

Teil 2: Hohe Netzurücklauftemperaturen problematisch

# Solare Nahwärme Göttingen



Abb. 1: Blick von oben auf die Flachkollektoranlage des Heizkraftwerks in Göttingen

Fotos: ISFH

In Teil 1 (SE 3/97) des Beitrags stellten Rainer Tepe und Klaus Vanoli vom *Institut für Solarenergieforschung GmbH (ISFH)* das Solare Nahwärme-Projekt in Göttingen und im besonderen die Flachkollektoranlage auf dem Dach des Heizkraftwerks der *Stadtwerke Göttingen AG* vor. In Teil 2 werden neben weiteren Untersuchungsergebnissen der Flachkollektoranlage hauptsächlich die Problematik der hohen Netzurücklauftemperaturen im konventionellen Wärmeversorgungssystem der Stadt Göttingen und Konzepte zur Anlagenoptimierung näher beleuchtet.

## Input/Output-Methode

Die Input/Output-Methode zur Funktionskontrolle und Überprüfung des Kollektorsertrags basiert auf dem Vergleich der Tageswerte des Kollektorfeldertrags und der täglichen Einstrahlung. Als charakteristische Kennlinien ergeben sich hierbei Geraden, die entsprechend der Differenz zwischen Betriebs- und Außentemperatur vertikal versetzt sind.

Abb. 2 bis 4 zeigen beispielhaft für das Ostkollektorfeld der Anlage in Göttingen monatliche Input/Output-Diagramme. Oberhalb eines Schwellwertes der täglichen Einstrahlung, der aufgrund der hohen mittleren täglichen Kollektorbetriebstemperaturen wesentlich höher ist als bei Solaranlagen zur Warmwasserbereitung, ergibt sich ein lineares Ansteigen der Input/Output-Betriebskennlinie.

Die Diagramme enthalten neben den Meßdaten die Regressionskennlinie für den Monat August 1993 als charakteristische Anlagenkennlinie. Der Vergleich der täglichen Ertragsdaten für die Monate April und Juli 1994 veranschaulicht die sehr gute Übereinstimmung mit der Ausgleichsgeraden des Monats August 1993.

Der in der Abb. 4 eingekreiste Ertragswert verdeutlicht die Eignung des Verfahrens zur Funktionskontrolle einer Solaranlage: An einem Tag im Monat Juli 1994 kam es um die Mittagszeit zu einem Ausfall des induktiven Durchflußmeßgeräts in dem Kollektorfeld, was mit einem Ausfall der Kollektorkreispumpe vergleichbar ist.

Anhand der Input/Output-Überwachung konnte der Fehler bereits am Abend des gleichen Tages festgestellt und die defekte Sicherung ausgetauscht werden.

Die Analyse anhand des Input/Output-Verfahrens in der Anlage in Göttingen hat gezeigt, daß mit diesem sehr einfachen

Kollektorfeld	H100 [kWh/m <sup>2</sup> a]	Q112 [kWh/m <sup>2</sup> a]	N100 [%]	N111 [%]	T601 [°C]
Ost	950,5	195,1	20,5	37,3	68,73
Süd	953,9	176,1	18,3	37,8	68,45
West	857,9	118,5	13,8	37,3	68,89

H100 Gesamteinstrahlung in Kollektorebene  
Q112 Kollektorfeldertrag  
N100 Gesamtwirkungsgrad

N111 Betriebswirkungsgrad  
T601 Netzurücklauftemperatur

Tab. 1: Ergebnisse der Untersuchungsperiode September 1993 bis August 1994

und kostengünstigen Verfahren eine Funktions- und Ertragskontrolle großer Kollektorfelder mit einer Genauigkeit besser als 10 % des mittleren Tagesertrags möglich ist.

Eine noch höhere Genauigkeit läßt sich erzielen, wenn anstatt der täglichen Gesamteinstrahlung lediglich die tägliche Einstrahlung während der Kollektorbetriebsdauer für die Regressionsanalyse herangezogen wird.

## Hohe Netzurücklauftemperaturen mindern Kollektorsertrag

Die meßtechnische Untersuchung der Solaranlage in Göttingen umfaßt den Zeitraum von April 1993 bis Dezember 1995.

Aufgrund der Vielzahl der durchgeführten Analysen werden an dieser Stelle nur die wesentlichen, für die Anlage aber charakteristischen Ergebnisse zusammengefaßt.

- Aufgrund der hohen Netzurücklauftemperaturen erfolgt ein Betrieb der Kollektorkreise erst ab Bestrahlungsstärken von ca. 400 bis 500 W/m<sup>2</sup>, so daß ein erheblicher Anteil der täglichen Gesamteinstrahlung verloren geht.
- Diese Rahmenbedingungen bewirken, daß z. B. an klaren, sonnigen Wintertagen die Kollektorfelder nicht in Betrieb gehen, da der Schwellwert der Einstrahlung in der Kollektorebene nicht überschritten wird.

- Der Einfluß der hohen Netztemperaturen spiegelt sich auch in den Differenzen zwischen den Wirkungsgradwerten bezogen auf die Gesamteinstrahlung N100 und auf die Betriebsstrahlung N111 in Tab. 1 wider.
- Der Ertrag der Gesamtanlage betrug in der ersten Jahresperiode 137,24 MWh bei einem Jahreswirkungsgrad von 18,8 %. In der folgenden Jahresperiode sanken die Werte auf 131,2 MWh bzw. 17,7 %. Dies ist einerseits auf die im ersten Teil des Beitrags beschriebene Verschmutzung der Kollektorglasabdeckungen, andererseits auf die im Jahresmittel etwa 1,5 K höheren Netzurücklauftemperaturen zurückzuführen.
- Die hohen Netzurücklauftemperaturen führen somit in zweifacher Hinsicht zu den eingetretenen Ertragseinbußen: Einerseits vermindert sich der Kollektorertrag aufgrund der hohen Kollektorbetriebstemperaturen, andererseits steigt der Anteil der nicht nutzbaren Solarstrahlung sehr stark an.

### Simulationrechnungen zu Netzurücklauftemperaturen

Bereits in der Planungsphase des Projekts haben die beteiligten Forschungsinstitute Simulationsrechnungen durchgeführt, um den Einfluß der Netzurücklauftemperaturen auf den Kollektorertrag zu analysieren. Abb. 5 veranschaulicht sowohl die Ergebnisse der mit den Programmen ISFH und TRNSYS durchgeführten Systemsimulationen als auch die gemessenen Wirkungsgradwerte für die ersten beiden Jahresperioden.

Für beide Simulationsprogramme läßt sich übereinstimmend feststellen, daß bei einer angestrebten Rücklauftemperatur von 40 °C jährliche Wirkungsgradwerte von 40 % zu erzielen sind, während diese Werte bei Netzurücklauftemperaturen von 70 °C auf 18 bis 20 % absinken.

Gleichzeitig zeigt sich, daß die Resultate der Simulationsrechnungen nahezu vollständig mit den gemessenen Werten übereinstimmen.

Nach Abschluß der meßtechnischen Überwachung der Anlage wurden seitens des ISFH weitere TRNSYS-Simulationen durchgeführt. Im Gegensatz zu den ursprünglichen Berechnungen wurde ein Kollektormodell, das auch die Kapazität der Kollektoren berücksichtigt, verwendet. Zur Anpassung des TRNSYS-Decks an die realen Betriebsbedingungen wurden zusätzlich die tatsächlich gemessenen Netzurücklauftemperaturen als Stundenwerte in die Simulation einbezogen.

Die Ergebnisse dieser nachträglichen Simulationsrechnungen sind im Balkendiagramm in Abb. 6 dargestellt. Simulation 1 beinhaltet die Ergebnisse der ursprünglichen Berechnungen mit angepaßten Daten an die gebaute Anlage und einer festen Netzurücklauftemperatur von 70 °C. Simulation 2 berücksichtigt das Modell mit Kollektorkapazität und den im Betrieb gemessenen Rücklauftemperaturen. Ebenfalls dargestellt sind die gemessenen Ertragswerte aus den Jahren 1994 und 1995.

Aus diesen Untersuchungen läßt sich ableiten, daß die Kapazität der Kollektoren und Verteilnetze einen hohen Einfluß auf die Resultate der Simulationsrechnungen haben. Durch die Berücksichtigung dieser Faktoren kann eine deutlich geringere Abweichung zwischen Messung und Simulation erzielt werden. Auch die Einbeziehung der realen Netztemperaturen führt zu einer Verbesserung der Simulationsergebnisse.

Die erzielte Genauigkeit zwischen gemessenen und simulierten Anlagenerträgen unterstreicht daher eindrucksvoll die Eignung des Simulationsprogramms zur Nachbildung großer Kollektoranlagen. Damit kann dem Anwender in Phasen der Anlagenvorplanung eine gewisse Sicherheit geboten werden. Die Entwick-

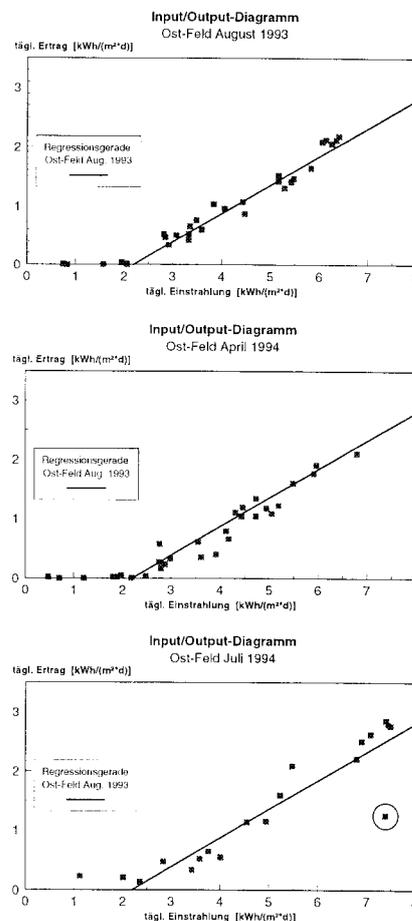


Abb. 2 bis 4: Monatliche Input/Output-Diagramme des Ostkollektorfeldes

lung neuer Kollektormodelle in den letzten Jahren hat allerdings auch gezeigt, daß durchaus noch weitere Verbesserungen – wenn auch nur in kleinem Maßstab – möglich sind.

### Göttinger Nahwärmenetz

Wie in den bisherigen Ausführungen bereits mehrfach angesprochen, sind die im Vergleich zu den Simulationsrechnungen relativ geringen Solaranlagenerträge auf die zu hohen Rücklauftemperaturen im Nahwärmenetz der Stadtwerke Göttingen zurückzuführen.

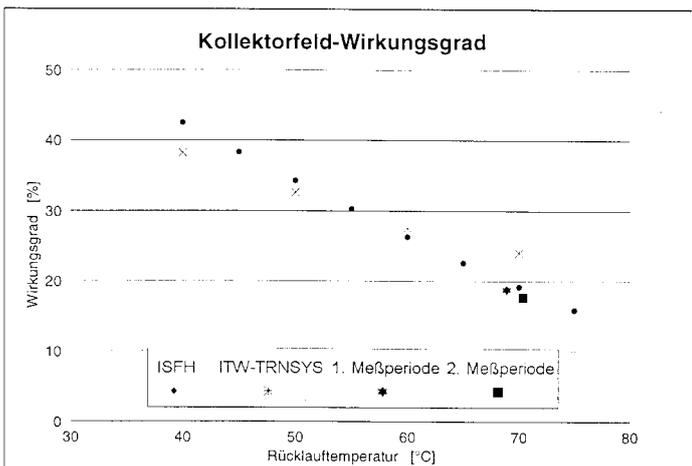


Abb. 5: Kollektorfeld-Wirkungsgrade in Abhängigkeit der Netzurücklauftemperatur

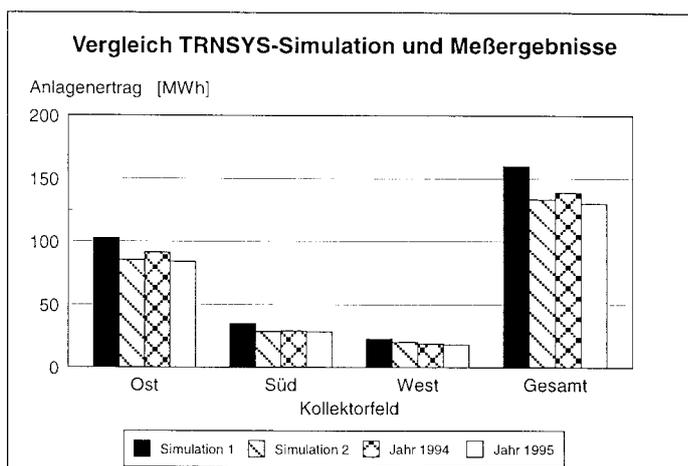


Abb. 6: Vergleich der TRNSYS-Simulationsrechnungen mit den gemessenen Ertragsdaten der Anlage in Göttingen

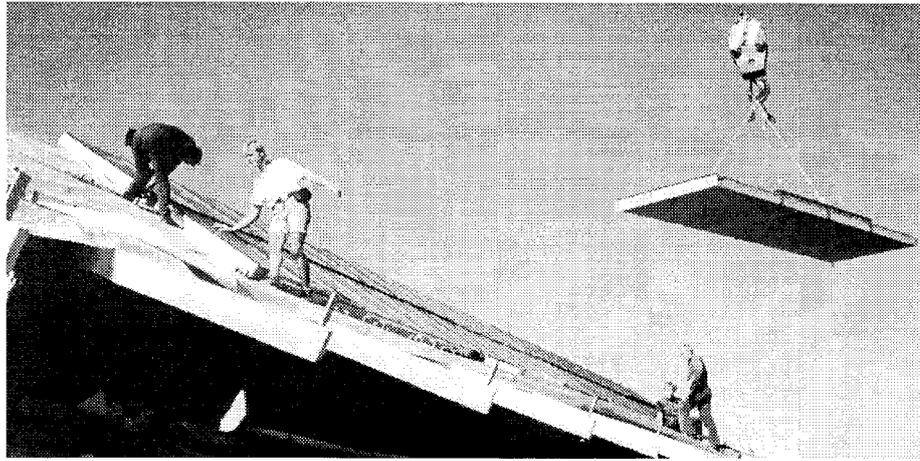


Abb. 7: Montage der Flachkollektormodule auf dem Dach des Göttinger Heizkraftwerks

Die ursprünglichen Planungen in der Entstehungsphase des Projekts sahen allerdings eine Einkopplung der Solaranlage in ein Teilnetz vor, das auf die gewünschten Temperaturen von  $t_{NR} = 40\text{ °C}$  abgesenkt werden sollte. Aufgrund der relativ geringen Sommerwärmelast in diesem Versorgungsbereich konnte allerdings eine vollständige Wärmeabnahme in den Zeiten der höchsten Solarerträge nicht garantiert werden, so daß die Kollektoranlage an den Rücklauf des gesamten Versorgungsnetzes angeschlossen wurde.

### Umstellung der Regelung

Die Verhältnisse im Nahwärmenetz der Stadtwerke Göttingen veranschaulicht Abb. 8 für das Jahr 1993, in dem die Kollektoranlage in Betrieb genommen wurde. Dargestellt sind sowohl die Tageswerte der Vor- und Rücklauftemperaturen, unterschiedlich gekennzeichnet für die charakteristischen Betriebsweisen mit Kraft-Wärme-Kopplung in den kalten Perioden und reinem Heizwerkbetrieb in

den Sommermonaten, als auch die Daten der täglichen Wärmeabgabe. Zusätzlich enthält die Grafik die Kennlinien der außentemperaturabhängigen Vorlauf- und Rücklaufregelung, die etwa ab Ende Februar des Jahres im Heizkraftwerk umgesetzt wurde.

Anhand dieses Diagramms läßt sich sehr anschaulich das Betriebsverhalten im Nahwärmeversorgungsnetz nachvollziehen. Vor der Umstellung auf die außentemperaturabhängige Fahrweise liegen die Netzvorlauftemperaturen bei etwa  $t_{NV} = 120\text{ °C}$ , die Rücklauftemperaturen bei etwa  $t_{NR} = 80\text{ °C}$ . Die Umstellung in Zeiten der Heizperiode entsprechend der dargestellten Kennlinie für  $t_{NV,Soll}$  führt sowohl im Vor- als auch im Rücklauf zu deutlich geringeren Werten. Dementsprechend stellt sich auch eine Reduzierung der Netzwärmeverluste ein.

In den Sommermonaten liegen die täglichen Vorlauftemperaturen nur unwesentlich über der Sollkurve. Die Werte im Rücklauf des Netzes erreichen aber nicht

den gewünschten Linienverlauf, sondern weichen deutlich davon ab. Gleichzeitig steigen sie mit abnehmender Wärmelast bzw. zunehmender Außentemperatur nochmals an, also insbesondere in den Zeiten hoher Solarerträge.

Aus den dargestellten Netzparametern läßt sich festhalten, daß die Umstellung der Fahrweise im Heizkraftwerk bereits zu deutlichen Verbesserungen geführt hat, die angestrebten Werte im Netzrücklauf aber noch nicht erreicht werden.

### Optimierung der Hausübergabestationen

Da die Rücklauftemperaturen in Nah- und Fernwärmenetzen im wesentlichen durch das Betriebsverhalten der Hausübergabestationen bestimmt werden, erfolgte aufgrund der nicht zufriedenstellenden Solaranlagenenerträge seitens des ISFH in Zusammenarbeit mit den Stadtwerken Göttingen eine detaillierte Analyse der angeschlossenen Hausstationen. Dabei wurden ausgewählte Verbraucheranlagen meßtechnisch über eine bzw. mehrere Wochen untersucht.

Ersten Aufschluß über das Betriebsverhalten sämtlicher angeschlossener Hausanlagen lieferten spezielle Balkendiagramme, die aus den monatlichen Daten der Wärmeabgabe aller Stationen erstellt wurden. Für den Monat Juni 1993 zeigt Abb. 9 das charakteristische Verhalten aller Verbraucher, die in dem Monat von den Stadtwerken mit Wärme versorgt wurden.

Für diese Diagramme sind die einzelnen Verbraucheranlagen entsprechend ihrem Betriebsverhalten in Klassen mit gleicher Temperaturspreizung (in 5 K-Schritten) eingeteilt worden, wobei jede schraffierte Fläche eine Hausstation abbildet. Die Klassen sind auf der Abszisse dargestellt. Auf der Ordinate ist der monatliche Wärmeverbrauch der Stationen in diesen Klassen kumuliert aufgetragen. Zusätzlich enthält das Diagramm die Daten für Netzvor- und -rücklauf- sowie die Netztemperaturspreizung, wie sie am Heizkraftwerk erfaßt wird.

Für den Monat Juni 1993 zeigt sich, daß bei einer Netzvorlauf-temperatur von  $t_{NV} = 84,1\text{ °C}$  im Versorgungsnetz eine Temperaturspreizung von  $\Delta t = 12,8\text{ K}$  erzielt wird. Ein erheblicher Teil der angeschlossenen Hausübergabestationen verzeichnet Temperaturdifferenzen zwischen Vor- und Rücklauf unter  $20\text{ K}$  – allein über zehn Anlagen liegen sogar unterhalb von  $10\text{ K}$ .

Aus dem Diagramm läßt sich außerdem ablesen, daß insbesondere zwei Hausstationen in diesem Bereich einen sehr hohen Anteil am Gesamtwärmeverbrauch haben, der in diesem Monat etwa 25 % beträgt. Da ein hoher Wärmever-

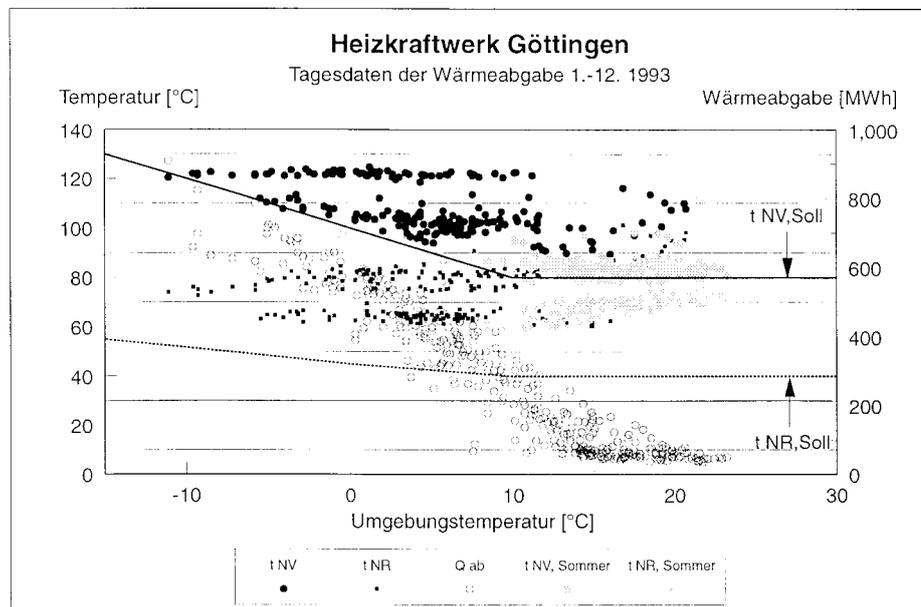


Abb. 8: Netzparameter und Wärmeabgabe im Nahwärmenetz der Stadtwerke Göttingen im Jahr 1993

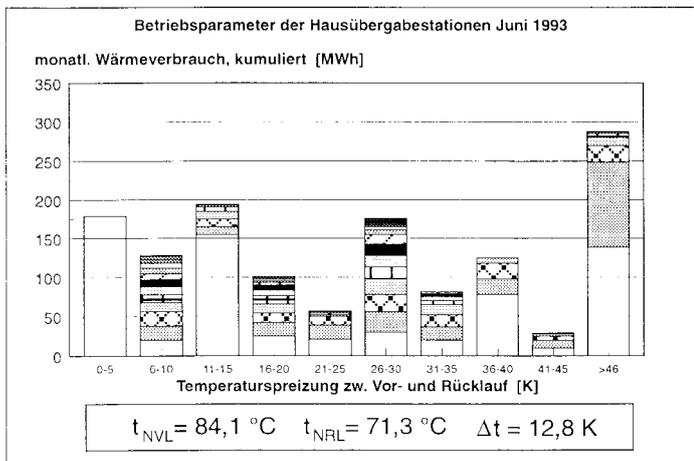


Abb. 9: Betriebsverhalten der Hausübergabestationen im Nahwärmenetz der Stadtwerke Göttingen im Monat Juni 1993

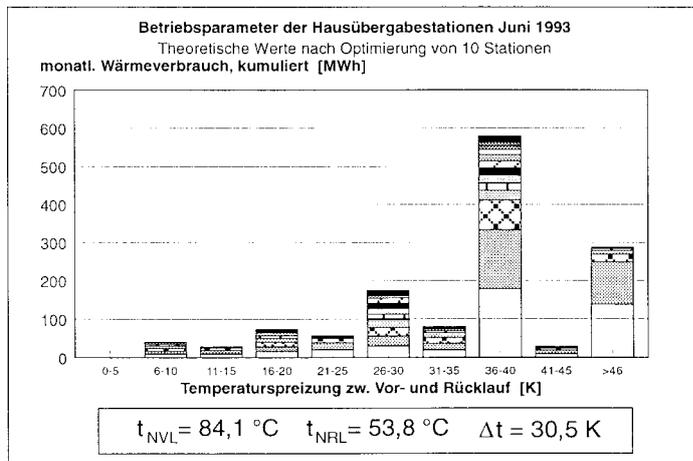


Abb. 10: Theoretisches Betriebsverhalten der Hausübergabestationen nach der Optimierung von zehn Hausanlagen

brauch bei gleichzeitig geringer Temperaturspreizung immer auch einen hohen Volumenstrom beinhaltet, läßt sich anhand dieser Abbildung sehr schnell ermes sen, welchen Einfluß diese beiden Stationen auf die nur geringe Netztemperaturspreizung ausüben.

Um den Nachweis zu erbringen, daß nur der Teil der Hausanlagen, die bei einer geringen Temperaturspreizung gleichzeitig auch einen hohen Wärmeverbrauchsanteil verzeichnen, optimiert werden sollten, erfolgte für den dargestellten Monat eine Berechnung des Betriebsverhaltens, wenn zehn Stationen auf eine Temperaturspreizung von 40 K gebracht würden. Abb. 10 veranschaulicht die sich aus dieser Optimierung ergebenden Veränderungen. Ein Teil der Hausanlagen ist in die Klasse mit einem  $\Delta t = 40 \text{ K}$  gerutscht, gleichzeitig verringert sich die Netzurücklauf tempera tur auf  $t_{NR} = 53,8 \text{ }^\circ\text{C}$  bei einer Netz spreizung von  $\Delta t = 30,5 \text{ K}$ .

Anhand dieser Untersuchungen läßt sich belegen, daß nur für einen geringen Teil der Verbraucherstationen Investitionen getätigt werden müssen, um das Betriebsverhalten in Nah- und Fernwärmenetzen zu verbessern. Dementsprechend gestaltet sich derzeit das Bestreben der Stadtwerke Göttingen, in Kooperation mit den Kunden und deren Planern eine Optimierung ausgewählter Hausanlagen vorzunehmen, um mit einem minimalen Aufwand an Investitionsmitteln den größtmöglichen Effekt zur Absenkung der Netzurücklauf temperaturen zu erzielen.

### Ertragssteigerung

Die Absenkung der Netzurücklauf temperaturen auf die zu Projektbeginn angestrebten Werte bietet ein Vielzahl von Vorteilen für den Anlagenbetreiber:

- Steigerung des Kollektor ertrags aufgrund reduzierter Betrieb temperaturen
- Senkung der Netz wärme verluste aufgrund verringerter Vor- und Rücklauf temperaturen,

- Erhöhung der Strom aus beute beim Betrieb in Kraft-Wärme-Kopplung bei abgesenkten Netzurücklauf temperaturen,
  - Einsatz kostengünstiger Ver lege verfahren beim Anschluß neuer Verbraucher.
- Die bereits zu Beginn des Vorhabens durchgeführten Maßnahmen zur Netztemperaturabsenkung haben bereits zu einer deutlichen Verbesserung des Betriebsverhaltens geführt.

Aufgrund der oben aufgeführten Vorteile sollte dieser Weg aber in jedem Fall weiter beschritten werden, um einerseits die möglichen Potentiale der Systemkopplung Solaranlage und bestehende Nahwärmeversorgungssystem voll ausschöpfen zu können, andererseits aber auch Vorbild für andere Stadtwerke in Deutschland zu sein. Denn das Thema Netztemperaturabsenkung hat erst in den letzten Jahren an Stellenwert gewonnen, wird zum Teil aber noch sehr stiefmütterlich behandelt.

Abschließend läßt sich festhalten, daß nach Einschätzung der beteiligten Projektpartner die verwirklichte Systemkombination ein hohes Potential zur Ein-

sparung fossiler Energieträger bietet, sofern die Rahmenbedingungen für hohe Solarerträge der Anlagen gegeben sind.

Denn neben den sehr geringen spezifischen Systemkosten aufgrund der sehr einfachen Anlagentechnik zeichnet sich die Solaranlage in Göttingen im Vergleich zu anderen Kollektorsystemen auch durch eine sehr geringe energetische Amortisationszeit aus, d. h. bereits nach sehr kurzer Zeit übersteigt der Ertrag dieser Systeme den für Herstellung, Betrieb und Entsorgung aufgewendeten Primärenergieaufwand.

Rainer Tepe, Klaus Vanoli

Im dritten Teil berichtet das ITW der Universität Stuttgart über die wissenschaftliche Untersuchung der in der Fassade des Heizkraftwerks integrierten Luftkollektoranlage. Der Abschlußbericht zu dem vom Forschungsministerium geförderten Forschungsvorhaben kann gegen einen geringen Unkostenbeitrag beim ISFH bezogen werden.

**Was Sie von einem Solarspeicher heute erwarten können?**

- Keine Legionellen-Keime durch Durchlauferhitzer-Prinzip
- Sehr gute Umweltverträglichkeit von der Herstellung bis zur Entsorgung
- Sofort warmes Wasser durch neuartiges Schichtensystem
- Heizungsunterstützung mit serienmäßigem Heizungswärmetauscher

**CONUS 500 Der Solarspeicher**  
 s. a. Bericht in Sonnenenergie 6/95

Consolar Energiespeicher- und Regelungssysteme GmbH, Dreieckstraße 48  
 D-60594 Frankfurt am Main, Telefon: 069-61 99 11-29, Telefax: 28

**CONSOLAR**