

# Project Documentation

## Gebäude-Dokumentation

### 1 Abstract / Zusammenfassung



**Reihenhaus mit vier Einheiten in Darmstadt Kranichstein**

<b>1.1 Data of building / Gebäudedaten</b>			
Year of construction / Baujahr	1991	<b>Space heating / Heizwärmebedarf</b>	<b>14 kWh/(m²a)</b>
U-value external wall / U-Wert Außenwand	0,138 W/(m²K)		
U-Wert Kellerdecke / U-Wert Kellerdecke	0,131 W/(m²K)	<b>Primary Energy Renewable (PER) / Erneuerbare Primärenergie (PER)</b>	30 kWh/(m²a)
U-Wert Dach / U-Wert Dach	0,108 W/(m²K)	<b>Generation of renewable Energy / Erzeugung erneuerb. Energie</b>	135 kWh/(m²a)
U-Wert Fenster / U-Wert Fenster	0,78 W/(m²K)	<b>Non-renewable Primary Energy (PE) / Nicht erneuerbare Primärenergie (PE)</b>	54 kWh/(m²a)
Wärmerückgewinnung / Wärmerückgewinnung	80 %	Pressurization test n <sub>50</sub> / Drucktest n <sub>50</sub>	0,2 h-1
Besonderheiten / Besonderheiten	Sonnenkollektoren für die Warmwasserbereitung, Grauwasser- Wärmerückgewinnung, Regenwassernutzung		

## 1.2 Brief Description

### Passive House Darmstadt Kranichstein

This terraced housing is the first Passive House building to be realised and used normally. The four terraced housing units each with a living area of 156 m<sup>2</sup> and identical floor layouts was built in the development area K7 of the City of Darmstadt and is an exactly south-facing solid construction with a full basement, with large accommodation units, each of which extends over three storeys. These houses have been inhabited since 1991 by the same private clients who commissioned the architectural firm Bott/Ridder/Westermeyer with its planning in 1990 [Feist 1988].

50% of the additional construction costs for the project and its scientific evaluation were provided by the Hesse State Government. The objective of this research project first and foremost was to examine the extent to which energy consumption in residential buildings could be reduced through passive measures alone. After the evaluation of more than 16 years of monitoring, the building has met the expectations with regard to energy efficiency. Compared with average residential buildings in Germany, the measured heat consumption was reduced to approximately one-twentieth, and the total consumption of final energy for space heating, hot water and domestic electricity was reduced to roughly ten percent of the usual values.

## 1.2 Kurzbeschreibung der Bauaufgabe

### Passivhaus Darmstadt Kranichstein

Dieses Reihenhhaus ist das erste realisierte und normal bewohnte Passivhaus. Die vier Reihenhauseinheiten mit je 156 m<sup>2</sup> Wohnfläche und identischen Grundrissen wurden im Baugebiet K7 der Stadt Darmstadt als exakt südorientierter, voll unterkellelter Massivbau mit großen, über jeweils drei Geschosse gehenden Wohnungen realisiert. Die Häuser werden seit 1991 von den gleichen vier privaten Baufamilien bewohnt, die 1990 den Auftrag zur Planung an das Architekturbüro Bott/Ridder/Westermeyer erteilt haben. [Feist 1988]

Die baulichen Mehrkosten des Projektes und die wissenschaftliche Auswertung wurden zu 50% durch die hessische Landesregierung gefördert. Die Zielsetzung des Forschungsprojektes war es vor allem, zu überprüfen, wie weit der Energieverbrauch in Wohngebäuden durch ausschließlich passive Maßnahmen gesenkt werden kann. Nach der Auswertung von mehr als 16 Messjahren erfüllt das Haus die Erwartungen in Bezug auf die Energieeffizienz. Gegenüber dem Durchschnitt deutscher Wohngebäude ist der gemessene Heizenergieverbrauch auf ungefähr ein Zwanzigstel gesenkt, der gesamte Endenergieverbrauch für Heizung, Warmwasser und Haushaltsstrom auf ungefähr 10% der üblichen Werte.

### 1.3 Responsible project participants / Verantwortliche Projektbeteiligte

Architect / Entwurfsverfasser	Prof. Dr. Bott, Ridder, Westermeyer <a href="http://www.uni-stuttgart.de/si/stb/">http://www.uni-stuttgart.de/si/stb/</a>	
Implementation planning / Ausführungsplanung /	Prof. Dr. Bott, Ridder, Westermeyer <a href="http://www.uni-stuttgart.de/si/stb/">http://www.uni-stuttgart.de/si/stb/</a>	
Building systems / Haustechnik	Ingenieurbüro inPlan, Dipl.-Ing. Norbert Stärz <a href="http://www.inplan-pfungstadt.de/">http://www.inplan-pfungstadt.de/</a>	
Structural engineering / Baustatik		
Building physics / Bauphysik	Prof. Dr. Wolfgang Feist, Passive House Institute Darmstadt <a href="http://www.passiv.de">www.passiv.de</a>	
Passive House project planning / Passivhaus-Projektierung	Prof. Dr. Wolfgang Feist, Passive House Institute Darmstadt <a href="http://www.passiv.de">www.passiv.de</a>	
Construction management / Bauleitung		
Certifying body / Zertifizierungsstelle	Passivhaus Institut Darmstadt <a href="http://www.passiv.de">www.passiv.de</a>	
Certification ID / Zertifizierungs ID	Project-ID ( <a href="http://www.passivehouse-database.org">www.passivehouse-database.org</a> ) Projekt-ID ( <a href="http://www.passivhausprojekte.de">www.passivhausprojekte.de</a> )	0195
Author of project documentation / Verfasser der Gebäude- Dokumentation	Passivhaus Institut Darmstadt <a href="http://www.passiv.de">www.passiv.de</a>	
Date, Signature / Datum, Unterschrift		

## 2 Ansichtsfotos Passivhaus Darmstadt Kranichstein

Die Südseite ist auf dem Deckblatt abgebildet.



**Westseite** Passivhaus Darmstadt Kranichstein mit kleinem Balkon und Zugangsleiter zum Dach. Die Wetterstation ist gut erkennbar (Foto: Feist)



**Aufnahme** Passivhaus Darmstadt Kranichstein von **Nordosten**; der Wintergarten ist gut erkennbar, in Höhe der Decke über EG die Luftansauggitter der vier individuellen Lüftungsanlagen.



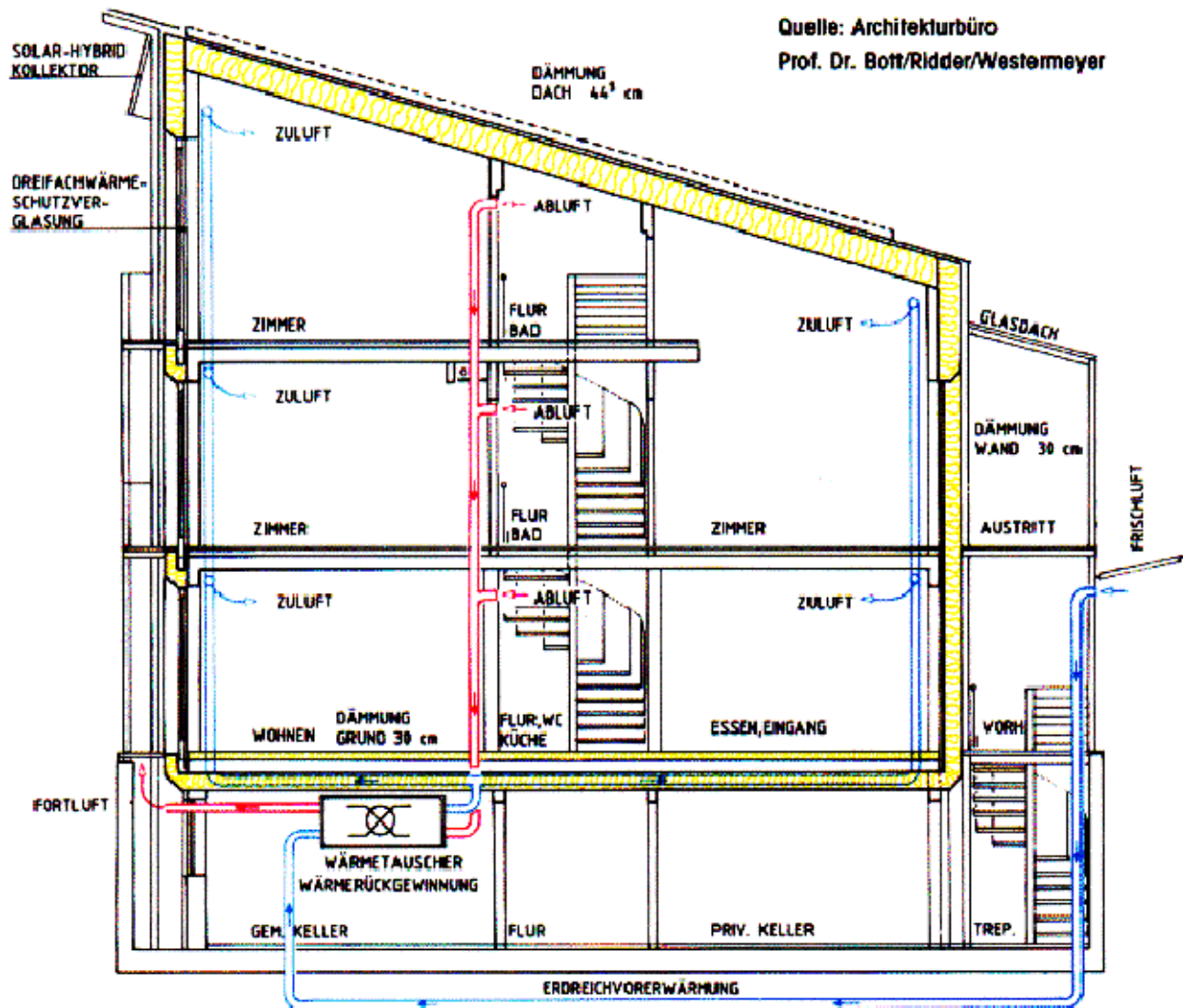


**Passivhaus Darmstadt Kranichstein, Ansicht von Südosten:** In der straßenseitigen Giebelwand gibt es nur ein kleines Ost-Fenster im OG. Gut erkennbar: Der Fortluftauslass und der überdachte zentrale Zugang zum Gemeinschaftskeller.



**Die Innenaufnahme vom Esszimmer in Richtung Wohnzimmer zeigt einen offenen Grundriss, der durch die großzügige Südverglasung direkt in die Terrasse überzugehen scheint.**

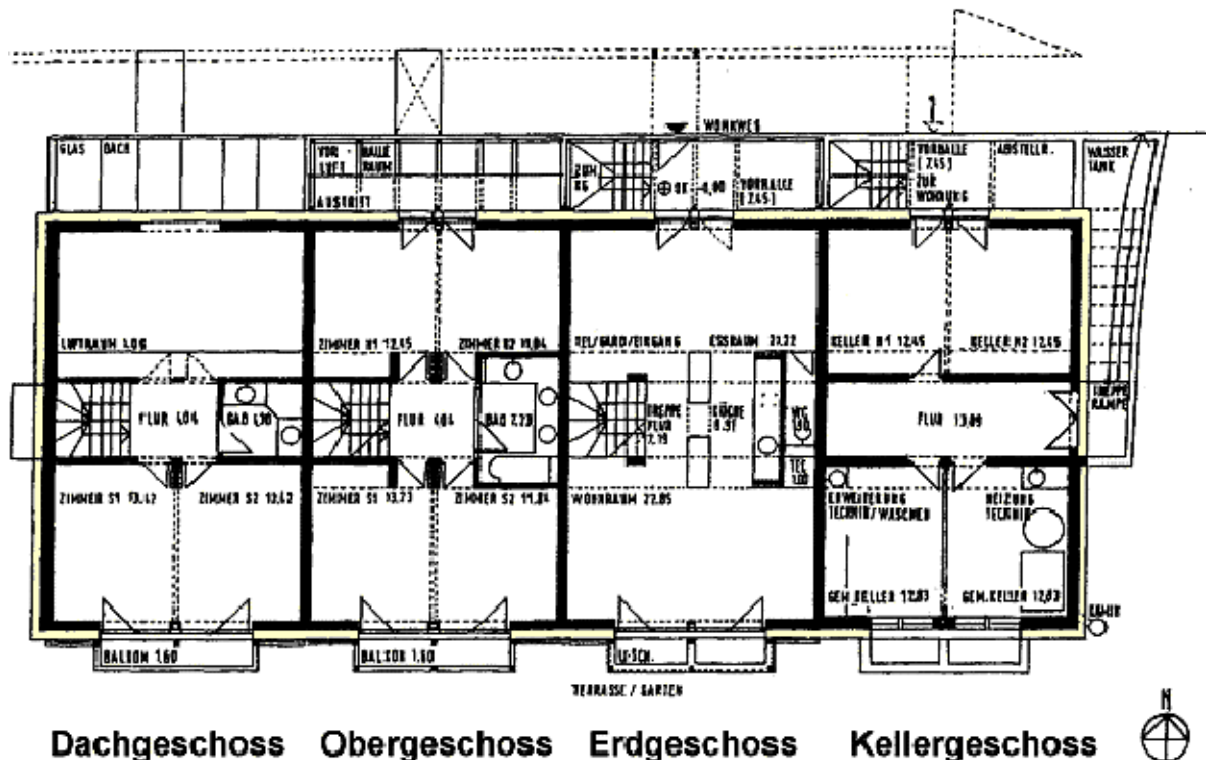
### 3 Schnittzeichnung Passivhaus Kranichstein



**Querschnitt durch das Passivhaus Darmstadt Kranichstein.** Gut erkennbar ist die ringsum geschlossene thermische Hülle mit jeweils guter Wärmedämmung. Die thermische Abtrennung des Kellergeschosses und der individuelle Zutritt zum Keller durch die im Nord-Glasvorbau gelegenen Kellertreppen wird deutlich. Der Querschnitt zeigt auch die Leitungsführung der Lüftungsanlage: Über einen Filterkasten im Glasvorbau wird Außenluft angesaugt, die im Erdreichwärmetauscher vorerwärmt wird und nach Durchströmen des Gegenstromwärmetauschers den Wohnräumen im Norden und Süden des Hauses zugeführt wird. Verbrauchte Abluft wird zentral im Haus aus Bädern, WC und Küche abgesaugt und nach der Wärmerückgewinnung nach außen geführt. Das Kellergeschoss ist thermisch abgetrennt und nicht beheizbar; im Süden des von Westen her über eine breite Treppe zugänglichen zentralen Flurs liegen gemeinschaftlich genutzte Räume. Das Erdgeschoss ist eine zentrale Installationszone (Küche, WC und Technikraum), ein

Esszimmer im Norden und das Wohnzimmer nach Süden auf. Im Obergeschoss wird der zentrale Bereich von Treppe und Bad eingenommen, im Norden und Süden befinden sich optional teilbare Räume (z.B. Schlaf- und Kinderzimmer). Im Dachgeschoss ist nur der südliche Teil des Grundrisses nutzbar; durch das Pultdach entsteht hier ein großzügiger, sich nach Süden öffnender Raum, der optional unterteilt werden kann.

## 4 Grundrisse Passivhaus Darmstadt Kranichstein

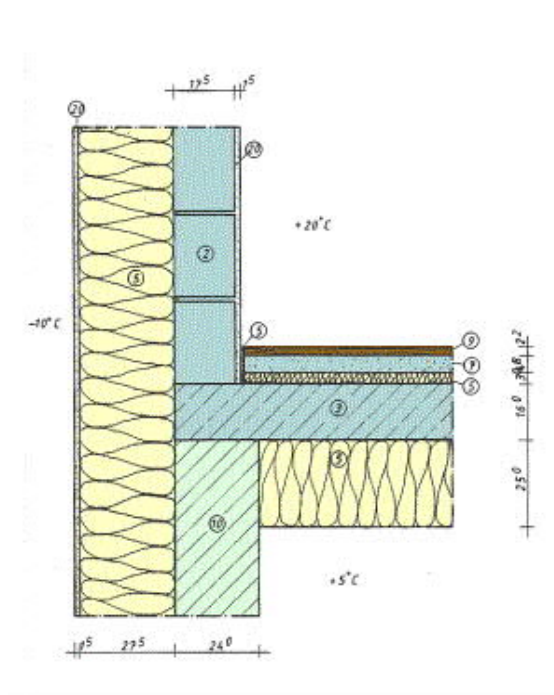


**Grundrisse des Passivhauses in Darmstadt Kranichstein.** Rechts das Kellergeschoss, das in einen privaten Teil im Norden, zusätzlich zugänglich von jeder individuellen Wohnen über eine Stahltreppe in der überglasten Vorhalle, und einen Gemeinschaftsteil mit zentralem Erschließungsgang in der Mitte und Gemeinschaftsräume (Technikraum, Waschküche, Trockenkeller, Fahrradraum und Gemeinschaftswerkstatt) im Süden unterteilt ist. Der Flur hat einen zusätzlichen gemeinsamen Zugang über die Rampe an der Ostseite. Im Keller befinden sich auch die vier individuellen Lüftungsanlagen.



## 5 Konstruktionsdetails der Passivhaus -Hülle und - Technik Passivhaus Darmstadt Kranichstein

### 5.1 Konstruktion inkl. Dämmung der Bodenplatte bzw. Kellerdecke mit Anschlusspunkten zu Außen- und Innenwänden



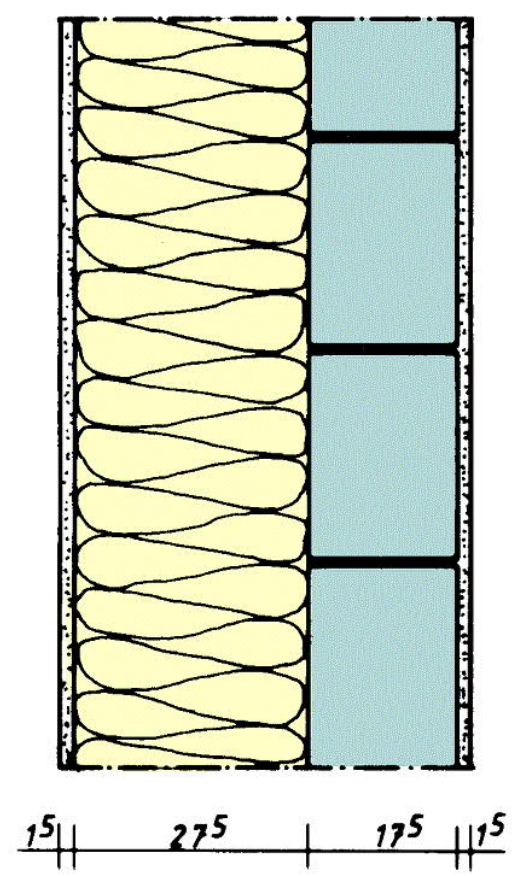
**Vermeidung von Wärmebrücken und Kellerdeckenaufbau am Fußpunkt des aufsteigenden Mauerwerks.** Um die konstruktiv bedingte Wärmebrücke gering zu halten, wird das Kellerwand-Mauerwerk mit einem Stein mit guter Materialdämmung (Porenbetonstein, Nr. ⑩) abgeschlossen. Die Dämmsteinlage muss so platziert werden, dass ein lückenloser Anschluss der Kellerdeckendämmung an die Dämmung der Außenwände resultiert. Auch die Kellerinnenwände weisen eine solche Porenbeton-Steinlage auf. Das Foto zeigt die beiden obersten Steinreihen während der Ausführung.

**Aufbau der Kellerdecke:**

<b>Keller-decke</b>	Spachtelung auf Glasfasergewebe; 250 mm Polystyrol-Hartschaumplatten ⑤; 160 mm Normalbeton; 40 mm Polystyrol-Trittschalldämmung; 50 mm Zement-Estrich; 8-15 mm Stäbchenparkett, geklebt; Versiegelung lösemittelfrei.	U-Wert 0,13 W/(m²K)
---------------------	---	---------------------------



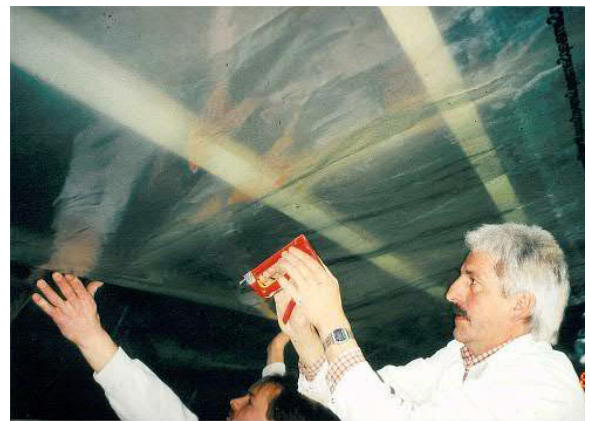
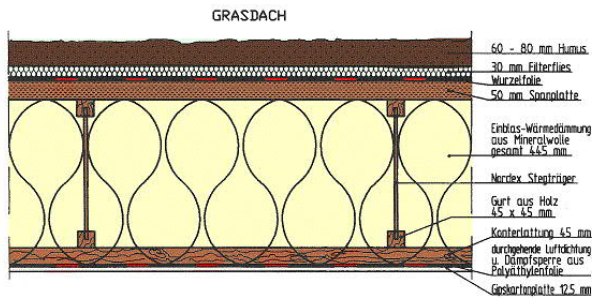
## 5.2 Konstruktion inkl. Dämmung der Außenwände



**Der Aufbau der Außenwand.** Eine gemauerte Kalksandsteinwand (in der Regel 17,5 cm dick) ist innen mit Gipsputz verputzt. Außen ist ein zweilagiges Wärmedämmverbundsystem mit einer Dämmdicke von 275 mm aufgebracht, das außen einen mineralischen Verputz aufweist. Der k-Wert dieses Aufbaus beträgt 0,138 W/(m²K). Rechts oben: Die Anbringung der ersten Dämmlage mit 150 mm dicken Dämmplatten aus expandiertem Polystyrol (EPS). Die Platten werden mit einem zementgebundenem Kleber direkt auf das Mauerwerk geklebt; jede Platte wird mit einem am Rand umlaufenden Kleberwulst versehen, um die Hinterströmung zusammenhängender Lufträume zwischen Platten und Wand zu verhindern. Unten rechts: Die Anbringung der 2. Dämmlage mit weiteren 125 mm Dämmplatten auf die erste Lage. 1991 gab es noch keinen WdVS-Anbieter, der eine Dämmung in der vollen Stärke liefern konnte.

<b>Außenwand</b>	Mineralischer Außenputz; 275 mm Polystyrol-Hartschaum; 175 mm Kalksandsteinmauerwerk; 15 mm durchgehender Innen-Gipsputz; Raufasertapete, Dispersionsfarbenanstrich.	U-Wert 0,14 W/(m²K)
------------------	--	---------------------------

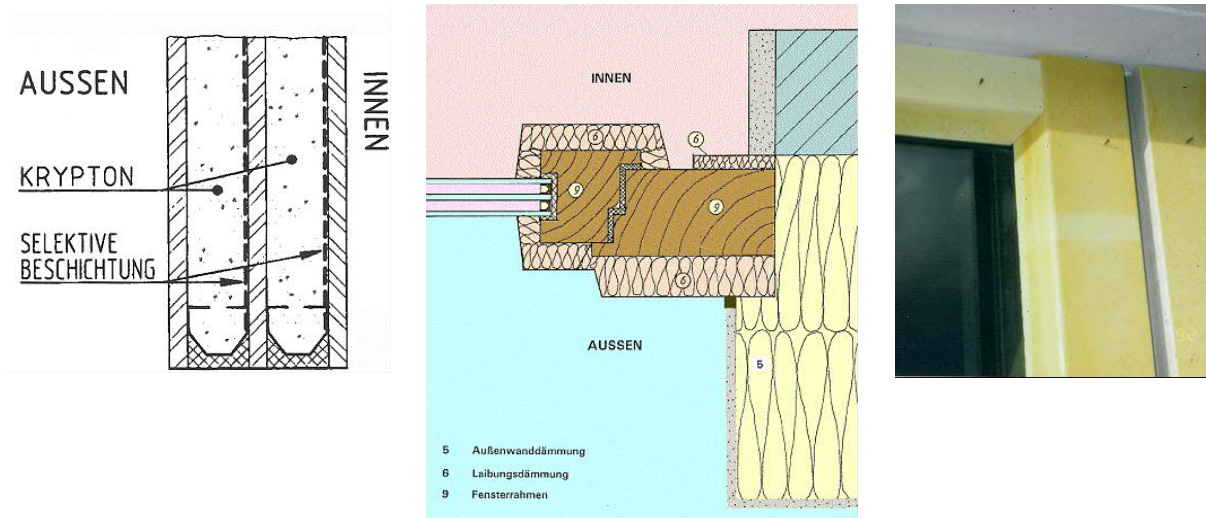
### 5.3 Konstruktion inkl. Dämmung des Daches



**Der Dachaufbau im Passivhaus Darmstadt Kranichstein.** Die Verwendung von Gründächern war im Baugebiet bindend festgelegt. Der Grasdachaufbau liegt auf einer von Stegträgern abgetragenen Spanplatte. Der Achsabstand der Stegträger konnte mit 1,08 m gewählt relativ hoch werden. Zum Raum hin folgt eine Konterlattung (45 mm), die durchgehende Luft- und Dampfdichtung (Polyäthylenfolie) und eine Gipskartonplatte. Bei 445 mm Dämmstoffdicke ergibt sich ein Dach-U-Wert unter  $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

<b>Dach</b>	Grasdach, Filtervlies, Wurzelschicht, formaldehydfreie Spanplatte, Doppel-T-Träger aus Holz (Steg aus Hartfaserplatte), Konterlattung, <b>fugenlos verklebte Luftdichtung aus Polyäthylenfolie</b> , Gipskartonplatte, Raufasertapete, Dispersionsfarbenanstrich, gesamter Hohlraum (445 mm) mit <b>Mineralwolle</b> ausgefüllt.	0,1 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
-------------	--	--

## 5.4 Fensterschnitte inkl. Einbauzeichnung



**Die verwendete Superverglasung mit drei Scheiben (links).** Je eine Oberfläche ist in jedem Scheibenzwischenraum für Wärmestrahlung reflektierend; bei den nun marktgängigen Verglasungen sind die äußerste und die innerste Scheibe beschichtet. Der  $U_g$ -Wert dieser Superverglasung beträgt (im Zentrum des Glases) noch  $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Heute gibt es Verglasungen ab  $U_g \geq 0,49 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Die Rahmendämmschalen aus  $\text{CO}_2$ -geschäumtem Polyurethan wurden auf der Innenseite der Fensterrahmen aufgeklebt (Zeichnung Mitte, Foto rechts), auf der Innenseite angeschraubt. Diese Maßnahme führte zu Rahmen- $U_f$ -Werten um  $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  und zu einer Abdeckung des Randbereiches der Verglasung, der wegen des Aluminium-Randverbunds eine starke Wärmebrücke aufweist. Diese Details wurden im Zuge der Bauvorbereitung erstmals mit mehrdimensionalen Wärmestromprogrammen berechnet. [Feist 1993]

Die Fenster sind die passiv solaren „Kollektoren“ des Passivhauses. Echte solare Wärmegewinne sind in Deutschland allerdings nur mit sehr hochwertigen Verglasungen zu erreichen: Die  $U$ -Werte müssen unter  $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  liegen; damit wird auch sichergestellt, dass die inneren Oberflächentemperaturen nicht unter etwa  $17^\circ\text{C}$  absinken. Das ist für eine hohe Behaglichkeit im Raum auch ohne ausgleichende Heizflächen wichtig. Im Passivhaus Darmstadt Kranichstein konnte erstmals in Deutschland die speziell entwickelte Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung mit einem  $U_g$ -Wert in Scheibenmitte von  $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  eingesetzt werden. Wenn im kalten Winter die Sonnen scheint, erwärmt sich die Innenoberfläche dieser Fenster auf über  $35^\circ\text{C}$  - ein unmittelbar für Besucher fühlbares Kennzeichen des Passivhaus-Prinzips.

### Daten zum Fenster

<b>Fenster</b>	Dreifach-Wärmeschutzglas mit Edelgasfüllung. Holzfensterrahmen mit Rahmendämmung aus Polyurethan-Integralschaumschalen ( $\text{CO}_2$ -geschäumt, FCKW-frei).	$0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
----------------	--	--------------------------------------



## 6 Beschreibung der luftdichten Hülle; Dokumentation des Drucktestergebnisses

Für das Passivhaus ist eine sehr dichte Gebäudehülle erforderlich. Aus den bisher vorliegenden Erfahrungen mit luftdichten Gebäuden wurde in [Feist 1993] ein Zielwert von unter  $0,6 \text{ h}^{-1}$  für den 50 Pa-Drucktestluftwechsel gesetzt. Der Hintergrund für dieses Ziel stellte sich wie folgt dar:

- Bisher gebaute Niedrigenergiehäuser in Deutschland wiesen Drucktestluftwechsel zwischen  $1$  und  $4 \text{ h}^{-1}$  mit einer Häufung um  $3 \text{ h}^{-1}$  auf. Nur wenige Objekte kamen nahe an  $1 \text{ h}^{-1}$  heran. In der deutschen Baupraxis lagen noch wenig Erfahrungen mit dem Bau von sehr gut luftdichten Gebäudehüllen vor.
- Andererseits wurden in Schweden bereits seit einigen Jahren bei Neubauten regelmäßig Drucktestluftwechsel um  $1 \text{ h}^{-1}$  erreicht, und dies bei meist vollständig aus Holzständerkonstruktionen aufgebauten Gebäudehüllen. Einige schwedische Drucktests kamen auch bereits auf Werte um  $0,5 \text{ h}^{-1}$  herunter. Damit war erwiesen, dass derart geringe Restleckagen auf der Basis der schwedischen Baupraxis durchaus erreichbar sind.
- Rechnet man in der Infiltrationsformel mit  $e=0,04$ , so ergibt sich bei einem  $n_{50}$ -Zielwert von  $0,6 \text{ h}^{-1}$  eine mittlere jährliche Infiltration von  $0,024 \text{ h}^{-1}$ ; dies bedeutet Infiltrationswärmeverluste für das gesamte Haus von um  $320 \text{ kWh/a}$  oder wohnflächenspezifisch von um  $2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Bei einem Ziel für den Energiekennwert Heizwärme von etwa  $10 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  ist dies bereits ein bedeutender Beitrag.

Der letzte Punkt zeigt, dass eine wesentlich höhere Restleckage beim Passivhaus nicht hätte toleriert werden können, ohne die Gesamtzielsetzung in Gefahr zu bringen. Andererseits zeigt Punkt 1, dass eine Dichtheit entsprechend der Zielsetzung bereits sehr hohe Anforderungen in Relation zur gängigen Baupraxis in Deutschland bedeutet. Es musste das Niveau sehr guter Niedrigenergiehäuser übersprungen und eine noch weit bessere Dichtheit erreicht werden.

**Dach:** Für das Dach wurden spezielle Doppel-T-Leichtbauträger verwendet, die eine extrem dicke Wärmedämmung bei nur sehr geringer Wärmebrückenwirkung erlauben. Die Dichtheit dieser Konstruktion wird durch eine durchgehende Polyäthylenfolie erreicht, die in großen Bahnen unter der Konterlattung angetackert wurde. Die Planung sah vor, dass in jedem Raum des Dachgeschosses nur ein groß Folienstück von Giebelwand zu Giebelwand verlegt wird; dadurch waren keine Verklebungen zwischen Folienstücken erforderlich. (Solche Verklebungen können im übrigen mit zweiseitigem Butyl-Klebeband dauerhaft und zuverlässig dicht ausgeführt werden; es



spart aber Arbeit, wenn dies nicht erforderlich wird und die Folien wirklich in einem Stück verlegt werden können.)



Beim Dach (Leichtbauteil) bildet die PE-Folie die luftdichte Lage, bei der Massivwand der durchgehende Gipsputz. Ein absolut dichter Anschluss dieser beiden Ebenen wurde durch Einputzen möglich: Die Folie wurde vor dem Anbringen des Innenputzes verlegt - dies hat darüber hinaus den Vorteil, dass die Feuchtigkeit während des Putzens nicht in die Leichtbaukonstruktion eindringen kann. An den Rändern zu Massivbauteilen wird die

Folie 8 bis 20 cm überstehen gelassen und auf das (Rohbau-) Massivbauteil aufgelegt. Am Massivbauteil wird sodann ein Streckmetall-Putzträger fixiert (genagelt bzw. Krampfenhalterung). Die Fixierungen dürfen auch durch die Folie hindurchgehen, jedoch sollte ein Abstand von mindestens 5 cm zur Stoßkante der Bauteile gehalten werden. Im letzten Arbeitsgang kann die Folie nun beim standardmäßigen Aufbringen des Innenputzes vollständig in diesen eingeputzt werden. Der so entstehende Anschluss ist einfach auszuführen und absolut luftdicht.



**Außenwand:** Für die Luftdichtung im Bereich der Außen- und Wohnungstrennwände wurde im Passivhaus ein vollflächig aufgebrachter Innenputz aus Gips verwendet. Es wurde speziell darauf geachtet, dass alle Mauerwerksbereiche vollständig verputzt wurden: Insbesondere auch die Bereiche, die im fertigen Innenraum gar nicht sichtbar sind. Der Putz reicht also von Oberkante Rohfußboden bis Unterkante Rohdecke.

**Fenster:** Die Fensterkanteln aus Holz sind luftdicht. In sie sind die Verglasungen mit einer umlaufenden Silikondichtung eingedichtet. Der Putz endet am Fenster etwa 10 mm vor dem Rahmen mit einer Anputzleiste (blauer Pfeil). Der

Raum zwischen der Leiste und dem Fenster wurde mit Acryl luftdicht verfugt (gelber Pfeil).

**Kellerdecke:** Die Ortbetondecke ist in sich dicht. Durchbrüche wurden mit flüssigem Anhydrit verfüllt, der sich beim Trocknen ausdehnt und so auch kleine Spalte verschließt.

Der erste Drucktest wurde nach Fertigstellung der luftdichten Hülle am 24.5.1991 durch das Ingenieurbüro ebök durchgeführt.

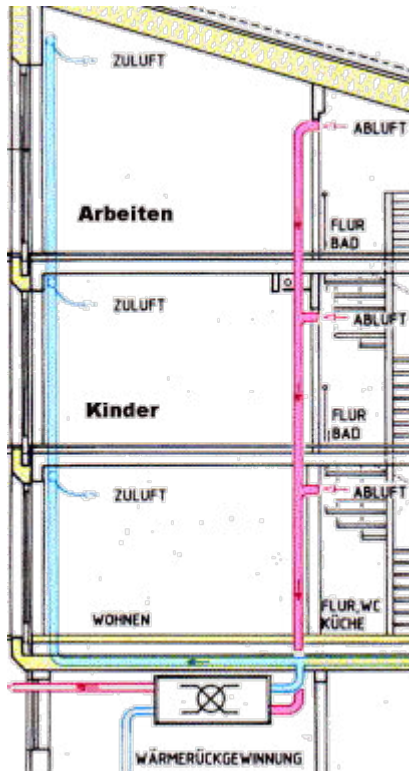
**Drucktestmessergebnisse vom 24./25.5.1991  
aus dem Passivhaus Darmstadt Kranichstein**

Messung	50 Pa-Drucktest- luftwechsel $n_{50} \text{ h}^{-1}$
Haus 1 regulär	0,403
Haus 2 regulär	0,276
Haus 3 regulär	0,258
Haus 4 regulär	0,240
Haus 1, Haustür abgeklebt	0,253
Haus 3, ein Fenster im EG gekippt	12,886



## 7 Lüftungsplanung Kanalnetz (exemplarisch)

Um die Lüftungsverluste stark zu reduzieren, wurde eine balancierte Zu/Abluft-Anlage mit einem hocheffizienten Gegenstrom-Luft-Luft-Wärmetauscher eingesetzt. Im Betrieb wurde eine Rückwärmzahl dieses Gerätes von über 80% gemessen.



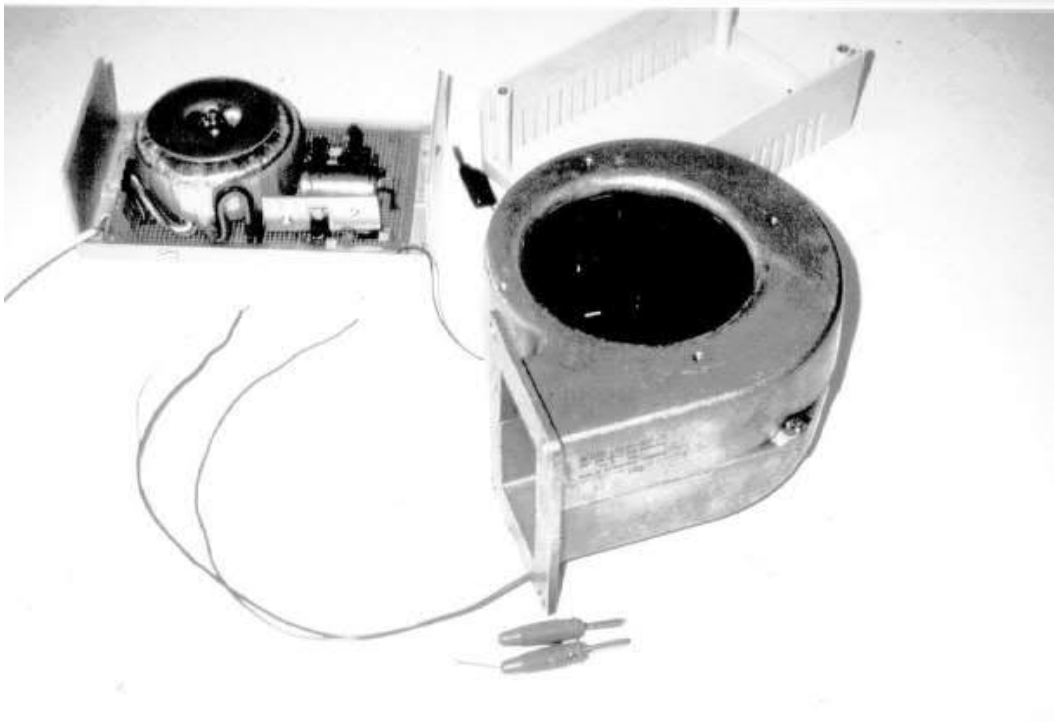
Zulufräume sind alle Hauptaufenthaltsräume (links in blau: Zuluftkanäle): Arbeitszimmer, Kinderzimmer, Schlafzimmer, Esszimmer und Wohnzimmer.

Ablufträume sind Bäder, WCs und die Küche.

Die Überströmung erfolgt durch Überströmgitter in den Innentüren in den Flur und das Treppenhaus. Von dort über Überströmöffnungen über den Türen in die Feuchträume. Von hier wird die verbrauchte Luft über ein Abluftkanalnetz (auf dem Bild links in rot) zurück zum Wärmeübertrager gebracht.



**Der verwendete Gegenstrom-Luft-Luft-Wärmeübertrager für die Wärmerückgewinnung.** Die Aufnahme zeigt den Blick auf das Plattenpaket von der Abluftseite/Zuluft-Seite. An dieser Stelle wird der Kasten mit den beiden Gebläsen aufgesetzt.

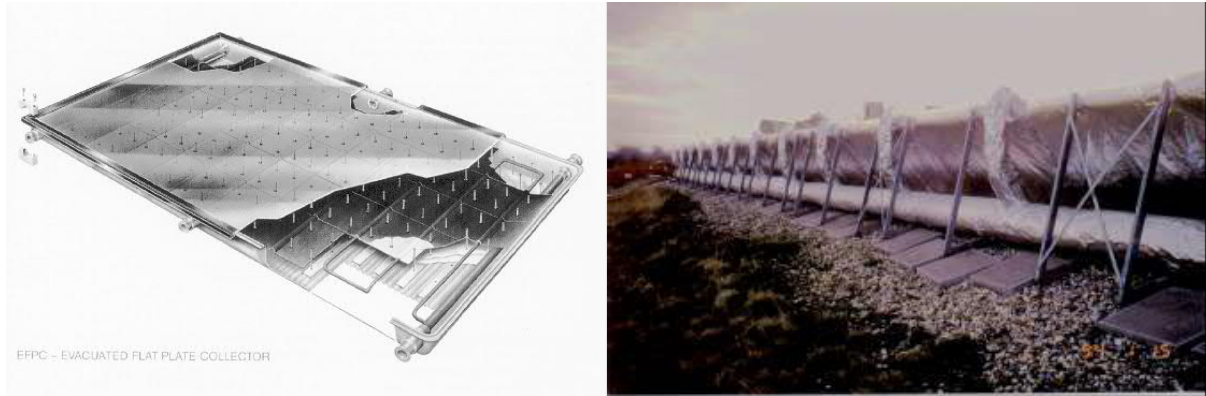


Erstmals in Darmstadt-Kranichstein in Wohnungslüftungsanlagen eingesetzt: **das elektronisch kommutierte Gebläse mit hoher Stromeffizienz**. Es wurde eine passende Steuer- und Regeleinheit entwickelt (Gleichstromversorgungseinheit oben im Bild).



## 8 Wärmeversorgung

Etwa 66% beträgt der solare Deckungsbeitrag der thermischen Flachkollektoren im Passivhaus Darmstadt Kranichstein. Weil die Bereitstellung von Warmwasser den höchsten Energiebedarf dieses Hauses darstellt, ist ein effizientes Brauchwassersystem hier von großer Bedeutung.



Der **thermische Flachkollektor** wurde auf dem Dach des Passivhauses aufgeständert. Verwendet wurden auf etwa 50 mbar evakuierte Flachkollektoren (bei diesem Unterdruck ist Konvektion im Füllgas (Argon) praktisch unterdrückt; es bleibt der Wärmeverlust durch Wärmeleitung im Füllgas).

Die übrige Warmwasserbereitung und die Raumheizung erfolgt über einen zentralen Gasbrennwertkessel für alle vier Wohneinheiten gemeinsam. Dieser versorgt einen 1 m<sup>3</sup> Trinkwarmwasserspeicher, in den auch die Solaranlage einspeist. Der Brennwertkessel ist mit einer Zeitsteuerung versehen (Winterbetrieb Anfang Dezember bis Mitte März; im Rest des Jahres nur Warmwassernachheizung, falls dies erforderlich ist).

## 9 PHPP-Berechnungen

Zum Zeitpunkt des Baus des Passivhauses Darmstadt Kranichstein gab es noch kein Passivhaus Projektierungspaket (PHPP). Alle Analysen und Berechnungen wurden mit einem detaillierten dynamischen Simulationsprogramm (DYNBIL) durchgeführt. Erst später stellte sich durch Auswertung der Messergebnisse heraus, dass auch für Häuser dieser Qualitätsklasse eine Berechnung mit speziell angepassten Bilanzprogrammen noch möglich ist – das führte zur Entwicklung des PHPP [AkkP 13].

Bei Eingabe der Daten des Endhauses Passivhaus Darmstadt Kranichstein erhält man die im Folgenden dokumentierten PHPP-Ergebnisse (Klima Frankfurt a.M.).

# Passivhaus-Nachweis



<b>Architektur:</b> Prof. Bott/Ridder/Westermeyer		<b>Objekt:</b> Passivhaus-Endhaus Kranichstein	
Straße: Jahnstr. 8		Straße:	
PLZ/Ort: 64285 Darmstadt		PLZ/Ort: 64289 Darmstadt	
Provinz/Land: Hessen DE-Deutschland		Provinz/Land: Hessen DE-Deutschland	
<b>Energieberatung:</b>		<b>Bauherrschaft:</b> Bauherrngemeinschaft Passivhaus	
Straße:		Straße:	
PLZ/Ort:		PLZ/Ort: 64289 Darmstadt	
Provinz/Land:		Provinz/Land: Hessen DE-Deutschland	
<b>Haustechnik:</b> öb Dipl.-Ing. Norbert Stärz		<b>Zertifizierung:</b> Passivhaus Institut	
Straße: Bahnhofstr. 49		Straße: Rheinstr. 44/46	
PLZ/Ort: 64319 Pfungstadt		PLZ/Ort: 64289 Darmstadt	
Provinz/Land: Hessen DE-Deutschland		Provinz/Land: DE-Deutschland	
Baujahr: 1991	Innentemperatur Winter [°C]: 20.0	Innentemp. Sommer [°C]: 25.0	
Zahl WE: 1	Interne Wärmequellen (IWQ) Heizfall [W/m²]: 2.4	IWQ Kühlfall [W/m²]: 2.4	
Personenzahl: 2.9	spez. Kapazität [Wh/K pro m² EBF]: 204	Mechanische Kühlung:	

## Gebäudekennwerte mit Bezug auf Energiebezugsfläche und Jahr

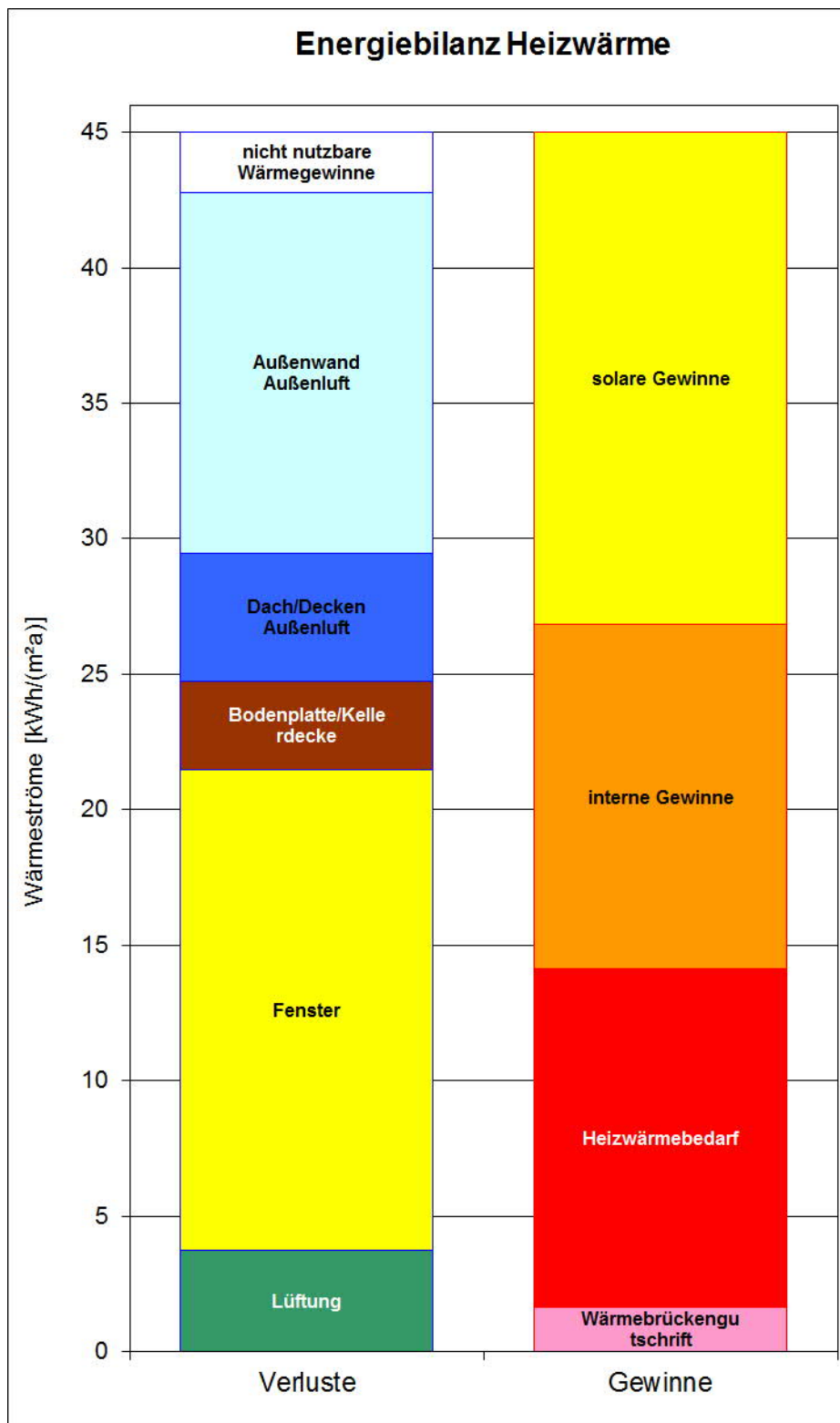
		Energiebezugsfläche m²		Kriterien	alternative Kriterien	Erfüllt? <sup>2</sup>
Heizen	Heizwärmebedarf kWh/(m²a)	156.0	≤	15	-	ja
	Heizlast W/m²	10	≤	-	10	
Kühlen	Kühl- + Entfeuchtungsbedarf kWh/(m²a)	-	≤	-	-	-
	Kühllast W/m²	-	≤	-	-	
	Übertemperaturhäufigkeit (> 25 °C) %	1	≤	10		ja
	Häufigkeit überhörter Feuchte (> 12 g/kg) %	0	≤	20		ja
Luftdichtheit	Drucktest-Luftwechsel n <sub>50</sub> 1/h	0.2	≤	0.6		ja
Nicht erneuerbare Primärenergie (PE)	PE-Bedarf kWh/(m²a)	54	≤	-		-
Erneuerbare Primärenergie (PER)	PER-Bedarf kWh/(m²a)	30	≤	60	60	ja
	Erzeugung erneuerb. Energie (Bezug auf überbaute Fläche) kWh/(m²a)	135	≥	-	-	

<sup>2</sup> leeres Feld: Daten fehlen; '-': keine Anforderung

Ich bestätige, dass die hier angegebenen Werte nach dem Verfahren PHPP auf Basis der Kennwerte des Gebäudes ermittelt wurden. Die Berechnungen mit dem PHPP liegen diesem Nachweis bei.

Passivhaus Classic? **ja**

**PHPP-Dokument des Endhauses Passivhaus Darmstadt Kranichstein.** Die beteiligten Planer sind hier ebenfalls angegeben. Für das Mittelhaus (ohne Giebelwand) ergibt sich mit ansonsten gleichen Daten ein Heizwärmebedarf von 8,2 kWh/(m²a). Für die gesamte Zeile resultiert q<sub>H</sub> = 9,4 kWh/(m²a).



Die mit PHPP berechnete Heizwärmebilanz des Endhauses Passivhaus Darmstadt Kranichstein.

Bei den Verlusten tragen die Fenster fast die Hälfte bei, die Außenwände etwa ein Viertel.

Fast die Hälfte der Verluste wird wieder durch Solargewinne der Fenster gedeckt (rechts).

Innere Wärmequellen tragen etwa ein Viertel bei, die Heizung nur das verbleibende Viertel von etwas mehr als 10 kWh/(m²a).

## 10 Baukosten

Das Passivhaus Darmstadt Kranichstein wurde im Jahr des Baubooms nach der Wiedervereinigung (1991) gebaut. Die Zinsen waren damals sehr hoch, der Baukostenindex untypisch hoch.

Zum Bau des Hauses gibt es eine umfassende Kostendokumentation [Militzer/Feist 1999]. Danach betrugen die

reinen Baukosten (Kostengruppen 300 bis 400)      1825 €/m<sup>2</sup>

das ist ein relativ hoher Wert – insbesondere die Vollunterkellerung, der große Nordglasvorbau und die Südbalkonanlage müssen in Betracht gezogen werden, um diese Kosten einzuordnen. Die baulichen Mehrinvestitionen für die Energieeffizienz lagen nach der o.z. Studie bei

Passivhaus-Mehrinvestitionen Kranichstein      292 €/m<sup>2</sup>

Oder etwa 16% der Baukosten. Diese hohen Mehrinvestitionen waren vor allem auf die innovativen Baukomponenten, die zu bedeutenden Teilen in Einzelfertigung hergestellt werden mussten, zurückzuführen. Die Mehrinvestitionen konnten in den vergangenen 15 Jahren durch Weiterentwicklung der Methoden und Produkte, größere Stückzahlen und Vereinfachungen bei Reihenhäusern auf unter 8% der üblichen Baukosten reduziert werden. Von den o.g. Mehrinvestitionen hat das Bundesland Hessen 50% gefördert. Für die Bauherren waren damit 146 €/m<sup>2</sup> zu finanzieren.

## 11 Messergebnisse aus dem bewohnten Passivhaus Darmstadt Kranichstein

### 1.1 Messdatenerfassung

Das Ingenieurbüro für Energieberatung und ökologische Konzepte (ebök) führte im Passivhaus eine umfassende **kontinuierliche Messdatenerfassung** durch. Es wurden über 200 Messgrößen kontinuierlich erfasst, u.a.:

- Klima (Außenlufttemperatur und -feuchte, Windgeschwindigkeit und -richtung, Solarstrahlung)
- Raumlufttemperaturen (in allen Häusern, allen Räumen)
- Raumluftfeuchten (Haus IV, alle Räume)
- Heizkörpertemperaturen (Haus IV, alle Räume)



- Wandtemperaturquerschnitt, Wärmeflussmessung Wand
- Dachtemperaturquerschnitt, Wärmeflussmessung Dach
- Oberflächentemperaturen der Fenster
- Status der Dämmschiebeläden
- Luftvolumenströme der Lüftungsanlage (sowie Temperatur und Feuchte)
- Volumenströme Kaltwasser, Regenwasser und Warmwasser und Temperaturen
- Wärmemengenzähler für Heizung, Warmwasser, Zirkulation und Sonnenkollektor

In zeitlich begrenzten Messaktionen wurden darüber hinaus ermittelt:

- Mit Thermographie: evtl. Inhomogenitäten der Wärmedämmung
- Mit Drucktests: Dichtheit der Hülle
- Mit Tracergasmessungen: Luftwechselzahl, Effizienz der Lüftung

Nach der Auswertung von sechzehn Messjahren (Messdaten von Oktober 1991 bis September 2007, Ausschnitt vgl. Tabelle) erfüllt das Haus die Erwartungen in Bezug auf die Energieeffizienz [AkkP 5] [Feist/Werner 1994]. Gegenüber dem Durchschnitt deutscher Wohngebäude ist der gemessene Heizenergieverbrauch auf ungefähr **ein Zwanzigstel** gesenkt.

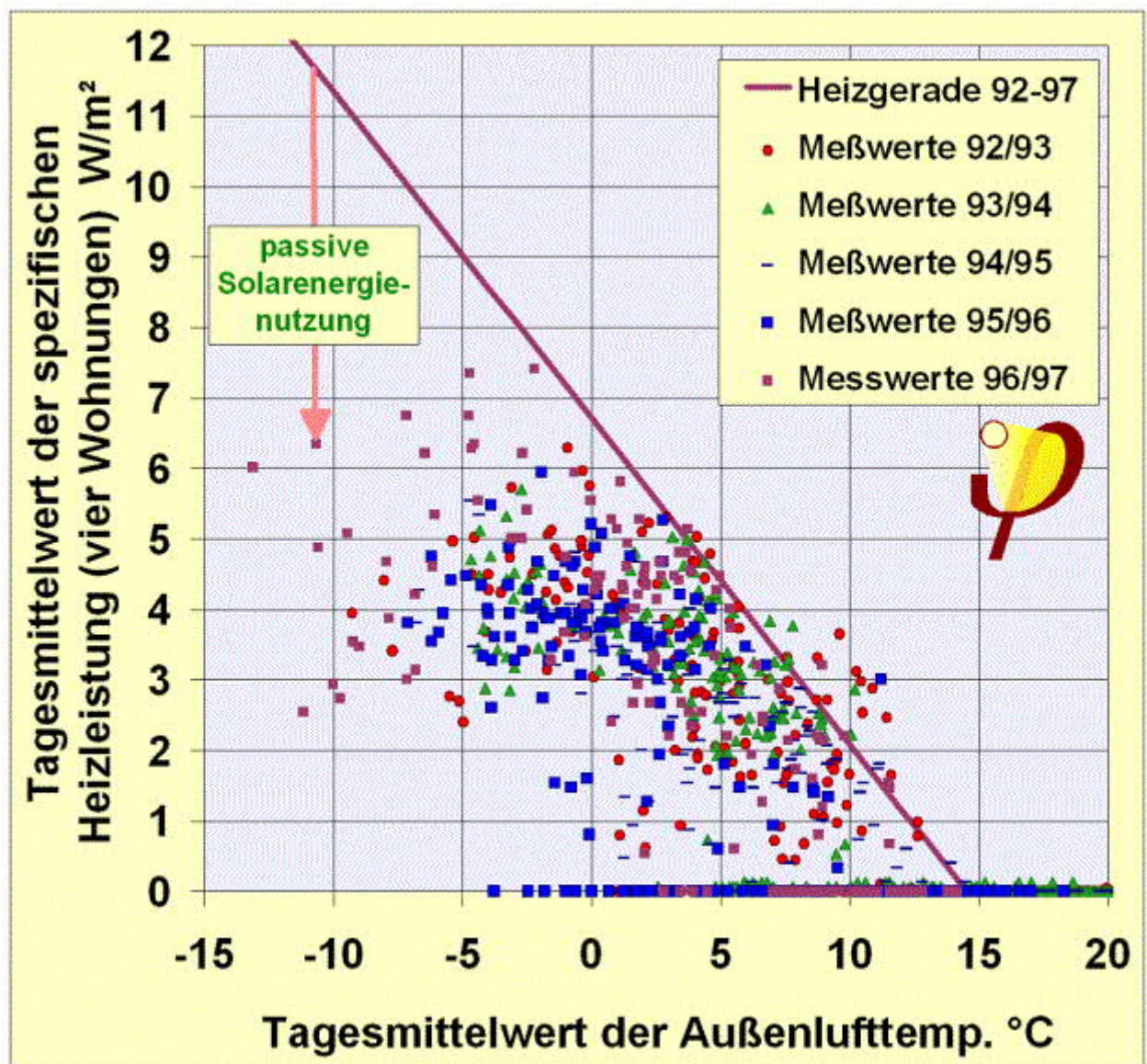
## 1.2 Gemessene Energieverbrauchswerte

In der Summe betrug der gemessene Gesamtenergiekennwert (Haushaltsstrom, Gemeinschaftsstrom, Kochgas, Lüftung, Warmwasser und Heizung) im Passivhaus im Messzyklus jeweils im zweiten bis vierten Jahr weniger als 33 kWh/(m<sup>2</sup>a). [Ebel/Feist 1997] Damit wurde der angestrebte Zielwert von 30 kWh/(m<sup>2</sup>a) nur geringfügig überschritten. Wie in der Zielsetzung angestrebt, ist der gesamte Energieverbrauch im Passivhaus **geringer** als allein der Haushaltsstromverbrauch in durchschnittlichen deutschen Gebäuden (bezogen auf die Wohnfläche). Damit ist der Gesamtendenergiekennwert des Passivhauses um fast 90 % geringer als in vergleichbaren bestehenden Einfamilienhäusern.

Die folgende Abb. zeigt die gemessenen tagesdurchschnittlichen Heizlasten der vier Wohnungen bezogen auf die Wohnfläche. Im ab dem zweiten Jahr reduzierte sich der Wärmebedarf durch die Rahmendämmung weiter; auch im dritten bis fünften Messjahr lag die gemessene maximale Heizlast immer unter 7,2 Watt/m<sup>2</sup>. Dies sind extrem geringe Heizleistungen: Zum Beispiel ergibt sich damit für das Wohnzimmer mit 22 m<sup>2</sup> Wohnfläche eine Spitzenleistung von etwa 150 Watt. Das Zimmer wäre daher bequem mit zwei gewöhnlichen Glühlampen "beheizbar".

### 1.3 Nutzerzufriedenheit, Nutzerverhalten

Für das Passivhaus Darmstadt Kranichstein wurde eine unabhängige sozialwissenschaftliche Studie durchgeführt. Dabei wurden die Bewohner nach ihrer Bewertung des Raumklimas im Sommer und im Winter befragt und dies mit der Statistik aus Niedrigenergiehäusern verglichen [Rohrmann 1994]. Die Ergebnisse waren im Durchschnitt besser als in der Vergleichsgruppe – auf Grund der kleinen Gesamtheit jedoch nicht signifikant. Dieses Ergebnis war allerdings ausreichend, um weitere, umfangreichere Demonstrationsvorhaben als sinnvoll anzusehen.

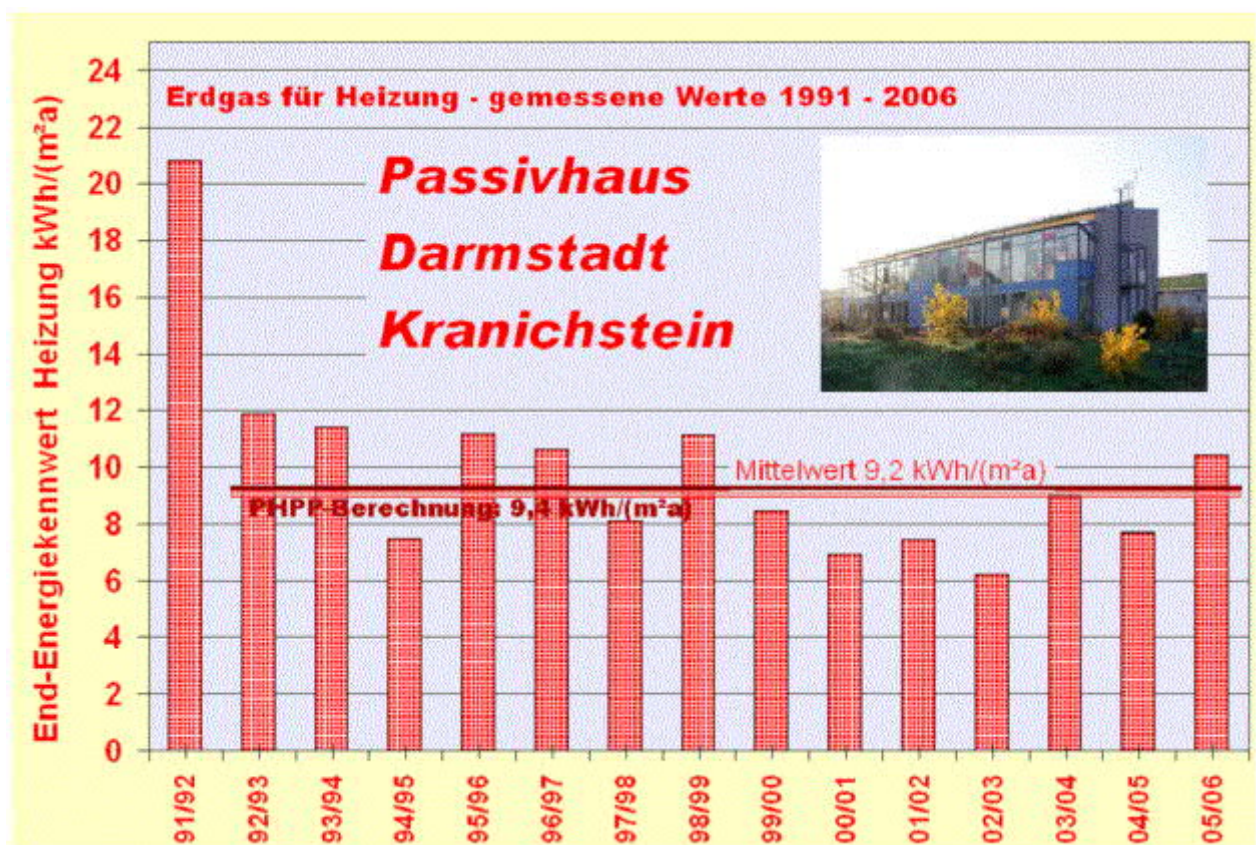


**Tägliche spezifische Heizleistung**, gemessen über zwei Heizperioden im Passivhaus (Mittelwert über alle 4 Wohnungen, jede hat 156 m² Wohnfläche) (aus [Feist 2005]).

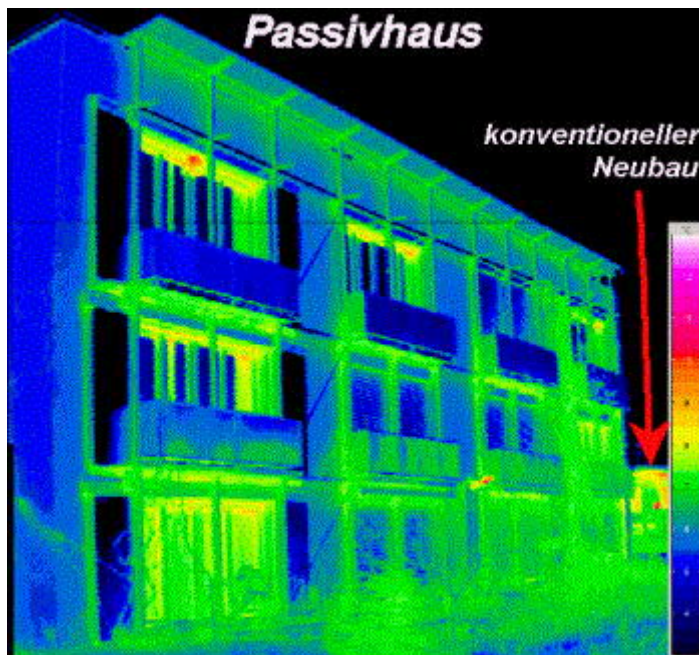


**Tabelle: Messergebnisse: Energiekennwerte im Passivhaus Darmstadt Kranichstein, Jahre 1 bis 4**

Energiekennwert (Endenergie) kWh/(m <sup>2</sup> a) (Wohnfläche)	Energie- träger	Passivhaus Messung 91/92	Passivhaus Messung 92/93	Passivhaus Messung 93/94	Passivhaus Messung 94/95
Haushaltsstrom	STROM	6,27	6,17	7,11	7,48
Lüftung (Strom)		2,65	2,93	2,93	2,93
Gemeinschaftsstrom		2,85	2,10	1,87	1,82
Kochgas	ERDGAS	2,43	2,60	2,89	2,85
Warmwasser		8,28	6,12	7,52	7,45
Heizung		20,81	11,91	11,45	7,42
<b>Gesamt</b>		<b>43,29</b>	<b>31,83</b>	<b>33,77</b>	<b>29,95</b>



**Messwerte für den Jahresheizenergieverbrauch** im Durchschnitt aller vier Wohnungen im Zeitraum zwischen 1991 und 2006. Der Mittelwert der Messungen liegt geringfügig unter dem mit PHPP auf 9,4 kWh/(m<sup>2</sup>a) berechneten Wert. Diese Messungen wurden am Erdgaszähler vorgenommen und nach Wärmezählermessungen der Kreise Heizung und Warmwasser aufgeteilt. Der Verbrauchswert ist (abgesehen von Wetterschwankungen) seit 15 Jahren stabil.



Das nebenstehende Bild zeigt eine **Wärmebildaufnahme (Thermographie) des Passivhauses**. Die Intensität der Wärmestrahlung zeichnet ein Bild der Oberflächentemperaturen: weiß sind die höchsten, schwarz sehr niedrige Temperaturen dargestellt. Erkennbar ist, dass die Außenwand durchgehend extrem geringe Oberflächentemperaturen aufweist; auch der Superfensterrahmen ist offensichtlich wirksam. Die Superverglasungen haben ebenfalls nur geringe Wärmeverluste. Besonders auffällig sind die höheren Oberflächen-Temperaturen eines konventionellen Neubaus im Hintergrund.

## Literatur

[AkkP 5] Energiebilanz und Temperaturverhalten – mit Messergebnissen aus dem Passivhaus Darmstadt Kranichstein; Protokollband Nr. 5 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, 1. Auflage, Passivhaus Institut, Darmstadt 1997

[AkkP 13] Energiebilanzen mit dem Passivhaus Projektierungs Paket; Protokollband Nr. 13 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, 1. Auflage, Passivhaus Institut, Darmstadt 1998

[Ebel/Feist 1997] Witta Ebel und Wolfgang Feist: "Ergebnisse zum Stromverbrauch im Passivhaus Darmstadt Kranichstein" in "Stromsparen im Passivhaus"; Protokollband Nr. 7 zum Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser; PHI; Darmstadt, 1997.

[Feist 1988] Forschungsprojekt Passive Häuser; Projektziele - mit einem Kommentar des Autors zur 2. Auflage 1995, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 1. Aufl. 1988, 2. Aufl. 1995

[Feist 1993] Passivhäuser in Mitteleuropa; Dissertation, Universität Kassel, 1993

[Feist/Werner 1994] Wolfgang Feist und Johannes Werner: "Gesamtenergiekennwert < 32 kWh/(m²a)"; Bundesbaublatt 2/1994

[Feist 1997a] Wolfgang Feist, Tobias Loga: "Vergleich von Messung und Simulation" in "Energiebilanz und Temperaturverhalten"; [AkkP 5]; PHI; Darmstadt, Januar 1997.

[Feist 1997b] Wolfgang Feist: "Der Härte-test: Passivhäuser im strengen Winter 1996/97"; GRE-Inform, 12/1997.

[Feist 1997c] Wolfgang Feist: "Passivhaus Darmstadt Kranichstein - Planung, Bau, Ergebnisse", Fachinformation PHI 1997/4, 1. Auflage, 16 Seiten,



[Feist 2000] Wolfgang Feist: "Erfahrungen objektiv: Messergebnisse aus bewohnten Passivhäusern"; in: Tagungsband zur 4. Passivhaus Tagung. Passivhaus Dienstleistung GmbH, 1. Auflage, Darmstadt 2000

[PHPP 2007] Feist, W.; Pfluger, R.; Kaufmann, B.; Schnieders, J.; Kah, O.: Passivhaus Projektierungs Paket 2007, Passivhaus Institut Darmstadt, 2007

[Rohrmann 1994] Bernd Rohrmann: "Sozialwissenschaftliche Evaluation des Passivhauses in Darmstadt"; Passivhaus-Bericht Nr. 11; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt, September 1994.