

Simulationsstudie zur Integration von PV-Modulen und PVT-Kollektoren in ein Solar-Wärmepumpensystem

Glück, C.; Faßnacht T.; Leibfried, U. ¹

Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau (fbta), KIT, Karlsruhe

Englerstraße 7, 76131 Karlsruhe

Tel.: +49 721 608 45867 , Fax: +49 721 608 46092

E-Mail: christian.glueck@kit.edu

¹Consolar Solare Energiesysteme GmbH

Gewerbestr. 7, 79539 Lörrach

Tel.: +49 7621 42228 30 , Fax: +49 7621 42228 31

E-Mail: anfragen@consolar.de

EINLEITUNG

Das Solar-Wärmepumpensystem Solaera [1] der Firma Consolar ist eines der effizientesten solar unterstützten elektrischen Wärmepumpensysteme für Wohngebäude. Das integrierte Systemkonzept verfügt über ein solarthermisches Flachkollektorfeld, das aus eigens dafür entwickelten und angepassten thermischen Solarkollektoren (STL-Kollektoren, Wärmegewinnung solarthermisch und aus der Luft) besteht. Diese können sowohl solarthermisch Wärme gewinnen, als auch - unterstützt durch zuschaltbaren Betrieb eingebauter Lüfter - Niedertemperaturwärme aus der Umgebung aufnehmen, wenn wenig oder keine solare Einstrahlung vorliegt. Die STL-Kollektoren stellen dabei die einzige Wärmequelle für den Verdampfer der Wärmepumpe dar.

Mit dem Ziel, einen möglichst hohen Anteil des Gesamtenergieverbrauchs eines Wohngebäudes (Wärme und Strom) lokal solar zu erzeugen, wird in dem Forschungsprojekt Sol2Heat [2] die Kombination des Solaera-Systems mit PV-Modulen und einem größeren thermischen Speicher untersucht. So kann z. B. im Winter bei guter Einstrahlung (oft auch tiefe Außentemperaturen) von den PV-Modulen produzierter Strom und von STL-Kollektoren erzeugte Niedertemperaturwärme mit hohem Wirkungsgrad in Heizwärme umgewandelt und kurzzeitig gespeichert werden. Diese Art der Speicherung ist deutlich günstiger als die elektrische Speicherung mit Batterien.

Um den Gesamtnutzungsgrad der für ein Kollektorfeld zur Verfügung stehenden Fläche weiter zu steigern, wird im Projekt Sol2Heat auch der Einsatz von PVT-Kollektoren (Photovoltaik und Thermie) zusätzlich oder alternativ zu den angepassten STL-Kollektoren untersucht. PVT-Kollektoren können neben solarer Wärme außerdem exergetisch und primärenergetisch wertvollen Solarstrom erzeugen, der entweder zur Verringerung oder Vermeidung des Netzstrombezugs während des Solaera-Betriebs genutzt, als Haushaltsstrom verbraucht, oder ins öffentliche Netz eingespeist werden kann.

Ziel der vorgestellten Arbeiten ist die Evaluation der Vor- und Nachteile der Integration von PV-Modulen oder photovoltaisch-thermischen (PVT) Solarkollektoren in ein bestehendes oder neu zu installierendes Kollektorsystem für Solaera. Durch die gleichzeitige Nutzung der Einstrahlung zur Gewinnung von Wärme und elektrischem Strom können beide erforderlichen Energieformen zum Betrieb von Solaera bereitgestellt werden.

Neben dem bisher durch spezielle Solarthermiekollektoren (STL-Kollektoren, Wärmegewinnung solarthermisch und aus der Luft) bereitgestellten Wärmebedarf könnte eine Kombination aus STL-Kollektoren und photovoltaischen Modulen zusätzlich einen Teil des elektrischen Strombedarfs von Solaera decken. Andererseits kann es zu einer Flächenkonkurrenz von STL- und PV- oder PVT-Kollektoren kommen.

In dieser Arbeit wurde untersucht, welchen Einfluss diese Flächenkonkurrenz auf die energetische Effizienz eines entsprechenden Gesamtsystems hätte, welche Bedeutung für die

Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems daraus erwächst, und wie sich die Nutzung von zur Verfügung stehender Dachfläche für ein Kollektorfeld optimiert werden kann.

SOLAERA-SYSTEM

Bei Solaera handelt es sich um ein Solarheizsystem mit integrierter Wärmepumpe [1]. Das Solaera-System besteht aus einer elektrischen Wärmepumpe zum Heizen, kombiniert mit einem Latentwärmespeicher bzw. Eisspeicher und einem speziellen thermischen STL-Flachkollektor. Anders als die meisten anderen Wärmepumpensysteme kommt Solaera ohne Erdwärmesonde, Erdreich-Wärmeübertrager oder separates Außenluftmodul aus, da die Umweltwärmegewinnung ausschließlich über die speziell angepassten Kollektoren möglich ist. Die Kollektoren dienen dabei als alleinige Wärmequelle für den Verdampfer der Wärmepumpe des Systems. Die STL-Flachkollektoren sind mit auf der Unterseite des Absorbers angebrachten Lüftern ausgestattet, so dass an strahlungsarmen Tagen über das Kollektorfeld Umweltwärme aus der Luft gewonnen werden kann. In Kombination mit dem Niedertemperatur-Latentwärmespeicher können dadurch strahlungsarme Zeiten überbrückt werden. Bei ausreichender Einstrahlung kann die Wärmebereitstellung für Warmwasser und Raumheizung direkt aus dem Solarkollektorfeld erfolgen.

Abbildung 1 zeigt ein hydraulisches Schema von Solaera. Oben rechts ist der solarthermische STL-Kollektor zu sehen, der sowohl durch Einstrahlung Wärme aus der Umgebung gewinnen kann, als auch aus der Umgebungsluft, was durch den Lüfter links unten im Kollektorschema angedeutet wird.

Über den Kollektorkreis wird die Wärme dem Eisspeicher und Verdampfer zugeführt oder direkt in den Solarkombispeicher eingespeist (Wärme auf höherem Temperaturniveau). Im sog. Energiezentrum befinden sich der Eisspeicher (Mitte der Abbildung) und die Wärmepumpe (darunter). Der Verdampfer der Wärmepumpe ist in Reihe zum Eisspeicher angeschlossen. Der Eisspeicher dient dabei als Energiespeicher für am Tag gewonnene Solarenergie zur Nutzung am Verdampfer der Wärmepumpe in der Nacht sowie als Puffer zur Glättung der Verdampfer Eintrittstemperatur. Der Kondensator kann über den Solarkombispeicher Brauchwarmwasser bereitstellen und das Heizungssystem zur Deckung des Heizwärmebedarfes versorgen.

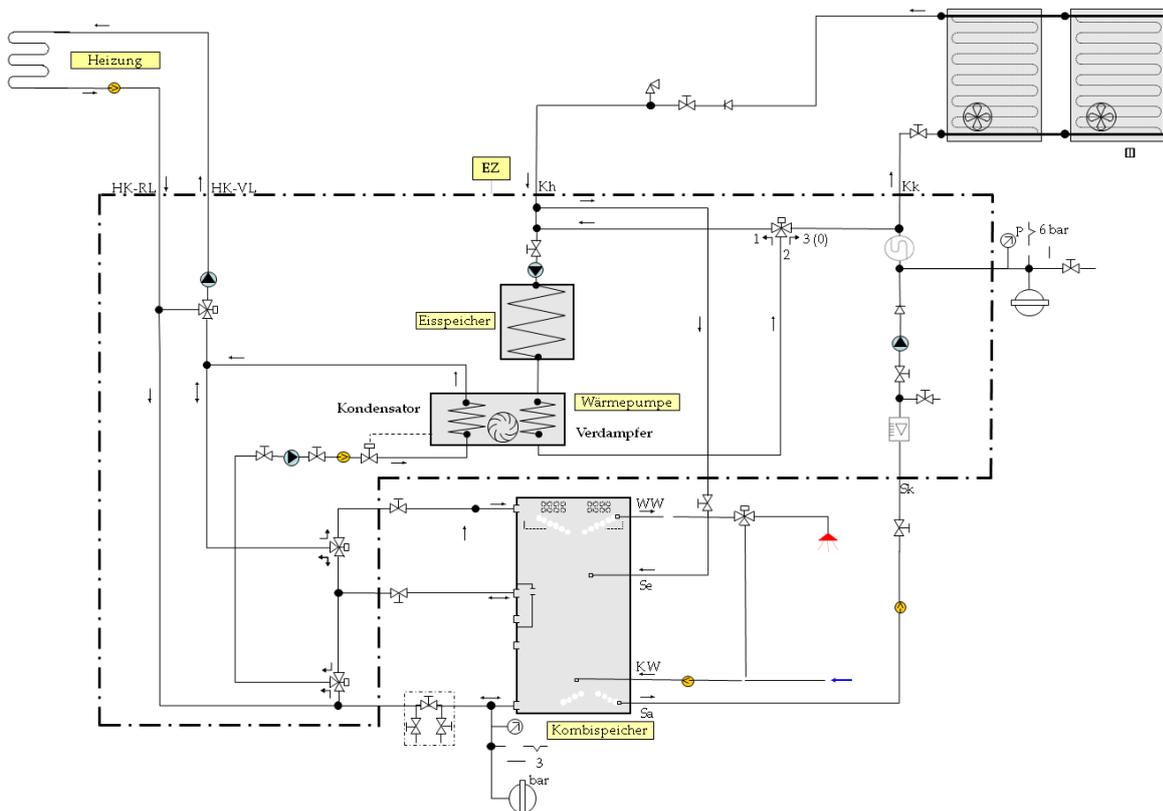


Abbildung 1: Hydraulikschema von Solaera [Quelle: Consolar]

Das Solaera-System ist zur hocheffizienten Wärmeversorgung von Neubauten und sanierten Wohngebäuden konzipiert [6]. Die Effizienz von Solaera wurde in Feldtests [5] nachgewiesen.

KOLLEKTORTYPEN

In dieser Arbeit wurden drei verschiedene Kollektortypen untersucht. Derzeit ins Solaera-System integriert werden spezielle solarthermische Flachkollektoren von Consolar (STL-Kollektoren), die den Ausgangspunkt für eine mögliche Modifikation des Kollektorsystems im Projekt Sol2Heat darstellen.

STL-Kollektor (Solarthermisch + Luft)

Der eingesetzte STL-Kollektor weist die Besonderheit auf, dass durch integrierte Lüfter, die von der Systemregelung ein- oder ausgeschaltet werden können, der Wärmedurchgangskoeffizient der Solarkollektoren signifikant erhöht werden kann. Üblicherweise will man diesen Koeffizienten so gering wie möglich halten, da thermische Solarkollektoren in anderen Systemkonzepten meist oberhalb der Außentemperatur betrieben werden und damit der Wärmeverlust zunähme. Da der STL-Kollektor bei Solaera auch unterhalb der Außentemperatur betrieben wird, erhöht sich hier bei Lüfterbetrieb hingegen die Wärmeaufnahme im Niedertemperaturbereich. Trifft keine Strahlung auf den Kollektor, ist dieser ein Sole-Luft-Wärmeübertrager mit einem Gleichstrom- und einem Gegenstromteil. In der Kollektorkennlinie [7] wird der Wärmedurchgangskoeffizient durch den Koeffizienten a_1 [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] repräsentiert:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot \frac{T_m - T_{\text{amb}}}{G} - a_2 \cdot \frac{(T_m - T_{\text{amb}})^2}{G} \quad (1)$$

Entgegen der üblichen Zielsetzung, den Wärmedurchgangskoeffizienten a_1 so klein wie möglich zu halten, um die konvektiven Verluste von thermischen Flachkollektoren zu minimieren, ist er in diesem Solarkollektor vom Betriebszustand der Lüfter abhängig. Im Solarbetrieb können die Lüfter abgeschaltet bleiben, so dass ein relativ geringer Wärmeverlust der Flachkollektoren erreicht wird.

Soll Niedertemperaturwärme aus der Umgebung gewonnen werden, können die Lüfter eingeschaltet werden, so dass die Solarkollektoren einen höheren Wärmeeintrag erreichen. Es findet hier dann also kein Wärmeverlust statt, sondern ein Wärmegewinn über die Solarkollektoren. Dabei wird sowohl fühlbare Wärme gewonnen, als auch Wärme aus Kondensation von Wasserdampf in feuchter Außenluft (Latentwärmegewinn).

PVT – Kollektor (Solarthermisch + PV)

Bei PVT-Kollektoren handelt um die Kombination eines thermischen und eines photovoltaischen Moduls in einem einzigen Kollektor. Im einfachsten Fall wird ein PV-Kollektormodul mit einer rückseitigen Kühlung versehen, so dass das durchströmende Fluid Wärme aufnimmt, während das PV-Modul gekühlt wird, was zu einer Effizienzsteigerung des PV-Ertrags führt.

Da in der Regel so viel Wärme wie möglich aus Solarstrahlung gewonnen werden soll, sind die Kollektoren meist mit einer thermischen Isolation versehen. Dazu wird das Kollektorgehäuse rückseitig mit Isolation versehen, um Wärmeverluste so weit wie möglich zu verringern. Bezüglich vorderseitiger Isolation teilen sich PVT-Kollektoren in zwei Gruppen auf: abgedeckte und unabgedeckte PVT-Kollektoren.

Abgedeckte Kollektoren sind mit einer transparenten Abdeckung und Luftspalt über dem PV-Modul versehen, um thermische Verluste über die Vorderseite des Kollektors zu minimieren. Bei sog. unabgedeckten PVT-Kollektoren hingegen wird auf den Luftspalt zwischen Glasabdeckung und PV-Modul verzichtet, so dass eine wesentlich geringere vorderseitige thermische Isolation gegen Konvektion besteht. Während abgedeckte PVT-Kollektoren auf einen höheren solarthermischen Energiegewinn ausgelegt sind, weisen unabgedeckte PVT-Kollektoren in der Regel einen höheren photovoltaischen Ertrag auf, da das PV-Modul im Mittel bei geringeren Temperaturen und damit höherer Effizienz betrieben wird.

INTEGRATION DER SOLARKOLLEKTOREN IN SOLAERA

Da das Kollektorfeld beim Heizungssystem Solaera die Wärmequelle für den Verdampfer der Wärmepumpe darstellt, wird ein hoher Wärmedurchgangskoeffizient des Kollektors benötigt, um die Wärmeversorgung der Wärmepumpe auch ohne Strahlung sicherstellen zu können. Aus diesem Grund wurden für die vorliegende Studie vor allem PVT-Kollektoren mit reduzierter Isolation, d. h. mit hohem Wärmeverlustkoeffizienten (bzw. hier Wärmegewinnkoeffizienten) untersucht, so dass ausschließlich unabgedeckte PVT-Kollektoren betrachtet wurden.

In dieser Studie wurden verschiedene Kollektorkombinationen mit einander verglichen. Neben der Ergänzung oder des Ersatzes der STL- durch PVT-Kollektoren wurde als Konkurrenz-Kollektorsystem eine Flächenkombination aus den STL-Kollektoren – die hocheffizient thermische Energie gewinnen, jedoch keinen Solarstrom – mit herkömmlichen PV-Modulen evaluiert. Diese zeichnen sich neben hoher Marktreife und flexibler Hersteller-Verfügbarkeit vor allem durch einen in Relation aktuell niedrigen Preis aus.

Beide Varianten - PVT und STL-Kollektoren mit PV – erhöhen die Flächeneffizienz des Solarkollektorfelds außerhalb der Heizperiode, da der dann produzierte PV-Strom durch Eigenstromverbrauch im Wohngebäude den erforderlichen Netzbezug verringert oder überschüssiger Strom ins öffentliche Netz eingespeist werden kann. Im Vergleich von PVT- gegenüber PV-Modulen zeichnen sich PVT-Kollektoren durch die zusätzliche Nutzbarkeit zur thermischen Energiegewinnung aus, so dass möglicherweise keine oder nur wenig zusätzliche Kollektorfläche benötigt wird (im Vergleich zu einem STL-Kollektorfeld).

In den durchgeführten Simulationen wurden nur Randbedingungen berücksichtigt, die für eine mögliche Produktintegration in Solaera relevant werden würden. So wurde zum Beispiel ausschließlich eine Reihenschaltung aus PVT-Kollektoren und STL-Kollektoren betrachtet, was wiederum positive Implikationen für die dadurch weitgehend unverändert bleibende Kollektorregelung hat.

Die PV-Kollektorfläche wurde mit einer Neigung von 40° simuliert, während die STL- und PVT-Kollektoren um hohe Schneesicherheit zu gewährleisten mit einer Neigung von 60° simuliert wurden. Testsimulationen mit unterschiedlichen Neigungen (z. B. PVT 40°) zeigten, dass die weiter unten abgeleiteten Ergebnisse von diesen Annahmen unberührt bleiben.

Eine Anpassung der Regelung, um mit gewonnenem PV-Strom auf Vorrat zu heizen wurde in dieser Studie noch nicht berücksichtigt.

Bewertungskriterien

Es wurden mehrere Bewertungskriterien berücksichtigt, um die Ergebnisse der Simulationen vergleichen zu können. Hier werden vor allem der Netzbezug bzw. die Einspeisung von Strom evaluiert, sowohl für Solaera allein als auch in Kombination mit dem Haushaltsstrombedarf. Für den Vergleich der Anschaffungs- und Betriebskosten unterschiedlicher Kollektorfeldkonfigurationen werden aktuelle Preise sowie Strombezugskosten und die aktuelle Einspeisevergütung berücksichtigt. Für eine Langzeit-Kostenstudie über 10 Jahre hinweg, wird eine Preissteigerung für elektrischen Strom und eine Inflationsrate angenommen.

Modellbeschreibung und Simulation

Das Solaera-System und ein zu versorgendes Wohngebäude wurden in TRNSYS modelliert und simuliert [4,6]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Modell überarbeitet und die verschiedenen Kollektortypen integriert. Um die Gesamt-Simulationsdauer zu reduzieren, wurde zudem eine separate Jahressimulation für das Gebäude durchgeführt, aus der eine sog. Heizlastreihe generiert wurde – eine Tabelle, die die in jedem Simulationszeitschritt erforderliche Heizleistung zur Erhaltung des thermischen Komforts im Gebäude enthält. Diese Datei kann dann in der Systemsimulation, die nur das Solar- und Heizungssystem enthält, eingelesen werden, wodurch die Laufzeit der Simulation signifikant reduziert werden konnte. Für die in dieser Veröffentlichung gezeigten Daten bedeutet dies, dass eine mögliche Lastverschiebung durch Überheizen der Gebäudemasse noch unberücksichtigt bleiben muss.

Die Eckdaten des simulierten Gebäudes und der Anlage sind in Tabelle 1 gegeben.

Standort	Würzburg, Deutschland
Beheizte Wohnfläche	180 m ²
Jahres-Gesamtheizwärmebedarf	9450 kWh/a
Gesamt-Brauchwarmwasserbedarf	2330 kWh/a
Belegung	3 Personen
Nutzungstyp	Wohngebäude
Kombispeicher	1000 ltr.
Sole-Wasser-Wärmepumpe	6 kW
Eisspeicher	290 kg

Tabelle 1: Eckdaten des simulierten Wohngebäudes

Als Simulationsmodell für den PVT-Kollektor kommt Type 203 zum Einsatz [3]. Es handelt sich um ein Simulationsmodell für einen unverglasten PVT-Kollektor, das ein elektrisches Modell nach EN 60904 [8] mit einem thermischen Modell nach EN 12975 [7] koppelt. Das PVT-Kollektormodell wird mit Herstellerdaten aus einer eigenen Marktstudie parametrisiert. Tabelle 2 zeigt die wichtigsten Parameter des PVT-Kollektors.

Aperturfläche	[m ²]	1.36
Konversionsfaktor η_0	[-]	0.65
Wärmeverlustkoeff. a_1	[W/m ² K]	11.4 bzw. 40
Konversionsfaktor el.	[%]	14.7
P_{\max} therm.	[W]	629
P_{\max} elektr.	[W]	200
Temperaturkoeff. elektr.	[%/K]	-0.5

Tabelle 2: Eckdaten der Parametrierung des PVT-Kollektormodells

Für die Simulation der PV-Module kommt Type 94a aus der TRNSYS-Standardbibliothek zum Einsatz. Das Simulationsmodell wurde nach einer Internetrecherche parametrisiert wie in Tabelle 3 gezeigt.

P_{\max} elektr.	[W]	185
Aperturfläche	[m ²]	1.32
Temperaturkoeff. elektr.	[%/K]	-0.43

Tabelle 3: Eckdaten der Parametrierung des PV-Kollektormodells

Zur Simulation des STL-Kollektors wird ein von Consolar entwickeltes Simulationsmodell verwendet. Einige Eckdaten des STL-Kollektors sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Aperturfläche	[m ²]	2.29
Opt. Wirkungsgrad η_0	[-]	0.8
Wärmeverlustkoeff. a_1	[W/m ² K]	4.635 / bzw. Kennlinie nach [4] bei Lüfter an
Wärmeverlustkoeff. a_2	[W/m ² K ²]	0.008

Tabelle 4: Eckdaten der Parametrierung des STL-Kollektormodells

SIMULATIONSERGEBNISSE

Zunächst wurde untersucht, wie sich eine Aperturfläche von ca. 21 m² (entspricht 9 STL-Kollektoren) aus unterschiedlichen Kollektortypen zusammensetzen kann, und wie sich dies auf den Netzbezug des Solaera-Systems auswirkt.

Flächenkombination von STL-Kollektoren und PVT-Kollektoren

Abbildung 2 zeigt, dass bei einer Kombination von PVT- und STL-Kollektoren zwar der Jahres-Netzbezug des Heizsystems mit zunehmendem PVT-Flächenanteil am Solarkollektorfeld moderat ansteigt (obere Kurve), die Einspeisung von PV-Strom im Jahresverlauf dies aber bilanziell überkompensiert (durchgezogene, fallende Kurve).

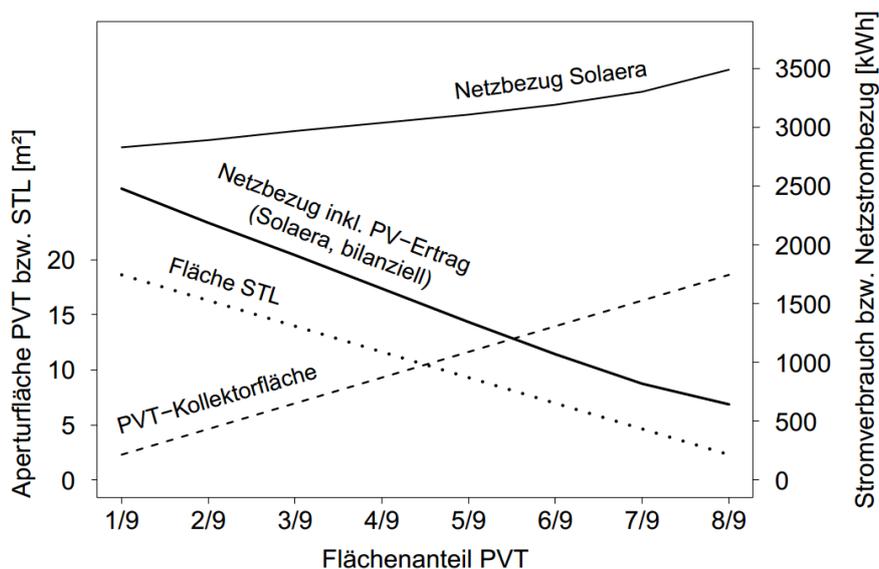


Abbildung 2: Jahres-Netzbezug des Heizsystems Solaera und bilanzieller Netzbezug (mit Einspeisung) über dem Flächenanteil von PVT an Gesamt-Solarkollektorfläche von ca. 21 m² aus STL- und PVT-Kollektoren, simuliert mit $a_1 = 11 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Bei einer angenommenen möglichen Erhöhung¹ des Wärmeverlustkoeffizienten a_1 auf einen Wert von 40 W/m²K bei den PVT-Kollektoren zeigt sich dasselbe Verhalten, der Netzbezug wird jedoch wegen des höheren Wärmeertrags aus der Umgebung etwas geringer. Durch diesen Effekt und einen etwas erhöhten PV-Ertrag ergibt sich das in Abbildung 3 gezeigte Verhalten. In beiden Fällen zeigt sich auch noch ein sehr hoher Anteil an PVT-Kollektoren als sinnvoll.

¹ Durch Verzicht auf rückseitige Wärmedämmung und passive Maßnahmen zur Erhöhung der Konvektion.

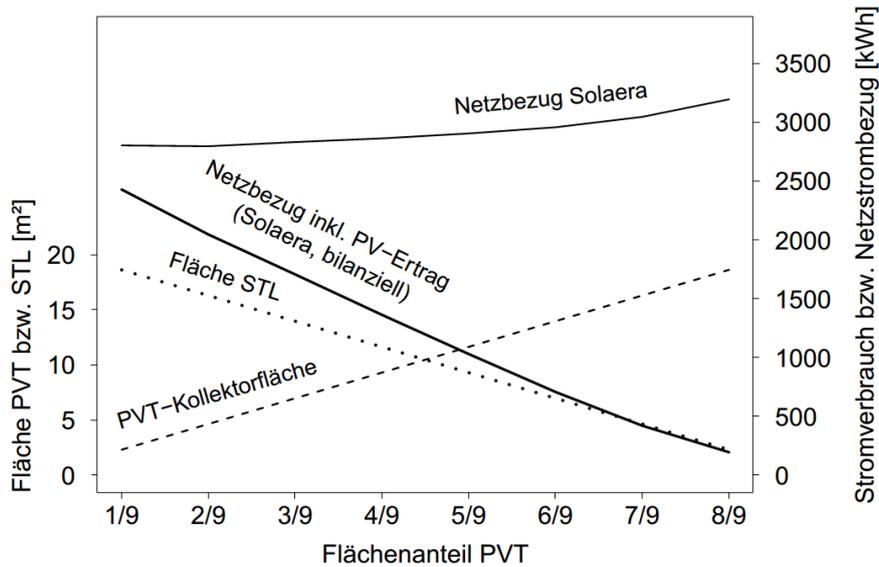


Abbildung 3: Jahres-Netzbezug des Heizsystems Solaera und bilanzieller Netzbezug (mit Einspeisung) über dem Flächenanteil von PVT an Gesamt-Solarkollektorfläche von ca. 21 m² aus STL- und PVT-Kollektoren, hier mit $a_1 = 40 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Flächenkombination von STL-Kollektoren und PV-Modulen

Bei einer Kombination von STL-Kollektoren und PV-Modulen zeigt sich bei geringen STL-Flächenanteilen ein drastischer Anstieg des Strombezugs des Solaera-Systems (obere durchgezogene Kurve). Durch die Reduktion des Wärmeertrags durch Verringerung der STL-Kollektorfläche, steht nicht mehr ausreichend Wärmeenergie für die Wärmepumpe zur Verfügung, wodurch die Effizienz dieser sinkt. Steigt der Flächenanteil des PV-Systems weit über ca. 50 %, reicht der Anteil an STL-Kollektoren nicht mehr aus, um den Umweltwärmebedarf von Solaera bereitzustellen, so dass der bilanzielle Netzbezug stark anwächst, da direkt mit elektrischem Strom geheizt werden muss.

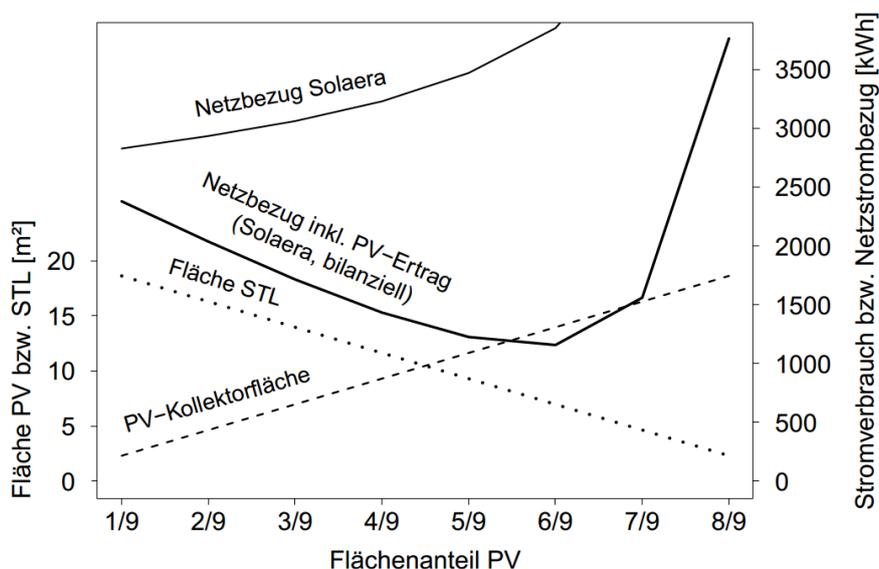


Abbildung 4: Jahres-Netzbezug des Heizsystems Solaera und bilanzieller Netzbezug (mit Einspeisung) über dem Flächenanteil von PV an Gesamt-Solarkollektorfläche von ca. 21 m² aus STL-Kollektoren und PV-Modulen.

Aus diesem Ergebnis lässt sich ableiten, dass bei einer Kombination aus STL-Kollektoren und PV-Modulen ein Minimalanteil an STL-Kollektorfläche nicht unterschritten werden darf. Für die

weiter unten gezeigten Untersuchungen wurde bei dieser Kombination deshalb ein immer beibehaltener Anteil von mindestens 5 STL-Kollektoren festgelegt.

Solarkollektorfeld ausschließlich aus PVT-Kollektoren

Die Untersuchung, ob das System auch ausschließlich mit einem PVT-Kollektorfeld betrieben werden kann, ist abhängig von der installierten Fläche in Abbildung 5 gezeigt.

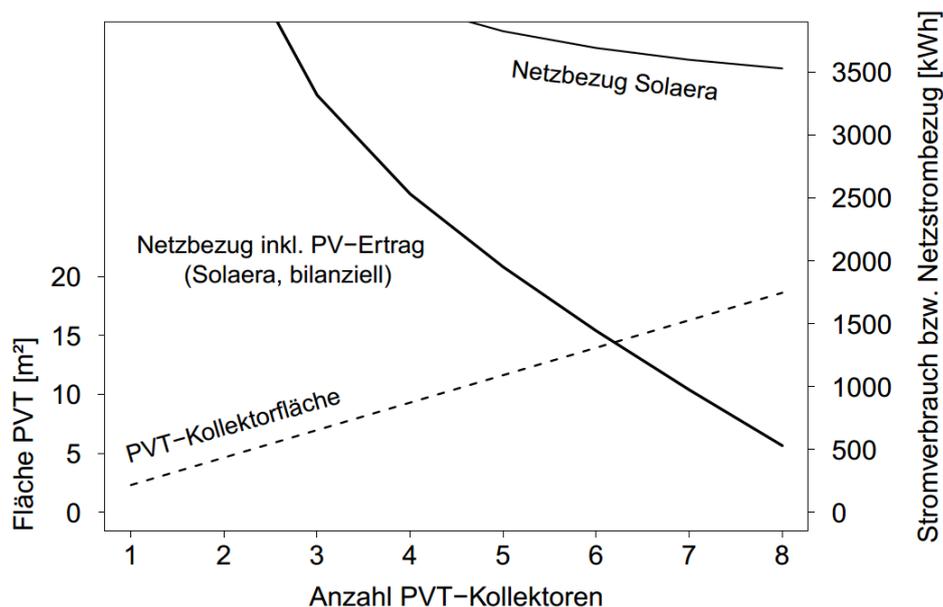


Abbildung 5: Jahres-Netzbezug des Heizsystems Solaera und bilanzieller Netzbezug (mit Einspeisung) über der Fläche eines PVT-Solarkollektorfelds (mit $a_1 = 40 \text{ W/m}^2\text{K}$). Grau: Netzbezug Solaera (oben) und bilanzieller Netzbezug (inkl. Einspeisung, unten) für ein kombiniertes Kollektorfeld aus STL- und PVT-Kollektoren (Abbildung 1).

Man sieht zwar, dass der Netzbezug des Solaera-Systems für alle Kollektoranzahlen höher ist als mit einer Kombination aus STL- und PVT-Kollektoren (vgl. Abb. 3 und obere graue Linie Abb. 5), was an der geringeren thermischen Effizienz der PVT-Kollektoren gegenüber den STL-Kollektoren liegt. Die Temperaturen am Verdampfer der Wärmepumpe sinken, wodurch der Stromverbrauch der Wärmepumpe zunimmt. Zwar ist bei kleinen Flächen auch der bilanzielle Netzbezug höher als für eine Kombination mit STL-Kollektoren, dies wird jedoch ab einer gewissen PVT-Kollektorfeldfläche (hier ab 18.64 m^2) bilanziell durch den Stromertrag der PVT-Kollektoren überkompensiert, so dass der Gesamtbezug am niedrigsten von allen untersuchten Kollektorkombinationen wird.

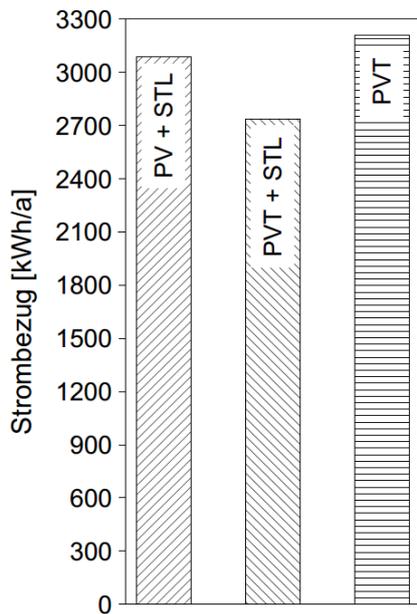
Wichtigstes Ergebnis ist hier, dass die PVT-Kollektoren in der Simulation die für den Solaera-Betrieb erforderliche Umweltwärmemenge (Wärmequelle für den Verdampfer) zur Verfügung stellen können, d. h. es ist eine Versorgung eines Solaera-Systems ausschließlich mit PVT-Kollektoren möglich.

Insgesamt kann aus den obenstehenden Ergebnissen geschlossen werden, dass Solaera neben der herkömmlichen Konfiguration mit speziellen STL-Kollektoren sowohl mit einer Kombination dieser Solarkollektoren mit PV- oder PVT-Kollektoren, als auch mit einem reinen PVT-Solarkollektorfeld betrieben werden kann.

Simulationen mit einem Wärmeverlustkoeffizienten a_1 der PVT-Kollektoren von $11 \text{ W/m}^2\text{K}$ zeigen ein ähnliches Verhalten, allerdings mit einem um ca. 5 % geringeren Stromertrag und einem ca. 7,5 % geringeren Wärmeertrag (beides Gesamt-Jahresbilanzen), was zu einem um ca. 10 % erhöhten Stromverbrauch des Solaera-Systems in der Jahresbilanz mit einem 21 m^2 großen PVT-Kollektorfeld führt.

KOSTENBETRACHTUNGEN

Die Entscheidung, welches Kollektorsystem installiert werden soll, kann nun neben anderen praktischen Gesichtspunkten, die nicht in die bisherigen Überlegungen eingeflossen sind, von der Wirtschaftlichkeit der betrachteten Systemkombinationen abhängen.



Geht man von einem Solarkollektorfeld von 21m² Gesamtfläche aus, so lassen sich nach obigen Untersuchungen u. a. folgende Kombinationen realisieren:

- Kombination aus 5 STL-Kollektoren und 9,3 m² PV
- Kombination aus 5 STL-Kollektoren und 9,3 m² PVT
- 21 m² PVT

Die zu erwartenden Strombezüge für diese drei Kombinationen sind in der Abbildung links gezeigt und unterscheiden sich um 12 bzw. 17 % vom Minimum für die Kombination aus STL-Kollektoren und PVT.

Zwar weist die Versorgung mit einem alleinigen PVT-Kollektorfeld den größten Strombezug für das Solaera-System auf, jedoch steht mit dieser Konfiguration auch die größte Fläche zur Stromerzeugung zur Verfügung. Dies resultiert in dem größten PV-Stromertrag für die alleinige PVT-Fläche. Hierdurch kann hier ein größerer Anteil des Haushaltstromes gedeckt und größere Erträge durch die Einspeisevergütung erzielt werden. Unter praktischen Gesichtspunkten ist es zudem naheliegend, den zu erwartenden erhöhten Strombezug in Kauf zu nehmen und mit den Kombinationen „PV + STL“ und „PVT“ jeweils Systeme zur Verfügung zu haben, die keine hydraulische Kopplung zweier Kollektorsysteme aufweisen, d. h. regelungstechnisch und auch in der Installation leichter handhabbar sind. Voraussetzung ist, dass dies wirtschaftlich vertretbar ist.

Initial- und jährliche Betriebskostenbilanz

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse bezüglich der Beschaffungskosten der Solarkollektoren und der Betriebskosten aufgrund des Strombezugs und der ggf. möglichen Stromeinspeisung durch PV-Ertrag diskutiert.

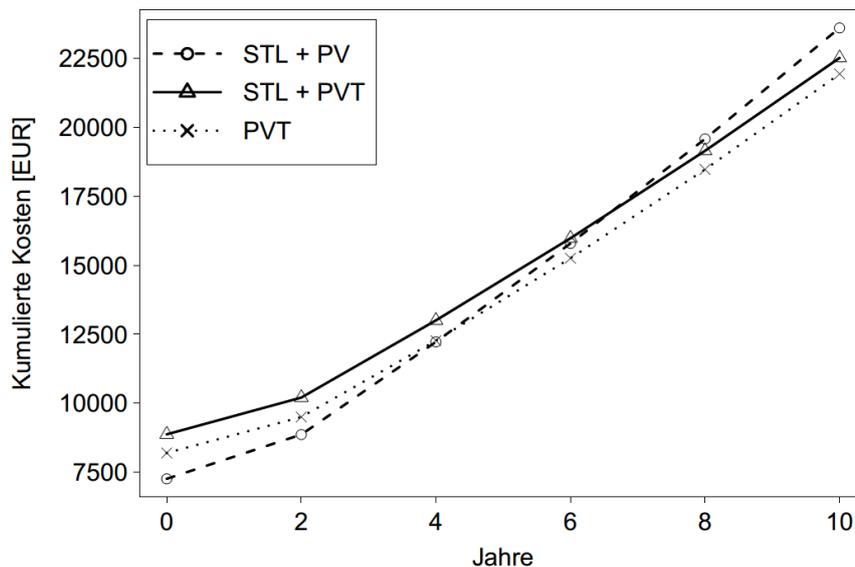


Abbildung 6: Kumulierte Kosten für Anschaffung, Stromkosten (Heizsystem und Haushalt) und Stromertrag für Kollektorfelder von 21m² Gesamtfläche (Strompreissteigerung und Inflationsrate berücksichtigt).

Abbildung 6 zeigt für Kollektorfelder von 21 m² für die o. g. Kombinationen die kumulierten Betriebskosten inkl. Anschaffungskosten über einen Zeitraum von 10 Jahren. Dazu wurde in einer Annuitätenmethode folgendermaßen gerechnet:

$$C(10a) = I_{n=0} + \sum_{n=0}^{n=9} [Q_{el.}(n) \cdot c_{el.} \cdot (1 + p_{el.})^n - Q_{el.}^+(n) \cdot c_{ein}] \cdot (1 - p_{infl.})^n \quad (2)$$

Am Nullpunkt auf der x-Achse in Abbildung 6 sind die Anschaffungskosten der Kollektoren (nur Modul-/Kollektorkosten, Endkundenpreise) plus Strombezugskosten und Einspeisevergütung im ersten Jahr zu sehen. Der Verlauf der Kurven zeigt die Entwicklung der Gesamtkosten für den jeweiligen Zeitraum bzgl. Stromkosten für Solaera-Betrieb und Haushaltsstromverbrauch und den Stromertrag ($Q_{el.}^+$) der ins Stromnetz eingespeist und finanziell vergütet wird.

Man sieht, dass die Initialkosten für den Fall STL+PV am geringsten sind, während die Betriebskosten für die PVT-Lösung am geringsten sind, da hier der Stromertrag durch PV am größten ist. Die Unterschiede zwischen den Varianten sind jedoch im Gesamten gering. Nach 10 Jahren weist der Fall mit nur PVT-Kollektoren die geringsten Gesamtkosten auf. Dies hängt jedoch stark von der Annahme der Einspeisevergütung ab. Bei geringerer Einspeisevergütung fallen die Kostenkurven nach 10 Jahren enger zusammen. Tabelle 5 zeigt die getroffenen Kostenannahmen für die Darstellung in Abbildung 6.

Strombezugspreis	[EUR]	0.25
Einspeisevergütung	[EUR]	0.1535
Teuerungsrate Strom	[%/a]	5
Inflationsrate	[%/a]	2
STL-Kollektor	[EUR]	898.6 (392.4 EUR/m ²)
PVT-Kollektor	[EUR]	430.6 (316.6 EUR/m ²)
PV-Modul	[EUR]	192.4 (130.0 EUR/m ²)

Tabelle 5: Kosten- und Zinsannahmen für den Anschaffungs- und Betriebskostenvergleich

ZUSAMMENFASSUNG

Die durchgeführten Simulationsstudien haben gezeigt, dass es möglich ist, das Solar-Wärmepumpenheizsystem Solaera sowohl effizient mit PVT-Kollektoren als auch mit einer Kombination aus STL-Kollektoren und PV-Modulen zu betreiben. Der Unterschied besteht derzeit vor allem in den unterschiedlichen Anschaffungspreisen, der über die Betriebsdauer des Systems jedoch nicht mehr ins Gewicht fällt, bzw. durch Mehrertrag an PV-Energie und die daraus erzielbaren geringeren Haushaltstromkosten und die Einspeisevergütung langfristig überkompensiert werden kann.

Eine Erhöhung des linearen Wärmedurchgangskoeffizienten a_1 bei PVT-Kollektoren für die Kombination mit Solaera ist anzustreben (vgl. Abb. 2 und 3). Hier bieten sich der Verzicht auf rückseitige Dämmmaßnahmen der Kollektoren und konstruktive Anpassungen an. Inwieweit eine Erhöhung des Wärmedurchgangskoeffizienten erreicht werden kann, sollen Messungen im Projekt Sol2Heat zeigen. Bei einer Kombination aus STL-Kollektoren und PV-Modulen ist zu beachten, dass der Flächenanteil von PV-Kollektoren bei fester zur Verfügung stehender Gesamtfläche durch eine Mindestanzahl benötigter STL-Kollektoren begrenzt ist.

DANKSAGUNG

Das Projekt *Intelligente Erzeugung und Speicherung von Solarwärme und -strom zur Realisierung hoher solarer Deckungsanteile und zum Lastmanagement*, Akronym „Sol2Heat“, wird gefördert durch die Bundesrepublik Deutschland, Zuwendungsgeber: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages (Förderkennzeichen 0325539A).

SYMBOLVERZEICHNIS

Symbol	Einheit	Beschreibung
η	[-]	Effizienz, Wirkungsgrad
η_0	[-]	Optischer Wirkungsgrad
a_1	[W/m ² K]	Linearer Wärmedurchgangskoeffizient
a_2	[W/m ² K]	Quadratischer Wärmedurchgangskoeffizient
T	[°C], [K]	Temperatur
T_m	[°C], [K]	Mitteltemperatur
T_{amb}	[°C], [K]	Umgebungstemperatur
G	[W/m ²]	Globalstrahlung auf Kollektorfläche
P_{max}	[W]	Nenn- oder Maximalleistung
C	[EUR]	Kosten, z. B. 10-Jahres-Kosten
$Q_{el.}$	[kWh]	elektrischer Verbrauch
$Q_{el.}^+$	[kWh]	elektrischer Ertrag
$c_{el.}$	[EUR/kWh]	Strombezugspreis
$p_{el.}$	[1/a], [%/a]	Teuerungsrate des Strombezugspreises
$c_{ein.}$	[EUR/kWh]	Einspeisevergütung
$p_{inf.}$	[1/a], [%/a]	Inflationsrate

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Symbol	Beschreibung
PV	PV-Modul (photovoltaischer Solarkollektor)
PVT	Photovoltaisch-thermischer Kollektor (Kombination aus PV und therm. Kollektor)
STL	Solarthermischer Flachkollektor mit Wärmegewinnungsfunktion aus Umgebungsluft (Solar – Thermisch – Luft)

REFERENZEN

- [1] Leibfried, U.: *Integrierte Systemlösungen für Bestand und Neubau als Weg zum Erreichen der Klimaziele*. 21. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, Mai 2011
- [2] Projekt Sol2Heat.: *Intelligente Erzeugung und Speicherung von Solarwärme und -strom zur Realisierung hoher solarer Deckungsanteile und zum Lastmanagement*. http://fbta.arch.kit.edu/182_557.php
- [3] Stegmann, M.: *PVT-Kollektormodell*. Emmerthal, März 2011, http://www.isfh.de/institut_solarforschung/files/03_bisolarwp_modellentwicklung.pdf (zuletzt abgerufen am 01.10.2013)
- [4] Tillman, F.: *Moderne Regelungsansätze für Solarsysteme mit integrierter Wärmepumpe zur Gebäudeheizung*. Zur Prüfung eingereichte Dissertation am 21.01.2014, Universität Stuttgart, 2014.
- [5] Leibfried, U.: *Die Vision vom solaren Heizen wird Wirklichkeit*. In: Erneuerbare Energien (2009), Nr. 3
- [6] Asenbeck, S. et. al: *Simulationsstudie Solar-Wärmepumpensystem zur Trinkwassererwärmung und Raumheizung*. Prüfbericht-Nr.: 07SIM109/1. Uni Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, 2008
- [7] DIN EN 12975-2, *Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – Kollektoren – Teil 2: Prüfverfahren*, Deutsche Fassung EN 12975-2:2006
- [8] DIN EN 60904-8, *Photovoltaische Einrichtungen, Teil 8: Messung der spektralen Empfindlichkeit einer photovoltaischen (PV) Einrichtung*, Deutsche Fassung EN 60904-8:1998