

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

**Passiv
Haus
Institut**
Dr. Wolfgang Feist



Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg: Bau und Messung

Autoren:

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

unter Mitwirkung von:

Vahid Sariri, Matthias Nagel,
Wiebke Wenzel (PHI)
Dipl.-Ing. Folkmer Rasch (faktor 10)
Dipl.-Ing. Petra Grenz (faktor 10)
Dipl.-Ing. Norbert Stärz (inPlan)

Auftragnehmer:

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

Bezug:

Stadtwerke Hannover,
matthias.vonoson@enercity.de
Hannover 2001/ Kurzfassung 2005

**Diese Kurzfassung entstand aus der
Zusammenführung der CEPHEUS-
Berichte Nr. 18 und Nr. 19.**

**Die zugrunde liegenden Berichte
entstanden 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.**

INHALT

1	Vorwort zur Passivhaussiedlung auf dem Kronsberg	4
2	Übersichtskarten	9
3	Baubeschreibung	12
3.1	Grundrisse, Gebäudeschnitte und Ansichten.....	12
3.2	Angaben zur Energiebezugsfläche Passivhäuser Hannover Kronsberg	15
3.3	Regelquerschnitte der Außenbauteile	15
3.4	Darstellung von Anschlussdetails: Luftdichtheit und wärmebrückenfreies Konstruieren.....	17
4	Lüftungskonzept	23
4.1	Lüftungszonen.....	23
4.2	Technische Parameter der Wohnungslüftung.....	24
4.2.1	Rohrleitungsnetz Lüftung	24
4.2.2	Auslegungsluftvolumenströme	25
4.2.3	Druckverluste.....	26
4.2.4	Zuluftventile	27
4.2.5	Abluftventile	27
4.2.6	Überströmelemente	27
4.3	Lüftungszentralgerät mit Wärmeübertrager	28
4.4	Regelmöglichkeiten	29
5	Konzept der Raumwärmeversorgung	30
5.1	Heizwärmeverteilung.....	30
5.2	Wärmeversorgung Heizung.....	30
5.2.1	Nahwärmeversorgung.....	30
5.2.2	Hausversorgung	30
6	Konzept der Warmwasserversorgung	31
6.1	Angaben zur Erzeugung, Speicherung, Verteilung	31
6.2	Auslegungsdaten	32
6.3	Solaranlage.....	32
7	Ausstattung mit elektrischen Haushaltsgroßgeräten und Beleuchtung	33
8	Kosten, Mehrkosten, Wirtschaftlichkeit	37
8.1	Mehrinvestitionen für Passivhäuser.....	37
8.2	Vom Haus nach Wärmeschutzverordnung '95 zum Passivhaus:.....	41

8.2.1	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	41
8.2.2	Schritt I: Passivhaus-Dämmung der Leichtbaufassaden	47
8.2.3	Schritt II: Dämmung der Giebelwände mit Wärmedämmverbundsystem	47
8.2.4	Schritt III: Erhöhung der Dachdämmung.....	47
8.2.5	Schritt IV: Dämmung der Erdgeschoss-Bodenplatte	47
8.2.6	Schritt V: Einbau von Passivhaus-Fenstern	48
8.2.7	Schritt VI: Hocheffiziente Wärmerückgewinnung	48
9	Beschreibung des Bauablaufs	51
9.1	Zeitliche Daten	51
9.2	Beteiligte und Organisation des Bauablaufs	51
9.3	Einweisung, Qualifizierung und Qualitätssicherung	51
9.3.1	Rohbau	52
9.3.1.1	Qualitätssicherung im Betonwerk/Vormontage Haustechnik	52
9.3.1.2	Vorfertigung der Holztafelbauelemente im Holzbauwerk und Wärmedämmung..	52
9.3.2	Fenster	53
9.3.2.1	Verglasungsauswahl	53
9.3.3	Luftdichtheit	53
9.3.3.1	Anschlüsse zwischen den Elementen.....	53
9.3.3.2	Dachdurchbrüche der Lüftungsrohre	54
9.4	Luftdichtheitstests	54
9.4.1	Quantitative Messergebnisse	55
9.4.2	Drucktest Messergebnisse	56
9.5	Ergebnisse der thermographischen Untersuchung.....	57
9.6	Balanceabgleich der Lüftungsanlagen.....	59
9.7	Nutzerhandbuch.....	60
10	Messkonzept	62
10.1	Messaufnehmer	62
10.2	Wärmemengenzähler (WMZ)	64
10.2.1	Hausanlagen	64
10.2.2	Intensivmessung-WMZ	65
10.2.3	Haupt-WMZ für Hauszeilen	66
10.3	Haupt- und Warmwasserzähler	66
10.4	Raumlufttemperaturen.....	66
10.5	Stromzähler.....	66
10.6	Intensivmessung	66
10.6.1	Wassertemperaturen.....	67
10.6.2	Kanal-Lufttemperaturen und -Luftfeuchte	67
10.6.3	Volumenstrom.....	67
10.6.4	Kondensat	67
10.7	Wetterstation	67

11	Datenauswertung	68
12	Übersicht über die Messergebnisse	69
8.1	Behaglichkeitsparameter	70
8.2	Heizlasten	70
12.1	Heizwärmeverbrauch	70
12.2	Endenergieverbrauch	71
12.3	Primärenergieverbrauch	72
13	Ergebnisse der Messungen im einzelnen	73
13.1.1	Nutzenergieverbräuche	73
13.1.2	Endenergieverbräuche	80
13.1.3	Endenergievergleich mit Niedrigenergiehäusern (NEH)	81
13.1.4	Nutzerstreuung und Verbrauchsniveau im Vergleich	83
13.1.5	Primärenergieverbräuche	85
13.2	Thermische Behaglichkeit	87
13.2.1	Typische Winterwochen	90
13.2.2	Typische Sommerwochen	92
13.3	Heizlasten	94
14	Projektspezifische Messdatenauswertung	96
14.1	Klimadatenvergleich	96
14.2	Kaltwasserverbrauch	98
14.3	Warmwasser	98
14.3.1	Warmwasserverbrauchsmenge	98
14.3.2	Fernwärmeverbrauch zur Warmwasserversorgung	100
14.3.3	Wärmeabgabe der Verteilungen: teilweise Nutzbarkeit im Winter	100
14.4	Stromverbrauch	104
14.4.1	Stromeffizienz Haushaltsstrom	104
14.4.2	Gemeinschaftsstromverbräuche	109
14.5	Wärmerückgewinnungsgerät	110
14.6	Luftfeuchte	114
14.7	Klimaneutralität der Passivhaussiedlung	116
	Literatur	120

1 Vorwort zur 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.

Bei der vom Bauträger Rasch & Partner unter Beteiligung der Stadtwerke Hannover 1998 errichteten Siedlung mit 32 Reihenhäusern wurde erstmals konsequent allein eine Heizwärmeverteilung über die aus lufthygienischen Gründen notwendige Frischluft 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 deutschen Neubauwohnungen (1999) verbraucht wird.

Die Verbesserung der wärmetechnischen Qualität ist nach den vorliegenden Ergebnissen 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 beim hervorragenden Wärmeschutz ausgeschlossen werden.

Mit etwa 80% im praktischen Betrieb gemessenem Wärmebereitstellungsgrad der Wärmerückgewinnungsanlagen erfüllen die eingesetzten Geräte die Erwartungen; der Stromverbrauch für den Lüfterbetrieb und die Regelung war sogar geringer als projektiert (250 kWh/a). Damit ergibt sich für das Lüftungssystem eine im Wohneinsatz gemessene Heizzahl von über 11. Auch für die Lüftung liegt der Vorteil nicht allein beim verringerten Energieverbrauch: Entscheidend ist die objektiv und subjektiv feststellbare Verbesserung der Luftqualität. 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 zusammengenommen, 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 Passivhausssiedlung zur Stromversorgung aus erneuerbaren Energiequellen etwa 35 kWh/(m²a) beigetragen. Die Kosten für einen Windkraftanteil der genannten Höhe lagen bei 1.250 Euro 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.

Die Passivhaus-Siedlung in Hannover-Kronsberg soll erstmals in Europa zeigen, dass eine vollständige regenerative Versorgung („Klimaneutralität“) einer Wohnsiedlung nicht nur technisch möglich, sondern mit dem Passivhausstandard auch ökonomisch vertretbar ist. Der Ausgleich der verbleibenden geringen Primärenergieverbräuche der Passivhäuser wird durch die Ankopplung an die auf dem Kronsberg errichtete Windkraftanlage ermöglicht. Zur Überprüfung der Ziele ist die Siedlung umfassend mit Messtechnik ausgestattet worden.

Die thermische Behaglichkeit erwies sich in allen Häusern mit einer mittleren winterlichen Raumtemperatur von 21,1°C als ausgezeichnet: Die Temperaturen sind sehr stabil, die Oberflächentemperaturen der Raumumfassungsflächen unterscheiden sich kaum von den Raumlufttemperaturen. Auch die Behaglichkeit im Sommer ist ausgezeichnet: Trotz eher hoher Außentemperaturen im Messsommer 2000 beträgt die Zahl der Stunden über 25 °C für die mittlere Raumtemperatur weniger als 2,5 % der Jahresstunden.

* Der äquivalente elektrische Energieeinsatz führt bei konventioneller Versorgung zum gleichen Primärenergieeinsatz.

Wenn nicht ausdrücklich anders gekennzeichnet, beziehen sich die Verbrauchswerte immer auf ein ganzes Jahr (1.10.1999 bis 30.9.2000) als Messzeitraum. Auch eine evtl. Sommerheizung ist in den dokumentierten Daten enthalten. Alle Angaben zum gesamten Endenergieverbrauch oder zum gesamten Primärenergieverbrauch enthalten auch die Stromverbräuche und zwar nicht nur den Hilfsstrom für die Haustechnik (wie in DIN 4701/Teil 10), sondern auch den Haushaltsstromverbrauch (inkl. Licht, Kühlen, Waschen, Kochen etc.) und den gesamten Gemeinschaftsstromverbrauch.

Wir beziehen die gemessenen Verbrauchswerte hier grundsätzlich auf die „treated floor area“ TFA. Diese Bezugsfläche ist fast gleich der beheizten Wohnfläche nach 2. Berechnungsverordnung. Damit sind die hier dokumentierten Energieverbrauchskennwerte (kWh/(m²a)) direkt vergleichbar mit statistischen Erhebungen der Heizkostenabrechnung. Die zur Berechnung des spezifischen Heizwärmebedarfs nach Wärmeschutzverordnung oder Energieeinsparverordnung verwendete „Gebäudenutzfläche A_N“ ist demgegenüber um 32% größer (vgl. Tabelle 1).

Fläche des repräsentativen Hauses der Passivhaussiedlung	Fläche nach CEPHEUS-Vereinbarung TFA m ²	beheizte Wohnfläche nach §44 Absatz 1II.BV m ²	Gebäudenutzfläche A _N nach Wärmeschutzverordnung m ²
	111,7 hier verwendet	111,1	147,5

Tabelle 1: Flächenvergleich am Beispiel des repräsentativen Hauses der Siedlung

Der gemessene Jahresheizwärmeverbrauch der 22 dauerbewohnten Reihenhäuser der Passivhaussiedlung lag im ersten Messjahr inkl. Sommerverbrauch bei 16 kWh/(m²a); würde man den Verbrauch auf die Gebäudenutzfläche A_N gemäß Wärmeschutzverordnung beziehen, so ergäben sich 12,1 kWh/(m²a). Im Vergleich zum durchschnittlichen Gebäudebestand in Deutschland beträgt die Einsparung über 90% und selbst im Vergleich zu neuen Reihenhäusern werden noch über 85% eingespart. Das bedeutet:

Die verbesserte Wärmedämmung mit mittleren U-Werten der opaken Bauteile von 0,11 W/(m²K) ist vollständig wirksam. Sowohl das Prinzip der wärmebrückenfreien Konstruktion als auch das Luftdichtheitskonzept haben sich damit bewährt. Dies konnte unabhängig auch durch die thermographische Untersuchung [Peper 2001a] und die Luftdichtheitsmessungen [Peper 1999a] bestätigt werden.

Die entscheidend verbesserten Fenster mit U-Werten von 0,83 W/(m²K) und hohem g-Wert von 60% tragen maßgeblich zur erreichten Energiebilanz bei: Ihre inneren Oberflächentemperaturen liegen auch bei strenger Kälte im Mittel über 17°C und selbst im Kernwinter wird durch die Südfenster mehr Solarenergie passiv zur Verfügung gestellt als diese Fenster an Wärme verlieren.

Die hocheffiziente Lüftungsanlage mit einem messtechnisch bestätigten Wärmebereitstellungsgrad von 78% weist zugleich einen nur sehr geringen Stromverbrauch auf (weniger als 2,3 kWh/(m²a)). Die Wärmerückgewinnung ist in der Praxis voll wirksam und wird nicht durch das Nutzerverhalten konterkariert.

Insbesondere zeigen die Messergebnisse zum Heizwärmeverbrauch, dass der Einfluss zusätzlicher Fensteröffnungen durch die Nutzer in der Heizperiode sehr gering ist. In der Passivhaussiedlung gibt es in jedem Raum Fenster oder Fenstertüren mit Dreh-Kipp-Beschlägen. Diese Fenster werden auch von den Bewohnern in den Übergangsjahreszeiten und vor allem im Sommer genutzt.

Die Passivhäuser auf dem Kronsberg bilden die erste Siedlung, bei welcher für die Beheizung der Wohnräume allein die Frischluftheizung eingesetzt wird. Die Funktionstüchtigkeit dieses Konzepts war im Forschungsprojekt CEPHEUS zunächst mit einer thermischen Gebäudesimulation geprüft worden [Schnieders 1998]. Über die alleinige Frischluftheizung können bei den Häusern der Siedlung maximal etwa 10 Watt Heizleistung je Quadratmeter Wohnfläche bereitgestellt werden; der Badheizkörper erlaubt eine geringfügige Anhebung. Die Messergebnisse zur tatsächlich aufgetretenen Heizleistung in den Wintern 1999/2000 und 2000/2001 bestätigen die Theorie: Gemessen wurden je 8,8 bzw. 7,0 W/m² maximale tagesmittlere Heizlast.

Dass die Heizleistung immer ausgereicht hat, geht auch daraus hervor, dass ein Einfluss der Außentemperatur auf die Raumtemperaturen ist im Winter praktisch nicht vorhanden ist: Auch am kältesten Tag werden im Mittel aller dauerbewohnten Häuser 20,9°C erreicht.

Der Endenergieverbrauch an Fernwärme für Heizung und Warmwasserbereitung zusammen wurde für das erste Jahr zu 34,6 kWh/(m²a) bestimmt, das bedeutet eine Einsparung von 75% gegenüber durchschnittlichen Neubauten.

Wenn wir die Primärenergiekennwerte nicht auf Wohnfläche, sondern auf Gebäudenutzfläche A_N beziehen und die Primärenergiefaktoren gemäß DIN 4701/10 verwenden (Fernwärme KWK 0,7, Strom 3,0) sowie den gemessenen Hilfsstromverbrauch einbeziehen, so ergibt sich der gemessene Jahresprimärenergieverbrauch zu 26,1 kWh/(m²a) (Heizung, Lüftung und Warmwasserbereitung). Damit wird nun ein Vergleich mit den EnEV-Anforderungen möglich: Das repräsentative Reihenhaus weist ein A/V-Verhältnis von 0,61 m⁻¹ auf. Daraus bestimmt sich der Anforderungswert für Q_p zu 106,9 kWh/(m²a). Der in der Siedlung im Mittel gemessene Primärenergieverbrauch liegt damit um mehr als einen Faktor 4 unter dem Anforderungswert der Verordnung. Darüber hinaus ist zu bedenken, dass die rechnerischen Nachweiswerte gemäß der Normen 4108/6 und 4701/10 niedriger ausfallen werden als die tatsächlichen Verbrauchswerte [Eschenfelder 1999].

Der Verbrauch an elektrischer Energie im Haushalt ist nun dominant. Alle im Haus eingesetzte elektrische Energie wird letztendlich in Wärme umgesetzt und dies bildet einen Teil des Angebotes an inneren Wärmequellen: In der Heizperiode deckt diese Elektroabwärme einen bedeutenden Anteil der Wärmeverluste (ca. 7,6 kWh/(m²a)) – dieser Beitrag ist fast so hoch wie der rechnerische Heizwärmebedarf. Im Sommer stellt die Elektroabwärme eine zusätzliche Wärmelast dar, durch welche die Behaglichkeit u. U. beeinflusst werden kann. Auch aus diesem Grund ist eine hohe Effizienz bei den elektrischen Energieanwendungen im Passivhaus wichtig.

Bei der Passivhaussiedlung auf dem Kronsberg ist es gelungen, die elektrische Energieeffizienz bei den Haushaltsgeräten gegenüber dem Durchschnitt deutscher Haushalte erheblich zu steigern. In einer Kombination von Beratung und finanziellem Anreiz wurde bei 18 Haushalten erreicht, dass eine Ausstattung mit besonders effizienten Elektrogeräten vorliegt. Die dadurch realisierte Einsparung beim elektrischen Haushaltsstrom beträgt für diese 18 Haushalte 45%.

Eine Gesamt-Primärenergiebilanz schließt auch die Primärenergieaufwendungen für den Haushaltsstrom mit ein; dieser dominiert mit 49,4 kWh/(m²a) sogar die Bilanz. Zusammen mit der Primärenergie für Fernwärme, Lüftung und Hilfsstrom ergeben sich insgesamt 82,6 kWh/(m²a) an Primärenergieverbrauch für alle von der Siedlung bezogenen Energieträger. Dieser Wert ist um etwa 66% geringer als der Referenz-Primärenergieverbrauch vergleichbarer Neubauwohnungen.

Der Durchschnittswert des gemessenen Endenergieverbrauchs in der Passivhaussiedlung (58,0 kWh/(m²a)) ist mit einer Standardabweichung des Mittelwertes von $\pm 2,5$ kWh/(m²a) trotz der Streuung des Nutzerverhaltens sehr gut gesichert. Bei einer von Lundström publizierten Referenzsiedlung mit durchschnittlichem Endenergieverbrauch von 203 kWh/(m²a) liegt die Standardabweichung des Mittelwertes bei $\pm 3,1$ kWh/(m²a). Dies zeigt, dass Passivhäuser genauso zuverlässig in Bezug auf das Nutzerverhalten projiziert werden können wie konventionelle Gebäude. Im Vorfeld geäußerte Befürchtungen, dass definierte Angaben zur Bauphysik und zum Heizwärmeverbrauch bei Gebäuden mit sehr gutem Wärmeschutz nicht mehr möglich seien, haben sich somit nicht bewahrheitet. Auch sind große Schwankungen durch das Lüftungsverhalten bei den Passivhäusern nicht erkennbar.

Der gesamte Energieverbrauch der Passivhaussiedlung ist so gering, dass mit vertretbarem technischem und finanziellem Aufwand eine Substitution durch erneuerbare Energieträger möglich wird: Mit einem im Kaufpreis enthaltenen Anteil im Gegenwert von Euro 1 250 je Haus an der auf dem Kronsberg errichteten Windkraftanlage kann Strom im Gegenwert von 89 kWh/(m²a) an Primärenergie erzeugt werden – das ist mehr als in der Siedlung insgesamt verbraucht wird. Hocheffiziente Technik erweist sich hier als entscheidende Voraussetzung und Chance für eine langfristig nachhaltige Energieversorgung.

2 Übersichtskarten



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

Die Stadt Hannover ist die Landeshauptstadt des deutschen Bundeslandes Niedersachsen. Sie hat mehr als 510.000 Einwohner. Die Passivhaussiedlung liegt im Stadtteil „Kronsberg“ im Süd-Osten des Stadtzentrums. Sie ist Teil des im Rahmen der Weltausstellung EXPO 2000 neu erstellten Wohngebietes Kronsberg mit bisher etwa 3000 Wohnungen. Die Siedlung steht auf einem von West nach Ost leicht ansteigendem Gelände, zwischen je zwei Häusern gibt es daher einen Versatz von 25 cm. Die vier Hauszeilen der Siedlung sind mit einer Abweichung von 15° (Richtung Westen) nach Süden ausgerichtet. Jeweils zwei Hausreihen werden von einem gemeinsamen Technikhaus versorgt, in dem sich die Fernwärmeübergabestation, alle Elektrozähler und der Hauptwasseranschluss befinden.

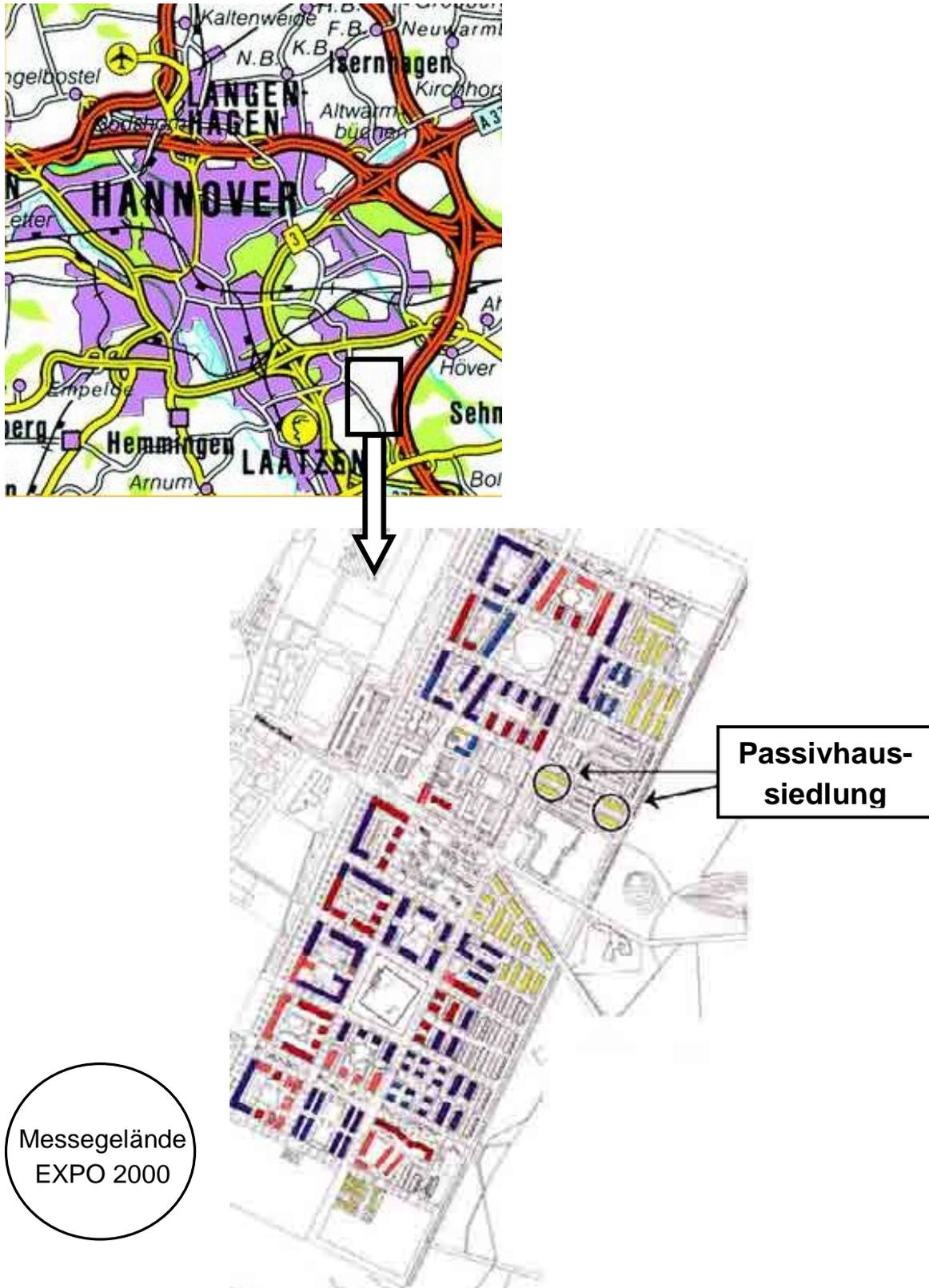


Abbildung 2: Stadtplan von Hannover mit der Lage der Passivhaussiedlung im Stadtteil Kronsberg [Hannover], [Eckert 2000].

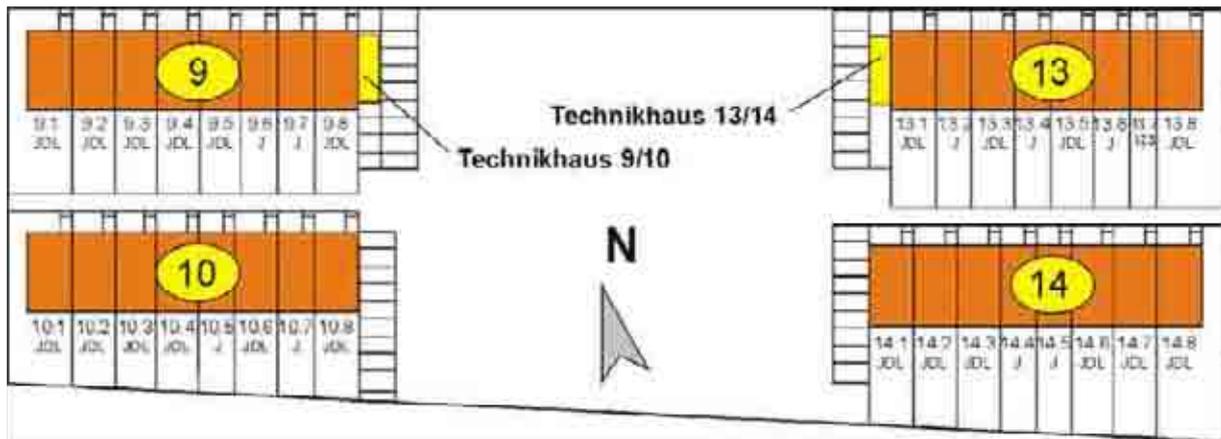


Abbildung 3: Lageplan der Passivhaussiedlung am Kronsberg (Sticksfeld Nr. 30 bis 124). Die Nummern geben die beim Bau und in diesem Bericht verwendete Bezeichnung wieder.

Standort: Geographische Länge: 9° 44' Geographische Breite: 52° 22' 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 Solarstrahlung [kWh/m² d]	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 2: 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

Es handelt sich um nicht unterkellerte Reihenhäuser mit Satteldach und außenliegendem Abstellraum in Massivbauweise: Decken, Wohnungstrennwände, Giebelwände und die übrige Tragstruktur sind aus Betonfertigbauteilen; hochwärmegedämmte 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 die Süd- und Nordansichten der Häuser mit den großen Fensterflächen zur Terrasse auf der Gartenseite und den Abstellhäusern auf der Nordseite.



Abbildung 4: Ansichten von Süden und Norden der Passivhauszeilen in Hannover-Kronsberg

Auf dem Kronsberg wurden drei Hausgrößen realisiert:

Haustyp „JDL: Jangster de LUX“

das breiteste Haus mit 6 m lichtem Innenmaß und "Treated Floor Area" nach CEPHEUS-Vereinbarung 119,5 m²; insgesamt 22 Häuser, davon 8 Endhäuser.

Haustyp „J: Jangster“

Mit 5 m lichtem Innenmaß und 97,3 m² Treated Floor Area nach CEPHEUS-Vereinbarung 96,8 m². Vom Typ Jangster wurden 9 Häuser realisiert.

Haustyp „123“

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

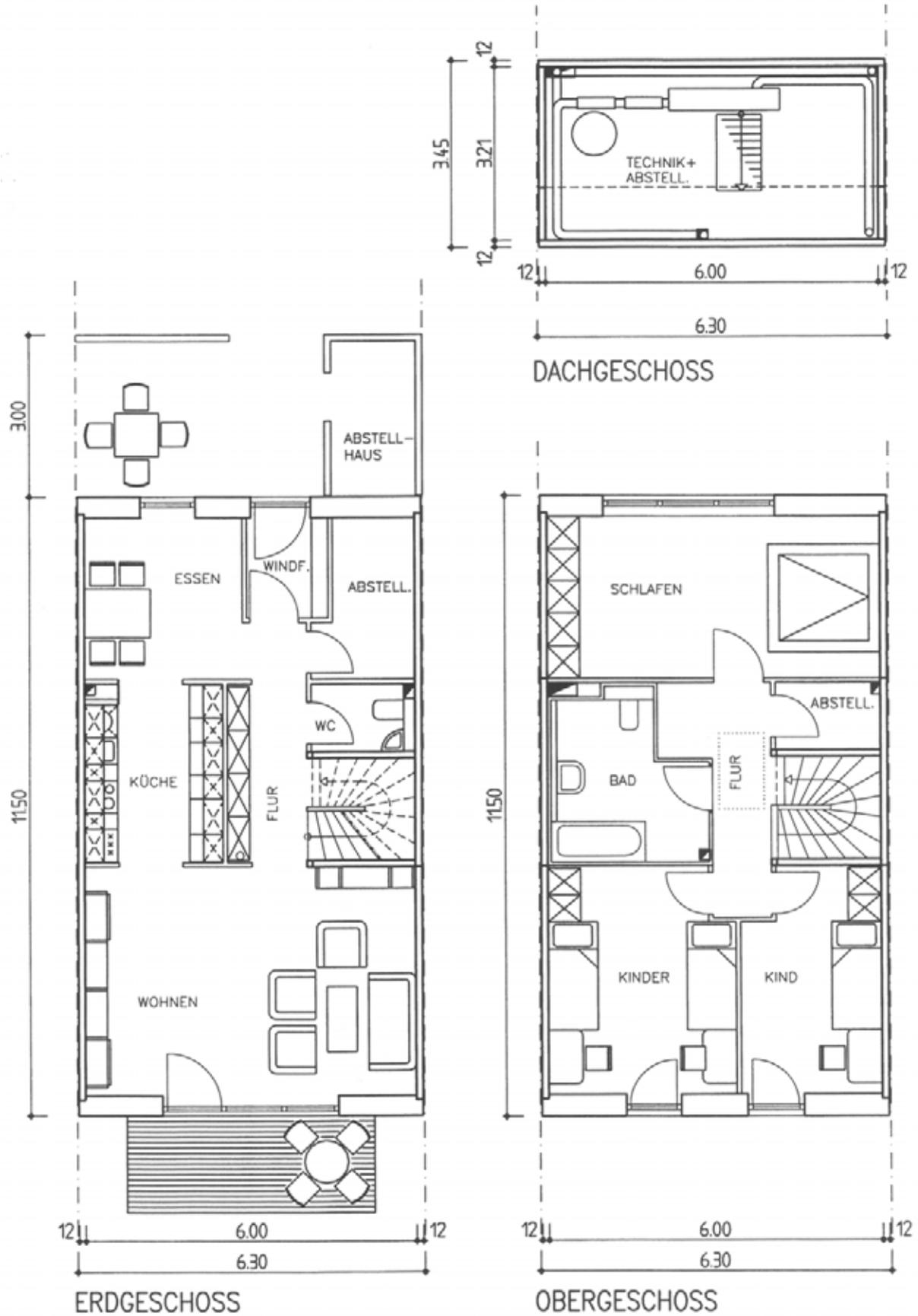


Abbildung 6: Grundrisse des Hauses vom Typ Jangster de Lük (Passivhäuser Kronsberg)

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 sowie nach EnEV
Jangster de LUX MH	118,3	119,5	153,3
Jangster de LUX EH	118,3	119,5	164,3
Jangster	97,3	96,8	128,7
„123“	79,0	75,1	99,2

3.3 Regelquerschnitte der Außenbauteile

Abbildung 7 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 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 sogenannte halbe Boxträger verwendet. Die luftdichte Ebene ist eine PE-Folie auf der Innenseite.
- Die Außenwand der Giebelseiten besteht wie die Wohnungstrennwände aus einem tragenden Stahlbetonelement. Dieses wird von außen mit einem 400 mm starken Wärmedämmverbundsystem (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, 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. Alle Anschlüsse wurden mit mehrdimensionalen Wärmestromberechnungen auf ihre Wärmebrückenwirkung untersucht; die Berechnungen sind bereits an anderer Stelle publiziert worden [Baffia 1999], hier werden nur Ergebnisse zitiert.

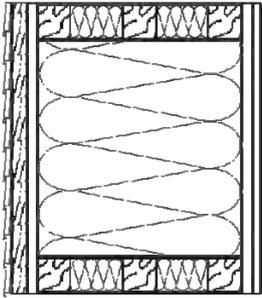
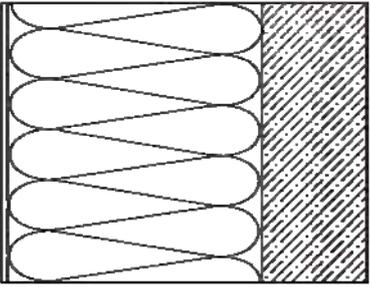
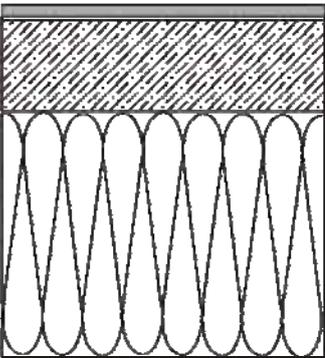
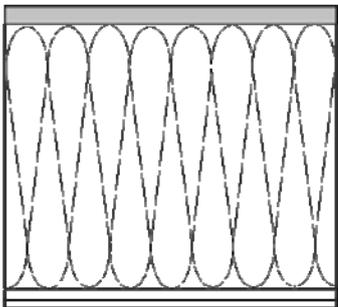
 <p style="text-align: center;"> 12^5 300 $16 \cdot 12^5$ </p>	<p>Außenwand (Süd- und Nordfassade) Holz-Fertigbauteil-Tafelbauelement Gipskartonplatte Spanplatte Mineralwolle/Halbboxträger Spanplatte hinterlüftete Brettverschalung $U = 0,126 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$</p>
 <p style="text-align: center;"> 10 400 165 </p>	<p>Außenwand (Giebelseite) Betonfertigteilelement (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;"> $150 \cdot 5 \cdot 20$ $300-420$ </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 12^5 </p>	<p>Dachaufbau Gipskartonplatte 12,5 mm Spanplatte 19 mm Mineralwolle 400 mm/Steigträger Spanplatte 25 mm Dachabdichtungsbahn Gründachaufbau $U=0,095 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$</p>

Abbildung 7: Die Regeldetails der Gebäudehülle der Passivhäuser Hannover-Kronsberg

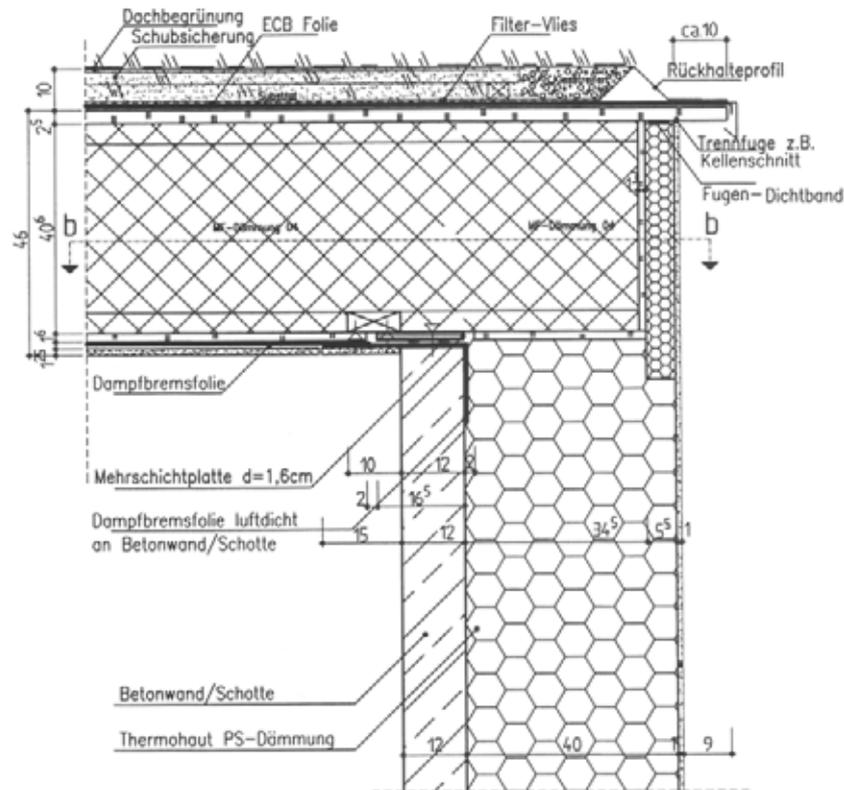
DACH / ENDHAUS / ORTGANG


Abbildung 9: Wärmebrückenfreier Anschluss Wärmedämmverbundsystem der Giebelwand an das Leichtbau-Dachelement

Zur Herstellung der luftdichten Ebene erfolgt wie bei der Trennwand.

Abbildung 10 zeigt den Anschluss der beiden Dachelemente im Bereich des First. 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 $-0,014 \text{ W}/(\text{mK})$ ermittelt.

Der Anschluss der Dachelemente an die Wandelemente der Fassade ist in Abbildung 11 dargestellt. Es wird eine lückenlose nicht durchstoßene Dämmhülle erreicht (Ψ -Wert dieses Anschlussdetails $-0,052 \text{ W}/(\text{mK})$). Die Luftdichtheit wird auch hier durch das Verkleben der beiden luftdichtenden Folien erreicht; dazu wird im Wandelement ein Gipskartonstreifen erst nachträglich eingebaut.

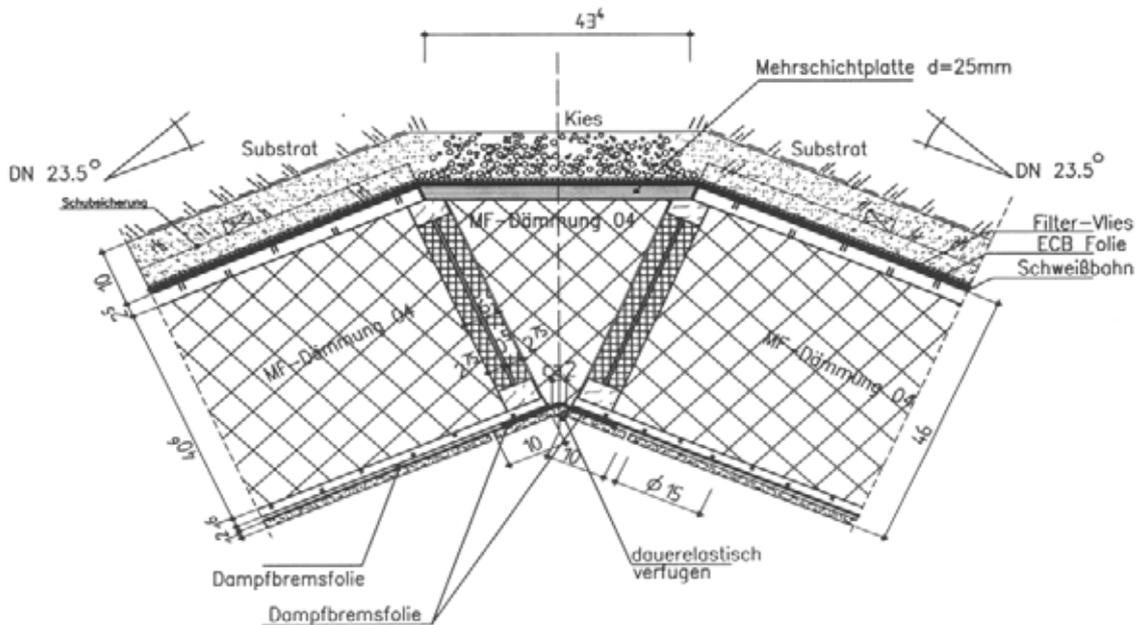
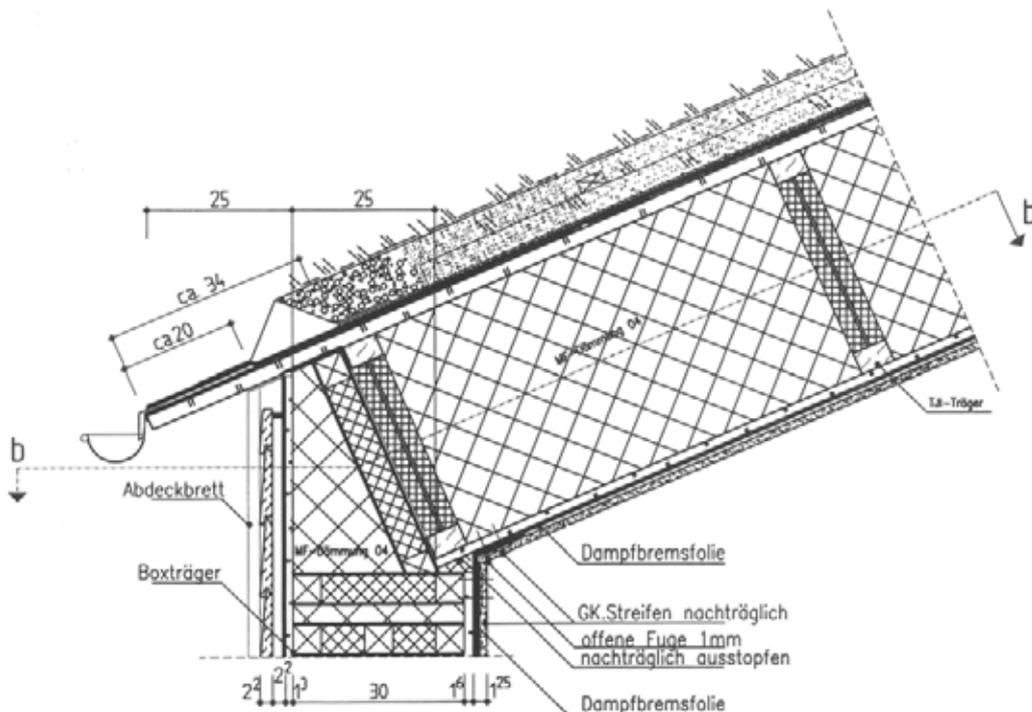
DACH / FIRST

Abbildung 10: Wärmebrückenfreier Firstanschluss

Abbildung 11: Wärmebrückenfreier Traufanschluss der Dachelemente an das Fassadenelement

Abbildung 12 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 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.

Der Anschluss der Fassadenelemente an die Giebelwand mit Wärmedämmverbundsystem wird in Abbildung 13 gezeigt. Der Anschluss ist mit $\Psi = -0,054 \text{ W/(mK)}$ wärmebrückenfrei.

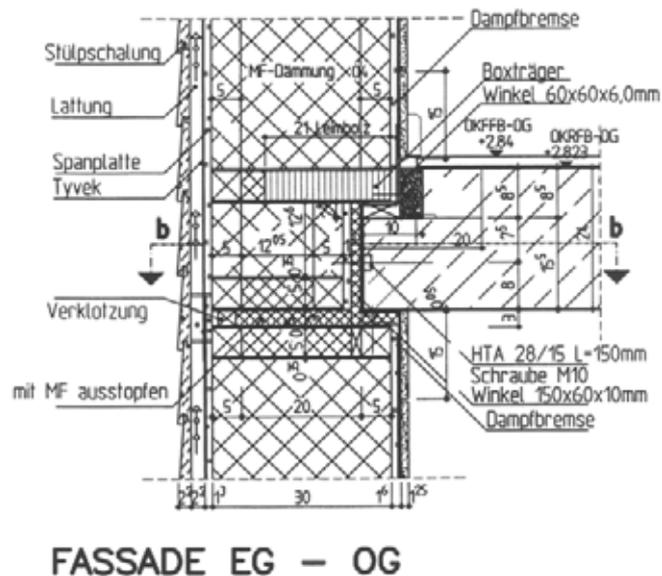


Abbildung 12: Beton-Geschossdecke zwischen Erd- und Obergeschoss (Nordseite)

FASSADE / THERMOHAUT

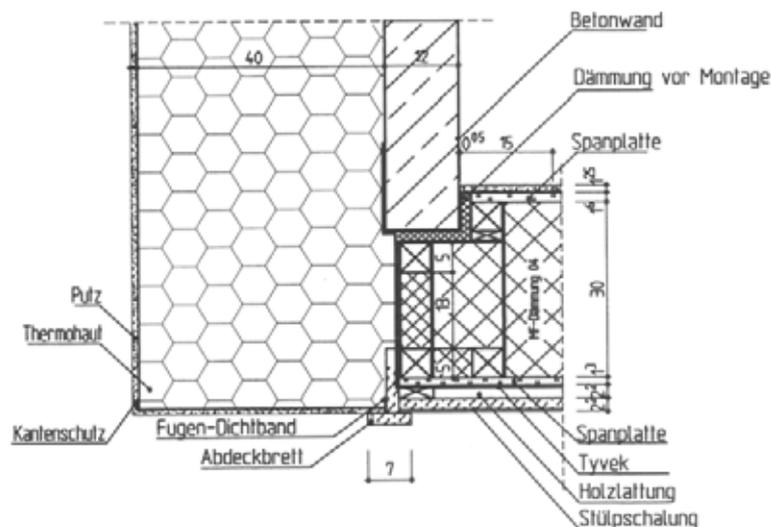
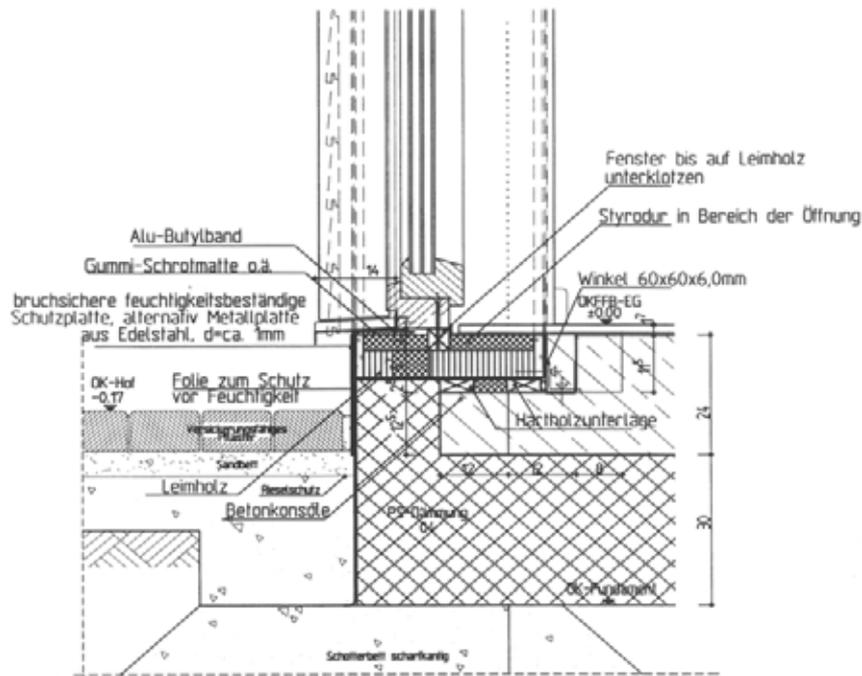


Abbildung 13: Anschluss der Fassadenelemente an die Giebelwand

Abbildung 14 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.

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.



FASSADE EG / SOCKEL

Abbildung 14: Anschluss der Fassadenelemente an die Bodenplatte

Abbildung 15 zeigt die in der Siedlung erstmals eingesetzten Warmfenster mit Dreischeibenwärmeschutzverglasung (2 * 15 mm Scheibenabstand, Argonfüllung). Der Verglasungs-U-Wert wurde mit $0,75 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angesetzt, der g-Wert beträgt 60%. 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 ein thermisch trennender Abstandhalter) 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.

Für den Einbau der Fenster in die Holztafelbauelemente wurde eine neue, besonders wärmebrückenreduzierte Lösung entwickelt: Bei diesem Einbau besteht eine durchgehende Dämmschicht zwischen der Dämmung des Fensterrahmens und jener des Tafelbauelementes; daher ist der Wärmebrückenverlustkoeffizient deutlich verringert und beträgt nur noch $\Psi=0,026 \text{ W}/(\text{mK})$.

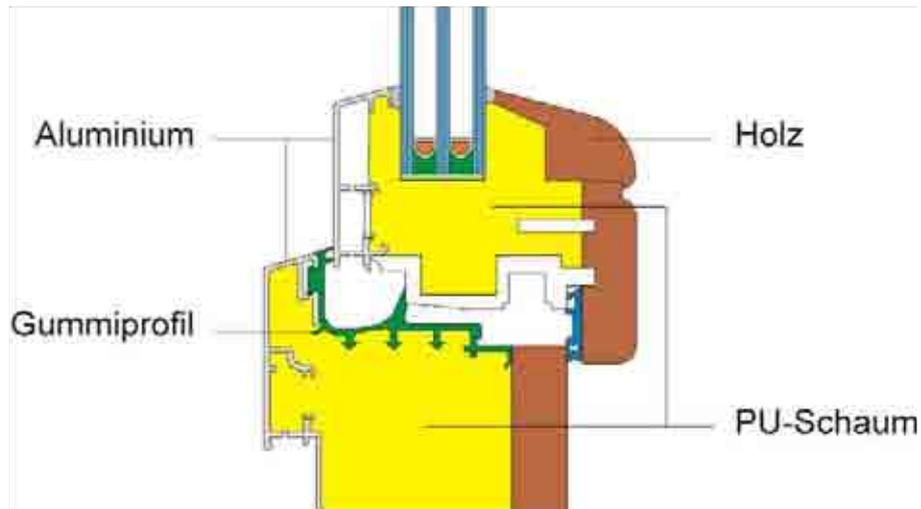


Abbildung 15: Die Fenster in der Passivhaussiedlung auf dem Kronsberg

Für die Wärmeverluste bedeutend sind bei dieser Siedlung auch die Betonunterzüge, die aus statischen Gründen in die Betonelemente der Erdgeschoss-Bodenplatte integriert wurden (Abbildung 16). Trotz einer Überdämmung ist der zusätzliche Wärmeverlust hier erheblich ($\Psi=0,022 \text{ W}/(\text{mK})$) und im Fall der schlechter gedämmten Mittelhäuser sogar noch höher ($\Psi=0,032 \text{ W}/(\text{mK})$).

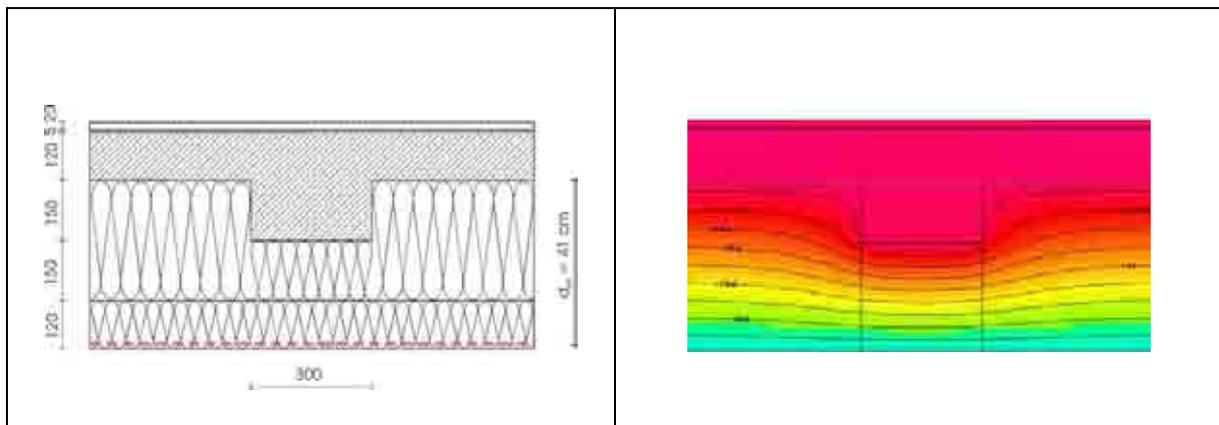


Abbildung 16: Betonunterzug in der Dämmung der Bodenplatte (Endhaus)

Um weitere Wärmebrückenwirkungen durch die Betonwände zu vermeiden, wurden die Häuser nur punktförmig mit den Unterzügen an insgesamt 16 „Höckern“ auf die Streifenfundamente aufgelegt. Die punktförmige Wärmebrückenwirkung ist zwar beträchtlich (Stahlbeton); verteilt man den resultierenden Zusatzwärmeverlust 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.

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. Das Bedienteil für die Lüftungsanlage befindet sich gut sichtbar im Windfangbereich eines jeden Hauses.

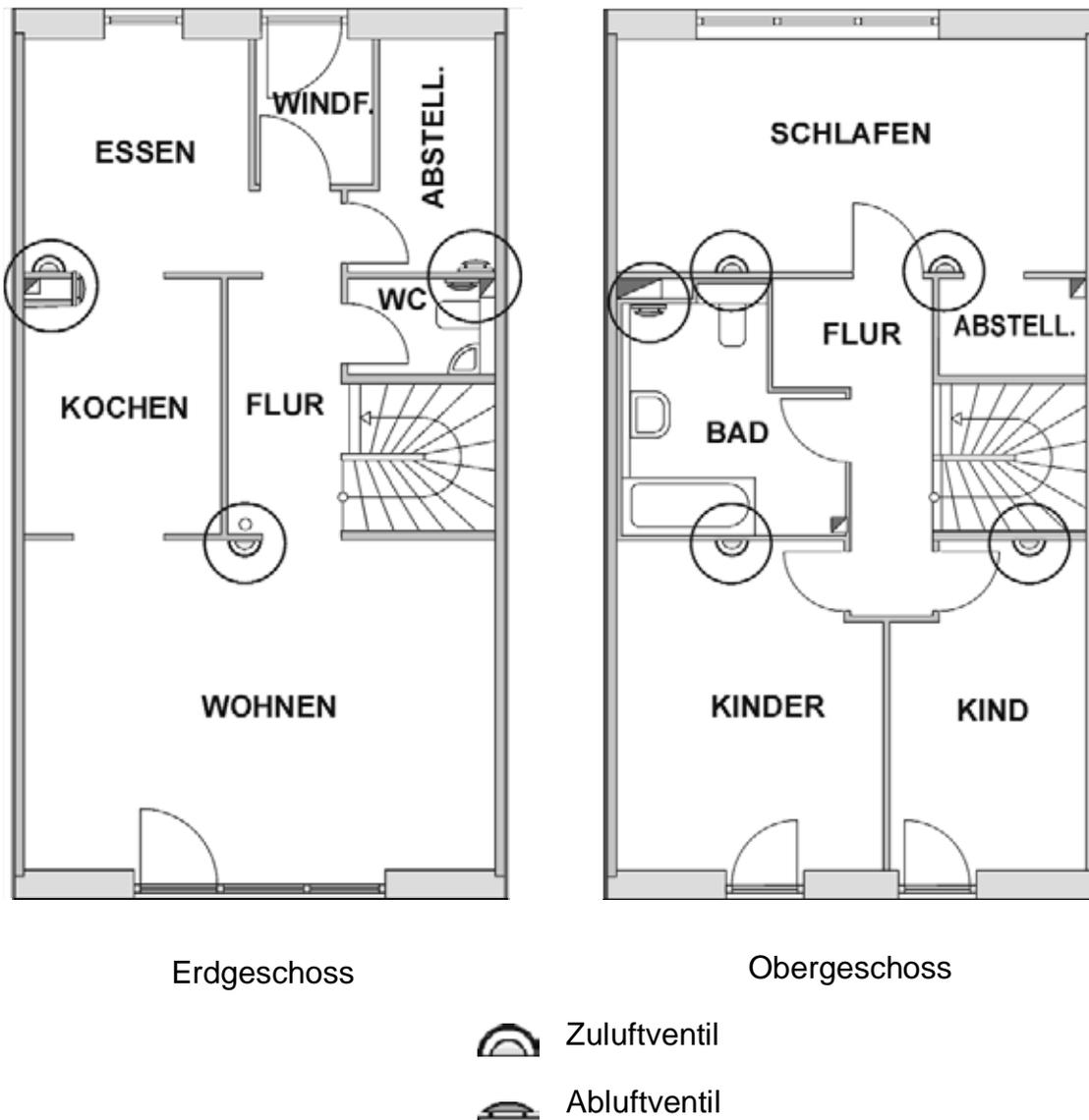


Abbildung 17: Position der Zu- und Abluftventile bzw. Düsen in beiden Geschossen

4.1 Lüftungszonen

Es darf keinen Raum geben, der nicht eindeutig in das Lüftungskonzept mit eingebunden ist. Die Frischluft mehrfach genutzt und es ist sichergestellt, dass keine „Totzonen“ mit stehender Luft vorhanden sind. In Abbildung 17 ist die Lage der Zu- und Abluftventile beispielhaft für den Haustyp „Jangster de LUX“ 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.

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 im Technikgeschoss. Ein Schacht mit dem Abluftkanal führt nordseitig am Badezimmer / Ecke Haustrennwand entlang bis zur Küche ins EG. Der zweite Schacht führt südseitig im Badezimmer 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.

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 eingebaut, um den Balanceabgleich der Anlage durchführen zu können. Im Außenluftansaugrohr befindet sich außerdem eine elektrische Frostschutzheizung mit Temperaturfühlern, um das Vereisen des Wärmetauschers zu verhindern. Die beiden Rohre befinden sich 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 mit einem 90-Grad Bogen mit Wetterschutz und eingebautem Gitter als Grobschutz (Ausblasbogen mit Gitter, Fa. Lindab).

Innerhalb der thermischen Hülle sind die **Zu- und die Ablufteleitungen** ab dem Wärmerückgewinnungsgerät in NW 100 bis 125 ausgeführt. Die Zuluftrohre sind ab

dem Heizregister mit 30 mm alukaschierter Mineralwolle gedämmt. Die Abluftleitungen sind komplett ohne Dämmung ausgeführt.

Das Strangschema in Abbildung 18 zeigt die Lüftungsanlage des Haustyps „Jangster de Lük“. Für die anderen Haustypen gibt es nur geringfügige Abweichungen.

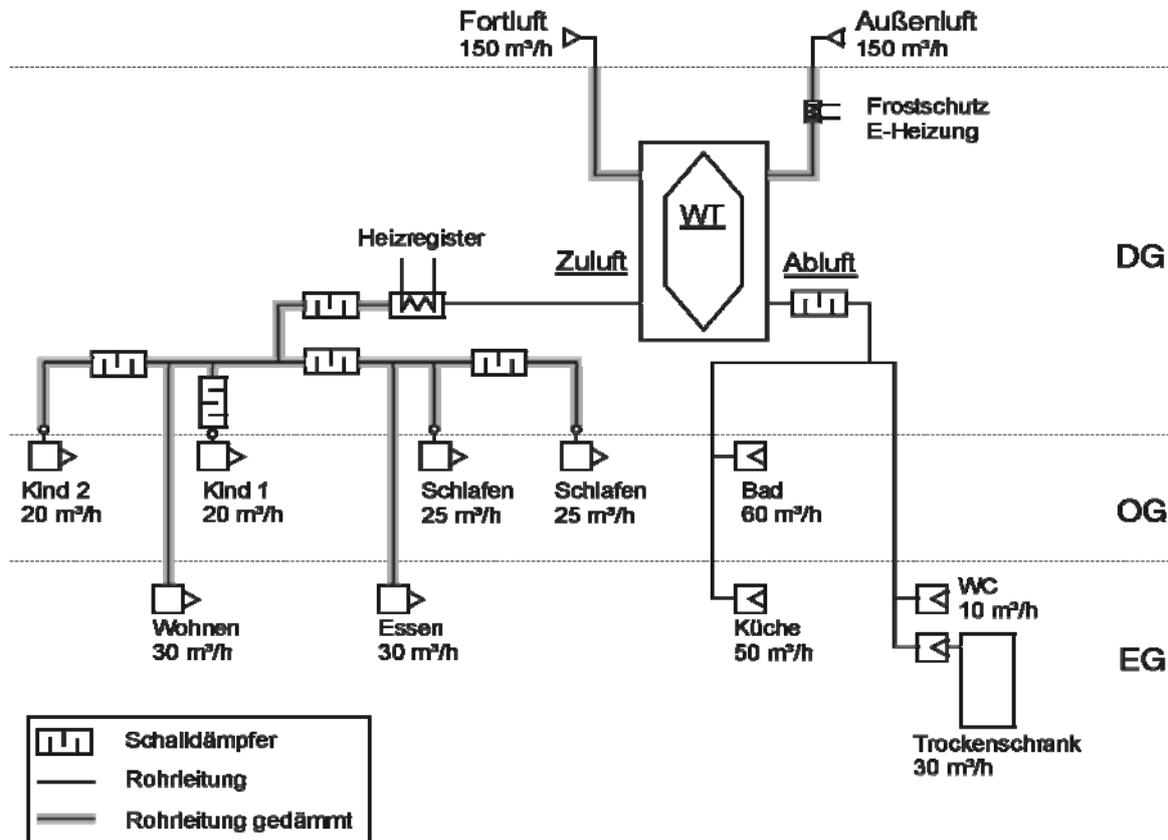


Abbildung 18: Strangschema der Lüftungsanlage eines Passivreihenhauses vom Typ „Jangster de Lük“ mit den Auslegungsvolumenströmen

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

4.2.2 Auslegungsluftvolumenströme

Auf der Zuluftseite sind 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. Diese Auslegung führt zu den folgenden Volumenströmen:

Haustyp		„123“	„Jangster“	„Jangster de LUX“
		[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 3: 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 Normallüftung eine verringerte Luftmenge anfordern „Grundlüftung“ (75%) oder eine erhöhte Luftmenge im Bedarfsfall einstellen (150%).

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.

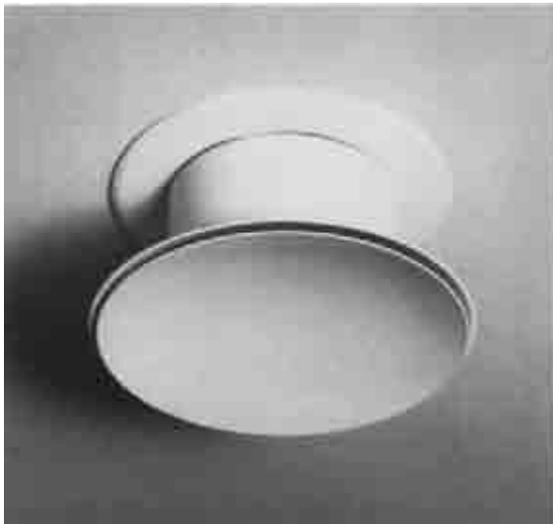


Abbildung 19: Zuluftelemente als Weitwurfdüsen in Decken- und Wandausführung (Fotos: Hersteller)

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.

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 20). 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.

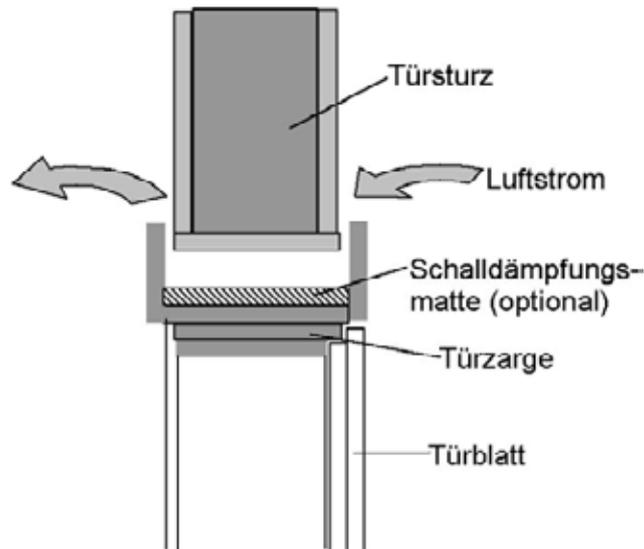


Abbildung 20: Überströmöffnungen zwischen Sturz und Türzarge (Quelle ebök)

4.3 Lüftungszentralgerät 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). Jede Lüftungsanlage ist 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 m³/h
Leistungsaufnahme (Gesamtgerät):	36 bis 88 W
Filterform (Außen- & Abluftfilter):	Z-Filter
Filterklasse (Außen- & Abluftfilter):	G4



Abbildung 21: 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. Es lassen sich die Betriebszustände Grundlüftung (75%), Normallüftung (100%), Stoßlüftung (150%) anwählen. 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.

5 Konzept der Raumwärmeversorgung

5.1 Heizwärmeverteilung

Für jeweils zwei Hausreihen mit je acht Reihenhäusern gibt es ein gemeinsames Technikhaus mit einer Fernwärmeübergabestation. 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 zur anderen Reihe.

Für die Wärmeverteilung im Haus ist wegen des geringen Wärmeverlustes kein konventionelles Heizsystem mehr erforderlich. Die Heizwärmeverteilung kann über die hygienisch notwendigen Zuluftströme mitverteilt werden. Eine Ausnahme bildet nur das Badezimmer, in dem kurzzeitig auch höhere Temperaturen (24 °C) erreicht werden müssen. Hier ist der einzige Heizkörper des Hauses angebracht.

5.2 Wärmeversorgung Heizung

5.2.1 Nahwärmeversorgung

Die Nahwärmeversorgung des Neubaugebietes Kronsberg für etwa 2.700 Wohneinheiten mit rund 240.000 m² beheizter Fläche wird durch eine Energiezentrale mit Blockheizkraftwerk am südlichen Rand des Wohngebietes sichergestellt.

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) sowie den hausweisen Flachkollektoranlagen zur Warmwasserbereitung. 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 Lüftungsröhre 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.

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

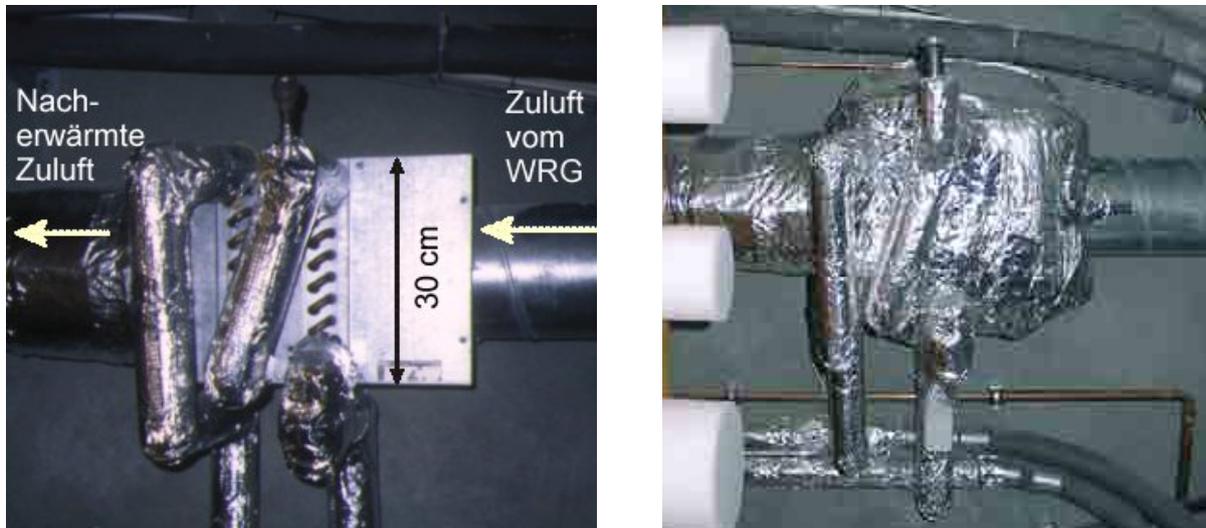


Abbildung 22: Heizregister in der Zuluftleitung (vor und nach der Montage der Wärmedämmung)

Die Steuerung des Heizregisters erfolgt über ein Ventil mit batteriebetriebenem Antrieb. Ein zentrales Raumthermostat 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.

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. 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.

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, dem Ausdehnungsgefäß 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. 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.

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

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 1000 Euro je Wohneinheit erhöht.
- Jedem Erwerberhaushalt wurde angeboten, die Stromeffizienz 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 1000 Euro 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.

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.

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 $18 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) erfüllt als auch einzelwirtschaftlich rentabel ist.

Mit dem hier beschriebenen Instrumentarium wurden von der Außenstelle Hannover des Bauträgers 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 ≤ 18 kWh/(m²a) in 14 von 18 Fällen nachgewiesen werden konnte.

Projektierung Stromverbrauch		Eingabe Altgeräte
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 23: Eingabeformular für elektrische Altgeräte für die Beratung Stromeffizienz bei der Passivhaussiedlung Hannover Kronsberg

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 24: Eingabeformular für neue, energieeffiziente Geräte (Beratung Stromeffizienz)

Projektierung Wirtschaftlichkeit		 Wohnfläche 117 m ²		
Ergebnisblatt		eingesparte Energiekosten	zusätzliche Kapitalkosten	Kostenein- sparung (DM)
Anwendung				
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 25: Ergebnisblatt zur Projektierung Stromeffizienz; hier: Wirtschaftlichkeit (Beispiel)

8 Kosten, Mehrkosten, Wirtschaftlichkeit

8.1 Mehrinvestitionen für Passivhäuser

Die Kostenaufstellung berücksichtigt alle Investitionskosten der Kostengruppen 3 und 4, jeweils ohne Mehrwertsteuer, aber inklusive aller Nebenarbeiten wie Randanschlüsse, Verspachtelung etc.. Folgenden Bauteilverbesserungen sind 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. Die Gesamtkosten der Leichtbaufassaden lagen bei 240,31 Euro/m².

- 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 Gesamtkosten des Bauteils wurden zu 145,72 Euro/m² angegeben.

- 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 Euro/m²

angegeben, die

Mehrinvestition Passivhaus-Dach mit 10,23 Euro/m².

- 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 Polystyrol-Dämmung der vorgefertigten Bodenplatte 326 mm; die Baukosten betragen

Bodenplattenaufbau Passivhaus 102,26 Euro/m²

Die Mehrinvestition Passivhaus-Boden betrug 15,34 Euro/m².

- Fenster mit Dreischeibenverglasung und Dämmrahmen

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. 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; durch steigende Stückzahlen erwarten wir in Zukunft eine weitere Senkung der Mehrkosten bei diesem Fenstertyp.

- Lüftungsanlage

Nach derzeitiger Verordnungslage werden in Deutschland keine Lüftungsanlagen in Wohngebäuden gefordert. 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 $4601,63 \text{ Euro}$

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

$903,58 \text{ Euro}$ (Heizwärmeverteilung)

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

üblichen Heizwärmeverteilung und -abgabe $2828,27 \text{ Euro}$

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 $2,5 \text{ kW}$ 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.

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.

Die Bauwerkskosten je m² Bezugsfläche lagen bei diesem Projekt insgesamt 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.

Für die Übersichtlichkeit der Darstellung ist es 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 Reihenhauseinheiten. Damit lassen sich für alle extensiven Größen (wie beispielsweise Hüllflächen, Luftvolumina, Energieverbrauchswerte, Baukosten etc.) die jeweiligen Werte für das repräsentative Haus als gewichtete 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

$$n_{\text{JDE}} = 8$$

$$n_{\text{JDM}} = 14$$

$$n_{\text{JAM}} = 9$$

$$n_{123} = 1$$

Mit dieser Definition lässt sich ein PHPP-Rechenblatt für das repräsentative Haus aufstellen. Für das repräsentative Haus ergeben sich die Mehrkosten 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

Zunächst wurde bestimmt, welche Bauteile und Komponenten hätten verwendet werden können, wenn allein nach der Wärmeschutzverordnung 95 gebaut worden wäre:

- 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 auf $U_G = 0,61 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ reduziert. Es werden gewöhnliche Standardfensterrahmen und eine Verglasung mit $U_g = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und $g = 62\%$ eingesetzt. Damit ergibt sich $U_w = 1,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.
- Eine Lüftungsanlage wird nicht mehr benötigt, dafür
- werden wieder Heizkörper mit einer Gesamtleistung von 6 kW an den Außenfassaden installiert.

Die Annahmen im Rechengang der Wärmeschutzverordnung führen zu einem vermeintlich niedrigeren Verbrauchswert. Daher 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 angenommen.

Passivhaus-Projektierung

ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME

Klima:	Deutschland		Gebäudetyp/Nutzung:	Wohnreihenhhaus			
Objekt:	Repräsentatives Passivhaus		Energiebezugsfläche A_{Ez} :	111,7 m ²			
Standort:	Hannover Kronsberg						

Bauteile	Fläche m ²	U-Wert W/(m ² K)	Reduktionsfaktor ξ	Q_0 kWh/a	Q_{0i} 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	78,8	0,095	1,0	84	=	597
3. Grund	68,1	0,115	0,5	84	=	329
4. Versprung Dach	3,8	0,110	1,0	84	=	28
5. Versprung Grund	2,7	0,209	0,5	84	=	24
6.					=	
7.					=	
8. Fenster	19,8	0,833	1,0	84	=	1369
9. Wbrücken außen (Länge/m)	22,28	-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_{Ez} m ²	lichte Raumhöhe m	n ⁴
Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmetauschers	β_{eff}	111,7	2,50	279
Wärmebereitstellungsgrad des Erde/Wärmetauschers	β_{eff}			
energetisch wirksamer Luftwechsel n_e	n_e	$n_{L,ange}$ 1/h	Φ_{akt}	$n_{L,eff}$ 1/h
	0,430	$(1 - 0,80)$		0,024
				0,109

 Lüftungswärmeverluste Q_L	V_L m ³	n_e 1/h	c_{Luft} Wh/(m ³ K)	Q_0 kWh/a	Q_L kWh/a	Q_L kWh(m ²)
	279	0,109	0,33	84	=	848
						7,6

 Summe Wärmeverluste Q_V	Q_T kWh/a	Q_L kWh/a	Reduktionsfaktor Nach-/Wochenend- absenkung	Q_0 kWh/a	Q_V kWh/a	Q_V kWh(m ²)
	3073	848	1,0		=	3921
						35,1

Ausrichtung der Fläche	Reduktionsfaktor vgl. Blatt Fenster	g-Wert (solar. Strahl.)	Fläche m ²	Globalstr. Heizzeit kWh/(m ² a)	Q_S 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	142	=	297
5. Horizontal	0,45	0,60	0,00	350	=	0
 Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S				Summe		1497
						13,4

 Interne Wärmequellen Q_I	kWh/a	Länge Heizzeit h/a	spezif. Leistung q_i W/m ²	A_{Ez} m ²	Q_I kWh/a	Q_I kWh(m ²)
	0,024	225	2,10	111,7	=	1267
						11,3

 Freie Wärme Q_F	$Q_S + Q_I$	Q_V	Q_F kWh/a	Q_F kWh(m ²)
	2764	3921	=	2764
				24,7

 Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten	Q_F / Q_V	Q_F / Q_V
	0,705	0,705

 Nutzungsgrad Wärmegewinne η_0	$(1 - (Q_F / Q_V)^2) / (1 - (Q_T / Q_V)^2)$	η_0	$\eta_0 \cdot Q_F$	Q_G kWh/a	Q_G kWh(m ²)
		0,941	2602	2602	23,3
					23,3

 Heizwärmebedarf Q_H	$Q_V - Q_G$	Q_H kWh/a	Q_H kWh(m ²)
	1319	1319	11,80

Tabelle 5: Dokumentation Passivhaus-Projektierungs-Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs für das repräsentative Haus in Hannover-Kronsberg.

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

spezifische Nettoinvestitionskosten EUR

Klima:	Deutschland
Objekt:	Mittleres repräsentatives Haus

Gebaudetyp/Nutzung:	Wohnreihenhaus
Standort:	Hannover Kronsberg

Für Heizenergieeinsparung:

Bauteile	Menge	Einheit	Bauteilspezifische Gesamtkosten PH	Bauteilspezifische 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: Gesamtkosten PH	Komponenten: 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		119.53 m² EUR/m²	871.52
Mehrkostenverhältnis			12.4%

Tabelle 6: 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. Dass der flächenspezifische 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.

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 26 die Heizenergieverbrauchswerte und die jeweiligen Energieeinsparungen durch die Einzelschritte dargestellt. Abbildung 27 zeigt die den jeweiligen Schritten zugehörigen Mehrinvestitionen. Schließlich wird in Abbildung 28 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 1998a].

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.

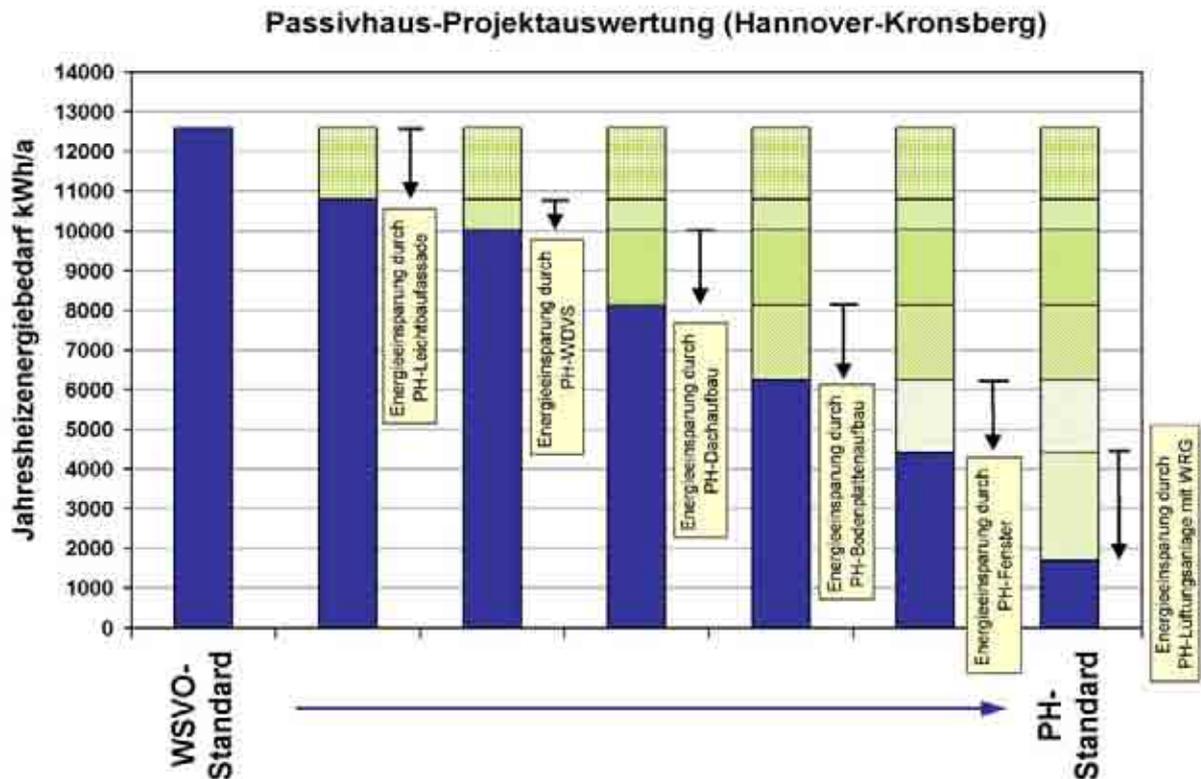


Abbildung 26: In sechs Schritten vom WSVO-Standard zum Passivhaus: Durch im Text beschriebene Energie-Effizienzmaßnahmen wird der Jahresheizenergiebedarf (inkl. Verluste der Haustechnik) um mehr als 80% reduziert. Der ganz rechts dargestellte Passivhausstandard ist in der gebauten Siedlung auf dem Kronsberg realisiert worden.

Die mit dynamischer Wirtschaftlichkeitsrechnung bestimmten „Kosten für die eingesparte Kilowattstunde“ erlauben einen transparenten Vergleich der in der Passivhausiedlung ergriffenen Effizienzmaßnahmen zu anderen Möglichkeiten der Energiebereitstellung. In Abbildung 28 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.

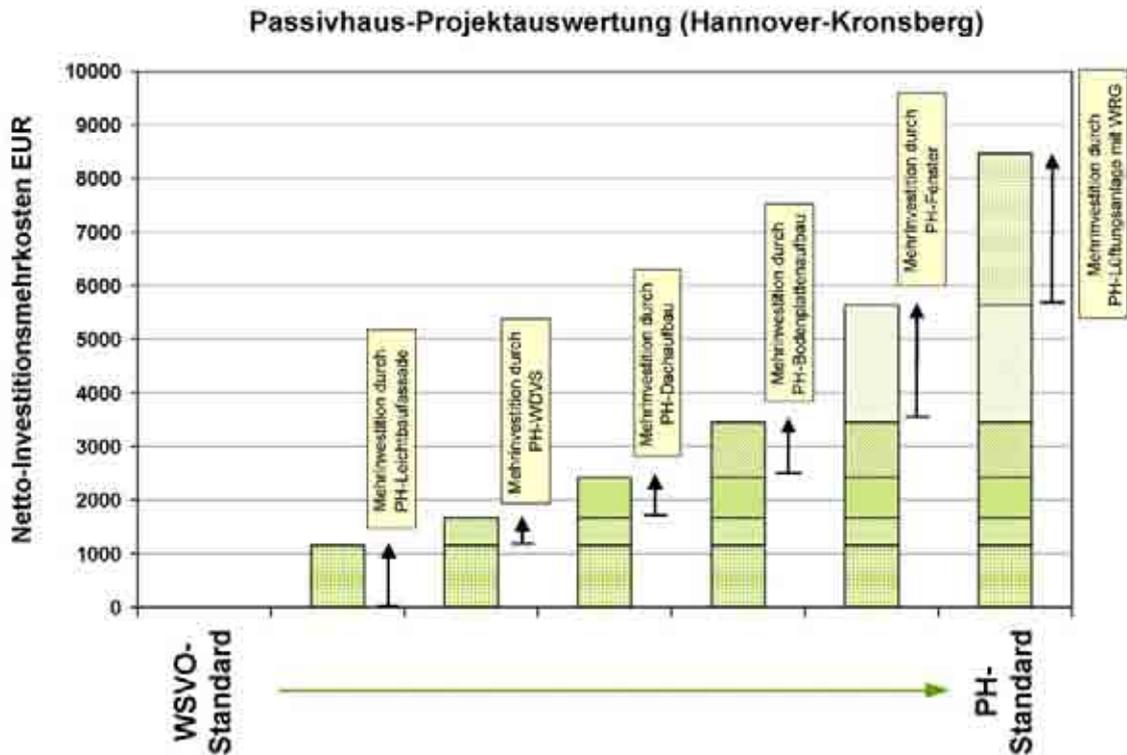


Abbildung 27: Erforderliche Mehrinvestitionen für die Effizienzmaßnahmen nach Abbildung 26.

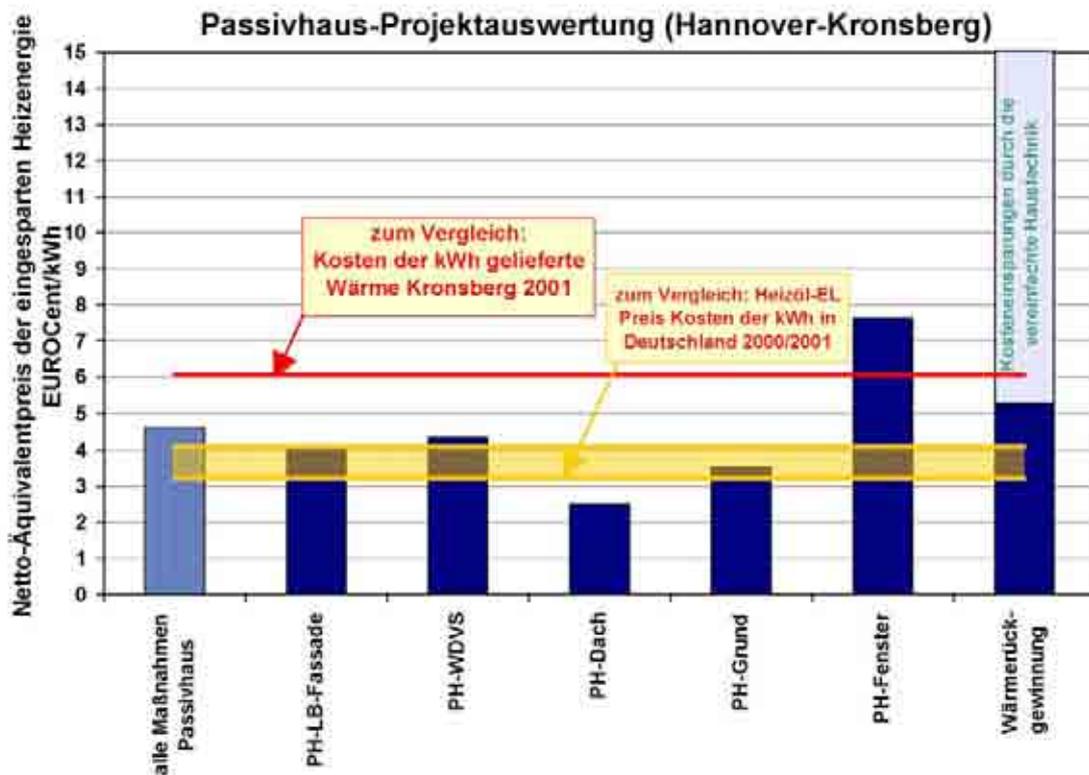


Abbildung 28: Kosten der „eingesparten Kilowattstunde“ durch die Effizienzmaßnahmen im Vergleich zur Fernwärmelieferung und zum Endenergiepreis für Heizöl-EL in Deutschland. Die linke Säule gilt für die Summe aller Maßnahmen (WSVO-Standard → Passivhausstandard), die folgenden jeweils für die zusätzlichen Maßnahmen des Einzelschrittes.

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 einzelwirtschaftlich rentabel.

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 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.

8.2.5 Schritt IV: Dämmung der Erdgeschoss-Bodenplatte

Die Dämmung der Bodenplatte wurde im Fertigteilibauwerk 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 einzelwirtschaftlich rentabel sind.

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.

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 Heizenergieeinsparung beträgt 22% des Heizenergieverbrauchs 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 7 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 7: 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 Technik 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 dem Lüftungssystem zu. Um die annuitätischen Kosten der Passivhaus-Lüftungsanlage zu bestimmen, werden die jährlichen Zusatzkosten 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 [Feist 1999].

Im Vergleich zur bezogenen Fernwärme (6,05 EuroCent/kWh) ist der Betrieb des Wohnungslüftungssystems einzelwirtschaftlich rentabel; gegenüber Ölkosten des Jahres 2001 sind die Kosten der eingesparten Kilowattstunden allerdings 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 Ölpreis von 2001. 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 höher als die der Fernwärme und weit höher als die Energieeinsparungskosten der Effizienzmaßnahmen. Die Mehrinvestition in den Passivhausstandard ist nach diesem Ergebnis 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.

9 Beschreibung des Bauablaufs

9.1 Zeitliche Daten

Der Planungsbeginn für die Reihenhaussiedlung war 1998, Baubeginn der 01.09.1998. Das Richtfest fand im November 1998 statt. Die Fertigstellung erfolgte im Dezember 1998, die ersten Eigentümer zogen bereits im Dezember 1998 ein.

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 im Auftrag von Rasch&Partner

Tabelle 8: 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. 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.

9.3.1.2 Vorfertigung der Holztafelbauelemente im Holzbauwerk und Wärmedämmung

Als Holzfertigteilverhersteller 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.
- die Qualität der verwendeten Wärmedämmstoffe (generell WLG 040 für alle Wand- und Dachelemente);
- der maßgerechte Zuschnitt der Dämmung sowie das paßgenaue Einbringen des Dämmstoffs Mineralwolle in die Tafelbauelemente. 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 29).



Abbildung 29: 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 30 (links): Fensteröffnung des Fassadenelementes. Die Stöße der Luftdichtungsfolie sind sorgfältig verklebt, die überhängende Folie dient zur Herstellung der Luftdichtheit mit den anschließenden Elementen

Abbildung 31 (rechts): Die fertigen Elemente, vorbereitet für den Transport zur Baustelle. Deutlich erkennbar die überstehenden Folien für die luftdichte Verbindung.

9.3.2 Fenster

9.3.2.1 Verglasungsauswahl

Vom PHI wurde aus Kostengründen 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. Durch diese Entwicklung 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%).

9.3.3 Luftdichtheit

9.3.3.1 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.

9.3.3.2 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 die Abdichtung einfach aus einem Streifen Mineralwolle und PE-Folienstücken 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 32). 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.

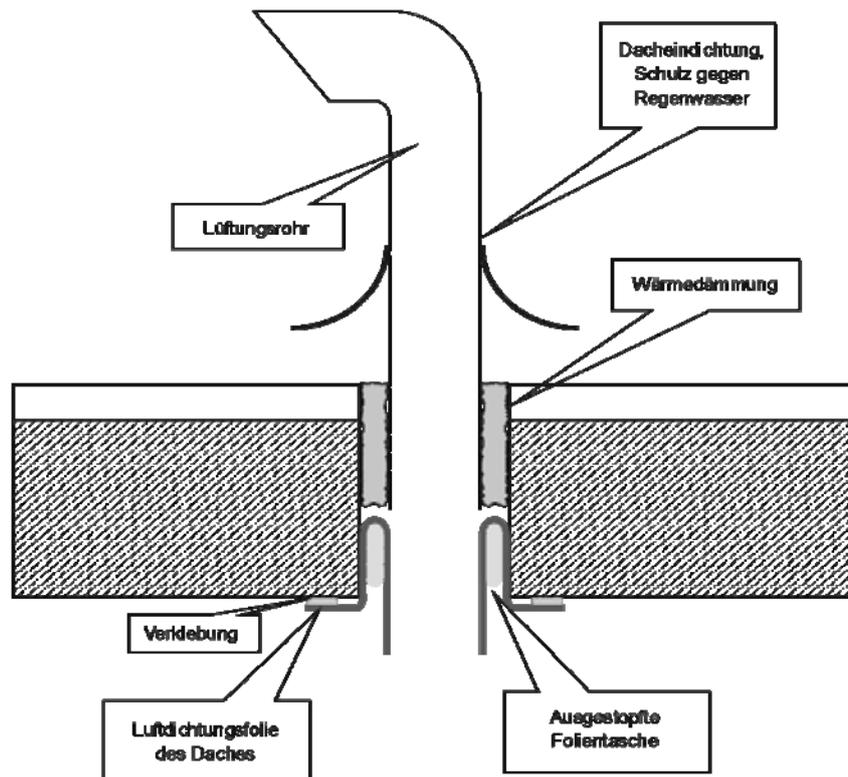


Abbildung 32: Luftdichte Lüftungsrohrdurchführung im Bereich des Daches.

9.4 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. Hier sollen nur die wichtigsten Ergebnisse kurz dokumentiert werden (vgl. [Peper 1999a]).

Die Drucktestmessungen wurden mit einer Blower Door (Fa. Minneapolis, Modell 4) durchgeführt. Die Gebäudehüllen waren zu den Messterminen geschlossen (alle Türen und Fenster eingebaut). 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.

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.

9.4.1 Quantitative Messergebnisse

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 $[h^{-1}]$.

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. Die dabei 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.

9.4.2 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 33 sind die Endergebnisse grafisch dargestellt:

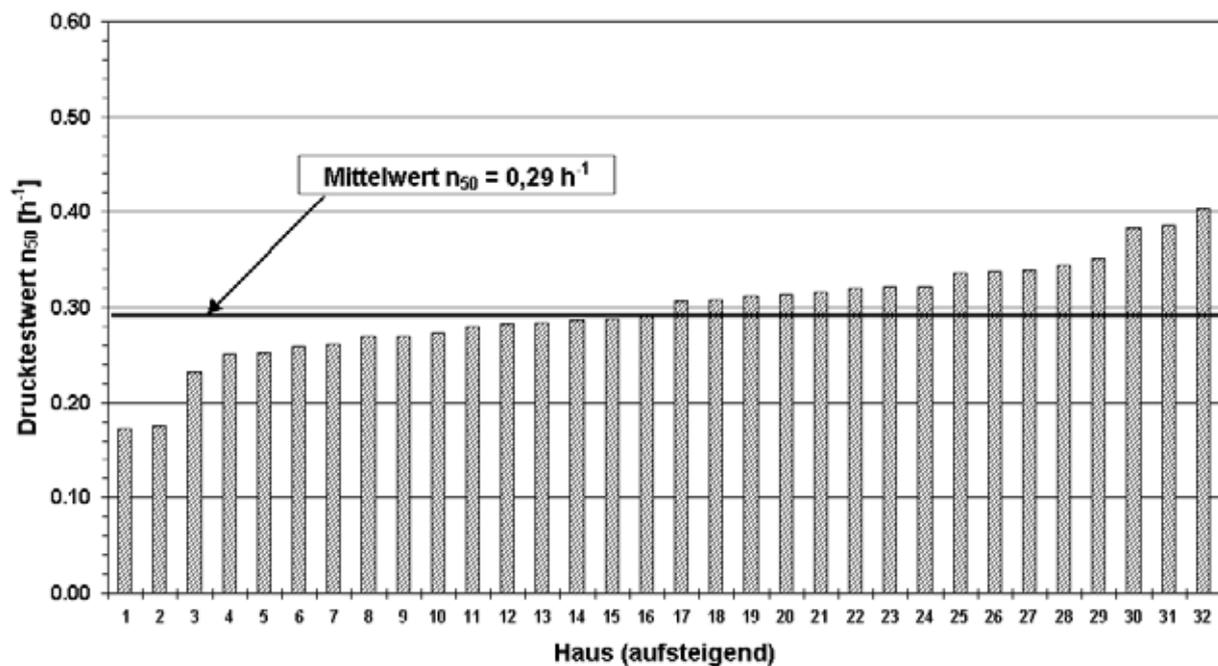


Abbildung 33: Drucktest-Endergebnisse der 32 Passivhäuser aufsteigend sortiert

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. Die abgezogenen Schutzdruckvolumenströme lagen zwischen 5 und 37 m^3/h , im Mittel bei 14 m^3/h .

9.5 Ergebnisse der thermographischen Untersuchung

IR-Thermographieaufnahmen wurden in der Passivhaussiedlung im Auftrag der Stadtwerke Hannover am 15.02.2001 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 hohe Qualität der Wärmedämmung der Außenbauteile bei der Passivhaussiedlung.
- Die Außenoberflächentemperaturen lagen bis auf Teile der Haustür- und Fensterrahmen und den Randbereichen der Scheiben (sowie vereinzelt konvektive 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 34: 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.

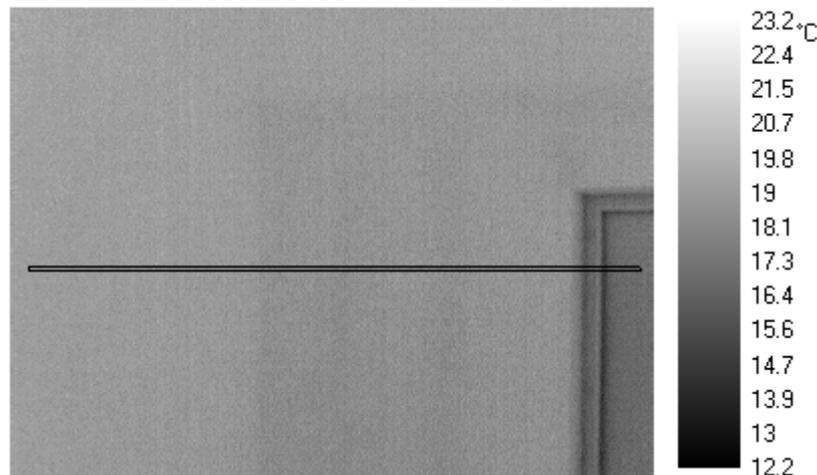


Abbildung 35: Thermographiebild der linken Wohnzimmerkante (Haustrenn- und Außenwand, mit einem Teil des Fensters). Temperaturunterschiede der beiden Wände sind so gut wie nicht zu erkennen.

- 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.

9.6 Balanceabgleich der Lüftungsanlagen

Bei Überprüfungen im intensiv vermessenen Haus wurden beim Lüftungsgerät Abweichungen von den durch den Haustechniker eingestellten Ventilatorleistungswerten 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 36: 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.

9.7 Nutzerhandbuch

Im Auftrag der Stadtwerke Hannover wurde für die Bewohner der Passivhaus-siedlung vom PHI ein Nutzerhandbuch erstellt [Peper 2000a]. Es dient zur Erläuterung der technischen Besonderheiten eines Passivhauses und soll die Eingewöhnung und Handhabung mit dem neuen Standard erleichtern. Aus Gründen der Vollständigkeit und der Übersichtlichkeit wurden auch alle anderen nutzerrelevanten technischen Komponenten und deren Handhabung detailliert beschrieben.

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. 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 Wiederaufinden 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, Überstromöffnungen 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 37: Kurzanleitung zum Nutzerhandbuch

10 Messkonzept

Ziel der Messungen sind Aussagen über den Energieverbrauch, den Komfort und das Nutzerverhalten in allen 32 Passivhäusern. Insbesondere soll damit auch die Klimaneutralität der Siedlung überprüft werden [Peper 2001].

Das Messprogramm besteht aus einer sog. „Standardmessung“, welche in allen 32 Häusern durchgeführt wird und einer sog. „Intensivmessung“ welche zusätzliche Messsensoren beinhaltet, die nur in einem Haus installiert sind. Außerdem gibt es noch einige weitere zusätzliche Messpunkte zur Bestimmung der gesamten und der gemeinschaftlichen Verbräuche sowie einige Sondermessungen.

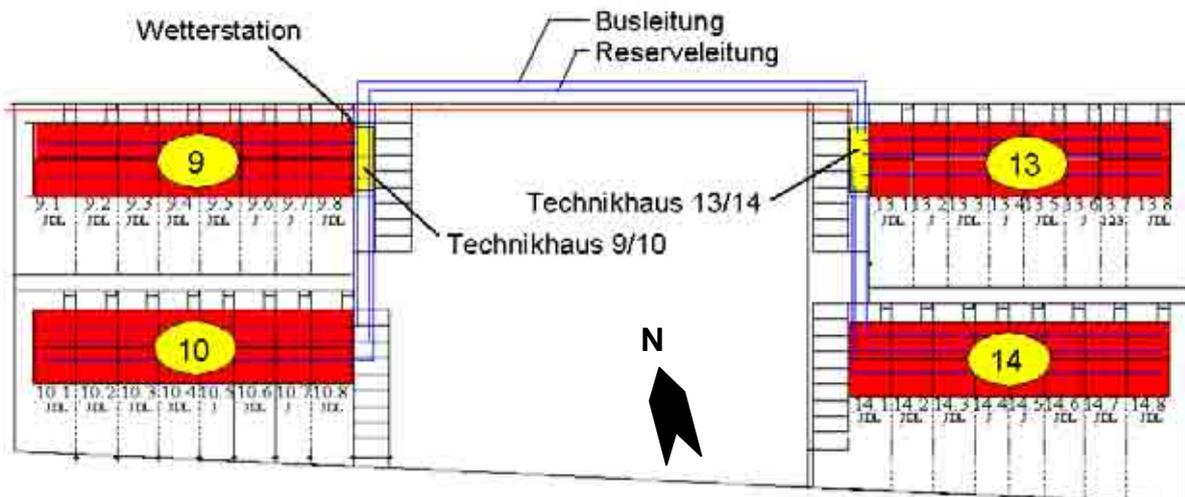


Abb. 1: Lageskizze der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg mit Messleitungen und Wetterstation. Die vier Hauszeilen sind in den jeweiligen Kreisen nummeriert.

Zur kontinuierlichen Messdatenerfassung ist in der Passivhaussiedlung eine zentrale Datenanlage installiert. Alle Messaufnehmer sind über M-Bus oder Feld-Busleitungen und Untermodulen in jedem zweiten Haus mit den Schaltschränken verbunden. Über Modemverbindung ist eine Datenkontrolle sowie das Auslesen der Daten möglich.

10.1 Messaufnehmer

Für die Standardmessung sind für jedes Haus sieben Messaufnehmer vorhanden. Es werden die folgenden Größen kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet:

1. Wärmemenge gesamt (Q_{ges})
2. Wärmemenge Warmwasser (Q_{WW})
3. Volumen Kaltwasser (V_{KW})
4. Volumen Warmwasser (V_{WW})
5. Elektrische Energie
6. Raumlufttemperatur EG Wohnzimmer / Südseite

7. Raumlufthemperatur OG Schlafzimmer / Nordseite

Die Lage der Messaufnehmer in den einzelnen Passivhäusern (Standardmessung) kann Abb. 2 entnommen werden. Die beiden Wärmemengenzähler und die beiden Wasserzähler sind jeweils im Technikgeschoss der Häuser angeordnet.

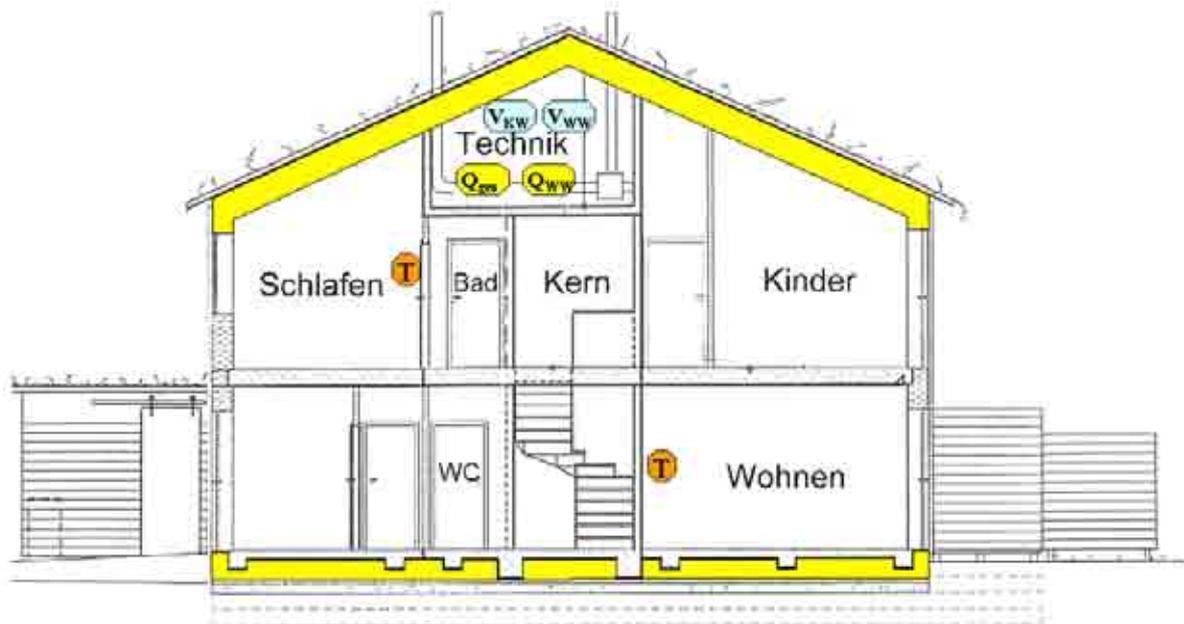


Abb. 2: Schnitt durch ein Passivreihenhaus mit eingezeichneter Lage der Messpunkte der Standardmessung (nach [Pfluger 2000]).

Die Technikgeschosse der einzelnen Gebäude sind wie oben gezeigt mit jeweils vier Messaufnehmern ausgestattet. In Abb. 3 sind darüber hinaus noch die Messaufnehmer für die Intensivmessung in einem der Häuser dargestellt.

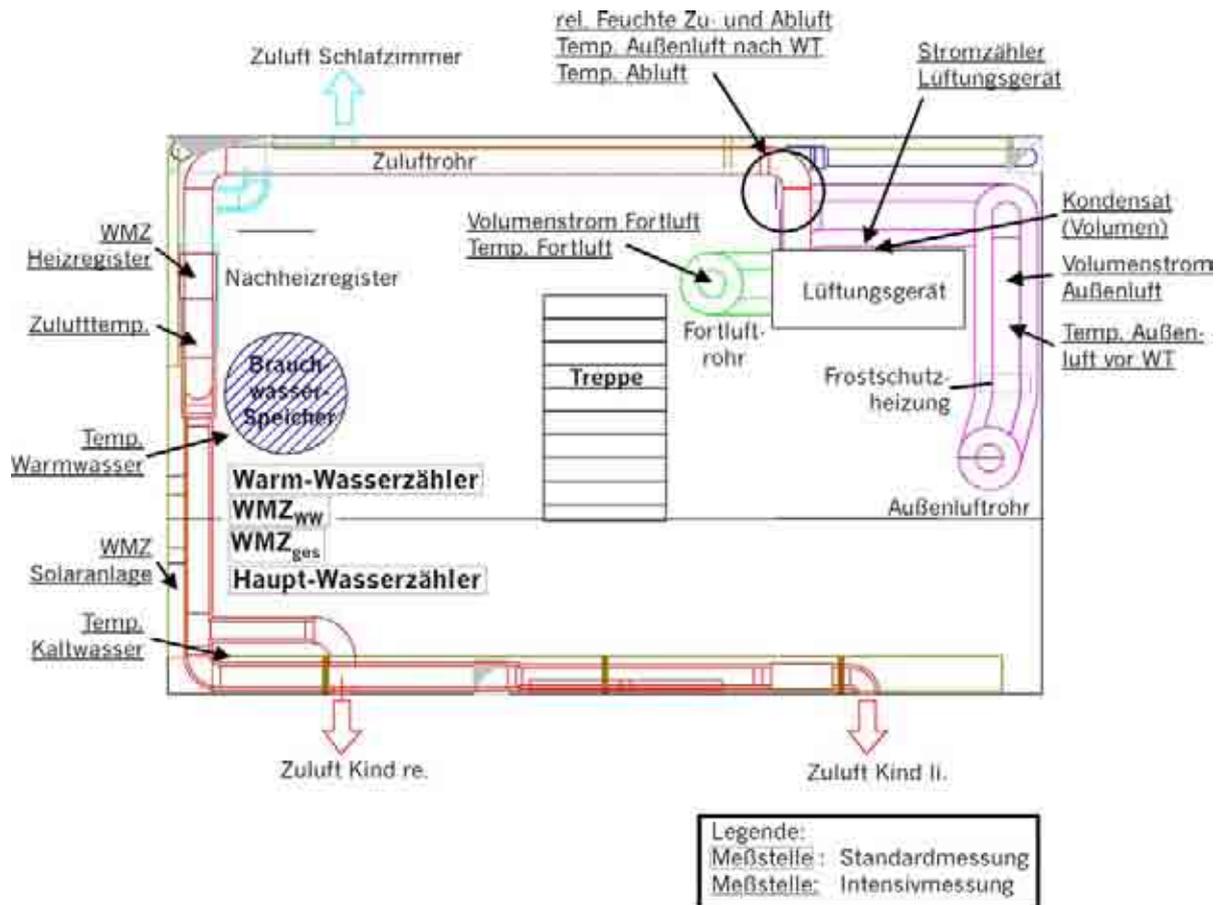


Abb. 3: Position der Messaufnehmer der Standard- und Intensivmessung im Technikgeschoss.

10.2 Wärmemengenzähler (WMZ)

10.2.1 Hausanlagen

In jedem einzelnen Haus sind zwei Wärmemengenzähler (Fa. Techem, Typ Delta Tech Compact II, Volumenmessung mit elektronisch abgetastetem Flügelrad, Rechenwerk, Temperaturmessung Pt 500, M-Bus Schnittstelle, Baugröße $Q_n = 0,6$) installiert. Ein Zähler misst den gesamten Wärmebezug des Hauses (WMZ_{ges}) und der zweite wird als Unterzähler zur Messung des Anteils zur Warmwassererwärmung aus Fernwärme (WMZ_{WW}) eingesetzt.



Abb. 4: Installationswand im Technikgeschoss mit Brauchwasserspeicher. Die beiden Wärmemengenzähler sind mit Pfeilen markiert.



Abb. 5: Gesamt-Wärmemengenzähler an der Installationswand im Technikgeschoss. Das Kabel führt zum Temperaturfühler (Pt 500) in der Vorlaufleitung.

Der Heizwärmeverbrauch eines Hauses wird Aufgrund der vorhandenen Wärmemengenzähler-Anordnung aus der Differenz des Gesamtwärmezählers und des Warmwasserwärmezählers ermittelt:

$$Q_{\text{Heiz}} = Q_{\text{ges}} - Q_{\text{WW}}$$

10.2.2 Intensivmessung-WMZ

Beim intensiv untersuchten Haus sind noch zwei weitere WMZ vom gleichen Typ eingebaut. Der eine misst den Verbrauch des Nachheizregisters, der andere den Ertrag der Solaranlage, der in den Brauchwarmwasserspeicher eingespeichert wird.

Bei diesem Haus werden zusätzlich auch alle vier VL-Temp. und Volumina der WMZ sowie die RL-Temp. des WMZ-Solaranlage aufgezeichnet.

10.2.3 Haupt-WMZ für Hauszeilen

Zur Erfassung des Gesamt-Wärmeverbrauchs im Rahmen des Messprojektes wurden in den Technikhäusern zwei weitere WMZ vom Typ Techem / Delta Tech Compact II/ $Q_n = 1,5$ eingebaut. Diese messen die Gesamt-Wärmemenge zur Versorgung von je 16 Häusern nach der Fernwärmeübergabestation und dem Pufferspeicher in den Technikhäusern.

10.3 Haupt- und Warmwasserzähler

In jedem einzelnen der 32 Häuser gibt es einen Hauptwasserzähler und einen als Unterzähler angeordneten Wasserzähler für die Warmwassermenge (im kalten Strang, vor dem Warmwasserspeicher).

10.4 Raumlufttemperaturen

In jedem der 32 Passivhäuser sind im Erdgeschoss Südraum (Wohnzimmer) an der Wand zum Treppenhaus und im OG Nordraum (normalerweise Schlafzimmer) neben der Zimmertür Raumlufttemperaturfühler (Aufputz) von Fa. K&P / Typ TRD 2 installiert worden. Die Sensoren wurden im EG ca. 1,5 Meter und im OG etwa 1,4 Meter über dem Fußboden montiert. Für die Intensivmessung sind drei zusätzliche Raumlufttemperaturfühler vom gleichen Typ in Küche und den beiden Kinderzimmern installiert worden um Aussagen über alle Wohn- und Aufenthaltsräume machen zu können. Zur Nachkalibrierung der Raumlufte Sensoren wurden mit einem auf $\pm 0,1$ K kalibrierten Thermometer (Fa. Ahlborn / Typ PK 06, 1/10 DIN) alle 67 Messstellen durch das PHI nachgemessen und durch K&P per Offseteingabe angepasst.

10.5 Stromzähler

Die Stromzähler aller Wohneinheiten sind zentral in den beiden Technikhäusern installiert. Es handelt sich um handelsübliche Wechselstromzähler (Fa. DZG Oranienburg / Typ DV 620 UF2 / Stromklasse 2) die mit Impulsausgang ausgestattet sind. Zusätzlich zu den 32 einzelnen Hauszählern gibt es noch je Technikhaus einen Zähler für den Gemeinschaftsstromverbrauch (Pumpen, Beleuchtung Gemeinschaftsflächen und Parkplätze). Für die Intensivmessung in einem Haus misst ein weiterer Stromzähler die elektrische Energie zur Versorgung des Lüftungsgerätes mit Wärmeübertrager.

10.6 Intensivmessung

Zusätzlich zu den bisher aufgeführten Messsensoren der Intensivmessung gibt es die im Folgenden dokumentierten Messstellen im intensiv vermessenen Haus.

10.6.1 Wassertemperaturen

Die Kalt- und Warmwassertemperatur werden im Technikgeschoss des Hauses mittels Anlegefühler (Fa. K&P / Typ TAVD mit aktivem Messelement KP10) gemessen und direkt an die DDC-Zentrale weitergeleitet.

10.6.2 Kanal-Lufttemperaturen und -Luftfeuchte

Um genauere Aussagen über Verhalten und Leistungsfähigkeit des Luft/Luft-Wärmeübertragers und des Nachheizregisters machen zu können, wurden noch fünf Lufttemperaturmessungen in den Lüftungskanälen vorgenommen:

1. Außenluft vor Wärmeübertrager (nach Frostschutzheizung)
2. Außenluft nach Wärmeübertrager
3. Zuluft (nach Heizregister)
4. Abluft
5. Fortluft

Die relative Luftfeuchte der Zu- und Abluft in den Kanälen wird mit Kanalfuchtefühlern vom Typ HR250D (Fa. K&P) gemessen.

10.6.3 Volumenstrom

Die Messung der Volumenströme von Außen- und Fortluft erfolgt mittels Druckdifferenzmessungen an den beiden Messkreuzen im relativ kurzen Außen- und Fortluftrohr mit Differenzdrucksensoren (Fa. Huba / Feindruck-Transmitter Typ 694). In diesem Haus sind zwei Messkreuze - im Unterschied zu allen anderen Passivhäusern der Siedlung - in DN 100 zur kontinuierlichen Messung eingebaut (Fa. Westaflex / Typ MSD 100).

10.6.4 Kondensat

Im Lüftungsgerät kommt es bei niedrigen Außentemperaturen zu Tauwasserbildung im Ab-/Fortluftkanal. Daher war eine Messung der Kondensatmenge notwendig.

10.7 Wetterstation

Zur Erfassung der lokalen Klimadaten wurde eine Wetterstation an einem Teleskopmast aufgebaut (Abb. 1). Sie besteht aus zwei Strahlungsmessgeräten (Fa. Kipp & Zonen, Pyranometer Typ CM 11, mit und ohne Schattenring) zur Messung der horizontalen Globalstrahlung und der horizontalen Diffusstrahlung, einem strahlungsgeschützten Außentemperatur- und Feuchtesensor (Fa. Kipp & Zonen, Hyro-Thermo-Transmitter-compact), einem Windrichtungsmessgerät (Fa. Kipp & Zonen, Typ Windrichtungsgeber-compact) und einem Windgeber (Fa. Kipp & Zonen, Typ Windgeber-compact).



Abb. 6 und Abb. 7: Wetterstation in der Passivhaussiedlung. Links: Teleskopmast mit den Sensoren. Rechts: Strahlungsmessgeräte mit und ohne Schattenring auf dem First.

11 Datenauswertung

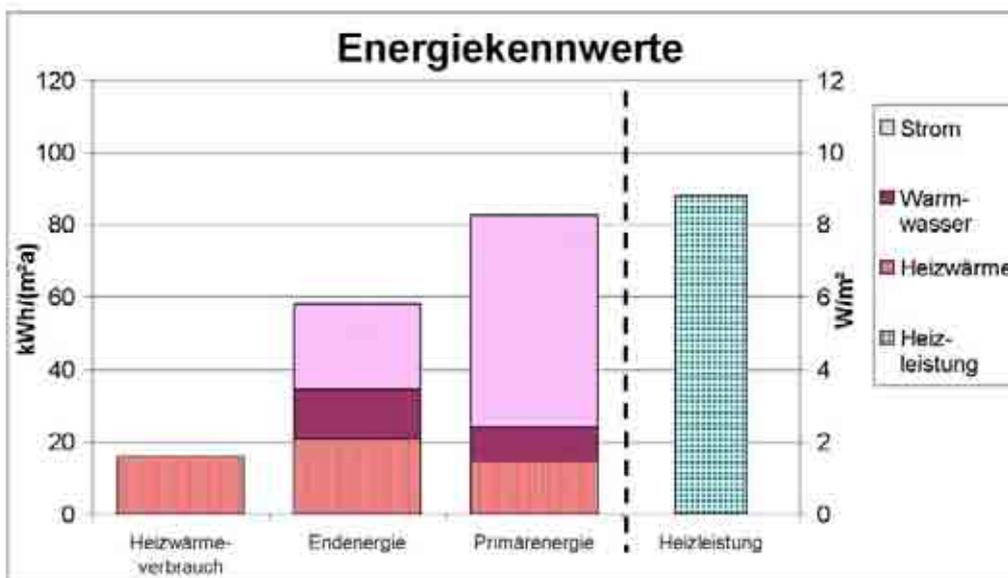
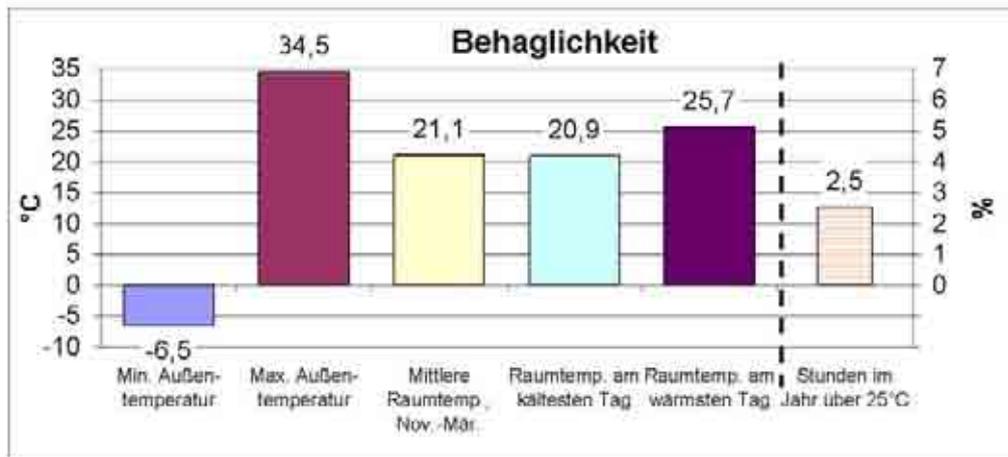
Ausgewertet wurden die Daten des Jahres mit der ersten vollständigen Heizperiode (01.10.1999 bis 30.09.2000) und die direkt anschließende zweite Heizperiode (01.10.2000 bis 30.04.2001). So sind direkte Vergleiche zwischen der ersten und der zweiten Heizperiode (jeweils 1.10. bis 30.4.) möglich.

Zeitraum		Anzahl der dauerhaft bewohnten Häuser
1	01.10.1999 - 30.09.2000	22
2	01.10.2000 - 30.04.2001	25

Tabelle 9: Anzahl der dauerhaft bewohnten Häuser in den beiden Untersuchungszeiträumen

Da alle Häuser in den betrachteten Heizperioden dauerhaft beheizt wurden, werden die Heizwärmeverbräuche von allen Häusern ausgewertet und im Mittelwert dargestellt. Bei hausweisen Darstellungen der Daten werden die nicht dauerhaft bewohnten Häuser markiert. Bei diesen Häusern ist der Eintrag durch innere Wärmequellen stark reduziert, da keine Personen anwesend sind und elektrische Energie ausschließlich für die Lüftungsanlage benötigt wird. Das führt in der Regel zu höheren Heizenergieverbräuchen als in einem bewohnten Haus. Bei stark verbrauchsabhängigen Größen wie Wasser- und Stromverbrauch werden immer nur die dauerhaft bewohnten Häuser des Zeitraumes dargestellt.

12 Übersicht über die Messergebnisse



Klima		
Minimale Außentemperatur	-6,5	°C
Maximale Außentemperatur	34,5	°C
Heizgradtage	2762	Kd
Globalstrahlung (Nov. - Mär.)	153	kWh/m²
Behaglichkeit		
Mittlere Raumtemp., Nov.-Mär.	21,1	°C
Raumtemp. am kältesten Tag	20,9	°C
Raumtemp. am wärmsten Tag	25,7	°C
Stunden im Jahr über 25 °C	2,5	%

Energiekennwerte		
Heizwärmeverbrauch	16,0	kWh/(m²a)
Max. tagesmittlere Heizleistung	8,8	W/m²
Erster Tag der Heizzeit	08.11.99	
Letzter Tag der Heizzeit	18.04.00	
Endenergie Heizwärme	20,9	kWh/(m²a)
Endenergie Warmwasser	13,7	kWh/(m²a)
Endenergie Strom	23,3	kWh/(m²a)
Gesamt-Endenergie	58,0	kWh/(m²a)
Primärenergie Heizwärme	14,7	kWh/(m²a)
Primärenergie Warmwasser	9,6	kWh/(m²a)
Primärenergie Strom	58,4	kWh/(m²a)
Gesamt-Primärenergie	82,6	kWh/(m²a)

Der Messdatenüberblick zeigt die Daten aus dem ersten Messjahr (1.10.99 bis 30.9.2000). Die Komfortparameter sowie die angegebenen Heizenergieverbräuche beziehen sich auf die dauerhaft bewohnten Häuser (Mittelwerte).

8.1 Behaglichkeitsparameter

Die Raumtemperaturen der dauerbewohnten Reihenhäuser liegen im Durchschnitt des Kernwinters mit 21,1°C mittig im Behaglichkeitsbereich; die nur geringe Abweichung (20,9°C) am kältesten Tag zeigt, dass die Behaglichkeit unabhängig von den Klimabedingungen garantiert wird. Die Höhe der mittleren Temperatur liegt deutlich über dem üblicherweise gewählten Ansatz von 20°C. Für ein repräsentatives Reihenhaus in Hannover beträgt der rechnerische Heizwärmemehrverbrauch beim Übergang von 20°C auf 21°C Raumsolltemperatur 1,7 kWh/(m²a) oder 15% [PHPP].

Auch die sommerlichen Raumtemperaturen liegen bis auf wenige Stunden unterhalb von 25°C und damit auch ohne Klimaanlage im behaglichen Bereich. Selbst am heißesten Tag des Messjahres lag der Durchschnitt der Raumtemperaturen aller dauerbewohnten Häuser bei nur 25,7°C.

8.2 Heizlasten

Von besonderer Bedeutung für die Funktion von Passivhäusern ist die maximal erforderliche Heizlast; liegt diese unter 10 W/m², so ist eine Beheizung der Wohnungen allein über die Frischluft (hygienisch erforderlicher Luftwechsel) der Lüftungsanlage möglich. Die Messungen in Hannover zeigen, dass in der ersten Heizperiode diese Grenze mit 8,8 W/m² (Tagesmittelwert) bereits unterschritten wurde; dabei ist der Maximalwert in diesem Fall ein deutlich erkennbarer Ausreißer (vgl. Abb. 25). In der zweiten Heizperiode lag die maximale Heizleistung mit 7,0 W/m² noch niedriger und unterschreitet den rechnerischen Wert (7,1 W/m², vgl. Abb. 26). Die Passivhäuser auf dem Kronsberg führen damit den Nachweis aus der Praxis, dass das Konzept der Frischluftheizung bei Gebäuden mit Passivhausqualität funktioniert. Der theoretische Nachweis war in CEPHEUS-Projektinformation Nr. 5 [Schnieders 1998] erbracht worden.

12.1 Heizwärmeverbrauch

Im ersten Jahr betrug der Jahresheizwärmeverbrauch inklusive der Sommerverbräuche 16,0 kWh/(m²a). Nimmt man die eigentlich nicht erforderlichen Sommerverbräuche heraus, so verbleiben (01.10.99 bis 30.04.00) 14,9 kWh/(m²a). Im zweiten Winterzeitraum (01.10.00 bis 30.4.01) lag der gemessene Heizwärmeverbrauch bei nur noch 13,3 kWh/(m²a). Der rechnerische Heizwärmebedarf für eine Solltemperatur von 20 °C liegt nach PHPP im Mittel aller Häuser bei 11,8 kWh/(m²a); bereits die oben diskutierte Anhebung der mittleren Raumtemperaturen auf etwa 21 °C führt rechnerisch zu einem Heizwärmebedarf von 13,6 kWh/m²a). Damit liegen die gemessenen Werte der Passivhaussiedlung im ersten Jahr nur wenig über dem rechnerischen Bedarf (etwa +10 %) und im zweiten Jahr sogar geringfügig darunter

(-2 %). Der hier gemessene Heizwärmeverbrauch bedeutet eine Einsparung gegenüber:

- dem durchschnittlichen Gebäudebestand in Deutschland von über 90 %,
- durchschnittlichen neuen Reihenhäusern in Deutschland von über 85 %.

12.2 Endenergieverbrauch

Auch die Verluste der Wärmeverteilung und Wärmeübergabe konnten bei den Passivhäusern extrem gering gehalten werden. Inklusive der (teilweise nutzbaren) Wärmeabgabe der Verteilungen in den Häusern betragen diese Verluste für Heizung und Warmwasserbereitung zusammen etwa $9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Dies entspricht auch dem zuvor rechnerisch projektierten Wert; prozentual am gesamten Endenergieverbrauch an Fernwärme ist dies allerdings mit 27 % ein nicht vernachlässigbarer Anteil. Es erscheint daher lohnend, Forschung und Entwicklung für eine noch weitere Reduktion dieser Verluste zu intensivieren.

Der Endenergieverbrauch für die Heizung ergab sich aus den Messungen des ersten Betriebsjahres zu $20,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, der für die noch erforderliche Nacherwärmung des Warmwassers zu $13,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (jeweils gemessen an der Fernwärmeübergabestation und jeweils inklusive aller Verteil- und Übergabeverluste). Die Warmwasserbereitung erfolgt überwiegend in den einzelnen Häusern mit den vorhandenen Solaranlagen; deren Energieeintrag ist in den hier dokumentierten Werten nicht enthalten. Der gesamte Endenergieverbrauch für Heizung und Warmwasserbereitung liegt mit $34,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ an Fernwärme bereits im ersten Betriebsjahr nur unwesentlich über dem rechnerisch projektierten Wert von $33,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Im Vergleich zum heute durchschnittlichen Neubaubestand beträgt die Endenergieeinsparung bei der Wärme für Heizung und Warmwasser über 75%. Wichtig ist es anzumerken, dass die Reduktion im Endenergieverbrauch nicht durch eine Substitution zugunsten eines exergetisch höherwertigen Energieträgers erfolgte - die Wärmeversorgung basiert nach wie vor auf Fernwärme.

Der gemessene Endenergieverbrauch an Strom betrug im ersten Jahr (1.10.1999 bis 30.9.2000) für die dauerbewohnten Reihenhäuser $23,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und zwar inklusive

- des gesamten Haushaltsstromverbrauchs der 22 Haushalte (also: Licht, Kühl- und Gefriergeräte, Waschmaschinen, Trockner, Spülmaschinen, Kochen und alle sonstigen Anwendungen) (Haushaltsstrom: $19,8 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{a}$),
- des gesamten Hilfsstromverbrauchs der Wohnungslüftungsanlagen (also: Regelung, Lüfterbetrieb und Frostschutzheizregister) (Strom Lüftungsanlagen $2,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$),

- des gesamten Hilfsstromverbrauchs der Wärmeverteilung der zentralen Regeltechnik und des übrigen Gemeinschaftsstromverbrauchs (Gemeinschaftsstromverbrauch: 1,4 kWh/(m²a)).

Der Gesamtverbrauch an Strom ist in dieser Siedlung somit deutlich geringer als der Referenzwert des durchschnittlichen Haushaltsstromverbrauchs in Deutschland von 32,8 kWh/(m²a), und dies, obwohl alle Haushalte der Siedlung überdurchschnittlich mit Elektrogeräten ausgestattet sind und sowohl die Lüftung als auch die solare Warmwasserbereitung gegenüber dem Referenzfall zusätzliche Stromwendungen darstellen. Eine genauere Analyse (vgl. Kapitel 14.4) zeigt, dass der Erfolg bei der Endenergieeinsparung im Bereich Elektrizität dem Einsatz besonders energieeffizienter Hausgeräte zu verdanken ist. Über ein Beratungskonzept, verbunden mit einem finanziellen Anreiz, konnten 18 Haushalte der Siedlung dafür gewonnen werden, sich mit modernen Geräten mit sehr hoher Energieeffizienz auszustatten. Die Einsparungen beim Haushaltsstrom (ohne Lüftung und Gemeinschaftsstrom) liegen bei diesen 18 Haushalten gegenüber dem Referenzfall bei 45 %.

Der gesamte Endenergieverbrauch der dauerbewohnten Passivhäuser dieser Siedlung liegt in der Summe aus Fernwärme und Strom bei 58,0 kWh/(m²a) und damit **um 67%** unter dem Verbrauch eines Referenzneubaus. Wegen der sehr hohen Einsparungen bei der Wärme ist nun der Stromverbrauch dominant - trotz der auch dort erfolgten Effizienzverbesserungen. Die weitere Verbesserung der Stromeffizienz ist daher eine der wichtigsten Zielsetzungen künftiger Forschung und Entwicklung.

12.3 Primärenergieverbrauch

Für die Ermittlung der Primärenergieverbräuche aus den gemessenen Endenergieverbrauchswerten werden die in CEPHEUS international vereinbarten Primärenergiefaktoren für die europäische Union verwendet (2,5 [kWh/kWh] für elektrischen Strom, 1,15 für Erdgas, 0,7 für Fernwärme aus Kraftwärmekopplung sowie 0,1 für Holzpellets; erneuerbare Energieträger wie Solarwärme, Wind- und Photovoltaikstrom werden mit 0 [kWh/kWh] angesetzt).

Wegen der Versorgung mit Fernwärme aus Kraftwärmekopplung reduziert sich der Primärenergieverbrauch für Heizung und Warmwasserbereitung gegenüber dem Endenergieverbrauch auf in der Summe 24,2 kWh/(m²a). Dies bedeutet eine Reduktion von 85% gegenüber dem Referenzfall.

Wegen der hohen Verluste bei der gegenwärtig vorherrschenden Form der Stromerzeugung tritt der Primärenergieverbrauch für Elektrizität besonders deutlich hervor. Obwohl der Stromverbrauch insgesamt gegenüber dem Referenzfall um etwa 30% verringert ist, macht die Strombereitstellung bei dieser Siedlung etwa $\frac{3}{5}$ des

Primärenergieverbrauchs aus. Dies unterstreicht die schon im letzten Abschnitt beschriebene Aufgabe, künftig insbesondere die Stromeffizienz weiter zu verbessern.

Insgesamt beträgt der gesamte Primärenergieverbrauch der Siedlung mit 82,6 kWh/(m²a) im ersten Jahr nur etwa ein Drittel des Verbrauchs bei konventionellen Neubauwohnungen. Dieser extrem geringe Verbrauch kann durch den Zukauf von Erzeugungskapazität der Windkraftanlage auf dem Kronsberg substituiert werden, und zwar zu einzelwirtschaftlich vertretbaren Kosten: Mit einem Anteilschein im Gegenwert von Euro 1.250 je Reihenhäuser wird eine Stromerzeugung von ca. 35,5 kWh/(m²a) substituiert; dies entspricht mit den hier verwendeten Primärenergiefaktoren einem Primärenergieeinsatz von ca. 89 kWh/(m²a) und übersteigt sogar den Verbrauch der Siedlung.

Die hohe Effizienz der Energienutzung in der Passivhaussiedlung ermöglicht es somit, die Energieversorgung überwiegend auf eine nachhaltige Basis zu stellen; entscheidend ist, dass erst bei einem entsprechend der hier gegebenen Effizienz verringerten Verbrauch genügend Standorte für die erneuerbare Energieerzeugung in Verbrauchernähe verfügbar sind.

13 Ergebnisse der Messungen im einzelnen

13.1.1 Nutzenergieverbräuche

Die Darstellung der energetischen Qualität der Passivhäuser in Form einer Jahresheizwärmebilanz zeigt Abb. 8. Sie ist auf der Basis von Messwerten für Solarstrahlung, Außentemperatur und des Heizwärmeverbrauchs aufgestellt worden. Die Transmissionswärmeströme an die Umgebung und den Boden, die Lüftungsverluste sowie die solaren Gewinne wurden mit Hilfe der Messdaten nach dem EN 832-Monatsverfahren berechnet.

Der Jahresheizwärmeverbrauch für das gesamte Jahr beträgt nach der Messung aller 32 Reihenhäuser 16,0 kWh/(m²a). Da in die Monatsdarstellung Strom- und Warmwasserverbrauchswerte einfließen, ist es hier sinnvoll, nur dauerhaft bewohnte Passivhäuser darzustellen. Zum gemessenen Haushaltsstromverbrauch eines jeden Hauses sind die anteiligen Verbräuche am Gemeinschaftsstromverbrauch (für Pumpen und Beleuchtung der Gemeinschaftsflächen ohne den Anteil des Messtechnikstromes) addiert worden. Die elektrischen Energieverbräuche für die Lüftungsanlage sind mit Hilfe der Daten aus dem intensivvermessenen Haus bestimmt worden. Diese Monatsbeträge werden separat im Diagramm dargestellt.

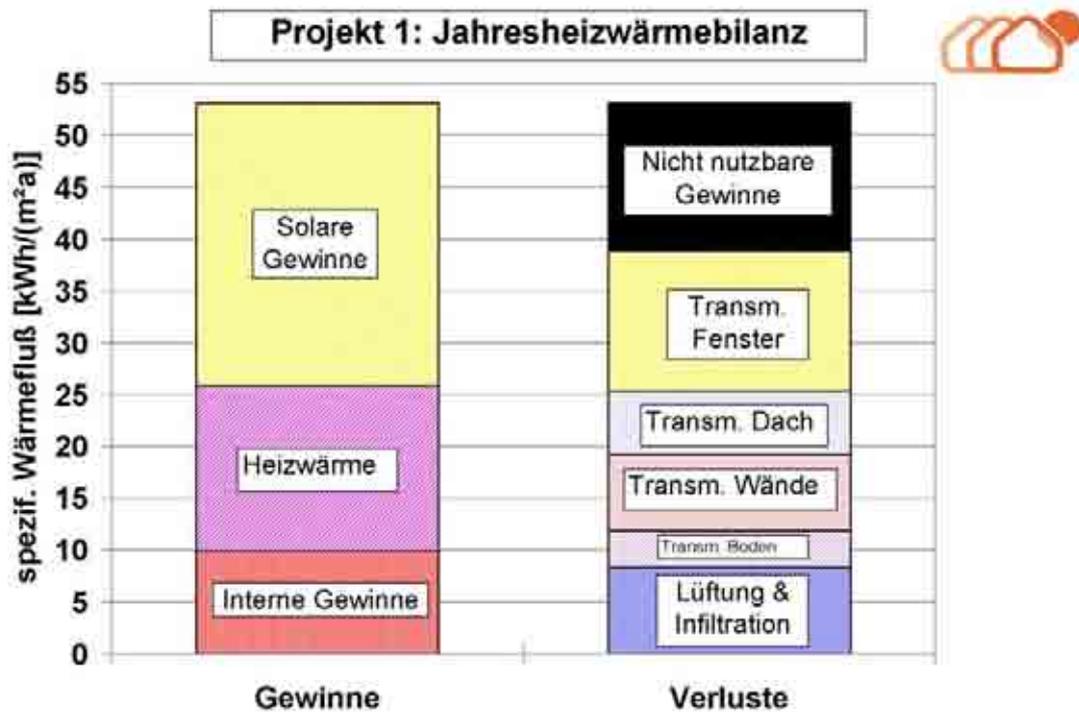


Abb. 8: Jahresheizenergiebilanz des ersten Messjahres (01.10.1999 bis 30.09.2000).

Die gemessenen Energieverbräuche werden in Abb. 9 als Monatswerte dargestellt. Abb. 10 zeigt die täglichen Verbräuche der dauerhaft bewohnten Häuser für Heizwärme und zur Warmwasserbereitung aus Fernwärmebezug sowie den Verbrauch an elektrischer Energie. Die elektrische Energie enthält die Gemeinschaftsanteile (ohne Messtechnik) und den Verbrauch der Lüftungsgeräte.

Deutlich wird hier insbesondere der Einfluss der solaren Brauchwassererwärmung durch den stark ansteigenden Fernwärmebezug für die Warmwasseraufbereitung in der dunkleren Jahreszeit. Der Strombezug ist über das gesamte Jahr relativ konstant, mit einem nur leichten Anstieg in den Wintermonaten, vermutlich durch erhöhten Beleuchtungsbedarf und einer kleinen „Urlaubsmulde“ im Juli.

In Abb. 11 werden die Heizwärmeverbräuche für das gesamte erste Messjahr hausweise in aufsteigender Reihenfolge dargestellt. Für die 32 Passivhäuser ergibt sich bei dieser Auswertung ein Mittelwert von $q_{\text{Heiz}} = 16,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Damit wird der mittels der PHPP-Bilanzierung [PHPP 1999] über alle Häuser berechnete Heizwärmebedarfswert von $q_{\text{Heiz theo}} = 11,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ leicht überschritten. Die Ursachen liegen in der Hauptsache in der Sommerheizung. Der Mittelwert in der eigentlichen Heizperiode vom 1.10.1999 bis zum 30.04.2000 ergibt sich zu $q_{\text{Heiz}} = 14,9 \text{ kWh}/\text{m}^2$.

Projekt 1: Monatlicher Energiebedarf

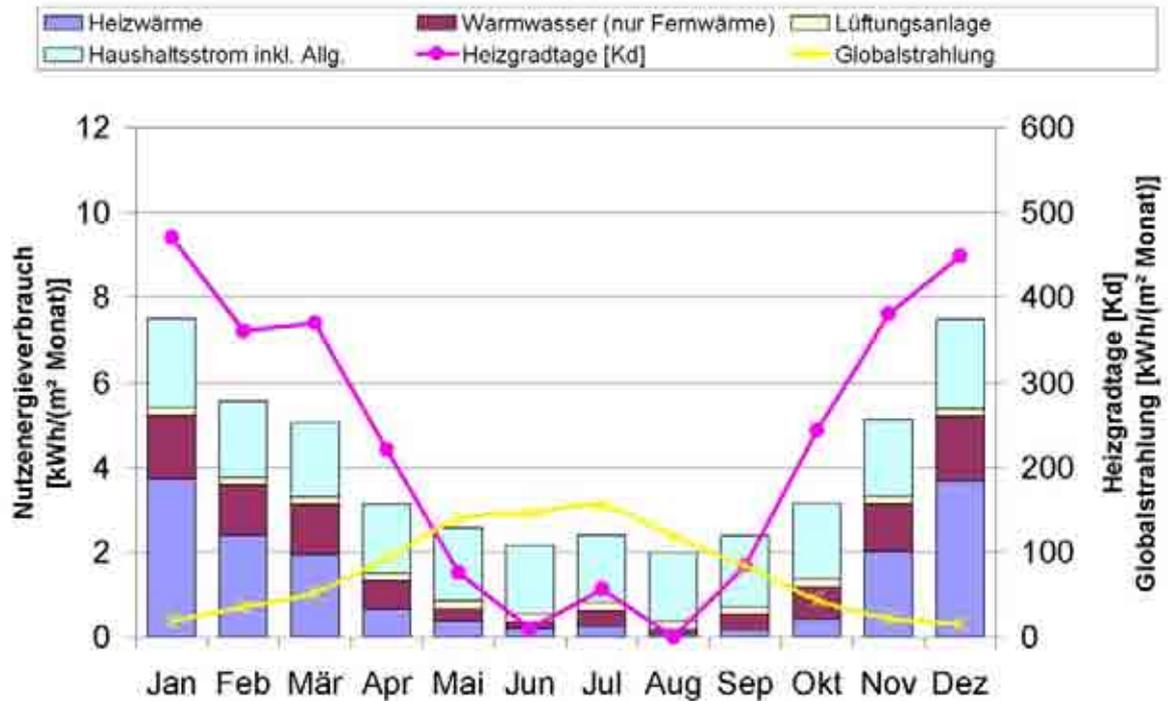


Abb. 9: Monatsverbrauchswerte für die dauerhaft bewohnten Passivhäuser im ersten Messjahr (01.10.1999 bis 30.09.2000).

Projekt 1: Täglicher Energiebedarf

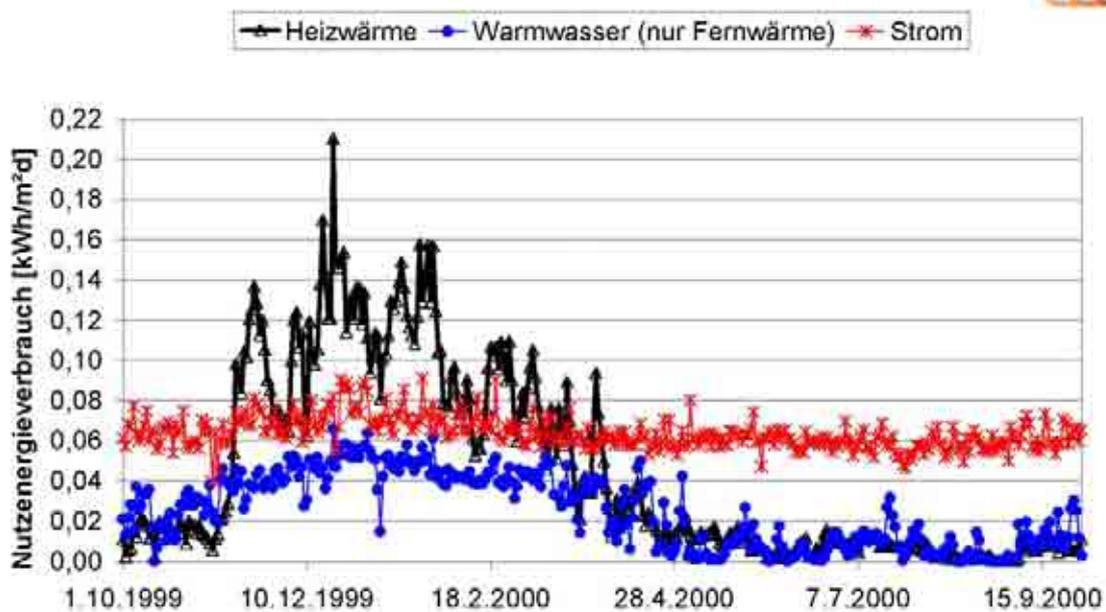


Abb. 10: Energieverbrauch pro Tag der dauerhaft bewohnten Häuser im ersten Messjahr

Aufgrund des hohen Wärmeschutzstandards muss in Passivhäusern normalerweise nicht einmal in der Übergangszeit geheizt werden. Die Sommerverbräuche von im Mittel 1,1 kWh/m² haben Ihre Hauptursache in sieben Häusern, welche im Sommer 2000 über nennenswerte Verbräuche verfügen, wobei eines davon mit einem Wert von 9,6 kWh/m² als Ausreißer zu werten ist. In diesem Haus war die Heizung aktiv bei tagesmittleren Raumlufttemperaturen von über 24 °C! Es wird sogar in der Hitzeperiode bei Außenlufttemperaturen von 28 °C kurzzeitig geheizt. Beim Abklingen der hohen Außentemperaturen setzt die Heizung sofort wieder dauerhaft ein, obwohl die Innentemperatur im EG noch um 28°C liegt. Dieser Extremfall macht deutlich, dass es sich um eine **ungewollte Beheizung** handelt. Vermutlich lag, wie auch in anderen Häusern der Siedlung, ein Mangel in der Funktion oder dem Zusammenspiel von Raumthermostat, Motorventil und Nachheizregister vor.

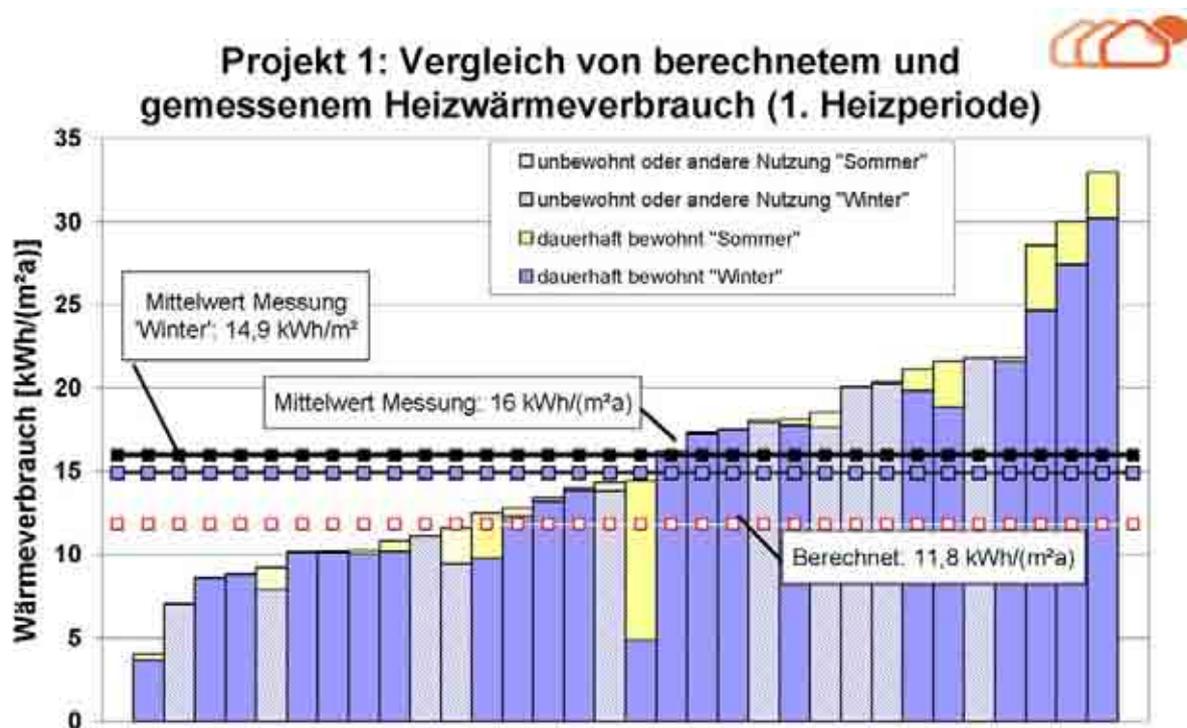


Abb. 11: Vergleich von gemessenen Heizwärmeverbräuchen und den projektierten Heizwärmebedarfswerten (berechnet) im ersten Messjahr (1.10.1999 bis 30.9.2000).

Auf den ersten Blick überrascht die Streuung der Verbrauchswerte. Wie wir aus Untersuchungen in anderen Siedlungen und bei anderen Objekten wissen, ist die Streuung durch das Nutzerverhalten bedingt und als völlig normal anzusehen: Auch bei Altbauten im Gebäudebestand und bei Niedrigenergiehäusern zeigen sich ähnliche Streuungen, nur auf sehr viel höherem Niveau. In [Schnieders 2001] wird gezeigt, dass die gemessenen Verbräuche in guter Näherung einer Normalverteilung folgen. Deren Mittelwerte entsprechen den mittleren Verbrauchswerten des jeweiligen baulich/technischen Gebäudestandards, die Standardabweichungen sind ein Maß für die durch die Nutzer bedingten Schwankungen. In den zwei hier dokumentierten statistischen Gesamtheiten sind die jeweiligen Werte in Tabelle 10

dokumentiert. In der dritten Spalte wird eine Schätzung s für die Standardabweichung σ der Einzelverbrauchswerte angegeben. Dabei erscheinen die Messergebnisse bei den 88 Niedrigenergiehauswohnungen sogar breiter gestreut ($\pm 65\%$ des Mittelwertes) als die bei den Passivhäusern ($\pm 42\%$ des Mittelwertes). Im Gegensatz zu oft geäußerten Befürchtungen nimmt die individuelle Streuung bei der Verbesserung der Energieeffizienz nicht entscheidend zu.

Man bedenke, dass der mittlere Verbrauchswert jeweils genauer bestimmt ist, und zwar für das 95 %-Vertrauensintervall durch $C \cdot s/n^{1/2}$, wobei C aus der t-Verteilung mit $n-1$ Freiheitsgraden zum Signifikanzniveau $\alpha = 95\%$ zu bestimmen ist; n ist hier bereits so groß, dass $C \approx 2$ nahe am Wert für die Normalverteilung liegt. Es ergibt sich das 95 %-Vertrauensintervall für den Erwartungswert bei den 88 Niedrigenergiehäuser (vgl. Abschnitt 13.1.3) zu $64,8 \pm 9,0$ kWh/(m²a) und für die 32 Passivhäuser zu $16,0 \pm 2,4$ kWh/(m²a), jeweils inkl. Sommerverbrauch. Damit sind die Einsparungen durch die baulich/technischen Energiesparmaßnahmen statistisch gesichert.

Projekt (Angaben jeweils inkl. Sommerheizung)	Schätzung für den Erwartungswert μ : mittlerer Heizwärmeverbrauch (ganzes Jahr) in kWh/(m ² a))	Schätzung für die Standardabweichung σ der zugehörigen Verteilung: Maß für die nutzerbedingte Streuung der Einzelwerte in kWh/(m ² a)
Niedrigenergiehäuser Kronsberg, 1999/2000	64,8	$\pm 42,5$ (65%)
Passivhäuser Hannover-Kronsberg 1999/2000	16,0	$\pm 6,7$ (42%)

Tabelle 10: Mittelwerte und Streuungen bei unterschiedlichen Baustandards

In [Wolff 2000] werden bezogen auf die Niedrigenergiehäuser am Kronsberg folgende Hypothesen für die Ursache der Streuungen aufgestellt:

- **Luftwechselraten/Lüftungsverhalten**

Der energetische Luftwechsel in der Heizzeit variere je nach Lüftungsverhalten zwischen 0,3 und 1,2 Luftwechseln in der Stunde. Daraus resultiere eine Bandbreite von +20 bis +100 kWh/(m²a) allein durch das Lüftungsverhalten.

Diese Hypothese kann mit den Ergebnissen aus der Passivhaussiedlung widerlegt werden: Die maximale Abweichung im Heizwärmeverbrauch nach oben beträgt hier überhaupt nur 17 kWh/(m²a). Die vermutete hohe Streuung durch das

Lüftungsverhalten ist bei den Passivhäusern definitiv nicht gegeben. Außerdem liefert diese Hypothese keine Erklärung für Verbrauchsabweichungen nach unten.

- **Raumtemperaturniveau**

Eine Raumtemperaturerhöhung um 1 K entspricht einem Mehrverbrauch von ca. 7-11 kWh/(m²a) im Niedrigenergiehaus (11 bis 17%).

Auch im Passivhaus ist der Einfluss der Raumtemperaturen sehr hoch. In absoluten Werten sind es zwar "nur" 1,7 kWh/(m²a) je Kelvin, beim vorliegenden niedrigen Verbrauchsniveau macht dies aber fast 15 %/K aus. Bei einem Spektrum der mittleren winterlichen Raumtemperaturen zwischen 19 und 23 °C ergeben sich dadurch Verbrauchsunterschiede von ±3,4 kWh/(m²a). Dies allein vermag die vorliegende Streuung allerdings nicht vollständig zu erklären.

- „**Wärmeklau (?)**“ angeführt.

Bedeutender werden die Wärmeströme zwischen den einzelnen Wohneinheiten, wenn diese unterschiedliche Temperaturen besitzen.

Dies ist nach durchgeführten Analysen z.B. beim CEPHEUS-Projekt "Geschosswohnungsbau als Passivhaus/Kassel Marbachshöhe" tatsächlich die bedeutendste Ursache für die Verbrauchsstreuung [Pfluger 2001]. Durch diesen Effekt werden die raumtemperaturbedingten Verbrauchsunterschiede zwischen zwei Nachbarhäusern verstärkt: Gehen wir beispielsweise davon aus, dass Nachbar A eine Raumtemperatur von 23° eingestellt hat, Nachbar B jedoch nur 19°C, so resultiert beim Baustandard der Passivhaus-Reihenhäuser in Hannover daraus ein Wärmestrom über die Wohnungstrennwand von A nach B in Höhe von fast 900 kWh/a. Dadurch reduziert sich der Wärmeverbrauch in Wohnung B um etwa 7,6 kWh/(m²a), während er sich für Wohnung A um den gleichen Betrag erhöht. In der Summe ist dieser Effekt für den Wärmeverbrauch der Siedlung ein Nullsummenspiel - die Wärme ist nicht verloren, sie ist nur beim Nachbarn. Die absolute Höhe des Effektes ist nicht dramatisch, durch die nur partiell verbrauchsunabhängige Abrechnung wird der Effekt ökonomisch etwa kompensiert.

Nimmt man die Einflüsse dieser Querwärmeströme und die der tatsächlichen Mehrverluste bei höheren Raumtemperaturen zusammen, so ergibt sich bereits eine Verbrauchsschwankung um ±11 kWh/(m²a) für die Passivhaussiedlung bei den in der Siedlung gemessenen unterschiedlichen Temperaturniveaus. Werte von 16±11 bewegen sich von 5 bis 27 kWh/(m²a); das trifft ziemlich genau die beobachtete Spreizung im ersten Betriebsjahr.

Da unterschiedliche mittlere Raumtemperaturen im Intervall 19 bis 23 °C tatsächlich gemessen wurden, war die aufgetretene Streuung der Verbrauchswerte allein aus diesem Grund zu erwarten.

Die diskutierten nutzungsbedingten Streuungen sind allerdings immer noch überlagert von einer Reihe von Einflüssen, die typisch sind für das "erste Jahr" eines bewohnten Neubaus: Einregulierprobleme, noch erfolgende Handwerkerleistungen, Trocknungsphase, Nutzereingewöhnung u.a. Dies drückt sich auch in dem gegenüber der theoretischen Berechnung geringfügig höheren mittleren Heizwärmeverbrauch aus.

In der zweiten Heizperiode konnte eine weitere Verringerung der Heizwärmeverbräuche festgestellt werden (Abb. 12).

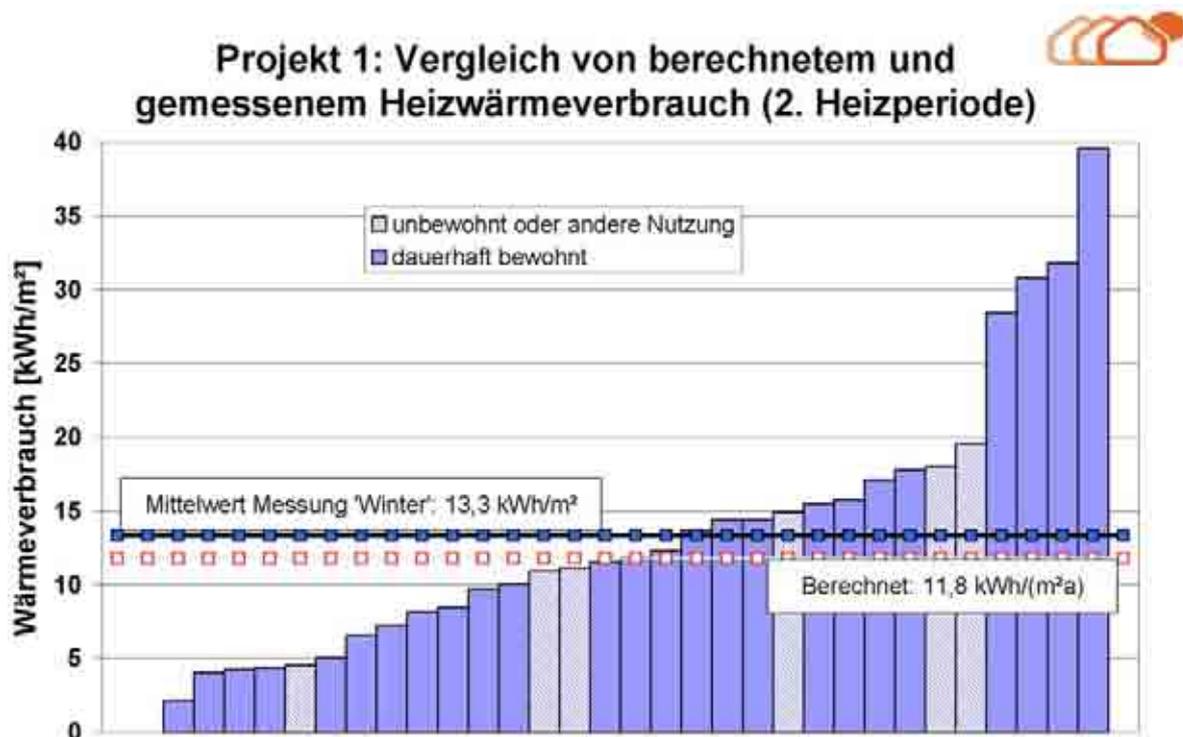


Abb. 12: Vergleich von gemessenen Heizwärmeverbräuchen und den projizierten Heizwärmebedarfswerten (berechnet) in der zweiten Heizperiode (1.10.2000 bis 30.4.2001).

Der Mittelwert von $Q_{\text{Heiz}} = 13,3 \text{ kWh/m}^2$ bestätigt die vermuteten weiteren Verbesserungen in der zweiten Heizperiode, wie sie auch aus anderen untersuchten Objekten bekannt sind.

Eine Gradtagszahlen-Gewichtung (Witterungsbereinigung der Verbrauchsdaten) des ausgewerteten Zeitraumes gegenüber dem langjährigen Mittel ist bei Passivhäusern nicht sinnvoll, da sich keine nennenswerten Veränderungen einstellen würden.

Zusätzlich zu den gemessenen Nutzenergieverbräuchen ist ein Teil der im nächsten Abschnitt behandelten Wärmeabgabe der Rohrleitungen in den Häusern während der Heizzeit nutzbar. Der Grund liegt darin, dass die Vor- und Rücklaufleitungen in den Technikgeschossen verlaufen. Deren Abstrahlungswärme kommt jeweils dem Haus zu einem großen Teil „nutzbar“ zugute. Dieser nutzbare Anteil wird in Abschnitt

14.3.3 bestimmt. Er liegt bei $3,9 (\pm 1,5)$ kWh/m². Damit ergibt sich für die erste Heizperiode ein Wert von $14,9 + 3,9 = 18,8 (\pm 2,5)$ kWh/m² und für die zweite Heizperiode $13,3 + 3,9 = 17,2 (\pm 2,5)$ kWh/m².

13.1.2 Endenergieverbräuche

Die über die Gebäudehüllen in die Siedlung gelieferten nicht erneuerbaren Energieströme bezeichnen wir als Endenergieverbräuche. Diese werden hier als hausbezogene Messdaten des ersten gesamten Messjahres (1.10.1999 bis 30.9.2000) dargestellt.

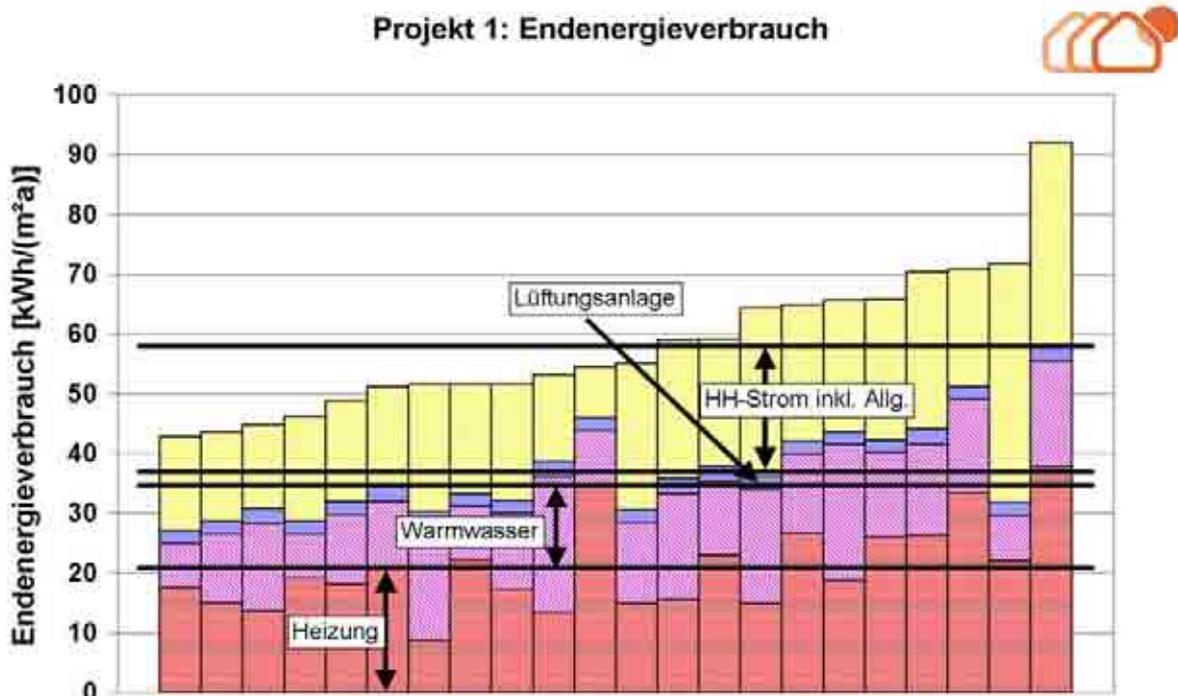


Abb. 13: Hausbezogene Endenergieverbräuche des ersten ganzen Messjahres (1.10.1999 bis 30.9.2000) der 22 dauerhaft bewohnten Passivhäuser.

Für die Darstellung wurden wieder die Daten der Fernwärmebezüge für Heizung und Warmwasserbereitung, der Lüftungsstromverbrauch und der restliche Haushaltsstromverbrauch verwendet. Die Berechnung des Stromverbrauchs erfolgt wie für die Daten in Abb. 9 beschrieben. Bei den Werten der Endenergieverbräuche werden auch die Verluste aller haustechnischen Installationen bis zu den Fernwärmeübergabestationen berücksichtigt. Diese wurden entsprechend jedem Haus, nach Heizungs- und Warmwasserfernwärmebezug getrennt zugeschlagen. Der Mittelwert der Heizenergie beträgt $q_{\text{HeizEnd}} = 20,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, der Mittelwert für die Endenergie (Fernwärme) zur Warmwasserbereitung beträgt $q_{\text{HWWEnd}} = 13,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Die Werte für den Bezug von elektrischer Energie verändern sich durch die Endenergiebetrachtung nicht. Der Mittelwert des Haushaltsstroms inkl. Allgemeinanteil beträgt $q_{\text{HausElek}} = 21,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, der des Lüftungsgerätes inkl. Steuerung und Frostschutzheizung $q_{\text{WRGElek}} = 2,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Im Mittel über alle 22 dauerhaft bewohnten Passivhäuser ergibt sich ein Endenergiekennwert von $q_{\text{End}} = 58,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (inkl. des Haushaltsstroms).

Im Vergleich zur Projektierung ($51,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) ist der gemessene Verbrauch $6,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ höher. Angesichts der tatsächlich **erzielten Endenergieeinsparung von 67 %** gegenüber durchschnittlichen Neubauwerten ist das Ergebnis als großer Erfolg zu werten. Für den Vergleich mit durchschnittlichen Neubauten wurden die Häuser der Siedlung in der Ausführung nach der [WSVO 95] modelliert und berechnet. Dabei ergab sich der Endenergiekennwert des Referenzfalls zu $173,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

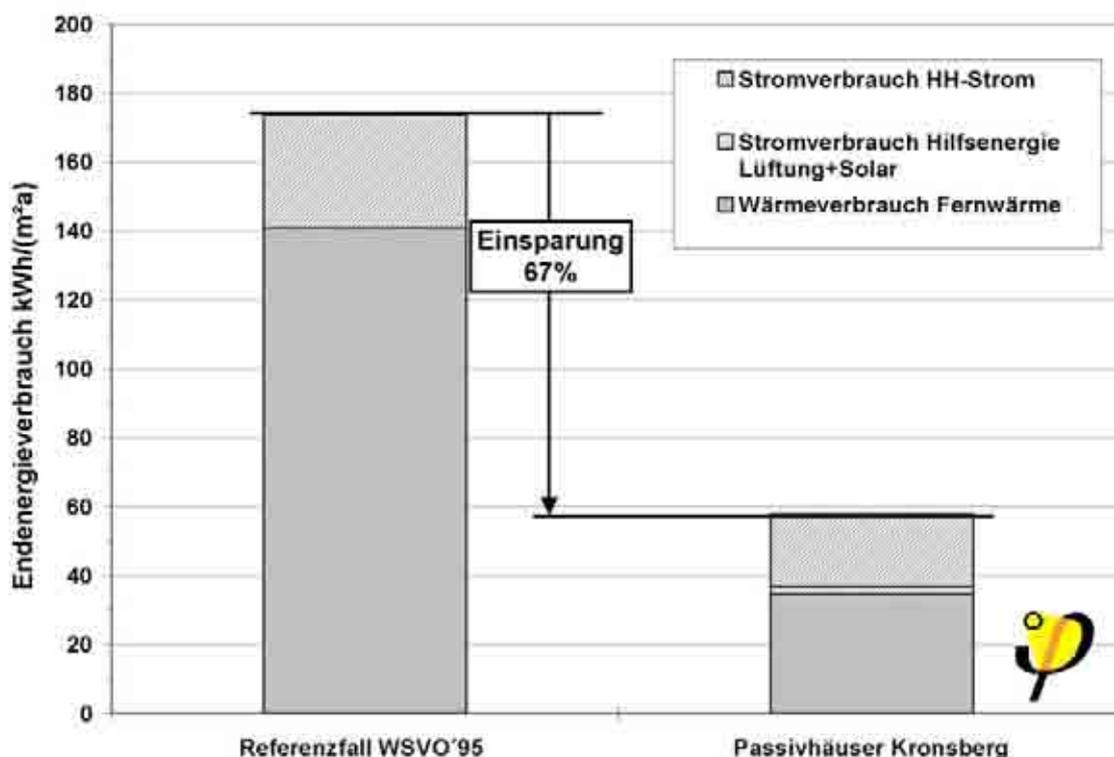


Abb. 14: Gesamter Endenergieverbrauch (Fernwärme und Strom inkl. Haushaltsstrom) für eine Referenzsiedlung mit heutigem durchschnittlichem Standard in Deutschland (links) und nach den Messwerten in der Passivhaussiedlung Kronsberg (22 ständig bewohnte Häuser im Messzyklus 4.10.1999 bis 3.10.2000).

13.1.3 Endenergievergleich mit Niedrigenergiehäusern (NEH)

Alle Gebäude des neuen Wohngebietes Hannover-Kronsberg mussten nach Vorgaben der Stadt Hannover energieoptimiert mindestens im Niedrigenergiehaus-Standard (NEH) erbaut werden. Der dafür definierte „Kronsberg-Standard“ übertrifft die Anforderungen der Energie-Einsparverordnung 2000 noch deutlich: Nachweise des Standards wurden von der Stadt Hannover von allen Gebäuden verlangt, geprüft und eine umfassende Qualitätssicherung wurde gefördert. Die Stadtwerke Hannover haben von fünf größeren Mehrfamilienhäusern mit insgesamt 88 Wohneinheiten im

Kronsberg-Standard die Heizkostenabrechnungen zum Vergleich zur Verfügung gestellt. Bei den Objekten enthalten die gemessenen Verbrauchsdaten die Verteilverluste der Rohrleitungen in den Häusern. Daher müssen für einen Vergleich mit den 32 Passivhäusern die Endenergieverbräuche herangezogen werden.

Es werden die Daten von jeweils fast dem gleichen Jahreszeitraum miteinander verglichen: Die NEH-Verbräuche wurden vom 15.10.1999 bis zum 16.10.2000 ermittelt, die der Passivhäuser im ersten Messjahr vom 01.10.1999 bis zum 30.09.2000.

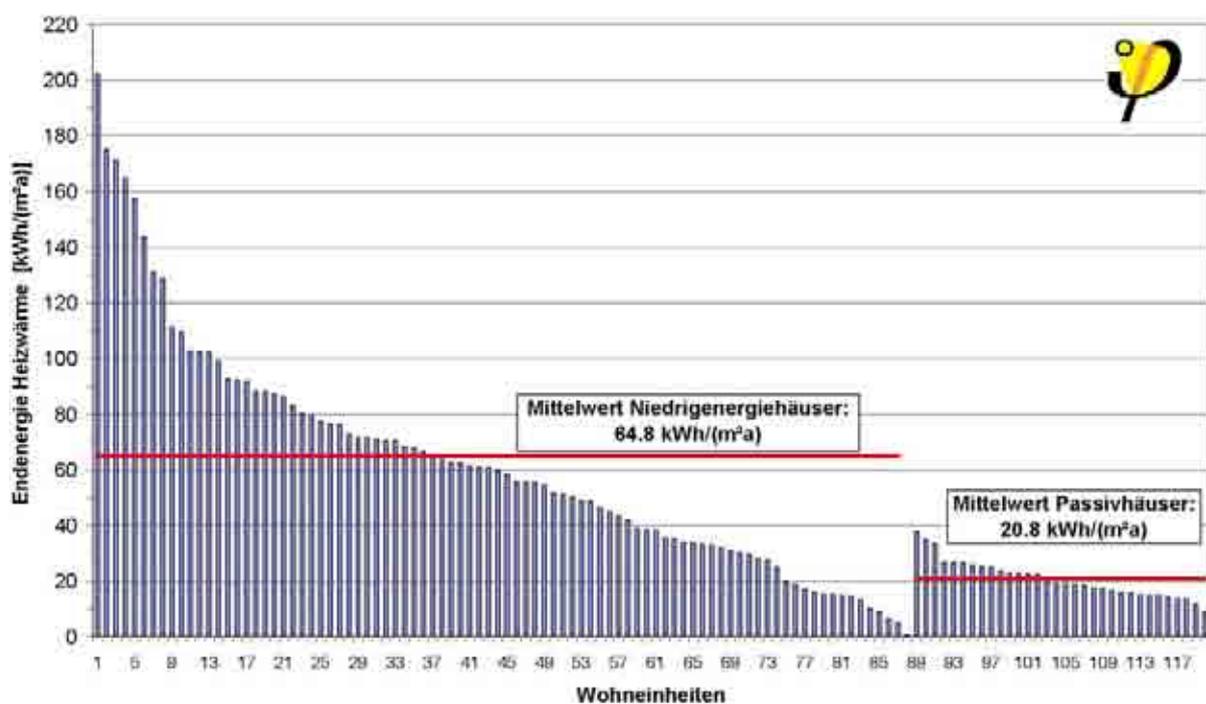


Abb. 15: Vergleich der Endenergieverbräuche für Heizung von fünf Mehrfamilienhäusern in Niedrigenergiestandard am Kronsberg (nach Heizkostenabrechnungen) und den 32 Passivhäusern. Dargestellt sind die vergleichbaren Zeiträume von jeweils einem Jahr (NEH: 15.10.1999 bis 16.10.2000, PH: 01.10.1999 bis 30.09.2001). Der Mittelwert der gemessenen Werte zeigt deutlich den Unterschied der Qualitätsstandards.

Abb. 15 zeigt eindrucksvoll den Unterschied der Standards bei den Endenergie-Mittelwerten für die Heizung von **64,8 kWh/(m²a)** für die NEH und **20,8 kWh/(m²a)** für die Passivhäuser. Es ist davon auszugehen, dass einige der Wohnungen in den NEH zeitweise unbewohnt und unbeheizt waren. Bei den Werten ist zu bemerken, dass es sich bei den Neubauten im NEH-Standard wie erwähnt um bereits energieoptimierte und qualitätsgesicherte Gebäude handelt, deren Verbräuche um 40 % unter denen von konventionellen Neubauten liegen. Die Heizenergieverbräuche der Passivhäuser sind gegenüber den der Niedrigenergiehäuser noch einmal um den Faktor 3 reduziert und nun derart gering, dass die Heizung energiewirtschaftlich praktisch unbedeutend ist.

13.1.4 Nutzerstreuung und Verbrauchsniveau im Vergleich

Eine bedeutende Untersuchung zum Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch in Einfamilienhäusern hat Erik Lundström 1986 in Schweden veröffentlicht [Lundström 1986]. Lundström hat dabei den gesamten Endenergieverbrauch von 77 baugleichen Einfamilienhäusern in Stockholm gemessen. Die untersuchten freistehenden Einfamilienhäuser hatten einen vergleichsweise guten Wärmeschutz ($U_{\text{Boden}} = 0,25$; $U_{\text{Wand}} = 0,38$, $U_{\text{Fenster}} = 2,79$ und $U_{\text{Dach}} = 0,23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) und werden allein mit elektrischer Energie versorgt - d. h. auch Heizung und Warmwasserbereitung erfolgen direkt elektrisch. Gemessen wurde nur der gesamte Stromverbrauch, also Heizung, Warmwasserbereitung und Haushaltsstrom zusammen.

Dieser Endenergieverbrauch der 27 Stockholm-Häuser ist in Abb. 16 in aufsteigender Reihenfolge dargestellt. Der Mittelwert des Endenergieverbrauchs beträgt $203 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und die geschätzte Standardabweichung $s = 27,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Aus der Streuung der Verbrauchswerte hatte Lundström folgende Thesen aufgestellt:

- Die Energieverbräuche baugleicher Häuser schwanken beträchtlich in Abhängigkeit vom Nutzerverhalten (Verhältnis bis 1:2).
- Die Nutzung hat den dominierenden Einfluss auf den Energieverbrauch.
- Der Einfluss von Gebäudequalität und Technik auf den Verbrauch wird übertrieben.
- Einsparmaßnahmen durch Verhaltensänderungen sind denen von technischen und baulichen Verbesserungen überlegen und kostengünstiger.

Daher empfiehlt Lundström in seiner Arbeit, die Anstrengungen für eine Verbesserung der technischen Effizienz zurückzustellen und stattdessen intensiv Programme zum energiesparenden Nutzerverhalten zu betreiben.

Mit den Ergebnissen unserer Messung in der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg können die Aussagen dieser historisch bedeutenden Arbeit überprüft werden. In Abb. 16 haben wir die gemessenen Endenergieverbrauchswerte für Heizung, Warmwasserbereitung und Haushaltsstrom der 22 dauerbewohnten Passivhäuser in Hannover im gleichen Maßstab mit eingeblendet: Die qualitative statistische Verteilung ist bei beiden Untersuchungen ähnlich. Beide Gesamtheiten lassen sich als normalverteilt ansehen.

Der Mittelwert der Endenergieverbräuche der Passivhäuser auf dem Kronsberg beträgt jedoch nur $58 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, mithin nur 29% des Mittelwertes bei den von Lundström untersuchten Stockholm-Häusern. Die erreichte mittlere Endenergieeinsparung zwischen den Stockholm-Häusern und den Passivhäusern in Hannover beträgt also über 70%.

Der Einfluss des Nutzerverhaltens ist wie bei den Stockholm-Häusern auch in den Passivhäusern in Hannover gegeben. Die Standardabweichung beträgt allerdings bei den Passivhäusern nur noch $s = 11,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, die absolute Höhe der Verbrauchsstreuung nimmt somit mit besser werdender technischer Effizienz ab.

Damit können den Thesen von Lundström die Erkenntnisse der hier durchgeführten Untersuchungen entgegengestellt werden:

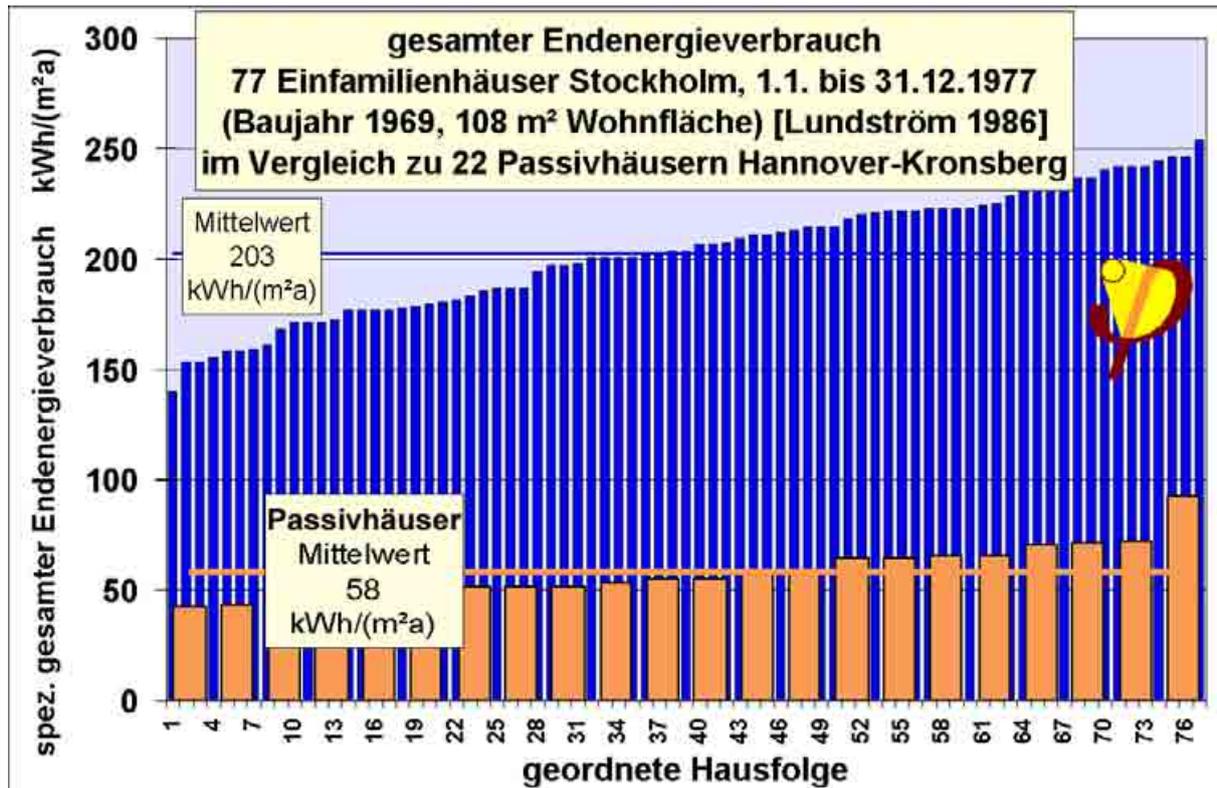


Abb. 16: Vergleich der Endenergieverbräuche für Heizung, Warmwasser und Haushaltsstrom der 22 dauerbewohnten Passivhäuser mit den 77 Stockholm-Häusern nach [Lundström 1986].

- Die Endenergieverbräuche baulich und technisch (weitgehend) gleicher Häuser schwanken unabhängig vom jeweiligen Standard in etwa im Verhältnis 1:2 zwischen minimalem und maximalem Verbrauch. Daran ändert sich beim Übergang von schlecht gedämmten zu sehr gut gedämmten Häusern praktisch nichts.
- Dennoch hat nicht die Nutzung, sondern der baulich/technische Standard den dominanten Einfluss auf den Energieverbrauch: Allein durch Verbesserung der technischen Effizienz ist es bei den Passivhäusern auf dem Kronsberg gelungen, den Energieverbrauch im Durchschnitt um mehr als einen Faktor 3 zu senken.
- Der Einfluss von Gebäudequalität und technischer Effizienz auf den Verbrauch wird für die Mittelwerte repräsentativer Nutzerstichproben durch die rechnerisch ermittelten Bedarfswerte sehr gut wiedergegeben. Die Potentiale der technischen Effizienzverbesserung werden somit keinesfalls übertrieben.

- Einsparmaßnahmen durch baulich/technische Effizienzverbesserungen sind Versuchen zur verhaltenspsychologischen Erziehung der Verbraucher in mehrfacher Hinsicht überlegen:
 - Sie führen sowohl bei sparsamen als auch bei verschwenderischen Nutzern gleichermaßen zu hohen relativen Einsparungen.
 - Sie sind, wie im Passivhausprojekt Hannover gezeigt, kostengünstig zu realisieren und behalten ihre Wirkung über die Nutzungszeit der Gebäude bei.
 - Sie kommen ohne eine Bevormundung und ohne erhobenen Zeigefinger aus.
 - Sie ermöglichen jedem Nutzer nach wie vor den thermischen Komfort, den er sich wünscht.

Die Untersuchungen in CEPHEUS konnten darüber hinaus die weiterführenden Studien von [Lundgren 1989] bestätigen und präzisieren: Unsere Untersuchungen in CEPHEUS zeigen für den separierten Einfluss der Nutzer, dass sich mehr als die Hälfte der Schwankungen durch unterschiedliche von den Nutzern gewünschte Innentemperaturen erklären (Bestimmtheitsmaß $\approx 50\%$). Diese unterschiedlichen Nutzerwünsche an das Raumklima sind offensichtlich bei allen untersuchten Projekten vorhanden. Die Verbesserung der baulich/technischen Effizienz erlaubt es, bedeutende Energieeinsparungen gesichert zu erreichen, ohne die Wertvorstellungen und Bedürfnisse der Nutzer verändern zu wollen. Die Ergebnisse von CEPHEUS zeigen, dass dies für das Erreichen eines nachhaltigen Zustandes bei der Energieversorgung von Haushalten offenbar ausreicht. Die Anstrengungen zur Verbesserung der technischen Effizienz sollten daher weiter intensiviert werden, und zwar in zwei Richtungen:

- Zum einen in der Umsetzung der bisher schon entwickelten hocheffizienten Technik in die breite Anwendungspraxis; hierbei haben sich vor allem die Komponenten von Passivhäusern bewährt - sie können auch in der Breite zur Verbesserung in bestehenden Gebäuden zum Einsatz kommen.
- Zum anderen durch die Fortsetzung von Forschung und Entwicklung in Richtung auf noch weiter verbesserte Effizienztechnik. Vor allem hocheffiziente Techniken der Elektrizitätsanwendung bieten hier eine bedeutende Chance.

13.1.5 Primärenergieverbräuche

Der Primärenergieverbrauch unterscheidet sich vom Endenergieverbrauch dadurch, dass die zusätzlichen Verluste der gesamten vorgelagerten Energiebereitstellungskette mitberücksichtigt werden. Verwendet wurden gemäß der CEPHEUS-Vereinbarung die folgenden Primärenergiefaktoren für die vorgelagerte Kette bei

- Fernwärme aus KWK-Anlagen: $0,7 \text{ kWh}_{\text{Primär}}/\text{kWh}_{\text{End}}$
- durchschnittl. europäischer Strommix: $2,5 \text{ kWh}_{\text{Primär}}/\text{kWh}_{\text{End}}$.

Alle erneuerbaren Energiebezüge werden mit $0 \text{ kWh}_{\text{Primär}}/\text{kWh}_{\text{End}}$ bewertet, da diese nicht zur Klimabelastung beitragen.

Es ergibt sich nach den Messwerten des ersten Jahres in der Passivhaussiedlung ein mittlerer Primärenergiekennwert der 22 dauerhaft bewohnten Häuser im ersten Messjahr von $82,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Der Referenzfall nach W5VO 95 wurde zu $244,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ berechnet. Die erzielte Primärenergieeinsparung beträgt **66 %**.

Da die Wärmeversorgung (Heizung $14,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und nicht regenerativer Wärmeverbrauch zur Warmwassererwärmung $9,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) komplett über Fernwärme realisiert wurden, werden diese Absolutwerte kleiner. Sie fallen mit einem Anteil am Primärenergieverbrauch von 29,4 % sehr gering aus. Andererseits wird die hohe Bedeutung der Haushaltsstromverbräuche ($52,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) mit 63,8 % am Gesamt-Primärenergiebedarf deutlich.

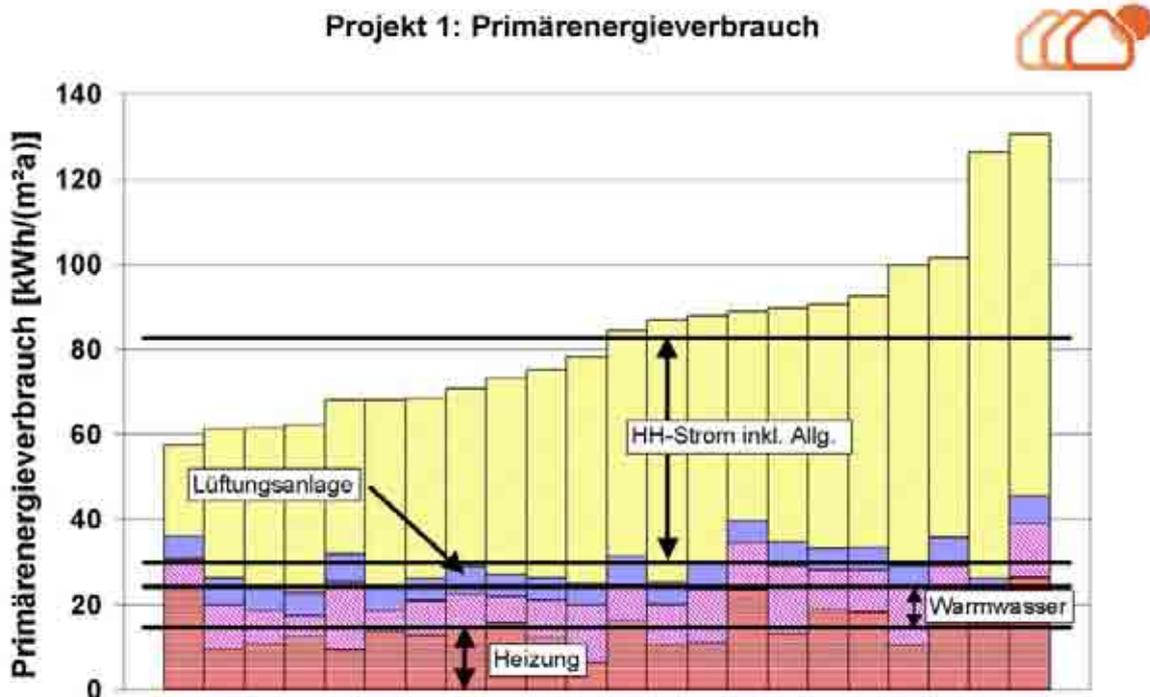


Abb. 17: Hausweise Primärenergieverbräuche des ersten ganzen Messjahres (1.10.1999 bis 30.9.2000) der 22 dauerhaft bewohnten Passivhäuser.

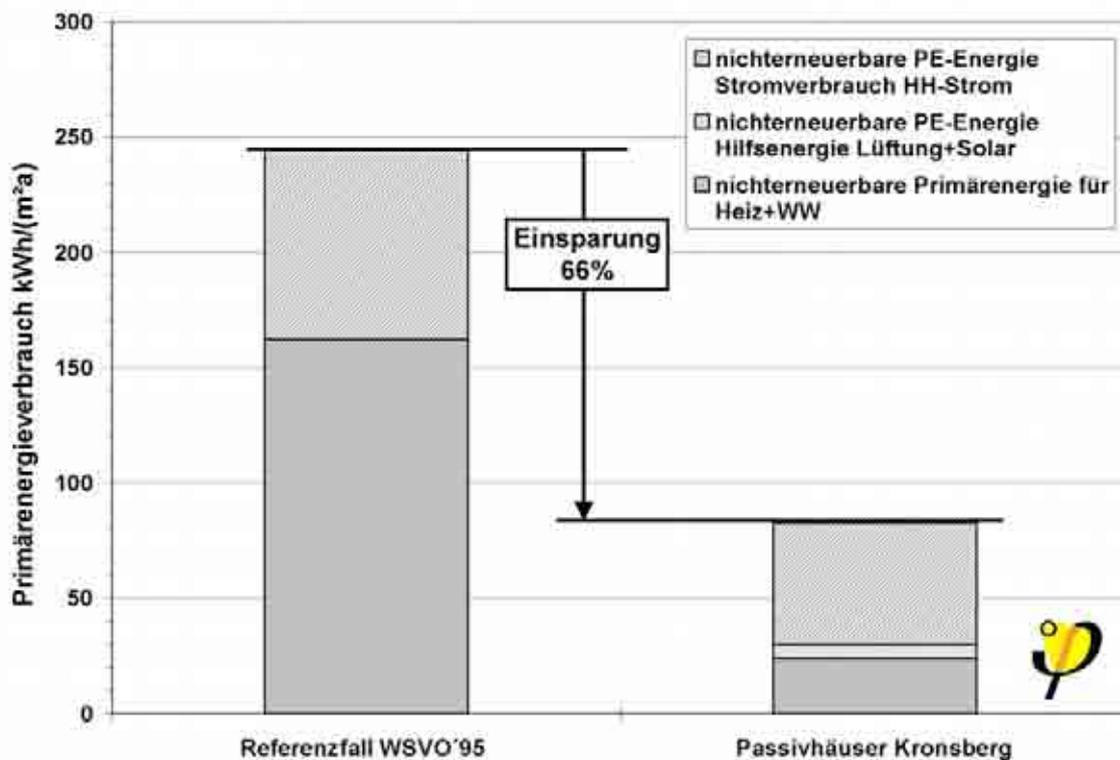


Abb. 18: Gesamter Primärenergieverbrauch für eine Referenzsiedlung mit heutigem durchschnittlichen Neubaustandard und nach den Messwerten in der Passivhaussiedlung.

Der erreichte Wert für den Primärenergieverbrauch liegt deutlich unter dem Zielwert für neue Passivhäuser in Deutschland (120 kWh/(m²a)).

Das Ergebnis zeigt, dass die wärmeseitige Optimierung der Passivhäuser auf dem Kronsberg in der Praxis sehr gute Kennwerte erzielt. Hingegen erweist sich die effiziente Nutzung von Strom als eine immer bedeutendere Aufgabe: Der Haushaltsstrom tritt mit dem erheblichen Anteil von fast 65 % des Primärenergieverbrauchs als Hauptanteil auf, obwohl hier schon Stromeffizienzverbesserungen um **38 %** erreicht wurden (vergleiche Abschnitt 14.4.1).

13.2 Thermische Behaglichkeit

Der Verlauf der gemessenen Raumlufttemperaturen der dauerhaft bewohnten Passivhäuser zusammen mit dem flächengewichteten Mittelwert sowie der Außenlufttemperatur sind in Abb. 19 als Tagesmittelwerte dargestellt.

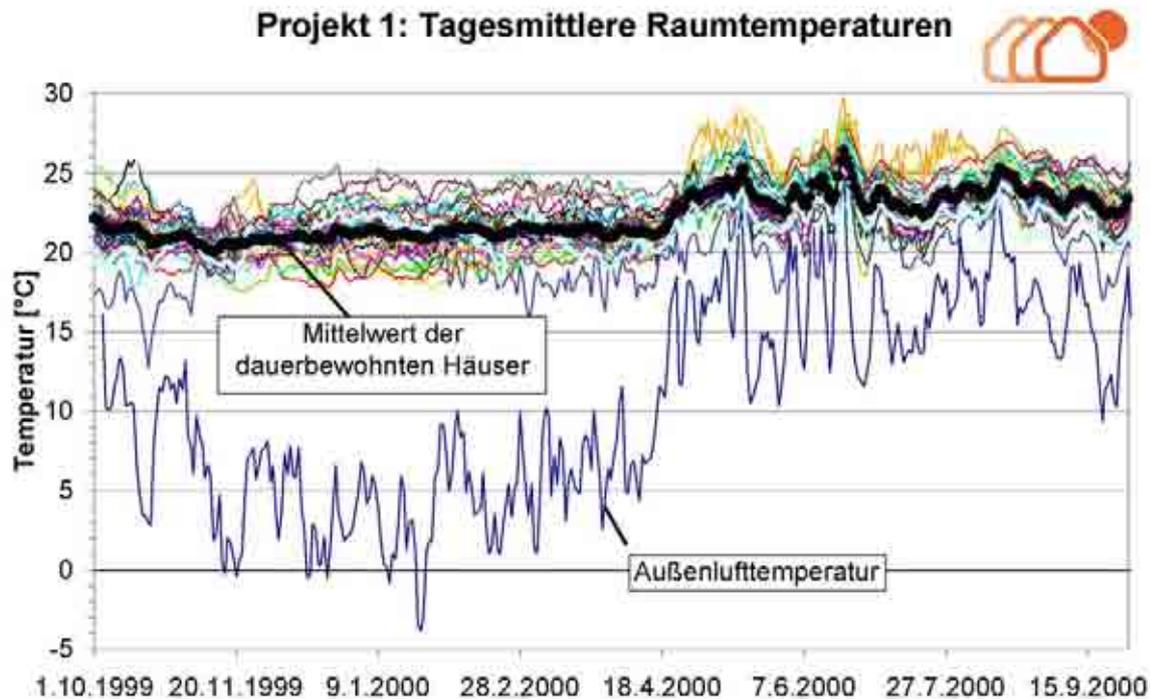


Abb. 19: Tagesmittlere Raumlufttemperaturen der 22 dauerhaft bewohnten Häuser im ersten Messjahr (1.10.1999 bis 30.9.2000).

Die Bandbreite der Raumlufttemperaturen reicht von ca. 12,7 bis 29,9 °C. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei der Temperatur von 12,7 °C um einen Ausreißer vom 18. bis 22. Oktober 1999 im Obergeschoss eines Hauses handelt. Wie die Grafik zeigt, ist hier die Außenlufttemperatur ebenfalls stark gesunken. Dies deutet darauf hin, dass in dieser Zeit das Schlafzimmerfenster geöffnet war. Bis auf die Kernzeit im Winter ist die Temperatur in diesem Obergeschoss im Vergleich zu den anderen Häusern fast immer sehr niedrig. Das deutet auf ein außerhalb der Heizzeit dauerhaft geöffnetes Schlafzimmerfenster hin.

Die thermische Behaglichkeit im Sommer war mit mittleren Raumlufttemperaturen von nur selten - und dann nur kurzzeitig - über 25 °C sehr gut. Die Auswertung der Stundenwerte ergibt eine Überschreitung von 25 °C in den bewohnten Häuser in nur 2,5 % der Jahresstunden.

Bei genauerer Untersuchung der bewohnten Häuser ergibt sich, dass die Mittelwerte der sommerlichen Tagesmitteltemperaturen in allen vier Passivhauszeilen in einem Band zwischen +22,3 und +26,4°C liegen (1.6. bis 30.09.2000). Höhere Tagesmitteltemperaturen als +26°C (sommerliche Komfortgrenze) werden dabei im Erdgeschoss überhaupt nur maximal an einem Tag, im Obergeschoss an 1 bis 4 Tagen erreicht. Damit betrug die Übertemperaturhäufigkeit $h_{9>26^{\circ}\text{C}}$ in der Passivhaus-siedlung Hannover im Sommer 2000 **maximal 1,1%**. Dies ist ein als sehr komfortabel anzusehendes Innenklima im Sommer. Das Ergebnis steht in guter Übereinstimmung mit der Passivhaus-Sommerklima-Studie [Feist 1998b].

Die Betrachtung der Korrelation zwischen Raumlufttemperaturen der bewohnten Häuser und der Außentemperatur (jeweils Tagesmittelwerte) zeigt sich der deutliche Unterschied zwischen dem winterlichen und dem sommerlichen Bereich (Abb. 20).

Die linearen Ausgleichsgerade des Bereichs von Außentemperaturen bis maximal +10 °C zeigt einen fast waagerechten Verlauf (0,02 K Temperaturanstieg pro Kelvin Temperaturerhöhung der Außenlufttemperatur). Für niedrige Außentemperaturen ist damit nur ein sehr geringer Einfluss auf das Innentemperaturniveau zu erkennen, was vor allem auf den vorhandenen aktiven Regeleinfluss der Zuluftheizung zurückzuführen ist.

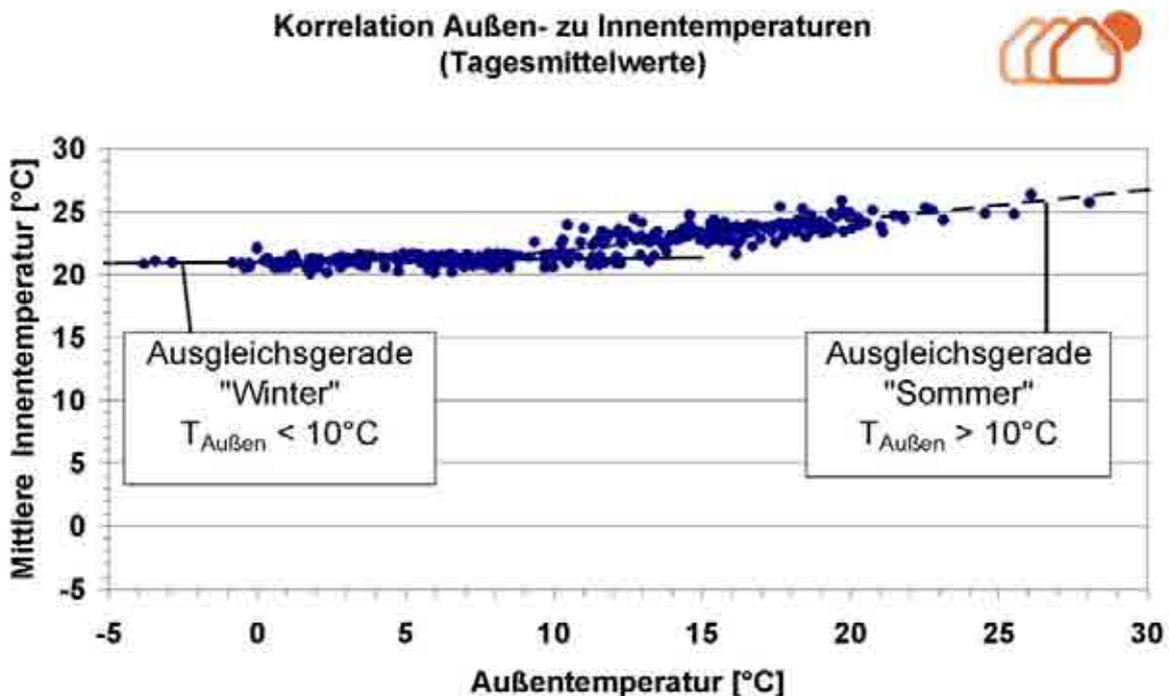


Abb. 20: Korrelation zwischen Außentemperatur und Raumlufttemperatur (Tagesmittelwerte) im ersten Messjahr.

Die höheren Außentemperaturen (über 10 °C Außentemperaturmittelwert) sind in Abb. 20 mit einer separaten Ausgleichsgerade („Sommer“) dargestellt. Diese Gerade zeigt, dass im Sommer die Verhältnisse grundlegend anders sind: Da die Häuser keinerlei aktive Kühlung aufweisen, verhalten sich die Räume im wesentlichen thermisch passiv; durch die Speichermasse und durch Nutzereingriffe wie Fensteröffnen ergibt sich aber auch hier eine gewisse Dämpfung der Schwankungen der Außentemperatur: In der Sommerperiode (1.6.2000 bis 30.9.2000) beträgt das $\Delta\vartheta_a$ der Tagesmittelwerte der Außenlufttemperatur 18,8 K (9,3 bis 28,1°C). Im Innenraum bewegen sich die Temperaturen dabei aber nur zwischen 22,3 und 26,4 °C; mithin beträgt $\Delta\vartheta_i$ 4,1 K. Definiert man ein Temperaturamplitudenverhältnis für das ganze

Haus, so beträgt es im Sommer 2000 etwa 22 %. Die Häuser wirken somit passiv ausgleichend für das Innenklima.

13.2.1 Typische Winterwochen

In der typischen kalten und sonnigen Winterwoche (20.1.2000 bis 27.1.2000, siehe Abb. 21) liegen die Außenlufttemperaturen zwischen $-6,5\text{ °C}$ und $+4,9\text{ °C}$. Die Raumlufttemperaturen liegen in dieser Woche im Haus zwischen $20,2$ und $22,8\text{ °C}$. Es zeigt sich, dass sich der Einfluss der Solarstrahlungen messbar nur ab Leistungen über 150 W/m^2 auf die Raumlufttemperatur - und dann auch nur auf die im EG - auswirkt (23. bis 25.1.2000).

Die hohe Zeitkonstante macht sich auch bei der Betrachtung der höchsten Heizleistungen, welche am 21. und 22.1.2000 auftreten ($15,8$ und $16,5\text{ W/m}^2$) bemerkbar: Die Heizleistungen an diesen beiden Tagen gehen **nicht** auf das Absinken der Außenlufttemperatur von 5 auf bis 0 °C zurück, sie erklären sich durch einen Bewohnereingriff in Form einer höheren Sollwerteneinstellung am Thermostat. Die hohen Heizleistungen erzeugen eine Raumlufttemperaturerhöhung im Obergeschoss um $0,4$ bzw. $1,2\text{ K}$. Im EG ist am 21.1.2000 eine Temperaturerhöhung um $0,4\text{ K}$ sichtbar. Eine genauere Untersuchung dieser Einflüsse ist einer separaten Veröffentlichung zu entnehmen [Kaufmann 2001].

Als typische bewölkte (trübe) Winterwoche wurde die Zeit vom 12.1. bis zum 19.1.2000 ermittelt und in Abb. 22 dargestellt. Hier liegen die Raumlufttemperaturen zwischen $19,8$ und $22,4\text{ °C}$. Die Solarstrahlung liegt an drei aufeinanderfolgenden Tagen immer unter 50 W/m^2 . Die Heizleistung steigt an diesen Tagen auf Werte bis über 15 W/m^2 an. Die Raumlufttemperatur, insbesondere im OG, steigt dabei um $2,6\text{ K}$, auf maximal $22,4\text{ °C}$ an.

Deutlich an der Diskussion zu Abb. 21 und Abb. 22 wird, dass für Passivhäuser die heizlastbestimmende Zeit **nicht** unbedingt klare kalte Wintertage sind, sondern möglicherweise die trüben Tage mit Außenlufttemperaturen um Null Grad. An kalten klaren Tagen liegt beim mitteleuropäischen Klima aufgrund der geringen Bewölkung tagsüber auch ein größeres Strahlungsangebot vor. Dieses sorgt für erhöhte passive Energieeinträge, welche die Heizleistung entsprechend reduzieren. Diese Zusammenhänge bestätigt die Analyse in [Bisanz 1999].

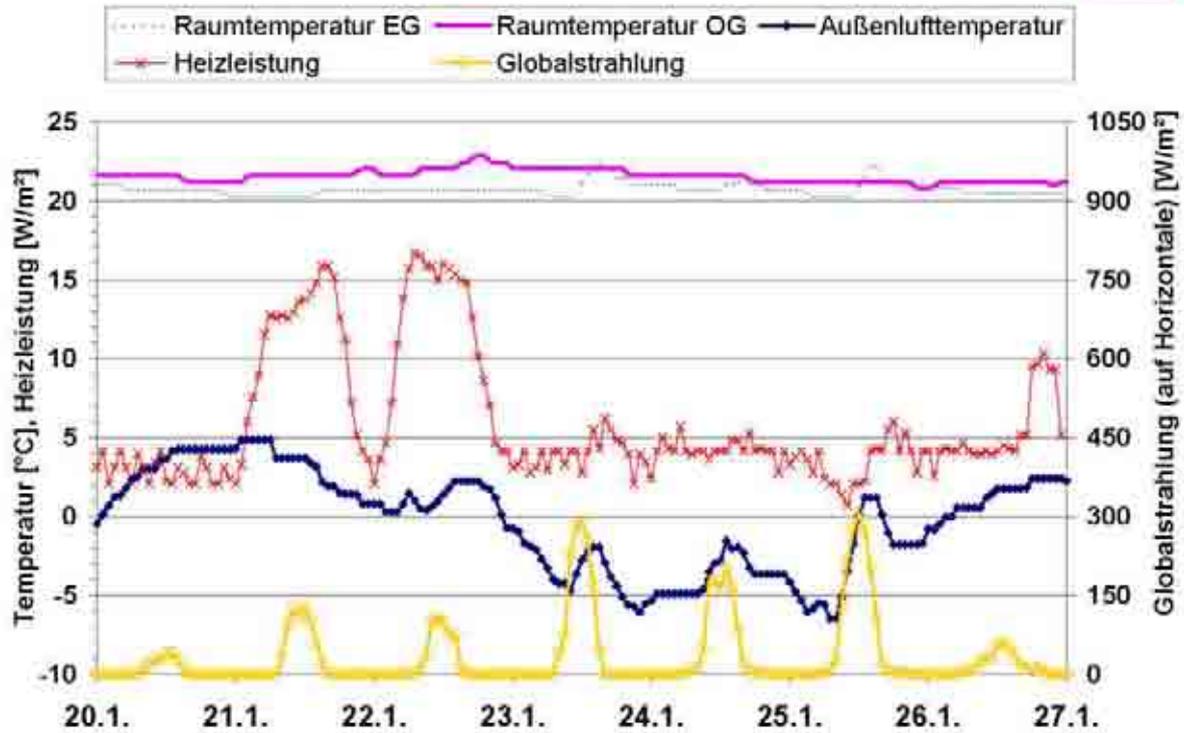
Projekt 1: Eine typische sonnige und kalte Winterwoche


Abb. 21: Typische sonnige kalte Woche im Winter der ersten Heizperiode 1999/2000

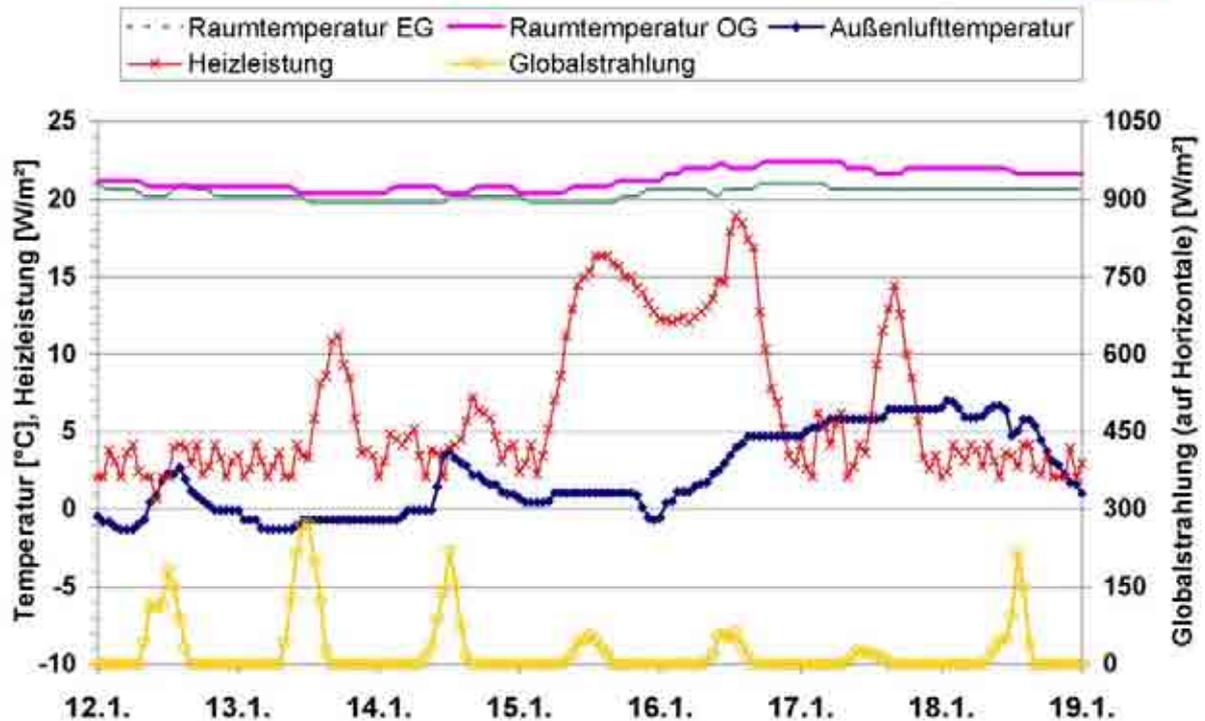
Projekt 1: Eine typische, bewölkte Winterwoche


Abb. 22: Typische moderat bewölkte Woche im Winter der ersten Heizperiode 1999/2000

13.2.2 Typische Sommerwochen

Zur Untersuchung einer typischen Sommerwoche ist das gleiche Haus betrachtet worden. Die typische Sommerwoche (Abb. 23) zeigt Außentemperaturen in einer Bandbreite zwischen 13,2 und 27,7 °C mit typischen Mittagsspitzen und Nacht-senken. Die Raumlufttemperaturen in EG und OG bewegen sich zwischen 23,1 und 25,1 °C. Bei der Solarstrahlung gibt es einen eher bedeckten strahlungsärmeren Tag mit maximal nur 265 W/m² und strahlungsreiche Tage mit einem Spitzenwert bis 770 W/m². Die Außenlufttemperaturspitzen bzw. die Strahlungsspitzen jeweils um die Mittagszeit finden sich in weit geringen Raumluft-Temperaturanhebungen (bis 1,3 K) wieder.

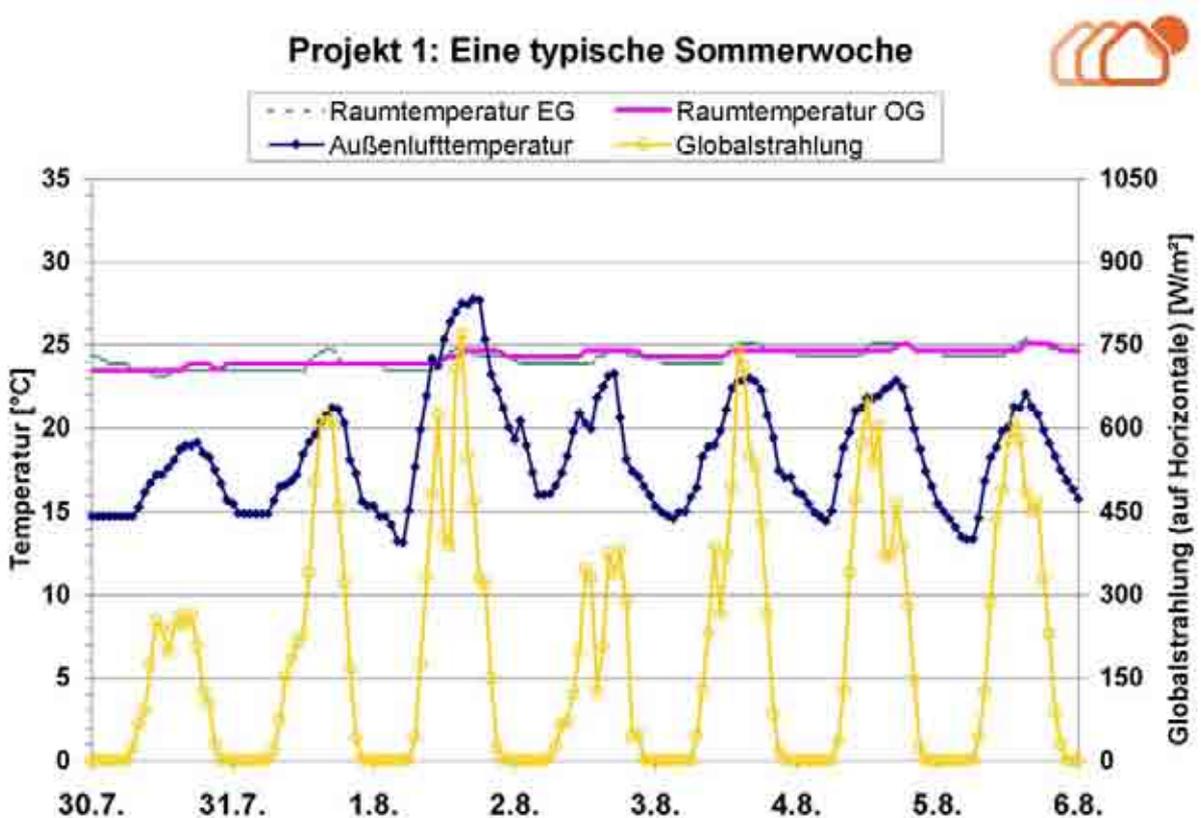


Abb. 23: Typische Woche im Sommer 2000 in einem der 32 Passivhäuser.

Aufschlussreich bzgl. des sommerlichen Innenklimas ist es, den Zeitraum einer Hitzeperiode zu untersuchen. Im Messzeitraum traten die höchsten Außenlufttemperaturen in der Zeit vom 17. Juni bis zum 23. Juni 2000 auf. Die Temperaturverläufe und Strahlungsverläufe in dieser auch sehr strahlungsreichen Zeit des bisher untersuchten Hauses zeigt Abb. 24.

Der Außenlufttemperaturgang zeigt den typischen Verlauf für eine mitteleuropäische sommerliche Hitzeperiode. Die Tagesmaxima der Außenlufttemperatur betragen vom 18. bis zum 20. Juni 2000 jeweils 27,9 °C, 33,2 °C und 34,5 °C.

Im Haus ist von dem sehr starken Tagesgang der Außenlufttemperatur praktisch nichts zu spüren. Ein geringer Tagesgang in den Häusern ist auf die Einstrahlung und auf Nutzungsaktivitäten zurückzuführen. Typisch für den Temperaturgang in Passivhäusern im Sommer ist der allmähliche Anstieg der Innentemperatur im Verlauf der Hitzeperiode in vier Tagen. Die Raumlufttemperatur im OG stieg dabei um fast 3 Kelvin (von 24,3 auf 27,1 °C) innerhalb von 3 Tagen an.

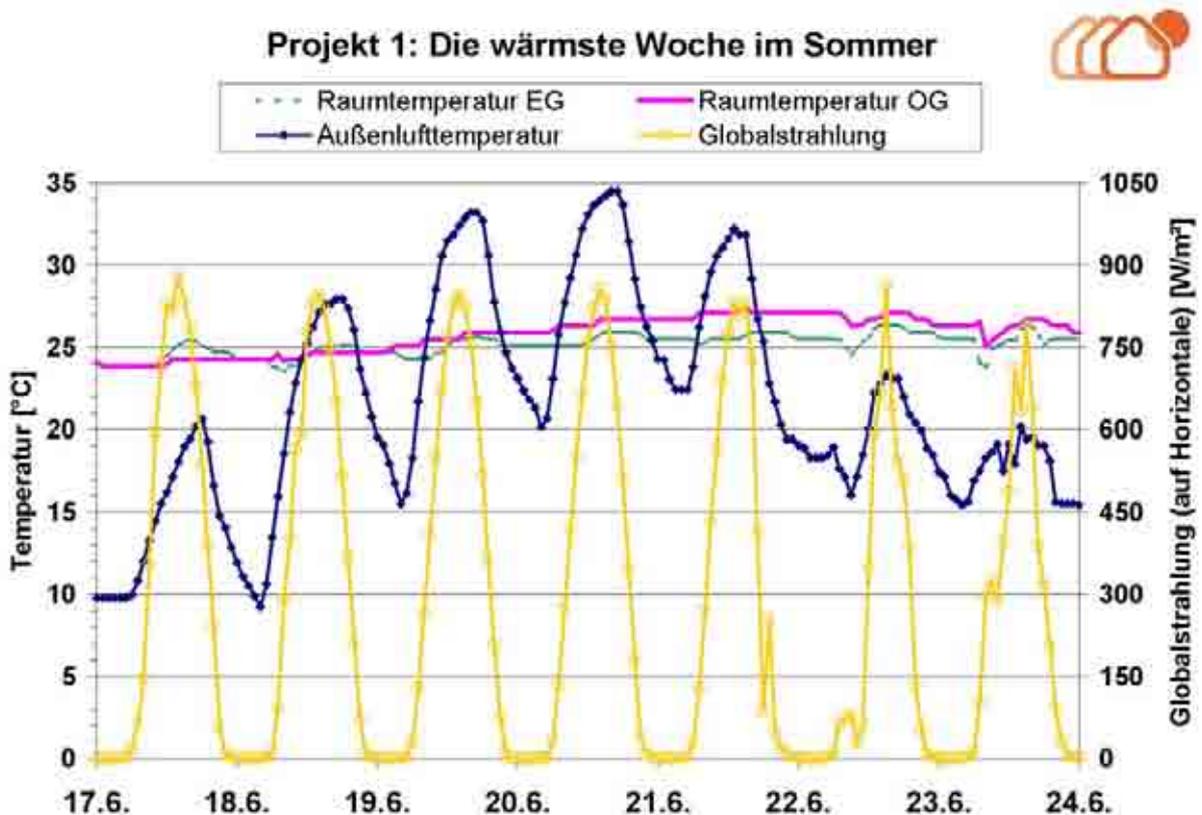


Abb. 24: Wärmste Woche im Sommer 2000 (Hitzeperiode) in einem der 32 Passivhäuser.

Nach dem Höhepunkt der Hitzeperiode haben die Raumlufttemperaturen ihr Maximum von 27,1 (OG) bzw. 25,5 °C (EG) erreicht.

Es wurde festgestellt, dass die Temperaturen im „kühlsten Haus“ in der Hitzeperiode 2 bis 4 Kelvin unter dem „wärmsten Haus“ in diesem Zeitraum liegen (hier werden nur bewohnte Häuser betrachtet). Die Untersuchung zeigte, dass dieser Unterschied allein durch das Nutzerverhalten bedingt ist. Er geht auf die beschriebenen Aktivitäten Nachtlüftung und Verschattung zurück. Zum Erreichen von niedrigen Temperaturen in einer Hitzeperiode ist es darüber hinaus zweckmäßig, tagsüber die Fenster möglichst geschlossen zu halten.

13.3 Heizlasten

Zur Einordnung der Heizleistungen ist die Bestimmung der theoretische Heizgeraden für die Passivhäuser im projektierten Dämmstandard hilfreich. Die Gerade stellt die Abhängigkeit der Heizleistung von der Außentemperatur dar, die sich beim projektierten Standard ergeben müsste. Ohne Solarstrahlung liegen alle Heizleistungen **theoretisch genau auf dieser Geraden**. Durch die Wärmegewinne der passiv genutzten Solarstrahlung müssten die gemessenen Heizleistungswerte dann regelmäßig unterhalb dieser Geraden liegen.

Der Verlauf einer solchen Heizkurve richtet sich neben dem Dämmstandard und der Annahme zu den internen Gewinnen ($2,1 \text{ W/m}^2$) auch nach der angesetzten Innentemperatur. Hier werden die gemessenen Werte aller dauerhaft bewohnten Passivhäuser in der Zeit vom 8.11.1999 bis zum 18.4.2000 verwendet. In diesen Häusern lag die **mittlere Innentemperatur** bei **$21,1 \text{ }^\circ\text{C}$** .

Die Heizgerade in Abb. 25 weist für die Häuser eine Heizgrenztemperatur von ca. $16 \text{ }^\circ\text{C}$ (Verlängerung der Geraden bis zur Heizleistung „0“ W/m^2 , also bis zum Durchgang durch die Abszisse) auf. Die Messpunkte, die tagesmittleren Heizleistungen der ständig bewohnten Häuser, zeigen allerdings, dass etwa ab Temperaturen über $11,5 \text{ }^\circ\text{C}$ gar nicht mehr geheizt wurde. Die eingetragenen Messpunkte zeigen, dass die maximale tatsächliche Heizlast $8,8 \text{ W/m}^2$ beträgt. Dieser Wert ist aber als Ausreißer zu werten. Die tagesmittleren Heizleistungen liegen regelmäßig deutlich unter 7 W/m^2 . Das PHPP-Heizlast-Berechnungsblatt weist für das repräsentative Haus der Siedlung eine maximale Heizlast von $7,1 \text{ W/m}^2$ aus. Sichtbar wird auch, dass die höchsten Heizleistungen nicht an den kältesten Tagen auftreten.

In der zweiten ausgewerteten Heizperiode 2000/2001 wird die rechnerische Heizlastobergrenze von $7,1 \text{ W/m}^2$ von den gemessenen tagesmittlere Heizlasten in keinem Fall überschritten (Abb. 26). Es liegen auch weniger tagesmittlere Heizleistungen über der theoretischen Heizkurve als in der vorausgehenden Heizperiode.

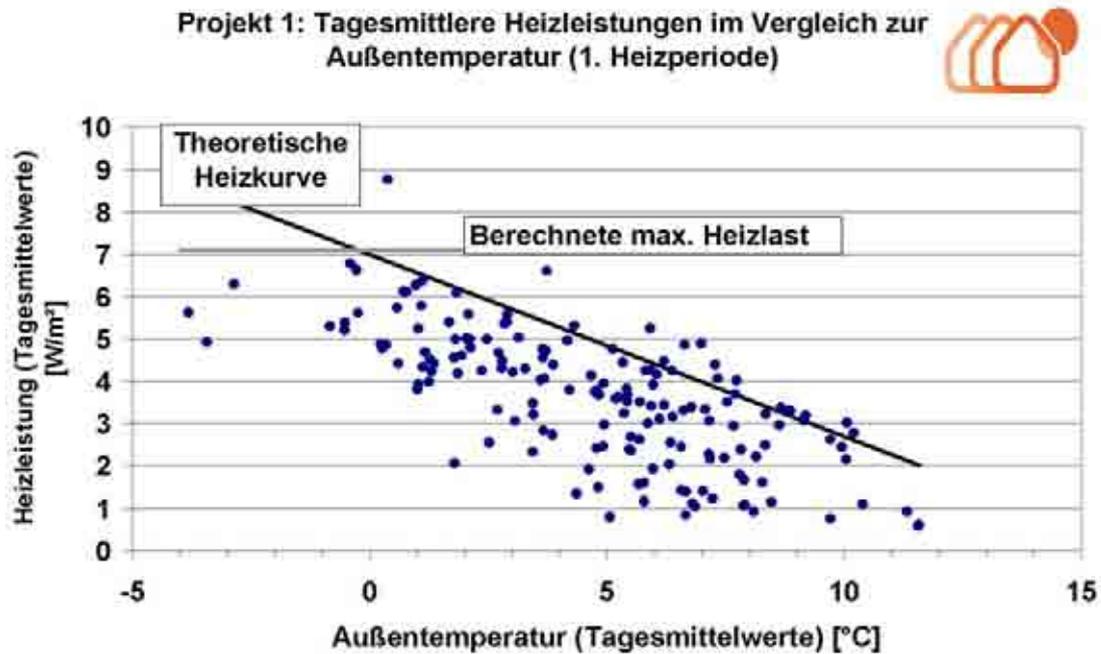


Abb. 25: Theoretische Heizgerade und tagesmittlere Heizleistungen im Vergleich zur tagesmittleren Außentemperatur (alles nur bewohnte Häuser) im Zeitraum der nach CEPHEUS Vorgaben berechneten Heizzeit (08.11.1999 bis 18.04.2000). Die nach PHPP berechnete Heizlast für das repräsentative Haus liegt bei 7,1 W/m².

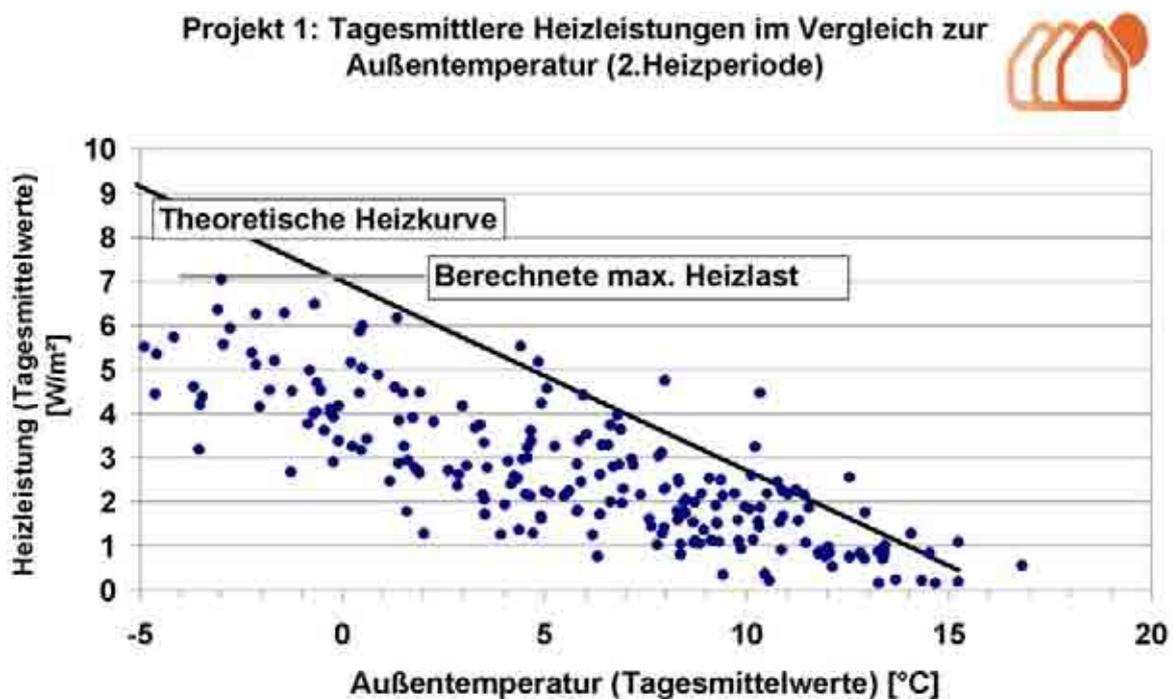


Abb. 26: Theoretische Heizgerade und tagesmittlere Heizleistungen im Vergleich zur tagesmittleren Außentemperatur (ausschließlich bewohnte Häuser) in der **zweiten Heizperiode** (01.10.2000 bis 30.04.2001). Die nach PHPP berechnete Heizlast für das repräsentative Haus liegt bei 7,1 W/m² und wurde gemäß der Messungen nicht überschritten.

14 Projektspezifische Messdatenauswertung

14.1 Klimadatenvergleich

Zur Einschätzung der Klimabedingungen im ersten Messjahr (1999/2000) sind die gemessenen Klimadaten mit Referenzdaten verglichen worden. Die Referenzdaten liegen der Simulation der Gebäude in Hannover-Kronsberg zugrunde [Schnieders 1998]. Sie stellen das typische Klima am Standort Hannover dar.

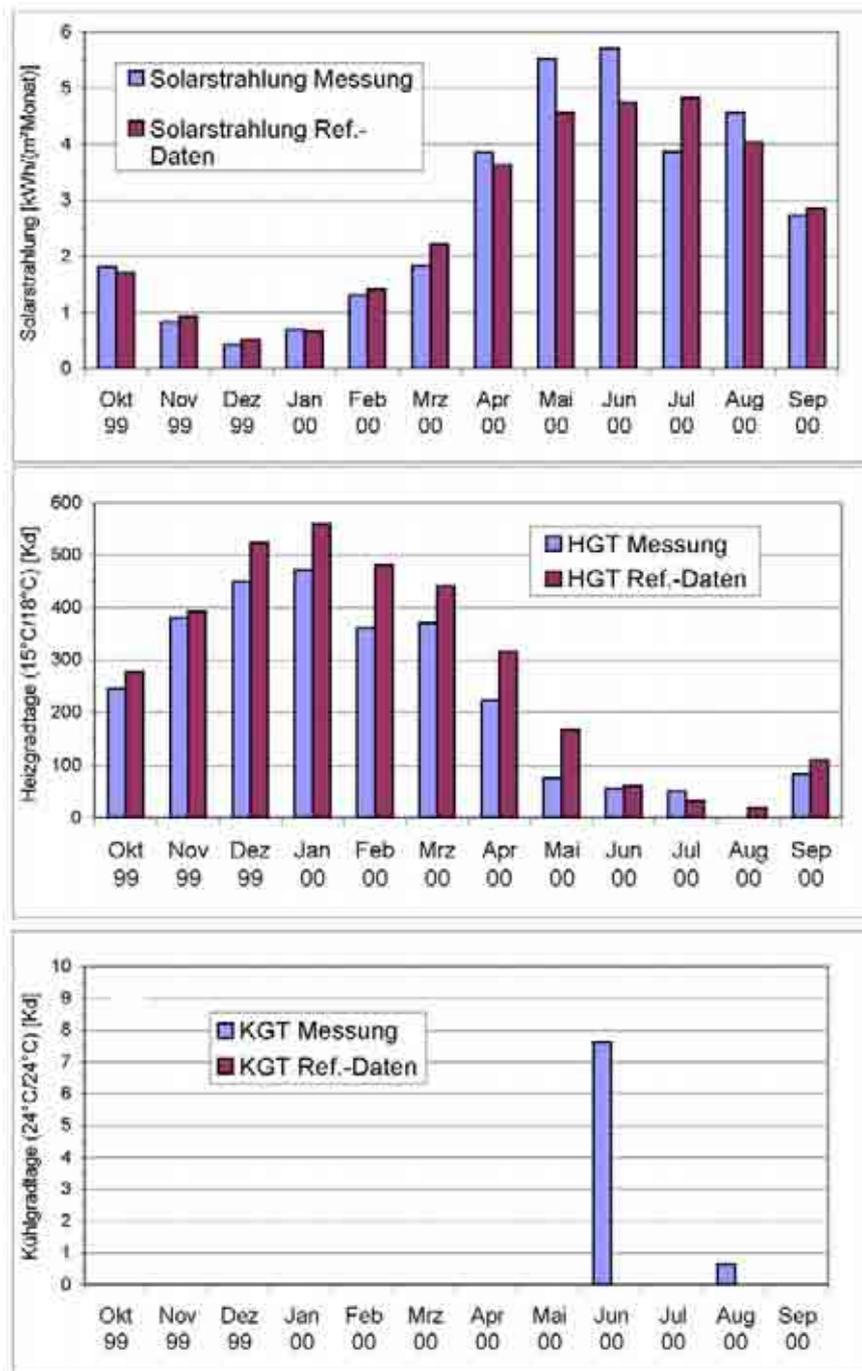


Abb. 27: Vergleich zwischen den Messdaten des ersten Jahres und den Referenzdaten, welche der Simulation zugrunde liegen [Schnieders 98]. Oben: Solarstrahlung, Mitte: Heiz- (HGT), Unten: Kühlgradtagen (KGT) (HGT: Heizgrenztemperatur 15 °C, Innentemperatur 18 °C, KGT: Kühlgrenztemperatur 24 °C, Innentemperatur 24 °C).

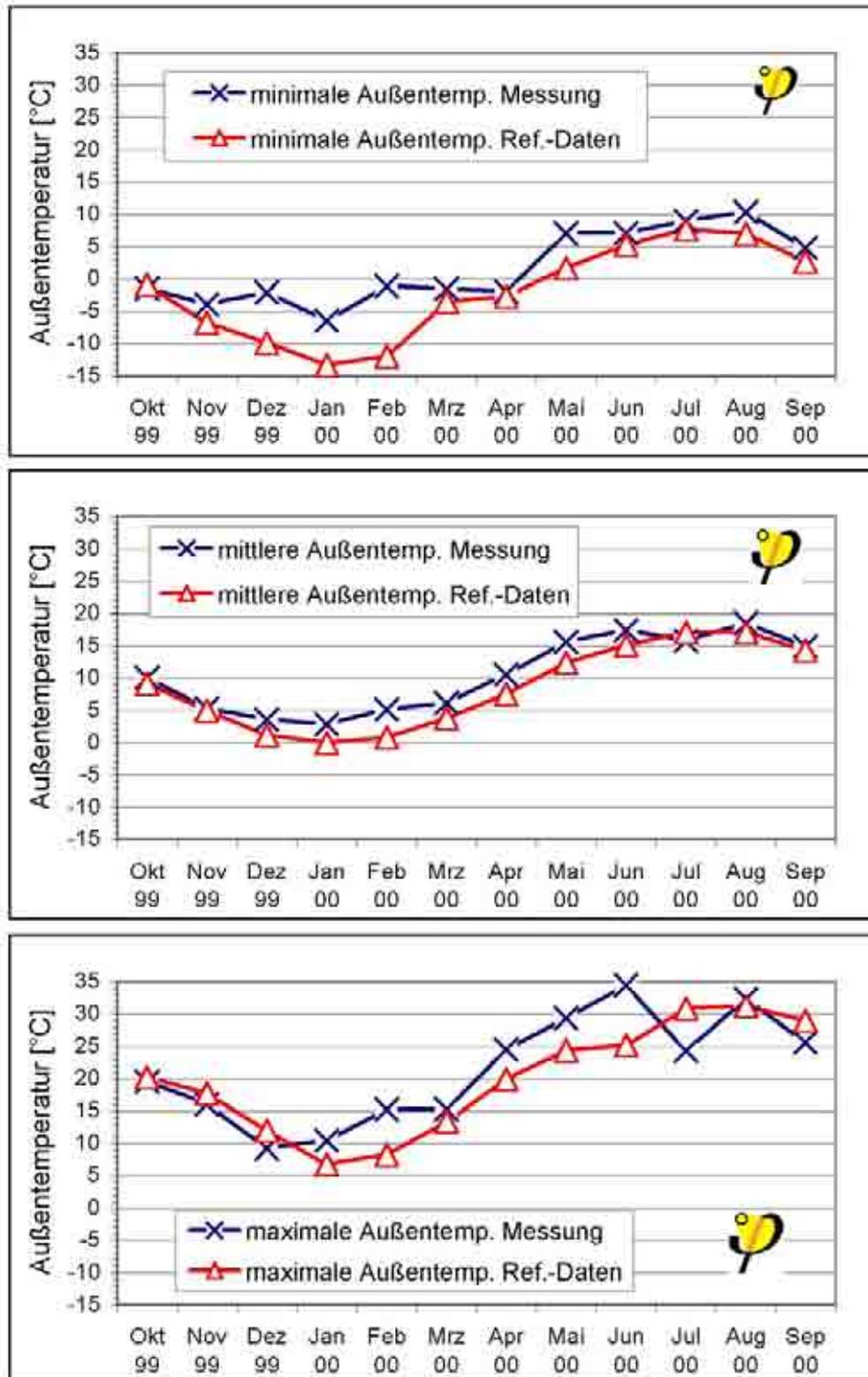


Abb. 28: Klimadatenvergleich des ersten Messjahres der minimalen, mittleren und maximalen Temperaturen (Monatswerte aus Stundendaten) zwischen den Messdaten und den Referenzdaten, welche der Simulation zugrunde liegen [Schnieders 98].

14.2 Kaltwasserverbrauch

Der gesamte Wasserverbrauch eines jeden Hauses wird jeweils mit einem Wasserzähler erfasst. Die Kaltwassermengen errechnen sich aus diesen Gesamtwassermengen abzüglich der entsprechenden Warmwassermengen (Unterzähler). Die Auswertung der Verbräuche des gesamten ersten Messjahres der 22 dauerhaft bewohnten Häuser zeigt Abb. 29.

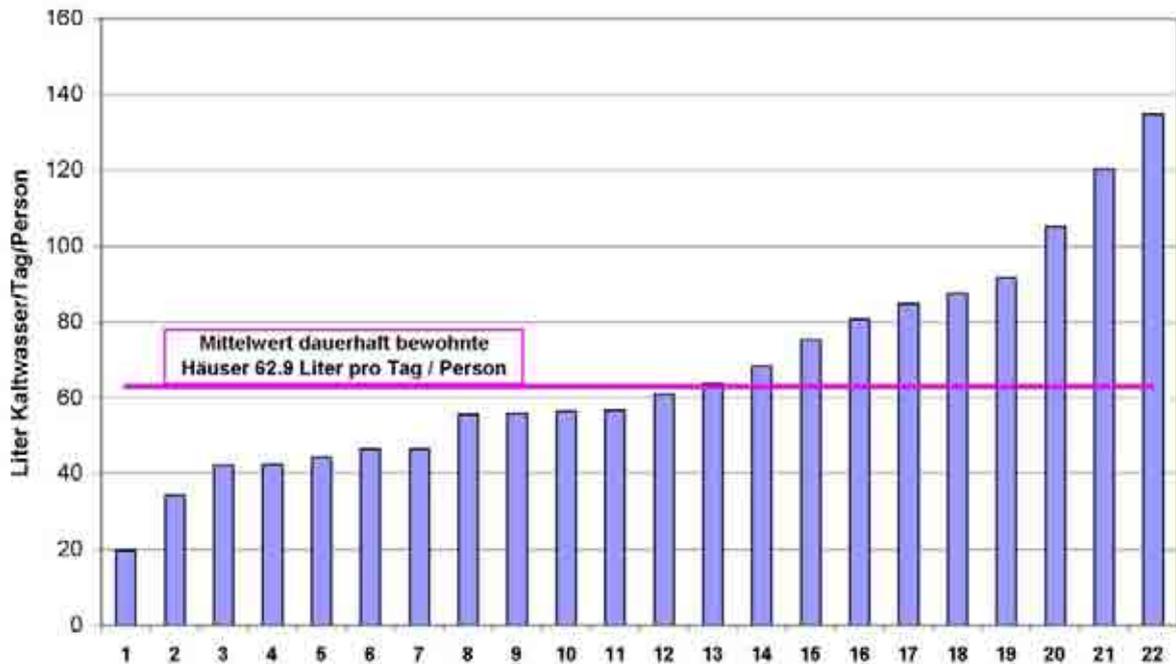


Abb. 29: Durchschnittliche Kaltwasserverbrauchsmenge pro Tag und Person in Litern vom 01. Oktober 1999 bis zum 30. September 2000 der 22 dauerhaft bewohnten Häuser.

Für die dauerhaft bewohnten Häuser ergibt sich ein **Tagesmittelwert von 62,9 Litern pro Person** mit einer Streuung von 20 bis zu 135 Litern/Tag und Person. Der Kaltwasserverbrauch pro Haus ergibt sich für den gleichen Zeitraum zu 200,6 Liter pro Haus und Tag.

14.3 Warmwasser

Für den Bereich Warmwasser muss in diesem Abschnitt die Warmwasserverbrauchsmenge und der Fernwärmeverbrauch für die Warmwasserversorgung unterschieden werden. Bereits in Abb. 9 waren die monatlichen Summen der Fernwärmebezüge für die Warmwassererwärmung grafisch dargestellt worden. Diese werden hier hausweise dokumentiert.

14.3.1 Warmwasserverbrauchsmenge

Unabhängig von der eingesetzten Energiequelle (Fernwärme oder Solaranlage) werden die Warmwasserverbräuche mit separaten Wasserzählern gemessen. Die

Auswertung für das erste Messjahr (1.10.1999 bis 30.09.2000) ergibt eine durchschnittliche tägliche Verbrauchsmenge pro Person von 31,6 Litern (nur dauerhaft bewohnte Häuser). Für jedes dauerhaft bewohnte Haus ergibt sich ein mittlerer Tagesverbrauch von 100,5 Litern.

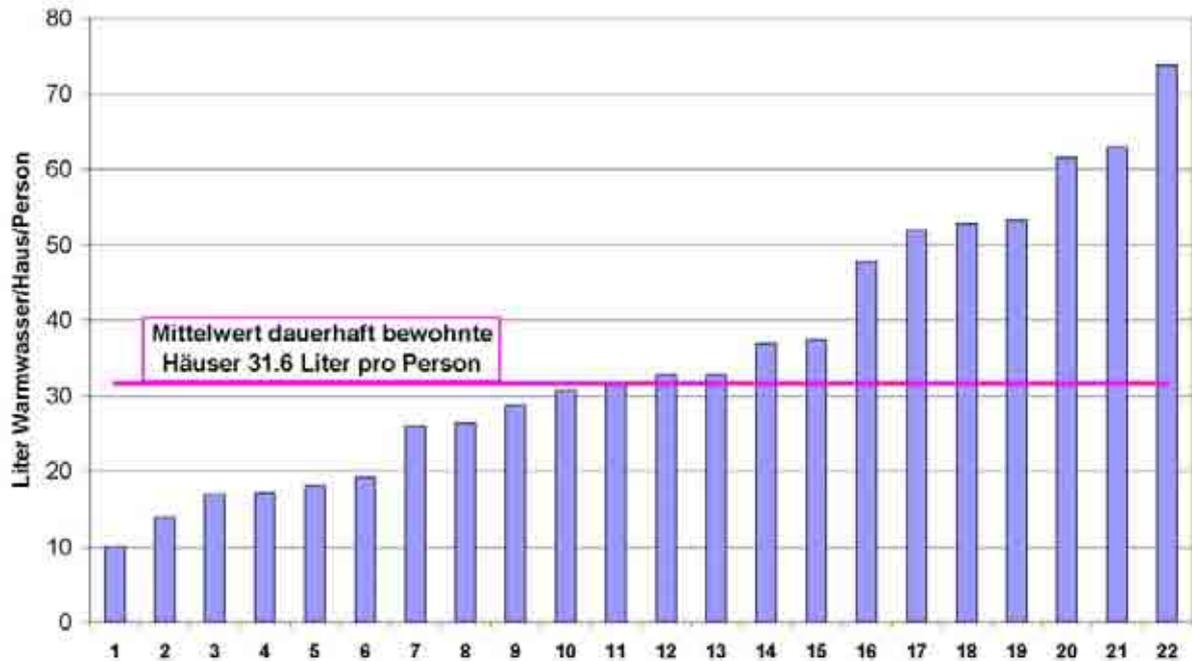


Abb. 30: Durchschnittliche Warmwasserverbrauchsmenge pro Tag in Litern vom 1. Oktober 1999 bis zum 30. September 2000 der 22 dauerhaft bewohnten Häuser.

In Abb. 30 ist eine breite Streuung in den dauerhaft bewohnten Häusern von 10 bis zu 74 Liter pro Tag und Person festzustellen.

Die Auswertung der Temperaturmessung nach dem Kaltwasserbeimischer ergab im intensiv gemessenen Haus mittlere Warmwassertemperaturen von etwa 46 °C (gesamtes Jahr). Dieser Wert kann allerdings in den Häusern individuell eingestellt werden. Der Durchschnittswert der Zapftemperatur über alle Häuser ist daher nicht genau bekannt.

Im PHPP [PHPP] wird ein Verbrauchsdurchschnitt Warmwasser von 25 Litern pro Tag und Person bei einer Wassertemperatur von 60 °C angesetzt. Setzen wir den Temperaturmesswert aus dem intensiv gemessenen Haus für alle bewohnten Häuser an, entspricht der Verbrauch bei einer Zapftemperatur von 46 °C einem mittleren Verbrauch bei 60 °C von etwa 22,8 Litern pro Person und Tag. Der in der Passivhaussiedlung gemessenen mittlere Verbrauchswerte für Warmwasser ist um knapp 9 % geringer als der Projektierungsansatz.

14.3.2 Fernwärmeverbrauch zur Warmwasserversorgung

Die Passivhäuser in Hannover-Kronsberg werden über die Fernwärmeleitung mit Energie zur Raumheizung und zur Trinkwarmwasserbereitung versorgt. Einer der beiden WMZ eines jeden Hauses summiert nur die Wärmeverbräuche der Warmwasserbereitung durch die Fernwärmeversorgung auf. Dabei handelt es sich nicht um die gesamte Energiemenge, die zur Warmwasseraufbereitung eingesetzt wird, da in jedem Haus ein Teil über die hauseigene solarthermische Anlage erzeugt wird.

Bei der hausweisen Darstellung der spezifischen Fernwärmeverbräuche zur Warmwasserbereitung der dauerhaft bewohnten Häuser im ersten Messjahr findet sich wie zu erwarten eine hohe nutzungsbedingte Streuung (Abb. 31). Der Jahresmittelwert liegt bei 9,2 kWh/(m²a).

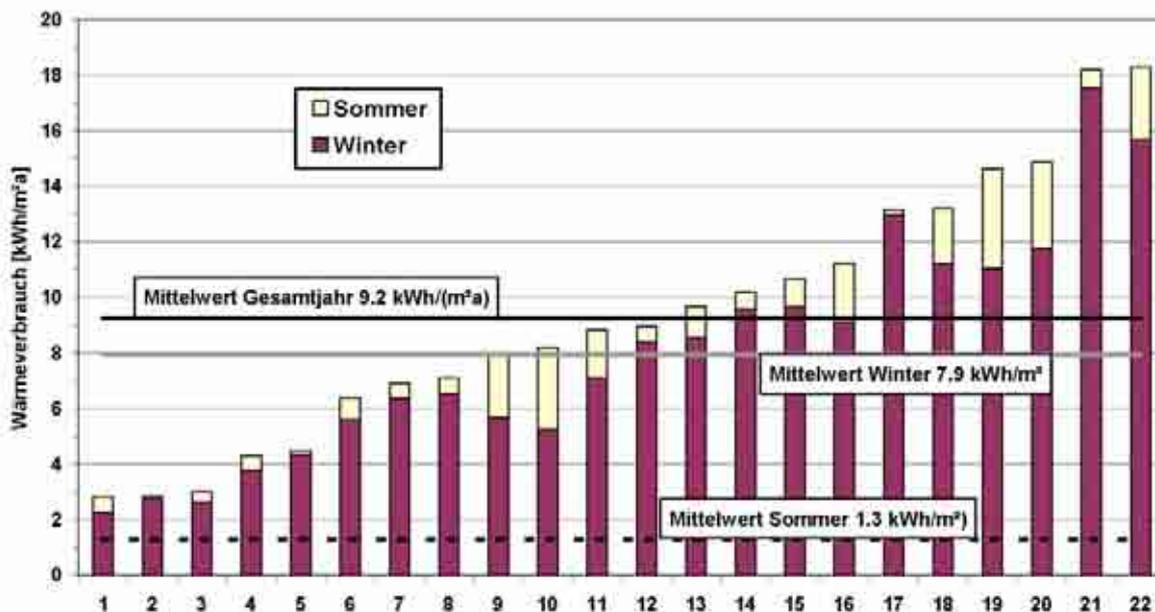


Abb. 31: Spezifischer Fernwärmeverbrauch zur Warmwasserbereitung für das erste Messjahr (01.10.1999 bis 30.09.2000) der 22 dauerhaft bewohnten Passivhäuser unterteilt in Winter- (01.10.1999 bis 30.04.2000) und Sommerzeitraum (01.05.2000 bis 30.09.2000).

Einige Häuser unterbrechen im Sommer für lange Zeit komplett ihre Fernwärmeversorgung. Dadurch wird der Brauchwarmwasserspeicher in dieser Zeit ausschließlich über die Solaranlage erwärmt, dies zeigt sich im Diagramm deutlich.

14.3.3 Wärmeabgabe der Verteilungen: teilweise Nutzbarkeit im Winter

Die hausweisen Gesamt-WMZ erfassen ausschließlich die individuellen Wärmeverbräuche. Diese WMZ sind unmittelbar am Abgang der jeweiligen Hausanlage von der im Dachgeschoss verlegten internen Fernwärmeverteilung platziert. Diese Zähler erfassen die Wärmeabgabe der internen Fernwärmeverteilung und der Wärme-

übergabe, der Pufferspeicher in den Heizhäusern und der erdverlegten Verteilungen **nicht** mit.

Demgegenüber erfassen die beiden zentralen Wärmemengenzähler an den jeweiligen Übergabestationen der Stadtwerke Hannover in den Heizhäusern (in Zeile 9/10 sowie in Zeile 13/14) die gesamte aus dem Fernwärmenetz bezogene Wärme, inkl. der oben genannten Wärmeabgabe von Leitungen und Speichern. Es ergaben sich für den Zeitraum vom 04.10.1999 bis 04.10.2000 folgende Werte:

- gesamter Fernwärmeverbrauch Zeilen 9+10: 61.430 kWh
- gesamter Fernwärmeverbrauch Zeilen 13+14: 56.311 kWh.

Daraus ermittelt man einen umgelegten Fernwärmeverbrauch durchschnittlich je Haus von 3680 kWh/a oder, bezogen auf die Wohnfläche, von

32,9 kWh/(m²a) Fernwärmeverbrauch 1999/2000.

Von diesem Verbrauch können die mit den Einzelzählern der Häuser ermittelten Verbräuche für Heizung und Warmwasser abgezogen werden:

- WMZ Heizung Winter+Sommer alle Häuser 16,0 kWh/(m²a)
- WMZ Warmwasser ganzes Jahr alle Häuser 7,7 kWh/(m²a).

Bei den über die Summe dieser Einzelverbräuche (23,7 kWh/(m²a)) hinausgehenden Werten der zentralen Zähler handelt es sich:

- zum einen um die Wärmeabgabe des Verteilnetzes und der Haustechnik in den Technikhäusern und
- um den Fehlerbetrag, der durch die Anlaufgrenzen der individuellen Wärmezähler entstehen kann.

Wie wir aus den nachfolgenden Untersuchungen sehen werden, sind die Anlauffehler gemäß dem zweiten eben aufgeführten Punkt offenbar klein; die Differenzen zwischen der Summe der Einzelzähler und dem genaueren Wert der beiden zentralen Zähler lassen sich nämlich durch die Wärmeabgabe der Verteilung vollständig erklären und es gibt keinen Grund zu der Annahme, dass die Verteilung deutlich weniger Wärme abgibt, als rechnerisch bestimmt.

Auch die Wärmeabgabe der Verteilungen ist nicht vollständig als Wärmeverlust anzusehen. Letzteres ist nur dann der Fall, wenn

- die technischen Systeme sich außerhalb der beheizten Gebäudehülle befinden (das ist z.B. für die erdreichverlegten Anbindungen der Hauszeilen 10 und 14 an die Heizhäuser der Fall) und
- wenn die Wärmeabgabe innerhalb der beheizten Gebäudehülle nicht nutzbar ist.

Verlaufen die Leitungen innerhalb der beheizten Gebäudehülle, so kommt die abgegebene Wärme den inneren Wärmequellen zu gute und ist zumindest teilweise nutzbar.

a) Verluste der erdverlegten Leitungen

Bei einem längenbezogenen Wärmeverlustkoeffizienten der erdverlegten Leitungen von $0,16 \text{ W}/(\text{mK})$ und einer Gesamtlänge dieser Leitungen von 122 m ergibt sich rechnerisch ein Wärmeverlust an das Erdreich von insgesamt 6900 kWh/a oder $1,9 (\pm 0,3) \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ wohnflächenbezogen.

b) Verluste der beiden Pufferspeicher

Bei einem Wärmeverlustkoeffizienten der in den Heizhäusern aufgestellten Speicher mit je 500 Liter Inhalt von 10 W/K ergibt sich ein Speicherwärmeverlust von 3680 kWh/a oder $1,0 (\pm 0,2) \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ wohnflächenbezogen.

c) Wärmeabgabe der in den Häusern (Dachgeschoss) verlegten zentralen Verteilleitungen

Bei einem längenbezogenen Wärmeverlustkoeffizienten der in den Dachgeschossen verlegten zentralen Wärmeverteilleitungen von $0,15 \text{ W}/(\text{mK})$ und einer Gesamtlänge dieser Leitungen von 416 m ergibt sich rechnerisch eine Wärmeabgabe in die Dachgeschosse von insgesamt 19.800 kWh/a oder $5,5 (\pm 1,2) \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ wohnflächenbezogen.

Summe der rechnerischen Wärmeabgaben der technischen Systeme

Die Summe der drei rechnerisch erwarteten Wärmeabgaben aus a) bis c) ergibt insgesamt $8,5 (\pm 1,4) \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Der Differenzbetrag zwischen den zentralen Zählern und der Summe der Einzelzähler beträgt andererseits $9,3 (\pm 1) \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Der rechnerisch ermittelte und der Differenzwert aus den Messungen stimmen im Rahmen der hier möglichen Genauigkeit überein. Für die folgende Darstellung gehen wir von den rechnerisch ermittelten Werten nach a) und b) aus und verwenden für die Wärmeabgabe der Verteilleitungen in den Häusern den Differenzbetrag der gemessenen Technikverluste minus Beträge nach a) und b); damit ergibt sich innerhalb der Fehlergrenzen für die Wärmeabgabe der Verteilleitungen in den Häusern $6,4 (\pm 1,5) \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Diese Wärmeabgabe erfolgt mit etwa $5,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ in der Zeit vom 1. Oktober 1999 bis 1. Mai 2000, der Rest wird im Sommer abgegeben.

Nutzbare Wärmeabgabe der in den Häusern (Dachgeschoss) verlegten zentralen Verteilleitungen

Die im letzten Abschnitt behandelte Wärmeabgabe der internen zentralen Verteilleitungen in der Hauptheizzeit ist zumindest teilweise als Beitrag zu den inneren Wärmequellen nutzbar. Wir haben den nutzbaren Anteil dieser Wärmeabgabe dadurch bestimmt, dass im Rechenverfahren nach EN 832 einmal ohne diese Wärmeabgabe (Basisfall) und einmal einschließlich dieser Wärmeabgabe als innere Quelle gerechnet wurde. Es ergab sich daraus ein marginaler Ausnutzungsgrad für die Leitungswärmeabgabe von 72 %. Das bedeutet, dass von den im Zeitraum vom 1. Oktober bis 1. Mai abgegebenen Wärmemengen der im Dachgeschoss verlegten Rohrleitungen durchschnittlich noch einmal $3,9 (\pm 1,5) \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ als Beitrag zur Heizwärme nutzbar sind. Damit ergibt sich für den Verbrauch der 32 Passivhäuser auf dem Kronsberg inkl. der hier ermittelten nutzbaren Wärmeabgabe der Verteilleitungen ein Wert von $19,9 (\pm 2,5) \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

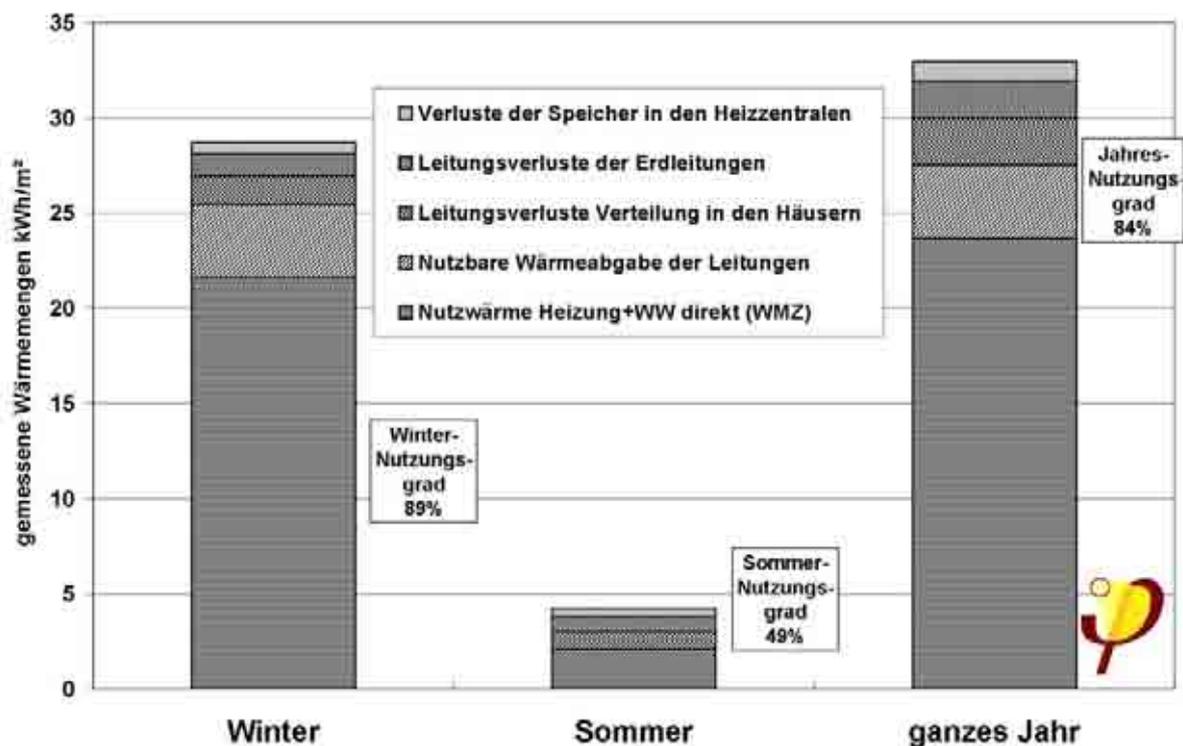


Abb. 32: Die Aufteilung des gesamten Fernwärmeverbrauches auf Nutzwärme (unten), nutzbare Wärmeabgabe der inneren Verteilleitungen (diagonal schraffiert) und Leitungs- sowie Speicherverluste (drei obere Säulen) für alle 32 Passivhäuser (Messzyklus 4.10.1999 bis 4.10.2000).

Der gesamte Endenergieverbrauch an Fernwärme lag im ersten Jahr bei $32,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ für alle, bzw. bei $34,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ für die 22 ständig bewohnten Häuser (der projektierte Wert liegt bei $32,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$). Die etwas höheren Werte für den Jahresheizwärmeverbrauch werden also durch geringere Fernwärmeverbräuche bei der Warmwasserbereitung ausgeglichen.

14.4 Stromverbrauch

Bei der Auswertung der Stromverbräuche werden der Haushalts- und der Gemeinschaftsstrom getrennt ausgewertet.

14.4.1 Stromeffizienz Haushaltsstrom

Zur Realisierung des Passivhausstandards gehört nicht nur eine möglichst hochgedämmte, wärmebrückenfreie und luftdichte Gebäudehülle, sondern ein effizienter Umgang mit allen Energieträgern. Dazu gehört neben der Heizenergie (hier Fernwärme) auch der elektrische Haushaltsstrom. Dieser stellt die höchstwertige Energieform dar, hat einen besonders hohen Primärenergieeinsatz und sollte daher besonders sparsam genutzt werden.

Für die Erwerber der Passivhäuser wurde daher im Rahmen von CEPHEUS eine spezielle Stromsparberatung durch Rasch&Partner angeboten. Diese Beratung war verbunden mit einer Berechnung des zu erwartenden Stromverbrauches mit den ursprünglich in den Haushalten eingesetzten Geräten ("Altgeräte"), einer Bestimmung der Wirtschaftlichkeit für die Anschaffung besonders effizienter Neugeräte und einer Vorkalkulation des zu erwartenden Jahresstromverbrauches mit der neuen Geräteausstattung. Ziel war es, einen Jahresstromverbrauch unter dem für Passivhäuser angestrebten Kennwert von 18 kWh/(m²a) zu erreichen. Die Beratungen wurden von Torsten Schwarz, Mitarbeiter bei Rasch & Partner, mit dem vom Passivhaus Institut erstellten Kalkulationsverfahren durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Vorkalkulationen sind in [Feist 2001] dokumentiert.

Bei erfolgreicher Projektierung war den Erwerbern als Anreiz für die Anschaffung stromsparender Geräte eine Rückzahlung in Höhe von etwa Euro 1000,- in Aussicht gestellt worden.

Insgesamt 18 Beratungen zur Stromeffizienz wurden mit dem beschriebenen Verfahren durchgeführt. Im Mittel war bei der Beratung ein projektiertes Jahresstromverbrauch von 1901 kWh/(m²a) berechnet worden. Die so berechneten Werte werden hier als "a priori-Berechnung" bezeichnet. Auf der Basis der inzwischen vorliegenden zusätzlichen Informationen zur Ausstattung der beratenen Haushalte und zum Hilfsstrombedarf, die bei der Beratung nur abgeschätzt worden waren, wurde für 18 der Haushalte vom PHI eine "ex posteriori-Berechnung" nach dem gleichen Verfahren durchgeführt. Verändert wurden dabei:

- Für die Stromeffizienzberatung war eine Standard-Personenbelegung von 35 m² Wohnfläche pro Person zugrundegelegt worden. Dadurch sollte gesichert werden, dass wirklich die Effizienz der Ausstattung unabhängig von den zufälligen Nutzungsbedingungen bewertet wird. Der spätere Stromverbrauch hängt natürlich

stark von der Anzahl der tatsächlich im Haus lebenden Personen ab. Nachdem die Haushaltsgrößen nun bekannt sind, konnten im Rechenverfahren diese Werte eingesetzt werden. Der größte Anteil der Abweichungen zwischen a priori- und ex posteriori Berechnung ist auf diesen Unterschied zwischen Standard- und realer Personenbelegung zurückzuführen.

- Die in den Effizienzberatungen geschätzten Hilfsstromverbräuche wurden angepasst, einige offensichtliche Unplausibilitäten wurden korrigiert und die Wohnflächen wurden entsprechend der CEPHEUS-Vereinbarung zur europaweit einheitlichen Bestimmung der "treated floor area" angepasst.
- Unter den Passivhausbewohnern wurde eine Befragung durchgeführt, die auch Ausstattungs- und Nutzungsmerkmale erfasste, die wesentlichen Einfluss auf den Strombedarf haben. Anhand dieser vorliegenden Angaben konnten die Informationen aus der Stromeffizienzberatung korrigiert und ergänzt werden. Folgende Abweichungen traten dabei auf:
 - In einigen Fällen unterschieden sich die Angaben über die Benutzung von Kalt- und Warmwasseranschlüssen bei Wasch- und Spülmaschinen. Da die Beratung vor dem Einzug erfolgt war, haben wir angenommen, dass die späteren Angaben die realen Nutzungsbedingungen korrekt wiedergeben.
 - Fast alle Beratungen gingen davon aus, dass die Wäsche in einem unbeheizten Trockenschrank getrocknet würde. In der Befragung stellte sich aber im nachhinein heraus, dass die Familien z.T. stattdessen auf der Leine trocknen oder einen elektrischen Wäschetrockner besitzen. Die Angaben aus der Befragung wurden verwendet.

Abb. 33 zeigt den Vergleich der a-priori und der ex-posteriori Berechnung des Strombedarfs. Der Mittelwert der ex-posteriori-Berechnung liegt mit 1963 kWh/a um etwa 3% über der a-priori-Ermittlung.

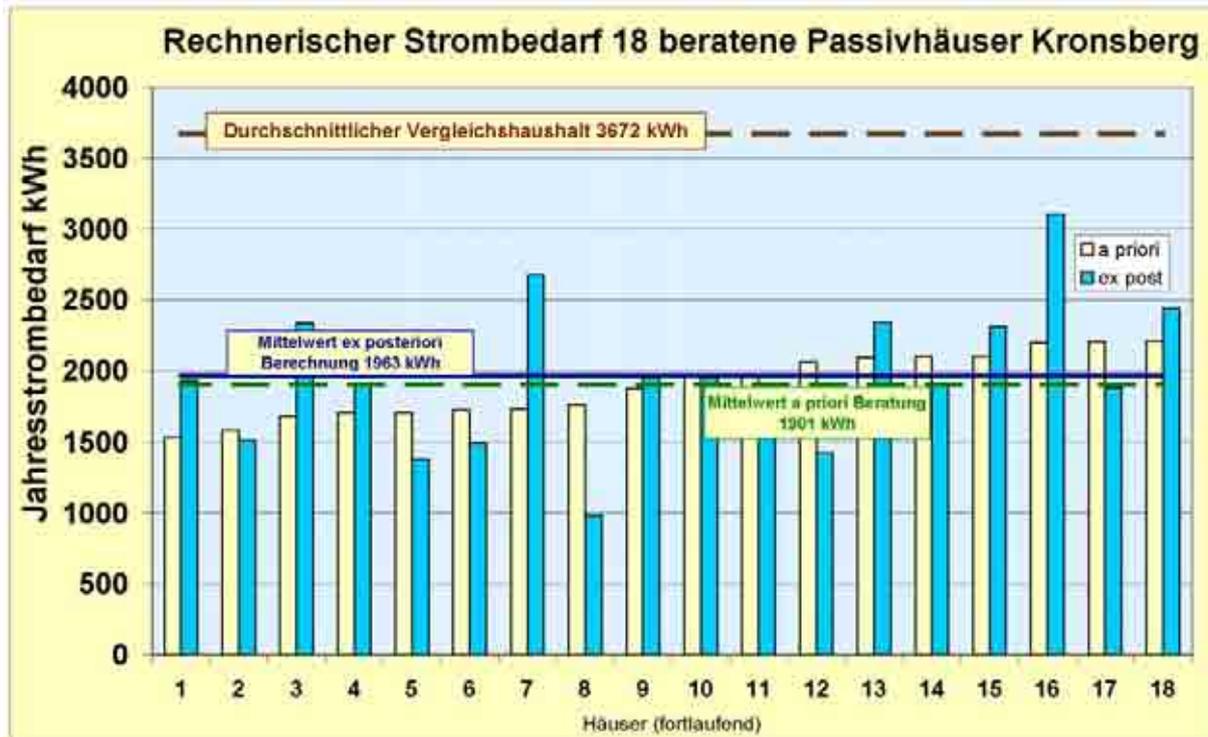


Abb. 33: Vergleich von a-priori und ex-posteriori Berechnungen des Jahresstrombedarfs von 18 Haushalten der Passivhaus-Siedlung Hannover

Auch nach diesen Ergänzungen ist anzunehmen, dass nicht alle stromverbrauchsrelevanten Ausstattungsmerkmale vollständig erfasst wurden. Insbesondere ist nicht bekannt, ob nach Einzug noch Geräte ersetzt wurden (und daher andere Normverbräuche aufweisen), oder ob zusätzliche Geräte beschafft wurden. Neben den nutzerbedingten Schwankungen sind diese Effekte mitverantwortlich für die Abweichungen zwischen berechnetem und gemessenem Stromverbrauch.

Die Stromsparberatung wurde von Rasch&Partner nach der Durchführung der dokumentierten 18 Einzelfälle eingestellt. Wie im folgenden gezeigt wird, führte das auch bei diesen Haushalten zu einer gewissen Stromeinsparung, sie verbrauchten aber 50 % mehr Strom als die beratenen Haushalte. Für die Auswertung wurden die Messergebnisse in

- 18 beratene Haushalte und
- 4 Haushalte ohne Stromeffizienzberatung aufgeteilt.

Ausgewertet wurden die Stände der Haushaltsstromzähler von 22 dauerbewohnten Häusern im Zeitraum vom 1.10.1999 bis zum 30.09.2000.

Über diese Haushaltsstromzähler wird der gesamte Haushaltsstrom sowie der Hilfsstrom für die haustechnische Anlagen (Pumpen der Solaranlagen, Steuerung) im

jeweiligen Haus gezählt. Hierin sind auch die Lüftungsanlagen enthalten, mit denen alle Häuser ausgestattet sind.

Nicht mit erfasst wird über die Haushaltsstromzähler der sog. Gemeinschaftsstrom für gemeinschaftliche Außenbeleuchtungen und Verbräuche in den beiden Technikhäusern (Licht, Pumpen der Heizwärmeverteilung, Gebäudeleittechnik etc.).

In Abb. 34 sind die Jahresstromverbrauchsdaten dieser 22 Passivhäuser dargestellt; die 4 Fälle ohne Beratung sind dabei abgegrenzt formatiert.

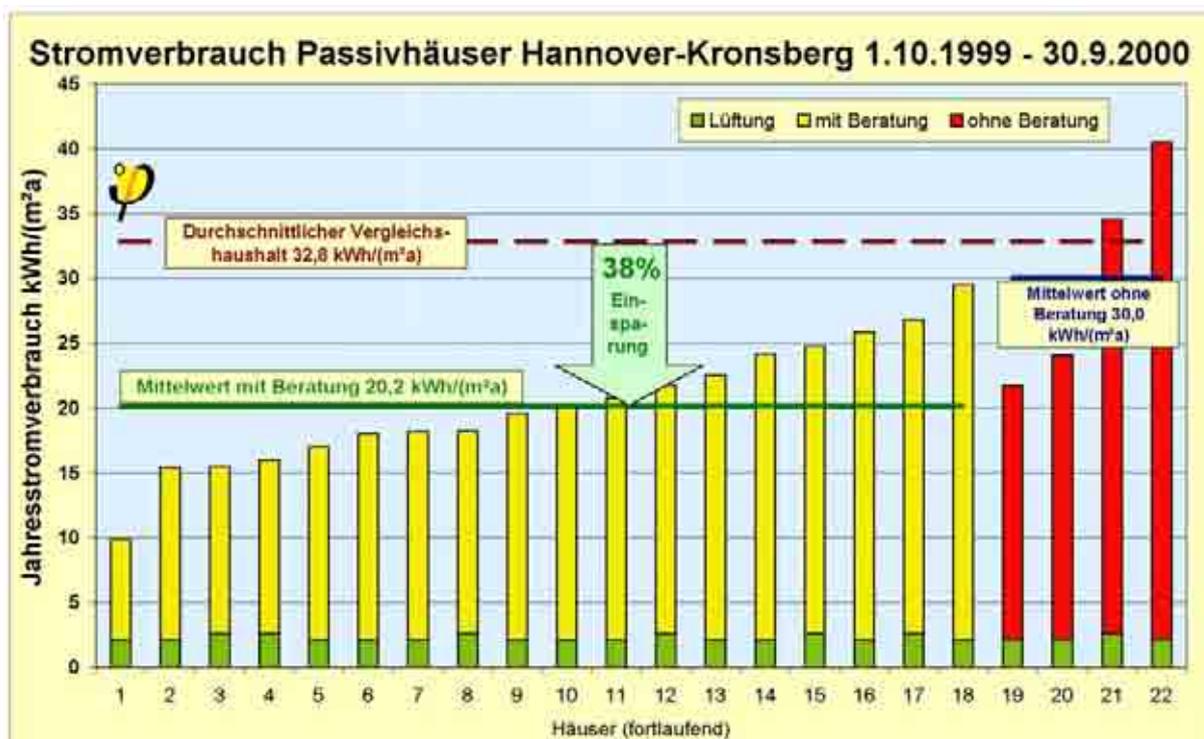


Abb. 34: Gemessener Jahresstromverbrauch von 22 Passivhäuser (1999/2000 dauerbewohnt) vom 1.10.1999 bis zum 30.09.2000 (Haushalts-, Hilfs- und Lüftungsstrom, aber ohne Gemeinschaftsstrom).

Abb. 35 zeigt die Korrelationsanalyse zwischen gemessenem Jahresstromverbrauch und ex-posteriori berechnetem Jahresstrombedarf. Erkennbar ist die Separierung zwischen

- den 18 Häusern mit Beratung mit einem mittleren gemessenen Stromverbrauch von 20,2 kWh/(m²a) und
- den 4 Häusern ohne Beratung mit einem Messwert von 30 kWh/(m²a).

Zwischen den ex posteriori rechnerisch bestimmten Bedarfswerten und den gemessenen Verbrauchswerten besteht eine signifikante Korrelation mit Korre-

lationskoeffizient 41%. Die Streuung bei den Verbrauchswerten ist allerdings ziemlich hoch; dies liegt vor allem am Nutzerverhalten.

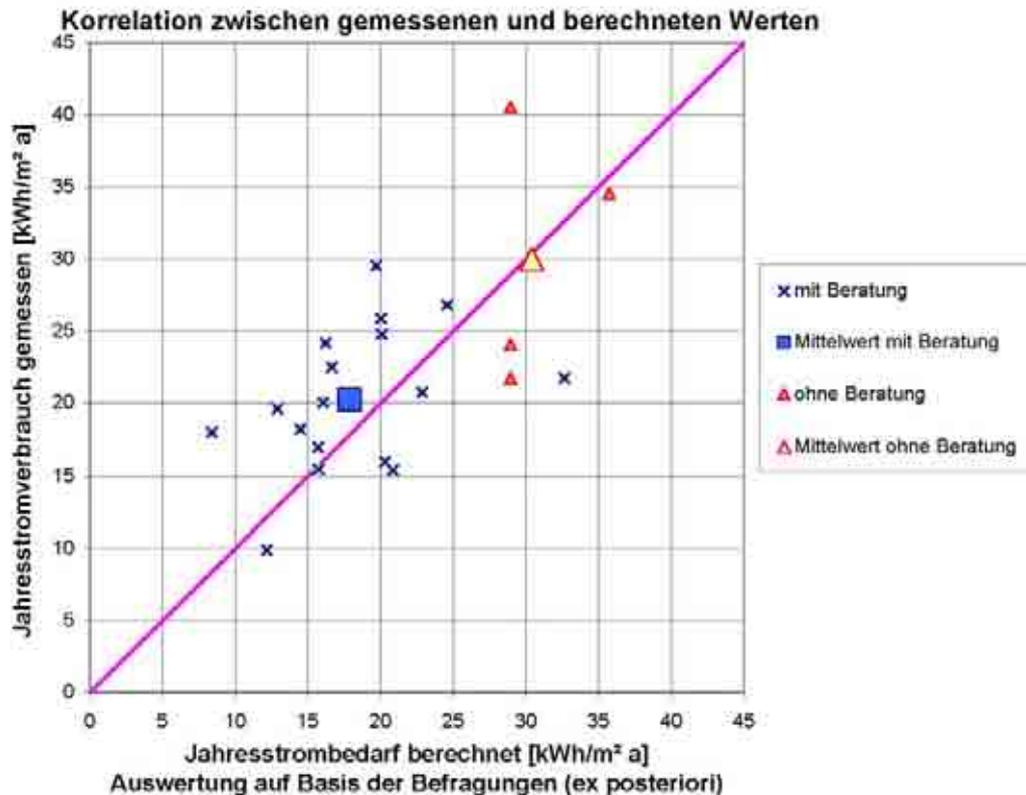


Abb. 35: Korrelationsanalyse zwischen berechnetem Jahresstrombedarf (ex posteriori) und dem gemessenen Jahresstromverbrauch in 18 Passivhäusern der Siedlung auf dem Kronsberg. Ebenfalls dargestellt sind 4 Haushalte, für welche keine Beratung durchgeführt wurde; deren Durchschnittsverbrauch liegt mit 30 kWh/(m²a) einerseits um etwa 50% über dem Verbrauch der Haushalte mit Stromeffizienzberatung, andererseits nahe am Erwartungswert des durchschnittlichen Haushaltsstromverbrauchs in Deutschland.

Die Analyse der Durchschnittswerte zeigt, dass das Rechenverfahren mit 17,5 kWh/(m²a) den Messwert mit 20,2 kWh/(m²a) durchschnittlich um 13% unterschätzt. Das ist für die Bestimmung eines unter durchschnittlichen Nutzungsbedingungen zu erwartenden Stromverbrauchs bereits ein sehr brauchbares Ergebnis.

Die Messwerte der 4 Fälle ohne Beratung liegen mit 30 kWh/(m²a) ziemlich genau in der Höhe des ermittelten statistischen Mittelwerts für durchschnittliche Haushalte in Deutschland (32,8 kWh/(m²a) ohne Speicherheizung und ohne elektrische Warmwasserbereitung).

Legt man diesen deutschlandweiten Durchschnittswert als Vergleichsmaßstab zugrunde, so beträgt bei den Haushalten mit Stromeffizienzberatung und Anschaffung entsprechender energiesparender Neugeräte die **Stromeinsparung 38%**.

Im Referenzwert von 32,8 kWh/(m²a) ist kein Stromverbrauch der Lüftungsanlagen enthalten, wohl aber im Mittelwert von 20,2 kWh/(m²a) der vermessenen bewohnten Häuser. Die mittleren Stromverbräuche für die Lüftungsanlagen lagen nach den durchgeführten Detailmessungen bei etwa 2,3 kWh/(m²a); ohne diese bei den Passivhäusern hinzukommenden Verbräuche liegt der Haushaltsstromverbrauch bei 17,9 kWh/(m²a) und damit um **45% unter dem statistischen Durchschnittswert**.

Das hier angewendete Instrument "detaillierte Beratung und finanzieller Anreiz für den Erwerber" ist allerdings mit einem ziemlich hohen Aufwand verbunden. Sowohl die Durchführung der Beratung, als auch die Erteilung eines Zuschusses bedeuten zusätzliche Kosten. Im Ergebnis der Nachuntersuchung zeigt sich, dass dieser Aufwand durch die guten Resultate durchaus gerechtfertigt werden kann. Zumindest für Demonstrationsvorhaben wie die hier realisierte Passivhaussiedlung ist derzeit eine Stromeffizienzverbesserung in der erreichten Größenordnung in Deutschland mit geringerem Beratungsaufwand nicht zu erreichen. Das Problem begründet sich dabei darin, dass auch heute (2001) noch Geräte mit ganz erheblich schlechterer Energieeffizienz am Markt angeboten werden. Will man vor diesem Hintergrund Verbraucher davon überzeugen, effizientere Geräte auszuwählen, so ist dies nur mit einer entsprechend eingehenden Beratung und einem finanziellen Anreiz möglich. Eine unzweifelhaft bessere Lösung besteht darin, dafür zu sorgen, dass generell höher effiziente Geräte ins Angebot kommen und dass Geräte mit nachweislich schlechter Energieeffizienz nicht mehr angeboten werden. Allerdings ergeben sich dann relativ lange Umstellungszeiträume die etwa den Lebensdauerzyklen der Geräte (10 bis 15 Jahre) entsprechen. Für Demonstrationsprojekte wie CEPHEUS müssen daher weitergehende Instrumente eingesetzt werden.

14.4.2 Gemeinschaftsstromverbräuche

Die Gemeinschaftsstromverbräuche der Siedlung werden über die beiden Stromzähler in den Technikhäusern gemessen. Sie enthalten die Energie für die Heizungspumpen und die Außenbeleuchtung der Gemeinschaftsflächen (Park- und Müllplätze sowie Technikhäuser). Die Stromverbräuche der Messtechnischen Anlage werden separat gemessen und sind hier bereits abgezogen. Der monatliche Verlauf der spezifischen Verbräuche ist Abb. 36 zu entnehmen.

Die Verbrauchsdarstellung zeigt deutlich die jahreszeitlich bedingten Schwankungen. Zum Vergleich sind hier die Mittelwerte der beiden vergleichbaren Zeiträume (jeweils Oktober bis April) dargestellt. Zwischen diesen beiden Mittelwerten ist eine Verringerung um 36 % festzustellen. Für den Sommerzeitraum ist eine noch größere Einsparung zu erwarten, da im Sommer die Heizkreispumpen über zwei Zeitschaltuhren gesteuert werden (Einstellung durch die Bewohner). Die Schaltuhren sorgen dafür, dass die Pumpen nur einige Stunden am Tag betrieben werden. Für die Warmwasserversorgung reicht diese Betriebsweise im Sommer aus, da die

Energieversorgung zum großen Teil über die hausweisen Solaranlagen erfolgt. Die Zeitschaltuhren sind erst im Juli und September 2000 eingebaut bzw. aktiviert worden. Im Winterbetrieb werden die Zeitschaltuhren wieder auf Dauerbetrieb gestellt. Als Mittelwert wird hier der verfügbare Jahreszeitraum mit dem niedrigeren Verbrauch ausgewertet. Der Mittelwert des Zeitraumes Mai 2000 bis April 2001 ergibt den Wert von 0,08 kWh/(m² Monat), damit für das gesamte Jahr insgesamt 0,98 kWh/(m²a).

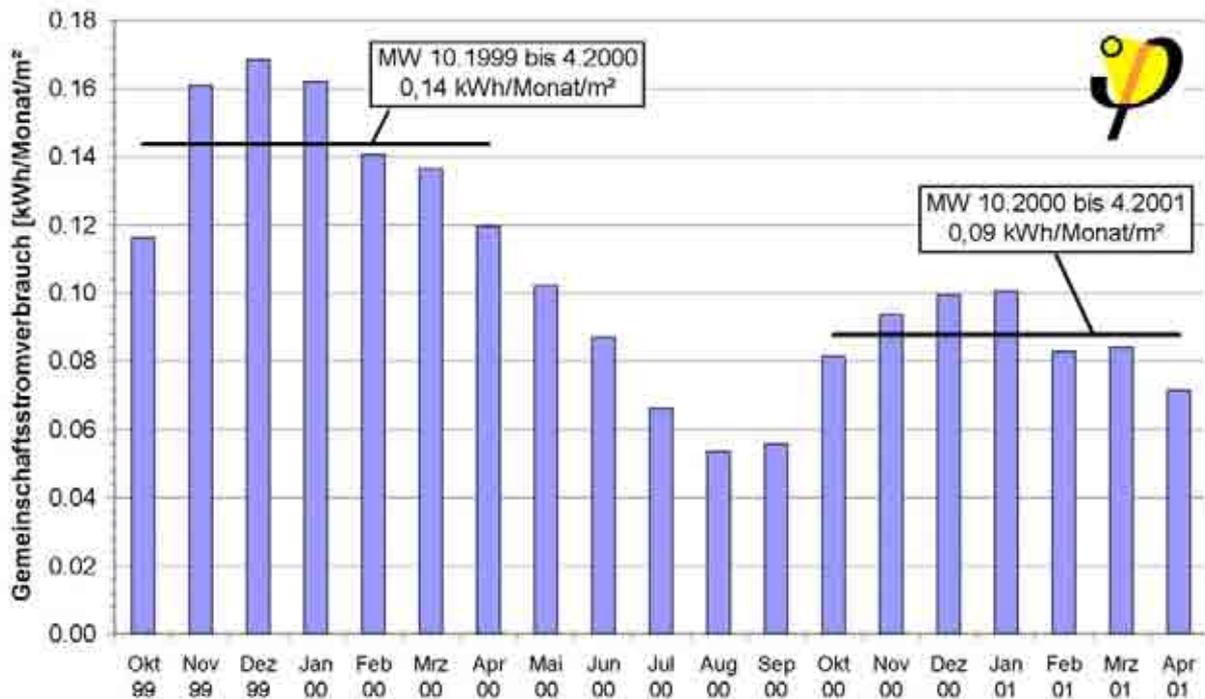


Abb. 36: Spezifische Gemeinschaftsstromverbräuche der 32 Passivhäuser ohne Messtechnikstrom von Oktober 1999 bis April 2001. Der Gemeinschaftsstromverbrauch enthält die Energie für die Heizungspumpen in den Technikhäusern und die Außenbeleuchtung der Allgemeinflächen (Park- und Müllplätze). Die Säulen zeigen deutlich die jahreszeitlichen Schwankungen. Zum Vergleich sind jeweils die Mittelwerte von Oktober bis April dargestellt.

14.5 Wärmerückgewinnungsgerät

Im Rahmen des Messkonzeptes wurde das Betriebsverhalten des Wärmerückgewinnungsgeräts genauer untersucht. Zunächst wurde ein Zeitraum untersucht, in dem die vorgeschaltete elektrische Frostschutzheizung zum Schutz des Wärmeübertragers nicht aktiv war. Abb. 37 zeigt den gemessenen Verlauf der Zu-, Ab-, Fort- und Außenluft vom 09.02. bis zum 31.03.2001.

Der aus den Messdaten (Temperaturen, Feuchte, Volumenströme und Stromaufnahme) berechnete Wärmebereitstellungsgrad (siehe Abb. 38) berücksichtigt Verluste durch Transmissionswärmeströme und Leckagevolumenströme sowie die erzwungene Exfiltration bei Zuluftüberschuß. Trotz großer Sorgfalt bei der Einstellung der Balance treten im Betrieb Disbalancen von zeitweise über 10 % auf,

welche sich signifikant auf die Lüftungswärmeverluste auswirken. Insgesamt ergibt sich ein durchschnittlicher Wärmebereitstellungsgrad von **78 %**.

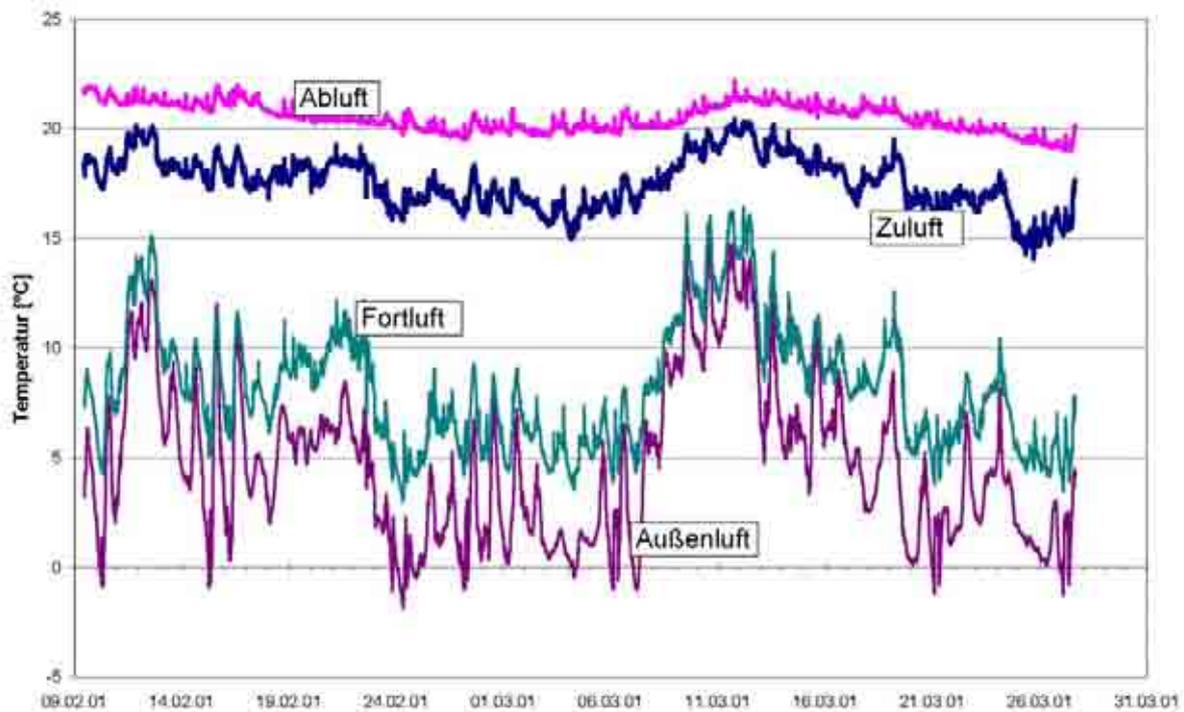


Abb. 37: Gemessener Verlauf der Zu-, Ab-, Fort- und Außenluft im Lüftungsgerät mit Wärmeübertrager (aus Stundenmittelwerten).

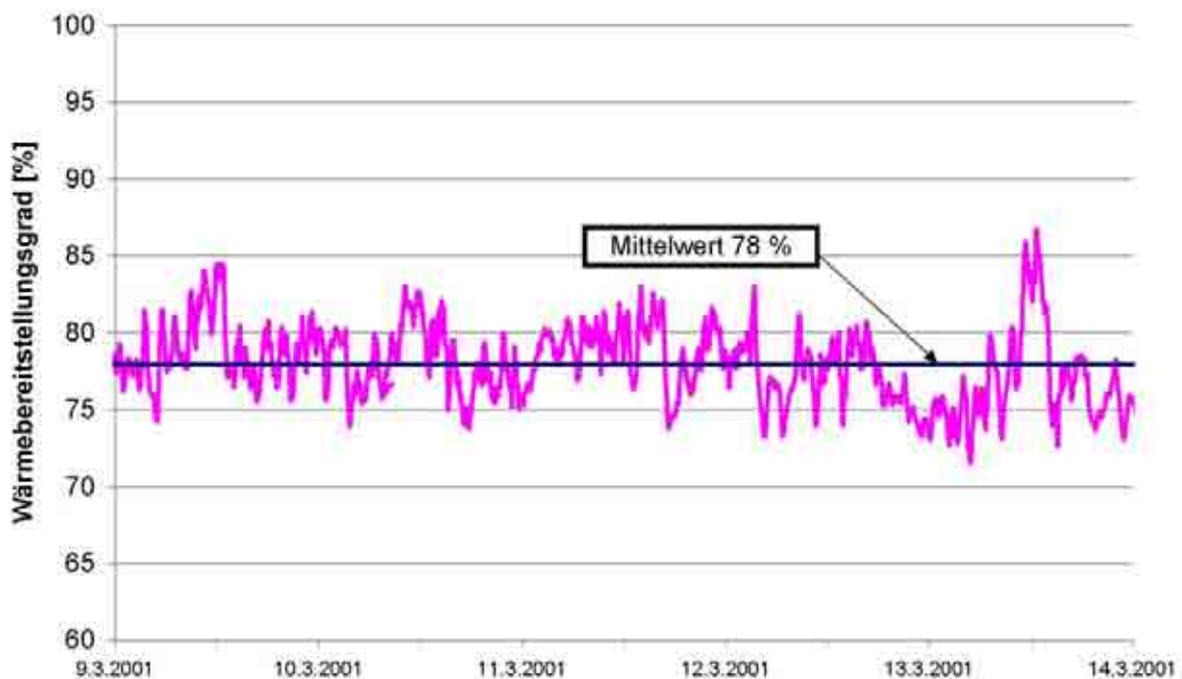


Abb. 38: Verlauf des Wärmebereitstellungsgrades des Lüftungsgerätes mit Wärmeübertrager.

Der Verlauf der Kurve zur anfallenden Kondensatmenge im Vergleich mit der Außentemperatur (Abb. 39) zeigt, dass (je nach Abluftfeuchte) ab einer Außentemperatur von ca. 5 °C nennenswert Kondensat auftritt.

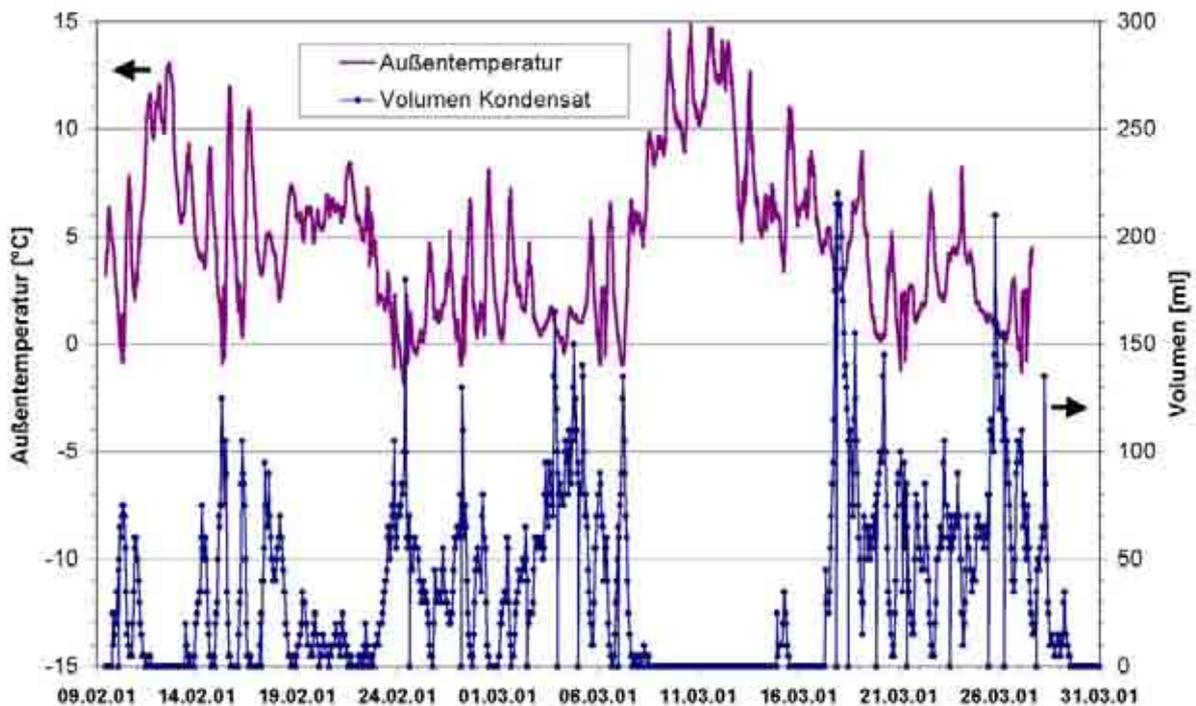


Abb. 39: Kondensatmenge des Wärmerückgewinnungsgerätes im Vergleich mit der Außentemperatur (Temperatur: Stundenmittel, Kondensat: Stundensummen).

Es kondensieren bis zu 220 ml Wasser in einer Stunde. Über den dargestellten Zeitraum von 50 Tagen (09.02. bis 31.03.2001) werden insgesamt 41,86 Liter Kondensat abgeleitet. Mit der Verdampfungsenthalpie umgerechnet ergeben sich so Leistungsspitzen bei der Kondensation von über 100 Watt. Im Mittel über den gesamten dargestellten Zeitraum ergibt sich eine Kondensationsleistung von rund 22 Watt. Bei der Berechnung des Wärmebereitstellungsgrades ist diese Leistung allerdings nicht bedeutend (Verbesserung im Bereich unter 1 %).

Das elektrische Frostschutzheizregister (auch „Defrosterheizung“) vor dem Wärmetauscher (WT) schützt diesen vor Vereisung. Laut Herstellerangabe verfügt die Heizwendel über 500 Watt Leistung und arbeitet leistungsgesteuert nach der Außenlufttemperatur. Die Einstellung der Ein- und Ausschalttemperaturen wird werkseitig vorgenommen und ist vom Nutzer nicht veränderbar. Der Hersteller gibt die Einschalttemperatur mit $\vartheta_{\text{außen}} < -4$ und eine Abschaltlufttemperatur hinter der Heizung von 0 °C an. In Abb. 40 sind die gemessenen Außenlufttemperaturen und die Frischlufttemperaturen nach dem Frostschutzregister sowie dessen Leistung vom 16. bis

zum 21.01.2001 dargestellt. Es ergeben sich die Ein- und Ausschaltpunkte des Heizregisters und damit dessen Betriebszeiten.

Das Heizregister wird bei einer Außenlufttemperatur von $-2,8\text{ °C}$ eingeschaltet und bei Lufttemperaturen nach dem Register von $+1,4\text{ °C}$ wieder abgeschaltet (beides Mittelwerte der dargestellten Ein- bzw. Abschalttemperaturen). Die elektrische Aufheizung der Luft nach dem Heizregister (vor dem WT) bis auf etwa $+1,4\text{ °C}$ ist relativ hoch. Es wäre wünschenswert, wenn die Hysterese deutlich geringer ausfallen würde. Dadurch ließen sich die schon geringen elektrischen Verbräuche des Gerätes nochmals optimieren. Der Stromverbrauch nur des Heizregisters in der Heizperiode 2000/2001 betrug insgesamt **36 kWh**. Das entspricht einem Energieaufwand von $0,3\text{ kWh/m}^2$ für das Haus in dieser Heizperiode.

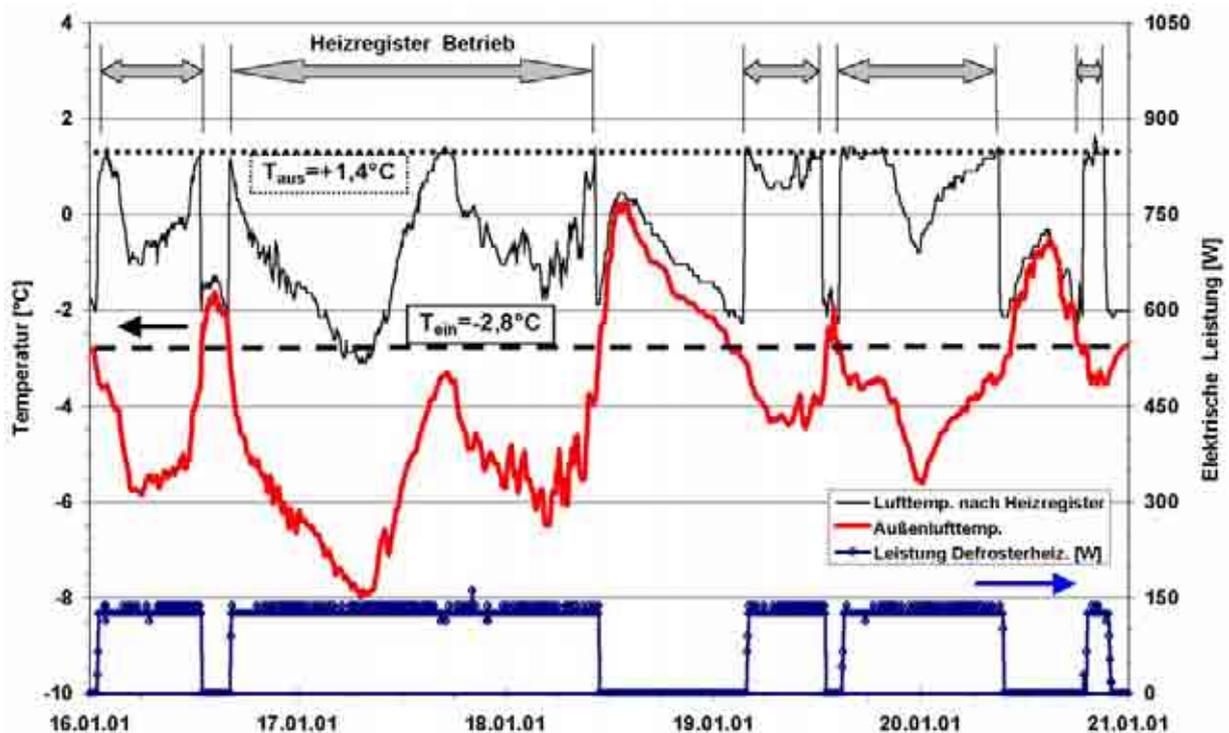


Abb. 40: Bestimmung der Betriebszeiten des elektrischen Frostschutzheizregisters (Ein- und Ausschalttemperaturen), welches dem Lüftungsgerät mit Wärmeübertrager vorgeschaltet ist. Dargestellt sind die Daten vom 16. bis zum 21.01.2001. Die elektrische Leistung des Heizregisters zeigt die Betriebszeiten an. Die Einschalttemperatur liegt bei einer Außentemperatur von $-2,8\text{ °C}$, die Abschalttemperatur bei einer Lufttemperatur nach Heizregister von $+1,4\text{ °C}$.

In dem betrachteten Zeitraum kann man auch erkennen, dass die Lufttemperatur nach dem Frostschutzheizregister mit fallender Außenlufttemperatur deutlich absinkt und Werte unter -3 °C erreicht. Zu dieser Zeit liegen die Außenlufttemperaturen kurzzeitig bei -8 °C . Dies ist ein Zeichen für die begrenzte Leistung des Heizregisters.

14.6 Luftfeuchte

Über die Messdatenerfassungsanlage ist die relative Zu- und relative Abluftfeuchte im intensivvermessenen Haus kontinuierlich aufgezeichnet worden. Die Messung erfolgt in Strömungsrichtung nach, bzw. vor dem Lüftungsgerät. Der Messwert der Abluftfeuchte stellt damit nicht die rel. Luftfeuchte in einem Raum des Hauses dar, sondern den Durchschnittswert der Luft, welche aus den Ablufträumen abgesaugt wird. Die Raumlufftfeuchte eines einzelnen Wohnraumes wurde mit Hilfe von autarken Dataloggern (Fa. testo) in einem (anderen) Passivhaus im Wohnzimmer (EG) gemessen.

Abb. 41 zeigt den Verlauf der relativen Raumlufftfeuchte und der Raumluffttemperatur im Wohnzimmer dieses Hauses sowie den Außentemperaturgang. Der Datenlogger hat die Temperatur- und Feuchtedaten im 2-Stunden-Intervall aufgezeichnet. Im Diagramm sind die gleitenden Mittelwerte über jeweils vier Datenpunkte dargestellt. Die gemessene relative Raumlufftfeuchte lag im dargestellten Zeitraum (19.11.1999 bis 20.03.2000) im Bereich zwischen 26 und 49 %, im Mittel bei knapp 38 %. Nur kurze Zeiträume lagen unter 30 % rel. Feuchte. Es wird deutlich, dass die Feuchteschwankungen ihre Ursache nicht in einer Veränderung der Raumluffttemperatur haben, da diese in der Kernzeit des Winters ziemlich konstant verläuft.

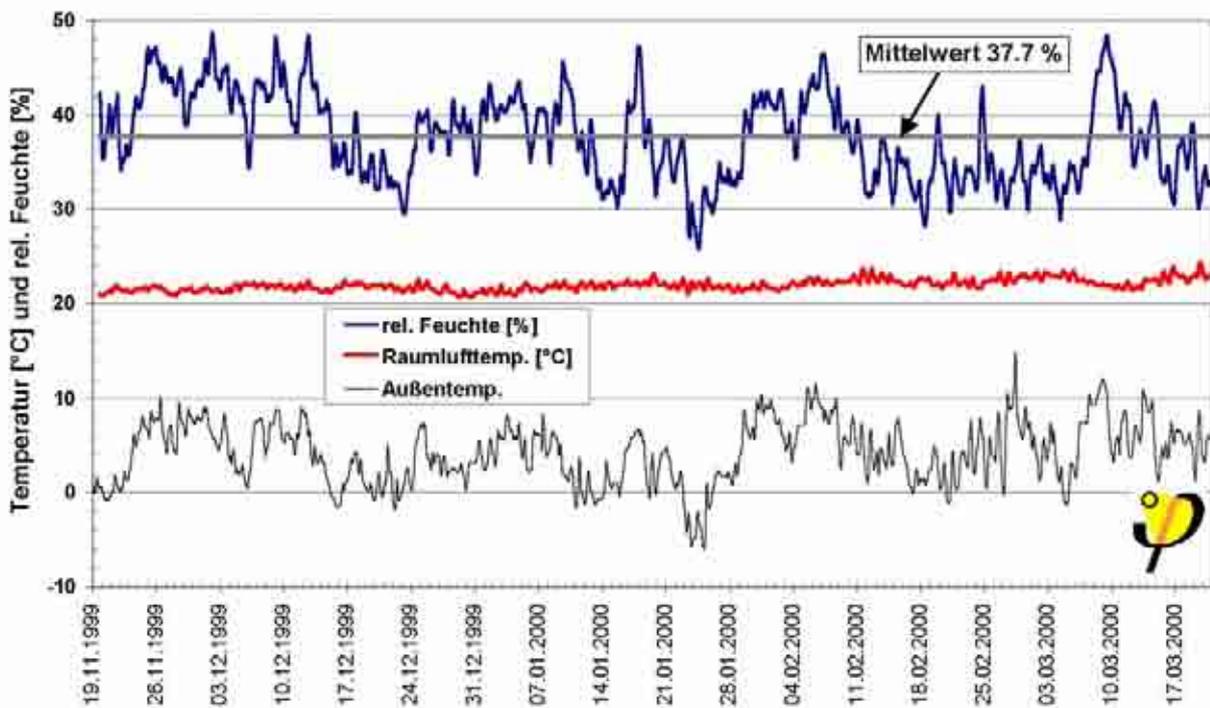


Abb. 41: Relative Raumlufftfeuchte und Raumluffttemperatur im Wohnzimmer (EG) eines Passivhauses sowie Ganglinie der Außentemperatur vom 19.11.1999 bis zum 20.03.2000. Die Daten im Gebäude wurden mit einem autarken Datenlogger mit zwei Stunden Auflösung aufgezeichnet. Dargestellt ist der gleitende Mittelwert über jeweils vier Datenpunkte.

Zur Klärung der Schwankungen der rel. Feuchte werden in einem Zeitausschnitt (10.12.1999 bis 12.02.2000) aus Abb. 41 mittels Achsenanpassung die Kurven der rel. Raumluftfeuchte und die der Außentemperatur angepasst. In Abb. 42 sind beide Kurven dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sie in weiten Teilen gut korrelieren. Damit ist die Hauptursache für die Schwankungen der relativen Feuchte im Innenraum klar zu erkennen.

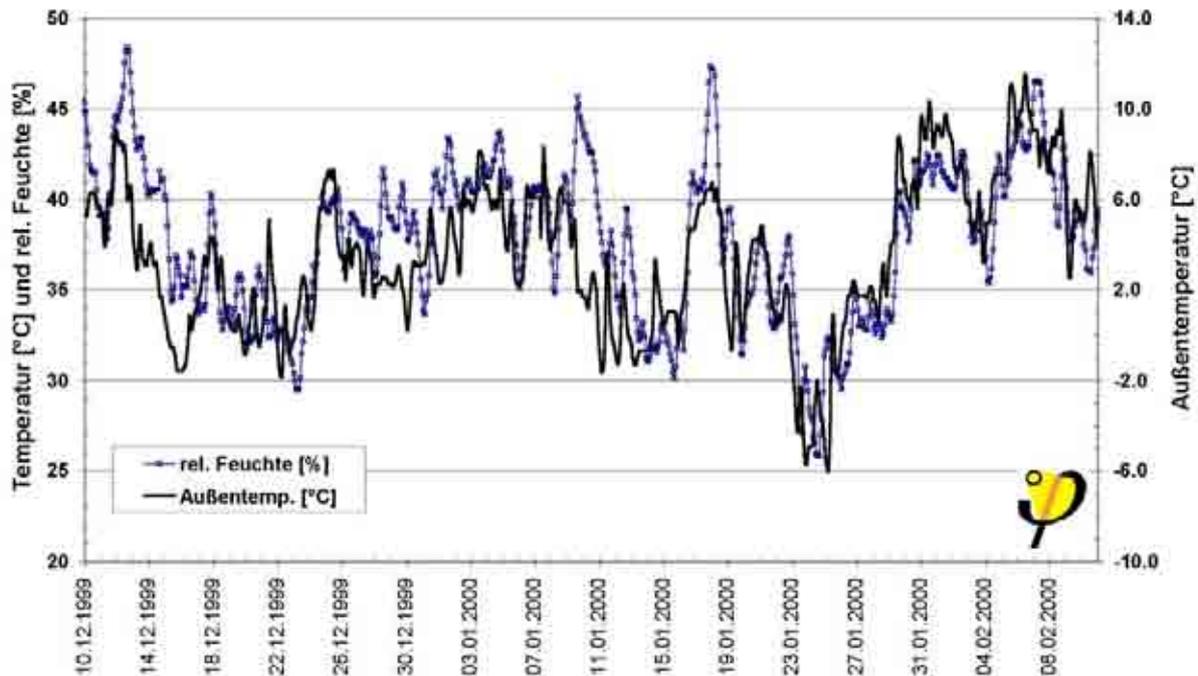


Abb. 42: Korrelation zwischen den Ganglinien der relativen Luftfeuchte und der Außentemperatur vom 10.12.1999 bis zum 12.02.2000 aus Abb. 41.

Bei den Passivhäusern liegen die relativen Luftfeuchtwerte damit in einem gesundheitlich als vernünftig anzusehenden Bereich. Selbst kurzzeitige Werte unter 30 % rel. Feuchte stellen keine Probleme dar. Als entscheidende Einflussgröße auf die relative Luftfeuchtigkeit im Innenraum erweist sich die Außentemperatur.

Die Luftfeuchtigkeit im Raum wird durch die dort vorhandenen Feuchtequellen angehoben. Je größer die zugeführte Außenluftmenge, desto stärker wird diese Feuchtigkeit aus den Quellen verdünnt.

Daher ergeben sich folgende Grundsätze:

- Wird die Raumluftfeuchtigkeit als zu hoch empfunden, so muss der Außenluftwechsel erhöht werden. Dies kann im Passivhaus durch höherstellen der Lüftungsanlage erfolgen. Eine Notwendigkeit hierfür ergibt sich allerdings nach den ausgewerteten Daten zu keinem Zeitpunkt.

- Wird die Raumlufffeuchtigkeit als zu niedrig empfunden, so sollte der Außenluftwechsel verringert werden. Dies kann im Passivhaus z. B. durch Zurückstellen der Lüftungsanlage auf Grundlüftung erfolgen. Objektiv ist dies nach den Messdaten ebenfalls nicht erforderlich; wenn einzelne Bewohner subjektiv höhere relative Luftfeuchtigkeit wünschen, ist dies aber sehr leicht durch die Zurückstellung erreichbar. Es gibt weder lufthygienische noch heiztechnische Gründe, die gegen eine solche Reduzierung sprechen.

14.7 Klimaneutralität der Passivhaussiedlung

Mit der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg soll gezeigt werden, dass der Energieverbrauch einer Wohnsiedlung durch Effizienzerhöhung soweit reduziert werden kann, dass die Deckung allein aus nachhaltig verfügbaren Energiequellen möglich ist. Und zwar kann dies erfolgen mit vertretbarem technischem Aufwand, bei mitteleuropäischen Verhältnissen reproduzierbar und mit vertretbaren Kosten. Als regenerative Energiequelle wurde auf dem Kronsberg im Juli 2000 eine Windkraftanlage in räumlicher Nähe zur Siedlung in Betrieb genommen.

Zur Überprüfung dieses Ziels der Klimaneutralität sind die gemessenen Primärenergieverbräuche der Siedlung heranzuziehen. Der gesamte Primärenergieverbrauch der Siedlung im ersten Messjahr betrug rund **83 kWh/(m²a)**. Der Wert ergibt sich aus der primärenergetischen Bewertung des Fernwärmebezugs von 35 kWh/(m²a) und des Stromverbrauchs von 23 kWh/(m²a) der bewohnten Häuser. Verwendet wurden wieder gemäß der CEPHEUS-Vereinbarung die folgenden einheitlichen Primärenergiefaktoren für die vorgelagerte Kette bei

- Fernwärme aus KWK-Anlagen: 0,7 kWh_{Primär}/kWh_{End}
- durchschnittl. europäischer Strommix: 2,5 kWh_{Primär}/kWh_{End}.

Diesen extrem geringen Primärenergieverbräuchen steht die mit der Windkraftanlage der Firma *windwaerts* erzeugte anteilige Strommenge gegenüber. Nach Veröffentlichung der Betreiberfirma betrug die Stromproduktion der Windkraftanlage vom 01. Juli 2000 bis zum 30. Juni 2001 2.262.102 kWh/a [windwaerts].

Im Kaufpreis eines jeden Passivhauses war eine Beteiligung an der Windkraftanlage auf dem Kronsberg von 1250,- Euro) einkalkuliert. Ein solcher finanzieller Anteil entspricht **2,6 kW** oder 0,175 % der Nennleistung der Windkraftanlage. Mit der Jahresproduktion der Anlage ergibt sich daraus eine anteilige Stromerzeugung von **3969 kWh/a** oder **35,5 kWh/(m²a)**. Diese Stromerzeugung substituiert in erster Näherung Strom aus dem europäischen Kraftwerksmix. Damit ergibt sich die Höhe der durch die Stromerzeugung substituierten Primärenergie aus dem vermiedenen Primärenergieverbrauch der Kraftwerke. Dieser lässt sich mit dem

Primärenergiefaktor des europäischen Strommix zu $2,5 \cdot 35,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, das sind etwa **89 kWh/(m²a)**, berechnen (vgl. Abb. 43).

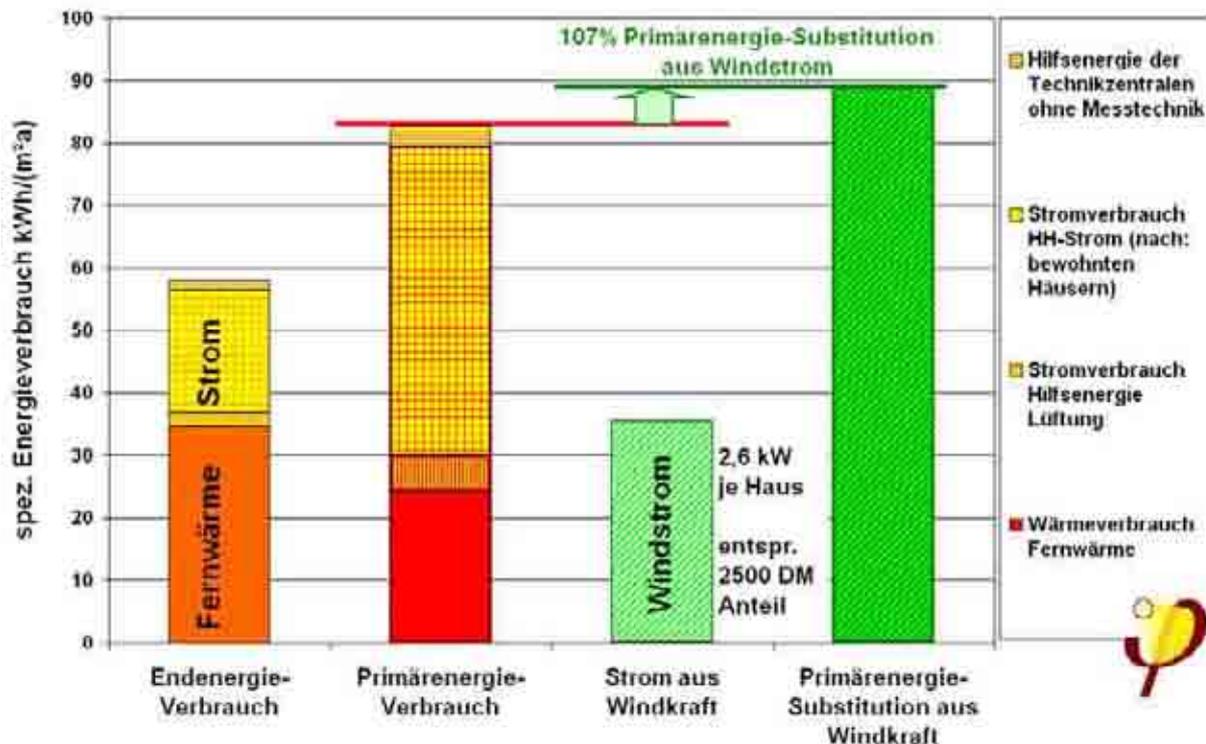


Abb. 43: Primärenergieverbrauch der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg im Vergleich mit der Substitution durch Windkraftanteile zur Illustration der Klimaneutralität.

Ein Leistungsanteil von 2,6 kW ist aus energiewirtschaftlicher Sicht als sehr gering anzusehen. Entsprechende Standorte für Windenergieanlagen stehen tatsächlich verbrauchernah in vielen Regionen Mitteleuropas zur Verfügung; wo dies nicht der Fall ist, können andere erneuerbare Energiesysteme wie Holzpellets und Biogas herangezogen werden, für die entsprechend kleine Mengen gleichfalls aus einer nachhaltigen Land- und Forstwirtschaft verfügbar gemacht werden können. Der Einsatz von Holzpellets wurde in anderen CEPHEUS-Projekten auch realisiert.

Eine (einmalige) Beteiligung in Höhe von 1.250,- Euro ist aus ökonomischer Sicht eine vertretbare Belastung: Selbst wenn es aus der Windkraftanlage keine Erlöse gäbe, liegen die jährlichen Kapitalkosten bei 4 % Realzins und angenommen 12 a Nutzungsdauer bei ca. 133 Euro/a. Dem stehen aber Erlöse aus der Stromerzeugung gegenüber, die höher sind als die sonstigen jährlichen Betriebskosten; bei den derzeit vereinbarten Vergütungen kann wahrscheinlich eine annähernde Wirtschaftlichkeit erreicht werden. Der zusätzliche Kapitaleinsatz in erneuerbare Energieerzeugung stellt damit für Passivhäuser keine unüberwindliche Hürde dar, da die benötigten Anteile an der Erzeugungskapazität nur klein sind.

Die Belastungen des Naturhaushaltes und die ökonomische Belastung nehmen zu, wenn nicht der extrem geringe Primärenergiebedarf eines Passivhauses, sondern der von konventionell gebauten Häusern substituiert werden soll. Für den dann etwa dreifachen Bedarf an regenerativer Energiekapazität stehen in der Regel verbrauchernahe Standorte nicht zur Verfügung. Auch die Höhe des erforderlichen finanziellen Anteils liegt dann in einem Bereich, der beim Kauf eines Hauses als spürbare Zusatzbelastung gelten muss. Wahrscheinlich ist ein solcher höherer Anteil mit den gegenwärtigen Rahmenbedingungen ebenfalls wirtschaftlich. Die Rahmenbedingungen können sich aber ändern, das damit verbundene Risiko ist beim für das Passivhaus benötigten Anteil nur sehr gering.

Klargestellt werden muss, dass es sich bei der hier erreichbaren bilanziellen Klimaneutralität nicht um eine vollständig autarke Versorgung aus erneuerbaren Energiequellen handelt. Der hierfür erforderliche technische und finanzielle Aufwand wäre sehr viel höher: Das Stromangebot der Windkraftanlage ist meteorologisch bedingt nicht gleichzeitig mit dem Strombedarf einer solchen Siedlung. In [Ewert 2000] wurde gezeigt, dass mit einem hier erreichten Leistungsanteil eine Eigennutzung von etwas über 50 % erreicht werden kann. Der übrige Strom wird ins Netz eingespeist und von anderen Verbrauchern genutzt – u. a. von solchen, für die eine verbrauchernahe Windkraftanlage nicht möglich oder nicht sinnvoll ist. Dieser Ansatz einer nur bilanziellen Klimaneutralität ist solange wirkungsvoll, wie der überwiegende Anteil der Stromerzeugung im übergeordneten Netz noch aus Wärmekraftwerken stammt, wie dies heute in jedem Fall zutrifft.

Eine autarke Lösung auf der Basis erneuerbarer Energiequellen würde gegenwärtig erhebliche Überdimensionierungen der Erzeugersysteme voraussetzen, würde mit Windenergie als einziger Quelle sehr teuer werden und darüber hinaus besondere Investitionen in Energiespeicher erforderlich machen. Dies ist ökonomisch selbst für Passivhäuser nur schwer darstellbar; aber auch in Zukunft liegt die sinnvollere Lösung mit Sicherheit in der Energieeinspeisung in das Netz und der Vermittlung der Energiespeicherfunktionen über das Netz.

Die Passivhaussiedlung auf dem Kronsberg zeigt vor diesem Hintergrund, dass es heute bereits möglich und wirtschaftlich vertretbar ist, den zusätzlichen Primärenergieverbrauch einer Neubaussiedlung durch gleichzeitige Errichtung von erneuerbarer Energiekapazität zu kompensieren. Das ist vor allem deswegen eine wichtige Botschaft, weil allgemein immer argumentiert wird, jeder Neubau führe generell immer nur zu zusätzlichen Verbräuchen und zusätzlichen Belastungen. Das Beispiel der an sich unscheinbaren Passivhaussiedlung auf dem Kronsberg zeigt, dass eine ökologische und ökonomische Perspektive besteht, zumindest die durch den Energieeinsatz bedingten Belastungen bei Neubauten zu vermeiden. Wie es die Waage vor dem Ausstellungshaus der Stadtwerke Hannover auf dem Kronsberg

illustriert (siehe Abb. 44), ist ein baulich und technisch ausgereiftes Konzept auf der Basis von Passivhäusern in der Lage, dieses Ziel zu erreichen. Wie die Ergebnisse in diesem Bericht zeigen, ist dies nicht nur für die energetischen Zielgrößen gelungen, sondern auch zur hohen Zufriedenheit der Bewohner sowie mit Vorteilen bei der thermischen Behaglichkeit und der Luftqualität in den Häusern.



Abb. 44: Informationssäule (rechts) und Waage (links, mit Pfeil markiert) vor dem Ausstellungshaus der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg.

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.
- [Bisanz 1999]** Bisanz, Carsten: Heizlastauslegung im Niedrigenergie- und Passivhaus, Fachinformation PHI-1999/2, Darmstadt, Passivhaus Institut, Januar 1999
- [CEPHEUS 13]** Schnieders, Jürgen; Common Measurement and Evaluation Scheme, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 13, Passivhaus Institut, Darmstadt 2000
- [Carlsson/ Elmroth 1980]** Carlsson, B., Elmroth, A.; Engvall, P.-Å., Airtightness and thermal insulation; Swedish Council for Building Research, Stockholm, D37:1980.
- [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.
- [EU 1993]** Colombo, R., Conti, F., Gilliaert, D., Helcké, G., Landabaso, A., Format Sheets for Presentation of the Results of Buildings Projects, Commission of the European Communities, Document SP-I 93.01, Joint Research Centre, Ispra 1993
- [Ewert 2000]** Ewert, Markus: Passivhaus – monoenergetisch versorgt mit Strom in „Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Protokoll-band Nr. 20“ („Passivhaus-Versorgungstechnik“), Passivhaus Institut, September 2000
- [Feist 1994]** Feist, W., Thermische Gebäudesimulation, S.274ff, Heidelberg 1994.
- [Feist 1998a]** Feist, W., Wirtschaftlichkeitsuntersuchung ausgewählter Energiesparmaßnahmen im Gebäudebestand, Darmstadt 1998.
- [Feist 1998b]** Feist, Wolfgang: Passivhaus Sommerklima Studie, Projektendbericht. Fachinformation PHI-1998/10, Darmstadt, Passivhaus Institut, Dezember 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.
- [Feist 2001]** Feist, Wolfgang; Peper, Søren; Görg, Manfred; von Oesen, Matthias: Klimaneutrale Passivhaus-Reihenhaussiedlung Hannover-Kronsberg, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 18, Darmstadt, Passivhaus Institut, Mai 2001

-
- [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.
- [Kaufmann 2001]** Kaufmann, Berthold; Feist, Wolfgang: Vergleich von Messung und Simulation am Beispiel eines Passivhauses in Hannover-Kronsberg; CEPHEUS-Projektinformation Nr. 21, Darmstadt, Passivhaus Institut, Juni 2001
- [K&P 20001]** Kieback & Peter, Technologie für Gebäudeautomation, Niederlassung Frankfurt: Projektdokumentation zum Projekt Passiv-haus-Siedlung Kronsberg, 2001
- [Kronvall 1980]** Kronvall, J., Air Flows in Building Components; Lund Institute of Technology, report TVBH-1002, Lund 1980.
- [Lundgren 1989]** Lundgren, Thomas: Bostäder som brukarstyrda energisystem. Byggnadsforskningradet, Stockholm, R7: 1989
- [Lundström 1986]** Lundström, Erik: Occupant Influence on energy consumption in single-family dwellings. Swedish Council for Building Research D5: 1986
- [Peper 1999a]** Peper, S., Untersuchung der Luftdichtheit in der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg, Passivhaus Institut Darmstadt, Fachinformation PHI-1999/4.
- [Peper 1999b]** 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.
- Pfluger 2000]** [Pfluger, Rainer; Peper, Søren: Ergebnisse der Messung in der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg; Tagungsband der 4. Passivhaus Tagung; Passivhaus Dienstleistungs GmbH, Kassel und Darmstadt 2000
- [Pfluger 2001]** Pfluger, Rainer; Feist, Wolfgang: Messtechnische Untersuchung und Auswertung; Kostengünstiger Passivhaus-Geschosswohnungsbau in Kassel Marbachshöhe, Fachinformation PHI-2001/2, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 15, 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.
- [Russ 2000]** Russ, Christel; Greuel, Bastian; Bühring, Andreas: Demonstrationsprojekt für ein innovatives Wärmeversorgungskonzept auf der Basis passiver und aktiver Solarenergienutzung in Kombination mit neuartigen Wärmepumpen. Zwischenbericht 01.01. - 31.12.2000, Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, Mai 2001
- [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.
- [Schnieders 2001]** Schnieders, Jürgen; Feist, Wolfgang; Pfluger, Rainer; Kah, Oliver, CEPHEUS – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung, Endbericht. CEPHEUS-Projektinformation Nr. 22, Passivhaus Institut, Darmstadt 2001
- [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.
- [windwaerts]** Daten von der Homepage der Firma Windwärts Energie GmbH, Kunst und Windenergie (www.windwaerts.de).
- [Wolff 2000]** Wolff, Dieter: Kurzstudie "Einflüsse auf den Heiz- und Warmwasserverbrauch und Auswirkungen auf die Heizkostenerfassung in Niedrigenergiehäusern", Wolfenbüttel, Oktober 2000
- [WSVO 95]** Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung) vom 16. August 1994.