



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 14. Januar 2010

Integration solarthermischer Anlagen in ein arealbezogenes Nahwärmenetz

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm P&D
CH-3003 Bern

www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Institut für Solartechnik SPF
HSR Hochschule für Technik Rapperswil
Oberseestrasse 10
CH-8640 Rapperswil

www.solarenergy.ch

Autoren:

Paul Gantenbein, Institut für Solartechnik SPF, paul.gantenbein@solarenergy.ch
Elimar Frank, Institut für Solartechnik SPF, elimar.frank@solarenergy.ch

BFE-Bereichsleiter: Urs Wolfer

BFE-Programmleiter: Jean-Christophe Hadorn

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 102695/153486

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Abstract

Für das Nahwärmenetz der HSR wurde ein Konzept zur Ganzjahresnutzung von Solarthermie mittels einer Retrofit-Lösung untersucht. Auf dem Dach von Bau 4 der HSR sollte dazu ein Kollektorfeld installiert werden, wobei aus bautechnischen Gründen je nach Kollektortyp zunächst ein Feld von bis zu $A_{\text{Kol}} = 40\text{m}^2$ Solarkollektorfläche vorgesehen war.

Die konzeptionellen Untersuchungen haben ergeben, dass prinzipiell die Nutzung der Wärme aus der Solaranlage lokal im vorhandenen Brauchwarmwasserspeicher von Bau 4, dezentral in den Brauchwarmwasserspeichern der übrigen Bauten auf dem Campus der HSR oder zentral in den Pufferspeichern des BHKW in der Heizzentrale des HSR-Campus möglich wäre. Eine Deckung des Wärmebedarfs auf dem ganzen Campus der HSR ist mit der Solaranlage auch in den Sommermonaten aufgrund der baulichen Einschränkungen nicht möglich. Die Solarwärme reicht jedoch für den lokalen Warmwasserbedarf in Bau 4, wenn durch eine Anpassung der Orientierung der Solarkollektoren der Nutztemperaturverlauf bzw. der Solarertrag dem lokalen Warmwasserbedarf angeglichen wird.

Die energetische Analyse der relevanten Bereiche des arealbezogenen Nahwärmenetzes der Hochschule für Technik Rapperswil (HSR) hat sich im Projektverlauf als wesentlich komplexer erwiesen als angenommen, konnte aber für eine detaillierte Analyse der Konzeptvarianten weitgehend durchgeführt werden. Auf dieser Grundlage können für den Projektverlauf relevante Aussagen gemacht werden. Die zeitlich detaillierte Messdatenerfassung, in der die wichtigsten Messwerte wie Energieflüsse, Temperaturen und Schaltzustände von Ladepumpe und Primärpumpe an Netzknoten im Bau 4 erfasst werden, ist weiterhin in Betrieb.

Die bisherigen konzeptionellen und messtechnischen Untersuchungen haben erst nach eingehender Analyse gezeigt, dass die Nutzung der Wärme aus der Solaranlage lokal im Brauchwarmwasserspeicher von Bau 4 wenig sinnvoll ist, weil durch eine gewerbliche Wärmerückgewinnung sehr oft genügend thermische Energie zur Bereitstellung des BWW in Bau 4 zur Verfügung steht. Zudem ist durch die obere Temperaturbegrenzung auf $T_{\text{BWW}} = 60^\circ\text{C}$ wegen möglicher Verkalkung nur eine geringfügige Temperaturerhöhung durch Solarthermie möglich, da aufgrund der WRG das untere Temperaturniveau im Speicher $T_{\text{BWW}}=40^\circ\text{C}$ selten unterschritten wird.

Die zentrale Einspeisung in das HSR-Nahwärmenetz ist über eine neue Fernrohrleitung und einen Wärmetauscher in der Heizzentrale zwar möglich, der zusätzliche Kostenaufwand dazu ist mit rund CHF 40'000.- jedoch erheblich. Die Wärmeverluste aus dieser Fernleitung von Bau 4 bis zur Heizzentrale in Bau 2 betragen rund 10% der gesamten eingebrachten Solarwärme. Bis die Solarwärme im sternförmigen HSR-Nahwärmenetz die übrigen Bauten auf dem Campus der HSR erreicht, sind weitere 10% Wärmeverluste zu erwarten.

Erhebliche Schwierigkeiten im Projektverlauf bei der Datenerfassung und der Zusammenstellung verlässlicher Informationen über die tatsächliche (und variierende) Betriebsweise des Nahwärmenetzes sowie deren Gründe haben abschliessend mit dazu geführt, dass erst nach aufwändiger Analyse festgestellt wurde, dass keine der möglichen Varianten zur Einbindung von Solarthermie ökonomisch sinnvoll umgesetzt werden kann.

Projektziele und Konzept

Als Projektziele wurden eingangs die technische **Systemerprobung** für die Ganzjahresnutzung von **Solarthermie** mittels einer einfachen **Retrofit-Lösung** bei **Nahwärmeverbunden** mit existierenden dezentralen Speichern – Brauchwasserspeichern (BWW) und – nach der Umsetzung einer Pilotanlage – die regeltechnische Systemerprobung bei bidirektionalen Wärmeströmen in **solarthermisch unterstützten arealbezogenen Nahwärmenetzen** definiert.

Um diese Ziele zu erreichen, sollte eine Solarthermieranlage in das Wärmeversorgungskonzept des arealbezogenen Nahwärmenetzes der Hochschule für Technik Rapperswil eingebunden werden. Dazu wurde ein modulares Konzept ausgearbeitet, in welchem auf zwei Gebäuden des HSR Campus ohne erheblichen Zusatzaufwand Solaranlagen installiert wer-

den können. Nach Möglichkeit sollten die bestehenden grossen und zentral angeordneten Warmwasserspeicher genutzt werden, wenn die solar bereitgestellte Wärme nicht direkt einer Wärmesenke zugeführt werden kann. In einer ersten Phase sollte auf dem Bau 4 der HSR ein Kollektorfeld mit je nach Kollektortyp einer Fläche von bis zu $A_{\text{Kol}} = 40\text{m}^2$ errichtet werden.

Die Wärme aus dem Solarkollektorfeld wird im Konzept in bestehende Brauch-Warmwasserspeicher (BWW) transportiert. Dies kann mit drei unterschiedlichen Betriebsmodi erfolgen:

- I: Lokale Nutzung - Einspeisung der Wärme in den BWW-Speicher 1 in Bau 4.
- II: Dezentrale Nutzung - Einspeisung der Wärme in BWW-Speicher eines (mehrerer) anderen Gebäudes auf dem HSR Campus.
- III: Zentrale Speicherung - Einspeisung der Wärme in die Pufferspeicher der Heizzentrale der HSR.

Zur *lokalen Nutzung* müsste dem in Bau 4 vorhandenen Brauchwarmwasserspeicher ein zusätzlicher externer Wärmeübertrager installiert werden, um den Solarkreis anzubinden, der ein Glykol-Wasser-Gemisch führt. Aus diesem Speicher wird hauptsächlich die Küche der Mensa mit Warmwasser versorgt. Bei fehlender Solarenergie wird das Wasser weiterhin mit Energie aus dem Nahwärmenetz aufgeheizt. Ist der BWW-Speicher in Bau 4 beladen und steht zusätzlich Solarenergie zur Verfügung, dann könnte über einen weiteren Plattenwärmeübertrager sowie eine neu zu bauende Fernrohrleitung und ein Wärmeübertrager in der Heizzentrale die Solarenergie in das HSR-Nahwärmenetz eingespeist werden. Durch gleichzeitigen Betrieb der Netzpumpen kann diese Wärmeenergie in der *dezentralen Nutzung* zu einem anderen BWW-Speicher eines anderen Gebäudes transportiert werden. Sind alle BWW-Speicher auf dem HSR Campus voll/geladen, dann kann mit der zusätzlichen Pumpe am neuen zentralen Wärmeübertrager die Solarenergie in die *zentralen Pufferspeicher* transportiert werden.

Die Veröffentlichungen zu vergleichbaren Systemen im Retrofitbereich sind spärlich. Dieser Mangel ist auf die jeweils örtlich speziellen Gegebenheiten wie relative Anordnung der Verbraucher, Verbrauchsprofil und Temperaturniveau in Nahwärmenetzen zurückzuführen. Alle zur Verfügung stehenden Publikationen behandeln Neubau-Systeme [2, 3, 4]. Vor diesem Hintergrund wurde es als wichtig angesehen, ein möglicherweise übertragbares Retrofit-Konzept für die Einbindung von Solarwärme in arealbezogene Kompaktnahwärmenetze zu identifizieren.

Nahwärmenetz und Einbindung einer Solaranlage

Zunächst erfolgte eine eingehende Analyse der Energieflüsse im Nahwärmenetz der HSR [1]. Daraus konnten erste Erkenntnisse hinsichtlich der Möglichkeiten, Solarwärme prinzipiell in das komplexe und historisch gewachsene Gesamtversorgungskonzept zu integrieren, gewonnen werden. Auf diesen Erkenntnissen aufbauend erfolgte eine detaillierte Analyse der Energieflüsse an den BWW Speichern im Bau 4 der HSR, um die Variante der lokalen Einspeisung zu analysieren.

Das vorhandene 2-Leiter-Nahwärmenetz auf dem Areal der HSR wird mit Wärme aus einem Blockheizkraftwerk (BHKW) und dazu in Serie geschalteten Heizkesseln (HK) mit Wärme versorgt [1]. Aus dem Vorlauf dieses 2-Leiternetzes wird Wärme mit einer Primär und einer Ladepumpe in den BWW Sp1 gebracht. In Fig. 1 ist eine vereinfachte schematische Darstellung von BHKW, HK, Pufferspeicher und Netzpumpen mit Mischstation dargestellt. Als Brennstoff wird Erdgas eingesetzt, wobei die HK als Zweistoff-Kessel ausgelegt sind und auch mit Öl betrieben werden könnten. Ab der zentralen Verteilstation („Hochtemperaturkollektor“) führt in jedes Gebäude eine Vorlaufrohrleitung. Aus dieser werden in den Bauten die Heizungen mit Wärme versorgt und die Brauchwasserspeicher (BWW) aufgeheizt, s. Fig. 2. Alle Rücklaufrohrleitungen aus den Gebäuden werden wiederum zentral auf ein Sammelrohr, den „Tiefemperaturkollektor“, geführt. Diese hydraulische „Sternschaltung“ (d.h. keine Ringleitung) bzw. Wärmeträgerführung hat in Betriebsmodus II & III – dezentrale Nutzung & zentrale Speicherung – erheblichen apparativen und rohrleitungsbaulichen Aufwand zur Folge,

da nicht wie ursprünglich angenommen, eine Anhebung der Rücklauftemperatur realisiert werden kann. In der zentralen Heizstation müsste parallel zu den vorhandenen Wärmequellen ein Wärmeübertrager mit Pumpe und 3-Wegeventil eingebaut werden. Über diesen Wärmeübertrager würde die Solaranlage für die zentral Einspeisung mit einer neu zu bauenden Fernrohrleitung als zusätzliche Wärmequelle in das HSR-Nahwärmenetz integriert, siehe Fig. 3.

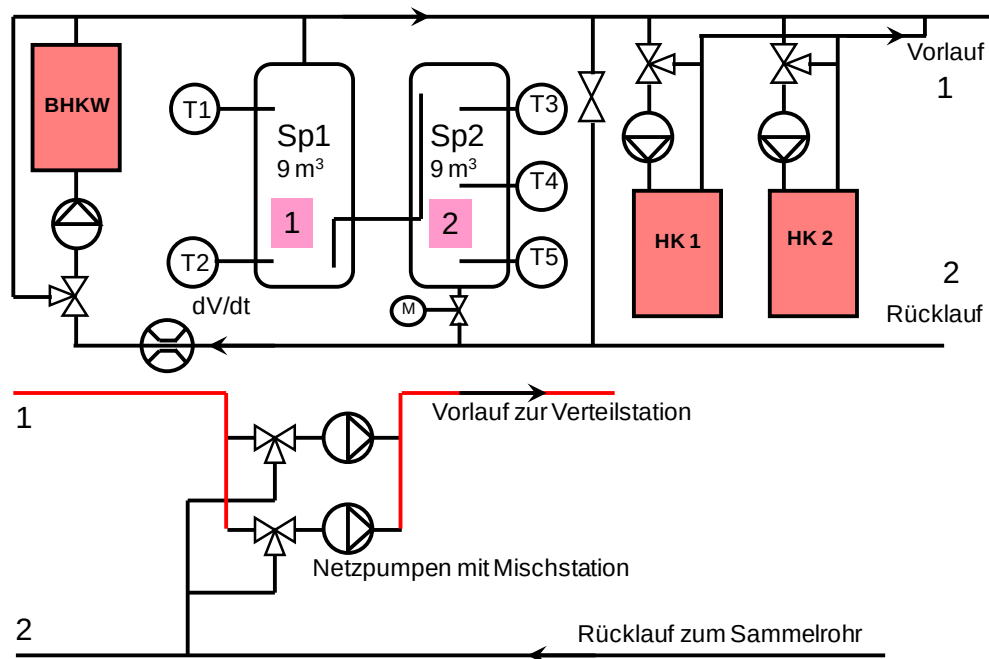


Fig. 1: Vereinfachte schematische Darstellung der Heizzentrale in Bau 2 mit Blockheizkraftwerk (BHKW), zwei 9m³ Pufferspeicher (Sp1 & Sp2) und Heizkessel (HK 1 & HK 2) sowie der Netzpumpen mit Mischstation. Die Pufferspeicher werden über das BHKW beladen.

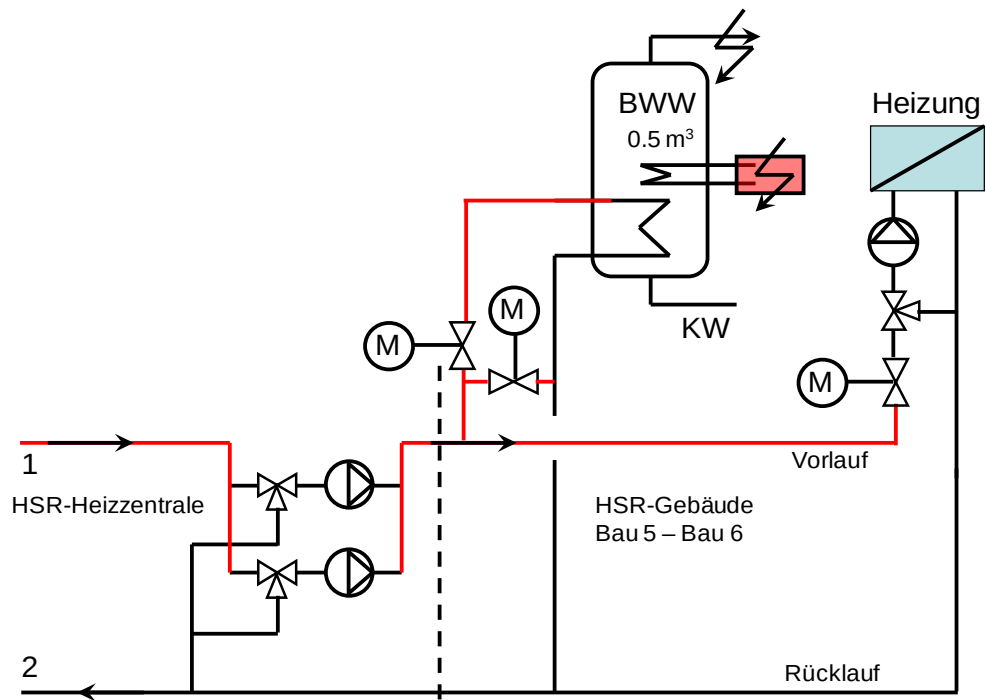


Fig. 2: Vereinfachte schematische Darstellung der Gebäudeanbindung an das HSR-Nahwärmenetz. In der Grafik ist die Situation der Gebäude Bau 5 und Bau 6 dargestellt. Den BWW Speichern ist eine elektrische Heizung eingebaut und die BWW-Rohrleitungen haben eine elektrische Begleitheizung um die Leistungsverluste auszugleichen. Die BWW Speicher in den Gebäuden 1, 2, 3 und 4 haben keine elektrische Zusatzheizung und auch keine Rohrleitungs-Begleitheizung – jedoch z.T. eine Pumpe zur Zirkulation.

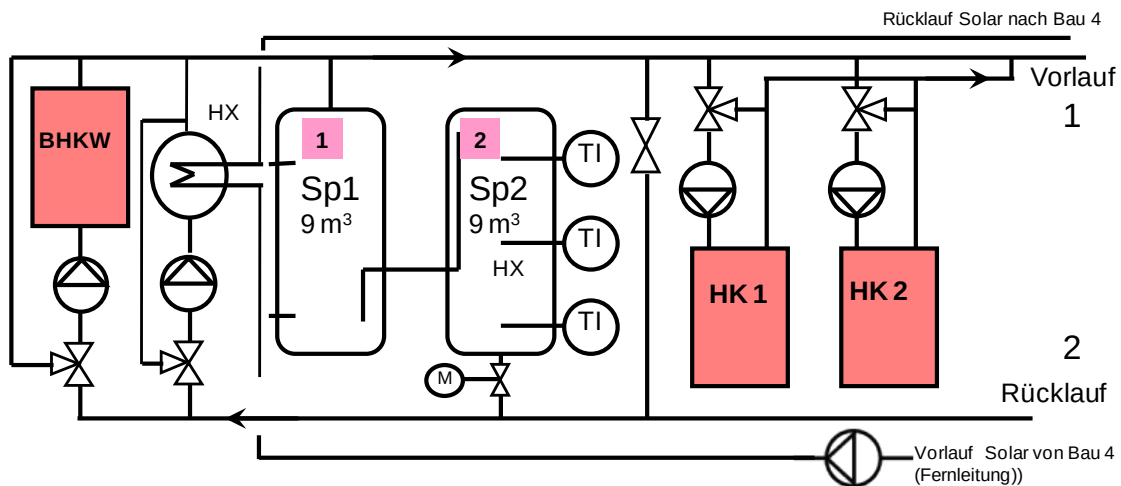


Fig. 3: Vereinfachte schematische Darstellung der Heizzentrale in Bau 2 mit Blockheizkraftwerk (BHKW), zwei 9m³ Pufferspeicher (Sp1 & Sp2) und Heizkessel (HK 1 & HK 2) sowie einer Variante der Einspeisung von Solarwärme über einen Wärmetauscher (HX) in das Wärmeträgernetz.

Durch diese Einbindung kann Konzept II & III umgesetzt werden, wobei in der dezentralen Wärmespeicherung, Konzept II, ein Speichervolumen (Summe der BWW Speichervolumen Bau 1, 2, 3, 5 und 6) von 2.83 m³ und in der zentralen Wärmespeicherung, Konzept III, ein Speichervolumen von maximal 18 m³ (Sp1 & Sp2) zur Verfügung steht. Wie bereits vorab festgestellt [1], steht dieser Lösung theoretisch zwar nichts entgegen, der apparative und rohrlage-technische Aufwand ist jedoch erheblich. Da alle drei Konzepte im Bau 4 eine Übergabe der solaren Wärme an die Verbraucher/das Nahwärmenetz erfordern wurde unter anderem aus diesem Grund die lokale Einspeisung (Konzept I) spezieller untersucht.

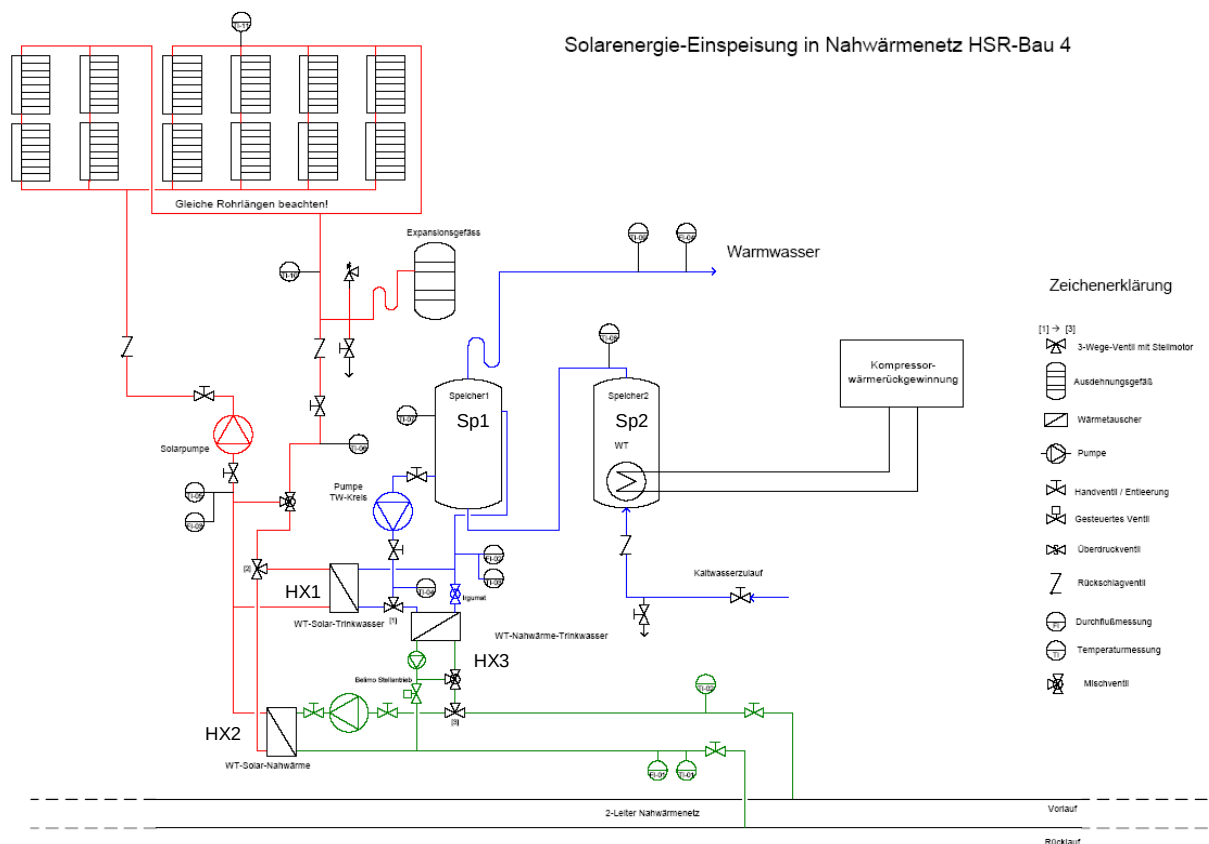


Fig. 4: Schematische Darstellung der Solaranlage mit Wärmeeinspeisung in den BWW-Speicher 1 (Sp1 links) und in das Nahwärmenetz der HSR. Die Wärmeübertragung aus dem Nahwärmenetz in den Speicher 1 ist vorhanden und bleibt bestehen.

In Fig. 4 ist dazu eine schematische Darstellung. Je nach Angebot an Solarenergie aus dem Kollektorfeld und Wärmebedarf im System wird die Solarwärme auf den entsprechenden Wärmeübertrager geleitet (HX1, HX2, HX3). Ist Wärmebedarf zur Warmwasserbereitung im Bau 4 vorhanden aber keine Solarenergie zur Verfügung, dann stellt das Nahwärmenetz die Wärme über den bestehenden Wärmeübertrager HX3 bereit.

Durchgeführte Messungen und Analysen

Blockheizkraftwerk-Betrieb – Temperaturverlauf Pufferspeicher

Zur Analyse des Nahwärmenetzes wurde eine Messkampagne gestartet, in der die wichtigsten Messwerte an relevanten Netzpunkten wie Energieflüsse, Temperaturen und Schaltzustände von BHKW und HK zeitlich detailliert erfasst werden. Die Messungen wurden Ende letzten Jahres auf dem vorhandenen Energieleitsystem gestartet. Da Wochen später unvorhergesehen ein Projekt zum Einsatz einer neuen Software für das Energieleitsystems gestartet wurde, entstanden im weiteren Verlauf wiederholte Lücken in der Datenaufzeichnung. Eine detaillierte Analyse konnte aufgrund der resultierenden Datengrundlage nicht sinnvoll durchgeführt werden. Damit ist auch die zunächst als Referenz vor dem Bau eine Solaranlage gedachte Messdatenerfassung ungenügend.

Für die nach Konzept III vorgesehene Speicherung der Solarwärme in den zentralen Pufferspeichern muss das Betriebskonzept des BHKW bekannt sein und ev. angepasst werden. Eine schematische Darstellung eines Teils der Heizzentrale im Bau 2 ist in der Fig. 5 aufgezeigt. Die Daten zur Einspeisung der thermischen (und der elektrischen) Energie aus dem BHKW in das HSR-Nahwärmenetz bzw. in die Pufferspeicher wurden dazu ausgewertet. In Fig. 6 ist der Verlauf des Gasverbrauchs ($\approx$ thermische Energie) in den Heizkessel (HK1 & HK2) für das Jahr 2008 und in Fig. 7 der Verlauf der Energieeinspeisung aus dem BHKW über die Monate im Jahr 2009 dargestellt. Dazu wurden freundlicher Weise auch Daten vom Elektrizitätswerk Jona-Rapperswil (EWJR) zur Verfügung gestellt um die teilweise vorhandenen Lücken der Datenerfassung mit dem Energieleitsystem zu schließen. Aus dem Verlauf wird die tiefe BHKW-Betriebszeit und damit Wärmewandlung in den Sommermonaten 2009 deutlich. Eine Nutzung der Pufferspeicher für Solarwärme bietet sich hier an und würde damit die angestrebte Reduktion des Primärenergieverbrauchs der Heizkessel (HK1 & HK2) unterstützen. Insbesondere ist das BHKW an den Wochenenden jeweils nur am Samstag für 5h (7:00 bis 12:00) in Betrieb.

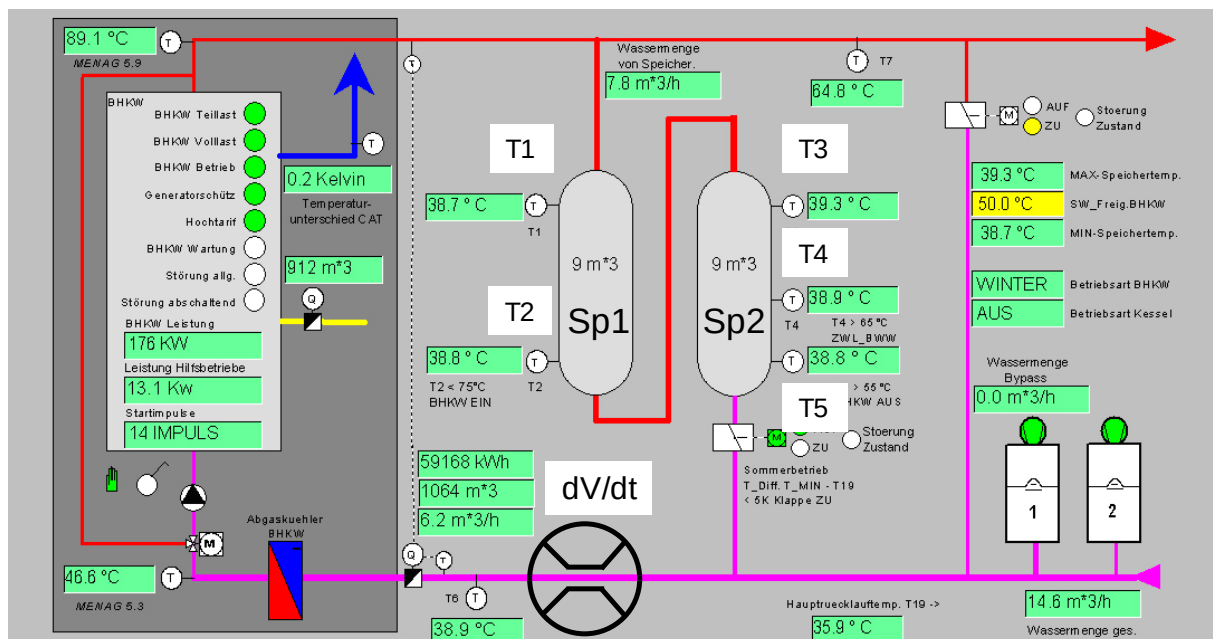


Fig. 5: Schematische Darstellung eines Teils der Heizzentrale im Bau 2 des HSR-Nahwärmenetzes mit BHKW (links) und Pufferspeicher Sp1 & Sp2 für Heizwasser sowie Messfühler-Positionen für Temperatur und Volumenstrom. Zwei in Serie geschaltete 9m³ Speicher werden durch das BHKW beladen.

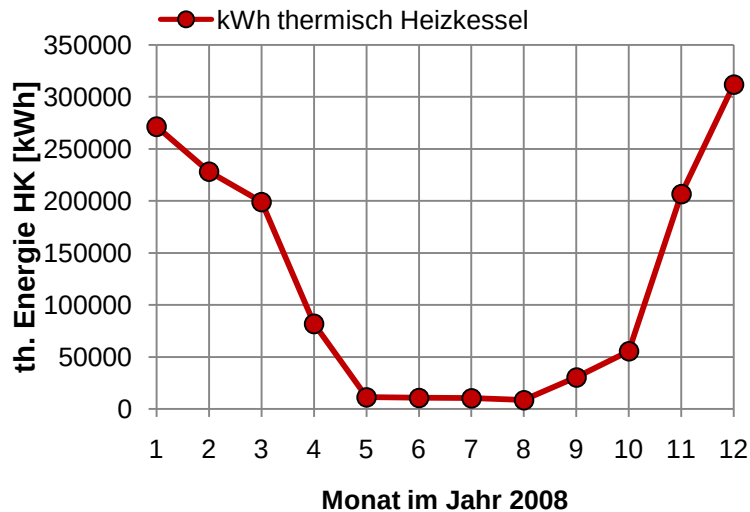


Fig. 6: Gas-Energiebezug für die Heizkessel (HK) im Jahr 2008 - Gasmenge in $m^3 \approx th.$ Energie in kWh. Die Daten sind ohne Berücksichtigung des $th.$ Wirkungsgrades η_{th} aufgetragen. Im Jahr 2009 sind die HK in den Monaten April bis August mit Öl betrieben worden.

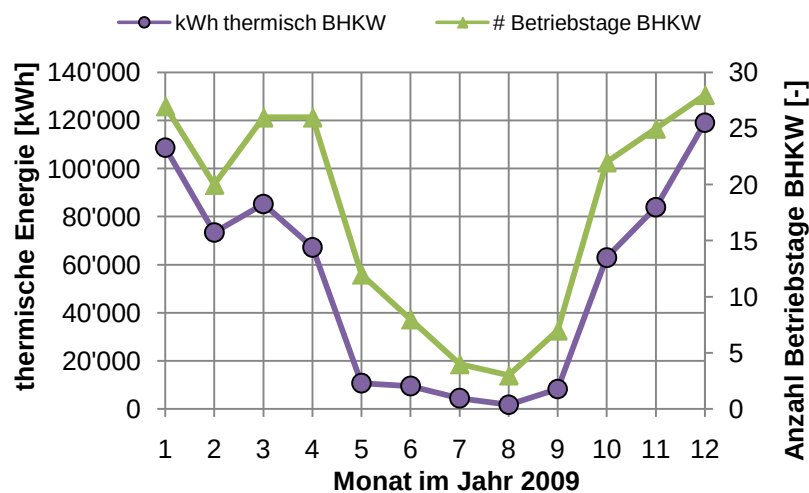


Fig. 7: Thermische Energie aus dem Betrieb sowie Anzahl Tage an denen das BHKW in Betrieb ist. Der „Einbruch“ im Februar ist auf Stillstand des BHKW während Revisionsarbeiten zurückzuführen.

Die geringe Betriebszeit des BHKW bzw. niedrige Anzahl Betriebstage im Sommer 2009 (Fig. 7) ist in Fig. 8 in Form der Einspeisung von elektrischer Energie (Leistung) in das HSR-Elektronetz dargestellt. In den dargestellten Monaten Juli und August 2009 war das BHKW weitgehend ausser Betrieb, wird jedoch auf Notfall-Schaltung für allfällige Stromausfälle gestellt. Durch Einspeisung von Solar-Wärme in die Pufferspeicher könnte folglich (wenn das BHKW überwiegend nicht betrieben wird) eine Vorwärmung des Heizwassers erzielt werden und damit eine Reduktion der Betriebszeiten der Heizkessel erreicht werden. Ein Konzept dazu wird mit dem Gebäudemanagement der HSR ausgearbeitet.

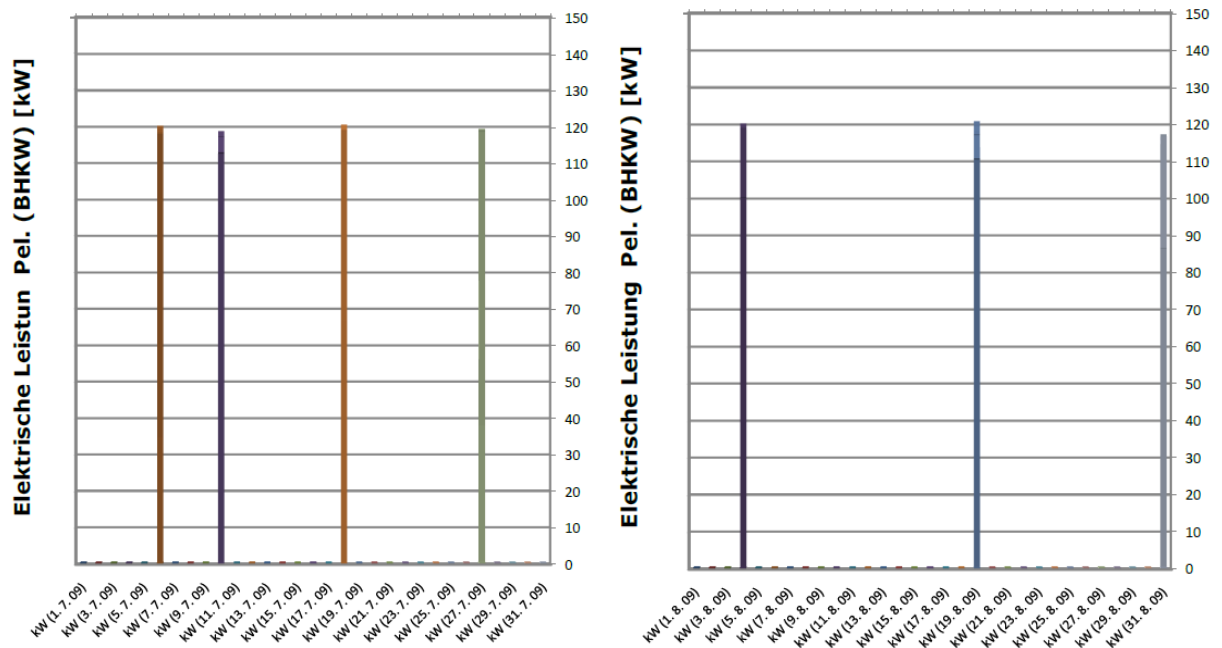


Fig. 8: Einspeisung von elektrischer Energie durch das BHKW in die Stromversorgung der HSR. Als Beispiel der Erfassung des BHKW Betriebs sind hier die Daten der Monate Juli und August dargestellt. In diesen Monaten läuft das BHKW nur an 4 bzw. 3 Tagen. Während den Sommermonaten läuft das BHKW ohnehin nur mit 75% ($P_{el.}=120\text{kW}$) der maximalen Leistung ($P_{el.}=160\text{ kW}$).

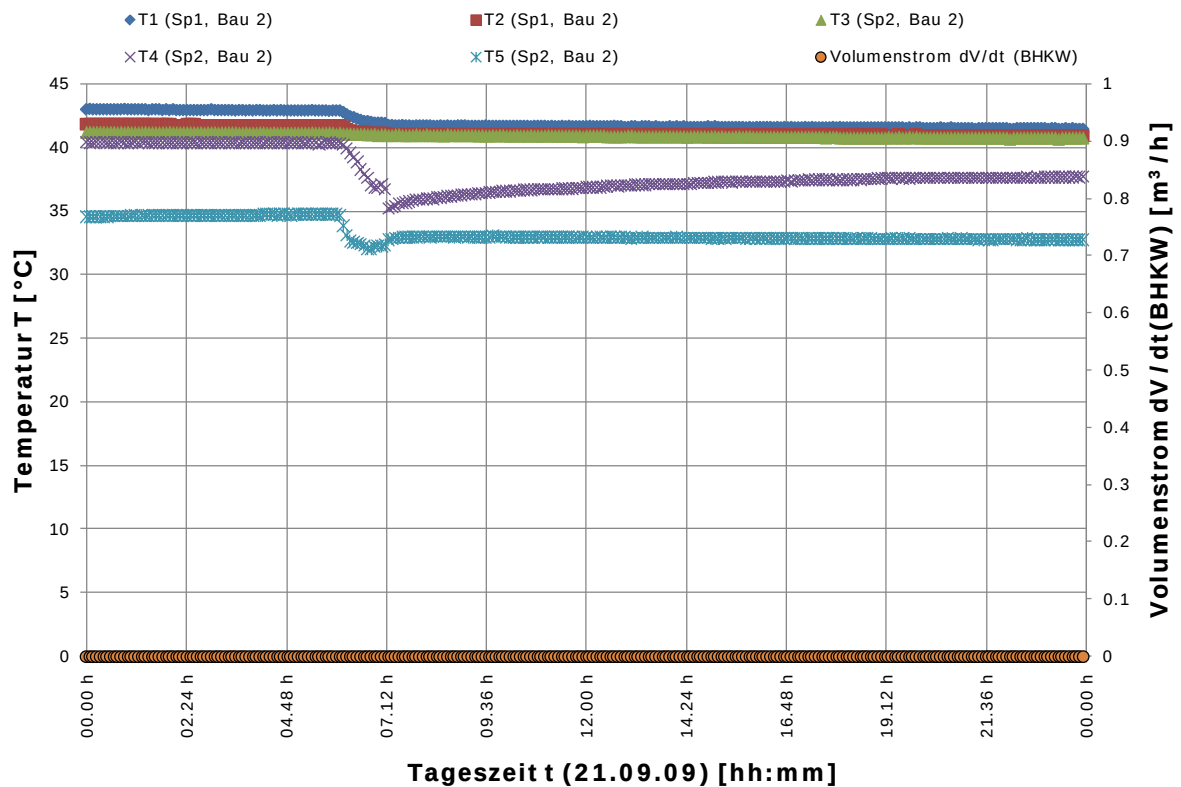


Fig. 9: Temperaturverlauf $T(t)$ in Funktion der Zeit t in den Pufferspeichern Sp1 & Sp2 sowie Volumenstrom dV/dt am BHKW des HSR-Nahwärmenetzes. Das BHKW ist an diesem Tag ausser Betrieb.

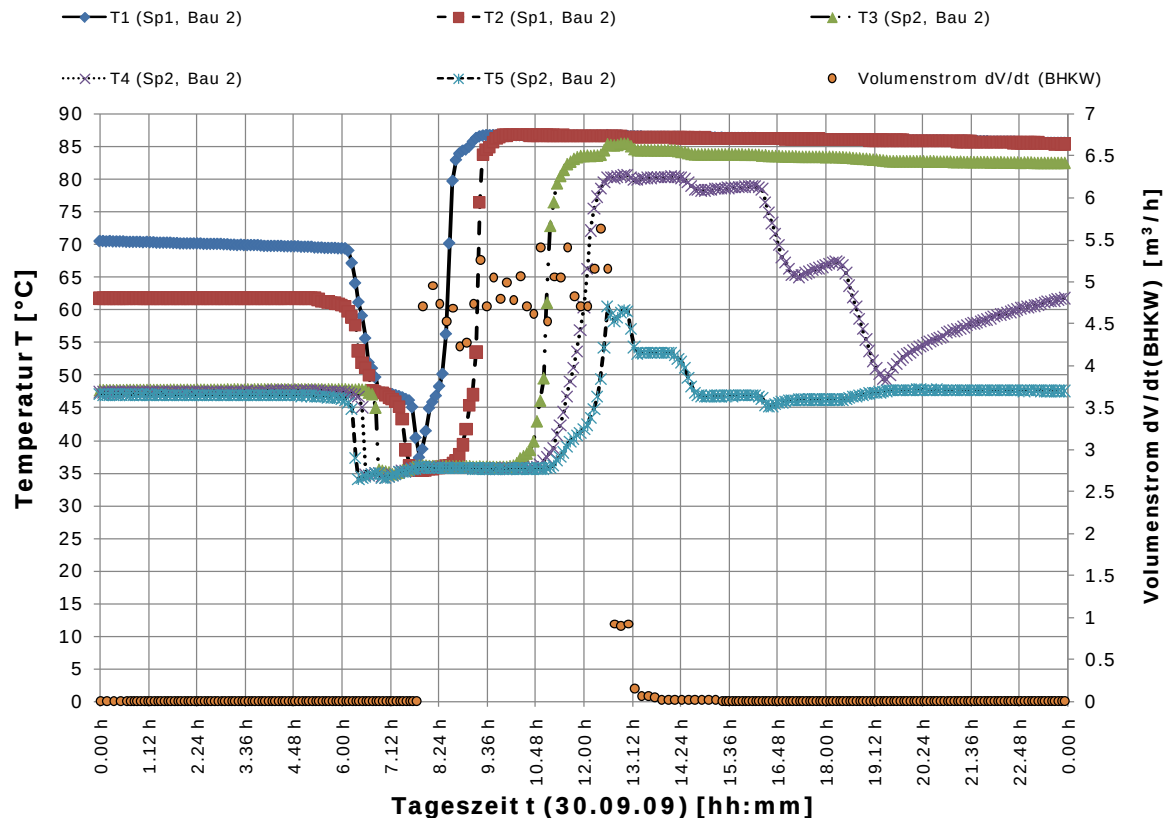


Fig. 10: Temperaturverlauf $T(t)$ in Funktion der Zeit t in den Pufferspeichern Sp1 & Sp2 sowie Volumenstrom dV/dt am BHKW des HSR-Nahwärmenetzes. Das BHKW ist an diesem Tag ab 8 Uhr bis 13 Uhr in Betrieb.

Der Wärmeertrag eines thermischen Solarsystems hängt vom Temperaturniveau der Kollektoranlage ab und steigt mit sinkender Temperatur. Daher ist auch entscheidend, ab welcher Temperatur die Solaranlage auf Grund der Speichertemperatur in Betrieb gehen kann. Wenn das BHKW ausser Betrieb ist und die Wärmeversorgung der Bauten nur durch die HK1 & HK2 erbracht wird, sinkt die Temperatur in den Pufferspeichern auf das Niveau des Haupt-Rücklaufes (als Voraussetzung zur Aufnahme der Wärmeenergie ist das Temperaturniveau der Pufferspeicher im Falle eines Betriebes des BHKW auf tiefem Niveau, da die Speicher zur Speicherung der „anfallenden“ Wärme vorgesehen sind). In Fig. 9 ist der Temperaturverlauf in den Pufferspeichern über einen Tag ohne BHKW-Betrieb dargestellt. Mit einer Temperatur im Bereich von 33°C bis 40°C - T5/T4/T3 (Sp2, Bau 2) – im Pufferspeicher 2, können an einem Tag für gemittelt 8h Sonnenscheindauer mit den $A_{\text{Kol}}=40\text{m}^2$ Flachkollektoren und bei Berücksichtigung von rund 10% Wärmeenergieverlust (v.a. durch die ca. 100 m lange Rohrleitung) von der Solaranlage auf dem Dach von Bau 4 bis zu den Pufferspeichern in Bau 2 ca. 140kWh bis 160kWh Wärmeenergie gespeichert werden. Diese Wärmeenergie bewirkt in 9 m^3 Wasser eine Temperaturerhöhung von rund 14°C bis 16°C . Für Tage an denen das BHKW in Betrieb ist, steht dieses Speichervolumen jedoch nicht für Solarwärme zur Verfügung. In Fig. 10 ist dazu der Temperaturverlauf in den beiden Pufferspeichern dargestellt.

Verbrauchsprofil und Temperaturverlauf im lokalen Brauchwarmwasserspeicher

Zur Realisierung der Einbindung nach Konzept I musste lokal im Bau 4 der Energiebezug aus dem HSR-Nahwärmenetz bestimmt und mit der Bereitstellung von Wärmeenergie aus der WRG verglichen werden. Dazu wurde eine Messdatenerfassung an diesem Teilsystem installiert. In Fig. 11 ist eine schematische Darstellung der Situation im Keller von Bau 4 dargestellt. Die Figur zeigt wie die zwei lokal in Bau 4 vorhandenen 2000l BWW-Speicher an das Nahwärmenetz „angebunden“ sind.

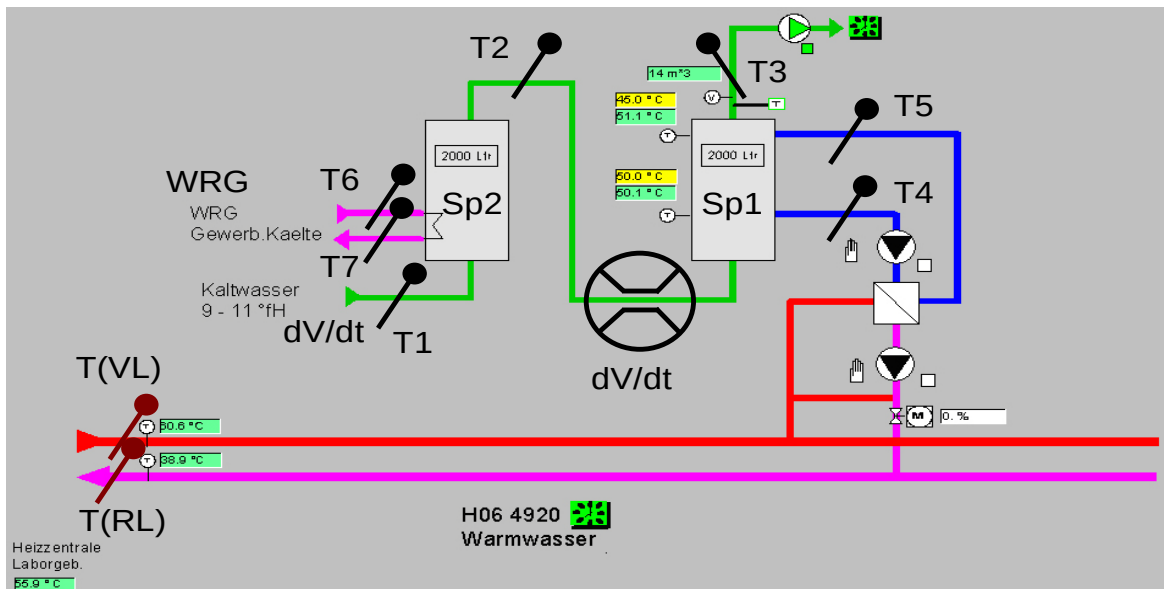


Fig. 11: Schematische Darstellung von Speicher Sp1 & Sp2 für Brauchwarmwasser (BWW) im Bau 4 und thermische Energie-Anbindung an das HSR-Nahwärmenetz sowie Messfühler-Positionen für Temperatur und Volumenstrom. Zwei in Serie geschaltete 2m³ Speicher mit Wärmerückgewinnung (WRG) aus den Kältemaschinen. Die thermische Energie zur Aufheizung des Wassers in Speicher Sp1 auf die Nutztemperatur von T=50°C bis T=55°C wird vom Nahwärmenetz geliefert. Die WRG aus der gewerblichen Kälte bewirkt eine Vorwärmung bzw. je nach Verbrauch sogar eine vollständige Bereitstellung des BWW in Bau 4.

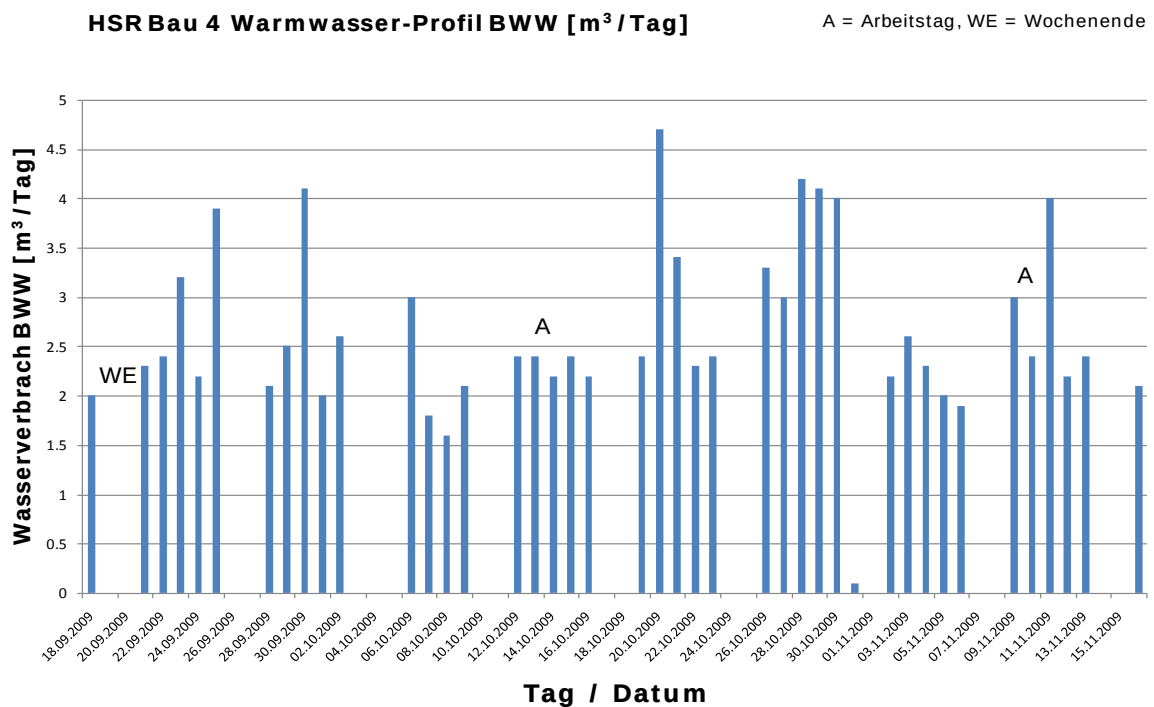


Fig. 12: Verbrauch von Warmwasser (BWW) im Bau 4 der HSR während einer Messperiode im Herbst 2009. Im Durchschnitt werden pro Arbeitstag 2.7m³ Warmwasser verbraucht. An Wochenendtagen ist nur in Ausnahmefällen BWW-Bedarf – z.B. bei Anlässen an denen die Teilnehmer durch die Mensa des SV-Service bewirtet werden. A=Arbeitstag, WE=Wochenende.

Zur Vorwärmung des Brauchwarmwassers wird in Speicher Sp2 die Abwärme aus Kompressorkältemaschinen genutzt. Mit zusätzlich montierten Temperatursensoren und Durchflussmesser konnten die Wärmeenergien zur Bereitstellung des BWW aus den beiden Quellen bestimmt und verglichen werden.

In der Fig. 12 ist der Verbrauch in m^3/Tag dargestellt, wobei an den Wochenendtagen nur in Ausnahmefällen ein Verbrauch besteht. Der Verbrauch von Warmwasser (BWW) an den Arbeitstagen (A) in Bau 4 liegt im Durchschnitt bei 2.7 m^3 . Hauptbezügerin ist die Küche der Mensa. Für den Bau und den Betrieb einer Solaranlage ist das Verbrauchsprofil über den Tag (24h) wichtig und dient auch dazu eine optimale Kollektorfeldorientierung anzustreben [1]. In den Fig. 13 und Fig. 16 sind die Verbrauchsprofile für BWW von zwei aufeinander folgenden Tagen - Dienstag 29. und Mittwoch 30. September - dargestellt. Während am Dienstag ein Profil mit Tagesspitzen zentriert um die Tagesmitte besteht ist jenes vom Mittwoch stark zu den früheren Morgenstunden hin geschoben. Entsprechend ist eine Ost-Orientierung des Solarkollektorfeldes sinnvoll [1]. Zur Bestimmung des Energiebezugs aus dem Nahwärmenetz oder Eintrages aus der WRG sind auch die Temperaturen gemessen worden und in den Fig. 14, Fig. 15 und Fig. 17, Fig. 18 zu den Verbrauchsprofilen angefügt worden.

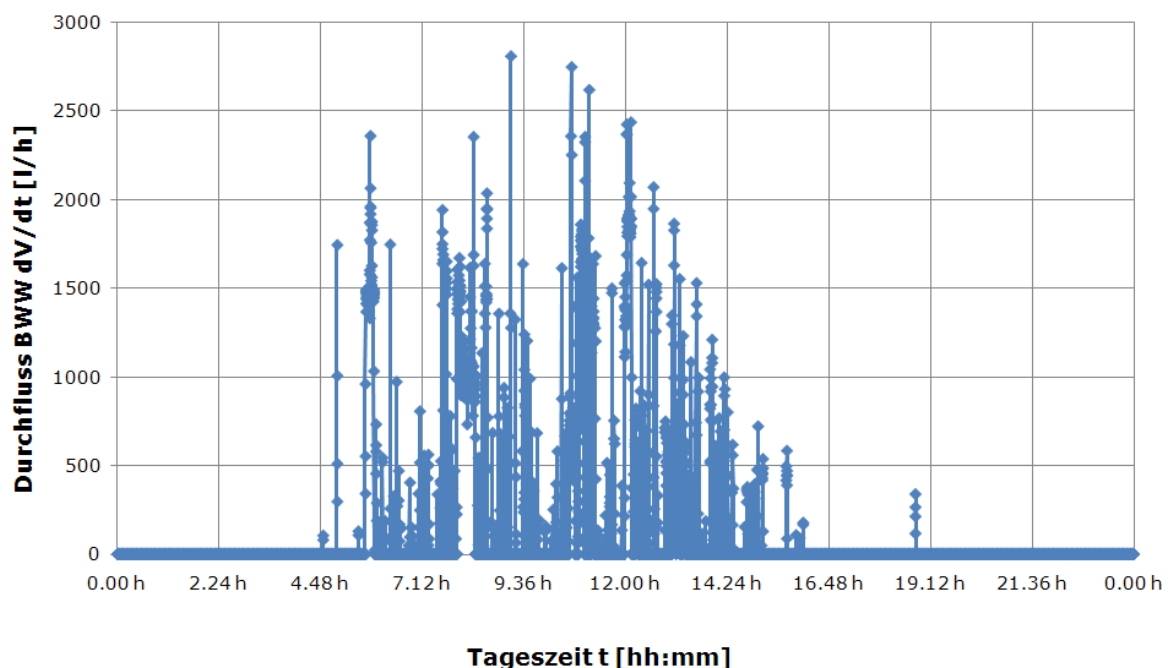


Fig. 13: Warmwasser-Verbrauchsprofil im Bau 4 am Dienstag dem 29. September 2009. An diesem Arbeitstag wurden 2.5 m^3 Warmwasser verbraucht. Dieser Wert liegt 0.2 m^3 unter dem durchschnittlichen Warmwasserverbrauch von 2.7 m^3 pro Arbeitstag.

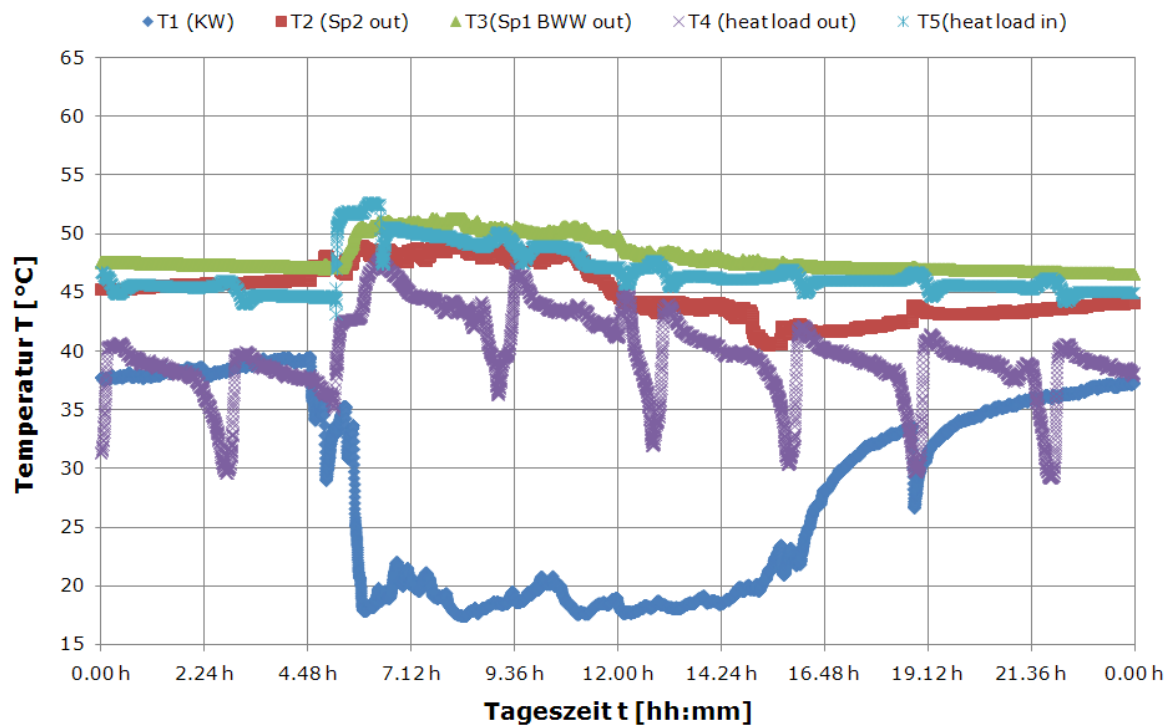


Fig. 14: Temperaturprofil an Sp1 und Sp2 Bau 4 am Dienstag dem 29. September 2009. An diesem Arbeitstag wurden 2.5m^3 Warmwasser verbraucht. Dieser Wert liegt 0.2m^3 unter dem durchschnittlichen Warmwasserverbrauch von 2.7m^3 pro Wochentag.

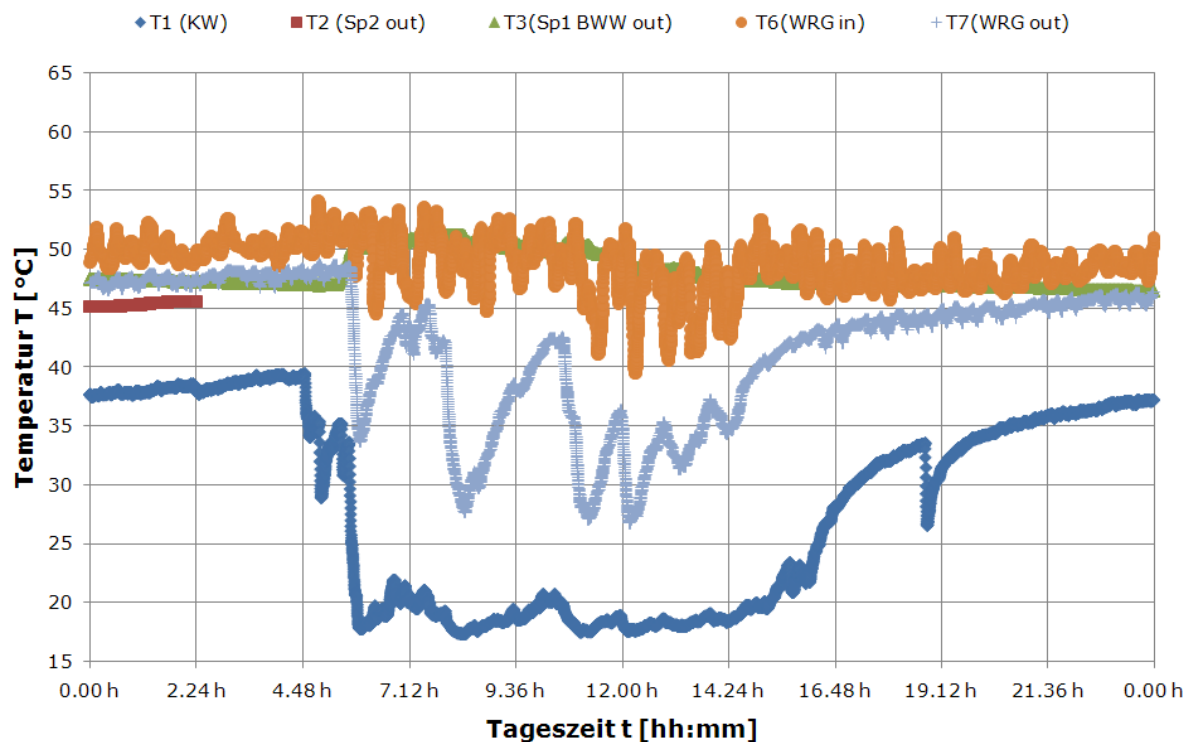


Fig. 15: Temperaturprofil an Sp1 und Sp2 Bau 4 am Dienstag dem 29. September 2009. An diesem Arbeitstag wurden 2.5m^3 Warmwasser verbraucht. Dieser Wert liegt 0.2m^3 unter dem durchschnittlichen Warmwasserverbrauch von 2.7m^3 pro Wochentag.

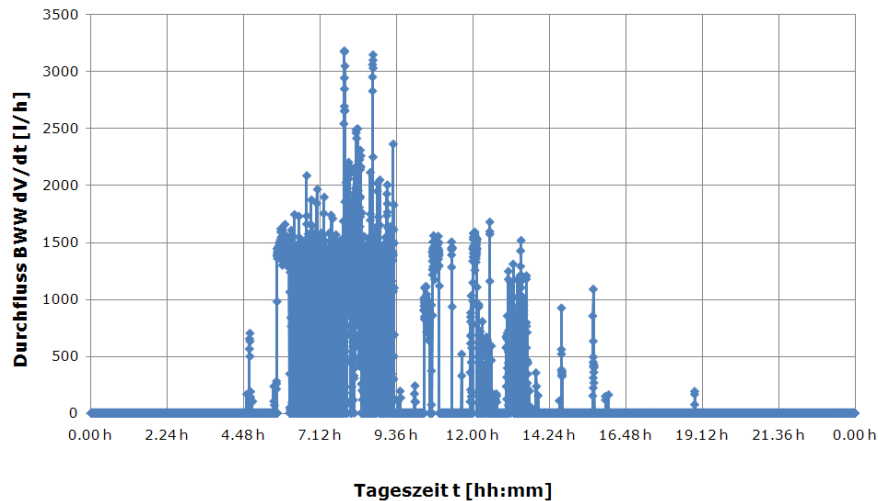


Fig. 16: Warmwasser-Verbrauchsprofil im Bau 4 am Mittwoch dem 30. September 2009.

An diesem Arbeitstag wurden 4.1m^3 Warmwasser verbraucht. Dieser Wert liegt um 1.4m^3 über dem durchschnittlichen Warmwasserverbrauch von 2.7m^3 pro Arbeitstag.

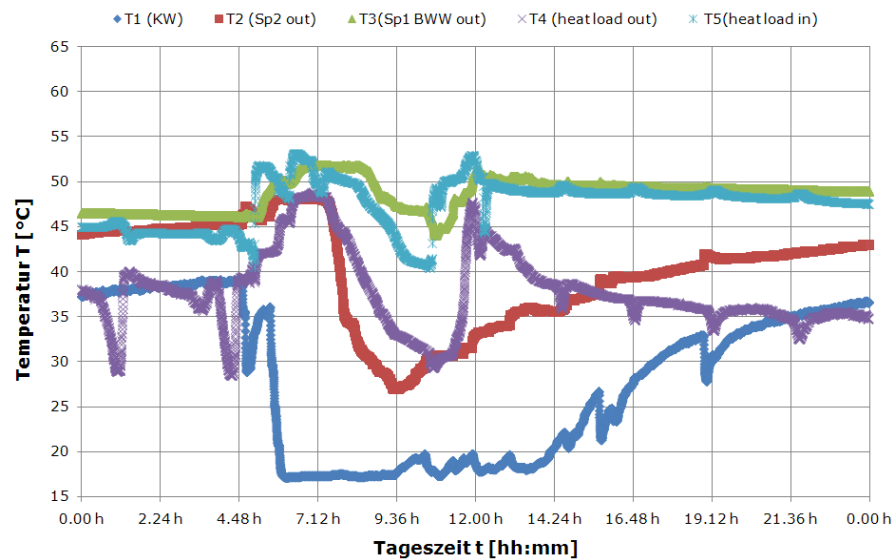


Fig. 17: Temperaturprofil an Sp1 und Sp2 Bau 4 am Mittwoch dem 30. September 2009.

An diesem Arbeitstag wurden 4.1m^3 Warmwasser verbraucht. Dieser Wert liegt um 1.4m^3 über dem durchschnittlichen Warmwasserverbrauch von 2.7m^3 pro Wochentag.

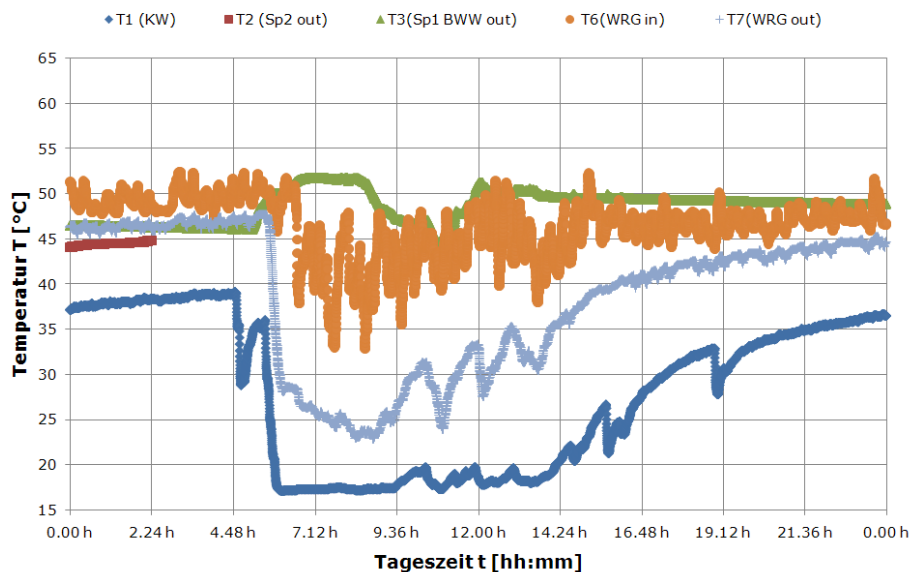


Fig. 18: Temperaturprofil an Sp1 und Sp2 Bau 4 am Mittwoch dem 30. September 2009.

An diesem Arbeitstag wurden 4.1m^3 Warmwasser verbraucht. Dieser Wert liegt um 1.4m^3 über dem durchschnittlichen Warmwasserverbrauch von 2.7m^3 pro Wochentag.

Die aus den Messungen bestimmten Wärmemengen sind aufgeschlüsselt nach Wärmequelle in Fig. 19 für eine Woche aus der Messperiode dargestellt. Auffallend ist der relativ tiefe Anteil aus dem Nahwärmenetz bzw. der hohe Anteil aus der Wärmerückgewinnung.

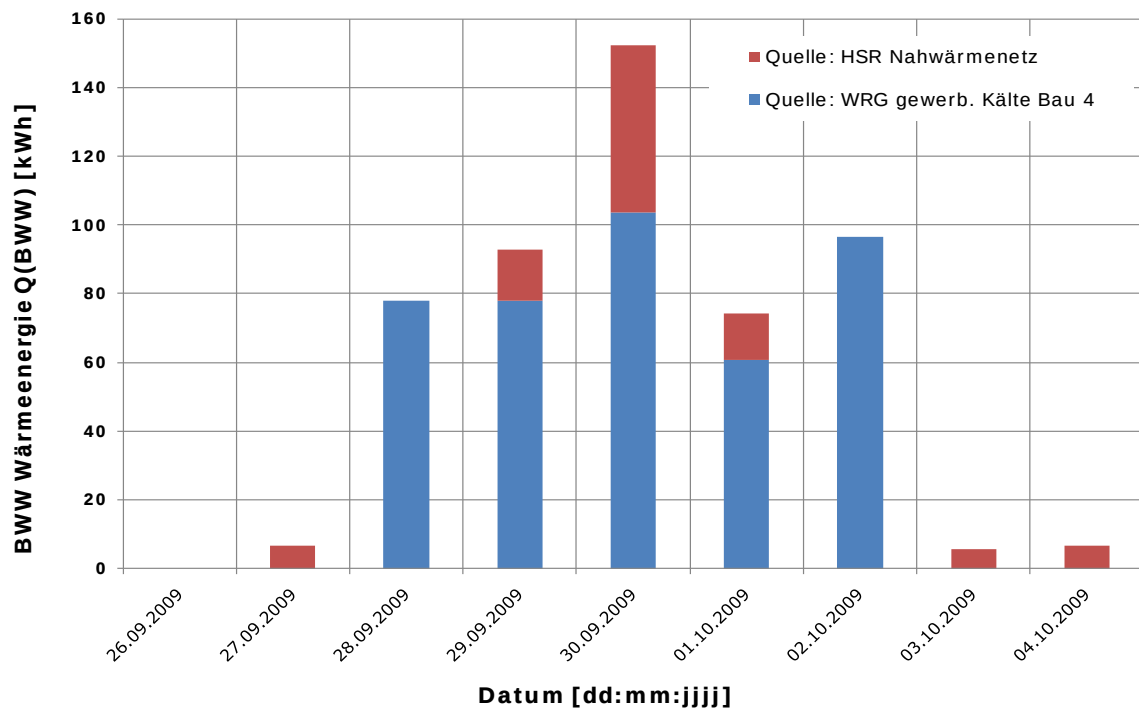


Fig. 19: Wärmeenergie nach Herkunft zur Bereitstellung des Brauchwarmwassers (BWW) im Bau 4. Ein grosser Teil der Energie zur Aufheizung des BWW liefert die WRG nur bei erhöhtem Verbrauch wird thermische Energie aus dem HSR Nahwärmenetz benötigt – jedoch nicht immer. An den Wochenenden (Sonntag 27.09. und 4.10. / Samstag 3. 10.), wenn kein Verbrauch besteht, wird der Wärmeverlust durch das Nahwärmenetz ausgeglichen.

Simulationen zur lokalen Einbindung

Das Kollektorfeld der Solaranlage auf dem Flachdach der Aula von Bau 4 kann je nach Kollektortyp eine Fläche von $A_{KOl} = 34m^2$ bis $A_{KOl} = 40m^2$ haben. Mit dieser geometrischen Begrenzung, dem lokalen Verbrauchsprofil und der geforderten Nutzttemperatur sind erste Simulationen durchgeführt worden. Dazu wurde ein Teil des Systems (Fig. 4) in ein Polysun 4 Modell übertragen und der Solarertrag sowie in einem weiteren Modell der Temperaturverlauf im Brauchwarmwasserspeicher berechnet. Die Resultate sind in [1] beschrieben worden. Fig. 20 zeigt den Solarertrag für eine Solaranlage mit einem $A_{KOl} = 34m^2$ Röhrenkollektorfeld. In einem weiteren Modell mit Fernwärmeanbindung sind die Wärmeverluste, welche beim Transport der Solarenergie bis zum Wärmeübertrager in Bau 2 (s. Fig. 3) zu erwarten sind, bestimmt worden. Mit einer Vorlauftemperatur von $T=65^\circ C$ und $T=20^\circ C$ im Speicherraum sowie im Rohrleitungskanal ist der Wärmeverlust im Bereich von 10% des Kollektorfeldertrages.

Die Beladung des BWW-Speichers 1 über das Nahwärmenetz ist in Fig. 21 dargestellt. Dazu öffnet die zentrale Steuerung um 6 Uhr das Rücklaufventil M und der Speicher wird auf über $T_{BWW}=50^\circ C$ (T_{unten}) geladen. Durch den Warmwasserverbrauch sinkt im Laufe des Tages die Wassertemperatur im Speicher unter $T_{BWW}=45^\circ C$ (T_{oben}) und dieser wird erneut mit Wärmeenergie aus dem Nahwärmenetz aufgeheizt. Die in der Zeit von 18 Uhr bis 22 Uhr sinkende Speichertemperatur wird durch die im Bau 4 vorhandene Warmwasserzirkulation verursacht.

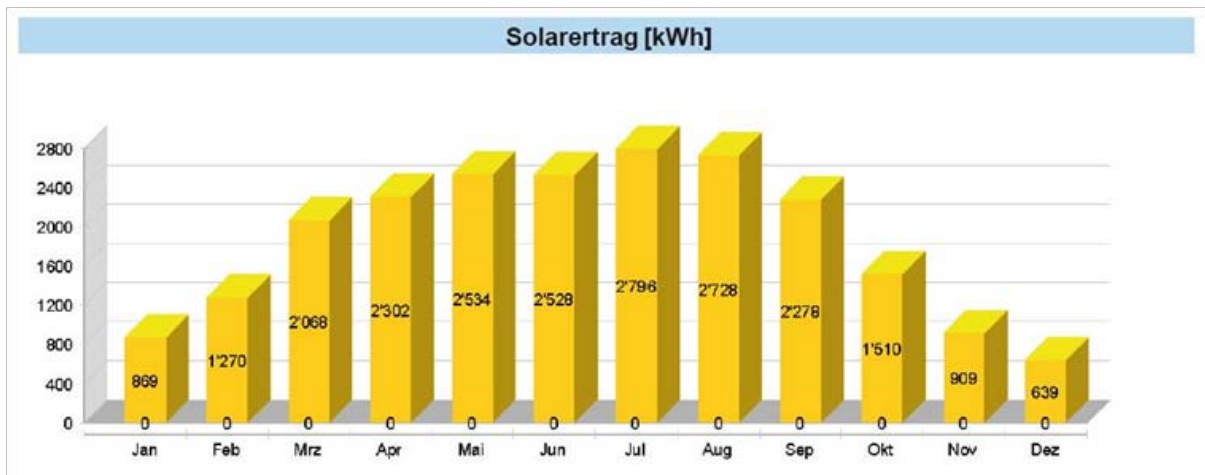


Fig. 20: Berechneter Ertrag aus einer Solaranlage mit $A_{Koi}=34m^2$ Röhrenkollektoren. Die Kollektoren haben einen Anstellwinkel von 40° gegenüber der Horizontalen und sind 20° nach Osten orientiert.

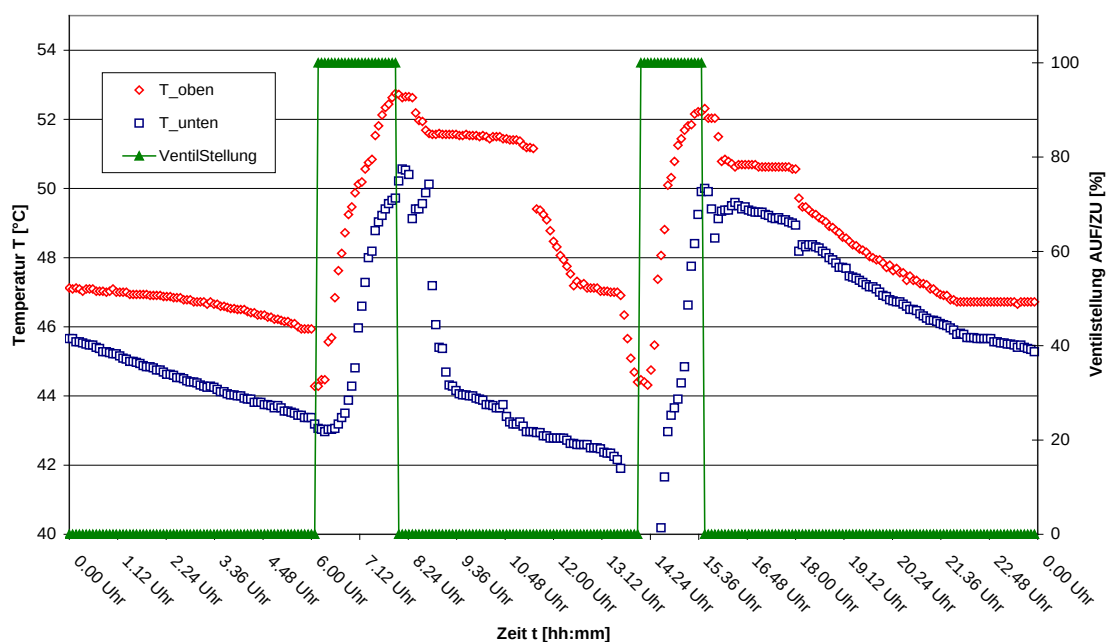


Fig. 21: Gemessener Temperaturverlauf $T_{oben}(t)$ und $T_{unten}(t)$ im Brauchwarmwasserspeicher 1 (BWW) im Bau 4 und Stellung des Ventils M zum Rücklauf, s. Fig. 4.

Bei Vorliegen weiterer Messdaten wird die aktuelle Programmierung der Regelung und Steuerung von Wärmequellen, Wärmesenken, Pumpen und Ventilen im Nahwärmenetz sichtbar. Eine Überprüfung oder gar Änderung der gewählten Einstellungen der geregelten Elemente wäre dann möglich, um so den unnötigen Wärmeenergieverbrauch zu reduzieren.

Simulationsergebnisse - Temperaturverlauf im dezentralen BWW-Speicher 1

Das Kollektorfeld der Solaranlage auf dem Flachdach der Aula von Bau 4 kann je nach Kollektortyp eine Fläche von $A_{Koi}=34m^2$ bis $A_{Koi}=40m^2$ haben. Mit dieser geometrischen Begrenzung, dem lokalen Verbrauchsprofil und der geforderten Nutztemperatur sind erste Simulationen durchgeführt worden. Dazu wurde das oben erwähnte Polysun Modell eingesetzt und

der Temperaturverlauf im Brauchwarmwasserspeicher berechnet. Die Fig.20 und Fig. 22 zeigen die Ergebnisse.

In den Monaten Mai, Juni, Juli und August kann die Solaranlage maximal ein Drittel der Wärmeleistung der Heizkessel des Nahwärmenetzes liefern, denn die von HK1 & HK2 bereitgestellt thermische Energie beträgt pro Monat rund 10000kWh, s. Fig. 6. Hingegen kann der lokale Wärmebedarf zur Warmwasseraufbereitung in Bau 4 ohne weiteres gedeckt werden.

Im Temperaturverlauf $T(t)$ des Warmwassers in der obersten Schicht im Speicher des Polysun Modells ist eine qualitative Übereinstimmung mit den Messungen am BWW-Speicher 1 zu sehen, s. Fig. 21 und Fig. 22. Je nach Jahreszeit in der Simulation ist auch die Temperaturerhöhung fast identisch.

Kollektor-Anstellwinkel 50°, 10 Kollektoren mit Azimut 20°, 10 Kollektoren mit Azimut 0°

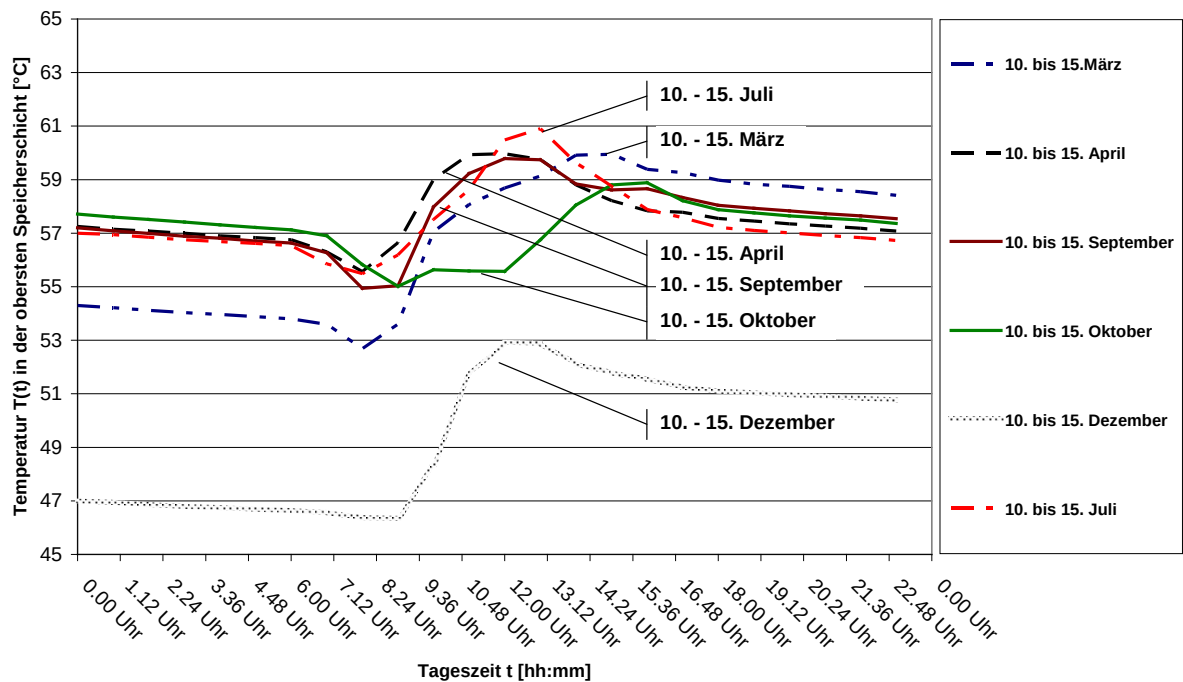


Fig. 22: Berechneter Temperaturverlauf in der obersten Schicht des Speichers 1 (BWW). Die Solaranlage wurde dazu mit zwei Kollektorfeldern unterschiedlicher Orientierung simuliert. Ein Teilfeld wurde auf Grund des Verbrauchsprofils (Fig. 15) und des Temperaturverlaufs (Fig. 20) um 20° nach Osten und das andere Teilfeld nach Süden orientiert. Beide Teilfelder haben einen Anstellwinkel von 50°.

Auswertung

Es wurden drei unterschiedliche Konzepte entwickelt, mit denen Solarwärme prinzipiell in das arealbezogene Kompaktnahwärmenetz der HSR eingebunden werden kann. Begleitend dazu wurden umfangreiche Messungen durchgeführt, mit denen die Vor- und Nachteile der jeweiligen Konzepte analysiert wurden. Dabei kam es wiederholt zu Schwierigkeiten, da einerseits durch den Ausfall von Sensoren und andererseits durch lückenhafte Datenlieferung des Drittanbieters, der für die Erfassung vieler Messpunkte im Nahwärmenetz zuständig ist, nur eingeschränkt belastbare Auswertungen möglich waren. Hinzu kam, dass es sich als zeitlich sehr aufwändig und vom Systemverständnis her sehr anspruchsvoll erwiesen hat, die Betriebsstrategien einzelner Abschnitte und des gesamten Nahwärmenetzes zu verstehen. Dies hat mehrere Gründe. Zu den als wesentlich einzuordnenden Gründen gehört zum einen das über die Jahre wiederholte Zubauen von Komponenten bzw. Gebäuden, wodurch das bei der ursprünglichen Konzeption des Netzes vorgesehene Betriebskonzept immer wieder in Teilen verändert wird und wodurch manche Vorgänge aus den Messungen nur erschwert nachvollziehbar sind. Zum Anderen war durch personelle Wechsel im Gebäudemanagement und einer nur eingeschränkt vorhandenen Dokumentation zum Steuerungs- und Regelkonzept ein umfassendes Verständnis der Betriebsweise erschwert, wie sie für die Einbindung einer vom Wetter abhängigen und mit vergleichsweise hohen Investitionskosten verbundenen Wärmelieferung von grosser Bedeutung ist. Zusätzlich konnten erst aufgrund der Messungen und der detaillierten Analyse einige Einschränkungen identifiziert werden, die eine Einbindung von Solarwärme erschweren, wie beispielsweise die Kenntnis der tatsächlichen Temperaturen nach der Wärmerückgewinnung in Bau 4, die Einbindung des zentralen BHKW als Notstromaggregat – und dessen Betrieb zur Überprüfung der Funktionstüchtigkeit – oder die (teils dynamisch angepasste) energiepreisabhängige Steuerung der Wärmebereitsteller.

Durch die Auswertung der Messdaten und zusätzlich Simulationen konnte ermittelt werden, dass die auf dem Dach der Aula des Bau 4 der HSR geplante Solaranlage den Wärmebedarf auf dem HSR Campus auch in den Sommermonaten nicht decken kann, da auf der zur Verfügung stehenden Dachfläche ein Solarkollektorfeld mit maximal $A_{K01}=40\text{m}^2$ Platz hat. Hingegen wäre die Deckung des Wärmebedarfs für BWB in Bau 4 in den Sommermonaten zwar möglich, durch die Wärmerückgewinnung aus der gewerblichen Kälte und der dadurch an einzelnen Tagen vollständigen Deckung des Wärmebedarfs zur Brauchwasser Erwärmung ist der Bedarf an Solarwärme aber nicht vorhanden.

Die dezentrale und die zentrale Speicherung der Solarwärme auf dem Campus der HSR ist vorwiegend in den Sommermonaten möglich, aber der Investitionsbedarf ist für eine neu zu installierende Fernrohrleitung mit $2 \times 100\text{m}$ (VL & RL) und den Wärmeübertrager sowie die zusätzliche Umwälzpumpe erheblich und erhöht die spezifischen Kosten pro m^2 Solaranlage (Basis 40m^2) um weitere CHF 1000.-. Somit würde ein geschätzter Preis pro m^2 Solaranlage von rund CHF 6000.- resultieren. Bei einer Amortisationszeit von 15 bis 25 Jahren und einem jährlichen Ertrag von 20000 kWh kommt somit 1 kWh thermische Solarenergie auf CHF 0.48 bis CHF 0.80 zu stehen (ohne dynamische Verzinsung). Zum Vergleich betragen die derzeitigen Kosten pro kWh Erdgas zwischen CHF 0.072 und CHF 0.075 je nach Bezugsmenge (Quelle: Erdgas Obersee AG – Rapperswil-Jona).

Zu Pilot und Demonstrationszwecken wäre die Solaranlage auf dem Campus der HSR zwar sehr gut geeignet. Dass jedoch der Bau unter den beschriebenen Randbedingungen sinnvoll ist, muss abschliessend bezweifelt werden, da insbesondere die vorab vermuteten ökonomischen Vorteile dieser Retrofit-Lösung durch die komplexe Betriebsführung der Wärmever-sorgung in keiner der analysierten Varianten ausgeschöpft werden können.

Mit den aus diesem Projekt gewonnenen Erkenntnissen ist geplant, eine Optimierung der Betriebsweise des Nahwärmenetzes vorzunehmen, worin ein beachtliches Einsparpotential liegen könnte. Zudem ist die Hoffnung der Autoren, dass die beschriebenen Schwierigkeiten für ähnliche Projekte gute Hinweise liefern, auf welche Aspekte bei der Planung einer Einbindung von Solarwärme in Wärmenetze als Retrofit-Lösung zu achten ist. In den meisten (und individuell sicher sehr unterschiedlich gestalteten und betriebenen) Netzen wird allein die Tatsache, dass bereits grosse Warmwasserspeicher und die geeigneten Flächen für ein Solarkollektorfeld vorhanden sind, noch nicht ausreichen, um mit hoher Wahrscheinlichkeit

mit geringem Planungsaufwand eine auch ökonomisch ansprechende Lösung identifizieren zu können.

Referenzen

- [1] **Integration solarthermischer Anlagen in ein arealbezogenes Nahwärmenetz - Konzept & Planung.** P. Gantenbein, E. Frank, BFE Projekt, Jahresbericht 2008.
- [2] **Solare Nahwärme.** Leitfaden für die Praxis. E. Hahne et al, Fachinformationszentrum Karlsruhe, BINE Informationsdienst, TÜV-Verlag Köln 1998.
- [3] **Solare Trinkwassererwärmung mit Grossanlagen.** F. A. Peuser , R. Croy, U. Rehrmann, H.-P. Wirth, Fachinformationszentrum Karlsruhe, BINE Informationsdienst, TÜV-Verlag Köln 1999.
- [4] **Energiewirtschaftliche Bewertung integrierter Nahwärmesysteme auf der Basis von solarer Wärme und Kraft-Wärme-Kopplung.** Entress Jörg, Dissertation, Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen, 1997.