

Integration einer Wärmepumpe in die solar unterstützte Nahwärmeversorgung in Neckarsulm

Janet Nußbicker-Lux, Roman Marx, Dan Bauer, Harald Drück
Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)
Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen (TZS)
Pfaffenwaldring 6, 70550 Stuttgart
Tel.: 0049-(0)711-685 63239, Fax: 0049-(0)711-685 63503
E-Mail: nussbicker@itw.uni-stuttgart.de
Internet: www.itw.uni-stuttgart.de

1. Einleitung

Durch die Integration einer Wärmepumpe (WP) in solar unterstützte Nahwärmesysteme (SUN) mit saisonaler Wärmespeicherung soll die energetische Effizienz der Gesamtanlage gesteigert werden. Es ergeben sich mehrere synergetische Effekte: Im Vergleich zu herkömmlichen erdgekoppelten Wärmepumpen steht der WP in einem solar unterstützten Nahwärmesystem ein höheres Temperaturniveau als Wärmequelle zur Verfügung. Sie erreicht dadurch Jahresarbeitszahlen >4 . Gleichzeitig kann der Langzeit-Wärmespeicher (LZWSP) durch die Kombination mit einer WP auf ein niedrigeres Temperaturniveau abgekühlt werden. Dadurch wird die effektiv nutzbare Speicherkapazität des LZWSP erhöht und (neu zu bauende) Wärmespeicher können kleiner und somit kostengünstiger gebaut werden. Durch die Integration einer WP wird das mittlere Temperaturniveau des LZWSP verringert. Damit verringern sich dessen Wärmeverluste und durch die niedrigeren Systemtemperaturen steigt der Kollektorwirkungsgrad. In diesem Beitrag werden die Integration einer Wärmepumpe in das Nahwärmesystem in Neckarsulm sowie Messdaten des Anlagenbetriebs vorgestellt.

2. Anlagenbeschreibung

In Neckarsulm entsteht seit 1996 ein Stadtteil, dessen Gesamtwärmebedarf (Trinkwarmwasser und Raumheizung) zu 50% solar gedeckt werden soll. Die Wärmeversorgung der Gebäude erfolgt mit Solarwärme, durch einen Gaskessel und mit einer Wärmepumpe, siehe Abb. 1. Die Solarwärme (5670 m² Kollektorfläche) kann ent-

weder direkt ins Nahwärmenetz eingespeist werden oder aus dem Erdsonden-Wärmespeicher (ESWSP, Volumen 63360 m³) ausgespeichert werden. Im Sommer wird die überschüssige Solarwärme in den ESWSP zur saisonalen Wärmespeicherung eingespeichert. Im Jahr 2008 wurde eine Kompressions-Wärmepumpe mit einer thermischen Leistung von 512 kW installiert, um den ESWSP auf tiefere Temperaturen entladen zu können. Ohne Wärmepumpe ist eine Entladung nur bis zur Netzurücklauftemperatur (~45°C) möglich. Die WP ist zwischen den beiden Pufferspeichern (PS1 & PS2), dem ESWSP und dem Nahwärmenetz (Netzvorlauf: NVL, Netzurücklauf: NRL), das als 3-Leiter-Netz ausgeführt ist, in das System integriert. Bei den Umbaumaßnahmen wurden der Solarvorlauf (SVL) und der NRL zu einer Leitung zusammengefasst, statt wie bis dahin Solarrücklauf (SRL) und NRL. Die Wärmepumpe kann die vom Kondensator (K) gelieferte Wärme entweder ins Netz oder in den Pufferspeicher PS1 oben bzw. unten einspeisen. Die Regelung der Wärmepumpe erfolgt in Abhängigkeit von der Außentemperatur ϑ_{amb} : Bei $\vartheta_{amb} < 10^\circ\text{C}$ bzw. $> 10^\circ\text{C}$ beträgt die Kondensator-Vorlauftemperatur 58°C bzw. 68°C. In [1] ist eine detaillierte Beschreibung der Anlage vor der Integration der Wärmepumpe gegeben.

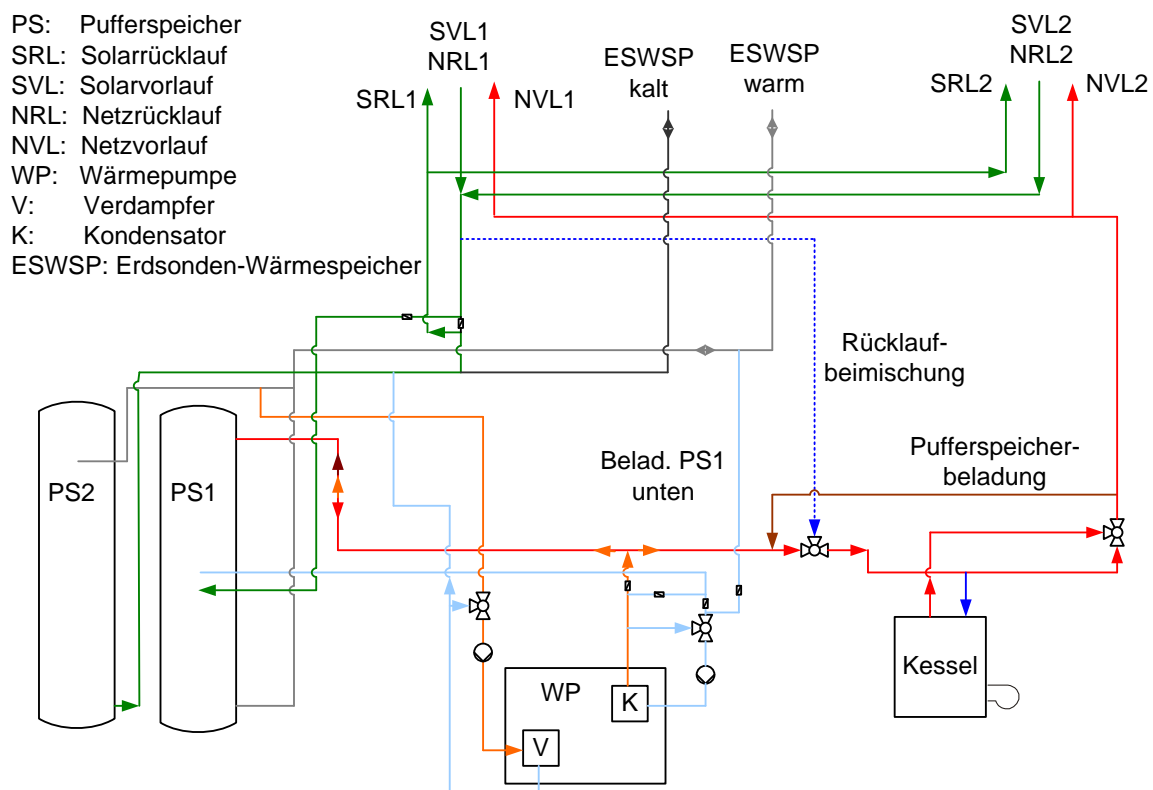


Abb. 1: Anlagenschema des solar unterstützten Nahwärmesystems in Neckarsulm

3. Messergebnisse

Die wesentlichen Messergebnisse des solar unterstützten Nahwärmesystems sind in Tabelle 1 angegeben. Die Wärmelieferung der Kollektoren war mit 1977 MWh im Jahr 2010 aufgrund von Optimierungsmaßnahmen und niedrigeren Rücklauftemperaturen deutlich höher als in den Vorjahren, obwohl die solare Einstrahlung geringer war. Die Wärmelieferung des Gaskessels war im Jahr 2010 mit 1163 MWh geringer als in den Vorjahren. Der defekte Gaskessel wurde durch einen neuen, leistungsgleichen 2 MW Gaskessel ersetzt und während der Baumaßnahmen haben die Solaranlagen und die Wärmepumpe über einen längeren Zeitraum allein die Wärme für das Netz geliefert. Anhand des Speichernutzungsgrades von 106% ist zu erkennen, dass im Jahr 2010 mehr Wärme aus dem ESWSP entnommen als eingespeichert wurde.

Tabelle 1: Messergebnisse des solar unterstützten Nahwärmesystems in Neckarsulm

Absolutwerte		2007	2008	2009	2010
Einstrahlung in Kollektorebene	kWh/m ²	1254	1243	1277	1185
Kollektorfläche (31.12.)	m ²	5523	5670	5670	5670
Wärmelieferung der Kollektoren	MWh	1854	1689	1431	1977
je m ² Kollektorfläche	kWh/m ²	336	298	252	349
Regenerative Nutzwärme ²	MWh	1204	1330	1215	1833
je m ² Kollektorfläche	kWh/m ²	218	235	214	323
Wärmelieferung durch Gaskessel	MWh	1485	1565	1438 ¹	1163
Elektrische Energie der WP	MWh	-	-	325	647
Gesamtwärmeverbrauch	MWh	2689	2921	2955	3643
Relativwerte					
Regenerative Nutzwärme ²	-	45%	46%	41%	50%
Wärmelieferung durch Gaskessel	-	55%	54%	48%	32%
Elektrische Energie der WP	-	-	-	11%	18%
Angaben zur Effizienz					
Speichernutzungsgrad	-	48%	55%	90%	106%
Jahresarbeitszahl Wärmepumpe	-	-	-	3,3	4,2
Regenerativer Deckungsanteil ²	-	45%	46%	41%	50%
Primärenergieeinsparung ³	-	45%	46%	25%	26%

¹ temporärer Ausfall des Gaskessels und Wärmeversorgung durch benachbartes Nahwärmesystem

² ausschließlich solar, da Temperatur des ESWSP immer über der Umgebungstemperatur lag

³ gegenüber vollständiger Wärmebereitstellung mit Gaskessel; Primärenergiefaktoren Gas: 1,1; Strom: 3,0 (2007) .. 2,7 (2008) .. 2,6 (2009 & 2010), nach EnEV 2007 [4], EnEV 2009 [5], in Neckarsulm wird der Strom von einem BHKW (in einer benachbarten Heizzentrale) erzeugt, sodass sich günstigere Primärenergiefaktoren -als hier angegeben- ergeben

Durch die relativ hohen Wärmequellentemperaturen für die Wärmepumpe konnte eine Jahresarbeitszahl (JAZ) von 4,2 im Jahr 2010 erreicht werden. Die gegenüber dem Vorjahr deutlich gestiegene JAZ der Wärmepumpe ist auf verschiedene Maßnahmen zurückzuführen: zum einen war die Regelung sowohl der Wärmepumpe als auch weiterer Komponenten, insbesondere der Solaranlagen, noch nicht entsprechend der Vorgaben des Planers umgesetzt [2]. Zum anderen wurden die Volumenströme der Wärmepumpe auf der Verdampfer- und der Kondensatorseite erhöht, um eine zu hohe Kondensatoraustrittstemperatur im Sommer zu vermeiden und eine höhere Temperatur am Verdampferaustritt zu erhalten [3]. Eine zu hohe Kondensatoraustrittstemperatur hat zur Folge, dass die Wärmepumpe aufgrund der hohen Temperaturen und Drücke in Hochdruckstörung geht. Außerdem hat die Entladeregulation des ESWSP nicht funktioniert und es traten auch im Betriebsstillstand geringe Volumenströme im Speicherkreis (ESWSP) auf, wodurch die Wärmepumpe etwas geringere Temperaturen auf der Verdampferseite erhalten hat. Die Effizienz der Anlage kann noch weiter gesteigert werden, da verschiedene Optimierungsmaßnahmen noch nicht umgesetzt wurden. Die Volumenströme wurden noch nicht in allen Solarübergabestationen eingeregelt und es treten im Betriebsstillstand immer noch geringe Volumenströme im Speicherkreislauf (ESWSP) auf. Außerdem war durch den Ausfall der M-BUS-Verbindung die sekundärseitige Pumpe einer Solar-Übergabestation vermutlich von Frühjahr bis Herbst 2010 permanent in Betrieb, obwohl das Einschaltkriterium (Frostschutz) nicht mehr gegeben war. Dies führte zu einem unnötigen Anstieg des Wärmeverbrauchs, der überwiegend durch die Wärmepumpe gedeckt wurde und einen erhöhten Stromverbrauch zur Folge hatte.

In Abb. 2 bzw. 3 sind Temperaturen, Volumenströme, Leistungen und COP-Werte zur Charakterisierung des Anlagenbetriebs beispielhaft für den 13.02.2011 bzw. den 27.06.2011 dargestellt. In Abhängigkeit von der Außentemperatur stellt die Wärmepumpe die Wärme am Kondensator bei 58°C bzw. 68°C zu Verfügung. In Abb. 2 ist an den Kondensatortemperaturen zu erkennen, dass die außentemperaturabhängige Umschaltung etwa um 15⁰⁰ Uhr und 17⁰⁰ Uhr erfolgt. Die Umschaltung ist vorgeesehen, da bei geringem Wärmebedarf im Netz die Wärmepumpe ohne Kessel be-

trieben werden soll, siehe auch Abb. 3. Bei hohem Wärmebedarf dient die Wärmepumpe zur ersten Anhebung des Temperaturniveaus und anschließend erfolgt durch den Kessel die Temperaturerhöhung bis auf die Netzvorlauftemperatur. Wie anhand der Volumenströme aus Abb. 2 ebenfalls hervorgeht, kann die Wärmepumpe mit und ohne Entladung des ESWSP betrieben werden. Als Wärmequelle kann somit auch die Solarwärme genutzt werden, wie es am 13.02. zwischen 11⁰⁰ Uhr und 18⁰⁰ Uhr der Fall ist. Zwischen 11⁰⁰ Uhr und 14⁰⁰ Uhr dienen sowohl der ESWSP als auch die Solaranlagen als Wärmequellen, während zwischen 14⁰⁰ Uhr und 18⁰⁰ Uhr überwiegend die Solarwärme als Wärmequelle dient. Diese kann auch genutzt werden, wenn die Solaranlagen zwar nicht in Betrieb sind, aber die Solarwärme in den Pufferspeichern zwischengespeichert wurde (z. B. zwischen 17⁰⁰ Uhr und 18⁰⁰ Uhr). Es ist zudem möglich, die Restwärme des NRL als Wärmequelle zu nutzen (z. B. zwischen 5⁰⁰ Uhr und 6⁰⁰ Uhr). Am 27.06., siehe Abb. 3, war die Wärmepumpe nur zeitweise in Betrieb, da die im Netz benötigte Wärme hauptsächlich durch die Solaranlagen bereitgestellt wurde.

Am 13.02., Abb. 2, ist an der zyklisch schwankenden Netzvorlauftemperatur zu erkennen, dass der Kessel taktet, während am 27.06., Abb. 3, der Kessel nicht in Betrieb war und die Wärme ausschließlich solar und durch die Wärmepumpe bereitgestellt wurde. Wie oben erwähnt, ist in Neckarsulm ein 3-Leiter-Nahwärme- und Solarnetz realisiert, bei dem der Solarvorlauf und der Netzurücklauf zu einer Leitung zusammengefasst sind. Die Solarvorlauf-/Netzurücklauftemperatur betrug am 13.02. etwa 40°C, Abb. 2, während sie am 27.06. etwa 50-55°C während der Nachtstunden und bis zu 77°C während des Solaranlagenbetriebs betrug, Abb. 3. Ein Teil der solaren Wärme wird direkt im Nahwärmenetz verwendet, während die überschüssige Wärme in den Erdsonden-Wärmespeicher eingespeichert wird. Die Vorlauftemperatur (VL) zur Beladung des ESWSP ist hauptsächlich durch die Solarvorlauftemperatur geprägt, wobei der ESWSP auch noch während der Nachtstunden aus dem PS heraus mit solarer Wärme beladen wird, Abb. 3. Am 13.02. wurde der ESWSP entladen, wobei die Vorlauftemperaturen etwa 28°C und die Rücklauftemperaturen ~20°C betragen, Abb. 2. Es wurden relativ niedrige Vorlauftemperaturen erreicht, da der ESWSP während der Entladesaison bereits weitgehend entladen wurde.

Im unteren Teil von Abb. 2 und 3 sind die Leistungen und der resultierende COP dargestellt. Der COP liegt in der Größenordnung um 4. Deutlich ist in Abb. 2 zu erkennen, dass die durch den Solarertrag erhöhten Wärmequellentemperaturen die thermische Leistung der Wärmepumpe erhöhen. Dagegen hat das Umschalten auf die höhere Kondensatortemperatur zwischen 15⁰⁰ Uhr und 17⁰⁰ Uhr einen erhöhten Aufwand an elektrischer Energie sowie eine geringfügige Verringerung des COP zur Folge. Die Schwankungen der Temperaturniveaus und die daraus resultierenden Leistungen sind auch beim COP zu erkennen. Auffällig sind die durch die Wärmepumpenregelung bedingten Spitzen des COP beim An- und Abschalten der Wärmepumpe. Beim Abschalten werden zuerst die Kompressoren und anschließend die Umwälzpumpen ausgeschaltet bzw. beim Anschalten umgekehrt. Dadurch kann mit einem sehr geringen Aufwand (nur elektrische Leistung der Umwälzpumpe) die restliche Wärmekapazität des Kondensators genutzt werden.

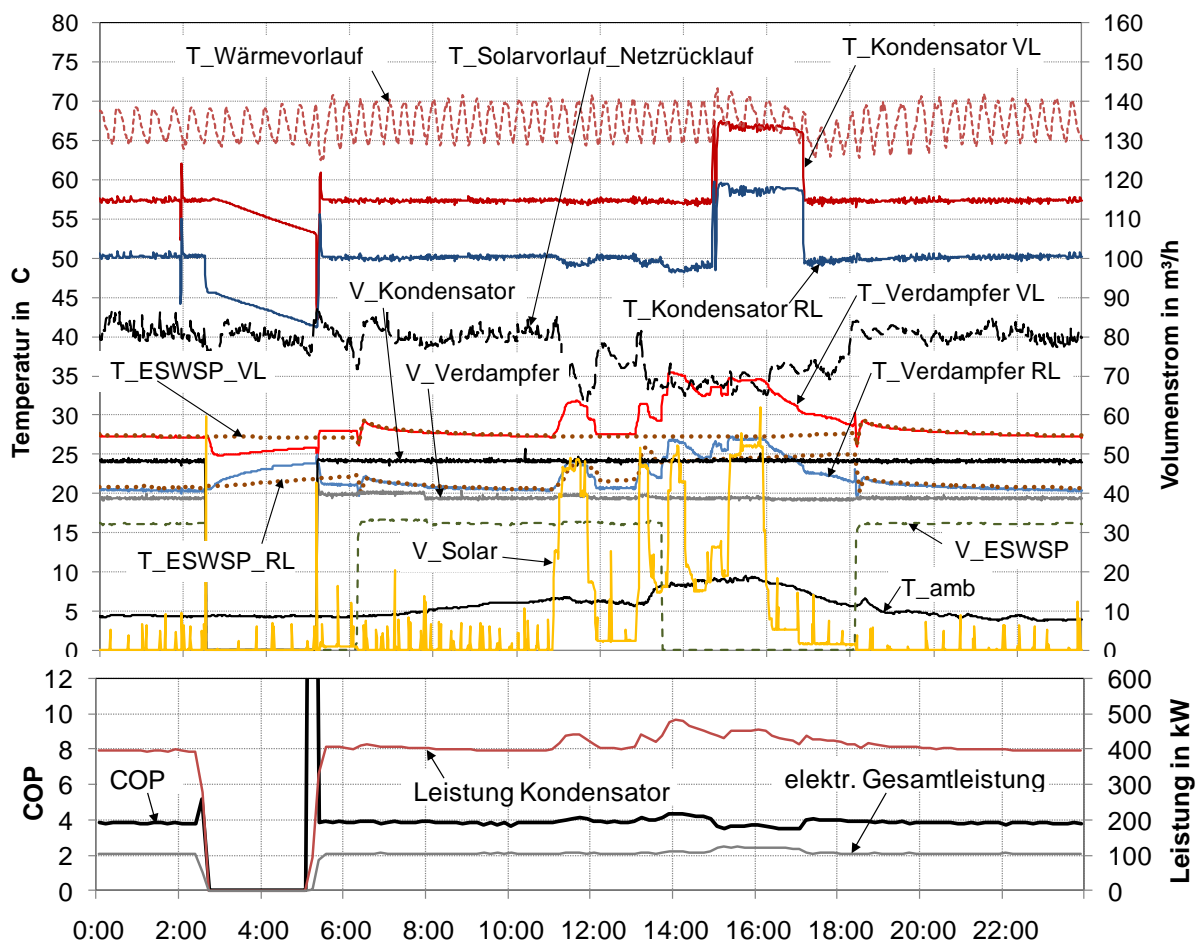


Abb. 2: Temperaturen, Volumenströme, COP und Leistungen in Neckarsulm am 13.02.2011

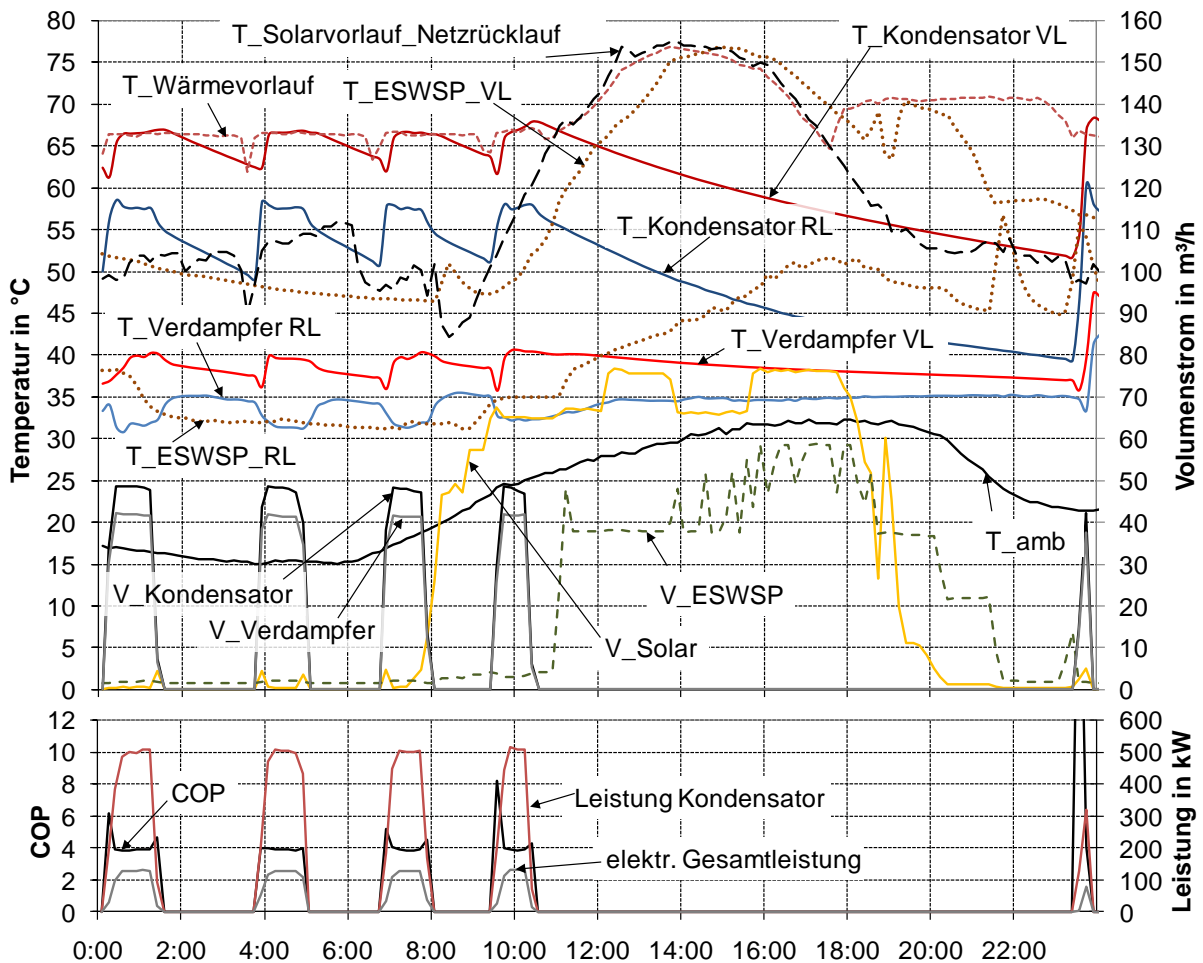


Abb. 3: Temperaturen, Volumenströme, COP und Leistungen in Neckarsulm am 27.06.2011

In Abb. 4 und 5 sind die vertikalen Temperaturverläufe in der Mitte des ersten und zweiten Ausbaus des ESWSP für ausgewählte Jahre jeweils am Monatsletzten am Ende der Entladesaison des ESWSP (März) und am Ende der Beladesaison des ESWSP (September) dargestellt. Die Temperaturverläufe repräsentieren die Minima und Maxima im jährlichen Verlauf. Im Jahr 2007 wurde die Anlage noch ohne Wärmepumpe betrieben und es wurden Maximaltemperaturen von über 60°C erreicht. Durch den Betrieb mit Wärmepumpe wurde das Temperaturniveau des Erdsonden-Wärmespeichers in den folgenden Jahren deutlich abgesenkt, sodass im Jahr 2010 der Speicher im Mittel bei 10 K tieferen Temperaturen betrieben wurde als in den Jahren zuvor. Der Erdsonden-Wärmespeicher wurde in der Speichermitte im Verlauf der Entladesaison 2010/11 auf etwa 30°C ausgekühlt und erreichte damit etwa 5 K niedrigere Temperaturen als im Vorjahr.

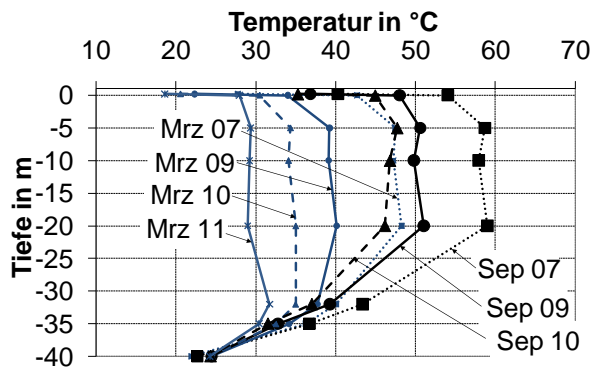


Abb. 4: Temperaturen an der Messlanze in der Mitte des 1. Ausbaus des ESWSP

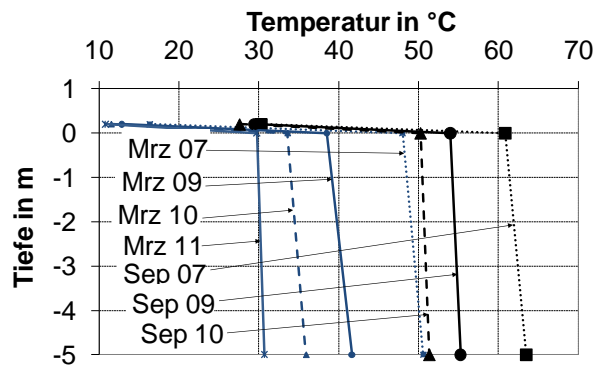


Abb. 5: Temperaturen an der Messlanze in der Mitte des 2. Ausbaus des ESWSP

4. Zusammenfassung

Durch die Integration einer Wärmepumpe in das Nahwärmesystem Neckarsulm im Jahr 2008 konnten die Temperaturen im Erdsonden-Wärmespeicher gesenkt und damit der Solaranlagenbetrieb verbessert und die Wärmeverluste des ESWSP verringert werden. Im Jahr 2010 wurde erstmals ein regenerativer Deckungsanteil von 50% erreicht. Hierbei betrug die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe 4,2.

5. Literatur

- [1] M. Benner, M. Bodmann, D. Mangold, J. Nußbicker, S. Raab, T. Schmidt, H. Seiwald: Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher (Nov. 1998 bis Jan. 2003), Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 0329606S
- [2] M. Guigas: Regelbeschreibung zum Projekt E06329 (Wärmepumpe Amorbach) vom 15.10.2010
- [3] M. Guigas: Protokoll zur Besprechung am 13.10.2010, Projekt E06329 (Wärmepumpe Amorbach)
- [4] EnEV 2007: Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV), Bundesgesetzblatt Jahrgang 2007 Teil I Nr. 34, Bonn am 26. Juli 2007
- [5] EnEV 2009: Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2009 Teil I Nr. 23, Bonn am 30. April 2009

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben 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.