

Neues Konzept zur Wärmeerzeugung für Niedrigenergiehäuser

Integrierte Kopplung von Solarthermie und Wärmepumpe zur Wärmeerzeugung

Henning Schmidt, Ahrensburg

Die Verwendung solarthermischer Kollektoren ist für die sommerliche Trinkwasserbereitung bewährt und wird bei weiter steigenden Energiekosten auch noch weitere Verbreitung finden. Eine Erweiterung der Einsatzmöglichkeit der Kollektoren ist die Gebäudeheizung, wobei der Bedarf dafür bei Niedrigenergie- und Passivhäusern auf das Niveau der Trinkwasserbereitung abgesenkt ist, so dass grundsätzlich über neue Strategien der Wärmeerzeugung nachgedacht werden muss. In diesem Beitrag wird ein System vorgestellt, bei dem der Einsatzbereich der Kollektoren durch Kopplung mit einer Wärmepumpe erweitert wird und durch zusätzliche Nutzung von Solarstrahlung geringer Intensität eine nennenswerte Einsparung an Primärenergie erreicht wird.

Solarthermische Kollektoren können nur dann Wärmeenergie liefern, wenn die Warmegewinne den Verlusten überwiegen. Aufgrund der Verluste liegt der "Ertrag" immer erheblich unter der entsprechenden Globalstrahlung. Bei einem Einsatz von Kollektoren zur Gebäudeheizung ist problematisch, dass der Wärmebedarf genau dann am höchsten ist, wenn die Sonnenstrahlung am geringsten ist – im Winter. Darüber hinaus ist der Ertrag des Kollektors im Winter gering, weil bedingt durch die niedrige Umgebungstemperatur ein großer Anteil der in Wärme umgewandelten Sonnenstrahlung ungenutzt in die Umgebung abfließt. Bei bekannten Systemen zur Heizungsunterstützung werden daher große Kollektorflächen eingesetzt, wodurch die Anlage im Sommer überdimensioniert und die Rentabilität infrage gestellt ist. Ein zusätzlicher Wärmeerzeuger ist in den meisten europäischen Ländern in jedem Fall erforderlich. Dieser zusätzliche Wärmeerzeuger kann z.B. eine Wärmepumpe sein.

Es ist mittlerweile allgemein anerkannt, dass Wärmepumpen hinsichtlich CO₂-Emission und Primärenergieverbrauch Vorteile gegenüber jeglicher Art von Heizkessel haben können. Immer noch problematisch ist jedoch der zur Erschließung der Wärmequellenseite erforderliche Invest, der aufgrund der hohen Kapitalkosten trotz geringer Verbrauchskosten recht hohe Betriebskosten zur Folge hat. Wenn ohnehin solarthermische Kollektoren zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden sollen, können diese auch als Wärmequelle für die Wärmepumpe genutzt werden. Damit kann der für den Bau eines Erdkollektors erforderliche Aufwand reduziert werden.

Ein weiterer Synergieeffekt ist, dass infolge der Temperaturabsenkung im Kollektor, bedingt durch den Wärmeentzug im Verdampfer, der Wärmeübergang des Kollektors an die Umgebung stark reduziert und damit der solare Ertrag des Kollektors erhöht werden kann. Durch die solare Wärmeversorgung des Verdampfers kann außerdem die Leistungszahl der Wärmepumpe aufgrund thermodynamischer Zusammenhänge erheblich gesteigert werden. Damit wird die gewünschte Senkung des Primärenergiebedarfs erreicht.

Die so genutzte Solarstrahlung hat fast, aber doch nicht ganz die gleiche Wertigkeit wie die konventionell

nutzbare Strahlung. Die Möglichkeit der konventionellen Nutzung muss daher ohne Einschränkung erhalten bleiben. Zur Veranschaulichung soll folgende Beispielrechnung dienen:

Kollektorwirkungsgrad ohne nichtlinearen Anteil:

$$\eta = C_0 - C_1 \cdot (T_m - T_U) / S$$

T_m $(T_{K0} + T_R) / 2$; mittlere Kollektortemperatur
 T_U Außenlufttemperatur
 $T_{S,p}$ Speichertemperatur „primär“
 T_{K0} Kollektorausstrittstemperatur
 T_R Speicher-Rücklaufstemperatur
 C_0 Konversionsquotient
 C_1 Kollektorkonstante für Wärmeverluste
 S bezogene Strahlungsleistung

Direktnutzung:

$$T_{S,p} = 40 \text{ °C}, T_{K0, \text{ein}} = 41 \text{ °C}, T_{K0, \text{aus}} = 43,4 \text{ °C},$$

$$T_{K0, \text{m}} = 42,2 \text{ °C}, T_U = 0 \text{ °C}$$

Kollektorkonstanten $C_0 = 0,85$, $C_1 = 3,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$,
 Kollektorfläche 10 m^2 , Strahlung $S = 220 \text{ W}/\text{m}^2$,
 Solestrom $0,05 \text{ kg}/\text{s}$
 Wärmestrom der Sole $Q' = m' \cdot c \cdot \Delta T$
 $\Rightarrow Q' = 0,05 \text{ kg}/\text{s} \cdot 3,65 \text{ kJ}/\text{kg}/\text{K} \cdot 2,4 \text{ K} \approx 440 \text{ W}$
 Nutzwärme $440 \text{ W} - 2,5 \text{ (PEF)} \cdot 26 \text{ W (Kollektorpumpe)} = \mathbf{375 \text{ W}}$
 resultierender Kollektorwirkungsgrad $\eta \approx 0,2$,
 PEF = Primärenergiefaktor

WP-Nutzung:

$$T_{WP, \text{aus}} = 6 \text{ °C}, T_{WP, \text{ein}} = 10 \text{ °C}, T_{K0, \text{m}} = 8 \text{ °C}$$

$$\eta = 0,85 - 3,4 \cdot 8 / 220 = 0,73$$

$$\Rightarrow Q' = 10 \text{ m}^2 \cdot 0,73 \cdot 220 \text{ W}/\text{m}^2 = 1,6 \text{ kW mögliche Kälteleistung}$$

aus WP-Vermessung bekannt:
 $\text{COP}_{0/40} = 4,15$, $\text{COP}_{10/40} = 4,95$
 Antriebsleistung $P_{10/40} = 1,6 / (4,95 - 1) = 405 \text{ W}$
 \Rightarrow Heizleistung = $2,05 \text{ kW}$
 Heizleistung bei gleicher Antriebsleistung $P_{0/40}$:
 $4,15 \cdot 405 = 1,68 \text{ kW} \Rightarrow \mathbf{370 \text{ W Differenz}}$

In dem dargestellten Beispiel reicht der energetische Vorteil der solar erwärmten Wärmepumpen-Wärmequelle an die direkte Nutzung heran. Damit wird klar wie wirkungsvoll das Verfahren sein kann. Dabei hat die Nutzung durch die Wärmepumpe den Vorteil, dass ein 5,5-fach größerer Wärmestrom erzeugt wird. Es handelt sich jedoch auch um ein Beispiel mit An-

nahmen, welche günstige (aber auch sehr häufig auftretende) Voraussetzungen für die Wärmepumpennutzung darstellen: 1. geringe Soletemperatur und damit hoher COP-Gradient und 2. geringe Strahlung und damit bei direkter Nutzung geringer Kollektorwirkungsgrad.

Beschreibung des Systems

Das untersuchte System entspricht der unter DE199 27 027 C1 geschützten Anordnung. Da der Bedarf an Wärme über den ganzen Tag verteilt sein kann, die Sonnenstrahlung aber nur einige Stunden nutzbar ist, ist grundsätzlich ein Wärmespeicher erforderlich, der zumindest einen Tagesbedarf bevorraten kann. Durch die erweiterte Nutzung des Kollektors bei einer weiteren, abgesenkten Temperatur ist ein zusätzlicher Speicher erforderlich. Es handelt sich damit um eine Zwei-Speicher-Anordnung. Dadurch dass alle Komponenten über eine einzige Wärmeträgerflüssigkeit verbunden sind, sind zwischengeschaltete Wärmetauscher weitgehend verzichtbar, was energetisch vorteilhaft ist. Die beiden Speicher werden als "Primärspeicher" für die konventionelle Zwischenspeicherung mit direkter Nutzung der Solarwärme bzw. als "Sekundärspeicher" zur Versorgung einer Wärmepumpe d.h. mit indirekter Nutzung bezeichnet. Aus dem Primärspeicher erfolgt die Wärmeentnahme für Gebäudeheizung und Trinkwasser mit der selben Temperatur. Diese Nutzttemperatur wird fest vorgegeben und durch Wärmezufuhr durch eine Wärmepumpe oder/und durch Solarkollektoren erzeugt. Es können abhängig von Solarstrahlung und Wärmebedarf folgende Betriebszustände eingenommen werden:

1. Solares Beladen eines "Primärspeichers" bei ausreichend intensiver Sonnenstrahlung. Dies bedeutet konventionellen Betrieb der Kollektoren.
2. Solares Beladen eines "Sekundärspeichers" bei infolge sehr starker Sonnenstrahlung voll geladenem Primärspeicher. Hier wird der Sekundärspeicher als Kapazitätserweiterung eingesetzt, die aufgrund der großen Kollektorfläche im Sommer ohnehin erforderlich ist.
3. Umladen vom Sekundärspeicher in den Primärspeicher über Wärmetauscher nach erfolgtem Beladen des Sekundärspeichers gemäß Schaltzustand "2" und nach erfolgtem Verbrauch aus dem Primärspeicher.
4. Beladen des Primärspeichers mittels Wärmepumpe, welche solar vorgewärmtes Wasser im Temperaturniveau "hochpumpt". Das bei geringer Sonneneinstrahlung vorgewärmte Wasser wird entweder direkt der Wärmepumpe zugeführt, oder im Sekundärspeicher zwischengespeichert. Wird es direkt der Wärmepumpe zugeführt, dann sind keine weiteren Wärmetauscher zwischengeschaltet. In diesem Betriebszustand können darüber hinaus, wenn energetisch sinnvoll, die Solarkollektoren in Reihe mit dem Erdkollektor geschaltet werden. Der erforderliche Primärenergieeinsatz wird dadurch erheblich reduziert.
5. Beladen des Primärspeichers mittels Wärmepumpe, welche konventionell dem Erdreich Wärmeenergie entzieht, wenn keine Sonnenstrahlung vorhanden ist. Dies ist üblicher Betriebszustand von Wärmepumpen, allerdings mit dem Unterschied, dass die Wärmekapazität des Erdreichs bei solarer Versorgung der Wärmepumpe geschont wird und daher die Temperatur des Erdreichs höher als bei konventionellem Wärme-

pumpenbetrieb ist. Der erforderliche Primärenergieeinsatz wird dadurch deutlich reduziert.

Die Erkennung des günstigsten Betriebszustandes erfolgt durch Messung der Temperaturen in Kollektor, in Primärspeicher, in Sekundärspeicher und im Erdreich und durch Messung des durch den Kollektor zirkulierenden Massenstroms der Wärmeträgerflüssigkeit. Es muß erkannt werden, wann welcher der beiden Speicher energetisch optimal geladen werden kann und ob die Versorgung der Wärmequellenseite der Wärmepumpe aus Solarkollektor, aus Sekundärspeicher, aus Erdkollektor oder aus einer Reihenschaltung von Erdkollektor und Solarkollektor (in dieser Reihenfolge) erfolgen muß.

Im Betrieb mit einem Zweispeichersystem ist eine häufig auftretende Betriebsbedingung, dass der Sekundärspeicher ein wesentlich niedrigeres Temperaturniveau als der Primärspeicher aufweist. Dann wird beim Beladen des Sekundärspeichers auch das Temperaturniveau des Kollektors abgesenkt und der Primärspeicher könnte erst dann geladen werden, wenn der Sekundärspeicher etwa die Temperatur des Primärspeichers erreicht hat. Das ist aber wie in obigem Beispiel dargelegt energetisch nicht optimal. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit in jedem Betriebspunkt feststellen zu können, ob die aktuelle Einstrahlung ausreichen würde, um die Wärmeverluste auf dem Temperaturniveau des Primärspeichers zu überwinden. Hierzu läßt sich eine Energiebilanz am Kollektor aufstellen, welche die Wärmeübertragung infolge Temperaturdifferenz und den Wärmetransport über das Wärmeträgerfluid erfaßt. Ein Umschalten vom Betrieb mit Sekundärspeicher auf den Betrieb mit Primärspeicher ist sinnvoll, wenn sich ein Kollektorwirkungsgrad $\eta > 0$ und damit die Bedingung $T_{K0} > T_{S,P}$ einstellen kann. Der Umschaltzeitpunkt kann berechnet werden, indem in der Kollektorgleichung $\eta = 0$ eingesetzt und nach der bezogenen Strahlung aufgelöst wird:

$$\Rightarrow S_{\min} = C_1/C_0 (T_{S,P} - T_U)$$

Mindeststrahlung in W/m^2 für $\eta = 0$

Für die Energiebilanz am Kollektor gilt:

$$S_{\text{ist}} = (Q'_{\text{Sole}} + Q'_{\text{Verlust}})/(C_0 \cdot A_{K0}) = [V'_{\text{Sole}}/A_{K0} \cdot \varphi \cdot c \cdot (T_{K0} - T_R) + C_1 \cdot (T_m - T_U)]/C_0$$

mit	
Q'	Wärmestrom
A_{K0}	wirksame Kollektorfläche
V'_{Sole}	Solevolumenstrom
φ	Dichte
c	Wärmekapazität

Wenn $S_{\text{ist}} \geq S_{\min}$ vorausgesetzt wird, läßt sich das Gleichungssystem nach $T_{S,P}$ auflösen, und damit erhält man eine Berechnungsvorschrift für die maximal für ein Umschalten zulässige Speichertemperatur. Das Ergebnis ist also eine Gleichung unabhängig von den (zeitlich veränderlichen) optischen Eigenschaften des Kollektors und unabhängig von der Außenlufttemperatur (kürzt sich beides raus). Es ist insbesondere keine zusätzliche Sensorik erforderlich. Um wieviel $T_{S,P}$ tatsächlich kleiner sein muss, um einen stabilen Betrieb zu gewährleisten, muss experimentell ermittelt werden.

Das System ist steuerungstechnisch anspruchsvoll, dafür entfällt der bei Wärmepumpenanwendungen übliche Invest für einen zweiten Wärmeerzeuger. Außerdem wird die Wärme für Gebäudeheizung und Trinkwasser mit dem gleichen (guten) Wirkungsgrad erzeugt.

Die eingestellte Nutztemperatur sollte 40 °C nicht wesentlich überschreiten, da die Leistungszahl mit etwa 0,09/K von dieser Temperatur abhängt. Entsprechend hat die Auslegung der Heizkörper zu erfolgen.

Die Beurteilung des Komforts der Trinkwassererwärmung erfolgt mit Kriterien der Richtlinie VDI 6003 [1]. Die Komfortkriterien für Waschtisch, Dusche und Sitzwaschbecken werden erfüllt und übertroffen, da das Warmwasser mit einer hohen Wärmekapazität entsprechend 500 l bei einer Schalthysterese des Wärmepumpenreglers von nur +1 K bereitgestellt wird. Die beim Komfortkriterium für Badewanne empfohlene Entnahmetemperatur von 45 °C muss explizit angefordert werden. Das Komfortkriterium für Spüle wird nicht erfüllt, da es sich energetisch nicht lohnt für eine Entnahme von 8 l ein Wasservolumen von 500 l auf 50 °C hochzuheizen und damit den Wirkungsgrad der gesamten Anlage infrage zu stellen. Es wird davon ausgegangen, dass diese Anwendung weitgehend von Spülmaschinen abgelöst ist. Das Komfortkriterium für Whirlpool wird nicht beurteilt, da das Füllvolumen nicht festgelegt ist. Die Entnahmetemperatur von 50 °C ist einstellbar, aber der zeitliche Abstand bei serieller Nutzung von 30 min ist bei hoher Entnahmemenge nicht immer einzuhalten.

Der Bedarf an Wärme zur Gebäudeheizung ist bei Niedrigenergie- und Passivhäusern nicht nur quantitativ sondern auch qualitativ anders als bei herkömmlichen Bauten. Bei Auslegung der Leistung des Wärmeerzeugers und der Heizkörper entsprechend der nach DIN EN 12831 zu ermittelnden Wärmebedarfs ist ein Leistungsüberschuss zur Temperaturänderung des Gebäudes kaum vorhanden. Eine bewusste, regelmäßig tägliche Absenkung um mehrere Kelvin (Nachtabsenkung) ist damit nicht praktikabel. Durch den auf das verschobene Verhältnis von Wärmetransmission zu Wärmekapazität des Bauwerkes zurückzuführenden Effekt treten bei Steuerung der Heizungs-Vorlauftemperatur über einen Außenfühler zudem erhebliche Abweichungen vom Bedarf ab (bei Anstieg der Außentemperatur entziehen die Außenwände den Innenräumen Wärme, die ggf. nicht nachgeliefert wird). Da sich bei dem hier beschriebenen System das Temperaturniveau für Gebäudeheizung an der gewünschten Trinkwassertemperatur orientiert, ist eine unwillkürliche Absenkung ohnehin nicht praktikabel. Es ist daher eine Absenkung implementiert, welche die tägliche Laufzeit der Wärmepumpe auswertet und damit insbesondere die Zeit zum Hochheizen des Primärspeichers nach Absenkung und damit die jeweils stark schwankenden Wärmeleistungen der Wärmepumpe und der Solar Kollektoren berücksichtigt. Die Forderung der Heizungsanlagenverordnung [2] nach einer „Einrichtung zur Verringerung und Abschaltung der Wärmezufuhr1. in Abhängigkeit von der Außentemperatur oder einer anderen geeigneten Führungsgröße und 2. der Zeit“ ist damit erfüllt. Eine Tagabsenkung ist bei diesem Konzept sinnvoller als eine Nachtabsenkung, da so preisgünstiger Nachtstrom genutzt werden kann und die Solarkollektoren aufgrund

niedrigerer Systemtemperatur besser genutzt werden. Das Konzept sieht weiterhin einen hochgenauen, in einem Pilotraum angeordnetem Raumtemperaturregler vor, der eine Vorsteuerung der Wärmebereitstellung zur Beheizung für andere Räume des Gebäudes vornimmt, um die Regelabweichung der mit P-Charakteristik arbeitenden Heizkörperthermostaten zu kompensieren.

Die Funktion einer solchen Auslegung sollte in einem Praxistest untersucht werden. Die Ergebnisse werden im folgenden dargestellt.

Das Potential geringer Solarstrahlung

Die zugrunde liegende Idee des Konzeptes ist die Nutzbarmachung von Solarstrahlung geringerer Intensität, um damit das Temperaturniveau der Wärmequellenseite (Verdampfer) einer Wärmepumpe anzuheben und somit die Leistungszahl zu verbessern. Die Erhöhung des Kollektor-Ertrags wird dadurch erreicht, dass die Kollektortemperatur über den Wärmeübergang im Verdampfer der Wärmepumpe bis auf die Umgebungstemperatur abgesenkt wird. So liefert ein guter Flachkollektor z.B. bei einer Strahlungsintensität von 200 W/m² und einer Temperaturdifferenz von 10 °C zwischen Kollektor und Umgebung eine Warmwasserleistung von 150 W/m², bei einer Temperaturdifferenz von 40 °C jedoch gar keine nutzbare Warmwasserleistung mehr. Bei z.B. 15 m² Kollektorfläche sind bei diesem grenzwertigen Strahlungsniveau also 2,25 kW solare Wärmeleistung nutzbar, wenn es gelingt, die Temperaturdifferenz ausreichend klein zu machen. Die Umsetzung des beschriebenen Konzeptes erfordert zumindest Entwicklungsaufwand, so dass zunächst der potentielle Nutzen quantifiziert werden soll. Dazu muss ermittelt werden, wie groß der Mehr-Ertrag zusätzlich zur konventionell nutzbaren Solarstrahlung ist und welche Temperatur damit an der Wärmequellenseite einer Wärmepumpe erzeugt werden kann. Dazu müssen konkrete klimatische Verhältnisse, technische Kennwerte der Kollektoren, technische Kennwerte der Wärmepumpe und eine vorhergesagte Wärmeentnahme ausgewertet werden. Die angenommenen Bedingungen sind:

- Klimatische Bedingung für Wetterstation Hamburg-Fuhlsbüttel, 53°40' nördliche Breite.
- Gebäude freistehendes EFH 160 m², Wärmebedarf berechnet mit 41 kWh/(m² a) = 6.630 kWh/a.
- Warmwasserbedarf von 5 Personen 16 kWh/d = 5.840 kWh/a gleichmäßig über's Jahr verteilt.
- Kollektortyp ARCON STU, 9,6 m² Absorberfläche, südlich ausgerichtet, 60 °angestellt.
- Kollektorvermessung und Ertragsprognose mit Daten vom Institut für Solartechnik SPF, CH-8640 Rapperswil
- Wärmepumpendaten: COP 4,15 bei 0/40 °C, ΔCOP 0,084/K soleseitig, 0,089/K wasserseitig

Das graphisch aufbereitete Ergebnis dieser Prognose ist in (Bild 1) dargestellt. Nicht zuletzt aufgrund des relativ hohen Warmwasserbedarfs muß auch in den Sommermonaten zugeheizt werden, so dass ein Sekundärertrag über das gesamte Jahr genutzt werden kann, der im Sommer einen COP der Wärmepumpe von bis zu 7 ermöglicht. Zwar beträgt der Ertrag im

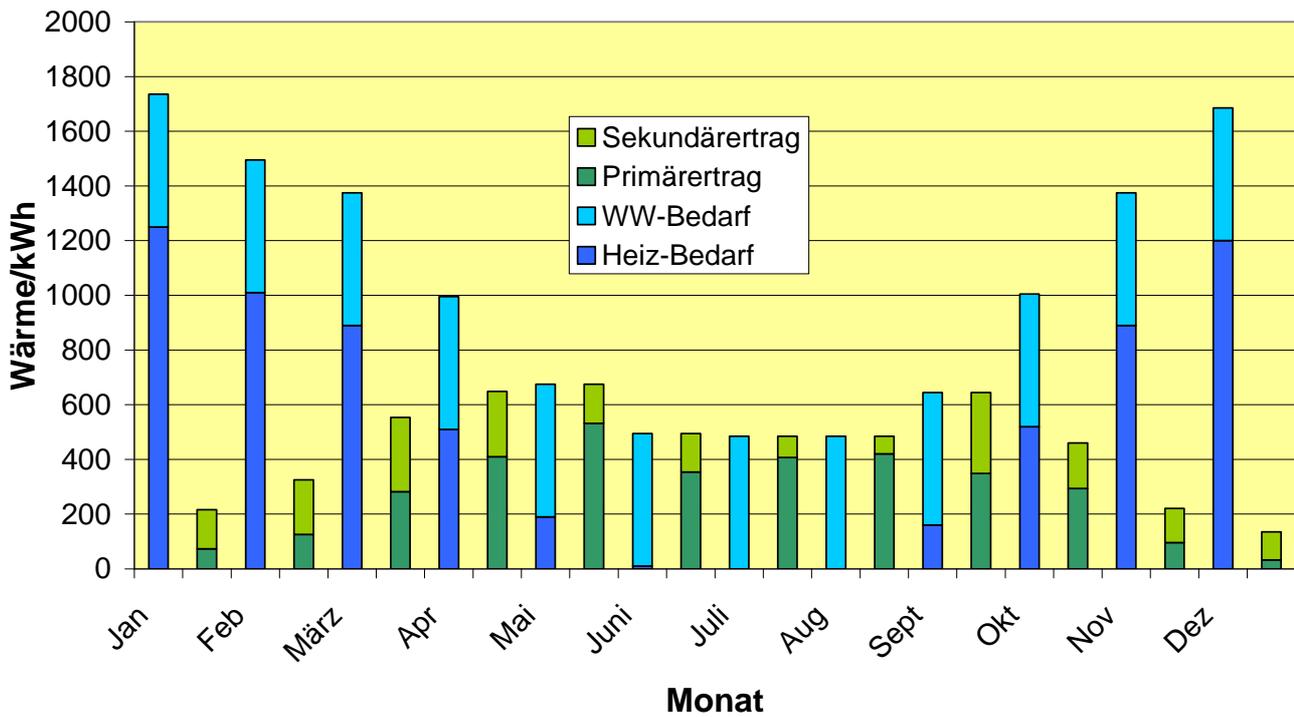


Bild 1: Prognostizierte Wärmebilanz am untersuchten Objekt

Sommer zeitweise das Doppelte des Bedarfs, diese Wärme kann aber mit konventioneller Technik nicht lange genug zwischengespeichert werden, um Schlechtwetterphasen zu überbrücken. Trotz der starken Gebäudeisolierung ist es bis Mai bzw. ab September erforderlich, das Gebäude zu beheizen. In den beiden genannten Monaten ist der Wärmebedarf aber vollständig solar zu decken. Dabei sind im September Sekundär- und Primärertrag etwa gleich. Zum Jahreswechsel fällt der Solarertrag stark ab. Der absolutbetrag des Sekundärertrags fällt zwar ebenfalls stark ab, der Anteil am Gesamtertrag steigt jedoch an. In den Monaten Oktober bis April beträgt der Anteil des

Sekundärertrags am Gesamtertrag mit 1247 von 2560 kWh ca. 50 %. Der bezogene Ertrag beträgt über das gesamte Jahr primär 351,5 bzw. sekundär 205,2 kWh/m². Damit werden primär 27,1 % und sekundär weitere 15,8 % des Wärmebedarfs gedeckt.

Die daraus berechnete, prognostizierte Energieersparnis ist in (Bild 2) dargestellt. Dabei ist das Ergebnis ausschließlich in der Energieform „elektrischer Strom“ dargestellt. Der Unterschied wird für das gesamte Jahr mit 2039 zu 2245 kWh entsprechend einem Verbrauchsvorteil von 10,1 % berechnet.

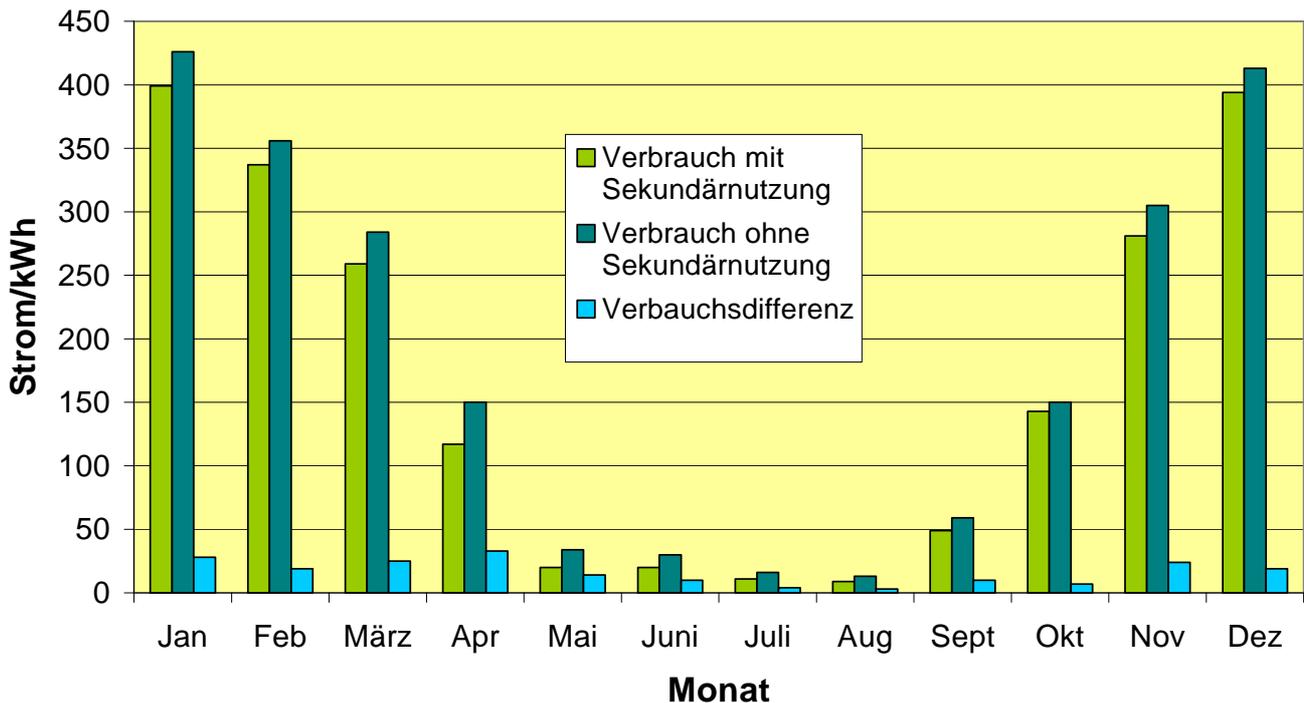


Bild 2: Prognostizierter Stromverbrauch am untersuchten Objekt

Besonderheiten der Wärmepumpe

Auslegung, Bau und Vermessung der Wärmepumpe erfolgten durch den Kooperationspartner Fa. HAUTEC GmbH, An der Molkerei 9, 47551 Bedburg-Hau. Als Kältemittel wird R290 (Propan) eingesetzt, die Norm-Heizleistung beträgt 5 kW bei B0/W35. Der Vermessung der Wärmepumpen-Leistungsdaten ist Voraussetzung für eine Ermittlung des mit der Kopplung verbundenen Einsparpotentials. Außerdem ist die Eignung zum Betrieb mit hoher Soletemperatur Voraussetzung für die vorgesehene Kopplung mit Solarkollektoren. Üblicherweise treten bei für Betrieb mit Erdkollektor ausgelegten Wärmepumpen verdampferseitig niemals Temperaturen über 20 °C auf. Bei der hier vorgesehenen direkten Beaufschlagung mit solar vorgewärmtem Wasser kann die Temperatur aber weit überschritten werden, was auch zur weiteren Erhöhung des COP führt und genutzt werden soll. Durch die Vermessung soll geklärt werden, bei welchen Betriebsbedingungen und bis zu welcher Verdampfer-temperatur die Wärmepumpe betrieben werden kann. Die Eignung zum Betrieb mit hoher Verdampfer-temperatur ist konstruktiv durch Maßnahmen am Kältemittelsammler und am Expansionsventil berücksichtigt.

Die bedeutendste Kennlinie der Wärmepumpenvermessung ist die des COP bei 40 °C als Funktion der Wärmequellentemperatur, da der Einsatz bevorzugt bei dieser Nutztemperatur erfolgen soll. Diese Kennlinie ist im folgenden (Bild 3) dargestellt. Der Verlauf des COP wurde nur im interessierenden Bereich der Quellen-

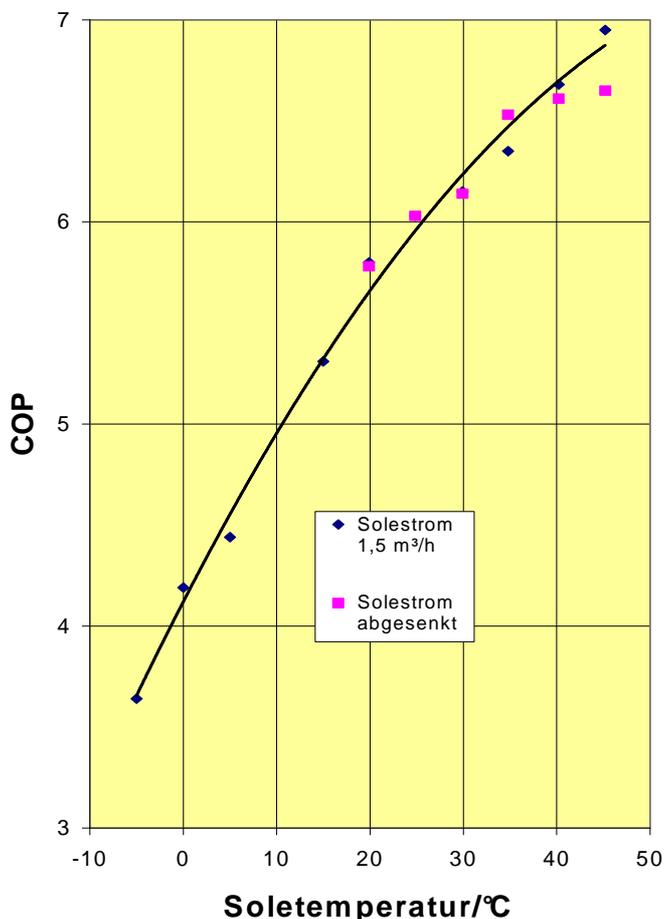


Bild 3: Leistungszahl über der Soletemperatur

temperatur vermessen. Eine Temperatur von weniger als -5 °C tritt in einem Erdkollektor nicht auf, und bei mehr als 45 °C lässt sich eine Temperatur von 40 °C wirtschaftlicher und technisch problemlos mit einem Wärmetauscher erzeugen. Die Ergebnisse der Vermessung zeigen, dass die Kältemittelüberhitzung ab einer Sole(eintritts)temperatur von 20 °C stark, die Verdampfungstemperatur aber nur noch gering ansteigt. Das Expansionsventil drosselt den Kältemittelstrom also verstärkt. Der gleiche Effekt lässt sich mit energetisch geringerem Aufwand dadurch erreichen, dass der Solestrom reduziert wird, wodurch die Soleaustrittstemperatur ansteigt. Dadurch lässt sich Pumparbeit bei der Erzeugung des Solestromes einsparen. Die so eingestellten Betriebspunkte sind in Bild 3 unter „Solestrom abgesenkt“ dargestellt. Er beträgt bei 20 °C noch 1,5 m³/h, bei 45 °C 0,75 m³/h, dazwischen linear reduziert. Es sind (innerhalb der Messgenauigkeit) keine Unterschiede beider Kurven zu erkennen, so dass bei Verwendung eines mechanischen Expansionsventils der Solestrom bei hoher Soletemperatur abgesenkt werden kann, ohne dabei Nachteile in Kauf nehmen zu müssen.

Um wie gewünscht aus den im realen Betrieb, in dem auch eine Absenkfunktion implementiert ist, erfassten Messwerten auf den COP schließen zu können, ist auch die Vermessung der Wärmepumpe bei verschiedenen Niveaus des Wärmesenke erforderlich. Die Ergebnisse der Vermessung sind in (Bild 4) dargestellt. Wassertemperatur ist die Kondensatoraustrittstemperatur. Diese Messwerte wurden in einer anderen Serie aufgenommen als diejenigen von Bild 3, der Solevolumenstrom beträgt hier nur 1,25 m³/h. Daher liegen die COP-Werte etwas niedriger. Dies trifft allerdings nur für die Verläufe bei 0 und 10 °C Soletemperatur zu. Bei höheren Temperaturen sind aufgrund der o.g. Wechselwirkung mit dem Verhalten des Expansionsventils keine Unterschiede feststellbar. In der Auswertung von Bild 4 sind insbesondere die Gradienten von Interesse. Folgende Feststellungen können getroffen werden:

- Die Kurven liegen für höhere Wassertemperaturen näher zusammen als bei niedriger Wassertemperatur. Eine proportionale Absenkung der Wassertemperatur bewirkt also einen überproportionalen Anstieg des COP (Steigung der Kurven).
- Noch deutlicher als in Bild 3 ist erkennbar, dass ab einer Soletemperatur von 20 °C der COP nur noch geringfügig ansteigt (Niveau der Kurven).

Bewertung des Gesamtsystems

Die beschriebene Geräteanordnung wurde in ein in Ahrensburg auf 53°40'30'' nördliche Breite gelegenes und von 5 Personen bewohntes Einfamilienhaus eingebaut und in der Zeit vom 01.10.04 bis 30.04.05 als Gesamtsystem untersucht. Hier sind die Gesamtfunktionalität und das reale Betriebsverhalten im Vergleich mit der Prognose von Interesse. Beim Vergleich mit der Prognose ist zu beachten, dass klimatische Bedingungen bekanntlich erheblichen Schwankungen unterworfen sind.

Die Meßwerterfassung erfolgte bis 31.01.05 manuell 1x täglich von integralen Kenngrößen. Eine genaue Ermittlung des Wirkungsgradvorteils ist damit nicht mög-

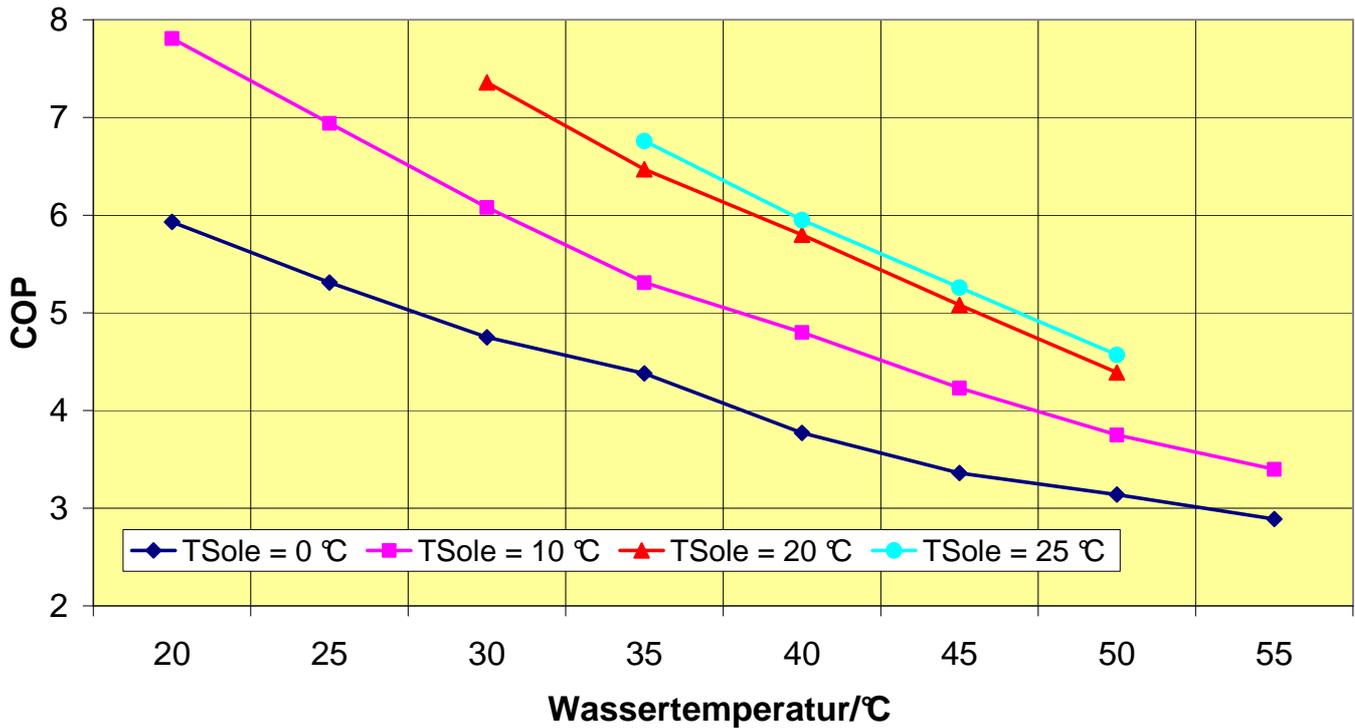


Bild 4: Verlauf der Leistungszahl über der Wassertemperatur für verschiedene Soletemperaturen

lich, da hierzu die zeitliche Zuordnung der Meßwerte zueinander notwendig ist. Es ist aber möglich, diese Messwerte in dem bereits beschriebenen Vorhersagemodell zu verwenden. Ab 01.02.05 wurden dann alle Meßwerte automatisch mit einer Abtastrate von 0,2/min aufgezeichnet und in geeigneter Form ausgewertet.

(Bild 5) zeigt den Vergleich zwischen vorhergesagten zu gemessenen Ertrag im Zeitraum Oktober 2004 bis Juni 2005. In dieser Darstellung fällt auf, dass die Übereinstimmung in einigen Monaten sehr gut ist, in den

anderen Monaten jedoch ausnahmslos niedriger als vorhergesagt liegt. Klimatische Einflüsse sind da eher unwahrscheinlich. Meßfehler sind auszuschließen. Wahrscheinlicher ist, dass die für die Kollektoren angenommenen Kennwerte (Dämmeigenschaft, Transmission, Reflexion) zu günstig sind. Die schlechten Ist-Werte des Oktober können mit der Inbetriebnahme des Steuergerätes erklärt werden. Da die Relation zwischen Sekundär- und Primärertrag für Vorhersage und Messung ähnlich ist, muss die oben beschriebene Erkennung der Umschaltbedingung zwischen Primär-

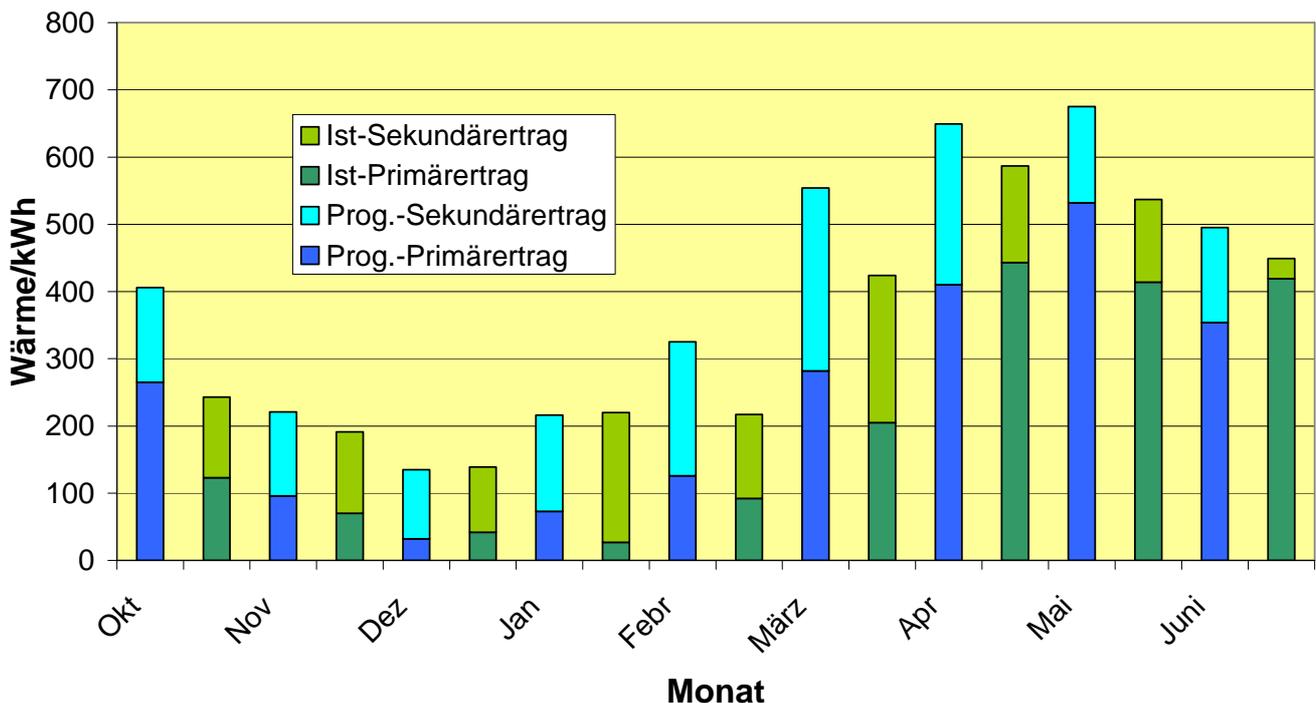


Bild 5: Vergleich der Kollektorerträge zwischen Vorhersage und Messung

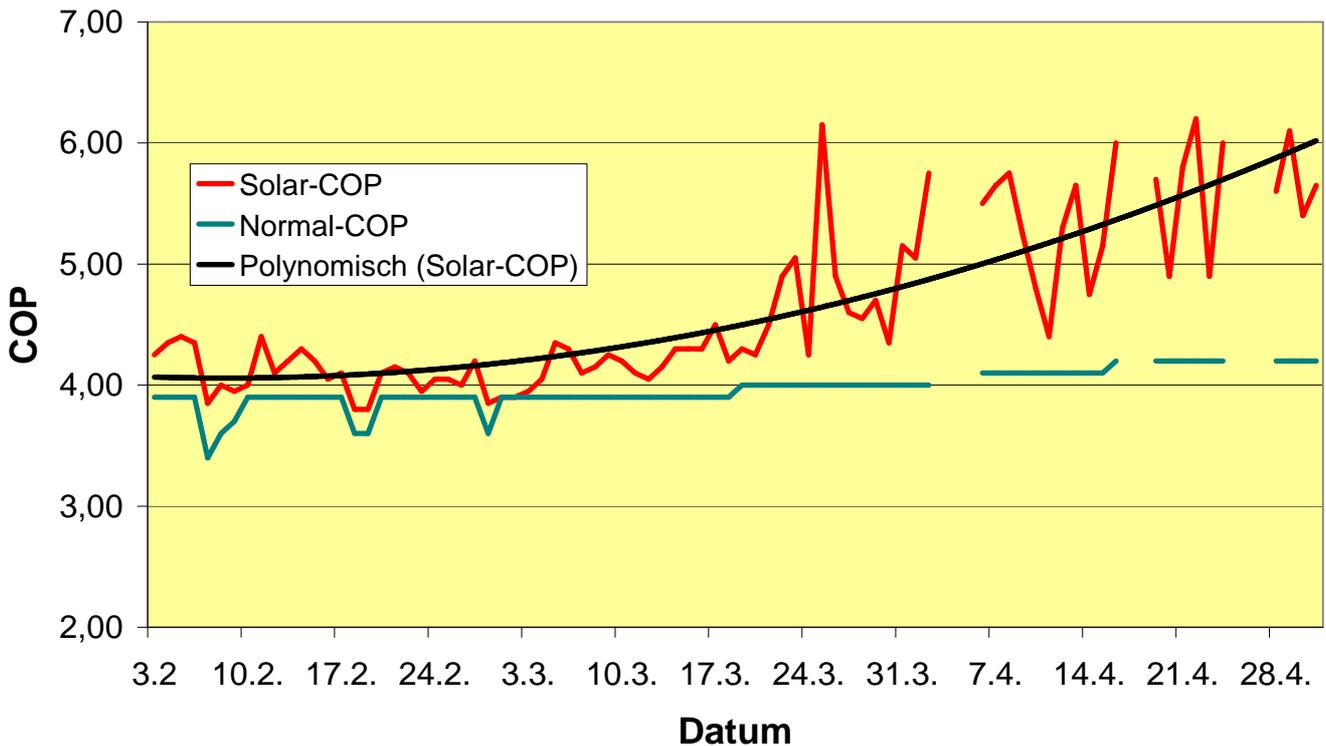


Bild 6: Mittlerer COP von Solarnutzung gegenüber mutmaßlichem Normalverlauf

und Sekundärnutzung gut funktioniert haben. Für die Heizperiode Oktober bis April war der Primärertrag mit 1313 kWh vorhergesagt und ist mit 1002 kWh gemessen. Der Sekundärertrag war mit 1247 kWh vorhergesagt und ist mit 1019 kWh gemessen. Im Juni war aufgrund des höheren Primärertrags der Bedarf an Sekundärnutzung nicht mehr vorhanden.

Durch die vorhandene Sekundärnutzung ist erstmalig die Voraussetzung für eine Energieeinsparung erfüllt.

Der aus der Sekundärnutzung resultierende Einfluss auf den COP der Wärmepumpe ist in (Bild 6) dargestellt. Die im Normalverlauf besonders offensichtlichen, nach unten zeigenden Spitzen sind durch einen für sehr kalte Tage außerplanmäßig notwendigen Bedarf an höherer Warmwassertemperatur begründet. An den Tagen, an denen die Kurven unterbrochen sind, wurde der Wärmebedarf vollständig durch Primärertrag gedeckt – ohne Wärmepumpenbetrieb keine COP-Berechnung. Da aufgrund des hohen Bedarfs bis Mitte

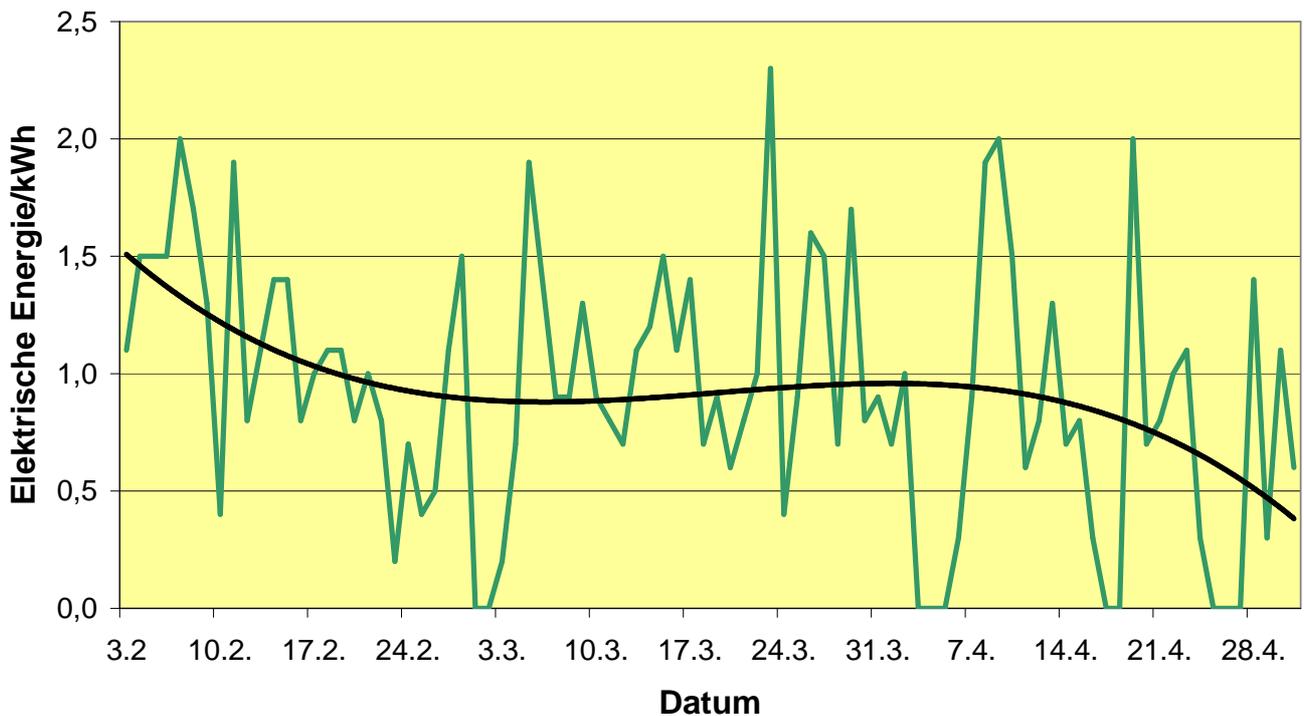


Bild 7: Verlauf der Differenz der Stromverläufe mit/ohne Sekundärnutzung in 2005

März jegliche Solarstrahlung ohne nennenswerte Zwischenspeicherung sofort verbraucht wird (was übrigens die Kollektortemperatur niedrig hält, damit für den Ertrag günstig und ein großer Vorteil der solaren Heizungsunterstützung gegenüber der reinen Warmwasserbereitung ist), sind die Schwankungen im COP-Verlauf relativ gering. Ab Mitte März wird dann zwischengespeichert, so dass große Schwankungen auftreten. Insgesamt wird von der Wärmepumpe in der beschriebenen Anwendung ein wesentlich dynamischerer Betrieb abverlangt als normal.

Ein hoher COP bedeutet zwar direkt einen geringen Stromverbrauch, bei der Beurteilung des Nutzens sind jedoch die Zeitanteile zu berücksichtigen. Dies ist in (Bild 7) erfolgt. Da die Schwankung sehr groß ist, ist über die Werte ein Polynom 3. Grades gelegt. Dabei zeigt sich, dass die mittlere, tägliche Einsparung absolut und über der Zeit recht konstant bei 1 kWh liegt. Der Grund dafür ist, dass in Zeiten geringer COP-Differenz die Zeitanteile hoch sind, in Zeiten hoher COP-Differenz die Zeitanteile gering sind. Der Abfall Ende April resultiert aus der Tatsache, dass immer häufiger der Wärmebedarf durch Nutzung des Primäranteils gedeckt werden kann.

Abschließend ist in (Bild 8) die Prognose der Strom-einsparung der gemessenen Stromeinsparung gegenübergestellt. Im auswertbaren Zeitraum beträgt der Unterschied 77 zu 83 kWh.

Fazit

Die gesetzten Ziel des Vorhabens wurden erfüllt. Mit den gewonnenen Ergebnissen können folgende Aussagen getroffen werden:

- Der Anteil an mit Flachkollektoren konventionell nicht nutzbarer Strahlungsenergie ist nennenswert, beträgt in der untersuchten Konstellation zusätzliche 58 % der konventionell nutzbaren Solarstrah-

- lung und fällt hauptsächlich in der Heizperiode an.
- Es ist möglich, eine Wärmepumpe für einen Betrieb mit hoher Wärmequellentemperatur auszu-legen, ohne Nachteile im Normalbetrieb inkauf-nehmen zu müssen. Gegenüber dem Normal-betrieb beträgt die mögliche Verbesserung des COP bis zu 66 %.
- Es ist möglich, die in DE199 27 027 C1 geschützte Anordnung mit geeigneten Steuerstrategien jeder-zeit stabil zu betreiben.
- Die praktische Energieeinsparung stimmt gut mit der Vorhersage überein. Daher ist das verwendete Prognoseverfahren geeignet, verschiedene Kon-stellationen zu vergleichen: Kollektorfläche, Kolleortyp, Gebäudetyp, Bedarfsprofil uvm.

In der untersuchten Konstellation beträgt die mögliche Einsparung an Primärenergie etwa 10 % entsprechend 200 kWh Strom pro Jahr. Dieser Unterschied ist etwa vergleichbar mit dem zwischen Niedertemperaturkessel und Bannwertkessel. Zusätzlich ist die Entlastung des Erdkollektors zu nennen, was einen einfacheren, kostengünstigeren Aufbau ermöglicht. Darüberhinaus können einige Komponenten sowohl für die Solaran-wendung als auch die Wärmepumpenanwendung benutzt werden, so dass die Anschaffung nur 1-fach erforderlich ist (Ausgleichsgefäß, Überdruckventil, Befüllventil, Steuerung).

Das Projekt wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU unter AZ 21506 finanziell gefördert.

Literatur

- [1] VDI Richtlinie 6003 – Trinkwassererwär-mungsanlagen, Komfortkriterien und Anforderungsstufen, Entwurf September 2003
- [2] Heizungsanlagen-Verordnung – HeizAnIV vom 4. Mai 1998 (BGBl. S.851)

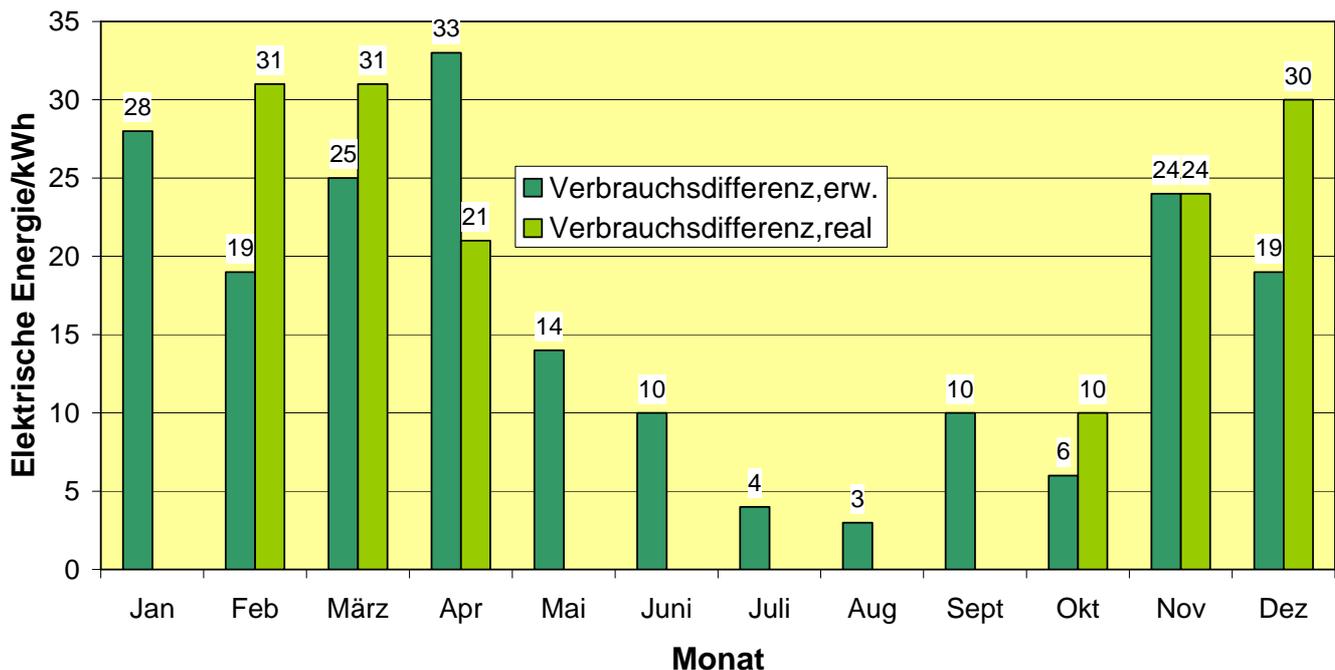


Bild 8: Vergleich der Stromeinsparung für Vorhersage und Messung