

Energieversorgung im Einfamilienhaus mittels Wärmepumpe, horizontalen Erdwärmekollektoren und photovoltaisch-thermischen Solarkollektoren

Fabian Hüsing, Oliver Mercker

Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH), Am Ohrberg 1, D-31860 Emmerthal

Abstract

Ein Energieversorgungssystem im Einfamilienhaus, bestehend aus Wärmepumpe (WP), horizontalen Erdwärmekollektor (EWK) und unabdgedeckten photovoltaisch-thermischen Solarkollektoren wird untersucht. Neben der Möglichkeit die benötigte EWK-Fläche durch Kombination mit Solarwärme zu reduzieren steht insbesondere die Betrachtung der elektrischen Energieflüsse im Fokus dieses Beitrags. Auf saisonaler und tageszeitlicher Ebene wird das Systemverhalten analysiert und bestimmt, welchen Beitrag der lokale PV-Ertrag zur Deckung des elektrischen Bedarfs der WP leistet. Der relative geringe Anteil in der rein bedarfsgeführten Wärmeerzeugung wird auf sowohl im Tagesverlauf als auch saisonal gegensätzliche Verläufe von PV-Ertrag und Wärmebedarf zurückgeführt. Schließlich werden Optionen zur Optimierung des Systems vorgestellt.

1. Motivation

Elektromotorische Wärmepumpen (WP) ermöglichen die Kopplung von Elektrizitäts- und Wärmebedarf auf Haushaltsebene, während photovoltaisch-thermische Solarkollektoren (PVT) elektrische und thermische Energie lokal bereitstellen können. Eine Kombination dieser Technologien verspricht daher Möglichkeiten zur effizienten Energieversorgung mit einer verringerten Belastung des umgebenden Stromnetzes. Horizontale Erdwärmekollektoren (EWK) sind, aufgrund ihrer geringen saisonalen Temperaturschwankung, eine attraktive Wärmequelle für Wärmepumpen. Gleichzeitig erfordern EWK, im Vergleich zu Erdwärmesonden, einen geringeren administrativen und baulichen Aufwand für Genehmigung und Errichtung. Bislang stellt der hohe Bedarf an unversiegelter Bodenfläche für EWK allerdings häufig ein wesentliches Hemmnis für ihre Anwendung dar.

In einem Forschungsprojekt untersucht das ISFH daher die Möglichkeiten, den Flächenbedarf von EWK durch eine geeignete Kombination mit Solarwärme zu verringern. Im vorliegenden Beitrag wird die Kombination von EWK und unabdgedeckten PVT-Kollektoren detailliert betrachtet. Neben den Effekten der Solarwärmenutzung ergeben sich hier auch Potenziale elektrische Solarenergieerträge (im Folgenden vereinfacht als „PV-Strom“ bezeichnet) zum Betrieb der WP zu nutzen. Somit wird eine lokale Erzeugung und Kopplung von elektrischer Energie und Wärme möglich.

2. Vorgehen Simulationsstudie

Die detaillierte Untersuchung des Betriebsverhaltens dieses dynamischen Systems wird anhand von Parameterstudien mittels der Simulationssoftware TRNSYS [1] durchgeführt. Hierzu wurde ein numerisches Modell des EWK entwickelt und experimentell an einer eigens am ISFH errichteten Versuchsanlage mit 150 m² EWK-Fläche validiert [2].

Als Randbedingungen der Simulationsstudie werden Referenzgebäude und Nutzerverhalten bzgl. interner Wärmegevinne und Bedarfsprofile gemäß Task 44 (Solar and Heat Pump) des Solar Heating and Cooling Programmes der Internationalen Energieagentur verwendet [3,4].

In **Abbildung 1** ist der Aufbau des betrachteten Systems schematisch dargestellt. Zentrale Komponente ist die Wärmepumpe (WP), die zwei Zonen eines Pufferspeichers belädt. Der Pufferspeicher versorgt die Raumheizung (RH) direkt und ermöglicht die Bereitstellung von Trinkwarmwasser (TWW) über eine Frischwasserstation. Auf der Quellenseite der WP befinden sich der PVT-Kollektor (PVT) und der EWK. Der PVT-Kollektor kann bei ausreichendem Temperaturniveau in den Quellenkreis hydraulisch zugeschaltet werden und wird dann mit einem Nennmassenstrom (m_{ST}) von 50 kg/(m² h)

betrieben. Im EWK werden in Abhängigkeit vom aktuellen Betriebszustand unterschiedliche Massenströme vorliegen: Liegt ein Wärmebedarf vor, so ist die Wärmepumpe in Betrieb und der EWK wird mit dem Nennmassenstrom der WP (m_{WP}) durchströmt. In diesem Fall strömt ein Teil des Wärmeträgers über einen Bypass am Solarkollektor vorbei. Liegt Solarertrag vor, aber kein Wärmebedarf, wird der EWK mit dem Nennmassenstrom des Solarkollektors regeneriert.

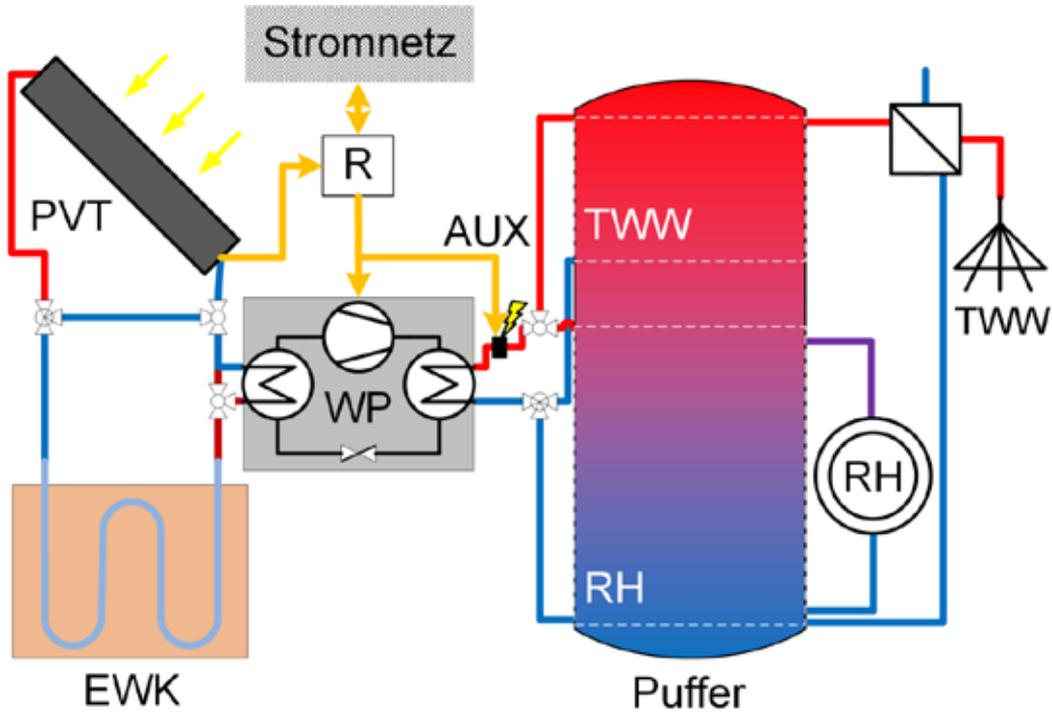


Abbildung 1: Schema des untersuchten Systems

Der Wärmeträger zirkuliert in den vorgestellten Untersuchungen nach dem Solarkollektor immer durch den EWK. Diese Konfiguration wird gewählt, um die Volatilität der Solarwärmeerträge mit der Kapazität des Erdreichs vor dem Verdampfer der WP zu dämpfen. Abhängig von den Temperaturniveaus an den Komponenten und dem vorliegenden Wärmebedarf ergeben sich vier mögliche Betriebsmodi für die Wärmequelle, welche in **Tabelle 1** zusammengefasst sind.

Tabelle 1: Mögliche Betriebszustände der Wärmequelle in Abhängigkeit des Systemzustands

Betriebsmodus	Systemzustand		Steuersignale		
	Solarwärmeangebot	Wärmebedarf	ST	EWK	WP
Aus	0	0	0	0	0
EWK+Solar	1	0	m_{ST}	m_{ST}	0
WP+EWK	0	1	0	m_{WP}	1
WP+EWK+Solar	1	1	m_{ST}	m_{WP}	1

Die Regelung stellt zudem sicher, dass das Wärmeträgerfluid beim Eintritt in den EWK maximal eine Temperatur von 25 °C aufweist. Für Quellentemperaturen unter -5 °C wird der Betrieb der WP ausgesetzt und eine elektrische Nachheizung (AUX) übernimmt die Wärmebereitstellung.

3 Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden Ergebnisse der Simulationsstudie vorgestellt. Neben dem Aspekt der EWK-Flächenreduktion durch Solarwärme wird detailliert auf die Möglichkeit der Nutzung der elektrischen Erträge zum Betrieb der WP eingegangen.

3.1 EWK-Flächenreduktionen durch thermische Solarerträge

In **Abbildung 2** ist die Wirkung der quellenseitigen Nutzung thermischer Solarerträge dargestellt. Es sind die Systemjahresarbeitszahlen, berechnet nach Gleichung (1), über der EWK-Fläche für verschiedene Verlegeabstände zwischen den EWK-Rohren dargestellt. Schwarze Rauten markieren die Dimensionierungsempfehlung der Entwurfsfassung der VDI 4640-2 vom Mai 2015 [5]. Rote Dreiecke signalisieren das Auftreten von kritischen Frostzuständen (z.B. horizontales Zufrieren des Erdreichs zwischen den EWK-Rohren, welches die Versickerung von Niederschlägen verhindert).

$$JAZ_{\text{SYS}} = \frac{\text{Nutzwärme}}{\text{Elektrische Energie}} = \frac{\int (\dot{Q}_{\text{TWW}} + \dot{Q}_{\text{RH}}) dt}{\int (P_{\text{WP_Komp}} + P_{\text{AUX}} + P_{\text{Pumpen}} + P_{\text{Regler}}) dt} \quad (1)$$

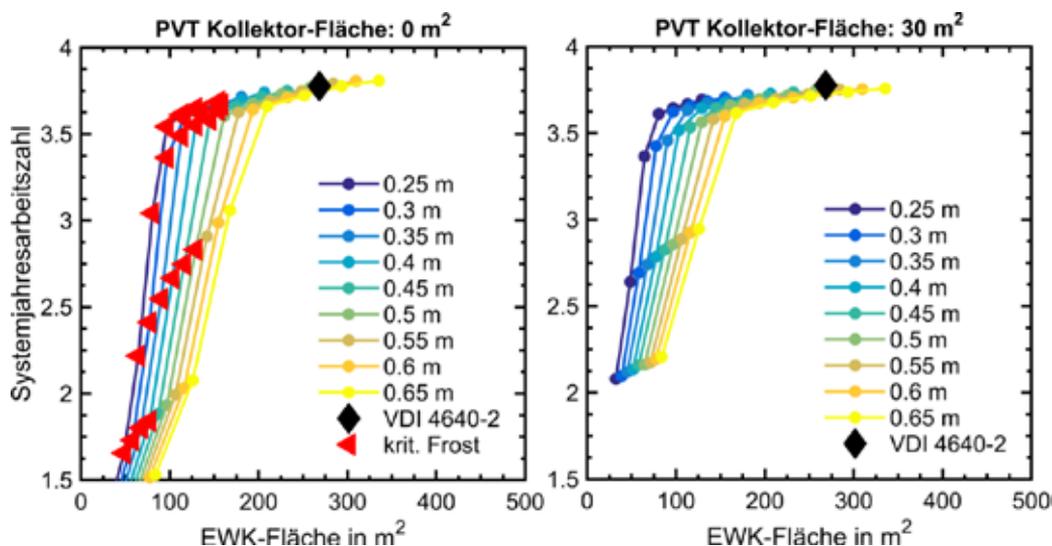


Abbildung 2: Systemjahresarbeitszahl über EWK-Fläche mit und ohne PVT-Kollektoren

Durch die quellenseitige Nutzung von Solarwärme kann die Effizienz von WP mit knapp oder gar unterdimensionierten EWK signifikant erhöht und das Auftreten kritischer Frostzustände verhindert werden. Entsprechend sind Reduktionen der EWK-Fläche um über 50 % gegenüber der VDI-Empfehlung möglich. Eine Analyse der zugrunde liegenden Effekte, sowie Ergebnisse für weitere ungedeckte Solarkollektoren und unterschiedliche Bodentypen sind veröffentlicht [6,7]. In den weiteren Analysen wird zu jeder PVT-Kollektorfläche die EWK-Konfiguration mit der kleinsten EWK-Fläche betrachtet, für die keine kritischen Frostbedingungen und kein Nachheizbedarf auftreten.

3.2 Nutzung von PV-Strom zur Wärmeversorgung

Der elektrische Ertrag der PVT-Kollektoren kann potenziell den erforderlichen Netzstrombezug zum Betrieb der Wärmepumpe senken, was die Effizienz des Systems erhöht und die Belastung des Stromnetzes vermindert. Im Verlauf der Jahressimulationen werden deshalb die Gleichzeitigkeit von Strombedarf der WP und elektrischem Ertrag der PVT-Kollektoren ausgewertet.

Der Betrieb der WP erfolgt bedarfsgesteuert. Elektrische Erträge der PVT-Kollektoren werden mit fester Priorität auf vorliegende Bedarfe verteilt. Bedarfe, die den Ertrag übersteigen, werden aus dem Stromnetz bezogen. Es wird die folgende Priorisierung zur Verteilung der elektrischen Erträge betrachtet: 1. (höchste Priorität) Kompressor der WP, 2. Elektrische Nachheizung (AUX), 3. Fluidpumpen, 4. Haushaltsstrombedarf und 5. (niedrigste Priorität) Netzeinspeisung.

In **Abbildung 3** sind die Beiträge von Netz- und PV-Strom zur Versorgung des Energiebedarfs der WP (linker Balken) und die Verteilung der PV-Erträge (rechter Balken) über der installierten PVT-

Kollektorfläche dargestellt. Während für den Haushaltsstrombedarf Beiträge in erwarteter Höhe vorliegen (E_{HSB_PV}), werden trotz hoher PV-Erträge nur geringe Deckungsgrade für den Strombedarf der WP erreicht. Selbst bei 30 m^2 PVT-Kollektorfläche (ca. $4,1\text{ kW}$ elektrische Nennleistung) werden nur $8,3\%$ des elektrischen Energiebedarfs der WP mit PV-Erträgen gedeckt.

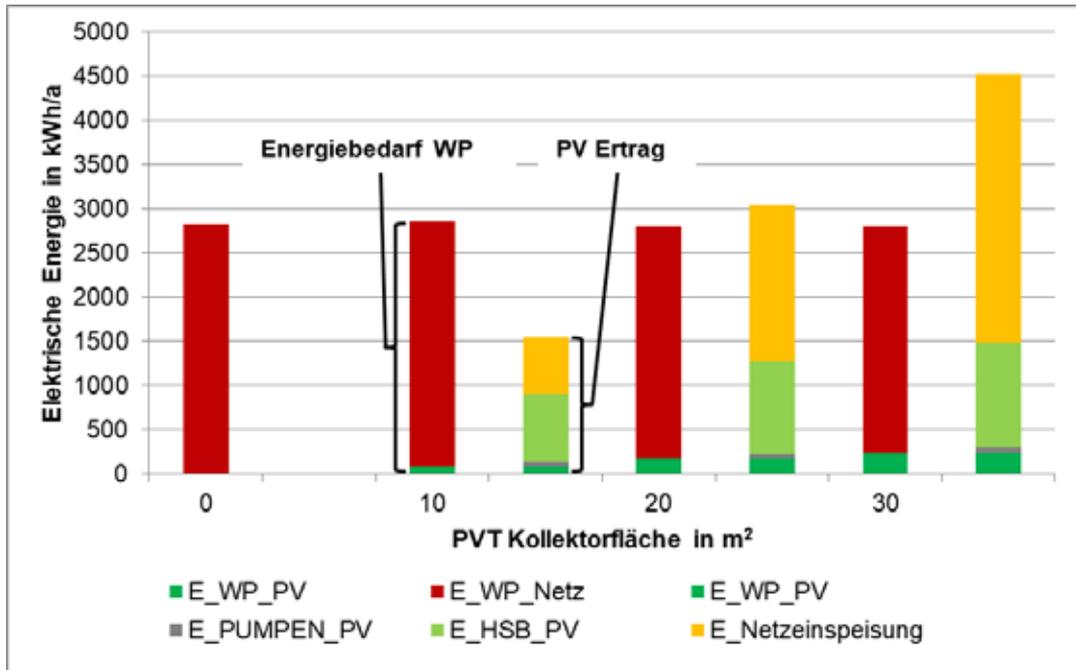


Abbildung 3: WP-Strombedarf und PV-Erträge für verschiedene PVT-Kollektorflächen

Um die Ursache für die geringen Deckungsgrade des Strombedarfs der WP zu analysieren, wird nachfolgend die tageszeitliche Verteilung verschiedener Betriebszustände betrachtet. Dafür werden die Laufzeiten der einzelnen Betriebsmodi der Wärmequelle auf die Stunden des Tages verteilt und aufsummiert. Weiterhin wird die mittlere solare Einstrahlung in die PVT-Kollektorebene über den betrachteten Zeitraum berechnet und dargestellt.

In **Abbildung 4** ist die tageszeitliche Verteilung für ein System mit 30 m^2 PVT-Kollektor bei einem Betrachtungszeitraum von einem Jahr dargestellt. Die mittlere solare Einstrahlung hat einen erwartungsgemäßen Verlauf mit einem Maximum von ca. 450 W/m^2 um 12 Uhr. Die Verteilung der summierten Laufzeiten der Quelle im Regenerationsbetrieb (EWK+Solar) weist einen der mittleren solaren Einstrahlung ähnlichen Verlauf auf. Einzig am Nachmittag treten geringere summierte Laufzeiten im Regenerationsbetrieb auf als der Verlauf der Einstrahlung erwarten lässt. Zu diesen Zeiten sind häufiger die maximal zugelassenen $25\text{ }^\circ\text{C}$ Eintrittstemperatur überschritten und entsprechend unterbleibt die weitere Einbringung von Solarwärme. Im Zeitraum von 19 bis 23 Uhr tritt Regenerationsbetrieb auf, ohne dass solare Einstrahlung vorliegt. In diesen Fällen regeneriert der unbedeckte PVT-Kollektor den EWK mit aus der Luft aufgenommener Wärme. Die Laufzeiten der WP weisen eine der mittleren solaren Einstrahlung entgegengesetzte Charakteristik auf. Die WP wird am häufigsten in den Zeiträumen von 1 bis 10 Uhr und von 21 bis 22 Uhr betrieben, während der gemeinsame Betrieb von WP, EWK und PVT-Kollektor insgesamt eher selten auftritt.

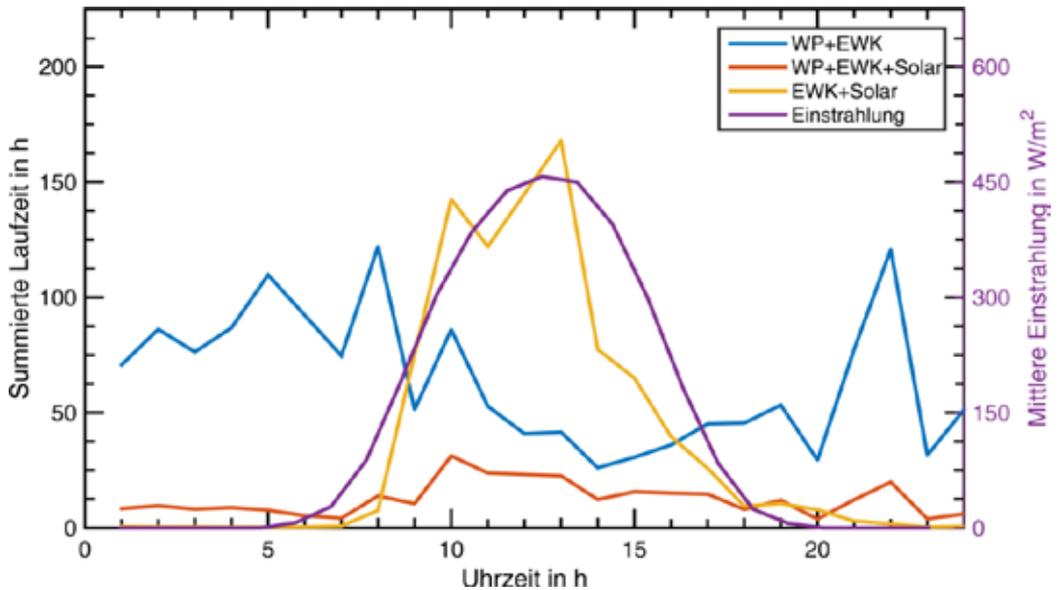


Abbildung 4: Tageszeitliche Verteilung der Laufzeiten – 30 m² PVT / gesamtes Jahr

Für eine detailliertere Betrachtung werden im folgenden Abschnitt die tageszeitlichen Verteilungen der elektrischen Energiemengen betrachtet. In **Abbildung 5** sind PV-Ertrag, zum Betrieb der WP aufgewendeter PV-Strom ($E_{WP,PV}$) und der gesamte elektrische Energiebedarf der WP ($E_{WP,ges}$) für ein gesamtes Jahr über der Tageszeit dargestellt. Weiterhin ist die summierte Globalstrahlung in der PVT-Kollektorebene aufgetragen. Wie bereits in den Betriebszeiten beobachtet, liegen die Intervalle des energieaufwändigsten Betriebs der WP (1 bis 9 Uhr und 21 bis 23 Uhr) außerhalb der Zeiten des PV-Ertrags. Auffällig ist, dass auch in den Stunden mit hohem PV-Ertrag (10 bis 16 Uhr) nur relativ geringe Anteile des Strombedarfs der WP direkt gedeckt werden.

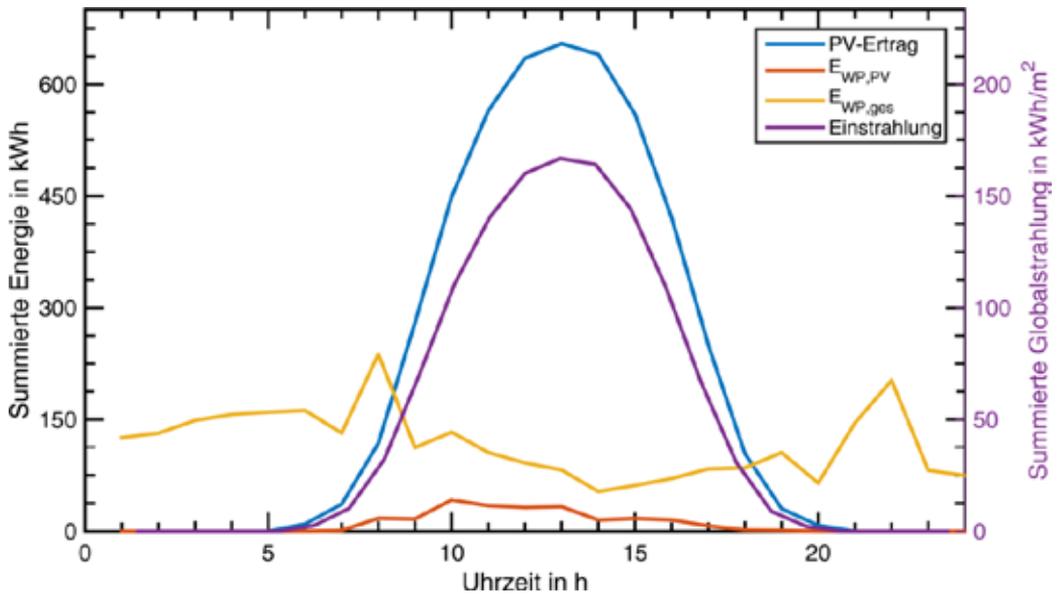


Abbildung 5: Tageszeitliche Verteilung elektrischer Energieflüsse – 30 m² PVT / gesamtes Jahr

In **Abbildung 6** und **Abbildung 7** sind die tageszeitlichen Verteilungen für die saisonalen Abschnitte Sommer (Juni, Juli, August) und Winter (Dezember, Januar und Februar) dargestellt. Es ist zu beachten, dass für eine bessere Darstellung unterschiedliche Achsenskalierungen gewählt sind. Im Sommer (**Abbildung 6**) übersteigt der PV-Ertrag den Strombedarf der WP erheblich. Dennoch liegt weiterhin eine Akkumulation von WP-Bedarf außerhalb der Zeiten mit PV-Ertrag (21 bis 22 Uhr) vor. In Summe ergibt sich für den Sommer eine direkte Deckung des WP-Bedarfs mit PV-Strom von 22,4 %.

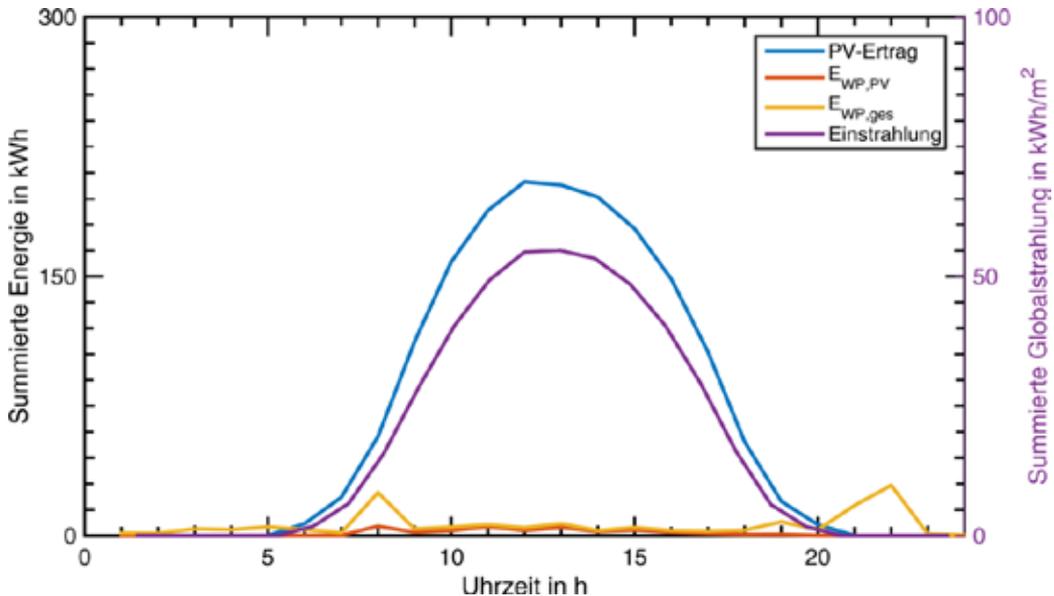


Abbildung 6: Tageszeitliche Verteilung elektrischer Energieflüsse – 30 m² PVT / Sommer

Im Winter (**Abbildung 7**) übersteigt der Strombedarf der WP den PV-Ertrag. Die Verläufe zeigen einen gegensätzlichen Trend – die WP wird in Zeiten mit höherer solarer Einstrahlung weniger häufig genutzt. Dieser Trend ist bei Auswertung auf Tagesbasis stärker ausgeprägt und begründet die geringe direkte Deckung von 5,8 % des Energiebedarfs der WP mit PV-Erträgen im Winter.

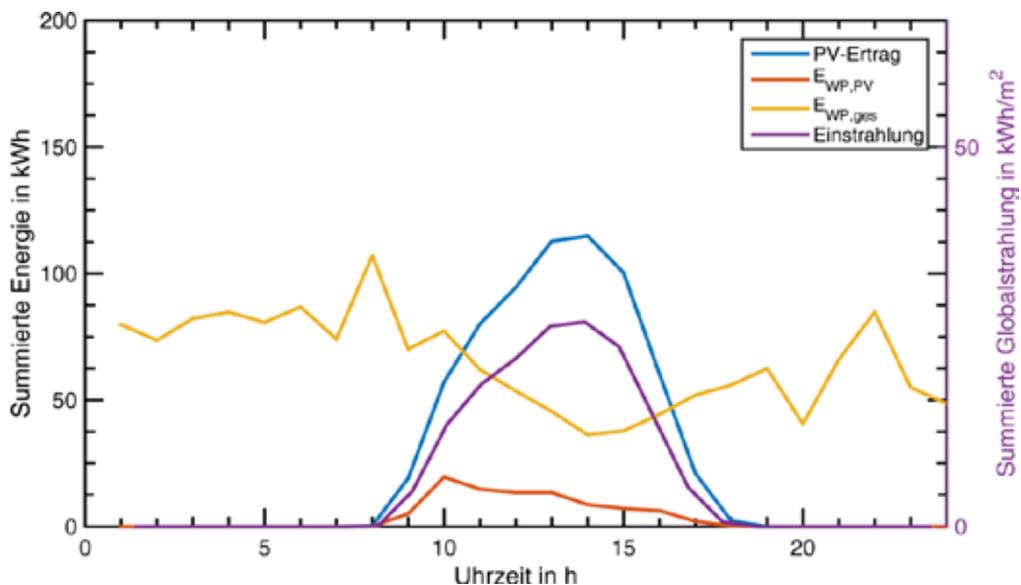


Abbildung 7: Tageszeitliche Verteilung elektrischer Energieflüsse – 30 m² PVT / Winter

Der saisonale Vergleich des Wirkungsgrads der PVT-Kollektoren ergibt, dass durch die niedrigen Temperaturen auf der Quellenseite der WP die Effizienz der elektrischen Energiegewinnung von 12,4 % im Sommer auf 14,1 % im Winter steigt.

4 Ansätze zur Optimierung

Um lokale PV-Erträge für den lokalen Strombedarf einer WP-basierten Wärmeversorgung im Einfamilienhaus effektiv einzusetzen, sind Optimierungen des Systems erforderlich. Als wesentliche Ursache der geringen Deckungsanteile konnte die mangelnde Gleichzeitigkeit von PV-Ertrag und dem elektrischen Bedarf der Wärmepumpe identifiziert werden. Für einen effektiveren Einsatz der PV-Erträge bieten sich entsprechend zwei Möglichkeiten: Die Zwischenspeicherung der elektrischen Energie oder eine Verschiebung der Wärmeerzeugung in Zeiten der PV-Erträge. Zu beiden Möglichkeiten wurden am ISFH Untersuchungen durchgeführt.

Die Zwischenspeicherung elektrischer Energie mittels eines modernen Akkumulatorsystems wurde für gleiche Randbedingungen (Gebäude, Wetterdaten, interne Wärmegewinne und Lastprofile), allerdings mit einem Raumheizsystem ohne Pufferspeicher untersucht [8]. Es konnte gezeigt werden, dass der Deckungsanteil im Raumheizsystem bereits durch eine nutzbare Akkumulatorkapazität von 2 kWh von 2,7 % auf 9,4 % gesteigert werden kann. Im Winter und den Übergangszeiten wird durch die Zwischenspeicherung eine nahezu vollständige Nutzung der PV-Erträge in der Wärmebereitung mittels WP möglich.

Die Wärmeerzeugung in Zeiten solarer Erträge war ein zentraler Bestandteil der Entwicklung eines neuen Sonnenhauskonzepts [9]. Es wurde die Möglichkeit untersucht, mittels Bauteilaktivierung (BTA) die Gebäudemasse als Speicher zu erschließen. Es konnte in Simulationsstudien und durch Messungen an einen Prototyp des neuen Sonnenhauskonzepts nachgewiesen werden, dass die BTA dank niedriger Beladetemperaturen und hoher Kapazität optimal für volatile Wärmeerzeugung auf niedrigem Temperaturniveau geeignet ist. Weiterhin konnte durch Erhöhungen der zulässigen Raumtemperatur um 3 °C in Zeiten solaren Energieangebots zusätzliche Speicherkapazität erschlossen und damit eine Endenergieeinsparung von 10 % erreicht werden.

5 Fazit

Im Beitrag wurde gezeigt, dass eine WP gemeinsam mit EWK und PVT-Kollektoren effiziente Energieversorgung im Einfamilienhaus ermöglichen kann. Die Verwendung von unabgedeckten PVT-Kollektoren auf der Quellenseite einer WP führt, aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus zu günstigen Betriebsbedingungen. Insbesondere um lokal erzeugte elektrische Energie effektiv zum Betrieb der WP zu nutzen, sind weitere Optimierungen des Systems erforderlich. Die präsentierten Optionen lassen erwarten, dass mit optimal konfigurierten und intelligent gesteuerten Systemen eine effiziente Wärmeversorgung im Einfamilienhaus unter minimierter Belastung des Stromnetzes erreichbar ist. Gleichzeitig stellt eine Vermeidung von Netzbezug bei den aktuellen Preisen für elektrische Energie immer auch eine wirtschaftlich attraktive Option dar.

6 Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben „Erdwärmekollektoren und Sonnenkollektoren als optimierte bivalente Quelle für hocheffiziente Wärmepumpensysteme“ wurde in Kooperation mit der Firma tewag-Technologie-Erdwärmeeinrichtungen-Umweltschutz GmbH und dem Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. durchgeführt und mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen FKZ 03ET1275A aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt ausschließlich bei den Autoren.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Klein, S.A. et al. (2010): TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program; Madison: University of Wisconsin - Solar Energy Laboratory
- [2] H. Hirsch und F. Hüsing (2016): Modellierung und Simulation von Erdwärmekollektoren in Wärmeversorgungssystemen, in GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis 06/16, ITM InnoTech Medien GmbH, Augsburg, 2016, ISSN 2195-643X
- [3] Haller, M. et al. (2012): The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 - Part A - General Simulation Boundary Conditions; unter: <http://task44.iea-shc.org/publications> (abgerufen am 15.01.2015)
- [4] Dott, R. et al. (2013): The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 - Part B: Buildings and Space Heat Load; unter: <http://task44.iea-shc.org/publications> (abgerufen am 15.04.2015)
- [5] Verein Deutscher Ingenieure (2015): Richtlinie VDI 4640 Blatt 2 Entwurf (Gründruck) „Thermische Nutzung des Untergrunds – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen“, Düsseldorf, 2015
- [6] Hüsing F., Hirsch, H., und Rockendorf, G. (2016): COMBINATION OF SOLAR THERMAL COLLECTORS AND HORIZONTAL GROUND HEAT EXCHANGERS AS OPTIMIZED SOURCE FOR HEAT PUMPS, in Proceedings of EuroSun 2016, International Solar Energy Conference, doi:10.18086/eurosun.2016.04.18
- [7] Hüsing, F., Mercker, O., Hirsch, H., und Rockendorf, G. (2017): Solare Regeneration von Erdwärmekollektoren – Reduzierter Flächenbedarf bei hoher Effizienz, im Tagungsband des 27. OTTI Symposiums Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2017
- [8] Hüsing, F., Glembin, J. und Rockendorf, G. (2015): Potenziale thermischer Nutzung photovoltaischer Energie, im Tagungsband des 25. OTTI Symposiums Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2015
- [9] Steinweg, J. (2017): Weniger ist manchmal mehr – Sonnenhäuser mit Bauteilaktivierung statt großem Speicher, 9. EffizienzTagung Bauen + Modernisieren, Hannover, 2017