

# Aktuelle Erfahrungen mit Lüftungs-Kompaktgeräten für Passivhäuser auf dem Teststand und im Einsatz

Dipl.-Ing. Andreas Bühring,  
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Oltmannsstr. 5,  
79100 Freiburg, Tel.: 0761-4588-288, Fax.: -132, Email: [buehring@ise.fhg.de](mailto:buehring@ise.fhg.de)

## 1 Zusammenfassung

Die Integration einer Kleinstwärmepumpe zur Restheizung und Brauchwassererwärmung in ein Lüftungskompaktgerät kann eine energieeffiziente und kostengünstige Variante dezentraler Systeme darstellen. Simulationen und Messungen auf dem neuen Teststand des Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE an einem ersten Kompaktgerät zeigen eine hohe Effizienz, welche die vorgelagerten Umwandlungsverluste der Stromproduktion ausgleicht. Die Kombination mit einem flüssiggasversorgten Kleinbrenner in der Abluft verdoppelt die Wärmeleistung des Kompaktgerätes und mindert die primärenergetische Anfälligkeit des Konzeptes gegenüber beispielsweise nutzerbedingt erhöhter Leistungsanforderung.

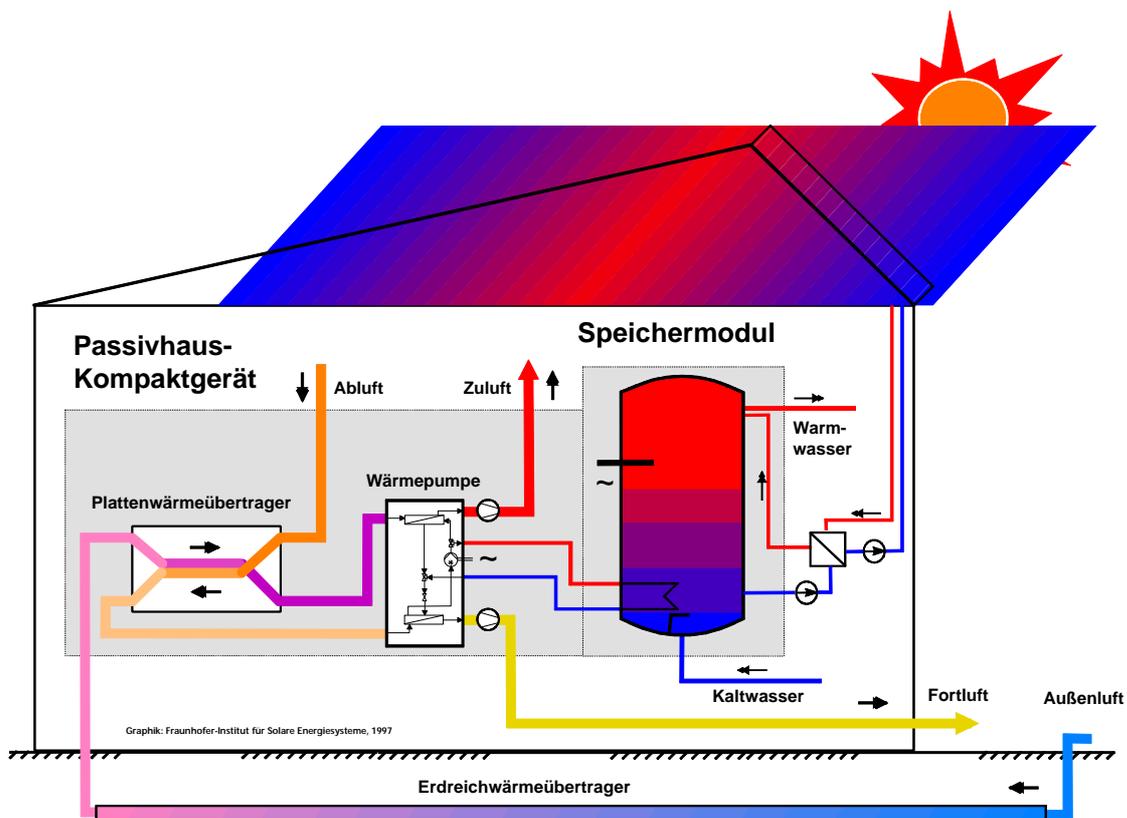
Das Fraunhofer ISE arbeitet seit einiger Zeit an der Untersuchung entsprechender Versorgungskonzepte für Passivhäuser und hat dafür neue Simulationsmodelle entwickelt [daS 97, Bau 97], ökonomische Studien angestellt [Hes 97, Met 99] und praktische Untersuchungen durchgeführt [Kno 98, Ste 98], um die Industrie bei der Entwicklung von entsprechenden Geräten zu unterstützen. Mit finanzieller Unterstützung interessierter Industrieunternehmen hat das Fraunhofer ISE einen Teststand zur Untersuchung von Lüftungskompaktgeräten aufgebaut und dort bisher zwei Geräte intensiv getestet.

Eines dieser Geräte wird seit Weihnachten im Rahmen eines Feldtests in einem bewohnten Passivhaus in Büchenau bei Karlsruhe betrieben und intensiv vom Fraunhofer ISE vermessen und überwacht. Erste Ergebnisse können voraussichtlich auf der Tagung präsentiert werden. Zur Zeit wird ein weiteres Meßprojekt in sieben Passivhaus-Reihenhäusern in Neuenburg am Rhein, die von Rasch&Partner errichtet werden, vorbereitet. Dort sollen sieben Geräte dieses Typs eingesetzt werden. Eine intensive Messung der Geräte und des Gebäudes soll Schlußfolgerungen zum Einfluß des Nutzerverhaltens auf die Betriebsergebnisse dieser Versorgungsvariante zulassen.

Im Auftrag eines deutschen Industrieunternehmens hat das Institut zusammen mit dem Büro für Solarmarketing das Marktpotential für derartige Geräte untersucht [Wit 99]. Gegenwärtig wird im Rahmen einer Systemstudie für dieses Unternehmen ein verbessertes Konzept für das Lüftungskompaktgerät entwickelt.

## 2 Lüftungskompaktgeräte mit Wärmepumpe

Lüftungskompaktgeräte sind dadurch gekennzeichnet, dass sie die Funktionen Lüftung, Heizung und Brauchwassererwärmung für Wohnhäuser mit einem Gerät abdecken, welches sich gegebenenfalls aus koppelbaren Modulen zusammensetzt. Für die Eignung zum Einsatz in Passivhäusern ist das Sicherstellen der Behaglichkeit in den Wohnräumen und eine hohe energetische Effizienz notwendig. Hierfür wurden in Vorbereitung der Passivhaustagung Kriterien entwickelt [PHI 99]. Unabdingbar ist der Einsatz effizienter Ventilatoren, eine passive Wärmerückgewinnung von der Abluft auf die Zuluft mit ausreichend hohem Wärmebereitstellungsgrad, die Kopplung mit einem solartauglichen Warmwasserspeicher und eine Wärmequelle hoher primärenergetischer Effizienz, um den Restwärmebedarf für die Zuluftnachheizung und die Brauchwassererwärmung zu decken.



*Bild 1: Prinzipschema von Lüftungskompaktgeräten mit Wärmepumpe*

Eine erfolgversprechende Variante der Deckung des Restwärmebedarfs ist durch den Einsatz einer Abluftwärmepumpe gegeben, die die Restenergie der Abluft nach der passiven Wärmerückgewinnung nutzt [Fei 96]. Wird ein Erdreichwärmeübertrager im Winter zum Vorwärmen der Frischluft eingesetzt (siehe Bild 1), so reicht beim Baustandard des Passivhauses die sensible und latente (Kondensationsenergie der Luftfeuchte) Wärme der Abluft aus, um zusammen mit der elektrischen Antriebsenergie der Wärmepumpe den größten Teil des Restwärmebedarfs zu decken [Büh 97]. Für die Bereitstellung der hochwertigen Energie Strom für den Antrieb der Wärmepumpe

entstehen vorgelagerte Umwandlungs- und Leitungsverluste. Deshalb ist beim Bezug von Strom aus dem deutschen Kraftwerksmix eine Jahresarbeitszahl, also das Verhältnis von Nutzwärme zu elektrischer Energie, über 2.94 [Gemis 3.08] notwendig, um diese auszugleichen. Durch die Liberalisierung der Stromwirtschaft ist es allerdings ab sofort möglich, den Bezug bei geringen Mehrkosten vollständig auf regenerativ erzeugten Strom umzustellen. Damit entsteht eine kostengünstige Variante für eine Nullemissions-Haustechnik.

Simulationen am Fraunhofer ISE mit einem für Wärmepumpen neu entwickelten Modul für das dynamische Simulationsprogramm TRNSYS ergeben in Simulationen für typische Passivhäuser Stromverbräuche von 10 bis 15 kWh/(m<sup>2</sup>a) für die drei haustechnischen Funktionen Lüften, Heizen und Brauchwassererwärmung. Dies entspricht einem Primärenergieeinsatz von 30 bis 45 kWh<sub>PE</sub>/(m<sup>2</sup>a) und liegt unter dem in [Wer 98] dargestellten Grenzwert von 55 kWh/(m<sup>2</sup>a).

### 3 Teststand für Lüftungskompaktgeräte

Im Solarhaus Freiburg betreibt das Fraunhofer ISE einen Teststand für Kompaktgeräte. Er ist in das Lüftungs- und Warmwassersystem des Gebäudes integriert und bietet Platz für zwei Kompaktgeräte (Bild 2). Auf dem Dach des Gebäudes ist eine Solarkollektoranlage installiert und in die Frischluftansaugung ist ein Erdreichwärmeübertrager integriert [Büh 98b].



*Bild 2: Teststand des Fraunhofer ISE für Lüftungskompaktgeräte*

Auf dem Teststand ist es möglich, Kompaktgeräte für Passivhäuser unter realen Einsatzbedingungen über längere Zeiträume zu testen und zu vermessen. Für Messungen unter stationären Bedingungen sind in die Frischluft und die Abluft Kühlgeräte, Nacherhitzer und Befeuchter eingebaut. Durch einen Sekundärkreis mit Wärmeabfuhr kann die Speichertemperatur konstant gehalten werden.

Durch eine umfangreiche Sensorik werden vollständige Energiebilanzen der Geräte, Leistungen der elektrischen Komponenten, Lufttemperaturen an verschiedenen Stellen im Gerät sowie Kältemitteltemperaturen und -drücke erfaßt. Hierdurch können neben der Berechnung von Bilanzen und Kennwerten auch konstruktive Empfehlungen zur Verbesserung der Geräte gegeben werden. Die Messungen werden außerdem für das Validieren der oben beschriebenen Simulationsmodelle verwendet.

Das Fraunhofer ISE bietet auf diesem Teststand Messungen über längere Zeiträume, in stationären Betriebspunkten oder für die Brauchwassererwärmung in Anlehnung an die DIN EN 255 an.

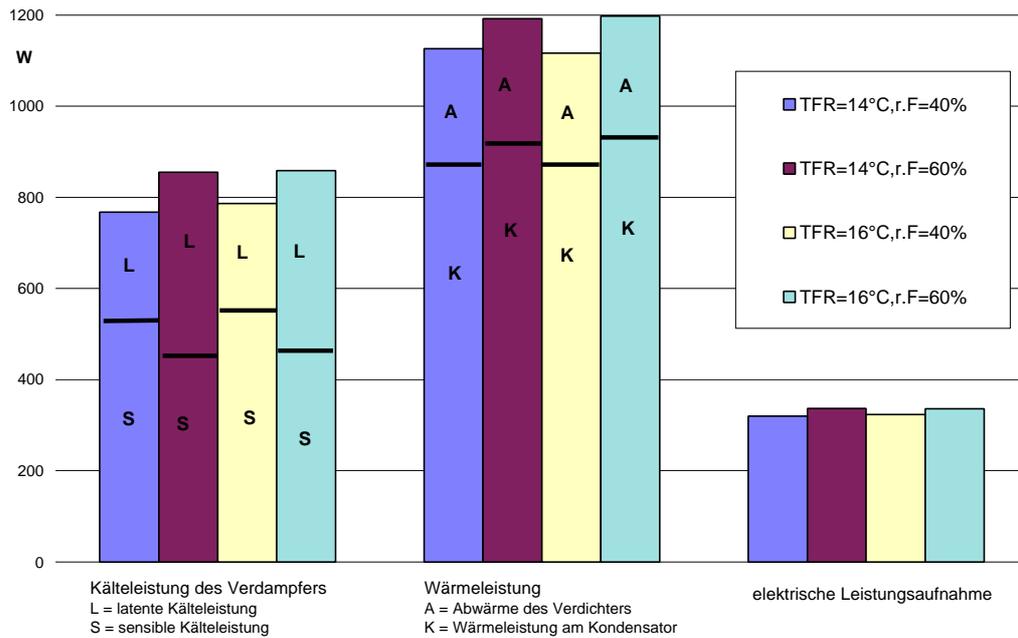
## 4 Messungen

### 4.1 Aerex BW 125

Mit dem Kompaktgerät Aerex BW 125 der Fa. Drexel Solarlufttechnik in Bregenz [Dre 97] wurden bereits umfangreiche Messungen durchgeführt. In diesem Gerät ist ein Kreuz-Gegenstrom-Wärmeübertrager eingesetzt. Die Ventilatoren haben elektronisch kommutierte Gleichstrommotoren und sind jeweils in drei Drehzahlstufen in %-Schritten regelbar. Die Abluftwärmepumpe hat einen Kältemittelverflüssiger in der Zuluft und einen zweiten intern im Warmwasserspeicher. Diese können alternativ betrieben werden. Die Zuluftnachheizung hat Vorrang vor der Brauchwassererwärmung. Wenn diese bei gleichzeitigem Wärmebedarf nicht von der Wärmepumpe abgedeckt werden kann, wird ein elektrischer Heizstab im Speicher in Betrieb genommen. Bei der Installation des Gerätes ist wegen des getrennten Transports von Speicher und Lüftungsgerät ein Kältetechniker für den Anschluß der Kältemittelleitungen erforderlich. Der Speicher hat ein Volumen von 190 Litern oder für die Kopplung mit einer thermischen Solaranlage auch 400 Liter.

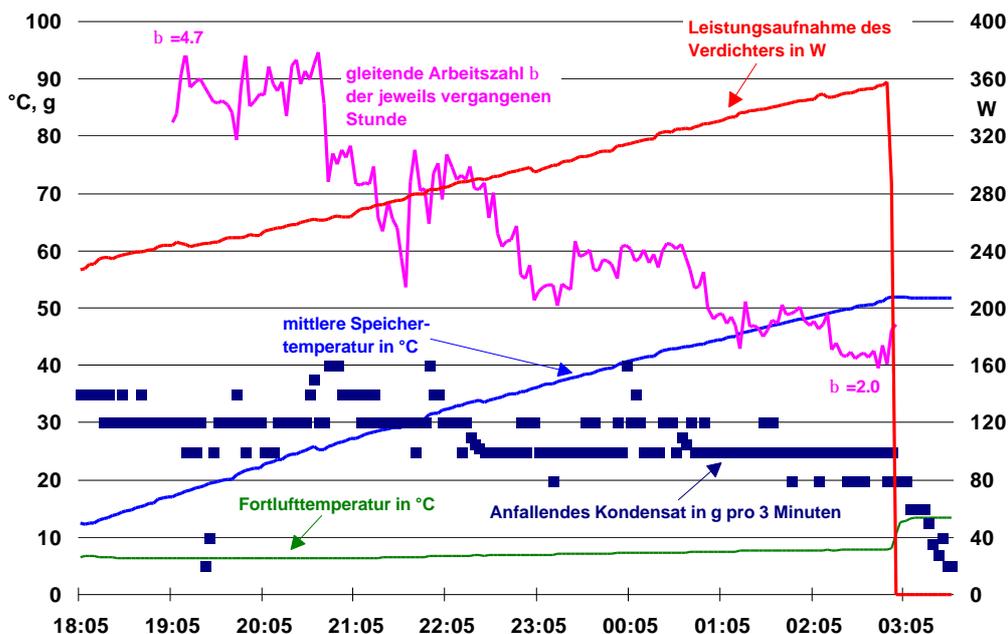
Für den Heizbetrieb konnte bei Frischlufttemperaturen von 14 °C bzw. 16 °C und Abluftfeuchten von 40% und 60% bei einer Ablufttemperatur von 19 °C eine Leistungszahl der Wärmepumpe (ohne Berücksichtigung des Wärmegewinns am Gegenstromwärmeübertrager) von 3.4 bis 3.6 gemessen werden. Die Heizleistung erreicht bei einem Luftvolumenstrom von 125 m<sup>3</sup>/h 1100 bis 1200 W (siehe Bild 3).

Bei der Erwärmung des 190-Liter-Speichers von 12 °C auf 52 °C wird eine Arbeitszahl von 3.2 erreicht [Büh 98c]. Wird die Abwärme des Verdichters, der im Zuluftteil des Lüftungsgerätes plaziert ist, in der Heizperiode genutzt, beträgt die Arbeitszahl 3.7 (siehe Bild 4). Für die Erwärmung des gesamten Speichers benötigt das Gerät 9 Stunden. Durch den innenliegenden Wärmeübertrager ohne Ladelanze kommt es zu einer vollständigen Durchmischung des Speichers. Eine geschichtete Beladung wie bei vielen Solarspeichern würde die Verfügbarkeit von Brauchwasser der gewünschten Temperatur und damit den Brauchwasserkomfort erhöhen. Bei der Brauchwasserentnahme kann eine vorhandene Schichtung weitgehend erhalten bleiben.



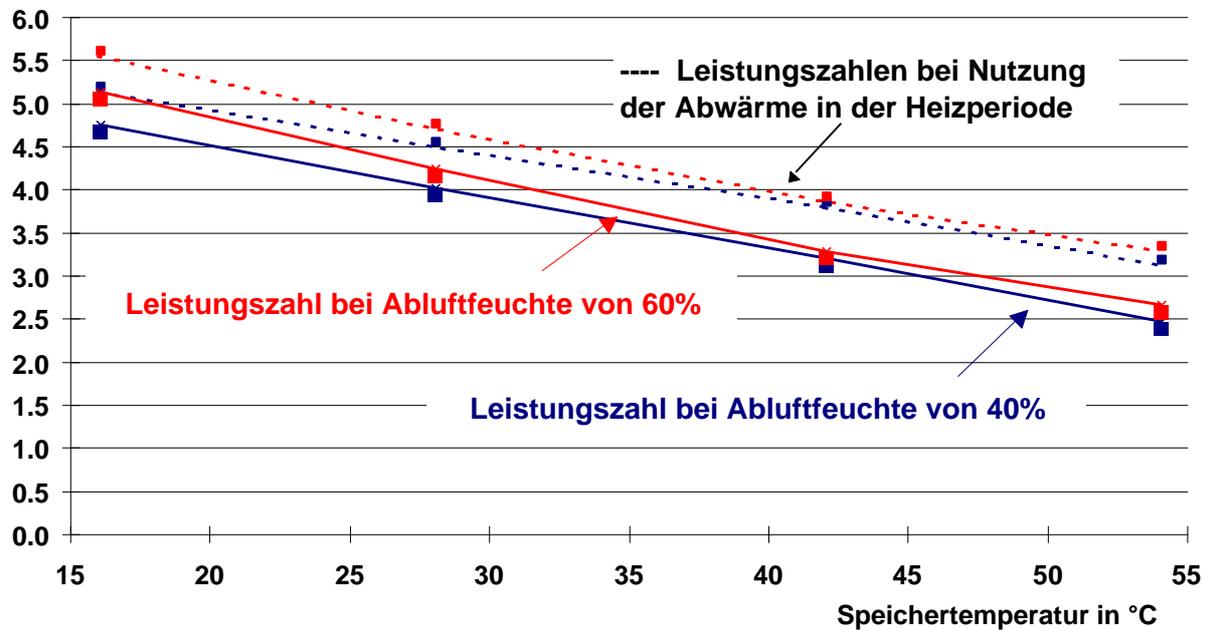
**Bild 3:** Messungen am Aerec BW 125 im Heizbetrieb bei 19 °C Ablufttemperatur und einem Luftvolumenstrom von 125 m<sup>3</sup>/h. Frischlufttemperatur TFR 14 °C und 16 °C, Abluffeuchte r.F. 40% und 60%

In der Graphik ist gut zu erkennen, wie die Leistungsaufnahme des Verdichters mit steigender Speichertemperatur größer wird. Dies hat seine Ursache darin, dass innerhalb des Kältemittelverflüssigers im Speicher der Kondensationsdruck ansteigt. Auf diesen muß der Verdichter das Kältemittel komprimieren. Durch die höhere mechanisch zu leistende Arbeit sinkt die Arbeitszahl von anfangs über 4 auf einen Wert von 2.



**Bild 4:** Messung der Brauchwassererwärmung mit dem Aerec BW 125 bei 140 m<sup>3</sup>/h Luftvolumenstrom, einer Ablufttemperatur von 22 °C bei 40% r.F. und einer Frischlufttemperatur von 12.5 °C.

Bei Messungen mit konstant gehaltener Speichertemperatur wird bis zu Temperaturen von 45 °C eine Leistungszahl über 3 erreicht. In der Heizperiode wird zusätzlich die Abwärme des Verdichters zum Erwärmen der Zuluft genutzt. Damit liegt die Leistungszahl auch noch bei 55 °C über einem Wert von 3.



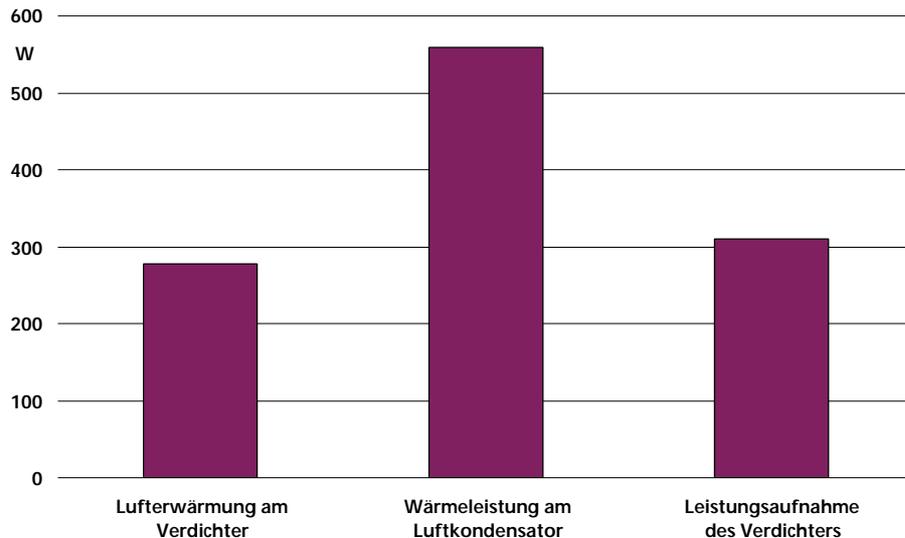
**Bild 5:** Leistungszahlen des Aerex BW 125 bei Speichererwärmung; gestrichelt der Betrieb in der Heizperiode. Randbedingung: Ablufttemperatur 19 °C, Frischlufttemperatur 14 °C, 125 m<sup>3</sup>/h Luftvolumenstrom

## 4.2 Combi

Mit dem Lüftungskompaktgerät Combi der Fa. Genvex aus Dänemark wurden ebenfalls Messungen durchgeführt. Im Combi ist ein Kreuzstromwärmeübertrager integriert. Die Ventilatoren haben Wechselstrommotoren, die in zwei Stufen betrieben werden können. Für die Normallüftungsstufe kann durch fest gewählte Verdrahtung bei der Inbetriebnahme eine von fünf Spannungsstufen gewählt werden. Auch hier hat die Abluftwärmepumpe einen Kältemittelverflüssiger in der Zuluft und einen zweiten für den Warmwasserspeicher. Allerdings ist dieser nicht intern im Speicher integriert, sondern als Mantelwickelkondensator außen auf diesen aufgebracht. Der Speicher hat einen Inhalt von 185 Litern und ist fest im Gerät integriert. Dadurch ist bei der Aufstellung des Gerätes kein Kältetechniker erforderlich. Allerdings entfällt die Möglichkeit, einen größeren Solarspeicher einzusetzen. Da der vorhandene Speicher nicht über 60 °C aufgewärmt werden darf, ist der nutzbare Wärmeinhalt des Speichers für eine Solaranlage ausgesprochen klein. Eine Besonderheit der Wärmepumpe ist die Möglichkeit des gleichzeitigen Betriebs der beiden Kältemittelverflüssiger durch parallele Aufteilung des Kältemittelstromes. Dabei soll 20% der Wärmeleistung in die Zuluft abgegeben werden und zu kalte Zulufttemperaturen verhindern. Je nach Bedarf kann aber auch jeder Verflüssiger einzeln betrieben werden.

In Bild 6 ist eine Messung beim reinen Heizbetrieb des Combi ohne Wassererwärmung, also auch ohne Ausgleich von Wärmeverlusten des Speichers, dargestellt. Die

Randbedingungen sind: Abluft 20.7 °C mit 30% relativer Feuchte, Frischluft 9.5 °C, Luftvolumenstrom 130 m<sup>3</sup>/h. Aus der Messung ergibt sich eine Wärmeübertragung von rund 200 W am Plattenwärmeübertrager. Der Verdichter gibt rund 280 W an die Zuluft ab. Der Kältemittelverflüssiger in der Zuluft weitere 560 W. Die Wärmeleistung der Wärmepumpe beträgt damit 840 W bei einer Leistungsaufnahme des Verdichters (ohne Ventile und ohne erhöhten Ventilatorverbrauch für Druckverluste an der Wärmepumpe) von 310 W. Damit berechnet sich eine Leistungszahl von 2.7 für die Wärmepumpe. Das elektrische Wirkverhältnis beträgt 2.5 für das gesamte Lüftungsgerät.



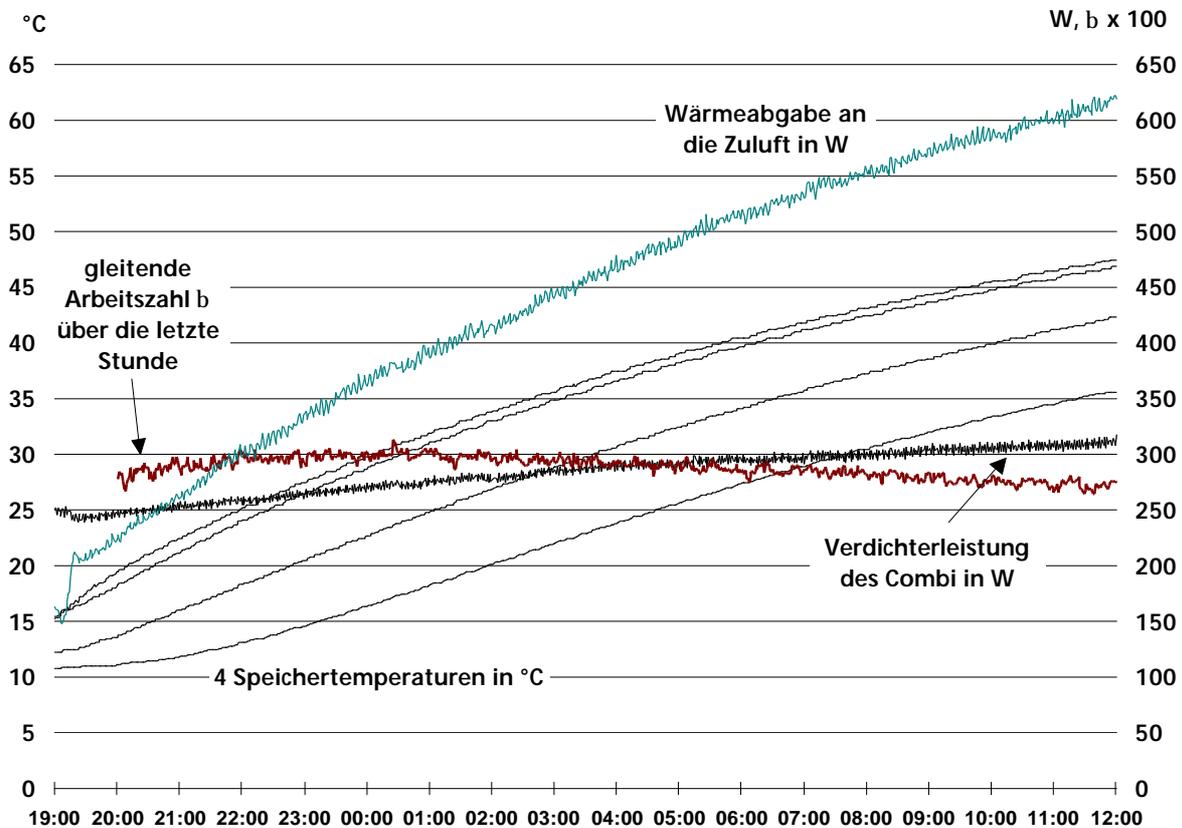
**Bild 6: Luftheizung mit dem Lüftungskompaktgerät Combi. Randbedingungen: Ablufttemperatur 20.7 °C bei 30% relativer Feuchte, Frischlufttemperatur 9.3 °C, Luftvolumenstrom 130 m<sup>3</sup>/h**

Die Erwärmung des ausgekühlten Speichers von 13 °C auf 43 °C bei gleichzeitiger Zulufterwärmung ist in Bild 7 wiedergegeben. Bemerkenswert lang ist die Zeit von 17 Stunden für die Erwärmung des oberen Bereichs des Speichers auf die Nutztemperatur von 45 °C.

Positiv ist die Schichtung der Speichertemperaturen während der Beladung. Dabei zeigt sich ein Vorteil des Mantelkondensators, der sich über einen großen Teil der Speicherhöhe erstreckt. Die Energiebilanz bei der Erwärmung des Speichers und der Zuluft ergibt einen Energiegewinn von 13.8 kWh. Davon dienen 54% der Zuluftheizung und der Rest der Brauchwassererwärmung. Dafür ist ein elektrischer Aufwand am Verdichter von 4.8 kWh notwendig. Die Arbeitszahl liegt mit 2.88 unter der Mindestanforderung von 3.

Die Messungen zeigen, dass das Combi in der getesteten Ausführung nicht für die energieeffiziente Wärmeversorgung von Passivhäusern geeignet ist. Allerdings zeigen sich auch positive Merkmale wie der nach dem Umbau der Wärmepumpe erreichte störungsfreie Betrieb und die schichtende Beladung des Speichers. Der Hersteller hat die richtigen Konsequenzen aus den Messungen gezogen und bietet das Gerät in der getesteten Version nicht mehr für die Wärmeversorgung in Passivhäusern an. Zur Zeit wird ein Nachfolgemodell entwickelt, welches nach Aussage der Fa. Genvex die gleiche

Energieeffizienz wie das Aerec erreichen soll. Dafür bilden die Erfahrungen mit dem bisherigen Combi sicherlich eine gute Ausgangsbasis für die Weiterentwicklung.



*Bild 7: Speichererwärmung bei gleichzeitiger Zuluftnachheizung mit dem Combi.  
Randbedingungen: Ablufttemperatur 17.4 °C bei 30% relativer Feuchte,  
Frischlufthtemperatur 3.6 °C, Luftvolumenstrom 125 m<sup>3</sup>/h*

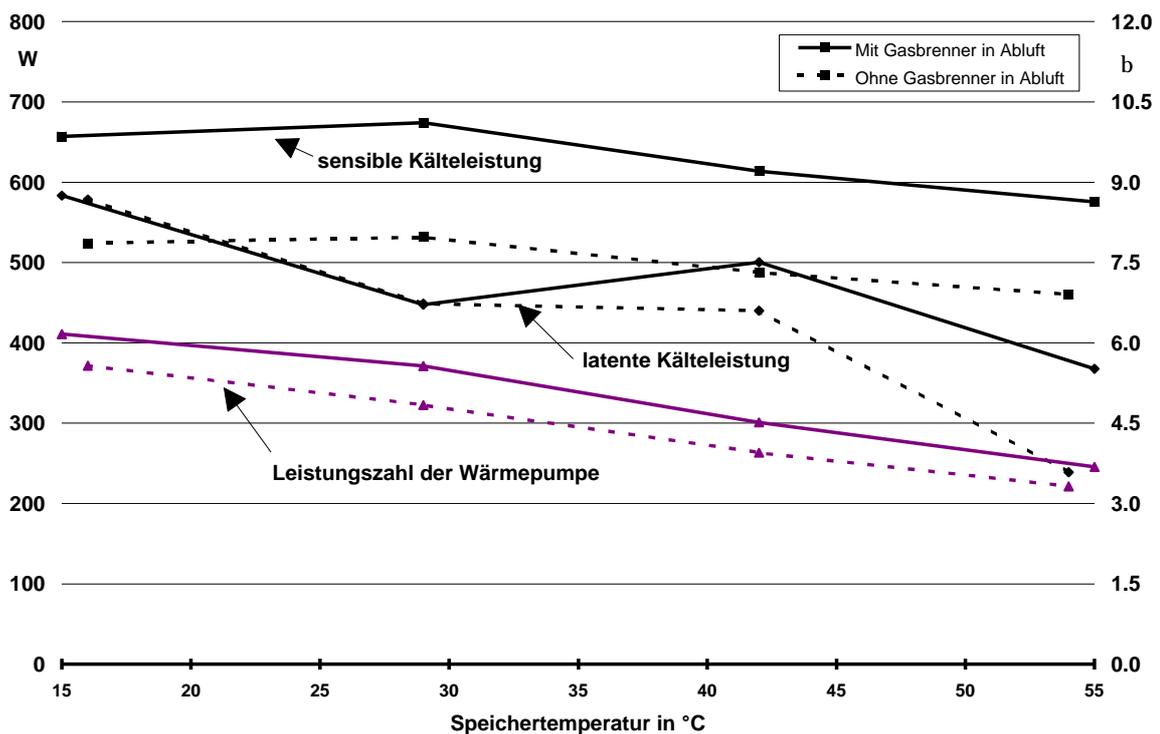
### 4.3 Primärenergiebrenner als Leistungsreserve

Durch eine starke Ausweitung der Idee von Passivhäusern werden auch vermehrt Gebäude errichtet werden, bei denen der angestrebte Heizenergiebedarf durch Mängel in der Bauausführung oder fehlerhafte Berechnungen von Ausführungsdetails überschritten werden wird. Ebenso können unvermeidbare Verschattungen, eine ungünstige Gebäudeausrichtung oder vom Auslegungsfall stark abweichendes Nutzerverhalten zu einem erhöhten Heizenergiebedarf führen. Bei den oben beschriebenen Lüftungskompaktgeräten stellt die Abluft die einzige, in ihrem Potential begrenzte Wärmequelle da. Deshalb würde es zu einem großen zusätzlichen Betrieb von elektrischen Widerstandsheizern im Wasserspeicher und in den Wohnräumen kommen. Damit steigt der Primärenergiebedarf überproportional an. Für die Lösung dieses Problems ist auf der 2. Passivhaustagung ein mit nicht-leitungsgebundenem fossilem Brennstoff (Flüssiggas, Heizöl) zu betreibender Brenner in der Abluft vorgeschlagen [Büh 98a] und vorher zum Patent angemeldet worden. Dabei wird die Abluft direkt als Verbrennungsluft verwendet und das Abgas mischt sich vor dem Lüftungskompaktgerät mit der Abluft. Somit ist weder eine Verbrennungsluftzufuhr noch eine Abgasleitung mit den damit verbundenen baulichen Kosten notwendig. Die Zuluft wird am (Platten-) Wärmeübertrager scho-

nend aufgeheizt, ohne dass es an heißen Stellen zu Staubverschmelzungen kommt wie bei einer direkten Zuluftnachheizung mit einem Gasbrenner. Je nach Rückwärmzahl werden 70% bis 90% der am Brenner umgesetzten Energie auf die Zuluft übertragen. Die restliche sensible und latente (Wasserdampfentstehung beim Verbrennungsvorgang) Wärme kann teilweise noch von der Wärmepumpe genutzt werden.

Bei dieser vorgeschlagenen Ergänzung der Lüftungskompaktgeräte kann die Vorrangschaltung in der Regelung auf den sonst in Wärmeversorgungssystemen üblichen Brauchwasservorrang umgestellt werden. Wenn beide Bedarfe gleichzeitig auftreten, wird der Brenner zur Zulufterwärmung betrieben und die Wärmepumpe zur Brauchwassererwärmung. Damit wird die thermische Leistungsfähigkeit des Gerätes mehr als verdoppelt. Dies schafft zusätzlich die Möglichkeit, gute Niedrigenergiehäuser mit diesem System komplett zu versorgen. Wenn bei diesen akzeptiert wird, dass in der Kernheizperiode der Luftwechsel auf einen Wert von  $0.8 \text{ h}^{-1}$  angehoben wird, so können Gebäude bis zu einem Heizwärmebedarf von ca.  $30 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  mit der Frischluft beheizt werden („Frischlufthäuser“). Hierbei ist auf eine ausreichende Dimensionierung der Luftkanäle zu achten, um Strömungsgeräusche zu vermeiden. Außerdem könnte es im Kernwinter zu trockener Raumluft kommen, so dass hiergegen geeignete Maßnahmen zu treffen sind (z.B. ein paar zusätzliche Topfpflanzen).

Um diese Idee untersuchen zu können, wurde auf dem Teststand des Fraunhofer ISE ein „virtueller Brenner“ in den Abluftkanal eingebaut [Ste 98]. Dieser besteht aus einem elektrischen Lufterhitzer und einer Befeuchtungseinrichtung, die für die kleinen Luftvolumenströme extra entwickelt werden mußte. Damit können die thermisch relevanten Verbrennungsprozesse des Erhitzens und der Befeuchtung durch den bei der Verbrennung entstehenden Wasserdampf nachgebildet werden.



**Bild 8:** Messung mit und ohne virtuellem Gasbrenner bei einer Frischlufttemperatur von 16 °C und (vor dem Gasbrenner) einer Ablufttemperatur von 19 °C sowie relative Feuchte von 60%

Mit Hilfe der oben beschriebenen Konditionierungseinrichtungen des Teststandes wurden konstante Verhältnisse in den Luftströmen und jeweils vier konstante Temperaturen im Speicher eingestellt. Aus den Verbrennungsberechnungen von Flüssiggas wurden die Abluftzustände mit und ohne Brenner bestimmt. Die Versuche wurden jeweils bis zum Einstellen stabiler Zustände mit dem Lüftungskompaktgerät Aerex durchgeführt.

Aus den in Bild 8 dargestellten Meßwerten ist ersichtlich, dass die Wärmepumpe des Aerex das höhere Energieangebot der Abluft tatsächlich nutzen kann. Der virtuelle Brenner hat eine Leistung von 1600 W<sub>HU</sub>. Die thermische Leistung der Wärmepumpe steigt um durchschnittlich 200 W, also um 16%. Dabei steigt die elektrische Leistungsaufnahme des Verdichters nur um 21 W, also um 7% und die durchschnittliche Leistungszahl um rund 8%. Am Plattenwärmeübertrager werden durchschnittlich zusätzlich 1200 W an die Zuluft abgegeben. Damit beträgt der Nutzungsgrad der dem Brenner zugeführten Energie 87%. Dies entspricht natürlich nicht den Werten eines guten (und teuren) Brennwärtekessels, ist aber für eine voraussichtlich sehr kostengünstige Erweiterung des Lüftungskompaktgerätes ein erfreulich guter Wert.

Da die beschriebenen, sehr detailliert ausgewerteten Messungen in einer schwül-heißen Phase des Sommers stattfanden, konnte die Frischluft trotz Erdreichwärmeübertrager und zusätzlichem Kühlgerät nicht auf realistische winterliche Temperaturen abgekühlt werden. Spätere Messungen wurden im Dezember bei einer Frischlufttemperatur von 6 °C, einer Ablufttemperatur von 19 °C, einer Abluftfeuchte von 40%, einem Luftvolumenstrom von 125 m<sup>3</sup>/h und einer virtuellen Brennerleistung von 1850 W durchgeführt. Dabei wurde der Wasserspeicher jeweils mit und ohne Brenner von 14 °C

auf 24 °C erwärmt. Die Wärmeabgabe an die Zuluft beträgt 1180 W und die zusätzliche Leistung der Wärmepumpe 290 W. Der Nutzungsgrad der Brennstoffenergie beträgt 80%, die Arbeitszahl der Wärmepumpe für diesen Teil der Speichererwärmung steigt von 3.5 auf 4.6 an.

## 5 Validieren der Simulationen

Ein Vergleich der Meßwerte mit den Simulationen zeigt nur eine geringe Abweichung (Bild 9). Die größten Abweichungen ergeben sich zur Zeit bei der Darstellung der Latentwärmenutzung. Diese wird in der Simulation noch unterschätzt. Bei den oben gezeigten Ergebnissen ist zu beachten, dass in die Simulation nur Kataloginformationen über die Komponenten der Wärmepumpe (Verdichter und Wärmeübertrager) und keinerlei Meßwerte einfließen.

Diese Ergebnisse stellen gut dar, dass diese Simulation einer Wärmepumpe in der Phase der Auslegung und Konstruktion bereits wertvolle Rückschlüsse erlaubt auf das spätere Verhalten innerhalb eines Gesamtsystems. Damit kann Herstellern eine wichtige Hilfestellung bei der Beurteilung von unterschiedlichen Varianten der Wärmepumpenauslegung gegeben werden, ohne jede Variante des Aggregats zu bauen und zu vermessen.

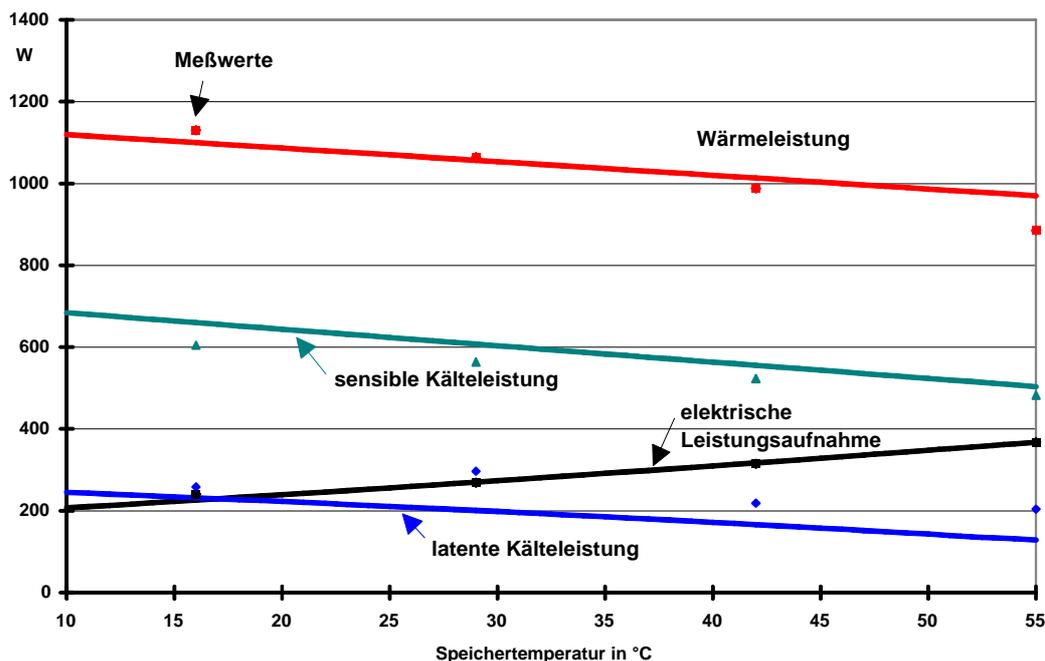


Bild 9: Vergleich der Meßwerte mit Simulationsergebnissen

## 6 Entwickeln eines verbesserten Lüftungskompaktgerätes

### 6.1 Rahmenbedingungen der Entwicklung

Das Fraunhofer ISE führt zur Zeit im Auftrag eines deutschen Industrieunternehmens eine Konzeptstudie für die Entwicklung eines deutlich verbesserten Lüftungskompaktgerätes durch. Einige Teilergebnisse dieser Studie und voraussichliche Entwicklungsziele

können hier bereits dargestellt werden. Ob alle hier genannten Entwicklungsziele tatsächlich in dem neuen Gerät umgesetzt werden, hängt von den weiteren Ergebnissen der Studie und von der Entscheidung über einen laufenden Forschungsantrag ab.

## **6.2 Reihenschaltung der Wärmepumpe**

Die Leistungszahl einer Wärmepumpe ist wesentlich von den Betriebsbedingungen des Kältemittelverdichters abhängig. Dessen Leistungsaufnahme steigt mit der zu überwindenden Druckspreizung, die wiederum von der Verdampfungs- und der Kondensationstemperatur des Kältemittels abhängt. Da die Verdichtung des Kältemittels stets im überhitzten Bereich stattfindet, liegen die Verdichtungsendtemperaturen weit über der Kondensationstemperatur. Dieses hohe Temperaturniveau wird in konventionellen Wärmepumpen meist nicht genutzt, wodurch große Exergieverluste verursacht werden.

### **Thermodynamischer Hintergrund**

In einer Kaltdampf-Wärmepumpe verdampft Kältemittel bei niedrigem Druck bei geringen Temperaturen im Verdampfer und entnimmt dabei einer Wärmequelle (also im Falle des Lüftungskompaktgerätes der Abluft) thermische Energie. Der Kältemitteldampf wird mit einem Verdichter auf ein höheres Druckniveau komprimiert. Dabei steigt die Temperatur des Kältemittels. Bei dem hohen Druck gibt das Kältemittel die im Verdampfer gewonnene Wärme und die (meist elektrische) Antriebsenergie in Wärme umgewandelt an die Wärmesenke (also die Zuluft oder das Brauchwasser) ab. Dabei ist in einen Bereich überhitzten Kältemittels, einen Bereich konstanter Kondensationstemperatur und einen Bereich der Unterkühlung des flüssigen Kältemittels zu unterscheiden.

Der Kondensationsdruck ist vom Temperaturniveau der Wärmesenke und vom Wärmeübertragungsvermögen  $k \cdot A$  des Verflüssigers abhängig. Die Druckspreizung zwischen Verdampfer und Verflüssiger hat wesentlichen Einfluß auf die elektrische Leistungsaufnahme des Verdichters. In Bild 10 sind typische thermodynamische Zustände bei Zulufterwärmung und Brauchwassererwärmung dargestellt.

Im simulierten Vergleich der Lufterwärmung von 19 °C auf 42 °C und der Wassererwärmung von 40 °C auf 55 °C steigt der Druck im Verflüssiger von 9.7 bar auf 14.2 bar und dadurch die Leistungsaufnahme des Verdichters um 20% von 260 W auf 310 W. Die Leistungszahl sinkt von 3.9 auf 3.1 bei einer Lufttemperatur von 7 °C und einem Wassergehalt von 6 g/kg am Verdampfer.

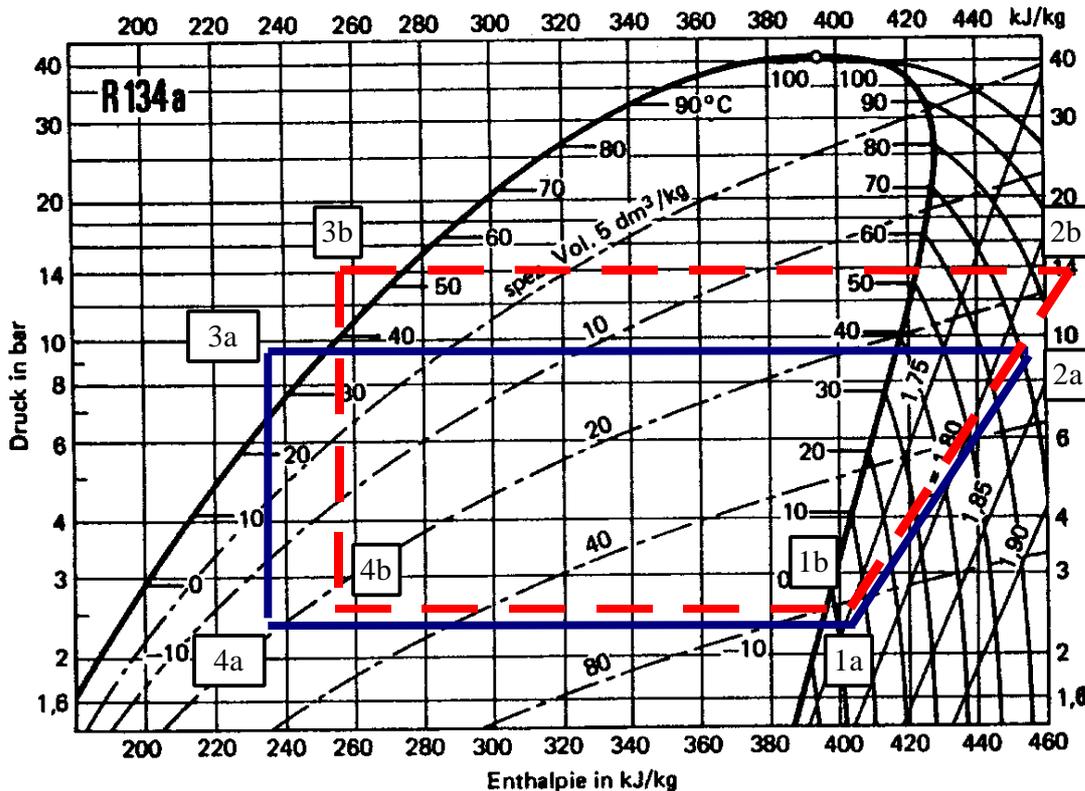


Bild 10: Beispiel für den thermodynamischen Kreisprozeß bei Zulufterwärmung (a) und Brauchwassererwärmung (b) im log-p-h-Diagramm von R 134a (Simulationswerte mit den Kenndaten des Aerex BW 125)

Wie in Bild 10 zu erkennen ist, hat das Kältemittel auch im Falle der Zulufterwärmung eine Austrittstemperatur aus dem Verdichter von über 70 °C. Es ist exergetisch sinnvoll, die Wärme auf einem möglichst hohen Temperaturniveau zu nutzen, also mit einer möglichst geringen Temperaturdifferenz im Wärmeübertrager. Deshalb ist es sinnvoll, das hohe Temperaturniveau des überhitzten, verdichteten Kältemitteldampfes für die Brauchwassererwärmung auf die gewünschte Endtemperatur von üblicherweise 50 °C bis 55 °C zu nutzen. Dies entspricht im Bild 11 der Strecke von Punkt 2a bis 2c'. Durch eine Vergrößerung der Überhitzung des Sauggases von 10 °C auf 25 °C (Punkt 1c) kann diese Strecke um das Stück von 2c nach 2a verlängert werden. Dabei entspricht die Verdichtungsendtemperatur und damit die thermische Belastung des Verdichters mit 90 °C dem Wert bei der Brauchwassererwärmung.

Deshalb soll eine Wärmepumpe entwickelt werden, die im Falle der Zulufterwärmung (mit geringer Kondensationstemperatur) das hohe Temperaturniveau des überhitzten und verdichteten Kältemittels zur Brauchwassererwärmung auf hohem Temperaturniveau nutzt. Hierfür wurde ein Konzept für eine einfache Reihenschaltung von Kältemittel/Wasser-Wärmeübertrager und luftgekühltem Kältemittelkondensator entwickelt und zum Patent angemeldet.

Erste Simulationen ergeben an einem typischen Wintertag für ein von einer vierköpfigen Familie bewohntes Passivhaus eine Steigerung der Arbeitszahl bei der Wärmebereitung (Zulufterheizung und Brauchwassererwärmung) um 20%.

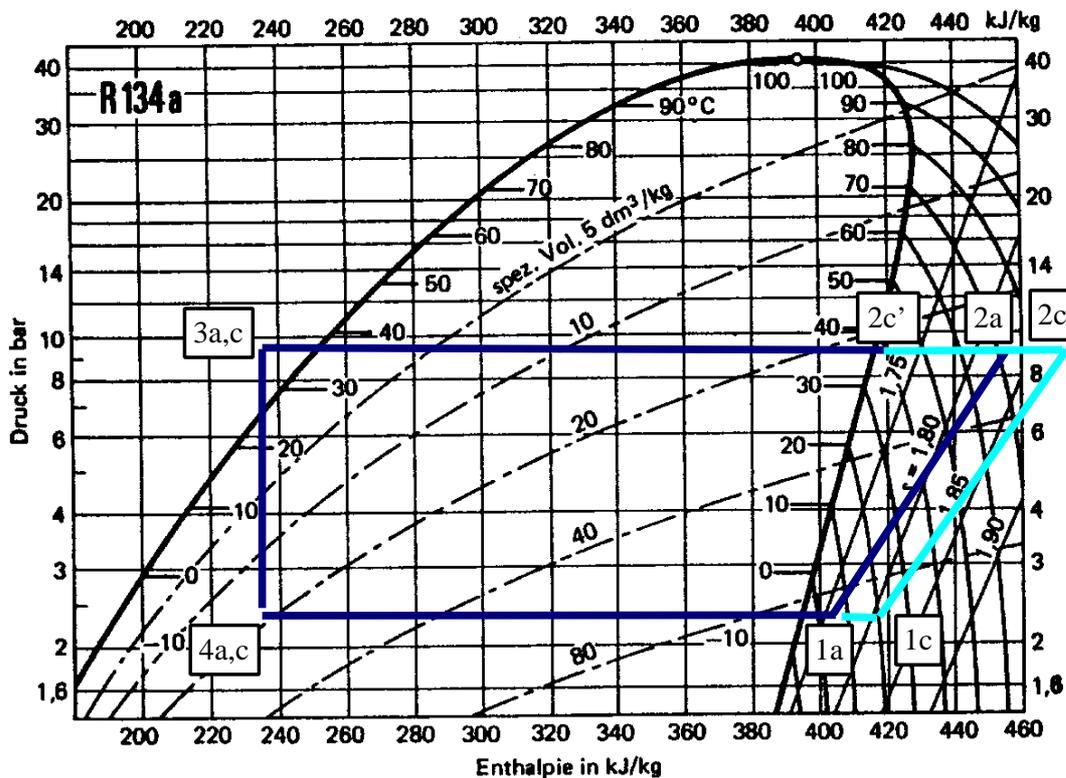


Bild 11: Beispiel für den thermodynamischen Kreisprozeß bei gleichzeitiger Zuluftnacherwärmung und Brauchwassererwärmung mit erhöhter Überhitzung(c) im Vergleich mit reiner Zuluftnacherwärmung (a)

### 6.3 Dynamische Massenstrombalance

An Lüftungskompaktgeräte wird die Forderung nach einer dynamischen Massenstrombalance gestellt. Diese wird zur Zeit von keinem auf dem Markt erhältlichen Lüftungsgerät gewährleistet, ist jedoch aus verschiedenen Gründen notwendig. Im laufenden Betrieb der Lüftungsanlage kommt es durch die in den Filtern abgefangenen Staubpartikel der Außenluft zu veränderlichen Druckverlusten. Dies kann ebenfalls durch zulässige oder auch durch unvorhergesehene Veränderungen und Eingriffe an den Zuluft- und an den Abluftventilen in den belüfteten Räumen geschehen. Dies würde zu einem veränderten Verhältnis zwischen Zuluft- und Abluftvolumenstrom und damit in der Heizperiode zu einer aufgeprägten Infiltration kalter Außenluft oder Exfiltration warmer Raumluft (ohne Wärmerückgewinnung) führen.

Veränderliche Temperaturen der Luftströme am Zuluft- oder am Abluftventilator, wie sie je nach konstruktiver Gestaltung durch die Wärmepumpe oder die Brennstoffzelle hervorgerufen werden können, führen zu einer veränderten Dichte der Luft. Da die Ventilatoren bei gleichen Druckverhältnissen und gleicher Antriebsleistung stets einen gleichen Volumenstrom fördern, würde sich der Luftmassenstrom je nach Temperatur zwischen Abluft und Zuluft deutlich unterscheiden. Auch hierdurch kann es wiederum zu einer starken Infiltration kalter Außenluft kommen. Dies kann zu unbehaglichen Kaltluftströmungen an Fenstern und Türen führen. Simulationen am Fraunhofer ISE ergaben für Passivhäuser einen starken Anstieg des Heizwärmebedarfs. Diese Problematik ist bei vorhandenen Geräten nicht ausreichend gelöst.

## 7 Fazit

Das Konzept der Wärmeversorgung von Passivhäusern mit einem Lüftungskompaktgerät mit integrierter Abluftwärmepumpe hat sich als technisch realisierbar erwiesen. Messungen auf dem Teststand zeigen, dass derartige Geräte mit ausreichend hoher energetischer Effizienz gebaut werden können. Die Ursachen von Störungen und auch Schadensfällen an beiden Geräten konnten identifiziert und von den Herstellern beseitigt werden. Aus den Messungen wurden den Herstellern Empfehlungen zur Verbesserung der Geräte gegeben. Über das Betriebsverhalten im praktischen Einsatz in bewohnten Gebäuden können noch keine fundierten Aussagen getroffen werden. Laufende Feldversuche werden hierüber zu vertieften Erkenntnissen führen.

Aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen wurden Ansätze für die Verbesserung der Gerätekonzeption entwickelt. Im Rahmen des modularen Aufbaus des Gerätes sind dafür Zusatzmodule zur Erweiterung der Funktionalität geplant. Durch den Primärenergiebrenner in der Abluft soll das Einsatzgebiet der Lüftungskompaktgeräte auf Frischluftthäuser ausgedehnt werden. Mit einem Modul zur solaren Kühlung kann der Nutzen der Energiegewinne einer thermischen Solaranlage zur Erhöhung des thermischen Komforts in Wohngebäuden gesteigert werden. In einer langfristigen Entwicklung wird die Integration von (Membran-) Brennstoffzellen kleiner Leistung vorbereitet. Eine solche Brennstoffzelle kann als Modul anstelle der Wärmepumpe in das Lüftungskompaktgerät integriert werden. Mit der Überschußwärme bei der Stromproduktion kann sowohl die Zuluft als auch das Brauchwasser erwärmt werden.

## 8 Dank

Für den Aufbau des Teststandes für Lüftungskompaktgeräte wurde das Fraunhofer ISE durch folgende Unternehmen mit Forschungsmitteln, Eigenleistungen oder durch die kostenlose Überlassung von Geräten unterstützt: EnBW Badenwerk AG, Ritter Energie- und Umwelttechnik GmbH, MAICO-Ventilatoren, Drexel Solarlufttechnik und Lüftungsbau GmbH, Sulzer Escher Wys Kältetechnik, Zimmermann Lüftungs- und Wärmesysteme GmbH & Co. KG und ENNOS Gesellschaft für innovative Energiesysteme mbH. Das Forschungsvorhaben Neuenburg wird durch die Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg gefördert.

## 9 Literatur

- [Bau 97] Baumgartner, J., Untersuchung des Zusammenwirkens von Luftkollektoren und Fortluftwärmepumpen für die Wärmeversorgung von Passivhäusern, Diplomarbeit am Fraunhofer ISE, Freiburg, 1997
- [Büh 97] Bühling, A., da Silva, P., Entwicklung eines Kompaktgerätes für Lüftung, Warmwasserbereitung und Heizung in Passivhäusern, Protokollband 10, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Darmstadt 1997
- [Büh 98a] Bühling, A., Wärmepumpen-Kompaktgeräte zur Lüftung, Warmwasserbereitung und Heizung im Passivhaus, Tagungsband der 2. Passivhaustagung, Düsseldorf, 1998
- [Büh 98b] Bühling, A., Kompakte Wärmeversorgung für Passivhäuser, Sonnenenergie & Wärmetechnik, 3/98, S. 51 - 55
- [Büh 98c] Bühling, A., Messungen auf dem Teststand für Passivhaus-Kompaktgeräte des Fraunhofer ISE, Protokollband 12. Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Darmstadt 1998
- [daS 97] da Silva, P., Einsatz von Kleinstwärmepumpen in Niedrigenergie- und Passivhäusern, Diplomarbeit am Fraunhofer ISE, Freiburg, 1997
- [Dre 97] Drexel, C., Entwurf eines Fortluft-Wärmepumpen-Warmwasser und Heizsystems für Passivhäuser, Protokollband 10, Arbeitskreis kosteng. Passivhäuser, Darmstadt 1997
- [Fei 96] Feist, W., Grundlagen der Gestaltung von Passivhäusern, Darmstadt, 1996
- [Gemis 3.08] Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme, erstellt vom Öko-Institut i. A. des Hessischen Ministers für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit, Version 3.08 Xmas Edition, Darmstadt/Freiburg/Berlin, 1998
- [Hes 97] Hesse, S., Wärmeversorgung von Niedrigenergie- und Passivhäusern Diplomarbeit am Fraunhofer ISE, Freiburg, 1997
- [Kno 98] Knobloch, M., Untersuchung einer Wärmeversorgungseinheit für Passivhäuser, bestehend aus Solarkollektor und Lüftungsgerät mit integrierter Wärmepumpe Diplomarbeit am Fraunhofer ISE, Freiburg, 1998
- [Met 99] Metzger, F., Untersuchung eines Kompaktgerätes zur Wärmeversorgung eines Passivhauses, bestehend aus Lüftungsgerät, Wärmepumpe und Solarkollektor, Semesterarbeit am Fraunhofer ISE, 1998
- [PHI 99] Passivhaus Institut, Zertifikat „Passivhaus geeignete Komponente“ : Wärmerückgewinnungsgerät, Darmstadt, 1999
- [Ste 98] Stefanovski, T., Flüssiggasintegration in ein Wärmepumpen-Kompaktgerät zur Lüftung, Warmwasserbereitung und Heizung von Passivhäusern, Diplomarbeit am Fraunhofer ISE, Freiburg, 1998
- [Wer 98] Werner, J., Stand der Haustechnikentwicklung, Protokollband 12. Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Darmstadt 1998
- [Wit 99] Witt, J., Passivhäuser: Nischenprodukt oder Zukunftsmarkt? Eine Marktpotentialstudie Tagungsband der 3. Passivhaustagung, Bregenz, 1999