



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

**Förderprogramm des BMU zu Forschung und Entwicklung im Bereich
Niedertemperatur-Solarthermie**

**Solarthermie2000plus: Wissenschaftlich-technische Begleitung von
Solaranlagen im Südwesten Deutschlands**

FKZ: 0329601P

Projektpartner: Hochschule Offenburg - Hochschule für Technik,
Wirtschaft und Medien

Zuwendungssumme: 510.446.78 EUR

Laufzeit: 01.08.2006 – 31.03.2012

Für den Inhalt der Projektbeschreibung ist der Projektnehmer verantwortlich.



Ergebnisse des Langzeitmonitorings von solarthermischen Großanlagen durch die Hochschule Offenburg in Südwestdeutschland

Wissenschaftlich-technische Begleitung

Im Rahmen des 1993 gestarteten Förderkonzepts Solarthermie-2000, Teilprogramm 2 und des Folgeprogramms Solarthermie2000plus wurden in ganz Deutschland über 70 solare Großanlagen errichtet. Eine der letzten zur solaren Klimatisierung wurde im April 2011 in Rottweil errichtet. Solarthermie2000plus wurde Ende 2011 endgültig abgeschlossen, sodass keine Mittel für Neuanlagen mehr unter diesem Förderkonzept beantragt werden können. Charakteristisch für diese Anlagen ist deren Kollektorfeldgröße von mindestens 100 m². Am Beispiel dieser Demonstrationsanlagen soll die technische und wirtschaftliche Einsatztauglichkeit aktiver thermischer Solarsysteme demonstriert, deren Technik weiterentwickelt und die Systemschaltungen und -dimensionierung standardisiert werden.

In einem wissenschaftlich-technischen Begleitprogramm werden die Solaranlagen von der Idee über die Realisierung bis hin zu einem mehrjährigen Betrieb von einer unabhängigen Stelle betreut. Für die Begleitung der Demonstrationsanlagen in Südwestdeutschland ist seit 1999 die Hochschule Offenburg zuständig.

Deren Hauptaufgaben sind:

- Eignungsprüfung von Objekten zur Errichtung thermischer Solargroßanlagen,
- Unterstützung der Projektbeteiligten bei der Anlagenplanung, -ausschreibung und -ausführung,
- Konzeption und Installation der Messtechnik,
- mehrjährige Messdatenerfassung und -auswertung,
- Überwachung und Beurteilung des Anlagenbetriebs,
- Störfallanalyse und Optimierungsvorschläge,
- Know-how Transfer.

Von der Hochschule Offenburg werden aktuell zehn Solargroßanlagen begleitet. Fünf dieser Anlagen werden ausschließlich zur Trinkwassererwärmung eingesetzt. Bei einer Anlage wird zusätzlich die Erwärmung des Schwimmbadwassers unterstützt. Von den vier jüngsten Anlagen, die bereits in Solarthermie2000plus gefördert werden, speist eine die Solarwärme in ein Nahwärmenetz und die drei anderen in das Heizungssystem des Firmengeländes bzw. Schulgebäudes ein. Die Wärme wird zur Raumheizung und Kältegewinnung genutzt. Die neueste der genannten Anlagen in Rottweil wurde 2011 fertiggestellt, sodass noch keine Messdaten für ein ganzes Jahr vorliegen.

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse und Erfahrungen aus der wissenschaftlich-technischen Begleitung der in **Abb. 1** gezeigten neun Solargroßanlagen zusammengefasst.

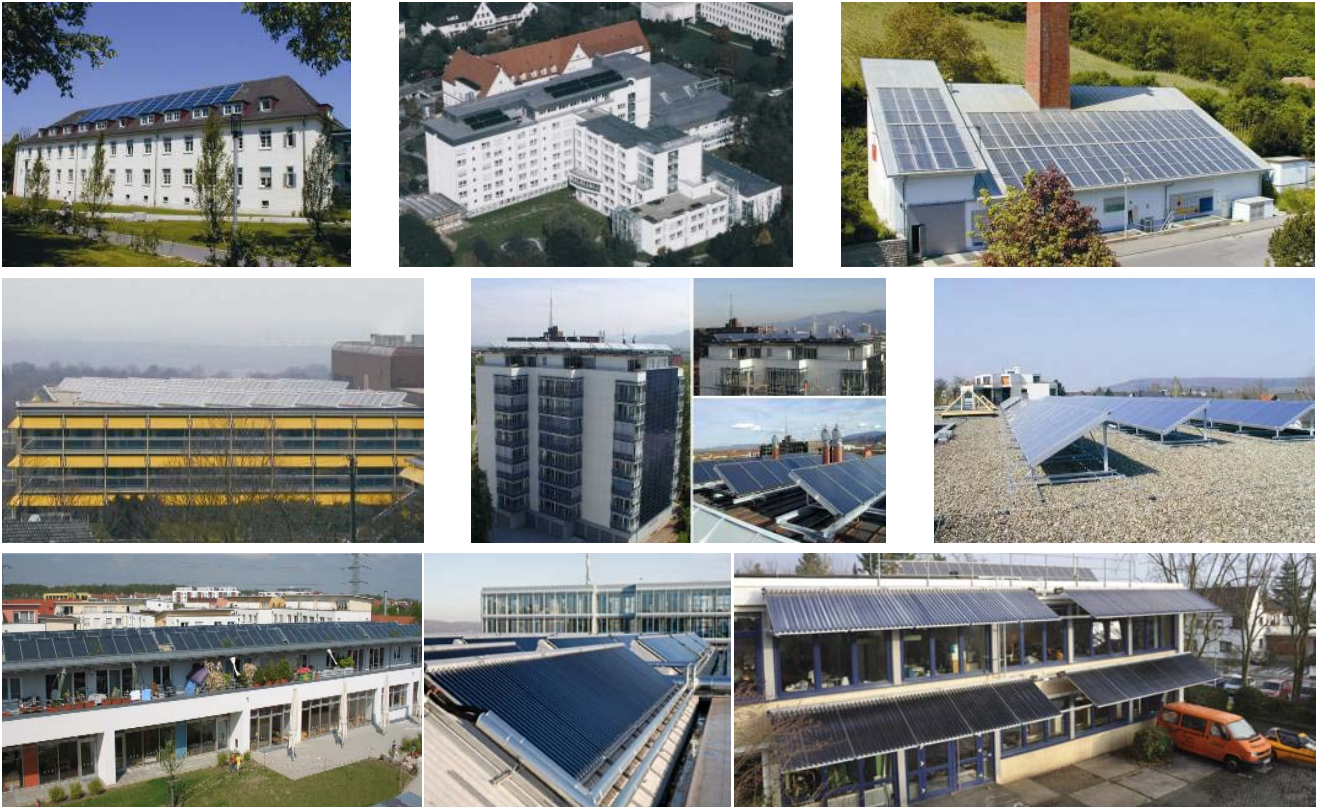


Abb. 1: von links oben nach rechts unten: Studentendorf Vauban (143 m²), Kreiskrankenhaus Mindelheim (120 m²), Hegau-Klinikum Singen (264 m²), Stadtklinik Baden-Baden (276 m²); Wohngebäude Wilmersdorfer Str. (228 m²), Albtherme Waldbronn (226 m²), Nahwärme Holzgerlingen (249 m²), solare Klimatisierung Esslingen (1330 m²), Technikerschule Butzbach (66 m², Foto ZfS).

Spezifische Solare Nutzwärme

2011 betrug die solare Nutzwärme von acht der zehn begleiteten Solaranlagen insgesamt ca. 1.072 MWh, was bezogen auf deren gesamte Aperturfläche von 2641 m² einer mittleren spezifischen solaren Nutzwärme von 406 kWh/(m²a) entspricht.

In **Abb. 2** sind die Jahressummen der gemessenen Nutzwärme der einzelnen Anlagen bezogen auf die Kollektorfläche dargestellt. Zum Vergleich ist auch die Nutzwärme dargestellt, die vor der Anlageninstallation auf Basis von Simulationen prognostiziert wurde. Es zeigen sich z. T. starke Ertragsunterschiede zwischen den einzelnen Anlagen, aber auch Schwankungen in den Jahreserträgen der jeweiligen Anlage. Dies liegt darin begründet, dass die Nutzwärme einer Solaranlage von vielen Faktoren bestimmt wird: Wetter, Warmwasserverbrauch, Regelkonzept, Betriebsweise der konventionellen Technik, Störungen und Ausfälle des Solarsystems etc.

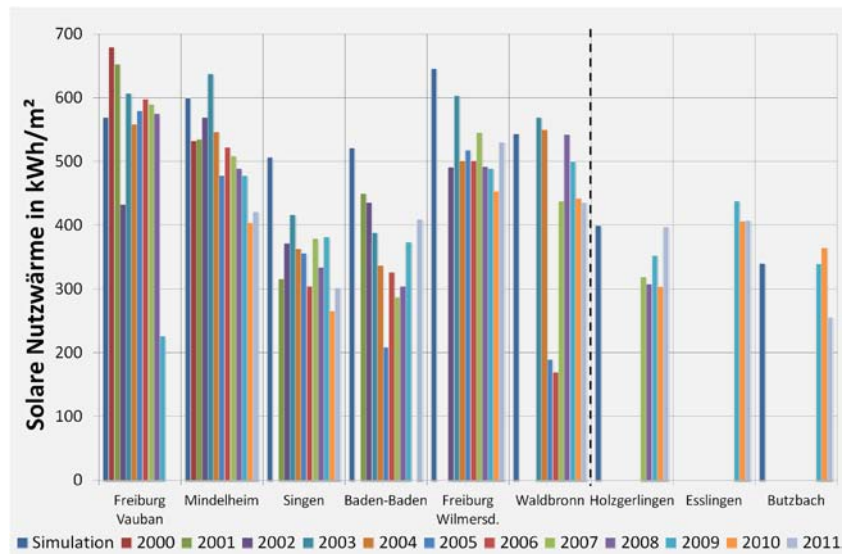


Abb. 2: Die Solare Nutzwärme ist die Energie, die von der Solaranlage an das Trinkwasser bzw. das Wärmenetz abgegeben wird.

In Freiburg-Vauban wurden 2002 und 2009 die für diese Anlage niedrigsten solaren Erträge erzielt. Die Anlage stand 2002, während des Umbaus längere Zeit still. Dadurch konnte nur ein niedriger solarer Jahresertrag realisiert werden. In den darauf folgenden Jahren erreichten die solaren Erträge nicht mehr das Niveau der Vorjahre, da zwar die Entladeperformance durch eine bessere Zapferkennung deutlich verbessert wurde, aber der Wärmeübertrager auf der Beladeseite eine geringere Leistung als der vorherige hat. 2009 kam es zu längerfristigen Störungen der Regelung und zu einem Komplettausfall der Anlage infolge von Undichtigkeiten im Kollektorfeld. Ab 2010 liegen für Vauban leider keine Messdaten vor.

In Singen fiel im ersten Messjahr der solare Ertrag niedriger aus als der in der Energiegarantie angegebene Wert. Die Solaranlage wurde daraufhin umgebaut. Hierbei wurde insbesondere die Verschaltung der Trinkwasserspeicher von vier parallel geschalteten Behältern auf eine paarweise Reihenschaltung geändert. Seit her sind die Speicher aufgeteilt in zwei Vorwärm- und zwei Bereitschaftsspeicher. Außerdem wurden Optimierungsmaßnahmen an Regelung und Dämmung der Solarspeicher durchgeführt. Hierdurch konnte in den Jahren 2002 bis 2005 deutlich mehr solare Nutzwärme geerntet werden. In 2006 und 2008 fiel der Ertrag durch diverse Störungen wieder deutlich geringer aus. Diese Störungen traten im jeweiligen Folgejahr nicht auf, sodass der Ertrag wieder gesteigert werden konnte. 2010 fällt hier der solare Ertrag vor allem wegen einer längerfristigen Störung niedriger aus. Außerdem trägt hier die geringe solare Einstrahlung und der reduzierte Warmwasserverbrauch zur Minderung des solaren Ertrags bei.

In Baden-Baden nahm der Solarertrag seit Inbetriebnahme bis 2005 stetig ab. Durch Verkalkungen im Trinkwasserwärmeübertrager konnte die Wärme immer schlechter an das Trinkwasser abgegeben werden. Erst durch einen Umbau der Anlage 2006 konnte eine deutliche Verringerung der Verkalkung und damit eine Erhöhung der Solarerträge erzielt werden. 2007 und 2008 konnte wieder nur weniger Ertrag erzielt werden, da der Warmwasserverbrauch deutlich reduziert war.

2009 war der Verbrauch wieder auf dem vorherigen Niveau, außerdem konnte durch weitere Reduzierung der Verkalkungsproblematik der Ertrag wieder gesteigert werden. Für 2010 liegen wegen einer Störung der Messwerterfassung keine Messdaten vor. In Waldbronn kam es in den Jahren 2005 und 2006 durch Probleme mit der Dichtigkeit der Wärmeübertrager zu einer längeren Stillstandsphase. Durch Austausch der Wärmeübertrager und Wiedereinbetriebnahme der Beckenwasservorwärmung konnten 2007 wieder deutlich höhere Solarerträge erzielt werden. In Mindelheim und Freiburg Wilmersdorfer Straße gab es während der

gesamten Laufzeit nur wenige Störungen, die ohne große Auswirkungen auf den Ertrag blieben. Der Rückgang der Erträge bei diesen beiden Systemen geht einher mit einer Reduzierung des Warmwasserverbrauchs und ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen.

Insgesamt konnten in Freiburg-Vauban mit durchschnittlich 587 kWh/m² die höchsten spezifischen solaren Erträge erzielt werden. Bei den meisten Anlagen wurde 2003 der höchste Ertrag realisiert.

Die Messergebnisse von Holzgerlingen, Esslingen und Butzbach sind getrennt zu betrachten, da es sich hier um ein Nahwärmenetz bzw. solare Klimatisierungsanlagen handelt, deren Erträge nur bedingt mit denen der anderen Solaranlagen vergleichbar sind.

Spezifische solare Einstrahlung in Kollektorebene

Die Solare Einstrahlung (**Abb. 3**) lag über alle Jahre und Anlagen zwischen 1140 und 1550 kWh/(m².a). Auffällig ist, dass bei allen Anlagen im Jahr 2003 gefolgt von 2011 die höchsten Strahlungssummen gemessen wurden. In 2010 wurde bei den meisten Anlagen die niedrigste solare Einstrahlung gemessen. Außerdem zeigt sich, dass in Singen regelmäßig die niedrigsten Werte erzielt werden, wobei die anderen Anlagen fast immer auf gleichem Niveau liegen. In Singen weicht die Ausrichtung des Kollektorfeldes 52 ° von der Südrichtung ab. Dennoch ist auch hier die Einstrahlung nur geringfügig niedriger als bei den anderen Anlagen.

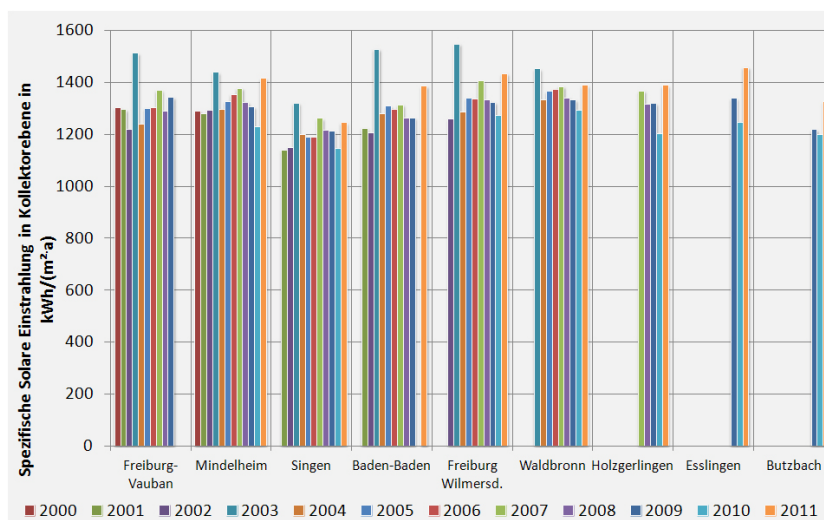


Abb. 3: Die solare Einstrahlung gibt die aufsummierte Strahlungsmenge auf einen Quadratmeter Kollektorfläche innerhalb eines Jahres an.

Solarer Systemnutzungsgrad

Der Jahres-Systemnutzungsgrad lag bei den Trinkwasseranlagen im Normalbetrieb im Bereich 30 – 52 %. Auf Grund von Funktionsstörungen und Reduzierung des Wasserverbrauchs kam es auch zu Systemnutzungsgraden unter 30 %.

Die mittleren jährlichen Systemnutzungsgrade der einzelnen Solaranlagen sind in **Abb. 4** dargestellt. Ebenfalls abgebildet sind die prognostizierten Systemnutzungsgrade, ermittelt auf Basis von Simulationsrechnungen. Bei Esslingen wurde der prognostizierte Nutzungsgrad nicht dargestellt, da sich dieser auf den Nutzungsgrad im Kollektorkreis bezieht und deshalb

nicht vergleichbar ist. Auffällig sind hier die im Vergleich zu den anderen Anlagen größtenteils hohen Nutzungsgrade in Freiburg-Vauban. Diese sind auf die hohe Anlagenauslastung zurückzuführen (vgl. **Abb. 5**). In Holzgerlingen, Esslingen und Butzbach wurden regelmäßig Nutzungsgrade unter 30 % oder knapp darüber realisiert, was größtenteils auf das höhere Temperaturniveau der Anlagen zurückzuführen ist.

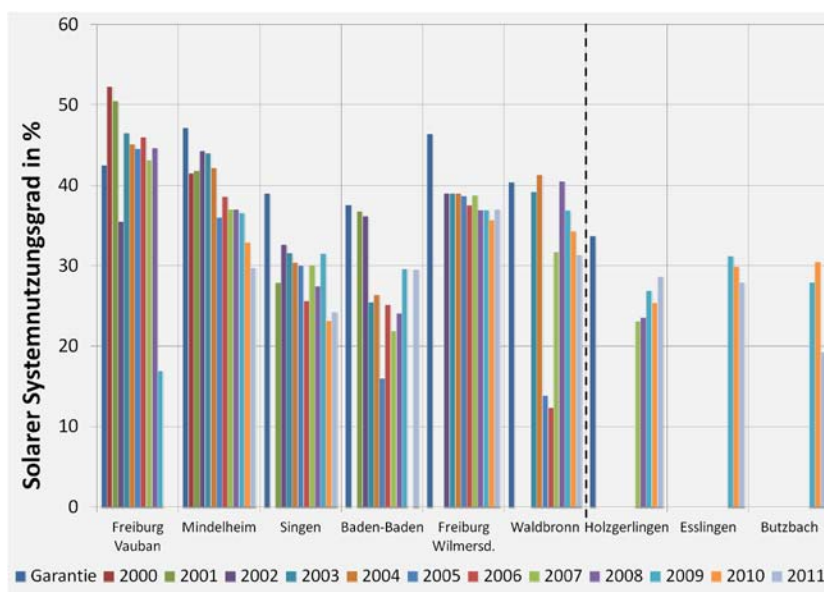


Abb. 4: Der Systemnutzungsgrad gibt an, welcher Anteil der auf die Kollektoren einestrahlten Energie in Nutzwärme umgewandelt wird.

Auslastung

In **Abb. 5** ist die mittlere Auslastung der Solarsysteme im Sommer und deren Relation zum Systemnutzungsgrad dargestellt. Eine höhere Auslastung bedingt i.d.R. einen höheren Nutzungsgrad. Die Auslastung liegt weitestgehend im Bereich $40 \text{ l}/(\text{m}^2\text{d}) - 70 \text{ l}/(\text{m}^2\text{d})$. Ausnahme ist das Studentendorf Freiburg-Vauban. Dort erhöhte sich wegen höherer Bewohnerzahlen im Vergleich zur Planungsphase der Warmwasserverbrauch und damit die Auslastung erheblich. Holzgerlingen, Esslingen und Butzbach können bezüglich Auslastung nicht bewertet werden, da die Wärme nicht nur zur Warmwasserbereitung eingesetzt wird. Insgesamt wird bestätigt, dass der Systemnutzungsgrad mit der Auslastung abnimmt.

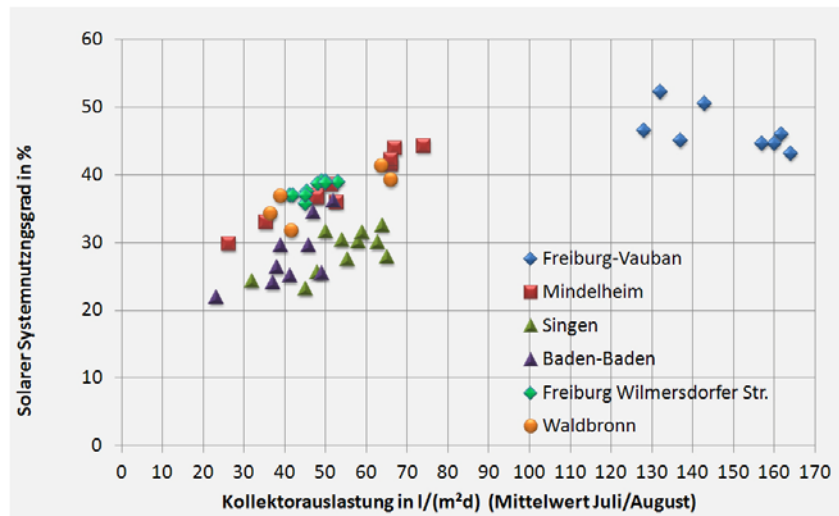


Abb. 5: Die Auslastung gibt an, wie viel Trinkwasser (60°C) täglich pro Quadratmeter Kollektorfläche verbraucht wird.

Solarer Deckungsanteil

In **Abb. 6** ist der solare Zapfdeckungsanteil an der Erwärmung des gezapften Warmwassers bzw. der ans Nahwärmenetz bzw. Heizungssystem abgegebenen Wärmemenge dargestellt. Dieser liegt meist im Bereich von $30 - 40\%$, was charakteristisch für Solaranlagen ist, die als Vorwärmssysteme konzipiert sind. Ein Ausreißer nach unten unter den Trinkwasseranlagen ist die Solaranlage im Studentendorf Freiburg-Vauban, wegen ihrer in Relation zum Warmwasserverbrauch kleinen Kollektorfläche fallen die Deckungsanteile sehr gering aus. Auch in Holzgerlingen und Esslingen fällt im Vergleich zu den anderen Anlagen der Deckungsanteil deutlich niedriger aus. Hier konnten die Kollektorfelder nicht größer ausgelegt werden, da nicht mehr geeignete Dachfläche zur Verfügung stand. Die Anlage Butzbach liefert als kleinste Anlage unter den solaren Klimatisierungssystemen den höchsten Deckungsanteil, da hier die Größe des Kollektorfeldes entsprechend der Empfehlung von ca. $3 \text{ m}^2/\text{kW}$ -Kälteleistung ausgelegt werden konnte. Außerdem werden die Kältemaschinen solar autark betrieben.

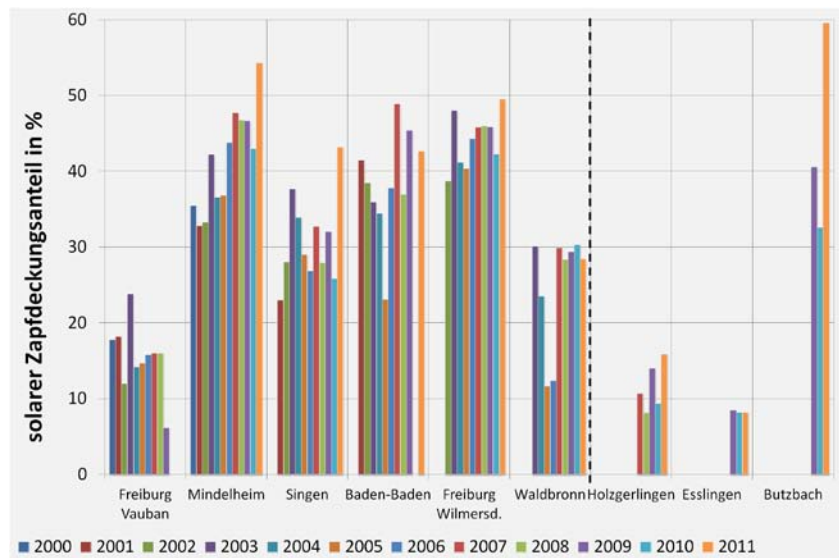


Abb. 6: Der solare Deckungsanteil ist der Anteil der solaren Nutzwärme am Wärmebedarf für die Erwärmung des Wassers.

Kosten

Die mittleren Investitionskosten für Planung und Errichtung der Solarsysteme lagen bei 681 Euro pro m² Kollektorfläche (inkl. MwSt.). In **Abb. 7** sind für sieben Anlagen die spezifischen Kosten pro m² Kollektorfläche dargestellt, unterteilt in Einzelkosten der Systemkomponenten und der Planung. Dabei zeigt sich eine große Bandbreite sowohl bei den Gesamtinvestitionskosten als auch bei den Kosten der Komponenten. Hauptursache dafür sind die unterschiedlichen Installationsbedingungen. Dies sind zum Beispiel die Art der Kollektormontage (Flach- oder Schrägdach/ In- oder Aufdach) oder die Verwendung

bereits vorhandener Komponenten (z. B. Wasserspeicher). Die Anlage mit den geringsten spezifischen Kosten ist Holzgerlingen. Dies ist vor allem auf die, im Vergleich zum Trinkwassersystem weniger aufwendige Anbindung an das Nahwärmenetz zurückzuführen. Die höchsten spezifischen Kosten entstanden in Freiburg Wilmersdorfer Straße. Hier schlägt vor allem die aufwendige Verrohrung und Kollektoraufständigung zu Buche. Da das Kollektorfeld auf zwei Hochhausdächer verteilt werden musste, waren neben einer erdverlegten Leitung auch zwei Steigleitungen notwendig.

Abb. 8 zeigt die mittleren solaren Nutzwärmekosten und zusätzlich die minimalen Nutzwärmekosten der Solarsysteme, die mit den Anlagen erreicht wurden. Hier konnten in Freiburg-Vauban die geringsten solaren Wärmekosten erzielt werden, was auf die sehr hohe Auslastung zurückzuführen ist. Die höchsten Wärmekosten wurden in Holzgerlingen erzielt, was auf den, im Vergleich zu Trinkwasseranlagen, niedrigen solaren Ertrag zurückzuführen ist.

Für die drei solaren Klimatisierungssysteme liegen leider keine Daten zu den Kosten vor.

Zusammenfassung und Fazit

Die gemessenen Anlagenenerträge entsprechen in etwa den prognostizierten Werten, was dadurch dokumentiert wird, dass alle bisher nachgerechneten Anlagen die Energiegarantie erfüllt haben. Dazu bedurfte es bei jeder Anlage eines mehr oder weniger langen Probetriebes mit entsprechenden Optimierungsmaßnahmen. Ohne eine intensive Vermessung und Beobachtung der Solarsysteme hätten viele Mängel nicht festgestellt werden können, was zwangsläufig zu einer reduzierten Funktionsfähigkeit und teilweise erheblich geringeren Anlagenenerträgen geführt hätte. Mit Solargroßanlagen zur Brauchwassererwärmung können Nutzwärmekosten erreicht werden, die eine künftige wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit zu der konventionellen Wärmeerzeugung in Aussicht stellen.

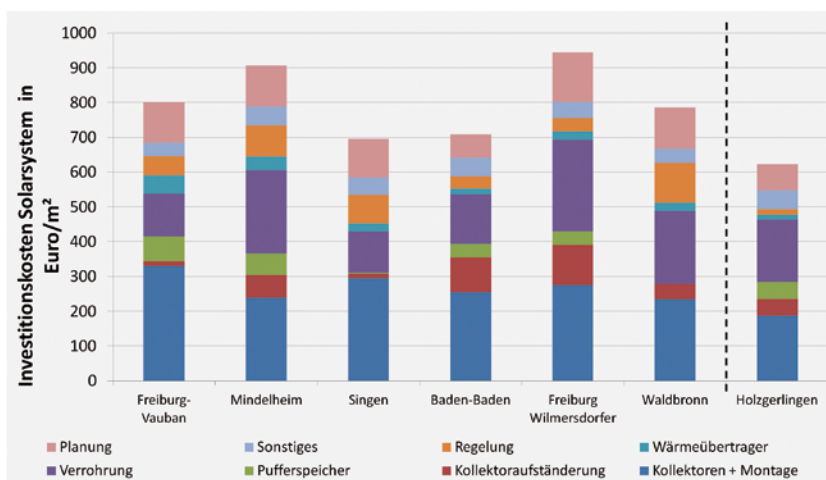


Abb. 7: Die Investitionskosten geben die Verteilung der Kosten der einzelnen Anlagenteile und der Planung wieder.

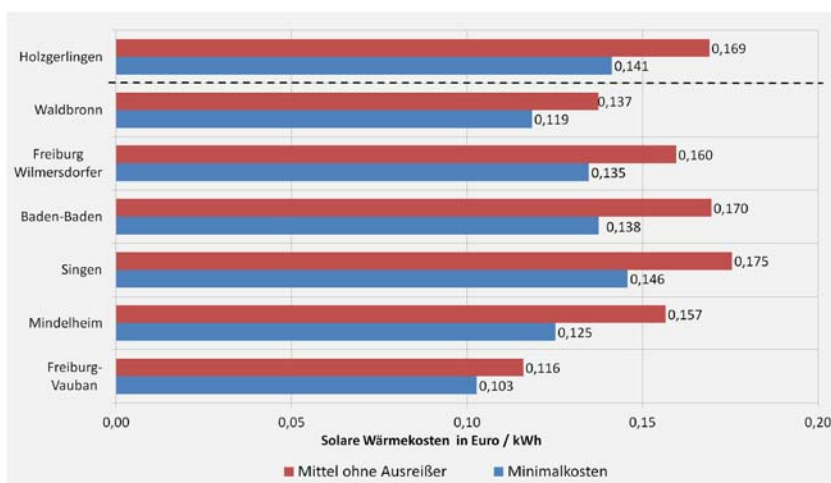


Abb. 8: Die solaren Nutzwärmekosten geben den Preis pro kWh Nutzwärme an. Sie werden berechnet aus dem Quotienten der Systemkosten (Investitionskosten für die Planung und Errichtung des Solarsystems und die Kapitalkosten bei 6 % Zins und einer Anlagenlebensdauer von 20 Jahren) und dem Jahresertrag des Solarsystems.



Nicht außer Acht lassen darf man den Beitrag der zehn begleiteten Solarsysteme zum Umweltschutz: Durch deren Betrieb können jährlich etwa 150.000 l Heizöl bzw. 150.000 m³ Erdgas eingespart werden, was gleichbedeutend mit der Vermeidung von ca. 300 t an CO₂ ist.

Solargroßanlagen zur Trinkwassererwärmung sind inzwischen weitestgehend standardisiert. Auch im Bereich der solaren Klimatisierung konnten umfangreiche Erkenntnisse zur Anlagenkonfiguration und Dimensionierung gewonnen werden, die zur Standardisierung der Systeme beitragen können. Durch die Kombination von Solarsystemen zur Trinkwasserbereitung und Heizungsunterstützung mit der solaren Klimatisierung können die Solarsysteme größer dimensioniert werden und damit höhere Deckungsanteile realisiert werden, ohne die Gefahr häufiger Stagnation im Sommer. Mit den gewonnenen Erkenntnissen wurde die Basis für einen effektiven Betrieb solcher Solarsysteme geschaffen.

Hochschule Offenburg, Badstraße 24, 77652 Offenburg, Tel.: 0781 205 294, E-Mail: bollin@fh-offenburg.de,
www.fgnet.hs-offenburg.de.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 032 9601 P gefördert.