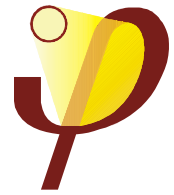


CEPHEUS - gefördertes Projekt:
EUROPÄISCHE KOMMISSION
DIRECTORATE-GENERAL XVII, ENERGY
THERMIE
Projekt-Nummer: **BU/0127/97**

**Passiv
Haus
Institut**
Dr. Wolfgang Feist



CEPHEUS-Projektinformation Nr. 19



Meßtechnische Untersuchung und Auswertung

Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg

Endbericht
Meßzeitraum Oktober 1999 bis April 2001

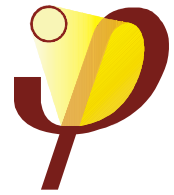


Im Auftrag der Stadtwerke Hannover AG



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

**Passiv
Haus
Institut**
Dr. Wolfgang Feist



CEPHEUS-Projektinformation Nr. 19



Meßtechnische Untersuchung und Auswertung

Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg

Autoren:

Søren Peper
Dr. Wolfgang Feist
Oliver Kah

unter Mitarbeit von

Matthias Nagel und Wiebke Wenzel

Auftragnehmer:

PASSIVHAUS INSTITUT
Rheinstraße 44/46
64283 Darmstadt
E-Mail: Passivhaus@t-online.de
www.passiv.de

Bezug:

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

Hannover 2001

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

Besonderer Dank gilt allen Bewohnern der Siedlung für die Mitarbeit und Unterstützung sowie die aufgebrachte Geduld bei den zahlreichen Besuchen.

Herrn Torsten Schwarz und Herrn Haushalter sei hier ganz besonders gedankt für die zahlreichen zusätzlichen Zählerablesungen, Antworten auf unzählige Fragen sowie das Verstellen des Schattenringes.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG UND ZUSAMMENFASSUNG	3
2	PROJEKTÜBERSICHT	9
3	HEIZWÄRMEBILANZ NACH PHPP	12
4	MEßKONZEPT	14
5	AUFBAU DER MEßTECHNIK.....	14
5.1	Meßaufnehmer	17
5.1.1	Übersicht Meßkanäle	19
5.2	Wärmemengenzähler (WMZ)	21
5.2.1	Hausanlagen	21
5.2.2	Intensivmessung-WMZ	24
5.2.3	Haupt-WMZ für Hauszeilen.....	24
5.3	Haupt- und Warmwasserzähler	24
5.4	Raumlufttemperaturen.....	25
5.5	Stromzähler	26
5.6	Intensivmessung	27
5.6.1	Wassertemperaturen.....	27
5.6.2	Kanal-Lufttemperaturen und -Luftfeuchte	28
5.6.3	Volumenstrom	30
5.6.4	Kondensat	31
5.7	Wetterstation	32
6	TECHNISCHE DATEN DER MEßTECHNIK.....	33
7	DATENAUSWERTUNG	35
8	ÜBERSICHT ÜBER DIE MEßERGEBNISSE.....	37
8.1	Behaglichkeitsparameter	38
8.2	Heizlasten	38
8.1	Heizwärmeverbrauch	38
8.2	Endenergieverbrauch	39
8.3	Primärenergieverbrauch.....	40
9	ERGEBNISSE DER MESSUNGEN IM EINZELNEN	42
9.1	Energieverbrauch.....	42
9.1.1	Nutzenergieverbräuche	42
9.1.2	Endenergieverbräuche	51
9.1.3	Endenergievergleich mit Niedrigenergiehäusern (NEH).....	52

9.1.4	Nutzerstreuung und Verbrauchsniveau im Vergleich	54
9.1.5	Primärenergieverbräuche.....	57
9.2	Thermische Behaglichkeit	59
9.2.1	Typische Winterwochen	63
9.2.2	Typische Sommerwochen.....	65
9.3	Heizlasten	68
10	PROJEKTSPEZIFISCHE MEBDATENAUSWERTUNG	71
10.1	Klimadatenvergleich.....	71
10.2	Kaltwasserverbrauch.....	74
10.3	Warmwasser	75
10.3.1	Warmwasserverbrauchsmenge	75
10.3.2	Fernwärmeverbrauch zur Warmwasserversorgung.....	76
10.4	Heizleistungen.....	77
10.4.1	Wärmeabgabe der Verteilungen: teilweise Nutzbarkeit im Winter.....	79
10.5	Stromverbrauch.....	84
10.5.1	Stromeffizienz Haushaltsstrom	84
10.5.2	Gemeinschaftsstromverbräuche	90
10.6	Wärmerückgewinnungsgerät.....	91
10.7	Zusätzliche Auswertung der Temperaturdaten	95
10.7.1	Vergleich der EG/OG Temperaturen	96
10.7.2	Raumlufttemperaturen in einem unbeheizten Haus	97
10.7.3	Mediumtemperaturen Versorgungsnetz.....	99
10.8	Luftfeuchte	100
10.9	Klimaneutralität der Passivhaussiedlung	104
11	LITERATUR	108
12	ANHANG: FORMAT SHEETS FOR PRESENTATION OF THE RESULTS OF BUILDING PROJECTS.....	111

1 Einleitung und Zusammenfassung

Die klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg besteht im realisierten ersten Bauabschnitt aus 32 Passivhäusern in 4 Zeilen. Sie wurde im Dezember 1998 fertiggestellt und Anfang 1999 bezogen.

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 konzeptionellen Ziele ist die Siedlung umfassend mit Meßtechnik ausgestattet worden. Die Auswertung der Meßdaten erlaubt eine Aussage zum Erfüllungsgrad der gesteckten Ziele.

In diesem Endbericht der meßtechnischen Begleitung werden die Auswertungen bezüglich aller Verbräuche und der Komfortparameter dargestellt. Untersucht wurde der Zeitraum 1. Oktober 1999 bis 30. April 2001. Diese umfaßt die ersten beiden vollständigen Heizperioden der Siedlung.

Nähere Angaben zu den Passivhäusern (Baubeschreibung, Haustechnik, Kosten, Qualitätssicherung usw.) sind dem gesonderten Bericht „Klimaneutrale Passivhaus-siedlung Hannover-Kronsberg“ [Feist 2001] zu entnehmen.

Die drei bisherigen Zwischenberichte zur Meßdatenauswertung der Siedlung ([Peper 2000a], [Peper 2000b] und [Peper 2001]) gehen überarbeitet in diesem Bericht auf. Vereinzelt wurden Werte bereinigt oder mußten korrigiert werden. Nähere Angaben dazu finden sich in Abschnitt Datenauswertung.

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.

Für die folgenden zusammengefaßten Ergebnisse bzgl. des Energieverbrauchs sei auf folgende Punkte hingewiesen:

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 somit in den von uns dokumentierten Daten enthalten. Alle Angaben zum „gesamten Endenergieverbrauch“ oder zum „gesamten Primärenergieverbrauch“ enthalten bereits auch die Stromverbräuche und zwar nicht nur den Hilfsstrom für die Haustechnik (wie in DIN 4701/Teil 10), sondern auch den

gesamten Haushaltsstromverbrauch (inkl. Licht, Kühlen, Waschen, Spülen, Kochen etc.) und den gesamten Gemeinschaftsstromverbrauch. Dies ist beim Vergleich mit anderen Messungen unbedingt zu berücksichtigen.

Wir beziehen unsere gemessenen Verbrauchswerte hier grundsätzlich auf die „treated floor area“ TFA als Bezugsfläche. Diese Bezugsfläche ist fast exakt gleich der beheizten Wohnfläche der Häuser nach 2. Berechnungsverordnung. Damit sind die hier dokumentierten Energieverbrauchskennwerte ($\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) direkt vergleichbar mit den statistischen Erhebungen der Heizkostenabrechnungs-Unternehmen. Die zur Berechnung des spezifischen Heizwärmebedarfs nach Wärmeschutzverordnung oder Energieeinsparverordnung verwendete „Gebäudenutzfläche A_N “ ist demgegenüber um 32% (!) größer (vergl. Tabelle 1). Bezieht man die Verbrauchswerte statt auf beheizte Wohnfläche auf A_N , so ergeben sich daher ganz erheblich niedrigere Kennwerte. Auch dies ist beim Vergleich mit anderen Publikationen zu beachten.

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 $16 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$; würde man den Verbrauch auf die Gebäudenutzfläche A_N gemäß Wärmeschutzverordnung beziehen, so ergäben sich $12,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Dieser gemessene durchschnittliche Heizwärmeverbrauch ist so außerordentlich gering, daß die Heizung bzgl. der Energieversorgung dieser Häuser praktisch unbedeutend ist. Im Vergleich zum durchschnittlichen Gebäudebestand in Deutschland beträgt die Einsparung über 90% und selbst im Vergleich zu neuen Reihenhäusern nach der gültigen Wärmeschutzverordnung werden noch über 85% eingespart. Dies beweist, daß sowohl die Wärmedämmmaßnahmen als auch die Wärmerückgewinnung ihren erwarteten Beitrag zur Energieeffizienz erbringen. Es beweist darüber hinaus, daß auch ein wie üblich stark streuendes Nutzerverhalten keinen negativen Einfluß auf die sich im Durchschnitt einstellende Heizenergiebilanz hat. Die dokumentierten Meßergebnisse können nur dann so geringe Werte aufweisen, wenn alle Komponenten der Passivhäuser ihre vorausberechneten Qualitätsmerkmale auch einhalten. Das bedeutet:

Die verbesserte Wärmedämmung mit mittleren U-Werten der opaken Bauteile von $0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 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 1999] bestätigt werden.

Die qualitativ entscheidend verbesserten Fenster mit U-Werten von $0,83 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und dennoch 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 $2,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$). 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 ausgiebig genutzt, insbesondere in den Übergangsjahreszeiten und vor allem im Sommer. Eine Abschätzung zeigt, daß in der relevanten Heizzeit der nutzerbedingte Luftwechsel niedriger als $0,03 \text{ h}^{-1}$ ist und der Einfluß auf den Heizwärmebedarf somit weniger als $2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ beträgt. Wegen des geringen Einflusses ist der genaue Wert allerdings meßtechnisch nicht quantifizierbar. Entgegen vielfach geäußerter Befürchtungen stellt sich somit heraus, daß die Fensterlüftung bei Passivhäusern in der Praxis bedeutungslos ist.

Die Passivhäuser auf dem Kronsberg bilden die erste Reihenhaussiedlung, bei welcher für die Beheizung der Wohnräume allein die Frischluftheizung eingesetzt wird. Die Funktionstüchtigkeit dieses Konzepts war im Forschungsprojekt CEPHEUS zunächst theoretisch 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 es, die Heizleistung noch etwas darüber hinaus anzuheben. Die Meßergebnisse zur tatsächlich aufgetretenen Heizleistung in den beiden Wintern 1999/2000 und 2000/2001 bestätigen die Theorie: Gemessen wurden je $8,8$ bzw. $7,0 \text{ W}/\text{m}^2$ maximale tagesmittlere Heizlast, wobei es sich beim ersten Wert ganz offensichtlich um einen Ausreißer handelt (vgl. Abschnitt 9.3). Die maximal verfügbaren Heizlasten werden somit immer unterschritten; bestätigt wurde das Heizlastprojektierungsverfahren nach PHPP, welches für die Häuser einen Wert von $7,1 \text{ W}/\text{m}^2$ liefert.

Daß die zusätzliche (extrem geringe) Heizleistung immer ausgereicht hat, geht auch aus der Winterkorrelationsanalyse der Raumlufttemperaturen über den Außentemperaturen hervor. Ein Einfluß der Außentemperatur auf die Raumtemperaturen ist im Winter praktisch nicht vorhanden: auch am kältesten Tag werden im Mittel aller dauerbewohnten Häuser $20,9^\circ\text{C}$ erreicht.

Der Endenergieverbrauch an Fernwärme für Heizung und Warmwasserbereitung zusammen wurde für das erste Jahr zu $34,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ bestimmt. Auch dieser Wert ist außerordentlich gering und bedeutet eine Einsparung von 75% gegenüber durchschnittlichen Neubauten. Wenn wir den gemessenen Fernwärmeverbrauch nicht auf Wohnfläche, sondern auf Gebäudenutzfläche gemäß Wärmeschutz-

verordnung beziehen, ergeben sich nur 26,1 kWh/(m²a). Entscheidend für die energiewirtschaftliche Bewertung ist jedoch der Primärenergieverbrauch inkl. der Verluste der vorgelagerten Versorgungskette. Betrachten wir hier zunächst nur Heizung und Warmwasserbereitung, so ergeben sich wegen der Gutschriften für die Fernwärme 24,2 kWh/(m²a). Dieser Wert ist geringer als die publizierten Werte für die Passivhauszeile in Neuenburg (30 kWh/(m²a)) [Russ 2000], trotz des in der rheinischen Tiefebene milderen Klimas. Auch der Wert für die Passivhäuser in Neuenburg ist als sehr gut einzustufen: Die hier vorgelegten Meßergebnisse aus Hannover zeigen aber, daß auch eine Fernwärmeversorgung von Passivhäusern sehr gute Betriebsergebnisse aufweisen kann. Das „Wettrennen“ der verschiedenen Versorgungsoptionen für Passivhäuser bleibt damit vorläufig unentschieden (vgl. [Feist 2000a]).

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, wie in der Norm beschrieben, einbeziehen, so ergibt sich der gemessene Jahresprimärenergieverbrauch zu 26,1 kWh/(m²a) (Heizung, Lüftung und Warmwasserbereitung). Die in DIN 4701/10 verwendeten Festlegungen entsprechen genau denen der Kabinettsvorlage der künftigen Energieeinsparverordnung EnEV. Damit wird nun ein Vergleich mit den dort festgelegten Anforderungen möglich: Das repräsentative Reihenhaus der Passivhaussiedlung weist ein A/V-Verhältnis von 0,61 m⁻¹ auf. Daraus bestimmt sich ein Anforderungswert für Q_p bei diesem Gebäude zu 106,9 kWh/(m²a) (rechnerischer Anforderungswert!). Der in der Siedlung im Mittel gemessene Primärenergieverbrauch liegt damit um mehr als einen Faktor 4 unter dem Anforderungswert der künftigen Verordnung. Darüber hinaus ist bei diesem Vergleich zu bedenken, daß die rechnerischen Nachweiswerte gemäß der Normen 4108/6 und 4701/10 regelmäßig niedriger ausfallen werden als die tatsächlich gemessenen Verbrauchswerte [Eschenfelder 1999]. Die in der Passivhaus-siedlung Hannover in der Praxis bereits im ersten Betriebsjahr erreichte Primärenergieeinsparung ist daher selbst im Vergleich mit der künftigen Verordnung außerordentlich hoch.

Wenn, wie bei Passivhäusern, der Energieverbrauch für Wärme so stark reduziert wird, daß er praktisch bedeutungslos ist, treten andere Energieströme im Gebäude in den Vordergrund. Insbesondere der Verbrauch an elektrischer Energie im Haushalt ist nun dominant. Auch läßt sich das thermische Verhalten der Häuser nicht mehr von den elektrischen Energieströmen abkoppeln: Alle im Haus eingesetzte elektrische Energie wird letztendlich in Wärme umgesetzt (Lichtenergie, die das Haus durch die Fenster verläßt, ist vernachlässigbar, ebenso wie chemische Energie, z.B. aufgeladene Handybatterien- und Lageenergie). Diese Wärmefreisetzung im Haus 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 bedeutend wie der rechnerische Heizwärmebedarf. Man erkennt daraus, daß sinnvolle Aussagen zur Energiebilanz nur unter Einschluß auch der elektrischen Energie möglich sind. 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 von besonderer Bedeutung.

Bei der Passivhaussiedlung auf dem Kronsberg ist es gelungen, die elektrische Energieeffizienz bei den Haushaltsgeräten gegenüber dem Durchschnitt deutscher Haushalte ganz erheblich zu steigern. In einer Kombination von kompetenter 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%.

Nimmt man alle dauerbewohnten Reihenhäuser (22) und schließt auch den Stromverbrauch für Lüftung, Solaranlagen und den Gemeinschaftsstrom mit ein, so ergeben sich 23,3 kWh/(m²a) Jahresstromverbrauch. Auch dieser Wert ist immer noch deutlich geringer als der Referenzwert mittlerer deutscher Haushalte (32,8 kWh/m²a)). Damit zeigt die Passivhaussiedlung auf dem Kronsberg auch, daß eine hocheffiziente Energietechnik mit Lüftung, Solaranlagen und elektronischen Regelungen keinesfalls zu überhöhten elektrischen Energieverbräuchen führen muß.

Eine Gesamt-Primärenergiebilanz schließt auch die Primärenergieaufwendungen für den Haushaltsstrom mit ein; dieser dominiert mit 49,4 kWh/(m²a) sogar die gesamte 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. Verwendet man als Bezugsfläche nicht die Wohnfläche, sondern die „Gebäudenutzfläche A_N“ und setzt die Primärenergiefaktoren aus DIN 4701 an, so erhält man für den gesamten Primärenergieverbrauch inkl. Haushaltsstrom 71,5 kWh/m²a). Der Vergleichswert für einen künftigen Neubau nach Energieeinsparverordnung wäre 181,7 kWh/(m²a). Auch diesem Wert gegenüber liegt immer noch eine Reduktion um über 60% vor.

Ein wichtiges Ergebnis der Meßdatenauswertung in der Passivhaussiedlung ist, daß die Funktion des Passivhauskonzeptes und die ganz erhebliche Reduktion des Heizwärmeverbrauchs nun statistisch gesichert ist. Der Vergleich mit Meßdaten anderer Projekte zeigt, daß die absolute Streuung der Verbrauchswerte bei Verbesserung der Energieeffizienz sogar abnimmt.

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 erkennbaren Streuung des Nutzerverhaltens sehr gut gesichert. Bei einer von Lundström publizierte 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. Vereinzelt geäußerte Befürchtungen, daß definierte Angaben zur Bauphysik und zum Heizwärmeverbrauch bei Gebäuden mit sehr gutem Wärmeschutz (wie Passivhäusern) 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 DM 2.500 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.

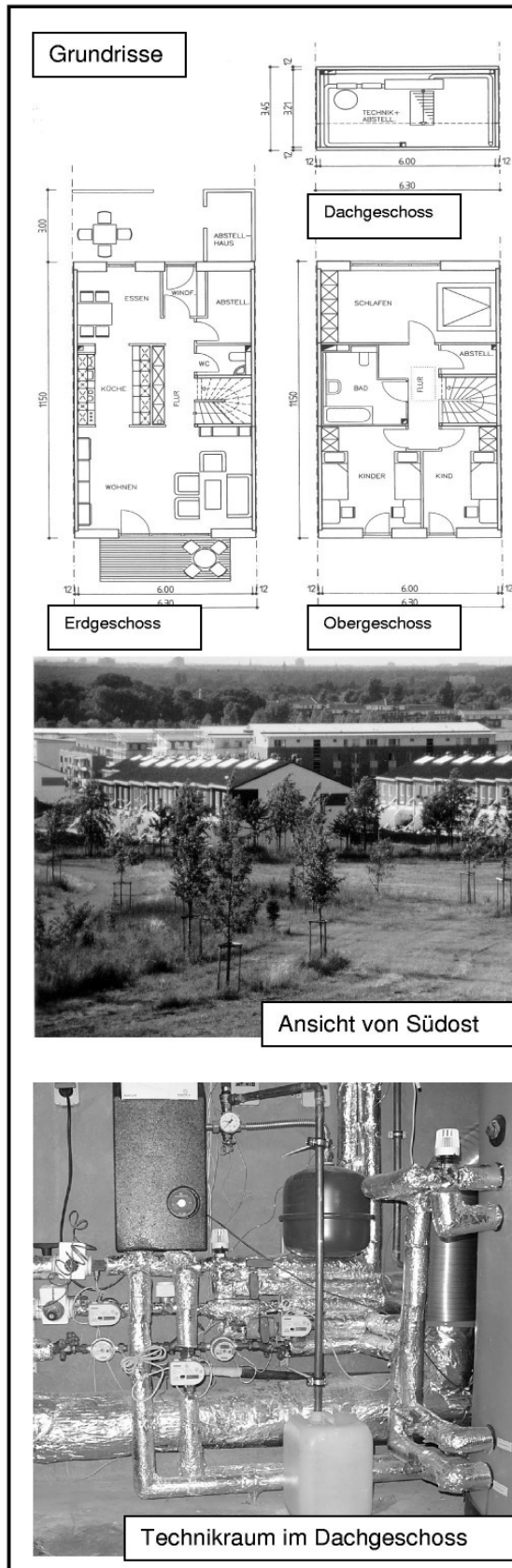
2 Projektübersicht

Die Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg besteht aus 32 Passivhäusern, welche in vier Hauszeilen je acht Häuser angeordnet sind, wobei es drei unterschiedliche Hausgrößen gibt. Die Siedlung wurde 1998 vom Bauträger Rasch & Partner errichtet. Die Häuser sind in Mischbauweise realisiert worden (tragende Betonfertigteile mit hochwärmegedämmten Holzleichtbauelementen für Dach und Außenwände). Es handelt sich um die erste Passivhaussiedlung mit einer Wärmeversorgung über reine Zuluftnachheizung. Nur im Badezimmer befindet sich noch ein kleiner Heizkörper um kurzzeitig höhere Raumlufttemperaturen (24 °C) ermöglichen zu können. Die Wärmeversorgung der Siedlung für Warmwasser und Heizung erfolgt über zwei Fernwärmeübergabestationen, welche sich in zwei separaten Technikhäusern befinden. Zusätzlich verfügt jedes der Häuser noch über eine Solaranlage zur Unterstützung der Warmwasserbereitung. Zum hygienisch notwendigen Luftwechsel ist jedes einzelne Passivhaus mit einem Lüftungsgerät mit Wärmeübertrager ausgestattet. Die Projektkurzübersicht zeigt die wichtigsten Daten der Gebäude (Abb. 1).

	<p>Konstruktion: Mischbau tragende Struktur aus Betonfertigteilen Außenwand und Dach als Holzleichtbauelement</p> <p>Heizsystem: reine Zuluft-nacherwärmung Versorgung durch Fernwärme</p> <p>Lüftung: Wohnungslüftung Mechanische Lüftung mit WRG 78%</p> <p>Energiekennwert: q_H: ca. 12 kWh/m²a, Berechnung mit PHPP</p> <p>spezif. Bauwerkskosten: ca. 872 €/m² (Wohnfläche) ohne MwSt.</p>
<p>32 Reihenhäuser in Hannover-Kronsberg Rasch & Partner Baujahr 1998 Wohnfläche je 75-120 m²</p>	

Abb. 1: Projekt-Kurzübersicht der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg.

Nachfolgend ist eine zweiseitige Projektbeschreibung mit den wichtigsten Angaben zu den Passivhäusern dargestellt (Grundrisse und Schnitte: Rasch & Partner, Südost Ansichtsfoto: Manfred Görg, Lageplan: nach [Eckert 2000]). Wie bereits in der Einleitung beschrieben, sind detaillierte Angaben der gesondert veröffentlichten Projektbeschreibung [Feist 2001] zu entnehmen.



Passivhaussiedlung Kronsberg

ADRESSE:

Sticksfeld 30 – 124
 30539 Hannover, Niedersachsen

BAUTRÄGER:

Rasch & Partner GmbH,
 Dipl. Ing. F. Rasch, Darmstadt

BAUHERR:

Rasch & Partner GmbH,
 Dipl. Ing. F. Rasch, Darmstadt

ARCHITEKT:

Rasch & Partner GmbH,
 Dipl.-Ing. Arch. P. Grenz,
 Dipl. Ing. F. Rasch, Darmstadt

FACHINGENIEURE:

Haustechnik:
 inPlan GmbH, Dipl.-Ing. N. Stärz,
 Pfungstadt

FERTIGSTELLUNG:

12/1998

VERÖFFENTLICHUNGEN:

- Feist, Wolfgang; Peper, Søren; Görg, Manfred; von Oesen, Matthias: Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 18, Fachinformation PHI-2001/5, Darmstadt, Passivhaus Institut, Juni 2001.
- Peper, Søren; Feist, Wolfgang: Thermographische Untersuchung der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg CEPHEUS-Projektinformation Nr. 20, Fachinformation PHI-2001/7, Darmstadt, Passivhaus Institut, Juni 2001.
- Kaufmann, Berthold; Feist, Wolfgang: Vergleich von Messung und Simulation am Beispiel eines Passivhauses in Hannover-Kronsberg; CEPHEUS-Projektinformation Nr. 21, Fachinformation PHI-2001/8, Darmstadt, Passivhaus Institut, Juni 2001.
- Enikö Baffia: Wärmebrückenfreie Reihenhäuser der Passivhaus-Siedlung Hannover Kronsberg in Mischbauweise; in Protokollband Nr. 16 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser "Wärmebrückenfreies Konstruieren", Darmstadt, Passivhaus Institut, 1999.
- Peper, Søren: Untersuchung der Luftdichtheit in der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg, Fachinformation PHI-1999/4, Darmstadt, Passivhaus Institut, 1999
- Stärz, Norbert; Kreuz, Witbold: Vorbereitende Untersuchung zur Haustechnik in den Passivhäusern Hannover Kronsberg, Pfungstadt, Ing.-Büro inPlan, April 1998



Ansicht von Südost

Projektbeschreibung

- **Satteldach-Reihenhauszeile** mit jeweils 8 Wohneinheiten, insgesamt 32 Wohneinheiten, Hannover-Kronsberg, Deutschland (9°44' O, 52°22'N), Südausrichtung (Abw. 15° nach West).
- **Energiekonzept:** Einsatz von
 - sehr guter Wärmedämmung und wärmebrückenfreien Details,
 - hoher Gebäudeluftdichtheit,
 - hoch-effizienter Wärmerückgewinnung,
 - passiver Solarenergienutzung,
 - 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung und
 - supergedämmten Fensterrahmen.
- **PHPP-Berechnung:**
 Heizwärmebedarf (Mittelwert der Siedlung):
 $Q_H = 11,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNFa}})$
 Heizwärmelast $P_H = 7,1 \text{ W}/\text{m}^2$
- **Kosten:** ca. 827 €/m² Wohnfläche)

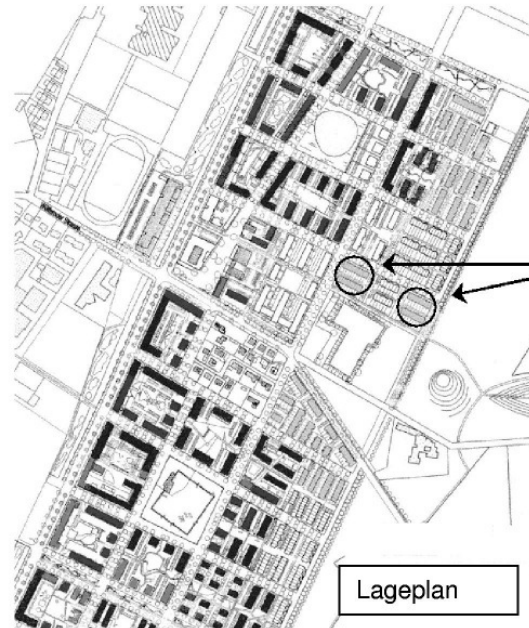
Konstruktion

- **Konstruktionsart:** tragende Struktur aus Betonfertigteilen, Außenwand und Dach als Holzleichtbauelement
- **Fenster und Verglasung:** 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung (g-Wert 60%), supergedämmte Fensterrahmen ($U_f = 0,57 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)
- **U-Werte:**

Außenwand	
Holzleichtbauelement	0,126 W/(m ² K)
massive Giebelwand	0,097 W/(m ² K)
EG-Bodenplatte	
(Endhaus)	0,096 W/(m ² K)
(Mittelhaus)	0,125 W/(m ² K)
Dach	0,095 W/(m ² K)
Verglasung	0,75 W/(m ² K)
Fenster ges.	0,83 W/(m ² K)

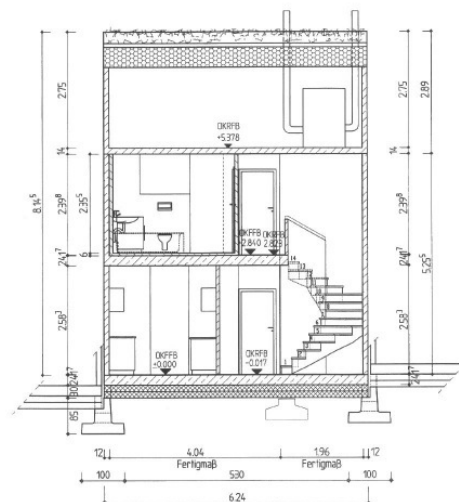
Haustechnik

- **Heizung und Lüftung:**
 - Zuluftnacherwärmung und Badheizkörper
 - Versorgung durch Fernwärme
 - eine autarke Lüftungsanlage je Wohneinheit
 - Gegenstrom-Wärmeübertrager (78%)
- **Warmwasser, Solaranlage:** solare Warmwasserbereitung über Flachkollektoranlage (3,8 m² Absorberfläche) mit einem Warmwasserspeicher von 300 l Inhalt (solarer Deckungsgrad ca. 50%).
- **Elektr. Geräte:** Beratung zu elektrischen Haushaltsgeräten und Förderung von hocheffizienten Energiespargeräten. Ausstattung aller Wohneinheiten mit einem an die Abluftanlage gekoppelten, energiesparenden Trockenschrank.

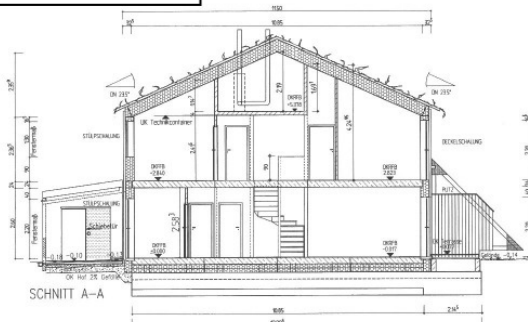


Lageplan

Querschnitt



Längsschnitt



3 Heizwärmebilanz nach PHPP

Schon in der frühen Phase der Vorprojektierung wurde der voraussichtliche Energiekennwert für die Heizwärme mit Hilfe des Passivhaus-Projektierungspaketes [PHPP] abgeschätzt. Die Berechnungen wurden im Laufe der Zeit dem fortschreitenden Erkenntnisstand (z.B. Ergebnissen der Drucktests) angepaßt und auf die später innerhalb von CEPHEUS vereinbarte neue einheitliche Energiebezugsfläche A_{TFA} umgerechnet. Beispielhaft wird in Abb. 2 hier das Heizwärmeblatt des Haustyps „Jangster de LUX“ Mittelhaus dargestellt. Für dieses berechnet sich der Heizwärmebedarf unter Berücksichtigung der Wärmebrücken zu 10,0 kWh/(m²a). Die Wärmebedarfswerte der anderen Haustypen sind in Tabelle 2 dokumentiert. Die zugehörigen PHPP-Berechnungen finden sich in [Feist 2001].

Haustyp	Energiebezugsfläche (TFA) [m ²]	Anzahl Häuser	Heizwärmebedarf (PHPP) [kWh/(m ² a)]
„123“	75,1	1	14,7
„Jangster“	96,8	9	12,5
„Jangster de LUX“ Mittelhaus	119,5	14	10,0
„Jangster de LUX“ Endhaus	119,5	8	14,0

Tabelle 2: Übersicht über die Energiebezugsflächen und die berechneten Heizwärmebedarfe der vier Passivhaustypen der Siedlung in Hannover-Kronsberg

Der flächenbezogene **Mittelwert des Heizwärmebedarfs aller 32 Häuser** (vier Haustypen) ergibt sich zu **11,8 kWh/(m²a)**.

Passivhaus-Projektierung ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME

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

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

Transmissionswärmeverluste Q_T Summe 3045 kWh/a 25,5 kWh/(m²a)

Leiftungsanlage:	wirksames Luftvolumen V_L m ³	A_{EG} m ²	lichte Raumhöhe m	V_R m ³	
		119.5	2.50	299	
Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmetauschers	η_{WRG} <input type="text" value="80%"/>				
Wärmebereitstellungsgrad des Einreichwärmetauschers	η_{WR} <input type="text" value="0%"/>				
energetisch wirksamer Luftwechsel n_L	$n_{L, Anlage} \cdot (1 - \eta_{WRG}) + \eta_{WR}$	0.402	0.80	0.023	0.103

Leiftungswärmeverluste Q_L	V_L m ³	n_L 1/h	C_{Luft} Wh/(m ³ K)	Q_L kWh/a	pro m ² kWh/(m ² a)
	299	0.103	0.33	84	853

Summe Wärmeverluste Q_V	Q_T kWh/a	Q_L kWh/a	Reduktionsfaktor Q_L Nacht-/Wochenend- absenkung	Q_V kWh/a	pro m ² kWh/(m ² a)
	3045	853	1.0	3898	32,6

Ausrichtung der Fläche	Reduktionsfaktor vgl. Blatt Fenster	g-Wert (senkr. Einstr.)	Fläche m ²	Globalstr. Heizzeit kWh/(m ² a)	Q_S kWh/a
1. Ost	0.45		0.00	225	
2. Süd	0.51	0.60	11.46	364	1276
3. West	0.45		0.00	225	
4. Nord	0.38	0.60	8.64	142	280
5. Horizontal	0.45		0.00	360	

Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S Summe 1556 kWh/a 13,0 kWh/(m²a)

Interne Wärmequellen Q_I	W/d	Länge Heizzeit d/a	spezif. Leistung q_I W/m ²	A_{EG} m ²	Q_I kWh/a
	0.024	225	2.10	119.5	1355

Freie Wärme Q_F $Q_S + Q_I = 2911$ kWh/a 24,4 kWh/(m²a)

Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten $Q_F / Q_V = 0.747$

Nutzungsgrad Wärmegewinne η_G $(1 - (Q_T / Q_V)^2) / (1 - (Q_T / Q_V)^2) = 0.929$

Wärmegewinne Q_G $\eta_G \cdot Q_F = 2704$ kWh/a 22,6 kWh/(m²a)

Heizwärmebedarf Q_H $Q_V - Q_G = 1194$ kWh/a **10,0 kWh/(m²a)**

Anforderung Bauwerksart (ankreuzen)	<input type="checkbox"/>	Grenzwert	15 kWh/(m ² a)	Anforderung erfüllt?	<input checked="" type="checkbox"/> ja
	<input checked="" type="checkbox"/>	Zielwert	15 kWh/(m ² a)		

Abb. 2: Heizwärmeblatt des Haustypen „Jangster de LUX“ Mittelhaus (JDLM) der Passivhaus-Siedlung Hannover-Kronsberg (aus [Feist 2001]).

4 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. Aus diesem Grund mußten alle 32 Häuser in die Messung einbezogen werden. Für die Untersuchung ist die möglichst vollständige Bestimmung der Energiebilanz erforderlich. Dafür ist die Erfassung

- des Heizwärmeverbrauchs,
- des Wärmeverbrauchs zur Aufheizung des Warmwassers,
- des Stromverbrauchs
- und des Kaltwasserverbrauchs notwendig.

Die hausweise Auswertung der Raumlufttemperaturen ermöglicht darüber hinaus Aussagen über den Komfort, die Nutzerstreuung und das Kopplungsverhalten zwischen den benachbarten Reihenhäusern.

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. Die Auflistung der Sensoren erfolgt in Abschnitt 5.

In 17 Passivhäusern sind Display-Module mit Touchscreen-Oberfläche installiert, die den Bewohnern ihre eigenen Verbrauchswerte im Vergleich mit denen des Siedlungsdurchschnitts anzeigen sollen. Die Module werden von der zentralen Meßdatenerfassungsanlage mit den entsprechend umgerechneten Daten versorgt. Die Module und deren Funktion werden hier nicht weiter behandelt, da sie nicht im direkten Zusammenhang mit der Meßdatenerfassung stehen. Die Display-Module waren der Grund zum Einsatz der relativ aufwendigen GLT/DDC-Anlage (GLT = Gebäude-Leit-Technik, DDC = „Direct-Digital-Control“), welche in [Peper 2000c] genauer beschrieben sind.

5 Aufbau der Meßtechnik

Das Meßkonzept ist in einer frühen Projektphase durch das PHI entwickelt worden. Seitens der Stadtwerke Hannover war das Büro inPlan mit der Planung, Erstellung des Leistungsverzeichnisses, Ausschreibung und Bauleitung der Meßdatenerfassung beauftragt. Realisiert wurde die Datenerfassungsanlage durch die Firma Kieback & Peter (K&P). Die Angaben über die Datenerfassungsanlage und die einzelnen Sensoren sind zum Teil Publikationen von [K&P 2001] sowie anderen Herstellerinformationen (Datenblätter etc.) entnommen.

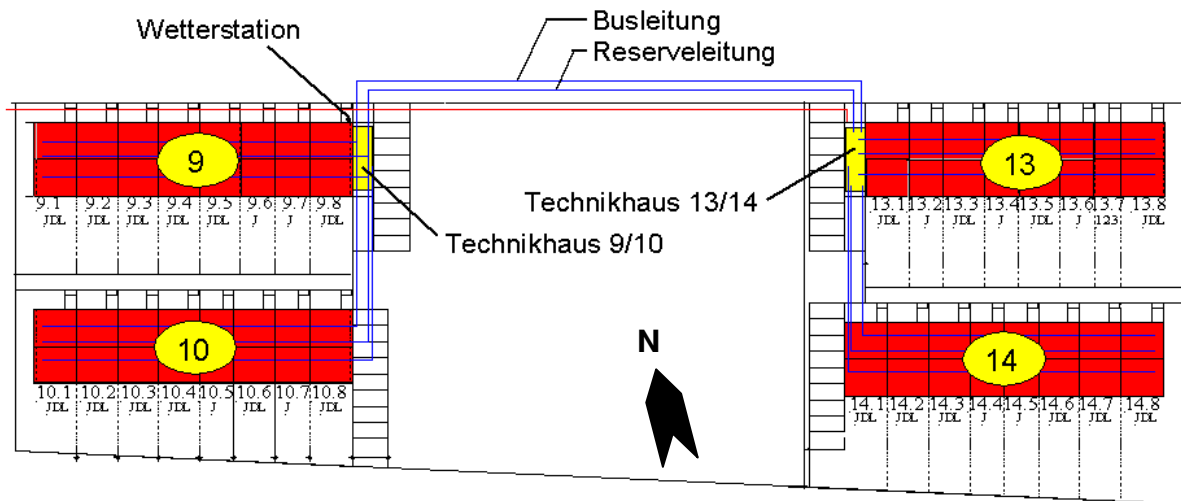


Abb. 3: Lageskizze der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg mit Meßleitungen und Wetterstation. Die vier Hauszeilen sind in den jeweiligen Kreisen nummeriert.

Zur kontinuierlichen Meßdatenerfassung ist in der Passivhaussiedlung eine GLT / DDC-Anlage installiert. Je zwei Reihen der Siedlung sind meßtechnisch mit einem Schaltschrank in dem jeweiligen Technikhaus verbunden. Alle Meßaufnehmer sind über M-Bus oder Feld-Busleitungen und Untermodulen in jedem zweiten Haus mit den Schaltschränken verbunden. Die beiden Hauptschaltschränke sind vernetzt und übergeben ihre Daten an eine GLT-Zentrale (GLT-PC, Betriebssystem UNIX), welche in Haus 9.8 (Sticksfeld 44) positioniert ist. Hier werden die Daten ereignisorientiert aufgezeichnet. Über Modemverbindung ist eine Datenkontrolle (sog. „Trendkurven“-Darstellung) sowie das kanalweise Auslesen der Daten möglich. Ein zweiter PC (Betriebssystem DOS) speichert alle fünf Minuten mit Hilfe eines Datenübertragungsprogramms von K&P (ASCII-Austauschfile) die Daten in konstanten Zeitabständen ab. Dieser PC ist ebenfalls über ein Modem fernsteuerbar und fernauslesbar (Datenübertragung).

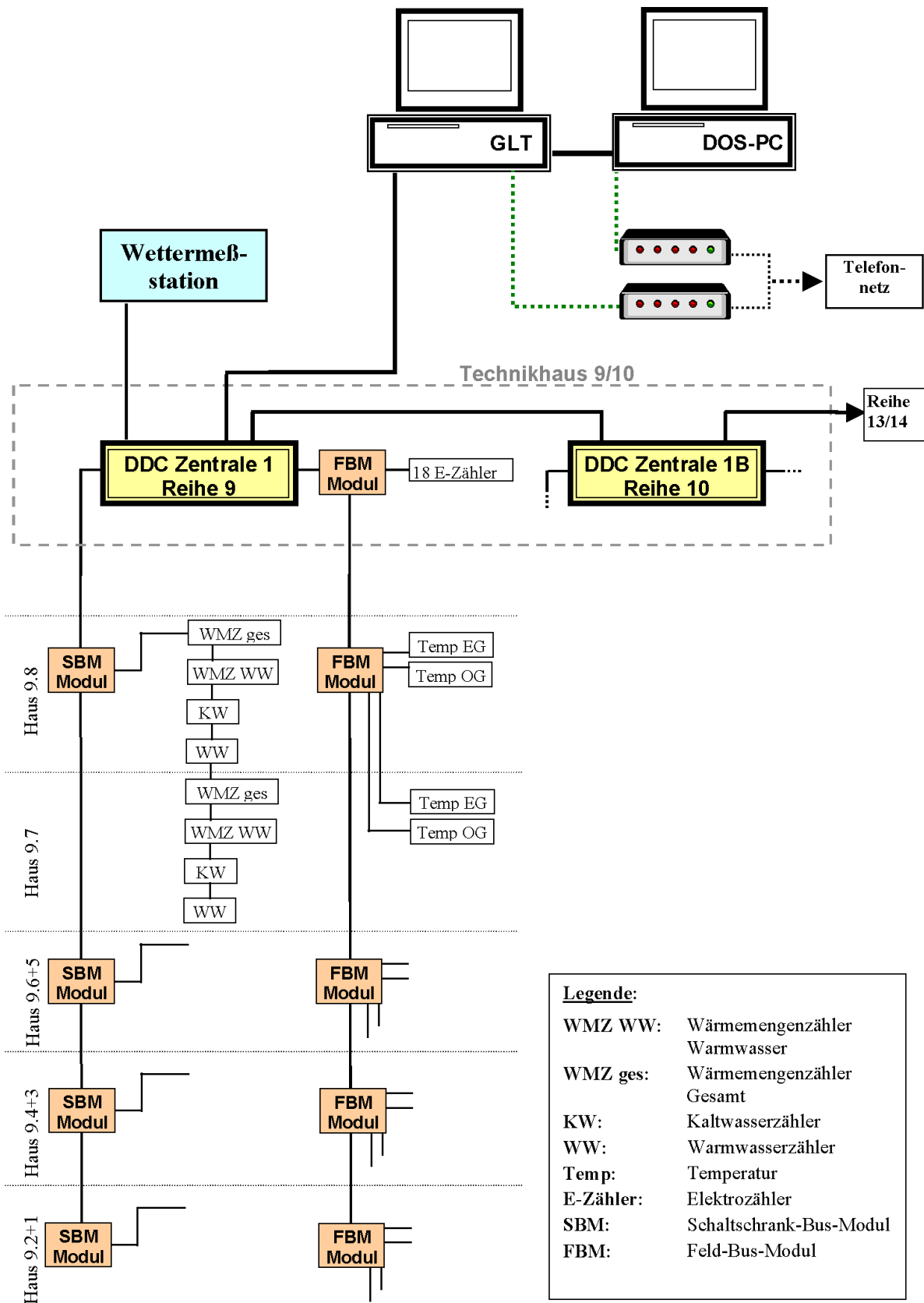


Abb. 4. Ausschnitt-Schema der Datenerfassungsanlage (Standardmessungen) mit Zentralrechner (GLT) und Fernübertragungseinrichtungen. Dargestellt ist ein Ausschnitt von Hausreihe 9 und angedeutet Reihe 10. Die Intensivmessung ist in Reihe 13 aufgeschaltet und hier nicht dargestellt.

In jedem zweiten Haus einer Hausreihe (Haus 2, 4, 6 und 8) befindet sich jeweils in einem kleinem separaten Schaltschrank ein sog. „Schaltschrank-Bus-Modul“ (SBM) und ein sog. „Feld-Bus-Modul“ (FBM). Die FBM haben im digitalen Meßsystem die Aufgabe, entweder bis zu acht digitale („FBM 18“) oder bis zu vier analoge („FBM 34“) Signale vor Ort aufzunehmen. Die Anbindung der Wärmemengen- und Wasserzähler von je zwei Häusern an die Schaltschrank-Bus-Module erfolgt über M-Bus Verbindung. Von den SBM erfolgt die Datenübertragung an eine DDC-Zentrale über SBM-Bus Verbindung (CAN) mit einer Übertragungsleistung von 100 kBaud. Die Kommunikation der jeweils zwei Temperatursensoren je Haus an ein FBM und von diesem an die DDC-Zentrale erfolgt über FBM-Bus Verbindung (CAN) mit einer Übertragungsleistung von 20 kBaud. Die DDC-Zentralen sind untereinander mit einem sog. „Zentralen-Bus“ verbunden (Übertragungsleistung von 100 kBaud). Um größere Entfernungen zu überbrücken, wurden Standleitungstreiber eingesetzt. Alle Verbindungskabel (Busleitungen) verlaufen je Reihe in den Technikgeschossen der Häuser. Zwischen den Hauszeilen sind die Kabel im Erdreich geführt.

Die eingesetzten DDC-Zentralen vom Typ „DDC3002“ und Typ „DDC3002B“ verfügen jeweils über 16 binäre Eingänge, 8 binäre Ausgänge, 8 wahlweise binäre Eingänge/Ausgänge, 16 analoge Eingänge und 8 analoge Ausgänge. Sie arbeiten mit einem 32 Bit/16 MHz Prozessor. In jedem der Schaltschränke sind zwei unterschiedliche DDC-Zentralen vorhanden. Die beiden DDC-Hauptzentralen (Typ „DDC 3002“) je Schaltschrank sind mit eigenem LCD-Display mit Klartextanzeige ausgestattet.

Die beiden zentralen Rechner (GLT und DOS-PC) befinden sich im Abstellraum EG des Hauses 9.8 (Sticksfeld 44)



Abb. 5 und Abb. 6: Links: Schaltschrank im Technikhaus 9/10 mit zwei DDC-Zentralen. Rechts: GLT-Zentralrechner zur Datenerfassung und DOS-PC mit Modems sowie Standleitungstreibern im Abstellraum EG von Haus 9.8

5.1 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. Raumlufttemperatur OG Schlafzimmer / Nordseite

Die Lage der Meßaufnehmer in den einzelnen Passivhäusern (Standardmessung) kann Abb. 7 entnommen werden. Die beiden Wärmemengenzähler und die beiden Wasserzähler sind jeweils im Technikgeschoß der Häuser angeordnet. Die Stromzähler sind zentral für jedes Haus in einem der beiden Technikhäuser installiert und daher auf dem Hausschnitt nicht zu sehen. Die beiden Raumlufttemperaturmessaufnehmer („T“) im Wohnzimmer / EG (Südseite) sowie im Schlafzimmer / OG (Nordseite) sind markiert. Die Sensoren im intensiv vermessenen Haus sowie Sondermessungen werden in diesem Schnitt nicht dargestellt.

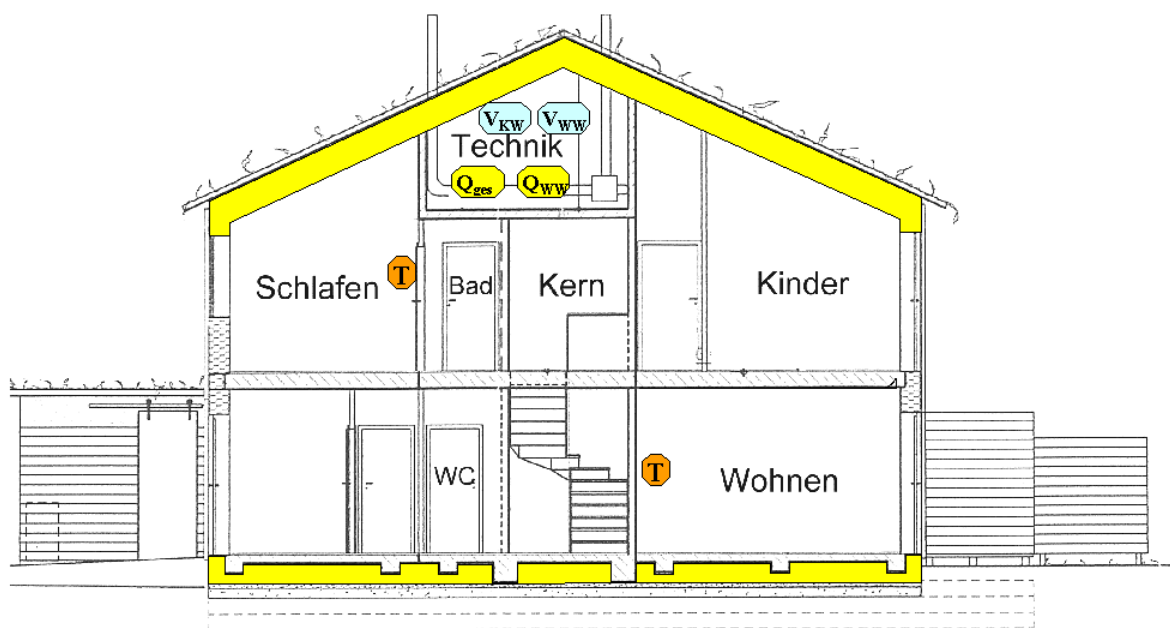


Abb. 7: Schnitt durch ein Passivreihenhaus mit eingezeichneter Lage der Meßpunkte der Standardmessung (nach [Pfluger 2000]).

Die Technikgeschosse der einzelnen Gebäude sind wie oben gezeigt mit jeweils vier Meßaufnehmern ausgestattet. In Abb. 8 sind darüberhinaus noch die Meßaufnehmer für die Intensivmessung in einem der Häuser dargestellt.

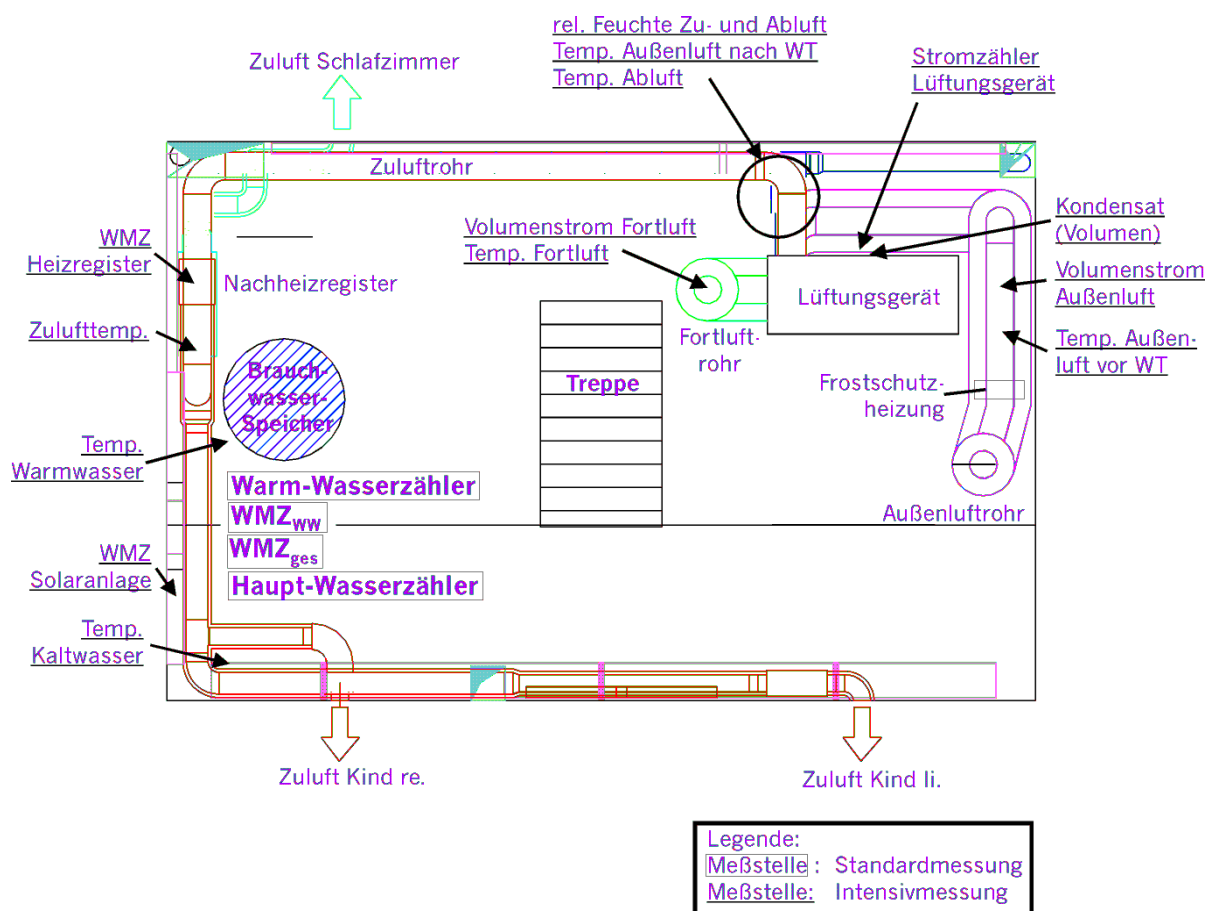


Abb. 8: Position der Meßaufnehmer der Standard- und Intensivmessung im Technikgeschoß.

5.1.1 Übersicht Meßkanäle

Neben der kontinuierlichen Standard- und Intensivmessung sind noch zusätzliche Kanäle vorhanden, und zwar entweder Messungen von Gesamtverbräuchen (z.B. Gesamtwärmemenge in den Technikhäusern), von gemeinschaftlichen Verbräuchen (z.B. elektrische Energie für Pumpen und Außenbeleuchtung der Gemeinschaftsflächen) oder Sonderkanäle (z.B. elektrische Energie Meßtechnikschaltschrank) sowie zusätzliche Kanäle von Wärmemengenzählern, bei denen über den M-Bus Vor- und Rücklauftemperaturen sowie die Wassermenge (Volumen) ausgelesen werden. Diese Meßaufnehmer sind zum größten Teil erst im Laufe des Meßzeitraumes installiert oder aktiviert worden.

Eine Übersicht über alle vorhandenen aufgezeichneten Kanäle gibt Tabelle 3.

Standardmessung (in allen 32 Häusern)		
1.	Raumtemperatur	EG/Süd
2.	Raumtemperatur	OG/Nord
3.	Wärmemenge	Gesamt
4.	Wärmemenge	Warmwasser
5.	Elektrische Energie	Haushalt gesamt
6.	Volumen	Warmwasser
7.	Volumen	Kaltwasser (Gesamt)
Intensivmessung (in einem Haus)		
8.	Raumtemperatur	Essen (Küche) EG/Nord
9.	Raumtemperatur	Kind 1 OG/Süd
10.	Raumtemperatur	Kind 2 OG/Süd
11.	Temperatur	Kaltwasser
12.	Temperatur	Warmwasser
13.	Temperatur	Außenluft vor WT
14.	Temperatur	Außenluft nach WT
15.	Temperatur	Zuluft (nach Heizregister)
16.	Temperatur	Abluft
17.	Temperatur	Fortluft
18.	Wärmemenge	Solaranlage
19.	Wärmemenge	Heizregister
20.	VL-Temperatur	WMZ Solaranlage
21.	VL-Temperatur	WMZ Heizregister
22.	VL-Temperatur	WMZ gesamt
23.	VL-Temperatur	WMZ Warmwasser
24.	RL-Temperatur	WMZ Solaranlage
25.	Volumen	WMZ Solaranlage
26.	Volumen	WMZ Heizregister
27.	Volumen	WMZ gesamt
28.	Volumen	WMZ Warmwasser
29.	Elektrische Energie	Wärmerückgewinnungsanlage
30.	Druckdifferenz (Volumenstrom)	Fortluft
31.	Druckdifferenz (Volumenstrom)	Außenluft
32.	rel. Feuchte	Zuluft
33.	rel. Feuchte	Abluft
34.	Kondensat	Wärmerückgewinnungsanlage
Allgemeine Messungen		
35.	Wärmemenge	Haupt-WMZ Reihe 9+10
36.	Wärmemenge	Haupt-WMZ Reihe 13+14
37.	VL-Temperatur	Haupt-WMZ Reihe 9+10
38.	VL-Temperatur	Haupt-WMZ Reihe 13+14
39.	RL-Temperatur	Haupt-WMZ Reihe 9+10
40.	RL-Temperatur	Haupt-WMZ Reihe 13+14
41.	Volumen	Haupt-WMZ Reihe 9+10
42.	Volumen	Haupt-WMZ Reihe 13+14
43.	Elektrische Energie	Allgemein Reihe 9 + 10
44.	Elektrische Energie	Allgemein Reihe 13 + 14
45.	Elektrische Energie	Meßtechnikschaltschrank Reihe 9 + 10
46.	Elektrische Energie	Meßtechnikschaltschrank Reihe 13 + 14
Wetterstation		
47.	Temperatur	Außenluft (Teleskopmast)
48.	Temperatur	Außenluft (Technikhaus 9/10)
49.	rel. Feuchte	Außenluft (Teleskopmast)
50.	Windrichtung	Außen (Teleskopmast)
51.	Windstärke	Außen (Teleskopmast)
52.	Strahlung (diffus)	Außen (Dachfirst)
53.	Strahlung (direkt)	Außen (Dachfirst)

Zusatzmessungen		
54.	VL-Temperatur	WMZ ges Endhaus 9.1
55.	VL-Temperatur	WMZ ges Endhaus 10.1
56.	VL-Temperatur	WMZ ges Endhaus 13.8
57.	VL-Temperatur	WMZ ges Endhaus 14.8
58.	RL-Temperatur	WMZ ges Endhaus 9.1
59.	RL-Temperatur	WMZ ges Endhaus 10.1
60.	RL-Temperatur	WMZ ges Endhaus 13.8
61.	RL-Temperatur	WMZ ges Endhaus 14.8
62.	Durchfluß	WMZ ges Endhaus 9.1
63.	Volumen	WMZ ges Endhaus 13.8
64.	Volumen	WMZ ges Endhaus 14.8

Tabelle 3: Übersicht über alle Meßaufnehmer bzw. aktiven Kanäle der Datenerfassung

In der Passivhaussiedlung sind damit insgesamt 279 Meßkanäle dauerhaft angeschaltet, welche kontinuierlich vom GLT-PC und dem DOS-PC abgespeichert werden.

5.2 Wärmemengenzähler (WMZ)

5.2.1 Hausanlagen

Die Passivhäuser werden zu je zwei Reihen aus dem zugehörigen Technikhaus mit Energie für die Wärmeversorgung (Heizung und Warmwasserbereitung) über die Vor- und Rücklaufleitungen von einer der beiden Fernwärmeübergabestationen versorgt. 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. Der Zähler WMZ_{ges} ist zu Abrechnungszwecken notwendig, der Zähler WMZ_{WW} dient speziell der begleitenden Meßdatenerfassung.



Abb. 9: Installationswand im Technikgeschoß mit Brauchwasserspeicher. Die beiden Wärmemengenzähler sind mit Pfeilen markiert.



Abb. 10: 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:

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

Der Wert Q_{Heiz} beinhaltet die Wärme für das Nachheizregister und für den Badheizkörper. Durch die Differenzbildung ergeben sich an dieser Stelle durch Fehlerfortpflanzung beider Einzelfehler höhere Fehlergrenzen. Da für die Energiebilanzen des Gebäudes die möglichst korrekte Erfassung des Summenwertes wichtiger ist und diese wegen des höheren Gesamtvolumenstromes auch genauer gemessen werden kann, wurde die hier vorgestellte Meßanordnung gewählt. Eine redundante Messung auch des Heizwärmeverbrauchs war aus Kostengründen auszuschließen.

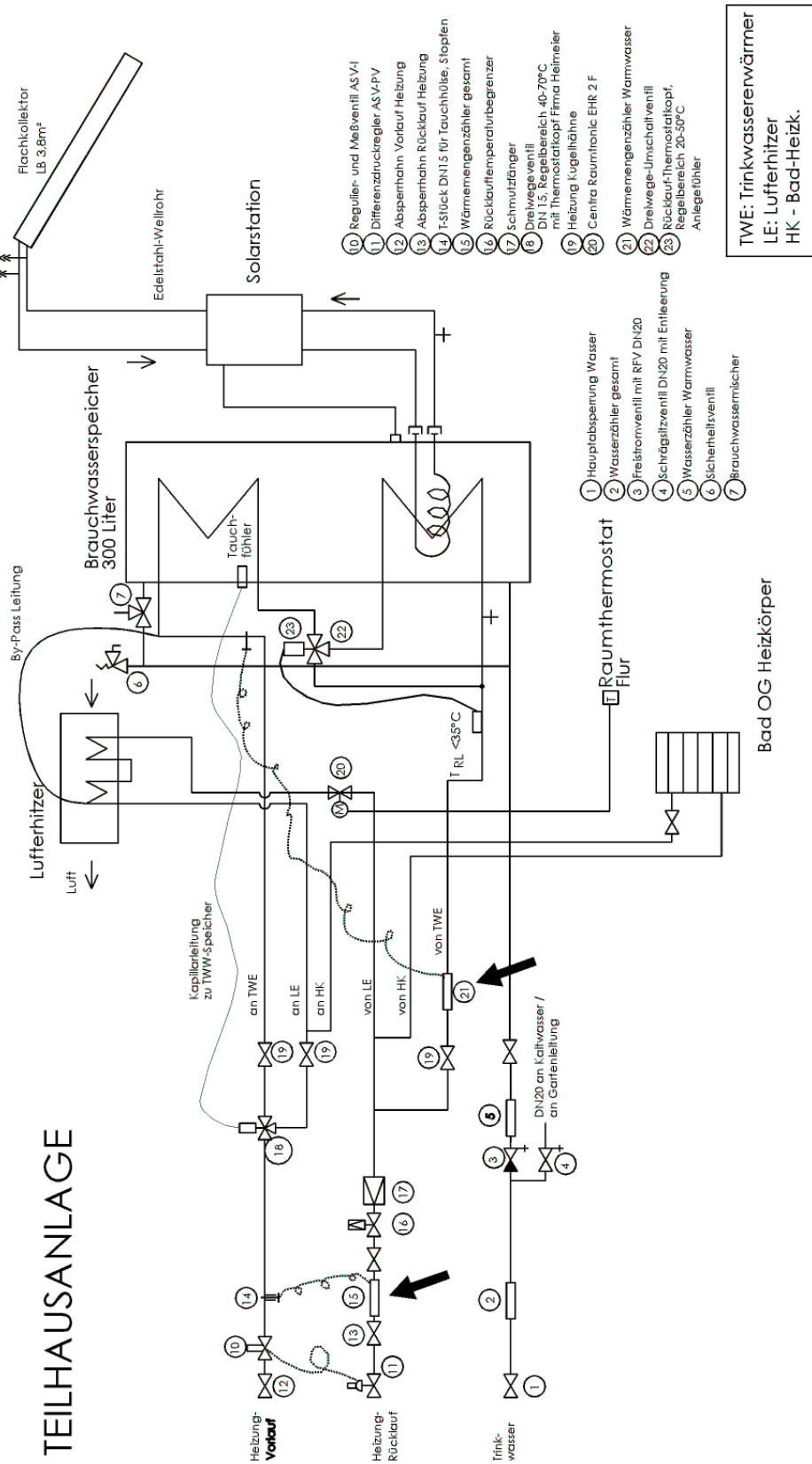


Abb. 11: Strangschemata der Hydraulikanbindung und der Wasserversorgung eines Passivhauses in Hannover-Kronsberg. Die Pfeile markieren die Einbauposition der beiden Wärmemengenzähler jeweils im Rücklauf mit den zugehörigen Meßleitungen zu den Vorlauftemperaturfühlern (Überarbeitet nach inPlan).

Daß die so durchgeführte Messung keine unzulässigen Abweichungen zum tatsächlichen Wärmeverbrauch hat, ergibt sich aus der Summenkontrolle gegenüber den zentral angeordneten Wärmemengenzählern der beiden Wärmeübergabezentralen (vergl. Abschnitt 10.4.1)

Die Wärmemengenzähler sind über M-Bus an die Meßdatenerfassungsanlage angeschlossen. Daher ist es möglich, neben der Wärmemenge auch weitere Informationen wie Vor- und Rücklauftemperaturen (VL-Temp., RL-Temp.) und das Volumen abzufragen und aufzuzeichnen. Für die außenliegenden Endhäuser der vier Reihen (Haus 9/1, 10/1, 13/8 und 14/8) werden die Größen VL-Temp. und RL-Temp. aufgezeichnet, für die beiden Häuser 13/8 und 14/8 auch das gemessene Volumen der WMZ.

5.2.2 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.

5.2.3 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. Hier wird auch die Wärmeabgabe der Versorgungsleitungen zu den Häusern mit erfaßt. Von diesen nachträglich installierten Zählern werden jeweils neben der Energie auch die Vor- und Rücklauftemperaturen und das Volumen aufgezeichnet. Die Wärmemengenzähler der Fernwärmeübergabestationen in den beiden Technikhäusern wurden bei Ortsterminen zur Kontrolle und Berechnung der Verluste im Technikhaus manuell abgelesen. Bei diesen Werten sind auch die Wärmeverluste der Pufferspeicher in den Technikhäusern sowie der Übergabestation mit enthalten.

5.3 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). Die Position ist Abb. 11 zu entnehmen. Es handelt sich dabei um 64 Zähler der Fa. Techem / Typ Aqua Tech Connec E (Meßprinzip: elektronische Flügelradabtastung) der metrologischen Klasse „C“ mit M-Bus Schnittstelle zur Datenfernübertragung.



Abb. 12: Hauptwasserzähler im Technikgeschoß.

Die beiden Wasserzähler für die Versorgung der jeweils 16 Häuser (Bezug von den Stadtwerken) befinden sich in den beiden Technikhäusern. Diese sind nicht auf die Meßdatenerfassungsanlage aufgeschaltet.

5.4 Raumlufthtemperaturen

In jedem der 32 Passivhäuser sind im Erdgeschoß Südraum (Wohnzimmer) an der Wand zum Treppenhaus und im OG Nordraum (normalerweise Schlafzimmer) neben der Zimmertür Raumlufthtemperaturenfühler (Aufputz) von Fa. K&P / Typ TRD 2 installiert worden. Die Einbaulage ist dem Schnitt (Abb. 7) zu entnehmen. Die Sensoren wurden im EG ca. 1,5 Meter und im OG etwa 1,4 Meter über dem Fußboden montiert. Bei den Sensoren handelt es sich um Raumlufthtemperaturenfühler mit aktivem Meßsystem „KP10“ in einem geschlitztem Kunststoffgehäuse.

Eine Ausnahme bei der Standard-Raumlufthtemperaturenmessung bildet ein Haus, in dem das Verbindungskabel des EG-Sensors nicht verlegt wurde und sich auch nachträglich nicht mit für die Bewohner vertretbarem Aufwand installieren ließ. In diesem Haus ist die Raumlufthtemperaturen mit einem separaten „stand-alone“ Datenlogger aufgezeichnet worden (Fa. testo/Typ tesostor 175). Der Datenlogger hat gleichzeitig mit einem zweiten Sensor die Raumlufthfeuchte gemessen.

Für die Intensivmessung in einem Haus sind drei zusätzliche Raumlufthtemperaturenfühler vom gleichen Typ in Küche (EG Nordseite) und den beiden Kinderzimmern OG (Südseite) installiert worden um Aussagen über alle Wohn- und Aufenthaltsräume machen zu können.

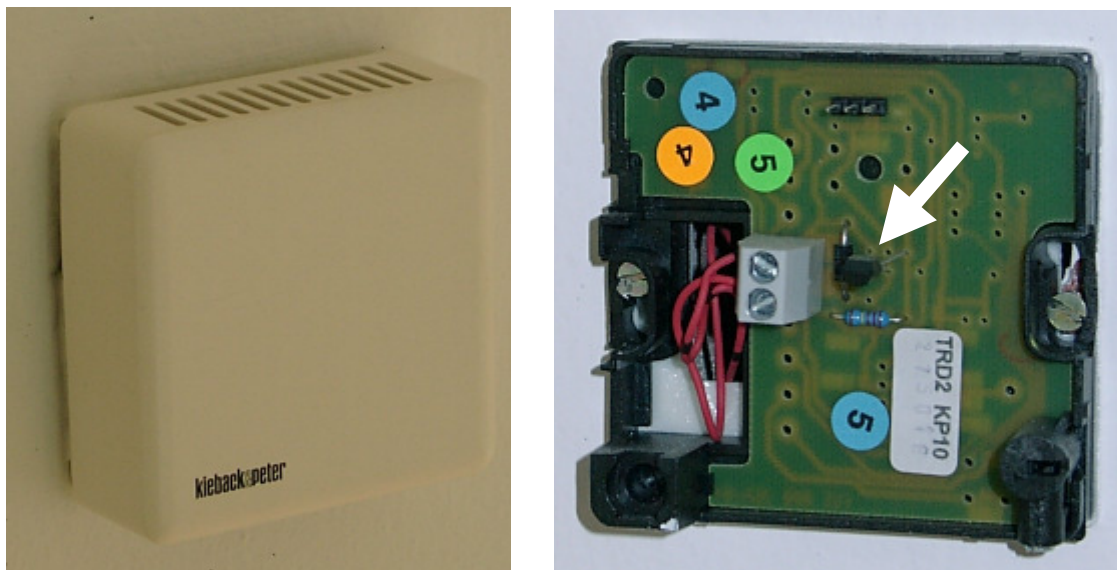


Abb. 13 und Abb. 14: Raumlufttemperaturfühler der Fa. K&P mit geschlossenem und geöffnetem Gehäusedeckel (Der Pfeil weist auf das Meßelement).

Zur Überprüfung und Nachkalibrierung der Raumluftsensoren wurden mit einem auf $\pm 0,1$ K kalibrierten Thermometer (Fa. Ahlborn / Typ PK 06, 1/10 DIN) alle 67 Meßstellen durch das PHI am 1. und 2.12.1999 nachgemessen und durch K&P per Offseteingabe angepaßt. Zusätzlich wurden die Meßstellen mit Datenloggern (Fa. Onset / Typ Hobo H8 Pro mit externem Sensor) über jeweils fünf bis acht Tage vergleichend gemessen. Daraus wurden additive Kalibrierzuschläge ermittelt, mit denen die Kanäle bei der Auswertung kalibriert wurden. Die Kalibriermessungen wurden im Februar und März 2001 vom PHI durchgeführt.

5.5 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) und in den DDC Schaltschränken jeweils einen Stromzähler für die separate Erfassung des benötigten Meßtechnikstroms.

Die Zähler sind in den Technikhäusern direkt auf ein Feld-Bus-Modul aufgeschaltet, welches die Impulse umwandelt und an die DDC-Zentrale überträgt.

Für die Intensivmessung in einem Haus mißt ein weiterer Stromzähler die elektrische Energie zur Versorgung des Lüftungsgerätes mit Wärmeübertrager. Die Messung erfaßt die gesamte Versorgung des Gerätes, also Ventilatorenstromaufnahme inkl. Steuerung und Energie für das vorgeschaltete elektrische Frostschutzregister (Schutz des Kanalwärmetauschers vor Vereisung). Für diese Messung ist ein Wechselstromzähler Fa. Schlumberger Industries Berlin / Typ A14 ST/STI Klasse 2 eingesetzt worden. In vier weiteren Häusern der Siedlung sind zeitweise Wechselstrom-

Zwischenzähler installiert worden, um den Energieverbrauch des Lüftungsgerätes auch in anderen Häusern bei anderem Nutzerverhalten zu messen.

5.6 Intensivmessung

Zusätzlich zu den bisher aufgeführten Meßsensoren der Intensivmessung gibt es die im Folgenden dokumentierten weiteren Meßstellen im intensiv vermessenen Haus.

5.6.1 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. Der Kaltwassersensor ist direkt am Abgang von der Hauptkaltwasserleitung angebracht. Die Position des Warmwasseranlegefühlers wurde während der Meßperiode am 27. September 2000 verändert. Vor dem Termin wurde die Wassertemperatur in Fließrichtung nach dem Brauchwassermischer (zur Beimischung von Kaltwasser, Verbrühschutz besonders bei Betrieb der Solaranlage) gemessen. Damit wurde die eigentliche Zapftemperatur (ohne Leitungsverluste) gemessen. Am genannten Termin wurde die Meßstelle in Fließrichtung vor den Brauchwassermischer, kurz hinter dem Ausgang aus dem Brauchwasserspeicher, montiert und wärmegeädämmt. So wird seit dieser Zeit die Temperatur gemessen, mit der das Wasser den Speicher verläßt.

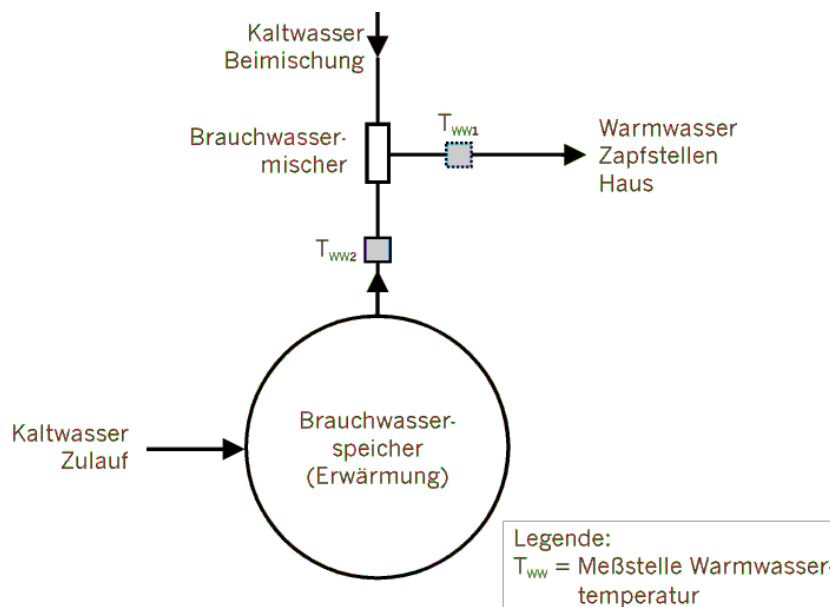


Abb. 15: Positionen der Warmwassertemperaturmessung für die Intensivmessung vor (T_{ww1}) und nach dem Umbau (T_{ww2}) der Meßstelle am 27.09.2000.



Abb. 16 und Abb. 17: Kalt- und Warmwassertemperaturmessung im Technikgeschoß (Anlegefühler). Beim Warmwassersensor (rechtes Bild) ist am linken Bildrand der Einstelldrehkopf des Brauchwassermischers zu erkennen. Im rechten Bildteil sieht man den Brauchwarmwasserspeicher.

5.6.2 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 im Technikgeschoß vorgenommen:

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

Diese fünf Temperaturen werden dauerhaft mit Kanaltemperaturfühlern vom Typ TLD2 (Fa. K&P) gemessen. Die Lage der Temperatursensoren ist Abb. 8 zu entnehmen.



Abb. 18: Kanaltemperatur- und Kanalfeuchtesensoren im intensivgemessenen Haus.

Die relative Luftfeuchte der Zu- und Abluft in den entsprechenden Kanälen im Technikgeschoß wird mit Kanalfeuchtefühlern vom Typ HR250D (Fa. K&P) gemessen. Die Messung der rel. Zuluftfeuchte erfolgt im Kanal der Außenluft nach dem Wärmeübertrager (also in Strömungsrichtung vor dem Heizregister).

Zur genaueren Untersuchung des Lüftungsgerätes ist noch eine knapp zwei Monate lange Sondermessung (9.2.2001 bis 27.03.2001) der vier Lufttemperaturen des Lüftungsgerätes durchgeführt worden. Dazu wurden ein Datenlogger der Fa. Ahlborn (Typ 2290-8) und vier Pt100-Lufttemperatursensoren (Fa. Ahlborn / Typ P 453-5, 1/5 DIN) eingesetzt. Die erreichte Meßgenauigkeit der Sondermessung liegt bei etwa $\pm 0,1$ K.

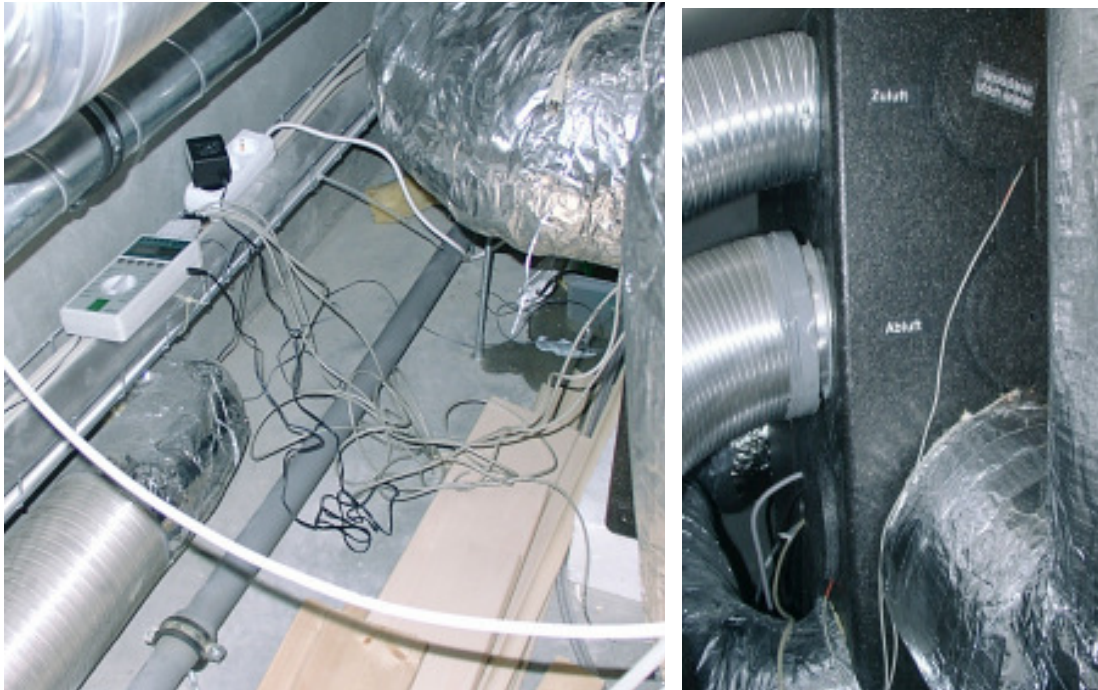


Abb. 19a und b: Zeitweilige Sondermessung der vier Lufttemperaturen des Lüftungsgerätes mit Wärmeübertrager mit einem Datenlogger (Handgerät Fa. Ahlborn). Links: Datenlogger mit Netzteil auf Kabeltritsche. Rechts: Seitenansicht des Lüftungsgerätes mit den durch die verschiedenen Revisionsöffnungen eingeführten Sensoren (Sichtbar sind nur Abschnitte der Sensorkabel).

5.6.3 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). Die anderen Häuser sind mit Meßkreuzen der Größe DN 160 ausgerüstet, welche dort zum Balanceabgleich der Lüftungsanlage genutzt werden. Zur dauerhaften Messung im Intensivmessungshaus war ein Umbau des Meßkreuzes notwendig, um die sonst sehr kleinen Druckdifferenzen zu erhöhen und dadurch mit höherer Auflösung erfassen zu können. Über die Umrechnungsformel

$$\dot{V} = 25,7 \frac{m^3}{h} \times \sqrt{\frac{\Delta p}{Pa}}$$

wird aus der Druckdifferenz Δp [Pa] der Volumenstrom V [m³/h] ermittelt.



Abb. 20: Differenzdruckmeßdose für die Fortluftmessung (Volumenstrombestimmung) Die Druckschläuche führen zum Meßkreuz im Fortluftrohr.

5.6.4 Kondensat

Im Lüftungsgerät mit Wärmeübertrager kommt es bei niedrigen Außentemperaturen zu Tauwasserbildung im Ab-/Fortluftkanal. Dabei wird Kondensationswärme freigesetzt, die bei der Energiebilanz des Gerätes berücksichtigt werden muß. Daher ist eine Messung der Kondensatmenge notwendig. Das Kondensat verläßt über einen Schlauch (Siphon-Prinzip) das Gerät auf der Rückseite und wird mit Hilfe eines Niederschlagsmeßgerätes (Fa. PRONAMIC / Typ Rain-O-Matic, Modell 100613) gemessen (Kipplöffel Prinzip). Das Impulssignal ist direkt auf der DDC im Technikhaus aufgeschaltet.

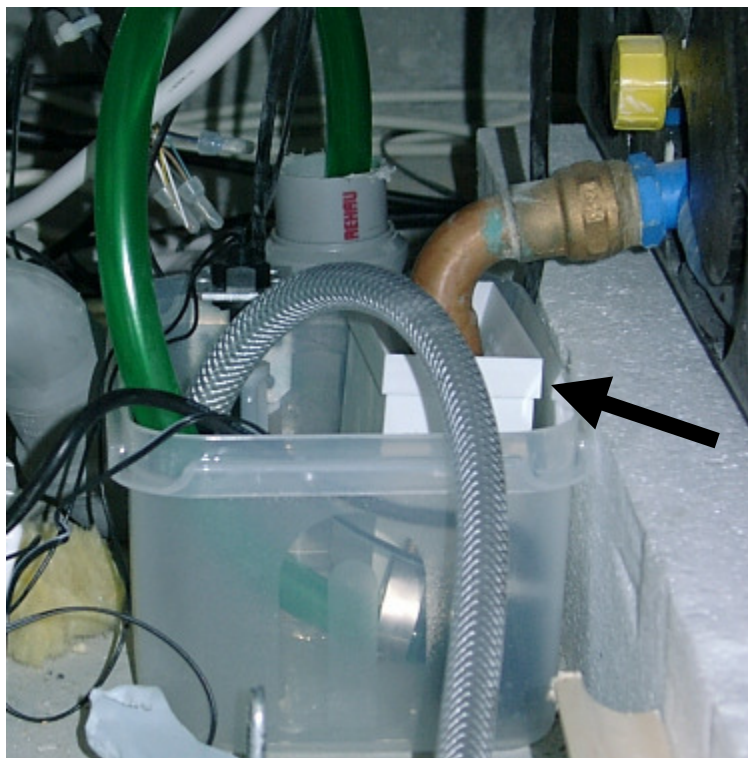


Abb. 21: Niederschlagsmeßgerät (Pfeil) zur Kondensatvolumenmessung in einer Auffangwanne mit Kondensatpumpe auf der Rückseite des Lüftungsgerätes im Technikgeschoß.

5.7 Wetterstation

Zur Erfassung der lokalen Klimadaten wurde eine Wetterstation an einem Teleskopmast (ca. 10 Meter Länge) neben Haus 9/8 (Sticksfeld 44) und auf dem Giebel des Hauses aufgebaut (die Lage ist Abb. 3 zu entnehmen). Sie besteht aus zwei Strahlungsmeßgeräten oder Solarimetern (Fa. Kipp & Zonen, Pyranometer Typ CM 11, mit und ohne Schattenring Typ CM 121B) zur Messung der horizontalen Globalstrahlung und der horizontalen Diffusstrahlung, einem strahlungs- und wettergeschützter Außentemperatur- und Feuchtesensor (Fa. Kipp & Zonen, Typ Hydro-Thermo-Transmitter-compact), einem Windrichtungsmeßgerät (Fa. Kipp & Zonen, Typ Windrichtungsgeber-compact) sowie einem Windgeschwindigkeitsmeßgerät (Fa. Kipp & Zonen, Typ Windgeber-compact). Die zugehörigen Meßverstärker, Blitzschutzeinrichtungen und die Spannungsversorgung sind im Technikhaus 9/10 angeordnet. Der Schattenring muß infolge der jahreszeitlichen Sonnenstandsveränderung alle ein bis drei Wochen nachgestellt werden. Zu diesem Zweck ist der Dachfirst des Hauses über eine Leiter erreichbar. Diese Arbeit wird von einem Bewohner der Siedlung regelmäßig durchgeführt.



Abb. 22 und Abb. 23: Wetterstation in der Passivhaussiedlung. Links: Teleskopmast mit den Sensoren (Am Giebel angelehnt die Leiter zur Schattenringnachstellung). **Rechts:** Strahlungsmessgeräte mit und ohne Schattenring auf dem First von Haus 9/8 (Im Vordergrund ein Teil des Kollektorfeldes der Solaranlage).

Zusätzlich zur Wetterstation ist am Technikhaus 9/10 (Nordfassade) noch eine Temperaturmeßstelle mit Strahlungsschutz montiert (Fa. K&P, Typ Witterungsfühler TAD mit Sonnenschutzkappe). Diese wurde nur zur Außenlufttemperaturmessung verwendet, bevor im Dezember 1999 die Wetterstation montiert wurde. Seit dieser Zeit dient sie zu Vergleichszwecken.

6 Technische Daten der Meßtechnik

Wetterstation				
Nr:	Meßgröße	Meßort	Spezifikation	Meßgenauigkeit
1.	Außenlufttemperatur	Teleskopmast	PT 100, Fa. Thies	$\pm 0,2$ K
2.	Außenluftfeuchte	Teleskopmast	FE 09/1, Fa. Thies	± 2 % r.F.
3.	Windrichtung	Teleskopmast	opto-elektronisch	$\pm 5^\circ$
4.	Windstärke	Teleskopmast	opto-elektronisch (Schlitzs.)	$\pm 0,5$ m/s
5.	Globalstrahlung horizontal	Dachfirst H. 9/8	Pyranometer CM 11	$\pm 0,5$ % v. Meßwert
6.	Diffusstrahlung horizontal	Dachfirst H. 9/8	Pyranometer CM 11 mit Schattenring	$\pm 0,5$ % v. Meßwert
7.	Außenlufttemperatur	Technikhaus 9/10 Fassade Nord	Akt. Meßsystem KP 10, K&P Typ Witterungsfühler TAD	k.A.

Tabelle 4: Technische Angaben zu den Meßfühlern für die Erfassung der meteorologische Daten.

Messungen in den Passivhäusern und den Technikzentralen				
	Meßgröße	Meßort	Spezifikation	Meßgenauigkeit
8.	Raumlufttemperatur	EG und OG	akt. Meßsystem K&P / TRD 2	$\pm 0,4$ K (Nachkalibration der Mittelwerte auf $\pm 0,2$ K)
9.	Wärmemenge	Technikgeschoß	WMZ Fa. Techem Delta Tech Compact II, $Q_n = 0,6$	PTB Klasse C
10.	Wärmemenge	Hauptzähler Technikhäuser	WMZ Fa. Techem Delta Tech Compact II, $Q_n = 1,5$	PTB Klasse C
11.	Volumen (Wasser)	Technikgeschoß	Wasserzähler Fa.Techem Aqua Tech Connec E	Metro. Klasse C
12.	Elektr. Energie	Technikhäuser	Wirkstromzähler Fa. DZG Typ DV 620 UF2	Zählerklasse 2, Verkehrsfehler 3%
13.	Wassertemperatur	Intensivm. Haus	Anlegefühler K&P Typ TAVD	k.A.
14.	Lufttemperatur	Luftkanal Inten. H.	Kanaltemperaturfühler K&P Typ TLD2	k.A.
15.	Elektr. Energie	Lüftungsgerät Intensivm. Haus	Wechselstromzähler Fa. Schlumberger Typ A14 St	Zählerklasse 2
16.	Differenzdruck (Volumenstrom)	Lüftungsgerät Intensivm. Haus	Differenzdrucksensoren Fa. Huba / Typ 694	$\pm 2,1$ Pa bei 100 Pa
17.	relative Feuchte	Luftkanal Inten. H	Kanalfeuchtefühler Fa. K&P Typ HR250D	k.A.
18.	Kondensatmenge	Lüftungsgerät Intensivm. Haus	Niederschlagsmeßgerät Fa. PRONAMIC Modell 100613	± 2 %
19.	Wärmemenge	Technikhäuser	WMZ Fa. Techem Delta Tech Compact II, $Q_n = 0,6$	PTB Klasse C

Tabelle 5: Technische Angaben zu den Meßfühlern für die Erfassung hausbezogener Daten.

7 Datenauswertung

Verwendet wurden fast durchgängig die Daten der direkten kanalweisen Modemübertragung aus dem GLT-PC, nur in wenigen Fällen wurden auch die Daten vom DOS-PC verwendet. Manuell erhobene Daten dienten zur Plausibilitätskontrolle der gemessenen Werte mit Ausnahme der Ablesungen der zusätzlichen Stromzähler in vier Häusern für die Energieverbräuche der Lüftungsgeräte sowie den Zählerständen der Fernwärmeübergabestationen, welche nicht auf der Meßdatenerfassungsanlage aufgeschaltet sind. Diese wurden zur Bestimmung der Primärenergieverbräuche benötigt.

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.

Bei den Auswertungen ist zu beachten, daß in den dargestellten Zeiträumen nicht alle Passivhäuser verkauft waren bzw. für Wohnzwecke genutzt wurden. Einige der 32 Häuser waren dauerhaft unbewohnt oder wurden anders genutzt (Ausstellungshaus, Gästehaus während der Weltausstellung, etc.). Einige der Häuser wurden innerhalb des jeweils betrachteten Zeitraumes verkauft und bezogen, dies macht sich bei den hausbezogenen Verbrauchswerten deutlich bemerkbar. Aus diesem Grund wurde bei den Auswertungen nach „dauerhaft bewohnten“ (im jeweiligen gesamten Zeitraum), „Einzug nach dem Beginn des jeweiligen Untersuchungszeitraumes“ und „unbewohnt oder anders genutzt“ unterschieden. Die Zuordnung nach der „Nutzungsart“ hat sich im zweiten untersuchten Zeitraum für einige Häuser verändert, womit sich die für die Auswertung interessante Zahl der dauerhaft bewohnten Häuser im jeweiligen Zeitraum ebenfalls verändert hat (siehe Tabelle 6).

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

Tabelle 6: 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 dann 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 (Annahme: gleiche Raumlufttemperaturen). Bei stark verbrauchsabhängigen Größen wie Wasser- und Stromverbrauch werden immer nur die dauerhaft bewohnten Häuser des Zeitraumes hausweise oder als Mittelwert dargestellt.

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, liegen die Ergebnisse der bisherigen Veröffentlichungen zur Meßdatenauswertung der Passivhaussiedlung (Zwischenberichte 1 bis 3, [Peper 2000a], [Peper 2000b] sowie [Peper 2001]) diesem Abschlußbericht

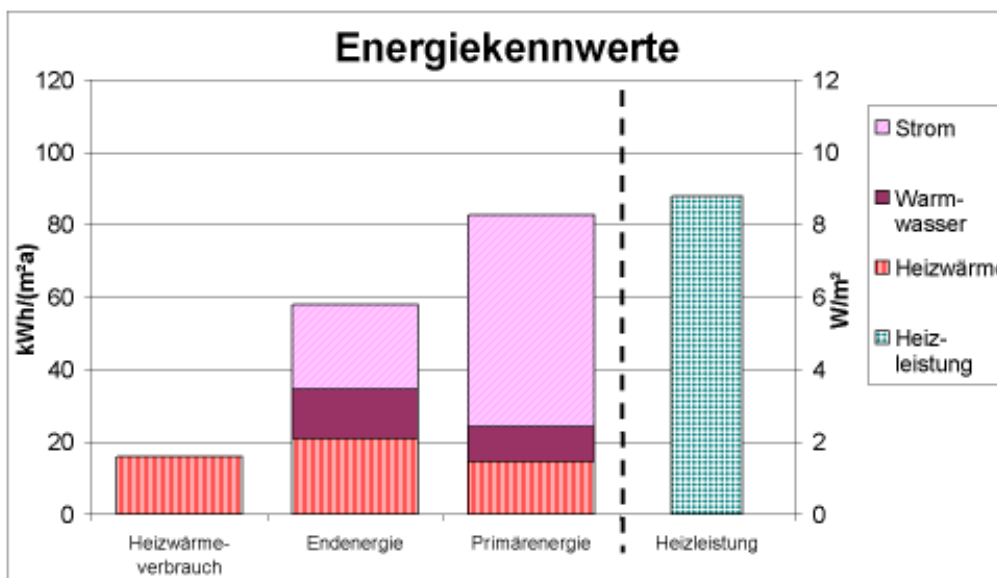
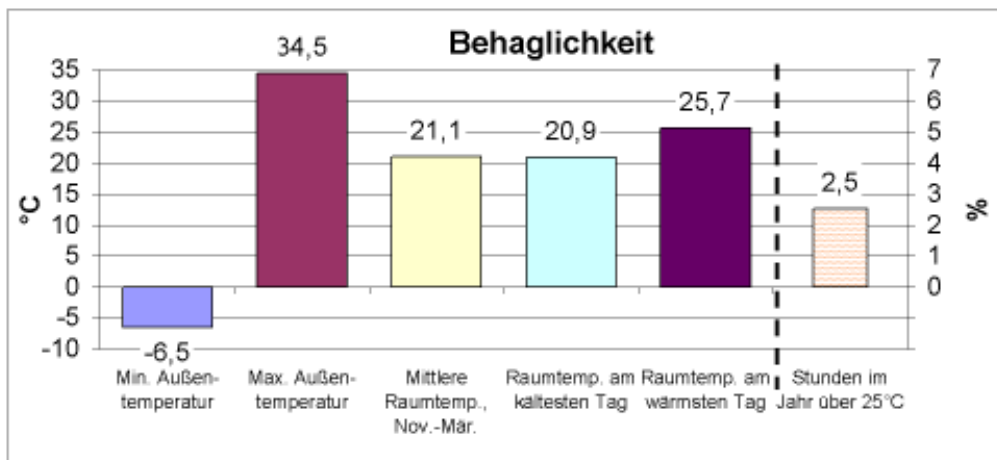
zugrunde. Der vorliegende Abschlußbericht ersetzt alle vorausgehenden Berichte. Alle entschiedenen Inhalte sind hier überarbeitet enthalten.

Gegenüber den früher durchgeführten Datenauswertungen und den Zwischenberichten ergeben sich stellenweise Abweichungen bei den hier dokumentierten Werten. Diese haben unterschiedliche Ursachen:

1. Die Energiebezugsfläche der Häuser hat sich durch die CEPHEUS-Vereinbarung zur internationalen Vereinheitlichung auf TFA (Treated floor area) geringfügig verändert.
2. Die angesetzten Primärenergiefaktoren sind entsprechend der CEPHEUS-Vereinbarung verändert.
3. Bei der weiteren Bearbeitung der Meßdaten in höherer Auflösung (Tages- und Stundenwerten) wurden noch einige Meßdatenunregelmäßigkeiten (Datenausfälle etc.) aufgefunden und korrigiert. Die Korrektur erstreckt sich jeweils auch auf alle abhängigen Daten.

Die durchgeführten Korrekturen und übrigen Veränderungen haben keinen entscheidenden Einfluß auf die Bewertung der Ergebnisse.

8 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). Die angegebene Heizzeit wurde nach dem CEPHEUS-Verfahren bestimmt. Die im folgenden häufig verwendeten Heizperioden (jeweils 1.10. bis 30.04) sind davon unabhängig.

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 (auch im Passivhaus-Projektierungs-Paket) und in jedem Fall über dem neuerdings in DIN 4108/Teil 6 verwendeten von 19 °C. Offenbar wird von heutigen Nutzern die Möglichkeit, eine höhere thermische Behaglichkeit herstellen zu können, gern wahrgenommen, wenn dies nur mit geringen Mehrkosten verbunden ist. Für ein repräsentatives Reihenhäuser in Hannover beträgt der rechnerische Heizwärmemehrverbrauch beim Übergang von 20 °C auf 21 °C Raumsolltemperatur 1,7 kWh/(m²a) oder 15% (nach [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. 43). 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. 44). 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; die Theorie wurde nun durch die Messungen in den Häusern ausgezeichnet bestätigt.

8.1 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 %.

Das Konzept des Passivhauses hat sich damit bezüglich der Heizwärmeeinsparung in vollem Umfang bewährt. Die verbleibenden Heizwärmeverbräuche sind so extrem gering, daß sie unabhängig von der gewählten Energieversorgung langfristig und nachhaltig gedeckt werden können. Die Voraussetzungen für eine kostengünstige Versorgung mit erneuerbaren Energiequellen sind bei diesen geringen Verbräuchen ebenfalls erfüllt.

8.2 Endenergieverbrauch

Auch die Verluste der Wärmeverteilung und Wärmeübergabe konnten bei den Passivhäusern extrem gering gehalten werden. Inklusive der (teilweise nutzbaren) Wärmeabgabe der Verteilleitungen 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: Gefragt ist vor allem eine Verbesserung der Dämmung von Armaturen, Anschlußfittings u. a. sowie von Speichern und Wärmeversorgungsleitungen. Insbesondere mit mikrozellulärer Wärmedämmung und Vakuumisolationstechnik können hier weitere Fortschritte erreicht werden.

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 $33,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$; es ist zu erwarten, daß der projektierte Wert in den kommenden Jahren sogar unterschritten wird. 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 kWh/m²a)),
- des gesamten Hilfsstromverbrauchs der Wohnungslüftungsanlagen (also: Regelung, Lüfterbetrieb und Frostschutzheizregister) (Strom Lüftungsanlagen 2,2 kWh/(m²a)),
- des gesamten Hilfsstromverbrauchs der Wärmeverteilung der zentralen Regeltechnik und des übrigen Gemeinschaftstromverbrauchs (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 10.5) 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 - der Verbrauch wurde um $\frac{2}{3}$ auf nur noch $\frac{1}{3}$ des Referenzwertes reduziert. 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.

8.3 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 und somit eine außerordentlich effiziente Wärmeversorgung.

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 und eine Erhöhung der Umwandlungswirkungsgrade bei der Stromerzeugung voranzutreiben.

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 DM 2.500 je Reihenhaus 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.

9 Ergebnisse der Messungen im einzelnen

Bei den in diesem Abschnitt dargestellten Auswertungen handelt es sich überwiegend um die für alle CEPHEUS-Einzelprojekte einheitlich durchzuführenden Analysen und Darstellungen [CEPHEUS 13].

9.1 Energieverbrauch

Bei der Auswertung der gemessenen Energieverbräuche werden die Daten für Nutzenergie, Endenergie und Primärenergie in getrennten Abschnitten dargestellt. Als Nutzenergie dokumentieren wir die Energiemengen, welche direkt bei der Übergabe in jedem Haus gemessen werden. Die Endenergiebetrachtung enthält anteilig die Verluste der Leitungen von der gesamten Haustechnik bis zur Fernwärmeübergabestation (Rohrleitungen, Speicher im Technikhaus, Verluste der Übergabestation). Bei der primärenergetischen Betrachtung wird auch die vorgelagerte Prozeßkette der Energieerzeugung und Übertragung berücksichtigt.

9.1.1 Nutzenergieverbräuche

Die Darstellung der energetischen Qualität der Passivhäuser in Form einer Jahresheizwärmebilanz zeigt Abb. 24. 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 Reihenhäusern 16,0 kWh/(m²a).

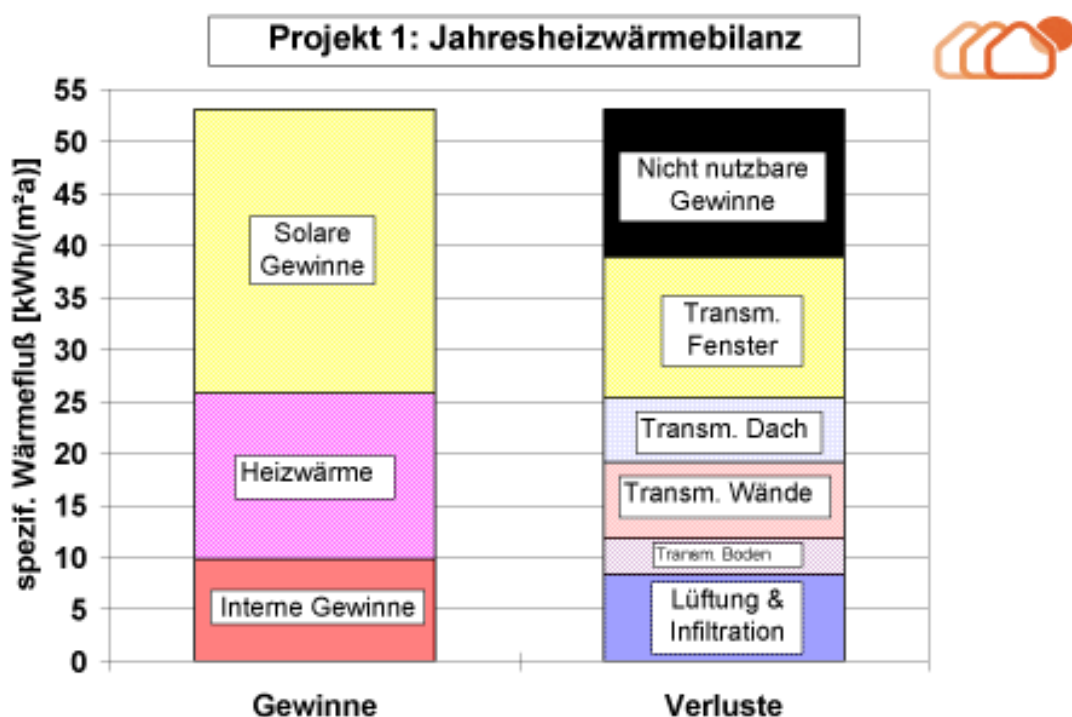


Abb. 24: Jahresheizenergiebilanz des ersten Meßjahres (01.10.1999 bis 30.09.2000).

Die gemessenen Energieverbräuche werden in Abb. 25 als Monatswerte dargestellt.

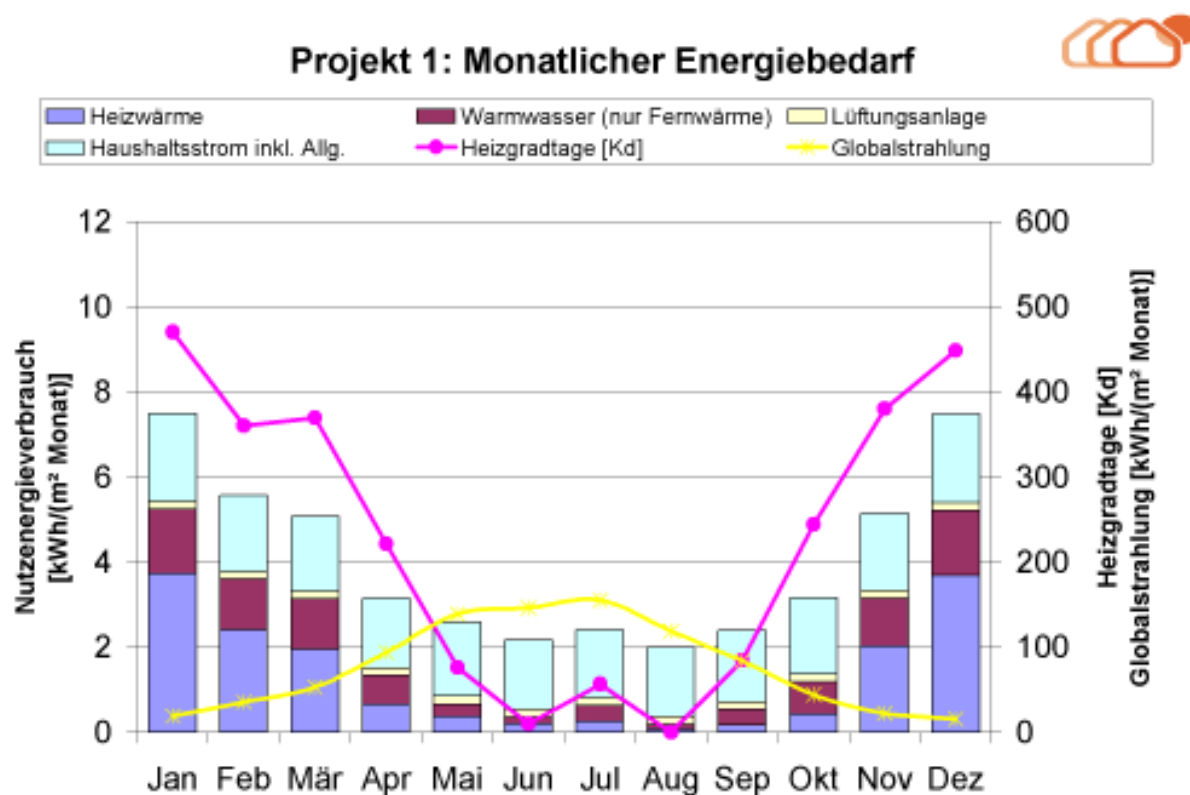


Abb. 25: Monatsverbrauchswerte für die dauerhaft bewohnten Passivhäuser im ersten Meßjahr (01.10.1999 bis 30.09.2000).

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 sind von den Stromverbräuchen der Häuser abgezogen worden, da sie separat im Diagramm dargestellt sind.

Der Einfluß der solaren Warmwasser-Erwärmung ist indirekt gut am Energieaufwand zur Warmwasserbereitung aus Fernwärme abzulesen. Mit steigender solarer Einstrahlung sinken wie erwartet die Fernwärmebezüge.

Die Heizgradtage wurden nach CEPHEUS-Vorgabe aus den Meßwerten berechnet. Gut zu erkennen ist der Beginn der Heizzeit ab etwa November 1999. Die Heizzeit endet etwa Ende März/Anfang April 2000. Die höchsten durchschnittlichen monatlichen Heizwärmeverbräuche liegen deutlich unter $4 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{Monat})$. Zu den vorliegenden geringen Wärmeverbräuchen im Sommer 2000 befindet sich eine Erläuterung weiter unten in diesem Abschnitt (siehe Seite 46).

Abb. 26 zeigt die mittleren täglichen Energieverbräuche der dauerhaft bewohnten Häuser für Heizwärme und Wärme zur Warmwasserbereitung (beides aus Fernwärmebezug) sowie den Verbrauch an elektrischer Energie. Die elektrische Energie enthält die Gemeinschaftsanteile (ohne Meßtechnikstrom) und den Verbrauch der Lüftungsgeräte.

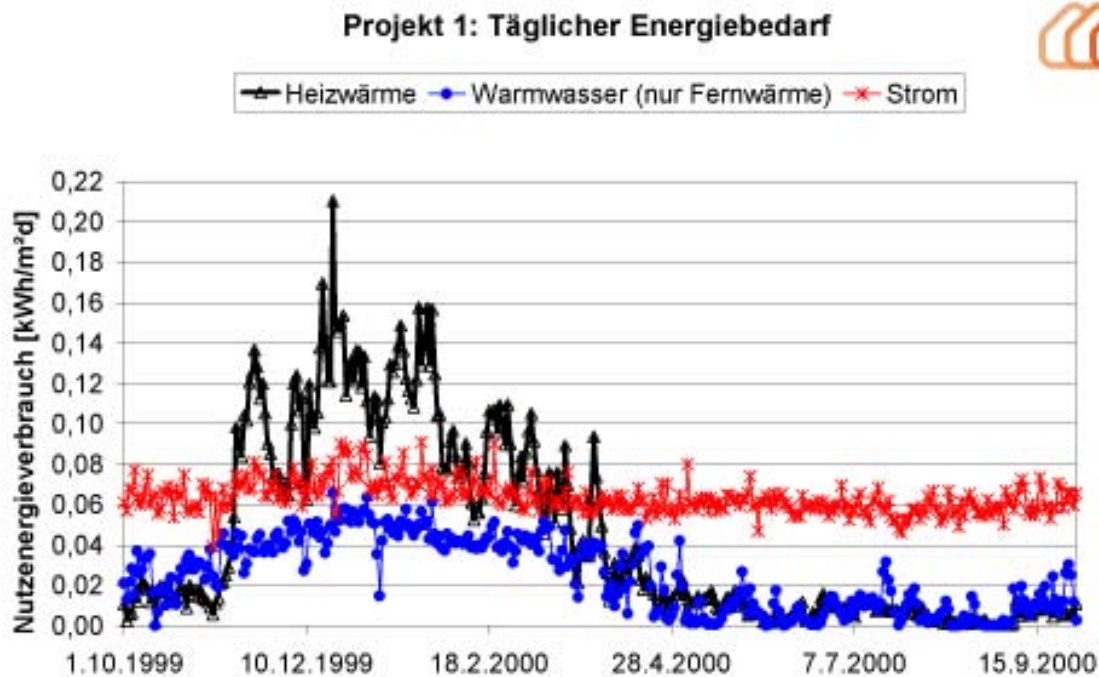


Abb. 26: Energieverbrauch pro Tag der dauerhaft bewohnten Häuser im ersten Meßjahr (Tagesmittelwerte)

Die gleichen Daten sind in Abb. 27 als gleitende Wochenmittelwerte dargestellt. Durch die Glättung lassen sich die Trends besser erkennen. Klar erkennbar ist die Konzentration des Heizwärmeverbrauchs auf die Kernmonate des Winters (November bis März). Die meiste Zeit des Jahres sind die Passivhäuser unbeheizt: Die Temperaturregelung erfolgt dann einfach durch Öffnen der Fenster, wenn es der Nutzer kälter haben möchte bzw. Schließen der Fenster, wenn es wieder wärmer werden soll. Die Wohnungslüftungsanlage sorgt dafür, daß die Luftqualität unabhängig von der Fensterstellung immer sehr gut bleibt und daß die Wärmeverluste bei geschlossenem Fenster sehr gering sind.

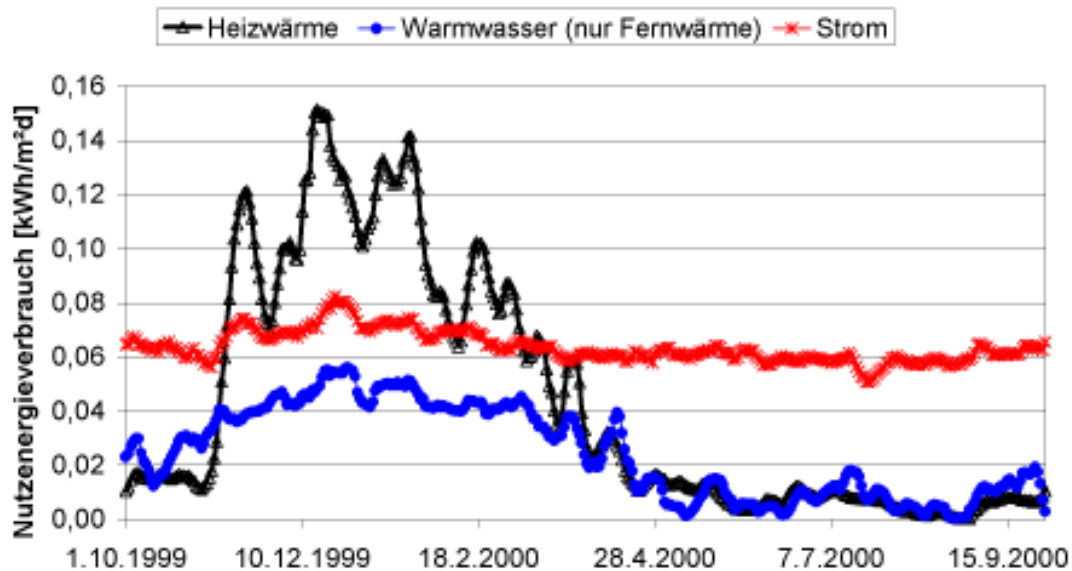
**Projekt 1: Täglicher Energiebedarf
 (Gleitender Wochen-Mittelwert)**


Abb. 27: Energieverbrauch pro Tag der dauerhaft bewohnten Häuser im ersten Meßjahr (Gleitender Wochen-Mittelwert)

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 gleichbleibend, mit einem nur leichten Anstieg in den Wintermonaten, vermutlich durch erhöhten Beleuchtungsbedarf und einer kleinen „Urlaubsmulde“ im Juli.

In Abb. 28 werden die Heizwärmeverbräuche für das gesamte erste Meßjahr hausweise in aufsteigender Reihenfolge dargestellt.

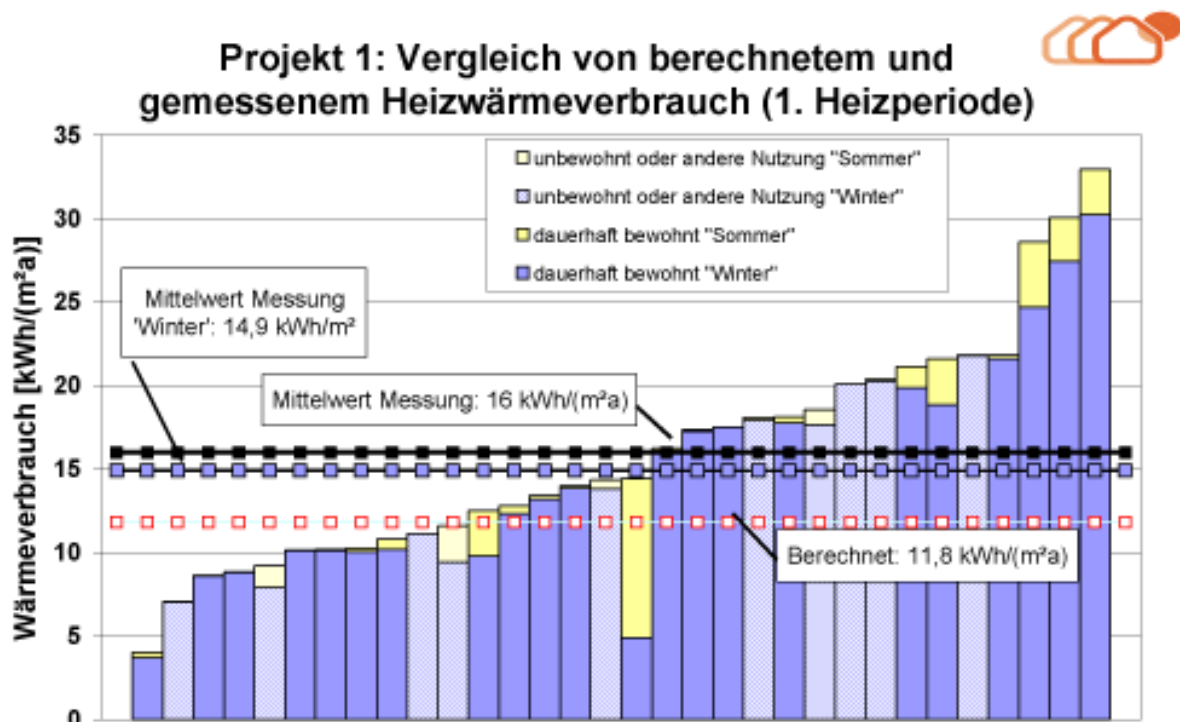


Abb. 28: Vergleich von gemessenen Heizwärmeverbräuchen und den projizierten Heizwärmebedarfswerten (berechnet) im **ersten Meßjahr** (1.10.1999 bis 30.9.2000). Für jedes Haus ist der Winter- und der Sommerverbrauch markiert (Erläuterung „ungewollte sommerliche Wärmeverbräuche“ siehe Text) und als Mittelwert aller Häuser angegeben.

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 den Verbräuchen im Sommer und in der Übergangszeit. Der Mittelwert in der eigentlichen Heizperiode vom 1.10.1999 bis zum 30.04.2000 ergibt sich zu $q_{\text{Heiz}} = 14,9 \text{ kWh}/\text{m}^2$. Beachtlich ist die Tatsache, daß in der Sommerzeit mit Außentemperaturen von selten unter $12 \text{ }^\circ\text{C}$ überhaupt geheizt wurde.

Die Heizperiode verkürzt sich auf die Kern-Wintermonate. Aufgrund des hohen Wärmeschutzstandards muß in Passivhäusern normalerweise nicht einmal in der Übergangszeit geheizt werden. Die Sommerverbräuche von im Mittel $1,1 \text{ kWh}/\text{m}^2$ haben Ihre Hauptursache in sieben Häusern, welche im Sommer 2000 über nennenswerte Verbräuche verfügen, wobei eines davon mit einem Wert von $9,6 \text{ kWh}/\text{m}^2$ als Ausreißer zu werten ist. In diesem Haus war die Heizung aktiv bei tagesmittleren Raumlufttemperaturen von über $24 \text{ }^\circ\text{C}$! Es wird sogar in der Hitzeperiode des Sommers bei Außentemperaturen von $28 \text{ }^\circ\text{C}$ kurzzeitig geheizt. Beim Abklingen der hohen Außentemperaturen setzt die Heizung sofort wieder dauerhaft ein, obwohl die Innentemperatur im EG noch um $28 \text{ }^\circ\text{C}$ liegt. Durch diesen Extremfall wird deutlich, daß es sich höchstwahrscheinlich um eine **ungewollte Beheizung** des Gebäudes handelt. Vermutlich lag, wie auch in anderen Häusern der Siedlung, ein Mangel in der Funktion oder dem Zusammenspiel von Raumthermostat, Motorventil und Nachheizregister vor.

Denkbar als Ursache sind darüber hinaus auch **Fehlbedienungen** der eigentlich einfachen über die Thermostateinstellung zu bedienenden Nachheizung. Erst am 26. September 2000 konnten die Nutzerhandbücher [Peper 2000c] an die Bewohner übergeben werden. So konnten beispielsweise bei einigen Häusern Ende Mai 2000 Fehlbedienungen an den konventionellen Raumthermostaten festgestellt werden. Diese führten nicht zu der gewünschten Abschaltung der Heizung, sondern zur maximalen Einstellung (Solltemperatur 28 °C).

Neben den sieben Häusern mit den relevanten Sommergebräuchen sind die Sommergebräuche aller restlichen Häuser nur sehr gering und gehen vermutlich auf die kurzen kühleren Zeiträume in den Sommermonaten zurück.

Aus der vorausgehenden Analyse kann geschlossen werden, daß zum größten Teil die sommerlichen Heizwärmeverbräuche als von den Bewohnerinnen und Bewohnern **nicht beabsichtigt und nicht benötigt** einzustufen sind. Es ist zu erwarten, daß diese nach Behebung der technischen Mängel und mit der zur Verfügung stehenden Information gegen Null gehen werden. Bei der Bewertung sollten zwei Tatsachen berücksichtigt werden:

1. Es handelt sich um das erste Meßjahr in der Siedlung; im ersten Jahr muß nach allen Erfahrungen immer von noch nicht optimalen Betriebsbedingungen ausgegangen werden.
2. Die dargestellte Sommerheizung ist für die Gesamtfunktion der Häuser und selbst für den Energieverbrauch nicht bedeutend.

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 (vgl. dazu auch Abb. 33). 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 7 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 im übrigen 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 9.1.3) zu $64,8 \pm 9,0$ kWh/(m²a) und für die 32 Passiv-

häuser zu $16,0 \pm 2,4$ kWh/(m²a), jeweils inkl. des gemessenen Sommerverbrauchs. Damit sind die erreichten 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 7: Mittelwerte und Streuungen bei unterschiedlichen Baustandards

Von verschiedenen Autoren sind Vermutungen über die Ursachen der individuellen Verbrauchsstreuungen geäußert worden. Zum Beispiel werden in [Wolff 2000] bezogen auf die Niedrigenergiehäuser am Kronsberg folgende Hypothesen für die 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 nämlich überhaupt nur 17 kWh/(m²a). Die vermutete gewaltige Streuung durch das Lüftungsverhalten ist somit bei den Passivhäusern definitiv nicht gegeben. Außerdem liefert diese Hypothese keine Erklärung für die ebenfalls vorhandene Verbrauchsabweichung nach unten. Genauere Analysen zum sicher vorhandenen Einfluß des Lüftungsverhaltens - wenn auch auf viel kleinerem Niveau - sollten in den folgenden Heizperioden durchgeführt werden.

Weiter nennt Wolff das

- **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 Verbrauchsschwankungen von $\pm 3,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Dies allein vermag die vorliegende Streuung allerdings nicht vollständig zu erklären.

Schließlich wird auch von Wolff der

- „**Wärmeklau (?)**“ angeführt.
Bedeutender werden die Wärmeströme zwischen den einzelnen Wohneinheiten, wenn diese unterschiedliche Temperaturen besitzen.

Dies ist nach den von uns 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 nämlich die raumtemperaturbedingten Verbrauchsunterschiede zwischen zwei Nachbarhäusern quasi 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 $7,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, 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 $\pm 11 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ für die Passivhaussiedlung bei den in der Siedlung gemessenen unterschiedlichen Temperaturniveaus. Werte von 16 ± 11 bewegen sich von 5 bis $27 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$; 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. Da die Siedlung auf dem Kronsberg mit einer kontinuierlich aufzeichnenden Meßdatenerfassung ausgestattet ist, ist es für diese Siedlung möglich, die Messungen über einen Nutzungszeitraum von mehr als einem Jahr nach Bezug fortzusetzen. Damit kann voraussichtlich eine genauere Analyse der verschiedenen Einflüsse auf den Verbrauch erfolgen.

In der zweiten Heizperiode konnte eine weitere Verringerung der Heizwärmeverbräuche festgestellt werden (Abb. 29).

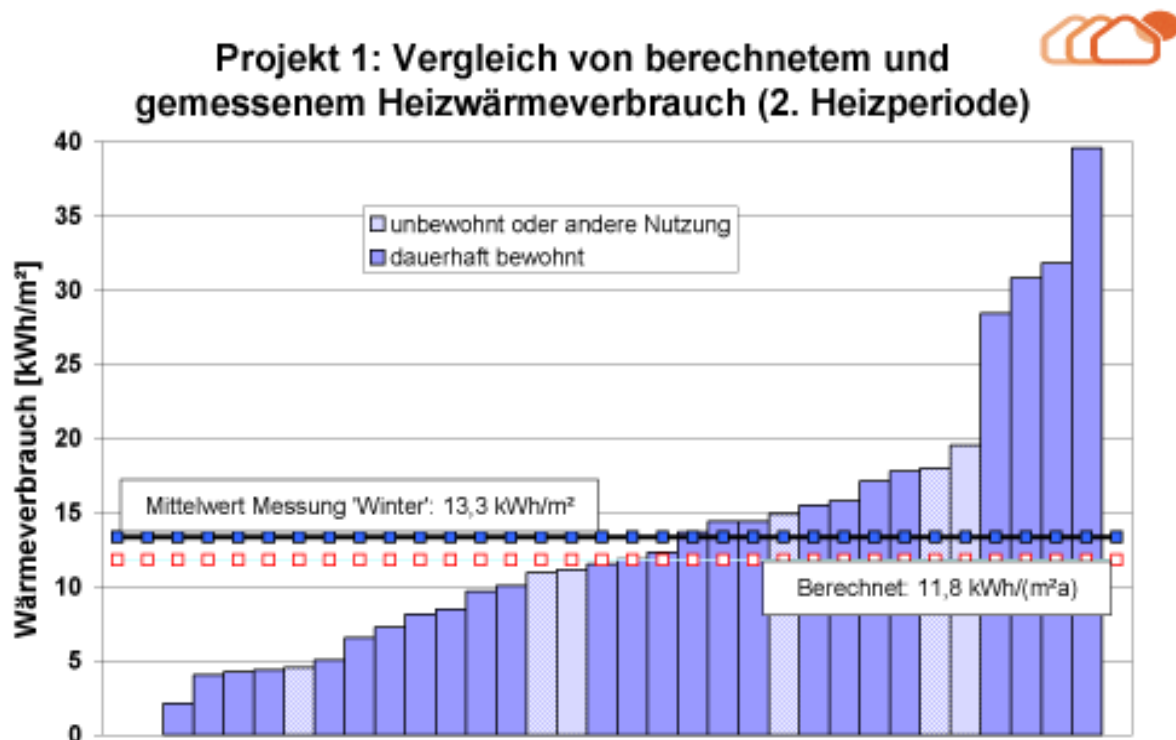


Abb. 29: Vergleich von gemessenen Heizwärmeverbräuchen und den projektierten Heizwärmebedarfswerten (berechnet) in der zweiten Heizperiode (1.10.2000 bis 30.4.2001).

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. Er muß dem direkt vergleichbaren Wert aus der ersten Heizperiode von $Q_{\text{Heiz}} = 14,9 \text{ kWh/m}^2$ gegenübergestellt werden. Eine Verringerung um fast 11 % weist darauf hin, daß die Bewohner sich mit der Bedienung vertraut gemacht haben und sich die Behebung einiger Mängel in der Regelung der Heizregister zusätzlich ausgewirkt haben.

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. Notwendig zur Klimakorrektur wäre eine genauere Untersuchung anhand der Bilanzierung mittels PHPP mit den gemessenen Klimadaten der jeweiligen Zeiträume, denn dabei ist insbesondere der Einfluß der Strahlung maßgeblich.

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 10.4.1 hergeleitet und berechnet. Er liegt (umgerechnet auf den Zeitraum Oktober bis April) bei $3,9 (\pm 1,5) \text{ kWh/m}^2$. Damit ergibt sich für die erste Heizperiode ein Wert von $14,9 + 3,9 = 18,8 (\pm 2,5) \text{ kWh/m}^2$ und für die zweite Heizperiode $13,3 + 3,9 = 17,2 (\pm 2,5) \text{ kWh/m}^2$.

9.1.2 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.

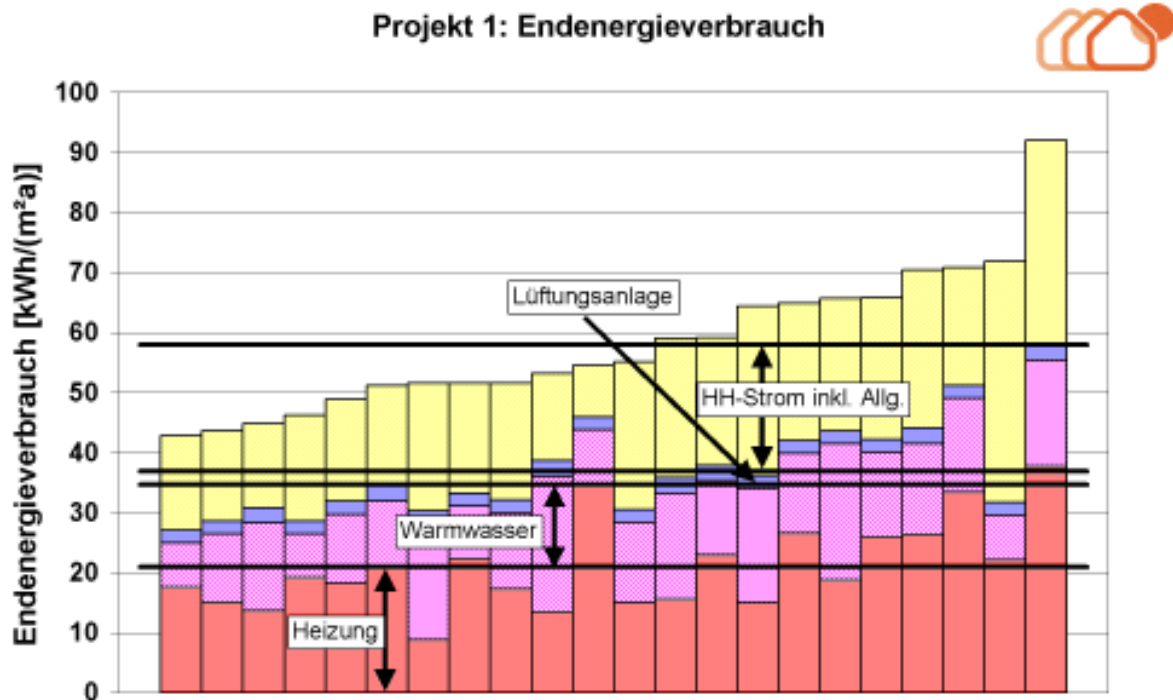


Abb. 30: Hausbezogene Endenergieverbräuche des ersten ganzen Meßjahres (1.10.1999 bis 30.9.2000) der 22 dauerhaft bewohnten Passivhäuser.

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. 25 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 kWh/(m²a)) ist der gemessene Verbrauch 6,1 kWh/(m²a) höher. Gegenüber der ursprünglich in CEPHEUS formulierten Zielsetzung eines Gesamt-Endenergiebedarfs ≤ 42 kWh/(m²a) ist allerdings eine durchaus bedeutende Überschreitung festzustellen. Nach dem gegenwärtigen Stand der Erkenntnisse über den laufenden Betrieb der Systeme in den Häusern ist es zu erwarten, daß die Projektierungswerte im 2. Betriebsjahr zwar nicht im einzelnen, aber doch in der Summe eingehalten werden. Auch dann bleibt aber ein gewisser Mehrverbrauch gegenüber der ursprünglichen Zielsetzung von 42 kWh/(m²a). Angesichts der tatsächlich **erzielten Endenergieeinsparung von 67 %** gegenüber durchschnittlichen Neubauwerten ist das Ergebnis jedoch 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 kWh/(m²a).

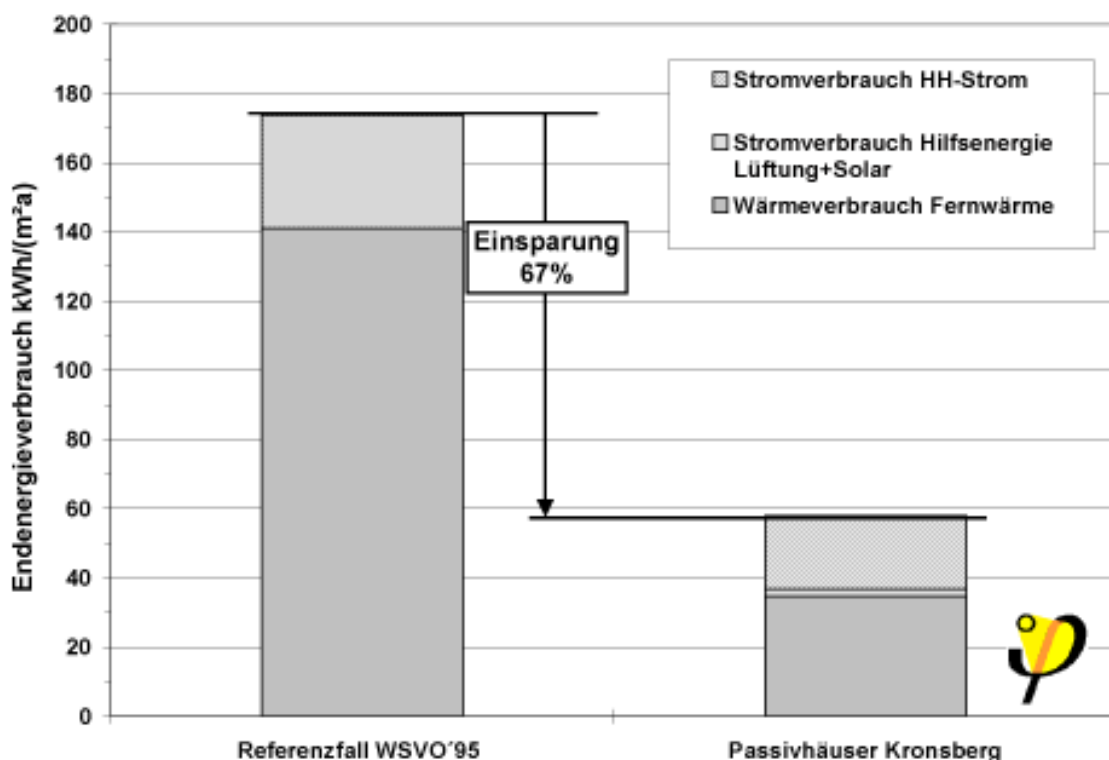


Abb. 31: Gesamter Endenergieverbrauch (Fernwärme und Strom inkl. Haushaltsstrom) für eine Referenzsiedlung mit heutigem durchschnittlichem Standard in Deutschland (links) und nach den Meßwerten in der Passivhaussiedlung Kronsberg (22 ständig bewohnte Häuser im Meßzyklus 4.10.1999 bis 3.10.2000).

9.1.3 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 künftigen Energie-Einsparverordnung 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. Damit ist eine gute Vergleichsmöglichkeit gegeben, da im Zeitraum die gleiche Heizperioden 1999/2000 enthalten sind und sich die Objekte am gleichen Standort befinden.

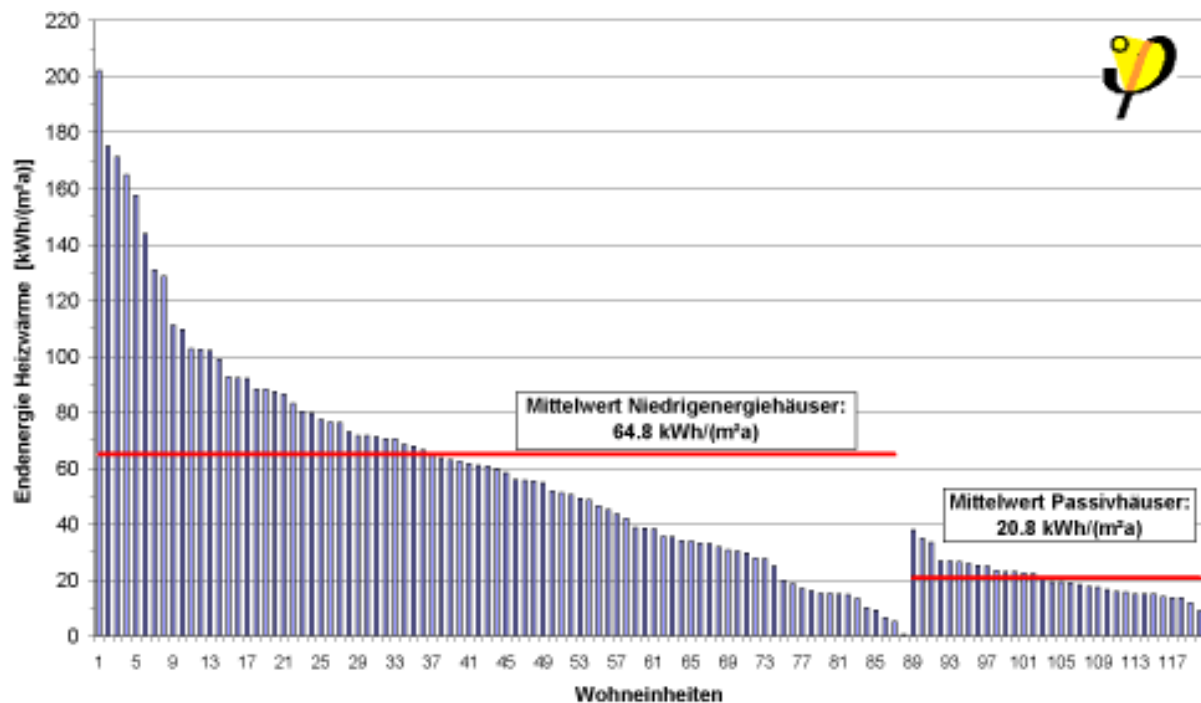


Abb. 32: Vergleich der Endenergieverbräuche für Heizung von fünf Mehrfamilienhäusern in Niedrigenergiestandard am Kronsberg (nach Heizkostenabrechnungen) und den 32 Passivhäusern. Dargestellt sind die vergleichbaren Zeiträume von jeweils einem Jahr (NEH: 15.10.1999 bis 16.10.2000, PH: 01.10.1999 bis 30.09.2001). Bei den NEH gibt es vermutlich Wohnungen, die in längeren Zeiträumen der Heizperiode nicht bewohnt waren und nicht beheizt wurden. Der Mittelwert der gemessenen Werte zeigt deutlich den Unterschied der Qualitätsstandards.

Abb. 32 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.

9.1.4 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. 33 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 technische 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. 33 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 normal verteilt ansehen.

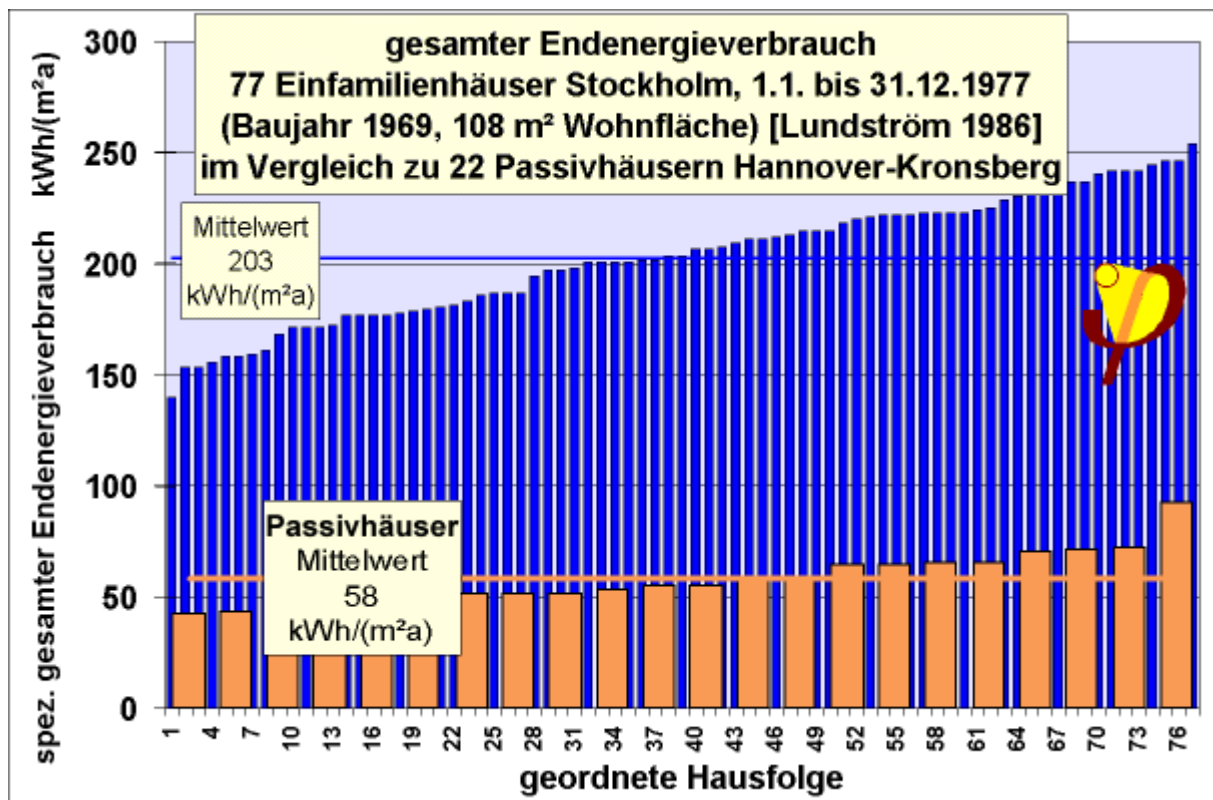


Abb. 33: Vergleich der Endenergieverbräuche für Heizung, Warmwasser und Haushaltsstrom der 22 dauerhaft bewohnten Passivhäuser in Hannover mit den 77 Stockholmer Häusern nach [Lundström 1986].

Der Mittelwert der Endenergieverbräuche der Passivhäuser auf dem Kronsberg beträgt jedoch nur 58 kWh/(m²a), 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 geschätzte 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 nun den Thesen von Lundström die Erkenntnisse der hier durchgeführten Untersuchungen entgegengestellt werden:

- Die Endenergieverbräuche baulich und technisch (weitgehend) gleicher Häuser schwanken unabhängig vom jeweiligen Standard der Grundgesamtheiten 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.

Selbst der Haushalt mit dem verschwenderischsten Nutzerverhalten im Passivhaus (92 kWh/(m²a)) verbraucht signifikant weniger Endenergie als der extremste Energiesparer bei den Stockholm-Häusern (140 kWh/(m²a)).

- 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 gesamte Nutzungszeit der Gebäude bei.
 - Sie kommen ohne eine Bevormundung und ohne moralisch 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: Lundgren hatte nachgewiesen, daß sich die Verbrauchsmessung für Heizwärme mit einem Bestimmtheitsmaß von 89,1 % durch die thermischen Kenngrößen (wie U-Werte und Flächen), die Innentemperatur und den Kaltwasserverbrauch erklären lassen. Unsere Untersuchungen in CEPHEUS zeigen für den separierten Einfluß der Nutzer, daß sich tatsächlich 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. Sie entspringen physiologisch und psychologisch bestimmten Bedürfnissen der jeweiligen Nutzer, welche sich erfahrungsgemäß nur sehr schwer beeinflussen lassen.

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.

9.1.5 Primärenergieverbräuche

Der Primärenergieverbrauch unterscheidet sich vom Endenergieverbrauch dadurch, daß die zusätzlichen Verluste der gesamten vorgelagerten Energiebereitstellungskette mitberücksichtigt werden. Der Primärenergieverbrauch gibt damit an, wie hoch die Verbräuche an zu fördernden nicht erneuerbaren Energieträger insgesamt sind.

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.

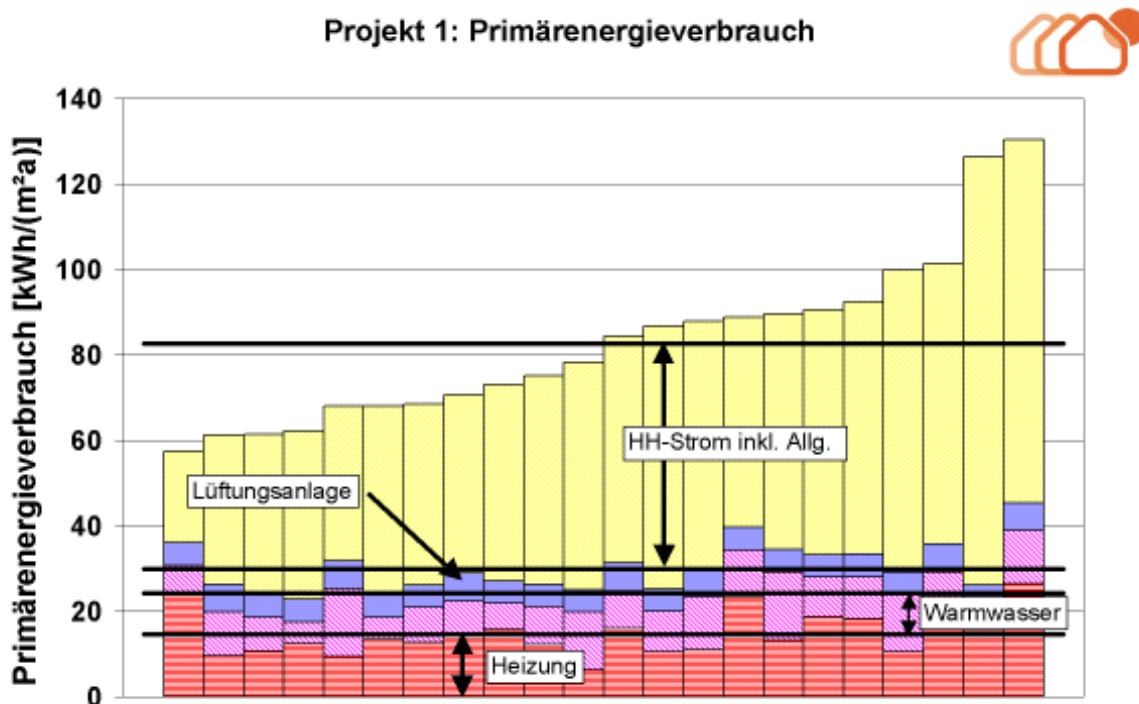


Abb. 34: Hausweise Primärenergieverbräuche des ersten ganzen Meßjahres (1.10.1999 bis 30.9.2000) der 22 dauerhaft bewohnten Passivhäuser.

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 WSV0 95 wurde zu $244,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ berechnet. Die erzielte Primärenergieeinsparung beträgt somit **66 %**.

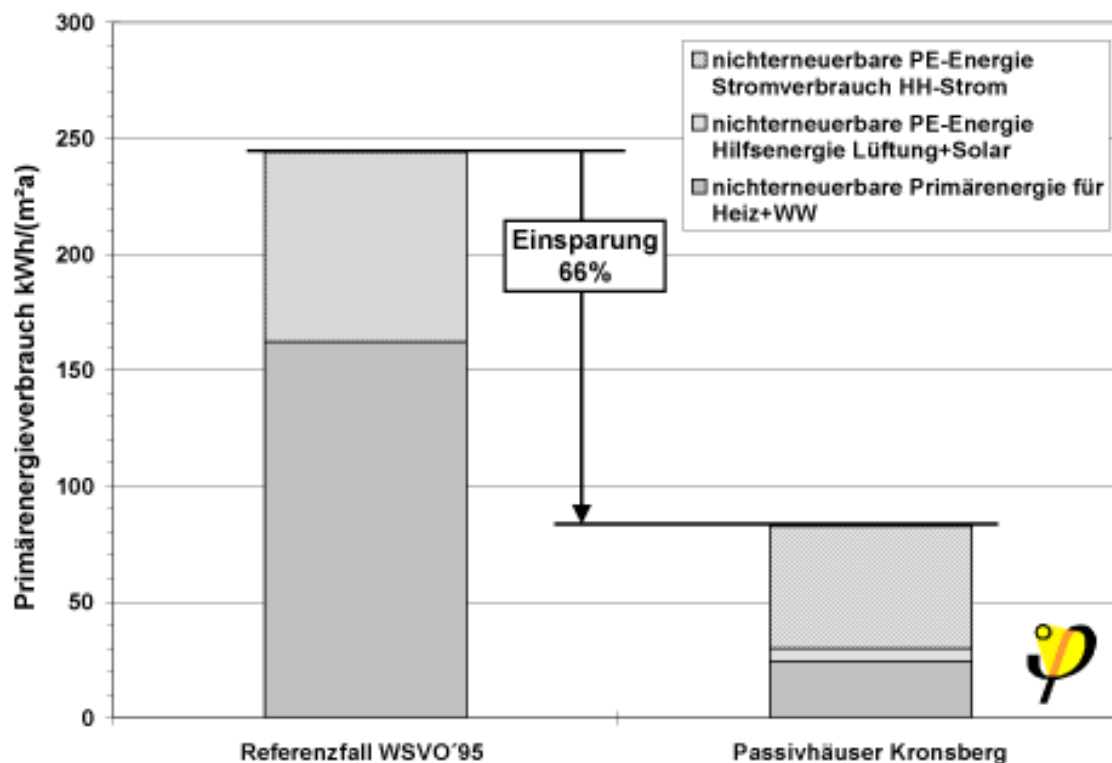


Abb. 35: Gesamter Primärenergieverbrauch (Fernwärme und Strom inkl. Haushaltsstrom) für eine Referenzsiedlung mit heutigem durchschnittlichen Standard in Deutschland (links) und nach den Meßwerten in der Passivhaussiedlung Kronsberg (22 ständig bewohnte Häuser im Meßzyklus 4.10.1999 bis 4.10.2000); verwendet wurden die Primärenergiefaktoren nach Vorgabe der EU.

Da die Wärmeversorgung (Heizung 14,7 kWh/(m²a) und nicht regenerativer Wärmeverbrauch zur Warmwassererwärmung 9,6 kWh/(m²a)) 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 kWh/(m²a)) mit 63,8 % am Gesamt-Primärenergiebedarf deutlich.

Der erreichte Wert für den Primärenergieverbrauch liegt deutlich unter dem Zielwert für neue Passivhäuser in Deutschland (120 kWh/(m²a)). Nach der künftigen Energie-Einsparverordnung dürften die Häuser allein für Heizung und Warmwasser einen solchen Primärenergieverbrauch aufweisen; hierfür liegt der Wert nach den Messungen in der Passivhaussiedlung bei 29,8 kWh/(m²a) inkl. des Primärenergieverbrauchs der Wärmerückgewinnungsanlage (Werte jeweils bezogen auf Wohnfläche (genauer:TFA)).

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 (vergl. Abschnitt 10.5.1).

9.2 Thermische Behaglichkeit

Der Verlauf der gemessenen Raumlufttemperaturen der dauerhaft bewohnten Passivhäuser zusammen mit dem flächengewichteten Mittelwert sowie der Außenlufttemperatur sind in Abb. 36 als Tagesmittelwerte und in Abb. 37 als gleitender Wochenmittelwert dargestellt.

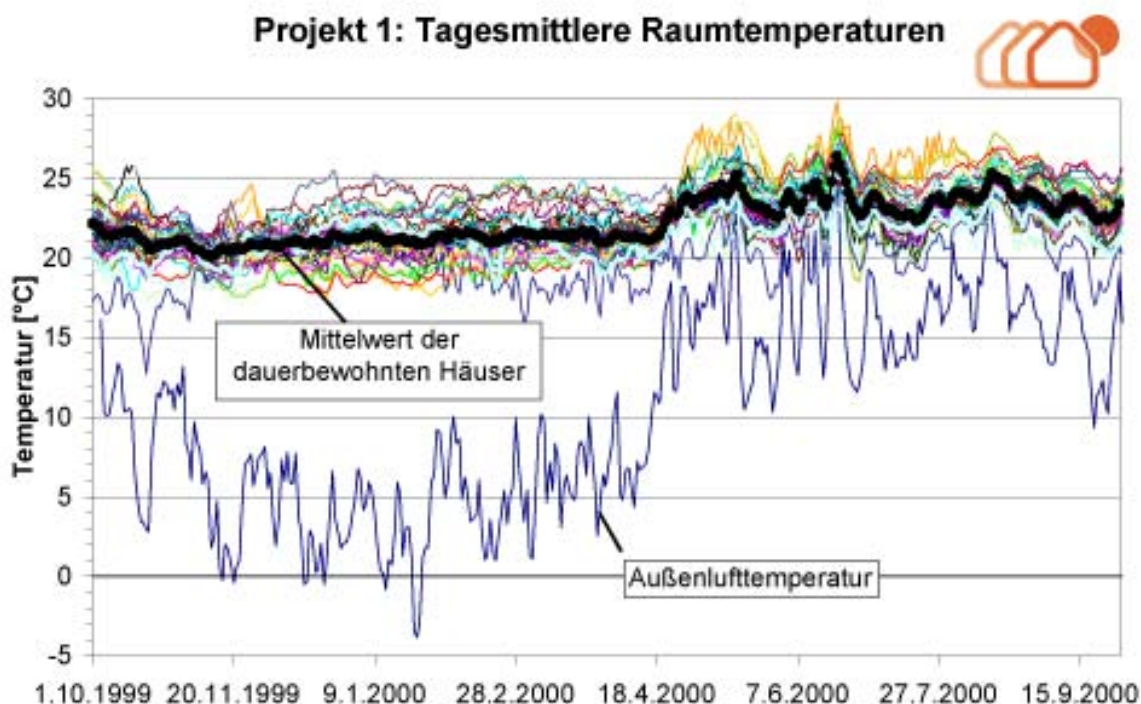


Abb. 36: Tagesmittlere Raumlufttemperaturen der 22 dauerhaft bewohnten Häuser im ersten Meßjahr (1.10.1999 bis 30.9.2000).

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. In der kalten Jahreszeit schlafen die Bewohner offenbar mit geschlossenem Fenster. Die maximalen Raumlufttemperaturen stammen von zwei Häusern, in denen auch während der Hitzeperiode im Sommer geheizt wurde (siehe oben in Abschnitt 9.1.1). Ohne diese Ausreißer ergibt sich eine Bandbreite der Raumtemperaturen über das ganze Jahr von **17,3 bis 28,8 °C**. Der flächengewichtete Mittelwert aller bewohnten Häuser bewegt sich zwischen 20,1 und 26,4 °C.

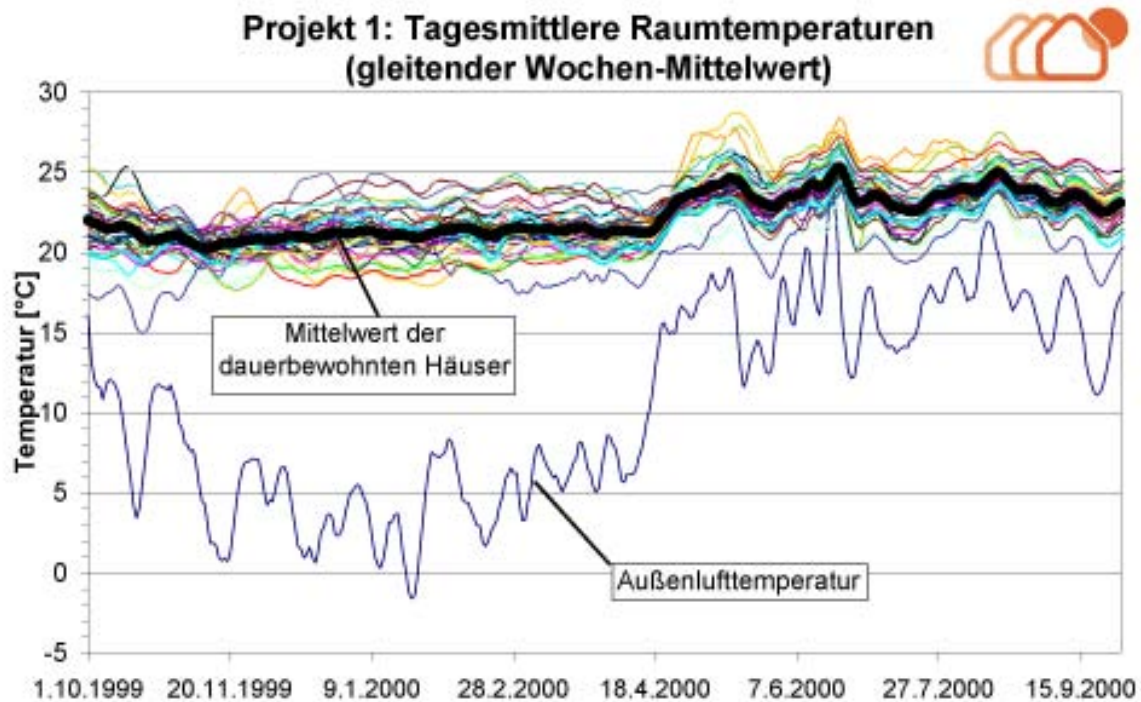


Abb. 37: Tagesmittlere Raumlufttemperaturen (Gleitender Wochen-Mittelwert) der 22 dauerhaft bewohnten Häuser im ersten Meßjahr (1.10.1999 bis 30.9.2000).

Bei der Kurve des gleitenden Wochenmittelwertes zeigt sich das konstante Niveau der Häuser während der Heizzeit noch deutlicher als bei den Tagesmittelwerten. In der Zeit, in der die Fenster überwiegend geschlossen sind (01.11.1999 bis 30.04.2000) ist der Temperaturmittelwert fast konstant (Mittelwert bei **21,2 °C**).

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. Die Zahl der Tage mit Temperaturen über 25 °C beträgt im EG im Durchschnitt 5,75 im OG im Durchschnitt 6,75 (jeweils von 122 Tagen). Damit betrug die Übertemperaturhäufigkeit $h_{\vartheta > 26^\circ\text{C}}$ in der Passivhaussiedlung 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 1998].

Tagesmittel- Temperatur größer °C	Anzahl Tage in Zeile 9 EG	Anzahl Tage in Zeile 9 OG	Anzahl Tage in Zeile 10 EG	Anzahl Tage in Zeile 10 OG	Anzahl Tage in Zeile 13 EG	Anzahl Tage in Zeile 13 OG	Anzahl Tage in Zeile 14 EG	Anzahl Tage in Zeile 14 OG
26	0	1	1	4	1	3	0	1
25	0	3	12	11	10	10	1	3
24	6	7	34	27	62	40	10	10
Gesamtzahl der Tage in der Sommerperiode: 122								

Tabelle 8: Zahl der Tage mit Überschreitung der Tagesmitteltemperatur von 24; 25; 26 °C der bewohnten Häuser im Sommer 2000 (1.6.2000 bis 30.09.2000). Gegenüber [Peper 2001] sind die Temperaturmessungen durch eine Nachkalibrierung korrigiert.

Betrachtet man Tabelle 8 genauer, so ist leicht erkennbar, daß die höheren Sommertemperaturen im allgemeinen in den Obergeschossen vorliegen. Auch dies stimmt mit der Simulation überein und hat mehrere Ursachen:

- Die Erdgeschosse grenzen mit dem Boden an das Erdreich; hier liegen im Sommer geringere Temperaturen vor als bei der Außenluft.
- Es gab im Sommer 2000 noch einen nennenswerten Wärmeeintrag aus dem Technikgeschoß über dem OG, weil Leitungen und Speicher ganzjährig in Betrieb waren und wärmedämmtechnisch zwar den Regeln der Technik entsprachen, aber weiter optimiert werden könnten. Dieser Wärmeeintrag wird nach Verbesserungen, die unter Anleitung durch das Passivhaus Institut im Sommer 2000 durchgeführt worden sind, und durch zeitweise Abschaltung der Fernwärmeverteilung in der nächsten Sommerperiode ganz erheblich sinken. Für den Sommer 2001 erwarten wir daher noch bessere Ergebnisse für das Sommerklima.
- Durch den thermischen Auftrieb ergibt sich eine Temperaturschichtung in dem im Zentrum des Hauses stehenden Treppenhaus.

Die individuellen Raumtemperaturen liegen im Sommer um bis zu 2 °C niedriger und um bis zu 2 °C höher als die eben diskutierten Mittelwerte über alle Häuser der jeweiligen Zeile. Die Ursachen für den individuellen Nutzereinfluß sind vielfältig:

- Jeweils nicht auszuschließen ist, daß die gemessenen unterschiedlichen Temperaturen von den Bewohnern bewußt so gewollt werden. Durch unterschiedliche Handhabung von Verschattungseinrichtungen und der Kippstellung bzw. Öffnung von Fenstern lassen sich die Sommertemperaturen in einem hohen Umfang beeinflussen.
- Insbesondere die Fensterlüftung beeinflußt die Sommertemperaturen im Passivhaus sehr stark.
- Aber auch das Vorhandensein von Verschattungseinrichtungen und die richtige Bedienung der Verschattung sind bedeutend.
- Schließlich sind die inneren Wärmequellen sehr unterschiedlich hoch; in den unbewohnten Häusern der Zeile 9, bei denen nur sehr wenig innere Wärmequellen vorhanden sind, liegen die Sommertemperaturen meßbar niedriger.

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. 38).

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. Die drei Innentemperaturen für die niedrigsten Tagesmittel-Außentemperaturen (Minimum von -3,8 °C) liegen bereits oberhalb von 20 °C. Bei weiteren kälteren Tagen, die in der ersten Heizperiode am Standort nicht gemessen wurden, ist zu erwarten, daß diese ebenfalls zu Innentemperaturmittelwerten von über 20 °C führen. Bei einer größeren Anzahl derartig kälterer Tage würde die Gerade dann eine noch geringere Abweichung vom waagerechten Verlauf aufweisen.

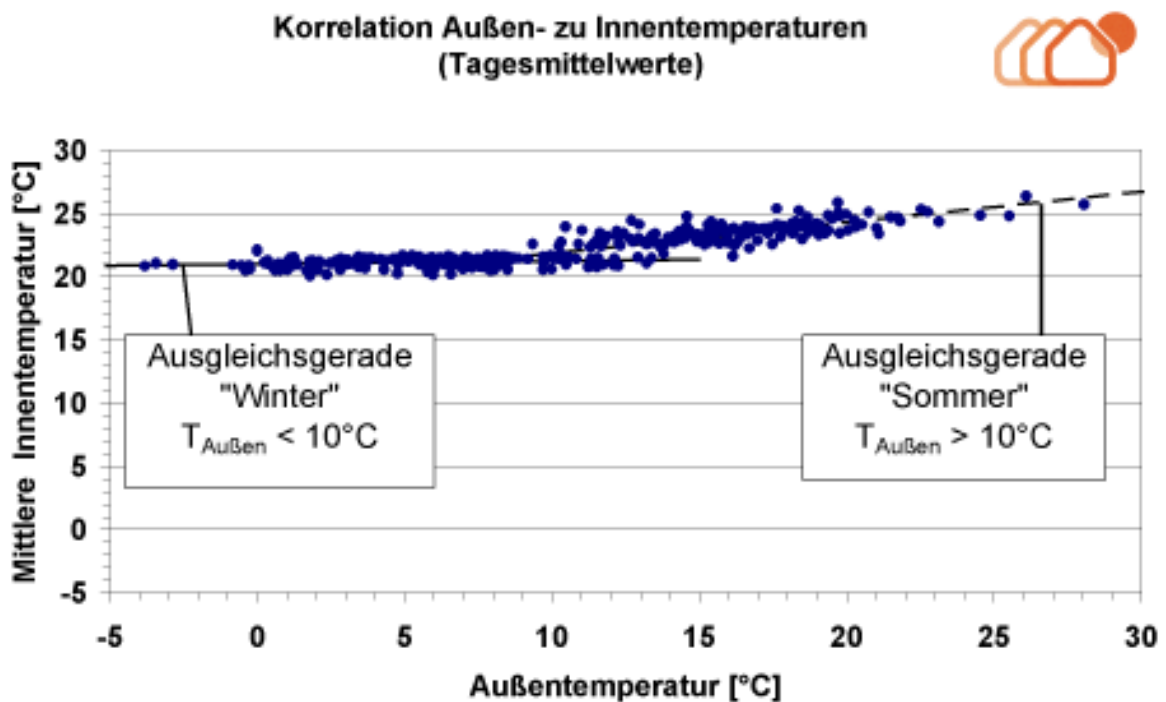


Abb. 38: Korrelation zwischen Außentemperatur und Raumlufttemperatur (Tagesmittelwerte) im ersten Meßjahr.

Die höheren Außentemperaturen (über 10 °C Außentemperaturmittelwert) sind in Abb. 38 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.

9.2.1 Typische Winterwochen

Zur Untersuchung einer typischen Winterwoche wurden die Raumlufttemperaturen der bewohnten Häuser jeweils gemittelt und das Haus ausgewählt, welches die größte Übereinstimmung zum Mittelwert besitzt. Es wird ein Haus vom Typ „Jangster“ (Mittelhaus) dargestellt, welches auf der Südseite über temporäre Verschattungsvorrichtungen verfügt. Als Datengrundlage wurden für diese Darstellung Stundenwerte verwendet.

In der typischen kalten und sonnigen Winterwoche (20.1.2000 bis 27.1.2000, siehe Abb. 39) liegen die Außenlufttemperaturen zwischen -6,5 °C und +4,9 °C. Die Raumlufttemperaturen liegen in dieser Woche im Haus zwischen 20,2 und 22,8 °C. Es zeigt sich, daß sich der Einfluß der Solarstrahlungen meßbar nur ab Leistungen über 150 W/m² auf die Raumlufttemperatur - und dann auch nur auf die im EG - auswirkt (23. bis 25.1.2000). Am 23.1.2000 erfolgt beispielweise eine Temperaturerhöhung im EG um 2 K. Die Temperaturerhöhung wirkt sich im EG merkbar aus, da die Temperaturmessung hier im Südraum positioniert ist und dort auch die größten Verglasungsflächen vorliegen. Bei der Messung im OG ist die Auswirkung aufgrund der Position des Sensors im Nordraum nicht ablesbar. Zusätzlich ist auch nicht ausgeschlossen, daß die Verschattungseinrichtung zeitweise benutzt wurde.

Es ist feststellbar, daß die Heizleistungen trotz kältester Außentemperaturen während der drei Tage nur moderat um etwa 4 W/m² schwanken. Hier sorgt die Solarstrahlung für den notwendigen Energieeintrag in das Haus, die Raumlufttemperaturen sinken nicht unter 20 °C ab. Die hohe Zeitkonstante des Gebäudes wirkt sich dabei ausgleichend aus.

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 W/m²) bemerkbar: Die Heizleistungen an diesen beiden Tagen gehen **nicht** auf das Absinken der Außenlufttemperatur von 5 auf bis 0 °C zurück (die Leistung am 21.1.2000 steigt schon steil an, obwohl die Außenlufttemperatur noch gering ansteigt). Die hohen Heizleistungen erklären sich durch einen Bewohnereingriff in Form einer höheren Sollwerteinstellung am Thermostat. Die hohen Heizleistungen erzeugen eine Raumlufttemperaturerhöhung im Obergeschoß um 0,4 bzw. 1,2 K. Im EG ist am 21.1.2000 eine Temperaturerhöhung um 0,4 K sichtbar. Bei der Interpretation muß allerdings angemerkt werden, daß die Einflüsse auch anderer Faktoren wie z.B. veränderte interne Wärmequellen (Personenzahl im Haus, Verbrauch von elektrischer Energie) hier nicht berücksichtigt sind. Eine genauere Untersuchung dieser Einflüsse ist einer separaten Veröffentlichung zu entnehmen [Kaufmann 2001].

Der Rückgang der Heizleistung in der Nacht (21./22.1. und 22./23.1.2000) geht auf eine Zeitprogrammeinstellung des Raumthermostaten zurück. Die Stufung der Heizleistungswerte im Diagramm resultiert aus der hohen Impulswertigkeit der

Wärmemengenzähler. Die den Impulsen entsprechende Leistung wurde gleichmäßig auf die entsprechenden Zeiträume verteilt.

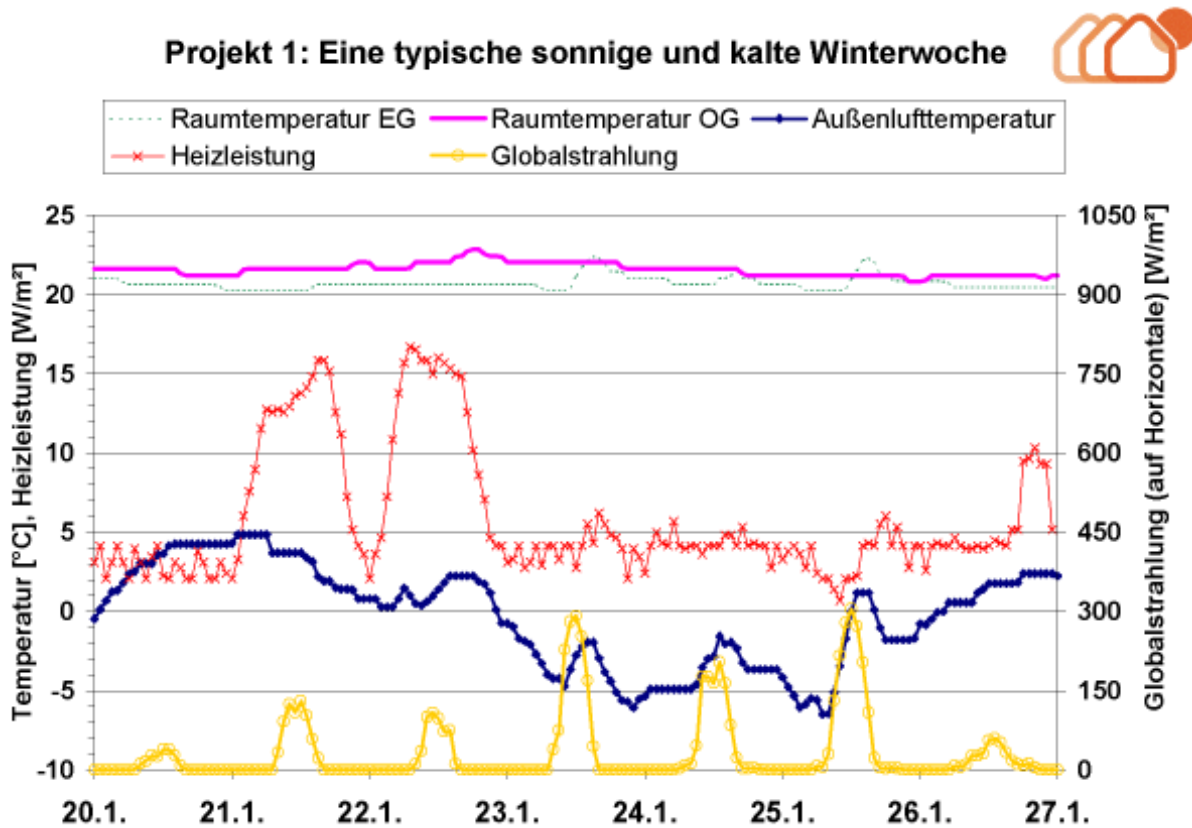


Abb. 39: Typische sonnige kalte Woche im Winter der ersten Heizperiode 1999/2000 in einem der 32 Passivhäuser

Als typische bewölkte (trübe) Winterwoche wurde die Zeit vom 12.1. bis zum 19.1.2000 ermittelt und in Abb. 40 dargestellt. Hier liegen die Raumlufttemperaturen zwischen 19,8 und 22,4 °C. Die Solarstrahlung liegt an drei aufeinanderfolgenden Tagen immer unter 50 W/m². Die Heizleistung steigt an diesen Tagen auf Werte bis über 15 W/m² an. Die Raumlufttemperatur, insbesondere im OG, steigt dabei um 2,6 K, auf max 22,4 °C an. Am dritten strahlungsschwachen Tag (17.1.2000) ist die Heizleistung nicht mehr so hoch, da die Raumlufttemperaturen in EG und OG im Vergleich zum ersten Tag (15.1.2000) bereits angehoben waren und die Außenlufttemperatur schon im Laufe des Vortags (16.1.2000) deutlich angestiegen ist (von 0 °C auf 4,7 bis 6,4 °C).

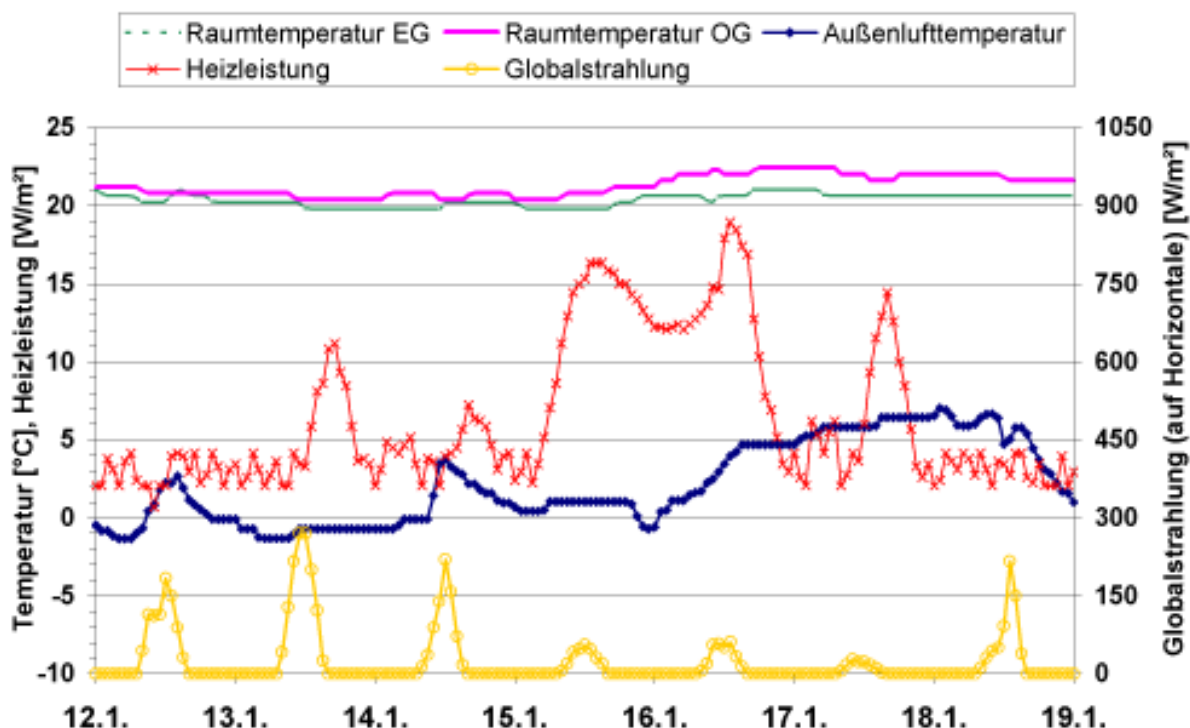
Projekt 1: Eine typische, bewölkte Winterwoche


Abb. 40: Typische moderat bewölkte Woche im Winter der ersten Heizperiode 1999/2000 in einem der 32 Passivhäuser

Deutlich an der Diskussion zu Abb. 39 und Abb. 40 wird, daß für diese 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. Dies gilt zumindest für Passivhäuser mit südorientierten Hauptfensterflächen. Diese Zusammenhänge bestätigt die Analyse in [Bisanz 1999].

9.2.2 Typische Sommerwochen

Zur Untersuchung einer typischen Sommerwoche ist das gleiche Haus betrachtet worden. Die typische Sommerwoche (Abb. 41) 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.

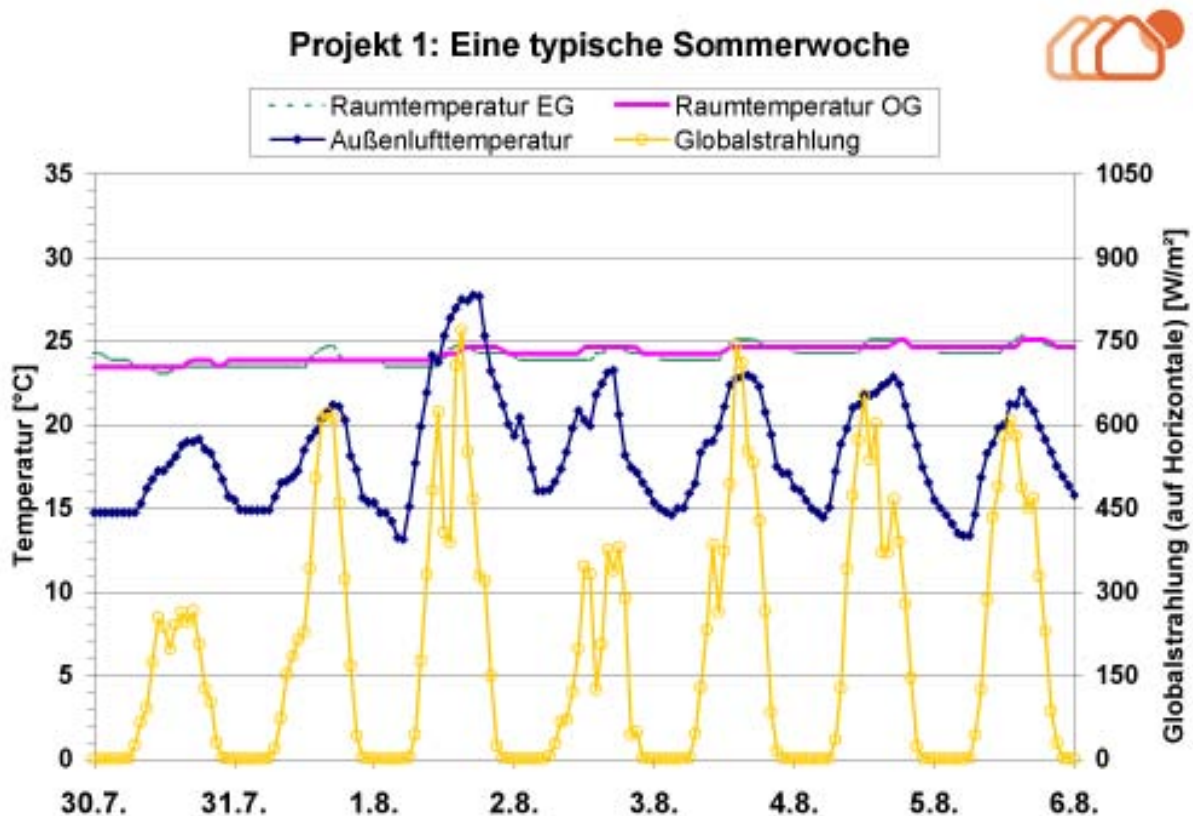


Abb. 41: Typische Woche im Sommer 2000 in einem der 32 Passivhäuser.

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. 42.

Der Außenlufttemperaturgang zeigt den typischen Verlauf für eine mitteleuropäische sommerliche Hitzeperiode: Die "Schönwetterphase" beginnt am 17. Juni 2000. Durch die Einstrahlung bedingt steigen die Außenlufttemperaturen tagsüber stark an, während es in der Nacht noch zur Abkühlung kommt. Allmählich schaukeln sich die Außenlufttemperaturen nach oben. In der Nacht vom 21. auf den 22. Juni wird nur noch eine minimale Außenlufttemperatur von 22,4 °C erreicht. 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. Ebenfalls 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 steigt dabei um fast 3 Kelvin (von 24,3 auf 27,1 °C) innerhalb von 3 Tagen an.

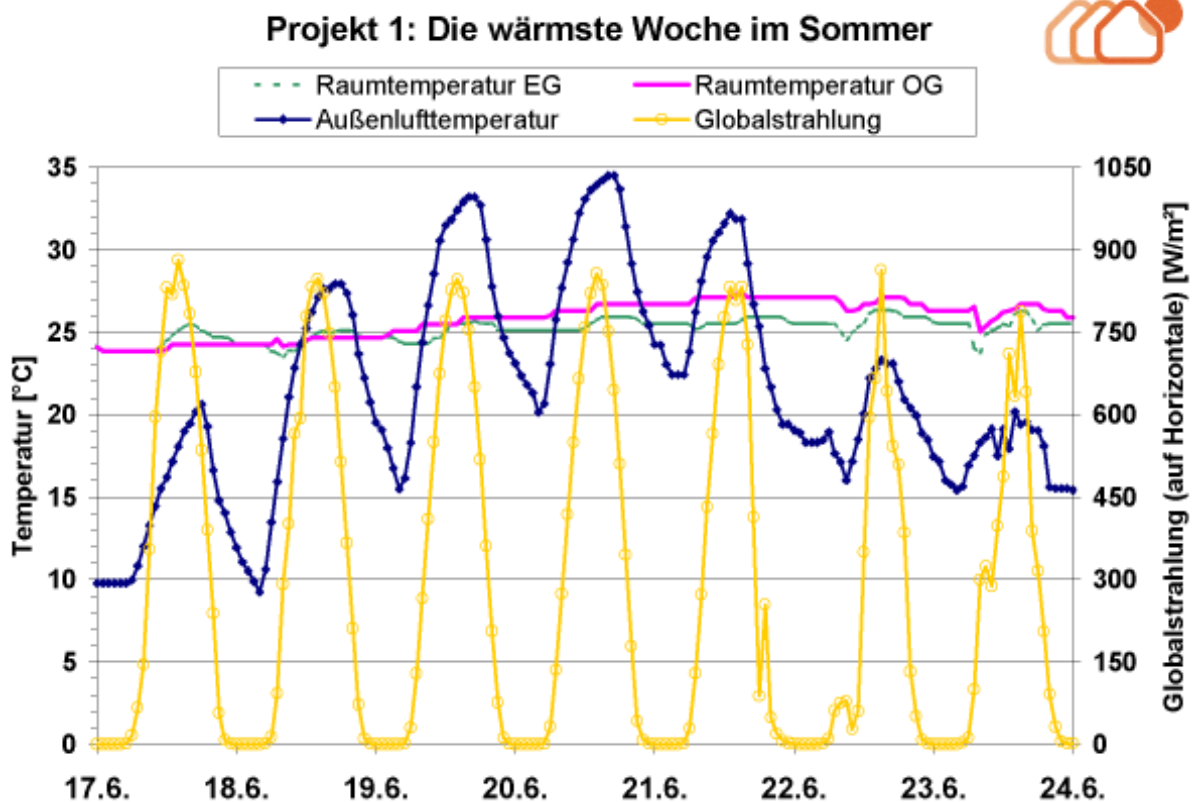


Abb. 42: Wärmste Woche im Sommer 2000 (Hitzeperiode) in einem der 32 Passivhäuser.

Nach dem Höhepunkt der Hitzeperiode haben die Raumlufttemperaturen ihr Maximum von 27,1 (OG) bzw. 25,5 °C (EG) erreicht. Am 22. und 23.6.2000 ist deutlich zu erkennen, daß die Bewohner durch Lüftung in den kühleren Morgenstunden den aufgeschaukelten Raumlufttemperaturen entgegenwirken (etwa ab 8:00 Uhr). Sie erreichen damit eine Abkühlung um bis zu 1 K. Allerdings werden gegen Mittag, bedingt durch die hohe Strahlungsintensität, wieder höhere Temperaturen erreicht. Zumindest im OG kann durch die Morgenlüftungen aber eine weitere Erwärmung verhindert werden. Durch konsequente Nachtlüftung und verstärkten Einsatz der Südverschattung wäre es auch in der Hitzeperiode möglich gewesen, die Raumlufttemperaturen noch niedriger zu halten. Durch die Untersuchung anderer Häuser in diesem Zeitraum kann dies belegt werden.

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 darüberhinaus zweckmäßig, tagsüber die Fenster möglichst geschlossen zu halten.

9.3 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. 43 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. Diese Tatsache wurde bereits weiter oben in Abschnitt 9.2.1 erwähnt.

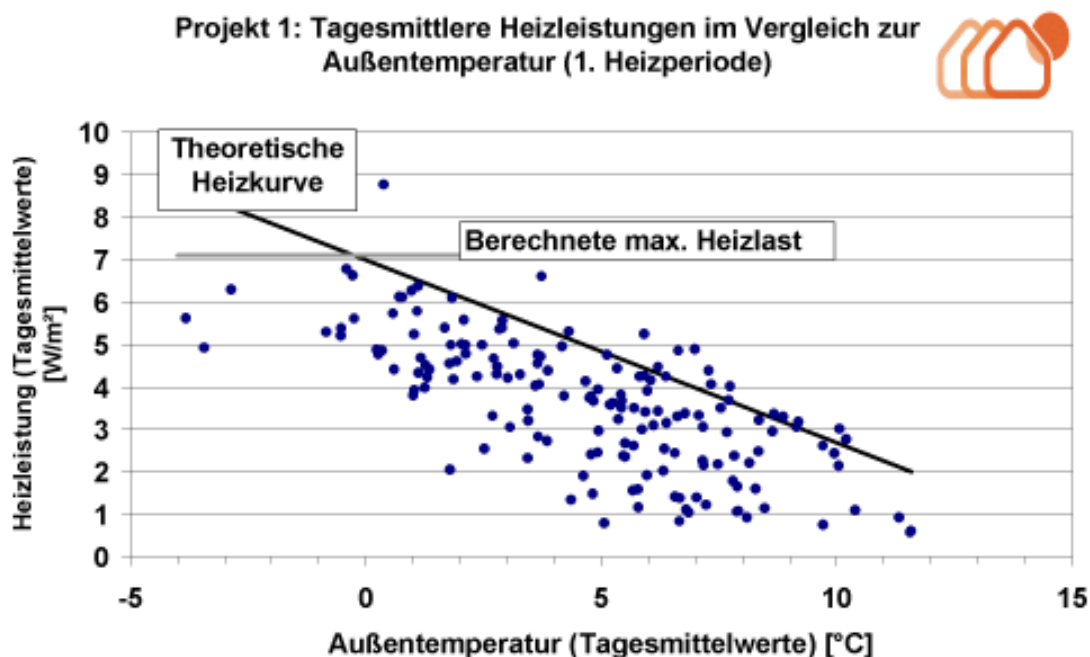


Abb. 43: Theoretische Heizgerade und tagesmittlere Heizleistungen im Vergleich zur tagesmittleren Außentemperatur (alles nur bewohnte Häuser) im Zeitraum der nach CEPHEUS Vorgaben berechneten Heizzeit (08.11.1999 bis 18.04.2000). Die nach PHPP berechnete Heizlast für das repräsentative Haus liegt bei $7,1 \text{ W/m}^2$.

Bei den mittleren Heizleistungen im betrachteten Untersuchungszeitraum ergeben sich einige Werte, die oberhalb der Heizkurve liegen. Bei den Werten oberhalb der Geraden handelt es sich um höhere Heizleistungen als es der Dämmstandard der Passivhäuser eigentlich erwarten läßt. Überwiegend wird es sich dabei um Aufheizevorgänge handeln, die höhere Leistungen benötigen.

Denkbar als weitere Ursache für höhere Heizleistungen sind auch andere Einflüsse, wie z.B. das „Weglüften“ von zu hohen Temperaturen und Abweichungen vom projektierten Baustandard. Durch die mehrfache Kontrolle der Häuser, die Betreuung der BewohnerInnen und den intensiven Austausch mit dem Haustechnikplaner wurde deutlich, daß die Wärmeversorgung der Häuser in der ersten Heizperiode nicht einwandfrei funktionierte. Durch einen Planungsfehler der hydraulischen Anlage (nicht passivhauspezifisch) ließen sich die Nachheizregister nicht wie gewünscht steuern und liefen vielfach lange Zeit mit hoher Leistung, obwohl die Bewohner dies nicht wünschten oder benötigten. Vor der Behebung dieser Probleme im Mai/Juni 2000 konnten die betroffenen Bewohnerinnen und Bewohner nur durch das Absperrern der gesamten VL-Leitung ihres Hauses das Heizregister abschalten. Da dann auch keine Warmwasserbereitung über die Fernwärmeversorgung mehr möglich ist, konnte dieser Weg nur begrenzt beschritten werden.

In der ersten Heizperiode waren die Nachheizregister noch nicht wärmegeämmt. Auch deren Wärmeverlust sowie die Abstrahlungsleistung der Vor- und Rücklaufleitung ab dem WMZ zum Nachheizregister und Badheizkörper werden von den Wärmemengenzählern mitgemessen. Auch hierdurch können höhere gemessene Leistungen vorkommen.

Zusätzlich gab es bei einigen Nutzerinnen und Nutzern Bedienungsproblem mit dem Raumthermostaten. So wurden bei den Nachbesserungsarbeiten in allen Häusern Ende Mai 2000 (Tagesaußentemperaturen von etwa 15 bis 19 °C, Nachts minimal 10 bis 13 °C) vier Häuser noch ungewollt beheizt. Diese Bewohner beklagten sich sogar über die zu hohen Temperaturen. Ursache war hier eine falsche Einstellung am Raumthermostaten, der nicht zur Abschaltung, sondern zur maximalen Leistungsanforderung führte (siehe dazu auch in Abschnitt 9.1.1 die Erläuterungen zu Abb. 28).

In der zweiten ausgewerteten Heizperiode 2000/2001 wird die rechnerische Heizlastobergrenze von 7,1 W/m² von den gemessenen tagesmittlere Heizlasten in keinem Fall überschritten (Abb. 44). Es liegen auch weniger tagesmittlere Heizleistungen über der theoretischen Heizkurve als in der vorausgehenden Heizperiode.

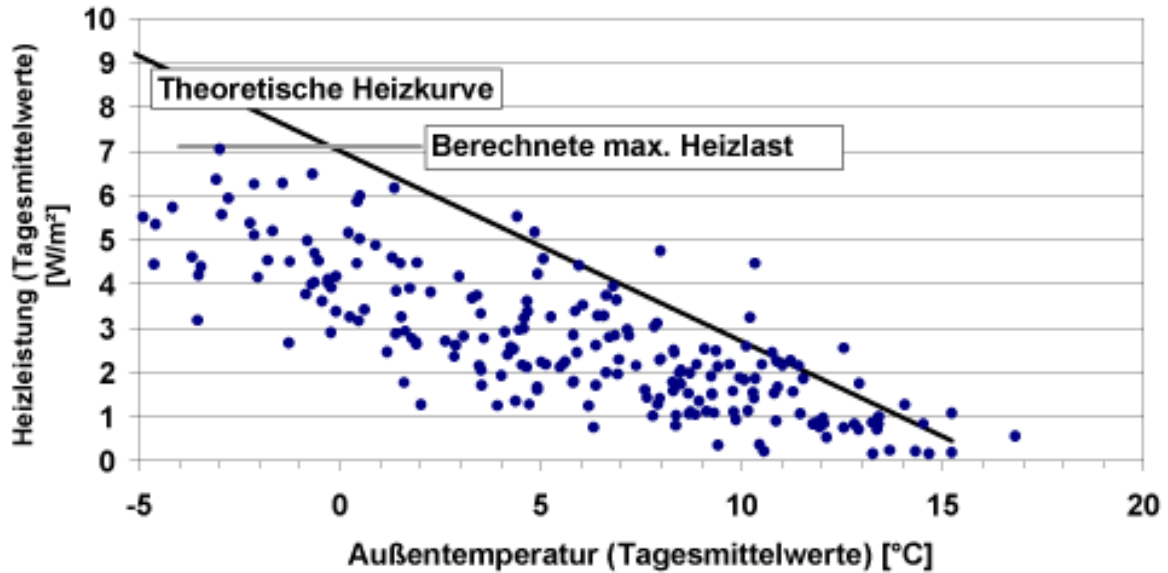
Projekt 1: Tagesmittlere Heizleistungen im Vergleich zur Außentemperatur (2.Heizperiode)


Abb. 44: 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.

10 Projektspezifische Meßdatenauswertung

Über die standardisierte CEPHEUS Datenauswertung in Abschnitt 8 und 9 hinaus werden hier noch weitergehende projektspezifische Datenauswertungen dargestellt.

10.1 Klimadatenvergleich

Zur Einschätzung der Klimabedingungen im ersten Meßjahr (1999/2000) sind in diesem Abschnitt die gemessenen Klimadaten mit den 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. Die Referenzdaten sind auch im Projektbericht [Feist 2001] als Klimadaten des Standortes dargestellt worden.

In Abb. 45 sind die monatlichen minimalen, mittleren und maximalen Außentemperaturen dargestellt. Diesen Daten liegen Stundenwerte zugrunde. Das erste Meßjahr hat fast durchgängig etwas höhere Temperaturen als das Referenzjahr. Der relativ milde Winter zeigt sich insbesondere bei den **minimalen** Temperaturen, welche bis zu 11 K höher liegen (Februar 2000) als im Referenzjahr. Im **Monatsmittel** ist die Abweichung allerdings nicht so groß (maximal 4,3 K im Februar 2000). Die Darstellung der **maximalen** Außentemperaturen zeigt in der Winterzeit drei Monate mit geringeren (Oktober bis Dezember 1999) und dann wieder Monate mit höheren gemessenen Monatswerten. Die relativ milden Wintertemperaturen lassen allein noch keine Aussage in Bezug auf Heizenergie-Mehrverbräuche oder -Einsparungen zu, da sich der Heizenergieverbrauch im Passivhaus nicht nur nach der Außentemperatur, sondern auch entscheidend nach der Solarstrahlung richtet.

In den Sommermonaten überwiegen die Monate, in denen die gemessenen maximalen Außentemperaturen höher sind als die des Referenzjahres. Der Vergleich der maximalen Außentemperaturen im Sommer ist für die Untersuchung der sommerlichen Behaglichkeit von Bedeutung. Die Temperaturdaten zeigen, daß es sich im April, Mai und Juni um Monate mit jeweils mindestens einem besonders warmen Tag gehandelt hat. Trotz dieser Tatsache ergaben die Untersuchungen zum Bereich der sommerlichen Innentemperaturen in Abschnitt 9.2 gute Ergebnisse.

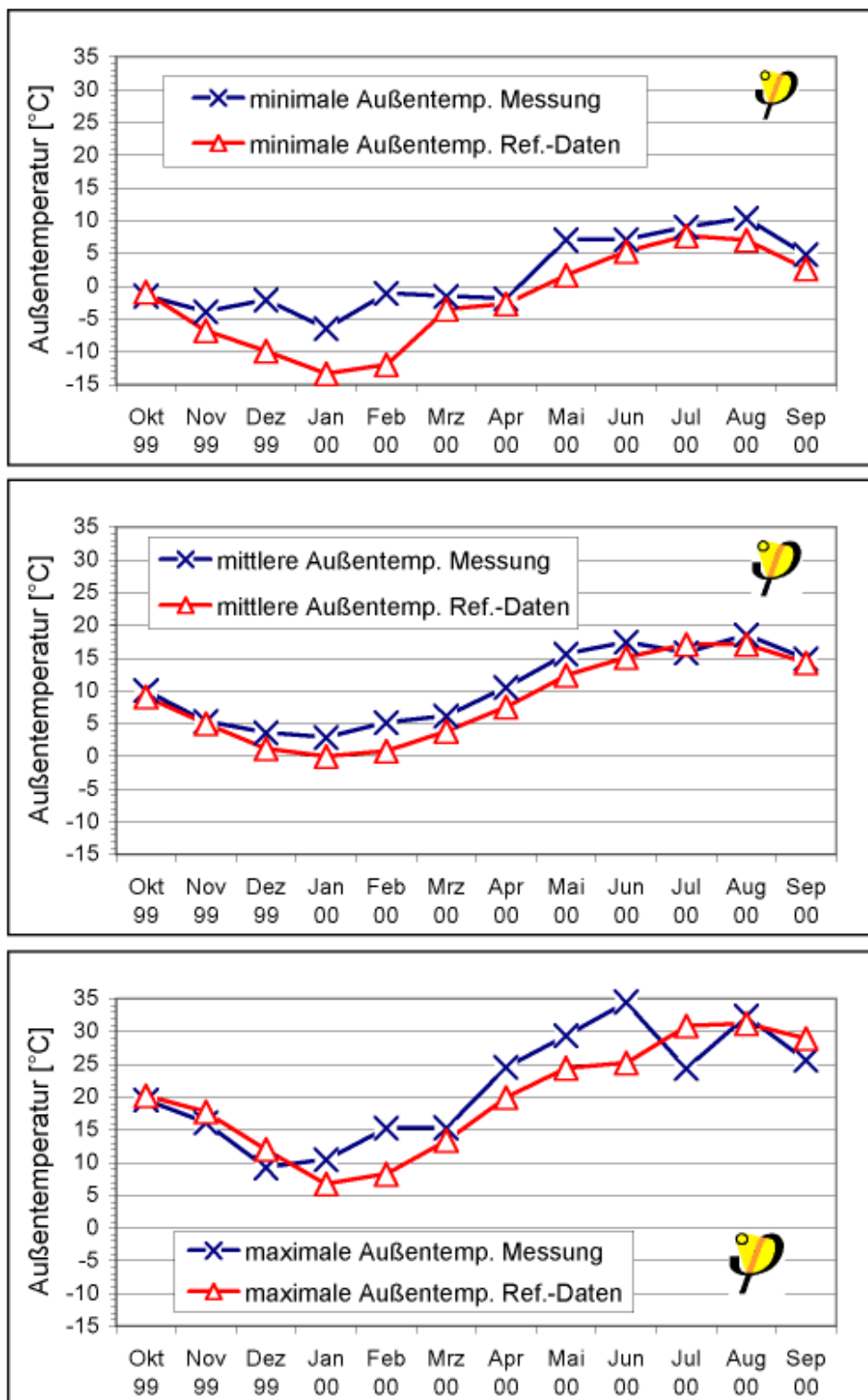


Abb. 45: Klimadatenvergleich des ersten Meßjahres der minimalen, mittleren und maximalen Temperaturen (Monatswerte aus Stundendaten) zwischen den Meßdaten und den Referenzdaten, welche der Simulation zugrunde liegen [Schnieders 98].

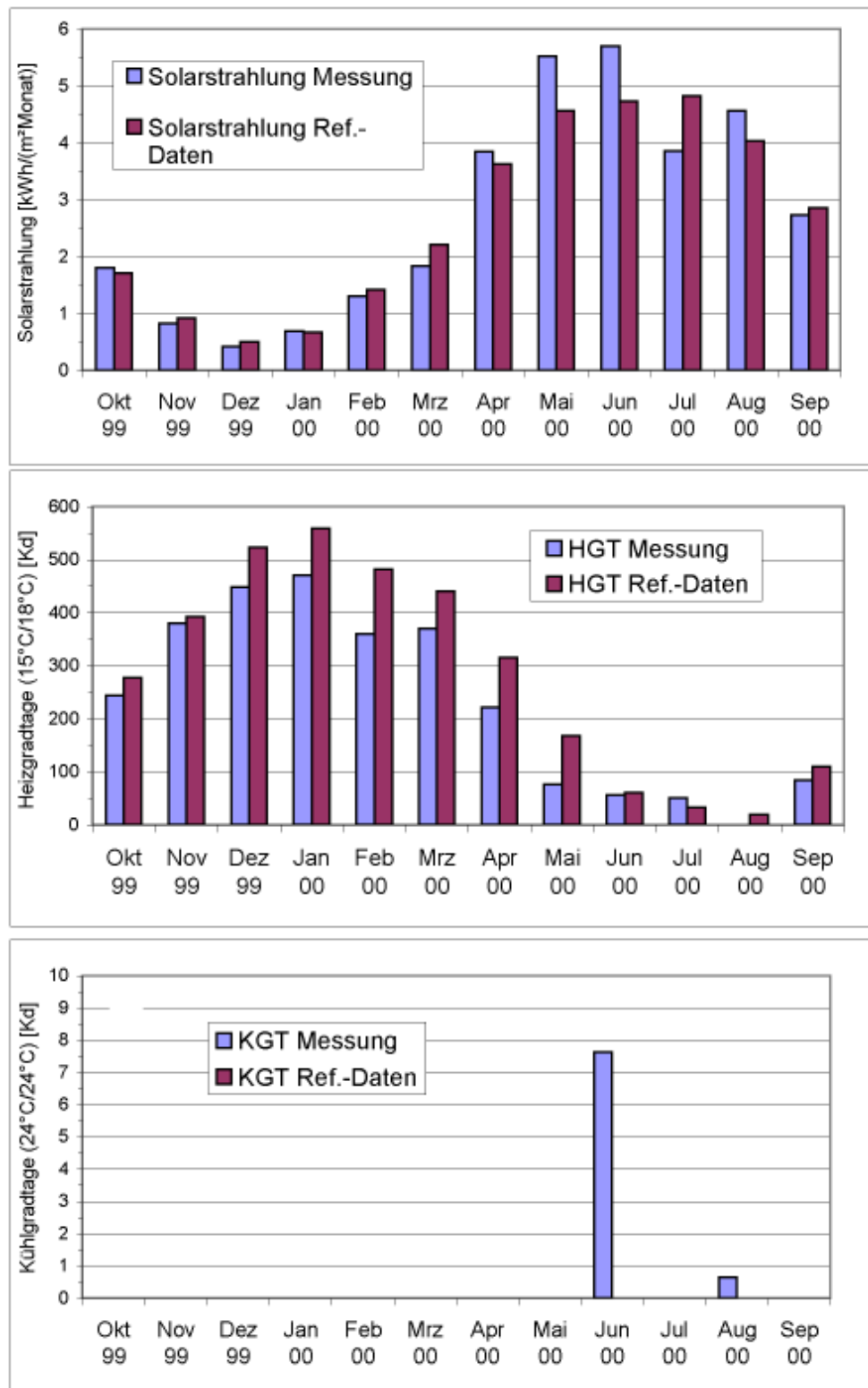


Abb. 46: Klimadatenvergleich des ersten Meßjahres zwischen den Meßdaten und den Referenzdaten, welche der Simulation zugrunde liegen [Schnieders 98]. Vergleich der Solarstrahlung sowie der Heiz- (HGT) und Kühlgradtagen (KGT) nach Temperaturvorgaben der EU (HGT: Heizgrenztemperatur 15 °C, Innentemperatur 18 °C, KGT: Kühlgrenztemperatur 24 °C, Innentemperatur 24 °C) als Monatswerte aus Tagesmittelwerten.

In Abb. 46 sind die Klimadatenvergleiche zwischen den Meß- und den Referenzdaten zur Solarstrahlung und zu den Heizgrad- bzw. Kühlgradtagen dargestellt. Die Monatssummen der Solareinstrahlungsdaten zeigen im November und Dezember 1999 sowie im Februar und März 2000 geringere, im Januar 2000 etwa gleich hohe gemessene Strahlungswerte im Vergleich zu den Referenzwerten. Den milderen Außenlufttemperaturen steht damit in der Kernheizzeit ein geringeres Solarstrahlungsangebot entgegen. Die milden Wintertemperaturen führen zu geringeren Heizenergieverbräuchen, das geringere Solarstrahlungsangebot zu höheren.

Die in Abb. 46 dargestellten Heiz- und Kühlgradtage sind nach Vorgabe der EU aus Tagesmittelwerten ermittelt worden. Die Berechnung der Heizgradtage erfolgt nach der Formel

$$\sum_{T_m \leq 15^\circ C} (18^\circ - T_m) \cdot 1d$$

Ihr liegt damit die Heizgrenztemperatur von 15 °C und eine Innentemperatur von 18 °C zugrunde. Diese Temperaturgrenzen stellen allerdings für die Passivhäuser keine realistischen Grenzwerte dar. Die Raumtemperatur liegt im Mittel höher, die Heizgrenztemperatur niedriger. Diese Berechnungsgrenzen führen unter anderem zum Ergebnis, daß es auch im Sommer noch Tage gibt, an denen theoretisch geheizt werden müßte. Der Vergleich mit den Referenzdaten zeigt im ganzen Meßjahr mit Ausnahme des Juli deutlich niedrigere HGT an. Da diese allein aus Temperaturdaten ermittelt werden und außerdem die vorgegebenen Grenzen für die Passivhäuser nicht verwendbar sind, werden die Daten hier nicht weiter interpretiert.

Die Kühlgradtage werden ebenfalls nach EU-Vorgabe und aus Tagesmitteltemperaturen nach der Formel

$$\sum_{T_m \geq 24^\circ C} (T_m - 24^\circ C) \cdot 1d$$

bestimmt. Hier wird angenommen, daß ab einer tagesmittleren Außentemperatur von 24 °C eine aktive Kühlung des Gebäudes erfolgt. Eine aktive Kühlung ist bei Passivhäusern nicht vorgesehen, und wie die Daten des Projektes Hannover-Kronsberg zeigen, bei entsprechender Planung und korrekter Ausführung auch nicht notwendig. Aus dem Datenvergleich in Abb. 46 zeigt sich, daß es nur nach den gemessenen Klimadaten im Juni und August 2000 Kühlgradtage geben würde.

10.2 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. 47.

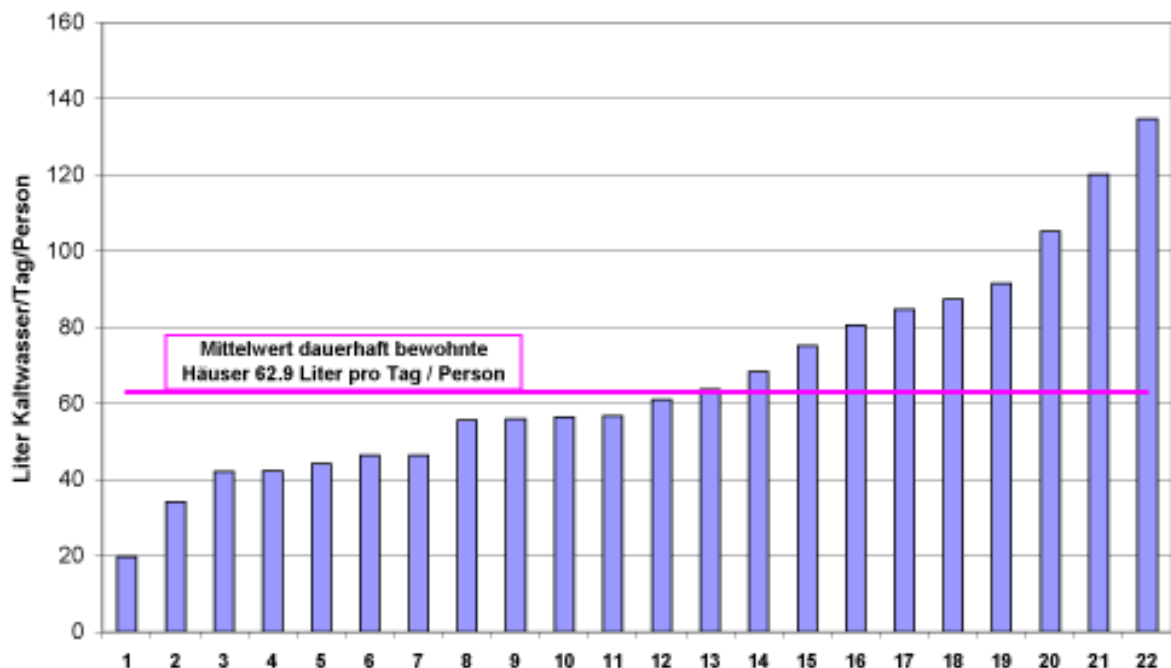


Abb. 47: Durchschnittliche Kaltwasserverbrauchsmenge pro Tag und Person in Litern vom 01. Oktober 1999 bis zum 30. September 2000 der 22 dauerhaft bewohnten Häuser.

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.

10.3 Warmwasser

Für den Bereich Warmwasser muß in diesem Abschnitt die Warmwasserverbrauchsmenge und der Fernwärmeverbrauch für die Warmwasserversorgung unterschieden werden. Bereits in Abb. 25 waren die monatlichen Summen der Fernwärmebezüge für die Warmwassererwärmung grafisch dargestellt worden. Diese werden hier hausweise dokumentiert.

10.3.1 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)¹. Für jedes dauerhaft bewohnte Haus ergibt sich ein mittlerer Tagesverbrauch von 100,5 Litern.

¹ Die Abweichung des durchschnittlichen Verbrauchswertes pro Tag und Person gegenüber dem Wert aus dem dritten Zwischenbericht [Peper 2001] ergibt sich durch die nach der sozialwissenschaftlichen Evaluation vorliegenden exakten Personenzahlen und durch eine Zählerkorrektur für ein Haus (wg. Meßdatenausfall).

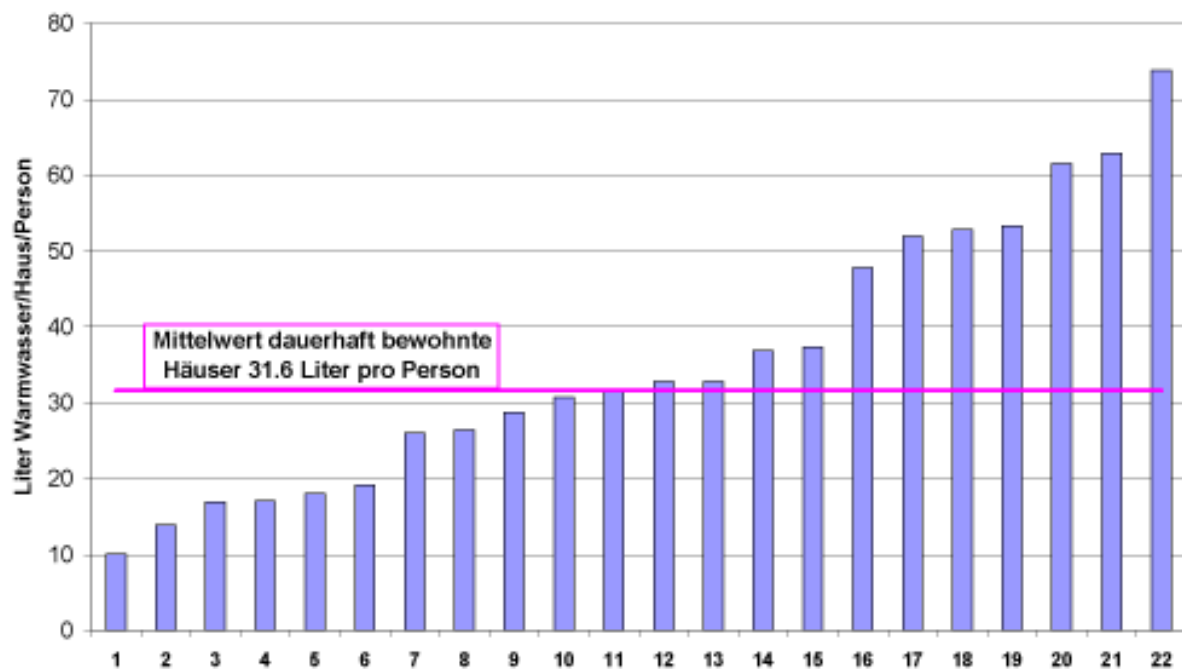


Abb. 48: Durchschnittliche Warmwasserverbrauchsmenge pro Tag in Litern vom 1. Oktober 1999 bis zum 30. September 2000 der 22 dauerhaft bewohnten Häuser.

In Abb. 48 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 (Verbrühschutz, vergl. Abb. 15, Meßstelle T_{WW1}) ergab im intensivgemessenen 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 intensivgemessenen 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. Bei der vorhandenen Streuung und den bestehenden Unsicherheiten bzgl. der individuellen Höhe der Zapftemperaturen sind die Projektierungsansätze als vernünftig anzusehen; sie weichen etwas nach oben ab und befinden sich damit auf der sicheren Seite.

10.3.2 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. 49). Der Jahresmittelwert liegt bei 9,2 kWh/(m²a). Die Sommergeverbräuche (5 Monate) sind als Teilsäule im oberen Bereich jeder Säule gesondert dargestellt. Sie sind durchschnittlich mit 1,3 kWh/m² sehr gering, dies ist neben dem kürzeren Zeitraum vor allem auf die solaren Beiträge der Kollektoranlagen zur Warmwasserbereitung zurückzuführen.

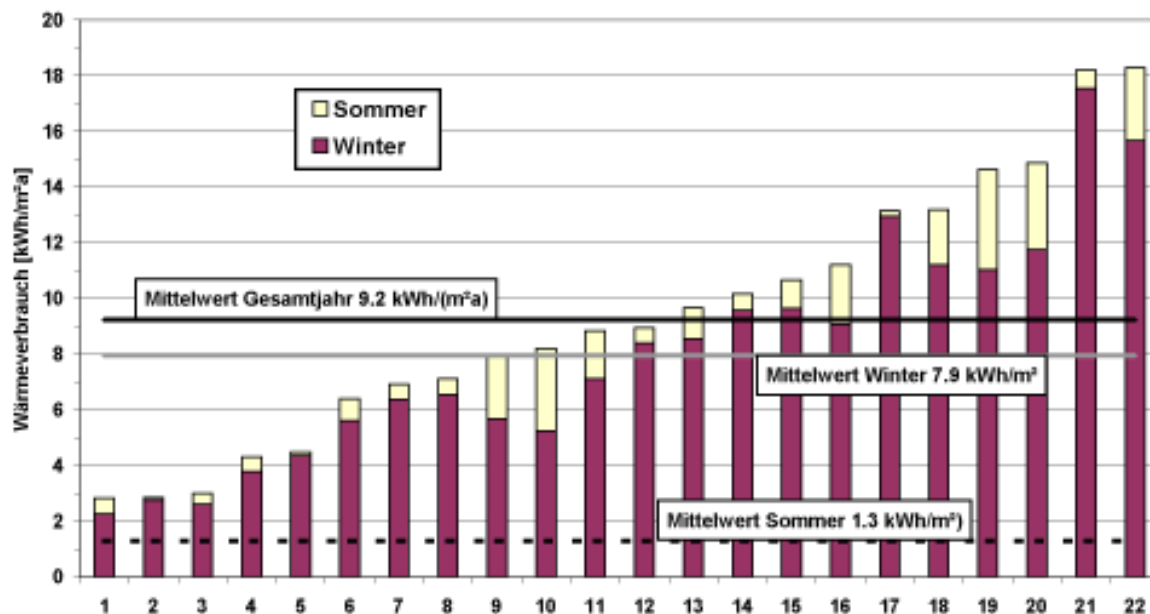


Abb. 49: Spezifischer Fernwärmeverbrauch zur Warmwasserbereitung für das erste Meßjahr (01.10.1999 bis 30.09.2000) der 22 dauerhaft bewohnten Passivhäuser unterteilt in Winter- (01.10.1999 bis 30.04.2000) und Sommerzeitraum (01.05.2000 bis 30.09.2000).

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 durch die ganz unterschiedliche Sommer-/Winterverteilung der Verbräuche des Fernwärmebezugs. Insbesondere die Häuser 2, 5 und 17 der aufsteigenden Sortierung haben so gut wie keine Energiebezüge der Fernwärme im Sommerzeitraum.

10.4 Heizleistungen

Zusätzlich zu den Wochenbetrachtungen und der Darstellung der Heizleistungen und der Heizkurve im Abschnitt 9 werden hier die Heizleistungen der 32 Passivhäuser in der ersten Heizperiode analysiert. Wie bereits ausgeführt ist für die Funktion des Passivhausstandards die notwendige Heizleistung ein wichtiges Kriterium. Angestrebt werden im Passivhaus maximale Werte von $P_{\text{heiz}} = 10 \text{ W/m}^2$. Damit wird sichergestellt, daß die Gebäude dauerhaft über die Zuluft beheizt werden können.

Bei der Auswertung der Meßdaten hat sich als **größter Tagesmittelwert** der Heizleistungen über alle Häuser $P_{\text{heiz Mittel max}} = 8,8 \text{ W/m}^2$ ergeben. Das Mittel aller Tagesmittelwerte für die erste Heizperiode liegt bei $P_{\text{heiz Mittel}} = 2,6 \text{ W/m}^2$. Dabei ist zu beachten, daß hier Zeiten mit sehr geringen Leistungen enthalten sind. Für den Kernwinter (relevante Hauptheizzeit vom 01.11.1999 bis 29.02.2000) ergibt sich ein Mittelwert der Heizleistung von $P_{\text{heiz Mittel}} = 4,1 \text{ W/m}^2$.

Die folgende Grafik (Abb. 50) zeigt tageweise die mittleren Heizleistungen der Passivhäuser im Vergleich zum mittleren Außentemperaturverlauf mit deutlich sichtbarer Korrelation zwischen Außentemperatur und Heizleistung.

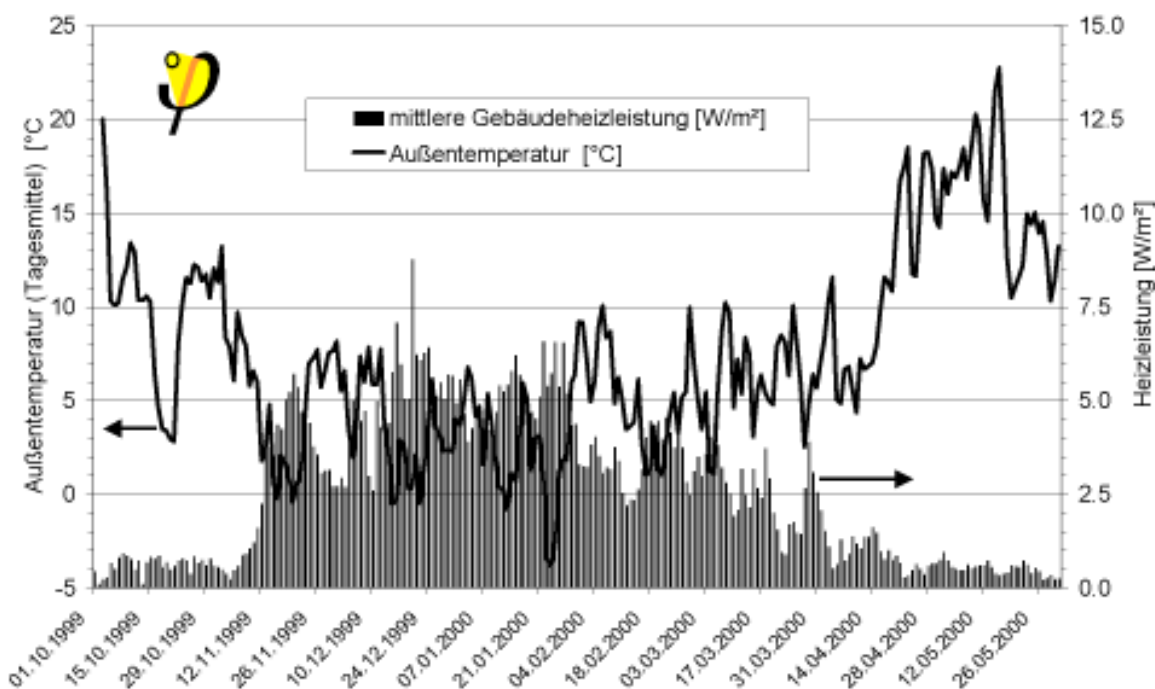


Abb. 50: Mittlere Heizleistung in den 32 Passivhäusern im Vergleich zur tagesmittleren Außentemperatur vom 01. Oktober 1999 bis zum 31. Mai 2000 (Die Pfeile weisen auf die abzulesende Achse)

Im Tagesmittel aller Häuser sind damit Heizleistungen von 10 W/m^2 deutlich unterschritten worden. Dies bedeutet nicht, daß bei einzelnen Häusern nicht auch deutlich höhere Tagesmittelleistungen gemessen wurden. Als maximaler Wert findet sich $P_{\text{Heiz max}} = 18,1 \text{ W/m}^2$ am 20.12.1999 in einem Reihenmittelhaus. Dies entspricht einer absoluten Leistung von $1,75 \text{ kW}$. Da das Nachheizregister eine Nennleistung von nur etwa $1,1 \text{ kW}$ besitzt, bedeutet diese Spitzenleistung, daß gleichzeitig auch der Badheizkörper betrieben wurde.

Abb. 51 zeigt ein einzelnes bewohntes Haus bezüglich der Korrelation zwischen Heizleistung, Außentemperatur und Innentemperatur (EG).

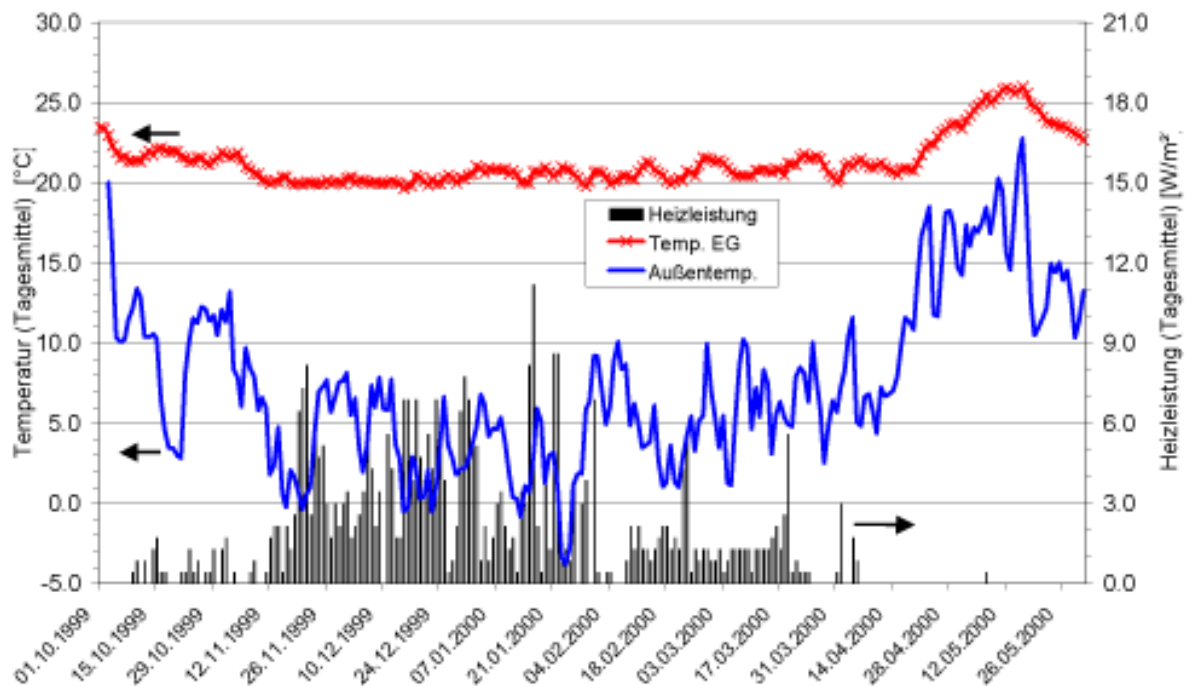


Abb. 51: Heizleistungen und Temperaturen (EG) in einem Mittelhaus der Reihe 14 sowie Außentemperaturen (alles Tagesmittelwerte) vom 1.10.1999 bis zum 31.05.2000 (Die Pfeile weisen auf die abzulesende Achse)

Die Grafik macht deutlich, daß in diesem Haus im EG durchgehend Tagesmitteltemperaturen von mindestens 20 °C zu finden sind. Die mittlere Temperatur im EG vom 01.10.1999 bis zum 31.5.2000 liegt bei 21,3 °C, für die Hauptheizzeit bei 20,4 °C (01.11.99 bis 29.02.2000). Die Heizleistungen korrelieren (z.T. leicht zeitversetzt) mit der Außentemperatur. Die höchste tagesmittlere Heizleistung in diesem Haus liegt bei 11,2 W/m² gemessen am 16.01.2000. Dies ist der einzige Tag im Winter 1999/ 2000 mit einer Leistung über 10 W/m².

10.4.1 Wärmeabgabe der Verteilungen: teilweise Nutzbarkeit im Winter

Die in Abschnitt 9.1 bereits dokumentierten Ergebnisse der Berechnung der nutzbaren Anteile der Fernwärmeverteilungen werden in diesem Abschnitt hergeleitet.

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 plziert. Diese Zähler erfassen die Wärmeabgabe der internen Fernwärmeverteilung und der Wärmeübergabe, 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.

Die beiden zentralen Wärmemengenzähler sind nicht mit an der Datenerfassung angeschlossen. Sie wurden allerdings regelmäßig von PHI-Mitarbeitern und von Torsten Schwarz "handabgelesen". Aus diesen Ablesungen läßt sich der gesamte Fernwärmeverbrauch für Heizung, Warmwasserbereitung inkl. aller Verluste des Verteil-, Speicher- und Wärmeübergabesystems bestimmen. 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 $19,9 (\pm 2,5) \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Bei der Bewertung dieser Ergebnisse muß beachtet werden, daß

- es sich um das Meßergebnis des ersten Meßjahres mit allen daraus resultierenden Unwägbarkeiten bzgl. Funktion und korrekter Einstellung der technischen Systeme (s.u.), Trocknung des Baukörpers, Einflüsse durch Einzug und durch noch nicht eingewöhnte Nutzer handelt,
- zeitweise in den meisten Häusern ein Defekt der zentralen wohnungsweisen Regelung wegen eines klemmenden Ventils vorlag,
- die Lüftungsregelungen erst im Verlauf des Sommers 2000 neu konfiguriert wurden und die Balance-Einstellungen durch PHI-Mitarbeiter im Oktober 2000 noch einmal überprüft und nachgestellt wurden,
- unkontrollierte Wärmeverluste von wärmeführenden Leitungen und Komponenten in den Dachgeschossen der Häuser erst im Mai 2000 unter Anleitung von PHI-Mitarbeitern durch zusätzliche Dämmmaßnahmen reduziert wurden.
- Mängel an div. Haustüren im Bezug auf die Luftdichtheit aufgetreten sind, welche zu erhöhten In- und Exfiltrationen führten. Einzelne Haustüren sind zwar durch den Hersteller mehrmals nachgestellt worden, eine dauerhafte Behebung der Mängel für alle Häuser wurde allerdings erst im Frühjahr 2001 durchgeführt.

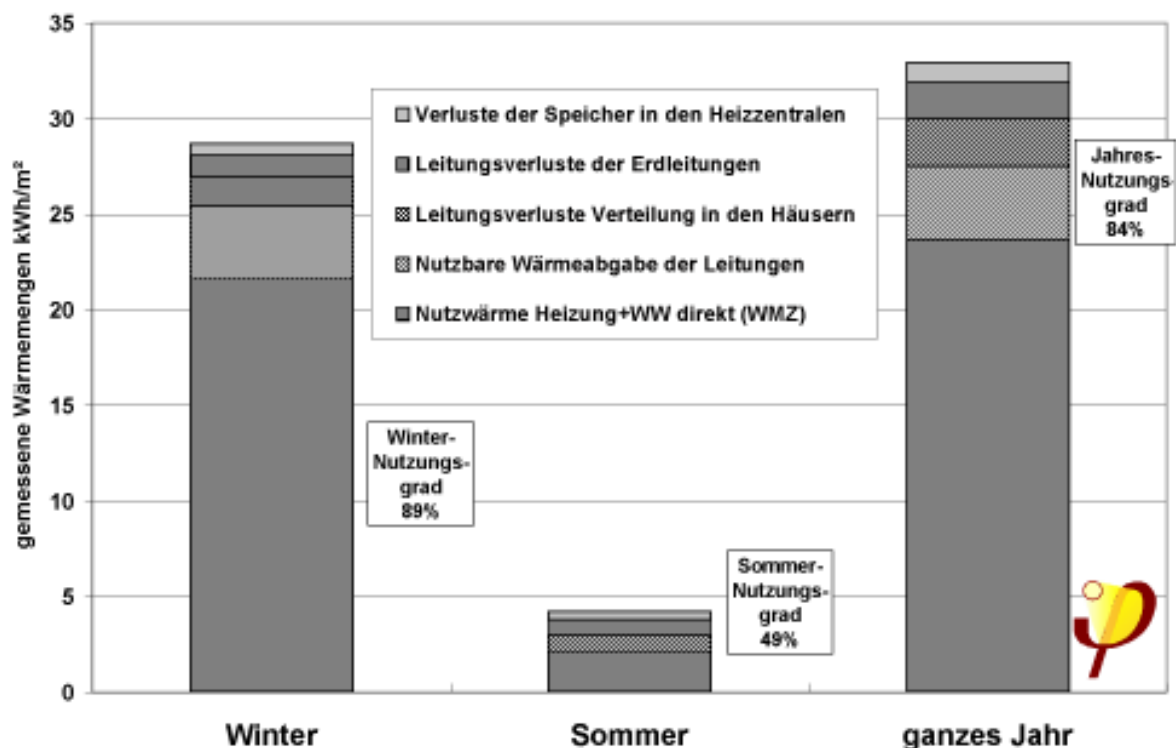


Abb. 52: Die Aufteilung des gesamten Fernwärmeverbrauches auf Nutzwärme (unten), nutzbare Wärmeabgabe der inneren Verteilungen (diagonal schraffiert) und Leitungs- sowie Speicher- verluste (drei obere Säulen) für alle 32 Passivhäuser (Meßzyklus 4.10.1999 bis 4.10.2000). Die Grafik wurde gegenüber der Darstellung in [Peper 2001] korrigiert.

Diese Punkte lassen erwarten, daß die Heizwärmeverbrauchswerte schon für das gerade laufende Meßjahr (1.Oktober 2000 bis 30.September 2001) geringer sein werden und sich den rechnerischen Werten stärker annähern. Differenzen der Meßwerte im 1. Meßjahr zu den Durchschnitts- werten der Folgejahre sind seit langem bei meß-

technisch begleiteten Projekten bekannt. Daher ist es auch wichtig, eine Meßkampagne mindestens über zwei volle Kalenderjahre durchzuführen.

Werden nur die 22 der im ersten Meßjahr 1999/2000 ständig bewohnten Häuser untersucht, so erhöht sich der spezifische Endenergieverbrauch etwas, da die flächenbezogene Nutzwärme zunimmt. Die Verlustseite bleibt jedoch unverändert. Damit ergeben sich etwas bessere Nutzungsgrade der Fernwärmeversorgung (vergl. Abb. 53).

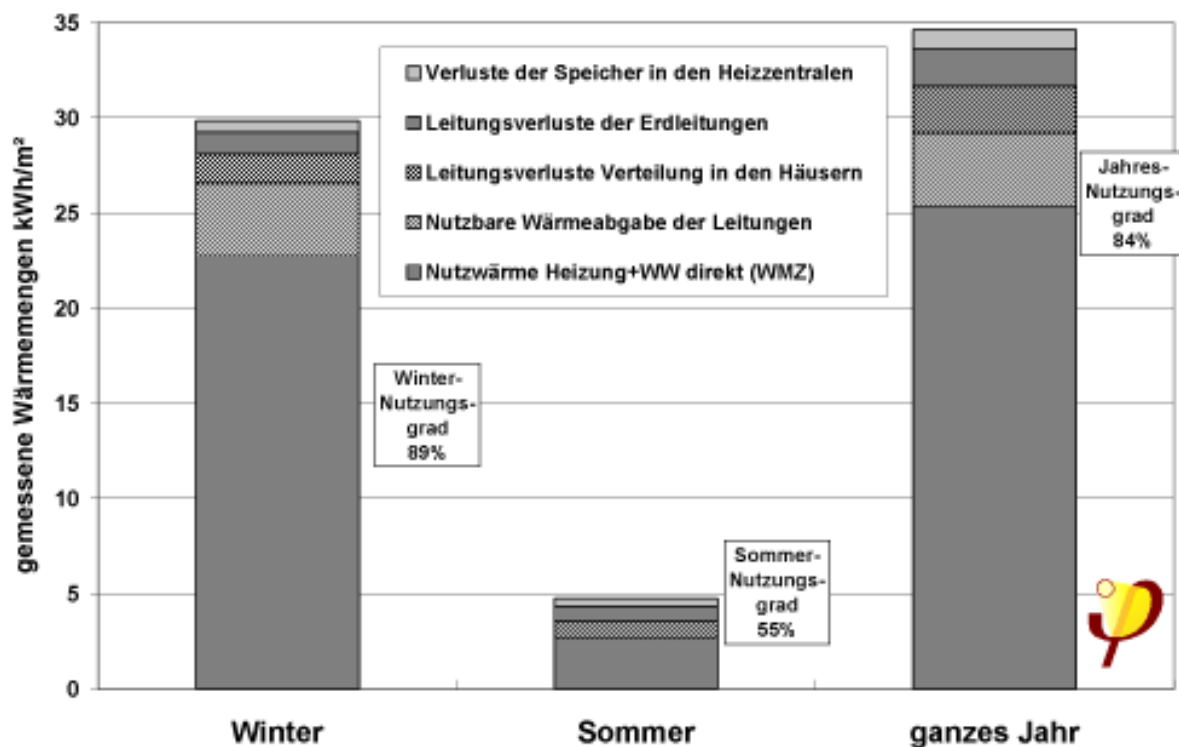


Abb. 53: Die Aufteilung des gesamten Fernwärmeverbrauches auf Nutzwärme (unten), nutzbare Wärmeabgabe der inneren Verteilleitungen (diagonal schraffiert) und Leitungs- sowie Speicher- verluste (drei obere Säulen) der 22 ständig bewohnten Passivhäuser (Meßzyklus 04.10.1999 bis 04.10.2000).

Die Ergebnisse auch des ersten Meßjahres aus der Passivhaussiedlung auf dem Kronsberg sind überzeugend: Der gesamte Endenergieverbrauch an Fernwärme lag nämlich schon im ersten Jahr bei 32,9 kWh/(m²a) für alle, bzw. bei 34,6 kWh/(m²a) für die 22 ständig bewohnten Häuser (der projektierte Wert liegt bei 32,9 kWh/(m²a)). Die etwas höheren Werte für den Jahresheizwärmeverbrauch werden also durch geringere Fernwärmeverbräuche bei der Warmwasserbereitung ausgeglichen.

10.5 Stromverbrauch

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

10.5.1 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 DM 2000,- 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.

Die Unterlagen der a-priori-Berechnungen wurden dem PHI zur Auswertung zur Verfügung gestellt. 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 in der Befragung 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. 54 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.

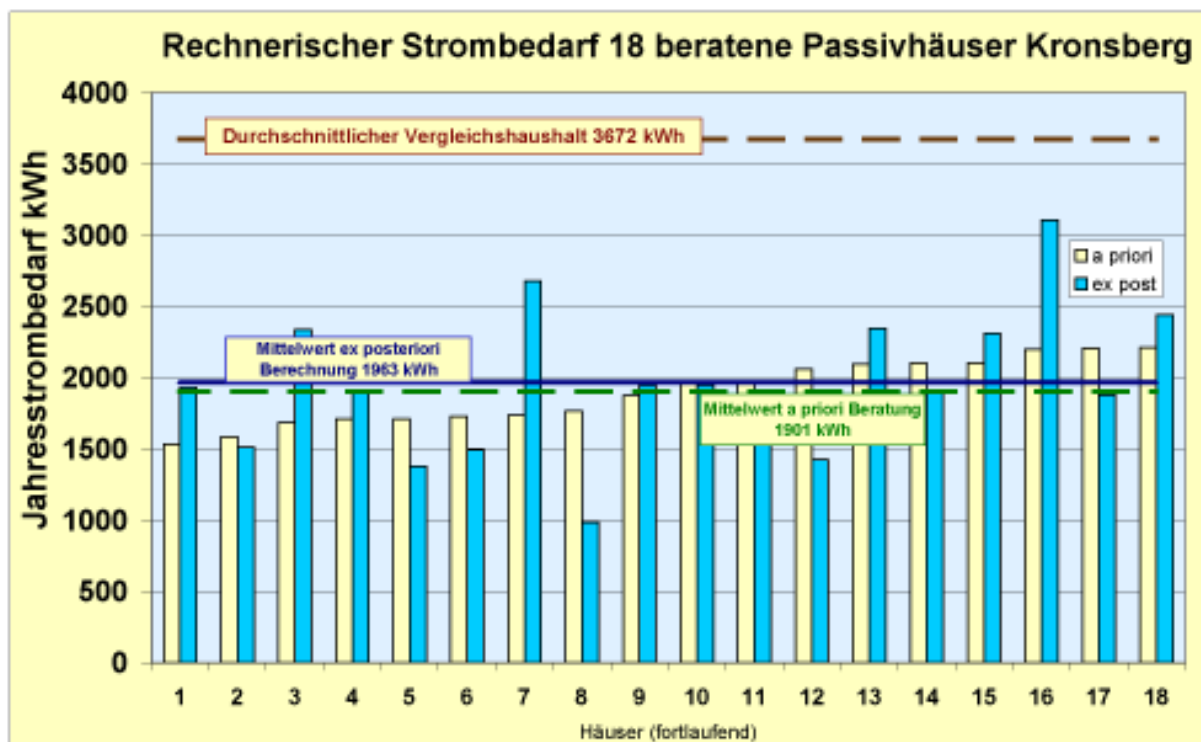


Abb. 54: Vergleich von a-priori und ex-posteriori Berechnungen des Jahresstrombedarfs von 18 Haushalten der Passivhaus-Siedlung Hannover

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. Die später hinzukommenden Erwerber wurden in der hier dokumentierten umfassenden Form nicht mehr beraten. Dies hat auf der einen Seite, wie wir noch sehen werden, zu höheren Stromverbräuchen bei diesen späteren Erwerbern geführt. Andererseits konnten auch sie z.T. anderweitige Beratungen sowie Förderungen von Einzelgeräten in Anspruch nehmen. 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.

Inzwischen liegen die gemessenen Jahresstromverbräuche von 22 dauerbewohnten Häusern der Passivhaussiedlung vor. 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.). Diese Verbräuche sind auch in den Berechnungen zur Projektierung *nicht* enthalten. Sie werden gesondert im nächsten Abschnitt ausgewertet.

In Abb. 55 sind die Jahresstromverbrauchsdaten dieser 22 Passivhäuser dargestellt; die 4 Fälle ohne Beratung sind dabei abgegrenzt formatiert.

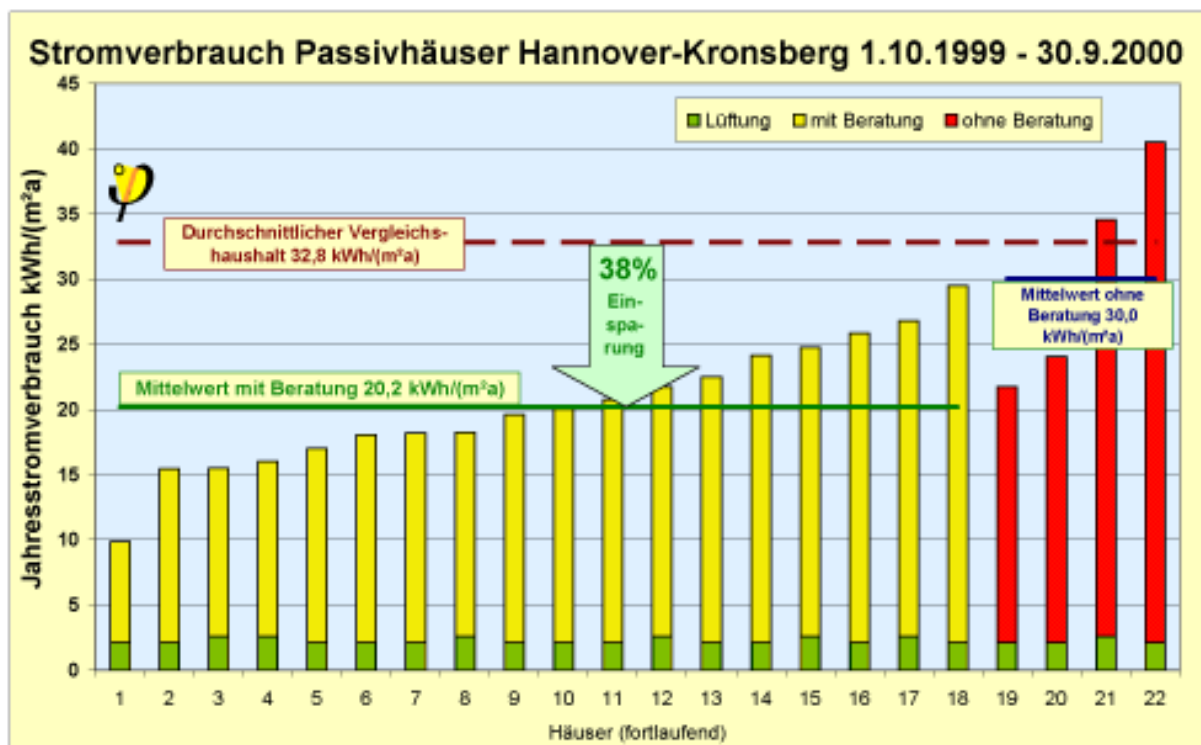


Abb. 55: Gemessener Jahresstromverbrauch von 22 Passivhäuser (1999/2000 dauerbewohnt) vom 1.10.1999 bis zum 30.09.2000 (Haushalts-, Hilfs- und Lüftungsstrom, aber ohne Gemeinschaftsstrom).

Abb. 56 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 Korrelationskoeffizient 41%. Die Streuung bei den Verbrauchswerten ist allerdings ziemlich hoch; dies liegt vor allem am Nutzerverhalten. Für eine Diskussion der Art der Einflüsse durch das Nutzerverhalten ist die hier betrachtete Gesamtheit allerdings zu klein.

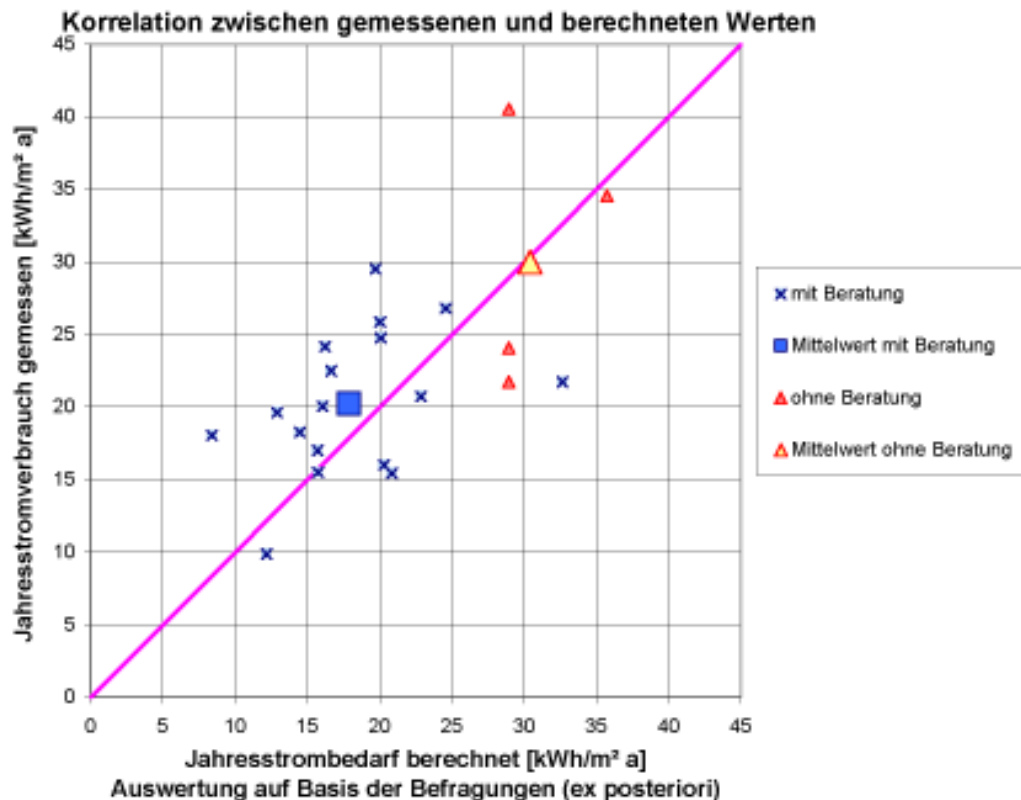


Abb. 56: Korrelationsanalyse zwischen berechnetem Jahresstrombedarf (ex posteriori) und dem gemessenen Jahresstromverbrauch in 18 Passivhäusern der Siedlung auf dem Kronsberg. Ebenfalls dargestellt sind 4 Haushalte, für welche keine Beratung durchgeführt wurde; deren Durchschnittsverbrauch liegt mit 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; für eine weitere Verbesserung des Rechenverfahrens sollten künftig weitere Großverbraucher, wie z.B. Personal-Computer, explizit mit einbezogen werden.

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%**.

Mit den Passivhäusern in Hannover vergleichbare Haushalte würden eher noch einen höheren Stromverbrauch erwarten lassen. Wären die Passivhäuser mit durchschnittlichen Elektrogeräten versehen, bei welchen keine besonderen Stromsparbemühungen eingeflossen wären, würde sich rechnerisch ein Stromverbrauchs-

kennwert von ca. 35,9 kWh/(m²a) ergeben (Berechnung mit PHPP) – übereinstimmend mit statistischen Analysen auf der Basis von Haushaltskundenbefragungen. Bei der Verwendung des statistischen Durchschnittswerts als Referenzwert werden die erzielten Einsparungen also eher konservativ abgeschätzt.

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 neu hinzukommenden Verbräuche liegt der Haushaltsstromverbrauch bei 17,9 kWh/(m²a) und damit um **45% unter dem statistischen Durchschnittswert**.

Für das Ergebnis zur Verbesserung der Stromeffizienz bei der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg kann zusammenfassend festgehalten werden:

- Durch das Beratungs- und Anreizmodell konnten bei 18 Haushalten, welche die Beratung wahrgenommen haben, gegenüber der durchschnittlichen Referenz in Deutschland Stromeinsparungen von 45% erreicht werden.
- Die vorab vorgenommenen Berechnungen des Strombedarfs und auch die ex posteriori durchgeführte Nachkalkulation führt zu einer signifikanten Korrelation, die großteils nutzungsbedingten Streuungen sind aber sehr hoch.
- In der wegen der Einstellung der Beratungen vorhandenen Gruppe von Haushalten ohne Stromeffizienzberatung werden dagegen in etwa durchschnittliche Haushaltsstromverbräuche beobachtet.

Damit zeigt die Untersuchung, daß die gewählte Kombination aus Beratung und Anreiz zu einer signifikanten Einsparung gegenüber der Referenz geführt hat. Allerdings ist diese Einsparung nicht so hoch, wie rechnerisch ermittelt wurde und wie es technisch möglich gewesen wäre, wenn die Haushalte tatsächlich mit optimal ausgewählten Geräten sehr hoher Effizienz ausgestattet worden wären. Eine meßtechnisch nachgewiesene Einsparung von 45% zeigt allerdings ein ganz erhebliches Potential für die Ausschöpfung einer höheren elektrischen Energieeffizienz.

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.

10.5.2 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. 57 zu entnehmen.

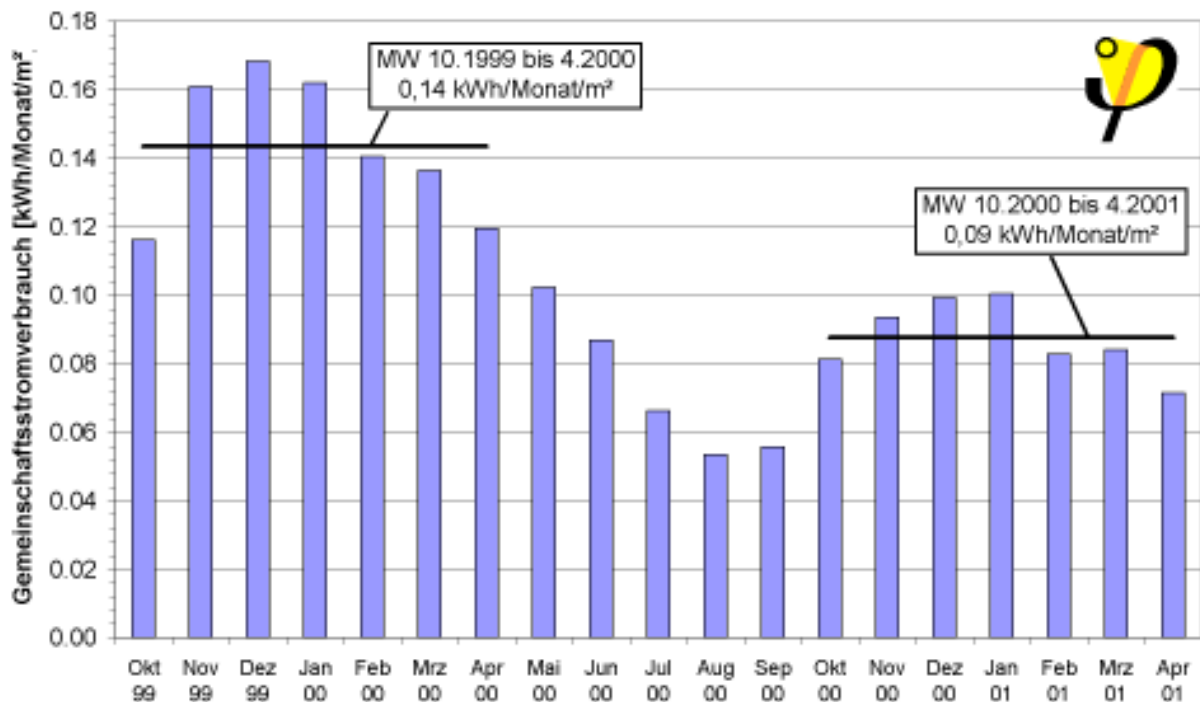


Abb. 57: Spezifische Gemeinschaftsstromverbräuche der 32 Passivhäuser ohne Meßtechnikstrom von Oktober 1999 bis April 2001. Der Gemeinschaftsstromverbrauch enthält die Energie für die Heizungspumpen in den Technikhäusern und die Außenbeleuchtung der Allgemeinflächen (Park- und Müllplätze). Die Säulen zeigen deutlich die jahreszeitlichen Schwankungen. Zum Vergleich sind jeweils die Mittelwerte von Oktober bis April dargestellt. Es ist eine deutliche Reduzierung der Verbräuche zwischen dem ersten und zweiten Jahr festzustellen.

Die Verbrauchsdarstellung zeigt deutlich die jahreszeitlich bedingten Schwankungen der Allgemeinstromverbräuche der Siedlung. Die Verbräuche sind hier auf alle 32 Häuser der Siedlung bezogen (Gesamtfläche), da für den Allgemeinstromverbrauch unerheblich ist, ob ein Haus bewohnt oder unbewohnt ist. Die Verbräuche sind im Untersuchungszeitraum stark gesunken. 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. Neben der Verringerung der Zirkulationsverluste, welche im Sommer in den Häusern nicht genutzt werden können, wird die Maßnahme den Allgemiestromverbrauch weiter verringern. 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). Wie beschrieben, wird eine weitere Verringerung erwartet. Die absolute Höhe der Verbräuche zeigt, daß es sich um sehr geringe Werte handelt.

10.6 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. 58 zeigt den gemessenen Verlauf der Zu-, Ab-, Fort- und Außenluft vom 09.02. bis zum 31.03.2001.

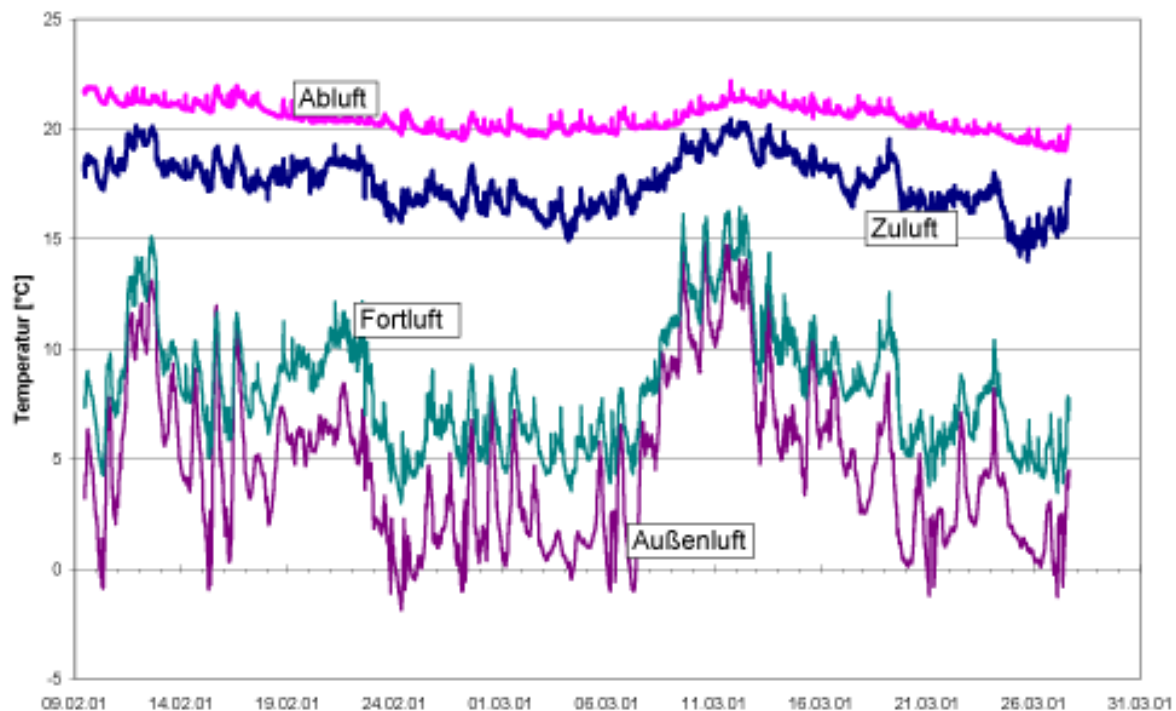


Abb. 58: Gemessener Verlauf der Zu-, Ab-, Fort- und Außenluft im Lüftungsgerät mit Wärmeübertrager (aus Stundenmittelwerten).

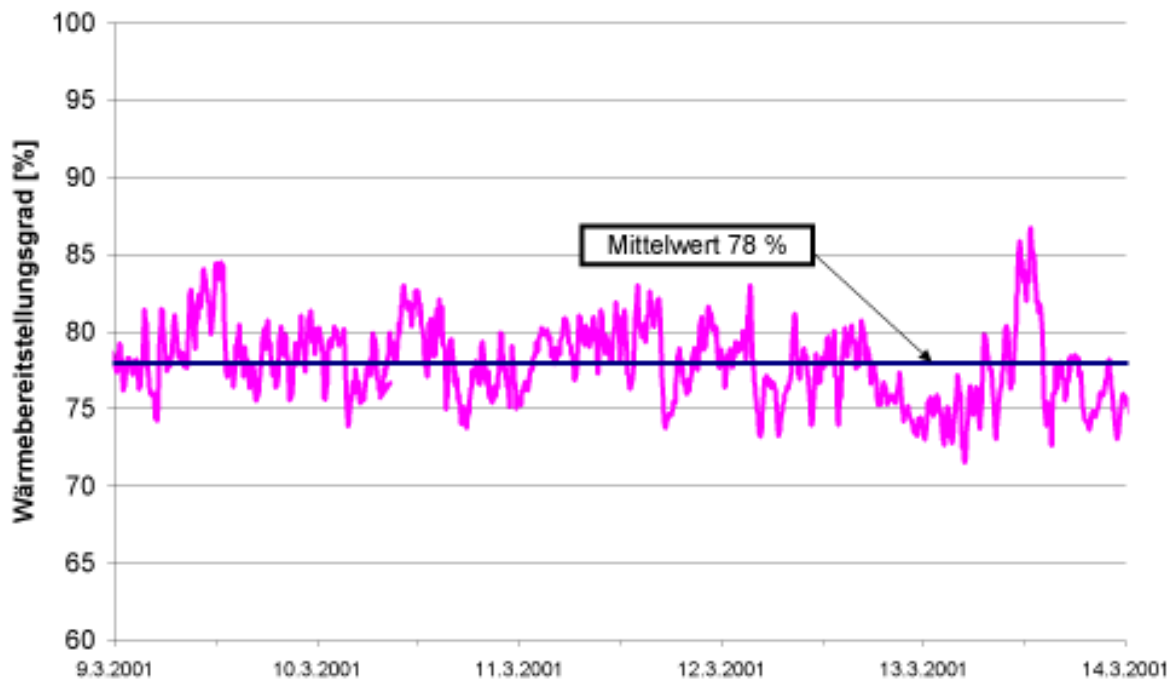


Abb. 59: Verlauf des Wärmebereitstellungsgrades des Lüftungsgerätes mit Wärmeübertrager.

Der aus den Meßdaten (Temperaturen, Feuchte, Volumenströme und Stromaufnahme) berechnete Wärmebereitstellungsgrad (siehe Abb. 59) 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 %**.

Der Verlauf der Kurve zur anfallenden Kondensatmenge im Vergleich mit der Außentemperatur (Abb. 60) zeigt, daß (je nach Abluftfeuchte) ab einer Außentemperatur von ca. 5 °C nennenswert Kondensat auftritt.

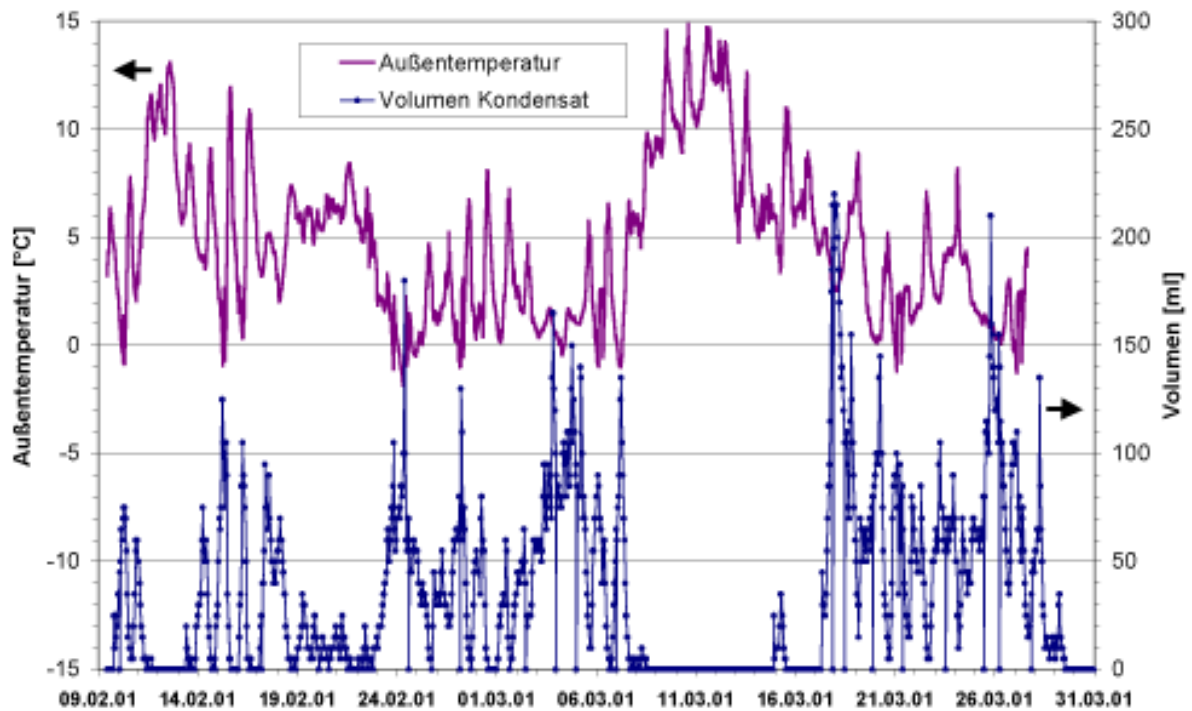


Abb. 60: Kondensatmenge des Wärmerückgewinnungsgerätes im Vergleich mit der Außentemperatur (Temperatur: Stundenmittel, Kondensat: Stundensummen).

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 (Abb. 61). 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 %).

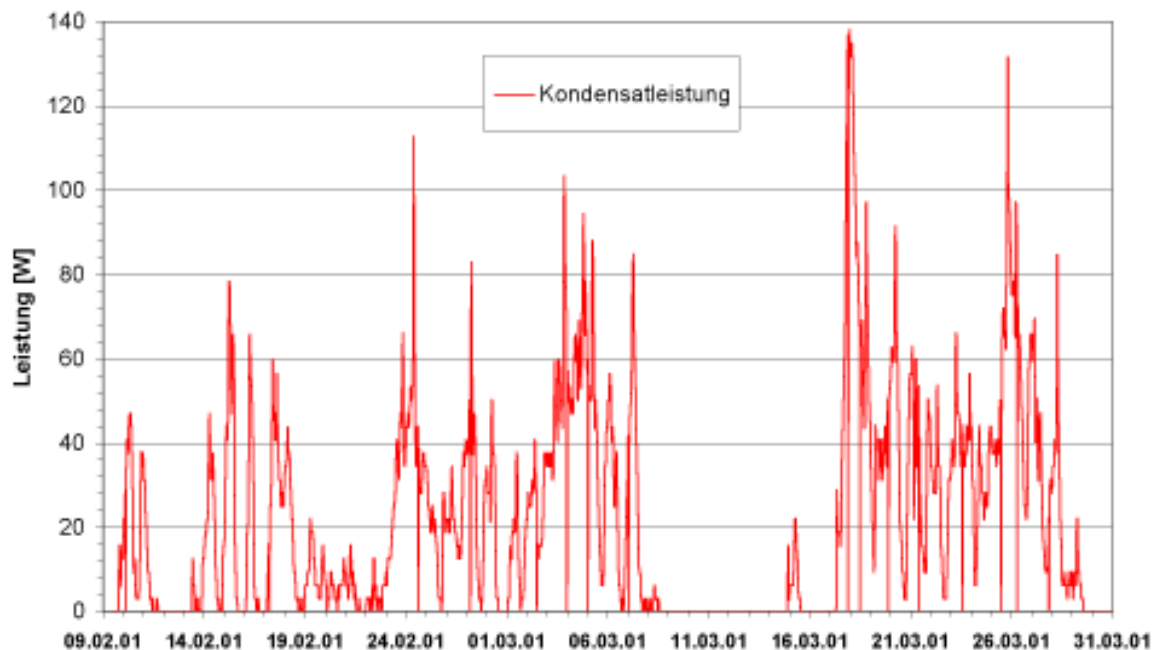


Abb. 61: Kondensatleistung des Wärmerückgewinnungsgerätes vom 09.02. bis zum 31.03.2001 (Stundensummen).

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. 62 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. Dieser geringe Verbrauch zeigt, daß es erlaubt ist, für diese Anwendung elektrische Energie direkt einzusetzen. Alle anderen Möglichkeiten der Energieversorgung zum Frostschutz des Wärmeübertragers wären deutlich aufwendiger und ökonomisch kaum darstellbar. Das Lüftungsgerät des Hauses hat in dieser Heizperiode (01.10.2000 bis 30.04.2001) insgesamt

120 kWh elektrische Energie verbraucht (Lüfterstrom, Regelung und Frostschutzregister).

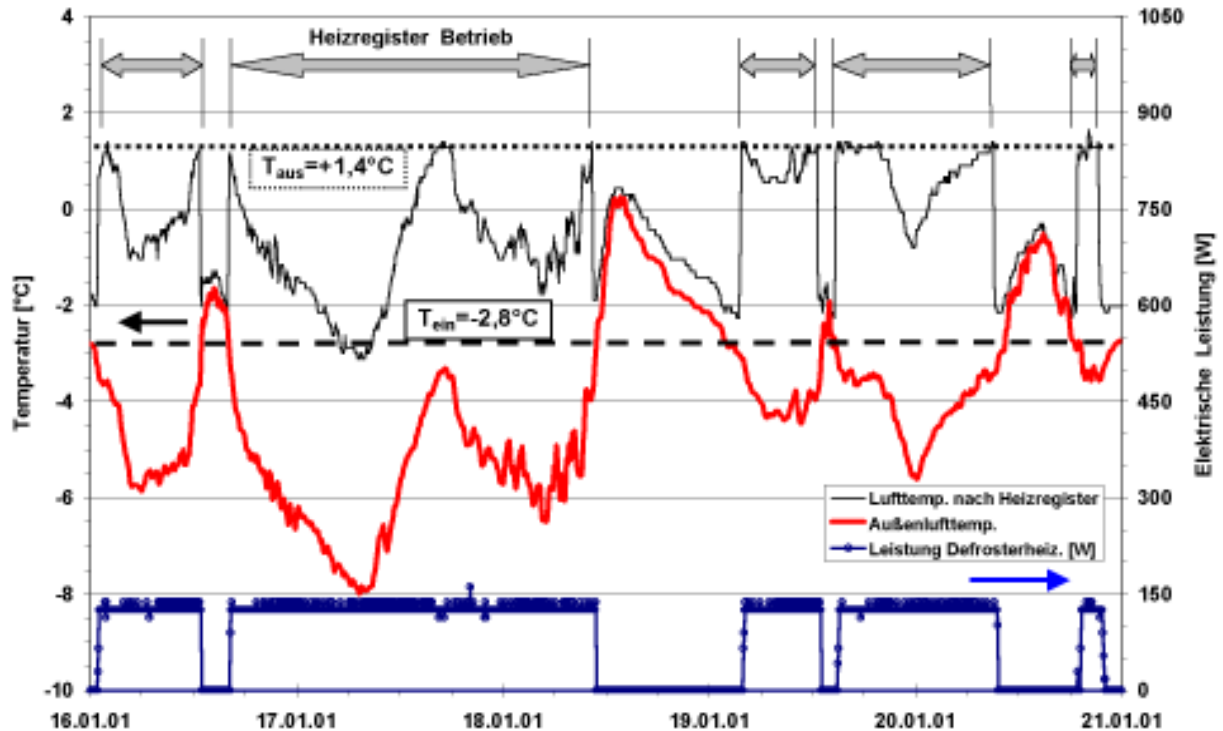


Abb. 62: Bestimmung der Betriebszeiten des elektrischen Frostschutzheizregisters (Ein- und Ausschalttemperaturen), welches dem Lüftungsgerät mit Wärmeübertrager vorgeschaltet ist. Dargestellt sind die Daten vom 16. bis zum 21.01.2001. Die elektrische Leistung des Heizregisters zeigt die Betriebszeiten an. Die Einschalttemperatur liegt bei einer Außentemperatur von $-2,8\text{ °C}$, die Abschalttemperatur bei einer Lufttemperatur nach dem Heizregister von $+1,4\text{ °C}$ (beides Mittelwerte der abgebildeten Ein- bzw. Auschaltgrenztemperaturen). Die beiden Pfeile weisen auf die jeweils abzulesende Achse.

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. Im betrachteten Zeitraum arbeitet das Heizregister mit einer Leistung von durchschnittlich 128 W .

10.7 Zusätzliche Auswertung der Temperaturdaten

Zusätzlich zu den Auswertungen in Abschnitt 9.2 zum thermischen Komfort in den Häusern werden hier noch weitere Ergebnisse der Temperaturmessungen analysiert.

10.7.1 Vergleich der EG/OG Temperaturen

Ausgewertet werden hier die mittleren Raumlufthtemperaturen von 21 bewohnten Häusern. Eines der bewohnten Häuser kann hier nicht dargestellt werden, da im EG kein Temperatursensor installiert wurde (vergl. Abschnitt 5.4). Der in diesem Haus im EG ersatzweise eingesetzte Datenlogger wurde für diesen Vergleich nicht verwendet, da ein systematischer Fehler nicht auszuschließen ist.

In der ersten Heizperiode (Oktober 1999 bis April 2000) gibt es sowohl Häuser mit höherer Temperatur im EG als auch solche mit höherer im OG (Abb. 63). Im Mittel sind die Raumlufthtemperaturen dieser 21 Häuser in EG und OG mit 21,2 °C gleich groß. Es läßt sich damit kein Trend feststellen. Deutlich heraus fällt mit einer geringeren mittleren Raumlufthtemperatur im OG nur ein Haus (laufende Nummer 16). Dabei handelt es sich um das auch schon im Abschnitt 9.2 beschriebene Haus, in dem vermutlich im Schlafzimmer zusätzlich über die Fenster gelüftet wird. Dies macht sich hier deutlich bemerkbar, da der OG-Temperatursensor im normalerweise als Schlafzimmer genutzten Nordraum positioniert ist.

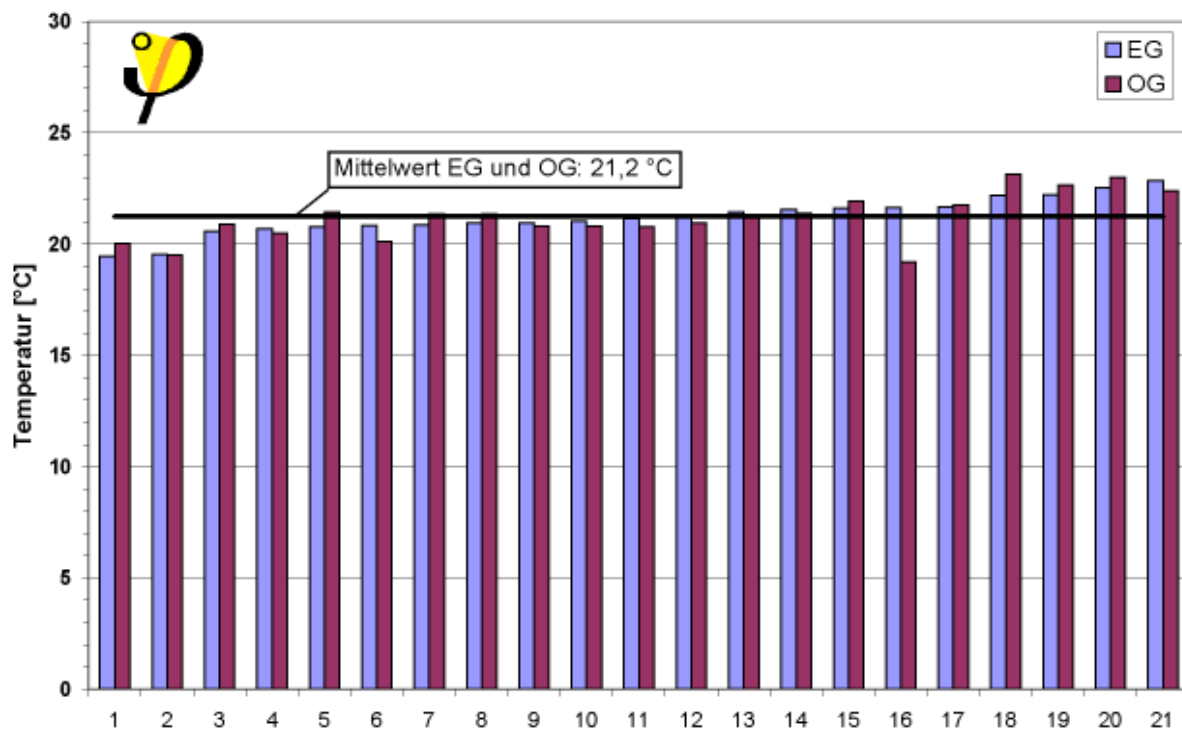


Abb. 63: Vergleich der mittleren EG- mit den OG-Raumlufthtemperaturen in der ersten gemessenen Heizperiode (Oktober 1999 bis April 2000). Der Mittelwert im EG und im OG ist mit 21,2 °C gleich groß. Die Häuser sind aufsteigend nach der EG-Temperatur sortiert.

Der Vergleich zwischen den Raumlufthtemperaturen im Sommer 2000 (Mai bis September 2000) ergibt Temperaturmittelwerte im EG von 23,7 °C und im OG von 23,6 °C (Abb. 64), d.h. im Rahmen der Meßgenauigkeit gleiche Werte. Die in Abschnitt 9.2 festgestellte größere Anzahl von Tagen, in denen im OG höhere Tagesmitteltemperaturen auftreten, mittelt sich im Gesamtzeitraum heraus. Diese Tatsache

bedeutet, daß die Temperaturschwankungen im OG größer sind als im EG. Dafür gibt es mehrere Ursachen:

- Im OG ist der Einfluß der Solarstrahlung aufgrund der geringeren Verschattung größer.
- Die Hüllfläche des OG gegenüber der Außenluft ist größer.
- Das EG grenzt über die Bodenplatte großflächig an das Erdreich. Die Temperatur unter der Bodenplatte ist wesentlich konstanter als die der Außenluft.

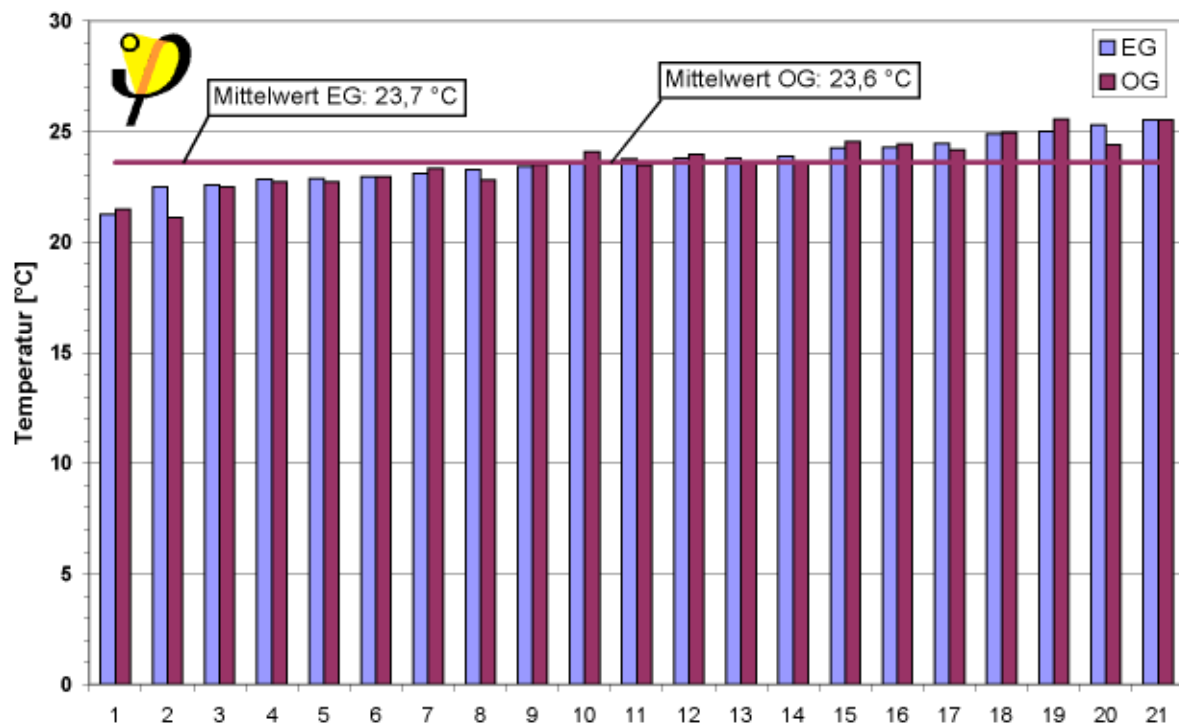


Abb. 64: Vergleich der mittleren EG- mit den OG-Raumlufttemperaturen in der ersten gemessenen Sommerperiode (Mai 1999 bis September 2000). Der Mittelwert im EG liegt bei 23,7 °C, der im OG bei 23,6 °C. Die Häuser sind aufsteigend nach der EG-Temperatur sortiert.

Es bleibt abschließend festzustellen, daß die Temperaturen in EG und OG im Mittel sehr ausgeglichen sind.

10.7.2 Raumlufttemperaturen in einem unbeheizten Haus

In der zweiten Heizperiode (Oktober 2000 bis April 2001) war eines der unbewohnten Passivhäuser dauerhaft unbeheizt. Der Wärmemengenzähler für die gesamte abgenommene Fernwärmemenge (Heizung und Warmwasser) zeigt in diesem Zeitraum dauerhaft keinen Verbrauch an. Das Haus war von der Fernwärme abgesperrt. Die einzigen internen Wärmequellen in diesem Haus waren im betrachteten Zeitraum:

- Die Wärmeeinträge von den Fernwärmeverteilungen (VL- und Rücklaufleitung) im Technikgeschoß (bzw. Wärmesenken durch die Kaltwasserverteilungen).

- Der Stromverbrauch des Lüftungsgerätes mit Wärmeübertrager (Mittelwert im betrachteten Zeitraum 14,2 Watt Dauerleistung).
- Evtl. Einträge durch die Solaranlage in den Warmwasserspeicher.

Betrachtet man den Verlauf der Raumlufttemperatur (EG) des unbeheizten Gebäudes in Abb. 65, so zeigt sich deutlich das Absinken der Temperatur in die kühlere Jahreszeit hinein. Die Raumlufttemperatur bleibt allerdings auch in den Kälteperioden des Winters mit Außenlufttemperaturen von im Tagesmittel bis minimal -6 °C immer deutlich über 15 °C . Es ist gut zu erkennen, daß die größeren Außenlufttemperaturschwankungen zeitverzögert in den Schwankungen der Raumlufttemperatur wiederzufinden sind.

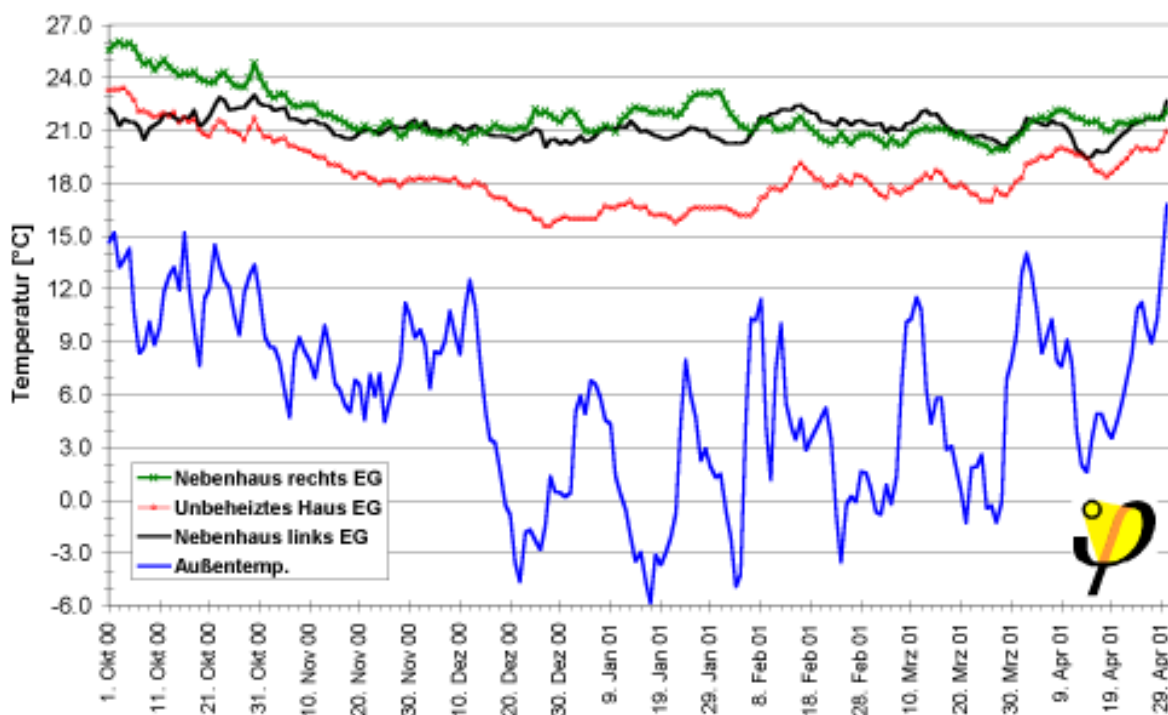


Abb. 65: Raumlufttemperaturen im Erdgeschoß eines dauerhaft unbeheizten und unbewohnten Hauses verglichen mit den beiden beheizten Nachbarhäusern sowie der Außenlufttemperatur. Dargestellt ist die gesamte zweite Heizperiode (Oktober 2000 bis April 2001). Alle Daten sind Tagesmittelwerte.

Einen Teil der Wärme bezieht das Gebäude aus seinen beiden bewohnten Nachbarhäusern. Die Raumlufttemperaturen in diesen beiden Häusern zeigen ein kontinuierliches Absinken bis etwa zum 20.11.2000. Dann ist die in der Struktur eingespeicherte „Sommerwärme“ soweit gesunken, daß die Temperatur etwa 21 °C beträgt und zunächst auf diesem Niveau bleibt. In der kalten Winterzeit (hier 20.11.2000 bis 30.04.2001) liegen die Temperaturen in den beiden Nachbarhäusern zwischen $19,4$ und $23,2\text{ °C}$, im Mittel bei $21,3$ bzw. $21,1\text{ °C}$. Im unbeheizten Haus bewegen sie sich zwischen $15,6$ und $20,9\text{ °C}$ und liegen im Mittel bei $17,7\text{ °C}$.

Es bleibt festzuhalten, daß die Temperaturen in einem unbeheizten Haus immer noch auf einem relativ hohem Niveau bleiben. Mit Bewohnern wären diese

Temperaturen sogar noch höher. Passivhäuser bieten daher eine Komfortgarantie selbst für Zeiten mit knapper oder sehr teurer Energie.

10.7.3 Mediumtemperaturen Versorgungsnetz

Die Vor- und Rücklauftemperaturen der Hauptwärmemengenzähler in den Technikhäusern (nach dem Pufferspeicher) sowie die der vier außenliegenden Endhäuser werden ebenfalls von der Datenerfassung aufgezeichnet. Hier werden die Vorlauftemperaturen dieser Wärmemengenzähler von Reihe 13/14 näher untersucht. Beispielhaft wird der Zeitraum vom 09. bis zum 19.01.2001 betrachtet; ein Zeitraum mit einer mittleren Außentemperatur von $-1,6\text{ °C}$ und einem durchschnittlichen Heizwärmeverbrauch der beiden Reihen von $96,7\text{ Wh}/(\text{m}^2\text{d})$. Der Fernwärmebezug zur Warmwasserbereitung der beiden Hauszeilen betrug durchschnittlich $74,9\text{ Wh}/(\text{m}^2\text{d})$. Insgesamt wurden damit durchschnittlich $171,6\text{ Wh}/(\text{m}^2\text{d})$ Energie von der Fernwärmestation bezogen

Die Vorlauftemperaturen zeigen in der betrachteten Zeit Schwankungen, welche durch die Ladevorgänge des Pufferspeichers im Technikhaus bedingt sind.

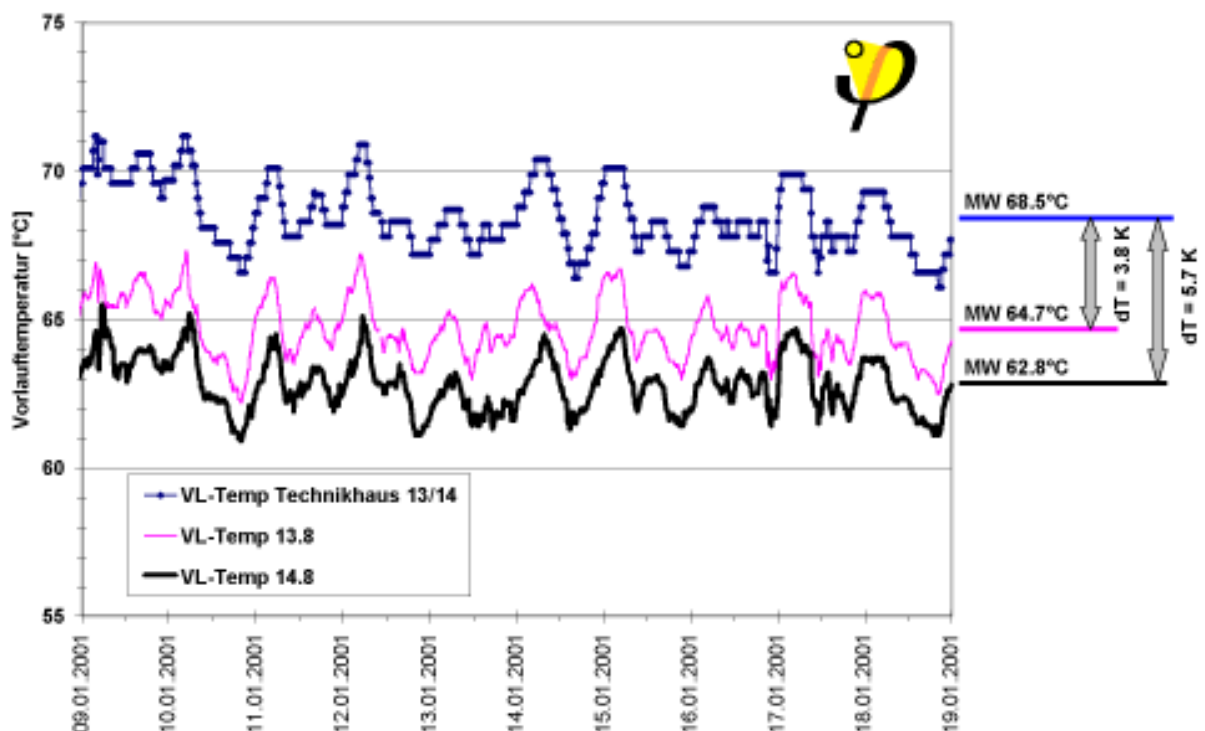


Abb. 66: Vorlauftemperaturen des Hauptwärmemengenzählers im Technikhaus der Reihe 13/14 und der beiden Gesamtwärmemengenzähler der beiden außenliegenden Endhäuser der Reihen vom 09. bis zum 19.01.2001 (Datenaufsg.: 5 Minuten). Rechts sind die Mittelwerte der drei Kurven eingezeichnet.

Die Temperaturänderung im VL des WMZ im Technikhaus findet sich wie erwartet verzögert in Zeit und Höhe auch in den beiden WMZ am Ende der beiden versorgten Hauszeilen 13 und 14 wieder. Die VL-Leitung zur Versorgung der Reihe 13 verläuft direkt vom Technikhaus unter der Giebelwanddämmung in das Technikgeschoß des

ersten Hauses und dann durch die acht Häuser. Der Mittelwert der VL-Temperatur liegt mit 64,7 °C um 3,8 K niedriger als die im Technikhaus. Die Temperaturdifferenz erklärt sich aus den Leitungswärmeabgaben auf dem Weg bis zum letzten Haus. Diese Energie ist in der Heizzeit, zumindest im Bereich der Technikgeschoße, als Raumwärme teilweise nutzbar. Sie wird hauptsächlich über die Betonwände und den Betonboden des Technikgeschoßes an die Räume im OG abgegeben.

Im letzten Haus der Hausreihe 14 ist der Temperaturmittelwert mit 62,8 °C um 5,7 K niedriger als im Technikhaus. Diese um nochmals 1,9 K größere Temperaturdifferenz erklärt sich durch die zusätzlichen Leitungsverluste der erdverlegten Leitungen vom Technikhaus bis zur Giebelwand des ersten Hauses der Reihe 14.

Die Daten zeigen, wie wichtig der erhöhte Dämmstandard der Versorgungsleitungen ist. Eine weitere Optimierung in diesem Bereich ist in Zukunft wünschenswert.

10.8 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 Raumluftfeuchte eines einzelnen Wohnraumes wurde mit Hilfe von autarken Dataloggern (Fa. testo) in einem (anderen) Passivhaus im Wohnzimmer (EG) gemessen.

Abb. 67 zeigt den Verlauf der relativen Raumluftfeuchte und der Raumlufttemperatur 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 Raumluftfeuchte 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 Raumlufttemperatur haben, da diese in der Kernzeit des Winters ziemlich konstant verläuft.

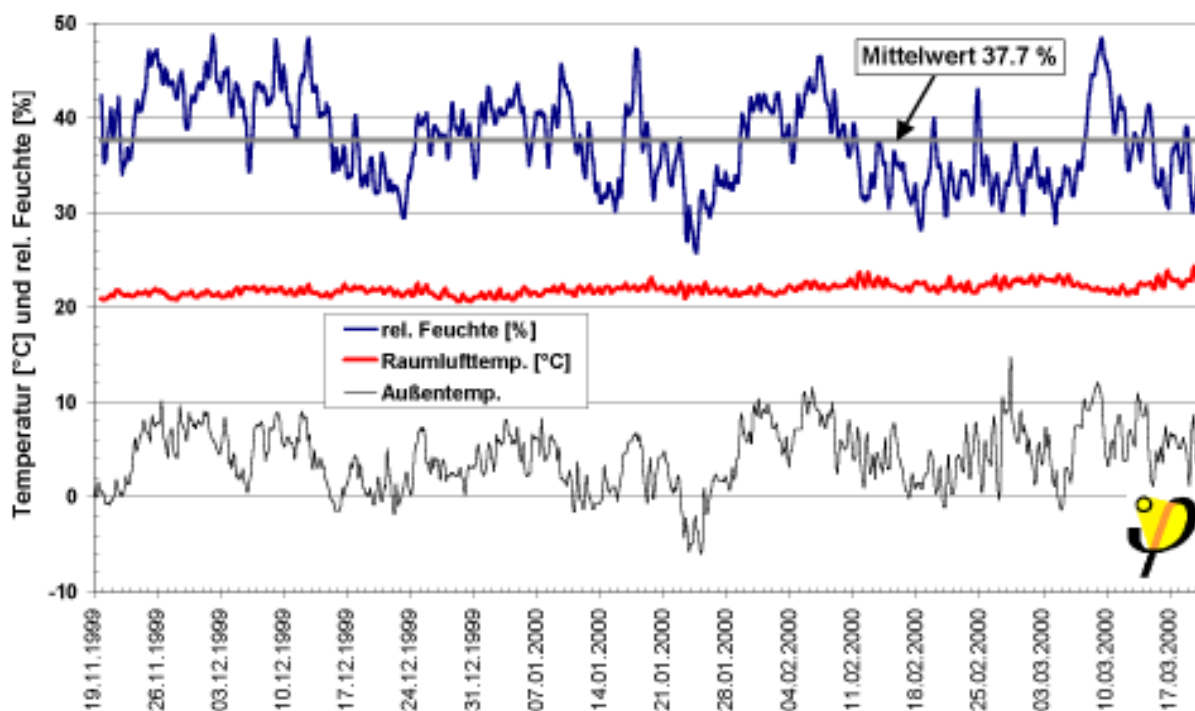


Abb. 67: Relative Raumluftfeuchte und Raumlufthtemperatur im Wohnzimmer (EG) eines Passivhauses sowie Ganglinie der Außentemperatur vom 19.11.1999 bis zum 20.03.2000. Die Daten im Gebäude wurden mit einem autarken Datenlogger mit zwei Stunden Auflösung aufgezeichnet. Dargestellt ist der gleitende Mittelwert über jeweils vier Datenpunkte.

Zur Klärung der Schwankungen der rel. Feuchte werden in einem Zeitausschnitt (10.12.1999 bis 12.02.2000) aus Abb. 67 mittels Achsenanpassung die Kurven der rel. Raumlufthfeuchte und die der Außentemperatur angepaßt. In Abb. 68 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.

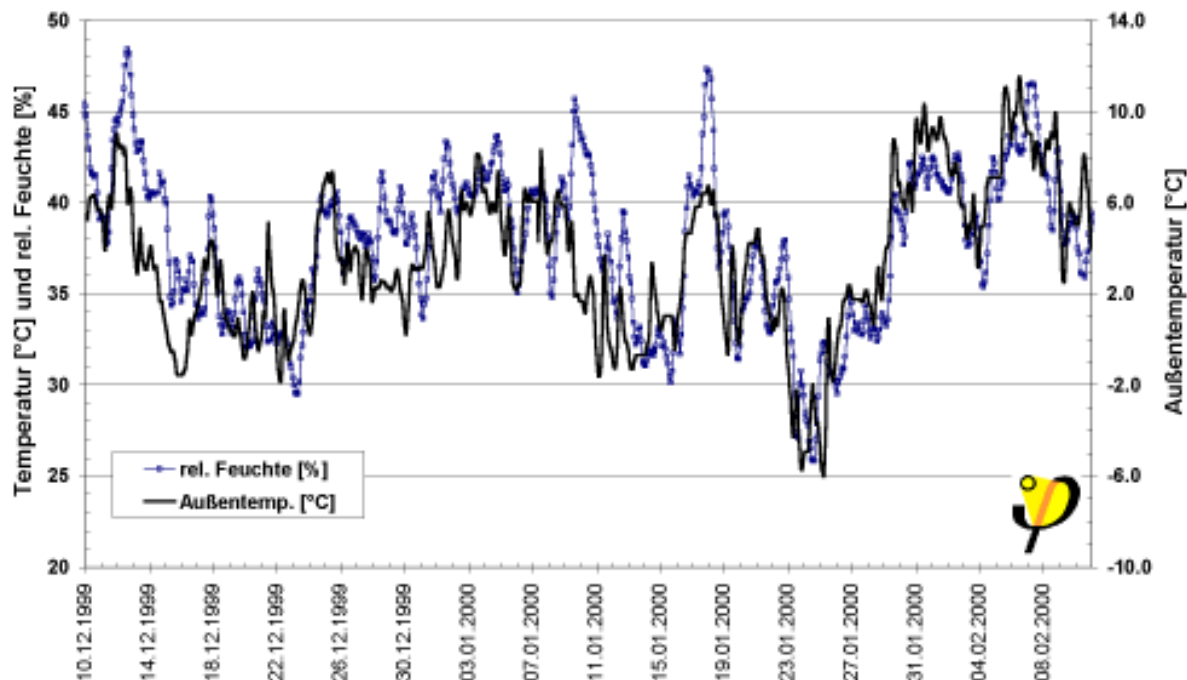


Abb. 68: Korrelation zwischen den Ganglinien der relativen Luftfeuchte und der Außentemperatur vom 10.12.1999 bis zum 12.02.2000 aus Abb. 67.

Der Verlauf der relativen Zu- und Abluftfeuchte im intensivvermessenen Haus zeigt im dargestellten Zeitraum (01.10.2000 bis 30.4.2001) ein ähnliches Bild. In Abb. 69 betragen die Abluftfeuchten zwischen 31,5 und 58,5 %, der Mittelwert über die zweite Heizperiode ergibt sich zu 43,8 %. Damit gibt es bei diesem Haus keine rel. Luftfeuchten unter 30 % in der Abluft. Beim Vergleich der Werte mit der relativ trocknen Außenluft im kalten Winter zeigt sich deutlich die Befeuchtung der Luft durch die Wasserdampfquellen im Haus (Personen, Pflanzen, Kochen, Duschen, etc.).

Bei beiden 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. Dies ist physikalisch so zu erwarten:

Bei niedrigen Außenlufttemperaturen ist der Sättigungsdampfdruck gering; auch bei 100% relativer Außenluftfeuchte enthält die Luft dann absolut nur sehr wenig Wasserdampf (z.B. 4,8 g/m³ bei einer Temperatur von 0 °C). Wird diese Außenluft in den Innenraum gebracht, so erwärmt sie sich dort auf z. B. 21 °C; es spielt dabei keine Rolle, auf welchem Weg die Luft zugeführt wird (Fensteröffnung oder Lüftungsanlage). In Luft von 21 °C beträgt der Sättigungswasserdampfgehalt 18,3 g/m³. Der absolute Wasserdampfgehalt der von außen zugeführten Luft bleibt gleich (Massenerhaltung), er entspricht bei Raumtemperatur aber nur noch einer relativen Luftfeuchtigkeit von 26%. Je kälter (und damit absolut trockener) die zuge-

fürte Außenluft ist, desto geringer wird demnach die relative Innenluftfeuchtigkeit, wie sich in Abb. 68 auch klar bestätigt.

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 Raumlufffeuchtigkeit 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.

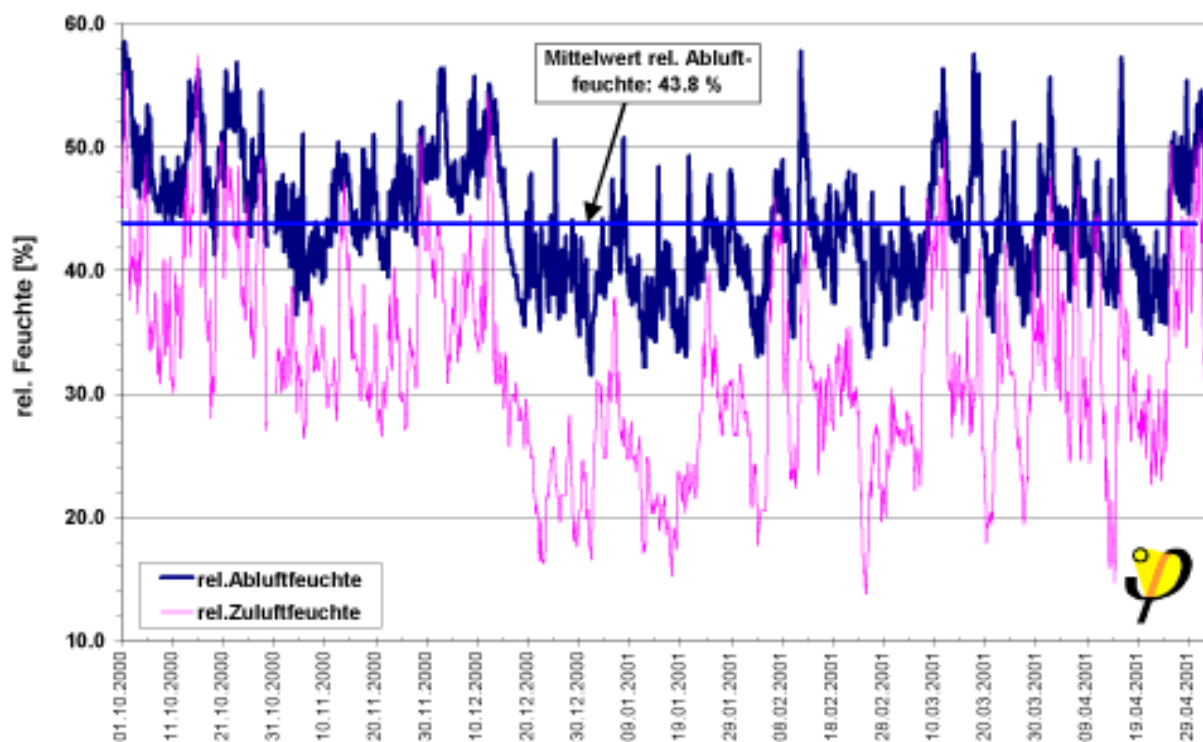


Abb. 69: Relative Zuluft- und relative Abluftfeuchte des intensivvermessenen Passivhauses in der zweiten Heizperiode vom 01.10.2000 bis zum 30.04.2001. Dargestellt ist der gleitende Mittelwert über jeweils vier Datenpunkte aus Stundenwerten.

10.9 Klimaneutralität der Passivhaussiedlung

Mit der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg soll gezeigt werden, daß der Energieverbrauch einer Wohnsiedlung durch Effizienzsteigerung 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 **2500,- DM** (entsprechend 1278 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 $2,5 \cdot 35,5$ kWh/(m²a), das sind etwa **89 kWh/(m²a)**, berechnen (vgl. Abb. 70).

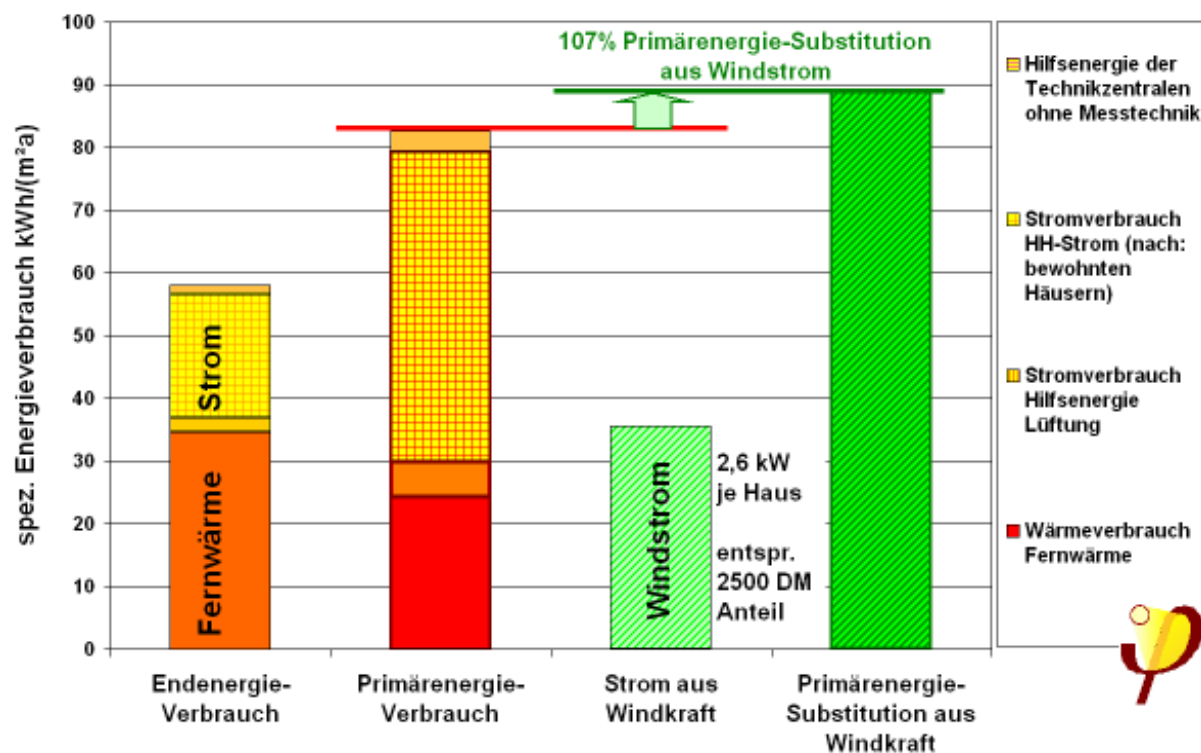


Abb. 70: Primärenergieverbrauch der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg im Vergleich mit der Substitution durch Windkraftanteile zur Illustration der Klimaneutralität.

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 2.500,- DM 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. 266 DM/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 Neubausiedlung 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. 71), ist ein baulich und technisch ausgereiftes Konzept auf der Basis von Passivhäusern in der Lage, dieses Ziel zu erreichen. Wie die Ergebnisse in diesem Meßbericht 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. 71: Informationssäule (rechts) und Waage (links, mit Pfeil markiert) vor dem Ausstellungshaus der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg.

11 Literatur

- [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
- [Eckert 2000] Eckert, Anja: Model Kronsberg: nachhaltiges Bauen für die Zukunft = Sustainable building for the future, Hrsg.: Landeshauptstadt Hannover, Der Oberbürgermeister, Umweltdezernat; Hannover 2000
- [Eschenfelder 1999] Eschenfelder, D.: Das Niedrigenergiehaus in NRW - Test; Bau-physik 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 Protokollband Nr. 20“ („Passivhaus-Versorgungstechnik“), Passivhaus Institut, September 2000
- [Feist 1998] Feist, Wolfgang: Passivhaus Sommerklima Studie, Projektendbericht. Fachinformation PHI-1998/10, Darmstadt, Passivhaus Institut, Dezember 1998
- [Feist 2000] Schnieders, Jürgen: Der Einfluß von Randverbund und Glaseinstand. In: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 14, Passivhaus-Fenster, Darmstadt, Passivhaus Institut, Dezember 1998
- [Feist 2000a] Feist, Wolfgang: Varianten für die Wärmeversorgung von Passivhäusern im Vergleich in „Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Protokollband Nr. 20“ („Passivhaus-Versorgungstechnik“), Passivhaus Institut, September 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
- [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 Passivhaus-Siedlung Kronsberg, 2001
- [Lundgren 1989] Lundgren, Thomas: Bostäder som brukarstyrda energisystem. Byggeforskningsradet, Stockholm, R7: 1989
- [Lundström 1986] Lundström, Erik: Occupant Influence on energy consumption in single-family dwellings. Swedish Council for Building Research D5: 1986
- [Peper 1999] Peper, Søren: Untersuchung der Luftdichtheit in der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg, Fachinformation PHI-1999/4, Darmstadt, Passivhaus Institut, 1999
- [Peper 1999a] Peper, Søren: Überprüfung der luftdichten Bauweise bei Passivhäusern. In: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 18, Passivhaus-Fenster, Darmstadt, Passivhaus Institut, Dezember 1999
- [Peper 2000a] Peper, Søren; Feist, Wolfgang: Meßdatenauswertung der klimaneutralen Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg: Erster Zwischenbericht, Darmstadt, Passivhaus Institut, Januar 2000
- [Peper 2000b] Peper, Søren; Feist, Wolfgang; Wenzel, Wiebke: Meßdatenauswertung der klimaneutralen Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg: Erste Heizperiode 1999/2000, Zweiter Zwischenbericht, Darmstadt, Passivhaus Institut, Juli 2000
- [Peper 2000c] Peper, Søren; Pfluger, Rainer; Feist, Wolfgang: Nutzerhandbuch für die Passivhaus-Siedlung „Lummerlund“ in Hannover-Kronsberg, Darmstadt, Passivhaus Institut, September 2000
- [Peper 2001] Peper, Søren; Feist, Wolfgang: Meßdatenauswertung der klimaneutralen Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg: Sommerklima und erstes vollständiges Jahr, Dritter Zwischenbericht, Fachinformation PHI-2001/1, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 14, Darmstadt, Passivhaus Institut, Januar 2001
- [Peper 2001a] Peper, Søren; Feist, Wolfgang: Thermographische Untersuchung der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg, Wissenschaftliche Auswertung, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 20, Darmstadt, Passivhaus Institut, Juni 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] Feist, Wolfgang, Enikö Baffia und Jürgen Schnieders: Passivhaus Projektierungs Paket, Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser, 2. Auflage, Fachinformation PHI-1999/1, Darmstadt, Passivhaus Institut, Januar 1999
- [Russ 2000] Russ, Christel; Greuel, Bastian; Bühring, Andreas: Demonstrationsprojekt für ein innovatives Wärmeversorgungs-konzept 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, Jürgen, Wolfgang Feist: 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, Darmstadt, Passivhaus Institut, Dezember 1998
- [Schnieders 2001] Schnieders, Jürgen; Feist, Wolfgang; Pfluger, Rainer; Kah, Oliver, CEPHEUS – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung, Endbericht. CEPHEUS-Projektinformation Nr. 22, Passivhaus Institut, Darmstadt 2001
- [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.

12 Anhang: Format Sheets for Presentation of the Results of Building Projects

Die „Format Sheets for Presentation of the Results of Buildings Projects“ [EU 1993], eine Auswertung der Daten nach Vorgaben der EU, sind im Anhang als Anlage zu diesem Bericht beigefügt.

FORMAT SHEETS FOR ENERGY SAVING IN BUILDINGS

1	ADMINISTRATIVE INFORMATION	REF.: BU/00127/97/DE/SE/AT
---	----------------------------	----------------------------

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES

	JOINT RESEARCH CENTRE	GENERAL DIRECTORATE FOR ENERGY DG XVII
-----------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------------------------

**REPORTING FORMAT
ENERGY SAVING SYSTEMS FOR BUILDINGS**

Project Reference Number: **BU/00127/97/DE/SE/AT**
 Project Name : **CEPHEUS**
Cost Efficient Passive Houses as European Standards

LEAD CONTRACTOR

Contact : **M. Görg**
 Organisation : **Stadtwerke Hannover**

Address : **Ihmeplatz 2
30 057 Hannover**

Telephone: **0511/430-2784**
 Telefax: **0511/430-1846**

MONITORING CONTRACTOR

Contact : **Dr. W. Feist**
 Organisation : **Passivhaus Institut**

Address : **Rheinstr. 44/46
64 283 Darmstadt**

Telephone: **06151/826990**
 Telefax: **06151/8269911**

PROJECT LOCATION


Street or location where the building(s) is (are) located: **Sticksfeld 30 - 124**
 Town: **Hannover** Province/County : **Niedersachsen**
 Region : Country : **Germany**
 Altitude: **90** m a.s.l. Longitude **9°44'** Latitude **52°22'**

Format Completed by: **Oliver Kah** (name)
 (signature)
31. Mai 01 (date)

PROJECT EXECUTION

Starting Date of the project **01. Jan 98** Completion Date of the project **31. Mai 01**

FORMAT SHEETS FOR ENERGY SAVING IN BUILDINGS

2		LOCAL CLIMATE AND SITE INFORMATION				REF.: BU/00127/97/DE/SE/AT			
Building location									
Min. winter design temp.		-10 °C		Max summer design temp.		-		°C	
Mean winter wind speed		4,5 m/s		Mean summer wind speed		2,1		m/s	
Predominant wind direction in winter				northwest		in summer northwest			
METEODATA: Test Ref. Year - or over period from Oct. 99 to Sep. 00									
Data taken from X Direct meas. on site				Meteo.station		Long-term tables			
Location of nearest meteo. station Hannover Langenhagen									
(Preferably, identify the nearest meteo station in the European Solar Radiation Atlas ISBN 3-88585-195-4)									
Distance from project site to meteo. station: 17 km									
MONTH/YEAR	EXTERNAL TEMP			HEATING DEGREE-DAYS (Base 18 °C)	COOLING DEGREE-DAYS (Base 24 °C)	MONTHLY MEAN SOLAR RADIATION [kWh/m ² day]	MONTHLY MEAN REL. HUM [%]		
	Min/Mean/Max								
[°C]									
JAN/ 2000	-6,5	2,8	10,4	470,2	0,0	0,7	84		
FEB/ 2000	-1,1	5,1	15,3	360,4	0,0	1,3	79		
MAR/ 2000	-1,6	6,1	15,3	369,6	0,0	1,8	82		
APR/ 2000	-2,0	10,5	24,6	221,2	0,0	3,8	72		
MAY/ 2000	7,0	15,6	29,4	76,3	0,0	5,5	64		
JUN/ 2000	7,1	17,4	34,5	56,8	7,6	5,7	65		
JUL/ 2000	9,0	15,7	24,3	50,8	0,0	3,9	77		
AUG/ 2000	10,4	18,6	32,4	0,0	0,6	4,6	69		
SEP/ 2000	4,9	14,8	25,6	84,5	0,0	2,7	79		
OCT/ 1999	-1,5	10,0	19,5	244,5	0,0	1,8	81		
NOV/ 1999	-3,9	5,3	16,1	379,9	0,0	0,8	85		
DEC/ 1999	-2,1	3,5	9,2	448,3	0,0	0,4	81		
TOTAL	-6,5	10,5	34,5	2762,4	8,3	2,8	77		
LOCATION PLAN									
									
(Illustration from [Eckert 2000])									

FORMAT SHEETS FOR ENERGY SAVING IN BUILDINGS

3	PROJECT DESCRIPTION & CLASSIFICATION	REF.:	BU/00127/97/DE/SE/AT
PROJECT AIM AND BRIEF TECHNICAL DESCRIPTION			
<p>AIMS:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Specific annual heat requirement of the passive houses: Less than 15 kWh/(m²a), so that a separate heating system is no longer necessary. Remaining heat requirement can be covered entirely through supplementary heating of the supply air that is required for acceptable indoor air quality. - Total primary energy requirement of passive houses: Less than 120 kWh/(m²a) incl. household-electricity. - Passive houses will be cost-efficient after market introduction, i.e. the additional investments in passive technologies are not higher than the expected capitalized energy cost savings over max. 13 years. - At the Hannover site: Completely renewable coverage of total energy requirement (electricity) through integrated share in a wind turbine installation (cost-efficient, grid-bound neutral climate balance). - Presentation of all projects at the EXPO 2000 World Fair in Hannover. <p>INNOVATIVE TECHNOLOGIES (ENERGY AND ENVIRONMENT) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cost-efficient superinsulation technologies (reduced thermal bridges, airtightness). - Further development of 3-pane low-emissivity glazing systems with U-value below 0.8 W/(m²K) with a high solar transmittance factor (60 %) for the passive use of solar energy. - Windows with superframes (U-value of frame below 0.8 W/(m²K)). - Heat recovery with high-efficiency counterflow air-to-air heat exchangers (efficiency greater than 75 %). - Particularly efficient electric appliances, available on the market or modified; savings up to 75 %. - Cost reductions through increased utilization of prefabricated elements. 			
BUILDING CATEGORY		ENERGY SAVING TECHNIQUES	
<ul style="list-style-type: none"> x 10 Residential 20 Commercial 30 Industrial 40 Educational 50 Hospital 60 Hotels & Restaurants 70 Public Administration 80 Sports Facilities 90 Other 		<ul style="list-style-type: none"> x 10 Building envelope improvement 20 Thermodynamic cycles for HVAC x 30 Heat recovery systems 40 Improved heat. & cool. plants & distrib. system 50 Thermal storage techniques x 60 Passive heating and cooling techniques 70 Advanced control and regulation x 80 Eff. lighting, daylight and electr. improvements 90 Other techniques 	
ENERGY SAVING AREA			fill Format Sheet No.:-
<ul style="list-style-type: none"> x Integrated Design for Low Energy x Building Envelope x Space Heating and Ventilation Systems Thermal Energy Storage Systems Space Cooling and Refrigeration Systems x Passive Space Heating and/or Cooling Comb. Heat & Power + District Heat & Cooling x Service Water Heating Systems Building Automation Systems x Lighting and Electrical Improvements Other 			7A 6-A,B,C 8A 8-B,C 9 7-B,C,D,E,F,G 10-A,B,C,D 11-A,B 12-A,B 13-A,B 14

FORMAT SHEETS FOR **ENERGY SAVING IN BUILDINGS**

4	PROJECT SUMMARY DATA	REF.:	BU/00127/97/DE/SE/AT
N.B. (pr = predicted/design data = based on calculations ms = measured data = measured directly or in combination with calculations)			
No. of buildings in which demonstration occurs		32	
Building No.	sum of all 32 buildings ⁽¹⁾		
ENVELOPE			
2. Gross floor area (GFA)	[m ²]	4400	
3. Treated floor area (TFA)(°)	[m ²]	3576	
4. Tot. treated volume (TV)(°)	[m ³]	14745	
5. Heat loss surface area (A)	[m ²]	7764	
6. Tot. glazed area (A _{gl})	[m ²]	415,8	
7. Shape factor (A/TV)	[m ⁻¹]	0,53	
8. Ave. ceiling height (TV/TFA)	[m]	3,15	
9. Tot. heat loss coeff. (pr)	[W/m ³ °C]	0,102	
10. Tot. heat loss coeff. (ms)	[W/m ³ °C]	0,101	
11. Bldg. thermal mass (Hi/Med/Low)		HI	
PLANT AND EQUIPMENT DATA			
1. Total number of heat generators		district heating	
2. Total installed capacity	[kW]	-	
3. Inst. capacity per building	[kW]	1,2 ⁽²⁾	
4. Type of generator(s)		combined heating and power station - district heating	
5. Energy source		natural gas - combined heating and power station	
6. Heating fluid (water or air)		air	
7. Temperature control type		thermostatic PI for each dwelling	
8. Ventilation type (nat or mech.)		mech.	
9. Estim. or meas. air change rate	[ach ⁻¹]	0,43	
10. Mech. cooling capacity	[kW]	-	
11. SHW(**) production (combined y/n)		n	
12. SHW energy source		gas - combined heating and power station / active solar	
13. SHW total power rating	[kW]	1 ⁽²⁾	
14. SHW type (inst/storage/central)		storage	
15. Lighting installed Wattage	[W/m ² GFA]	not relevant	
16. Lighting control type		manual	
17. Total rated elec. power	[kW]	not relevant	
OCCUPANCY and BUILDING UTILISATION			
1. Total permanent occupants		80 (70⁽³⁾)	
2. Number of visitors/day		not known	
3. Occupancy hours/working day		15 ⁽⁴⁾	
4. Occupancy hours/weekend day		20 ⁽⁴⁾	
5. Occupancy days/week		7 ⁽⁴⁾	

(*) Add further sheets if necessary

(**) SHW = Service or Sanitary Hot Water

(°) Treated = comfort conditioned by heating or cooling systems

(1) The terraced house development includes 32 very similar houses, which are arranged in 4 rows.

They are here considered as one building. The values represent the sum respectively the average of all houses.

(2) Per dwelling.

(3) Number of occupants referring to 22 permanently inhabited households.

(4) Investigation in one dwelling.

FORMAT SHEETS FOR **ENERGY SAVING IN BUILDINGS**

5-A		ANNUAL ENERGY FLOWS AND DATA		REF.: BU/00127/97/DE/SE/AT	
SUMMARY OF ENERGY PERFORMANCE DATA					
Period		FROM	Oct. 99	TO	Sep 00
The energy data should refer to a 1 year period and should be normalised by the building Treated Floor Area TFA, (Sheet 4)					
ENERGY End Uses	Quantities of Utilisation	Fuel Used	Convers. Factor ⁽¹⁾	Energy Supplied (kWh/m ² TFA)	
				Measured	Predicted
Space Heating	3576 m ² of Htd. Floor Area	district heat.	0,7	20,8 ⁽³⁾ / 20,9 ⁽⁴⁾	17,3
Space Cooling	- m ² of Cond. Floor Area	-	-	0	0
Refriger-ation	- m ³ of Ref. Vol. /ice	incl. in "other"	-	-	-
Service Hot Water	942,2 m ³ of SHW/a	district heat.	0,7	13,7 ^{(5),(4)} / 8,8 ⁽⁶⁾	15,6 ⁽⁶⁾ / 12,0 ⁽⁶⁾
Process Heat	- Prodn. Level ⁽²⁾	incl. in "other"	-	-	-
Lighting	- m ² of Lit Floor Area	electricity	2,5	-	3,2
Other El. Loads	80 no. of Occupants	electricity	2,5	23,3 ^{(7), (4)}	15,5
ENERGY TOTALS		EN. SUPPLY INDICATOR [kWh/m ² TFA.yr.]	PRIMARY EN. INDICATOR [kWh/m ² TFA.yr.]	PRIMARY EN. REQUIRED [GJ/yr.]	
Thermal Energy		34,6 ⁽⁴⁾	24,2	312	
Electrical Energy		23,3 ⁽⁴⁾	58,4	751	
Total		58,4 ⁽⁴⁾	82,6	1063	

(1) European conversion factor according to CEPHEUS from delivered to primary energy are used.

(2) Production level refers to building category, not to process heat = e.g. no. of beds for hospitals, no. of working places for offices, selling area for supermarkets, m² or m³ of pool for swimming pools, no. of students for school, etc.

(3) Value referring to all houses.

(4) Value referring to 22 permanently inhabited households.

(5) SHW provided by district heating

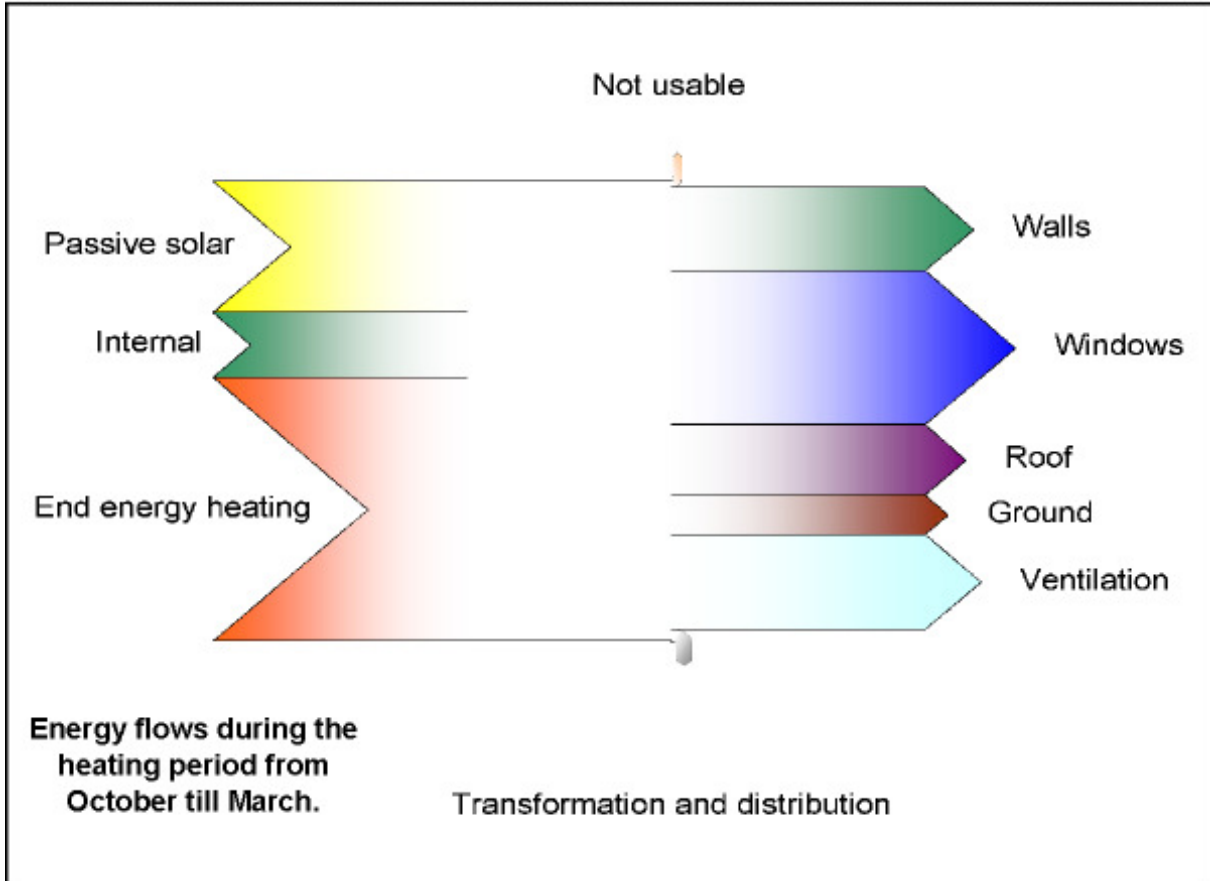
(6) SHW provided by active solar water heating system. Investigation in one dwelling.

(7) Total electrical energy consumption.

FORMAT SHEETS FOR **ENERGY SAVING IN BUILDINGS**

5B-1	ENERGY FLOWS AND INDICATORS	REF.:	BU/00127/97/DE/SE/AT
-------------	------------------------------------	-------	----------------------

SANKEY DIAGRAM OF ENERGY FLOWS DURING THE HEATING PERIOD FROM OCT. TILL MAR.



MONTHLY ENERGY DATA

MONTH	ENERGY LOADS ⁽¹⁾ [kWh/month]		ENERGY REQUIRED ⁽¹⁾ (Measured*) [kWh/month]		ENERGY SUPPLIED ⁽¹⁾ (Measured) [kWh/month]	
	Thermal	Electrical	Thermal	Electrical	Thermal	Electrical
JAN	23053	6532	13329	6532	15855	6532
FEB	19187	6000	8580	6000	10862	6000
MAR	18363	5992	6971	5992	9497	5992
APR	14924	5600	2339	5600	4783	5600
MAY	8540	5725	1329	5725	1329	5725
JUN	5623	5301	711	5301	711	5301
JUL	4131	5398	924	5398	924	5398
AUG	3479	5673	277	5673	277	5673
SEP	5795	5793	610	5793	610	5793
OCT	12306	5688	1546	5688	4072	5688
NOV	16405	5909	7269	5909	9714	5909
DEC	20524	6578	13207	6578	15733	6578
TOTAL	152331	70188	57092	70188	74366	70188

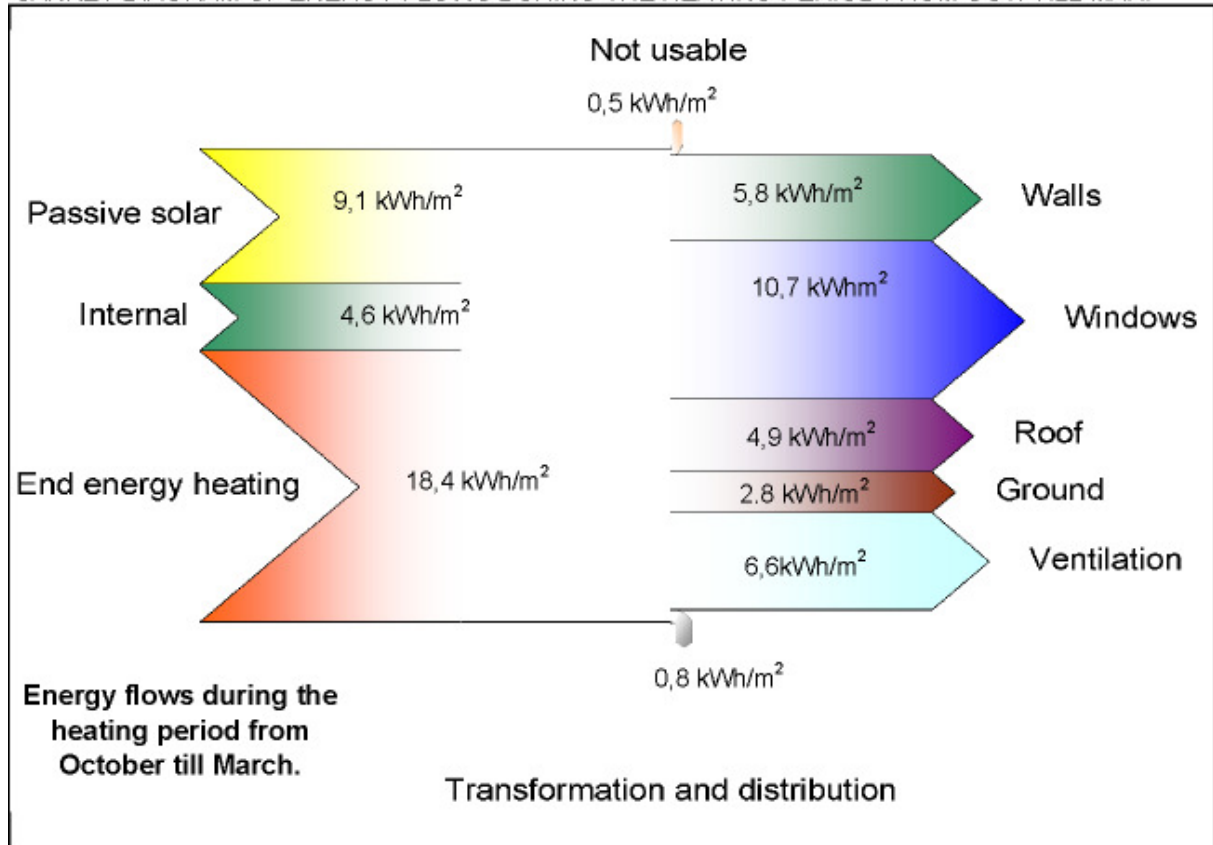
* The original notes on the completion of the format sheets and the original format sheets themselves are contradictory in this point. Here, measured data are used.

(1) The given data refer to all 32 houses.

FORMAT SHEETS FOR ENERGY SAVING IN BUILDINGS

5B-2	ENERGY FLOWS AND INDICATORS	REF.:	BU/00127/97/DE/SE/AT
-------------	------------------------------------	-------	----------------------

SANKEY DIAGRAM OF ENERGY FLOWS DURING THE HEATING PERIOD FROM OCT. TILL MAR.



MONTHLY ENERGY DATA

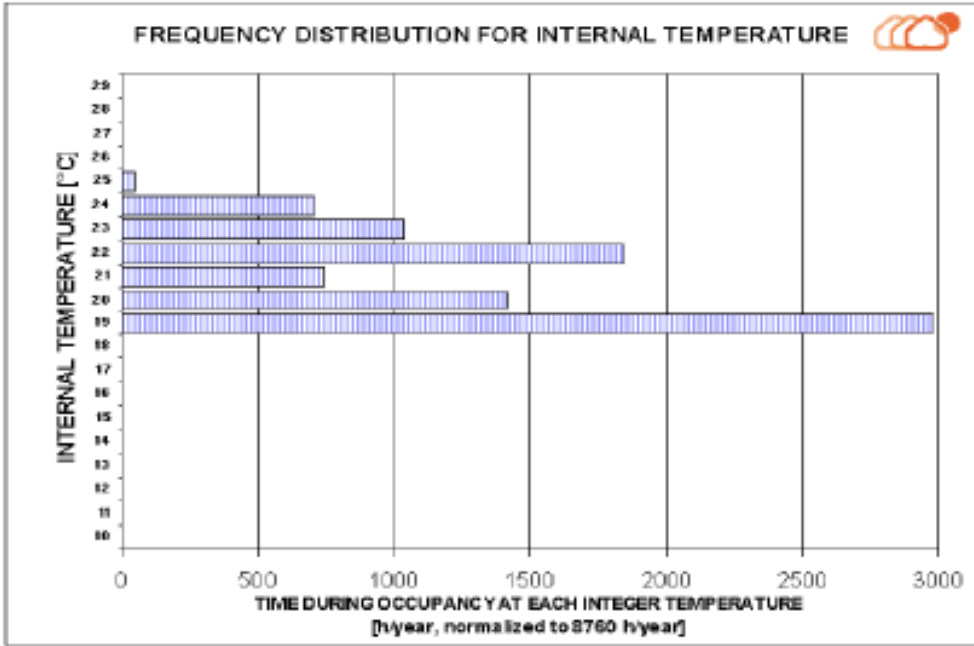
MONTH	ENERGY LOADS [kWh/(month m ²)]		ENERGY REQUIRED (Measured*) [kWh/(month m ²)]		ENERGY SUPPLIED (Measured) [kWh/(month m ²)]	
	Thermal ⁽¹⁾	Electrical ⁽²⁾	Thermal ⁽¹⁾	Electrical ⁽²⁾	Thermal ⁽¹⁾	Electrical ⁽²⁾
JAN	6,4	2,2	3,7	2,2	4,4	2,2
FEB	5,4	2,0	2,4	2,0	3,0	2,0
MAR	5,1	1,9	1,9	1,9	2,7	1,9
APR	4,2	1,8	0,7	1,8	1,3	1,8
MAY	2,4	1,9	0,4	1,9	0,4	1,9
JUN	1,6	1,8	0,2	1,8	0,2	1,8
JUL	1,2	1,8	0,3	1,8	0,3	1,8
AUG	1,0	1,8	0,1	1,8	0,1	1,8
SEP	1,6	1,9	0,2	1,9	0,2	1,9
OCT	3,4	2,0	0,4	2,0	1,1	2,0
NOV	4,6	2,0	2,0	2,0	2,7	2,0
DEC	5,7	2,3	3,7	2,3	4,4	2,3
TOTAL	42,6	23,3	16,0	23,3	20,8	23,3

* The original notes on the completion of the format sheets and the original format sheets themselves are contradictory in this point. Here, measured data are used.

(1) The given data refer to all 32 houses.

(2) Electrical energy referring to 22 permanently inhabited households.

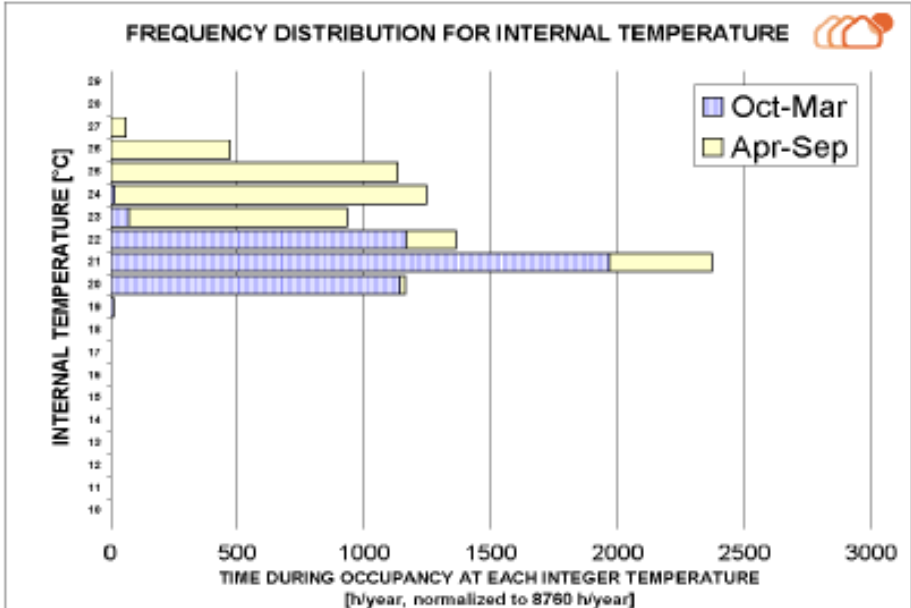
FORMAT SHEETS FOR ENERGY SAVING IN BUILDINGS

5C-1	DETAILED ENERGY PERFORMANCE (Predicted)	REF.: BU/00127/97/DE/SE/AT
BUILDING / ZONE (For large buildings complete one sheet for each area served by separate plant)		
FREQUENCY DISTRIBUTION FOR INTERNAL TEMPERATURE (dry bulb °C)		
 <p>FREQUENCY DISTRIBUTION FOR INTERNAL TEMPERATURE</p> <p>INTERNAL TEMPERATURE [°C]</p> <p>TIME DURING OCCUPANCY AT EACH INTEGER TEMPERATURE [h/year, normalized to 8760 h/year]</p>		
PERFORMANCE DATA		
	UNITS	JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC ANNUAL TOTAL
CLIMATE & OCCUPANT EFFECTS		
External Heat Losses (fabric & fresh air)	kWh/m ²	6,3 5,3 4,9 3,3 2,4 1,5 0,9 0,8 1,8 3,3 4,4 5,6 40,5
External Heat Gains (fabric & fresh air)	kWh/m ²	1,4 1,5 2,2 3,7 3,6 4,0 4,3 3,4 3,0 2,2 1,4 0,8 27,1
Occupant Gains	kWh/m ²	1,6 1,4 1,6 1,5 1,6 1,5 1,6 1,6 1,5 1,6 1,5 1,6 18,4
EQUIPMENT EFFECTS		
Appliances Energy ⁽¹⁾ (computers, catering, lifts, etc.)	kWh/m ²	1,3 1,2 1,3 1,3 1,3 1,3 1,3 1,3 1,3 1,3 1,3 1,3 15,5
Lighting Energy	kWh/m ²	0,3 0,2 0,3 0,3 0,3 0,3 0,3 0,3 0,3 0,3 0,3 0,3 3,2
ENERGY CONSUMPTION		
Cooling Input Energy	kWh/m ²	- - - - - - - - - - - - -
Heating Input Energy (including humidification)	kWh/m ²	5,0 3,5 1,7 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,1 2,3 4,7 17,3
Pump Absorbed Energy	kWh/m ²	0,1 0,1 0,1 0,1 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,1 0,1 0,1 1,0
Fan Absorbed Energy	kWh/m ²	0,3 0,3 0,3 0,3 0,1 0,0 0,0 0,0 0,0 0,3 0,3 0,3 2,2
TOTAL ANNUAL ELECTRICAL ENERGY CONSUMPTION		18,7 kWh/m ²
TOTAL ANNUAL DISTRICT HEAT CONSUMPTION		33,1 ⁽²⁾ kWh/m ²
TOTAL ANNUAL ENERGY CONSUMPTION		51,8 kWh/m ²
HEATING PLANT ANNUAL EFFICIENCY		95 %
COOLING PLANT ANNUAL COP		-
<i>(Excluding distribution losses, pump and fan power)</i>		

(1) Total monthly electrical energy consumption without lighting energy.

(2) District heat consumption for space heating and domestic hot water (including hot water supply for domestic appliances).

FORMAT SHEETS FOR ENERGY SAVING IN BUILDINGS

5C-2	DETAILED ENERGY PERFORMANCE (Measured)		REF.: BU/00127/97/DE/SE/AT											
BUILDING / ZONE: (For large buildings complete one sheet for each area served by separate plant)														
FREQUENCY DISTRIBUTION FOR INTERNAL TEMPERATURE (dry bulb °C) ⁽¹⁾														
														
PERFORMANCE DATA														
	UNITS	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANNUAL TOTAL
CLIMATE & OCCUPANT EFFECTS														
External Heat Losses ⁽²⁾ (fabric & fresh air)	kWh/m ²	6,0	5,2	5,0	3,8	2,5	1,6	1,1	1,1	1,8	3,3	4,4	5,6	41,4
External Heat Gains ⁽²⁾ (fabric & fresh air)	kWh/m ²	1,4	1,7	1,8	3,0	3,6	3,4	2,7	3,3	2,5	2,2	1,0	0,7	27,3
Occupant Gains ⁽³⁾	kWh/m ²	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,7	0,8	9,8
EQUIPMENT EFFECTS														
Appliances Energy ^{(4), (7)} (computers, catering, lifts, etc.)	kWh/m ²	2,2	2,0	1,9	1,8	1,9	1,8	1,8	1,8	1,9	2,0	2,0	2,3	23,3
Lighting Energy	kWh/m ²	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
ENERGY CONSUMPTION														
Cooling Input Energy	kWh/m ²	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Heating Input Energy (including humidification)	kWh/m ²	4,4	3,0	2,7	1,3	0,4	0,2	0,3	0,1	0,2	1,1	2,7	4,4	20,8
Pump Absorbed Energy	kWh/m ²	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,1
Fan Absorbed Energy ⁽⁵⁾	kWh/m ²	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	2,2
TOTAL ANNUAL ELECTRICAL ENERGY CONSUMPTION										23,3 ⁽⁷⁾ kWh/m²				
TOTAL ANNUAL DISTRICT HEAT CONSUMPTION										34,6 ^{(6), (7)} kWh/m²				
TOTAL ANNUAL ENERGY CONSUMPTION										58,0 kWh/m²				
HEATING PLANT ANNUAL EFFICIENCY				95 %				COOLING PLANT ANNUAL COP				-		
<small>(Excluding distribution losses, pump and fan power)</small>														

- (1) Internal temperatures distribution of one typical dwelling.
 (2) Values are determined by using measured climate data.
 (3) According to known occupancy the occupant gains are calculated.
 (4) Total monthly electrical energy consumption.
 (5) Including electrical anti-freeze heating of the heat recovery unit.
 (6) District heat consumption for space heating and domestic hot water.
 (7) The given data refer to 22 permanently inhabited households.

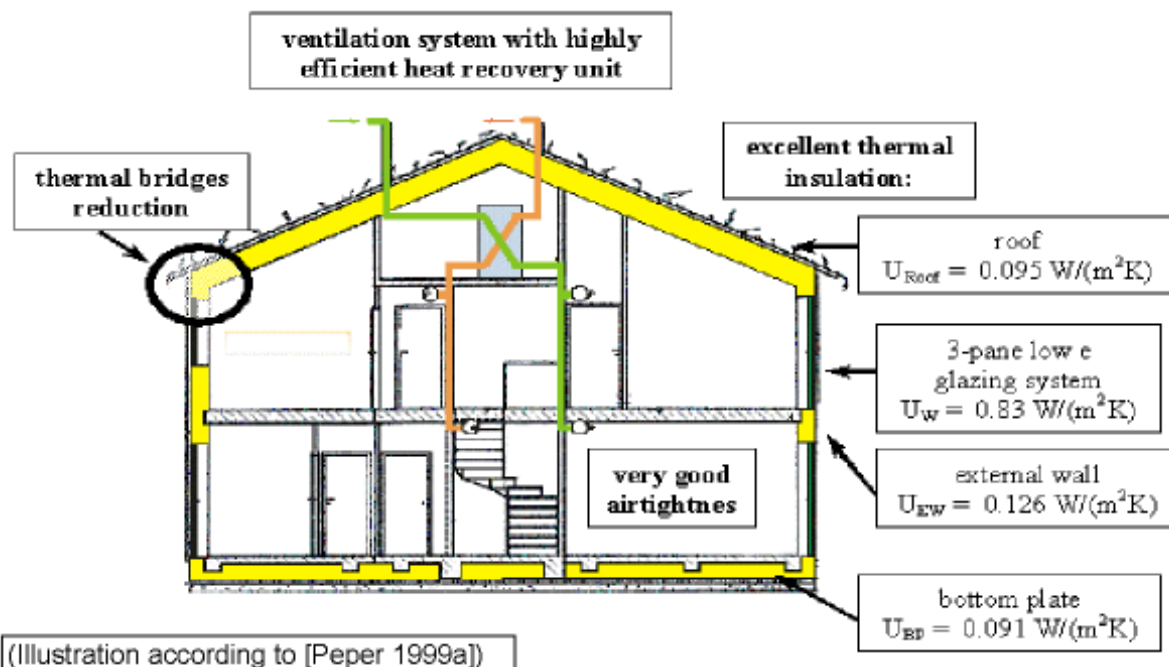
FORMAT SHEETS FOR **ENERGY SAVING IN BUILDINGS**

6-A1	BUILDING ENVELOPE SPECIFICATION	REF.: BU/00127/97/DE/SE/AT
-------------	----------------------------------------	----------------------------

APPLICATION DESCRIPTION AND DATA: Complete this sheet only if applicable

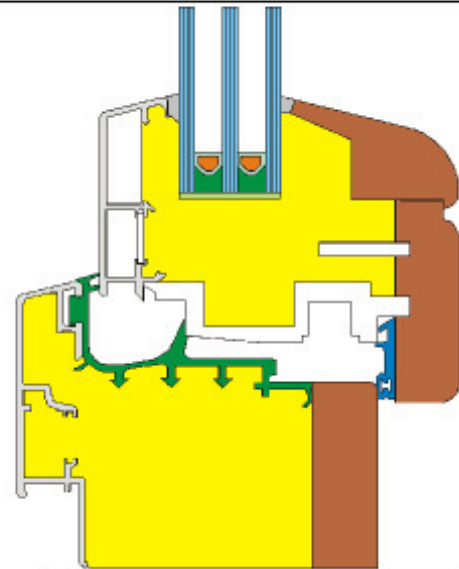
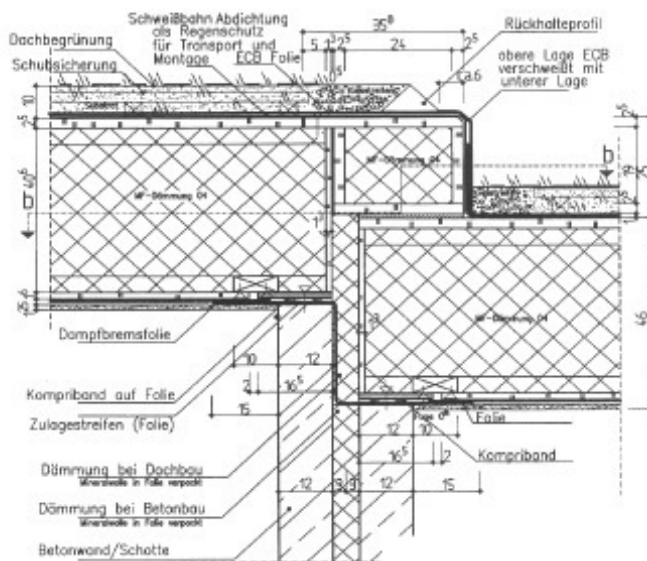
DESCRIPTION OF ENERGY SAVING FEATURES

- Superinsulation technologies: U-values of all opaque envelope elements below $0.15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.
- Reduced thermal bridges.
- Very good airtightness (PE-films in lightweight elements, airtight connections): $n_{50} < 0,6 \text{ /h}$.
- Use of passive solar energy: large south oriented windows.
- 3-pane low-emissivity glazing systems with U-value below $0.8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ and a high solar transmittance factor (60 %).
- Windows with superframes (U-value of frame below $0.8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)
- Heat recovery with high-efficiency counterflow air-to-air heat exchangers (efficiency greater than 75 %).
- Solar collectors for production of domestic hot water.

SKETCH OF ENVELOPE, HIGHLIGHTING NOVEL ASPECTS


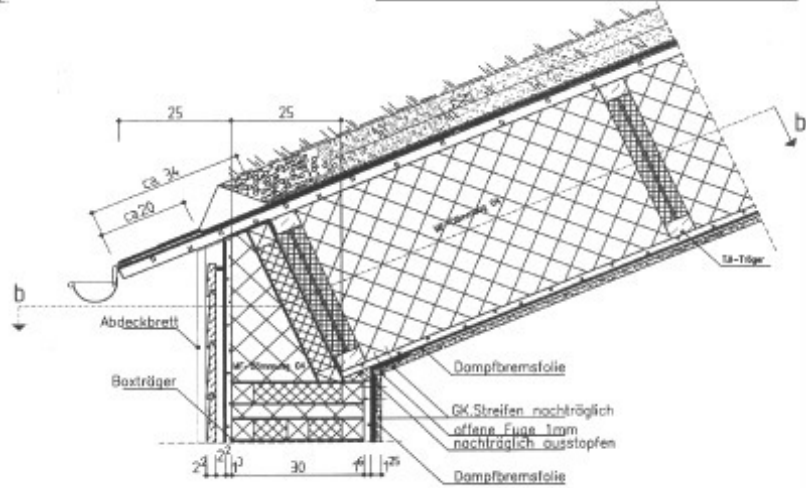
FORMAT SHEETS FOR **ENERGY SAVING IN BUILDINGS**
6-A2 BUILDING ENVELOPE SPECIFICATION REF.: BU/00127/97/DE/SE/AT

APPLICATION DESCRIPTION AND DATA: Complete this sheet only if applicable

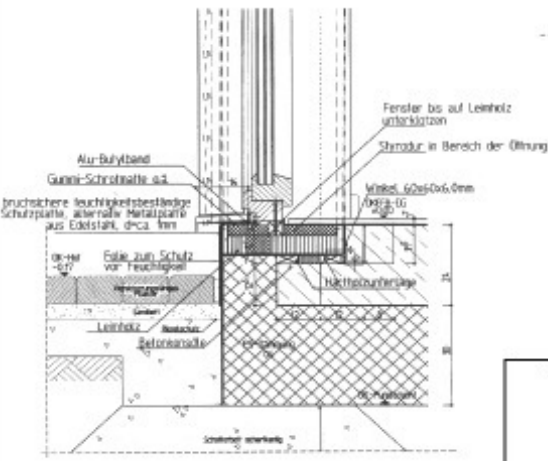
DESCRIPTION OF ENERGY SAVING FEATURES
HIGHLIGHTING NOVEL ASPECTS


**Thermal bridge reduction
superinsulated window frame**
(Illustration according
to copy of manufacture)

**Thermal bridge reduction and
airtightness
roof/verge**
(Illustration from [Feist 2001])


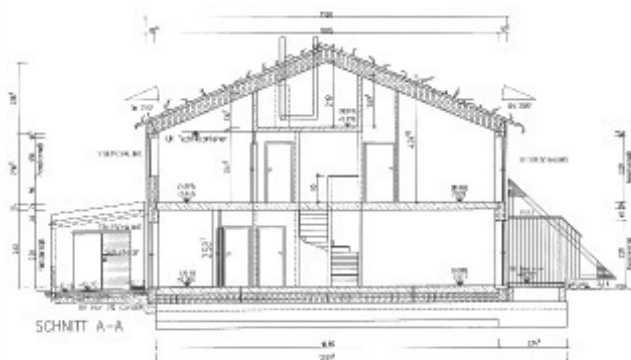
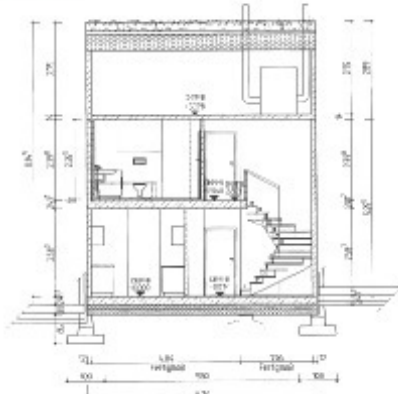
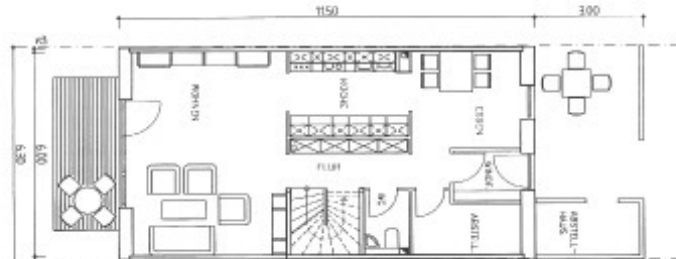
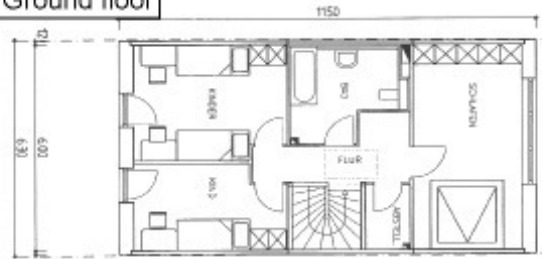
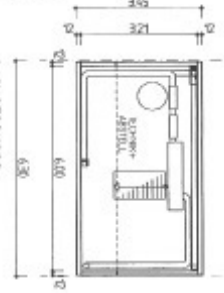


**Thermal bridge reduction and
airtightness
eaves/roof**
(Illustration from [Feist 2001])



**Thermal bridge reduction and
airtightness
external wall/base**
(Illustration from [Feist 2001])

FORMAT SHEETS FOR ENERGY SAVING IN BUILDINGS

6B-all	BUILDING DRAWINGS	REF.:	BU/00127/97/DE/SE/AT
APPLICATION DESCRIPTION AND DATA: Complete this sheet only if applicable			
Building type	10 Residential	TFA: 3576⁽¹⁾	m²
Complete separate copies of sheets 6B and 6C for each different building type			
Each copy should be identified by adding successive numbers in top lefthand corner:e.g. 6B-1, 6B-2 ,6C-1, 6C-2, etc			
			
			View from southeast
			
Sectional view from east (Illustration from [Feist 2001])		Sectional view from south (Illustration from [Feist 2001])	
			
Ground floor			
			
Upper floor		Top floor	
Plan views (Illustrations from [Feist 2001])			

(1) Sum of all 32 dwellings.

FORMAT SHEETS FOR ENERGY SAVING IN BUILDINGS

6C	ENVELOPE INSULATION ANALYSIS	REF.:	BLJ00127/97/DE/SE/AT
APPLICATION DESCRIPTION AND DATA: Complete this sheet only if applicable			
Building type	10 Residential	TFA: 3576 ⁽¹⁾	m ²
Complete separate copies of sheets 6B and 6C for each different building type Each copy should be identified by adding successive numbers in top lefthand corner e.g. 6B-1, 6B-2, 6C-1, 6C-2, etc			
Actual Building Heat Loss Coefficient	0,418 [W/m ² k]	or	0,133 [W/m ² k]
Heat Loss Coeff. according to Norms ⁽²⁾	1,56 [W/m ² k]	or	0,50 [W/m ² k]
Actual Yearly Space Heating Consumption	57,5 [MJ/m ²]	or	18,2 [MJ/m ²]
Space Heating Cons. according to Norms ⁽²⁾	385 [MJ/m ²]	or	122 [MJ/m ²]

OPAQUE BUILDING ENVELOPE PARTS OR COMPONENTS

Azim. /Tilt Angle	Envel. Part or Comprt.	Composition Materials (out to in)	Total Thckn. [cm]	Contiguity Fctr ¹	Insulation Type Position and Thickness [cm]	Overall U-value [W/m ² K]	Surf. Area [m ²]
e. or w./90°	façade lightweight construction	chipboard, mineral wool, chipboard, gypsum board	34,5	1	λ = 0,04 W/(mK), 30cm	0,13	1716,8 ⁽¹⁾
n. and s./90°	façade concrete construction	rendering, thermal insulation, concrete	42	1	λ = 0,04 W/(mK), 40 cm	0,09	665,7 ⁽¹⁾
n. and s./23,5°	roof 1	chipboard, mineral wool, chipboard, gypsum board	45,7	1	λ = 0,04 W/(mK), 40 cm	0,095	2393,0 ⁽¹⁾
-	ground 1	thermal insulation, concrete, impact sound insulation, wooden floor	59,5	0,4	λ = 0,04 W/(mK), 42 cm	0,091	2178,9 ⁽¹⁾
n. and s./23,5°	roof 2	chipboard, mineral wool, chipboard, mineral wool	39	1	λ = 0,04 W/(mK), 12 cm + 22 cm	0,11	95,7 ⁽¹⁾
-	ground 2	concrete, thermal insulation, concrete	42	0,4	λ = 0,04 W/(mK), 18 cm	0,209	88,0 ⁽¹⁾
-	-	-	-	-	-	-	-

Data on doors should be reported in the upper or lower table, according to whether they are opaque or glazed.

WINDOWS AND OTHER GLAZED COMPONENTS

Azim. /Tilt Angle	Type of Glazing	Frame Material	Air Infiltration [m ³ /hm ²]	Night shutter type	Average Shading Factor	Overall day U-value	Overall night U-value	Glazed Area [m ²]
south/90°	low e, triple	metal, plastic, wood	-	-	0,89	0,83	0,83	361,7 ⁽¹⁾
north/90°	low e, triple	metal, plastic, wood	-	-	0,91	0,83	0,83	264,2 ⁽¹⁾
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-

¹ 1.0 for outside / 0.85 for ventilated, non-heated spaces / 0.60 for non-vent., non-heated spaces / 0.40 toward ground

(1) The settlement consists of 4 passive house rows with 32 dwellings. The houses are very similar therefore the data are given in sum.

(2) Values according to the german norm: Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung), Bonn 8/1994.

FORMAT SHEETS FOR ENERGY SAVING IN BUILDINGS

7-A	INTEGRATED DESIGN FOR LOW ENERGY	REF.:	BU/00127/97/DE/SE/AT		
APPLICATION DESCRIPTION AND DATA: Complete this sheet only if applicable					
		Thermal	Electric	Total	Tot. primary
Reference(*) Ann. Consumption	[kWh/m ² .yr.]	141 ⁽¹⁾⁽²⁾	32,8 ⁽³⁾	173,8	244,2 ⁽⁴⁾
Actual Annual Consumption	[kWh/m ² .yr.]	34,6 ^{(2),(5)}	23,3 ^{(6),(5)}	58,0 ⁽⁵⁾	82,6 ⁽⁵⁾
Ratio Actual to Ref. Consumption		25%	71%	33%	34%
Fraction of Load provided by Renewables		-	-	-	-

(*) Take as reference the values for the specific building(s) derived or imposed by national norms

(1) Reference values according to the German norm: Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung), Bonn 8/1994.

(2) Annual consumption for space heating and domestic hot water.

(3) Without electric energy for mechanical ventilation

(4) Assumption: Reference heat generator is a low temperature boiler with a conversion factor of 1.15 for gas.

(5) The given data refer to 22 permanently inhabited households.

(6) With electric energy for mechanical ventilation

TECHNIQUES APPLIED IN THE PROJECT

ENERGY SAVING TECHNIQUES	RENEWABLE ENERGY TECHNIQUES
(See Format Sheet no.3)	X Solar Active
10 Building envelope improvement	X Solar Passive
30 Heat recovery systems	- Solar Photo-Voltaic
60 Passive heating and cooling techniques	X Wind
80 Eff. lighting, daylight and electr. improvements	- Small Scale Hydro
	- Biomass
	- Other

DESCRIPTION OF THE MOST IMPORTANT INTEGRATION ASPECTS

- The houses have mechanically balanced ventilation systems. The heat requirement of them is so low that the remaining heat is distributed by the supply air. No additional heat distribution is needed. No recirculated air is needed.
- Large south oriented windows for passive solar gains and reduced use of artificial lighting.
- Heat for space heating as well as hot water are provided by district heat. One transfer station supplies the heat for 16 dwellings.

FORMAT SHEETS FOR ENERGY SAVING IN BUILDINGS

7-B		DIRECT PASSIVE SOLAR GAIN				REF.: BU/00127/97/DE/SE/AT			
APPLICATION DESCRIPTION: Complete this sheet only if applicable, use a separate copy for each different building type									
Building type:		10 Residential				TFA:		3576 m ²	
		Predicted #		Measured #					
1. HEATING SEASON USEFUL SOLAR HEAT GAIN ⁽¹⁾		7,7		7,9		kWh/m ² TFA			
2. HEATING SEASON WINDOW HEAT LOSS ⁽¹⁾		7		6,1		kWh/m ² TFA			
3. HEATING SEASON NET GAIN (2-1) ⁽¹⁾		0,7		1,8		kWh/m ² TFA			
GLAZING PARAMETERS (Refer to notes in Guidelines section 2.2.6A)									
1. Façade orientation	East	South East	195° (SE)	South West	West				
2. Tilt (deg. from horiz'l)	-	-	90	-	-				
3. Area m ²	-	-	11,5	-	-				
4. Glazing layers (1,2,3)	-	-	3	-	-				
5. New technology *	-	-	LE	-	-				
6. % Frame	-	-	31%	-	-				
7. Frame type *	-	-	M,P+TB	-	-				
8. % facing sunspace	-	-	-	-	-				
9. Total solar transmittance	-	-	0,6	-	-				
10. U-value (day) W/m ² k	-	-	0,83	-	-				
11. U-value (night) W/m ² k	-	-	0,83	-	-				
SHADING PARAMETERS									
A.Shade type *	-	-	VE	-	-				
B.Shade location *	-	-	EXT	-	-				
C.Shade material *	-	-	textile	-	-				
D.Shade colour *	-	-	Medium	-	-				
E.Projection (m) *	-	-	0	-	-				
F.Shade operation *	-	-	MECH	-	-				
*New technologies	LE: Low Emissivity coating(s)		AE: Aerogel		TI: Transparent Insulation				
	PG: Prismatic Glazing		VG: Vacuum Glazing		SC: Solar Control glazing				
*Frame type	W:Wood		M: Metal		P: Plastic		(+)+TB: (+)Thermal Break		
*Shade type	ST: Structural, SS: Sliding/folding Shutter, RS: Roller Shutter, VE: VenElian, AW:AWning								
*Shade location	EXT: EXTeRnal		IGL: InteGrAL		INT: INTernal				
*Shade material	W:Wood		M: Metal		P: Plastic		(+)+INS: (+)INSulation		
*Shade colour	Light, Medium, Dark								
*Projection	Maximum projection from face of glazing in horizontal plane in meters								
*Shade operation	MAN: MANual		MECH: MECHanically operated		AUTO: fully AUTOMatic				

(# predicted = based on calculation or simulation / measured = measured directly or combination of measurement & calculation)

(1) The values refer to southerly facing windows (October till March).

FORMAT SHEETS FOR ENERGY SAVING IN BUILDINGS

8-A SPACE HEATING & VENTILATION SYSTEMS		REF.: BU00127/87/0E/SE/AT	
APPLICATION DESCRIPTION AND DATA: Complete this sheet only if applicable			
Building Type:	lease/residential		
Treated Floor Area (TFA) [m ²]:	3.516	No. of Floors:	2
External design Temperature [°C]:	-10	External Design Humidity:	-
HEATING PLANT DESIGN DATA			
Heating Source:	district heat / CHP		
Is Plant Integrated with a Combined Heat & Power System/District Heat:	Yes		
Fuel Input:	<input checked="" type="checkbox"/> Natural Gas <input type="checkbox"/> Biogas <input type="checkbox"/> Landfill Gas <input type="checkbox"/> Gas oil/Diesel <input type="checkbox"/> Other		
Manufacturer:	Zappala (CHP), Viessmann (boiler plant)		
Total efficiency:	0,94	Model:	Typ G35 16 B (CHP), Turbosmat 6000 - RN (boiler plant) (CHP)
HEAT DISTRIBUTION SYSTEM			
Distribution System:	Ventilation System	Heat Generator	Air Heater (supply air)
Heat Distribution Fluid:	air	Supply Temp. [°C] (Nov. - Mar.)	27,0
Installed Capacity [W/m ²]:	10	Mean Supply Temp. [°C]	55,5
		Max. Daily Sup. Temp. [°C]	55,5
		Max. Daily Mean Heating Load [W/m ²]	9
VENTILATION SYSTEM DESIGN DATA			
BUILDING ENVELOPE'S AIRTIGHTNESS			
Pressurization Test:	yes	Mean Air Change (pressure difference 50 Pa) n ₅₀ [1/h]	0,29 ⁽¹⁾
VENTILATION SYSTEM			
Distribution System:	central ventilation system per dwelling, short air ducts		
Pressure Loss of Ventilation System [Pa] (at air flow):	design values 60 ⁽²⁾ (60 m ³ /h) 105 ⁽³⁾ (120 m ³ /h) 175 ⁽³⁾ (150 m ³ /h)		
Fresh Air Ventilation:	design value	measured value	
Electrical Efficiency [Wh/m ³ air]:	from 0,3 to 0,35	0,22 ⁽⁴⁾	
Ventilation Control:	manual		
EARTH-TO AIR HEAT EXCHANGER			
Length of Ducts [m]:	not used	Diameter of Ducts [m]:	not used
Depth [m]:	not used	Number of Ducts:	not used
HEAT RECOVERY SYSTEM			
Manufacturer:	Paul Wanner/Gebrüder, Milten, Germany		
Type/Set-Up of Heat Exchanger:	counterflow air-to-air	central per dwelling	
Efficiency:	Design Value 87%	Measured Value 78%	
Annual Energy Efficiency [%] (saved ventilation losses in relation to energy consumption of ventilation system):	10,8		
DESIGN DATA FOR HEATED ZONE			
Building Overall Heat Loss Coefficient:	Predicted		Measured
UA/m ² [W/(K m ² TFA)]:	0,424		0,418
UA/m ² [W/(K m ²)]:	0,102		0,101
ZONE DESCRIPTION			
Floor Area TFA [m ²]:	3676	Volume [m ³]:	14745
Occupant Density [m ² /person]:	35,2 ⁽⁵⁾	Internal Gain [W/m ²]:	2,1
Infiltration Rate [ac/h]:	0,02	Fresh Air Ventilation [l/s person] (excluding infiltration):	10,5 ^{(6), (4)}
Internal Air Temperature (dry bulb) [°C]:	20		

(1) Mean values of 32 dwellings.

 (2) Value refers to one dwelling of 120 m² TFA.

(3) Value refers to the 22 permanent inhabited dwellings.

(4) Standard ventilation.

FORMAT SHEETS FOR **ENERGY SAVING IN BUILDINGS**

11-A	SERVICE WATER HEATING SYSTEM	REF.:	BU/00127/97/DE/SE/AT
APPLICATION DESCRIPTION AND DATA: Complete this sheet only if applicable			
<u>Consumption Data</u>			
Typical number of building occupants during working days	70 ⁽⁴⁾	wkends	70 ⁽⁴⁾
Typical daily HW cons. from whole system, working days [l/d]	2211 ⁽⁴⁾	wkends [l/d]	2211 ⁽⁴⁾
Temperature of SHW at points of use:	47	[°C]	
Total annual consumption of cold water:	1612654 ⁽⁴⁾	[l/yr.]	hot water 809210 ⁽⁴⁾ [l/yr.]
How is consumption data derived, - calculated (persons x litres/pers/day), measured, estimated? measured			
<u>Service Hot Water Production</u>			
X Central	Combined with central boiler	Separate production	X Independent boilers in each dwelling Independent boilers at points of use Other (Specify)
<u>Fuel Used:</u>		<u>Winter</u>	<u>Summer</u>
Principal Source	active solar system	active solar system	
Backup Source	district heat	district heat	
(if electricity, give % produced at off-peak rate, where applicable -)			
<u>Type of heater</u>	Instantaneous	X With storage	
<u>If Storage:</u> <u>Auxiliary Heating Tank Storage Data</u>			
Storage type:	Single Volume	Multi modules x (32 modules) ⁽²⁾	
Percent of max. rated daily consumption	300	%	
Total storage volume:	32 x 300 ⁽⁵⁾	litres	Auxiliary heater thermostat setting - °C
Storage heat loss coeff ¹	2,9 ⁽⁶⁾	W/K	Ave. daily heat losses ¹ 32 x 1,7 ^{(5), (6)} kWh/day
<u>If any energy source is solar or recovered heat. Pre-heating Tank Data</u>			
Separate tank	Integral with auxiliary heating tank	X	
Pre-heating water storage volume	130	litres	
Pre-heating tank storage heat loss coeff.	2,9 ⁽⁶⁾	W/K	
<u>Heat Exchanger:</u>	None	External	Internal to preheat. tank X
if internal, location in tank:	top	bottom	X all around
type of heat exchange	with intermediate fluid	X	direct contact
<u>Heater</u>			
Manufacturer			
Model ²	district heat	Type	-
No. of units of the same model:		Ave. rated power of each generator	kW
Total rated power	- kW	Maximum supply capacity	- litres/min
Generation efficiency ³	in Winter	in Summer	-
Low temperature heat source (for heat pumps only)			-
<u>Distribution system</u> (if applicable) ⁽⁷⁾	Gravity	Pumped circulation	-
Rated circulation pump power	- kW	Piping total length	- m
Pump circulator running time	- hr/day	Piping heat loss	- W/m
Ave. daily heat losses from distribution system			- kWh/day
<u>HW meters:</u>	none	1 per building X	1 per dwelling or zone
<u>HW control:</u>	none	timer X	Build. En. Man. Sys.

¹ Provide both design and measured values

² If more than 1 model, use additional sheets

³ COP for heat pump heaters


⁽⁴⁾ The values relate to 70 persons of 22 permanently occupied houses.

⁽⁵⁾ The project describes 32 terraced houses, 22 of them were permanently occupied during the measuring period.

⁽⁶⁾ Design value.

⁽⁷⁾ No circulation distribution system in the houses.

FORMAT SHEETS FOR ENERGY SAVING IN BUILDINGS

11-B	ACTIVE SOLAR WATER HEATING SYSTEMS	REF.: BU/00127/97/DE/SE/AT
APPLICATION DESCRIPTION:		Complete this sheet only if applicable: use a separate copy for each different water heater
		
COLLECTOR ARRAY		
Gross Area:	4,3 ⁽¹⁾ m ²	Aperture area: 3,95 ⁽¹⁾ m ² Absorber area: 3,8 ⁽¹⁾ m ²
	Inclination to the horizontal:	23,5° deg
	Orientation (S, SW, etc.):	195° (southeast)
COLLECTOR TYPE		MANUFACTURER
Flat Plate	X	Wagner & CO
Unglazed		
Evacuated tube		
Other:		
HEAT TRANSFER FLUID		
WATER	WATER + GLYCOL X	AIR OTHER:
COLLECTOR GLAZING:		
SINGLE GLASS:	X	OTHER:
GLASS SEALANT:	-	
ABSORBER COATING		
BLACK PAINT:	SELECTIVE	chromium-nickel : (α = 95% ε = 12%)
COLLECTOR PERFORMANCE CHARACTERISTICS:		
ETA ZERO =	76,4%	LOSS COEFFICIENT = 3,1 W/m ² K
Data based on: Absorber Area		m ² / Gross Area m ² / Aperture Area
Data based on: Collector mean temperature		X Collector inlet temperature
COLLECTOR FLUID CIRCULATION:		
BY PUMP	X	(pump rating = 60 ⁽¹⁾ W) RPM-regulated (30%-100%)
BY FAN (Air collectors)		(fan rating = - W)
BY THERMOSIPHON		
COLLECTOR CIRCUIT CONTROL:		
DIFFERENTIAL TEMPERATURE CONTROLLER		X
SOLAR SENSOR		
OTHER: RPM-regulated		X

(1) Data given per dwelling.

FORMAT SHEETS FOR **ENERGY SAVING IN BUILDINGS**

14	OTHER ENERGY SAVING TECHNIQUES	REF.: BU/00127/97/DE/SE/AT
-----------	---------------------------------------	----------------------------

APPLICATION DESCRIPTION AND DATA: This is a free format sheet to be used for projects which are not covered by other sheets.

PROJECT DESIGN CHARACTERISTICS AND PERFORMANCE DATA

The drying wardrobes use the exhaust air of the ventilation system. They are installed in all houses.

All dwellings have the possibility to connect the dish-washer and the washing machine with the domestic hot water (DHW) supply to avoid electrical heat production as much as possible.

All inhabitants were advised to equip their households with energy saving electric appliances e.g. light, cooling and freezing, dish-washer, and washing machine.

The use of energy efficient appliances was supported.

SIMPLIFIED SCHEMATIC VIEW OF TECHNIQUE


drying wardrobe

FORMAT SHEETS FOR **ENERGY SAVING IN BUILDINGS**

15	QUALITATIVE ASSESSMENT	REF.:	BU/00127/97/DE/SE/AT
----	------------------------	-------	----------------------

USER REACTION: (ease of use, controllability, etc.)

Almost all inhabitants are very content with their dwelling. They mention the following aspects:

- little temperature gradient
- high air quality
- manual ventilation isn't needed.
- low running costs

NON ENERGY BENEFITS: (improved thermal comfort, good daylighting, aesthetics, etc.)

The majority is content respectively very content with the indoor climate and the controlled ventilation. But they are less satisfied with the architectural surroundings.

RELIABILITY: (evidence of reliability, frequency of failures, types of failures, etc.)

Some initial problems with the conventional control of the heating system.

MAINTENANCE REQUIREMENTS: (actions needed, cleaning, ease of maintenance, cost differences, etc.)

Ventilation system: Change of air filter.
No maintenance of heating system.
Most occupants regard the maintenance expenditure as little.

MAIN IMPLEMENTATION PROBLEMS: (obstacles, staffing difficulties, suppliers, provision of new materials or parts, etc.)

During the construction phase happened an ingress of water in a part of the building's roofs .
Some initial problems with the control of the heating system.

FORMAT SHEETS FOR ENERGY SAVING IN BUILDINGS

16	ENVIRONMENTAL IMPACT OF PROJECT	REF.:	BUJ00127/97/DE/SE/AT	
Comment briefly on each of following issues, highlighting any improvements (or otherwise) with respect to usual environmental impact of modern buildings. Add any other relevant remarks.				
A) GLOBAL EFFECTS				
Specify reduction of gaseous emissions (CO ₂ , SO ₂ , NO _x , VOC,..) in relation to energy savings obtained.				
Use following equivalence factors ⁽¹⁾ , which are in kg of pollutant per t.o.e. of fuel:				
	CO ₂	SO ₂	NO _x	Volatile Organic Compounds
Solid fuels	4000	18	2	18,7
Liquid fuels	3000	5,9	2	8,7
Gas	2200	0	2	0,4
Reduction of gaseous emissions due to energy savings in comparison to Reference(*) Ann. Consumption (Sheet 7a) :				
	CO ₂	SO ₂	NO _x	Volatile Organic Compounds
	[kg/a]	[kg/a]	[kg/a]	[kg/a]
thermal ⁽²⁾	78702	0	72	14
electrical ⁽³⁾	23432	101	22	96
B) QUALITY OF BUILDING MATERIALS AND EQUIPMENT				
Presence/avoidance of CFC materials	avoidance (The Kronsberg city district was built applying all the most modern expertise on ecological construction in the spirit of Agenda 21.)			
Use of biological and recyclable building materials	timber, grass roof			
Long lasting materials	-			
Reduced or no maintenance cost material and equipment	-			
Aesthetic appearance	standard terraced houses, painted façade			
Integration in the building site	well adapted			
C) WASTE MANAGEMENT AND RECYCLING				
Separate treatment of different wastes	yes (waste paper, mixed manure, waste of packaging material)			
Use of recyclable building materials	timber, grass roof			
Advanced water management	rainwater infiltration			
Emission gas pollution abatement	gas-powered CHP module running on the lean mix principle with oxidation catalytic converter			
D) HEALTH AND SAFETY				
Indoor air quality	mechanical ventilation system, air filter			
Indoor comfort	high thermal comfort, excellent airtightness (no draught)			
Avoidance of hazardous materials (formaldehyde, asbestos, etc.)	timber flooring (no wall to wall carpet)			
Acoustic insulation	well standard between the dwellings, very silent heat recovery unit			
E) LAND USE				
Modification of land (specify additional surface area recovered for green uses or destroyed by asphalt and cement)	Little use of land because of compact design (terraced house)			
Transport needs created by project (new roads, increased traffic volume, etc.)	Environmentally responsible transport concept (compact community)			
F) ENVIRONMENTAL MANAGEMENT MEASURES				
Existence/Creation of permanent Energy Manager post	Kronsberg Environmental Liaison Agency (KUKA), Hannover			
Establishment of energy & environmental reporting procedures	several			

(1) Source: TNO/CEC report, Emission Factors, November 1988

(2) Thermal energy is generated by natural gas.

(3) Values are based on the power generation in Germany (coal, natural gas). Energieflußbild der Bundesrepublik Deutschland, RWE Energie AG 1995.

FORMAT SHEETS FOR **ENERGY SAVING IN BUILDINGS**

17	REPLICATION AND DISSEMINATION	REF.: BU/00127/97/DE/SE/AT
-----------	--------------------------------------	----------------------------

CONTRACTOR'S EVALUATION OF PROJECT'S SUCCESS

Success	Technical	Economic	Social Acceptability
Full	X	X	X
Partial			
Disappointing			

Comments and Explanations

The 'passiv house' development were successfully constructed in standard factory production. According to the known monitoring results, the experience of quality assurance as well as the occupant's reactions we can state that the building project is a great success.

REPLICATION/DISSEMINATION ACTIONS UNDERTAKEN

Provide the following details of each action

- a) organisation promoting replication/dissemination (project contractor, national agency, etc.)
Stadtwerke Hannover; proKlima, Klimaschutz-Fonds Hannover
- b) type of action undertaken
Exhibition house with guided tour (especially during world exposition, about 1700 visitors)
Compilation of exhibition about passive houses (permanent exhibition since 10/2000)
Guest-house: living in a passive house.
- c) names of other organisations involved in action
World Exposition Expo 2000; Kronsberg Environmental Liaison Agency (KUKA), Hannover; Niedersächsische Energieagentur NEA, Hannover
- d) nature of feed-back or reaction received
great interest
- e) economic burden imposed on contractor by replication, :-
 - in absolute terms **50000 €**
 - as % of investment cost of present demonstration project.

COMMERCIAL REPLICATION OF PROJECT

Provide the following information (if known), for each new replication:

- a) name, address and field of activity of replicating company
Wuppertal, Freiburg-Neuenburg, Mainz, Friedberg (replications of the same developer)

In 2001 there are more then 1000 passive houses been built in Germany.

- b) was replication based on direct² information transfer by project contractor or designed independently?
direct: using of information published by the Passive House Institute, especially CEPHEUS-Fachinformation and "Arbeitskreis kostengünstiges Passivhaus". Increase of development activities for passive house components. For instance, the number of window frames appropriate for passives houses rises from one in 1998 to 25 in 2001.

- c) is replication object of contractual agreement between project contractor and replicating company?
 -

- d) amount of capital invested for replication
 -

- e) number of units in each replication project
Wuppertal: 22 units, Freiburg: 7 units, Mainz: 10 units, Friedberg: 24 units

- f) estimated amount of energy saved in replication project
total primary energy (electrical + thermal): about 63 x 16700 kWh/a

- g) other relevant information
 -

¹ *Replication* means any investment, based on or very similar to demonstration project, made after project was announced.

² *direct* means that it occurred through transmission channels set up by or in agreement with the project contractor