

# Haustechnik- konzepte für Passivhäuser – Eine Vision für den Wohnungsbau

von Andreas Bühring,  
Wolfgang Feist,  
Martin Ufheil  
und Gunter Rockendorf

Dipl.-Ing. Andreas Bühring ist Leiter des Teststands für Passivhaus-Kompaktlüftungsgeräte im Solarhaus Freiburg und Dipl.-Ing. (FH) Martin Ufheil ist Leiter des Forschungsprojekts "Mehrfamilien-Passivhaus Vauban" in der Gruppe Solares Bauen im Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE), Freiburg.

Dr. Wolfgang Feist ist Leiter des Passivhaus Instituts, Darmstadt, und koordinierte den Aufbau des Passivhauses Darmstadt-Kranichstein.

Dipl.-Ing. Gunter Rockendorf ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln/Emmerthal (ISFH), Emmerthal.

## Überblick

In einem Passivhaus gleicht das Heizsystem nur die Heizenergiebilanz aus und ermöglicht die Verteilung der Restheizwärme mit der Frischluft. Solarkollektoren können bis zur Hälfte des Gesamtwärmebedarfs beitragen. Fassadenkollektoren bieten neue architektonische Möglichkeiten. Eine Kleinstwärmepumpe in einem Lüftungskompaktgerät zur Restheizung und Warmwasserbereitung ist eine energieeffiziente und kostengünstige Variante. Simulationen und Messungen zeigen eine hohe Effizienz, welche die Umwandlungsverluste der vorgelagerten Stromproduktion ausgleicht. Die Kombination mit einem flüssiggasversorgten Kleinbrenner in der Abluft verdoppelt die Wärmeleistung und mindert die primärenergetische Anfälligkeit gegenüber nutzerbedingt erhöhter Leistungsanforderung.

In einem Mehrfamilien-Passivhaus kann ein Kleinst-BHKW mit einer zentralen thermischen Solaranlage und einem Pufferspeicher die Wärmeversorgung hocheffizient abdecken. Eine getrennte Heizkostenerfassung erübrigt sich wegen des geringen Heizwärmebedarfs.

The heating system in a passive house needs only to adjust the heating energy balance and can provide the remaining heating demand. Solar collectors can provide up to half of the total heating demand. Facade-integrated collectors offer new architectural possibilities. A small heat pump integrated into a compact ventilation device is an energy-efficient and cost-effective alternative for providing the remaining space heating and warm water demand. Simulations and test demonstrate a high efficiency which compensates the losses during electricity generation. The combination with a small gas-fuelled furnace in the exhaust air doubles the thermal output of the compact heat pump device and decreases the sensitivity against variations in primary energy consumption by changes in heating demand.

The energy demand in a passive apartment building can be supplied with high efficiency by a small cogeneration unit together with a central solarthermal system and a thermal storage tank. The low heating demand obviates the need for monitoring the heat supplied to each apartment.

## 1. Einführung

Passivhäuser sind eine konsequente Weiterentwicklung von Niedrigenergiehäusern [1]. Sie haben einen verbesserten Wärmeschutz mit einer

durchgehenden Dämmschicht von 25 bis 40 cm Stärke unter Vermeidung von Wärmebrücken. Für die Fenster wird eine Dreifach-Wärmeschutzverglasung mit möglichst wärmegeprägten Rahmen und einem k-Wert für das Fenster inklusive Rahmen und Randverbund unter  $0.8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  eingesetzt. Eine Lüftungsanlage mit hocheffektiver Wärmerückgewinnung (trockene Rückwärmzahl über 80%) und möglichst mit vorgeschaltetem Erdreichwärmetauscher mindert die Lüftungswärmeverluste und vermeidet Zugerscheinungen durch Kaltluft. Durch diese passiven Maßnahmen herrscht jederzeit thermische Behaglichkeit auch ohne aktives Heizsystem – daher der Name Passivhaus.

Durch den hohen Anteil passiver Wärmegewinne besitzen Passivhäuser einen spezifischen Heizwärmebedarf von weniger als  $15 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{a}$ . Für das Einbringen der Restheizenergie besteht eine große Freiheit bei Wahl des Ortes und der Zeit. Dies ermöglicht eine Vielfalt kostengünstiger neuer Lösungen. Die maximale Heizlast liegt unter  $10 \text{ W}/\text{m}^2$ , so daß die Heizwärme beispielsweise mit dem hygienisch notwendigen Luftwechsel ohne Umluftanteil in die Wohnräume eingebracht werden kann. Eine reine Frischluftheizung kann so verwirklicht und ein zusätzliches Wärmeverteilsystem für die Raumheizung eingespart werden. Damit wird ein Teil der zusätzlichen Kosten der verbesserten Gebäudehülle ausgeglichen.

Der Wärmebedarf für die Brauchwasserbereitung entspricht dem üblicher Gebäude und übertrifft den Heizwärmebedarf. Er kann 60% des Gesamtwärmebedarfs des zu versorgenden Objektes ausmachen. Auf 2/3 des Warmwasserbedarfs ausgelegte Solarkollektoren können so über 40% des Gesamtwärmebedarfs liefern. Das im Jahresverlauf gleichmäßigere Wärmeangebot fassadenintegrierter Solarkollektoren vermeidet häufige Stagnationszeiten des Kollektors. Zusammen mit den passiven Solargewinnen stellt die Sonnenenergie die wesentliche Energiequelle zur Deckung des Wärmebedarfs von Passivhäusern dar.

Zur Deckung des Restwärmebedarfs ist eine kostengünstige und energieeffiziente Haustechnik notwendig, die

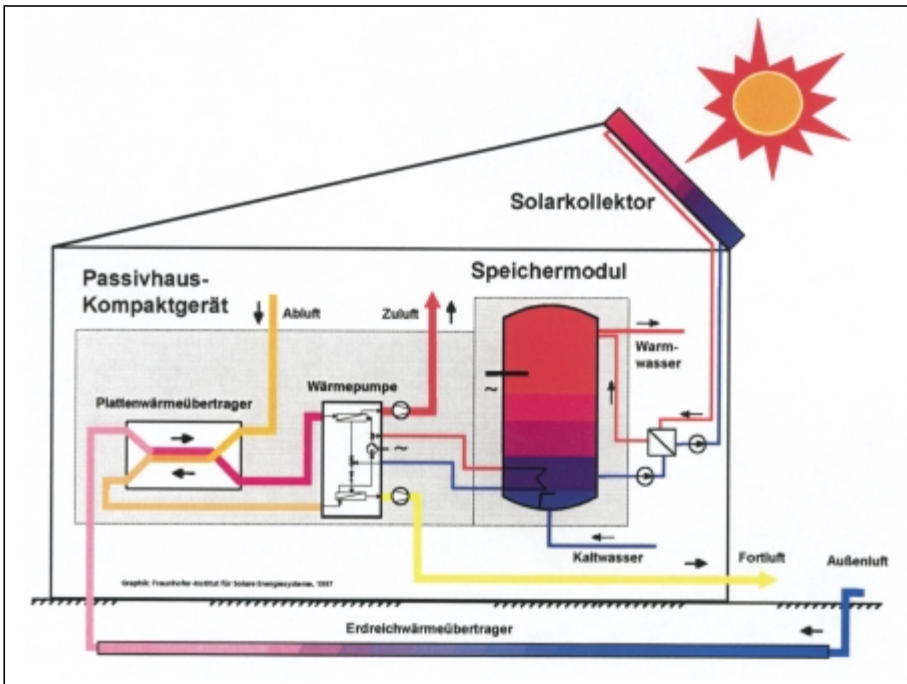
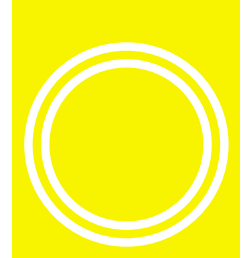


Abbildung 1: Prinzipdarstellung des Kompaktgerätes in einem Passivhaus

zur Lüftung, Brauchwassererwärmung und Heizung einschließlich aller Nebennagregate einen Primärenergieeinsatz von maximal 50 kWh/m<sup>2</sup>a verursacht [2] und bei dezentralen Lösungen in einem Gerät integriert sein sollte.

Gegenwärtig entstehen die meisten Passivhäuser als Reihenhäuser oder als freistehende Einfamilienhäuser. Aus städtebaulichen Gründen und um Verkehrsbelastungen durch zersiedelte Wohngebiete zu mindern ist der

Schritt zu verdichteten Passivhäusern notwendig. Ein erstes Mehrfamilienhaus im Passivhausstandard entsteht zur Zeit im Neubaugebiet Vauban in Freiburg.

## 2. Lüftungskompaktgeräte in dezentralen Systemen

### 2.1 Technisches Konzept

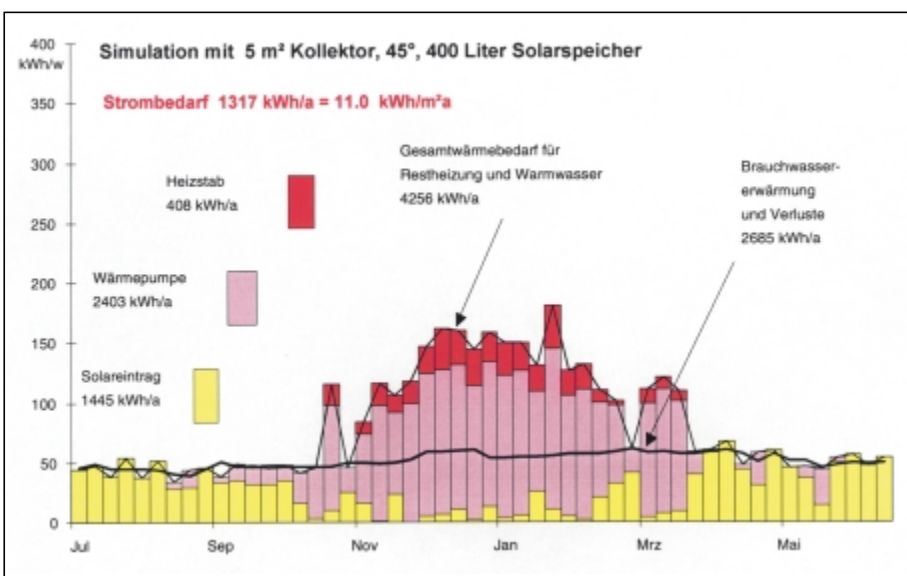
Ein Lüftungskompaktgerät besteht aus einem Lüftungsteil mit Ventilatoren und Wärmetauscher, einer Kleinstwär-

mepumpe und einem Speicher (Abbildung 1). Eine hohe Rückwärmzahl des Wärmetauschers kann beispielsweise durch einen Gegenströmer erreicht werden. Die Wärmepumpe nutzt die sensible und die latente Restwärme der Fortluft nach deren Wärmeabgabe an die Zuluft. Ein Kondensator zur Warmwasserbereitung erwärmt den Speicher. Dieser Speicher bildet die Schnittstelle zur thermischen Solaranlage. Wenn weder Solaranlage noch Wärmepumpe ausreichend Wärme liefern, wird der Speicher durch einen Heizstab nacherwärmt. Die Nacherwärmung der Zuluft bei Heizbedarf kann mit einem Nachheizregister erfolgen, welches vom Speicher versorgt wird. Abweichend kann ein zweiter Kondensator in der Zuluft vorgesehen werden, der alternativ oder in Reihe mit dem Brauchwasserkondensator betrieben wird. Durch das Vermeiden eines zweiten Wärmeübergangs kann die Leistungszahl der Wärmepumpe steigen [3]. Am Fraunhofer ISE werden theoretische [4], ökonomische [5] und meßtechnische [6, 7] Untersuchungen durchgeführt, um die Industrie bei der Entwicklung von entsprechenden Geräten zu unterstützen.

### 2.2 Simulationen

Mit einem am Fraunhofer ISE entwickelten Wärmepumpen-Modul für das Simulationsprogramm TRNSYS wurden Untersuchungen und Optimierungsberechnungen für unterschiedliche Schaltungsvarianten von Kompaktgeräten durchgeführt. Für den Erdreichwärmetauscher wurde eine Temperatureffizienz von 80% angenommen. Die simulierte Solaranlage entspricht einer 5 m<sup>2</sup> großen Flachkollektoranlage. Der Warmwasserbedarf mit zeitlichen Profilen liegt bei 140 l/d bei 45°C.

Abbildung 2: Ergebnisse der TRNSYS-Simulationen des Kompaktgerätes und eines Passivhauses, dargestellt in Wochenwerten



Das simulierte Reihemittelhaus hat 121 m<sup>2</sup> Wohnfläche und wird von vier Personen genutzt. Die inneren Wärmequellen betragen durchschnittlich 1.6 W/m<sup>2</sup>. Die Feuchteproduktion wird mit 120 g/h pro Person festgelegt. Eine Zirkulation ist nicht vorhanden. Die Lüftungsanlage ist auf einen Volumenstrom von 125 m<sup>3</sup>/h eingestellt. Die Infiltration verursacht durchschnittlich 0.05 Luftwechsel pro Stunde und entspricht einer sehr guten Dichtheit der Ge-



Abbildung 3: Teststand des Fraunhofer ISE für Lüftungskompaktgeräte im Solarhaus Freiburg

bäudehülle mit  $n_{50}=0.6 \text{ h}^{-1}$ . Der simulierte Jahresheizwärmebedarf beträgt  $13 \text{ kWh/m}^2$ .

Die Ergebnisse der Jahressimulation werden in [Abbildung 2](#) in Wochenwerten dargestellt. Die Solaranlage deckt 34% des Restwärmebedarfs für Warmwasser und Heizung, die Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 3.2 weitere 56%. Der Rest wird direkt elektrisch mit einem Heizstab im Speicher erzeugt. Die Heizleistung der Wärmepumpe reicht zur Aufrechterhaltung der Raumsolltemperatur.

Der Jahresstrombedarf für Lüftung, Brauchwassererwärmung und Heizung inklusive aller Nebenaggregate liegt bei  $10.9 \text{ kWh/m}^2$  und entspricht einer Primärenergie von  $32 \text{ kWh}_{PE}/\text{m}^2\text{a}$ .

### 2.3 Teststand am Solarhaus Freiburg

Im Solarhaus Freiburg betreibt das Fraunhofer ISE einen Teststand für Kompaktgeräte. Der Teststand ist in das Lüftungs- und Warmwassersystem des Gebäudes integriert und bietet Platz für zwei Kompaktgeräte ([Abbildung 3](#)). Auf dem Dach des Gebäudes ist eine Solarkollektoranlage installiert und in die Frischluftansaugung ist ein Erdreichwärmetauscher integriert.

Auf dem Teststand ist es möglich, Kompaktgeräte für Passivhäuser unter realen Einsatzbedingungen über längere Zeiträume zu testen und zu ver-

messung. 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.

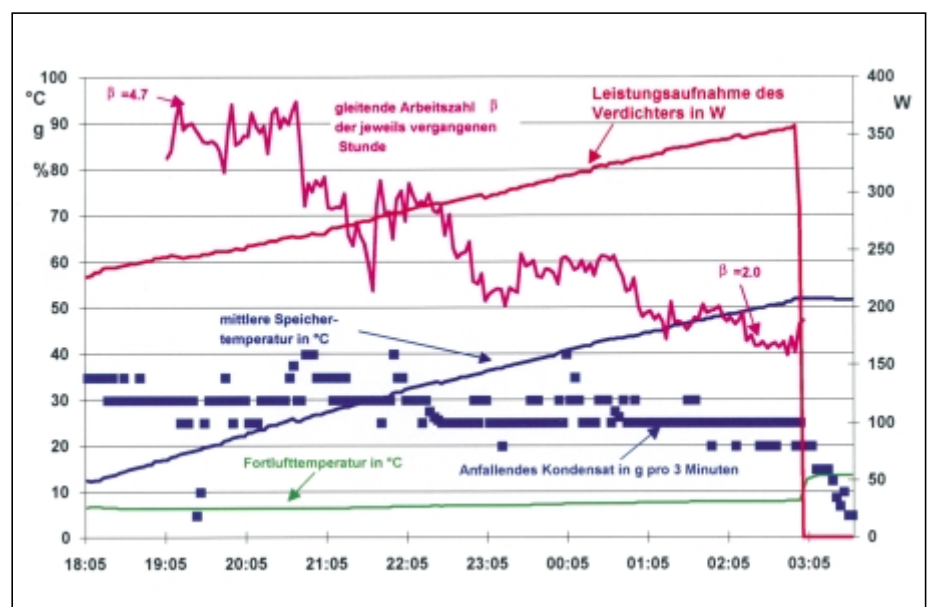
### 2.4 Messungen und Validieren der Simulationen

Mit dem Kompaktgerät Aerex BW 125 der Fa. Drexel Solarlufttechnik in Bregenz wurden bereits umfangreiche Messungen durchgeführt. Für den Heizbetrieb konnte bei unterschiedlichen Frischlufttemperaturen und Abluftfeuchten eine Leistungszahl der Wärmepumpe (ohne Gegenstromwärmetauscher) von 3.4 bis 3.6 bei einer Heizleistung von 1.100 bis 1.200 W gemessen werden.

Bei der Erwärmung des 190-Liter-Speichers (für die Solaranbindung gibt es mittlerweile auch einen 400-Liter-Speicher) von 12 auf  $52^\circ\text{C}$  wird eine Arbeitszahl von 3.2 erreicht. Wird die Verdichterabwärme an die Zuluft in der Heizperiode genutzt, beträgt die Arbeitszahl 3.7 ([Abbildung 4](#)).

Bei Messungen mit konstant gehaltener Speichertemperatur wird bis zu Temperaturen von  $42^\circ\text{C}$  eine Leistungszahl über 3 erreicht. In der Heizperiode liegt sie auch bei  $55^\circ\text{C}$  noch darüber.

Abbildung 4: Messung der Brauchwassererwärmung mit dem Aerex BW 125 bei  $140 \text{ m}^3$  Luftvolumenstrom, einer Ablufttemperatur von  $22^\circ\text{C}$  bei 40% relativer Feucht und einer Frischlufttemperatur von  $12,5^\circ\text{C}$



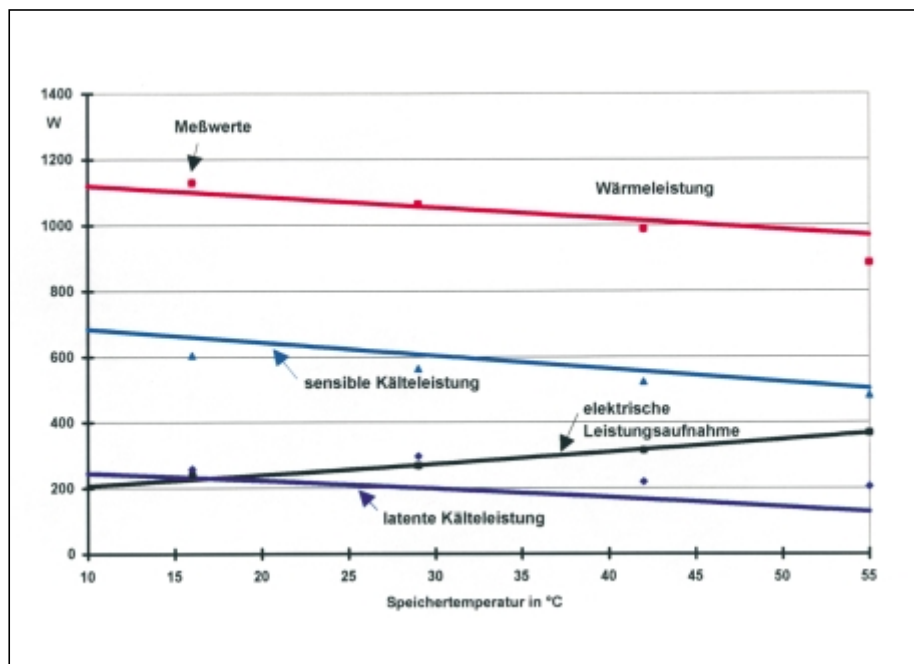
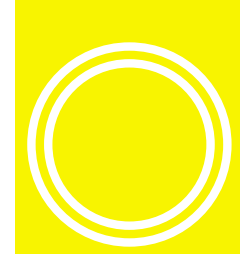


Abbildung 5: Vergleich von Messungen der Speichererwärmung mit dem Aerex BW 125 bei konstant gehaltener Speichertemperatur und Vergleich mit Simulationsergebnissen (Linien)

Ein Vergleich der Meßwerte mit den Simulationen zeigt nur eine geringe Abweichung (Abbildung 5). Dabei ist zu beachten, daß in die Simulation nur Kataloginformationen über die Komponenten der Wärmepumpe (Verdichter und Wärmetauscher) und keinerlei Meßwerte einfließen.

### 3. Flüssiggasbrenner für die Reserveleistung

#### 3.1 Konzept der Flüssiggasintegration

Durch häufige zusätzliche Fensterlüftungen in der Heizperiode, starke Verschattung, ungünstige Ausrichtung oder einen nicht erreichten Passivhausstandard des Gebäudes kann der Heizwärmebedarf deutlich ansteigen. Dann reicht das Energiepotential der Fortluft nicht mehr für die Wärmebereitung aus. In den bisherigen Konzepten wird die Reserveleistung ausschließlich direkt elektrisch vorgehalten und der Strombedarf kann sich deshalb mehr als verdoppeln. Eine primärenergetische Deckung der Reserveleistung wäre für diese Situationen von Vorteil. Wenn ein Erdgasnetz aufgrund geringer Energieumsätze in Neubausiedlungen nicht verlegt wird, ist Flüssiggas in Flaschen eine Alternative. Bei Ersatz des in Abbildung 2 dargestellten direkt elektrischen Wärme-

eintrags würde eine Flasche mit 33 kg pro Jahr ausreichen. Durch die Integration des Brenners in den Abluftkanal kann auf eine Verbrennungsluftzufuhr und auf einen Abgaskamin verzichtet werden. Die Zuluft wird thermisch schonend am Plattenwärmetauscher erhitzt. Die restliche Wärme steht mit der Fortluft am Verdampfer der Wärmepumpe zur Verfügung [8].

Aus den oben dargestellten Simulationen ergibt sich, daß bei einer Heizungsvorrangschaltung wie im Aerex und gemäßigttem Lüftungsverhalten die Wärmezufuhr mit der Zuluft zur Heizung ausreicht. Wenn jedoch gleichzeitig Warmwasserbedarf vorhanden ist, muß der elektrische Heizstab diesen decken. Beim Einsatz des Brenners kann der Vorrang geändert werden. Nun wird der Warmwasserbedarf stets von der Wärmepumpe gedeckt. Bei gleichzeitigem Heizungsbedarf wird der Brenner aktiviert und die Zuluft am Plattenwärmetauscher erwärmt.

#### 3.2 Messungen der Leistungssteigerung durch die Flüssiggasintegration

Auf dem Teststand im Solarhaus wurde der Effekt eines solchen Flüssiggasbrenners gemessen. Dafür wurden

mit dem elektrischen Nachheizregister und mit dem Befeuchter – wegen der Wasserdampfproduktion bei der Verbrennung – die Abluftzustände eingestellt, wie sie durch einen Gasbrenner mit 1.600 W<sub>HU</sub> entstehen würden.

Die Zuluft wird am Plattenwärmetauscher um zusätzlich 1.200 W erwärmt. Außerdem steigt die Wärmeleistung der Wärmepumpe um 200 W. Dabei erhöht sich die Leistungszahl um rund 0.5, also beispielsweise bei 42°C Speichertemperatur von 3.8 auf 4.3. Dabei steigt die Stromaufnahme des Wärmepumpenverdichters um rund 30 W. Die zur Verfügung stehende Wärmeleistung verdoppelt sich auf 2.600 W [7].

Die Messungen bestätigen die Erwartungen an die Integration eines kleinen Flüssiggasbrenners in die Abluft. Die Wärmeleistung des Gasbrenners kann zu fast 90% genutzt werden. Dadurch wird die primärenergetisch bewertete Toleranz des Kompaktgerätes deutlich gesteigert. Die Kosten eines solchen Brenners sollten aufgrund der sehr einfachen Anforderungen niedrig liegen.

### 4. Fassadenkollektoren

Die architektonische Gestaltung von Passivhäusern zeichnet sich häufig durch eine intensive Öffnung der Südfassade zur Sonne aus. Dadurch gibt es in vielen Entwürfen keine nach Süden ausgerichteten Dachflächen. Solarkollektoren können dann aufgeständert auf dem Dach oder als feste Verschattung vor der Südfassade angebracht werden. Eine Kostenreduktion gegenüber der Aufständigung kann durch die Integration des Kollektors in die Südfassade erreicht werden. Hierdurch ergeben sich neben den energetischen Aspekten auch neue Spielräume für die Gestaltung des Gebäudes.

Die Jahressumme der Solarstrahlung auf die Südfassade liegt um etwa 30% unter der einer optimal geneigten Fläche. Die Reduktion der Strahlung tritt im Sommer auf, während die Fassade in den Wintermonaten geringe Vorteile aufweist. Diese veränderte Jahresverteilung bietet die Möglichkeit, eine fassadenintegrierte Solaranlage größer auszulegen, ohne im Som-

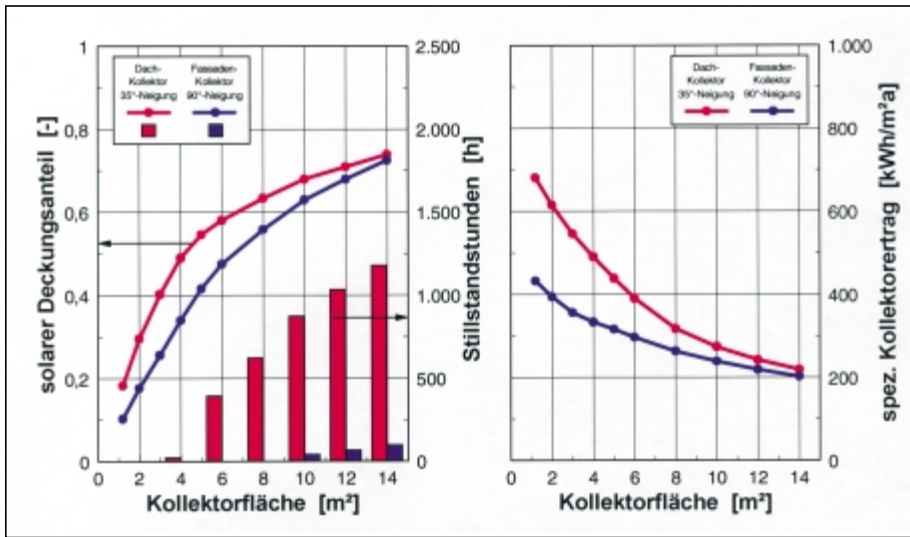
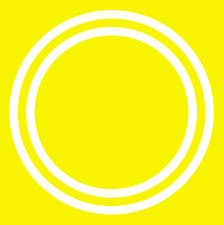


Abbildung 6

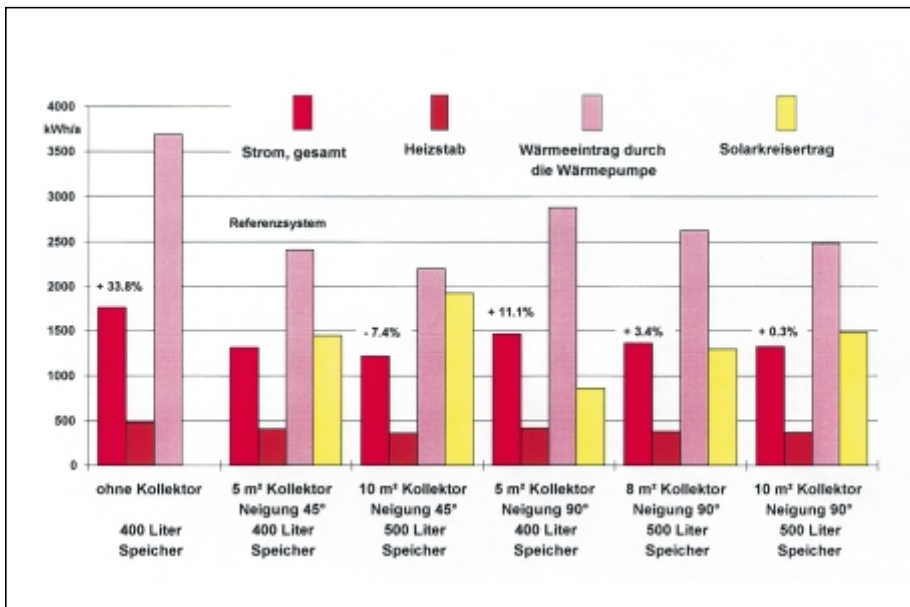


Abbildung 7

Abbildung 8



Abbildung 6: Solarer Deckungsanteil, Stillstandszeiten und Kollektorkreislaubeite von Fassaden- und Dachkollektoranlagen als Funktion der Kollektorfläche, Würzburg, Bedarf 2.600 kWh/a

Abbildung 7: Ergebnisse der TRNSYS-Simulationen des Kompaktgerätes und eines Passivhauses mit unterschiedlicher Kollektorgröße und Kollektorneigung

Abbildung 8: Computermodell des Bauvorhabens Vauban

mer über lange Zeiträume in die Stagnation der Anlage wegen Speicherüberhitzung zu kommen. Zusätzlich sinken die Wärmeverluste des Speichers und der Rohrleitungen. Dadurch kann ein insgesamt höherer solarer Deckungsgrad erreicht werden (Abbildung 6).

Simulationen am Fraunhofer ISE mit dem oben beschriebenen Gebäude und der geschilderten Anlagentechnik ergeben bei Integration von 8 m² fassadenintegrierter Kollektorfläche und einem 500-Liter-Speicher einen um rund 10% geringeren Kollektorkreislertrag als im oben beschriebenen Fall einer 5 m² großen Dachanlage. Die günstigere jahreszeitliche Verteilung der Solargewinne senkt jedoch die Speicherverluste. Dadurch steigt der Strombedarf für die Wärmeversorgung nur um weniger als 4% (45 kWh) an (Abbildung 7). Der Verzicht auf eine Solaranlage würde zu einer Steigerung des Strombedarfs für Heizung, Brauchwassererwärmung und Lüftung um 34% (445 kWh) führen.

Die Integration des Solarkollektors in die Fassade kann im Ergebnis vergleichender Simulationen am ISFH durchaus auf Kosten eines Teils der Wärmedämmung geschehen. Die Minderung der Wanddämmung von 16 auf 12 cm bei gleichzeitiger Integration des Kollektors in die thermische Hülle führt aufgrund der Wärmeabgabe des Absorbers sogar zu einem Sinken des Transmissionswärmeverlustes der Fassade [9]. Allerdings ist zu beachten, daß der Absorber in der Übergangszeit bei Pumpenausfall Stagnationstemperaturen bis zu 180°C erreichen

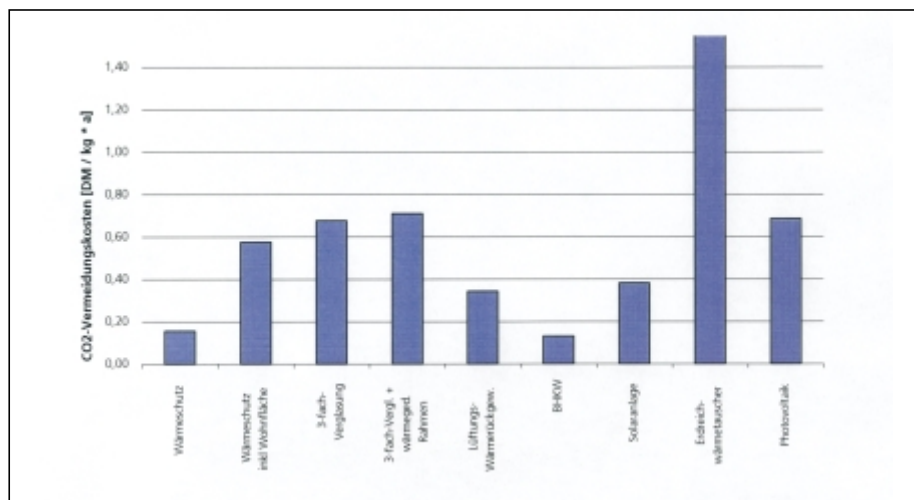
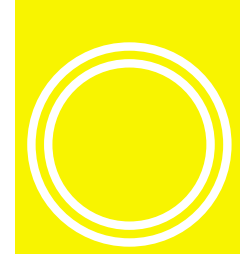


Abbildung 9: CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten der einzelnen Maßnahmen beim Bauvorhaben Vauban

kann. Der Wandaufbau muß für diese hohen Temperaturen geeignet sein.

Durch die Integration von Solarkollektoren in vorgefertigte Fassadenelemente können bei Berücksichtigung von Bauteilgutschriften die flächenbezogenen Kosten deutlich unter denen von dachmontierten Kollektoren liegen. Auch mit Berücksichtigung des Flächenmehrbedarfs kann es so zu reduzierten Wärmegestehungskosten kommen.

### 5. Zentrale Systeme im Mehrfamilien-Passivhaus Vauban

Im Neubaugebiet Vauban in Freiburg entsteht derzeit ein 5-geschossiges Mehrfamilienhaus mit einer Gesamtwohnfläche von 1.400 m<sup>2</sup> (Abbildung 8). Zur Bereitstellung von Raumwär-

me, Warmwasser und Elektrizität sollen 80% weniger CO<sub>2</sub> emittiert werden, als bei einem konventionellen Neubausvorhaben.

Unter Einhaltung eines strengen Kostenplans besteht das Ziel, daß die Mehrkosten im Vergleich zu einem konventionellen Neubausvorhaben weniger als 300 DM pro Quadratmeter Wohnfläche betragen. Mit Einhaltung gieser Zielgröße wird erreicht, daß das Gesamtvorhaben, trotz der heute sehr niedrigen Energiepreise, eine statische Amortisationszeit von weniger als 20 Jahren aufweist. Ein wichtiger Aspekt dieses Projektvorhabens ist es, durch die Kostenobergrenze eine bundesweite Übertragbarkeit zu gewährleisten.

Um das vorgegebene Kostenziel nicht zu überschreiten war ein konsequente

Kostenrechnung von Beginn an erforderlich. Nach derzeitigem Planungsstand (Rohbau) ist mit baulichen Mehrkosten von ca. 95 DM/m<sup>2</sup> zu rechnen. Im Bereich Haustechnik sollte im Rahmen des Vorentwurfs eine kostengünstige Lösung zur Lüftungswärmerückgewinnung gefunden werden. Hierzu wurden die in Tabelle aufgeführten Versorgungsvarianten bilanziert.

Aufgrund der deutlich geringeren Investitionsmehrkosten fiel die Entscheidung für ein zentrales Lüftungssystem. Hier entstehen Mehrkosten von 45 DM/m<sup>2</sup>. Die Mehrkosten für die dezentralen Systeme betragen zwischen 100 und annähernd 200 DM/m<sup>2</sup>.

Von Nachteil ist, daß der Nutzer beim zentralen Lüftungssystem nicht eigenständig eingreifen kann. Die Luftvolumenströme dürfen nur durch Fachpersonal verändert werden.

Weiterhin kann die Wärmerückgewinnung nicht für jede Nutzeneinheit getrennt erfolgen. Damit entspricht diese Anlage nicht den Vorgaben der WSchVO 95. Darin ist formuliert, daß bei Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung die Trennung nach Nutzeneinheiten erfolgen soll. Da im gesamten Haus keine Heizkostenabrechnung erfolgen wird, weil die Kosten der Abrechnung die der Wärmeerzeugung überschreiten, wurde diese Einschränkung von Seiten der Bauherrschaft akzeptiert.

Das Bauvorhaben Vauban wird nach

Tabelle: Vergleich unterschiedlicher Versorgungsvarianten im Mehrfamilienhaus Vauban

		Investitionskosten Wärmeversorgung [DM]	Investitionskosten Lüftungsanlage [DM]
Standard:	mechanische Entlüftung von innenliegenden Bädern, WC's und Abstellräumen	91.800	28.400
Zentrale Lüftungsanlage:	zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, Zuluftführung über Installationsebene in d. Außenwand. Beheizung über Radiatoren	81.100	101.500
Lüftungsanlage je Wohnung:	Beheizung mittels Nachheizregister je Wohnung.	61.200	191.200
Kompakttaggregat m. Wärmepumpe:	dezentrale Warmwasserbereitung im Kompaktgerät mit Anschluß an zentrale Warmwasserbereitung	85.500	152.800
Dezentraler Lüfter je Raum:	dezentrale Lüfter je Raum, mechanische Entlüftung von innenliegenden Bädern, WC's und Abstellräumen, Beheizung mittels Radiatoren	4.000	384.100

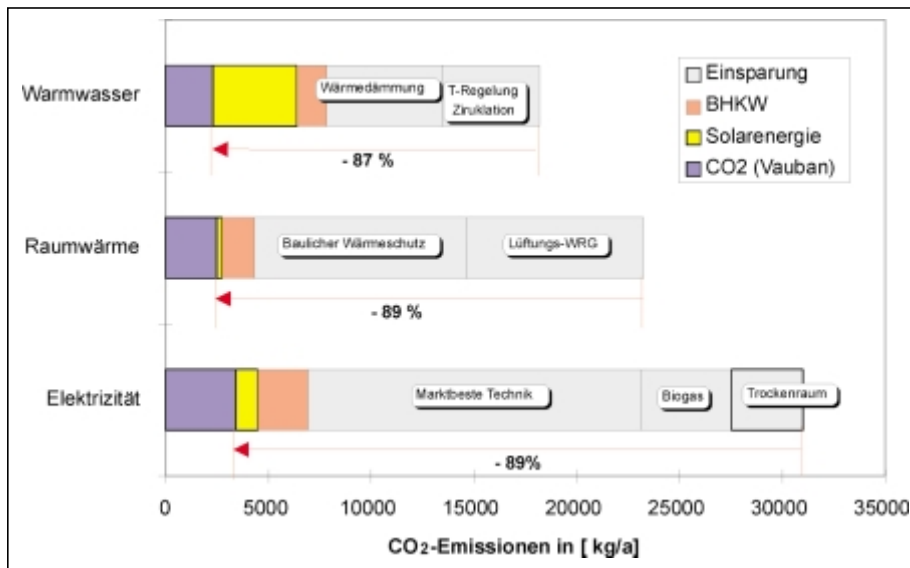
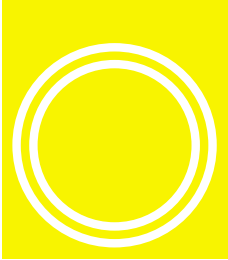


Abbildung 10: CO<sub>2</sub>-Einsparungen beim Bauvorhaben Vauban

wie vor konventionell über Radiatoren beheizt. Eine Beheizung über die zentrale Lüftungsanlage war nicht möglich, weil einerseits die Bauherrenschaft eine individuelle Raumtemperaturregelung wünscht, andererseits auch die Zulufttemperatur in Abhängigkeit des Wärmebedarfs der einzelnen Wohnungen zwischen 38°C und 71°C variiert werden müßte. Ein weiteres Argument sind die geringen Investitionskosten der konventionellen Wärmeversorgung von nur noch 50 DM/m<sup>2</sup>.

Um das Ziel einer 80%igen CO<sub>2</sub>-Reduktion zu erreichen, sind neben den baulichen Maßnahmen effiziente Systeme zur Wärmeerzeugung sowie zur Bereitstellung und Einsparung von elektrischer Energie erforderlich. Die Auswahl der einzelnen Systeme erfolgte nach deren CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten. Die Ergebnisse der Bilanzierung zeigt [Abbildung 9](#).

Die günstigsten CO<sub>2</sub> Vermeidungskosten ergeben sich durch den Einsatz des Klein-BHKW, sowie durch den verbesserten Wärmeschutz. Die Kosten der baulichen Maßnahmen steigen deutlich an, wenn neben den Materialkosten zusätzlich die erforderliche Wohnfläche bilanziert wird. Dies ist beim Bauvorhaben Vauban der Fall, da Grenzbebauung vorliegt.

Die günstigen Ergebnisse der Solarsysteme ergeben sich unter anderem, weil die Solarsysteme als feste Elementen

te der Architektur eingesetzt werden. So dient die thermische Solaranlage als Überdachung des Laubengangs auf der Nordseite. Die Photovoltaik dient als Überdachung der Terrassen im 3. Obergeschoß. Die spezifischen Kosten der Anlagen sinken hierdurch um 250 DM je m<sup>2</sup>. Auf der Basis der kalkulierten CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten sind derzeit folgende Maßnahmen vorgesehen:

- Erhöhter baulicher Wärmeschutz in Kombination mit einer Lüftungswärmerückgewinnung (LWRG). Die Rückwärmzahl der LWRG beträgt 80%. In Kombination mit einer 3-fach-Wärmeschutzverglasung (im Holzrahmen) ergibt sich ein rechnerischer Heizwärmebedarf von 13 kWh/m<sup>2</sup>a.
- 45 m<sup>2</sup> Flachkollektoranlage.
- Klein-BHKW (Erdgas).
- 5 kW Photovoltaik.
- Gemeinschaftlicher Trocken- und Waschräum.
- Energiesparende Haushaltsgeräte.
- Gaskochstelle.

Die Summe dieser Maßnahmen kann nach derzeitiger Kostenrechnung bei Mehrkosten von 250 DM pro Quadratmeter Wohnfläche realisiert werden. Die erzielten CO<sub>2</sub>-Einsparungen sind [Abbildung 10](#) zu entnehmen.

## 6. 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, Drexel Solarluftechnik und Lüftungsbau GmbH, Sulzer Escher Wys Kältetechnik, Zimmermann Lüftungs- und Wärmesysteme GmbH & Co. KG und Maico Ventilatoren.

Die Forschungsarbeiten am „Passivhaus Vauban“ werden von der Bundesstiftung Umwelt unterstützt.

## Literatur

- [1] W. Feist  
„Grundlagen der Gestaltung von Passivhäusern“, Darmstadt (1996)
- [2] J. Werner  
„Stand der Haustechnikentwicklung - Einführung“, Protokollband 12, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Darmstadt (1998)
- [3] A. Bühring, P. da Silva  
„Entwicklung eines Kompaktgerätes für Lüftung, Warmwasserbereitung und Heizung in Passivhäusern“, Protokollband 10, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Darmstadt (1997)
- [4] P. da Silva  
„Einsatz von Kleinstwärmepumpen in Niedrigenergie- und Passivhäusern“, Diplomarbeit, Fraunhofer ISE, Freiburg (1997)
- [5] S. Hesse  
„Wärmeversorgung von Niedrigstenergie- und Passivhäusern“, Diplomarbeit, Fraunhofer ISE, Freiburg (1997)
- [6] M. Knobloch  
„Untersuchung einer Wärmeversorgungseinheit für Passivhäuser aus Solar Kollektor und Lüftungsgerät mit integrierter Wärmepumpe“, Diplomarbeit, Fraunhofer ISE, Freiburg (1998)
- [7] T. Stefanovski  
„Flüssiggasintegration in ein Wärmepumpenkompaktgerät zur Lüftung, Warmwasserbereitung und Heizung von Passivhäusern“, Diplomarbeit, Fraunhofer ISE, Freiburg (1998)
- [8] A. Bühring  
„Flüssiggasintegration in ein Kompaktgerät für Lüftung, Brauchwassererwärmung und Heizung von Passivhäusern“, Patentanmeldung P 198 24 315.4, Fraunhofer-Gesellschaft
- [9] S. Janßen, G. Rockendorf  
„Fassadenintegration von Solarkollektoren“, Gleisdorf Solar (1998)