

# Erfolgskontrolle und Anlagenmonitoring

Die Solaranlage der Stadtklinik Baden-Baden wurde im Rahmen des Förderkonzepts Solarthermie-2000 intensiv vermessen, analysiert und optimiert. Kontinuierliche Anlagenüberwachung führt zu einer hohen Anlageneffizienz; auch dadurch, dass Störungen frühzeitig erkannt werden können.



Fotos: FH Offenburg



Bild 1  
Kollektorfeld auf dem Flachdach der Stadtklinik Baden-Baden

**R**und 60 solarthermische Großanlagen zur Trinkwassererwärmung wurden im Rahmen des Förderkonzepts Solarthermie-2000, Teilprogramm 2, in Deutschland realisiert. Seit 1993 wurden mit Hilfe einer repräsentativen Anzahl der diversen Anlagenvarianten umfangreiche Erfahrungen mit unterschiedlichen Systemkombinationen gewonnen.

In Solarthermie-2000 (ST-2000) soll anhand von Beispiellösungen für große solarthermische Anlagen mit einer Mindestkollektorfläche von  $100\text{ m}^2$  an unterschiedlich genutzten Gebäuden nachgewiesen werden, dass zur thermischen Solarenergienutzung gute technische Lösungen zur Verfügung stehen. Diese Systemlösungen sollen weiter verbessert und standardisiert werden. Zugleich soll erreicht werden, dass die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit gesteigert wird, indem durch Reduzierung der spezifischen Systemkos-

ten und Erhöhung des spezifischen Nutzenergieertrages die solaren Wärmekosten gesenkt werden.

Das Programm fordert, dass die Kosten der solaren Nutzwärme einen Grenzwert von  $0,13\text{ Euro/kWh}$  nicht überschreiten (basierend auf einer Lebensdauer von 20 Jahren und 6% Zins). Die Fachhochschule Offenburg betreut sechs Projekte aus dem Forschungsvorhaben. Von der auf der Stadtklinik Baden-Baden installierten Anlage mit einer Absorberfläche von  $276\text{ m}^2$  werden die Technik und Erfahrungen beim Betrieb der Solaranlage beschrieben und die Ergebnisse dargestellt.

## Auslegung des Solarsystems

Die wichtigsten Kenngrößen für die Auslegung von Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung sind der tatsächliche Warmwasserverbrauch und das Verbrauchsprofil,

d. h. die zeitliche Verteilung der Warmwassersentnahme innerhalb des Tages, der Woche und vor allem des Jahres. Allgemeine Empfehlungen für Krankenhäuser von zum Beispiel 100 bis 300 Liter pro Patient [1] reichen als Auslegungsgrundlage für eine Solaranlage nicht aus.

Deshalb ist es in vielen Fällen erforderlich, den tatsächlichen Verbrauch zu messen und daraus ein Zapfprofil zu erstellen. Dieses Zapfprofil ist Grundlage für die Anlagensimulation mit einem Simulationsprogramm, in diesem Fall T\*Sol<sup>1)</sup>. In der Stadtklinik Baden-Baden wurde über einen Zeitraum von einem Monat der tatsächliche Warmwasserverbrauch gemessen und aufgezeichnet. Mit Hilfe des für Krankenhäuser typischen Jahresverlaufs wurden die restlichen Monate ergänzt (Bild 2). Der Jahresverlauf wurde aufgrund von Messungen von anderen ST-2000 Anlagen ermittelt.

Zusätzlich wurden die Kalt- und Warmwassertemperatur erfasst, um die Umrechnung der Verbrauchswerte auf eine Referenz-Warmwassertemperatur von  $60^\circ\text{C}$  zu ermöglichen. In der Sommerzeit lag der tägliche Warmwasserverbrauch bei durchschnittlich ca.  $19\text{ m}^3/\text{d}$ , d. h. ca. 47 Liter pro Person (bezogen auf ca.  $45^\circ\text{C}$  Warmwassertemperatur). Umgerechnet auf die Referenz-Warmwassertemperatur von  $60^\circ\text{C}$  sind dies ca.  $13\text{ m}^3/\text{d}$ .

Der Verbrauchswert war Ausgangspunkt für die Ermittlung der Kollektorfläche. Ein Richtwert der im ST-2000 Programm erarbeitet wurde, die so genannte Kollektorauslastung, liegt bei  $70\text{ l}$  Warmwassertagesverbrauch ( $60^\circ\text{C}$ ) pro  $1\text{ m}^2$  Kollektorfläche. Ist die Warmwassertemperatur geringer, so ist der Auslegungsrichtwert entsprechend zu ändern. Dies wurde bei der Stadtklinik Baden-Baden nicht berücksichtigt. Die Kollektorauslastung liegt bei  $50\text{ l}/\text{m}^2$  Kollektorfläche. Dadurch wurde der Systemnutzungsgrad etwas niedriger, der Deckungsanteil jedoch größer.

Als Richtwert für die Auslegung der Pufferspeicher kann in erster Näherung ein Wert von  $40\text{ l}/\text{m}^2$  Kollektorfläche angenommen werden.

<sup>1)</sup> Valentin EnergieSoftware, Berlin

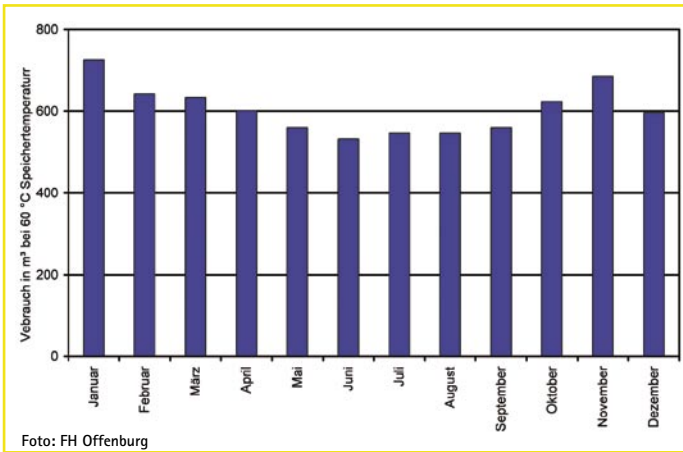


Bild 2  
Prognostizierter  
Jahresverlauf des  
Warmwasserverbrauchs

und somit des solaren Ertrages zur Folge. Der Wärmeübertrager wurde jedoch nicht ausgetauscht, da eine Erfüllung der Energiegarantie trotzdem möglich war.

Mitte August 2001 wurde festgestellt, dass der Volumenstrom auf der Sekundärseite des Entladewärmeübertragers seit einem Monat ständig abnahm (Bild 5). Nachdem die Reinigung des Schmutzfängers keine Besserung brachte, wurde der Wärmeübertrager ausgebaut und eine starke Verkalkung festgestellt. Dies obwohl die Warmwasser-

## Integration der Solaranlage

Die Flachkollektoren (Wagner & Co LB 87, LB 76, LB 5 mit Antireflexglas) der Solaranlage mit einer Absorberfläche von insgesamt 276 m<sup>2</sup> sind auf dem Flachdach in Südrichtung und einer Neigung von 45° aufgestellt.

Bild 3 zeigt das Prinzipschaltbild der Solaranlage. Sobald eine bestimmte Temperaturdifferenz zwischen Kollektor und Pufferspeicher überschritten wird, wird die aus der Sonneneinstrahlung gewonnene Energie über eine Wärmeträgerflüssigkeit im Kollektorkreis zu einem Plattenwärmeübertrager transportiert und dort über den Beladekreis an die drei Solar-Pufferspeicher (je 4000 l) abgegeben.

Die Entladung erfolgt über einen zweiten Wärmeübertrager. Sobald eine ausreichende Temperaturdifferenz zwischen Solar-Pufferspeicher und Trinkwasservorwärmespeicher gemessen wird, schaltet die Entladepumpe ein und die gespeicherte Energie wird in den solaren Vorwärmespeicher (1500 l) geladen. Bei Warmwasserentnahme strömt das so erwärmte Wasser aus dem Vorwärmespeicher in zwei Trinkwasserspeicher (je 3000 l). An diese beiden Speicher ist eine außenliegende Nachheizung angeschlossen, mit der das Trinkwasser bei nicht ausreichendem Solarenergieangebot auf Solltemperatur gebracht wird.

## Betriebserfahrung

Nach Empfehlung von [2] ist für Wärmeübertrager im Kollektorkreis eine Übertragungsleistung bezogen auf die Kollektorfläche von 100 W/(K m<sup>2</sup>) erforderlich. Es sollen folgende charakteristische Auslegungswerte herangezogen werden, bei einem Volumenstrom im Kollektorkreis von 12 l/(h m<sup>2</sup>):

Temperaturen primär: 75/33 °C  
Temperaturen sekundär: 68/30 °C

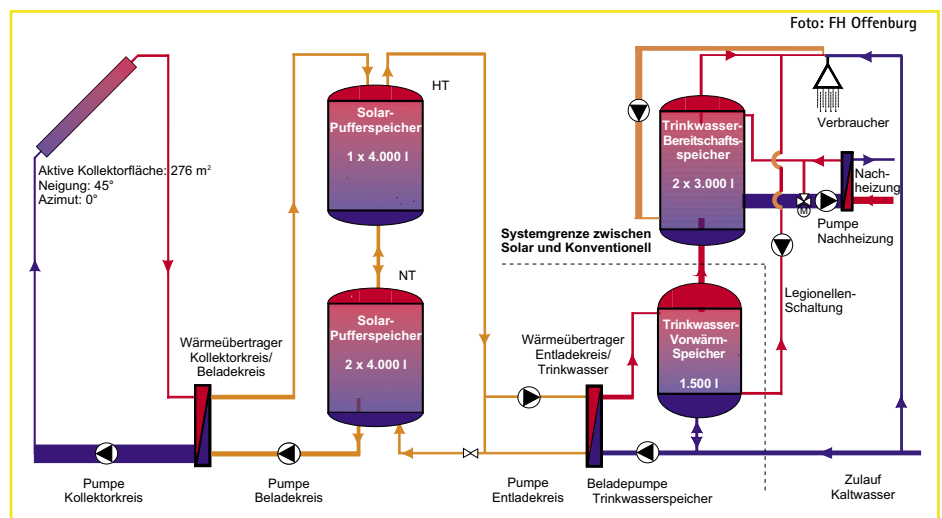


Bild 3 Hydraulikschema

Dies ergibt eine logarithmische Temperaturdifferenz von ca. 5K. Der Kollektorkreiswärmeübertrager der Stadtklinik Baden-Baden wurde jedoch nicht nach diesen Empfehlungen dimensioniert. Die logarithmische Temperaturdifferenz lag bei ungünstigeren 8,5K.

Es wurde festgestellt, dass der Wärmeübertrager im Verhältnis zu den Empfehlungen nach [2] um 40% unterdimensioniert ist. Dies kann auch an den Temperaturen in Bild 4 erkannt werden. Die Spreizung ist höher als empfohlen, sie beträgt bis zu 15K. Besonders bei hoher Einstrahlung und somit hohen Temperaturen kann die nötige Leistung nicht übertragen werden. Die Unterdimensionierung erfolgte aus Kostengründen. Sie hat eine Verringerung des Kollektorkreisnutzungsgrades

temperatur auf 60 °C begrenzt war. Nach der Säuberung erreichten Volumenstrom und Solarertrag wieder den Auslegungswert. Nachdem ein Jahr später wieder eine Volumenstromabnahme aufgrund erneuter Verkalkung des Wärmeübertragers festgestellt wurde, wird er nun regelmäßig gereinigt.

## Ergebnisse aus drei Messjahren

Seit August 2000 ist die Solaranlage in der Stadtklinik Baden-Baden im Intensivmessbetrieb. Tabelle 1 gibt einen Überblick über den erreichten solaren Ertrag und Systemnutzungsgrad im Vergleich zur Simulation mit T\*Sol unter realitätsnahen Bedingungen. Wobei der solare Ertrag die Energiemenge kennzeichnet, die vom Solarsystem an das Trinkwassersystem abgegeben wurde. Der Systemnutzungsgrad

	Simulationsergebnis mit T*Sol	Messjahr 1 August 2000 bis Juli 2001	Messjahr 2 August 2001 bis Juli 2002	Messjahr 3 August 2002 bis Juli 2003
Solare Einstrahlung auf gesamtes Kollektorfeld	382 786 kWh/a	334 980 kWh	340 393 kWh	377 568 kWh
Ertrag aus Solarsystem	143 820 kWh/a	123 716 kWh	117 789 kWh	127 788 kWh
Systemnutzungsgrad	37,6%	36,9%	34,6%	33,8%
Warmwasserverbrauch	7200 m <sup>3</sup> /a	8000 m <sup>3</sup> /a	7900 m <sup>3</sup> /a	8000 m <sup>3</sup> /a

Tabelle 1 Simulationsergebnisse und Messergebnisse

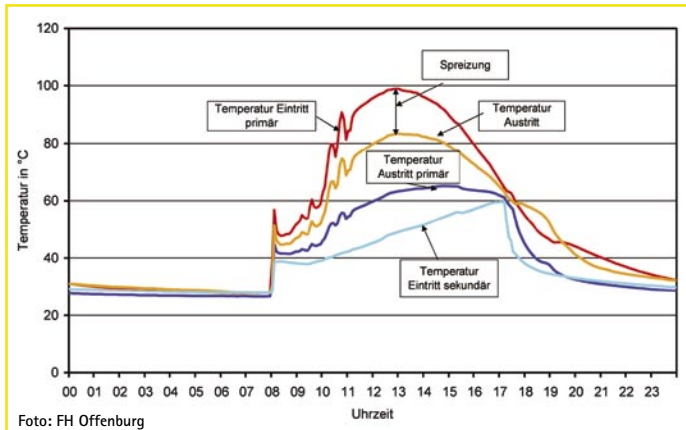


Bild 4  
Temperaturverläufe am  
Wärmeübertrager WT1

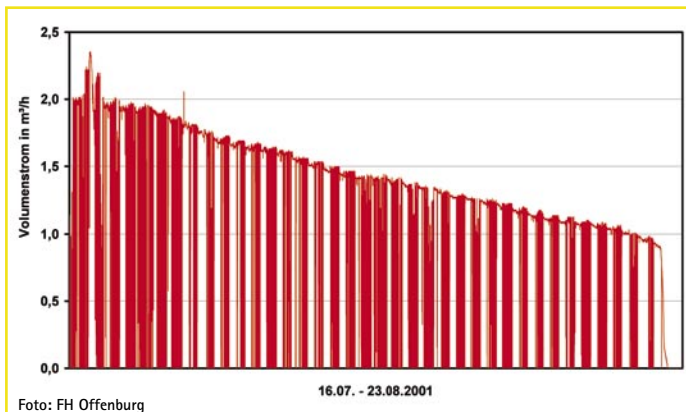


Bild 5  
Volumenstromabnahme  
bei der Verkalkung des  
Wärmeübertragers WT2

ist das Verhältnis vom solaren Ertrag zur gesamten eingestrahelten solaren Energie. Die Abnahme des Nutzungsgrades liegt hauptsächlich an Ausfällen aufgrund der beschriebenen Störungen.

Bild 6 zeigt die Jahresverteilung des System- und Kollektorkreisnutzungsgrades in wöchentlicher Auflösung. Der Kollektorkreisnutzungsgrad ist das Verhältnis aus der Energie, die vom Kollektorkreis an die Pufferspeicher abgegeben wurde und der solaren Einstrahlung. Der Verlauf ist relativ konstant über das gesamte Jahr. Den Verlauf des Deckungsgrades (Anteil der Solarenergie am gesamten Warmwasserverbrauch) in der ersten Messperiode stellt Bild 7 dar. In den einstrahlungsreichen Sommermonaten wird zeitweise ein Deckungsanteil von bis zu 0% erreicht.

## Garantierter Energieertrag

Vom Anlagenerrichter (Installateur) muss laut „ST-2000“ Förderbedingungen ein Jahresenergieertrag der Solaranlage garantiert werden. Diese Energiegarantie basiert auf den im Leistungsverzeichnis vorgegebenen Wetter- und Verbrauchsdaten. Für die Solaranlage in Baden-Baden wurde eine Energiegarantie von 143 820 kWh abgegeben, was 20% unter dem Simulationsergebnis liegt. Dieser Sicherheitsabschlag stellte zugleich das Maximum dar und wurde auf den geforderten Preis von 0,13 Euro/kWh „optimiert“.

Zwischen den tatsächlichen Betriebsbedingungen, wie Verbrauch und Wetter sowie den prognostizierten Bedingungen, muss ein Abgleich vorgenommen werden, um dem Garantiegeber entsprechende Abweichungen weder anzulasten noch gutzuschreiben. Dazu wird eine weitere T\*Sol-Simulation durchgeführt, bei der die real gemessenen Wetter- und Verbrauchsdaten verwendet werden. Mit

dieser Korrekturrechnung ergeben sich Referenzwerte für die Energiemenge und den Systemnutzungsgrad des Systems unter realen Bedingungen.

T\*Sol errechnet dabei aus den gemessenen horizontalen Einstrahlungsdaten die Strahlungsleistung auf das Kollektorfeld in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung. Da die errechneten Werte mit Umrechnungsfehlern und die gemessenen Daten mit Messfehlern behaftet sind, stimmen die gemessenen und berechneten Strahlungswerte in Kollektorebene nicht überein. Dieser Fehler wirkt sich bei der Berechnung des Ertrags anders aus als bei der Berechnung des Systemnutzungsgrades. Um dies nicht dem Anlagenerrichter anzulasten gilt die Garantie als erfüllt, wenn einer der beiden Werte die Erfordernisse erfüllt.

Da nur 80% vom Simulationsergebnis garantiert wurden, wird das mit den realen Bedingungen nachgerechnete Ergebnis auch auf 80% reduziert. Zum Ausgleich von Messtoleranzen und Schwankungen in den Simulationsrechnungen werden die in der Nachrechnung ermittelten korrigierten Werte für Energieertrag und Systemnutzungsgrad zusätzlich noch um 10% reduziert, d.h. die Garantie gilt als erfüllt, wenn in einem Messjahr mindestens einer der beiden gemessenen Garantiewerte größer oder gleich 90% der korrigierten Werte ist.

In Tabelle 2 ist das prinzipielle Ablaufschema der Garantiekorrektur für das

Zeile	Wert	Ertrag	Systemnutzungsgrad
1	Garantie des Anbieters, basierend auf Standardbedingungen	143 820 kWh/a	37,6%
2	Ergebnis der Nachsimulation durch FH Offenburg, basierend auf Standardbedingungen	179 707 kWh/a	47,8%
3	Faktor Garantie zu Simulation (Zeile 1/Zeile 2)	0,80	0,80
4	Ergebnis Simulation mit realen Betriebsbedingungen	160 895 kWh/a	45,9%
5	Korrigierte Simulation mit realen Betriebsbedingungen (Zeile 4 × Zeile 3)	128 765 kWh/a	36,1%
6	Messergebnis 01.08.2000–31.07.2001	123 716 kWh/a	37,0%
7	Verhältnis Messergebnis zu korrigierter Simulation (Zeile 6/Zeile 5)	97,0%	102,4%

Tabelle 2 Prinzipschema zur Nachrechnung der Ertragsgarantie

	Vergabe	Real		
		1. Messjahr	2. Messjahr	3. Messjahr
Energieertrag aus Solarsystem (vom Anlagenerrichter garantiert für 282 m <sup>2</sup> Kollektorfläche)	Garantiertrag	1. Messjahr	2. Messjahr	3. Messjahr
	143 820 kWh/a 511 kWh/(m <sup>2</sup> a)	123 716 kWh/a 448 kWh/(m <sup>2</sup> a)	117 852 kWh/a 427 kWh/(m <sup>2</sup> a)	127 788 kWh/a 463 kWh/(m <sup>2</sup> a)
Kosten Solarsystem + Planung (inkl. 16% MwSt.)	190 349 Euro	195 776 Euro		
Spezifische Systemkosten (inkl. Planung und MwSt.)	689 Euro/m <sup>2</sup>	713 Euro/m <sup>2</sup>		
Solare Nutzwärmekosten für garantierten Ertrag (bei 8,72% rel. Annuität, 20 Jahre Systemlebensdauer)	0,12 Euro/kWh	1. Messjahr	2. Messjahr	3. Messjahr
		0,13 Euro/kWh	0,14 Euro/kWh	0,13 Euro/kWh

Tabelle 3 Geplante und reale Anlagen- und solare Nutzwärmekosten

Garantiemessjahr skizziert. Der garantierte Nutzungsgrad wurde mit 102% erfüllt. Wäre die Energiegarantie nicht erfüllt worden, hätte der Anlagenerrichter Optimierungsmaßnahmen durchführen müssen. In Baden-Baden hätte dies zum Beispiel ein größerer Kollektorkreiswärmeübertrager sein können.

**Kosten/Nutzen-Relation**

Tabelle 3 zeigt die geplanten und realen Anlagen- und Nutzwärmekosten. Dabei ist die Förderung durch das BMWi von 75%

nicht berücksichtigt. Im ersten Messjahr lagen die spezifischen Nutzwärmekosten bei 0,13 Euro/kWh. Die im Vergleich zur Vorausberechnung etwas höheren Nutzwärmekosten lassen sich begründen mit schlechteren Wetterbedingungen und höheren Investitionskosten für das Solarsystem. Trotz geringer Abweichungen der Nutzwärmekosten liegen die Werte im Toleranzbereich.

Die Solaranlage der Stadtklinik Baden-Baden läuft nach anfänglichen kleineren Schwierigkeiten sehr gut und hat in allen

drei Betriebsjahren die Energiegarantie erfüllt. Es hat sich jedoch gezeigt, dass eine kontinuierliche Überwachung nicht nur in der Inbetriebnahmephase notwendig ist, um einen effektiven Betrieb der Anlage zu gewährleisten. Die Überwachungsfunktion kann heute im Rahmen des technischen Gebäudemanagements oder von einem Dienstleister vorgenommen werden. ←

**Literatur**

- [1] Recknagel Sprenger Schramek: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 01/02 70. Auflage München. 2001
- [2] Peuser, F. A.; Croy, R.; Rehrmann, U.; Wirth, H. P.: Solare Trinkwassererwärmung mit Großanlagen. Fachinformationszentrum Karlsruhe. TÜV-Verlag. Köln. 1999
- [3] Remmers, Karl-Heinz: „Große Solaranlagen“. Solarpraxis Berlin. 1999
- [4] Sascha Himmelsbach, Elmar Bollin, Uta-Maria Klingenberger: Solare Dusch- und Beckenwassererwärmung in der Altherme Waldbronn. 13. Symposium Thermische Solarenergie in Staffelstein. Mai 2003
- [5] Uta-Maria Klingenberger, Elmar Bollin, Sascha Himmelsbach: Untersuchungen zum Steuer- und Regelverhalten von solaren Großanlagen zur Trinkwassererwärmung im Rahmen des Solarthermie-2000 Programms“, 10. Symposium Thermische Solarenergie in Staffelstein, Juni 2000

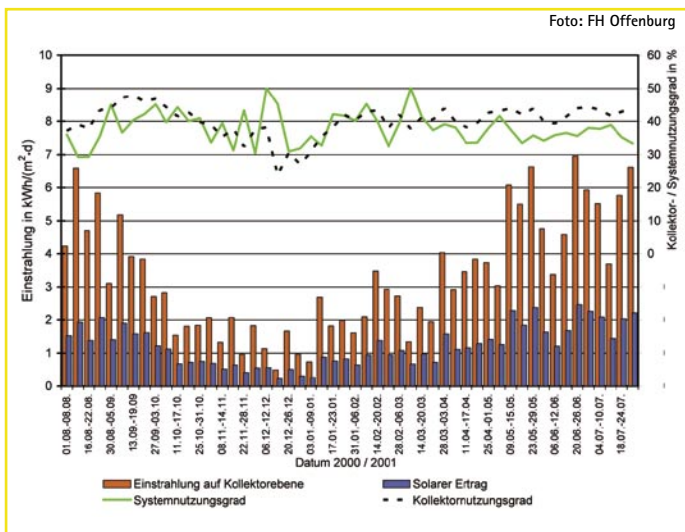


Bild 6 Verteilung der Nutzungsgrade und des solaren Ertrags

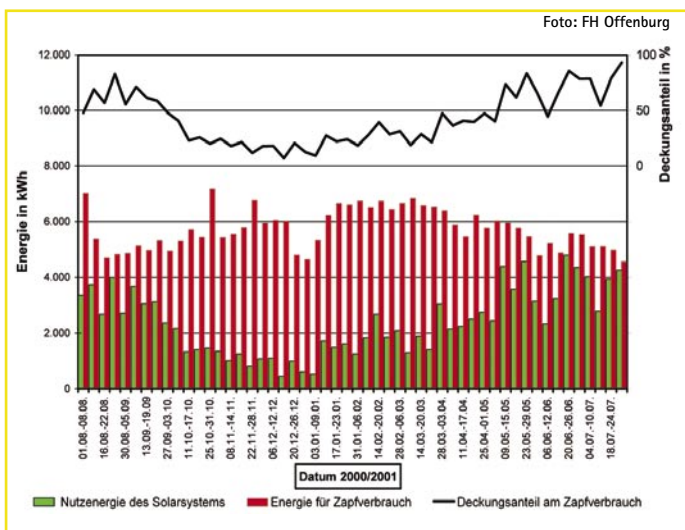


Bild 7 Jahresverlauf des Deckungsanteils

Dipl.-Ing. (FH) M.Sc. Uta-Maria Klingenberger, ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Fachhochschule Offenburg im Programm Solarthermie-2000, Telefon (07 81) 20 51 22, E-Mail: klingenberger@fh-offenburg.de, www.fh-offenburg.de/mv/st2000/

Prof. Dipl.-Ing. Bollin ist Leiter der Projektgruppe Solarthermie-2000 an der FH Offenburg

Dipl.-Ing. (FH) Sascha Himmelsbach ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fachhochschule Offenburg im Programm Solarthermie-2000