

FORSCHUNGSZENTRUM  
ROSSENDORF e.V.

FZR

---

Archiv-Ex.:  
FZR-137  
April 1996

*D. Brünig und U. Rindelhardt*

**Solare Warmwasserbereitung  
und Fernwärmeeinspeisung**

**- Waldblickschule Freital -**

**Forschungszentrum Rossendorf e.V.**

Postfach 51 01 19 · D-01314 Dresden

Bundesrepublik Deutschland

Telefon (0351) 260 3663

Telefax (0351) 260 3440

E-Mail [rindelh@fz-rossendorf.de](mailto:rindelh@fz-rossendorf.de)

# **Solare Warmwasserbereitung und Fernwärmeeinspeisung**

**- Waldblickschule Freital -**

**D. Brünig, U. Rindelhardt**

**April 1996**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde durch Mittel des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landesentwicklung sowie der Technischen Werke Freital gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt allein bei den Autoren.

## **Kurzfassung**

In ein mit Erdgas betriebenes konventionelles Fernwärmesystem (Anschlußleistung 2,1 MW) wurde eine Solarkollektoranlage mit einer Bruttofläche von 100 m<sup>2</sup> integriert. Die Kollektoranlage diente vorrangig der Erzeugung von Brauchwarmwasser für eine Schule, solare Überschüsse wurden in den Rücklauf des Fernwärmesystems eingespeist. Ein umfangreiches Meßprogramm ermöglichte Effizienzuntersuchungen des Systems.

Der jährliche Nettoertrag des Solarsystems lag bei 280 kWh/m<sup>2</sup> bei einem Systemnutzungsgrad von 26 %. Beide Kennziffern werden durch hohe Rücklauftemperaturen (58° C) im Nahwärmenetz negativ beeinflußt. Weitere Untersuchungen galten dem Betrieb von in Reihe geschalteten Schichtspeichern, die Ergebnisse werden im Einzelnen dargestellt. Bei Ausschöpfung der in dem Vorhaben deutlich gewordenen Optimierungspotentiale können in künftigen Anlagen Nettoerträge von 350 kWh/m<sup>2</sup>a und solare Wärmegestehungskosten unter 0.30 DM/kWh erreicht werden.

## **Summary**

A solar heat system (collector area 100 m<sup>2</sup>) was integrated in a gas-fueled district heating system of 2.1 MW power. The solar heat output has been used for domestic hot water demand of a school and additionally to increase the return flow temperature of the district heating system. Efficiency investigations of the system has been performed based on a large scale measuring programme.

The annual solar heat production was found to be 280 kWh/m<sup>2</sup> with a system efficiency of 26 %. Both numbers were influenced negatively by the high return flow temperature (58°C) in the district heating system. These results as well as the investigations of the buffer layer tanks coupled in series are discussed in detail. Using the described optimization potentials future solar systems can produce an annual net solar energy of 350 kWh/m<sup>2</sup> with costs lower than 0.30 DM/kWh.

## **Inhalt**

1.	Einleitung	1
2.	Anlagenkonzeption	1
2.1	Standortbedingungen	1
2.2	Systemkomponenten und Regelprinzip	3
3.	Betriebsergebnisse der Solaranlage	5
3.1	Kollektorkreis	5
3.1.1	Kollektorkennlinie	5
3.1.2	Kollektorkreisregelung	7
3.1.3	Wirkungsgrad und Leistung	7
3.1.4	Leistungsparameter des Wärmeübertragers 1	14
3.2	Pufferspeicherkreis	17
3.2.1	Konzeption und Beladeregulung	17
3.2.2	Temperaturschichtung und Entladeregulung	19
3.2.3	Temperaturprofil an sonnigen bzw. wechselhaften Tagen	21
3.2.4	Ertragssimulation ohne Pufferspeichervolumen	25
3.2.5	Funktionsbedingte Schichtinhomogenität im Entladeprozeß	26
3.3	Verbraucherkreise	28
3.3.1	Trinkwarmwasserbereitung für die Schule	28
3.3.2	Solarwärmeeinspeisung in den Fernwärmerücklauf	32
3.3.3	Reduzierungspotentiale des Rücklauftemperaturniveaus und mögliche Solarertragssteigerungen	37
3.4	Allgemeine Betriebserfahrungen	42
4.	Energiebilanzen und Wirtschaftlichkeit	44
4.1	Jahresenergiebilanzen	44
4.1.1	Gesamtbilanzen der Solaranlage	44
4.1.2	Solare Deckungsgrade des Energiebedarfes der Anlagennutzer	49
4.1.3	Verifizierung des Solarwärmenutzungskonzepts	50
4.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	51
4.2.1	Wärmegestehungskosten	51
4.2.2	Preis-/Leistungsoptimierung großer Solaranlagen	54
5.	Gesamtbewertung und Schlußfolgerungen	57
	Literatur	60
	Anhang	

## 1 Einleitung

Die thermische Nutzung der Solarenergie besitzt ein großes Potential bei der Einbeziehung regenerativer Energiequellen in die Wärmeversorgung.

Durch die Gruppe Erneuerbare Energiequellen im Forschungszentrum Rossendorf e.V. wurde gemeinsam mit der Stadt Freital und den Technischen Werken Freital sowie mit Förderung durch das Sächsische Staatsministerium für Umwelt und Landesentwicklung im Rahmen des Klimaschutzprogrammes Sachsen ein Modellvorhaben zur Integration solarer Warmwasserbereitung in ein neugeschaffenes Fernwärmenetz auf Erdgasbasis realisiert.

Die im Juni 1994 in Betrieb genommene Solaranlage Waldblickschule Freital ist mit 100 m<sup>2</sup> Kollektorfläche eine der größten solarthermischen Anlagen Sachsens. Erstmals erfolgt neben der Vorwärmung von Trinkwarmwasser für die Schule auch eine Nutzung der Solarwärme zur Anhebung der Rücklauftemperatur eines Fernwärmenetzes, dessen Heizzentrale sich im Keller der Schule befindet.

In Auswertung eines bis Ende 1995 durchgeführten Meßprogramms werden im vorliegenden Bericht qualitative und quantitative Aussagen zu den erreichten Betriebsparametern der Anlage und zu den einzelnen Anlagenkomponenten dargestellt. Durch die energetische Analyse des realisierten solaren Wärmeertrags kann das gegenwärtige technische und wirtschaftliche Potential großer Solaranlagen mit Fernwärmeanschluß eingeschätzt werden. Die Untersuchungsergebnisse und Betriebserfahrungen sind verallgemeinerbar und können sowohl dem technologischen Transfer als auch - bedingt durch den Standort - der Umwelterziehung dienen.

## 2 Anlagenkonzeption

### 2.1 Standortbedingungen

Als Standort für die Realisierung des Modellvorhabens wurde die Waldblickschule in Freital bei Dresden ausgewählt (Bild 1). Für große solarthermische Anlagen (Kollektorflächen >100 m<sup>2</sup>) ist es möglich, ein günstigeres Preis- / Leistungsverhältnis der solaren Wärmeenergieerzeugung im Vergleich zu kleinen Hausanlagen zu erzielen. Grundlage dafür ist ein kontinuierlicher Wärmebedarf, der vor allem in den einstrahlungsreichen Sommermonaten nur durch die Versorgung einer großen Anzahl von Verbrauchern gegeben ist. Die Waldblickschule in Freital als großstädtische öffentliche Einrichtung mit einem stark schwankenden Eigenwärmebedarf und gleichzeitig als Standort einer kleinen Fernwärmezentrale zur Wärmeversorgung des umliegenden Wohngebietes erschien geeignet, Einsatzvoraussetzungen und energetische Potentiale großer solarthermischer Anlagen aufzuzeigen.

In die Konzeption der Solaranlage wurden folgende Schwerpunkte integriert /1/:

- Vorwärmung des Trinkwarmwassers für die Schule
- Einspeisung der nicht für die Schule benötigten Solarwärme in den Rücklauf des Fernwärmenetzes

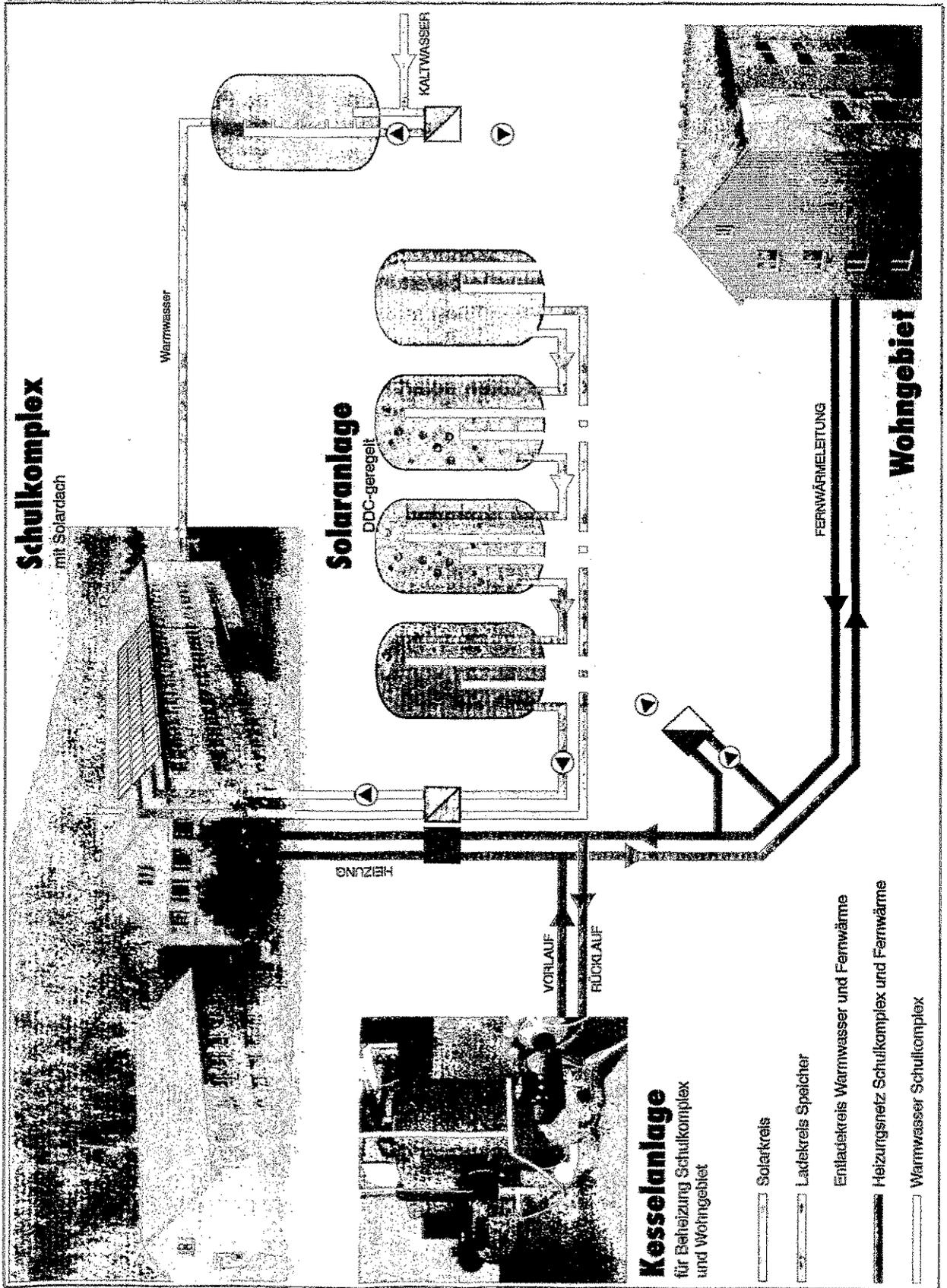


Bild 1: Integration der Solaranlage Waldblickschule in die Wärmeversorgung

- Einsatz neuer solartechnischer Systemkomponenten
- Langfristige meßtechnische Erfassung aller relevanten Wärmemengen und Temperaturen zur umfassenden Anlagenanalyse im Rahmen eines wissenschaftlichen Begleitprogramms

Der Warmwasserbedarf der Schule beträgt ca.  $1 \text{ m}^3$  pro Wochentag und wird im wesentlichen durch die Schulküche bestimmt (ca. 750 Essen täglich). Im Keller der Schule wurde eine gasbeheizte Fernwärmezentrale mit einer Anschlußleistung von 2.1 MW errichtet. Sie dient der zentralen Heizung und Warmwasserbereitung der Schule und einer Kindertagesstätte sowie der Ablösung der bislang dezentralen Einzelofenheizungen des umliegenden Wohngebietes mit 264 Wohnungen. In jedem der 8 Wohnblöcke befindet sich eine Hausanschlußstation, die auch die ganzjährige zentrale Warmwasserbereitung mit je 110 kW Anschlußleistung gewährleistet.

## 2.2 Systemkomponenten und Regelprinzip

Die Solaranlage /2/ ist einschließlich der installierten Temperaturmeßstellen in Bild 2 schematisch dargestellt, Anlage 1 beinhaltet das projektierte Anlagenschema. Charakteristisch für die Struktur der Anlage sind vier voneinander hydraulisch getrennte Wärmekreise.

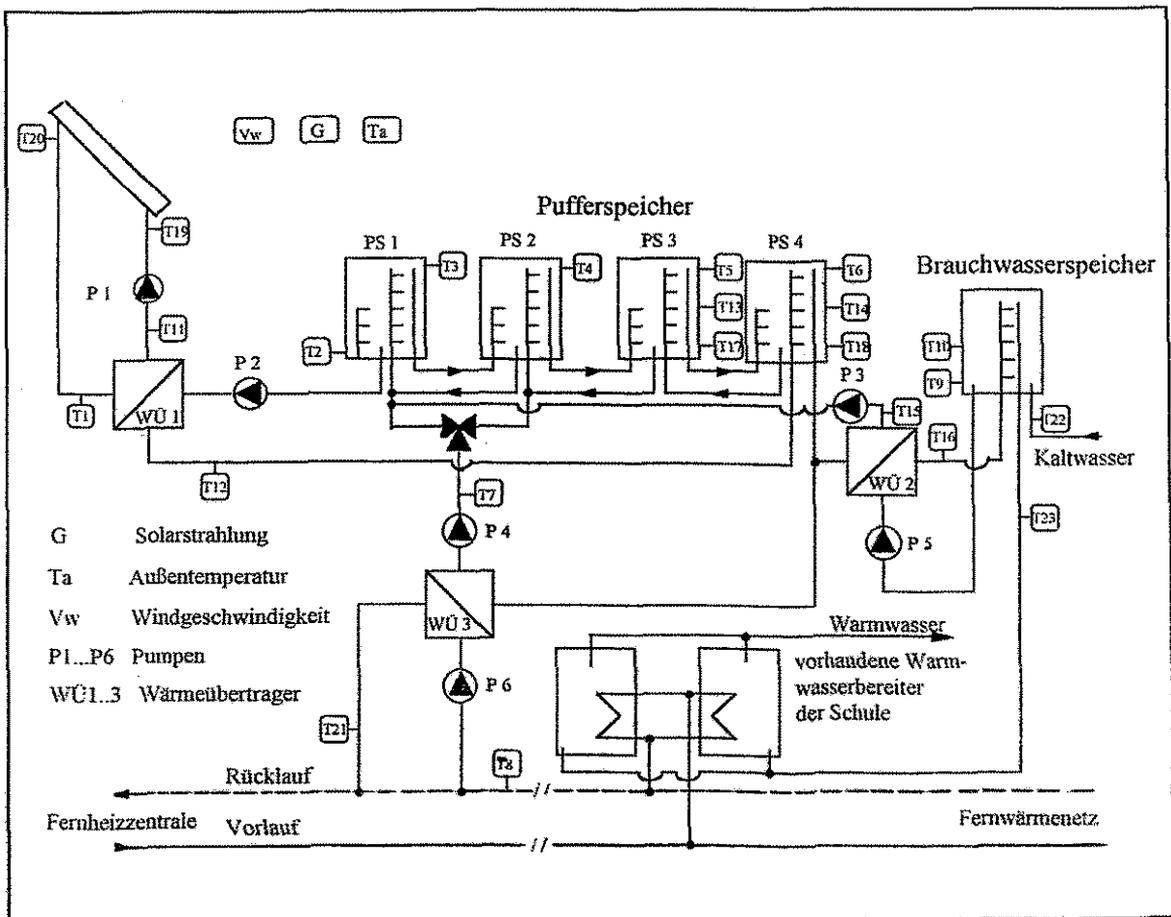


Bild 2: Schematische Darstellung der Solaranlage

- **Kollektorkreis:** Auf dem Dach der Schule wurden 12 Kollektormodule vom Typ Solvis F75 mit jeweils 8.2 m<sup>2</sup> Kollektor- bzw. 7.4 m<sup>2</sup> Absorberfläche dachintegriert installiert. Die Dachfläche ist nach SSW orientiert und um 36° zur Horizontalen geneigt. Alle Kollektormodule sind in Reihe geschaltet und werden entsprechend dem Low-Flow-Prinzip mit 12 l/h und m<sup>2</sup> Absorberfläche von der Wärmeträgerflüssigkeit, einem Wasser/Tyfocon-Gemisch im Verhältnis von 60/40 Vol% durchströmt. Am Wärmeübertrager 1 wird die Solarwärme (Wärmemenge Q<sub>1</sub>) an die Pufferspeicher übergeben. Die Übertragungsleistung des Plattenwärmeübertragers beträgt unter Auslegungsbedingungen 53 kW (Temperaturspreizung primärseitig 65/20 °C und sekundärseitig 15/55 °C). Die Kollektorkreispumpe P1 wird in Betrieb genommen, wenn entsprechend der in Kollektorebene gemessenen Solarstrahlungsleistung ein Wärmegewinn für das System zu erwarten ist.
- **Pufferspeicherkreis:** Der Pufferspeicherkreis besteht aus vier in Reihe geschalteten Stratos-Schichtspeichern mit je 750 l Inhalt, die mit Ladewechselvorrichtungen zur selbstregelnden Speicherschichtbeladung ausgestattet sind und mit Heizungswasser befüllt werden. Damit sollen die im Kollektorfeld erzielten hohen Temperaturen im Kollektorvorlauf besonders effektiv an das Pufferspeichersystem übergeben werden /3/. Der Pufferspeicherladeprozess wird temperaturgesteuert durch Pumpe P2 begonnen, wenn die Kollektorvorlauftemperatur T1 um 5 K über der niedrigsten Pufferspeichertemperatur T2 liegt. Eingespeist wird in den Pufferspeicher PS4. Entsprechend dem Temperaturprofil in den Pufferspeichern, das von T6 bis T2 abfällt, strömt das solar erwärmte Wasser, das in den speziellen Ladewechselvorrichtungen nach oben steigt, in die seiner Temperatur entsprechenden Pufferspeicherregion. Die gespeicherte Solarwärme wird auf zwei Wegen genutzt:
- **Trinkwarmwasservorwärmung für die Schule:** Mittels Wärmeübertrager 2 gelangt solar vorgewärmtes Wasser in einen 400 l-Brauchwasserspeicher (BWS). Er enthält den Kaltwasseranschluß und bei jeder Warmwasserabnahme in der Schule strömt vorgewärmtes Wasser in die bereits vorhandenen Warmwasserbereiter der Schule (2 x 500 l). Dort kann es bei nicht ausreichender solarer Vorwärmung durch die Fernwärme auf die Solltemperatur von 60 °C nachgeheizt werden. Die Beladepumpen P3 und P5 werden dann in Betrieb genommen, wenn die Temperatur T<sub>10</sub> < Solltemperatur (T<sub>soll</sub>) ist, bzw. bei T<sub>6</sub> > T<sub>10</sub> + 5 K, wenn die Pufferspeichertemperatur T<sub>6</sub> < T<sub>soll</sub> ist. Die Solarwärme wird mit einem Durchfluß von 1 m<sup>3</sup>/h dem heißesten Speicher PS4 entnommen und abgekühlt in den Speicher PS1 zurückgeführt. Der Plattenwärmeübertrager 2 hat unter Auslegungsbedingungen (Temperaturspreizung primärseitig 65/15 °C und sekundärseitig 10/60°C) eine Leistung von 58 kW. Auf der Primärseite des Wärmeübertragers 2 ist eine Rücklaufbeimischung installiert, um zu vermeiden, daß der Brauchwasserspeicher auf eine höhere als die gewählte Solltemperatur erwärmt wird. Die Wärmemenge Q<sub>2</sub> ist die vom Brauchwasserspeicher an die Warmwasserbereiter der Schule abgegebene Wärmemenge in Bezug auf die Temperatur des nachströmenden Kaltwassers.
- **Fernwärmeeinspeisung:** Das Fernwärmesystem befand sich während der Konzeption der Solaranlage noch im Bau, so daß noch keine Meßwerte über die sich einstellenden Rücklauftemperaturen vorlagen. Liegt kein Ladebedarf des Brauchwasserspeichers der Schule vor und beträgt die Temperaturdifferenz zwischen T<sub>6</sub> im Pufferspeicher 4 und dem Fernwärmerücklauf T<sub>8</sub> mehr als 10 K, werden die Pumpen P4 und P6 in Betrieb genommen. Am Wärmeübertrager 3 kann dann ein Teil des Fernwärmerücklaufwassers (2.5 m<sup>3</sup>/h) solar erwärmt werden (Wärmemenge Q<sub>3</sub>). Der Pufferspeicherrücklauf erfolgt auf Grund der wech-

selnden Fernwärmerücklauftemperaturen temperaturgesteuert in die Speicher PS1 oder PS2 (Temperaturvergleich T7, T4, T5). Eine gleichzeitige Wärmeabgabe an den Brauchwasserspeicher und die Fernwärme erfolgt nicht.

- **Anlagenregelung und Meßdatenerfassung:** Es wurde eine frei programmierbare DDC- Anlage mit Datenfernübertragung der Firma Landis & Gyr /4/ installiert. Damit sind ein einfacher Zugriff auf die Regelgrößen sowie deren Variation möglich, die im Rahmen des Begleitprogramms zur Optimierung der Anlagenregelung beitragen sollen. Die Meßwerte werden als Mittelwerte von 10 Minuten abgelegt, die Wärmemengen besitzen eine Auflösung von 1 kW, die Pumpenschaltungen werden zum aktuellen Zeitpunkt registriert.

### 3 Betriebsergebnisse der Solaranlage

#### 3.1 Kollektorkreis

##### 3.1.1 Kollektorkennlinie

Der Wirkungsgrad, mit dem ein Solarkollektor die einfallende solare Strahlungsenergie in Wärmeenergie des Wärmeträgermediums umwandelt, ist definiert als das Verhältnis der Nutzleistung PQ zur einfallenden Strahlungsleistung  $G_A$  auf die Absorberfläche A:

$$\eta = PQ / G_A.$$

Da der Kollektorwirkungsgrad sowohl von systemtechnischen als auch von den aktuellen meteorologischen Betriebsgrößen abhängt, wird dieser Einfluß in genormten Prüfverfahren nach DIN4757 bzw. ISO- Norm 9806 für neuentwickelte Kollektortypen unter stationären Betriebsbedingungen ermittelt und in Kennwerten quantifiziert. Danach kann der stationäre Kollektorwirkungsgrad  $\eta$  durch die mathematische Beziehung

$$\eta = \eta_0 - k_1 * (T_m - T_a) / G - k_2 * (T_m - T_a)^2 / G$$

mit der mittleren Kollektortemperatur  $T_m$ , der Außentemperatur  $T_a$  und der Solarstrahlungsleistung  $G$  in  $W/m^2$  Absorberfläche charakterisiert werden. Die Koeffizienten  $k_1$  und  $k_2$  beschreiben die Wärmeverluste des Kollektors. Der maximale Wirkungsgrad  $\eta = \eta_0$  kann nur erreicht werden, wenn die mittlere Kollektortemperatur  $T_m$  als Mittelwert aus Kollektoreintritts- und Kollektoraustrittstemperatur der Außentemperatur entspricht und somit keine Wärmeverluste des Kollektors an die Umgebung auftreten.  $\eta_0$  ist eine Systemgröße, die i.w. durch die Transparenz der Kollektorabdeckung und den Absorptionsgrad des Absorbermaterials bestimmt wird. Sind die Koeffizienten  $\eta_0$ ,  $k_1$  und  $k_2$  bekannt, können für beliebige Sonneneinstrahlungen und Kollektortemperaturen die resultierenden Kollektorwirkungsgrade bzw. die nutzbaren Wärmeleistungen errechnet werden.

Für den in der Waldblickschule Freital installierten Kollektortyp Solvis F75 werden die Kollektorkenngrößen  $\eta_0=0.8024$ ,  $k_1=3.69 W/m^2K$  und  $k_2=0.007 W/m^2K$  angegeben /5/. Die daraus resultierenden Kollektorkennlinien für verschiedene Einstrahlungen  $G$  bzw. bezogen auf die Einstrahlung  $G$  sind in den Bildern 3 und 4 dargestellt.

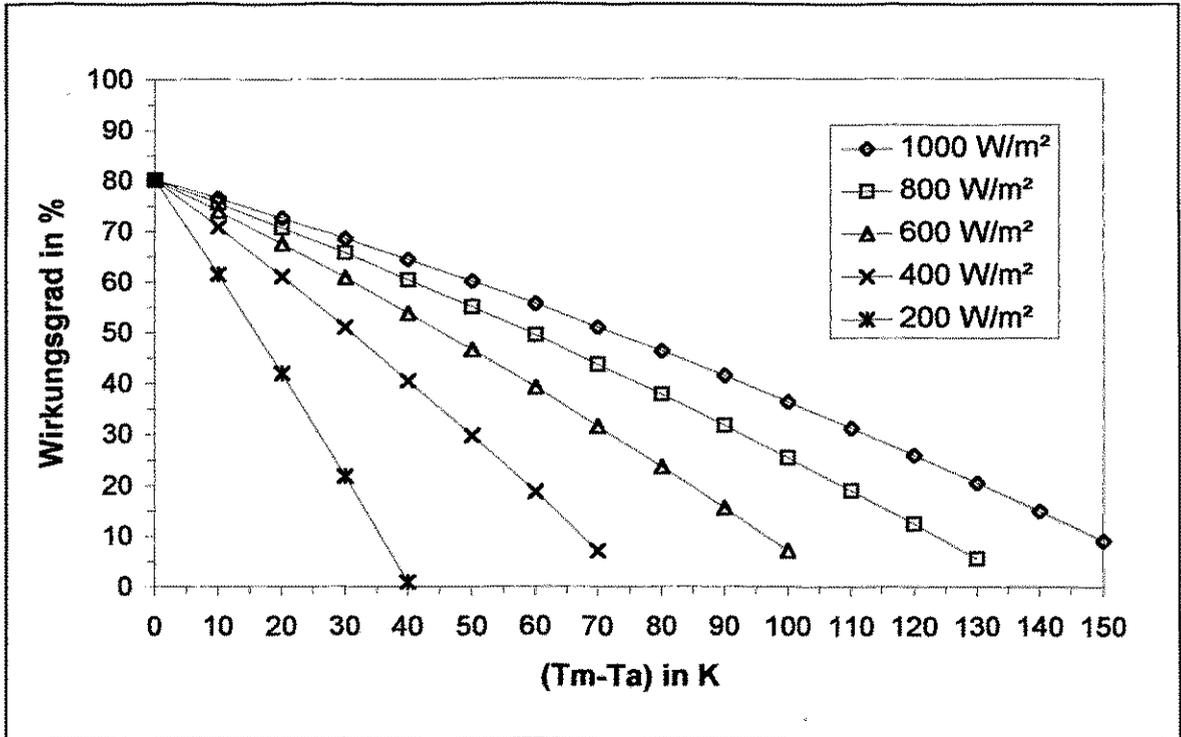


Bild 3: Kollektorkennlinien Solvis F75 für verschiedene Einstrahlungen  $G$  (in  $W/m^2$ )

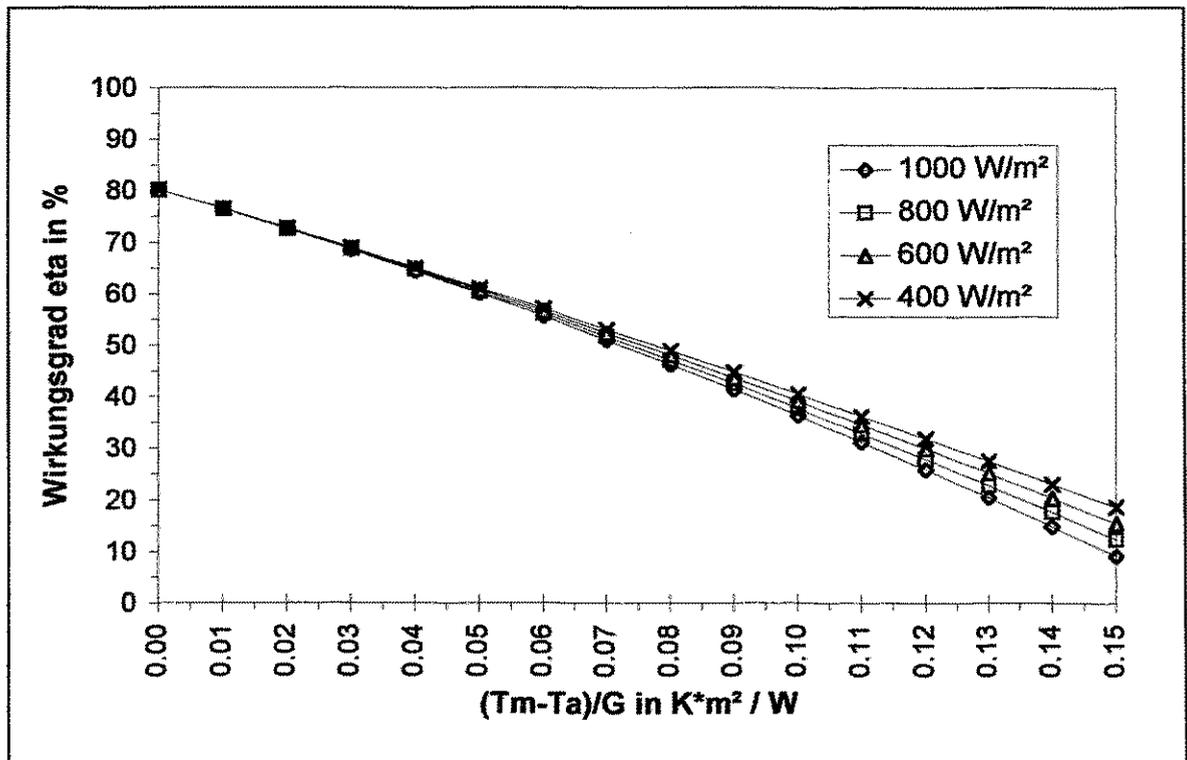


Bild 4: Kollektorkennlinie Solvis F75 bezogen auf die Einstrahlungen  $G$

Häufig wird nur die Kollektorkennlinie normiert auf die Strahlung von  $800 \text{ W/m}^2$  angegeben. Durch den quadratischen Term in der Gleichung zur Berechnung des Kollektorwirkungsgrades wird berücksichtigt, daß gleichen Abszissenwerten  $(T_m - T_a)/G$  bei geringeren Strahlungsleistungen höhere Kollektorwirkungsgrade entsprechen, da in diesem Fall auch  $(T_m - T_a)$  und somit auch die Wärmeverluste kleiner sind (Bild 4).

### 3.1.2 Kollektorkreisregelung

Die Inbetriebnahme der Kollektorkreispumpe P1 erfolgt auf Grund der gemessenen Solarstrahlung  $G$ , der Außentemperatur und der Pufferspeichertemperatur  $T_2$ . Um Wärme an die Pufferspeicher übergeben zu können, muß die Kollektormitteltemperatur  $T_m$  größer als die niedrigste Pufferspeichertemperatur  $T_2$  sein. Als Einschaltkriterium wurde anhand der Kennlinie in Bild 4 der Wirkungsgrad von 15 % ausgewählt. Daraus ergibt sich als Einschaltbedingung für die Kollektorkreispumpe:

$$T_m - T_2 = (0.14 \cdot G + T_a) - T_2 > 5 \text{ K.}$$

Die Abschaltung der Pumpe P1 erfolgt anhand der gemessenen Kollektorvor- und Rücklauftemperaturen, wenn  $(T_1 - T_{11})$  kleiner oder gleich 3 K ist. Um häufige Pumpenschaltungen in der Aufwärmzeit der Kollektorkreises zu vermeiden, wurde eine Pumpennachlaufzeit von 5 Minuten eingestellt.

### 3.1.3 Wirkungsgrad und abgegebene Leistung

Die unter Standardbedingungen ermittelten Kollektorkennlinien sollen nun mit den unter Betriebsbedingungen meßtechnisch ermittelten Kollektorkreiskennwerten der Solaranlage Waldblickschule verglichen werden. Dabei werden zusätzlich alle Wärmeverluste der Verrohrung zwischen den einzelnen Kollektormodulen sowie der Vor- und Rücklaufleitungen zum Wärmeübertrager<sup>1</sup> im Heizungskeller wirksam. Eine Gesamtansicht des Schulgebäudes mit dem dachintegrierten Kollektorfeld zeigt Bild 5.

Anhand der Temperaturmeßstellen  $T_1$ ,  $T_{11}$ ,  $T_a$ , der Solarstrahlung  $G$  sowie der mittels Durchflußzähler unter Berücksichtigung der Wärmekapazität des Wärmeträgermediums ermittelten Wärmemenge  $Q_1$  wurden die Wirkungsgrade des Kollektorkreises ermittelt, die im Anlagenbetrieb vorlagen.

Die charakteristischen Tagesprofile der Kollektorkreistemperaturen im Vergleich zur Globalstrahlung in Kollektorebene sowie die sich einstellenden Kollektorkreiswirkungsgrade und -leistungen für einen sonnigen Sommertag sind im Bild 6 dargestellt. Durch die Fernwärmeeinspeisung der Solarwärme lag die Kollektorrücklauf-temperatur nahezu konstant bei  $61 \text{ °C}$ . Ab ca.  $500 \text{ W/m}^2$  Einstrahlung wurden Kollektorvorlauftemperaturen über  $70 \text{ °C}$  erreicht und die Fernwärmeeinspeisung konnte beginnen. Bei Strahlungen größer  $800 \text{ W/m}^2$  betrug die Kollektorkreisleistung  $40 \text{ kW}$  bei einem Kollektorkreiswirkungsgrad von rund 50 %.

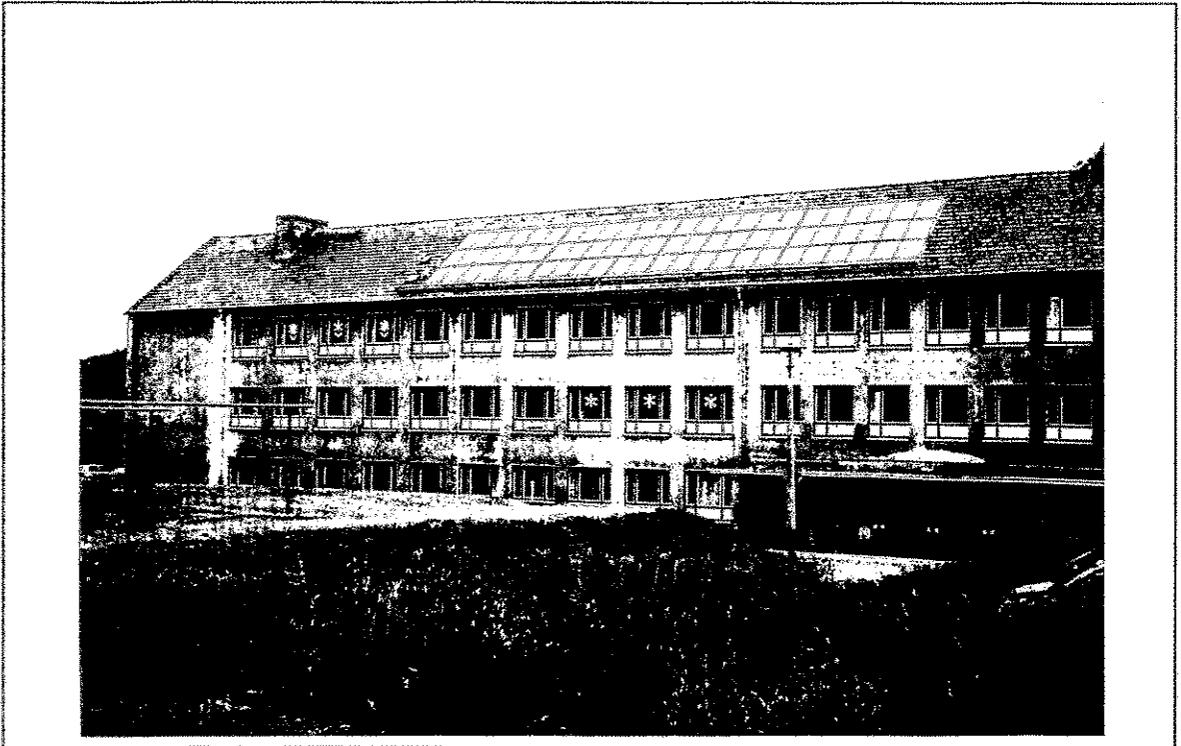


Bild 5: Gesamtansicht der Waldblickschule mit dem dachintegrierten Kollektorfeld

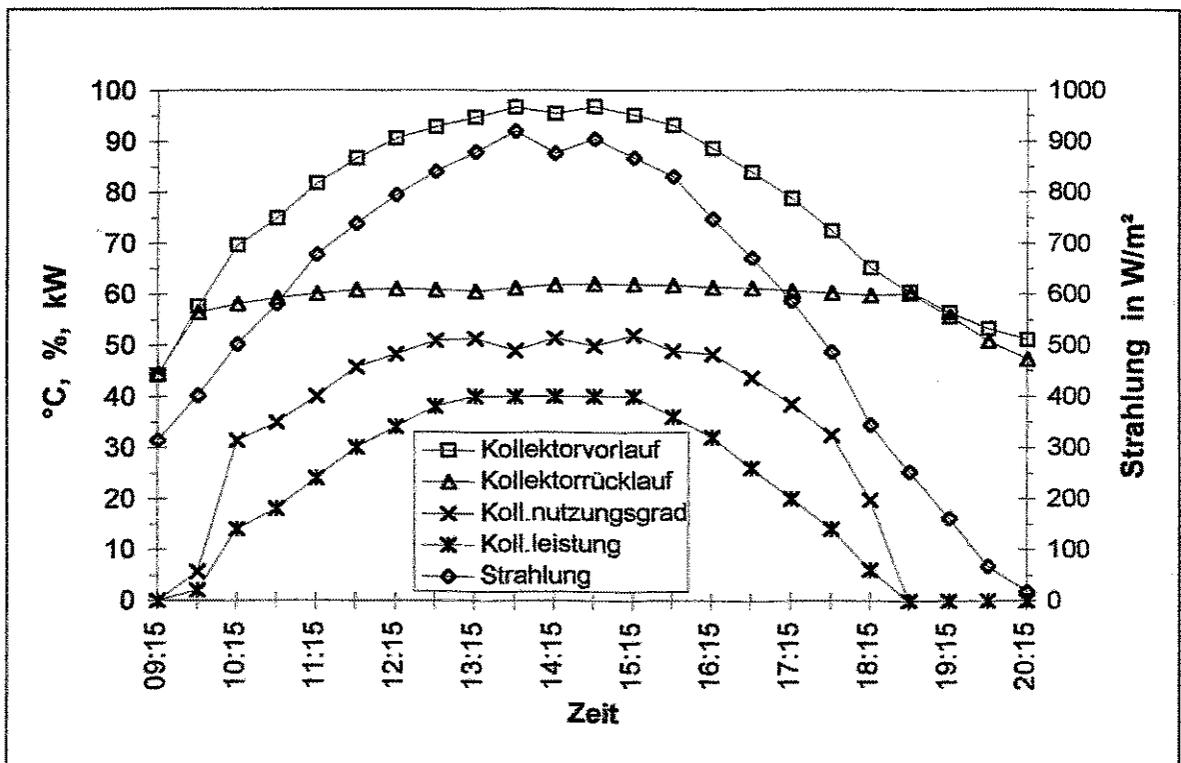


Bild 6: Tagesverlauf des Kollektorkreisbetriebes am 11.08.1995

Um jahreszeitliche Einflüsse auf die Kollektorkreisfunktion aufzuzeigen und um mit weitgehend stationären Bedingungen zu arbeiten wurden wolkenlose, solarstrahlungsreiche Tage in verschiedenen Monaten des Jahres 1995 ausgewertet. Die Tagesverläufe der Solarstrahlungsleistungen in Kollektorebene sind in Bild 7 dargestellt. Bild 8 enthält die entsprechenden Tagesverläufe der gemessenen Kollektorkreisleistung PQ1.

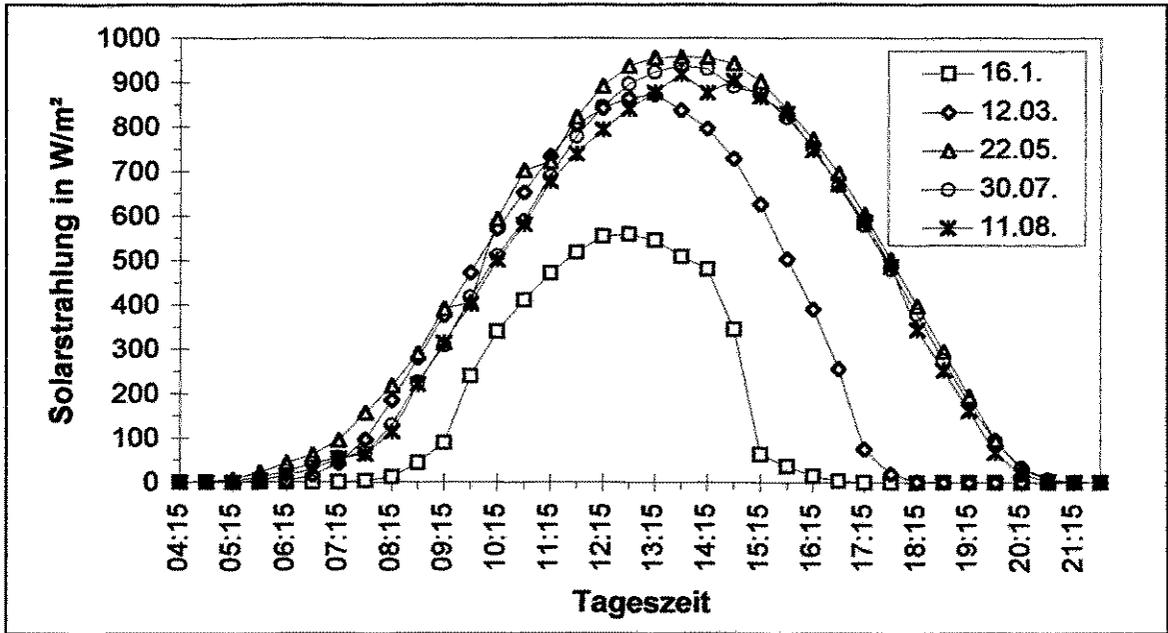


Bild 7: Solarstrahlung in Kollektorebene - ausgewählte Tagesprofile 1995

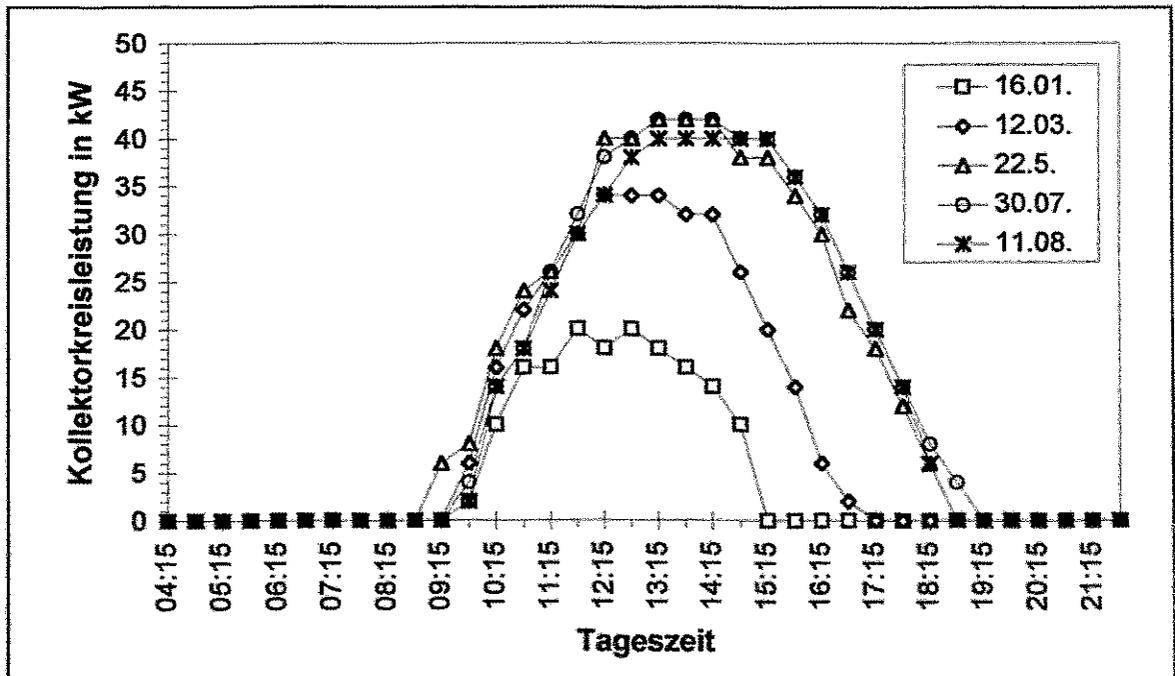


Bild 8: Kollektorkreisleistung PQ1 - ausgewählte Tagesprofile 1995

Im Bild 9 sind die Arbeitspunkte des Kollektorkreises im Vergleich zu den rechnerisch aus den angegebenen Kollektorkenngrößen ermittelten Kennlinien für Einstrahlungsleistungen von 1000 bzw. 600 W/m<sup>2</sup> dargestellt. Erwartungsgemäß liegen alle Arbeitspunkte unterhalb der Kollektorkennlinien, denn durch die Einbeziehung der erforderlichen Verrohrungen treten zusätzliche Wärmeverluste auf. Die höchsten Wirkungsgrade an den einzelnen dargestellten Tagen sind den einstrahlungsreichsten Mittagsstunden zuzuordnen und weisen auf Grund der dann vorherrschenden stationären Betriebsbedingungen die kleinste Meßunsicherheit auf (ca. 1 kW). Die höheren Abszissenwerte der einzelnen Tage entsprechen den ansteigenden bzw. abfallenden Strahlungsleistungen in den Vormittags- und Nachmittagsstunden und sind auf Grund der hohen Wärmekapazität des Kollektorkreises, der rund 220 l Wärmeträgerflüssigkeit enthält, und seiner Zeitkonstanten (Fließzeit vom Kollektorfeld zum Wärmeübertrager, Zeitkomponente der Temperaturmeßfühler) mit einem größeren Auswertefehler behaftet.

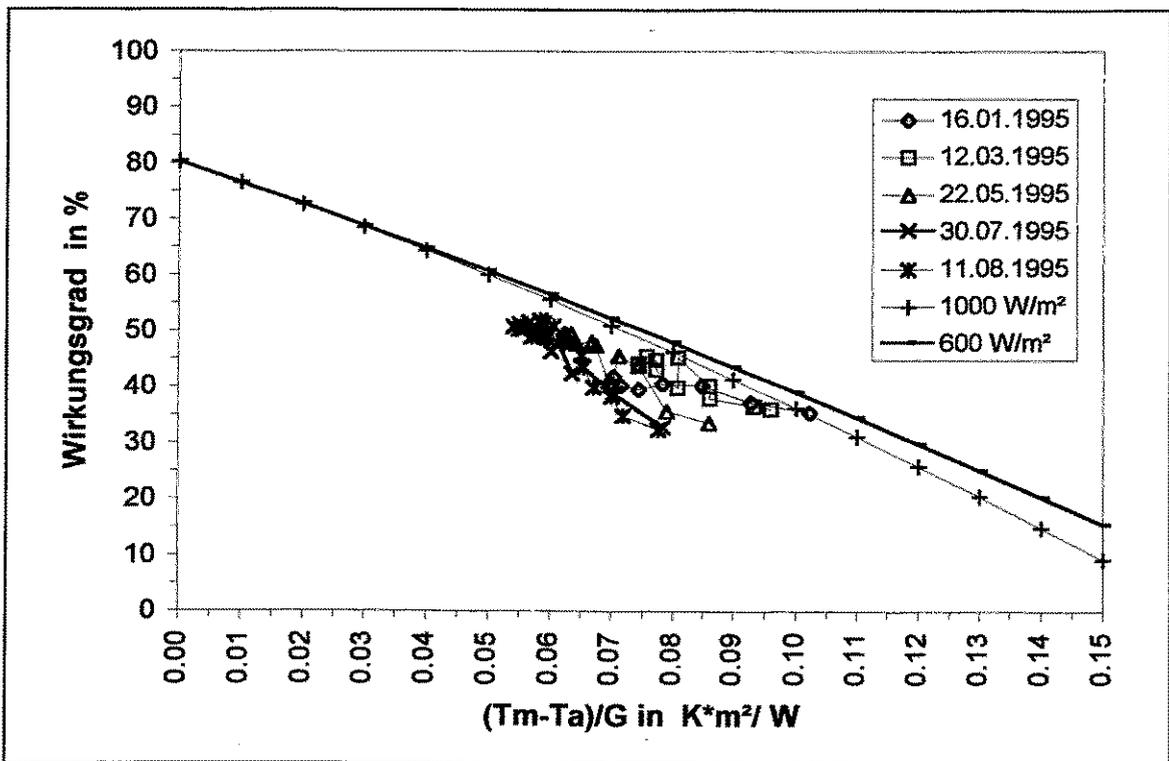


Bild 9: Kollektorkennlinien und Arbeitspunkte des Kollektorkreises

Anhand der im Bild 10 dargestellten Tagesprofile des Kollektorkreiswirkungsgrades zeigt sich, daß der Kollektorkreiswirkungsgrad unter den Betriebsbedingungen der Solaranlage maximal Werte von 52 % in den Mittagsstunden der Hochsommertage, 49,5 % am 22. Mai, 45,5 % am 12. März und 44 % am 16. Januar erreichte. Die den Sommerwirkungsgraden entsprechenden Arbeitspunkte weisen die größte Abweichung zur Kollektorkennlinie im Bild 9 auf, die Arbeitspunkte des Kollektorkreisbetriebes im Januar und März die geringsten. Ursache dafür sind die im Sommer höheren Temperaturen im Kollektorkreis (Nachteil des Low-Flow-Prinzips!), die auch höhere Leitungswärmeverluste zur Folge haben.

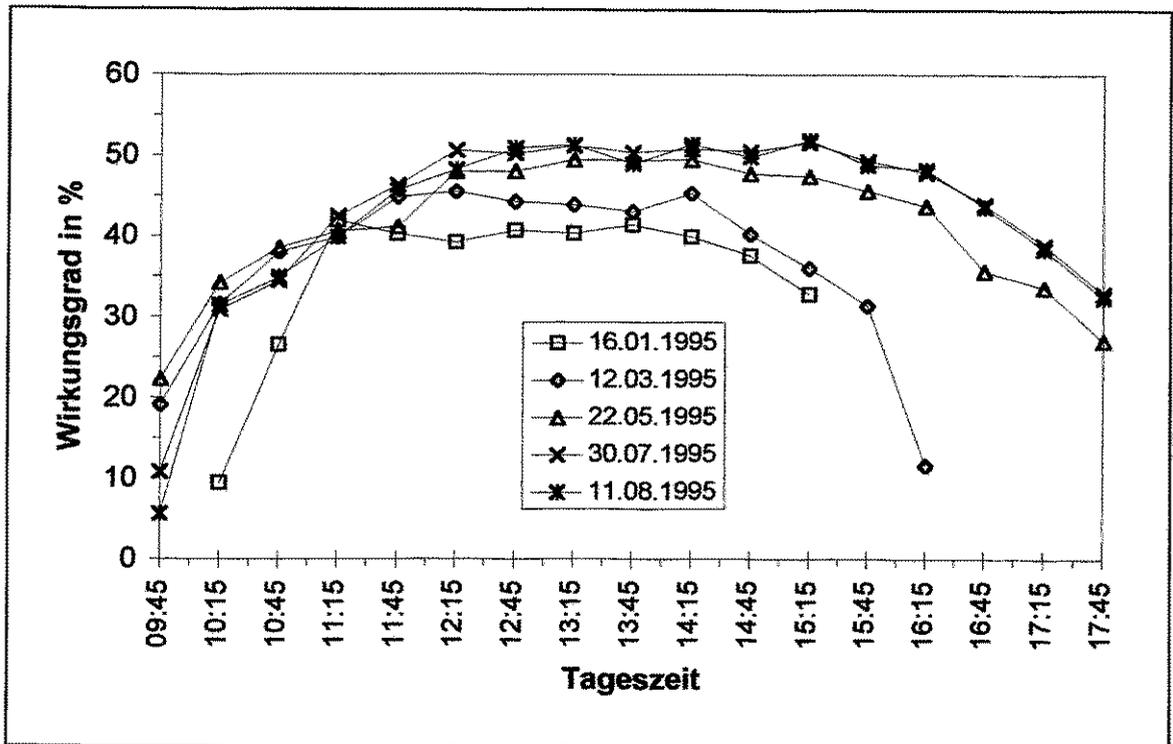


Bild 10: Tagesverlauf des Kollektorkreiswirkungsgrades an ausgewählten Tagen

Beim Vergleich der Tagesprofile der in Kollektorebene gemessenen Solarstrahlungsleistung und der entsprechenden Kollektorkreiswirkungsgrade fällt auf, daß der Kollektorkreiswirkungsgrad an den betrachteten Tagen dem deutlichen Maximum der Strahlungsleistung in der Mittagszeit nicht folgt, sondern über einen längeren Zeitraum einen stationären Wert annimmt. An strahlungsreichen Tagen erreicht die Kollektorvorlauftemperatur Werte, die deutlich höher als die Rücklauftemperatur des Fernwärmenetzes sind. Da der Wärmebedarf zur Warmwasserbereitung der Schule klein im Verhältnis zum Solarertrag an einem sonnigen Tag ist, erfolgt während des größten Teils der Kollektorlaufzeit, insbesondere auch in den Mittagsstunden, die Einspeisung der Solarwärme in das Fernwärmenetz. Bei der annähernd konstanten Fernwärmerücklauftemperatur im Sommer von ca. 57 °C stellt sich somit auch ein konstanter Kollektorrücklauf ein (Bild 6). Bei weiterer Vergrößerung der Solarstrahlungsleistung erhöht sich mit wachsender mittlerer Kollektortemperatur auch der Wärmeverlust an die Umgebung. Die Wirkungsgradverbesserung bei steigender Strahlungsleistung wird durch die Wirkungsgradverschlechterung mit steigender Kollektormitteltemperatur aufgehoben. Es stellt sich ein durch das Niveau der Fernwärmerücklauftemperatur bestimmter maximaler Kollektorkreiswirkungsgrad ein. Stellvertretend für einen sonnigen Hochsommertag sind im Bild 11 die den Kollektorkreiswirkungsgrad bestimmenden Profile von  $G$ ,  $T_m$  bzw.  $(T_m - T_a)$  sowie die gemessene Kollektorkreisleistung und der Wirkungsgrad dargestellt. In der Zeit von 12.15 bis 15.45 Uhr mit  $G > 800 \text{ W/m}^2$  korreliert die Konstanz der Größe  $(T_m - T_a)/G$  mit der Konstanz des Wirkungsgrades. Der Arbeitspunkt des Kollektorkreises liegt bei  $(T_m - T_a)/G$  rund  $0.055 \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$  und  $\eta$  rund 51 %.

Die charakteristischen Temperaturprofile von Kollektorvor- und rücklauf bei Speicherbeladung im Januar und bei Fernwärmeeinspeisung im März und im Sommer sind in Bild 12 dargestellt.

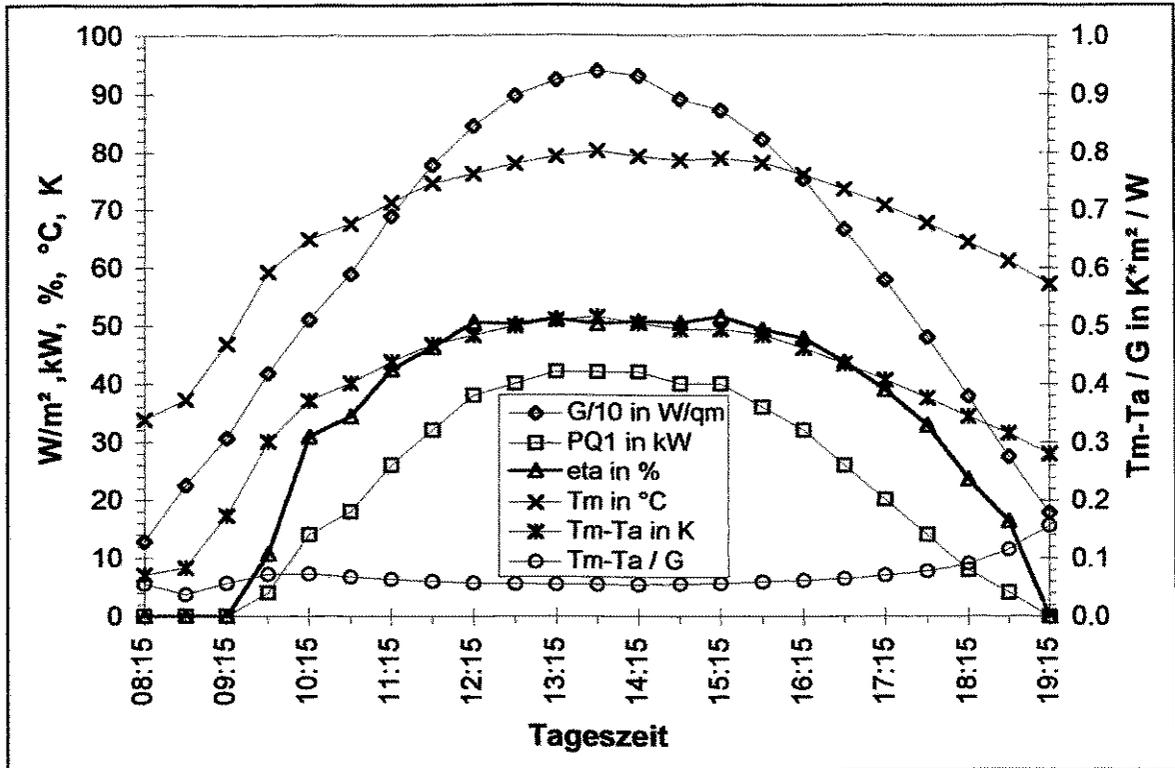


Bild 11: Betriebsbedingungen des Kollektorkreises am 30.07.1995

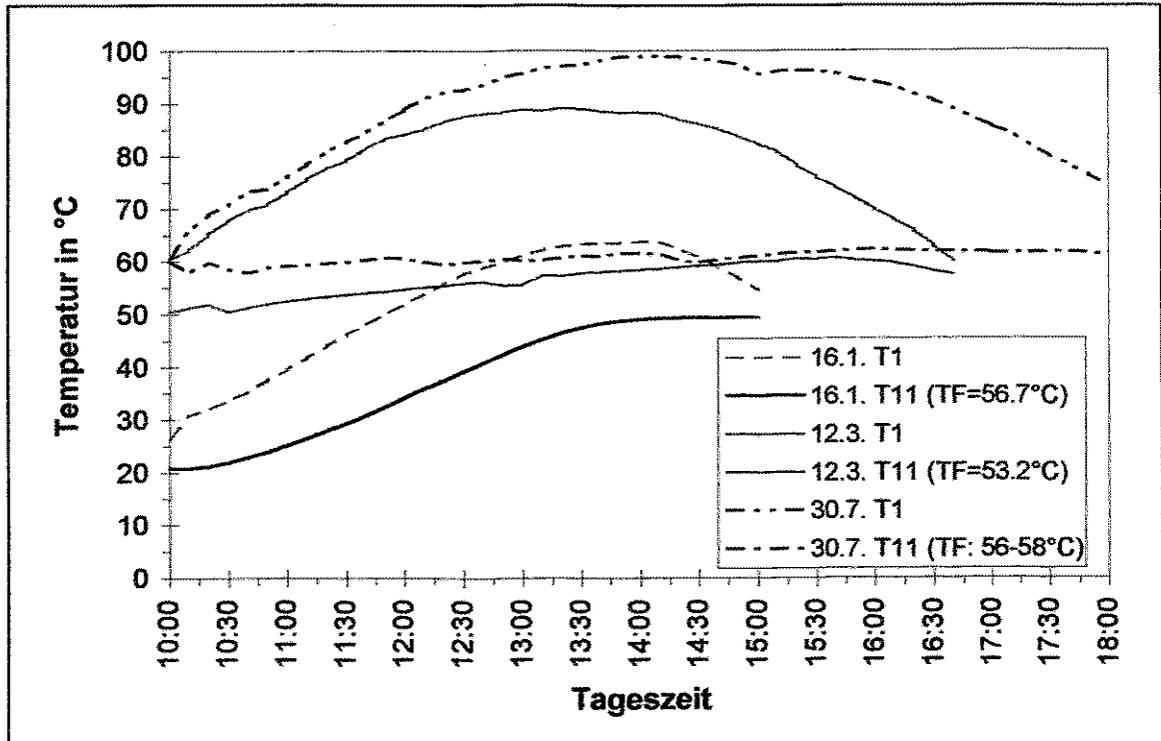


Bild 12: Tagesverlauf der Kollektorvor- und Kollektorrücklauftemperaturen (T1, T11)

Eine weitere Folge der jahreszeitlich unterschiedlichen Systemtemperaturen wird bei der Betrachtung der Wirkungsgradmaxima an den ausgewählten Tagen deutlich (Bild 10). Im Sommer lag der maximale Kollektorkreiswirkungsgrad nur 8 % über dem des 16. Januar, obwohl die maximale Strahlungsleistung rund  $950 \text{ W/m}^2$  gegenüber  $550 \text{ W/m}^2$  betrug. Das niedrigste Temperaturniveau in den Pufferspeichern lag im Januar zu Beginn des Kollektorkreisbetriebes bei  $19 \text{ }^\circ\text{C}$ . Bereits bei einer Einstrahlung von  $250 \text{ W/m}^2$  begann der Kollektorkreisbetrieb. Bei  $550 \text{ W/m}^2$  Einstrahlung am Mittag wurde mit 44 % Wirkungsgrad eine Leistung von 20 kW abgegeben. Dabei erfolgte die Pufferspeicherbeladung. Die Kollektorrücklauftemperatur stieg im Tagesverlauf von  $21$  auf  $49 \text{ }^\circ\text{C}$  bei maximalen Kollektorvorlauftemperaturen von  $63 \text{ }^\circ\text{C}$ . Im Juli dagegen begann der Kollektorkreis wegen der höheren Temperaturen erst bei ca.  $400 \text{ W/m}^2$  Einstrahlung zu arbeiten und lieferte am Mittag bei Kollektorvor- und rücklauftemperaturen von  $99$  bzw.  $61 \text{ }^\circ\text{C}$  und einer Fernwärmerücklauftemperatur von rund  $57 \text{ }^\circ\text{C}$  eine Leistung von 42 kW bei einem Wirkungsgrad von maximal 52 %.

Auf Grund dieser unterschiedlichen Temperaturverhältnisse in der Solaranlage ergeben sich die im Bild 13 dargestellten jahreszeitlich etwas abweichenden Zusammenhänge zwischen Solarstrahlungsleistung in Kollektorebene und Kollektorkreisleistung. Im Winter lieferte die Anlage mit vergleichsweise höheren Wirkungsgraden aber auf Grund der geringeren Einstrahlung natürlich quantitativ mit geringerer Leistung Energie als in der Übergangszeit bzw. im Sommer, wo die charakteristischen Niveaus des Fernwärmerücklaufs die Systemtemperaturen und damit die Wirkungsgrade bestimmen.

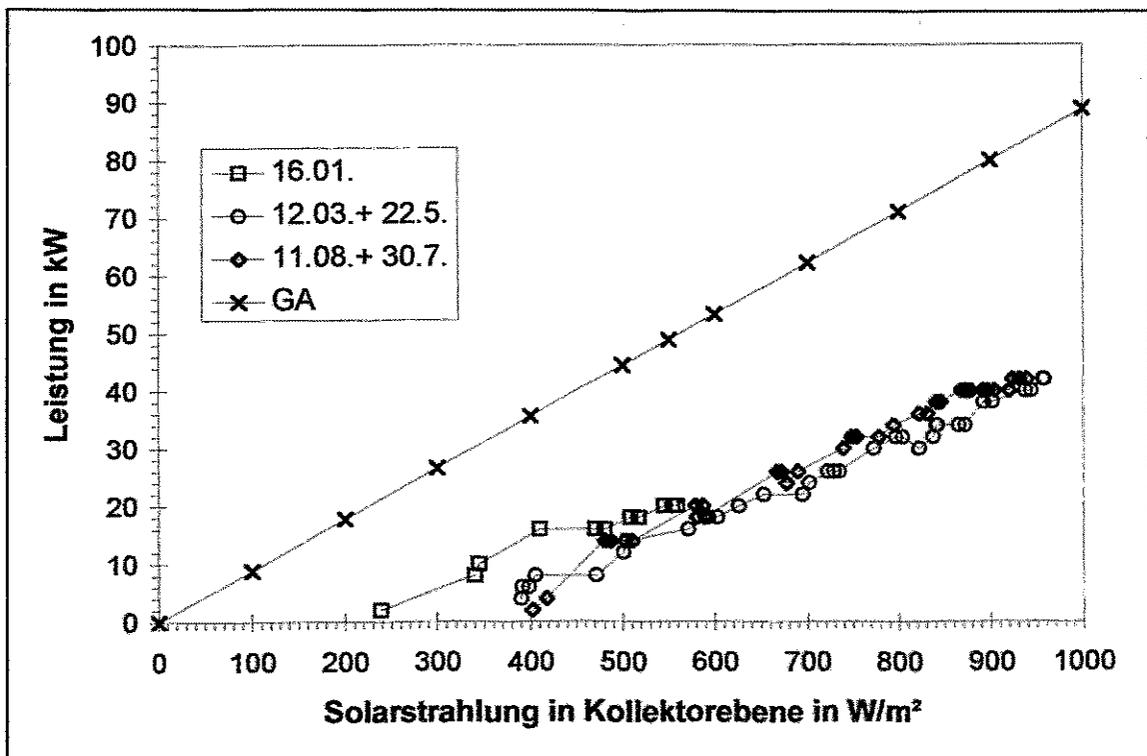


Bild 13: Kollektorkreisleistung in Abhängigkeit von der Einstrahlung im Vergleich zur Gesamtstrahlungsleistung  $G_A$  auf die Absorberfläche

Der Einfluß der Außentemperatur auf die Kollektorverluste ist in der Kennliniendarstellung durch die Abszisse  $(T_m - T_a)/G$  berücksichtigt. Im Betrieb der Solaranlage Waldblickschule wird er z. B. deutlich beim Vergleich der Solarstrahlungsleistungen und der Wirkungsgrade am 22. Mai und dem Juli- bzw. Augusttag (Bild 14). Bei höherer maximaler Strahlungsleistung am 22. Mai beträgt der Kollektorkreiswirkungsgrad auf Grund der um 10 K höheren Temperaturdifferenz  $(T_m - T_a)$  nur maximal 49.5 gegenüber 52 % im Sommer (vergleiche Bild 10). Am größten ist der Wert von  $(T_m - T_a)$  im März.

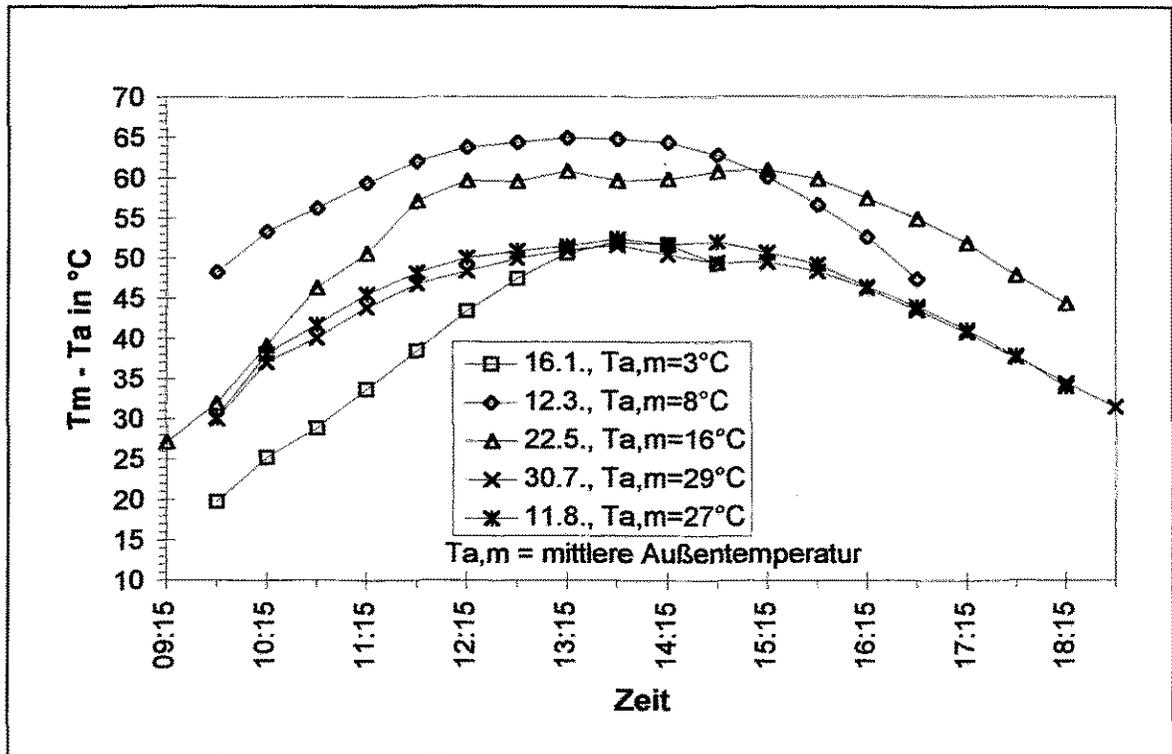


Bild 14: Vergleich ausgewählter Tagesprofile von  $(T_m - T_a)$

### 3.1.4 Leistungsparameter des Wärmeübertragers 1

Die vom Kollektorfeld aufgenommene Solarwärme wird durch den Plattenwärmeübertrager WÜ1 im Gegenstromprinzip an das Pufferspeichersystem übergeben. Er wurde entsprechend der im Low-Flow-Kollektorkreisbetrieb möglichen hohen Temperaturspannungen zwischen Kollektorvor- und rücklauf ausgelegt. Dabei wurde vom Temperaturniveau der Trinkwarmwasserbereitung ausgegangen:

Temperaturspannung primärseitig:	65/20 °C
Temperaturspannung sekundärseitig:	15/60 °C
Volumenstrom primär:	1.1 m³/h, Medium: Wasser/Tyfocon
Volumenstrom sekundär:	1,0 m³/h, Medium: Wasser.

Der übertragene Wärmestrom  $\dot{Q}$  beträgt berechnet sich nach /6/ zu

$$\dot{Q}_1 = \dot{C}_{p,prim} * \Delta T_{prim} = \dot{C}_{p,sek} * \Delta T_{sek} = k * A * \Delta T_m$$

mit

$\dot{C}_{p,prim}$  : primärseitiger Wärmekapazitätsstrom (Kollektorkreis)  $\dot{m}_{prim} * c_{p,prim}$  in W/K

$\dot{C}_{p,sek}$  : sekundärseitiger Wärmekapazitätsstrom (Pufferspeicherladung)  $\dot{m}_{sek} * c_{p,sek}$

$\Delta T_{prim}$  : primärseitige Temperaturdifferenz (Meßstellen T1, T11) in K

$\Delta T_{sek}$  : sekundärseitige Temperaturdifferenz (Meßstellen T2, T12) in K

k : Wärmedurchgangskoeffizient in W/m<sup>2</sup>K

A : Wärmeübertragerfläche in m<sup>2</sup> und

$\Delta T_m$  : mittlere logarithmische Temperaturdifferenz

$$\Delta T_m = (T1-T12) - (T11-T2) / \ln (T1-T12)/(T11-T2).$$

Die spezifische Wärmekapazität der Wasser- Tyfocor- Mischung im Kollektorkreis beträgt bei einer Kollektorkreismitteltemperatur von 42.5 °C ca. 3.76 J/gK bei einer Dichte von 1.027 g/cm<sup>3</sup>. Daraus errechnen sich eine Wärmeübertragerleistung im Auslegungsfall von rund 53 kW bei einer mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz von 5 K und ein charakteristischer Wärmeübertragerkennwert (k\*A) von 10 600 W/K.

Nachfolgend soll gezeigt werden, inwieweit diese Auslegung den realen Betriebsbedingungen gerecht wird. Anhand einer Reihe solarstrahlungsreicher Betriebstage von Juli 1994 bis März 1996 wurde unter annähernd stationären Betriebsbedingungen die Abhängigkeit der Wärmeübertragerleistung von der mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz bestimmt. Drei unterschiedliche Charakteristika wurden gefunden (Bild 15):

- Das Wärmeübertragerverhalten im Sommer 1994, also nach der im Juni erfolgten Inbetriebnahme, entspricht einem linearen Zusammenhang zwischen  $\dot{Q}_1$  und  $\Delta T_m$ , das durch einen (k\*A) - Wert von 14 400 W/K (Anstieg der Geraden) gekennzeichnet ist.
- Ab Oktober 1994 wurde eine Veränderung des Übertragerverhaltens festgestellt, das als Alterungsprozess des Wärmeübertragers interpretiert wird. Durch Ablagerungen auf den Wärmeübertragerflächen verschlechtert sich der Wärmeübergang insbesondere bei kleinen Temperaturdifferenzen und es liegt kein linearer Zusammenhang mehr vor. Bei Verlängerung der Regressionslinie bis  $\Delta T_m = 5$  K erhält man etwa die Auslegungsleistung von 53 kW.
- Im Juli 1995 mußte die Pufferspeicherbatterie auf Grund eines Druckabfalls mit Wasser nachgefüllt werden. In diesem Zeitraum wurde eine zeitweise Verschlechterung des Wärmeübertragerverhaltens festgestellt, das auf einen Einfluß von Luftbläschen auf den sekundärseitigen Wärmeübergang schließen läßt.

Der Einfluß des (k\*A)- Wertes auf den Kollektorkreisenertrag läßt sich durch den Vergleich der Meßergebnisse im Sommer 1994 mit denen von 1995 abschätzen, da wie oben gezeigt, der Wärmeübertrager erst nach einiger Betriebszeit seine Auslegungsleistung annahm. In der Tabelle 1 sind die Tagessummen  $H_A$  der Solarstrahlung auf die Absorberfläche, die Tagessummen der vom Kollektorkreis abgegebenen Wärmemenge  $\dot{Q}_1$ , die maximalen Solarstrahlungsleistungen und die maximalen  $PQ_1$  für Beispieltage und für die Vergleichszeiträume Juni bis August zusammengestellt.

	$H_A$ in kWh	$Q_1$ in kWh	$G$ in $W/m^2$	$PQ_1$ in kW	$Q_1/H_A$ in %
04.07.94	647	273	960	44	42
20.07.94	695	283	990	44	40.7
22.08.94	597	240	945	42	40.2
30.07.95	640	259	940	42	40.4
11.08.95	620	247	920	42	39.8
Juni-Aug. 1994	41 433	13 881			33.5
Juni-Aug. 1995	38 506	12 858			33.4

Tabelle 1: Vergleich der Kollektorkreisenerträge im Sommer 1994 und 1995

Nur im Juli 1994 konnten maximale Kollektorkreisleistungen von 44 kW ermittelt werden, wobei auch maximale Solarstrahlungsleistungen zu verzeichnen waren. Der Vergleich der Kollektorkreisnutzungsgrade ( $Q_1/H_A$ ) der Vergleichszeiträume Juni bis August 1994 und 1995 zeigt, daß keine Verschlechterung des Kollektorertrages im Zusammenhang mit der Alterung des Wärmeübertragers nachgewiesen werden kann.

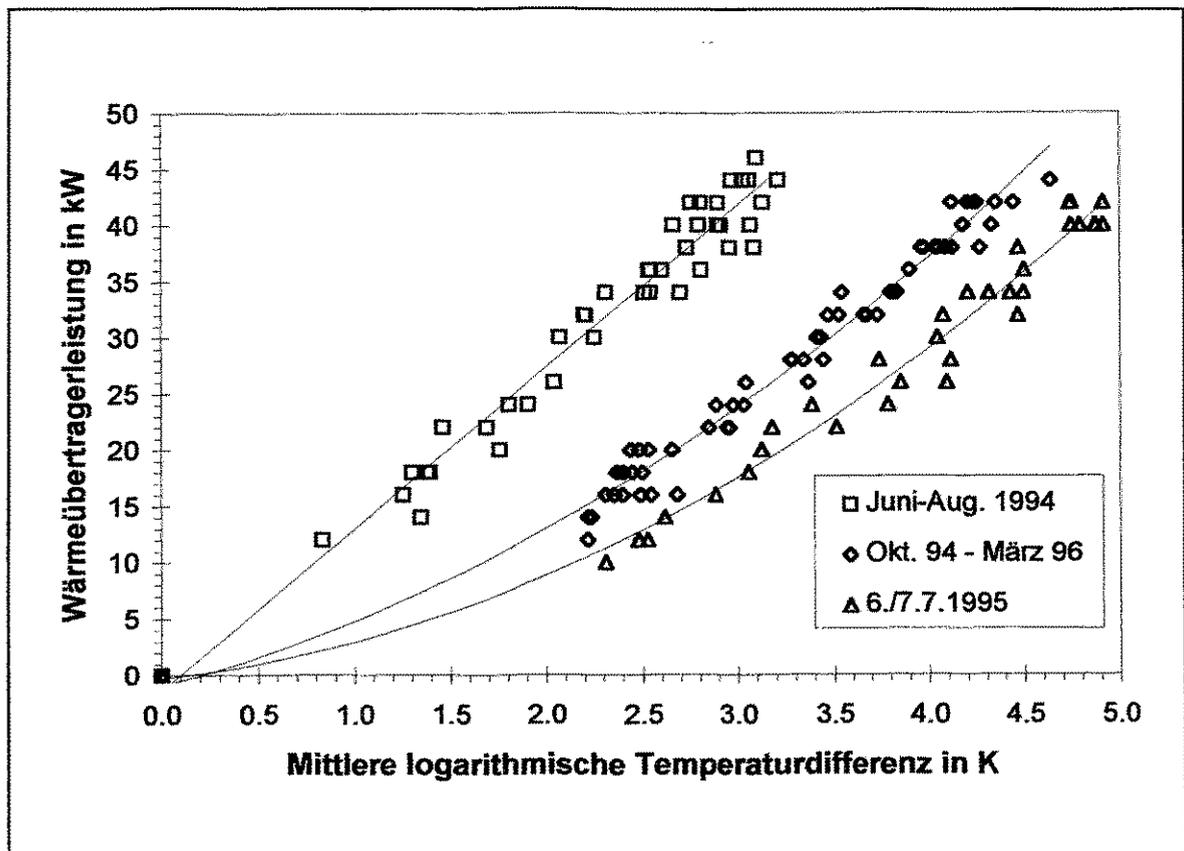


Bild 15: Abhängigkeit der Wärmeübertragerleistung ( $WÜ_1$ ) von der mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz  $\Delta T_m$

## 3.2 Pufferspeicherkreis

### 3.2.1 Konzeption und Beladeregulung

Solarthermische Anlagen mit großen Kollektorflächen ( $>100 \text{ m}^2$  bis größer  $1000 \text{ m}^2$ ) können entsprechend ihrer Wärmenutzungskonzeption unterschieden werden in

- Anlagen mit saisonalen Wärmespeichern für solare Nahwärmesysteme /7/, um die im Sommer gewonnene Solarwärme bis in den Winter hinein zur Unterstützung der Wärmeversorgung zu nutzen (Speichervolumen ca.  $2 \text{ m}^3$  pro  $\text{m}^2$  Kollektorfläche),
- Anlagen mit „Tagesspeichern“ zur zentralen Trinkwarmwasserbereitung /8/ für eine große Anzahl Nutzer (Speichervolumen ca.  $70 \text{ l}$  pro  $\text{m}^2$  Kollektorfläche) und
- Anlagen ohne Speicher zur direkten Einspeisung in Nah- oder Fernwärmesysteme.

Die Solaranlage Waldblickschule wurde erstmals als kombinierte Anlage sowohl zur Unterstützung der Trinkwarmwasserbereitung als auch zur Einspeisung in ein kleines Fernwärmesystem konzipiert, um die spezifischen Nutzungsbeschränkungen der jeweiligen Einzelanwendungen zu vermeiden.

Im Sommerhalbjahr kann das gesamte Solarwärmeangebot in das Wärmenetz mit den daran angeschlossenen 264 Wohneinheiten eingespeist werden, wenn zur Warmwasserbereitung der Schule kein Bedarf mehr vorliegt. Im Winterhalbjahr und an Tagen mit geringer solarer Einstrahlung ist die Fernwärmeeinspeisung auf Grund niedriger Kollektorvorlauftemperaturen nicht möglich. Mit dem installierten Pufferspeichervolumen kann jedoch die verfügbare Solarwärme auf dem angebotenen Niveau zwischengespeichert und zur Trinkwasservorwärmung für die Schule genutzt werden. Daher wurde das Pufferspeichervolumen mit  $3000 \text{ l}$  klein bezüglich der Kollektorfläche ausgelegt, es entspricht aber gleichzeitig dem ca. dreifachen Tagesbedarf der Schule.

Aus räumlichen Gründen ergab sich eine Aufteilung des Pufferspeichervolumens in vier  $750 \text{ l}$ -Speicher, die als Speicherkaskade in Reihe geschaltet wurden. In den Speichern befinden sich sogenannte Ladestäbe aus Polypropylen, die nur in bestimmten Höhen Austrittsöffnungen besitzen (Bild 16). Diese sind mit Klappen versehen, die durch den umgebenden Wasserdruck verschlossen sind. Das von unten in das Rohr geleitete Wasser steigt soweit im Rohr nach oben, bis seine Temperatur der Umgebungstemperatur des Speicherwassers entspricht. Auf Grund gleicher hydrostatischer Drücke kann dann das Wasser in den Speicher ausströmen. Wechselnde, aus der Solarstrahlungsleistung resultierende Wassertemperaturen können somit effektiv und ohne zusätzlichen Regelaufwand genutzt werden.

Bei der Pufferspeicherentladung wird das Wasser im führenden PS4 oben entnommen, zu den Wärmeübertragern 2 bzw. 3 geführt und in die PS1 bzw. 2 abgekühlt wieder zurückgespeist. Bei der Speicherdurchströmung wird jeweils das wärmste Wasser der Pufferspeicher 1 - 3 im oberen Bereich entnommen und in den kurzen Beladestab des nächsten Pufferspeichers geleitet.

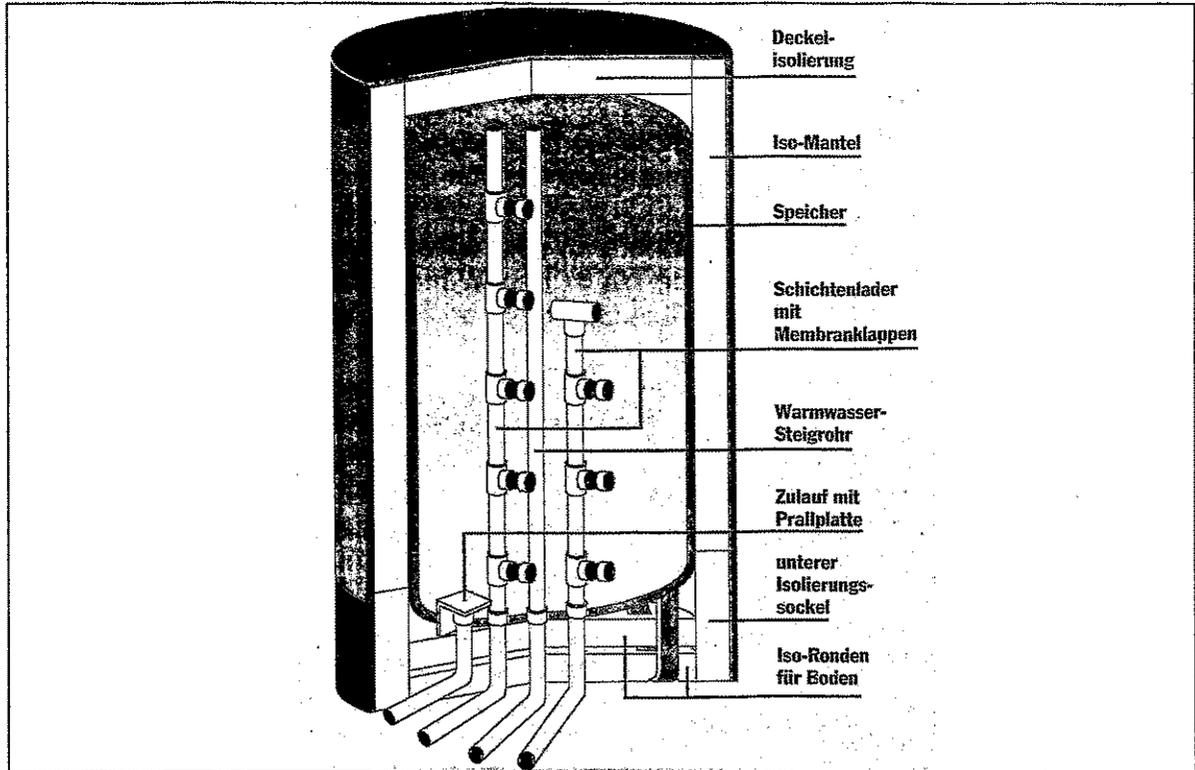


Bild 16: Schnittdarstellung des Stratos- Schichtenspeichers /9/

Die Kollektorkreispumpe P1 und die Pufferspeicherladepumpe P2 werden unabhängig voneinander temperaturabhängig gesteuert. Erst wenn die Kollektorvorlauf-temperatur um 5 K über der niedrigsten Pufferspeichertemperatur liegt ( $T_1 > T_2 + 5 \text{ K}$ ), wird die Pumpe P2 in Betrieb genommen und das Pufferspeicherwasser kann am Wärmeübertrager 1 erwärmt werden. Die Abschaltung der Pumpe P2 erfolgt, wenn

Datum/Zeit	T1 °C	T11 °C	T2 °C	T12 °C	$t_m$ K	PQ1 <sub>gem</sub> kW
16.1.95, 10.20 Uhr P2 ein: 10.01 Uhr	28.6	20.9	20.0	26.1	1.6	9
16.1.95, 15.10 Uhr P2 aus: 15.15 Uhr	55.7	49.3	48.1	53.6	1.6	9
22.5.95, 9.30 Uhr P2 ein: 9.14 Uhr	47.8	43.2	41.6	45.1	2.1	6
22.5.95, 18.20 Uhr P2 aus: 18.38 Uhr	67.9	60.1	58.9	64.5	2.1	9
30.7.95, 10.20 Uhr P2 ein: 9.59 Uhr	67.3	58.8	58.0	64.1	1.7	9
30.7.95, 18.50 Uhr P2 aus: 18.58 Uhr	65.4	60.4	59.4	63.2	1.5	6

Tabelle 2: Anlagenparameter beim Zu- und Abschalten der Speicherladepumpe P2  
Die angegebenen Temperaturen sind Mittelwerte der vorangegangenen 20 Minuten (die Schaltvorgänge basieren auf den Momentanwerten).

$T_1 \leq T_2 + 3 \text{ K}$ . Zur Überprüfung dieser Schalthysterese muß die Übertragercharakteristik des Wärmeübertragers 1 herangezogen werden (Bild 15). In der Tabelle 2 sind einige Beispiele für die aufgetretenen Temperaturverhältnisse nach dem Zu- bzw. vor dem Abschalten der Pumpe P2 zusammengestellt.

Es ist zu sehen, daß - bedingt durch das Regelregime - erst Kollektorkreisleistungen ab 9 kW zur Abgabe von Energie führen.

Eine Absenkung der zur Regelung verwendeten Temperaturdifferenzen würde bei wolkenlosem Wetter nur wenige Minuten Schaltverzögerung bedeuten, bei stark schwankenden Solarstrahlungsleistungen jedoch zu häufigen Pumpenschaltungen führen, die ohne relevante Ertragssteigerung zum Verschleiß der Pumpe führen können.

### 3.2.2 Temperaturschichtung und Entladeregulung

Der Pufferspeichervorlauf erfolgt immer in den Speicher PS4 in das lange Rohr der Ladewechselvorrichtung. Entsprechend seiner Temperatur steigt das Wasser im Rohr nach oben. Ist es kälter als in der untersten Pufferspeicherschicht, tritt es bereits an der untersten Laderohröffnung aus und wird mit der durch die Pumpe P2 erzwungenen Strömung in das lange Beladerohr des Speichers PS3 geleitet. Durch die Pufferspeicherreihenschaltung setzt sich dieser Prozess bis zum Speicher PS4 fort, so daß das Wasser mit dem niedrigsten Temperaturniveau in der untersten Schicht des Speichers PS1 vorliegt und an den Wärmeübertrager 1 geleitet werden kann. Dieses Temperaturniveau variiert entsprechend der Wärmeabnahmebedingungen zwischen 17 und 57 °C zum Tagesbeginn und bestimmt die Mindeststrahlungsleistung, die zur Inbetriebnahme des Kollektorkreises erforderlich ist. Der niedrigste Wert für  $T_2$  wurde im Januar gemessen, als nach einer Reihe solarstrahlungsarmer Tage die gespeicherte Wärme zur Vorwärmung des Trinkwarmwassers für die Schule abgegeben worden war. Die höchsten Werte liegen im Sommer vor, wenn die Solarwärme zum überwiegenden Teil in das Fernwärmenetz eingespeist wird und somit die Fernwärmerücklauftemperatur die niedrigste Systemtemperatur darstellt. Im Bild 17 sind die Profile von  $T_2$  für die Monate Januar, März und August dargestellt. Im Januar erfolgte nur die Trinkwasservorwärmung für die Schule, man erkennt gut die Korrelation von  $T_2$  mit den Kollektorfelderträgen  $Q_1$  der vorangegangenen Tage. Im März waren je nach solarer Einstrahlung sowohl die Schule als auch das Fernwärmenetz Wärmeabnehmer, somit korreliert das Temperaturniveau von  $T_2$  nach strahlungsreichen Tagen mit der Fernwärmerücklauftemperatur. Im Juli und August wurde zu Vergleichszwecken die Trinkwasservorwärmung außer Betrieb genommen und  $T_2$  liegt nahezu konstant bei 57 °C.

Im Bild 17 ist auch die Temperatur  $T_6$  des führenden Speichers PS4 jeweils zum Tagesanfang dargestellt. Es ist ersichtlich, daß in der Pufferspeicherkaskade entgegen dem angestrebten Konzept keine Temperaturschichtung vorliegt. Auch im Tagesverlauf werden die Vorteile der Schichtbeladekonzeption nur wenig wirksam. Die Ursachen für diesen überraschenden Befund sollen im einzelnen diskutiert werden, wobei nochmals im Detail auf die Regelkonzeption bei Entladung der Pufferspeicher eingegangen werden muß.

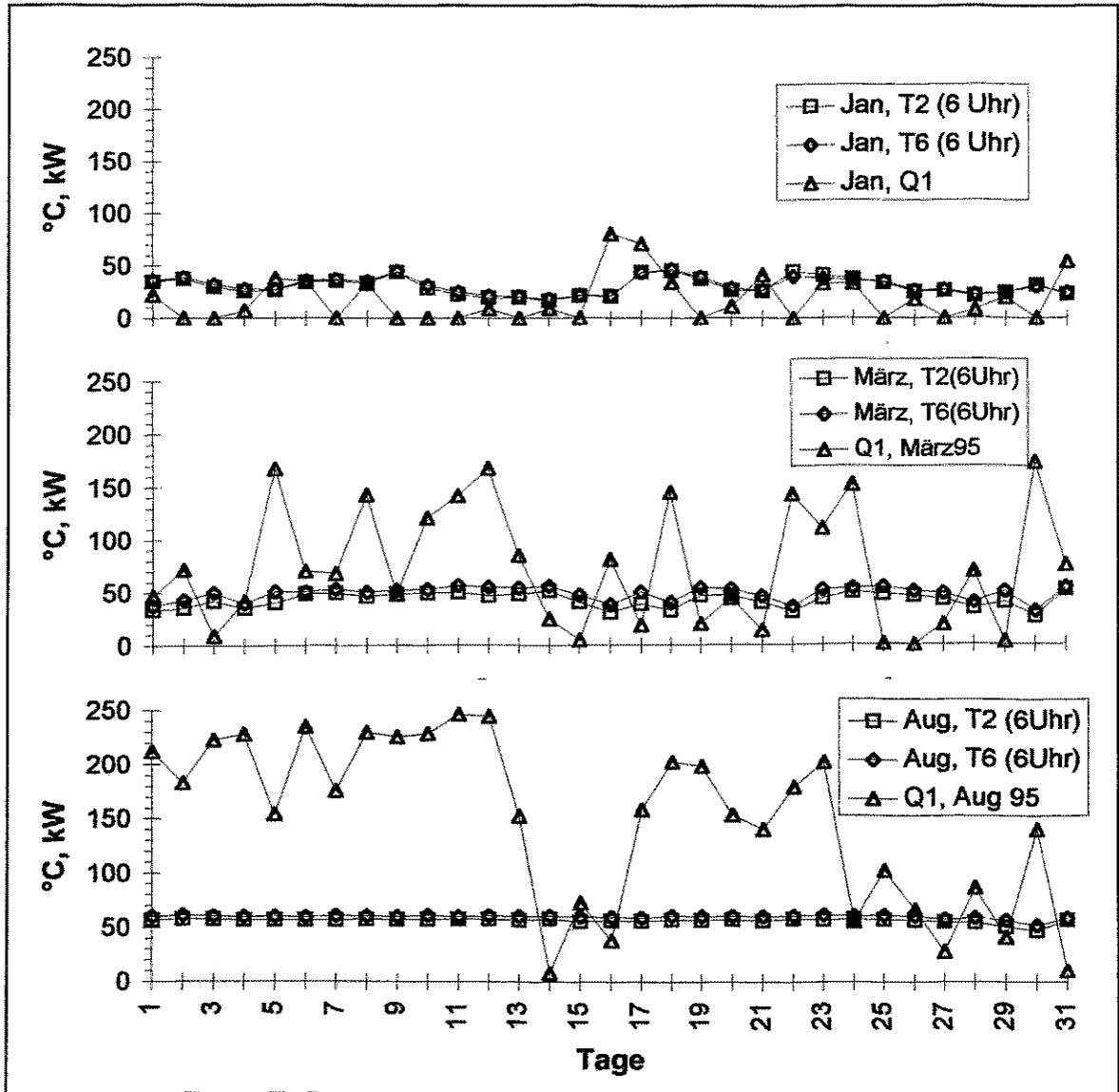


Bild 17: Pufferspeichertemperaturen und aufgenommenen Wärmemengen Q1 für die Monate Januar, März und August 1995

**Trinkwasservorwärmung:** Die Priorität bei der Wärmenutzung besitzt die Trinkwasservorwärmung für die Schule mit einem Sollwert von 60 °C. Das Temperaturniveau im Brauchwasserspeicher (BWS) liegt am Tagesanfang entweder bei der Solltemperatur oder bei der am Vortag maximal erreichten Temperatur oder nach frühzeitiger Wärmeabnahme und Nachladung aus den Speichern bei  $T_{10} = T_6 - 3 \text{ K}$ .

Ist:  $T_{10} = 60 \text{ °C}$ , liegt kein Ladebedarf des BWS vor,

ist:  $T_{10} < 60 \text{ °C}$ , erfolgt die Nachladung sobald  $T_6 \geq T_{10} + 5 \text{ K}$  erreicht solange, bis

entweder  $T_9 = T_{\text{soll}} (60\text{°C})$

oder  $T_9 = T_2 - 3 \text{ K}$ .

Die Rückspeisung des Pufferspeicherwassers erfolgt in den Beladestab im Speicher PS1.

**Fernwärmeeinspeisung:** Liegt kein Ladebedarf für den BWS vor und erreicht T6 den Wert  $T6 > T8 + 10 \text{ K}$ , erfolgt die Inbetriebnahme der Pumpen P4 und P6 zur Einspeisung der Wärme der Pufferspeicher in den Fernwärmerücklauf. Die gespeicherte Wärme wird natürlich auch unabhängig von der Pufferspeicherbeladung an die Fernwärme abgegeben, wenn durch erhöhte Wärmeabnahme im Netz zeitweise eine niedrige Rücklauftemperatur vorliegt. Die Rückspeisung des Pufferspeicherwassers erfolgt temperaturgeführt bei  $T7 > T3$  in den PS2, sonst in den PS1.

### 3.2.3 Temperaturprofil an sonnigen bzw. wechselhaften Tagen

Da am Tagesanfang ein ausgeglichenes Temperaturniveau in den Pufferspeichern vorliegt, besitzt das solar erwärmte Wasser bei Inbetriebnahme der Pumpe P2 das höchste Temperaturniveau und gelangt in die oberste Schicht von PS4.

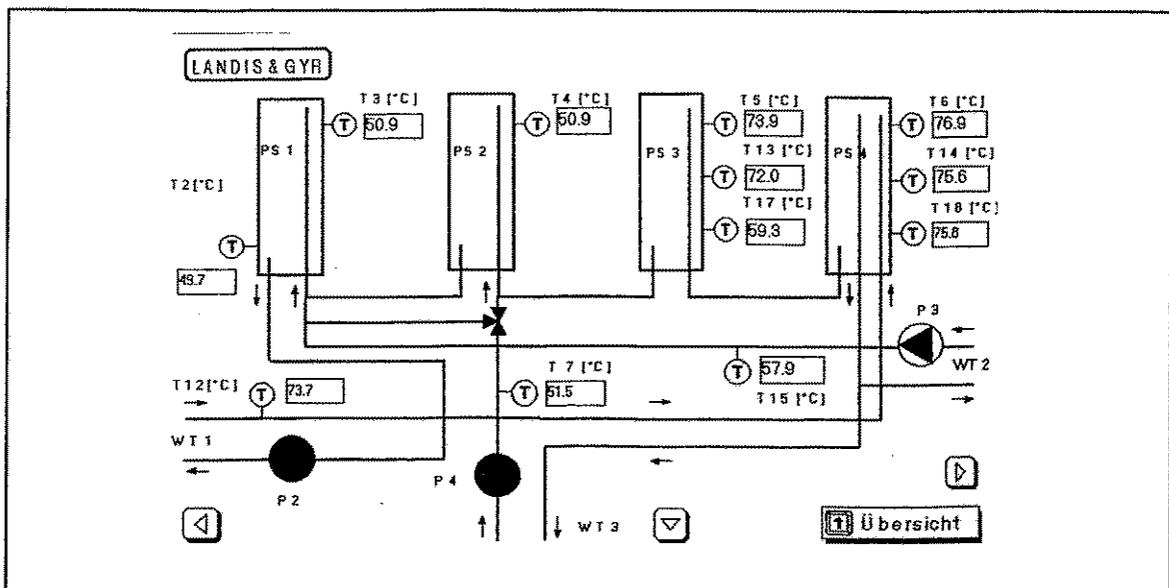


Bild 18: Prozeßbildardarstellung der Pufferspeichertemperaturen

Mit der im Tagesverlauf eines wolkenlosen Tages schnell ansteigenden Strahlungsleistung auf die Kollektorfläche erhöht sich auch die Vorlauftemperatur und das Wasser wird weiter in die oberste Schicht von PS4 eingespeist. Mit dem Low-Flow-Prinzip der Kollektordurchströmung sind hohe Temperaturspreizungen im Kollektorkreis verbunden, d.h. bereits nach kurzer Zeit erreicht mit der Vorlauftemperatur T12 auch T6 ein Niveau, das entweder die Nachladung des BWS oder die Fernwärmeeinspeisung auslöst. Besonders anschaulich ist dabei die Prozeßbildardarstellung der Pufferspeicher einschließlich der Temperaturmeßstellen im Bild 18.

Am Beispiel des 22.5.1995 soll die charakteristische zeitliche Dynamik der Temperaturverteilung in den Pufferspeichern an einem sonnigen Tag veranschaulicht werden. Der Tagesbeginn des Anlagenbetriebes ist aus Tabelle 3 ersichtlich. Nachdem bereits von 8.28 bis 8.59 Uhr eine Vorwärmung des BWS erfolgte, begann infolge des Solarwärmegewinns ab 10.07 Uhr die **Nachladung des BWS**, ausgehend von  $T10 = 47.4 \text{ °C}$  auf die Solltemperatur von  $60 \text{ °C}$ . Gleichzeitig fand auch eine Warmwasserabnahme in der Schule statt, so daß die BWS-Ladung bis 12.24 Uhr andauerte.

Zeit	G W/m <sup>2</sup>	Pumpe 2	T1 °C	T12 °C	T2 °C	T6 °C	Ladung BWS.	T10 °C
							8.28-8.59	
09.10	361		42.4	39.3	40.3	48.1		48.0
		9.14- 18.40						
09.20	400		45.8	42.3	40.3	48.0		48.0
09.40	361		49.3	47.9	41.4	48.9		48.0
10.00	576		49.8	48.4	42.3	49.4		47.4
10.20	581		60.5	57.6	43.0	52.7	10.07- 10.37	47.4
10.40	673		65.3	62.7	44.6	52.7		50.5
10.50							10.43- 12.24	

Tabelle 3: Ausgewählte Temperaturen und Pumpenlaufzeiten am Vormittag

Am Ende der BWS- Beladung weist die Pufferspeicherkaskade folgende Temperaturverteilung auf (in °C):

#### 12.20 Uhr

	PS1	PS2	PS3	PS4	
	T3=52.9	T4=46.7	T5 =49.4	T6 =82.3	
			T13=48.3	T14=75.2	
T12=88.4	T2=52.3		T17=47.6	T18=68.6	T15=57.1

Die Temperaturverteilung ist nicht kontinuierlich abfallend von T6 bis T2. Die Ursache liegt in der Nachladung des BWS auf hohem Temperaturniveau und der damit bedingten hohen Rücklauftemperaturen T15 in den Pufferspeicher PS1. Im PS4 wird während der BWS- Ladung ein Temperaturgefälle aufgebaut, da die Pufferspeicherladetemperatur rund 88 °C beträgt, am Wärmeübertrager 2 aber eine Rücklaufbeimischung die Ladetemperatur für den BWS begrenzt. Im Anschluß an die BWS- Ladung beginnt die Fernwärmeeinspeisung.

Die sich in Folge der **Fernwärmeeinspeisung** einstellenden Temperaturverhältnisse im Gesamtsystem sollen ebenfalls am Beispiel des sonnigen 22.05.1995 mit Hilfe der Tabellen 4 und 5 veranschaulicht werden. Der Betrieb der Pumpen P4/P6 erfolgte von 12.24 Uhr bis 20 Uhr, wobei bereits 18.40 Uhr die Pufferspeicherbeladung beendet wurde. Zu beachten ist hier, daß die Volumenströme auf der Pufferspeicherseite ca. 1.5 m<sup>3</sup>/h und auf der Fernwärmeseite ca. 2.4 m<sup>3</sup>/h betragen.

Auch hier sollen die Temperaturverteilungen in der Pufferspeicherkaskade zum Zeitpunkt hoher Solarstrahlungsleistung um 14 Uhr, sowie am Ende der Fernwärmeeinspeisung um 20 Uhr die Probleme bei der Pufferspeicherschichtung aufzeigen:

	12.40 Uhr	14.00 Uhr	16.00 Uhr	18.00 Uhr	20.00 Uhr
G in W/m <sup>2</sup>	927	961	820	466	-
T1 in °C	94.1	94.9	92.4	71.2	-
T12 in °C	88.7	89.7	88.2	68.3	-
T2 in °C	50.8	51.0	58.5	59.0	55.2
T6 in °C	84.2	88.0	85.5	62.7	58.8
T8 in °C	53.4	54.3	56.0	54.6	51.1
T21 in °C	71.6	74.4	73.1	62.2	55.6
T7 in °C	57.3	58.0	61.0	58.4	54.5
PQ1 in kW	42	*42	*36	*17	*-
PQ3 in kW	48	*28	*31	*18	*7

\*Stundenmittel

Tabelle 4: Systemparameter während der Fernwärmeeinspeisung am 22.05.1995

**14 Uhr:**

	PS1	PS2	PS3	PS4	
	T3=52.7	T4=60.1	T5 =56.3	T6 =88.0	
			T13=54.6	T14=80.0	T7=58.1
T12=89.7	T2=51.0		T17=50.3	T18=71.9	T8=54.3

**20 Uhr:**

	PS1	PS2	PS3	PS4	
	T3=55.6	T4=57.7	T5 =58.6	T6 =58.8	
			T13=58.1	T14=57.6	T7=54.5
T12= /	T2=55.2		T17=56.9	T18=57.5	T8=49.0

Während des gleichzeitigen Betriebs von Pufferspeicherbeladung und Fernwärmeeinspeisung wird das solar erwärmte und in den PS4 geleitete Wasser sofort wieder abgezogen und zum Wärmeübertrager 3 geleitet. Mit der Temperatur T7 gelangt es nach der Wärmeabgabe an das Fernwärmewasser zurück in die Pufferspeicher PS1 oder 2. Dadurch wird das Wasser im Pufferspeicher 4 nur wenig bewegt und ändert sein Temperaturprofil kaum. In den Pufferspeichern PS1 und 2 stellt sich das Temperaturniveau von T7 ein und bestimmt damit den Kollektorrücklauf. Der Pufferspeicher 3 wird durch diese Prozesse kaum beeinflusst und nur sehr langsam erwärmt, da der Volumenstrom zum WÜ3 bei ca. 1.5 m<sup>3</sup>/h liegt, der Pufferspeicherbeladestrom vom WÜ1 jedoch nur bei ca. 1m<sup>3</sup>/h.

Kurzzeitige Erhöhungen der Fernwärmerücklauftemperatur werden durch das Pufferspeichervolumen von PS1 und 2 ausgeglichen und ermöglichen die Konstanz der Kollektorrücklauftemperatur im Verlauf eines Sonnentages. Da die Fernwärmerücklauftemperatur in den Nachmittagsstunden am größten ist und in den Abendstunden durch den erhöhten Wärmebedarf im Netz absinkt, ergab sich am Beispieltag die in Tabelle 5 dargestellte zeitliche Wärmemengenverteilung (Q2 ist dabei die vom BWS an die Schulboiler abgegebene Wärmemenge und nicht an den Betrieb der Pumpen P3/P5 gebunden).

Es zeigt sich, daß an solarstrahlungsreichen Tagen unter den vorliegenden Betriebs- und Regelbedingungen die Vorteile der Schichtbeladeeinrichtungen in der Pufferspeicherkaskade nicht wirksam werden.

Zeit	H <sub>A</sub> in kWh (Solarstrahlung)	Q1 in kWh (Koll.kreis)	Q2 in kWh (BWS)	Q3 in kWh (Fernwärme)
5.40 - 9.00	35	/	27	
9.00 - 12.20	192	62	22	
12.20 - 18.40	438	196	37	171
18.40 - 20.00	23	/	/	9
Summe	688	258	86	180

Tabelle 5: Energiebilanz am 22.05.1995

Im Bild 19 sind die relevanten Pufferspeichertemperaturen im Vergleich zur stark schwankenden Solarstrahlungsleistung des wechselhaften 21.05.1995 dargestellt.

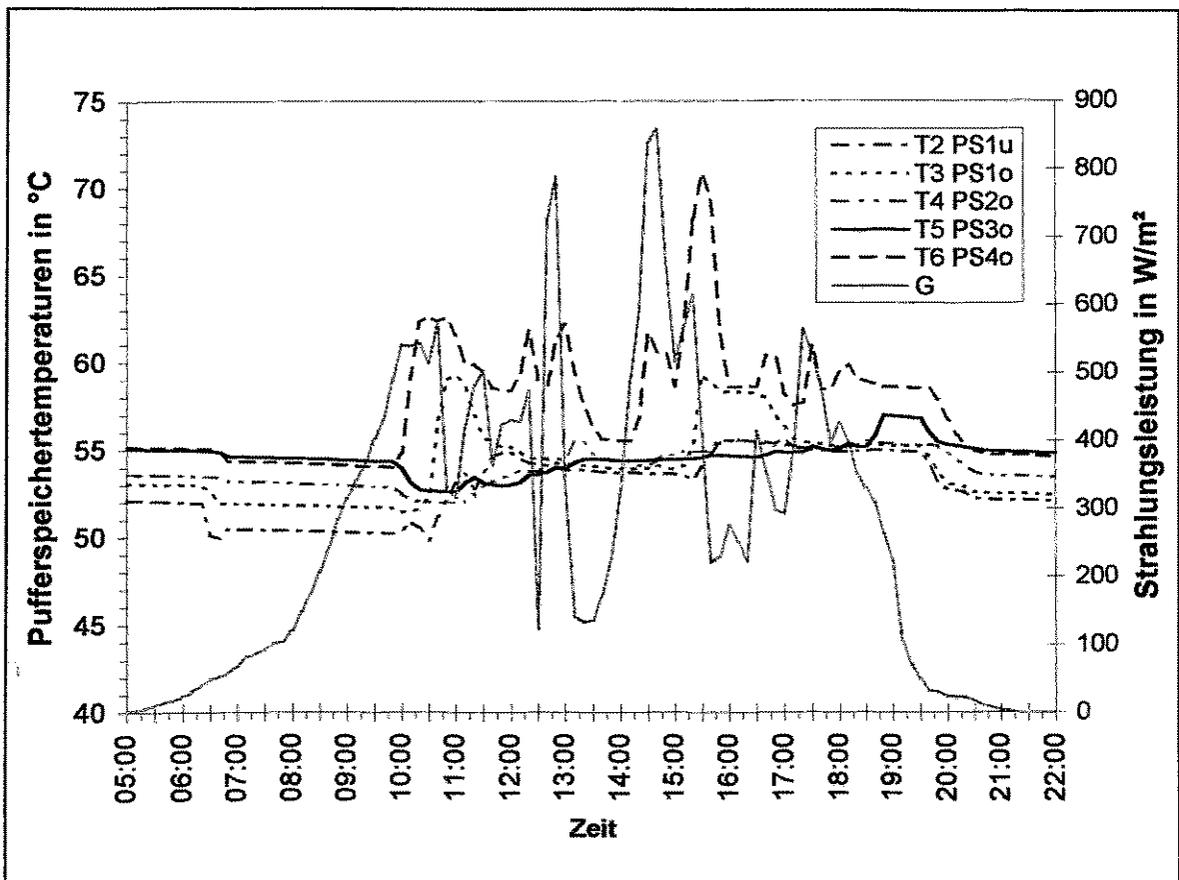


Bild 19: Tagesverlauf des Temperaturprofils in der Pufferspeicherkaskade an einem wolkgigen Tag (21.05.1995)

Am Tagesbeginn lag wieder das ausgeglichene Temperaturprofil in den Pufferspeichern vor. Entsprechend der Zeitkonstante stieg mit wachsender Strahlungsleistung zuerst die Temperatur T6 im führenden Pufferspeicher an. Mit Beginn der Fernwärmeinspeisung erhöhte sich durch den Pufferspeicherrücklauf auch die Temperatur T3 im PS1. Im Tagesverlauf glichen sich alle Temperaturniveaus außer T6 an. Ab 20 Uhr fand nochmals eine Entladung der Pufferspeicher auf das Niveau des Fernwärmerücklaufs statt. Nachfolgend dargestellter Tagesgang (Tabelle 6) demonstriert die

Pumpenlaufzeiten, die dabei übergebenen Wärmemengen und relevante Temperaturen.

Laufzeit P1 (Koll.kreis)	Laufzeit P2 (Pufferspeicher) Q1 in kWh	Laufzeit P4/6 (Fernwärme) Q3 in kWh	T6/T2/T8 bei P4 ein
		06.20 - 06.40 - 1 kWh	55/52/45
8.41 - 13.10	09.48 - 12.28 - 28 kWh	11.07 - 12.00 - 10 kWh	62/53/49
	12.38 - 13.06 - 10 kWh	12.10 - 12.32 - 4 kWh	61/54/51
13.54 - 15.45	14.08 - 15.39 - 30 kWh	12.44 - 13.32 - 12 kWh	60/54/48
16.10 - 16.15	16.30 - 16.53 - 3 kWh	14.22 - 14.59 - 17 kWh	61/54/51
16.23 - 18.39	17.09 - 18.39 - 12 kWh	15.06 - 15.46 - 4 kWh	65/54/50
		16.38 - 17.11 - 4 kWh	61/55/51
		17.21 - 17.48 - 7 kWh	58/55/48
		17.59 - 18.25 - 3 kWh	60/55/50
		19.29 - 20.28 - 7 kWh	59/54/48
Summe	83 kWh	69 kWh	

Tabelle 6: Pumpenlaufzeiten und Wärmebilanzen am 21.05.1995

Als Tagesbilanz ergab sich

Strahlungsmenge $H_A$ auf die Absorberfläche:	406 kWh
Q1 (Kollektorkreis):	83 kWh
Q3 (Fernwärme):	69 kWh
Q2 (BWS): keine Abnahme, da Sonntag	0 kWh.

### 3.2.4 Ertragssimulation ohne Pufferspeichervolumen

Mit der folgenden Betrachtung soll abgeschätzt werden, wie sich das Pufferspeichervolumen an wolkigen Tagen auf den solaren Nutzertrag auswirkt. Die Tagesbilanz des 21.05.1995 ergab sich aus den in der Tabelle 6 zusammengestellten temperaturgeregelten Pumpenbetriebszeiten und den dabei erzielten Wärmeströmen vom Kollektorkreis an die Pufferspeicher und anschließend an den Fernwärmerücklauf.

Wenn kein Pufferspeichervolumen vorliegt, würde die Wärmeübertragung vom Kollektorkreis an den Fernwärmerücklauf an einem gemeinsamen Wärmeübertrager erfolgen, basierend auf der jeweils aktuellen Fernwärmerücklauftemperatur. Mit den gemessenen Kollektorvorlauf- und Fernwärmerücklauftemperaturen wurde unter Annahme einer Temperaturspreizung von 4 K am Wärmeübertrager die zu erwartende Wärmeleistung im Tagesverlauf errechnet und im Bild 20 dargestellt.

Als Tagesbilanz wurde eine Wärmemenge von 83 kWh ermittelt, die an die Fernwärme übergeben werden könnte. Dieser Wert entspricht dem gemessenen Kollektorkreisenertrag Q1, von dem am 21.05. jedoch nur 69 kWh tatsächlich zur Fernwärmeinspeisung wurden. Da die Fernwärmerücklauftemperatur an diesem Tag das Temperaturniveau in den Pufferspeichern bestimmte, zeigt sich, daß die Zwischenspeicherung der Solarwärme trotz der Schichtbeladeeinrichtungen gegenüber einer Direkteinspeisung keinen Vorteil brachte.

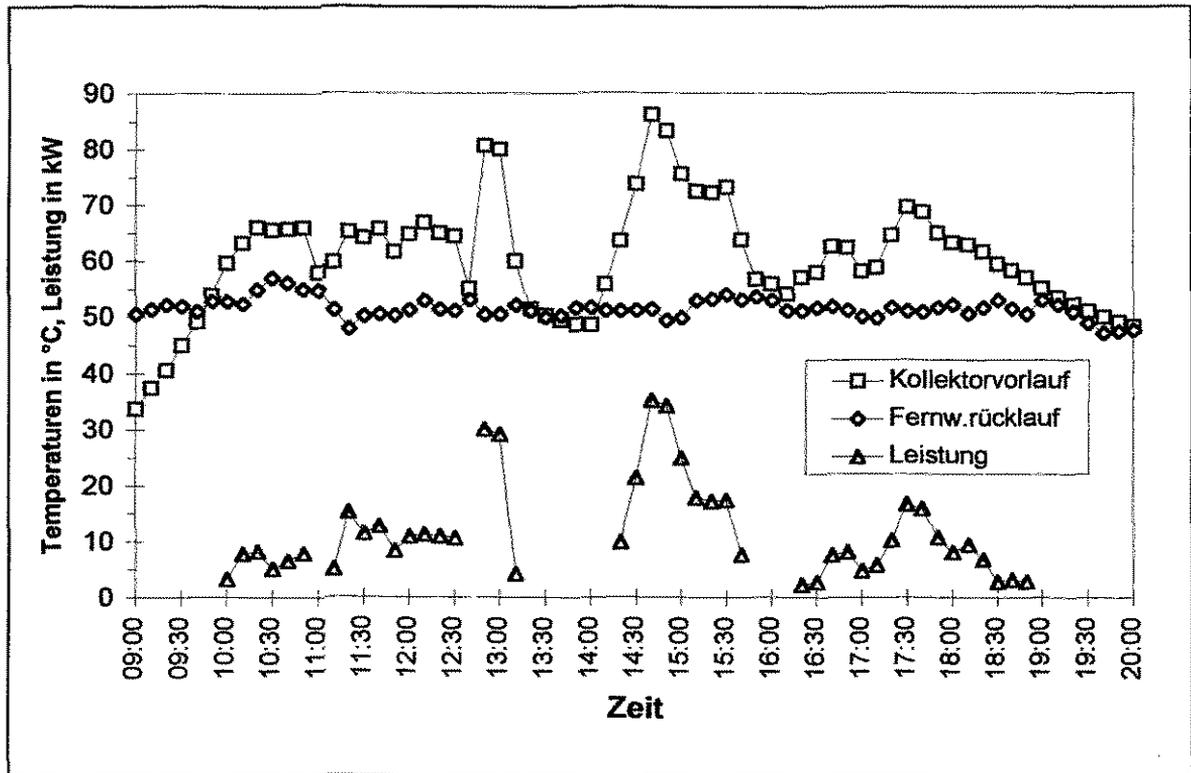


Bild 20: Simulation der Fernwärmeeinspeisung an einem wolkeigen Tag ohne Pufferspeichervolumen (21.05.1995)

### 3.2.5 Funktionsbedingte Schichtinhomogenität im Entladeprozeß

Die bisher aufgezeigten Probleme bei der Ausbildung einer Pufferspeicherschichtung sind zum einen auf die hohen Rücklauftemperaturen in die Pufferspeicher zurückzuführen und zum anderen auf das im Verhältnis zur Kollektorfläche kleine Pufferspeichervolumen mit überwiegender Fernwärmeeinspeisung.

Ein weiteres Problem, das vor allem die optimale Nutzung der gespeicherten Solarwärme für die Trinkwasservorwärmung beeinträchtigt hat, soll hier vorgestellt werden. Es wurde beobachtet, daß die Temperaturen im führenden Pufferspeicher PS4 am Tagesanfang niedriger waren als im PS3. Erst eine einsetzende Pufferspeicherbeladung beendete diese Unregelmäßigkeit. Ein Beispiel dazu ist anhand des Prozeßbildes im Bild 21 dargestellt.

Die Temperatur T6 ist niedriger als T5 und im unteren Teil des PS4 befindet sich das niedrigste Temperaturniveau der Pufferspeicherkaskade. Da T6 gleichzeitig die Regeltemperatur für die Trinkwasservorwärmung ist, wird deutlich, daß in diesem Fall das Trinkwasser nicht bis auf das höchste in den Pufferspeichern enthaltene Temperaturniveau vorgewärmt werden kann. Da nur zu Beginn der BWS-Ladung Wasser mit einem entsprechend niedrigen Temperaturniveau als Pufferspeicher-rücklauf auftreten kann, dieses jedoch in den PS1 geleitet wird, wurde ein direkter Weg vom PS1 zum PS4 bei der BWS-Ladung vermutet.

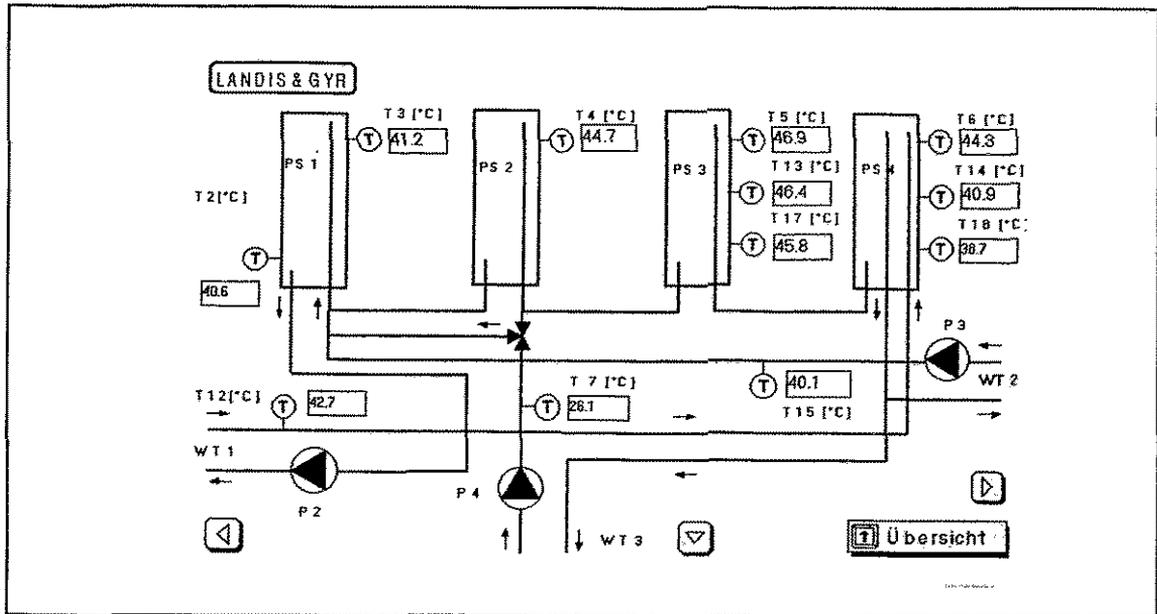


Bild 21: Schichtinhomogenität in den Pufferspeichern

Durch Messungen konnte nachgewiesen werden, daß beim Entladeprozeß der Pufferspeicher, wenn die Pufferspeicherladepumpe P2 nicht in Betrieb ist, nur etwa die Hälfte des Entladevolumenstromes wie vorgesehen diagonal durch die Pufferspeicher fließt, die andere Hälfte dagegen über die Pumpe P2 und durch den Wärmeübertrager 1 in den langen Beladestab des PS4 gelangt. Der Druckverlust über Pumpe und Wärmeübertrager ist also gleich dem der Beladestäbe in den in Reihe geschalteten Pufferspeichern. Da diese Strömung in Richtung der Pufferspeicherbeladung stattfindet, kann sie nur durch ein mit der Pumpe P2 gekoppeltes Magnetventil unterbunden werden. Immer wenn P2 nicht in Betrieb ist, muß das Ventil geschlossen sein. Die Nachinstallation des Ventils wurde angeregt.

Dieser Effekt konnte nur durch die Kontrolle der Pufferspeichertemperaturen gefunden werden und sollte künftig bei allen Speicherreihenschaltungen berücksichtigt werden.

### 3.3 Verbraucherkreise

#### 3.3.1 Trinkwarmwasserbereitung für die Schule

Die Vorwärmung des Trinkwassers hat regelungstechnisch Vorrang vor der Einspeisung der Solarwärme in das Fernwärmenetz. Der Warmwasserbedarf der Schule liegt bei ca. 1 bis 1.5 m<sup>3</sup> an den Wochentagen und dient zur Versorgung der Schulküche, des Schulhortes sowie zur Reinigung. An den Wochenenden besteht kein Bedarf, in den Ferien ist er stark reduziert.

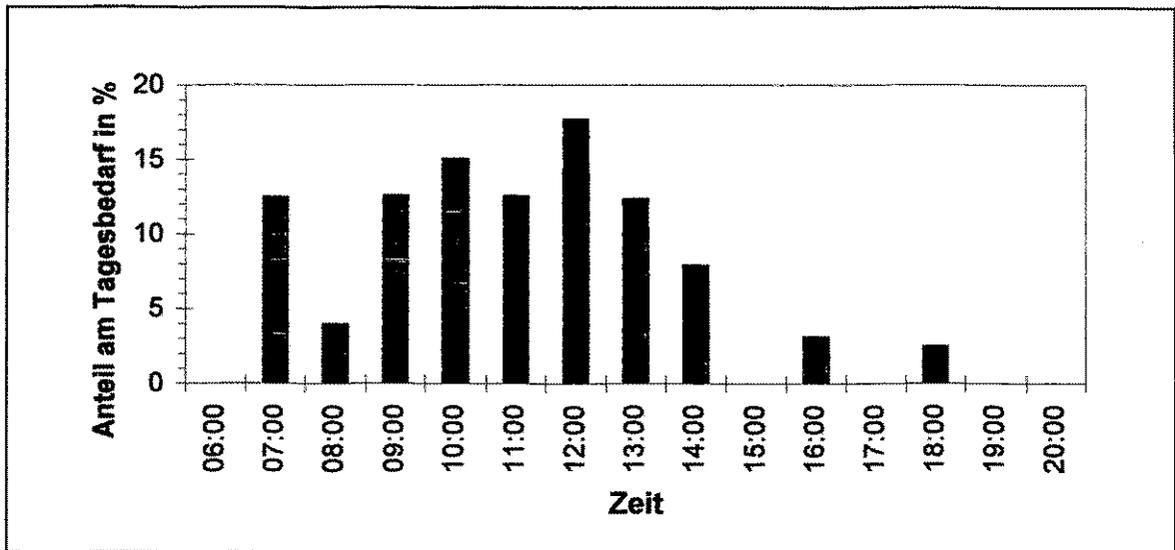


Bild 22: Warmwasserverbrauchsprofil der Waldblickschule an Schultagen

Ein typisches Verbrauchsprofil des Warmwasserbedarfs ist im Bild 22 dargestellt. Es zeigt, daß bis 10 Uhr bereits ca. 45 % und bis 14 Uhr ca. 90 % des Tagesbedarfs an Warmwasser abgenommen wurden. Die restlichen 10 % verteilen sich unregelmäßig auf die Nachmittagsstunden. Damit stellte sich die zeitliche Dynamik der solaren Trinkwasservorwärmung im Brauchwasserspeicher (BWS) wie folgt dar:

**Bis 10 Uhr:** Ca. 450 l Warmwasser wurden den Warmwasserbereitern der Schule entnommen und aus dem BWS mit der am Vortag erreichten Temperatur nachgespeist. Der BWS wurde dabei aus den Pufferspeichern der Solaranlage bis maximal T<sub>6</sub> (Pufferspeicher 4) erwärmt. Im Kapitel 3.2.2 wurde bereits gezeigt, daß zum Tagesanfang auch im Sommer in Folge der Wärmeabgabe an die Fernwärme die Temperaturen in den Pufferspeichern unter 60 °C lagen. Durch die SSW- Orientierung des Kollektorfeldes reichte die Solarstrahlungsleistung bis ca. 10 Uhr nicht aus, um Wärme an das Pufferspeichersystem zu liefern.

**Ab 10 Uhr :** Sobald im Pufferspeicher 4 solar erwärmtes Wasser mit einer um 5 K höheren Temperatur als im BWS vorlag, begann die Nacherwärmung des BWS. Bei genügendem Solarstrahlungsangebot wurde der BWS bis gegen 14 Uhr immer wieder auf Solltemperatur nachgewärmt, wenn T<sub>10</sub> im BWS die Solltemperatur unterschritt. Genügte die Solarstrahlung nicht, konnte auch der weitere Warmwasserbedarf nur bis auf Temperaturen unterhalb der Solltemperatur vorgewärmt werden. Hierin unterscheidet sich die beschriebene Solaranlage von den Solaranlagen mit

alleiniger Warmwasserbereitung, bei denen in den Pufferspeichern Wasser mit Temperaturen bis zu 95 °C zwischengespeichert sein kann. Auch in den solarstrahlungsreichen Sommermonaten erfolgt daher keine vollständige solare Deckung des Energiebedarfs zur Warmwasserbereitung.

Die Warmwasserzirkulation in der Schule ist zeitgerecht und auf die Abnahmebedingungen abgestimmt. Die Zirkulationsverluste werden allein durch die Fernwärme ausgeglichen. Die Einbindung des BWS in die Warmwasserzirkulation hätte durch bauliche und regeltechnische Aufwendungen höhere Anlagenkosten verursacht.

Um eine Energiebilanz der Warmwasserbereitung der Waldblickschule Freital aufzustellen, wurden vor Ort die Zählerstände des Kaltwasserzulaufs, des Wärmemengenzählers Q2 (solare Vorwärmung) und des Wärmemengenzählers zur Nachheizung der Warmwasserbereiter durch die Fernwärme abgelesen und im Bild 23 dargestellt. Am geradlinigen Anstieg der verbrauchten Wassermenge ist ersichtlich, daß der relative Warmwasserbedarf im Zeitraum von Mai 1995 (Probelauf der Solaranlage) bis April 1995 nahezu konstant war. Der Energiebedarf zur Wassererwärmung auf die Solltemperatur setzte sich im betrachteten Zeitraum aus veränderlichen Anteilen der solaren Vorwärmung und der Fernwärmennachheizung zusammen. Der solare Anteil hatte sein Maximum bei 71 % Ende September 1995. Ab Mitte Februar 1995 sank er auf unter 50 %, erklärbar durch ein geringeres Solarstrahlungsangebot. Von Juni bis August wurde die solare Trinkwasservorwärmung außer Betrieb genommen. Ab September entspricht der Solaranteil am Energiebedarf wieder dem Vergleichszeitraum von 1994.

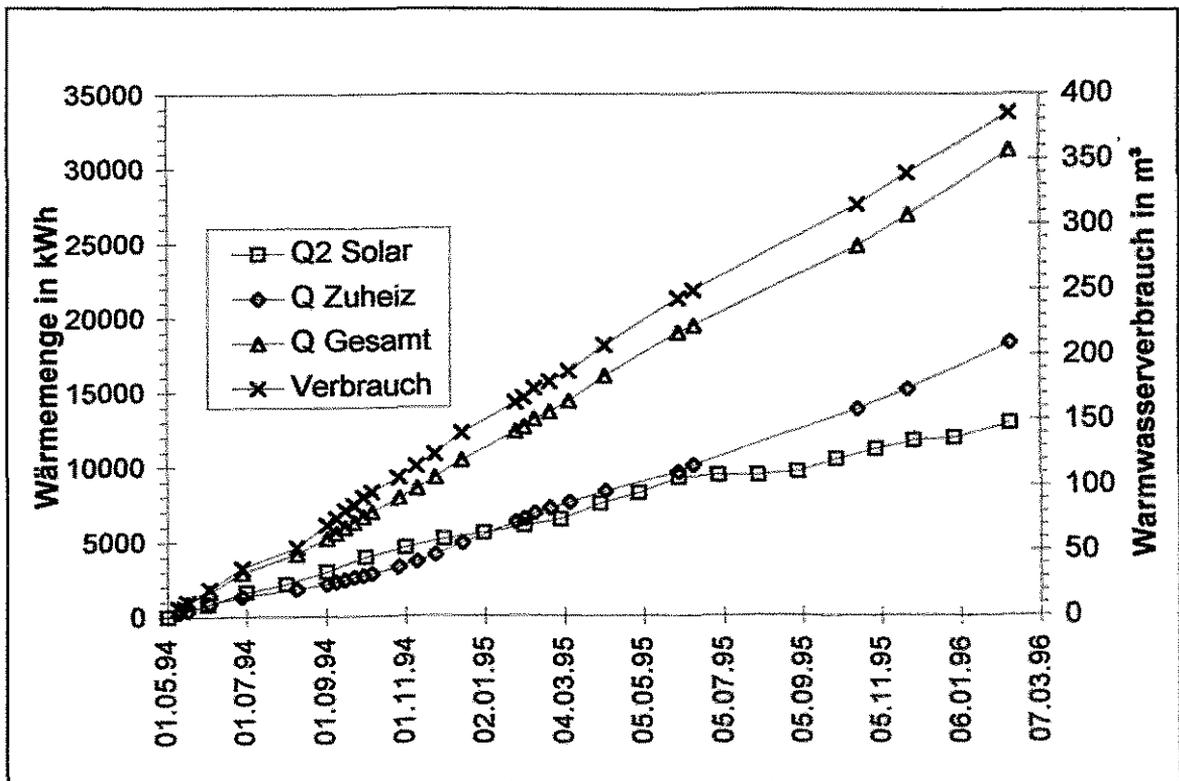


Bild 23: Warmwasserverbrauch der Waldblickschule und zugehörige Energieanteile der solaren Vorwärmung und Fernwärmennachwärmung

In der Jahresbilanz vom 27.04.1994 bis 05.04.1995 liegt der solare Deckungsgrad am Gesamtenergiebedarf für die Warmwasserversorgung der Waldblickschule bei 48 %. Die anteiligen Deckungsgrade im Jahresverlauf sind in der Tabelle 7 zusammengestellt.

Bei der Gesamtbilanzierung vom 27.04.1994 bis 13.02.1996 liegt der solare Deckungsgrad auf Grund der versuchsweisen Außerbetriebnahme der Trinkwasservorwärmung von Juni bis August 1995 bei 41 %. Vergleicht man den rechnerisch anhand des Wasserverbrauchs und einer einheitlichen Temperaturdifferenz von 50 K zwischen Kaltwasserzulauf und Solltemperatur ermittelten Nettowärmebedarf zur Warmwasserbereitung mit dem gemessenen Bruttowärmebedarf, gelangt man zu den Wärmeverlusten der Warmwasserbereitstellung. Die Annahme einer konstanten Kaltwassertemperatur ist sehr grob, läßt jedoch auf einen Verlustanteil von immerhin 28 % bei der Warmwasserbereitstellung schließen. Er umfaßt die Zirkulations- und Leitungswärmeverluste.

Tabelle 7: Energiebilanz der Warmwasserbereitung der Waldblickschule Freital

Datum	Summarische Bilanz					Bilanz im Ablesezeitraum						
	Q2	Qzu	WW	Qges	Anteil	Anteil	WW	Energie	Energie	Energie	Energie	
	(Solar) kWh	(Fernw.) kWh	Verbrauch m³	Q2+Qzu kWh	Solar %	Solar %	Verbrauch m³	Netto kWh	Brutto kWh	Differenz kWh	Verluste %	
27.04.1994	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
09.05.1994	345	260	7	605	57	57	7	407	605	198	33	33
16.05.1994	501	397	11	898	56	53	4	233	293	60	21	21
02.06.1994	819	855	21	1674	49	41	10	581	776	195	25	25
28.06.1994	1576	1346	37	2922	54	61	16	930	1248	318	25	25
09.08.1994	2329	1841	53	4170	56	60	16	930	1248	318	25	25
01.09.1994	3055	2186	70	5241	58	68	17	988	1071	83	8	8
08.09.1994	3248	2319	75	5567	58	59	5	291	326	35	11	11
15.09.1994	3457	2460	81	5917	58	60	6	349	350	1	0	0
22.09.1994	3664	2603	85	6267	58	59	4	233	350	117	34	34
29.09.1994	3933	2715	91	6648	59	71	6	349	381	32	8	8
06.10.1994	4124	2845	95	6969	59	60	4	233	321	88	28	28
27.10.1994	4616	3276	106	7892	58	53	11	640	923	283	31	31
10.11.1994	4910	3645	115	8555	57	44	9	523	663	140	21	21
24.11.1994	5164	4103	124	9267	56	36	9	523	712	189	27	27
15.12.1994	5525	4906	140	10431	53	31	16	930	1164	234	20	20
26.01.1995	6047	6268	163	12315	49	28	23	1337	1884	547	29	29
01.02.1995	6121	6504	167	12625	48	24	4	233	310	77	25	25
09.02.1995	6270	6879	174	13149	48	28	7	407	524	117	22	22
21.02.1995	6445	7195	179	13640	47	36	5	291	491	200	41	41
08.03.1995	6777	7600	187	14377	47	45	8	465	737	272	37	37
05.04.1995	7711	8345	207	16056	48	56	20	1163	1679	516	31	31
01.06.1995	9338	9603	243	18941	49	56	36	2093	2885	792	27	27
13.06.1995	9358	10082	249	19440	48	4	6	349	499	150	30	30
18.10.1995	10958	13831	315	24789	44	30	66	3837	5349	1512	28	28
26.11.1995	11691	15162	339	26853	44	36	24	1395	2064	669	32	32
13.02.1996	12898	18281	385	31179	41	28	46	2674	4326	1652	38	38

### 3.3.2 Solarwärmeeinspeisung in den Fernwärmerücklauf

Die Untersuchung der Einspeisebedingungen von Solarwärme in das Fernwärmenetz war vorrangiges Anliegen dieses Pilotprojektes. Um den Anteil einer Solaranlage an der Wärmebereitstellung des Fernwärmesystems kalkulierbar zu machen, müssen das Wärmeleistungsvermögen der Solaranlage und die zeitliche Korrelation zwischen solarem Wärmeangebot und dem Vorliegen geeigneter Temperaturverhältnisse im Fernwärmerücklauf analysiert werden. Durch die Nutzung von Fernwärmesystemen als quasi unendlich große, zeitlich konstante Wärmebedarfsträger sollen die bei Einzelabnehmern unvermeidlichen Wärmeüberschüsse im Sommer oder bei Abwesenheit durch die große Anzahl Nutzer vermieden und somit der Solarertrag erhöht werden.

Regelungstechnisch ist das Fernwärmenetz für die Solaranlage Waldblickschule Freital der Zweitabnehmer. Nur wenn die Temperatur T6 im Pufferspeicher 4 um 10 K über der Fernwärmerücklauftemperatur liegt und für die Vorwärmung des Brauchwasserspeichers kein Bedarf vorliegt, erfolgt die Abgabe der Solarwärme in den Fernwärmerücklauf. Dazu wird ein Teil des Fernwärmerücklaufwassers über den Wärmeübertrager 3 geführt, solar erwärmt und dem Gesamtrücklauf wieder beigemischt. Die technische Realisierung der Wärmeeinspeisung in den Fernwärmerücklauf erfolgt in der Heizzentrale im Keller der Schule. Wie im Bild 24 zu erkennen ist, erfolgen die Abzweigung des Teilstromes und dessen Wiedereinspeisung nach der solaren Erwärmung vor der hydraulischen Weiche des Wärmenetzes und vor einer Rohrerweiterung. Ein Rückstau des erwärmten Wassers wird damit vermieden.

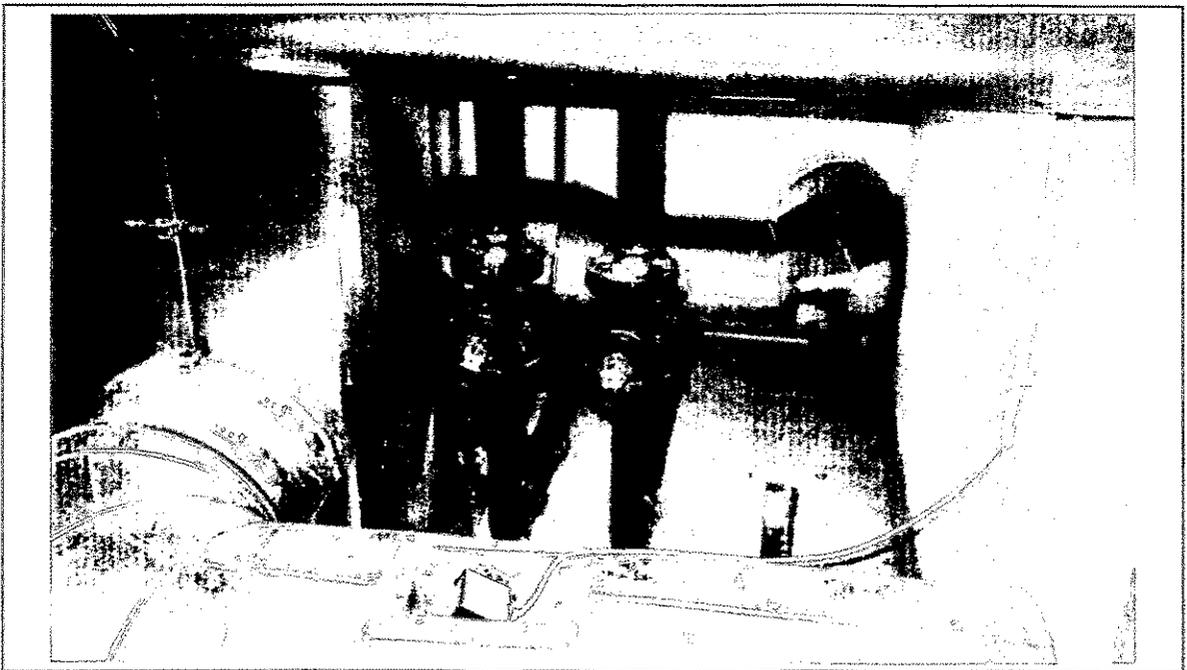


Bild 24: Technische Realisierung der Fernwärmeeinspeisung (ohne Isolierung)

An das Fernwärmenetz sind die Waldblickschule, eine Kindertagesstätte sowie 8 Wohnblöcke mit insgesamt 264 Wohnungen angeschlossen. Die Warmwasserbereitung erfolgt dezentral in jedem Wohnblock durch Beladen von je zwei 500-l-Speichern. Die Fernwärmeverlaufstemperatur wird außentemperaturabhängig geregelt. In

der heizungsfreien Zeit wird das Netz zur Warmwasserbereitung mit einer konstanten Vorlauftemperatur von 70 °C betrieben.

In den gleichzeitigen Planungsphasen des Fernwärmenetzes und der Solaranlage wurde mit Temperaturspreizungen zwischen Fernwärmeverlauf und -rücklauf von 70/35 °C im Sommer bzw. 90/70 °C im Winter gerechnet. Die Ausführung der Hausanschlußstationen mit einem Speicherladeprinzip ist jedoch in Verbindung mit dem vorliegenden Warmwasserbedarf und der Solltemperatur von 60 °C nicht geeignet, die für die Solarwärmenutzung idealen 35 °C des Fernwärmerücklaufs im Sommer zu realisieren. In der Heizperiode dagegen liegt das bestimmende Temperaturniveau im niedrigeren Heizungsrücklauf der Wohnungen. Durch die gleitenden Vorlauftemperaturen und die insgesamt höhere Wärmelast liegen die realen Fernwärmerücklauftemperaturen in dieser Zeit niedriger als im Sommer.

Die charakteristischen Tagesprofile der Fernwärmerücklauftemperatur T8 ausgewählter Monate veranschaulicht Bild 25.

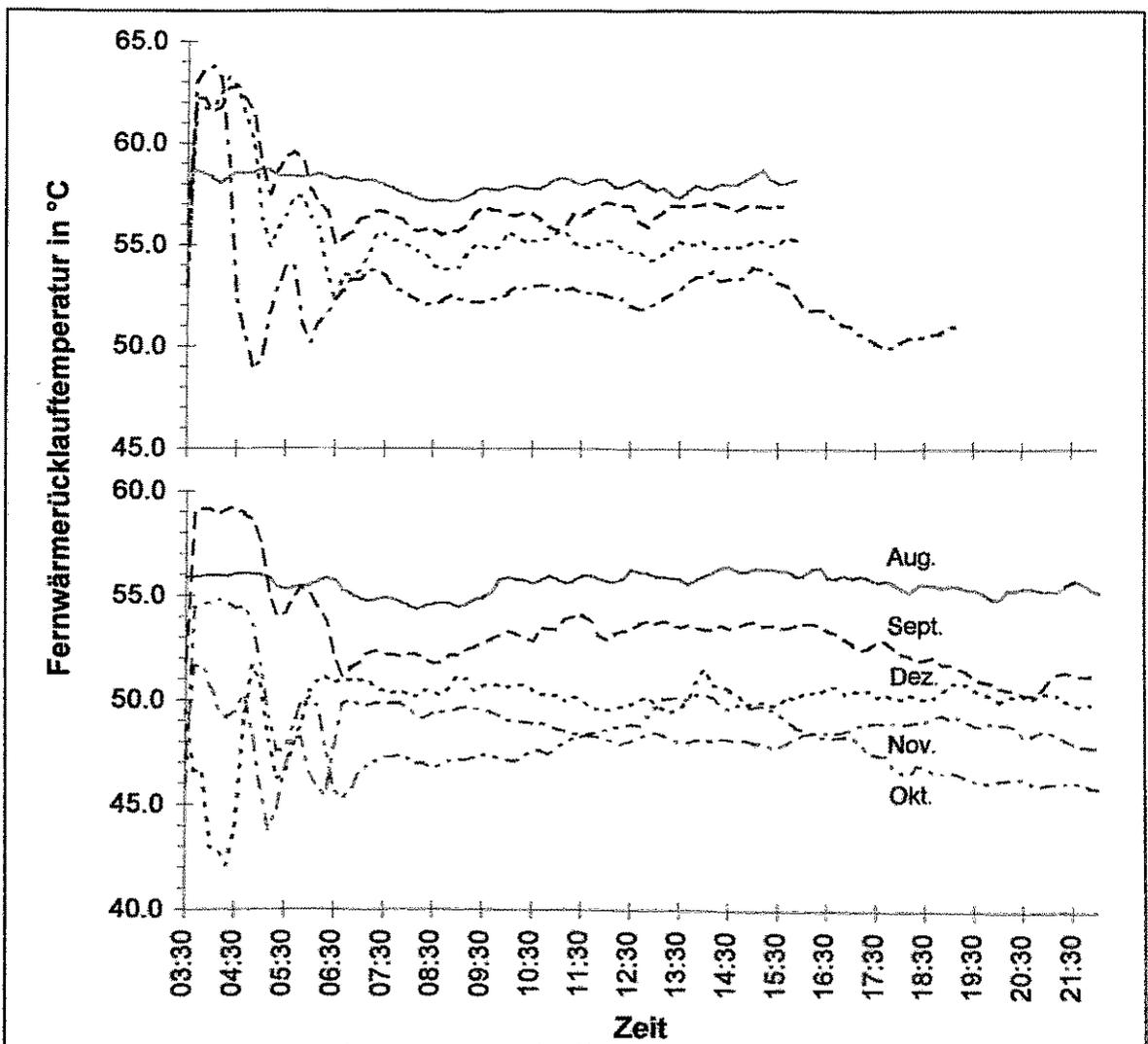


Bild 25: Tagesprofil der Fernwärmerücklauftemperatur T8 (Monatsmittel)

Im Tagesverlauf der heizungsfreien Zeit schwankte die Fernwärmerücklauf­temperatur nur wenig um den Mittelwert von rund 57 °C. Die Vorlauf­temperatur­regelung des Fernwärmenetzes beinhaltet in der Heizperiode eine Nachtabsenkung der Vorlauf­temperatur und entsprechend eine Erhöhung in den Frühstunden, um den erhöhten Wärmebedarf der morgendlichen Raumerwärmung ausgleichen zu können. Im Temperaturprofil des gemessenen Fernwärmerück­laufs ergibt sich daraus ein typisches Bild. In den Frühstunden der Übergangszeit bewirkt die Erhöhung der Vorlauf­temperatur auch eine Erhöhung der Rücklauf­temperatur T8. Im weiteren Tagesverlauf sinkt T8 zuerst stark ab, hat in der Mittagszeit ein schwaches Maximum und fällt in den Abendstunden wieder leicht ab. Im Winter bei niedrigen Außentemperaturen wird die Vorlauf­temperatur­erhöhung der Frühstunden durch den erhöhten Wärmebedarf kompensiert. Da an den Wochenenden die morgendliche Erhöhung der Vorlauf­temperatur eine Stunde später als an den Wochentagen erfolgt, stellt sich diese Überlagerung in der Monatsbilanz wie eine Anfangsschwingung dar.

Für die Einspeisung der Solarwärme in das Wärmenetz ist im wesentlichen die Fernwärmerücklauf­temperatur zwischen 9 und 19 Uhr von Bedeutung. Die über diesen Zeitraum gemittelten Werte der einzelnen Monate und vergleichsweise dazu die Außentemperaturen sind im Bild 26 dargestellt.

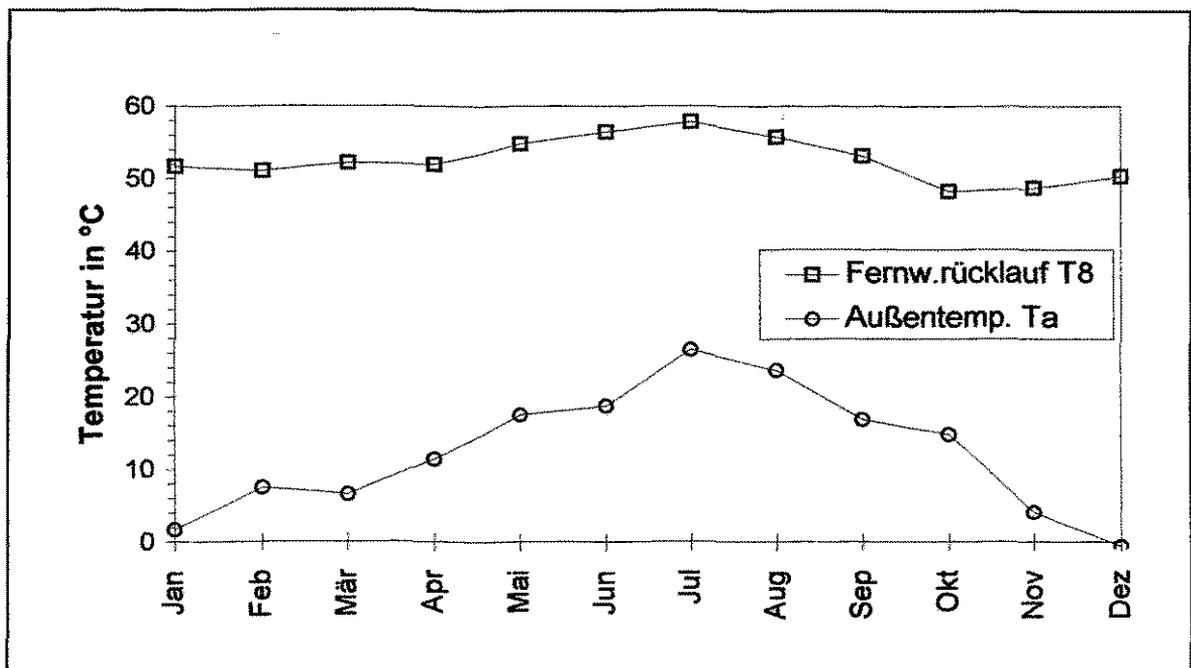


Abb. 26: Monatsmittelwerte der Temperaturen T8 und Ta

Das kurzzeitig niedrige Niveau von T8 in den Frühstunden führte auch zu kurzzeitigen Fernwärmeeinspeisungen, trug damit zu dem im Kapitel Pufferspeicherkreis beschriebenen niedrigen und ausgeglichenen Temperaturniveau in den Pufferspeichern bei. Durch die niedrigeren Rücklauf­temperaturen als im Sommer ist auch in der Übergangszeit die Einspeisung von Solarwärme möglich.

Die Einspeiseleistung der Solarwärme in den Fernwärmerücklauf erreicht an sonnigen Sommertagen ihren größten Wert. Um nicht nutzbare Wärmeüberschüsse zu vermeiden, müssen Anlagendimensionierung und Wärmebedarf zu dieser Zeit auf-

einander abgestimmt sein. Der Kollektorwirkungsgrad wird durch das Temperaturniveau im Kollektorkreis, dieses wiederum vom Temperaturniveau der Wärmeabnahme bestimmt. Im Bild 27 sind beispielhaft für die Fernwärmeeinspeisung an Sommertagen die Temperaturprofile des Kollektorvor- und rücklaufs, des Fernwärmerücklaufs, der Rücklaufanhebung sowie die Strahlungsleistung in Kollektorebene am 30.07.1995 dargestellt. Die resultierenden Leistungsprofile des Kollektorkreises und der Fernwärmeeinspeisung enthält Bild 28 im Vergleich zur Strahlungsleistung  $G$  pro  $m^2$  bzw. auf die Absorberfläche  $G_A$ . Die um 10 Uhr beginnende Rücklaufanhebung erreicht zwischen 14 und 14.30 Uhr mit 46 kW die maximale Leistung. Auf Grund der Temperaturschwankungen des Fernwärmerücklaufs und mit Hilfe des Pufferspeichervolumens konnte sie kurzzeitig höher als die maximale Kollektorkreisleistung (42 kW) sein. Von 12 bis 16.30 Uhr konnte die Einspeiseleistung zwischen 36 bis 42 kW kontinuierlich vom Fernwärmenetz aufgenommen werden. Die Fernwärmerücklaufanhebung lag dabei zwischen 53 und 58 °C, die Kollektorvorlaufanhebung erreichte 99 °C und die Solarstrahlung 940 W/m<sup>2</sup>. Die Tagesbilanz mit

Strahlung auf Absorberfläche:	640 kWh
Aufgenommene Wärmemenge Q1:	265 kWh
Abgegebene Wärmemenge Q3:	265 kWh
Anlagennutzungsgrad:	41 %

spiegelt die im Kapitel Kollektorkreisleistung dargestellte obere Leistungsgrenze der Solaranlage unter diesen Betriebsbedingungen wider. Die vom Kollektorkreis aufgenommene und die an die Fernwärme abgegebene Wärmemenge stimmen überein. Die Vorwärmung des Trinkwassers war nicht in Betrieb.

Im Sommer 1995 war die Solaranlage ohne abnahmebedingte Stillstandszeiten in Betrieb. Der Juli 1994 mit seinem überdurchschnittlich hohen Solarstrahlungsangebot führte an elf Nachmittagen zu zeitweisen Stillständen der Solaranlage. Beispielhaft dafür wurden die relevanten Temperaturprofile des 03.07.1994 im Bild 29 dargestellt.

Auf Grund fehlender Wärmeabnahme im Fernwärmenetz erhöhte sich durch die Solarwärmeeinspeisung die Netztemperatur. Mit dem Anstieg der Fernwärmerücklaufanhebung auf 72 °C stiegen auch die Pufferspeichertemperatur  $T_2$  und die Kollektorrücklaufanhebung  $T_{11}$  über die sogenannte "Notaus"-Temperatur (siehe Kapitel 3.4). Der Kollektorkreisbetrieb wurde unterbrochen, um überhöhte Kollektorkreistemperaturen zu vermeiden. Ab 16 Uhr sank die Fernwärmerücklaufanhebung durch Wärmeabnahme ab und gegen 16.45 wurde der Kollektorkreis wieder in Betrieb genommen. Infolge der hohen Stillstandstemperatur im Kollektorfeld traten Temperaturspitzen von  $T_1$  und  $T_{21}$  auf. Nach 18 Uhr ist im Bild 29 eine deutliche Absenkung von  $T_8$  sichtbar, die durch eine erhöhte gleichzeitige Warmwasserabnahme an diesem Sonntagabend im Wohngebiet verursacht wurde. Daher konnte die Fernwärmeeinspeisung der in den Pufferspeichern enthaltenen Solarwärme nach der Beendigung des Kollektorkreisbetriebes um 19.10 Uhr noch bis 20.50 Uhr fortgesetzt werden. Die Tagesbilanz weist auf Grund des Anlagenstillstandes von 15.40 Uhr bis 16.45 Uhr mit

Strahlung auf Absorberfläche:	655 kWh
Aufgenommene Wärmemenge Q1:	230 kWh
Abgegebene Wärmemenge Q3:	197 kWh
Kollektorkreisnutzungsgrad:	35 %

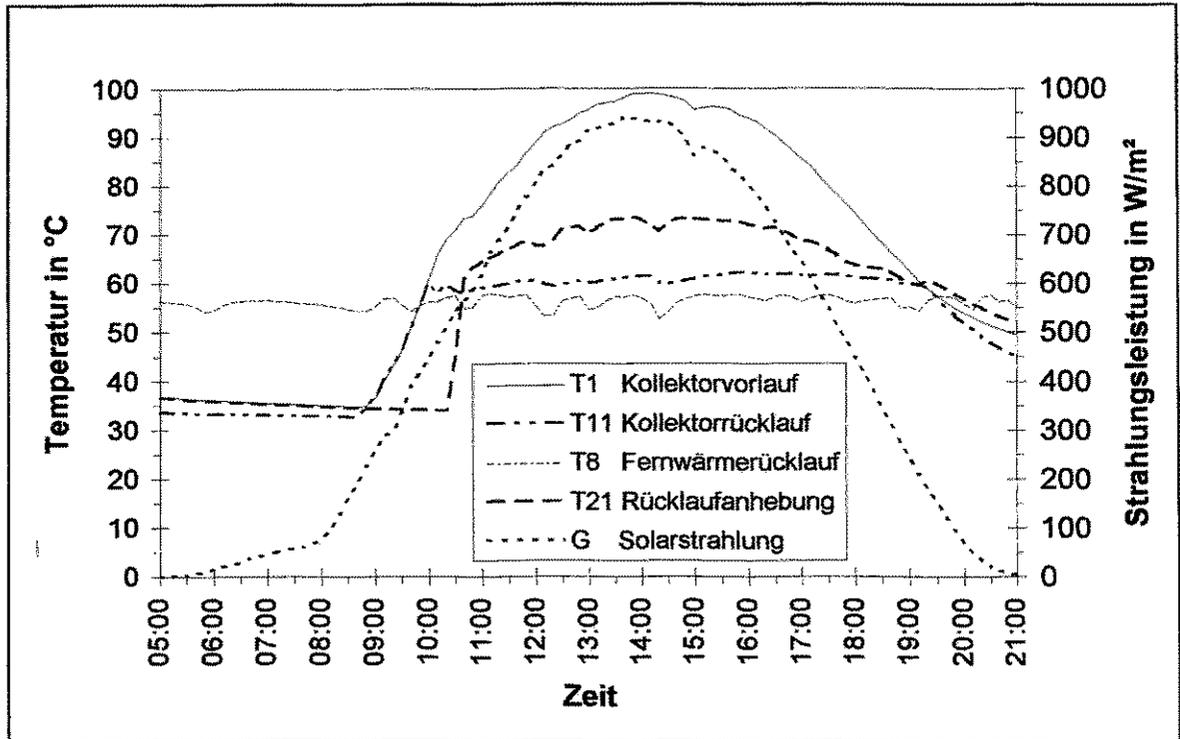


Bild 27: Temperaturprofile der Fernwärmeeinspeisung am 30.07.1995

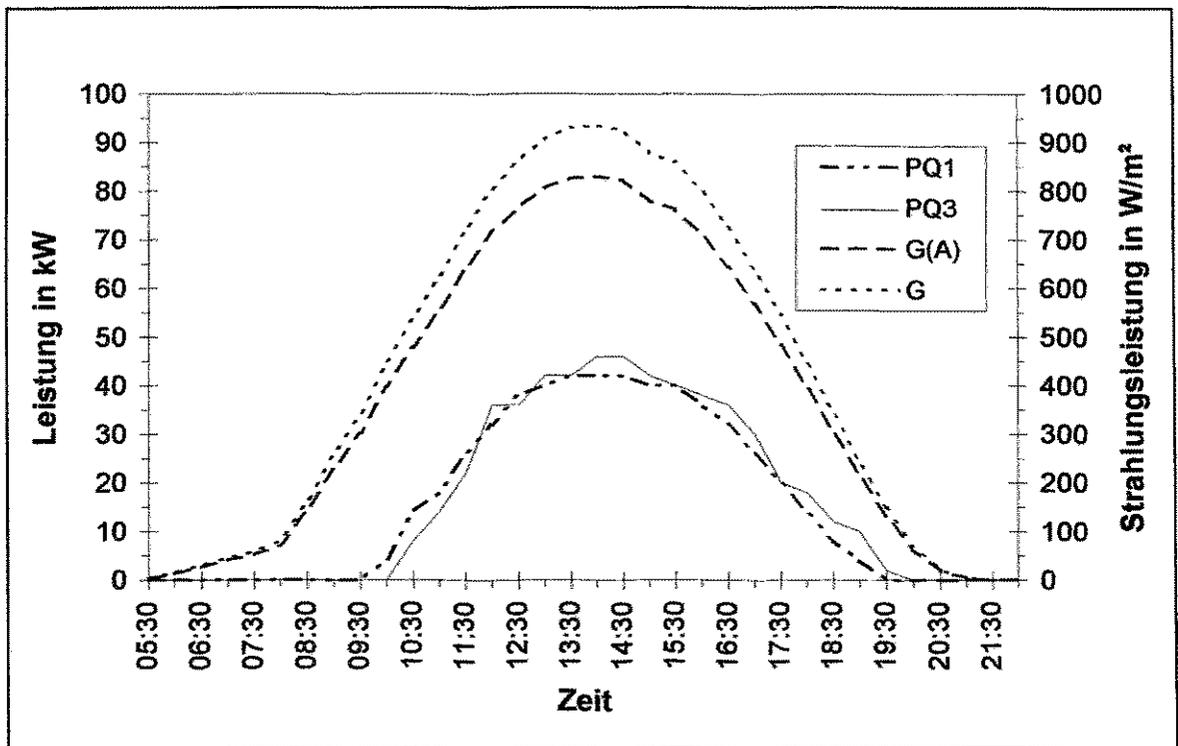


Bild 28: Leistungsprofile der Fernwärmeeinspeisung am 30.07.1995

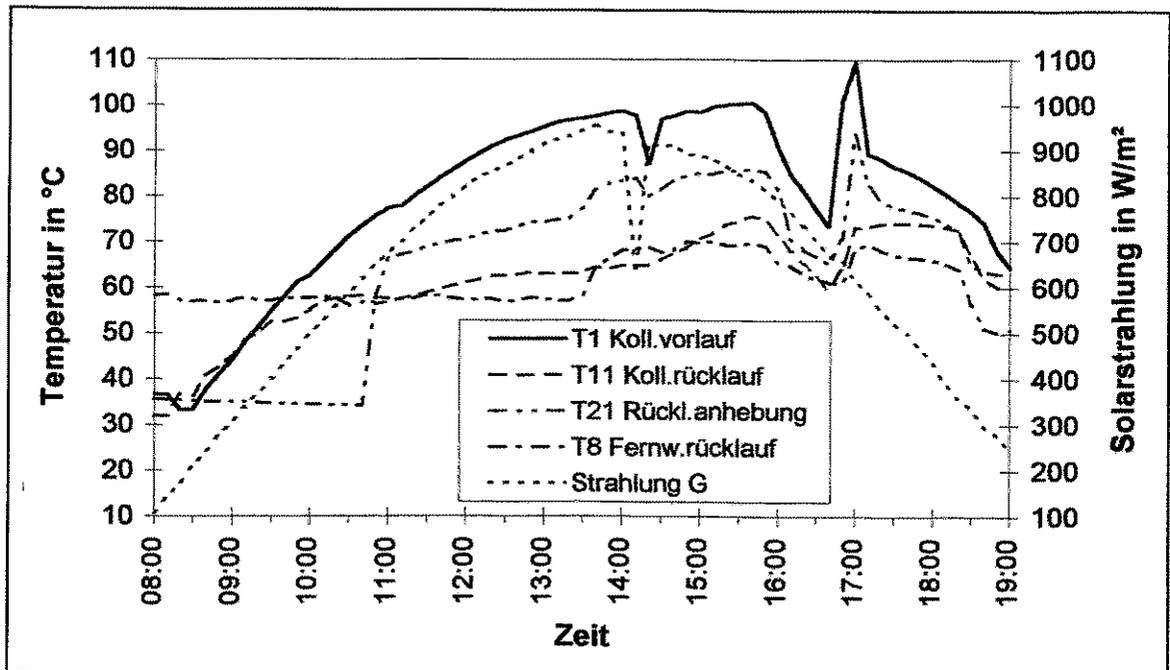


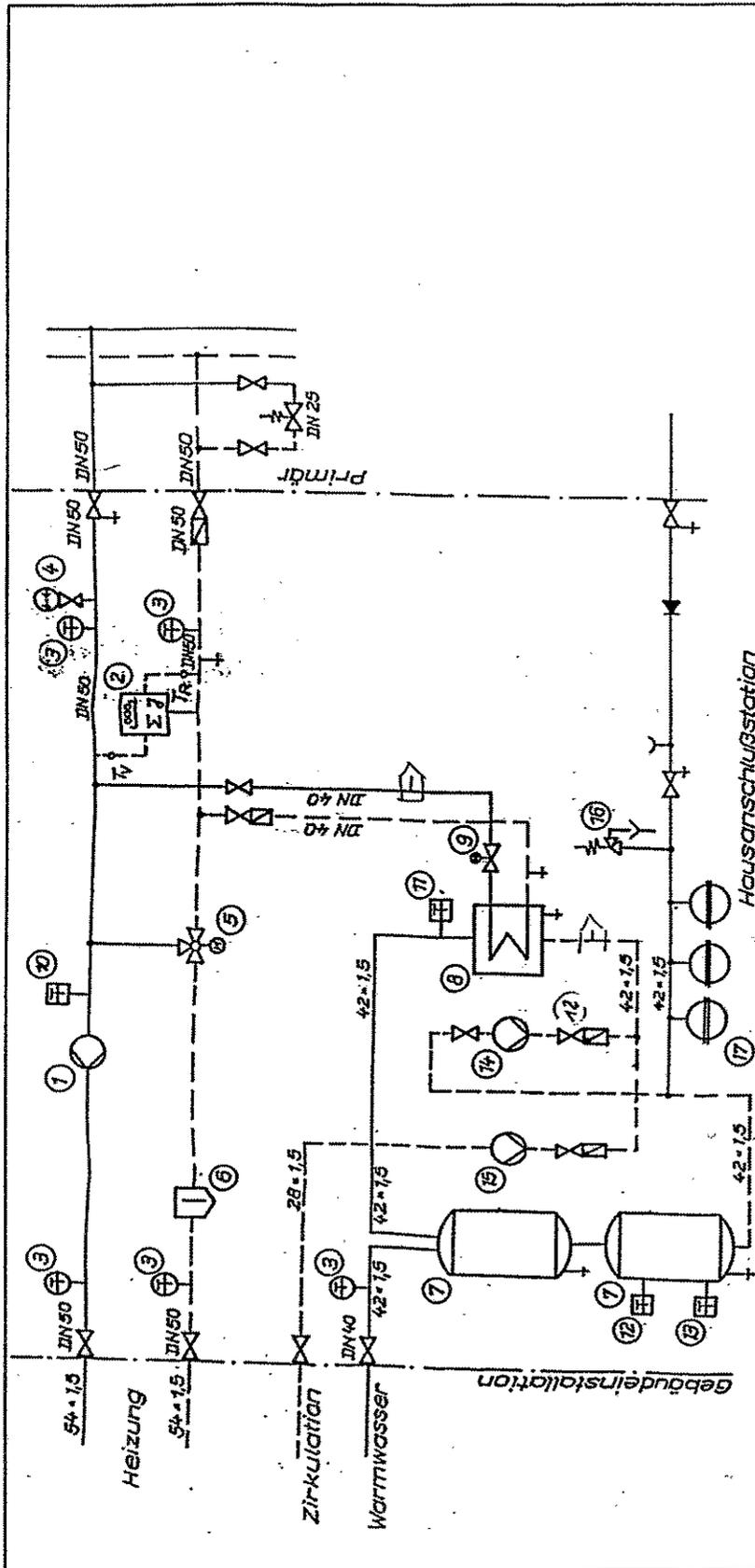
Bild 29: Tagesverlauf der Fernwärmeeinspeisung am 03.07.1994 mit Solaranlagenstillstand von 15.40 bis 16.45 Uhr

und Nachladung des BWS am Vormittag einen 6 % niedrigeren Nutzungsgrad als am oben beschriebenen Vergleichstag mit ununterbrochenem Anlagenbetrieb.

An diesem Beispiel wird deutlich, daß es im Hochsommer selbst bei angeschlossenen 264 Wohneinheiten Zeiten gab, an denen kein Warmwasserbedarf bestand und die Netzspeicherkapazität sowie die Netzverluste nicht ausreichten, um die mit 88.8 m<sup>2</sup> Absorberfläche gewonnene Solarwärme aufzunehmen.

### 3.3.2.1 Reduzierungspotential des Rücklauftemperaturniveaus und mögliche Solarertragssteigerungen

Da das Rücklauftemperaturniveau des Fernwärmenetzes die nutzbare solare Wärme in entscheidender Weise beeinflusst, wurden die Möglichkeit zu dessen Reduktion geprüft. Die derzeitige Schaltung der Hausanschlußstationen ist im Bild 30 dargestellt. Sie stellen das Bindeglied zwischen dem Fernwärmenetz und den angeschlossenen Verbrauchern dar. Als Abnehmer in den Hausanschlußstationen sind der Heizwärmekreislauf und der davon hydraulisch getrennte Kreislauf der Trinkwarmwasserbereitung zu erkennen. In den solarstrahlungsreichen Sommermonaten bestimmen die Trinkwarmwasserkreisläufe der einzelnen Häuser die Fernwärmerrücklauftemperatur. Diese bestehen aus zwei in Reihe geschalteten 500-l-Speichern, von denen aus die Warmwasserleitung mit einer Solltemperatur von 60 °C gespeist wird (T3 im Bild 30). Wenn der zweite Speicher durch das bei Warmwasserabnahme aus dem ersten Speicher nachströmende kalte Wasser im oberen Teil (T12) die Solltemperatur unterschreitet, wird die Speicherkombination aus dem Wärmenetz mittels Wärmeübertrager 8 nachgeladen.



- 14 - Speicherladepumpe Grundfos UP 20-45N
- 15 - Zirkulationspumpe Grundfos UP 20-30N
- 16 - Membransicherheitsventil 1"
- 17 - Membrandruckgefäß OTTO, 18l

- 1 - Heizungspumpe Grundfos UPE 40-120
- 2 - Wärmemengenrechner LUG WSC 5-6.0
- 3 - Temperaturmeßstelle Maschinenthermometer 0-100 °C
- 4 - Druckmeßstelle Manometer 0-6 bar
- 5 - Dreiweghahn LUG VBI 21.50
- 6 - Schlammfänger 2"
- 7 - Warmwasserspeicher OTTO EMS 500-1000
- 8 - Wärmetauscher OTTO OM 60-30
- 9 - Durchgangsventil LUG VVF 21.40-19
- 10-11 - Tauchtemperaturfühler mit Schutzrohr  
1 Nl 1000.52 ± 0°C (LUG QAE 21 A)

Bild 30: Hausanschlußstation

Die gemessene Wärmeabnahme in einer Hausanschlußstation während eines typischen Sommertages ist im Bild 31 dargestellt. Die Zeitpunkte der Speichernachladung sind an den Leistungsspitzen deutlich zu erkennen. Neben dem Wärmebedarf durch Speicherladung liegt außerdem eine konstante Wärmeabnahme von 4 bis 5 kW über den ganzen Tag vor. Sie erfolgt ebenfalls sekundärseitig am Wärmeübertrager 8 mit einer gesonderten Leitung (Pumpe 15) und dient dem ständigen Ausgleich der Wärmeverluste der Trinkwarmwasserbereitstellung über die Zirkulationsleitung. In der realisierten Schaltung wird das Zirkulationswasser wieder auf 60 °C erwärmt und in den oberen Teil des ersten Speichers zurückgeführt. Diese kontinuierliche Temperaturspreizung auf der Sekundärseite des Wärmeübertragers führt auf der Primärseite zu einer Temperaturspreizung von 65 auf ca. 60 °C und bestimmt somit das Rücklauf Temperaturniveau im Fernwärmenetz. Im Gesamtrücklauf werden Temperaturen von ca. 57 °C gemessen. Nur im Fall von Speicherbeladungen traten kurzzeitig deutliche Reduzierungen der Rücklauf Temperatur auf (Bild 32).

Zum Erreichen dauerhaft niedriger Rücklauf Temperaturen bieten sich zwei Wege an. Der erste, technisch einfachere Weg besteht in einer Änderung der Regelung der Hausanschlußstation. Warmwasser an der Zapfstelle muß eine Temperatur von nur 50 °C aufweisen, das unter diesen Bedingungen über die Zirkulation zum Wärmeübertrager gelangende Wasser besitzt dann nur noch eine Temperatur von 45 °C. Diese Betriebsweise von Hausanschlußstationen wird heute bereits an einigen Standorten, u. a. in Berlin /10/ realisiert. Zur Vermeidung von unzulässigem Legionellenbefall ist lediglich einmal wöchentlich eine Aufheizung der Speicherkombination und damit des gesamten Trinkwarmwassernetzes auf Temperaturen > 60 °C für einige Stunden erforderlich. Auf diesem Wege wird eine dauerhafte Senkung der Netzurücklauf Temperaturen um bis zu 10 Grad möglich.

Ein zweiter Weg zur Senkung der Rücklauf Temperaturen besteht darin, vom reinen Speicherladeregime der Hausanschlußstationen zu einem gemischten Durchfluß-Speicherladeregime überzugehen. Dazu ist in der Kaltwasserzuleitung zu den Speichern ein zusätzlicher Wärmeübertrager (netzseitig in Reihe mit dem vorhandenen Wärmeübertrager) einzufügen. Dadurch würde jede Warmwasserentnahme zu einer Vorwärmung des nachströmenden Kaltwassers und damit netzseitig zu einer Rücklauf Temperaturabsenkung führen. Es wäre weiter zu prüfen, ob in diesem Fall auch die direkte Einbindung der Zirkulationsleitung in den oberen Teil des kälteren Wärmespeichers sinnvoll ist. Im Ergebnis dieser Änderungen würde sich in der Summe aller acht Hausanschlußstationen der kontinuierliche Wärmebedarf bei niedrigeren Netzurücklauf Temperaturen erhöhen. Die im Bild 30 sichtbaren Beladespitzen würden demgegenüberdeutlich zurückgehen. Prinzipiell sind auf diesem Weg größere Reduktionen der Fernwärmerücklauf Temperatur als in der oben diskutierten Variante denkbar, allerdings auch mit einem größeren technischen Aufwand (zweiter Wärmeübertrager). Eine Rücklauf Temperaturabsenkung unter 40 °C in derartigen Netzen ist allerdings kaum realisierbar.

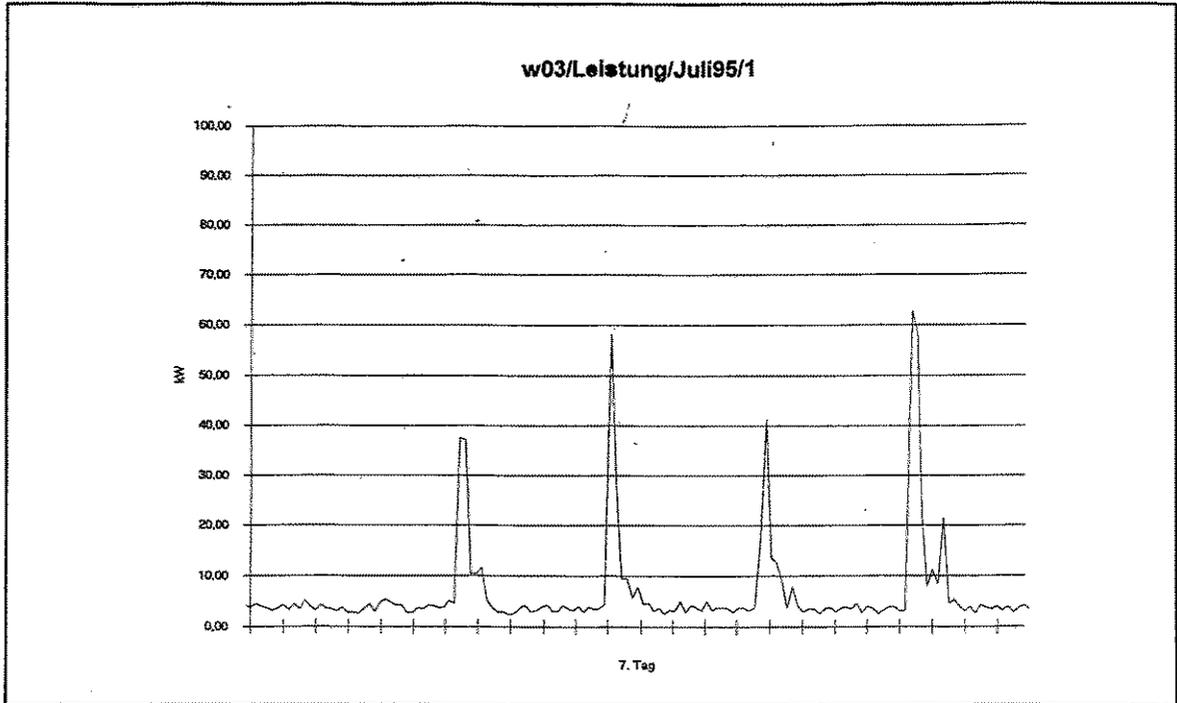


Bild 31: Warmwasserbereitung in einer Hausanschlußstation

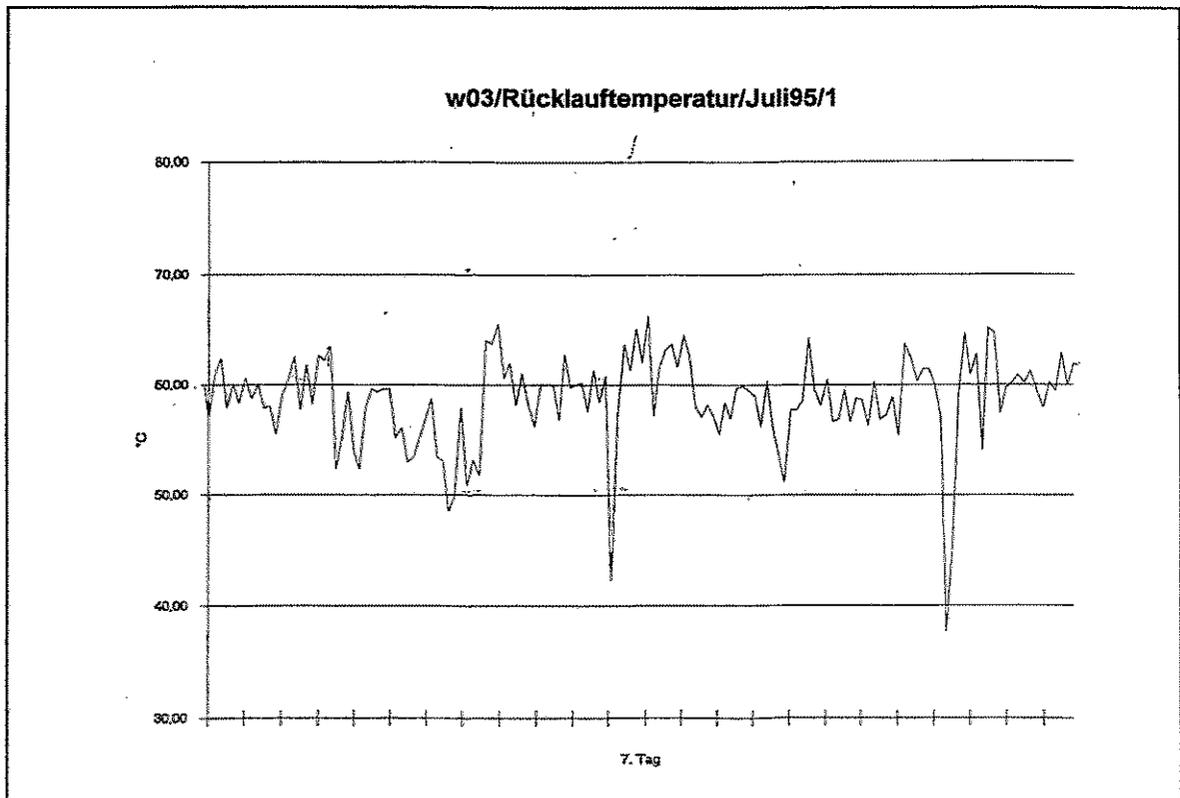


Bild 32: Rücklauftemperaturen in einer Hausanschlußstation

Im folgenden sollen die möglichen Solarertragssteigerungen bei einer Absenkung der bisherigen Rücklauftemperaturen von ca. 57 °C auf 45 °C bzw. 40 °C abgeschätzt werden. Im Bild 9 wurden die ermittelten Arbeitspunkte des Kollektorkreisbetriebes dargestellt. Dabei wurden im Vergleich zu der unter Standardbedingungen gemessenen Kollektorkennlinie geringere Wirkungsgrade im realen Anlagenbetrieb festgestellt. Zur folgenden Abschätzung wurde eine Solarstrahlungsleistung von 900 W/m<sup>2</sup> und eine Außentemperatur  $T_a$  von 25 °C angenommen. Damit wurde für verschiedene Betriebspunkte  $(T_m - T_a)/G$  der zu erwartende Kollektorkreiswirkungsgrad der realen Anlage abgeschätzt, anhand der Betriebsbedingungen (Massenstrom, Wärmekapazität) die Temperaturspreizung errechnet und daraus die Kollektorein- und austrittstemperaturen ( $T_E, T_A$ ) in der Tabelle 8 sind einige Ergebnisse dargestellt.

$(T_m - T_a)/G$	0.055	0.044	0.04
$\eta$	51 %	56 %	58 %
$PQ1 = (\eta \cdot G_A)$	40.8 kW	44.8 kW	46.4 kW
$\Delta t = PQ1/m \cdot c_p$	35 K	38.8 K	40.4 K
$(T_m - T_a)$	49.5 K	40.5 K	36 K
$T_m$	74.5 K	65.5 K	61 K
$T_E$	57 °C	46.1 °C	40.8 °C
$T_A$	92 °C	84.9 °C	81.2 °C

Tabelle 8: Berechnung von Anlagenparametern

Es zeigt sich, daß die Absenkung der Kollektoreintrittstemperatur von 57 auf 41 °C eine Steigerung des Kollektorkreiswirkungsgrades um voraussichtlich 13 % von 51 auf 58 % bewirkt. Damit verbunden ist auch eine Steigerung der Kollektorkreisleistung um 13 % (unter gleichen Einstrahlungsbedingungen).

In der Gesamtbilanz der Anlage können diese möglichen Ertragssteigerungen nur in den Sommermonaten wirksam werden. Im Jahr 1995 wurden in den Monaten Juni bis September 11 821 kWh Solarwärme in das Fernwärmenetz eingespeist. Erhöht man diesen Betrag um 13 % ergeben sich 13 357 kWh zu erwartender Fernwärmeertrag und in der Jahresbilanz eine Steigerung der solaren Nutzenergie um 6 % (Kapitel 4.1, Energiebilanzen).

### 3.4 Allgemeine Betriebserfahrungen

Eine solarthermische Anlage ist immer nur ein Teil einer Wärmeversorgungsanlage, welche stets so groß ausgelegt ist, daß sie bei fehlendem Solarwärmeangebot selbstregelnd den gesamten Wärmebedarf decken kann. Daher ist es möglich, daß Betriebsstörungen oder Fehlfunktionen der Solaranlage und damit verbundene Minderungen des Solarertrages vom Nutzer gar nicht bemerkt werden.

Aus den Erfahrungen von 1 ½ Betriebsjahren der Solaranlage Waldblickschule Freital werden im folgenden einige technische Aspekte und Beispiele für Anlagenstörungen vorgestellt, um Anregungen für die Projektierung und die Erstellung von Kontrollunterlagen für künftig zu errichtende Solaranlagen zu geben.

**Die sicherheitstechnischen Anforderungen** an die Komponenten solarthermischer Anlagen sind durch die Dampfkesselverordnung /11/ vorgeschrieben. Im Unterschied zu konventionellen Heizungsanlagen kann bei solarthermischen Anlagen die Sonne als Wärmeerzeuger in ihrer Leistung nicht geregelt werden. Solarkollektoren müssen daher mit einem Betriebsdruck von 10 bar geprüft sein. Für den Kollektorkreis sind Sicherheitsvorrichtungen erforderlich, z.B. Membranausdehnungsgefäß und Sicherheitsventil. Der Kollektorkreis wird mit einem Überdruck von ca. 1.5 bar im Kollektorfeld betrieben, um die Siedetemperatur der verwendeten Wärmeträgerflüssigkeit zu erhöhen.

**Kollektorkreisstillstand bei fehlender Wärmeabnahme:** Die Stillstandstemperatur von hocheffektiven Flachkollektoren, die sich bei fehlender Wärmeabnahme einstellt, liegt bei über 160 °C. Dabei befindet sich die in den Kollektoren enthaltene Wärmeträgerflüssigkeit im Dampfzustand mit einem vielfach vergrößerten Volumen. Die Wärmeträgerflüssigkeit der Steigleitungen wird in das erforderliche Membranausdehnungsgefäß, das das gesamte Kollektorvolumen aufnehmen können muß, zurückgedrückt. Durch geeignete Temperaturfühler sollte beim Überschreiten einer einzustellenden Grenztemperatur des Kollektorrücklaufs die Kollektorkreispumpe außer Betrieb genommen werden ("Notaus"), um keine weitere Flüssigkeit in das Kollektorfeld zu transportieren. Nach dem Rückgang der Strahlungsleistung am Abend kondensiert die Flüssigkeit im Kollektorfeld und die Anlage wird durch das Membranausdehnungsgefäß selbständig zurückgefüllt. Wird der Kollektorkreisbetrieb nicht unterbrochen, kann durch die Verdampfung der ständig nachgelieferten Wärmeträgerflüssigkeit der Druck im Kollektorkreis so hoch werden, daß das Sicherheitsventil anspricht und Solarflüssigkeit in den Überlaufbehälter abgegeben wird. Danach muß der Kollektorkreis wieder nachgefüllt werden.

**Ausfall von Umwälzpumpen:** Pumpenausfälle können nur dann von einer Steuerungs- und Regelanlage erfaßt werden, wenn ihr Betrieb durch einen Strömungswächter kontrolliert wird. Ansonsten kann z.B. die verwendete DDC- Anlage nur kontrollieren, ob das computergesteuerte Schaltsignal auch durch das Schaltmodul an die Pumpe ausgelöst wurde. Ist das erfolgt, meldet die Anlage Pumpenbetrieb, auch wenn die Pumpe nicht läuft. Die aus der Fehlfunktion resultierenden Betriebszustände der Solaranlage müssen durch geeignete Sicherheitseinrichtungen kontrolliert werden. Langfristige unbemerkte Anlagenausfälle sollten durch geeignete Störungsmeldungen vermieden werden.

**Plazieren der "Notaus"- Fühler:** Die "Notaus"- Funktion sollte bei großen Solaranlagen mit externem Wärmeübertrager im Kollektorkreis durch zwei Temperaturmeßfühler kontrolliert werden:

- Im Kollektorrücklauf: Die Abnahme der Solarwärme kann z.B. durch Ausfall der Speicherladepumpe dauerhaft verhindert sein. In diesem Fall würde ein im Kollektorrücklauf platzierter Temperaturfühler den Kollektorkreisbetrieb bei Erreichen der Grenztemperatur unterbrechen. Eine selbsttätige Wiederinbetriebnahme der Kollektorkreispumpe darf nicht erfolgen, und eine Störungsmeldung muß ausgelöst werden.
- Am Pufferspeicher: Die Wärmeabnahme kann aber auch nur zeitweise durch fehlenden Bedarf verhindert sein. Dann erreicht die Pufferspeicherbatterie ihre zulässige Maximaltemperatur und der Kollektorkreisbetrieb muß unterbrochen werden. Mit wachsendem Wärmebedarf sinkt die Temperatur in den Pufferspeichern wieder ab und ein Kollektorkreisbetrieb wäre möglich. Für diese Schaltfunktionen ist ein zweiter, am Pufferspeicher platzierter Temperaturfühler erforderlich.

1. Beispiel: In der Solaranlage Waldblickschule diente nur der Temperaturfühler T2 am Pufferspeicher PS1 zur "Notaus"- Funktion. Als bei intensivem Sonnenschein die Pumpe P2 ausfiel, wurde am Pufferspeicher nicht die erforderliche "Notaus"-Schalttemperatur erreicht. Der Kollektorkreis lief ohne Wärmeabgabe mit 130 °C Fluidtemperatur. Damit war im Kollektorkreis auf Grund des Überdrucks noch nicht der Siedepunkt erreicht, aber am Wärmeübertrager 1 bewirkte diese Temperatur die Bildung von Dampfblasen auf der Pufferspeicherseite, denn in den Pufferspeichern liegt ein geringerer Überdruck an und die Siedetemperatur wurde überschritten.

### **Ausfall und Verschluß der Brauchwasserspeicher- Beladepumpe**

2. Beispiel: Als zweite Störung trat in der beschriebenen Solaranlage der Ausfall der BWS- Ladepumpe P5 auf, wurde aber von der DDC- Anlage nicht als Störung registriert. Da nun der BWS nicht wirklich nachgeladen wurde, lag für die DDC- Regelung eine ständige Bedarfsanforderung des BWS vor. Durch die fehlende Wärmeabgabe wurden in diesem Fall die Pufferspeicher aufgeladen und der "Notaus"-Fühler T2 hätte zu gegebener Zeit den Kollektorkreisbetrieb unterbrochen. Durch eine Anlagenkontrolle wurde der Pumpenausfall jedoch vorher bemerkt. In automatisch betriebenen Heizanlagen kann eine solche Anlagenstörung längere Zeit unbemerkt bleiben, denn die Trinkwassererwärmung wäre durch den Fernwärmeanschluß gesichert und der Kollektorkreisbetrieb würde durch die "Notaus"- Schaltung außer Betrieb genommen.

3. Beispiel: Durch Verschmutzung, Kalkablagerung oder Ablagerung von feinem Rohrabrieb (Pumpe P5 setzte sich zu) war der Nenndurchfluß der BWS- Beladung (Leitungswasser) mehrfach stark reduziert. Die Folge waren mehrstündige Beladezeiträume, bei denen auf der Pufferspeicherseite des Wärmeübertragers 2 nur eine geringe Temperaturspreizung vorlag und das ganze Pufferspeichervolumen mehrfach umgewälzt wurde (bei einem Nenndurchfluß von 1 m<sup>3</sup>/h einmal in 3 Stunden). Eine Speicherschichtung wird dabei zerstört und bei hoher Solarstrahlungsleistung auch die Wärmeabnahme reduziert.

## Druckabfall in den Pufferspeichern

4. Beispiel: Als weitere Störung trat durch defekte Entlüfterventile ein Wasserlust in den Pufferspeichern auf. Damit reduzierten sich der Durchfluß bei der Be- und Entladung der Pufferspeicher und auch der Solarwärmegewinn. Das Wasser ist in diesem Fall zwischen Speicher und Wärmedämmung ausgelaufen, so daß diese für einige Zeit zum Trocknen geöffnet werden mußte. Die Folge waren hohe Wärmeverluste der Pufferspeicher.

## Betriebs- und Ertragskontrolle durch den Nutzer

Die Sicherheit der Solaranlage Waldblickschule war durch die beschriebenen Betriebsstörungen nicht gefährdet. Aber nur durch die regelmäßigen Betriebskontrollen vor Ort und die Auswertung der Meßdaten, konnten die beschriebenen Störungen erkannt werden. Die Solaranlage Waldblickschule ist DDC- geregelt und besitzt einen Datenspeicher, der durch den Betreiber, die Technischen Werke Freital per Modem abgefragt werden kann. Aufbauend auf den Betriebserfahrungen und den Energiebilanzen wurden eine Checkliste und ein Störmeldungskonzept erarbeitet, womit dem Betreiber künftig eine einfache Betriebskontrolle ermöglicht werden soll.

## 4 Energiebilanzen und Wirtschaftlichkeit

### 4.1 Jahresenergiebilanzen

#### 4.1.1 Gesamtbilanzen der Solaranlage

Die Solaranlage Waldblickschule Freital wurde seit ihrer offiziellen Inbetriebnahme im Juni 1994 bis Dezember 1995 meßtechnisch überwacht und energetisch bewertet. Zur Darstellung der Energiebilanzen der Solaranlage wurden folgende Größen ermittelt:

- Vom Kollektorkreis aufgenommene Wärmemenge:  $Q_1$
- Vom solar vorgewärmten Brauchwasserspeicher an die Schule abgegebene Wärmemenge bezogen auf den Kaltwasserzulauf:  $Q_2$
- In den Fernwärmerücklauf eingespeiste Wärmemenge:  $Q_3$
- Globalstrahlung in Kollektorebene bezogen auf die Absorberfläche:  $H_A$  ( $88.8 \text{ m}^2$ )
- Solare Nutzwärme:  $(Q_2 + Q_3)$ ,
- Nutzungsgrad Kollektorkreis:  $Q_1/H_A$  : Er beschreibt den vom Kollektorkreis in Wärme umgesetzten Teil der eingestrahnten Solarenergie  $H_A$  .
- Speichernutzungsgrad:  $(Q_2 + Q_3)/Q_1$  in Prozent: Er beschreibt die Wärmeverluste des Pufferspeichersystems.
- Anlagennutzungsgrad:  $(Q_2 + Q_3)/H_A$ : Er charakterisiert den als Nutzwärme abgegebenen Teil der eingestrahnten Solarenergie  $H_A$  .

Als Maß für die Vergleichbarkeit der Solaranlage mit anderen werden auch die Energiebilanzen bezogen auf den Quadratmeter installierter Absorberfläche berechnet. In den Tabellen 9 und 10 sind alle Größen monatlich von Juni 1994 bis Dezember 1995 sowie als Gesamtbilanzen für das 1. Betriebshalbjahr Juni bis Dezember 1994 und für das Jahr 1995 zusammengestellt.

<b>Solaranlage Waldblickschule Freital - Strahlungs- und Energiebilanzen</b>										
	<b>Strahlung</b>	<b>Koll.kreis</b>	<b>BWS</b>		<b>Fernwärme</b>	<b>Nutzwärme</b>	<b>Speicher</b>	<b>Anteil BWS</b>	<b>Anteil FW</b>	
<b>Monat</b>	<b>H<sub>A</sub> kWh</b>	<b>Q1 kWh</b>	<b>Q2 kWh</b>	<b>Q3 kWh</b>	<b>Q2+Q3 kWh</b>	<b>(Q2+Q3)/Q1 %</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
<b>Jun 94</b>	12926	3878	819	2259	3078	79	27	73		
<b>Jul 94</b>	16390	6100	545	4873	5418	89	10	90		
<b>Aug 94</b>	12117	3903	837	2388	3225	83	26	74		
<b>Sep 94</b>	8997	2403	928	1093	2021	84	46	54		
<b>Okt 94</b>	7393	1962	650	907	1557	79	42	58		
<b>Nov 94</b>	3130	752	552	115	667	89	83	17		
<b>Dez 94</b>	2750	596	419	0	419	70	100	0		
<b>Bilanz</b>	<b>63703</b>	<b>19594</b>	<b>4750</b>	<b>11635</b>	<b>16385</b>	<b>84</b>	<b>29</b>	<b>71</b>		
<b>Jan 95</b>	2928	556	457	0	457	82	100	0		
<b>Feb 95</b>	4778	1006	444	244	688	68	65	35		
<b>Mär 95</b>	8686	2272	1017	867	1884	83	54	46		
<b>Apr 95</b>	8203	2215	721	1240	1961	89	37	63		
<b>Mai 95</b>	12850	4016	1048	2682	3730	93	28	72		
<b>Jun 95</b>	9583	2577	140	1609	1749	68	8	92		
<b>Jul 95</b>	15464	5649	32	4761	4793	85	1	99		
<b>Aug 95</b>	13459	4632	222	4440	4662	101	5	95		
<b>Sep 95</b>	7950	2201	843	1011	1854	84	45	55		
<b>Okt 95</b>	7370	2364	673	1395	2068	87	33	67		
<b>Nov 95</b>	3136	765	573	129	702	92	82	18		
<b>Dez 95</b>	1555	329	199	22	221	67	90	10		
<b>Bilanz</b>										
<b>Juni-Dez.</b>	<b>58517</b>	<b>18517</b>	<b>2682</b>	<b>13367</b>	<b>16049</b>	<b>87</b>	<b>17</b>	<b>83</b>		
<b>Bilanz 95</b>	<b>95962</b>	<b>28582</b>	<b>6369</b>	<b>18400</b>	<b>24769</b>	<b>87</b>	<b>26</b>	<b>74</b>		

Tabelle 9: Strahlungs- und Energiebilanzen

<b>Solaranlage Waldblickschule Freital - Nutzungsgrade und relative Energiebilanzen pro m<sup>2</sup> Absorberfläche A</b>						
	<b>Strahlung Abs.fläche H<sub>A</sub></b>	<b>Nutz.grad Koll.feld Q1/H<sub>A</sub></b>	<b>Nutz.grad Anlage (Q2+Q3)/H<sub>A</sub></b>	<b>Solarstr. pro m<sup>2</sup> H</b>	<b>Koll.ertrag pro m<sup>2</sup> Q1/A</b>	<b>Systemertr. pro m<sup>2</sup> (Q2+Q3)/A</b>
<b>Monat</b>	<b>kWh</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>kWh/m<sup>2</sup></b>	<b>kWh/m<sup>2</sup></b>	<b>kWh/m<sup>2</sup></b>
Jun 94	12926	30	24	146	44	35
Jul 94	16390	37	33	185	69	61
Aug 94	12117	32	27	136	44	36
Sep 94	8997	27	22	101	27	23
Okt 94	7393	27	21	83	22	18
Nov 94	3130	24	21	35	8	8
Dez 94	2750	22	15	31	7	5
<b>Bilanz</b>	<b>63703</b>	<b>31</b>	<b>26</b>	<b>717</b>	<b>221</b>	<b>185</b>
Jan 95	2928	19	16	33	6	5
Feb 95	4778	21	14	54	11	8
Mär 95	8686	26	22	98	26	21
Apr 95	8203	27	24	92	25	22
Mai 95	12850	32	29	145	45	42
Jun 95	9583	27	18	108	29	20
Jul 95	15464	37	31	174	64	54
Aug 95	13459	34	35	152	52	53
Sep 95	7950	28	23	90	25	21
Okt 95	7370	32	28	83	27	23
Nov 95	3136	24	22	35	9	8
Dez 95	1555	21	14	18	4	2
<b>Bilanz Juni-Dez.</b>	<b>58517</b>	<b>32</b>	<b>27</b>	<b>659</b>	<b>209</b>	<b>181</b>
<b>Bilanz 95</b>	<b>95962</b>	<b>30</b>	<b>26</b>	<b>1081</b>	<b>322</b>	<b>279</b>

Tabelle 10: Nutzungsgrade und relative Energiebilanzen

Entsprechend des Jahresprofils der eingestrahlen Solarenergie erreichen die Monate Mai bis August die höchsten Solarerträge, wobei im Monat Juli 1994 eine überdurchschnittlich hohe solare Einstrahlung vorlag und in den Monaten Juni 94 und 95 eine geringere als im Monat Mai 95. In diesen Monaten wurden 2.3 bis 4.8 MWh Solarwärme in das Fernwärmenetz eingespeist. Die Kollektorkreisnutzungsgrade lagen zwischen 32 und 37 %, die Anlagennutzungsgrade zwischen 24 % im Juni 94 und 35 % im August 95. Dabei muß der Juni 95 wegen technischer Probleme im Pufferspeicherkreis ausgeklammert werden. Auch der August 95 fällt mit einem Speichernutzungsgrad von 101 % auf. Bis zum 27. August war die Vorwärmung des BWS außer Betrieb, aber allein durch die Erwärmung des Kaltwassers in den Leitungen und durch Wärmeleitung von den beheizten Schulwarmwasserbereitern zum BWS wurden Wärmemengen von 41 kW als Q2 gezählt und durch eine kurzzeitige Speicherladung weitere 30 kW. Bei Abzug dieser Wärmemenge ergibt sich ein Speichernutzungsgrad von 99 %, ein Ergebnis der effektiveren Fernwärmeeinspeisung, wenn keine kurzzeitigen Unterbrechungen durch angeforderte BWS-Ladungen eintreten. Bei kombinierter Anlagennutzung beträgt der Fernwärmeanteil im Sommer zwischen 73 und 90 % der solaren Nutzwärme.

Ebenfalls vergleichbar bezüglich der solaren Einstrahlung und der genutzten Solarwärmemengen sind die Monate März/ April und September/ Oktober. Der Solargeinn ist ca. halb so groß wie in den Sommermonaten. Auf Grund der niedrigeren Fernwärmerücklauftemperaturen werden immerhin noch 46 bis 67 % der Solarwärme an das Fernwärmenetz abgegeben. Der Kollektorfeldnutzungsgrad liegt im Mittel bei 28 %, der Anlagennutzungsgrad bei 23 %.

Die eingestrahlte Solarenergie lag in den Wintermonaten (November bis Februar) zwischen 18 kWh/m<sup>2</sup> im Dezember 95 und 54 kWh/m<sup>2</sup> im Februar 95 (im Sommer dagegen im Mittel bei 150 kWh/m<sup>2</sup> und Monat). In diesen Monaten wird die Solarwärme bei Kollektorfeldnutzungsgraden von 21 bis 24 % bzw. Anlagennutzungsgraden von 14 bis 22 % fast ausschließlich zur Unterstützung der Warmwasserbereitung für die Schule genutzt.

Als **jährliche Bilanz** für die Solaranlage Waldblickschule wurden für die derzeitigen Betriebsbedingungen folgende Größen ermittelt:

<b>Kollektorertrag:</b>	<b>28 bis 30 MWh/a</b>	<b>315 bis 338 kWh/m<sup>2</sup> a</b>
<b>Solare Nutzwärme:</b>	<b>24 bis 26 MWh/a</b>	<b>270 bis 293 kWh/m<sup>2</sup> a</b>
<b>davon Warmwasserbereitung:</b>	<b>rund 30 %</b>	
<b>Fernwärmeeinspeisung:</b>	<b>rund 70 %.</b>	

Zum Betrieb der Pumpen und zur Versorgung der Steuer- und Regelanlage wurden im Jahr 1995 insgesamt 1670 kWh Elektroenergie benötigt.

Diese Jahresbilanz setzt sich aus den unter verschiedenen Einstrahlungsbedingungen und den zugehörigen Kollektorkreisleistungen gewonnenen Solarwärme zusammen. Im folgenden sollen die besonders relevanten Betriebsbedingungen ermittelt werden. Dazu werden die in einer statistischen Auswertung ermittelten Solarstrahlungsstunden bestimmter Strahlungsleistungen mit den zugehörigen Kollektorkreisleistungen (Bild 13) multipliziert. Das im Bild 33 dargestellte Ergebnis zeigt, daß der größte Teil des Kollektorkreisenertrages auf Betriebszeiten mit Einstrahlungen zwischen 700 und 900 W/m<sup>2</sup> und Kollektorkreisleistungen zwischen 30 und 40 kW zurückzuführen ist.

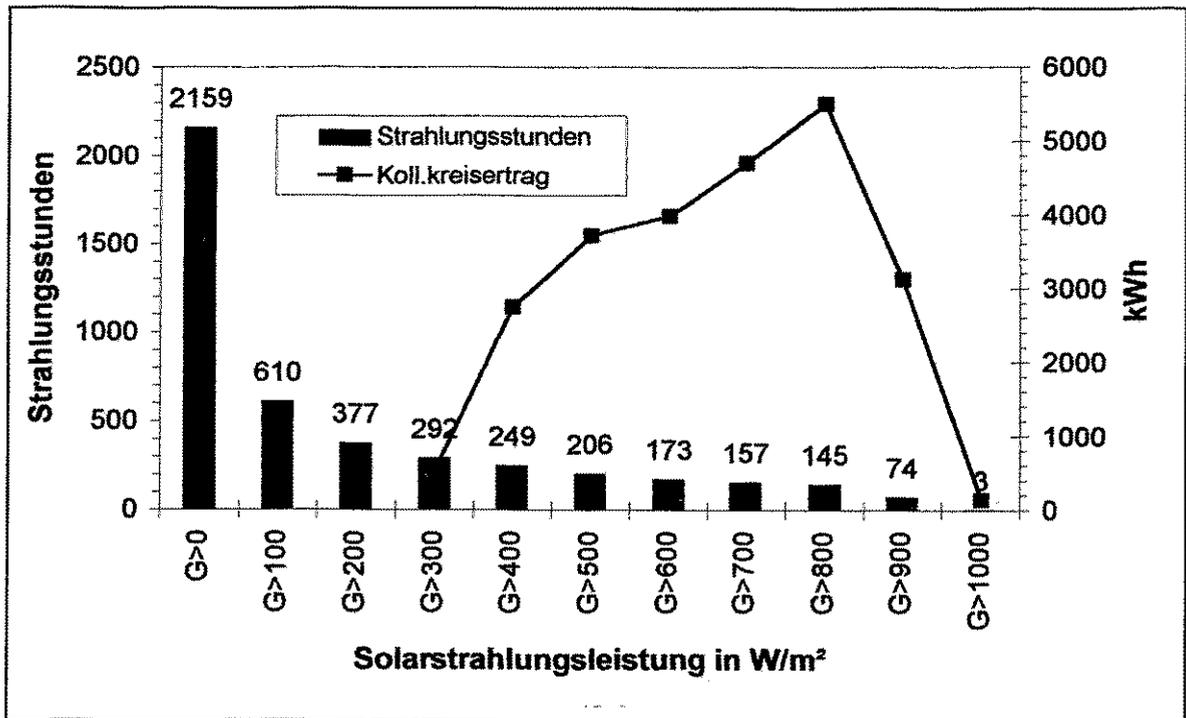


Bild 33: Häufigkeitsverteilung der Solarstrahlungsleistung und zugehörige Kollektor-  
kreiserträge im Jahr 1995

Aus Tabelle 11 kann die Verteilung der Solarstrahlungsleistungen in den einzelnen  
Monaten entnommen werden.

	>0	>100	>200	>300	>400	>500	>600	>700	>800	>900	>1000
Jan	198.5	31.2	15	15	14.5	9.7	1.7				
Feb	154.3	46.5	27.5	19.3	15.5	11.0	7.8	9.5	3.2	0.2	
März	148	69	42	30	24	18	15	18	15	5	
April	180	57.5	26.5	15	10.7	10.3	10.7	11	11.7	6.5	
Mai**	149.2	53.7	39.2	30.8	24.8	19.5	13.8	12.0	13.2	12.8	0.8
Juni	240.7	89.7	43.2	32.3	24.8	19.8	13.7	13.3	14.3	11.3	0.3
Juli	174.8	61.8	44.5	41.2	30.5	30.7	32.0	30.7	43.3	22.5	0.7
Aug.	158.8	55.7	47.0	33.8	32.0	27.2	32.5	32.8	31.7	12.5	0.3
Sept.	172.3	59.2	42.3	30.8	26.2	20.3	16.3	11.8	8.2	3.5	0.8
Okt.	160.8	43.0	26.5	23.3	23.3	25.0	24.2	17.3	4.5	0.2	
Nov.	193.5	31.7	12.7	12.3	16.3	11.8	5.3				
Dez.	227.7	10.7	10.7	8.3	6.5	3.3					
Sum.	2159	610	377	292	249	206	173	157	145	74	3

\* 1.-24.4.1995

\*\*9.-31.5.1995

Tabelle 11: Strahlungsstundenverteilung der Solarstrahlungsleistungen G in (W/m<sup>2</sup>)

Die Solarstrahlungsleistung lag in rund 302 Stunden des Jahres im Bereich von 700 bis 900 W/m<sup>2</sup>. Das sind 14 % der Zeit, in denen eine Solarstrahlung gemessen wurde. In dieser Zeit wurden nach der oben genannten Abschätzung rund 45 % des Solarertrages gewonnen.

#### 4.1.2 Solare Deckungsgrade des Energiebedarfs der Anlagennutzer

##### Solarer Deckungsgrad der Warmwasserbereitung für die Schule:

Der Anteil der Warmwasserbereitung an der gesamten solaren Nutzenergie betrug im Zeitraum Juni 94 bis Mai 95 mit 8437 kWh rund 33 % und deckte damit zu 50 % den Gesamtenergiebedarf zur Warmwasserbereitung der Schule.

##### Solarenergieanteil an der Fernwärmeversorgung:

Für den Zeitraum Oktober 1994 bis September 1995 wurde von den Technischen Werken Freital die Gesamtenergiebilanz des Fernwärmenetzes zur Verfügung gestellt /12/. Der Energiebedarf kann wie folgt aufgeteilt werden:

- Wohngebiet (264 WE)	
Warmwasserbedarf	480 MWh/a
Heizwärmebedarf	1980 MWh/a
Gesamtbedarf	2464 MWh/a
- Schule und Kindereinrichtung	
Gesamtbedarf	865.8 MWh/a
- Summe Energiebedarf	3329.8 MWh/a
Solare Nutzwärme in diesem Zeitraum	24 421 kWh
Anteil Solarwärme am Gesamtbedarf	0.7 %
Anteil Fernwärmeeinspeisung in diesem Zeitraum(Q3)	17 876 kWh
Anteil Solarwärme am Warmwasserbedarf des Wohngebietes	3.7 %

Im Durchschnitt betrug der Energiebedarf zur Warmwasserbereitung 40 MWh pro Monat. Als zirkulationsbedingte Grundlast lagen ca. 30 kW vor, wenn keine Speicherladung stattfand. Damit betrug der Nettoenergiebedarf zur Warmwasserbereitung ca. 18 040 kWh/Monat bei Zirkulationsverlusten von 55 %. Dieser sehr hohe, jedoch nicht untypische Wert ist bedingt durch die ganztägige Zirkulation und dem in Wohngebieten geringen Warmwasserbedarf, der unter Annahme einer Temperaturspannung von 50 K zu 310 288 l/Monat bei 60 °C errechnet wird. Bezogen auf die 264 Wohneinheiten sind das rund 39 l/Wohneinheit und Tag, bzw. 10.3 m<sup>3</sup>/Tag im Wohngebiet. Im Laufe des Tages erfolgten 4 bis 5 mal pro Hausanschluß zu verteilten Zeiten von 6 bis gegen 22 Uhr Speicherladungen. In einigen Hausanschlußstationen wurden sehr häufige Speicherladungen mit geringerer Spitzenleistung als im Bild 31 beobachtet. Für eine gleichmäßige Verteilung des Warmwasserbedarfs auf die Zeit von 6 bis 22 Uhr würde erhält man unter Hinzufügen der Zirkulationsverluste eine kontinuierliche Warmwasserbereitungsleistung von 67 kW erhalten. Damit wird ein Leistungsbereich zwischen 30 und 67 kW festgelegt, innerhalb denen die Einspeiseleistung einer Solaranlage liegen sollte, die ohne Stillstandszeiten und ohne Zwischenspeicherung alle anfallende Solarwärme in das Wärmenetz des untersuchten Wohngebietes abgeben kann.

Im Kapitel 3.3.2.1 wurde gezeigt, daß die Fernwärmeeinspeisung der Solaranlage Waldblickschule mit 100 m<sup>2</sup> Kollektorfläche in den Mittagsstunden der Sommertage bei etwa 42 kW lag. Im überdurchschnittlich heißen Juli 1994 gab es Zeiten, in denen im Wohngebiet an den Nachmittagsstunden weniger als 42 kW Wärmeleistung benötigt wurden. Die Solarwärmeeinspeisung führte zur Temperaturerhöhung im Netz über die Solltemperatur hinaus und schließlich zum Abschalten der Solaranlage (Bild 29). Im Sommer 1995 wurde dieser Effekt nicht beobachtet.

Für den Monat August 1995 wurde gezeigt, daß die kombinierte Anlagennutzung im Sommer durch den geringen Warmwasserbedarf der Schule einen geringeren Nutzwärmeertrag als die alleinige Fernwärmeeinspeisung zur Folge hat. Bei einer Auserbetriebsnahme der BWS- Ladung in den Monaten Mai bis September kann man voraussichtlich mit Fernwärmeeinspeiserträgen Q3 in Höhe von 95 % der bisher gemessenen Kollektorkreiserträge Q1 rechnen. Durch Mittelung aller gemessenen Kollektorerträge in den Monaten Mai bis September 1994 und 1995 und deren Wichtung zu 95 % kann ein zu erwartender solarer Deckungsgrad für die Warmwasserbereitung des Wohngebietes für diesen Zeitraum abgeschätzt werden:

- Mittlerer monatlicher Kollektorertrag (Mai bis September)	3930 kWh/Monat
davon 95 %	3734 kWh/Monat
(bisher)	2791 kWh/Monat)
- Monatlicher Warmwasserbedarf im Wohngebiet	40 MWh/Monat
- Zu erwartender solarer Deckungsgrad (Mai - September)	9.3 %
(bisher im Vergleichszeitraum)	6.9 %)

Da bei dem vorliegenden hohen Temperaturniveau des Fernwärmerücklaufs die maximale Kollektorkreisleistung im Sommer 1995 bei 42 kW lag, kann angenommen werden, daß auf diesem Weg der solare Nutzerertrag gegenüber der bisherigen Regelung im Sommer verbessert werden kann. Gleichzeitig wird deutlich, daß die Wärmeleistung von großen solarthermischen Anlagen, die in Fernwärmenetze einspeisen sollen, mit der Grundlast des Wärmenetzes übereinstimmen muß, wenn Wärmeüberschüsse vermieden werden sollen. Dabei kann man maximal mit einem solaren Deckungsgrad von 10 % bei der Warmwasserbereitung für Wohngebiete im Sommer rechnen.

#### 4.1.3 Verifizierung des Solarwärmenutzungskonzepts

Die bisherige Regelung der Solaranlage Waldblickschule basiert auf der Priorität der Trinkwarmwasservorwärmung für die Schule, da angenommen wurde, daß diese stets das niedrigste Temperaturniveau zur Solarenergienutzung zur Verfügung stellt. In den vorangegangenen Kapiteln wurde jedoch gezeigt, daß der Trinkwarmwasserbedarf zu klein ist, um mit der Primärversorgung günstige Abnahmebedingungen für die Solarwärme zu schaffen. Für den Sommer wurde nachgewiesen, daß durch die vorrangige Trinkwasservorwärmung sogar eine Verringerung des Solarertrages verursacht wurde.

Um das Konzept der kombinierten Warmwasserbereitung und Fernwärmeeinspeisung zu optimieren, muß die Priorität bei der Solarwärmenutzung in den Sommermonaten bei der Fernwärmeeinspeisung als dem Hauptabnehmer der Solarwärme

liegen. Aus dem Tagesprofil des Warmwasserbedarfs der Schule (Bild 22) ist ersichtlich, daß in den Frühstunden vor Beginn des Kollektorkreisbetriebes bereits 45 % des Warmwasserbedarfes, also ca. 450 l, abgenommen wurden, weitere 45 % bis gegen 14 Uhr. Der Brauchwasserspeicher besitzt 400 l Wasserinhalt. Auf Grund dieser Korrelation wird für die Sommermonate nicht eine vollständige Außerbetriebnahme der Trinkwasservorwärmung zur Steigerung des Solarertrages vorgeschlagen, sondern eine auf die Früh- und Abendzeiten begrenzte Nutzung der Restwärme in den Pufferspeichern. Damit kann am Abend der BWS auf das in den Pufferspeichern vorhandene Temperaturniveau vorgewärmt werden und trägt zur Bedarfsdeckung in den Frühstunden bei. Auch das nachströmende Kaltwasser kann im BWS bis 10 Uhr aus den Pufferspeichern vorgewärmt werden. Anschließend wird die angebotene Solarwärme in das Wärmenetz eingespeist. Erst in den Abendstunden kann der inzwischen mit Kaltwasser gefüllte BWS wieder aus den Pufferspeichern vorgewärmt werden. Damit kann auch eine Ursache der Schichtinhomogenitäten in der Pufferspeicherkaskade - die Rückspeisung von warmem Wasser bei der Nacherwärmung des BWS - vermieden werden. Mit der Verringerung des solaren Deckungsgrades der Trinkwasservorwärmung für die Schule und der gleichzeitigen Steigerung des solaren Deckungsgrades der Warmwasserversorgung des Wohngebietes in den Sommermonaten ist eine Steigerung des Gesamtertrages der Solaranlage erreichbar.

## 4.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

### 4.2.1 Wärmegestehungskosten

Ziel bei der Errichtung großer solarthermischer Anlage ist die Verbesserung des Preis-/ Leistungsverhältnisses der Solarwärmegewinnung gegenüber kleinen solarthermischen Hausanlagen. Die Potentiale liegen dabei in dem verringerten technischen und materiellen Aufwand bei der Installation von Solaranlagen bezogen auf den Quadratmeter Kollektorfläche sowie in der Kontinuität des Wärmebedarfs und damit der Erhöhung des Solarertrages vor allem im Sommerhalbjahr.

Als Vergleichsgrundlage sollen die nach der Annuitätenmethode errechneten solaren Wärmegestehungskosten, d.h. die Energiekosten pro Kilowattstunde solarer Nutzenergie, dienen. Diese Energiekosten  $K$  in DM/kWh errechnen sich nach:

$$K = I / Q * ( a + i )$$

mit:

I: Investitionskosten verringert um eventuelle Gutschriften oder Zuschläge in DM

Q: Jährliche solare Nutzenergie in kWh

a: Annuitätenfaktor entsprechend der geplanten Nutzungsdauer und einem konstanten Zinsfuß

i: Wartungs- und Instandsetzungsfaktor bezogen auf die Investitionskosten.

Anhand des Nomogramms in Bild 34 können die Einflüsse der Annuität, der Investitionskosten (Kapitaleinsatz) und des jährlichen Solarertrages auf die Energiekosten auf grafischem Weg sehr schnell ermittelt werden.

Die Tabelle 12 beinhaltet einen Vergleich der solaren Wärmegestehungskosten für kleine solare Hausanlagen verschiedener Anbieter nach Stiftung Warentest /13/,

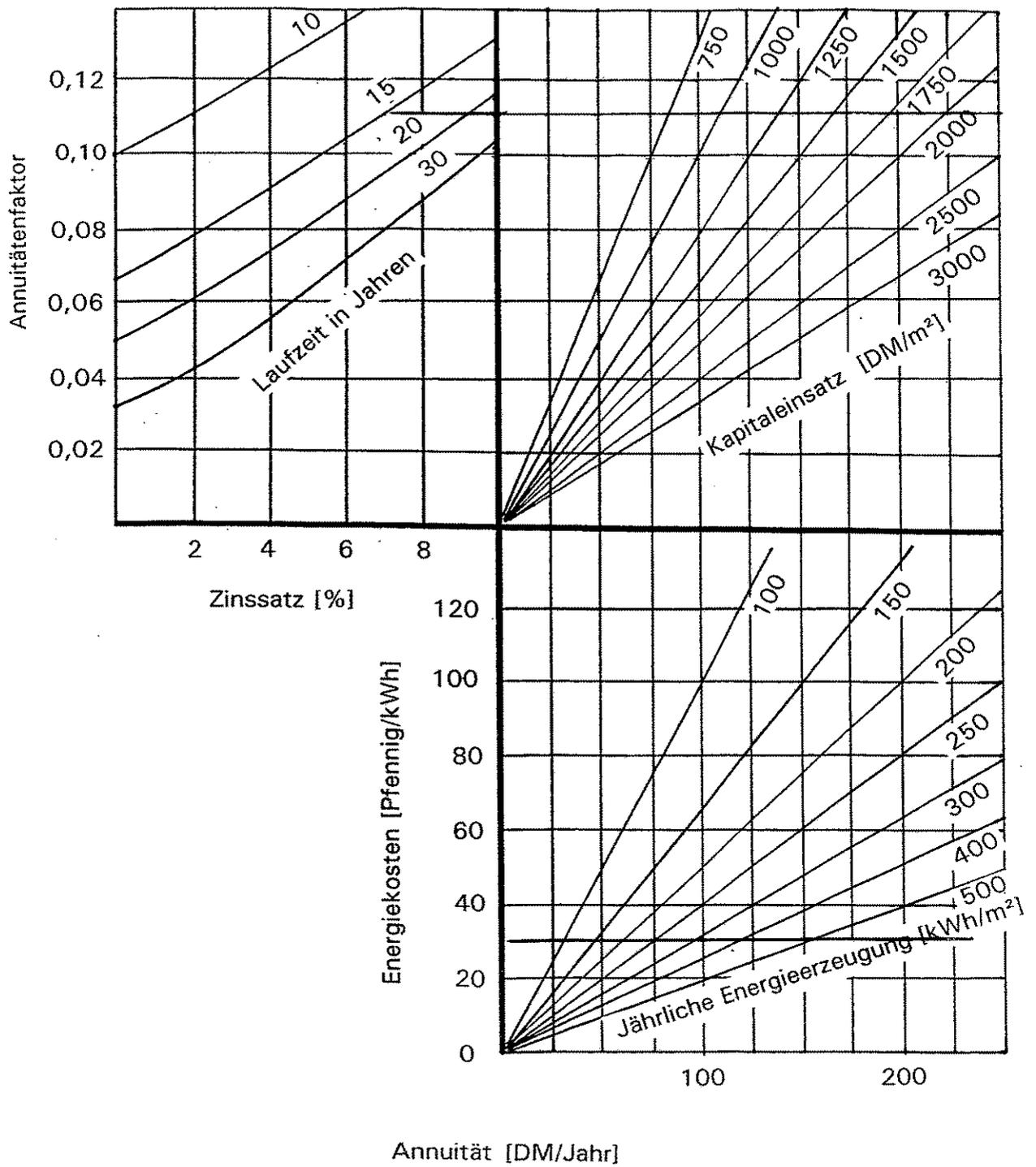


Bild 34: Nomogramm zur Ermittlung solarer Wärmegestehungskosten

Tabelle 12: Kostenvergleich solarthermischer Anlagen

	Wagner*	Solvis*	Dornier* (Vakuum)	Sachsen ** günstig 4 - 8 m <sup>2</sup>	Sachsen ** teuer 4 - 8 m <sup>2</sup>	Waldblick- schule	Senkung spez. Kosten	Erhöhen d. Solar- ertrags
Kollektorfläche	5.07 m <sup>2</sup>	5.01 m <sup>2</sup>	3.3 m <sup>2</sup>	Bsp.: 5 m <sup>2</sup>	Bsp.: 5 m <sup>2</sup>	98.4 m <sup>2</sup>	98.4 m <sup>2</sup>	98.4 m <sup>2</sup>
spezif Kosten in DM/m <sup>2</sup>	2 361	2 832	5 509	1 300	3 000	1 387	641	990
Komplettpreis I in DM	11 970	14 190	18 180	7 500	15 000	136 500	63 073	97 477
Annuität (a * I) in DM, 20 Jahre, 6 % (8.72 * I)	1 044	1 237	1 585	654	1.308	11 903	5 500	8 500
Wartung (i * I) in DM	150	150	150	150	150	2 000	2 000	2.000
Jährlicher Kapital- dienst in DM/a	1 194	1 387	1 735	804	1 458	13 903	7 500	10 500
Jährl. Solarertrag pro m <sup>2</sup> Koll.fläche kWh/m <sup>2</sup> a	311	296	455	Annahme: 300	Annahme: 300	254	254	Annahme: 356
Jährl. Solarertrag in kWh	1 577	1 483	1 501	1 500	1 500	25 000	25 000	35 000
Solare Wärme- gestehungskosten K in DM/kWh	0,76	0,94	1,16	0,53	0,97	0,55	0,3	0,3

\* /13/

\*\*/14/

nach einer statistischen Auswertung geförderter Solaranlagen des Landes Sachsen 1995 /14/ sowie für die Solaranlage Waldblickschule. Bei einer Bewertung der Angaben in Tabelle 12 ist zu beachten, daß die in der Spalte Sachsen (günstig) ausgewiesene Anlage Eigenleistungen des Betreibers in der Planungs- und Installationsphase enthält. Des Weiteren ist in Tabelle 12 eine Rückrechnung auf die zu realisierenden Systemkosten enthalten, wenn ein solarer Wärmegestehungspreis unter 0.30 DM erzielt werden soll. Die mit der Solaranlage Waldblickschule nach dieser Rechnung erzielten solaren Wärmegestehungskosten von 0.547 DM/kWh betragen mehr als das 5-fache des Fernwärmepreises. Um den solaren Wärmepreis auf 0.30 DM/kWh zu reduzieren, dürfte der maximale Investitionseinsatz für die Solaranlage mit dem gegenwärtigen Solarertrag von 25 MWh/a bei 63 073,- DM bzw. bei einem gesteigerten Solarertrag auf 35 MWh/a bei 97 477,- DM liegen. Das bedeutet eine Senkung der spezifischen Kosten von derzeit 1 387,- DM/m<sup>2</sup> installierter Kollektorfläche auf 641,- bzw. 990,- DM/m<sup>2</sup>. Diese Werte sind mit der vorliegenden Anlagenkonfiguration nicht zu erreichen.

#### 4.2.2 Preis-/Leistungsoptimierung großer Solaranlagen

Es hat sich gezeigt, daß mit der Solaranlage Waldblickschule trotz der kombinierten Trinkwarmwasserbereitung und Fernwärmeeinspeisung kein akzeptabler solarer Wärmepreis erzielt werden kann. Die Ursachen liegen zum einen in der zu hohen Fernwärmerücklauftemperatur, durch die der jährliche Solarertrag nur bei 254 kWh/m<sup>2</sup> liegt, und zum anderen in der zu aufwendigen Pufferspeicherkonzeption, bei der durch die kombinierte Solarwärmenutzung der vorteilhafte Schichtspeichereffekt nicht wirksam wird.

Zur Kostenreduktion dezentraler großer Solaranlagen mit kombinierter Trinkwarmwasserbereitung und Fernwärmeeinspeisung muß der materielle und technische Aufwand reduziert werden.

Solaranlagen mit Fernwärmeanschluß sollten ohne Pufferspeicher die Wärme vom Kollektorkreis direkt in den Fernwärmerücklauf mittels Plattenwärmeübertrager einspeisen. Dabei muß die maximale Leistung aller an das Fernwärmenetz angeschlossenen Solaranlagen an die Grundlast dieses Netzes im Sommer angepaßt sein. Um außerdem das niedrige Temperaturniveau der Trinkwarmwasserbereitung zur Steigerung des Jahresertrages der Solaranlage zu nutzen, werden folgende Systemvarianten vorgeschlagen:

##### **A: Installation des Kollektorfeldes auf großen Wohngebäuden mit Fernwärmeanschluß**

Im Bild 35 ist ein Vorschlag für eine Anlagenkonzeption mit direkter Einspeisung der Solarwärme in den Fernwärmerücklauf im Bereich der Hausanschlußstation im Keller des Gebäudes dargestellt. Da die Rücklauftemperatur im Sommer im Bereich von 55 °C zu erwarten ist, sollte in Reihe zum ersten Wärmeübertrager ein zweiter Wärmeübertrager im Kollektorkreis installiert werden, der im Durchflußprinzip zur Vorwärmung des Trinkwarmwassers dient. Reicht die Solarwärme nicht aus, um in das Fernwärmenetz einzuspeisen, kann der erste Wärmeübertrager durch einen Bypass umströmt werden und die Solarwärme dient der Vorwärmung des jeweiligen Bedarfs.

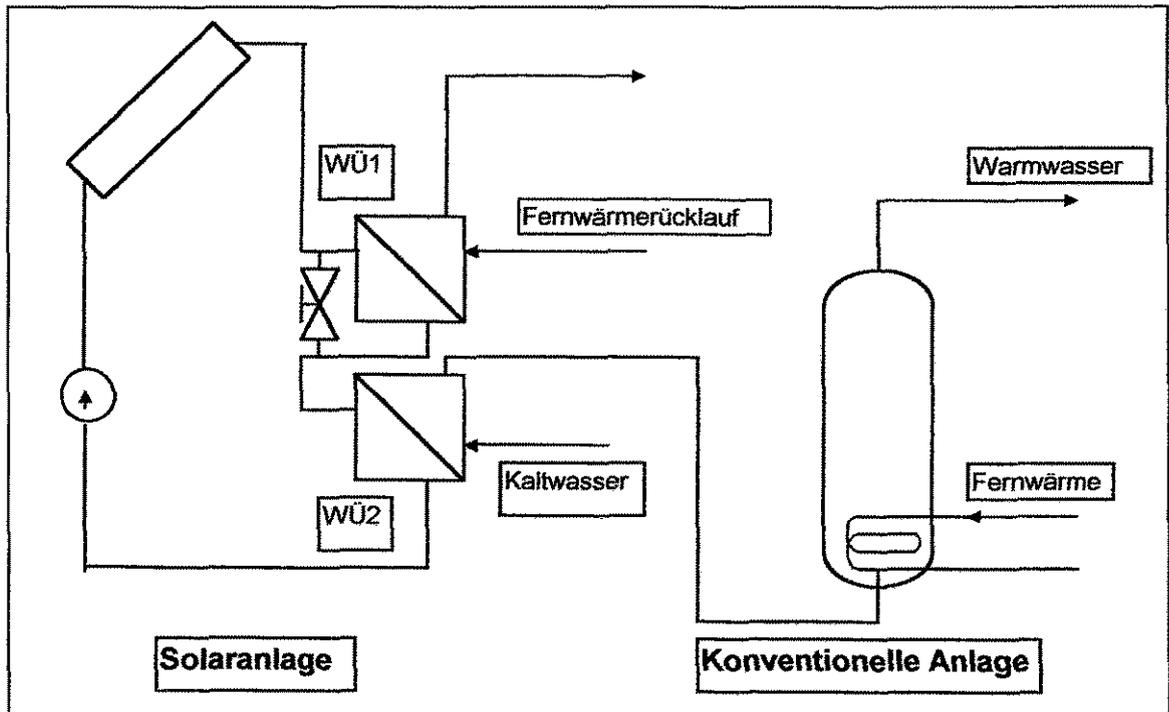


Bild 35: Fernwärmeeinspeisung der Solarenergie und Trinkwasservorwärmung im Durchflußprinzip

### B: Installation des Kollektorfeldes auf öffentlichen Gebäuden mit Fernwärmeanschluß

In öffentlichen Gebäuden besteht vergleichbar mit der Waldblickschule nur an Wochentagen ein Warmwasserbedarf. Die direkte Fernwärmeeinspeisung der Solarwärme sollte genauso wie bei Variante A erfolgen. Für die Unterstützung der Warmwasserbereitung ist jedoch die Vergrößerung des vorhandenen oder geplanten Speichervolumens erforderlich. Da zum Schutz gegen Legionellenbildung jeder mit Trinkwasser gefüllter Speicher in regelmäßigen Zeitabständen auf 60 °C erwärmt werden muß, wäre es günstig, das Zusatzspeichervolumen vom Trinkwasser zu trennen. Diese Variante ist teurer als Variante A. Anhand des regelmäßigen Warmwasserbedarfs an den Wochentagen und unter Bewertung des Niveaus der Fernwärmerücklauf­temperatur muß geprüft werden, inwieweit eine Solarertragssteigerung den zusätzlichen Aufwand rechtfertigt.

Die Vorteile dieser Varianten im Vergleich zur Solaranlage Waldblickschule bestehen darin, daß eine gleichzeitige Nutzung der Solarwärme sowohl für die Fernwärmeeinspeisung als auch für die Trinkwasservorwärmung stattfindet. In Variante A wird dabei bei jedem Verbrauch direkt das Temperaturniveau des Kaltwassers zur Senkung der Kollektorkreisrücklauf­temperatur und somit zur Verbesserung des Kollektorkreiswirkungsgrades genutzt. In Variante B wird ein kleineres und preiswerteres Zusatzspeichervolumen eingesetzt. Diese Variante kann auch so abgewandelt werden, daß das vorgewärmte Trinkwasser im Durchflußprinzip durch die Fernwärme nacherwärmt wird. Dabei wird der konventionelle Trinkwasserspeicher eingespart.

Für die beschriebenen Varianten A und B wurde in Anlehnung an die Kostenbilanz der Waldblickschule eine Abschätzung der zu erwartenden solaren Wärmegegestehungskosten durchgeführt. Sie ist in Tabelle 13 zusammengefaßt und bezieht sich auf eine Kollektorfläche von 100 m<sup>2</sup>.

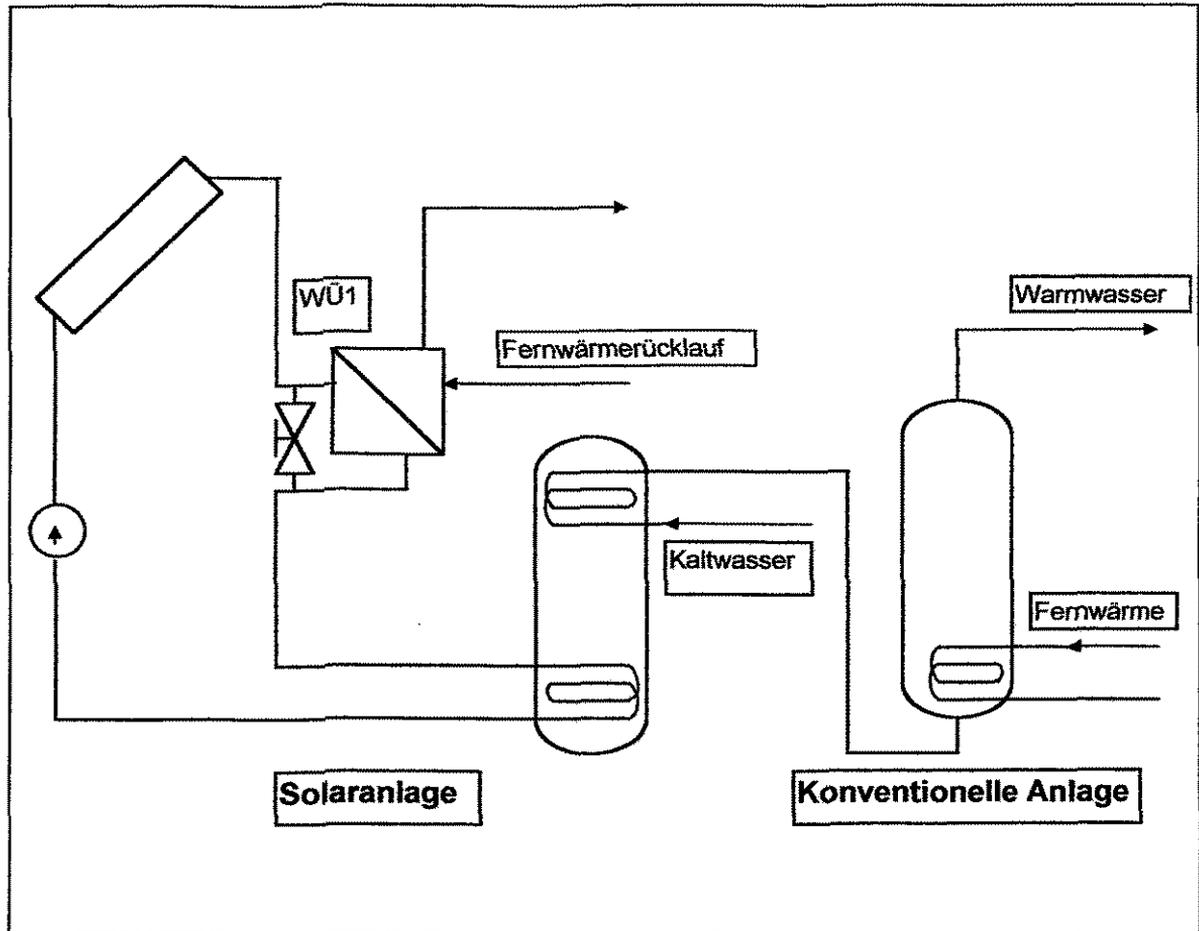


Bild 36: Fernwärmeeinspeisung der Solarenergie und Trinkwasservorwärmung mit Pufferspeicher

Spezifische Kostenreduktionen können im Zuge von Sanierungsmaßnahmen für die Dachintegration des Kollektorfeldes und durch Nutzung von erforderlichen Deckendurchbrüchen zur Steigrohrverlegung erzielt werden bzw. durch Mengenrabatte bei wesentlich größeren Kollektorflächen. Eine Solarertragssteigerung und damit eine Senkung der solaren Wärmegegestehungskosten ist bei Realisierung niedrigerer Fernwärmerücklaufftempeaturen (kleiner 45 °C) möglich. Für die Kostenbilanz der Variante A kann z.B. bei einem Solarertrag von 35 MWh/a ein solarer Wärmepreis von 0.29 DM/kWh erreicht werden.

	Waldblickschule	Variante A	Variante B
Kollektorfeld incl. -Lieferung -Montage	63 100 TDM	65.000 TDM	65.000 TDM
Installation Kollektorkreis incl. Wärmeisolation	12 000 TDM	12.000 TDM	12.000 TDM
Wärmeübertrager 1	7 700 TDM	6.000 TDM	6.000 TDM
Wärmeübertrager 2		5.000 TDM	5.000 TDM
Regelung	5 500 TDM	3.000 TDM	3.000 TDM
Anbindung Fernwärme und Trinkwasservorwärmung	48 200 TDM	3.000 TDM	10.000 TDM
Summe	136 500 TDM	94.000 TDM	101.000 TDM
Jährlicher Solarertrag	25 MWh	30 MWh	35 MWh
Annuität (20 Jahre, 6%)	8.72 %	8.72 %	8.72 %
Wartung und Instandhaltung	2 000 DM/a	2 000 DM/	2.000 DM/a
Solare Wärme gestehungskosten	0.55 DM/kWh	0.38 DM/kWh	0.35 DM/kWh

Tabelle 13: Kostenreduktion großer Solaranlagen mit Fernwärmeeinspeisung und Trinkwasservorwärmung

## 5 Gesamtbewertung und Schlußfolgerungen

Das Demonstrationsvorhaben „Solare Warmwasserbereitung und Fernwärmeeinspeisung - Waldblickschule Freital“ war das erste solarthermische Großvorhaben in den neuen Bundesländern mit wissenschaftlichen Begleituntersuchungen und gleichzeitig mit einer neuartigen Anlagenkonzeption. Die Planung, Realisierung und Vermessung der Anlage führte zu verallgemeinerungsfähigen Ergebnissen, welche auch im nationalen Rahmen Beachtung fanden. Als Hauptergebnisse des Vorhabens lassen sich zusammenfassen:

- Die Solaranlage mit einer Kollektorfläche von 98 m<sup>2</sup> erbrachte im Jahr 1995 einen spezifischen Bruttoertrag von 322 kWh/m<sup>2</sup> und einen Nettoertrag von 279 kWh/m<sup>2</sup>. Der Nettoertrag führte zu einer Reduktion des eingesetzten Erdgases um ca. 3000 m<sup>3</sup> und damit zu einer CO<sub>2</sub>- Vermeidung von 5230 t.
- Durch die Anbindung der Solaranlage an ein Fernwärmenetz wurde geprüft, wie sich die kombinierte Solarenergienutzung zur Trinkwasservorwärmung und Fernwärmeeinspeisung auf den spezifischen Solarertrag auswirkt.
- Auf Grund des geringen täglichen Warmwasserbedarfs der Schule wurden nicht nur solare Wärmeüberschüsse der Trinkwarmwasserbereitung in das Fernwärmenetz eingespeist, sondern das Fernwärmenetz war mit 70 % der Hauptabnehmer der Solarwärme.

- Damit beeinflusste das - gegenüber der ursprünglichen Auslegung des neuerrichteten Fernwärmenetzes - zu hohe Temperaturniveau des Fernwärmerücklaufs entscheidend den Bruttoertrag der Solaranlage. Auch das starre Low-Flow-Prinzip der Kollektordurchströmung führte bei bestimmten Anlagenzuständen zu Ertragsverlusten.
- Die in Verbindung mit dem Low-Flow-Prinzip zur effektiven Solarwärmespeicherung konzipierte Pufferspeicherkaskade mit selbstregelnden Schichtbeladeeinrichtungen konnte auf Grund der spezifischen Abnahmebedingungen der Solarwärmenutzer nur ungenügend wirksam werden. Das parallele Be- und Entladen der Pufferspeicher unter den Bedingungen der Versorgung von zwei nach Bedarf und Temperaturniveau unterschiedlichen Verbrauchern führte zu zwar stabilen, jedoch nicht temperaturgeschichteten Verhältnissen in den Pufferspeichern.
- Die Priorität der Trinkwasservorwärmung bei der Regelung der Solarwärmenutzung bewirkte wiederum auf Grund des geringen Warmwasserbedarfs Wärmeverluste durch Zwischenspeicherung in den Pufferspeichern in Höhe von durchschnittlich 15 % des Bruttoertrages.
- Eine Senkung der Speicherwärmeverluste auf ca. 5 % des Bruttoertrages werden durch zwei Maßnahmen erwartet, erstens durch eine Veränderung der Anlagenregelung mit Priorität bei der Fernwärmeeinspeisung und Nutzung der Restwärme in den Pufferspeichern zur Trinkwasservorwärmung, zweitens durch den Einbau eines Magnetventils, das eine Fehldurchströmung bei der Pufferspeicherentladung verhindern soll (siehe Kapitel 3.4).
- Die auf der Basis des solaren Nettowärmeertrages ermittelten Wärmegestellungskosten der untersuchten Anlage liegen bei 0,55 DM/kWh. Dies ist mehr als das Fünffache der Wärmekosten bei der Bereitstellung aus konventionellen Energiequellen. Das erreichte Ergebnis liegt jedoch bis zu 45 % unter den solaren Wärmegestellungskosten, die mit thermischen Solaranlagen im Ein- und Zweifamilienhausbereich angegeben werden. Als mit der derzeitigen Technik und optimaler Auslegung erreichbare solare Wärmegestellungskosten in großen Solaranlagen mit Kollektorflächen größer 100 m<sup>2</sup> werden je nach Anwendungsfall 0,20 bis 0,30 DM/kWh angesehen. Der spezifische Ertrag solcher Anlagen kann 350 kWh/m<sup>2</sup>a und mehr betragen.
- Durch die Analyse der direkten Solarwärmeeinspeisung in ein Fernwärmenetz wurde gefunden, daß die Einspeiseleistung der Solaranlage auf die Grundlast des Wärmenetzes begrenzt sein muß, wenn Wärmeverluste durch Anlagenstillstand im Sommer vermieden werden sollen. Dabei beträgt der maximale solare Deckungsgrad der Trinkwarmwasserbereitung des Wohngebietes im Sommer ca. 10 %. Entscheidend für den Solarertrag ist das Niveau der Fernwärmerücklauftemperatur. Hausanschlußstationen, bei denen wie im Wärmenetz der Waldblickschule die Fernwärmerücklauftemperatur von der faktisch im Durchflußprinzip betriebenen Zirkulationswärmeversorgung und den kurzzeitigen Speicherladespitzen bestimmt wird und bei ca. 57 °C im Sommer liegt, sind für ein Wärmenetz mit Solarwärmeeinspeisung ungeeignet.
- Für große solarthermische Anlagen, die dezentral auf Wohngebäuden mit Fernwärmeanschluß installiert werden und in das Fernwärmenetz einspeisen sollen,

wurde eine Anlagenkonzeption erarbeitet, bei der die Trinkwasservorwärmung im Durchflußprinzip die Kollektorrücklauftemperatur absenkt und damit den Kollektorwirkungsgrad erhöht.

**Literatur**

- /1/ D. Brünig, F. Naehring, U. Rindelhardt  
4. Symposium Thermische Solarenergie, Staffelstein 1994  
Tagungsband S. 241
- /2/ D. Brünig, U. Rindelhardt  
5. Symposium Thermische Solarenergie, Staffelstein 1995  
Tagungsband S. 133
- /3/ U. Viertel  
3. Symposium Thermische Solarenergie, Staffelstein 1993  
Tagungsband S. 146
- /4/ UNIGYR EMS: Das objektorientierte DDC-Managementsystem  
Firmenschrift Landis & Gyr, 1993
- /5/ Thermische Solarsysteme  
Firmenschrift SOLVIS Energiesysteme GmbH, Braunschweig 1993
- /6/ E.-R. Schramek (Hrg.)  
Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik  
Oldenburg-Verlag München/Wien 1995, S. 1109
- /7/ N. Fisch, R. Kübler, E. Hahne  
Solarunterstützte Nahwärmeversorgung  
Terratec `95, Leipzig 1995, Tagungsband S.141
- /8/ F. A.Peuser, R. Croy  
Erfahrungen mit Solaranlagen zur Warmwasserbereitung, ZfS Hilden, 1991
- /9/ Stratos-Schichtspeicher  
Firmenschrift SOLVIS Energiesysteme GmbH, Braunschweig 1993
- /10/ G. Bräunig  
pers. Mitteilung
- /11/ Bundesgesetzblatt Teil I, Nr. 8, S.173 (1980)
- /12/ Wärmebilanzen des Versorgungsgebietes Waldblick  
Technische Werke Freital, internes Material, 1995
- /13/ Stiftung Warentest  
test Heft 5/95, S.518
- /14/ R. Maletti  
Sonnenenergie & Wärmetechnik, Heft 5, S. 21 (1995)

Anhang

