

Einfluss der Speicherkonzepte

Effizienz von Wärmepumpensystemen unter realen Nutzungsbedingungen

Im Bereich Heizung und Trinkwassererwärmung nehmen Wärmepumpensysteme einen immer höheren Stellenwert ein. Dies spiegelt sich deutlich in wachsenden Marktanteilen im Neubaubereich wider. Eine ähnliche Entwicklung kann bei der Gebäudesanierung und dem Austausch von Systemen mit fossilen Brennstoffen beobachtet werden. Die Vorteile der Wärmepumpen scheinen die Investoren zunehmend zu überzeugen.

Betrachtet man diese Vorteile unter ökonomischen, energetischen und ökologischen Gesichtspunkten, so hängen sie stets direkt von der Effizienz der Wärmepumpe ab. Um diese zu ermitteln und das Systemverhalten von Wärmepumpen zu analysieren, führt das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE aus Freiburg zwei große Feldtests durch und untersucht dabei knapp 200 Wärmepumpenanlagen.

Der Artikel beschreibt die Ergebnisse aus diesen beiden Projekten und fokussiert dabei die Rolle von zusätzlichen Speichern im Heizkreis.

Weiterhin wird auf die Haupterkenntnisse hingewiesen und die zukünftige Entwicklung der Wärmepumpen auf dem Markt der Wärmeerzeugungssysteme thematisiert.

Vorstellung der Projekte

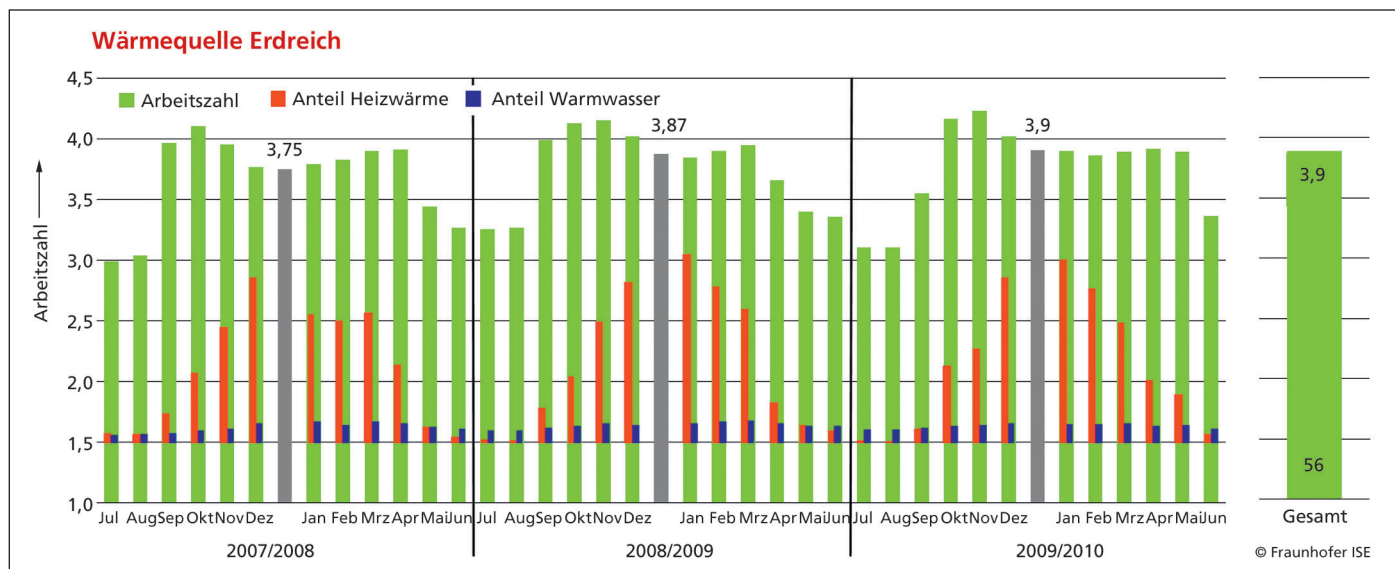
In den Jahren 2006 bis 2010 wurde im Rahmen zweier Projekte jeweils eine große Anzahl von elektrisch angetriebenen Kompressionswärmepumpen im realen Einsatz vom Fraunhofer ISE vermessen. Dabei wurden in minütlicher Auflösung Volumenströme, Temperaturen, Wärmemengen und Stromverbräuche erfasst und per Datenfernabfrage täglich am Institut gespeichert und ausgewertet. Aus den Messergebnissen werden Kennwerte, das Systemverhalten, Gütegrade und Korrelationen zu Anlagenstammdaten abgeleitet. In dem Feldtest „WP-Effizienz“ wurden ca. 110 Wärmepumpen in neu gebauten Einfamilienhäusern ver-

messen. In Zusammenarbeit mit sieben Wärmepumpenherstellern und den Energieversorgern EnBW und E.ON Energie untersuchte das Institut, wie effizient elektrische Wärmepumpen den Wärmebedarf der Gebäude decken können. Vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie erfährt das Projekt eine Förderung von 50 % (Förderkennzeichen 0327401A). Die Energieversorger und die Hersteller begleiten das Projekt inhaltlich und unterstützen es finanziell. Weitere Informationen zu diesem Projekt umfasst der unter <http://wp-effizienz.ise.fraunhofer.de> erhältliche Endbericht.

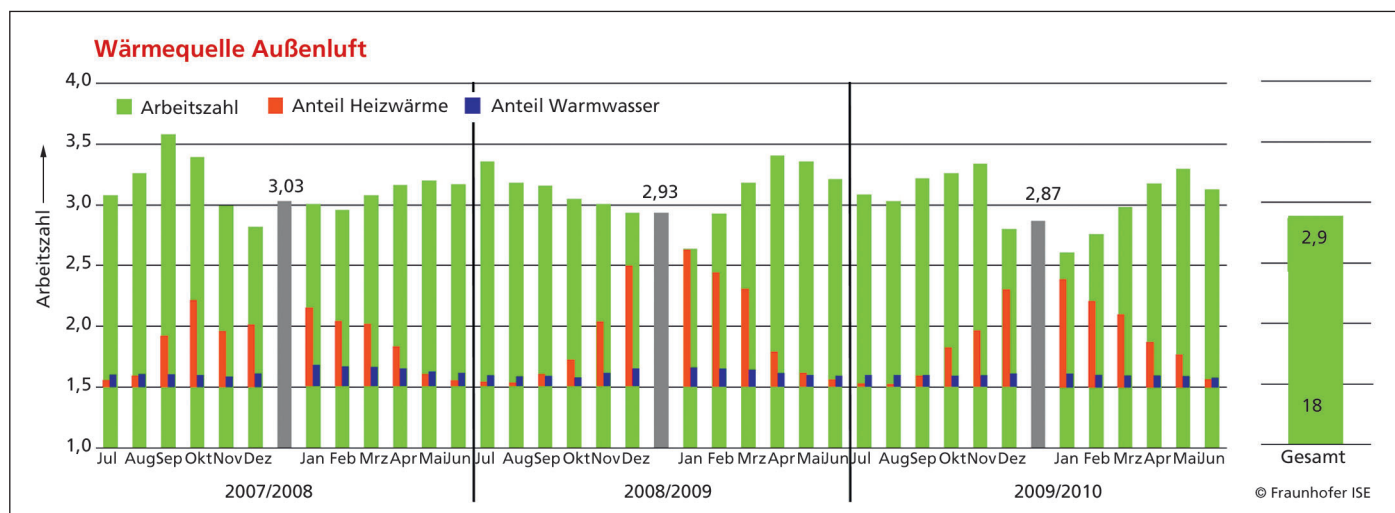
In einem weiteren von der E.ON Energie AG finanzierten Projekt wurden ca. 70 Wärmepumpen in unsanierten Bestandsgebäuden untersucht. Die Anlagen ersetzten dabei die alten Ölkessel von E.ON-Kunden. Das Institut hat neben der Effizienz der eingesetzten Wärmepumpen die Sicherung der Wärmeversorgung der Gebäude geprüft und stellte einen ökologischen und wirtschaftlichen Vergleich gegenüber dem Einsatz einer Ölheizung an. Das Projekt und die Ergebnisse werden ausführlich im Endbericht unter <http://wp-im-gebaeudebestand.de> beschrieben.

Charakteristik der untersuchten Wärmepumpensysteme und Gebäude

In beiden Projekten wurde angestrebt, eine repräsentative Anzahl von unterschiedlichen Wärmequellen zu berücksichtigen. Das Ziel wurde hinsichtlich der Wärmequellen Erdreich und



1 – Monatliche, jährliche und Gesamt-Arbeitszahlen der Sole-/Wasser-Wärmepumpenanlagen aus dem Projekt „WP-Effizienz“ (Neubau)



2 – Monatliche, jährliche und Gesamt-Arbeitszahlen der Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen aus dem Projekt „WP-Effizienz“ (Neubau)

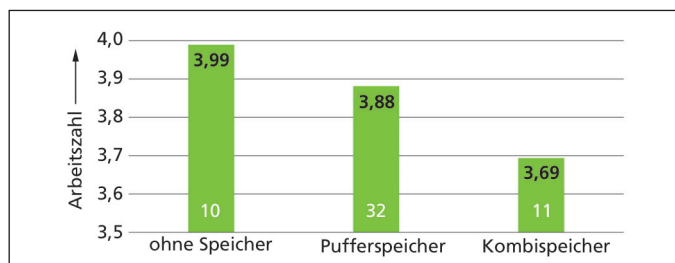
Außenluft erreicht. Die Systeme mit Grundwasser (Wasser/Wasser-Wärmepumpen) haben lediglich eine untergeordnete Rolle gespielt. Die Wärmeverteils- und Wärmeübergabesysteme entsprechen den spezifischen Anforderungen der Neubauten oder Bestandsgebäude. Im Projekt „WP-Effizienz“ ist die Dominanz des von der Wärmepumpe bevorzugten Übergabesystems eindeutig: Über 90 % der Häuser sind mit Fußbodenheizung ausgestattet. Bei den Bestandsgebäuden sieht die Verteilung umgekehrt aus: Über 95 % der Anlagen nutzen Radiatoren als Wärmeverteilsystem. Dies erfordert aufgrund der geringeren Wärmeübertragerfläche zwangsläufig höhere Vorlauftemperaturen im Vergleich zu Systemen mit reiner Fußbodenheizung. Die beheizte Wohnfläche der untersuchten Objekte liegt bei beiden Projekten knapp über 190 m².

Die ausgewerteten Objekte aus dem Neubauprojekt hatten im Jahr 2009 einen mittleren spezifischen Heizenergieverbrauch von ca. 70 kWh/m² a. Die Bandbreite erstreckt sich von ca. 30 bis 150 kWh/m² a. Der Wärmebedarf der Bestandsgebäude für Heizung und Warmwasserbereitung betrug auf Basis des Ölverbrauchs der letzten fünf Jahre im Mittel 177 kWh/m² a beheizte Wohnfläche.

Auswertung der Messdaten, Bilanzgrenze

Im Projekt „WP-Effizienz“ reicht der Auswertungszeitraum von Juli 2007 bis Juni 2010 und beträgt somit drei Jahre. Für das Projekt mit den Bestandsgebäuden werden die Ergebnisse für die Jahre 2008 und 2009 vorgestellt. Fast ausnahmslos dienen die untersuchten Wärmepumpen sowohl der Heizung als auch zur Trinkwassererwärmung. Die Effizienzkennwerte (Arbeitszahlen), die Quotienten aus bereitgestellter thermischer Energie und zugeführter elektrischer Energie, wurden in beiden Projekten mit identischer Systematik ermittelt. Bezogen auf den Stromverbrauch wurden die Wärmepumpe (Verdichter plus Steuerung), die Solepumpe bei den Erdreich-Anlagen bzw. die Ventilatoren bei den Luft-Anlagen und die elektrische Zusatzheizung (z. B. Heizstab) berücksichtigt.

Die erzeugte Wärme wurde direkt im Anschluss an die Wärmepumpe gemessen. Das bedeutet, dass die Wärmeverluste des Trinkwasserspeichers und (falls vorhanden) des Pufferspeichers nicht berücksichtigt worden sind. Für die Bestimmung der Effizienz wurden die Wärmepumpenanlagen nach Wärmequellen gruppiert.



3 – Jahresarbeitszahlen von Erdreich-Wärmepumpen für den Zeitraum Juli 2009 bis Juni 2010, gruppiert nach Speicherkonzept

Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen

Bild 1 zeigt die Arbeitszahlen der Erdreich-Wärmepumpen für verschiedene Zeiträume aus dem Projekt „WP-Effizienz“. Bilanziert wurden hierbei Monate, Jahre und der komplette Auswertungszeitraum von Juli 2007 bis Juni 2010. Die Anzahl der ausgewerteten Anlagen ist von zehn zu Beginn der Auswertungsperiode auf 56 im Oktober 2010 gestiegen. Die Balken auf den dargestellten monatlichen Arbeitszahlen geben zur Orientierung die Heiz- (rot) und Trinkwarmwasserenergie (blau) in absoluten Werten wieder. Der mittlere Anteil der Energie für die Trinkwassererwärmung beträgt 18 %.

Über die drei Jahre erreichen Erdreich-Wärmepumpen im Mittel eine Arbeitszahl von 3,9. Die mit grauen Balken dargestellten Jahresarbeitszahlen steigen dabei von 3,75 auf 3,90 an. Bei der Erläuterung von monatlichen Arbeitszahlen müssen die Temperaturniveaus der Wärmesenke berücksichtigt werden. Die Beladung des Trinkwasserspeichers erfolgt durchschnittlich mit 52 °C, die des Heizkreises dagegen mit 36 °C. Dementsprechend spiegeln sich die Anteile für den Heizbetrieb in den mittleren (von der Wärmepumpe bereitgestellten) Temperaturen wider. Da die Wärmequellentemperatur bei Erdreich-Anlagen größere Konstanz als die Wärmesenkentemperatur aufweist, tragen die Betriebsmodi Heizen und Trinkwassererwärmung zu einem Temperaturhub bei, der höhere Arbeitszahlen in den Winter- und geringere Arbeitszahlen in den Sommermonaten provoziert. Besonders hohe Monatsarbeitszahlen sind in den Herbstmonaten abzulesen. Am Anfang der Heizperiode weist die Wärmequelle Erdreich relativ hohe Temperaturen bei gleichzeitig moderaten Heizkreisvorlauftemperaturen auf. Dies ist besonders bei den Anlagen mit Erdreichkollektoren zu beobachten.

Die Wärmequellenanlagen teilen sich in 27 % Erdreich-Kollektoren und in 73 % Erdreich-Sonden auf. Im September 2008 wurde begonnen, die Anlagen aus der zweiten Phase des Projekts zu installieren. Die Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der ersten Phase hat sich positiv auf die Ergebnisse ausgewirkt. Insbesondere die Installationen der Wärmepumpensysteme wurden sehr sorgfältig durchgeführt und die einzelnen Elemente besser aufeinander angepasst. Teilweise wurden auch neue Generationen der Wärmepumpen installiert.

Die Wärmepumpen im Gebäudebestand-Projekt haben insgesamt höhere Vorlauftemperaturen im Heizkreis. In den Wintermonaten werden für die meisten Anlagen Vorlauftemperaturen zwischen 45 und 55 °C erreicht, für einzelne Anlagen bis zu 65 °C. Trinkwarmwasser wird ganzjährig zwischen 50 und 51 °C bereit gestellt. Der Anteil der Energie für Trinkwarmwasser an der insgesamt bereitgestellten Energie liegt zwischen 12 und 14 %.

Infolge des größeren Temperaturhubs zwischen Wärmequelle und Wärmesenke und den höheren absoluten Vorlauftemperaturen im Heizkreis gegenüber den Anlagen im „WP-Effizienz“-Projekt werden für die Sole/Wasser-Wärmepumpen im Mittel Arbeitszahlen von 3,3 erreicht. Der Trend des monatlichen Verlaufs der Arbeitszahlen ist vergleichbar mit dem der Wärmepumpen bei „WP-Effizienz“, allerdings auf niedrigerem Niveau. Die Unterschiede zwischen Sommer- und Wintermonaten fallen im Gebäudebestand kleiner aus.

Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen

Bild 2 stellt die Arbeitszahlen für die Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen aus dem Projekt „WP-Effizienz“ dar. Wie bei den Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen wurde die elektrische Zusatzheizung (z. B. Heizstab) bei der Berechnung der Arbeitszahlen berücksichtigt.

Bei den Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen ergeben sich im Jahresverlauf wesentliche Unterschiede im Vergleich zu den Sole/Wasser-Wärmepumpen. Während sich für letztgenannte höhere Arbeitszahlen in den Übergangs- und Wintermonaten ergeben, zeigen Luft-Anlagen ihre Stärke in der Übergangszeit und teilweise in den Sommermonaten. Ähnlich wie bei den Erdreich-Anlagen sorgt die Trinkwassererwärmung im Sommer für höhere Vorlauftemperaturen, verringert den positiven Einfluss der höheren Wärmequellentemperatur und führt somit zu den geringeren Arbeitszahlen. Anders als bei den Erdreich-Anlagen stehen Luft-Anlagen im Winter geringere Wärmequellentemperaturen zur Verfügung, was sich wiederum in niedrigeren Arbeitszahlen auswirkt. Da der Wärmebedarf der Gebäude unabhängig von der Wärmequelle ist, verhalten sich die jeweils erzeugten Energien im Jahresverlauf (relativ sowie absolut) wie jene der Erdreich-Anlagen. Somit findet die wesentliche Gewichtung der Arbeitszahlen für Luft-Anlagen auch für die „diesbezüglich negativen“ Wintermonate statt, was sich in einer Arbeitszahl von 2,9 bei Neubau und 2,6 bei Bestandsgebäuden widerspie-

gelt. Die niedrigsten Monatsarbeitszahlen sind im Januar 2009 und 2010 zu beobachten. Das korreliert stark mit den niedrigsten Außentemperaturen für diese zwei Monate. Bei dem Projekt „WP-Effizienz“ war die Anzahl der auswertbaren Anlagen erst mit Beginn der zweiten Heizperiode (2008/09) auf einem Niveau, das belastbare Auswertungen zulässt. Dementsprechend können die Verläufe der Monatsarbeitszahlen erst ab diesem Zeitpunkt als fundiert betrachtet werden. Insgesamt wurden 18 Luft/Wasser-Wärmepumpen bei Neubau und 35 bei Bestand ausgewertet.

Aktivität des Heizstabs

Tabelle 1 zeigt die Anteile des Stromverbrauchs der einzelnen Komponenten bei Sole/Wasser- und Luft/Wasser-Wärmepumpen aus dem Neubauprojekt.

Der Anteil der wärmequellenseitigen Komponenten ergibt für beide Wärmequellentypen sehr ähnliche Werte. Das Gleiche gilt für den Verdichter. Erfreulicherweise sind die Anteile der elektrischen Zusatzheizung jeweils auf sehr niedrigem Niveau. Im Fall der Erdreich-Anlagen sollten die Heizstäbe lediglich bei Ausfällen der Wärmepumpe oder der Unterstützung der Hausaustrocknung betrieben werden. Diese Strategie haben die Messdaten bestätigt. Nur bei ca. 30 % der untersuchten Anlagen wurde eine signifikante Aktivität des Heizstabs festgestellt. Häufig hat es sich dabei um kurzfristige Ausfälle der Wärmepumpe gehandelt. Die Aktivität des Heizstabs korreliert bei Erdreich-Anlagen weniger mit den Außentemperaturen als bei Luft-Wärmepumpen. Bei fast allen untersuchten Anlagen wurde die Aktivität des Heizstabs in den kältesten Monaten festgestellt. Dies bestätigt die bewusst gewählte Strategie bei der Wärmequelle Luft und weist auf eine richtige Dimensionierung und ein korrektes Zusammenspiel des Gesamtsystems hin.

Effizienz und Speicher bei Erdreich-Wärmepumpen

Aus unterschiedlichen Gründen werden Heizkreise zusätzlich mit einem Pufferspeicher ausgestattet. In der Regel werden diesbezüglich ein kontinuierlicher Verdichterbetrieb, die Überbrückung von Sperrzeiten oder die Gewährleistung eines Mindestwasserdurchsatzes genannt. In diesem Abschnitt werden Korrelationen zwischen dem Aufbau der Wärmesenkenanlage und der Effizienz der Wärmepumpe überprüft. Man unterscheidet hierbei die direkte Beladung des Heizkreises (ohne Pufferspeicher), die Nutzung eines Pufferspeichers, der entweder seriell oder parallel installiert werden kann, sowie die Nutzung eines Kombispeichers. Letzterer vereint die Speicherung von Energie für Trinkwarmwasser und Heizwärme. Aufgrund der geringen Anzahl von parallel installierten Pufferspeichern werden die Wärmepumpen in drei Gruppen zusammengefasst.

Um den Einfluss durch die Wärmequelle einschätzen zu können, sei an dieser Stelle erwähnt, dass die Anlagen ohne Speicher eine durchschnittliche Sole-Vorlauftemperatur von 6,1 °C, die Anlagen mit Pufferspeicher von 5,9 °C und jene mit Kombispei-

Tabelle 1

Der anteilige Stromverbrauch der einzelnen Komponenten bei Luft- und Sole/Wasser-Wärmepumpen

Komponenten:	Ventilatoren	Solepumpe	Verdichter	Elektrische Zusatzheizung
Luft/Wasser-WP	7 %		89 %	4 %
Sole/Wasser-WP		6 %	92 %	2 %

cher von 7,4 °C aufweisen. Somit haben die erstgenannten Gruppen im Gegensatz zu den Anlagen mit Kombispeicher einen leichten Nachteil hinsichtlich ihrer Wärmequelle.

Die Ergebnisse dieser Auswertung werden als Balkendiagramm im Bild 3 dargestellt. Der Wert am oberen Ende eines Balkens entspricht der durchschnittlichen Arbeitszahl der definierten Gruppe, der Wert am unteren Ende der Anzahl der ausgewerteten Wärmepumpen.

Nach dieser Auswertung zeichnet sich ein Trend ab. Am effizientesten arbeiten demnach Wärmepumpen ohne Speicher im Heizkreis. Diese Anlagen erreichen eine Arbeitszahl von 3,99. Wärmepumpenheizsysteme mit Pufferspeicher erreichen mit der Arbeitszahl 3,88 eine um 0,11 geringere Effizienz. Die Wärmepumpen mit Kombispeicher bewegen sich trotz geringerer Wärmequelltemperaturen mit ihrer Arbeitszahl von 3,69 auf wesentlich geringerem Niveau. Ein Grund hierfür liegt im mangelhaften Beladungsmanagement des Kombispeichers, das bei einigen Anlagen beobachtet werden konnte. Grundsätzlich wird bei Kombispeichern eine Temperaturschichtung angestrebt, die im unteren Teil die Anforderungen des Heizkreises und im oberen jene der Trinkwarmwasserversorgung erfüllt. Die Beladung erfolgt entsprechend dem Betriebszweck mit der hinreichenden Temperatur in die dafür vorgesehene Schicht. Dies bietet der Wärmepumpe optimale Voraussetzungen effizient zu arbeiten, gleichzeitig verringert eine gemeinsame Speicherung die Verluste. Kommt es jedoch zu einer Verschiebung der Beladung im Heizmodus hin zu einer Beladung im Trinkwassermodus, erhöht sich die mittlere Beladungstemperatur, was letztlich zu einer Verringerung der Wärmepumpeneffizienz führt. Der Effekt kann beispielsweise durch eine falsche Positionierung von Temperaturfühlern oder ungenauen Regelparametern provoziert werden.

Empfehlungen für hohe Effizienz – doch wer trägt die Verantwortung?

Bei beiden Projekten war die besondere Gelegenheit gegeben, die Arbeit der Wärmepumpenanlagen sowohl bei Neubauten als auch bei Bestandsgebäuden unter realen Bedingungen zu untersuchen. Dabei wurden sowohl theoretische Zusammenhänge bestätigt als auch neue Erkenntnisse gewonnen:

- Die Anlagen in neu gebauten Wohngebäuden weisen eine höhere Effizienz auf – die Fußbodenheizung verlangt niedrigere Temperaturen als die Radiatoren. Es ist daher wichtig, möglichst niedrige Temperaturen auch bei Bestandsgebäuden anzustreben. Die Installation der Fußbodenheizung kommt nur selten in Frage, allerdings lassen sich die bestehenden Radiatoren oft durch besser geeignete Modelle austauschen oder die Flächen der Heizkörper vergrößern.
- Bei den Untersuchungen wurden viele Fehler bei der Installation der Anlagen festgestellt. Unterdimensionierte Wärmequellen bei Erdreichwärmepumpen, fehlender hydraulischer Abgleich, fehlerhafte Beladungsstrategie der Speicher (besonders bei Kombispeichern), falsche Temperaturspreizung sowohl bei der Wärmequelle als auch bei der Wärmesenke, nicht gedämmte Rohrleitungen, nicht gereinigte Filter bei Luft-Wärmepumpen, falsch eingestellte Regelparameter sind Fehler, die relativ einfach zu beheben sind, aber leider immer wieder auftreten.

Eine sorgfältige und fehlerfreie Installation ist die beste Voraussetzung für eine gute Effizienz der Wärmepumpenanlagen.

- Häufig wird versucht, hohe Effizienz durch besonders ausgeklügelte und komplizierte Systeme zu erreichen. Hierbei

muss jedoch berücksichtigt werden, dass eine Erhöhung von Anlagenkomplexität immer mit größeren Anforderungen an die Installation, an die Komponentenauswahl und an die Steuerung und Regelung einhergeht. Einfache Systeme sind naturgemäß robuster im realen Betrieb. Wer sich für eine Kombination aus mehreren Komponenten entscheidet und z. B. zwei oder mehr Wärmeerzeuger bündeln will, sollte besonders auf die korrekte Installation und reibungslose Zusammenarbeit aller Komponenten achten. Auch die besten Komponenten können nicht effizient arbeiten, werden diese Aspekte nicht berücksichtigt.

- Zu einem effizienten Wärmepumpenheizsystem und geringem Elektroenergieverbrauch können alle am Prozess der Heizwärmebereitstellung beteiligten Gruppen (Wärmepumpenhersteller, Installateure und Planer sowie die Hausbewohner) beitragen. Den Herstellern obliegt die Aufgabe der kontinuierlichen Verbesserung ihrer Produkte. Die resultierende Steigerung der Leistungszahl sorgt für eine Erhöhung der Wärmepumpeneffizienz bei verschiedenen Rahmenbedingungen. Für die richtigen Rahmenbedingungen ist der Planer verantwortlich. Er sorgt mit der geeigneten Auslegung für hohe Wärmequellen- und geringe Wärmesenkentemperaturen. Die Installateure sind für die sorgfältige Installation der Komponenten verantwortlich. Der Hausbewohner hat im Wesentlichen auf zwei Ebenen Einfluss auf die Effizienz der Wärmepumpe und geringem Energieverbrauch. Übergeordnet bestimmt er letztlich mit seiner Investitionsbereitschaft darüber, ein Gebäude mit geringem Heizwärmebedarf zu bauen bzw. ein bestehendes Gebäude energetisch zu sanieren, die bessere Wärmequelle auszuwählen oder sie großzügiger auszuliegen. Auf der Betriebsebene kann er Einfluss auf die Wärmesenkentemperatur durch eine kontinuierliche Anpassung der Heizkurve nehmen oder auch die elektrische Zusatzheizung deaktivieren, um zumindest außerplanmäßige Heizstabaktivität zu vermeiden.

Fazit

Die Wärmepumpensysteme sind in der Lage eine Effizienz zu erreichen, die sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile gegenüber mit fossilen Brennstoffen betriebenen Systemen bietet. Allerdings ist die hohe Effizienz nicht automatisch garantiert. Während der durchgeführten Feldtests wurden sowohl schlechte als auch sehr gute Installationen untersucht. Es gibt eindeutige Aspekte, die bereits bei der Auswahl des Wärmepumpensystems für die zukünftige Effizienz eine wichtige Rolle spielen.

Die Wärmequelle und das Wärmeverteilungssystem determinieren gewissermaßen die zu erwartende Effizienz. Die erwähnten Aspekte sind aber nicht ausschließlich entscheidend. Ob die Bewohner mit ihren Wärmepumpenanlagen zufrieden sind, hängt neben den Wärmepumpenherstellern in erster Linie von der Planung, den Installateuren und nicht zuletzt von ihnen selbst ab.



Die Autoren

Dipl.-Ing. Marek Miara, Dipl.-Wi.-Ing. (FH)
 Danny Günther, Fraunhofer-Institut für
 Solare Energiesysteme ISE, Freiburg
 Abteilung Thermische Anlagen
 und Gebäudetechnik

