



Begleitung von Planung und Bau eines ausgewählten Projekts:

Energieeffizientes Einfamilienhaus in Königsfeld

Endbericht

IEA SHC TASK 28 / ECBCS ANNEX 38

**Dr. Berthold Kaufmann
Dipl. Ing. Vahid Sariri**

Juni 2005

Begleitung von Planung und Bau eines ausgewählten Projekts:

Energieeffizientes Einfamilienhaus in Königsfeld

Endbericht

IEA SHC TASK 28 / ECBCS ANNEX 38

Forschungsvorhaben im Rahmen der nationalen
Beteiligung an der Arbeitsgruppe 'Sustainable Solar
Housing' der Internationalen Energie Agentur IEA

Subtask C: Demonstrationsprojekte

<p>Autoren: Dr. Berthold Kaufmann Dipl.-Ing. Vahid Sariri</p> <p>Herausgeber: Passivhaus Institut Rheinstraße 44/46 D-64283 Darmstadt</p> <p>Tel: 06151 / 82699-0 Fax: 06151 / 82699-11 E-Mail: mail@passiv.de internet: www.passiv.de</p> <p>Darmstadt Juni 2005</p>	<p>Dieser Bericht entstand im Rahmen des Forschungsprojekts IEA SHC TASK 28 / ECBCS ANNEX 38 als nationale Beteiligung an der Arbeitsgruppe 'Sustainable Solar Housing' der Internationalen Energieagentur IEA</p> <p>Der vorliegende Bericht bezieht sich auf die Forschungsarbeiten im Subtask C: Demonstrationsprojekte</p> <p>Die Nationalen Forschungsarbeiten wurden teilweise finanziert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi vertreten durch den Projektträger Forschungszentrum Jülich GmbH (BEO).</p> <p>Danksagung: Unser besonderer Dank geht an den Architekten und den Bauträger Firma Schröder, Niederzissen und an die Bewohner des Gebäudes.</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung, Zusammenfassung	2
2	Architektonischer Entwurf	3
2.1	Grundrisse	3
2.2	Ansichten und Schnitt	5
2.3	Beschreibung der Tragkonstruktion	7
3	Regelbauteile der Gebäudehülle	8
3.1	Außenwand	8
3.2	Regelaufbau Dach	9
3.3	Regelaufbau Bodenplatte	10
3.4	Wärmebrückenfreies Konstruieren	12
3.5	Luftdichte Gebäudehülle	13
3.6	Luftdichte und Wärmebrückenfreie Anschlussdetails	18
3.6.1	Außenwandkante	19
3.6.2	Außenwandanschluss an Bodenplatte	19
3.6.3	Geschossdecke / Fassade	20
3.6.4	Ortgang	21
3.6.5	Traufe	22
3.6.6	First	22
3.7	Passivhausfenster	24
3.7.1	Fensteranschluss und Einbau	24
3.7.2	Verschattung und sommerlicher Wärmeschutz	27
3.8	Passivhaus-Haustechnik	30
3.8.1	Lüftungs- und Heizkonzept	30
3.8.2	Diskussion unterschiedlicher Lüftungs- und Heizungskonzepte	34
4	Energiebilanz mit dem PHPP Passivhaus Projektierungs Paket	39
4.1	Ergebnisse der PHPP-Berechnung	40
4.2	Planungsvarianten	40
4.3	PHPP-Dokumentation, Variante 'wie gebaut'	43
5	Literatur	48

1 Einleitung, Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes 'Solar Sustainable Housing' der IEA wurde im 'Task 28/38' die Entwicklung von Gebäuden mit besonders niedrigem Energieverbrauch eingehend untersucht und Konzepte zur marktfähigen Umsetzung solcher Gebäude gesucht. Im Rahmen dieses Projektes war es unter anderem eine Aufgabe, ein neu zu errichtendes Gebäude in der Planungs- und Realisierungsphase beratend zu begleiten und dabei das Wissen über energieeffizientes Bauen in Zusammenarbeit mit den an der Planung beteiligten Architekten und Ingenieuren in den Planungsprozess einzubringen.

Die Bauträgerfirma Schröder Baudeen in Niederzissen in der Nähe von Koblenz hat sich für das Angebot der Planungsbegleitung interessiert und sich bereit erklärt, den Planungsprozess gegenüber dem Passivhaus Institut (PHI) offen zu legen. Das zu errichtende Gebäude wurde im Laufe des Jahres 2004 für die Familie Grochovski in Königfeld geplant und errichtet. In diesem Zusammenhang fanden mehrere Besuche des PHI auf der Baustelle, ein Gespräch mit dem Architekten und dem Statiker und ein Gespräch mit dem Planer der haustechnischen Anlagen statt. Außerdem hat die Firma Schröder zahlreiche Fotos vom Bauablauf und Planzeichnungen für diese Dokumentation zur Verfügung gestellt.

Die Bauteile der Gebäudehülle, die im folgenden noch genauer beschrieben werden, waren durch das ausgewählte passivhauszertifizierte Bausystem aus Beton-Schalungssteinen bereits weitgehend festgelegt, es wurden darüber hinaus Hinweise zur Auswahl der Fenster gegeben.

Bei der Auswahl der haustechnischen Anlagen fand eine intensive Diskussion des vorgeschlagenen Konzeptes mit dem Haustechnikplaner statt: Kontrollierte Wohnungslüftung mit Kreuzstrom-Wärmeübertrager kombiniert mit einer Kleinstwärmepumpe und elektronisch geregelten aber direkt-elektrisch betriebenen Nachheizelementen. Dieses Konzept wurde vom Planungsbüro Zimmermann in Olpe für Niedrigenergiehäuser entwickelt und wird dort häufig eingesetzt. Die Diskussion ist im Abschnitt 3.8 dokumentiert. Hier wäre es für die Zukunft wünschenswert, eine Feldmessung durchzuführen, um den Verbrauch an elektrischer Energie zu erheben.

Insgesamt wurde das Gebäude sehr sorgfältig geplant und gebaut. Die Ausführung der haustechnischen Anlagen, vor allem die Dämmung der Lüftungskanäle, ist vorbildlich zu nennen. Das PHI hat nach Abschluss der Bauarbeiten die Luftdichtheit der Gebäudehülle mittels eines Drucktests (Blower-Door-Test) geprüft. Das Ergebnis ist in Abschnitt 3.5 dokumentiert.

Die Autoren danken der Firma Schröder an dieser Stelle für die freundliche und unterstützende Zusammenarbeit in diesem Projekt.

2 Architektonischer Entwurf

2.1 Grundrisse

Das Einfamilienhaus befindet sich in Königsfeld. Die umgebende Bebauung besteht auch aus Einfamilienhäusern. Der Zugang zum Gebäude erfolgt ebenerdig über die Haustür an der Ostseite des Gebäudes.

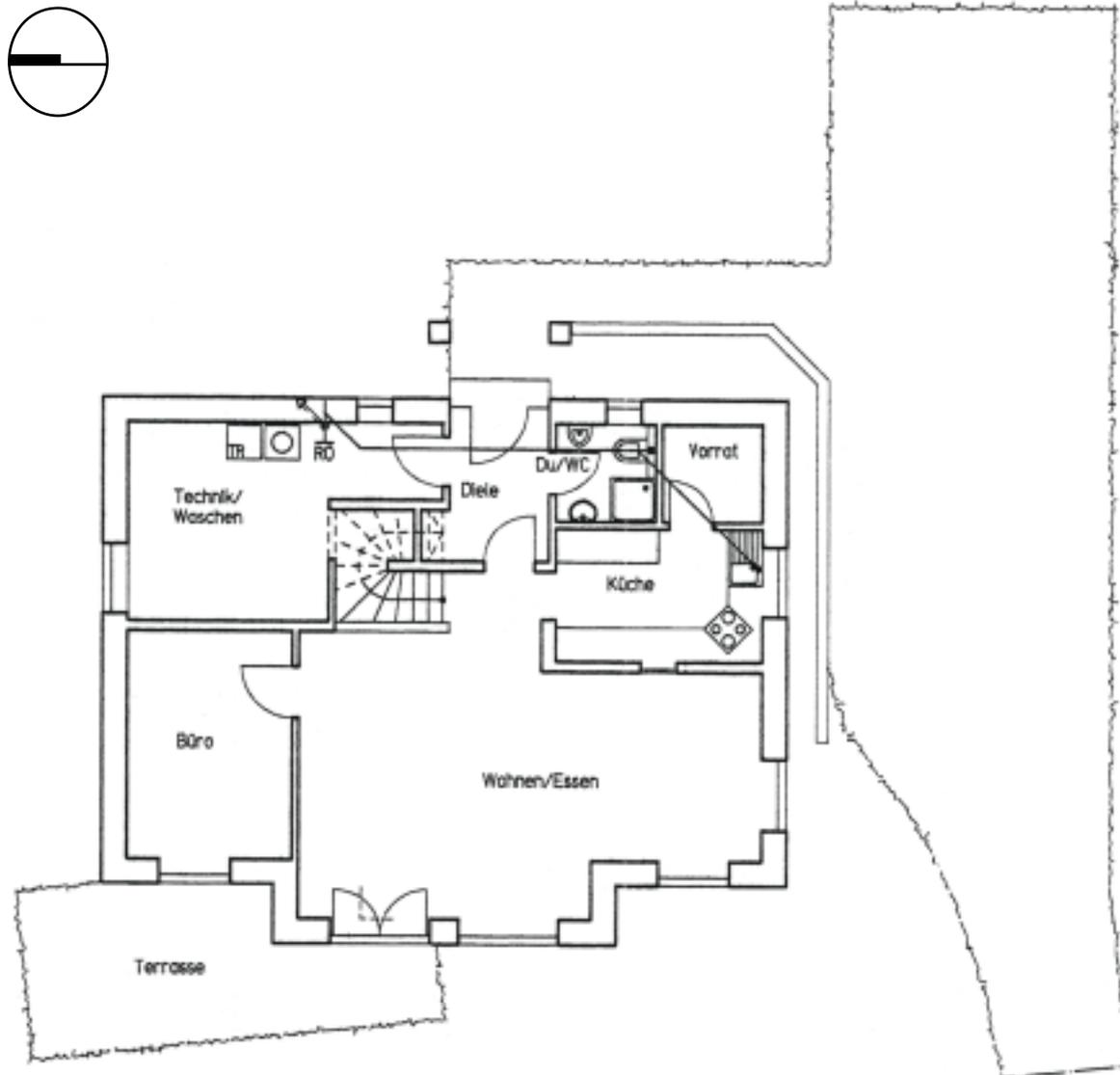


Abbildung 1: Grundriss Erdgeschoss

Das Haus besteht aus zwei Ebenen. Im Erdgeschoss befinden sich Wohnräume und Küche sowie ein kleines Büro, vgl. Abbildung 1. Im Obergeschoss befinden sich die Schlafräume und das Bad. Die Funktionsräume sind im Osten angeordnet. In einem Technikraum im Erdgeschoss auf der Nord-Ost-Seite des Gebäudes befindet sich der Hausanschluss für Kommunikation, Energie und Wasser/Abwasser. Dort befinden sich auch die Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und die Warmwasserbereitung.

Der offene Wohn-/Essbereich ist nach Westen orientiert. Ein Teil des Wohnbereichs ist zum Obergeschoss offen, vgl. Abbildung 7. Über eine 180° gewendelte zentral im Grundriss gelegene Treppe gelangt man in das Obergeschoss, vgl. Abbildung 2. Die Funktionsräume sind hier ebenfalls im Osten angeordnet. Diese Anordnung optimiert die Installation und Warmwasser-Versorgung.

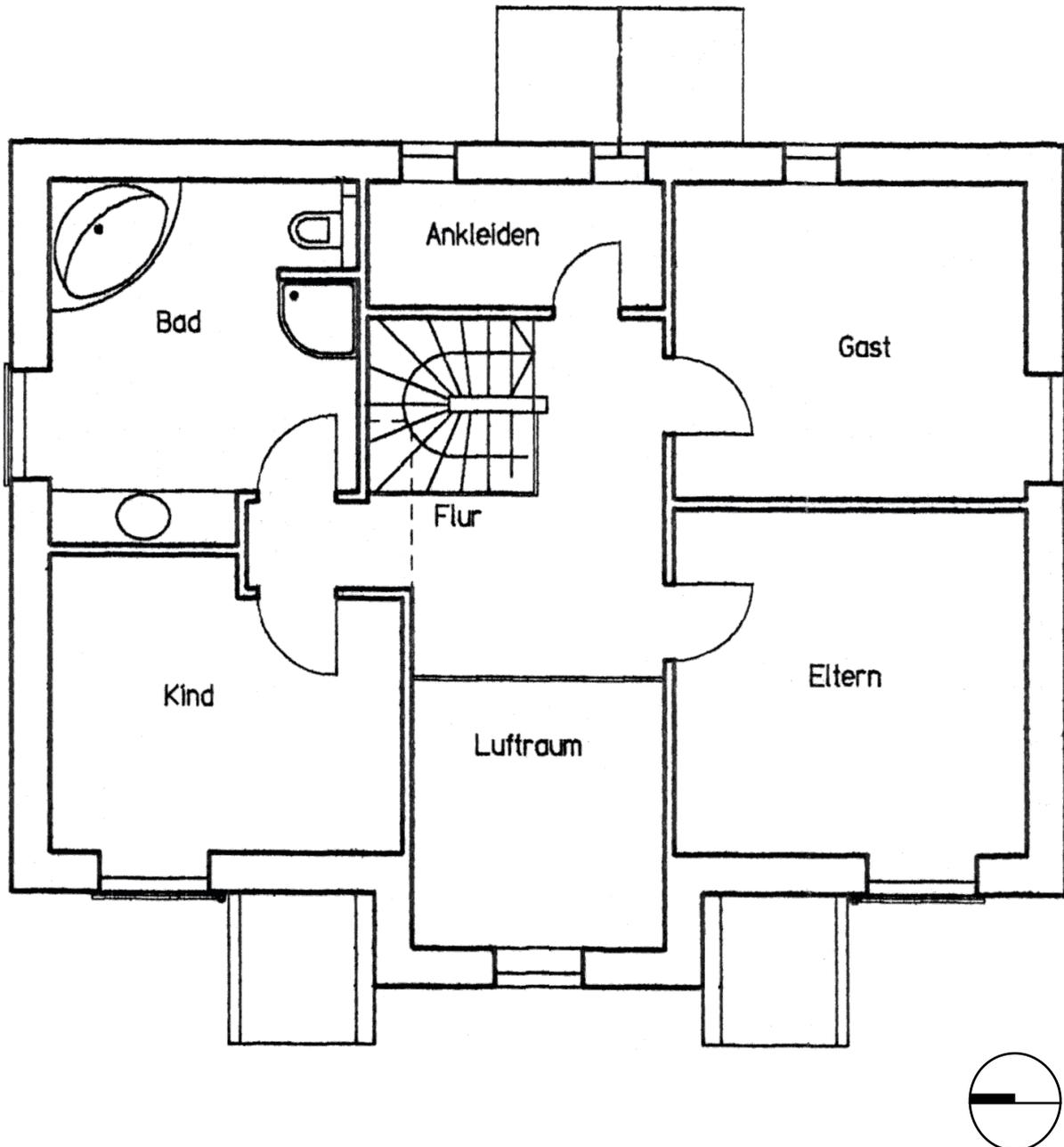


Abbildung 2: Grundriss Obergeschoss

2.2 Ansichten und Schnitt

Die Hauptfassade mit den großzügigen Fenstern von Wohn-, Esszimmer und Büro ist nach Westen orientiert. Dies war vom Bebauungsplan an dieser Stelle so vorgesehen. Eine wünschenswerte Orientierung der Hauptfassade nach Süden war deshalb nicht möglich. Gerade diese für ein Einfamilienhaus ungünstige Orientierung, die in Deutschland sehr verbreitet ist, macht das Fallbeispiel interessant: lässt sich auch unter dieser Bedingung der Passivhausstandard erreichen? Diese Frage wird in Abschnitt 4 im Rahmen der Energiebilanz diskutiert.

Die Ostfassade hat neben der Haustür lediglich fünf kleine Fenster zur Belichtung der dort gelegenen Funktionsräume. Die Räume auf der Nord- und Südseite werden über raumhohe Doppelflügel Fenster belichtet. Die Außenhaut des Gebäudes bildet ein Putz, wie sonst bei Wärmedämmverbundsystemen üblich. Das Haus ist 1,5 geschossig angelegt. Im Querschnitt des Gebäudes, Abbildung 7 ist eine Galerie über dem Wohnbereich zu erkennen. An dieser Stelle ist das Wohnzimmer etwa 3,5 Meter hoch.

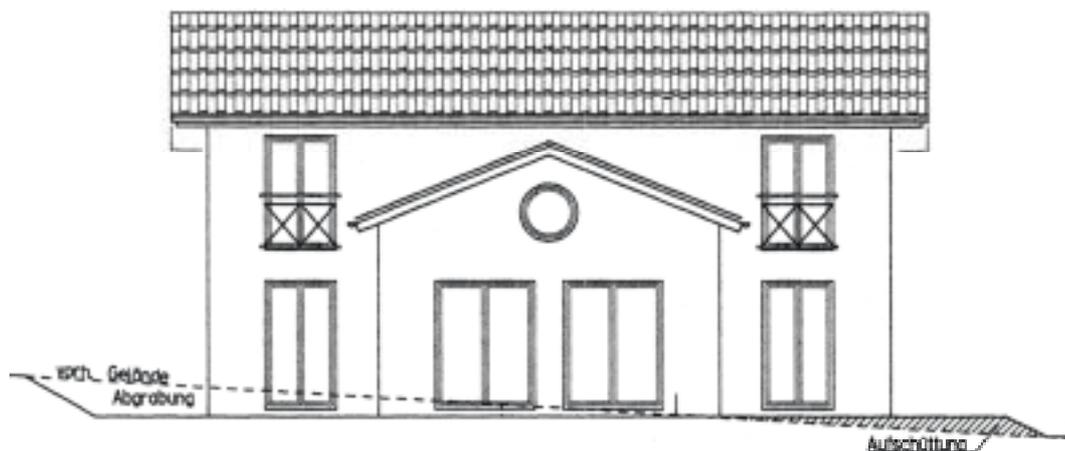


Abbildung 3: Ansicht West

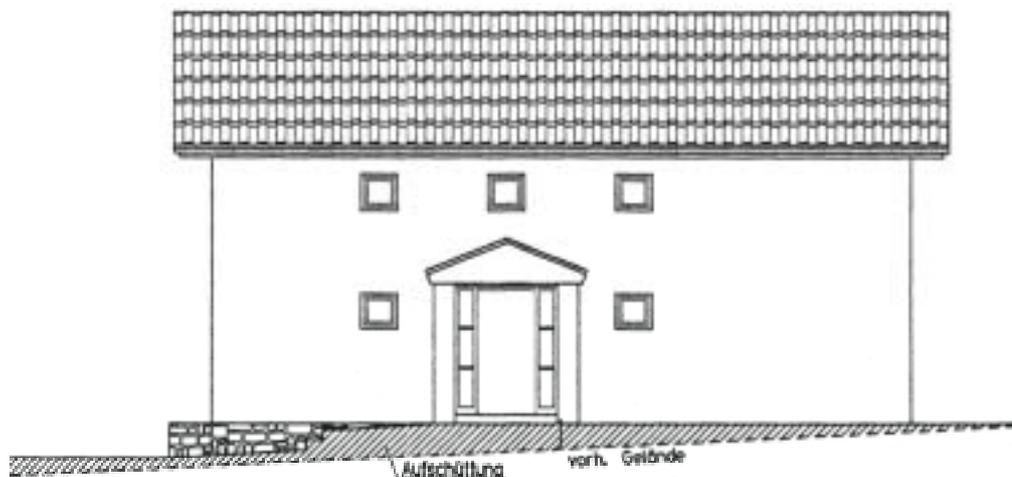


Abbildung 4: Ansicht Ost



Abbildung 5: Ansicht Süd

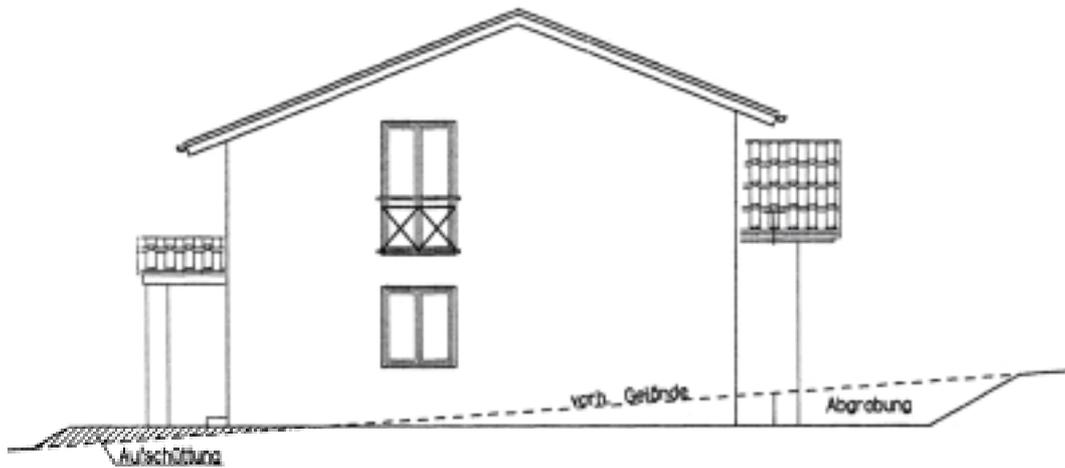


Abbildung 6: Ansicht Nord

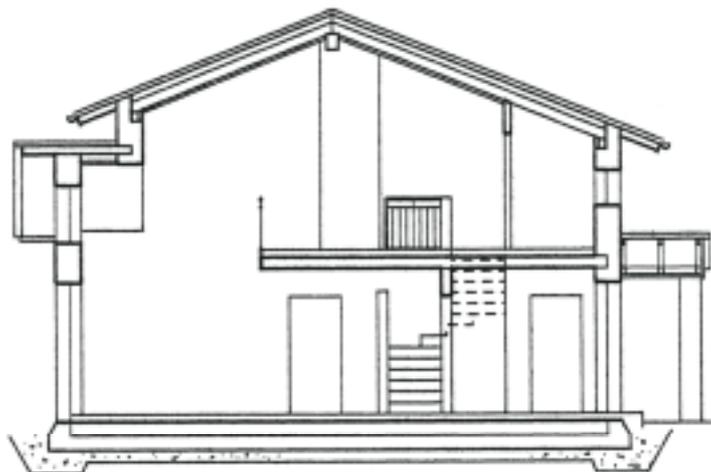


Abbildung 7: Vertikaler Schnitt

2.3 Beschreibung der Tragkonstruktion

Das Gebäude ist ein Massivbau mit Sparrendach. Die tragenden Außenwände sind aus Beton-Schalungssteinen konstruiert. Die verlorene Schalung ist aus Polystyrol und bildet auf der Außen- und Innenseite der Schalungssteine eine wärmedämmende Schicht, welche insgesamt zu einem U-Wert der Außenwand von $U_{\text{Wand}} = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ führt. Der Kern der Schalungssteine wird gemäß den statischen Erfordernissen bewehrt und mit Ortbeton verfüllt.

Auf den tragenden Außenwänden liegt eine Zwischendecke aus Stahlbeton. Im OG liegt über einem Kniestock direkt das Dach auf den Außenwänden, Abbildung 8. Das Sparrendach besteht aus tragenden Sparren mit einer Höhe von 240 mm, darauf liegen Kontersparren mit 160 mm, wodurch insgesamt eine Dämmstärke von 400 mm erreicht wird. Die Sparrenzwischenräume sind jeweils mit Polystyrol als Dämmstoff gefüllt.



Abbildung 8: Herstellung der Zwischendecke als Filigrandecke.



Abbildung 9: Sparrendach aus vorgefertigten gedämmten Dachelementen. Deutlich zu sehen sind die überstehenden Folienstreifen, die später mit den angrenzenden Bauteilen luftdicht verklebt bzw. eingeputzt werden.

3 Regelbauteile der Gebäudehülle

Alle Außenbauteile des Gebäudes haben U-Werte im Bereich von 0,1 W/(m²K) wie es für Passiv-Einfamilienhäuser üblich ist. Für ein freistehendes Einfamilienhaus sind sehr niedrige U-Werte anzustreben, da hier das Verhältnis der Oberfläche, die Wärme an die Umgebung abgeben kann, zum umbauten Volumen größer ist als bei Reihenhäusern und Geschosswohnungsbauten. Für das vorliegende Gebäude ist $A/V = 0,76 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Die U-Werte sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Bauteil	Fläche [m ²]	U-Wert [W/(m ² K)]	H-Wert: U × A [W/K]	Temperaturgewichtungsfaktor f_t	H-gewichteter Wert $f_t \times U \times A$ [W/K]	Anteil am Transmissions-Wärmeverlust
Außenwand Süd	43.8	0.112	4.9	1.000	4.889	7%
Außenwand Nord	46.8	0.112	5.2	1.000	5.223	8%
Außenwand West	59.1	0.112	6.6	1.000	6.592	10%
Außenwand Ost	54.7	0.112	6.1	1.000	6.110	9%
Dach	118.8	0.105	12.4	1.000	12.447	18%
Bodenplatte	109.2	0.095	10.3	0.617	6.383	9%

Tabelle 1: Auflistung der Wärmeverluste für die verschiedenen opaken Außenbauteile. In der Summe betragen die H-gewichteten Wärmeverluste 61 % der Transmissionswärmeverluste

3.1 Außenwand

Die tragenden Außenwände sind aus Beton-Schalungssteinen konstruiert (System Wolf). Die verlorene Schalung ist aus Polystyrol und bildet auf der Außen- (240 mm) und Innenseite (63 mm) der Schalungssteine jeweils eine wärmedämmende Schicht, welche insgesamt zu einem U-Wert der Außenwand von $U_{\text{Wand}} = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ führt, vgl. Tabelle 2. Der Kern der Schalungssteine wird gemäß den statischen Erfordernissen bewehrt und mit Ortbeton verfüllt. Auf der Innen- bzw. Außenseite werden die Oberflächen jeweils verputzt. Die Schalungselemente werden mithilfe eines Gerüsts lotrecht aufgerichtet. Die einzelnen Schalungselemente müssen formschlüssig ineinandergefügt werden, siehe Abbildung 10.



Abbildung 10: Prinzipschema (links) und Bilder eines Betonschalungssteins zum Aufbau der Außenwand. Dämmstärke außen 240 mm, innen 63 mm.



1 Außenwand						Summe Breite	
Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung							
Wärmeübergangswiderstand [m²K/W] innen R _{s1} : 0.13							
außen R _{s3} : 0.04							
Teilfläche 1	λ [W/(m·K)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(m·K)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(m·K)]	Dicke [mm]	
1. Innenputz	0.350					15	
2. Styropor	0.035					63	
3. Beton	2.100					188	
4. Styropor	0.035					240	
5. Außenputz	0.800					15	
6.							
7.							
8.							
Flächenanteil Teilfläche 2							
Flächenanteil Teilfläche 3							
						Summe	52.0 cm
U-Wert: 0.112 W/(m²K)							

Tabelle 2: U-Wert Berechnung für den Regelaufbau der Außenwand

3.2 Regelaufbau Dach

Das Sparrendach besteht aus tragenden Sparren mit einer Höhe von 240 mm. Darauf liegen Kontersparren 160 mm hoch, womit insgesamt eine Dämmstärke von 400 mm erreicht wird. Die Sparrenzwischenräume sind jeweils mit Polystyrol als Dämmstoff gefüllt, so dass sich insgesamt ein U-Wert von $U_{\text{Dach}} = 0,085 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ergibt, Tabelle 3. Die vorgefertigten Dachelemente werden direkt auf die Fuß- und Firstpfette aufgelegt, Abbildung 11.

2 Dach							
Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung							
Wärmeübergangswiderstand [m ² K/W] innen R _{si} : 0.13							
außen R _{se} : 0.08							
Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Summe Breite Dicke [mm]	
1. Holzwerkstoffplatte	0.130					50	
2. Polystyrol	0.040	Holz	0.130			240	
3. Polystyrol	0.040			Holz	0.130	160	
4.							
5.							
6.							
7.							
8.							
		Flächenanteil Teilfläche 2			Flächenanteil Teilfläche 3	Summe	
		2.0%				45.0 cm	
U-Wert: 0.096 W/(m ² K)							

Tabelle 3: U-Wert Berechnung für den Regelaufbau des Daches

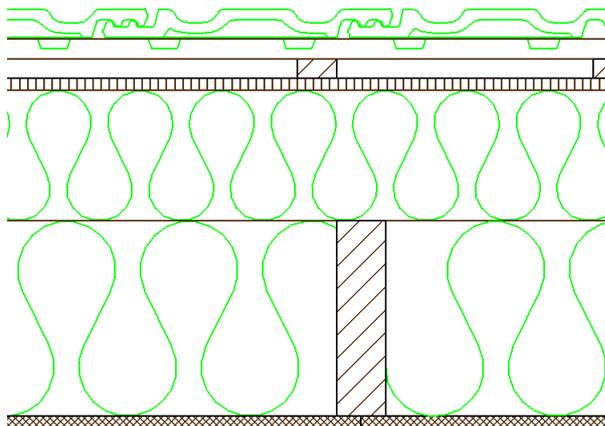


Abbildung 11: Prinzipschema des Dachaufbaus mit tragendem Sparren (240 mm). Darüber liegt ein Kontersparren (160 mm) damit insgesamt eine Dämmstärke von 400 mm entsteht. Rechts: vorgefertigte Dachelemente werden auf First- und Fußpfette aufgelegt.

3.3 Regelaufbau Bodenplatte

Das Gebäude hat eine Bodenplattengründung. Die Last wird von der Bodenplatte gleichmäßig auf der ganzen Fläche verteilt, so dass mit heute verfügbaren Dämmstoffen die Bodenplatte unterseitig gedämmt werden kann. Über einer Sauberkeitsschicht wurde eine Folie als Sperre gegen aufsteigende Feuchte verlegt. Darauf wurden direkt die Dämmplatten der Dämmung in zwei Lagen verlegt, vgl. Abbildung 12

Die Randelemente der Bodenplattendämmung sind L-förmige Formteile, die als Schalung für den später eingebrachten Ortbeton dienen. Die Bodenplatte bildet zusammen mit den Randelementen ein fertig vorkonfektioniertes Bausystem, in das die Bodenplatte ohne weiteren Aufwand gegossen werden kann.

3 Bodenplatte						
Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung						
Wärmeübergangswiderstand [m ² K/W] innen R _{s,i} : 0.17						
außen R _{s,e} : 0.00						
Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Summe Breite Dicke [mm]
1. Parkett	0.130					22
2. Estrich	1.050					48
3. Trittschalldämmung	0.040					110
4. Betondecke	2.100					250
5. Polystyrol	0.035					250
6.						
7.						
8.						
		Flächenanteil Teilfläche 2		Flächenanteil Teilfläche 3		Summe
						68.0 cm
U-Wert: 0.096 W/(m ² K)						

Tabelle 4: U-Wert-Berechnung für den Regelaufbau der Bodenplatte

Unabhängig vom aktuellen Projekt in Königsfeld wurde vom Bauträger (Fa. Schröder Baudeen, Niederzissen) ein weiter optimiertes Bodenplattensystem entwickelt, das eine noch rationellere Fertigung verspricht.

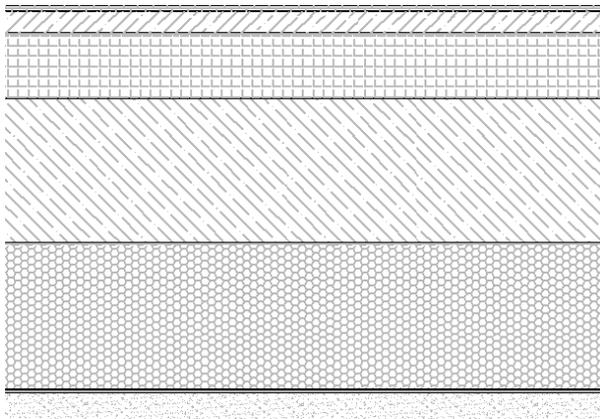


Abbildung 12: Prinzipieller Aufbau der Bodenplatte und verschiedene Phasen bei der Erstellung.

3.4 Wärmebrückenfreies Konstruieren

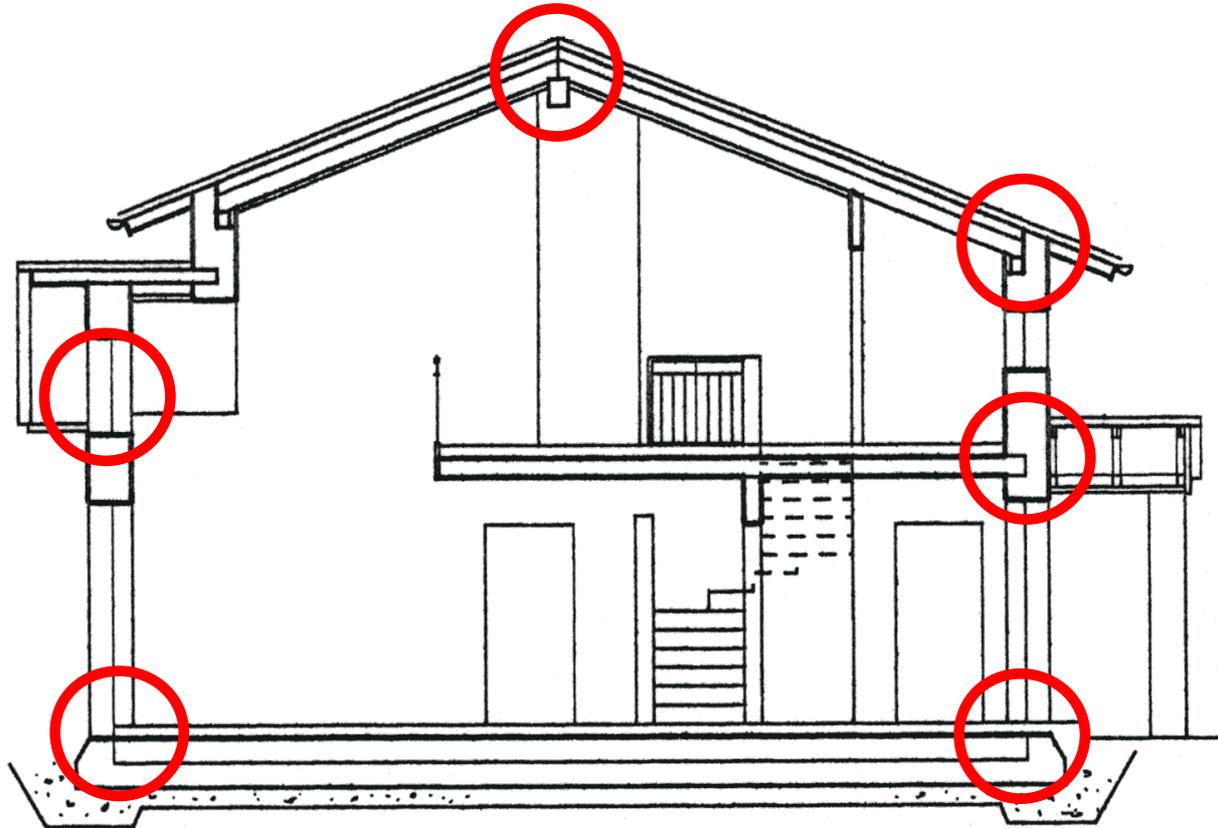


Abbildung 13: Vertikaler Schnitt mit linienförmigen Wärmebrückendetails

Eine wesentliche Aufgabe beim Entwurf eines Passivhauses ist die möglichst weitgehende Vermeidung von Wärmebrücken. Beim vorliegenden Gebäude wurde dies Dank der verwendeten Bausysteme für Wand, Bodenplatte und Dach vorbildlich erfüllt. In Tabelle 5 sind die Wärmebrückenverluste der verschiedenen Anschlüsse aufgelistet. Die Anschlüsse der Außenbauteile an Ortgang, Traufe, First, Außenwandkante und Fußpunkt der Außenwand sind rein geometrische Wärmebrücken, die alle negative Wärmebrückenverlustkoeffizienten Ψ_a aufweisen. Lediglich die Anschlüsse der Zwischendecken und Innenwände an die Außenwand haben leicht positive Ψ_a -Werte, weil dort jeweils die innenliegende Dämmschicht des Schalungselementes durchstoßen wird.

Insgesamt bringt die Bilanzierung der Wärmebrückenverluste also eine Gutschrift beim Transmissionswärmeverlust von -2,8 % bzw. eine Verminderung des Heizwärmebedarfs von -0,9 kWh/(m²a), vgl. Tabelle 5. Das Kriterium des 'Wärmebrückenfreien Konstruierens' wird für das dokumentierte Einfamilienhaus somit übererfüllt [1].

Benennung	Länge l [m]	Ψ W/(mK)	H-Wert: $\Psi \times l$ [W/K]	Temperaturgewichtungsfaktor f_t	H-gewichteter Wert $f_t \times \Psi \times l$ [W/K]	Anteil am Transmissionswärmeverlust
AWB Außenw.-Bodenplatte	43.20	-0.045	-1.94	0.617	-1.200	-1.8%
TRW Innenwände	41.20	0.030	1.24	1.000	1.236	1.8%
ZWIK Zwischendecken	43.20	0.030	1.30	1.000	1.296	1.9%
AWD Ortgang	19.00	-0.030	-0.57	1.000	-0.570	-0.8%
AWAW Außenwanddecke	21.00	-0.066	-1.39	1.000	-1.386	-2.0%
AWD Traufe	24.00	-0.047	-1.13	1.000	-1.128	-1.7%
First	12.00	-0.013	-0.16	1.000	-0.156	-0.2%

Tabelle 5: Auflistung der Wärmebrückenverluste für die verschiedenen Anschlussdetails. In der Summe betragen die H-gewichteten Wärmebrückenverluste -2,8 % der Transmissionswärmeverluste, da die rein geometrischen WB mit negativen Ψ_a -Werten die Effekte von Innenwänden und Zwischendecken überwiegen.

3.5 Luftdichte Gebäudehülle

Die luftdichte Hülle des Gebäudes bildet an den Außenwänden der Innenputz, vgl. Abbildung 14. Dort, wo Vorwandinstallationen an den Außenwänden liegen, wurde vor der Installation vorgeputzt, um später überall an den Außenwänden eine lückenlose Putzschicht gewährleisten zu können, Abbildung 16. An den Fensteranschlüssen wird die Verbindung zwischen Rahmen und Putz mit Klebebändern hergestellt, die vor dem Verputzen angebracht und später eingeputzt wurden, vgl. die Schnittzeichnung in Abbildung 29 sowie Abbildung 30.

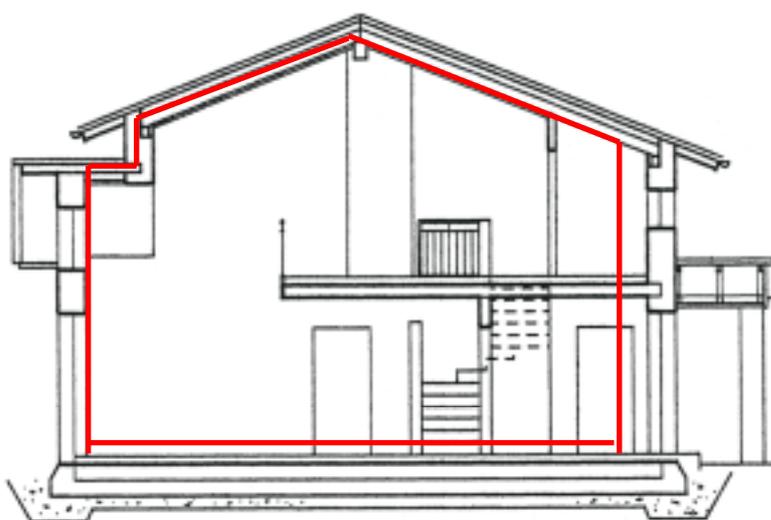


Abbildung 14: Verlauf der luftdichten Ebene (Innenputz) im vertikalen Schnitt und fertig verputzte Innenoberflächen der Außenwände.

Im Dach bildet die untere Beplankung der vorgefertigten Dachelemente die luftdichte Ebene. Die einzelnen Elemente wurden mit überstehenden Folienstreifen angeliefert. Nach dem Auflegen auf die Pfetten wurden benachbarte Dachelemente sorgfältig mit diesen Folienstreifen luftdicht verklebt, Abbildung 27. Die luftdichte Verbindung am First bildet ein vorkomprimiertes Schaumstoffband, welches an die westlichen Dachelemente geklebt wurde, bevor anschließend die östlichen Elemente aufgesetzt wurden, Abbildung 28. Diese Methode ist zuverlässig, sie erfordert allerdings sehr maßgenaues Arbeiten.

Der luftdichte Anschluss des Daches an die Außenwände geschieht wie beim Fenster über Verklebungen mit Spezialklebeband. Die Klebebänder wurden anschließend vom Innenputz überputzt. Erst durch das Überputzen entsteht die luftdichte Verbindung, Abbildung 15.



Abbildung 15: Die luftdichte Verbindung der unteren Beplankung des Daches mit den Außenwänden wurde mit Spezialklebeband hergestellt. Das Klebeband wurde später eingeputzt, wodurch die luftdichte Verbindung erst entsteht.

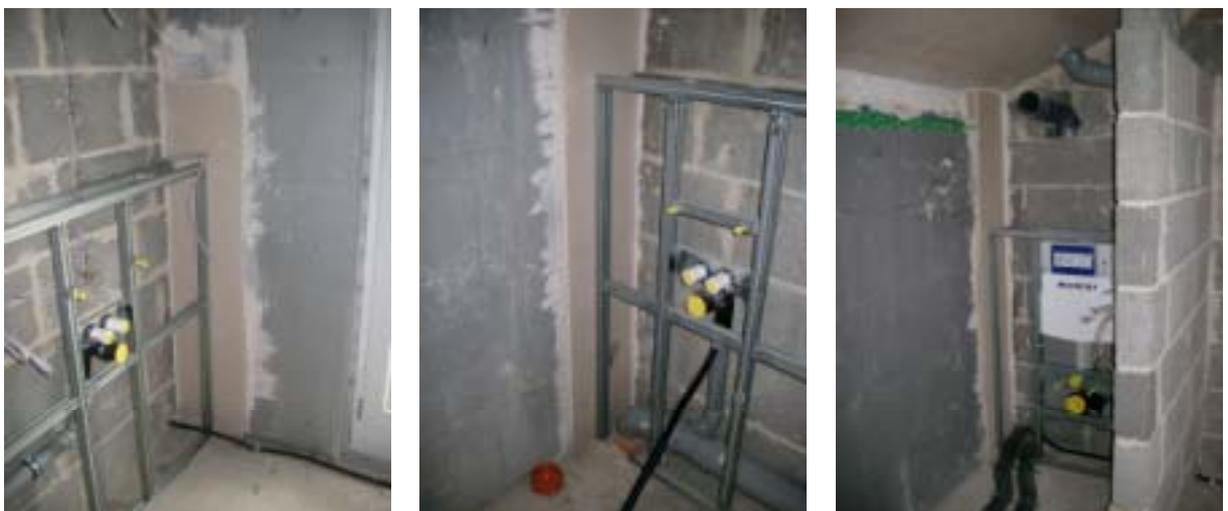
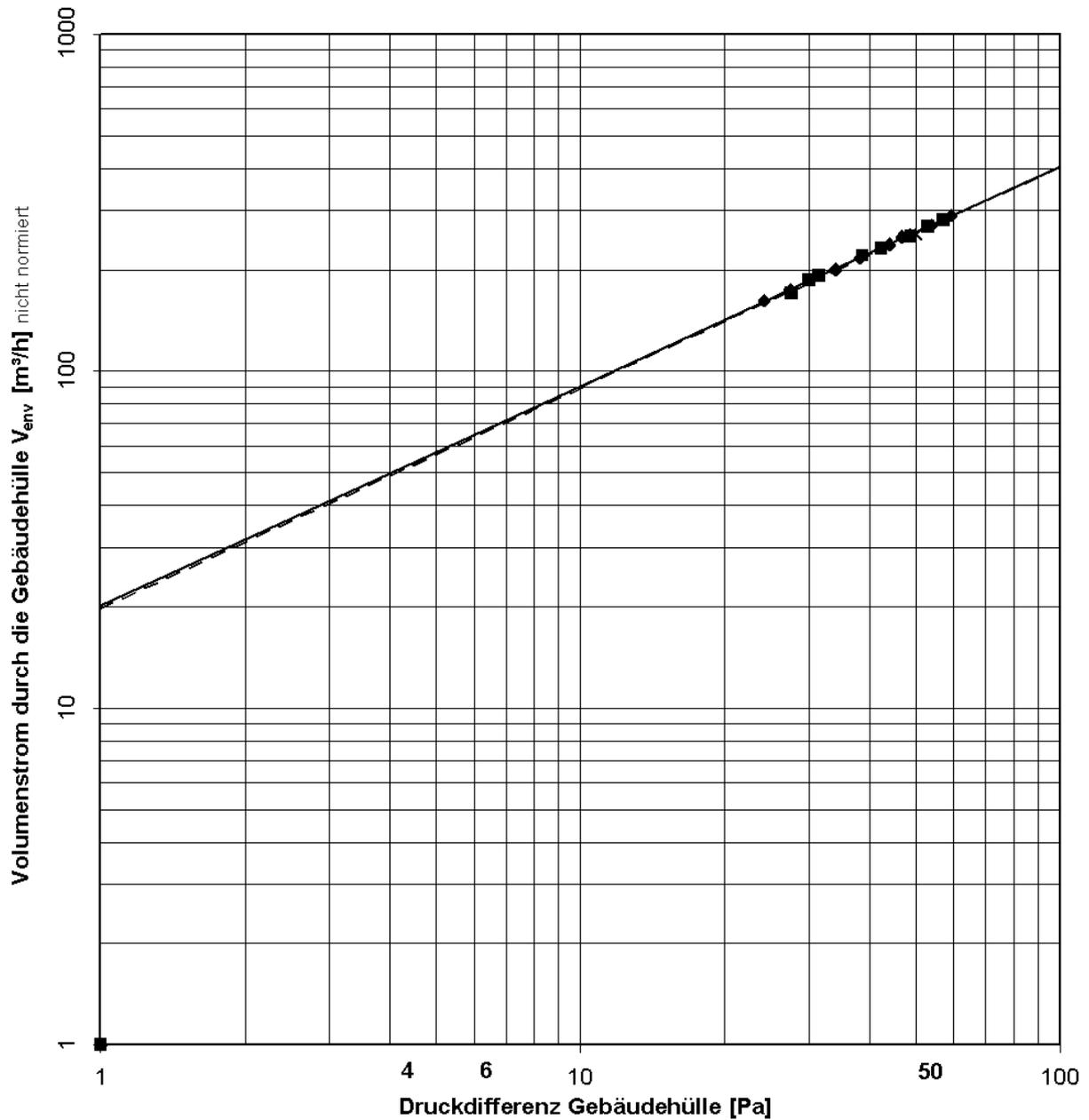


Abbildung 16: Überall, wo sich Vorwandinstallationen an Außenwänden befinden, wurde die Wand vorgeputzt, um auch dort die Luftdichtheit sicherzustellen.

BlowerDoor-Leckagekurve
Objekt: EFH, BV Grochowski Bauträger: Schröder Bauideen,
56651 Niederzissen



- ◆ Volumenstrom Unterdruck [m^3/h]
- Volumenstrom Überdruck [m^3/h]
- Regressionsgerade Unterdruck [m^3/h]
- - - Regressionsgerade Überdruck [m^3/h]
- × Volumenstrom (gemittelt) bei 50 Pa [m^3/h]

Abbildung 18: Grafische Darstellung der einzelnen Datenpunkte der Blower-Door-Messung

Diskussion der Luftdichtheit der Gebäudehülle

Beim Drucktest mit der Blower-Door wurde auf Anhieb der Grenzwert von $n_{50} = 0,6 \text{ } ^1/\text{h}$ unterschritten. Der gemessene Luftwechsel bei 50 Pa Über- und Unterdruck war 0,54 bzw. $0,55 \text{ } ^1/\text{h}$, siehe Abbildung 17 und Abbildung 18. Dies zeigt, dass das gewählte Planungskonzept für die luftdichte Gebäudehülle tragfähig ist, und bei dem untersuchten Gebäude konsequent umgesetzt wurde.

Die einzigen messbaren Leckagen wurden bei den Fenstern festgestellt. Alle doppelflügligen Fenster im Gebäude sind mit Stulp und nicht mit Setzpfosten ausgeführt. Hier stellt der Stoß der Dichtungen der beiden Fensterflügel eine potentielle Undichtheit dar. Sind die Fenster sehr gut einjustiert, so kann dies minimiert werden. Die Fenster wurden aufgrund dieses Befundes nach dem Drucktest nachjustiert.

Weitere messbare Leckagen konnten nicht gefunden werden. Es ist jedoch durchaus möglich, dass viele kleinere Leckagen zusammengenommen das Ergebnis verschlechtern. Mögliche weitere Punkte wären die Durchführungen der Lüftungsleitungen und die Durchführungen der Hausanschlüsse für Wasser, Abwasser und Strom.

Es ist nach aller Erfahrung mit der Luftdichtheit bei Passivhäusern durchaus möglich, Drucktest-Ergebnisse von $n_{50} = 0,3 \text{ } ^1/\text{h}$ und besser mit vertretbarem Aufwand zu erreichen. Wie die Energiebilanzberechnung nach PHPP zeigt, hätte ein n_{50} -Wert von $0,3 \text{ } ^1/\text{h}$ gegenüber $0,55 \text{ } ^1/\text{h}$ eine Reduktion des Heizwärmebedarfs von etwa $1,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ gebracht, vgl. Abbildung 21.



Abbildung 19: Leckageortung beim Blower-Door-Test. Undichtheit am Stulp der doppelflügligen Fenster.



Abbildung 20: Durchführungen der Hausanschlussleitungen, Wasser, Abwasser, Elektrizität. Hier konnten keine messbaren Leckagen festgestellt werden.

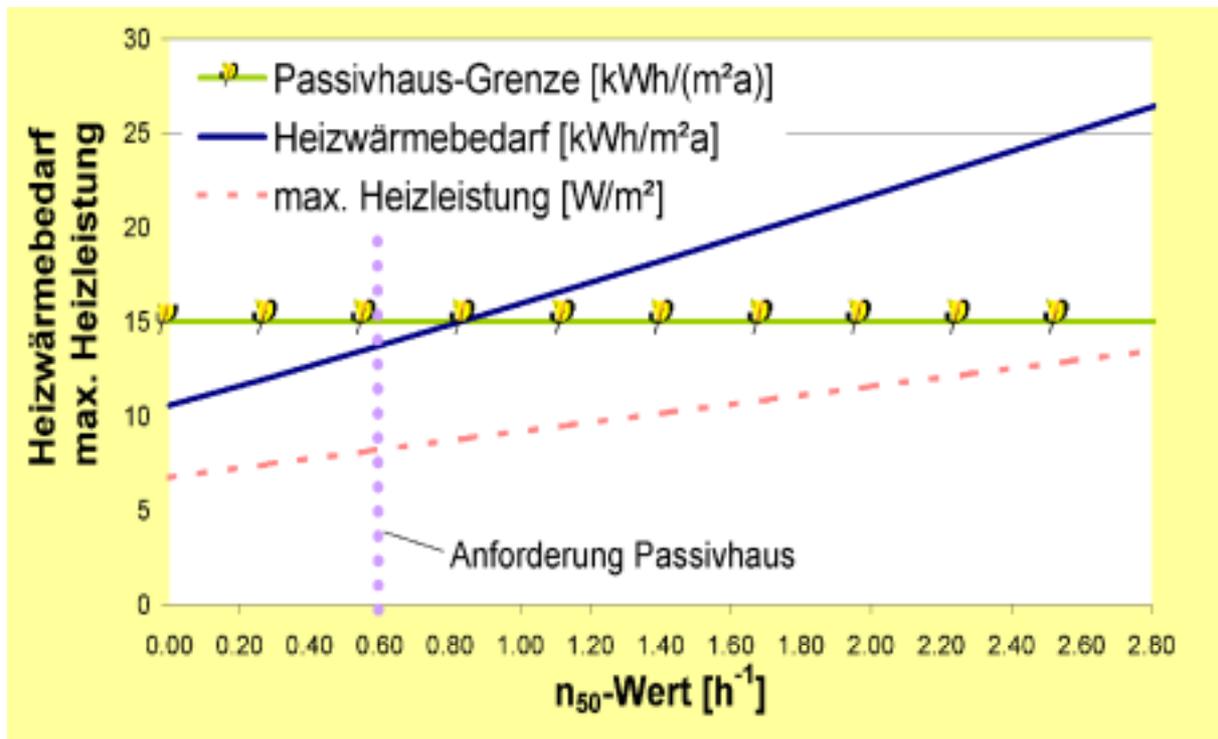


Abbildung 21: Einfluss der Luftdichtheit auf den Heizwärmebedarf und die maximal erforderliche Heizleistung [2].

3.6 Luftdichte und Wärmebrückenfreie Anschlussdetails

In diesem Abschnitt werden die verschiedenen Anschlussdetails, die für das Gebäude relevant sind, dargestellt. Die Besonderheiten werden jeweils bei den Abbildungen diskutiert.

3.6.1 Außenwandkante

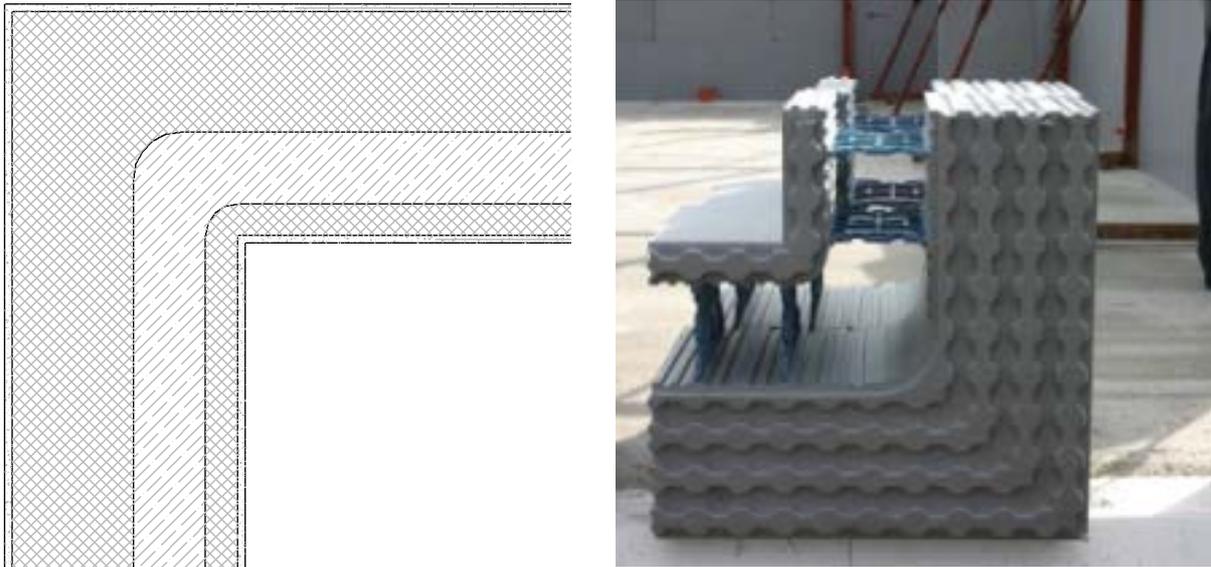


Abbildung 22: Betonschalungselement für die Außenwandkante. Die außenliegende Dämmschicht ist durchgehend ohne Unterbrechungen, $\Psi_a = -0,066$, Tabelle 5.

Die Außenwandkante ist mit den verwendeten Schalungselementen wärmebrückenfrei, $\Psi_a = -0,066 \text{ W/(mK)}$, da die Dämmebene ohne Unterbrechung um den Betonkern gezogen wird. Durchdringungen bestehen keine.

Die luftdichte Ebene bildet später der Innenputz, der ohne weitere Maßnahmen in der Kante luftdicht herzustellen ist, denn alle Wandbauteile sind über den gemeinsamen Betonkern miteinander verbunden. Es besteht also keine Gefahr, dass der Innenputz aufgrund von Bauteilbewegungen reißt.

3.6.2 Außenwandanschluss an Bodenplatte

Die äußere Dämmschicht der Wand-Schalungselemente schließt ohne Unterbrechung an die L-förmig überstehenden Formteile der Bodenplattendämmung an, so dass keine Wärmebrücke entsteht [3]. $\Psi_a = -0,045 \text{ W/(mK)}$, vgl. Tabelle 5 und Abbildung 23.

Die Luftdichtheit wird an dieser Stelle ebenfalls durch den Innenputz hergestellt. Auch hier sind die beiden Bauteile Wand und Bodenplatte durch den Betonkern miteinander verbunden, so dass ein Reißen des Innenputzes in der Kante ausgeschlossen werden kann.

Die wasserdichte Folie unter der Dämmung wird später außen hochgezogen und bildet den Schutz gegen Feuchtigkeit aus dem Erdreich, siehe auch Abbildung 33.

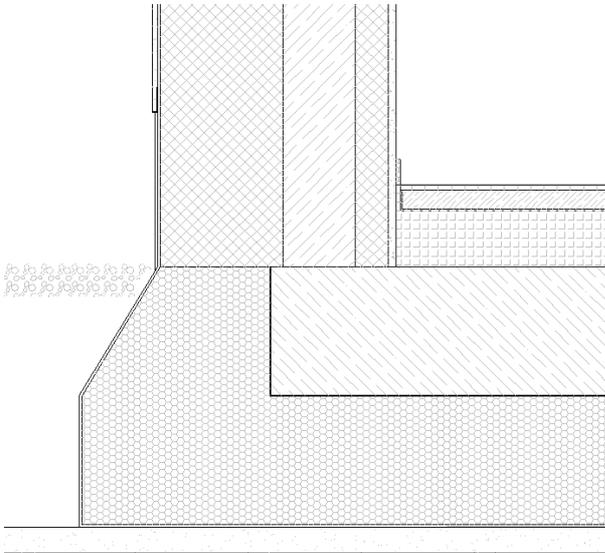


Abbildung 23: Fußpunkt der Außenwand. Anschluss an die Bodenplatte $\Psi_a = -0,045 \text{ W/(mK)}$

3.6.3 Geschosdecke / Fassade

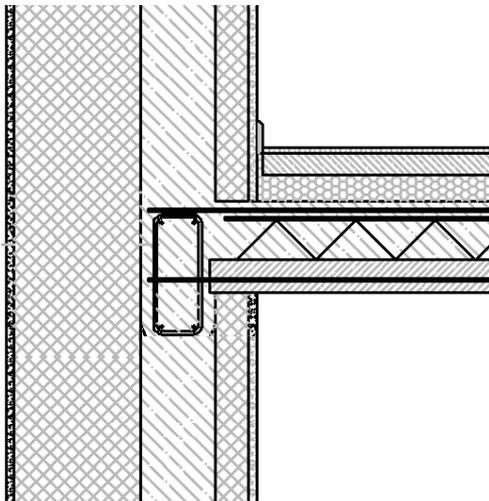


Abbildung 24: Anschluss Geschosdecke an Außenwand. Hier wird die Innenliegende Dämmschicht des Schalungselements durchbrochen, $\Psi_a = +0,03 \text{ W/(mK)}$, Tabelle 5.

Beim Anschluss der Geschosdecke an die Außenwand wird die innen liegende Dämmschicht des Schalungselements durchbrochen, deshalb ist $\Psi_a = +0,03 \text{ W/(mK)}$, vgl. Tabelle 5.

Der luftdichte Anschluss ist an dieser Stelle besonders sorgfältig, ggf. mit zusätzlichen Klebebändern herzustellen, denn die Unterseite der Betondecke durchstößt den Innenputz und die Dämmschale. Durch unterschiedliche Ausdehnung bei Temperaturschwankungen könnte hier der Innenputz der Wand von der Decke abreißen, so dass nicht auszuschließen ist, dass hier später Leckagen entstehen.

3.6.4 Ortgang

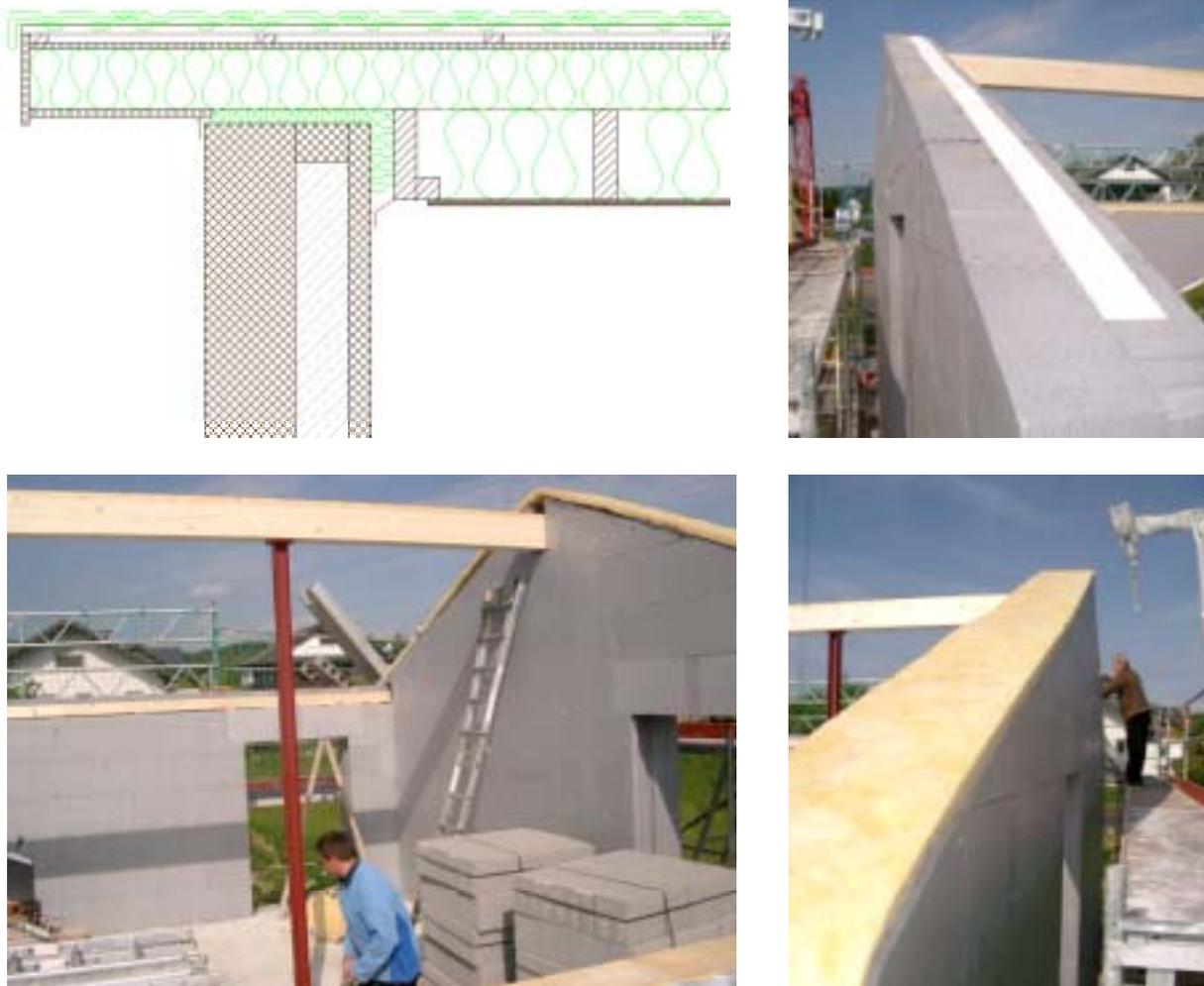


Abbildung 25: Wärmebrückenfreier Anschluss Ortgang mit zusätzlichem Randdämmstreifen.
 $\Psi_a = -0,03 \text{ W/(mK)}$, vgl. Tabelle 5.

Auch beim Ortgang ist der Anschluss von der Dämmebene des Daches zur Dämmebene der Außenwand ohne Unterbrechung ausgeführt, es handelt sich auch hier um eine rein geometrische Wärmebrücke, $\Psi_a = -0,03 \text{ W/(mK)}$. Da die Dachelemente nicht auf der Giebelwand, sondern nur auf First- und Fußpfette aufliegen, konnte der Betonkern auf der Oberseite der Giebelwand mit einem Dämmstreifen abgedeckt werden, auf den dann die Dachelemente aufgelegt wurden, vgl. Abbildung 25.

3.6.5 Traufe

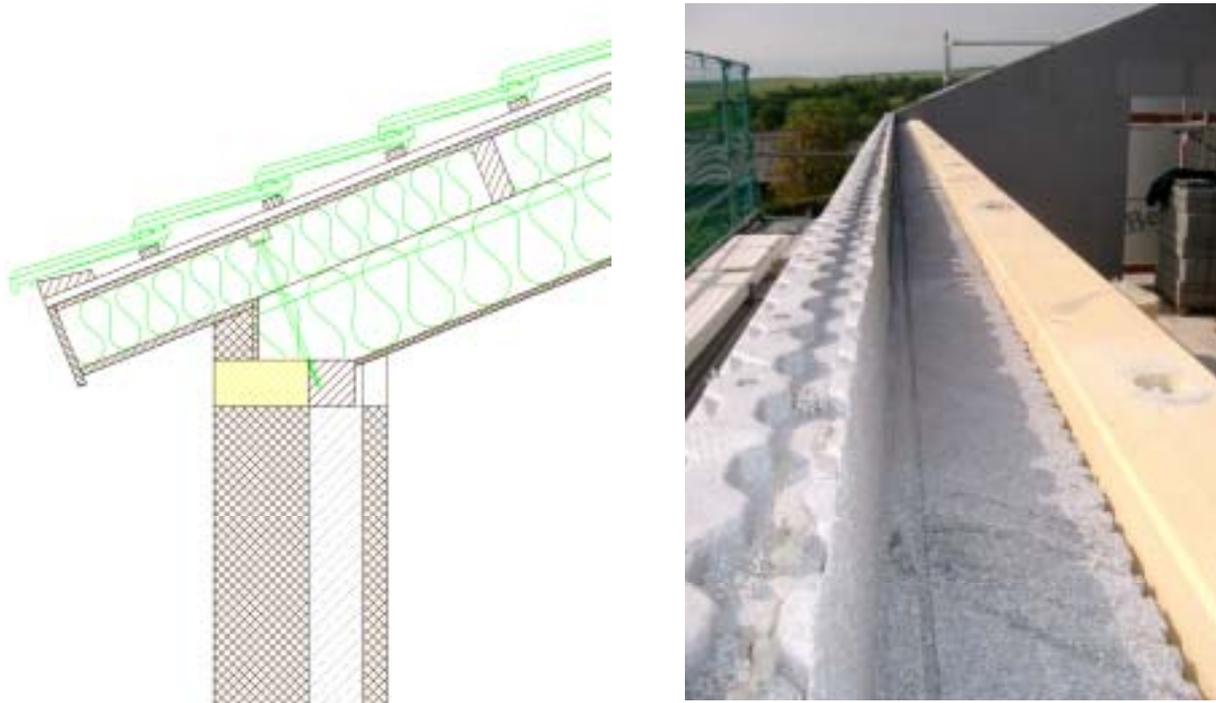


Abbildung 26: Anschluss Traufe. Fußpfette liegt auf Betonkern der Außenwand auf, Dämmebene läuft außenseitig ununterbrochen durch, $\Psi_a = -0,047 \text{ W/(mK)}$.

An der Traufe ist die außenseitige Dämmschicht der Außenwand zum Teil ausgeklinkt, damit die Dachelemente Platz finden, siehe Abbildung 26. Die Dämmebenen von Dach und Wand schließen ohne wärmeleitende Durchdringungen an, so dass auch hier der Wärmebrückenverlust gering bleibt, $\Psi_a = -0,047 \text{ W/(mK)}$.

Der luftdichte Anschluss wird an Traufe und Ortgang durch überstehende Folienstreifen an den Dachelementen gebildet. Die Folienstreifen werden auf der Innenseite der Außenwände mit den Schalungselementen verklebt und später eingeputzt, vgl. Abbildung 27. Die Folienstreifen bzw. die Verklebungen sind elastisch genug, dass ggf. Bauteilbewegungen aufgenommen werden können, ohne dass die Fuge aufreißt und undicht wird.

3.6.6 First

Am First stoßen die beiden Dachelemente wärmebrückenfrei aneinander $\Psi_a = -0,013 \text{ W/(mK)}$. Die luftdichte Verbindung wird mittels eines vorkomprimierten Schaumstoffbandes gebildet, das vor dem Einlegen der zweiten Reihe der Dachelemente in die spätere Fuge geklebt wird, vgl. Abbildung 28. So entsteht eine Verbindung, die auch kleinere Bauteilbewegungen ohne undicht zu werden verkraftet.

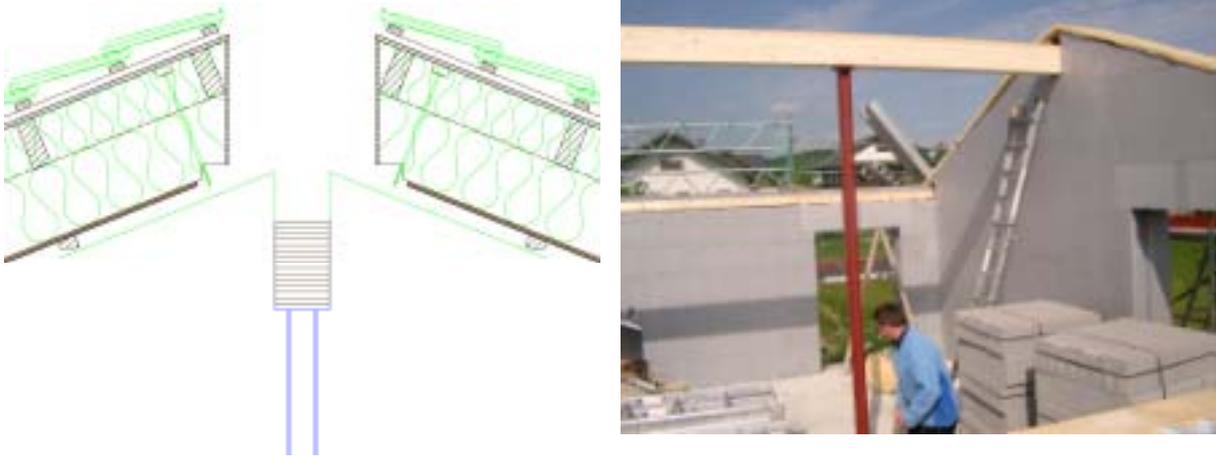


Abbildung 27: Anschluss First. Positionierung der Dachelemente auf First- und Fußpfette. Die luftdichte Folie (blau) ragt aus den Dachelementen hervor und kann später mit den Wänden verklebt und danach eingeputzt werden.



Abbildung 28: Herstellen des luftdichten Anschlusses der vorgefertigten Dachelemente durch Einlegen eines vorkomprimierten Schaumstoffbandes.

3.7 Passivhausfenster

Die Fenster wurden mit hoch wärmegeprägten Kunststoffrahmen und mit Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung ausgeführt. Damit werden, gemittelt über alle Fenster, U-Werte von weniger als $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erreicht.

Die Kennwerte des ausgewählten Fensters sind:

- Rahmen-U-Wert $U_f = 0,74 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.
- Rahmen-Ansichtsbreite 132 mm.
- Thermisch getrennter Glasrand mit tiefem Glaseinstand: $\Psi_g = 0,035 \text{ W}/(\text{mK})$.
- Verglasungs-U-Wert: $U_g = 0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.
- Wärmebrückenverlustkoeffizient beim Einbau des Fensters: $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,005 \text{ W}/(\text{mK})$.
- Die Luftdichtheit zwischen Flügel- und Blendrahmen wird über eine doppelte Lippendichtung hergestellt.

Es handelt sich hierbei um ein ausgereiftes Produkt eines großen Herstellers.

Bauteil	Fläche [m ²]	U-Wert [W/(m ² K)]	H-Wert: U × A [W/K]	Temperatur- gewichts- faktor f _t	H-gewichteter Wert f _t × U × A [W/K]	Anteil am Trans- missions- Wärme- verlust
Fenster Ost	5.3	0.762	4.0	1.000	4.010	6%
Fenster Süd	7.8	0.795	6.2	1.000	6.199	9%
Fenster West	17.9	0.795	14.3	1.000	14.270	21%
Fenster Nord	4.8	0.797	3.8	1.000	3.832	6%

Tabelle 6: Auflistung der Wärmeverluste für die verschiedenen Fensterflächen. In der Summe betragen die mit H gewichteten Wärmeverluste 42 % der Transmissionswärmeverluste.

3.7.1 Fensteranschluss und Einbau

Der Fensterrahmen ist in Laibung und Sturz fast vollständig überdämmt, vgl. die Zeichnung in Abbildung 29. In Abbildung 30 ist zu erkennen, dass die Laibungen der Fensteröffnung alle mit Dämmstoff ausgebildet sind, der auch hier als Teil der Schalung fungiert. So ist sichergestellt, dass der Betonkern der Wand die Dämmschicht nicht durchdringt. Im Brüstungsbereich ist ein Streifen Schaumglas statt Polystyrol eingelegt. Dieses Material hat eine höhere Festigkeit, so dass auch große Fensterelement problemlos darauf aufgesetzt werden können. Die Befestigung erfolgt durch Schrauben, die durch den Rahmen hindurch bis in den Betonkern der Wand reichen.

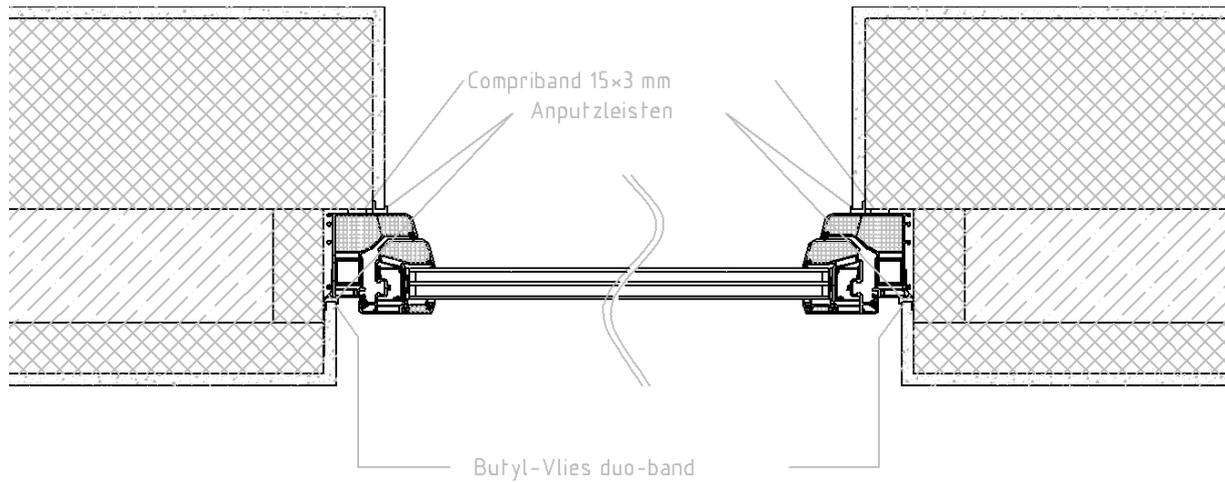
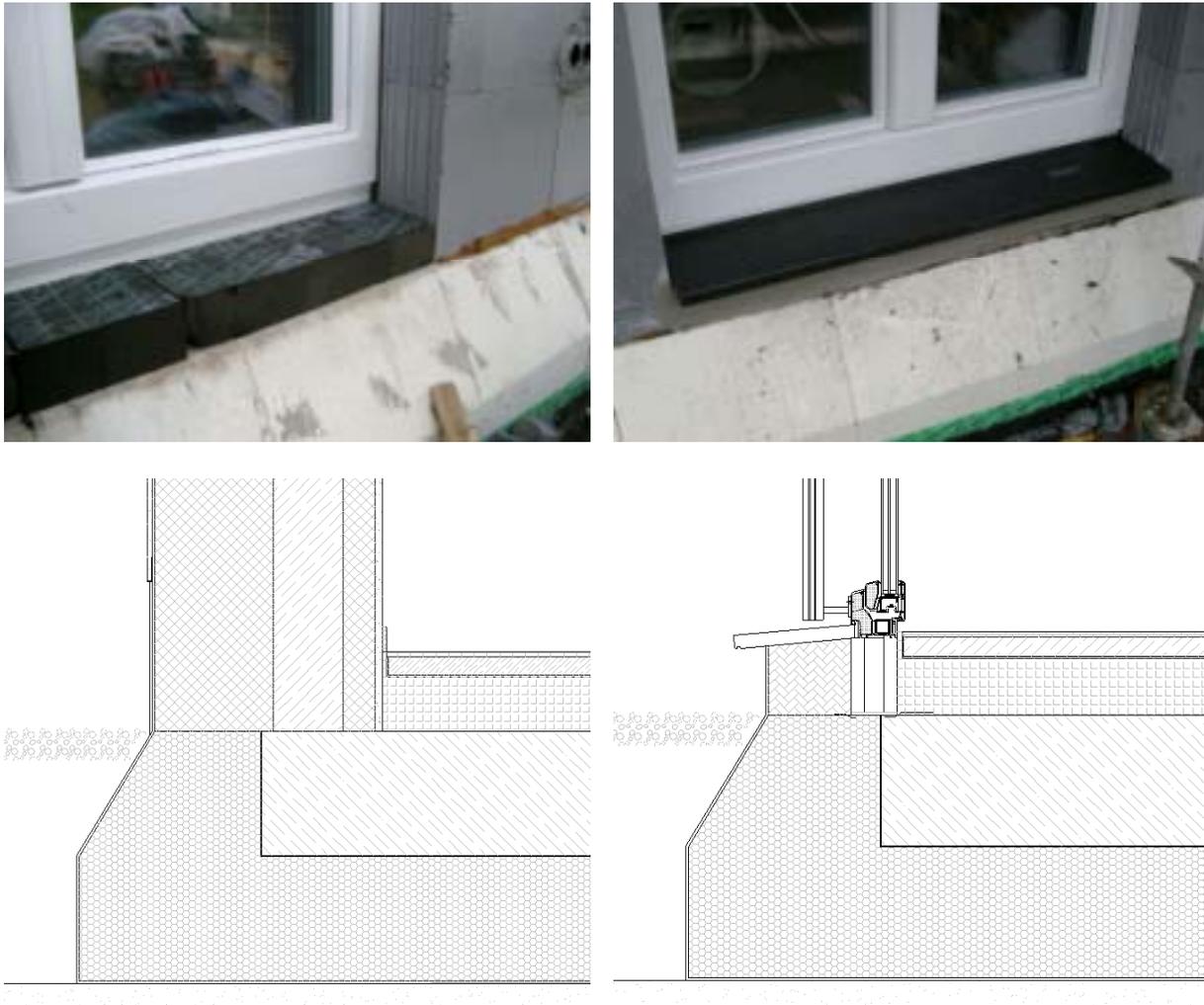


Abbildung 29: Konsequente Überdämmung des Blendrahmens von außen in der Laibung,
 $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,001 \text{ W/(mK)}$



Abbildung 30: Fensteröffnung in der Wand aus Beton-Schalungsstein in den verschiedenen Realisierungsstadien. Links oben noch ohne Betonkern. Mitte: ausbetoniert. Rechts oben: Druckfeste Auflage für das Fensterelement aus Schaumglas. Links unten: Fenster eingebaut und mit Klebeband luftdicht an Brüstung und Laibung verklebt.



**Abbildung 31: Wärmebrückenfreier Fenstereinbau, $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,005 \text{ W/(mK)}$.
Die Auflage für das Fenster und die Fensterbank sind zur Erhöhung der Festigkeit aus Schaumglas hergestellt, $\lambda = 0,06 \text{ W/(mK)}$.**

Der luftdichte Anschluss des Rahmens an die Wände geschieht über Spezialklebebänder. Diese Verklebungen wurden anschließend in den Innenputz eingeputzt, vgl. Abbildung 30.

Der wärmebrückenfreie Anschluss der bodentiefen Fenster erfolgt ebenfalls über eine Konsole aus Schaumglas, welche die erforderliche Festigkeit aufweist, um das Fenster zu tragen. In Abbildung 31 sind die Zeichnungen und Fotos der Bausituationen dargestellt.

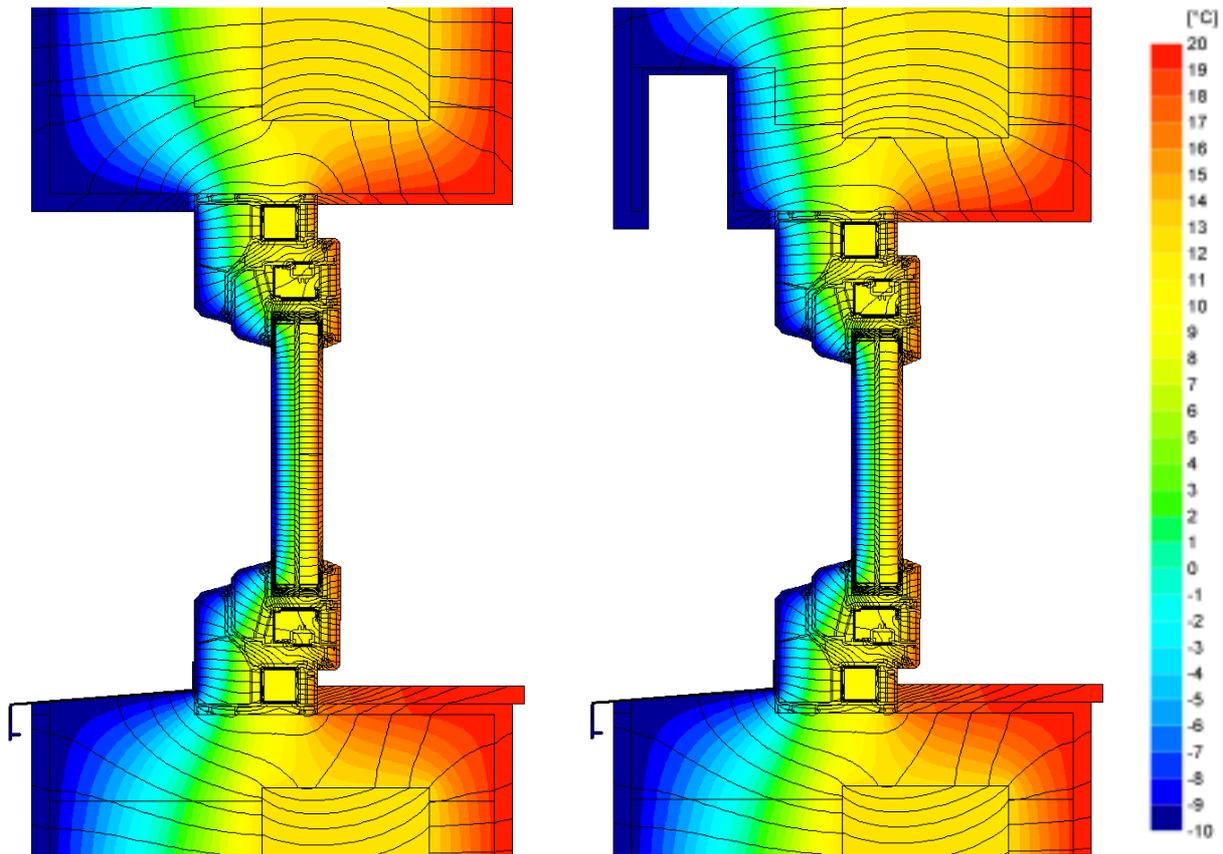


Abbildung 32: Wärmebrückenfreier Fenstereinbau, $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,02 \text{ W/(mK)}$. Auch mit einem Kasten für die Aufnahme der Lamellenstores für die Verschattung ist der Wärmebrückenverlust akzeptabel. Insbesondere die Bauteiltemperaturen an den Innenoberflächen sind überall unkritisch.

3.7.2 Verschattung und sommerlicher Wärmeschutz

Alle Fenster des vorliegenden Gebäudes sind mit außen liegenden Lamellen-Stores für eine temporäre Verschattung ausgestattet, vgl. Abbildung 32. Die Fensterflächen der Wohnräume sind zwar nach Westen orientiert, was eine erhöhte sommerliche Überhitzungsgefahr erwarten lässt, die gesamte Fensterfläche auf der Westseite

beträgt aber nur 18 m² von insgesamt 77 m² Außenwandfläche, das sind 23 %. Wie Abbildung 33 zeigt, können die hinter diesen Fenstern gelegenen Wohn- und Schlafräume damit großzügig mit Tageslicht belichtet werden. Dieser Fensterflächenanteil kann jedoch in bezug auf das sommerliche Verhalten des Gebäudes als moderat bezeichnet werden.



Abbildung 33: Bodentiefe bzw. raumhohe Fenster auf der Westseite des Gebäudes. Fensterflächenanteil etwa 23 %

Die Berechnung des sommerlichen Temperaturverhaltens zeigt deshalb für dieses Gebäude wie zu erwarten keine besonderen Auffälligkeiten. Der besonders gute Wärmeschutz der Außenbauteile ist auch im Sommer wirksam.

Bei üblicher Wohnnutzung ist mit einer Überhitzung der Räume auf über 25 °C nicht zu rechnen. Dazu wurde angenommen, dass die Wärmerückgewinnung der Wohnungslüftung in den Sommermonaten durch den Bypasskanal überbrückt wird, so dass die Außenluft nur angesaugt, nicht aber vorgewärmt wird. Zusätzlich bietet es sich an, die Fenster auf den jeweils gegenüberliegenden Seiten des Gebäudes zu kippen und so die Räume nachts mit kühler Nachtluft zu spülen, so dass sich die massiven Bauteile ggf. wieder abkühlen können. Diese sogenannte passive Nachtauskühlung hat sich in anderen Passivhausprojekten gut bewährt.

Passivhaus-Projektierung SOMMERFALL

Klima: Trier	Innentemperatur: 20 °C	
Objekt: EFH Grochowski	Gebäudetyp/Nutzung: Einfamilienhaus, freistehend	
Variante: Wie gebaut: Orientierung: West, Fenster: Veka, WRG: 60%,		
Standort: Königsfeld	Energiebezugsfläche A _{EB} : 157.0 m ²	
spez. Kapazität: 108 Wh/K pro m ² WFL		
Über- temperaturgrenze: 25 °C		

Bauteile	Temperaturzone	Fläche m ²	U-Wert W/(m ² K)	Reduktionsfaktor f _{t,sommer}	H _{sommer} Wärmeleitwert
1. Außenwand Außenluft	A	204.4	0.112	0.92	21.0
2. Außenwand Erdreich	B			1.00	
3. Dach/Decken Außenluft	D	118.8	0.105	0.62	7.7
4. Bodenplatte	B	109.2	0.095	1.00	10.3
5.	A			0.92	
6.	A			0.92	
7.	X			0.92	
8. Fenster	A	35.8	0.790	1.00	28.3
9. Außentür	A			1.00	
10. Wbrücken außen (Lang)	A	160.4	-0.004	0.92	-0.7
11. Wbrücken Perimeter (P)	P			1.00	
12. Wbrücken Boden (Lang)	B	43.2	-0.045	1.00	-1.9

Transmissionsleitwert außen H_{T,e}	56.4 W/K
Transmissionsleitwert Erdreich H_{T,g}	8.4 W/K

Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmeübertragers	η _{WRG}	59%	wirksames Luftvolumen V _L	A _{EB}	157.0 m ²	lichte Raumhöhe	2.50 m	=	393 m ³
ankreuzen:	<input checked="" type="checkbox"/>	freie Lüftung (Fenster+Fugen):	Sommerlüftung Luftwechsel:	1/h	1.00				
	<input type="checkbox"/>	nur mechan. Abluft		1/h	0.00				
	<input type="checkbox"/>	Zu- und Abluft wie Winterbetrieb mit WRG							
	<input type="checkbox"/>	Zu-/Abl. ohne WRG							
energetisch wirksamer Luftwechsel n _L		1.000	+ η _{EW1}	n _{L,Anlage}	0.000	* (1 - Φ _{WRG})	+ n _{L,Rest}		0.000
		V _L	n _{L,Anlage} Anteil	C _{Luft}					
Lüftungsleitwert außen H_{V,e}		393 m ³	1.000 1/h	0.33 W/(m ² K)				=	129.5 W/K
Lüftungsleitwert Erdreich H_{V,g}		393 m ³	0.000 1/h	0.33 W/(m ² K)				=	0.0 W/K

Ausrichtung der Fläche	Winkel-faktor Sommer	Versch.-faktor Sommer	Rück-reflektion	g-Wert (senkr. Enstr.)	Fläche m ²	Verglasungsanteil	Apertur m ²
1. Ost	0.84	0.64	0.95	0.52	5.3	60%	0.8
2. Süd	0.84	0.58	0.95	0.52	7.8	52%	1.0
3. West	0.84	0.62	0.95	0.52	17.9	52%	2.4
4. Nord	0.84	0.53	0.95	0.52	4.8	51%	0.5
5. Horizontal	0.84	1.00	0.95	0.00	0.0	0%	0.0
Solarapertur					Summe		4.7 m ²

Innere Wärmequellen Q_I	spezif. Leistung q _I W/m ²	2.10	AEB m ²	157	=	330 W	2.1 W/m ²
------------------------------------------	--------------------------------------------------	-------------	--------------------	------------	---	--------------	-----------------------------

Übertemperaturhäufigkeit h_{3 ≥ 3_{max}}

0.0%

bei der Übertemperaturgrenze 3_{max} = 25 °C

Wenn die "Häufigkeit über 25°C" 10% überschreitet, sind zusätzliche Maßnahmen zum Schutz vor Sommerhitze erforderlich.

Abbildung 34: Sommerliches Temperaturverhalten nach PHPP, Variante 'Wie gebaut'.

3.8 Passivhaus-Haustechnik

3.8.1 Lüftungs- und Heizkonzept

Das Gebäude hat eine kontrollierte Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung. Die Außenluft wird im Erdgeschoss durch einen Außenluftdurchlass an der Ostseite des Gebäudes angesaugt und gelangt von dort auf kurzem Weg zur zentralen Wärmerückgewinnung, die im Technikraum im EG untergebracht ist. Die Fortluft wird ebenfalls vom Gerät aus über einen kurzen gedämmten Kanal zum Außenluftauslass auf der Nordseite des Gebäudes geleitet.

Das Lüftungsgerät enthält einen Luft-Luft Wärmeübertrager mit einer Effizienz von $\eta = 60 \%$. Im Fortluftkanal befindet sich zusätzlich der Primärkreis einer Luft-Sole-Wärmepumpe, welche der Fortluft zusätzlich Wärme entzieht und diese über ihren Sekundärkreis der Zuluft zuführt, Abbildung 35 .

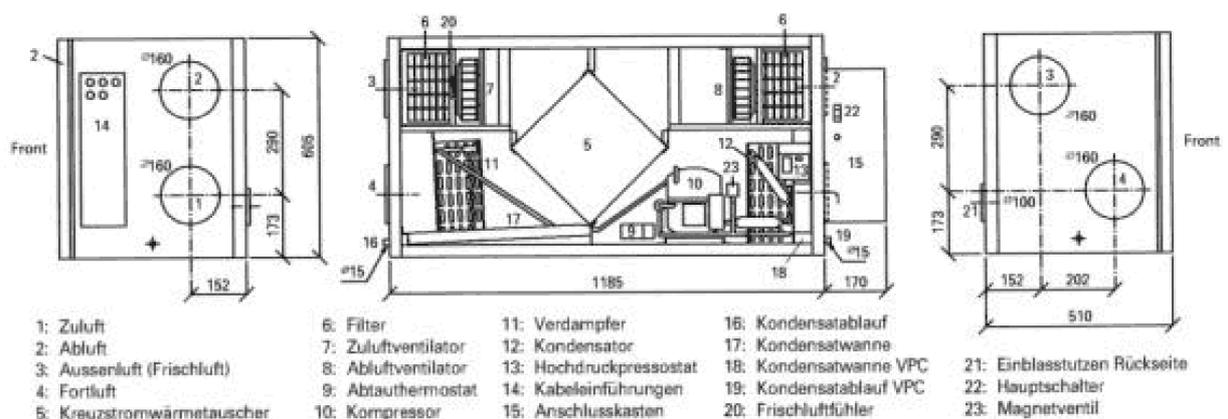
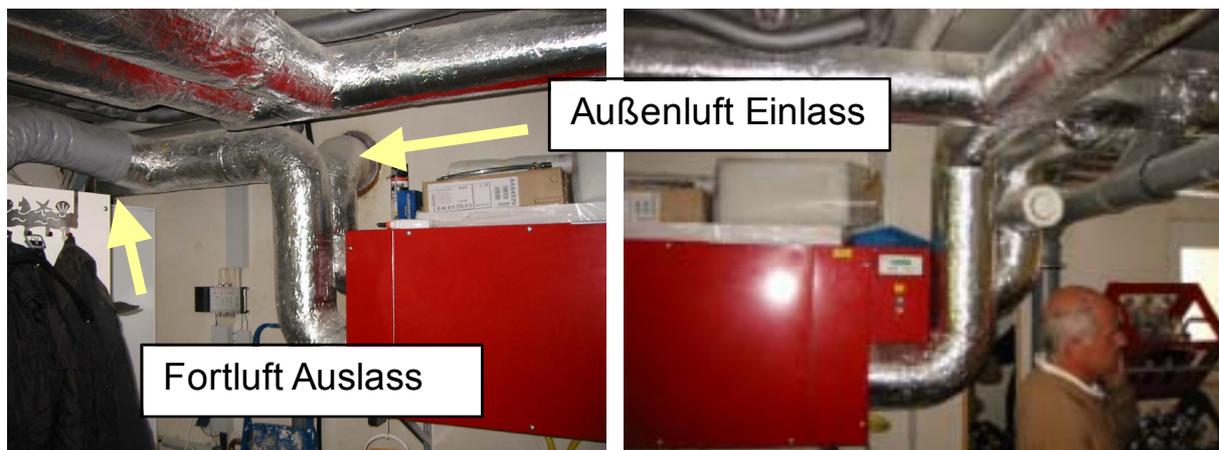


Abbildung 35: Zentrales Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung und Wärmepumpe. Außenluftansaugung und Fortluftkanal sind kurz ausgeführt und gut wärme- und schwitzwassergedämmt.



Abbildung 36: Separates Wärmepumpenaggregat mit Pufferspeicher zur Warmwasserbereitung und Fortluftauslässe von beiden WP-Aggregaten auf der Nordseite des Gebäudes.

Neben dem Lüftungsgerät mit Wärmepumpe für die Beheizung des Gebäudes gibt es noch ein separates Wärmepumpenaggregat zur Warmwasserbereitung, das ebenfalls im Technikraum im EG untergebracht ist. Die WW- Wärmepumpe saugt Luft aus der Abluftleitung des Lüftungsgerätes bzw. der Heizungswärmepumpe. Sollte deren Luftvolumenstrom zu gering sein, oder die Lüftung ausgeschaltet sein, dann wird Luft von außen über den Abluftstutzen angesaugt. Somit ist der Luftvolumenstrom der WW-Wärmepumpe unabhängig von der Lüftungsanlage, nutzt aber trotzdem soweit wie möglich deren Abluft, siehe Abbildung 36 und Leitungsschema Abbildung 40.

Alle Teile der Lüftungsanlage, insbesondere die Rohre im Technikraum sind sehr sorgfältig verlegt worden. Die Verarbeitung der Wärmedämmung der Rohre ist gut.



Abbildung 37: Links: Bypassleitung für Sommerbetrieb. Mitte: PTC-geregelte elektrisch beheizte Zuluft- Heizregister, die der Wärmepumpe nachgeschaltet sind. Rechts: Umluftstrang für Heizbetrieb bei höheren Wärmeleistungen.

Im Technikraum werden die Zuluftleitungen zu allen Räumen verzweigt, so dass jeder Raum einen separaten Zuluftkanal hat, Abbildung 37. Dadurch sind die einzelnen Volumenströme gering (40...60 m³ pro Raum) so dass Flachkanäle im Fußbodenaufbau verwendet werden können. Die Zuluftöffnungen in den Räumen sind meist Bodenauslässe in der Nähe der Fenster, Abbildung 38.



Abbildung 38: Luftverteilung über Bodenkanäle bis zur den Fenstern.

Jeder Zuluftstrang ist mit einem PTC-geregelten Heizregister ausgestattet, Abbildung 37, so dass jeder einzelne Raum individuell temperiert werden kann. Die Heizregister werden direkt-elektrisch beheizt, die Regelung behandelt die Heizregister jedoch nachrangig zur Wärmepumpe. Somit ist gewährleistet, dass die Elektro-Heizregister nur dann in Betrieb gehen, wenn die Wärmerückgewinnung bzw. die Wärmepumpe nicht genügend Wärmeleistung liefern kann.

Für den Fall, dass die vorhandene Heizleistung zur Temperierung des Gebäudes nicht ausreichen sollte, bzw. diese Heizleistung nicht über die Zuluft transportiert werden kann, sieht die Planung einen Umluftbetrieb vor. Das heißt, dass zeitweise keine (kalte) Außenluft angesaugt wird, sondern lediglich die Luft im Gebäude umgewälzt wird, um das Gebäude aufzuheizen.

Über einen Sommerbypass können die Wärmerückgewinnung und die Heizungs-wärmepumpe komplett überbrückt werden. Somit kann die Lüftung bei Bedarf (Schallschutz oder Pollenfilter für Allergiker) auch im Sommer für kontrollierte Lüftung sorgen, ohne dass die Luft vorgewärmt wird.

Passivhaus-Projektierung

LÜFTUNGSDATEN

Objekt:

Variante: | Energiebezugsfläche A_{EB} | m² | | (Blatt Flächen) |
| Raumhöhe h | m | | (Blatt Heizwärme) |
| Raumluftvolumen Lüftung ($A_{EB} \cdot h$) = V_{RLT} | m³ | | (Blatt Heizwärme) |

Auslegung Lüftungsanlage Standard-Betriebsart

Personenbelegung	m ² /P	<input type="text" value="39"/>
Anzahl Personen	P	<input type="text" value="4.0"/>
Frischluft pro Person	m ³ /(P*h)	<input type="text" value="30"/>
Frischluftbedarf	m ³ /h	<input type="text" value="120"/>
Ablufträume		
Anzahl		
Abluftbedarf pro Raum	m ³ /h	
Abluftbedarf gesamt	m ³ /h	<input type="text" value="120"/>

	Küche	Bad	Dusche	WC	
Anzahl	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>		<input type="text" value="1"/>	
Abluftbedarf pro Raum	<input type="text" value="60"/>	<input type="text" value="40"/>	<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="20"/>	
Abluftbedarf gesamt	<input type="text" value="120"/>				

Auslegungsvolumenstrom (Maximum) m³/h

Berechnung des mittleren Luftwechsels

Betriebsarten	tägl. Betriebszeiten h/d	Faktoren bezügl. Maximum	Luftvolumenstrom m ³ /h	Luftwechsel 1/h
Maximum		1.00	153	0.39
Standard	<input type="text" value="24.0"/>	<input type="text" value="0.77"/>	118	0.30
Grundlüftung		<input type="text" value="0.54"/>	82	0.21
Minimum		<input type="text" value="0.40"/>	61	0.16
<input checked="" type="checkbox"/> Wohngebäude		Mittelwert <input type="text" value="0.77"/>	mittlerer Luftaustausch (m³/h) <input type="text" value="118"/>	mittlerer Luftwechsel (1/h) <input type="text" value="0.30"/>

Infiltrationsluftwechsel nach DIN EN 832

Windschutz-Koeffizienten e und f gemäß EN 832		
Koeffizient e für Abschirmungsklasse	mehrere Einwirkungsseiten	eine Einwirkungsseite
keine Abschirmung	0.10	0.03
mäßige Abschirmung	0.07	0.02
starke Abschirmung	0.04	0.01
Koeffizient f	15	20

Windschutzkoeffizient e		<input type="text" value="0.07"/>	<input type="text" value="0.18"/>	
Windschutzkoeffizient f		<input type="text" value="15"/>	<input type="text" value="15"/>	
Luftwechsel bei Drucktest n_{50}		<input type="text" value="0.55"/>	<input type="text" value="0.55"/>	<input type="text" value="465"/>

für Jahresbedarf: für Heizlastfall: Netto Luftvolumen für Drucktest V_{n50} m³

Art der Lüftungsanlage

<input checked="" type="checkbox"/> Balancierte Passivhauslüftung	<i>bitte ankreuzen</i>	für Jahresbedarf:	für Heizlastfall:
<input type="checkbox"/> Reine Abluft			
Abluftüberschuss		<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00"/>
Infiltrationsluftwechsel $n_{L,Rest}$		<input type="text" value="0.046"/>	<input type="text" value="0.114"/>

Effektiver Wärmebereitstellungsgrad der Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung

<input checked="" type="checkbox"/> Gerät innerhalb der thermischen Hülle			
<input type="checkbox"/> Gerät außerhalb der thermischen Hülle			
Wärmebereitstellungsgrad Gerät $\eta_{eff,WRG}$	- Nutzerdefiniert -	<input type="text" value="0.60"/>	
Leitwert Außenluftkanal Ψ	W/(mK)	<input type="text" value="0.166"/>	Berechnung siehe Nebenrechnung
Länge des Außenluftkanals	m	<input type="text" value="2"/>	
Leitwert Fortluftkanal Ψ	W/(mK)	<input type="text" value="0.166"/>	Berechnung siehe Nebenrechnung
Länge des Fortluftkanals	m	<input type="text" value="2"/>	
Temperatur des Aufstellraumes (nur eintragen falls Gerät außerhalb der thermischen Hülle)	°C	<input type="text" value="20"/>	Innenraumtemperatur (°C)
		<input type="text" value="4.3"/>	mittl. Außentemp. (°C)

Effektiver Wärmebereitstellungsgrad η_{eff}

Wärmebereitstellungsgrad des Erreichwärmeübertr. η_{EWT}

Tabelle 7: Zur Auslegung der Lüftungsanlage: Lüftungsblatt aus dem PHPP. Variante: 'wie gebaut'.

Möglichkeit der Einzelraum-Temperaturregelung und es kann mit der Wärmepumpe im Sommer bei Bedarf gekühlt werden. Die Kühlfunktion konnte zu Baubeginn von keinem anderen Hersteller in der gewünschten Form angeboten werden, sie war der Baufamilie schon vorher verbindlich zugesagt worden.

Um die Diskussion über die verschiedenen möglichen Anlagenvarianten zu dokumentieren und für künftige Planungen mögliche Modifikationen des hier realisierten Konzeptes anzuregen, sollen im folgenden die wichtigsten Aspekte beleuchtet werden. Es steht außer Frage, dass die eingebaute Anlage einwandfrei funktionieren kann und der Bauherr die zugesagte Leistung erhalten hat, nämlich ein Gebäude, das zu jeder Zeit auf komfortablen Innentemperaturen gehalten werden kann.

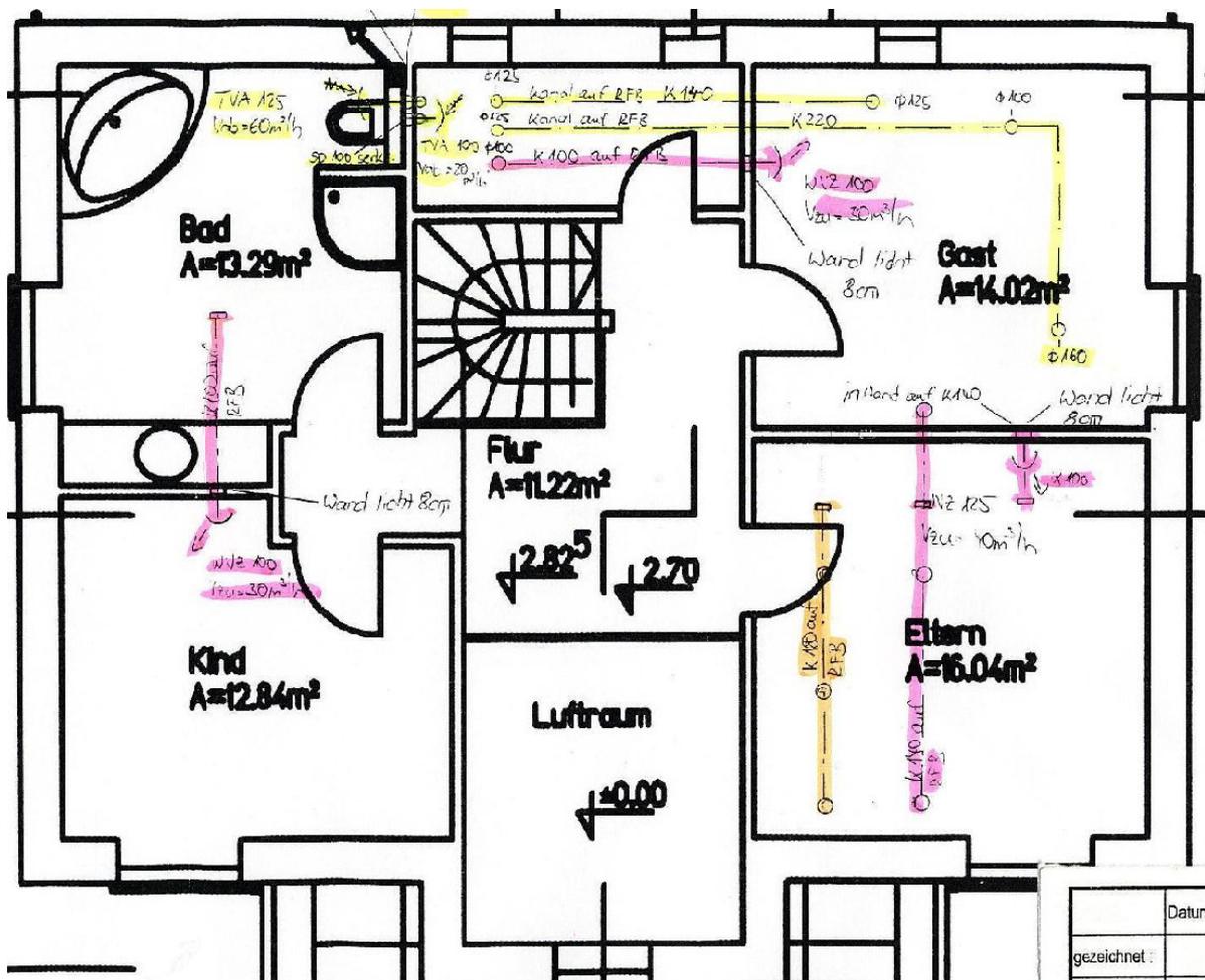


Abbildung 40: Schema der Lüftungskanäle im OG.

Lüftung mit Wärmerückgewinnung und Wärmepumpe

Der Luft-Luft-Wärmeübertrager, d.h. das zentrale Bauteil der kontrollierten Wohnungslüftung auch kurz 'Wärmerückgewinnung' genannt, hat bei dem vorliegenden Gebäude lediglich einen Wärmebereitstellungsgrad von nur 60 %. Von den Herstellerfirmen wird dafür die Begründung angegeben, dass gerade dadurch die Fortluft-

temperatur nach dem Luft-Luft-Wärmeübertrager entscheidend höher liegt und somit die Wärmepumpe eine bessere Arbeitszahl erreichen könne. Insgesamt werden vom Hersteller Arbeitszahlen für die Gesamtkonfiguration WRG + Wärmepumpe von bis zu 5 angegeben, vgl. Abbildung 41. Richtig ist bei dieser Argumentation, dass die Wärme der Abluft nur einmal verwertet werden kann, entweder vom Luft-Luft-Wärmeübertrager oder von der Wärmepumpe.

Hocheffiziente Gegenstrom-Wärmeübertrager weisen Arbeitszahlen von deutlich über 10 auf, da dort nur wenig elektrische Energie zum Betrieb der Lüfter eingesetzt werden muss. Diese Effizienz wird von keiner Wärmepumpe übertroffen. Schon aus primärenergetischen Gründen ist daher der Einsatz von hocheffizienten Wärmeübertragern sinnvoll.

Darüber hinaus ermöglichen Luft-Luft-Wärmeübertrager mit einer Effizienz von 80...90 % die Bereitstellung von komfortabel temperierter Zuluft, die auch ohne zusätzliche Heizung eine Mindesttemperatur von mehr als 16°C hat und die deshalb ohne weiteres direkt in die Wohnräume eingebracht werden kann. Dies ist außerhalb der Kern-Heizperiode vorteilhaft, wenn in einem Passivhaus nicht geheizt werden muss.

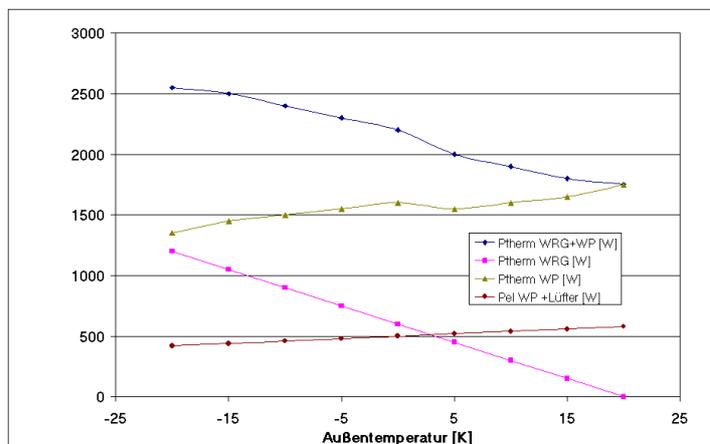


Abbildung 41: Kennlinien des Luft-Luft-Wärmeübertragers ($\eta = 60\%$) und der Heizungs-Wärmepumpe.

Zum Betrieb der Wärmerückgewinnung werden lediglich zwei Lüfter mit Gleichstrommotoren benötigt. Im Passivhausprojekt Hannover Kronsberg konnte durch Messungen belegt werden, dass damit eine Arbeitszahl von mehr als 15 (Verhältnis von eingesparter Wärme zu Lüfterstromverbrauch) erreicht werden kann. Beim vorliegenden Konzept muss jedoch die Wärmepumpe immer laufen, um die Komfortparameter der Zuluft ($T_{Zuluft} > 16^\circ\text{C}$) zu gewährleisten, auch in den Zeiten, in denen ein Heizbetrieb mit einer modifizierten WRG mit nicht notwendig wäre. Dies erfordert den Einsatz von Primärenergie, der vermieden werden kann.

Die Jahresarbeitszahl der eingesetzten Wärmepumpe konnte in Bilanzrechnungen abgeschätzt werden. Dazu wurden die Daten aus Abbildung 41 mit den Monatsmittelwerten der Außentemperatur und des Heizwärmebedarfs aus dem PHPP gewichtet, siehe Tabelle 11. Daraus ergeben sich die mittleren themischen

Leistungen für den Luft-Luft-Wärmeübertrager bzw. die Wärmepumpe für jeden Monat und daraus die mittlere Arbeitszahl im jeweiligen Monat. Über das Jahr gemittelt ergibt sich für das gesamte Gerät, d.h. Lüftung mit WRG und Wärmepumpe eine mittlere Arbeitszahl von 3,7. Für die Wärmepumpe alleine ergibt sich eine Arbeitszahl von 3,1. Die Lüftung mit Wärmerückgewinnung hat selbst mit dem eingesetzten Kreuzstromwärmetauscher eine mittlere Arbeitszahl von 8,9.

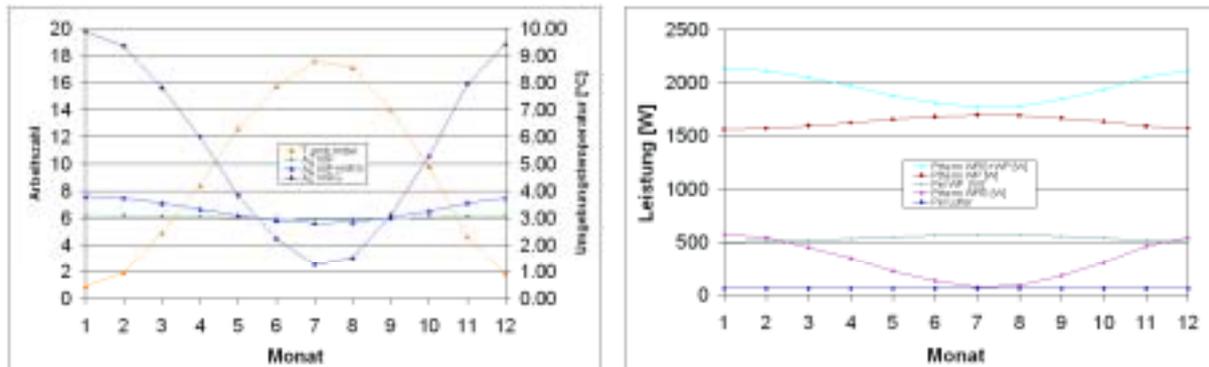


Abbildung 42: Monatliche Kenndaten des Luft-Luft-Wärmeübertragers ($\eta = 60\%$) und der Heizungs-Wärmepumpe.

Die Kennwerte des eingesetzten Lüftungsgerätes mit integrierter Wärmepumpe entsprechen damit in etwa den derzeit am Markt verfügbaren Wärmepumpen-Kompaktgeräten [8]. Bei dem Gerät für die Warmwasserbereitung handelt es sich praktisch um eine Fortluftwärmepumpe mit geringerer Arbeitszahl.

Nachheizung direkt-elektrisch, raumweise Temperaturregelung

Messergebnisse konnten im Rahmen dieses Projektes nicht erhoben werden. Insbesondere konnte nicht ermittelt werden, wie oft die direkt-elektrischen Heizregister für die Zuluft-Nacherwärmung in Betrieb waren, bzw. wie viel Stromverbrauch hier tatsächlich zu verzeichnen ist. Hier zeigt sich, dass das vorliegende Haustechnik-Konzept ursprünglich für Niedrigenergiehäuser mit einer wesentlich höheren Heizlast entwickelt wurde, die von der Wärmepumpe in keinem Fall vollständig bereitgestellt werden kann.

In einem Passivhaus sollte die Anlage so ausgelegt werden, dass die Heizleistung der Wärmepumpe ausreicht um den größten Teil der Wärme bereitzustellen. Eine direkt-elektrische Nachheizung ist dann, wenn überhaupt, nur für kurzzeitige Spitzenlasten erforderlich [9]. Reicht jedoch die Wärmeleistung der Wärmepumpe nicht aus, die Heizlast zu decken, so besteht die Gefahr, dass sehr viel elektrische Energie direkt 'verheizt' wird, ohne dass dies dem Benutzer bewusst wird. Hier ist auf jeden Fall zu empfehlen, dass die Anlage eine entsprechende Störmeldung ausgibt oder die Betriebsstunden der Heizregister protokolliert. Der Einsatz eines elektrischen Zwischenzählers, der den Stromverbrauch der Heizregister misst und vom Bewohner zu Kontrolle abgelesen werden kann, bietet sich ebenfalls an.

Vergleicht man die maximale Leistung der eingesetzten Wärmepumpe im Winter (1500 W) mit der nach PHPP berechneten Heizlast des Gebäudes, Tabelle 12, so dürfte die Wärmepumpe dieser Anlage das vorliegende Gebäude im großen und ganzen ausreichend mit Wärme versorgen können.

Werden nur die Investitionskosten betrachtet, so stellen elektrische Nachheizregister eine kostengünstige Möglichkeit dar, eine raumweise Temperaturregelung bzw. Nachheizung zu realisieren. Diese wird im Niedrigenergiehaus in jedem Fall benötigt, um das Leistungsdefizit der Wärmepumpe im Vergleich zur Heizlast auszugleichen. Betrachtet man gleichzeitig jedoch die hohen Kosten für die eingesetzte direkt elektrische Energie (0,15...0,20 €/kWh vgl. [10]), so relativiert sich der Kostenvorteil.

Ob die Einzelraumregelung mit den individuell geregelten Heizregistern für jeden Raum im Passivhaus wirklich notwendig ist, bleibt letztendlich dem Wunsch des Bewohners überlassen. Die Passivhausentwicklung hat gezeigt, dass die Bewohner ein gleichmäßig temperiertes Gebäude schnell zu schätzen lernen, wenn die gleichmäßige Temperierung ohne großen Mehraufwand möglich ist. Es zeigt sich, dass die Diskussion um eine Temperaturdifferenzierung in der Wohnung (z.B. der Wunsch nach einem 'kalten Schlafzimmer') durch diese statistisch belegbaren Erfahrungen stark an Bedeutung verliert [11], [2].

Umluftbetrieb

Beim vorliegenden Anlagenkonzept ist die Möglichkeit zum Umluftbetrieb gegeben, falls die Heizleistung durch Erwärmung der Frischluft alleine nicht bereitgestellt werden kann. Wie in der Heizlastberechnung nach PHPP zu sehen ist, besteht ein Leistungsdefizit von etwa 1,7 W/m². Es kann also zeitweise notwendig werden, den Umluftbetrieb zu aktivieren und keine frische Außenluft anzusaugen, bevor nicht die gewünschte Raumtemperatur erreicht ist.

Vom Standpunkt der Luftqualität sollte dieser Betriebsmodus jedoch so kurz wie möglich gehalten werden, weil in dieser Zeit das Gebäude nicht mit Frischluft versorgt wird. Im Umluftbetrieb kann evtl. belastete Abluft, die z.B. aus dem Flurbereich abgesaugt wurde, wieder in die Wohnräume eingebracht werden [12].

Bei einem Passivhaus-Konzept ist vorgesehen, dass die notwendige Wärmezufuhr alleine über die für eine gute Raumluftqualität notwendige Zuluft transportiert werden sollte. Das sind in der Regel 30 m³/h pro Person d.h. bei einer Auslegung für das beschriebene Gebäude für 4 Personen 120 m³/h, vgl. Tabelle 7. Die maximal zulässige Zulufttemperatur darf nicht wesentlich höher als 50°C liegen, da sonst mit Staubverschmelzung gerechnet werden muss. Aus diesem Grund ist die über die Zuluft transportierbare Heizleistung beim vorliegenden Gebäude auf 10,4 W/m² begrenzt. Höhere Heizlasten könnten nur über den beschriebenen Umluftbetrieb oder über eine höhere Temperatur der Zuluft bereitgestellt werden.

Luftverteilung über Flachkanäle im Fußbodenaufbau

Die Luftverteilung wird im wesentlichen über Flachkanäle realisiert, die im Fußbodenaufbau verlegt sind, vgl. Abbildung 38. Die Kanäle enden als Quell-Luft-Auslässe in der Nähe der Fenster. Dies bedeutet, dass die Kanäle ausgehend vom Technikraum von der Decke auf den Boden geführt werden müssen und anschließend über den Flur und die gesamte Tiefe der Wohnräume bis an die Außenwand des jeweiligen Raumes reichen müssen. Jeder Kanal ist daher zwischen 10 und 20 Meter lang.

Bei Verwendung von Weitwurfdüsen kann die Luft auch direkt vom Flur in den Wohnraum eingebracht werden. Die Luftströmung legt sich an der Decke des Raumes an, so dass eine vollständige Durchströmung des Raumes ohne Kurzschluss-Strömung erreicht wird. Es ist dann nicht notwendig, Zuluft-Auslässe an der Außenwand eines Raumes anzuordnen.

Lange Kanäle, insbesondere Flachkanäle, erzeugen besonders hohe Druckverluste, die von den Lüftern aufgebracht werden müssen und die einen hohen Stromverbrauch nach sich ziehen, der bei Verwendung von Weitwurfdüsen vermeidbar wäre.

Separate Wärmepumpe für Warmwasserbereitung

Zur Erwärmung von Brauchwamwasser wird im Gebäude eine separate Wärmepumpe, die unabhängig von der Heizungswärmepumpe arbeitet, eingesetzt. Über dieses Gerät liegen lediglich die Herstellerdaten vor, die keine detaillierte Berechnung zulassen. Gängige Wärmepumpen-Kompaktgeräte für Passivhäuser kombinieren die beiden Funktionen Heizung und Brauchwassererwärmung in einem Gerät, um die Investitionskosten niedrig zu halten. Die Jahresarbeitszahl einer Geräte-Kombination ist im Winterbetrieb in aller Regel höher, weil die Abwärme des Kompressors bei der WW-Bereitung noch zum Heizen genutzt werden kann.

4 Energiebilanz mit dem PHPP Passivhaus Projektierungs Paket

Die Energiebilanz des Objekts wurde mit dem Passivhaus Projektierungs Paket (PHPP) erstellt [13]. Dieses Verfahren zur Berechnung des Heizwärmebedarfs eines Gebäudes richtet sich nach der europäischen Norm EN 832 [14]. Das PHPP konnte in verschiedenen messtechnischen Untersuchungen an realisierten Passivhäusern validiert werden [2], [15]. Das Rechenverfahren ist als Tabellenkalkulation konzipiert und kann von jedem Planer oder Architekten zur Bilanzierung des Heizwärmebedarfs eines Gebäudes verwendet werden.

Zur Berechnung des Heizwärmebedarfs eines Gebäudes sind die Eigenschaften aller Bauteile der Hüllfläche zu erheben, das sind die U-Werte von Wand, Dach, etc. und die U-Werte und g-Werte der Fenster, wie sie in Kapitel 3 dieses Berichts ausführlich

dokumentiert wurden. Die Wärmebrückenverluste der verschiedenen Anschluss-Details wurden für das vorliegende Gebäude mit einem Wärmestrom-Programm exakt berechnet, vgl. Abschnitt 3.4. Die U-Wert-Berechnung der Bauteile erfolgt entsprechend der Norm EN ISO 6946. Die Eigenschaften der Verglasungen sind nach gemäß EN 673 (U_g Wert) bzw. EN 410 (g-Wert) berechnet worden. Die Eigenschaften der Anlage zur kontrollierten Wohnungslüftung, insbesondere die Effizienz des Luft-Luft-Wärmeübertragers (Abschnitt 3.8) und die Luftdichtheit der Gebäudehülle (n_{50} -Wert, Abschnitt 3.5) müssen ebenfalls bekannt sein, damit die Lüftungswärmeverluste korrekt bilanziert werden können. Neben den Eigenschaften der einzelnen Bauteile geht die Geometrie und insbesondere die Orientierung des gesamten Gebäudes in die Energiebilanz ein. Alle diese Daten werden in den Blättern der Tabellenkalkulation erfasst und auf dieser Basis der Heizwärmebedarf berechnet.

Neben der Berechnung des Heizwärmebedarfs kann im PHPP auch eine Heizlastberechnung für das Gebäude durchgeführt werden. Der Rechengang hierzu wurde im Rahmen des aktuellen IEA-Projektes geprüft und durch Vergleich von Simulationsrechnungen mit Messergebnissen validiert [6]. Außerdem ist eine Abschätzung des sommerlichen Verhaltens des Gebäudes möglich, indem die Verschattungsverhältnisse im Sommer separat erfasst werden und die Möglichkeiten der nächtlichen Querlüftung zur passiven Kühlung des Gebäudes überprüft werden, vgl. auch die Ausführungen in [5], sowie Abbildung 34.

4.1 Ergebnisse der PHPP-Berechnung

In Tabelle 9 bis Tabelle 13 werden die wichtigsten Ergebnisse der Energiebilanz nach PHPP für das vorliegende Gebäude dokumentiert, Variante 'wie gebaut'. Demnach liegt der berechnete Heizwärmebedarf bei 23 kWh/(m²a) und damit über der Grenze für Passivhäuser von 15 kWh/(m²a). Der Primärenergie Kennwert für Heizung, Warmwasserbereitung und Hilfsstrom nach PHPP liegt bei 60 kWh/(m²a) bezogen auf die Wohnfläche.

Die Überschreitung des Passivhaus-Grenzwertes hat vor allem drei Gründe: Das Gebäude ist mit seiner Hauptfassade, d.h. mit den großen Fenstern der Wohnräume, nach Westen orientiert, weil dies im Bebauungsplan so festgelegt war. Die Wärmehückgewinnung der kontrollierten Lüftung hat einen Wärmebereitstellungsgrad von lediglich 60 % statt möglichen 85...90 %. Die Luftdichtheit der Gebäudehülle war bei der Projektierung mit $n_{50} = 0,3 \text{ }^1/\text{h}$ angesetzt worden, tatsächlich wurde $0,55 \text{ }^1/\text{h}$ gemessen.

4.2 Planungsvarianten

Um den Einfluss der genannten Änderungen an der Gebäudekonfiguration auf die Energiebilanz quantitativ zu erfassen, wurden neben der Variante 'wie gebaut' jeweils

eine Energiebilanz für eine 'optimale PH-Variante' und vier weitere Varianten erstellt, in denen jeweils eine der oben genannten Konfigurationsänderungen vorgenommen wurde. Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Tabelle 8 dargestellt. Wegen der höheren Genauigkeit werden hier immer die Werte aus dem Monatsverfahren diskutiert.

		1	2	3	4	5	6	7	8
Heizwärmebedarf Monatsverfahren	kWh/(m ² a)	23.8	23.8	22.1	21.9	22.5	19.2	14.6	16.2
Differenz HWB der Variante zu Grundversion in Spalte 1	kWh/(m ² a)	0.00	0.00	-1.68	-1.87	-1.29	-4.59	-9.2	-7.6
Heizlast	W/m ²	12.3	12.3	11.7	11.8	11.3	10.8	8.8	9.3
davon über die Zuluft transportierbar	W/m ²	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	8.9	8.9	8.9
PE-Kennwert (PHPP)	kWh/(m ² a)	58.8	47.3	57.2	57.0	57.2	54.5	44.5	45.7
Differenz PE-Kennwert der Variante zu Grundversion in Spalte 1	kWh/(m ² a)	0.0	-11.5	-1.6	-1.8	-1.6	-4.3	-14.3	-13.1

Tabelle 8: Variante 'wie gebaut' und die Auswirkung verschiedener im Text beschriebener Modifikationen davon. Variante 7 ist die optimale Kombination aller Varianten, mit der sich ein Passivhaus ergeben würde. Legende:

Spalte	Kommentar / Erläuterung
1	Wie gebaut: Orientierung: West, $n_{50} = 0,55 \text{ }^1/\text{h}$, WRG: 60%,
2	Wie gebaut+solar: Orientierung: West, $n_{50} = 0,55 \text{ }^1/\text{h}$, WRG: 60%,
3	Orientierung der Hauptfassade 'Süd', sonst wie gebaut
4	anderes Fenster: modifizierte Verglasung und Rahmen
5	$n_{50} = 0,3 \text{ }^1/\text{h}$ statt $0,55 \text{ }^1/\text{h}$, sonst wie gebaut
6	WRG 85 % statt 60 %, sonst wie gebaut
7	Optimiert als PH: Orientierung: Süd, $n_{50} = 0,3 \text{ }^1/\text{h}$, WRG: 85%,
8	Orientierung der Hauptfassade 'West', sonst wie 7

Effizienz der Wärmerückgewinnung

Den größten Anteil an der Erhöhung des Heizwärmebedarfs hat die geringe Effizienz der Wärmerückgewinnung. Eine Verbesserung von 60% auf 85% führt zu einer Verringerung des Heizwärmebedarfs von um $\Delta\text{HWB} = 4,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Der Primärenergie-Kennwert verbessert sich um $4,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Dabei wurde die Arbeitszahl der Heizungswärmepumpe in beiden Varianten mit 3,1 angesetzt, denn marktverfügbare WP-Kompaktgeräte erreichen dies auch mit einem hocheffizienten Luft-Luft-Wärmeübertrager.

Luftdichtheit

Eine Verbesserung der luftdichten Gebäudehülle von $n_{50} = 0,55 \text{ }^1/\text{h}$ auf $0,3 \text{ }^1/\text{h}$ verringert den Heizwärmebedarf um $\Delta\text{HWB} = 1,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, der PE-Kennwert wird um $1,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ geringer.

Orientierung des Gebäudes

Eine Änderung der Orientierung der Hauptfassaden des Gebäudes verbessert die Energiebilanz um $\Delta\text{HWB} = 1,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Das heißt, wenn die großen Fenster der Wohnzimmer, nach Süden orientiert wären, das gesamte Gebäude also um 90° gedreht wäre, könnten höhere solare Gewinne realisiert werden. Der PE-Kennwert nach PHPP verringert sich um $1,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Auswirkung von Fensterrahmen, Verglasungsqualität und Fenstereinbau

Eine geringfügig größere Apertur der Verglasungsflächen, d. h. ein schmaleres Rahmenprofil könnte den Heizwärmebedarf um weitere $\Delta\text{HWB} = 1,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ senken. Verglasungen mit Krypton-Füllung ($U_g = 0,51 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) statt Argon ($U_g = 0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) brächten nochmals $\Delta\text{HWB} = 0,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Der PE-Kennwert nach PHPP verringert sich zusammen um $1,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Alle fünf genannten Maßnahmen wurden in Tabelle 8 Spalte 7 als eine weitere Variante 'Passivhaus' mit einem Heizwärmebedarf von $14 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ zusammengefasst. Die Differenz zu Spalte 1 zeigt, dass sich damit der Heizwärmebedarf des Gebäudes um insgesamt $9,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ verringert. Dies stimmt nicht genau mit der Summe der Einzelbeiträge überein, da der gesamte Heizwärmebedarf nicht linear von den einzelnen Maßnahmen abhängt. Der PE-Kennwert für Heizung, Lüftung und Warmwasserbereitung nach PHPP verringert sich insgesamt um $14 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ von 58 auf $44 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ bezogen auf die Wohnfläche.

Die beiden letztgenannten Maßnahmen bringen im Vergleich zum materiellen Aufwand nur eine kleine Verbesserung und sind hier nur der Vollständigkeit halber genannt. Die anderen drei Maßnahmen: höhere Effizienz der Wärmerückgewinnung, Luftdichtheit der Gebäudehülle und Orientierung des Gebäudes haben einen viel größeren Einfluss auf die Energiebilanz. Sie sind andererseits mit geringem zusätzlichen Planungsaufwand zu realisieren, denn sie bedeuten jeweils lediglich eine konzeptionelle Änderung der Planung (Orientierung des Gebäudes) oder können durch Qualitätssicherungsmaßnahmen (Luftdichtheit) erreicht werden.

Solaranlage zur Brauchwassererwärmung verringert PE-Kennwert

Der Primärenergie-Kennwert des gebauten Gebäudes könnte durch die Verwendung einer Solar-Anlage zur Unterstützung der Brauchwassererwärmung stark verringert werden, siehe Tabelle 8, Spalte 2. In diesem Kennwert sind der Primärenergiebedarf für Heizung, Hilfsstromverbrauch und Warmwasserbereitung zusammengefasst. Eine Solaranlage mit typischer kostengünstiger Auslegung (4 m^2 , d.h. 1 m^2 Kollektorfläche pro Person) würde den PE-Kennwert nach PHPP von 58 auf $47 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ verringern. Wenn das Haustechnik-Konzept es zulässt, wäre also zu überlegen, ob der Bauherr nachträglich noch eine Solaranlage zur Brauchwassererwärmung nachrüstet. Am Heizwärmebedarf des Gebäudes ändert sich dadurch nichts.

4.3 PHPP-Dokumentation, Variante 'wie gebaut'

Passivhaus Nachweis



Objekt:	EFH Grochowski		
Variante:	Wie gebaut: Orientierung: West, Fenster: Veka, WRG: 60%,		
Bemerkung:	#BEZUG!		
Standort und Klima:	Königsfeld		Trier
Straße:	Buchenweg 18		
PLZ/Ort:	53426 Königsfeld		
Land:	Deutschland		
Objekt-Typ:	Einfamilienhaus, freistehend		
Bauherr(en):	Familie Grochowski		
Straße:	Buchenweg 18		
PLZ/Ort:	53426 Königsfeld		
Architekt:	Hans Kupka		
Straße:	Dorfstraße 44		
PLZ/Ort:	53426 Schalkenbach		
Haustechnik:	Fa. Zimmermann Luftungs- und Wärmesysteme		
Straße:	Zu Hildringhausen 31		
PLZ/Ort:	57462 Olpe		
Baujahr:	2004		
Zahl WE:	1		
Umbautes Volumen V_e :	619.2	m ³	
Personenzahl:	4.0		
Innentemperatur:	20.0	°C	
Interne Wärmequellen:	2.1	W/m ²	

Kennwerte mit Bezug auf Energiebezugsfläche			
Energiebezugsfläche:	157.03	m ²	
	Verwendet:	<i>Monatsverfahren</i>	PH-Zertifikat: Erfüllt?
Energiekennwert Heizwärme:	24	kWh/(m ² a)	15 kWh/(m ² a) <input type="checkbox"/>
Drucktest-Ergebnis:	0.55	h ⁻¹	0.6 h ⁻¹ <input checked="" type="checkbox"/>
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung, Hilfs- u. Haushalts-Strom):	128	kWh/(m ² a)	120 kWh/(m ² a) <input type="checkbox"/>
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Hilfsstrom):	59	kWh/(m ² a)	
Primärenergie-Kennwert Einsparung durch solar erzeugten Strom:		kWh/(m ² a)	
Heizlast:	12.3	W/m ²	
Übertemperaturhäufigkeit:	0.0%	über	25 °C

Tabelle 9: Nachweisblatt aus dem PHPP mit den zentralen Ergebnissen: Heizwärmebedarf, Luftdichtheit der Gebäudehülle, Primärenergiekennwert. Variante: wie gebaut.

Passivhaus-Projektierung ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME

Klima: Trier (Region 8) Objekt: EFH Grochowski Variante: Wie gebaut: Orientierung: West, n50 = 0,55 l/h, WRG: 60%, Standort: Königsfeld	Innentemperatur: 20.0 °C Gebäudetyp/Nutzung: Einfamilienhaus, freistehend Energiebezugsfläche A _{EB} : 157.0 m ² Standard-Personenbelegung: 4.0 Pers	
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Bauteile	Temperaturzone	Fläche m ²	U-Wert W/(m ² K)	Temp.-faktor ζ	G _t kWh/a	kWh/a	Energiebezugsfläche
1. Außenwand Außenluft	A	204.4	0.112	1.00	76.9	1755	11.2
2. Außenwand Erdreich	B			0.62			
3. Dach/Decken Außenluft	D	118.8	0.105	1.00	76.9	957	6.1
4. Bodenplatte	B	109.2	0.095	0.62	76.9	491	3.1
5.	A			1.00			
6.	A			1.00			
7.	X			1.00			
8. Fenster	A	35.8	0.790	1.00	76.9	2178	13.9
9. Außentür	A			1.00			
10. Wbrücken außen (Länge/m)	A	160.4	-0.004	1.00	76.9	-54	-0.3
11. Wbrücken Perimeter (Lang P)				0.62			
12. Wbrücken Boden (Länge/m)	B	43.2	-0.045	0.62	76.9	-92	-0.6
Summe aller Hüllflächen		468.2					

Transmissionswärmeverluste Q_T

A _{EB} m ² : 157.0 lichte Raumhöhe m: 2.50 = 392.6 m ³	Summe: 5235 kWh/a = 33.3 kWh/(m ² a)	

Lüftungsanlage:

effektiver Wärmebereitstellungsgrad der Wärmerückgewinnung: **59%**
 Wärmebereitstellungsgrad des Erdreichwärmeübertr.: **0%**

wirksames Luftvolumen V_L m³: 393
 energetisch wirksamer Luftwechsel n_L 1/h: 0.300

Lüftungswärmeverluste Q_L

V _L m ³ : 393 n _L 1/h: 0.170 c _{Luft} Wh/(m ³ K): 0.33 = 1690 kWh/a = 10.8 kWh/(m ² a)	Summe: 6924 kWh/a = 44.1 kWh/(m ² a)	

Summe Wärmeverluste Q_V

Q _T kWh/a: 5235 Q _L kWh/a: 1690 = 6924 kWh/a = 44.1 kWh/(m ² a)		

Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S

Ausrichtung der Fläche 1. Ost: 0.45, 0.52, 5.26, 199 = 242 kWh/a 2. Süd: 0.38, 0.52, 7.80, 334 = 510 kWh/a 3. West: 0.35, 0.52, 17.95, 199 = 655 kWh/a 4. Nord: 0.34, 0.52, 4.81, 129 = 109 kWh/a 5. Horizontal: 0.40, 0.00, 0.00, 309 = 0 kWh/a	Summe: 1515 kWh/a = 9.6 kWh/(m ² a)	

Interne Wärmequellen Q_I

kh/d: 0.024 Länge Heizzeit d/a: 205 spezif. Leistung q _I W/m ² : 2.10 = 1619 kWh/a = 10.3 kWh/(m ² a)	Summe: 3134 kWh/a = 20.0 kWh/(m ² a)	

Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten: **0.45**

Nutzungsgrad Wärmegewinne η_G: **99%**

Wärmegewinne Q_G

η _G * Q _F : 3101 kWh/a = 19.7 kWh/(m ² a)		

Heizwärmebedarf Q_H

Q _V - Q _G : 3823 kWh/a = 24.3 kWh/(m²a)		

Tabelle 10: Heizwärmeblatt aus dem PHPP. Variante: wie gebaut.

PASSIVHAUS-PROJEKTIERUNG ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME MONATSVERRFAHREN

Klima: Trier Innentemperatur: 20 °C
 Objekt: EFH Grochowski Gebäudetyp/Nutzung: Einfamilienhaus, freistehend
 Variante: Wie gebaut: Orientierung: West, n50 = 0,55 1/h, WRG: 60% Energiebezugsfläche A_{GB}: 157 m²
 Standort: Königsfeld

	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr	
Heizgr.Std. Außen	14.2	12.2	11.2	8.4	5.5	3.1	1.8	2.2	4.3	7.6	11.1	13.5	95	kKh
Heizgr.Std. Grund	7.9	7.7	8.5	7.6	6.8	5.4	4.6	4.1	4.0	4.7	5.6	6.9	74	kKh
Verluste Außen	1206	1032	953	709	467	263	151	183	366	644	941	1149	8063	kWh
Verluste Grund	67	64	71	64	57	46	39	34	33	39	47	58	619	kWh
Summe spezif. Verluste	8.1	7.0	6.5	4.9	3.3	2.0	1.2	1.4	2.5	4.4	6.3	7.7	55.3	kWh/m ²
Solare Gewinne Ost	18	34	58	86	105	104	113	97	69	41	20	12	758	kWh
Solare Gewinne Süd	47	85	113	127	131	119	133	138	122	91	54	35	1193	kWh
Solare Gewinne West	48	93	158	234	284	281	306	263	186	110	55	33	2051	kWh
Solare Gewinne Nord	9	15	26	37	46	49	50	43	30	19	10	6	339	kWh
Solare Gewinne Horiz.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	kWh
Innere Wärmequellen	245	222	245	237	245	237	245	245	237	245	237	245	2889	kWh
Summe spezif. Angebot solar + intern	2.3	2.9	3.8	4.6	5.2	5.0	5.4	5.0	4.1	3.2	2.4	2.1	46.0	kWh/m ²
Solarer Ausnutzungsgrad	100%	100%	100%	95%	65%	39%	22%	28%	62%	99%	100%	100%	68%	
Heizwärmebedarf	906	647	424	86	1	0	0	0	0	180	611	875	3731	kWh
spezif. Heizwärmebedarf	5.8	4.1	2.7	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	3.9	5.6	23.8	kWh/m ²

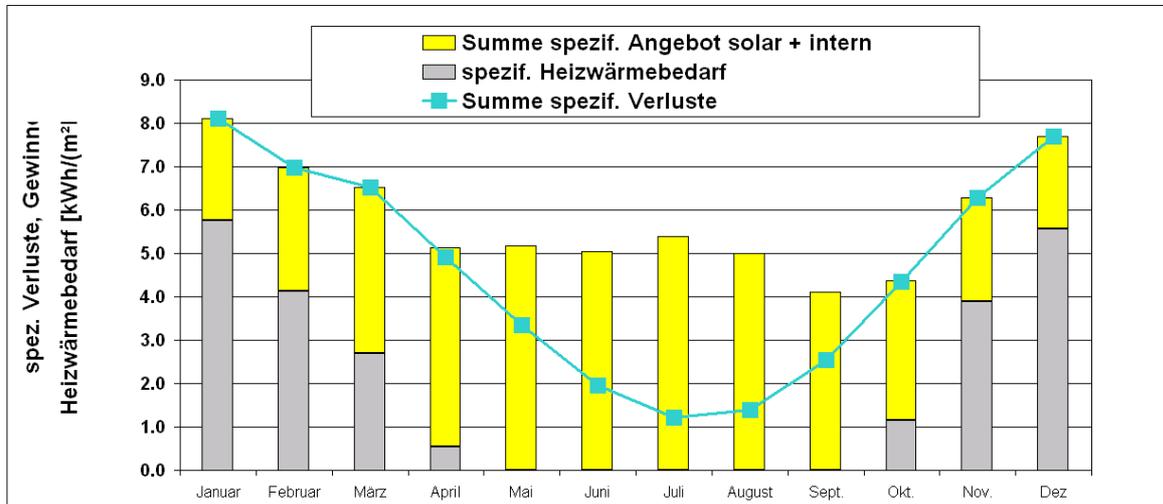


Tabelle 11: Energiekennwert Heizwärme für jeden Monat des Jahres nach dem Monatsverfahren des PHPP. Dabei werden Monatsmittelwerte des Klimadatensatzes zugrundegelegt. Variante: wie gebaut.

Passivhaus-Projektierung HEIZWÄRMELAST

Objekt: **EFH Grochowski** Gebäudetyp/Nutzung: **Einfamilienhaus, fr** Innentemperatur: **20** °C
 Standort: **Königsfeld** Energiebezugsfläche A_{EB}: **157** m²
 Kenn-Nr. Heizlast-Region: **4** Keine Auswahl / Heizlastdaten zugeordnet Klima (Heizlast): **Nördliche und westliche Mittelgebirge ohne Hochlagen, z.B.**

Auslegungstemperatur: Wetter 1: **-4.0** °C Wetter 2: **-1.0** °C
 Erdreichauslegungstemp.: **8.6** °C

Bauteile	Temperaturzone	m ²	U-Wert W/(m ² K)	Faktor immer 1 (außer "X")	TempDiff		P _T 1 Watt	P _T 2 Watt
					K	K		
1. Außenwand Außenluft	A	204.4	0.112	1.00	24.0	bzw. 21.0	548	bzw. 479
2. Außenwand Erdreich	B			1.00	11.4	bzw. 11.4		bzw.
3. Dach/Decken Außenluft	D	118.8	0.105	1.00	24.0	bzw. 21.0	299	bzw. 261
4. Bodenplatte	B	109.2	0.095	1.00	11.4	bzw. 11.4	118	bzw. 118
5.	A			1.00	24.0	bzw. 21.0		bzw.
6.	A			1.00	24.0	bzw. 21.0		bzw.
7.	X			1.00	24.0	bzw. 21.0		bzw.
8. Fenster	A	35.8	0.790	1.00	24.0	bzw. 21.0	679	bzw. 595
9. Außentür	A			1.00	24.0	bzw. 21.0		bzw.
10. Wbrücken außen (Länge/m)	A	160.4	-0.004	1.00	24.0	bzw. 21.0	-17	bzw. -15
11. Wbrücken Perimeter (Länge/m)	P			1.00	11.4	bzw. 11.4		bzw.
12. Wbrücken Boden (Länge/m)	B	43.2	-0.045	1.00	11.4	bzw. 11.4	-22	bzw. -22
13. Haus/Wohnungstrennwand	I			1.00	3	bzw. 3		bzw.

Transmissionswärmelast P_T

Summe = **1605** bzw. **1416**

Luftungsanlage:

Wärmebereitstellungsgrad des Wärmeübertragers: **59%**
 Wärmebereitstellungsgrad des Erdreichwärmetauschers: **0%**

wirksames Luftvolumen V_L: **157.0** m³ * **2.50** m = **393** m³

energetisch wirksamer Luftwechsel n_L: **0.300** 1/h * (1 - **0.59**) + **0.114** 1/h = **0.238** 1/h

Luftungswärmelast P_L

V_L m³: **392.6** * n_L 1/h: **0.238** * c_{Luft} Wh/(m³K): **0.33** * TempDiff 1 K: **24.0** bzw. TempDiff 2 K: **21.0** = **740** bzw. **647** W

Summe Wärmelast P_V

P_T + P_L = **2345** bzw. **2063** W

Wärmeangebot Solarlast P_S

Ausrichtung der Fläche: **Ost**, **Sud**, **West**, **Nord**, **Horizontal**

Fläche m ²	g-Wert (senkr. Einstrahlung)	Reduktionsfaktor (vgl. Blatt Fenster)	Strahlung 1 W/m ²	Strahlung 2 W/m ²	P _S 1 W	P _S 2 W
5.3	0.5	0.4	15.0	5	18	6
7.8	0.5	0.4	60.0	5	92	8
17.9	0.5	0.4	15.0	5	49	16
4.8	0.5	0.3	5.0	5	4	4
0.0	0.0	0.4	5.0	5	0	0

Summe = **164** bzw. **34** W

Interne Wärmelast P_I

spez. Leistung W/m²: **1.6** * A_{EB} m²: **157** = **251** bzw. **251** W

Wärmegewinne P_G

P_S + P_I = **415** bzw. **286** W

P_V - P_G = **1930** bzw. **1778** W

Heizwärmelast P_H

= **1930** W

wohnflächenspezifische Heizwärmelast P_H / A_{EB}

= **12.3** W/m²

Eingabe max. Zulufttemperatur: **52** °C
 Zulufttemperatur ohne Nachheizung: $\vartheta_{Zu,Min}$ 10 °C Zulufttemperatur Max.: $\vartheta_{Zu,Max}$ 52 °C
 zum Vergleich: Wärmelast, die von der Zuluft transportierbar ist P_{Zuluft,Max} = **1629** W spezifisch **10.4** W/m²

Tabelle 12: Heizlastberechnung nach PHPP. Variante: wie gebaut.

Passivhaus-Projektierung PRIMÄRENERGIEKENNWERT

Objekt: EFH Grochowski	Gebäudetyp/Nutzung: Einfamilienhaus, freistehend		
Variante: Wie gebaut: Orientierung: West, n50 = 0,55 l/h, WRG: 60%,	Energiebezugsfläche A _{EB} : 157 m ²		
Standort: Königsfeld	Q _{H+Q_{HL}} : 23.9 kWh/(m ² a)		
	Endenergie kWh/(m ² a)	Primärenergie kWh/(m ² a)	Emissionen CO₂-Äquivalent kg/(m ² a)
			PE-Kennwert
			CO ₂ -Emissionsfaktor (CO ₂ -Äquivalent)
Strombedarf (ohne Wärmepumpe)			
Anteil Deckung Heizwärmebedarf (Projekt)	0%	kWh/kWh	g/kWh
Anteil Deckung Warmwasserbedarf (Projekt)	0%	2.7	680
Heizung, direkt elektrisch Q _{H,de}	0.0	0.0	0.0
Warmwasserbereitung, direkt elektrisch Q _{WW,de} (Blatt WW+Verteil, SolarWW)	0.0	0.0	0.0
Strombedarf Haushaltsgeräte Q _{EHH} (Blatt Strom)	21.9	59.1	14.9
Strombedarf Hilfsstrom	4.5	12.2	3.1
Summe Strombedarf (ohne Wärmepumpe)	26.4	71.3	18.0
Wärmepumpe			
Anteil Deckung Heizwärmebedarf (Projekt)	0%	kWh/kWh	g/kWh
Anteil Deckung Warmwasserbedarf (Projekt)	100%	2.7	680
Energieträger Ergänzungsheizung	Strom	2.7	680
Jahresarbeitszahl Wärmepumpe	2.00		
Aufwandszahl Wärmeerzeuger Gesamtsystem	0.50		
Strombedarf Wärmepumpe (ohne WW Wasch&Spül) Q _{WP}	9.3	25.2	6.3
Nichtelektrischer Bedarf WW Wasch&Spül	0.0	0.0	0.0
Summe Strombedarf Wärmepumpe	9.3	25.2	6.3
Kompaktgerät mit el. Wärmepumpe			
Anteil Deckung Heizwärmebedarf (Projekt)	100%	kWh/kWh	g/kWh
Anteil Deckung Warmwasserbedarf (Projekt)	0%	2.7	680
Energieträger Ergänzungsheizung	Strom	2.7	680
Arbeitszahl Wärmepumpe Winter	3.1		
Arbeitszahl Wärmepumpe Sommer	2.0		
Aufwandszahl Wärmeerzeuger (Nachweis)	0.33		
Aufwandszahl Wärmeerzeuger (Projektierung)	0.49		
Strombedarf Wärmepumpe (ohne WW Wasch&Spül) Q _{WP}	7.9	21.4	5.4
Nichtelektrischer Bedarf WW Wasch&Spül	3.8	10.3	2.6
Summe Kompaktgerät	11.8	31.7	8.0
Heizung, Warmwasser, Hilfs- und Haushaltsstrom	47.5	128.3	32.3
Gesamt PE-Kennwert	128.3 kWh/(m ² a)		
Gesamtemission CO₂-Äquivalent	32.3 kg/(m ² a)		
Primärenergieanforderung	120 kWh/(m ² a)	nein (ja/nein)	
Heizung, Warmwasser, Hilfsstrom (keine Haushaltsanwendungen)	21.8	58.8	14.8
PE-Kennwert Haustechnik	58.8 kWh/(m ² a)		
Gesamtemission CO₂-Äquivalent	14.8 kg/(m ² a)		

Tabelle 13: Primärenergie-Kennwerte nach PHPP. Variante: wie gebaut.

5 Literatur

- [1] Feist, W. (Hrsg.): **Wärmebrückenfreies Konstruieren**, Passivhaus Institut, Darmstadt, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 16, 2. Auflage 2001.
- [2] Peper, S., Feist, W., Kah, O.: **Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg**, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 19, Messtechnische Untersuchung und Auswertung, Hannover 2001.
- [3] Schröder, H.: **Wärmetechnische Untersuchung eines Einfamilienhauses in hochdämmender Bauweise hinsichtlich der energetischen Auswirkung von Glasvorbauten** – Konstruktion und Bemessung ausgesuchter Tragwerksteile, Diplomarbeit an der FH Koblenz, Fachbereich Bauingenieurwesen, Koblenz 2003.
- [4] Feist, W. (Hrsg.): **Passivhaus-Versorgungstechnik**, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 20, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2000.
- [5] Feist, W. (Hrsg.): **Neue Passivhaus-Gebäudetechnik mit Wärmepumpen**, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 26, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2004.
- [6] Feist, W.: **Heizlast in Passivhäusern – Validierung durch Messungen**, Forschungsvorhaben im Rahmen der nationalen Beteiligung an der Arbeitsgruppe IEA SHC TASK 28 / ECBCS ANNEX 38 'Sustainable Solar Housing' der Internationalen Energie Agentur IEA Subtask B: Design und Analyse, Darmstadt, 2005.
- [7] Feist, W. (Hrsg.): **Wärmeübergabe- und Verteilverluste im Passivhaus**, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 28, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2004.
- [8] Bühring, A.: **Heat production by heat pumps**, in: Sustainable Solar Housing, A Reference Book for Planners, editors: R. Hastings & M. Wall, publisher: James & James Science Publishers, London, to be published in 2006.
- [9] Reiß, J.: **Ergebnisse des Forschungsvorhabens 'Messtechnische Validierung des Energiekonzeptes einer großtechnisch umgesetzten Passivhausentwicklung in Stuttgart-Feuerbach'**, Fraunhofer IBP, Stuttgart, Passivhaustagung Hamburg 2003 und Projektbericht zu IEA Task 28.
- [10] Kaufmann, B.: **Economics of high thermal performance houses**, in: Sustainable Solar Housing, A Reference Book for Planners, editors: R. Hastings & M. Wall, publisher: James & James Science Publishers, London, to be published in 2006.

-
- [11] Feist, W. (Hrsg.): **Temperaturdifferenzierung in der Wohnung**, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 25, Passivhaus Institut, Damstadt, 2004.
- [12] Feist, W. (Hrsg.): **Einfluss der Lüftungsstrategie auf die Schadstoffkonzentration und -ausbreitung im Raum**, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 23, Passivhaus Institut, Damstadt, 2003.
- [13] Passivhaus-Projektierungs-Paket (PHPP) mit Handbuch, Damstadt, Ausgabe 2004a.
- [14] Europäisches Komitee für Normung: **EN 832:1998, Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung des Heizenergiebedarfs – Wohngebäude**, Brüssel, Dezember 1998.
- [15] Schnieders: J., **CEPHEUS – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung, Endbericht**, CEPHEUS Projektinformation Nr. 22, Passivhaus Institut, Damstadt, 2001, siehe auch www.cephus.de.