

Kombination Solarthermie und Wärmepumpe – Lösungsansätze, Chancen und Grenzen

Hans-Martin Henning, Marek Miara

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Heidenhofstrasse 2, Deutschland 79110 Freiburg

Tel.: 0761 4588 5134

hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de, marek.miara@ise.fraunhofer.de

Internet: www.ise.fraunhofer.de

Einleitung, Hintergrund

In den vergangenen Jahren wurden verschiedene Systeme präsentiert, die eine Kombination von Solaranlagen und Wärmepumpen darstellen. Die Anbieter dieser Systeme kommen in der Regel entweder aus der Solarkollektoren- oder aus der Wärmepumpenbranche. Die Systeme auf dem Markt umfassen einfache Lösungen, bei denen die Solarkollektoren und die Wärmepumpe ohne Interaktion und Ausnutzung möglicher Synergieeffekte nebeneinander arbeiten, bis hin zu ausgeklügelten Systemen, beispielsweise mit speziellen Hybridkollektoren und Phasenwechselmaterialwärmespeichern. Im Wesentlichen sind die drei folgenden Ansätze zu beobachten:

- Die Hauptkomponenten des Systems (Solaranlage und Wärmepumpe) arbeiten nebeneinander ohne Interaktion. Solarkollektoren werden somit genutzt, um den Strombedarf der Wärmepumpe bei der Brauchwasserwärmung zu senken. Vielfach werden solche Anlagen von Anbietern von Wärmepumpensystemen angeboten.
- Die Hauptaufgabe der Wärmepumpe wird als Maßnahme zur Erhöhung der Solarerträge der Solaranlage verstanden. Die Wärmepumpe erlaubt die Nutzung der Solarenergie während Zeiten mit nicht ausreichender Solarstrahlung, um die geforderten Temperaturen für Heizung bzw. Brauchwassererwärmung mithilfe der Solaranlage direkt zu erreichen.
- Schließlich gibt es eine Vielzahl ganzheitlicher Systemkonzepte, die eine Interaktion der Solaranlage und der Wärmepumpe ermöglichen. Die Wärmepumpe nutzt dabei direkt oder indirekt (über einen Wärmespeicher) die Solarenergie als Wärmequelle. Dabei werden unterschiedlichste Speicherkonzepte verwendet, die auch Latentwärme (PCM = phase change material, Eis) oder das Erdreich einbeziehen.

Die wachsende Zahl angebotener Systeme mit der Kombination aus thermischer Solarenergie und Wärmepumpen dokumentiert die hohen Erwartungen an ihren Beitrag zur energiesparenden Bereitstellung von Heizung, möglicherweise Kühlung, und Brauchwassererwärmung. Bis jetzt existiert jedoch kein Ansatz zur ganzheitlichen Betrachtung dieser Systeme unter ökologischen und ökonomischen Aspekten. Außerdem fehlen die entsprechenden Standards und Normen zur Beschreibung und Bewertung. Aktuell ist die Vorbereitung eines Projekts unter dem Dach des Solar Heating & Cooling Programme der Internationalen Energie-Agentur (IEA) im Gange, das sich dieser Thematik umfassend widmen soll.

Stand der Nutzung von Wärmepumpen zur Wärmebereitstellung in Gebäuden

Die Wärmepumpe erlebt aktuell ihre zweite Blütezeit. Obwohl Wärmepumpen seit mehr als 50 Jahren zur Beheizung von Wohngebäuden eingesetzt werden, hatte die Technologie erst in den achtziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts ihre erste Boomphase. Seitdem hat sich viel verändert – die Technik ist heute deutlich weiter fortgeschritten. Richtig an den Wärmebedarf angepasste Wärmepumpen mit einer gut funktionierenden Regelung können gegenüber einer mit fossilen Brennstoffen versorgten Anlage sowohl ökonomische als auch ökologische Vorteile bringen. Die Wärmepumpe ist im Vergleich zu konventionellen Techniken hinsichtlich des Primärenergieverbrauchs und der Begrenzung der Klimabelastung eine vielfach diskutierte Alternative, insbesondere wenn das Erdreich als Niedertemperatur-Wärmequelle genutzt wird, da hier eine relativ gleichmäßige und vergleichsweise hohe Temperatur zur Verfügung steht. Luft/Wasser-Wärmepumpen sind dagegen ökologisch nicht unumstritten. Die steigenden Verkaufszahlen von Wärmepumpenanlagen sowohl für Neubauten als auch für Sanierungsgebäude deuten auf eine zunehmende Popularität dieser Technik hin.

In zwei aktuell laufenden Projekten, die am Fraunhofer ISE durchgeführt werden, wird jeweils eine große Anzahl von Wärmepumpen im realen Einsatz vermessen. Dabei werden mit hoher zeitlicher Auflösung Volumenströme, Temperaturen, Wärmemengen und Stromverbräuche erfasst und per Datenfernabfrage täglich am Institut gespeichert und ausgewertet (weitere Details zu den Projekten unter /1/, /2/, /3/).

Die Bilder 1 und 2 stellen die mittleren Arbeitszahlen der ausgewerteten Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen aus beiden Projekten dar. Die Zahlen auf den grünen Monatsbalken zeigen die Anzahl der ausgewerteten Anlagen für den einzelnen Monat. Der Mittelwert für die erfassten Arbeitszahlen der Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen liegt im Jahr 2008 bei 3.8 (Neubau) und 3.3 (Bestand).

WP Effizienz (Neubau)

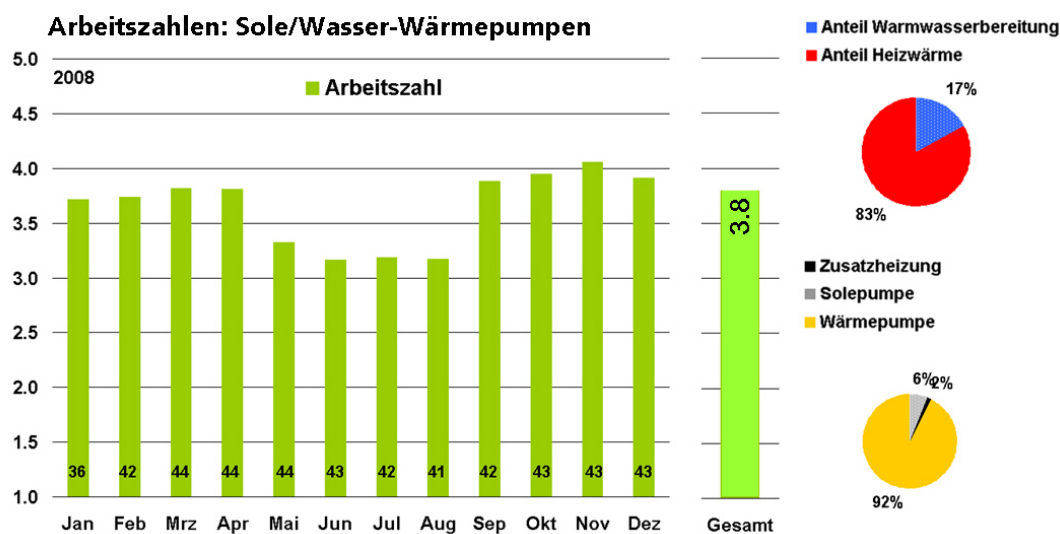


Bild 1: Mittlere Arbeitszahlen der Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen im Jahr 2008 (Neubau)

WP Gebäudebestand (Bestand)

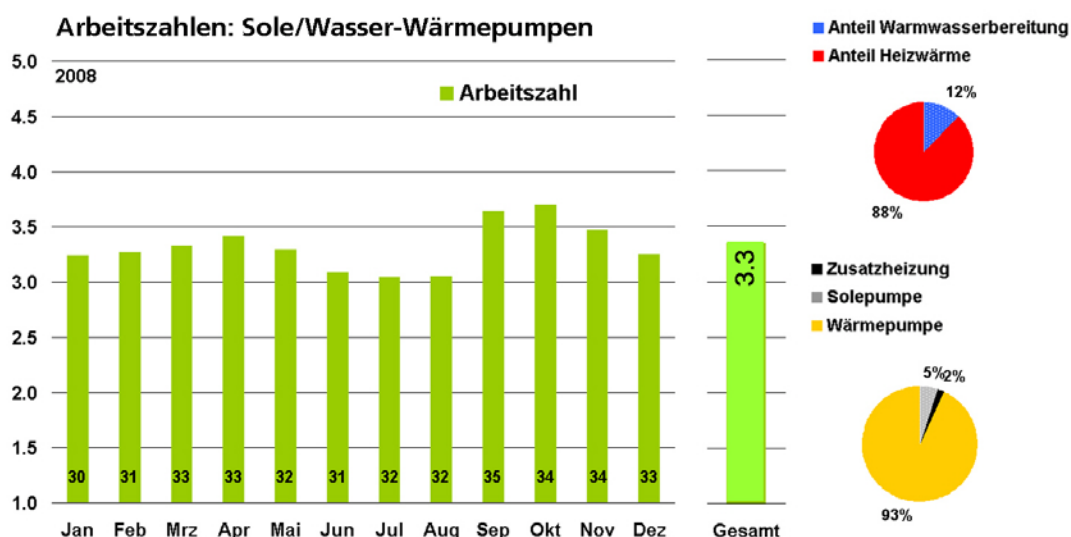


Bild 2: Mittlere Arbeitszahlen der Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen im Jahr 2008 (Bestand)

Die Anlagen sorgen sowohl für die Bereitstellung der Heizwärme als auch für die Erwärmung des Brauchwassers. Für den reinen Heizbetrieb der Wärmepumpenanlagen beträgt der Mittelwert der Arbeitszahlen bei aktuellem Baustandard 4.1. Die elektrische Zusatzheizung (z. B. Heizstab) wird bei der Berechnung der genannten Arbeitszahlen berücksichtigt.

Bild 3 zeigt die mittleren Arbeitszahlen der ausgewerteten Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen aus dem Projekt „Wärmepumpen im Bestand“. Der Mittelwert für die erfassten Arbeitszahlen liegt im Jahr 2008 bei 2.6.

Bei dem Projekt „WP-Effizienz“ gibt es bis jetzt gegenüber den Sole/Wasser-Wärmepumpen deutlich weniger Anlagen mit Luft/Wassser-Wärmepumpen, bei denen Messwerte für eine längere Zeitperiode zur Verfügung stehen. Deswegen sind die gebildeten Mittelwerte weniger repräsentativ als bei den Sole/Wasser-Wärmepumpen. Für die sechs erfassten Luft-Wasser-Wärmepumpenanlagen beträgt die mittlere Arbeitszahl im Jahr 2008 inklusive elektrische Zusatzheizung 3.0.

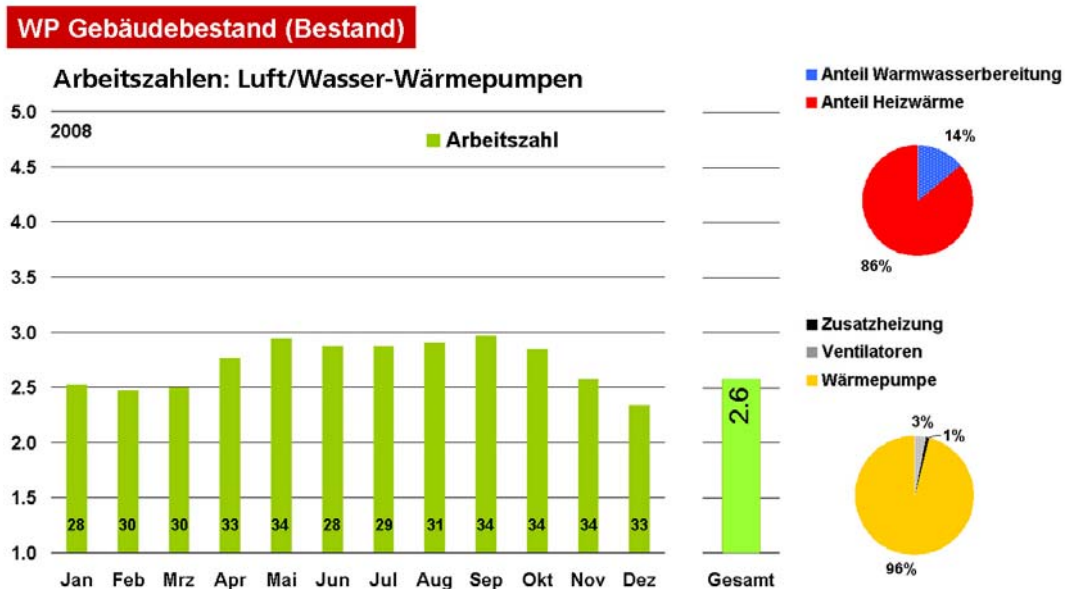


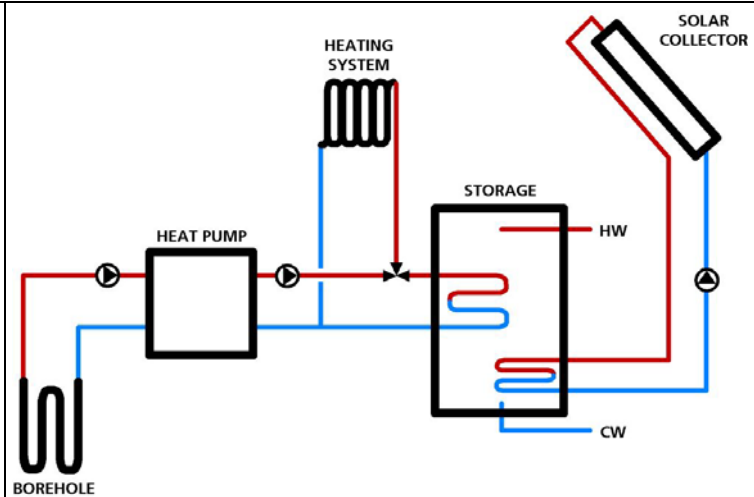
Bild 3: Mittlere Arbeitszahlen der Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen im Jahr 2008 (Bestand)

Übersicht über Systemtypen

Im Folgenden wird versucht, die auf dem Markt identifizierten Kombinationen aus Solaranlagen und Wärmepumpen zu systematisieren und der entsprechende Systemtyp wird jeweils kurz vorgestellt (ohne Anspruch auf Vollständigkeit). Die Anlagenschemata beschränken sich auf die Hauptbestandteile der Systeme. Um die Darstellung zu vereinfachen, wird bei allen Systemen auf dieselbe Verbindung mit dem Heizsystem zurückgegriffen. In der Klammer werden beispielhaft Anbieter der jeweiligen Systeme angegeben (ebenfalls ohne Anspruch auf Vollständigkeit). Die Hersteller-Informationen basieren im Wesentlichen auf einer Internet-Recherche und den dort verfügbaren Dokumenten sowie auf einer im Rahmen der Deutschen Solar-Thermie-Technologie-Plattform (DSTTP) erstellten Kurzstudie /4/.

Systemtyp 1 – „Unabhängig voneinander operierend“

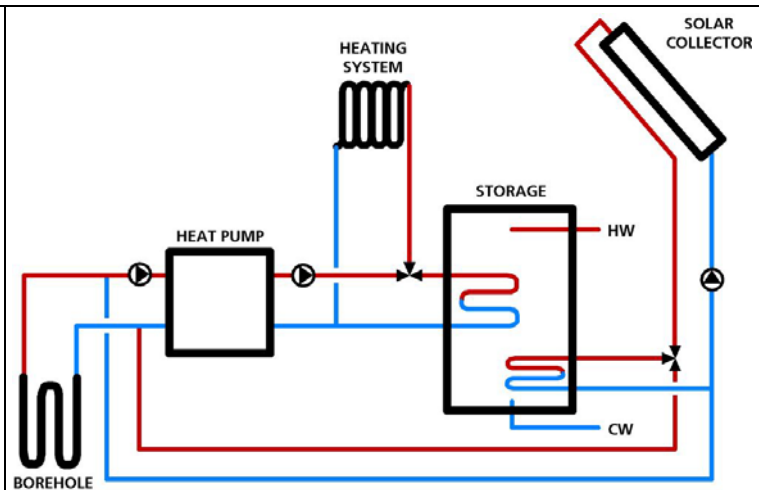
(im Angebot diverser Wärmepumpen- und Solarkollektorhersteller wie Viessmann, Vaillant, Nibe, Bosch Thermotechnik, ...)



- Die Hauptbestandteile der Anlage arbeiten unabhängig voneinander.
- Unkomplizierter Aufbau; Regelung für Wärmepumpe und Solaranlage getrennt.
- Hauptvorteil – neben der Brauchwassererwärmung durch Solarenergie und die damit direkt verbundene Vermeidung des Stromeinsatzes – ist die Senkung der benötigten Durchschnittsvorlauftemperatur auf Kondensatorseite und der damit verbundene Anstieg der Arbeitszahl
- Es findet keine aktive Regenerierung der Wärmequelle durch Solarenergie statt, sondern lediglich eine reduzierte Wärmeabnahme im Sommer aufgrund der solaren Brauchwassererwärmung.

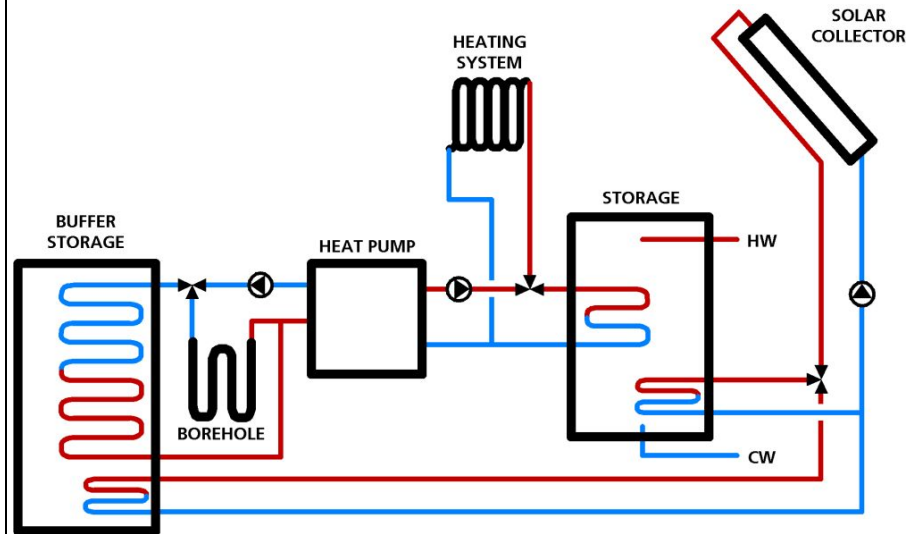
Systemtyp 2 – „Aktive Regeneration“

(IDM Energie Systeme, Immosolar, Schüco, Roth Werke)



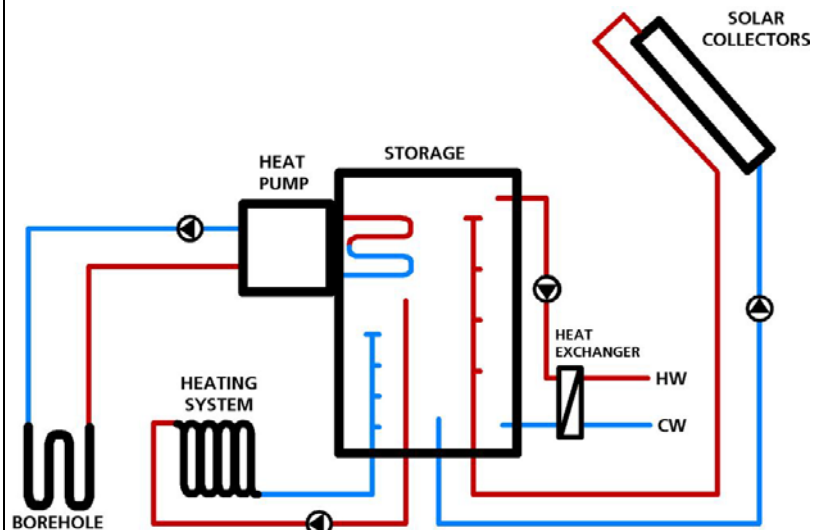
- Zusätzliche Nutzung der Solarenergie zur Regenerierung der Solewärmequelle
- Die aktive Regenerierung kann eine Dehydrierung/das Abtrocknen der Sole im Bohrbereich verursachen, was einen Nachteil im Hinblick auf eine zukünftige natürliche Regeneration darstellt. Ein weiteres Problem ist ein Abfluss der gespeicherten Energie über das Grundwasser. Dieser Prozess kann den Vorteil der aktiven Regeneration des Bohrbereiches erheblich verringern, hängt jedoch von lokalen Gegebenheiten ab
- Das System erhöht den Gewinn an Solarenergie und verhindert eine Stagnation des Solarkollektors durch hohe Sonneneinstrahlung und wenig Energieverbrauch im Sommer

Systemtyp 3 – „Großer Pufferspeicher“
(Chemowerk-CEMO, Soltex, Thermosolar)



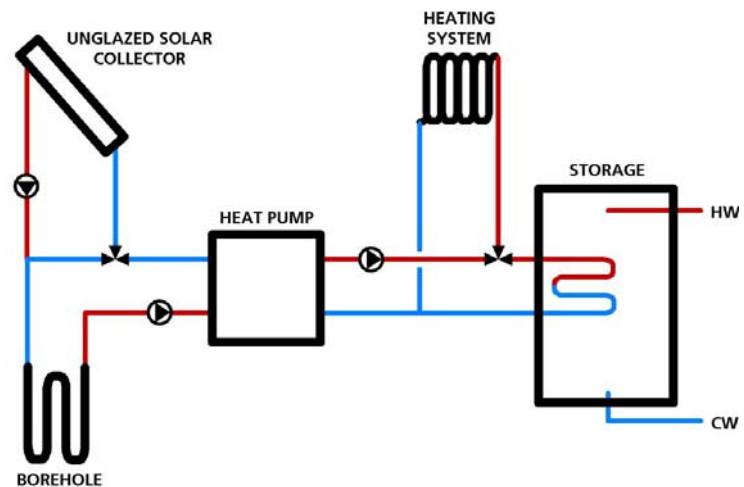
- Der Pufferspeicher verfügt über ein großes Volumen (z. B. 800 l) und dient als Wärmequelle für die Wärmepumpe; kommt es zu Energiemangel innerhalb des Speichers, nutzt die Wärmepumpe das Erdreich als Wärmequelle.
- Als Konsequenz der vielen hydraulischen Komponenten (unter anderem zwei Wärmespeicher) benötigt das System mehr Platz, verursacht einen höheren Kostenaufwand und muss aufwändig geregelt werden.
- Eine aktive Regenerierung der Wärmequelle ist meistens nicht vorgesehen.
- Das System ermöglicht eine höhere Vorlauftemperatur für den Verdampfer und damit einen erhöhten Solarenergiegewinn

Systemtyp 4 – „Maximale Integration“ (SolvisMax – SOLVIS)



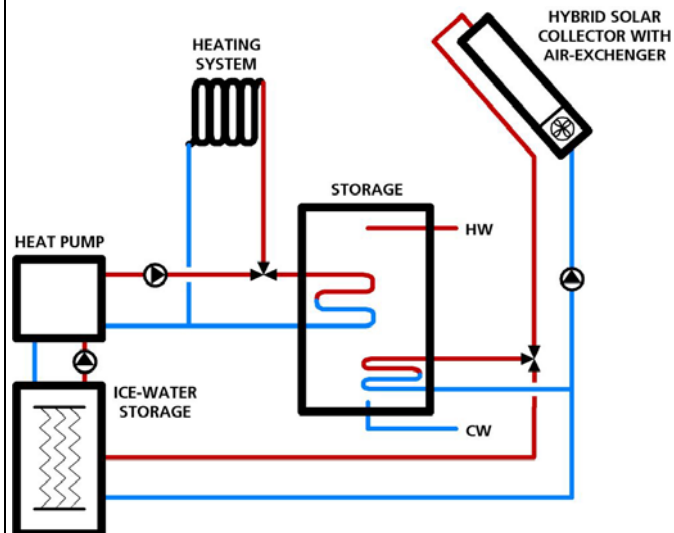
- Kernbestandteil des Systems ist der Schichtwärmespeicher
- Der Verflüssiger der Wärmepumpe ist direkt im Wärmespeicher platziert
- Keine aktive Regenerierung der Wärmequelle. Solaranlage und Wärmepumpe operieren unabhängig voneinander, sind jedoch über den Wärmespeicher verbunden (solares Kombisystem)
- Sehr kompakt und platzsparend mit nur einem Steuerelement
- Brauchwassererwärmung erfolgt über externen Wärmetauscher

Systemtyp 5 – „Unverglaste Solarkollektoren“ (Rheinzink)



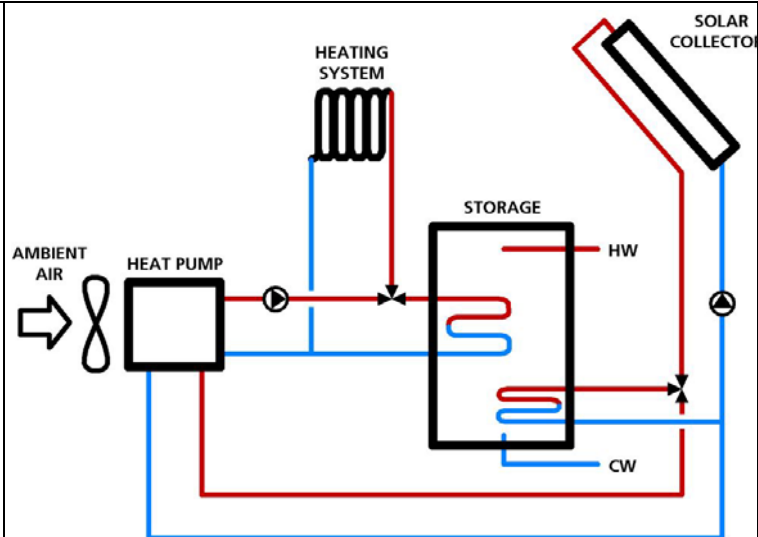
- Das System nutzt die unverglaste Solarkollektoren zur Erhöhung der Vorlauftemperatur für die Wärmepumpe und für die aktive Regenerierung des Erdreichs, jedoch nicht zur Brauchwassererwärmung
- Die nicht abgedeckten Solarkollektoren sind kostengünstiger als übliche abgedeckte Kollektoren und ermöglichen eine Integration der Kollektoren in der Hausfassade
- Ähnlich wie bei anderen Systemen mit aktiver Regenerierung der Solewärmequelle besteht die Möglichkeit, die Erdsonden kleiner zu dimensionieren

Systemtyp 6 – „Solares Heizungssystem“ (System SOLAERA der Fa. Comsolar; andere Systeme mit Eisspeicher bieten die Firmen Aquasol und terra sunenergy an)



- Hauptbestandteile des Systems sind spezielle Hybridsolarkollektoren mit Luftwärmetauscher, Wärmepumpe, Trinkwasserspeicher und Eisspeicher
- Der Eisspeicher akkumuliert die durch die Hybridkollektoren gewonnene Energie mit hoher Energiedichte. Die Wärmepumpe nutzt als Wärmequelle den Eisspeicher und produziert Wärme für Heizung und Brauchwasser
- Geringe Speicherverluste auf Grund niedriger Speichertemperatur
- Keine Erfordernis für Erdsonden oder Erdkollektoren als Wärmequelle
- Der Hybridkollektor nutzt die Sonneneinstrahlung oder die Umgebungsluft

Systemtyp 7 – „Luft-Wärmepumpen mit solarer Unterstützung“ (SOLution, ratiotherm, Sonnenkraft)



- Hauptbestandteil des Systems sind Solarkollektoren, eine Luft-Wasser-Wärmepumpe sowie ein Wärmespeicher
- Die Wärmepumpe nutzt die Energie der Solarkollektoren oder der Umgebungsluft als Wärmequelle; in einigen Anlagen kommen spezielle Verdampfer zum Einsatz, die sowohl mit Luft als auch mit Sole betrieben werden können
- Der Solarkollektor produziert direkt Wärme für Heizung und Brauchwasser, sofern das erforderliche Temperaturniveau erreicht wird
- Es sind keine Erdsonden oder Erdkollektoren erforderlich

Ergebnisse von Systemsimulationen

Im Folgenden werden erste Ergebnisse von Systemsimulationen dargestellt, die einen Anhaltspunkt dafür geben sollen, welche Verbesserungen erreichbar sind, wenn eine übliche Solaranlage und eine Luft-Wasser-Wärmepumpe kombiniert werden und das nutzbare Temperaturniveau der Solaranlage dadurch ausgedehnt wird, dass die Solaranlage als Niedertemperatur-Wärmequelle der Wärmepumpe genutzt wird. Die wichtigsten Randbedingungen der Beispielrechnung sind:

- Wetter: Testreferenzjahr 13 (Passau)
- Datenbasis: Stundendaten, Simulation in 1-Minuten-Schritten
- Einfache Modelle (stationär außer Speicher)
- Flachkollektor, 40° nach Süden geneigt, Kollektorbruttofläche 6 m²
- Kennlinien-Modell Wärmepumpe: Arbeitszahl $\varepsilon = f(T_{\text{Kondensator}} - T_{\text{Aussenluft}})$
- Lastprofil Einfamilienhaus 140 m²: Heizwärmebedarf 8400 kWh/a (entsprechend 60 kWh/m²a), Wärmebedarf Brauchwasser 2480 kWh/a (17,7 kWh/m²a)

Als Systemkonzept wurde eine ähnliche Variante wie Systemtyp 7 gewählt; allerdings sind im Rechenmodell die Solaranlage und die Wärmepumpe über einen Niedertemperatur-Pufferspeicher gekoppelt. Die Solaranlage gibt Wärme an diesen Pufferspeicher ab, sofern das Temperaturniveau nicht für eine direkte Versorgung von Heizung und/oder Brauchwasserbereitung ausreicht. Die Wärmepumpe nutzt je nach verfügbarem Temperaturniveau entweder Wärme aus dem Niedertemperatur-

Pufferspeicher oder den Aussenluftwärmetauscher. Die verwendete Wärmepumpen-Kennlinie zeigt Bild 4.

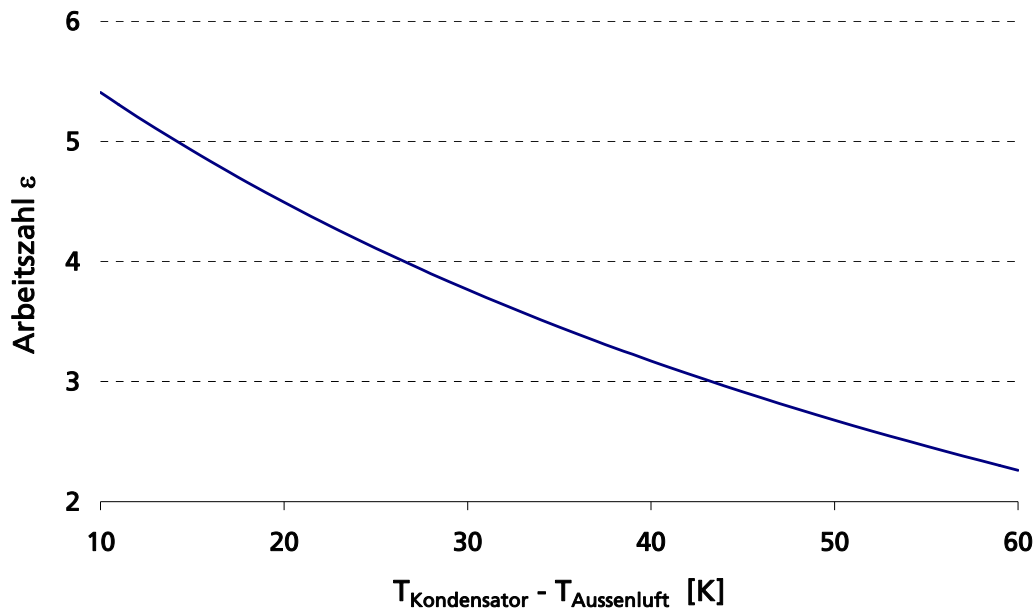


Bild 4: in den Simulationsrechnungen verwendete Kennlinie der Wärmepumpe

Folgende Systemvarianten wurden verglichen:

- Variante 1: Referenzsystem Luft-Wasser-Wärmepumpe ohne Solaranlage
- Variante 2: Luft-Wasser-Wärmepumpe und Solaranlage getrennt: Solaranlage arbeitet ausschließlich direkt für Brauchwassererwärmung
- Variante 3: Luft-Wasser-Wärmepumpe und Solaranlage kombiniert: Solaranlage liefert Wärme für Brauchwassererwärmung, Heizung oder als Wärmequelle für Wärmepumpe durch Wärmeabgabe an Niedertemperatur-Pufferspeicher (System 3: Solar und WP kombiniert)
- Variante 4: Luft-Wasser-Wärmepumpe und Solaranlage kombiniert mit Latentwärmespeicher. Bei dieser Variante wird ein hypothetischer Latentwärmespeicher als Niedertemperatur-Pufferspeicher angenommen, der eine Schmelzwärme von 330 kJ/kg (entsprechend Eis) aufweist, dessen Schmelzbereich allerdings zwischen 15 und 20°C liegt. Das Volumen wurde identisch angenommen wie bei Variante 3 (300 Liter).

Tabelle 1 stellt die Ergebnisse vergleichend dar. Dabei werden folgende Größen verwendet:

- Solarer Deckungsanteil Brauchwasser, SF_{BW} : Anteil der solaren Deckung am Brauchwasserbedarf
- Solarer Deckungsanteil gesamt, SF_{gesamt} : Anteil der solaren Deckung an der Summe aus Wärmebedarf für Brauchwasser und Heizung
- Arbeitszahl der Wärmepumpe, ε_{WP} : Verhältnis aus am Kondensator abgegebener Wärme und bezogener elektrischer Energie

- Arbeitszahl System, ϵ_{System} : Verhältnis aus Wärmebedarf für Brauchwasser und Heizung und bezogener elektrischer Energie

Variante	#1	#2	#3	#4
Beschreibung	Referenzsystem: nur Luft-WP	Solaranlage und Luft-WP getrennt	Solaranlage und Luft-WP kombiniert; Niedertemperaturpufferspeicher (Wasser)	Solaranlage und Luft-WP kombiniert; Niedertemperaturpufferspeicher (Latentspeicher mit Schmelzbereich 15..20°C)
SF_{BW}	-	59.4%	57.9%	57.9%
Sf_{gesamt}	-	13.5%	14.5%	14.5%
ϵ_{WP}	3.03	3.15	3.17	3.52
ϵ_{System}	3.00	3.59	3.65	4.05

Tabelle 1: Ergebnisse der verglichenen Systemvarianten

Die Ergebnisse zeigen zunächst, dass die Nutzung einer üblichen solaren Brauchwasseranlage zu einer deutlichen Reduktion des Stromverbrauchs im Vergleich zu einer reinen Versorgung mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe führt. Die Rechnungen zeigen dabei, dass sich dieser Effekt einerseits aus dem unmittelbaren Beitrag der solar bereit gestellten Wärme und andererseits aus den günstigeren Betriebsbedingungen für die Wärmepumpe und der resultierenden erhöhten Arbeitszahl der Wärmepumpe, ϵ_{WP} , von 3.03 auf 3.15 zusammensetzt. Die Nutzung der Solaranlage als Niedertemperaturwärmequelle für die Wärmepumpe bringt in der hier untersuchten Variante (Niedertemperatur-Pufferspeicher, Wasser, 300 Liter) eine weitere Steigerung der System-Arbeitszahl, ϵ_{System} , von 3.59 auf 3.65. Interessant erscheint der Einsatz eines Latentwärmespeichers, der die Niedertemperaturwärme der Wärmepumpe auf einem Temperatur-Niveau von 15-20°C einspeichern kann. Der Ersatz des Wasserspeichers durch einen derartigen Latentwärmespeicher führt zu einer signifikanten Erhöhung der System-Jahresarbeitszahl auf über 4. Hier ist sicher noch eine Optimierung möglich, wobei ein höheres Temperaturniveau des Schmelzbereichs günstiger ist für die Arbeitszahl der Wärmepumpe und ungünstiger für die Solaranlage (und entsprechend umgekehrt). Der optimale Schmelzbereich ist insofern von der Wärmepumpe (Kennlinie), den Kennwerten der Solaranlage als auch dem Klima abhängig.

Bild 5 zeigt die Monatssummen des Wärmebedarfs für Heizung und Brauchwasser sowie die Einstrahlung auf den Solarkollektor und die Stromaufnahme der Wärmepumpe. Bild 6 zeigt die Monatssummen der genutzten Solarenergie sowie der Einstrahlung auf den Solarkollektor im Vergleich. Die Grafiken gelten für Variante 4, d.h. die Anlage mit Latentwärmespeicher.

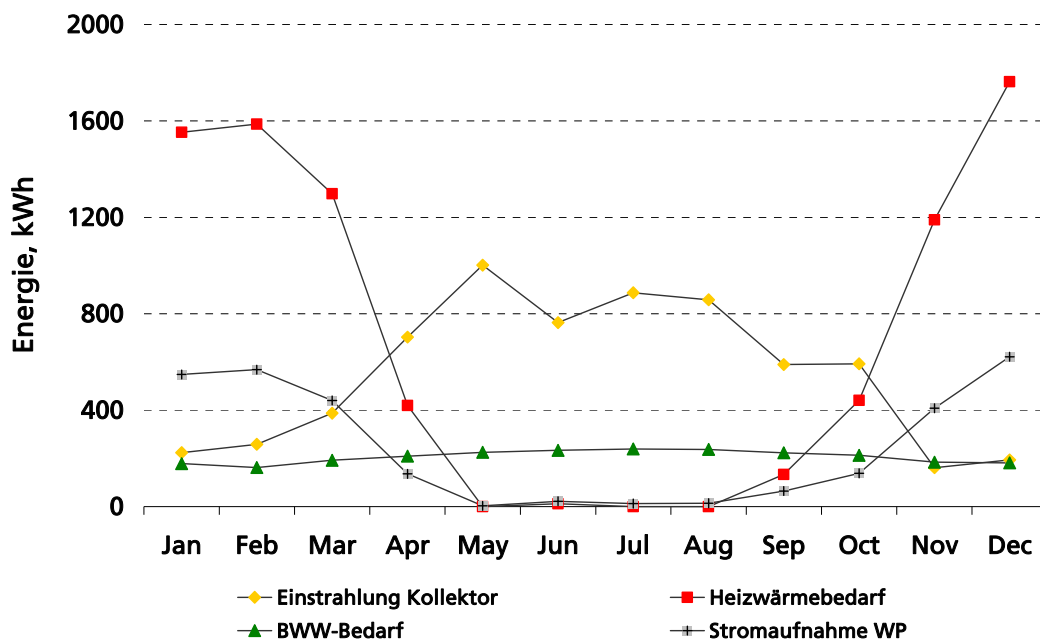


Bild 5: Monatssummen von Wärmebedarf für Heizung und Brauchwasser, Einstrahlung auf den Kollektor und Stromaufnahme der Wärmepumpe

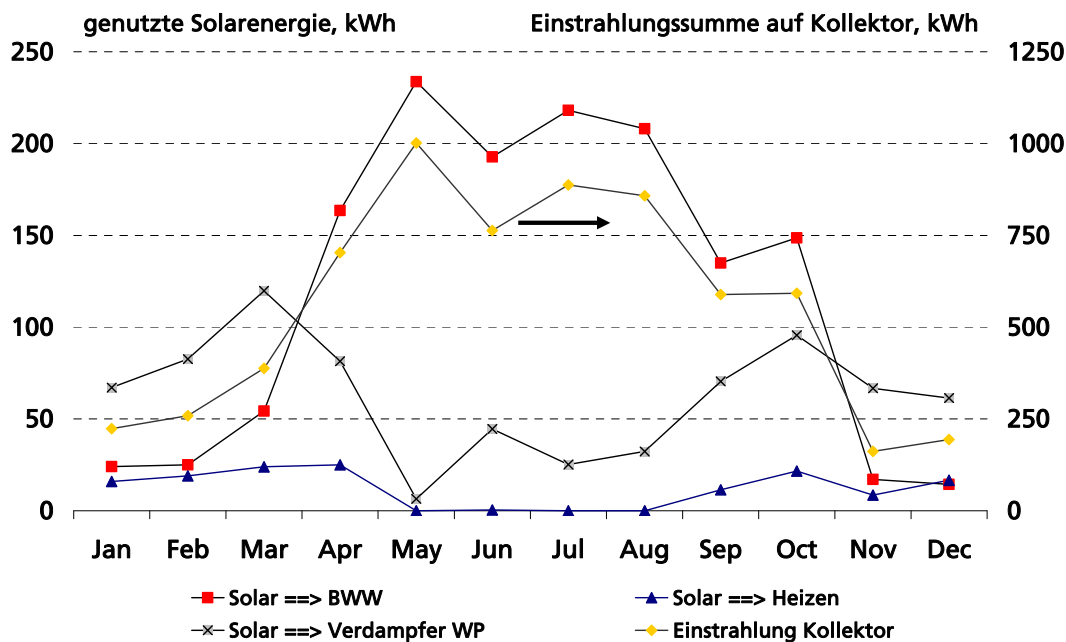


Bild 6: Monatssummen der genutzten Solarwärme für Brauchwassererwärmung (BWW), Heizung direkt (Heizen) sowie als Niedertemperaturquelle für die Wärmepumpe (Verdampfer WP)

Zusammenfassung und Ausblick

Wärmepumpen haben einen guten technischen Stand erreicht und ermöglichen bei einer entsprechenden Auslegung, Installation und Betriebsführung eine primär-energetisch günstige Wärmeversorgung von Wohnhäusern. Sowohl technische

Weiterentwicklungen bei den Wärmepumpensystemen als auch eine steigende Primärenergieeffizienz des Stromnetzes werden diese Tendenz in der Zukunft verstärken. Die Kombination von Wärmepumpen und solarthermischen Anlagen erlaubt eine darüber hinaus gehende signifikante Reduktion des Energiebedarfs für Heizung und Brauchwassererwärmung. Durch diese Kombination eröffnet sich eine Vielfalt an technischen Lösungsansätzen, von denen heute bereits etliche am Markt verfügbar sind. Das Potenzial dieser Kombination ist jedoch sicher noch nicht vollständig ausgeschöpft und durch zusätzliche neue Komponenten, wie z.B. den in diesem Beitrag untersuchten Latentwärmespeicher auf der Seite der Niedertemperatur-Wärmequelle ergeben sich weitere, sinnvolle Lösungsansätze. Die wesentliche Herausforderung liegt in den folgenden Punkten:

- Identifikation und Entwicklung von unter energetischen und kostenmäßigen Gesichtspunkten optimierten technischen Lösungsansätzen
- Umsetzung derartiger Lösungsansätze in ausgereifte, betriebssichere und für den Installateur handhabbare Produkte
- Entwicklung und Umsetzung angepasster Regelungskonzepte
- Entwicklung von Bewertungsverfahren, in denen die unterschiedlichen Systemkonzepte fair und unter Verwendung klar definierter Kriterien vergleichend bewertet werden können
- Entwicklung und Bereitstellung von handhabbaren Auslegungsverfahren, die eine angepasste Auslegung je nach Klimabedingungen und Gebäudestandard erlauben

Das Solar Heating & Cooling Programme der Internationalen Energie-Agentur (IEA) hat die Thematik der Kopplung von elektrischen Wärmepumpen und solarthermischen Anlagen als wichtiges Thema identifiziert und die Installation eines internationalen Projektes im Rahmen dieses Programms, das die angesprochenen Themenkomplexe adressieren soll, befindet sich in der Vorbereitung.

Literaturhinweise

- /1/ Miara, Marek: Wärmepumpen-Feldtest, Mit Sorgfalt effizient, in: TAG Fachplaner. Das Magazin für die Technische Gebäudeausrüstung 10, 7. Jahrgang, Stuttgart, Okt. 2008, S. 68-70
- /2/ Miara, Marek: Richtig geplant – wirklich gespart, in IKZ Haustechnik, Heft 3, Feb. 2009, S. 28-32
- /3/ Miara, Marek: Feldmessung – neuer Wärmepumpen „Wärmepumpen-Effizienz“ – Zwischenergebnisse, in: 6. Forum Wärmepumpe, Tagungsband 2008, Berlin 2008, S. 40-44
- /4/ Müller, Holger; Trinkl, Christoph; Zörner, Wilfried: Kurzstudie Niederst- und Niedertemperaturkollektoren, Präsentation DSTTP-Mitgliederversammlung. Frankfurt/Main, 24.09.2008