



**PASSIV
HAUS
INSTITUT**

Fachinformation PHI-2002/3

Dr. Wolfgang Feist

Rheinstr. 44/46

D-64283 Darmstadt

Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg

Analyse im dritten Betriebsjahr

Endbericht

Mai 2001 bis April 2002



enercity[®]
positive energie

Im Auftrag der Stadtwerke Hannover AG



**PASSIV
HAUS
INSTITUT**

Fachinformation PHI-2002/3

Dr. Wolfgang Feist

Rheinstr. 44/46

D-64283 Darmstadt

Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg

Analyse im dritten Betriebsjahr

Endbericht

Mai 2001 bis April 2002

enercity[®]
positive energie

Im Auftrag der Stadtwerke Hannover AG

Autoren:

Søren Peper

Dr. Wolfgang Feist

unter Mitarbeit von

Matthias Nagel

Herausgeber:

PASSIVHAUS INSTITUT

Rheinstraße 44/46

64283 Darmstadt

E-Mail: Passivhaus@t-online.de

www.passiv.de

Darmstadt Juli 2002

**Dieser Bericht entstand im Auftrag der
Stadtwerke Hannover AG.**

Besonderer Dank gilt allen Bewohnern der Siedlung für die Mitarbeit und Unterstützung sowie die aufgebrachte Geduld während der dreijährigen messtechnischen Begleitung ihrer Häuser.

Familie Haushalter sei hier ganz besonders gedankt für die zahlreichen zusätzlichen Zählerablesungen, Antworten auf unzählige Fragen sowie das Verstellen des Schattenringes. Außerdem gilt unser Dank besonders Frau Wefel für die vielen spontanen „Einsätze“ und den Temperatursturz in Abbildung 40.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG UND ZUSAMMENFASSUNG	3
2	MESSDATENAUSWERTUNG	7
2.1	THERMISCHE BEHAGLICHKEIT.....	7
2.1.1	Übersicht Raumluf-Temperaturverläufe der Heizperiode	9
2.2	WÄRMEVERBRÄUCHE	11
2.2.1	Heizwärmeverbrauch	11
2.2.2	Heizleistungen	16
2.2.3	Warmwasser	17
2.3	STROMVERBRAUCH	20
2.4	KONTROLLIERTE WOHNUNGSLÜFTUNG	22
2.4.1	Stromverbrauch Lüftungsgeräte	23
2.4.2	Energieeffizienz des Lüftungsgerätes	25
3	AUSWERTEMODELL PASSIVHÄUSER KRONBERG	27
3.1	MODELLGESTÜTZTE ERGEBNISAUSWERTUNG PASSIVHÄUSER HANNOVER-KRONBERG	27
3.2	DEFINITION DER BESTIMMUNGSGRÖßEN DES MODELLS FÜR DIE PASSIVHAUSSIEDLUNG	28
3.3	MODELLGLEICHUNGEN	32
3.4	TEST MIT DEN WINTERERGEBNISSEN 1999/2000	33
3.4.1	Randbedingungen im Winter 1999/2000	33
3.4.2	Modellergebnisse in der Heizperiode 1999/2000	35
3.5	ERGEBNISSE AUS DER HEIZPERIODE 2001/2002	36
3.5.1	Dokumentation der Randbedingungen 2001/2002	36
3.5.2	Modellergebnisse für die Heizperiode 2001/2002	41
3.5.2.1	Wärmebedarf bei Normalbedingungen und Langzeitmittel des Klimas Deutschland	41
3.5.2.2	Wärmebedarf bei Normalbedingungen und am Standort gemessenen Wetterdaten der hier betrachteten Messperiode 2001/2002 in Hannover	42
3.5.2.3	Berücksichtigung der Mittelwerte der aktuellen Nutzungsparameter	42
3.5.2.4	Individuelle Wärmeverluste infolge individueller Haustemperaturen	44
3.5.2.5	Querwärmeströme infolge Temperaturdifferenzen zwischen den Häusern	45
3.5.2.6	Individuelle Werte für die inneren Wärmequellen	47
3.5.2.7	Einbeziehung der Informationen zu zusätzlichen Fensteröffnungen	48
3.5.2.8	Einbeziehung der Drucktestergebnisse	49
3.5.2.9	Fehlerbetrachtung	51
3.5.2.10	Vergleich von Monatswerten zwischen Messung und Modellrechnung	53
3.5.2.11	Diskussion der Ergebnisse für den Winterbetrieb	54
3.6	MODELLVERGLEICH FÜR DEN SOMMERFALL	57
3.6.1	Modellbesonderheiten für den Sommerfall	58
3.6.2	Modellgleichungen für den Sommerfall	61

3.6.3	Randbedingungen für den Sommerfall	62
3.6.4	Validierung des Modells für den Sommerfall anhand von Messwerten.....	63
3.6.4.1	Unbewohnte Häuser	66
3.6.4.2	Weniglüfter in einem Haus ohne Sonnenschutzrollos.....	68
3.6.4.3	Viellüfter in einem Haus ohne Sonnenschutzrollos	69
3.6.4.4	Weniglüfter in einem Haus mit Sonnenschutzrollos	70
3.6.4.5	Normallüfter in einem Haus mit Sonnenschutzrollos.....	71
3.6.5	Modellvergleich für das PHPP-Sommerfallblatt.....	72
3.7	ANALYSE DER EINFLÜSSE AUF DAS SOMMERLICHE INNENKLIMA	76
3.7.1	Der Einfluss zusätzlicher sommerlicher Fensterlüftung.....	76
3.7.1.1	Nichtlüfter: auch im Sommer keine Fensteröffnung	76
3.7.1.2	Weniglüfter: im August durchschnittlich 2 Fenster gekippt.....	77
3.7.1.3	Durchschnittslüfter: im August durchschnittlich 4 Fenster gekippt	77
3.7.1.4	Viellüfter: im August alle Fenster gekippt.....	77
3.7.2	Der Einfluss der Verschattung	82
3.7.2.1	Innenliegendes Rollo (25% Reduktion).....	82
3.7.2.2	Außenliegendes Rollo, wenig genutzt (40% Reduktion)	83
3.7.2.3	Außenliegendes Rollo, konsequent genutzt (80% Reduktion)	83
4	WÄRMEVERSORGUNG 85	
4.1	WÄRMEVERTEILSYSTEM FERNWÄRME	85
4.2	VOR- UND RÜCKLAUFTEMPERATUREN.....	89
5	LITERATUR.....	91
6	ANHANG	93
6.3	PROJEKT-KURZVORSTELLUNG.....	93
6.4	ZEITVERLÄUFE DER RAUMLUFTTEMPERATUREN.....	96

1 Einleitung und Zusammenfassung

Die 32 Passivhäuser in Hannover-Kronsberg stellen die erste Passivhaussiedlung dar, bei der die komplette Wärmeversorgung aller Wohn- und Schlafräume allein über das Frischluftsystem realisiert wurde. Zusätzlich konnte erstmals anhand dieser Siedlung gezeigt werden, dass sich durch den energieeffizienten Standard eine bilanziell vollständig klimaneutrale Versorgung ökonomisch realisieren lässt. Umgesetzt wurde dies durch die im Kaufpreis des Hauses enthaltene Beteiligung (rund 1300,- €) an einer ortsnahen Windkraftanlage. Weitere Informationen über die Häuser sind dem Anhang und [Feist 2001a] zu entnehmen.

Durchgehende Messungen in der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg wurden seit dem 1. Oktober 1999 durchgeführt. Mit der neuen Messkampagne für Sommer 2001 und den Winter 2001/2002 sind nun insgesamt zwei Sommer und drei Heizperioden analysiert. Im Bericht [Peper 2001b] im Rahmen des CEPHEUS-Projektes¹ ist eine Auswertung der Messungen aus den ersten beiden Messjahren dokumentiert worden.

Mittlerweile sind 31 Häuser dauerhaft bewohnt, ein Haus dient auch weiterhin als Ausstellungs- und Gästehaus. Während der hier untersuchten dritten Heizperiode wurde das 31. Haus bezogen, weshalb für den Winter 2001/2002 insgesamt 30 Häuser als durchgehend bewohnt ausgewertet werden konnten. Mit dem dritten Messjahr konnte die Messdatenerfassung in einem Zeitraum mit stabilen und ungestörten Bedingungen fortgesetzt werden: Die Bewohnerinnen und Bewohner sind mit ihren Häusern vertraut, die Technik hat einige kleinere „Kinderkrankheiten“ überwunden und die Einstellungen konnten noch weiter optimiert werden. Damit können Auswirkungen der unterschiedlichen Nutzereinflüsse wie Raumtemperatureinstellungen, Elektroverbräuche und Belegungsdichte besser untersucht werden.

Dieser Endbericht zur Analyse im dritten Betriebsjahr teilt sich in die drei Hauptteile: Messdatenauswertung, Modellrechnung sowie Ausführungen zur Wärmeversorgung.

Messdatenauswertung

Die Messdatenauswertung zeigt, dass in der dritten Heizperiode vergleichbar niedrige Heizwärmeverbräuche vorliegen wie in der vorangegangenen. Es wurde ein durchschnittlicher Heizwärmeverbrauch von 13,3 kWh/(m²a) gemessen. Damit liegt der gemessene Verbrauchswert nahe am projektierten Wert. Es kann nun davon ausgegangen werden, dass er dauerhaft so niedrig bleibt. Gegenüber der WSV 1995 ergibt sich eine Heizenergieeinsparung von 88 %. Die gemessenen mittleren Heizleistungen sind mit maximal 7,2 W/m² als sehr gering einzustufen und entsprechen fast genau dem projektierten Wert. Die Raumlufttemperaturen lagen im Mittel mit 22,0 °C (1.10.2001 bis 30.4.2002) höher als im ersten und zweiten Winter. Die Korrelation zwischen der Innen- und der Außentemperatur ist wieder nur sehr

¹ CEPHEUS: Cost Efficient Passiv Houses as European Standards, durch die Europäische Union im Rahmen des EU-Thermie-Programms gefördertes Demonstrationsprojekt bei dem an 14 Standorten in in fünf europäischen Ländern insgesamt 221 Wohneinheiten gebaut wurden.



schwach, daraus kann direkt auf sehr geringe zusätzliche winterliche Fensterlüftung geschlossen werden.

Die sommerlichen Durchschnittstemperaturen liegen mit 23,8 °C nur um 0,3 K höher als im Sommer 2000. Es hat sich gezeigt, dass auch in den Hitzeperioden niedrige sommerliche Innentemperaturen eingehalten werden konnten.

Die Fernwärmeverbräuche zur Warmwasserbereitung sind gegenüber dem ersten Jahr leicht angestiegen und liegen nun bei 10,8 kWh/(m²a). Die restliche Energie wird durch die hauseigenen thermischen Solaranlagen geliefert. Die Stromverbräuche zeigen mit 22,9 kWh/(m²a) fast das gleiche Ergebnis wie im ersten Messjahr. Damit wurden im Bereich der Stromverbräuche Einsparungen von 30 % erzielt, was besonders eindrucksvoll ist, da auch der gesamte Hilfsstromverbrauch der Lüftungsanlagen in der Bilanz des Haushaltsstromes enthalten ist. Die Stromverbräuche von einigen Lüftungsgeräten wurden zusätzlich separat gemessen: Es ergibt sich ein durchschnittlicher Jahresstromverbrauch von 2,9 kWh/(m²a) für die Geräte inkl. Ventilatoren, Regelung und elektrischem Frostschutz. Die Effizienz des Lüftungssystems mit Wärmerückgewinnung aus der Abluft ist mit einer energetischen Arbeitszahl von 16,5 ausgesprochen gut und wird von keinem anderen haustechnischen System auch nur annähernd erreicht.

Modellrechnung

Der Haupteinfluss der Verbrauchsstreuung der Heizwärmeverbräuche im Winter liegt in den unterschiedlichen Temperaturniveaus der Häuser. Zur Erklärung der verbleibenden Unklarheiten wurde der traditionelle Weg der nur begrenzt erfolgreichen Korrelationsanalyse verlassen und ein thermisches 32-Zonen-Modell aufgebaut. Dieses berücksichtigt auch die Querwärmeströme durch die Haustrennwände. Das hohe Bestimmtheitsmaß von 75 % zeigt die gute Eignung des verwendeten Modells. Die nutzungsbedingte Streuung der Heizwärmeverbrauchswerte folgt in guter Näherung einer Normalverteilung. Die Streuung lässt sich nach der vorgelegten Analyse durch den Einfluss der Nutzer über folgende Zusammenhänge zu 75 % erklären:

- eingestellte Innentemperaturen und deren Einfluss auf die Wärmeverluste,
- eingestellte Innentemperaturen und dadurch bedingte Querwärmeströme zwischen den Häusern,
- Höhe der individuellen inneren Wärmequellen,
- Befragungs- und Beobachtungsergebnisse zum Fensteröffnungsverhalten.

Die in der Siedlung vorkommenden individuellen Schwankungen durch Nutzereinflüsse führen auch im extremsten Einzelfall nicht zu einer Beeinträchtigung der Funktion der Gebäude als Passivhaus. Insgesamt kann daher auf der Basis der vorliegenden Untersuchung festgestellt werden, dass das übliche Spektrum des Nutzerverhaltens für die Funktion des Passivhausstandards unkritisch ist. Selbst wenn extreme Nutzungsbedingungen auftreten, wie sie in der Siedlung tatsächlich vorgekommen, gefährden sie das Konzept nicht, führen jedoch u.U. zu individuell deutlich höheren Energieverbräuchen. Diese waren aber immer noch in allen Einzelfällen niedriger, als das typische Verbrauchsniveau in Niedrigenergiehäusern. Der absolut höchste in der Siedlung beobachtete Heizwärmeverbrauch liegt bei 32 kWh/(m²a) (gutes Drei-Liter-Haus-Niveau), der Durchschnitt liegt mit 13,3 kWh/(m²a) deutlich unter der Hälfte dieses Wertes.

Das thermische 32-Zonen-Modell wurde für die Untersuchung des Sommerzeitraumes angepasst und erweitert. Für den Sommerfall ergibt sich ein sehr hoher Korrelationskoeffizient zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen von 92,8 %. Bei der Untersuchung der Messdaten des Sommers 2001 zeigt sich eine Übertemperaturhäufigkeit von 6,6 % bezogen auf 25 °C (Tagesmittelwerte). Im Mittel aller bewohnten Häuser führt eine um 1 K höhere Außenlufttemperatur zu einem mittleren Anstieg der Innenraumtemperatur von nur 0,24 K: D.h. im Innenraum der Passivhäuser reduziert sich der sommerliche Temperaturanstieg auf ungefähr ein Viertel.

Die Betrachtung einiger Fälle signifikanter Abweichung im Vergleich von Messung und Rechnung kann eindeutigen Unterschieden im Nutzerverhalten zugeordnet werden. Es zeigt sich deutlich der Einfluss des unterschiedlichen Lüftungsverhaltens auf die sommerlichen Temperaturen in den Häusern. Wie erwartet, ergeben sich die geringsten sommerlichen Raumlufttemperaturen für die Häuser mit außenliegender Verschattungsvorrichtung und angepasstem Sommerlüftungsverhalten. Hier liegt die Übertemperaturhäufigkeit bei nur 1,9 %.

Mit dem so validierten 32-Zonen-Modell ist es möglich, die unterschiedlichen Einflüsse bei der Feldbeobachtungen zu separieren und deren Auswirkungen zu studieren. Mit dem Modell wurde der Einfluss der sommerlichen Fensterlüftung und der Verschattung in unterschiedlichen Varianten untersucht. In Übereinstimmung mit der Praxis zeigt sich, dass in Passivhäusern ohne weiteres ohne Kühlung und mit einfachen Maßnahmen ein sehr gutes sommerliches Innenklima gewährleistet werden kann. Insbesondere sind hier die oben bereits genannten Strategien der Lüftung und außenliegenden Verschattung wirksam. Es hat sich für die hier untersuchten Gebäude gezeigt, dass auch nur mit einer dieser beiden Maßnahmen passable Ergebnisse erreichbar sind:

- Viellüfter ohne Nutzung der Verschattung: Übertemperaturhäufigkeit 3,8 %
- Weniglüfter mit konsequenter Außenrollonutzung: Übertemperaturhäufigkeit 4,7 %

Das Sommerfall-Modell entspricht im Kern dem im Passivhaus Projektierungs Paket [PHPP 2002] implementierten Verfahren. Mit den Messwerten aus dem Sommer 2001 wurde in der Untersuchung dieses Sommerfallverfahren überprüft. Das vereinfachte Modell gibt im Rahmen der erreichbaren Fehlergrenzen die Werte nach dem detaillierteren Modell brauchbar wieder. Bei sehr hohen Übertemperaturhäufigkeiten ($h_{\vartheta \geq 25^\circ\text{C}} > 15\%$) wird $h_{\vartheta \geq 25^\circ\text{C}}$ jedoch unterschätzt; dies ist unerheblich, weil in solchen Fällen ohnehin Maßnahmen gegen sommerliche Überhitzung ergriffen werden müssen. Bei kleinen $h_{\vartheta \geq 25^\circ\text{C}}$ neigen die Modellrechnung und das vereinfachte Verfahren eher zu einer Überschätzung; das ist im Sinne einer sicheren Abschätzung sinnvoll.

Wärmeversorgung

Bei der Fernwärmeversorgung der Siedlung waren Regelungsprobleme bei der Wärmeverteilung nach der Übergabestation festgestellt worden. Diese konnten durch



Änderung der Regelung und durch die Abkopplung der Pufferspeicher in den beiden Technikhäusern beseitigt werden. Damit werden sich die Verteilungsverluste der Systeme weiter reduzieren.

Exemplarisch für ein Endhaus wurden die Vor- und Rücklauftemperaturen dargestellt. Daraus sind die Zeiten der vollständigen Abtrennung des hauseigenen Systems vom Versorgungsnetz erkennbar.

Fazit

Plakativ titelte die Presse bereits im März 2000 über die Passivhaussiedlung: „Genial - Haus ohne Heizung, aber keiner bibbert“. Mit den Analysen zum dritten Messjahr kann diese Aussage zur energieeffizienten Passivhaussiedlung wissenschaftlich untermauert werden.

2 Messdatenauswertung

Die vorliegende Messdatenauswertung der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg im dritten Jahr behandelt die Bereiche der thermischen Behaglichkeit, die Wärmeverbräuche für Heizung und Warmwasserbereitung, die Stromverbräuche sowie die Effizienz der Lüftungsgeräte.

2.1 Thermische Behaglichkeit

Zur Überprüfung der thermischen Behaglichkeit in den Passivhäusern wurden die Raumlufttemperaturen in allen 32 Häusern getrennt nach EG und OG gemessen und ausgewertet. Im Anhang sind die Temperaturverläufe jeweils von den acht Häuser einer Zeile getrennt nach Ober- und Untergeschoss sowie nach Sommerzeitraum 2001 und Winterzeitraum 2001/2002 dargestellt. Zusätzlich ist in den Diagrammen jeweils der Temperaturmittelwert über aller Häuser der Zeile jeweils im EG bzw. OG eingetragen. Zur besseren Übersicht sind jeweils zwei Diagramme der gleichen Bezugsflächen (z.B. EG Reihe 9), einmal für den Sommer- und einmal für den Winterzeitraum auf einer Seite angeordnet.

Auffällig ist, dass die Temperaturverläufe im Winterzeitraum deutlich geringere Schwankungen aufweisen als im Sommerzeitraum. Die Ursache liegt in der stärkeren winterlichen Entkopplung von der Außenluft durch die überwiegend geschlossenen Gebäudehüllen (Fenster werden überwiegend geschlossen gehalten) und die thermostatisch geregelte Beheizung der Häuser.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Gebäude alle mit relativ hohen Raumlufttemperaturen in die Heizperiode 2001/2002 eingetreten sind. Diese noch sommerlichen Temperaturen Anfang Oktober 2001 reduzieren sich in den Hauszeilen verschieden stark auf die von den Bewohnern gewünschten Niveaus. Der Verlauf ist besonders gut in Reihe 13 im EG zu erkennen.

In Reihe 9 ist im Winter ein Haus mit zeitweise niedrigeren Temperaturen (minimal 16,2 °C) zu erkennen. Dabei handelt es sich um ein erst während des Winters bezogenes Gebäude. Nach dem Bezug des Hauses liegen die Temperaturen deutlich höher. In Reihe 10 sind in zwei Häusern - allerdings nur im OG - Temperaturen bis minimal 15,8 °C gemessen worden. Die Temperaturmessstelle im OG befindet sich im Nordzimmer, welches in den meisten Wohneinheiten als Elternschlafzimmer genutzt wird. Kurzzeitige Temperaturminima sind plausibel mit winterlicher Fensterlüftung in den Schlafzimmern zu erklären. Nach den Temperaturen bewertet fallen diesbezüglich nur vier Häuser mit winterlicher Zusatzlüftung über die Fenster auf. In der ersten Passivhaussiedlung in Wiesbaden-Dotzheim ist bei genauerer Untersuchung der Fensteröffnungen eine höhere Tendenz festgestellt worden [Ebel 2002]. Dort lag der Anteil der „Nachtlüfter“ mit knapp 30 % deutlich höher als hier aus den Temperaturkurven abgeleitet wurde (13% bei 4 von 30 bewohnten Häusern).

Die sommerlichen Temperaturen liegen als Mittelwert aller bewohnten Häuser (27 Reiheneinheiten) bei 23,9 °C im EG und 23,7 °C im OG. Der gesamte Mittelwert über EG und OG liegt bei 23,8 °C und damit um 0,3 K höher als im Sommer 2000 (vergl. [Peper 2001a]). Der höchste Tagesmittelwert wurde am 15.08.2002 mit 27,1 °C gemessen.

Die Tagesmittelwerte der bewohnten Häuser der vier Reihen liegen im Winter zwischen 19,9 und 23,9 °C. Damit wird die individuelle Regelung je nach Bedarf der Nutzer deutlich. Der winterliche Mittelwert aller bewohnten Häuser in diesem Zeitraum (30 Gebäude) liegt im Winter bei 22 °C (vergl. Abbildung 2).

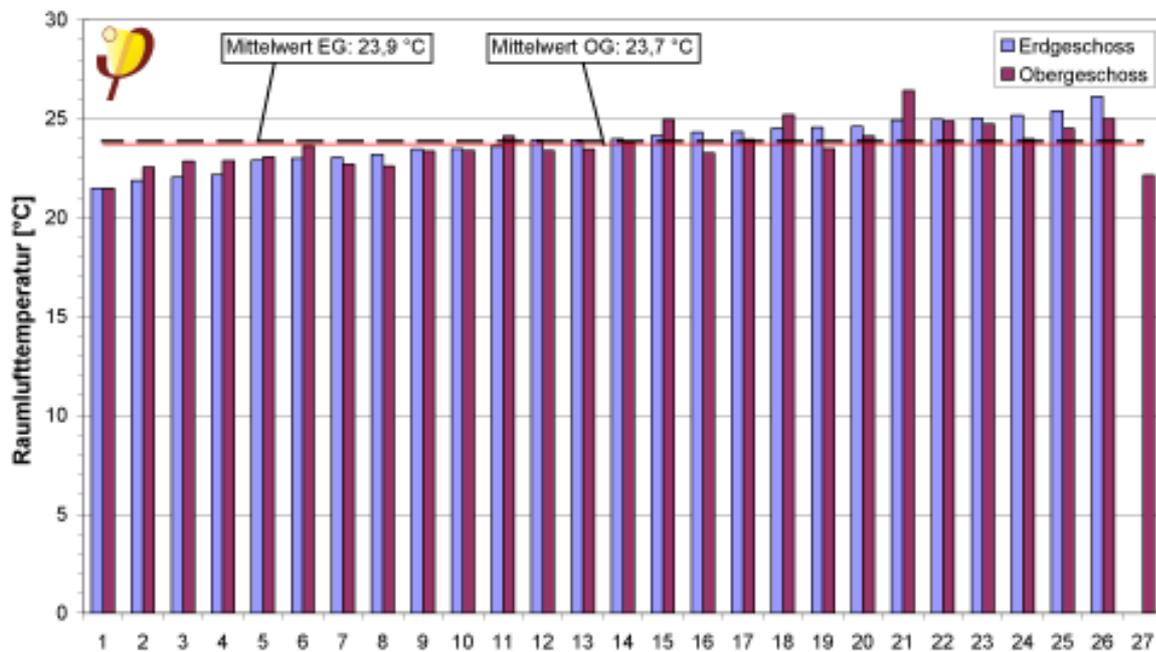


Abbildung 1: Raumlufthtemperaturen der im Sommer 2001 (01.04. bis 30.09.2001) bewohnten 27 Passivhäuser am Kronsberg. Es sind die mittleren Temperaturen eines jeden Hauses getrennt nach EG und OG dargestellt. Die aufsteigende Sortierung erfolgte nach den EG Temperaturen. Die angegebenen Mittelwerte von EG und OG weichen nur um 0,2 K voneinander ab. Ein Haus ist mit nur einem Temperaturmesssensor ausgestattet (laufende Nr. 27).

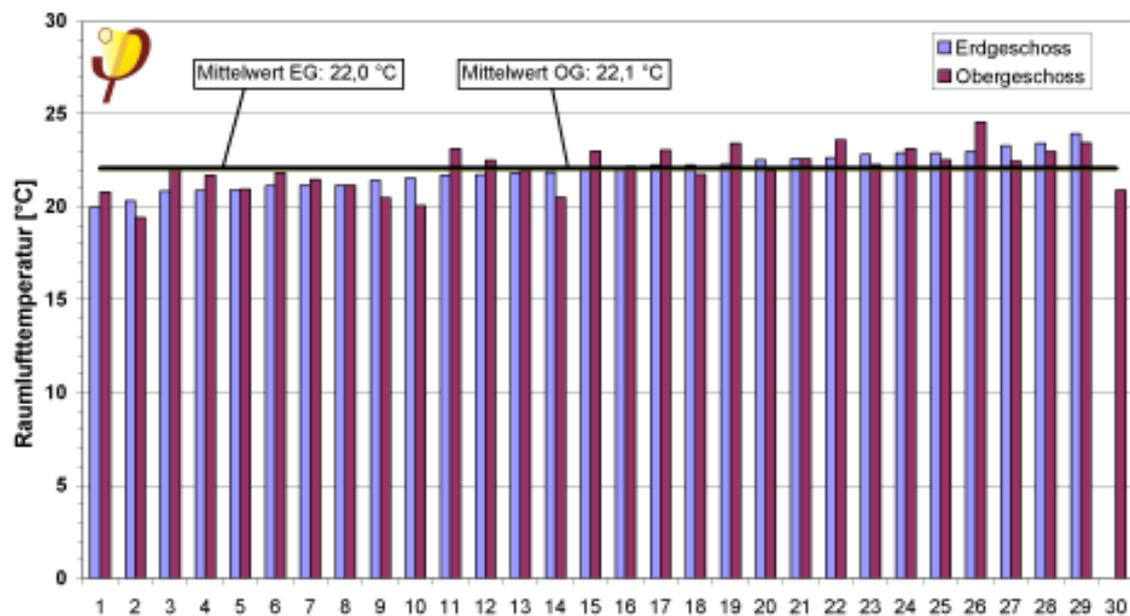


Abbildung 2: Raumlufttemperaturen der im Winter 2001/2002 (01.10. bis 01.04.2002) bewohnten 30 Passivhäuser am Kronsberg. Es sind die mittleren Temperaturen eines jeden Hauses getrennt nach EG und OG dargestellt. Die aufsteigende Sortierung erfolgte nach den EG Temperaturen. Die angegebenen Mittelwerte liegen bei 22 °C und damit relativ hoch. Die EG- und OG-Temperaturen weichen nur um 0,1 K voneinander ab. Ein Haus ist mit nur einem Temperatursensor ausgestattet (laufende Nr. 30).

2.1.1 Übersicht Raumluft-Temperaturverläufe der Heizperiode

Zur Übersicht sind die tagesmittleren Temperaturverläufe aller 30 im Winter 2001/2002 bewohnten Häuser in einer Grafik abgebildet (Abbildung 3). Dabei sind jeweils die Temperaturverläufe von EG und OG dargestellt. Die Tagesmittelwerte wurden flächengewichtet errechnet und liegen zwischen 20,8 und 23,6 °C. Als gesamter Mittelwert aller bewohnten Häuser ergibt sich für den untersuchten Winter (1.10. bis 30.4.) eine Temperatur von **22,0 °C**. Damit liegt der Wert um 0,8 K über der Mitteltemperatur aus dem Winter 1999/2000 und um 0,2 K über der des Winters 2000/2001.

Der geringste Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur des Winters wurde mit -6,9 °C am 23.12.2001 gemessen. Der flächengewichtete Temperaturmittelwert in den 30 dauerbewohnten Häusern liegt an diesem Tag bei 21,3 °C. Im kältesten Haus wurden 17,4 °C und im wärmsten Haus wurden 24,7 °C gemessen (beides OG). Bei dem minimalen Messwert des Tages handelt es sich um eines der Häuser, welches bereits weiter oben als Haus mit winterlicher zusätzlicher Schlafzimmerfensterlüftung beschrieben wurde. Dieser niedrige Messwert muß daher als beabsichtigt eingestuft werden und stellt keine Komfortbeeinträchtigung dar.

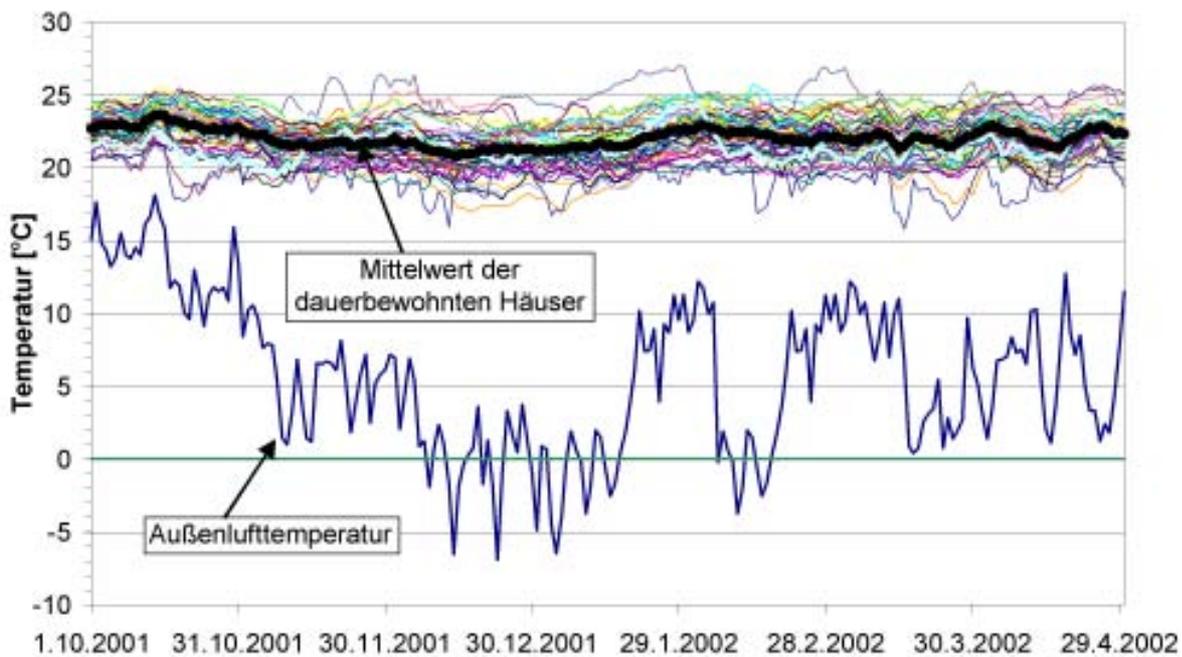


Abbildung 3: Flächengewichtete tagesmittlere Lufttemperaturen in EG und OG der dauerbewohnten Häuser sowie Außenlufttemperaturen im Winter 2001/2002 (1.10.2001 bis 30.4.2002).

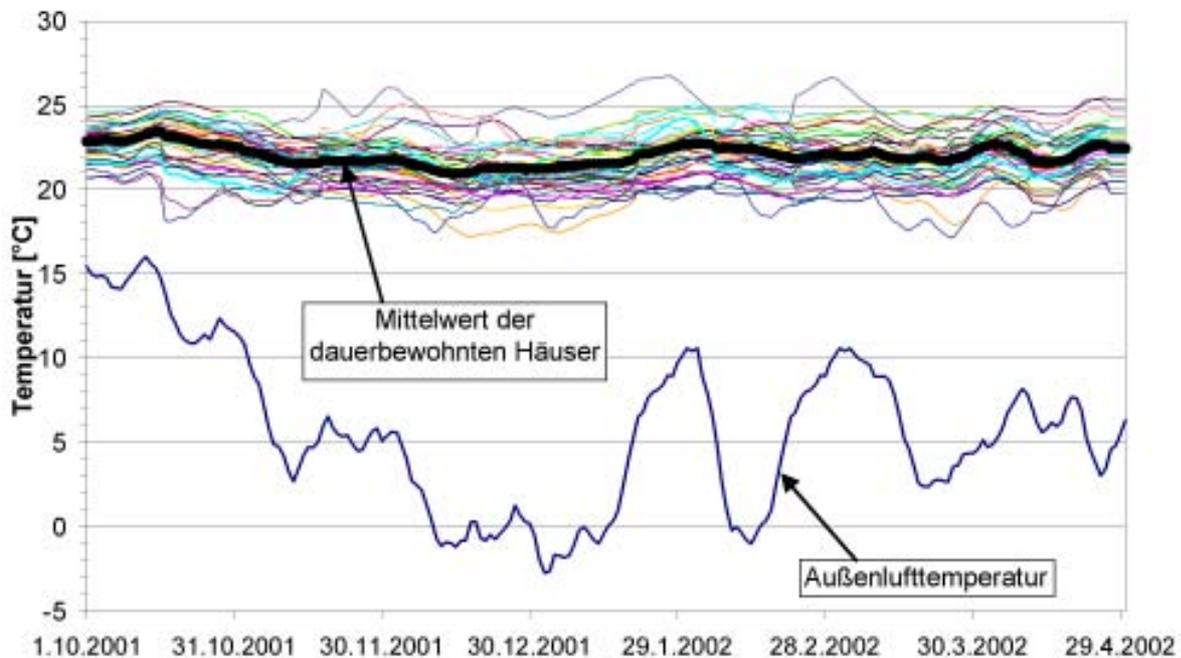


Abbildung 4: Flächengewichtete gleitende Wochenmittelwerte der tagesmittleren Lufttemperaturen in EG und OG der dauerbewohnten Häuser sowie der Außenlufttemperatur im Winter 2001/2002 (1.10.2001 bis 30.4.2002).

Zur besseren Übersicht sind die Temperaturverläufe im Winter aus Abbildung 3 als gleitende Wochenmittelwerte dargestellt (Abbildung 4).

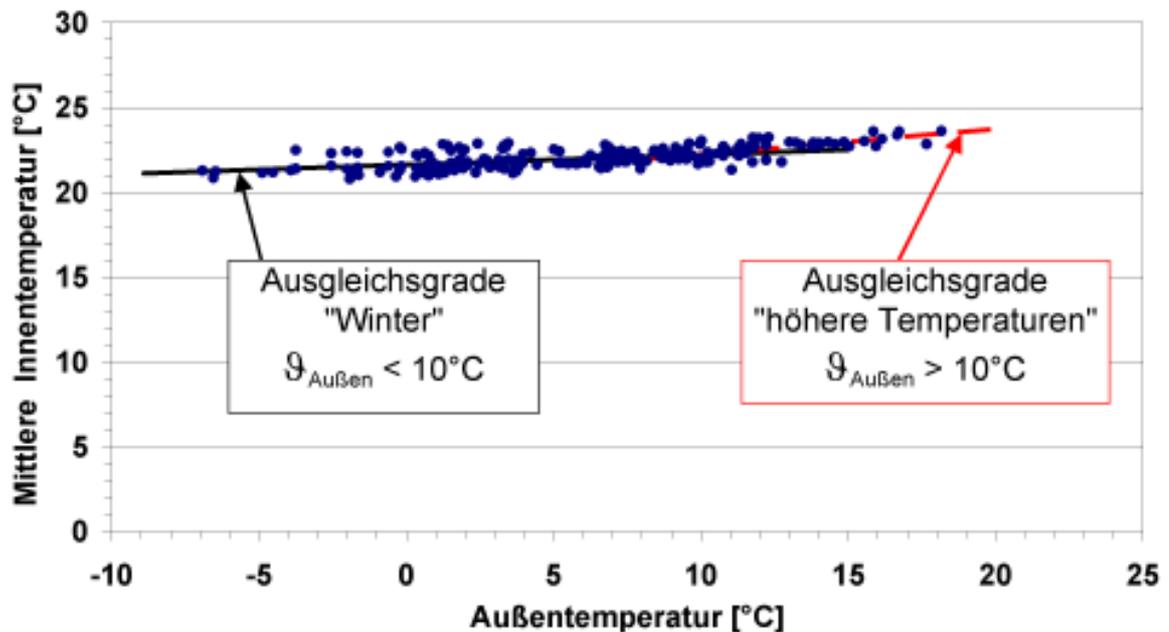


Abbildung 5: Korrelation zwischen Außentemperatur und Raumlufttemperatur (Tagesmittelwerte) der 30 dauerhaft bewohnten Häuser im Winter 2001/2002 (01.10.2001 bis 30.04.2002). Dargestellt sind die Ausgleichsgeraden für Außentemperaturen unter und über 10 °C.

Bei der Untersuchung der Korrelation zwischen Raumlufttemperaturen der bewohnten Passivhäuser und den Außenlufttemperaturen zeigt sich eine nur sehr schwache Abhängigkeit für Temperaturen unter +10 °C. Der Temperaturanstieg pro Kelvin Temperaturerhöhung der Außenluft beträgt 0,06 K. Im Winter 1999/2000 lag er mit 0,02 K noch niedriger [Peper 2001b]. Die Ausgleichsgerade für höhere Temperaturen verfügt hier über eine größere Steigung, was allerdings nicht von Bedeutung ist, da nur der Winterzeitraum dargestellt wurde.

2.2 Wärmeverbräuche

Die Auswertung der Wärmeverbräuche teilt sich in den Bereich der Heizwärmeverbräuche und der Fernwärmeverbräuche für die Warmwasserbereitung. Die Versorgung erfolgt für beide durch die zwei Fernwärmeübergabestationen in den Technikhäusern.

2.2.1 Heizwärmeverbrauch

Die Messung der Heizwärmeverbräuche aller 32 Passivhäuser ergibt in dem Jahreszeitraum 01.05.2001 bis zum 30.04.2002 einen Mittelwert von 13,3 kWh/(m²a). Die Werte der einzelnen Häuser liegen in breiter Streuung zwischen 3,6 bis 33,7 kWh/(m²a) und damit in einem Feld von -73 bis +153 % um den Mittelwert. Bei den Messwerten handelt es sich um die Verbräuche in den einzelnen Passivhäusern, also um Nutzwärme ohne die Verteilverluste ab den beiden zentralen Fernwärme-

übergabestationen. Diese wurden bereits in [Peper 2001b] untersucht und detailliert dargestellt.

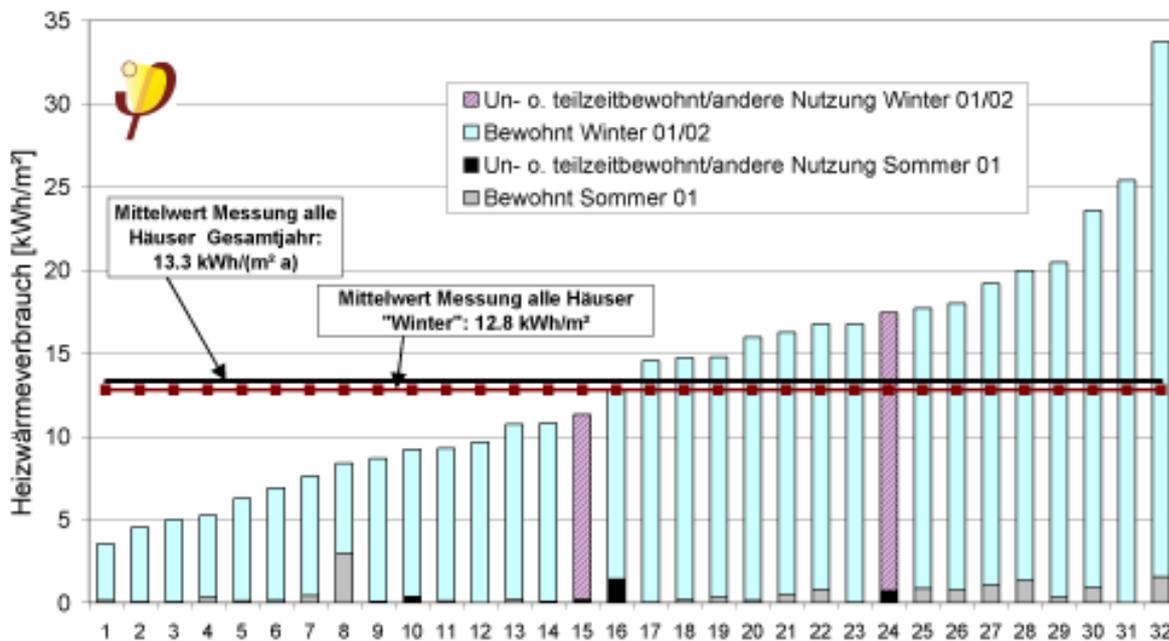


Abbildung 6: Spezifische Heizwärmeverbräuche (Nutzwärme) aller 32 Passivhäuser im dritten Messjahr (01.05.2001 bis 30.04.2002). Für jedes Haus ist der Sommer- und der Winterverbrauch markiert (Stapelbalken), sowie auch die Nutzung der Häuser. Die Mittelwerte für das gesamte Jahr sowie den Winter beziehen sich auf alle Häuser.

Die beiden im Winter unbewohnten bzw. zeitweise als Gästehaus und Ausstellungsraum genutzten Häuser liegen im Mittelfeld der dauerbewohnten Häuser. Trotz der großen Schwankungsbreite im Heizwärmeverbrauch funktionieren alle Gebäude bei hohem Komfort als Passivhäuser mit reiner Zuluftheizung sowie dem Zusatzheizkörper im Badezimmer.

In der Heizperiode vom 01.10.2001 bis zum 30.04.2002 wurde im Mittel ein Verbrauch von 12,8 kWh/m² gemessen. Damit hat sich der „ungewollte“ Sommerverbrauch (vergl. [Peper 2001b]) auf 0,5 kWh/m² reduziert. Im vorherigen Sommer 2000 lag er mit 1,1 kWh/m² noch um mehr als doppelt so hoch. Dies zeigt, dass die Nutzer sich noch besser mit den Häusern vertraut gemacht haben und die Probleme in der Handhabung deutlich reduziert werden konnten. Erstaunlich ist, dass es noch immer ein Haus gibt (hier laufende Nr. 8) bei dem 36 % der Heizwärme im Sommerzeitraum verbraucht wurden, insgesamt über das Jahr aber ein sehr geringer Verbrauch vorliegt. In der Tendenz sind die Sommerverbräuche eher in den Häusern festgestellt worden, die im oberen Drittel des Verbrauchsfeldes liegen. In diesen Häusern wird entweder in der Übergangszeit noch gewollt geheizt oder es liegen Mängel in der Feinabstimmung der Regelung vor. Aus einigen Häusern wurden auch in der dritten Heizperiode von kleineren technischen „Schwachpunkten“ berichtet (Regelung reagierte nicht auf reduzierte Einstellung), welche sich aber in Eigenleistung beheben ließen.

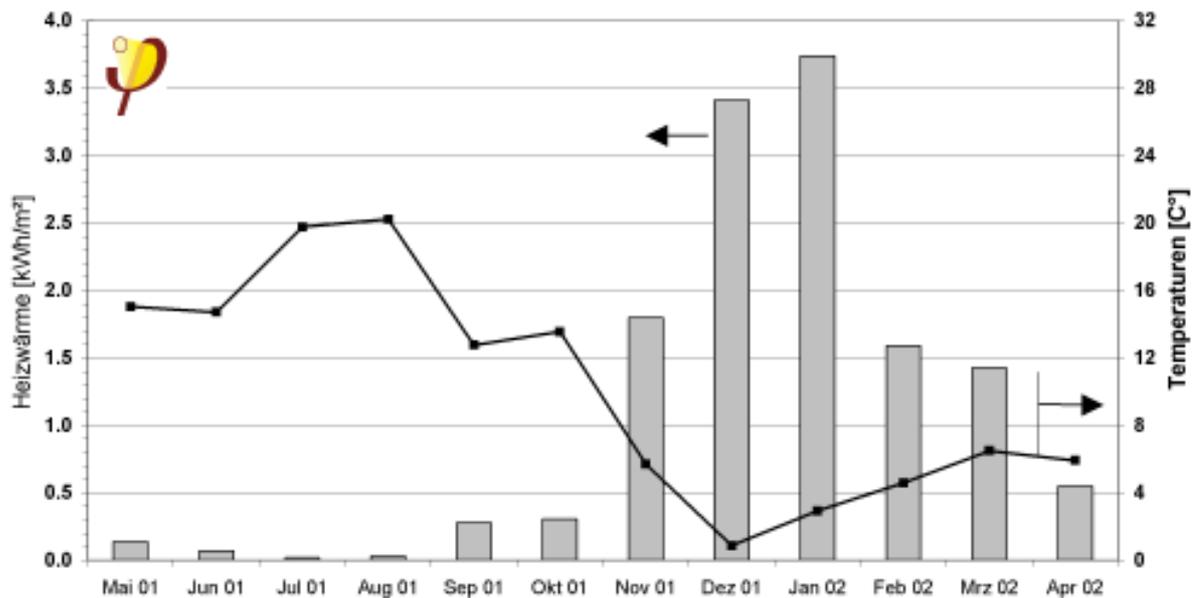


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen den spezifischen monatlichen Heizwärmeverbräuchen (Nutzwärme) aller 32 Passivhäuser und den mittleren Außentemperaturen vom 01.05.2001 bis zum 30.04.2002. Die Pfeile in der Grafik weisen auf die abzulesende Achse hin.

Der Zusammenhang zwischen dem spezifischen Wärmeverbrauch der 32 Häuser und den mittleren monatlichen Außentemperaturen ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Kernheizzeit beschränkt sich auf die Monate November bis März. Auffällig ist, dass bei etwa gleichen mittleren Außentemperaturen im November 2001 und April 2002 deutlich unterschiedliche Heizwärmeverbräuche vorliegen. Der Wert im November 2001 ist mit $1,8 \text{ kWh/m}^2$ dreimal so hoch wie der im April 2002. Bei der Betrachtung der direkten Solarstrahlung kann die Ursache erkannt werden: diese ist im November um mehr als den Faktor 3 kleiner als im April ($16,5 \text{ W/m}^2$ zu $57,8 \text{ W/m}^2$). Die Monatsbilanz der PHPP-Berechnung [PHPP] für ein typisches Passivhaus der Siedlung zeigt diese Tendenz noch deutlicher: Für November ergibt sich dort ein rechnerischer Wert von $1,5 \text{ kWh/m}^2$ und für den April von $0,0 \text{ kWh/m}^2$. Hinzu kommt aber noch die hohe Zeitkonstante von mehreren Wochen, die daraus resultierenden jahreszeitlichen Speichereffekte werden im Monatsverfahren nicht berücksichtigt, bei den Messwerten sind sie aber deutlich zu erkennen.

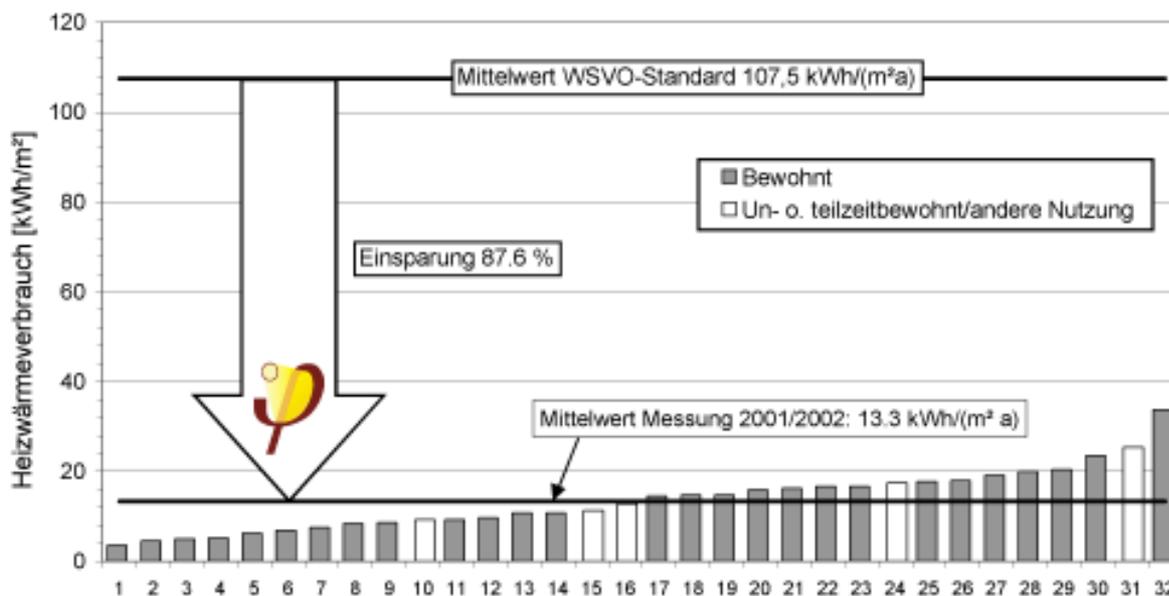


Abbildung 8: Vergleich der spezifischen Heizwärmeverbräuche der 32 Passivhäuser für das Jahr 01.05.2001 bis zum 30.04.2002 mit dem Baustandard der WSVO 1995 (jeweils Nutzwärme). Zur Zeit der Errichtung der Siedlung stellte die WSVO 1995 die gültige Baunorm dar.

Die drastische Heizwärmeeinsparung durch den Passivhausstandard wird in Abbildung 8 beim Vergleich der gemessenen Jahresverbrauchsdaten mit den Anforderungen des Baustandards der Wärmeschutzverordnung von 1995 deutlich. Wäre die Siedlung in diesem Standard errichtet worden, würde sich ein mittlerer Heizwärmebedarf von 107,5 kWh/(m²a) ergeben [Peper 2001b]. Dem gegenüber weist der gemessene Heizwärmeverbrauchswert eine **Einsparung von 88 %** aus. Die Schwankungsbreite der Verbräuche sowie die weiter vorn diskutierten geringen Sommerverbräuche treten bei diesem Maßstab völlig in den Hintergrund.

Von Interesse ist auch die Veränderung der gemessenen Wärmeverbräuche zwischen den drei bisherigen Heizperioden. Dazu werden die Messwerte aller 32 Häuser aus der dritten Heizperiode mit den Mittelwerten der beiden Vorjahre verglichen. Als Heizperiode gilt hier jeweils der Zeitraum vom 1. Oktober bis zum 30 April. In Abbildung 9 ist deutlich der Effekt des „ersten Jahres“ erkennbar, wie er auch in zahlreichen anderen Projekten festgestellt werden konnte. Die Verbräuche lagen in der ersten Heizperiode bei 14,9 und in der zweiten bei 13,3 kWh/(m²a). Der „Mehrverbrauch“ von etwa 2 kWh/(m²a) in der ersten Heizperiode hat seine Gründe in noch nicht optimalen Einstellungen der Anlagen, Unsicherheiten bzw. Unklarheiten bei den Bewohnern („Fehlbedienungen“), in noch nicht behobenen technischen Mängeln (vergl. auch [Peper 2001b]) sowie in der Trocknungsenthalpie von feucht eingebrachten Baustoffen. Die Mittelwerte der 2. und 3. Heizperiode liegen sehr dicht beieinander und zeigen, dass die Verbräuche sich etwa bei 13 kWh/(m²a) eingependelt haben.

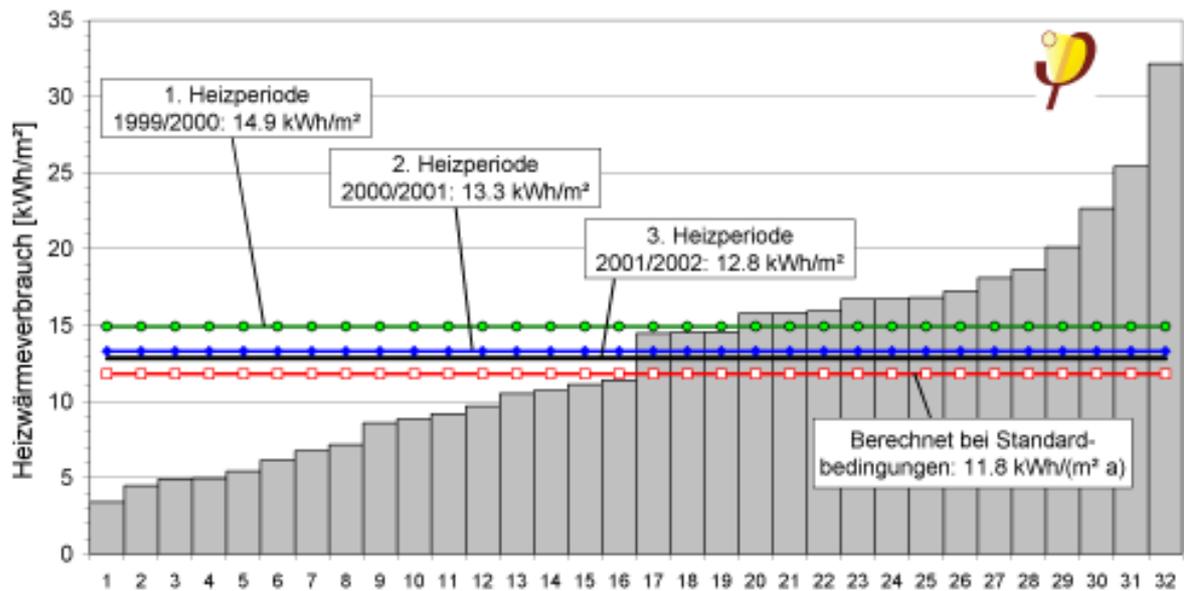


Abbildung 9: Vergleich der gemessenen Heizwärmeverbräuche (Nutzwärme) in den drei ersten Heizperioden sowie Einzelwerten der dritten Heizperiode (jeweils 01.10. bis 30.04.) für alle 32 Passivhäuser (immer Nutzwärme). Ebenfalls dargestellt ist der projizierte Heizwärmebedarf (Quadratsymbol).

Die Ergebnisse der dritten Heizperiode liegen nur noch 1 kWh/(m²a) höher als der berechnete theoretische Mittelwert des Heizwärmebedarfs von 11,8 kWh/(m²a). Diese geringe Abweichung zeigt die sehr gute Eignung der Berechnungsmodelle zur Passivhausprojektierung [PHPP].

In Abbildung 10 sind alle in den drei Heizperioden dauerbewohnten Häuser mit ihren Einzelwerten dargestellt. An der Grafik ist bei fast allen Häusern der Effekt des „ersten Jahres“ sichtbar (jeweils die erste weiße Säule). Die 3. Heizperiode zeigt gegenüber der 2. Heizperiode bei 14 Häusern einen Anstieg und bei 8 eine Reduzierung der Heizwärmeverbräuche. Der Heizwärmeverbrauch des Hauses mit der laufenden Nummer 5 muß im 2. Jahr als Ausreißer gewertet werden (Fehlbedienung). Der Verbrauch von Haus 22 scheint sich, entgegen dem allgemeinen Trend, nach dem ersten Jahr bei deutlich höheren Verbräuchen eingependelt zu haben.

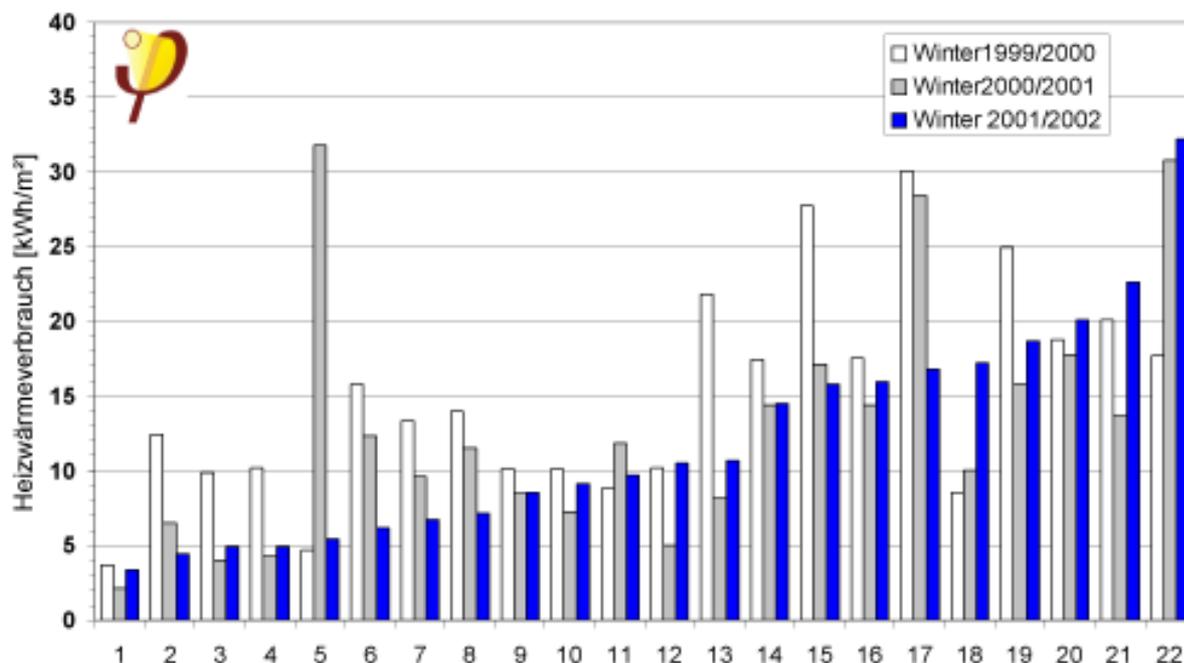


Abbildung 10: Vergleich der gemessenen Heizwärmeverbräuche (Nutzwärme) in den drei ersten Heizperioden (jeweils 01.10. bis 30.04.) als jährliche Einzelwerte der 22 dauerbewohnten Passivhäuser. Die Daten sind aufsteigend sortiert nach Einzelwerten der dritten Heizperiode.

Zusätzlich zu den gemessenen Nutzenergieverbräuchen ist ein Teil der Wärmeabgabe der Rohrleitungen in den Häusern während der Heizzeit nutzbar, da die Vor- und Rücklaufleitungen in den Technikgeschossen verlaufen. Deren Wärmeabgabe kommt jeweils dem Haus zu einem großen Teil „nutzbar“ zugute. Dieser nutzbare Anteil wird in [Peper 2001] hergeleitet und berechnet. Er liegt (umgerechnet auf den Zeitraum Oktober bis April) bei $3,9 (\pm 1,5)$ kWh/m². Damit ergibt sich für die dritte Heizperiode ein Wert von $12,8 + 3,9 = 16,7 (\pm 1,9)$ kWh/m².

2.2.2 Heizleistungen

Die theoretische Heizgerade der Passivhäuser bestimmt sich aus der Qualität der Gebäudehülle (Dämmstandard), dem Ansatz für die internen Wärmequellen sowie der Innentemperatur. Die mittlere flächengewichtete Innentemperatur der 30 dauerbewohnten Häuser lag in der 3. Heizperiode bei 22,0 °C. Die Heizkurve dient der Einordnung der mittleren Tagesleistungen der Passivhäuser. Ohne Solareinstrahlung müssten theoretisch alle tagesmittleren Heizleistungen genau auf der Geraden liegen (stationäre Betrachtung). Durch den Einfluß der Solarstrahlung „fallen“ die gemessenen Heizleistungen mehr oder weniger von der Geraden herunter.

An der Heizgeraden in Abbildung 11 lässt sich ablesen, dass die Heizgrenztemperatur (Schnittpunkt der Geraden mit der Abszisse) bei etwa 17 °C liegt. Die Messdaten zeigen nennenswerte Heizleistungen nur unterhalb von ca. 12,7 °C. Nur eine der tagesmittleren Heizleistungen liegt nennenswert über der Heizgeraden. Im Vergleich zu den Werten aus den vorangegangenen Jahren spricht dies ebenfalls für

das Erreichen des projektierten Zustandes. Auch die gemessene maximale mittlere Heizleistung liegt mit $7,2 \text{ W/m}^2$ fast exakt auf der Grenzgeraden der theoretischen maximalen Heizlast für die Gebäude ($7,1 \text{ W/m}^2$).

Bei der theoretischen Heizgeraden sind keine Anheizvorgänge (z.B. nach nicht-empfohlener Abschaltung der Heizung während eines Winterurlaubs) und keine erhöhten Heizleistungen (z.B. wegen geöffneter Fenster) enthalten. Die Messwerte aus der 3. Heizperiode zeigen, dass diese Vorgänge im Mittel keinen bedeutenden Einfluß haben.

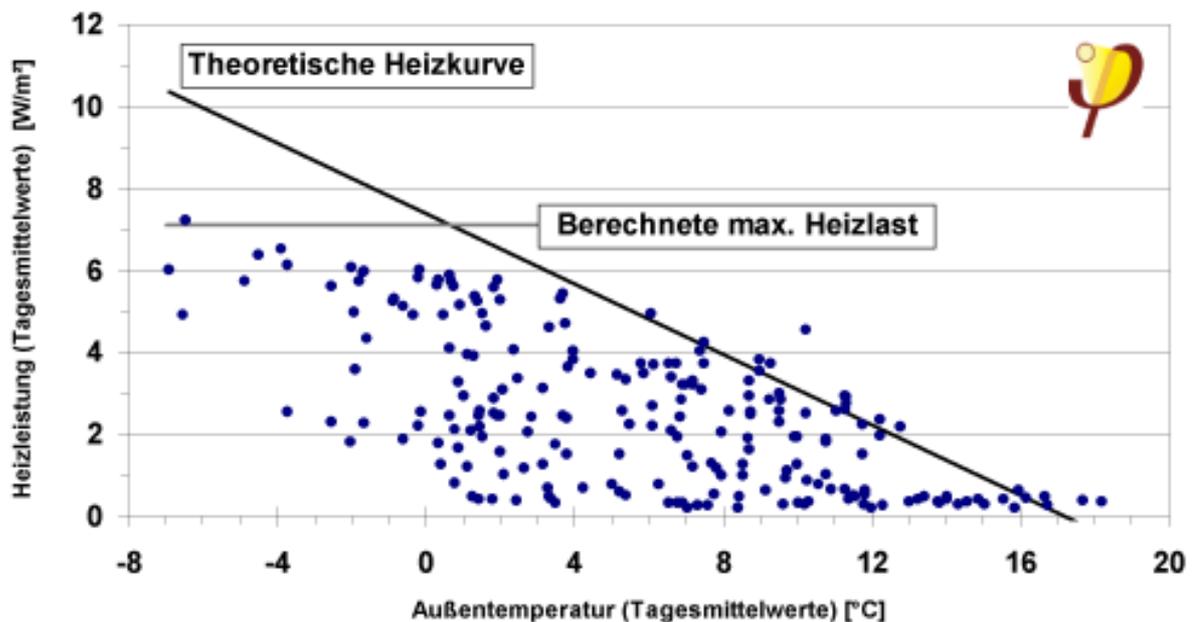


Abbildung 11: Theoretische Heizgerade und tagesmittlere Heizleistungen der dauerbewohnten 30 Passivhäuser im Vergleich zur mittleren Außentemperatur in der dritten Heizperiode (01.10.2001 bis 30.4.2002). Die nach PHPP berechnete Heizlast für das repräsentative Haus liegt bei $7,1 \text{ W/m}^2$.

Der Passivhaus-Richtwert von 10 W/m^2 für über die Zuluft beheizte Gebäude wird in der Passivhaussiedlung im Mittel deutlich unterschritten. Die Reduktion der Anlagentechnik mit den kleinen Heizregistern mit Leistungen von ca. $1,1 \text{ kW}$ je Haus und einem zusätzlichen Badheizkörper (vergl. [Feist 2001a]) hat sich damit bewährt. In einzelnen Häusern wurden zeitweise deutlich höhere Heizleistungen gemessen, d.h. es standen ausreichend Leistungsreserven zur Verfügung.

2.2.3 Warmwasser

Die Warmwasserbereitung der Passivhäuser erfolgt hausweise über das Fernwärmenetz, welches auch der Heizwärmeversorgung dient. Die Warmwasserbereitung wird

zusätzlich in jedem Haus über eine eigene thermische Solaranlagen unterstützt. Einige Nutzer trennen die hauseigene Warmwasserversorgung in den Sommermonaten gänzlich vom Wärmenetz ab, um ausschließlich solarerwärmtes Wasser zu nutzen. Für das untersuchte Jahr 2001/2002 ergibt sich ein Fernwärmeverbrauch zur Warmwasserversorgung von durchschnittlich $10,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Die Werte der dauerhaft bewohnten Häuser schwanken dabei zwischen $3,0$ und $25,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Dabei hat die jeweilige Bewohnerzahl des Hauses einen stärkeren Einfluß als bei den Heizwärmeverbräuchen. Im Vergleich zum ersten Untersuchungsjahr (1999/2000) mit einem Durchschnittswert von $9,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, ist der Verbrauch um $1,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ angestiegen [Peper 2001b].

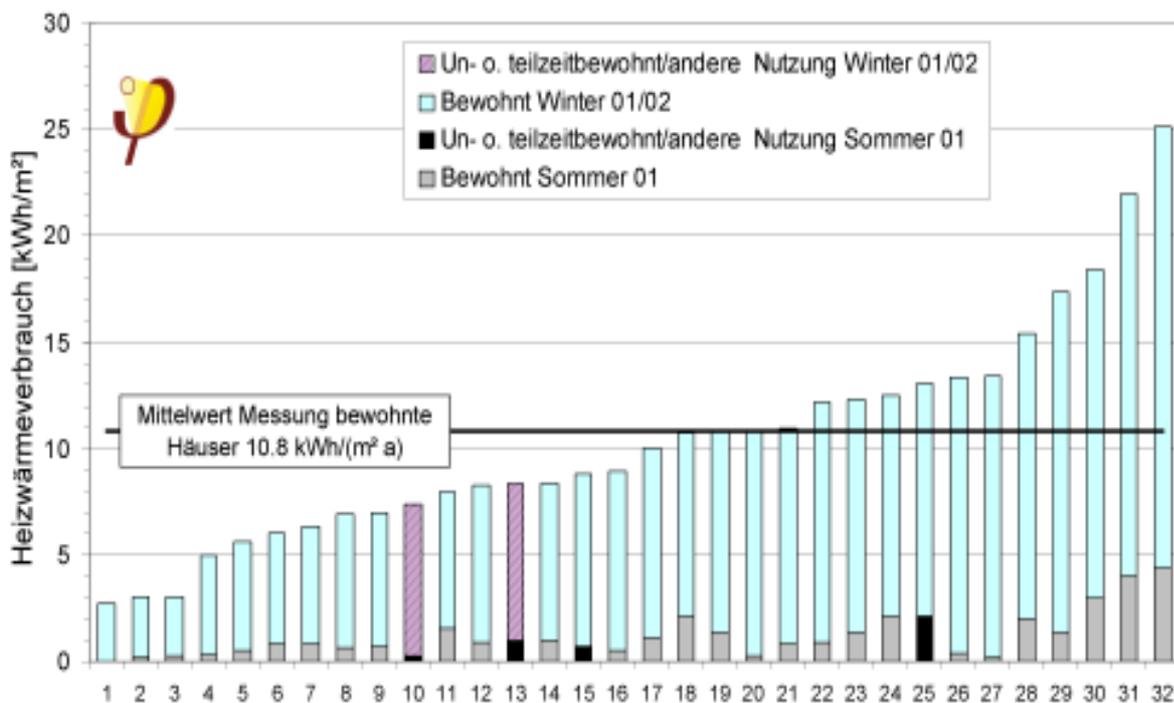


Abbildung 12: Spezifische Fernwärmeverbräuche zur Warmwasserbereitung der 32 Passivhäuser am Kronsberg (Nutzwärme) in der Zeit vom 01.05.2001 bis zum 30.04.2002. Der Mittelwert bezieht sich nur auf die in diesem Zeitraum dauerbewohnten 27 Passivhäuser.

Die Sommer/Winterunterteilung der Warmwasserverbräuche in Abbildung 12 zeigt deutlich den großen Beitrag der solaren Warmwasserbereitung: Die sommerlichen Verbräuche sind verschwindend gering. Nur 12 % der bezogenen Nutzwärme zur Warmwasserbereitung werden im Durchschnitt der bewohnten Gebäude in den 5 Monaten des Sommerzeitraumes benötigt. Der Beitrag der solaren Wassererwärmung und dessen jahreszeitlicher Verlauf kann auch in Abbildung 13 erkannt werden.

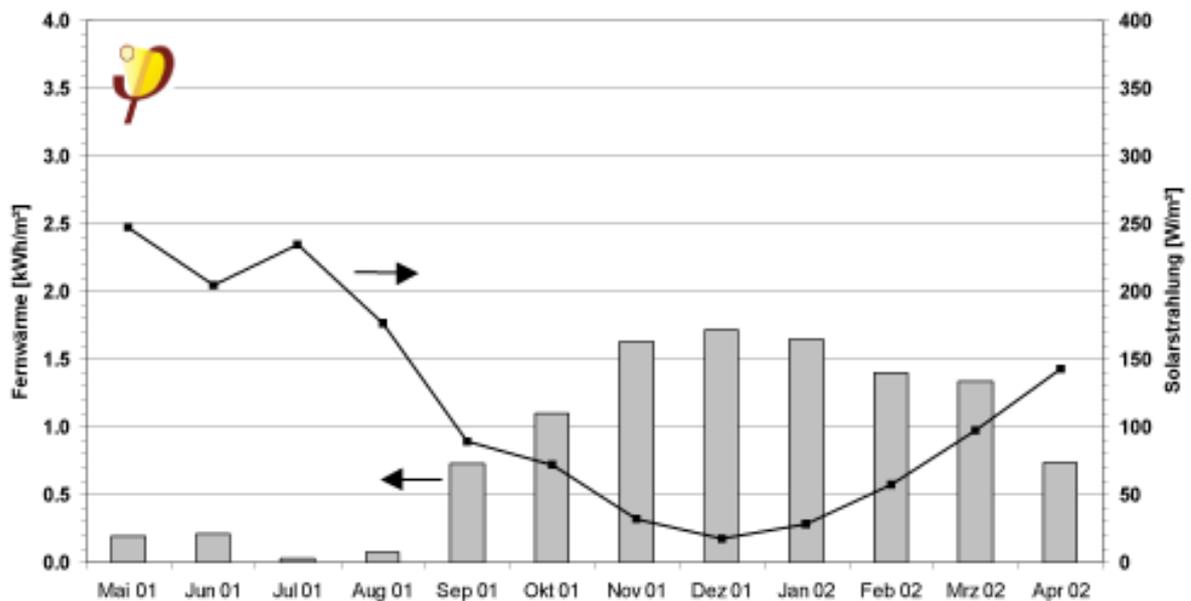


Abbildung 13: Vergleich der spezifischen monatlichen Fernwärmeverbräuche zur Warmwasserversorgung der 32 Passivhäuser sowie der mittleren monatlichen Solarstrahlung. Dargestellt sind die Messdaten für den Jahreszeitraum 01.05.2001 bis zum 30.04.2002. Die Pfeile weisen auf die abzulesende Achse.

Werden die Verbrauchsdaten für die Fernwärmebezüge zur Warmwasserbereitung auf die Personenzahl der jeweiligen Hausbewohner bezogen, zeichnet sich eine Tendenz ab: die kleineren Haushalte benötigen im Durchschnitt pro Kopf mehr Energie zur Warmwasserbereitung als die personenstärkeren Haushalte. Die Mittelwerte der vier Haushaltsgrößen von zwei bis vier Personen liegen zwischen 4,6 und 2,4 kWh/(a m² Person). In Abbildung 14 wurden dafür die bewohnten Häuser nach Haushaltsgröße sortiert und die Verbrauchswerte auf die Bewohnerzahl bezogen. Es wurde nicht zwischen Erwachsenen und Kindern unterschieden.

Diese Tendenz ist insofern erstaunlich, weil kleine 2-Personen-Haushalte über die gleiche Solarspeichergröße verfügen (300 Liter) und damit einen höheren solaren Deckungsbeitrag erzielen als die 5-Personen-Haushalte.

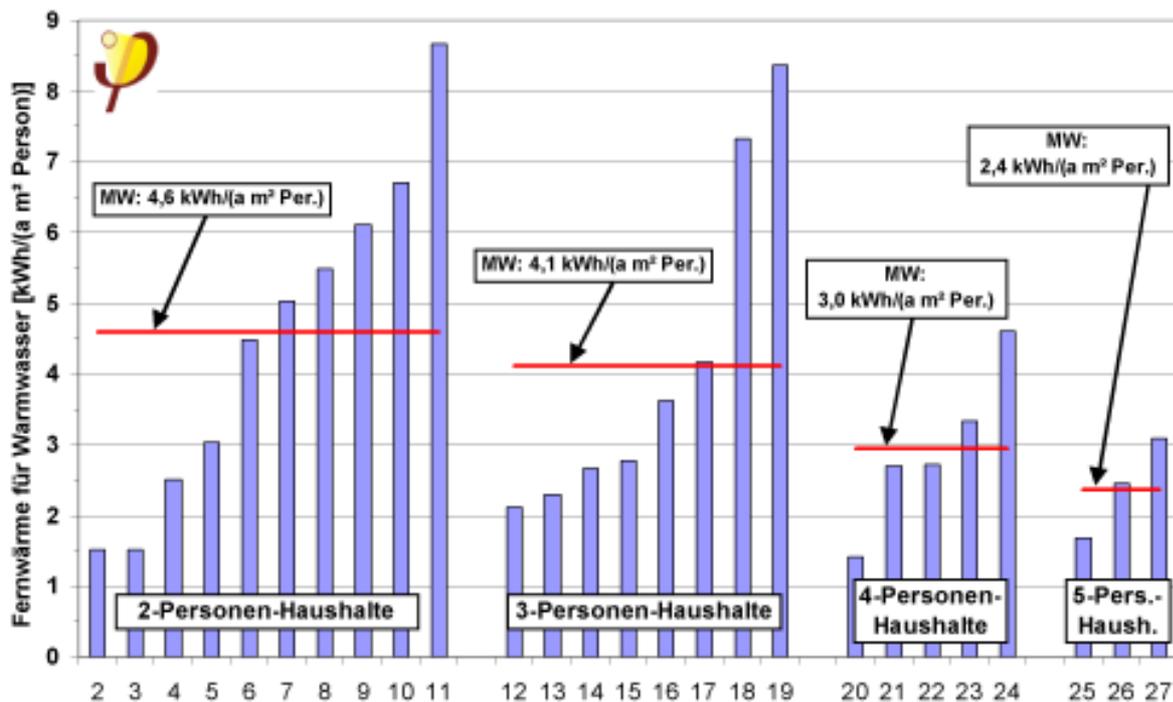


Abbildung 14: Spezifische Fernwärmeverbräuche zur Warmwasserbereitung der 32 Passivhäuser am Kronsberg (Nutzwärme) in der Zeit vom 01.05.2001 bis zum 30.04.2002 pro Person und Quadratmeter. Die Daten sind nach Haushaltsgröße aufsteigend sortiert. Das 27igste dauerbewohnte Haus wurde aus Datenschutzgründen nicht dargestellt, da es sich um das in diesem Zeitraum einzige Haus mit nur einem Bewohner handelt.

2.3 Stromverbrauch

Die Haushalts- und Gemeinschaftsstromverbräuche des ersten Jahres wurden in [Peper 2001b] untersucht. Insbesondere der erfolgreiche Einfluß der bei 18 Haushalten durchgeführten Stromsparberatung wurde dort beleuchtet.

Bei der aktuellen Messung im dritten Jahr zeigt sich mit einem Mittelwert von **22,9 kWh/(m²a)** fast das gleiche Ergebnis wie im Messjahr 1999/2000 mit 23,3 kWh/(m²a). Im dritten Messjahr sind deutlich mehr Häuser bewohnt, der Mittelwert bleibt aber nahezu konstant. Die Streuung ist mit Werten von 10,5 bis 41,8 kWh/(m²a) wieder sehr groß. Zum Vergleich wurde der rechnerische Bedarfswert eines Vergleichshaushaltes gleicher Größe und Ausstattung in [Peper 2001b] mit 32,8 kWh/(m²a) bestimmt. Die erzielte **Einsparung** der Passivhäuser am Kronsberg beträgt damit im dritten Messjahr **30 %**. Der Erfolg ist in Abbildung 15 graphisch dargestellt. Besonders eindrucksvoll ist das Ergebnis, da in den Haushaltsstromverbräuchen auch der gesamte Hilfsstromverbrauch für die Wohnungs-lüftungsanlagen (Regelung, Lüfterbetrieb und Frostschutz) enthalten ist.

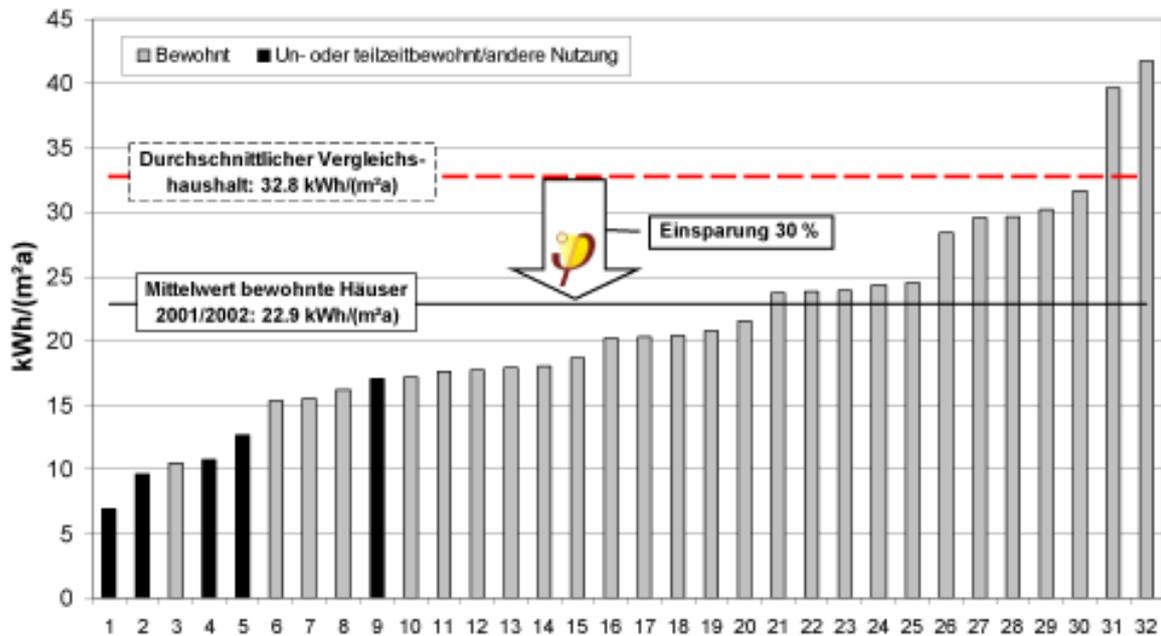


Abbildung 15: Gemessene Jahresstromverbräuche der 32 Passivhäuser in der Zeit vom 01.05.2001 bis zum 30.04.2002. Der Vergleich mit einem „Standardhaushalt“ zeigt Einsparungen von 30%. Betrachtet wurden hier die Verbräuche von Haushalts-, Hilfs-, und Lüftungsstrom ohne Gemeinschaftsstrom.

In den nicht dauerbewohnten Häusern liegen die Verbräuche alle deutlich unterhalb des Mittelwertes, da dauerhaft nur die Lüftungsgeräte betrieben werden. Der Einfluß von elektrischen Wäschetrocknern macht sich bei den Stromverbräuchen deutlich bemerkbar: Das Haus mit dem höchsten spezifischen Stromverbrauch nutzt trotz der im Kaufpreis enthaltenen Wäschetrockenschränke einen elektrischen Wäschetrockner. Die beiden höchsten Verbräuche sind Häusern zuzuordnen, welche nach der Bewohneranzahl nur zu den mittleren Haushalten zählen. Die Zuordnung nach der Haushaltsgröße kann Abbildung 16 entnommen werden. Dabei ist auch wieder die erwartete Tendenz erkennbar, dass die kleineren spezifischen Verbräuche in den personell größeren Haushalten gemessen werden konnten. Die zwei Haushalte mit den größten Verbräuchen sind in der Gruppe der 3-Personen-Haushalte angesiedelt. Daher macht der Mittelwert dieser Gruppe hier eine Ausnahme in der beschriebenen Tendenz.

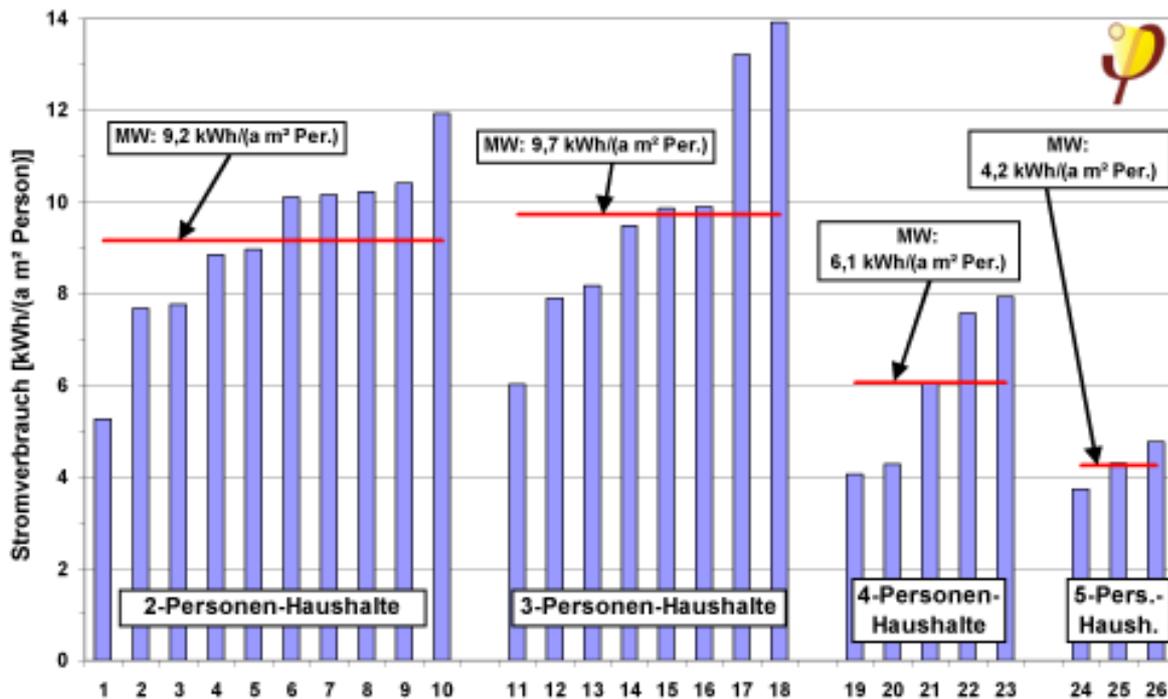


Abbildung 16: Gemessene Jahresstromverbräuche der 26 dauerbewohnten Passivhäuser in der Zeit vom 01.05.2001 bis zum 30.04.2002 je Person und Quadratmeter. Die Daten sind nach Haushaltsgröße aufsteigend sortiert. Das 27igste dauerbewohnte Haus wurde aus Datenschutzgründen nicht dargestellt, da es sich um das in diesem Zeitraum einzige Haus mit nur einem Bewohner handelt.

Messwerte aus der ersten Passivhaussiedlung in Wiesbaden mit vergleichbaren Haushaltsgrößen liegen trotz finanziellem Stromsparanreiz bei $30 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und damit deutlich höher [Ebel 2002]. Dort sind auch identische Niedrigenergiehäuser am gleichen Standort vermessen worden, bei denen keine Förderungen beim Kauf von Energiespargeräten gezahlt wurde. Bei diesen lagen die Verbräuche bei $37,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Damit wird der Erfolg der Bemühungen sehr gut deutlich. Die erreichbaren Einsparpotentiale sind allerdings mindestens doppelt so hoch: Die 4 Haushalte der Passivhäuser in Darmstadt Kranichstein verbrauchten über mehrere Jahre hinweg für Strom und Kochgas nur $14,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ [Ebel 1997].

2.4 Kontrollierte Wohnungslüftung

Jedes Haus ist mit einem Lüftungsgerät mit Wärmeübertrager ausgestattet (Gegenstrom-Kanalwärmeübertrager). Der Stromverbrauch und das Betriebsverhalten eines der Lüftungsgeräte in der Siedlung wurde im Rahmen der Intensivmessung genauer untersucht. Die Ergebnisse sind in [Peper 2001b] dargestellt. Der durchschnittliche Wärmebereitstellungsgrad unter Berücksichtigung der Verluste durch Transmissionswärmeströme und Leckagevolumenströme sowie erzwungener Exfiltration bei Zuluftüberschuß lag nach Auswertung der Messung im Winter 2000/2001 bei 78 %.

2.4.1 Stromverbrauch Lüftungsgeräte

Um die Bandbreite des Stromverbrauchs bei unterschiedlicher Nutzung der Lüftungsanlage näher bestimmen zu können, wurden in acht weiteren Häusern der Siedlung zusätzliche Strommessgeräte installiert. Die Bewohnerinnen und Bewohner haben sich bereit erklärt, die Zähler mindestens monatlich abzulesen, da die Zusatzgeräte nicht auf der zentralen Messtechnikanlage aufgeschaltet werden konnten. In zwei Häusern wurde mit der Zusatzmessung bereits im November 2000 begonnen, in vier weiteren am 30.6. bzw. 1.7.2001. Die Ergebnisse von zwei weiteren Geräten wurden nicht mit ausgewertet, da die Häuser nicht dauerhaft bewohnt waren oder als Ausstellungshaus/Gästehotel genutzt wurden.

Wie auch im intensivvermessenen Haus wurden mit der Messung die gesamten Stromverbräuche der jeweiligen Lüftungsgeräte erfasst. Diese beinhalten den Strom für die Regelung, die beiden Ventilatoren sowie das vorgeschaltete Frostschutzheizregister zur Vermeidung der Vereisung des Wärmeübertragers. Je nach Klima (Frostschutz) und Benutzung des Gerätes (Ventilatorstufe, Nutzung im Sommer) ergeben sich unterschiedlich hohe Stromverbräuche. So gibt es Bewohnerinnen und Bewohner, die das Gerät zeitweise auch im Winter abschalten und andere, z. B. starke Raucher, welche Langzeit auf Stoßlüftungsbetrieb geschaltet haben. Die Auswertung der Ergebnisse spiegelt diese Bandbreite im Stromverbrauch wider. Es wurden alle 6 zusätzlichen Messgeräte in den dauerhaft bewohnten Häusern und die Daten aus dem intensivvermessenen Haus ausgewertet. Um einen etwa vergleichbaren Zeitraum darstellen zu können, sind zunächst die Daten ab Juni/Juli 2001 bis Anfang Mai 2002 verglichen worden. Durch die unterschiedlichen Ablesezeiträume der Bewohnerinnen und Bewohner ergeben sich nicht exakt die gleichen Zeiträume für diese Betrachtung. Die Dauer schwankt zwischen 304 und 335 Tagen, sie beträgt im Mittel 318 Tage (10,6 Monate). Entscheidend ist, dass der gesamte Winter 2001/2002 innerhalb der Messperiode und der Unterschied nur in einigen Sommertagen im Juni 2001 liegt. Aus den Daten wurden mittlere Tagesverbräuche berechnet. Auf dieser Grundlage wurden dann die Verbräuche auf ein gesamtes Jahr hochgerechnet. Da die Messung des Winters mit eher höheren Verbräuchen (Frostschutz, Dauerbetrieb) der Rechnung zugrunde liegt, sind die Hochrechnungen tendenziell auf der „sicheren Seite“.

Für die 7 vermessenen Passivhäuser ergeben sich Jahresverbräuche zwischen 65 und 553 kWh/a, im Mittel **333 kWh/a**. Bezogen auf die Fläche bedeutet das einen Stromverbrauch zwischen 0,54 und 4,62 kWh/(m²a), der Mittelwert stellt sich mit **2,9 kWh/(m²a)** ein. Die Ergebnisse sind in Abbildung 17 dargestellt. Nach der Untersuchung in [Peper 2001b] betrug der Stromverbrauch nur für das vorgeschaltete Frostschutz-Heizregister in der Heizperiode 2000/2001 im intensivvermessenen Haus insgesamt 36 kWh. Setzt man diese Größenordnung des Verbrauches für die Frostfreihaltung des Wärmeübertragers hier an, beträgt der Netto-Stromverbrauch der Zentralgeräte (Ventilatoren und Steuerung) rund 300 kWh/a bei projektierten Luftvolumenströmen zwischen 90 und 180 m³/h bzw. 113 und 225 m³/h (je nach Hausgröße).

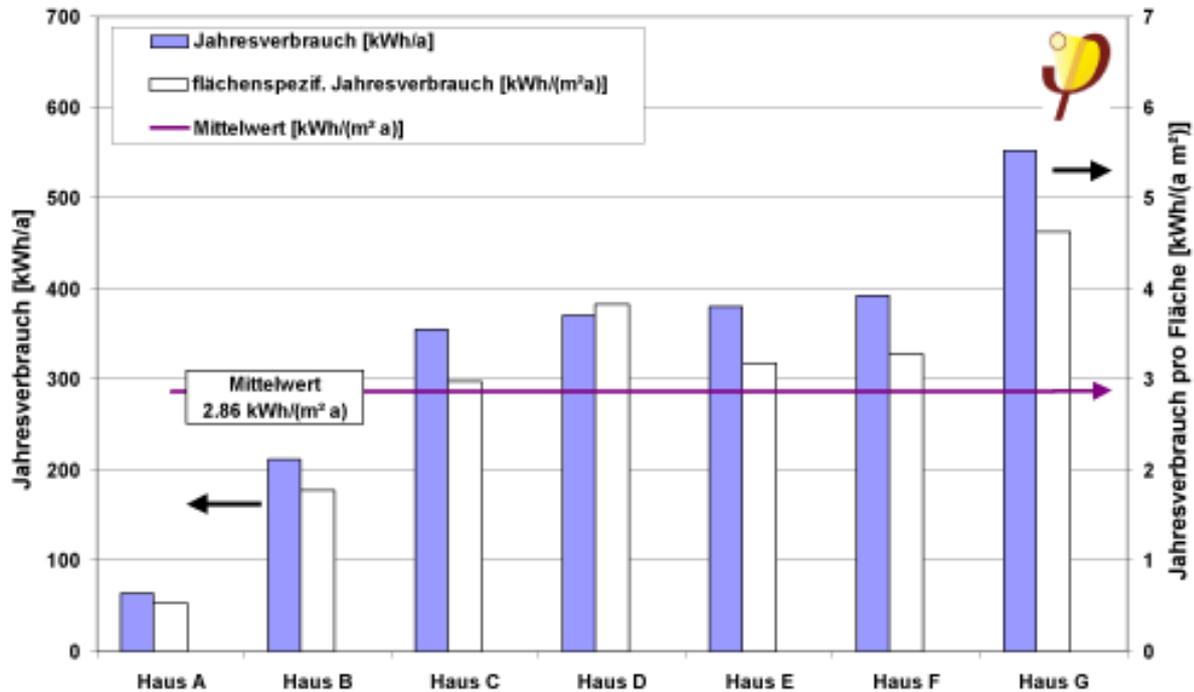


Abbildung 17: Auswertung der Sondermessung zum Stromverbrauch der Lüftungsgeräte (Ventilatoren, Regelung und Defrosterheizung) vom Juni/Juli 2001 bis Anfang Mai 2002. Die Daten wurden hochgerechnet auf Jahresverbräuche und zeigen die Schwankung durch unterschiedliches Nutzerverhalten auf sehr niedrigem Niveau. Die Daten sind aufsteigend sortiert nach dem Jahresverbrauch.

Drei der oben untersuchten Gebäude wurden in einem längeren Zeitraum untersucht. Es liegen Daten der Sondermessung von September 2000, bzw. November 2000 bis Anfang Mai 2002 vor. In diesem Zeitraum sind damit zwei Kernheizzeiten enthalten. Für diese Häuser wurden ebenfalls durchschnittliche Jahreswerte ermittelt. Es ergeben sich Jahresverbräuche von im Mittel **243 kWh/a** bzw. **2,2 kWh/(m²a)**, die in Abbildung 18 dargestellt sind. Damit zeigt sich, dass auch über einen längeren Zeitraum stabile niedrige Verbräuche für den Betrieb der gesamten Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung realisiert wurden.

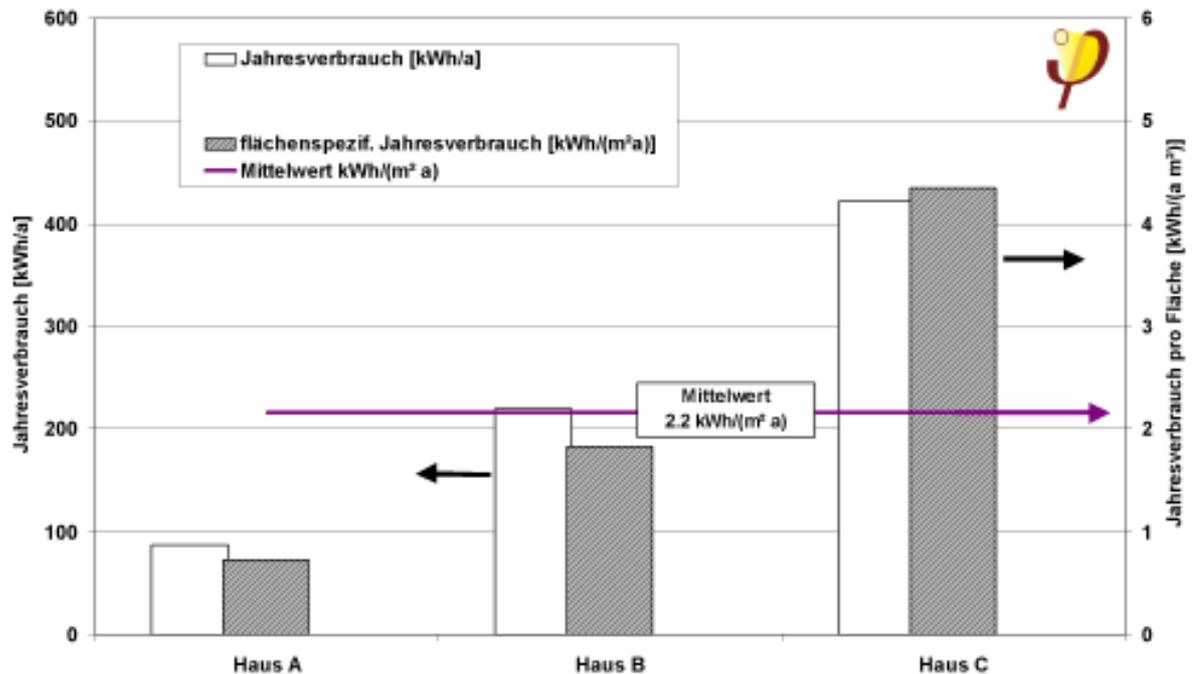


Abbildung 18: Auswertung der Sondermessung zum Stromverbrauch der Lüftungsgeräte (Ventilatoren, Regelung und Defrosterheizung) vom September/November 2000 bis Anfang Mai 2002.

2.4.2 Energieeffizienz des Lüftungsgerätes

Noch immer gibt es kritische Stimmen, welche der kontrollierten Lüftung mit Wärmerückgewinnung die Sinnhaftigkeit absprechen. Die Gründe liegen wohl in den zahlreichen schlecht geplanten oder schlecht ausgeführten Anlagen sowie den eingesetzten Zentralgeräten mit geringer Effizienz in Niedrigenergiehäusern (vergl. [Michael 2000]). Ein Passivhaus funktioniert aus energetischen Gründen nur mit einer Lüftungsanlage mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung. Eine Lüftungsanlage wird aus lufthygienischen Gründen sowieso benötigt.

Die Wirksamkeit der Wärmerückgewinnung des Lüftungsgerätes wurde mit den Messdaten des intensivvermessenen Hauses überprüft. In der Winterperiode 2001/2002 (01. Oktober 2001 bis zum 30. April 2002) wurden 1908 kWh Wärme mit der Anlage von der Abluft an die Frischluft übertragen. Bei 119,5 m² wurden also 16 kWh/m² Wärme im Haus gehalten und nicht mit der Fortluft ausgetragen. Für diese Wärmeübertragung hat das Gerät im gleichen Zeitraum 112,1 kWh Strom benötigt. Im Stromverbrauch sind die gesamten Verbräuche des Gerätes enthalten (Steuerung, Lüfterstrom und Frostschutz). Die Passivhäuser der Siedlung werden ohne Erdreichwärmetauscher betrieben. Die energetische Arbeitszahl des Gerätes in dieser Winterperiode beträgt damit 16,5 (Aufwandszahl: 0,06). Das bedeutet, dass sich der Einsatz der hochwertigen Energieform „Strom“ für diese Anwendung auf jeden Fall lohnt: Für die eingesetzte Kilowattstunde Strom erhält man 16,5 kWh Wärme zurück. Wenn beim Strom der Herstellungsaufwand berücksichtigt wird (Primärenergieeinsatz), muss für den deutschen Strommix mit einem Faktor drei multipliziert werden (Ansatz nach EnEV). Es ergibt sich so eine primärenergetische



Arbeitszahl von 5,5, ein ausgezeichneter Wert, wie er von keinem anderen System auch nur annähernd erreicht wird.

Wird der Stromverbrauch der Anlage von einem gesamten Jahr - also inkl. Sommerlüftung (diese Anlage wurde ganzjährig betrieben) - der in diesem Zeitraum transportierten Luftmenge gegenübergestellt, erhält man eine Möglichkeit, den Stromverbrauch zu überprüfen. Für das Gerät ergibt sich der Wert von $0,26 \text{ Wh/m}^3$, er liegt damit sogar noch unter dem empfohlenen Richtwert von $0,3$ bis $0,45 \text{ Wh/m}^3$ geförderter Luft. Wird nur der Sommerzeitraum betrachtet ergibt sich der Messwert zu $0,2 \text{ Wh/m}^3$. Da die Anlage ganzjährig mit sehr wenigen kurzen Ausnahmen in der gleichen Lüftungsstufe betrieben wurde, zeichnet sich hier der Einfluß der elektrischen Frostschutzheizung ab. Allerdings gibt es eine kleine Verfälschung durch den Sommerbypass (geringerer Druckverlust im Zuluftstrom). Die Frostschutzheizung schaltet sich nach [Peper 2001] ab $-2,8^\circ\text{C}$ ein, um den Wärmeübertrager vor dem Vereisen zu schützen. Der Stromverbrauch für das Frostschutzregister betrug 36 kWh in der Heizperiode 2000/2001, was einem Energieaufwand von $0,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ für das Haus bedeutet. Dieser geringe Verbrauch zeigt, dass es ökonomisch und ökologisch wenig relevant ist, für diese Anwendung elektrische Energie direkt zu verwenden. Es wäre ausreichend die Frostschutzgrenztemperatur auf -4°C zu reduzieren. Damit würden die Stromverbräuche für den Frostschutz sogar noch weiter reduziert werden.

Derartig gute Ergebnisse können nur mit hocheffizienten Geräten erreicht werden, welche mit Gegenstrom-Wärmeübertragern und hocheffizienten Gleichstrommotoren arbeiten.

3 Auswertemodell Passivhäuser Kronsberg

3.1 Modellgestützte Ergebnisauswertung Passivhäuser Hannover-Kronsberg

Die bisherigen Auswertungen der zwei Sommer und drei Heizperioden stützen sich im wesentlichen auf die Messergebnisse und interpretieren diese deskriptiv [Peper 2001b]. Die Funktionsfähigkeit der Häuser als Passivhäuser konnte auf diesem Weg erwiesen werden, ebenso wie die Erfüllung der Zielsetzungen bzgl. eines extrem niedrigen Heizwärmeverbrauches und der durch den Zukauf von Windkraftanteilen erreichten Klimaneutralität.

Damit ist das Potential an Erkenntnisgewinn aus den vorliegenden Messungen jedoch keinesfalls erschöpft: Die Auswertung der Verbrauchsstatistik hat gezeigt, dass die individuellen Heizwärmeverbrauchsunterschiede als normalverteilt angesehen werden können. Sie folgen damit einer offensichtlich universellen Regel, wie durch den Vergleich mit Niedrigenergiehäusern am gleichen Standort auf dem Kronsberg [Peper 2001a, S. 52] und mit der Statistik einer Vergleichssiedlung in Stockholm [Peper 2001a, S. 55] gezeigt werden konnte. Da die Mittelwerte der jeweiligen Verteilungen ausgezeichnet mit dem rechnerisch ermittelten Verbrauchswert korrespondieren, kann man mit diesem Ergebnis schon sehr zufrieden sein. Es verbleibt allerdings die Tatsache, dass die Ursachen für die nicht unerheblichen Verbrauchsunterschiede nicht vollständig verstanden werden.

Der traditionelle Ansatz, Erklärungen für die gemessenen Unterschiede zu gewinnen, besteht in (multiplen) Korrelationsanalysen mit ausgewählten Variablen. Untersuchungen bei anderen Projekten zeigen, dass das auf diesem Weg erreichbare Erklärungsmaß begrenzt ist. Im Verlauf der hier vorgestellten weitergehenden Auswertung wird später erkennbar werden, warum dies so ist. Grundsätzlich gibt es zu diesem Problem einen eindeutigen Hinweis aus der Statistik: Korrelationsanalysen erlauben es grundsätzlich nur, die Validität einer vermuteten Abhängigkeit zu prüfen; am Anfang einer Analyse muß daher eine Theorie für einen vermuteten Zusammenhang stehen, welche durch die Statistik überprüft werden kann. So liegt es nahe, einen Zusammenhang zwischen den gemessenen mittleren Raumlufttemperaturen und dem Heizwärmeverbrauch zu vermuten. Diese Hypothese läßt sich mit einer Korrelationsanalyse überprüfen. Wie die diesbezüglichen Untersuchungen in [Feist 2001b] und [Pfluger 2001] zeigen, ergeben sich dabei jedoch häufig enttäuschend geringe Korrelationskoeffizienten. Es wäre ein fataler Fehlschluß, bereits an dieser Stelle aus einem solchen Ergebnis zu folgern, dass die Bedeutung der Raumtemperaturen für den Heizwärmeverbrauch nicht so gravierend ist, wie allgemein angenommen. Bei einer unmittelbaren Korrelationsanalyse zwischen Verbrauch und Raumtemperaturen legen wir nämlich gar nicht das gesamte Wissen über den physikalisch begründeten Zusammenhang zugrunde. Dieses Wissen besteht aus den bauphysikalischen Erkenntnissen für den Zusammenhang zwischen einer Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ (z.B. zwischen zwei aneinandergrenzenden Häusern) und dem Wärmestrom $H\Delta\vartheta$, der durch diesen Antrieb erzeugt wird (H ist der temperaturspezifische Wärmeverlust). Dieser Wärmestrom wiederum geht in durch die bauphy-

sikalische Theorie bestimmter Form in die Energiebilanz des Hauses ein; der dadurch kausal formulierte Zusammenhang ist regelmäßig nichtlinear. Mit diesen Erkenntnissen läßt sich der vermutete Zusammenhang weit präziser formulieren, als es durch eine einfache Korrelationsanalyse zwischen Raumtemperatur und Heizwärmeverbrauch möglich ist.

Die Prüfung einer derart präzisierten Hypothese setzt allerdings die Verwendung eines physikalisch begründeten Modells für das thermische Verhalten des Gebäudes voraus. Die Vorgehensweise besteht darin,

- dass im ersten Schritt ein bauphysikalisch begründetes Modell für die Siedlung erstellt wird, durch welches der kausale Zusammenhang zwischen den Einflußvariablen und dem Heizwärmeverbrauch (oder dem Sommertemperaturniveau) widergespiegelt wird;
- dass dann die mit einem solchen Modell bestimmten „theoretischen Ergebnisse“ mit den Messergebnissen in der Siedlung verglichen werden.

Auf diesem Weg läßt sich die Validität des vermuteten bauphysikalischen Zusammenhangs prüfen. Wie die folgende Untersuchung zeigt, lassen sich mit dieser Methode weit höhere Bestimmtheitsmaße und Signifikanzniveaus erreichen.

Der Erkenntnisgewinn aus einem solchen Vorgehen ist aber noch weit höher: Es wird nicht nur eine vertiefte Auswertung der aus dem Projekt vorliegenden Messdaten ermöglicht, sondern auch

- ein besseres Verständnis der Zusammenhänge zwischen den Einflußfaktoren und dem erzielten Ergebnis und
- eine Validierung der verwendeten Modelle.

Letzteres ist von großer Bedeutung für die Weiterentwicklung: Die hier validierten Modelle können nämlich zukünftig der Projektierung neuer Gebäude zugrunde gelegt werden. Dies erhöht die Planungssicherheit und erweitert die Spielräume für den Planer.

3.2 Definition der Bestimmungsgrößen des Modells für die Passivhaussiedlung

Abbildung 19 zeigt alle Reihenhäuser der Siedlung gemäß der Numerierung zur Bauzeit.

Für die gesamte Passivhaussiedlung wurde ein thermisches Beukenmodell erstellt, das auch die Kopplung zwischen den Häusern korrekt wiedergibt.

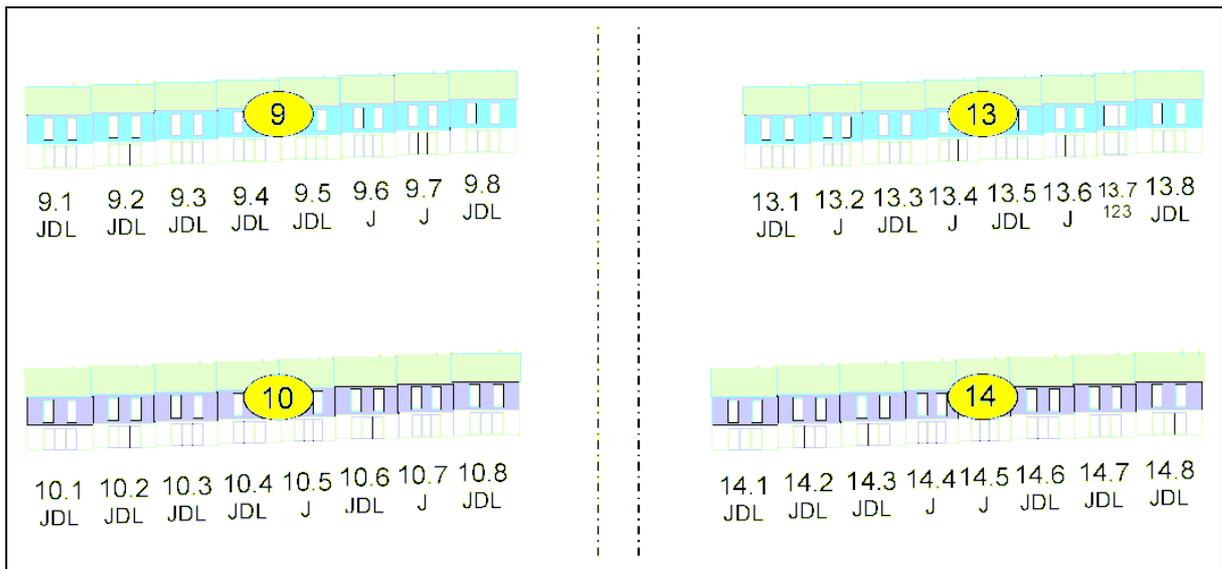


Abbildung 19: Gesamtumfang der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg

Jedes einzelne Haus wird dabei mit einem Einkapazitätenmodell beschrieben. Ist n die Nummer des Hauses, so ist $n-1$ der linke Nachbar (wenn ein angebautes Haus vorhanden ist, sonst: freier Knoten) und $n+1$ der rechte Nachbar (wenn ein angebautes Haus vorhanden ist, sonst: freier Knoten). Die Verkopplung der Einzelmodelle erfolgt ausschließlich über die Wärmeleitung durch die Wohnungstrennwände.

Das Einzelmodell des Hauses n weist folgende charakterisierende Bestandteile auf (vgl. Abbildung 20):

Leitwert zur Außenluft	$H_{e,n}$ (external),
Leitwert zum Erdreich	$H_{g,n}$ (ground),
Leitwert zu den im Haus verlegten Wärmeverteilerrohren	$H_{p,n}$ (pipe),
Leitwert zum linken Nachbarn	$H_{Trenn-1,n}$,
Leitwert zum rechten Nachbarn	$H_{Trenn+1,n}$,
effektive Wärmekapazität des Hauses	C_n ,
Innere Wärmequelle des Hauses	P_n ,
Solarapertur nach „Süden“(genauer: 15° Süd-Süd-West)	$A_{S,n}$
Solarapertur nach „Norden“(genauer: 195° Nord-Nord-Ost)	$A_{N,n}$

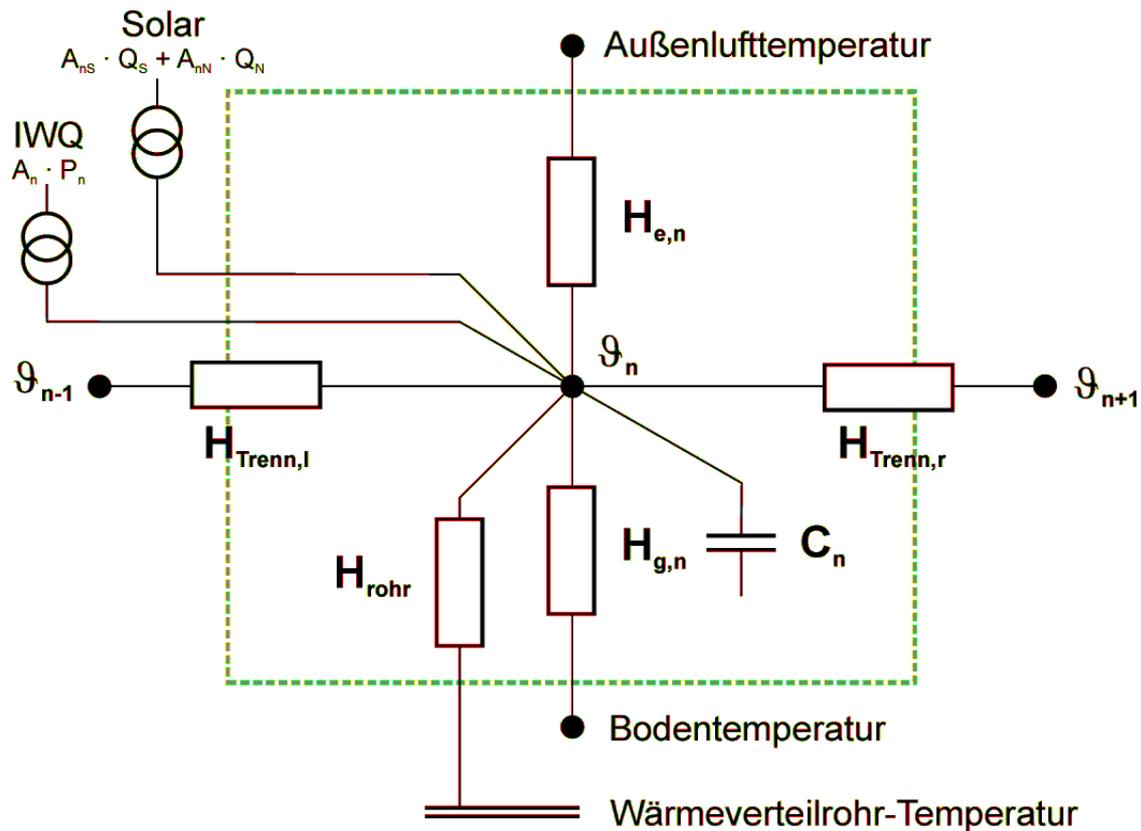


Abbildung 20: Thermisches Modell eines Hauses

Diese Größen sind wie folgt definiert:

$$H_{e,n} = A_{Giebw} U_{Giebw} + A_{AW,Holz} U_{AW,Holz} + A_{Fens} U_{Fens} + A_D U_D + A_{VersD} U_{VersD} + I_e \Psi_e + V_{Luft} n_{\text{äqui}} c_p \rho_{Luft}$$

$$H_{g,n} = A_g U_g + A_{Vers,g} U_{Vers,g} + I_g \Psi_g$$

$$H_{p,n} = I_p \Psi_p$$

$$H_{Trenn} = A_{Trenn} U_{Trenn}$$

$$C_n = \sum A_k C_{\text{wirk},k}$$

$$P_n = Z_{\text{Pers}} P_{\text{Pers}} + \zeta P_{\text{elektr}}$$

$$A_{S,n} = A_{Fen,S} F_S$$

$$A_{N,n} = A_{Fen,N} F_N$$

Dabei bezeichnen

- A Flächen
- F Strahlungsreduktionsfaktor (Verschattung, Verschmutzung, Einfallswinkelkorr., Rahmenanteil)
- U Wärmedurchgangskoeffizient

Ψ	längenspezifischer Wärmeverlustkoeffizient
C_{wirk}	wirksame innere Speicherkapazität
V	Volumen
l	Länge
n	Luftwechsel
c_p	spezifische Wärmekapazität Luft
ρ_{Luft}	Dichte Luft
Z_{Pers}	Zahl der durchschnittlich anwesenden Personen
P_{elektr}	abgenommene elektrische Leistung
ζ	Verfügbarkeit der Wärmeabgabe aus elektrischen Geräten

Die Indizes bedeuten:

AW,Holz	Fassadenwand nach Nord und Süd
e	außen (external)
Fen	Fenster
FenS	Fenster Süd
FenN	Fenster Nord
g	Grund
GiebW	Giebelwand
Vers,D	Versprung Dach
Vers,g	Versprung Grund

Für die Werte der charakterisierende Größen ergibt sich aus den PHPP-Berechnungen für die Häuser der Passivhaus-Siedlung Hannover-Kronsberg (vgl. [Feist 2001a], S. 96-99):

			JDE	JDM	JAM	123
			Endhaus Jangster de lüx	Jangster de lüx Mittelhaus	Jangster Mittelhaus	123 kleines Mittelhaus
Leitwert außen	H_e	W/K	49,3	40,8	37,0	32,6
Leitwert Erdreich	H_g	W/K	8,3	11,1	9,9	8,4
Leitwert Nachbar rechts (falls vorh., sonst 0)	$H_{\text{Trenn-1}}$	W/K	46,6	46,6	46,6	46,6
Leitwert Nachbar links (falls vorh., sonst 0)	$H_{\text{Trenn+1}}$	W/K	46,6	46,6	46,6	46,6
Leitwert Rohre	H_p	W/K	3,2	3,2	2,8	2,3
Apertur Süd	A_S	m ²	3,42	3,36	2,97	2,65
Apertur Nord	A_N	m ²	2,46	1,98	2,04	1,96
eff. Wärmekapazität	C	kWh/K	26,7	26,7	21,6	16,8

Tabelle 1: Leitwerte, Apertur und Wärmekapazität der vier Haustypen.

3.3 Modellgleichungen

In der Heizperiode ist die Schwankungsbreite der Raumlufttemperaturen erwartungsgemäß so gering, dass es ausreicht jedes Einzelhaus mit Hilfe eines stationären Modells nach dem *Monatsverfahren* der EN 832 zu behandeln. Da alle Zonen des Mehrzonenmodells beheizt sind und ihre Temperaturen daher feststehen (für die Auswertung werden die in den Häusern gemessenen Monatsmitteltemperaturen beider Temperaturmessstellen verwendet), sind die Modelle untereinander nur über die jeweils durch $H_{Trenn} (\vartheta_n - \vartheta_{n\pm 1})$ gegebenen Quersärmeströme gekoppelt. Werden diese (bekannten) Quersärmeströme in den Einzelmodellen berücksichtigt, so läßt sich das Modell unmittelbar in die n Einzelmodelle gemäß Abb. 2 mathematisch separieren. Für jedes Einzelmodell gilt:

$$Q_{Heiz} = Q_e + Q_g + Q_{Quer} - Q_{Rohr} - \eta (Q_{IWQ} + Q_{Sol});$$

Dabei sind η der monatliche Ausnutzungsgrad gemäß EN832 und Q die Wärmeströme gemäß der Indizes

Heiz	Heizung
e	Transmission external
g	Transmission ground
Quer	Transmission zu Nachbarhäusern
Rohr	Heizleitungen
IWQ	innere Wärmequellen
Sol	Solar.

Diese Größen ergeben sich aus den jeweiligen monatlichen Werten der gemessenen mittleren Innentemperaturen ϑ_n in den Häusern, der gemessenen mittleren Außenlufttemperaturen ϑ_e , der Erdreichtemperaturen ϑ_g , der Temperaturen der Heizleitungen ϑ_p , dem nutzerbedingten Fensterluftwechsel $n_{\text{Öff}}$ des jeweiligen Hauses, der Leistungen P_n der inneren Wärmequellen und des monatlichen solaren Strahlungsangebotes Q_S (Süd) und Q_N (Nord) sowie der Dauer t_{mon} des gerade betrachteten Monats:

$$Q_e = (H_e + n_{\text{Öff}} V_{\text{Luft}} c_p \rho_{\text{Luft}}) (\vartheta_n - \vartheta_e) t_{\text{mon}}$$

$$Q_g = H_g (\vartheta_n - \vartheta_g) t_{\text{mon}}$$

$$Q_{\text{Quer}} = (H_{Trenn} (\vartheta_n - \vartheta_{n-1}) + H_{Trenn+1} (\vartheta_n - \vartheta_{n+1})) t_{\text{mon}}$$

$$Q_{\text{Rohr}} = H_p (\vartheta_p - \vartheta_n) t_{\text{mon}}$$

$$Q_{\text{IWQ}} = P_n$$

$$Q_{\text{Sol}} = A_{S,n} Q_S + A_{N,n} Q_N$$

$$\eta = (1 + \gamma^{(a+1)}) / (1 - \gamma^a) \text{ für } \gamma \neq 1 \text{ und } \eta = a / (a+1) \text{ für } \gamma = 1,$$

wobei

$\gamma = (Q_{IWQ} + Q_{sol}) / (Q_g + Q_e + Q_{Quer} - Q_{Rohr})$ und $a = 1 + C_n / 16 / (H_e + H_g)$.

Hierbei sind γ das Solar/Lastverhältnis und η der solare Ausnutzungsgrad gemäß den Vorgaben der EN 832 für das Monatsverfahren.

Der Luftwechsel durch Fensteröffnungen $n_{\text{öff}}$ wurde aus Einzelbeobachtungen in der Siedlung extrapoliert.

Mit diesen Einzelmodellen wurden mit den gemessenen Randbedingungen die monatlichen Wärmebilanzen berechnet.

3.4 Test mit den Winterergebnissen 1999/2000

3.4.1 Randbedingungen im Winter 1999/2000

Die beiden folgenden Tabellen zeigen die gemessene Außentemperatur, die daraus berechnete Erdreichtemperatur unter den Häusern sowie die Summenwerte der Globalstrahlung auf die Fassadenflächen, jeweils als Monatswerte.

	Jan 00	Feb 00	Mrz 00	Apr 00	Mai 00	Jun 00	Jul 00	Aug 00	Sep 00	Okt 99	Nov 99	Dez 99
Länge des Monats t_{mon} in h	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
Außentemp. °C	2,8	5,2	6,0	10,8	15,6	17,4	15,9	18,5	14,8	9,9	5,3	3,5
Erdreich-temp. °C	11,7	11,0	10,6	10,8	11,3	12,1	12,9	13,6	14,0	13,9	13,3	12,5

Tabelle 2: Gemessene Außentemperatur und Erdreichtemperatur

kWh/m ²	Jan 00	Feb 00	Mrz 00	Apr 00	Mai 00	Jun 00	Jul 00	Aug 00	Sep 00	Okt 99	Nov 99	Dez 99
Str. Süd (195° SO)	40,1	56,1	61,8	84,6	97,6	89,7	64,9	98,3	71,6	72,7	42,6	23,7
Str. Nord (15° NW)	10,7	15,4	25,5	43,8	65,8	70,8	48,7	55,4	32,3	23,0	10,1	5,9

Tabelle 3: Gemessene Globalstrahlungswerte

Die inneren Wärmequellen müssen aus Datenschutzgründen anonymisiert bleiben.

Großen Einfluß auf die Energiebilanz haben die Raumtemperaturen. Die Temperaturunterschiede zwischen EG und OG sind vernachlässigbar gering (siehe Abbildung 1 in Abschnitt 2.1), daher wurde der Mittelwert der beiden gemessenen Temperaturen im EG und im OG verwendet. Für die Bilanz wurden jeweils Monatsmittelwerte der Raumlufttemperaturen bestimmt. Diese Daten werden hier

anonymisiert; sie sind in Tabelle in aufsteigender Reihenfolge (nach Januar-temperatur) angegeben. Jede Zeile steht für ein Haus der Siedlung, dessen Lage jedoch nicht angegeben wird. Das zu den Daten der ersten Zeile gehörende Haus ist unbewohnt und unbeheizt. Dennoch fallen die Monatsmittelwerte auch hier nicht unter 12,5 °C.

	Jan 00	Feb 00	Mrz 00	Apr 00	Mai 00	Jun 00	Jul 00	Aug 00	Sep 00	Okt 99	Nov 99	Dez 99
Innentemperaturen °C												
Haus a1	13,2	15,3	17,1	19,7	21,0	21,2	19,7	20,9	20,7	17,0	12,5	12,5
Haus a2	17,0	17,7	18,0	19,7	21,2	21,5	20,8	22,0	20,8	17,1	13,8	16,9
Haus a3	17,2	17,9	18,5	20,0	21,6	22,3	20,8	22,8	21,0	18,5	16,4	17,1
Haus a4	17,9	18,1	18,6	20,3	22,3	22,5	20,9	22,8	21,1	18,6	16,5	17,6
Haus a5	17,9	18,5	18,8	20,3	22,5	22,9	21,0	22,9	21,3	18,7	17,2	17,9
Haus a6	18,6	19,2	19,6	20,4	22,5	22,9	21,1	23,0	21,5	19,0	17,4	18,6
Haus a7	18,8	19,5	19,9	20,5	22,6	23,0	21,7	23,0	21,6	19,5	17,5	18,7
Haus a8	18,9	20,0	20,0	20,7	22,7	23,1	21,9	23,0	21,9	19,6	18,3	18,8
Haus a9	19,3	20,0	20,3	20,9	22,9	23,2	22,0	23,2	21,9	19,7	18,8	19,2
Haus a10	19,6	20,4	20,5	20,9	23,1	23,2	22,0	23,2	22,2	19,8	19,2	19,4
Haus a11	20,2	20,5	20,6	21,0	23,1	23,3	22,1	23,4	22,2	19,8	19,8	19,7
Haus a12	20,3	20,6	20,7	21,2	23,2	23,4	22,2	23,5	22,5	20,1	19,9	20,0
Haus a13	20,3	20,7	20,7	21,3	23,2	23,4	22,3	23,6	22,5	20,4	20,0	20,0
Haus a14	20,5	20,7	20,8	21,3	23,3	23,4	22,3	23,7	22,5	20,4	20,2	20,2
Haus a15	20,6	20,8	20,8	21,3	23,5	23,5	22,3	23,7	22,5	20,5	20,2	20,6
Haus a16	20,6	20,8	20,9	21,4	23,5	23,6	22,6	23,9	22,7	20,5	20,3	20,6
Haus a17	20,7	20,9	20,9	21,4	23,7	23,6	22,8	24,1	22,8	20,7	20,3	20,7
Haus a18	20,8	20,9	20,9	21,5	24,0	23,7	23,2	24,1	23,0	20,8	20,4	20,9
Haus a19	20,8	21,0	21,0	21,5	24,0	23,9	23,2	24,1	23,2	21,0	20,5	20,9
Haus a20	20,9	21,2	21,2	21,7	24,4	24,2	23,2	24,2	23,3	21,0	20,6	21,0
Haus a21	20,9	21,3	21,3	21,8	24,5	24,4	23,2	24,3	23,4	21,4	20,6	21,0
Haus a22	21,0	21,4	21,5	21,8	24,6	24,6	23,3	24,3	23,4	21,6	20,6	21,1
Haus a23	21,3	21,4	21,6	21,9	24,6	24,6	23,5	24,7	23,5	21,6	20,7	21,1
Haus a24	21,6	21,6	21,7	21,9	24,6	24,6	23,5	24,8	23,5	21,6	20,8	21,2
Haus a25	21,7	21,9	21,7	22,1	24,7	24,9	23,6	24,9	23,6	21,7	20,9	21,4
Haus a26	21,8	21,9	21,8	22,3	24,7	25,0	23,8	25,0	23,7	21,7	21,0	21,5
Haus a27	22,1	22,0	21,8	22,4	24,9	25,1	23,9	25,1	23,7	21,9	21,1	21,6
Haus a28	22,1	22,1	21,8	22,5	25,2	25,1	24,1	25,1	24,0	21,9	21,2	22,1
Haus a29	22,4	22,8	22,8	23,0	25,3	25,3	24,2	25,2	24,0	22,3	21,2	22,1
Haus a30	23,0	23,3	23,0	23,3	25,4	25,4	24,3	25,3	24,5	22,6	21,3	22,3
Haus a31	23,4	23,6	23,6	23,3	25,9	25,6	24,9	25,8	24,5	23,0	21,4	22,5
Haus a32	23,5	23,8	23,9	23,4	27,0	26,1	25,9	26,1	25,1	23,3	21,9	22,6

Tabelle 4: Gemessene Innentemperaturen 1999/2000, anonymisiert. Das erste Haus ist unbewohnt und unbeheizt.

3.4.2 Modellergebnisse in der Heizperiode 1999/2000

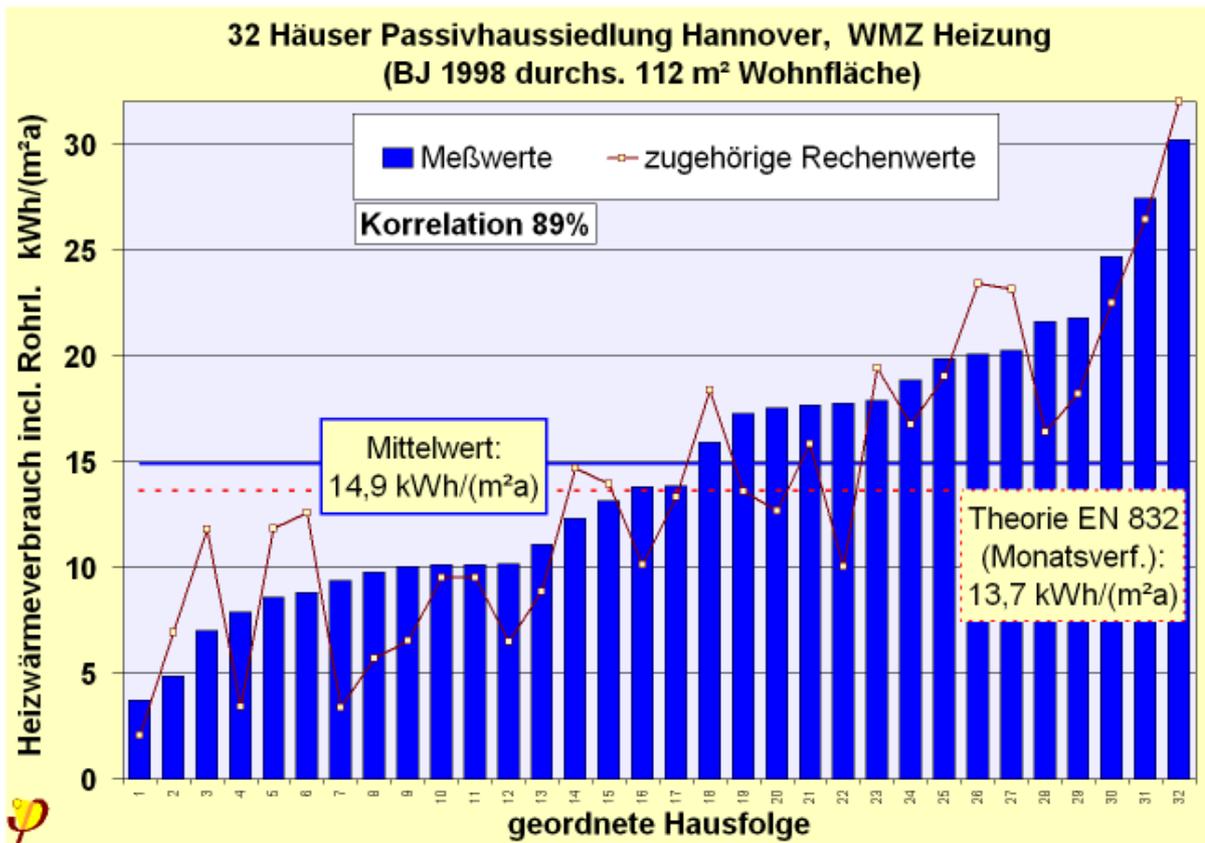


Abbildung 21: Ergebnisse des Vergleichs Modellrechnung mit Messung für die erste Heizperiode (1999/2000).

Abbildung 21 zeigt die gemessenen Einzelverbrauchswerte der Häuser (Säulen) in aufsteigender Reihenfolge im Vergleich zu den mit dem beschriebenen Modell berechneten Werten (Kurve mit Quadratsymbol). Der Mittelwert der Verbrauchsmessung über alle Häuser ergibt sich zu 14,9 kWh/(m²a); der Mittelwert der Modellrechnung liefert mit 13,7 kWh/(m²a) einen mit 1,2 kWh/(m²a) oder etwa 8% nur geringfügig abweichenden Wert. Bei Standardannahmen zum Nutzerverhalten (innere Wärmequellen 2,1 W/m²; Raumtemperatur 20°C) wurde der theoretisch mit PHPP berechnete Wert zu 11,8 kWh/(m²a) bestimmt [Peper 2001b]. Von der Differenz (3,1 kWh/(m²a)) zwischen Messwert und Theorie können damit durch das Kopplungsmodell mit den gemessenen Temperaturen bereits nahezu 2/3 erklärt werden.

Der Korrelationskoeffizient zwischen den Einzelmesswerten und der Modellrechnung beträgt 89%. Das Bestimmtheitsmaß für die Streuung der Einzelwerte durch das hier verwendete Modell beträgt somit fast 80% (Quadrat des Korrelationskoeffizienten). Damit kann festgestellt werden, dass die als Einflussgrößen verwendeten Variablen (Innentemperaturen, Belegungszahlen, Stromverbräuche, Fensteröffnung) einen beträchtlichen Teil der Verbrauchsstreuungen über das Modell erklären können.

Besonders gut ist die erreichte Korrelation in Abbildung 22 zu erkennen. Hier ist der nach dem Modell berechnete Wert als y-Wert über dem gemessenen Heizwärmeverbrauch (als x-Wert) abgetragen. Eingezeichnet ist zum Vergleich die Gerade $y = x$, die den theoretisch zu erwartenden Zusammenhang darstellt.

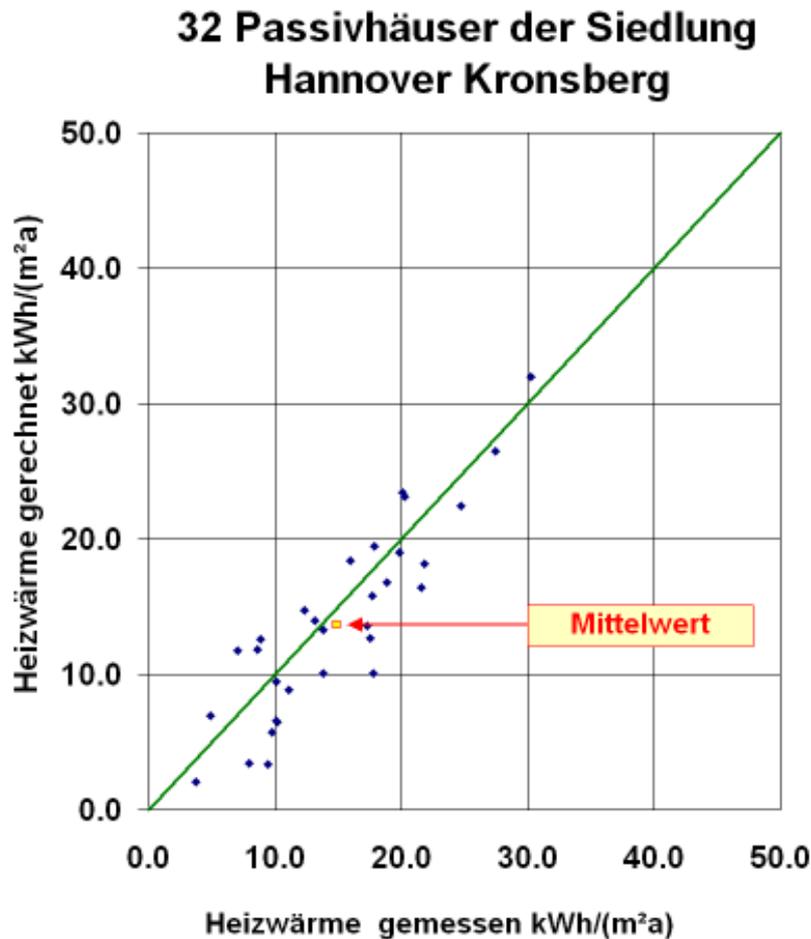


Abbildung 22: Korrelationsanalyse für den Vergleich Messung und Modellrechnung in der ersten Heizperiode (1999/2000) in der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg. Der Korrelationskoeffizient beträgt 89%; die Übereinstimmung ist ausgezeichnet.

3.5 Ergebnisse aus der Heizperiode 2001/2002

3.5.1 Dokumentation der Randbedingungen 2001/2002

In Tabelle 5 sind die Messwerte der Außenlufttemperaturen (Monatsmittel) des Zeitraums vom 1. Mai 2001 bis 30. April 2002 sowie die daraus mit dem Bodenmodell berechneten mittleren Erdreichtemperaturen (Mittelwert unter der Bodenplatte) dokumentiert. Abbildung 23 zeigt die Außentemperaturen der beiden Messperioden im Vergleich zu den langjährigen Mittelwerten. Es ist erkennbar, dass die gemessenen Temperaturen in beiden Perioden höher lagen als im langjährigen Mittel (Ausnahmen sind Oktober und November 1999 sowie Juni und September 2001 und April 2002). Die Sommertemperaturen im Juli und August lagen jeweils deutlich über

den langjährigen Mitteln, so dass die Sommermessungen als „Härtetest“ für die Siedlung angesehen werden können. Die auf typische Passivhaus-Heizzeiten bezogenen Heizgradstunden liegen in der Heizperiode 99/00 deutlich (71,2 kWh) und in der Heizperiode 01/02 geringfügig (75,0 kWh) unter dem langjährigen Mittel für Hannover (78,4 kWh). Damit waren zwar beide Winter milder als üblich, die klimatischen Randbedingungen 01/02 kommen aber den langjährigen Mitteln schon recht nahe.

	Jan 02	Feb 02	Mrz 02	Apr 02	Mai 01	Jun 01	Jul 01	Aug 01	Sep 01	Okt 01	Nov 01	Dez 01
Länge des Monats t_{mon} in h	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
Außentemp. °C	2,9	4,6	6,5	5,9	15,0	14,7	19,8	20,2	12,8	13,5	5,7	0,8
Erdreich-temp. °C	11,4	10,5	10,1	10,3	11,0	12,0	13,0	13,9	14,2	14,1	13,4	12,4

Tabelle 5: Gemessene Außentemperatur und Erdreichtemperatur

Tabelle 6 zeigt die gemessenen Solarstrahlungssummen (direkte und diffuse Strahlung) auf senkrechte Flächen mit der Orientierung der Haupt- und der Rückfassade der Passivhäuser.

kWh/m ²	Jan 02	Feb 02	Mrz 02	Apr 02	Mai 01	Jun 01	Jul 01	Aug 01	Sep 01	Okt 01	Nov 01	Dez 01
Str. Süd (195° SO)	41,7	59,9	71,4	78,0	105,8	73,8	90,7	82,2	47,2	58,6	29,8	19,3
Str. Nord (15° NW)	7,3	11,1	21,3	32,8	50,5	55,9	54,2	41,3	25,7	17,0	8,7	5,5

Tabelle 6: Gemessene Globalstrahlungswerte

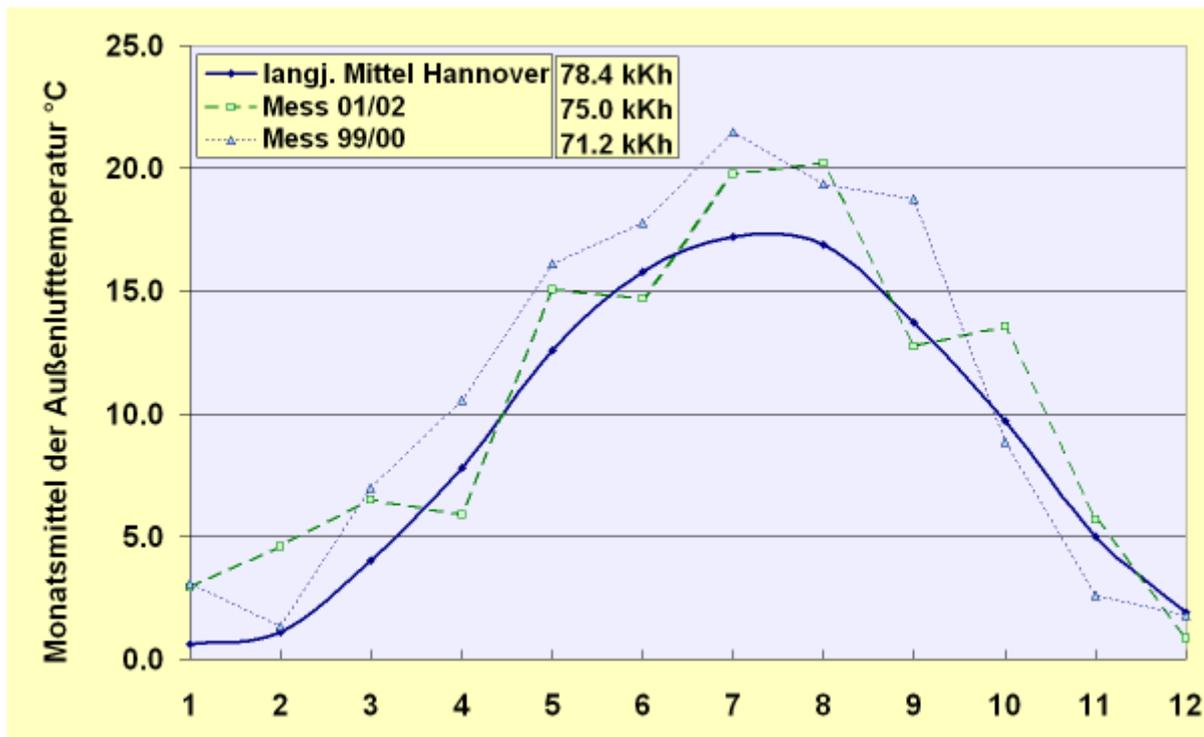


Abbildung 23: Vergleich des Langzeitmittels der Außenlufttemperaturen mit den gemessenen Monatsmittelwerten der untersuchten Heizperioden

In Tabelle 7 sind die Monatsmittelwerte der gemessenen Raumtemperaturen der 32 Passivhäuser der Siedlung dokumentiert. Verwendet wurde für jedes Haus der arithmetische Mittelwert der beiden verfügbaren Messwerte (Erdgeschoss Süd und Obergeschoss Nord). Um die Daten zu anonymisieren, wurde die Reihenfolge der Häuser nach aufsteigender Januar-temperatur gewählt. Alle Häuser (auch die letzten noch nicht regulär bewohnten) wurden in der hier dokumentierten Heizperiode durchgehend auf normales Komfortniveau beheizt. Dadurch entfallen die niedrigeren der Raumtemperaturwerte, die in Tabelle 4 noch vorkamen. Die Temperaturdaten der verschiedenen Nutzer streuen in dieser Heizperiode im Winter zwischen 19 °C und 24 °C (die zugehörige Standardabweichung beträgt ± 1 °C); der Mittelwert im Zeitraum November 2001 bis Ende Februar 2002 über alle Häuser beträgt 21,6 °C. Dieser Wert kann als Maß für das in der Heizperiode gewählte Temperaturniveau gewertet werden. Das Temperaturniveau ist gegenüber der zuerst untersuchten Heizperiode 1999/2000 angestiegen. Dies hat mehrere Ursachen:

- Zunächst sind Häuser bezogen worden, die in 99/00 noch unbewohnt waren.
- Aber auch in den schon zuvor bewohnten Häusern sind die mittleren Temperaturen angestiegen. Hierfür dürften zwei Gründe maßgebend sein: Einige der eingezogenen Familien haben inzwischen Kleinkinder, wodurch längere Anwesenheitszeiten und höhere Temperaturniveaus resultieren.

Hohe Sommertemperaturen kommen nur in zwei Häusern vor; diese waren zum Zeitpunkt der Messungen nicht bewohnt (vgl. Absatz 3.6.4.1).

	Jan 02	Feb 02	Mrz 02	Apr 02	Mai 01	Jun 01	Jul 01	Aug 01	Sep 01	Okt 01	Nov 01	Dez 01
Innentemperaturen °C												
Haus b1	19,4	21,9	20,5	20,8	26,0	25,1	27,4	26,7	22,5	23,0	20,9	19,0
Haus b2	19,8	20,1	19,5	19,8	21,1	20,3	23,2	23,4	19,4	20,1	19,9	19,9
Haus b3	19,9	21,1	21,7	21,1	23,2	22,6	24,8	24,8	21,7	22,7	20,6	19,3
Haus b4	20,1	20,4	20,7	21,8	23,7	23,3	25,6	26,1	23,1	23,2	20,7	19,7
Haus b5	20,3	20,0	19,9	20,4	22,0	21,3	23,6	24,2	21,2	21,4	20,6	20,2
Haus b6	20,5	21,0	20,8	22,3	22,7	21,6	24,2	24,0	22,0	22,2	21,1	20,4
Haus b7	20,8	20,9	20,6	21,1	24,3	23,8	26,1	26,6	23,1	21,3	17,9	18,9
Haus b8	20,9	21,6	21,6	21,7	22,6	22,3	22,5	23,3	22,0	21,8	21,7	21,0
Haus b9	21,0	22,8	22,3	23,6	25,8	26,3	29,3	29,6	23,5	23,0	21,8	20,5
Haus b10	21,0	21,2	21,0	21,2	22,1	21,8	25,3	23,5	22,1	22,2	21,0	20,7
Haus b11	21,0	21,2	20,8	21,0	22,0	20,9	23,6	23,6	20,6	21,6	20,0	20,6
Haus b12	21,1	22,7	22,6	23,4	25,9	25,3	28,4	28,5	24,0	23,2	21,3	20,5
Haus b13	21,2	21,4	21,6	23,3	23,5	23,1	24,3	24,6	22,8	23,7	21,7	21,1
Haus b14	21,4	22,7	22,6	22,6	25,1	24,5	27,1	27,2	24,4	23,8	22,6	21,3
Haus b15	21,5	21,4	21,1	21,8	22,9	22,4	23,8	23,7	21,5	21,5	21,0	21,0
Haus b16	21,6	21,9	21,3	21,1	22,9	22,2	24,1	24,7	21,9	22,5	21,4	21,1
Haus b17	21,6	23,4	23,6	23,0	23,7	23,4	25,3	24,8	22,9	24,2	22,8	21,6
Haus b18	21,7	21,8	21,7	21,6	22,0	21,5	23,3	23,1	21,1	21,5	20,3	20,4
Haus b19	21,8	22,5	22,4	23,9	24,6	23,8	26,0	26,2	24,0	24,1	22,4	21,9
Haus b20	21,9	21,6	21,4	22,6	23,4	22,8	25,0	25,4	22,7	22,8	21,9	21,1
Haus b21	21,9	21,9	20,8	22,0	23,1	22,2	24,7	25,0	22,7	22,7	21,2	20,9
Haus b22	21,9	23,1	22,4	22,1	22,8	22,9	24,2	24,2	23,1	23,2	21,7	20,6
Haus b23	22,1	22,0	20,8	20,9	22,8	22,3	24,9	24,6	21,9	22,4	21,0	21,3
Haus b24	22,2	23,1	23,2	22,9	23,9	22,8	24,9	25,1	22,7	23,8	22,9	21,8
Haus b25	22,3	23,5	22,9	23,1	23,9	23,9	25,5	25,8	23,8	24,5	22,8	22,8
Haus b26	22,4	23,4	21,2	21,7	23,4	23,6	24,4	24,8	22,8	23,1	22,0	21,8
Haus b27	22,5	23,3	23,5	21,8	24,5	24,2	26,7	26,6	22,9	23,1	21,1	22,2
Haus b28	22,9	22,6	22,4	24,6	25,1	24,0	26,0	26,0	23,7	23,3	22,7	23,9
Haus b29	23,2	23,2	22,9	22,2	23,9	23,0	24,4	24,6	22,5	22,3	22,5	21,9
Haus b30	23,5	23,5	22,3	23,0	25,9	25,0	27,1	27,7	23,5	24,2	22,6	21,9
Haus b31	23,8	24,4	24,5	23,4	25,0	24,7	25,9	25,9	22,9	23,8	23,0	22,8
Haus b32	24,2	23,9	23,8	23,8	25,9	24,2	25,4	25,4	23,3	23,8	23,7	23,2

Tabelle 7: Gemessene Innentemperaturen 2001/2002, anonymisiert, nach Temperaturwerten des Monats Januar sortiert

Die aus der Personenbelegung und den gemessenen Stromverbräuchen bestimmten Werte für die inneren Wärmequellen in der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg (Messung 2001/2002) sind in Abbildung 25 dargestellt. Der Mittelwert beträgt für diesen Zeitraum $2,55 \text{ W/m}^2$ (Fehlerbereich: $\pm 0,4 \text{ W/m}^2$); er liegt damit geringfügig über dem Standardansatz nach dem Passivhaus-Projektierungspaket, allerdings noch innerhalb des Fehlerbereiches. Da die Streuung jedoch $\pm 0,8 \text{ W/m}^2$ beträgt, ist es ratsam, bei der Projektierung des Heizwärmebedarfs mit den inneren Wärmequellen auf der sicheren Seite zu bleiben. Der spezifische Haushaltsstromverbrauch

der bewohnten Passivhäuser ist mit etwa $22,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ gegenüber dem Wert von $23,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ im Messjahr 1999/2000 nahezu unverändert. Der vorhandene spezifische Stromverbrauch mit $22 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ als vergleichsweise niedrig anzusehen; da der Zielwert von $18 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ aber überschritten wird, ergeben sich auch entsprechend höhere Ansätze für die inneren Wärmequellen; die Differenz entspricht ziemlich genau den zusätzlichen $0,45 \text{ W}/\text{m}^2$ an innerer Wärmelast.

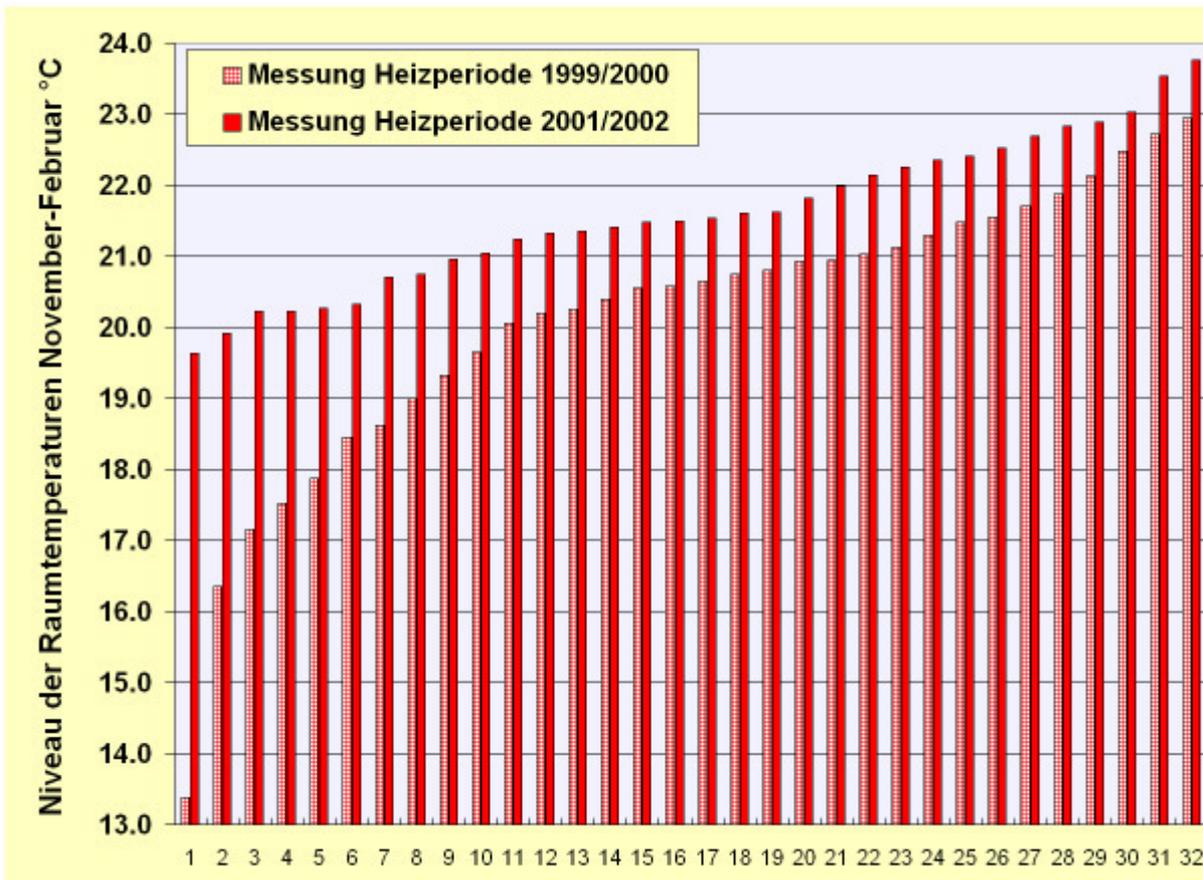


Abbildung 24: Vergleich des Raumtemperaturniveaus in den 32 Passivhäusern für die beiden untersuchten Heizperioden; die nicht oder nur wenig beheizten Wohnungen (1999 noch 10) sind entfallen; die Verteilung weist daher eine geringere Streuung auf, das Temperaturniveau ist aber auch in den schon zuvor bezogenen Wohnungen angehoben worden.

Mit im Mittel 2,78 Personen je Haus (1,9 Erwachsene und 0,88 Kinder) liegt die Personenbelegung im durchschnittlichen Bereich.

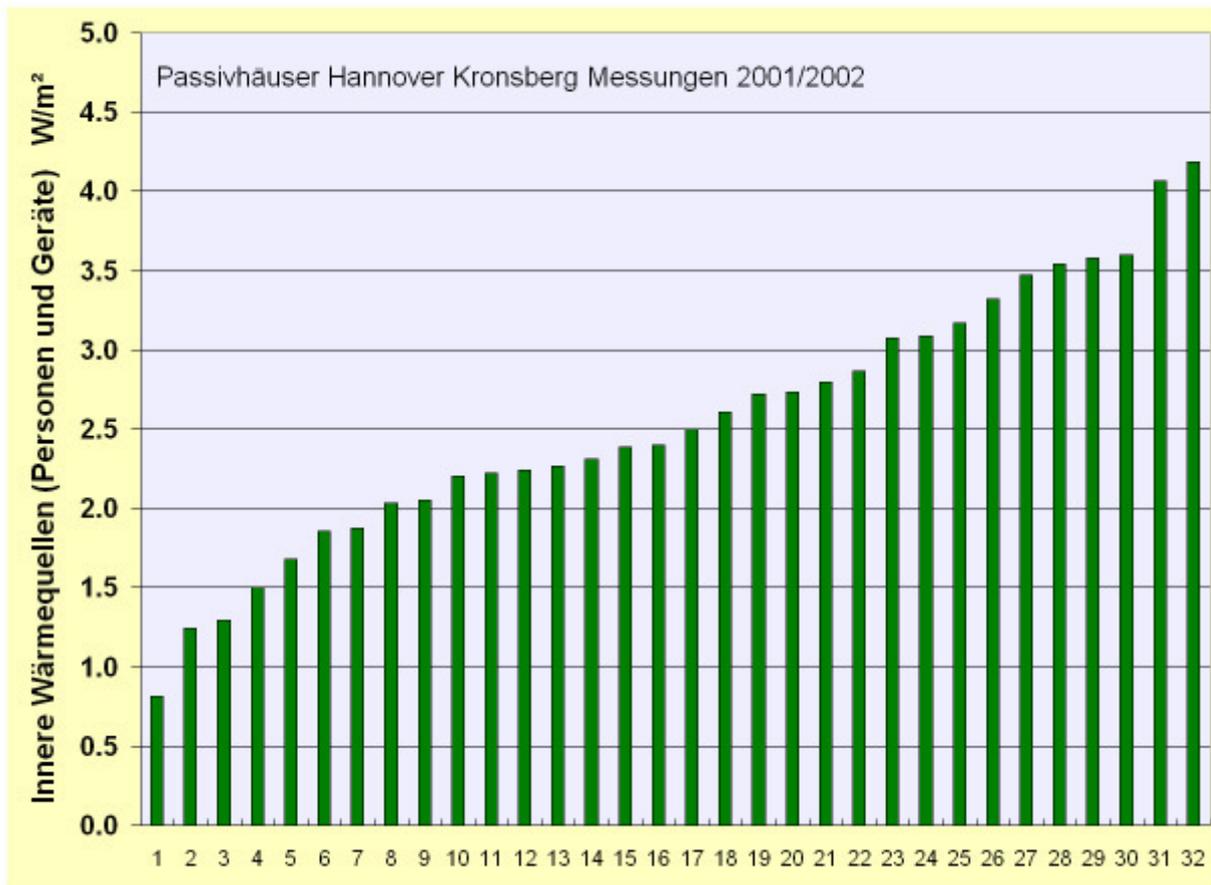


Abbildung 25: Innere Wärmequellen in den 32 Passivhäusern der Siedlung in Hannover-Kronsberg, Messung 2000 / 2001

3.5.2 Modellergebnisse für die Heizperiode 2001/2002

Wir werden im Folgenden die Randbedingungen der Berechnung mit dem Modell immer genauer den tatsächlich in der Siedlung vorgefundenen Randbedingungen anpassen und dadurch die Einflüsse der verschiedenen Parameter analysieren.

3.5.2.1 Wärmebedarf bei Normalbedingungen und Langzeitmittel des Klimas Deutschland

Ursprünglich wurde der Wärmebedarf der Passivhäuser unter Normalbedingungen für das Nutzerverhalten und mit Langzeitmittelwerten für das Klima in Deutschland berechnet:

- mittlere Innentemperatur 20 °C
- mittlere innere Wärmequellen: 2,1 W/m²
- Standardklima Deutschland des Passivhaus Projektierungs Paketes [PHPP 2002].

Mit diesen Standardrandbedingungen ergeben sich für die Häuser der Siedlung die in [Feist 2001a] dokumentieren Jahresheizwärmebedarfswerte nach Tabelle 8. Der Mittelwert der gesamten Anlage aus 32 Häusern würde unter den Standardrandbedingungen 11,8 kWh/(m²a) Heizwärmebedarf aufweisen.



Endhaus Jangster de lüx	Mittelhaus Jangster de lüx	Mittelhaus Jangster	"123"	Mittelwert 32 Häuser
kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)
14,0	10,0	12,5	14,7	11,8

Tabelle 8: Jahresheizwärmebedarf der Passivhäuser unter Standardbedingungen (Klima Deutschland, $\vartheta_i=20^\circ\text{C}$, $P_i=2,1\text{ W/m}^2$)

3.5.2.2 Wärmebedarf bei Normalbedingungen und am Standort gemessenen Wetterdaten der hier betrachteten Messperiode 2001/2002 in Hannover

Beibehalten werden die Daten für das „normale Nutzungsprofil“:

- mittlere Innentemperatur 20°C
- mittlere innere Wärmequellen: $2,1\text{ W/m}^2$

Nun werden jedoch die Wetterdaten verwendet, die auf der Basis der am Standort installierten Wetterstation bestimmt wurden. Unter diesen Bedingungen ergeben sich für die Häuser der Siedlung die Jahresheizwärmebedarfswerte nach Tabelle 9. Der Mittelwert der gesamten Anlage aus 32 Häusern würde unter Standardnutzungsbedingungen am Standort in der Heizperiode 2001/2002 einen Heizwärmebedarf von $9,3\text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ aufweisen. Wie schon in Abschnitt 3.5.1 dokumentiert, waren die Wetterverhältnisse im Messjahr am Standort milder als das normalerweise verwendete Standardklima. Das mildere Klima würde sich in einer Reduktion der Heizwärmebedarfswerte um 21% auswirken, wenn es keine weiteren Einflüsse gäbe.

Endhaus Jangster de lüx	Mittelhaus Jangster de lüx	Mittelhaus Jangster	Haustyp "123"	Mittelwert 32 Häuser
kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)
11,2	7,9	9,8	9,6	9,3

Tabelle 9: Jahresheizwärmebedarf der Passivhäuser mit Wetterdaten Hannover-Kronsberg Messwerte 2001/2002 aber sonst unter Standardbedingungen ($\vartheta_i=20^\circ\text{C}$, $P_i=2,1\text{ W/m}^2$)

3.5.2.3 Berücksichtigung der Mittelwerte der aktuellen Nutzungsparameter

Die aktuellen Daten für die Nutzung der Passivhäuser auf dem Kronsberg unterscheiden sich nicht nur in der Verteilung, sondern auch in den Mittelwerten von den Standardwerten. Setzen wir bei den konstanten Randbedingungen nicht die Standardwerte, sondern die aus den Messungen erhaltenen Mittelwerte ein, so ist (vgl. Abschnitt 3.5.1):

- mittlere Innentemperatur 21,6°C (November bis Februar)
- mittlere innere Wärmequellen: 2,55 W/m²

Weiterhin werden die am Standort gemessenen Wetterdaten verwendet. Unter diesen Bedingungen ergeben sich für die Häuser der Siedlung die Jahresheizwärmebedarfswerte nach Tabelle 10. Der Mittelwert des Heizwärmebedarfs aus 32 Häusern am Standort in der Heizperiode 2001/2002 mit den mittleren gemessenen Nutzungsbedingungen beträgt 10,6 kWh/(m²a). Der Mittelwert liegt bereits näher am tatsächlich gemessenen Verbrauchswert (12,8 kWh/(m²a)).

Endhaus Jangster de lüx	Mittelhaus Jangster de lüx	Mittelhaus Jangster	"123"	Mittelwert 32 Häuser
kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m²a)
12,7	9,0	11,3	13,7	10,6

Tabelle 10: Jahresheizwärmebedarf der Passivhäuser mit Wetterdaten Hannover-Kronsberg Messwerte 2001/2002 und unter konstanten Randbedingungen (Mittelwerte: $\vartheta_i=21,6^\circ\text{C}$, $P_i=2,55\text{ W/m}^2$)

Allerdings ist auf der Basis der Verwendung von Mittelwerten nicht zu erwarten, dass die Einzelbedarfswerte der Modellrechnung, die nur die baulichen Unterschiede berücksichtigen, zu den Einzelmesswerten passen. Wie Abbildung 26 zeigt, ist dies auch nicht der Fall. Der Korrelationskoeffizient ist mit 28% erwartungsgemäß gering.

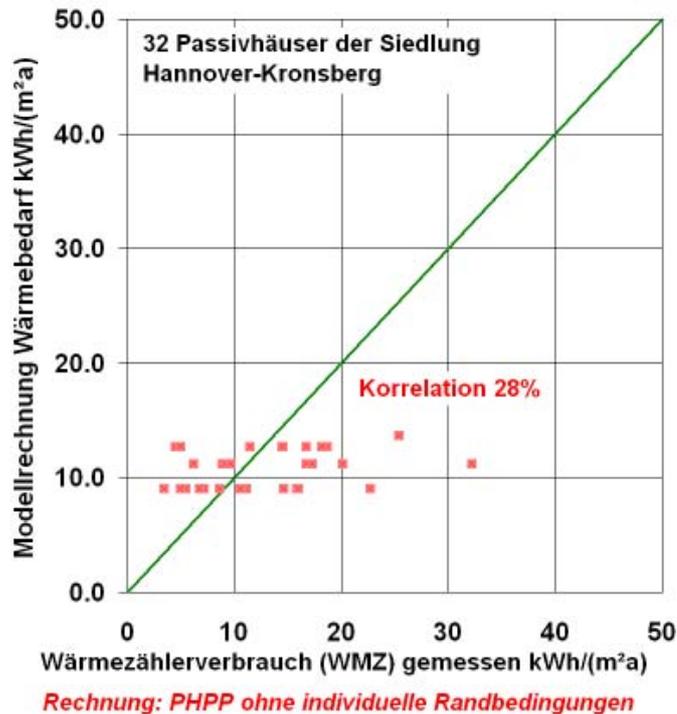


Abbildung 26: Korrelationsanalyse der gemessenen Wärmeverbräuche (WMZ) (x-Achse) gegen die Modellrechnung mit konstanten Randbedingungen (gemessenes Klima, Innentemperaturmittelwerte von 21,6°C und 2,55 W/m² innere Wärmequellen; y-Achse).

3.5.2.4 Individuelle Wärmeverluste infolge individueller Haustemperaturen

Im hier dokumentierten Schritt wurden nun die Wärmeverluste gegen Außenluft und an das Erdreich für jedes der 32 Häuser mit der aktuellen monatsmittleren Temperaturdifferenz zur individuellen Innentemperatur gemäß Tabelle 7 berechnet. Der Mittelwert des Heizwärmebedarfs der Siedlung mit den individuellen Wärmeverlusten steigt dann auf 10,8 kWh/(m²a) an; die Zunahme ist darauf zurückzuführen, dass die Nutzbarkeit der freien Wärmegewinne nichtlinear vom Gewinn/Verlustverhältnis abhängt. Der Minderverbrauch in „kälteren“ Wohnungen kompensiert den Mehrverbrauch in wärmeren Wohnungen nicht vollständig, weil die Nutzbarkeit der freien Wärme in den wärmeren Wohnungen nicht im gleichen Maße zunimmt, wie sie in den kälteren abnimmt. Zunächst überraschend ist, dass durch die Verwendung der individuellen Temperaturdaten der Korrelationskoeffizient zwischen Modellrechnung und Messdaten nicht verbessert wird. Dies unterstreicht noch einmal, dass eine Analyse der Daten alle wesentlichen physikalischen Zusammenhänge berücksichtigen muss: Das Modell verwendet in dieser Stufe die Innentemperaturen nur für die Berechnung des Wärmeverlustes über die Außenbauteile. Weit bedeutender sind aber die inneren Wärmeströme auf Grund der Temperaturdifferenzen zwischen den Wohnungen; berücksichtigt man diesen Zusammenhang nicht, so ist eine hohe Korrelation nicht zu erwarten.

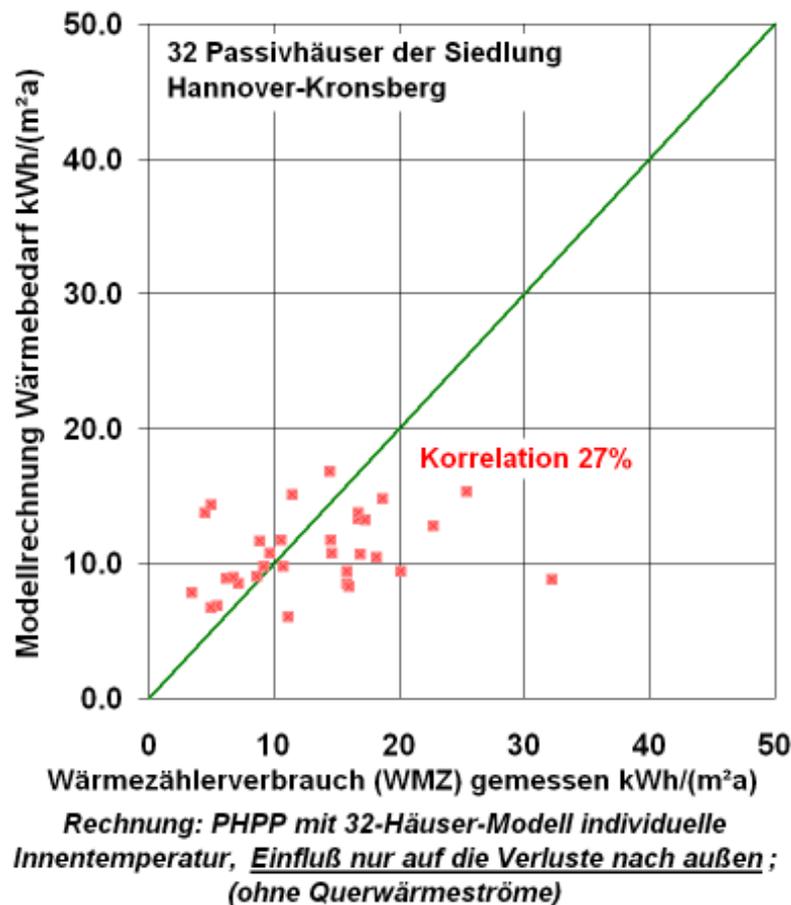


Abbildung 27: Korrelationsanalyse der gemessenen Wärmeverbräuche (WMZ) gegen die Modellrechnung mit individuellen Temperaturen für die Berechnung der Wärmeverluste (gemessenes Klima; konstant 2,55 W/m² innere Wärmequellen).

3.5.2.5 Querwärmeströme infolge Temperaturdifferenzen zwischen den Häusern

Im letzten Abschnitt war der Wärmedurchgangskoeffizient der Trennwände zwischen den Häusern noch auf Null gesetzt worden. Nun wird hier der nach Abschnitt 3.2 bestimmte Wert von H_{Trenn} (etwa **46,6 W/K**) zwischen benachbarten Wohnungen eingesetzt. Daraus resultieren zum Teil erhebliche Querwärmeströme zwischen den Häusern. Diese haben zur Auswirkung, dass die ohnehin vorhandenen Verbrauchsunterschiede verstärkt werden: Hat ein Haus ein höheres Innentemperaturniveau (und damit einen höheren Wärmeverlust nach außen), so sind auch die Wärmeströme zu den Nachbarhäusern erhöht. Weil die Haustrennwände aber bei weitem nicht so gut gedämmt sind wie die Außenbauteile, wirkt sich der Effekt der Querwärmeströme auf die individuellen Heizwärmeverbräuche relativ stark aus.

Der Mittelwert des Heizwärmebedarfs inklusive der Querwärmeströme steigt nochmals auf nunmehr 11,5 kWh/(m²a) um +0,7 kWh/(m²a) an; die Zunahme ist wieder darauf zurückzuführen, dass der Minderverbrauch in „kälteren“ Wohnungen den Mehrverbrauch in wärmeren Wohnungen nicht vollständig kompensiert, weil die Nutzbarkeit der freien Wärme in den wärmeren Wohnungen nicht im gleichen Maße zunimmt, wie sie in den kälteren abnimmt. Der Anstieg ist aber im Vergleich zu den

mittleren über die Trennwände ausgetauschten Energieströmen ($\pm 6,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) unbedeutend.

Wie Abbildung 28 zeigt, verbessert die Einbeziehung der Querwärmeströme die Korrelation zwischen den berechneten Werten und dem gemessenen Heizwärmebedarf beträchtlich. Der Zusammenhang zwischen gemessenem und berechnetem Heizwärmebedarf ist signifikant bei einem Signifikanzniveau von 3%. Allerdings liefert ein Korrelationskoeffizient r von 38% (entsprechend einem Bestimmtheitsmaß von $r^2=14\%$) noch immer keine überwältigende Erklärung für die Streuung der Messdaten. Für die Verbrauchswerte der Passivhaussiedlung in Wiesbaden [Feist 2001b] und der Wohnungen im Passivhausgeschosswohnungsbau in Kassel [Pfluger 2001] war das Bestimmtheitsmaß mit den bisher eingeführten Variablen bereits deutlich höher. Betrachtet man Abbildung 35 genauer, so fällt auf, dass die Korrelation hoch ist, solange das Haus mit dem höchsten gemessenen Verbrauch herausgenommen wird. Unter vorläufige Aussparung dieses „Ausreißers“ ergibt sich tatsächlich ein Korrelationskoeffizient in der reduzierten Gesamtheit von 55%. Die Querwärmeströme können somit (mit Ausnahme der noch zu klärenden Ursachen für die Abweichung des „Ausreißer-Hauses“) einen bedeutenden Anteil an der verbliebenen Streuung der Verbrauchswerte erklären.

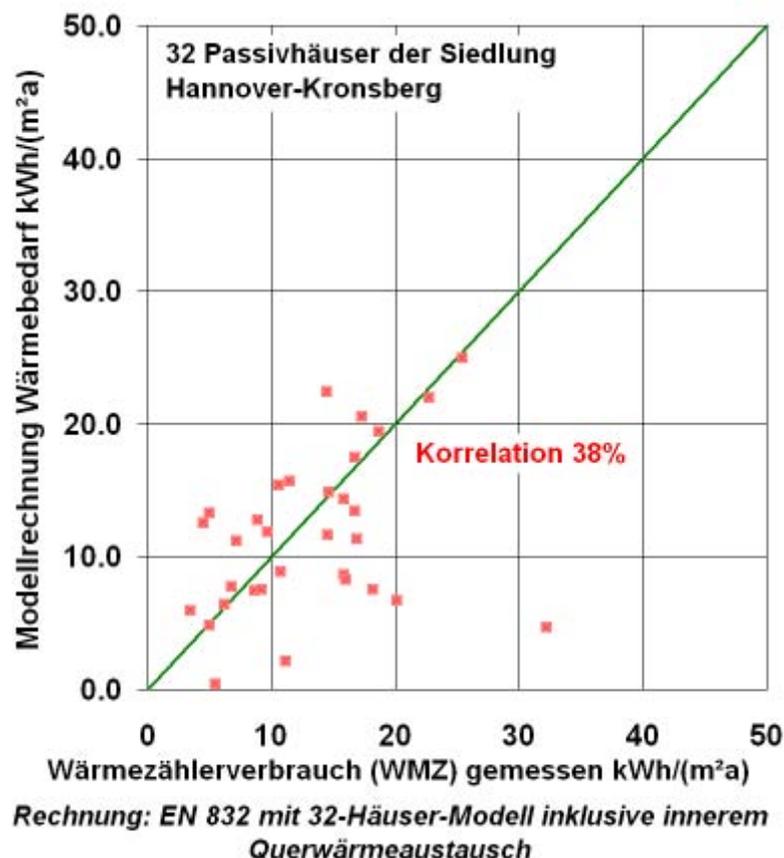


Abbildung 28: Korrelationsanalyse der gemessenen Wärmeverbräuche (WMZ) gegen die Modellrechnung mit individuellen Temperaturen, nun auch für die Berechnung der Querwärmeströme zwischen den Häusern über die Trennwände (gemessenes Klima; konstant $2,55 \text{ W}/\text{m}^2$ innere Wärmequellen).

3.5.2.6 Individuelle Werte für die inneren Wärmequellen

Für die Passivhaussiedlung auf dem Kronsberg liegen Angaben zur Personenbelegung und Messwerte des individuellen Haushaltsstromverbrauchs vor. Die Anwesenheitszeiten konnten nicht projektspezifisch erhoben werden, sondern wurden aus an anderen Orten erhobenen Durchschnittsdaten übernommen [Kaufmann 2001]. Auch ist die Verteilung des Stromverbrauchs auf die Einzelanwendungen nicht gemessen worden; diese unterscheiden sich in der Verfügbarkeit der von ihnen abgegebenen Wärme (Herd: viel Verdunstungswärme mit Verfügbarkeit nahe Null; Kühlschrank: im wesentlichen Strahlungswärme und konvektiv abgegebene Wärme mit Verfügbarkeit nahe 1). Dennoch lassen sich mit der Annahme von üblichen Randbedingungen die individuellen inneren Wärmequellen auf der Basis der vorliegenden Informationen abschätzen. In Abbildung 25 sind diese Werte bereits dokumentiert.

Aus Abbildung 29 wird nun deutlich, dass die Einbeziehung der individuellen inneren Wärmequellen in die Energiebilanzen des 32-Häuser-Modells die Korrelation zwischen den berechneten Werten und dem gemessenen Heizwärmebedarf nochmals auf 42% (entsprechend einem Bestimmtheitsmaß von $r^2=18\%$) erhöht. Nimmt man den erkennbaren Ausreißer wieder heraus, so ergibt sich ein Korrelationskoeffizient in der reduzierten Gesamtheit von 65%.

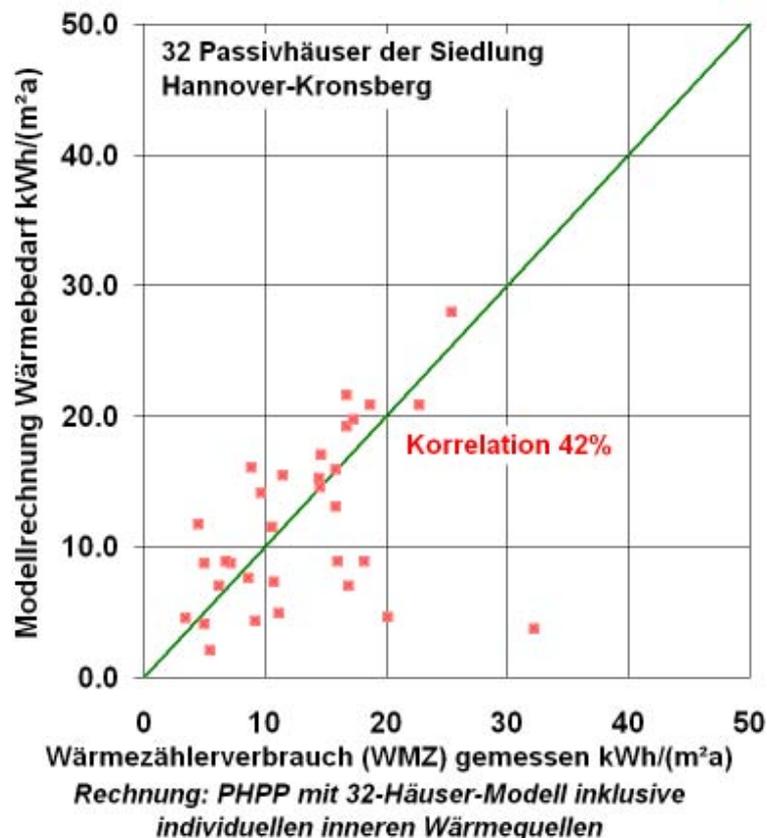


Abbildung 29: Korrelationsanalyse der gemessenen Wärmeverbräuche (WMZ) gegen die Modellrechnung mit individuell angesetzten inneren Wärmequellen (gemessenes Klima; gemessene Innentemperaturen; inkl. Querwärmeströme).

3.5.2.7 Einbeziehung der Informationen zu zusätzlichen Fensteröffnungen

Informationen zur Häufigkeit von zusätzlichen winterlichen Fensteröffnungen liegen aus zwei Quellen vor: Aus der Befragung der Nutzer [Danner 2001] und aus der Beobachtung der Fensterstellungen im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung [Peper 2001c]. Nach beiden Informationen gibt es nur wenige Häuser, in denen im Kernwinter regelmäßig Fensterkippstellungen oder ganze Fensteröffnungen vorgenommen werden: In drei Häusern kann von einer regelmäßigen Kippstellung von Fenstern OG Nord in der Nacht ausgegangen werden; bei 9 Stunden Kippstellung und einem mittleren Luftaustausch über ein solches Fenster von etwa $80 \text{ m}^3/\text{h}$ [Maas 1995] ergibt sich in den betreffenden Häusern durchschnittlich ein zusätzlicher winterlicher Fensterluftwechsel von etwa $0,28 \text{ h}^{-1}$. Dies führt rechnerisch zu einer Erhöhung des Heizwärmebedarfs in den betroffenen Häusern von etwa $11 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Für ein Haus wird darüber hinaus von regelmäßigem vollständigem Fensteröffnen im Obergeschoss (wie schon in der Heizperiode 1999/2000) ausgegangen. Umgelegt auf die gesamte Siedlung ergibt sich durch diese Fensteröffnungstellungen ein zusätzlicher Luftwechsel von etwa $0,04 \text{ h}^{-1}$ ($\pm 0,02 \text{ h}^{-1}$). Für die Gesamtstatistik ist der resultierende mittlere Fensterluftwechsel im Winter daher vernachlässigbar gering, für die Verbräuche in den betroffenen Einzelhäusern jedoch von spürbarem Einfluss. Die Befragung von [Danner 2001] ergab einen signifikanten Rückgang der Angabe „Fenster mehrere Stunden gekippt“ zwischen der Heizperiode 1999/2000 (12%) und 2001/2002 (7%). Diesen Rückgang konnten wir anhand der Verbrauchsstatistik nachvollziehen: Tatsächlich fällt ein Haus aus der Kategorie der „Fensterkippstellung“ heraus; aus der Literatur ist bekannt, dass ein Bedürfnis nach zusätzlichem Lüften vor allem in den ersten Jahren nach dem Bezug eines Neubaus besteht. Diese Tendenz bestätigt sich auch für den (ohne geringen) Anteil der Fensterkippstellungen in der Passivhaussiedlung.

Abbildung 30 zeigt die Korrelationsanalyse unter Einbeziehung des Einflusses einer zusätzlichen Fensterlüftung. Gegenüber Abbildung 29 haben sich die rechnerischen Werte der betroffenen vier Häuser nach oben bewegt. Dadurch ergibt sich eine deutliche Verbesserung beim Korrelationskoeffizienten auf 86% und für das Bestimmtheitsmaß auf 74%.

Nach dem rechnerischen Modell erhöht die zusätzliche Fensteröffnung den durchschnittlichen Heizwärmebedarf in der Siedlung um etwa 13%. Das entspricht in absoluter Höhe einer Zunahme um $1,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$; es besteht also ein prinzipielles Einsparpotential durch ein verändertes Nutzerverhalten in dieser Beziehung, jedoch ist gerade bei den betroffenen Häusern der rechnerische Bedarf und der tatsächliche Verbrauch an Heizwärme mit 16 bis $30 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ nicht übermäßig hoch.

Auch in den Häusern mit ausgiebiger zusätzlicher Fensteröffnung funktioniert das Passivhauskonzept ohne Problem, und die Zusatzverluste halten sich in Grenzen. Es wäre allerdings ein Trugschluss, aus der Funktionsfähigkeit der Gebäude auf die Möglichkeit eines Verzichts auf die kontrollierte Wohnungslüftung schließen zu wollen: Der durchschnittliche Zusatzluftwechsel von $0,28 \text{ h}^{-1}$ wäre allein nicht ausreichend, raumlufthygienisch zufriedenstellende Ergebnisse herzustellen. Vielmehr gibt es je nach Witterung Zeiträume mit überhöhtem Luftwechsel sowie Abschnitte mit viel zu geringer Lüfterneuerung. Ohne kontrollierte Lüftung müsste in den Häusern weit mehr gelüftet werden (eben nicht nur einzelne zeitweise gekippte Fenster),

wodurch sich der Heizwärmeverbrauch stärker erhöhen würde (schon im Einzelhaus). Entscheidend ist jedoch, dass ohne kontrollierte Wohnungslüftung die Fensterlüftung in allen Wohneinheiten aktiviert werden müsste. Aus der Modellrechnung ergab sich, dass die durchschnittlichen Heizwärmebedarfswerte der Häuser bei sonst gleicher Bauweise ohne Wärmerückgewinnung und mit der notwendigen zusätzlichen Fensterlüftung bei etwa 35 kWh/(m²a) liegen würden (Zunahme um nahezu einen Faktor 3 gegenüber dem Messwert).

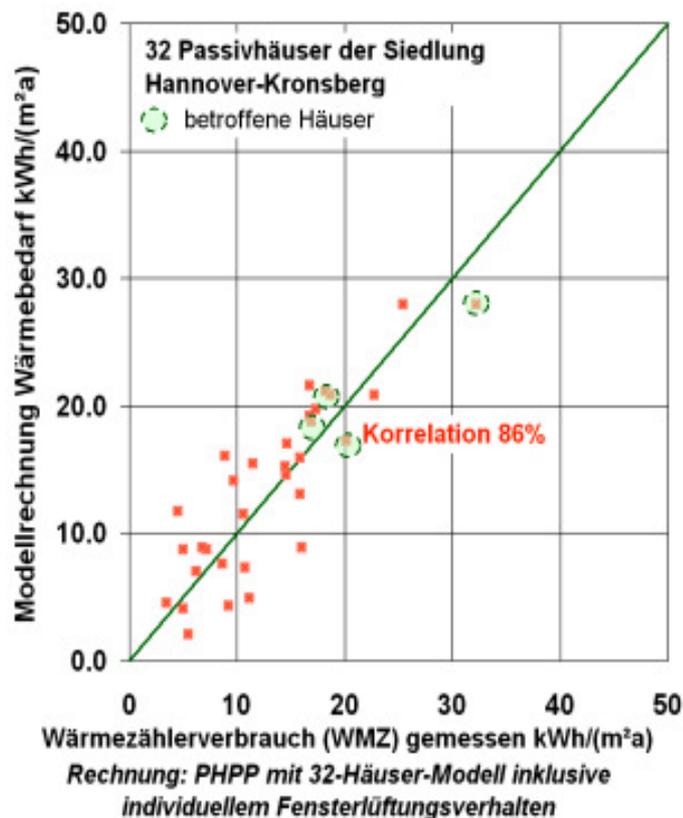


Abbildung 30: Korrelationsanalyse der gemessenen Wärmezählerverbräuche gegen die Modellrechnung mit Berücksichtigung von Fensterkipp- und Öffnungsstellungen (gemessenes Klima; gemessene Innentemperaturen; inkl. Quersärmeströme; inkl. individueller innerer Wärmequellen).

3.5.2.8 Einbeziehung der Drucktestergebnisse

In der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg wurden Gebäudeluftdichtheitsprüfungen in allen Häusern einschließlich der Elimination der Luftströme zwischen den Wohneinheiten mit Schutzdruckmessungen durchgeführt [Peper 1999]. Der Mittelwert der Restundichtheit lag bei $n_{50}=0,29 \text{ h}^{-1}$, die Einzelwerte der 32 Häuser erstreckten sich von $0,18$ bis $0,40 \text{ h}^{-1}$. Damit sind die Passivhäuser der Siedlung als besonders dicht einzuschätzen und die bestehende Differenz zwischen den Einzelhäusern hat keinen besonders auffälligen Einfluß auf die Energiebilanz. Das 32 Zonenmodell erlaubt die Berücksichtigung der individuellen Drucktestergebnisse durch einen Infiltrationsterm, der den energieäquivalenten Luftwechsel um Δn erhöht:

$$\Delta n = n_{50} \cdot e_{\text{wind}}$$

Der Infiltrationsvolumenstrom V_x ergibt sich aus dem n_{50} -Wert gemäß Formel (44) der DIN V 1946-6. Dabei wurde (in Ermangelung genauerer Informationen) davon ausgegangen, dass die Lüftungsanlagen in Balance betrieben werden. Unter der Voraussetzung von zwei Einwirkungsseiten und halbfreier Lage der Bebauung ergibt sich der Windschutzfaktor e_{wind} zu 0,07. Setzen wir die individuellen Ergebnisse der Luftdichtheitsprüfungen in die obige Gleichung ein, so ergeben sich (geringfügige) Korrekturen der rechnerischen Heizwärmebedarfswerte. Zu bedenken ist an dieser Stelle, dass die Infiltration neben der Dichtheit der Hülle auch noch durch andere Parameter deutlich beeinflusst wird: Z.B. durch den Zustand der Innentüren (geschlossen oder geöffnet). Da auch hierüber keine genaueren Informationen vorliegen, begnügen wir uns mit der Berücksichtigung des durch die obige Formel erfassten Einflusses. Die individuellen Wärmebedarfswerte ändern sich durch die Berücksichtigung der unterschiedlichen Infiltration um bis zu 0,6 kWh/(m²a) (max. 5% des mittleren Heizwärmebedarfs). Wie Abbildung 31 zeigt, verbessert die Berücksichtigung der individuellen Restleckagewerte die Korrelation nur unmerklich (jetzt bei 87%). Der Grund für den relativ geringen Einfluss liegt vor allem darin, dass alle Häuser bereits eine sehr hohe Luftdichtheit aufweisen; dies war erklärtes Ziel beim Bau der Häuser, welches auch erfolgreich gemeistert wurde. Würde man höhere Undichtheiten z.B. im Bereich von 0,8 h⁻¹ zulassen, wie es manchmal vorgeschlagen wird, so würde sich dagegen der Heizwärmebedarf um bis zu 3 kWh/(m²a) erhöhen. Auf die Anforderung „ $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$ “ für Passivhäuser kann daher nicht verzichtet werden.

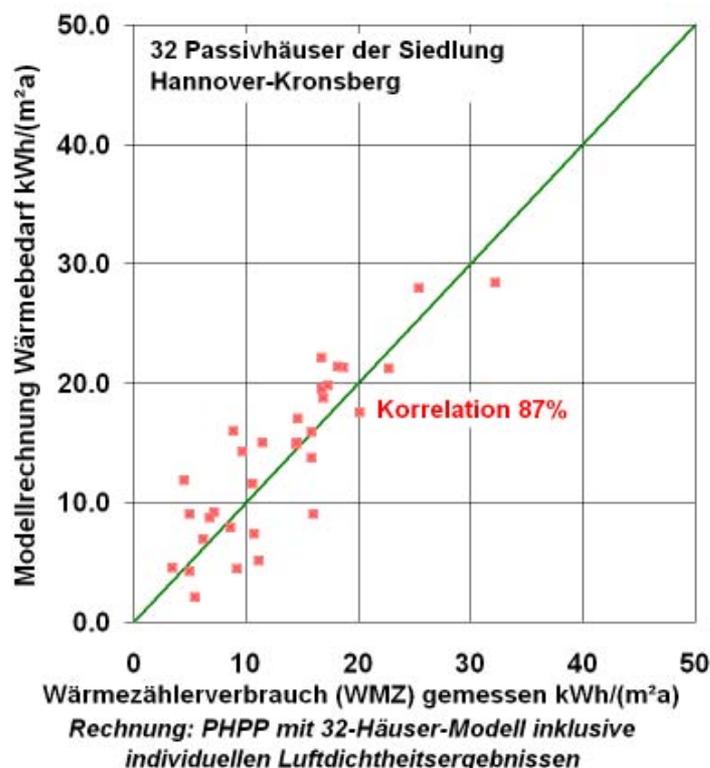


Abbildung 31: Korrelationsanalyse der gemessenen Wärmeverbräuche (WMZ) gegen die Modellrechnung mit Berücksichtigung der n_{50} -Luftdichtsmessungen (gemessenes Klima; gemessene Innentemperaturen; inkl. Querwärmeströme; inkl. individueller innerer Wärmequellen; inkl. Fensteröffnungsverhalten).

3.5.2.9 Fehlerbetrachtung

Der Vergleich von theoretischer Berechnung mit dem Monatsmodell der 32 Häuser der Passivhaussiedlung liefert unter Berücksichtigung aller gemessenen und erhobenen Einflussparameter

- gemessenen Wetterbedingungen (Außentemperatur, Solarstrahlung)
- gemessenen Innentemperaturen (2 Werte je Haus, ein Haus nur ein Wert) und deren Einfluss auf die Wärmeverluste nach außen,
- berechneten Querwärmeströmen zwischen den Häusern,
- Höhe der individuellen inneren Wärmequellen,
- Befragungsergebnissen zum Fensteröffnungsverhalten,
- Drucktestergebnissen der Einzelhäuser

die in Abbildung 32 dargestellten Ergebnisse. Berechnung und Messwerte passen erkennbar gut zusammen. Die mittlere quadratische Abweichung zwischen Messung und Rechenwerten beträgt mit diesen Daten $\pm 3,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. In [Feist 2001, S. 52] war die potentielle Genauigkeit einer Modellrechnung mit exaktem rechnerischen Modell, sorgfältiger Datenaufnahme und korrekter Durchführung der Berechnung mit $\pm 3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ abgeschätzt worden.

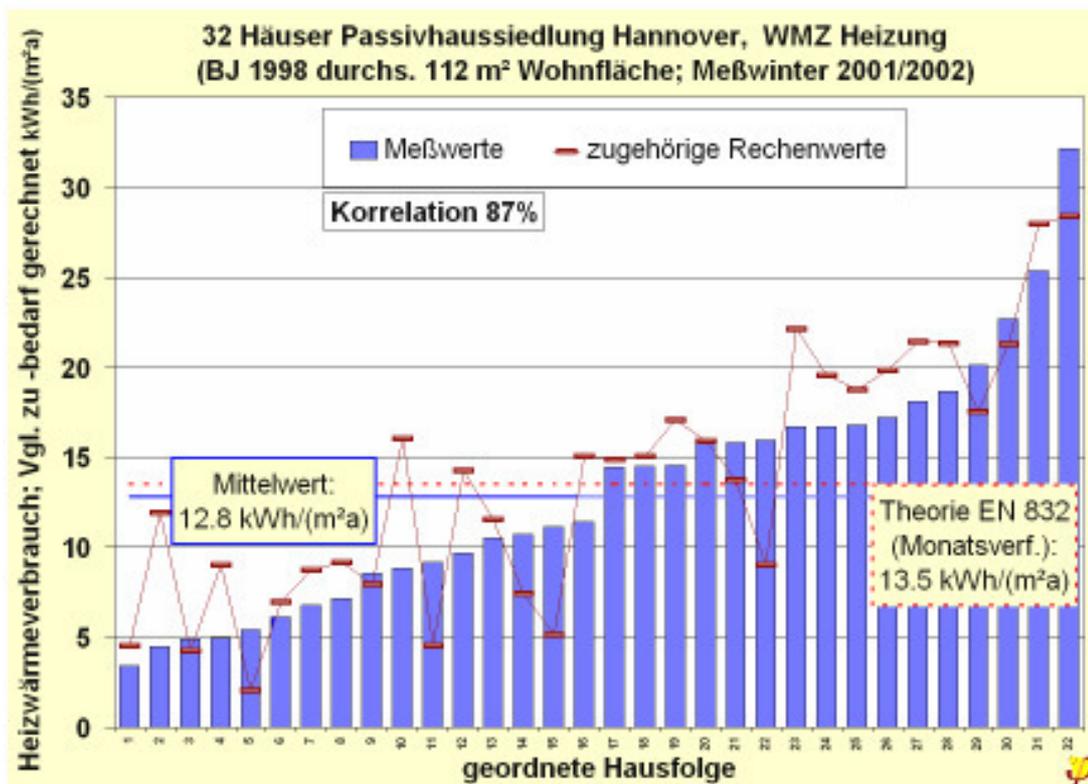


Abbildung 32: Vergleich der aufsteigend angeordneten gemessenen Wärmeverbräuche (WMZ) mit der Modellrechnung unter Berücksichtigung aller gemessenen und bekannten spezifischen Nutzungsparameter (gemessenes Klima; gemessene Innentemperaturen; inkl. Querwärmeströme; inkl. individueller innerer Wärmequellen; inkl. Fensteröffnungsverhalten; inkl. n₅₀-Luftdichtsmessungen) im Messwinter 2001/2002.

Die in diesem konkreten Fall erreichte Übereinstimmung liegt damit bereits sehr nahe an der überhaupt erreichbaren Grenze. Die Fehlerbetrachtung in [Feist 2001] war davon ausgegangen, dass folgende Fehlereinflüsse vorliegen, die für den konkreten Fall der Siedlung Hannover-Kronsberg gegebenenfalls korrigiert wurden:

- ① Abweichungen bei Wärmedämmdicken, Wärmeleitfähigkeiten und Maßketten: Subsummiert in Dämmstärken ± 15 mm $\rightarrow \Delta Q_h = 0,7$ kWh/(m²a).
- ② Abweichungen bei der Wärmerückgewinnung: Subsummiert in einer Variation des effektiven Wärmebereitstellungsgerades von ± 5 % $\rightarrow \Delta Q_h = 1,2$ kWh/(m²a).
- ③ Messgenauigkeit der Drucktestergebnisse: $\pm 0,05$ h⁻¹ $\rightarrow \Delta Q_h = 0,24$ kWh/(m²a).
- ④ Abweichungen des Wärmeschutzes bei Fenstern: $\Delta U_w = \pm 0,07$ W/(m²K) $\rightarrow \Delta Q_h = 0,6$ kWh/(m²a).
- ⑤ Messgenauigkeit bei den Raumtemperaturen: $\pm 0,6$ °C $\rightarrow \Delta Q_h = 1,2$ kWh/(m²a).
- ⑥ Unbestimmtheit des nutzungsbedingten Luftwechsels (erhöht gegenüber der Angabe in [Feist 2001]): $\pm 0,02$ h⁻¹ $\rightarrow \Delta Q_h = 1,7$ kWh/(m²a).
- ⑦ Unbestimmtheit der inneren Wärmelast (erhöht gegenüber der Angabe in [Feist 2001]): $\pm 0,4$ W/m² $\rightarrow \Delta Q_h = 1,7$ kWh/(m²a).

Dazu kommt der Messfehler der Wärmemengenzähler für den Heizwärmebezug in den Einzelhäusern. Bei den vorliegenden kleinen Volumenströmen kann es hierbei insbesondere zu Abweichungen durch nicht registrierte Anlaufwärmemengen kommen. Wir schätzen diesen Messfehler mit $\pm 1,3$ kWh/(m²a) ab.

Nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz ergibt sich aus den aufgeführten Fehlerabschätzungen für diese Siedlung ein mittlerer quadratischer Gesamtfehler von

$$\Delta Q_{h,ges} = \pm 3,3 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}.$$

Die hier ermittelte quadratische Abweichung liegt mit $\pm 3,6$ kWh/(m²a) nicht sehr viel höher. Dies zeigt, dass sowohl die bedeutendsten Einflussparameter gefunden und beachtet wurden, als auch die Abschätzungen für die Fehler realistisch sind.

Weitergehend können wir daraus nun folgern, dass die in den Abschnitten 3.5.2.2 bis 3.5.2.8 quantitativ diskutierten Einflussgrößen sowohl von ihrer Bestimmung, als auch von der in der monatlichen Energiebilanz im Modell verwendeten Abhängigkeit vernünftig getroffen wurden. Haupteinflüsse liegen damit bei den Innentemperaturen, insbesondere bei den durch diese verursachten Querwärmeströmen, bei der Höhe der inneren Wärmequellen und beim individuellen Fensterlüftungsverhalten.

Mit der hier verfügbaren Genauigkeit der Erfassung dieser Einzelgrößen konnten die vorliegenden individuellen Verbrauchswerte mit dem in Abschnitt 3 beschriebenen Ansatz aus 32 gekoppelten Einkapazitätenmodellen mit einem Bestimmtheitsmaß von am Ende $r^2=0,75$ nachvollzogen werden. Noch 25% der vorliegenden Schwankungen der Verbrauchswerte werden als auf der Basis dieses Modells und der verfügbaren Daten (und deren Genauigkeit) nicht erklärt. Allein auf Grund der vorliegenden Messgenauigkeiten ist eine wesentlich höhere Korrelation kaum erreichbar.

3.5.2.10 Vergleich von Monatswerten zwischen Messung und Modellrechnung

Auch wenn im Standardverfahren nach EN 832 empfohlen wird, monatliche Energiebilanzen zu berechnen, schränkt die Norm die Verwendbarkeit der rechnerisch ermittelten monatlichen Wärmebedarfswerte (bewusst) ein: Das Monatsverfahren wird als ein geeigneter Algorithmus für die Bestimmung von Jahresbilanzen angesehen; die im Verlaufe der Berechnung ermittelten monatlichen Werte haben nicht den Anspruch, die einzelnen monatlichen Verbräuche zutreffend abzubilden; dies ist methodisch durch den quasistationären Berechnungsansatz bedingt, da unterschiedliche Ladungszustände der Wärmekapazitäten nicht über die Monatsgrenzen nach dem verwendeten Verfahren übertragen werden.

Interessehalber haben wir in Abbildung 33 die Messwerte für die monatlichen Heizwärmeverbräuche aller 32 Häuser (in kWh/(m²a)) den nach dem 32-Zonenmodell berechneten Werten gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass auch die monatlichen Werte qualitativ in vertretbarer Genauigkeit wiedergegeben werden (mittlere quadratische Abweichung 0,3 kWh/(m²mon) entsprechend ca. 12%). Eine Besonderheit des Jahres 2002 war ein relativ kalter Monat April; bei durchschnittlichen Wetterdaten liegt der Monatsbedarf für den Monat April nahe bei Null.

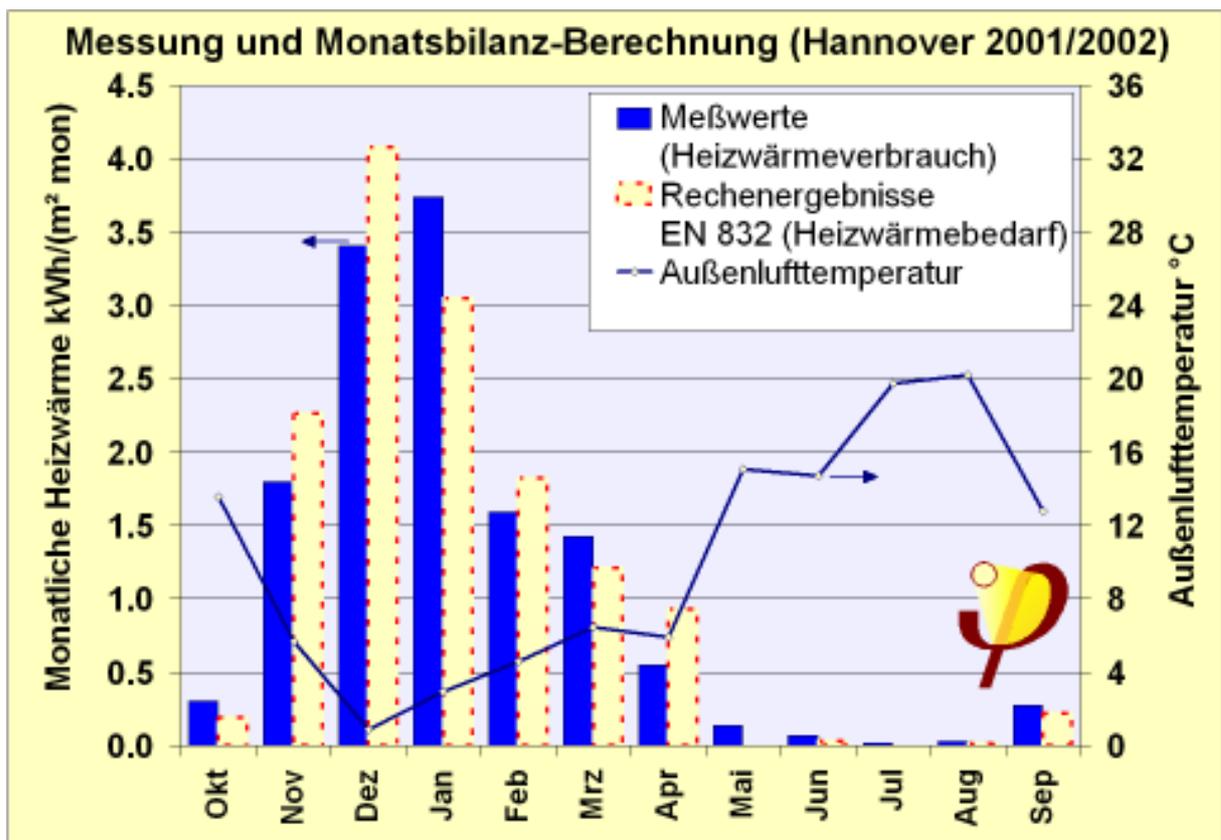


Abbildung 33: Vergleich monatlicher Daten für die Heizwärmeverbräuche mit den Rechenergebnissen nach dem 32-Kapazitätenmodell; Messwinter 2001/2002.

3.5.2.11 Diskussion der Ergebnisse für den Winterbetrieb

Als Ergebnisse der Analyse lassen sich festhalten:

- Eine **direkte multiple Korrelationsanalyse** zwischen den als wesentlich erkannten Einflussgrößen und dem gemessenen Heizwärmeverbrauch führt nur zu relativ **schwachen Bestimmtheitsmaßen**. Dies liegt vor allem darin begründet, dass die Einflüsse über eine nichtlineare und untereinander in Wechselwirkungen stehende Wirkungskette vermittelt werden. Die Einflüsse bestimmen den resultierenden Heizwärmebedarf nicht direkt, sondern durch Veränderungen von Randbedingungen für die physikalisch bestimmten Wärmeströme.
- Wenn die physikalisch gegebenen Wirkungsketten in einem **thermischen Modell** berücksichtigt werden und die daraus im Modell unter den Randbedingungen bestimmten Heizwärmebedarfswerte mit den gemessenen Verbrauchswerten verglichen werden, ergaben sich für beide untersuchte Heizperioden für die Siedlung **hohe Bestimmtheitsmaße**: 80% für 1999/2000 und 75% für 2001/2002. Dabei erwies sich ein gekoppeltes Modell aus 32 Einkapazitätenmodellen für die Siedlung und eine quasistationäre Behandlung nach dem Monatsverfahren der EN 832 als ausreichend. Die verbleibende nicht erklärte Streuung kann nach der durchgeführten Fehlerbetrachtung im wesentlichen durch die unvermeidbaren Messfehler bei der Ermittlung der Einflussgrößen bedingt sein. Die nach dieser Methode bestimmte Korrelation ist hochsignifikant (bei einem Signifikanzniveau $\ll 0,01\%$).
- **Schlussfolgerung I: Methodik**
Das verwendete quasistationäre **32-Häuser-Modell nach EN 832** (mit den Randbedingungen des PHPP) kann die Abhängigkeit des Heizwärmebedarfs von den entscheidenden Einflussgrößen mit **guter Genauigkeit** wiedergeben. Damit liegt für die Methodik nach EN 832 eine weitere Validierung auf der Basis von Messungen in bewohnten Häusern vor. Diese Validierung ist von besonders hoher Aussagekraft, da die berechneten sowie die gemessenen Jahresheizwärmewerte bei der untersuchten Siedlung extrem klein sind (um 13 kWh/(m²a) und damit um mindestens einen Faktor 4 weniger als nach der geltenden neuen Energieeinsparverordnung erforderlich). Für derart niedrige Wärmebedarfswerte ist die Berechnungsmethode der EN 832 ursprünglich nicht ausgelegt worden. Die vorgelegte Untersuchung bestätigt aber, dass die Methode mit immer noch vertretbarer Genauigkeit auf Häuser mit einem derart geringen Heizwärmebedarf anwendbar ist; damit bestätigt sich die praktische Erfahrung der Bewährung des Passivhaus Projektierungs Paketes [PHPP 2002] in einer sorgfältig dokumentierten Felduntersuchung.
- **Schlussfolgerung II: Wirksamkeit der Effizienztechnik, Funktion des Passivhauskonzeptes**
Allein die gemessenen sehr niedrigen Verbrauchswerte bestätigen die Wirksamkeit der in der Siedlung verwendeten Maßnahmen des energieeffizienten Bauens:
 - erheblich verbesserter Wärmeschutz der opaken Bauteile mit U-Werten zwischen 0,09 und 0,13 W/(m²K)

- Warmfenster mit U_w -Werten um $0,83 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (inkl. Einbauwärmebrücke) und g-Wert von 60%

- hocheffiziente Wärmerückgewinnung mit Wärmebereitstellungsgrad ca. 80%.

Die mit diesen Maßnahmen in der Passivhaussiedlung in Hannover-Kronsberg erreichten extrem niedrigen Wärmeverbrauchswerte stehen im 3. Betriebsjahr (Durchschnitt $12,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) in sehr guter Korrespondenz zum rechnerischen Bedarfswert ($13,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$). Damit ist nachgewiesen, dass mit der gewählten Kombination von Effizienzmaßnahmen die vorausgerechneten sehr niedrigen Heizwärmebedarfswerte in der Praxis wirklich erreicht werden. Von verschiedener Seite geäußerte Zweifel an der Wirksamkeit einzelner Komponenten (z.B. am Wärmeschutz, an den niedrigemittierende Beschichtungen der Verglasungen, an der Wärmerückgewinnung) und des Gesamtsystems (z.B. bezweifelte Regelfähigkeit, unterstellte hohe zusätzliche Fensterlüftung) haben sich nach den vorgelegten Ergebnissen nicht bestätigt. Vielmehr liegen die Messergebnisse aus der Siedlung im Rahmen der Messgenauigkeit genau im vorab projektierten Bereich. Dies dürfte bei Gültigkeit der geäußerten Einwände nicht der Fall sein: Die Einwände sind daher durch die Ergebnisse der Messungen und deren Analyse widerlegt.

- **Schlussfolgerung III: Erklärungsmodell für die Nutzungsstreuung**

Die nutzungsbedingte Streuung der Heizwärmeverbrauchswerte der individuellen Wohneinheiten der Passivhaussiedlung folgt in guter Näherung einer Normalverteilung. Für die Heizperiode 2001/2002 beträgt die Streuung $\sigma = 6,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Die Streuung läßt sich nach der vorgelegten Analyse durch den Einfluss der Nutzer über folgende Einflussstrecken zu 75% erklären:

- eingestellte Innentemperaturen und deren Einfluss auf die Wärmeverluste,
- eingestellte Innentemperaturen und dadurch bedingte Querwärmeströme zwischen den Häusern

- Höhe der individuellen inneren Wärmequellen,

- Befragungs- und Beobachtungsergebnisse zum Fensteröffnungsverhalten.

Damit erweisen sich genau die Einflussgrößen als energetisch relevant, die bereits in vorausgehenden Parameterstudien als solche erkannt worden waren [Feist 1997]. Die hier vorgelegten Ergebnisse bestätigen entsprechende Untersuchungen für einen Mehrgeschosswohnungsbau [Pfluger 2001] und für eine Reihenhaussiedlung in Wiesbaden [Ebel, Großklos, Loga 2002].

- **Schlussfolgerung IV: Nutzereinfluß auf das Passivhauskonzept**

Wie bei jedem thermisch-energetischen Gebäudestandard ist auch beim Passivhaus der wohnungsweise Heizenergieverbrauch vom individuellen Verhalten des jeweiligen Nutzers abhängig. Die in dieser Studie untersuchte Nutzerabhängigkeit erweist sich als durch physikalische Wirkungsketten erklärbar. Die in der Siedlung vorkommenden individuellen Schwankungen führen auch im extremsten Einzelfall nicht zu einer Beeinträchtigung der Funktion des Gebäudes als Passivhaus. Die im Mittel vorliegenden Nutzungsbedingungen beeinflussen die energetische Bilanz der Häuser nur wenig. Insgesamt kann daher auf der Basis der vorliegenden Untersuchung festgestellt werden, dass das übliche Spektrum vernünftigen Nutzerverhaltens für die Funktion des Passivhausstandards unkritisch ist. Selbst vorgekommene extreme Nutzungsbedingungen gefährden das Konzept nicht, führen jedoch zu individuell u.U. deutlich höheren Energieverbräuchen, die aber immer noch in allen Einzelfällen niedriger sind, als mittlere



Verbrauchsniveaus in Niedrigenergiehäusern. Der absolut höchste in der Siedlung beobachtete Heizwärmeverbrauch liegt bei 32 kWh/(m²a) (gutes Dreiliter-Haus-Niveau), der Durchschnitt liegt deutlich unter der Hälfte dieses Wertes.

- **Schlussfolgerung V: Standardnutzungsbedingungen**

Die Mittelwerte der Nutzungsrandbedingungen in der untersuchten Siedlung unterscheiden sich geringfügig von den üblicherweise angesetzten Standardnutzungsbedingungen. So liegen die durchschnittlich gemessenen Innentemperaturen (21,6°C im Kernwinter) über den in der EnEV angesetzten 19°C und auch über den normalerweise für das PHPP verwendeten 20°C. Man könnte daran denken, die Randbedingungen für die Berechnung entsprechend diesen Ergebnissen zu ändern: Allerdings müßten dann auch die zugehörigen Grenzwerte für den Passivhausstandard nach oben angepasst werden. Da dies auf die Auslegung der Häuser bei der Projektierung insgesamt keinen Einfluss hat, halten wir eine solche Anpassung gegenwärtig nicht für sinnvoll. Es sollte eine breitere statistische Grundlage abgewartet werden. Allerdings muss man sich dessen bewusst sein, dass die in der Praxis gemessenen Verbrauchswerte entsprechend der Unterschiede in den Nutzungsrandbedingungen von den Berechnungen abweichen können.

3.6 Modellvergleich für den Sommerfall

Für die Behandlung des Sommerfalls wurden ebenfalls die gemäß Abbildung 19 und Abbildung 20 verkoppelten 32 Einkapazitätenmodelle verwendet. Diese Modellbildung entspricht dem im PHPP-Sommerblatt eingesetzten Algorithmus. Eine der Aufgabenstellungen für die Untersuchung war es, die Validität dieses Algorithmus an Hand der Messdaten aus dem Sommer 2001 zu überprüfen.

Die Besonderheit bei der Behandlung des Sommerfalles ist es, dass hier eine Betrachtung von Monatsmittelwerten nicht ausreicht: gerade bei einem typischen mitteleuropäischen Sommer gibt es Phasen von einigen Tagen, in denen sowohl die Strahlung als auch die Außentemperaturen ganz besonders hoch sind; entscheidend ist gerade die Frage, ob auch in diesen Phasen ein vernünftiger thermischer Komfort aufrecht erhalten werden kann. Auch die gemessenen Wetterdaten im Zeitraum 1.5.2001 bis 30.9.2001 (hier untersuchter Zeitraum) weisen diese typischen heißen Sommerphasen auf (vgl. Abbildung 34).

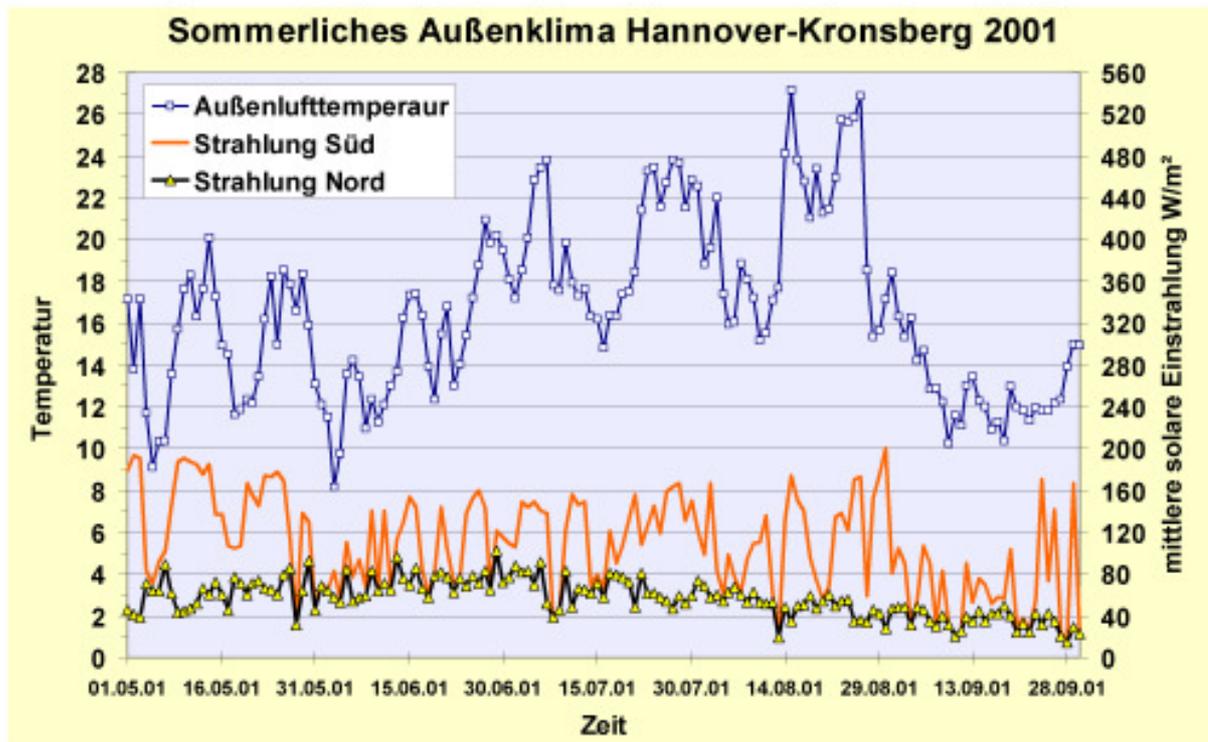


Abbildung 34: Klimadaten (Tagesmittelwerte) im Zeitraum 1.5.2001 bis 30.9.2001; dieser Zeitraum liegt den Untersuchungen für den Sommerfall zugrunde.

Für die Untersuchungen zum Sommerfall müssen somit kleinere Zeiteinheiten betrachtet werden: Für diese Studie verwenden wir eine Analyse auf der Basis von Tagesmittelwerten. Dies ist auch das Zeitintervall, das im PHPP-Sommerblatt verwendet wird. Man mag hier einwenden, dass gerade für das sommerliche Verhalten von Gebäuden der Tagesgang von Strahlung und Temperatur eine große Rolle spielt: Insbesondere bei schlecht gedämmten Gebäuden und bei geringen Speichermassen wirkt sich dies tatsächlich sehr stark aus. Passivhäuser haben jedoch eine sehr gute Wärmedämmung und daher sehr lange Zeitkonstanten. Die

Theorie zeigt, dass dies auf eine arithmetische Mittelung von Tagesgängen hinausläuft; durch den in der Regel sehr geringen täglichen Temperaturgang in den Häusern wird diese Aussage bestätigt. Im folgenden wird daher eine Analyse auf der Basis der Tagesmittelwerte durchgeführt; die Ergebnisse werden zeigen, ob sich ein solcher Ansatz bewährt.

Die Wetterdaten für die Randbedingungen des Modells sind in Abbildung 34 dokumentiert.

3.6.1 Modellbesonderheiten für den Sommerfall

Die das Modell definierenden Größen wurden zunächst identisch nach den Werten des in Kapitel 1 definierten Wintermodells übernommen. Wir geben den so bestimmten Größen noch den Index „0“ bei, um zu kennzeichnen, dass es sich dabei um das Basismodell wie in Kapitel 1 handelt, z.B.:

$$H_{e,n,0} = A_{\text{GiebW}} U_{\text{GiebW}} + A_{\text{AW,Holz}} U_{\text{AW,Holz}} + A_{\text{Fens}} U_{\text{Fens}} + A_{\text{D}} U_{\text{D}} + A_{\text{VersD}} U_{\text{VersD}} + I_e \Psi_e + V_{\text{Luft}} n_{\text{äqui},0} c_p \rho_{\text{Luft}}$$

Die Werte der Hüllflächen und die U-Werte der opaken Bauteile ändern sich gegenüber den Winterwerten so gut wie nicht; der Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung ist im Sommer zwar durchschnittlich (geringfügig) höher, die auftretende Differenz ist jedoch von nur geringer Bedeutung und wir vernachlässigen sie hier.

Durchaus in starkem Ausmaß kann sich der energieäquivalente Luftwechsel $n_{\text{äqui}}$ während der Tage im Sommer vom Winterwert unterscheiden. Dafür gibt es zwei Ursachen:

- Verwendung des Sommer-Bypasses des Lüftungs-Wärmerückgewinnungsgerätes

Durch den Bypass wird der Wärmebereitstellungsgrad des zentralen Lüftungsgerätes praktisch auf „Null“ gesetzt. Damit ändert sich der energieäquivalente Luftwechsel beim Bypassbetrieb auf

$n_{\text{äqui},\text{Anl-Sommer}} = V_{\text{anl.}} / V_{\text{Luft}}$. Dieser Wert ist für die vier Haustypen in Tabelle 11 dokumentiert.

			JDE	JDM	JAM	123
			Endhaus Jangster de lüx	Jangster de lüx Mittelhaus	Jangster Mittelhaus	123 kleines Mittelhaus
Bezugsluftvolumen	V_{Luft}	m^3	299	299	242	188
Auslegungs- Volumenstrom der Anlage	V_{Anl}	m^3/h	120	120	120	100
Anlagen-Luftwechsel = energieäquivalenter Luftwechsel im Sommer	$n_{Anl,Somm}$	1/h	0,40	0,40	0,50	0,53
energieäquivalenter Anlagen-Luftwechsel im Winter	$n_{äqui,Winter}$	1/h	0,08	0,08	0,10	0,11

Tabelle 11: Anlagenluftwechsel im Sommer

In Übereinstimmung mit der Nutzerbefragung und mit den Messergebnissen aus den Häusern wird der Zeitpunkt der Inbetriebnahme des Sommerbypass in der Lüftungsanlage bei den bewohnten Häusern auf den 1.7.2001 gelegt; der Bypassschieber wird am 11.9.2001 wieder eingesetzt. In einigen Häusern lagen die betreffenden Zeitpunkte anders; wir diskutieren dies später anhand der Ergebnisse.

- **Zusätzliche sommerliche Fensterlüftung**

In den Passivhäusern lässt sich in sämtlichen Wohn- und Schlafräumen mindestens ein Fenster öffnen; grundsätzlich wurden Drehkippsbeschläge verwendet, so dass auch Kippstellungen der Fenster möglich sind. Das Nutzerhandbuch empfiehlt auch ausdrücklich, insbesondere im Sommer mit Hilfe von Fensteröffnungen und Fensterkippsstellungen die Temperaturen in den Räumen abzusenken. Von dieser Möglichkeit wird ausgiebig Gebrauch gemacht.

Die Fensterstellungen werden nicht von der Datenerfassung aufgezeichnet. Bzgl. der Fensterstellungen sind wir daher auf Einzelbeobachtungen und auf die Aussagen Bewohner bei der begleitenden sozialwissenschaftlichen Untersuchung angewiesen.

Für das Sommermodell sind wir für „Normallüfter“ davon ausgegangen, dass im Mittel über 24 h in den bewohnten Gebäuden im betrachtete Zeitraum

bei Außentemperaturen unter 11 °C	1 Fenster gekippt
bei Außentemperaturen zwischen 11 °C und 18 °C	3 Fenster gekippt
bei Außentemperaturen über 18 °C	6 Fenster gekippt (alle)

werden. In den Häusern mit verwendetem Sonnenschutz ist die Fensteröffnungszeit nur 40% so lang, in den unbewohnten Häusern werden die Fenster i.d.R. geschlossen gehalten; Sondersituationen werden später bzgl. einiger Häuser

behandelt. Gemäß [Maas 1995] gehen wir von einem mittleren Luftvolumenstrom pro gekippt gehaltenem Fenster von

$$V_{\text{kippt}} = 80 \text{ m}^3/\text{h}$$

aus. Der energieäquivalente Luftwechsel durch Fensterlüftung wird damit in Abhängigkeit von der jeweiligen Zahl z_{kippt} der durchschnittlich gekippten Fenster

$$n_{\text{äqui,kippt}} = z_{\text{kippt}} V_{\text{kippt}} / V_{\text{Luft}}$$

Insgesamt erhalten wir damit für den energieäquivalenten Luftwechsel im Sommer aus den drei Beiträgen $n_{\text{äqui,Anl-Sommer}}$, $n_{\text{äqui,kippt}}$ und der Infiltration n_{inf} :

$$n_{\text{äqui, Sommer}} = n_{\text{äqui,Anl-Sommer}} + n_{\text{äqui,kippt}} + n_{\text{inf}}$$

Dagegen ist im Winter bei geschlossenen Fenstern

$$n_{\text{äqui, Winter}} = (1 - \eta_{\text{WRG}}) n_{\text{äqui,Anl}} + n_{\text{inf}}$$

Daraus ergibt sich ein Differenzwert für den temperaturspezifischen Wärmeverlust H_e im Sommer, mit welchem gilt

$$H_{e,\text{Sommer}} = H_{e,0} + \Delta H_{e,\text{Sommer}}$$

und der sich jeden Tag gemäß den oben beschriebenen Annahmen ergibt zu

$$\Delta H_{e,\text{Sommer}} = (\eta_{\text{WRG}} n_{\text{äqui,Anl}} + n_{\text{äqui,kippt}}) V_{\text{Luft}} c_p \rho_{\text{Luft}}$$

Ein weiterer im Sommer veränderter Modellparameter ist der Wert für die Strahlungsaperturen

$$A_{\text{S,Sommer}} = A_{\text{Fen,S}} F_{\text{S,Sommer}}$$

$$A_{\text{N,Sommer}} = A_{\text{Fen,S}} F_{\text{N,Sommer}}$$

Aufgrund der höheren Sonnenbahn ändern sich die Abminderungsfaktoren $F_{\text{S,Sommer}}$ und $F_{\text{N,Sommer}}$ in allen Gebäuden: auch die Nordseite kann im Sommer einen gewissen direkten solaren Energieeintrag abbekommen; hingegen wird die Verschattungswirkung von Dachüberstand, Balkonen und Laibungen im Süden verstärkt, die Verschattung durch Horizontverbauung hingegen geschwächt. Wegen der für diese Berechnungen ohnehin begrenzten Genauigkeit wurden die Sommerwerte für F_{S} und F_{N} nur jeweils einmal für den gesamten Zeitraum mit dem Algorithmus des Sommerfallblattes des PHPP bestimmt.

Dazu kommt allerdings noch die Wirkung der temporären Verschattung durch die bei einer Auswahl der Häuser vorhandenen außenliegenden Sonnenschutzrollos. Deren Wirkung haben wir wie folgt modelliert:

In den Häusern, in denen Sonnenschutzrollos vorhanden sind und benutzt werden, wird oberhalb einer tagesmittleren Leistung der Solarstrahlung auf die Südflassade von 50 W/m^2 davon ausgegangen, dass die Rollos zumindest teilweise geschlossen werden. Die damit erzielte Reduktion der Solarstrahlung gegenüber dem Wert ohne Rollo wird mit durchschnittlich 70% angesetzt.

3.6.2 Modellgleichungen für den Sommerfall

Für jedes Einzelhaus (Nummer n) wird die instationäre Differentialgleichung für den unbeheizten Fall

$$dQ_{i,n}/dt = \dot{Q}_{e,n} + \dot{Q}_{g,n} + \dot{Q}_{\text{Quer},n} - \dot{Q}_{\text{Rohr},n} - \dot{Q}_{\text{IWQ},n} - \dot{Q}_{\text{Sol},n}$$

jeweils für den Zeitraum eines Tages (24 h) explizit gelöst. Die Wärmeströme auf der rechten Seite sind

$$dQ_n/dt = C_n d\vartheta_{i,n}/dt$$

$$\dot{Q}_{e,n} = H_{e,n} (\vartheta_{i,n} - \vartheta_e)$$

$$\dot{Q}_{g,n} = H_{g,n} (\vartheta_{i,n} - \vartheta_g)$$

$$\dot{Q}_{\text{Quer},n} = H_{\text{Trenn}} (\vartheta_{i,n} - \vartheta_{i,n-1}) + H_{\text{Trenn}} (\vartheta_{i,n} - \vartheta_{i,n+1})$$

$$\dot{Q}_{\text{Rohr},n} = H_{\text{Rohr},n} (\vartheta_{i,n} - \vartheta_{\text{Rohr}})$$

$$\dot{Q}_{\text{IWQ},n} = \dot{Q}_{\text{IWQ},el,n} + \dot{Q}_{\text{IWQ},Pers,n} \quad (\text{aus Messwerten, Randbedingung})$$

$$\dot{Q}_{\text{Sol},n} = A_{\text{Fen},S,n} F_{S,\text{Sommer},n} \dot{q}_{\text{Sol},S} + A_{\text{Fen},N,n} F_{N,\text{Sommer},n} \dot{q}_{\text{Sol},N}$$

Daraus ergibt sich das inhomogene Differentialgleichungssystem erster Ordnung für die Raumtemperatur $\vartheta_i(t)$

$$d\vartheta_{i,n}(t)/dt = -H_{\text{ges},n}/C_n \vartheta_{i,n} + [H_{\text{Trenn}} \vartheta_{i,n-1} + H_{\text{Trenn}} \vartheta_{i,n+1}] + \{ H_{e,n} \vartheta_e + H_{g,n} \vartheta_g + H_{\text{Rohr},n} \vartheta_{\text{Rohr}} + \dot{Q}_{\text{IWQ},el,n} + \dot{Q}_{\text{IWQ},Pers,n} + A_{\text{Fen},S,n} F_{S,S,n} \dot{q}_{\text{Sol},S} + A_{\text{Fen},N,n} F_{N,S,n} \dot{q}_{\text{Sol},N} \}$$

Wegen der hohen thermischen Trägheit des Systems und der zusätzlichen Trägheit der koppelnden Bauteile (Wände und Decken, die in die H-Werte eingehen) kann die gesamte Inhomogenität in der geschweiften Klammer mit dem Tagesmittelwert der dort enthaltenen Größen als in guter Näherung tagesweise konstant angenommen werden. Das gilt auch für die Temperaturen $\vartheta_{i,n-1}$ und $\vartheta_{i,n+1}$ der jeweiligen Nachbarhäuser zum gerade betrachteten Haus; für diese Temperaturen wird der Endwert des letzten Tages (d.i. die Anfangsbedingung für den betrachteten Tag) angenommen. Auch der Term in eckigen Klammern kann damit der Inhomogenität I_n zugeschlagen werden, die sich damit zu

$$I_n = H_{\text{Trenn}} \vartheta_{i,n-1} + H_{\text{Trenn}} \vartheta_{i,n+1} + H_{e,n} \vartheta_e + H_{g,n} \vartheta_g + H_{\text{Rohr},n} \vartheta_{\text{Rohr}} + \dot{Q}_{\text{WQ,el},n} + \dot{Q}_{\text{WQ,Pers},n} \\ + A_{\text{Fen,S,n}} F_{\text{S,S,n}} q_{\text{Sol,S}} + A_{\text{Fen,N,n}} F_{\text{N,S,n}} q_{\text{Sol,N}}$$

ergibt. Das resultierende Differentialgleichungssystem

$$d\vartheta_{i,n}(t)/dt = -H_{\text{ges},n}/C_n \vartheta_{i,n} + I_n$$

ist entkoppelt und läßt sich für jedes einzelne Gebäude durch den Ansatz

$$\vartheta_{i,n}(t) = \vartheta_{i,n}(t_0) + (1 - e^{-t/\tau_n}) (\vartheta_{i,n}(\infty) - \vartheta_{i,n}(t_0))$$

lösen. Dabei ist $\vartheta_{i,n}(t_0)$ die Anfangstemperatur im Haus der Nummer n am Anfang des betrachteten Tages, $\tau_n = C_n / H_{\text{ges}}$ die Zeitkonstante des Hauses und

$$\vartheta_{i,n}(\infty) = I_n / H_{\text{ges},n}$$

die Gleichgewichtstemperatur, die im betrachteten Haus nach entsprechend langer Zeit unter den gegebenen Randbedingungen angenommen würde. Die angegebenen Lösungen des Einkapazitätenmodells für jeweils einen Tag können leicht in einem Tabellenkalkulationsblatt implementiert werden. Aus der Lösung läßt sich die Endtemperatur für den jeweiligen Tag als $\vartheta_{i,n}(24\text{h})$ bestimmen. Dies ist dann jeweils die Anfangsbedingung für den nächsten Tag. Zum Vergleich mit den gemessenen Temperaturen in den Häusern wird der Tagesmittelwert berechnet:

$$\vartheta_{i,n,\text{Mittel}} = \vartheta_{i,n}(\infty) + \tau_n / 24 \text{ h} (\vartheta_{i,n}(\infty) - \vartheta_{i,n}(t_0)) (e^{-24 \text{ h}/\tau_n} - 1).$$

3.6.3 Randbedingungen für den Sommerfall

In die Randbedingung für den Sommerfall gehen die Werte in der Inhomogenität I_n ein, das sind

Außenlufttemperatur	ϑ_e
Bodentemperatur unter der Grundplatte	ϑ_g
Rohrtemperatur	ϑ_{Rohr}
innere Wärmequellen	$\dot{Q}_{\text{WQ,el},n}$ und $\dot{Q}_{\text{WQ,Pers},n}$
Solarstrahlung auf Süd- und Nordflächen	$q_{\text{Sol,S}}$ und $q_{\text{Sol,N}}$

Von diesen Werten wurde ϑ_e direkt gemessen. Daraus läßt sich ϑ_g durch Modellrechnung einer Bodenplatte mit einem zweidimensionalen instationären Wärme­stromprogramm ermitteln.

$\dot{Q}_{\text{WQ,el},n}$ ergibt sich aus dem gemessenen Stromverbrauch \dot{Q}_{el} , wobei ein Verfügbarkeitsfaktor von 65 % angenommen wurde. Dieser ergibt sich aus der PHPP-Berechnung der inneren Wärmequellen unter Berücksichtigung von Verdunstungsprozessen und von durch die Abwasserleitung direkt durch die Gebäude­hülle nach außen geführter Wärme. $\dot{Q}_{\text{WQ,Pers}}$ wird aus den Belegungszahlen der

Häuser mit einer mittleren täglichen Anwesenheitsquote von 54% und einer mittleren trockenen Wärmeabgabe von 80 W/Person bestimmt.

Die spezifischen Solarangebote $q_{\text{Sol,S}}$ und $q_{\text{Sol,N}}$ wurden aus den gemessenen Wetterdaten als Tagesmittelwerte auf senkrechte Flächen in der Ebene der Fassaden der Reihenhäuser bestimmt.

Der Verlauf der Daten für die Randbedingungen geht aus Abbildung 34 für die Klimadaten und exemplarisch für eine Reihenhausezeile aus Abbildung 35 hervor.

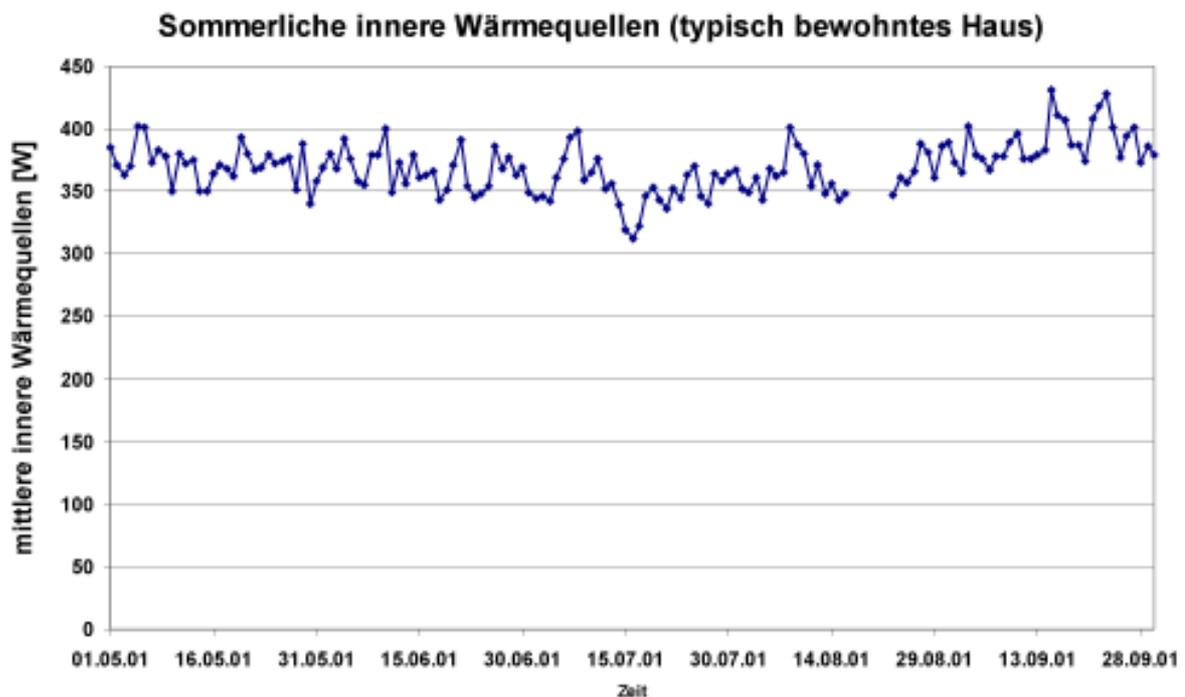


Abbildung 35: Verlauf der inneren Wärmequellen bei einem beispielhaften Mittelhaus

3.6.4 Validierung des Modells für den Sommerfall anhand von Messwerten

Abbildung 36 zeigt den gemessenen Temperaturverlauf im Mittel aller bewohnten Häuser der Passivhaussiedlung im Vergleich zum entsprechenden Mittelwert der Modellrechnung. Einzelne Abweichungen infolge nicht genau bekannter Randbedingungen mitteln sich bei der Anzahl von 27 bewohnten Häusern weitgehend heraus. Die Übereinstimmung zwischen dem Modell und der Messung ist als ausgezeichnet anzusehen. Abbildung 37 zeigt die zugehörige Korrelationsanalyse. Der Korrelationskoeffizient beträgt fast $r=93\%$; das bedeutet, dass mit dem verwendeten Modell und den darin enthaltenen Einflussparametern insgesamt $r^2=86\%$ der Einflüsse auf das sommerliche Innenklima erklärt werden können. Restliche zufällige Einflüsse sind immer zu erwarten, sie könnten nur mit einem ganz erheblich höheren

Aufwand der Datenerfassung einbezogen werden: Zu nennen sind z.B. der genaue Zeitverlauf der Fensteröffnungen sowie die Unterscheidung „gekippt“ und ganz geöffnet; die genaue Erfassung der Personenzahl und ihrer Aktivität in den Häusern; nicht erfasste Klimaeinflüsse wie z.B. Regen; nicht berücksichtigte Feuchtigkeits-sorptions und -desorptionsvorgänge. Bei einer mittleren quadratischen Abweichung zwischen den Tagesmittelwerten der Modellrechnung und der Messung von 0,3 K bestätigt sich, dass die Behandlung der Sommertemperaturen mit Einkapazitätenmodellen für jedes Haus (bzw. jede Wohnung) mit sehr guter Genauigkeit möglich ist. Die Steigung der Ausgleichsgeraden von 1,02 K/K (Rechnung in Bezug auf Messung) ist etwas größer als 1, somit liegt man mit dem Modell auf der sicheren Seite.

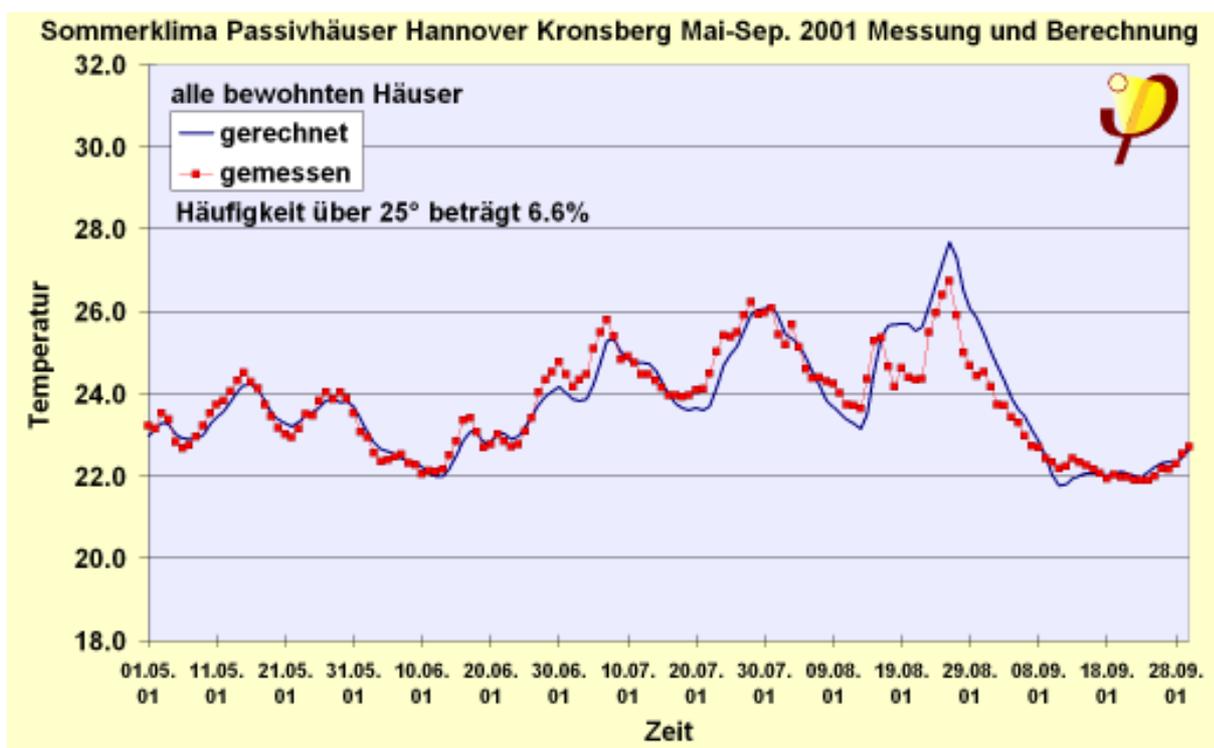


Abbildung 36: Vergleich von Berechnung und Messung der Sommertemperaturen für die Mittelwerte aller bewohnten Häuser; die Häufigkeitsangabe bezieht sich auf Tagesmittelwerte.

Naturgemäß ist die Übereinstimmung bei den Temperaturen in den einzelnen Häusern nicht so gut wie bei den Mittelwerten. Die Modellrechnung gibt aber auch dabei die wesentlichen Ergebnisse gut wieder: der mittlere Korrelationskoeffizient aller Einzelwerte beträgt 89%, der zugehörige mittlere quadratische Fehler 0,9 K. Bei den Einzelhäusern schwankt die Korrelation zwischen 71% und 96%, der mittlere quadratische Fehler zwischen 0,5 und 1,5 K.

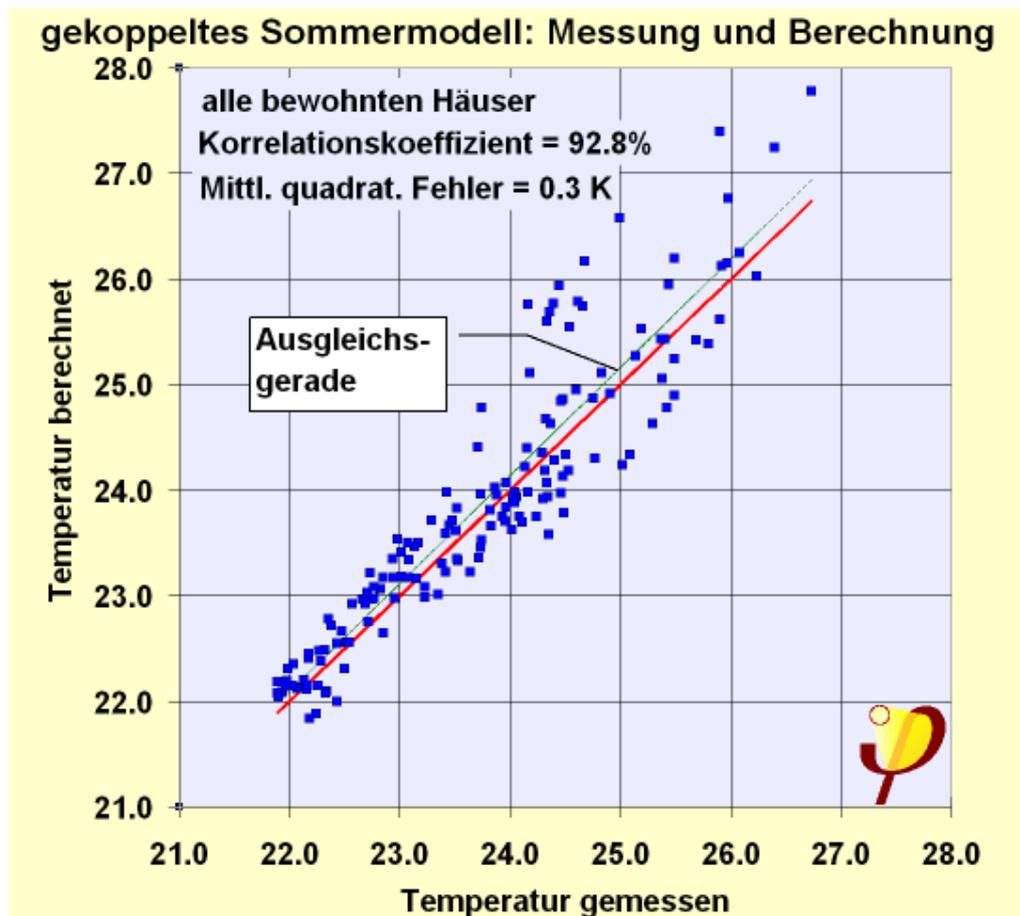


Abbildung 37: Korrelationsanalyse für den Vergleich von Messwerten mit der Berechnung nach den gekoppelten Einkapazitätenmodellen

Die in Abbildung 37 dargestellte Korrelation charakterisiert ausschließlich die Güte des zur Berechnung eingesetzten Modells im Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Innentemperaturen im Sommer. Die Steigung der Ausgleichsgeraden liegt hierfür nahe bei 1. Diese Analyse darf nicht mit der Korrelation zwischen Außen- und Innentemperaturen verwechselt werden, die gern zur Beurteilung der Effizienz von sommerlichen Wärmeschutzkonzepten herangezogen wird. Um diesen Unterschied herauszuarbeiten, haben wir in Abbildung 38 auch die Korrelation zwischen Außenlufttemperatur und (gemessenen) Innentemperaturen dargestellt. Verwendet wurden jeweils Tagesmittelwerte. Die Steigung der Ausgleichsgerade beträgt hierfür 0,24 Kelvin/Kelvin: D.h. eine um 1 K höhere Außenlufttemperatur führt im Mittel zu einem Anstieg von nur 0,24 K bei den Innentemperaturen. Die Häuser der Passivhaussiedlung vermitteln somit eine Dämpfung des sommerlichen Temperaturanstieges auf ungefähr ein Viertel.

Das Bestimmtheitsmaß allein dieses Zusammenhangs (Außenluft → Raumluft) ist mit 58% schon relativ hoch für eine solche simple Analyse, jedoch erheblich geringer als $r^2=86\%$, wie es sich mit dem Modell ergeben hatte. Das Modell kann die Sommertemperaturen daher weit besser erklären als die einfache Korrelationsanalyse – abgesehen davon, dass die einfache Korrelationsanalyse noch keine Berechnungsanleitung dafür liefert, wie Steigung und Achsenabschnitt der Korrelationsgeraden zwischen Außen- und Innentemperatur aus den Gebäude- und Technikdaten zu

ermitteln sind. Aus dem Modell lassen sich diese Parameter jedoch ohne weiteres bestimmen.

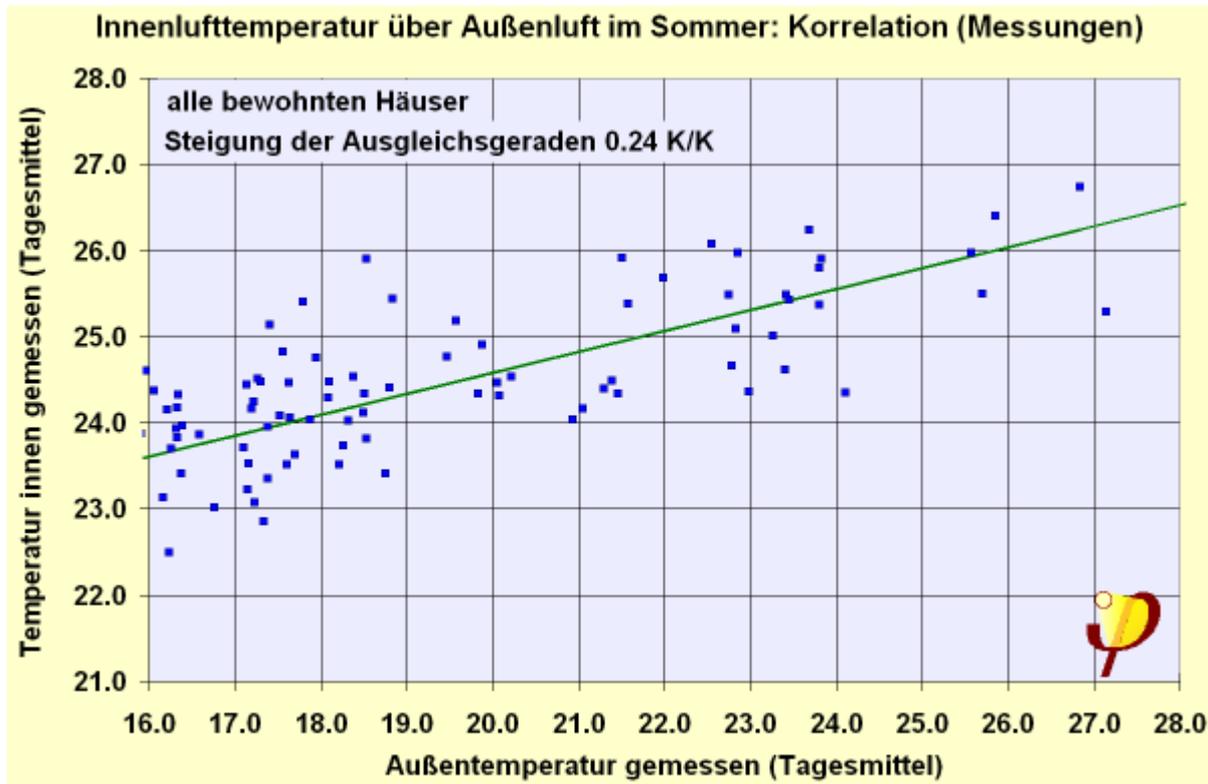


Abbildung 38: Korrelationsanalyse zwischen Außenlufttemperatur (gemessen) und Raumtemperatur (gemessen), jeweils Tagesmittelwerte. Der Anstieg liegt bei etwa $\frac{1}{4}$ Kelvin (innen) je Kelvin Außentemperatur.

Im folgenden wollen wir einige Beispiele für den Vergleich von Messung und Berechnung bei den Einzelhäusern etwas genauer diskutieren.

3.6.4.1 Unbewohnte Häuser

Abbildung 39 zeigt die Verhältnisse in einem unbewohnten Haus (ein Nachbarhaus ebenfalls unbewohnt, das andere bewohnt). Da in einem solchen Fall alle Parameter ziemlich gut bekannt sind (keine Bewohner, angenommen keine Fensteröffnungen, gemessene Stromverbräuche), sollte das Modell auch eine gute Übereinstimmung zeigen. Mit einem Korrelationskoeffizienten von 94% und einem mittleren quadratischen Fehler von 0,7 K ist das auch der Fall. Im Zeitraum 11.-13. August und am 29. August ist eine stärkere Abweichung zu erkennen; dies könnte z.B. dadurch bedingt sein, dass in dieser Zeit doch Fenster gekippt wurden.

In einem Haus ohne Sonnenschutz und ohne gezielte Sommerlüftung steigen die Temperaturen nach Messung und Berechnung auf bis zu 30°C an. Im Mittel der sehr heißen Phase liegen die Temperaturen allerdings mit um 28°C immer noch in einem erträglichen Bereich. Die Häufigkeit von Temperaturen über 25°C liegt in diesem Fall allerdings bei 29%, so dass Maßnahmen zur Verbesserung der

Sommerbehaglichkeit dringend empfohlen werden müssen. Wie solche Maßnahmen aussehen und welche Wirkungen sie haben, wird bei den weiteren Fallbeispielen erläutert.

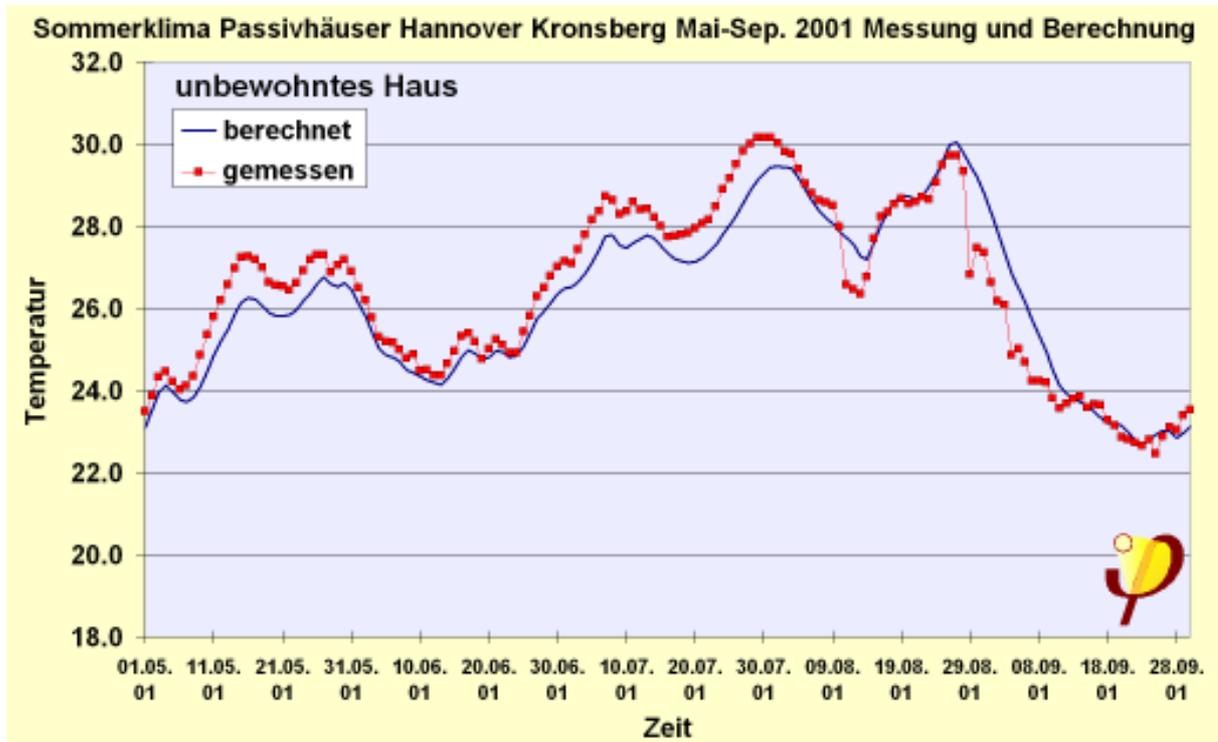


Abbildung 39: Vergleich von Messung und Modellrechnung für ein unbewohntes Haus.

Abbildung 40 zeigt den Vergleich für ein weiteres unbewohntes Haus: Es ist das Reihenendhaus, in welchem die Messrechner der Datenerfassung untergebracht sind; diese setzen nennenswert höhere innere Wärmegewinne (ca. +100 W) frei, weshalb die Temperaturen noch stärker ansteigen, wie im zuletzt dokumentierten Fall (Maximaltemperatur 31,5 °C). Dieses Haus hat zudem ein unbeheiztes Haus als (einzigen) Nachbarn.

Ab Anfang Juni wurden in diesem Haus bewusst alle Fenster geschlossen gehalten, um den ungestörten freien Temperaturgang studieren zu können. Für den Zeitraum zwischen 30.6.2001 und 26.8.2001 liegt der mittlere quadratische Fehler zwischen Modellrechnung und Messung bei 0,4 K, der Korrelationskoeffizient beträgt 93%.

Um die Wirksamkeit einer bewußten Nutzerlüftung zu demonstrieren, wurden vom 27. bis 29.8.01 in diesem Haus die Fenster gekippt. Dadurch ergab sich in dieser Zeit ein etwa 3,3 facher Luftwechsel, wodurch die Temperaturen übereinstimmend zwischen Messung und Berechnung sehr schnell auf Werte unter 24 °C abgesenkt wurden. Abbildung 40 zeigt den sehr steilen Temperaturabfall vom 27. bis 29.8.

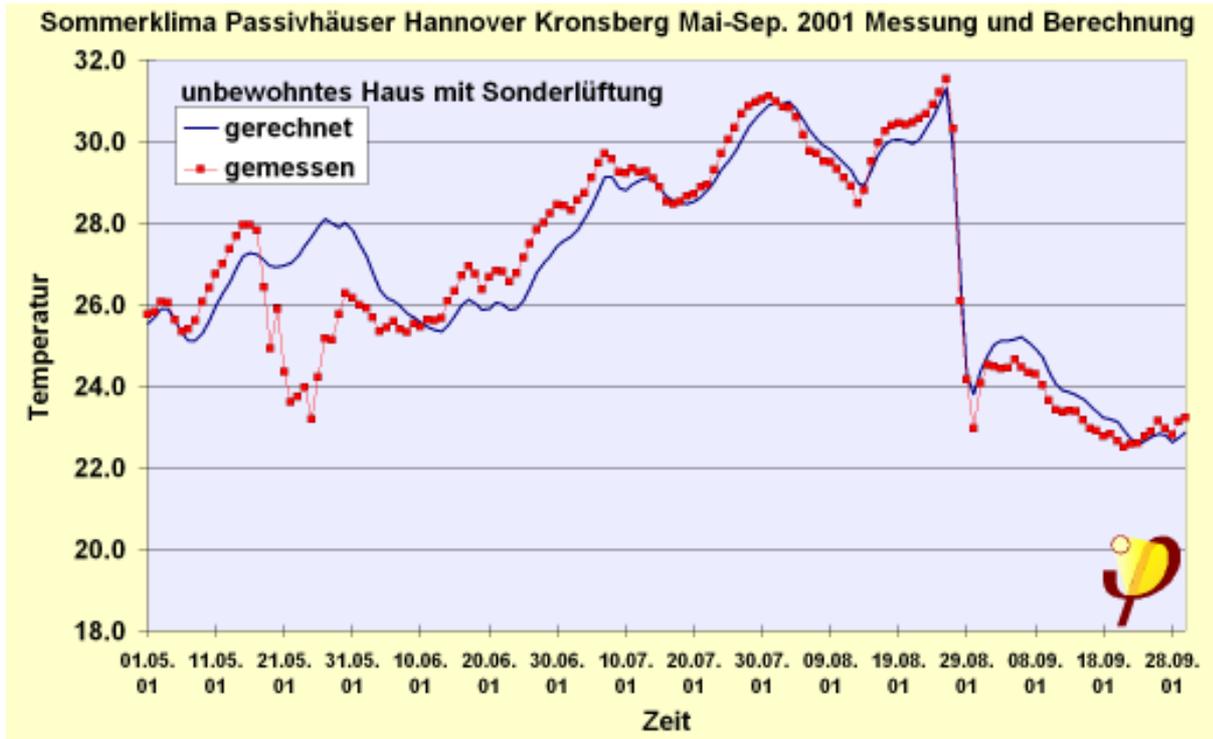


Abbildung 40: Vergleich für ein weiteres unbewohntes Haus, jedoch mit gezielter Lüftung vom 27. bis zum 29.8.2001.

3.6.4.2 Weniglüfter in einem Haus ohne Sonnenschutzrollos

Abbildung 41 zeigt den Temperaturverlauf in einem Haus ohne Sonnenschutzrollo und mit vergleichsweise geringer sommerlicher Lüftung. Im Durchschnitt sind hier zwischen 30.6.01 und 29.8.01 insgesamt zwei Fenster gekippt, wodurch ein zusätzlicher Fensterluftwechsel von $0,57 \text{ h}^{-1}$ resultiert. Erkennbar ist, dass dadurch in Übereinstimmung von Messung und Simulation die Temperaturen bis Mitte Juni in einem Bereich von 23 bis 25°C stabilisiert werden; es sind keine besonders heftigen Temperaturschwankungen erkennbar. In den eigentlichen Hitzeperioden um den 30.7. und den 25.8. steigen die Temperaturen nun noch auf bis zu 27°C an. Die Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung ist dabei weniger gut; das ist vor allem darauf zurückzuführen, dass der genaue Zeitverlauf der Fensterstellungen nicht bekannt ist; das grundsätzliche Verhalten wird dafür jedoch immer noch zufriedenstellend getroffen (Korrelationskoeffizient 80%, mittlerer quadratischer Fehler 0,9 K).

Auch ohne Sonnenschutzrollo und mit einer nur zurückhaltenden Lüftungsstrategie wird in diesem Haus eine akzeptable Sommerbedingung mit Übertemperaturhäufigkeiten von etwa 9% zu 25 °C erreicht.

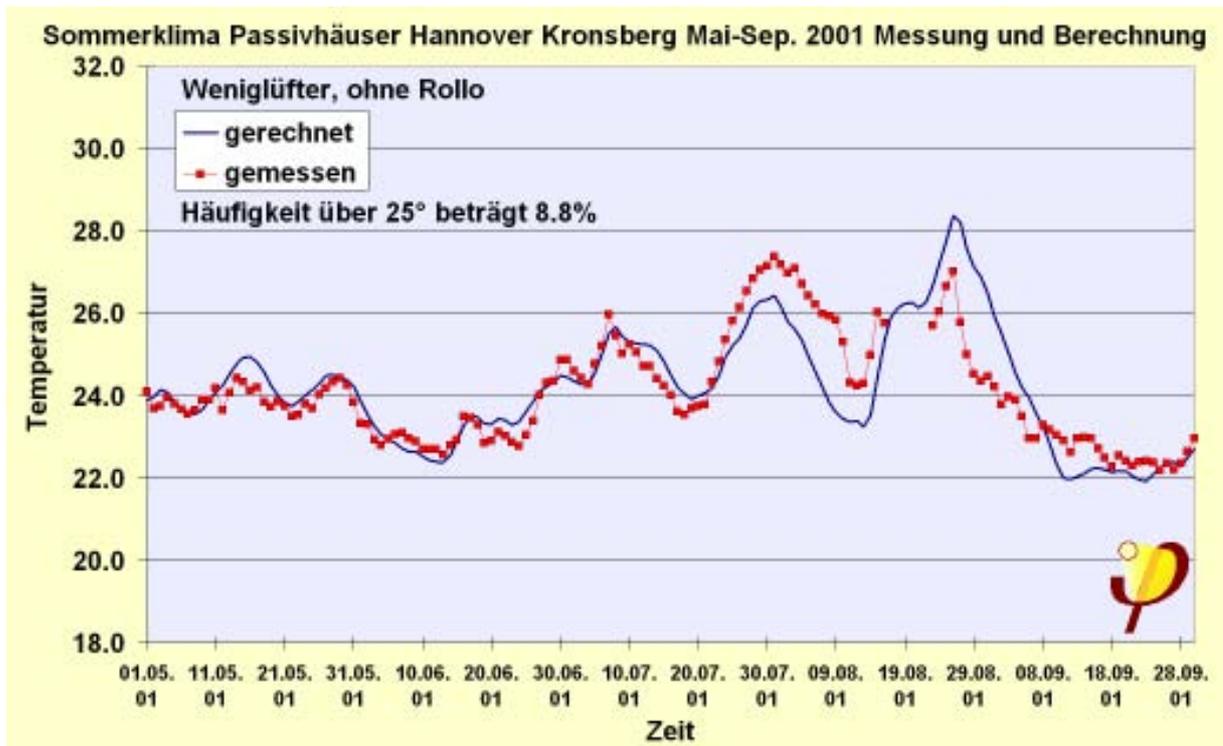


Abbildung 41: Beispielhaus ohne Sonnenschutzrollo und mit nur geringer sommerlicher Fensterlüftung.

3.6.4.3 Viellüfter in einem Haus ohne Sonnenschutzrollos

Im Kontrast zum zuletzt behandelten Fall ist in Abbildung 42 der Temperaturverlauf in einem Haus wiedergegeben, in welchem ausgiebig im Sommer zusätzlich über Fenster gelüftet wird: Hier sind alle Fenster in der heißen Zeit fast ständig geöffnet, der resultierende zusätzliche Luftwechsel liegt dann bei mehr als 3 h^{-1} . Auch in diesem Haus gibt es jedoch keinen temporären Sonnenschutz.

Die Korrelation zwischen Messung und Berechnung ist in diesem Fall mit 94% sehr hoch (mittl. quadrat. Fehler $0,7 \text{ K}$). Zwar sind auch hier die Fensterstellungen nicht exakt bekannt: Weil durch die dauerhaft hohe Öffnung aber die Kopplung zur Außenluft besonders hoch ist, ist der exakte Wert nicht von sehr großer Bedeutung. Die Auswirkungen einer solchen Viellüfter-Strategie sind in der Abbildung in Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung sehr gut zu erkennen:

In den gemäßigten Sommerzeiten liegen die Temperaturen nun zwischen 19 und 22°C . Der Anstieg selbst in den Hitzeperioden ist nur sehr kurzzeitig, eine Temperatur über 26°C wird überhaupt nur an einem Tag erreicht. Klar erkennbar ist die relativ starke Schwankung der Temperaturen, die durch die enge Kopplung an das Außenklima bedingt ist.

Insgesamt ist das sommerliche Innenklima mit dieser Strategie sehr gut zu beherrschen. Die Übertemperaturhäufigkeiten zu 25°C beträgt auch in diesem sehr heißen Sommer nur $2,2\%$; bemerkenswert ist nach der hier durchgeführten Berechnung, dass dies sogar ohne temporäre Sonnenschutzmaßnahmen erreichbar ist.

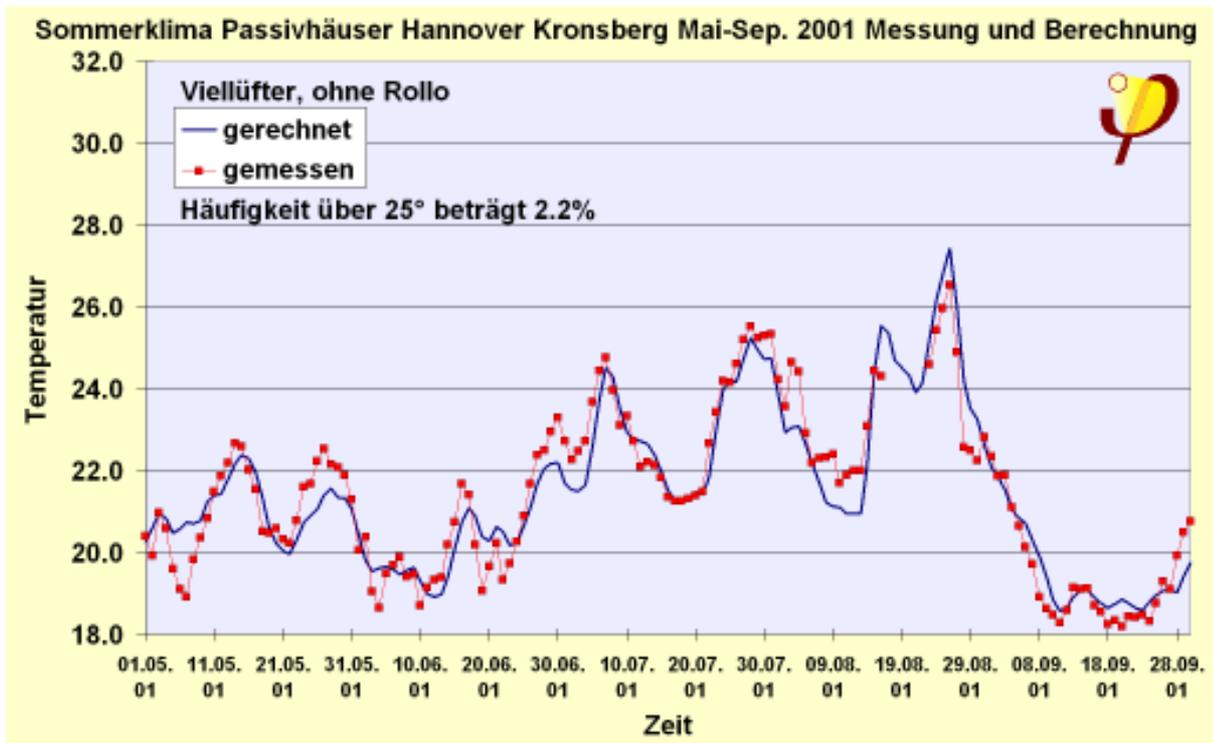


Abbildung 42: Haus ohne Sonnenschutzrollos, aber mit ausgiebigem zusätzlichem Fensterlüftungsverhalten.

3.6.4.4 Weniglüfter in einem Haus mit Sonnenschutzrollos

In Abbildung 43 ist ein Haus mit Sonnenschutzrollos, aber sehr zurückhaltendem Fensteröffnungsverhalten dokumentiert (etwa 2 Fenster gekippt, resultierender Zusatzluftwechsel etwa $0,57 \text{ h}^{-1}$). Die Übereinstimmung von Messung und Berechnung ist in diesem Fall mit einem mittl. quadr. Fehler von $0,5 \text{ K}$ ziemlich gut. Interessant ist der Vergleich mit dem entsprechenden Fall ohne Rollos aus Abbildung 41: Die Temperaturen liegen im Haus mit Rollos insgesamt niedriger, insbesondere aber in den Hitzeperioden. Auch hier wird eine Temperatur von 26°C nur an einem Tag erreicht, die Übertemperaturhäufigkeiten zu 25°C beträgt nur noch $4,7\%$. Der Temperaturverlauf ist außerdem sehr gleichmäßig.

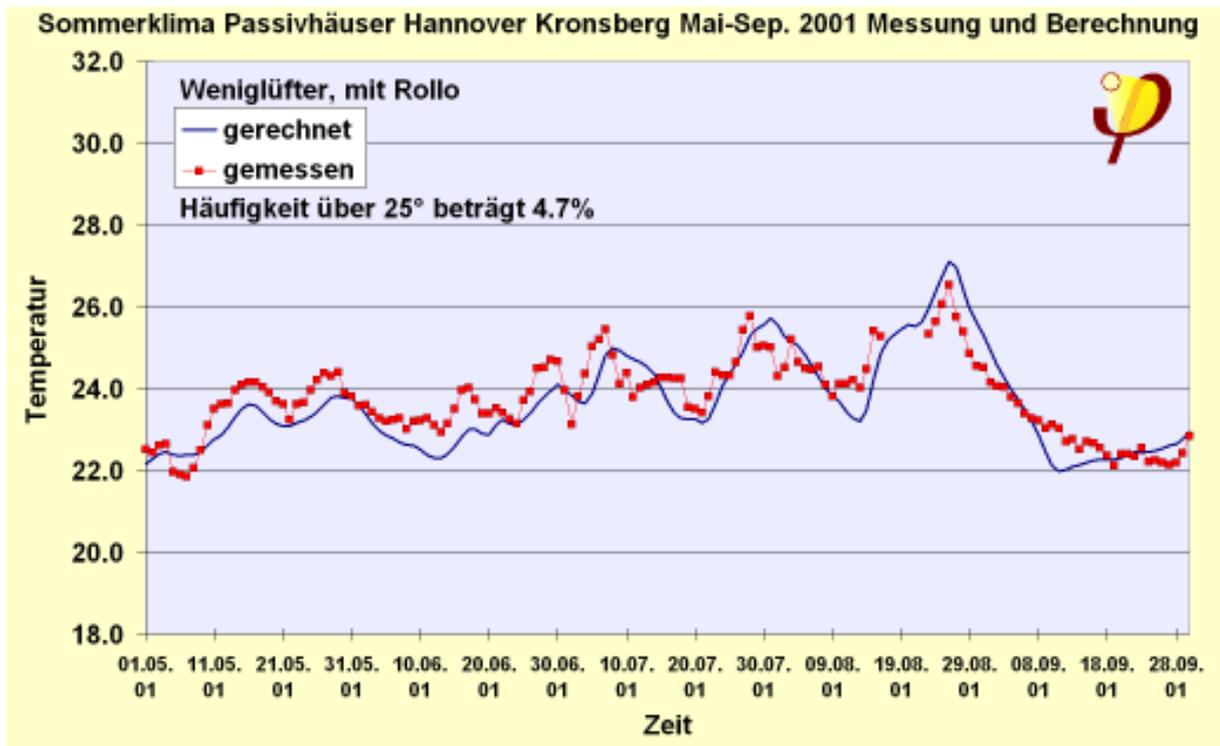


Abbildung 43: Weniglüfter in einem Haus mit Sonnenschutzrollo; auch hier liegen Messung und Modellrechnung nahe beieinander.

3.6.4.5 Normallüfter in einem Haus mit Sonnenschutzrollos

Welche Temperaturstabilität in den Passivhäusern mit Sonnenschutzrollo und einem angepassten, aber nicht übermäßigem Sommerlüftungsverhalten erreicht werden kann, zeigt Abbildung 44. In diesem Haus sind durchschnittlich etwa 3 Fenster gekippt, wobei ein etwa $0,75 \text{ h}^{-1}$ Fensterluftwechsel resultiert. Mit etwa 71% ist der Korrelationskoeffizient zwischen Berechnung und Messung im dokumentierten Fall am schlechtesten im Vergleich zu allen anderen Häusern. Die Ursache dafür ist, dass auch hier der tatsächliche Zeitverlauf der Öffnungen nicht bekannt ist, dass dies aber bei mittleren Öffnungszuständen von hohem Einfluss ist. Außerdem waren die Bewohner offenbar bis 30. Juni im Urlaub und hatten die Fenster in dieser Zeit geschlossen, woraus der sonst vermeidbare „Peak“ der Temperaturen in dieser Zeit resultiert.

Mit der hier eingeschlagenen Strategie gelingt es tatsächlich, die Temperaturen über weite Zeiträume bei um 22°C mit nur sehr geringen Schwankungen zu stabilisieren. Dies ist ein ganz ausgezeichnetes sommerliches Innenklima. Die nominale Übertemperaturhäufigkeit zu 25°C von 1,9% resultiert ausschließlich aus der urlaubsbedingten „Nichtlüftungszeit“.



Abbildung 44: Temperaturstabilität in einem Haus mit Sonnenschutzrollo und angepasstem (normalen) Sommerlüftungsverhalten

3.6.5 Modellvergleich für das PHPP-Sommerfallblatt

Für den Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser wurde 1999 ein vereinfachtes Verfahren zur Bestimmung der Behaglichkeit im Sommer entwickelt [AkkP 15]. Dieses Verfahren verwendet ein Einkapazitätenmodell wie in Abbildung 20, jedoch ohne Kopplungsterme zwischen verschiedenen Häusern. Die im Protokollband publizierte Modellgleichung wird auch nicht mit Tagesschrittweite, sondern nur für die Monate Mai-September als Monatsverfahren und für 4 zusätzliche Zeitabschnitte im Juli (Typisch-Tage-Verfahren) gelöst. Sowohl die Wahl dieser Zeitabschnitte als auch die dafür verwendeten Randbedingungen waren im Vergleich zu dynamischen Simulationsrechnungen gewählt worden. Ein Algorithmus für die Lösung der Modellgleichungen nach dem Typisch-Tage-Verfahren ist in das Passivhaus Projektierungs Paket ab der Auflage 2002 aufgenommen.

Die Messdaten aus der Siedlung in Hannover bieten sich an, dieses Passivhaus-Sommerfall-Verfahren zu überprüfen.

Abbildung 45 zeigt die Jahresdauerlinien der Raumtemperatur für das unbewohnte Haus (vgl. Abschnitt 3.6.4.1). Es ist erkennbar, dass das vereinfachte Verfahren im PHPP die Überhitzungshäufigkeit in diesem Fall unterschätzt (22% statt 29% gemessen). Alle Werte liegen jedoch weit oberhalb des als vertretbar angesehenen Bereiches, so dass Maßnahmen zur Verbesserung der sommerlichen Behaglichkeit dringend empfohlen werden.

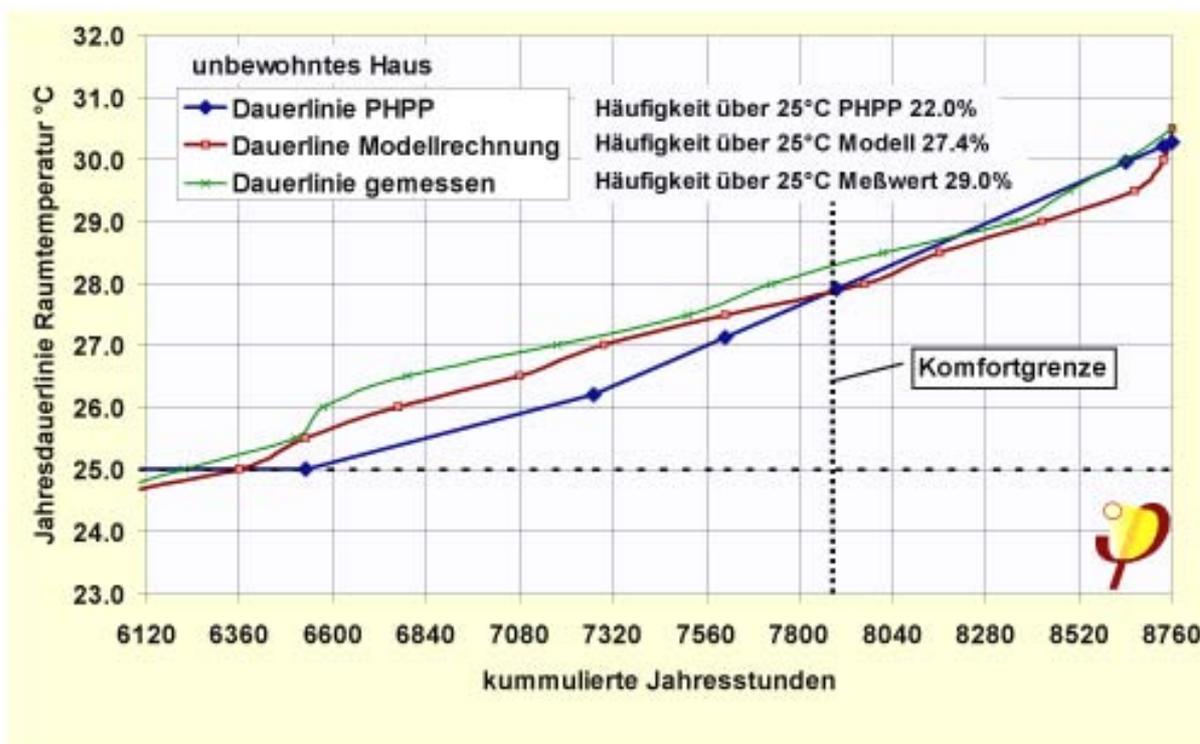


Abbildung 45: Ausschnitt aus der Jahresdauerlinie für das unbewohnte Haus; Vergleich von Messwerten, Modellrechnung und Berechnung nach dem Typisch-Tage-Verfahren, welches im PHPP implementiert ist.

In Abbildung 46 sind Jahresdauerlinien für die gesamte Zeile 10 der Passivhaus-siedlung wiedergegeben. Diese Zeile ist komplett bewohnt, keines der Häuser hat Sonnenschutz-einrichtungen. Die Häuser können im Mittel als durchschnittlich gelüftet angesehen werden (mittlerer Fensterluftwechsel im Sommer $0,57 \text{ h}^{-1}$). Die tatsächlich beobachtete Übertemperaturhäufigkeit ist mit 7,4% etwas geringer als das Ergebnis der Modellrechnung (8,5%). Das vereinfachte Verfahren im PHPP überschätzt die Übertemperaturhäufigkeit $h_{\vartheta \geq 25^\circ\text{C}}$ noch stärker (9,2%). Wenn man den Verlauf der Jahresdauerlinien betrachtet, wird allerdings deutlich, dass eine höhere Genauigkeit mit einem vereinfachten Modell kaum erreicht werden kann, weil die aus der Messung resultierende Dauerlinie auffällig nichtlinear ist und gerade beim Wert „25 °C“ eine ausgeprägte Gradientenänderung aufweist. Insofern ist $h_{\vartheta \geq 25^\circ\text{C}}$ als Kennwert etwas willkürlich und in diesem Fall eigentlich artifiziell niedrig. Betrachtet man $h_{\vartheta \geq 25,5^\circ\text{C}}$ so ergeben sich gemessen 6,8%, nach Modellrechnung 6,3% und mit dem vereinfachten Verfahren ebenfalls 6,3%.

Abbildung 47 zeigt den entsprechenden Mittelwert für Zeile 14: 6 dieser 8 Häuser haben Sonnenschutzrollos, die Fensterlüftung ist mit der aus Zeile 10 vergleichbar. man erkennt, dass $h_{\vartheta \geq 25^\circ\text{C}}$ nun nach Messwerten 3,8% deutlich reduziert ist. Die Modellrechnung liegt in der Jahresdauerlinie um etwa 0,5 K höher, was sich in der Angabe von $h_{\vartheta \geq 25^\circ\text{C}}$ mit 6,8% deutlich auswirkt. Die Jahresdauerlinie nach dem vereinfachten Verfahren stimmt mit der Modellrechnung ziemlich gut überein ($h_{\vartheta \geq 25^\circ\text{C}} = 7,0\%$).

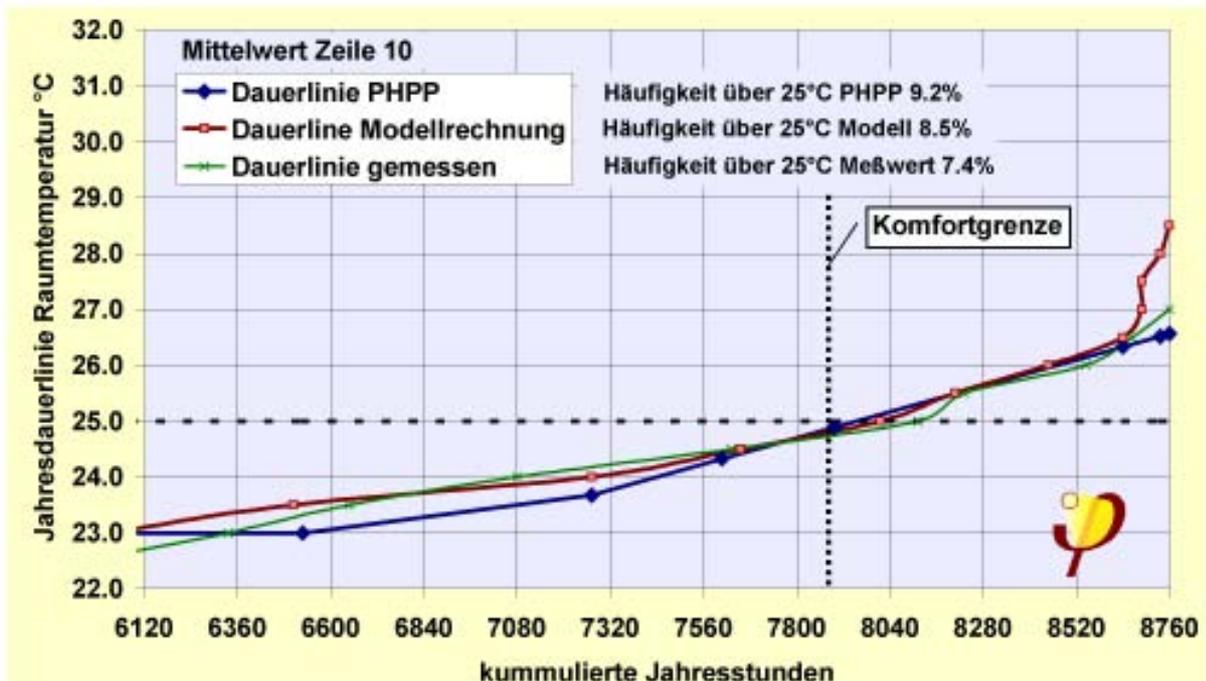


Abbildung 46: Jahresdauerlinie für den Durchschnitt aller Häuser in Zeile 10; Vergleich von Messwerten, Modellrechnung und Berechnung nach dem Tyisch-Tage-Verfahren. Diese Häuser sind alle bewohnt, haben jedoch keine Sonnenschutzeinrichtungen.

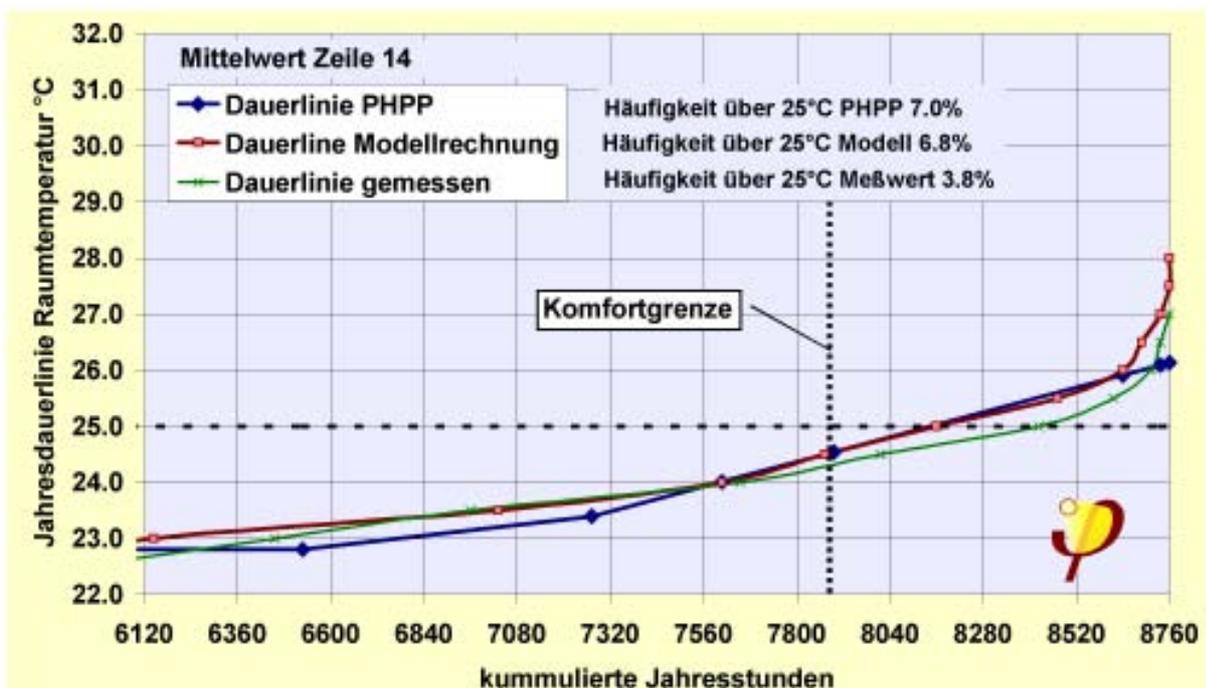


Abbildung 47: Jahresdauerlinie für den Durchschnitt aller Häuser in Zeile 14; wieder werden Messwerte, Modellrechnung und vereinfachtes Verfahren verglichen. Diese Häuser haben zu 75% Sonnenschutzrollos.

Als Fazit für die Modellüberprüfung zum vereinfachten PHPP-Sommerfallblatt kann festgehalten werden: Das vereinfachte Modell gibt im Rahmen der erreichbaren Fehlergrenzen die Werte nach dem ausführlichen Modellverfahren brauchbar wieder. Bei sehr hohen Übertemperaturhäufigkeiten (15% und mehr) wird $h_{\vartheta \geq 25^\circ\text{C}}$ jedoch unterschätzt; dies ist unerheblich, weil in solchen Fällen ohnehin Maßnahmen ergriffen werden müssen. Bei kleinen $h_{\vartheta \geq 25^\circ\text{C}}$ neigen die Modellrechnung und das vereinfachte Verfahren eher zu einer Überschätzung; das ist im Sinne einer sicheren Abschätzung sinnvoll. In der Diskussion stellte sich zudem heraus, dass die Angabe von $h_{\vartheta \geq 25^\circ\text{C}}$ sehr empfindlich auf kleine Änderungen in der Temperatur reagiert; übliche Mess- und Modellfehler wirken sich daher gerade auf diese Größe sehr stark aus. Es muss daher die Frage gestellt werden, ob $h_{\vartheta \geq 25^\circ\text{C}}$ tatsächlich eine vernünftig handhabbare Kenngröße für die Sommerbehaglichkeit darstellt. Evtl. sind doch die Übertemperaturgradstunden besser geeignet. Allerdings hat sich diese Größe bereits im Normenwerk etabliert (Neuaufgabe DIN 4108 Teil 2).

3.7 Analyse der Einflüsse auf das sommerliche Innenklima

Bei der Feldbeobachtung sind die verschiedenen Einflüsse immer gekoppelt wirksam. Unmittelbar erkennbar sind die Einzelwirkungen bestimmter Maßnahmen aus vielen Gründen in der Regel nicht:

- Die Randbedingungen sind nur zu einem Teil genau genug bekannt, in jedem Fall sind sie aber für die verschiedenen Häuser unterschiedlich.
- Häufig werden Einflüsse durch dominante Auswirkungen anderer Parameter verdeckt.
- Schließlich kommen individuelle Einflüsse wie unterschiedliche Behaglichkeitsanforderungen und unterschiedliches Verhalten des Menschen im Regelkreis „empfundene Temperaturen → Fensteröffnung → Wärmeabfuhr → Sommertemperaturen“ zur Entfaltung.

Um die Einflüsse und ihre Auswirkungen genauer studieren zu können, müssen sie in Reinform isoliert werden. Das ist mit vertretbarem Aufwand nur durch eine Modellrechnung möglich.

Die bisher durchgeführte Validierung des gekoppelten Einkapazitäten-Netzwerkmodells versetzt uns in die Lage, die Modellrechnung mit einem validierten Modell durchzuführen.

3.7.1 Der Einfluss zusätzlicher sommerlicher Fensterlüftung

Schon beim Vergleich von Messung und Modellrechnung hatte sich herausgestellt, dass der Einfluss einer zusätzlichen Fensterlüftung auf das sommerliche Raumklima sehr groß ist. Wir diskutieren im folgenden vier Fälle unterschiedlichen Lüftungsverhaltens. Dabei werden alle anderen Parameter konstant gehalten: In diesem Fall wird z.B. ohne temporären Sonnenschutz gerechnet; der Bypass der Lüftungsanlage ist aber in Funktion. Die inneren Wärmequellen werden wie im Durchschnitt der messtechnisch erfassten bewohnten Häuser angesetzt. Bei dem Modell wird von einem gleichmäßigen Luftwechsel (Tag/Nacht) mit der tagesmittleren Außenlufttemperatur gerechnet. Zu jedem der vier Fälle ist im Anschluss jeweils eine Grafik zum zeitlichen Verlauf sowie die Jahresdauerlinie dargestellt.

3.7.1.1 Nichtlüfter: auch im Sommer keine Fensteröffnung

Werden die Fenster in einer Reihenhauszeile auch im Sommer überhaupt nicht geöffnet, so liegt der durch den Bypass bedingte energieäquivalente Luftwechsel nur bei etwa $0,42 \text{ h}^{-1}$. Die Modellrechnung für ein bewohntes Haus ergibt für diesen Fall im Sommer Temperaturen, die in der Regel zwischen 24 und 26°C liegen und in den Hitzeperioden bis zu 31°C erreichen (Abbildung 48). Entsprechend hoch ist mit über 30% die Übertemperaturhäufigkeit (Abbildung 49). Ohne Frage sind diese Temperaturen nicht akzeptabel. Es müssen also Maßnahmen für ein verbessertes Raumklima getroffen werden. Ohne Frage sind diese Temperaturen nicht akzeptabel. Es müssen also Maßnahmen für ein verbessertes Raumklima getroffen werden. Ohne Frage sind diese Temperaturen nicht akzeptabel. Es müssen also Maßnahmen für ein verbessertes Raumklima getroffen werden.

3.7.1.2 Weniglüfter: im August durchschnittlich 2 Fenster gekippt

In diesem Fall erfolgt eine zusätzliche Fensterlüftung mit im Monat August durchschnittlich 2 gekippten Fenstern im gesamten Haus. Daraus resultiert im August ein Fensterluftwechsel von etwa $0,56 \text{ h}^{-1}$; in den anderen Sommermonaten sind die Fensteröffnungszeiten kürzer und es wird ein energieäquivalenter Fensterluftwechsel im gesamten Sommer von $0,37 \text{ h}^{-1}$ angesetzt (Abbildung 50). Auch für diese Fälle ist die Übertemperaturhäufigkeit mit 14,8% noch zu hoch (vgl. Abbildung 51).

3.7.1.3 Durchschnittlüfter: im August durchschnittlich 4 Fenster gekippt

Hier erfolgt eine zusätzliche Fensterlüftung mit im August durchschnittlich 4 gekippten Fenstern im gesamten Haus. Daraus resultiert ein Fensterluftwechsel im August von etwa $1,23 \text{ h}^{-1}$ und bei geringerer Lüftung in den anderen Monaten ein energieäquivalenter Fensterluftwechsel im gesamten Sommer von $0,82 \text{ h}^{-1}$. Mit dieser Strategie ergeben sich bereits gute raumklimatische Verhältnisse im Sommer (siehe Abbildung 52 und Abbildung 53).

3.7.1.4 Viellüfter: im August alle Fenster gekippt

Bei den Viellüftern werden im August alle Fenster im Haus dauergekippt (bzw. gleichwertige Lüftungsmaßnahmen mit ganz geöffneten Fenstern ergriffen). Daraus resultiert ein Fensterluftwechsel im August von etwa $2,2 \text{ h}^{-1}$ und ein energieäquivalenter Fensterluftwechsel im gesamten Sommer von $1,5 \text{ h}^{-1}$. Wie Abbildung 55 zeigt, gibt es bei dieser Lüftungsstrategie so gut wie keine sommerliche Überhitzung in den Passivhaus-Reihenhäusern mehr, auch wenn keine Sonnenschutzrollos vorhanden sind. Die zum Vergleich aufgeführten Messwerte aus Häusern mit „Viellüftern“ zeigen, dass die Parameter realitätsnah gewählt sind.

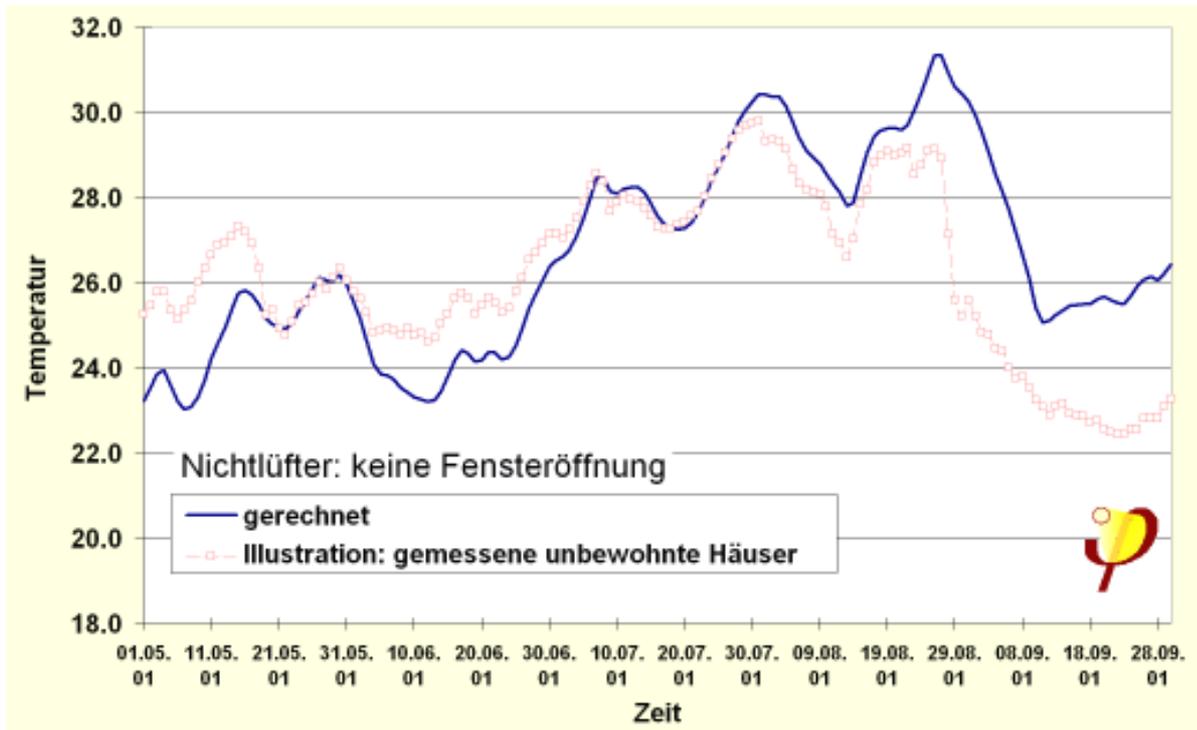


Abbildung 48: Zeitverlauf der Sommertemperaturen im Fall ohne jede Fensterlüftung. Zur Illustration sind die Messergebnisse aus den unbewohnten Häusern aufgeführt: Allerdings sind dabei die Randbedingungen anders als in der Modellrechnung (z.B. bzgl. der inneren Wärmequellen und bzgl. teilweise doch erfolgter Fensteröffnungen und bzgl. der Temperaturen der Nachbarn).

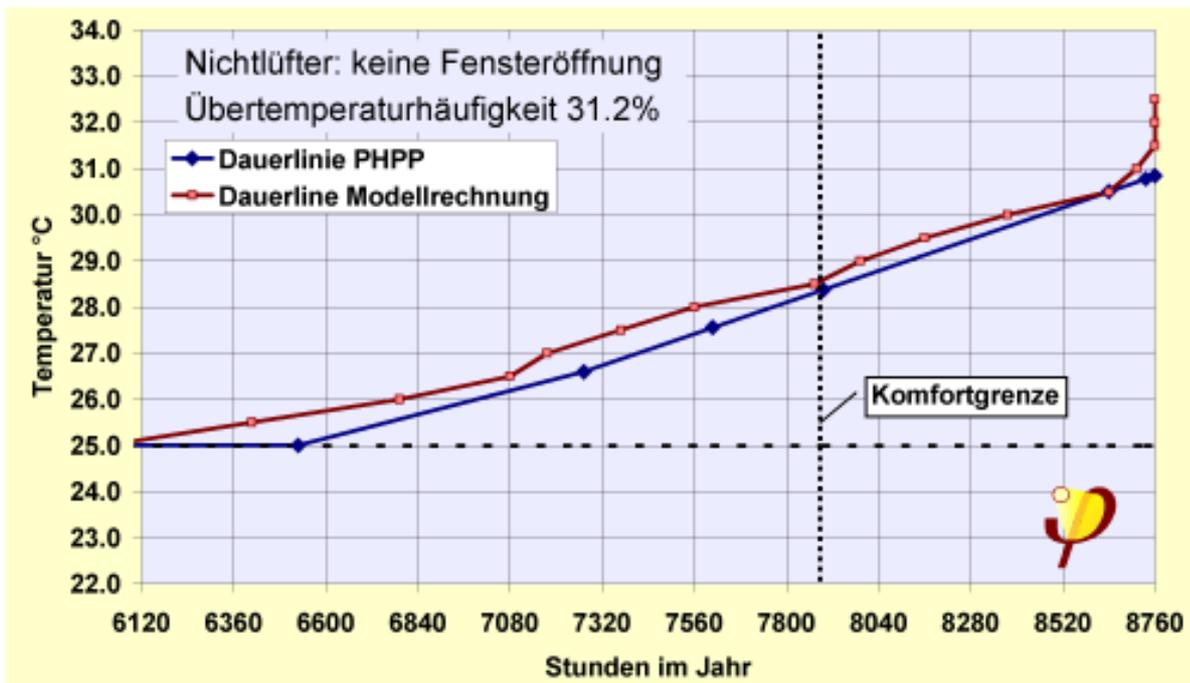


Abbildung 49: Jahresdauerlinie für den Fall Nichtlüfter. Es ergeben sich indiskutabel hohe Raumtemperaturen.

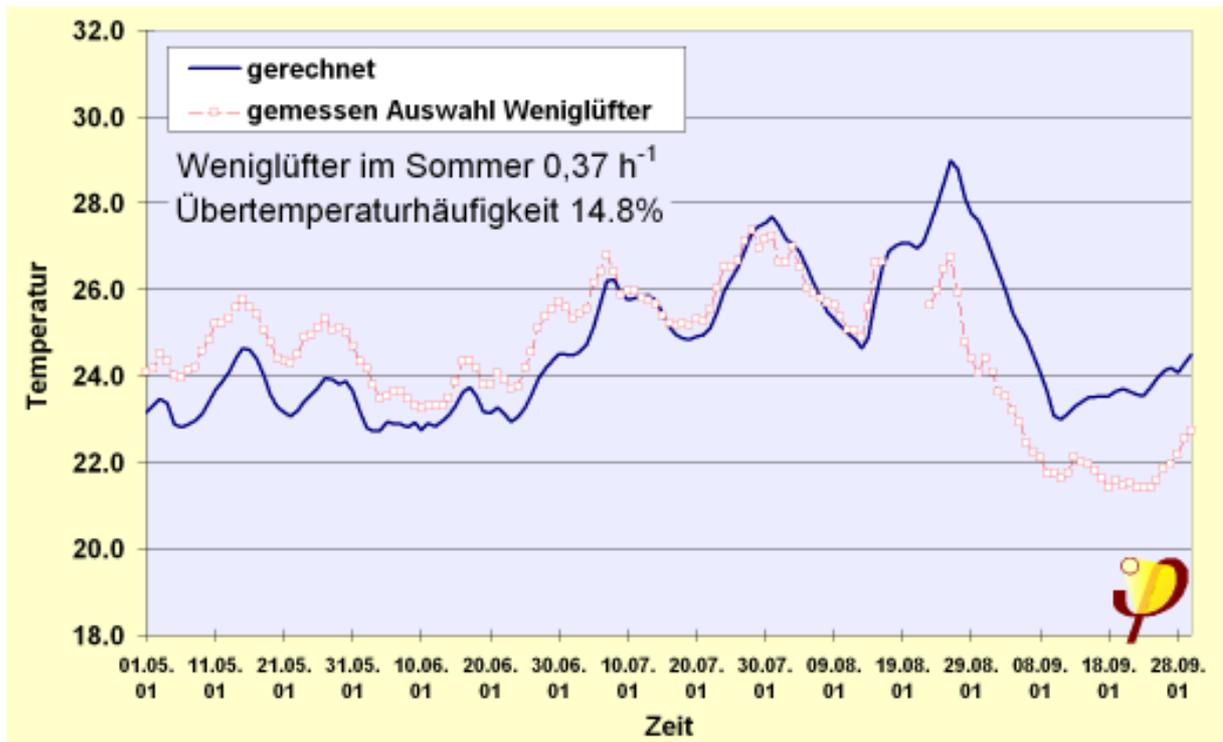


Abbildung 50: Zeitverlauf der Sommertemperaturen für geringe Fensterlüftung (im August sind durchschnittlich zwei Fenster gekippt). Zur Illustration ist der Durchschnitt der Messergebnisse einer Auswahl von Häusern aufgeführt, für die aber nicht genau bekannte Randbedingungen gelten.

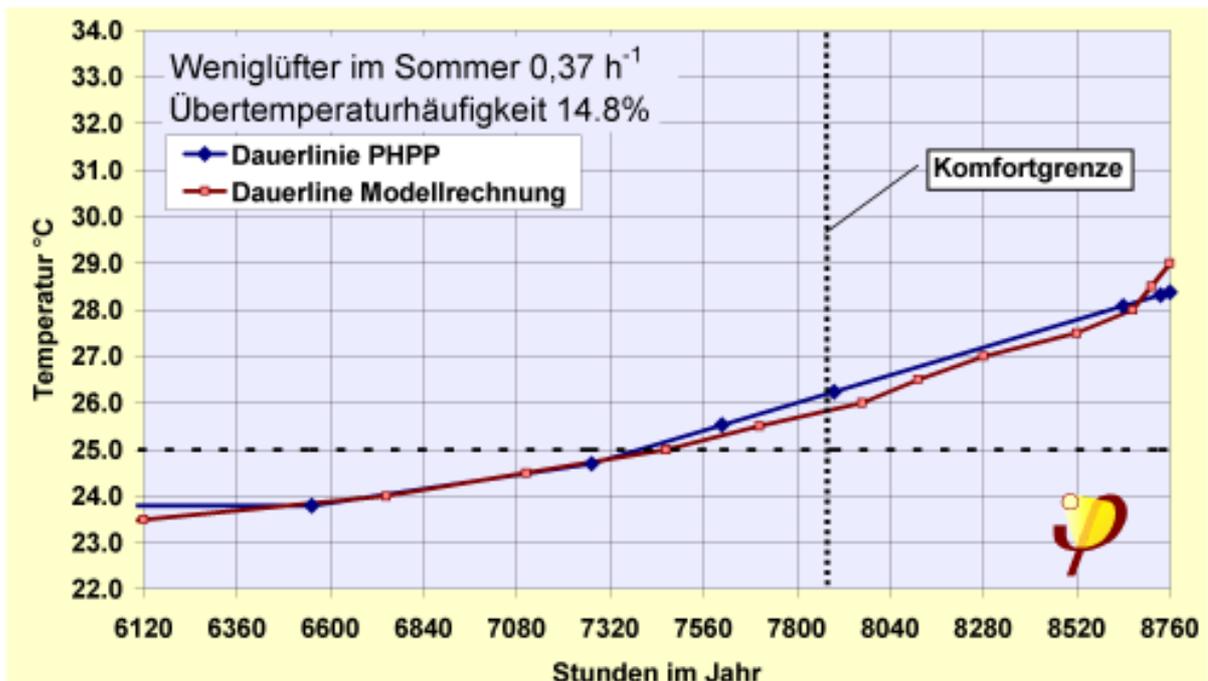


Abbildung 51: Jahresdauerlinie für den Fall Weniglüfter. Es ergeben sich noch immer zu hohe Raumtemperaturen.

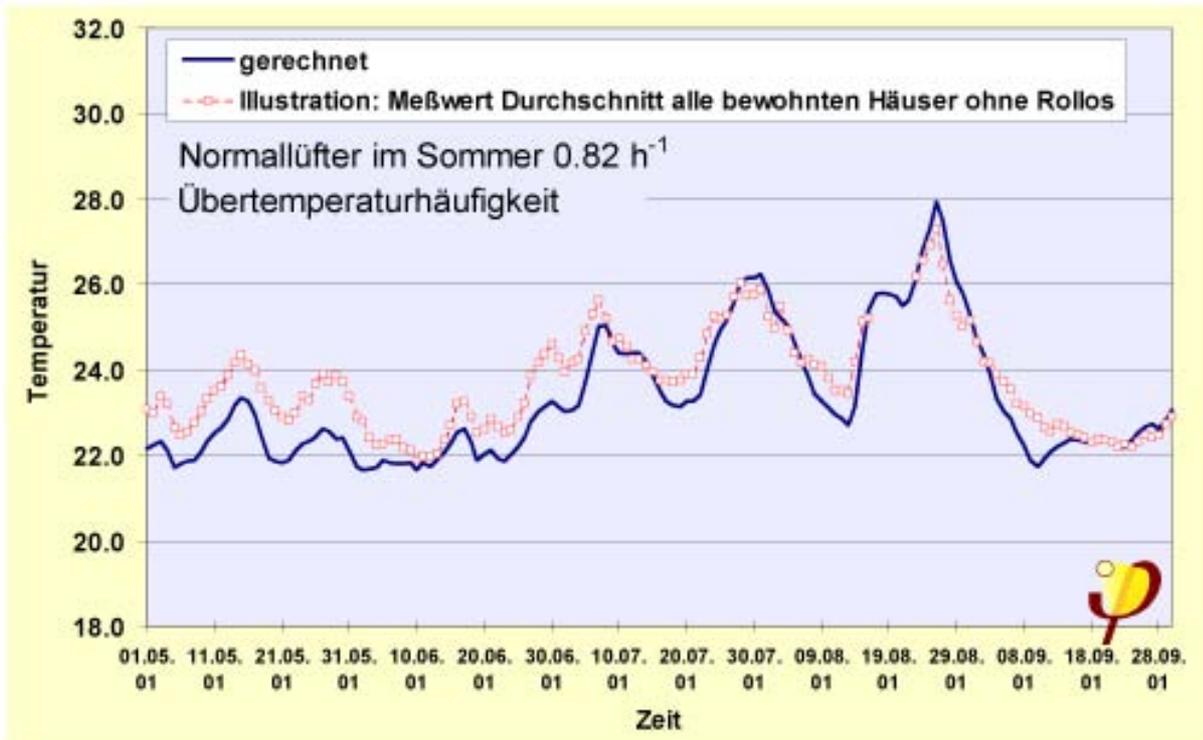


Abbildung 52: Zeitverlauf der Sommertemperaturen für durchschnittliche Fensterlüftung (im August sind durchschnittlich 4 Fenster gekippt). Zur Illustration sind die Messergebnisse des Durchschnitts aller bewohnten Häuser ohne Sonnenschutzrollos aufgeführt.

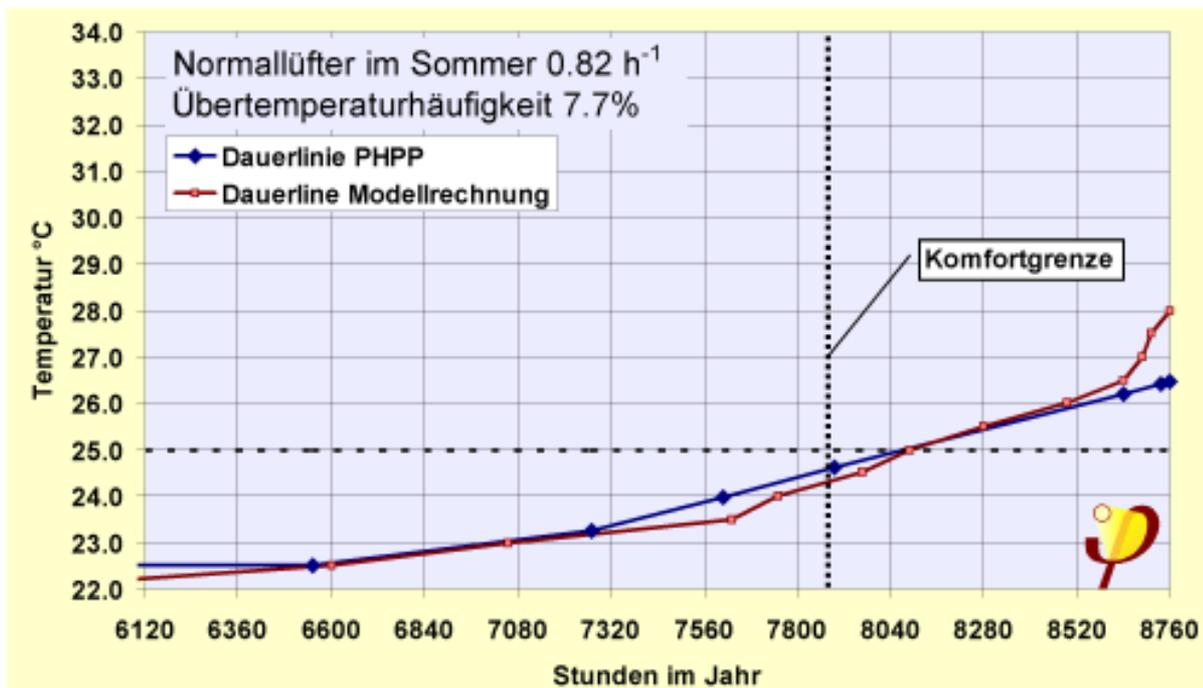


Abbildung 53: Jahresdauerlinie für den Fall Normallüfter. Es resultiert eine gute thermische Behaglichkeit im Sommer.

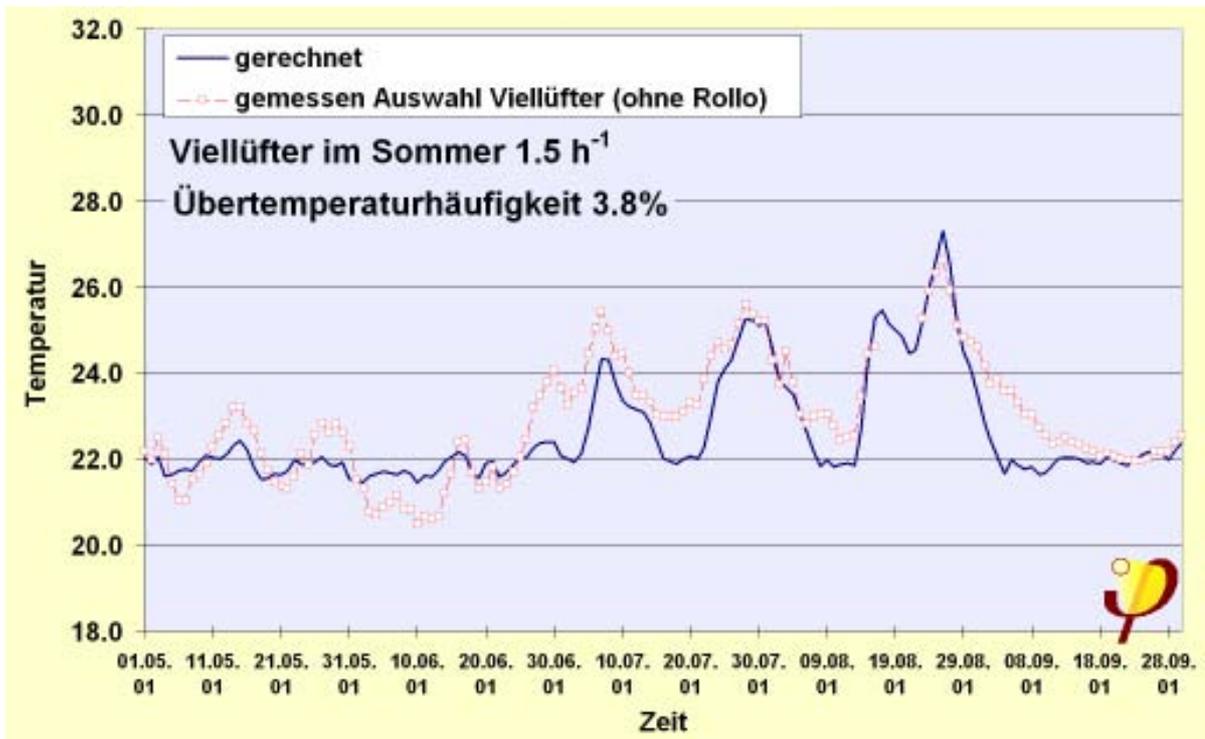


Abbildung 54: Zeitverlauf der Sommertemperaturen für sommerliche Viellüfter (im August sind durchschnittlich alle 8 Fenster gekippt). Zur Illustration sind die Messergebnisse des Durchschnitts aller im Sommer stark gelüfteten Häuser ohne Sonnenschutzrollos aufgeführt.

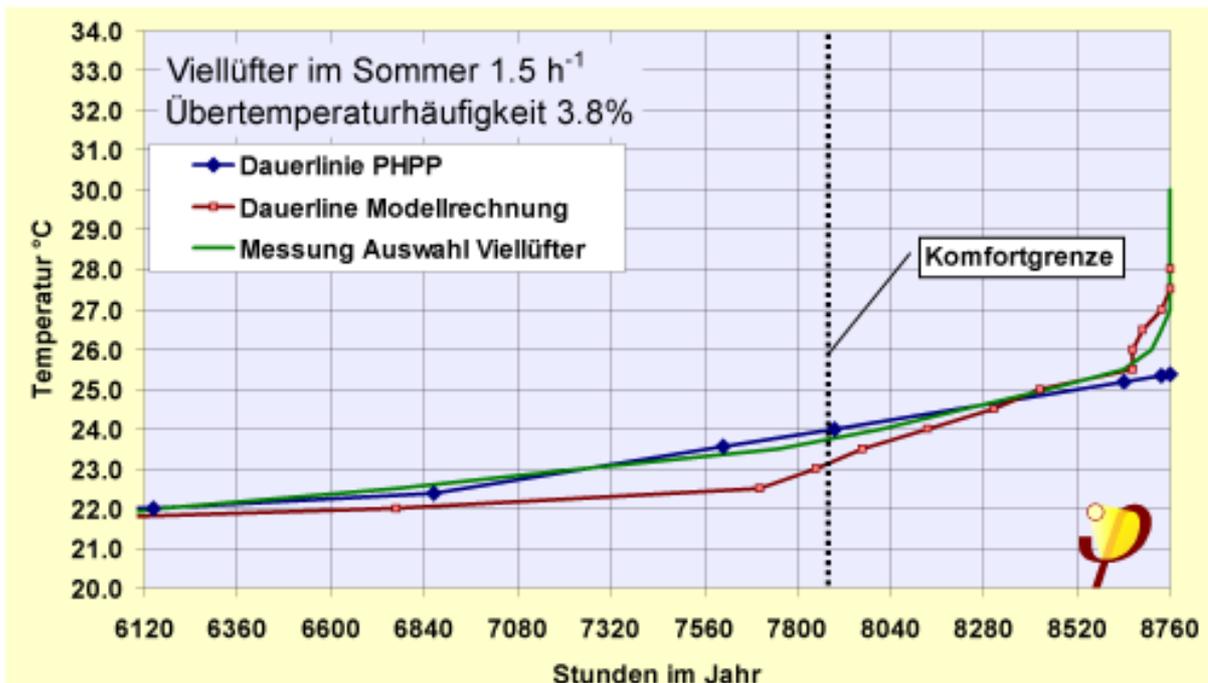


Abbildung 55: Jahresdauerlinie für den Fall Viellüfter. Es gibt nur noch eine sehr geringe Übertemperaturhäufigkeit von 3,8%.

Beim Einfluss der Fensterlüftung zeigt die Untersuchung damit deutlich, dass im Sommer sogar ohne Sonnenschutzmaßnahmen bei ausreichendem Luftwechsel Innenraumtemperaturen mit nur geringen Übertemperaturhäufigkeiten erreicht werden.

3.7.2 Der Einfluss der Verschattung

Als Grundlage für die Parameterstudie zur Verschattung dient der bereits in 3.7.1.2 behandelte Fall des „Weniglüfters“ ohne Sonnenschutzrollo. Für diesen Fall hatte sich eine Übertemperaturhäufigkeit von 14,8% ergeben. Weitere Maßnahmen werden hier als erforderlich angesehen.

3.7.2.1 Innenliegendes Rollo (25% Reduktion)

Eine einfache und kostengünstige Maßnahme ist ein innenliegendes Rollo. Nach vorausgehenden Analysen kann ein gut reflektierendes innenliegendes Rollo den Energieeintrag durch eine Dreischeibenwärmeschutzverglasung um bis zu 40% verringern. Wir gehen hier aber von einem einfacheren weißen Rollo aus. Zudem muß angenommen werden, das dieses auch nicht immer konsequent und vollständig herabgelassen wird. Die erreichte Reduktion des Gesamtenergiedurchlasses setzen wir daher in den betreffenden Zeiten mit 20% an. Abbildung 56 zeigt die Jahresdauerlinie für diesen Fall. Die Überhitzungshäufigkeit nimmt auf 12,1% ab; dies ist für eine gute sommerliche Behaglichkeit jedoch noch nicht ausreichend. Außerdem muß beachtet werden, dass durch ein innenliegendes Rollo die thermische Belastung für die Verglasung noch zunimmt (erhöhte Absorption auch der reflektierten Strahlung in den Scheiben). Wir raten daher nicht zu einer solchen Lösung.

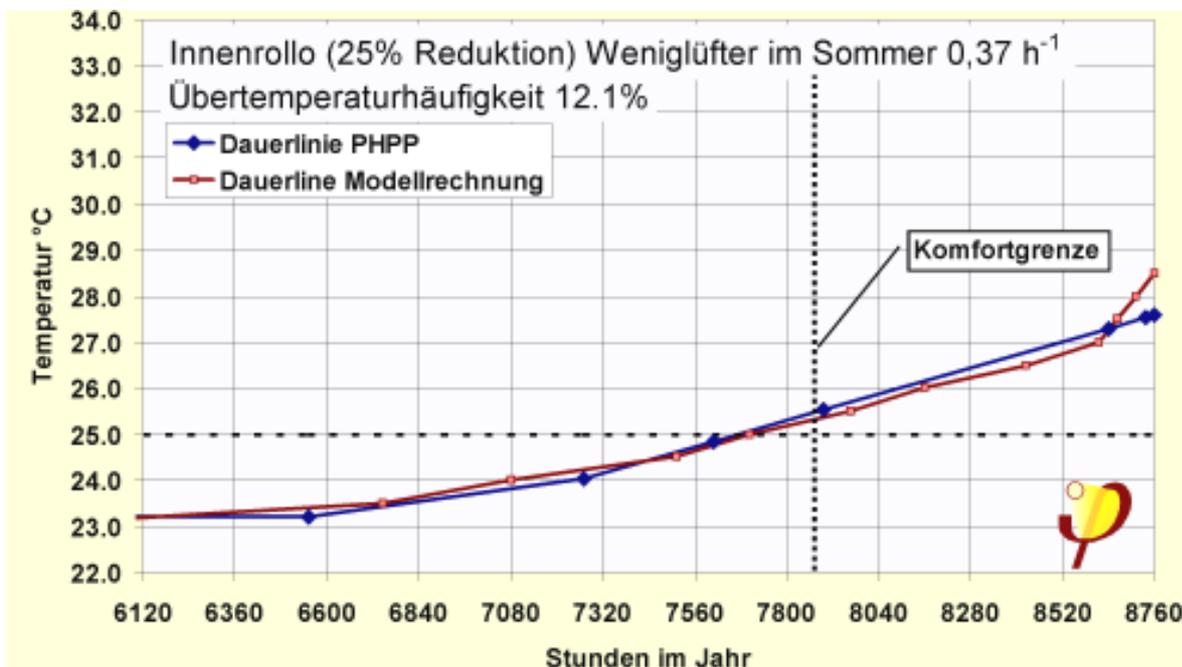


Abbildung 56: Jahresdauerlinie bei Verwendung eines innenliegenden Rollos. Die Überhitzungshäufigkeit nimmt gegenüber dem Basisfall ab (vgl. Abbildung 51), die Maßnahme reicht aber für eine hohe sommerliche Behaglichkeit noch nicht aus.

3.7.2.2 Außenliegendes Rollo, wenig genutzt (40% Reduktion)

Für ein außenliegendes Rollo der in der Siedlung verwendeten Bauart kann im geschlossenen Zustand von einer Reduktion des Solarenergiedurchlasses um 80% ausgegangen werden. Im hier behandelten Fall nehmen wir aber an, dass die auf der Südseite verwendeten Rollos in der strahlungsreichen Periode nur zur Hälfte geschlossen werden. Abbildung 57 zeigt die Jahresdauerlinie für diesen Fall. Eine Übertemperaturhäufigkeit von 8,8% zeigt an, dass damit eine akzeptable sommerliche Behaglichkeit erreicht werden kann.

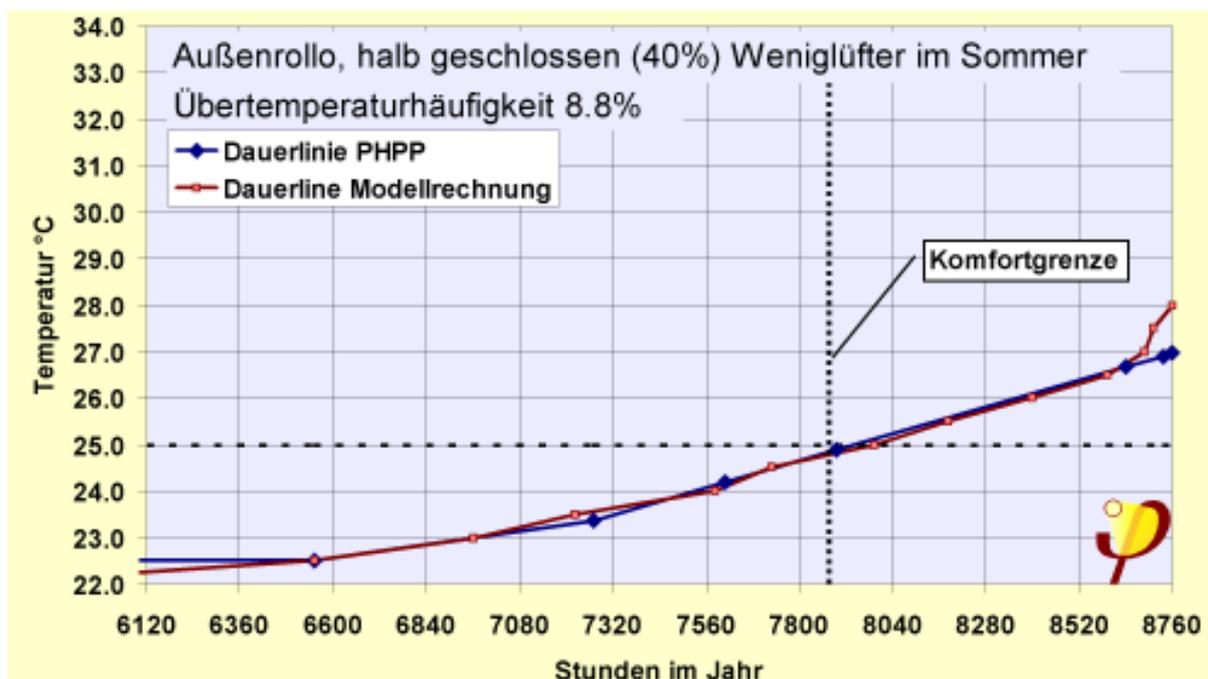


Abbildung 57: Jahresdauerlinie mit einem Außenrollo, das zur Hälfte geschlossen wird (Reduktion der Einstrahlung um 40%)

3.7.2.3 Außenliegendes Rollo, konsequent genutzt (80% Reduktion)

Ein konsequent in Hitzeperioden genutztes außenliegendes Rollo der in der Siedlung verwendeten Bauart führt zu weit besseren Ergebnissen. Wie Abbildung 58 zeigt, liegt die Übertemperaturhäufigkeit bei konsequenter Nutzung der außenliegenden Rollos bei nur noch 4,7%. Die gemessenen Werte aus einer Auswahl von Häusern mit einer annähernd solchen Strategie zeigen ein sogar noch günstigeres Verhalten ($h_{\vartheta \geq 25^\circ\text{C}} = 1,9\%$). Es kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass in diesen Häusern zeitweise auch mehr gelüftet wird.

Der hier behandelte Fall zeigt in Übereinstimmung mit der Praxis, dass in Passivhäusern ohne weiteres im Sommer ohne Kühlung ein sehr gutes Innenklima gewährleistet werden kann. Diese Aussage sollte jedoch nicht dazu verleiten bei der Planung die Frage der sommerlichen Behaglichkeit nicht im Einzelfall sehr genau zu

prüfen, weil die Übertemperaturhäufigkeit stark von der lokalen Klimaregion abhängig ist.

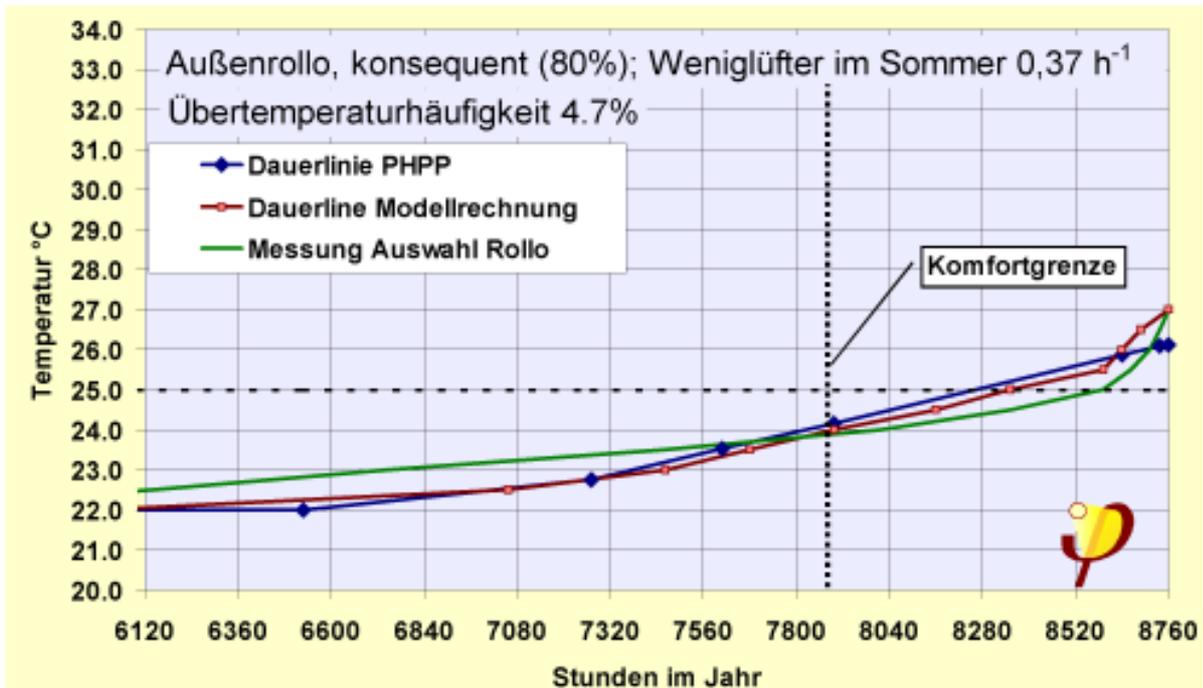


Abbildung 58: Jahresdauerlinie für ein Haus mit Weniglüfter, aber konsequent in Hitzeperioden geschlossenem außenliegendem Rollo. Es ergeben sich sehr gute Komfortbedingungen; eine Auswahl von Nutzern (Messung) bestätigen diese Einstufung.

Wird nur der Verschattungseinfluß betrachtet, zeigt sich, dass auch bei geringen Luftwechselraten („Weniglüfter“) durch außenliegende Verschattungen auf der Südseite die sommerlichen Temperaturspitzen sehr gut beherrschbar werden. In der Kombination von Lüftungs- und Verschattungsmaßnahmen stellen sich in den Häusern angenehme sommerliche Temperaturen ein.

4 Wärmeversorgung

4.1 Wärmeverteilsystem Fernwärme

Die Fernwärme für Heiz- und Warmwassersystem wird in den beiden Heizhäusern an die Netze der Siedlung für jeweils zwei Hauszeilen übergeben. Das Fernwärmenetz stellt den Primärkreislauf, der Ladekreislauf des Speichers den Sekundärteil und das aus dem Speicher versorgte Hausnetz den Tertiärkreislauf dar. Der Speicher im Technikhaus fungiert als eine sog. hydraulische Weiche, um die beiden Kreisläufe hydraulisch zu entkoppeln.

Durch die messtechnische Begleitung des PHI wurden bereits im Dezember 2000 festgestellt, dass die Fernwärmeversorgung im Zusammenspiel mit der Sekundär- und Tertiärseite Regelungsprobleme aufweist. Zeitweise wurden erhebliche Temperatur-Schwingungen in der Vorlauftemperatur beider Netze festgestellt.

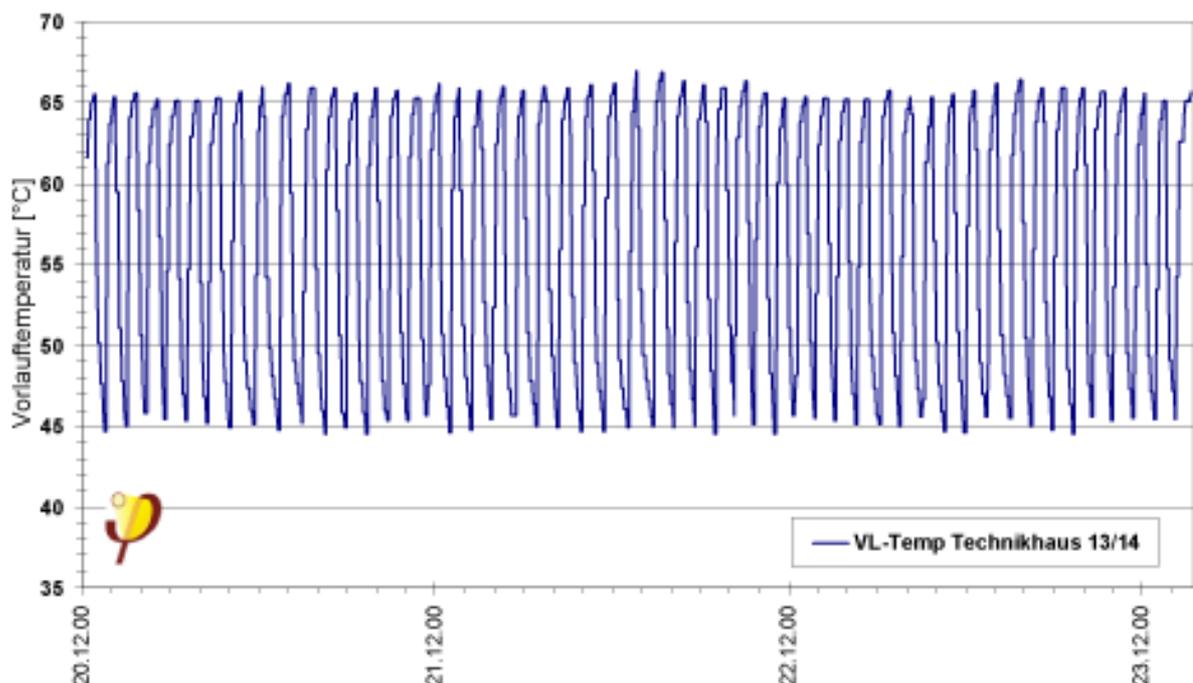


Abbildung 59: Vorlauftemperaturen an drei Tagen im Dezember 2000 vom Versorgungsnetz (tertiär) nach dem Wärmespeicher im Technikhaus 13/14. Diese großen periodischen Temperaturschwankungen wirken sich ungünstig auf die individuelle Regelung aus.

Die Schwankungen der VL-Temperatur im Technikhaus nach dem Pufferspeicher (Tertiärnetz) betrug mehr als 20 K, deren Periode lag in der Heizzeit bei 1:25 h. Dies zeigt die Ausschnittsvergrößerung in Abbildung 60. Dort sind zusätzlich auch noch die VL-Temperaturen der beiden außen liegenden Endhäuser dargestellt. Die Differenzen zwischen den Maximalwerten der Vorlauftemperaturen in diesen beiden

Häusern betragen aufgrund der Wärmeverluste auf der Rohrleitungsstrecke (bei Reihe 14 mit einem Abschnitt Erdreichleitung) 3,5 bzw. 8 K. Wie bereits in [Peper 2001b] beschrieben, wäre hier eine weitere Optimierung der Leitungswärmedämmung bei Folgeprojekten wünschenswert.

Bei der Versorgung der einzelnen Hausspeicher zur Warmwasserversorgung kann die periodische Temperaturschwankung zwischen 44 und 63 °C bzw. 41 und 58 °C je nach Wärmeanforderung des Hauses effektiv zu periodischen Entladungen der Speicher führen. Die Schwingungen in der Vorlauftemperatur traten allerdings nicht fortwährend auf. Zusätzlich zu diesem Mangel waren in beiden Technikhäusern die zentralen Versorgungspumpen bereits mehrfach defekt und mussten ausgewechselt werden.

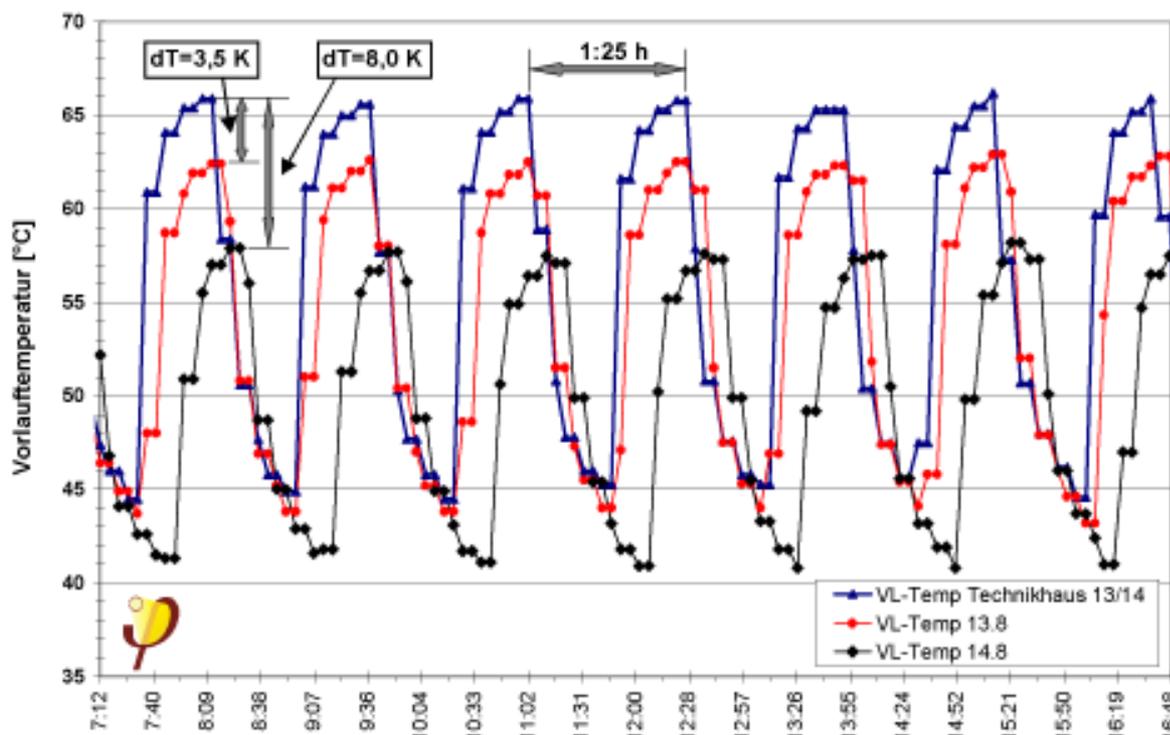


Abbildung 60: Zeitlicher Ausschnitt der Vorlauftemperaturen aus Abbildung 59 vom 21.12.2000. Zusätzlich sind die VL-Temperaturen der beiden außen liegenden Endhäuser dargestellt. Neben der Temperaturschwankung und der Periode der Schwingung sind auch die Temperaturdifferenzen zu den beiden außen liegenden Endhäusern eingetragen.

Mitte 2001 wurde mit den Betreibern des Fernwärmenetzes (Stadtwerke Hannover) dieses Problem auf der Hausnetzseite erörtert. Gemeinsam mit dem Haustechnikplaner Hr. Stärz / Büro inPlan wurde versucht, die Ursachen für das Regelverhalten zu klären. Aus diesem Grund hat der Versorger Ende Oktober / Anfang November 2001 Zusatzmessungen an beiden Übergabestationen mit unterschiedlich eingestellten Regelparametern durchgeführt. Das Anliegen des Versorgers liegt insbesondere in der Rücklauftemperaturbegrenzung von 39 °C. Diese wurde regelmäßig überschritten. Als Ursachen der Mängel sind sowohl hydraulische als auch Regelungsprobleme erkannt worden. Die Übergabestation regelte bei zu hohen RL-Temperaturen den Durchfluß des Primärkreislaufes herunter

bis die RL-Temperatur nicht mehr überschritten wurde. Dies führte vermutlich zu den festgestellten periodischen Schwingungen. Die Einbindung des Pufferspeichers als hydraulische Weiche sowie die Verbindung der RL-Leitung vom Hausnetz und vom Sekundärnetz außerhalb des Speichers haben sich als nicht optimal herausgestellt. Außerdem ist der Speicher für die Versorgung der Häuser nicht notwendig. Diese können vom sekundären Kreislauf auch direkt bedient werden. Es wurde festgestellt, dass die Temperatursensoren im Speicher für eine Schichtenbeladung ungünstig angeordnet waren.



Abbildung 61: Fernwärmeübergabestation (links), Pufferspeicher (rechts) sowie Ausdehnungsgefäß (mitte) in einem der beiden Technikhäuser der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg vor dem Umbau im April 2002.

In Absprache zwischen Stadtwerken Hannover, dem Büro inPlan und dem PHI wurde geklärt, dass ein Umbau der Anlage sinnvoll und notwendig ist. Aus diesen Gründen ist den Bewohnern der kostenfreie Umbau der Anlage von den Stadtwerken Hannover angeboten worden. Nach einer positiven Stellungnahme auch des Büros inPlan und der Erläuterung des PHI an die beiden Hauseigentümergeinschaften haben diese ihr Einverständnis zum Umbau gegeben. Im Technikhaus 13/14 erfolgte der Umbau am 16. April 2002, im Technikhaus 9/10 am 8. Mai 2002.

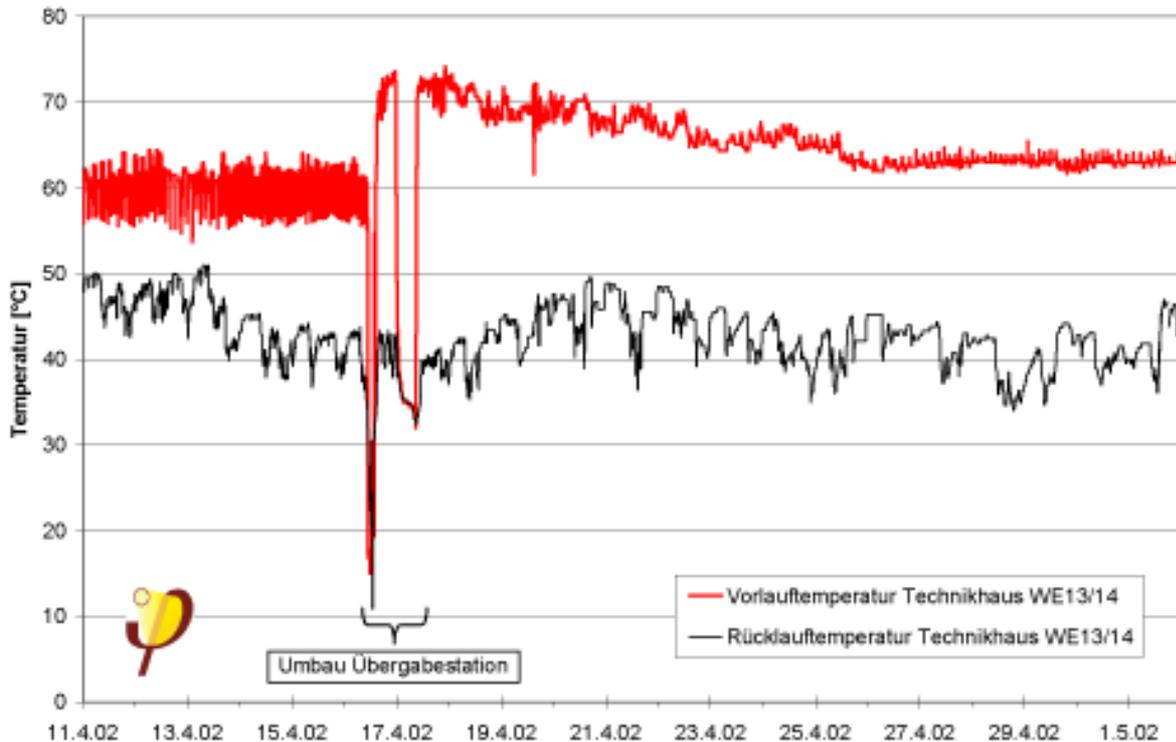


Abbildung 62: VL- und Rücklauftemperatur des Hausnetzes (Tertiärkreis) im Technikhaus 13/14 vor und nach dem Umbau. Nach dem Umbau am 16. April 2002 wurde die Vorlauftemperatur im Sekundärkreis schrittweise von über 70 auf ca. 62°C abgesenkt. Es ist ein deutlich ruhiger Verlauf insbesondere der VL-Temperatur zu erkennen.

Beim Umbau der Übergabestation sind die Speicher im Technikhaus hydraulisch außer Betrieb genommen worden. Hydraulisch sind Sekundär- und Tertiärkreislauf zusammengelegt worden, d.h. am Wärmeübertrager der Übergabestation wurde direkt das Hausnetz angeschlossen. Damit konnte die Ladepumpe außer Betrieb genommen werden. Zum Halten der Sollwerttemperatur „Vorlauf Hausnetz“ variiert die Regelung der Übergabestation den Volumenstrom des Primärkreislaufes über ein Ventil. Nach dem Umbau wurde der Sollwert der sekundären Vorlauftemperatur schrittweise von 70 auf ca. 60°C abgesenkt, um niedrigere Rücklauftemperaturen zu erhalten. Mit dem Ergebnis sind bislang alle Beteiligten zufrieden. Wie man in Abbildung 62 erkennt, sind die Verläufe der Temperaturen viel gleichmäßiger geworden, es liegen nur noch geringe Schwankungen von 2 bis 3 K vor. Die Stadtwerke Hannover werden zur Sicherheit das Regelverhalten der Übergabestation zu Beginn der Heizperiode 2002/2003 nochmals im Winterbetrieb genauer untersuchen.

Die Zeitschaltuhr zur Minimierung der Zirkulationsverluste im Sommerhalbjahr wirkt jetzt direkt auf die Übergabestation und schaltet diese komplett ab (Ventil wird geschlossen). So sind diesbezüglich keine Störungen zu erwarten.

4.2 Vor- und Rücklauftemperaturen

Die Vor- und Rücklauftemperaturen des Versorgungsnetzes zu den einzelnen Häusern wird jeweils auch in den vier außenliegenden Häusern (jeweils größter Abstand in der Reihe zur Übergabestation) gemessen. Die Vorlauftemperaturen liegen wegen der Leitungsverluste niedriger als im Technikhaus (vergl. hierzu auch die Ausführungen in [Peper 2001b]). Die Messdaten des gesamten hier ausgewerteten Jahres eines der außenliegenden Häuser werden in Abbildung 63 exemplarisch dargestellt. Deutlich sind die Zeiten in Frühjahr und Sommer zu erkennen, in dem das Haus vollständig vom Versorgungsnetz abgetrennt wurde und der Wärmebezug für die Warmwasserbereitung ausschließlich über die Solaranlage bezogen wurde. In dieser Zeit sind die beiden Temperaturen nahezu identisch. Die zeitweise hohen Schwankungen in der Übergangszeit haben ihren Ursprung im Betrieb der Zeitschaltuhr. Diese hat beispielsweise während der Übergangszeit in zwei Tageszyklen die Pumpe aktiviert. Zwischen diesen Betriebsphasen kühlt die VL-Leitung im Hausnetz wieder ab und wird dann einige Stunden später wieder erwärmt. Während der Heizzeit im Winter verringern sich die Temperaturschwankungen deutlich, da die Heizkreispumpe jetzt dauerhaft betrieben wird.

Wenn kein Wärmeversorgungsbedarf des Gebäudes besteht, fließt kein Volumenstrom durch das Hausnetz (Ventil geschlossen). Der Messfehler der VL- und RL-Temperatur in diesen Zeiträumen ist als eher gering einzustufen, da sich die Positionen der Temperaturmessungen kurz nach dem Abzweig von der Versorgungsleitung befindet.

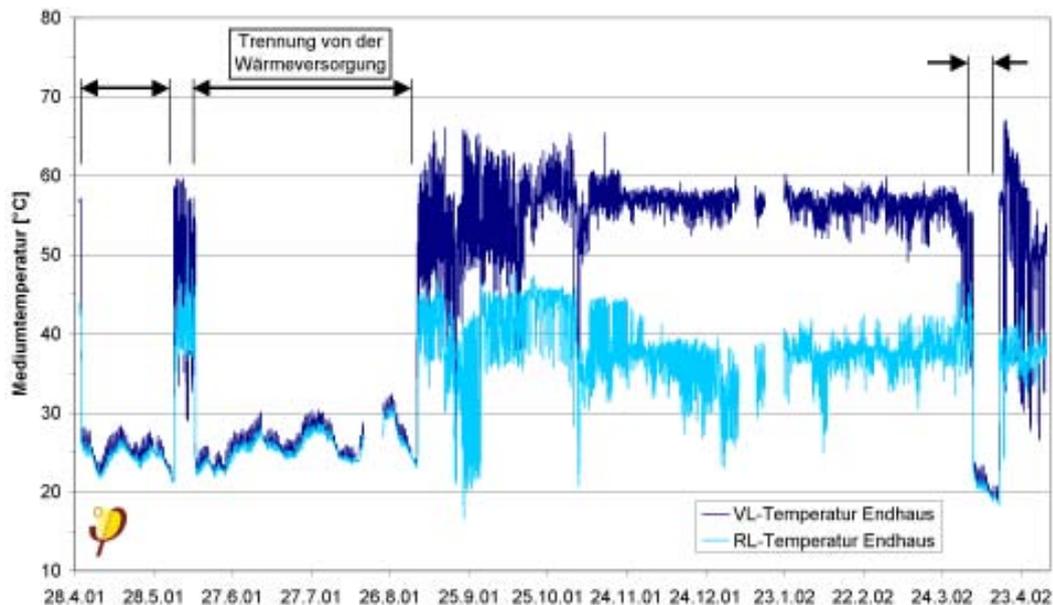


Abbildung 63: VL- und RL-Temperaturen in einem der außenliegenden Endhäuser vom 1.5.2001 bis zum 1.5.2002. Drei Zeiträume im Frühjahr und Sommer in denen das Haussystem komplett vom Wärmeversorgungsnetz abgetrennt war, sind gekennzeichnet. Die zeitweilig größeren Temperatur-Schwankungen werden durch die Schaltzeiten der Umwälzpumpe verursacht. Im Sommer und in der Übergangszeit wird die Pumpe nur zu bestimmten Zeiten am Tag betrieben. Das führt nach dem Abschalten zu Abklingkurven der Mediumstemperaturen.

Der Umbau der Übergabestation am 16. April 2002 sowie das anschließende Absenken der Vorlauftemperatur sind in Abbildung 63 ebenfalls zu erkennen.

Die Mediumtemperatur der Reihe 13/14 im Winterbetrieb sowohl im Heizhaus nach dem Speicher als auch in den beiden außenliegenden Endhäusern sind in Abbildung 64 dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass die VL-Temperatur im Technikhaus (Tertiärkreislauf) vor dem Umbau der Station um etwa 60°C pendelt; die VL-Temperaturen in den Häusern werden in diesem Zeitraum im Mittel ca. 3 bis 4 K tiefer liegen.

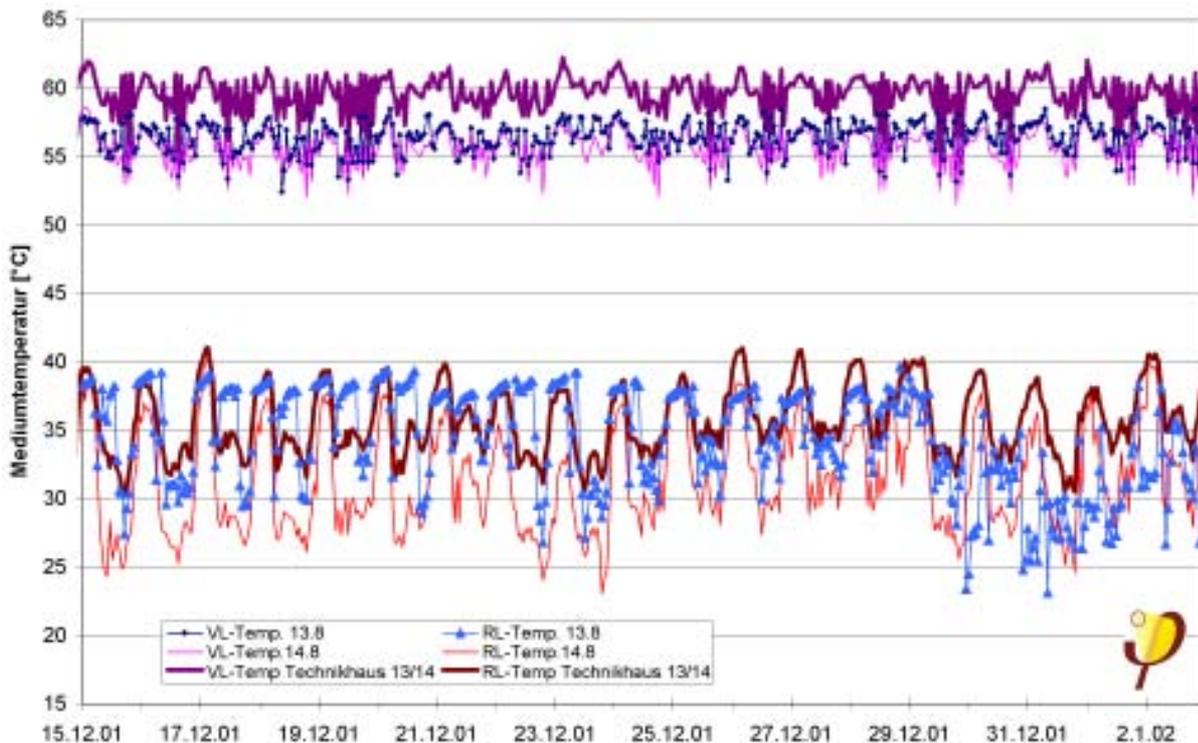


Abbildung 64: VL- und RL-Temperaturen der beiden außenliegenden Endhäuser und der Netztemperaturen im Technikhaus im Winterbetrieb der Reihe 13 und 14 (15.12.2001 bis 3.1.2002).

5 Literatur

- [AkkP 15] Feist, Wolfgang: **Passivhaus-Sommerfall**; Protokollband Nr. 15 zum Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, 1. Auflage, 1999
- [Danner 2001] Danner, Michael: **Wohnen in der Passivhaussiedlung Lummerlund im Neubaugebiet Hannover-Kronsberg**; Abschlußbericht der sozialwissenschaftlichen Evaluation; Hannover, 2001
- [Ebel 1997] Ebel, W., Feist, W.: **Ergebnisse zum Stromverbrauch im Passivhaus Darmstadt Kranichstein**. In: Stromsparen im Passivhaus, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 7, Passivhaus Institut, Darmstadt, Mai 1997
- [Ebel 2002] Ebel, W., Großklos, M., Loga, T.: **Energiebilanzen und Messergebnisse einer Passiv-Reihenhaussiedlung in Wiesbaden**. HLH Band 53 (2002) Nr. 6, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf; Juni 2002
- [Ebel, Großklos, Loga 2002] Ebel, W.; Großklos, M.; Loga, T.: **Energiebilanzen und Meßergebnisse einer Passiv-Reihenhaussiedlung in Wiesbaden**; HLH Bd. 53 (2002) Nr.6 – Juni, S. 43 bis 51
- [Eckert 2000] Eckert, Anja: **Model Kronsberg: nachhaltiges Bauen für die Zukunft = Sustainable building for the future**, Hrsg.: Landeshauptstadt Hannover, Der Oberbürgermeister, Umweltdezernat; Hannover 2000
- [Feist 1997] Feist, W. (Hrsg.): **Nutzerverhalten**; Protokollband Nr. 9 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Darmstadt 1997
- [Feist 2001] Feist, W.: **Stellungnahme zur Vornorm DIN V 4108 Teil 6:2001 aus Sicht der Passivhausentwicklung**; CEPHEUS Projektinformation Nr. 39, Passivhaus Institut Darmstadt, Hannover 2001
- [Feist 2001a] Feist, W., Peper, S., Görg, M., von Oesen, M.: **Klimaneutrale Passivhaus-Reihenhaussiedlung Hannover-Kronsberg**, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 18, Passivhaus Institut Darmstadt, Hannover 2001
- [Feist 2001b] Feist, W.: **Wissenschaftliche Auswertung von Messungen in Passivhäusern/Niedrigenergiehäusern der Siedlung Wiesbaden Lummerlund**. Passivhaus Institut / Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 2001



- [Kaufmann 2001] Kaufmann, B., Feist, W.: **Vergleich von Messung und Simulation am Beispiel eines Passivhauses in Hannover-Kronsberg**. CEPHEUS-Projektinformation Nr. 21, Passivhaus Institut Darmstadt, Hannover 2001
- [Maas 1995] Maas, A.: **Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung**; Dissertation, Universität Kassel 1995
- [Michael 2000] Micheal, K., Eichhorn, S., Lux, S., Schmid, K., Kramp, M.: **Effizienz von Lüftungsanlagen in Niedrigenergie-Häusern in NRW**, Endbericht. Forschungsprojekt 253 146 98 der AG Solar NRW, Niedrig-Energie-Institut GbR, Detmold 2000
- [Peper 1999] Peper, S.: **Untersuchung der Luftdichtheit in der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg**, Passivhaus Institut Darmstadt, Fachinformation PHI-1999/4
- [Peper 2001a] Peper, S., Feist, W.: **Meßdatenauswertung der klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg: Sommerklima und erstes vollständiges Jahr**. Fachinformation PHI-2001/1, Passivhaus Institut, Darmstadt Januar 2001.
- [Peper 2001b] Peper, S., Feist, W., Kah, O.: **Meßtechnische Untersuchung und Auswertung; Klimaneutrale Passivhaussiedlung in Hannover-Kronsberg**. CEPHEUS-Projektinformation Nr. 19, Passivhaus Institut Darmstadt, Hannover 2001.
- [Peper 2001c] Peper, S., Feist, W.: **Thermografische Untersuchung der Passivhaussiedlung in Hannover-Kronsberg**. CEPHEUS-Projektinformation Nr. 20, Passivhaus Institut, 1. Aufl., Darmstadt 2001
- [Pfluger 2001] Pfluger, R., Feist, W.: **Meßtechnische Untersuchung und Auswertung; Kostengünstiger Passivhaus-Geschoßwohnungsbau Kassel Marbachshöhe**. CEPHEUS-Projektinformation Nr. 15, Passivhaus Institut, 1. Aufl., 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
- [PHPP 2002] Feist, W.; Baffia, E.; Schnieders, J.; Pfluger, R.; Kah, O.: **Passivhaus Projektierungs Paket**; 4. überarbeitete Auflage; PHI, Darmstadt 2002.

6 Anhang

6.3 Projekt-Kurzvorstellung

Um eine Übersicht über die untersuchten Gebäude zu geben, werden hier die Kurzbeschreibungen und Darstellungen aus [Peper 2001b] übernommen.

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.

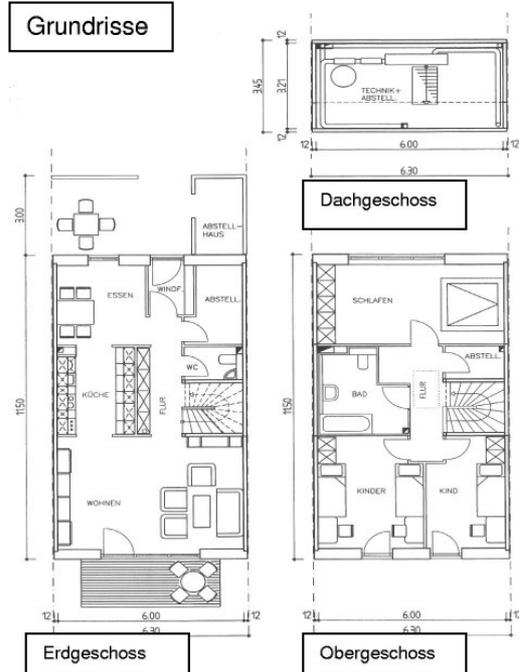
	<p>Konstruktion: Mischbau tragende Struktur aus Betonfertigteilen Außenwand und Dach als Holzleichtbauelement</p> <p>Heizsystem: reine Zuluft-nacherwärmung Versorgung durch Fernwärme</p> <p>Lüftung: Wohnungslüftung Mechanische Lüftung mit WRG 78%</p> <p>Energiekennwert: q_H: ca. 12 kWh/m²a, Berechnung 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>	

Abbildung 65: 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 2001a] zu entnehmen.

Grundrisse



Grundrisse

Erdgeschoss

Obergeschoss

Dachgeschoss

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

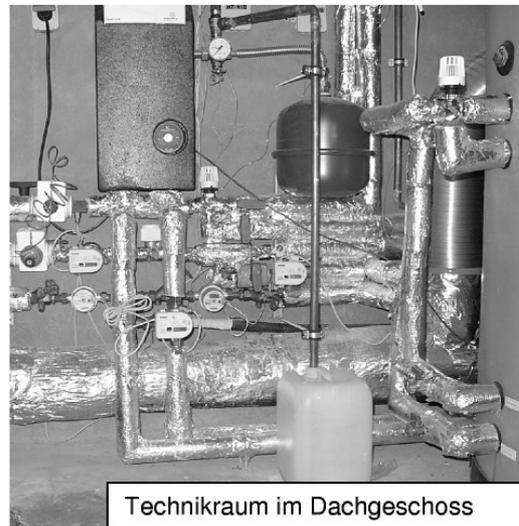
FERTIGSTELLUNG:
12/1998

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



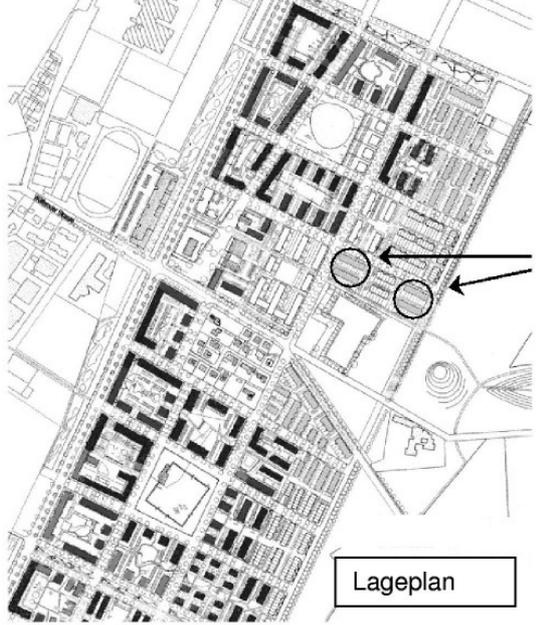
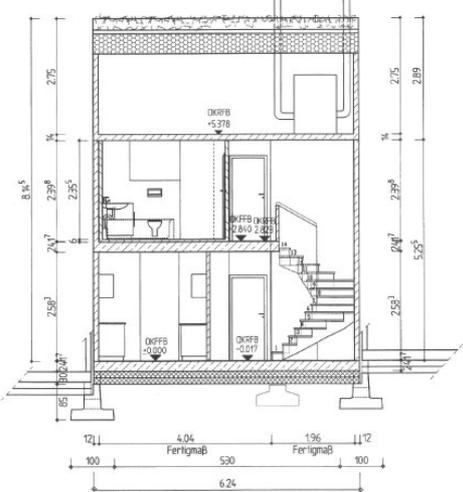
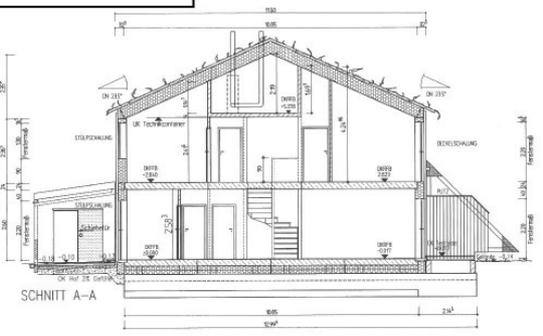
Ansicht von Südost



Technikraum im Dachgeschoss



Ansicht von Südost

Projektbeschreibung	 <p style="text-align: right; border: 1px solid black; padding: 2px;">Lageplan</p>																											
<ul style="list-style-type: none"> • 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 <ul style="list-style-type: none"> - 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 €/(\text{m}^2 \text{ Wohnfläche}) 	<p style="text-align: center; border: 1px solid black; padding: 2px;">Querschnitt</p> 																											
<p style="text-align: center; border: 1px solid black; padding: 2px;">Konstruktion</p> <ul style="list-style-type: none"> • 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: <table border="0" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Außenwand</td> <td style="padding: 2px;"></td> <td style="padding: 2px;"></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;"> Holzleichtbauelement</td> <td style="padding: 2px;"></td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">0,126 W/(m²K)</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;"> massive Giebelwand</td> <td style="padding: 2px;"></td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">0,097 W/(m²K)</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">EG-Bodenplatte</td> <td style="padding: 2px;"></td> <td style="padding: 2px;"></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;"> (Endhaus)</td> <td style="padding: 2px;"></td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">0,096 W/(m²K)</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;"> (Mittelhaus)</td> <td style="padding: 2px;"></td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">0,125 W/(m²K)</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Dach</td> <td style="padding: 2px;"></td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">0,095 W/(m²K)</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Verglasung</td> <td style="padding: 2px;"></td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">0,75 W/(m²K)</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Fenster ges.</td> <td style="padding: 2px;"></td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">0,83 W/(m²K)</td> </tr> </table> 	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)	<p style="text-align: center; border: 1px solid black; padding: 2px;">Längsschnitt</p>  <p style="text-align: center;">SCHNITT A-A</p>
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)																										
<p style="text-align: center; border: 1px solid black; padding: 2px;">Haustechnik</p> <ul style="list-style-type: none"> • Heizung und Lüftung: <ul style="list-style-type: none"> - 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. 																												

6.4 Zeitverläufe der Raumlufthtemperaturen

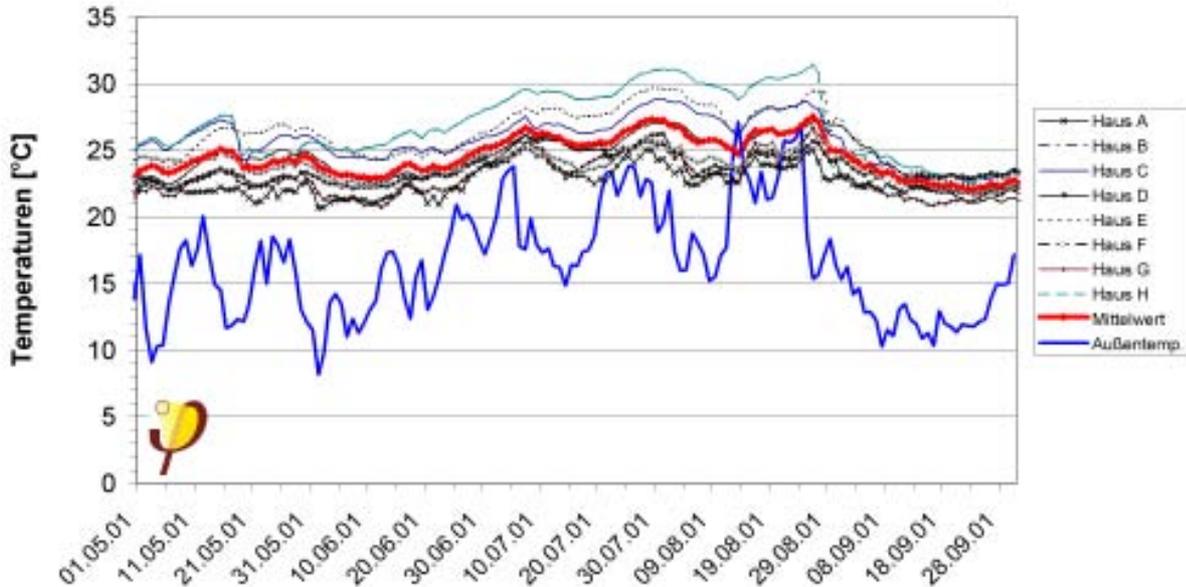


Abbildung 66: Tagesmittlere Lufttemperaturen im EG der Hausreihe 9 sowie Außenlufttemperaturen im Sommer 2001 (1.5. bis 30.9.2001).

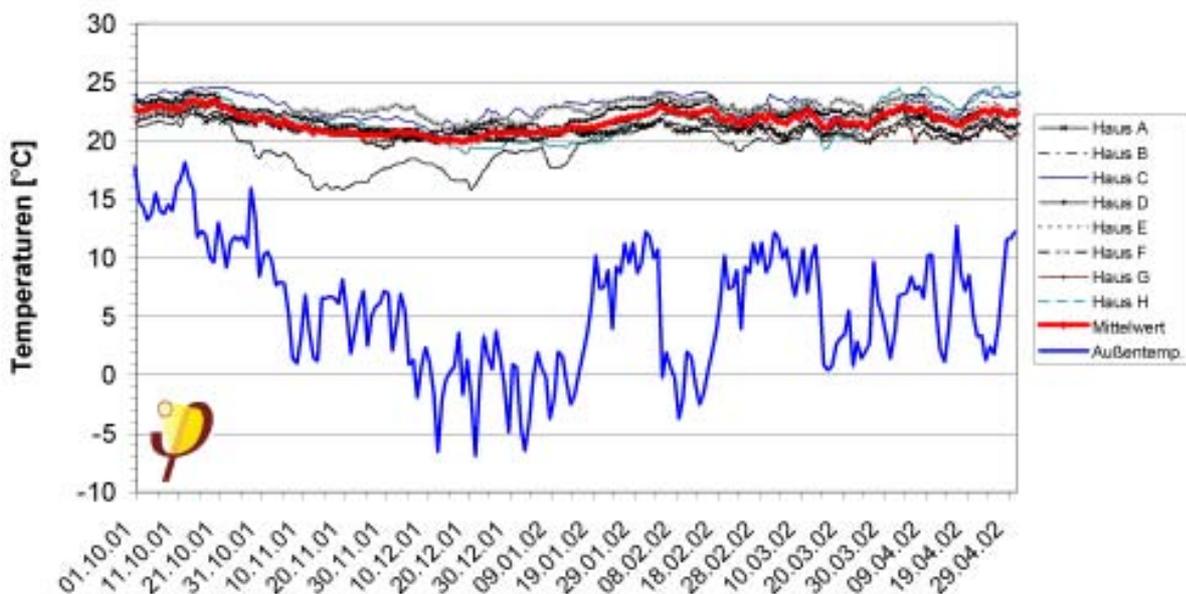


Abbildung 67: Tagesmittlere Lufttemperaturen im EG der Hausreihe 9 sowie Außenlufttemperaturen im Winter 2001/2002 (1.10.2001 bis 30.4.2002).

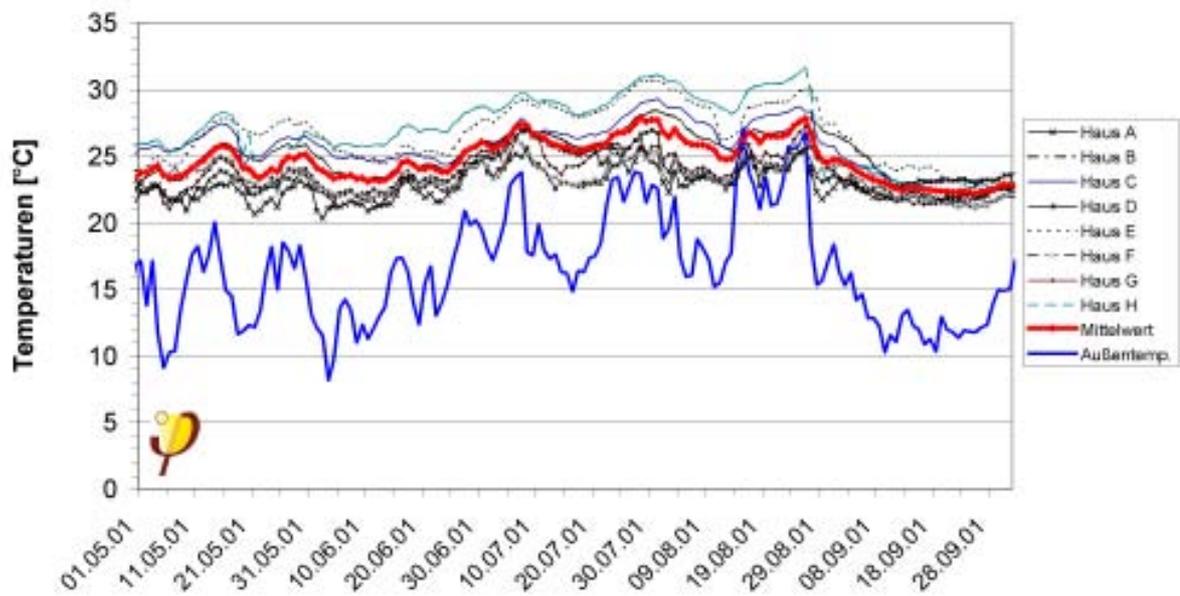


Abbildung 68: Tagesmittlere Lufttemperaturen im OG der Hausreihe 9 sowie Außenlufttemperaturen im Sommer 2001 (1.5. bis 30.9.2001).

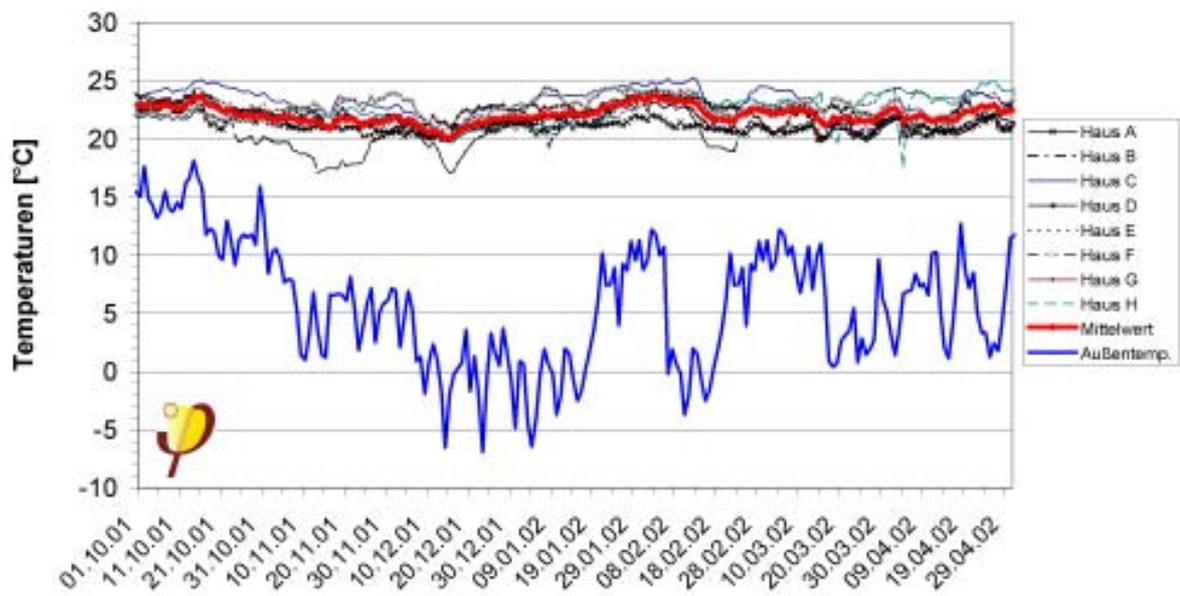


Abbildung 69: Tagesmittlere Lufttemperaturen im OG der Hausreihe 9 sowie Außenlufttemperaturen im Winter 2001/2002 (1.10.2001 bis 30.4.2002).

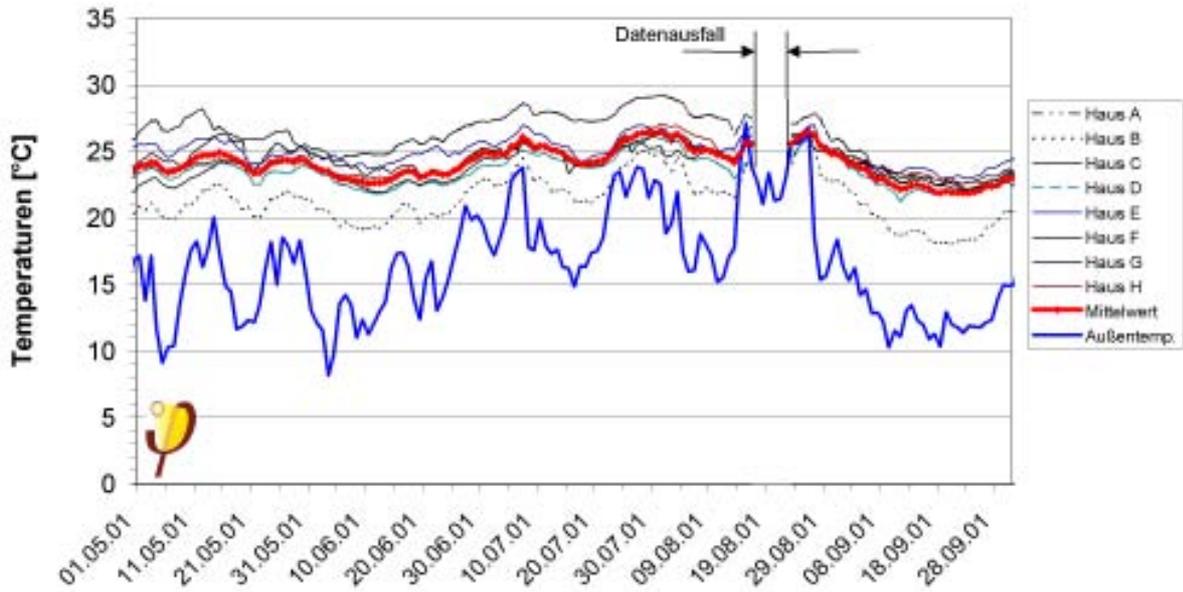


Abbildung 70: Tagesmittlere Lufttemperaturen im EG der Hausreihe 10 sowie Außenlufttemperaturen im Sommer 2001 (1.5. bis 30.9.2001).

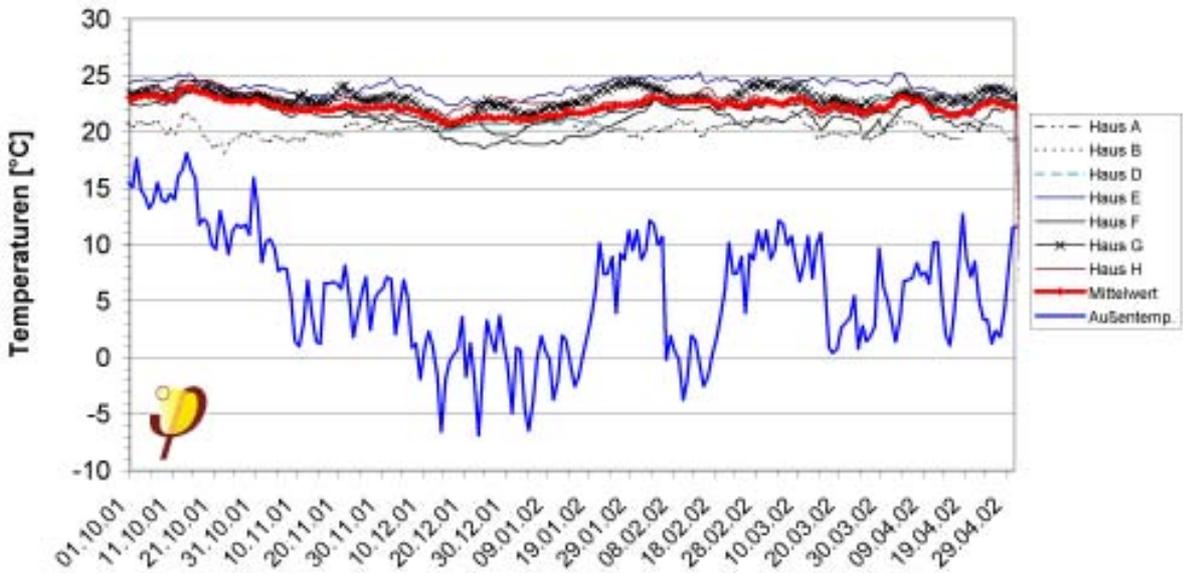


Abbildung 71: Tagesmittlere Lufttemperaturen im EG der Hausreihe 10 sowie Außenlufttemperaturen im Winter 2001/2002 (1.10.2001 bis 30.4.2002).

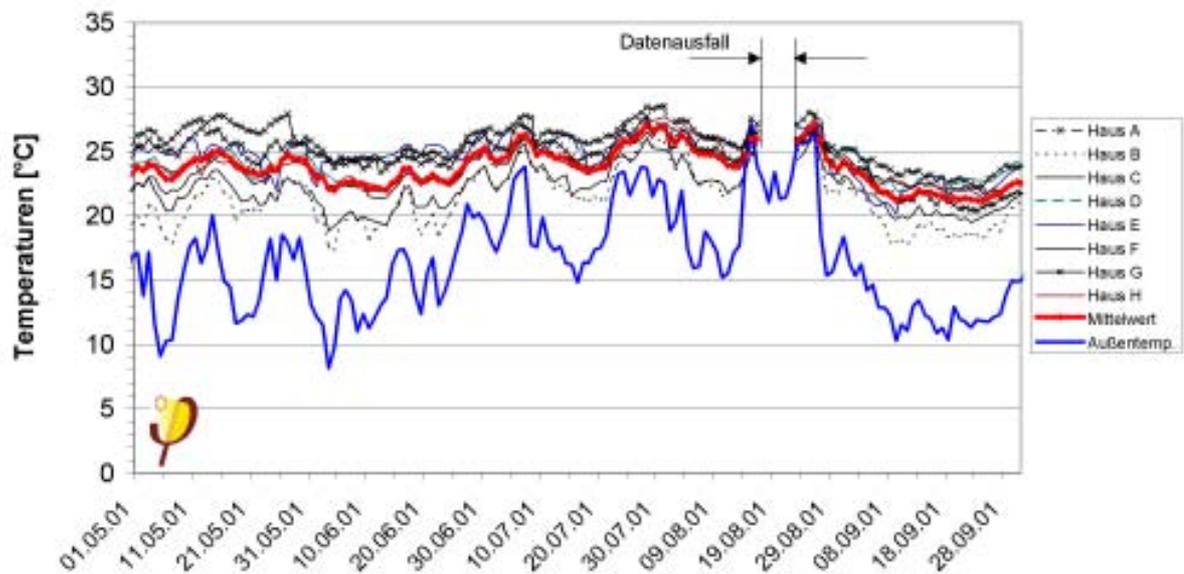


Abbildung 72: Tagesmittlere Lufttemperaturen im OG der Hausreihe 10 sowie Außenlufttemperaturen im Sommer 2001 (1.5. bis 30.9.2001).

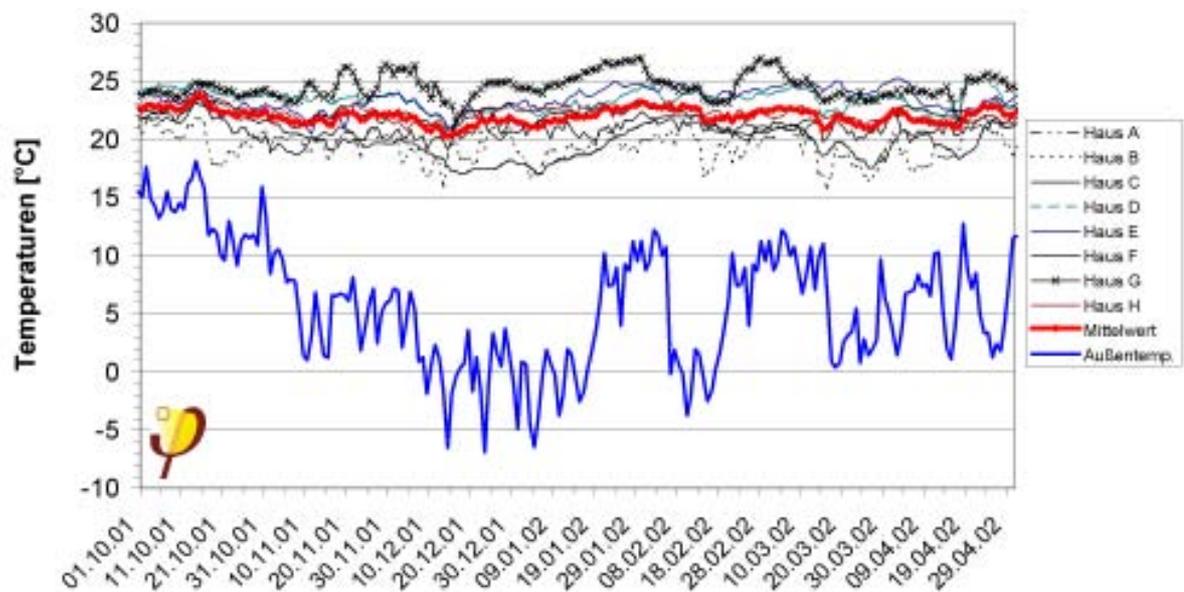


Abbildung 73: Tagesmittlere Lufttemperaturen im OG der Hausreihe 10 sowie Außenlufttemperaturen im Winter 2001/2002 (1.10.2001 bis 30.4.2002).

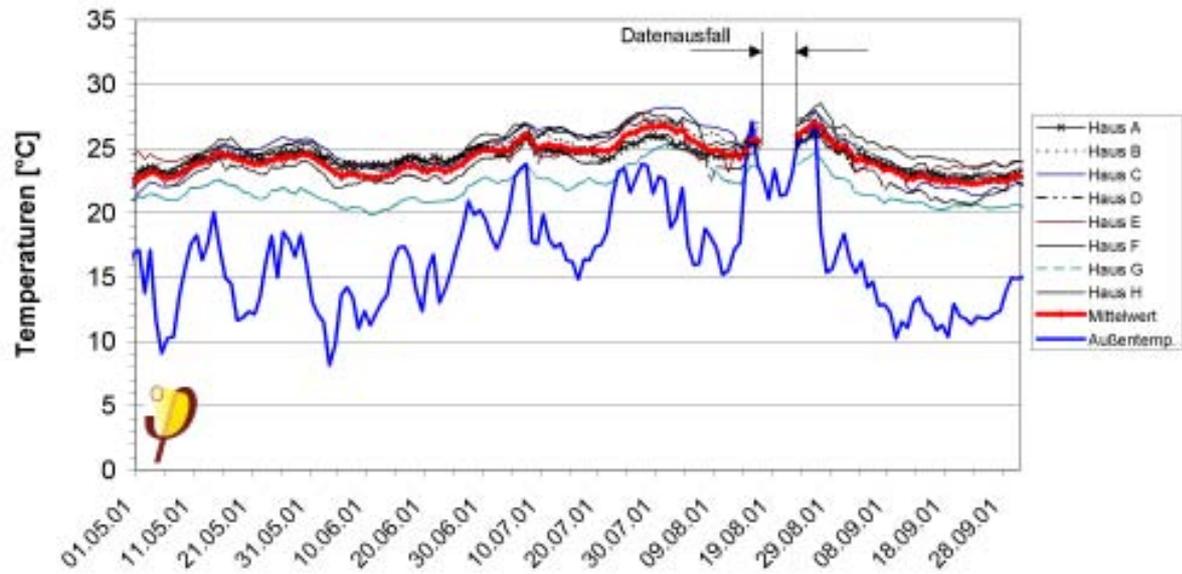


Abbildung 74: Tagesmittlere Lufttemperaturen im EG der Hausreihe 13 sowie Außenlufttemperaturen im Sommer 2001 (1.5. bis 30.9.2001).

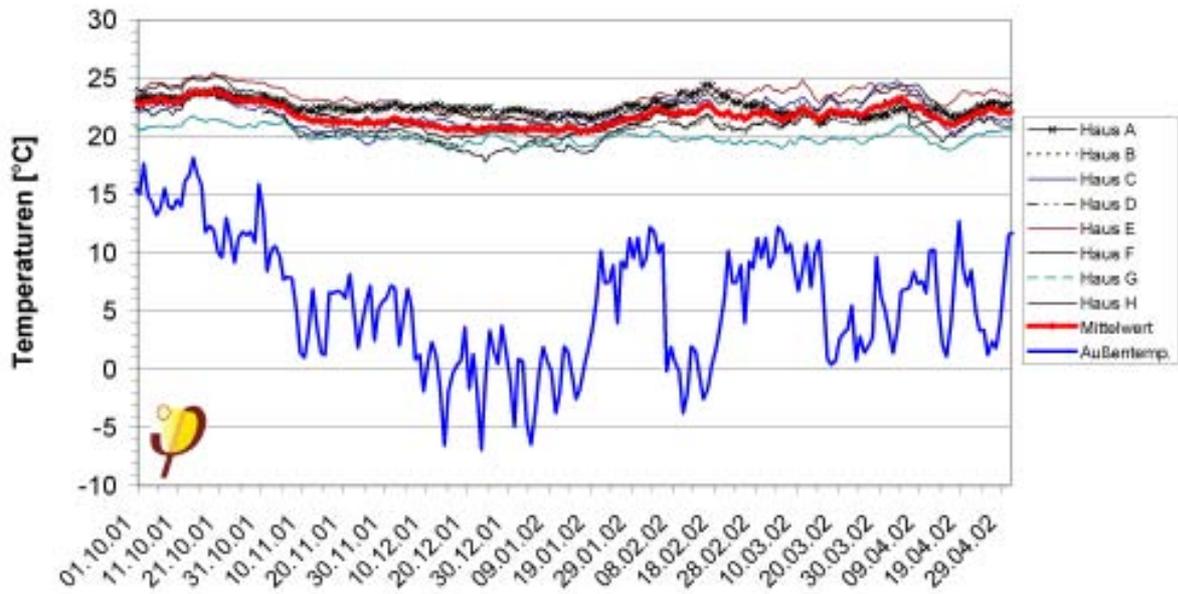


Abbildung 75: Tagesmittlere Lufttemperaturen im EG der Hausreihe 13 sowie Außenlufttemperaturen im Winter 2001/2002 (1.10.2001 bis 30.4.2002).

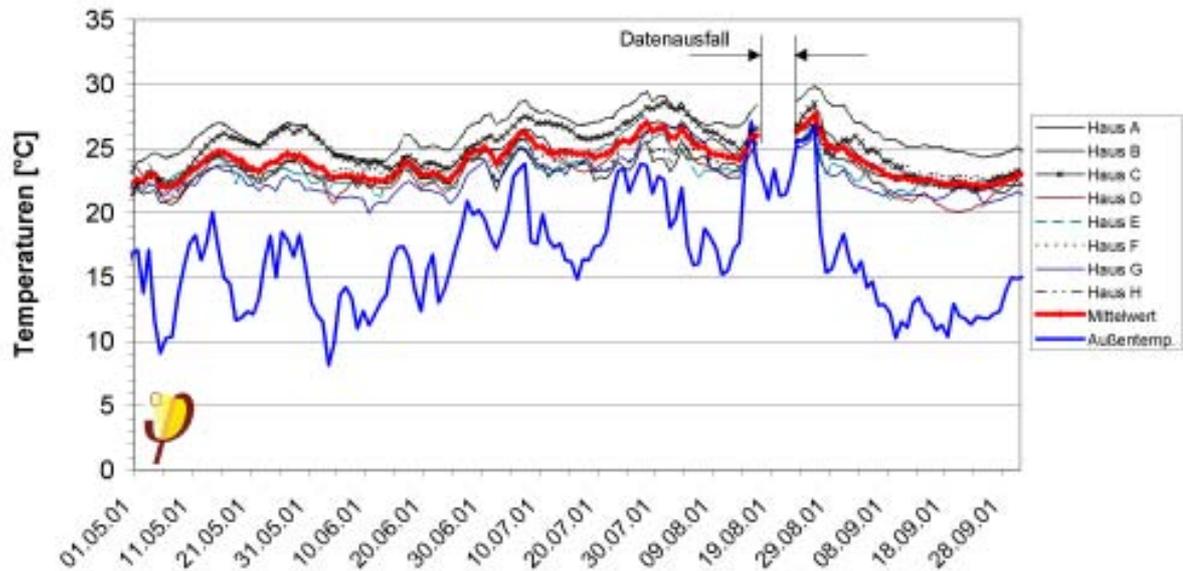


Abbildung 76: Tagesmittlere Lufttemperaturen im OG der Hausreihe 13 sowie Außenlufttemperaturen im Sommer 2001 (1.5. bis 30.9.2001).

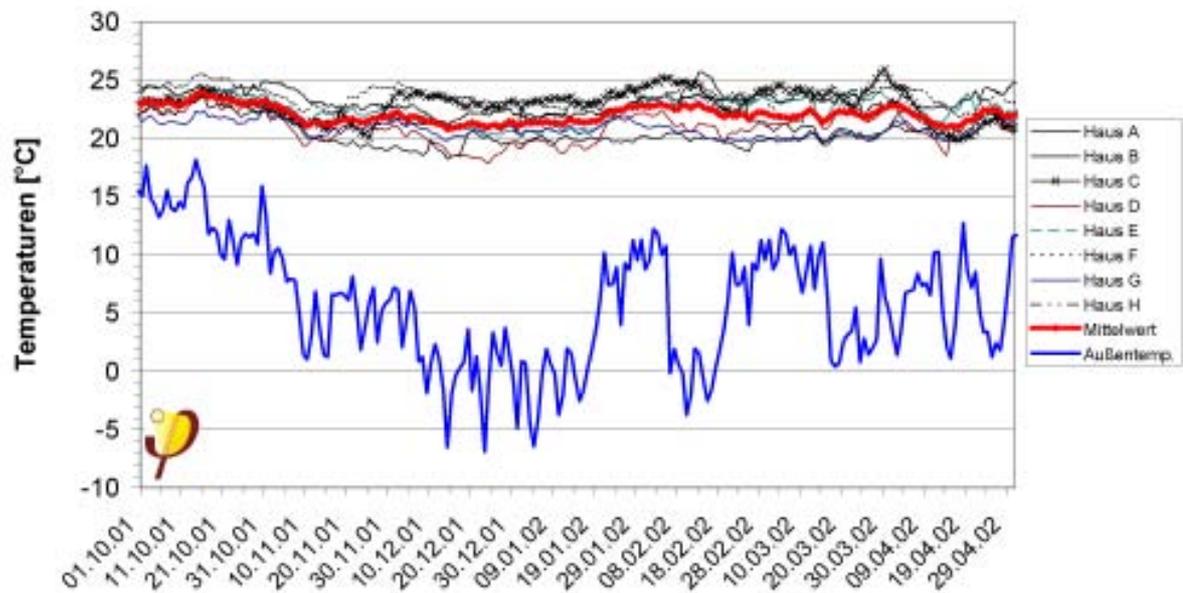


Abbildung 77: Tagesmittlere Lufttemperaturen im OG der Hausreihe 13 sowie Außenlufttemperaturen im Winter 2001/2002 (1.10.2001 bis 30.4.2002).

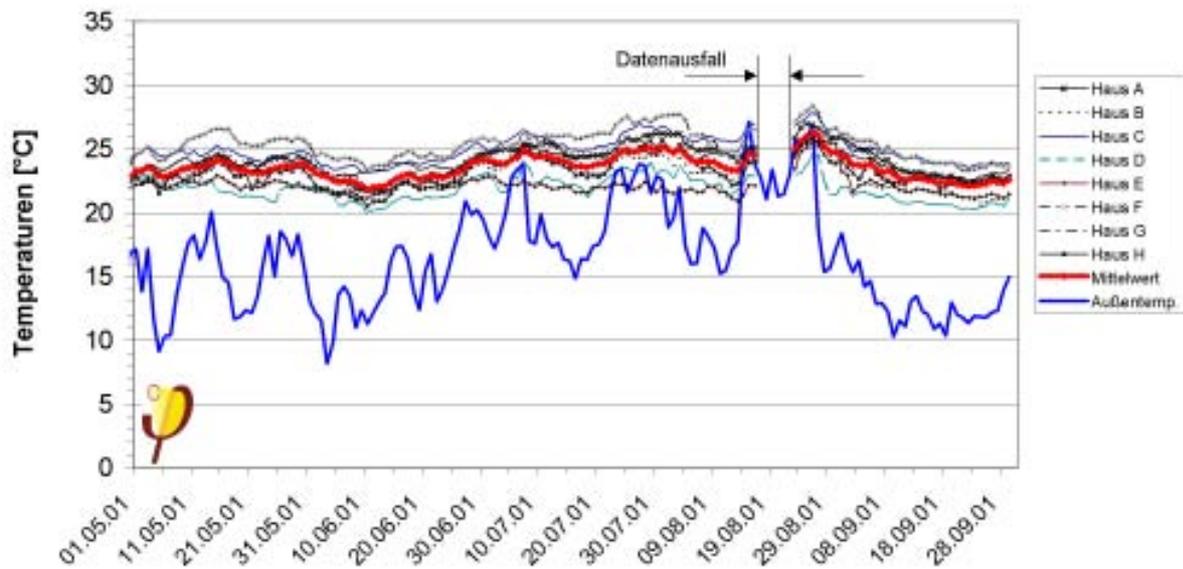


Abbildung 78: Tagesmittlere Lufttemperaturen im EG der Hausreihe 14 sowie Außenlufttemperaturen im Sommer 2001 (1.5. bis 30.9.2001).

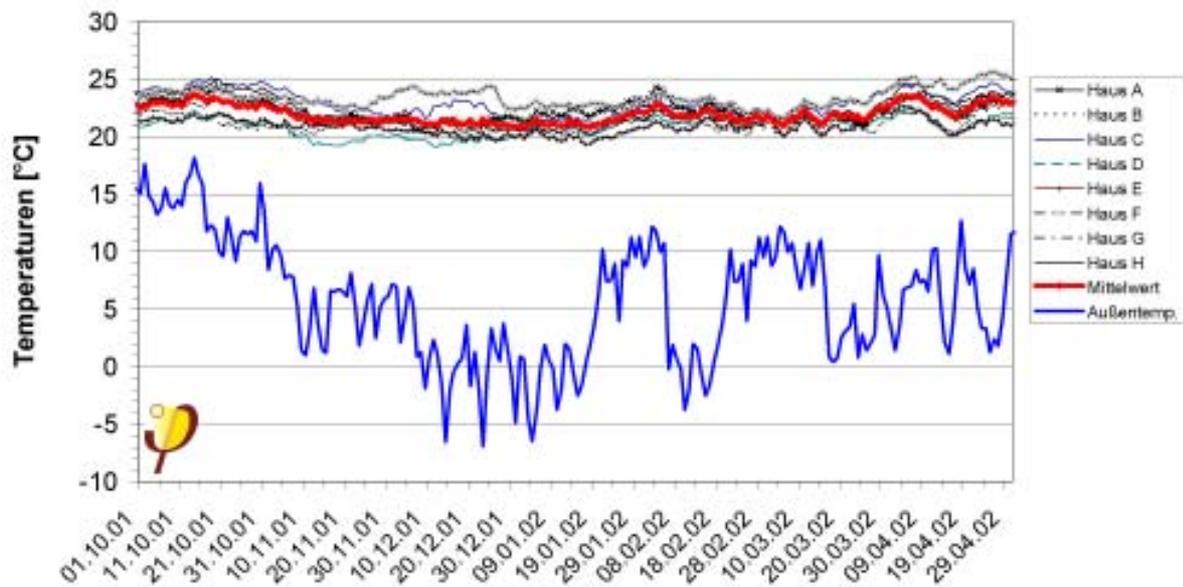


Abbildung 79: Tagesmittlere Lufttemperaturen im EG der Hausreihe 14 sowie Außenlufttemperaturen im Winter 2001/2002 (1.10.2001 bis 30.4.2002).

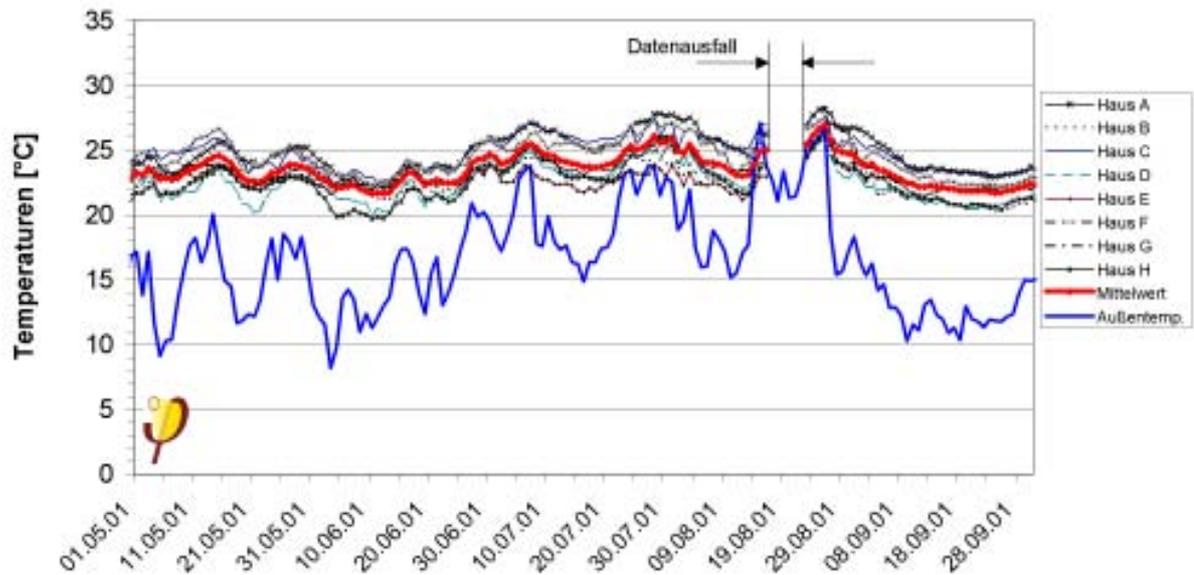


Abbildung 80: Tagesmittlere Lufttemperaturen im OG der Hausreihe 14 sowie Außenlufttemperaturen im Sommer 2001 (1.5. bis 30.9.2001).

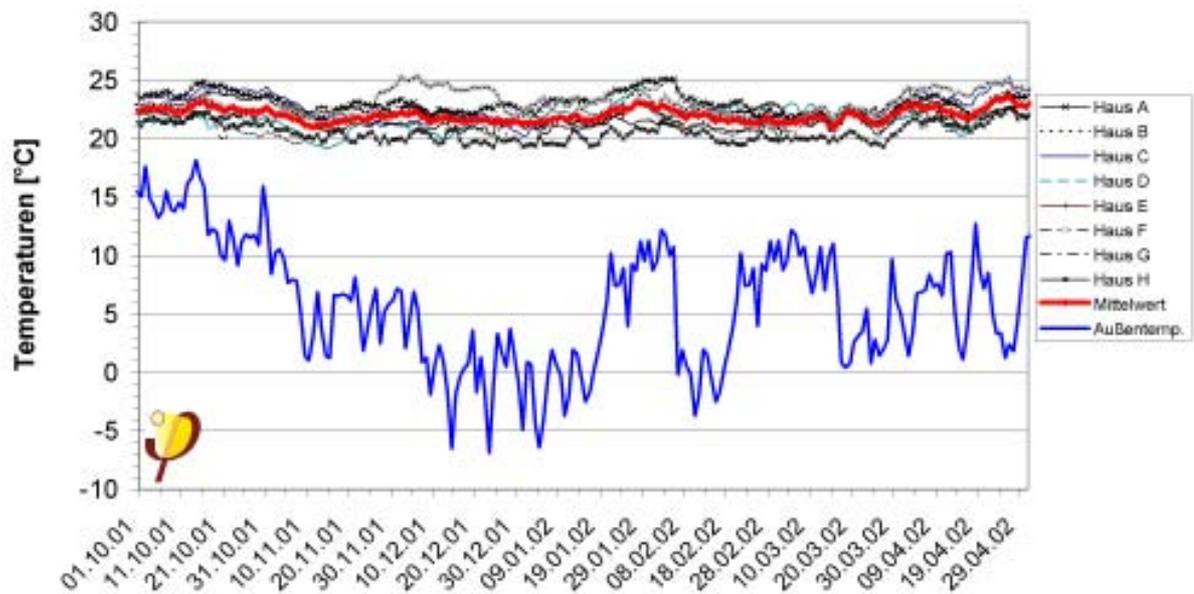


Abbildung 81: Tagesmittlere Lufttemperaturen im OG der Hausreihe 14 sowie Außenlufttemperaturen im Winter 2001/2002 (1.10.2001 bis 30.4.2002).