

Solare Nahwärmeversorgung in Crailsheim mit 7500 m² Kollektorfläche

Janet Nußbicker-Lux, Harald Drück

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)

Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen (TZS)

Pfaffenwaldring 6, 70550 Stuttgart

Tel.: +49-(0)711-685-63239, Fax: +49-(0)711-685-63503

E-Mail: nussbicker@itw.uni-stuttgart.de

Internet: www.itw.uni-stuttgart.de

1. Einleitung

In Crailsheim entsteht gegenwärtig auf einem ehemaligen Kasernengelände die größte Anlage zur solaren Nahwärmeversorgung (SuN) in Deutschland. Die Anlage hatte im Jahr 2011 einen Wärmeverbrauch von insgesamt 3750 MWh und umfasst derzeit etwa 250 Wohneinheiten sowie eine Schule mit Sporthalle. Im Jahr 2011 waren an die solare Nahwärmeversorgung 7 410 m² Kollektorfläche, ein 39 000 m³ Erdsonden-Wärmespeicher, zwei Pufferspeicher (100 m³ & 480 m³) und eine elektrisch angetriebene Kompressions-Wärmepumpe mit einer elektrischen Leistung von 80 kW angeschlossen. Die solare Nahwärmeversorgung ist auf einen solaren Deckungsanteil von 50%, bezogen auf den Wärmebedarf für Raumheizung und Trinkwarmwasser, ausgelegt.

Im Folgenden wird die Anlage beschrieben, siehe auch [1], [2] und es wird insbesondere auf die Komponenten Erdsonden-Wärmespeicher (Baujahr 2008), Kollektoren auf dem Westwall (Installation 2011) und Wärmepumpe (Installation 2011) eingegangen. Die seit der Inbetriebnahme gewonnenen Betriebserfahrungen werden erläutert und es werden Messwerte zu den einzelnen Anlagenkomponenten sowie die Wärmebilanzen der vergangenen Jahre vorgestellt und diskutiert.

2. Anlagenbeschreibung

Die solare Nahwärmeversorgung (SuN) in Crailsheim ist in zwei Anlagenteile aufgeteilt, siehe Abb. 1, die miteinander verbunden sind. An den *ersten Anlagenteil* sind 2 492 m² Kollektorfläche angeschlossen, die auf der Schule, der Turnhalle und den sogenannten CBE-Gebäuden (Mehrfamilienhäuser) installiert sind. Des Weiteren besteht der erste Anlagenteil aus einem 100 m³ Pufferspeicher (PS) und einer Heizzentrale an die das Nahwärmenetz sowie die Fernwärme aus einem Heizkraftwerk, die als Nachheizung dient, angeschlossen sind. Der *zweite Anlagenteil* wird hinsichtlich der Wärmespeicherung überwiegend saisonal betrieben und besteht aus 4 918 m² Kollektorfläche auf den Lärmschutzwällen Ost und West, einem 480 m³ Pufferspeicher, einem 39 000 m³ Erdsonden-Wärmespeicher (ESWSP) sowie einer 80 kW_{el} elektrisch angetriebenen Kompressions-Wärmepumpe. Der PS 2 wird benötigt, da die maximale thermische Leistung der Kollektoren höher ist, als die maximale Beladeleistung des ESWSP. Mit dem PS 2 kann die solare Wärme über einen Zeitraum von 24 Stunden in den ESWSP eingespeichert werden. Die Wärmepumpe ist hydraulisch zwischen den beiden Pufferspeichern eingebunden, da Systemsimulationen ergeben haben, dass bei dieser Konfiguration die Effizienz der Kollektorfelder und damit der solare Nutzwärmeertrag durch die Absenkung des Temperaturniveaus im PS 2 erhöht wird.

Außerdem kann die Wärmepumpe dann sowohl verdampfer- als auch kondensatorseitig auf große hydraulische Volumina arbeiten, wodurch lange Laufzeiten in effizienten Betriebspunkten ermöglicht werden [2].

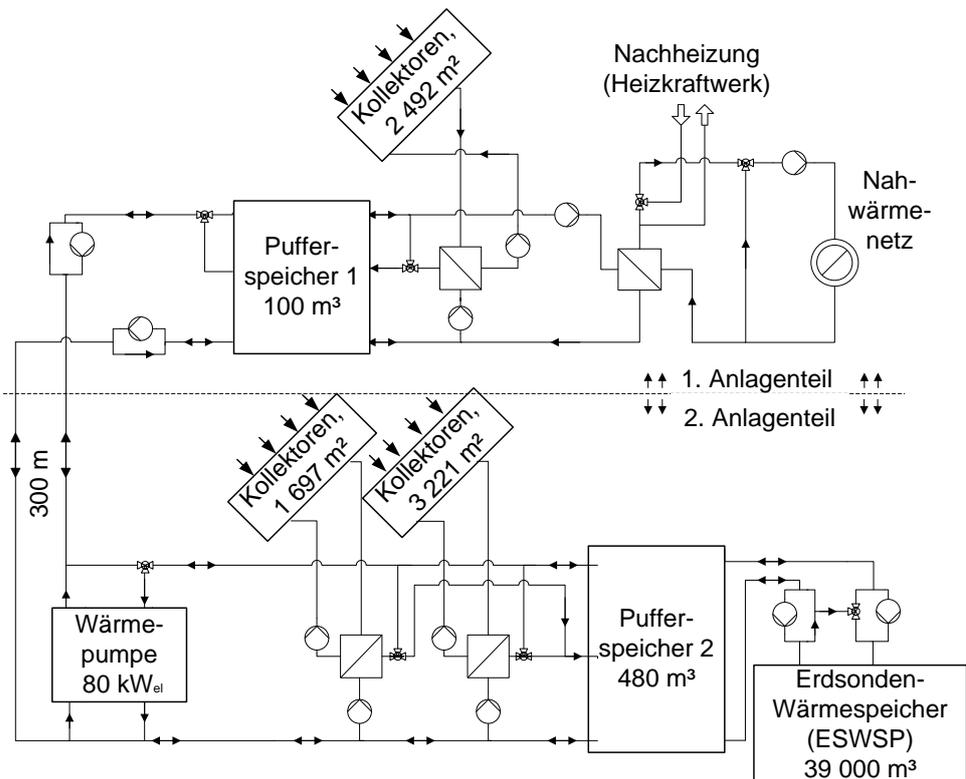


Abb. 1: Schema der solaren Nahwärmeversorgung in Crailsheim

Solaranlagen

In Crailsheim sind derzeit 7 410 m² (Aperturfläche) Kollektoren unterschiedlicher Hersteller (Wagner, Solid, Aquasol, Schüco) installiert. Im Folgenden werden einige ausgewählte Kollektorfelder vorgestellt.



Abb. 2: CBE-Gebäude mit Kollektoren

Abb. 2 zeigt die Kollektoren auf den fünf CBE-Gebäuden. Die vorderen drei CBE-Gebäude wurden umfassend energetisch saniert und die Kollektoren wurden auf einem neu aufgesetzten, stärker geneigten Dach installiert, dass auf der Südseite als Solar-Roof ausgeführt ist.

Abb. 3 zeigt einen Ausschnitt der in 13 ca. 250 m² große Felder aufgeteilten Kollektoren auf dem Lärmschutzwall Ost (3 221 m²). Die Unterkonstruktion wurde aus horizontalen Betonquerträgern und dazu senkrechten Stahlträgern errichtet. Die sich er-



Abb. 3: Kollektoren auf dem Lärmschutzwall Ost

ebende Kollektorfläche wurde optisch als nicht optimal empfunden und für den Lärmschutzwall West wurde die nachfolgend beschriebene Unterkonstruktion gewählt.

Abb. 4 zeigt die Unterkonstruktion der in drei 727 m² bzw. 485 m² große Felder aufgeteilten Kollektoren auf dem Lärmschutzwall West während des Baus. Als Unterkonstruktion wurde aus Kostengründen und um eine bessere Kontrolle der



Abb. 4: Kollektor-Unterkonstruktion Lärmschutzwall West

Bodenverdichtung zu erreichen, eine Unterkonstruktion aus Ortbeton gewählt.

Abb. 5 zeigt die fertig montierten Kollektoren auf dem Lärmschutzwall West (1 697 m²). Im Vordergrund sind die Abstandsbalken sowie der Anschlusschacht (bei der Personengruppe) zu erkennen.



Abb. 5: Kollektoren auf dem Lärmschutzwall West

Erdsonden-Wärmespeicher

Der ESWSP wird als saisonaler Wärmespeicher genutzt, indem die solare Wärme direkt im Erdreich gespeichert wird. Das Volumen des ESWSP beträgt 39 000 m³ und wird von 80 Erdwärmesonden (EWS), siehe Abb. 6, erschlossen. Die EWS bestehen aus PE-Xa (Polyethen, vernetzt) und reichen bis eine Tiefe von 55 m. Jeweils zwei EWS sind hydraulisch seriell miteinander verbunden, der Sondenabstand beträgt 3 m. Die Beladung des ESWSP erfolgt von den inneren EWS nach außen, bei der Entladung wird die Durchströmungsrichtung umgekehrt. Das Foto in Abb. 7 zeigt die Rollen mit aufgewickelten EWS aus PE-Xa, rechts neben den Rollen ist der - zur mechanischen Verstärkung und um Beschädigungen beim Einbringen zu verhindern - eingegossene Sondenfuß zu erkennen. Abb. 8 zeigt einen Blick auf den ESWSP während des Baus. In der Mitte ist der zentrale Anschlusschacht und in der rechten Bildhälfte sind aufgewickelte Sondenenden zu erkennen.

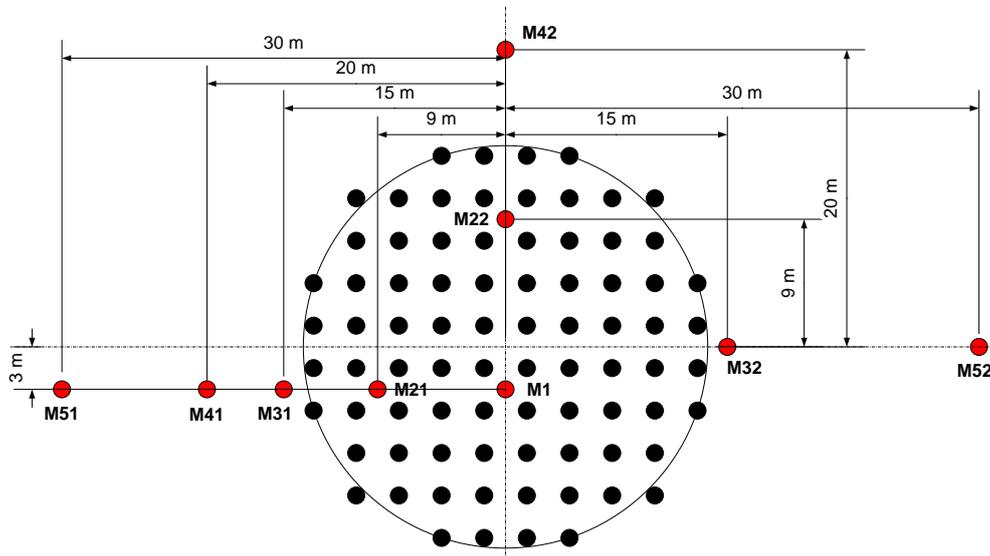


Abb. 6: Positionen der EWS (schwarz) und der Messlanzen (rot) im Erdsonden-Wärmespeicher



Abb. 7: Rollen mit PE-Xa Erdwärmesonden



Abb. 8: Blick auf die Baustelle des ESWSP

Wärmepumpe

Abb. 9 zeigt die elektrisch angetriebene Kompressions-Wärmepumpe mit einer Leistung von 80 kW_{el}. Die Wärmepumpe wird mit dem Kältemittel R227ea betrieben, um auch die relativ hohen Quellentemperaturen des ESWSP nutzen zu können. Die minimalen bzw. maximalen Verdampfer Eintrittstemperaturen betragen 25°C bzw. 52°C und die WP wurde auf Kondensatorvorlauftemperaturen von 65°C bis 75°C ausgelegt.



Abb. 9: Wärmepumpe

3. Messergebnisse

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Anlagen und Betriebsdaten der SuN angegeben. Die Planungswerte wurden [2] und die Daten für die Jahre 2006 bis 2008 [3] entnommen. Die Kollektorfläche wurde von 1 559 m² im Jahr 2008 auf 7 410 m² im Jahr 2011 vergrößert und somit wird der Planungswert von 7 325 m² bereits übertroffen. Die geplante Wärmelieferung der Kollektoren von 2 699 MWh/a konnte bisher nicht erreicht werden, da die Kollektoren auf dem Lärmschutzwall West erst im Laufe des Jahres 2011 installiert und in Betrieb genommen wurden. Aufgrund der geringeren solaren Wärmelieferung als geplant und da der Erdsonden-Wärmespeicher noch nicht entladen wurde, ist die ins Netz gelieferte solare Nutzwärme mit 1 342 MWh im Jahr 2011 geringer als die geplante solare Nutzwärmemenge von 2 095 MWh/a.

Die geplante Wärmemenge „Gesamt ins Netz Hirtenwiesen II“, siehe Tab. 1, von 4 100 MWh/a wurde im Jahr 2010 fast erreicht. Im Jahr 2011 war die ins Netz gelieferte Wärmemenge mit 3750 MWh jedoch wieder etwas niedriger, da weniger Wärme für Bauheizungen benötigt wurde und einige Optimierungsmaßnahmen, wie z. B. die Senkung der Netzvorlauftemperatur, durchgeführt wurden. Die Wärmelieferung durch Fernwärme, die als Nachheizung dient und von einem benachbarten Heizkraftwerk geliefert wird, war im Jahr 2011 ca. 40% höher als geplant. Der Anteil der Wärmelieferung durch Fernwärme wird sinken, wenn der Erdsonden-Wärmespeicher entladen wird.

Die geplante Beladewärmemenge des ESWSP beträgt 1 135 MWh/a und wurde im Jahr 2011 noch nicht erreicht, da die Kollektoren des Lärmschutzwalls West erst im Laufe des Jahres 2011 angeschlossen wurden. Eine Entladung des ESWSP hat noch nicht stattgefunden, da der ESWSP noch nicht das zur direkten Entladung notwendige Temperaturniveau erreicht hatte und die Wärmepumpe erst Anfang 2012 in Betrieb genommen wurde.

Der geplante solare Deckungsanteil, bei dem 7 325 m² Kollektorfläche, zwei Pufferspeicher mit Volumina von 100 m³ bzw. 600 m³, ein 37 500 m³ ESWSP sowie eine 258 kW_{el} Wärmepumpe für die Berechnung zugrunde gelegt wurden, beträgt 51%. Die Werte der realisierten Anlage unterscheiden sich (außer bei der Leistung der Wärmepumpe) nur geringfügig. Im Jahr 2011 wurde ein solarer Deckungsanteil von 35,8% erreicht; der geplante solare Deckungsanteil wurde wegen der im Jahr 2011 noch nicht vollständig installierten Kollektorfläche und der in diesem Jahr noch nicht im Betrieb befindlichen Wärmepumpe noch nicht erreicht.

Tabelle 1: Anlagen- und Betriebsdaten der solaren Nahwärmeversorgung in Crailsheim

		Planung	2008	2009	2010	2011
Kollektorfläche (am Jahresende)	m ²	7 325	1 559	5 714	5 714	7 410
Wärmelieferung der Kollektoren Schule, CBE, Turnhalle Lärmschutzwall Ost Lärmschutzwall West	MWh/a	2 699 gesamt	570 - -	765 970 -	765 1 020 -	1 010 1 217 110
Solare Nutzwärme ins Netz HW II	MWh/a	2 095	484	647	864	1 342
Wärmemenge „Gesamt ins Netz Hirtenwiesen II“	MWh/a	4 100	2 990	3 497	4 068	3 750
Wärmelieferung durch Fernwärme	MWh/a	1 715	2 530	2 832	3 197	2 407
Beladewärmemenge ESWSP	MWh/a	1 135	-	849	779	781
Entladewärmemenge ESWSP	MWh/a	830	-	-	-	-
Solarer Deckungsanteil	%	51	16,2	19,3	21,2	35,8

In Abb. 10 sind die solaren Wärmeerträge in Abhängigkeit von der Globalstrahlung in der Kollektorebene für die Kollektoren des 1. Anlagenteils dargestellt. Es ist an den Regressionsgeraden zu erkennen, dass die Kollektoren im Jahr 2010 höhere spezifische Wärmeerträge geliefert haben als im Jahr 2011.

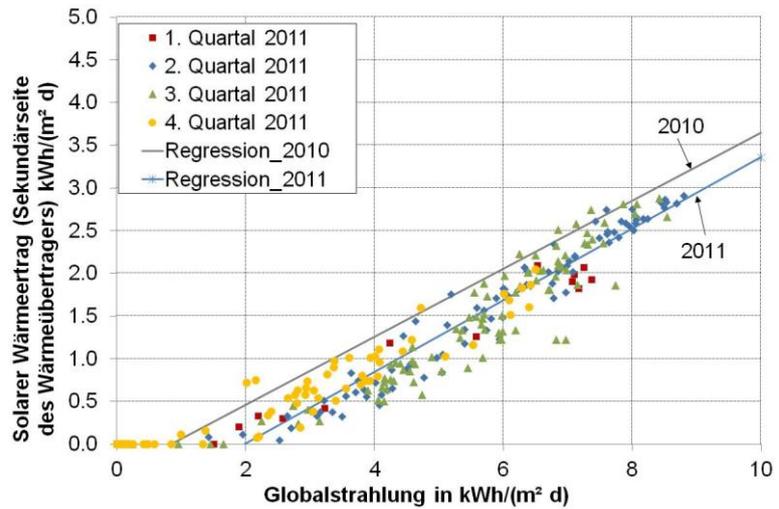


Abb. 10: Input-Output-Diagramm Kollektoren 1. Anlagenteil

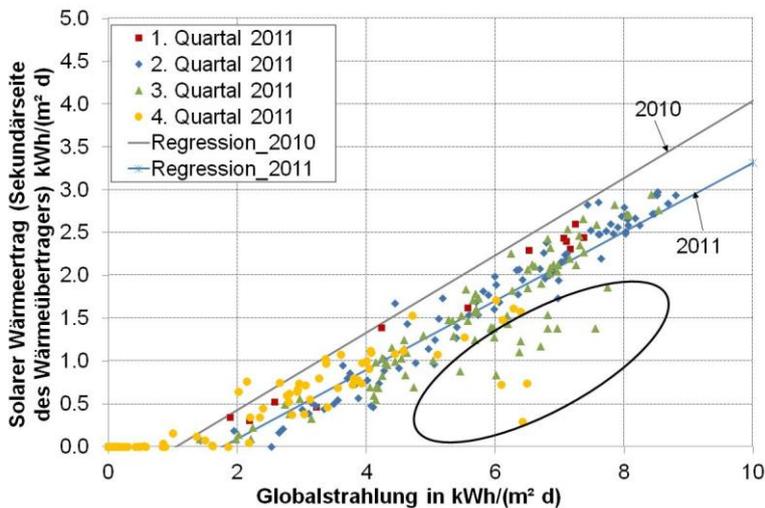


Abb. 11: Input-Output-Diagramm Kollektoren 2. Anlagenteil (Lärmschutzwall Ost)

In Abb. 11 sind die solaren Wärmeerträge in Abhängigkeit von der Globalstrahlung in der Kollektorebene für die Kollektoren auf dem Lärmschutzwall Ost dargestellt. Wie bei den Kollektoren des 1. Anlagenteils sind die solaren Wärmeerträge im Jahr 2011 geringer als 2010. Die spezifischen solaren Wärmeerträge der Kollektoren des 1. Anlagenteils und des Lärm-

schutzwalls Ost sind ungefähr gleich hoch. Die erzielten spezifischen solaren Tages-Wärmeerträge ($\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{d}$) waren im Jahr 2011 geringer als im Jahr 2010, da die Rücklauftemperaturen zu den Solaranlagen aufgrund des bereits erwärmten ESWSP und aufgrund der höheren Netzurücklauftemperaturen höher waren. Der gesamte solare Wärmeertrag (MWh/a) war im Jahr 2011 höher als in 2010, da die solare Einstrahlung höher war. Außerdem wurden im September/Oktober 2011 die Kollektoren auf den Lärmschutzwällen zeitweise nachts zum Kühlen des Pufferspeichers 2 verwendet, da der Pufferspeicher 1 aufgrund einer Undichtigkeit außer Betrieb war (eingekreiste Punkte Abb. 11).

In Abb. 12 sind die monatlichen Beladewärmemengen sowie die Temperaturen in der Speichermitte (M1), an den Speicherrändern (M21, M22) sowie außerhalb des ESWSP (M31, M32) in einer Tiefe von 30 m für die Jahre 2010 und 2011 aufgetragen. Von Dezember 2010 bis März 2011 fehlen die Daten aufgrund eines Ausfalls der Datenerfassungsanlage. Die Lage der Messlanzen (M1...) kann Abb. 6 entnommen werden. Eine aktive Entladung des ESWSP hat bisher noch nicht stattgefunden. Die monatliche Beladewärmemenge ist in den Frühjahr-/Sommermonaten am höchsten, da der ESWSP in diesem Zeitraum die niedrigsten Temperaturen aufweist und außerdem der Wärmebedarf im Nahwärmenetz gering ist.

Die Temperaturen im ESWSP (M1, M21, M22) sinken aufgrund von Wärmeverlusten zwischen Januar und April 2010 und steigen dann durch die Beladung auf Temperaturen von 51°C im Oktober 2010. Während der ESWSP nicht in Betrieb ist (Oktober 2010 bis März 2011) sinken die Temperaturen im ESWSP wieder ab, sind aber im April 2011 noch höher als im April 2010. Im November 2011 wurde mit 56°C die bisher höchste Temperatur im ESWSP gemessen.

Die Temperaturen außerhalb des ESWSP (M31, M32), ca. 1,5 m von den äußeren EWS entfernt, zeigen eine Temperaturdifferenz von etwa 1 bis 5 K. Diese Temperaturdifferenz deutet auf eine Grundwasserströmung hin; die Temperaturabnahme an den Speicherrändern ist mit etwa 1 bis 2 K pro Monat jedoch gering. Der Einfluss von Grundwasser auf das thermische Verhalten von ESWSP wurde in [6] untersucht.

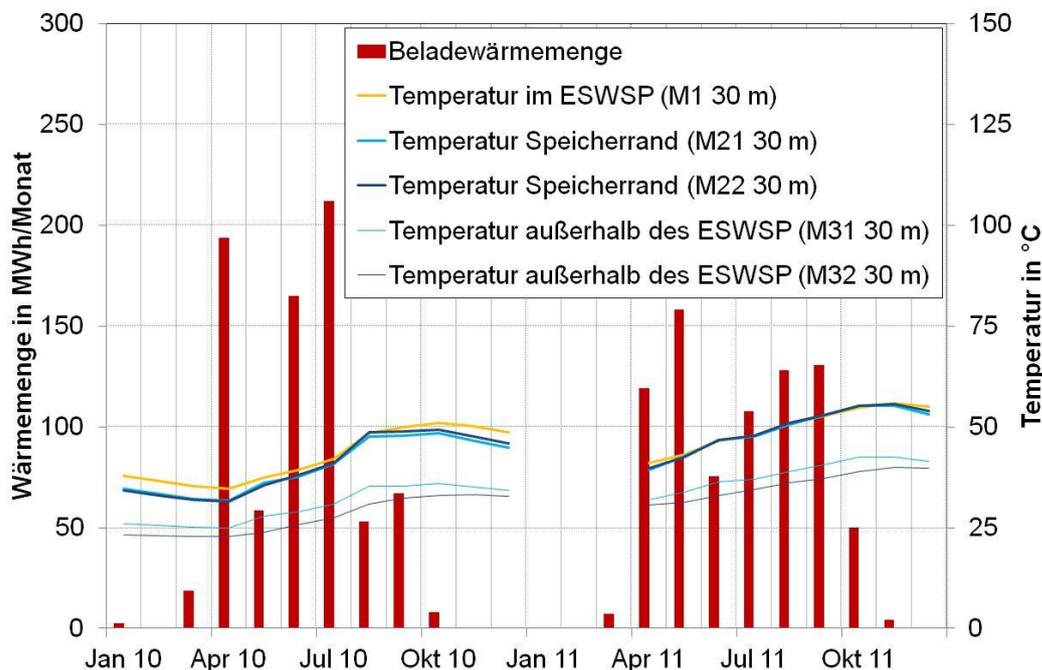


Abb. 12: Monatliche Beladewärmemengen und Temperaturen in und um den ESWSP

In Abb. 13 sind die Vor- und Rücklauftemperaturen des Nahwärmenetzes sowie die Volumenströme für die Jahre 2010 und 2011 aufgetragen. Anfang des Jahres 2011 fehlen die Daten aufgrund eines Ausfalls der Datenerfassung. Die Netzvorlauftemperatur war im Jahr 2010, vor allem in der Heizperiode, deutlich höher als im Jahr 2011. Bei einer Begehung der Anlage wurde festgestellt, dass sich der Temperatursensor zur Regelung der Vorlauftemperatur an einer ungünstigen Stelle nahe eines T-Stücks befand. Der Temperatursensor wurde durch einen günstiger positionierten ersetzt und die Netzvorlauftemperatur konnte um 4 K gesenkt werden.

Der Volumenstrom im Nahwärmenetz ist im Jahr 2011 gegenüber dem Jahr 2010 gestiegen, da weitere Gebäude gebaut und an das Nahwärmenetz angeschlossen wurden. Um die neu errichteten Gebäude mit Wärme zu versorgen, mussten weitere Rohrleitungsstränge in Betrieb genommen werden. Damit die Versorgungssicherheit gewährleistet bleibt (ausreichend hohes Temperaturniveau auch im letzten Gebäude) werden die neuen Rohrleitungsstränge mit Überstömventilen betrieben, sodass in den Rohrleitungen auch dann eine Zirkulation stattfindet, wenn keine Wärmeabnahme durch die Gebäude erfolgt. Zusammen mit noch nicht korrekt einregulierten Wärmeübergabestationen, teilweise ist in den Gebäuden lediglich die Bauheizung in Betrieb, führt dies zu erheblich höheren Netzzücklauftemperaturen als geplant. Die geplanten Netzzücklauftemperaturen von 35°C werden mit gemessenen Netzzücklauftemperaturen von ca. 40°C bis 50°C um ca. 5 K bis 15 K überschritten.

Eine weitere Ursache für die hohen Netzzücklauftemperaturen wird im Folgenden erläutert. In Abb. 14 sind die Temperaturen und Volumenströme am Wärmeübertrager zwischen Pufferspeicher 1 und Nahwärmenetz beispielhaft für den 05.08.2011 aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass der Volumenstrom auf der Pufferspeicherseite (Primärseite) ab ca. 12° deutlich höher ist als der Volumenstrom auf der Seite des Nahwärmenetzes (Sekundärseite). Dies führt zu Rücklauftemperaturen auf der Pufferspeicherseite von ca. 50°C bis 66°C gegenüber 42°C bis max. 54°C, die bei etwa gleich hohen Volumenströmen auf der Pufferspeicher- und Nahwärmenetzseite erreicht werden. Der Volumenstrom auf der Pufferspeicherseite wird in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen der Nahwärmenetz- Vorlauftemperatur und der Soll-Netzvorlauftemperatur geregelt. Ist die Temperaturdifferenz kleiner 5 K soll der Volumenstrom auf der Pufferspeicherseite 0,9-mal so hoch sein wie auf der Nahwärmenetzseite. Diese Regelung funktioniert jedoch nicht zuverlässig.

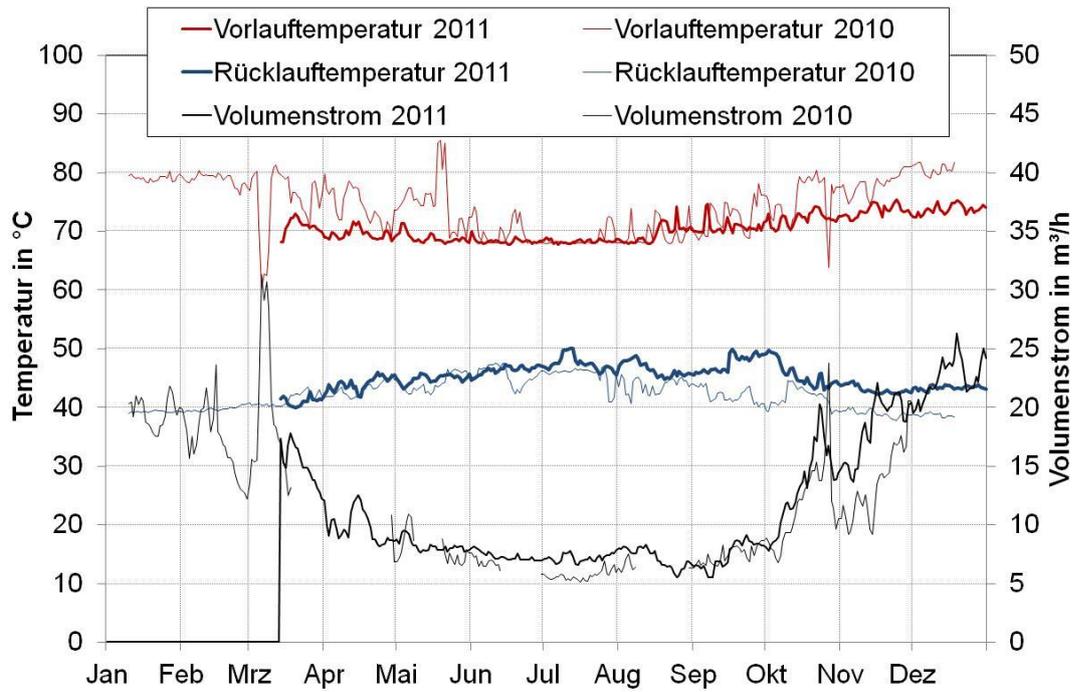


Abb. 13: Netzvor-/rücklauftemperaturen und Volumenströme der Jahre 2010 und 2011

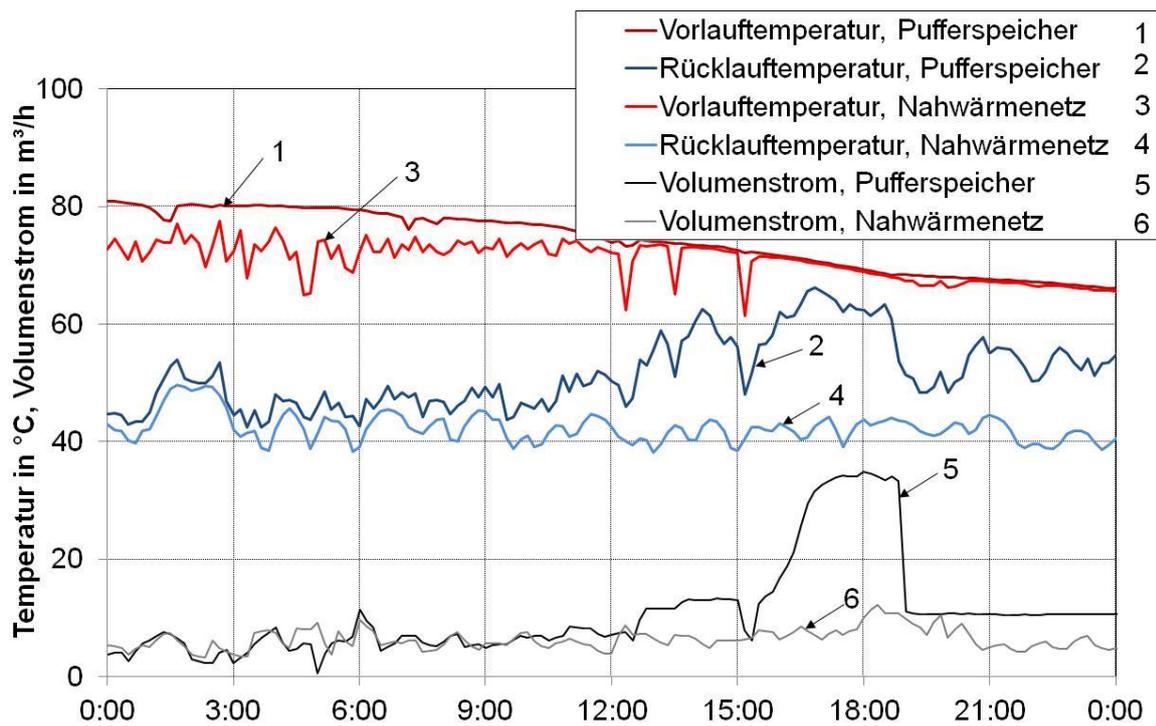


Abb. 14: Temperaturen und Volumenströme am Wärmeübertrager zwischen Pufferspeicher 1 und Nahwärmenetz am 05.08.2011

4. Betriebserfahrungen und Ausblick

Nachfolgend werden einige ausgewählte Betriebserfahrungen beschrieben. Die Wärmelieferung der Kollektoren liegt im erwarteten Bereich, es sind jedoch an verschiedenen Kollektorfeldern Schäden, z. B. durch defekte Glashalter und Längenkompensatoren, aufgetreten. Der Betrieb des ESWSP war bisher störungsfrei. Der Zeitraum bis zur Erteilung der Genehmigung zur Errichtung und zum Betrieb des ESWSP war jedoch verhältnismäßig lang.

Die beiden Pufferspeicher (PS) wurden mit Schichtbeladeeinrichtungen ausgestattet, die gut funktionieren, siehe [3]. An beiden PS wurden während des bisherigen Betriebs Leckagen festgestellt. Am PS 1 ist im Jahr 2011 eine Leckage durch die Deformation der Edelstahlauskleidung aufgetreten, die bei einer Betriebssituation mit Unterdruck aufgetreten ist. D. h. zu diesem Zeitpunkt haben sowohl der Vakuumbrecher als auch die Druckhaltung, die als Sicherheitseinrichtungen zur Vermeidung derartiger Zustände vorgesehen sind, nicht funktioniert. Der Vakuumbrecher wies einen technischen Defekt auf und die Druckhaltung war manuell ausgeschaltet. Die Suche nach der Leckage sowie deren Ursache und die Reparatur des PS durch ein erneutes Verschweißen der Edelstahlauskleidung des PS hat mehrere Monate gedauert. Während dieser Zeit konnte die Wärmepumpe nicht in Betrieb genommen werden und der Betrieb mehrerer Komponenten (Kollektoren) erfolgte per manueller Steuerung.

Beim Transfer von Wärme zwischen den beiden Anlagenteilen wurde stets ein Volumenstrom in beide Richtungen gemessen. Eine Überprüfung der motorgesteuerten Klappen hat ergeben, dass die Stellmotoren nicht bis in ihre Endlage gefahren sind, d. h. dass die Klappen nicht vollständig geschlossen wurden.

Als eine wichtige Erkenntnis kann festgestellt werden, dass auch die Standardkomponenten einer regelmäßigen Überprüfung bedürfen, insbesondere Pumpen, Wärmeübertrager, Klappen, Ventile, Schmutzfänger und Sicherheitseinrichtungen!

Durch die wissenschaftlich-technische Begleitung der SuN-Anlage in Crailsheim konnte bereits eine Vielzahl wichtiger Erkenntnisse gewonnen werden, z. B. hinsichtlich des thermischen Verhaltens des ESWSP und dessen Wärmedämmung. Außerdem konnte der Anlagenbetrieb bereits teilweise optimiert und weiteres Optimierungspotenzial identifiziert werden. Zukünftig sollen insbesondere der Betrieb und die Regelung der neu installierten Komponenten Wärmepumpe und Kollektoren

auf dem Lärmschutzwall sowie deren Einfluss auf das Gesamtsystem detailliert untersucht werden. Nachdem die Wärmepumpe in Betrieb genommen wurde, soll der Erdsonden-Wärmespeicher entladen werden. Hierbei ist dessen thermisches Verhalten, v. a. auch im Hinblick auf die Interaktion mit dem umgebenden Erdreich von besonderem wissenschaftlichen Interesse. Ebenso wichtig ist es festzustellen, nach wie vielen Betriebsjahren ein quasi-stationärer Zustand erreicht ist und welche solaren Nutzwärmeerträge und welcher Speichernutzungsgrad sich dann einstellen.

5. Literatur

- [1] Bauer, D., Heidemann, W., Marx, R., Nußbicker-Lux, J., Ochs, F., Raab, S., Panthalookaran, V. (2008). Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher (Juni 2005 bis Juli 2008), Forschungsbericht zum BMU-Vorhaben 0329607J, Stuttgart.
- [2] Bodmann, M., Mangold, D., Nußbicker, J., Raab, S., Schenke, A., Schmidt, T. (2005). Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher (Februar 2003 bis Mai 2005), Forschungsbericht zum BMWA / BMU-Vorhaben 0329607F, Stuttgart.
- [3] Marx, R.; Nußbicker-Lux, J.; Bauer, D.; Heidemann, W.; Müller-Steinhagen, H. (2009). Erste Messergebnisse der solar unterstützten Nahwärmeversorgung in Crailsheim, OTTI, 19. Symposium "Thermische Solarenergie", Kloster Banz, Bad Staffelstein.
- [4] Ebel, M.; Schopf, M. (2008). Umsetzungserfahrungen Solare Nahwärme Hirtenwiesen 2 in Crailsheim, 18. OTTI Symposium thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2008
- [5] Nußbicker-Lux, J. (2009). Nahwärme mit saisonalem Wärmespeicher in Crailsheim, 2. Fachtagung Regenerative Nahwärme, DENEX Wiesbaden.
- [6] Bauer, D.; Heidemann, W.; Müller-Steinhagen, H.; Dirsch, H.-J.G.; Rühhaak, W.; Schätzl, P.; Koller, B.; Sass, I.; Mielke, P. (2010). Untersuchung des Einflusses von Grundwasserströmung auf Erdsonden-Wärmespeicher, Abschlussbericht zum BMU-Vorhaben FKZ 0329289A, Stuttgart.

6. Danksagung

Die wissenschaftlich-technische Begleitung des diesem Bericht zugrunde liegenden Vorhabens wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.