

## 10 Jahre solar unterstützte Nahwärmeversorgung in Neckarsulm-Amorbach

J. Nußbicker<sup>1)</sup>, W. Heidemann<sup>1)</sup>, H. Müller-Steinhagen<sup>1), 2)</sup>

<sup>1)</sup> Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik

Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart

Tel. +49-(0)711-685-63229, Fax: +49-(0)711-685-63242

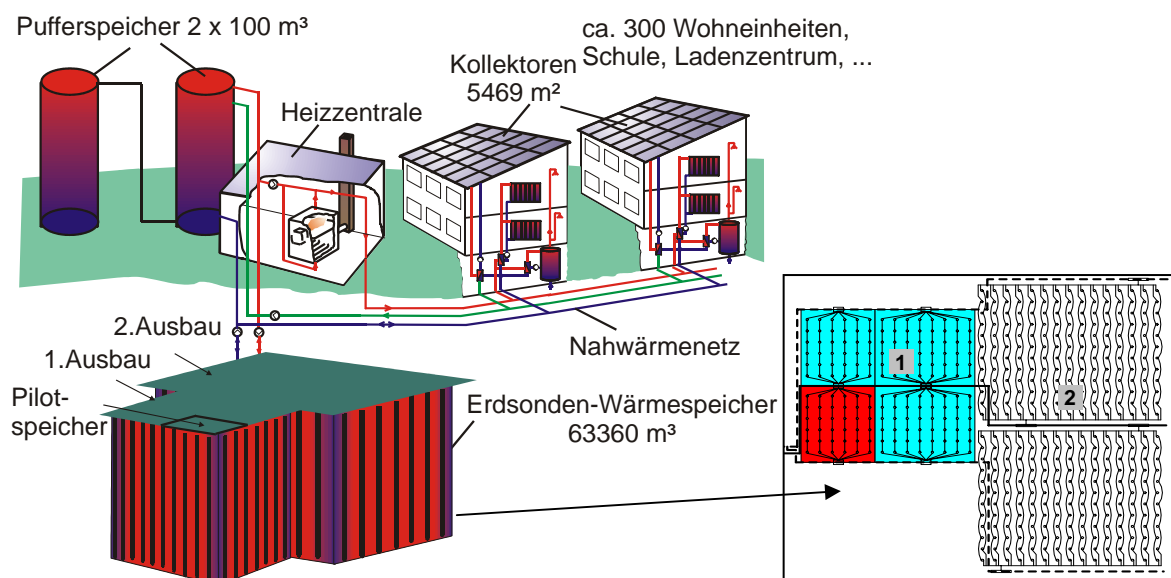
E-mail: nussbicker@itw.uni-stuttgart.de

Internet: www.itw.uni-stuttgart.de/sun

<sup>2)</sup> DLR Stuttgart, Institut für Technische Thermodynamik

### 1. Einleitung

In Neckarsulm-Amorbach wird seit 1997 eine solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit Erdsonden-Wärmespeicher (ESWSp) mit einem geplanten solaren Deckungsanteil von 50% realisiert. Derzeit sind 5469 m<sup>2</sup> Solarkollektoren mit einer thermischen Leistung von 3828 kW installiert, die zur Wärmeversorgung von ca. 300 Wohneinheiten sowie öffentlichen Gebäuden dienen. Da der sommerliche Wärmebedarf im Nahwärmenetz geringer ist als die Wärmelieferung der Solarkollektoren, wird die überschüssige Wärme in den Erdsonden-Wärmespeicher gespeichert. Der Erdsonden-Wärmespeicher, der als Langzeit-Wärmespeicher dient, wird vorwiegend in den Herbst- und Wintermonaten bei hohem Wärmebedarf entladen. Im ESWSp sind 528 Erdwärmesonden installiert, dies entspricht einem Volumen von 63360 m<sup>3</sup>. 1997 wurde ein Pufferspeicher gebaut, der 1998 sowie 2001 auf sein jetziges Volumen erweitert wurde, siehe Bild 1.

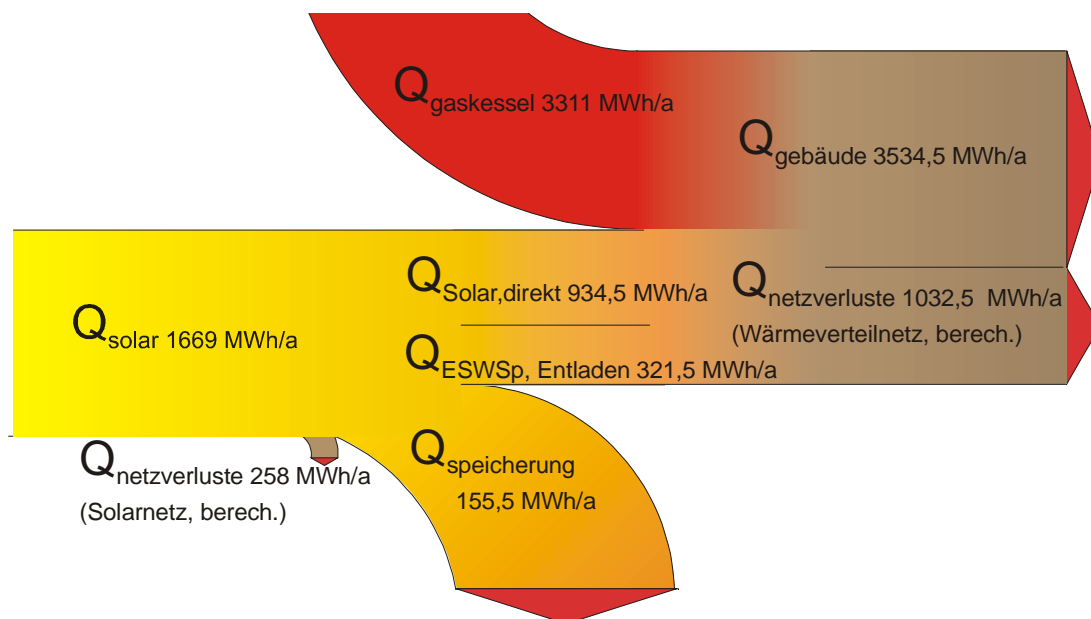


**Bild 1: Anlagenschema der solar unterstützten Nahwärmeversorgung in Neckarsulm-Amorbach**

## **2. Messdatenauswertung und Erfahrungen**

### **2.1 Nahwärmesystem und Solaranlagen**

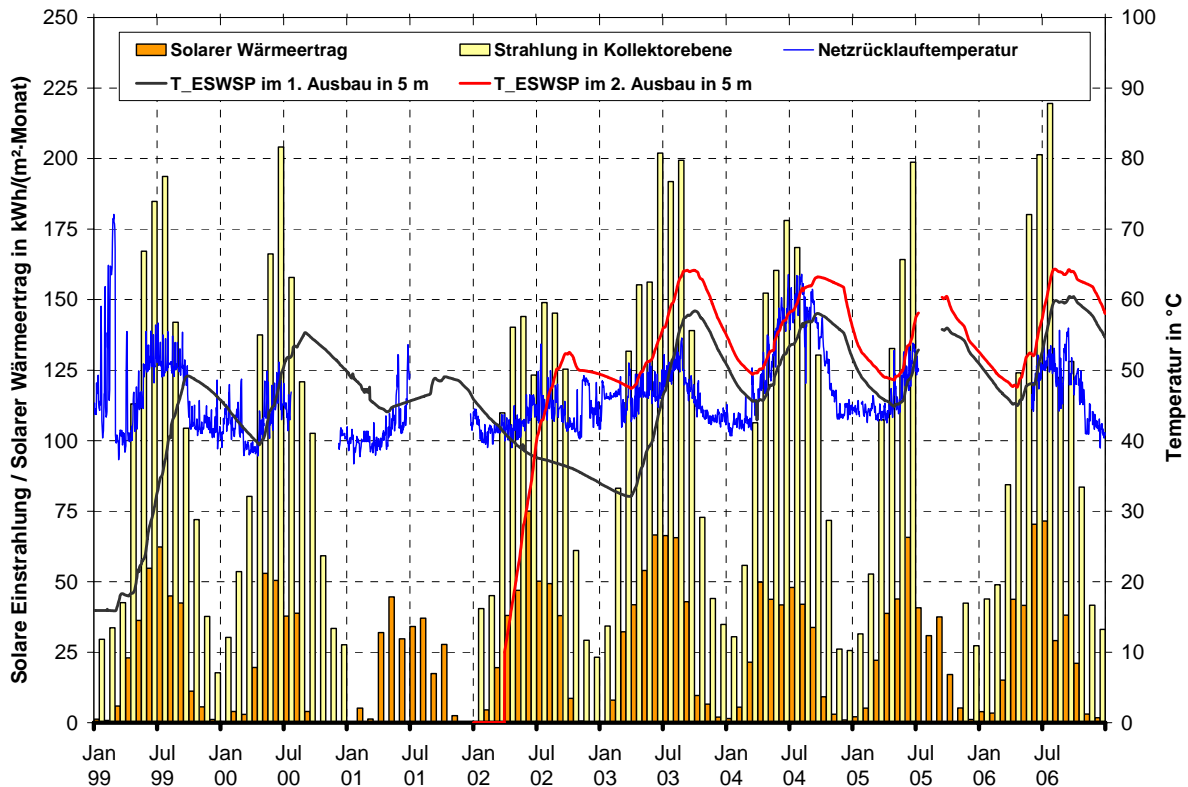
Bild 2 zeigt das Sankey-Diagramm für die solar unterstützte Nahwärmeversorgung in Neckarsulm für das Jahr 2005. Es wurde 2005 etwa die Hälfte der gewonnenen solaren Wärme (1669 MWh) direkt ins Nahwärmenetz abgegeben (934,5 MWh). 321,5 MWh Wärme wurden aus dem Erdsonden-Wärmespeicher entladen und der Gaskessel lieferte 3311 MWh. Insgesamt wurden 3534,5 MWh Wärme abgegeben, davon 1834 MWh an das solar unterstützte Nahwärmenetz mit Erdsonden-Wärmespeicher (Grenchenstraße) und weitere 1700 MWh als Notversorgung an ein benachbartes Nahwärmenetz. Die bilanzierten Netzverluste (Solar- u. Nahwärmenetz) betragen insgesamt 1290,5 MWh und sind damit -u. a. aufgrund des weit verzweigten Nahwärmenetzes- sehr hoch. Der solare Deckungsanteil am Gesamtwärmebedarf (Warmwasser und Heizung) beträgt für die gesamte Wärmeabgabe 27,5% und erreicht wegen des hohen Wärmebedarfs zur Notversorgung des benachbarten Nahwärmenetzes nicht die Vorjahreswerte von 39%.



**Bild 2: Sankey-Diagramm der solar unterstützten Nahwärmeversorgung Neckarsulm (2005)**

In Bild 3 sind die solaren Wärmeerträge, die Netzurücklauftemperaturen und die Temperaturen im ESWSp im 1. bzw. 2. Ausbau in einer Tiefe von 10 m dargestellt. Die Netzurücklauftemperaturen betragen im Jahresmittel (volumenstromgewichtet) zwischen 43°C (2000-2002) und 50,5°C (2004). Eine niedrige Netzurücklauftemperatur ist, da sie gleichzeitig die Kollektorrücklauftemperatur ist, für den Solarertrag von entscheidender Bedeutung. Außerdem kann der Erdsonden-Wärmespeicher nur bis

auf das Niveau der Netzurücklauftemperatur entladen werden, da diese die niedrigste im System vorhandene Temperatur ist.

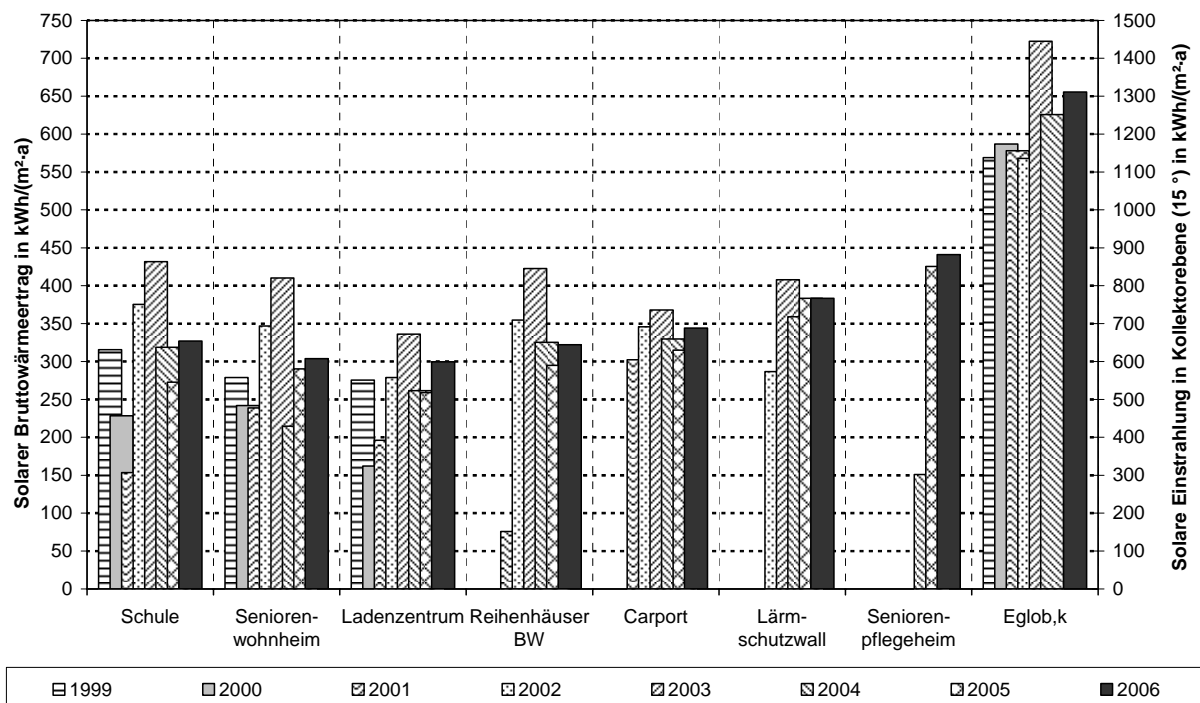


**Bild 3: Solare Wärmeerträge, Netzurücklauftemperatur und Temperaturverläufe im ESWSp**

Der solare Bruttowärmeertrag der einzelnen Kollektorfelder und die solare Einstrahlung auf die Kollektorebene ( $15^\circ$  gegenüber der Horizontalen) sind in Bild 4 dargestellt. Die solare Einstrahlung der Jahre 1999 bis 2002 unterscheidet sich nur unwesentlich, während sie in 2003 überdurchschnittlich hoch war. Auch in den Jahren 2004 und 2006 war die solare Einstrahlung höher als 1999-2002. Für das Jahr 2005 liegt wegen eines Blitzeinschlags kein Wert vor.

In Bild 4 ist zu erkennen, dass die Wärmeerträge der einzelnen Kollektorfelder in den verschiedenen Jahren zum Teil sehr unterschiedlich sind. Im Jahr 2000 mussten die Kollektorfelder wegen eines Ausfalls der Regelungstechnik manuell betrieben werden. Außerdem wurde der zweite Pufferspeicher gebaut, sodass wegen der Umbaumaßnahmen die Kollektorfelder außer Betrieb genommen werden mussten. Im Sommer 2001 wurde der saisonale Erdsonden-Wärmespeicher erweitert und es war daher in diesem keine Wärmespeicherung möglich. Da die Wärmelieferung der Kollektoren im Sommer höher als der Wärmebedarf im Nahwärmenetz ist, mussten einige Kollektorfelder außer Betrieb genommen werden. 2002 traten nur wenige Betriebs- und technische Probleme auf, sodass der solare Bruttowärmeertrag höher

als in den Vorjahren war. 2003 war die solare Einstrahlung überdurchschnittlich hoch und dies spiegelt sich auch in den solaren Bruttowärmeerträgen wider. Die Unterschiede zwischen den Kollektorfeldern, es wurden 2003 Bruttowärmeerträge zwischen 336 und 432 kWh(m<sup>2</sup>-a) erreicht, resultieren aus unterschiedlichen Kollektorrücklauftemperaturen. Die Kollektorrücklauftemperaturen der einzelnen Kollektorfelder bestimmen sich aus den Rücklauftemperaturen des Nahwärmenetzes und hier insbesondere der Wärmeübergabestationen der Gebäude auf denen die Kollektoren installiert sind. 2004 und 2005 waren die solaren Bruttowärmeerträge geringer als 2002 und 2003 aufgrund geringerer solarer Einstrahlung und besonders im Sommer höherer Rücklauftemperaturen aus dem Nahwärmenetz. Außerdem verursachte 2005 ein Blitzeinschlag Schäden an der Regelungstechnik und an konventionellen Anlagenteilen (Pumpen).

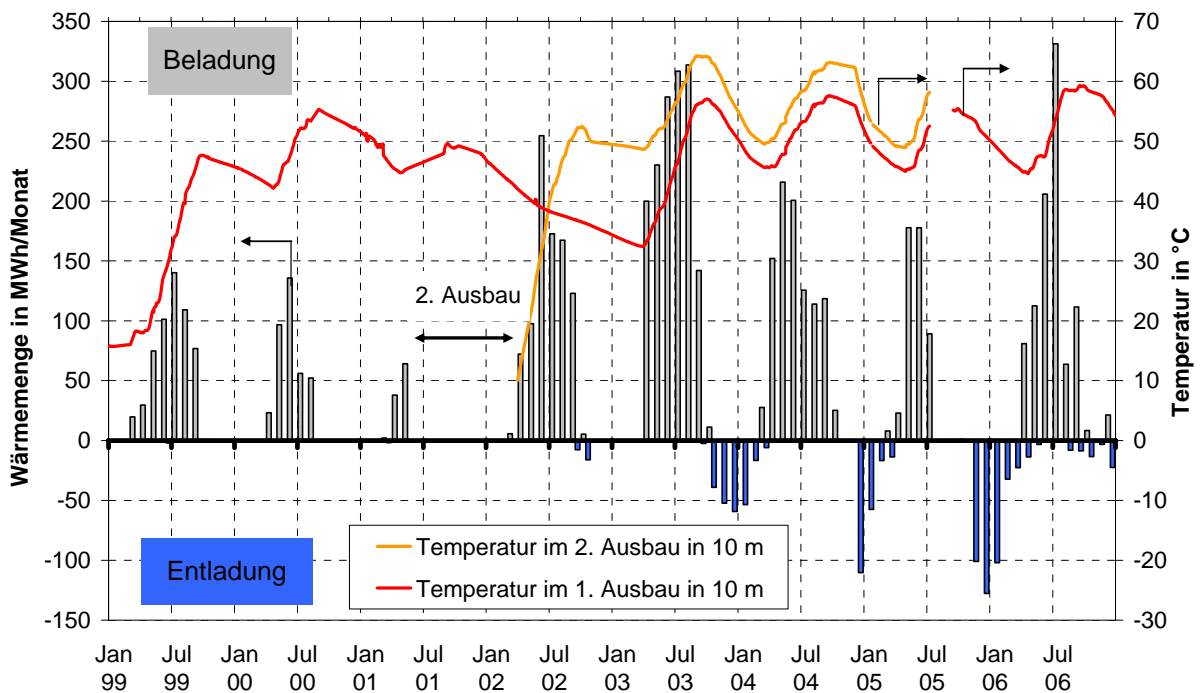


**Bild 4: Solarer Kollektor-Bruttowärmeertrag und solare Einstrahlung in Kollektorebene**

## 2.2 Erdsonden-Wärmespeicher

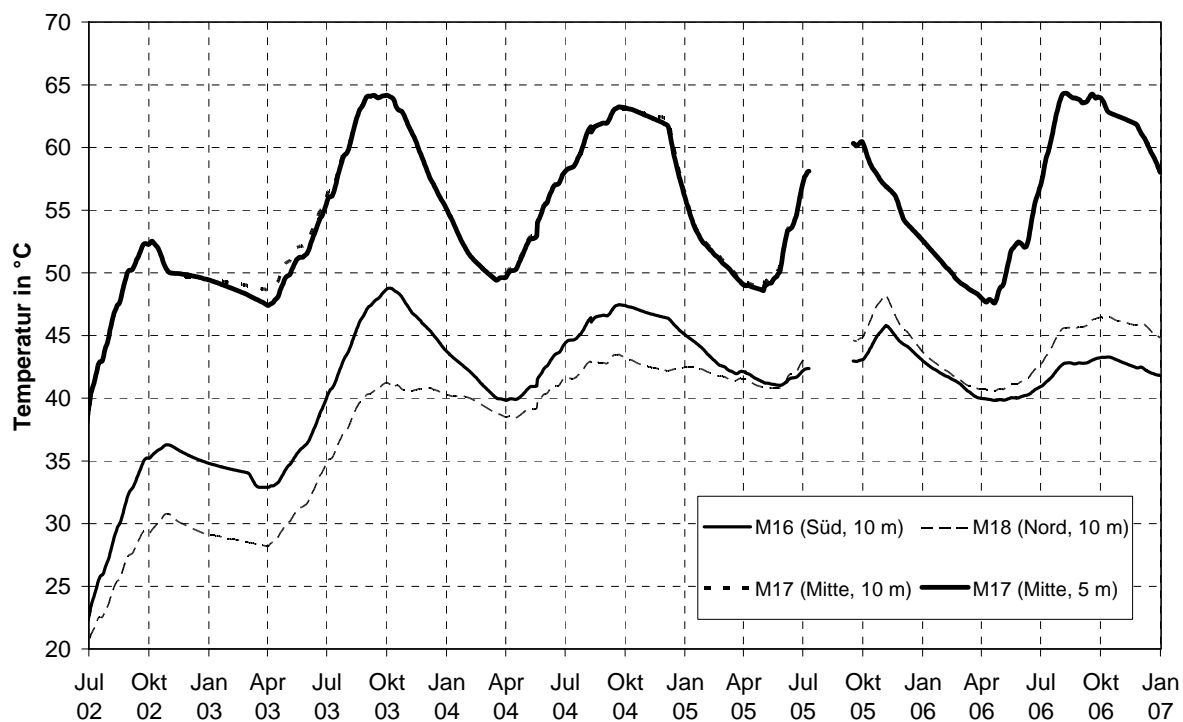
Wie erwähnt, dient der Erdsonden-Wärmespeicher als Langzeit-Wärmespeicher, um die im Sommer überschüssige solare Wärme im Winter nutzbar machen zu können. Es ist geplant, den ESWSp mit den Solarkollektoren auf Temperaturen von 85-90°C zu beladen. Der Wärmeeintrag in das Erdreich erfolgt über 30 m tiefe Doppel-U-Rohr-Sonden mit einem Durchmesser von 25 mm, die u. a. wegen der hohen Temperaturen aus Polybuten bestehen. Der ESWSp wurde zur Erdoberfläche hin mit einem diffusionsoffenen Wärmedämm Aufbau versehen. Weitergehende Informationen über den Bau und Betrieb des ESWSP können [1] und [2] entnommen werden.

In Bild 5 sind die Be- und Entladewärmemengen sowie die Netzurücklauf-temperatur und die Temperaturen in 10 m Tiefe in der Mitte des 1. u. 2. Ausbaus des ESWSp aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Entladewärmemenge bis 2004 sehr gering war. Der ESWSp muss in den ersten Betriebsjahren erwärmt werden, bis ein quasi-stationärer Zustand erreicht wird. Dies ist auch an den Temperaturen im ESWSp erkennbar, die in den letzten Jahren maximal ca. 65°C betragen, wobei die Temperaturen im 2. Ausbau etwa 5 K höher sind als im 1. Ausbau. Dieser wurde 2002 nicht beladen, um eine schnelle Temperaturangleichung der Speicherbereiche zu erreichen. Die Entladung kann nur bis auf das Temperaturniveau des Netzurücklaufs erfolgen, da dies die niedrigste Temperatur im System ist. Da die Netzurücklauf-temperatur mit ca. 40-45°C im Winter relativ hoch ist, konnte der prognostizierte Speichernutzungsgrad von 70% bisher nicht erreicht werden. Ebenso wurde die geplante maximale Speichertemperatur von 85-90°C noch nicht erreicht. Dies liegt u. a. an der gegenüber der Planung zu geringen Kollektorfläche (geplant: 6500 m<sup>2</sup>, 5469 m<sup>2</sup> installiert).



**Bild 5: Be-/Entladewärmemengen sowie Temperaturen des Netzurücklaufs und im ESWSp in 10 m Tiefe**

Die Messdaten der Temperaturen im Erdsonden-Wärmespeicher hatten eine ungleiche Temperaturverteilung im Nord- und Südbereich des 2. Ausbaus ergeben, siehe Bild 6. Ursache hierfür kann sowohl eine unterschiedliche hydraulische Durchströmung der beiden Speicherbereiche als auch eine Anisotropie des Untergrundes sein. Im Jahr 2004 wurde vom Betreiber der Durchfluss auf der Südseite verringert, um die Temperaturen in den beiden Speicherbereichen des 2. Ausbaus anzugleichen. Dies hat zu umgekehrten Temperaturverhältnissen geführt und zeigt, dass eine exakte hydraulische Einregulierung von mehreren Hundert Erdwärmesonden nur schwer machbar ist. Bei dem Projekt in Crailsheim wird daher die gleichmäßige Durchströmung der Erdwärmesonden über gleiche Leitungslängen sichergestellt, siehe Beitrag D. Bauer.



**Bild 6: Temperaturen in der Mitte und an der Nord- bzw. Südseite des zweiten Ausbaus**

### 3. Transiente Simulation des Erdsonden-Wärmespeichers

Es wurden transiente Simulationen mit dem Superposition Borehole Model (SBM, TRNSYS-Version) [3], [4] durchgeführt, um die Vorhersagen des thermischen Verhaltens des ESWSp zu validieren und Optimierungsvorschläge, z. B. für die Be- und Entladeregelung, aufzuzeigen. Dazu wurde das SBM-Modell an die TNSYS-Version 16 [5] und die Randbedingungen des gegebenen Erdsonden-Wärmespeichers (528 Erdwärmesonden, vier hydraulische Kreise etc.) angepasst und eine detaillierte Parameteranalyse durchgeführt. Die Parameteranalyse erfolgte aufgrund der langen Rechendauer für ein ausgewähltes Jahr (2004). Als Anfangsbedingung diente dabei ein mit den Messdaten der Jahre 1997 bis 2003 mit Simulationen erzeugtes Temperaturfeld, das zu Beginn der Simulation eingelesen wurde. Bei den Simulationen wurde der ESWSp mit den gegebenen geometrischen und hydraulischen Randbedingungen unter Verwendung der gemessenen Speicherein- und -austrittstemperaturen sowie Volumenströme nachgebildet. In Bild 7 sind die gemessenen und simulierten Temperaturen an fünf verschiedenen Positionen inner- und außerhalb des ESWSp aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Temperaturdifferenzen im Speicherbereich im Jahresverlauf maximal 3 Kelvin und außerhalb des Speicherbereichs maximal 5 Kelvin betragen. Für die Be- und Entladewärmemengen betragen die Differenzen zwischen gemessener und berechneter Wärmemenge weniger als 5%.

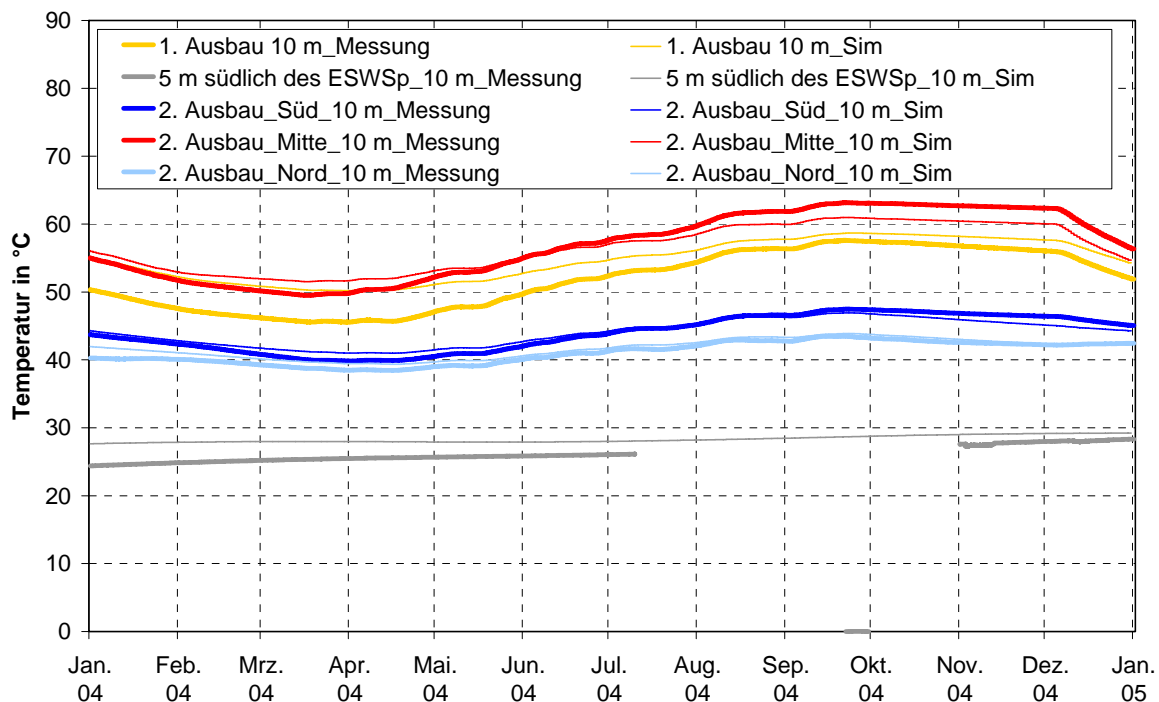
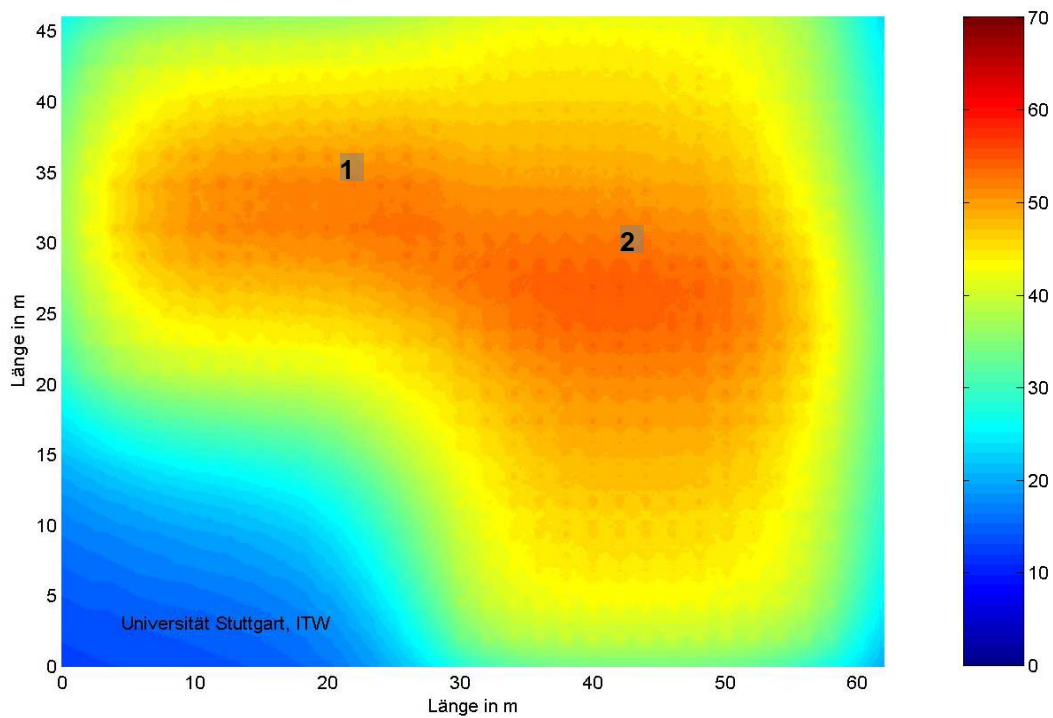
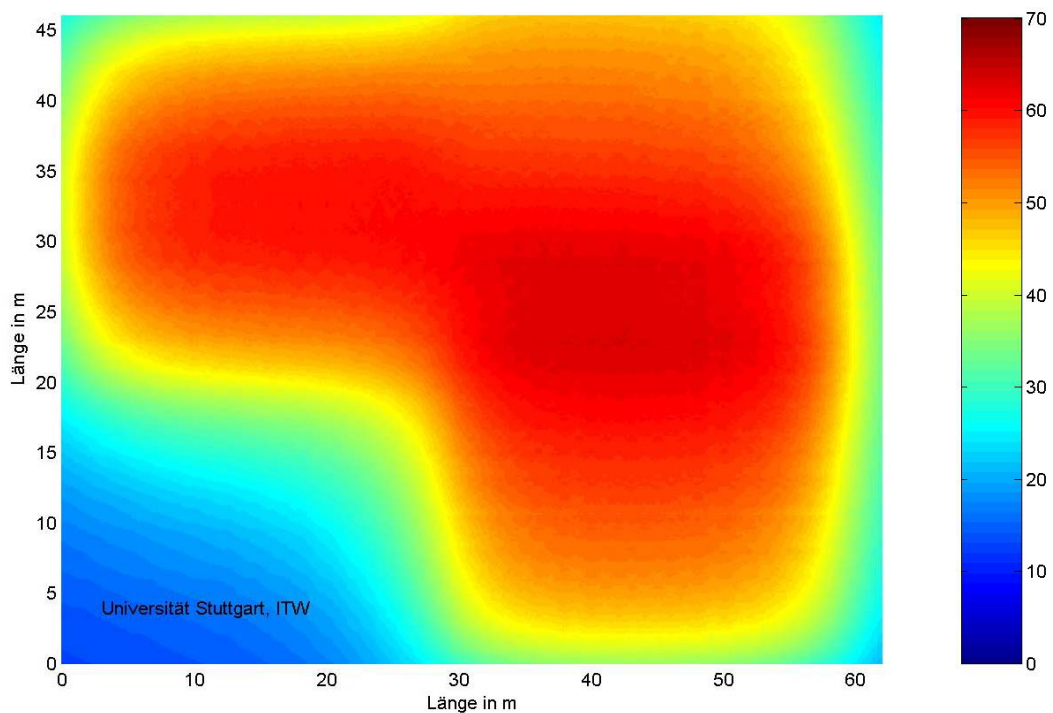


Bild 7: Gemessene und simulierte Temperaturen im Erdsonden-Wärmespeicher (2004)

Die Bilder 8 und 9 zeigen die simulierten Temperaturen im ESWSp in einer Tiefe von 10 m am Ende der Entladesaison (März) bzw. Beladesaison (September). Zu erkennen ist, dass die höchsten Speichertemperaturen in der Mitte des 2. Ausbaus auftreten, entsprechend der gemessenen Temperaturen, siehe Bilder 5 und 6. Die Nummern 1 und 2 zeigen die Positionen der Temperatursensoren im 1. Ausbau und in der Mitte des 2. Ausbaus an, vergleiche Bild 1.



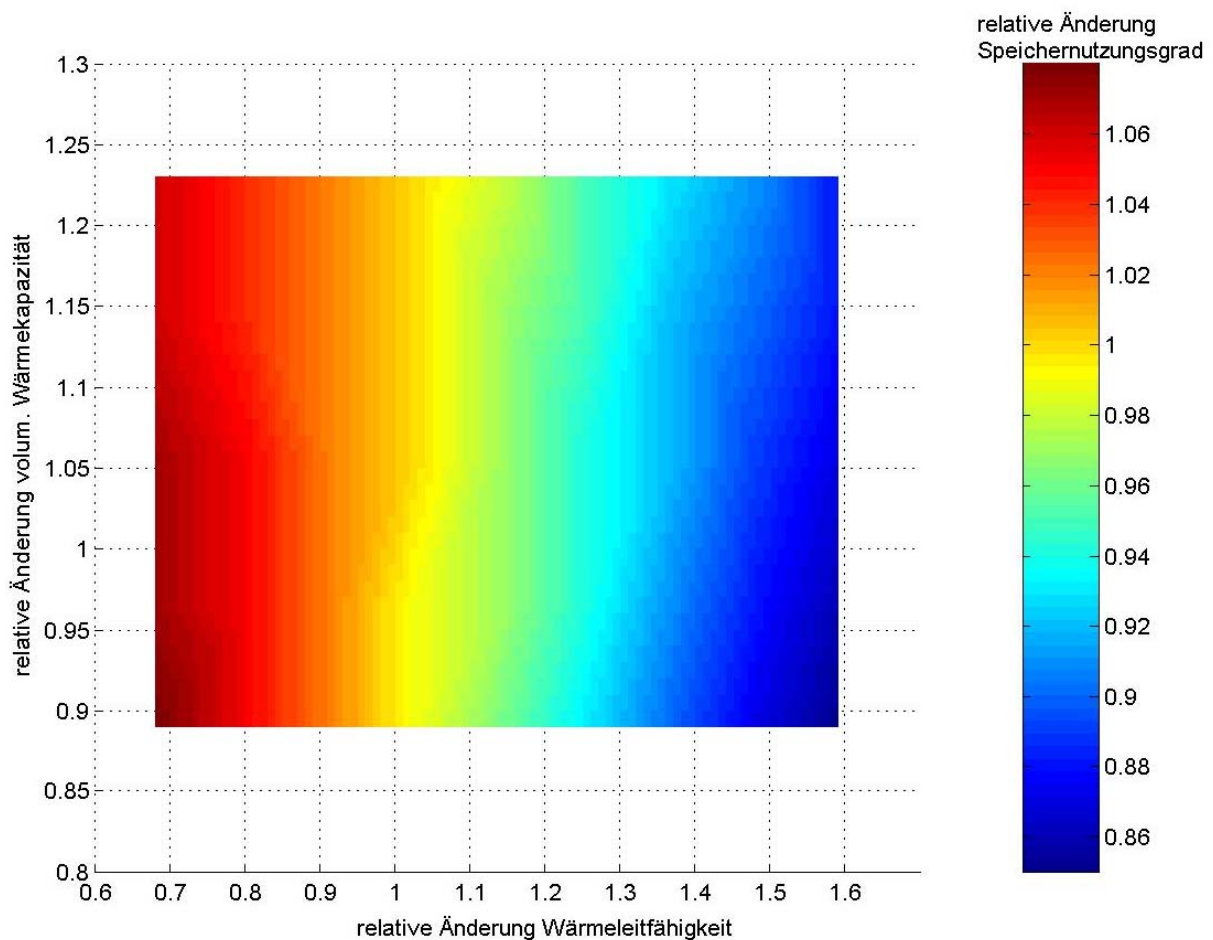
**Bild 8: Temperaturen im Erdsonden-Wärmespeicher in 10 m Tiefe Ende März 2004**





**Bild 9: Temperaturen im Erdsonden-Wärmespeicher in 10 m Tiefe Ende September 2004**

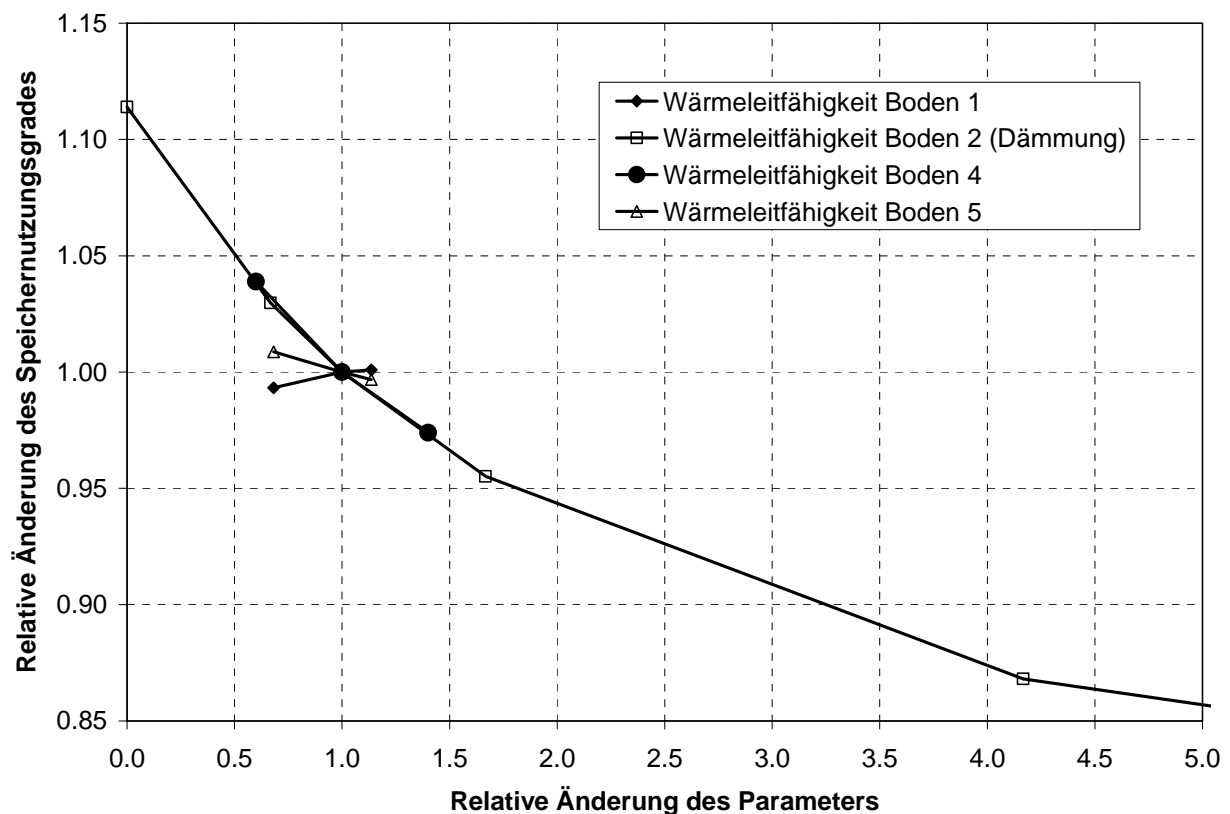
In Bild 12 ist die relative Änderung des Speichernutzungsgrades in Abhängigkeit der relativen Änderung der Wärmeleitfähigkeit und der volumetrischen Wärmekapazität im Speicherbereich aufgetragen. Als Speichernutzungsgrad wird das Verhältnis auszu eingespeicherter Wärmemenge bezeichnet. Als Referenzwerte wurden  $2,2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  für die Wärmeleitfähigkeit und  $2,85 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$  für die volumetrische Wärmekapazität verwendet. Bei einer Veränderung beider Werte um  $\pm 10\%$  verändert sich der Speichernutzungsgrad um  $\pm 2\%$ . Eine sorgfältige Bestimmung der Bodenkennwerte ist daher vor der Planung von Erdsonden-Wärmespeichern notwendig, da die in der Literatur angegebenen Bodenkennwerte einen großen Schwankungsbereich aufweisen.



**Bild 12: Relative Änderung des Speichernutzungsgrades in Abhängigkeit von der relativen Änderung der Wärmeleitfähigkeit und volumetrischen Wärmekapazität**

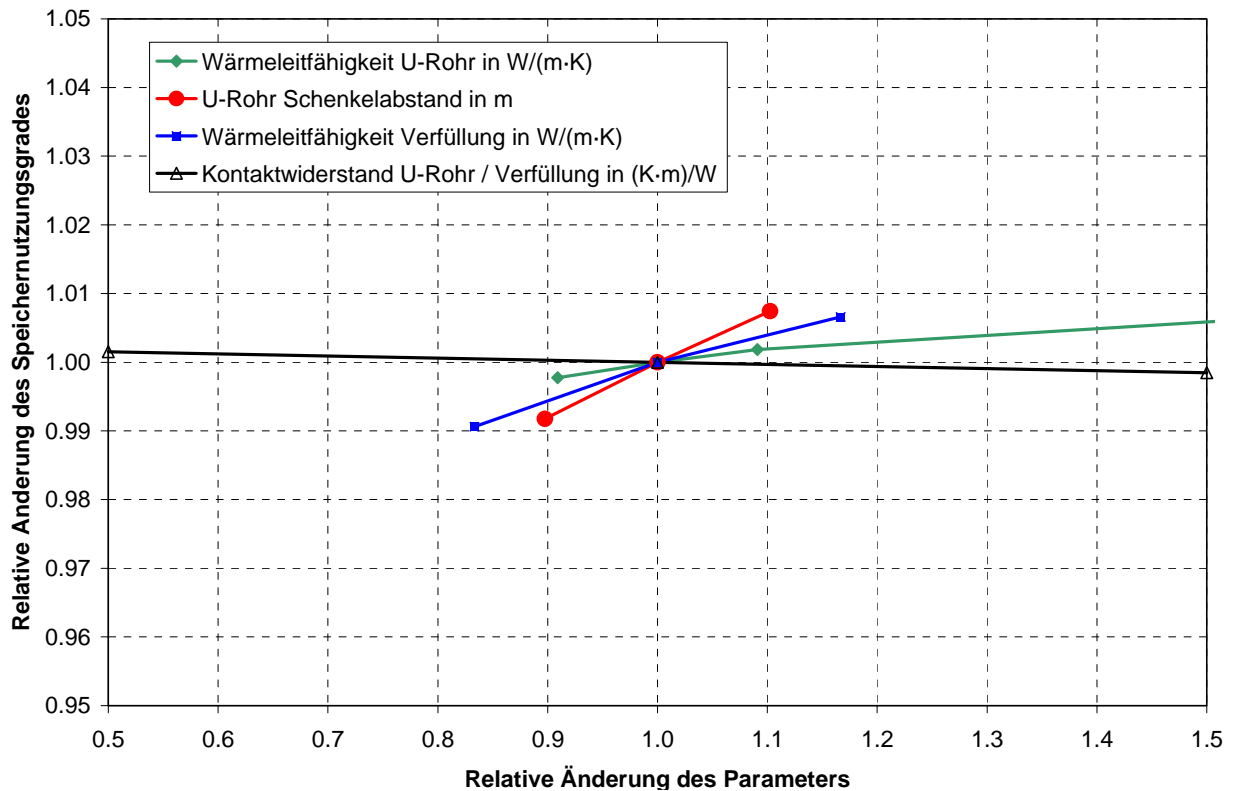
In Bild 11 ist die relative Änderung des Speichernutzungsgrades in Abhängigkeit von der relativen Änderung der Wärmeleitfähigkeit der (Boden)-Schichten über und unter dem Speicherbereich aufgetragen. Den signifikantesten Einfluss haben die Wärmeleitfähigkeit der (Boden)-Schichten 2 und 4, d. h. der Wärmedämmung über dem

ESWSp ( $\lambda_2$ ) und der Bodenschicht unter dem ESWSp ( $\lambda_4$ ). Eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit der Schichten 2 und 4 um -10% bzw. +10% führt zu einem um 1% erhöhten bzw. um 0,8% verringerten Speichernutzungsgrad, siehe Bild 11. Der Referenzwert der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung betrug  $\lambda_2 = 0,06 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  (gemessen mit einer 2-Platten-Apparatur). Die Simulationen haben einen Wert von  $0,1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  ergeben. Bei diesem Wert werden sowohl für die Differenz zwischen gemessenen und simulierten Temperaturen als auch Be- und Entladewärmemengen die niedrigsten Werte erreicht. Der Wert  $\lambda_4$  kann nicht beeinflusst werden, muss aber bei der Quantifizierung der Wärmeverluste des ESWSp berücksichtigt werden.



**Bild 11: Relative Änderung des Speichernutzungsgrades in Abhängigkeit von der relativen Änderung der Wärmeleitfähigkeit der Bodenschichten über und unter dem Speicher**

In Bild 12 ist die relative Änderung des Speichernutzungsgrades  $\eta_{Sp}$  in Abhängigkeit von der relativen Änderung ausgewählter Parameter des Bohrlochs bzw. der Erdwärmesonde dargestellt. Den größten Einfluss von den betrachteten Parametern hat demzufolge der Schenkelabstand der U-Rohre. Bei einer Veränderung des Schenkelabstands um  $\pm 10\%$  ändert sich der Speichernutzungsgrad um  $\pm 0,8\%$ . Ursache hierfür ist die erhöhte bzw. verringerte thermische Wechselwirkung zwischen dem kalten bzw. warmen Fluid in dem auf- bzw. absteigenden U-Rohr-Schenkel (so genannter thermischer Kurzschluss).



**Bild 12: Relative Änderung des Speichernutzungsgrades in Abhängigkeit von der relativen Änderung ausgewählter Parameter**

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Die vergangenen Jahre haben gezeigt, dass die solaren Deckungsanteile unter den Erwartungen geblieben sind. Hauptursachen hierfür sind eine geänderte Bebauung und hohe Netzurücklauftemperaturen. Als problematisch hat sich während des Betriebs vor allem die Regelung erwiesen, die u. a. zu diversen Ausfällen der Solarkollektoren geführt hat und derzeit ersetzt wird. In zukünftigen Projekten muss auf eine niedrige Netzurücklauftemperatur und eine zuverlässige Anlagenregelung und -überwachung besonderer Wert gelegt werden.

## Literatur

- [1] M. Benner, M. Bodmann, D. Mangold, J. Nußbicker, S. Raab, Th. Schmidt, H. Seiwald: Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher (Nov. 98 bis Jan. 03), Forschungsbericht zum BMWi-Vorhaben 0329606 S, ISBN 3-9805274-2-5, Stuttgart 2004
- [2] J. Nußbicker, D. Mangold, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen, Bau und Betrieb des Erdsonden-Wärmespeichers in Neckarsulm-Amorbach, 8. Geothermische Fachtagung & 5. Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen, Landau/Pfalz, 10.-12.11.2004
- [3] P. Eskilson, Superposition Borehole Model, Manual for Computer Code, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Schweden, 1986
- [4] S. Holst, Type 146 TRNSBM – Modified Version for separate ground layers, TRANSSOLAR, 1997
- [5] TRNSYS 16 - a TRaNsient SYstem Simulation program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison (USA) 2004

*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 dieses Berichtes liegt bei den Autoren.*