

Faktor 4 ist möglich - Untersuchung der Wärmeversorgung mit Wärmepumpen in Passiv-Wohnhäusern

Christel Russ, Andreas Bühring, Benoit Sicre

Passivhäuser sind heute schon ein Bestandteil im Wohnungsbau, speziell bei Einfamilienhäusern. Baukonstruktive und bautechnische Entwicklungen in den letzten zehn Jahren haben dazu geführt, dass bei Passivhäusern mit der hochwärmedämmten Hülle die zusätzlichen Mehrkosten für die baulichen und technischen Investitionen nach Feist [1] zwischen 0% und 17% liegen. Diese Mehrkosten werden auch durch die Bewertungen der durch das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE untersuchten Passivhäuser bestätigt.

Fördermaßnahmen durch die KfW¹ sowie in Programmen der Länder, Gemeinden und Energieversorger trugen dazu bei, in ganz Deutschland etwa 2000 Passivhäuser als Ein- bis Zweifamilienhäuser in Form von Einzel-, Doppel- und Reihenhäusern zu errichten. Derzeit findet die Passivhausbauweise auch in den Geschosswohnungsbau Eingang und die ersten Gebäude werden erfolgreich genutzt [2]. Neben den Wohnhäusern existieren heute auch Büro-, Verwaltungs- und Produktionsgebäude in Passivhausbauweise².

Die hochwärmedämmte und stark wärmebrückenreduzierte Gebäudehülle in Verbindung mit der Nutzung der Solarenergie und internen Wärmelasten führen in den Passivhäusern zu einem niedrigen »Rest«- Heizwärmebedarf. Nach Berechnungen mit dem Passivhausprojektierungspaket PHPP unter Einbeziehen der durch eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung zurückgewonnenen Wärme als Bedarfsminderung sind für den jährlichen Heizwärmebedarf 15 kWh/m² Nutzfläche als Zielgrenze festgelegt. Die Deckung des Restwärmebedarfs, die Bereitung von Trinkwarmwasser einschließlich der Hilfsenergien sollen laut PHPP einen Jahresprimärenergiebedarf von 60 kWh/m² Nutzfläche nicht überschreiten. Um diese Bedingungen zu erfüllen, sind in Passivhäusern effiziente und flexible Wärmeversorgungskonzepte zur Deckung des Restwärmebedarfs, der Warmwasserversorgung und der Realisierung eines hygienisch und bauphysikalisch notwendigen Luftwechsels erforderlich. Häufig werden diese Konzepte durch die Nutzung von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung und häufig durch Wärmepumpen im kleinen Leistungsbereich mit solarthermischer Unterstützung realisiert [3].

Monitoringprogramm

Um die Effektivität der bautechnischen Maßnahmen und der Wärmeversorgung in den Passiv-Wohnhäusern zu untersuchen, werden in verschiedenen Monitoringprogrammen des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE energierelevante Parameter im Gebäude und in den Wärmeversorgungsanlagen erfasst und unter den Einfluss der klimatischen Umgebungsparameter und der Gebäudenutzung bewertet. Einen Schwerpunkt in jeder Untersuchung bildet die Haustechnik. So wurde in einem durch die EnBW Energie Baden-Württemberg im Jahr 1999 aufgelegten Förderprogramm (im Einzugsgebiet der EnBW) der Bau von Passivhäusern mit einem Zuschuss von 10.000,- DM (5.113,- €) unterstützt, wenn in diesen Häusern Wärmepumpen in Verbindung mit Solarkollektoranlagen die Restwärme- und Trinkwarmwasserbereitstellung sichern. Diese Häuser werden gleichzeitig in ein Monitoringprogramm aufgenommen. Die Förderung ist an den Einsatz von Wärmepumpen zur Heizung und Warmwasserbereitung in Verbindung mit einer thermischen Solaranlage sowie einer Lüftungsanlage gebunden. Wärmepumpe und Lüftungsanlage können als separate Anlagenbestandteile eingesetzt werden. Eine neue Generation von Geräten zur Wärmeversorgung wird in Form von Lüftungs-Kompaktgeräten eingesetzt, die in einer Einheit

¹ www.kfw.de KfW-Programme zur CO₂-Minderung

² www.solarbau.de Solarbau Monitor

die Lüftungsanlage und eine Kleinstwärmepumpe zur Heizung und Bereitstellung von Warmwasser integriert haben.

Um die energetische Effizienz der unterschiedlichen Wärmeversorgungsstechnologien zu bewerten, wurde parallel zur Wohnungsförderung durch die EnBW Energie Baden-Württemberg und durch die Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg ein gefördertes Monitoringprojekt gestartet. In Baden-Württemberg wurden im Rahmen dieses Programms 78 Objekte – von Einfamilien- bis zu Reihenhäusern in das Monitoringprogramm eingebunden. 65 Passivhäuser davon werden in der sogenannten Standardmessung, 13 Objekte in der Intensivmessung über zwei Jahre durch das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE begleitet. Zusätzlich wurden noch acht Passivhäuser mit einem zentralen Wärmeversorgungs-konzept in die Bewertung aufgenommen. Bild 1 zeigt anhand der Übersichtskarte Baden Württembergs die Standorte der bis Ende 2001 im Monitoringprogramm erfassten Gebäude.

Von allen Gebäuden werden die Parameter zum Gebäude wie z. B. Baujahr, Heizwärmebedarf nach PHPP, Ergebnis der Messung zur Gebäudedichtheit (Blower Door-Messung) sowie das Haustechnikkonzept erfasst.

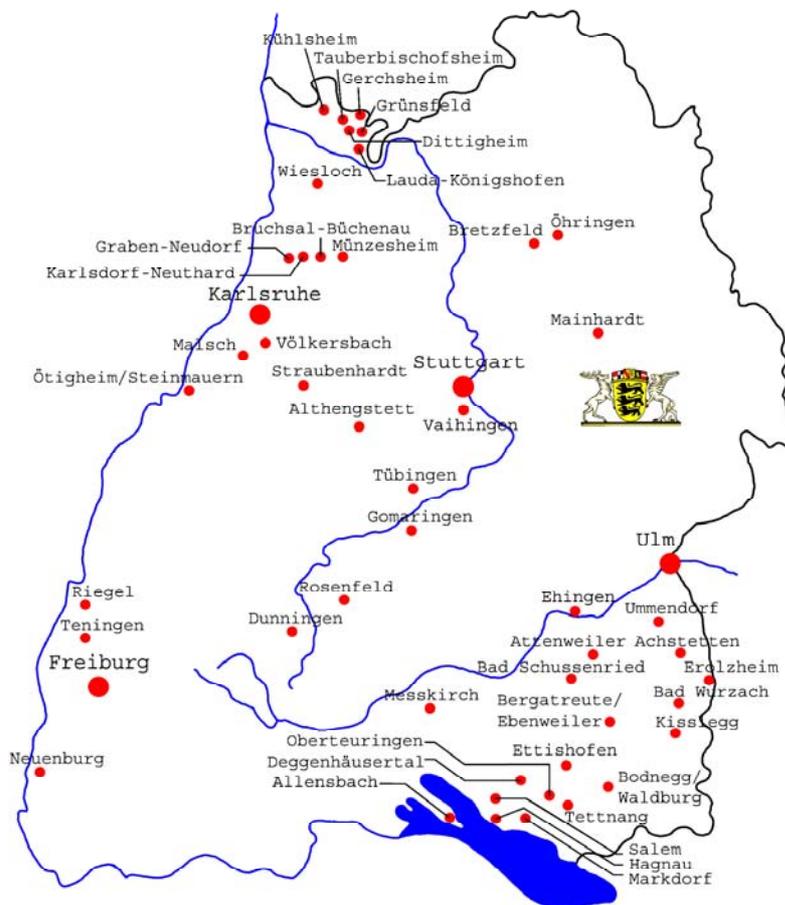


Bild 1 Übersicht der Standorte der im Monitoringprogramm für Passivhäuser bis Ende 2001 aufgenommenen Gebäude

Im Standardprogramm werden der Verbrauch Warmwasser, der Hausstromverbrauch und der Stromverbrauch für die wichtigsten Komponenten der Haustechnik durch die Bewohner monatlich abgelesen und an das Fraunhofer ISE zur Dokumentation und Bewertung geschickt. Um detaillierte Aussagen zur Effizienz unterschiedlicher Wärmeversorgungs-konzepte zu erhalten, werden in 13 Objekten intensive Bewertungen durchgeführt. Die Messwerte der Temperaturen, Volumenströme und der elektrische Energieverbrauch für die Haustechnik und den Haushaltsstrom werden vor Ort mit einem Datenlogger erfasst, täglich durch das Fraunhofer ISE abgerufen, in Datendateien als Fünf-Minutenwerte abgelegt und ausgewertet. Daraus werden detaillierte Ergebnisse zum Temperaturverhalten in den Häusern, dem Stromverbrauch für die Wärmepumpe und Hilfsenergien sowie die erzeugte Wärme durch die

Wärmepumpe, die Solaranlage, das Erd-Luft-Register und dem Wärmeübertrager der Lüftungsanlage ermittelt. Anhand der Ergebnisse zum Primärenergieverbrauch der Anlagenaufwandszahl, zwei Bewertungskriterien nach der Energieeinsparverordnung EnEV 2002, können Aussagen zur Effektivität der Wärmeversorgungssysteme getroffen werden. Die Ergebnisse fassen wir jährlich in einem Monitoringbericht bzw. in separaten Berichten zusammen. Die Berichte sind sowohl den Planern, Geräteherstellern, Eigentümern der Gebäude als auch anderen Interessierten zugänglich³. Weiterhin finden Sie aktuelle Informationen zum Marktbereich Monitoring und Demonstrationsprojekten auf der Internetseite des Fraunhofer ISE in dem Geschäftsfeld »Gebäude und Technische Gebäudeausrüstung«.

Wärmeversorgungskonzepte

Eine Variante der wärmetechnischen Versorgung der Passivhäuser im Einfamilienhausbereich sind Wärmepumpen, häufig in Verbindung mit Solaranlagen. Die im Monitoringprogramm untersuchten Passivhäuser entsprechen drei Versorgungskonzepten

- modular aufgebaute Systeme mit separater Wärmepumpe, Solarkollektor und Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung,
- Lüftungs-Kompaktgeräte mit thermischer Solaranlage sowie
- Nahwärmeversorgung einer kleinen Passivhaussiedlung mit Wärmepumpe und Solarkollektoranlage, sowie wohnungsweiser Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung.

1. Modulare Anlagenkonfiguration mit Wärmepumpe, Solarkollektor und Lüftungsgerät

Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung reduzieren die Lüftungswärmeverluste in Passivhäusern erheblich. Die Wärmepumpen decken den Rest-Heizwärmebedarf und dienen zur Bereitung des Trinkwarmwassers. Die Wärmeversorgung erfolgt durch das Nachheizen der Zuluft nach dem Wärmeübertrager in der Lüftungsanlage über ein Nachheizregister. Ergänzend werden in einzelnen Räumen zusätzliche Heizkörper/Radiatoren, oder teilweise eine Fußbodenheizung betrieben. In seltenen Fällen erfolgt eine Nachheizung in den Räumen über elektrisch betriebene Radiatoren. Als Wärmepumpe finden Erdreichgekoppelte Elektrowärmepumpen Verwendung. Die Solaranlage unterstützt die Warmwasserbereitung. Im Bedarfsfall kann die Warmwasserbereitstellung in den Speichern noch durch einen elektrischen Heizstab zur Spitzendeckung unterstützt werden.

In vielen Gebäuden wird die Außenluft über ein Erd-Luft-Register der Lüftungsanlage zugeführt. Das hat den Vorteil, dass die Eingangstemperatur am Wärmeübertrager der Lüftungsanlage nicht unter 0°C sinkt und ein Vereisen am Wärmeübertrager vermieden wird. Die üblicherweise in den Lüftungsanlagen integrierte elektrische Vorheizung der Außenluft bei Umgebungstemperaturen unter 0 °C entfällt. Bild 2 zeigt das typische Versorgungsschema eines Passivhauses mit Erd-Luft-Register, Lüftungsanlage mit Wärmeübertrager, erdreichgekoppelter Elektrowärmepumpe, Speicher mit elektrischer Nachheizmöglichkeit, Zuluftnachheizregister und Radiatoren. Je nach Kundenwunsch kann dieses Konzept angepasst werden, z.B. anstelle der erdreichgekoppelten Elektrowärmepumpe kann eine Abluftwärmepumpe eingesetzt werden oder es wird in der Außenluftzuführung zur Lüftungsanlage kein Erd-Luft-Register eingesetzt, usw. .

³ Monitoringbericht 2001 bei ENBW und unter www.ise.fhg.de

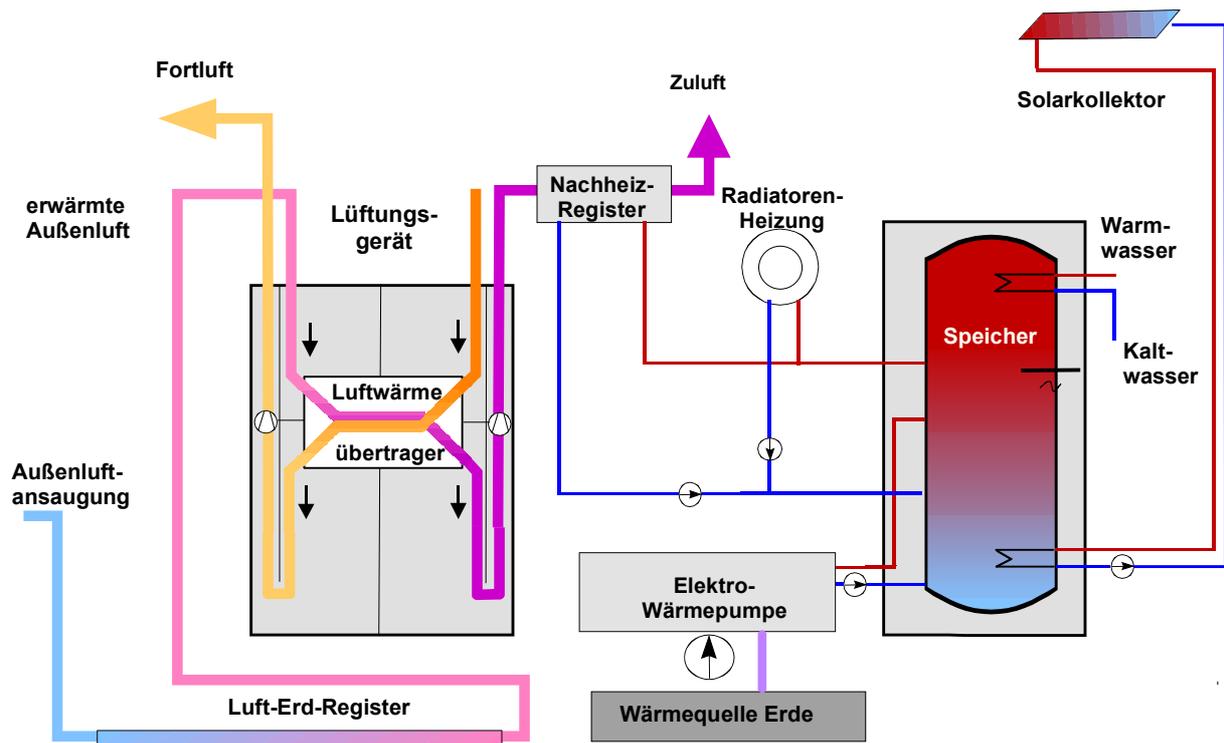


Bild 2 Schema der Wärmeversorgung von Passivhäusern mit erdreichgekoppelter Elektrowärmepumpe, Solaranlage und Lüftungsanlage mit Erd-Luft-Register und Wärmeübertrager. Über die Wärmepumpe und die Solaranlage wird der Speicher erwärmt. Vom Speicher kann die Zuluft über ein Nachheizregister nacherwärmt werden sowie eine direkte Heizung über Radiatoren erfolgen.

2. Lüftungs-Kompaktgerät (Kombigerät)

Gegenüber der separaten Wärmeversorgung mit Lüftungsanlage und Wärmepumpe hat sich der Einsatz von Lüftungs-Kompaktgeräten LKG in Passivhäusern bewährt. In diesen Geräten ist neben einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung eine Abluftwärmepumpe mit einer Leistungsaufnahme unter 1 kW_{el} enthalten. Als Wärmequelle der Wärmepumpe dient die Abluft nach dem Passieren des Plattenwärmeübertragers. Mit der Abluftwärmepumpe wird die Zuluft meist direkt nachgeheizt. Ist keine Heizwärme erforderlich, kann die Warmwasserbereitung durch die Wärmepumpe erfolgen, d.h. der Speicher wird aufgeladen. Optimal ist hier die Unterstützung der Warmwasserbereitung durch eine Solaranlage, die z.B. im Sommer den Warmwasserbedarf komplett decken kann. Durch eine Kombination des LKG mit einem Erd-Luft-Register in der Außenluftzuführung zum Plattenwärmeübertrager kann die Gefahr der Vereisung am Wärmeübertrager umgangen werden. Die Lüftungs-Kompaktgeräte arbeiten hinsichtlich der Steuer- und Regelung sehr effizient, was die Ergebnisse zum Primärenergieverbrauch in den untersuchten Wohngebäuden zeigen. Über das Wirkungsprinzip und die Ergebnisse beim Einsatz von Lüftungs-Kompaktgeräten siehe auch eb 2/2001. Bild 3 zeigt das Schema der Wärmeversorgung mit einem Lüftungs-Kompaktgerät.

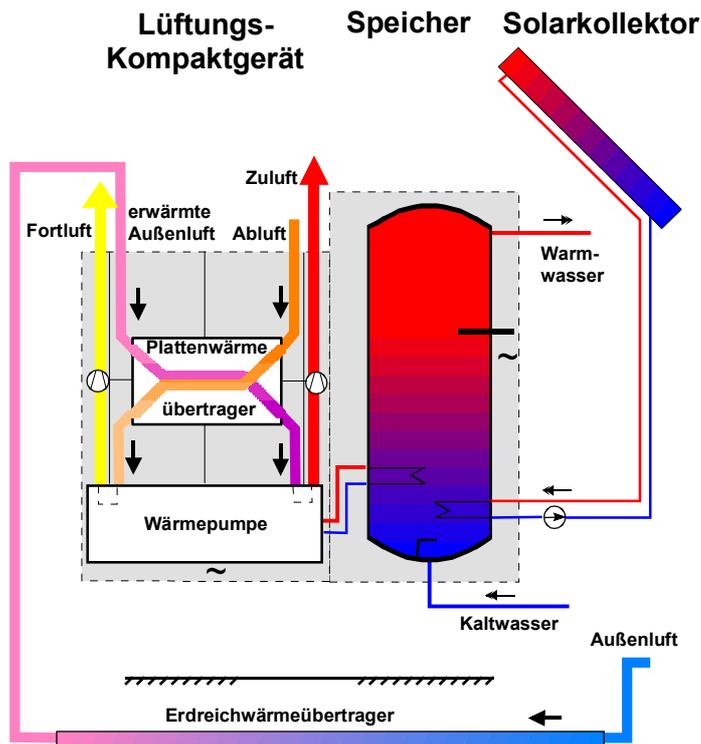


Bild 3 Schema der Wärmeversorgung in einem Passivhaus mit einem Lüftungs-Kompaktgerät. Die Lüftungsanlage und Wärmepumpe zum Nachheizen der Zuluft und zur Warmwasserbereitung befinden sich in einem Gerät. Kombination des LKG mit einem Erd-Luft-Registers/Erdreichwärmeübertrager zur Vorwärmung der Außenluft und eine thermische Solaranlage zur Unterstützung der Bereitung von Trinkwarmwasser.

Zentrale Wärmeversorgung

In einen weiteren Monitoringprojekt wird eine zentrale Wärmeversorgung für 8 Passivhäuser mit einer Erdsondenwärmepumpe und einer zentralen Solarkollektoranlage bewertet. Die Wärmeversorgung erfolgt über ein 2-Speicher-System; einen Pufferspeicher mit direkter Einspeisung in das Heizungssystem und einen separaten Warmwasserspeicher. Die Wärmepumpe und die Kollektoranlage speichern in einen Pufferspeicher ein, über den direkt die Wärmeversorgung der Häuser in Form einer Wandheizung und die Nachheizung der Zuluft nach dem Wärmeübertrager der Lüftungsanlage erfolgt. Im Bedarfsfall kann in beiden Speichern über zwei bzw. einen elektrischen Heizstab nachgeheizt werden. Die Vorlauftemperatur der Heizung ist außentemperaturabhängig auf maximal 43 °C eingestellt. Die Warmwasserversorgung erfolgt über einen Warmwasserspeicher, der über einen zweiten Verflüssiger der Wärmepumpe beladen wird. Bei ausreichendem Wärmeangebot im Pufferspeicher kann die Wärme in den Warmwasserspeicher umgespeichert werden. Bild 4 zeigt das Schema der Wärmeversorgung.

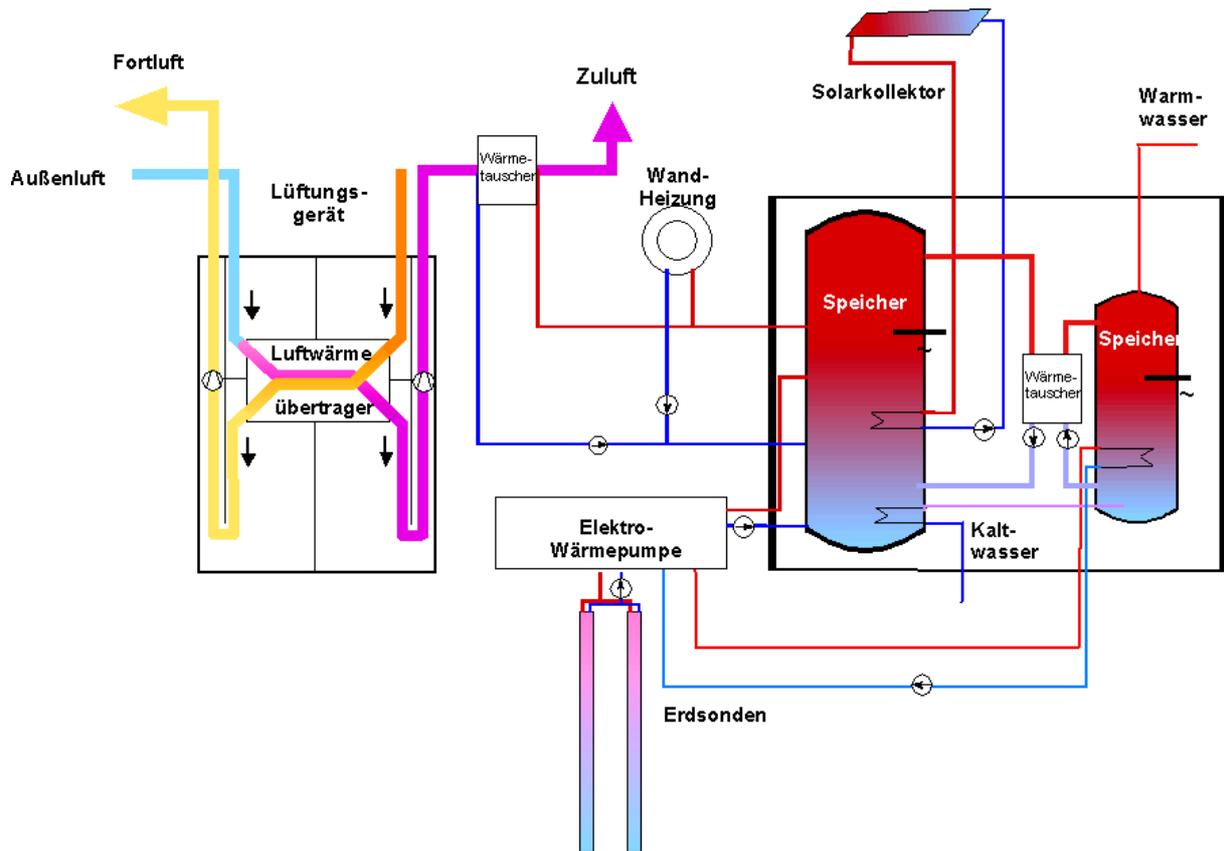


Bild 4 Schema für eine zentrale Wärmeversorgung für Heizung und Warmwasser von Passivhäusern mit einer Erdsondenwärmepumpe und einer Solaranlage; separat pro Haus gibt es eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung

Ergebnisse der energetischen Bewertung

Erste Ergebnisse der Bewertung des Messjahres 2001 zeigen hinsichtlich des Primärenergieverbrauches in den einzelnen Passivhäusern größere Unterschiede. Bild 5 zeigt den Primärenergieverbrauch der bis Ende 2001 untersuchten Passivhäuser im Monitoringprogramm. Basis für die primärenergetische Bewertung sind die Faktoren 3,0 für Strom und 1,1 für Gas/Öl.

1. Modulare Konfiguration - Lüftungsanlage, Wärmepumpe, thermischer Solaranlage

Wie aus Bild 5 zu ersehen ist, haben die Passivhäuser mit einer separaten Wärmepumpe und einer Lüftungsanlage im Jahr 2001 einen mittleren Primärenergieverbrauch von 79 kWh/m². In einzelnen Häusern übersteigt der Primärenergieanteil das Dreifache des Zielwertes von 60 kWh/m² nach PHPP, liegt jedoch noch unter den nach EnEV vorgegeben Grenzwert von etwa 120 bis 140 kWh/m² für Einfamilienhäuser. Mehr als 60 % der bisher in dieser Kategorie bewerteten Gebäude haben einen Primärenergieverbrauch von über 60 kWh/m². Eine Ursache kann hier in der Komplexität der Steuer- und Regelung der Anlagensysteme zu sehen sein, wobei der Abgleich der einzelnen Parameter zu prüfen ist. Das führt auch dazu, dass bei einem Nutzereingriff keine optimale Wärmeversorgung gewährleistet wird und z. B. die elektrische Warmwasserbereitung im Vorrang gegenüber der Wärmepumpe geschaltet werden kann und im Ergebnis ein hoher Primärenergieverbrauch auftritt. Im Rahmen des Monitoringprojektes kann anhand der Messergebnisse das Steuer- und Regelungsverhalten der Systeme bewertet werden.

2. Lüftungs-Kompaktgeräte und thermische Solaranlage

Zu guten Ergebnissen bezüglich des Primärenergieverbrauchs führte der Einsatz der Lüftungs-Kompaktgeräte in den Passivhäusern. Im Mittel wird in den untersuchten Gebäuden im Jahr 2001 ein Primärenergieverbrauch von 42 kWh/m² erreicht. Etwa 80 % der untersuchten Gebäude haben einen Primärenergieverbrauch unter 60 kWh/m², 50 % liegen sogar bei 30 kWh/m² und darunter. Dies bedeutet, dass diese Geräte hinsichtlich der Steuer- und Regeltechnik in den meisten Fällen sehr gut arbeiten.

3. Zentrale Wärmeversorgung mit Wärmepumpe, Solaranlage und dezentralen Lüftungsgeräten

Bei der zentralen Wärmeversorgung liegt der Primärenergieverbrauch mit 67,5 kWh/m² knapp über dem angestrebten Grenzwert nach PHPP, jedoch noch ca. 50 % unter dem Grenzwert nach EnEV. Ergebnisse der genauen Untersuchung der einzelnen Erzeugerbereiche zeigten, dass durch Optimierungen in der Steuer- und Regelung der Primärenergieverbrauch gesenkt werden kann. Beispiele hierfür sind:

- Abstimmen der Vorgabeparameter in den Speichern für die Heizwärme- und Warmwasserbereitstellung entsprechend den tatsächlichen Anforderungen, um die Laufzeit der Wärmepumpe zu optimieren;
- Beseitigen der Störungen in Umspeicherkreis vom Pufferspeicher in den Warmwasserspeicher, um in den Sommermonaten die solaren Gewinne effektiver zur Warmwasserbereitung zu nutzen und
- bedarfsgerechte Einstellung der Thermostatventile am Nachheizregister der Zuluft in den Häusern, um den Heizwärmeverbrauch besser zu steuern und zusätzlichen Heizwärmeverbrauch außerhalb der Heizzeit zu vermeiden.

Primärenergieverbrauch in kWh/m²a

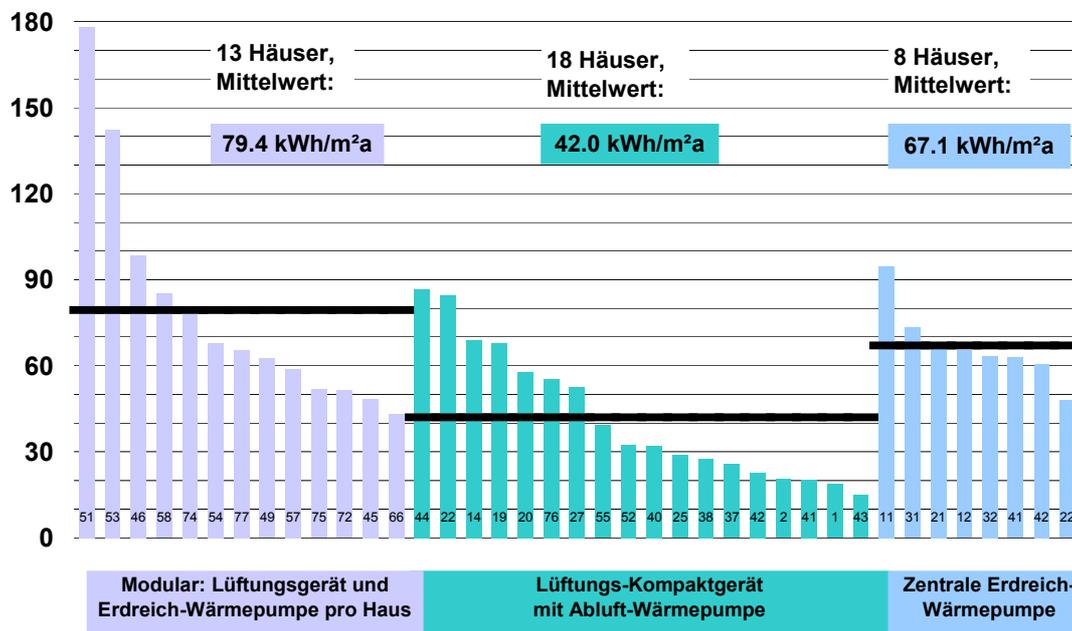


Bild 5 Primärenergieverbrauch der Haustechnik, bezogen auf die beheizte Wohnfläche, für die im Rahmen des Passivhaus-Monitoringprogramms untersuchten Gebäude im Jahr 2001. Der Primärenergieverbrauch wird für die drei Versorgungskonzepte dargestellt:

- Modulare Konfiguration mit Lüftungsgerät, Wärmepumpe und Solarkollektor;
- Lüftungs-Kompaktgeräte und Solarkollektor und
- zentrale Wärmeversorgung mit Wärmepumpe, Solarkollektor und Lüftungsanlage pro Haus.

Ergebnisse ausgewählter Beispiele

An zwei Beispielen wird im Folgenden der Energiefluss im Gebäude untersucht. Dazu wurden die Ergebnisse der Wärmeversorgung mit Lüftungs-Kompaktgeräten und die zentrale Wärmeversorgung mit einer erdreichgekoppelten Elektrowärmepumpe näher betrachtet. Projektbeispiele sind sieben Passiv-Reihenhäuser in Neuenburg mit Lüftungs-Kompaktgeräten (Bild 6) und vier Passiv-Doppelhäuser in Königsbach-Stein mit einer zentralen Wärmeversorgung (Bild 7).

Tabelle 1 enthält die Zusammenstellung einiger wichtiger Gebäudeparameter. Die Gebäudeparameter für die Reihenhäuser werden als Mittelwert über alle Häuser angegeben.

Tabelle 1 Gebäudeparameter der sieben Passiv-Reihenhäuser Neuenburg und der vier Passiv-Doppelhäuser Königsbach-Stein (Mittelwerte der Häuser)

Parameter	Passiv-Reihenhaus Neuenburg	Passiv-Doppelhaus Königsbach-Stein
Architekt	Rasch/Partner, Darmstadt; Hansen Freiburg	Morlock, Königsbach- Stein
Haustechnikkonzept	Inplan, Pfungstadt	pki, Stuttgart
Baujahr	1999	2000
Anzahl Bewohner (Mittel)	3,6	3,2
Gebäudeoberfläche A nach EnEV m ²	232	356
Gebäudevolumen V _e nach EnEV m ³	447	460
Formfaktor AV _e	0,52	0,77
Gebäudenutzfläche A _n nach EnEV m ²	143	147
Beheizte Wohnfläche A _{wfl} m ²	103	138
Maximal zul. Primärenergiebedarf je A _n	100,7	119,7
Maximal zul. Primärenergiebedarf je A _{wfl}	139,9	127,7
Primärenergieverbrauch*, gemessen kWh/m ² Wohnfläche	27,9	67,2
Primärenergie – Haushaltsstrom kWh/m ² Wohnfläche	91	83
Mittlere Raumtemperatur Heizperiode °C (Januar bis April; November bis Dezember)	22,1	22,0
Solarkollektorfläche pro Haus m ²	4,8	7,5
Heizwärmeverbrauch 2001, gemessen kWh/m ² Wohnfläche, ohne Anteil Wärmerückgewinnung	5,5	29,7
Verbrauch Trinkwarmwasser kWh/m ² Wohnfläche	13,7	10,2

*gemessener Stromverbrauch mit dem Faktor 3 bewertet



Bild 6 Südansicht Passiv-Reihenhäuser Neuenburg



Bild 7 Südwestansicht Passiv-Doppelhaus Königsbach-Stein

Passiv-Reihenhäuser Neuenburg

Um den Energieverbrauch in den Gebäuden zu vergleichen, wird für beide Projekte in Abstimmung mit den Arbeiten der Internationalen Energieagentur IEA Task 28/38 Sustainable Solar Housing [4] ein Energieflussdiagramm erstellt. In diesem Diagramm sind der Endenergieverbrauch, die Hilfsenergien für das Lüftungsgerät und die Solaranlage, der Stromverbrauch der Wärmepumpe, der Ertrag der Kollektoranlage und der Wärmepumpe sowie die Nutzenergie für Heizung und Warmwasser dargestellt. Bild 8 zeigt das Energieflussdiagramm für die sieben Reihenhäuser in Neuenburg für das Jahr 2001. Zur Vorwärmung der Außenluft durch das Erd-Luft-Register werden $12,7 \text{ kWh/m}^2$ Erdwärme genutzt (davon $10,0 \text{ kWh/m}^2$ in der Heizzeit).

Nach DIN 4701-10 wird bei einer Wärmerückgewinnung (WRG) mit einer Rückwärmzahl von 0,8 mit einem Nutzungsgrad der zurückgewonnenen Wärme von 0,91 gerechnet. Daraus ergibt sich bei einem 0,4 fachen Luftwechsel eine nutzbare Wärme von durchschnittlich $17 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Im Jahr 2001 wurden $22,5 \text{ kWh/m}^2$ für die aus der WRG rückgewonnene Wärme (Faktor 0,91 als Nutzungsfaktor nach DIN 4107-10 wurde berücksichtigt) gemessen. In die gesamte Vorwärmung der Außenluft gehen sowohl die Wärmegewinne aus dem Erd-Luft-Register als auch die aus der Wärmerückgewinnung ein. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Nutzbarkeit der Gewinne aus dem Erd-Luft-Register gegenüber denen aus der Wärmerückgewinnung geringer ist⁴. Der Gesamtwert von $35,2 \text{ kWh/m}^2$ Wohnfläche resultiert zum einen aus dem

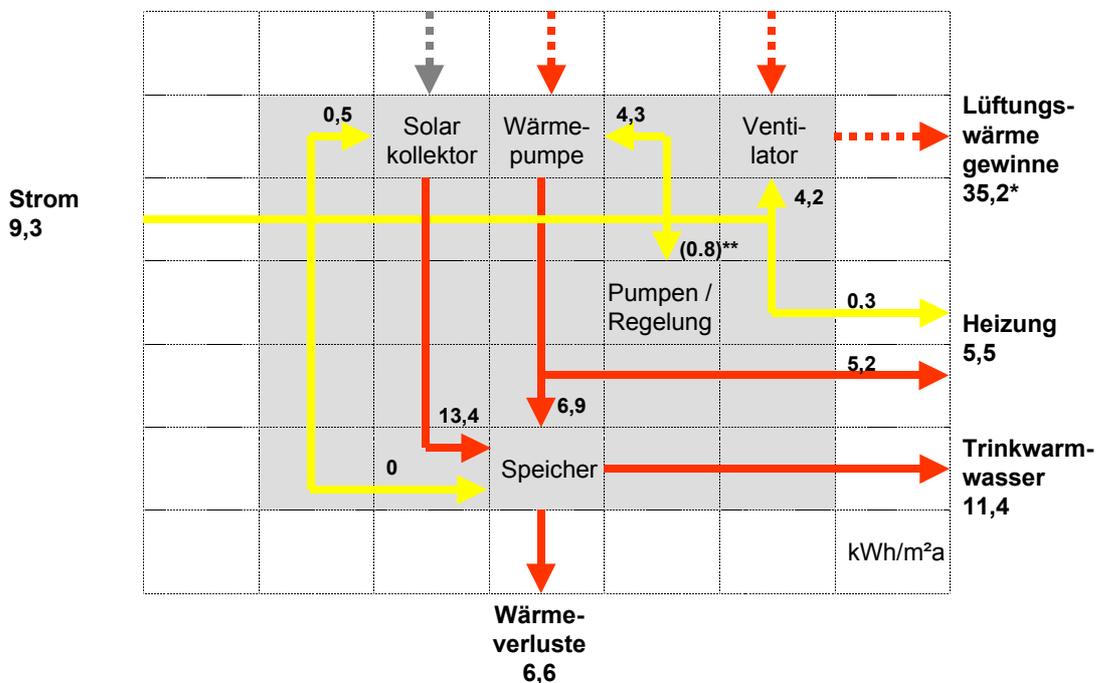
⁴ Ein ergänzendes Luft-Erdregister verändert den Wärmebereitstellungsgrad des gesamten Lüftungssystems nur um wenige Prozentpunkte. Dies gilt vor allen dann, wenn bereits der Wärmeübertrager selbst einen hohen Wärmebereitstellungsgrad (>80%) aufweist, da der Wärmebereitstellungsgrad immer unter 100% liegen muss. Die Nutzung der Wärmegewinne beschränkt sich im wesentlichen auf vermiedenen elektrischen Energieeinsatz zur Abtauung.

höheren mittleren Luftwechsel von 0,5 pro Stunde und der gegenüber der DIN-Vorgabe um 3 K höheren Raumtemperatur. Da außerdem das gesamte Jahr 2001 betrachtet wurde, sind 9,7 kWh/m² Wärme in der Wärmerückgewinnung enthalten, die außerhalb der Heizzeit (Januar bis April und November bis Dezember) bereitgestellt werden. Damit werden aus Erd-Luft-Register und Wärmerückgewinnung in der Heizzeit insgesamt 22,8 kWh/m² Nutzfläche erreicht, etwa 5 kWh/m² mehr als nach DIN 4701 berechnet.

Der geringe Heizwärmeverbrauch von 5,5 kWh/m² (Nutzwärme), der aktiv durch die Wärmepumpe und elektrische Nachheizung der Zuluft gedeckt wird, fällt ausschließlich in der Heizzeit an.

Der Trinkwarmwasserverbrauch von 13,7 kWh/m² liegt geringfügig über den nach EnEV vorgegeben Rechenwert von 12,5 kWh/m². Solaranlage und Wärmepumpe speisen in den Warmwasserspeicher ein. Da alle Leitungen in der thermischen Hülle mit kurzen Leitungswegen verlegt sind, ist der Anteil der Leitungsverluste gering und wird in diesem Fall vernachlässigt. Es fallen besonders die relativ hohen Verluste des Speichers auf, die etwa dem Betrag der Warmwasserbereitstellung durch die Wärmepumpe entsprechen. Sie werden vorwiegend durch die hohen Speichertemperaturen in den Monaten Mai bis September hervorgerufen. In dieser Zeit wird der 400-Liter-Speicher durch die Solaranlage bis auf 90 °C aufgeheizt, die tägliche Entnahme liegt bei etwa 70 Liter. In den übrigen Monaten liegen die Speichertemperaturen im Mittel zwischen 45 °C und 50 °C, die täglichen Entnahmemengen im Mittel bei 90 Litern. Aus dem Stromverbrauch für die Haustechnik wird ein Primärenergieverbrauch von 27,9 kWh/m² berechnet. Gegenüber dem nach EnEV zulässigen maximalen Primärenergieverbrauch ist der tatsächliche Verbrauch etwa um den Faktor 4 geringer. Das bestätigt die Arbeitshypothese der IEA, Task 28, den Primärenergieverbrauch in Passivhäusern gegenüber dem EnEV-Grenzwert um den Faktor 4 zu senken. Die effiziente Wärmeversorgung unter Nutzung der Solarenergie spiegelt sich auch in der kleinen Anlagenaufwandszahl von $e = 0,52$ wieder, dem Verhältnis von eingesetzter Primärenergie zur Nutzenergie.

Primärenergie : 27,9 kWh/m² Wohnfläche



* 0,91 Nutzungsgrad nach DIN 4107 berücksichtigt, Wert inklusive 12,7 kWh/m² aus Erdluft-Register
 ** Regelung bereits im Wert der Wärmepumpe und Ventilatoren enthalten

Bild 8 Energieflussdiagramm für die Passiv-Reihenhäuser Neuenburg. Alle Werte entsprechen dem Mittelwert über alle sieben Häuser. Aus dem Stromverbrauch für die Haustechnik wird ein Primärenergieverbrauch von 27,9 kWh/m² ermittelt, ein Viertel des Primärenergiegrenzwertes

nach EnEV. Die Wärmepumpe erreicht eine Arbeitszahl von 2,9. Insgesamt arbeitet die Wärmepumpe im Mittel zu 2/3 der Gesamtnutzungszeit für die Trinkwasserwärmung (Solltemperatur im Warmwasserspeicher von 45 bis 50 °C), in den meisten Häusern jedoch zwischen 80 – 90 % der Gesamtnutzungszeit.

Der Einsatz einer Solaranlage in Passivhäusern, der in Neuenburg im Jahr 2001 eine Jahresarbeitszahl von rund 27 erreicht, trägt wesentlich dazu bei, den Primärenergieverbrauch und die Anlagenaufwandszahl zu senken. Durch die Wärmerückgewinnung wurde vergleichsweise nur eine Jahresarbeitszahl von 8,5 ermittelt.

Passiv-Doppelhäuser in Königsbach-Stein

Etwas anders gestaltet sich das Energieflussdiagramm in Königsbach-Stein, da hier eine zentrale Wärmeversorgung der vier Doppelhäuser erfolgt. Neben den Speicherverlusten treten bei der zentralen Heizungs- und Warmwasserversorgung durch die außerhalb der Gebäude verlegten Versorgungsleitungen mit bis zu 50 m Leitungslänge Leitungs- und Zirkulationsverluste im Warmwasserkreis auf. Bild 9 zeigt das Energieflussdiagramm für die Wärmeversorgung der Passivhäuser in Königsbach-Stein für das Jahr 2001. Zu den geringen Speicherverlusten von 2,9 kWh/m² kommen wegen der zentralen Versorgung Leitungsverluste von 15,4 kWh/m² hinzu.

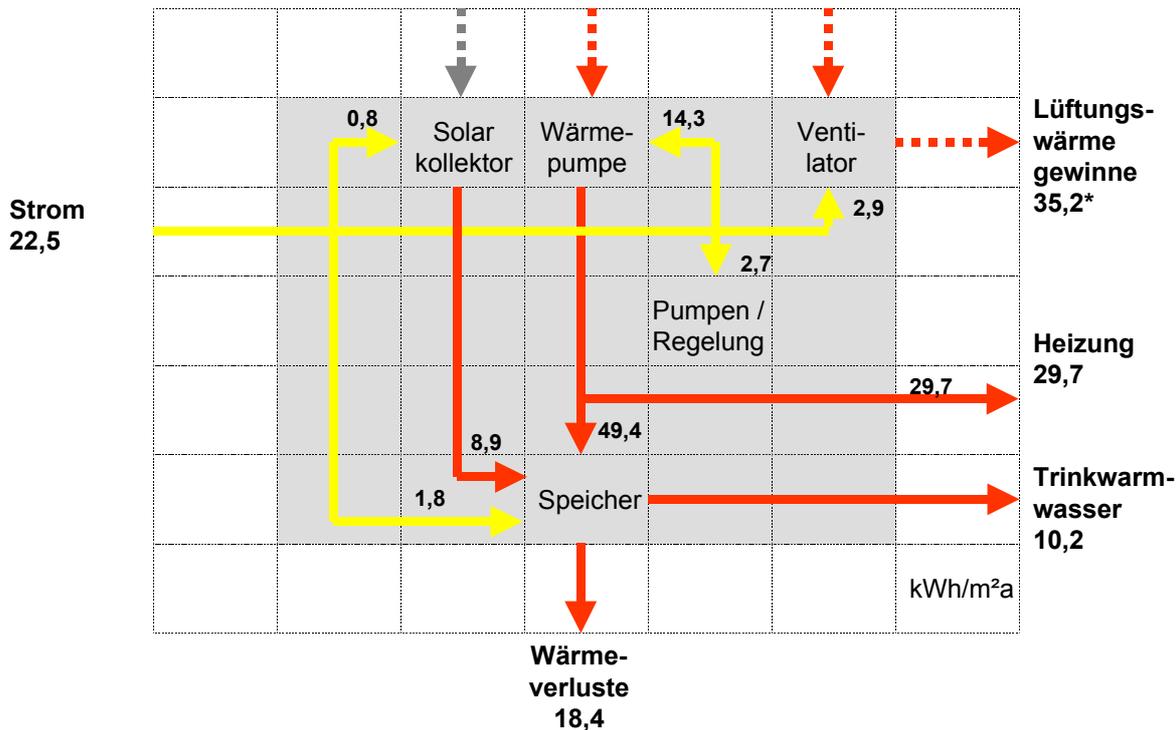
Von den 29,7 kWh/m² benötigter Heizwärme (Nutzwärme) werden 72% durch die Wandheizung und 28% zur Nacherwärmung der Zuluft genutzt.

Durch den Wärmeübertrager in der Lüftungsanlage werden 24,2 kWh/m² Wohnfläche (Berücksichtigung des Nutzungsgrades von 91% nach DIN 4701-10) bereitgestellt. Gegenüber der Heizperiode Januar bis April und November bis Dezember ist das ein um 8 kWh/m² höherer Verbrauch. Da auch hier das gesamte Jahr betrachtet wird, sind die Wärmegewinne durch die WRG von 8 kWh/m² außerhalb der Heizzeit nur bedingt nutzbar. In der Heizzeit liegen die Wärmegewinne durch die WRG mit 16,2 kWh/m² um 1 kWh/m² unter dem Wert nach DIN 4701. Der geringere Wert resultiert aus der Nutzungszeit der Lüftungsanlage. Im Mittel wird die Lüftungsanlage in Königsbach-Stein in der Heizperiode nur zu 80% der möglichen Nutzungstunden betrieben, zu 20% der Zeit ist die Anlage ausgeschaltet. Die Lüftungsanlage erreicht eine Jahresarbeitszahl von 8, liegt damit auch unter dem in Neuenburg erreichten Wert. Insgesamt ist die zur Deckung des Heizwärmeverbrauches durch die Wärmepumpe bereitgestellte Wärme in den Passivhäusern in Königsbach-Stein höher als in Neuenburg. Aufgrund von anlagentechnischen Problemen in der Umspeicherung zwischen Puffer- und Warmwasserspeicher, die ab Juni 2001 wegen permanenter Störungen ganz ausfiel, erfolgte die solare Nutzung nur ungenügend, was sich in der Bereitstellung von nur 8,8 kWh/m² Wohnfläche (260 kWh/m² Kollektorfläche) zeigt. Die Trinkwassererwärmung wurde deshalb ausschließlich mit der Wärmepumpe realisiert. Infolge der geringen Nutzung der solaren Erträge erreicht die Jahresarbeitszahl der Kollektoranlage nur einen Wert von 11. Die durch die Wärmepumpe für die Heizung und Trinkwarmwasserbereitung erzeugte Wärme beträgt insgesamt 49,3 kWh/m² wobei 10,2 kWh/m² zur Deckung des Warmwasserverbrauchs dienen.

Mit einer gesamt erzeugten Wärme von 49,4 kWh/m² bei einem Stromaufwand von 14,3 kWh/m² wird für die Wärmepumpe eine Jahres-Arbeitszahl von 3,5 ermittelt. Diese Arbeitszahl ergibt sich aufgrund des hohen Anteils der Warmwasserbereitung durch die Wärmepumpe in den Sommermonaten. Es wurde anhand der Messergebnisse festgestellt, dass die Regelung der Wärmepumpe aufgrund der geringen Temperaturdifferenz in der Sollvorgabe und einer unzureichenden Platzierung des Regelfühlers im Warmwasserspeicher täglich in kurzen Schaltrhythmen arbeitet, was zu einer starken Belastung der Wärmepumpe und schlechten Arbeitszahlen führt.

Der Primärenergieeinsatz für die Wärmeversorgung wurde zu 67,5 kWh/m² ermittelt. Das entspricht in etwa der Hälfte des nach EnEV zulässigen Grenzwertes an Primärenergie von 125 kWh/m². Die Anlagenaufwandszahl von 1,05 ist größer als bei den Passiv-Reihenhäusern in Neuenburg und zeigt eine geringere Effektivität bei der Wärmeversorgung, besonders die mangelnde Solarenergienutzung der Passiv-Doppelhäuser.

Primärenergie 67,5 kWh/m² Wohnfläche



*0,91 Nutzungsgrad nach DIN 4107 berücksichtigt

Bild 9 Energieflussdiagramm der Passiv-Doppelhäuser Königsbach-Stein; Der Primärenergieverbrauch von 67,5 kWh/m² entspricht etwa der Hälfte des nach EnEV vorgegebenen Grenzwertes. Gegenüber der dezentralen (hausweisen) Wärmeversorgung der Passivreihenhäuser treten hier Leitungs- und Zirkulationsverluste von 15,4 kWh/m² auf, die in etwa dem mittleren Wärmeverbrauch eines Passiv-Reihenhauses in Neuenburg entsprechen. Die Speicherverluste sind jedoch geringer, da im Warmwasserspeicher mit 700 Liter Inhalt und einer mittleren Temperatur von 45 – 50 °C bei einem täglich Durchsatz von ca. 900 Liter die Speicherverluste geringer ausfallen. Im Pufferspeicher mit 5 m³ Inhalt, der die Heizung speist, sind die maximalen Temperaturen auf 45 °C festgelegt.

Im Ergebnis des Monitoring ist es möglich, Schwachstellen im Wärmeversorgungssystem aufzudecken. So konnten durch die Untersuchungen des Wärmeversorgungssystems der Passiv-Doppelhäuser festgestellt werden, dass durch offene Ventile in der Nachheizung der Zuluft noch bis zum Juni in einzelnen Häusern Heizwärme abgefordert wurde, wenn die nächtlichen Temperaturen unter 12 °C lagen. Auch Unstimmigkeiten in der Regelung der Beheizung des Warmwasserspeichers durch die Wärmepumpe wurden erkannt und konnten abgestellt werden. Derzeit werden Anstrengungen unternommen, um das Problem durch das Verkalken des Wärmetauschers im Umspeicherkreis zwischen Puffer- und Warmwasserspeicher zu beseitigen, damit die solar erzeugte Wärme im Sommer auch zur Bereitung des Trinkwarmwassers genutzt werden kann. Die vorgenommenen Optimierungen werden dazu beitragen, den Heizwärme- und den Primärenergieverbrauch zu reduzieren und die Gesamtenergiebilanz zu verbessern..

Fazit

Mit der Energieeinsparverordnung 2002 wird die Basis geschaffen, die Gebäude nicht nur nach dem Heizwärmeverbrauch zu bewerten, sondern Gebäude und Haustechnik als Gesamtkonzept

zu betrachten. Der Primärenergieverbrauch und die Anlagenaufwandzahl sind wesentliche Beurteilungskriterien für die energetische Qualität von Gebäude und Haustechnik. Passivhäuser bringen als Voraussetzung bereits geringe Transmissionswärmeverluste mit. Ein geringer Primärenergieverbrauch und eine Anlagenaufwandzahl kleiner¹ sind nur zu erreichen, wenn energieeffiziente Wärmeversorgungskonzepte unter Nutzung erneuerbarer Energien eingesetzt werden. Je höher der Anteil der erneuerbaren Energien ist, um so kleiner werden der Primärenergieverbrauch und die Anlagenaufwandzahl. Nur unter diesem Aspekt kann auch einem konsequenten Klimaschutz entsprochen werden. Unter Berücksichtigung dieser Kriterien wird ein energetischer Vergleich der Passivhäuser mit unterschiedlichen Haustechnikkonzepten auf einheitlicher Basis möglich. Das betrifft auch den Vergleich mit Passivhäusern mit anderen Wärmeversorgungsstrategien. Erste Ergebnisse wurden unter diesen Gesichtspunkten im Monitoring-Passivhaus-Programm diskutiert.

Die im Monitoringprogramm erhaltenen Ergebnisse hinsichtlich des Primärenergieverbrauchs der Passivhäuser mit Wärmepumpen und Solaranlagen zeigen, dass der Grenzwert des Primärenergiebedarfes nach EnEV deutlich unterschritten wird. Eine Reduzierung des Primärenergieverbrauches um den Faktor 4 in bezug auf den EnEV-Grenzwert ist möglich, wie es die Ergebnisse der Passiv-Reihenhäuser in Neuenburg zeigen. Andere Ansätze der Wärmeversorgung der Gebäude müssen sich daran messen.

Die EnBW hat in einem Förderprogramm einerseits den Bau von Passivhäusern mit Wärmepumpen und thermischen Solaranlagen, andererseits das Monitoringprogramm der Passivhäuser zur messtechnischen Bewertung der Versorgungssysteme unterstützt und führt sie mit einer sozialwissenschaftlichen Begleituntersuchung durch das Fraunhofer ISE fort, um mögliche Hemmnisse bei der Markteinführung von Geräten und bei den Nutzern rechtzeitig zu erkennen. Durch die unmittelbare Nutzung der Ergebnisse wird die EnBW zum Erfahrungsträger für effiziente Wärmeversorgungstechnologien für Passivhäuser, speziell beim Einsatz von elektrischen Wärmepumpensystemen.

Danksagung

Für die fördernde Unterstützung der Durchführung der Messungen möchten wir uns bei EnBW Energie Baden-Württemberg und der Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg recht herzlich bedanken..

Literatur

- [1] Feist, W., Passivhaus 2002, Fakten, Trends, Forschung und Entwicklung, 6. Europäische Passivhaustagung Basel, Jan. 2002, S.33 - 41
- [2] Voss, K., Ufheil, M., Solarenergie und Effizienz im Geschosswohnungsbau – Ergebnisse, Erfahrungen und Trends aus aktuellen Demonstrationsprojekten; 12. Symposium thermische Solarenergie, Staffelstein, April 2002, S. 521-529
- [3] Bühring, A., Russ, C., Kiefer, K., Harter, K., Von der Wärmepumpe zur Brennstoffzellen-Heizung, 6. Europäische Passivhaustagung Basel, Jan 2002, S. 209 – 218
- [4] Voss, K., Hastings, R., Sustainable Solar Housing, Definition, Projekte und erste Analysen der internationalen Energieagentur IEA, 6. Europäische Passivhaustagung Basel, Jan. 2002, S. 97 – 104