1                                    | Temperatur Pufferspeicher oben                                                         | °C                      |
| TPS2                                    | Temperatur Pufferspeicher oberes Drittel                                               | °C                      |
| TPS3                                    | Temperatur Pufferspeicher Mitte                                                        | °C                      |
| TPS4                                    | Temperatur Pufferspeicher unteres Drittel                                              | °C                      |
| TPS5                                    | Temperatur Pufferspeicher unten                                                        | °C                      |
| T1                                      | Temperatur Ladekreis Pufferspeicher Einspeisung Mitte                                  | °C                      |
| T2                                      | Temperatur Ladekreis Pufferspeicher Einspeisung oben                                   | °C                      |
| T3                                      | Temperatur Netzurücklauf Pufferspeicher Einspeisung unten                              | °C                      |
| T4                                      | Temperatur Netzurücklauf Pufferspeicher Einspeisung unteres Drittel                    | °C                      |
| TGAS                                    | Temperatur Gasleitung                                                                  | °C                      |
| TA                                      | Außentemperatur                                                                        | °C                      |
| TRAUM                                   | Temperatur Aufstellraum Pufferspeicher                                                 | °C                      |
| <b>Betriebsstunden</b>                  |                                                                                        |                         |
| HP4                                     | Betriebsstunden Pumpe P4 Kollektorkreis                                                | h                       |
| HP5                                     | Betriebsstunden Pumpe P5 Beladung Pufferspeicher                                       | h                       |
| HP6                                     | Betriebsstunden Pumpe P6 Nachspeisepumpe Kollektorkreis                                | h                       |
| HMK1A                                   | Betriebsstunden Motorklappe MK1 auf                                                    | h                       |
| HMK1Z                                   | Betriebsstunden Motorklappe MK1 zu                                                     | h                       |
| HMK2A                                   | Betriebsstunden Motorklappe MK2 auf                                                    | h                       |
| HMK2Z                                   | Betriebsstunden Motorklappe MK2 zu                                                     | h                       |
| HMK3A                                   | Betriebsstunden Motorklappe MK3 auf                                                    | h                       |
| HMK3Z                                   | Betriebsstunden Motorklappe MK3 zu                                                     | h                       |
| HMK4A                                   | Betriebsstunden Motorklappe MK4 auf                                                    | h                       |
| HMK4Z                                   | Betriebsstunden Motorklappe MK4 zu                                                     | h                       |
| HBR                                     | Betriebsstunden Brenner                                                                | h                       |
| <b>Druck</b>                            |                                                                                        |                         |
| PKOLL                                   | Absolutdruck Kollektorkreis Vorlauf (ca. 5 m unterhalb Oberkante Kollektorfeld)        | bar <sub>abs</sub>      |

Tabelle 1: Vom Daten-Logger erfasste Messgrößen

Zur Bilanzierung von längeren Zeiträumen und zur Berechnung von Systemkennwerten werden aus den Leistungen und Volumenströmen Energien und Volumina berechnet. Außerdem wird die Strahlungsleistung auf die aktive Absorberfläche berechnet (Tabelle 2).

|                           |                                                           |                    |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------|
| <b>Strahlungsleistung</b> |                                                           |                    |
| EIK                       | Gesamtstrahlungsleistung auf die aktive Absorberfläche    | kW                 |
| <b>Strahlungsenergien</b> |                                                           |                    |
| EITK                      | Gesamtstrahlungsenergie auf die aktive Absorberfläche     | kWh                |
| EIT1                      | spezifische Gesamtstrahlungsenergie in die Kollektorebene | kWh/m <sup>2</sup> |
| EIT2                      | spezifische Gesamtstrahlungsenergie horizontal            | kWh/m <sup>2</sup> |
| <b>Energien</b>           |                                                           |                    |
| QKT                       | Energie Kollektorkreis                                    | kWh                |
| QSP                       | Energie Beladung Pufferspeicher                           | kWh                |
| QHT                       | Energie Kessel                                            | kWh                |
| QNE                       | Energieverbrauch Nahwärmenetz                             | kWh                |
| NST                       | elektrische Energie (Strombedarf Solarsystem)             | kWh                |
| QGAS                      | Energie Brenner                                           | kWh                |
| <b>Volumina</b>           |                                                           |                    |
| KT                        | Umwälzvolumen Kollektorkreis                              | m <sup>3</sup>     |
| SP                        | Umwälzvolumen Pufferspeicher-Ladekreis                    | m <sup>3</sup>     |
| HT                        | Umwälzvolumen Kesselkreis                                 | m <sup>3</sup>     |
| NE                        | Umwälzvolumen Netz                                        | m <sup>3</sup>     |
| SS                        | Umwälzvolumen Netz durch Puffer                           | m <sup>3</sup>     |
| GAS                       | Gasvolumen                                                | m <sup>3</sup>     |

Tabelle 2: Berechnete Strahlungsleistung, Energien und Volumina

## 4.2 Definition der solaren Nutzenergie und Kennzahlen des Solarsystems

### Solare Nutzenergie

Die solare Nutzenergie ist die in den Puffer eingespeiste Solarenergie abzüglich der Pufferverluste. Vereinfachend wird dabei angenommen, dass der Puffer ohne die Solaranlage nicht vorhanden gewesen wäre und damit dem Kessel auch kein Kesselpuffervolumen zur Verfügung stehen würde.<sup>1</sup> Somit werden die Pufferverluste (auch die Pufferverluste, die bei der Nachheizung des Bereitschaftsteils durch den Kessel entstehen) vollständig der Solarenergie angelastet.

$$Q_{\text{Nutz}} = Q_{\text{SP}} - (Q_{\text{SP}} + Q_{\text{HT}} - Q_{\text{NE}})$$

$$Q_{\text{Nutz}} = Q_{\text{NE}} - Q_{\text{HT}}$$

<sup>1</sup> Bei dieser Vereinfachung ist Folgendes zu berücksichtigen:

*In dieser Anlage ist das Kesselpuffervolumen von ca. 13 m<sup>3</sup> so ausgelegt, dass der zwischen 160 kW und 599 kW modulierende Kessel aufgrund des eingestellten Volumenstroms der Kesselpumpe selbst bei geringem Wärmebedarf mindestens 26 Minuten lang in der kleinsten Leistungsstufe läuft. Die Kesselaufzeit wird durch die Messungen auch weitgehend bestätigt.*

*Würde der Kesselpuffer entfallen, müsste die angeforderte Netzleistung zu jedem Zeitpunkt vom Kessel gedeckt werden. In der heizfreien Zeit, wenn nur der Warmwasserbedarf gedeckt werden muss, ist der auf 5 Minuten bezogene Wärmebedarf des Netzes (mittlere Leistung im 5-Minuten-Intervall) mit rd. 5 kW bis 15 kW um den Faktor 10 bis 30 kleiner als die kleinste Kesselleistung. Der Kessel würde in diesen Zeiten nur sehr kurze Brennerlaufzeiten haben und dadurch sehr viel häufiger ein- und ausschalten (takten) als zurzeit. Häufiges Takten führt in der Regel zu einem verringerten Nutzungsgrad des Kessels mit erhöhtem Endenergieeinsatz (Öl, Gas) und erhöhter Schadstoffemission. Dieser erhöhte Endenergieverbrauch müsste mit dem Kesselnutzungsgrad in*

Wärmeenergie umgerechnet und von dem der Solaranlage angelasteten Energieverlust des Bereitschaftsteils abgezogen werden. Da wir zu dem (fiktiven) erhöhten Endenergieverbrauch des Kessels jedoch keine Angaben machen können, wird darauf vereinfachend verzichtet.

Man kann das Kesseltakten verhindern, indem ein separater Kesselpuffer oder ein Zusatzkessel für den kleinen Leistungsbereich installiert wird. In diesem Fall müssten die Energieverluste des separaten Kesselpuffers bzw. die Energieverluste des kleinen Zusatzkessels (Kesselnutzungsgrad) bei der Berechnung der solaren Nutzenergie berücksichtigt werden. Im Übrigen müssen diese zusätzlichen Komponenten auch bei den solaren Wärmekosten berücksichtigt werden, da sie mit Solaranlage nicht erforderlich wären.

Würde der Kessel ohne Solaranlage mit einer Mindestlaufzeit betrieben (z.B. 10 Minuten), würde der Kessel länger laufen als von der Netzanforderung her nötig gewesen wäre, und die "überschüssige" Energie müsste im Netzvolumen gespeichert werden, was zu höheren Netztemperaturen und damit höheren Netzverlusten führt (viele Netze werden so betrieben). Den eingesparten Pufferverlusten des Bereitschaftsteils stehen dann die erhöhten Netzverluste entgegen (und u.U. ein erhöhter Endenergieverbrauch des Kessels durch kürzere Laufzeit – in diesem Beispiel z.B. 10 min statt 26 min).

Auch zu den letztgenannten Punkten können wir derzeit keine gesicherten Abschätzungen machen.

### **Kollektorkreisnutzungsgrad $g_k$**

Der Kollektorkreisnutzungsgrad ist das Verhältnis von Wärme, die aus dem Kollektorkreis an den Wärmetauscher (Primärseite) abgegeben wurde, zur Gesamtstrahlungsenergie, die im gleichen Zeitraum auf die aktive Absorberfläche auftraf. Die Messung der Wärmeabgabe aus dem Kollektorkreis birgt jedoch erhebliche Unsicherheiten. So wäre es erforderlich, dass für die Wärmemengenberechnung die Wärmekapazität und Dichte des Wärmeträgers in Abhängigkeit der Konzentration und der Temperatur bestimmt werden, was mit zusätzlichen Messungenauigkeiten verbunden ist. Weiterhin sind die verwendeten Volumenzähler nur für Wasser geeicht (eine Eichung auf den Wärmeträger wäre mit erheblichen Kosten verbunden), sodass die Volumenmessung im Kollektorkreis ebenfalls Unsicherheiten aufweist. Daher wird die Energieabgabe des Kollektorkreis-Wärmetauschers (Sekundärseite) für die Berechnung des Kollektorkreisnutzungsgrades benutzt, weil dort die bekannten Stoffwerte von Wasser verwendet werden können. Rechnerisch werden damit die Wärmeverluste am Kollektorkreis-Wärmetauscher dem Kollektorkreis zugeschlagen. Da diese Verluste jedoch minimal sind, ist der hierbei gemachte Fehler kleiner als der, der bei der Messung im Kollektorkreis gemacht wird.

$$g_k = \frac{\text{Energie Beladung Pufferspeicher}}{\text{Gesamtstrahlungsenergie auf die aktive Absorberfläche}} = \frac{QSP}{EITK} * 100 \%$$

**Solarsystemnutzungsgrad** brutto  $g_{SB}$  und netto  $g_{SN}$

Der Systemnutzungsgrad ist das Verhältnis von solarer Nutzenergie, die aus dem Solarsystem an das konventionelle System abgegeben wurde, zur Strahlungsenergie, die im gleichen Zeitraum auf die aktive Absorberfläche auftraf.

$$g_{SB} = \frac{\text{Nutzenergie des Solarsystems}}{\text{Gesamtstrahlungsenergie auf die aktive Absorberfläche}} = \frac{Q_{\text{Nutz}}}{E_{\text{ITK}}} * 100 \%$$

$$g_{SN} = \frac{\text{Nutzenergie des Solarsystems - elektrische Energie}}{\text{Gesamtstrahlungsenergie auf die aktive Absorberfläche}} = \frac{Q_{\text{Nutz}} - NST}{E_{\text{ITK}}} * 100 \%$$

**Solarer Gesamt-Deckungsanteil** brutto  $D_{SB}$  und netto  $D_{SN}$

Der solare Gesamt-Deckungsanteil gibt an, wie viel Prozent des gesamten Wärmeverbrauchs der Wohnsiedlung für Warmwasserbereitung und -zirkulation, Raumheizung und Netzzirkulation von der Solaranlage gedeckt werden.

$$D_{SB} = \frac{\text{Nutzenergie des Solarsystems}}{\text{Energieverbrauch Nahwärmenetz}} = \frac{Q_{\text{Nutz}}}{Q_{\text{NE}}} * 100 \%$$

$$D_{SN} = \frac{\text{Nutzenergie des Solarsystems - elektrische Energie}}{\text{Energieverbrauch Nahwärmenetz}} = \frac{Q_{\text{Nutz}} - NST}{Q_{\text{NE}}} * 100 \%$$

**Arbeitszahl** des Solarsystems  $A$

Die Arbeitszahl beschreibt das Verhältnis von gelieferter Nutzenergie aus dem Solarsystem zur aufgewendeten elektrischen Hilfsenergie ohne Messtechnik. Sie gibt an, wie viel kWh solarer Nutzenergie pro eingesetzter Kilowattstunde Strom geliefert wurden.

$$A = \frac{\text{Nutzenergie des Solarsystems}}{\text{elektrische Energie}} = \frac{Q_{\text{Nutz}}}{NST}$$

## 5 Betriebserfahrungen

Die Solaranlage wurde im Frühjahr 2005 zunächst nur mit dem östlich gelegenen Teilfeld auf dem ehemaligen Schlachthofgebäude ( $175,7 \text{ m}^2_{\text{Abs}}$ , rechtes Feld in Abbildung 2) in Betrieb genommen, da zu diesem Zeitpunkt erst wenige Häuser angeschlossen waren. Das andere westliche Teilfeld blieb leer. Die Messdatenerfassung wurde Mitte Mai 2005 installiert, war aber aufgrund von anfänglichen Problemen mit der elektronischen Erfassung der Impulssignale von den erstmals eingesetzten Ultraschall-Volumenzählern erst ab Anfang Juli 2005 voll funktionsfähig. Seit Beginn der Datenaufzeichnung lief die Solaranlage bis zum 4.7.2006 ohne nennenswerte Störungen. Danach traten nach einem 5-tägigen Ausfall der Kollektorkreispumpe Probleme mit der Durchströmung der Kollektorfelder auf (vermutlich Luft im Kollektorfeld).

Mitte Oktober 2005 wurde das zweite Kollektorfeld angeschlossen (insgesamt nun  $351,3 \text{ m}^2_{\text{Abs}}$  aktive Absorberfläche). Der Volumenstrom im Kollektorfeld wurde dabei zunächst auf  $6,3 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $18 \text{ l}/(\text{h}\cdot\text{m}^2_{\text{Abs}})$ ) eingestellt, der Volumenstrom im Ladekreis war jedoch mit  $1,8 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $5,1 \text{ l}/(\text{h}\cdot\text{m}^2_{\text{Abs}})$ ) erheblich zu niedrig. Anfang Dezember 2005 wurden die bis dahin vorliegenden Betriebserfahrungen mit dem Betreiber und Planer besprochen. Es wurde u.a. vereinbart, die Volumenströme auf einen Durchsatz von ca.  $15 \text{ l}/(\text{h}\cdot\text{m}^2_{\text{Abs}})$  im Kollektorkreis und ca.  $14 \text{ l}/(\text{h}\cdot\text{m}^2_{\text{Abs}})$  im Ladekreis einzustellen.

In der zweiten Dezemberhälfte 2005 gab es ca. zwei Wochen lang Probleme mit der Gasdruckhaltung und in der Folge Störungen bei der Nachheizung mit dem Kessel, sodass die Netzvorlauftemperatur zeitweise auf  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  absank. Im Februar 2006 fiel die Netzvorlauftemperatur aufgrund von Problemen mit der DDC-Regelung erneut auf zeitweise  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  ab. Die Störungen führten dazu, dass sich die Volumenstromumstellung im Kollektor- und Ladekreis bis Mitte Februar 2006 verzögerte. In der zweiten Februarhälfte 2006 wurde an vier Tagen aufgrund von Abgastests am Kessel die Bereitschaftstemperatur im Puffer zeitweise bis zu  $83 \text{ }^\circ\text{C}$  und die Netzvorlauftemperatur bis zu  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  erhöht.

Unter den oben aufgeführten Randbedingungen war es sinnvoll, einen ersten Auswertzeitraum für die Solaranlage unter Inbetriebnahme der  $351 \text{ m}^2_{\text{Abs}}$  großen Kollektorfläche ab Mitte Februar 2006 zu beginnen.

Im Spätsommer 2006 wurde das Kollektorfeld zeitweise mit  $8 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $22 \text{ l}/(\text{h}\cdot\text{m}^2_{\text{Abs}})$ ) durchströmt, da es bei niedrigerem Durchsatz zu Strömungsproblemen kam. Die erste Jahresbilanzierung wurde für das  $351 \text{ m}^2_{\text{Abs}}$  große Feld auf dem ehemaligen Schlachthofgebäude für den Zeitraum 14.2.2006 bis 13.2.2007 vorgenommen. Die Energiebilanz dieser ersten Messperiode ist in /6/ beschrieben.

Während der 2. Messperiode (21.6.2007 bis 19.6.2008, erste Messperiode bei voll ausgebautem Kollektorfeld von  $545 \text{ m}^2_{\text{Abs}}$ ) traten in den Monaten März/April 2008 erneut Störungen bezüglich der gleichmäßigen Durchströmung der Kollektorfelder auf. Das Problem war, dass im östlichen Feld auf dem Schlachthofgebäude die Durchströmung absank und dort zu sehr hohen Kollektortemperaturen führte. Die Kollektortemperaturen in diesem Feld erreichten bis zu  $50 \text{ K}$  oberhalb der Temperatur im Kollektorkreisvorlauf des Gesamtfeldes. Da sich im östlichen Feld der Regelfühler für die Kollektor-

pumpe befindet und dieser zeitweise die Abschaltbedingung von 130 °C (s. Kap. 3.2.3) erreichte, schaltete die Kollektorkreispumpe unnötig ab.

Um diesen Fehler zu beheben, wurde das Feld Ost gespült und entlüftet und die Durchströmung aller Felder neu einreguliert.

## 5.1 Netztemperaturen

Es wird der gesamte Zeitraum seit Inbetriebnahme der Datenerfassung von Mai 2005 bis Mitte 2008 betrachtet (Abbildung 6). Die **Temperatur am Ausgang des Puffers** liegt im Winter und in den Übergangszeiten im Tagesmittel zumeist um 67 bis 70 °C. Nach dem Anschluss des zweiten Feldes auf dem ehemaligen Schlachthofgebäude wurden im Sommer 2006 Tagesmittelwerte von knapp 90 °C erreicht, seit dem Anschluss des Feldes auf den Carports bis 95 °C.

Durch die Netzurücklaufbeimischung wird die obere Speichertemperatur auf die **Netzvorlauftemperatur** abgekühlt, die bis September 2006 bei 63 bis 64 °C liegt. Danach wurde die Netzvorlauftemperatur an der DDC auf 67 °C erhöht, tatsächlich haben sich aber nur 66 °C eingestellt. Seit 2008 sinkt sie wieder leicht ab auf 65 °C ohne dass Änderungen an der Regeleinstellung vorgenommen wurden.

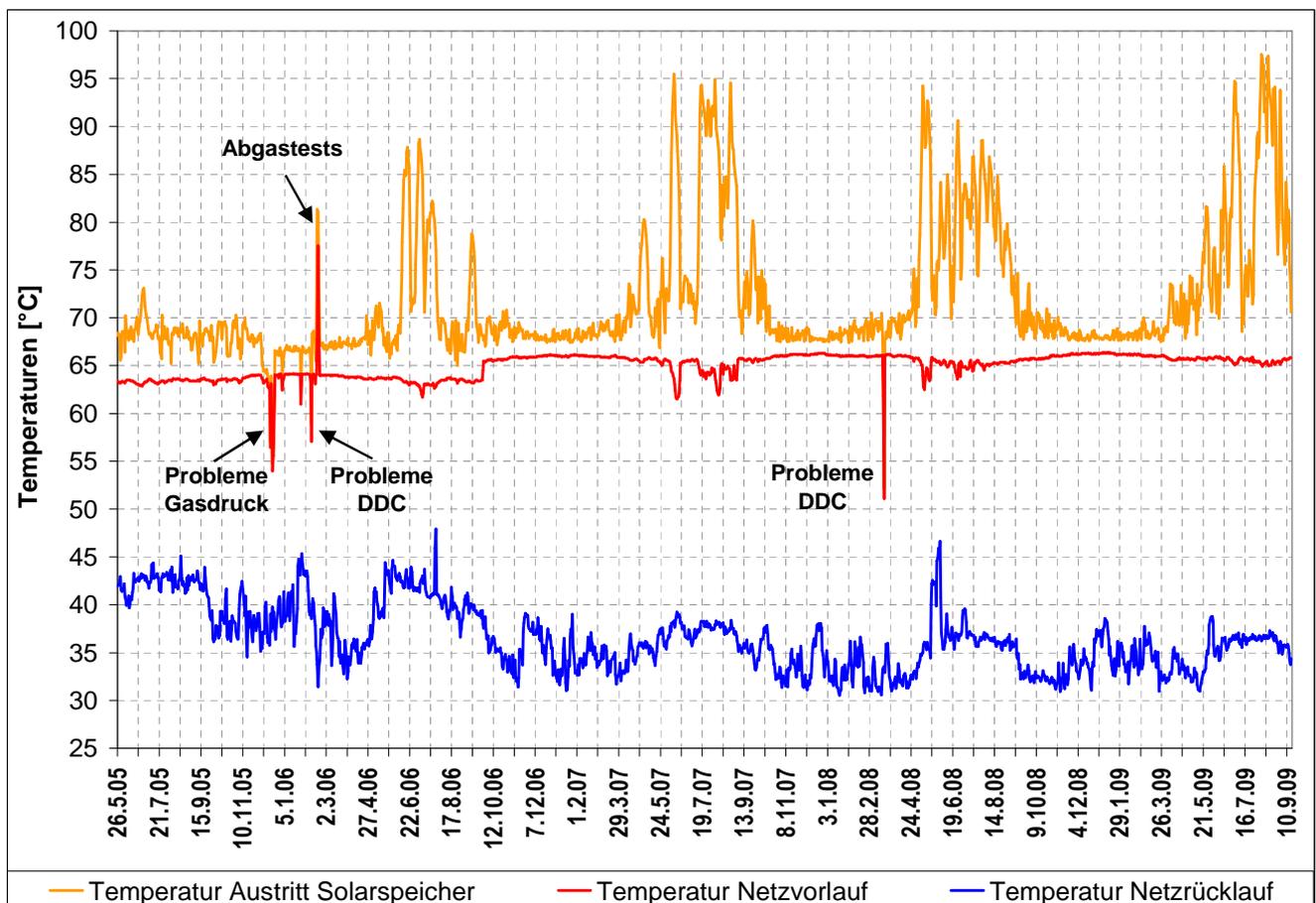


Abbildung 6: Tagesmittelwerte der Vor- und Rücklauftemperaturen im Nahwärmenetz und der Temperatur am Austritt des Puffers

Die **Netzurücklauftemperatur** lag zu Beginn der Messungen im Bereich von zumeist 35 bis 45 °C und ist mit zunehmender Bebauung des Wohngebietes immer weiter abgesunken. Diese Absenkung liegt vor allem daran, dass anfangs laufend neue Häuser gebaut wurden und in den ersten Jahren in vie-

len Häusern ein gesonderter Aufheizbetrieb (Estrichaufheizprogramm) erfolgte. Mittlerweile liegt die Netzurücklaufemperatur im Winter 2007/2008 und Winter 2008/2009 zwischen 31 und 38 °C, im Sommer steigt sie bis ca. 38 °C an. Kurzzeitige Anstiege der Netzurücklaufemperatur wie z.B. im Mai 2008 sind Folge des Estrich-Aufheizprogramms nach den Zubau weiterer Häuser. Die nun erzielten Netzurücklaufemperaturen sind die niedrigsten aller Nahwärmeanlagen im Rahmen von Solarthermie-2000 bzw. Solarthermie2000plus.

## 5.2 Kollektorkreiswirkungsgrad

### 5.2.1 Östliches Feld auf dem ehemaligen Schlachthofgebäude

Zur Überprüfung des Kollektorkreiswirkungsgrades vom östlichen Feld (vorderes Feld in Abbildung 2) wurden Messwerte aus dem Sommer 2005, als nur ein Kollektorfeld (175,7 m<sup>2</sup><sub>Abs</sub>) in Betrieb war, mit der Kollektorwirkungsgradkennlinie verglichen. Die Kennlinie beschreibt den Verlauf des Kollektorwirkungsgrades (Quotient aus Energieabgabe aus dem Kollektor und Einstrahlungsenergie auf die Kollektorfläche) in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen der mittleren Wärmeträgertemperatur des Kollektors und der Außentemperatur bei definierter Strahlung. Ermittelt wird die Kennlinie unter genormten, eng definierten und stationären Prüfbedingungen. Die Kenntnis der Kollektorkennlinie und der sich daraus ableitenden Kollektorkennwerte ist notwendig, um die Nutzenergie einer thermischen Solaranlage mit Hilfe eines Simulationsprogramms berechnen zu können.

Um Messwerte vom Kollektorkreis mit der im Labor gemessenen Kollektorkennlinie vergleichen zu können, wurden nur Messdatensätze (5-Minuten-Mittelwerte) ausgewählter Betriebszustände berücksichtigt. Folgende Kriterien sollten möglichst erfüllt sein:

- Die Solaranlage soll einen Zustand erreicht haben, der den stationären Bedingungen im Labor möglichst nahe kommt, da nur dann eine stabile Wirkungsgradmessung möglich ist. Dies ist bei unbehinderter Einstrahlung (möglichst keine wechselnde Bewölkung) in der Nähe des Strahlungsmaximums der Fall und wenn keine Ein- und Ausschaltvorgänge stattfinden.
- Die Einflüsse der Reflexion an der Glasscheibe und eine dadurch verursachte Wirkungsgradreduzierung sollten gering sein. Dies bedingt Betriebsphasen mit möglichst senkrechter Einstrahlung auf die Kollektoren. Die Ermittlung der Kollektorkennlinie im Prüfinstitut wird ebenfalls stets bei angenähert senkrechter Einstrahlung vorgenommen (nach DIN EN 12975-2 darf der Winkelkorrekturfaktor nicht größer als  $\pm 2\%$  werden). Dies wird üblicherweise erreicht, wenn bei einem Kollektor mit Glasabdeckung der Einfallswinkel der Einstrahlung nicht mehr als 20° von der Senkrechten auf die Glasoberfläche abweicht.

Aufgrund dieser Kriterien wurden nur Datensätze zugelassen, die die folgenden Bedingungen erfüllen:

- Die Einstrahlung auf die geneigte Kollektorebene musste über 800 W/m<sup>2</sup> betragen.

- Ununterbrochene Pumpenlaufzeiten (Kollektorkreis- und Pufferladepumpe) über das gesamte 5-min-Mittelungsintervall.
- Annähernd senkrechter Einfall der direkten Strahlung. Bei 30° Neigung und Ausrichtung der Kollektoren nach Süd ist dies im Sommerhalbjahr am Standort Speyer in der Zeit von ca. 11:00 bis 14:00 Uhr (MEZ) gegeben.

Durch diese Einschränkungen werden die stationären Bedingungen eines Kollektortests näherungsweise als Vorgabe für die statistische Auswertung der Messdaten genutzt, da ein Vergleich sonst kaum möglich ist. Für den Vergleich wurden die Kenndaten des Kollektors gemäß Kollektortest Nr. 96COL53 /4/ des Instituts für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart (ITW) zugrunde gelegt. Da die Kenndaten des ITW auf die Aperturfläche bezogen sind, wurden sie auf die aktive Absorberfläche umgerechnet. Die auf die Aperturfläche bezogenen Original-Kennwerte sind zusätzlich in Anhang I (Technisches Datenblatt der Hauptkomponenten; "Kollektoren") aufgeführt.

$$\eta = \eta_0 - k_1 \frac{(g_m - g_L)}{G_K} - k_2 \frac{(g_m - g_L)^2}{G_K} \quad (1)$$

oder

$$\eta = \eta_0 - k_1 T^* - k_2 G_K (T^*)^2 \quad (2)$$

mit:  $\eta$  = Wirkungsgrad des Kollektors

$\eta_0$  = Konversionsfaktor; Wert: 0,815

$k_1$  = linearer Wärmeverlustkoeffizient; Wert: 4,189 W/(m<sup>2</sup><sub>Abs</sub>•K)

$k_2$  = quadratischer Wärmeverlustkoeffizient; Wert: 0,008 W/(m<sup>2</sup><sub>Abs</sub>•K<sup>2</sup>)

$T^*$  = normierte Temperatur in (K•m<sup>2</sup>/W): Formel:  $T^* = (\bar{\delta}_m - \bar{\delta}_a) / G_K$

$\bar{\delta}_m$  mittlere Temperatur des Wärmeträgers im Kollektor zwischen Ein- und Austritt in °C

$\bar{\delta}_a$  Umgebungstemperatur in °C

$G_K$  globale Strahlung auf die Kollektorebene in W/m<sup>2</sup>; Wert in Gleichung (2): 860 W/m<sup>2</sup>

Die mittlere globale Einstrahlung während des Kollektortests am ITW betrug 857 W/m<sup>2</sup>. In Abbildung 12 ist die o.g. Funktion als Kollektorkennlinie für  $G_K = 860$  W/m<sup>2</sup> aufgetragen.

Für die vergleichende Darstellung der Kollektorkennlinie mit dem Kollektorkreiswirkungsgrad aus den Messwerten wurden folgende Messgrößen benutzt:

- Kollektorkreiswirkungsgrad als Quotient der 5-Minuten-Mittelwerte

$$\frac{\text{PSP Wärmeleistung Beladung Pufferspeicher}}{\text{EIK Gesamtstrahlungsleistung auf die aktive Absorberfläche}}$$

- Als mittlere Temperatur des Wärmeträgers im Kollektor ( $\bar{\delta}_m$ ) wurde der Mittelwert aus den am Kollektorkreis-Wärmetauscher gemessenen Temperaturen (TKT1 und TKT2) gebildet.
- TA Außentemperatur.

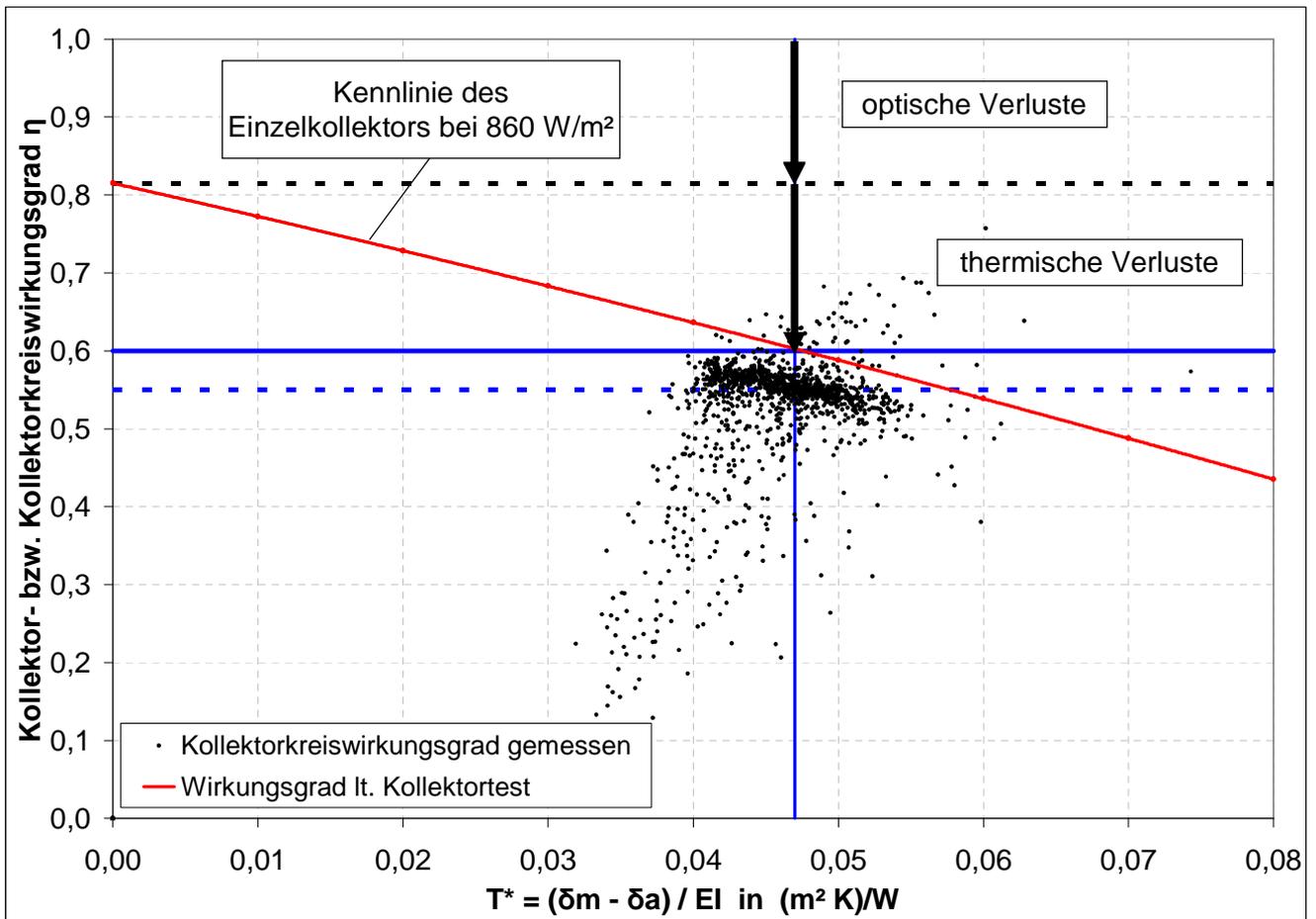


Abbildung 7: Wirkungsgrad eines Kollektors unter Laborbedingungen und 5-Minuten-Mittelwerte des Kollektorkreiswirkungsgrades von einem Teilfeld ( $175,7 m^2_{Abs}$ )

Die in Abbildung 7 eingezeichnete senkrechte Hilfslinie durch die Mitte des Punkthaufens schneidet die Kollektorkennlinie bei  $\eta = 0,6$  und einer normierten Temperaturdifferenz von ca.  $0,047 (m^2_{Abs} \cdot K)/W$ , was bei einer Einstrahlung von  $860 W/m^2$  und einer Außentemperatur von 20 bis  $30 ^\circ C$  einer mittleren Kollektor(kreis)temperatur von etwa 60 bis  $70 ^\circ C$  entspricht. Ein einzelner Kollektor würde bei diesen Bedingungen mit einem Wirkungsgrad von ca. 60 % arbeiten. Er hätte 18,5 %-Punkte optische Verluste ( $1 - 0,815$ ), die unabhängig von der Betriebstemperatur sind und 21,5 %-Punkte thermische Verluste in diesem Betriebspunkt. Für die Mitte des Punkthaufens der gemessenen Kollektorkreiswirkungsgrade ergibt sich dagegen ein Wirkungsgrad von ca. 55 %. Dies bedeutet, dass der Kollektorkreis mit dem knapp  $176 m^2_{Abs}$  großen Teilfeld einen etwa um 5 %-Punkte niedrigeren Wirkungsgrad hat als der Einzelkollektor unter Laborbedingungen. Diese Abweichung ist durch folgende Faktoren begründet:

- Thermische Verluste der Rohrleitungen im Kollektorkreis und innerhalb der Kollektorreihen.
- Serienstreuung der Kollektorgüte.
- Verschmutzung der Kollektorverglasung.
- Evtl. Durchströmungsabweichungen zwischen den Kollektorreihen.

Die Streuung der Messpunkte ist insbesondere durch die Kapazitätseffekte, dynamische Schwankungen der Strahlung (Wolken) sowie durch den Tagesverlauf der Strahlung bedingt.

Die Abweichung von nur 5 %-Punkten zwischen den Messpunkten und dem theoretischen Betriebspunkt ist gering und deutet auf eine gute Funktion des Kollektorfeldes hin.

### 5.2.2 Östliches und westliches Feld auf dem ehemaligen Schlachthofgebäude

Für die Überprüfung beider Felder auf dem Gebäude des ehemaligen Schlachthofes (ohne Carports) wird der Zeitraum ab Einregulierung des Kollektor- und Ladekreises bis zu den aufgetretenen Störungen im Juli 2006 (14.2. bis 3.7.2006) herangezogen (vgl. Abbildung 8, gleiche Randbedingungen zur Wirkungsgradermittlung wie zuvor beschrieben).

Die Trendlinie durch die dichteste Häufung der Messpunkte liegt ebenfalls nur 5 %-Punkte unterhalb der theoretischen Kennlinie, was wiederum auf eine gute Funktion hindeutet auch wenn beide Kollektorfelder auf dem Schlachthofgebäude durchströmt werden (gilt nur für die Betriebsbedingungen bis zum 3.7.2006).

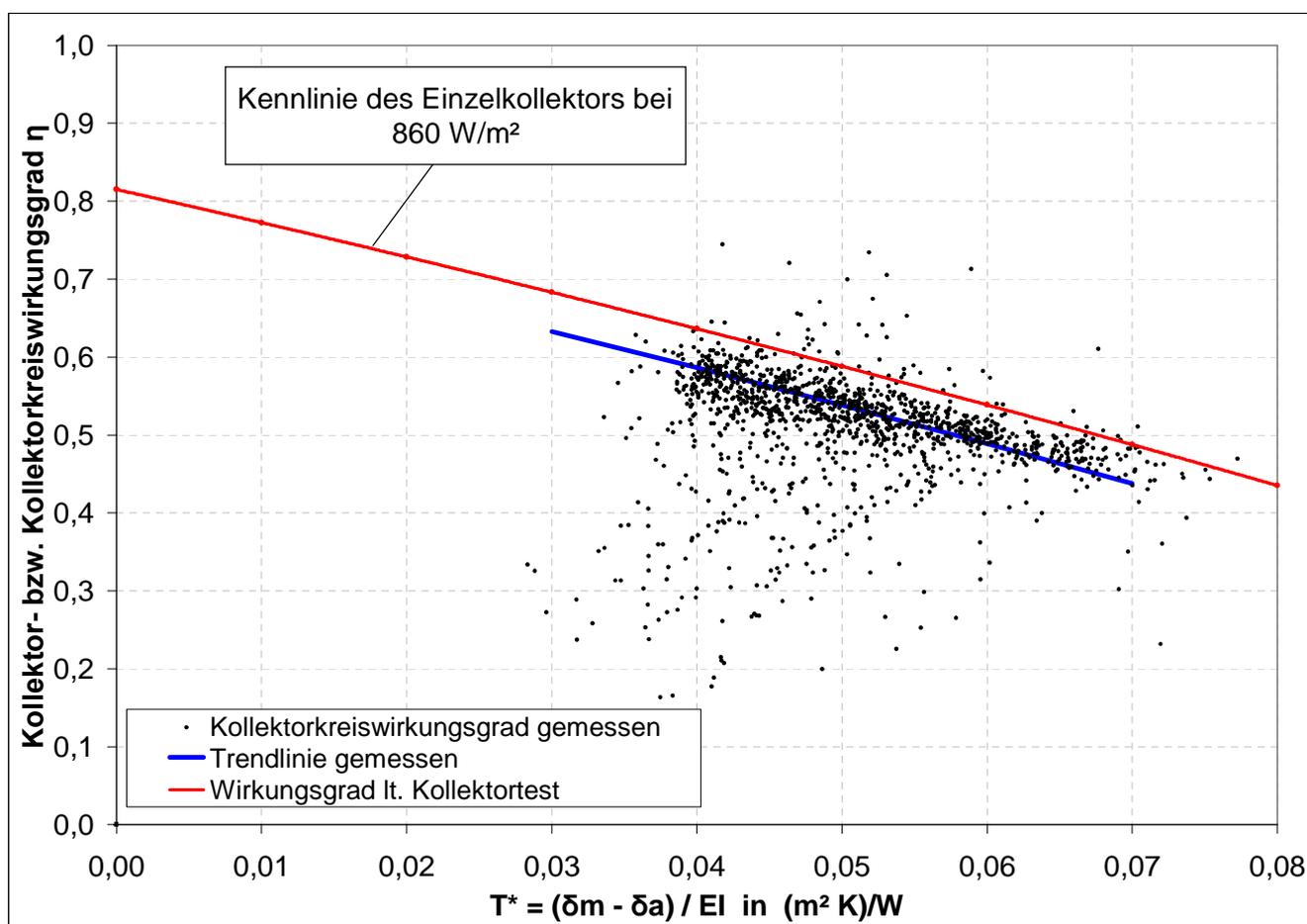


Abbildung 8: Wirkungsgrad eines Kollektors unter Laborbedingungen und 5-Minuten-Mittelwerte des Kollektorkreiswirkungsgrades von Feld Ost und West auf dem ehemaligen Schlachthofgebäude ( $351,3 \text{ m}^2_{\text{Abs}}$ )

## 6 Bilanz und Systemkennzahlen

Die Ergebnisse der Messperiode 1, als nur das Kollektorfeld auf dem ehemaligen Schlachthofgebäude installiert war ( $351,3 \text{ m}^2_{\text{Abs}}$ ), sind in /6/ beschrieben. Im Folgenden werden die Ergebnisse der aussagekräftigeren Messperiode 2 beschrieben, als das Kollektorfeld voll ausgebaut war (inkl. des Feldes auf den Carports).

### 6.1 Messperiode 2 mit $544,8 \text{ m}^2_{\text{Abs}}$ (21.6.2007 bis 19.6.2008; 365 Tage)

Tabelle 3 zeigt eine Zusammenfassung der wichtigsten Messdaten und Systemkennzahlen der zweiten Messperiode. In den Monaten März/April 2008 traten Störungen bezüglich der gleichmäßigen Durchströmung der Kollektorfelder auf (s. Kapitel 5). Der dadurch verursachte Ertragsausfall wurde mit ca. 7 MWh abgeschätzt. In der Tabelle sind die tatsächlich gemessenen Energiewerte (inkl. der Störung) dargestellt, der Ertragsausfall ist dort also nicht korrigiert.

|    |                                                                                                                                               |                 |         |                                                                                   |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Gesamtstrahlungsenergie auf die aktive Absorberfläche ( $544,8 \text{ m}^2$ )                                                                 | EITK            | 708 MWh | $1300 \text{ kWh/m}^2$<br>$3,6 \text{ kWh/m}^2$ pro Tag                           |
| 2  | Energie Beladung Pufferspeicher                                                                                                               | QSP             | 187 MWh | $343 \text{ kWh/m}^2_{\text{Abs}}$<br>$0,94 \text{ kWh/m}^2_{\text{Abs}}$ pro Tag |
| 3  | Energie vom Gaskessel in Pufferspeicher                                                                                                       | QHT             | 522 MWh |                                                                                   |
| 4  | Speicherverluste (absolut)                                                                                                                    | QvPS            | 14 MWh  |                                                                                   |
| 5  | Speicherverluste (prozentual vom Gesamtenergieeintrag Kollektorfeld und Kessel)                                                               | vPS             | 1,9 %   |                                                                                   |
| 6  | Energie Netzverbrauch für<br>– Raumheizung<br>– Trinkwassererwärmung<br>– Trinkwasserzirkulation sofern vorhanden<br>– Netzverluste           | QNE             | 695 MWh |                                                                                   |
| 7  | Nutzenergie Solarsystem (QNE – QHT)                                                                                                           | QNutz           | 173 MWh | $318 \text{ kWh/m}^2_{\text{Abs}}$<br>$0,87 \text{ kWh/m}^2_{\text{Abs}}$ pro Tag |
| 8  | Kollektorkreisnutzungsgrad<br>$100 \cdot \text{QSP} / \text{EITK}$                                                                            | $g_{\text{KB}}$ | 26,4 %  |                                                                                   |
| 9  | Systemnutzungsgrad<br>$100 \cdot \text{QNutz} / \text{EITK}$                                                                                  | $g_{\text{SB}}$ | 24,5 %  |                                                                                   |
| 10 | solarer Deckungsanteil<br>$100 \cdot \text{QNutz} / \text{QNE}$                                                                               | $D_{\text{SB}}$ | 24,9 %  |                                                                                   |
| 11 | Stromverbrauch Kollektor-, Lade- und Nachspeisepumpe                                                                                          | NST             | 2,7 MWh |                                                                                   |
| 12 | Arbeitszahl Solarsystem (ohne Stromverbrauch der Motorklappen und des solarbedingten Anteils der DDC-Regelung)<br>$\text{QNutz} / \text{NST}$ | A               | 64      |                                                                                   |

Tabelle 3: Messergebnisse und Systemkennzahlen für den Zeitraum 21.6.2007 bis 19.6.2008 (365 Tage) bei realem Betrieb; Ertragsausfall von ca. 7 MWh wurde nicht korrigiert

Von der Gesamtstrahlungsenergie EITK auf die aktive Absorberfläche des Kollektorfeldes (708 MWh bzw.  $1300 \text{ kWh/m}^2$ ) wurden im Messzeitraum 187 MWh (QSP) in den Pufferspeicher geladen. Die Energiedifferenz zwischen der Strahlungsenergie und der Abgabe vom Kollektorkreis an den Solarpuffer QSP resultiert aus optischen und thermischen Verlusten der Kollektoren und Kollektorkreisver-

rohrung, Stillstandszeiten aufgrund der beschriebenen Betriebsstörung oder wegen Erreichen der maximalen Speichertemperatur sowie Standzeiten während zu geringer (d.h. nicht nutzbarer) Strahlung. Prozentual wurden von der Strahlungsenergie 26,4 % (Kollektorkreisnutzungsgrad) an den Pufferspeicher abgegeben.

Da die Pufferspeicherverluste von 14 MWh voll der Solaranlage angelastet werden (Puffer wäre ohne Solaranlage nicht erforderlich), beträgt die solare Nutzenergie 173 MWh. Daraus errechnet sich ein Systemnutzungsgrad von 24,5 %.

Bei einem Wärmeverbrauch im Netz von 695 MWh für Raumheizung, Trinkwassererwärmung, Trinkwarmwasserzirkulation (sofern diese in den Häusern vorhanden ist) und Netzverlusten errechnet sich ein solarer Deckungsanteil am Gesamtwärmeverbrauch von knapp 25 %. Da die Siedlung im Messzeitraum noch weiterhin ausgebaut wurde, und noch nicht alle geplanten 61 Einfamilienhäuser an das Netz angeschlossen sind, kann man davon ausgehen, dass der solare Deckungsanteil in Zukunft etwas niedriger liegen wird.

Ohne den Stromverbrauch der Motorklappen und des solarbedingten Anteils der DDC-Regelung beträgt die Arbeitszahl 64. Mit Berücksichtigung dieser Verbraucher liegt sie schätzungsweise um 60.

Die in den Puffer ein- und ausgehenden tatsächlich gemessenen Energiewerte lagen nicht bei den in Tabelle 3 angegebenen Werten sondern betragen:

Beladung Pufferspeicher QSP<sup>g</sup>: 192 MWh

Energie Kessel QHT<sup>g</sup>: 537 MWh

Energie Netz QNE<sup>g</sup>: 677 MWh

Der aus diesen Messwerten berechnete Energieverlust des Pufferspeichers ( $QSP^g + QHT^g - QNE^g$ ) erscheint uns jedoch mit 52 MWh (6,8 % des Energieeintrags durch den Kollektorkreis und den Kessel) unplausibel hoch, weil der unter praxisnahen Annahmen berechnete theoretische Speicherverlust nur rd. 14 MWh beträgt (berechnet mit den gemessenen Speichertemperaturen; Verlustbeiwerte für Rohrleitungsstutzen und die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung wurden berücksichtigt).

Der "gemessene" Wert erscheint uns auch deshalb ungewöhnlich hoch und nicht erklärbar, weil der Puffer in einem trockenen Raum steht und keine Durchfeuchtungen der 20 mm dicken Dämmung zu vermuten sind. Wie eine Überprüfung der Volumenstromzähler mit einem externen Auslesegerät und der Temperaturfühler durch Vergleich mit Thermometern und anderen Fühlern zeigte, liegt auch kein gravierender Messfehler vor.

Naheliegender scheint ein Messfehler im Bereich der üblichen Fehlertoleranzen von  $\pm 3$  % bei der Energiemessung zu sein. Da die Speicherverluste durch Subtraktion von – im Vergleich zum Pufferverlust – sehr großen Energiewerten berechnet werden (Formel s.o.), ergibt sich ein recht großer Fehlerbereich der Speicherverluste von rd. 94 MWh bis 10 MWh (12,6 % bis 1,4 % des Energieeintrags durch den Kollektorkreis und den Kessel). Da der theoretisch berechnete Wert von rd. 14 MWh

innerhalb der Fehlerbandbreite liegt und wir keinen Grund für erhöhte Speicherverluste sehen, gehen wir deshalb davon aus, dass der theoretisch ermittelte Wert eher den tatsächlichen Speicherverlusten entspricht als der aus Messwerten berechnete Wert von 52 MWh.

Damit bei 14 MWh Speicherverlust auch die Energiebilanz des Puffers aufgeht, wurden die in den Puffer eingehenden gemessenen Energien (Energie vom Kollektorkreis und vom Kessel;  $QSP^9$  und  $QHT^9$ ) um 2,8 % verringert und die austretende Energie des Nahwärmenetzes ( $QNE^9$ ) um 2,8 % erhöht. Obwohl der Energieeintrag vom Kollektorfeld verringert wurde, erhöht sich die solare Nutzenergie, weil bei den Speicherverlusten, die voll der Solaranlage angerechnet werden, der geringere berechnete Wert angesetzt wird. Durch diese Korrektur errechnet sich die solare Nutzenergie zu 173 MWh (s. Tabelle 3). Die aus Messwerten berechnete solare Nutzenergie hätte lediglich 140 MWh betragen (192 MWh - 52 MWh).

Abbildungen 9 und 10 zeigen die mittels der theoretischen Speicherverluste modifizierten Wochenmittelwerte des Systemnutzungsgrades und des solaren Deckungsanteils mit den wöchentlich gemittelten spezifischen Tagessummen der zugehörigen Energien. Der negative Systemnutzungsgrad während zwei Wochen im Dezember 2007 entsteht dadurch, dass in diesen Zeiten die Pufferverluste (theoretisch berechnet) größer sind als der Solarenergieeintrag. Der niedrige Systemnutzungsgrad im März/April 2008 (um 20 %) ist vor allem auf die erwähnten Probleme bei der Kollektorfelddurchströmung im Feld Ost des ehemaligen Schlachthofgebäudes zurückzuführen (bzw. den dadurch verursachten vorzeitigen Abschaltungen der Kollektorkreispumpe).

Der solare Deckungsanteil liegt in den Sommermonaten mehrere Wochen lang bei 100 %. In dieser Zeit wird das Nahwärmenetz nur mit Solarenergie betrieben, ohne dass konventionelle Energie benötigt wird. Der Gaskessel bleibt dann abgeschaltet. Von Mitte November bis Ende Februar liegt der solare Deckungsanteil dagegen um 0 %.

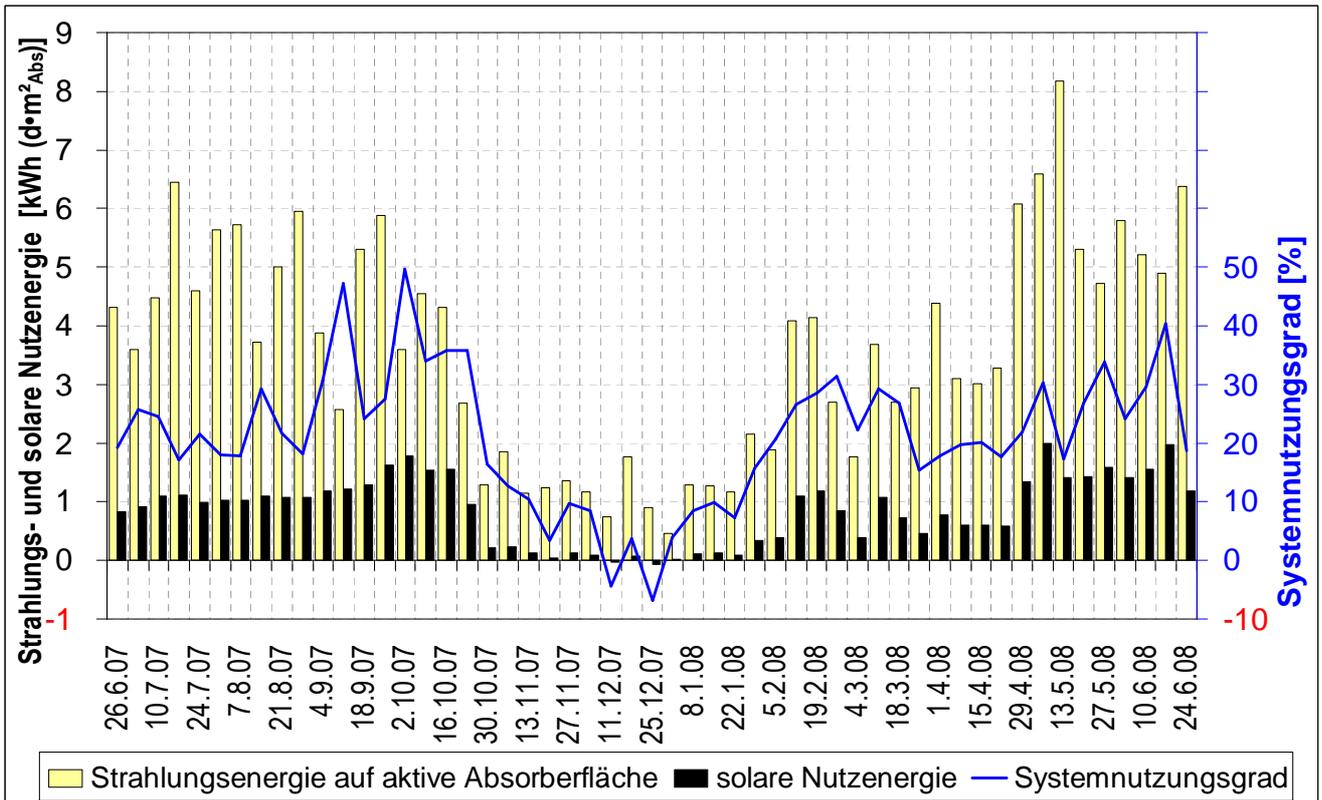


Abbildung 9: Wöchentlich gemittelte spezifische Tagessummen der Strahlungsenergie und solaren Nutzenergie und Wochenmittelwerte des Systemnutzungsgrades (Messperiode 2) (Werte wurden anhand der theoretisch berechneten Speicherverluste korrigiert)

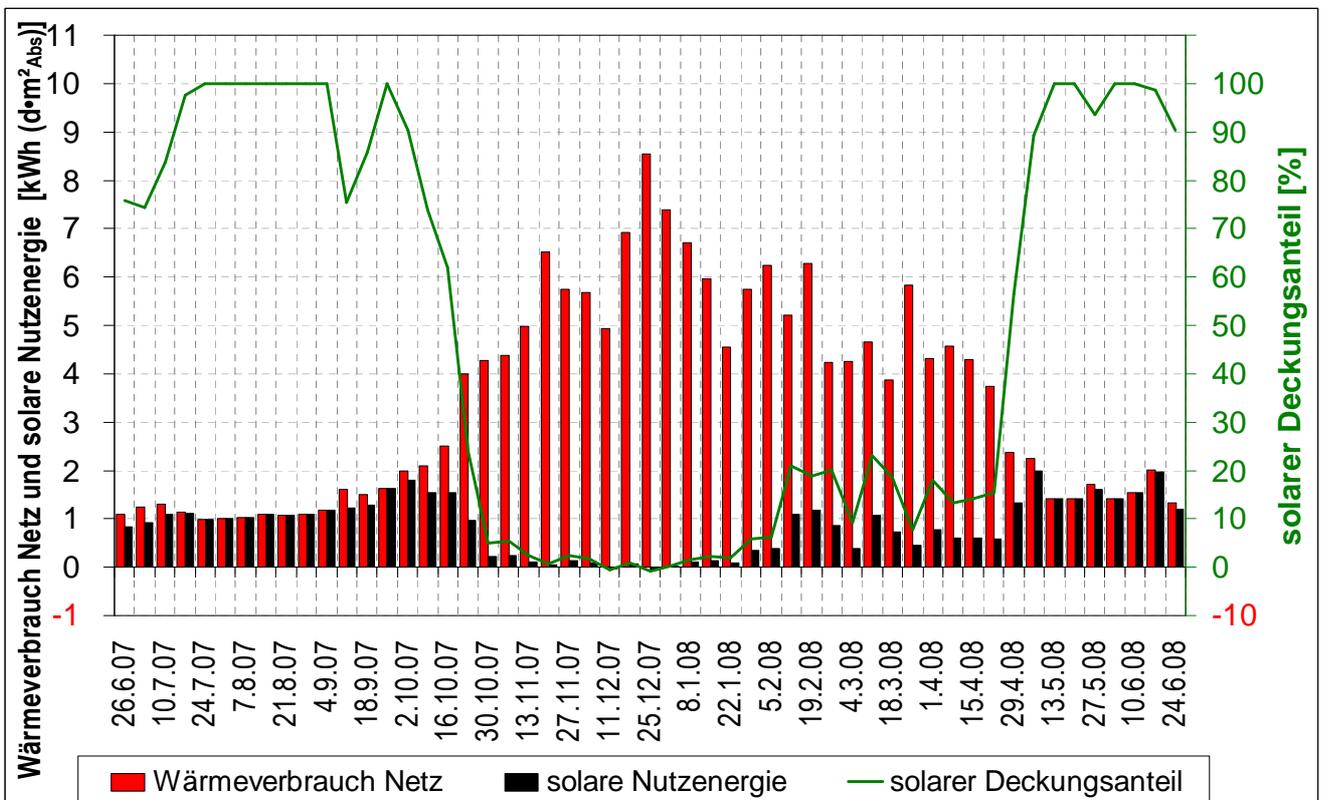


Abbildung 10: Wöchentlich gemittelte spezifische Tagessummen der solaren Nutzenergie und des Netzverbrauches und Wochenmittelwerte des solaren Deckungsanteils (Messperiode 2) (Werte wurden anhand der theoretisch berechneten Speicherverluste korrigiert)

## 6.2 Messperiode 3 mit 544,8 m<sup>2</sup><sub>Abs</sub> (11.7.2008 bis 10.7.2009; 365 Tage)

Tabelle 4 zeigt eine Zusammenfassung der wichtigsten Messdaten und Systemkennzahlen der dritten Messperiode.

|    |                                                                                                                                     |                 |         |                                                                                         |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Gesamtstrahlungsenergie auf die aktive Absorberfläche (544,8 m <sup>2</sup> )                                                       | EITK            | 695 MWh | 1275 kWh/m <sup>2</sup><br>3,5 kWh/m <sup>2</sup> pro Tag                               |
| 2  | Energie Beladung Pufferspeicher                                                                                                     | QSP             | 201 MWh | 369 kWh/m <sup>2</sup> <sub>Abs</sub><br>1,0 kWh/m <sup>2</sup> <sub>Abs</sub> pro Tag  |
| 3  | Energie vom Gaskessel in Pufferspeicher                                                                                             | QHT             | 644 MWh |                                                                                         |
| 4  | Speicherverluste (absolut)                                                                                                          | QvPS            | 14 MWh  |                                                                                         |
| 5  | Speicherverluste (prozentual vom Gesamtenergieeintrag Kollektorfeld und Kessel)                                                     | vPS             | 1,7 %   |                                                                                         |
| 6  | Energie Netzverbrauch für<br>– Raumheizung<br>– Trinkwassererwärmung<br>– Trinkwasserzirkulation sofern vorhanden<br>– Netzverluste | QNE             | 831 MWh |                                                                                         |
| 7  | Nutzenergie Solarsystem (QNE – QHT)                                                                                                 | QNutz           | 187 MWh | 342 kWh/m <sup>2</sup> <sub>Abs</sub><br>0,94 kWh/m <sup>2</sup> <sub>Abs</sub> pro Tag |
| 8  | Kollektorkreisnutzungsgrad<br>100 • QSP / EITK                                                                                      | g <sub>KB</sub> | 28,9 %  |                                                                                         |
| 9  | Systemnutzungsgrad<br>100 • QNutz / EITK                                                                                            | g <sub>SB</sub> | 26,8 %  |                                                                                         |
| 10 | solarer Deckungsanteil<br>100 • QNutz / QNE                                                                                         | D <sub>SB</sub> | 22,4 %  |                                                                                         |
| 11 | Stromverbrauch Kollektor-, Lade- und Nachspeisepumpe                                                                                | NST             | 2,4 MWh |                                                                                         |
| 12 | Arbeitszahl Solarsystem (ohne Stromverbrauch der Motorklappen und des solarbedingten Anteils der DDC-Regelung)<br>QNutz / NST       | A               | 78      |                                                                                         |

*Tabelle 4: Messergebnisse und Systemkennzahlen für den Zeitraum 11.7.2008 bis 10.7.2009 (365 Tage) bei realem Betrieb*

Bei einer im Vergleich zur 2. Messperiode etwas geringeren Gesamtstrahlungsenergie auf die aktive Absorberfläche wurden im betrachteten Messzeitraum 201 MWh (QSP) und damit 14 MWh mehr als in Messperiode 2 in den Pufferspeicher geladen. Dieser Anstieg ist im wesentlichen Folge der deutlichen Steigerung im Netzverbrauch auf nun 831 MWh. Der im Vergleich zur vorigen Messperiode um ca. 20 % gestiegene Netzverbrauch wird dadurch begründet, dass die Siedlung während des Messzeitraums noch weiter ausgebaut wurde. Der Anschluss aller geplanten Häuser an das Nahwärmenetz erfolgte Mitte September 2009. Der höhere Netzverbrauch führte zu einer besseren Auslastung der Solaranlage und damit zu einem gegenüber dem vorigen Messzeitraum um 2,3 % auf 26,8 % (relative Steigerung: 9,4 %) gestiegenen Systemnutzungsgrad. Im Gegenzug ist die solare Deckungsrate durch den deutlichen Anstieg im Netzverbrauch von 24,9 % auf 22,4 % gefallen. Positiv anzumerken ist, dass auch die Netzurücklauftemperaturen weiter gefallen sind und im Vergleich zur vorigen Messperiode im Sommerhalbjahr um ca. 4 K, im Winterhalbjahr um ca. 1 K niedriger liegen.

## 7 Garantierter solarer Ertrag

Das solare Garantieverfahren im Rahmen des Programms Solarthermie2000plus sieht vor, dass der Bieter für das Solarsystem unter Zugrundelegung vorgegebener Randbedingungen (Plan-Betriebsbedingungen) einen Energieertrag garantiert. Die Randbedingungen (Wetter, Energieverbrauch, Netzvor- und rücklauftemperatur) wurden bei dieser Anlage vom Planungsbüro vorgegeben. Der Kollektorhersteller, der auch die Kollektorfelder installiert hat, hat einen jährlichen Kollektorkreisertrag von 191.335 kWh bei 546,3 m<sup>2</sup><sub>Abs</sub> angegeben. Der Wert wurde von uns auf 190.810 kWh für die tatsächlich installierte Fläche von 544,8 m<sup>2</sup><sub>Abs</sub> angepasst (s. Zeile 1 der Tabelle 5).

Unter solarem Ertrag (Abkürzung: QSP) wird im Folgenden die Energie verstanden, die von der Solaranlage in den Puffer geladen wird. Da die realen Betriebsbedingungen während der Messphase nicht mit denen der bei der Auslegung festgelegten Plan-Betriebsbedingungen übereinstimmen, wird der vom Anbieter garantierte Ertrag unter Berücksichtigung der realen Betriebsbedingungen mit Hilfe eines geeigneten Simulationsprogrammes (hier TRNSYS) angepasst. Verschlechterungen der realen Betriebsbedingungen (schlechteres Wetter, geringerer Verbrauch, höhere Netzzrücklauftemperatur) oder Verbesserungen (besseres Wetter, höherer Verbrauch, geringere Netzzrücklauftemperatur) gegenüber den vorgegebenen Werten werden so dem Anbieter weder angelastet noch gutgeschrieben.

Im Folgenden wird das Ablaufschema mit den wichtigsten fünf Schritten zur Überprüfung der Garantiefüllung kurz erklärt. In Tabelle 5 ist das Schema durch die entsprechenden Zahlen ergänzt. Ausführliche Berechnungsblätter befinden sich in den Tabelle 6 bis Tabelle 8.

### **a) Simulationsrechnung mit Plan-Betriebsbedingungen gemäß Leistungsverzeichnis** (Zeile 2 der Tabelle 5)

Zunächst wird die Anlage von der betreuenden Stelle (hier: ZfS) in einem Simulationsprogramm (z. B. T\*SOL oder TRNSYS) abgebildet. Mit dieser Abbildung wird ein wahrscheinlicher Ertrag unter den vorgegebenen Plan-Betriebsbedingungen gemäß Leistungsverzeichnis berechnet. Bei den späteren Nachrechnungen auf der Basis realer Betriebsbedingungen (vgl. unten) wird bei der betreuenden Stelle dieselbe Abbildung weiterbenutzt.

### **b) Ermittlung des "Korrekturfaktors" (Zeile 3 der Tabelle 5)**

Da die Berechnungen des Anbieters und die der betreuenden Stelle in Grenzen voneinander abweichen können (z.B. durch die Benutzung unterschiedlicher Simulationsprogramme oder Unterschiede in der Systemabbildung innerhalb der Simulation), wird zunächst ein Korrekturfaktor gebildet aus dem Verhältnis der Garantie des Anbieters zum Simulationsergebnis der betreuenden Stelle. Der Korrekturfaktor beinhaltet die Abweichung des Simulationsergebnisses unter Plan-Betriebsbedingungen zum Garantiertrag unter Plan-Betriebsbedingungen.

### **c) Simulationsrechnung mit realen Betriebsbedingungen (Zeile 4 der Tabelle 5)**

Die Betriebsbedingungen während einer Messphase stimmen natürlicherweise nicht mit den in den Ausschreibungsunterlagen festgelegten Randbedingungen überein. Daher wird in einem nächsten Schritt von der betreuenden Stelle mit Hilfe des zuvor bereits benutzten Simulationsprogramms und

Abbildungsmodells der Systemertrag unter den realen Wetter- und Verbrauchsbedingungen (Eingabe von Messwerten in das Simulationsprogramm) neu berechnet. Auswirkungen durch Verschlechterungen der realen Betriebsbedingungen (geringere Einstrahlung, niedrigerer Verbrauch) oder Verbesserungen (höhere Einstrahlung, höherer Verbrauch) gegenüber den Plan-Betriebsbedingungen werden so durch das Simulationsergebnis quantifiziert. Im vorliegenden Fall liegt das Simulationsergebnis bei realen Betriebsbedingungen über dem Ergebnis bei Plan-Betriebsbedingungen.

**d) Berechnung des Garantiertrags unter realen Betriebsbedingungen  
(korrigierter Garantiertrag) (Zeile 5 der Tabelle 5)**

Um den auf die realen Betriebsbedingungen umgerechneten Garantiertrag (korrigierter Garantiertrag) zu erhalten, wird das Simulationsergebnis (Zeile 4 der Tabelle 5) mit dem in Zeile 3 ermittelten Korrekturfaktor multipliziert. Diesen korrigierten Garantiertrag sollte die Solaranlage unter Berücksichtigung der real vorliegenden Betriebsbedingungen im betreffenden Messjahr erreichen.

**e) Vergleich von gemessenem Ertrag und korrigiertem Garantiertrag  
(Zeile 6 und 7 der Tabelle 5)**

Zuletzt wird der korrigierte Garantiertrag mit den Messergebnissen verglichen. Kurze Betriebsausfälle oder Minderleistungen der Solaranlage, die nicht auf grundsätzlichen System- oder Installationsfehlern beruhen, werden durch Interpolation mit wahrscheinlichen Messdaten gefüllt. Sie wirken sich also nicht negativ auf das Messergebnis bzw. die Garantierechnung aus. So wurde der Solarertrag für die Monate März und April 2008 hochgerechnet, da wir davon ausgehen, dass die Minderleistung durch die ungleiche Durchströmung der Kollektorfelder kein grundsätzlicher, sondern ein behebbarer Systemmangel ist. Der Quotient aus ggf. korrigiertem Messergebnis (Zeile 6) und korrigiertem Garantiertrag liefert den Anteil am garantierten Ertrag, den das Solarsystem erbracht hat (Zeile 7). Dieser Anteil muss bei mindestens 90 % liegen, wenn die Bietergarantie als erfüllt angesehen werden soll. Durch die Einhaltung von nur 90 % werden Messfehler oder Fehler innerhalb der Simulation zugestanden. Im vorliegenden Fall wird deshalb auch der gemessene Kollektorkreisenertrag QSP<sup>9</sup> von 192 MWh für die Garantierechnung angesetzt (und nicht der anhand der theoretisch berechneten Speicherverluste geänderte Wert von 187 MWh), um mögliche Messfehler nicht zweimal zu berücksichtigen. Außerdem war die Korrektur des Messwertes QSP<sup>9</sup> nur deshalb nötig, weil der "gemessene" Speicherverlust zu hoch war. Hätte man die Ertragsmessung nur auf den Kollektorkreis beschränkt, wäre eine Anpassung des Messwertes QSP<sup>9</sup> ohnehin nicht erfolgt.

Bei Werten unter 90 % ist die Garantie nicht erfüllt, und der Bieter muss Nachbesserungen vornehmen oder es wird eine entsprechende Rückzahlung gefordert.

| Zeile                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Wert                                                                                                   | Jahresertrag   | Systemnutzungsgrad   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------|
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Angabe (Garantie) des Anbieters aufgrund der Plan-Betriebsbedingungen                                  | 190.810 kWh    | 30,70 % <sup>1</sup> |
| 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Ergebnis ZfS-Simulation mit Plan-Betriebsbedingungen                                                   | 168.140 kWh    | 27,05 %              |
| 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Korrekturfaktor Garantie zu ZfS-Simulation [Zeile 1 / Zeile 2]                                         | 1,1348         | 1,1348               |
| 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Ergebnis ZfS-Simulation mit <b>realen</b> Betriebsbeding.                                              | 199.738 kWh    | 29,19 %              |
| 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Korrigierte Garantie bei realen Betriebsbeding. [Ergebnis ZfS-Sim. Real (Zeile 4) * Faktor in Zeile 3] | 226.668 kWh    | 33,13 %              |
| 6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Korrigiertes Messergebnis 21.06.07 bis 19.06.08 (Annahme: kein Defekt <sup>2</sup> )                   | 199.000 kWh    | 28,10 %              |
| <b>7</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <b>Verhältnis korrigiertes Messergebnis (Zeile 6) zu korrigierter Garantie (Zeile 5)</b>               | <b>87,79 %</b> | <b>84,83 %</b>       |
| <sup>1</sup> Wird berechnet als Quotient aus dem garantierten Ertrag und dem vom Anbieter in das Datenblatt " <b>Jahresnutzenergieertrag der Solaranlage</b> " eingetragenen Wert für die Strahlung auf die geneigte Kollektorfläche (ergibt sich aus dem Simulationsprogramm und den Daten für die horizontale Strahlung).<br><sup>2</sup> Im Zeitraum April/Mai 2008 war eine ungleiche Durchströmung der Kollektorfelder vorhanden, was sich negativ auf den Solarertrag auswirkte. Da wir bisher davon ausgehen, dass dies keine systembehafte Betriebsstörung war, wurde dieser Zeitraum für eine korrigierte Ertragsberechnung so abgeschätzt, als sei die Anlage regulär gelaufen. Diese Vorgehensweise ist in dem Rechengang zur Bestimmung der Garantieerfüllung entsprechend vorgegeben. Der gemessene Kollektorkreisenertrag von 192 MWh wird so auf 199 MWh korrigiert (Erhöhung um ca. 3,6 %). |                                                                                                        |                |                      |

Tabelle 5: Prinzipielles Ablaufschema zur Bestimmung der Garantieerfüllung

Die beschriebenen Rechnungen werden für zwei Werte parallel durchgeführt, einmal für den Ertrag (in kWh) und einmal für den Systemnutzungsgrad. Da in der Simulation die Strahlung auf die horizontale Fläche eingegeben werden muss und diese dann intern auf die geneigte Fläche umgerechnet wird, können bezüglich der Strahlung auf die geneigte Fläche geringe Abweichungen zwischen dem Simulationsergebnis und der Messung entstehen, die sich auf den Nutzungsgrad auswirken. Zu Gunsten des Bieters wurde festgelegt, dass nur einer der beiden Werte (Energie oder Nutzungsgrad) die korrigierte Garantie zu mindestens 90 % erreichen muss.

Im vorliegenden Fall wurden beide Bedingungen mit Werten von 87,79 % (Ertrag) und 84,83 % (Systemnutzungsgrad) unterschritten.

Eine mögliche Potenzialsteigerung der Solaranlage wurde seitens der ZfS in der Regelung der solaren Pufferspeicherbeladung gesehen. Die Pufferbeladepumpe P5 wurde in Messperiode 2 nur mit einem Mindestvolumenstrom von 4.100 l/h betrieben, während der Kollektorkreis im Mittel mit 8.000 l/h bzw. seit Neueinstellung im April 2008 mit 10.000 l/h (Sollwert) betrieben wurde. Dies führt insbesondere in den strahlungsschwächeren Monaten zu erhöhten Kollektorkreisverlusten, da der Kollektorkreisrücklauf durch die (gegenüber der Primärseite) niedrigere Durchströmung auf der Sekundärseite nicht optimal abgekühlt wird.

In einer weiteren Simulationsrechnung wurde der Mindestvolumenstrom von P5 auf 7.200 l/h angehoben. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 dargestellt. In der Simulation mit realem Wetter und realen

Verbrauchsdaten gibt der Kollektorkreis jährlich 9.800 kWh mehr an den Puffer ab. Geht man davon aus, dass sich die reale Anlage ähnlich verhält, würde ein Solarertrag von 208.800 kWh erreicht und der garantierte Ertrag wäre zu 91,84 % erfüllt. Wir empfehlen daher, die Regelung so umzustellen, dass der Mindestvolumenstrom von P5 bei ca. 90 % des Volumenstroms im Kollektorkreis liegt. Dies wurde in der Messperiode 3 umgesetzt. Jedoch hat sich der simulierte Ertragsanstieg in der realen Anlage nicht proportional niedergeschlagen. Die erreichte Energie innerhalb der Garantierechnung wurde zwar um 0,7 Prozent von 87,79 % auf 88,5 % verbessert, verfehlt aber nach wie vor den Mindestwert von 90 % (s. Tabelle 8).

In Zusammenhang der Garantierfüllung muss allerdings erwähnt werden, dass der Kollektorhersteller möglicherweise irrtümlich einen zu hohen Ertrag garantiert hat. Er hat nicht den vom Planer berechneten Kollektorkreisertrag bei 25° und 30° geneigten Teilfeldern von 180.000 kWh angegeben, sondern den Kollektorfelderertrag (ohne Berücksichtigung der Kollektorkreisverrohrung) von 190.810 kWh eines vollständig um 30° geneigten Feldes. Bei Berücksichtigung eines Ertrags von 180.000 kWh wäre der garantierte Ertrag bereits in Messperiode 2 zu 93 % erfüllt worden.

| <b>Nachrechnung des garantierten solaren Energieertrages</b>                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                               |                         |                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| <b>Objekt:</b>                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Speyer Alter Schlachthof</b>                                                                                                                               |                         |                                                                 |
| <b>2. Messperiode mit 544,8 m<sup>2</sup> Absorberfläche</b>                                                                                                                                                                                                            | <b>21.06.2007 - 19.06.2008</b>                                                                                                                                |                         |                                                                 |
| <b>Berechnungen durchgeführt von:</b>                                                                                                                                                                                                                                   | <b>ZfS- Rationelle Energietechnik GmbH</b>                                                                                                                    |                         |                                                                 |
| <b>P5: variabel 4.100/13.200 l/h</b>                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                               |                         |                                                                 |
| <b>Simulation mit TRNSYS 15</b>                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                               |                         |                                                                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>Einheit</b>                                                                                                                                                | <b>Wert</b>             | <b>Anmerkungen</b>                                              |
| <b>Garantie des Erstellers anhand der in den Randbedingungen zum LV vorgegebenen Werte</b>                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                               |                         |                                                                 |
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                       | Wärmeabgabe ins Netz                                                                                                                                          | MWh                     | 757 vorgegeben                                                  |
| 2                                                                                                                                                                                                                                                                       | Gesamtstrahlungsenergie horizontal                                                                                                                            | kWh/(m <sup>2</sup> *a) | 1.038 vorgegeben (TRNSYS Frankfurt)                             |
| 3                                                                                                                                                                                                                                                                       | Netzurücklauftemperatur                                                                                                                                       | °C                      | 32,0 vorgegeben                                                 |
| 4                                                                                                                                                                                                                                                                       | Gesamtstrahlungsenergie auf aktive Absorberfläche                                                                                                             | kWh/a                   | 621.544 <b>vom Bieter kein Wert bekannt</b>                     |
| 5                                                                                                                                                                                                                                                                       | garantierter Ertrag (QSP <sup>gar</sup> )                                                                                                                     | kWh/a                   | 190.810 vom Bieter garantiert                                   |
| 6                                                                                                                                                                                                                                                                       | garantierter Sytemnutzungsgrad (g <sub>KB</sub> <sup>gar</sup> )                                                                                              | %                       | 30,70 gar. eta=(Z5/Z4)*100%                                     |
| 7                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                               |                         |                                                                 |
| <b>8 Ergebnis mit TRNSYS unter fiktiven Betriebsbedingungen (vorgegebene Werte aus Randbedingung)</b>                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                               |                         |                                                                 |
| 9                                                                                                                                                                                                                                                                       | Wärmeabgabe ins Netz                                                                                                                                          | MWh                     | 757 vorgegeben                                                  |
| 10                                                                                                                                                                                                                                                                      | Gesamtstrahlungsenergie horizontal                                                                                                                            | kWh/(m <sup>2</sup> *a) | 1.038 vorgegeben (TRNSYS Frankfurt)                             |
| 11                                                                                                                                                                                                                                                                      | Netzurücklauftemperatur                                                                                                                                       | °C                      | 32,0 vorgegeben                                                 |
| 12                                                                                                                                                                                                                                                                      | Strahlungsenergie auf aktive Absorberfläche                                                                                                                   | kWh/a                   | 621.544 mit TRNSYS berechnet                                    |
| 13                                                                                                                                                                                                                                                                      | Ertrag (QSP <sup>TRNSYS,fiktiv</sup> )                                                                                                                        | kWh/a                   | 168.140 mit TRNSYS berechnet                                    |
| 14                                                                                                                                                                                                                                                                      | Kollektorkreisnutzungsgrad (g <sub>KB</sub> <sup>TRNSYS,fiktiv</sup> )                                                                                        | %                       | 27,05 g <sub>KB</sub> <sup>TRNSYS,fiktiv</sup> = (A13/A12)*100% |
| 15                                                                                                                                                                                                                                                                      | Faktor Ertrag                                                                                                                                                 |                         | 1,1348 Faktor Ertrag = Z5/Z13                                   |
| 16                                                                                                                                                                                                                                                                      | Faktor Kollektorkreisnutzungsgrad (Faktor g <sub>KB</sub> )                                                                                                   |                         | 1,1348 Faktor g <sub>KB</sub> = Z6/Z14                          |
| 17                                                                                                                                                                                                                                                                      | Der garantierte Ertrag des Erstellers (QNutz <sup>gar</sup> ) und der garantierte Kollektorkreisnutzungsgrad (g <sub>KB</sub> <sup>gar</sup> ) weichen um die |                         |                                                                 |
| 18                                                                                                                                                                                                                                                                      | o.g. Faktoren von der TRNSYS-Nachrechnung der ZfS ab. Um diese Faktoren hat der Ersteller den Ertrag und den                                                  |                         |                                                                 |
| 19                                                                                                                                                                                                                                                                      | Kollektorkreisnutzungsgrad der Solaranlage (verglichen mit TRNSYS) abweichend bewertet.                                                                       |                         |                                                                 |
| 20                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                               |                         |                                                                 |
| <b>21 Ergebnis mit TRNSYS unter realen Betriebsbedingungen (Messwerte) im o.g. Zeitraum</b>                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                               |                         |                                                                 |
| 22                                                                                                                                                                                                                                                                      | Wärmeabgabe ins Netz                                                                                                                                          | MWh                     | 691 simuliert                                                   |
| 23                                                                                                                                                                                                                                                                      | spezifische Gesamtstrahlungsenergie horizontal                                                                                                                | kWh/(m <sup>2</sup> *a) | 1.071 gemessen                                                  |
| 24                                                                                                                                                                                                                                                                      | Netzurücklauftemperatur, repräsentativ für Februar/Juli                                                                                                       | °C                      | 33°C/41°C gemessen                                              |
| 25                                                                                                                                                                                                                                                                      | Gesamtstrahlungsenergie auf aktive Absorberfläche                                                                                                             | kWh/a                   | 684.169 mit TRNSYS berechnet                                    |
| 26                                                                                                                                                                                                                                                                      | Ertrag (QSP <sup>TRNSYS,real</sup> )                                                                                                                          | kWh/a                   | 199.738 mit TRNSYS berechnet                                    |
| 27                                                                                                                                                                                                                                                                      | Kollektorkreisnutzungsgrad (g <sub>KB</sub> <sup>TRNSYS,real</sup> )                                                                                          | %                       | 29,19 g <sub>KB</sub> <sup>TRNSYS,real</sup> = (Z26/Z25)*100%   |
| 28                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                               |                         |                                                                 |
| <b>29 Umrechnung der TRNSYS-Ergebnisse unter realen Betriebsbedingungen mit Faktoren</b>                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                               |                         |                                                                 |
| 30                                                                                                                                                                                                                                                                      | Korrigierter Ertrag bei realem Betrieb (QSP <sup>kor</sup> )                                                                                                  | kWh/a                   | 226.668 korr. Ertrag=Z26*Z15                                    |
| 31                                                                                                                                                                                                                                                                      | Korrigierter Kollektorkreisnutzungsgrad bei realem Betrieb (g <sub>KB</sub> <sup>kor</sup> )                                                                  | %                       | 33,13 korr. eta=Z27*Z16                                         |
| 32                                                                                                                                                                                                                                                                      | Das Ergebnis aus der TRNSYS-Rechnung unter realen Betriebsbedingungen wird mit den o.a. Faktoren umgerechnet,                                                 |                         |                                                                 |
| 33                                                                                                                                                                                                                                                                      | um so den Unterschied zwischen der Bietergarantie und dem Ergebnis mit TRNSYS unter fiktiven Betriebsbedingungen                                              |                         |                                                                 |
| 34                                                                                                                                                                                                                                                                      | in die Bewertung der Messergebnisse einfließen lassen zu können.                                                                                              |                         |                                                                 |
| 35                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                               |                         |                                                                 |
| <b>36 Messergebnisse unter realen Betriebsbedingungen im o.g. Zeitraum</b>                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                               |                         |                                                                 |
| 37                                                                                                                                                                                                                                                                      | Wärmeabgabe ins Netz                                                                                                                                          | MWh                     | 676.800 gemessen                                                |
| 38                                                                                                                                                                                                                                                                      | spezifische Gesamtstrahlungsenergie horizontal                                                                                                                | kWh/(m <sup>2</sup> *a) | 1.071 gemessen                                                  |
| 39                                                                                                                                                                                                                                                                      | Gesamtstrahlungsenergie auf aktive Absorberfl. bei 30° Neigung                                                                                                | kWh/a                   | 708.100 gemessen                                                |
| 40                                                                                                                                                                                                                                                                      | gemessener Ertrag (QSP <sup>g</sup> )_korr (192.000+7.000)                                                                                                    | kWh/a                   | 199.000 gemessen                                                |
| 41                                                                                                                                                                                                                                                                      | gemessener Kollektorkreisnutzungsgrad (g <sub>KB</sub> <sup>g</sup> )                                                                                         | %                       | 28,10 gem. eta=(Z40/Z39)*100%                                   |
| 42                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                               |                         |                                                                 |
| <b>43 Ergebnis:</b>                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                               |                         |                                                                 |
| 44                                                                                                                                                                                                                                                                      | erreich. Energie in % von umgerechneten TRNSYS-Ergebnis                                                                                                       | %                       | 87,79 erreichte Energie=(Z40/Z30)*100%                          |
| 45                                                                                                                                                                                                                                                                      | erreich. eta in % vom umgerechneten TRNSYS-Ergebnis                                                                                                           | %                       | 84,83 erreichte eta=(Z41/Z31)*100%                              |
| 46                                                                                                                                                                                                                                                                      | <b>Garantie</b>                                                                                                                                               |                         | <b>nicht erfüllt</b>                                            |
| Die Abweichungen zwischen den Prozentsätzen von erreichtem Ertrag und erreichtem Kollektorkreisnutzungsgrad (Zeile 44, 45) sind begründet durch die Umrechnung mit TRNSYS von der gemessenen horizontalen Strahlung in die (mit Umrechnungsfehlern behaftete) Strahlung |                                                                                                                                                               |                         |                                                                 |
| Liegt einer der beiden oben angegebenen Prozentsätze über 90 %, so gilt die Garantie als erbracht.                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                               |                         |                                                                 |

Tabelle 6: Berechnungsblatt zum Garantieverfahren mit bisheriger Regelung

| <b>Nachrechnung des garantierten solaren Energieertrages</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                         |                         |                                                                 |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| <b>Objekt:</b>                                               | <b>Speyer Alter Schlachthof</b>                                                                                                                                                                                                                                         |                         |                                                                 |
| <b>2. Messperiode mit 544,8 m<sup>2</sup> Absorberfläche</b> | <b>21.06.2007 - 19.06.2008</b>                                                                                                                                                                                                                                          |                         |                                                                 |
| <b>Berechnungen durchgeführt von:</b>                        | <b>ZfS- Rationelle Energietechnik GmbH</b>                                                                                                                                                                                                                              |                         |                                                                 |
| <b>P5: variabel 7.200/13.200 l/h</b>                         |                                                                                                                                                                                                                                                                         |                         |                                                                 |
| <b>Simulation mit TRNSYS 15</b>                              |                                                                                                                                                                                                                                                                         |                         |                                                                 |
|                                                              | <b>Einheit</b>                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Wert</b>             | <b>Anmerkungen</b>                                              |
| <b>Z</b>                                                     | <b>Garantie des Erstellers anhand der in den Randbedingungen zum LV vorgegebenen Werte</b>                                                                                                                                                                              |                         |                                                                 |
| 1                                                            | Wärmeabgabe ins Netz                                                                                                                                                                                                                                                    | MWh                     | 757 vorgegeben                                                  |
| 2                                                            | Gesamtstrahlungsenergie horizontal                                                                                                                                                                                                                                      | kWh/(m <sup>2</sup> *a) | 1.038 vorgegeben (TRNSYS Frankfurt)                             |
| 3                                                            | Netzurücklauftemperatur                                                                                                                                                                                                                                                 | °C                      | 32,0 vorgegeben                                                 |
| 4                                                            | Gesamtstrahlungsenergie auf aktive Absorberfläche                                                                                                                                                                                                                       | kWh/a                   | 621.544 vom Bieter kein Wert bekannt                            |
| 5                                                            | garantierter Ertrag (QSP <sup>gar</sup> )                                                                                                                                                                                                                               | kWh/a                   | 190.810 vom Bieter garantiert                                   |
| 6                                                            | garantierter Kollektorkreisnutzungsgrad (g <sub>KB</sub> <sup>gar</sup> )                                                                                                                                                                                               | %                       | 30,70 gar. eta=(Z5/Z4)*100%                                     |
| 7                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                         |                         |                                                                 |
| <b>8</b>                                                     | <b>Ergebnis mit TRNSYS unter fiktiven Betriebsbedingungen (vorgegebene Werte aus Randbedingung)</b>                                                                                                                                                                     |                         |                                                                 |
| 9                                                            | Wärmeabgabe ins Netz                                                                                                                                                                                                                                                    | MWh                     | 757 vorgegeben                                                  |
| 10                                                           | Gesamtstrahlungsenergie horizontal                                                                                                                                                                                                                                      | kWh/(m <sup>2</sup> *a) | 1.038 vorgegeben (TRNSYS Frankfurt)                             |
| 11                                                           | Netzurücklauftemperatur                                                                                                                                                                                                                                                 | °C                      | 32,0 vorgegeben                                                 |
| 12                                                           | Strahlungsenergie auf aktive Absorberfläche                                                                                                                                                                                                                             | kWh/a                   | 621.544 mit TRNSYS berechnet                                    |
| 13                                                           | Ertrag (QSP <sup>TRNSYS,fiktiv</sup> )                                                                                                                                                                                                                                  | kWh/a                   | 175.866 mit TRNSYS berechnet                                    |
| 14                                                           | Kollektorkreisnutzungsgrad (g <sub>KB</sub> <sup>TRNSYS,fiktiv</sup> )                                                                                                                                                                                                  | %                       | 28,30 g <sub>KB</sub> <sup>TRNSYS,fiktiv</sup> = (Z13/Z12)*100% |
| 15                                                           | Faktor Ertrag                                                                                                                                                                                                                                                           |                         | 1,0850 Faktor Ertrag = Z5/Z13                                   |
| 16                                                           | Faktor Kollektorkreisnutzungsgrad (Faktor g <sub>KB</sub> )                                                                                                                                                                                                             |                         | 1,0850 Faktor g <sub>KB</sub> = Z6/Z14                          |
| 17                                                           | Der garantierte Ertrag des Erstellers (Q <sub>Nutzgar</sub> ) und der garantierte Kollektorkreisnutzungsgrad (g <sub>KB</sub> <sup>gar</sup> ) weichen um die                                                                                                           |                         |                                                                 |
| 18                                                           | o.g. Faktoren von der TRNSYS-Nachrechnung der ZfS ab. Um diese Faktoren hat der Ersteller den Ertrag und den                                                                                                                                                            |                         |                                                                 |
| 19                                                           | Kollektorkreisnutzungsgrad der Solaranlage (verglichen mit TRNSYS) abweichend bewertet.                                                                                                                                                                                 |                         |                                                                 |
| 20                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                         |                         |                                                                 |
| <b>21</b>                                                    | <b>Ergebnis mit TRNSYS unter realen Betriebsbedingungen (Messwerte) im o.g. Zeitraum</b>                                                                                                                                                                                |                         |                                                                 |
| 22                                                           | Wärmeabgabe ins Netz                                                                                                                                                                                                                                                    | MWh                     | 691 simuliert                                                   |
| 23                                                           | spezifische Gesamtstrahlungsenergie horizontal                                                                                                                                                                                                                          | kWh/(m <sup>2</sup> *a) | 1.071 gemessen                                                  |
| 24                                                           | Netzurücklauftemperatur, repräsentativ für Februar/Juli                                                                                                                                                                                                                 | °C                      | 33°C/41°C gemessen                                              |
| 25                                                           | Gesamtstrahlungsenergie auf aktive Absorberfläche                                                                                                                                                                                                                       | kWh/a                   | 684.169 mit TRNSYS berechnet                                    |
| 26                                                           | Ertrag (QSP <sup>TRNSYS,real</sup> )                                                                                                                                                                                                                                    | kWh/a                   | 209.553 mit TRNSYS berechnet                                    |
| 27                                                           | Kollektorkreisnutzungsgrad (g <sub>KB</sub> <sup>TRNSYS,real</sup> )                                                                                                                                                                                                    | %                       | 30,63 g <sub>KB</sub> <sup>TRNSYS,real</sup> = (Z26/Z25)*100%   |
| 28                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                         |                         |                                                                 |
| <b>29</b>                                                    | <b>Umrechnung der TRNSYS-Ergebnisse unter realen Betriebsbedingungen mit Faktoren</b>                                                                                                                                                                                   |                         |                                                                 |
| 30                                                           | Korrigierter Ertrag bei realem Betrieb (QSP <sup>kor</sup> )                                                                                                                                                                                                            | kWh/a                   | 227.359 korr. Ertrag=Z26*Z15                                    |
| 31                                                           | Korrigierter Kollektorkreisnutzungsgrad bei realem Betrieb (g <sub>KB</sub> <sup>kor</sup> )                                                                                                                                                                            | %                       | 33,23 korr. eta=Z27*Z16                                         |
| 32                                                           | Das Ergebnis aus der TRNSYS-Rechnung unter realen Betriebsbedingungen wird mit den o.a. Faktoren umgerechnet,                                                                                                                                                           |                         |                                                                 |
| 33                                                           | um so den Unterschied zwischen der Bietergarantie und dem Ergebnis mit TRNSYS unter fiktiven Betriebsbedingungen                                                                                                                                                        |                         |                                                                 |
| 34                                                           | in die Bewertung der Messergebnisse einfließen lassen zu können.                                                                                                                                                                                                        |                         |                                                                 |
| 35                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                         |                         |                                                                 |
| <b>36</b>                                                    | <b>Messergebnisse unter realen Betriebsbedingungen im o.g. Zeitraum</b>                                                                                                                                                                                                 |                         |                                                                 |
| 37                                                           | Wärmeabgabe ins Netz                                                                                                                                                                                                                                                    | MWh                     | 676.800 gemessen                                                |
| 38                                                           | spezifische Gesamtstrahlungsenergie horizontal                                                                                                                                                                                                                          | kWh/(m <sup>2</sup> *a) | 1.071 gemessen                                                  |
| 39                                                           | Gesamtstrahlungsenergie auf aktive Absorberfl. bei 30° Neigung                                                                                                                                                                                                          | kWh/a                   | 708.100 gemessen                                                |
| 40                                                           | <b>erwarteter Ertrag (QSP<sup>g</sup>)_kor (192.000+7.000+9.800)</b>                                                                                                                                                                                                    | kWh/a                   | 208.800 <b>Annahme</b>                                          |
| 41                                                           | gemessener Kollektorkreisnutzungsgrad (g <sub>SB</sub> <sup>g</sup> )                                                                                                                                                                                                   | %                       | 29,49 gem. eta=(Z40/Z39)*100%                                   |
| 42                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                         |                         |                                                                 |
| <b>43</b>                                                    | <b>Ergebnis:</b>                                                                                                                                                                                                                                                        |                         |                                                                 |
| 44                                                           | <b>erreich. Energie in % von umgerechneten TRNSYS-Ergebnis</b>                                                                                                                                                                                                          | %                       | <b>91,84</b> erreichte Energie=(Z40/Z30)*100%                   |
| 45                                                           | <b>erreich. eta in % vom umgerechneten TRNSYS-Ergebnis</b>                                                                                                                                                                                                              | %                       | <b>88,73</b> erreichte eta=(Z41/Z31)*100%                       |
| 46                                                           | <b>Garantie</b>                                                                                                                                                                                                                                                         |                         | <b>erfüllt</b>                                                  |
|                                                              | Die Abweichungen zwischen den Prozentsätzen von erreichtem Ertrag und erreichtem Kollektorkreisnutzungsgrad (Zeile 44, 45) sind begründet durch die Umrechnung mit TRNSYS von der gemessenen horizontalen Strahlung in die (mit Umrechnungsfehlern behaftete) Strahlung |                         |                                                                 |
|                                                              | Liegt einer der beiden oben angegebenen Prozentsätze über 90 %, so gilt die Garantie als erbracht.                                                                                                                                                                      |                         |                                                                 |

Tabelle 7: Berechnungsblatt zum Garantieverfahren mit geänderter Regelung

| Nachrechnung des garantierten solaren Energieertrages  |                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                     |               |                                                           |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------|
| Objekt:                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                         | Speyer Alter Schlachthof            |               |                                                           |
| 3. Messperiode mit 544,8 m <sup>2</sup> Absorberfläche |                                                                                                                                                                                                                                                                         | 11.07.2008 - 10.07.2009             |               |                                                           |
| Berechnungen durchgeführt von:                         |                                                                                                                                                                                                                                                                         | ZfS- Rationelle Energietechnik GmbH |               |                                                           |
| Simulation mit TRNSYS 15                               |                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                     |               |                                                           |
|                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                         | Einheit                             | Wert          | Anmerkungen                                               |
| Z                                                      | <b>Garantie des Erstellers anhand der in den Randbedingungen zum LV vorgegebenen Werte</b>                                                                                                                                                                              |                                     |               |                                                           |
| 1                                                      | Wärmeabgabe ins Netz                                                                                                                                                                                                                                                    | MWh                                 | 757           | vorgegeben                                                |
| 2                                                      | Gesamtstrahlungsenergie horizontal                                                                                                                                                                                                                                      | kWh/(m <sup>2</sup> *a)             | 1.038         | vorgegeben (TRNSYS Frankfurt)                             |
| 3                                                      | Netzurücklauftemperatur                                                                                                                                                                                                                                                 | °C                                  | 32,0          | vorgegeben                                                |
| 4                                                      | Gesamtstrahlungsenergie auf aktive Absorberfläche                                                                                                                                                                                                                       | kWh/a                               | 621.544       | vom Bieter kein Wert bekannt                              |
| 5                                                      | garantierter Ertrag (QSP <sup>gar</sup> )                                                                                                                                                                                                                               | kWh/a                               | 190.810       | vom Bieter garantiert                                     |
| 6                                                      | garantierter Kollektorkreisnutzungsgrad (g <sub>KB</sub> <sup>gar</sup> )                                                                                                                                                                                               | %                                   | 30,70         | gar. eta=(Z5/Z4)*100%                                     |
| 7                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                     |               |                                                           |
| 8                                                      | <b>Ergebnis mit TRNSYS unter fiktiven Betriebsbedingungen (vorgegebene Werte aus Randbedingung)</b>                                                                                                                                                                     |                                     |               |                                                           |
| 9                                                      | Wärmeabgabe ins Netz                                                                                                                                                                                                                                                    | MWh                                 | 757           | vorgegeben                                                |
| 10                                                     | Gesamtstrahlungsenergie horizontal                                                                                                                                                                                                                                      | kWh/(m <sup>2</sup> *a)             | 1.038         | vorgegeben (TRNSYS Frankfurt)                             |
| 11                                                     | Netzurücklauftemperatur                                                                                                                                                                                                                                                 | °C                                  | 32,0          | vorgegeben                                                |
| 12                                                     | Strahlungsenergie auf aktive Absorberfläche                                                                                                                                                                                                                             | kWh/a                               | 621.544       | mit TRNSYS berechnet                                      |
| 13                                                     | Ertrag (QSP <sup>TRNSYS,fiktiv</sup> )                                                                                                                                                                                                                                  | kWh/a                               | 176.550       | mit TRNSYS berechnet                                      |
| 14                                                     | Kollektorkreisnutzungsgrad (g <sub>KB</sub> <sup>TRNSYS,fiktiv</sup> )                                                                                                                                                                                                  | %                                   | 28,41         | g <sub>KB</sub> <sup>TRNSYS,fiktiv</sup> = (Z13/Z12)*100% |
| 15                                                     | Faktor Ertrag                                                                                                                                                                                                                                                           |                                     | 1,0808        | Faktor Ertrag = Z5/Z13                                    |
| 16                                                     | Faktor Kollektorkreisnutzungsgrad (Faktor g <sub>KB</sub> )                                                                                                                                                                                                             |                                     | 1,0808        | Faktor g <sub>KB</sub> = Z6/Z14                           |
| 17                                                     | Der garantierte Ertrag des Erstellers (Q <sub>Nutzgar</sub> ) und der garantierte Kollektorkreisnutzungsgrad (g <sub>KB</sub> <sup>gar</sup> ) weichen um die                                                                                                           |                                     |               |                                                           |
| 18                                                     | o.g. Faktoren von der TRNSYS-Nachrechnung der ZfS ab. Um diese Faktoren hat der Ersteller den Ertrag und den                                                                                                                                                            |                                     |               |                                                           |
| 19                                                     | Kollektorkreisnutzungsgrad der Solaranlage (verglichen mit TRNSYS) abweichend bewertet.                                                                                                                                                                                 |                                     |               |                                                           |
| 20                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                     |               |                                                           |
| 21                                                     | <b>Ergebnis mit TRNSYS unter realen Betriebsbedingungen (Messwerte) im o.g. Zeitraum</b>                                                                                                                                                                                |                                     |               |                                                           |
| 22                                                     | Wärmeabgabe ins Netz                                                                                                                                                                                                                                                    | MWh                                 | 815           | simuliert                                                 |
| 23                                                     | spezifische Gesamtstrahlungsenergie horizontal                                                                                                                                                                                                                          | kWh/(m <sup>2</sup> *a)             | 1.065         | gemessen                                                  |
| 24                                                     | Netzurücklauftemperatur, repräsentativ für Februar/Juli                                                                                                                                                                                                                 | °C                                  | 32°C/37°C     | gemessen                                                  |
| 25                                                     | Gesamtstrahlungsenergie auf aktive Absorberfläche                                                                                                                                                                                                                       | kWh/a                               | 672.660       | mit TRNSYS berechnet                                      |
| 26                                                     | Ertrag (QSP <sup>TRNSYS,real</sup> )                                                                                                                                                                                                                                    | kWh/a                               | 214.233       | mit TRNSYS berechnet                                      |
| 27                                                     | Kollektorkreisnutzungsgrad (g <sub>KB</sub> <sup>TRNSYS,real</sup> )                                                                                                                                                                                                    | %                                   | 31,85         | g <sub>KB</sub> <sup>TRNSYS,real</sup> = (Z26/Z25)*100%   |
| 28                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                     |               |                                                           |
| 29                                                     | <b>Umrechnung der TRNSYS-Ergebnisse unter realen Betriebsbedingungen mit Faktoren</b>                                                                                                                                                                                   |                                     |               |                                                           |
| 30                                                     | Korrigierter Ertrag bei realem Betrieb (QSP <sup>korrt</sup> )                                                                                                                                                                                                          | kWh/a                               | 231.536       | korrt. Ertrag=Z26*Z15                                     |
| 31                                                     | Korrigierter Kollektorkreisnutzungsgrad bei realem Betrieb (g <sub>KB</sub> <sup>korrt</sup> )                                                                                                                                                                          | %                                   | 34,42         | korrt. eta=Z27*Z16                                        |
| 32                                                     | Das Ergebnis aus der TRNSYS-Rechnung unter realen Betriebsbedingungen wird mit den o.a. Faktoren umgerechnet,                                                                                                                                                           |                                     |               |                                                           |
| 33                                                     | um so den Unterschied zwischen der Bietergarantie und dem Ergebnis mit TRNSYS unter fiktiven Betriebsbedingungen                                                                                                                                                        |                                     |               |                                                           |
| 34                                                     | in die Bewertung der Messergebnisse einfließen lassen zu können.                                                                                                                                                                                                        |                                     |               |                                                           |
| 35                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                     |               |                                                           |
| 36                                                     | <b>Messergebnisse unter realen Betriebsbedingungen im o.g. Zeitraum</b>                                                                                                                                                                                                 |                                     |               |                                                           |
| 37                                                     | Wärmeabgabe ins Netz                                                                                                                                                                                                                                                    | MWh                                 | 811           | gemessen                                                  |
| 38                                                     | spezifische Gesamtstrahlungsenergie horizontal                                                                                                                                                                                                                          | kWh/(m <sup>2</sup> *a)             | 1.065         | gemessen                                                  |
| 39                                                     | Gesamtstrahlungsenergie auf aktive Absorberfl. bei 30° Neigung                                                                                                                                                                                                          | kWh/a                               | 694.800       | gemessen                                                  |
| 40                                                     | gemessener Ertrag (QSP <sup>g</sup> )                                                                                                                                                                                                                                   | kWh/a                               | 204.900       |                                                           |
| 41                                                     | gemessener Kollektorkreisnutzungsgrad (g <sub>SB</sub> <sup>g</sup> )                                                                                                                                                                                                   | %                                   | 29,49         | gem. eta=(Z40/Z39)*100%                                   |
| 42                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                     |               |                                                           |
| 43                                                     | <b>Ergebnis:</b>                                                                                                                                                                                                                                                        |                                     |               |                                                           |
| 44                                                     | erreich. Energie in % von umgerechneten TRNSYS-Ergebnis                                                                                                                                                                                                                 | %                                   | 88,50         | erreichte Energie=(Z40/Z30)*100%                          |
| 45                                                     | erreich. eta in % vom umgerechneten TRNSYS-Ergebnis                                                                                                                                                                                                                     | %                                   | 85,68         | erreichte eta=(Z41/Z31)*100%                              |
| 46                                                     | Garantie                                                                                                                                                                                                                                                                |                                     | nicht erfüllt |                                                           |
|                                                        | Die Abweichungen zwischen den Prozentsätzen von erreichtem Ertrag und erreichtem Kollektorkreisnutzungsgrad (Zeile 44, 45) sind begründet durch die Umrechnung mit TRNSYS von der gemessenen horizontalen Strahlung in die (mit Umrechnungsfehlern behaftete) Strahlung |                                     |               |                                                           |
|                                                        | Liegt einer der beiden oben angegebenen Prozentsätze über 90 %, so gilt die Garantie als erbracht.                                                                                                                                                                      |                                     |               |                                                           |

Tabelle 8: Berechnungsblatt zum Garantieverfahren in Messperiode 3

## 8 Systemkosten und garantierter Ertrag

Eine Übersicht über die angebotenen Systemkosten, den garantierten Nutzenergieertrag und den solaren Wärmepreis zeigt Tabelle 9.

Die Lieferungen und Montagen des Kollektorfeldes, des Pufferspeichers und der übrigen Heizungs- und Solartechnik wurden in drei Losen ausgeschrieben. Die Systemkosten für die Solaranlage mit rd. 545 m<sup>2</sup><sub>Abs</sub> aktiver Absorberfläche betragen 280.125 € (ohne Planung und ohne MwSt.). Unter Einbeziehung der Planungskosten und Mehrwertsteuer (19 % für das Kollektorfeld auf den Carports, 16 % für die übrige Systemtechnik) ergeben sich tatsächliche Brutto-Systemkosten von 357.020 €.

Für das gesamte 545 m<sup>2</sup><sub>Abs</sub> große Kollektorfeld wurde ein jährlicher Kollektorkreisertrag von rd. 191 MWh garantiert. Bei 14 MWh Speicherverlusten ergibt sich ein solarer Plan-Systemertrag von 177 MWh. Unter Annahme einer 20-jährigen Lebensdauer und 6 % Zins (8,72 % Annuität) errechnet sich ein solarer Wärmepreis für den solaren Plan-Systemertrag von 0,176 €/kWh. Legt man den Systemertrag aus dem ersten Messjahr mit 545 m<sup>2</sup><sub>Abs</sub> von 173 MWh zugrunde (vgl. Tabelle 3), ergeben sich 0,18 €/kWh, was im Bereich des Planwertes liegt. Im darauf folgenden Messjahr (11.07.2008 bis 10.07.2009) ist die solare Nutzwärme auf 187 MWh angestiegen (vgl. Kap. 6.2). Der Wärmepreis hat dadurch auf 0,166 €/kWh verringert und liegt damit 1 cent/kWh unter dem Planwert.

|                                                                                                                         |                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| tatsächliche Kosten im Endausbau                                                                                        |                  |
| – Solarsystem 545 m <sup>2</sup> <sub>Abs</sub> ohne MwSt.                                                              | 280.125 €        |
| – Planung ohne MwSt. (11,9 % der Systemkosten)                                                                          | 25.512 €         |
| – Solarsystem inkl. Planung, ohne MwSt.                                                                                 | 305.637 €        |
| – <b>Solarsystem inkl. Planung, inkl. MwSt. (16 % und 19 %)</b>                                                         | <b>357.020 €</b> |
| jährliche Kapitalkosten bei 20 a Lebensdauer und 6 % Zins (8,72 % Annuität)                                             | 31.132 €/a       |
| solare Nutzenergie gemessen (21.6.2007 bis 19.6.2008, vgl. Tabelle 3)                                                   | 173.000 kWh      |
| solarer Wärmepreis bei 8,72 % Annuität inkl. Planung inkl. MwSt. für tatsächliche Kosten und tatsächlichen Systemertrag | 0,18 €/kWh       |

*Tabelle 9: Tatsächliche Systemkosten und tatsächlicher Systemertrag und solarer Wärmepreis im Zeitraum 21.6.2007 bis 19.6.2008)*

Bei den solaren Wärmekosten wurden gemäß Definition des Rechenganges in Solarthermie2000plus die Betriebs- und Wartungskosten nicht integriert sowie die vom Gaskessel eingesparte Menge konventionell erzeugter Energie mangels fehlender Simulationswerkzeuge nicht gegengerechnet. Diese Faktoren erhöhen bzw. vermindern die Kosten der Solarwärme.

## 9 Literatur

/1/ Förderkonzept "Solarthermie2000plus"

/2/ Erläuterungen zum Förderkonzept "Solarthermie2000plus"

/3/ Fragebogen zur Vorauswahl von Objekten

- Solare Kombianlagen zur Trinkwassererwärmung und Raumheizung in Einzelgebäuden bzw. -gebäudegruppen
- Solaranlagen zur Raumkühlung in Einzelgebäuden bzw. Gebäudegruppen
- Solaranlagen zur Unterstützung der Wärmeversorgung in 2-Leiter-Wärmenetzen (solare Nahwärme)

Bezug von /1/ bis /3/ als pdf-Datei unter [www.solarthermie2000plus.de](http://www.solarthermie2000plus.de)

/4/ Prüfbericht Kollektortest 96COL53 Solar Roof

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart (ITW)

Bezug: [www.itw.uni-stuttgart.de/ITWHomepage/TZS/Berichte.html](http://www.itw.uni-stuttgart.de/ITWHomepage/TZS/Berichte.html)

/5/ BINE Projekt Info 11/06

Solare Nahwärme Neubausiedlung Speyer

Bezug: [www.bine.info/templ\\_main.php/erneuerbare\\_energien/solare\\_waerme](http://www.bine.info/templ_main.php/erneuerbare_energien/solare_waerme)

/6/ Croy, R.; Wirth, H. P.:

2. Zwischenbericht für das Projekt Solaranlage im Wohngebiet ehemaliger Schlachthof in Speyer;  
Mai 2007

## **10 Adressen**

### **Programm- und Projektförderung**

Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)  
(vormals Förderung durch BMBF und BMWA)

### **Projektentwicklung und Informationen zum Programm Solarthermie-2000**

Projektträger Jülich (PtJ) des BMU, BMBF und BMWA  
Projektträger Jülich, Geschäftsbereich Erneuerbare Energien, Forschungszentrum Jülich GmbH  
Postfach 61 02 47  
10923 Berlin

### **Wissenschaftlich-technische Programmbegleitung**

ZfS – Rationelle Energietechnik GmbH  
Verbindungsstraße 19  
40723 Hilden

### **Antragsteller**

Stadtwerke Speyer  
Georg-Peter-Süß-Straße 2  
67346 Speyer

### **Bauträger**

Gemeinnützige Wohnungsbau und Siedlungs-GmbH GEWO  
Lessingstraße 4  
67345 Speyer

### **Technische Betreuung der Solaranlage**

TDG – Technik und Dienstleistungs-GmbH  
Landauerstraße 58  
67346 Speyer

### **Planung der Solaranlage**

Steinbeis-Transferzentrum  
Ingenieurgesellschaft Energie-, Gebäude- und Solartechnik mbH, EGS-plan  
STZ-EGS  
Gropiusplatz 10  
70563 Stuttgart

### **Installation Solarsystem**

Griskiewitz GmbH Haustechnik  
Werkstraße 3  
67354 Römerberg

### **Standort der Solaranlage**

Mausbergweg  
67346 Speyer

## Anhang I: Technisches Datenblatt der Hauptkomponenten des Solarsystems

In den folgenden Tabellen sind die Hauptkomponenten des Solarsystems aufgeführt.

### Kollektoren

|                                                    |                                                                                                                     |                                     |                                     |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Kollektorhersteller, Typ                           | Wagner & Co, Solar Roof FDK                                                                                         |                                     |                                     |
| Bauartzulassung                                    | 06 – 328 - 022                                                                                                      |                                     |                                     |
| Baujahr                                            | auf ehem. Schlachthofgebäude: 2004<br>auf Carports: 2007                                                            |                                     |                                     |
| Ausrichtung<br>(Süd = 0°, Ost = -90°, West = +90°) | 0°                                                                                                                  |                                     |                                     |
| Neigung                                            | auf ehem. Schlachthofgebäude: 30°<br>auf Carports: 25°                                                              |                                     |                                     |
|                                                    | ehem. Schlachthof-<br>gebäude                                                                                       | Carports                            | gesamt                              |
| Bruttofläche                                       | 391,0 m <sup>2</sup> <sub>Br</sub>                                                                                  | 221,4 m <sup>2</sup> <sub>Br</sub>  | 612,4 m <sup>2</sup> <sub>Br</sub>  |
| Aperturfläche                                      | 355,7 m <sup>2</sup> <sub>Ap</sub>                                                                                  | 197,1 m <sup>2</sup> <sub>Ap</sub>  | 552,8 m <sup>2</sup> <sub>Ap</sub>  |
| aktive Absorberfläche                              | 351,3 m <sup>2</sup> <sub>Abs</sub>                                                                                 | 193,5 m <sup>2</sup> <sub>Abs</sub> | 544,8 m <sup>2</sup> <sub>Abs</sub> |
| Absorbermaterial                                   | Kupfer                                                                                                              |                                     |                                     |
| Beschichtung                                       | Sunselect, selektiv                                                                                                 |                                     |                                     |
| Frontabdeckung                                     | strukturiertes Glas                                                                                                 |                                     |                                     |
| Stillstandstemperatur                              | 206 °C                                                                                                              |                                     |                                     |
| Quelle Kollektorkennwerte                          | Kollektortest ITW 96 COL53<br>Bezugsfläche im Kollektortest: Aperturfläche                                          |                                     |                                     |
| Konversionsfaktor $\eta_0$                         | 0,805 (bez. auf Aperturfläche)<br>0,815 (bez. auf aktive Absorberfläche)                                            |                                     |                                     |
| linearer Wärmeverlustkoeffizient                   | 4,138 W/(m <sup>2</sup> <sub>Ap</sub> ·K)<br>4,189 W/(m <sup>2</sup> <sub>Abs</sub> ·K)                             |                                     |                                     |
| quadratischer Wärmeverlustkoeffizient              | 0,008 W/(m <sup>2</sup> <sub>Ap</sub> ·K <sup>2</sup> )<br>0,008 W/(m <sup>2</sup> <sub>Abs</sub> ·K <sup>2</sup> ) |                                     |                                     |
| Winkelkorrekturfaktor                              | $K_{50^\circ} = 0,92$<br>$K_{\text{diffus}} = 0,86$                                                                 |                                     |                                     |
| spezifische Wärmekapazität                         | 8.019 J/(m <sup>2</sup> <sub>Ap</sub> ·K)<br>8.119 J/(m <sup>2</sup> <sub>Abs</sub> ·K)                             |                                     |                                     |

### Vorschaltgefäß vor MAG im Kollektorkreis

|                                   |                     |
|-----------------------------------|---------------------|
| Hersteller                        | Reflex              |
| Typ                               | Reflex V            |
| Fabr.-Nr.                         | 04 E 1117 50044     |
| Baujahr                           | 2004                |
| Volumen                           | 60 l                |
| max. zulässiger Betriebsüberdruck | 10 bar <sub>ü</sub> |
| zulässige Temperatur              | -10 bis 120 °C      |

### Expansionsgefäß

|                                   |                      |
|-----------------------------------|----------------------|
| Hersteller                        | Reflex               |
| Typ                               | Reflex S             |
| Fabr.-Nr.                         | 04 E 0603 50011      |
| Baujahr                           | 2004                 |
| Volumen                           | 300 l                |
| Vordruck werksseitig              | 3,0 bar <sub>ü</sub> |
| Vordruck bauseitig (eingestellt)  | 2,0 bar <sub>ü</sub> |
| max. zulässiger Betriebsüberdruck | 100 bar <sub>ü</sub> |
| max. zulässige Vorlauftemperatur  | 120 °C               |
| zulässige Membrantemperatur       | -10 bis 70 °C        |

### Kollektorkreispumpe P4

|                           |             |         |         |
|---------------------------|-------------|---------|---------|
| Hersteller                | Wilo        |         |         |
| Typ                       | TOP S 50-15 |         |         |
| Anzahl                    | 1           |         |         |
| max. zulässige Temperatur | 130 °C      |         |         |
| Stufen                    | 1           | 2       | 3       |
| max. Leistungsaufnahme    | 1.600 W     | 1.290 W | 1.030 W |
| eingestellte Stufe        |             | X       |         |

### Wärmeträger im Kollektorkreis

|            |                |
|------------|----------------|
| Hersteller | Tyforop        |
| Markenname | Tyfocor LS     |
| Basisstoff | Propylenglykol |

### Wärmetauscher Kollektorkreis/Speicherladekreis

|                                    |                                           |                       |
|------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------|
| Hersteller                         | SWEP                                      |                       |
| Typ                                | B57H x 253 / 2P-SC-S                      |                       |
| SWEP – item Nr.                    | 076585 – 1                                |                       |
| customer item Nr.                  | 11460-253+28148+21235                     |                       |
| Seriennummer                       | 20410 75720001                            |                       |
| Herstellungsjahr                   | 2004                                      |                       |
| Material                           | Edelstahl                                 |                       |
| max. zulässige Temperatur          | 155 °C (primär und sekundär)              |                       |
| max. zulässiger Druck              | 31 bar <sub>ü</sub> (primär und sekundär) |                       |
| Volumeninhalt                      | 42,1 l (primär und sekundär)              |                       |
| Auslegungswerte                    | primär                                    | sekundär              |
| Medium                             | 60 % Wasser<br>40 % Propylenglykol        | Wasser                |
| Auslegungstemperaturen Eintritt    | 74 °C                                     | 30 °C                 |
| Auslegungstemperaturen Austritt    | 34,4 °C                                   | 69,41 °C              |
| Auslegungsvolumenstrom             | 8,6 m <sup>3</sup> /h                     | 7,8 m <sup>3</sup> /h |
| Druckverlust bei Auslegungsvolumen | 96 mbar                                   | 83 mbar               |

### Nachspeisepumpe Kollektorkreis P6

|                           |                                                  |  |
|---------------------------|--------------------------------------------------|--|
| Hersteller                | Wilo                                             |  |
| Typ                       | Hochdruckkreiselpumpe<br>MHI804-1/E/1-230-50-2/B |  |
| Anzahl                    | 1                                                |  |
| max. zulässige Temperatur | 110 °C                                           |  |
| Stufen                    | 1                                                |  |
| Nennleistung              | 1,5 kW                                           |  |

### Speicherladepumpe P5

|                           |             |       |       |
|---------------------------|-------------|-------|-------|
| Hersteller                | Wilo        |       |       |
| Typ                       | TOP S 50-10 |       |       |
| Anzahl                    | 1           |       |       |
| max. zulässige Temperatur | 130 °C      |       |       |
| Stufen                    | 1           | 2     | 3     |
| max. Leistungsaufnahme    | 880 W       | 680 W | 500 W |
| eingestellte Stufe        |             |       | X     |

### Pufferspeicher

|                                                            |                                                                      |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Hersteller                                                 | Kopf                                                                 |
| Baujahr                                                    | 2004                                                                 |
| Volumeninhalt gesamt<br>– Bereitschaftsteil<br>– Solarteil | 100 m <sup>3</sup><br>ca. 13 m <sup>3</sup><br>ca. 87 m <sup>3</sup> |
| Material Behälterwand                                      | Stahl                                                                |
| Material Wärmedämmung                                      | Mineralwolle                                                         |
| Dicke der Wärmedämmung                                     | 20 cm                                                                |
| Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ der Wärmedämmung              | 0,04 W/(m•K)                                                         |

### Regelung Solaranlage und Kessel

|            |                      |
|------------|----------------------|
| Hersteller | Kieback & Peter, DDC |
|------------|----------------------|

### Netzpumpen P1 und P2

|                           |                                      |                                       |
|---------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Hersteller                | Wilo                                 |                                       |
| Typ                       | <b>Pumpe P1<br/>IP – E40 / 5 -28</b> | <b>Pumpe P2<br/>IL – 50/220-2,2/4</b> |
| Anzahl                    | 1                                    | 1                                     |
| max. zulässige Temperatur | 120 °C                               |                                       |
| Stufen                    | stufenlos drehzahlge-<br>regelt      | 1-stufig                              |
| Leistungsaufnahme         | 3.900 W                              | 2.200 W                               |

### Kesselpumpe P3

|                           |            |         |       |
|---------------------------|------------|---------|-------|
| Hersteller                | Wilo       |         |       |
| Typ                       | TOP-S65/13 |         |       |
| Anzahl                    | 1          |         |       |
| max. zulässige Temperatur | 130 °C     |         |       |
| Stufen                    | 1          | 2       | 3     |
| Leistungsaufnahme         | 1.450 W    | 1.180 W | 960 W |
| eingestellte Stufe        | X          |         |       |

### Kessel

|                                   |                                             |
|-----------------------------------|---------------------------------------------|
| Hersteller                        | Viessmann                                   |
| Typ                               | Gas-Brennwertkessel<br>Vitocrossal 300; CT3 |
| Anzahl                            | 1                                           |
| Nenn-Wärmeleistung bei 80 / 60 °C | 577 kW                                      |
| Wärmeleistung bei 40 / 30 °C      | 635 kW                                      |
| Nenn-Wärmebelastung               | 599 kW<br>modulierend bis 187 kW            |
| Kesselwassereinhalte              | 570 l                                       |