

ENERGIEEFFIZIENZ BEI GEBÄUDEN – DARGESTELLT AM BEISPIEL PASSIVHAUS

Wolfgang Feist

Passivhaus Institut, Darmstadt

1. Einordnung des Heizwärmebedarfs

Der Energieverbrauch zur Beheizung von Gebäuden hat in Deutschland einen Anteil von etwa einem Drittel am gesamten Endenergieverbrauch. Es handelt sich damit um den größten Einzelposten bei der Energieanwendung.

Bereits auf vorausgehenden Physikertagungen hat der Autor dargestellt, dass für die hier nachgefragte Dienstleistung, nämlich ein thermisch behagliches Innenklima, aus rein physikalischer Sicht überhaupt keine aktive Energiezufuhr erforderlich ist. Vielmehr handelt es sich um eine Aufrechterhaltung eines Nichtgleichgewichtszustandes, der ebenso gut durch rein passive Maßnahmen in Form von Barrieren gegen die aus dem Haus austretenden Energieströme aufrecht erhalten werden kann. Zunächst mit theoretischen Methoden der Gebäudesimulation, dann durch den Bau eines regulär bewohnten Demonstrationsgebäudes hat der Autor bewiesen, dass es im mitteleuropäischen Klima tatsächlich möglich ist, den Heizenergieverbrauch von Wohngebäuden auf einen beliebig kleinen Wert zu senken.

2. Fortschritte beim Passivhaus-Konzept

Das Passivhaus erschließt sich immer weitere Anwendungsfelder (Abb. 1). Zwischenzeitlich kann vom Passivhauskonzept mit Fug und Recht dieselbe Aussage gemacht werden, die der Autor vor 14 Jahren für das damals als neu und exotisch geltende Niedrigenergiehaus gegeben hat: „Aus jedem Gebäudeentwurf kann ein Passivhaus werden, wenn die baulichen und technischen Qualitätsanforderungen beachtet werden.“

Woraus leitet sich die ausgesprochene Sicherheit ab, die aus den bisher gemachten Erfahrungen auf einen breiten Entwicklungstrend schließen lässt? Es sind einige wenige, aber zentrale Gesichtspunkte, die erkennen lassen, dass der Trend insgesamt und nachhaltig zum Passivhaus geht.

2.1 Das „Ohnehin“-Prinzip

Passivhäuser müssen gegenüber „gewöhnlichen“ Neubauten keine grundsätzlich anderen, zusätzlichen oder exotischen Komponenten aufweisen: Wände, Dächer, Fenster und auch die Lüftung werden in jedem Haus, das für den dauerhaften Aufenthalt von Menschen gedacht

ist, *ohnehin* gebraucht. Das Passivhauskonzept setzt auf eine erhebliche Qualitätsverbesserung eben *dieser* Komponenten. Weil die für das Passivhaus erforderliche Qualität bereits heute technisch ohne Umstände zu erfüllen ist, ergibt sich dadurch eine klare Perspektive: Warum sollte man sich künftig mit Qualitäten zufrieden geben, die unnötig schlechter sind als das nach dem Stand der Technik schon heute Verfügbare?



2.2 Das Qualitätssprungprinzip

Zwar ist die Qualität aller Einzelkomponenten der Passivhäuser „nur“ jeweils quantitativ besser als die heute übliche Massenware; aber aus der Summe dieser Verbesserungen resultiert ein qualitativer Sprung. Gerade durch diesen Sprung ist das Passivhaus definiert: „Ein Passivhaus ist ein Gebäude, in welchem die Art, der Ort (im Raum) und der Zeitpunkt (am Tag) der Heizwärmezufuhr keine Rolle mehr spielt. Die thermische Behaglichkeit wird durch die Qualität der Gebäudehülle und des Lüfterneuerungssystems bestimmt.“

Dieser Zustand wird erreicht, wenn die Innenoberflächentemperaturen aller Bauteile sowie die Zulufttemperatur auch unter kältesten Auslegungsbedingungen nicht mehr als 3,5 °C unter die Raumlufttemperatur fallen und wenn die auf die Wohnfläche bezogene maximale Heizlast nicht größer als 10 W/m² ist (Abb. 2).

Für künftige Neubauten kann man nur empfehlen, diese Bedingungen generell zu erfüllen: Denn dadurch sind Gebäude auf Dauer unabhängig von jedem technischen Korsett, das für eine Korrektur sonst vorliegender asymmetrischer Temperaturfelder gebraucht würde. Der Qualitätssprung, der zum Passivhaus führt, ist physikalisch begründet – so gibt es auch aus dieser Sicht keinen Grund, hinter diesem Standard zurückzubleiben.

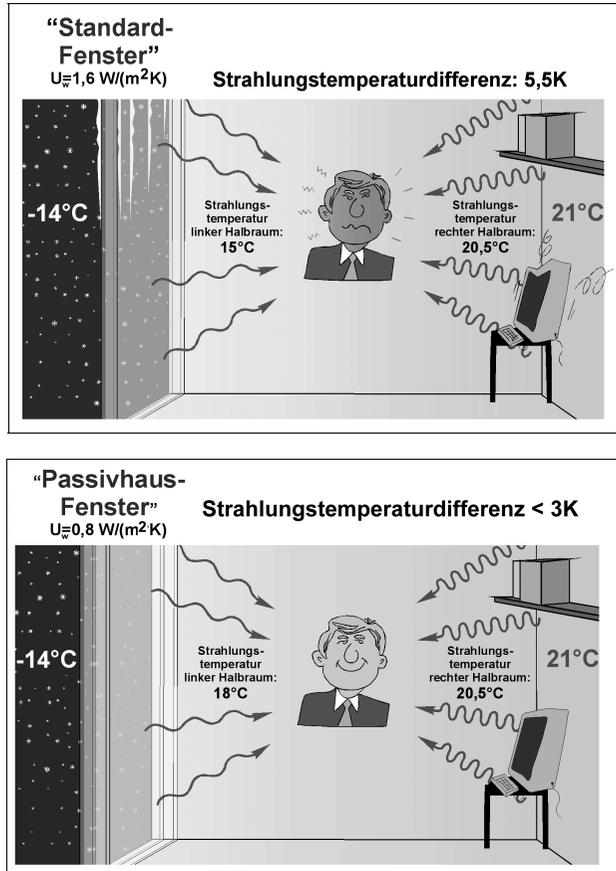


Abb. 2: Qualitätssprung beim Übergang zu Außenbauteilen mit U-Werten unter $0,85 \text{ W/(m}^2\text{K)}$: Störende Strahlungstemperasymmetrien und Kaltluftschichten im Raum entfallen. Auch ohne ausgleichende Heizflächen ist es überall im Raum behaglich

2.3 Das Prinzip Kostengünstigkeit

Viel wurde gestritten über angeblich teure Komponenten bei Niedrigenergiehäusern: Mancher Eiferer sah schon die gesamte Volkswirtschaft in Gefahr wegen angeblich teurer Dämmstoffkonstruktionen. Was ist eigentlich von den anfänglichen Mehrkosten bei Niedrigenergiehäusern Mitte der 80er Jahre übrig geblieben? Fenster, Außenwände und Dachkonstruktionen sind heute kostengünstiger als vor 15 Jahren – haben wir eine Qualitätsverbesserung zum Nulltarif bekommen? Sicher gab es Entwicklungskosten; aber die Grenzkosten der Niedrig-

energiertechnik tendieren gegen Null. Das gleiche wird sich in wenigen Jahren auch für die Passivhauskomponenten erweisen – warum sind wir uns auch dabei so sicher? Schon heute können Passivhäuser im Lebenszyklus ökonomisch mit gewöhnlichen Neubauten konkurrieren, und dies, obwohl es sich bei den verwendeten Komponenten noch keinesfalls überall um industriell gefertigte Massenprodukte handelt. In dem Maß aber, in welchem eine kostengünstige Fertigung auch der Passivhauskomponenten fortschreitet, wird sich für sie das gleiche erweisen wie schon für die Niedrigenergieertechnik: Der Mehraufwand ist minimal, bei geschickter Fertigung gehen die Mehrkosten auch des Passivhausstandards gegen Null. Einige Beispiele, die auf der 6. Passivhaus-Tagung in Basel präsentiert wurden, belegen diesen Trend.

2.4 Komfortable Häuser

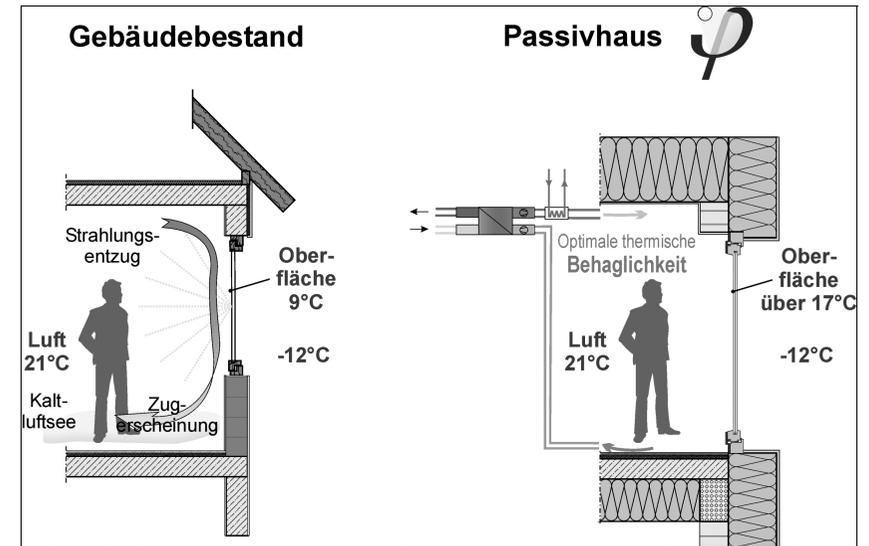


Abb. 3: Gut gedämmte Außenbauteile sorgen für ein günstiges Strahlungsklima im Passivhaus; die Komfortlüftung garantiert gute Luftqualität.

Je mehr Erfahrungen mit dem Passivhaus gesammelt wurden, desto klarer kristallisiert sich die außerordentlich hohe Behaglichkeit in diesen Gebäuden heraus. Bewohner berichten, wie sie den Kontrast zwischen gewöhnlichen, zugigen, schlecht gedämmten Häusern mit mäßiger Luftqualität und ihrem Passivhaus erleben. Dass es enorme Komfortvorteile beim Passivhaus gibt, ist kein Wunder – auch dies begründet sich aus einfachen physikalischen Zusammenhängen (Abb. 3):

- Gut gedämmte Außenoberflächen sind im Winter automatisch warm – sie bleiben im Sommer automatisch kühl. Eine spürbare Strahlungstemperaturasymmetrie entfällt, der Antrieb für die Raumluftwalze und den Kaltluftsee am Boden ebenfalls. Das Ergebnis sind „warme Füße“ und darüber berichten die Bewohner.
- In ausreichendem Ausmaß ständig erneuerte Luft schafft gute Innenraumqualität; das wurde in Passivhäusern mehrfach objektiv gemessen und auch darüber berichten die Bewohner.

2.5 Robuste Häuser

Einer der deutschen Passivhausbauträger drückte das so aus: „Passivhäuser sind sehr gutmütige Gebäude“. Wie ist das zu verstehen? Wir erläutern es an drei Beispielen:

- Im ersten Passivhaus in Darmstadt Kranichstein war im Januar 1992 für mehrere Tage der Wärmeerzeuger komplett ausgefallen. Ergebnis: Die Bewohner haben dies überhaupt erst nach 4 Tagen gemerkt.
- „Aus Versehen“ habe ich im Dezember die Balkontür im Obergeschoss morgens offen stehen lassen – erst um die Mittagszeit wurde sie geschlossen. Ergebnis: Betroffen von der Auskühlung war nur ein Raum. Schon nach knapp zwei Stunden war auch dieser wieder angenehm warm; die geringe verfügbare Heizleistung ist dabei kein Problem: Es ist genug Wärme in der Struktur des Gebäudes gespeichert.
- Im sozialen Geschosswohnungsbau als Passivhaus in Kassel-Marbachshöhe gab es durch eine nicht geschlossene Badewannenarmatur einen massiven Wasserschaden; nach durchgeführter Bautrocknung war auch dieser Baukörper noch im ersten Betriebswinter wieder vollständig als Passivhaus funktionsfähig.

Die Gutmütigkeit des Passivhauskonzeptes ist kein Freibrief für Nachlässigkeit bei der qualitativ hochwertigen Erstellung der Gebäude; die Qualitätsanforderungen des Passivhauses stellen gerade *die* bauphysikalischen Eigenschaften sicher, die für dauerhafte Bauschadensfreiheit *ohnein* von zentraler Bedeutung sind.

3. Passivhaus-Bauerfahrungen

Nach dem Erfolg des Passivhaus-Geschosswohnungsbauprojektes in Kassel-Marbachshöhe sind im vergangenen Jahr zahlreiche neue Mehrfamilienhausprojekte angegangen worden. In Hamburg sind drei Projekte im Bau, darunter ein erstes achtgeschossiges Passivhaus. Die ersten Schweizer Projekte zeigen überzeugende Ergebnisse, ebenso die österreichischen Wohnungsbauten.

Aus den bestehenden Passivhaussiedlungen liegen Messergebnisse und Aussagen der sozialwissenschaftlichen Begleitung vor (vgl. dazu Kapitel 4 und 5).

Mehrere neue Passivhaus-Bürogebäude sind im Bau. Für diese Anwendung hat sich das Passivhauskonzept als besonders erfolgreich erwiesen: Im Rahmen der Auswertung des Programms „SolarBau“ des BMBW (Koordiniert durch BEO) heben sich die Passivhaus-Bürogebäude durch eine besonders gute Primärenergiebilanz heraus: Die Restverbräuche für die Heizung sind vernachlässigbar, auf eine aktive Klimatisierung kann verzichtet werden. Das Institut für solare Energiesysteme in Freiburg hat für diesen Ansatz auch den Begriff „schlanke Gebäude“ geprägt, der zum Ausdruck bringt, dass hier mit einem vergleichsweise geringen technischen Aufwand gute Ergebnisse für die Behaglichkeit bei niedrigem Energieverbrauch erreicht werden [Voss 2001].

Erste Erfahrungen liegen für Bau und Betrieb von Kindergärten und Schulen mit Passivhausstandard vor. Auch bei diesen Bauaufgaben ergeben sich durch die Integration der Lüftung bedeutende Synergieeffekte.

Das Passivhaus-Produktionsgebäude in Zwingenberg/Bergstraße ist bereits im zweiten Betriebsjahr. Hier gab es anfangs erhebliche Probleme im Zusammenspiel zwischen der Haustechnik und dem chemischen Produktionsbetrieb; auch diese konnten jedoch überwunden werden [Preikschat 2001].

Zu den Bauerfahrungen gehört auch die Langzeitbewährung: Eine Überprüfung der Luftdichtheit „ein Jahrzehnt danach“ lieferte im ersten Passivhaus in Darmstadt Kranichstein nach wie vor ausgezeichnete Werte (n_{50} zwischen 0,26 und 0,36 h⁻¹); das Vierfamilienhaus zeigt sich insgesamt bzgl. Komfort, Heizleistungsbedarf und Energieverbrauch seit 10 Jahren stabil. Aber nicht nur der verputzte Massivbau hat damit die Langzeitbewährungsprobe bestanden; auch andere, systematisch geplante und korrekt ausgeführte Gebäudehüllen erwiesen sich bei Nachmessungen nach mehreren Jahren als qualitätsstabil.

4. Passivhaus-Komponenten

4.1 Außenwände, Dächer, Decken (Abb. 4)

Bewährte Bauweisen für die hochwärmedämmende Gebäudehülle mit U-Werten um und unter 0,15 W/(m²K) konnten weiter verbessert werden: Zunehmend wird bei Mauersteinwänden mit Wärmedämmverbundsystem der neue Dämmstoff Neopor mit Wärmeleitfähigkeit 0,035 W/(mK) bei einer geringen Rohdichte unter 15 kg/m³ eingesetzt. Damit lässt sich die Dämmwirkung weiter verbessern und Gestaltungsspielraum gewinnen.

Für die Holztafelbauweise mit Leichtbauträgern wurde eine Vielzahl von guten Detaillösungen entwickelt. Vor allem durch das Projekt CEPHEUS liegen dokumentierte wärmebrückenfreie und luftdichte Details vor ([Schnieders 2001]; vgl. auch www.CEPHEUS.at).

Eine sehr weitgehende Sicherung der Qualität schon im Werk erlauben für das Passivhaus geeignete Leichtbetonfertigelemente. Komplette Bauteile werden zwischenzeitlich von mehreren Herstellern angeboten.

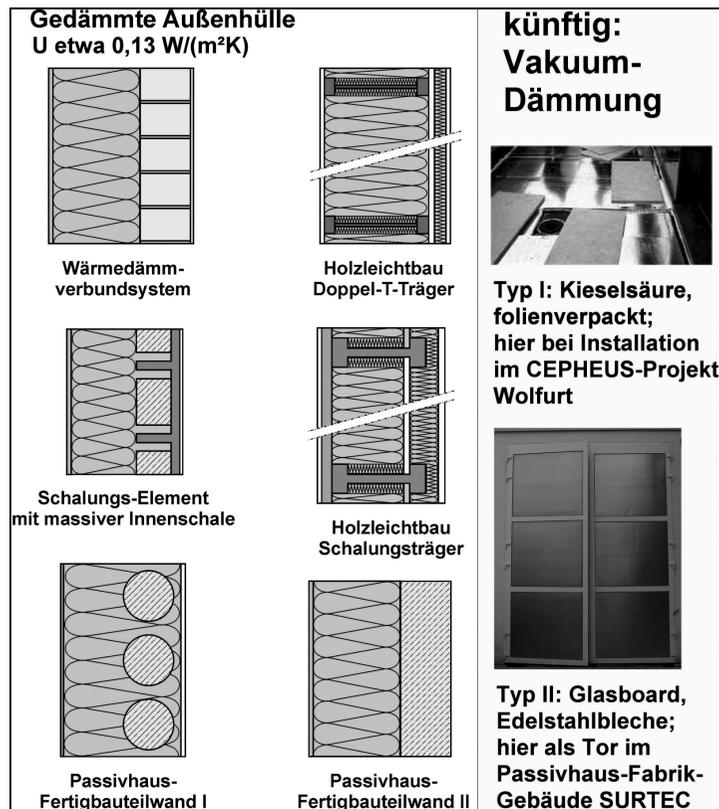


Abb. 4 : Aussenwände, Dächer, Decken

Auch für Passivhäuser in Schalungselementetechnik wurden weitere Systeme zertifiziert: So sind nun auch Elemente mit massiver innerer Schale verfügbar, wodurch noch höhere Gebäudezeitkonstanten und dadurch auch in Problemfällen eine einfachere Beherrschung des Sommerklimas möglich wird.

Auch vollständig neue Systemlösungen wurden entwickelt und durch das Passivhaus-Institut zertifiziert. U.a. ein System, das mit geschosshohen Fertigbauteilen auf PU-Dämmstoffbasis arbeitet und dessen integrierte Schalungsrohre an der Baustelle mit Beton verfüllt werden. Durch die niedrige Wärmeleitfähigkeit sind auch hier geringe Außenwandstärken möglich – und ein Schritt in Richtung äußerst kostengünstiger Konstruktionen, wie sie von Pionieren des Passivhausbaus schon vor Jahren vorhergesehen wurden.

Bei allen Systemen gibt es einen Trend zu höherer Funktionsintegration. Die Ausbildung der Details wird von der Baustelle in die Produktionshalle verlagert: Dadurch ist ein geschützteres und hochwertigeres Arbeiten möglich.

Die Potentiale der Passivhausbauteile sind damit aber bei weitem noch nicht ausgereizt. Vielmehr stehen eine ganze Reihe von Hightech-Materialien vor dem Durchbruch: Nanoporöse Baustoffe haben bereits unter Normaldruck Wärmeleitfähigkeiten, die unter der von Luft liegen; in vielen Bereichen der Technik werden sie schon heute eingesetzt [Binz 2002]. Bei einem relativ bescheidenen Vakuum im Bereich von 10 mbar fallen die Wärmeleitfähigkeiten bei diesen Materialien auf 0,004 bis 0,008 W/(mK), d.h. ein Fünftel bis ein Zehntel des Wertes bei konventionellen Dämmstoffen. Keine Frage, dass dies eine bedeutende Perspektive für das Passivhaus darstellt; erste Anwendungen sind bereits erfolgt, so z.B. bei der Terrassenwärmedämmung des CEPHEUS-Projektes Wolfurt (Österreich).

Ebenso spannend ist die Entwicklung im Bereich der Solarenergienutzung über opake Bauteile. D. Schwarz hat z.B. eine Latentspeicherwand vorgestellt, die passive Solarenergienutzung und sommerlichen Wärmeschutz auf intelligente Weise verbindet [Schwarz 2002].

4.2 Die Entwicklung beim Fenster

4.2.1 Fortschritte bei den Verglasungen

Die passive Nutzung der Sonnenenergie ist eines der Basiskonzepte für die niedrigen Wärmeverbräuche im Passivhaus. Auch die Solarenergie durch die Fenster führt zu weiter verbessertem Komfort: Lichtdurchflutete Räume sind die Konsequenz der Öffnung zur Sonne. Speziell für das Passivhaus entwickelt wurden Dreischeibenwärmeschutz-Verglasungen, die mit einem „center of glass“ U_g -Wert von unter 0,7 W/(m²K) so gut wärmedämmen, wie noch vor wenigen Jahren übliche Außenwände. Zwei Vorteile liegen auf der Hand (Abb. 5):

- **Diese Fenster lassen auch im mitteleuropäischen Kernwinter mehr Sonnenenergie in die Räume, als Wärme durch sie verloren geht.**
- **Die Oberflächentemperaturen sind dauerhaft auch in Kälteperioden so hoch, dass weder ein spürbarer Strahlungswärmeentzug noch eine störende Konvektionswalze entstehen.**

Passivhaus - Behaglichkeitskriterium Verglasung: $U_g \leq 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Passivhaus - Energiekriterium Verglasung: $U_g - 1,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \cdot g < 0$

Die Verfügbarkeit derart hochwertiger Verglasungen war entscheidend für den Durchbruch bei der Passivhaustechnologie. In einigermaßen wenig verschatteten südorientierten Fassaden ist damit eine echte passive Solarenergienutzung mit Nettowärmegevinnen auch im Januar möglich.

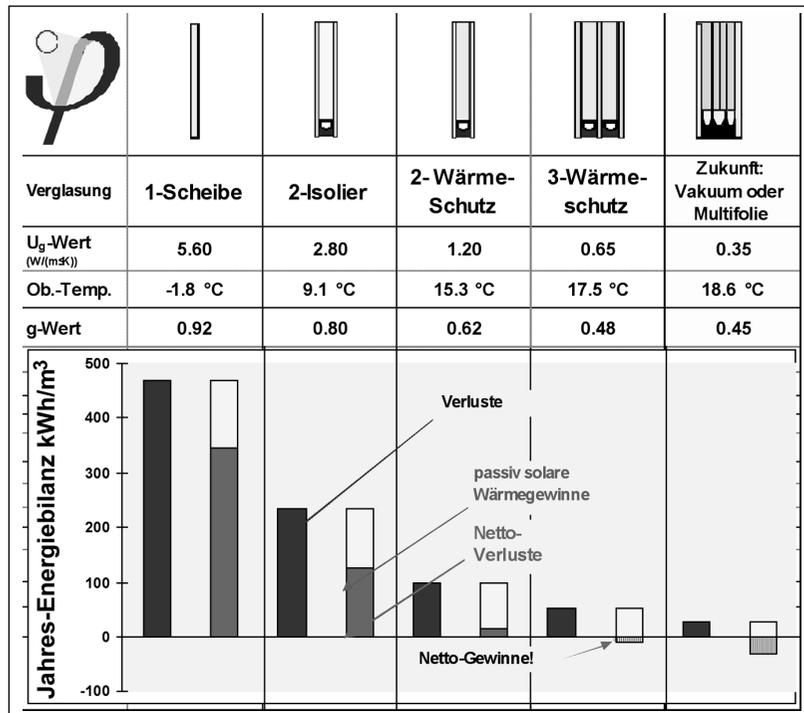


Abb. 5: Die Entwicklung der Verglasungsqualität ist ein herausragendes Beispiel für die Verbesserung der Energieeffizienz. Energieeinsparung, Umweltschutz und verbesserte Behaglichkeit gehen dabei Hand in Hand

4.2.2 Fensterrahmen

Eine gute Verglasung benötigt unbedingt auch einen Rahmen mit entsprechender Qualität [Feist 1998]. Dank des Engagements der Hersteller ist es innerhalb weniger Jahre gelungen, qualitativ hochwertige Fensterrahmen für das Passivhaus zu entwickeln: Inzwischen sind Fenster- U_w -Werte zwischen 0,7 und 0,8 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ohne weiteres erreichbar. Passivhaus-Qualität verlangt hier, dass bei Einbau einer Verglasung mit $U_g=0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ein Fenster- U -Wert (EN 10077) kleiner oder gleich 0,8 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ erreicht wird. Die Begründung für dieses Kriterium leitet sich unmittelbar aus den Komfortbedingungen ab.

Passivhaus - Kriterium Rahmen: mit einer Verglasung mit $U_g=0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ muss ein Fenster- U -Wert U_w nach EN 10077 von

$U_w \leq 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erreicht werden (Fenstergröße 1,23m x 1,48 m).

Charakterisiert wird der Rahmen durch den U_f -Wert (englisch „frame“). Aber erst zusammen mit dem Glasrandverlustkoeffizient Ψ_g kann die thermische Qualität eines Fensters vollständig bewertet werden.

Der nach EN 10077 definierte Fenster- U_w -Wert darf nicht mit dem alten k_F (bzw. U_F) nach DIN 4108 verwechselt werden. In k_F werden die Wärmebrückenwirkungen nicht angemessen berücksichtigt. Bei der Planung von Passivhäusern muss immer von den U_w -Werten nach EN 10077 ausgegangen werden. Eine Hilfe ist dabei das Passivhaus Projektierungs Paket; damit ist eine Bestimmung von U_w unter Verwendung der zertifizierten Werte von U_g (Glas), U_f (Rahmen) und dem im nächsten Abschnitt behandelten Glasrandverlustkoeffizient Ψ_g möglich [PHPP 2002].

4.2.3 Randverbund

Die einzelnen Scheiben eines Isolierglases müssen am Rand durch den Abstandhalter fixiert werden. Das Randverbundsystem hat weiterhin die Aufgabe, das Füllgas dauerhaft einzuschließen. Andererseits bildet der Randverbund eine Wärmebrücke, die zwischen den hochwärmedämmenden Gläsern und Fensterrahmen im Passivhaus eine deutliche Schwachstelle darstellt. Besonders gravierend ist der Wärmebrückeneffekt bei Aluminiumabstandhaltern, so dass heute im Passivhaus meist Abstandhalter aus anderen Werkstoffen eingesetzt werden, bei denen z.T. lediglich eine mehr oder minder dünne Metallfolie als Diffusionsdichtung vorhanden ist. Der TPS-Abstandhalter kommt sogar ganz ohne Metall aus. Abb. 6 stellt verschiedene Abstandhalter-Konstruktionen schematisch dar.

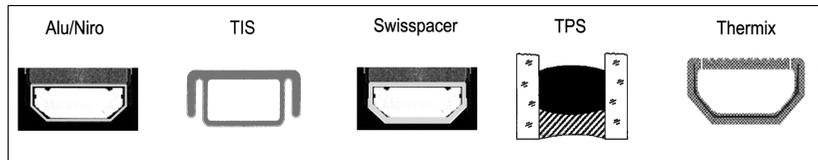


Abb. 6: Am Markt erhältliche Randverbundkonstruktionen (nach [Schnieders 1998])

Den Berechnungen in [Schnieders 1998] zufolge bewirkt der Ersatz des konventionellen Aluminiumabstandhalters durch einen Edelstahlabstandhalter geringerer Wandstärke bei passivhaustauglichen Fensterrahmen eine Verringerung des Fenster-U-Werts um etwa $0,02 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

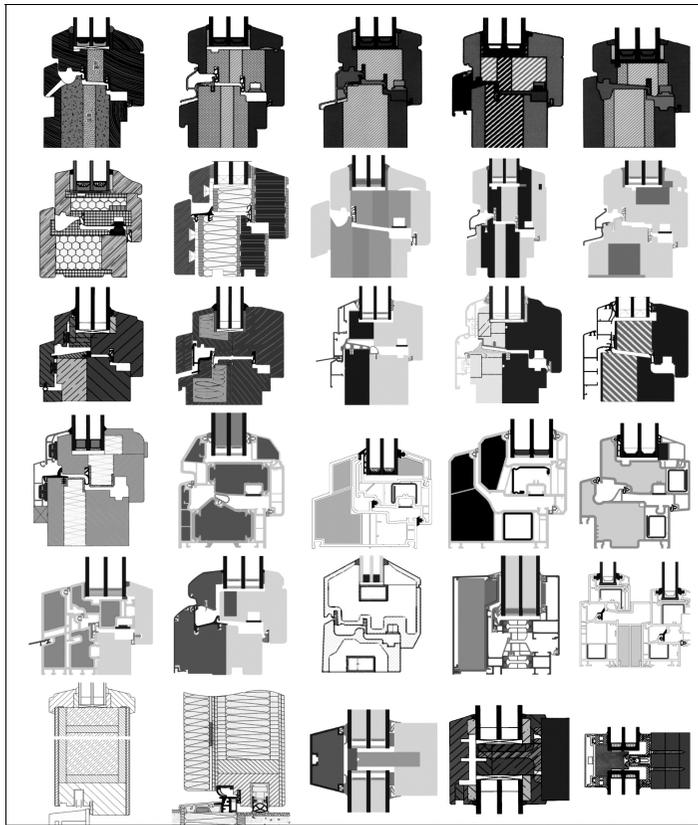


Abb. 7: Für das Passivhaus geeignete Fensterrahmen mit resultierendem Wärmedurchgangskoeffizienten U_w unter $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (hier wird $U_g = 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ als Referenzwert herangezogen)

4.2.4 Wärmebrückenfreier Einbau

Ein geeigneter Fenstereinbau ist äußerst wichtig, um die thermischen Qualitäten der hochwärmegeprägten Verglasungen und Rahmen auch zu nutzen. Besonders beim Massivbau ist auf den richtigen Einbau zu achten, da hier Materialien mit sehr unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten zum Einsatz kommen. Die Dämmschichten sollten ohne Versatz durchlaufen und vollflächig aneinander anstoßen. Abb. 8 zeigt einen sehr ungünstigen und den vom PHI empfohlenen Einbau. Die Auswirkungen verschiedener Fenstereinbau-Varianten in massiven Außenwänden werden in [Feist 1998a] beschrieben.

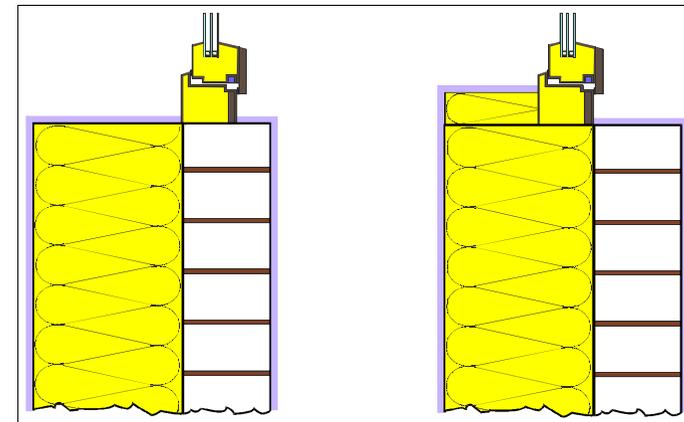


Abb. 8: Extrem schlechter (links) und empfohlener (rechts) seitlicher/oberer Einbau in eine Kalksandsteinwand mit Wärmedämmverbundsystem. Der gesamte spezifische Wärmeverlust beim linken Einbau ist um ca. $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, d.h. fast 50 %, größer als beim rechten!

4.2.5 Selbstverständlich: Öffnbare Fenster

Fast regelmäßig wird der Autor bei seinen Vorträgen gefragt, ob in Passivhäusern wegen der dort verwendeten Wohnungslüftungsanlagen die Fenster nicht mehr geöffnet werden können. Darauf gibt es eine klare Antwort: In jedem Wohnraum eines Passivhauses sollte es mindestens ein öffenbares Fenster geben. Bei Bedarf kann und darf das Fenster geöffnet werden. Für frische Luft sorgt das Lüftungssystem – außer in besonders belasteten Ausnahmefällen wird man daher das Fenster nicht zum Lüften öffnen müssen. Das Lüftungssystem ist keine Klimaanlage – es sorgt nur für die erforderliche Menge an frischer Luft. Will man Wohnräume auch im Sommer schön kühl halten, so kann ein längeres Kippen oder volles Öffnen der Fenster insbesondere in der Nacht und morgens hilfreich sein.

4.3 Technik

In unseren Nachbarländern (Dänemark, Frankreich und Schweiz) ist die grundsätzliche Notwendigkeit der kontrollierten Wohnungslüftung nicht umstritten, während in Deutschland erneut eine Grundsatzdiskussion über den Sinn der Wohnungslüftung überhaupt entfacht wurde. Dies erscheint vor dem Hintergrund von Hunderttausenden von Wohnungen mit Feuchteschäden infolge unzureichender Lüftung und Debatten über Schadstoffe in der Raumluft geradezu absurd. Interessanterweise ist die Wohnungslüftung aber trotz dieser Diskussion auch in Deutschland ein Wachstumsmarkt: Die praktischen Vorteile der Anlagen setzen sich offenbar auch gegen interessengeführte Polemik durch.

Entscheidende Erkenntnis zur Wohnungslüftung ergibt sich aus der Studie „Effizienz von Lüftungsanlagen in Niedrigenergie-Häusern in NRW“ [Michael 2001]. Aus den Felduntersuchungen ergibt sich zweifelsfrei, dass die Zuluftverteilung bei Einfachanlagen mit nur Abluftventilatoren und Unterdruckbetrieb sehr häufig nicht den Planungsvorgaben entsprechen. Gut geplante und realisierte Anlagen mit Zu- und Abluftführung führten dagegen zu zufriedenstellenden Ergebnissen: Dies gilt insbesondere für die Anlagen in der Passivhaussiedlung in Wuppertal.

Dass Lüftungsanlagen leise, effizient, hygienisch und mit geringem Stromverbrauch arbeiten, ist eine Frage der Qualität. Nur gute Anlagen führen zu einer Verbesserung der Raumluftqualität bei gleichzeitiger Energieeinsparung. Der dafür vom Passivhaus Institut gesetzte Qualitätsmaßstab setzt sich bei den Herstellern zunehmend durch [Pfluger 2002]. Wie schon bei den Fenstern wird mit der Eignung für das Passivhaus eine neue Qualitätsstufe erreicht, welche Wohnungslüftungsanlagen an sich gut ansteht. Dies führt zu spürbar besserer Akzeptanz der Systeme am Markt. Passivhaus geeignete Lüftungsanlagen haben gute Kenndaten nicht nur im Labor, sondern auch im praktischen Betrieb, wie die messtechnischen Felduntersuchungen insbesondere bei den CEPHEUS-Projekten zeigen [Pfluger 2001], [Peper 2001], [Schnieders 2001].

Bei der Luftführung kann man den Planern immer wieder zurufen:

- Mut zur Einfachheit!
- Das beste Rohr ist *kein Rohr*: Nutzung der Decken als halbseitigen Kanal.
- Nicht an den Querschnitten sparen, wohl aber an den Leitungslängen.

Insbesondere der Passivhausgeschosswohnungsbau in Kassel-Marbachshöhe setzt hier Maßstäbe [Pfluger 2001a].

Die Diskussion um Luft als Wärmeträger wurde in [Humm 2001] treffend zusammengestellt. Dort wird die Passivhausgrenze noch einmal unabhängig und aus anderem Blickwinkel abgeleitet. Im Passivhaus bietet sich die Zuluft der Wärmerückgewinnungsanlage als Wärmeträger an: Sie muss ohnehin in die Aufenthaltsräume gebracht werden und sie kann bei hygienisch ausreichender Frischluftmenge 10 W/m^2 (Wohnfläche) ohne weiteres transportieren;

das ist gerade die maximale Heizleistung, die ein Passivhaus bei Auslegungsbedingungen benötigen darf. Dass Frischluftheizungen im Passivhaus einwandfrei funktionieren, ist durch die Projektauswertungen in Hannover [Peper 2001], Kassel [Pfluger 2001], Wolfurt, Wegere/Luzern [Schnieders 2001] und Stuttgart [Werner 2001] bewiesen. Unterstrichen werden müssen drei Punkte:

- Nur in Passivhäusern, die auch diesen Namen verdienen, funktioniert die Frischluftheizung mit gutem Wohnkomfort. Der Qualitätsmaßstab ist publiziert und eine Qualitätssicherung wird von vielen seriösen Institutionen angeboten.
- Wer es schafft, Frischluftheizungen teurer zu erstellen als konventionelle Wärmeverteilungssysteme, sollte lieber konventionelle Systeme einbauen.
- Passivhäuser dürfen durchaus auch andere Wärmeabgabe- und Verteilsysteme verwenden als die Zuluft. Die Wahl des Systems ist keine ideologische, sondern eine technische und ökonomische Frage. Die zahlreichen Vorteile des Passivhausstandards bleiben bestehen, wenn andere Heizsysteme verwendet werden.

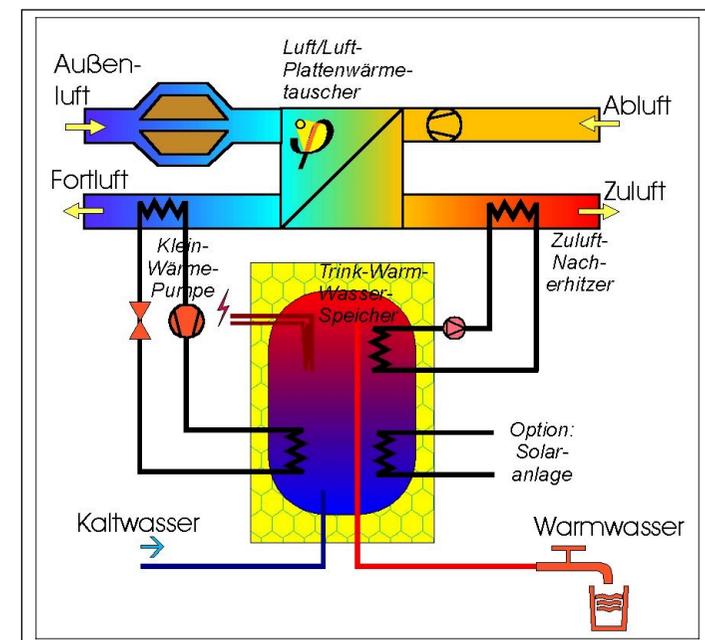


Abb. 9: Wärmepumpenkompaktaggregat für Passivhäuser: Die gesamte Haustechnik für Heizung, Warmwasser und Lüftung in einem Kompaktgerät von Gefrierschrankgröße vereint

Wie schon zuvor gezeigt, reicht in einem Passivhaus ein kleiner Nacherhitzer im Zuluftstrang aus, um das ganze Gebäude zu beheizen. Die Wärme für die Zuluftnachheizung kann z.B. aus

dem Warmwasserbereitungssystem kommen; die Verhältnisse werden umgedreht: Bisher hat man mit der Heizanlage die Warmwasserbereitung noch "nebenbei" miterledigt; künftig wird man im Passivhaus die geringfügige Restheizung einfach mit der Warmwasserbereitung "nebenbei" decken.

Eine Möglichkeit hierfür ist im Prinzipbild von Abb. 9 dargestellt: Eine Kleinstwärmepumpe (um 1000 W Verflüssigerleistung, ein Kompressor aus der Kühlgeräteserie) entnimmt Quellwärme aus der Fortluft des Luft/Luft-Wärmetauschers. Diese ist ohnehin gefasst, jedenfalls wärmer als die Außenluft und enthält die gesamte Latentwärme des im Haus freigesetzten Wasserdampfes. Wenn, wie es hierfür empfohlen wird, ein Erdreichwärmetauscher in der Frischluft vorgeschaltet ist, fällt die Fortlufttemperatur in der Regel nicht unter 10°C. Wenn die Fortluft nun auf 0 bis 2°C abgekühlt wird, lässt sich ein Wärmestrom von 500 bis 800 W am Verdampfer entnehmen. Ein äußerst einfaches Kompaktsystem kann somit die gesamte Lüftung, Heizung und Warmwasserbereitung in einem Passivhaus übernehmen.

Mit dem eben vorgestellten System ist es möglich, den gesamten Bedarf für Warmwasser und den Restbedarf der Raumheizung mit einem gesamten Stromeinsatz von 1000 bis 2000 kWh/a zu decken. Inzwischen befinden sich mehrere Hundert Wärmepumpenkompaktaggregate verschiedener Hersteller in Passivhäusern im Einsatz (Abb. 10).



Abb. 10: Beispiele für Wärmepumpenkompaktaggregate verschiedener Hersteller. Auf sehr kleiner Stellfläche wird die gesamte Technik vereint

Mit einem solchen Kompaktaggregate kann die gesamte Lüftung, Heizung und Warmwasserbereitung in *einem* Gerät von Größe und Aussehen eines Haushaltskühlschranks geleistet

werden - mit einem Gesamtstromverbrauch, der auch nicht höher ist als der einer alten Kühl/Gefrierkombination.

Es überrascht daher nicht, dass die Kosten für ein derartig einfaches System schon mittelfristig sehr gering sein können.

5. Planungsinstrumente

Durch den breit angelegten Praxistest mit CEPHEUS wurde nicht nur die Funktionstüchtigkeit des Passivhauskonzeptes überprüft, sondern auch die Tauglichkeit der bei der Planung eingesetzten Instrumente. Sehr gut bewährt haben sich

- das Planungsprinzip des „Wärmebrückenfreien Konstruierens“,
- die Planungshilfe „Luftdichte Projektierung von Passivhäusern“ [Peper 1999],
- die Empfehlungen für Passivhaus geeignete Fenster,
- die Planungsrichtlinien für die Luftführung in Passivhäusern [Pfluger 1999].

Durch die Messergebnisse liegt darüber hinaus eine quantitative Validierung des Planungswerkzeuges „Passivhaus Projektierungs Paket“ vor [Feist 2001]. Dies betrifft sowohl die Bestimmung des Jahresheizwärmebedarfs als auch das neue Verfahren zur Berechnung der maximalen Heizlast. In der Neufassung des PHPP ist außerdem die neue Normung aufgenommen und eine Berechnung des Sommerfalls ermöglicht worden [PHPP 2002].

6. Projektauswertung: Energiebilanzen, Objektkennwerte

Mit den Daten des CEPHEUS-Projektes liegen belastbare Daten für den Heizwärmeverbrauch aus einer statistisch repräsentativen Stichprobe von Passivhäusern vor. Im Ergebnis (vgl. [Schnieders 2001]) hat CEPHEUS bewiesen, dass

- Passivhäuser heute in unterschiedlichen Bauweisen und Gebäudetypen mit vertretbaren Kosten errichtet werden können [Krapmeier 2001],
- sich die Planungshilfen zum „Wärmebrückenfreien Konstruieren“, zur „Luftdichtheit“, zu „Passivhausfenstern“ und zur „Luftführung“ bewährt haben,
- die Passivhaustechnik einwandfrei funktioniert, insbesondere die alleinige Zulufheizung ausreicht,
- sowohl Eigentümer als auch Mieter in hohem Grade zufrieden mit der thermischen Behaglichkeit sind,
- extrem niedrige Verbrauchswerte sowohl bei der Heizwärme als auch bei allen anderen Energieanwendungen im Haushalt erreicht werden können.

Von wissenschaftlicher Seite führen insbesondere folgende Ergebnisse aus CEPHEUS weiter:

- Erstmals gibt es eine nach statistischen Gesichtspunkten ausreichend große Anzahl von Wohneinheiten in Passivhäusern, um die Frage nach den Ursachen und Auswirkungen der Verbrauchsunterschiede zwischen den Einzelwohnungen untersuchen zu können. Die gemessenen Verbrauchswerte können als normalverteilt angesehen werden (Abb. 11). Der Mittelwert der Verbrauchsstatistik ergibt sich zu $16,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und ist nur geringfügig höher als der auf Basis der Heizwärmebilanz nach EN 832 ermittelte Bedarf. Damit kann das Rechenverfahren nach EN 832 als im Feldversuch validiert gelten. Die Streuung der Heizwärmebedarfswerte ist mit $\pm 8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ erheblich geringer als bei Wohnungen mit schlechterem Baustandard. Durch CEPHEUS wurde damit der Beweis erbracht, dass die beobachtete Nutzerstreuung für die Funktion der Wohnungen und für das durchschnittliche Verbrauchsergebnis unbedeutend ist.
- Darüber hinaus liefert CEPHEUS auch eine Erklärung für die nutzungsbedingte Streuung der Heizwärmeverbrauchswerte. Beim Projekt Kassel-Marbachshöhe wurde mit Hilfe eines multizonalen Auswertemodells gezeigt, dass die Ursache hauptsächlich in den durch unterschiedliche Temperaturniveaunforderungen bedingten Querwärmeströmen zwischen den Wohnungen liegt (Abb. 12; [Pfluger 2001]). Dieses Ergebnis wird auch durch Untersuchungen des IWU gestützt (vgl. [Ebel 2002]). In keiner der untersuchten Siedlungen oder Mehrfamilienhäuser spielt der Mehrverbrauch durch Fensterlüftung eine bedeutende Rolle.

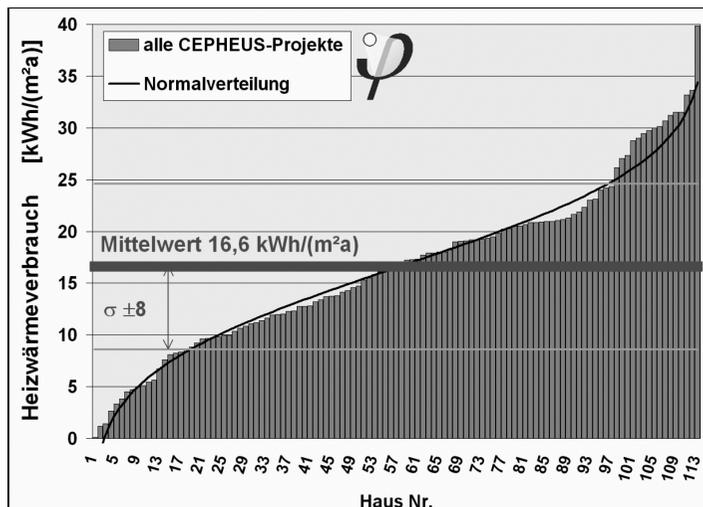


Abb. 11: Geordnete Verbrauchswerte der Messergebnisse für den Heizwärmeverbrauch bei 114 Wohnungen des CEPHEUS-Projektes; mit etwa $16 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ liegt der Durchschnitt bei einem Zehntel des mittleren Verbrauches deutscher Wohngebäude. Die Verteilung der Einzelwerte folgt nahezu einer Gauß- (Normal-) Verteilung

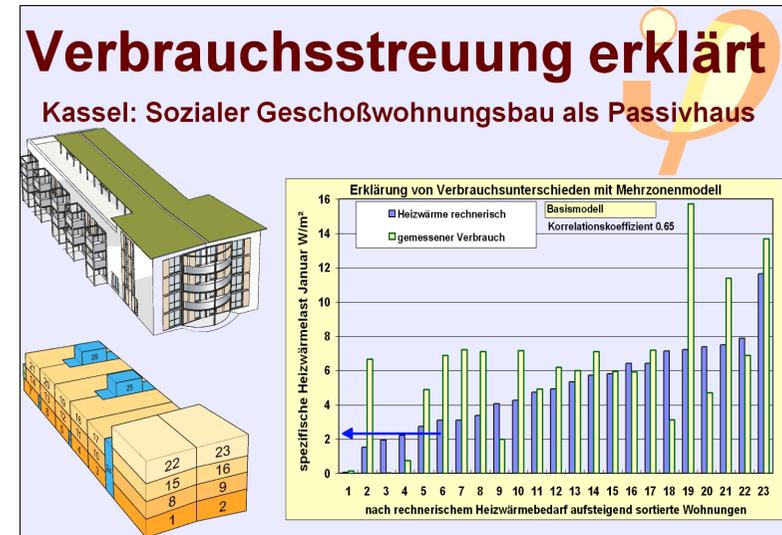


Abb. 12: Am Beispiel des Passivhausgeschosswohnungsbau Kassel (Projekt ASP und Hegger/Hegger/Schleif) konnte die beobachtete Verbrauchsstreuung zum größten Teil durch die Querwärmeströme zwischen Wohnungen mit unterschiedlicher Temperatur erklärt werden

- Das Einhalten der Heizlast-Leistungsbegrenzung in einer statistisch aussagekräftigen Gesamtheit von Gebäuden ist ein weiteres wichtiges Ergebnis (Abb. 13). Damit liegt nun auch eine Validierung des PHPP-Heizlastverfahrens vor.
- Komfortmessungen in den CEPHEUS-Passivhäusern in Kassel und Luzern zeigen die Übereinstimmung der Raumluftströmung mit der CFD-Simulation [Schnieders 2001]. Alle Behaglichkeitsbedingungen werden eingehalten.
- Die detaillierte Analyse bei einigen der Projekte zeigt, dass die Passivhausheizung über die Frischluft auch in der Praxis zur vollsten Zufriedenheit der Bewohner funktioniert [Kaufmann 2001].

7. Projektauswertung: Nutzerzufriedenheit

Drei neue sozialwissenschaftliche Begleitstudien zum Nutzerverhalten und zur Nutzerakzeptanz wurden in diesem Jahr verfügbar: Die des Instituts Wohnen und Umwelt zur Passivhaus-siedlung Wiesbaden [Ebel 2002], die des Instituts für Umweltkommunikation Lüneburg zur Passivhaus-siedlung in Hannover und die Ergebnisse der Nutzerbefragung der Universität Kassel beim CEPHEUS-Projekt Kassel-Marbachshöhe [Hübner 2002]. Alle drei Studien liefern klare Ergebnisse: In den Passivhäusern gibt es nachhaltig eine hohe Zufriedenheit der Nutzer.

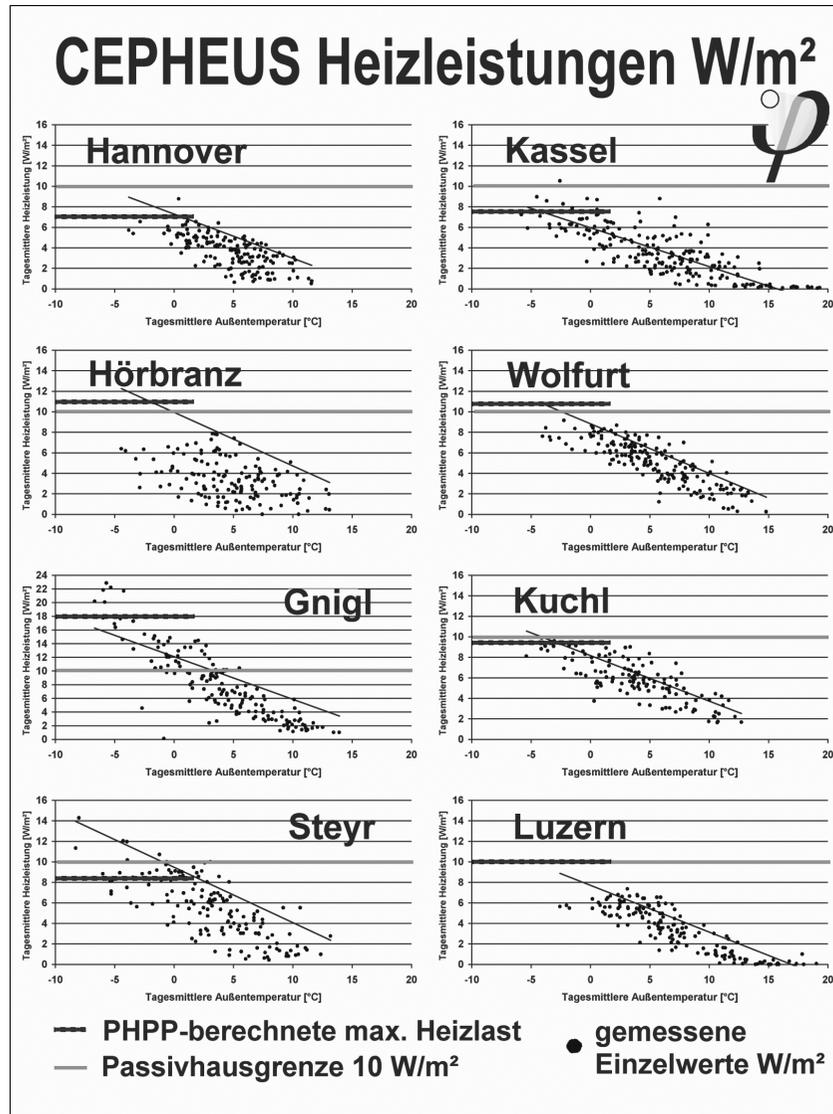


Abb. 13: Die gemessenen täglichen Heizlastwerte (Punkte) geben Auskunft über die Funktion des jeweiligen Bauprojektes als Passivhaus. Die „Passivhausgrenze“ von $10 W/m^2$ ist als horizontale Linie eingezeichnet; nur im Bauprojekt Salzburg-Gnigl wird diese Grenze überschritten. Die gewellten Linien geben die berechneten Heizlasten nach PHPP an [PHPP 2002]. Horizontale Achse: Tagesmittlere Außentemperatur in $^{\circ}C$; vertikale Achse: Tagesmittlere Heizleistung in W/m^2

8. Literatur

- [Binz 2002] **Binz, Armin:** Hightech-Materialien vor dem Durchbruch. 6. Europäische Passivhaus-Tagung, Basel, 2002
- [Ebel 2002] **Ebel, Witta; Grosklos, Marc; Loga, Tobias:** Bewohnerverhalten in Passivhäusern. 6. Europäische Passivhaus-Tagung, Basel, 2002
- [Feist 1998] **Feist, Wolfgang:** Fensterrahmen und Randverbund – die bisher schwächsten Glieder; Tagungsband der 2. Passivhaus Tagung, S. 141ff, Darmstadt 1998
- [Feist 1998a] **Feist, Wolfgang:** Fenster: Schlüsselfunktion für das Passivhaus-Konzept. In: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 14, Passivhaus-Fenster, Darmstadt, Passivhaus Institut, Dezember 1998
- [Feist 2001] **Feist, Wolfgang:** Stellungnahme zur Vornorm DIN V 4108 Teil 6:2001 aus Sicht der Passivhausentwicklung; CEPHEUS Projektinformation Nr. 39, Passivhaus Institut, Darmstadt 2001
- [Humm 2001] **Humm, O.:** Wenn Luftheizung, dann richtig! Gebäudetechnik 6; Jan. 2001, S. 28-34
- [Hübner 2002] **Hübner, Hartmut und Hermelink, Andreas:** Gestaltung von Passivhäusern für Mieter; 6. Europäische Passivhaus-Tagung, Basel, 2002
- [Kaufmann 2001] **Kaufmann, B., Feist, W.:** Vergleich von Messung und Simulation am Beispiel eines Passivhauses in Hannover-Kronsberg. Fachinformation PHI-2001/8, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 21, Passivhaus Institut, Darmstadt 2001
- [Krapmeier 2001] **Krapmeier, Helmut; Drössler, Eckart; u.a.:** CEPHEUS – Wohnkomfort ohne Heizung. Wien, New York 2001
- [Michael 2001] **Michael, K., Eichhorn, S. u.a.:** Effizienz von Lüftungsanlagen in Niedrigenergie-Häusern in NRW. 1. Auflage, Niedrig-Energie-Institut, Detmold 2001
- [Peper 1999] **Peper, S.:** Luftdichte Projektierung von Passivhäusern. Fachinformation PHI-1999/6, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 7, Passivhaus Institut, Darmstadt 1999

- [Peper 2001] **Peper, S., Feist, W., Kah, O.:** Messtechnische Untersuchung und Auswertung; Klimaneutrale Passivhaussiedlung in Hannover-Kronsberg. Fachinformation PHI-2001/6, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 19, Passivhaus Institut, Darmstadt 2001
- [Pfluger 1999] **Pfluger, R., Feist, W., Schnieders, J.:** Luftführung in Passivhäusern. CEPHEUS-Projektinformation Nr. 8, Passivhaus Institut, Darmstadt 1999
- [Pfluger 2001] **Pfluger, R., Feist, W.:** Messtechnische Untersuchung und Auswertung; Kostengünstiger Passivhaus-Geschosswohnungsbau in Kassel Marbachshöhe. CEPHEUS-Projektinformation Nr. 15, Passivhaus Institut, Darmstadt 2001
- [Pfluger 2001a] **Pfluger, R., Feist, W.:** Kostengünstiger Passivhaus-Geschosswohnungsbau in Kassel Marbachshöhe. CEPHEUS-Projektinformation Nr.16, Passivhaus Institut, Darmstadt 2001
- [Pfluger 2002] **Pfluger, R.:** Prüfung und Qualitätssicherung für Passivhaus-Lüftungsanlagen. 6. Europäische Passivhaus-Tagung, Basel, 2002
- [PHPP 2002] **Feist, Wolfgang; Baffia, Enikö; Schnieders, Jürgen; Pfluger, Rainer; Kah Oliver:** Passivhaus Projektierungs Paket 2002, Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser. 4. Auflage, Fachinformation PHI-2002/1, Darmstadt, Passivhaus Institut, Januar 2002
- [Preikschat 2001] **Preikschat, P.:** Fabrik als Passivhaus – Nutzungserfahrungen eines chemieverarbeitenden Unternehmens; Tagungsband Passivhaus Hessen 2001, Wetzlar 2001
- [Schnieders 1998] **Schnieders, Jürgen:** Der Einfluss von Randverbund und Glaseinstand. In: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr.14, Passivhaus-Fenster, Darmstadt, Passivhaus Institut, Dezember 1998
- [Schnieders 2001] **Schnieders, J.; Feist, W.; Pfluger, R.; Kah, O. :** CEPHEUS - Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung, Endbericht; Fachinformation PHI-2001/9, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 22, Passivhaus Institut, Darmstadt 2001
- [Schwarz 2002] **Schwarz, Dietrich:** Gewinn-Speicher-Wand. 6. Europäische Passivhaus-Tagung, Basel, 2002

- [Voss 2001] **Voss, K.:** Schlanke Gebäude: Hohe Arbeitsplatzqualität bei geringem Energieverbrauch; EnergieEffizientes Bauen, 3/2001, S. 12-17
- [Werner 2001] **Werner, Johannes:** Passivhaussiedlung Stuttgart Schelmenäcker; kommunaler Klimaschutzkongress 2001

