



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 – 31.12.2011

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 ca. 80 solare Großanlagen errichtet. Eine der letzten zur solaren Klimatisierung befindet sich gerade in Rottweil in Bau. Solarthermie2000plus wird 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 neun Solargroßanlagen begleitet. Fünf dieser Anlagen werden ausschließlich zur Trinkwassererwärmung eingesetzt. Bei einer Anlage wird zusätzlich die Erwärmung des Schwimmbadwassers unterstützt. Von den drei jüngsten Anlagen, die bereits in Solarthermie2000plus gefördert werden, speist eine die Solarwärme in ein Nahwärmenetz und die beiden anderen in das Heizungssystem des Firmengeländes. Die Wärme wird zur Raumheizung und Kältegewinnung genutzt. Die neueste der genannten Anlagen in Rottweil befindet sich aktuell im Bau, sodass noch keine Messdaten vorliegen.

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



Abb. 1: obere Zeile v. l. n. r.: Studentendorf Vauban (143 m²), Kreiskrankenhaus Mindelheim (120 m²), Hegau-Klinikum Singen (264 m²), Stadtklinik Baden-Baden (276 m²); untere Zeile v.l.n.r.: Wohngebäude Wilmersdorfer Str. (228 m²), Albtherme Waldbronn (226 m²), Nahwärme Holzgerlingen (249 m²), solare Klimatisierung Esslingen (1330 m²).

Solare Nutzwärme

In 2010 betrug die solare Nutzwärme von sechs der acht begleiteten Solaranlagen insgesamt ca. 936 MWh, was bezogen auf deren gesamte Kollektorfläche von 2.305 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.

In Freiburg-Vauban wurden in 2002 und 2009 die für diese Anlage niedrigsten solaren Erträge erzielt. Die Anlage stand in 2002, während des Einbaus von Kompaktstationen im Rahmen eines Forschungsprojektes des Fraunhofer ISE, 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 einerseits die Entladeperformanz durch eine bessere Zapferkennung deutlich verbessert wurde, andererseits aber der Wärmeübertrager auf der Beladeseite eine geringere Leistung als der vorherige hat. In 2009 kam es zu längerfristigen Störungen der Regelung und zu einem Komplettausfall der Anlage infolge von Undichtigkeiten im Kollektorfeld. Für 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 2001 umgebaut. Hierbei wurde insbesondere die Verschaltung der Trinkwasserspeicher von vier parallel geschalteten Behältern auf eine paarweise Reihenschaltung geändert. Seither sind die Speicher aufgeteilt in zwei Vorwärm- und zwei Bereitschaftsspeicher, die von der Nachheizung auf die Solltemperatur hochgeheizt werden. 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. In 2010 fällt hier der solare Ertrag vor allem wegen einer längerfristigen Störung niedriger aus. Außerdem trägt hier die im Vergleich zu den anderen Jahren geringe solaren Einstrahlung und der etwas reduzierte Warmwasserverbrauchs 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. Regelmäßige Spülungen mit Zitronensäure brachten kurzzeitige Verbesserung, konnten aber die stetige Verschlechterung der Übertragungsleistung nicht verhindern. Erst durch einen Umbau der Anlage in 2006 konnte eine deutliche Verringerung der Verkalkung und damit eine Erhöhung der Solarerträge erzielt werden. In 2007 und 2008 konnte wieder nur weniger Ertrag erzielt werden, da der Warmwasserverbrauch aufgrund von Umstrukturierungen deutlich reduziert war. In 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 für das gesamte Jahr vor sodass auf die Darstellung verzichtet wird.

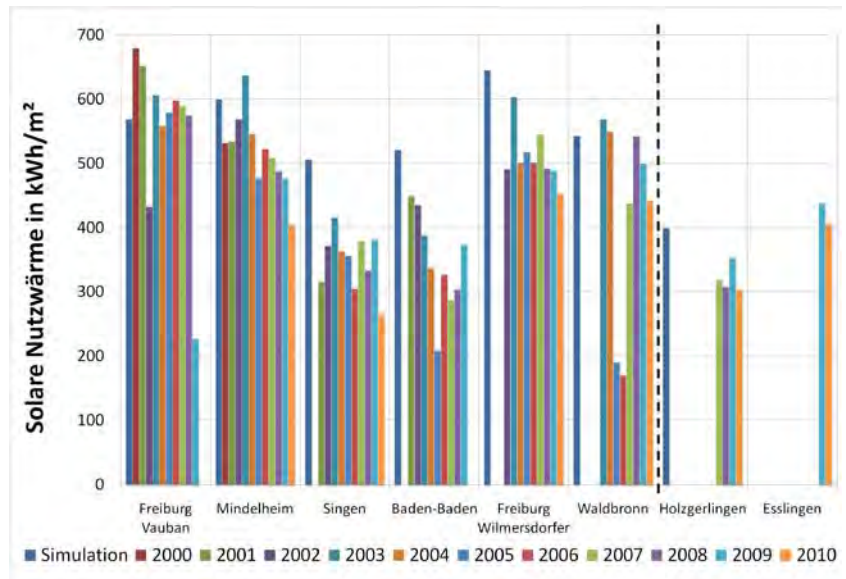


Abb. 2: Die Solare Nutzwärme ist die Energie, die von der Solaranlage an das Trinkwasser bzw. das Wärmenetz abgegeben wird.

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, Wiederinbetriebnahme der Beckenwasservorwärmung und Optimierungsmaßnahmen an der Regelung der Beckenwassernachspeisung und der Duschwassererwärmung konnten in 2007 bis 2010 wieder höhere Erträge erzielt werden, die wieder annähernd auf dem Niveau der ersten beiden Messjahre liegen. In 2010 macht sich auch in Waldbronn die geringe Einstrahlung dieses Jahres deutlich bemerkbar.

In Mindelheim und Freiburg Wilmersdorfer Straße gab es während der gesamten Laufzeit nur wenige Störungen, die ohne große Auswirkungen auf den Ertrag blieben. Tendenziell nimmt der solare Ertrag bei beiden Anlagen etwas ab, was zumindest zum Teil auf die Reduzierung des Warmwasserverbrauchs bei beiden Objekten zurückzuführen ist und sich auch im Systemnutzungsgrad zeigt.

Insgesamt konnten in Freiburg-Vauban mit durchschnittlich 550 kWh/m² die höchsten spezifischen solaren Erträge erzielt werden. Bei den meisten Anlagen konnten in 2003 aufgrund der sehr hohen Einstrahlung die höchsten Erträge realisiert werden. Dem gegenüber steht 2010 wo wegen der sehr geringen Einstrahlung nur sehr niedrige solare Erträge realisiert werden konnten. Die Messergebnisse von Holzgerlingen und Esslingen sind getrennt zu betrachten, da es sich hier um ein Nahwärmenetz bzw. eine solare Klimatisierungsanlage handelt, deren Erträge nur bedingt mit denen der Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung vergleichbar sind (z. B. höheres Temperaturniveau). Die Erträge liegen bei Holzgerlingen durch erhöhte Netzrücklauftemperaturen, Störungen in der Regelung und eine ungleichmäßige Durchströmung des Kollektorfeldes im Vergleich zu den meisten Trinkwasseranlagen deutlich niedriger.

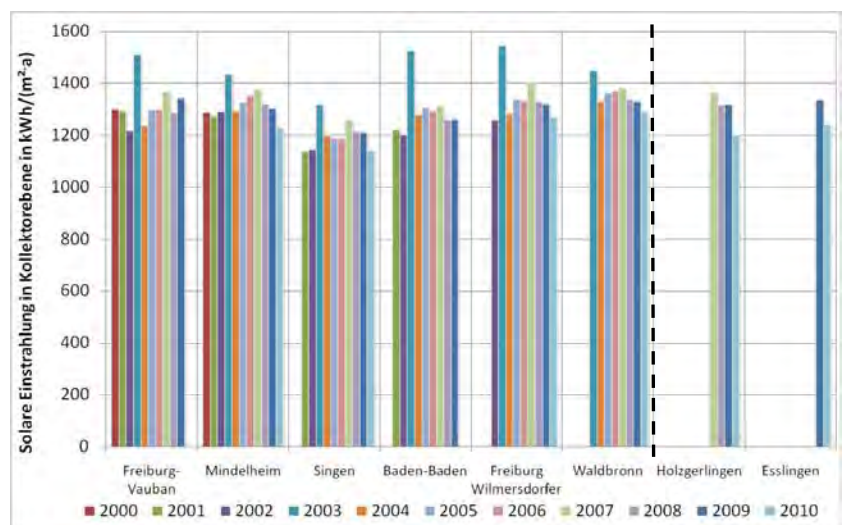


Abb. 3: Die solare Einstrahlung gibt die aufsummierte Strahlungsmenge auf einen Quadratmeter Kollektorfläche innerhalb eines Jahres an.

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 die höchsten Strahlungsleistungen erzielt wurden. In 2010 wurde bei den meisten Anlagen die niedrigste solare Einstrahlung gemessen. Außerdem zeigt sich, dass in Singen regelmäßig die niedrigsten Einstrahlungssummen erzielt werden, wobei die anderen Anlagen fast immer auf gleichem Niveau liegen. In Singen weicht die Ausrichtung des Kollektorfeldes mit 52 ° am deutlichsten von der Südrichtung ab. Dennoch ist auch hier die Einstrahlung nur geringfügig niedriger als bei den anderen Anlagen.

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 %. In Holzgerlingen

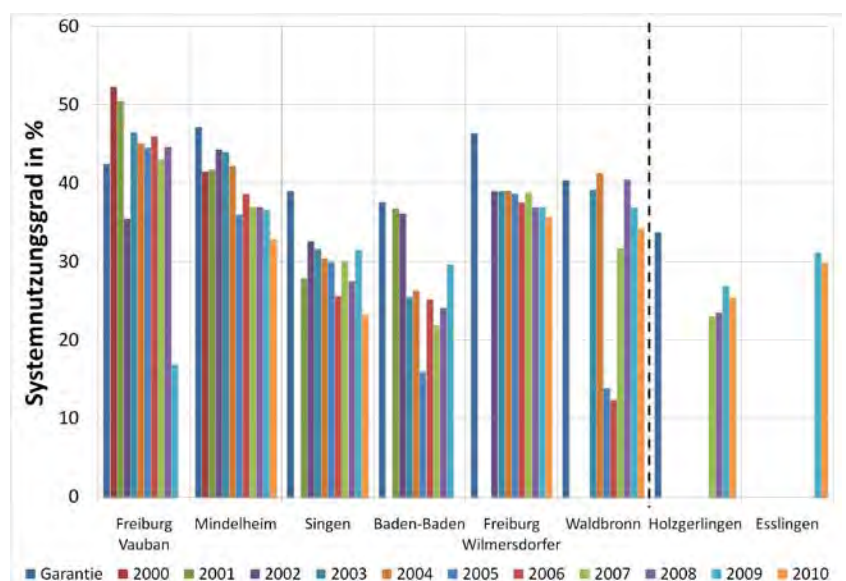


Abb. 4: Der Systemnutzungsgrad gibt an, welcher Anteil der auf die Kollektoren eingestrahlten Energie in Nutzwärme umgewandelt wird.

und Esslingen wurden regelmäßig Nutzungsgrade unter 30 % oder knapp darüber realisiert, was größtenteils auf das deutlich höhere Temperaturniveau der Anlagen zurückzuführen ist, was in Holzgerlingen auf die bereits genannten Probleme mit hohen Rücklauftemperaturen aus dem Nahwärmenetz zurückzuführen ist.

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. 6**)

Warmwasserverbrauch

Abb. 5 zeigt den gemessenen Warmwasserverbrauch, dargestellt als Tagesverbrauch pro Patient, Bewohner bzw. Besucher. Zum Vergleich werden der aus der Jahressumme gemittelte Tagesverbrauch und der mittlere Tagesverbrauch im Sommer (Auslegungsverbrauch) aufgezeigt. Dabei wird deutlich, dass es bei den Wohngebäuden der Wilmersdorfer Straße und der Albtherme Waldbronn eine erhebliche Differenz zwischen Sommer- und Jahresverbrauch gibt (ca. 25 %). Ermittelt man den Auslegungsverbrauch z. B. aus der Jahressumme des Warmwasserverbrauchs, so muss der Sommerverbrauch i.d.R. gegenüber dem Durchschnittsverbrauch reduziert werden.

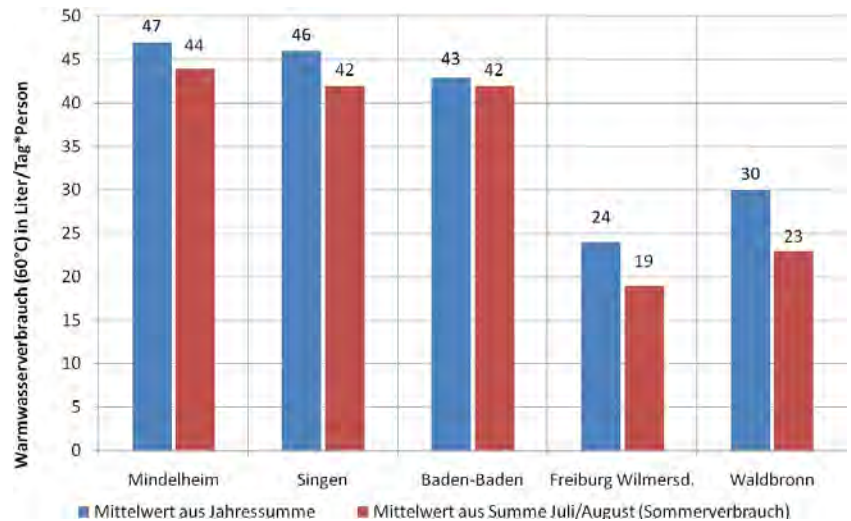


Abb. 5: Der Warmwasserverbrauch sollte vor Beginn der Systemauslegung gemessen werden. Zur Normierung der Verbrauchswerte werden diese auf eine Warmwassertemperatur von 60 °C umgerechnet.

Der Pro-Kopf-Verbrauch im Studentendorf Freiburg-Vauban ist nicht dargestellt, da keine verlässlichen Daten über dessen Belegung vorliegen. Erwähnenswert ist beim Studentendorf der starke Verbrauchsrückgang im Sommer (Semesterferien) um ca. 40 % im Vergleich zum mittleren Jahresverbrauch, was bei der Dimensionierung der Solaranlage unbedingt berücksichtigt werden muss.

Im Nahwärmenetz Holzgerlingen und bei der solaren Klimatisierung Esslingen wird die Wärme neben der Trinkwassererwärmung auch zur Raumheizung oder Kälteerzeugung genutzt, dementsprechend kann hier kein sinnvoller Wert angegeben werden.

Auslastung

In **Abb. 6** 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 – 70 Liter pro Tag und m² Kollektorfläche. Ausnahme ist das Studentendorf Freiburg-Vauban. Dort erhöhte sich wegen höherer Bewohnerzahlen im Vergleich zur Planungsphase der Warmwasserverbrauch und damit die Auslastung erheblich. Holzgerlingen und Esslingen können bezüglich Auslastung nicht bewertet werden, da die Wärme nicht nur zur Warmwasserbereitung eingesetzt wird. Insgesamt wird be-

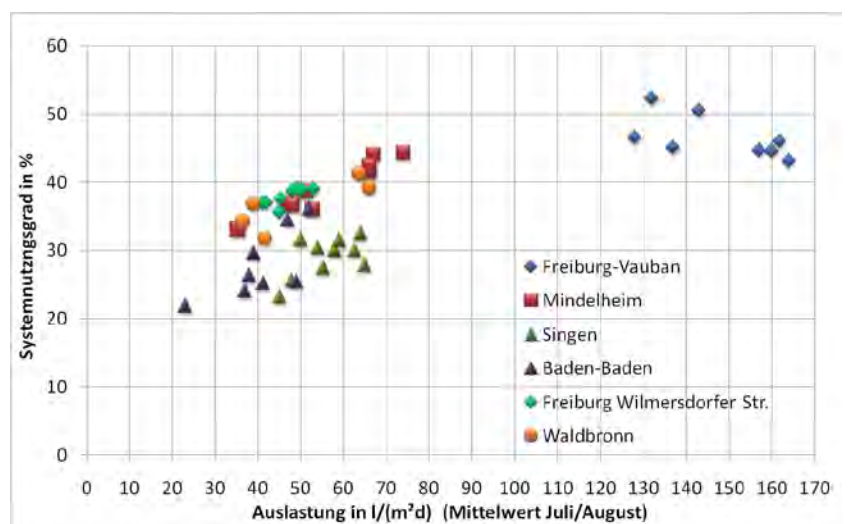


Abb. 6: Die Auslastung gibt an, wie viel Trinkwasser (60°C) täglich pro Quadratmeter Kollektorfläche verbraucht wird.

stätigt, dass der Systemnutzungsgrad mit der Auslastung abnimmt.

Solarer Deckungsanteil

In **Abb. 7** ist der solare Deckungsanteil an der Erwärmung des gezapften Warmwassers bzw. der ans Nahwärmenetz bzw. Heizungssystem abgegebenen Wärmemenge dargestellt. Dieser lag meist im Bereich von 30 – 40 %, was charakteristisch für Solaranlagen ist, die als Vorwärmssysteme konzipiert sind. Ausreißer ist die Solaranlage im Studentendorf Freiburg-Vauban, wegen ihrer in Relation zum Warmwasserverbrauch kleinen Kollektorfläche. 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.

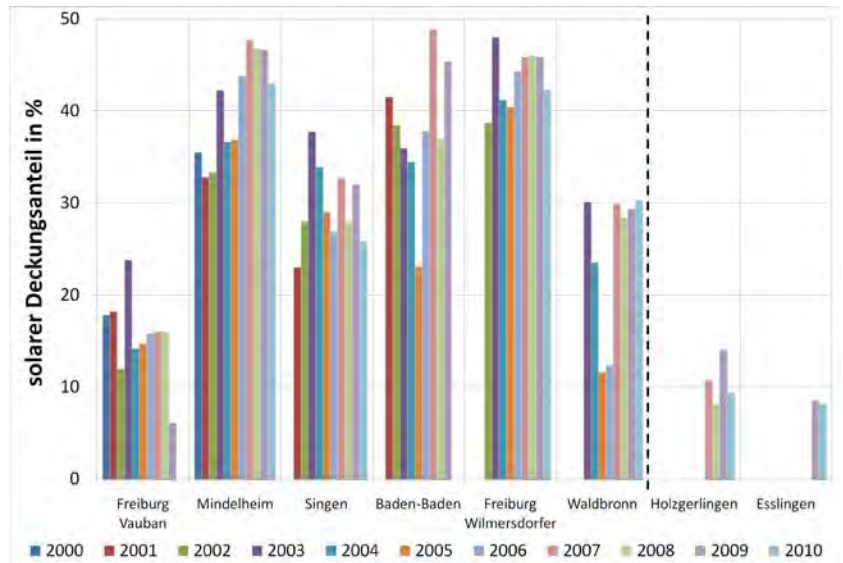


Abb. 7: Der solare Deckungsanteil ist der Anteil der solaren Nutzwärme am Wärmebedarf für die Erwärmung des Wassers.

Kosten

Die mittleren Investitionskosten für Planung und Errichtung der Solarsysteme lagen bei 681 Euro pro m² Kollektorfläche (inkl. MwSt.). In **Abb. 8** sind für jede der 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.

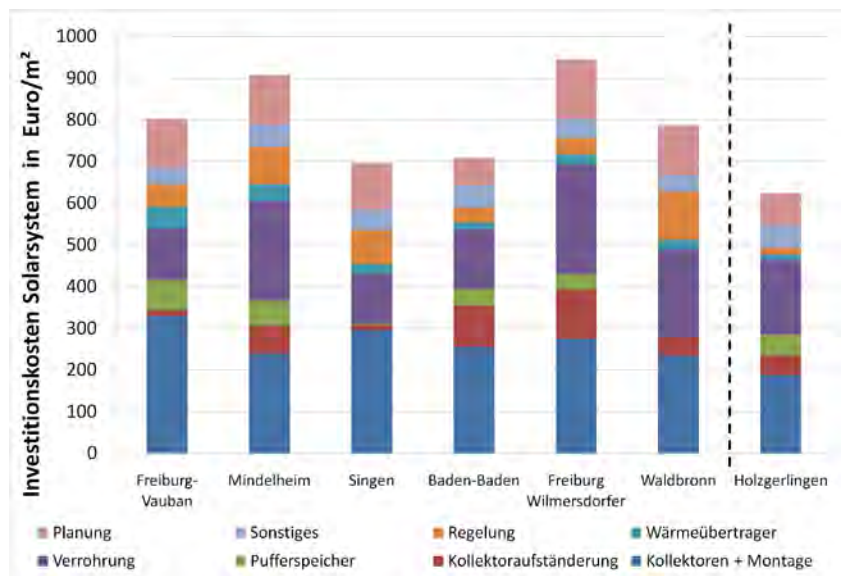


Abb. 8: Die Investitionskosten geben die Verteilung der Kosten der einzelnen Anlagenteile und der Planung wieder.

Die höchsten spezifischen Kosten entstanden in Freiburg Wilmersdorfer Straße. Hier schlägt vor allem die aufwendige Verrohrung und Kollektoraufständerung zu Buche. Da das Kollektorfeld auf zwei Hochhausdächer verteilt werden musste, waren neben einer erdverlegten Leitung auch zwei Steigleitungen notwendig.

Abb. 9 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.

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 Probebetriebs mit entsprechenden Optimierungsmaßnahmen. Ohne eine intensive Vermessung und Beobachtung der Solarsysteme wären viele Mängel nicht festgestellt worden. Die Folgen wären zwangsläufig eine reduzierte Funktionsfähigkeit und teilweise erheblich geringere Anlagenenerträge gewesen. Dies zeigt sich vor allem nach der intensiven Betreuungsphase. Danach im unüberwachten Betrieb werden bei vielen Anlagen auftretende Störungen nur zufällig und spät erkannt. Mit Solargroßanlagen zur Brauchwassererwärmung können Nutzwärmekosten erreicht werden, die eine künftige wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit zu der konventionellen Wärmeerzeugung in Aussicht stellen.

Nicht außer Acht lassen darf man den Beitrag der acht 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-Emissionen ist.

Solargroßanlagen zur reinen Trinkwassererwärmung sind inzwischen weitestgehend standardisiert. Mit den gewonnenen Erkenntnissen wurde die Basis für einen effektiven Betrieb solcher Solarsysteme geschaffen. Im Folgekonzept Solarthermie2000plus wurden Solarsysteme gefördert, deren Wärme auch anderen Verbrauchern als der Trinkwassererwärmung zugeführt wird und deren höherer solarer Deckungsanteil zu einer noch stärkeren Reduzierung der CO₂-Emissionen führt.



Abb. 9: 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.