



CEPHEUS - gefördertes Projekt:
EUROPÄISCHE KOMMISSION
DIRECTORATE-GENERAL XVII, ENERGY
THERMIE
Projekt-Nummer: **BU/0127/97**

**Passiv
Haus
Institut**
Dr. Wolfgang Feist



CEPHEUS-Projektinformation Nr. 18

CEPHEUS



cost efficient passive houses as european standards

Klimaneutrale Passivhaus- Reihenhaussiedlung Hannover- Kronsberg

Autoren:

Dr. Wolfgang Feist (PHI)
Dipl.-Ing. Søren Peper (PHI)
Dipl.-Ing. Matthias von Oesen (StWH)

unter Mitwirkung von:

Vahid Sariri, Matthias Nagel,
Wiebke Wenzel (PHI)
Dipl.-Ing. Folkmer Rasch (R&P)
Dipl.-Ing. Petra Grenz (R&P)
Dipl.-Ing. Norbert Stärz (inPlan)

Auftragnehmer:

PASSIVHAUS INSTITUT
Rheinstr. 44-46
D-64283 Darmstadt
E-Mail: passivhaus@t-online.de
www.passiv.de

Hannover 2001

Dieser Bericht entstand im Auftrag der Stadtwerke Hannover AG. Dieser Auftrag war Teil des im Thermie Programm geförderten europäischen Forschungsprojekts CEPHEUS - Cost Efficient Passive Houses as European Standards.

Bezug:

Stadtwerke Hannover AG
Herr von Oesen
Glockseestraße 33
30169 Hannover
Fax: +49 (0)5 11 43 09 41 33 20
E-Mail: matthias.vonoesen@enercity.de

INHALT

1	Vorwort	5
2	Übersichtskarten und Pläne	8
3	Baubeschreibung	12
3.1	Grundrisse, Gebäudeschnitte und Ansichten	12
3.2	Angaben zur Energiebezugsfläche Passivhäuser Hannover Kronsberg	21
3.3	Beschreibung der Bauweise	21
3.4	Regelquerschnitte der Außenbauteile	21
3.5	Darstellung von Anschlußdetails: Luftdichtheit und wärmebrückenfreies Konstruieren	24
4	Lüftungskonzept	33
4.1	Lüftungszonen	33
4.2	Technische Parameter der Wohnungslüftung	35
4.2.1	Rohrleitungsnetz Lüftung	35
4.2.2	Auslegungsluftvolumenströme	37
4.2.3	Druckverluste	39
4.2.4	Zuluftventile	39
4.2.5	Abluftventile	39
4.2.6	Überströmelemente	40
4.3	Beschreibung des Lüftungsgerätes mit Wärmeübertrager	41
4.4	Regelmöglichkeiten	42
5	Konzept der Raumwärmeversorgung	43
5.1	Heizwärmeverteilung	43
5.2	Wärmeversorgung Heizung	44
5.2.1	Nahwärmeversorgung	44
5.2.2	Hausversorgung	45
6	Konzept der Warmwasserversorgung	50
6.1	Angaben zur Erzeugung, Speicherung, Verteilung	50
6.2	Auslegungsdaten	51
6.3	Solaranlage	51

7	Ausstattung mit elektrischen Haushaltsgroßgeräten und Beleuchtung	53
8	Kosten, Mehrkosten, Wirtschaftlichkeit	60
8.1	Mehrinvestitionen für Passivhäuser	60
8.2	Vom Haus nach Wärmeschutzverordnung '95 zum Passivhaus	70
8.2.1	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	70
8.2.2	Schritt I: Passivhaus-Dämmung der Leichtbaufassaden	78
8.2.3	Schritt II: Dämmung der Giebelwände mit Wärmedämmverbundsystem.....	78
8.2.4	Schritt III: Erhöhung der Dachdämmung.....	78
8.2.5	Schritt IV: Dämmung der Erdgeschoß-Bodenplatte.....	78
8.2.6	Schritt V: Einbau von Passivhaus-Fenstern.....	79
8.2.7	Schritt VI: Hocheffiziente Wärmerückgewinnung.....	79
8.3	Perspektivische Entwicklung	83
9	Beschreibung des Bauablaufs	85
9.1	Zeitliche Daten.....	85
9.2	Beteiligte und Organisation des Bauablaufs.....	85
9.3	Einweisung, Qualifizierung und Qualitätssicherung.....	85
9.3.1	Rohbau.....	86
9.3.1.1	Qualitätssicherung im Betonwerk/Vormontage Haustechnik.....	86
9.3.1.2	Vorfertigung der Holztafelbauelemente im Holzbauwerk und Wärmedämmung.	87
9.3.2	Fenster	90
9.3.2.1	Verglasungsauswahl.....	90
9.3.2.2	Fensterauswahl und -einbau.....	91
9.3.3	Luftdichtheit.....	92
9.3.3.1	Luftdichtheit der Holztafelbauelemente.....	92
9.3.3.2	Anschlüsse zwischen den Elementen.....	92
9.3.3.3	Dachdurchbrüche der Lüftungsrohre	92
9.4	Erfahrungen mit Beteiligten und mit den geplanten technischen Lösungen hinsichtlich der Realisierung der Qualitätsanforderungen	93
10	Ergebnisse qualitätssichernder Maßnahmen	95
10.1	PHPP-Berechnungen für die Passivhaussiedlung auf dem Kronsberg	95
10.2	Berechnungen zu Wärmebrücken	100
10.3	Ergebnisse von Luftdichtheitstests	101
10.3.1	Messungen.....	102
10.3.2	Drucktest Meßergebnisse	104
10.3.3	Genauigkeit der Luftdichtheitsmessungen bei den Passivhäusern Hannover- Kronsberg.....	107
10.3.4	Genauigkeit der Meßgeräte	107
10.4	Ergebnisse der thermographischen Untersuchung	113

10.5	Berechnungsergebnisse für Elektrogeräteausrüstung.....	116
10.6	Besonderheiten.....	116
10.6.1	Verbesserungsarbeiten.....	116
10.6.2	Balanceabgleich der Lüftungsanlagen.....	117
11	Angaben zu Erwerberr/Bauherren bzw. Mieter	121
11.1	Durchgeführte Einweisungen.....	121
11.2	Sozialwissenschaftliche Evaluierungen	124
11.2.1	Zuzugmotivation.....	125
11.2.2	Subjektive Komfortbeurteilungen durch die Bewohner.....	125
11.2.3	Nutzerakzeptanz	127
12	Presse- und Öffentlichkeitsarbeiten	128
	Literatur	131

1 Vorwort

Die Passivhaussiedlung auf dem Kronsberg

Der Beginn des 21. Jahrhunderts läßt Perspektiven aufleuchten: Eine wesentlich verbesserte Ausnutzung der bereitgestellten Energie kann den verbleibenden Energieverbrauch so weit reduzieren, daß eine Deckung allein aus nachhaltig verfügbaren Energiequellen möglich wird – und dies nicht nur technisch, sondern auch wirtschaftlich vertretbar. Dies ist die zusammengefaßte Erfahrung aus der Auswertung des Demonstrationsprojektes „Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg“.

Bei der vom Bauträger Rasch & Partner Bauen und Wohnen GmbH mit der Planung der Architektin Petra Grenz 1998 errichteten Siedlung mit 32 Reihenhäusern wurde erstmals konsequent allein eine Heizwärmeverteilung über die Zuluft für die Aufenthaltsräume verwendet; nur in den Bädern gibt es noch kleine Heizkörper. Möglich ist dieses sehr einfache und kostengünstige Konzept der Haustechnik durch eine außerordentlich hohe Effizienz der Gebäudehülle: sehr guter Wärmeschutz, eine wärmebrückenfreie Konstruktion, luftdichte Anschlußdetails und Fenster einer zuvor nicht verfügbaren Qualität. Dies bewirkt zusammen mit der Lüftungswärmerückgewinnung, daß der Heizwärmebedarf in den Häusern unter 15 kWh/(m²a) bleibt und damit nur ungefähr ein Siebtel dessen beträgt, was in vergleichbaren heute üblichen Neubauwohnungen verbraucht wird. Die Meßergebnisse aus der Passivhaussiedlung, die im separaten Bericht CEPHEUS-Projektinformation Nr. 19 [Peper 2001] veröffentlicht wurden, zeigen, daß die nahezu unglaubliche Energieeinsparung nicht nur auf dem Papier, sondern im praktischen Betrieb der bewohnten Häuser erreicht wurde.

Im hier vorliegenden Band werden die Gebäude selbst und ihre Technik vorgestellt. Diese Dokumentation kann Architekten, Planern, Bauträgern und potentiellen Bauherren exemplarisch zeigen, wie kostengünstige Passivhaus-Reihenhäuser heute realisiert werden können. Da es sich um die erste Siedlung mit alleiniger Erwärmung über die Zuluft der Lüftungsanlage handelt, mußten im Zuge der Vorplanung eine ganze Reihe von Bauteilen und Details neu entwickelt werden; insbesondere bei den Fenstern hat dies zu neuen Produkten und neuen Erkenntnissen geführt. Daß die angestrebte hohe wärmetechnische Qualität der Gebäude in der Praxis auch erreicht wurde, wird nicht nur durch die gemessenen extrem niedrigen Heizwärme-Verbrauchswerte bestätigt: strenge Qualitätssicherungsmaßnahmen haben bereits während der Bauzeit zu einer Kontrolle der Ausführung geführt; dies wird im Bericht [Peper 1999] „Luftdichtheitsprüfung“ dokumentiert. Besonders eindrucksvoll und aussagekräftig sind die thermografischen Aufnahmen der Gebäudehülle von außen und von innen; auch diese sind in einem separaten Bericht einschließlich ihrer Analyse publiziert: CEPHEUS-Projektinformation Nr. 20 [Peper 2001a]. Die Aufnahmen zeigen, wie erwartungsgemäß der sehr

gute Wärmeschutz zu gleichmäßig hohen inneren Oberflächentemperaturen im Gebäude führt. Die Verbesserung der wärmetechnischen Qualität ist nach den vorliegenden Ergebnissen eben nicht nur mit einer Energieeinsparung, sondern auch mit einer erheblichen Verbesserung der Behaglichkeit und mit garantierter Tauwasserfreiheit an den Innenoberflächen verbunden. Auch Zugerscheinungen und Temperaturschichtungen können bei diesem hervorragenden Wärmeschutz ausgeschlossen werden, wie die Äußerung von Bewohnern der Siedlung in einem Zeitungsinterview eindrucksvoll belegt: „Endlich habe ich mal warme Füße. Hier kriegt mich keiner mehr raus...“ [Jacob-Rüdiger 2000].

Die Siedlung auf dem Kronsberg liefert wertvolle Ergebnisse für die Bauphysik hochwärmedämmender Bauteile und für die Lüftungstechnik: Mit etwa 80% im praktischen Betrieb gemessenem Wärmebereitstellungsgrad der Wärmerückgewinnungsanlagen erfüllen die hier eingesetzten Geräte die in sie gesteckten Erwartungen; der Stromverbrauch für den Lüfterbetrieb und die Regelung war sogar geringer als projiziert (weniger als 250 kWh/a). Damit ergibt sich für das Lüftungssystem eine im Wohneinsatz gemessene Heizzahl von über 11: Je eingesetzter Kilowattstunde Strom werden 11 kWh Wärme eingespart. Das ist sowohl für die Primärenergiebilanz als auch für die Betriebskosten eine erfreuliche Bilanz. Auch die Lüftung betreffend liegt der Vorteil nicht allein und nicht einmal hauptsächlich beim verringerten Energieverbrauch: Entscheidend ist vielmehr die objektiv und subjektiv feststellbare Verbesserung der Luftqualität in den Wohnräumen. Nicht ohne Grund bekam die Lüftungsanlage der Passivhaussiedlung in der sozialwissenschaftlichen Befragung in Neubauten auf dem Kronsberg die mit Abstand besten Noten seitens der Bewohner.

Der gesamte verbliebene Energieverbrauch der Passivhaussiedlung ist in der Summe so gering, daß er einem elektrischen Energieeinsatz von etwa 33 kWh/(m²a) äquivalent ist^{*}. Das ist in etwa so viel, wie in durchschnittlichen Haushalten in Deutschland allein an Haushaltsstrom verbraucht wird (32,8 kWh/(m²a)).

Die Primärenergieeinsparung gegenüber gewöhnlichen Neubauten beträgt damit fast 66%. Dabei sind bereits alle Haushaltsanwendungen zusammengekommen, nämlich Heizung, Warmwasser, der Betriebsstrom der Wohnungslüftung und der gesamte Stromverbrauch für Licht, Kochen, Waschen, Kühlen und alles Sonstige.

Unter diesen Umständen ist es wirtschaftlich vertretbar, die gesamte noch benötigte Restenergie für die Siedlung durch eine erneuerbare Energieversorgung zu kompensieren: mit einem Anteil von 2,6 kW an der auf dem Kronsberg errichteten 1,5 MW-Windkraftanlage hat jedes Haus der Passivhaussiedlung zur Stromversorgung aus erneuerbaren Energiequellen etwa 35,5 kWh/(m²a) beigetragen. Das

* Das bedeutet, daß der äquivalente elektrische Energieeinsatz zum gleichen Primärenergieeinsatz wie in der Siedlung führt (Randbedingung: Konventionelle Energieversorgung).

ist mehr, als der Gegenwert des Restverbrauches ausmacht. Die Kosten für einen Windkraftanteil der genannten Höhe liegen übrigens in erschwinglicher Höhe: Sie lagen im vorliegenden Fall bei 2.500 DM je Haus:

Die CEPHEUS-Demonstrationssiedlung auf dem Kronsberg beweist aus der Praxis:

- Passivhäuser sind behaglich,
sie haben einen hohen thermischen Komfort und eine sehr gute Luftqualität;
- Passivhäuser sind kostengünstig,
die Häuser auf dem Kronsberg waren im Verkauf nicht teurer als vergleichbare Objekte im selben Baugebiet. Die Maßnahmen zu Energieeffizienzverbesserung erwiesen sich als bereits bei gegenwärtigen Randbedingungen rentabel;
- Passivhäuser sind umweltfreundlich,
zumal bereits durch die Passivhaustechnik allein eine bedeutende Primärenergieeinsparung erfolgt. Durch den niedrigen Verbrauch wird im zweiten Schritt mit dem Windkraftanteil sogar eine vollständige Klimaneutralität erreicht.

2 Übersichtskarten und Pläne

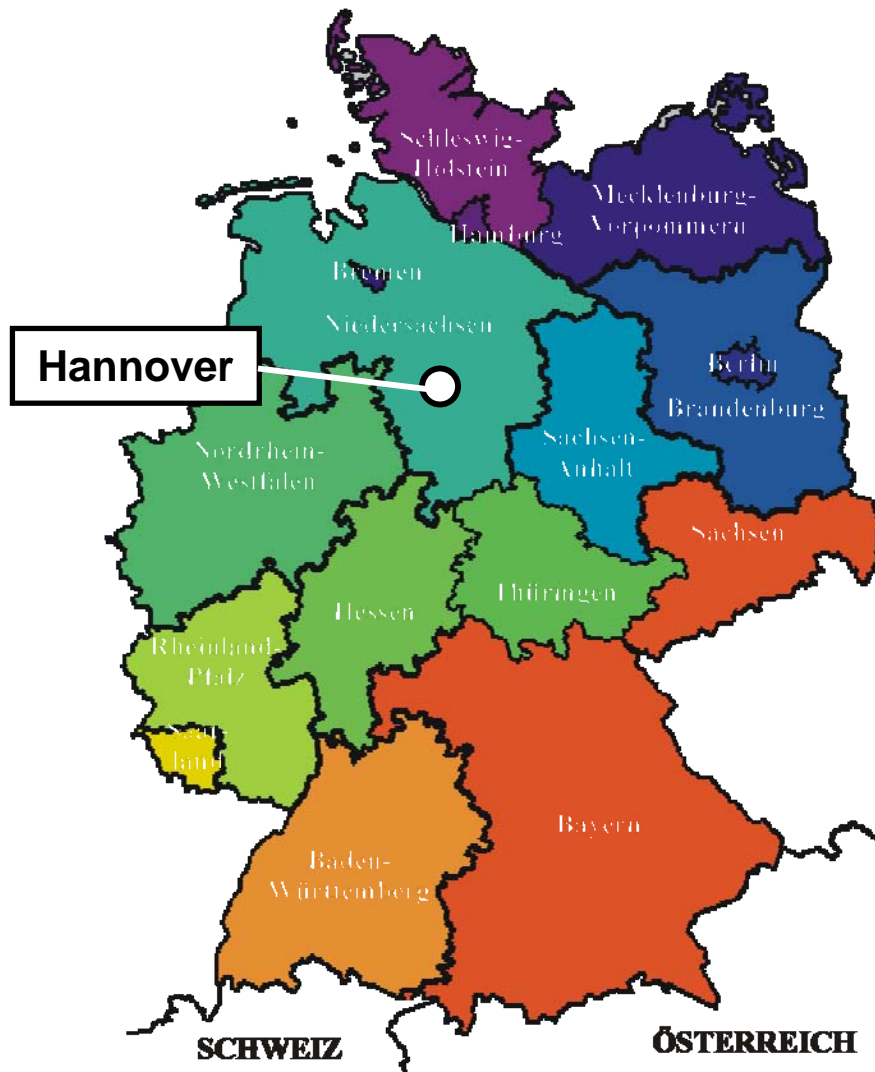


Abbildung 1: Deutschlandkarte mit Lage der Stadt Hannover (im Bundesland Niedersachsen)

Die Stadt Hannover ist die Landeshauptstadt des Bundeslandes Niedersachsen. Sie hat mehr als 510.000 Einwohner. Die hier beschriebene Passivhaussiedlung liegt im Stadtteil „Kronsberg“ im Süd-Osten des Stadtzentrums. Der Kronsberg selbst ist mit knapp 120 m über NN die höchste Erhebung im Stadtgebiet.

Die Passivhaussiedlung besteht aus 32 Reihenhäusern. Sie ist Teil des im Rahmen der Weltausstellung EXPO 2000 neu erstellten Wohngebietes Kronsberg mit bisher etwa 3000 Wohnungen, eigenem Stadtteilzentrum, Einkaufsmöglichkeiten und Stadtbahnanbindung. Die Passivhaussiedlung grenzt an ein Naherholungsgebiet, zwei noch unbebaute Baulandflächen sowie ein bewachsenes Gelände mit einem Wasserhochbehälter. Im Nord-Westen schließt ein Baugebiet mit dreistöckigen Geschößwohnungsbauten an. Die Siedlung steht auf einem von West nach Ost leicht ansteigendem Gelände, zwischen je zwei Häusern gibt es daher einen Versatz von 25 cm.

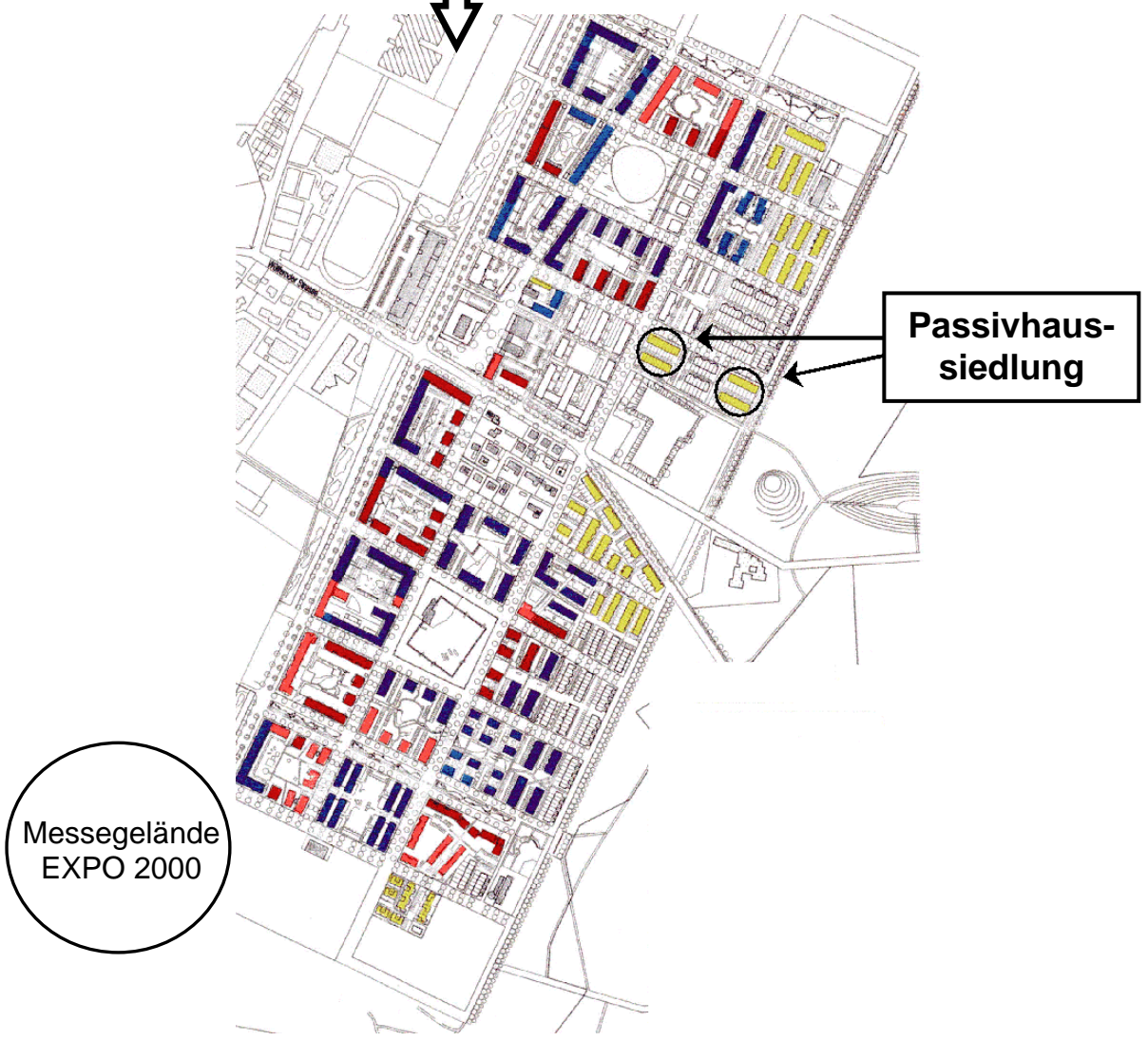


Abbildung 2: Stadtplan von Hannover mit der Lage der Passivhaussiedlung im Stadtteil Kronsberg [Hannover], [Eckert 2000].

Die vier Hauszeilen der Siedlung sind mit einer Abweichung von 15° (Richtung Westen) nach Süden ausgerichtet. Zwischen den jeweils zwei Hausreihen ist für einen zweiten Bauabschnitt noch Platz für 14 weitere Passivhäuser in ähnlicher Ausführung, aber mit grundsätzlich geänderter Haustechnik. Diese Fläche ist im Moment ungenutzt.

Jeweils zwei Hausreihen werden von einem gemeinsamen Technikhaus versorgt, in dem sich die Fernwärmeübergabestation, alle Elektrozähler und der Hauptwasseranschluß befinden.

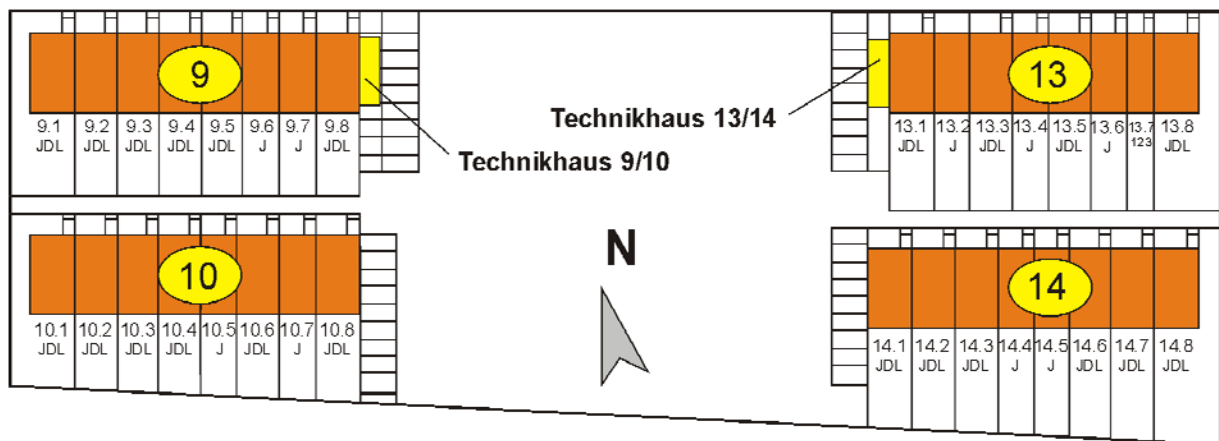


Abbildung 3: Lageplan der Passivhaussiedlung am Kronsberg (Sticksfeld Nr. 30 bis 124). Die Nummern geben die während des Baus und in diesem Bericht verwendete Bezeichnung wieder.

Geografische und klimatische Daten

Siedlungsstandort: Geographische Länge: 9° 44'
 Geographische Breite: 52° 22'
 Geographische Höhe: 90 müNN

Min. Außentemp. Winter: -13,4 °C
 Max Außentemp. Sommer: 31,2 °C

Monat / Jahr	Tagesmittlere Außentemp.			Heizgradtage (bzgl. 18 °C) *	Kühlgradtage (bzgl. 24 °C) *	Monatliche Mittelwerte der Solar- strahlung	Monatliche Mittelwerte der rel. Luftfeuchte
	min	mittel	max	$\sum_{T_m \leq 15^\circ C} (18^\circ C - T_m)$	$\sum_{T_m \geq 24^\circ C} (T_m - 24^\circ C)$		
	[°C]			[Kd]	[Kd]		
Jan.	-13,4	0,0	6,7	559,2	0,00	0,62	87,7
Feb.	-12	0,8	8,2	481,9	0,00	1,26	85,3
März	-3,6	3,8	13,3	440,8	0,00	1,71	79,8
Apr.	-2,7	7,5	19,9	315,2	0,00	3,13	75,9
Mai	1,6	12,3	24,4	167,5	0,00	4,49	70,9
Jun.	5,3	15,0	25,2	61,2	0,00	4,88	75,2
Jul.	7,6	17,1	30,8	32,5	0,00	5,01	75,3
Aug.	7	17,1	31,2	19,7	0,00	3,83	74,0
Sept.	2,6	14,2	28,9	110,1	0,00	2,80	81,1
Okt.	-0,9	9,1	20,2	277,1	0,00	1,44	85,4
Nov.	-6,8	4,9	17,7	391,9	0,00	0,75	85,5
Dez.	-9,9	1,1	12	522,7	0,00	0,51	87,9
Jahr	-13,4	8,6	31,2	3379,8	0,00	0,71	80,3

Tabelle 1: Klimatische Bedingungen am Standort Hannover (gemäß den der Simulation zugrunde liegenden Klimadaten [Schnieders 1998])

* Berechnet mit Tagesmittelwerten

3 Baubeschreibung

3.1 Grundrisse, Gebäudeschnitte und Ansichten

Im ersten Bauabschnitt wurden 1998/1999 in vier Reihenhauszeilen mit je 8 Häusern insgesamt 32 Passivhäuser auf dem Kronsberg errichtet. Es handelt sich um nicht unterkellerte Reihenhäuser mit Satteldach und außenliegendem Abstellraum in Massivbauweise: Decken, Wohnungstrennwände, Giebelwände und die übrige Tragstruktur sind aus Betonfertigbauteilen; hochwärmegeämmte Fassaden- und Dach-Elemente sind Holzfertigbauteil-Konstruktionen. Außerdem wurden dreifachverglaste Fenster mit speziell gedämmtem Fensterrahmen sowie eine Wohnungslüftungsanlage mit sehr hoher Wärmerückgewinnung eingesetzt.

Abbildung 4 zeigt eine Ansicht der Häuser (Südfassade) mit den großen Fensterflächen zur Terrasse auf der Gartenseite. Erkennbar sind der Sichtschutz (Trennwände) im Bereich der Terrasse, die thermischen Solarkollektoren auf dem Satteldach und die Frischluftansaugung auf dem Dach.

Abbildung 5 zeigt einen Ausschnitt einer Reihenhauszeile mit der nördlichen Erscheinungsseite. Hier erkennt man die den Wohnungen vorgelagerten Abstellhäuser und Außenluft- sowie Fortluftöffnung im Giebelbereich des begrünten Daches.



Abbildung 4: Ansichten der Südfassaden der Passivhauszeilen in Hannover-Kronsberg



Abbildung 5: Ansichten der Passivhauszeilen in Hannover-Kronsberg von der Nordseite

Auf dem Kronsberg wurden drei Hausgrößen realisiert:

Haustyp „JDL: Jangster de LUX“,

das breiteste Haus mit 6 m lichtem Innenmaß und 118,3 m² beheizter Wohnfläche nach II. Berechnungsverordnung (Treated Floor Area nach CEPHEUS-Vereinbarung 119,5 m²). Vom Haustyp JDL gibt es insgesamt 22 Häuser, davon 8 Endhäuser.

Haustyp „J: Jangster“

mit 5 m lichtem Innenmaß und 97,3 m² beheizter Wohnfläche (Treated Floor Area nach CEPHEUS-Vereinbarung 96,8 m²). Vom Typ Jangster wurden auf dem Kronsberg 9 Häuser realisiert.

Haustyp „123“

mit nur 3,80 m lichtem Innenmaß und 79,0 m² beheizter Wohnfläche (Treated Floor Area nach CEPHEUS-Vereinbarung 75,1 m²); der Typ 123 ist mit nur einem Haus vertreten.

Abbildung 6 zeigt die Ansicht der Nordseite (Eingangsseite) der drei Haustypen. Wegen einer leichten Neigung des Geländes sind die Häuser gegeneinander in der Höhe versetzt.

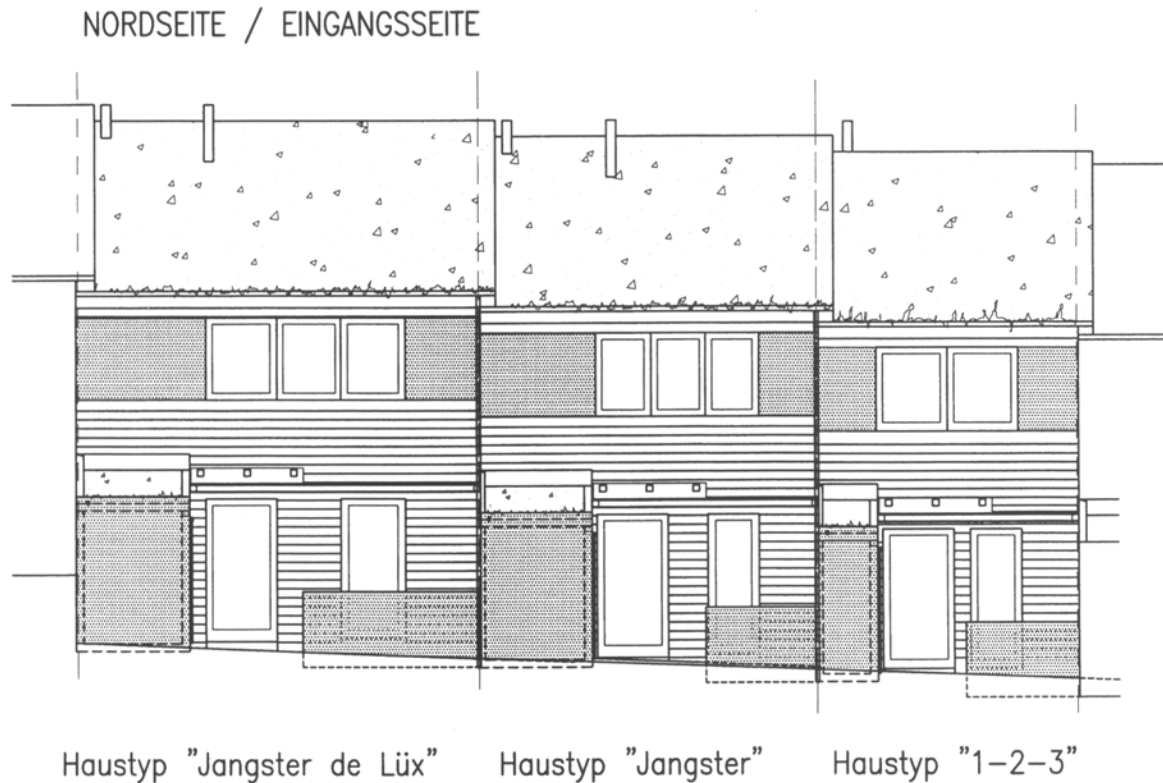


Abbildung 6: Ansicht Nordseite einer Reihenhausezeile Passivhäuser Kronsberg

Abbildung 7 zeigt die Südseite (Gartenseite) mit den jeweils geschosshohen Fenstern. Auch hier ist der Höhenversatz gut erkennbar. Große Südfensterflächen befinden sich vor allem im Erdgeschoß (Wohnzimmer).

Im Längsschnitt (Abbildung 8) sind bereits die wesentlichen Merkmale des Passivhausstandards erkennbar:

- Eine dicke Wärmedämmlage umschließt das gesamte Gebäude.
- Die Fenster mit Dreischeibenwärmeschutzverglasung sind thermisch optimal in die gedämmten Fassadenelemente aus Holztafelbau-Elementen eingebaut.
- Die thermische Hülle wird nur im Giebelbereich durch das Fortluft- und Außenluftrohr durchbrochen sowie durch die Entwässerung durch die Bodenplatte.
- Die Lüftungsanlage sowie die Versorgungsleitungen verlaufen im Technikcontainer im Giebelbereich des Hauses.

SÜDSEITE / GARTENSEITE

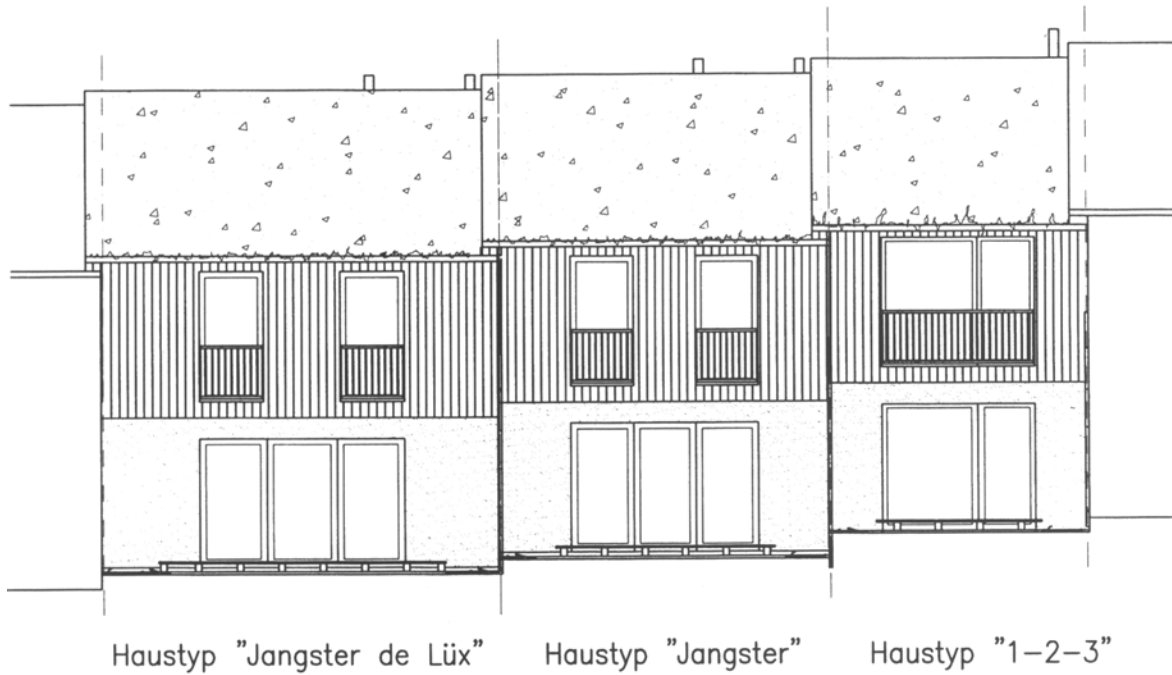


Abbildung 7: Ansicht einer Zeile von der Südseite/Gartenseite

LÄNGSSCHNITT

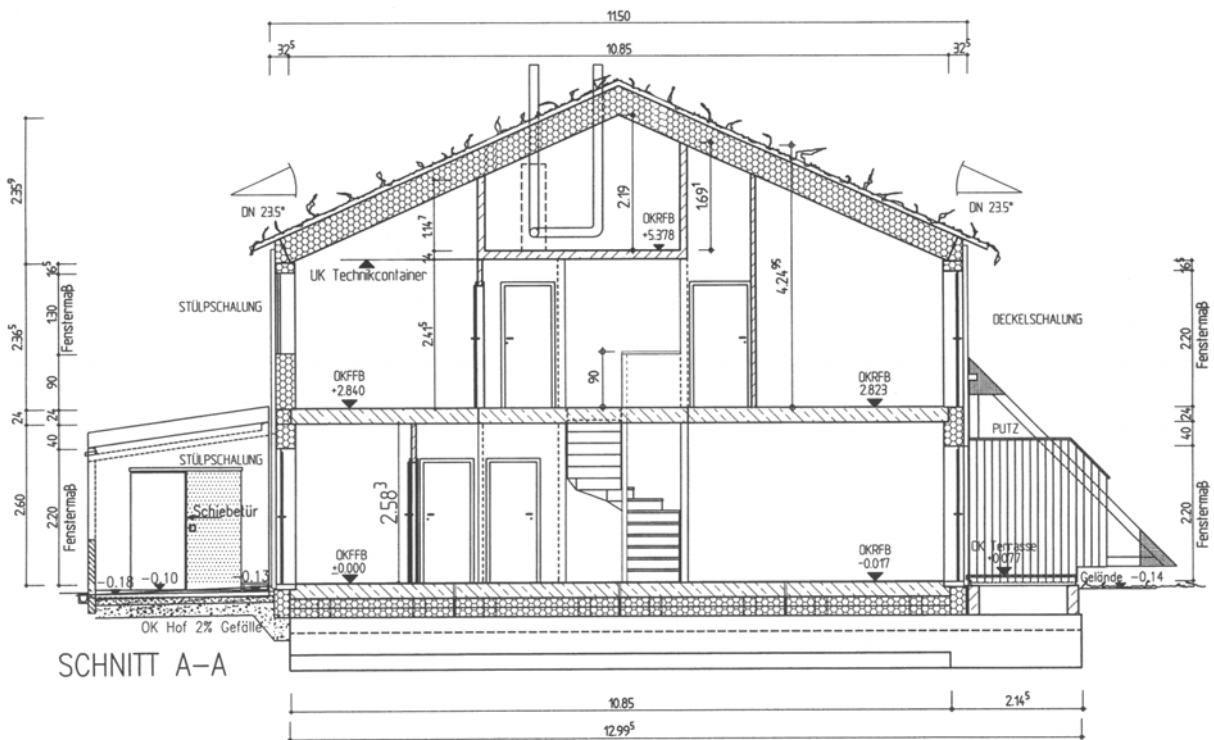


Abbildung 8: Längsschnitt durch eines der Passivhäuser der Reihenanlage auf dem Kronsberg

Abbildung 9 zeigt den Querschnitt durch ein Haus des Typs „Jangster de Lùx“. Die tragende innere Struktur der Häuser besteht aus Beton-Fertigteilen. Die Trennwände zwischen den Reihenhäusern weisen 2 x 120 mm Beton und einen mit Mineralwolle gefüllten Zwischenraum (60 mm) auf. Über eine Treppe erschließt sich das Obergeschoß; der Technik- und Abstellraum im Dachgeschoß ist über eine ausklappbare Dachbodentreppe erreichbar.

QUERSCHNITT

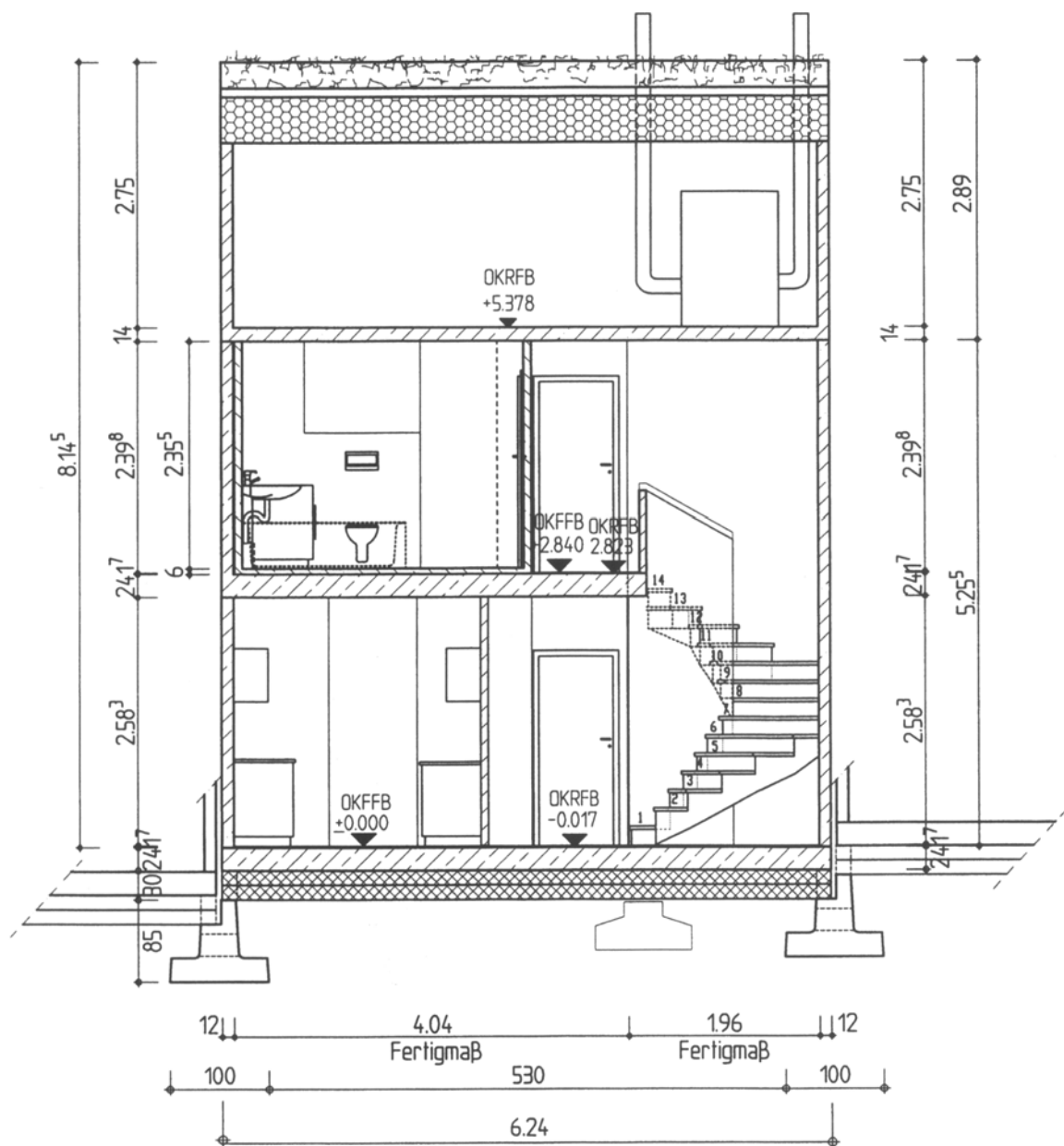


Abbildung 9: Querschnitt durch ein Passivhaus vom Typ Jangster de Lùx

In Abbildung 10 sind die Grundrisse des Haustyps „Jangster de Lùx“ zusammengestellt. Im Erdgeschoß betritt man das Haus über einen Windfang an der Nordseite; nach Osten schließt sich ein Abstellraum und das Gäste-WC, nach Westen ein Esszimmer mit eigenem Zugang zu einem Freiplatz auf der Nordseite an.

In der Mittelzone des Erdgeschosses befinden sich die Funktionsräume: im Osten Erschließung und Treppe, im Westen die Küche. Auf der Südseite schließt sich ein großzügiges Wohnzimmer mit einer Tür zur Terrasse an.

Über eine 180° gewendete Treppe gelangt man in das Obergeschoß. Auch hier liegen in der Mittelzone Funktionsräume: die Fertig-Bad-Zelle, Flur und Abstellraum. Im Norden des OG läßt sich ein Schlafzimmer einrichten; auf der Südseite sind zwei Kinderzimmer.

Über die ausklappbare Geschoßtreppe gelangt man in das Dachgeschoß. Hier ist die Versorgungstechnik untergebracht, und der übrige Teil des Raumes läßt sich weiterhin als Abstellraum nutzen. Die nichttragende Innenwände sind beliebig zu gestalten, sodaß es auch Häuser mit separatem Esszimmer gibt oder solche mit ganz offenem EG Bereich.

Abbildung 11 zeigt die Grundrisse des Haustyps Jangster, die das gleiche Raumprogramm mit einem schmaleren Grundriß aufweisen. Im Obergeschoß kann eine Schrankwand raumsparend als Trennung der beiden Kinderzimmern eingesetzt werden.

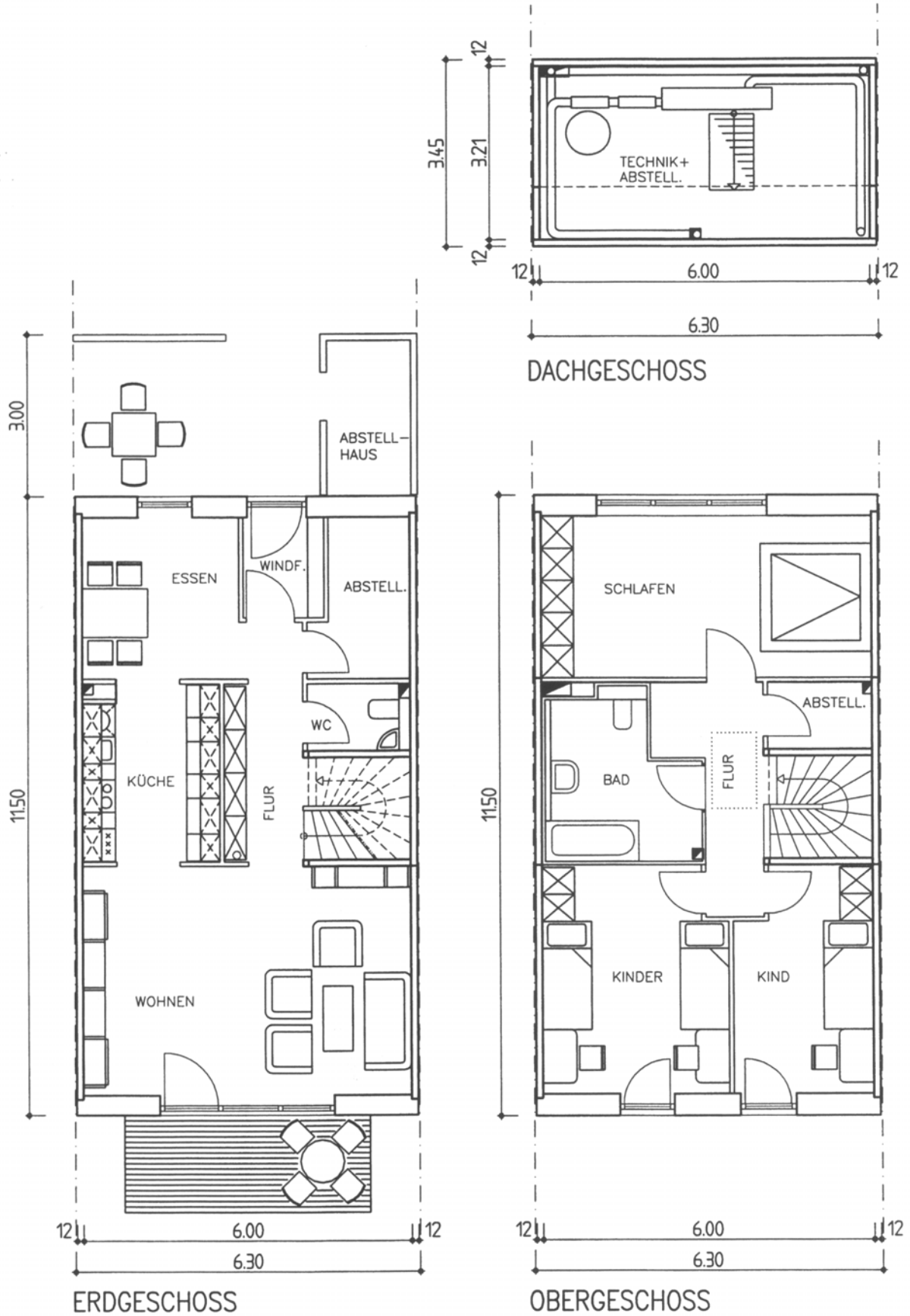


Abbildung 10: Grundrisse des Hauses vom Typ Jangster de Lüz (Passivhäuser Kronsberg)

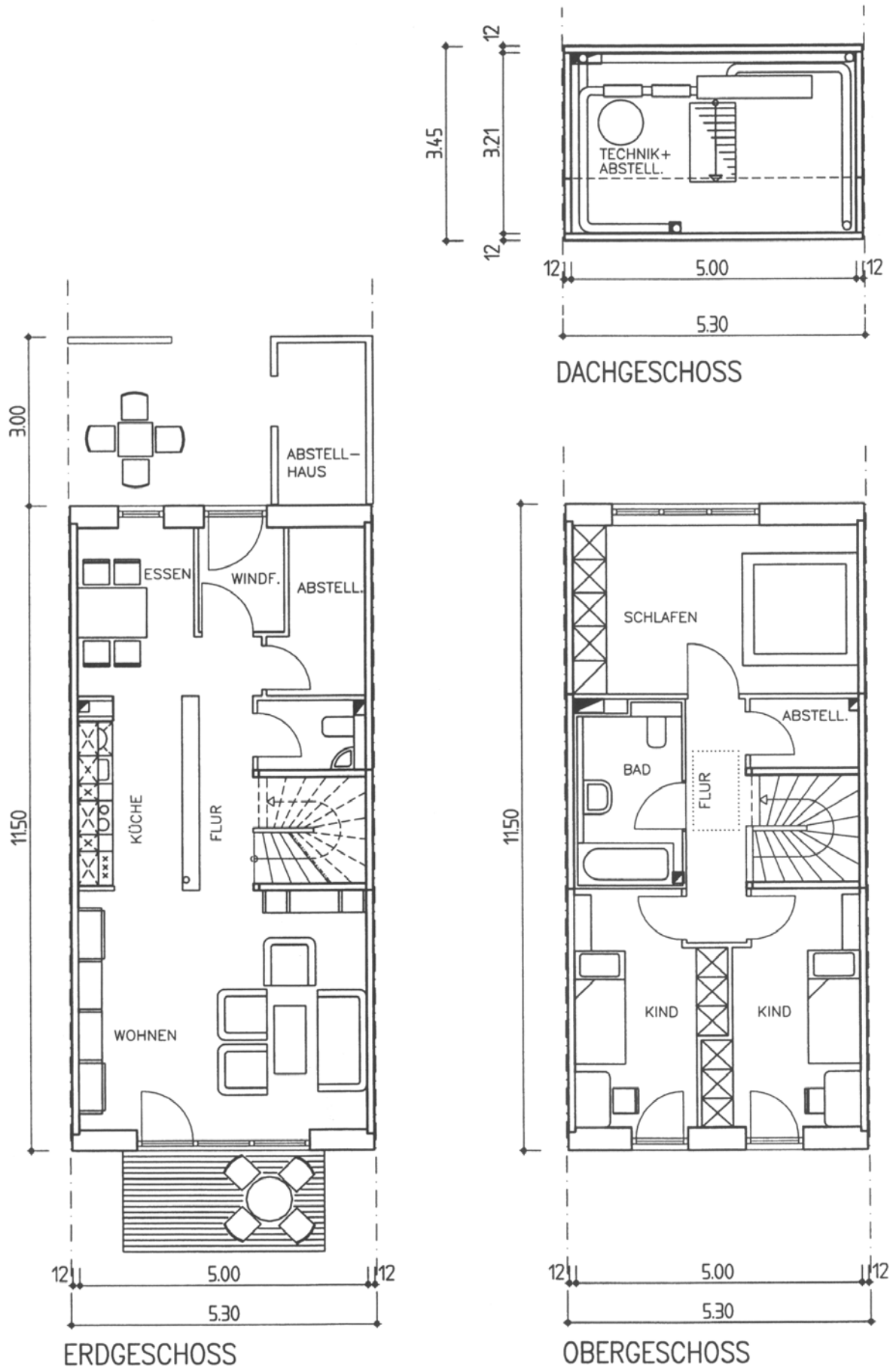


Abbildung 11: Grundrisse des Hauses vom Typ Jangster (Passivhäuser Kronsberg)

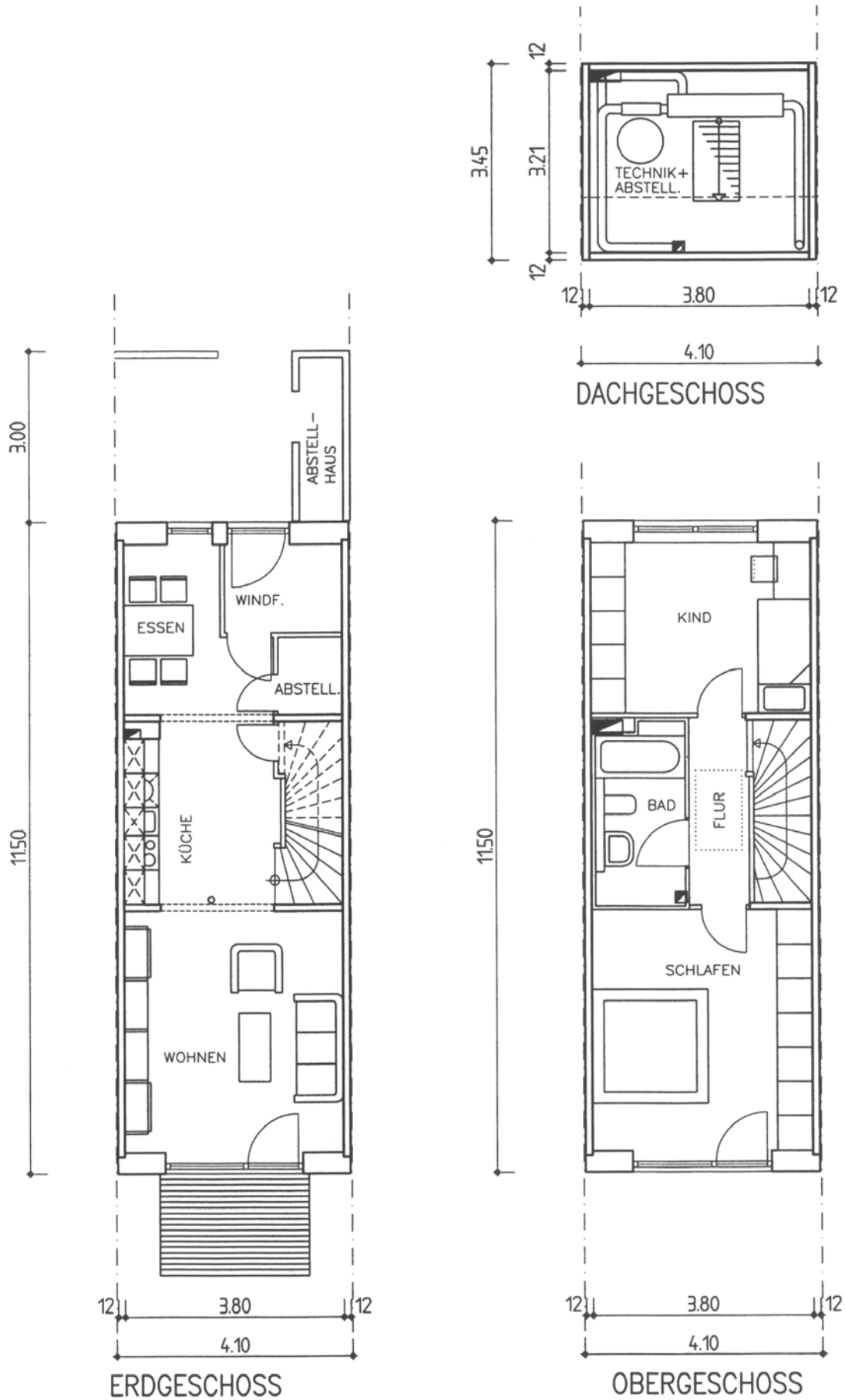


Abbildung 12: Grundrisse des Hauses vom Typ „123“ (Passivhäuser Kronsberg)

Abbildung 12 zeigt die Grundrisse des kleinsten Haustypes „123“ mit einer lichten Breite von nur 3,80 m. Hier gibt es im Obergeschoß nur ein Kinderzimmer und ein Schlafzimmer, im übrigen ist es aber gelungen, das gleiche Raumprogramm unterzubringen.

3.2 Angaben zur Energiebezugsfläche Passivhäuser Hannover Kronsberg

Objekt	Beheizte Wohnfläche nach II. BVO	Energiebezugsfläche „treated floor area TFA“ nach vereinbartem EU-Berechnungsmodus	Bezugsfläche nach deutscher Wärmeschutzverordnung 1995
Jangster de Lük MH	118,3	119,5	153,3
Jangster de Lük EH	118,3	119,5	164,3
Jangster	97,3	96,8	128,7
„123“	79,0	75,1	99,2

3.3 Beschreibung der Bauweise

Alle Reihenhauserzeilen sind in Mischbauweise ausgeführt:

- tragender innerer Kern aus Stahlbeton-Fertigteilmwänden mit Stahlbetondecken und Wohnungstrennwänden aus zweischaligen Fertigbetonbauteilen,
- wärmedämmende Hülle bei den Nord- und Südfassaden und beim Dach aus hochgedämmten Holzfertigbauteilen, selbsttragend, mit im Werk eingebauten Fenstern und Luftdichtung durch Polyäthylen-Folien,
- Wärmedämmung der Giebelwände mit einem 400 mm starken Wärmedämmverbundsystem auf Betonfertigbauteile.

3.4 Regelquerschnitte der Außenbauteile

Abbildung 13 zeigt die Regeldetails der hochwärmedämmenden Gebäudehülle:

- Das Dach aus vorgefertigten Holz-Tafelbau-Elementen mit 400 mm hohen Doppel-T-Trägern, die von Trennwand zu Trennwand gespannt sind. Die Gefache zwischen den Pfetten sind vollständig werkseitig mit Mineralwolle gedämmt. Das Dach trägt auf einer Spanplatte einen Gründach-Aufbau. Die luftdichte Ebene bildet eine PE-Folie auf der Innenseite.

- Die Außenwand-Elemente für die Nord- und Südfassade sind ebenfalls aus vorgefertigten Holz-Tafelbauteilen. Hier werden als Stiele vom Zimmereibetrieb selbst gefertigte sogenannte „halbe Boxträger“ verwendet, welche ebenfalls eine wärmebrückenfreie Holzkonstruktion ermöglichen. Die luftdichte Ebene bildet ebenfalls eine PE-Folie auf der Innenseite.
- Die Außenwand der Giebelseiten besteht dagegen wie die Wohnungstrennwände aus einem tragenden Stahlbetonelement. Dieses wird von außen mit einem 400 mm starken Wärmedämmverbundsystem aus Polystyrol-Hartschaum (EPS) gegen Wärmeverluste geschützt. Die luftdichte Ebene wird bei der Giebelwand durch den Beton selbst übernommen.
- Die Bodenplatte besteht aus 240 mm Stahlbetonplatten, die an der Unterseite mit 300 mm (bei den Endhäusern sogar 420 mm) Polystyrol-Hartschaum (EPS) werkseitig gedämmt sind. Auch hier bildet die Betonplatte selbst die luftdichte Ebene.

Entscheidend für das Erreichen des Passivhausstandards ist nicht allein die gute Dämmung der Hüllflächenbauteile im Regeldetail, sondern vor allem der wärmebrückenfreie und luftdichte Anschluß der Bauteile aneinander. Bei der Planung der Passivhäuser auf dem Kronsberg wurde besondere Sorgfalt auf diese Anschlußdetails gelegt. Alle Anschlüsse wurden mit mehrdimensionalen Wärmestromberechnungen auf ihre Wärmebrückenwirkung untersucht; die Berechnungen sind bereits an anderer Stelle publiziert und ausführlich diskutiert worden [Baffia 1999]: Das Projekt dient als Musterbeispiel für das Grundprinzip des wärmebrückenfreien Konstruierens. Die Ergebnisse werden hier für eine vollständige Projektdokumentation aufgenommen.

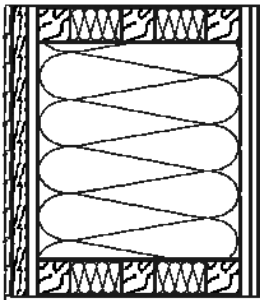
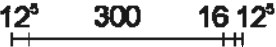
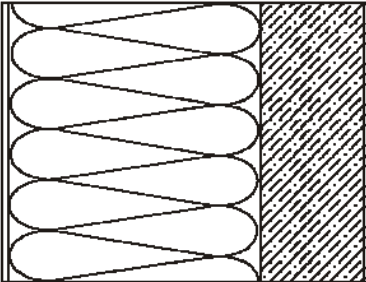

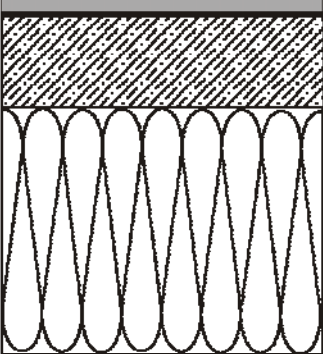

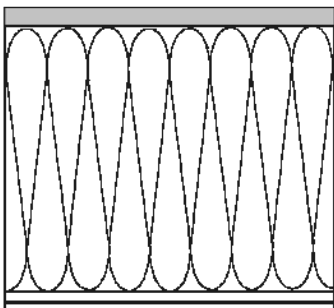
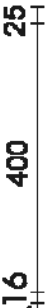
 <p style="text-align: center;"> 12^s 300 16 12^s  </p>	<p>Außenwand (Süd- und Nordfassade) Holz-Fertigbauteil-Tafelbauelement Gipskartonplatte Spanplatte Mineralwolledämmung/Halbboxträger Spanplatte hinterlüftete Brettverschalung $U = 0,126 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$</p>
 <p style="text-align: center;"> 10 400 165  </p>	<p>Außenwand (Giebelseite) Betonfertigbauteil (165 mm) mit nachträglich angebrachtem Wärmedämmverbundsystem (400 mm) aus Polystyrol-Hartschaum EPS, außen verputzt $U=0,097 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$</p>
 <p style="text-align: right;"> 150 5 20 $300-420$  </p>	<p>Bodenplatte Holzfußboden Trittschalldämmung (5 mm PE-Schaum) Betonplatte (150 mm) Dämmstoff (300 mm/420 mm Endhäuser) $U=0,125 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (Mittelhäuser) $U=0,091 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (Endhäuser)</p>
 <p style="text-align: right;"> 25 400 12^s 16  </p>	<p>Dachaufbau Gipskartonplatte 12,5 mm Spanplatte 19 mm Mineralwolle 400 mm/Stegträger Spanplatte 25 mm Dachabdichtungsbahn Gründachaufbau $U=0,095 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$</p>

Abbildung 13: Die Regeldetails der Gebäudehülle der Passivhäuser Hannover-Kronsberg

3.5 Darstellung von Anschlußdetails: Luftdichtheit und wärmebrückenfreies Konstruieren

Abbildung 14 zeigt den Anschluß zweier versetzter Dachflächenelemente von aneinandergrenzenden Häusern oberhalb der Haustrennwände; der Versatz beträgt 250 mm; die vorgefertigten Holztafelbauelemente bilden geschlossene Tafeln, die jeweils mit einer Spanplatte abgeschlossen werden; sie enden jeweils an der Fugenkante der Betontrennwände. Die Trennfuge ist mit Mineralwolle (60 mm) ausgefüllt. Um eine wärmebrückenfreie gedämmte Hülle zu erhalten, wird auf dem tiefer liegenden Dachelement ein ausgedämmter Kasten (h x b 250 mm x 290 mm) aufgelegt.

DACH / VERSPRUNG / ORTGANG

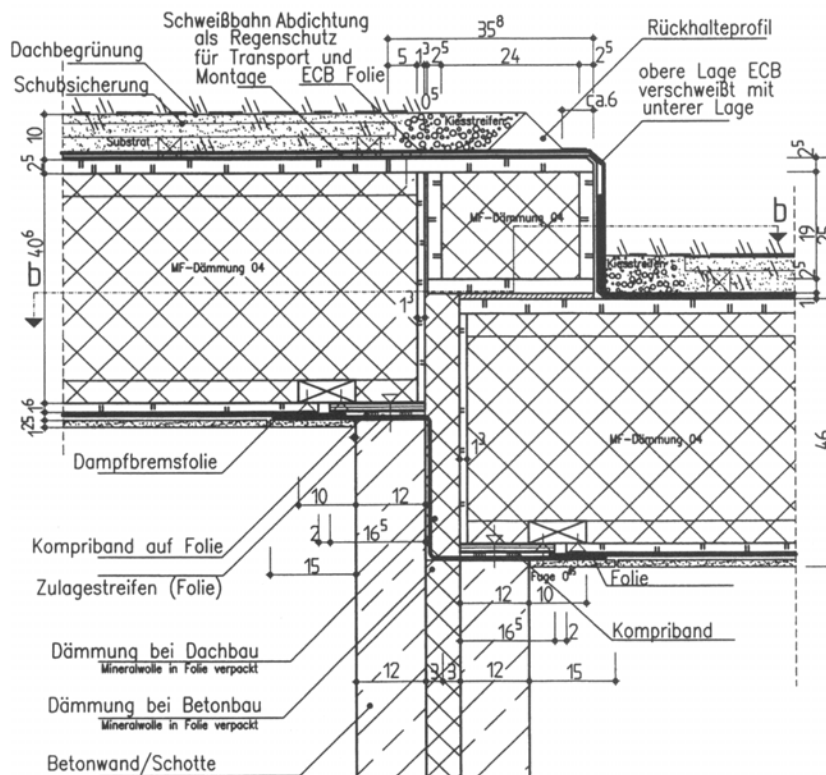


Abbildung 14: Wärmebrückenfreier Anschluß zweier versetzter Dachelemente mit Versprung

Dadurch wird ein vollflächiger Anschluß der Dämmebenen erreicht; das Isothermenbild zeigt die nur geringe Störung im Verlauf. Der Wärmebrückenverlustkoeffizient Ψ dieses Anschlußdetails beträgt $-0,002 \text{ W/(mK)}$ für das obere und $+0,007 \text{ W/(mK)}$ für das untere Haus; das Detail erfüllt damit die Bedingung „wärmebrückenfrei“.

Die Luftdichtheit wird durch PE-Folien hergestellt, die zugleich Dampfbremsen sind. Bereits vor dem Auflegen der Dachelemente ist der Folienstreifen voll über die beiden Betontrennwände gelegt worden. Er bildet die gemeinsame luftdichtende

Hülle der beiden Nachbarhäuser und dichtet auch die Trennwandfuge nach außen ab. Auf die Folienstreifen werden die vorgefertigten Dachelemente mit dazwischengelegten Kompribändern aufgelegt. Die im Dachelement bereits integrierte Dampfbremsfolie wird auf diesem Weg dauerhaft luftdicht mit dem Folienstreifen verbunden. Zugleich wird durch den Anpreßdruck auch eine ausreichende individuelle Luftdichtheit der Einzelhauses gegenüber dem Nachbarhaus erreicht.

Abbildung 15 zeigt den Anschluß des Dachelementes beim Endhaus-Ortgang an die Giebelwand mit Wärmedämmverbundsystem. Das Dachelement steht hier 345 mm über die Betonwand über. Das Wärmedämmverbundsystem (WDVS) wird von unten an die Spanplatte des Dachelementes herangearbeitet. Die Stirnfläche des Dachelementes ist mit einer 55 mm starken Dämmplatte des WDVS überdämmt. Das zugehörige Isothermenbild zeigt auch hier einen wärmebrückenfreien Anschluß mit einem Ψ -Wert von $-0,055 \text{ W}/(\text{mK})$. Dieser Wert ist so gering, daß dadurch sogar andere (positive) Wärmebrückeneffekte kompensiert werden.

DACH / ENDHAUS / ORTGANG

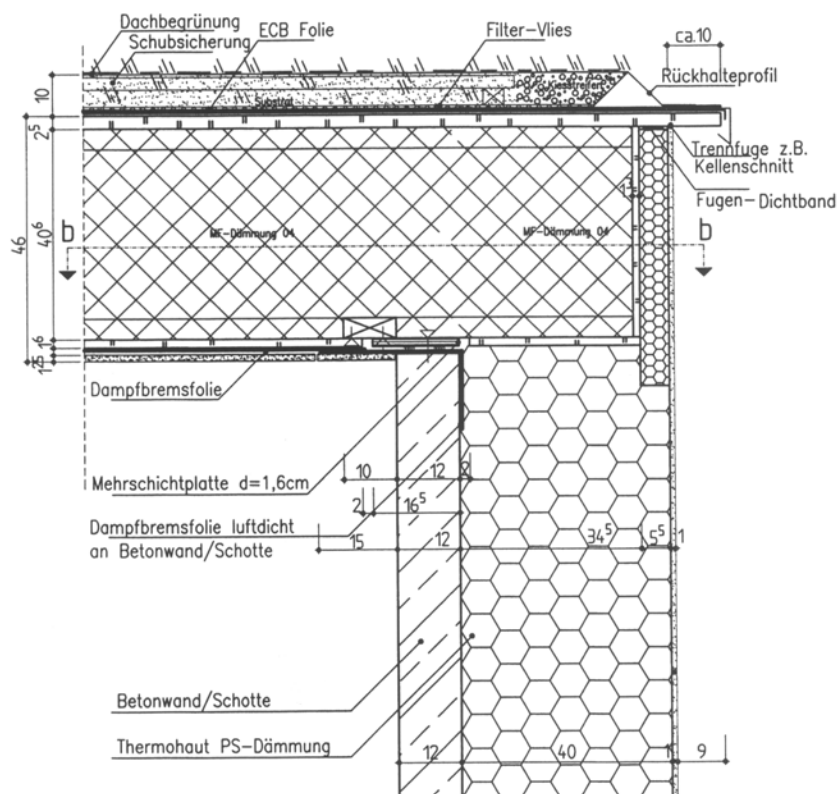


Abbildung 15: Wärmebrückenfreier Anschluß Wärmedämmverbundsystem der Giebelwand an das Leichtbau-Dachelement

Zur Herstellung der luftdichten Ebene wird hier (wie bei der Trennwand) ein Folienstreifen über die Betonkante gelegt, die in diesem Fall auf der Außenseite mit

der Betonwand verklebt wird. An diesen Folienstreifen wird die Dampfbremssfolie des Dachtafelbauelementes luftdicht angeschlossen.

Abbildung 16 zeigt den Anschluß der beiden Dachelemente im Bereich des First. Das Prisma im Bereich des Stoßes wird bauseits mit Mineralwolle ausgefüllt und mit einer Mehrschichtplatte abgedeckt. Die beiden in die Dachelemente integrierten Folien werden dauerhaft luftdicht verklebt. Die obersten 100 mm Gipskartonstreifen werden erst ganz nach Abschluß der Arbeiten eingesetzt. Für diesen Anschluß wurde ein Ψ -Wert von $-0,014 \text{ W/(mK)}$ ermittelt; auch hier ist die Bedingung „wärmebrückenfrei“ erfüllt.

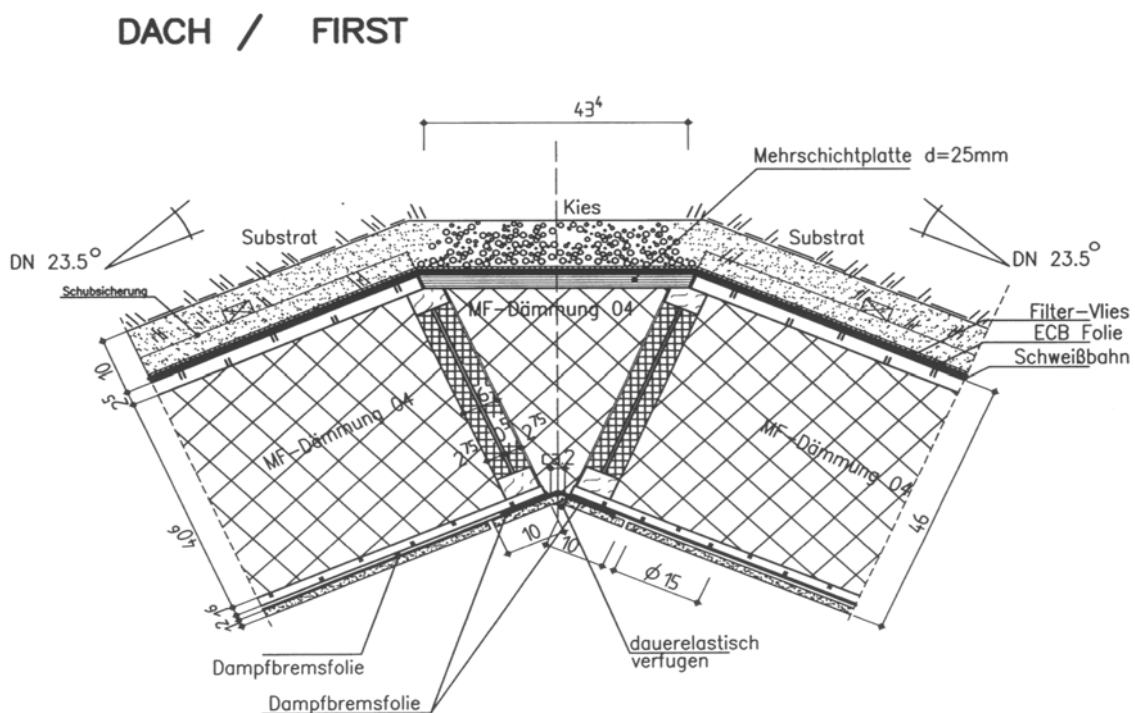


Abbildung 16: Wärmebrückenfreier Firstanschuß

Der Anschluß der Dachelemente an die Wandelemente der Fassade ist in Abbildung 17 dargestellt. Auch hier wird eine lückenlose nicht durchstoßene Dämmhülle erreicht. Der Ψ -Wert dieses Anschlußdetails wurde zu $-0,052 \text{ W/(mK)}$ berechnet und führt ebenfalls zu einer nicht unbedeutenden Reduktion der Gesamtwärmeverluste des Hauses gegenüber naiver Berechnung mit Außenoberflächen. Die Luftdichtheit wird auch hier durch das Verkleben der beiden luftdichtenden Folien von Dach- und Wandelement erreicht; dazu wird im Wandelement ein Gipskartonstreifen erst nachträglich eingebaut, nachdem die luftdichte Verklebung hergestellt wurde.

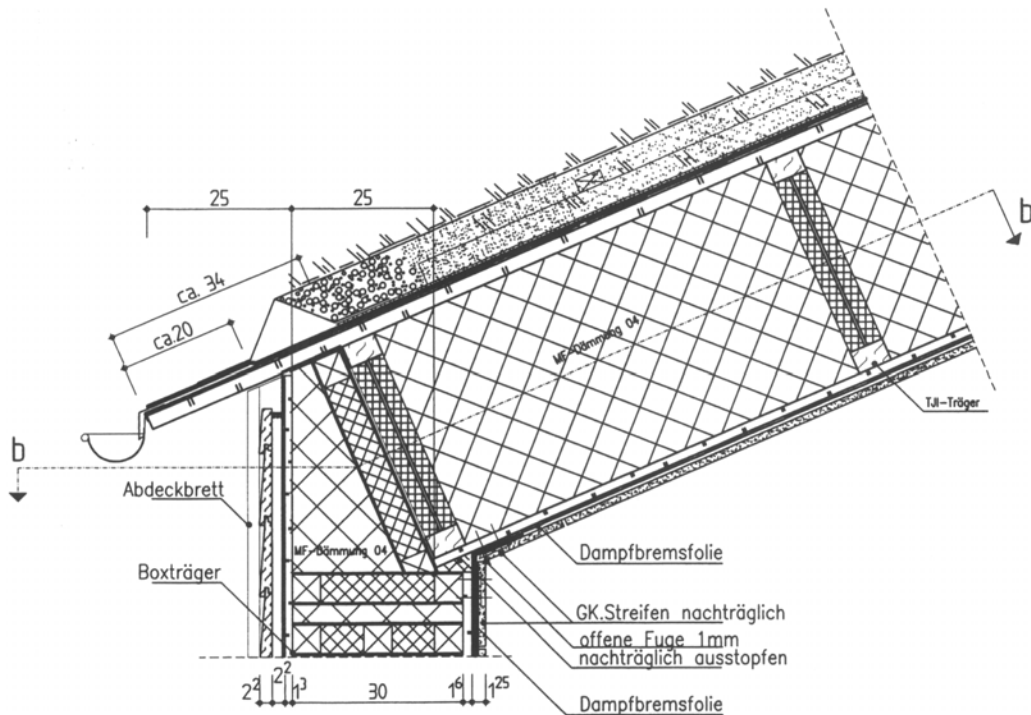
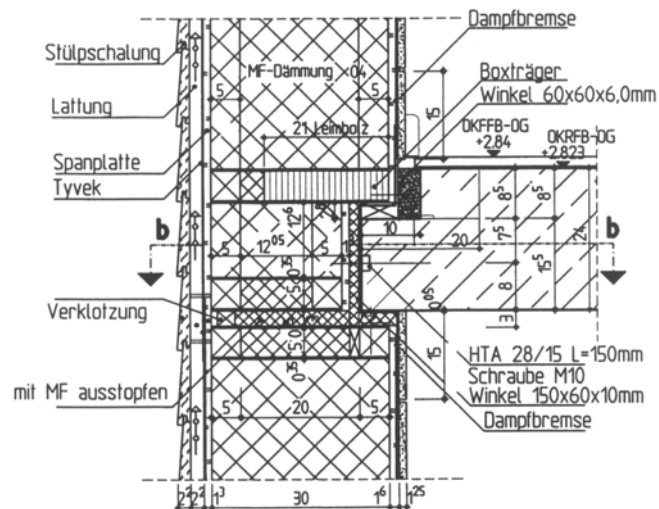


Abbildung 17: Wärmebrückenfreier Traufanschluß der Dachelemente an das Fassadenelement

Abbildung 18 zeigt den Anschluß der beiden Fassadenelemente von Erdgeschoß und Obergeschoß im Bereich der Beton-Geschoßdecke. Die Geschoßdecke ragt um etwa 50 mm in die Dämmebene der Holztafelbauelemente hinein. Dadurch, und durch den Leimbinder, der zur Lastaufnahme der OG-Außenwand benötigt wird, entsteht ein gewisser Wärmebrückeneffekt mit $\psi = 0,015 \text{ W}/(\text{mK})$; formal ist hier die Zielsetzung „wärmebrückenfrei“ nicht erreicht; der Effekt wird jedoch durch die Minusbeiträge von First und Traufe überkompensiert; allerdings ergab die Qualitätssicherung vor Ort, daß die Holzanteile an dieser Stelle höher sind als bei der Berechnung angenommen und daß die Zusatzdämmung bauseits vielfach nicht die gewünschte Qualität erreicht hat. Dies führt wahrscheinlich zu etwas höheren Wärmeverlusten, als berechnet. Die Luftdichtheit wurde durch Verkleben der beiden in die Fassadenelemente integrierten Dampfbremsfolien auf der Oberseite der Decke erreicht; die Klebestelle wird in der Aussparung der Betondecke versteckt.

Der Anschluß der Fassadenelemente an die Giebelwand mit Wärmedämmverbundsystem wird in Abbildung 19 gezeigt. Wieder steht die Betonwand etwa 50 mm in die Dämmebene des Fassaden-Tafelbauelementes hinein. Das Isothermenbild zeigt eine völlig gleichmäßige Leitung der Isothermen um die Kante herum. Der Anschluß ist mit $\Psi = -0,054 \text{ W}/(\text{mK})$ wärmebrückenfrei. Die Luftdichtheit ist ähnlich wie bei Abbildung 15 durch einen außen auf die Betongiebelwand aufgeklebten Folienstreifen, der mit der Dampfbremsfolie des Fassadenelementes verbunden wird, sichergestellt.



FASSADE EG – OG

Abbildung 18: Einbindende Beton-Geschoßdecke zwischen Erd- und Obergeschoß (Nordseite)

FASSADE / THERMOHAUT

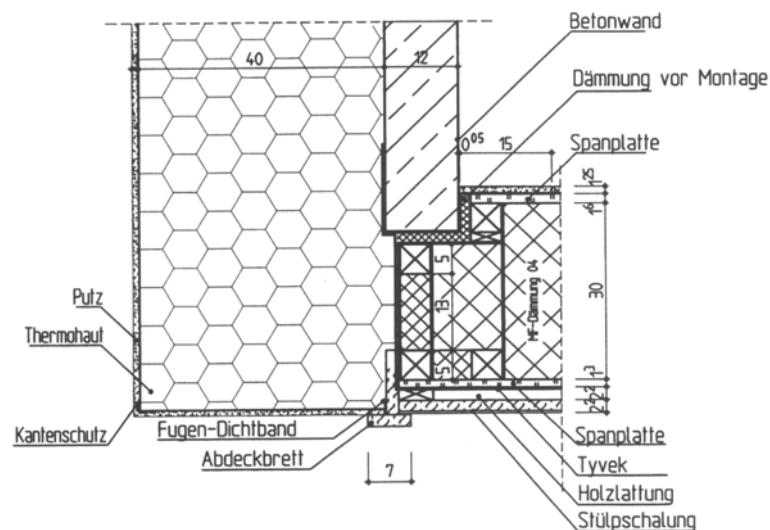


Abbildung 19: Anschluß der Fassadenelemente an die Giebelwand

Abbildung 20 zeigt den Anschluß der Fassadenelemente zweier benachbarten Reihenhäuser im Bereich der Wohnungstrennwände. Im Bereich des Elementstoßes werden 100 mm Zwischenraum zwischen den Elementen bauseits mit Mineralwolle gedämmt. Die Luftdichtheit wird auch bei diesem Detail durch einen zuvor über die Betontrennwände verlegbaren Folienstreifen hergestellt – diese wird mit den in den Fassadenelementen integrierten Folien verklebt.

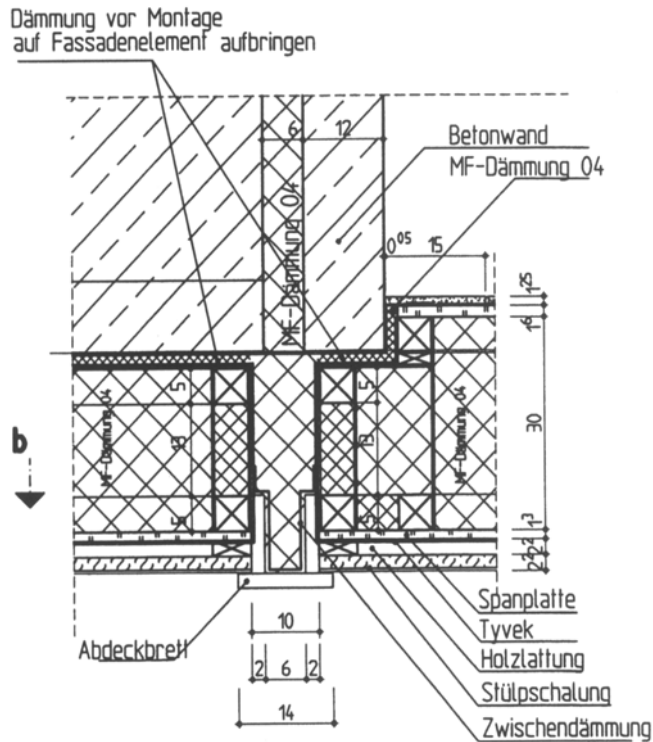
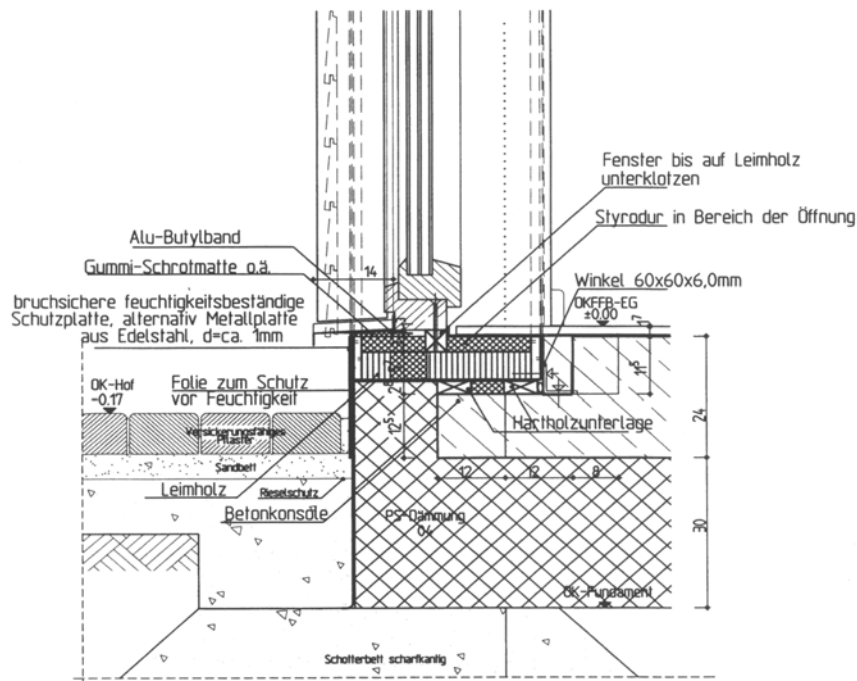


Abbildung 20: Anschluß Fassadenelemente an den Haustrennwänden (links Versprung der Schnittebene in die Geschoßdeckenplatte)



FASSADE EG / SOCKEL

Abbildung 21: Anschluß der Fassadenelemente an die Bodenplatte

Abbildung 21 zeigt den Anschluss des aufsteigenden Fassaden-Elementes an die Bodenplatte. Die Bodenplatte wird über einzelne Fundamentklötze abgetragen. Die

Betonkonsolen sind nur stellenweise zur Lastabtragung vorhanden. Auch hier ist der untere Boxträger durch einen Leimholzbinder verstärkt.

Das Fenster sitzt so in der Fassade, daß die Befestigung durch Verklotzung auf dem Leimholzbinder möglich ist. Die Dämmung im Fensterrahmen geht lückenlos in die Dämmung zwischen den Holmen des Boxträgers über. Die Dämmung auf der Stirnseite der Bodenplatte wird bauseits angebracht.

Abbildung 22 zeigt die in der Siedlung eingesetzten Warmfenster der Firma Pazen. Erstmals wurden hier Holz/Alu-Rahmen mit PU-Kern eingesetzt; für diese neue Konstruktion, die auch bei anderen CEPHEUS-Projekten eingesetzt werden sollte, mußte eine gekoppelt thermisch-hygrische Berechnung zum Tauwasserschutz durchgeführt werden (vgl. [Schnieders 1999]). Erstmals wurde eine Dreischeibenwärmeschutzverglasung mit 2 * 15 mm Scheibenabstand und Argonfüllung eingesetzt: „Während der Planungsphase für die deutschen Cepheus-Projekte stieg der Preis des Fenster-Füllgases Krypton innerhalb kurzer Zeit stark an. In Zusammenarbeit mit der Firma Vegla gelang es, eine 3fach-Wärmeschutzverglasung zu entwickeln, die mit dem kostengünstigeren Füllgas Argon auskommt. Diese Verglasung besitzt nahezu die gleichen U-Werte wie die bisher verwendeten kryptongefüllten Gläser und ist damit passivhausgeeignet. Durch diese Entwicklung konnte eine Kostensteigerung beim Bau von Passivhäusern vermieden werden.“ (vgl. CEPHEUS, techn. Bericht Nr. 3). Der Verglasungs-U-Wert wurde mit $0,75 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angesetzt, der g-Wert beträgt 60% (Glastyp: Climatop Solar der Firma VEGLA / Aachen). Der Rahmen-U-Wert beträgt $U_f = 0,57 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, der Ψ -Wert der Glaskante $0,03 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (verwendet wurde der thermisch trennende „Swiss-Spacer“ der Firma Saint Gobain Swiss) und der Einbau- ψ -Wert $0,03 \text{ W}/(\text{mK})$. Daraus resultiert ein mittlerer effektiver U-Wert der Fenster von $U_w = 0,83 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ im Haus Jangster de lüx.

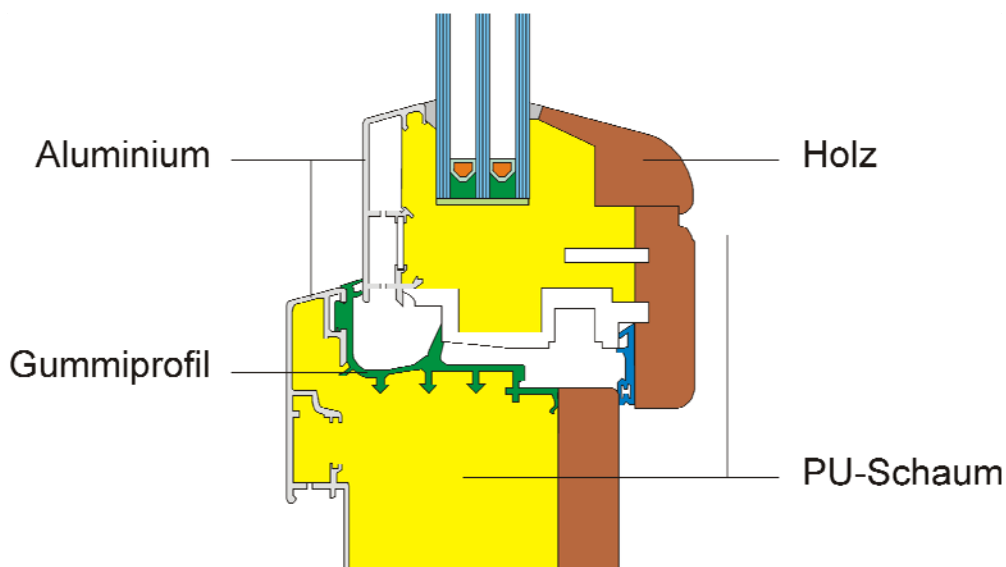


Abbildung 22: Die Fenster in der Passivhaussiedlung auf dem Kronsberg

Für den Einbau der Fenster in die Holztafelbauelemente wurde eine neue, besonders wärmebrückenreduzierte Lösung entwickelt: Entscheidend ist dafür, daß die Wärmedämmung im verwendeten Fensterrahmen der Firma Eurotec lückenlos an die Wärmedämmung im Holztafelbauelement anschließt. Hierbei würde ein rundumlaufender Leimholzrahm in der Fensterlaibung eine bedeutende Wärmebrücke ($\Psi_{\text{Einbau,alt}}=0,043 \text{ W}/(\text{mK})$) bilden; dies war beim Vorläuferbauprojekt rechnerisch nachgewiesen und durch thermografische Aufnahmen bestätigt worden [Schnieders 1998a]. Um diese Wärmebrücke zu vermeiden, hat das PHI dem Bau-träger eine Alternativausführung in der Laibung vorgeschlagen, welche auf einem Spezial-Boxträgerelement mit drei Holmen beruht (Abbildung 23). Bei diesem Einbau besteht eine durchgehende Dämmschicht zwischen der Dämmung des Fenster-rahmens und jener des Tafelbauelementes; daher ist der Wärmebrückenverlust-koeffizient deutlich verringert und beträgt nur noch $\Psi=0,026 \text{ W}/(\text{mK})$.

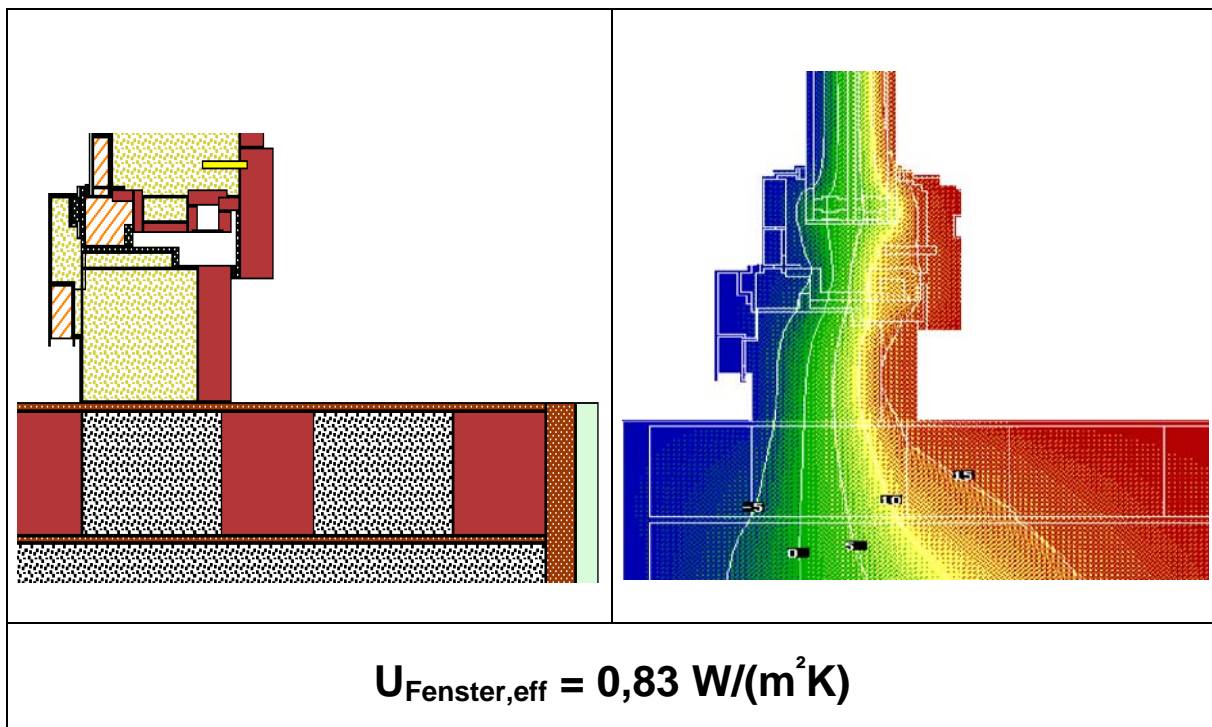


Abbildung 23: Anschluß des Fensters in der Laibung mit Spezial-Boxträger (aus [Baffia 1999])

Für die Wärmeverluste bedeutend sind bei dieser Siedlung auch die Betonunterzüge, die aus statischen Gründen in die Betonelemente der Erdgeschoß-Bodenplatte integriert wurden (Abbildung 24). Trotz einer Überdämmung ist der zusätzliche Wärmeverlust hier erheblich ($\Psi=0,022 \text{ W}/(\text{mK})$) und im Fall der schlechter gedämten Mittelhäuser sogar noch höher ($\Psi=0,032 \text{ W}/(\text{mK})$).

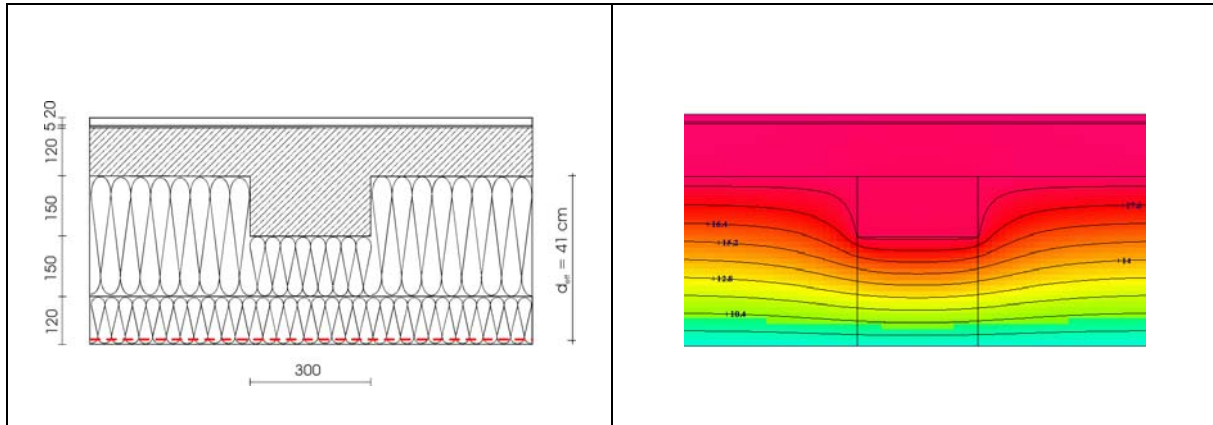


Abbildung 24: Betonunterzug in der Dämmung der Bodenplatte (Endhaus)

Um erhebliche Wärmebrückenwirkungen durch die Betonwände zu vermeiden, wurden die Häuser nur punktförmig mit den Unterzügen an insgesamt 16 „Höckern“ auf die Streifenfundamente aufgelegt. Die Berechnung dieses Details war nur mit einem dreidimensionalen Wärmeströmungsmodell möglich. Abbildung 25 zeigt die Lösung. Die punktförmige Wärmebrückenwirkung ist zwar beträchtlich (Stahlbeton); verteilt man den resultierenden Zusatzwärmeverlust aber auf die gesamte Länge des Streifenfundamentes, so ergibt sich ein effektiver Ψ -Wert von $0,09 \text{ W}/(\text{mK})$. Dieser Wert erfüllt zwar nicht die Bedingung der Wärmebrückenfreiheit; aber das Ergebnis ist für die Passivhäuser insgesamt zufriedenstellend.

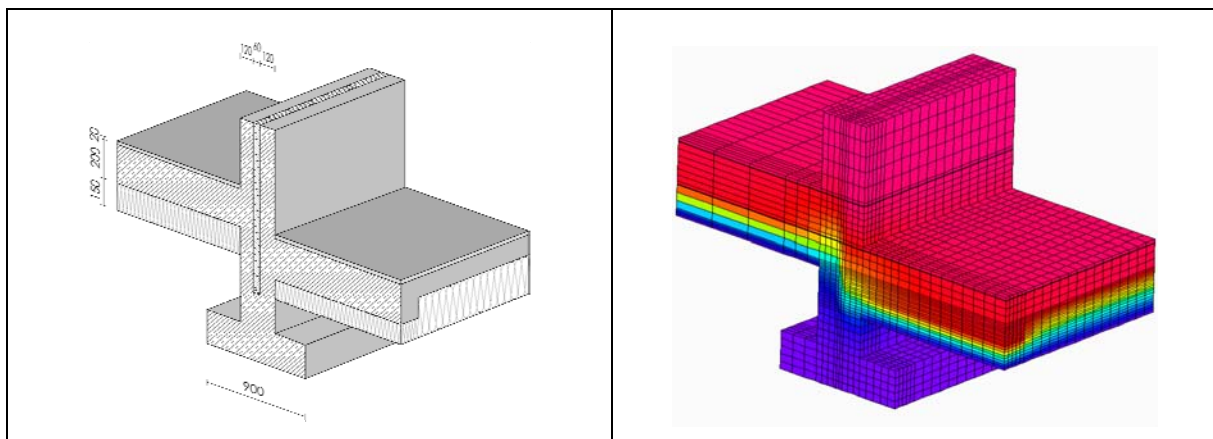


Abbildung 25: Aufsetzen der Häuser auf Höcker

4 Lüftungskonzept

Jedes der 32 Passivhäuser verfügt über ein eigenes autarkes Lüftungsgerät mit Wärmeübertrager zur Wärmerückgewinnung, welches vom Nutzer selbst bedient werden kann. Das Gerät befindet sich im Technikraum unter dem Dach; Außen- und Fortluft werden direkt über Dach angesogen, bzw. abgeblasen. Erdreichwärmeübertrager sind nicht vorhanden. Das Bedienteil für die Lüftungsanlage befindet sich gut sichtbar im Windfangbereich eines jeden Hauses.

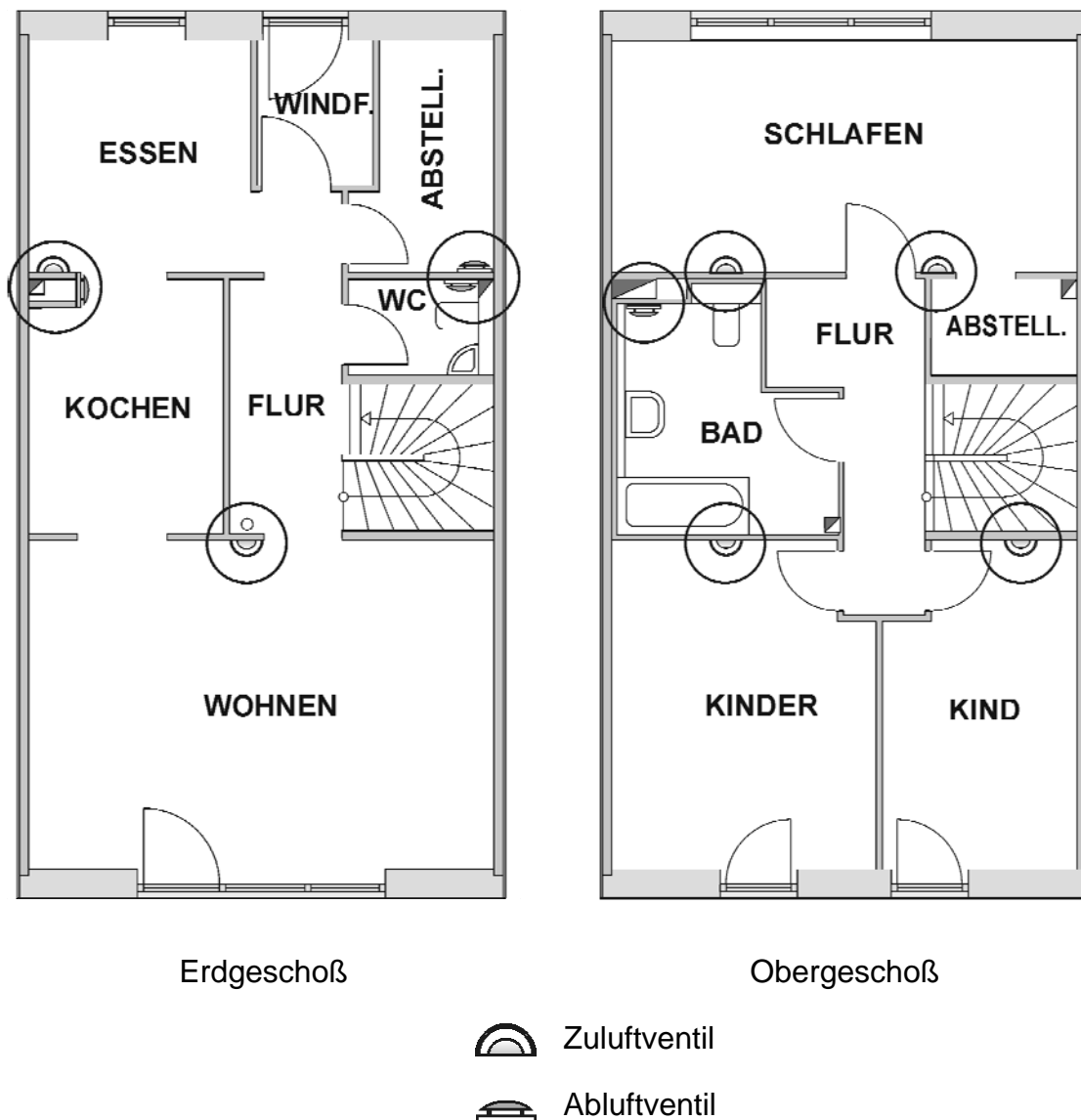


Abbildung 26: Position der Zu- und Abluftventile bzw. Düsen in beiden Geschossen

4.1 Lüftungszonen

Jedes Haus wird in Zu-, Überström- und Abluftzonen aufgeteilt, um die Auslegung und Funktion der Lüftungsanlage sicherzustellen. Dabei darf es keinen Raum geben, der nicht eindeutig in das Lüftungskonzept mit eingebunden ist. Auf diesem Weg wird

die Frischluft mehrfach genutzt und es ist sichergestellt, daß keine „Totzonen“ mit stehender Luft vorhanden sind. In Abbildung 26 ist die Lage der Zu- und Abluftventile beispielhaft für den Haustyp „Jangster de Lûx“ eingetragen.

Alle Wohn- und Schlafräume sind als Zuluftzonen ausgelegt, die Ablufträume sind die Küche, der Abstellraum, das WC und das Badezimmer. Die Überströmzonen stellen Flure und das Treppenhaus dar. In Abbildung 27 sind die aus der Lage der Ventile entstehenden Lüftungszonen für diesen Haustyp dargestellt.

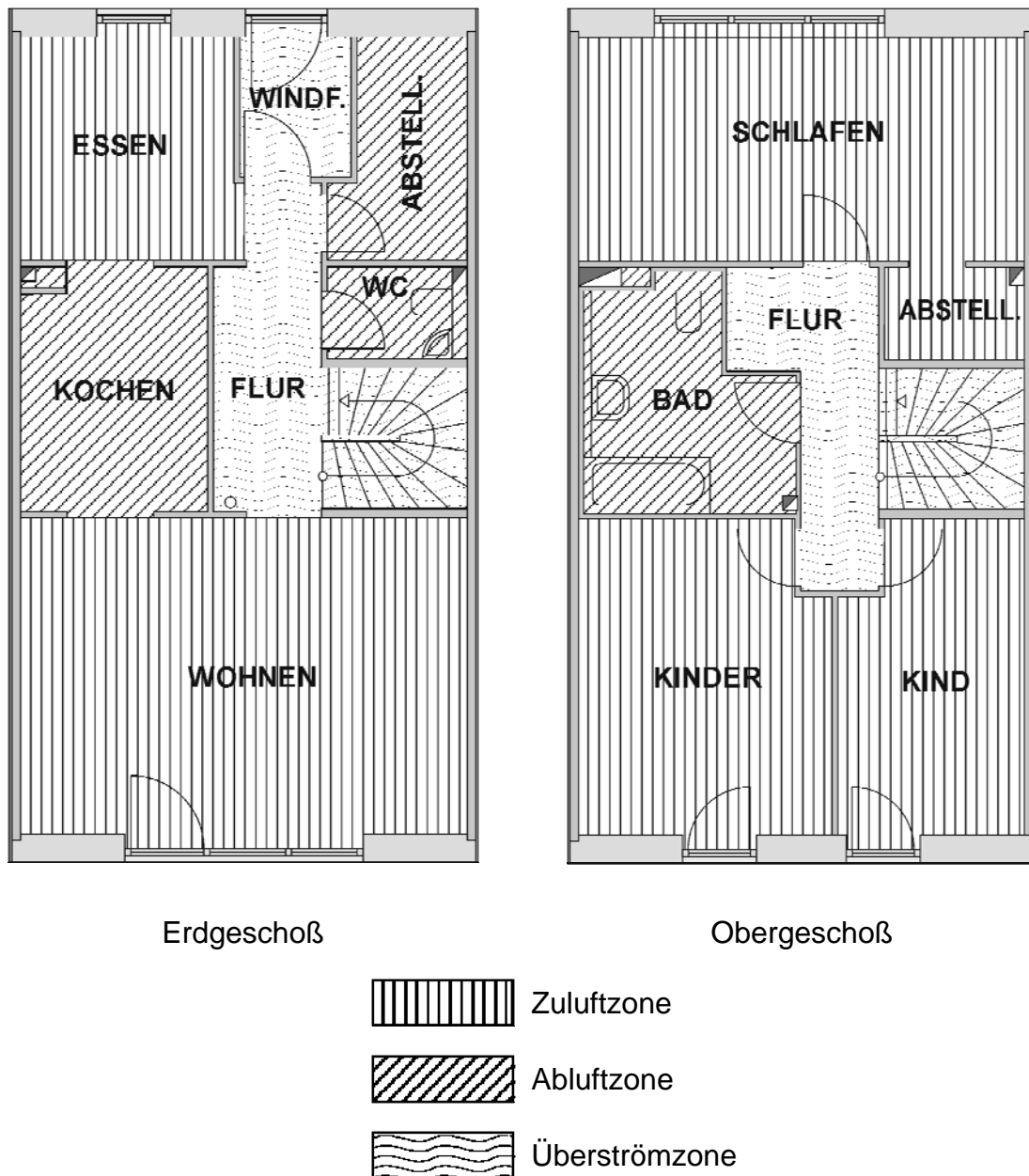


Abbildung 27: Zonierung des Passivhauses in Zuluft-, Abluft- und Überströmzonen in beiden Geschossen (Beispielhaft für Haustyp Janster de Lûx)

Die nichttragenden Zimmertrennwände der einzelnen Reihenhäuser sind im gewissen Rahmen individuell nach den Nutzerwünschen gestaltet worden. So sind

bei anders realisierten Grundrissen (z.B. ganz offener oder ganz geschlossener Küchenbereich, weitere abgeteilte Zimmer in EG oder/und OG) geringe Abweichung von den hier prinzipiell dargestellten Lüftungszonen vorhanden; in jedem Fall ist aber eine vollständige Durchlüftung gewährleistet.

Das Kanalnetz zur Luftverteilung besteht aus Wickelfalzrohr und Schalldämpfern und wurde möglichst kompakt ausgeführt, um die Druckverluste zu minimieren. Die räumliche Verteilung zu den drei senkrechten Schächten erfolgt, bedingt durch die Lage des Lüftungsgerätes, im Technikgeschoß. Ein Schacht führt nordseitig am Badezimmer / Ecke Haustrennwand entlang bis zur Küche ins EG, hier ist das Abluftrohr von Küche und Badezimmer untergebracht. Der zweite Schacht führt südseitig im Badezimmer / Ecke Flurwand nach unten und führt über den Durchbruch das Zuluftrohr zum Wohn-/Esszimmer. Der dritte Schacht mit einem Wickelfalzrohr verläuft im Abstellraum OG nordseitig an der Haustrennwand durch das Obergeschoß, um im EG die Abluft aus WC und Abstellraum/Trockenschrank abzusaugen.

Die Zuluftdüsen der Schlaf- und Kinderzimmer im OG werden direkt aus dem Technikgeschoß bedient. Dies wird möglich, da die Nord- und die Südwand des Technikraumes direkt an diese Zimmer grenzt. So sind hier nur Wanddurchführungen für die Zuluftdüsen notwendig, die Verteilung erfolgt auf der Technikraumseite.

4.2 Technische Parameter der Wohnungslüftung

Die komplette Haustechnik wurde vom Ingenieurbüro inPlan geplant, die folgenden Angaben zu den technischen Parametern wurden [Stärz 1998] entnommen.

4.2.1 Rohrleitungsnetz Lüftung

Für das Rohrleitungsnetz wurde ein Optimum zwischen großen Nennweiten zur Verminderung der Druckverluste und vertretbaren Investitionskosten angestrebt. Die Strömungsgeschwindigkeit ist auf maximal 3 m/s ausgelegt. Aufgrund der zentralen Lage der Naßräume (Abluft) und der Verwendung von Weitwurfdüsen konnte ein Kanalnetz mit sehr geringen Druckverlusten realisiert werden.

Das **Außen- und das Fortluftrohr** ist mit sehr kurzen Leitungslängen aus der thermischen Hülle durch das Dach herausgeführt worden. Dazu wurde Wickelfalzrohr mit NW 160 und einer alukaschierten Mineralwolldämmung von 90 mm eingesetzt. In beiden Leitungen sind dauerhaft Meßkreuze der Firma Westaflex Typ „Staudruck Meßeinrichtung“, System Halton, DN 160 (Standardfall, Ausnahme ein Haus mit DN 100) eingebaut, um den Balanceabgleich der Anlage durchführen zu können. Im Außenluftansaugrohr befindet sich außerdem eine elektrische Frostschutzheizung mit Temperaturfühlern, um das Vereisen des Wärmtauschers zu verhindern. Die beiden Rohre befinden sich jeweils beide auf dem Nordteil der Dächer. Um einen

Kurzschluß der Luftströmungen zu vermeiden, sind die Leitungen mit möglichst großem Abstand (ca. 3 m) über Dach angeordnet. Die Rohre enden jeweils mit einem 90-Grad Bogen mit Wetterschutz und eingebautem Gitter als Grobschutz (Ausblasbogen mit Gitter, Fa. Lindab). Die Rohröffnungen sind rechtwinklig zur Giebellinie (also etwa nach Norden) ausgerichtet.

Innerhalb der Thermischen Hülle sind die **Zu- und die Abluftleitungen** ab dem Wärmerückgewinnungsgerät in NW 100 bis 125 ausgeführt. Die Zuluftrohre sind ab dem Heizregister mit 30 mm alukaschiierter Mineralwolle gedämmt. Eine Ausnahme bildet hier nur die Zuluftleitung zum Zuluftventil Wohnzimmer im Schachtbereich des Badezimmers. Hier ist die Leitung mit 13 mm PE-Schaum-Dämmschlauch gedämmt. Die Abluftleitungen sind komplett ohne Dämmung ausgeführt.

Das Strangschema in Abbildung 28 zeigt die Lüftungsanlage des Haustyps „Jangster de Lük“. Für die anderen Haustypen gibt es nur geringfügige Abweichungen.

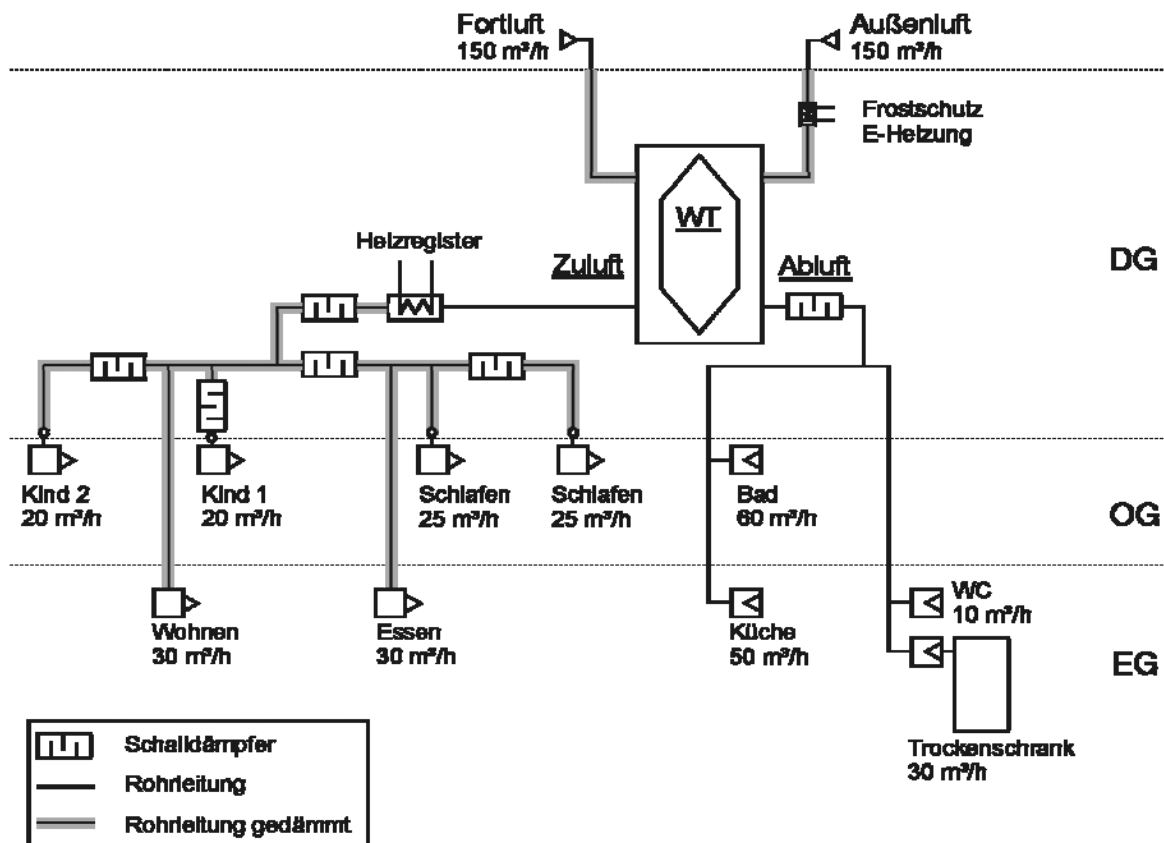


Abbildung 28: Strangschema der Lüftungsanlage eines Passivreihenhauses vom Typ „Jangster de Lük“ mit den Auslegungsvolumenströmen (siehe dazu auch Abschnitt 3.2.2)

Als Schallschutzziel ist ein Schalldruckpegel von 25 dB(A) angestrebt, was eine deutliche Unterschreitung der Anforderungen von 30 dB(A) für sog. „schutzbedürftige Räume“ darstellt. Als **Schalldämpfer** sind flexible Geräte der Firma „Aerotechnik Sigwart“ mit perforiertem Alu-Innenrohr, MF-Packung und Alu-Außenrohr eingesetzt worden. Zuluftseitig sind fünf Schalldämpfer (SD) im Bereich des Technikgeschosses eingesetzt worden: Nach dem Heizregister ein Schalldämpfer NW 160, Baulänge

1000 mm, Packungsdichte 25 mm und dann noch vier weitere Telefonieschall-dämpfer (NW 100 und 125, Baulänge 500 mm, Packungsdichte 25 mm) zur Reduzierung der Schallübertragung von Raum zu Raum.

Abluftseitig befindet sich ein gemeinsamer Schalldämpfer (NW 160, Packungsdicke 25 mm, Baulänge 1000 mm) kurz vor dem Lüftungsgerät.

4.2.2 Auslegungsluftvolumenströme

Die Auslegung der Luftvolumenströme für die einzelnen Räume richtet sich einerseits nach den lufthygienischen Erfordernissen für die Zu- und Ablufträume und andererseits nach der Mindestluftwechselrate, bezogen auf das gesamte Hausvolumen. Der Planer hat die Luftmengen raumweise und hausweise bestimmt und verglichen. Die Erfahrung zeigt, daß die Auslegung nach hausbezogenem Luftwechsel für diese Haustypen ausreichend ist. Danach sind auf der Zuluftseite personenbezogene Luftmengen von 30 m³/h vorgesehen. Das ergibt für 3 Personen („123“) 90 m³/h, für 4 Personen („Jangster“) 120 m³/h und für 5 Personen („Jangster de Lük“) 150 m³/h. Auf der Abluftseite sind Volumenströme für die Küche (40-50 m³/h), das WC im EG (10 m³/h) und das Bad (40 m³/h) vorzusehen. Die raumbezogenen Luftmengen für den Auslegungsfall sind dann so angepaßt worden, daß die Gesamtluftmenge für das Gebäude eingehalten wird. Projektiert wurde dabei auf den Auslegungsfall „Normallüftung“ des Lüftungsgerätes (Lüftungsstufen siehe weiter unten).

Diese Auslegung führt zu den folgenden Volumenströmen:

Haustyp		„123“	„Jangster“	„Jangster de Lük“
		[m ³ /h]	[m ³ /h]	[m ³ /h]
Zuluftraum	Essen EG	20	30	40
	Wohnen EG	25	30	40
	Schlafen OG	25	30	40
	Kind 1 OG	20	15	15
	Kind 2 OG	-	15	15
Gesamt		90	120	150
Abluftraum	Trockenschr.	-	30	30
	Küche EG	50	40	50
	WC EG	-	10	10
	Bad OG	40	40	60
Gesamt		90	120	150

Tabelle 2: Auslegungsvolumenströme für die drei Haustypen (m³/h)

Um auf die unterschiedlichen Belegungen und Nutzungen des Hauses reagieren zu können, ist die Lüftungsanlage in drei Leistungsstufen einstellbar. Die Nutzer können neben der Normlüftung eine verringerte Luftmenge anfordern „Grundlüftung“ (75%) oder eine erhöhte Luftmenge im Bedarfsfall einstellen (150%). Geplant war zusätzlich noch eine Stufe „Minimallüftung“, um noch geringere Luftmengen auszutauschen, z.B. für den Fall einer sehr geringen Belegung oder auch zur Erhöhung der relativen Luftfeuchte in der Kälteperiode. Mit dem Lüftungsgerät konnten noch geringere Luftmengen jedoch nicht realisiert werden, da die Ventilatorleistung sich nicht weiter reduzieren ließ. Für die unterschiedlichen Haustypen ergeben sich damit folgende projektierte Luftmengen für die drei Stufen:

Haustyp	„123“	„Jangster“	„Jangster de LUX“
	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[m ³ /h]
Grundlüftung (75%)	68	90	113
Normlüftung (100%)	90	120	150
Stoßlüftung (150%)	135	180	225

Tabelle 3: Auslegungsluftmengen nach Haustypen für die unterschiedlichen Einstellungen der Lüftungsanlagen

In der Begleitforschung stellte sich heraus, daß die projektierten Luftvolumenströme immer noch eher höher als notwendig sind. Es gab in keinem Fall Probleme mit der Beheizbarkeit oder mit der Luftqualität. Jedoch gibt es Zeiträume, in denen die Innenluft objektiv sehr trocken ist (um 30% relative Feuchte und weniger) und subjektiv auch so empfunden wird. Dies läßt sich durch eine geringere Außenlufttrate beheben. Wir empfehlen daher heute, Wohnungslüftungsanlagen keinesfalls auf höhere Luftvolumenströme als 30 m³/h und Person für die gesamte Wohnung zu projektieren.

4.2.3 Druckverluste

Eine Übersicht über die Größenordnung der Druckverluste des gesamten Systems bei den unterschiedlichen Betriebsstufen zeigt die folgende Tabelle:

	Nachheiz- register	Zu- & Abluft- elemente	Filter	Kanalnetz	Gesamt
	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
Grundlüftung 90 m³/h	10	10	15	25	60
Normlüftung 120 m³/h	15	30	20	40	105
Stoßlüftung 180 m³/h	35	50	30	60	175

Tabelle 4: Projektierte Druckverluste der Lüftungsanlage bei den drei unterschiedlichen Betriebsstufen

4.2.4 Zuluftventile

Als Zuluftelemente in Wohn- und Schlafzimmern sind ausschließlich Weitwurfdüsen in Decken- oder Wandausführung der Hersteller ABB Typ „CTVB“ und „CTVK“ eingesetzt worden.

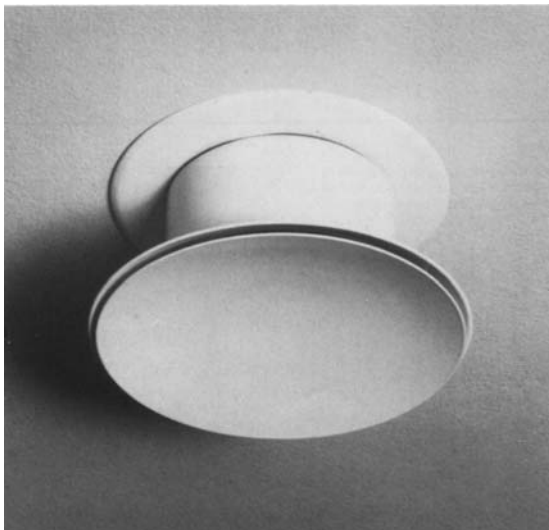


Abbildung 29: Zuluftelemente als Weitwurfdüsen in Decken- und Wandausführung (Fotos: Hersteller)

4.2.5 Abluftventile

Die Ablufträume sind mit Abluftelementen des Herstellers Exhausto ausgerüstet. In Bad, WC und Abstellraum EG sind Tellerventile vom Typ VTU eingesetzt, in der

Küche die Filterarmatur vom Typ FA 100 PB mit herausnehmbarem Aluminiumfilter (EU3 / G85) und dahinterliegendem Abluftventil vom Typ URH.

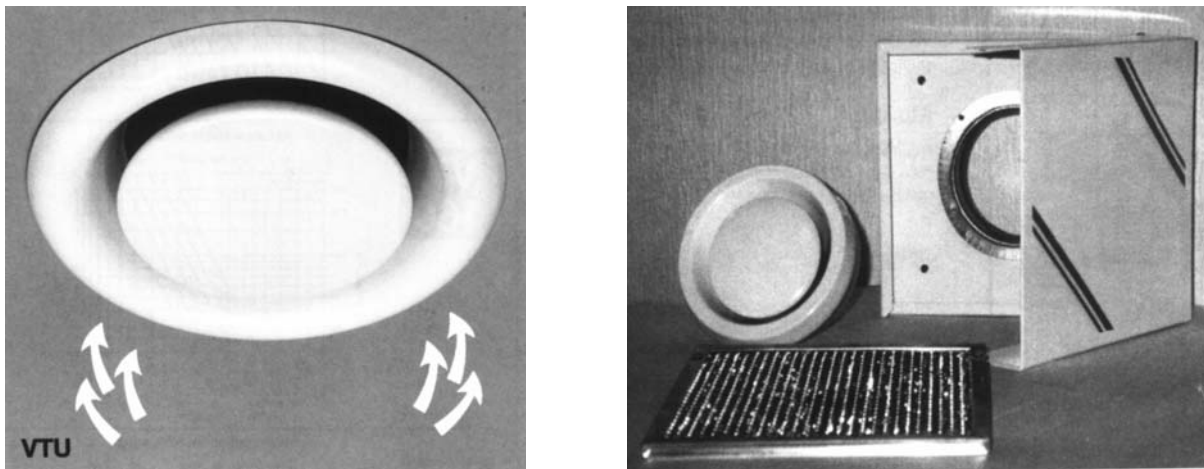


Abbildung 30: Abluftelemente (Wandelement und Ausführung in der Küche mit Metallgewebe-Filter) (Fotos: Hersteller)

4.2.6 Überströmelemente

Um die geringen gerichteten Luftströmungen im Gebäude dauerhaft sicherzustellen sind Überströmöffnungen notwendig, wenn zwischen den Zonen Türen geschlossen werden können. In den 32 Häusern sind die Überströmöffnungen über den Türzargen integriert (Prinzip siehe Abbildung 31). Das hat den Vorteil, daß die Elemente nicht sichtbar sind und bei geschlossener Tür kein Licht von einer in die andere Zone gelangen kann; zudem ist der Schallschutz erhöht. Eine Ausnahme bei der Ausstattung bildet hier nur die Badezimmertür, welche mit einem klassischen Gitter im oberen Bereich der Tür ausgestattet ist; auch hier empfiehlt das PHI ebenfalls die in Abbildung 31 dargestellte Lösung, die sich sehr gut bewährt hat.

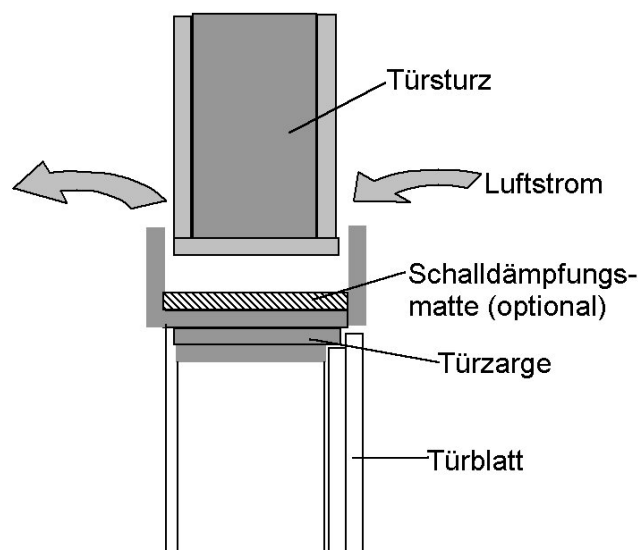


Abbildung 31: Überströmöffnungen zwischen Sturz und Türzarge (Quelle ebök)

4.3 Beschreibung des Lüftungsgerätes mit Wärmeübertrager

Die Lüftungsgeräte bestehen aus einem Gegenstromwärmeübertrager, den Zu-, und Abluftventilatoren, zwei integrierten Filtern und einer Regelung zur Einstellung der Volumenströme. Es sind Lüftungszentralgeräte mit Gegenstrom-Kanalwärmeübertrager der Firma Paul vom Typ „Thermos 201 DC“ eingesetzt worden. Bei den beiden Ventilatoren der Geräte handelt es sich um wartungsfreie 24 V Gleichstromventilatoren (Radialventilatoren mit rückwärts gekrümmter Schaufel). Da keine Erdreichwärmetauscher eingesetzt wurden, ist jede Lüftungsanlage mit einer elektrischen „Defrosterheizung“ im Frischluftstrom ausgestattet, welche das Zufrieren des Wärmeübertragers verhindert.

Technische Daten des Lüftungsgerätes (Herstellerangaben):

Abmessungen:	1010x1300x450mm (BxHxT)
Kanalmaterial:	Kunststoff
Kanalanschlüsse:	DN 160
Ventilatoren:	2 Radialventilatoren, 24 V
Luftvolumenstrom:	75 bis 230 m ³ /h
Leistungsaufnahme (Gesamtgerät):	36 bis 88 W
Filterform (Außen- & Abluftfilter):	Z-Filter
Filterklasse (Außen- & Abluftfilter):	G4



Abbildung 32: Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung im Technikgeschoß eines Passivhauses in Hannover-Kronsberg. Im Hintergrund das Frischluftrohr mit Defrosterheizung und im Vordergrund das Fortluftrohr (beide mineralwolle gedämmt mit Alukaschierung)

Die Geräte sind alle mit einem Bypass-Schieber ausgestattet, der sich manuell bedienen lässt. Wird in der Übergangszeit der Wärmetauscher nicht mehr benötigt, kann dieser durch das Ziehen des Bypass-Schiebers umgangen werden. Auf der Rückseite der Geräte befindet sich ein Kondensatablaufschauch zur Ableitung des im Wärmetauschers anfallenden Kondensats.

4.4 Regelmöglichkeiten

Über ein Bedienteil, welches gut sichtbar im Windfang positioniert ist, kann das Lüftungsgerät in verschiedene Betriebszustände geschaltet werden. Das Bedienteil ist auf Anforderung des Passivhaus Institutes besonders einfach gehalten worden; es verfügt über ein Klartextdisplay und fünf Tasten. So lassen sich die Betriebszustände Grundlüftung (75%), Normallüftung (100%), Stoßlüftung (150%) anwählen (In Klammern jeweils der vom Planer projektierte Leistungswert der Ventilatoren bezogen auf den Auslegungsfall). Außerdem kann mit dem Taster „Sommerlüftung“ nur der Abluftventilator betrieben werden, wenn die Zuluft über geöffnete Fenster hereinkommt und z.B. das innenliegende Bad entlüftet werden soll. Mit dem fünften Taster „Aus“ lässt sich die Lüftung ganz abschalten. Der jeweilige Betriebszustand wird auf dem Display angezeigt. Außerdem erscheint die Anzeige „Filterwechsel“ jeweils nach einer Laufzeit der Ventilatoren von drei Monaten. Die angewählten Betriebszustände bleiben so lange in Betrieb, bis eine andere Einstellung angewählt wird (auch Stoßlüftung). Eine automatische Zeitsteuerung ist bei dieser Ausführung nicht enthalten.



Abbildung 33: Bedienteil der Lüftungsanlage im Windfang der Passivhäuser (mit Klartext Display)

5 Konzept der Raumwärmeversorgung

5.1 Heizwärmeverteilung

Für jeweils zwei Hausreihen mit je acht Reihenhäusern gibt es ein gemeinsames Technikhaus mit einer Fernwärmeübergabestation inkl. eines Pufferspeichers. Das Technikhaus befindet sich direkt an der Giebelwand jeweils der nördlichen Hausreihe. Von hier werden eine Vor- und eine Rücklaufleitung unter der Giebelwanddämmung des Gebäudes in das Technikgeschoß des Endhauses geführt. Die beiden Leitungen verlaufen von dort durch die acht Technikgeschosse. Die andere Reihe ist mit zwei Erdreichleitungen an das Technikhaus angeschlossen. Der Leitungsverlauf ist ansonsten identisch zu der anderen Reihe. Bei den Erdreichleitungen handelt es sich um jeweils zwei Kunststoff-Mantel-Medienrohre (32 x 2,9 mm) mit Außenmantel 125 mm PE gerippt mit mikrozellulär vernetztem PE-Schaum als Dämmung vom Typ „Microflex UNO“ des Herstellers Microflex. Die Trassenlängen vom Technikhaus 9/10 zum Haus 10/8 beträgt 29 Meter, die vom Technikhaus 13/14 zum Haus 14/1 beträgt 45 Meter.

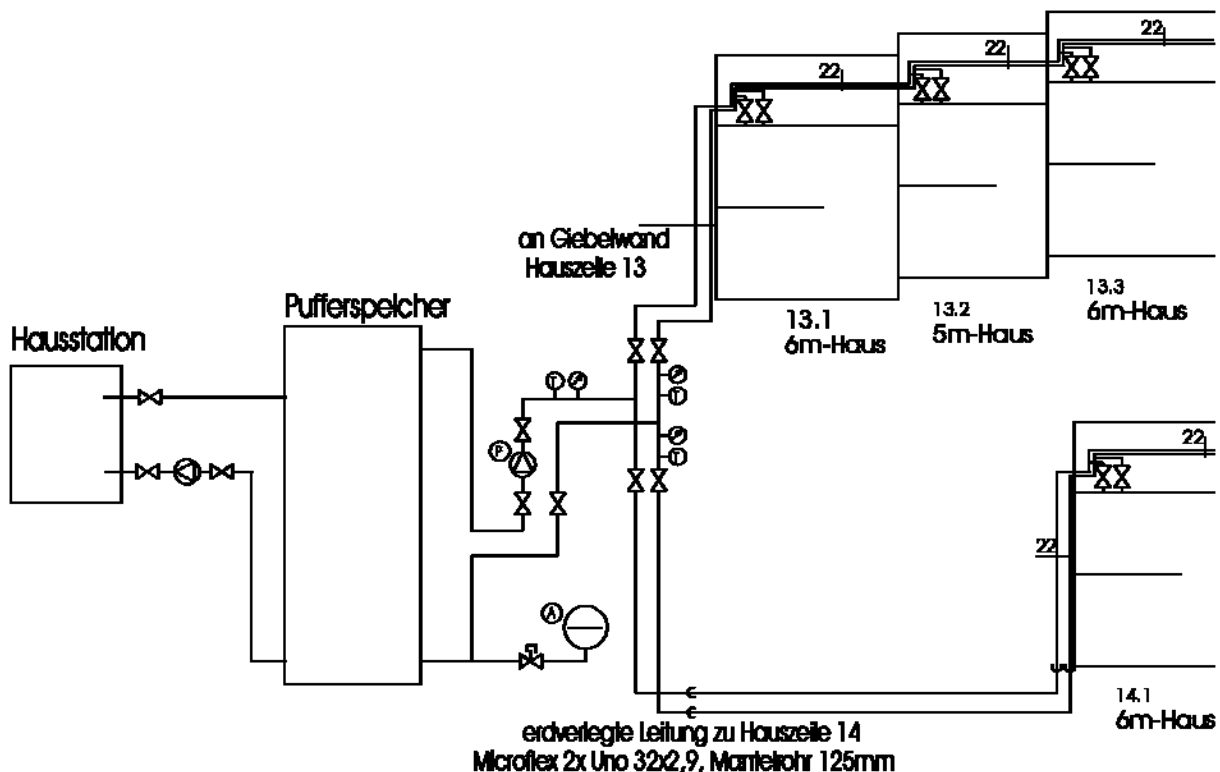


Abbildung 34: Ausschnitt aus dem Strangschemata Heizung von Reihe 13 und 14 (Quelle: inPlan). Es sind nur die ersten Häuser der beiden Reihen angedeutet. Die Fernwärmeübergabestation („Hausstation“) für die 16 Häuser sowie der Pufferspeicher und die Armaturen befinden sich im Technikraum.

Für die Wärmeverteilung im Gebäude ist aufgrund der geringen notwendigen Leistungen kein konventionelles Heizsystem mehr erforderlich. Die Heizwärmever-

teilung kann über die hygienisch notwendigen Zuluftströme mitverteilt werden. Eine Ausnahme bildet nur das Badezimmer, in dem es ermöglicht werden muß, kurzzeitig auch höhere Temperaturen (24 °C) zu realisieren. Hier ist der einzige Heizkörper des Hauses angebracht und mit sehr kurzen Leitungen durch die Decke im Technikgeschoß mit der hydraulischen Anlage verbunden.

5.2 Wärmeversorgung Heizung

5.2.1 Nahwärmeversorgung

Die Nahwärmeversorgung des Neubaugebietes Kronsberg für etwa 2.700 Wohneinheiten (welche etwa Niedrigenergiestandard aufweisen) mit rund 240.000 m² beheizter Fläche wird durch eine Energiezentrale am südlichen Rand des Wohngebietes sichergestellt. Die Energiezentrale der Stadtwerke Hannover befindet sich in rund 900 Meter Luftlinie zur Passivhaussiedlung. Im Endausbau des Wohngebietes werden hier 11,7 MW thermische Leistung und 1,2 MW elektrische Leistung erzeugt. Die Energiebereitstellung erfolgt hier ökologisch vorteilhaft durch Kraft-Wärme-Kopplung mittels BHKW Einsatz (KWK-Wärmeanteil mit min. 60% projiziert). Zur Netzversorgung sind vorhanden:

1	BHKW-Modul	Erdgasbetriebener gemischaufladener 16-Zylinder-Motor mit 1,165 MW elektrischer und 1,65 MW thermischer Leistung und Brennwertnutzung aus den Abgasen. Gesamtwirkungsgrad 94% Fa. Zeppelin, Typ G35 16 B
2	2 Heizkessel	Zwei baugleiche gasbefeuerte Kessel mit jeweils 5 MW thermischer Leistung Fa. Viessmann, Typ Turbomat 6000 - RN, Dreizugkessel Brenner: Fa. Elmatic, Typ TG 4.680 ME
3	2 Pufferspeicher	Zwei Pufferspeicher mit jeweils 35 m ³ Inhalt zur Sicherstellung der BHKW-Mindestbetriebszeiten
	PV-Anlage	Photovoltaikanlage auf dem Dach der Energiezentrale mit einer Leistung von 5 kW

Die Zentrale soll den jährlichen Nutzwärmebedarf von 14.500 MWh/a sicherstellen. Die Wärmeübergabestationen in den Häusern des Wohngebietes sind über eine Hauptversorgungsleitung (Vor- und Rücklaufleitung erdverlegt in 1 m Tiefe, Rohrdurchmesser 200 bzw. 125 mm, 60 mm PUR Wärmedämmung, Länge über 1 km) und Verteilleitungen (VL/RL erdverlegt in 60 bis 80 cm Tiefe, Rohrdurchmesser 20 bis 100 mm, Gesamtlänge etwa 6 km) mit der Energiezentrale verbunden.

Die Angaben zur Energiezentrale und zum Leitungsnetz sind der Informationsschrift „WärmeService-Projekt Nahwärmeversorgung Kronsberg“ der Stadtwerke Hannover entnommen (Nr. 01-001-04-9118). Ergänzt mit Hersteller- und Typenangaben der Geräte durch eine persönliche Information des Stadtwerke Mitarbeiters Dipl.-Ing. H. Haushalter.

5.2.2 Hausversorgung

Die Wärmeversorgung für Warmwasserbereitung und Heizung der 4 Reihenhauszeilen erfolgt über die Fernwärmeübergabestationen in den beiden Technikhäusern (jeweils 40 kW Leistung und 500 Liter Pufferspeicher) sowie den hausweisen Flachkollektoranlagen zur Warmwasserbereitung.

Jedes Haus ist über die in Abschnitt 4.1 beschriebenen Vor- und Rücklaufleitungen an die Fernwärmeversorgung angeschlossen. Das Vorlaufwasser versorgt in den einzelnen Häusern direkt das zentrale Nachheizregister zur Luftnacherhitzung, den Badheizkörper und den Brauchwarmwasserspeicher.

Die zentralen Luft-/Wassernachheizregister sind im Technikgeschoß untergebracht und erwärmen bei Bedarf die Zuluft nach dem Lüftungsgerät. Es handelt sich jeweils um ein „Warmwasser-Heizregister WHR 125“ der Fa. Helios zum Einbau in Lüftungsrohre mit einer Leistung von 1100 Watt (Angaben bei 0 °C Zulufttemperatur, Vor-/Rücklauftemperaturen 60/40 °C). Die Anlage ist so ausgelegt, daß die maximale Lufttemperatur am Nachheizregister 55 °C nicht übersteigen soll, um Staubverschmelzung zu vermeiden.

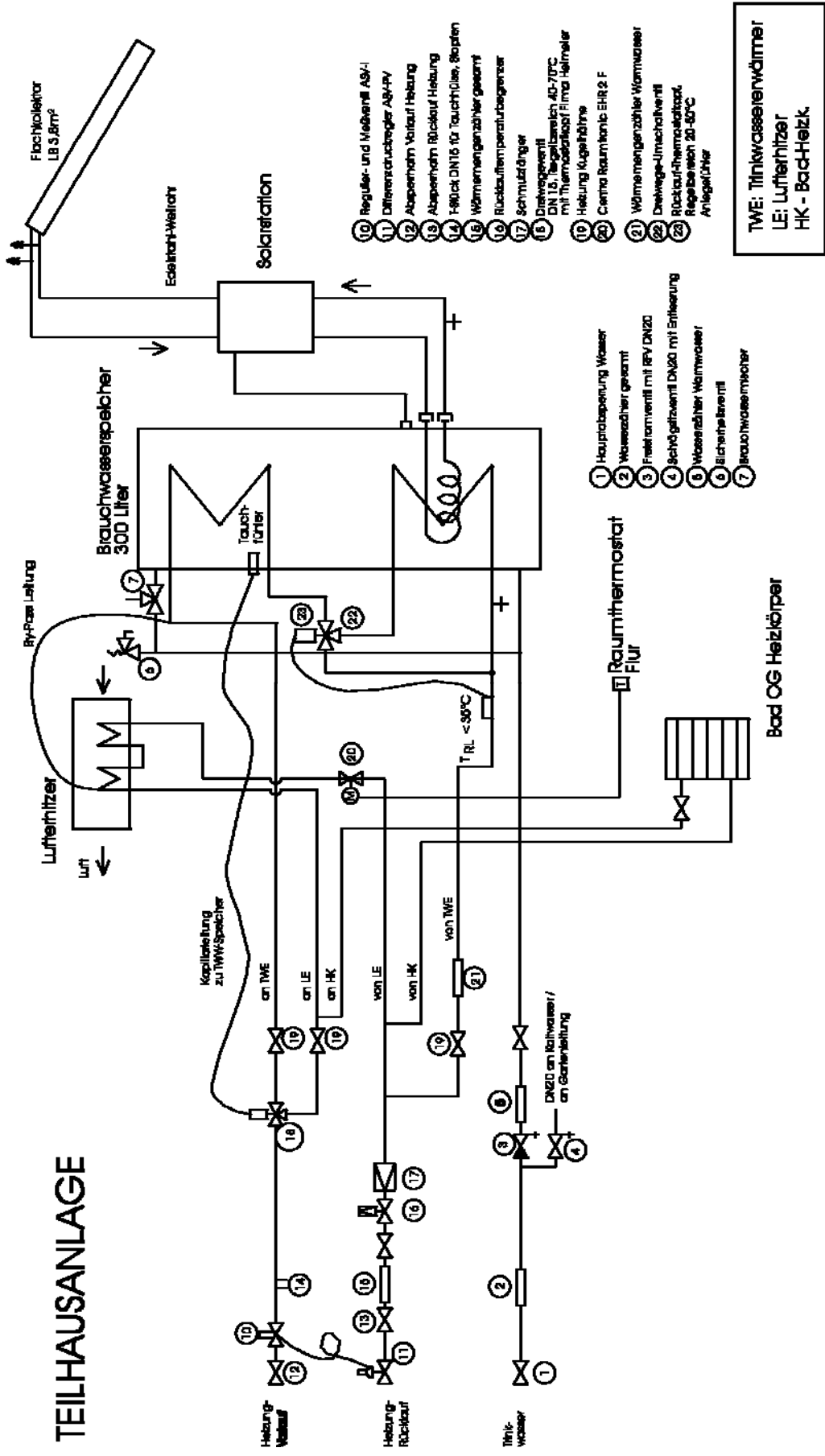


Abbildung 35: Strangschemata Teilhaus der Wärmeversorgung Heizung und Warmwasser (Quelle: nach inPlan)

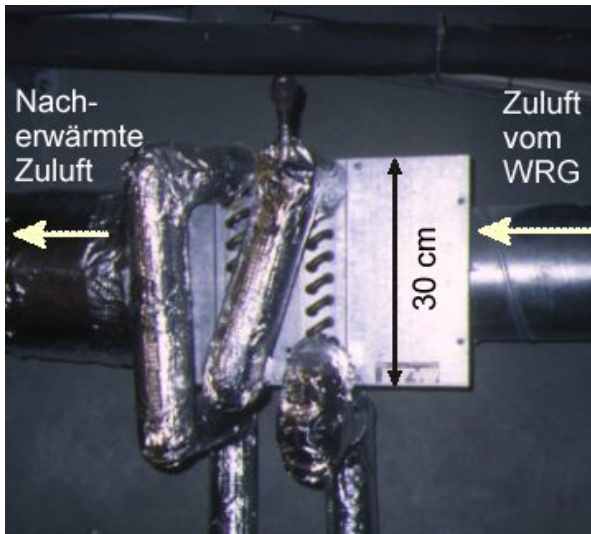


Abbildung 36: Heizregister in der Zuluftleitung (vor und nach der Montage der Wärmedämmung)

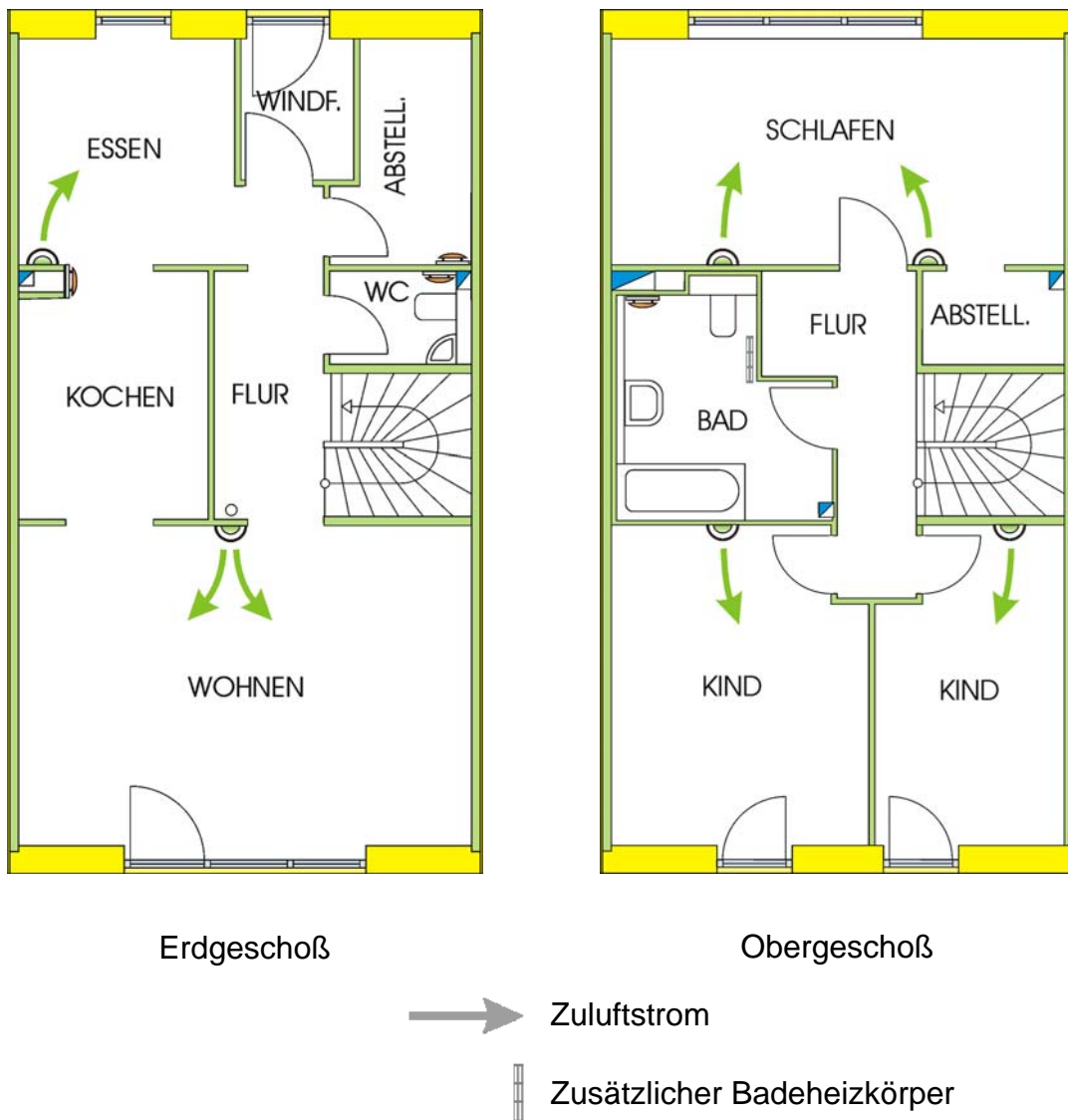


Abbildung 37: Wärmeverteilung über die Zuluftelemente (Beispielhaft am Haustyp Jangster de Lûx)

Die Verteilung der nacherwärmten Luft erfolgt wie im Abschnitt 3 „Lüftungskonzept“ beschrieben. Damit wird die notwendige Wärme – gleichzeitig mit der Raumluft – in den Zulufräumen eingebracht und verteilt.

Zur raumweisen Betrachtung der eingetragenen Wärme (ohne Berücksichtigung des Badheizkörpers) kann vereinfacht die maximale Leistung des Heizregisters prozentual nach den in die verschiedenen Zuluftzonen eingebrachten Volumenströmen aufgeteilt werden. Dabei werden die Wärmeabgaben der Lüftungsrohrleitungen bis zum jeweiligen Ventil nicht berücksichtigt. Es ergeben sich die folgenden Werte:

	Eintrag Wärme	Wärme Eintrag pro m²
	[W]	[W/m ²]
Essen	293	34.1
Wohnen	293	11.6
Schlafen	293	16.3
Kind 1	110	7.9
Kind 2	110	11.2
Summe	1100	---

Tabelle 5: Projektierung der Wärmeeinträge in die Zuluftzonen nach den projizierten Volumenströmen (Beispielhaft für Haustyp Jangster de Lüs)

Die Steuerung des Heizregisters erfolgt über ein Ventil mit batteriebetriebenen Antrieb. Ein zentrales Raumthermostat (Fa. Centra/Honeywell, Typ Raumtronic) mit Zeitschaltuhr, welches sich im Erdgeschoßflur befindet, steuert das Motorventil an. Vom Raumthermostat wird zentral für das ganze Haus (eine Zone) die Raumlufttemperatur geregelt. Eine Nachtabsenkung macht bei der hier vorliegenden guten Gebäudedämmung und der dadurch bedingten langen Zeitkonstante keinen Sinn mehr. Wenn keine Anforderung vom Thermostat vorliegt, schließt das Ventil ganz. Der Wartungsaufwand für die Wärmeversorgung beschränkt sich auf den zweijährlichen Batteriewechsel am Raumthermostat.

Die Einstellung und Wartung der hier speziell ausgewählten Systeme bereitet bei einigen Häusern wiederholt Schwierigkeiten; diese waren nicht konzeptioneller Art – das Prinzip der wohnungsweisen Regelung hat sich gut bewährt – sondern waren durch die Gerätetechnik bedingt. Der Hersteller hat inzwischen ein neues, überarbeitetes Produkt angekündigt.



Abbildung 38: Raumthermostat mit Zeitschaltuhr im Flur EG (in „off“-Stellung)

Der Badezimmerheizkörper (Fa. Brötche, „Handtuchwärmekörper“, Leistung: 205 Watt) verfügt zur Regelung über ein eigenes Thermostatventil und kann so unabhängig vom Heizregister betrieben werden.

6 Konzept der Warmwasserversorgung

6.1 Angaben zur Erzeugung, Speicherung, Verteilung

Die Warmwasserversorgung aller Häuser wird zum einen ebenfalls über die beiden Fernwärmeanschlüsse und die beschriebenen Verteilungen realisiert. Zum anderen gibt es in jedem Haus eine Solaranlage. Diese beiden Wärmequellen versorgen jeweils einen 300 Liter Brauchwasserspeicher im Technikgeschoß. Die Speicher werden über die Fernwärmeleitung im oberen Drittel je nach Einstellung auf etwa 45 °C aufgeheizt. Dies erfolgt durch eine thermostatische Regelung.

Wie in jedem zentralversorgten Wohngebäude üblich, wird die Warmwasserverteilung vorrangig vor der Raumwärmeverteilung bedient. Das bedeutet, daß im eher seltenen Fall der gleichzeitigen Anforderung vom Heizregister/Badheizkörper und vom Wärmetauscher zur Warmwasseraufheizung die Warmwasseraufheizung Vorrang hat. Dies wird über ein Dreiwegeventil mit Temperaturfühler im oberen Teil des Warmwasserspeichers realisiert. So ist gewährleistet, daß immer ausreichend Warmwasser zur Verfügung steht und die Heizung nur kurzzeitig nicht versorgt wird.

Um die Anforderungen einer maximalen Rücklauftemperatur von 35 °C der Stadtwerke Hannover für die Nahwärmeversorgung mit BHKW-Betrieb sicherzustellen, kann das Vorlaufwasser in einem zweiten Wärmetauscher im unteren Teil des Standspeichers nochmals Wärme abgeben und den Speicher aufladen. Diese Funktion wird nur bei zu hoher Rücklauftemperatur automatisch aktiviert (Thermostat mit Anlegefühler).

Am Speicherausgang ist in der Warmwasserleitung ein thermostatischer Brauchwassermischer als Verbrühschutz eingebaut. Dieser mischt bei Temperaturüberschreitung Kaltwasser bei, um zu hohe Zapftemperaturen zu vermeiden.

In den Sommermonaten werden die Wärmeversorgungsleitungen von den Technikhäusern nur zur Warmwasserbereitung betrieben. Darum ist es nur notwendig, die nicht von der Solaranlage gelieferte Energie zu ergänzen. Zur Vermeidung unnötiger Zirkulationsverluste der Versorgungsleitungen zu diesen Zeiten wurden in den Technikhäusern auf Veranlassung des Passivhaus Institutes nachträglich je eine Zeitschaltuhr eingebaut, die in der heizfreien Zeit dafür sorgt, daß die Heizkreispumpe nur einige Stunden am Tag betrieben wird. In dieser Zeit werden die Versorgungsleitungen zum Aufladen der hauseigenen Warmwasserspeicher betrieben. Auf diesem Weg können die Zirkulationsverluste beträchtlich reduziert werden. Die Wärmeabgabe der Rohrleitungen kommen den Häusern im Winter als Heizwärme zugute, da die Leitungen größtenteils innerhalb der Gebäude verlaufen. In der heizfreien Zeit, in der die Versorgungsleitungen nicht betrieben werden (Pumpen aus), kann der Badheizkörper dann nicht betrieben werden.

6.2 Auslegungsdaten

Der Warmwasserbedarf ist hauptsächlich abhängig von der Anzahl der im Haus lebenden Personen und deren Nutzerverhalten. Die jahreszeitlichen Schwankungen sind relativ gering. Für die Auslegung der Warmwasserversorgung sind pro Person und Tag 40 Liter bei 45 °C zugrundegelegt worden. Es wurde für einen 4-Personen-Haushalt von einem mittleren Leistungsbedarf von ca. 270 Watt ausgegangen. Für die Speicherdimensionierung ist zumindest der Spitzenbedarf für eine Badewannenfüllung zu berücksichtigen. Ausreichen muß dazu der obere Teil des Speichers, da nur dieser dauerhaft durch die Fernwärme aufgeheizt wird.

6.3 Solaranlage

Die Solaranlage (Fa. Wagner & Co) besteht aus einem ca. 4 m² Flachkollektorfeld auf dem Süddach, einer Steuerungseinheit (Solarkreisstation „CIRCO 3“), dem Ausdehnungsgefäß, der notwendigen Verrohrung sowie dem Wärmetauscher im unteren Teil des Warmwasserspeichers. Sie arbeitet als autarkes System mit einem eigenen geschlossenen Kreislauf, der mit einer frostsicheren Flüssigkeit gefüllt ist. Bei ausreichender Sonneneinstrahlung setzt die Steuerung der Solaranlage die Pumpe in Betrieb, und das erwärmte Wasser kann seine Energie in den Brauchwasserspeicher abgeben. Durch die Anordnung des Wärmetauschers im unteren Bereich des Wasserspeichers kann der Speicher von unten her komplett durchladen werden (300 Liter). Im Bereich des Solarwärmetauschers ist auch der Speichertemperaturfühler montiert. Der zweite Temperaturfühler befindet sich im Kollektor auf dem Dach; dieser ist über einen Überspannungsschutz an die Regelung angeschlossen.

Die Temperatur im Speicher kann durch die Solarenergie bis etwa 85 °C aufgeheizt werden. Der oben beschriebene Brauchwassermischer sorgt durch Kaltwasserbeimischung dafür, daß es nicht zu Verbrühungen an den Zapfstellen kommen kann.

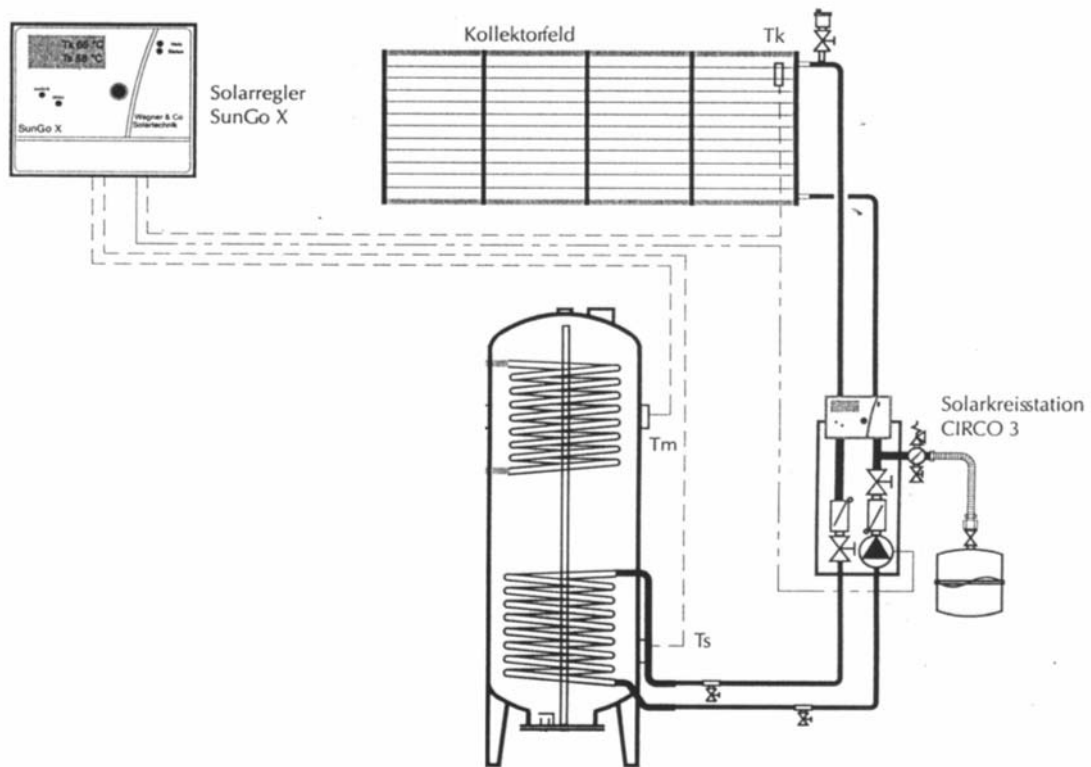


Abbildung 39: Prinzipskizze der Solaranlagen mit Hydraulik, Speicher, Ausdehnungsgefäß und Steuerung (Quelle: Hersteller)

7 Ausstattung mit elektrischen Haushaltsgroßgeräten und Beleuchtung

Für die Passivhaussiedlung Hannover Kronsberg wurde vom Bauträger ein neues Konzept getestet, das für den verstärkten Einsatz energieeffizienter Hausgeräte sorgen sollte:

- Der Kaufpreis der Häuser wurde um 2000 DM je Wohneinheit erhöht. Im Kaufvertrag wurde festgelegt, daß ein Erwerber eine Rückerstattung von 2000 DM aus der Kaufsumme erhalten kann, wenn er die Verwendung besonders energieeffizienter Haushaltsgeräte auf dem im folgenden beschriebenen Weg nachweist.
- Jedem Erwerberhaushalt wurde angeboten, die Effizienz seiner Ausstattung mit elektrischen Geräten mit dem Programm „Projektierung Stromverbrauch“ des Passivhaus Institutes zu ermitteln und ihn bzgl. der Anschaffung neuer, besonders sparsamer Geräte zu beraten.
- Wurde mit dem Programm „Projektierung Stromverbrauch“ ein Stromkennwert kleiner gleich $18 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und ein Primärenergiekennwert Strom kleiner gleich $55 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ nachgewiesen, so wurde die Rückerstattung der 2000 DM aus der Kaufsumme freigegeben.
- Als Besonderheit wurden alle Häuser der Passivhaussiedlung vom Bauträger mit optimierten Wäschetrockenschränken ausgestattet (vgl. CEPHEUS-Bericht Nr. 4 und [Feist 2000]), welche im Abluftbetrieb nur etwa ein Siebtel des Stromverbrauchs von herkömmlichen Abluft- oder Kondensationstrockern aufweisen.

Die Beratungen mit dem Programm „Projektierung Stromverbrauch“ wurden von Torsten Schwarz, dem damaligen Leiter der Außenstelle Hannover des Bauträgers, durchgeführt. Die Erwerber mußten hierfür Angaben über die von ihnen bisher eingesetzten und weiter zu verwendenden Altgeräte machen. Für diese wurden die Normverbräuche laut Produktinformation abgefragt oder, falls nicht vorhanden, tatsächliche Verbrauchswerte mit von den Stadtwerken ausgeliehenen elektronischen Stromverbrauchsmeßgeräten gemessen. Diese Daten wurden in das Eingabeformular „Eingabe Gerätedaten Altgeräte“ eingegeben (Abbildung 41). Hiermit läßt sich bereits unter Normalnutzungsbedingungen der Stromverbrauch des Haushalts unter der Bedingung berechnen, daß es beim Einsatz genau dieser Altgeräte bleibt. Im allgemeinen wird dieser Verbrauch („Nullvariante“) höher sein als der Zielwert von $18 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Auf dieser Basis baut die eigentliche Stromeffizienzberatung auf: Es werden verschiedene alternative Investitionsmöglichkeiten in effizientere Neugeräte bestimmt. Die Kennwerte für diese Neugeräte werden in ein ähnliches Formular übertragen (Abbildung 42).



Abbildung 40: Trockenschrank in einem der Passivhäuser; der Fortluftschlauch ist an den Abluftstrang der Lüftungsanlage angeschlossen.


Projektierung Stromverbrauch		<h2 style="margin: 0;">Eingabe Altgeräte</h2>
Wohnfläche		117 m ²
Kühlschrank vorhanden? (0/1)		1
Normverbrauch lt. Produktinformation		0.8 kWh/Tag
Kühl- Gefrier-Kombination		
vorhanden (nur anstelle getrennter Geräte)? (0/1)		0
Normverbrauch lt. Produktinformation		1.5 kWh/Tag
Gefriergerät vorhanden? (0/1)		1
Normverbrauch lt. Produktinformation		1.3 kWh/Tag
Standort:(neu) beheizter Raum (1) oder unbeheizter Keller (0)		1
Spülmaschine vorhanden? (0/1)		1
Normverbrauch lt. Produktinformation		2 kWh/Anwendung
bezieht sich auf Maßgedecke (Anzahl)		12
Warmwasseranschluß (1/0)		0
Waschmaschine vorhanden? (0/1)		1
Normverbrauch lt. Produktinformation		2.7 kWh/Anwendung
bezieht sich auf Fassungsvermögen		5 kg Wäsche
Normverbrauch bezieht sich auf 60°-Wäsche (0) oder Kochwäsche (1)		1
Warmwasseranschluß (1/0)		0
Wäschetrockner vorhanden? (0/1)		1
Normverbrauch lt. Produktinformation für 70% Restfeuchte		3.8 kWh/Anwendung
bezieht sich auf Fassungsvermögen		5 kg Wäsche
Restfeuchte lt. Produktinformation Waschmaschine bzw. Schleuder		70%
Elektrisch (0) oder mit Gas (1)		0
Herd Elektroherd (0) oder Gasherd (1) ?		0
Halogen-Strahlungsheizung der Kochmulde bzw. Induktionsplatten? (Wenn ja:1, sonst 0)		0
Beleuchtung Energiesparlampen (1/0)		0%
Anteil der Energiesparlampen an der Lichtarbeit		0

Abbildung 41: Eingabeformular für elektrische Altgeräte für die Beratung Stromeffizienz bei der Passivhaussiedlung Hannover Kronsberg (Beispielberatung durch Rasch&Partner)


Projektierung Stromverbrauch		Eingabe Neugeräte
Wohnfläche		117 m²
Kühlschrank vorhanden? (0/1)		0
Normverbrauch lt. Produktinformation		0.28 kWh/Tag
Kühl- Gefrier-Kombination		
vorhanden (nur anstelle getrennter Geräte)? (0/1)		1
Normverbrauch lt. Produktinformation		0.82 kWh/Tag
Gefriergerät vorhanden? (0/1)		0
Normverbrauch lt. Produktinformation		0.5 kWh/Tag
Standort: beheizter Raum (1) oder unbeheizter Keller (0)		1
Spülmaschine vorhanden? (0/1)		1
Normverbrauch lt. Produktinformation		1.2 kWh/Anwendung
bezieht sich auf Maßgedecke (Anzahl)		12
Warmwasseranschluß (1/0)		1
Waschmaschine vorhanden? (0/1)		1
Normverbrauch lt. Produktinformation		1 kWh/Anwendung
bezieht sich auf Fassungsvermögen		5 kg Wäsche
Normverbrauch bezieht sich auf 60°-Wäsche (0) oder Kochwäsche (1)		0
Warmwasseranschluß (1/0)		0
Trockenschrank vorhanden? (0/1)		1
Normverbrauch lt. Produktinformation für 70% Restfeuchte		0.4 kWh/Anwendung
bezieht sich auf Fassungsvermögen		4 kg Wäsche
Restfeuchte lt. Produktinformation Waschmaschine bzw. Schleuder		50%
Elektrisch (0) oder mit Gas (1)		0
Herd Elektroherd (0) oder Gasherd (1) ?		0
Halogen-Strahlungsheizung der Kochmulde bzw. Induktionsplatten? (Wenn ja:1, sonst 0)		0
Beleuchtung Energiesparlampen (1/0)		1
Anteil der Energiesparlampen an der Lichtarbeit		90%

Abbildung 42: Eingabeformular für neue, energieeffiziente Geräte (Beratung Stromeffizienz) (Beispiel aus der Beratung durch Rasch&Partner)

Mit den Daten für Alt- und Neugeräte sowie den Anschaffungskosten für die Neugeräte lassen sich nun bestimmen:

- der Jahresstromverbrauch einer Kombination aus Alt- und Neugeräten,
- die Gesamtinvestition bei Anschaffung der Neugeräte bei dieser Kombination,
- die Energiekosteneinsparung und damit die Wirtschaftlichkeit der Neuanschaffungen.

Projektierung Stromverbrauch		Wohnfläche	
Ergebnisblatt Strombedarf		117	m ²
Anwendung	Stromverbrauch (kWh/a)	nichtelektrischer Verbrauch (kWh/a)	Endenergieverbrauch (kWh/a)
Geschirrspülen	152	96	452
Waschen	222	0	103
Wäschetrocknen	83	0	660
		0	0
Kühlen	0		248
Gefrieren	0		0
oder Kombination	299		0
Kochen	488	0	888
Beleuchtung	180		1448
Elektronik	172		0
Kleingeräte/sonstiges	195		534
Umwälzpumpe	18		510
Hilfsstrom solar	30		579
Hilfsstrom sonst	0		52
Lüftung	221		89
Summe	2059	96	6219
Kennwert	17.6		18.4
Anforderung erfüllt?	ja		ja

Abbildung 43: Ergebnisblatt zur Projektierung der Stromeffizienz; hier: Strombedarf (Beispiel)


Projektierung Wirtschaftlichkeit		 Wohnfläche 117 m ²		
Ergebnisblatt				
Anwendung		eingesparte Energiekosten	zusätzliche Kapitalkosten	Kostenein- sparung (DM)
Geschirrspülen		898	936	
Waschen		444	1 495	
Wäschetrocknen		1 367	763	
Kühlen		916	618	
Gefrieren		1 489	808	
oder Kombination		-	-	
Kochen		-	1 397	
Beleuchtung		1 320	383	
			-	
Zuschuß			2000	
			=	
Summe		6435	- 4400	= 2035

Abbildung 44: Ergebnisblatt zur Projektierung Stromeffizienz; hier: Wirtschaftlichkeit (Beispiel)

Die Wirtschaftlichkeit wird dabei auf der Basis von Kapitalwerten ermittelt: Die eingesparten Energiekosten werden dabei über die Nutzungsdauer der Geräte (z.B. Spülmaschine 12 Jahre) mit dem Realzins kapitalisiert.

Auf diesem Weg läßt sich eine Kombination von beibehaltenen einigermaßen effizienten Altgeräten plus Anschaffung einiger neuer Ersatzgeräte mit hoher Effizienz finden, die sowohl die Anforderung (Strombedarf kleiner gleich 18 kWh/(m²a)) erfüllt als auch einzelwirtschaftlich rentabel ist.

Mit dem hier beschriebenen Instrumentarium wurden von der Außenstelle Hannover des Bauträgers durch Torsten Schwarz insgesamt 18 Erwerber beraten. Die Beratungen waren alle insoweit erfolgreich, als daß rechnerisch die Einhaltung der Anforderung für das CEPHEUS-Projekt „Einhaltung der Stromeffizienzkriterien“ (Strombedarf $\leq 18 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) in 14 von 18 Fällen nachgewiesen werden konnte.

Die Ergebnisse für die projektierten Strombedarfswerte sind in Abbildung 45 dokumentiert. Danach sollte in den Haushalten, welche die Stromeffizienzberatung wahrgenommen haben, ein mittlerer Haushaltsstrombedarf von 1901 kWh/a bestehen. Gegenüber dem durchschnittlichen Referenzwert für vergleichbare Haushalte von ca. 3650 kWh weist die Berechnung eine erhebliche Einsparung aus.

Ob die rechnerisch projektierten Einsparungen auch in der Praxis erreicht wurden, muß die meßtechnische Begleitung des Projektes zeigen. Die Ergebnisse der Messungen sind im Bericht [Peper 2001] dargestellt.

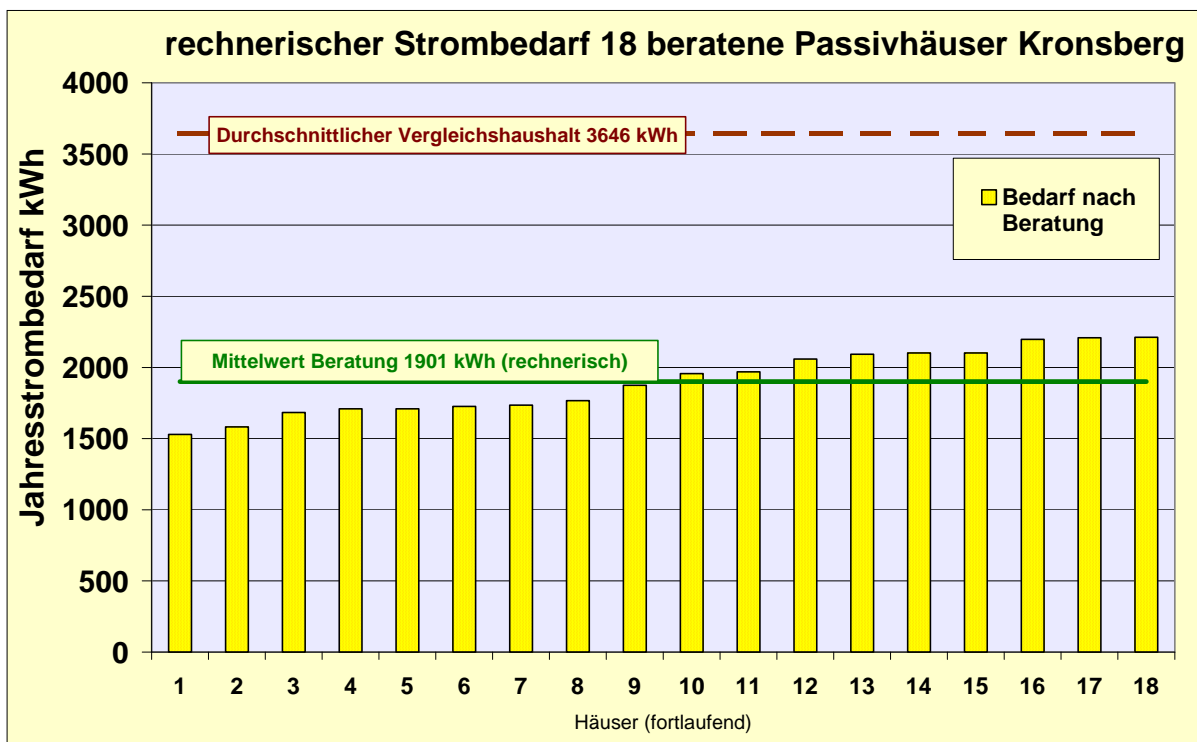


Abbildung 45: Ergebnisse der Projektierung des Haushaltsstrombedarfs in den 18 Beratungsfällen, aufsteigend geordnet (rechnerisch: Meßwerte konnten vor Bezug noch nicht vorliegen).

8 Kosten, Mehrkosten, Wirtschaftlichkeit

8.1 Mehrinvestitionen für Passivhäuser

Für die Passivhäuser auf dem Kronsberg geben die folgenden Tabellen die Netto-Investitionskosten für die relevanten Bauteile und Komponenten wieder. Die Kostenaufstellung berücksichtigt alle Investitionskosten der Kostengruppen 3 und 4, jeweils ohne Mehrwertsteuer, aber inklusive aller Nebenarbeiten wie Randanschlüsse, Verspachtelung etc.. Da die Mehrwertsteuersätze in Europa sehr unterschiedlich sind, hat sich die CEPHEUS-Arbeitsgruppe darauf geeinigt, im Interesse einer besseren Vergleichbarkeit, alle Kosten ohne Mehrwertsteuer anzugeben. Zum Zeitpunkt des Baus der Passivhäuser betrug der Mehrwertsteuersatz in Deutschland 16%.

Für das Erreichen des Passivhausstandards bei den Häusern der Siedlung auf dem Kronsberg waren die folgenden Bauteilverbesserungen relevant:

- Verbesserung der Wärmedämmung Leichtbauaußenwand

Nach Wärmeschutzverordnung '95 wäre hier ein U-Wert von $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ entsprechend einer Dämmstoffstärke von 80 mm ausreichend. Die spezifischen Mehrkosten für den Passivhauswandaufbau mit insgesamt 300 mm Dämmstärke wurden vom Bauträger zu

AW-Leichtbau Mehrkosten 17,90 Euro/m²

angegeben. Das entspricht Kosten von ziemlich genau 1 Euro je cm Dämmdicke und m² Bauteilfläche. Die Gesamtkosten der Leichtbaufassaden lagen laut Bauträger bei 240,31 Euro/m². Damit betragen die dem Passivhaus zurechenbaren Mehrinvestitionen bei den Leichtbaufassadenteilen etwa 8%.

- Verbesserung der Wärmedämmung der Giebelwände mit Wärmedämmverbundsystem

Auch hier würde nach Wärmeschutzverordnung '95 ein U-Wert von $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ausreichen. Die Dämmstoffstärke wurde von 70 mm auf 400 mm erhöht; hierfür gibt der Bauträger Mehrkosten von 25,56 Euro/m² an; die Mehrkosten entsprechen 0,77 Euro je cm Dämmstoffdicke und Quadratmeter. Die Gesamtkosten des Bauteils (Betongiebelwand mit Wärmedämmverbundsystem) wurden zu 145,72 Euro/m² angegeben; die Mehrinvestition für das Passivhaus beträgt damit 21% der ursprünglichen Bauteilkosten.

Passivhaus-Investitionskostenvergleich (01-Deutschland, Hannover-Kronsberg)

spezifische Nettoinvestitionskosten EUR

 Klima:
 Objekt:

 Gebäudetyp/Nutzung:
 Standort:

Für Heizenergieeinsparung:

Bauteile	Menge	Einheit	Bauteilspezifische Gesamtkosten PH	Bauteilspezifische Mehrkosten g. WSWO
1. Fassade Leichtbau	68.63 m ²	Euro/m ²	240.31	17.90
2. Fassade WDVS	80.00 m ²	Euro/m ²	145.72	25.56
3. Dach	80.00 m ²	Euro/m ²	102.26	10.23
4. Grund	71.47 m ²	Euro/m ²	102.26	15.34
5. Fenster	20.10 m ²	Euro/m ²	341.54	111.46
6. Lüftung		Euro	4 601.63	4 601.63
7. Heizwärmeverteilung		Euro	903.58	-1 924.69
8. Drucktest		Euro	153.39	153.39
Nettoinvestitionskosten für Heizenergieeinsparung EUR			56 162.05	10 258.37

Für Warmwasserbereitung:

Komponente	Menge	Einheit	Komponenten: Gesamtkosten PH	Komponenten: Mehrkosten g. WSWO
1. Warmwasserleitungen	36.50 m	EUR/m	20.38	0.00
2. Warmwasserspeicher	1	EUR	1 542.69	766.94
3. Solaranlage	1	EUR	2 273.71	2 273.71
Nettoinvestitionskosten für Warmwasserbereitung EUR			4 560.36	3 040.65
Nettoinvestitionskosten Wärmeeinsparung EUR			60 722.41	13 299.03

Investitionsmaßnahmen für Stromeffizienz:

Ausstattung	Menge	Einheit	Gewährter Investitionskostenzuschuß g. konventioneller Ausstattung
1. Zuschuß elektrische Hausgeräte	1	EUR	1 022.58
Nettoinvestitionskosten für Stromeffizienz EUR			1 022.58
Bauwerkskosten Gruppe 300 und 400 insgesamt			EUR 113 670.41
Bauwerkskosten je m² Bezugsfläche			119.53 m² EUR/m² 951.02
Mehrkostenverhältnis			13.2%

Tabelle 6: Mehrkosten des Passivhausstandards für das Endhaus „JDE“

Passivhaus-Investitionskostenvergleich (01-Deutschland, Hannover-Kronsberg)

spezifische Nettoinvestitionskosten EUR

 Klima:
 Objekt:

 Gebäudetyp/Nutzung:
 Standort:

Für Heizenergieeinsparung:

Bauteile	Menge	Einheit	Bauteilspezifische	Bauteilspezifische
			Gesamtkosten PH	Mehrkosten g. WSVO
1. Fassade Leichtbau	68.63 m ²	Euro/m ²	240.31	17.90
2. Fassade WDVS	0.00 m ²	Euro/m ²	145.72	25.56
3. Dach	76.00 m ²	Euro/m ²	102.26	10.23
4. Grund	71.47 m ²	Euro/m ²	102.26	15.34
5. Fenster	20.10 m ²	Euro/m ²	341.54	111.46
6. Lüftung		Euro	4 601.63	4 601.63
7. Heizwärmeverteilung		Euro	903.58	-1 924.69
8. Drucktest		Euro	153.39	153.39
Nettoinvestitionskosten für Heizenergieeinsparung EUR			44 095.56	8 172.30

Für Warmwasserbereitung:

Komponente	Menge	Einheit	Komponenten:	Komponenten:
			Gesamtkosten PH	Mehrkosten g. WSVO
1. Warmwasserleitungen	36.50 m	EUR/m	20.38	0.00
2. Warmwasserspeicher	1	EUR	1 542.69	766.94
3. Solaranlage	1	EUR	2 273.71	2 273.71
Nettoinvestitionskosten für Warmwasserbereitung EUR			4 560.36	3 040.65
Nettoinvestitionskosten Wärmeeinsparung EUR			48 655.92	11 212.95

Investitionsmaßnahmen für Stromeffizienz:

Ausstattung	Menge	Einheit	Gewährter
			Investitionskostenzuschuß g. konventioneller Ausstattung
1. Zuschuß elektrische Hausgeräte	1	EUR	1 022.58
Nettoinvestitionskosten für Stromeffizienz EUR			1 022.58
Bauwerkskosten insgesamt		EUR	105 837.42
Bauwerkskosten je m² Bezugsfläche		119.53 m²	EUR/m² 885.48
Mehrkostenverhältnis			11.8%

Tabelle 7: Mehrkosten des Passivhausstandards bei den großen Mittelhäusern JDL

Passivhaus-Investitionskostenvergleich (01-Deutschland, Hannover-Kronsberg)

spezifische Nettoinvestitionskosten EUR

 Klima:
 Objekt:

 Gebäudetyp/Nutzung:
 Standort:

Für Heizenergieeinsparung:

Bauteile	Menge	Einheit	Bauteilspezifische	Bauteilspezifische
			Gesamtkosten PH	Mehrkosten g. WSVO
1. Fassade Leichtbau	57.63 m ²	Euro/m ²	240.31	17.90
2. Fassade WDVS	0.00 m ²	Euro/m ²	145.72	25.56
3. Dach	66.45 m ²	Euro/m ²	102.26	10.23
4. Grund	60.00 m ²	Euro/m ²	102.26	15.34
5. Fenster	18.46 m ²	Euro/m ²	341.54	111.46
6. Lüftung		Euro	4 601.63	4 601.63
7. Heizwärmeverteilung		Euro	903.58	-1 924.69
8. Drucktest		Euro	153.39	153.39
Nettoinvestitionskosten für Heizenergieeinsparung EUR			38 742.17	7 518.87

Für Warmwasserbereitung:

Komponente	Menge	Einheit	Komponenten:	Komponenten:
			Gesamtkosten PH	Mehrkosten g. WSVO
1. Warmwasserleitungen	36.50 m	EUR/m ²	20.38	0.00
2. Warmwasserspeicher	1	EUR	1 542.69	766.94
3. Solaranlage	1	EUR	2 273.71	2 273.71
Nettoinvestitionskosten für Warmwasserbereitung EUR			4 560.36	3 040.65
Nettoinvestitionskosten Wärmeeinsparung EUR			43 302.53	10 559.52

Investitionsmaßnahmen für Stromeffizienz:

Ausstattung	Menge	Einheit	Gewährter
			Investitionskostenzuschuß g. konventioneller Ausstattung
1. Zuschuß elektrische Hausgeräte	1	EUR	1 022.58
Nettoinvestitionskosten für Stromeffizienz EUR			1 022.58
Bauwerkskosten insgesamt			EUR 95 611.58
Bauwerkskosten je m² Bezugsfläche		96.78 m²	EUR/m² 987.94
Mehrkostenverhältnis			12.4%

Tabelle 8: Mehrkosten des Passivhausstandards beim kleinen Mittelhaus „JAM“

Passivhaus-Investitionskostenvergleich (01-Deutschland, Hannover-Kronsberg)

spezifische Nettoinvestitionskosten EUR

Klima: Deutschland	Gebäudetyp/Nutzung: Wohnreihenhaus
Objekt: "123" Mittelhaus	Standort: Hannover Kronsberg

Für Heizenergieeinsparung:

	Bauteile	Menge	Einheit	Bauteilspezifische Gesamtkosten PH	Bauteilspezifische Mehrkosten g. WSWO
1.	Fassade Leichtbau	44.00 m ²	Euro/m ²	240.31	17.90
2.	Fassade WDVS	0.00 m ²	Euro/m ²	145.72	25.56
3.	Dach	51.25 m ²	Euro/m ²	102.26	10.23
4.	Grund	46.27 m ²	Euro/m ²	102.26	15.34
5.	Fenster	17.56 m ²	Euro/m ²	341.54	111.46
6.	Lüftung		Euro	4 601.63	4 601.63
7.	Heizwärmeverteilung		Euro	903.58	-1 924.69
8.	Drucktest		Euro	153.39	153.39
Nettoinvestitionskosten für Heizenergieeinsparung EUR				32 199.81	6 808.17

Für Warmwasserbereitung:

	Komponente	Menge	Einheit	Komponenten: Gesamtkosten PH	Komponenten: Mehrkosten g. WSWO
1.	Warmwasserleitungen	36.50 m	EUR/m	20.38	0.00
2.	Warmwasserspeicher	1	EUR	1 542.69	766.94
3.	Solaranlage	1	EUR	2 273.71	2 273.71
Nettoinvestitionskosten für Warmwasserbereitung EUR				4 560.36	3 040.65
Nettoinvestitionskosten Wärmeeinsparung EUR				36 760.17	9 848.83

Investitionsmaßnahmen für Stromeffizienz:

	Menge	Einheit	Gewährter Investitionskostenzuschuß g. konventioneller Ausstattung
1. Zuschuß elektrische Hausgeräte	1	EUR	1 022.58
Nettoinvestitionskosten für Stromeffizienz EUR			1 022.58
Bauwerkskosten insgesamt			EUR 81 800.77
Bauwerkskosten je m² Bezugsfläche			75.05 m² EUR/m² 1 089.91
Mehrkostenverhältnis			13.7%

Tabelle 9: Mehrkosten des Passivhausstandards für den Haustyp „123“

- Verbesserung der Wärmedämmung Dach

Mit einer Dämmstoffdicke von 150 mm im Sparrendach hätte man den Anforderungen der Wärmeschutzverordnung '95 mit einem U-Wert von $0,29 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ genüge getan. Für das Passivhaus wurde eine Dämmstoffstärke von 400 mm gewählt. Die Bauteilkosten werden mit

Dachaufbau Passivhaus-Dach mit $102,26 \text{ Euro}/\text{m}^2$

angegeben, die

Mehrinvestition Passivhaus-Dach mit $10,23 \text{ Euro}/\text{m}^2$.

Daraus ergeben sich Mehrkosten entsprechend etwa $0,41 \text{ Euro}$ je cm Dämmstoffdicke und Quadratmeter oder 11% der ursprünglichen Bauteilkosten.

- Verbesserung der Wärmedämmung Grund

Im Bauteil der EG-Bodenplatte hätte gemäß Wärmeschutzverordnung eine 50 mm Dämmschicht ausgereicht (U-Wert dann $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$). Im Mittel über alle Haustypen beträgt die Stärke der direkt anbetonierten Polystyrolämmung der vorgefertigten Bodenplatte 326 mm; die Baukosten betragen

Bodenplattenaufbau Passivhaus $102,26 \text{ Euro}/\text{m}^2$

Die Mehrinvestition Passivhaus-Boden betrug $15,34 \text{ Euro}/\text{m}^2$,

das entspricht $0,56 \text{ Euro}$ je cm Dämmstoffstärke und m^2 bzw. 18% der ursprünglichen Bauteilkosten.

- Fenster mit Dreischeibenverglasung und Dämmrahmen

Die in diesem Projekt eingesetzten Passivhausfenster sind sowohl bezüglich des Argon-Füllgases als auch bezüglich des Fensterrahmens innovativ. Gewöhnliche Zweischeiben-Wärmeschutzverglasungen in einem Standardrahmen hätten einen Wärmedurchgangskoeffizienten von etwa $1,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ aufgewiesen. Hier wurde $U_w=0,83 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erreicht; allerdings liegt der g-Wert mit $0,60$ geringfügig unterhalb des Vergleichswertes der Zweischeibenverglasung mit $0,62$. Die Gesamtkosten der

Passivhaus-Fenster sind mit $341,54 \text{ Euro}/\text{m}^2$ angegeben.

Sie liegen laut Bauträger um $111,46 \text{ Euro}/\text{m}^2$ über den Kosten vergleichbarer Fenster mit $U_w=1,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Die relativen Mehrkosten von 48% am ursprünglichen Fensterpreis sind hoch; sie gehören neben den Kosten für die Wohnungslüftung zu den bedeutenden Mehrinvestitionen bei einem Passivhaus. Durch steigende Stückzahlen erwarten wir in absehbarer Zukunft eine weitere Senkung der Mehrkosten bei diesem innovativen Fenstertyp.

- Lüftungsanlage

Nach derzeitiger Verordnungslage werden in Deutschland keine Lüftungsanlagen in Wohngebäuden gefordert; überwiegend wird auch in Neubauten keine Wohnungslüftung eingebaut.

Obwohl aus unserer Sicht eine dauerhaft gesicherte Be- und Entlüftung für Wohngebäude eine unverzichtbare Voraussetzung für gesundes Wohnklima auch schon bei konventionellen Neubauten ist, wollen wir gemäß der derzeit noch üblichen Praxis die gesamten

Investitionskosten Wohnungslüftung 4601,63 Euro

für jedes der 32 Passivhäuser hier auch als Mehrinvestition für den Passivhausstandard ansetzen.

Eine einfache Wohnungslüftung auf der Basis einer Abluftanlage mit dezentraler Zuluft durch Außenluftventile wäre mit Investitionskosten in diesem Haus von ca. 1300 Euro realisierbar. Wir sehen davon ab, diese Kosten gegenüber dem Passivhausstandard gegenzurechnen.

- Heizwärmeverteilung

Die beim Projekt noch erforderliche hydraulische Heizwärmeverteilung (Rohrleitungen, Schieber, Badheizkörper) ist sehr einfach und hat nur noch

903,58 Euro (Heizwärmeverteilung)

je Haus gekostet [Stärz 1999]. Die Kostenreduktion gegenüber üblichen Kosten in Höhe der

üblichen Heizwärmeverteilung und -abgabe 2828,27 Euro

je Haus resultiert aus zwei Beiträgen:

- a) Durch die Verringerung der maximalen Heizlast eines Passivhauses gegenüber einem Haus nach Wärmeschutzverordnung von etwa 6 kW auf nur noch 2,5 kW installierte Leistung spart etwa 1400 Euro ein (400 Euro je Kilowatt).
- b) Durch die Zuluftleitungen wird die Heizwärmeverteilung in Wohn-, Eß-, Kinder- und Schlafzimmer mit übernommen, so daß nur noch ein sehr kleiner Heizkörper im Bad benötigt wird. Dadurch entfallen weitere etwa 525 Euro an Investitionskosten für Heizkörper und Verrohrung.

- Luftdichtheitsprüfung

Nach derzeitiger Rechtslage in Deutschland ist eine Luftdichtheitsprüfung bei Neubauten nicht zwingend erforderlich. Für alle Passivhäuser auf dem Kronsberg ist eine solche Prüfung mit Investitionskosten von

153,39 Euro

je Objekt durchgeführt worden. Diese Kosten wurden hier in die Aufstellung der Mehrkosten der Passivhäuser übernommen, obwohl sie eigentlich zu einer fachgerechten Qualitätssicherung bei jedem Neubau gehören sollten und auch von der Stadt Hannover für den Kronsberg-Standard gefordert waren.

- Solaranlagen

Für das CEPHEUS-Projekt war eine thermische Solaranlage gefordert, diese gehört nicht zwingend zum Passivhausstandard. Diese Anlagen haben Mehrinvestitionen erforderlich gemacht:

Für Kollektoren inkl. Montage, Regelung, Wärmeübertrager	2273,71 Euro
für einen vergrößerten und solartauglichen Warmwasserspeicher	766,94 Euro.

Die Summe der Mehrinvestitionen für das Warmwassersystem gegenüber einer konventionellen Anlage betrug damit 3.040,65 Euro oder etwa 800 Euro je Quadratmeter Kollektorfläche (Systemkosten).

Bei der Bestimmung der gesamten investierten Mehrkosten für die einzelnen Gebäudetypen der Passivhaussiedlung müssen die Flächenangaben verwendet werden, die der Abrechnung des Bauträgers Rasch & Partner mit seinen Unterauftragnehmern zugrunde lagen (Tabelle 10). Diese Flächen weichen von den Hüllflächenabmessungen der Wärmebilanzrechnung ab. Dies muß so sein, denn:

- die der Wärmebilanzrechnung zugrunde liegende äußere Hüllfläche ist nicht die für die Abrechnung der Einzelbauteile maßgebliche Fläche;
- die Grenzen zwischen einzelnen Bauteilen sind bei der Wärmebilanz und bei der Abrechnung anders definiert;
- teilweise werden bestimmte Flächenteile bei der Abrechnung übermessen (z.B. kleine Fensteröffnungen in einem Wärmedämmverbundsystem).

Flächen Bauteilabrechnung Rasch&Partner

Bauteil		JDE	JDM	JAM	123	repräsent. Durchschnitts- haus
	Anzahl	8	14	9	1	
Fassade Leichtbau	m ²	68.63	68.63	57.63	44.00	64.77
Fassade WDVS	m ²	80.00				20.00
Dach	m ²	80.00	76.00	66.45	51.25	73.54
Grund	m ²	71.47	71.47	60.00	46.27	67.45
Fenster	m ²	20.10	20.10	18.46	17.56	19.56

Tabelle 10: Die Bauteilflächen, die der Abrechnung des Bauträgers mit den Unterauftragnehmern zugrunde liegen. Achtung: diese Flächen weichen von den Außenhüllflächen der Energiebilanzrechnung ab.

Für die Kostenermittlung müssen selbstverständlich die tatsächlich abgerechneten Bauteilflächen verwendet werden.

Mit den spezifischen Mehrkosten und den Flächen ergeben sich für die vier Gebäudetypen folgende Mehrkosten (jeweils ohne Mehrwertsteuer) für die Heizenergieeinsparung:

Haustyp „Jangster de Lük Endhaus“	10258,37 Euro
Haustyp „Jangster de Lük Mittelhaus“	8172,30 Euro
Haustyp „Jangster Mittelhaus“	7518,87 Euro
Haustyp „123“	6808,17 Euro.

Für die Energieeinsparung bei der Warmwasserbereitung sind die Solaranlage und der zugehörige vergrößerte Warmwasserspeicher gleichermaßen für alle Häuser mit 3.040,65 Euro kostenwirksam.

Aus den Tabellen geht außerdem hervor, daß die Bauwerkskosten je m² Bezugsfläche bei diesem Projekt insgesamt (ohne Mehrwertsteuer) für die Kostengruppe 300 und 400 bei

Haustyp „Jangster de Lük Endhaus“	951,02 Euro/m ²
Haustyp „Jangster de Lük Mittelhaus“	885,48 Euro/m ²
Haustyp „Jangster Mittelhaus“	987,94 Euro/m ²
Haustyp „123“	1089,91 Euro./m ²

lagen. Die Bauwerkskosten lagen damit im unteren Mittelfeld von am Standort üblichen Baukosten vergleichbarer Reihenhäuser.

Die anteiligen Mehrkosten gegenüber einem Gebäude nach gültiger Wärmeschutzverordnung lagen zwischen 11,6% und 13,7% der reinen Baukosten inklusive der

Mehrkosten für die Sonnenkollektoren; betrachtet man allein die Kosten des Passivhausstandards, so lagen diese zwischen 8 und 9% der Baukosten.

Die Zuordnung der Kosten der Giebelwände zu den Endhäusern beinhaltet eine gewisse Willkür (die Giebelwände werden als Abschluß der Reihenhauszeile für alle Häuser benötigt) und entspricht auch nicht der faktischen Kostenzuordnung beim Verkauf der Häuser. Für die Übersichtlichkeit der Darstellung ist es ohnehin nicht sinnvoll, die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen an Hand aller vier Gebäudetypen einzeln zu diskutieren; wegen der vergleichsweise geringen Unterschiede bei den prozentualen Kosten hat dies auch keinen zusätzlichen Erkenntniswert. Daher wurde im nächsten Schritt ein

repräsentatives Haus

definiert, mit welchem die weiteren Untersuchungen durchgeführt werden:

Das „repräsentative Haus“ ist definiert als ein Zweiunddreißigstel (1/32) aller 4 zusammengenommenen Reihenhauszeilen.

Damit lassen sich für alle extensiven Größen (wie beispielsweise Hüllflächen, Luftvolumina, Energieverbrauchswerte, Baukosten etc.) die jeweiligen Werte für das repräsentative Haus als anzahlgewichtete Mittelwerte der entsprechenden Größen der vier Haustypen gewinnen:

$$X_{\text{repr}} = (n_{\text{JDE}}X_{\text{JDE}} + n_{\text{JDM}}X_{\text{JDM}} + n_{\text{JAM}}X_{\text{JAM}} + n_{123}X_{123}).$$

Dabei sind in der Siedlung

$$\begin{aligned}n_{\text{JDE}} &= 8 \\n_{\text{JDM}} &= 14 \\n_{\text{JAM}} &= 9 \\n_{123} &= 1\end{aligned}$$

Mit dieser Definition läßt sich ein PHPP-Rechenblatt für das repräsentative Haus aufstellen. Da die Energiebilanzberechnung nach EN832 nicht streng linear ist, ist eine kleine Abweichung zwischen dem Mittelwert der Energiebedarfswerte und dem Energiebedarfswert des repräsentativen Hauses zu erwarten: tatsächlich ist gemäß Tabelle 11 der Heizwärmebedarf für das repräsentative Haus 11,80 kWh/(m²a) und der flächengewichtete Mittelwert der dokumentierten Haustypen 11,86 kWh/(m²a). Diese Abweichung ist allerdings vernachlässigbar klein.

Für das repräsentative Haus ergeben sich die Mehrkosten (d. s. 1/32 der Mehrkosten aller 32 Passivhäuser auf dem Kronsberg) für den Passivhausstandard zu

Wärmeschutz und Lüftungstechnik	8467,41 Euro (9,1%)
Solaranlage	3040,65 Euro (3,3%)

in Höhe von insgesamt 12,4% der Investitionskosten für ein ansonsten baugleiches Gebäude nach der Wärmeschutzverordnung 1995.

8.2 Vom Haus nach Wärmeschutzverordnung '95 zum Passivhaus

8.2.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Für das repräsentative Haus wurde zunächst bestimmt, welche Bauteile und Komponenten hätten verwendet werden können, wenn es nicht als Passivhaus, sondern allein gemäß der gültigen Wärmeschutzverordnung 95 gebaut worden wäre. Die wesentlichen Änderungen sind wie folgt zusammenzufassen:

- Die U-Werte der Außenwände können auf etwa $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erhöht werden.
- Die Dämmung im Dach wird so reduziert, daß $U_D = 0,29 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.
- Die Geschoßbodenplattendämmung wird mit dem Ergebnis $U_G = 0,61 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ reduziert. Es werden gewöhnliche Standardfensterrahmen und eine Verglasung mit $U(\text{BAZ}) = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und $g = 62\%$ eingesetzt. Damit ergibt sich $U_{\text{Fenster}} = 1,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.
- Eine Lüftungsanlage wird nicht mehr benötigt, dafür
- werden wieder Heizkörper mit einer Gesamtleistung von 6 kW an den Außenfassaden installiert.

Tabelle 12 mit dem Nachweis nach dem Rechengang der Wärmeschutzverordnung '95 zeigt, daß mit den genannten Bauteilkennwerten die Verordnung erfüllt wird. Bei diesem Rechengang wird allerdings nicht die TFA (also annähernd die Wohnfläche) als Bezugswert verwendet, sondern eine weit größere „Nutzfläche“, die in diesem Fall $147,5 \text{ m}^2$ beträgt (zum Vergleich: TFA $111,7 \text{ m}^2$). Auch andere Annahmen im Rechengang der Wärmeschutzverordnung führen zu einem vermeintlich niedrigeren Verbrauchswert (z.B. die Annahme von inneren Wärmequellen in Höhe von fast $5 \text{ W}/\text{m}^2$ - der realistische PHPP-Wert beträgt nur $2,1 \text{ W}/\text{m}^2$). Um einen realistischen Referenzwert für den Jahresheizwärmebedarf des repräsentativen Hauses zu erhalten, wurde die Energiebilanz mit den gerade bestimmten Hüllflächen mit dem Verfahren PHPP noch einmal gerechnet. Dabei wurde angenommen, daß sich an der Luftdichtheit nichts ändert (!) und daß der mittlere Luftwechsel in gleicher Höhe wie beim Passivhaus verbleibt. Auch die wärmebrückenfreie Konstruktion wurde weiter unterstellt, jedoch keine sorgfältige Zusatzdämmung im Bereich des Haushöhenversatzes (im Dach und bei der Erdgeschoß-Bodenplatte) angenommen.

Passivhaus-Projektierung ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME

Klima:	Deutschland	Gebäudetyp/Nutzung:	Wohnreihenhaus
Objekt:	Repräsentatives Passivhaus	Energiebezugsfläche A_{EB} :	111.7 m ²
Standort:	Hannover Kronsberg		

Bauteile	Fläche m ²	U-Wert W/(m ² K)	Reduktionsfaktor ξ	G_T kWh/a	=	kWh/a	pro m ² Energie- bezugsfläche
1. Fassade Leichtbau	53.6	0.126	1.0	84	=	568	
2. Fassade WDVS	20.8	0.097	1.0	84	=	170	
3. Dach	74.8	0.095	1.0	84	=	597	
4. Grund	68.1	0.115	0.5	84	=	329	
5. Versprung Dach	3.0	0.110	1.0	84	=	28	
6. Versprung Grund	2.7	0.209	0.5	84	=	24	
7.					=		
8. Fenster	19.6	0.833	1.0	84	=	1369	
9. Wbrücken außen (Länge/m)	72.28	-0.013	1.0	84	=	-79	
10. Wbrücken Boden (Länge/m)	47.73	0.033	0.5	84	=	66	
Transmissionswärmeverluste Q_T				Summe		3073	27.5

Lüftungsanlage:	wirksames Luftvolumen V_L	A_{EB} m ²	lichte Raumhöhe m	=	m ³		
		111.7	2.50	=	279		
Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmetauschers	η_{WRG}	80%	$\eta_{L,Anlage}$ 1/h	Φ_{WRG}	$\eta_{L,Rest}$ 1/h		
Wärmebereitstellungsgrad des Erdreichwärmetauschers	η_{EWT}	0%	0.430	$(1 - 0.80)$	0.024		
energetisch wirksamer Luftwechsel n_L			0.430	+	0.024	= 0.109	
Lüftungswärmeverluste Q_L	V_L m ³	n_L 1/h	c_{Luft} Wh/(m ³ K)	G_T kWh/a	=	kWh/a	kWh/(m ² a)
	279	0.109	0.33	84	=	848	7.6

Summe Wärmeverluste Q_V	Q_T kWh/a	+ Q_L kWh/a	Reduktionsfaktor Nacht-/Wochenend- absenkung	=	kWh/a	kWh/(m ² a)	
	3073	+ 848	1.0	=	3921	35.1	
Ausrichtung der Fläche	Reduktionsfaktor vgl. Blatt Fenster	g-Wert (senkr. Einstr.)	Fläche m ²	Globalstr. Heizzeit kWh/(m ² a)	=	kWh/a	
1. Ost	0.45	0.60	0.00	235	=	0	
2. Süd	0.49	0.60	11.25	365	=	1200	
3. West	0.45	0.60	0.00	235	=	0	
4. Nord	0.42	0.60	8.31	143	=	297	
5. Horizontal	0.45	0.60	0.00	360	=	0	
Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S				Summe		1497	13.4

Interne Wärmequellen Q_I	kh/d	Länge Heizzeit d/a	spezif. Leistung q_I W/m ²	A_{EB} m ²	=	kWh/a	kWh/(m ² a)
	0.024	225	2.10	111.7	=	1267	11.3
Freie Wärme Q_F				$Q_S + Q_I$	=	2764	24.7
Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten				Q_F / Q_V	=	0.705	
Nutzungsgrad Wärmegewinne η_G				$(1 - (Q_F / Q_V)^5) / (1 - (Q_F / Q_V)^6)$	=	0.941	
Wärmegewinne Q_G				$\eta_G * Q_F$	=	2602	23.3
Heizwärmebedarf Q_H				$Q_V - Q_G$	=	1319	11.80

Tabelle 11: Dokumentation Passivhaus-Projektierungs-Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs für das repräsentative Haus in Hannover-Kronsberg.

Berechnungsblatt für das Verfahren nach der Wärmeschutzverordnung 1995

JAHRESHEIZWÄRMEBEDARF WSV0

Objekt: <input type="text" value="Repräsentatives Passivhaus"/>	Gebäudetyp/Nutzung: <input type="text" value="Wohnreihenhaus"/>
Standort: <input type="text" value="Hannover Kronsberg"/>	Umbautes Volumen <input type="text" value="460.8"/> m ³ WSV0-Nutzfläche <input type="text" value="147.5"/> m ² vgl. Bezugsfläche TFA <input type="text" value="111.7"/> m ² A/V-Verhältnis <input type="text" value="0.51"/> m ⁻¹

Bauteile	Fläche m ²	U-Wert W/(m ² K)	Reduktionsfaktor WSVC	G _t kWh/a	kWh/a
1. Fassade Leichtbau	47.0	0.50	1.0	84	1967
2. Fassade WDVS	20.8	0.50	1.0	84	869
2. Dach	74.8	0.29	0.8	84	1437
3. Grund	68.1	0.61	0.5	84	1738
4. Versprung Dach	3.0	2.43	0.8	84	488
5. Versprung Grund	2.7	3.11	0.5	84	359
6.					
7.					
8. Fenster	19.6	1.90	1.0	84	3122
SUMME	236.0 m ²				

Jahres-Transmissionswärmeverluste Q_T Summe

Luftvolumen V _L	Faktor <input type="text" value="0.76"/>	*	umbautes Vol <input type="text" value="461"/>	=	m ³ <input type="text" value="350"/>
1/h					
energetisch wirksamer Luftwechsel n _L	η _{WRG} <input type="text" value="0.00"/>	η _{L,Anlage} <input type="text" value="0.800"/>	Faktor Anlage <input type="text" value="1.00"/>	Faktor 65% / η _{WRG} <input type="text" value="1.00"/>	= <input type="text" value="0.800"/>
1/h					

Lüftungswärmeverluste Q_L m² * 1/h * c_{Luft} Wh/(m³K) * G_t kWh/a = kWh/a

Summe Wärmeverluste Q_V (kWh/a + kWh/a) * Gleichzeitigkeitsfaktor = kWh/a

Ausrichtung der Fläche	g-Wert (senkr. Einstr.)	Fläche m ²	Globalstr. Heizzeit kWh/(m ² a)	kWh/a
1. Ost	0.567	0.62	0.00	275 = 0
2. Süd	0.567	0.62	11.25	400 = 1582
3. West	0.567	0.62	0.00	275 = 0
4. Nord	0.567	0.62	8.31	160 = 468
5. Horizontal	0.567	0.62	0.00	275 = 0

Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S Summe

Interne Wärmequellen Q_I spezif. interne Quellen kWh/m² * A_N m² = kWh/a

Wärmegewinne Q_G Freie Wärme Q_F: **Q_S + Q_I** =

Heizwärmebedarf Q_H **Q_V - Q_G** = kWh/a **Q_H** kWh/(m²a)

Anforderung Bauwerksart kWh/(m²a) Anforderung erfüllt? **Q_H** kWh/(m²a)

Tabelle 12: Wärmeschutznachweis für das repräsentatives Reihenhaus in einer Variante, die gerade die Wärmeschutzverordnung 1995 erfüllt.

Passivhaus-Projektierung ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME

Klima:	Deutschland																																																																												
Objekt:	Repräsentatives Passivhaus					Gebäudetyp/Nutzung:	Wohnreihenhaus																																																																						
Standort:	Hannover Kronsberg					Energiebezugsfläche A_{EB} :	111.7 m ²																																																																						
								pro m ² Energie- bezugsfläche																																																																					
Bauteile	Fläche m ²	U-Wert W/(m ² K)	Reduktionsfaktor f_t	G_T kKWh/a	=	kWh/a																																																																							
1. Fassade Leichtbau	53.6	0.498	1.0	84	=	2242																																																																							
2. Fassade WDVS	20.8	0.497	1.0	84	=	869																																																																							
2. Dach	74.8	0.286	1.0	84	=	1796																																																																							
3. Grund	68.1	0.608	0.5	84	=	1738																																																																							
4. Versprung Dach	3.0	2.425	1.0	84	=	609																																																																							
5. Versprung Grund	2.7	3.105	0.5	84	=	359																																																																							
6.					=																																																																								
7.					=																																																																								
8. Fenster	19.6	1.900	1.0	84	=	3122																																																																							
9. Wbrücken außen (Länge/m)	72.28	-0.013	1.0	84	=	-79																																																																							
10. Wbrücken Boden (Länge/m)	47.73	0.033	0.5	84	=	66																																																																							
Transmissionswärmeverluste Q_T						Summe	10724		96.0																																																																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 40%;">Lüftungsanlage:</td> <td style="width: 15%;">wirksames Luftvolumen V_L</td> <td style="width: 10%;">A_{EB} m²</td> <td style="width: 10%;">*</td> <td style="width: 10%;">lichte Raumhöhe m</td> <td style="width: 10%;">=</td> <td style="width: 5%;">m³</td> </tr> <tr> <td>Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmetauschers η_{WRG}</td> <td>0%</td> <td>111.7</td> <td>*</td> <td>2.50</td> <td>=</td> <td>279</td> </tr> <tr> <td>Wärmebereitstellungsgrad des Erdreichwärmetauschers η_{EWT}</td> <td>0%</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>energetisch wirksamer Luftwechsel n_L</td> <td>0.430</td> <td colspan="2">* (1 - 0.00)</td> <td>+ 0.024</td> <td>=</td> <td>0.453</td> </tr> <tr> <td></td> <td>V_L m³</td> <td>n_L 1/h</td> <td>*</td> <td>C_{Luf} Wh/(m³K)</td> <td>*</td> <td>G_T kKWh/a</td> <td>=</td> <td>kWh/a</td> <td>kWh/(m²a)</td> </tr> <tr> <td>Lüftungswärmeverluste Q_L</td> <td>279</td> <td>0.453</td> <td>*</td> <td>0.33</td> <td>*</td> <td>84</td> <td>=</td> <td>3509</td> <td>31.4</td> </tr> </table>										Lüftungsanlage:	wirksames Luftvolumen V_L	A_{EB} m ²	*	lichte Raumhöhe m	=	m ³	Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmetauschers η_{WRG}	0%	111.7	*	2.50	=	279	Wärmebereitstellungsgrad des Erdreichwärmetauschers η_{EWT}	0%						energetisch wirksamer Luftwechsel n_L	0.430	* (1 - 0.00)		+ 0.024	=	0.453		V_L m ³	n_L 1/h	*	C_{Luf} Wh/(m ³ K)	*	G_T kKWh/a	=	kWh/a	kWh/(m ² a)	Lüftungswärmeverluste Q_L	279	0.453	*	0.33	*	84	=	3509	31.4																				
Lüftungsanlage:	wirksames Luftvolumen V_L	A_{EB} m ²	*	lichte Raumhöhe m	=	m ³																																																																							
Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmetauschers η_{WRG}	0%	111.7	*	2.50	=	279																																																																							
Wärmebereitstellungsgrad des Erdreichwärmetauschers η_{EWT}	0%																																																																												
energetisch wirksamer Luftwechsel n_L	0.430	* (1 - 0.00)		+ 0.024	=	0.453																																																																							
	V_L m ³	n_L 1/h	*	C_{Luf} Wh/(m ³ K)	*	G_T kKWh/a	=	kWh/a	kWh/(m ² a)																																																																				
Lüftungswärmeverluste Q_L	279	0.453	*	0.33	*	84	=	3509	31.4																																																																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 40%;">Summe Wärmeverluste Q_V</td> <td style="width: 10%;">Q_T kWh/a</td> <td style="width: 10%;">+</td> <td style="width: 10%;">Q_L kWh/a</td> <td style="width: 10%;">* Reduktionsfaktor Nacht-/Wochenend- absenkung</td> <td style="width: 10%;">=</td> <td style="width: 10%;">kWh/a</td> <td style="width: 10%;">kWh/(m²a)</td> </tr> <tr> <td>Summe Wärmeverluste Q_V</td> <td>(10724 + 3509)</td> <td>*</td> <td>1.0</td> <td>=</td> <td>14233</td> <td>127.4</td> </tr> </table>										Summe Wärmeverluste Q_V	Q_T kWh/a	+	Q_L kWh/a	* Reduktionsfaktor Nacht-/Wochenend- absenkung	=	kWh/a	kWh/(m ² a)	Summe Wärmeverluste Q_V	(10724 + 3509)	*	1.0	=	14233	127.4																																																					
Summe Wärmeverluste Q_V	Q_T kWh/a	+	Q_L kWh/a	* Reduktionsfaktor Nacht-/Wochenend- absenkung	=	kWh/a	kWh/(m ² a)																																																																						
Summe Wärmeverluste Q_V	(10724 + 3509)	*	1.0	=	14233	127.4																																																																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S</td> <td style="width: 15%;">Ausrichtung der Fläche</td> <td style="width: 10%;">Reduktionsfaktor vgl. Blatt Fenster</td> <td style="width: 10%;">g-Wert (senkr. Einstr.)</td> <td style="width: 10%;">Fläche m²</td> <td style="width: 10%;">Globalstr. Heizzeit kWh/(m²a)</td> <td style="width: 10%;">=</td> <td style="width: 10%;">kWh/a</td> <td style="width: 10%;">kWh/(m²a)</td> </tr> <tr> <td>1. Ost</td> <td>0.45</td> <td>0.62</td> <td>0.00</td> <td>235</td> <td>=</td> <td>0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2. Süd</td> <td>0.49</td> <td>0.62</td> <td>11.25</td> <td>365</td> <td>=</td> <td>1239</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3. West</td> <td>0.45</td> <td>0.62</td> <td>0.00</td> <td>235</td> <td>=</td> <td>0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>4. Nord</td> <td>0.42</td> <td>0.62</td> <td>8.31</td> <td>143</td> <td>=</td> <td>307</td> <td></td> </tr> <tr> <td>5. Horizontal</td> <td>0.45</td> <td>0.62</td> <td>0.00</td> <td>360</td> <td>=</td> <td>0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S</td> <td colspan="6">Summe</td> <td>1547</td> <td>13.8</td> </tr> </table>										Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S	Ausrichtung der Fläche	Reduktionsfaktor vgl. Blatt Fenster	g-Wert (senkr. Einstr.)	Fläche m ²	Globalstr. Heizzeit kWh/(m ² a)	=	kWh/a	kWh/(m ² a)	1. Ost	0.45	0.62	0.00	235	=	0		2. Süd	0.49	0.62	11.25	365	=	1239		3. West	0.45	0.62	0.00	235	=	0		4. Nord	0.42	0.62	8.31	143	=	307		5. Horizontal	0.45	0.62	0.00	360	=	0		Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S	Summe						1547	13.8										
Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S	Ausrichtung der Fläche	Reduktionsfaktor vgl. Blatt Fenster	g-Wert (senkr. Einstr.)	Fläche m ²	Globalstr. Heizzeit kWh/(m ² a)	=	kWh/a	kWh/(m ² a)																																																																					
1. Ost	0.45	0.62	0.00	235	=	0																																																																							
2. Süd	0.49	0.62	11.25	365	=	1239																																																																							
3. West	0.45	0.62	0.00	235	=	0																																																																							
4. Nord	0.42	0.62	8.31	143	=	307																																																																							
5. Horizontal	0.45	0.62	0.00	360	=	0																																																																							
Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S	Summe						1547	13.8																																																																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Interne Wärmequellen Q_I</td> <td style="width: 10%;">Länge Heizzeit kh/d</td> <td style="width: 10%;">spezif. Leistung $q \cdot l$ W/m²</td> <td style="width: 10%;">*</td> <td style="width: 10%;">A_{EB} m²</td> <td style="width: 10%;">=</td> <td style="width: 10%;">kWh/a</td> <td style="width: 10%;">kWh/(m²a)</td> </tr> <tr> <td>Interne Wärmequellen Q_I</td> <td>0.024</td> <td>225</td> <td>*</td> <td>2.10</td> <td>*</td> <td>111.7</td> <td>=</td> <td>1267</td> <td>11.3</td> </tr> <tr> <td colspan="6">Freie Wärme Q_F</td> <td>$Q_S + Q_I$</td> <td>=</td> <td>2814</td> <td>25.2</td> </tr> <tr> <td colspan="6">Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten</td> <td>Q_F / Q_V</td> <td>=</td> <td>0.198</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="6">Nutzungsgrad Wärmegewinne η_G</td> <td>$(1 - (Q_F / Q_V)^5) / (1 - (Q_F / Q_V)^6)$</td> <td>=</td> <td>1.000</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="6">Wärmegewinne Q_G</td> <td>$\eta_G \cdot Q_F$</td> <td>=</td> <td>2813</td> <td>25.2</td> </tr> <tr> <td colspan="6">Heizwärmebedarf Q_H</td> <td>$Q_V - Q_G$</td> <td>=</td> <td>11420</td> <td>102.2</td> </tr> </table>										Interne Wärmequellen Q_I	Länge Heizzeit kh/d	spezif. Leistung $q \cdot l$ W/m ²	*	A_{EB} m ²	=	kWh/a	kWh/(m ² a)	Interne Wärmequellen Q_I	0.024	225	*	2.10	*	111.7	=	1267	11.3	Freie Wärme Q_F						$Q_S + Q_I$	=	2814	25.2	Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten						Q_F / Q_V	=	0.198		Nutzungsgrad Wärmegewinne η_G						$(1 - (Q_F / Q_V)^5) / (1 - (Q_F / Q_V)^6)$	=	1.000		Wärmegewinne Q_G						$\eta_G \cdot Q_F$	=	2813	25.2	Heizwärmebedarf Q_H						$Q_V - Q_G$	=	11420	102.2
Interne Wärmequellen Q_I	Länge Heizzeit kh/d	spezif. Leistung $q \cdot l$ W/m ²	*	A_{EB} m ²	=	kWh/a	kWh/(m ² a)																																																																						
Interne Wärmequellen Q_I	0.024	225	*	2.10	*	111.7	=	1267	11.3																																																																				
Freie Wärme Q_F						$Q_S + Q_I$	=	2814	25.2																																																																				
Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten						Q_F / Q_V	=	0.198																																																																					
Nutzungsgrad Wärmegewinne η_G						$(1 - (Q_F / Q_V)^5) / (1 - (Q_F / Q_V)^6)$	=	1.000																																																																					
Wärmegewinne Q_G						$\eta_G \cdot Q_F$	=	2813	25.2																																																																				
Heizwärmebedarf Q_H						$Q_V - Q_G$	=	11420	102.2																																																																				

Tabelle 13: Bestimmung des Jahresheizwärmebedarfs für das repräsentative Haus mit Daten gemäß Tabelle 12 (WSVO-Standard) mit dem Verfahren des Passivhaus-Projektierungs-Paketes

Passivhaus-Investitionskostenvergleich (01-Deutschland, Hannover-Kronsberg)

spezifische Nettoinvestitionskosten EUR

 Klima:
 Objekt:

 Gebäudetyp/Nutzung:
 Standort:

Für Heizenergieeinsparung:

Bauteile	Menge	Einheit	Bauteilspezifische	Bauteilspezifische
			Gesamtkosten PH	Mehrkosten g. WSVO
1. Fassade Leichtbau	64.77 m ²	Euro/m ²	240.31	17.90
2. Fassade WDVS	20.00 m ²	Euro/m ²	145.72	25.56
3. Dach	73.54 m ²	Euro/m ²	102.26	10.23
4. Grund	67.45 m ²	Euro/m ²	102.26	15.34
5. Fenster	19.56 m ²	Euro/m ²	341.54	111.46
6. Lüftung		Euro	4 601.63	4 601.63
7. Heizwärmeverteilung		Euro	903.58	-1 924.69
8. Drucktest		Euro	153.39	153.39
Nettoinvestitionskosten für Heizenergieeinsparung EUR			45 234.80	8 467.41

Für Warmwasserbereitung:

Komponente	Menge	Einheit	Komponenten:	Komponenten:
			Gesamtkosten PH	Mehrkosten g. WSVO
1. Warmwasserleitungen	36.50 m	EUR/m	20.38	0.00
2. Warmwasserspeicher	1	EUR	1 542.69	766.94
3. Solaranlage	1	EUR	2 273.71	2 273.71
Nettoinvestitionskosten für Warmwasserbereitung EUR			4 560.36	3 040.65
Nettoinvestitionskosten Wärmeeinsparung EUR			49 795.16	11 508.07

Investitionsmaßnahmen für Stromeffizienz:

Ausstattung	Menge	Einheit	Gewährter Investitionskostenzuschuß g. konventioneller Ausstattung
1. Zuschuß elektrische Hausgeräte	1	EUR	1 022.58
Nettoinvestitionskosten für Stromeffizienz EUR			1 022.58
Bauwerkskosten insgesamt			EUR 104 168.51
Bauwerkskosten je m² Bezugsfläche			EUR/m² 871.52
Mehrkostenverhältnis			12.4%

Tabelle 14: Investitionskosten für Energieeffizienzmaßnahmen beim repräsentativen Haus

Der rechnerische Heizwärmebedarf nach PHPP liegt für ein solches Reihenhaus, das gerade eben der gültigen Wärmeschutzverordnung entspricht, bei 11420 kWh/a, und damit um 9% über dem nach dem Rechenverfahren der Verordnung ermittelten Wert. Diese Abweichung entspricht den von anderen Autoren empirisch gefundenen Differenzen bei Feldmessungen [Eschenfelder 1999].

Daß der wohnflächenspezifische Heizwärmebedarf mit 102 kWh/(m²a) deutlich über den etwa 71 nach dem Rechenverfahren der Wärmeschutzverordnung liegt, ist hauptsächlich auf die sehr viel größere Bezugsfläche im letztgenannten Verfahren zurückzuführen.

Für die Versorgung des Reihenhauses wird der gleiche Anschluß an das Fernwärmenetz angenommen wie bei der gebauten Siedlung; allein der Anschlußwert erhöht sich von 2,5 kW auf 6 kW. Unter Einbeziehung der Rohrleitungsverluste und der Verluste der Wärmeübergabe bestimmt sich der Jahresnutzungsgrad für das Verteilungssystem und den Anschluß beim Standard nach Wärmeschutzverordnung zu 91%. Der Fernwärmeverbrauch für die Heizung beträgt dann 12600 kWh/a. Wegen des geringeren Nutzwärmebedarfs aber nur wenig reduzierter Verluste der Verteilung beträgt der Jahresnutzungsgrad im Passivhaus nur noch etwa 78%.

In den folgenden Schritten wird die Auswirkung der stufenweisen Verbesserung des Gebäudestandards ausgehend vom Referenzfall nach Wärmeschutzverordnung bis zum tatsächlich realisierten Passivhaus betrachtet: Dabei sind in Abbildung 46 die Heizenergieverbrauchswerte und die jeweiligen Energieeinsparungen durch die Einzelschritte dargestellt. Abbildung 47 zeigt die den jeweiligen Schritten zugehörigen Mehrinvestitionen. Schließlich wird in Abbildung 48 der Netto-Äquivalentpreis für eine Kilowattstunde Heizenergie, wie sie durch die Energieeffizienzmaßnahmen bereitgestellt wird, dokumentiert.

Dieser „Preis der eingesparten Kilowattstunde“ ergibt sich durch die annuitätische Umlegung der Mehrinvestitionen in Jahreskosten (reale Kosten, d. h. inflationsbereinigt) auf Kostenbasis der Jahres 2000/2001:

$$P_{\text{Ein}} = (a \cdot I_{\text{Mehr}} + Z) / E_{\text{Ein}},$$

wobei a die Annuität, I_{Mehr} die Mehrinvestition, Z zusätzliche jährliche Kosten (z.B. Wartung) und E_{Ein} die jeweiligen Energieeinsparungen sind [Feist 1998].

Für die Ermittlung der Annuität a wurde ein Realzinssatz von 4%/a angesetzt. Dies entspricht dem langjährigen Mittel des Realzinses für Hypothekendarlehen in Deutschland und in guter Näherung auch den gegenwärtigen Bedingungen (mit etwa 6,5%/a Effektivzins und 2,4%/a Inflationsrate). Die Nutzungsdauer für die baulichen Maßnahmen und die Lüftungstechnik wurde mit 25a angesetzt, für die Solaranlage mit 20a. Daraus ergeben sich Annuitäten von 6,4%/a (real) für die baulichen

Maßnahmen und 7,4%/a für die Solaranlage. Bei den rein baulichen Maßnahmen gibt es keine Wartung oder sonstige Zusatzkosten: Kosten für die Pflege und Nachstellung der Fenster sind in einem Passivhaus nicht höher als bei gewöhnlichen Gebäuden. Die jährlichen sonstigen Kosten der haustechnischen Systeme werden an entsprechender Stelle diskutiert.

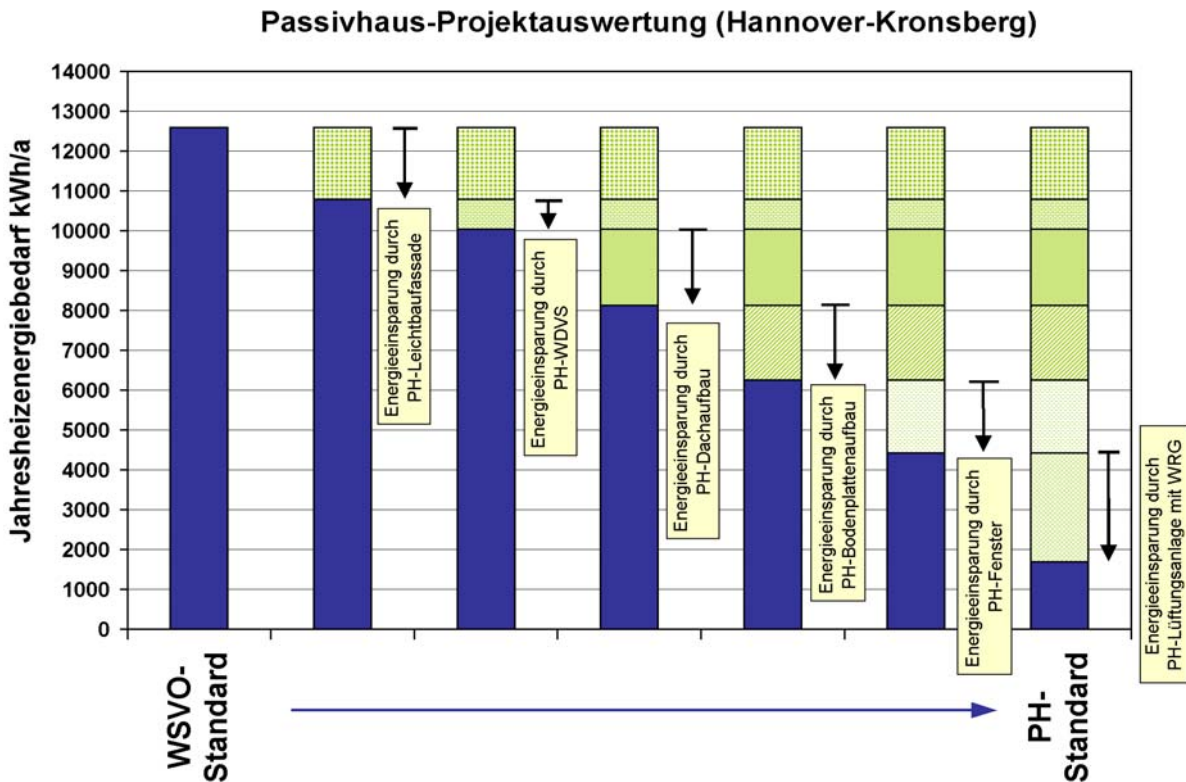


Abbildung 46: In sechs Schritten vom WSVO-Standard zum Passivhaus: Durch im Text beschriebene Energie-Effizienzmaßnahmen wird der Jahresheizenergiebedarf (inkl. Verluste der Haustechnik) um mehr als 80% reduziert. Der ganz rechts dargestellte Passivhausstandard ist in der gebauten Siedlung auf dem Kronsberg realisiert worden.

Die mit dynamischer Wirtschaftlichkeitsrechnung bestimmten „Kosten für die eingesparte Kilowattstunde“ erlauben einen transparenten Vergleich der in der Passivhaussiedlung ergriffenen Effizienzmaßnahmen zu anderen Möglichkeiten der Energiebereitstellung. In Abbildung 48 sind solche Vergleichswerte mit aufgetragen:

Zum einen der tatsächliche Wärmepreis der Fernwärmeversorgung auf dem Kronsberg, der laut Abrechnung 13,72 DPfg/kWh inklusive Mehrwertsteuer beträgt. Daraus ergibt sich ein

Fernwärmepreis Kronsberg ohne MwSt (2001) von 6,05 EuroCent/kWh.

Als weiterer Vergleichswert wurde der durchschnittliche Preis für Heizöl-EL in Deutschland im Zeitraum 6/2000 bis 5/2001 zu 0,71 DM/Liter (ohne Mehrwertsteuer) ermittelt. Wegen der großen Preisschwankungen beim Öl geben wir an

Endenergiepreis Heizöl ohne MwSt (2001) von 3,66±0,44 EuroCent/kWh.

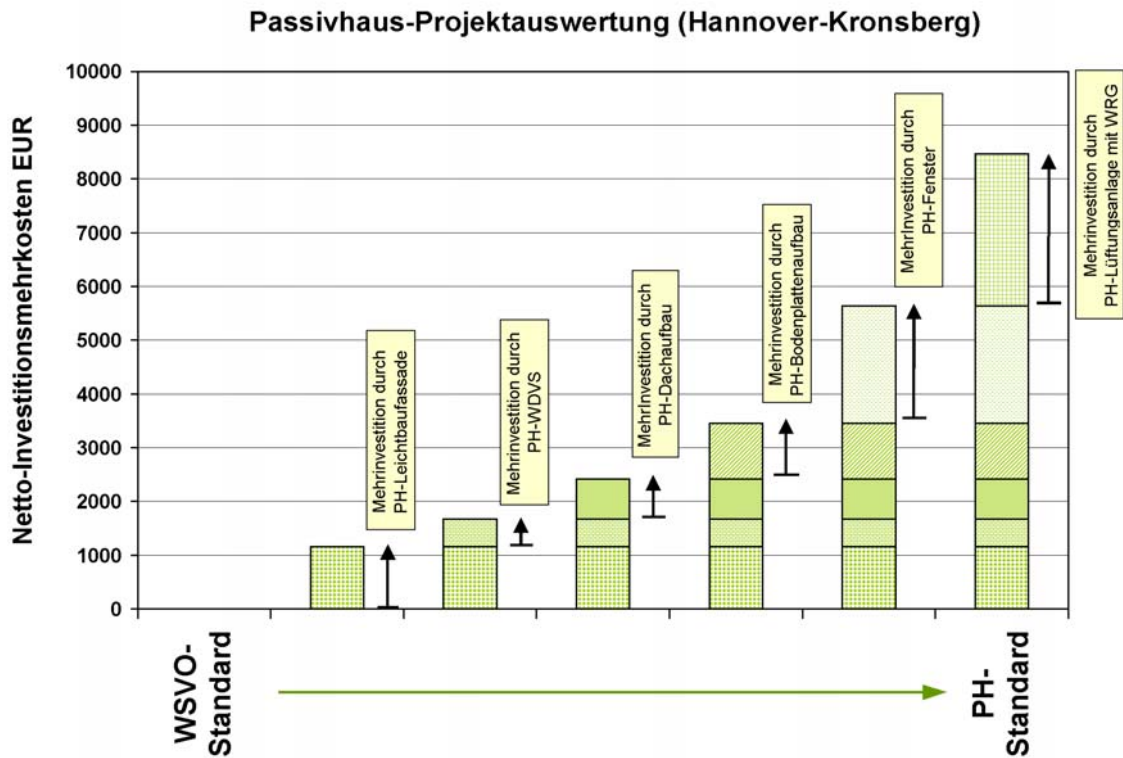


Abbildung 47: Erforderliche Mehrinvestitionen für die Effizienzmaßnahmen nach Abbildung 46.

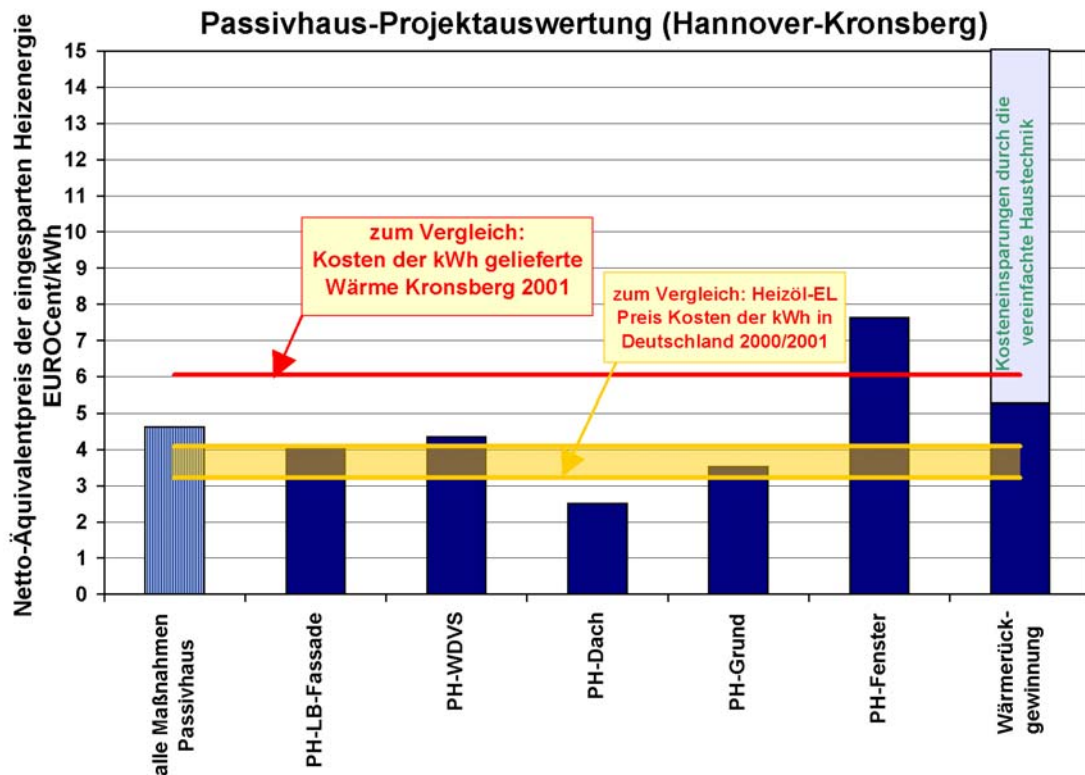


Abbildung 48: Kosten der „eingesparten Kilowattstunde“ durch die Effizienzmaßnahmen im Vergleich zur Fernwärmelieferung und zum Endenergiepreis für Heizöl-EL in Deutschland. Die linke Säule gilt für die Summe aller Maßnahmen (WSVO-Standard → Passivhausstandard), die folgenden jeweils für die zusätzlichen Maßnahmen des Einzelschrittes - Erklärungen im Text.

8.2.2 Schritt I: Passivhaus-Dämmung der Leichtbaufassaden

Durch die Erhöhung der Dämmung der Nord- und Süd-Fassadenelemente resultieren Heizenergieeinsparungen von 14% gegenüber dem Heizenergieverbrauch des Referenzfalles nach Wärmeschutzverordnung. Die Mehrinvestitionen betragen bei 64,8 m² Bauteilfläche 1159 Euro. Es ergeben sich Kosten für die Kilowattstunde eingesparte Energie von 4,1 EuroCent/kWh. Diese Maßnahme ist am Standort somit gegenüber Fernwärmeversorgung einzelwirtschaftlich rentabel und auch im Vergleich zum gegenwärtigen Ölpreis sinnvoll.

8.2.3 Schritt II: Dämmung der Giebelwände mit Wärmedämmverbundsystem

Diese Maßnahme betrifft vor allem die Endhäuser; umgelegt auf das mittlere repräsentative Haus ergibt sich eine Energieeinsparung von 6%. Die Mehrinvestitionen betragen bei anteilig 20 m² im repräsentativen Haus etwa 511 Euro. Die annuitätischen Kosten für die Kilowattstunde eingesparte Energie ergeben sich zu 4,6 EuroCent/kWh. Auch dies ist deutlich günstiger als bezogene Fernwärme und liegt immer noch im Bereich zu erwartender Ölpreise. Auch diese Passivhaus-Wärmedämmmaßnahme ist daher für sich genommen schon heute einzelwirtschaftlich sinnvoll.

8.2.4 Schritt III: Erhöhung der Dachdämmung

Die im repräsentativen Haus erzielte Endenergieeinsparung beträgt etwa 15% des Heizenergiebedarfs des Wärmeschutzverordnungs-Standards. Die Mehrinvestitionen betragen bei 73,5 m² Bauteilabrechnungfläche etwa 1471 Euro. Damit liegt der Preis für die eingesparte Kilowattstunde der Dachdämmung bei 2,4 EuroCent/kWh. Dies ist ganz erheblich günstiger als der gegenwärtige Preis der Fernwärme und auch als der gegenwärtige Heizölpreis. Eine bedeutende Verbesserung der Wärmedämmung im Dach gegenüber den heute üblichen Werten ist damit wirtschaftlich dringend zu empfehlen.

8.2.5 Schritt IV: Dämmung der Erdgeschoß-Bodenplatte

Die Dämmung der Bodenplatte wurde im Fertigteilbauwerk durch eine anbetonierte Polystyrol-Dämmplatte realisiert. Die hierdurch erreichte Energieeinsparung beträgt etwa 15% des Bedarfs nach Wärmeschutzverordnung-Standard. Die Mehrkosten betragen bei 67,5m² abgerechneter Bauteilfläche etwa 1035 Euro. Die annuitätischen Kosten für eine eingesparte Kilowattstunde belaufen sich damit auf 3,5 EuroCent/kWh. Auch dies ist gegenüber der Fernwärmelieferung sehr günstig und im Vergleich zum heutigen Ölpreis einzelwirtschaftlich rentabel.

Mit Schritt IV sind alle Maßnahmen an der opaken Gebäudehülle durchgeführt. Der Heizenergiebedarf nach diesem IV. Schritt beträgt nun noch 56 kWh/(m²a) („6-Liter-Haus“) oder 50 % des Wertes, der mit dem Wärmeschutzverordnung-Standard

erreicht worden wäre. Die dargestellten Schritte zeigen, daß alle bisher diskutierten Maßnahmen zur Verbesserung der opaken Wärmedämmung schon für sich einzelwirtschaftliche Rentabilität erreichen.

8.2.6 Schritt V: Einbau von Passivhaus-Fenstern

Durch die Verwendung von Passivhausfenstern wird eine weitere Energieeinsparung von 15% gegenüber WSVO-Standard erreicht. Bei 19,6 m² Abrechnungsfläche ergeben sich für die hier verwendeten Fenster Mehrkosten in Höhe von 2180 Euro beim repräsentativen Haus. Dies führt zu Kosten der eingesparten Kilowattstunde von 7,6 EuroCent/kW; diese Kosten liegen etwas höher als die Kosten des Fernwärmebezugs. Allerdings erlauben es die verwendeten Passivhausfenster, die Heizungsinstallation deutlich zu vereinfachen: Heizkörper müssen nicht mehr an der Fassade unter den Fenstern stehen, da die mittleren inneren Oberflächentemperaturen oberhalb von 17°C liegen (vgl. auch [Peper/Feist 2001]). Die Einsparungen bei der konventionellen Heiztechnik werden jedoch nicht an dieser Stelle, sondern nachfolgend behandelt.

Aus dem Ergebnis der Analyse zur Wirtschaftlichkeit bei den Fenstern geht hervor, daß eine weitere Mehrkostenreduktion bei Passivhaus-Fenstern angestrebt werden muß; eine solche Kostensenkung ist bei größeren Stückzahlen erreichbar – bei den hier eingesetzten Fenstern handelt es sich um erste Exemplare einer noch kleinen Serie.

Mit der Verwendung der Passivhaus-Fenster ist die Grenze der heute vernünftig allein mit baulichen Maßnahmen erzielbaren Energieeinsparungen erreicht; das repräsentative Haus hat jetzt einen Heizenergiebedarf von etwa 40 kWh/m² (4-Liter-Haus). Weitere Effizienzverbesserungen setzen nun auch eine Reduktion des anteilig sehr hohen Lüftungswärmebedarfs voraus: dieser beträgt nun 53% der Gesamtwärmeverluste, die zu 23% durch solare Gewinne und zu 19% durch innere Wärmequellen gedeckt werden.

8.2.7 Schritt VI: Hocheffiziente Wärmerückgewinnung

Eine Reduzierung der Frischluftmengen zur Verringerung der Lüftungswärmeverluste ist aus hygienischen Gründen ausgeschlossen: Im Gegenteil, eine gute Lösung für die Wohnungslüftung wird die Lüftererneuerung in den Gebäuden sogar erhöhen.

In den Passivhäusern auf dem Kronsberg wurde eine hocheffiziente Wärmerückgewinnungsanlage mit einem Wärmebereitstellungsgrad von etwa 80% verwendet. Diese Anlage wird mit einer mittleren Frischluftmenge entsprechend 120 m³/h betrieben. Die Erfahrung in den bewohnten Häusern zeigt, daß damit eine sehr gute Luftqualität erreicht wird – in sehr kalten Phasen im Winter könnte die Luftmenge sogar noch etwas verringert werden, um eine höhere Raumluftfeuchtigkeit in den Zulufräumen zu erreichen. Die mit der Wärmerückgewinnung erreichte Heizenergie-

einsparung beträgt 22% des Heizenenergieverbrauchs des WSVO-Standards. Mit Schritt VI ist der Standard der tatsächlich gebauten Passivhäuser erreicht: Der verbliebene Heizenergiebedarf bei Standardnutzung beträgt 15 kWh/(m²a).

Die Kosten für die Lüftungsanlage inkl. aller Komponenten mit Einbau, Leitungsnetz, Filter, Regelung und Zentralgerät betragen 4602 Euro. Diesen Investitionskosten sind jedoch die Kosteneinsparungen bei der herkömmlichen Haustechnik gegenüberzustellen. Gemäß Tabelle 15 wurden bereits allein durch die Reduzierung der Heizleistung bei Wärmeverteilung und Wärmeabgabe im Passivhaus 1395 Euro eingespart (7 statt 8 Heizkörper, Leistung von 6 auf 2,5 kW reduziert, Heizkörper an den Innenwänden statt Außenwänden). Durch die Verwendung des Zuluftnachheizregisters anstelle von 6 Heizkörpern ergibt sich eine weitere Einsparung von 529 Euro [Stärz 1999].

Standard		Investitionskosten ohne Mehrwertsteuer		Quelle
		DM	Euro	
Fall 0: WSVO-Standard	übliche Wärmeverteilung; Leistung 6 kW; insgesamt 8 Heizkörper an den Fassaden, inkl. Verteilnetz und Thermostatventilen und aller sonstigen Komponenten	5531.61	2828.27	[Feist 1998]; "Heizung im Niedrigenergiehaus"
Passivhaus-Standard, aber mit Heizkörpern	Wärmeverteilung mit insgesamt 7 Heizkörpern (EG WC gespart) jeweils an den Innenwänden zu Flur/Treppe inkl. verkleinertem Verteilnetz, Thermostatventilen und allen sonstigen Komponenten; Leistung insg. 2.5 kW	2801.72	1432.50	[Stärz 1999] in AK17
Fall PH: Passivhaus-Standard, nur Badheizkörper +Nachheizregister, wie gebaut	Wärmeverteilung mit nur 1 Badheizkörper und Zuluft-Nachheizregister, inkl. aller Komponenten; Leistung insg. 1.3 kW	1767.24	903.58	[Stärz 1999] in AK17
Investitionskosten-Einsparung: Fall 0 - Fall PH		3764.37	1924.69	

Tabelle 15: Durch die starke Reduktion der Heizlast werden Kosten für das Wärmeverteil- und Abgabennetz eingespart. In den Passivhäusern auf dem Kronsberg sind nur noch ein Lüftungs-Nachheizregister und ein Heizkörper im Bad erforderlich.

Insgesamt resultiert eine Investitionskostenreduktion bei der konventionellen Haustechnik um 1924 Euro. Tatsächlich ist die verwendete Lüftungs- und Heiztechnik in den Passivhäusern auf dem Kronsberg um 2678 Euro teurer als eine konventionelle Heizwärmeverteilung in einem Haus mit WSVO-Standard.

Die Kosten für den Drucktest in Höhe von 153 Euro ordnen wir der Übersichtlichkeit wegen ebenfalls dem Lüftungssystem zu; eine geprüfte, luftdichte Gebäudehülle ist die Voraussetzung für eine Funktion des hier verwendeten Systems.

Um die annuitätischen Kosten der Passivhaus-Lüftungsanlage zu bestimmen, werden im folgenden die jährlichen Zusatzkosten Z im einzelnen zusammengestellt:

- a) Kapitalkosteneinsparung durch vereinfachtes Heizsystem (annuitätisch aus -1924 Euro) - 113,38 Euro/a
- b) Leistungspreiseinsparung Fernwärme 3,5 kW - 101,20 Euro/a
- c) Kapitalkosten Drucktest (annuitätisch aus 153 Euro) 9,82 Euro/a
- d) Filterkosten der Lüftungsanlage 35,26 Euro/a
- e) Die Wartung der Lüftungsanlage ist nicht teurer als die Wartung des alternativen Heizsystems. Keine Zusatzkosten.
- f) Stromkosten der Lüftungsanlage:
252,6 kWh/a mit Netto-Stromtarif 11,5 EuroCent/kWh 29,06 Euro/a

Daraus ergeben sich insgesamt Zusatzkosten bei der Lüftungsanlage in Höhe von -150,26 Euro/a. Die annuitätischen Kosten für die Einsparung einer Kilowattstunde Heizwärme betragen damit für das Lüftungssystem

$$P_{\text{EEin, Lüftung}} = (6,4\%/a \cdot 4602 \text{ Euro} - 150,26 \text{ Euro/a}) / 2736 \text{ kWh/a} = 5,27 \text{ EuroCent/kWh.}$$

Bringt man für die Wohnungslüftung nur die Kapitalkosten der Lüftungsanlage und deren Betriebskosten (Strom und Filter) in Ansatz und nimmt keine Gegenrechnung der beim Heizsystem eingesparten Kosten vor, so ergeben sich in diesem Objekt 15 EuroCent/kWh. Aus dieser Gegenüberstellung wird ersichtlich, wie entscheidend die Ausnutzung der Kostenvorteile des Passivhausstandards für den wirtschaftlichen Betrieb von Wohnungslüftungsanlagen ist. Dies war in allgemeiner Form bereits in [Feist 1999] erkannt worden.

Im Vergleich zur bezogenen Fernwärme (6,05 EuroCent/kWh) ist der Betrieb des Wohnungslüftungssystems ebenfalls einzelwirtschaftlich rentabel; gegenüber heutigen Ölkosten sind die Kosten der eingesparten Kilowattstunden allerdings merklich höher. Künftige reale Energiepreise dürften jedoch um 5 EuroCent / kWh liegen.

Nehmen wir nun die gesamten Maßnahmen zum Passivhaus zusammen, so ergeben sich Gesamtmehrinvestitionen für das repräsentative Haus ohne Mehrwertsteuer von 8467 Euro. Inklusive der zur Lüftung gehörenden Zusatzkosten b) d) e) und f) ergeben sich für das Passivhaus dann insgesamt

$$P_{\text{EEin}} = 4,6 \text{ EuroCent/kWh}$$

Diese Kosten für die eingesparte Kilowattstunde liegen deutlich unter dem Fernwärmebezugspreis und nur wenig über dem gegenwärtigen Ölpreis. Wenn mittelfristig von einem Vergleichspreis von 5 EuroCent/kWh ausgegangen wird, so sind die Maßnahmen für das hier beschriebene Passivhaus einzelwirtschaftlich rentabel.

7.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die solare Warmwasserbereitung

Für die Investitionskosten der Solaranlage inkl. Speichermehrkosten waren 3040,65 Euro ermittelt worden. Bei einer Nutzungsdauer von 20 Jahren (Annuität 7,4%) und Stromkosten von 3,45 Euro/a (20kWh á 11,5 EuroCent/kWh) ergeben sich für die gelieferte Kilowattstunde Solarwärme Kosten von

$$P_{\text{Solar}} = 13,8 \text{ EuroCent/kWh}$$

Diese Wärmegestehungskosten sind deutlich höher als die der Fernwärme und weit höher als die Energieeinsparkosten der Effizienzmaßnahmen für das Passivhaus. Die Mehrinvestition in den Passivhausstandard ist nach diesem Ergebnis heute deutlich rentabler als konventionelle thermische Solarkollektoren. Warmwasser-Solaranlagen werden heute als sinnvolle Investition zum Klimaschutz angesehen; wir teilen diese Auffassung, weil die Wärmegestehungskosten noch in einem vertretbaren Verhältnis zu den künftig zu erwartenden Energiepreisen stehen. Die Investition in den Passivhausstandard beim Neubau ist gegenüber thermischen Solaranlagen wirtschaftlich sogar noch günstiger zu beurteilen.

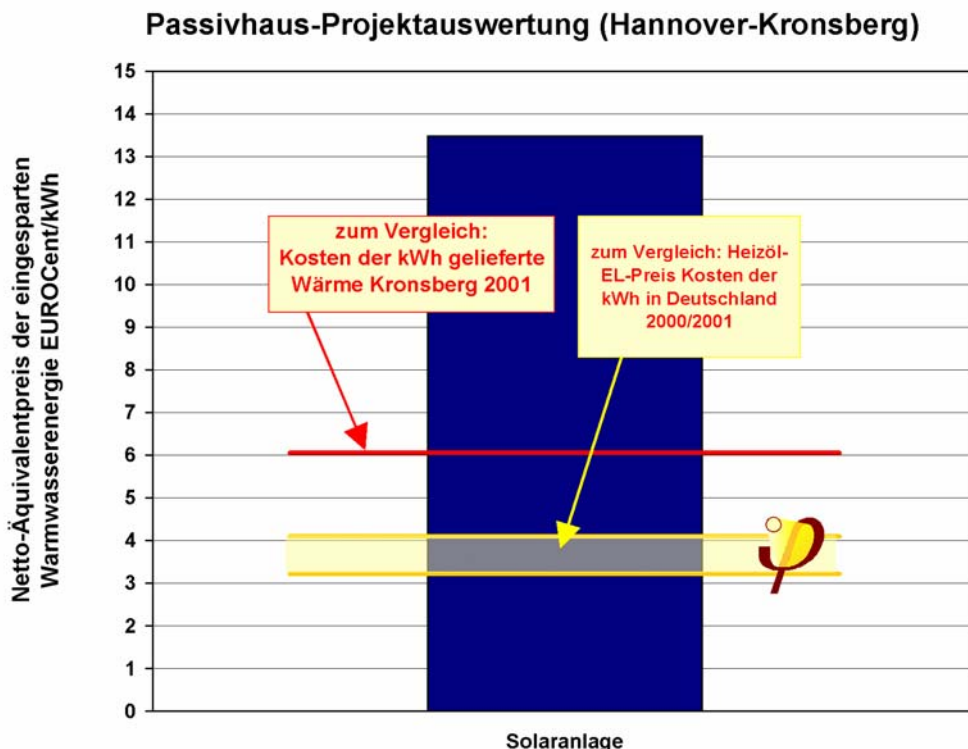


Abbildung 49: Wirtschaftlichkeit der Warmwasser-Solaranlagen: Kosten der solarthermisch bereitgestellten Energie je kWh im Vergleich zum Fernwärme- und Heizöl-EL-Preis.

8.3 Perspektivische Entwicklung

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hat gezeigt, daß die entscheidenden Kostenfaktoren für das Passivhaus bei den Mehrkosten der Fenster und des Lüftungssystems liegen.

Bei beiden Komponenten handelt es sich um innovative Produkte, die erst seit wenigen Jahren am Markt angeboten werden und die derzeit noch in relativ kleinen Stückzahlen produziert werden. Für beide Komponenten zeichnet sich eine weitere Reduktion der Mehrkosten bereits heute ab. So können bei den Lüftungssystemen mittelfristig gegenüber den hier entstandenen Kosten weitere Einsparungen von 700 bis 1000 Euro durch Serienproduktion und weitere Integration erzielt werden. Auch bei den Fenstern sind Grenzkosten, die um 50 bis 100 Euro/m² unter denen beim hier diskutierten Bauprojekt liegen, bei entsprechender Stückzahl erreichbar.

Bestimmt man mit diesen perspektivisch niedrigeren Investitionskosten (Summe dann für das repräsentative Haus 6770 Euro) die äquivalenten Kosten der eingesparten Energie, so ergibt sich auch im Vergleich zu heutigen Ölpreisen bei allen Komponenten eine einzelwirtschaftliche Rentabilität. Die Gesamtkosten für den Passivhausstandard belaufen sich dann auf

$$P_{EEIn,PH,künftig} = 3,6 \text{ EuroCent/kWh}$$

Mit dem Passivhausstandard liegt daher eine technisch erprobte und einzelwirtschaftlich attraktive Möglichkeit vor, den Energieverbrauch für Heizung gegenüber dem üblichen Standard um mehr als 80% zu senken. Ökonomisch noch nicht bewertet ist dabei die Verbesserung der thermischen Behaglichkeit und der Komfortgewinn durch die bessere Luftqualität.

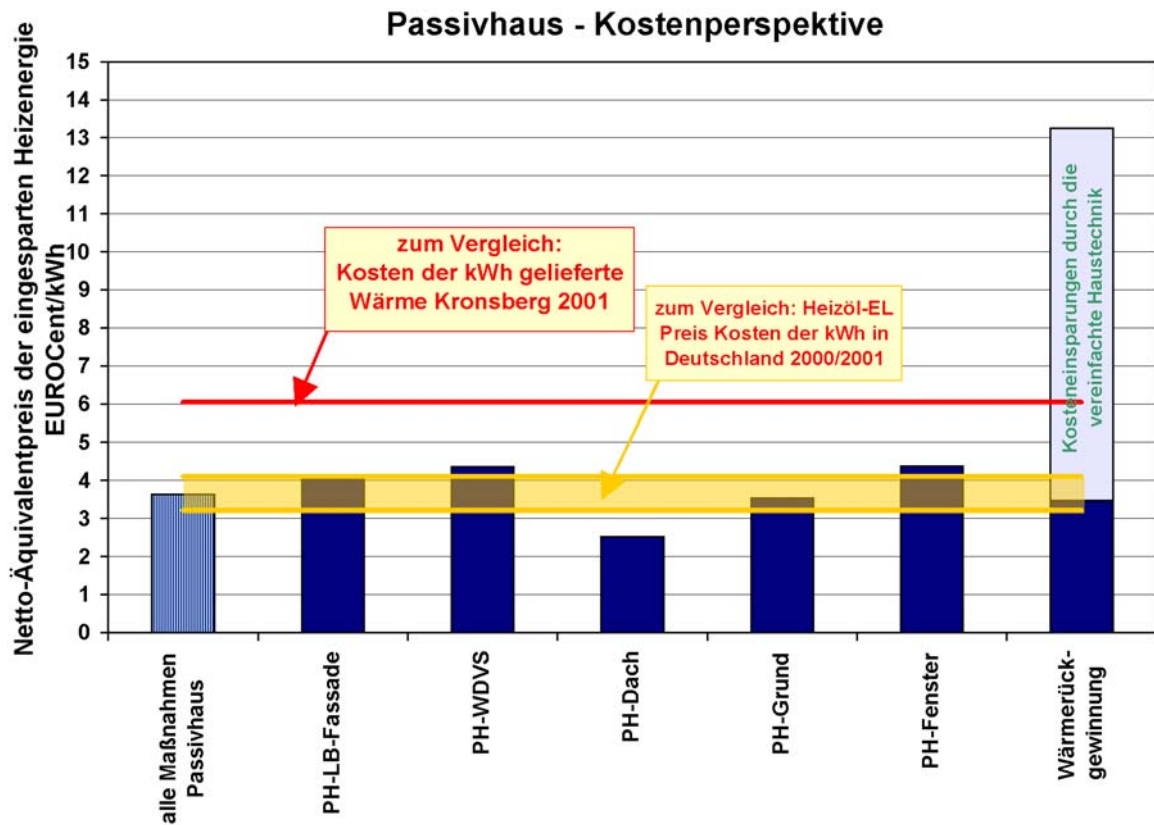


Abbildung 50: Durch größere Serien werden die Mehrkosten bei Fenstern und bei den Passivhaus-Lüftungsanlagen künftig weiter sinken. Bei Reihenhäusern der hier dokumentierten Bauart lassen sich dann die Kosten für die eingesparte Kilowattstunde unter den heutigen Ölpreis (2001) senken.

9 Beschreibung des Bauablaufs

9.1 Zeitliche Daten

Der Planungsbeginn für die Reihenhaussiedlung war 1998. Am 01.09.1998 wurde mit dem Bau begonnen.

Das Richtfest fand im November 1998 statt. Die Fertigstellung erfolgte im Dezember 1998, die ersten Eigentümer zogen bereits im Dezember 1998 ein. Eine Einweihungsfeier fand am 20. Mai 1999 statt.

9.2 Beteiligte und Organisation des Bauablaufs

Bauträger	Rasch und Partner GmbH
Architekten	Petra Grenz
	Folkmer Rasch
Haustechnik	Firma InPlan GmbH, Pfungstadt
Bauleitung	Petra Grenz, Rasch und Partner
Qualitätssicherung	Passivhaus Institut, insbesondere Dr. Wolfgang Feist und Søren Peper im Auftrag von Rasch&Partner

Tabelle 16: Planungsbeteiligte und Bauträger Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg

9.3 Einweisung, Qualifizierung und Qualitätssicherung

Mit der Qualitätssicherung bzgl. des Passivhausstandards bei diesem Bauprojekt hat der Bauträger Rasch und Partner am 03.09.1998 das Passivhaus Institut beauftragt. Die Qualitätssicherung **war bis auf die Thermographie nicht Teil des CEPHEUS-Projektes**, vielmehr wurde eine Qualitätssicherung des Kronsberg-Niedrigenergiehausstandards von der Stadt Hannover, Amt für Umweltschutz, für alle Bauprojekte auf dem Kronsberg gefordert. Die Stadt Hannover hatte hierfür formale Anforderungen (Kronsberg-Standard) aufgestellt, die auch von den Passivhäusern des Bauträgers Rasch und Partner erfüllt werden mußten. Die Anforderungen an den in CEPHEUS geforderten Passivhausstandard gehen weit über die Anforderungen der Stadt hinaus; dennoch mußte auch die Qualitätskontrolle im Sinn der städtischen Anforderungen durchgeführt werden. Hiermit hat das Passivhaus Institut das Ingenieurbüro „Bau+Energie+Umwelt“ (Dipl.Ing. Paul Simons) beauftragt.

Da die Qualitätssicherung bei Passivhäusern einen entscheidenden Beitrag für die funktionale Erfüllung des Passivhausstandards darstellt, soll in dieser Projekt-

dokumentation eine Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse der Qualitätssicherung erfolgen. Diese sind bis auf den Drucktestbericht [Peper 1999] bisher unveröffentlicht. Die hier vorgelegte Dokumentation der Qualitätssicherung wurde im Rahmen des Auftrags der Stadtwerke Hannover durchgeführt; dabei wurden die Ergebnisse der im Auftrag von Rasch&Partner durchgeführten Qualitätssicherung verwendet.

Grundlage für die Qualitätskontrolle bei der Bauausführung waren bemaßte Ausführungspläne und Detailzeichnungen der geplanten Regelaufbauten und Bauteilanschlüsse sowie wärmetechnische Materialangaben der Baustoffe, Dämmstoffe und Befestigungsmittel. Darüber hinaus wurde das Luftdichtheitskonzept anhand von Detailzeichnungen vorab mit dem Bauträger erörtert.

Die Qualitätssicherung wurde mit Ortsterminen bei der Vorfertigung, Baustellenbegehungen, Fotodokumentationen, Drucktests (mit Blower Door) und thermografischen Aufnahmen durchgeführt.

9.3.1 Rohbau

9.3.1.1 Qualitätssicherung im Betonwerk/Vormontage Haustechnik

Die Haustechnikräume im Spitzboden der Häuser wurden bereits beim Hersteller der Betonfertigteile (Betonwerk Müller-Gönnern) so weit wie möglich vorgefertigt. Die Lüftungs- und Wasserinstallationen samt Armaturen wurden dort vormontiert. Jürgen Schnieders vom PHI führte daher im Betonwerk eine Qualitätssicherung durch: Gemeinsam mit dem Haustechnik-Planer Norbert Stärz und der Architektin Petra Grenz wurden die bereits durchgeführten Arbeiten begutachtet und die weiteren Schritte mit den Lüftungsbauern durchgesprochen. Besonderes Augenmerk wurde auf die folgenden Punkte gelegt:

- Wärmedämmung der kalten Seiten der Lüftungsstränge, die innerhalb der Gebäudehülle verlaufen; insbesondere muß die Wärmedämmung dieser Kanäle raumseitig eine sorgfältig luftdichte Dampfsperre erhalten, damit es nicht zur Tauwasserbildung an den kalten Kanaloberflächen kommt;
- Dichtheit der Lüftungsleitungen,
- Lage und Art der Schalldämpfer,
- Zugänglichkeit der Bedienungs- und Wartungseinrichtungen sowie des Lüftungszentralgeräts,
- Schutz vor Beschädigungen beim Transport der Technikcontainer auf die Baustelle,
- Schutz vor Korrosion durch Tauwasser an Befestigungsschrauben, korrekte Montage der Kreuzblenden für die Volumenstrommessung beim Meßprogramm.

9.3.1.2 Vorfertigung der Holztafelbauelemente im Holzbauwerk und Wärmedämmung

Als Holzfertigteilerhersteller hatte der Bauträger Rasch&Partner die Firma „Lehner Holzbau GmbH“ beauftragt. Bereits die Ausführung der Elemente im Holzbauwerk wurde vom PHI am 03.09.1998 vor Ort geprüft. Die Prüfung umfaßte:

- Vollständigkeit und Qualität der Wärmedämmung der vorgefertigten Kastenträger (vgl. Abbildung 51). Es gibt zwei Typen von Kastenträgern: Den Standardtyp mit zwei Holmen 60mm x 60mm und den Spezialtyp für die Fensterlaibung mit drei Holmen (vgl. Detail „Fenstereinbau“ Abbildung 23 unter 2.5 „Darstellung von Anschlußdetails: Luftdichtheit und wärmebrückenfreies Konstruieren“);
- die Qualität der verwendeten Wärmedämmstoffe (generell WLG 040 für alle Wand- und Dachelemente);



Abbildung 51: Mit Mineralwolle gedämmte Kastenträger, auf dem oberen Stapel: Spezial-Boxträger mit drei Holmen für den Fenstereinbau

- der maßgerechte Zuschnitt der Dämmung sowie das paßgenaue Einbringen des Dämmstoffs Mineralwolle in die Tafelbauelemente (Abbildung 52 und Abbildung 53a/b). Dabei muß der Dämmstoff das Element vollständig ausfüllen, er darf nicht so stark gepreßt werden, daß Aufwerfungen entstehen und muß aber andererseits etwa 5 bis 10 mm überhöht sein, so daß die abschließende

Spanplatte den Dämmstoff auf der vollen Fläche leicht komprimiert (Abbildung 54).



Abbildung 52: Die Dämmmatten werden zentimetergenau maßgeschneidert



Abbildung 53a/b: Die Dämmung wird paßgenau in die Holzbauelemente eingebracht



Abbildung 54: Der Dämmstoff muß locker und leicht überhöht im Element liegen, damit sich später keine Hohlräume bilden

- Die Verwendung sachgerechter Materialien für die Herstellung der luftdichtenden Ebene am Holztafelbauelement: Verwendet werden dürfen ausschließlich Wärme- und UV-stabilisierte Polyäthylenfolien [Carlsson/Elmroth 1980].
- Die plangerechte Anbringung der Folie, so daß ein späterer luftdichter Anschluß von Element zu Element ermöglicht wird (Abbildung 55, Abbildung 56 (links) und Abbildung 57 (rechts)).



Abbildung 55: Die Folie wird mit Hilfe des Eckabschlußelementes angeheftet; damit ist der luftdichte Einbau vorbereitet.



Abbildung 56 (links): Fensteröffnung des Fassadenelementes. Die Stöße der Luftdichtungsfolie sind sorgfältig verklebt, die überhängende Folie dient zur Herstellung der Luftdichtheit mit den anschließenden Elementen

Abbildung 57 (rechts): Die fertigen Elemente, vorbereitet für den Transport zur Baustelle. Deutlich erkennbar die überstehenden Folien für die luftdichte Verbindung zu den anderen Bauteilen.

9.3.2 Fenster

9.3.2.1 Verglasungsauswahl

Für die deutschen CEPHEUS-Bauprojekte des Bauträgers Rasch&Partner stellte sich während der Ausführungsplanung das drängende Problem, weiterhin kostengünstige, für das Passivhaus geeignete Verglasungen verfügbar zu halten, nachdem das für die ersten Demonstrationsprojekte allgemein verwendete Füllgas Krypton wegen kurzzeitig mangelnder Marktverfügbarkeit übermäßig teuer angeboten wurde. Vom PHI wurde daraufhin die Verwendung von Verglasungen mit größeren Scheibenabständen (2*16 mm) und Argonfüllung empfohlen. Diese Verglasung besitzt nahezu die gleichen U-Werte wie die bisher verwendeten kryptongefüllten Gläser und ist damit für das Passivhaus geeignet; nach Berechnungen des PHI kann mit einem Verglasungs-U-Wert von $0,75 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ gerechnet werden (Abbildung 58), solange ein Füllgrad über 70% Argon gewährleistet werden kann; dies gilt insbesondere für Berechnung mit dem Passivhaus Projektierungs Paket (PHPP). Die Empfindlichkeit des Verglasungs-U-Wertes gegenüber Gasverlust ist bei Argonfüllung sogar geringer als bei den kryptongefüllten Verglasungen. Durch diese Entwicklungen konnte eine Kostensteigerung beim Bau von Passivhäusern vermieden werden. Wichtig war für dieses Projekt, daß eine Verglasung mit hohem g-Wert gewählt werden konnte (die Auswahl viel auf Vegla „Climatop solar“ mit $g=60\%$).

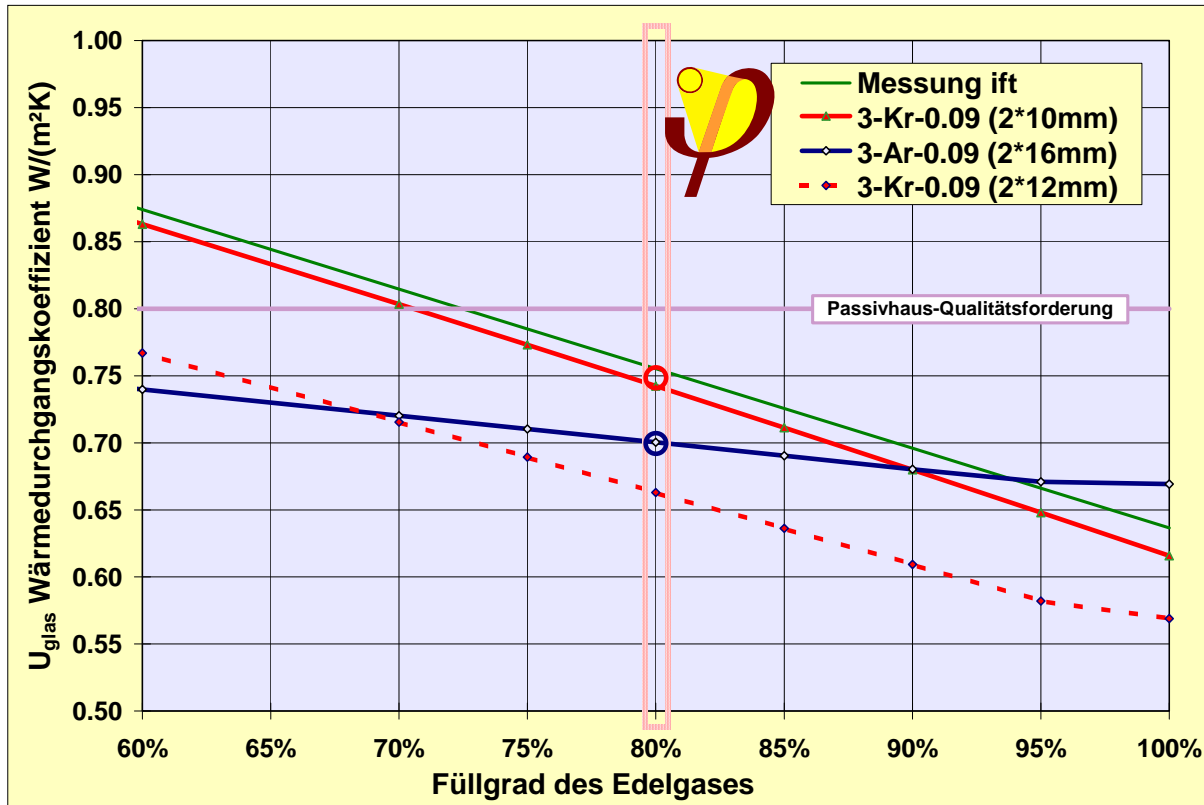


Abbildung 58: Abhängigkeit des U-Wertes der Verglasung vom Edelgas-Füllgrad bei verschiedenen Füllgasen und Scheibenabständen. Für die in die Siedlung Hannover-Kronsberg verwendete 2*16 mm Argonverglasung ist die Empfindlichkeit gegenüber Gasverlusten sogar ausgesprochen gering.

9.3.2.2 Fensterauswahl und -einbau

Bereits für die Passivhaussiedlung in Wiesbaden waren speziell gedämmte Fensterrahmen der Firma Eurotec eingesetzt worden, dort allerdings solche mit dem Aufbau Holz/PU/Holz (PU: Polyurethandämmstoff). Zum Zeitpunkt der Planungen für die deutschen CEPHEUS-Projekte hatte die Firma Eurotec ein neues Passivhausfenster mit dem Aufbau Alu/PU/Holz (von außen nach innen) auf den Markt gebracht.

Hier bestanden zunächst seitens des PHI Bedenken wegen der bauphysikalisch dampfdiffusionsseitig falschen Aufbaufolge: außen dampfdicht, im Kern Dämmstoff und innen weitgehend diffusionsoffen (Holz). Diese Frage wurde wegen ihrer Wichtigkeit für das gesamte CEPHEUS-Projekt vom PHI mit einer gekoppelten zweidimensionalen Wärme- und Feuchtestromberechnung numerisch behandelt [Schnieders 1999]. Ergebnis dieser Berechnungen war, daß eine übermäßige Tauwasserbildung vermieden werden kann, wenn sowohl in ausreichendem Maß für Belüftungsbohrungen in der äußeren Aluminiumschale gesorgt wird als auch die innere Holzschale eine ausreichend dampfbremsende Lackierung erhält. Beides wurde mit dem Hersteller für die Projekte in Hannover und Dietzenbach so vereinbart.

9.3.3 Luftdichtheit

9.3.3.1 Luftdichtheit der Holztafelbauelemente

Die Qualitätskontrolle bei der Fertigung der Elemente wurde bereits unter 8.3.1.2 zusammengefaßt.

9.3.3.2 Anschlüsse zwischen den Elementen

Die Folien stehen an den Rändern der Elemente in einem für Anschlüsse ausreichenden Maß über. Vorgesehen war, die überstehenden Folienstücke von innen her nach der Montage der Elemente und dem Verschließen des gesamten Hauses in aller Ruhe herauszuklappen und an die Folienstücke der jeweiligen Nachbarelemente bzw. die zuvor bauseits verlegten Folienstücke über Wohnungstrennwänden bzw. Geschoßdecken luftdicht zu verkleben. Ortstermine an der Baustelle ergaben, daß diese Arbeiten in der Regel sachgerecht durchgeführt wurden. Vereinzelt waren allerdings insbesondere die unteren Folienstreifen von Handwerkern mit schwerem Schuhwerk begangen worden, wodurch sich Verschmutzungen und teilweise auch Verletzungen der Folien ergaben. In diesen Fällen war der ursprünglich hergestellte Anschluß nicht ausreichend luftdicht und er mußte nachgebessert werden. Im Kapitel 9.3 (Drucktest) wird dokumentiert, daß sich trotz dieser Anschlußbereiche letztendlich in allen Gebäuden ein gutes Ergebnis für die Luftdichtheit erreichen ließ.

9.3.3.3 Dachdurchbrüche der Lüftungsrohre

Die Stellen, an denen die Lüftungsrohre die dichtende Folie im Dachbereich durchstoßen, erfordern zur Gewährleistung der Luftdichtheit besondere Sorgfalt bei Planung und Ausführung. Bereits in der Planungsphase war erkannt worden, daß hier sinnvollerweise ein Mineralwolle-Streifen, welcher mit PE-Folie umgeben ist, eingesetzt wird. Ein entsprechendes Fertigprodukt ist von der Firma Gullfiber (Schweden, 260 50 Billesholm) unter der Bezeichnung „Tätfiber 1011“ zu beziehen.

Statt eines Fertigprodukts kann auf der Baustelle genauso effektiv die Abdichtung einfach aus einem Streifen Mineralwolle und PE-Folienstücken (Höhe ca. 30 cm) hergestellt werden. Dafür wird die Folie der Länge nach übergeschlagen („gefaltet“), so daß sich ein Streifen von etwa 15 cm Höhe als „Tasche“ (V-Form) ergibt (Abbildung 59). Dieser muß so lang sein, daß sich die beiden Enden mindestens 10 cm überlappen wenn sie rund um das Innenrohr in den abzudichtenden Zylinderschlitz gesteckt wird. Die Folientasche wird mit der Öffnung nach unten in den Spalt gesteckt und nachträglich mit Mineralwolle oder mit geschäumter PE-Folie ausgestopft.

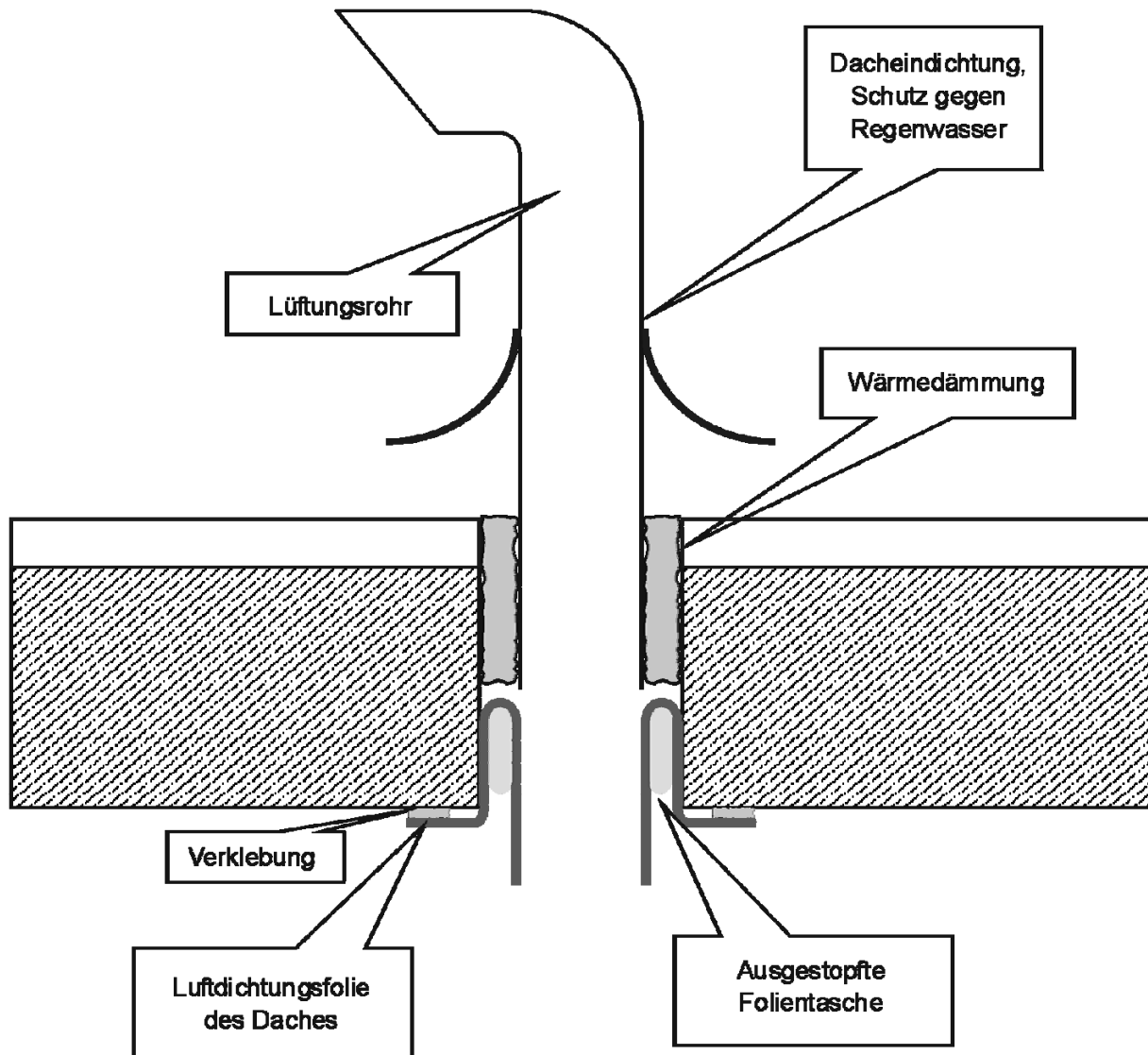


Abbildung 59: Luftdichte Lüftungsrohrdurchführung im Bereich des Daches.

9.4 Erfahrungen mit Beteiligten und mit den geplanten technischen Lösungen hinsichtlich der Realisierung der Qualitätsanforderungen

Der Bau der Häuser in Hannover Kronsberg wurde durch ungünstige Witterungsbedingungen erheblich erschwert. Im gesamten Zeitraum der Errichtung der Häuser regnete es praktisch ununterbrochen; teilweise kam es zu heftigen Sturmböen, die das Aufstellen der Wand- und Dachelemente schwierig werden ließen. Wegen eines nicht zu allen Zeiten ausreichenden Regenschutzes der schon an die Baustelle gelieferten Holzbauelemente und wegen Verletzungen von Schutzfolien der bereits montierten Dachelementen durch Windböen kam es zeitweise zu nicht unerheblichem Eintrag von Regenwasser in die Konstruktion und in die Häuser. Diese Schwierigkeiten hatte mit den passivhausbedingten Anforderungen nichts zu tun, haben aber den Bau und die Möglichkeit der Herstellung der luftdichten Innenhülle ganz erheblich verzögert.

Der Bauträger hat zwar auf diese Probleme schnell und richtig reagiert, indem sofort ein ausreichender hinterlüfteter Regenschutz geschaffen und eine Bautrocknung eingerichtet wurde sowie nach erfolgreichem Abschluß der Trocknung in den betroffenen Hauszeilen ein hinterlüftetes Überdach angebracht wurde (Dachaufdoppelung in Reihe 13+14); dies verzögerte aber den Ablauf, lenkte die Aufmerksamkeit von den eigentlich für das Passivhaus relevanten Details ab und trieb die Kosten nicht unerheblich nach oben.

Aus diesen Erfahrungen kann gelernt werden, daß Holzfertigbauelemente beim Transport und bei der Montage sorgfältig vor Witterungseinflüssen geschützt werden müssen.

Wie die Ergebnisse von Thermographie und Drucktest zeigen, wurden dennoch die Anforderungen bzgl. Wärmebrückenfreiheit und Luftdichtheit in vollem Umfang auch in der Praxis erfüllt. Die Herstellung der jeweiligen Konstruktionen erwies sich als praktikabel, wenn auch bei den Folienanschlußdetails als relativ aufwendig.

10 Ergebnisse qualitätssichernder Maßnahmen

10.1 PHPP-Berechnungen für die Passivhaussiedlung auf dem Kronsberg

Das Passivhaus Projektierungs Paket (PHPP) erlaubt eine zuverlässige energetische Bilanzierung geplanter Passivhäuser [PHPP 1999]. Das Paket beruht für das zentrale Heizwärmeblatt auf der europäischen Norm EN 832. Daneben sind Projektierungen für die Heizlast, die Warmwasserbereitung und den elektrischen Stromverbrauch möglich. Schließlich gibt es eine Dokumentation der technischen Einrichtungen und des Primärenergiebedarfs.

Für der Passivhaussiedlung auf dem Kronsberg wurde eine Berechnung aller 32 individuellen Reihenhäuser mit den jeweils veränderten Randbedingungen (z.B. bzgl. der Verschattung und der Nutzung) vorgenommen. Jedes Haus wurde als Passivhaus zertifiziert, alle Häuser erfüllen die daran geknüpften Bedingungen. Die Prüfung dieser Berechnungen wurden im Rahmen eines Auftrages des Bauträgers Rasch&Partner durchgeführt; dieser war Teil des Kronsberg-Qualitätssicherungs-Programms, welches durch die Stadt Hannover gefördert wurde. Die dabei durchgeführten Maßnahmen waren nicht Teil des CEPHEUS-Projektes und wurden auch nicht aus CEPHEUS finanziert. Da die bisher unveröffentlichten Ergebnisse aber für CEPHEUS von großer Bedeutung sind, werden diese hier aufgearbeitet und in verkürzter Form dokumentiert.

Bei den Passivhäusern auf dem Kronsberg sind vier grundsätzliche Typen zu unterscheiden:

- Reiheneindhäuser; diese sind alle vom Typ Jangster de LUX,
- große Reihemittelhäuser vom Typ Jangster de LUX,
- mittelgroße Reihemittelhäuser vom Typ Jangster,
- kleine Reihemittelhäuser vom Typ „123“.

Für diese vier Typen ist in den folgenden Tabellen das Heizwärmeblatt des Passivhaus-Projektierungspaketes dokumentiert. Die eingesetzten Bauteil-U-Werte gehen aus Abbildung 13 hervor, die Berechnungsergebnisse zu den wärmebrückenfreien Anschlüssen sind in Abschnitt 9.2 dokumentiert. Die Flächenberechnungen wurden anhand der Bauaufnahme aktualisiert, die angegebene Wohnfläche ist bereits die von den CEPHEUS-Partner international abgesprochene „treated floor area“ TFA; im Vergleich zur ursprünglich verwendeten Wohnfläche gemäß II. Berechnungs-Verordnung ergaben sich nur geringe Veränderungen.

Passivhaus-Projektierung

ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME

 Klima:
 Objekt:
 Standort:

 Gebäudetyp/Nutzung:
 Energiebezugsfläche A_{EB} : m²

 pro m²
 Energie-
 bezugsfläche

Bauteile	Fläche m ²	U-Wert W/(m ² K)	Reduktionsfaktor ξ	G_T kWh/a	G_T kWh/a
1. Fassade Leichtbau	62.3	0.126	1.0	84	659
2. Fassade Massivbau	83.2	0.097	1.0	84	681
2. Dach	83.0	0.095	1.0	84	662
3. Grund	76.3	0.091	0.5	84	291
4. Versprung Dach	3.1	0.110	1.0	84	29
5. Versprung Grund	2.8	0.209	0.5	84	25
6.					
7.					
8. Fenster	20.1	0.832	1.0	84	1405
Wbrücken außen (Länge/m)	82.8	-0.019	1.0	84	-135
Wbrücken Boden (Länge/m)	63.0	0.013	0.5	84	35

Transmissionswärmeverluste Q_T
Summe

Luftungsanlage:	wirksames Luftvolumen V_L m ³	A_{EB} m ²	lichte Raumhöhe m	n_L 1/h	n_L 1/h
Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmetauschers	η_{WRG} <input type="text" value="80%"/>	<input type="text" value="119.5"/>	<input type="text" value="2.50"/>	<input type="text" value="0.402"/>	<input type="text" value="0.101"/>
Wärmebereitstellungsgrad des Erdreichwärmetauschers	η_{EWT} <input type="text" value="0%"/>				
energetisch wirksamer Luftwechsel n_L				$n_{L,Anlage} \cdot (1 - \Phi_{WRG}) + n_{L,Rest}$	<input type="text" value="0.101"/>

V_L m ³	n_L 1/h	c_{Luft} Wh/(m ³ K)	G_T kWh/a	Q_L kWh/a
<input type="text" value="299"/>	<input type="text" value="0.101"/>	<input type="text" value="0.33"/>	<input type="text" value="84"/>	<input type="text" value="839"/>

Q_T kWh/a	Q_L kWh/a	Reduktionsfaktor Nacht-/Wochenend- absenkung	Q_V kWh/a
<input type="text" value="3651"/>	<input type="text" value="839"/>	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="text" value="4490"/>

Ausrichtung der Fläche	Reduktionsfaktor vgl. Blatt Fenster	g-Wert (senkr. Einstr.)	Fläche m ²	Globalstr. Heizzeit kWh/(m ² a)	Q_S kWh/a
1. Ost	0.45		0.00	225	
2. Süd	0.50	0.60	11.46	364	1244
3. West	0.45		0.00	225	
4. Nord	0.47	0.60	8.64	142	349
5. Horizontal	0.45		0.00	360	

Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S
Summe

kh/d	Länge Heizzeit d/a	spezif. Leistung q_l Wh/m ²	A_{EB} m ²	Q_I kWh/a
<input type="text" value="0.024"/>	<input type="text" value="225"/>	<input type="text" value="2.10"/>	<input type="text" value="119.5"/>	<input type="text" value="1355"/>

Freie Wärme Q_F	$Q_S + Q_I$	<input type="text" value="2948"/>
-------------------	-------------	-----------------------------------

Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten	Q_F / Q_V	<input type="text" value="0.657"/>
-------------------------------------	-------------	------------------------------------

Nutzungsgrad Wärmegewinne η_G	$(1 - (Q_F / Q_V)^5) / (1 - (Q_F / Q_V)^6)$	<input type="text" value="0.954"/>
------------------------------------	---	------------------------------------

Wärmegewinne Q_G	$\eta_G \cdot Q_F$	<input type="text" value="2814"/>
--------------------	--------------------	-----------------------------------

Heizwärmebedarf Q_H	$Q_V - Q_G$	<input type="text" value="1676"/>
-----------------------	-------------	-----------------------------------

Anforderung Bauwerksart (ankreuzen)	<input type="checkbox"/>	Grenzwert	<input type="text" value="15"/>	Anforderung erfüllt?	<input type="text" value="ja"/>
	<input checked="" type="checkbox"/>	Zielwert			

Tabelle 17: Dokumentation Passivhaus-Projektierungs-Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs für ein Reihenendhaus in Hannover-Kronsberg

Passivhaus-Projektierung

ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME

 Klima:
 Objekt:
 Standort:

 Gebäudetyp/Nutzung:
 Energiebezugsfläche A_{EB}: m²

Bauteile	Fläche m ²	U-Wert W/(m ² K)	Reduktionsfaktor f _r	G _T kWh/a	pro m ² Energie- bezugsfläche kWh/(m ² a)
1. Fassade Leichtbau	55.6	0.126	1.0	84 = 588	
2. Dach	77.7	0.095	1.0	84 = 620	
3. Grund	69.9	0.125	0.5	84 = 366	
4. Versprung Dach	3.0	0.110	1.0	84 = 27	
5. Versprung Grund	2.7	0.209	0.5	84 = 24	
6.				=	
7.				=	
8. Fenster	20.1	0.832	1.0	84 = 1405	
Wbrücken außen (Länge/m)	68.2	-0.011	1.0	84 = -63	
Wbrücken Boden (Länge/m)	48.9	0.038	0.5	84 = 78	
Transmissionswärmeverluste Q_T				Summe 3045	25.5

Lüftungsanlage:	wirksames Luftvolumen V _L m ³	A _{EB} m ²	lichte Raumhöhe m	m ³	
Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmetauschers η _{WRG}	<input type="text" value="80%"/>	<input type="text" value="119.5"/>	<input type="text" value="2.50"/>	<input type="text" value="299"/>	
Wärmebereitstellungsgrad des Erdreichwärmetauschers η _{EWT}	<input type="text" value="0%"/>				
energetisch wirksamer Luftwechsel n _L	<input type="text" value="0.402"/>	<input type="text" value="0.80"/>	<input type="text" value="0.023"/>	<input type="text" value="0.103"/>	
	<input type="text" value="299"/>	<input type="text" value="0.103"/>	<input type="text" value="0.33"/>	<input type="text" value="84"/>	
Lüftungswärmeverluste Q_L				853	7.1

Summe Wärmeverluste Q _V	Q _T kWh/a	Q _L kWh/a	Reduktionsfaktor Nacht-/Wochenend- absenkung	kWh/a	kWh/(m ² a)
	<input type="text" value="3045"/>	<input type="text" value="853"/>	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="text" value="3898"/>	<input type="text" value="32.6"/>
Ausrichtung der Fläche	Reduktionsfaktor vgl. Blatt Fenster	g-Wert (senkr. Einstr.)	Fläche	Globalstr. Heizzeit	kWh/a
1. Ost	<input type="text" value="0.45"/>	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="225"/>	<input type="text" value="1276"/>
2. Süd	<input type="text" value="0.51"/>	<input type="text" value="0.60"/>	<input type="text" value="11.46"/>	<input type="text" value="364"/>	<input type="text" value="280"/>
3. West	<input type="text" value="0.45"/>	<input type="text" value="0.60"/>	<input type="text" value="8.64"/>	<input type="text" value="142"/>	<input type="text" value="360"/>
4. Nord	<input type="text" value="0.38"/>	<input type="text" value="0.60"/>	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00"/>	
5. Horizontal	<input type="text" value="0.45"/>	<input type="text" value="0.60"/>	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00"/>	
Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S				Summe 1556	13.0

Interne Wärmequellen Q _I	kh/d	Länge Heizzeit d/a	spezif. Leistung q _I W/m ²	A _{EB} m ²	kWh/a	kWh/(m ² a)
	<input type="text" value="0.024"/>	<input type="text" value="225"/>	<input type="text" value="2.10"/>	<input type="text" value="119.5"/>	<input type="text" value="1355"/>	<input type="text" value="11.3"/>
Freie Wärme Q _F					<input type="text" value="2911"/>	<input type="text" value="24.4"/>
Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten					<input type="text" value="0.747"/>	
Nutzungsgrad Wärmegewinne η _G					<input type="text" value="0.929"/>	
Wärmegewinne Q_G					<input type="text" value="2704"/>	<input type="text" value="22.6"/>
Heizwärmebedarf Q_H					<input type="text" value="1194"/>	<input type="text" value="10.0"/>

 Anforderung Bauwerksart Grenzwert kWh/(m²a) (ja/nein)
 (ankreuzen) Zielwert Anforderung erfüllt? ja

Tabelle 18: Dokumentation Passivhaus-Projektierungs-Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs für ein Reihemittelhaus Typ „Jangster de LUX“ in Hannover-Kronsberg

Passivhaus-Projektierung ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME

Klima: Deutschland
Objekt: Passivhaus-Mittelhaus, Jangster
Standort: Hannover Kronsberg

Gebäudetyp/Nutzung: Reihenhaus / Wohnungen
Energiebezugsfläche A_{EB}: 96.8 m²

Bauteile	Fläche m ²	U-Wert W/(m ² K)	Reduktionsfaktor ξ	G _T kWh/a	pro m ² Energie- bezugsfläche kWh/(m ² a)	
1. Fassade Leichtbau	45.2	0.126	1.0	84 = 478		
2. Dach	65.4	0.095	1.0	84 = 522		
3. Grund	60.1	0.125	0.5	84 = 315		
4. Versprung Dach	3.0	0.110	1.0	84 = 27		
5. Versprung Grund	2.7	0.209	0.5	84 = 24		
6.				=		
7.				=		
8. Fenster	18.5	0.836	1.0	84 = 1295		
Wbrücken außen (Länge/m)	63.2	-0.011	1.0	84 = -56		
Wbrücken Boden (Länge/m)	43.1	0.042	0.5	84 = 75		
Summe					2681	27.7

Lüftungsanlage:

wirksames Luftvolumen V _L	A _{EB}	lichte Raumhöhe	
	96.8 m ²	2.50 m	242 m ³
Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmetauschers η_{WRG}	80%		
Wärmebereitstellungsgrad des Erdreichwärmetauschers η_{EWT}	0%		
energetisch wirksamer Luftwechsel n _L	0.496	Φ_{WRG} = 0.80	0.026
	* (1 - 0.80) + 0.026 =		0.125

Lüftungswärmeverluste Q_L	V _L m ³	n _L 1/h	c _{Luft} kWh/(m ³ K)	G _T kWh/a	kWh/(m ² a)
	242	0.125	0.33	84 = 839	8.7

Summe Wärmeverluste Q_V	Q _T kWh/a	Q _L kWh/a	Reduktionsfaktor Nacht-/Wochenendaussenkung	Summe kWh/a	kWh/(m ² a)
	2681	839	1.0	3520	36.4

Ausrichtung der Fläche	Reduktionsfaktor vgl. Blatt Fenster	g-Wert (senkr. Einstr.)	Fläche m ²	Globalstr. Heizzeit kWh/(m ² a)	Summe kWh/a	kWh/(m ² a)
1. Ost	0.45		0.00	225		
2. Süd	0.45	0.60	11.00	364	1080	
3. West	0.45		0.00	225		
4. Nord	0.42	0.60	7.46	142	266	
5. Horizontal	0.45		0.00	360		
Summe					1346	13.9

Interne Wärmequellen Q_I	kh/d	Länge Heizzeit d/a	spezif. Leistung q _I W/m ²	A _{EB} m ²	Summe kWh/a	kWh/(m ² a)
	0.024	225	2.10	96.8	1097	11.3

Freie Wärme Q _F	Q _S + Q _I	Summe kWh/a	kWh/(m ² a)
		2443	25.2
Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten	Q _F / Q _V		0.694

Nutzungsgrad Wärmegewinne $\eta_G = (1 - (Q_F / Q_V)^5) / (1 - (Q_F / Q_V)^6) = 0.945$

Wärmegewinne Q_G	$\eta_G * Q_F$	Summe kWh/a	kWh/(m ² a)
		2308	23.8

Heizwärmebedarf Q_H	Q _V - Q _G	Summe kWh/a	kWh/(m ² a)
		1213	12.5

Anforderung Bauwerksart (ankreuzen) Grenzwert Zielwert kWh/(m²a) 15 Anforderung erfüllt? ja

Tabelle 19: Dokumentation Passivhaus-Projektierungs-Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs für ein Reihenmittelhaus Typ „Jangster“ in Hannover-Kronsberg; für das kleinere Haus ist der absolute Wärmebedarf nur wenig geringer als beim größeren Haustyp (vgl. Tabelle 18). Der auf die Energiebezugsfläche bezogene Wert ist daher höher.

Passivhaus-Projektierung ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME

Klima:
 Objekt:
 Standort: Gebäudetyp/Nutzung:
 Energiebezugsfläche A_{EB}: m²

Bauteile	Fläche m ²	U-Wert W/(m ² K)	Reduktionsfaktor ξ	G _t kWh/a	WWh/a	pro m ² Energie- bezugsfläche	
1. Fassade Leichtbau	34.0	0.126	1.0	84	= 360		
2. Dach	53.0	0.095	1.0	84	= 423		
3. Grund	48.8	0.125	0.5	84	= 255		
4. Versprung Dach	3.0	0.110	1.0	84	= 27		
5. Versprung Grund	2.7	0.209	0.5	84	= 24		
6.					=		
7.					=		
8. Fenster	17.6	0.829	1.0	84	= 1226		
Wbrücken außen (Länge/m)	58.2	-0.010	1.0	84	= -48		
Wbrücken Boden (Länge/m)	37.1	0.047	0.5	84	= 73		
Transmissionswärmeverluste Q_T					Summe	2340	31.2

Luftungsanlage:	wirksames Luftvolumen V _L m ³	A _{EB} m ²	lichte Raumhöhe m	m ²
	<input type="text" value="188"/>	<input type="text" value="75.1"/>	<input type="text" value="2.50"/>	<input type="text" value="188"/>
Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmetauschers	η_{WRG} <input type="text" value="80%"/>			
Wärmebereitstellungsgrad des Erdreichwärmetauschers	η_{EWT} <input type="text" value="0%"/>			
Erdreichwärmetauschers		n _{L,Anlage} <input type="text" value="0.533"/>	Φ_{WRG} <input type="text" value="0.80"/>	n _{L,Rest} <input type="text" value="0.037"/>
energetisch wirksamer Luftwechsel n _L		$(1 - 0.80) + 0.037$		= <input type="text" value="0.143"/>

Luftungswärmeverluste Q _L	V _L m ³	n _L 1/h	c _{Luft} Wh/(m ³ K)	G _t kWh/a	WWh/a	WWh/(m ² a)
	<input type="text" value="188"/>	<input type="text" value="0.143"/>	<input type="text" value="0.33"/>	<input type="text" value="84"/>	= <input type="text" value="746"/>	<input type="text" value="9.9"/>

Summe Wärmeverluste Q _V	Q _T WWh/a	Q _L WWh/a	Reduktionsfaktor Nachts-/Wochenend- absenkung	WWh/a	WWh/(m ² a)
	<input type="text" value="2340"/>	<input type="text" value="746"/>	<input type="text" value="1.0"/>	= <input type="text" value="3087"/>	<input type="text" value="41.1"/>

Ausrichtung der Fläche	Reduktionsfaktor vgl. Blatt Fenster	g-Wert (senkr. Einstr.)	Fläche m ²	Globalstr. Heizzeit WWh/(m ² a)	WWh/a	WWh/(m ² a)	
1. Ost	0.45		0.00	225	=		
2. Süd	0.42	0.60	10.56	364	=	964	
3. West	0.45		0.00	225	=		
4. Nord	0.46	0.60	7.04	142	=	278	
5. Horizontal	0.45		0.00	360	=		
Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S					Summe	1242	16.5

Interne Wärmequellen Q _I	kh/d	Länge Heizzeit d/a	spezif. Leistung q _I W/m ²	A _{EB} m ²	WWh/a	WWh/(m ² a)	
	<input type="text" value="0.024"/>	<input type="text" value="225"/>	<input type="text" value="2.10"/>	<input type="text" value="75.1"/>	= <input type="text" value="851"/>	<input type="text" value="11.3"/>	
Freie Wärme Q _F					Q _S + Q _I	= <input type="text" value="2093"/>	<input type="text" value="27.9"/>
Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten					Q _F / Q _V	= <input type="text" value="0.678"/>	
Nutzungsgrad Wärmegewinne η_0					$(1 - (Q_F / Q_V)^5) / (1 - (Q_F / Q_V)^6)$	= <input type="text" value="0.949"/>	

Wärmegewinne Q _G	η_0	Q _F	WWh/a	WWh/(m ² a)
	<input type="text" value="0.949"/>	<input type="text" value="2093"/>	= <input type="text" value="1986"/>	<input type="text" value="26.5"/>

Heizwärmebedarf Q _H	Q _V - Q _G	WWh/a	WWh/(m ² a)
	<input type="text" value="1101"/>	= <input type="text" value="1101"/>	<input type="text" value="14.7"/>

Anforderung Bauwerksart Grenzwert WWh/(m²a) (ja/sein)
 (ankreuzen) Zielwert Anforderung erfüllt? ja

Tabelle 20: Dokumentation Passivhaus-Projektierungs-Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs für das Reihenmittelhaus Typ „Einszweidrei“ in Hannover-Kronsberg; für dieses sehr kleine Haus ist der absolute Wärmebedarf kaum geringer als beim größeren Haustyp (vgl. Tabelle 19). Der auf die Energiebezugsfläche bezogene Wert ist daher deutlich höher und das Haus erreicht nur knapp den geforderten Grenzwert für Passivhäuser.

10.2 Berechnungen zu Wärmebrücken

Alle Anschlußdetails zwischen Bauteilen wurden mit zwei- und dreidimensionalen numerischen Wärmestromprogrammen berechnet und die Details den Ergebnissen entsprechend optimiert. Die Details und ihre Wärmebrückenverlustkoeffizienten waren bereits in 2.5 dokumentiert worden. Hier werden in Tabelle 6 alle Einzelwerte, die Längen der Wärmebrücken und der resultierende Gesamtleitwert H_{WBV} zusammengestellt. Alle Terme werden anschließend zu zwei Gesamtwerten zusammengefaßt: Die Gesamtlänge aller Wärmebrücken gegenüber Außenluft und deren mittlerer Wärmebrückenverlustkoeffizient, der sich als negativ erweist, und die entsprechende Länge gegenüber Erdreich; hier ist der resultierende zusätzliche spezifische Wärmeverlust positiv, vor allem wegen der Wärmeverluste über die Höcker (vgl. Abschnitt 2.5). In der Gesamtsumme ist es jedoch gelungen, die Wärmebrücken so weit zu reduzieren, daß sich gegenüber einer Berechnung nur über die Regelbauteilflächen der Außenhülle durch die Berücksichtigung der Wärmebrücken sogar eine Verringerung der Wärmeverluste ergibt. Die Prinzipien des „wärmebrückenfreien Konstruierens“ wurden bei diesem Projekt also erfolgreich umgesetzt.

Bezeichnung	Außenmaß- bezogener	Länge der Wärmebrücke	Länge der Wärmebrücke	Länge der Wärmebrücke	Länge der Wärmebrücke
	Ψ	J delüx EH	J delüx MH	Jangster MH	123 Mittelhaus
	[W/mK]	[m]	[m]	[m]	[m]
Giebel-Dach	-0,0554	12,53	0,00	0,00	0,00
Leichtwand-Dach	-0,0520	12,48	12,48	10,48	8,08
Trennwand-Dach, oben	-0,0016	0,00	11,45	11,45	11,45
Trennwand-Dach, unten	0,0073	11,45	11,45	11,45	11,45
First	-0,0135	6,24	6,24	5,24	4,04
Außenkanten	-0,0536	12,30	0,00	0,00	0,00
Außenwand- Deckenanschluß	0,0149	12,48	12,48	10,48	8,08
Außenwand- Trennwand	0,0156	11,63	11,63	11,63	11,63
Unterzug unter der Bodenplatte, klein	0,0136	12,48	12,48	10,48	8,08
Unterzug unter der Bodenplatte, groß	0,0307	12,48	12,48	10,48	8,08
Giebel-Boden	-0,0930	11,45	0,00	0,00	0,00
Leichtwand-Boden	-0,0151	12,48	12,48	10,48	8,08
Höcker	0,0481	11,45	11,45	11,45	11,45
Summe Wärmebrücken gegen Außen		-1,607	-0,751	-0,664	-0,576
Länge Außen		82,79	68,18	63,18	58,18
$\Psi_{\text{Mittel, Außen}}$		-0,019	-0,011	-0,011	-0,010
Summe Wärmebrücken gegen Erdreich		0,824	1,857	1,795	1,737
Länge Erdreich		63,03	48,88	43,14	37,14
$\Psi_{\text{Mittel, Erdreich}}$		0,013	0,038	0,042	0,047

Tabelle 21: Dokumentation der Wärmebrücken, ihrer Wärmebrückenverlustkoeffizienten beim Reihenhendhaus vom TYP Jangster de lüx, die maßgeblichen Längen und die Zusammenfassung zu zwei Wärmebrückentermen im PHPP.

10.3 Ergebnisse von Luftdichtheitstests

Zwischen dem 8. Dezember 1998 und dem 12. Februar 1999 wurden im Rahmen der Qualitätssicherung im Auftrag des Bauträgers Rasch & Partner und mit Förderung durch die Landeshauptstadt Hannover alle 32 Passivhäuser auf ihre Luftdichtheit untersucht. Durchgeführt wurde die Messung von der Ingenieurgemeinschaft Bau +

Energie + Umwelt in Zusammenarbeit mit dem Passivhaus Institut. Eine detaillierte Beschreibung und Auswertung der Messung der Passivhaussiedlung liegt mit [Peper 1999] vor. Hier sollen nur die wichtigsten Ergebnisse kurz dokumentiert werden.

Die Drucktestmessungen wurden mit einer Blower Door (Fa. Minneapolis, Modell 4) durchgeführt. Die Gebäudehüllen waren zu den Meßterminen geschlossen (alle Türen und Fenster eingebaut), die Beplankung der Außenwände von innen allerdings auch schon fast überall geschlossen, da diese vorgefertigt angeliefert wurden. Damit konnte die eigentliche luftdichte Ebene nur indirekt überprüft werden. Vor den eigentlichen Messungen wurde jedes Haus entsprechend vorbereitet, indem die Durchführungen für Lüftungsrohre und Solaranlagenleitungen sowie alle Wasser-/Abwasserrohre abgedichtet wurden. Die Blower Door wurde in die geöffneten Terrassentüren eingesetzt. Bei einem konstanten Unterdruck von 50 Pa sind im gesamten Gebäude an allen Anschlüssen und Durchführungen Restleckagen gesucht und nach Möglichkeit nachgebessert worden. Dabei wurden die Luftgeschwindigkeiten der Hauptleckagen mit Hilfe eines Hitzdraht-Anemometers quantifiziert. Für die Nachbesserungen war es sehr hilfreich, daß alle beteiligten Handwerker noch auf der Baustelle anwesend waren und fachgerecht kleinere Leckagen abdichten konnten.

Gefundene Hauptleckagen:

1. Anschluß Außenwandelemente an Betonteile
2. Auflagerfugen Giebelwände auf Boden- und Geschoßplatten
3. Dichtung und Anschluß von Haustüren und Fenster
4. Kabeldurchführungen durch die Bodenplatte und durch die Wände des Technikraums
5. Betonrisse
6. Sanitärrohre und Wasserleitungen
7. Dachdurchführungen

Bei den gefundenen Restleckagen handelt es sich fast immer um kleinere Mängel. Als besonders wichtig hat sich das Nachstellen der Fenster und Haustüren herausgestellt. Dadurch konnten die Dichtheitswerte regelmäßig deutlich verbessert werden.

10.3.1 Messungen

Für die eigentlichen Messungen wurden mittels der Blower Door verschiedene Druckdifferenzen (ca. 20 bis 60 Pa, jeweils Über- und Unterdruck) zwischen Haus und Umgebung erzeugt und die zugehörigen Volumenströme an der Meßeinrichtung mittels elektronischem Auswertesystem aufgezeichnet. Daraus wurde der mittlere

Volumenstrom bei einer Druckdifferenz von 50 Pa ermittelt und mit dem Gebäudevolumen ins Verhältnis gesetzt. So ergibt sich ein von der Hausgröße (Volumen) unabhängiger Vergleichswert der Luftdichtheit mit der Bezeichnung n_{50} und der Einheit $[h^{-1}]$.



Abbildung 60: Eingebaute Blower Door in die geöffnete Terrassentür bei einer Messung in der Siedlung. Im Vordergrund Druckmessdosen und Laptop zur Datenaufzeichnung.

Es wurde jedes Haus auf diese Weise einzeln gemessen. Die thermische Hülle umschließt jedoch jeweils eine gesamte Hauszeile. Unter diesem Blickwinkel wird klar, daß auch bei der Luftdichtheit die Ex- und Infiltrationen gegen die Außenumgebung entscheidend ist und nicht die Luftströme in die jeweiligen Nachbarhäuser. Diese gilt es zwar auch zu minimieren, allerdings vor allem aus hygienischen Gründen (Geruchsbelästigung durch Nachbarwohnungen) und zur Vermeidung von Bauschäden (Kondensatbildung bei Exfiltration feuchter Raumluft). Aus diesem Grund wurden für jedes Haus auch sog. Schutzdruckmessungen durchgeführt.

Durch die **Schutzdruckmessung** (auch „Guard-Zone-Messung“ oder „Gegendruck-Verfahren“) läßt sich die Größe der Leckagen zwischen einem Haus und einer angrenzenden Zone ermitteln, in diesem Fall also zwischen einem Einzel-Reihenhaus und seinen Nachbarhäusern.

Dabei wird in dem zu untersuchenden Haus 50 Pa Unterdruck erzeugt und abgewartet bis der dazu notwendige Volumenstrom sich konstant eingestellt hat. Anschließend wird im angrenzenden Haus mit einer zweiten Blower Door ebenfalls ein Unterdruck von 50 Pa aufgebaut. Bei vorhandenen Leckagen zum entsprechenden Nachbargebäude verringert sich der Leckagevolumenstrom im zu untersuchenden Objekt. Durch Differenzbildung der beiden Volumenströme (mit und ohne Schutzdruck im Nachbarhaus) ergibt sich der Anteil der Leckagen zu diesem Nebenhaus. Bei zwei Nachbargebäuden ergibt die Summe beider festgestellter Schutzdruck-Volumenströme den für das Haus maßgeblichen Wert. Diese Messungen sind für alle 32 Reihenhäuser zu ihren jeweiligen ein oder zwei Nachbarhäusern durchgeführt worden. Die so ermittelten Schutzdruck-Leckageströme zu den jeweiligen Nachbarhäusern werden von dem Volumenströmen der eigentlichen Dichtheitsmessung abgezogen, um den relevanten Luftdichtheitswert (gegen Außenluft) des Gebäudes zu bestimmen.

10.3.2 Drucktest Meßergebnisse

Die Meßwerte der Luftdichtheitsuntersuchung ergeben trotz der kleineren Mängel optimale Ergebnisse von $n_{50} = 0,17$ bis $0,4 \text{ h}^{-1}$, der Mittelwert aller Häuser ergibt den beachtlich niedrigen Wert von $n_{50 \text{ Mittel}} = 0,29 \text{ h}^{-1}$. Damit wird der Grenzwert für Passivhäuser von $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$ selbst von den maximalen Meßwerten deutlich unterschritten. Die Siedlung kann in diesem Punkt als vorbildlich eingestuft werden, wenn man das Verhältnis zur heute noch üblichen Baupraxis betrachtet. In Abbildung 61 sind die Endergebnisse grafisch dargestellt:

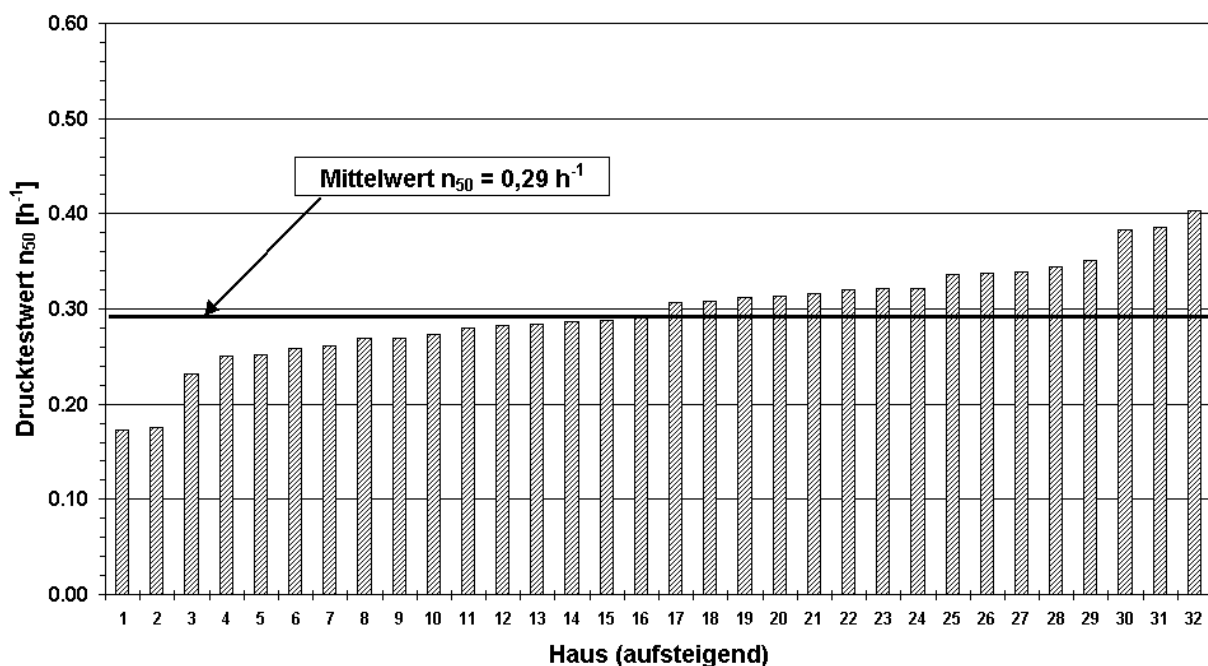


Abbildung 61: Drucktest-Endergebnisse der 32 Passivhäuser aufsteigend sortiert

Die Häufigkeitsverteilung (Abbildung 62) zeigt, daß die meisten Objekte n_{50} -Werte zwischen $0,25$ und $0,35 \text{ h}^{-1}$ aufweisen.

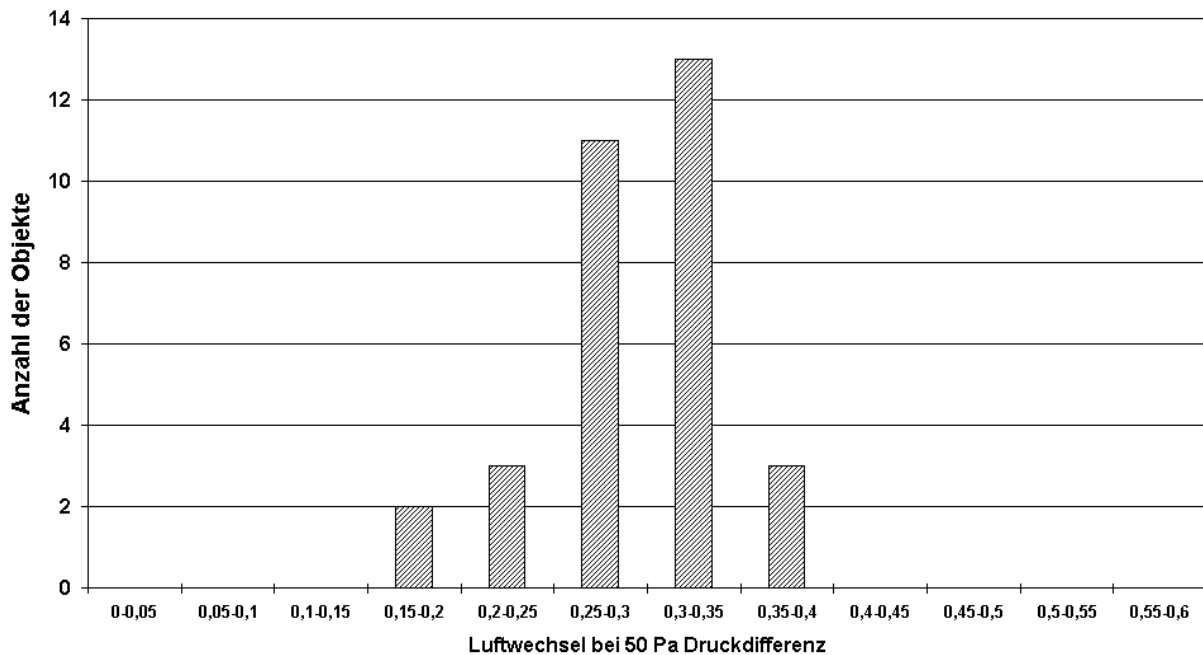


Abbildung 62: Häufigkeitsverteilung der Drucktest-Endergebnisse

Solche ausgezeichneten Werte lassen sich zuverlässig nur durch die Kombination von sorgfältiger Konzeptionierung und Planung, guter Bauausführung und Qualitätssicherung mittels Drucktestmessung erreichen. In puncto Luftdichtheit konnte mit den Häusern in Hannover gezeigt werden, daß sich durch eine konsequente konzeptionelle Planung in frühem Stadium reproduzierbar hohe Qualität kostengünstig verwirklichen läßt. Individuelle nachträgliche „Bastlerlösungen“ sind weder notwendig noch ratsam.

Die abgezogenen Schutzdruckvolumenströme lagen zwischen 5 und $37 \text{ m}^3/\text{h}$, im Mittel bei $14 \text{ m}^3/\text{h}$. Das entspricht einem Anteil der Schutzdruckvolumenströme an den gesamten Leckagevolumenströmen von 4% bis $28,5\%$, im Mittel $14,6\%$. Ohne Abzug der Schutzdruckvolumenströme liegen die Meßwerte im Bereich zwischen $n_{\text{ges}} = 0,2$ bis $0,47 \text{ h}^{-1}$, der Mittelwert ergibt sich dann zu $n_{\text{ges}} = 0,34 \text{ h}^{-1}$. Damit wäre selbst für jeden Einzelwert einschließlich der Leckagen zu den Nachbarn der Grenzwert noch deutlich unterschritten. Dies ist ein brillantes Ergebnis der sorgfältigen Planung, Ausführung und Qualitätssicherung.

Der Vergleich mit den Drucktestergebnissen von 79 anderen Reihenhäusern am Kronsberg macht den Erfolg des Luftdichtheitskonzeptes bei den Passivhäusern noch deutlicher. Die 79 Reihened- und -mittelhäuser wurden alle nach den Kriterien der Stadt Hannover („Kronsberg-Standard“) als Niedrigenergiehäuser (NEH) errichtet und qualitätssichernd von verschiedenen Institutionen begleitet. Die Drucktestmessungen wurden vom Institut für Bauforschung Hannover, dem Ingenieurbüro

Bau+Energie+Umwelt und von den Stadtwerken Hannover durchgeführt. Diese stellten auch die Meßergebnisse zur Verfügung. Die Blower Door Messungen ergaben einen Mittelwert von $0,93 \text{ h}^{-1}$, wobei es sich zum Teil bereits um Zweitmessungen nach durchgeführten grundlegenden Nachbesserungen handelt. Zwei weitere Endhäuser sind bei den Ergebnissen nicht enthalten, da die Nachbesserungsarbeiten dort noch nicht den notwendigen Erfolg gezeigt haben.

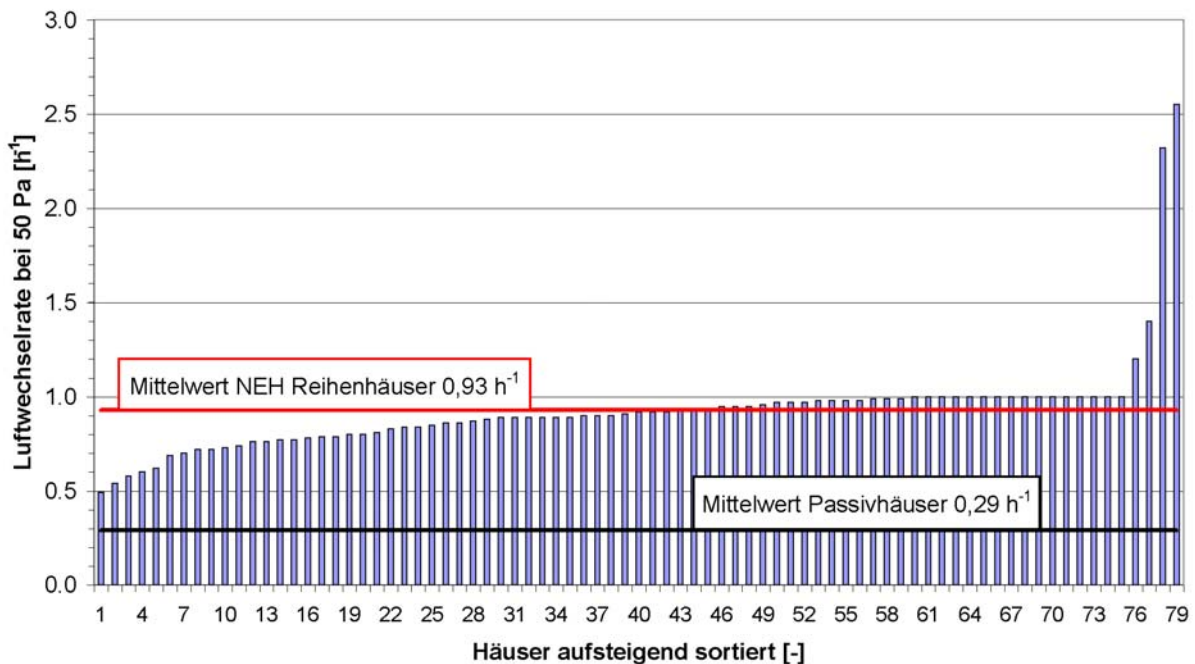


Abbildung 63: Ergebnisse der Blower Door Messungen von 79 Niedrigenergiehäusern im Baugebiet Hannover-Kronsberg im Vergleich mit dem Mittelwert der Messungen bei den 32 Passivhäusern.

Die Ergebnisse (Abbildung 63) zeigen deutlich vier Ausreißer nach oben. Wenn diese vier aus der Mittelwertberechnung herausgenommen werden, ergeben sich **$0,88 \text{ h}^{-1}$** . Diese Ergebnisse liegen im Vergleich zu Objekten der heutigen Baupraxis ohne intensive Qualitätssicherung schon sehr gut. Der Vergleich mit dem Mittelwert der Passivhäuser zeigt allerdings für letztere einen deutlichen Qualitätsvorsprung.

10.3.3 Genauigkeit der Luftdichtheitsmessungen bei den Passivhäusern Hannover-Kronsberg

Verschiedentlich war die Genauigkeit der Luftdichtheitstests angezweifelt worden. Es wurde sogar prinzipiell in Zweifel gezogen, daß „derart kleine n_{50} -Werte“ (gemeint waren Werte unter 1 h^{-1}) überhaupt noch mit einer angemessenen Genauigkeit gemessen werden können.

Zur Klärung dieser Frage stellen wir im Folgenden eine Fehlerberechnung am Beispiel der Passivhäuser auf dem Kronsberg vor.

Die 32 Reihen-Einfamilienhäuser verfügen über jeweilige Innenluftvolumina von 247 m^3 (Haus „123“), 309 m^3 (Haus „Jangster“) bzw. 372 m^3 (Haus „Jangster de lüx“). Fehler bei der Ermittlung des Innenluftvolumens werden hier nicht weiter verfolgt, da die Meßgenauigkeit von ihnen unabhängig ist.

Alle Blower Door Messungen wurden nach DIN EN ISO 9972 durchgeführt. Die Messungen sind für jedes Haus in einem Protokollblatt dokumentiert. Die gesamte Messung ist in der Publikation „Untersuchung der Luftdichtheit in der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg“ [Peper 1999] publiziert.

Gemessen wurde mit einer Minneapolis Blower-Door Modell 4 des „Energy Conservatory“. Die Druckdifferenzmessung wurde mit Hilfe von Druckdosen im System „ATP - Automated Performance Testing“ des gleichen Herstellers durchgeführt. Alle Daten wurden automatisch digital aufgezeichnet.

10.3.4 Genauigkeit der Meßgeräte

Für die Minneapolis Blower-Door Modell 4 gibt es Werkskalibrierscheine des TÜV Süddeutschland vom 28.7.1998, nach denen die Blower-Door auf dem großen Kammerprüfstand (QS-07M0689) nach der Norm DIN 24163 vermessen wurde. Durch die Kalibriermessung wird bestätigt, daß die Blower Door in allen Meßbereichen (und mit allen Meßblenden) eine Fehlergrenze beim gemessenen Volumenstrom von $\pm 4\%$ des einzelnen Meßwertes einhält. Für den für uns relevanten Meßbereich mit der Meßblende D liegt der Werkskalibrierschein beispielhaft dieser Fehlerbetrachtung bei (Abbildung 64).

Für das Druckdifferenzmeßgerät ATP wird eine automatische Nullpunktkalibrierung während jeder Messung durchgeführt. Der Meßfehler liegt unter $\pm 3\%$ des einzelnen Meßwertes.

WERKSKALIBRIERSCHEIN
BLD001

Gegenstand: Minneapolis Blower Door
Hersteller: Ingenieurgesellschaft Bau+Energie+Umwelt GmbH
Typ: Modell 4
Geräte Nr.: 5KCP 39 PG T362AS
Meßblende: D

Referenzgerät: Kammerprüfstand nach der Norm DIN 24163
Hersteller: TÜV Bau- und Betriebstechnik GmbH
Typ: Großer Kammerprüfstand
Geräte Nr.: QS-07M 0689

Prüfbedingungen: Umgebungstemperatur 31 °C
Umgebungsdruck 957 mbar

Meßbereich: 56 bis 200 m³/h
Fehlergrenze laut Herstellerangabe: ± 4 % vom Meßwert

Die Anforderungen wurden erfüllt.

Datum: 28.07.1998
Prüfer: T. Bichler

Durch die DAP Deutsches Akkreditierungssystem Prüfwesen GmbH akkreditiertes Prüflaboratorium.
Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde genannten Prüfverfahren.
© Deutscher Blower Door®/Kaltreschen Blower Door®/D. Bichler

TÜV
BAU UND BETRIEB

Zentralabteilung
Kälte- und Klimatechnik
Riederstraße 57
80339 München
Telefon 089 / 5190-3165
Telefax 089 / 5190-3192
München, 28.07.98
BY-V996/bj
Seite 1 von 3

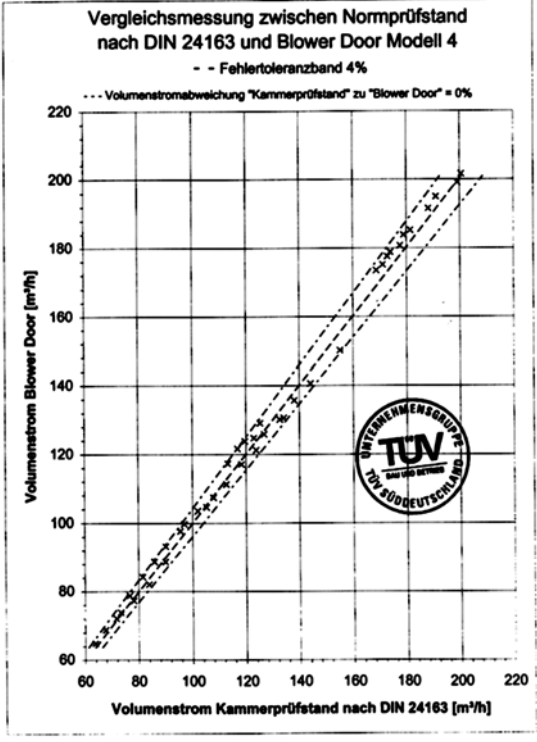
TÜV
BAU UND BETRIEB


Seite 3 von 3

München, 28.07.98


Vergleichsmessung zwischen Normprüfstand nach DIN 24163 und Blower Door Modell 4
-- Fehlertoleranzband 4%

--- Volumenstromabweichung "Kammerprüfstand" zu "Blower Door" = 0%





Deutscher Akkreditierungs Rat
DAP-P-02.886-00-94-01



Deutscher Akkreditierungs Rat
DAP-P-02.886-00-94-01

Abbildung 64: Werkskalibrierschein für die Minneapolis Blower Door

Typische Meßwerte in den Häusern liegen zwischen 40 und 180 m³/h. Diese liegen sämtlich innerhalb der Meßbereiche der Blenden D oder E; für diese gelten daher die oben aufgeführten Fehlergrenzen. Die n_{50} -Werte liegen dementsprechend zwischen 0,2 und 0,47 h⁻¹. Die Häuser sind daher nach heutigen Maßstäben als außerordentlich luftdicht einzustufen.

Fehlerstatistik

An einer typischen Messung wird der zufällige Fehler der Einzelmessungen (infolge Winddruckschwankungen und anderer Einflüsse) diskutiert. Es ist die auf S. 27 der Publikation [Peper 1999] dokumentierte Unterdruck-Messung mit N=5 Meßpunkten.

Für diese Messung wird die Abschätzung der Meßabweichung gemäß Abbildung 65 der DIN EN ISO 9972 durchgeführt. Die folgende Tabelle dokumentiert den Rechengang.

			Volumenstrommessung			
korr. Meßwerte für Unterdruck Δp_i	$x_i = \ln(\Delta p_i)$	Abw. x	V_i	$y_i = \ln(V_i)$	Abw. y	
35	3.56	-0.439	104	4.64	-0.289	
48	3.87	-0.123	125	4.83	-0.106	
55	4.01	0.013	143	4.96	0.029	
67	4.20	0.211	159	5.07	0.135	
76	4.33	0.337	175	5.16	0.231	
Anzahl	5		Anzahl	5		
Mittel-x	3.99		Mittel-y	4.93		
S_x^2	0.091		S_y^2	0.042		
S_{xy}		0.0616				
vermuteter funktionaler Zusammenhang		$V = C (\Delta p)^n$				
bester Schätzwert n		0.675				
Schätzwert $\ln C$		2.240				
Wert C		9.39				
daraus bester Schätzwert V_{50}		131.5 m ³ /h				
daraus Schätzwert n_{50}		0.353 h ⁻¹				
Fehlerbetrachtung:						
Streuung von n s_n		0.0305	(Formel (C.10) EN ISO 9972)			
Streuung von y bei $x = \ln 50$ s_y		0.0086	(Formel (C.14) EN ISO 9972)			
Vertrauensintervall für eine Wahrscheinlichkeit von 95% der zweiseitigen Studentverteilung liefert:						
$T(p_i, N-2) =$		3.182	(für N=5)	95%		
$l_y =$		0.027				
Daraus ergeben sich folgende Intervall-Grenzen aus der Statistik für 95% Wahrscheinlichkeit						
Volu.-Str. Untergrenze $V_{50, \text{Min, Statistik}}$		127.9	m ³ /h	-3%		
Volu.-Str. Obergrenze $V_{50, \text{Max, Statistik}}$		135.1	m ³ /h	3%		
Dazu: Fehlerfortpflanzung Vol.-Str.-Messung (4%)		5.3	m ³ /h	± 4%		
Dazu: Fehlerfortpflanzung Druck-Diff.-Messung (2.5%)		3.6	m ³ /h	± 3%		
Dazu: Fehlereinfluß Winddruck 4 Pa		7.1	m ³ /h	± 5%		
Dazu: Einbaufehler Door; Wegfall des Einbaufensters		8.2	m ³ /h	± 6%		
Volu.-Str. Untergrenze $V_{50, \text{Min, ges}}$		118.4		-10%		
Volu.-Str. Obergrenze $V_{50, \text{Max, ges}}$		144.6		10%		
Also: n_{50} zwischen		0.32	und	0.39	h ⁻¹	
Angabe: $0.35 \pm 0.04 \text{ h}^{-1}$						
relativer Fehler der Luftdichtheitsmessung		-10%	bis	10%		

Abbildung 65: Abschätzung der Meßabweichung

Die zufälligen statistischen Abweichungen bei dieser Messung sind, wie auch bereits von der Korrelationsgrafik her zu erwarten war, ziemlich gering:

statistischer Fehler ±3,7 m³/h oder ±3%.

Die ermittelten Intervallgrenzen für ein 95%-Vertrauensintervall von n_{50} wären auch bei höheren absoluten Volumenströmen nicht geringer.

Die Fehlerfortpflanzung des Meßfehlers bei der Volumenstrommessung geht direkt mit $\pm 4\%$ ein:

Fehlerfortpflanzung Volumenstrommessung $\pm 5,3 \text{ m}^3/\text{h}$ oder $\pm 4\%$.

Die Fehlerfortpflanzung des Meßfehlers bei der Druckmessung wird zu

Fehlerfortpflanzung Druckmessung $\pm 3,6 \text{ m}^3/\text{h}$ oder $\pm 3\%$ bestimmt.

Durch das Vorliegen von Wind während der Messung (böig) ist ein systematischer Fehler infolge eines gewissen stationären Anteils des Winddrucks nicht auszuschließen: die Böen werden durch den statistischen Fehler mit erfaßt. Der mögliche systematische Fehler wird mit $\pm 5 \text{ Pa}$ abgeschätzt; daraus ergibt sich ein

Fehlereinfluß durch stationären Winddruck $\pm 7.1 \text{ m}^3/\text{h}$ oder $\pm 5\%$.

Bis zu diesem Fehlerbeitrag geht die absolute Höhe des jeweiligen Volumenstroms V_i **nicht ein**, sondern jeweils nur die relative Abweichung bei diesen Einzelmessungen. Unter Berücksichtigung der bis hier analysierten Fehler hätte auch eine Messung bei höherer Undichtheit (also höheren Volumenströmen) keinen kleineren relativen Fehler.

Bedenken wir jetzt noch, daß die Luftförderanlage in eine sonst geschlossene und ebenfalls zur luftdichten Hülle gehörende Öffnung eingebaut wird - in diesem Fall in eine Terrassentür -, so entsteht ein weiterer Fehler, weil die betreffende Einbauöffnung nicht in ihrem „normalen“ baulichen Zustand gemessen wird; die Luftförderanlage kann sowohl dichter als auch weniger dicht eingebaut sein, als es die Öffnung normalerweise ist. Etwa die Hälfte der Restleckagen geht bei Gebäuden dieses Types normalerweise auf Kosten der Fenster; bei 8 Fenstern und Verwendung eines dieser Fenster für den Einbau ergibt sich ein typischer

Einbaufehler von $1/8 \cdot 50\% \cdot V_{50}$, in diesem Fall $\pm 8.2 \text{ m}^3/\text{h}$ oder $\pm 6\%$.

Dieser Fehler ist als einziger Beitrag nicht zwingend proportional zur Leckage; er kann den relativen Fehler bei Messungen in sehr dichten Gebäuden also erhöhen.

Bezieht man nun nach den Gesetzen der Fehlerfortpflanzung alle oben bestimmten Meßgenauigkeiten der Meßgeräte, Winddruck, und Einbaufehler ein und unterstellt eine Unabhängigkeit der verschiedenen Fehler (Additivität der Varianz), so ergibt sich für diese Messung mit 5 Stützpunkten eine Angabe von

$$V_{50} = 132 (\pm 13) \text{ m}^3/\text{h},$$

was einem relativen Fehler von $\pm 10\%$ entspricht.

In die Angabe von n_{50} geht auch noch das Referenzvolumen ein, das ebenfalls einen Meßfehler aufweisen kann. Im Gegensatz zu anderen Betrachtungen ist dieser Fehler aber hier nicht relevant, da in die Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs nach dem Passivhaus Projektierungs Paket letztendlich nur der Absolutwert $V_{50}=n_{50}V_{\text{Ref}}$ in die Infiltrationsverluste eingeht; das setzt voraus, daß das Referenzvolumen normgerecht im Protokoll der Luftdichtheitsprüfung genannt wird.

Zusätzliche Fehler können durch unterschiedlich sorgfältige Präparation des Gebäudes vor dem Drucktest entstehen: Es müssen im Rohbau zunächst Syphone mit Wasser verfüllt oder mit Blasen verschlossen werden; Fenster müssen (richtig) geschlossen sein, eine evtl. Lüftungsanlage in den vereinbarten Zustand gebracht und die Luftförderanlage korrekt eingebaut werden. Fehler, die durch Präparations-nachlässigkeit entstehen, sind selbstverständlich bei kleinen n_{50} -Werten relativ bedeutender. Die Vorbereitung der Messungen wird damit bei sehr gut luftdichten Gebäuden wichtiger als bisher.

Weitere Fehler resultieren daraus, daß die Modellannahme für die Gebäudeleckage, nämlich daß sich diese mit dem Ansatz

$$dV/dt = C \Delta p^n$$

darstellen läßt, in den seltensten Fällen exakt zutrifft (dV/dt Volumenstrom, Δp Druckdifferenz über der Gebäudehülle, C Konstante, n Strömungsexponent). Der Zusammenhang gilt recht gut für eine einzelne, wohldefinierte Öffnung, wie z.B. einen Spalt. Leckagepfade in einer Gebäudehülle können aber weitaus komplexer sein [Kronvall 1980]. Besondere Abweichungen können vorliegen, wenn Teile der Hülle „Ventilfunktion“ haben, wie dies z.B. regelmäßig für Fenster mit Lippendichtungen der Fall ist. Fälle, in denen solche Effekte eine Rolle spielen, sind in dichten Gebäuden **nicht häufiger** als in anderen Objekten.

Zusammenfassung und Diskussion

Die hier dokumentierte und statistisch ausgewertete Luftdichtheits-Messung fand unter vergleichsweise ungünstigen Bedingungen statt (Windgeschwindigkeiten bis 5 m/s, böig); allerdings ist zu bedenken, daß trotz anderer Empfehlungen der Norm häufig bei solch ungünstigen Bedingungen gemessen werden muß, um die Bauabläufe nicht noch mehr zu stören.

Trotz der ungünstigen Bedingungen ergab sich für die Messung ein typischer Gesamtfehler für V_{50} von $\pm 10\%$ und dies bei einem besten Schätzwert für n_{50} von 0.35 h^{-1} . Die Analyse zeigt, daß die Genauigkeit der Messung vor allem von den Witterungseinflüssen und kaum von der absoluten Höhe von V_{50} abhängt, solange die untere Schranke des Meßbereiches der Blower Door mit ca. $30 \text{ m}^3/\text{h}$ nicht unterschritten wird. Diese Analyse deckt sich auch mit der Publikation von [Geißler 1999], wo eine Meßgenauigkeit innerhalb von 10 bis 20% angegeben wird.

Dort heißt es ebenfalls: „Die Größe der Gesamtleckage hat einen vernachlässigbaren Einfluß auf den rechnerischen Gesamtfehler“.

Eine Genauigkeit von $\pm 10\%$ bei n_{50} – Werten von bis zu $0,6 \text{ h}^{-1}$ bei Passivhäusern ist für den Berechnungsgang nach dem Passivhaus Projektierungspaket andererseits völlig ausreichend. Durch den Fehler im n_{50} – Wert resultiert dann ein maximaler Fehler im Heizwärmebedarf Q_h von $\pm 0,26 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Dieser Fehler ist ohne weiteres tolerierbar. Die Modellannahmen zur Berechnung einer mittleren Infiltration aus der n_{50} -Messung sind nach unserer Auffassung mit einer weit größeren Unsicherheit behaftet [Feist 1994, Abb. 8-24].

Wir fordern für Passivhäuser einen Wert für n_{50} unter $0,6 \text{ h}^{-1}$ und empfehlen sogar, Werte um $0,3 \text{ h}^{-1}$ anzustreben, wie dies bei der Siedlung in Hannover gelungen ist. Die durch den Meßfehler bestehende Unsicherheit beträgt bei $0,3 \text{ h}^{-1}$ nur $\pm 0,13 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und ist damit vernachlässigbar. Wäre dagegen ein n_{50} -Wert von $1,0 \text{ h}^{-1}$ noch zugelassen, so läge dadurch der Heizwärmebedarf um fast $3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ über dem in der Siedlung in Hannover-Kronsberg erreichten Wert; diese Zunahme wäre bei der Verbrauchsmessung bereits feststellbar.

Der wesentliche Grund, weshalb bei Passivhäusern n_{50} -Werte unter $0,6 \text{ h}^{-1}$ gefordert (und unter $0,3 \text{ h}^{-1}$ empfohlen) werden, liegt jedoch in der sicheren Vermeidung von ungewollten Infiltrationsströmen. Kalte Luftströme (sog. „Zugerscheinungen“) können die Funktion eines Passivhauses empfindlich beeinträchtigen, da i.d.R. keine statischen Heizflächen zur Kompensation vorhanden sind. Eine sehr gute Luftdichtheit ist daher bei Gebäuden, deren Funktion ganz wesentlich auf der verwendeten Lüftungsanlage beruht, von entscheidender Bedeutung.

Eine noch nicht abschließend geklärte Fragestellung ist, wie dauerhaft die sehr guten Werte der Passivhäuser bzgl. Luftdichtheit beibehalten werden. Da es derart gute Werte reproduzierbar noch nicht sehr lange bei bewohnten Gebäuden gibt (erstmalig konnte 1991 im Passivhaus Darmstadt $n_{50,1991}=0,24 (\pm 0,03) \text{ h}^{-1}$ gemessen werden), kann es heute naturgemäß noch keine Meßreihen geben, die das Langzeitverhalten sehr gut luftdichtender Gebäudehüllen über den notwendigen Zeitraum einiger Jahrzehnte verfolgen. Im Fall des Passivhauses Darmstadt Kranichstein wurde nach 9 Jahren eine Nachmessung durchgeführt, die auf $n_{50,1999}=0,27 (\pm 0,03) \text{ h}^{-1}$ geführt hat [Peper 2000]. Wenn hier (im Rahmen der Meßgenauigkeit) überhaupt eine Zunahme der Leckage vorliegt, so ist diese allein durch geringfügige Dejustierung der Fenster erklärbar. Zumindest das Luftdichtungskonzept des ersten Passivhauses in Darmstadt Kranichstein kann vor diesem Hintergrund als dauerhaft zuverlässig gelten.

10.4 Ergebnisse der thermographischen Untersuchung

IR-Thermographieaufnahmen wurden in der Passivhaussiedlung im Auftrag der Stadtwerke Hannover am 15. 2. 2001 durchgeführt. Beteiligt waren Prof. W. Zapke und A. Bethe (beide Fachhochschule Hannover / FB Bauingenieurwesen) sowie Søren Peper vom Passivhaus Institut. Die Dokumentation und wissenschaftliche Auswertung der Aufnahmen sind in einem separaten Bericht veröffentlicht [Peper 2001a]. Hier werden einige grundsätzliche Ergebnisse der thermographischen Untersuchungen dargestellt.

- Durch zeitgleiche hochgenaue Messung repräsentativer Oberflächentemperaturen gelang sowohl für die Außen- als auch für die Innenseite eine quantitative Auswertung.
- Der überwiegende Teil der Regelflächen (Fenster, Außenwände, Dächer) zeigt in der Thermographie qualitativ und quantitativ etwa die aus der Theorie erwarteten Oberflächentemperaturen. Damit bestätigt die Thermographie die außerordentlich hohe Qualität der Wärmedämmung der Außenbauteile bei der Passivhaus-siedlung.
- Die Außenoberflächentemperaturen lagen bis auf Teile der Haustür- und Fensterrahmen und den Randbereichen der Scheiben (sowie vereinzelte konvek-tive Wärmebrücken) unter der Außenlufttemperatur. Damit bestätigt sich noch einmal der große Einfluß der langwelligen Abstrahlung in den kalten Nachthimmel (dessen Äquivalenttemperatur während der Aufnahmen zu $-13,5\text{ °C}$ bestimmt wurde; zum Vergleich: die Außentemperatur lag bei $-1,5$ bis $-3,7\text{ °C}$).



Abbildung 66: Außenthermographie eines Ausschnitts der Häuser von Reihe 9 (Nordseite). Der Bereich unter dem Dachüberstand und unter dem Vordach über der Haustür erscheint wärmer, da diese Bereiche gegenüber der nächtlich kalten Himmelsstrahlung „abgeschattet“ sind. Die Fassaden zeigen ansonsten durchgehend niedrige Temperaturen von etwa -4 °C .

- Besondere Vorsicht ist bei der Interpretation von Thermographiebildern von direkt reflektierenden Oberflächen geboten: Bei den hier untersuchten Gebäuden sind dies z.B. die metallischen Regenfallleitungen sowie Verglasungsoberflächen. Durch einen bedeutenden Teil von Reflexstrahlung darf das Thermographiebild hier nicht als Oberflächentemperatur des betreffenden Bauteils interpretiert werden. Ein besonders schönes Beispiel bieten die IR-Außenaufnahmen der Fenster im Obergeschoß der Zeile 9. Die Verglasung ist hier im Zentralbereich betaut ($\varepsilon \approx 0,95$, kaum Reflexion und diese auch nur diffus: daher gibt das Thermographiebild hier tatsächlich etwa die Oberflächentemperatur wieder). Zum Rand hin steigen die Oberflächentemperaturen wegen der Wärmebrücken im Randverbund an – daher ist die Verglasung dort nicht betaut. Wegen der direkten Reflexion des kalten Nachthimmels erkennt man im Thermographiebild jedoch einen kälteren Bereich in Form eines „umgedrehten U“.
- Auch die Häuser der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg sind nicht frei von in der Thermographie erkennbaren Schwachstellen. Soweit derzeit beurteilbar, sind die gefundenen Bereiche (vor allem mit konvektiven Wärmebrücken) aber weder kritisch für die Substanz noch von entscheidendem Einfluß auf die Heizwärmebilanz.
- Geringfügige Schwachstellen sind indirekt durch die oberhalb der hinterlüfteten Fassaden austretenden Warmluftströme zu vermuten. Andererseits wird die hohe Qualität der Außenfassaden durch die Oberflächentemperatur im Bereich des Wärmedämmverbundsystems (Südseite EG) und der hinterlüfteten Fassade (Südseite OG) deutlich: Bei diesen beiden Flächen ist **kein Temperaturunterschied meßbar!**
- Die Innenthermographie eines der unbewohnten aber beheizten Häuser ergab durchgehend hohe Oberflächentemperaturen aller Wandflächen. Die hohen Oberflächentemperaturen zeigen den Erfolg der hohen Dämmqualität und zeigen, daß im ganzen Gebäude keine Tauwasserprobleme zu erwarten sind. Vereinzelt lagen die Oberflächentemperaturen an Bereichen von konstruktiven Wärmebrücken (zwei Zimmerecken im OG) unter den erwarteten Werten. Auch an diesen Stellen ist keine Tauwassergefahr vorhanden. Diese Bereiche führen nur zur minimalen Erhöhung der Heizenergieverbräuche. Von Mängeln kann hier bei minimalen Oberflächentemperaturen von 16,9 °C in keinem Fall gesprochen werden.

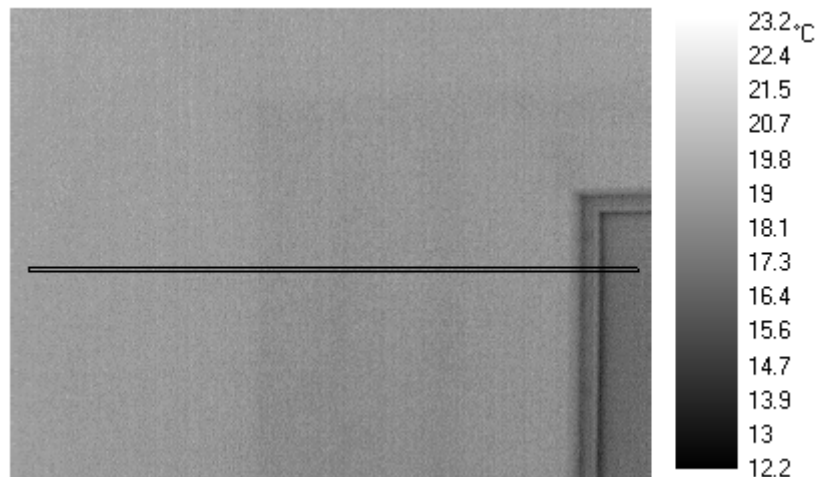


Abbildung 67: Thermographiebild der linken Wohnzimmerkante (Haustrenn- und Außenwand, mit einem Teil des Fensters). Temperaturunterschiede der beiden Wände sind so gut wie nicht zu erkennen. Die horizontale Bereichsmarkierung zeigt die Lage des Temperaturprofils aus Abbildung 68 an.

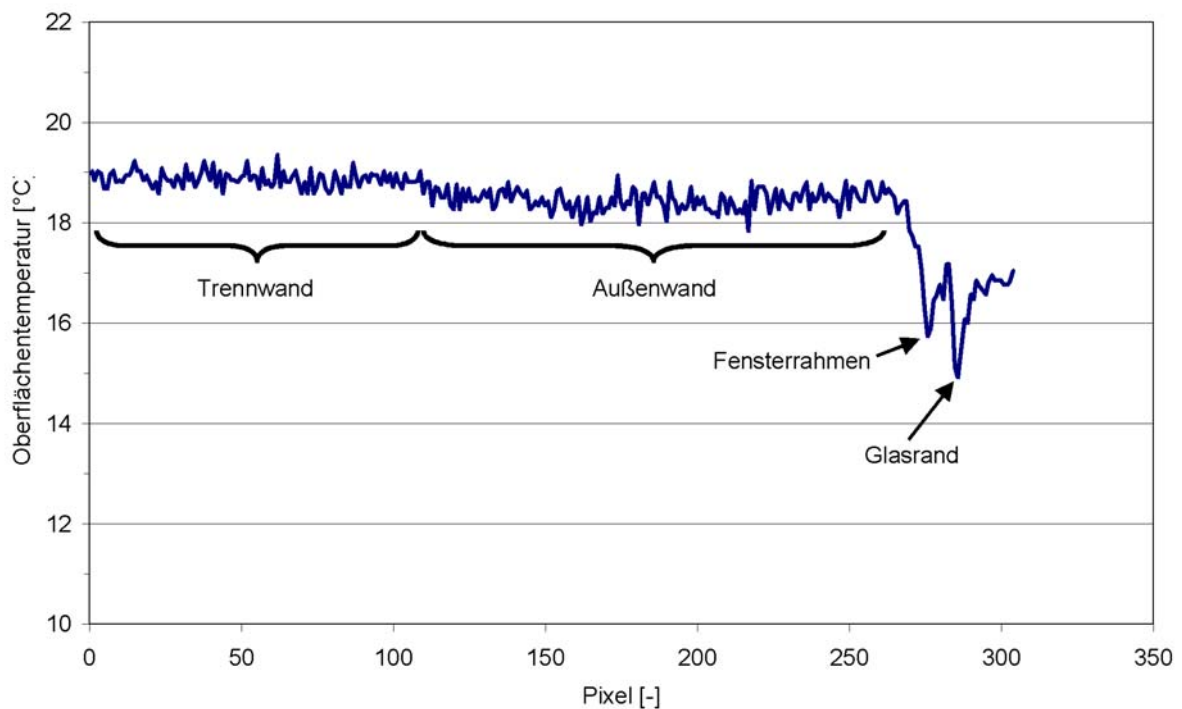


Abbildung 68: Oberflächentemperaturprofil des IR-Bildes aus Abbildung 67. Der Unterschied zwischen Trennwand und Außenwand ist minimal. Fensterrahmen und Verglasung sind deutlich zu erkennen. Mit minimal 15 °C liegen die Temperaturen der Innenoberflächen im erwarteten unproblematischen Bereich.

- Die Haustür zeigte bereits bei der Messung ohne Unterdruck im Haus (Blower Door Einsatz) auffällige Undichtheiten im unteren Bereich. Auch bei der Außen-thermographie zeigten sich bereits an zwei anderen Haustüren diesbezügliche Schwachstellen. Diese führen zu höheren Energieverlusten als vorab projiziert. Alle Haustüren wurden im März 2001 (also nach der IR-Untersuchung) in den

Bandbereichen verstärkt und neu eingestellt. Dadurch ist anzunehmen, daß sich diese Schwachstellen verbessert haben.

- Bei der Untersuchung des Gebäudes bei Unterdruckbedingungen (Blower Door Einsatz in der Terrassentür) wurde nur in 5 Fällen eine nennenswerte Abweichung von den Vergleichsbildern ohne Unterdruck festgestellt. Aufgrund der hohen Luftdichtheit des Hauses waren diese Bereiche selbst bei diesem „künstlichen“ Gebäudezustand völlig unkritisch.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse der thermographischen Untersuchung der Passivhaussiedlung Hannover Kronsberg durchgehend die hohe Qualität der Dämmung der gesamten Gebäudehülle.

10.5 Berechnungsergebnisse für Elektrogeräteausstattung

Vgl. Kapitel 6.

10.6 Besonderheiten

Im Rahmen der Arbeiten zur Qualitätssicherung und meßtechnischen Begleitung des Projektes sind einige besonders erwähnenswerte Arbeiten durchgeführt worden, die nachfolgend kurz beschrieben werden.

10.6.1 Verbesserungsarbeiten

Bei der Qualitätskontrolle der technischen Ausführung der Haustechnikanlage wurden diverse kleinere Mängel an der Anlage im Technikgeschoß der Häuser festgestellt. Es handelt sich dabei entweder um bauüblichen Standard, der für ein derartig qualitativ hochwertiges Gebäude als nicht ausreichend einzustufen ist oder zum Teil auch um mangelhafte Ausführungen. Die Mängel der unzureichenden Wärmedämmung an unterschiedlichen Punkten (Rohrleitungen, Brauchwarmwasserspeicher, Heizregister) führten zu relativ hohen Abstrahlungsverlusten und damit zu ungewollt hohen Temperaturen in den Technikgeschossen der Häuser. Da vom Bauträger bzw. den Fachgewerken hier keine Nachbesserungen zu erwarten waren, wurden in der Zeit vom 22. bis 24. Mai 2000 die folgenden Arbeiten zur Verbesserung des Standards durchgeführt:

1. Rohrabschnitte und Armaturen der Heizungs- vor- und Heizungsrücklaufleitungen vor der Installationswand der Häuser wurden nachgedämmt.
2. Blindstopfen der Brauchwarmwasserspeicher wurden gedämmt, Fugen im Kopfbereich gegen Luftströmung zwischen dem Stahlbehälter und der Mantel- dämmung ausgestopft sowie eine neue, größere und gedämmte Deckelhaube aufgesetzt.
3. An den Heizregistern wurde eine alukaschierte Wärmedämmung angebracht, da diese bis dato ungedämmt waren.
4. Die Luftdichtheit des Wärmerückgewinnungsgerätes wurde durch eine zusätzliche Klemme verbessert.

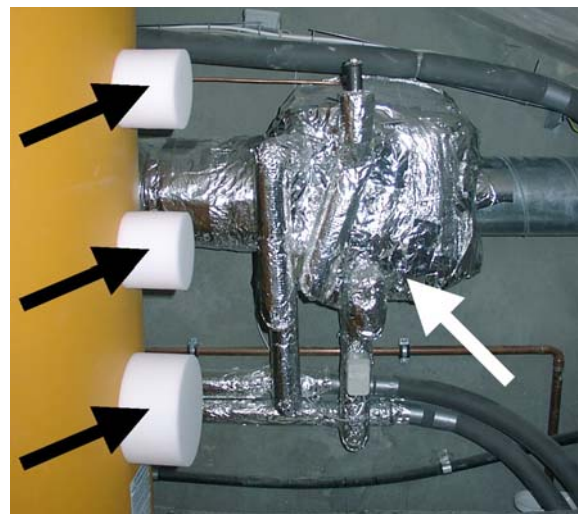
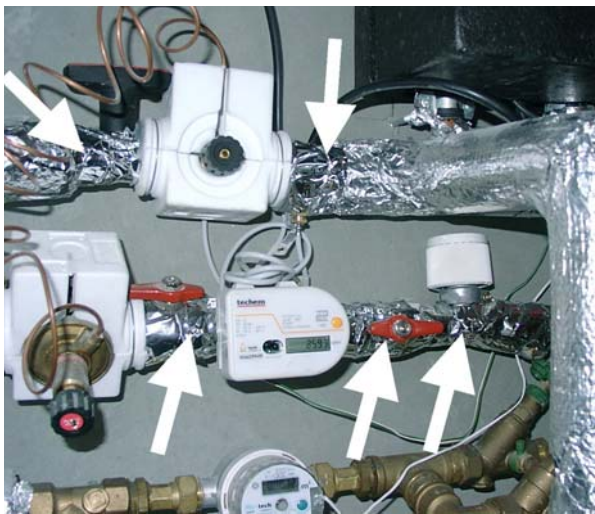


Abbildung 69 / Abbildung 70: Beispiele für die durchgeführten Nachbesserungsarbeiten in den Technikgeschossen der 32 Passivhäuser (Links: Nachdämmung von Teilen der Vor- und Rücklaufleitung an Armaturen und Einbauten. Rechts: Dämmung des Heizregisters und der Blindstopfen am Brauchwasserspeicher).

Die Arbeiten wurden in Zusammenarbeit mit der Fa. Paul (Hersteller der Wärmerückgewinnungsgeräte) und dem Planungsbüro für die Haustechnik inPlan unter der Leitung des Passivhaus Instituts durchgeführt. Die Firma Wagner & Co GmbH (Hersteller der Solaranlagen und Warmwasserspeicher) spendete einen Teil des benötigten Materials, und die Bewohner der Häuser beteiligten sich finanziell an den restlichen Materialkosten.

Fünf Personen in zwei Arbeitsteams führten die Arbeiten durch. Je Team wurden etwa 1,5 bis 2 Stunden pro Haus benötigt. Die Arbeiten waren erfolgreich: Laut Aussage von Bewohner hat sich die Temperatur in den Technikhäusern spürbar reduziert, wie es erwartet worden war.

10.6.2 Balanceabgleich der Lüftungsanlagen

Bei Überprüfungen im intensiv vermessenen Haus wurden beim Lüftungsgerät Abweichungen von den durch den Haustechniker eingestellten Ventilatorleistungs-

werten festgestellt. Mit der Veränderung der Ventilatorleistungen war die Anlage nicht mehr abgeglichen. Es lag eine dauerhafte Disbalance vor, die je nach Einstellung erzwungene In- oder Exfiltration durch Restleckagen verursacht. Dieser Mangel hat deutliche Auswirkung auf den Energieverbrauch eines Hauses, da diese Luftströme nicht über den hocheffizienten Wärmetauscher geführt werden.



Abbildung 71: Meßtechnikaufbau zur Balanceeinstellung des Wärmerückgewinnungsgerätes im Technikgeschoß eines der Passivhäuser. Mittels Druckmessung werden die Volumenströme an den Meßkreuzen im Außen- (rechts) und Fortluftrohr (links) festgestellt und abgeglichen. Die Leistung der beiden Ventilatoren wurde einzeln mit dem Bediengerät des Herstellers eingestellt.

Um die Einstellungen auch in den restlichen Passivhäusern zu überprüfen und ggf. nachzustellen, wurden von zwei Mitarbeitern des Passivhaus Instituts vom 24. bis 26. Oktober 2000 alle 32 Häuser aufgesucht. Mit Differenzdruckmeßgeräten und einem Servicegerät für die Einstellung der Lüftungsgeräte wurden alle Anlagen mittels der im Außen- und Fortluftstrom dauerhaft installierten Meßkreuze überprüft und nachgestellt. Dabei wurden zahlreiche erhebliche Abweichungen von den eingestellten Werten oder bei richtig eingestellten Werten auch vorhandene Disbalancen festgestellt. Alle Anlagen wurden nachjustiert und die veränderten Werte später auf Einstellprotokollblättern den Bewohnern ausgehändigt. Über die Ursache für die festgestellten Abweichungen konnte keine endgültige Klarheit gewonnen werden.

Das Ergebnis der Einstellung sind möglichst optimal balancierte Lüftungsanlagen in allen 32 Häusern. Allerdings mußte festgestellt werden, daß die absoluten Höhen der projektierten Werte für die drei Lüftungsstufen regelmäßig nicht erreicht wurden. Bei der Stellung „Stoßlüftung“ ist die Abweichung besonders groß. Obwohl es sich um ein kurzes Rohrnetz mit relativ geringen Druckverlusten handelt, ist die Leistung der Lüftungsgeräte nicht ausreichend, um die projektierten Werte sicherzustellen. Abbildung 72 und Abbildung 73 zeigen die Werte der eingestellten Anlagen getrennt für die Haustypen „Jangster de Lük“ und „Jangster“. Der Haustyp „123“ wird hier nicht separat dargestellt, da er nur einmal vorkommt und die Ergebnisse vergleichbar mit den anderen Haustypen sind.

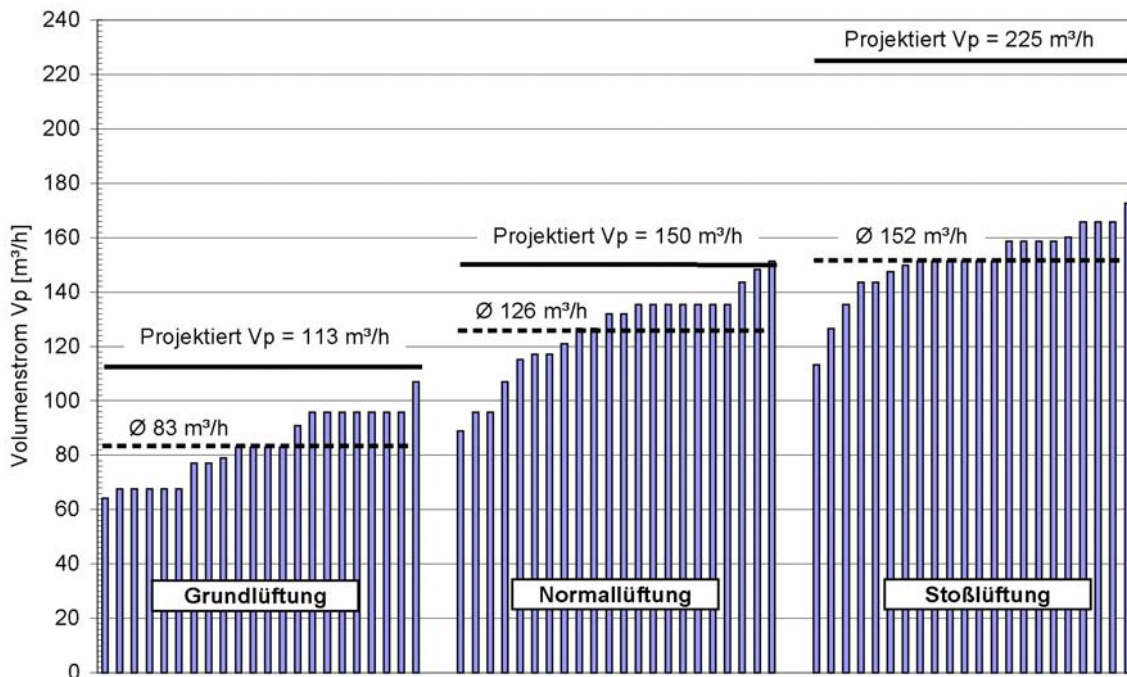


Abbildung 72: Gemessene Volumenströme (über Differenzdruckmessung am Staukreuz) der abgeglichenen Lüftungsanlagen der 22 Passivhäuser vom Typ „Jangster de Lük“. Die Werte sind nach den drei Leistungsstufen sortiert und in jeder Gruppe aufsteigend sortiert. Die Horizontallinien zeigen die in der Projektierung angestrebten Werte.

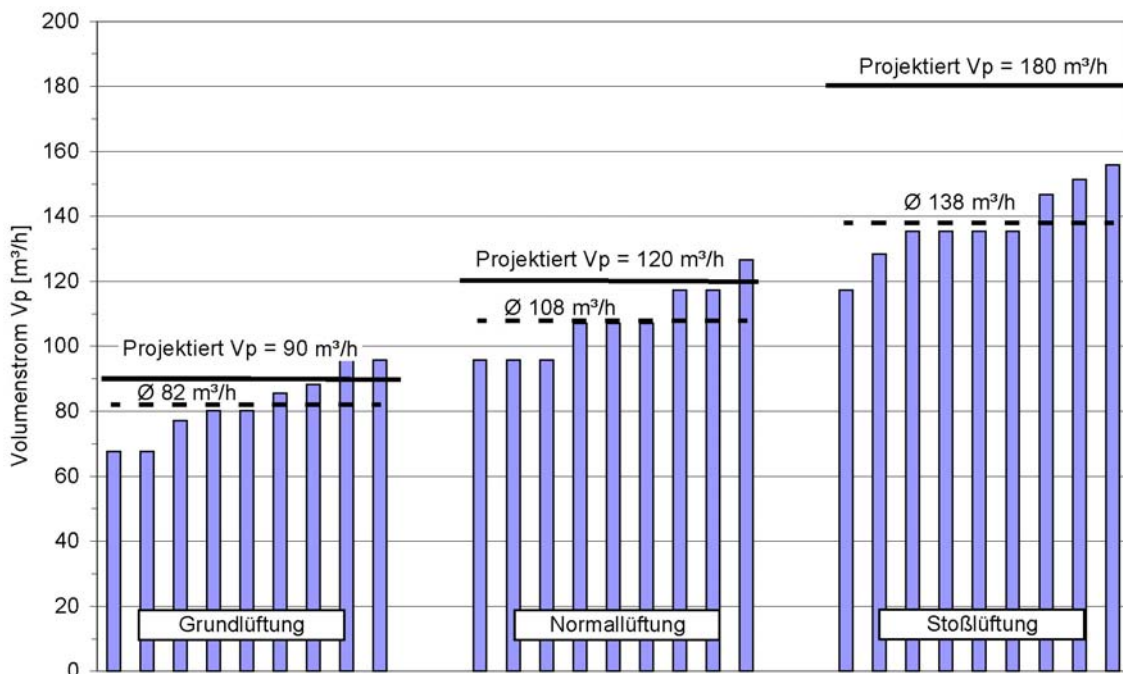


Abbildung 73: Gemessene Volumenströme (über Differenzdruckmessung am Staukreuz) der abgeglichenen Lüftungsanlagen der 9 Passivhäuser vom Typ „Jangster“. Die Werte sind nach den drei Leistungsstufen sortiert und in jeder Gruppe aufsteigend sortiert. Die Horizontallinien zeigen die in der Projektierung angestrebten Werte.

Sichtbar wird durch diese Darstellung auch, daß die Stufung der Einstellungen gegeneinander nicht den Umfang aufweist, der erwartet worden war. Es wäre zweckmäßig, wenn sich die gewählten Einstellungen deutlicher voneinander unterschieden. Bei den vorgenommenen Einstellungen wurde allerdings schon die maximale Stufung unter der Berücksichtigung der Balance angestrebt. Allerdings sind die projizierten Werte – wie im Abschnitt Lüftungskonzept beschrieben – vom PHI als zu hoch bewertet worden. Dies zeigen insbesondere die Rückmeldungen einiger Bewohner zur zeitweiligen zu geringen Luftfeuchte. Aus diesem Grund sind die Abweichungen gegenüber den angestrebten Werten nicht als negativ anzusehen. Die erreichten Volumenströme erweisen sich als offensichtlich ausreichend. Die Bewohner zeigen sich zufrieden mit der Wirksamkeit der Wohnungslüftung.

11 Angaben zu Erwerberr/Bauherren bzw. Mieter

11.1 Durchgeführte Einweisungen

Für die 32 Passivhäuser in Hannover wurde vom PHI im Auftrag der Stadtwerke Hannover AG ein „Nutzerhandbuch“ entwickelt [Peper 2000a], das den Nutzern gerade im Umgang mit den passivhauspezifischen Komponenten behilflich ist. Aus Gründen der Vollständigkeit und der Übersichtlichkeit wurden auch alle anderen nutzerrelevanten technischen Komponenten und deren Handhabung detailliert beschrieben. Dieses Handbuch (bei der Stadtwerke Hannover AG erhältlich) dient als Einweisungslektüre und wird, sollten Probleme auftreten, als Nachschlagewerk zu deren Lösung herangezogen.

Das Nutzerhandbuch gliedert sich in die folgenden Abschnitte:

1 Was ist anders im Passivhaus?

- 1.1 Das Passivhaus - behaglich, energiesparend, umweltschonend, zukunftssicher
- 1.2 Passivhäuser - ganz normale Wohngebäude
- 1.3 Wodurch wird ein Gebäude zum Passivhaus?
- 1.4 Wärmedämmung
- 1.5 Passive Sonnenenergienutzung
- 1.6 Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung
- 1.7 Ergänzungsheizung
- 1.8 Luftfeuchtigkeit im Passivhaus

2 Wohnen in Ihrem Passivhaus

- 2.1 Ihre jahresbilanzielle Null-Energie Siedlung am Kronsberg
- 2.2 Dämmung und Luftdichtheit
- 2.3 Fenster
- 2.4 Lüftung
 - 2.4.1 Lüftungszentralgerät
 - 2.4.2 Zusatzlüftung über die Fenster in der kalten Jahreszeit
- 2.5 Wärme-, Wasser- und Stromversorgung
 - 2.5.1 Wärmeversorgung
 - 2.5.2 Wasserversorgung
 - 2.5.3 Stromversorgung / Elektroinstallation
- 2.6 Warm im kalten Winter: Die Ergänzungsheizung
- 2.7 Kühl im heißen Sommer
- 2.8 Warmwasserbereitung
- 2.9 Solaranlage
- 2.10 Stromsparende Geräte

3 Wartung und Reinigung

- 3.1 Filterwechsel und Reinigung

3.2 Wartung und Instandhaltung

- 3.2.1 Lüftungszentralgerät
- 3.2.2 Nachheizregister
- 3.2.3 Solaranlage
- 3.2.4 Elektrische Anlage
- 3.2.5 Thermostat
- 3.2.6 Entleerung Gartenwasser
- 3.2.7 Trockenschrank
- 3.2.8 Fenster und Tür

4 Anhang

- 4.1 Übersicht Wartungs- und Reinigungsarbeiten
- 4.2 Termintabellen Filterreinigung
- 4.3 Sanitär-Ausstattung
- 4.4 Technische Herstellerunterlagen

Da das Handbuch mit rund 60 Seiten zuzüglich „Technische Herstellerunterlagen“ relativ umfangreich ist, wurde eine Kurzanleitung „*Wohnen im Passivhaus - Auf einen Blick*“ erstellt, laminiert und der Langfassung beigelegt (vergl. Abb. 74). Auf diese Weise haben die Bewohner die wichtigsten Nutzerhinweise schnell zur Hand (und können diese ggf. an geeigneter Position aufhängen).

Wohnen im Passivhaus - Auf einen Blick

Was Sie regelmäßig tun sollten:

- Ab November bis Ende März (je nach Witterung) Fenster geschlossen halten, Lüftungsanlage mit eingesetztem Bypass-Schieber betreiben.
- Im Sommer ganz normal Fensterlüften und als Entlüftung von Bad & WC Lüftungsgerät auf Stellung "Sommerlüftung" betreiben. Während der sommerlich warmen Zeit Bypass-Schieber herausziehen und zum sicheren Wiederauffinden am besten auf dem Gerät lagern.
- Filterwechsel: Kontrolle am Lüftungsgerät alle 3 Monate (beide Filter), Küchenfilter alle 3 Monate kontrollieren.
- Monatliche Sichtkontrolle der Haustechnik und Solaranlage.
- Zur Vermeidung von Überhitzung im Sommer: Nachtlüftung & Verschattungseinrichtungen nutzen, möglichst energiesparende Haushaltsgeräte einsetzen.

Was Sie in längeren Zeitabständen regelmäßig tun sollten:

- Wärmetauscher der Lüftungsanlage alle zwei Jahre reinigen.
- Nachstellen der Fenster, Dichtlippen überprüfen und fetten der Beschläge.

Was Sie beachten sollten:

- Bei längerer Abwesenheit im Winter Heizung **nicht** ausschalten, z.B 18°C am Thermostat **einstellen**.
- Fenster in der Heizzeit möglichst nur im Bedarfsfall öffnen (Ausfall der Lüftungsanlage, Party etc), Eingangstüre und Balkontüre nach dem Benutzen möglichst rasch und dichtsitzend wieder schließen! Die Haustür schließt **nur luftdicht**, wenn der Schlüssel zweimal vollständig gedreht wurde.
- Gegenstände und helle bzw. reflektierende Flächen innen vor dem Fenster vermeiden (Mindestabstand 20 cm), es kann sonst durch örtliche Erwärmung zu Glasbruch kommen.
- Verletzungen der luftdichten Hülle durch Dübel, Nägel, Schrauben etc.: Nach dem Wiederentfernen die verbleibenden Löcher im Putz der Außenwände wieder sorgfältig mit Fugenmörtel ausspachteln!
- Zuluftöffnungen, Überströmöffnungen und Abluftöffnungen immer frei halten und Einstellung nicht verändern!
- Keinen Ablufttrockner zum Wäschetrocknen verwenden (Schimmelbildung durch zuviel Kondenswasser)!
- Entleerung der Gartenwasserleitung vor dem ersten Frost
- Fenster in der kalten Jahreszeit tagsüber möglichst nicht verschatten (Solargewinne).

Wie Sie Energie sparen können:

- Fensterlüftung in der Heizperiode vermeiden
- Raumlufttemperatur nur so hoch wie nötig (Räume nicht überheizen!)
- Badheizung im Regelfall ausgeschaltet lassen, bzw. nicht dauerhaft damit heizen.
- Zum Wäschetrocknen möglichst Trockenschrank ohne el. Heizung benutzen oder Wäsche auf dem Wäscheständer im Flur oder im Bad trocknen, weil so die Feuchtigkeit besser abgeführt werden kann.
- Stromsparende Haushaltsgeräte und Energiesparlampen verwenden, Geräte mit Standby-Schaltung bei Nichtbenutzung ganz abschalten.

Abbildung 74: Kurzanleitung zum Nutzerhandbuch

Auf mehreren Informationsveranstaltungen wurden Fragen der Nutzer zum Passivhausansatz und dem damit verbundenen Nutzerverhalten beantwortet. Es wurden Hilfestellungen zu häufig auftretenden Problemen, wie z. B.: dem Auftreten von trockener Luft und wie sich dieser Zustand vermeiden lässt oder zum Filterwechsel der Lüftungsanlage, beantwortet. Außerdem wurden Ergebnisse der Verbrauchsdatenanalysen vorgestellt, um den Bewohnern einen Eindruck über die Gesamtsituation zu geben. All diese Maßnahmen haben sich sehr positiv auf das Verständnis für das eigene Passivhaus ausgewirkt, Missverständnisse ausgeräumt und ungewolltes Fehlverhalten vermieden

In 16 von 32 Haushalten wurde ein Nutzerinformationssystem eingebaut, das die Energie- und Wasserverbräuche des entsprechenden Haushalts in Bezug auf alle Häuser darstellt. Die Nutzer haben die Möglichkeit über einen Bildschirm im Erdgeschoss ihre eigenen Verbräuche mit jeweiligen Gesamtverbräuchen abzugleichen. Durch berühren des Bildschirms wird der Anwender durch ein einfaches Menü geführt. Jeder Besitzer eines solchen Displays kann sich dadurch objektiv selbst einschätzen und kann dann ggf. das eigene Verhalten entsprechend anpassen.

Vom Einzug des ersten Bewohners bis zum Ende der Expo (November 2000) war ein fachkundiger Mitarbeiter vor Ort, der bei der einen oder anderen Frage den Nutzern oft hilfreich zur Seite stand.

11.2 Sozialwissenschaftliche Evaluierungen

In der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg wurden mehrere sozialwissenschaftliche Evaluierungen durchgeführt, um die Akzeptanz der Bewohner zu überprüfen.

Durch Bewohnerbefragungen in den Jahren 2000 und 2001 wurden umfangreiche Daten zu den verschiedensten Fragestellungen für den gesamten Kronsberg erhoben. Diese Befragungen wurden von der Kronsberg Umwelt Kommunikation Agentur (KUKA) in Auftrag gegeben. Es wurden insgesamt mehr als 2500 Fragebögen verteilt, von denen fast 900 ausgewertet werden konnten. Die Befragungen der KUKA sind gleichzeitig der erste Baustein einer sozialwissenschaftlichen Evaluierung, die im Auftrag der Stadtwerke Hannover AG im Rahmen von CEPHEUS für das Teilprojekt Passivhaussiedlung Hannover Kronsberg durchgeführt wurde [Danner 2001] (bei der Stadtwerke Hannover AG erhältlich). Die vergleichende Auswertung dient vor allem dem Ziel, wohnformspezifische Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede zu identifizieren. Der zweite Baustein wurde im Rahmen einer 1,5-stündigen persönlichen Befragung aller Passivhaushalte im November 2000 realisiert. Die Einschätzung der Bewohner hinsichtlich verschiedener Parameter des Wohnkomforts, der Wohnqualität sowie zum Nutzerverhalten waren dabei von besonderer Bedeutung. Im März 2001 fand der dritte Baustein parallel zur Bewohnerbefragung aller „Kronsberger“ im Rahmen einer schriftlichen

Nachbefragung statt. In dieser Untersuchung wurden die Erfahrungen und das Nutzerverhalten der Bewohner abgefragt.

11.2.1 Zuzugmotivation

85 % der Passivhausbewohner haben vor dem Zuzug zur Miete gewohnt. Ebensoviele Personen haben vom Passivhausansatz vorher nichts gewusst. Die Erwartung von geringen Nebenkosten haben fast 90 % zum Kauf eines Passivhauses bewogen. Umweltschutz, die Erwartung auf ein angenehmes Raumklima und einen höheren Wohnkomfort, gaben 2 von 3 Personen als Entscheidungsgrund für das Passivhaus an.

11.2.2 Subjektive Komfortbeurteilungen durch die Bewohner

Die folgenden Ausführungen basieren auf einer Bewohnerbefragung die in den Jahren 2000 und 2001 zum Einen für den gesamten Kronsberg und zum Anderen durch eine persönliche und eine schriftliche Befragung speziell der Passivhausbewohner durchgeführt wurden. Diese sozialwissenschaftlichen Evaluierungen wurde von der Universität Lüneburg, Institut für Umweltkommunikation, im Auftrag der Stadtwerke Hannover AG ausgeführt. Die ausführlichen Ergebnisse sind in [Danner 2001] und [von Oesen 2001] nachzulesen.

Im Folgenden werden einige wesentliche Ergebnisse in Prozentwerten angegeben. Die Zahlen der gesamten Kronsbergbewohner (Passivhäuser, NEH-Reihenhäuser und Mieter) werden zum Vergleich in Klammern jeweils dahinter genannt.

Die Zufriedenheit mit dem Raumklima im Winter wird von einer deutlichen Mehrheit der Bewohner als gut bis sehr gut eingeschätzt. Es gab keinen Bewohner, der sich negativ geäußert hat. Die höheren Oberflächentemperaturen und die gleichmäßige Temperaturverteilung im gesamten Raum (keine Temperaturschichtung) gegenüber „normalen Häusern“, werden zudem als sehr angenehm empfunden. Die Äußerung einer Bewohnerin während eines Presseinterviews beschreibt dieses Phänomen recht treffend: „Ich habe endlich keine kalten Füße mehr“. Die Zufriedenheit mit der Schlafzimmertemperatur während der Heizperiode hat sich nach einer Eingewöhnungsphase ebenfalls deutlich erhöht. Mehr als die Hälfte der Bewohner fanden die Temperatur im Schlafzimmer genau richtig.

Auch für den Sommer können die Messergebnisse durch die Bewohner bestätigt werden, da sich 88 % der Befragten zufrieden bzw. sehr zufrieden über das Innenklima im Sommer äußerten. Besonders die kühle Luft bei geschlossenen Fenstern wurde von vielen Bewohnern positiv erwähnt. Die Nachtlüftung wird von den meisten Haushalten angewandt, da diese sich als sehr effektiv herausgestellt hat und zudem die Durchführung im Nutzerhandbuch leicht verständlich beschrieben ist.

Die Luftqualität wird von 95 % der Bewohner als gut bis sehr gut eingeschätzt und kein Befragter gab eine negative Einschätzung ab.

Die Lüftungsgewohnheiten während der Heizperiode macht die Zufriedenheit der Passivhausbewohner deutlich, da 82 % der Passivhausbewohner (40 % aller Kronsbergbewohner) ausschließlich die Lüftungsanlage zum Austausch der verbrauchten Luft nutzen. Auf Fensterlüftung wird dennoch nicht gänzlich verzichtet. 7 % (30 %) öffnen für wenige Minuten, 4 % (23 %) für ca. 15 Minuten und weitere 7 % (7 %) kippen sogar für mehrere Stunden ihre Fenster. Es wird deutlich, dass die Notwendigkeit zum Fensterlüften bei den Passivhäusern eigentlich nicht besteht, wenn jedoch die Fensterlüftung vereinzelt dennoch in Anspruch genommen wird, funktioniert das System trotzdem.

Auf die Frage nach der Zufriedenheit mit ihrer Lüftungsanlage, erklären sich 90 % (54 %) der Passivhausbewohner sehr zufrieden bis zufrieden. Nur 6 % (28 %) waren nur teils-teils mit der Anlage zufrieden. Es gab unter den Passivhausbewohnern nur eine negative Einschätzung von 4 % (18 %) über die Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Im Vergleich zu den anderen Kronsbergbewohner wird deutlich, dass die Akzeptanz der Passivhauslüftungsanlage deutlich größer ist. Die Zufriedenheit der Passivhausbewohner kann an dem im Vergleich zu den anderen Häusern qualitativ sehr viel besseren Lüftungssystem liegen. Es kommen zum großen Teil reine Abluftanlagen zum Einsatz. Inwieweit sich die Einschätzung der Lüftungsanlagen in Abhängigkeit von verschiedenen Anlagensystemen unterscheidet, konnte durch die Erhebung leider nicht festgestellt werden.

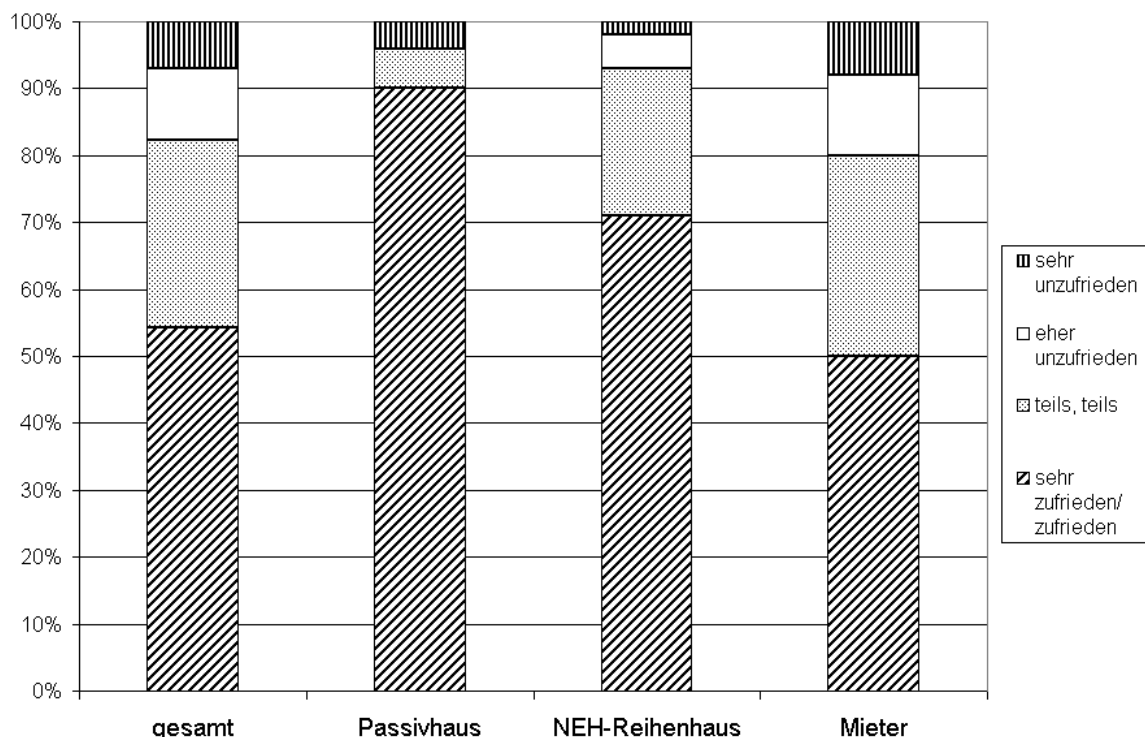


Abbildung 75: Akzeptanz der Lüftungsanlagen

Fast 90 % der Passivhausbewohner fiel die Umgewöhnung an die Lüftungsanlage leicht und die Handhabbarkeit der Anlagen wird ebenfalls als unkompliziert beschrieben. Die gesamten Messergebnisse werden durch die subjektive Wahrnehmungen der Bewohner bestätigt.

11.2.3 Nutzerakzeptanz

Die hohe Nutzerakzeptanz der Passivhausbewohner wird durch die Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Evaluierungen mehr als deutlich. So wurde den Bewohnern in Hannover die folgende Frage gestellt: „Haben sich ihre anfänglichen Erwartungen bisher erfüllt?“

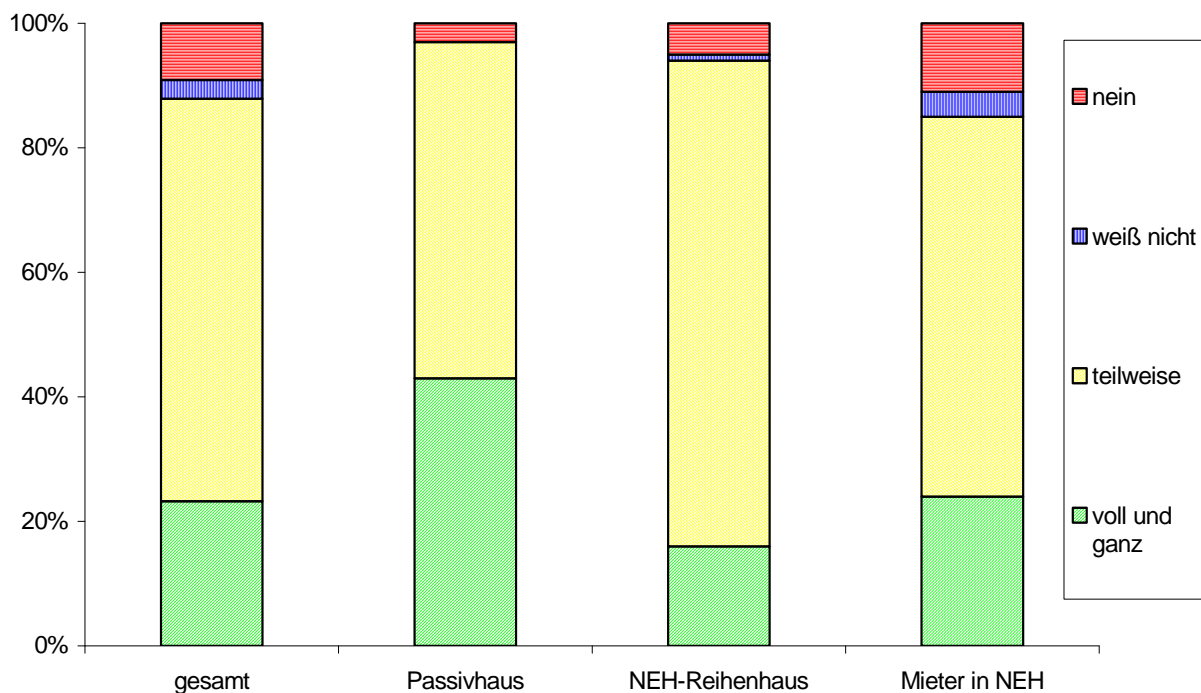


Abbildung 76: Erfüllung der Erwartungen der Kronsbergbewohner

Die Grafik zeigt sehr schön die überdurchschnittliche Zufriedenheit der Passivhausbewohner im Vergleich zu den Bewohnern von Niedrigenergiehäusern und -wohnungen. Nur 3 % (12 %) sind nicht zufrieden oder wissen nicht ob Sie zufrieden sind. Für 43 % (23 %) sind die Erwartungen voll und ganz eingetreten.

12 Presse- und Öffentlichkeitsarbeiten

Ein Haus wird durch die Stadtwerke Hannover AG für Seminar-, Besichtigungs- und Ausstellungszwecke genutzt. Es ist mit technischen Exponaten, passivhausgeeigneter Komponenten, sowie Informationstafeln über CEPHEUS und seine Teilprojekte ausgestattet.

Während der EXPO war ein Ausstellungshaus der Stadtwerke Hannover AG täglich durchschnittlich 7 Stunden geöffnet und mit einem Fachberater besetzt. In der Zeit wurden ca. 1.650 Besucher im Ausstellungshaus eingehend über den Ansatz und das Projekt informiert. Der überwiegende Teil (ca. 60 %) der Besucher waren der Kategorie „fachlich interessiert“ zuzuordnen. Die Einzelpersonen und Gruppen kamen aus der gesamten Bundesrepublik Deutschland, Österreich, Schweiz, Italien, Spanien, Belgien, Niederlande, Schweden, Tschechische Republik, USA, Kanada, Korea, China und Japan. Das Ausstellungshaus wurde darüber hinaus von Firmen für Arbeitstreffen und Gespräche sowie für Seminarveranstaltungen genutzt.

Vier weitere Häuser wurden durch die Stadtwerke Hannover AG als Gästehäuser zur EXPO 2000 genutzt, ein Haus steht bis auf weiteres zum Probewohnen zur Verfügung. Im Oktober 2000 wurde im Rahmen einer Pressekonferenz mit Beteiligung der Staatssekretärin Frau Dr. Herlind Gundelach vom Hessischen Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten eine Zwischenbilanz gezogen und eine Sonderausstellung „Passivhaus zum Anfassen“ für Laien und Fachleute eingerichtet (diese Ausstellung war als Wanderausstellung auch während der 5. Passivhaustagung in Böblingen zu besichtigen). In zahlreichen Vorträgen auf Fachkongressen wurde und wird ausführlich über das Thema berichtet (4. und 5. Passivhaustagung, 9. Europa-Symposium „Ökologisches Bauen“ im Dez 2000 in Düsseldorf, Nachhaltiges Bauen für das 21. Jahrhundert im Februar 2001 in Hannover, etc.). Außerdem gibt es viele Veröffentlichungen in der regionalen und überregionalen Presse bzw. Fachpresse, sowie im Internet, Jahresberichten etc.

Neue Presse

Ausgabe: 16.03.2000

Seite: 18

Passiv-Häuser begeistern Bauherren mit aktiver Ökologie und gutem Preis

Bewohner der Mustersiedlung auf Kronsberg ziehen positive
erste Bilanz

VON KARL-RICHARD WÜRGER
HANNOVER. Das erste Haus (fast) ohne
Heizung – es funktioniert: Familie Pankokel wohnt in einem der so genannten
Passiv-Häuser auf dem Kronsberg. Vater Reinhard (46), Mutter Karin (38) und
Sohn Timon (6) jubeln: „Früher mussten wir immer nachzahlen, wenn die
Heizkosten-Abrechnung kam, jetzt kommen wir mit 100 Mark im Jahr
aus.“

Das schönste Kompliment macht Karin Pankokel der Kronsberg-Siedlung: „In
unserem alten Haus in Langenhagen hatte ich immer kalte Füße. Seitdem ich hier
im Sticksfeld wohne, ist das vorbei: Bei uns ist es jetzt immer mollig warm.“

Möglich wird das, weil Architekt Werner Mähler richtig tief in die Öko-Kiste
greift: 40 Zentimeter dicke Dämmung (normal sind 20), Dreifach-Verglasung,

intelligentes Verwertungssystem für
Fernwärme und so weiter ...

Die 32 blauweißen Energiespar-Häuser in der Siedlung Lummerland funktionieren
bestens, weil ausgereifte Technik und kostengünstige Konzeption dahinter
stehen. Dafür gibt es sogar Zuschüsse: Bis zu 30 000 Mark von der Kreditanstalt
für Wiederaufbau.

280 000 Mark reichen

Und teurer als normal muss der Öko-Bau auch nicht sein: Für 100 Quadratmeter
Wohnfläche zahlen Bauherren etwa 280 000 Mark.

Andere Länder schauen bereits interessiert auf die Passiv-Häuser. Und die
Macher unter Führung der Stadtwerke sind sich einig: „Diese Technik setzt
Standards. So wird in Zukunft gebaut.“



Sie baut auf die Öko-Bauweise: Karin Pankokel (38) wohnt in einem Passiv-Haus am
Kronsberg: „Wir sparen ohne Ende Energie.“
Foto: Spolvint

Abbildung 77: Zeitungsbericht über die Passivhäuser am Kronsberg in der „Neue Presse“ vom
16.03.2000.

BILD HANNOVER	
Ausgabe: 16.03.2000	Seite: 3

Genial

Haus ohne Heizung, aber keiner bibbert

Von C. JACOB-RÜDIGER
 Es klingt genial: ein Haus ohne Heizung - und trotzdem ist es kuschelig warm! „Endlich habe ich mal warme Füße. Hier kriegt mich keiner mehr raus aus diesem wunderbaren Haus“, schwärmt **Karin Pankoke** (38).
 Die Ingenieurin, sie lebt mit ihrem Mann **Reinhard** (46) und Sohn **Timon** (6) in einem der **32 Reihen-„Passivhäuser“** (390 000 Mark) in der **Siedlung Lummerlund am Kronsberg**. Das

Außergewöhnliche: Im ganzen Haus gibt es keine Heizung - aber es ist trotzdem warm.
Projektleiter Torsten Schwarz (38) von der hannoverschen Firma „Rasch & Partner“: „Das ganze Geheimnis ist eine außergewöhnliche Dämmung und ein Wärmetauscher.“
 Es funktioniert tatsächlich!
 ● Die Außenwände (Holz, Beton) sind 40 Zentimeter dick, mit Steinwolle verfüllt.
 ● Alle Fenster sind drei-

fach verglast. Zwischen der ersten und der zweiten Schicht ein Spezialgas, das Wärme nach innen, aber nicht nach draußen lässt.
 ● Auf dem Boden ist ein Wärmetauscher (1,50 m hoch, 50 cm breit) installiert. Der zieht verbrauchte Luft über Düsen aus den Räumen ab. Die erwärmt gleichzeitig die frische Luft, die das Gerät über ein Rohr von außen ansaugt.
 ● Heißes Wasser (Küche, Bad, Gäste-WC) wird durch Fernwärme aufgeheizt - die

einzigsten Kosten für die Passivhaus-Eigentümer.
 Karin Pankoke hat's ausgerechnet: „Das sind lächerliche 100 Mark im Jahr für 120 Quadratmeter Wohnfläche.“ Zum Vergleich: In ihrer ähnlich großen Wohnung in Langenhagen zahlte die Familie pro Jahr 1800 Mark an Heizkosten.
 Weil sich Pankokes für dieses Ökohaus (Gründach aus Fetthennengewächsen) entschieden haben, wurden sie

auch noch belohnt. Die „Kreditanstalt für den Wiederaufbau“ gewährte ihnen zwei zinsgünstige Kredite zu je 4,5 und 5,56 Prozent.
 Fünf Reihenhäuser sind im „Lummerlund“ (anerkanntes Expo-Projekt) noch zu haben. Weitere Passivhäuser werden in **Bothfeld** an der Carl-Loges-Straße, am Freibad in **Empelde** und in Langenhagens neuem Stadtteil **Weihersfeld** gebaut. Infos ☎ (0511) 2703151 oder (0511) 1614848.



Karin Pankoke mit ihrem Sohn Timon auf der Terrasse. Die Ingenieurin: „Aus diesem Haus ziehe ich nicht wieder aus.“

Foto: Eberhard Wedder

Abbildung 78: Zeitungsbericht über die Passivhäuser am Kronsberg in der „BILD Hannover“ vom 16.03.2000.

Literatur

- [Baffia 1999]** Baffia, E., Wärmebrückenfreie Reihenhäuser der Passivhaussiedlung Hannover Kronsberg in Mischbauweise; in Protokollband Nr. 16 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser "Wärmebrückenfreies Konstruieren", Passivhaus Institut, Darmstadt 1999.
- [Carlsson/ Elmroth 1980]** Carlsson, B., Elmroth, A.; Engvall, P.-Å., Airtightness and thermal insulation; Swedish Council for Building Research, Stockholm, D37:1980.
- [Danner 2001]** Danner, Michael: Wohnen in der Passivhaussiedlung Lummer-lund im Neubaugebiet Hannover-Kronsberg, Abschlußbericht zur Sozialwissenschaftlichen Evaluation, U Konzept, Agentur für Umweltkommunikation e.V., Universität Lüneburg, Lüneburg 2001.
- [Eckert 2000]** Eckert, Anja: Model Kronsberg: nachhaltiges Bauen für die Zukunft = Sustainable building for the future, Hrsg.: Landeshauptstadt Hannover, Der Oberbürgermeister, Umweltdezernat; Hannover 2000, ISBN 3-00-006942-9.
- [Eschenfelder 1999]** Eschenfelder, D., Das Niedrigenergiehaus in NRW – Test; Bauphysik 21/1999, Heft 6, S. 260-267.
- [Feist 1994]** Feist, W., Thermische Gebäudesimulation, S.274ff, Heidelberg 1994.
- [Feist 1998]** Feist, W., Wirtschaftlichkeitsuntersuchung ausgewählter Energiesparmaßnahmen im Gebäudebestand, Darmstadt 1998.
- [Feist 1999]** Feist, W., Anforderungen an die Wohnungslüftung im Passivhaus, Protokollband Nr. 17 des Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, Darmstadt 1999.
- [Feist 2000]** Feist, W., Ebel, W.; Stärz, N., Wäschetrocknen im Trockenschrank: Meßergebnisse und Nutzererfahrungen in einem Passivhaus; Passivhaus Institut, Darmstadt 2000.
- [Geißler 1999]** Geißler, A.: Genauigkeit von Luftdichtheitsmessungen; im Tagungsband 4. Blower Door-Symposium, EUZ 1999.
- [Hannover]** Stadtkarten Hannover; Herausgeber: Landeshauptstadt Hannover, Stadtvermessungsamt (www.Hannover.de).
- [Jacob-Rüdiger 2000]** Jacob-Rüdiger; Genial Haus ohne Heizung, aber keiner bibbert; Bild-Hannover; 16.03.2000, Seite 3.
- [Kronvall 1980]** Kronvall, J., Air Flows in Building Components; Lund Institute of Technology, report TVBH-1002, Lund 1980.

- [Peper 1999]** Peper, S., Untersuchung der Luftdichtheit in der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg, Passivhaus Institut Darmstadt, Fachinformation PHI-1999/4.
- [Peper 1999a]** Peper, S., Luftdichte Projektierung von Passivhäusern, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 7, Fachinformation PHI-1999/6, Passivhaus Institut, Darmstadt 1999.
- [Peper 2000a]** Peper, S., Pfluger, Rainer; Feist, Wolfgang: Nutzerhandbuch für die Passivhaussiedlung in Hannover-Kronsberg, Passivhaus Institut, Darmstadt 2000.
- [Peper 2001]** Peper, S., Feist, W., Kah, O., Meßtechnische Untersuchung und Auswertung; Klimaneutrale Passivhaussiedlung in Hannover-Kronsberg, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 19, Passivhaus Institut, Darmstadt 2001.
- [Peper 2001a]** Peper, S., Feist, W., Thermographische Untersuchung der Passivhaussiedlung in Hannover Kronsberg, Wissenschaftliche Auswertung, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 20, Passivhaus Institut, Darmstadt 2001.
- [PHPP 1999]** Feist, W., Baffia, E.; Schnieders, J., Pfluger, R., Passivhaus Projektierungs Paket `99, Passivhaus Institut, 3. Überarbeitete Auflage, Darmstadt 2000.
- [Schnieders 1998]** Schnieders, J., Feist, W., Passivhaus-Reihenhäuser: Über die Zuluft beheizbar? Simulation des thermischen Gebäudeverhaltens bei Variation ausgewählter Parameter und bei Zuluftnachheizung. CEPHEUS-Projektinformation Nr. 5, Fachinformation PHI-1998/12, Passivhaus Institut, Darmstadt 1998.
- [Schnieders 1998a]** Schnieders, J., Such, M., Untersuchung der Luftdichtheit in der Niedrigenergie- und Passivhaussiedlung Lummerlund in Wiesbaden-Dotzheim"; Fachinformation PHI-1998/9, Passivhaus Institut, Darmstadt 1998.
- [Schnieders 1999]** Schnieders, J., Feist, W., Für das Passivhaus geeignete Fenster; CEPHEUS-Projektinformation Nr. 9, Fachinformation PHI-1999/9, Passivhaus Institut, Darmstadt 1999.
- [Stärz 1998]** Stärz, N., Kreuz, W., Vorbereitende Untersuchung zur Haustechnik in den Passivhäusern Hannover Kronsberg, Büro inPlan, Pfungstadt 1998.
- [Stärz 1999]** Stärz, N., Lüftungstechnik bei Reihenhaussiedlungen mit Passivhäusern, Protokollband Nr. 17 des Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, Darmstadt 1999.
- [von Oesen 2001]** von Oesen, Matthias: 2 Jahre Passivhaussiedlung „Lummerlund“ in Hannover Kronsberg Messergebnisse und Erfahrungen, in Tagungsband 5. Passivhaus Tagung, erneuerbare energien, Reutlingen 2001.