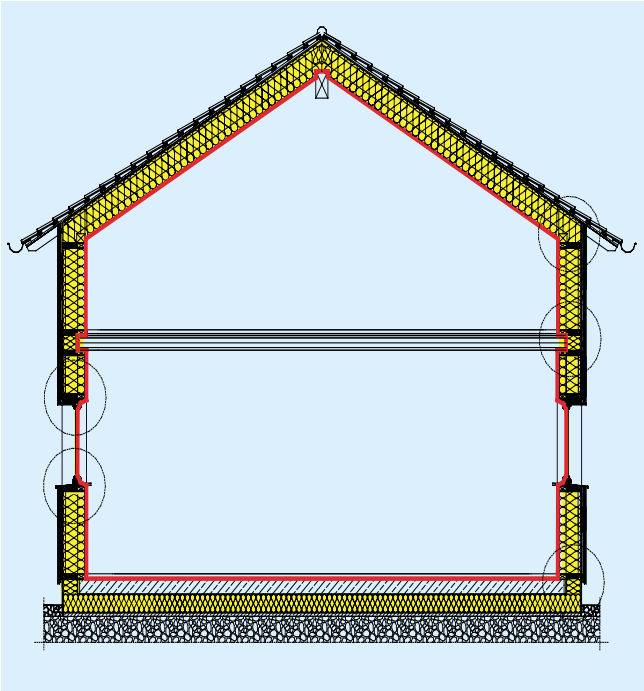
INFORMATIONSDIENST **HOLZ**

Das Passivhaus – Energie-Effizientes-Bauen



holzbau handbuch Reihe 1 Teil 3 Folge 10

Inhalt

1 Was ist ein Passivhaus? 4

2 Passivhaus: Konzept und funktionaler Ansatz 5

2.1 Energiebilanz, Heizwärmekennwert 5

2.2 Hoher Dämmstandard 6

2.3 Wärmebrückenfreies Konstruieren 8

2.4 Warmfenster 14

2.5 Rundum luftdichte Konstruktion. .17

3 Haustechnik 19

3.1 Kontrollierte Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung 19

3.2 Extrem geringe Heizlast 21

3.3 Sonstige Haustechnik 21

3.4 Integriertes Planungsteam 22

4 Passivhaus im Sommer 22

5 Kosten 23

6 Hinweise zur Ausschreibung . .23

7 Literatur 24

8 Gebaute Passivhäuser 26

Abbildung 1 Zeichnung auf Titelseite links oben:
1. Planungsgrundsatz: Wärmebrückenfreies Konstruieren mit der 'Regel vom breiten Stift'. Die breite Wärmedämmebene ist gelb hinterlegt.
2. Planungsgrundsatz: eine geschlossene luftdichte Ebene führt rund um das Gebäude. Die dünne, rot hinterlegte Linie muss in den Plänen mit einem Stift umfahren werden können, ohne abzusetzen. Erläuterungen siehe im Text.

Abbildung 2 Fotos auf Titelseite [28]
Rechts oben: Haus in Bretten, Architekturbüro Oehler + arch kom, Bretten
Links unten: Haus in Erding, Gernot Vallentin, Dorfen
Rechts unten: Doppelhaus, Erber Architekten, Lindau

Impressum

Das holzbau handbuch ist eine gemeinsame Schriftenreihe von
- Arbeitsgemeinschaft Holz e.V., Düsseldorf
- Entwicklungsgemeinschaft Holzbau (EGH) in der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung e.V., München

Herausgeber:
DGfH Innovations- und Service GmbH
Postfach 31 01 31, D-80102 München
mail@dgfh.de
www.dgfh.de
(089) 51 61 70-0
(089) 53 16 57 fax

und

HOLZABSATZFONDS
Absatzförderungsfonds der deutschen Forst- und Holzwirtschaft, Bonn

Autoren:
Dr. Berthold Kaufmann
Dr. Wolfgang Feist
Dipl.-Ing. Markus John
cand.-Ing. Matthias Nagel
Passivhaus Institut, Rheinstraße 44/46, D-64283 Darmstadt,
email: passivhaus@t-online.de,
internet: www.passiv.de,

Beratend haben mitgewirkt:
Dipl.-Ing. Gerhard Wagner, Dipl.-Ing. Helmut Zeitter, Ingenieurbüro Wagner Zeitter, Wiesbaden
Dipl.-Ing. Gerrit Horn, Ingenieurbüro bau.werk, Kaiserslautern
Robert Borsch-Laaks, Sachverständiger für Bauphysik, Aachen
Prof. Dr. Stefan Winter, Dipl.-Ing. Daniel Kehl, Universität Leipzig

Mitglieder der begleitenden Arbeitsgruppe:
Dipl.-Ing. (FH) Wilhelm Bauer, ZimmerMeisterHaus, Schwäbisch Hall
Wolfgang Hallinger, Landesinnungsverband des Bayerischen Zimmererhandwerks, München
Dipl.-Ing. Peter Jonak, BIEN ZENKER, Michelstadt
Dr. F.-J. Kasper, Saint-Gobain ISOVER+HAG, Ladenburg
Dipl.-Ing. Christoph Kempkes, Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH, Baunatal
Dipl.-Ing. Georg Lange, Bundesverband Deutscher Fertigbau e.V., Bad Honnef
Wilfried Schneider, Holzabsatzfonds, Bonn
Dipl.-Ing. Tobias Wiegand, Arge Holz e.V., Düsseldorf

Technische Anfragen an:
Arbeitsgemeinschaft Holz e.V.
Postfach 30 01 41
D-40401 Düsseldorf
argeholz@argeholz.de
www.argeholz.de
(0211) 478180
(0211) 452314 fax

Die technischen Informationen dieser Schrift wurden nach bestem Wissen zum Zeitpunkt der Drucklegung zusammengestellt. Eine Haftung für den Inhalt kann trotz sorgfältiger Bearbeitung und Korrektur nicht übernommen werden. Werden spezielle Eigenschaften von Werkstoffen beschrieben (z.B. Spezial-Klebebänder für dauerhaft luftdichte Verklebungen) so sind die Verarbeitungshinweise der Hersteller zu beachten.

Erschienen: Oktober 2002
ISSN-Nr. 0466-2114

holzbau handbuch
Reihe 1: Entwurf und Konstruktion
Teil 3: Wohn- und Verwaltungsbauten
Folge 10: Passivhaus – Energie-Effizientes-Bauen

1 Was ist ein Passivhaus?

Lassen sich die Ziele hohe Behaglichkeit, gute Raumluftqualität, wirtschaftlicher Betrieb und vertretbare Investitionskosten bei einem Neubau gemeinsam erreichen? Lange Zeit schien es, als ob Ökonomie und Ökologie widerstreitende Ziele wären, zwischen denen zumindest ein Kompromiss geschlossen werden muss. Durch die zahlreichen realisierten Beispiele von Passivhäusern wissen wir heute:

Ökologie und Ökonomie lassen sich gleichermaßen zufriedenstellend berücksichtigen.

Der Schlüssel hierzu ist eine ganz erheblich verbesserte Energieeffizienz. Verbesserte Energieeffizienz heißt bei Wohngebäuden in Mitteleuropa vor allem sehr guter Wärmeschutz, Luftdichtheit, hocheffiziente Lüftung, Haustechnik mit niedrigen Aufwandszahlen und stromsparende Geräte. Die effiziente Technik verringert nicht nur den Energieverbrauch, sondern erhöht auch die thermische Behaglichkeit und verbessert den Schutz der Bausubstanz. Dadurch steigt der Wert des Gebäudes im allgemeinen mehr, als für die Verbesserungen an Mehrinvestionen aufgewendet werden muss. Wenn hohe Qualität zu vertretbaren Kosten zu bekommen ist, hat sich die einmalige Investition schnell gelohnt.

Gestiegener Wert, verringerte Instandhaltungsaufwendungen, längere Nutzungsdauer, gesündere und behaglichere Wohnverhältnisse – das ist zusätzlicher Nutzen, der eine verbesserte Effizienz schon allein rechtfertigt. Dazu kommen aber auch ganz erhebliche Kosteneinsparungen beim Heizenergieverbrauch: Passivhäuser sparen nicht nur einige Prozent gegenüber den gesetzlichen Mindeststandards; messtechnisch begleitetet Projekte zeigen vielmehr, dass gegenüber der Energieeinsparverordnung etwa um einen Faktor 4 weniger Heizenergie verbraucht wird.

Die Versöhnung von Ökologie und Ökonomie bei der Anwendung von Effizienztechniken ist kein Zufall, sie ist den eingesetzten Techniken immanent:

Verbesserte Wärmedämmung bedeutet nicht nur reduzierte Wärmeverluste, sondern auch im Winter höhere und im Sommer niedrigere Innenoberflächentemperaturen. Dadurch steigt die Behaglichkeit (Strahlungsklima) und sinkt die Anfälligkeit für Tauwasser an Innenoberflächen. Bessere Wärmedämmung beruht auf dem vermehrten Einsatz von Dämmstoffen ('verpackter Luft'); dies sind sehr leichte Baustoffe – von Natur aus kostengünstig und wenig materialintensiv. Gerade der Holzbau hat hier gute Chancen, hochwertig gedämmte Konstruktionen kostengünstig und vergleichsweise schlank zu realisieren.

Die **Vermeidung von Wärmebrücken** stellt nach den Erfahrungen im Passivhausbau eine der wirtschaftlichsten Effizienzmaßnahmen dar. Auch hier sind der erreichte Schutz der Bausubstanz und die verbesserte Behaglichkeit offensichtlich. Bei wohnraumüblichen Temperaturen und Feuchtigkeiten gibt es in einem wärmebrückenfrei konstruierten Passivhaus kein Tauwasser an Innenoberflächen mehr. Für den Holzbau gibt es eine ganze Reihe von erprobten Lösungen, die grundlegenden Prinzipien werden in diesem Heft dargestellt.

Auch die **Luftdichtheit** reduziert die Anfälligkeit für Bauschäden, insbesondere beim Holzbau. Durch die bereits vor einem Jahrzehnt realisierten Passivhäuser ist inzwischen im Langzeittest nachgewiesen, dass sorgfältig geplante und ausgeführte Gebäudehüllen dauerhaft luftdicht bleiben. Nachdem Luftdichtheit anfangs als „Problem“ für den Holzbau angesehen worden war, zeigen heute herausragende Beispiele, dass n_{50}-Werte um 0,3 $^1/_h$ reproduzierbar erreicht werden können.

Beim **Bauteil Fenster** wurden in den letzten Jahren entscheidende Qualitätsverbesserungen erreicht. Hochwertige Fenster sind für das Passivhaus eine wichtige Voraussetzung. Um einen Gesamt-U_w-Wert dieser sogenannten 'Warmfenster' von weniger als 0,85 W/(m²K) zu erreichen, kommt es nun vor allem auf einen sachgerechten Einbau an: Auch dies stellt für den Holzbau kein Problem dar, erfordert aber eine stringente Planung. Gerade das hochwärmedämmende Fenster trägt entscheidend zur besseren Behaglichkeit bei, weil es gelingt, die mittleren Oberflächentemperaturen über 17 °C zu halten. Dadurch wird die Art der Wärmezufuhr im Raum zweitrangig: Es kommt nicht mehr darauf an, wo und wie im Raum die noch erforderliche geringe Heizwärme zugeführt wird. Selbst der Zeitpunkt der Wärmezufuhr ist im Passivhaus unkritisch: auch mehrere Stunden Heizungsunterbrechung werden praktisch nicht bemerkt.

Die **Lufterneuerung** für die Bewohner darf über allen Maßnahmen zum Wärmeschutz und zur Luftdichtheit nicht vernachlässigt werden. Zuverlässig, in genau der richtigen Menge, am gewünschten Ort, pollenfrei und komfortabel ist die Frischluftzufuhr durch eine geregelte Wohnungslüftung möglich. Auch hier stehen Lufthygiene und Behaglichkeit im Vordergrund. Durch die inzwischen am Markt verfügbaren hocheffizienten Geräte zur Wärmerückgewinnung kann diese Aufgabe mit einer entscheidenden Verbesserung der Effizienz verbunden werden.

In allen aufgeführten Punkten steht das Passivhaus für die Spitze der Entwicklung. Doch erst durch das Zusammenspiel von sehr guter Wärmedämmung, Luftdichtheit, Warmfenstern und einer Komfortlüftung mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung wird es möglich, Häuser im mitteleuropäischen Klima so zu bauen, dass der verbleibende Heizenergieverbrauch verschwindend gering ist und die Heizung eine funktionale Verbindung mit der Lüftung eingehen kann – mit Synergieeffekten für beide Bereiche, aber vor allem mit einer erheblichen Steigerung der Behaglichkeit und der Bauqualität.

Passivhäuser sind inzwischen als freistehende Einfamilienhäuser, Reihenhäuser, Geschosswohnungsbauten, Wohnheime, Bürogebäude, Schulen, Kindergärten und Produktionsgebäude realisiert worden. Eine Begrenzung seitens der Nutzungsmöglichkeiten ist bisher nicht in Sicht: Ganz im Gegenteil, die Vielfalt der Ansätze hat sich mit der Zeit immer mehr verstärkt. Für den Holzbau ist das Passivhaus inzwischen ein vielfach umgesetzter Baustandard. Die Detaillösungen, die bei der Umsetzung von Passivhäusern gefunden wurden, eignen sich im übrigen hervorragend für gut gedämmte und luftdichte Konstruktionen allgemein. Auch wer nicht plant, in unmittelbarer Zukunft Passivhäuser zu bauen, kann von dem hier dokumentierten Erfahrungsschatz profitieren.

Begriffe Symbole, Formelzeichen etc.

PHPP Passivhaus Projektierungs Paket, Heizenergiebilanz nach EN 832, mit Randbedingungen, die speziell auf das Passivhaus zugeschnitten sind.

U [W/(m²K)] Wärmedurchgangskoeffizient eines flächigen Bauteils, berücksichtigt auch regelmäßig vorkommende Wärmebrückenbeiträge, z.B. bei Fenstern oder Holzständerbauweise. Alte Bezeichnung: k-Wert. $\Sigma U \cdot A \cdot \Delta\vartheta = \dot{Q}$ Regelwärmestrom durch Bauteil mit Fläche A. Man benutze Außenmaße für alle Hüllflächen, vgl. Abschnitt 2.3.

λ [W/(mK)] Wärmeleitfähigkeit eines Materials

U_w Fenster-U-Wert nach DIN EN 10077 (Window)

U_D U-Wert einer Tür (Door)

U_g U-Wert im Zentrum einer Verglasung, Wärmebrückeneffekte am Glasrand werden darin nicht berücksichtigt

U_f U-Wert eines Fensterrahmens (engl. frame) berechnet nach [29]

Ψ_a [W/mK] linearer Wärmebrückenverlustkoeffizient, auf Außenmaße der Bauteile bezogen. Generell alle Ψ-Werte in diesem Heft sind außenmaßbezogen, siehe Abschnitt 2.3.

Ψ_i [W/mK] innenmaßbezogener linearer Wärmebrückenverlustkoeffizient, in dieser Schrift nicht verwendet.

Ψ_g [W/mK] linearer Wärmebrückenverlustkoeffizient am Glasrand eines Fensters

Ψ_E [W/mK] linearer Wärmebrückenverlustkoeffizient, der beim Einbau eines Fensters in die Wand entsteht

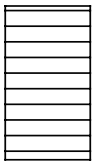
χ [W/K] punktueller Wärmebrückenverlustkoeffizient z.B. einer Durchdringung aus Metall

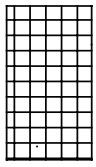
g [%] Gesamtenergiedurchlassgrad durch transparente Bauteile, auch g-Wert genannt

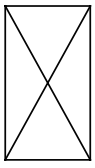
Drucktest mit der 'Blower-Door' (engl. für Gebläsetür), damit wird die luftdichte Hülle eines Gebäudes geprüft

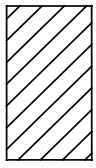
n_{50}-Wert [$^1/_h$] Luftvolumenstrom bei einer Druckdifferenz von 50 Pa beim Drucktest, bezogen auf das Nettovolumen des Gebäudes, gibt ein Maß für die Luftdichtheit eines Gebäudes.

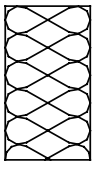
Legende für Schraffuren

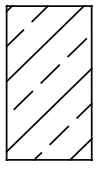

Holz mit Faserrichtung

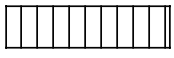

druckfester, hochdämmender Massivbaustoff, z.B. Porenbeton

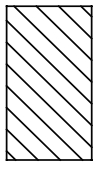

Hirnholz

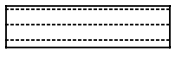

Estrich

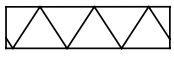

Dämmstoff

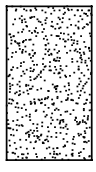

Normalbeton, bewehrt

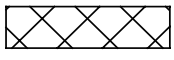

Holzwerkstoff-Platte

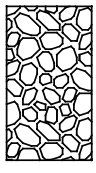

Normalbeton, unbewehrt

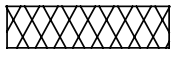

Gipswerkstoff-Platte


Diffusionsoffene HW-Platte


Putzschicht

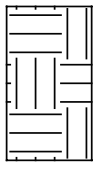

Putzträgerplatte


Kies/Schotter


Trittschall-dämmung

Luftdichte Ebene, keine Folie

Abklebung


Erdreich

Folie

Die luftdichte Ebene kann in vielen Fällen mit flächigen Bauteilen wie z.B. Holzwerkstoff-Platten oder Betondecken realisiert werden. In diesen Fällen ist keine separate Folie notwendig. In den Zeichnungen werden diese Bauteile durch die dargestellte hellrote strichpunktierte Linie markiert. Abklebungen von Plattenstößen etc. sind nochmals mit einer separaten dunkelroten gestrichelten Linie dargestellt. Sonstige Folien sind mit einer schwarz gestrichelten Linie markiert.

2 Passivhaus: Konzept und funktionaler Ansatz

Auch im Passivhaus muss ein Restwärmebedarf gedeckt werden – es ist kein Nullheizenergiehaus. Es reicht aber aus, die Wärme durch eine Nacherwärmung der Zuluft, die ohnehin verteilt werden muss, zuzuführen. So kann die Lüftung gleichzeitig auch für die Heizwärmeverteilung genutzt werden.

Das Passivhauskonzept ist auf die Minimierung der Wärmeverluste und auf die möglichst effektive Nutzung von solaren Wärmegewinnen angelegt. Unabhängig von einem konkreten Entwurf stehen deshalb die beiden Anforderungen an die Orientierung der Hauptfassade relativ zur Sonne und die Kompaktheit des Gebäudes an herausragender Stelle. Die Hauptfassade sollte möglichst nach Süden (± 25°) orientiert und möglichst wenig verschattet sein, weil nur so die solaren Wärmegewinne im Winter einen nennenswerten Beitrag zur Energiebilanz des Gebäudes beitragen können.
Die Kompaktheit des Gebäudes wird durch das Verhältnis der einhüllenden Gebäudeoberfläche A [m²] zu dem umbauten Volumen V [m³] definiert. Ein kompaktes Gebäude hat ein möglichst kleines A/V-Verhältnis und mithin eine möglichst kleine Oberfläche, über die Wärme an die Umgebung abgegeben wird. Ein kompaktes Gebäude ist damit auch kostengünstig zu realisieren, denn die bauliche Hülle macht einen großen Anteil an den Kosten eines Gebäudes aus. Reihenhäuser und Geschosswohnungen haben hier einen geometrischen Vorteil gegenüber frei stehenden Einfamilienhäusern.

Selbstverständlich sind diese beiden Anforderungen nicht immer streng zu erfüllen, weil Vorgaben des Geländes und des Bebauungsplanes dem entgegenstehen können, aber auch unter ungünstigen Bedingungen ist es durchaus möglich, Passivhäuser zu realisieren, wie eine große Zahl von gebauten Objekten beweist. Kompaktheit und Solarzugang entscheiden jedoch nicht unerheblich über die Kosten des entstehenden Passivhauses. Zur eingehenden Diskussion dieser Aspekte sei auf die Literatur verwiesen [1].

2.1 Energiebilanz, Heizwärmekennwert

Das wichtigste Hilfsmittel bei der Planung eines Passivhauses ist die Erstellung der Wärmebilanz des Gebäudes, sie soll im folgenden erläutert werden. Mit dem Passivhaus Projektierungspaket (PHPP [2], basierend auf EN 832 [3]) einem gut eingeführten Berechnungsverfahren für Passivhäuser, steht dem Planer ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem die Energiebilanz und mithin die Funktionstüchtigkeit des entstehenden Passivhauses vom ersten bis zum letzten Planungsschritt verfolgt werden kann. Hier fließen alle energetisch relevanten Information über das entstehende Gebäude zusammen.

Zur Berechnung der Wärmebilanz werden die Außenoberflächen der Gebäudehülle auf der Basis der Bauteilaußenmaße ermittelt. Zu jedem Bauteil wird der U-Wert berechnet. Bei Fenstern wird der U-Wert des Rahmens (U_f) und der Verglasung (U_g), der Wärmebrückenverlustkoeffizient am Glasrand (Ψ_g) und der Einbau-Ψ-Wert benötigt, um die Wärmeverluste des Fensters bzw. dessen U-Wert zu berechnen (U_w). Zur Bestimmung der solaren Gewinne, die durch die verglasten Flächen ins Gebäude eintreten, wird der g-Wert der Verglasung benötigt und die Himmelsrichtung, in welche die Öffnung zeigt.

In Abbildung 3 werden die wesentlichen Ergebnisse der Energiebilanz eines typischen Passivhauses beispielhaft dargestellt. Links ist das Gleichgewicht zwischen Transmissionswärmeverlusten und Lüftungswärmeverlusten sowie den passiv solaren Wärmegewinnen durch die Fenster, den internen Wärmequellen und der Heizwärme aufgetragen. Die sogenannte 'freie Wärme' (Q_F), ist die Summe aus den solaren Gewinnen (Q_S) und den inneren Wärmequellen (Q_I). Um daraus die tatsächlich für die Energiebilanz zur Verfügung stehenden Wärmegewinne (Q_G) zu erhalten, wird gemäß EN 832 ein Ausnutzungsgrad für die freie Wärme berechnet. Die verbleibende Differenz zwischen den nutzbaren Gewinnen und den Verlusten stellt den restlichen Heizwärmebedarf des Passivhauses dar ($Q_H = Q_V - Q_G$), der dem Gebäude von einem klein dimensionierten Wärmeerzeuger zugeführt werden muss.

Die inneren Wärmequellen Q_I rühren von den Aktivitäten der Bewohner her. Sie stellen die Wärmeabgabe von Personen und die Abwärme durch den Betrieb von elektrischen Geräten dar. Für Wohnhäuser wird hier bewusst ein Wert von nur 2,1 W/m² angenommen. Die EnEV 2002 bzw. die zugrunde liegende Norm DIN 4108 setzt hier 5 W/m² an. Das ist in der Regel zu hoch und kann bei Passivhäusern zu Auslegungsfehlern führen [6, 7, 8, 9].
Im oben genannten Gebäude ergäbe sich unter einer Annahme von 5 W/m² ein dop-

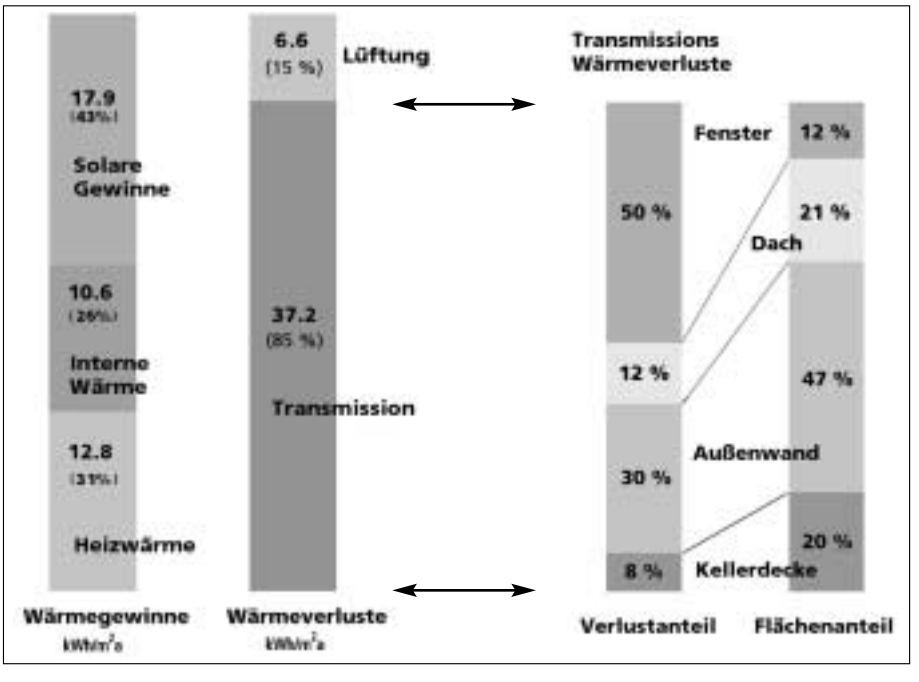


Abbildung 3 Jahres-Heizwärmebilanz nach EN 832 [2, 3] eines beispielhaften Passivhauses. Die wichtigsten Verlustbeiträge, Transmissionwärmeverluste und Lüftungswärmeverluste, stehen im Gleichgewicht mit den solaren Gewinnen, den internen Wärmequellen und dem restlichen aufzubringenden Heizwärmebedarf. Auf der rechten Seite sind die Transmissionswärmeverluste durch die einzelnen Bauteile (Summe = 100 %) im Vergleich zu deren typischen Flächenanteilen an der gesamten Hüllfläche einzeln dargestellt.

pelt so hoher Anteil für Q_I und der Heizwärmebedarf errechnete sich dann zu lediglich 5 kWh/(m²a). Die gemessenen Heizwärmeverbräuche im realisierten Beispielgebäude (12,8 kWh/(m²a), Abbildung 3) liegen deutlich höher.
Rechts in Abbildung 3 sind die Transmissionswärmeverluste getrennt nach Bauteilen aufgegliedert. Wärmebrückeneffekte werden in der Bilanz oft separat berechnet, sie sind in dieser Abbildung den jeweiligen Bauteilen zugeschlagen.

Im Umgang mit der Energiebilanz wird sehr schnell klar, dass Obergrenzen für die verschiedenen wärmetechnischen Kenngrößen der Bauteile eingehalten werden müssen, damit der für das Passivhaus resultierende Heizwärmebedarf (Q_H) kleiner wird als 15 kWh/(m²a). Für die Funktion des Passivhauses ist außerdem das sogenannte Heizlastkriterium bestimmend, siehe Abschnitt 3.2.

Planungsgrundlagen für Passivhäuser

Die Energiebilanz begründet das Konzept und die wichtigsten Planungsgrundsätze für Passivhäuser:

> **Wärmeverluste verringern – passiv solare Gewinne optimieren.**

Im mitteleuropäischen, gemäßigt-atlantischen Klima ist die wichtigste Maßnahme die Verringerung der Wärmeverluste des Gebäudes. Das liegt daran, dass hier im Winter längere Zeiten mit zwar moderaten Außentemperaturen, aber wolkenverhangenem Himmel vorkommen, in denen die solaren Gewinne gering sind.

Das Verringern der Wärmeverluste führt im übrigen auch dazu, dass die solaren Gewinne und die internen Wärmequellen zu einem weit bedeutenderen Teil zur Temperierung des Gebäudeinneren herangezogen werden können, als bislang üblich. Ein Hinweis auf ein schlecht gedämmtes Gebäude im Bestand kann dies verdeutlichen: An einem sonnigen Winternachmittag wird es in den besonnten Räumen zwar eine Weile wohlig warm, aber spätestens nach Einbruch der Dunkelheit ist die Wärme mangels Dämmung wieder weg und es muss geheizt werden. Anders im Passivhaus: **Die Wärmedämmung unterstützt hier die Wärmespeicherung.** Sollte die Heizung im Passivhaus einmal ausfallen, so würde die Raumtemperatur nur etwa ein Kelvin pro Tag abfallen.

Aus den Heizwärmebilanzen zahlreicher gebauter Passivhäuser ergeben sich folgende Erfahrungswerte: Die U-Werte für opake Bauteile sollten normalerweise kleiner als 0,15 W/(m²K) sein, anzustreben sind U-Werte von etwa 0,1 W/(m²K). Konstruktive Wärmebrücken müssen soweit wie möglich vermieden werden. Für Fenster und Türen im Passivhaus sollte im Regelfall U_W bzw. $U_D \leq 0{,}8$ W/(m²K) sein.
Fensterlüftung verursacht sehr hohe Lüftungswärmeverluste, wenn der hygienisch notwendige Luftwechsel in einer Wohnung gewährleistet werden soll. Im Passivhaus wird deshalb eine kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung eingesetzt, welche die Lüftungswärmeverluste sehr stark reduziert. Im Passivhaus ist Fensterlüftung während der Heizperiode nicht mehr notwendig, denn die kontrollierte Lüftung sorgt kontinuierlich für frische, angenehme Luft. Trotzdem hat jeder Raum Fenster zum Öffnen, was besonders im Sommer wichtig ist.
Eine konsequent luftdichte Hülle des Gebäudes ist eine weitere wesentliche Anforderung, auf der das Passivhaus-Konzept beruht. Die Lüftungswärmeverluste werden von der Luftströmung durch Fugen maßgeblich bestimmt. Der Grenzwert für die Luftdichtheit liegt für das Passivhaus deshalb bei $n_{50} \leq 0{,}6\ ^1/_h$. Die Erfahrung zeigt, dass nur so die Lüftungswärmeverluste klein genug gehalten werden können.

2.2 Hoher Dämmstandard

Ein erhöhter Dämmstandard bei den Bauteilen der Hüllfläche verringert nicht nur den Heizwärmeverbrauch eines Hauses. Für den Bewohner viel wichtiger sind die spürbar höheren Oberflächentemperaturen aller Umschließungsflächen eines Raumes. Es entsteht ein angenehm gleichmäßiges Raumklima ohne kalte Ecken. 'Kalte Füße' gehören im Passivhaus der Vergangenheit an.

In Bestandsgebäuden mit schlechter Wärmedämmung sind die Außenwände im Winter wesentlich kälter als die Innenwände. Dies führt zu dem Effekt der 'Strahlungstemperatur-Asymmetrie', die dann als besonders unangenehm empfunden wird, wenn die Temperaturunterschiede stark ausgeprägt sind. Als extremes Beispiel kann man sich die Verhältnisse in mittelalterlichen Burgen vorstellen: hier die heiße Feuerstelle, dort die kalten Maueroberflächen.

An den Fenstern, deren Wärmedämmung gegenüber den Wänden in der Regel geringer ist, bildet sich ohne Heizkörper ein Kaltluftabfall, der den Aufenthalt in der Nähe von konventionellen Fenstern an kalten Wintertagen besonders unkomfortabel macht. Am Fußboden bildet sich eine kalte Luftschicht.

Eine gewisse Linderung schafft der Heizkörper, der an der Außenwand eines Raumes (unter dem Fenster) platziert wird. Der Heizkörper wirkt als treibende Kraft für eine dem Kaltluftabfall entgegenwirkende Luftwalze: Warme Luft steigt über dem Heizkörper auf und strömt am Fenster und an der Decke entlang. Diese Luftströmung kann erhebliche Geschwindigkeiten annehmen und wird als unangenehm empfunden. Die Bildung einer Kaltluftschicht am Boden wird dadurch lediglich abgeschwächt. Trotz Heizkörpern und hohem Energieverbrauch können deshalb bei schlechter Wärmedämmung immer noch kalte Bereiche bleiben.

Erhöhte Wand-Innentemperaturen ergeben sich auch schon beim Niedrig-Energie-Haus. Dort beträgt die minimale Wand-Innenoberflächen-Temperatur an ungünstigen Stellen wie Außenecken etwa 17 °C, bei einem typischen U-Wert von 0,3 W/(m²K). Problematisch bleiben dort jedoch die Bereiche unter dem Fenster. Im Auslegungsfall sinken die Oberflächentemperaturen auf der Innenseite eines Standardfensters (U_w = 1,5 W/[m²K]) auf unter 15 °C. Man kann wegen des Kaltluftabfalls und der Strahlungstemperatur-Asymmetrie auf einen Heizkörper am Fenster oft nicht verzichten.

Beim Passivhaus ($U \leq 0{,}15$ W/[m²K]) sind die Wand-Innentemperaturen so weit erhöht, dass sie sich auch im Auslegungsfall kaum mehr von der mittleren Raumtemperatur (hier 20 °C) unterscheiden. Selbst am Fenster ($U_w \leq 0{,}8$ W/[m²K]) sinkt die mittlere Temperatur an der Innenoberfläche nicht mehr unter 17 °C.

In diesem Zusammenhang ist die Rolle der 'passiven' Maßnahme Wärmedämmung besonders augenfällig: Ist die Hülle gut gedämmt, so stellen sich im Innenraum ohne weiteres Zutun angenehme Oberflächentemperaturen ein. Schlecht gedämmte Wohnungen kann man hingegen mit keinem vertretbaren Aufwand gleichmäßig warm bekommen, es sei denn, alle Bauteiloberflächen können getrennt beheizt werden.

Regelquerschnitte

Der prinzipielle Aufbau von Wand und Dach ist beim Passivhaus nicht anders als bei einem Niedrig-Energie-Haus [4].
Beim Passivhaus ist es von besonderer Bedeutung, die Wärmebrückenwirkung des statisch notwendigen Holzanteils in der Wand- und Dachkonstruktion zu reduzieren. Das Optimieren von Varianten mit spitzem Bleistift lohnt sich in jeder Hinsicht, thermisch, statisch und nicht zuletzt kostenmäßig.

Der Holzbau hat hier einige konstruktive Vorteile: Die Hohlräume zwischen den statisch tragenden Ständern stehen ganz für die Aufnahme der wärmedämmenden Materialien zur Verfügung. Die größere Dämmstärke beim Passivhaus kann entweder durch eine zweite dämmende Schicht vor der tragenden Ebene realisiert werden (zweischalige Bauweise, siehe Abbildung 4), oder sie kann durch geeignet gewählte Wandsysteme mit speziellen Trägern besonders leicht und kostengünstig hergestellt werden.

Die hohen Dämmstärken sind in Abbildung 5 durch einen Box-Träger realisiert, dessen innerer Gurt (je nach Statik z.B. 6 cm x 12 cm) die statisch tragende Funktion übernimmt. Der äußere Gurt (6 cm x 4 cm) wird mit dem inneren mittels einer Beplankung aus 4…6 mm starken Holzwerkstoff-Platten (Hartfaser, MDF, BFU, etc.) verbunden. Die äußere Beplankung und der äußere Gurt haben eine untergeordnete statische Funktion, sie tragen nur die Fassadenlasten.

Auf diese Weise werden die Vorteile der zweischaligen Bauweise – die durchgehende Dämmebene liegt außen – mit der rationellen Fertigung der einschaligen Bauweise – das ganze Gefach kann in einem Arbeitsgang mit Dämmstoff gefüllt werden – kombiniert. Wie die Beispiele in Abbildung 7 ff zeigen, können mit diesem Aufbau alle wichtigen Details wärmebrückenfrei gestaltet werden.

An der Stelle des Boxträgers in Abbildung 5, der hier stellvertretend für eine Vielzahl anderer firmenspezifischer Lösungen stehen soll, können prinzipiell auch andere zugelassene Träger eingesetzt werden: Doppel-T-Träger, mit Holzdübeln verbundene Träger und gegebenenfalls auch der volle Brettschichtholz-Träger (6 cm x 36 cm).
Der statisch tragende Teil der Holzbau-Konstruktion wirkt im Wandaufbau immer

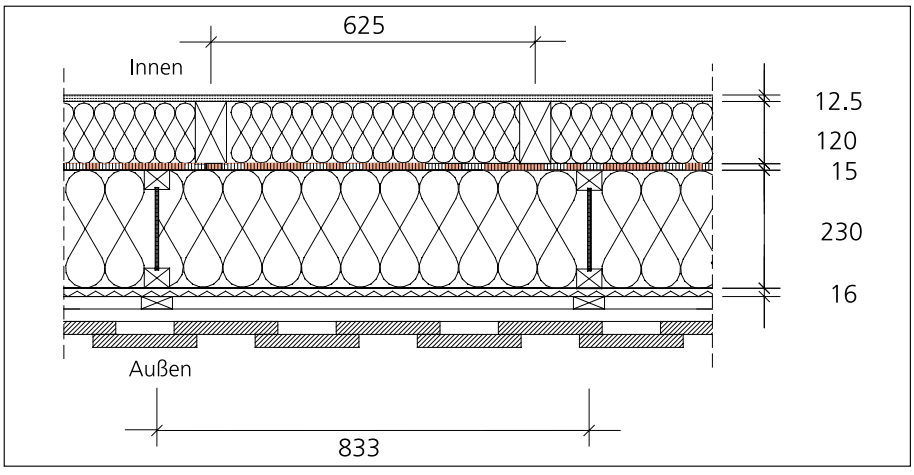


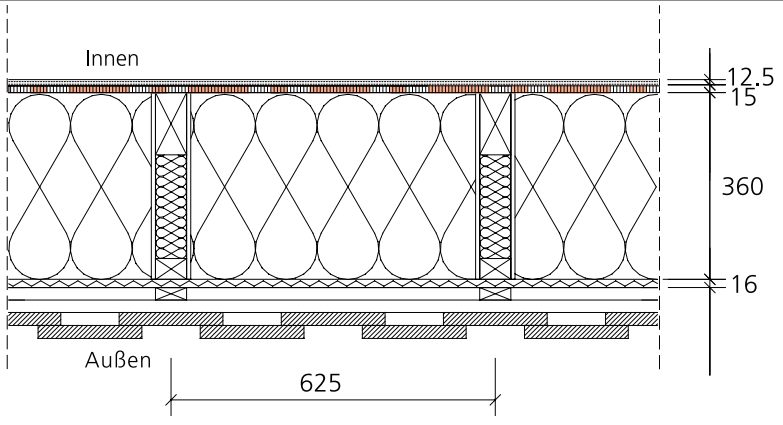
Abbildung 4 Aufbau einer zweischaligen Wand, tragende Ebene mit Ständern 6 cm x 12 cm, davor hängende Dämmebene, die von Doppel-T-Trägern getragen wird. Die luftdichte Ebene wird von der mittleren Beplankung gebildet. Das Rastermaß der vorgehängten Dämmebene (83,3 cm) unterscheidet sich von dem der Haupttragwand damit die Wärmebrückenwirkung der Stege vermindert wird, U = 0,12 W/(m²K). System Kölner Holzhaus (Architekt: Robert Laur, [5]).

dann als Wärmebrücke, welche die Dämmwirkung verschlechtert, wenn er quer zur Wand bzw. in Wärmestromrichtung liegt. Die Eigenschaften verschiedener Wandaufbauten sind in Tabelle 1 gegenübergestellt. Zur Diskussion der Auswahl eines bestimmten Bausystems, insbesondere die Frage der Baupraxis und der Kosten sei auf die Literatur verwiesen [18, 19].

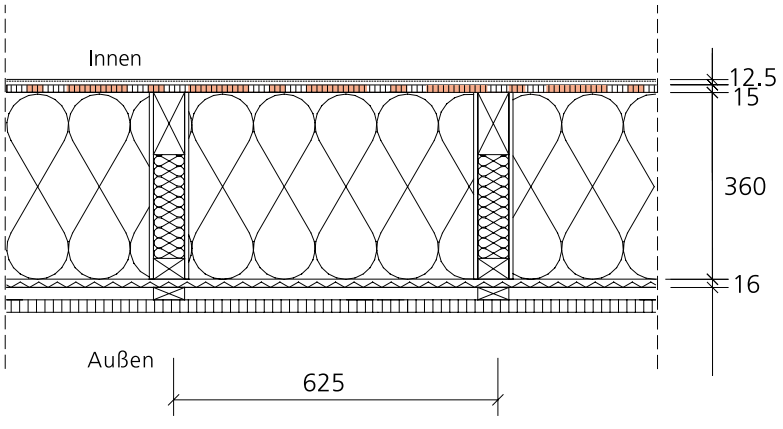
Viele Eigenschaften von Holz sind wegen seiner faserigen Struktur anisotrop, das gilt auch für die Wärmeleitfähigkeit. Deshalb muss die Wärmeleitfähigkeit von Bauteilen wie z.B. Stegen und Platten, wenn deren Faserrichtung oder Plattenebene parallel zum Wärmestrom liegt, höher angesetzt werden, als wenn die Bauteile quer zum Wärmestrom liegen. In der Literatur werden verschiedene Werte angegeben. Die DIN 4108-4 : 1998-10 rechnet mit einem Faktor 2,2. In der neuesten Ausgabe der Norm (DIN 4108-4 : 2002, [14]) wird mit einem Faktor 1 gerechnet. Hauser/Stiegel [15, 16] rechnen mit λ = 0,29 W/(mK), siehe auch [17]. Bis zur weiteren Klärung dieser Annahmen sollte eher auf der sicheren Seite gerechnet werden. Wir wählen für die Berechnungen in dieser Schrift λ_{quer} = 0,29 W/(mK) für Holzwerkstoff-Platten, bzw. λ = 0,2 W/(mK) für Sperrholz.
Der in Tabelle 1 angegebene Holzanteil bezieht sich lediglich auf die Dämmschicht von 360 mm Dicke und nur auf die in Abbildung 5 und Abbildung 6 dargestellten Regelaufbauten mit dem angegebenen Rastermaß, ohne zusätzliche Verstärkungen, Schwellen und Rähme, d.h. der 'ehrliche' Holzanteil einer gebauten Wand liegt in jedem Fall höher (erfahrungsgemäß bei etwa 16 %). Nach einer groben Abschätzung aus [17] erhöht sich der U-Wert einer Konstruktion um etwa 4 %, wenn der Holzanteil um weitere 7%-Punkte steigt. Das entspricht umgekehrt einer zusätzlich erforderlichen Dämmschicht von 2 cm, wenn der U-Wert gleich bleiben soll.

Tabelle 1 U-Werte verschiedener Wandaufbauten nach Abbildung 4 bis 6. Der Holzanteil innerhalb der Dämmschicht von 360 mm und die anzusetzende Wärmeleitfähigkeit λ_{Steg} der Holzwerkstoffe in der Dämmschicht ist angegeben. Die exakten U-Werte wurden mit einem zweidimensionalen Wärmestromprogramm berechnet, die U-Werte nach PHPP sind jeweils gleich groß. Um die Werte miteinander vergleichen zu können, wurde die Dämmwirkung einer Installationsschicht nicht berücksichtigt [18, 19]. *) Der U-Wert des Gefachs zwischen den Ständern ist hypothetisch und nur zum Vergleich angegeben.

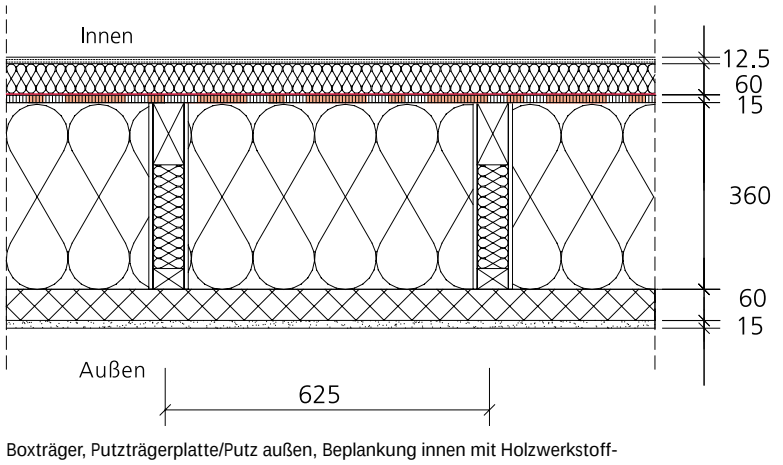
Typ	*Holzanteil in der Dämmschicht (d = 360 mm)*	*Rastermaß [cm]*	*λ_{Steg} [W/(mK)]*	*U-Wert [W/(m²K)]*	
*Gefach zwischen Ständern *)*	*0 % *)*	*–*	*–*	*0,11 *)*	
Brettschichtholz-Träger 60 mm	*9,6 %*	*62,5*	*0,13*	*0,13*	
Doppel-T-Träger	*3,6 %*	*62,5*	*0,29*	*0,12*	*Abbildung 6*
Box-Träger	*6,2 %*	*62,5*	*0,20*	*0,12*	*Abbildung 5*
doppelschaliger Aufbau	*10,3 %*	*62,5/83,3*	*0,25*	*0,12*	*Abbildung 4*
Massivholz-Wand mit WDVS	*0 % (d = 280 mm)*	*–*	*–*	*0,12*	*Abbildung 6*



Boxträger, Beplankung außen mit diffusionsoffener Holzwerkstoff-Platte, hinterlüftete Fassade aus Vollholzprofilen. Innenbeplankung mit Holzwerkstoff-Platte als luftdichte Ebene und Gipswerkstoff-Platte, U = 0,12 W/(m²K)



Boxträger, Beplankung außen mit diffusionsoffener Holzwerkstoff-Platte, hinterlüftete Plattenfassade. Beplankung innen mit Holzwerkstoff-Platte als luftdichte Ebene und Gipswerkstoff-Platte, U = 0,12 W/(m²K)



Boxträger, Putzträgerplatte/Putz außen, Beplankung innen mit Holzwerkstoff-Platte als luftdichte Ebene, optional zusätzliche gedämmte Installationsebene innen mit Gipswerkstoff-Platte beplankt. U = 0,09 W/(m²K), gerechnet mit Installationsebene innen und Putzträger-Platte außen. Für gleiche Dämmwirkung (U=0,12 W/[m²K]) könnte der Boxträger auf 220 mm verkleinert werden.

Abbildung 5 Regelaufbauten von Holzrahmenbau-Konstruktionen mit 360 mm Dämmschichtstärke. Boxträger mit Innengurt (6 cm x 12 cm), Außengurt (6 cm x 4 cm) und Beplankung aus zweimal 4…6 mm starker Holzwerkstoff-Platte, Verschiedene Fassaden [10] und Innenplankungen sind möglich. Äußere Beplankung aus diffusionsoffener Holzwerkstoff-Platte. Die innere Beplankung aus Holzwerkstoff-Platten bildet die luftdichte Ebene (rot markiert) und gleichzeitig die Dampfbremse, siehe Abschnitt 2.5. In der Fläche ist keine zusätzliche Folie notwendig. Die Platten werden an den Stößen mit geeignetem Klebeband, Folienstreifen oder Baupappenstreifen verklebt.

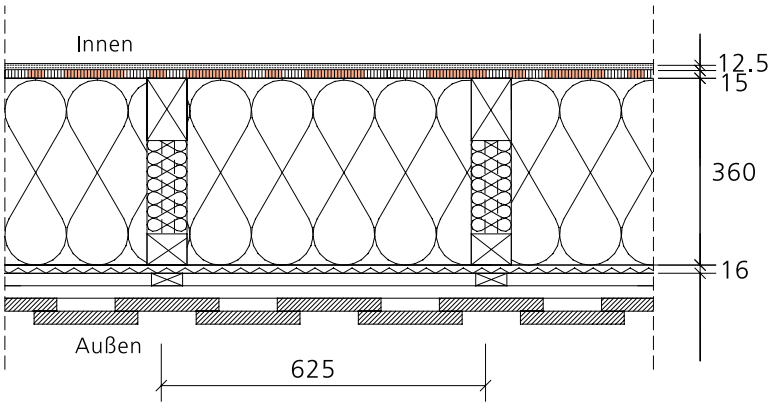
Die U-Werte der Regelaufbauten werden im folgenden stets so verwendet, wie sie in Tabelle 1 angegeben sind. D.h. der U-Wert einer Holz-Leichtbau-Wand versteht sich inklusive des regulären Holzanteils, wie er durch das Rastermaß vorgegeben wird. Wärmebrückenverlustkoeffizienten werden stets auf diesen U-Wert bezogen. Nur der an der Wärmebrücke vorhandene zusätzliche Holzanteil z.B. von Versteifungen wird in den jeweiligen Ψ-Wert eingerechnet. Der Holzanteil von Rähm und Schwelle einer Wand wird nicht explizit berücksichtigt. Das vereinfacht den Rechengang erheblich und ist zulässig, wenn generell Bauteilaußenmaße für die Berechnung der Energiebilanz verwendet werden, vgl. die Ausführungen im nächsten Abschnitt. Die zusätzliche Dämmwirkung einer Installationsebene wurde zur besseren Vergleichbarkeit in den U-Werten in Tabelle 1 nicht berücksichtigt.

2.3 Wärmebrückenfreies Konstruieren

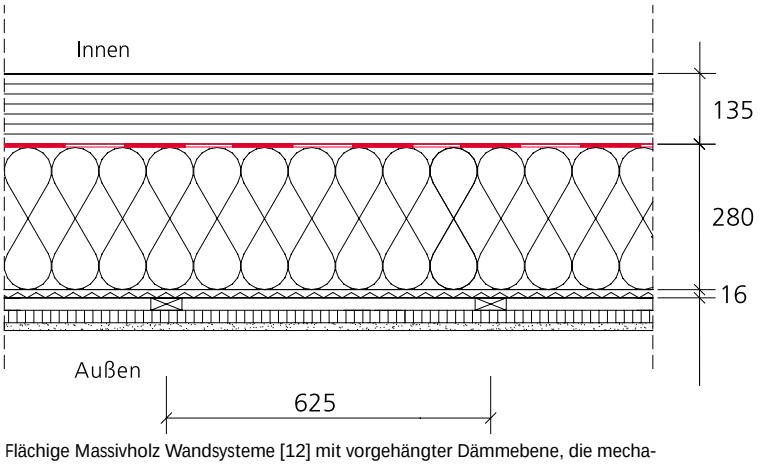
Multipliziert man den Wärmeduchgangskoeffizienten U [W/(m²K)] des Bauteils mit seiner Fläche A [m²] und der Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$[K], so erhält man den Regelwärmeverlust dieser Fläche. Anschließend wird über alle Bauteile der Hüllfläche summiert: $\dot{Q}_{reg} = \Sigma_i U_i \cdot A_i \cdot \Delta\vartheta$ [W].

Der Rechengang wird durch die konsequente Verwendung des Außenmaßes aller Bauteile vereinfacht, der Planer kann in diesem Fall eine Maßkette einmal um den gesamten beheizten Bereich herumlegen. Neben der Einfachheit birgt das Außenmaß eine gewisse Reserve: weil die Außenoberfläche des Gesamtgebäudes immer größer ist als die Summe der inneren Oberflächen der Außenbauteile, wird der so berechnete Regelwärmeverlust höher und das Ergebnis liegt auf der sicheren Seite.

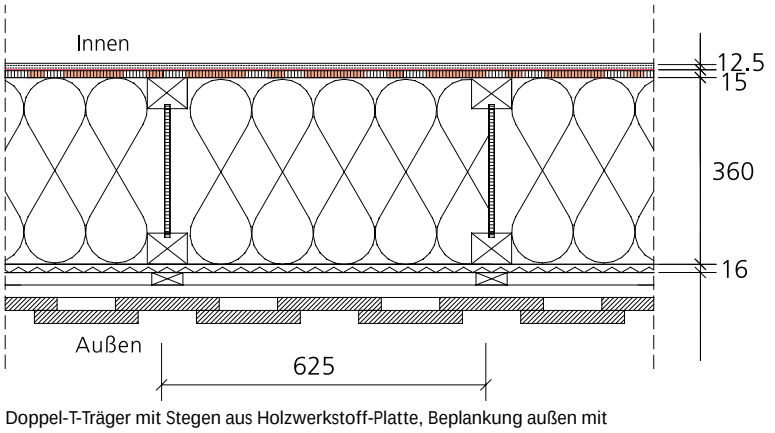
Der Regelwärmeverlust stellt allerdings nur eine Näherung dar, denn der tatsächliche Wärmeverlust $\dot{Q}$ ergibt sich aus dem Integral der dreidimensionalen Wärmeströme, die durch Materialwechsel und wegen der nicht ebenen Geometrie der Gebäudehülle räumlich veränderlich sind. Bei konstruktiven Wärmebrücken, wie auskragenden Balkonplatten (lineare Wärmebrücke) oder die Dämmschicht durchdringenden Metallankern (punktuelle Wärmebrücke), ist der entstehende Fehler leicht einzusehen, hier geht zusätzlich Wärme verloren.



Träger mit Holzdübeln und Holzfaserdämmstoff zwischen den beiden Holmen. Beplankung außen mit diffusionsoffener Holzwerkstoff-Platte, hinterlüftete Fassade aus Vollholzprofilen. Innenbeplankung mit Holzwerkstoff-Platte als luftdichte Ebene und Gipswerkstoff-Platte, U = 0,12 W/(m²K).



Flächige Massivholz Wandsysteme [12] mit vorgehängter Dämmebene, die mechanische Befestigung der Fassade wurde hier nicht dargestellt. Die luftdichte Schicht wird mit einer Folie oder Baupappe realisiert, U = 0,12 W/(m²K).
Die Dämmschicht wurde im Beispiel 280 mm stark gewählt, um denselben U-Wert wie bei den anderen Aufbauten zu erhalten.



Doppel-T-Träger mit Stegen aus Holzwerkstoff-Platte, Beplankung außen mit diffusionsoffener Holzwerkstoff-Platte, hinterlüftete Fassade aus Vollholzprofilen. Innenbeplankung mit Holzwerkstoff-Platte als luftdichte Ebene und Gipswerkstoff-Platte, U = 0,12 W/(m²K)

Abbildung 6 Regel-Wandaufbauten mit verschiedenen Trägersystemen. Beplankung innen und außen wie in Abbildung 5. Die luftdichte Schicht bzw. Dampfbremse ist jeweils die innere Beplankung aus Holzwerkstoff-Platten, die an den Stößen verklebt werden. Bei der massiven Holzwand ist eine Folie oder armierte Baupappe als luftdichte Schicht notwendig. Zur weitergehenden Beschreibung der Holzbausysteme siehe [12].

Bei Wärmebrücken, die sich linear erstrecken, wird der zusätzliche Wärmeverlust durch einen linearen Wärmebrückenverlustkoeffizienten Ψ [W/mK] multipliziert mit der Länge der Wärmebrücke s [m] und der Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ [K] berechnet. Punktuelle Wärmebrücken werden durch einen Koeffizienten χ [W/K] beschrieben. Der gesamte Wärmestrom durch die Gebäudehülle lässt sich dann nach der Formel $\dot{Q} = \dot{Q}_{reg} + (\Sigma_j \Psi_j s_j + \Sigma_k \chi_k) \Delta\vartheta$ berechnen.

Es zeigt sich, dass man bei sorgfältiger Wahl der Details erreichen kann, dass in einem mit dem Außenmaß bestimmten Regelwärmeverlust alle Wärmebrückenverluste bereits enthalten sind. Ist dies der Fall, dann liegt definitionsgemäß eine im Ganzen 'wärmebrückenfreie Konstruktion' vor. In diesem Fall kann man sich die explizite Berechnung von Wärmebrücken ersparen.

Geometrische Wärmebrücken entstehen, wenn Außenbauteile mit unterschiedlicher Orientierung aneinanderstoßen und sich deshalb das Außenmaß vom Innenmaß unterscheidet, zum Beispiel an einer Hauskante, am Traufanschluss, am Ortgang und am First. In Abbildung 7 ff sind die wichtigsten Details dargestellt. Verwendet man den Außenmaßbezug für alle Hüllflächenbauteile, so werden die Ψ_a-Werte der geometrischen Wärmebrücken bei Bauteilen ohne zusätzliche konstruktive Störungen regelmäßig negativ. Das bedeutet, die näherungsweise mit den Außenmaßen der Bauteile berechneten temperaturspezifischen Wärmeverluste $\Sigma U_i \cdot A_i$ sind größer als der tatsächliche Verlust. Ausnahmen sind konkave Bereiche der Hülle (z.B. Innenecke). Deren positiver geometrischer Wärmebrückenbeitrag wird aber immer durch den Negativbeitrag in einem zusätzlichen konvexen Bereich ausgeglichen [18].

Werden geometrische Anschlüsse mit zusätzlichen **konstruktiven Durchdringungen** belastet, so müssen diese Details ggf. mit einer zweidimensionalen Berechnung bewertet werden. Diese Lösungen müssen ausdrücklich kritisch bewertet werden, sie sind nicht nur teuer, sondern auch thermisch ungünstig konzipiert und können deshalb für das Passivhaus nicht empfohlen werden. Eine Lösung für diesen Konflikt wurde schon mit den Regelaufbauten (Abbildung 5) vorgeschlagen. Der Wandaufbau wird formal in eine statisch tragende Ebene und eine außenliegende Dämmebene aufgetrennt.

Generell sollten konstruktive Wärmebrücken beim Passivhaus soweit wie möglich vermieden oder jedenfalls auf einen vernachlässigbaren Wert begrenzt werden. Das Grundprinzip hierfür ist das **'wärmebrückenfreie Konstruieren'**. Als Kriterium hierfür hat sich die Anforderung $\Psi_a \leq 0{,}01$ W/(mK) bewährt. Erreicht man durch günstige Auswahl der konstruktiven Details, dass jeder Wärmebrückenverlustkoeffizient höchstens diesen Wert annimmt, so wird die Summe der zusätzlichen Wärmebrückenterme in der obigen Formel in der Regel negativ bzw. vernachlässigbar klein. Hat man erst eine Sammlung von Anschlussdetails, die das Kriterium 'wärmebrückenfrei' erfüllen, so kann man sich bei ausschließlicher Verwendung dieser Details in einem Gebäude auf die Berechnung der Regelwärmeverluste beschränken. Ein pauschaler Zuschlag auf den U-Wert (ΔU_{WB}) kann unter diesen Umständen mit 'Null' angesetzt werden. Auch die EnEV [4, 6] geht diesen Weg: sind die Wärmebrücken in den Regel-U-Werten bereits enthalten, so darf mit $\Delta U_{WB} = 0$ gerechnet werden. Wir werden im Folgenden für den Holzbau allgemeine Prinzipien und konkrete Konstruktionsvorschläge für die wesentlichen Details angeben, die es erlauben, Passivhäuser wärmebrückenfrei zu projektieren.
Bereits im Regel-U-Wert berücksichtigte Elemente, wie z.B. Holzständer im Rasterabstand, zählen nicht als Unterbrechung; dagegen stellt eine Durchdringung der Wand von innen nach außen von hochwärmeleitendem Material auch geringer Dicke, z.B. einer Aluminiumfolie, eine Verletzung des Konstruktionsprinzips dar. Immer, wenn man mit der 'Regel vom breiten Stift' auf Anschlüsse oder Durchdringungen trifft, bei denen die Erfüllung der Regel nicht offensichtlich ist, empfiehlt sich eine genauere Betrachtung. Das wird meist eine numerische zweidimensionale Wärmebrückenberechnung für das betreffende Detail sein.

Die Abbildung 1 auf der Titelseite zeigt den Planungsgrundsatz für solche Konstruktionen: Es ist die **'Regel vom breiten Stift'**. Man bedient sich dazu maßstäblicher Zeichnungen der Gebäudehülle (Grundrisse und Schnitte). Für ein Passivhaus verwendet man nun einen Zeichenstift, dessen Breite einem Wärmedurchgangswiderstand von R = 6 m²K/W entspricht. Für einen Dämmstoff mit $\lambda = 0{,}04$ W/(mK) sind dies 24 cm maßstäblicher Breite. Wenn es nun gelingt, die Außenhülle des Gebäudes in dieser vollen Breite innerhalb des Dämmstoffes unterbrechungsfrei zu durchfahren – gelbe Dämmebene in Abbildung 1 – kann man sicher sein, dass die so getesteten Details das Kriterium der Wärmebrückenfreiheit erfüllen, siehe z.B. den Deckenanschluss in Abbildung 16.

Diese Anschlüsse müssen auch in der Detailplanung besonders berücksichtigt werden, um die baupraktische Ausführbarkeit sicherzustellen. Die planerischen Vorgaben müssen die Anforderungen nach Wärmebrückenfreiheit und Luftdichtheit präzise beschreiben. Der Fensteranschluss ist hierfür ein wichtiges Beispiel.

Auskragende Balkone, deren tragende Konstruktion die Dämmschicht durchdringt, sind aus wärmetechnischer Sicht nicht mehr Stand der Technik. Balkone können bei Neubauten in aller Regel selbsttragend vor der Fassade aufgestellt werden, so dass sie lediglich mit dünnen, thermisch getrennten Ankern am Gebäude fixiert werden müssen.

Für **Vordächer, Geländer, Lampen** und andere auskragende Fassadenelemente gibt es Spezialdübel und Konsolen aus Glasfaserverbundmaterialen und druckfesten Dämmstoffen die eine Dämmschicht durchdringen dürfen und dennoch keine nennenswerte Wärmebrücke bilden. Der Holzbau hat hier einen bedeutenden konstruktiven Vorteil, denn die Dämmschicht wird in aller Regel von einer Beplankung abgeschlossen, welche ihrerseits die Befestigung von leichten Bauteilen zulässt, ohne die Dämmschicht zusätzlich durchdringen zu müssen. Schwerere Geländer, Vordächer und Markisen müssen auf bzw. vor einem statisch ausreichend dimensionierten Wand-Träger befestigt werden, was bei den üblichen Rastermaßen kein Problem sein dürfte.

Eine besondere Herausforderung stellen Sockelpunkte dar. Beispielhafte Lösungen hierfür sind in den Details in Abbildung 11 bis Abbildung 15 zu finden.

Der Deckenanschluss an die Außenwand, Abbildung 16, ist dann unproblematisch, wenn die Planungsregel vom 'breiten Stift' konsequent angewandt wird, d.h. wenn die Überdeckung am Deckenanschluss genügend dick (24 cm bei $\lambda = 0{,}04$ W/[mK]) ausgeführt wird. Für die Anschlüsse von nicht tragenden Innenwänden an die Außenwand oder an das Dach gilt das selbe. Für weitere konstruktive Details sei auf die umfangreiche Literatur zu diesem Thema verwiesen, z.B. [17, 19, 22, 23, 24].

Wechsel von Innenmaß auf Außenmaßbezug

In vielen Veröffentlichungen und Datensammlungen z.B. [15] sind bisher auf die Innenmaße bezogene Ψ-Werte tabelliert, die man mit den Werten in diesem Heft nicht direkt vergleichen kann. Kennt man jedoch die zugehörigen Maßketten, so lassen sich die Werte Ψ_a und Ψ_i jeweils ineinander umrechnen [18].

$$\Psi_a = \Psi_i - U_1 (s_{1a} - s_{1i}) - U_2 (s_{2a} - s_{2i})$$

1 und 2 bezeichnen dabei die beiden aneinanderstoßenden Bauteile, $s_{a1,a2}$ bzw. $s_{i1,i2}$ sind die Außen- bzw. Innenmaße der Bauteile. Neuerdings werden die Ψ-Werte meist außenmaßbezogen angegeben [4]. Der Außenmaßbezug ist für Berechnungen nach PHPP auch am Sockelpunkt konsequent zu handhaben, d.h. die Höhe einer Außenwand ist von der Unterkante der gedämmten Bodenplatte bzw. Kellerdecke ab zu rechnen. Die Ψ_a-Werte für diese Details sind dann wie für alle Außenkanten klein und meist vernachlässigbar. In der EnEV wird hier ab der Oberkante Bodenplatte gemessen. Die resultierenden Ψ-Werte müssen dann immer berücksichtigt d.h. berechnet werden, was nicht zuletzt den Arbeitsaufwand vergrößert.

Bezug zum Bauteil beachten

Vorsicht: Bei schlechten Bauteil-U-Werten können Ψ-Werte manchmal niedrig erscheinen! Entscheidend ist aber nicht der Ψ-Wert für sich, sondern der Gesamtwärmeverlust als Summe aus Regelverlust und Wärmebrückenbeiträgen. Es macht somit keinen Sinn, niedrige Ψ-Wert durch hohe Regel-U-Werte zu erkaufen. Wärmebrückenverlustkoeffizienten gelten prinzipiell nur für die Bauteilkonstruktionen, für die sie berechnet wurden. Deshalb muss neben der Angabe eines Ψ-Wertes stets mindestens die jeweilige Konstruktion mit allen Maßen angegeben werden und es sollten die U-Werte aller angrenzenden Bauteile mit angegeben werden, vgl. [21]. Insbesondere gilt: der Ψ-Wert z.B. eines Fensteranschlusses für das Passivhaus ergibt sich unrealistisch niedrig, wenn der Anschluss mit einer Wand mit hohem U-Wert (z.B. $U_{Wand} = 0{,}5$ W/[m²K]) berech-

net wird. Deshalb müssen Wärmebrückenverlustkoeffizienten von Anschlüssen für das Passivhaus mit den Bauteilaufbauten berechnet werden, die im Passivhaus tatsächlich vorkommen, d.h. mit $U_{Wand} \leq$ 0,15 W/(m²K). Dies bedeutet aber weiterhin: Ψ-Werte aus Datensammlungen von konventionellen Bauteilen dürfen nur mit größter Vorsicht auf das Passivhaus übertragen werden.

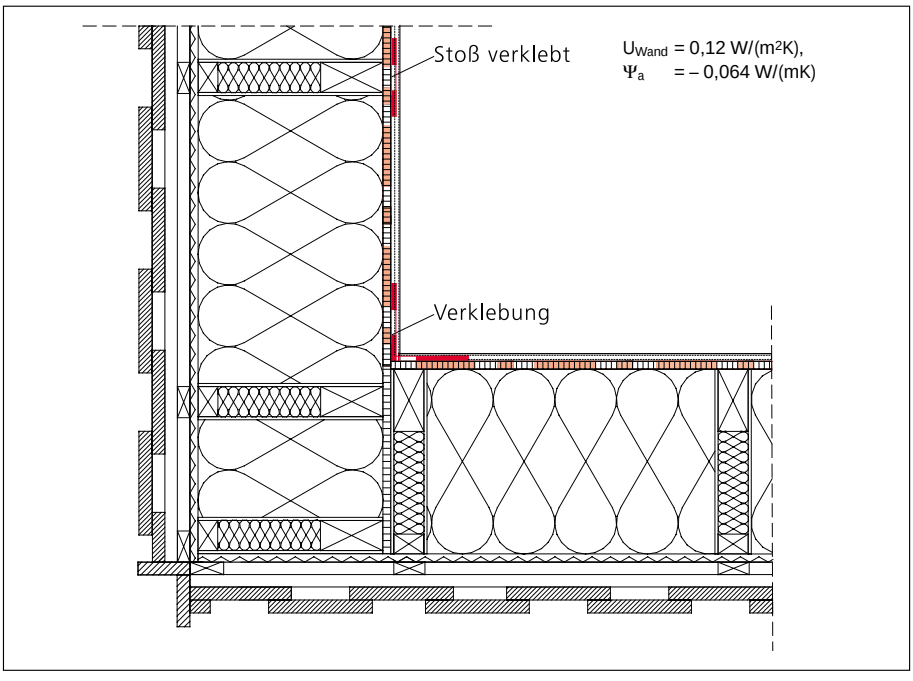


Abbildung 7 Wandanschluss an der Hauskante. An der Außenwand wurde nur ein zusätzlicher Steg eingefügt. Im wesentlichen handelt es sich um eine geometrische Wärmebrücke. Man beachte die Verklebung der luftdichten Beplankung in der inneren Kante [17, 22]

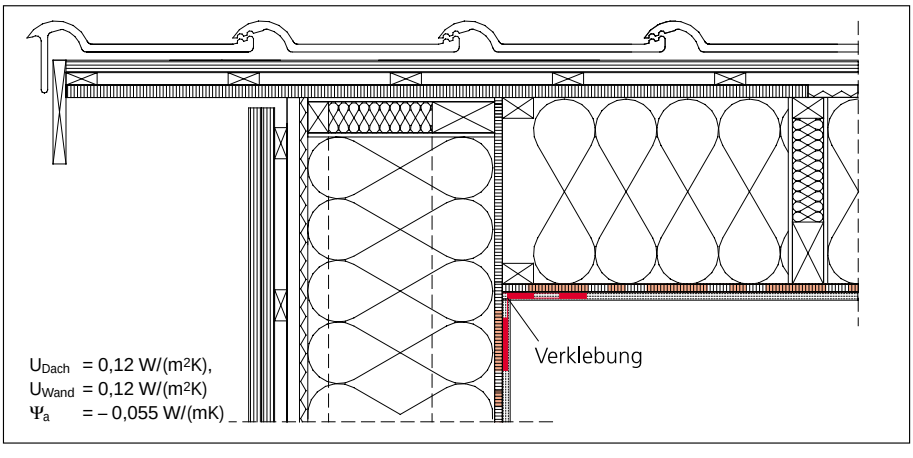


Abbildung 8 Ortgang. Die Innenbeplankung aus Holzwerkstoff-Platten bildet die luftdichte Ebene. An den Stößen und Kanten werden die Platten mit Folienstreifen oder luftdichter Baupappe flächig verklebt.

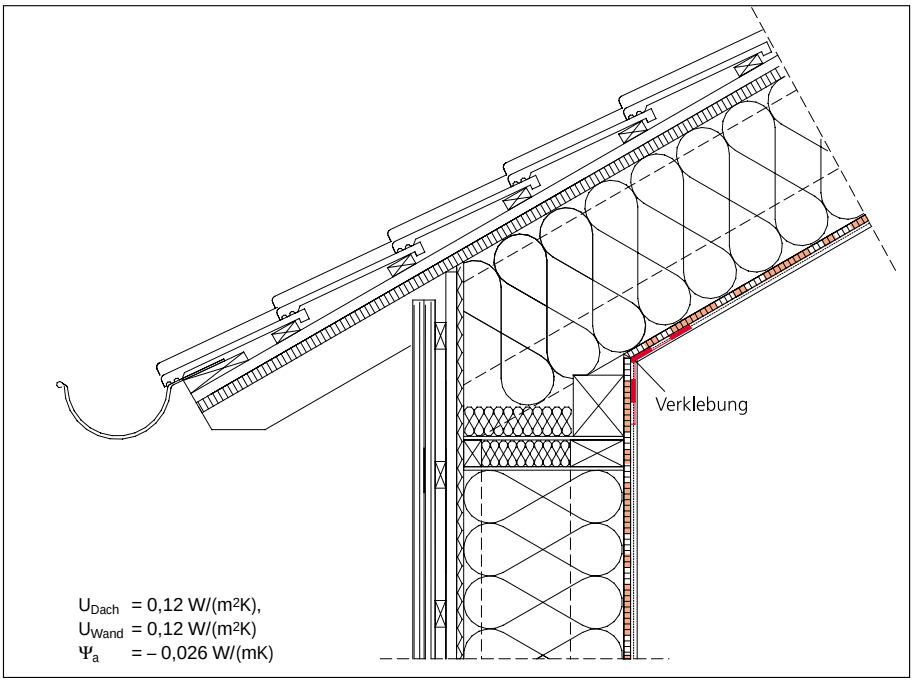
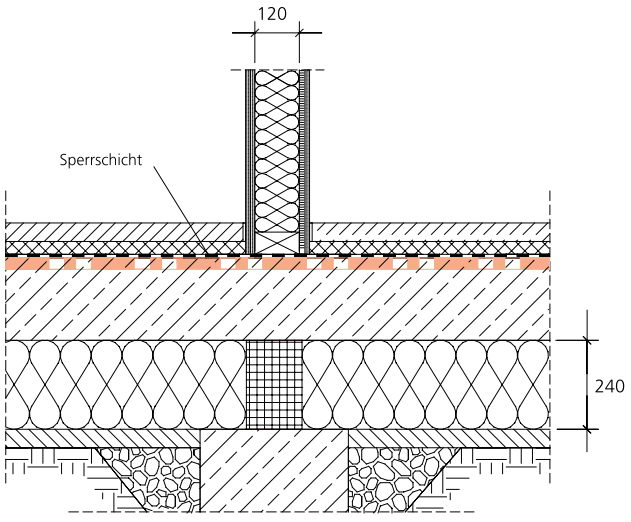
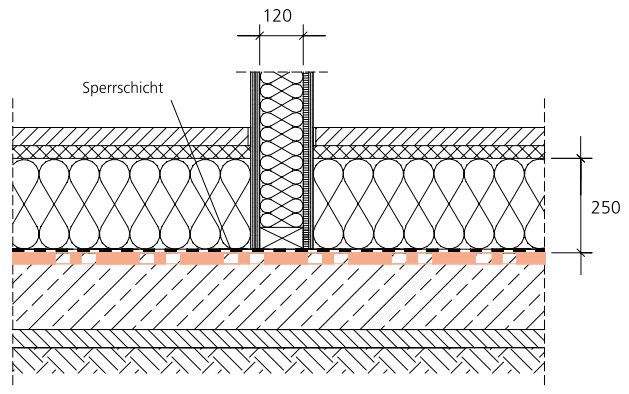


Abbildung 9 Traufe. Luftdichte Ebene wie beim Ortgangdetail. Der tragende Untergurt ist gemäß den statischen Erfordernissen zu bemessen und zu detaillieren.



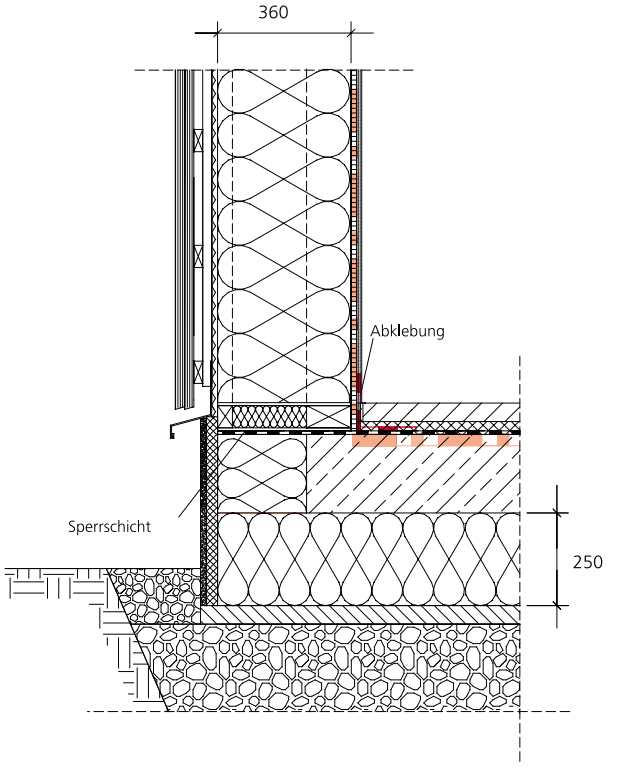
$U_{Bodenplatte}$ = 0,12 W/(m²K)
Ψ_a = + 0,022 W/(mK)
Dämmblock aus Porenbeton λ = 0,1 W/(mK)

Abbildung 10 Tragende Innenwand mit Streifenfundament bei außenliegender Dämmung. Über dem Fundament angeordnet ist ein druckstabiler Dämmblock zur Lastabtragung. Die luftdichte Ebene ist die Betondecke. Bemessung der Bodenplatte und der Fundamente gemäß Statik.



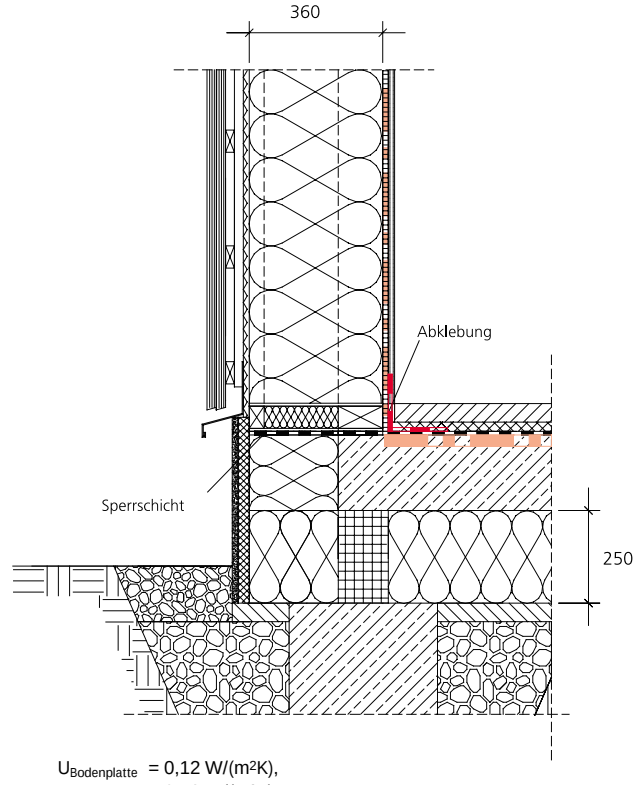
$U_{Bodenplatte}$ = 0,12 W/(m²K)
Ψ_a = + 0,015 W/(mK)

Abbildung 11 Innenliegende Dämmung. Die luftdichte Schicht ist wieder die Betonplatte. Über der Betonplatte muß eine Sperre gegen aufgehende Feuchte vorgesehen werden. Als raumseitige Feuchte-Sperre dient die Folie unter dem Estrich.



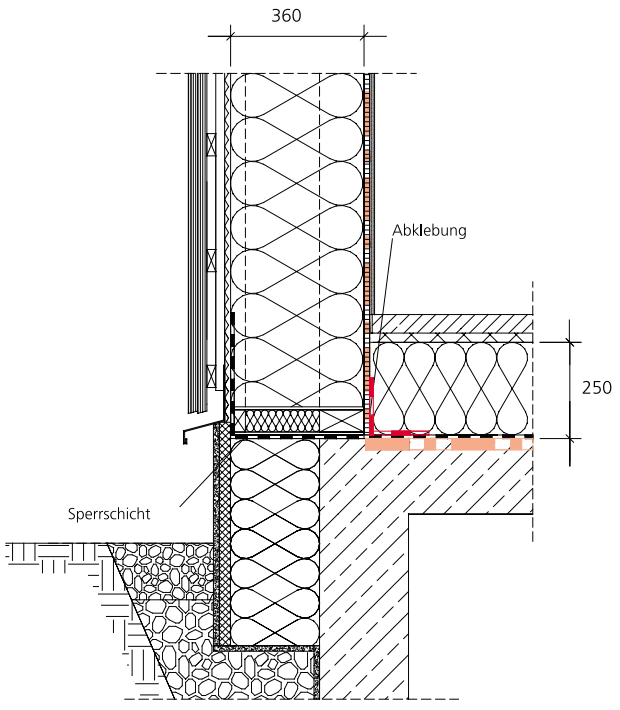
$U_{Bodenplatte}$ = 0,12 W/(m²K),
U_{Wand} = 0,12 W/(m²K)
Ψ_a = – 0,031 W/(mK)

Abbildung 12 Außenwandschwelle mit schwimmend auf der Dämmung betonierter Bodenplatte (links). Man beachte die Feuchtigkeits-Sperre unter dem Wandelement, siehe auch in [11].

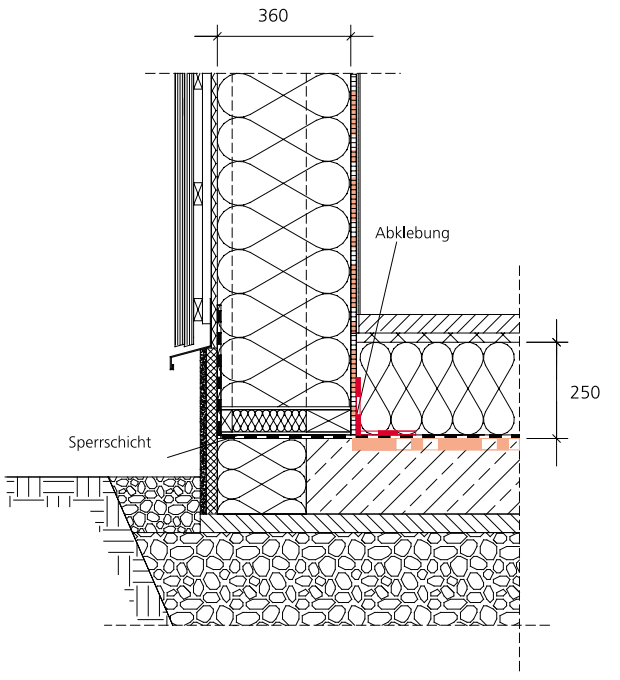


$U_{Bodenplatte}$ = 0,12 W/(m²K),
U_{Wand} = 0,12 W/(m²K)
Ψ_a = – 0,019 W/(mK)
Dämmblock aus Porenbeton λ = 0,1 W/(mK)

Abbildung 13 Bodenplatte mit Streifenfundament und thermisch getrennter Lastabtragung.

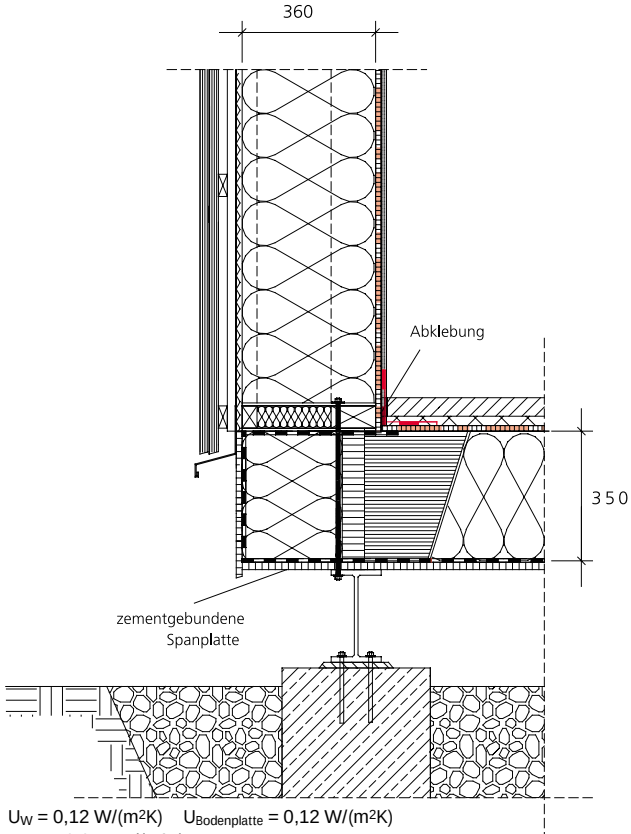


$U_{Kellerdecke}$ = 0,12 W/(m²K), U_{Wand} = 0,12 W/(m²K), Ψ_a = -0,056 W/(mK)



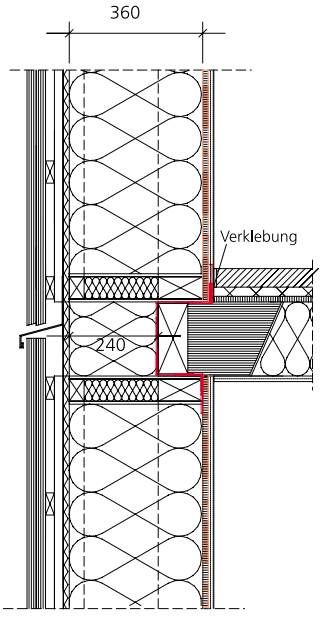
$U_{Bodenplatte}$ = 0,12 W/(m²K), U_{Wand} = 0,12 W/(m²K), Ψ_a = – 0,056 W/(mK)

Abbildung 14 Außenwandschwelle auf Kellerdecke zum unbeheizten Keller, bzw. Bodenplatte mit innenliegender Dämmung. Beide Details entsprechen sich wärmetechnisch. Auf Sperrschicht gegen aufsteigende Feuchte achten.



U_W = 0,12 W/(m²K) $U_{Bodenplatte}$ = 0,12 W/(m²K)
Ψ_a = +0.057 W/(m²K)

Abbildung 15 Bodenplatte aus Holz. Holzschutz durch zementgebundene Spanplatte realisiert, Detail nach [24].



U_{Wand} = 0,12 W/(m²K) Ψ_a = 0,009 W/(mK)

Abbildung 16 Anschluss Decke an Außenwand. Wird die Stoßstelle mit einer genügend dicken Dämmschicht überdeckt (Regel vom breiten Stift), ist die Wärmebrückenwirkung vernachlässigbar. Ein breiter Folienstreifen, der im unteren Wandelement eingeklemmt ist, wird nach dem Auflegen der Balkendecke nach innen geschlagen und später mit der Beplankung des oberen Wandelements im Bereich des Estrichs verklebt.

2.4 Warmfenster

Fenster stellen den Außenbezug her und lassen Licht in die Räume. Die Fenster wirken darüber hinaus wie 'passive' Sonnenkollektoren: sie sammeln solare Energie, welche die hinter dem Fenster liegenden Räume erwärmt. Wie man in der Heizwärmebilanz (Abbildung 3, links) sieht, ist der Anteil der realisierbaren solaren Gewinne (43 %) gegenüber den internen Wärmen (26 %) und dem restlichen Heizwärmebedarf (31%) von erheblichem Gewicht. Größenordnungsmäßig decken diese drei Anteile in Passivhäusern jeweils etwa ein Drittel der Wärmeverluste ab. Wenn die solaren Gewinne durch kleinere oder ungünstig orientierte oder verschattete Fenster verringert werden, so müssen die Wärmeverluste durch die Gebäudehülle weiter reduziert werden, wenn das Gebäude trotzdem als Passivhaus funktionieren soll. Dies kann in einem innerstädtischen Umfeld evtl. notwendig werden, wenn die Orientierung eines Gebäudes nicht frei gewählt werden kann, vgl. dazu die Ausführungen in [1].

Ein zentrales Problem ist die jahreszeitliche Verschiebung zwischen Strahlungsangebot und Wärmebedarf. Im mitteleuropäischen Kernwinter (Dezember, Januar, Februar) ist das Angebot an solarer Strahlung sehr gering. Außerdem sind die Außentemperaturen niedrig, d.h. in dieser Zeit sind die Wärmeverluste zudem am größten. Selbst die besten heute verfügbaren transparenten Bauteile haben immer noch deutlich höhere U-Werte (U_g = 0,5… 0,7 W/[m²K]) als die opaken Wände ($U_{Wand} \leq$ 0,15 W/[m²K]). Vergrößert man die verglasten Flächen, so werden daher auch die Wärmeverluste ansteigen. In Abbildung 3 rechts sind deshalb die Flächenanteile der einzelnen Hüllflächenbauteile zum Vergleich ausgewiesen. Die Fenster haben in diesem Beispiel nur 12 % Flächenanteil, sind aber für 50 % der Transmissionswärmeverluste verantwortlich. Wichtig ist deshalb, dass bei der Auswahl der Fenster die Energiebilanz zwischen den nutzbaren solaren Wärmegewinnen und den zusätzlichen Wärmeverlusten während des Kernwinters abgewogen wird [25].

Wärmeschutzverglasung

Hochwertige Wärmeschutzverglasungen (WSVG) sind aus drei Scheiben aufgebaut, von denen in der Regel zwei mit einer Beschichtung versehen sind. Diese 'low-emissivity' (low-e), 'niedrigemittierenden' oder 'selektiven' Beschichtungen wirken wie Spiegel, die allerdings nur Wärmestrahlung, d.h. infrarotes Licht reflektieren und deshalb Wärme auch nur schlecht abstrahlen können. Physikalischer Hintergrund ist das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz, nachdem die Emissivität einer Oberfläche (ihre Fähigkeit Wärme abzustrahlen) immer gleich dem Absorptionskoeffizienten ist. Wird eine solche niedrig emittierende Scheibe erwärmt, so kann sie die Wärme auf der beschichteten Seite nicht gut 'loswerden'. Eine Beschichtung je Scheibenzwischenraum genügt, um den Strahlungsaustausch zwischen zwei gegenüberliegenden Scheiben zu vermindern, normalerweise werden die Oberflächen 2 und 5 (von außen nach innen gezählt) beschichtet.

Beschichtungen auf der Außen- bzw. Innenseite von Verglasungen bringen nur eine geringe weitere Verbesserung des U_g-Wertes. Metallische Schichten wären an diesen Oberflächen zudem nicht abriebfest (Soft-Coating). Pyrolytische Schichten sind abriebfest (Hard-Coating) und damit auch für eine außenliegende Beschichtung geeignet. Dort ist ihr Einsatz interessant, um ein Beschlagen mit Tauwasser bzw. Vereisen der Verglasung von außen in klaren Nächten zu verhindern. Bei Dachfenstern sind deshalb pyrolytische Schichten auf den Außenoberflächen heute schon am Markt verfügbar.

'Selektiv' verspiegelt heißt übrigens, dass sichtbares Licht von diesen Beschichtungen gut durchgelassen wird. Deshalb sind die

Einscheiben Verglasung	*2fach Verglasung mit Luftschicht, Alu Randverbund*	*2fach WSVG mit Beschichtung auf 3, Edelgasfüllung aber Alu-Randverbund*	*3fach WSVG mit Beschichtung auf 2 und 5, thermisch getrenntem Randverbund und Edelgasfüllung*
U_g = 5,6 W/(m²K)	*U_g = 2,8 W/(m²K)*	*U_g = 1,0...1,6 W/(m²K)*	*U_g = 0,5...0,8 W/(m²K)*
ϑ = –2°C	*ϑ = 9 °C*	*$\vartheta \geq$ 14 °C*	*$\vartheta \geq$ 17 °C*
g = 0,85	*g = 0,76*	*g = 0,5...0,68*	*g = 0,4...0,6*

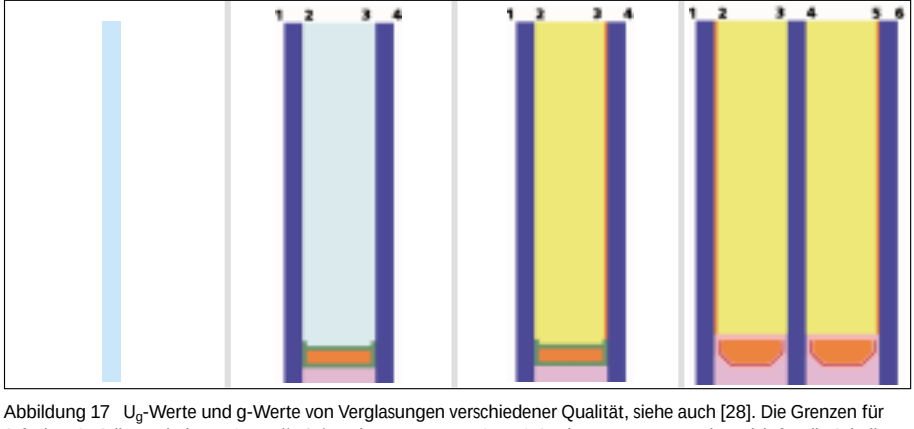


Abbildung 17 U_g-Werte und g-Werte von Verglasungen verschiedener Qualität, siehe auch [28]. Die Grenzen für 3-fach WSVG liegen bei U_g = 0,5 W/(m²K) und g-Werten von 0,4...0,6. Die U_g-Werte verstehen sich für die Scheibenmitte. Der Wärmeverlust durch den Abstandhalter am Glasrand ist darin nicht berücksichtigt, dieser muss durch eine Wärmebrückenberechnung ermittelt werden [26, 29]. Die angegebenen Temperaturen im Zentrum der Innenoberfläche gelten jeweils für den größeren der angegebenen U-Werte (Auslegungsfall). Die Oberflächen werden von außen (1) nach innen durchgezählt. Die Beschichtungen der Oberflächen sind mit einer roten Linie angedeutet.

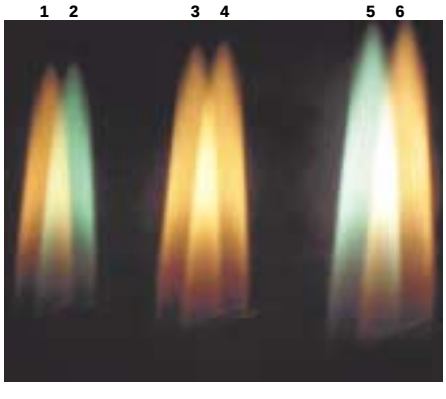
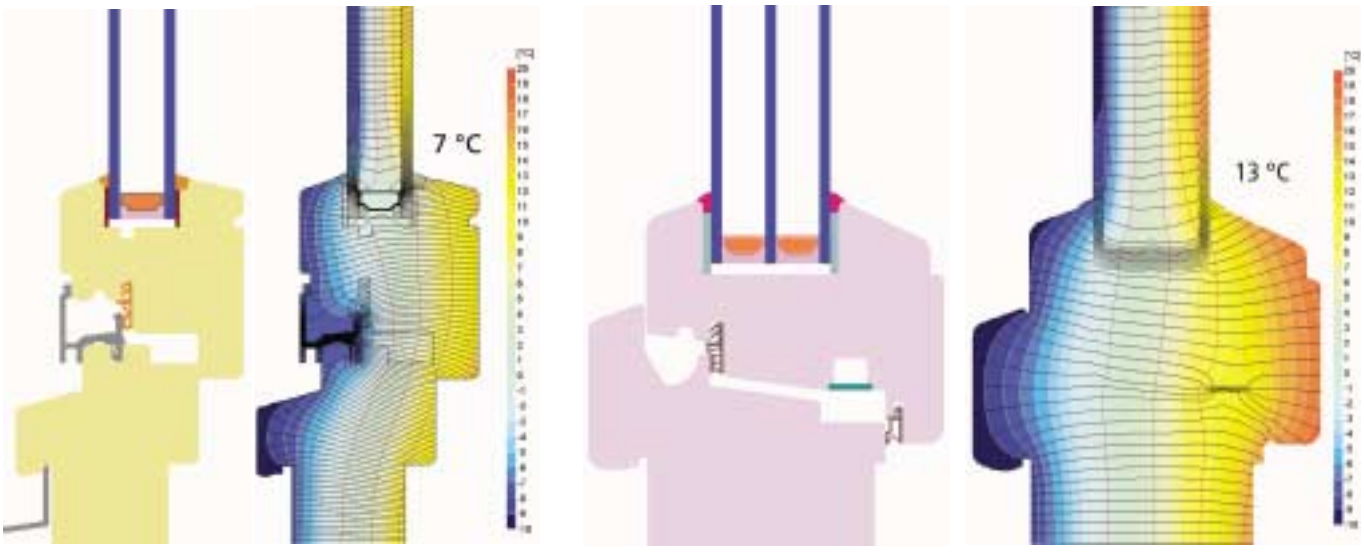


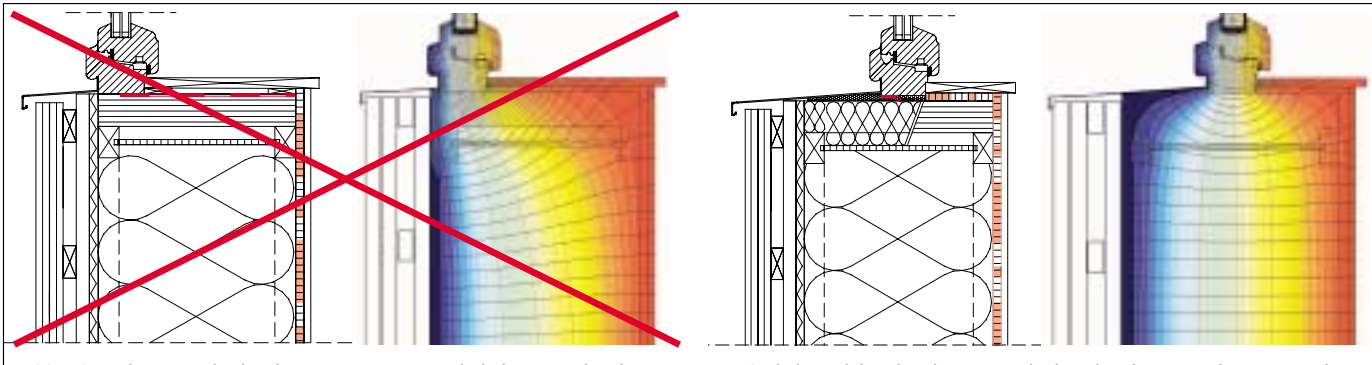
Abbildung 18 Sechs Spiegelbilder einer Flamme in einer dreifach verglasten Scheibe. Die Oberflächen 2 und 5 sind 'low-e' beschichtet. Die entsprechenden Spiegelbilder Nr. 2 und 5 erscheinen deshalb in einer anderen Farbe.



U_f = 1,9 W/(m²K) Ψ_g = 0,064 W/(mK)
Glaseinstand 15 mm U_W = 1,6 W/(m²K)

U_f = 0,75 W/(m²K) Ψ_g = 0,028 W/(mK)
Glaseinstand 27 mm U_W = 0,78 W/(m²K)

Abbildung 19 Standard-Fensterrahmen (IV68) aus Nadelholz im Vergleich zu einem wärmegedämmten Fensterrahmen, jeweils mit Isothermenbild. Beim gedämmten Rahmen sind Glaseinstand (20...30 mm) und Bautiefe (hier 120 mm) vergrößert, ein thermisch getrennter Randverbund wird verwendet. Stellvertretend für viele mögliche Konstruktionen [28] ist im Bild ein fiktives homogenes Material (λ = 0,085 W/[mK]) eingezeichnet. Man beachte besonders die Oberflächentemperaturen am Glasrand innen: 7 °C im Auslegungsfall führen beim ungedämmten Standard-Fensterrahmen mit Alu-Randverbund regelmäßig zu Tauwasserbildung. Beim gedämmten Rahmen ist dies nicht der Fall.



SO NICHT: Ein ungünstig eingebautes Fenster verursacht hohe Wärmebrückenverluste: weit außen platziert, durchgehendes Brett in Laibung und Brüstung, keine Überdämmung des Rahmens.

Ψ_{Einbau} = 0,06 W/(mK) $U_{W,eingebaut}$ = 0,93 W/(m²K)

Optimierte Einbausituation: Fenster in der Mitte der Dämmebene angeordnet, Kanthölzer nur punktuell unter dem Fenster platziert (Statik beachten).

$\Psi_{Einbau} \leq$ 0,014 W/(mK) $U_{W,eingebaut}$ = 0,82 W/(m²K).

Im Brüstungsbereich muss selbstverständlich auf eine funktionsfähige Wasserführung geachtet werden. Im Laibungsbereich sollte der Rahmen gut überdämmt werden, siehe Abbildung 21.

Abbildung 20 Prinzipskizzen für Fenstereinbau in eine Wand mit U_{Wand} = 0,12 W/(m²K), jeweils mit Isothermenverlauf. Fenster U-Wert: U_w = 0,78 W/(m²K)

Scheiben für das Auge transparent. Die Transparenz im sichtbaren Spektralbereich (τ_{vis}) und der Energiedurchlassgrad (g-Wert) werden durch die Beschichtung jedoch ein wenig verringert, d.h. es muss ein Kompromiss zwischen gutem Wärmeschutz und solaren Gewinnen gefunden werden.

Für die Optimierung des g-Wertes wäre es z.B. wünschenswert, statt der Oberflächen 2 und 5 die Flächen 3 und 5 zu beschichten. Beschichtet man jedoch eine Oberfläche auf der mittleren der drei Scheiben, so kann diese sich im Sommer bei hohen Einstrahlungen so stark und vor allem inhomogen erhitzen, dass sie möglicherweise springt. Aus diesem Grund kann die Beschichtung von Oberfläche 3 nur bei Einsatz von gehärtetem Einscheiben-Sicherheitsglas empfohlen werden. Dies wird aus Kostengründen nur in besonderen Fällen realisierbar sein.

Zwei-Scheiben-WSVG sind ähnlich aufgebaut, dort ist nur eine der vier Oberflächen (3. von außen) beschichtet. Die besten heute verfügbaren Zwei-Scheiben-WSVG erreichen U_g-Werte von 0,9 W/(m²K); nur mit dem Füllgas Xenon wären noch bessere Werte erreichbar. Xenon ist jedoch schlecht verfügbar und deshalb teuer. Weil für das Passivhaus geeignete Verglasungen U_g-Werte kleiner gleich 0,8 W/(m²K) aufweisen sollten, sind dafür in Mitteleuropa Dreischeibenverglasungen oder Verbundlösungen (z.B. 2 +1 oder 2 + 2) erforderlich.

Die heute erreichbaren U_g-Werte in Scheibenmitte und die g-Werte von Dreischeiben WSVG sind in Abbildung 17 zusammengestellt. Im mitteleuropäischen Klima

ist die Energiebilanz der Dreischeiben WSVG immer günstiger als die von Zweischeibenverglasungen; das gilt auch für südorientierte Fenster.

Das Passivhaus-**Energiekriterium** für eine Verglasung besagt, dass der g-Wert nicht auf Kosten des U_g-Wertes zu weit absinken darf, es muss gelten:

$$g \cdot 1{,}6\ W/(m^2K) \geq U_g$$

Ist diese Bedingung erfüllt, so kann man mit einer solchen Verglasung in der Regel über den Kernwinter hinweg netto solare Gewinne realisieren, sofern die Fenster nicht verschattet oder ungünstig orientiert sind.

In diesem Zusammenhang sei noch auf ein einfach zu prüfendes Merkmal solcher Verglasungen hingewiesen. Die Beschichtungen lassen sich durch die Farbe unterscheiden, die das Spiegelbild einer Kerzenflamme hat. Betrachtet man die sechs Spiegelbilder, so erscheinen die niedrig emittierenden Beschichtungen in einer anderen Farbe als die vier Bilder der nicht beschichteten Oberflächen. Mit diesem Schnelltest lässt sich also einfach prüfen, welche Oberflächen beschichtet sind, ob sich die Beschichtungen auf den richtigen Oberflächen befinden, bzw. ob überhaupt eine Beschichtung vorhanden ist. Man beachte jedoch, daß farbneutrale Beschichtungen geringere Farbunterschiede im Spiegelbild haben können als in Abbildung 18.

Bei Kastenfenstern werden zwei Zweifach-WSVG kombiniert. Es ist damit prinzipiell möglich, das Energiekriterium zu erfüllen, allerdings muss die Scheiben-Beschichtungs-Kombination geprüft werden, weil die vierte Scheibe den g-Wert evtl. zu stark vermindert. Verbundfenster kombinieren eine Zweifach-WSVG mit einer einzelnen Scheibe. Inzwischen sind einige für Passivhäuser geeignete Kasten- und Verbundfenster am Markt erhältlich [28]. Schalltechnisch sind diese Konstruktionen positiv zu bewerten. Die Möglichkeit, einen integrierten wettergeschützten Sonnenschutz im Luftzwischenraum anzuordnen, ist vor allem in windreichen Küstengebieten ein weiterer Vorteil, siehe Abschnitt 4.

Gedämmter Fensterrahmen

Neben den Wärmeverlusten der Verglasung sind die Verluste durch einen ungedämmten Fensterrahmen erheblich. Bei einem herkömmlichen Fensterrahmen (U_f = 1,5...2 W/[m²K]) sind sie etwa doppelt so groß wie bei einer typischen Dreischeiben-WSVG (U_g = 0,7 W/[m²K]). Zu einer hochwertigen Verglasung gehört daher auch ein gut wärmedämmender Fensterrahmen, denn die Rahmenanteile sind mit 30 bis 40 % bei typischen Fenstermaßen relativ hoch.

Der Rahmenanteil bzw. der Verglasungsanteil wird generell auf das Rohbaumaß der Fensteröffnung bezogen, unabhängig von einer etwaigen Überdämmung des Rahmens. Typische Rahmen-Ansichtsbreiten liegen bei etwa 120 mm (Laibung und Sturz) bis 140 mm (Brüstung) und zwar sowohl bei optimierten gedämmten Rahmen als auch beim Standard-Fensterrahmen mit 68 mm Bautiefe (IV68). Bei mittleren Fenstermaßen von 1,23 m x 1,48 m ist der Rahmenanteil 34 %, bei Balkontüren (1,1 m x 2,2 m) beträgt er immer noch 31 %, bei kleineren Fenstern steigt er schnell auf über 40 %.

Die wichtigsten Maßnahmen zur wärmetechnischen Optimierung von Fensterrahmen sind in [25] und [26] beschrieben, neuere Entwicklungen finden sich in [27] und in der Herstellerliste [28]. An erster Stelle steht die Vergrößerung der Bautiefe des Rahmens, um eine Dämmschicht unterbringen zu können. 68 mm Bautiefe sind für das Passivhaus regelmäßig zu wenig, selbst wenn heute verfügbare, thermisch optimierte Materialien verwendet werden.

Heute ist eine Vielzahl von gut wärmedämmenden Fensterrahmen am Markt erhältlich: Sandwich-Kanteln aus Holz-Purenit-PUR-Purenit-Holz führen zu einer Bautiefe von etwa 110 mm. Eine ähnliche Konstruktion ist auch mit Holz-Kork-Holz-Kork-Holz verfügbar.

Einige Hersteller fertigen Fensterrahmen aus Holz mit einer Dämmschale aus Kork, PUR, EPS oder anderem Dämmaterial, die aber nicht mit dem Holzrahmen verklebt, sondern verschraubt oder aufgeklipst ist. So kann die Konstruktion im Entsorgungsfall leicht in ihre Komponenten zerlegt werden. Eine Vorsatzschale aus Aluminium kann in vielen Fällen zusätzlich eingesetzt werden. Dämmschalen aus PU-Schaum werden inzwischen auch als Aufrüstungs-Bausatz für die Altbausanierung angeboten. Bei Kunststoffrahmen müssen die größeren Kammern der Profile mit Dämmaterial gefüllt sein. Weit verbreitet sind Einschieblinge, die aus Plattenmaterial gefräst sind. Bei ausgeschäumten Profilen muss vom Hersteller die Rohdichte des Materials kontrolliert werden, weil diese die Wärmeleitfähigkeit stark beeinflusst. Rahmen von Kasten- und Verbundfenstern erreichen wegen ihrer großen Bautiefe die geforderten Dämmwerte auch als Vollholz-Konstruktionen. Bei Kunststoff-Profilen müssen die Kammern jedoch in jedem Fall mit Dämmstoff gefüllt werden [28].

Zur Beurteilung eines wärmegedämmten Rahmens gilt folgende Regel: Gleichgültig, welches Material verwendet wird, es muss darauf geachtet werden, dass die wärmedämmende Schicht den Rahmen möglichst ununterbrochen und 'gerade' durchzieht. Einzelne isoliert angeordnete Einsätze aus dämmendem Material sind nur wenig wirksam. Betrachtet man die Isothermen im Rahmenprofil (Abbildung 19), so sollten sie möglichst 'kurz' sein, d.h. geradlinig durch das Rahmenprofil verlaufen, denn jede Verschwenkung vergrößert die wirksame Oberfläche, über die Wärme – von innen nach außen – ausgetauscht werden kann.

Neben den hier beschriebenen wärmetechnischen Eigenschaften eines Fensterrahmens sind selbstverständlich die luftdichte Ausführung der umlaufenden Dichtungen, bis zu drei Dichtungsebenen sind inzwischen üblich, siehe Abschnitt 2.5, die Schlagregendichtheit und die Funktionssicherheit für eine lange Lebensdauer des Fensters wichtig.

Thermisch getrennter Randverbund, erhöhter Glaseinstand

Die Standard-Fensterrahmen haben einen Glaseinstand von lediglich 15 mm. In der Standard-WSVG wird darüber hinaus ein Abstandhalter aus Aluminium eingesetzt, der eine erhebliche Wärmebrücke darstellt. Die Entschärfung der Wärmebrücke am Glasrand erfolgt auf zwei Wegen. Zum einen wird der Glaseinstand vergrößert, 25 bis 30 mm sind nach neueren Untersuchungen unproblematisch. Darüber hinaus wird ein thermisch getrennter Abstandhalter aus dünnwandigem Edelstahlblech (Wandstärke ≤ 0,2 mm) oder aus Kunststoffprofilen verwendet [27]. Bei gleicher Geometrie des Rahmenprofils lassen sich damit die Wärmeverluste eines Fensters um bis zu 8 % verringern. Wichtig ist auch, dass wegen der geringeren Wär-

mebrückenwirkung eine Tauwasserbildung am Glasrand nahezu ausgeschlossen wird.

Einbauwärmebrücke am Fenster

Beim Einbau eines Fensters in die Wand entsteht oft eine nicht zu vernachlässigende Wärmebrücke. Typische Wärmebrücken-Verlustkoeffizienten Ψ_{Einbau} von optimierten Einbaudetails liegen im Brüstungsbereich bei 0,03 W/(mK), weil hier wegen der Fensterbank und der Wasserführung der Rahmen kaum überdämmt werden kann. In Laibung und Sturz lassen sich mit einer konsequenten Überdämmung des Rahmens auch negative Einbau-Ψ-Werte erreichen. Die genannten Werte beziehen sich auf eine Wand mit $U_{Wand} \leq 0{,}15$ W/(m²K). Der Grenzwert für ein eingebautes Passivhausfenster von $U_{W,eingebaut} \leq 0{,}85$ W/(m²K) kann somit eingehalten werden.

Viele konventionelle Einbaudetails weisen sehr große Wärmebrückeneffekte auf [21].

Das Fenster ist weit aus der Mitte des Wandaufbaus heraus platziert und wird auf einem durchgehenden Brett befestigt. Wie man in Abbildung 20 sieht, können die durch ungünstigen Einbau verursachten Wärmebrückenverluste so groß werden, dass sich trotz der Verwendung eines thermisch optimierten Fensters mit $U_W \leq 0{,}8$ W/(m²K) für das eingebaute Fenster eine erhebliche Verschlechterung ergibt.

Rolläden sind prinzipiell auch im Passivhaus möglich. Ihr Einbau verursacht jedoch eine zusätzliche Wärmebrücke. Wenn möglich sollten Vorbau-Rolläden gewählt werden, die vor einer mindestens 6 cm starken Dämmschicht angeordnet werden, so dass sich auf der Innenoberfläche kein Tauwasser bilden kann. Die Bedienung sollte möglichst über einen luftdichten Antrieb erfolgen, elektrisch oder mit Kurbelwelle, es gibt inzwischen aber auch luftdichte Gurtdurchführungen [30].

Behaglichkeitskriterium für Fenster

Die Forderung nach einem U-Wert von weniger als 0,85 W/(m²K) für das Fenster leitet sich von den Anforderungen an die Behaglichkeit und aus der Energiebilanz des Gebäudes her. Verzichtet man auf einen Heizkörper unter dem Fenster, so muss die mittlere Temperatur an der Innenoberfläche des Fensters auch im Auslegungsfall höher sein als 17 °C. Ansonsten kann es zu einem Kaltluftsee am Boden kommen, so dass ein Aufenthalt in der Nähe der Fenster unbehaglich sein kann.

Die Forderung nach Vermeidung von Schimmelwachstum führt bei üblichen Raumluftfeuchten auf eine Oberflächentemperatur von mindestens 13 °C an jeder Stelle der inneren Fensteroberfläche, d.h. auch am Glasrand. Mit den oben erwähnten thermisch getrennten Abstandhaltern und einem erhöhten Glaseinstand lässt sich dies ohne weiteres realisieren.

Gedämmte, luftdichte Haustür

Für Haustüren gelten die gleichen Anforderungen wie für Fenster. Der U-Wert einer eingebauten Tür, bezogen auf das Standardmaß von 1,1 m x 2,2 m, sollte nicht über 0,8 W/(m²K) liegen. Die Einbauwärmebrücke im Bereich der Schwelle ist relevant, weil hier der Rahmen nicht überdämmt werden kann.

Neben der thermischen Anforderung ist die dauerhaft luftdichte Konstruktion hier besonders wichtig, weil eine Tür sehr viel öfter bewegt wird als ein Fenster. Die Luftdichtheit ist unter verschiedenen typischerweise auftretenden Klimabedingungen zu gewährleisten. Besonderes Augenmerk ist auf das Schwellenprofil zu legen, wofür inzwischen spezielle Schließmechanismen zur Verfügung stehen [28].

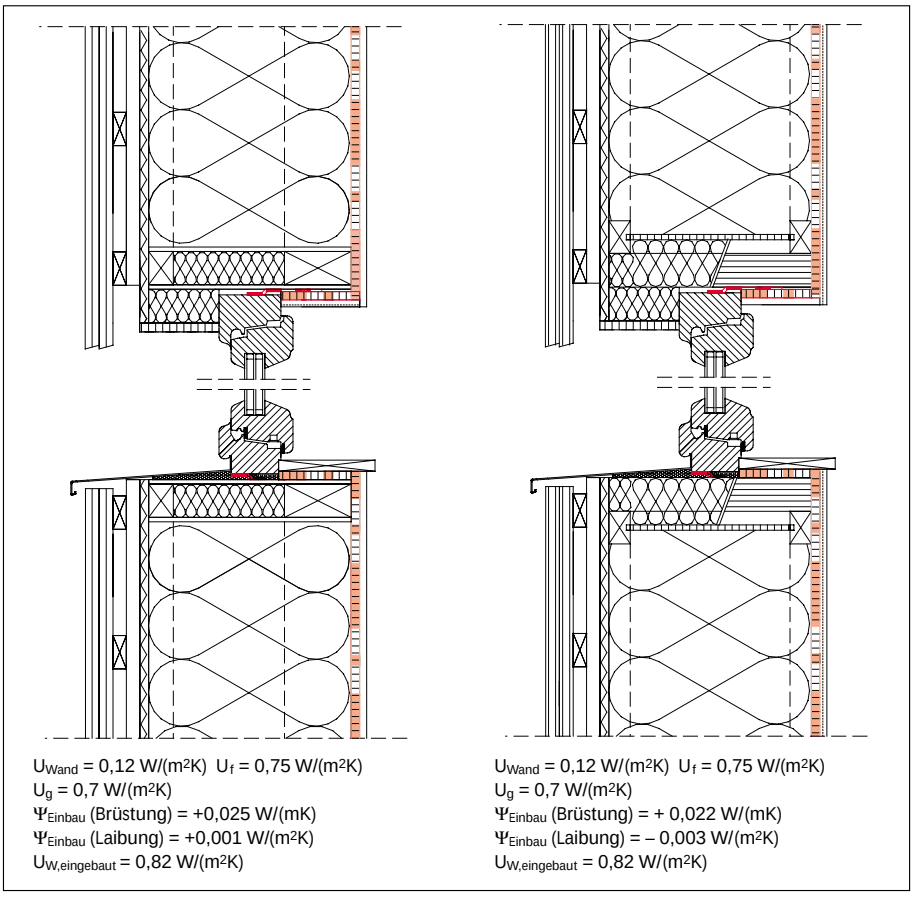


Abbildung 21 Einbaudetail Fenster. Links bei einer Box-Träger-Konstruktion. Rechts: Beim Doppel-T-Träger kann mit punktuell eingelegten Kanthölzern über dem quer liegenden Träger gearbeitet werden, so dass das Fenster darauf abgestellt werden kann. Abstand und Bemessung je nach Statik. Die innere Laibung ist hier mit Holzwerkstoff-Platten dargestellt, die mit dem Fenster luftdicht verklebt wird. Statt dessen kann ggf. auch mit einer Folienschürze gearbeitet werden, die mit dem Fenster geliefert und direkt mit der Innenwand-Beplankung verklebt wird [23].

2.5 Rundum luftdichte Konstruktion.

Die Gebäudehülle muss aus verschiedenen Gründen luftdicht sein. Die weitverbreitete Meinung, dass durch Fugen in Wänden und Fenstern eine ausreichende Belüftung einer Wohnung sichergestellt werden kann, ist irrig. Fugenlüftung ist bei Windstille ungenügend, weil der Luftaustausch zu gering ist, oder aber es zieht schon bei mäßigem Wind sehr unangenehm.

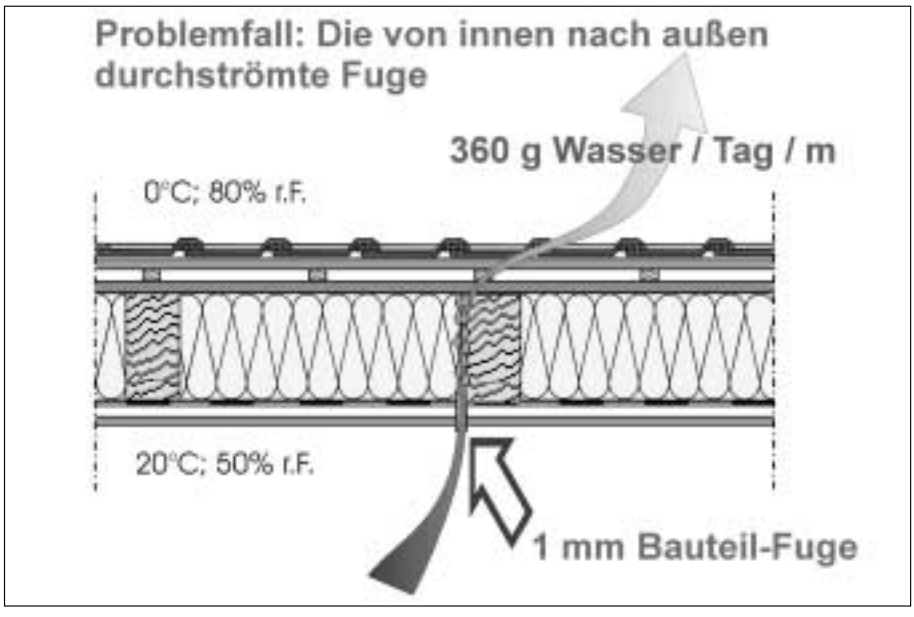


Abbildung 22 Wasserdampftransportmechanismen in Bauteilen. Eine Luftströmung aufgrund von Konvektion durch Fugen transportiert einige Zehnerpotenzen mehr an Wasser als die Wasserdampfdiffusion [32, 33].

Außerdem transportiert Luft auch Feuchtigkeit. Warme Raumluft bei 20 °C und 50 % rel. Feuchte enthält etwa 7,3 g Wasserdampf pro kg Luft. Der Luftstrom durch eine 1 mm breite Fuge, der von einer Druckdifferenz von nur 2 Pa getrieben wird, transportiert rund 360 g Wasser pro Tag und Meter Fugenlänge nach außen durch das Bauteil, Abbildung 22. Im Bauteil sinkt jedoch die Temperatur bis auf Außentemperatur (im Beispiel 0 °C) ab. Wird in der Fuge die Taupunkt-Temperatur der Luft unterschritten (10 °C bei Randbedingungen nach DIN 4108) fallen dort erhebliche Mengen an Tauwasser aus, welche die Materialfeuchte der umgebenden Werkstoffe erhöhen und dort zu Schäden führen können. Die Menge Wasserdampf, die über Diffusion durch das Bauteil transportiert wird, ist demgegenüber verschwindend gering. Die Diffusion ist jedoch selbstverständlich durch einen geeigneten Aufbau der Einzelschichten zu berücksichtigen [32, 33, 34].

Ein weiterer Nachteil der Fugenlüftung sind die daraus resultierenden unkontrollierten Lüftungswärmeverluste, die sogenannten Infiltrationswärmeverluste. Für ein gut luftdichtes Gebäude (n_{50} = 0,3...0,4 $^1/_h$) betragen sie lediglich etwa 1 kWh/(m²a), sie steigen mit zunehmenden Leckagen rasch an. Bei einem n_{50}-Wert von 0,6 $^1/_h$, dem Grenzwert für Passivhäuser, werden schon 3 kWh/(m²a) erreicht. Mit einem n_{50}-Wert von 1,0 $^1/_h$ würde der Heizenergiebedarf für das Beispielgebäude in Abbildung 3 den Grenzwert von 15 kWh/(m²a) schon überschreiten.

Als Zielwert für die Luftdichtheit von Passivhäusern sollte man n_{50} = 0,3 $^1/_h$ anstreben, um den Grenzwert von n_{50} = 0,6 $^1/_h$ dauerhaft und sicher zu unterschreiten. Wie die zahlreichen gebauten und messtechnisch begleiteten Häuser zeigen, ist dieser Wert bei guter Planung und konsequenter Ausführung von Details bei allen Bauarten gut erreichbar [36, 37, 38]. Kleinere n_{50}-Werte sollten jedoch nicht angestrebt werden, weil der Aufwand dann stark ansteigt.

Planungsgrundsätze für eine luftdichte Hülle

Der bei weitem wichtigste Grundsatz bei der Planung und Erstellung einer luftdichten Gebäudehülle besteht in einer frühzeitigen klaren Festlegung der luftdichten Ebene. Es muss **genau eine** dichte Hüllfläche rund um das ganze Gebäude führen. Zwei halbwegs dichte Hüllen sind zusammen ebenfalls nur halbwegs dicht. Die luftdichte Hülle muss man auf den Schnittzeichnungen mit einem Stift jeweils ohne Abzusetzen umfahren können, vgl. Abbildung 1. Dabei ist es unbedingt notwendig, bei der Planung schon an die baupraktische Ausführung zu denken. Dreidimensionale Details sind besonders zu berücksichtigen. Durchdringungen sind möglichst zu vermeiden, ansonsten sind sie sorgfältig zu planen, präzise auszuschreiben und die Ausführung ist zu kontrollieren. Die luftdichte Schicht wird normalerweise raumseitig angeordnet, so kann sie zugleich als Dampfbremse fungieren. In den Beispielen in Abbildung 4 bis Abbildung 6 übernimmt jeweils die innenliegende Holzwerkstoff-Platte diese Aufgabe. Nach dem Grundsatz: **innen dicht und außen dämmend,** aber diffusionsoffen, ist ein solcher Aufbau bauphysikalisch einwandfrei. Dies entbindet jedoch nicht von einer genauen Betrachtung des Feuchtetransports, sowohl in der Fläche als auch an den Anschluss-Details. Auch für Schallschutz und Brandschutz ist die Dichtheit bedeutsam: 'Wo Luft geht, geht auch Schall'. Fugen ermöglichen außerdem Rauchströmungen im Brandfall.

Drucktest ist unabdingbar

Die Prüfung der Gebäudehülle auf Luftdichtheit, auch Drucktest genannt, sollte möglichst frühzeitig nach dem Einbau der Fenster und Türen stattfinden. Eine innenliegende luftdichte Schicht ist dabei vorteilhaft, weil sie gut zugänglich ist und ggf. nachgebessert werden kann. Der Innenausbau, d.h. das Anbringen einer Installationsebene bzw. einer Beplankung sollte aus diesem Grund erst nach dem Drucktest stattfinden.

Die Luftdichtheit eines Gebäudes oder einer Wohnung wird bei einem Drucktest mit einer 'Blower-Door' (engl. Ausdruck für Gebläsetür) ermittelt. Dazu wird ein Gebläse in eine Öffnung, z.B. eine Tür oder ein Fenster eingebaut und alle anderen Öffnungen, auch die Zu- und Abluftkanäle, werden geschlossen. Mit dem Gebläse wird in der Wohnung ein kleiner Über- oder Unterdruck von 50 Pa erzeugt. Gleichzeitig wird der Luftvolumenstrom [m³/h] gemessen, der bei dieser Druckdifferenz vom Gebläse gefördert wird. Dieser Messwert wird auf das umbaute Netto-Volumen [m³] der Wohnung bezogen. So entsteht der sogenannte n_{50}-Wert [$^1/_h$], der den Luftwechsel einer Wohnung bei 50 Pa Druckdifferenz angibt. Grenzwert für die Luftdichtheit eines Passivhauses ist n_{50} = 0,6 $^1/_h$. Die Normung [31] schreibt hier die Vorgehensweise beim Drucktest und den Berechnungsmodus vor, der Fachverband für Luftdichtheit im Bauwesen (FLIB) gibt dazu weitere Hinweise [32, 34, 35].
Dieser Luftwechsel bei 50 Pa Druckdifferenz ist nicht zu verwechseln mit dem Nennluftwechsel [$^1/_h$], der von der Lüftungsanlage im regulären Betrieb aufrechterhalten wird, siehe Abschnitt 3.1.

Der Drucktest mit der 'Blower-Door' (siehe Kasten) ist ein zentrales Mittel der Qualitätssicherung für ein Passivhaus. Von vielen Holzbaufirmen wird er inzwischen als Serviceleistung inklusive angeboten, weil damit aufwändige spätere Nacharbeiten vermieden werden können. Trotzdem sollte die Endabnahme möglichst von einem unabhängigen Gutachter durchgeführt werden [32]. Dies ist auch im Hinblick auf die Gewährleistung der zugesicherten Eigenschaften des Gewerks 'luftdichte Hülle' dringend anzuraten und dient zur Abgrenzung von nachfolgenden Gewerken.

Materialien und Komponenten für die luftdichte Hülle

Für die luftdichte Hülle sind drei Kategorien zu beachten: die luftdichte Fläche der Regelbauteile, Bauteilanschlüsse (Ortgang, Traufe, Fenstereinbau) und punktförmige Durchdringungen (z.B. Kabeldurchführungen). Dauerhaft luftdichte Materialien für die Regelflächen und für Anschlüsse sind in Tabelle 2 zusammengestellt.
Durchdringungen der luftdichten Ebene sollten möglichst vermieden werden. Hier hat die Installationsebene Vorteile. Sie sollte allerdings so tief sein (6 cm), dass die luftdichte Schicht beim Bohren bzw. bei Einbauten wie Steckdosen nicht verletzt werden kann. Es können aber auch Vorwandinstallationen, z.B. Fußleistensysteme eingesetzt werden.
Für unvermeidbare Durchdringungen gibt es Gummimanschetten mit verschiedenen Durchmessern und fertig angeschweißtem Kragen, der ein faltenfreies Verkleben auf der durchstoßenen Ebene erlaubt. Steckdosen für Hohlwandinstallationen in luftdichter Ausführung sind inzwischen Stand der Technik [35], allerdings dürfen in diese Dosen nur die wirklich benötigten passgenauen Löcher geschnitten werden. Auf einzelne Steckdosen sollte in Außenwänden jedoch soweit wie möglich verzichtet werden.
Für Fenster verwendet man Klebebänder mit zwei unabhängig voneinander abgedeckten Klebeflächen, die zuerst als Kragen am Fenster angebracht werden und später bauseits mit der luftdichten Ebene verklebt werden. Auch eine fest mit dem Fenster verbundene Folienschürze vereinfacht den Einbau [23]. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass alle am Bau Beteiligten über den Sinn dieser überstehenden Folienstücke aufgeklärt werden, sonst werden sie gerne (in Unkenntnis) abgeschnitten. Ein entsprechender Hinweis in den Ausschreibungen ist hier hilfreich, die Kontrolle vor Ort unerlässlich.
Geometrisch komplizierte Abklebungen sollten sorgfältig vorgeplant werden, sie gelingen einfacher mit Klebeschnüren z.B. aus Butylkautschuk.
Bei allen Verklebungen, die nicht formschlüssig z.B. durch eine Anpressleiste unterstützt werden, gilt generell: die Standzeit des Klebstoffs und die Beschaffenheit der Oberflächen bei der Verarbeitung entscheidet über die Lebensdauer der luftdichten Schicht. Verklebungen mit Paketklebeband halten gerade eben 'bis nach dem Drucktest' und sind daher für diesen Zweck definitiv ungeeignet. Die Klebemittelindustrie hat inzwischen zahlreiche Produkte, deren Standzeit als gut bezeichnet werden kann [28, 32].
Die Reißfestigkeit von qualifizierten Spezialklebebändern kann nach den bisherigen Erfahrungen ebenfalls als ausreichend bezeichnet werden. Bei der Verklebung von Holzwerkstoff-Platten treten im allgemeinen Bauteilbewegungen von wenigen Millimetern auf, die von den Klebebändern ohne Rissbildung verkraftet werden. Nachmessungen der Luftdichtheit an bewohnten Gebäuden ergaben keine nennenswerte Verschlechterung des n_{50}-Wertes nach einigen Jahren.
Bei geschlossenen Holztafelelementen mit Befestigung der Außenwandtafeln durch Stahlwinkel ist das luftdichte Abkleben der Anschlußfuge vor dem endgültigen Befestigen der Winkel auszuführen. Ein Überkleben der Montagewinkel ist aufwändig und fehleranfällig. Werden OSB-Platten als luftdichte Ebene gewählt, so müssen wegen der rauhen Oberfläche die Stossverklebungen mit möglichst breiten Klebebändern (60...100 mm), die sorgfältig angedrückt werden, verklebt werden. Gut bewährt haben sich Streifen aus Baupappe mit pastösem Kartuschenkleber.

Tabelle 2 geeignete bzw. nicht geeignete Materialien für die Konstruktion der luftdichten Hülle eines Gebäudes. Selbstverständlich sind die Verarbeitungshinweise der Hersteller zu beachten.

Geeignet: luftdichte Materialien für Regelbauteile	*Nicht geeignet: undichte Materialien*
• *Innenputz auf Mauerwerk* • *Folien* • *armierte Baupappe* • *Harte Holzwerkstoff-Platten, z.B. OSB, FPP, BFU* • *Beton, richtig verarbeitet*	• *Mauerwerk (Mörtelfugen!)* • *HWL- und Holzweichfaser-Platten* • *perforierte Folien* • *PS-Hartschaumplatten* • *Nut- und Federschalung*
dichte Anschlüsse	*nicht dauerhaft dichte Anschlüsse*
• *Verkleben von Folien mit Butylkautschuk-Klebeband und zusätzliche Anpresslatte* • *sachgerecht verwendetes vorkomprimiertes Dichtungsband mit Anpresslatte* • *mit gut eingestelltem Beton ausgegossene Durchdringungen und verspachtelte Fugen* • *luftdichtes Acrylat-Klebeband* • *angepresste Dichtlippe*	• *Paketklebeband, Kreppband o.ä.* • *zu trockener Beton (schwer dichtend einzubringen)* • *zu nasser Beton (Schwindfugen)* • *Verklebung auf ungeprimerten Massivbauteilen* • *PU-Montageschaum* • *Verfugung mit Silikon*

3 Haustechnik

3.1 Kontrollierte Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung

Die kontrollierte Wohnungslüftung ist ein zentraler Bestandteil des Passivhauses. Sie versorgt die Wohnung dauernd mit hygienisch einwandfreier frischer Luft und transportiert Feuchtigkeit, Gerüche und andere Luftbelastungen aus der Wohnung. Untersuchungen der Raumluftfeuchte und Raumluftqualität zeigen, dass auch in konventionellen Gebäuden das Lüften über Fenster bei üblichen Lüftungsverhalten häufig nicht ausreicht. Andererseits werden oft deutlich erhöhte Heizwärmeverbräuche hervorgerufen, wenn die Fenster auf Dauer-Kipp gestellt werden.

Im Passivhaus ist eine Komfort-Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung (WRG) aus der Abluft unumgänglich, um die Lüftungswärmeverluste auf ein vertretbares

Der hygienisch notwendige Volumenstrom für frische zuströmende bzw. abzuführende Luft liegt bei etwa 30 m³/h pro Person und Wohnung (DIN 1946). Das führt bei typischen Wohnungen und Einfamilienhäusern mit einer Belegung von vier Personen zu einer Luftmenge von 120 m³/h. Bezogen auf das Netto-Volumen einer Wohnung von z.B. 120 m² · 2,5 m = 300 m³ ergibt sich ein Nenn-Luftwechsel von etwa 0,4 $^1/_h$. Dieser Luftwechsel wird bei der Auslegung einer Lüftungsanlage zugrundegelegt. Im Winter, bei sehr tiefen Außentemperaturen und deshalb sehr trockener Außenluft kann es ratsam sein, den Luftwechsel individuell zu drosseln, 0,3 $^1/_h$ ist dann immer noch ausreichend.

Maß zu reduzieren. Der Luftwechsel liegt in der Regel zwischen 0,3 $^1/_h$ und 0,5 $^1/_h$. Dem liegt eine Auslegungs-Richtgröße von 30 m³/h Luftvolumenstrom pro Person in der Wohnung zugrunde, der erfahrungsgemäß ausreicht, um hygienisch einwandfreie Luft zu erreichen. Bei reinem Abluftbetrieb oder Fensterlüftung verursacht solch ein Luftwechsel Wärmeverluste, die den Heizwärmeverbrauch in einem typischen Passivhaus etwa verdoppeln würden.

Die Wärmerückgewinnung reduziert diese Lüftungswärmeverluste erheblich, indem in einem Wärmeübertrager (Abbildung 23) die warme Abluft an der kalten Frischluft vorbeigeleitet wird. Dabei kann die Außenluft je nach Effizienz des Wärmeübertragers über 90 % der Wärme aus der Abluft aufnehmen. Ein Wärmebereitstellungsgrad der WRG von mindestens 75 % ist der Grenzwert für das Passivhaus. Abluft- und Außenluftkanäle im Wärmeübertrager müssen gegeneinander dicht sein, so dass sich Außenluft und Abluft sich nicht vermischen können (interne und externe Leckagen kleiner als 3 %).

Über das ganze Jahr gerechnet reduzieren sich die Lüftungswärmeverluste durch die Wärmerückgewinnung auf etwa 7 kWh/(m²a). Die Zahlen in Tabelle 3 machen deutlich, dass ein Passivhaus ohne Komfort-Lüftung mit effizienter WRG nicht realisierbar wäre, auch wenn die anderen Komponenten, z.B. Wände und Fenster, noch weiter verbessert würden.

Die Zuluft hat nach dem Wärmeübertrager auch im Auslegungsfall eine Temperatur von mindestens 16,5 °C. Diese Temperatur genügt, um unbehagliche Temperaturschichtungen im Zuluftraum zu vermeiden. Die Zuluft muss also nicht unbedingt nacherwärmt werden, wenn die zusätzlich notwendige Wärme anderweitig eingebracht wird. Dies kann z.B. bei Modernisierungsmaßnahmen der Fall sein, wenn schon Heizkörper in den Räumen vorhanden sind, oder wenn mit kostengünstigen kleinen statischen Heizflächen gearbeitet wird.

Die Lüftungsanlage darf insgesamt nicht mehr Primärenergie verbrauchen, als sie an Wärmeverlusten einspart. Der Verbrauch an elektrischer Energie für den Betrieb der Ventilatoren und deren Steuerung darf deshalb nach dem Stromeffizienzkriterium für Lüftungsanlagen mit WRG nicht höher sein als 0,45 Wh/m³, bezogen auf das

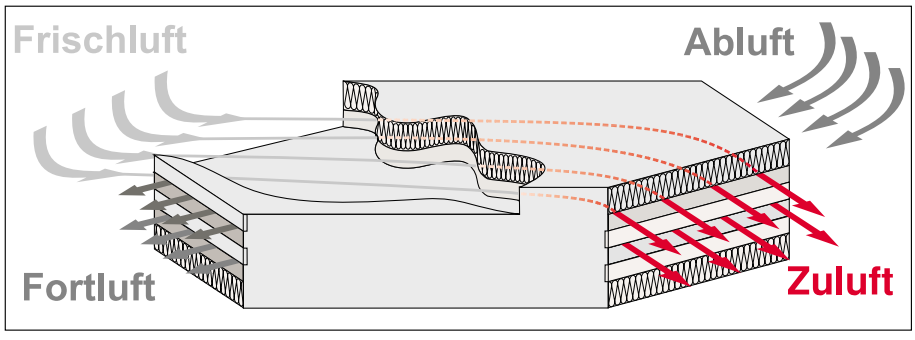


Abbildung 23 Der Wärmeübertrager, Herzstück der kontrollierten Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung. Zuluft- und Abluftkanäle sind vollständig voneinander getrennt.

Tabelle 3 Luftwechsel und Lüftungswärmeverluste im Passivhaus mit Lüftungswärmerückgewinnung verglichen mit reinem Abluftbetrieb oder Fensterlüftung.

			Lüftung mit WRG	*reine Abluft bzw. Fensterlüftung*
Luftwechsel	n	$[^1/_h]$	*0,4*	*0,4*
Effizienz der WRG	η_{WRG}		*81 %*	*0 %*
Lüftungswärmeverluste	Q_V	*[kWh/(m²a)]*	*6,6 (15 %)*	*27,7 (43 %)*
Transmissionswärmeverluste	Q_T	*[kWh/(m²a)]*	*37,2*	*37,2*
Heizwärmebedarf	Q_H	*[kWh/(m²a)]*	*14,9*	*34,7*

geförderte Luftvolumen. Das entspricht bei einem typischen Volumenstrom von 120 m³/h einer elektrischen Leistung von weniger als 60 W. Um diese Effizienz zu erreichen, muss die ganze Anlage sorgfältig ausgelegt und geplant werden. Die Kanäle zu den Räumen sollten möglichst kurz sein, geradlinig verlaufen und mit glattwandigen, möglichst runden Rohren ausgeführt werden, um die Druckverluste zu minimieren. Die Zuluft- und Abluftelemente in den Räumen sollten ebenfalls geringe Druckverluste aufweisen und müssen einstellbar sein. Das ist besonders im Holzbau wichtig, weil hier die Innenwände aus Gründen des Schallschutzes gut gedämmt sind (U_{Wand} = 0,3...0,4 W/[m²K]). Die Wärmezufuhr und damit der Luftvolumenstrom zu den einzelnen Räumen muss deshalb besonders genau abgeglichen werden.

Zulufträume (Wohn und Schlafzimmer) und Ablufträume (Küche, Bad, WC) sind durch Überströmzonen (Flur etc.) miteinander verbunden. Auf diese Weise wird der gerichtete Luftstrom auf dem Weg durch die Wohnung mehrfach genutzt. Damit der vorgegebene Luftvolumenstrom nicht durch geschlossene Türen behindert, bzw. die Druckverluste nicht erhöht werden, müssen geeignete Überströmöffnungen vorgesehen werden [41]. Am einfachsten geschieht das durch Kürzen des Türblattes. Zu empfehlen ist auch ein verblendeter Spalt über der Türzarge, der Schalltechnisch optimiert werden kann, Abbildung 24. Die Lüftung darf auch akustisch nicht stören. Ein Schallpegel von 25 dB(A) als oberer Grenzwert hat sich in Passivhäusern bewährt. Um diesen Wert zu erreichen, sind in Zu- und Abluftkanälen Schalldämpfer vorzusehen, die das Ventilatorgeräusch vermindern und die Telefonieschallübertragung zwischen den Räumen unterbinden.

Die Lüftungsanlage muss aus hygienischen Gründen (Verschmutzung des Rohrnetzes) mit einem geeigneten Filter in der Frischluftansaugung und Grobfiltern in den Abluftventilen ausgestattet sein. Diese Filter müssen spätestens nach einem Jahr erneuert werden. Die Bedienung der Anlage durch den Nutzer sollte möglichst einfach sein.

Die Temperatur der angesaugten Außenluft muss an sehr kalten Wintertagen so weit angehoben werden, dass der Wärmeübertrager fortluftseitig – also dort, wo die abgekühlte feuchte Raumluft nach außen strömt – nicht zufriert. In der Regel muss dazu die zuströmende Außenluft auf über –4 °C gehalten werden, damit die Fortlufttemperatur nicht unter 0 °C absinkt. Im typischen mitteleuropäischen Klima ist der Energieaufwand hierfür sehr gering, weil die Perioden mit extrem kalten Außentemperaturen nicht sehr lang dauern.

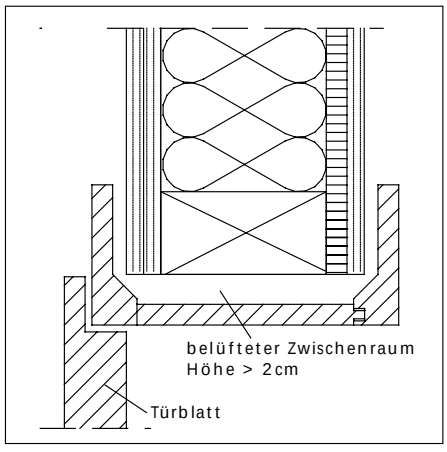


Abbildung 24 Konstruktionsvorschlag für eine Überströmöffnung im oberen Teil der Türzarge, die im Holzbau einfach herzustellen ist. Druckabfall und Schallschutzanforderungen beachten, Zeichnung nach Ing.-Büro ebök, Tübingen in [41].

Ein richtig dimensionierter Erdkanal bzw. Erdreichwärmetauscher [41] kann diese Frostschutzfunktion erfüllen, er erwärmt die zuströmende kalte Außenluft ohne zusätzlichen Energieverbrauch, so dass der Wärmeübertrager immer frostfrei bleibt. Die damit realisierbare zusätzliche Heizwärme-Einsparung beträgt etwa 1,2 kWh/(m²a), die in der Aufstellung in Abbildung 3 schon eingerechnet ist. Ohne Erdkanal ergäbe sich für dieses Haus ein Heizenergieverbrauch von 14 statt 12,8 kWh/(m²a). Aus diesen Zahlen wird deutlich, dass ein in der Investition teurer Erdkanal zu relativ hohen Kosten für die durch ihn eingesparte Kilowattstunde Heizwärme führt.

3.2 Extrem geringe Heizlast

Im Passivhaus ist der restliche durch eine Heizung zu deckende Wärmebedarf extrem gering. Aus numerischen Simulationen und aus den Erfahrungen von inzwischen zahlreichen gebauten und messtechnisch begleiteten Gebäuden ergibt sich für das Passivhaus eine Heizleistung im Auslegungsfall von maximal 10 W/m² [39].
Die im Kernwinter benötigte restliche Raumwärme muss nicht unbedingt über konventionelle Heizflächen, sondern kann auch über die ohnehin vorhandene Lüftungsanlage den Räumen zugeführt werden. Dazu wird die Lüftungsanlage mit einem Luftheizregister, das nach dem Wärmeübertrager im Zuluftstrom angeordnet wird, zu einer Frischluftheizung ergänzt. Mit typischen Volumenströmen (120 m³/h pro Wohnung) und realistischen Temperaturhüben von $\Delta\vartheta$ = 37 K = 52 °C – 15 °C (Lufttemperatur nach dem Wärmeübertrager im Auslegungsfall) kann eine Heizleistung von etwa 10 W/m² erbracht werden.

Nach den geltenden Regeln muss die Temperatur im Badezimmer generell auf 24 °C einstellbar sein. Dazu reicht die oben beschriebene Zuluftheizung im Auslegungsfall nicht aus. Deshalb ist im Badezimmer eine zusätzliche Wärmequelle vorzusehen. Handelt es sich um einen Heizkörper, sollten Vor- und Rücklaufleitungen möglichst kurz gehalten werden. Man achte hierfür auf eine optimierte Grundrissgestaltung der Wohnung, siehe weiter unten.

Die Wohnungslüftung mit WRG und Zuluftnacherwärmung ist keine Umluftheizung und keine Klimaanlage. Sondern es wird nur die aus hygienischen Gründen ohnehin erforderliche Außenluft nach dem Wärmeübertrager auf die gewünschte Zuluft-Temperatur aufgeheizt. Aus diesem Grund wird dafür häufig der Begriff 'Frischluftheizung' verwendet [39].

3.3 Sonstige Haustechnik

Warmwasser-Bereitung

Der Energiebedarf für die Brauchwasserbereitung liegt im Passivhaus in der Regel über dem Heizwärmebedarf. Daher ist hier auf besondere Effizienz zu achten: Leitungswege für Warmwasser sollten möglichst kurz gehalten werden, so dass auf eine Zirkulation verzichtet werden kann. Leitungen und Speicher sollten generell gut gedämmt werden (etwa Faktor zwei gegenüber der heute üblichen Dämmstärke und sorgfältige Ausführung). Der Grundrissgestaltung kommt dabei besondere Bedeutung zu, weil sie meist in einem frühen Planungs-Stadium festgelegt wird. Küche, Bad und WC sollten in einem Bereich des Hauses, evtl. übereinander, konzentriert werden. So können Versorgungsleitungen für Wasser und die Abluftleitungen kurz gehalten werden.

Eine Solaranlage ist für Passivhäuser wegen der Dominanz des Warmwasserverbrauchs besonders interessant. Bei einer typischen Auslegung (Kollektorfläche etwa 5 m², Speichervolumen etwa 300 Liter) kann die Solaranlage den Brauchwasserwärmebedarf im Sommer weitgehend decken.

Wärmeerzeugung für das Passivhaus

Als Wärmeerzeuger stehen im Passivhaus generell alle bekannten Techniken zur Verfügung: Gas-/Öl-Brennwert-Geräte, Holz- bzw. Holz-Pellets-Heizungen. Wegen des sehr geringen Leistungsbedarfs von etwa 1,5 kW für eine typische Wohnung sind die bislang am Markt verfügbaren Geräte für Einfamilienhäuser jedoch meist zu groß dimensioniert. Für Reihenhaus-Blocks und Geschosswohnungsbauten bieten sich Semi-Zentrale Lösungen an, die mit gängigen Geräten im unteren Leistungsbereich versorgt werden können. In Siedlungen werden immer öfter Nahwärmenetze mit Blockheizkraftwerken realisiert. In jedem Fall sollten die Möglichkeiten am Standort ausgelotet werden und ein auf die konkrete Situation abgestimmtes Energie-Konzept erarbeitet werden.

Für die Beheizung von einzelnen Passivhäusern und Wohnungen können auch sogenannte Kompaktaggregate eingesetzt werden. Diese Geräte heizen die Zuluft und erwärmen das Brauchwarmwassers mit einem integrierten kleinen Wärmeerzeuger, z.B. einer Wärmepumpe. Sie wurden in den letzten Jahren von verschiedenen Firmen bis zur Marktreife entwickelt. Sie bieten sich für Passivhäuser an, weil die gesamte Haustechnik in einem Gerät vereinigt ist und somit der Installationsaufwand gering ist.

Eine Wärmepumpe entzieht der abgekühlten Fortluft, die in der Regel nach dem Wärmeübertrager immer noch wärmer als 5 °C ist, weitere Wärme und bringt sie auf Brauchwassertemperatur (40 °C bis 60 °C, Sekundärkreislauf). Für Spitzenlasten ist noch eine Nachheizung im oberen Bereich des Brauchwasserspeichers vorgesehen. Auf diese Weise nutzt die Wärmepumpe eine ganzjährig vorhandene Wärmequelle mit einer gleichmäßig hohen Temperatur und erreicht Arbeitszahlen von mehr als 3. Primärenergetisch sind solche Versorgungslösungen mit Wärmepumpe mit einer Erdgas oder Fernwärmevesorgung vergleichbar [43, 44]. Alle genannten Lösungen haben sich inzwischen in Passivhäusern bewährt.

Voraussetzung für den Einsatz von Kompaktaggregaten ist allerdings der insge-

samt besonders geringe Energieverbrauch des Passivhauses. Ein konventionelles Haus mit mehr als 70 kWh/(m²a) Heizenergiebedarf mit einem Kompaktaggregat heizen zu wollen macht keinen Sinn.
Eine konkrete Definition von Anforderungen an die Energie-Effizienz der Anlagentechnik in der Ausschreibung wird dringend angeraten, weil heute noch viele standardmäßig am Markt verfügbare Komponenten und Geräte einige der oben genannten Eigenschaften vermissen lassen.

Haushaltsstrom

Ein typischer Vier-Personen-Haushalt verbraucht in Deutschland etwa 3000 kWh/a elektrische Endenergie ('Strom') für Licht, Waschen, Kochen etc. Das sind etwa 30 kWh/(m²a) Endenergie bzw. 90 kWh/(m²a) Primärenergie. Diese Zahlen zeigen, dass auch hier noch Handlungsspielraum besteht. Für Passivhäuser wurde nach eingehender Untersuchung der Einsparpotenziale und Erprobung in Referenzobjekten ein oberer Zielwert für den Haushaltsstromverbrauch von 18 kWh/(m²a) Endenergie bzw. 55 kWh/(m²a) Primärenergie empfohlen [45].

Der Bereich Haushaltsstrom entzieht sich allerdings weitgehend der Planung durch den Architekten, zumal in Deutschland auch im Mietwohnungsbau die Ausstattung mit elektrischen Geräten in der Regel vom Bewohner angeschafft wird. In verschiedenen Passivhaus-Siedlungen, z.B. Wiesbaden [45] und Hannover [37] wurde deshalb versucht, über ein Beratungsangebot und finanzielle Anreize die zukünftigen Bewohner zur Anschaffung von besonders Energieeffizienten Geräten zu bewegen. Die Auswertungen dieser Maßnahmen zeigen, dass Einsparungen von 50 % und mehr in der Praxis erreichbar sind.

In Bürogebäuden hat das Thema Stromverbrauch zusätzliche Bedeutung, weil hier die elektrische Leistung pro m² Nutzfläche deutlich höher ist als im Wohnungsbau. Neben dem erhöhten Stromverbrauch führt dies im Sommer leichter zu einer Überhitzung von Räumen, bzw. zu weiterem Energieeinsatz für die Klimatisierung der Räume. Hier erzeugt der hohe Energieverbrauch zusätzliche Komfortprobleme. Referenzobjekte zeigen, dass auch in diesem Sektor eine erhebliche Senkung der Stromverbräuche durch eine effiziente Technik erreichbar ist. Beispiele sind TFT-Displays und Stand-by-Schaltungen von elektronischen Geräten. Diese Überlegungen zeigen, dass das Konzept 'Energie-Effizienz' nicht nach der Fertigstellung des Passivhauses endet, vielmehr hat der Nutzer durch sein Verhalten einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Effizienz der Energie-Dienstleistung [36, 37, 38].

3.4 Integriertes Planungsteam

Die vorgegangenen Ausführungen zeigen, dass die kontrollierte Wohnungslüftung mit WRG und die sonstigen haustechnischen Einrichtungen eine umsichtige Auslegung und Planung erforderlich machen. Diese Aufgabe sollte der Architekt unbedingt einem erfahrenen Fachplaner überlassen, um vor späteren unliebsamen Überraschungen und teuren Nachbesserungen sicher zu sein.

Diese Forderung ist für den Bereich Tragwerksplanung gesetzlich zwingend vorgeschrieben. Dem Wärmeschutz und der Haustechnik kommen beim Passivhaus jedoch ebenso große Bedeutung zu. Die 'Integrierte Planung' sollte sehr frühzeitig beginnen, denn die Grundrissgestaltung und die Orientierung des Hauses hat, wie bereits erwähnt, einen wesentlichen Einfluß auf die Energie-Effizienz und mithin auf die Funktionsfähigkeit des Gebäudes als Passivhaus.

Die frühzeitige Einbeziehung eines Holzbau-Fachbetriebs kann die Planung ebenfalls optimieren und beschleunigen: Das Praxiswissen kann manche erst theoretisch geplante Lösung optimieren helfen [40]. Solche Planungsleistungen, wie sie im Holzfertigbau bereits heute üblicherweise angeboten werden, sind ansonsten im Wohnungsbau bislang unüblich und sollten gesondert honoriert werden, da hier ein enormes Kosten-Senkungs-Potenzial liegt.

4 Passivhaus im Sommer

Passivhäuser mit ihrer dicken Dämmschicht sind im Sommer einfacher auf angenehm kühlen Innentemperaturen zu halten als weniger gut gedämmte Gebäude. Diese zunächst durch Simulationen gewonnene Erkenntnis wird von der Erfahrung in den gebauten Passivhäusern gestützt. Die Häufigkeit, mit der sommerliche Innentemperaturen von 25 °C überschritten werden, ist bei typischen Passivhausern unabhängig von der Bauweise maximal 10 % der Stunden pro Jahr, wenn die nachfolgend genannten Regeln konsequent umgesetzt werden [46]. Temperaturspitzen von über 30°C treten dann nur sehr selten auf. Diese Übertemperatur-Häufigkeit muss nach den gängigen Richtlinien bei Bürogebäuden ggf. durch Einsatz einer Klimaanlage eingehalten werden, sie wird in konventionellen ungedämmten Wohnhäusern jedoch häufig überschritten.
Folgende Hinweise sollten im Hinblick auf einen guten sommerlichen Wärmeschutz beachtet werden:

Der **Anteil der Fensterfläche** an der südorientierten Hauptfassade sollte ohne besondere Sonnenschutzmaßnahmen 25 bis 35 % nicht überschreiten.

Dachüberstände oder kleine Balkone über den Südfenstern mit einer Tiefe bis zu 1,25 m erhöhen den Heizenergiebedarf im Winter kaum, verringern die Temperaturspitzen im Sommer aber erheblich. Mit solchen Überständen kann bei nicht zu großen Südfenstern auf einen temporären Sonnenschutz verzichtet werden.

Kann ein Passivhaus z.B. wegen Vorgaben des Bebauungsplanes mit der Hauptfassade nicht nach Süden orientiert werden, so sollten die **Fensterflächen auf der West- oder Ostseite** auf das gesetzlich vorgeschriebene Mindestmaß, das zur Belichtung der Räume notwendig ist (10% der Grundfläche je nach Bauordnung), begrenzt werden. Dachüberstände bringen hier keine merkliche Entlastung. Für Fenster, die in dieser Richtung orientiert sind, ist ein temporärer Sonnenschutz die einzig wirksame Maßnahme.

Außenliegende Rollos oder sonstige Sonnenschutzmaßnahmen sind für den sommerlichen Wärmeschutz am besten geeignet, weil die dahinter liegenden Scheiben nicht erwärmt werden. Innenliegende oder im Scheibenzwischenraum

liegende Rollos sind jedoch besser vor Witterungseinflüssen geschützt. Wird ein Rollo direkt hinter der ersten außenliegenden Scheibe plaziert, so ist seine Sonnenschutzwirkung fast so gut wie bei der außenliegenden Verschattung. Verbund- und Kastenfenster haben hier einen konstruktiven Vorteil, denn hier kann eine Jalousie wind- und wettergeschützt im Luftspalt angeordnet werden. Verschattungselemente aus Holz, wie Schiebe- oder Klappläden sind langlebig und bieten zudem architektonische Gestaltungsmöglichkeiten.

Einen bedeutenden Kühleffekt bringt die **nächtliche Querlüftung der Wohnung.** Werden die Fenster nachts, wenn die Außentemperatur unter der Innentemperatur liegt, gekippt, so können die Raumoberflächen von der Luftströmung gekühlt werden. Werden tagsüber die Fenster wieder geschlossen, so kann ein gut gedämmtes Gebäude kühl gehalten werden [46].

In Bürogebäuden wird diese Lüftungsstrategie in zunehmendem Maße eingesetzt, um auf eine teure und energieintensive konventionelle Klimaanlage verzichten zu können. Ist eine Gebäudeleittechnik (GLT) vorhanden, so können die Fenster je nach Temperaturgang und Wetter (Regen, Sturm) in der Nacht geöffnet werden.

Die **thermisch wirksame Masse** eines Gebäudes spielt durchaus eine Rolle, sie tritt aber gegenüber den anderen oben genannten Einflüssen zurück. Extreme Leichtbauweise sollte jedoch vermieden werden. Schon eine zusätzliche Gipswerkstoff-Platte auf den Innenoberflächen erhöht die Wärmekapazität wirksam, so dass tägliche Temperaturschwankungen besser abgepuffert werden können. Ein Nass-Estrich, Flächenbauteile aus Holzbaustoffen, z.B. Brettstapel, Holzwerkstoff-Platten, Blockholz, Parkett, haben eine hohe spezifische Wärmespeicherfähigkeit und eignen sich daher gut für raumseitige Oberflächen. Dämmstoffe aus Zellulosefasern bzw. Holzfasern haben ebenfalls eine vergleichsweise hohe Wärmespeicherfähigkeit.

Die Einflüsse des Entwurfs auf das sommerliche Innenklima in Passivhäusern lassen sich mit Hilfe einer dynamischen Gebäudesimulation vorab bestimmen. Dies sei vor allem für größere Verwaltungsgebäude (innere Wärmelasten!) und Schulen angeraten. In den meisten Fällen ist jedoch eine vereinfachte Berechnung z.B. mit dem Sommerfall-Rechenblatt des PHPP ausreichend [2].

Wird die kontrollierte Wohnungslüftung den Sommer hindurch betrieben, so muss darauf geachtet werden, dass der Wärmeübertrager durch einen Bypass überbrückt wird. Ansonsten würde die Zuluft unnötig erwärmt. Viele Geräte haben den Bypasskanal bereits integriert, so dass im Sommer lediglich ein Schieber gezogen werden muss. Bei einigen Geräten wird statt dem Wärmeübertrager eine Sommerkasette eingesetzt. Die bequemste Lösung ist eine elektrisch gesteuerte Bypassklappe, so dass nur umgeschaltet werden muss.

Tabelle 4 Kosten je eingesparter Kilowattstunde für jede Einzelmaßnahme zur Erreichung des Passivhausstandards im Vergleich zu einem Standardgebäude nach WschVO 95. Aufstellung am Beispiel der Passivhaussiedlung Hannover Kronsberg. *) Die Kosten der Lüftungsanlage alleine wären 15 Cent/kWh und damit erheblich höher.

Maßnahme	*Kosten der eingesparten Energie Cent/kWh*
PH-Dämmung Leichtbau-Dach	*2,4*
PH-Dämmung Bodenplatte	*3,5*
PH-Dämmung Leichtbaufassade	*4,1*
Passivhaus-Fenster	*7,6*
Lüftung mit WRG wenn Einsparung beim Heizsystem gegengerechnet wird	*5,3 *)*
Gesamtdurchschnitt	*4,6*

5 Kosten

Beim Bau eines Passivhauses entstehen zur Zeit etwa 5 % bis 15 % zusätzliche Investitionskosten gegenüber einem konventionellen Baustandard. Für die Passivhaus-Siedlung in Hannover Kronsberg wurde im Rahmen des Europäischen Forschungsprojektes CEPHEUS die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Investitionsmaßnahmen, insoweit sie Effizienzmaßnahmen zur Erreichung des Passivhausstandards darstellen, überprüft [37]. Die Siedlung besteht aus 32 Reihenhäusern, deren wesentliche Hüllflächen in Holzbauweise hergestellt wurden. Der Grad an Serienfertigung war bei diesen Häusern sehr hoch.

Um die Kosten vergleichen zu können, wurde ein äquivalenter Preis für die durch die jeweilige Maßnahme eingesparte kWh Energie berechnet, bezogen auf den Baustandard nach der WschVO 95, die zur Bauzeit der Häuser gültig war [8]. Dabei wurde eine durchschnittliche Lebensdauer der Komponenten von 25 Jahren zugrunde gelegt [37].

Für alle Maßnahmen zusammen ergaben sich im Mittel Kosten von 4,6 Cent/kWh. Fernwärme wurde im Vergleichszeitraum von der Stadtwerken Hannover zu einem Preis 6,05 Cent/kWh abgerechnet. Die Kosten für die Effizienz-Maßnahmen sind daher wirtschaftlich sinnvoll. Bei den Kosten für die Lüftungsanlage muss berücksichtigt werden, dass in diesen Häusern kein zusätzliches Heizsystem mit statischen Heizflächen benötigt wird. Die entsprechenden Kosteneinsparungen können also bei den Kosten der Lüftung angerechnet werden [37]. So ergeben sich die in Tabelle 4 angegeben Kosten von 5,3 Cent pro eingesparter Kilowattstunde. Die Kosten der Lüftungsanlage alleine wären 15 Cent/kWh und damit erheblich höher.

Die Höhe der Einzelkosten ergibt eine Rangfolge. Demnach waren Passivhausfenster zur Zeit der Errichtung dieser Häuser, bezogen auf die Kilowattstunde eingesparter Energie, noch etwa doppelt so teuer wie die Dämmaßnahmen an den opaken Bauteilen. Durch eine weitere Verbreitung im Markt dürfte sich hier jedoch noch eine Kostenreduzierung erreichen lassen.

6 Hinweise zur Ausschreibung

Passivhäuser stellen hohe Anforderungen an die Qualität der Gebäudehülle und der Haustechnik. Dabei ist nicht nur die Qualität der einzelnen Bauteile wichtig, deren Eigenschaften in der Ausschreibung der jeweiligen Gewerke definiert sind. Ein Passivhaus ist mehr als die Summe seiner hochwertigen Teile. Besonders ausschlaggebend für das Gelingen des Ganzen ist das Zusammenspiel aller Gewerke. Darauf sollten alle Beteiligten in der Ausschreibung ausdrücklich hingewiesen werden. Besondere Maßnahmen der beauftragten Betriebe, die zur Qualitätssicherung beitra-

gen, wie Mitarbeiterschulung, Luftdichtheitsprüfung etc. sollten angeregt bzw. bei der Vergabe honoriert werden.

Alle Beteiligten sind aufgefordert, sich über die besonderen Anforderungen beim Bau eines Passivhauses kundig zu machen. Bitte fragen Sie im Zweifelsfall beim zuständigen Planer nach, bevor Sie (teure) Fehler machen. Zum Beispiel muss beim Einbau eines hochwertigen Fensters in eine Passivhaus geeignete Wand sorgfältig auf die Vermeidung von Wärmebrückeneffekten und einen luftdichten Anschluss geachtet werden. Falsche Materialwahl oder ein Abweichen von der planerischen Vorgabe kann unter Umständen einen Großteil der Anstrengungen beim einzelnen Bauteil wieder zunichte machen. Die technischen Anforderungen an Passivhäuser sind im Infokasten zusammengefasst. Weitere Informationen finden Sie auch in der Literatur [28].

Exzellenter Wärmeschutz und kompakte Gebäudehülle
Alle Bauteile der Außenhülle müssen rundum sehr gut wärmegedämmt werden. Zum guten Wärmeschutz gehört beispielsweise wärmebrückenfreies Konstruieren, bei dem Kanten, Ecken, Anschlüsse und Durchdringungen besonders sorgfältig geplant werden. Zudem muss die Außenhülle so gut luftdicht sein, dass sie bei einem Drucktest $n_{50} \leq 0{,}6\ ^1/_h$ erfüllt.

Warmfenster als Wärmesammler
Die Qualität der Fenster, einschließlich der Fensterrahmen, sollten im Regelfall dem Passivhausstandard entsprechen ($U_{W,eingebaut} \leq 0{,}85$ W/[m²K]).

Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung
Die Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung bewirkt in erster Linie eine gute Raumluftqualität – in zweiter Linie dient sie der Energieeinsparung. Im Passivhaus werden mindestens 75 % der Wärme aus der Abluft über einen Wärmeübertrager der Frischluft wieder zugeführt. Die Lüftung darf akustisch nicht stören und muss dauerhaft hygienisch einwandfrei sein. Ein Schallpegel von 25 dB(A) als oberer Grenzwert hat sich in Passivhäusern bewährt.

Auch im Passivhaus muss ein Restwärmebedarf gedeckt werden – es ist kein Nullheizenergiehaus. Es reicht aber aus, die Wärme durch eine Nacherwärmung der Zuluft, die ohnehin verteilt werden muss, zuzuführen. So kann die Lüftung gleichzeitig auch als Heizwärmeverteilung dienen.

Effiziente Warmwasserbereitung
Da für die Heizung nur noch sehr wenig Energie verbraucht wird, wird die Warmwasserbereitung zum bedeutendsten Verbraucher. Mit thermischen Sollarkollektoren können bis zu 60 % der Energie für Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie erzeugt werden.

Stromspargeräte im Haushalt
Durch hocheffiziente Stromspargeräte wie Kühlschrank, Herd, Waschmaschine usw. kann der verbleibende Stromverbrauch deutlich gesenkt werden.

Nutzerfreundlichkeit aller Komponenten
Alle eingesetzten Systeme müssen vom Nutzer einfach und komfortabel bedient werden können, damit die Anlagen richtig bedient werden und die Einsparungen auch tatsächlich erzielt werden.

Qualitätssicherung und Zertifizierung
Die Einhaltung des Passivhausstandards setzt eine akkurate Planung und handwerkliche Ausführung voraus. Eine mehrstufige Qualitätssicherung beginnt bei der Entwurfsplanung mit der Passivhaus Vorprojektierung (PHVP), der Detailplanung mit dem Passivhaus Projektierungspaket (PHPP) und umfasst die Qualitätssicherung am Bau durch erfahrene Fachleute.

7 Literatur

[1] Stadtplanerische Instrumente zur Umsetzung von Passivhäusern, Protokollband Nr. 19, Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser (AKKP), Darmstadt, 2000.

[2] Passivhaus-Projektierungs-Paket (PHPP) mit Handbuch, Darmstadt, Ausgabe 2002.

[3] Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden, Berechnung des Heizenergiebedarfs von Wohngebäuden. Deutsche Fassung DIN EN 832:1998-12, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin 1998.

[4] Hauser, G, Otto, F., Ringeler, M., Stiegel, H., Holzbau und die EnEV, INFORMATIONSDIENST HOLZ, holzbau handbuch, Reihe 3, Teil 2, Folge 2, DGFH, München, Dezember 2000.

[5] Borsch-Laaks, R., Ein Passivhaus der besonderen Art, die neue quadriga 6/2000, Verlag Kastner, Wolnzach.

[6] Verordnung über den energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden, Energieeinsparverordnung – EnEV, verkündet am 21. Nov. 2001 im Bundesgesetzblatt Nr. 59. In Kraft getreten am 1. Feb. 2002.

[7] Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden. Vornorm DIN V 4108 Teil 6–10, Berechnung des Jahresheizwärme und des Jahresheizenergiebedarfs, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin 2001.

[8] Feist, W., PHPP und Vornorm DIN-V-4108-6 : 2001, Bewertung mit Ergebnissen aus dem CEPHEUS Projekt, Energie Effizientes Bauen, Heft 4/2001 und 1/2002.

[9] Stellungnahme zur Vornorm DIN V 4108 Teil 6:2001 aus Sicht der Passivhausentwicklung, CEPHEUS Projektinformation Nr. 39, Passivhausinstitut, Darmstadt, 2001.

[10] Müller, A., Sessing, J., Schwaner, K. Wiegand, T., Außenbekleidungen mit Holzwerkstoffplatten, INFORMATIONSDIENST HOLZ, holzbau handbuch, Reihe 1, Teil 10, Folge 4, DGFH, München, Dezember 2001.

[11] Schulze, H., Baulicher Holzschutz, INFORMATIONSDIENST HOLZ, holzbau handbuch, Reihe 3, Teil 5, Folge 2, DGFH, München, September 1997.

[12] Cheret, P., Grohe, G., Müller, A., Schwaner, K., Winter, S., Zeitter, H., Holzbausysteme, INFORMATIONSDIENST HOLZ, holzbau handbuch, Reihe 1, Teil 1, Folge 4, DGFH, München, Dezember 2000.

[13] Colling, F., Lernen aus Schäden im Holzbau, Ursachen, Vermeidung, Beispiele, DGFH, München, 2000.
Teil A. Ursachen und Vermeidung.
Teil B. Typische Beispiele.

[14] Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden. Vornorm DIN V 4108 Teil 4, Wärme und Feuchteschutztechnische Kennwerte, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin 1998, Neue Ausgabe von 2002.

[15] Hauser, Gerd, Stiegel, Horst, Wärmebrückenatlas für den Holzbau, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin 1992.

[16] Hauser, G.; Stiegel, H. und Haupt, W.: Wärmebrückenkatalog auf CD-ROM. Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH, Baunatal 1998.

[17] Borsch-Laaks, Robert, Holzbauwände für das Passivhaus, ein wärmetechnischer Systemvergleich, die neue quadriga 5/2001, Verlag Kastner, Wolnzach.

[18] Wärmebrückenfreies Konstruieren, Protokollband Nr. 16, AKKP, 2. Auflage, Darmstadt 2001.

[19] Horn, Gerrit, Vergleich Energieeffizienter Holzbausysteme: Wärmebrücken, Luftdichtheitskonzepte, Kosten. Tagungsband zur 3. Passivhaustagung 1999, Bregenz und Darmstadt 1999.

[20] Hauser, G., Otto, F.; Niedrigenergiehäuser, INFORMATIONSDIENST HOLZ, holzbau handbuch, Reihe 1, Teil 3, Folge 3, DGFH, München, März 1995, Nachdruck Juni 1999.

[21] Hauser, G.; Stiegel, H., Wärmebrücken, INFORMATIONSDIENST HOLZ, holzbau handbuch, Reihe 3, Teil 2, Folge 6, DGFH, München, Oktober 1997, Nachdruck August 2000.

[22] Kehl, D., Borsch-Laaks, R., Wärmebrücken im Holzrahmenbau, die neue quadriga 6/2000, Verlag Kastner, Wolnzach.

[23] Borsch-Laaks, R., Köhnke, E.U., Winter, S., Durchblick erwünscht, die Optimierung des Fensteranschlusses, die neue quadriga 3/2001, Verlag Kastner, Wolnzach.

[24] Borsch-Laaks, R., Winter, S., Bodenplatten in Holzbauweise, condetti-Detail, die neue quadriga 5/2001, Verlag Kastner, Wolnzach.

[25] Fenster für das Passivhaus, Protokollband Nr. 14, AKKP, Darmstadt 1998.

[26] Schnieders, J., Passivhausfenster, 4. Passivhaustagung, Kassel, März 2000.

[27] Kaufmann, B., Schnieders, J., Pfluger, R., Passivhaus-Fenster. Tagungsband zur 6. Europäischen Passivhaustagung, Seite 289, Basel 2002.

[28] Passivhaus Institut, Darmstadt (www.passiv.de) Eine Liste von realisierten Passivhausprojekten und Herstellern von Komponenten wird ständig aktualisiert. Die Liste enthält auch die wichtigsten technischen Daten von Passivhaus geeigneten Produkten, z.B. Fensterrahmen, Bausysteme oder Lüftungsanlagen mit WRG.

[29] Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen, Berechnung des Wärmeduchgangskoeffizienten, DIN EN ISO 10077-Teil 1:2000. Teilweise Ersatz für DIN V 4108-4 :1998-10, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin 1998. Enthält insbesondere einen Algorithmus zur Berechnung des Rahmen U-Wertes U_f Ψ und der Wärmebrücke am Glasrand Ψ_g.

[30] Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München, FIW, Prüfbericht D1.2-4/01, München 2001.

[31] Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden, Differenzdruckverfahren, DIN 13829, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin 2001.

[32] Luftdichtheit von Wohngebäuden – Messung, Bewertung, Ausführungsdetails, Herausgegeben von der RWE, Essen, verfaßt von J. Zeller, ebök, Tübingen, zu beziehen über Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e.V., Kassel, (www.flib.de)

[33] Hauser, G. und Maas A.: Auswirkungen von Fugen und Fehlstellen in Dampfsperren und Wärmedämmschichten. Aachener Bausachverständigentage 1991. Bauverlag Wiesbaden 1991, S. 88–95; DBZ 40 (1992), H. 1, S. 97–100.

[34] Luftdichte Projektierung von Passivhäusern, CEPHEUS Projektinformation Nr. 7, 4. Auflage, Darmstadt, 2002.

[35] Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden. DIN V 4108 Teil 7, Luftdichtheit von Gebäuden, Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin 2001.

[36] Pfluger, R., Feist, W., Kostengünstiger Passivhaus-Geschoßwohnungsbau in Kassel Marbachshöhe, Messtechnische Untersuchung und Auswertung, CEPHEUS Projektinformation Nr. 15, Darmstadt, 2001.

[37] Feist, W., Peper, S., von Oesen, M., Klimaneutrale Passivhaus-Reihenhaussiedlung Hannover Krobsberg, CEPHEUS Projektinformation Nr. 18, Hrsg.: Stadtwerke Hannover AG, Hannover 2001.

[38] Schnieders, J., Feist, W., Pfluger, R., Kah, O., Endbericht CEPHEUS – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung, CEPHEUS Projektinformation Nr. 22, Darmstadt, 2001.

[39] Kaufmann, B., Feist W., Die Frischluftheizung hat sich bewährt. Tagungsband zur 6. Europäischen Passivhaustagung, Seite 129, Basel 2002.

[40] Passivhaus Holzbau Teams, die neue quadriga 1/2001, Verlag Kastner, Wolnzach.

[41] Dimensionierung von Lüftungsanlagen, Protokolband Nr. 17, AKKP, Darmstadt 1999.

[42] Michael, K., Passivhaus Kindertagesstätte in Münster, EB Energie Effizientes Bauen 2/2002.

[43] Haustechnik im Passivhaus, Protokolband Nr. 6, AKKP, Darmstadt 1997.

[44] Passivhaus Versorgungstechnik, Protokolband Nr. 20, AKKP, Darmstadt 2000.

[45] Energiebilanzen mit dem PHPP, Protokolband Nr. 13, AKKP, Darmstadt 1998.

[46] Feist, W., Passivhaus Sommerklima Studie, Darmstadt 1998

8 Gebaute Passivhäuser

Seit mehr als zehn Jahren wurden inzwischen mehr als 3.000 Wohneinheiten in Passivhaus Bauweise errichtet, ein erheblicher Teil davon aus Holz. Neben Einfamilienhäusern, Reihenhäusern und Geschosswohnungsbauten sind inzwischen einige Bürogebäude und Schulen fertiggestellt bzw. im Bau. In dieser Broschüre können aus Platzgründen nur einige wenige Beispiele von den vielen bislang realisierten Gebäuden dokumentiert werden. Die getroffene Auswahl stellt in keiner Weise den Anspruch repräsentativ zu sein, in der Projektliste beim Passivhaus Institut [28] stehen Informationen über weitere Gebäude zur Verfügung. Verschiedene Zeitschriften dokumentieren ebenfalls die aktuelle Entwicklung.

Zu jedem der in dieser Broschüre dokumentierten Objekte werden neben einem Bild die wichtigsten Daten des Gebäudes aufgezählt. Die Daten beruhen auf den Informationen der Architekten und sind nach einem Fragenkatalog des PHI erhoben worden. Weitere Projekte sind willkommen: Baubeschreibungen, Planungserfahrungen, Bauerfahrungen, Messwerte bezüglich Luftdichtheit, Verbrauchsmesswerte oder Rechenwerte, Luftqualität, Bewohnerurteil etc. können anderen wertvolle Dienste leisten.

Haus Haller in 51789 Lindlar-Hohkeppel

Einfamilienhaus, 2-geschossig mit Pultdach 15°, **Wohnfläche** 140 m², nicht unterkellert,
Konzeption: kompakter Baukörper, tragende Struktur aus völlig wärmebrückenfreier Holzwerkstoff-Monocoque-Konstruktion in vorgefertigter Tafelbauweise.
Außenwände: 350 mm integrierte Mineralfaserdämmung, zusätzlich 80 mm WDVS außen, mit mineralischem Putz, Nordfassade mit Holz-Stülpschalung. U = 0,1 W/(m²K)
Bodenplatte: Beton oberseitig gedämmt, U = 0,12 W/(m² K)
Dach: Holzwerkstoff-Konstruktion in Ortmontage, Mineralfaserdämmung, U = 0,10 W/(m² K).
Alle Außenwände und Dach grundsätzlich diffusionsoffen und luftdicht, ohne Verwendung von Folien. Alle Ver- und Entsorgungsleitungen luftdicht durch die Bodenplatte geführt. Blower-Door-Test bei Fertigstellung n_{50} = 0,6 $^1/_h$, Nachmessung 2001 durch PHI n_{50} = 0,45 $^1/_h$
Fenster: hochwärmegedämmte Holz-Alu-Konstruktion, 3-fach Wärmeschutzverglasung, gedämmter Fensteranschlag, gesamt-Fenster-U-Wert 0,80 W/(m²K)
Lüftung: kontrollierte Be- und Entlüftungsanlage, effiziente WRG, vorgeschalteter Erdreichwärmetauscher mit Feinfilter und Kondensatabführung
Heizung: Heizlast maximal 7 W/m² Restheizung durch ein neu entwickeltes Kleinst-Warmluft-Flüssiggasheizaggregat, vollintegriert in die Lüftungsanlage, thermostatisch gesteuert, Leistung ca. 1200 W
Warmwasser: Thermische Solarkollektoranlage mit 400 Liter Speicher, Nachheizung über elektronisch geregelten, elektrischen Spezial-Durchlauferhitzer, optimale Solarnutzung – keine Systemüberlagerungen mit der Heizung.
Heizwärmebedarf: nach PHPP 10,2 kWh/(m² a)
Architekt: Manfred Brausem, MB Planungs-GmbH für passiv-solare Architektur, Köln

Haus Suntech in 72072 Tübingen

Geschosswohnungsbau mit 650 m² **Wohn- und Gewerbefläche,** 4 Wohn- und 3 Gewerbeeinheiten
Konstruktion: Statischer Betonkern, Holzaußenfassade
Außenwand: Doppel-T-Träger, 44 cm Zellulosedämmung, U-Wert: 0,11 W/(m²K)
Bodenplatte: Betonplatte, Dämmung 15 cm PU-Schaum U-Wert: 0,31 W/(m²K)
Dach: Doppel-T-Träger-Konstruktion, 44 cm Zellulosedämmung U-Wert: 0,11 W/(m²K)
Fenster: Holzfenster mit Dämmschale aus Kork, Dreifach-Wärmeschutzverglasung U-Wert 0,84 W/(m²K)
Lüftung: Gegenstromwärmetauscher im EG und 1. OG mit Anschluss an einen Erdkanal
Heizung/Warmwasser: Flachkollektor 34 m² , Pufferspeicher 2000 l als hydraulische Weiche mit Frischwasser-Durchlauferhitzer-Station, Versorgung der Nachheizregister der Lüftungsanlagen aus dem Pufferspeicher, Nachheizung mit modulierendem Holzvergaser
Stromversorgung: 4 kW Photovoltaikanlage als passive Verschattung der Südfenster
Ökolgische Aspekte: PVC-freie Elektroinstallation, Regenwasseranlage mit 7 m³ Speicher, Recycling-Anlage für Grauwasser zur Versorgung der WC, Holzparkett, Trittschall aus Holzweichfaser und Zelluloseflocken
Heizwärmebedarf: 10,6 kWh/(m²a) berechnet nach PHPP
Architekt: ARGE, Sonnenmoser, Schlierf, Riedel, Tübingen
Planung der Haustechnik: Ing.büro Suntech, Tübingen
Foto: Friedrich Förster, Tübingen
Fertigstellung: Ende 2001

Haus in 96047 Bamberg

Freistehendes Einfamilienhaus, Wohn-/Nutzfläche 195 m²
Konstruktion: Holztafelbauweise
Außenwand/Dach: Holztafelbauweise mit zwei Dämmschichten, Trag- und Installationsebene, **Aufbau von innen:** Gipskarton-Platte, Installationsebene mit Flachsdämmung, OSB-Platte verklebt als luftdichte Ebene, Holzkonstruktion mit Zellulosedämmung, Holzweichfaserplatte, U-Wert 0,12 W/(m²K)
Bodenplatte: U-Wert 0,16 W/(m²K)
Fenster: Nordseite Glas-U-Wert 0,5/Südseite Glas-U-Wert 0,7 W/(m²K), Holzrahmen mit gedämmten Blendrahmen und zweifacher Lippendichtung
Lüftung: kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung, mit Gegenstromwärmetauscher und vorgeschaltetem Erdwärmetauscher
Heizung/Warmwasser: evtl. erforderlicher Restheizwärmebedarf wird über thermostatgesteuerte Elektro-Direktheizung gedeckt. Solaranlage 6 m² Kollektoren
Ökologische Aspekte: Regenwassernutzung 6 m³ für WC, Waschmaschine und Garten
Energiebedarf: ca. 16 kWh/(m² a) nach Transys-Simulation
Dichtheit: n_{50} = 0,57 $^1/_h$ (gemessen durch Blower-Door-Test)
Planung: Architekturbüro Trykowski, Frensdorf
Baubeginn Oktober 1997
Fertigstellung Juni 1998

Haus in 61169 Friedberg

Gebäude mit drei Büros, 283 m² **Gesamtnutzfläche**
Konstruktion: Holzkonstruktion mit Doppel-T-Trägern
Außenwand: Holzrahmenkonstruktion mit direkter Putzträgerbeplankung, Installationsebene, U-Wert 0,136 W/(m²K)
Kellerdecke/Bodenplatte: Stahlbetonplatte, 20 cm PU-Dämmung WLG 030, Dampfbremse, Estrich, Bodenbelag, U-Wert 0,143 W/(m²K)
Dach: Holzkonstruktion mit Doppel-T-Trägern, begrüntes Flachdach mit Hinterlüftung, Installationsebene, U-Wert 0,1 W/(m²K)
Fenster: U_W = 0,86 W/(m²K), g = 50 %
Lüftung: Ein dezentrales Lüftungsgerät je Büro mit Kreuz-Gegenstrom-Wärmeübertrager
Heizung: Elektrische Nachheizregister
Warmwasser: Dezentral mit Untertischgeräten
Luftdichtheit: n_{50} = 0,29 $^1/_h$
Ökologische Aspekte: Regenwasserversickerung, Gründach
Heizwärmebedarf berechnet: 15 kWh/(m²a) nach PHPP
Architekt: Dipl.-Ing. Martin Blumrich, Friedberg
Haustechnikplanung: Ing.-Büro Kunkel, Zwickau
Baubeginn Juli 2001, Bezug November 2001

Haus Heim in 88682 Salem

Einfamilienwohnhaus mit Einlieger, 1 Wohneinheit + Einlieger (später Praxis), zwei Vollgeschosse, nicht unterkellert, Wohnfläche 198 m²
Boden: (u-o) Stahlbetoneinzel- und Streifenfundamente, vorgefertigte Holz-Bodenplatte. 18 mm OSB-Platten, 356 mm Doppel-T-Träger, Zellulosedämmung λ = 0,04 W/mK, 28 mm Spanplatte, 22 mm Industrieparkett. U-Wert: 0,12 W/(m²K) (97% Gefach, 3% Ständer)
Wand: (i-a) 10 mm Gipsfaser-Platte, 18 mm OSB-Platten, 356 mm Doppel-T-Träger, Zellulosedämmung, 16 mm MDF-Platte, horizontale Lärchen- Leistenschalung auf Lattung mit Hinterlüftung, Faserzementplatten im Dachbereich. U-Wert: 0,11 W/(m²K) (97% Gefach, 3%Ständer)
Dach: (i-a) 12,5 mm Gipsfaser-Platte, 30 mm Lattung, Dampfbremse, 356 mm Doppel-T-Träger, Zellulosedämmung, 16 mm MDF-Platte, Tonziegel.
U-Wert: 0,11 W/(m²K) (97% Gefach, 3% Ständer)
Fenster: Passivhausfenster τ_{vis} = 69%, g-Wert: 53%, U_W-Wert: 0,77 W/(m²K)
Lüftung: Gegenstromwärmetauscher 95% Wärmerückgewinnung, Erdwärmetauscher Durchmesser: 160 mm, Länge: 30 m
Heizung: Pellet-Kaminofen, Verteilung über Wärmetauscher/Lüftungsanlage, ein Heizkörper im Bad
Warmwasser: Solarkollektoren 9,2 m²,Deckungsrate: 70%, ohne Zirkulation, Kombi-Speicher 950/230 Liter,
Stromversorgung: Photovoltaikanlage
Ökologische Aspekte: Regenwasserspeicher 8 m³, Verzicht auf chemische Behandlung der Hölzer, keine Kunststoffe und Folien, Naturfarben, dampfdiffussionsoffene Bauweise ohne PE-Folien, minimal versiegelte Flächen im Außenbereich, extensiv begrünter Carport
Luftdichtheit: n_{50} = 0,39 $^1/_h$
Heizwärmebedarf: 14,6 kWh/(m²a) nach PHPP
Architekt: Martin Wamsler, Markdorf
Haustechnik: Roland Stuber, Waldburg,
Fertigstellung: 10/2000 (Bauzeit 9 Monate)

Haus in 85435 Erding

Freistehendes Einfamilienhaus, Wohnfläche 170 m², beheizter Keller
Konstruktion: Holzleichtbau
Außenwand: Gipskarton-Platten 15 mm, Lattung 40 mm, OSB-Platten 15 mm, Holzstegträger mit Zellulosedämmung 401 mm, MDF-Platte 16 mm, Lattung 30 mm, Holzschalung 24 mm, U-Wert 0,11 W/(m²K)
Boden: Linoleum 5 mm, Estrich 50 mm, Dämmung 120 mm, Bodenplatte 250 mm, Perimeterdämmung 140 mm, U-Wert 0,14 W/(m²K)
Dach: Gipskarton-Platten 15 mm, Lattung 40 mm, OSB-Platten 15 mm, Holzstegträger (401mm) plus Lattung (30 mm) mit Zellulosedämmung: insgesamt 431 mm, MDF-Platte 16 mm, Lattung 30 mm, Holzschalung 24 mm, U-Wert 0,10 W/(m²K)
Fenster: U-Wert 0,76 W/(m²K)
Lüftung: kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung, mit Gegenstromwärmetauscher und vorgeschaltetem Erdwärmetauscher
Heizung/Warmwasser: Solaranlage mit 5,5 m² Kollektorfläche, Gas-Brennwertkessel
Luftdichtheit: n_{50} = 0,41 $^1/_h$
Heizwärmebedarf: 13,3 kWh/(m² a) nach PHPP
Architekt: Gernot Vallentin, Dorfen
Fertigstellung: April 2000

Haus in 3681 Schlüchtern-Elm

Öko-Solar-Passivhaus als **Einfamilienwohnhaus** mit 148 m² Wohnfläche
Konstruktion: Holzleichtbauweise mit Doppel-T-Trägern
Außenwand: Doppel-T-Träger, Zellulose-Dämmstoff. An der Innenseite: OSB-Platten (18 mm), Installationsebene (6 cm, mit Zellulose ausgeblasen), innerer Abschluss: Gipsfaserplatten (10 mm). An der Außenseite: MDF-Platten (24 mm) als winddichte Verkleidung, Lüftungs- und Traglattung. Außenhaut: 2 x 2 cm dicke Lärchenholz-Schalung. U-Wert: 0,10 W/(m²K)
Boden: Streifenfundament, Kiesschicht (10 cm), PE-Folie, 16 cm dicke Bodenplatte. Auf der Bodenplatte liegen Doppel-T-Träger, mit Zellulose-Dämmstoff ausgeblasen, Abdeckung 18 mm OSB-Platten, darauf Holzweichfaser-Platten und Dielenboden. U-Wert: 0,11 W/(m²K)
Dach: Holzkonstruktion aus Doppel-T-Trägern, mit Zellulose-Dämmstoff ausgeblasen. Innenseite: OSB-Platten (18 mm) und Gipsfaser-Platten (10 mm). Außenseite Holzweichfaser-Platten (24 mm) als Unterdach, Lüftungslattung, Dachlattung, Eindeckung, U-Wert: 0,107 W/(m²K)
Fenster: Verglasungs-U-Wert: 0,7 W/(m²K); Rahmen-U-Wert: 0,8 W/(m²K)
Lüftung: Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung
Heizung: Luftnachheizregister in der Luftzufuhr
Solaranlage: Vakuumröhrenkollektor und Pufferspeicher zur Brauchwasserbereitung und Heizungsunterstützung. Nacheizung über Elektroheizstab im Pufferspeicher, im Sommer 1999 Umstellung auf Holz-Pelletsofen mit Warmwasserregister
Ökologische Aspekte: Solaranlage, Regenwassernutzungsanlage, Recyclingdämmstoff, Ökologische Baustoffe, Netzfreischaltung, abgeschirmte PVC-freie Elektroleitungen
Luftdichtheit: n_{50} = 0,4 $^1/_h$
Heizenergiebedarf: 15 kWh/(m²a) berechnet nach PHPP
Entwurfsplanung, Ausführungs- und Haustechnikplanung: Kolb und Müller GmbH, Schlüchtern-Elm

Haus Oehler in 75015 Bretten

Freistehendes Einfamilienhaus, 165 m² Wohnfläche
Konstruktion: Holzkonstruktion; passivhaustaugliche Pfosten-Riegel-Fassade in Furnierschichtholz
Außenwand: Wand EG/OG Holzstegträger, 36 cm Mineralwolldämmung, U-Wert 0,112 W/(m² K)/Betonwand UG, Dämmung 20 cm XPS, U-Wert 0,134 W/(m² K)
Boden: Bodenplatte schwimmend auf 20 cm XPS, U-Wert 0,135 W/(m² K)
Dach: Flachdach mit Holzstegträger 36 cm, 41 cm Mineralwolldämmung, U-Wert 0,086 W/(m² K)
Fenster/Türen: Rahmen Polyurethan/Holz, U-Wert 0,85 W/(m² K)
Lüftung: Be- und Entlüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und vorgeschaltetem Erdreich-Wärmetauscher, Rückwärmezahl 83 %
Heizung/Warmwasser: Zuluftheizung mit Gas , Warmwasser und Kochen mit Gas
Ökologische Aspekte: 18 m² Solarzellen, Netzeinspeisung 2 kW, Regenwasserteich als offenes Regenrückhaltebecken
Heizwärmebedarf: 12,3 kWh/(m²a) berechnet nach PHPP
Architekt: Architekturbüro Oehler + arch kom, Bretten
Baubeginn: September 1997, Bezug März 1998

Haus in 86456 Gablingen

Einfamilienhaus mit 180 m² Wohnfläche
Konstruktion: Holzständerbauweise
Außenwand: Doppel-T-Träger mit 30 cm Zellulose-Dämmung, Installationsebene 6 cm Flachs, U-Wert: 0,12 W/(m²K)
Bodenplatte: 24 cm Doppel-T-Träger, insg. 27 cm Zellulose-Dämmung, U-Wert: 0,14 W/(m²K)
Dach: Doppel-T-Träger und 40 cm Zellulose-Dämmung, U-Wert: 0,10 W/(m²K)
Fenster: gedämmte Fensterrahmen, U_g-Wert 0,7 W/(m²K), g-Wert 60 %
Lüftung: mit WRG, Kanalgegenstromwärmetauscher, Erdwärmetauscher
Heizung: Blockheizkraftwerk, Wärmeverteilung über die Lüftungskanäle, in Bad u. Wohnzimmer Wandheizung
Warmwasser: über BHKW und thermische Solaranlage 3,9 m² Kollektorfläche, 500 Liter Schichtenspeicher und 2 Pufferspeicher 1000 Liter
Luftdichtheit: n_{50} = 0,49 $^1/_h$
Ökolgische Aspekte: kein Stromanschluss, BHKW, 1,5 kW Photovoltaik, 3,9 m² Solaranlage, Regenwassernutzung
Heizwärmebedarf: 14,0 kWh/(m²a) berechnet nach PHPP
Holzbauplanung: Straubinger Holzbau GmbH, Monika Färber, Ingolstadt
Planung der Haustechnik: Dipl.-Ing. Michael Motzke, Augsburg
Fertigstellung: Oktober 2000

Haus in 26203 Wardenburg-Südmoslesfehn

Einfamilienhaus mit 137 m² Wohnfläche
Konstruktion: Holzbau mit Doppel-T-Trägern
Außenwand: Holz, Klinker, 30 cm Zellulose, 6 cm gedämmte Installationsebene
Kellerdecke/Boden: 18 cm Dämmung λ = 0.025 W/(m²K), U-Wert 0,13 W/(m²K)
Dach: Holz, Doppel-T-Träger, 36 cm Zellulose
Fenster: Holzfenster, PU-Kern, U_W = 0,78 W/(m²K)
Lüftung: Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung
Heizung: Luft-Wasser-Register über Lüftungsanlage
Warmwasser: Warmwasserbereitung über Solaranlage, 500l Speicher, 8 m² Kollektorfläche
Luftdichtheit: n_{50} = 0,43 $^1/_h$ (gemessen im Rohbauzustand) zusätzl. Qualitätskontrolle durch parallel durchgeführte Thermografie zeigte keine sichtbaren Wärmebrücken. Eine Nachmessung nach 18 Monaten ergab n_{50} = 0,30 $^1/_h$
Ökologische Aspekte: ökologische Baumaterialien, Buchenparkett und Buchentreppe, Regenwassernutzung, Solares Warmwasser, Tonziegel, Holzböden, Fotovoltaikanlage
Heizwärmebedarf: 14 kWh/(m²a)
Architekt: Ulf Brannies, Architekturbüro Team 3, Oldenburg
Planung der Haustechnik: Oldenburger Energiekontor, Oldenburg
Fertigstellung: 2001

Doppelhaus in 88131 Lindau

Doppelhaus mit zweimal 179 m² Wohnfläche
Konstruktion: Holzhaus aus vorgefertigten Wandplatten
Außenwand: Lärchenschalung, 10 cm Hinterlüftung, MDF-Platte, 30 cm Zellulosedämmung zwischen Doppel-T-Trägern, OSB-Platten, Installationsebene, Gipsfaserplatten, U-Wert: 0,12W/(m²K)
Kellerdecke: (Keller unbeheizt) OSB-Platten, 30 cm Zellulosedämmung zwischen Doppel-T-Trägern, OSB-Platten, Holzfaser-Platte als Trittschall-Dämmung 15 mm, Lärchendielen
Dach: wie Außenwand
Fenster: Schreinerfenster, Lärche massiv, mit aufgedoppelten Schenkeln, Rahmen zu 90 % eingedämmt, 3-fach Verglasung, U_g-Wert ca. 0,7 W/(m²K), g-Wert 50 %
Lüftung: Zentralgerät mit Wärmerückgewinnung, Gegenstrom-Kanal-Wärmetauscher mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad, Erdreichwärmetauscher aus 160 mm PE-Rohr zur Vorwärmung der Außenluft.
Heizung: Holz-Pellets, Luft-Nachheiz-Register, Heizkörper im Bad
Warmwasser: thermische Solaranlage, 12,6 m² Absorberfläche, Solarspeicher DUO 950/230 Liter
Luftdichtheit: n_{50} = 0,4 $^1/_h$
Ökolgische Aspekte: Regenwasseranlage
Heizwärmebedarf: 13,3 kWh/(m²a) berechnet nach PHPP
Architekten: Erber Architekten, Sabine und Cord Erber, Lindau
Planung der Haustechnik: Ökoplan Haustechnik, Roland Stuber, Waldburg,
Fertigstellung: Februar 2000

Kindergarten in 73494 Rosenberg

Kindergarten, Nutzfläche 186 m², unterkellert
Konstruktion: Holzständerbauweise
Außenwandaufbau: Doppel-T-Träger mit Zellulose-Dämmstoff, U-Wert= 0,118 W/m²K
Kellerdecke/Bodenplatte: analog zur Wand, U-Wert= 0,104 W/(m²K)
Dach: analog zur Wand, U-Wert= 0,118 W/(m²K)
Fenster: Holz-Kastenfenster; U-Wert= 0,68 W/(m²K); g-Wert= 0,47
Lüftung: Erdreich-Wärmeübertrager unter der Bodenplatte, 2 x Kreuz-Gegenstrom Wärmeübertrager im Parallelbetrieb
Heizung: Fernwärmestation im Nebengebäude, Strahlungsheizkörper
Warmwasser: Elektrokleinspeicherboiler in Küche und Toilette
Luftdichtheit: n_{50} = 0,6 $^1/_h$, Messung im Rohbau
Ökologische Aspekte: 1 kW Photovoltaikanlage
Heizwärmebedarf: berechnet, 14,1 kWh/(m²a)
Architekt: ACT – architectur concept Tröster, Ellwangen
Planung Holzbau, Statik, Bauphysik und Haustechnik: Ing.-Büro A.Naumann & H.Stahr GbR, Leipzig
Fertigstellung: März 2002

Haus in Neustadt a.d. Weinstraße-Gimmeldingen

Freistehendes Einfamilienhaus mit 2 Geschossen, 260 m² Wohnfläche, Südhang, im Bestand
Konstruktion: vorgefertigte Holztafelbauweise
Außenwand: thermisch getrennte Holzträger 6 cm x 33 cm mit Holzdübeln und Holzweichfaserdämmung zwischen den Holmen, 33 cm Einblaszellulose-Dämmung, Installationsebene mit 6 cm flexiblen Zellulose-Dämmplatten, hinterlüftete Fassade mit Calciumsilikat-Putzträgerplatten, U-Wert = 0,10 W/(m²K)
Keller: teilweise Kaltkeller, teilweise Warmkeller; Stahlbeton-Fertigteile mit 16 cm XPS-Perimeter-Dämmung, auch unter der Bodenplatte. U-Wert = 0,22 W/(m²K)
Dach: Dämmsparren mit Holzweichfaserdämmung und Holzdübeln zwischen den Gurten, 6 cm x 45 cm, 45 cm Einblaszellulose-Dämmung, U-Wert = 0,09 W/(m²K)
Fenster: Holz-Alu-Fenster, 3-fach-WschVerglasung, U-Wert = 0,80 W/(m²K)
Lüftung: Lüftungsanlage mit 92 % WRG, Erdwärmetauscher, Warmwasser-Nachheizregister in der Zuluft
Heizung: thermische Solaranlage mit Gasbrennwert-Therme. Zusätzlich zum Zuluft-Nachheizregister sind kleine Warmwasser-Wandheizflächen in Holz-Innenwänden angeordnet.
Luftdichtheit: n_{50} = 0,4 $^1/_h$, luftdichte Ebene: Holzwerkstoffplatte OSB
Ökologische Aspekte: Regenwassernutzung, thermische Solaranlage
Heizwärmebedarf (berechnet): 14,2 kWh/(m²a) nach PHPP
Architektur und Planung der Haustechnik: Architektur- und Ingenieurbüro bau.werk – Energie gestalten, Ploß und Horn GbR, Kaiserslautern-Erfenbach
Baubeginn: August 2001 – **Einzug:** April 2002

Verwaltungsgebäude Wagner & Co in 35091 Cölbe

Das erste **Verwaltungsgebäude** in Europa mit Passivhaus-Standard,
727 m² Grundfläche, 2.180 m² Brutto-Nutzfläche, drei Geschosse
Konstruktion: kompakter Baukörper, A/V-Verhältnis 0,36 1/m Mischbau, tragende Struktur als Stahlbetonskelett
Außenwand: Holz-Doppel-T-Leichtbauträger mit Dämmstärken bis zu 35 cm, U-Wert 0,15 W/(m²K)
Bodenplatte: U-Wert 0,2 W/(m²K)
Dach: Holzleichtbau-Fertigelemente auf Leimholzbinder mit Dämmstärken bis zu 35 cm, U-Wert 0,15...0,1 W/(m²K)
Fenster: Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung mit Edelgasfüllung, U-Wert 0,7 W/(m²K).
Heizung: Zuluftheizung, Solaranlage, Restheizung: Kleinst-BHKW
Lüftung: mechanische Lüftung mit WRG > 80% (Dreifach-Kreuzstrom) und Erdreichwärmetauscher
ökologischer Aspekt: Regenwassernutzung für Toilettenspülung, Reinigungszwecke und Bewässerung der Außenanlagen
Luftdichtheit: n_{50} = 0,4 h^{-1}
Heizwärmebedarf (berechnet): 14 kWh/(m²a) nach PHPP
Heizwärmebedarf (gemessen): 12 kWh/(m²a) (Winter 1999/2000)
Maximale Heizlast (gemessen): 10 W/m²
Gesamt-Primärenergie-Bezug: 121 kWh/(m²a) inkl. Stromverbrauch der Büros!
Architekt: Dipl.-Ing. Christian Stamm, Schweinsberg
Projektleiter: Klaus Schweitzer, Firma Wagner & Co Solartechnik, Cölbe b. Marburg
Wissenschaftliche Begleitung: Philipps-Universität Marburg (Fachbereich Physik) und Passivhaus Institut Darmstadt
Baubeginn: April 1997
Fertigstellung September 1998

Haus in 79199 Kirchzarten

Mehrfamilienhaus als Doppelhaushälfte, 3 Wohneinheiten, ca. 260 m² Wohnfläche
Konstruktion: Holzrahmenbauweise, zweischalig, mit Brettschichtholz-Massivdecken d = 14 cm als Ein- und Zweifeldträger, z.T. mit Kragarm.
Außenwand: Von innen nach außen: Gipsfaserplatte, Installationsebene 6 cm mit Flachsdämmung, OSB-Platte15 mm, Ständer 6/24 cm mit Zwischendämmung aus Zellulose, eingeblasen, MDF-Holzfaser-Platte16 mm, Stülpschalung Fichte/Tanne, U-Wert 0,12 W/(m²K)
Kellerdecke /Boden: Kellerdecke mit mit Polystyroldämmung und Anhydridestrich, Beton-Bodenplatte mit Flügelglättung und 12 cm Perimeterdämmung, U-Wert 0,18 W/(m²K)
Dach: Von innen nach außen: Gipsfaserplatte, Installationsebene 6 cm mit Flachsdämmung, OSB-Platte15 mm, Sparren 24 cm mit Zwischendämmung aus Zellulose, eingeblasen, MDF-Platte16 mm, U-Wert 0,12 W/(m²K), Dachüberstand traufseitig verglast.
Fenster und Fenstertüren: Einfach-Holzfenster IV 68, Rahmen von außen zusätzlich gedämmt mit Weichfaserplatte, Dreifach-Wärmeschutz-Verglasung
Sonnenschutz: Raffstore nur vor Südfassade, elektrisch gesteuert, Wind und Sonnenwächter. Balkonanlage dreigeschossig vor Südfassade als zusätzlicher Sonnenschutz.
Lüftung: Zentralgerät mit Gegenstrom-Wärmeübertrager, WRG 90%. Erdkanal mit 100 lfdm Verrohrung
Heizung: Holz-Pellets-Heizkessel 5-15 kW im UG, Wärmeverteilung im Heizkreis zu Luft-/Wasser-Heizregistern.
Warmwasser: Solar-Flachkollektoren ca. 10 m² auf Süd-Schrägdach 45°, Frischwassersystem im Pufferspeicher 550 Liter
Luftdichtheit: n_{50} = 0,42 $^1/_h$
Ökologische Aspekte: diffusionsoffene Bauweise, Massivholzparkett-,Naturstein- und Naturfaserböden mit Kokosfaserdämmung und Lehmziegen, Dämmung Außenwand und Dach aus Recycling Zellulose und Flachs, Regenwasserzisterne zur Gartenbewässerung
Heizwärmebedarf (berechnet): 13 kWh/(m²a)
Architekt: Frank Rosenkranz, a plus architekten, Kirchzarten;
Haustechnik: Solares bauen Ingenieurgesellschaft mbH, Freiburg
Fertigstellung: August 2000

EGH
Entwicklungsgemeinschaft Holzbau
in der
Deutschen Gesellschaft für Holzforschung

HOLZ®
Und Deine Welt
hat wieder ein Gesicht.