

Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern



Eine vergleichende Analyse der Nutzerfaktoren am Beispiel der
,Gartenhofsiedlung Lummerlund‘ in Wiesbaden-Dotzheim

Teilbericht

**Bauprojekt, messtechnische Auswertung, Energiebilanzen und
Analyse des Nutzereinflusses**

Institut Wohnen und Umwelt
Annastr. 15
64285 Darmstadt
2003

Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern

Eine vergleichende Analyse der Nutzerfaktoren am Beispiel der
,Gartenhofsiedlung Lummerlund‘ in Wiesbaden-Dotzheim

Teilbericht

Bauprojekt, messtechnische Auswertung, Energiebilanzen und Analyse des
Nutzereinflusses

Endbericht

Wissenschaftliche Bearbeitung:

Witta Ebel

Marc Großklos

Jens Knissel

Tobias Loga

Kornelia Müller

Das Projekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie
gefördert (Förderkennzeichen: 032 7256A).

Institut Wohnen und Umwelt

Annastr. 15

64285 Darmstadt

www.iwu.de

Juli 2003

IWU-Bestellnummer: 04/03

ISBN-Nr. 3-932074-63-7

Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern: Eine vergleichende Analyse der Nutzerfaktoren am Beispiel der ‚Gartenhofsiedlung Lummerlund‘ in Wiesbaden
Bauprojekt, messtechnische Auswertung, Energiebilanzen und Analyse des Nutzereinflusses

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	7
2	Ausgangslage	13
2.1	Die Entwicklung des Passivhaus-Standards.....	13
2.1.1	Niedrigenergiehäuser, Passivhäuser und kostengünstige Passivhäuser	13
2.1.2	Untersuchungen zu Nutzerverhalten, Komfort, Luftqualität und Zufriedenheit in Niedrigenergie- und Passivhäusern	15
2.2	Das Projekt Wiesbaden-Lummerlund	19
2.2.1	Die Häuser und das Baukonzept	19
2.2.2	Messergebnisse zum Heizungs- und Warmwasserverbrauch aus der zweiten Heizperiode 1998/1999	25
3	Zielsetzungen und Vorgehensweise	27
4	Messungen und Messergebnisse	31
4.1	Das Messkonzept	31
4.1.1	Messtechnik in den Einzelgebäuden	32
4.1.2	Messtechnik in den Heizzentralen	34
4.1.3	Erweiterung des Messprogramms	35
4.1.4	Fehlerbetrachtung	37
4.2	Messergebnisse	40
4.2.1	Klimadaten.....	40
4.2.2	Gesamtwärmeverbrauch	44
4.2.3	Raumheizung	47
4.2.4	Heizleistungen	50
4.2.5	Raumtemperaturen.....	53
4.2.6	Warmwasserverbrauch.....	58
4.2.7	Lüftungsanlagen	63
4.2.8	Haushaltsstromverbrauch.....	69
4.2.9	Fensteröffnungsverhalten	72
4.2.10	Versorgungstechnik.....	86

4.2.11	Vergleich verschiedener Versorgungsvarianten	87
5	Lüften durch Fensteröffnen.....	89
5.1	Messungen von Luftaustauschkennzahlen mit Einsatz von Tracergas .	89
5.1.1	Messung von Luftaustauschkennzahlen.....	90
5.1.2	Versuchsaufbau.....	96
5.1.3	Messergebnisse	99
5.1.4	Bewertung und weiterer Forschungsbedarf.....	115
5.2	Rechnerische Bestimmung des Volumenstroms bei Fensterlüftung....	116
5.2.1	Der Luftvolumenstrom über ein gekipptes Fenster	117
5.2.2	Spezielle Geometrie des gekippten Fensters	120
5.2.3	Einfluss der Falzausbildung.....	137
5.2.4	Öffnungsbeiwert	140
5.2.5	Einfluss der Fensterlaibung	142
5.2.6	Windinduzierter Volumenstrom.....	145
5.2.7	Verbesserte Berechnungsgleichung für den Volumenstrom über ein gekipptes Fenster	150
5.2.8	Einfluss der Modellverbesserungen auf den Heizwärmebedarf und den Luftwechsel.....	155
5.2.9	Rechnerischer Einfluss von gekippten Fenstern am Beispiel der Gartenhofsiedlung	166
5.2.10	Bewertung und weiterer Forschungsbedarf.....	169
5.3	Luftwechsellmessergebnisse in ausgewählten Niedrigenergiehäusern und die Bedeutung für die Energiebilanz.....	171
5.4	Alternative Methoden zur messtechnischen Erfassung von Fensteröffnungszeiten	179
5.4.1	Analyse der Raumlufttemperaturen	179
5.4.2	Automatische Druckmessung	181
6	Determinanten für Energieverbrauch, Komfort und Zufriedenheit	182
6.1	Bewohnerbefragungen	182
6.1.1	Untersuchungskonzept und energierelevante Fragestellungen bei der Befragung.....	182
6.1.2	Bewohnerinformationen.....	186
6.2	Raumklima und Komfort	195
6.2.1	Überblick und Einordnung	195
6.2.2	Temperaturen und Bewertung des Raumklimas.....	198
6.2.3	Luftfeuchtigkeit	205
6.3	Lüftung.....	210
6.3.1	Lüftungsanlagen	210

6.3.2	Fensteröffnen: Bewohnerbefragung und Vergleich mit der Messung ..	216
6.4	Einflussgrößen auf den Heizenergieverbrauch	234
6.4.1	Raumlufttemperaturen	234
6.4.2	Einfluss des Fensteröffnens	237
6.4.3	Betrieb der Lüftungsanlage	240
6.4.4	Innere Quellen: Stromverbrauch, Warmwasserverbrauch und Anwesenheit	241
6.4.5	Empirische Einflussgrößen im Vergleich	242
6.4.6	Analyse mit Energiebilanzen	249
6.4.6	Analyse mit Energiebilanzen	250
7	Strom- und Primärenergieverbrauch	254
7.1	Bedeutung des Stromverbrauchs	254
7.2	Ergebnisse zum Stromverbrauch	255
7.3	Einflussgrößen auf den Stromverbrauch	259
7.4	Ergebnisse zum Primärenergieverbrauch	261
8	Schlussfolgerung und Ausblick	271
9	Literatur	274
Anhang	287

Anhang A Messung und Auswertung zur Warmwasser-Energiebilanz der
Passivhäuser Wiesbaden-Lummerlund

Anhang B Messung von Luftaustauschkennzahlen in einem Passiv- und
einem Niedrigenergiehaus der Siedlung in Wiesbaden

1 Zusammenfassung

Passivhäuser haben sich seit dem ersten Forschungsprojekt in Deutschland im Jahr 1989 innerhalb kurzer Zeit als erfolgreicher Baustandard durchgesetzt. Im Durchschnitt hat sich allein in Deutschland die Zahl der fertig gestellten Passivhäuser jährlich verdoppelt. Eine innerhalb dieser Entwicklung sehr früh entstandene Passivhaussiedlung wurde in dem vorliegenden Projekt untersucht.

Die Passiv- und Niedrigenergie-Reihenhaussiedlung in Wiesbaden-Dotzheim umfasst 24 Niedrigenergiehäuser und 22 Passivhäuser, die untereinander jeweils weitgehend baugleich sind. Die Passivhäuser gehören zu den ersten Passivhäusern, die vom Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser begleitet wurden. Die Siedlung wurde 1997 gebaut und bezogen.

Seit 1998 wurden Messdaten aus allen 22 Passivhäusern sowie aus 8 der insgesamt 24 Niedrigenergiehäuser in der Siedlung kontinuierlich erfasst.

Heizwärmeverbrauch und funktionale Anforderung

Als wichtigstes Ergebnis lässt sich festhalten, dass die Zielsetzung des Passivhausstandards erreicht wurde. In den insgesamt vier Messjahren wurden im Durchschnitt über alle 22 Passivhäuser Heizwärmeverbräuche zwischen 10,2 und 13,4 kWh pro m² Wohnfläche und Jahr gemessen. Im Durchschnitt lagen dabei die Raumlufttemperaturen im Winterhalbjahr zwischen 20,2 und 20,9 °C. Die funktionale Anforderung von 15 kWh/(m²a) wurde damit nachhaltig erfüllt.

Die Passivhäuser in Wiesbaden verfügen noch über eine konventionelle Heizwärmeverteilung mit Heizkörpern. Aufgrund der niedrigen, der Projektierung entsprechenden Heizwärmeverbräuche und tagesmittleren Heizlasten sollte es zukünftig möglich sein, Passivhäuser allein über die Zuluft zu beheizen.

Lüftungsanlage

Zur Erreichung des geringen Heizenergieverbrauchs ist neben dem hohen Wärmeschutzstandard eine Lüftungsanlage mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung unverzichtbar. Die Lüftungsanlage wird von allen Bewohnern genutzt. Sie liefert in den Passivhäusern – wie Spurengasmessungen und Einschätzungen der Bewohner bestätigen – eine gute Luftqualität und hat sich insgesamt gut bewährt, obwohl zum Zeitpunkt der Errichtung der Gebäude noch keine passivhausgeeigneten Lüftungsanlagen zur Verfügung standen. Die erforderliche Effizienz wurde erst durch einen Umbau erreicht. Da auch an dieser Stelle Kostengünstigkeit die höchste Priorität hatte, gibt es jedoch – im Vergleich zu späteren Projekten – geringfügige Einschränkungen bei der Nutzung, die es nicht erlauben, einen erhöhten Luftwechsel im

Wohnbereich, insbesondere in der Küche, unkompliziert einzustellen. Dies führt zusammen mit den offenen Wohnungsgrundrissen zeitweise zu einer erhöhten Geruchsbelastung beim Kochen. Mit solchen Einschränkungen ist bei modernen passivhausgeeigneten Lüftungsanlagen nicht mehr zu rechnen.

In den Niedrigenergiehäusern erweisen sich dagegen die Luftwechselraten der Abluftanlage mit feuchtegeregelten Zu- und Abluftöffnungen als sehr gering. Die geringen Luftwechselraten führen zwar zu niedrigen gemessenen Verbräuchen; aber bei den im Winter häufig niedrigen Luftfeuchtigkeiten wird ein hygienisch ausreichender Luftwechsel mit dem eingebauten Produkt nicht sichergestellt. Zusätzlich ist auch der lokale Luftaustausch im Aufenthaltsbereich (bezogen auf die Luftwechselrate) geringer, so dass auch das Konzept der Luftverteilung dem der Passivhäuser unterlegen ist.

Bei den Passivhäusern liegt der projektierte Luftwechsel mit 0,45 – 0,54/h an der Obergrenze der Empfehlungen für Passivhaus-Wohngebäude. Er könnte bei sorgfältiger Planung noch reduziert werden. Es hat sich herausgestellt, dass viele Bewohner offenbar bei bislang als komfortabel angesehenen Bereichen der Luftfeuchtigkeit von 30-50% die Luft bereits subjektiv als zu trocken empfinden. Ein verringerter Luftwechsel würde die Luftfeuchtigkeit erhöhen und den Komfort für die betroffenen Bewohner verbessern. In einigen Häusern haben die Bewohner bereits einen geringeren Volumenstrom bei der Lüftungsanlage eingestellt.

Die Wärmerückgewinnungsgeräte arbeiten mit hoher energetischer Effizienz: Die gemessenen Wärmebereitstellungsgrade liegen im Durchschnitt über 80%. Voraussetzung ist ein rechtzeitiger Filterwechsel. Die gemessenen Lüftungsstromverbräuche liegen je nach eingestellter Luftwechselraten um 0,3 – 0,35 Wh/m³.

Fensterlüftung

Die Bewohner machen von der Möglichkeit Gebrauch, die Fenster auch öffnen zu können. Dies geschieht vorzugsweise im Sommer, wobei die Fensteröffnung einen wesentlichen Beitrag zur natürlichen Kühlung der Gebäude leistet. Trotz oft nicht befriedigender Verschattungseinrichtungen werden komfortable Innentemperaturen im Sommer erreicht. Wie in der Siedlung in Wiesbaden der Fall, muss aus diesem Grunde in jedem Wohnraum ein offenes Fenster vorhanden sein.

Im Winter werden in den Passivhäusern weniger Fenster geöffnet als in den Niedrigenergiehäusern. Der Gesamtumfang der Fensterlüftung in den Passivhäusern beträgt im Mittel über alle 22 Wohneinheiten in den beiden untersuchten Heizperioden 0,9 bzw. 1,5 Stunden pro Tag und Raum. Dabei ist das Fensterlüftungsverhalten stark von der Witterung abhängig. In den Kernwintermonaten sowie bei niedrigen Außentemperaturen und geringer Solareinstrahlung bleiben die Fenster meistens geschlossen. Die Gewohnheiten der Bewohner sind sehr unterschiedlich: Ein Teil öffnet häufig nachts ein Fenster. Aber mehr als 70 % der Passivhausbewohner öffneten in der Heizzeit die Fenster allenfalls nur kurz und im Vergleich

zu von anderen Instituten untersuchten Häusern, auch solchen mit Lüftungsanlagen, nur selten. Die große Mehrheit der Passivhausbewohner in Wiesbaden nutzt damit die durch die Lüftungsanlage gebotene Möglichkeit, die Fenster nicht mehr öffnen zu müssen, um ein angenehmes und komfortables Raumklima gleichmäßig in allen Räumen realisieren zu können. Im Einklang mit diesem Ergebnis wird in den Befragungen das „Nicht-mehr-Fenster-öffnen-müssen“ von der Mehrheit der Bewohner als Komfortgewinn bewertet.

Der mit dem Fensteröffnen induzierte Luftwechsel wurde rechnerisch abgeschätzt sowie während zweier Messzeiträume im März und im Mai 2002 mit Indikatorgas gemessen. Messungen und Theorie deuten übereinstimmend darauf hin, dass in gängigen Berechnungsansätzen der Fensterluftwechsel in Passivhäusern bisher in der Regel überschätzt wurde. In einer theoretischen Untersuchung wurden mehrere Punkte identifiziert, die bei der Quantifizierung des Volumenstroms berücksichtigt werden müssen und durch entsprechende Berechnungsansätze integriert wurden: die Geometrie der Öffnungsfläche, die dreidimensionale Ausprägung der Fensterfalz, die Fensterlaibung sowie die Turbulenzen im Windfeld. Verallgemeinerungsfähige Aussagen können allerdings daraus noch nicht abgeleitet werden, denn der Fensterluftwechsel hängt von den momentanen Wetterbedingungen, Fensterbauarten (einschließlich der genauen Fensterprofile), Gebäudeform und Gebäudeeinbindung in die Umgebung ab. Hier gibt es sowohl im Bereich der rechnerischen Modellierung als auch im messtechnischen Bereich (Spurengasmessungen) weiteren Forschungsbedarf.

Wegen des niedrigen Gesamtniveaus der Fensteröffnung, wegen des mit den Spurengasmessungen nachgewiesenen geringeren Luftaustauschs über die Fenster, und wegen des auch witterungsangepassten Verhaltens der Passivhausbewohner ist der Einfluss der Fensterlüftung auf den Energieverbrauch nur begrenzt. Im Durchschnitt wird der Zusatzverbrauch gerade durch die höheren inneren Wärmequellen (aufgrund von gegenüber der Projektierung höheren Anwesenheitszeiten und höherem Stromverbrauch) kompensiert. Die Bewohner der Passivhäuser haben offenbar keine Schwierigkeiten, mit ihren Fenstern so umzugehen, dass weder die Funktion der Häuser noch das Einsparziel damit in Frage gestellt werden.

Determinanten der Nutzerstreuung

Bei einer Analyse der Streuung der individuellen Heizwärmeverbräuche in der untersuchten Gesamtgruppe erweist sich als die wichtigste Einflussgröße der bauliche Standard (Niedrigenergie- oder Passivhaus), der mit einer Korrelation von 63% mit dem Heizwärmeverbrauch alle nutzerbedingten Größen weit dominiert – obwohl auch die Niedrigenergiehäuser einen sehr guten Standard (Ultra- Häuser oder 3-Liter-Häuser) aufweisen.

Die weitere Untersuchung der Determinanten des *Nutzereinflusses* unter Einbeziehung von Mess- und Befragungsdaten wurde daher auf die Passivhäuser konzentriert. Es wurden sowohl statistische Methoden als auch geeignete Energiebilanzmodelle eingesetzt. Als mit Abstand bedeutendster Nutzereinfluss erwiesen sich dabei die Raumlufttemperaturen. Als weitere

Einflussgrößen wurden festgestellt: die Anzahl der Bewohner und deren Anwesenheitszeiten, weitere Verbrauchsdaten (Strom, Wasser) sowie die *gemessenen* Fensteröffnungszeiten. Die beste Übereinstimmung sowohl in bezug auf den Gesamtverbrauch als auch in Bezug auf die Erklärung der Nutzerstreuung wird bei einem angenommenen Fensterluftwechsel von 50-60 m³/h pro geöffnetes Fenster erreicht. Die Aufzeichnungen der Fensterkontakte zeigen, dass überwiegend ein kleines Nordfenster gekippt wird. Die so ermittelte Größenordnung ist in guter Übereinstimmung mit den theoretischen Untersuchungen und den Spurengasmessungen.

Mit den beschriebenen Einflussgrößen lässt sich bei den Passivhäusern gut die Hälfte der beobachteten Varianz erklären sowie mit ca. 80% eine sehr hohe Korrelation zwischen den gemessenen und den mit dem Passivhaus Projektierungs Paket berechneten individuellen Energieverbrauchswerten herstellen. Die (auf einem relativen Maßstab) große beobachtete Nutzerstreuung wird damit gut erklärt.

Projektierungswerkzeuge und primärenergetische Bewertung

Die relative Nutzerstreuung bewegt sich in einem Rahmen, der unabhängig vom baulichen Standard auch in anderen Projekten beobachtet wird. Aufgrund des niedrigen Gesamtniveaus ist die absolute Streuung aber sehr gering. Auch das Haus mit dem höchsten Verbrauch benötigt weniger als ein Viertel der Heizenergie verglichen mit einem Haus, das nach der zum Zeitpunkt der Errichtung gültigen Wärmeschutzverordnung gebaut wurde. Die funktionale Anforderung für den Passivhausstandard – gesamter Heizwärmeverbrauch unter 15 kWh/(m²a) bezogen auf die Wohnfläche - wird im Mittel in jedem Messjahr erfüllt.

Die Messergebnisse für den Heizwärmeverbrauch stimmen unter Berücksichtigung des Klimas und der nutzerbestimmten Randbedingungen sehr gut mit den Berechnungsergebnissen überein. Die eingesetzten Projektierungsinstrumente können daher als bewährt gelten.

Der Primärenergieverbrauch für Heizung, Warmwasser und Lüftung wird gegenüber den Anforderungen der Energieeinsparverordnung um 73% unterschritten. Bei einer Bewertung mit den in der EnEV festgesetzten Primärenergiefaktoren beläuft sich die Einsparung sogar auf 80%.

Das Berechnungsverfahren der EnEV ist jedoch nicht geeignet, die messtechnisch erhobenen Verbrauchswerte zu reproduzieren. Schwerer wiegt, dass es nicht möglich ist, mit dem Verfahren der EnEV die funktionalen Anforderungen für den Passivhausstandard zu erfüllen. Auf der Basis der EnEV lässt sich somit kein geeignetes Kriterium für den Passivhausstandard herleiten. Bei der Planung von Passivhäusern sollte daher auf bewährte Projektierungswerkzeuge für Passivhäuser zurückgegriffen werden, für die im Rahmen der hier vorliegenden Auswertung der Passivhaussiedlung Wiesbaden die Zuverlässigkeit unter Beweis gestellt wurde.

Schlussfolgerung

Die oftmals geäußerte Befürchtung, dass Bewohner von Passivhäusern die Zielsetzung in Bezug auf den Heizenergieverbrauch oder die Funktionsfähigkeit der Häuser gefährden, erweist sich mit den Ergebnissen dieser Untersuchung als unbegründet. Der Passivhausstandard und die damit verbundenen Qualitätsanforderungen haben sich nicht nur technisch bewährt, sondern darüber hinaus auch als nutzergerecht erwiesen. In den Befragungen äußern sich die Nutzer zufrieden mit den Häusern und dem Komfort. Dabei handelt es sich nach den Ergebnissen der sozialwissenschaftlichen Untersuchung bei den Bewohnern der Passivhäuser nicht um eine besondere Gruppe von Bewohnern. Der aus ökologischen Gründen wünschenswerten Verbreitung von Passivhäusern steht damit nichts entgegen.

Die Nutzer haben höhere Spielräume sowohl bei der Wahl der Raumlufttemperatur als auch beim Umgang mit den Fenstern, als zuvor oft prognostiziert wurde. Entscheidend für diese Freiheiten ist das gutmütige Betriebsverhalten der Gebäude, die auf baulicher und anlagentechnischer Seite die Einhaltung hoher Qualitätskriterien für den Passivhausstandard voraussetzt. Insbesondere auch in Bezug auf die Luftdichtheit und die kontrollierte Lüftung mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung haben sich die für Passivhäuser geforderten Zielsetzungen im Hinblick auf Vermeidung von Feuchteschäden, Energieeinsparung, Komfort und nutzerorientierter Gestaltung bewährt.

2 Ausgangslage

Die vorliegende Untersuchung „Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern“ wurde von März 2000 bis Juni 2002 durchgeführt. In diesem Projekt sollten eine Reihe projektspezifischer messtechnischer und sozialwissenschaftlicher Fragestellungen geklärt werden, die Gegenstand der Kapitel 3-8 sind. Das Bauprojekt der Passiv- und Niedrigenergiehäuser in Wiesbaden selbst wurde bereits 1996 initiiert und 1997 realisiert. Der vorliegenden Untersuchung vorausgegangen waren außerdem bereits die ersten, allerdings weniger umfangreichen Messungen.

In diesem Kapitel 2 soll die Geschichte der Passivhäuser bis hin zu dieser ersten Passivhaussiedlung dargestellt und in die Geschichte der energiesparenden Gebäude eingeordnet werden (Abschnitt 2.1). In Abschnitt 2.2 wird das Passivhausprojekt in Wiesbaden bis zum Entwicklungsstand 2000 selbst kurz vorgestellt.

2.1 Die Entwicklung des Passivhaus-Standards

Der ersten Passivhaussiedlung, die hier untersucht wird, geht eine lange Geschichte zur Entwicklung energiesparender Gebäude voraus. Wichtige Meilensteine waren das erste Passivhaus in Darmstadt sowie die Gründung des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, die in Abschnitt 2.1.1 in die Gesamtentwicklung eingeordnet werden.

Ein Teil des in dieser Studie vorgestellten Forschungsprojekts ist eine sozialwissenschaftliche Untersuchung, mit der u.a. festgestellt werden soll, ob die Passivhäuser bewohnergerecht sind, wo es Verbesserungsmöglichkeiten gibt und ob es sich um besonders energiebewusste Bewohner handelt. Die durch die Befragung erhobenen Daten sind eine zusätzliche wichtige Datenquelle für die Analyse der Messergebnisse. Dies ist nicht die erste sozialwissenschaftliche Untersuchung in Passivhäusern; dass der Passivhausstandard sich nach dem ersten Passivhaus schnell verbreitete, war auch der Tatsache zu verdanken, dass die Bewohner ein hohes Ausmaß an Zufriedenheit zeigten, das einerseits von den unzähligen Besuchern registriert, aber auch bereits in einer frühen sozialwissenschaftlichen Untersuchung dokumentiert wurde. Deren wichtigste Ergebnisse sind in Abschnitt 2.1.2 wiedergegeben.

2.1.1 Niedrigenergiehäuser, Passivhäuser und kostengünstige Passivhäuser

Das erste bewohnte Niedrigenergiehaus-Forschungsprojekt wurde in Hessen – aufbauend auf den Erfahrungen aus Schweden und Dänemark [1] – 1986 vom IWU initiiert [2], [3]. Wesentlich darüber hinaus geht das Konzept des Passivhauses, das ab 1989 entwickelt wurde [4], [5], [6]. Ermutigt nicht nur durch zahlreiche theoretische Überlegungen und Simulationen [7], [8], [9], sondern auch durch Experimentierhäuser wie das „Zero energy house“ in Kopenhagen [10], das Saskatchewan Conservation House in Kanada [11] und das Philips-

Experimentierhaus in Aachen [12], war bereits das erste Modellprojekt ein von vier Familien bewohntes Mehrfamilienhaus [13].

Beide Konzepte – Niedrigenergiehaus und Passivhaus - haben ihre Feuerprobe bestanden: Nicht nur theoretisch, sondern auch messtechnisch wurde nachgewiesen, dass Niedrigenergiehäuser gegenüber dem Bestand zwei Drittel der Heizenergie, Passivhäuser mehr als 90 % der Heizenergie einsparen [14], [15], [16]. Beim ersten Passivhaus wurde die Energieeinsparung nachhaltig über mehr als zehn Jahre nachgewiesen [17], [18].

Passivhäuser gab es bis 1996 nur als Prototypen: Das Passivhaus Darmstadt Kranichstein [13], [19] sowie den Nachbau Passivhaus Groß-Umstadt [20].

Die Zielsetzung des ersten Prototyps war, ein Haus fast ohne Heizenergiebedarf zu bauen, das gleichzeitig finanzierbar war und dessen Konzept versprach, in Zukunft auch ohne wesentliche Mehrkosten realisierbar zu sein.

Mit einem umfangreichen Messprogramm wurde nachgewiesen

- dass bereits das erste Passivhaus gegenüber dem Bestand 95 % der Heizenergie einsparte und damit diese Zielsetzung in vollem Umfang erfüllte [16], [21]
- dass die hier eingesetzten Simulationswerkzeuge zuverlässig waren [22], [23]
- dass die Bewohner das Raumklima als sehr behaglich empfanden [24], und dass in dem Gebäude auch bei extremen Außenklimabedingungen mühelos die gewünschten Innentemperaturen erreicht wurden [25].

Für das in Darmstadt realisierte Gebäudekonzept konnte bereits nachgewiesen werden, dass der Passivhausstandard auch bei einer Betrachtung des gesamten Lebenszyklus primärenergetisch optimal ist [26].

Um ein Passivhaus ohne wesentliche Mehrkosten realisieren zu können, standen jedoch noch keineswegs die zur Erreichung eines so geringen Energieverbrauchs nötigen Komponenten zur Verfügung [6]. Einige Komponenten wurden vom Hersteller als Prototypen (z.B. die völlig neuen, für dieses Projekt entwickelten Dreifach-Wärmeschutzverglasungen) geliefert, andere in handwerklicher Einzelfertigung hergestellt (wie z.B. die Fensterrahmen), oder es waren erhebliche Umbauten und Nachbesserungen notwendig. Daher waren die beiden genannten Projekte noch mit erheblichen Mehrinvestitionen verbunden. Die baulichen Mehrinvestitionen beim Passivhaus Darmstadt betragen (ohne Solaranlage) 16 % der Baukosten; dies ist in der Studie „Wirtschaftlichkeit von Niedrigenergiehäusern“ dokumentiert [27]. In dieser Untersuchung aus dem Jahr 1994 wird gleichzeitig eine wirtschaftliche Analyse durchgeführt, die bereits die Perspektiven für erhebliche Kostenreduktionen aufzeigt. Dennoch erschien damals das Passivhaus noch nicht wirtschaftlich konkurrenzfähig mit Niedrigenergiehäusern mit Heizwärme Kennwerten um 60 kWh/(m²a). Inzwischen hat sich jedoch gezeigt, dass bei Passivhäusern auf ein separates Heizsystem verzichtet werden kann, sofern der Heizwärme Kennwert unter 15 kWh/(m²a) liegt [28]. Damit entfallen Kosten, so dass es beim Passivhaus nun neben Mehrkosten auch Minderkosten gibt. Dies eröffnet die Perspektive, bei

entsprechender Weiterentwicklung von kostengünstigen passivhausgeeigneten Komponenten und Bausystemen Passivhäuser zu nahezu gleichen Kosten wie Niedrigenergiehäuser errichten zu können [29].

Seit 1996 arbeiten Wissenschaftler, Bauträger, Architekten und Ingenieure im Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser an innovativen kostengünstigen Lösungen [30].

Ende 1997 wurden die Mehrkosten für ein Passivhaus des Typs Darmstadt Kranichstein (156 m²) mit 18550 DM, d. h. 119 DM/m² Wohnfläche angegeben [31]. Bereits mit der Gründung des Arbeitskreises standen nicht nur die Kosten im Blickpunkt des Interesses, sondern auch die Frage der Übertragbarkeit des Konzepts auf einen größeren Nutzerkreis. Der Einfluss der Nutzer wurde praktisch am Beispiel des gebauten Passivhauses in Darmstadt ebenso sowie mittels Parameterstudien theoretisch untersucht [32]. Dabei zeigte sich, dass vom Nutzer weder besondere Kenntnisse noch Aufmerksamkeit verlangt werden müssen. Zudem verspricht das Passivhaus gleichmäßige behagliche Innenklimabedingungen - gute Voraussetzungen für eine weitere Verbreitung.

Die ersten kostengünstigen Passivhäuser wurden 1997 in Wiesbaden durch den Bauträger Rasch & Partner sowie in Naumburg durch den Architekten Karl-Heinz Fingerling realisiert. In Wiesbaden entstand damit auch die erste Passivhaussiedlung - das Untersuchungsobjekt dieser Studie. Insgesamt wurden in diesem Baugebiet 24 Niedrigenergie- und 22 Passivhäuser errichtet.

2.1.2 Untersuchungen zu Nutzerverhalten, Komfort, Luftqualität und Zufriedenheit in Niedrigenergie- und Passivhäusern

Neben dem technischen Standard hat auch das Nutzerverhalten Einfluss auf den Energieverbrauch. Parallel zur Entwicklung energiesparender Gebäudekonzepte wurden stets der Einfluss und die relative Bedeutung von technischen und nutzerseitigen Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs diskutiert. Bereits seit der ersten Ölkrise wurde die Frage, ob Energiesparpotenziale hauptsächlich durch technische Maßnahmen (z.B. Wärmeschutz) oder durch Verhaltensänderungen beim Nutzer erschlossen werden können, oft äußerst kontrovers behandelt.

In zahlreichen Untersuchungen, in denen entweder umfangreiche statistische Erhebungen im Bestand durchgeführt wurden, oder in denen als Maßstab für den Nutzereinfluss in baugleichen Objekten die Schwankungen des Energieverbrauchs zwischen den Häusern gemessen wurden, wurde diese Fragestellung beleuchtet. Die Studien umfassten Baustandards vom alten Bestand bis zum Niedrigenergiehausstandard. Eine zusammenfassende Darstellung der entscheidenden Arbeiten findet sich in [33]. Aus den Ergebnissen lässt sich die folgende Schlussfolgerung ziehen:

Neben dem Einfluss des Baustandards ist auch der Einfluss der Nutzer auf den jeweiligen Verbrauch einer Wohnung groß. Schwankungen um $\pm 60\%$ um den Mittelwert sind üblich. Die Mittelwerte des Verbrauchs über eine ausreichend große Zahl von Nutzern (≥ 30) baugleicher Häuser treffen die durch die baulichen und haustechnischen Details bestimmten Projektierungswerte jedoch sehr gut.

Die Durchschnittswerte der Niedrigenergiehausprojekte liegen unter 70 kWh pro m² Wohnfläche und Jahr und damit um mehr als 50% unter den untersuchten Häusern des Bestands. Die durch die Niedrigenergie-Technik projektierten Energieeinsparungen werden - unabhängig von der bei jedem Baustandard vorhandenen Nutzerstreuung - damit reproduzierbar eingehalten.

Gilt diese Schlussfolgerung auch noch bei darüber hinaus reduziertem Energiebedarf?

In vielen früheren Projekten, insbesondere solchen mit hoher technischer Ausstattung oder mit einem hohen Anteil passiver Solarenergienutzung waren es schließlich die Nutzer, denen die Schuld daran zugeschoben wurde, dass die Energieverbräuche höher ausfielen als erwartet.

Das erste Passivhaus Darmstadt Kranichstein wurde bereits 1991 bezogen. Dieses Projekt war bereits – mit Förderung durch das hessische Wirtschafts- bzw. Umweltministerium – von vier Familien privat finanziert worden und so angelegt, dass es eine realistische Perspektive sowohl für die kostenmäßige Realisierbarkeit als auch für die Akzeptanz und Verbreitung bieten sollte [34]. Aus diesem Grund bot sich das Projekt für eine begleitende Untersuchung über die Bewohnererfahrungen an.

Über drei Jahre hinweg konnte eine sozialwissenschaftliche Untersuchung durchgeführt werden. In regelmäßigen Zeitabständen wurden die Bewohner in mündlichen und schriftlichen Befragungen sowie Wohnprotokollen sowohl nach ihrem Verhalten als auch nach ihren Eindrücken und ihrer subjektiven Bewertung befragt [35]. In dieser Untersuchung zeigte sich, dass die Bewohner nach kurzer Zeit sehr gut mit dem Passivhaus zurechtkamen. Sie lobten den hohen Komfort, vor allem das Raumklima sowohl im Winter als auch im Sommer sowie die gute Luftqualität. Sie gewöhnten sich sehr schnell an die Lüftungsanlage und daran, die Fenster nicht mehr öffnen zu müssen. Gewöhnungsbedürftig war – vor dem Hintergrund der Unsicherheit, ob denn das noch völlig neue Konzept überhaupt funktioniere - zunächst die geringe zur Verfügung stehende Heizleistung, die nach Absenkphasen zu einer Verzögerung beim Wiederaufheizen führte. Nachdem der richtige Umgang mit der Heizung „gelernt“ worden war, wurde auch die Heizung gut beurteilt.

Zwar standen zum Zeitpunkt der Untersuchung nur 4 Passivhaus-Wohneinheiten zur Verfügung, die aber - zu diesem Zeitpunkt in Deutschland immer noch ungewöhnlich – immerhin baugleich waren. Die Untersuchung war somit eine Vollerhebung, und trotz des notwendig eingeschränkten Umfangs war sie auf Grund der guten Bewertung durch die Bewohner sehr hilfreich für die weitere Umsetzung des Passivhaus-Konzepts.

Tabelle 2.1.2-1: Sozialwissenschaftliche Untersuchungen im Passivhaus Darmstadt und in hessischen Niedrigenergiehäusern (aus[38])

Vergleich Passivhaus - Niedrigenergiehaus Studien		
Bewertungsskala: von 1(sehr unzufrieden) bis 5 (sehr zufrieden)	PH	NEH
Stichprobenumfang	4	30
Befragungszeitpunkte	9	1
Bewohnerprotokolle an ... Tagen	6	0

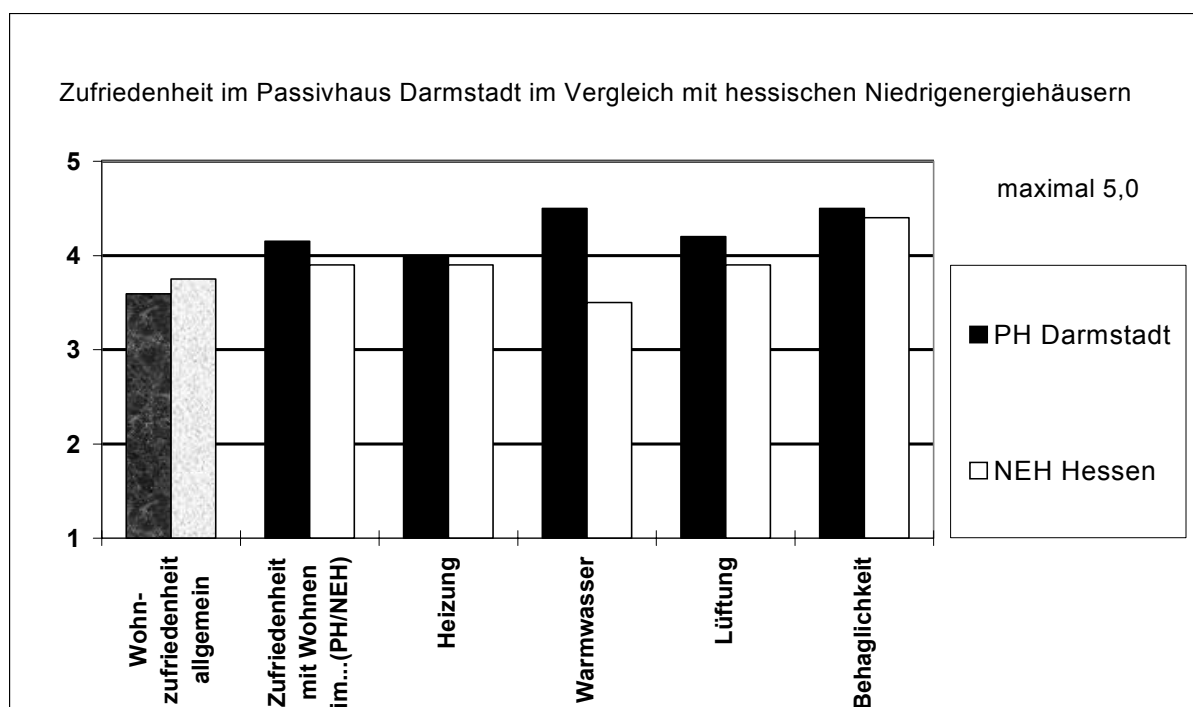
Gleichzeitig mit den Passivhäusern wurde von demselben Auftragnehmer eine Felduntersuchung zu Niedrigenergiehäusern durchgeführt [36]. Der Vergleich mit dieser Studie ist aufschlussreich, da eine Reihe von Bewertungskriterien identisch war; insbesondere folgende:

- Zufriedenheit mit dem „Wohnen im Passivhaus (bzw. Niedrigenergiehaus)“
- Zufriedenheit mit der Heizung
- Zufriedenheit mit der Warmwasserbereitung
- Zufriedenheit mit der Lüftung
- Beurteilung der Luftfeuchtigkeit
- empfundene Behaglichkeit
- allgemeine Zufriedenheit mit der Wohnsituation

Der Stichprobenumfang war bei den Niedrigenergiehäusern mit 30 Haushalten weit größer, die Intensität der Befragung aber geringer: Die Befragungen fanden nur zu einem Zeitpunkt statt, während bei den Passivhäusern in einem Zeitraum von mehr als zwei Jahren insgesamt 10 Interviews pro Haushalt durchgeführt wurden. Im Rahmen des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser wurde ein Vergleich dieser beiden Studien durchgeführt [37].

In Bezug auf die Zufriedenheit mit dem Haus, seinen Komponenten und die Behaglichkeit ergaben sich ähnliche, positive Bewertungen. Das Wohnen im Passivhaus wurde dabei in jeder Beziehung eher noch besser beurteilt als das Wohnen im Niedrigenergiehaus [37], [38],– wobei aber auch das sehr gute Raumluftklima bereits bei den Niedrigenergiehäusern von den Nutzern gelobt wurde [36]. Dabei hatten gerade die Passivhausbewohner auch besonders hohe Erwartungen an den Komfort [35],[37]. Diese Erwartung war ein wesentlicher Grund für die Bereitschaft zu einer höheren baulichen Investition gewesen. Das Ergebnis spricht dafür, dass Konzepte zur weitergehenden Energieeinsparung sich auch vorteilhaft auf Komfort und Bewohnerakzeptanz auswirken.

Abbildung 2.1.2-1: Wohnen in Niedrigenergie- und Passivhäusern im Vergleich (aus: [38])



In der Abbildung sind die durchschnittlichen Bewertungen innerhalb der beiden Gruppen (Passivhaus Darmstadt und, hessische Niedrigenergiehäuser) gezeigt. Bewertungen wurden dabei auf einer Skala von 1 bis 5 vergeben. Das beste Ergebnis ist 5,0 (sehr zufrieden).

Die guten Urteile der Bewohner decken sich mit den Ergebnissen der Untersuchungen zu Behaglichkeit und Raumluftqualität. Das Raumklima ist aufgrund der warmen Oberflächen und der gleichmäßigen Temperaturverteilung besonders günstig, dies wurde nicht nur theoretisch abgeleitet sondern auch messtechnisch nachgewiesen [24]. Ebenso wurde die Luftqualität über einen Zeitraum von insgesamt 7 Jahren untersucht. Die Raumluftqualität ist überdurchschnittlich gut, spezifische Belastungen traten praktisch nicht auf [39], [40]. Bis heute – nach mittlerweile über elfjähriger Nutzung – sind die Bewohner im ersten Passivhaus nachhaltig zufrieden [41].

In der Befragung der Siedlung in Wiesbaden sind einige der Fragen zur Zufriedenheit wieder aufgegriffen worden, so dass festgestellt werden kann, ob die positiven Bewertungen auch in einer größeren Siedlung reproduziert werden (vgl. Abschnitt 6.2).

2.2 Das Projekt Wiesbaden-Lummerlund

In diesem Kapitel werden das Passivhaus-Bauprojekt beschrieben (Abschnitt 2.2.1) sowie die bereits vorliegenden Messergebnisse aus der ersten Messperiode dargestellt (Abschnitt 2.2.2).

2.2.1 Die Häuser und das Baukonzept

Auf einem ehemaligen Kasernengelände in Wiesbaden wurde 1997 die erste Passivhaus-siedlung errichtet. Der Bauträger Rasch & Partner entwickelte in enger Zusammenarbeit mit dem Passivhaus Institut und dem Institut Wohnen und Umwelt Niedrigenergie- und Passivhäuser und realisierte in dem Baugebiet in Wiesbaden insgesamt 24 Niedrigenergie- und 22 Passivhäuser [42].

Das Projekt gehörte zusammen mit 2 Reihenhäusern in Naumburg, die zeitgleich fertig gestellt wurden, zu den ersten Passivhäusern der 2. Generation des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser [30].

Gebäude

Die Häuser sind in drei Reihen angeordnet. Jeweils zwei auf einer Achse liegende Halbzeilen werden von einer Heizzentrale über einen Nahwärmeanschluss mit Wärme versorgt. Die drei Reihen werden wie folgt bezeichnet (vgl. Lageplan Abbildung 2.2.1-2):

- Reihe A: 16 Niedrigenergiehäuser (Nordreihe)
- Reihe B: 8 Niedrigenergiehäuser und 7 Passivhäuser (mittlere Reihe)
- Reihe C: 15 Passivhäuser (Südreihe)

Unter den Passivhäusern wurden zwei Typen realisiert, die sich – je nach Flächenbedarf der Familien - in ihrer Breite unterscheiden. Fünf Häuser haben eine Wohnfläche von 88,3 m² („Typ Jangster“), 17 besitzen 107,8 m² Wohnfläche („Typ Jangster de lük“). Fünf der Häuser sind Reihendhäuser, die übrigen 17 sind Reihemittelhäuser.

Unter den Niedrigenergiehäusern befinden sich 7 Endhäuser und 17 Reihemittelhäuser. Ein Endhaus hat eine Wohnfläche von 64,6 m² („Typ Einszweidrei“), 10 Häuser 88,3 m² sowie 13 Häuser 107,8 m².

Abbildung 2.2.1-1: Die Häuser in Wiesbaden-Lummerlund



Südansicht



Nordansicht

Standort:	Wiesbaden-Dotzheim
Baujahr	1997
Nutzung	Wohnungen (Reihenhäuser für junge Familien)
Größe	Siedlung mit 22 Passivhäusern und 24 Niedrigenergiehäusern, 64 bis 108 m ²
Projektziele	Kostengünstiger Wohnungsbau; Niedrigenergiehäuser; Passivhausstandard für 22 Häuser
Bauträger	Rasch & Partner, Darmstadt
Haustechnik	InPlan, Pfungstadt
Wissenschaftliche Begleitung und Beratung des Planungs- und Bauteams	Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Institut Wohnen und Umwelt, Passivhaus Institut
Qualitätssicherung	Passivhaus Institut
Messtechnische Begleitung und Auswertung	Institut Wohnen und Umwelt in Kooperation mit dem Passivhaus Institut
Sozialwissenschaftliche Begleitung	Institut Wohnen und Umwelt
Auftraggeber der wissenschaftlichen Auswertung	Hessisches Umweltministerium und Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
Finanzielle Unterstützung	ESWE Wiesbaden

Die Häuser wurden als kostengünstige Wohnungen geplant und in Mischbauweise ausgeführt [43]. Die Bauelemente wurden vorgefertigt und die Gebäude 1997 in einer Bauzeit von wenigen Monaten errichtet und bereits Mitte des Jahres bezogen.

Die Nutzer dieser Häuser sind fast ausschließlich gleichzeitig Erwerber. Sie konnten wählen, ob sie ein Niedrigenergiehaus oder eine Passivhaus, das um 17000 DM teurer angeboten wurde [44], erwerben wollten. Es entstanden schließlich etwa zur Hälfte Niedrigenergie- und Passivhäuser (je drei Halbzeilen). Untersuchungsgegenstand sind im Folgenden die Reihe B und C, also insgesamt 22 Passivhäuser und 8 Niedrigenergiehäuser (vgl. Abbildung 2.2.1-1).

Tabelle 2.2.1-1: Anzahl der Wohneinheiten und Wohnfläche der „Gartenhofsiedlung Lummerlund“

		Wohnfläche in m ²	Anzahl Niedrigenergiehäuser	Anzahl Passivhäuser
"4-m-Typ"	Endhaus	64.6	1	0
"5-m-Typ"	Endhaus	88.3	2	1
	Mittelhaus	88.3	15	4
"6-m-Typ"	Endhaus	107.8	8	4
	Mittelhaus	107.8	14	13
Summe		6211 (100.2 pro WE)	40	22

Die Passiv- und die Niedrigenergiehäuser sind jeweils untereinander weitgehend baugleich. Sie haben keinen Keller, dafür aber Abstellräume sowohl im warmen als auch im außen liegenden Bereich. Alle 46 Häuser besitzen einen sehr guten Wärmeschutz der opaken Flächen sowie eine Lüftungsanlage [45]. Abgesehen von den Fenstern sind die baulichen Konstruktionen der Hüllflächen bei Passiv- und Niedrigenergiehäusern identisch. Der Bauträger hatte sich dafür entschieden, die wärmetauschende Hülle auch der Niedrigenergiehäuser in Passivhausqualität auszuführen, um so den Planungsaufwand zu reduzieren. Außerdem wurde es dadurch ermöglicht, erst zu einem späten Zeitpunkt, nach der Entscheidung der Erwerber, festzulegen, welche Häuser als Niedrigenergie- und welche als Passivhäuser ausgeführt werden.

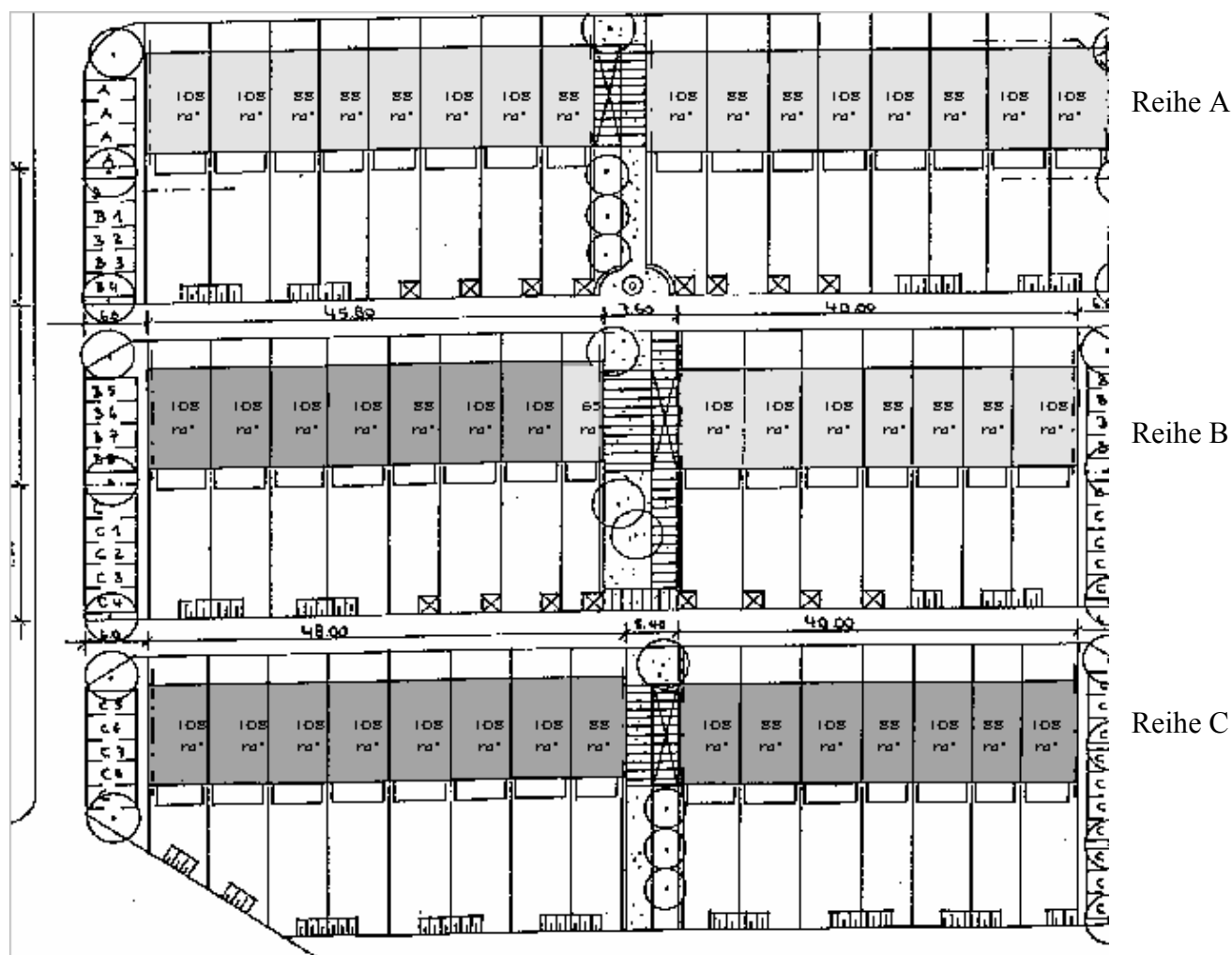
Die opaken Flächen der Niedrigenergiehäuser weisen damit denselben ausgezeichneten Wärmeschutzstandard auf wie die Passivhäuser. Es handelt sich somit um sehr gute Niedrigenergiehäuser, die gelegentlich auch als „Ultrahäuser“ bezeichnet werden.

Die Häuser stehen auf einer 30 cm dicken Dämmlage aus Styropor, das Dach ist mit 40 cm gedämmt, in den Leichtbau-Fertigelementen der Außenwand befindet sich eine Dämmlage von 30 cm. An den Giebelwänden der Endhäuser ist ein Wärmedämmverbundsystem mit einer 35 cm starken Dämmschicht angebracht. Eine möglichst weitgehende Wärmebrückenfreiheit wurde vor allem durch Reduzierung der durchgehenden Holzquerschnitte von Trägern und Stützen im Fassaden- und Dachbereich, thermische Trennung von Zusatzbauteilen (Balkone, Eingangspodeste etc.) und sorgfältige Detailplanung, vor allem im Bereich der Anschlüsse erreicht [46].

Die Unterschiede zwischen den Passivhäusern und den Niedrigenergiehäusern bestehen vor allem bei

- den Fenstern
- der Lüftungsanlage
- der Qualitätssicherung.

Abbildung 2.2.1-2 : Schema der Hausanordnung (die dunkel gekennzeichneten Gebäude sind die Passivhäuser)



Fenster

Die Passivhäuser sind zusätzlich mit einer Dreifach-Wärmeschutzverglasung und einer hocheffizienten Wärmerückgewinnung ausgestattet, während die Niedrigenergiehäuser über eine normale Zweifach-Wärmeschutzverglasung sowie über eine Abluftanlage verfügen. Bei den Fenstern der Passivhäuser haben die Verglasungen einen U-Wert von 0,7 und entsprechen weitgehend den erstmals im Passivhaus Darmstadt verwendeten Verglasungen. Während in Darmstadt allerdings auf die (Holz-)Rahmen noch Dämmschalen aufgeklebt werden mussten, gelang es in Wiesbaden, aus einer ersten Serienfertigung Fenster einzusetzen, die Passivhausqualität aufwiesen [47].

Der Fenster-U-Wert liegt durchschnittlich bei ca. 0,8 (ohne Einbau), unter der Berücksichtigung der Einbausituation bei 0,89 [48].

Qualitätssicherung

Voraussetzung für geringe Lüftungswärmeverluste ist ferner eine sehr hohe Luftdichtheit der Gebäudehülle. Die Qualitätssicherung der Passivhäuser in Wiesbaden wurde durch das Passivhaus Institut ausgeführt.

Zur Überprüfung und gegebenenfalls Nachbesserung wurden in allen Häusern Drucktests durchgeführt. Die n_{50} -Werte der Passivhäuser lagen zwischen 0,3 und 0,52/h, im Mittel bei 0,44/h [49]. Die hohe Qualität der thermischen Hülle wurde durch einen abschließenden Drucktest sowie thermografische Aufnahmen bestätigt.

Lüftung

Bei den Niedrigenergiehäusern erfolgt die kontrollierte Lüftung über eine Abluftanlage (projektierte Ventilatorleistung: 40 W) mit feuchtegeregelt Zuluftöffnungen am Fenster.

Für die Passivhäuser ist die Lüftungsanlage von entscheidender Bedeutung für Luftqualität, Komfort und Einhaltung des Passivhausstandards. Auf Planung und Ausführung von Lüftungsanlage und Luftführung kommt es daher besonders an [50].

Im Gegensatz zu den Fenstern standen zum Zeitpunkt des Baus der Häuser in Wiesbaden bei den Lüftungsanlagen noch keine serienreifen passivhausgeeigneten Wärmerückgewinnungsgeräte zur Verfügung. Bei den Zu- und Abluftanlagen der Passivhäuser wurden hocheffiziente Gegenstromwärmetauscher der Firma Temovex eingesetzt, die aus Dänemark importiert werden mussten, da zu diesem Zeitpunkt Geräte mit dieser Effizienz auf dem deutschen Markt noch nicht vorhanden waren. Die Wärmetauscher sind in einem Abstellraum im Erdgeschoss untergebracht.

Die ursprünglich eingebauten Ventilatoren, die einen viel zu hohen Stromverbrauch aufwiesen, wurden durch Gleichstromventilatoren ersetzt. Dieser Umbau war bereits im Passivhaus Darmstadt projektiert und durchgeführt worden, so dass es möglich war, auf die dort vorliegenden Erfahrungen zurückzugreifen [51]. Dadurch wurde es möglich, die Passivhausqualitätskriterien einzuhalten und nicht nur eine Rückwärmzahl $> 80\%$ zu realisieren, sondern auch eine Stromeffizienz für die Lüftung unter $0,4 \text{ Wh/m}^3$ [52].

Die Luftführung erfolgt im Zentralbereich des Gebäudes in Wickelfalzrohren und mit Weitwurfdüsen in die Zulufräume (Wohnzimmer, Schlafzimmer und Kinderzimmer). Bad und Küche sind Ablufträume.

Ursprünglich war zusätzlich für alle Passivhäuser ein Erdreichwärmetauscher vorgesehen. Da bei den Mittelhäusern die funktionale Zielsetzung auch ohne Erdreichwärmetauscher erreicht werden konnte, wurde bei diesen darauf verzichtet. Nur bei den Endhäusern (5 der insgesamt 22 Passivhäuser) ist daher ein Erdreich-Wärmetauscher dem Gegenstromwärmetauscher vorgeschaltet, um die erhöhten Wärmeverluste durch die zusätzliche Außenoberfläche zu kompensieren und den Passivhausstandard zu erreichen.

Damit ist bei den Endhäusern gleichzeitig für den Frostschutz gesorgt. Für die Mittelhäuser wurde durch eine bei Bedarf zugeschaltete Abluft-Nacherwärmung, die über die Wärmerück-

gewinnung zu einer Erhöhung der Zulufttemperatur führt, dafür gesorgt, dass der Gegenstromwärmetauscher frostfrei bleibt.

Die Regelung der Luftmengen blieb – im Gegensatz zu den Prototypen in Darmstadt - aus Kostengründen sehr einfach: Die Drehzahlen von Zu- und Abluftventilator werden – unabhängig voneinander – direkt am Wärmetauscher manuell eingestellt. Das Haustechnik-Ingenieurbüro führte an jeder Lüftungsanlage einen individuellen Balance-Abgleich durch und markierte jeweils an den Drehknöpfen drei Positionen mit ausgeglichener Balance mit einem Luftvolumenstrom von 90 m³/h, 120 m³/h und 150 m³/h. Für den Normalbetrieb ist ein Luftvolumenstrom von 120 m³/h vorgesehen. Damit wird im großen Gebäudetyp ein Luftwechsel von 0,45/h, im kleinen von 0,54/h erreicht (jeweils bezogen auf Standard-Luftvolumen).

Auf einen Schalldämpfer in der Zuluft wurde aus Kostengründen zunächst verzichtet, nachdem sich herausgestellt hatte, dass die bestehende Norm auch ohne Schalldämpfer eingehalten wird. Dies führte allerdings zu Klagen der Bewohner. Nach einer Nachuntersuchung im Rahmen des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser mussten dann nachträglich Schalldämpfer eingebaut werden. Es zeigte sich, dass die Einhaltung der Norm in Bezug auf den Schall bei Lüftungsanlagen in Wohngebäuden nicht ausreicht. Dies sollte bei Gebäuden mit Zu- und Abluft zukünftig berücksichtigt werden, um einen unnötigen zusätzlichen Kostenaufwand oder die Nichtakzeptanz der Lüftungsanlage zu vermeiden [53].

Wärmeversorgung

Der Bedarf an Wärme für die Warmwasserbereitung und die Heizung (bei Passivhäusern: Restheizung) wird mit Nahwärme gedeckt. Zu jeder Hauszeile gehört ein Nahwärmeanschluss, insgesamt also drei Anschlüsse für drei Zeilen. Das Warmwasser wird hausintern mit einem thermischen Durchlauferhitzer bereitet.

Der Anschluss an die Nahwärme war für die Siedlung in Wiesbaden vorgeschrieben. Als Alternative hätte zum Zeitpunkt des Baus sonst die Möglichkeit einer dezentralen Lösung auf der Basis von Gas-Brennwertkesseln bestanden, die aber auch mit ca. 80% höheren Investitionskosten verbunden gewesen wäre als die ausgeführte zentrale Lösung [54].

Konventionelle Heizwärmeverteilung

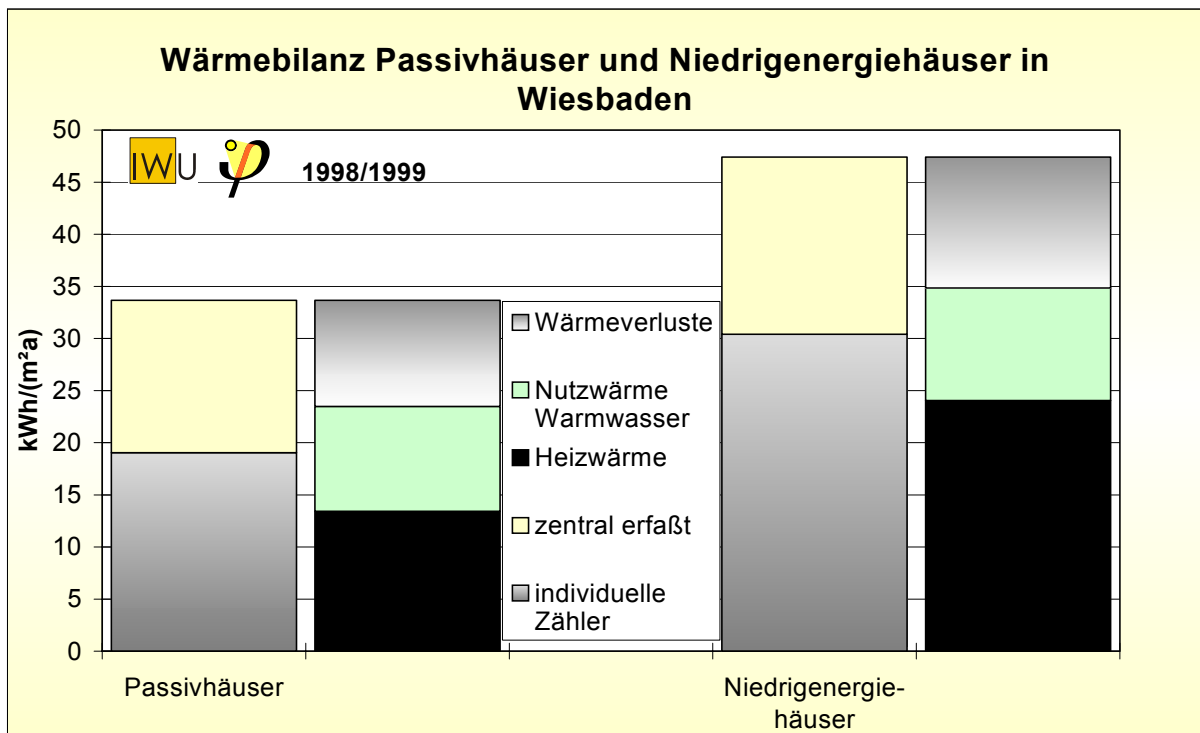
Passivhäuser haben eine so geringe Heizlast, dass sie prinzipiell allein über die Zuluft der ohnehin vorhandenen Lüftungsanlage beheizt werden können [55], [56], [57], [58]. Damit könnte ein separates Heizsystem entfallen und es können zusätzlich Kosten gespart werden. Dieser Schritt wurde in Wiesbaden noch nicht vollzogen. Da die 22 Passivhäuser dieser Siedlung zu den ersten Passivhäusern der zweiten Generation gehörten, besitzen sie wie die Niedrigenergiehäuser noch konventionelle (kleine und innen liegende) Heizkörper.

Inzwischen wurde nicht nur theoretisch, sondern auch praktisch bewiesen, dass Reihenhäuser wie in Wiesbaden tatsächlich allein über die Zuluft beheizbar sind [59].

2.2.2 Messergebnisse zum Heizungs- und Warmwasserverbrauch aus der zweiten Heizperiode 1998/1999

Mit der messtechnischen Erfassung wurde 1998, ein Jahr nach dem Einzug, begonnen. Die ersten Messergebnisse lagen zu Beginn dieses Projekts bereits vor und waren Grundlage für die Projektzielsetzungen. Die wichtigsten Ergebnisse sollen in diesem Abschnitt vorgestellt werden.

Abbildung 2.2.2-1: Wärmebilanz in den Passiv- und Niedrigenergiehäusern in Wiesbaden



Die Balken auf der linken Seite zeigen den gesamten durchschnittlichen Fernwärmeverbrauch der Häuser (für Heizung und Warmwasser). Davon wird der untere Teil durch die individuellen Zähler erfasst, der Rest ergibt sich als Differenz aus dem gemessenen Gesamtverbrauch und der Summe der individuellen Verbräuche. Die rechten Balken zeigen die Aufteilung der Wärme auf den Heizenergieverbrauch (incl. der nutzbaren Wärme der Rohrleitungen), die Nutzenergie für das Trinkwarmwasser sowie die Wärmeverluste.

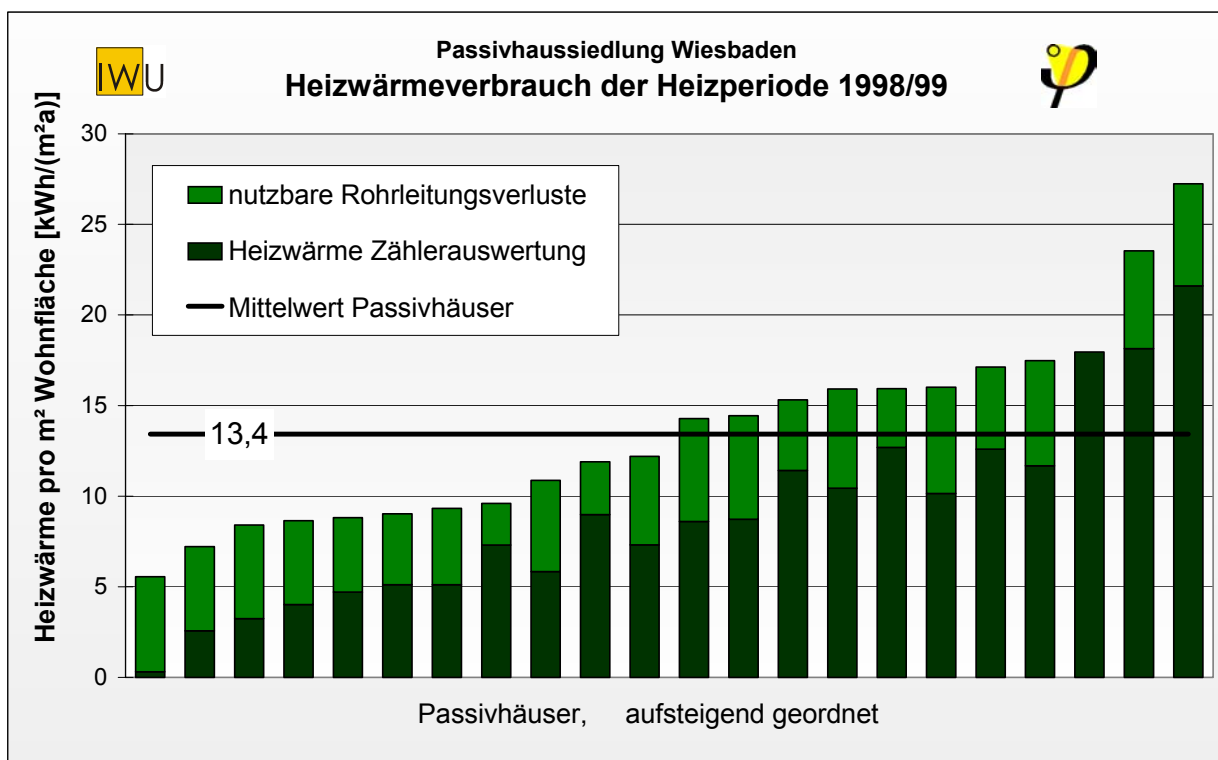
Im Einzelnen wurden seit Sommer 1998 im Auftrag des Hessischen Umweltministeriums mit Unterstützung durch die Stadtwerke Wiesbaden in Reihe B (Passiv- und Niedrigenergiehäuser) und C (Passivhäuser) die folgenden Größen messtechnisch erfasst: Die (individuelle) Gesamt-Wärmeabnahme für Raumheizung und Warmwasser in jeder Wohneinheit, das Warmwasservolumen in jeder Wohneinheit, die gesamte Wärmelieferung der Stadtwerke Wiesbaden jeweils für die Heizzentralen der Reihe B und Reihe C, der individuelle Gesamtstromverbrauch der Haushalte und der beiden Heizzentralen, die Raumlufttemperaturen in 3 Räumen jeder Wohneinheit, die Temperaturen an verschiedenen Punkten der Heizwärmeverteilung, exemplarisch in 4 Passivhäusern Temperaturen in Lüftungskanälen und der Stromverbrauch der Lüftungsanlage

sowie die Außenlufttemperatur. Die Auswertung wurde gemeinsam vom Institut Wohnen und Umwelt und dem Passivhaus Institut durchgeführt.

Nachdem die ersten vorläufigen, aber bereits vielversprechenden Messergebnisse Anfang 1999 auf der 3. Passivhaustagung präsentiert worden waren [60], bestätigte eine genauere Analyse nach Ablauf des ersten Messjahres: Die Zielsetzungen in Bezug auf den Heizenergieverbrauch wurden mit einem gemessenen mittleren Heizwärmebedarf von 13,4 kWh/(m²a) in vollem Umfang erreicht [61]. Im Vergleich zur Anforderung der zum Errichtungszeitpunkt gültigen Wärmeschutzverordnung wurden damit 87% Heizenergie eingespart.

Das mittlere Ergebnis entspricht im Mittel damit genau der Projektierung mit dem Passivhaus Projektierungs Paket (PHPP, [62]). Abbildung 2.2.2-1 zeigt die Wärmebilanz der gemessenen Niedrigenergie- und Passivhäuser.

Abbildung 2.2.2-2: Heizenergiekennwerte (inkl. nutzbarer Wärmeabgabe von Rohrleitungen) (Quelle: [61], [63])



Die Einzelmesswerte der einzelnen Wohnungen reichten von 5½ bis 25 kWh/(m²a) Heizenergie (vgl. Abbildung 2.2.2-2). Die nutzerbedingten Schwankungen scheinen zunächst recht hoch. Tatsächlich liegt die Streuung - relativ zum Gesamtverbrauchsniveau - etwa im Bereich von Niedrigenergie-Projekten [64]. Gleichzeitig ist aber auch festzustellen, dass die absolute Streuung mit ca. 20 kWh/(m²a) nicht groß ist. Selbst der Haushalt mit dem höchsten Verbrauch benötigt nur ein Viertel der Heizenergie, die im Durchschnitt für vergleichbare, nach der gültigen Wärmeschutzverordnung errichtete Wohngebäude benötigt worden wäre.

3 Zielsetzungen und Vorgehensweise

In der Passivhaussiedlung in Wiesbaden wurde erstmals eine größere Zahl von Passivhäusern in einer einheitlichen Bauweise errichtet. Dadurch ergab sich hier erstmals die Möglichkeit, bei einer größeren Gruppe von Gebäuden dieses Standards Erfahrungen über das Betriebsverhalten und die Nutzererfahrungen von Passivhäusern zu sammeln.

Grundlage der Untersuchung sind die Messdaten und den sozialwissenschaftlichen Befragungen.

Heizenergiebedarf – funktionale Anforderung

Wichtigstes Ziel der messtechnischen Auswertung der ersten Passivhaussiedlung war zu überprüfen, ob die Zielsetzungen in Bezug auf den geringen Heizenergieverbrauch erfüllt wurden.

Untersucht werden sollte vor allem, ob diese Einsparung nachhaltig erreicht werden kann, oder ob z.B. Veränderungen der Gebäudedichtheit, der Ausfall von Komponenten oder nutzerbedingte Ursachen zu einer nachträglichen Erhöhung des Heizwärmebedarfs führen.

Lüftung

Eine zentrale Stellung nehmen die Fragen zur Lüftung ein. Die Zu- und Abluftanlage mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung ist ein unverzichtbarer Bestandteil des Passivhauskonzepts. Entscheidend ist, dass dieses System nicht nur in Prototypen, sondern auch in einer breiteren Umsetzung funktioniert und von den Bewohnern akzeptiert wird. Für eine solche Untersuchung ist eine größere Siedlung wie in Wiesbaden besonders geeignet.

Durch Messungen wurden die Energiebilanzen der Lüftungsanlagen untersucht und überprüft, ob die projektierten Wirkungsgrade und Zulufttemperaturen erreicht werden. Weiterhin war - durch Messung und Befragung - zu klären, ob die kontrollierte Lüftung, sowohl objektiv als auch subjektiv empfunden, einen ausreichenden Luftwechsel garantiert. Schließlich war eine wichtige Frage, ob die Lüftungsanlage von den Bewohnern akzeptiert wird, welche Randbedingungen dafür erfüllt sein müssen und welche Verbesserungsvorschläge zukünftig Berücksichtigung finden sollten.

Die Fensteröffnungsdauern wurden mit Fensterkontakten ermittelt. Zusätzlich wurde eine weitere Möglichkeit konzipiert, geöffnete Fenster allein über den Zustand der Lüftungsanlage festzustellen - die automatische Druckmessung. Sie wurde in einem der Häuser erprobt. Es soll versucht werden, das Konzept gemeinsam mit Herstellern weiter zu entwickeln.

Durch die Messung und die Befragung sollte festgestellt werden, ob die Bewohner in nennenswertem Umfang zusätzlich Fenster öffnen, welchen zusätzlichen Luftwechsel sie damit verursachen und ob die Gefahr besteht, das Einsparziel zu verfehlen. Gegebenenfalls waren die

Ursachen für die Fensterlüftung zu ermitteln. Zur Einschätzung des zusätzlichen, durch die Fensterlüftung verursachten Luftwechsels und Heizwärmebedarfs wurden weitere messtechnische (Spurengasmessungen) und rechnerische Methoden herangezogen.

Planungswerkzeuge und Erklärung der Nutzerstreuung

Auch wenn der Heizenergiebedarf (nach Auswertungsstand zu Untersuchungsbeginn) genau der Projektierung entspricht, sind eine Reihe von Fragen offen:

Die für die Energiebilanz maßgeblich wirksamen Größen, die in die Projektierung der Wärmebilanz eingingen, sind nicht vollständig erfasst. Zu nennen sind insbesondere: Die Höhe der Lüftungswärmeverluste sowie Höhe der inneren Quellen - Effekte, die sich gegenseitig kompensieren können. Der Ermittlung dieser Einflussgrößen dienen sowohl die messtechnische Erfassung als auch Informationen, die von den Bewohnern im Verlauf der Befragungen erhoben wurden. Außerdem ist bei den Wärmemengenzählern nicht exakt nach Heizung und Warmwasser zu differenzieren. Dies sollte im vorliegenden Projekt messtechnisch geklärt werden.

Auch wenn die Abweichungen zwischen den gemessenen Heizwärmeverbräuchen auf einer absoluten Skala gering sind, stellt sich die Frage, ob die Messergebnisse in Bezug auf den Verbrauch (insgesamt sowie in Bezug auf die individuellen Unterschiede) mit den zur Verfügung stehenden physikalischen Daten ausreichend erklärt werden. Welche der Randbedingungen sind dabei entscheidend und haben maßgeblichen Einfluss und welche sind weniger bedeutend? Diese Fragen wurden sowohl mit Parametervariationen in geeigneten Energiebilanzmodellen als auch mit statistischen Analysen untersucht.

Bewohnerfaktoren und -zufriedenheit

In mehrfacher Hinsicht tragen die Nutzer zum Erfolg eines Energiesparkonzepts bei. Einerseits sind sie es, die oft das Gebäude und die Anlagen, in jedem Fall aber die Wohnung „betreiben“. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, dass die Häuser und das Konzept nutzergerecht sind, d.h. für die Bewohner unproblematisch handhabbar sind und gegebenenfalls auch eine ausreichende Toleranz gegenüber nicht optimalen Verhaltensweisen der Nutzer aufweisen. Andererseits sind es auch die persönlichen subjektiven Bewertungen, die die Nutzer weitertragen, und die auch darüber mitentscheiden, ob ein Konzept Nachahmer findet oder nicht. Aus diesem Grunde wurde gleichzeitig eine sozialwissenschaftliche Untersuchung durchgeführt.

Mit der parallel zu den Messungen durchgeführten Befragung wurden in diesem Kontext daher insbesondere die folgenden Zielsetzungen verbunden:

- Ermittlung sonst unbekannter Randbedingungen für die messtechnische Auswertung

- Rückkopplungen über aufgetretene Probleme. Probleme sollten vorrangig behoben und die Erfahrungen weitergegeben werden an zukünftige Planungsteams
- Auswirkungen (z.B. Verhalten, Komfort) des Wohnens im Passivhaus bzw. Niedrigenergiehaus auf die Bewohner
- Bewertung des Wohnens im Passiv- oder Niedrigenergiehaus durch die Bewohner anhand definierter Kriterien
- Informationen über die Zufriedenheit der Bewohner. Darüber hinaus war es wichtig herauszufinden, ob es für eventuelle Unzufriedenheiten Gründe gibt, die sich beseitigen oder verbessern lassen
- Klärung der Frage, ob es sich bei den Passivhausbewohnern in Wiesbaden um einen spezifischen Nutzerkreis handelt, der besondere Kenntnisse besitzt oder besonders zum Energiesparen motiviert ist, oder ob zu erwarten ist, dass das Passivhauskonzept auf breiter Ebene auf einen wesentlich größeren Nutzerkreis erfolgreich übertragbar ist.

Primärenergetische Bewertung

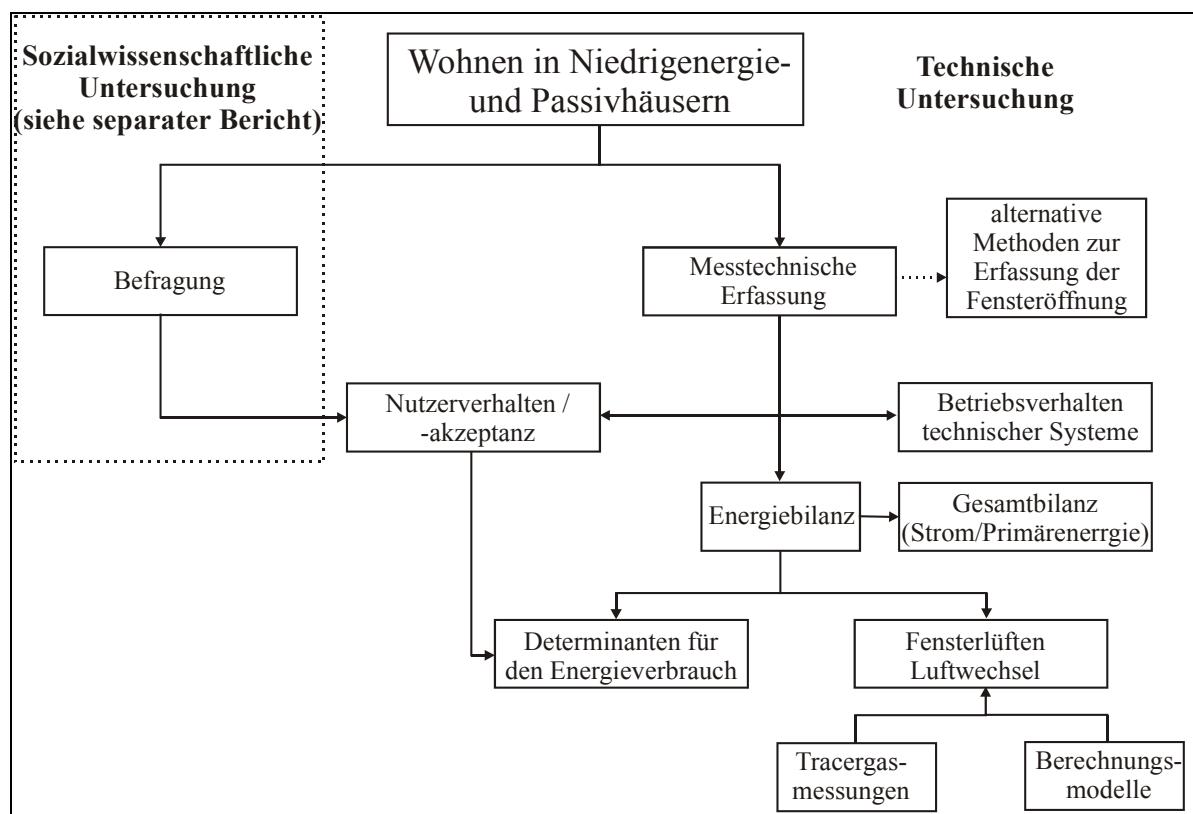
Auf Wunsch des Fördermittelgebers sollten ferner die Ergebnisse dieses Projekts in die IEA Task 28 eingebracht werden. Als Vergleichsbasis mit anderen Gebäudekonzepten diente dabei der berechnete und gemessene nach der Systematik der EnEV bewertete Primärenergieverbrauch. An diese Untersuchung schließt sich eine Bewertung des Berechnungsverfahrens der EnEV im Hinblick auf ein Beurteilungskriterium für Passivhäuser an.

Aufbau des Forschungsprojekts

Das Forschungsprojekt „Wohnen in Niedrigenergie- und Passivhäusern“ gliederte sich in zahlreiche Einzeluntersuchungen, deren Zusammenhang mit dem Gesamtprojekt in Abbildung 3-1 verdeutlicht wird.

Ausgangspunkt des Projekts sind die sozialwissenschaftliche Untersuchung mit den Bewohnerinterviews (Detailergebnisse in separatem Bericht) und die technische Untersuchung mit der messtechnischen Erfassung von Verbräuchen, Temperaturen sowie der Fensteröffnungszeiten (Kapitel 4).

Abbildung 3-1: Aufbau des Forschungsprojekts



Die Ergebnisse der messtechnischen Erfassung wurden sowohl als Eingangsgrößen bei der Beurteilung des Betriebsverhaltens der technischen Systeme (Kapitel 4.2.7 und 5.3) wie auch zur Erstellung der Energiebilanz der Häuser (Kapitel 7.4) und schließlich als Eingangsgröße zur Beschreibung des Nutzerverhaltens herangezogen. Zusätzlich wurden sie bei der Beurteilung der alternativen Methoden zur Erfassung der Fensteröffnungszeiten benötigt (Kapitel 5.4). Die Energiebilanz der Passivhäuser floss anschließend in die primär-energetische Gesamtbilanz der Häuser ein (Kapitel 7).

Als weitere Eingangsgrößen zur Beurteilung des Nutzerverhaltens und der Nutzerakzeptanz wurden Ergebnisse aus der sozialwissenschaftlichen Befragung herangezogen (Kapitel 6.1 – 6.3).

Die Resultate der Untersuchungen zur Nutzerakzeptanz und zum Nutzerverhalten flossen zusammen mit den Messdaten bzw. der Energiebilanz in die Bestimmung der Determinanten des Energieverbrauchs ein (Kapitel 6.4).

Die Ergebnisse der Energiebilanz konnten schließlich für den Bereich des Fensterlüftens bzw. des Luftwechsels in den Häusern durch Tracergas-Untersuchungen (Kapitel 5.1) und die Erstellung von Berechnungsmodellen (Kapitel 5.2) erklärt werden.

4 Messungen und Messergebnisse

4.1 Das Messkonzept

Über einen Zeitraum von vier Jahren (Sommer 1998 bis Sommer 2002) wurden in Reihe B (7 Passiv- und 8 Niedrigenergiehäuser) und C (15 Passivhäuser) folgende Verbrauchsgrößen und Temperaturen messtechnisch erfasst und ausgewertet:

- Wärmemengenzähler in jeder Wohneinheit für Raumheizung und Warmwasser
- Warmwasserzähler in jeder Wohneinheit
- gesamte Wärmelieferung der Stadtwerke Wiesbaden (ESWE) jeweils für die Heizzentralen der Reihen B und Reihe C mittels Wärmemengenzähler
- Stromverbrauch der Haushalte und der beiden Heizzentralen
- Raumlufttemperaturen an drei Punkten in jeder Wohneinheit (Erdgeschoss Wohnbereich, Obergeschoss Süden, Obergeschoss Norden)
- Außenlufttemperatur sowie Temperaturen an verschiedenen Punkten der Heizwärmeverteilung

Darüber hinaus wurden in vier Passivhäusern die Temperaturen in den Lüftungskanälen und der Stromverbrauch der Lüftungsanlage aufgezeichnet.

Tabelle 4.1-1 gibt einen Überblick über die eingesetzte Messtechnik, die Abbildungen 4.1.1-1 bis 4.1.3-1 zeigen das Messschema.

Die Durchführung und Auswertung der Messungen erfolgte im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit und wird finanziell durch das Bundesministerium für Wirtschaft gefördert. Das Bundeswirtschaftsministerium übernahm die Kosten für die zusätzlichen Messungen der Fensterkontakte und der Klimastation.

Das Projekt wurde weiterhin durch die Stadtwerke Wiesbaden (ESWE) unterstützt, die die Finanzierung und Beschaffung der Wärmemengenzähler übernommen hatte.

Seit Oktober 1998 wurden alle oben genannten Daten aufgezeichnet. Die folgenden Auswertungen decken den Messzeitraum von Oktober 1998 bis Ende Juni 2002 ab. In den verschiedenen Kapiteln sind exemplarisch einzelne Jahre dargestellt, die charakteristische Verläufe der Messwerte im gesamten Messzeitraum repräsentieren, alle anderen Werte sind tabellarisch dargestellt. Die Überschneidung der Auswertezwischenräume im Sommer 1999 hat auf die Ergebnisse des Heizenergieverbrauchs keinen Einfluss, da sie nicht zur Heizzeit der Gebäude gehört.

Tabelle 4.1-1: Messgrößen in der Niedrigenergie- und Passivhaussiedlung Wiesbaden- Dotzheim

Messungen in der "Gartenhofsiedlung Lummerlund" in Wiesbaden Dotzheim		
	Messgeräte und Anzahl	Auflösung
Datenerfassung	M-Bus-Zentraleinheit + PC/Modem 15 x Duplex-Logger mit Speicherkarte (für Temp.+WWZ) (Reihe B); 15 x Bus-fähiger Duplex-Logger (für Temp.+WWZ) (Reihe C)	
Wärmemenge	je 15 x WMZ an M-Bus (Reihe B und C)	1 kWh / 1d
Warmwasser	je 15 x WWZ, Kontakt-Ausgang an Duplex-Logger (Reihe B und C)	10 l / 1 h
Haushaltsstrom	je 15 x ESWE-Zähler (Reihe B und C) Handablesung	1 kWh / vierteljährlich
Raumlufttemperaturen	3 Temperaturfühler je Wohnung an Duplex-Logger (1xEG, 2xOG)	0,1 °C / 1 h
Lüftung: Temperaturen + Stromverbrauch	in 4 PH-Wohnungen (2 Mittel- und 2 Endhäuser): 4 bzw. 5 Temperaturfühler in Lüftungskanälen + Stromzähler	0,1 °C / 1 h; 13 Wh / 1 h
Heizhaus: Wärmemenge + Strom	für Reihe B und C jeweils ESWE-Stromzähler: Handablesung ESWE-WMZ: M-Bus	1 kWh / 1d (Wärme); 1 kWh / vierteljährlich (Strom)
Heizhaus: Temperaturen primär/sekundär/ tertiär	jeweils 7 Temperaturfühler an Duplex-Logger (Reihe B und C)	0,1 °C / 1 h

4.1.1 Messtechnik in den Einzelgebäuden

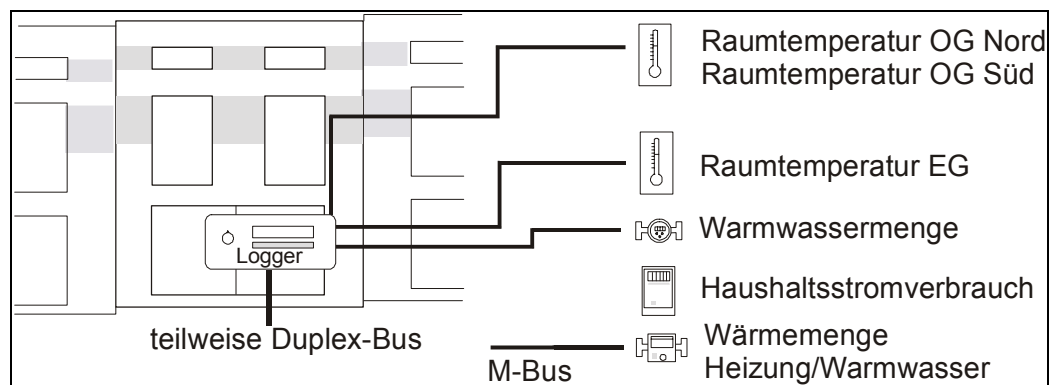
Die in den Häusern verbrauchte Wärme für Heizung und Warmwasser wurde über einen Wärmemengenzähler (Firma Spanner-Pollux) abgelesen. Alle Zähler waren über einen M-Bus mit den Zentraleinheiten in den beiden Heizhäusern verbunden, von denen aus täglich die Zählerstände ausgelesen und abgespeichert wurden.

Weiter wurden in jedem Gebäude mit einem Datenlogger die Temperaturen im Erdgeschoss, im einem Südzimmer im Obergeschoss sowie im Nordzimmer des Obergeschosses aufgezeichnet. Die Temperaturfühler waren so angeordnet, dass sie zu keiner Zeit direkt vom Sonnenlicht beschienen werden konnten. Der Datenlogger speicherte die alle 10 Sekunden aufgenommenen Messwerte als Stundenmittelwerte der Messgrößen ab. Alle Häuser besaßen Warmwasserzähler mit Impulsausgang, der einen Impuls pro 10 Liter Warmwasserzapfung abgibt. Der Datenlogger integrierte die Impulsanzahl und speicherte Stundensummen ab (Abbildung 4.1.1-1). Zusätzlich wurde mehrmals im Jahr der Haushaltsstromzähler im Heizhaus von Hand abgelesen.

Es wurden zwei verschiedenen Datenloggertypen verwendet:

- In Reihe B wurden Kartenlogger eingesetzt, die mit 32 kByte Speicherkapazität die Daten ca. drei Monate abspeichern können.
- In Reihe C waren Bus-Logger eingebaut, deren Speicher täglich vom zentralen Rechner im Heizhaus über einen seriellen 4-Draht-Bus ausgelesen und die Daten auf seiner Festplatte abgespeichert wurden.

Abbildung 4.1.1-1: Übersicht der Messgrößen im Haus bei Standardmessung



In vier Passivhäusern wurden zusätzlich noch die Lüftungsanlage detailliert vermessen, je in zwei Reihenmittel- und in zwei Reihenendhäusern. Die Reihenmittelhäuser besaßen ein Nachheizregister zur Frostfreihaltung des Wärmetauschers, so dass in diesen Gebäuden die Abluft vor und nach diesem Wärmetauscher, die Fortluft, die Außenluft und die Zuluft mit Temperaturfühlern im Strömungsquerschnitt gemessen wurden. Die Reihenendhäuser benötigten wegen ihres Erdreichwärmetauschers das Nachheizregister nicht. Daher war in diesen Gebäuden nur ein Fühler in der Abluft vorhanden (Abbildung 4.1.1.-2 und Abbildung 4.1.1.-3).

Die Stromversorgung von Lüftermotoren und Regelung der Wärmerückgewinnung wurde über einen zusätzlichen Stromzähler geführt, dessen Zählerscheibe optisch abgetastet und die Impulse im Datenlogger zu Stundenwerten aufsummiert wurden. In Häusern mit ausführlicher Messung wurden immer Kartenlogger mit 64 kByte-Speicherkarten eingesetzt.

Abbildung 4.1.1-2: Messgrößen bei ausführlichen Messungen (in 4 Häusern)

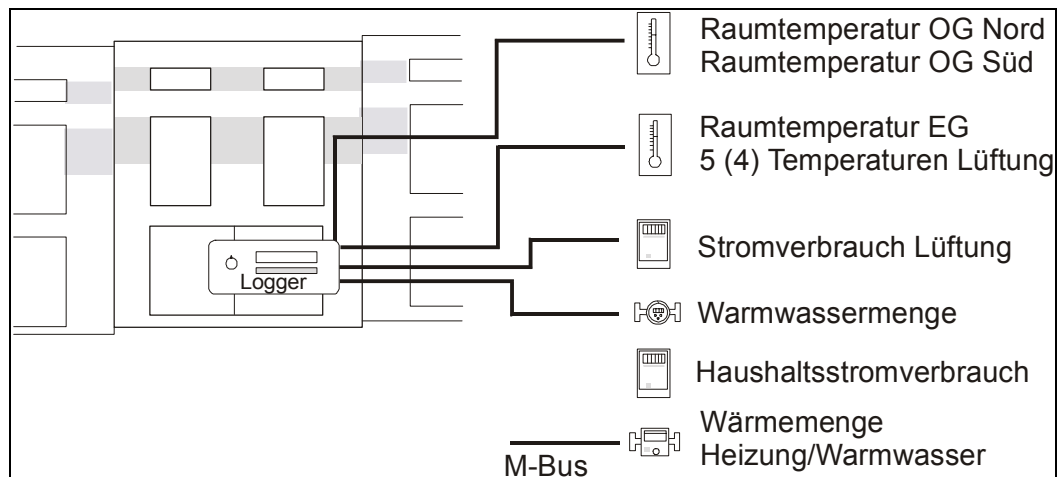
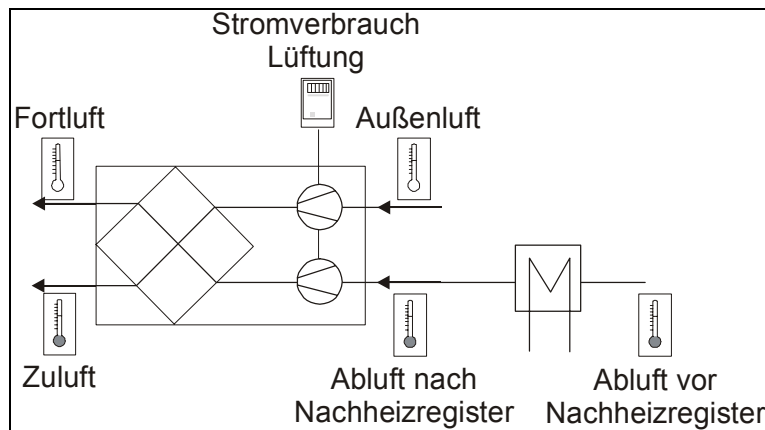


Abbildung 4.1.1-3: Vermessung der Lüftungsanlage (in 4 Häusern)



4.1.2 Messtechnik in den Heizzentralen

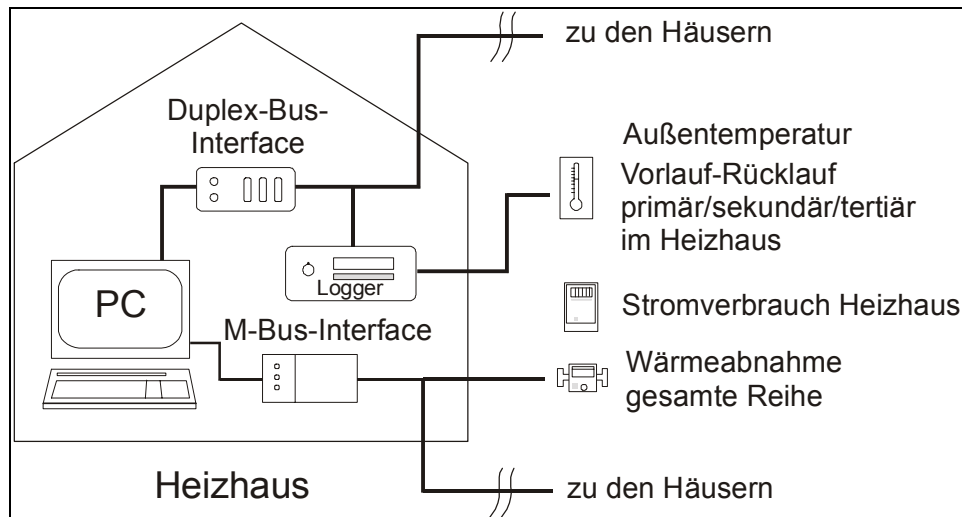
In den Heizhäusern der Reihen B und C befanden sich Computer, die über ein M-Bus-Interface die Wärmemengenzähler in den Gebäuden auslesen. In Reihe C las der Rechner über ein Interface zusätzlich den Duplex-Bus der Datenlogger aus.

Folgende Messgrößen wurden in den Heizhäusern aufgenommen (Abbildung 4.1.2-1):

- Wärmemenge am Übergabepunkt der Stadtwerke ESWE (Tageswerte)
- Außentemperatur (Stundenmittelwerte)
- Vor- und Rücklauftemperatur Primärkreis Nahwärme (ESWE-Übergabepunkt) (Stundenmittelwerte)
- Vor- und Rücklauftemperatur Sekundärkreis Nahwärme (Speicherladekreis) (Stundenmittelwerte)
- Vor- und Rücklauftemperatur Teilstrang 1 und 2 Tertiärkreis (Einspeisung Verteilung zu den Häusern) (Stundenmittelwerte)

Weiterhin wurde der Stromverbrauch der Heizzentrale über vierteljährliche Handablesungen festgehalten.

Abbildung 4.1.2-1: Messtechnik in den Heizhäusern



4.1.3 Erweiterung des Messprogramms

Zur Klärung der weiter unten beschriebenen Verbrauchsschwankungen zwischen den Häusern wurde das Messprogramm im Herbst 2000 erweitert. Zur Erfassung der Fensteröffnungszustände wurden in 21 Passiv- und 7 Niedrigenergiehäusern jedes offenbare Fenster mit einem Magnetkontakt ausgerüstet, der per Funk Zustandsänderungen an eine Zentraleinheit weiterleitete. Die Zentraleinheit kumulierte die Öffnungszustände von Fenstern aus einem Raum. Zwischen gekippten und vollständig geöffneten Fenstern wurde dabei nicht unterschieden. Der vorhandene Datenlogger erfasste die kumulierte Öffnungszeit aller Fenster eines Raumes und speicherte die Ergebnisse als Stundensummen ab. Zur genaueren Erfassung der Fensteröffnungszeiten waren ab Herbst 2000 die Abtastraten der Logger auf einen 3-Sekunden-Takt erhöht worden. Weiterhin wurden nun größere Speicherkarten verwendet.

Am Heizhaus der Reihe B war zusätzlich eine Wettermessstation montiert, die folgende Parameter erfasste:

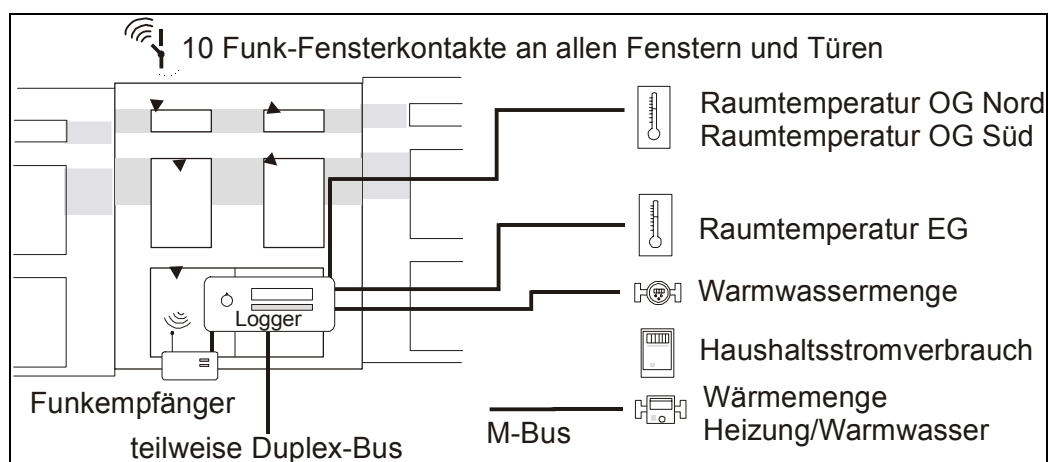
Tabelle 4.1.3-1: Zusätzliche Messgrößen im erweiterten Messprogramm

Erweiterung des Messprogramms in Wiesbaden-Dotzheim				
	Messgerät	Auflösung	Messunsicherheit	
Fensteröffnungszustand (in 28 Häusern)	10 x Funksender mit je einem Repeater und einem Empfänger pro Haus	5 sek.	< 2 % *)	
Datenerfassung Wetterstation	Datenlogger Modas 1217			
Außentemperatur	Pt100 (1/3 Klasse B) in Strahlungsschutz nach WMO	0,05 °C	0,1 °C	
Windgeschwindigkeit	Thies Compact Schalenkreuz-Anemometer	0,5 m/s	3 %	
Windrichtung	Thies Compact Windrichtungsgeber	11,25 °	+/- 5 °	
Solarstrahlung <ul style="list-style-type: none"> • Horizontal • Nord • Süd • Süd unter 45° geneigt • Süd im Erdgeschoss (2 m über Erdgeschossfußboden) • Süd im 1. Obergeschoss (2 m über Obergeschossfußboden) 	6 x Kalibrierte Silizium-Einstrahlungssensor SOZ 03	1 W/m ²	5 % für Monatssummen	

*) abgeschätzt

Für die in den einzelnen Niedrigenergie- und Passivhäusern installierte Messtechnik ergibt sich somit folgendes Aussehen:

Abbildung 4.1.3-1: Installierte Messtechnik in Einzelhäusern



4.1.4 Fehlerbetrachtung

Bei der Bewertung und der Diskussion der in Wiesbaden Dotzheim gemessenen Temperaturen und Wärmemengen muss die jeweilige Messunsicherheit beachtet werden. Zwei Faktoren wirken sich auf die Genauigkeit der erfassten Daten aus:

- a) Messgeräte weisen immer Toleranzen auf. Die Messunsicherheit der in Wiesbaden eingesetzten Messgeräte und Fühler sind in Tabelle 4.1.4-1 aufgelistet.

Tabelle 4.1.4-1: Messunsicherheiten der einzelnen Messgeräte

Messfühler/Messgerät	Anzahl	Einheit	Messunsicherheit
Wärmemengenzähler (Klasse C)	32	kWh	$\pm 5 \%$
Raumtemperaturfühler	90	$^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,3 \text{ K}$
Temperaturfühler Lüftungsanlage	18	$^{\circ}\text{C}$	$\pm 1 \text{ K}^*)$
Anlegetemperaturfühler Heizhaus	14	$^{\circ}\text{C}$	$\pm 1 \text{ K}^*)$
Außentemperaturfühler	2	$^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,3 \text{ K}$
Stromzähler Haushaltsstrom	32	kWh	$\pm 3 \%$
Stromzähler Lüftungsanlage	4	kWh	$\pm 3 \%$
Warmwasserzähler	30	m^3	$\pm 5 \%$

^{*)} abgeschätzt

- b) Messdatenlücken bei den Wärmemengen- sowie den Warmwasserzählern durch den zeitweisen Ausfall von Geräten. Sie wurden im Rahmen der Auswertung - durch Heranziehung von später abgelesenen Zählerständen - plausibel ergänzt. Lücken in den Temperaturdaten wurden nicht aufgefüllt. Die Genauigkeit der Ergänzung und Zuordnung zu den Zeiteinheiten wird auf ca. $\pm 10 \%$ abgeschätzt. Bezogen auf den gesamten Messzeitraum ergeben sich damit bei Wärmeverbrauch und Warmwassermenge Gesamtfehler von deutlich weniger als $\pm 1 \%$. In der folgenden Fehlerbetrachtung werden die Ausfallzeiten - wegen der geringen Relevanz - nicht mitberücksichtigt.

Die Abbildungen 4.1.4-1 und 4.1.4-2 zeigen den Anteil der Datenlücken in den Messjahren und Heizperioden 1998/1999, 1999/2000, 2000/2001, 2001/2002. Bei den Lücken der Wärmemengenzähler blieben die Jahressummen erhalten (außer im Haus P04), so dass hierdurch kein zusätzlicher Fehler die Jahresbilanz beeinflusst. Im Haus P04 fiel im Sommer 2001 der Wärmemengenzähler komplett aus und konnte auch nicht mehr ersetzt werden.

In den Heizperioden lag die mittlere Ausfallquote der Datenlogger (Raumtemperaturen, Fensterkontakte und Warmwasservolumen) bei 6,0 %, die der Wärmemengenzähler bei 10,2 %. Auf den gesamten ausgewerteten Zeitraum betrachtet traten 7,8 % Ausfälle bei den Datenloggern und 10,2 % bei den Wärmemengenzählern auf. Die Passivhäuser waren dabei mit 4,1 % Ausfällen der Logger in der Heizperiode deutlich weniger betroffen als die

Niedrigenergiehäuser mit 12,4 % (hier liegt der Grund in den anfälligeren Kartenloggern). Die Verfügbarkeit der Messdaten ist somit als gut zu bezeichnen.

Abbildung 4.1.4-1: Prozentualer Anteil der Datenlücken für den gesamten Messzeitraum

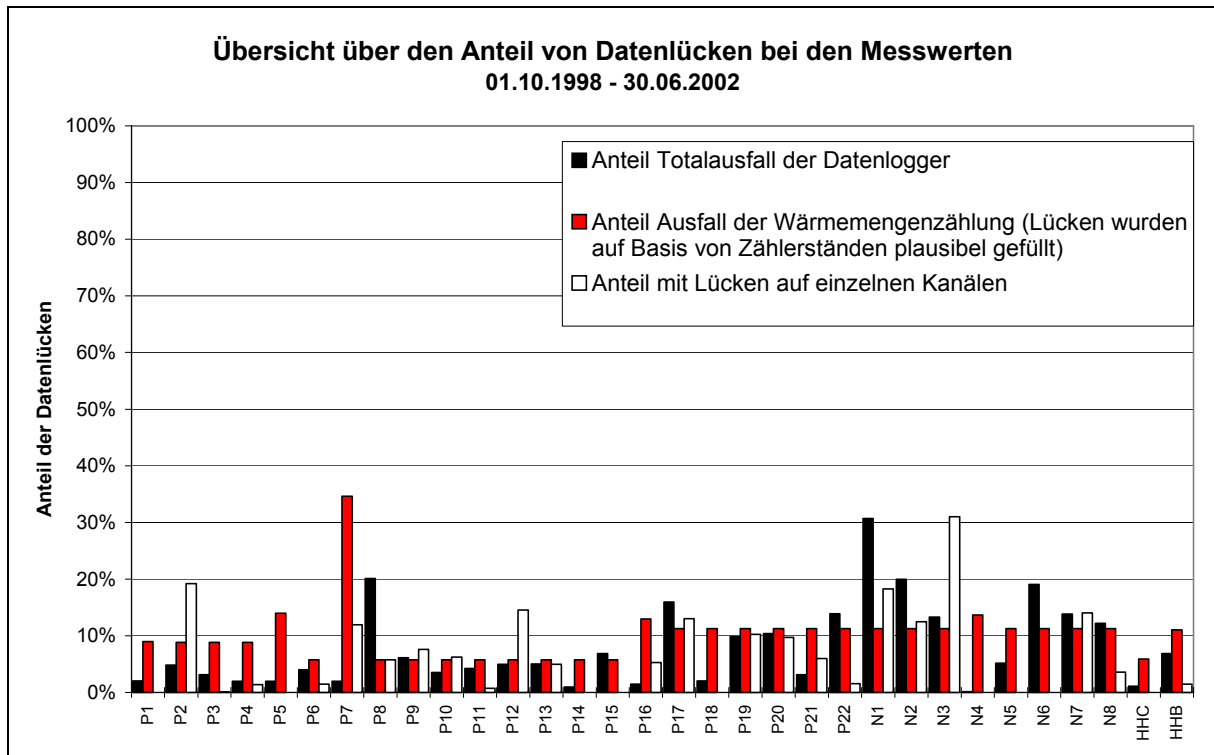
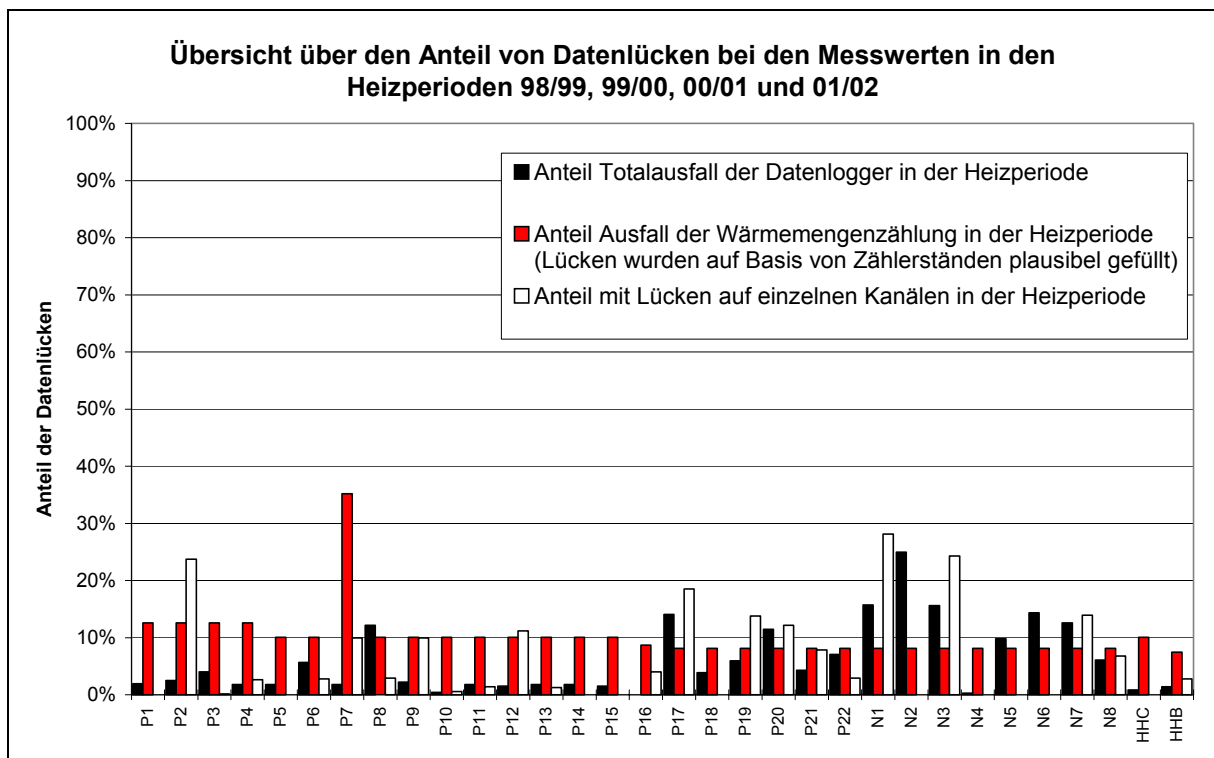


Abbildung 4.1.4-2: Prozentualer Anteil der Datenlücken in den Heizperioden



Die Messunsicherheit hängt stark von der betrachteten Bilanzgröße ab. Während direkt erfasste Größen (z. B. Warmwassermenge) nur geringe Toleranzen aufweisen (nämlich die des jeweiligen Messgerätes), ist die Bilanzierung kleiner Differenzen von Messwerten mit einem großen relativen Fehler behaftet. Diese indirekten Messgrößen werden daher vergleichsweise unsicher erfasst.

Bei einem linearen Zusammenhang zwischen den direkten Messgrößen und der daraus resultierenden indirekten Größe ist die Fehlergrenze die Summe der absoluten Maximalfehler:

$$\Delta F = \pm \left(a * \Delta \bar{x}_i + b * \Delta \bar{y}_i + c * \Delta \bar{z}_i + \dots \right)$$

ΔF	Messunsicherheit der indirekten Größe F
a, b, c, ...	Faktoren der Messgrößen x_i, y_i, z_i, \dots
$\Delta \bar{x}_i, \Delta \bar{y}_i, \Delta \bar{z}_i$	absoluter Maximalfehler der Größe x_i, y_i, z_i, \dots

Wird die indirekte Messgröße durch eine Produktbildung aus den direkten Messgrößen errechnet, so ergibt sich die Messgröße aus der Summe der relativen Maximalfehler der Einzelmessgrößen:

$$\frac{\Delta F}{F} = \pm \left(a * \frac{\Delta \bar{x}_i}{x_i} + b * \frac{\Delta \bar{y}_i}{y_i} + c * \frac{\Delta \bar{z}_i}{z_i} + \dots \right)$$

$\Delta F/F$	relative Messunsicherheit der indirekten Größe F
a, b, c, ...	Faktoren der Messgrößen x_i, y_i, z_i, \dots
$\frac{\Delta \bar{x}_i}{x_i}, \frac{\Delta \bar{y}_i}{y_i}, \frac{\Delta \bar{z}_i}{z_i}, \dots$	relative Messunsicherheit der Größe x_i, y_i, z_i, \dots

Daraus ergeben sich die in Tabelle 4.1.4-2 aufgelisteten maximalen Fehler für die einzelnen Messgrößen.

Tabelle 4.1.4-2: Maximalfehler der einzelnen Messgrößen

direkte Messgrößen	Anzahl	Einheit	Unsicherheit	relativer Maximalfehler	absoluter Maximalfehler
Wärmemengenzähler Klasse C HH	2	kWh	+/- 5 %	5 %	+/-2500 kWh
Wärmemengenzähler Klasse C Einzelhäuser	30	kWh	+/- 5 %	5 %	+/-90 kWh
Raumtemperaturfühler	90	°C	+/- 0,3 K	2 %	+/-0,3 K
Temperaturfühler Lüftungsanlage	18	°C	+/- 1 K	5 %	+/-1 K
Anlegetemperaturfühler Heizhaus	14	°C	+/- 2 K	3 %	+/-2 K
Außentemperaturfühler	2	°C	+/- 0,3 K	3 %	+/-0,3 K
Stromzähler Haushaltsstrom	32	kWh	+/- 3 %	3 %	+/-90 kWh
Stromzähler Lüftungsanlage	4	kWh	+/- 3 %	3 %	+/-8 kWh
Warmwasserzähler	30	l	+/- 5 %	5 %	+/-2000 l
Fensteröffnungsdauer	269	s	+/- 5 s	0,1 %	+/-5 s
indirekte Messgrößen				relativer Maximalfehler	absoluter Maximalfehler
Wärme Warmwasserbereitung				22 %	+/-270 kWh
Heizwärme				28 %	+/-340 kWh
Verluste Nahwärmenetz und Heizhaus				19 %	+/-3900 kWh
Heizleistung Nachheizregister				15 %	+/-30 W
Heizleistung Erdreichwärmetauscher				15 %	+/-40 W
Rückwärmzahl				38 %	+/-0,3 -

Der größte maximale relative Fehler mit 38 % ergibt sich bei der Bestimmung der Rückwärmzahl des Wärmetauschers in der Wärmerückgewinnung. Bei den Heizwärmeverbräuchen ergibt sich ein maximaler relativer Fehler von 28 %. Auf die Wohnfläche bezogen muss mit einem maximalen absoluten Fehler von 3,5 kWh/(m²*a) gerechnet werden. Die Bestimmung der Wärmemenge zur Warmwasserbereitung weist eine maximale Unsicherheit von 22 %, die Bestimmung der Verluste im Nahwärmenetz eine Unsicherheit von 19 % auf. Die Fehler von max. 15 % bei der Bestimmung der Heizleistungen von Nachheizregister und Erdreichwärmetauscher sind für den Fall von neuen Filtern, d.h. nur geringe Abweichungen (max. 20 %) vom Nennvolumenstrom berechnet.

Generell muss der große maximale Fehler bei der Interpretation, besonders bei weniger gravierenden Phänomenen, berücksichtigt werden. Die grundlegenden Aussagen der Untersuchung werden dadurch jedoch nicht in Frage gestellt.

4.2 Messergebnisse

Die folgenden Auswertungen der Messergebnisse dokumentieren den Messzeitraum vom 01. Oktober 1998 bis 30. Juni 2002. Zur Ergebnisdarstellung wird jeweils ein typisches Jahr ausgewählt, der gesamte Messzeitraum ist meist tabellarisch dargestellt. Eine detailliertere Auswertung dieses ersten Messjahres findet sich in [63].

4.2.1 Klimadaten

In Tabelle 4.2.1-1 sind die in der Gartenhofsiedlung Lummerlund gemessenen Klimadaten aufgelistet. Für eine Heizgrenze von 12 °C ergaben sich Gradtage zwischen 2770 Kd/a und

3043 Kd/a. Das langjährige Mittel der Messstation Wiesbaden-Süd liegt bei 3300 Kd/a [126]. Die Gradtagszahl lag somit 8 % bis 12 % unter dem langjährigen Mittel für diesen Standort.

Tabelle 4.2.1-1: Gemessene Gradtage und Heiztag in Wiesbaden

Heizgrenze 12 °C	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jahres- summe	Heizgrad- stunden
Messwerte in der Siedlung Okt. 1998 - Juni 1999														
Gradtage [Kd]				126*	528	566	526	512	411	209	18	0	2770	66,5 kWh/a
Heiztage [d]				11*	30	31	31	28	31	18	2	0	171	
Messwerte in der Siedlung Juli 1999 - Juni 2000														
Gradtage [Kd]	0	0	0	274	464	536	556	453	398	221	55	0	2957	71,0 kWh/a
Heiztage [d]	0	0	0	25	29	31	31	29	31	20	6	0	202	
Messwerte in der Siedlung Juli. 2000 - Juni 2001														
Gradtage [Kd]	0	0	0	229	394	488	552	446	398	327	39	19	2891	69,4 kWh/a
Heiztage [d]	0	0	0	23	30	31	31	28	29	27	4	2	205	
Messwerte in der Siedlung Juli 2001 - Juni 2002														
Gradtage [Kd]	0	0	157	110	466	605	593	401	371	267	75	0	3043	73,0 kWh/a
Heiztage [d]	0	0	17	12	30	31	31	28	28	22	7	0	206	
langjähriges Mittel der Station Wiesbaden-Süd														
Gradtage [Kd]	1	3	63	279	450	557	593	507	448	280	102	17	3300	79,2 kWh/a
Heiztage [d]	0	0	7	27	30	31	31	28	31	23	10	2	220	

* Messdaten liegen erst ab 20.10.98 vor

Im untersuchten Zeitraum von Oktober 1998 bis Juni 2002 fielen somit die Wintermonate milder aus als im langjährigen Mittel des Standorts. Bei der Analyse von Verbrauchswerten ist insbesondere bei Passivhäusern zu berücksichtigen, dass eine Gradtagskorrektur nicht angebracht ist, da der Heizwärmeverbrauch bei diesem Haustyp viel stärker von der solaren Einstrahlung abhängig ist als im Altbau. Will man den Einfluss der Witterung eliminieren, so muss eine Klimakorrektur durchgeführt werden, die die gemessene Globalstrahlung berücksichtigt.

Tabelle 4.2.1-2 zeigt die Globalstrahlungsdaten der Wetterstation Geisenheim (ca. 30 km westlich von Wiesbaden gelegen) des Deutschen Wetterdienstes [65] im langjährigen Mittel und die im Zeitraum Juli 2001 bis Juni 2002 in der Siedlung gemessenen Einstrahlungsdaten. Für das Messjahr 2001/2002 lag die Einstrahlung in horizontaler Richtung beim langjährigen Mittelwert, in Südrichtung jedoch 12 % über dem langjährigen Mittelwert - auch im Winter sind höhere Solareinträge aufgetreten.

Da nicht für den gesamten Messzeitraum Strahlungsdaten vor Ort vorliegen, sind in Tabelle 4.2.1-3 die Messwerte der Station Geisenheim für die entsprechenden Zeiträume aufgeführt. Betrachtet man nur die Heizperiode, so sind die Einstrahlungen in den ersten beiden Heizperioden 3 % bis 6 % höher als im langjährigen Mittel, 2000/2001 wurde das Mittel nicht ganz erreicht (-2 %), im Messjahr 2001/2002 um 23 % überschritten. Große absolute Abweichungen sind aber in keinem der Messjahre festzustellen.

Tabelle 4.2.1-2 Globalstrahlung an der Station Geisenheim und in der Siedlung

	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jahres- summe
Langjähriges Mittel der Globalstrahlung der Station Geisenheim [kWh/m ²]													
Horizontal	151	131	90	49	24	17	22	40	69	115	141	150	999
Süd	81	86	83	59	35	27	32	59	69	87	82	78	778
Nord	54	43	28	18	10	8	10	14	26	38	49	57	355
Globalstrahlung Juli 2001 - Juni 2002 [kWh/m ²]													
Horizontal	168	131	65	53	24	16	19	38	86	110	134	157	1001
Süd	97	95	57	74	50	45	39	65	93	90	78	86	870
Nord	53	41	24	19	10	9	10	13	27	35	47	55	343
Globalstrahlung an Heiztagen Juli 2001 - Juni 2002 [kWh/m ²]													
Horizontal	0	0	38	13	24	16	19	38	76	75	16	0	314
Süd	0	0	33	14	50	45	39	65	82	60	9	0	396
Nord	0	0	14	5	10	9	10	13	24	24	7	0	118

In Tabelle 4.2.1-2 ist auch die Globalstrahlung an Heiztagen für das letzte Messjahr aufgelistet. Diese Werte werden in Kapitel 4.2.3 verwendet um die Energiebilanz der Passivhäuser exemplarisch für das Messjahr 2001/2002 mit den tatsächlichen Klimabedingungen nachzurechnen.

Tabelle 4.2.1-3 Horizontalstrahlung der Station Geisenheim [kWh/m²]

	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jahres- summe
langjähriges Mittel	151	131	90	49	24	17	22	40	69	115	141	150	999
1998/99	134	155	74	38	28	16	23	42	74	120	156	169	1029
1999/00	183	144	109	61	27	18	22	44	68	128	162	196	1161
2000/01	135	161	82	46	22	18	29	46	55	110	179	164	1047
2001/02	177	148	74	58	31	21	24	42	94	128	144	175	1118

Abbildung 4.2.1-1 zeigt die Verteilung des Tagesmittels der Außentemperatur während der Messjahre. Die niedrigste Außentemperatur lag im Tagesmittel bei -9,1 °C, im Maximum wurden 28,3 °C erreicht. Die mittlere Temperatur in diesem Zeitraum lag bei 10 °C (Median). Auffällig sind die beiden Maxima der Verteilung bei ca. 5 °C und bei ca. 16 °C.

Abbildungen 4.2.1-2 und 4.2.1-3 zeigen schließlich die Verteilung der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung im Zeitraum vom 06.12.2000 bis 30.06.2002. Die mittlere Windgeschwindigkeit lag bei 1,35 m/s. Große Geschwindigkeiten über 3 m/s kamen nur selten vor. Bei den Windrichtungen fällt das in Westdeutschland typische ausgeprägte Maximum bei west-südwestlicher Richtung auf. Aus Nord- und Südrichtung, also senkrecht auf die Fassaden der Gebäude, trat der Wind deutlich seltener auf die Häuser. Daraus folgt, dass bei hohen Windgeschwindigkeiten die Auswirkungen auf die Gebäude durch die schräge Anströmung der Fassaden geringer ausfallen, als dies aufgrund des Betrags der Windgeschwindigkeit zu erwarten wäre.

Zusammenfassend kann für das Klima im untersuchten Zeitraum festgestellt werden, dass die Temperaturen höher und die Solarstrahlung nur geringfügig über dem langjährigen Mittel lagen. Extreme Wettersituationen traten nicht auf.

Abbildung 4.2.1-1: Verteilung des Tagesmittels der Außentemperatur im Messzeitraum

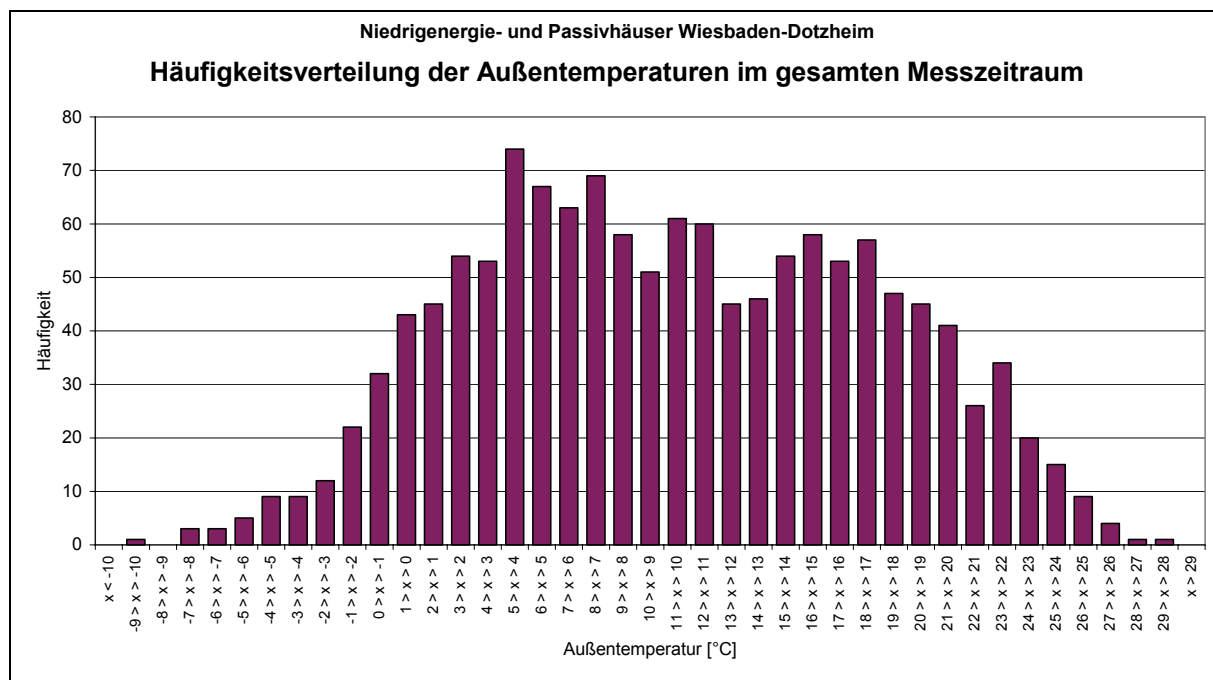
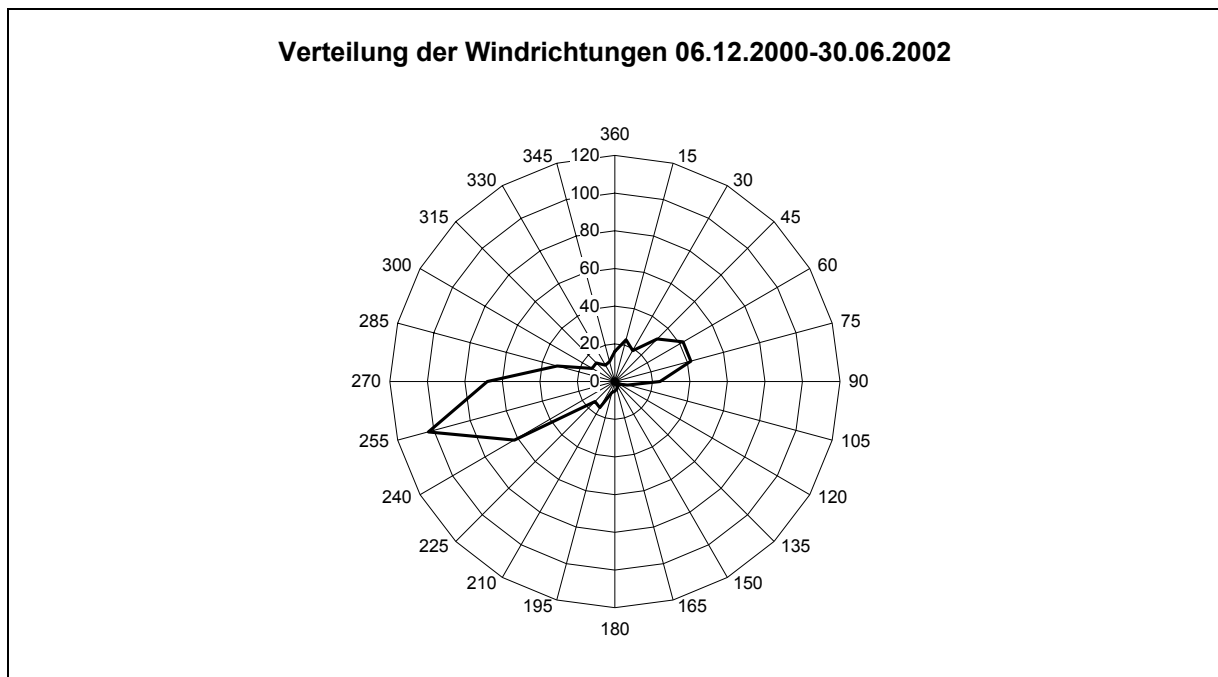


Abbildung 4.2.1-2: Verteilung des Tagesmittels der Windgeschwindigkeit 06.12.2000 – 30.06.2002



Abbildung 4.2.1-3: Verteilung der Windrichtungen im Zeitraum zwischen 06.12.2000 und 30.06.2002



4.2.2 Gesamtwärmeverbrauch

Der in den Heizhäusern mittels Wärmemengenzähler gemessene Gesamt-Wärmeverbrauch für die beiden Hauszeilen beinhaltet den Heizwärmeverbrauch der 15 Häuser, den Energieeinsatz zur Bereitung warmen Brauchwassers, die Verteilverluste der Wärme vom Heizhaus in der Mitte der jeweiligen Hauszeile bis zu den Verbrauchern und die Verluste im Heizhaus inklusive dem zentralen Speicher.

In der reinen Passivhauszeile C lag der Gesamtwärmeverbrauch zwischen 48 MWh/a und 53 MWh/a, in Reihe B mit 7 Passiv- und 8 Niedrigenergiehäusern wurden zwischen 51 MWh/a und 60 MWh/a verbraucht (Tabelle 4.2.2-1). Daraus ergeben sich flächenspezifische Verbräuche von ca. 31 kWh/(m²*a) (Reihe C) bzw. ca. 36 kWh/(m²*a) (Reihe B). So erreichen die Passivhäuser der Reihe C eine Reduktion des Gesamtwärmeverbrauchs um den Faktor 4 gegenüber einem Haus gleicher Kubatur nach Wärmeschutz-Verordnung (WSchV), das inklusive Warmwasserbereitung und Verteilverluste 124,7 kWh/(m²*a) (rechnerisch bestimmt) erreichen würde.

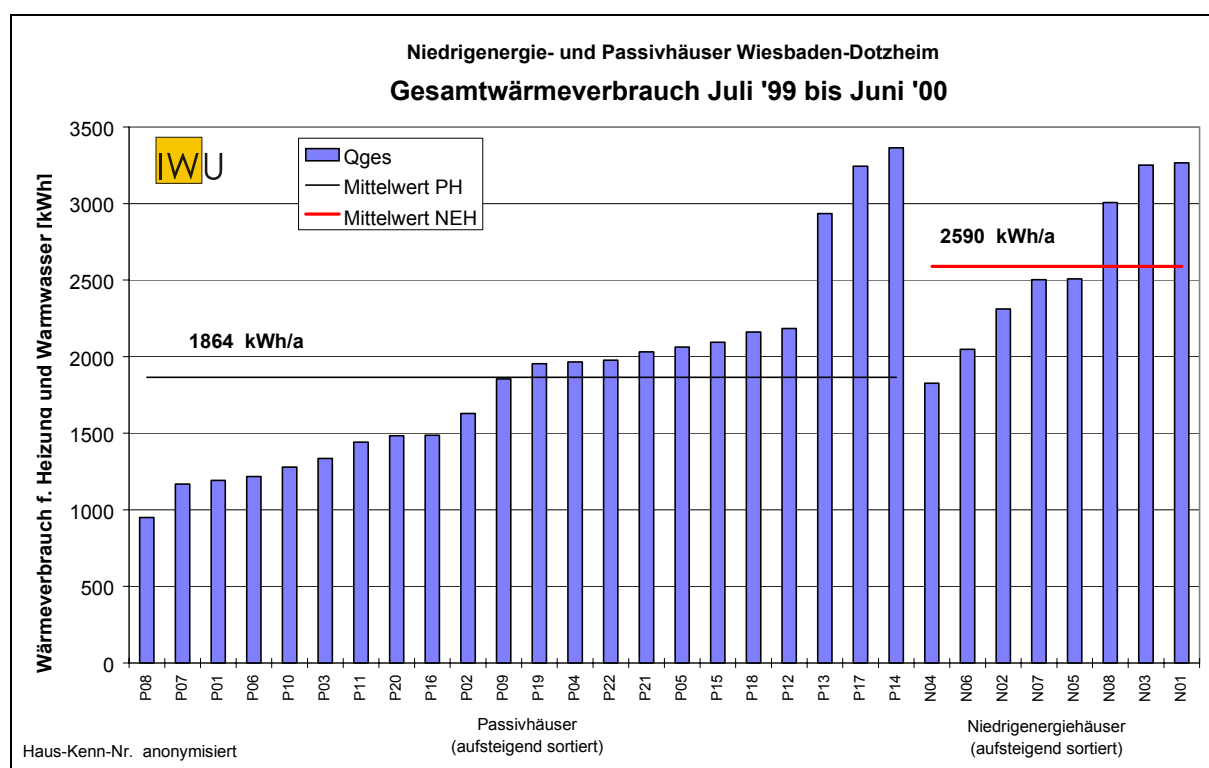
Tabelle 4.2.2-1: Gesamtwärmeverbräuche in den vier Messperioden

	Verbrauch (absolut) [MWh/a]			
	01.10.98-30.09.99	01.07.99-30.6.00	01.07.00-30.6.01	01.07.01-30.6.02
Reihe B (7 Passiv-, 8 Niedrigenergiehäuser)	59,7	53,5	51,1	46,1 *
Reihe C (15 Passivhäuser)	52,9	47,9	47,9	47,8
	Verbrauch flächenspezifisch [kWh/(m ² *a)]			
	01.10.98-30.09.99	01.07.99-30.6.00	01.07.00-30.6.01	01.07.01-30.6.02
Reihe B (7 Passiv-, 8 Niedrigenergiehäuser)	39,9	35,8	34,1	30,8 *
Reihe C (15 Passivhäuser)	34,4	31,1	31,1	31,1

* Datenausfall 13.05.02-30.06.02

Tabelle 4.2.2-1 zeigt auch, dass die Verbräuche anfangs sanken um dann ein gleichmäßiges Niveau zu erreichen. Im zweiten Messjahr sind die Verbrauchswerte um ca. 11 % gesunken. Da die Gradtagszahl jedoch leicht angestiegen ist und die Solarstrahlung im Kernwinter nahezu unverändert blieb, wäre somit ein Anstieg des Verbrauchs zu erwarten gewesen. Die Gründe für diese Entwicklung müssen somit an anderer Stelle gesucht werden. Eine mögliche Erklärung ist neben einem geringen Trockenheizeffekt eine allmähliche Anpassung der Bewohner an die Bedingungen eines Passivhauses.

Abbildung 4.2.2-1: Gesamtwärmeverbrauch in den Passiv- und Niedrigenergiehäusern 1999/2000

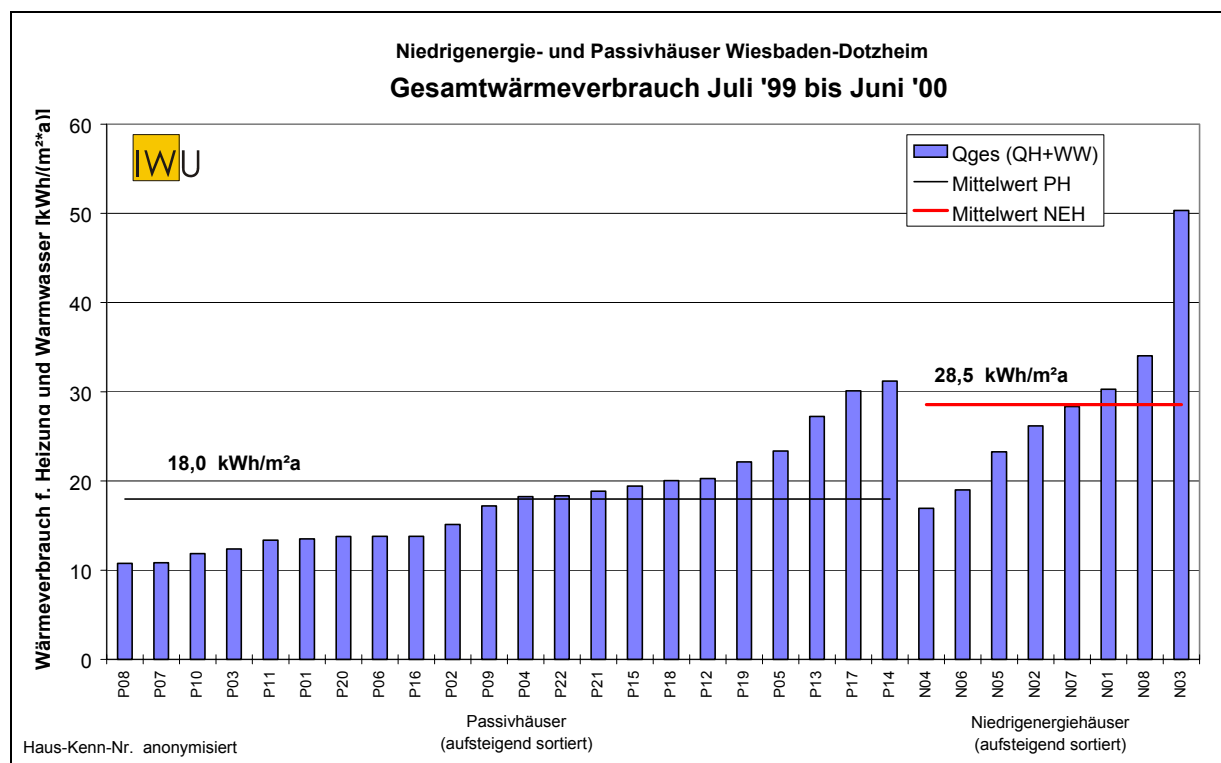


Betrachtet man die Messergebnisse der Wärmemengenzähler der einzelnen Häuser (in Abbildung 4.2.2-1 ist exemplarisch das Messjahr 1999/2000 dargestellt), so streut der gemessene Wärmeverbrauch für Heizung und Warmwasser bei den Passivhäusern zwischen

950 kWh/a und 3400 kWh/a und bei den Niedrigenergiehäusern zwischen 1800 kWh/a und 3300 kWh/a. Die niedrigen Verbräuche der Niedrigenergiehäuser resultieren zum Teil aus der Tatsache, dass die betrachteten Häuser einen deutlich besseren Dämmstandard aufweisen als übliche Gebäude dieser Bauart. Zu beachten ist weiterhin die kleine statistische Gesamtheit von 8 Niedrigenergiehäusern gegenüber 22 untersuchten Passivhäusern. Dies kann die gemessenen Verbräuche jedoch nicht erklären. Daher folgt im Kapitel 4.2.3 nochmals eine genauere Betrachtung dieses Sachverhaltes.

Bei den Mittelwerten liegen die Passivhäuser mit 1860 kWh/a um 28 % unter dem Gesamtwärmeverbrauch der Niedrigenergiehäuser (2590 kWh/a). Die Verteilverluste außerhalb der Gebäude und die Nutzung eines Teils dieser Verluste zur Raumheizung sind in diesen Zahlen nicht enthalten.

Abbildung 4.2.2-2: Spezifischer Gesamtwärmeverbrauch in den Passiv- und Niedrigenergiehäusern 1999/2000



Bei den flächenspezifischen Verbräuchen bildet sich der Unterschied zwischen Passiv- und Niedrigenergiehäusern deutlicher heraus. Durch die größere mittlere Wohnfläche erreichen die Passivhäuser mit einem mittleren Gesamtwärmeverbrauch von 18,0 kWh/(m²*a) den üblicher Weise allein für die Warmwasserbereitung (17 kWh/(m²*a)) erforderlichen Energieeinsatz [69]. Die Niedrigenergiehäuser liegen jedoch bei einem Mehrverbrauch von ca. 36 % immer noch auf einem hervorragenden Niveau (28,5 kWh/(m²*a)).

Diese außergewöhnlich niedrigen Verbräuche zeigen, dass mit dem Passivhauskonzept tatsächlich auch bei einer größeren Anzahl von Gebäuden im Mittel eine deutliche Reduktion des Energieverbrauchs erreicht werden kann.

4.2.3 Raumheizung

Die Heizwärmeverbräuche werden aus den Wärmemengenzähler-Messungen (Gesamtwärme) durch Abzug des Wärmeanteils zur Warmwasserbereitung berechnet. Aus diesem Grund ist der Heizwärmeverbrauch eine Größe, die nur indirekt bestimmt werden kann. Da sich bei indirekten Messgrößen die Fehler der darin einfließenden Größen addieren und somit eine große Unsicherheit über das genaue Ergebnis besteht, wurden Zusatzmessungen zur Überprüfung des Wärmeanteils zur Warmwasserbereitung in Auftrag gegeben. Die Resultate sind in Kapitel 4.2.6.1 ausgewertet und im Anhang dokumentiert. Für die Berechnung des Energieverbrauchs zur Raumheizung ergibt sich danach insgesamt eine Unsicherheit von maximal ca. 15,6 % oder $\pm 195 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$.

Bei der Berechnung der Heizwärmeverbräuche müssen auch die Heizbeiträge der Nahwärmelösungen berücksichtigt werden. Diese sind in der thermischen Hülle unter dem Gebäude verlegt. Obwohl gut isoliert, tragen sie im Mittel mit $4,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ [61] bedeutend zur Beheizung bei. Bei den Niedrigenergiehäusern wurde der gleiche Heizbeitrag durch die unter dem EG-Fußboden verlegten Heizleitungen angesetzt.

Tabelle 4.2.3-1 zeigt die Entwicklung der Heizwärmeverbräuche im Laufe der Messjahre. Auch hier zeigt sich, wie bereits bei dem Gesamtwärmeverbrauch, eine Reduktion nach den ersten beiden Jahren, in denen die Häuser bewohnt waren (Einzug Sommer 1997).

Tabelle 4.2.3-1: Mittlerer Heizwärmeverbrauch der Passiv- und Niedrigenergiehäuser in den einzelnen Messperioden

	Verbrauch (absolut) [kWh/a]			
	01.10.98-30.09.99	01.07.99-30.6.00	01.07.00-30.6.01	01.07.01-30.6.02
Passivhäuser	1366	1261	1084	1067
Niedrigenergiehäuser	2226	2133	1982	1854
	Verbrauch flächenspezifisch [kWh/(m ² ·a)]			
	01.10.98-30.09.99	01.07.99-30.6.00	01.07.00-30.6.01	01.07.01-30.6.02
Passivhäuser	13,3	12,2	10,5	10,4
Niedrigenergiehäuser	24,4	23,9	22,7	21,0

Passivhäuser

Der Wärmeanteil, der zur Beheizung der Häuser notwendig ist, schwankt bei den 22 Passivhäusern zwischen 450 kWh/a und 2400 kWh/a bzw. zwischen $4,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ und $26 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Hierbei sind sowohl die gemessenen Heizwärmeverbräuche als auch die Wärmeabgabe der Verteilleitungen unter den Gebäuden berücksichtigt.

Mit einem Mittelwert von $12,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ erreichen die Passivhäuser auch unter Berücksichtigung des vorhandenen Fehlers bei der Bestimmung der Heizwärmeverbräuche den Passivhausstandard. Die Schwankungsbreite liegt zwischen -54 % und +114 % um den Mittelwert, was einen Faktor 4 zwischen größtem und kleinstem Verbrauchswert bedeutet. Somit beeinflussen die Bewohner auch bei identischen Gebäuden den Energieverbrauch in gleichem Maße wie bei konventionellen Häusern oder im Altbau, wo ebenfalls Schwankungsbreiten um den Faktor vier auftreten [66]. Das absolute Niveau des Verbrauches

liegt jedoch im Bereich des projektierten Wertes von $12,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (berechnet mit LEG_PH – Jahresverfahren) bei einem Standardklima (langjähriges Mittel der Station Geisenheim) [61]. Im folgenden Abschnitt wird die Berechnung des Heizwärmebedarfs klimabereinigt für die Passivhäuser durchgeführt.

Abbildung 4.2.3-2: Statistische Kennwerte des Heizwärmeverbrauchs der Passivhäuser

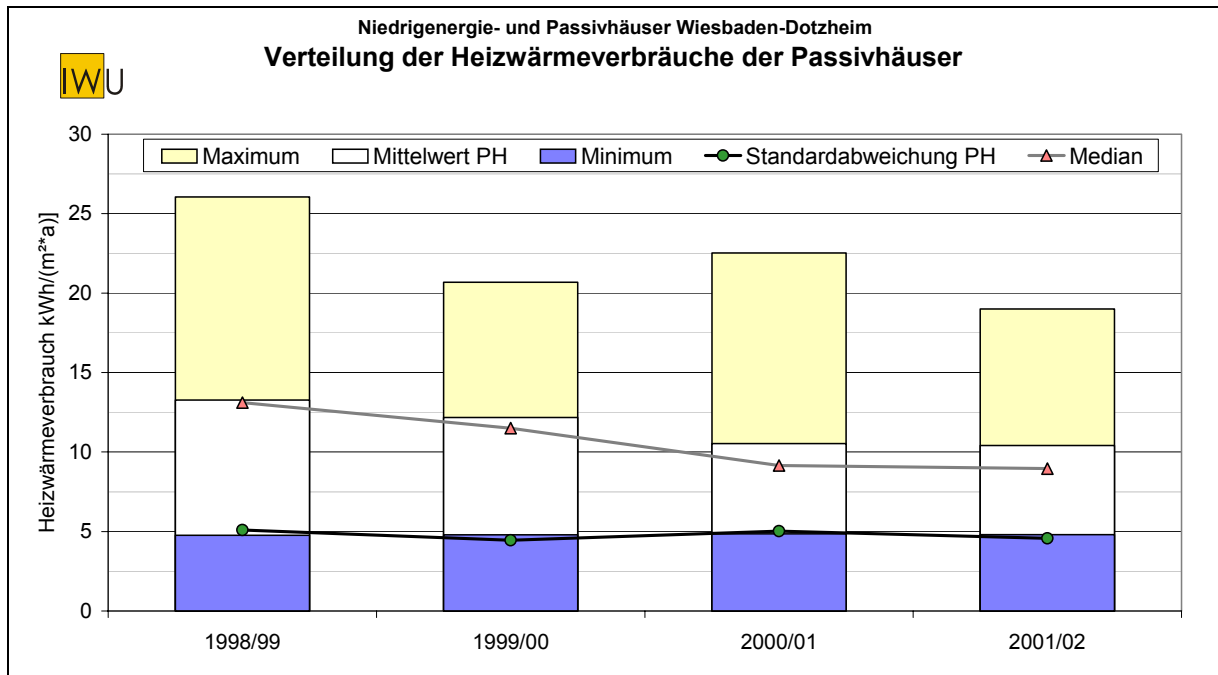


Abbildung 4.2.3-2 zeigt die Minima und Maxima der Verbräuche. Das Minimum ist in allen Messjahren auf die Wärmeabgabe der Heizleitungen unter den Häusern beschränkt. Die Maxima fallen unterschiedlich hoch aus, extreme Ausreißer gibt es aber nicht (siehe auch beispielhaft Abbildung 4.2.3-4).

Niedrigenergiehäuser

Die Niedrigenergiehäuser erreichen Verbräuche zwischen $600 \text{ kWh}/\text{a}$ und $3200 \text{ kWh}/\text{a}$. Die spezifischen Werte liegen zwischen $5,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ und $50 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Die Schwankungsbreite der Verbrauchsergebnisse beträgt somit Faktor 9. Der Mittelwert der acht Gebäude liegt über die vier Messjahre mit $23,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ um ca. 60 % unter dem berechneten Heizwärmebedarf von $55 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (ohne Berücksichtigung eines NEHs mit $3,80 \text{ m}$ Breite, für das keine Pläne vorliegen) - für Niedrigenergiehäuser mit Abluftanlage ungewöhnlich niedrig.

Die Verteilung der Heizwärmeverbräuche schwankt bei den Niedrigenergiehäusern stärker als bei den Passivhäusern (Abbildung 4.2.3-3). Bei der Interpretation muss beachtet werden, dass nur 8 Niedrigenergiehäuser in die Messungen eingeschlossen waren und in einem $3,80 \text{ m}$ breiten Endhaus mit 64 m^2 Energiebezugsfläche besonders hohe spezifische Transmissionswärmeverluste auftraten, was zu der größeren Schwankungsbreite der Verbrauchswerte führte.

Abbildung 4.2.3-3: Statistische Kennwerte des Heizwärmeverbrauchs der Niedrigenergiehäuser

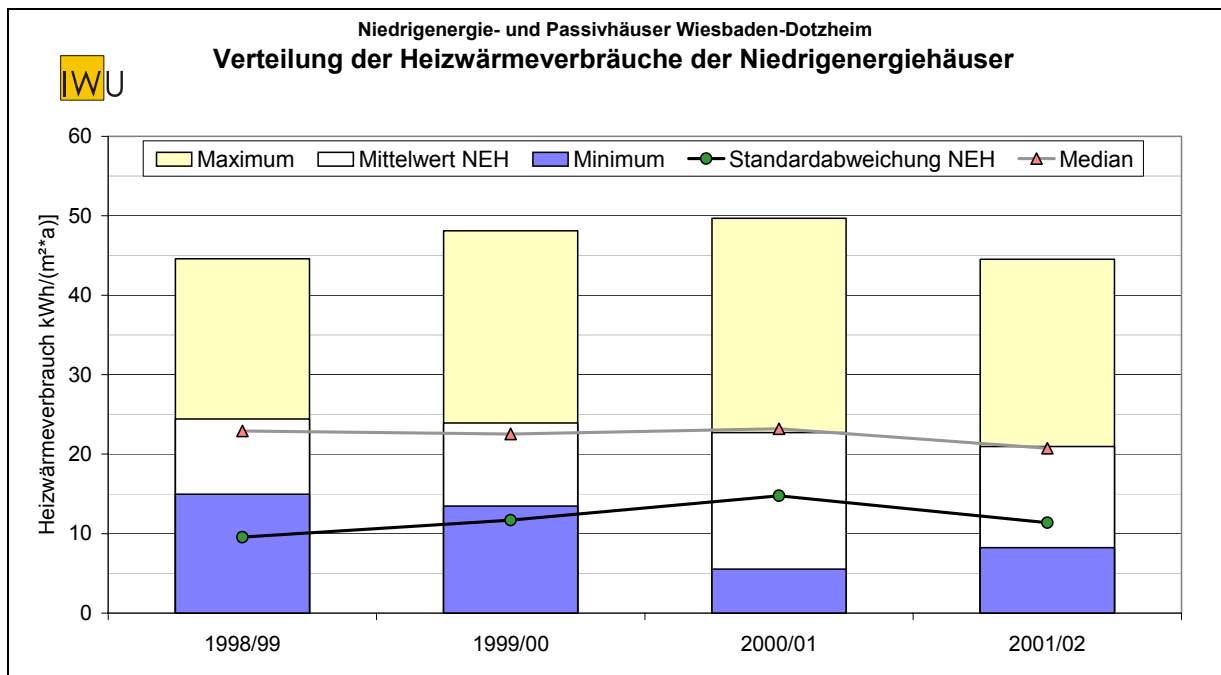
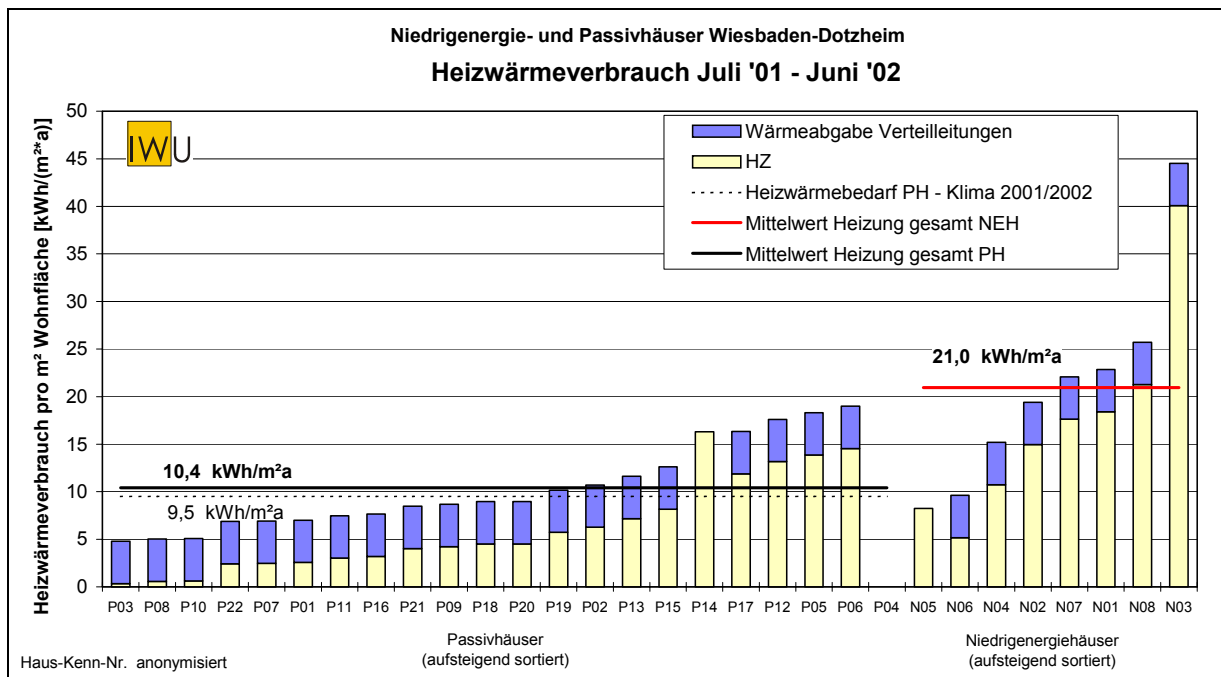


Abbildung 4.2.3-4: Spezifischer Heizwärmeverbrauch der einzelnen Häuser im Messjahr 1999/2000



Heizwärmebedarf unter Berücksichtigung des gemessenen Klimas

In den betrachteten vier Jahren lagen die gemessenen Heizgradstunden zwischen 66 und 73 kWh/a, das langjährige Mittel der Station Geisenheim, die zur Berechnung der Energiebilanz zugrunde gelegt wurde, liegt jedoch bei 79,2 kWh/a. Die Winter waren somit milder, was sich auch auf den Heizwärmebedarf auswirkt. Um eine Klimakorrektur für den tatsächlichen Heizwärmebedarf durchführen zu können, wurde auch die jeweilige Solarstrahlung des Jahres berücksichtigt.

Für das Messjahr 2001/2002 wurden die gemessenen Klimaparameter in die Energiebilanz eingefügt und somit der tatsächliche Heizwärmebedarf für das Messjahr bestimmt.

Tabelle 4.2.3-2: Heizwärmebedarf für die Passiv- und Niedrigenergiehäuser für das Standardklima und mit dem gemessenen Klima 2001/02

Haustyp	Heizwärmebedarf Passivhäuser [kWh/(m ² *a)]		Heizwärmebedarf Niedrigenergie- häuser [kWh/(m ² *a)]	
	Standardklima	Klima 2001/02	Standardklima	Klima 2001/02
6m Mittelhaus	11,7	8,4	50,1	43,3
6m Endhaus	15,0	12,2	55,3	48,0
5m Endhaus	17,5	13,2		
5m Mittelhaus	13,4	9,7	58,6	50,7
flächengewichteter Mittelwert	12,8	9,5	55,0	47,6

Tabelle 4.2.3-2 zeigt, dass bei den Passivhäusern der Heizwärmebedarf im Messjahr 2001/02 nur 9,5 kWh/(m²*a) betragen hat, gegenüber 12,8 kWh/(m²*a) beim Standardklima (entspricht - 26 %). Somit liegen der gemessene Verbrauch und der berechnete Heizwärmebedarf sehr nahe beieinander (siehe Abbildung 4.2.2-5).

Bei den Niedrigenergiehäusern ergibt sich ein Minderbedarf von 13 %, der die geringen gemessenen Verbräuche nicht erklären kann. In Kapitel 6.3.1.2 folgt eine Betrachtung der Gründe für den deutlichen Minderverbrauch.

4.2.4 Heizleistungen

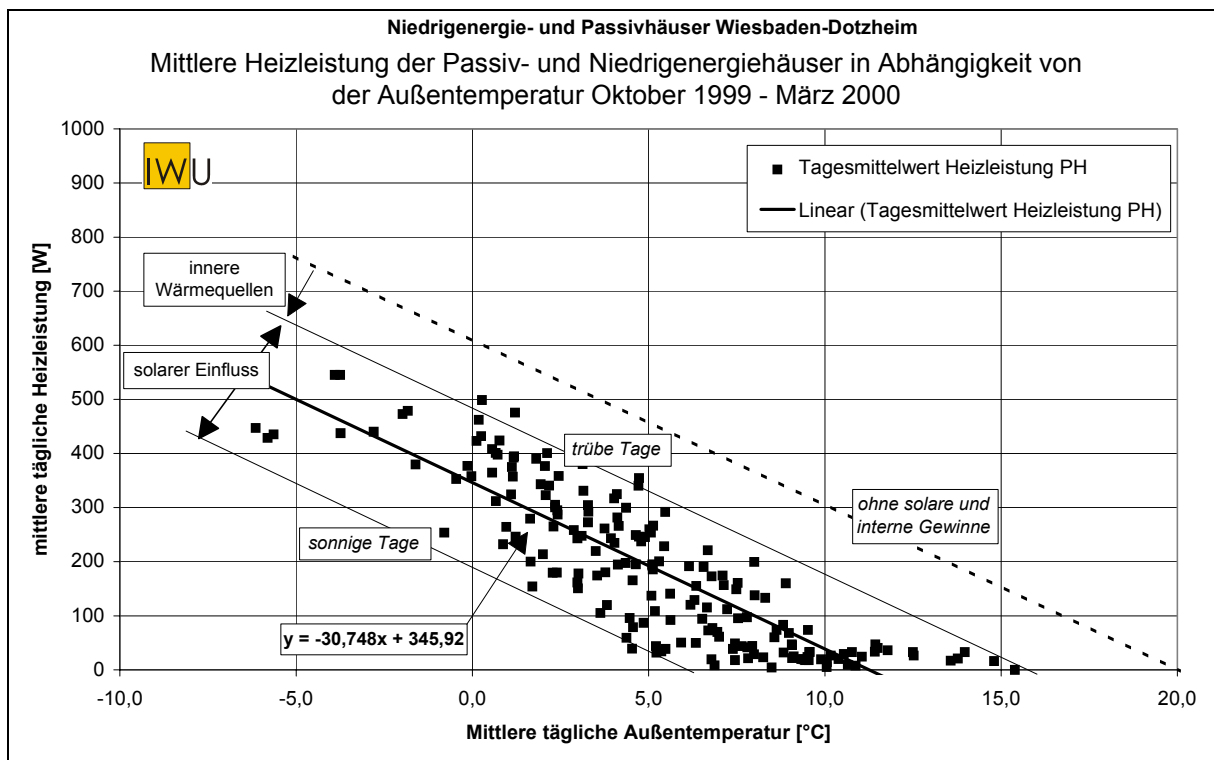
Betrachtet man die Tagesmittel der Heizleistung der Passivhäuser in Abhängigkeit von der Außentemperatur, so erkennt man in der Abbildung 4.2.4-1, dass die Heizgrenztemperatur für das Messjahr 1999/2000 bei ca. 11 °C liegt. Verschiebt man die Ausgleichsgerade so, dass sie die Außentemperatur bei 20 °C schneidet, so erhält man die Heizkurve für den hypothetischen Fall, dass keine internen und solaren Gewinne vorliegen. Zeichnet man zusätzlich die Grenzen für die Streuung ein, so ergibt sich folgendes Bild:

Der Einfluss der (konstant angenommenen) inneren Wärmequellen liegt bei ca. 150 W, der der Sonne bei maximal 300 W im Tagesmittel. Dieses Ergebnis belegt, dass eine hohe interne Wärmelast als Grund für die niedrigen Verbrauchswerte ausscheidet. Der hier abgeschätzte Wert von 1,5 W/m² ist (insbesondere verglichen mit dem Wert der Energieeinsparverordnung von 5 W/m²) sehr niedrig.

Die Heizkurve, die durch die Ausgleichsgerade der Messwerte bei den Passivhäusern repräsentiert wird, liegt von der Heizgrenztemperatur dann bis ca. 0 °C sehr gut in der Punktwolke der Messwerte. Durch die bei kalten, oft klaren Tagen, vorhandene Sonnenein-

strahlung wird der Anstieg der Heizleistung gebremst. Die maximale mittlere Heizleistung der 22 Passivhäuser lag bei 5,3 W/m² pro Haus. Für die übrigen Messjahre zeigt Tabelle 4.2.4-1 die Ergebnisse. Die Steigung der Ausgleichsgeraden, die den differentiellen Wärmeleitwert der Gebäude widerspiegelt, liegt mit ca. 30 W/K leicht unter dem berechneten Wert. Die maximale Heizlast in einem Einzelhaus lag mit 1950 W (18,1 W/m²) im gesamten Messzeitraum zwar über dem Grenzwert für von 10 W/m², dieser ist jedoch nur bei Passivhäusern relevant, die ausschließlich über die Zuluft beheizt werden. Im Messjahr 2000/2001 fallen die Heizleistungen aufgrund der milden Witterung sehr niedrig aus, so dass sich davon abgeleitete Kennwerte auch deutlich gegenüber den anderen Messjahren verschieben.

Abbildung 4.2.4-1: Tagesmittel der Heizleistung in Abhängigkeit von der Außentemperatur in der Heizperiode 1999/2000



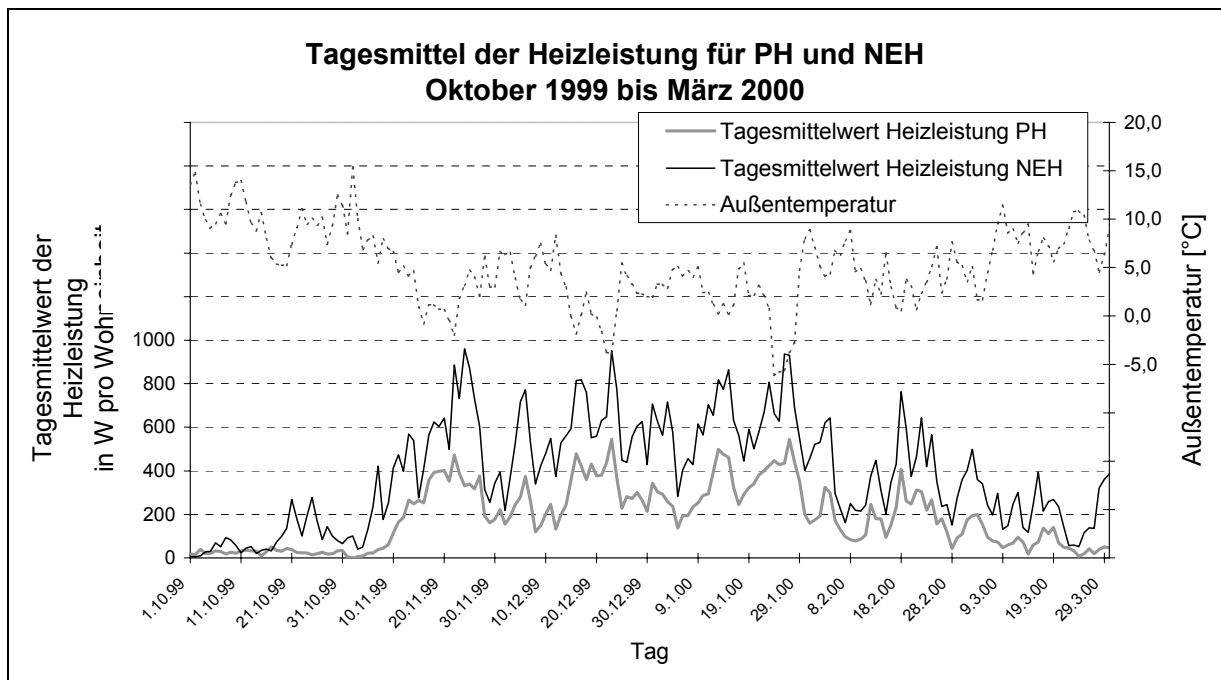
Bei den Niedrigenergiehäusern liegt die Heizgrenztemperatur bei ca. 13 °C. Die Steigung der Heizkurve fällt bei diesem Haustyp steiler aus, da er keine Wärmerückgewinnung besitzt und die Verglasung nicht die Güte derjenigen der Passivhausfenster erreicht. Der differentielle Wärmeleitwert liegt daher bei ca. 46 W/K. Das maximale Tagesmittel der Heizleistung lag im gesamten Messzeitraum bei 12,0 W/m², die maximale Einzelheizlast bei 2750 W (entspricht 31 W/m²).

Tabelle 4.2.4-1: Kennwerte der Heizleistungen in den Niedrigenergie- und Passivhäusern

	Kennwerte Heizleistung Passivhäuser			
	01.10.98-30.09.99	01.07.99-30.6.00	01.07.00-30.6.01	01.07.01-30.6.02
Heizgrenztemperatur [°C]	10,6	11,3	13,2	9,6
Differenzieller Wärmeleitwert [W/K]	34,0	30,7	19,4	29,7
mittlere Heizlast in der Heizperiode [W/m ²]	2,1	1,8	1,4	1,4
max. mittlere Heizlast [W/m ²]	7,1	5,3	4,2	5,9
max. Einzelheizlast [W]	1947	1632	1750	1750
	Kennwerte Heizleistung Niedrigenergiehäuser			
	01.10.98-30.09.99	01.07.99-30.6.00	01.07.00-30.6.01	01.07.01-30.6.02
Heizgrenztemperatur [°C]	13,6	13,1	15,9	11,8
Differenzieller Wärmeleitwert [W/K]	45,1	48,7	34,3	48,4
mittlere Heizlast in der Heizperiode [W/m ²]	4,4	4,1	3,6	3,5
max. mittlere Heizlast [W/m ²]	12,0	10,1	11,1	11,9
max. Einzelheizlast [W]	2751	1580	1722	1647

Abbildung 4.2.4-2 zeigt die Tagesmittel der Heizleistungen der Niedrigenergie- und Passivhäuser in der Heizperiode 1999/2000. Deutlich ist bei beiden Haustypen zu erkennen, dass die Heizleistung stark mit der Außentemperatur korreliert. Während die Niedrigenergiehäuser schon im Oktober nennenswert Heizwärme verbrauchen, ist die Heizleistung der Passivhäuser bis Anfang November vernachlässigbar. Allgemein liegt für den gesamten Messzeitraum die Heizlast der Passivhäuser etwa 40 bis 50 % niedriger als die der Niedrigenergiehäuser.

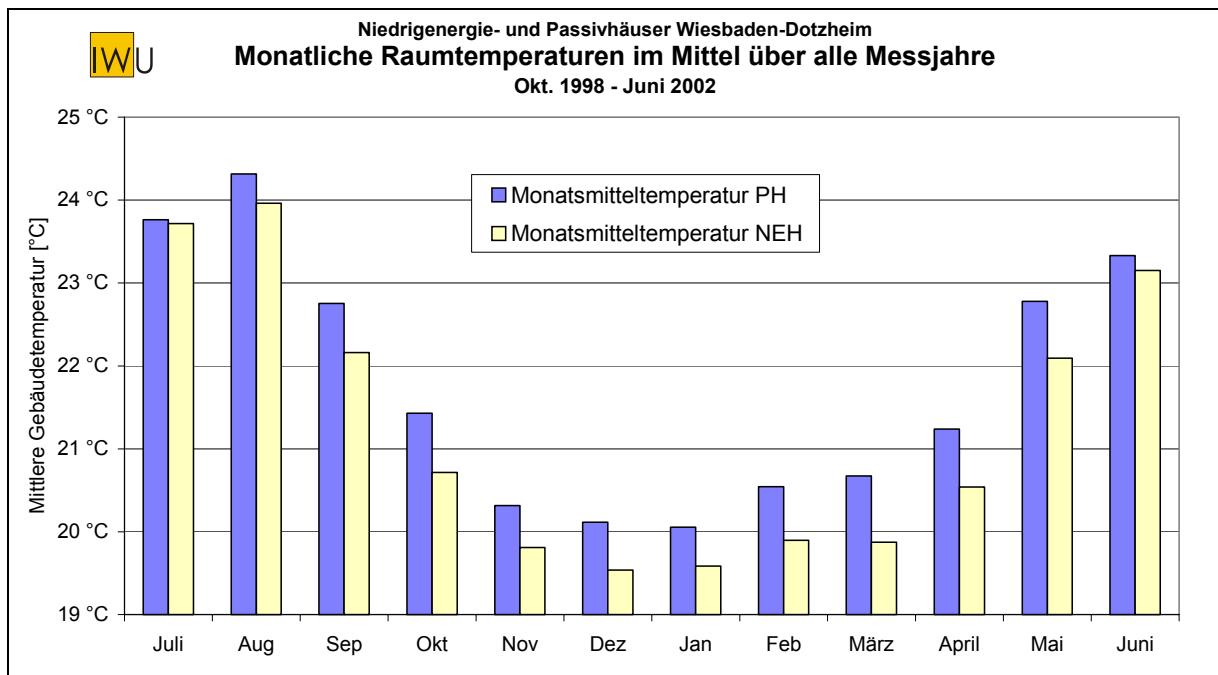
Abbildung 4.2.4-2: Tagesmittel der Heizleistung und Außentemperatur im Zeitverlauf



4.2.5 Raumtemperaturen

In Abbildung 4.2.5-1 ist die Entwicklung der mittleren Raumtemperatur von Niedrigenergie- und Passivhäusern im Jahresverlauf dargestellt. Die Gebäudetemperatur wurde durch eine Mittelwertbildung der drei Fühler in Wohnzimmer (Erdgeschoss), Nordzimmer im Obergeschoss und ein Südzimmer im Obergeschoss berechnet. Das Wohnzimmer wurde wegen seiner großen Fläche doppelt gewertet. In Abbildung 4.2.5-1 wurden die Monatsmittelwerte der jeweiligen Messjahre zu einem gemeinsamen Monatsmittelwert zusammengezogen.

Abbildung 4.2.5-1: Jahresverlauf der mittleren Raumlufthtemperaturen



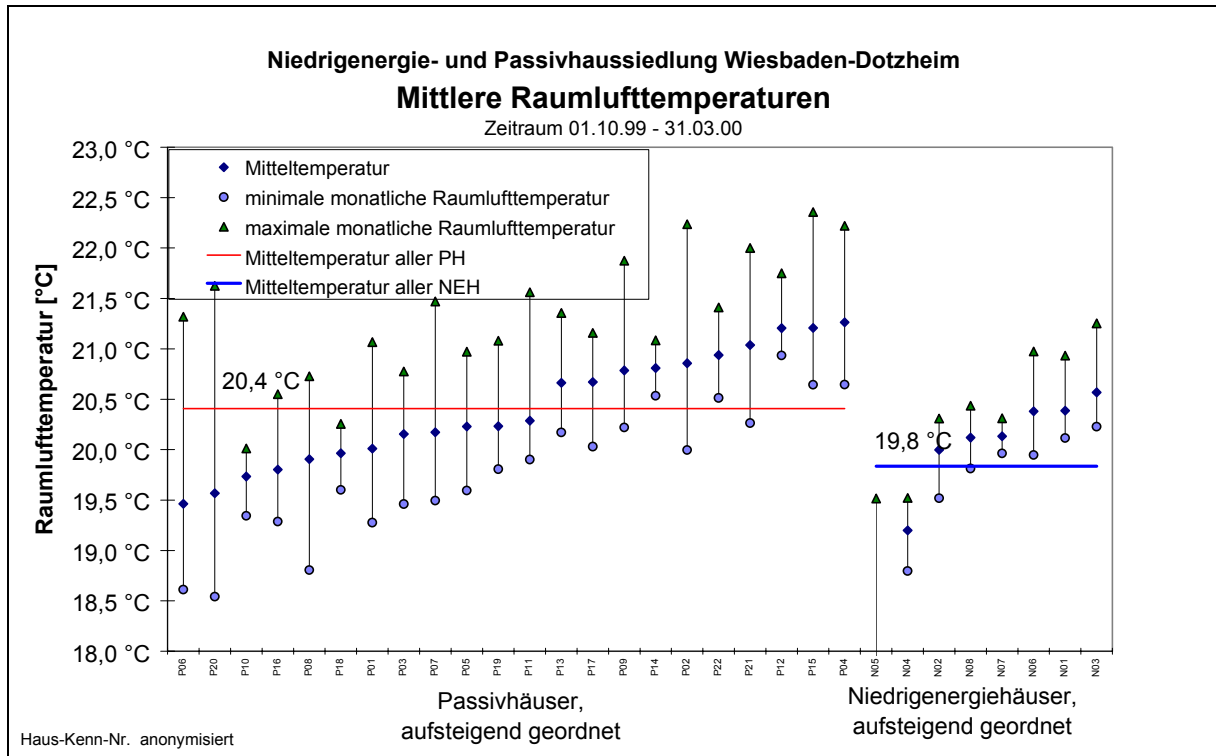
Bei den Passivhäusern schwanken die Temperaturen zwischen 24,3 °C im August und 20,1 °C in Dezember und Januar. Im Winter liegen in allen anderen Monaten die Temperaturen der Passivhäuser über 20 °C. Besonders im Oktober und Februar bis April ergeben sich in den Passivhäusern deutlich höhere Raumlufthtemperaturen als in den Niedrigenergiehäusern, die in diesen Monaten teilweise eine Heizungsunterstützung benötigen. Die Mitteltemperatur liegt bei den Niedrigenergiehäusern in den Monaten November bis März leicht unter 20 °C, jedoch immer über 19 °C. Die DIN V 4108-6 geht von einer mittleren Gebäudetemperatur von 18,3 °C (inklusive Nachtabenkung) während der Heizzeit aus [67]. Somit ist der thermische Komfort sowohl in den Niedrigenergie- als auch in den Passivhäusern als gut zu bezeichnen. Bei den Passivhäusern wird mit einer Mitteltemperatur von 20,3 °C in der Zeit von November bis Ende März bei deutlich geringerem Heizwärmeverbrauch eine höhere Raumtemperatur erreicht. Bei den Niedrigenergiehäusern liegt dieser Mittelwert immer noch bei 19,7°C.

Abbildung 4.2.5-2 zeigt die Mittel-, minimalen und maximalen Monatstemperaturen der einzelnen Häuser von Oktober bis Ende März für das Messjahr 1999/2000. Die Mitteltemperaturen der Häuser schwanken zwischen 19,5 °C und 21,3 °C bei den Passiv-, und zwischen 17,9 °C und 20,6 °C bei den Niedrigenergiehäusern. Auch wenn man den Ausreißer mit extrem niedrigen Raumtemperaturen außer Acht lässt, liegt das Temperaturniveau bei den Niedrigenergiehäusern niedriger als bei den Passivhäusern. Die Bewohner des Hauses mit 17,9 °C Mitteltemperatur gaben im übrigen bei der Befragung an, dass sie mit den Temperaturen in ihrem Haus zufrieden sind.

Abbildung 4.2.5-3 zeigt die Temperaturen im Dezember 2001, dem kältesten Monat des gesamten Messzeitraums. Bei Schwankungen zwischen 18,2 °C und 22,5 °C ergibt sich für die

Passivhäuser eine mittlere Temperatur von 20,2 °C. Die Niedrigenergiehäuser schwanken zwischen 17,1 °C und 20,8 °C (Mittelwert 19,5 °C).

Abbildung 4.2.5-2: Mittlere, minimale und maximale monatliche Temperaturen der einzelnen Häuser im Winterhalbjahr



Betrachtet man den kältesten Tag des Messzeitraumes (05.01.2002), bei dem die mittlere Außentemperatur bei -9,1 °C lag, ergibt sich ein ähnliches Bild (Abbildung 4.2.5-4). Bei den Passivhäusern liegt der Mittelwert der gemessenen Temperaturen bei 20,3 °C. Die Niedrigenergiehäuser erreichen mit 19,7 °C eine etwas höhere Temperatur als im Mittel des Dezembers 2001 (kältester Monat). Die Streuung der Einzelwerte liegt ebenfalls im gleichen Bereich. Somit führen auch extreme Klimasituationen nicht dazu, dass es in den Häusern unbehaglich geworden wäre.

Abbildung 4.2.5-3: mittlere Raumlufttemperaturen der einzelnen Häuser im Dezember 2001

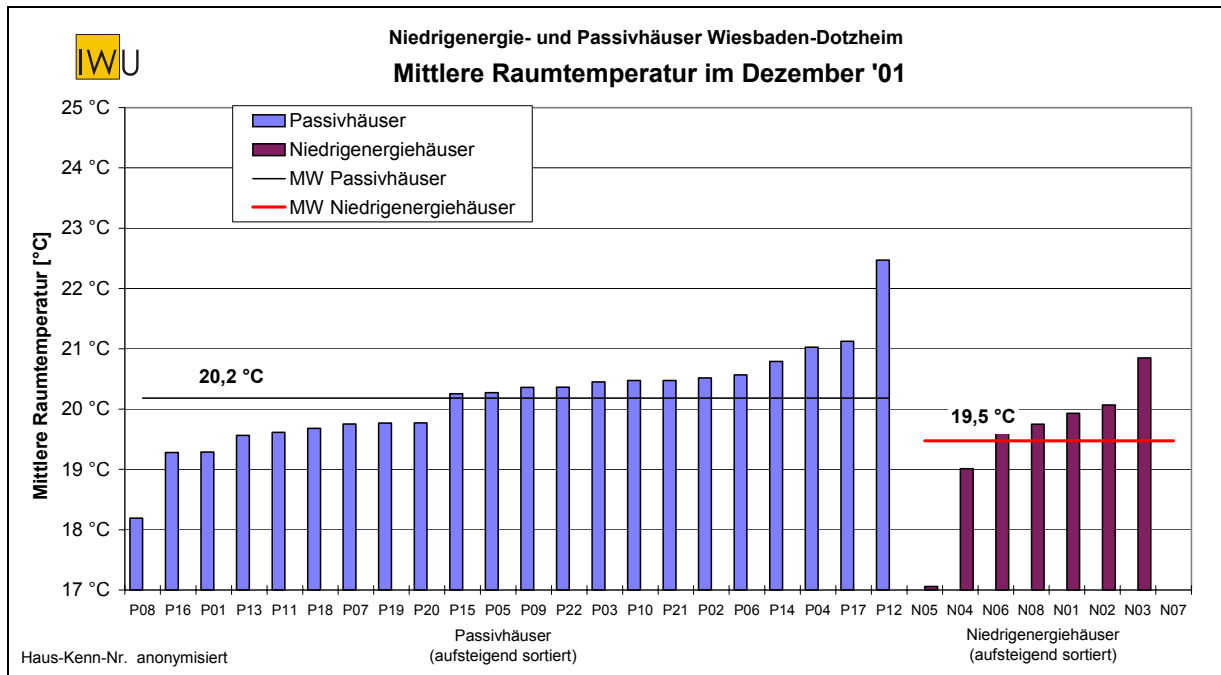
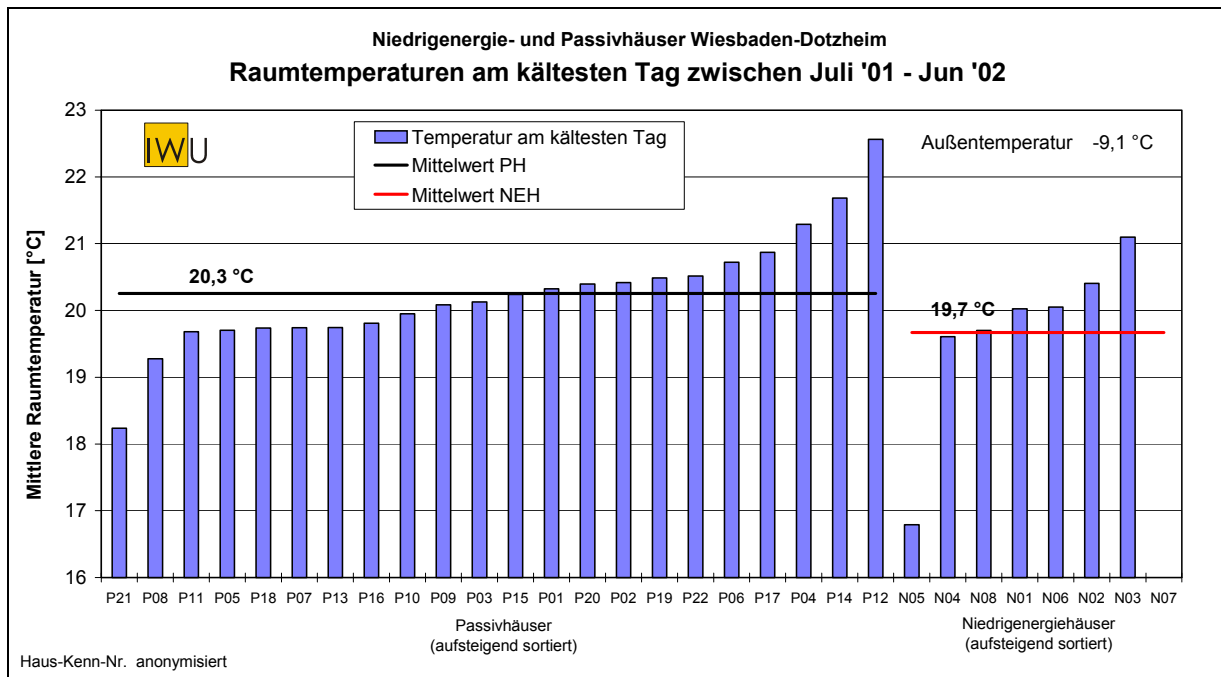


Abbildung 4.2.5-4: Raumlufttemperaturen am kältesten Tag (05.01.02)



Die Messergebnisse im Juli 1999 (Abbildung 4.2.5-5), der der wärmste Monat des Auswertzeitraumes war, schwanken bei den Passivhäusern zwischen 22,9 °C und 25,6 °C. Bei einer Monatsmitteltemperatur außen von 21,5 °C wurden mittlere Raumtemperaturen von 24,3 °C gemessen. Die starke Streuung der Ergebnisse in identischen Häusern belegt, wie sehr das Verhalten der Bewohner und die Möglichkeiten der außen liegenden Verschattung der Fenster die Raumtemperaturen im Sommer beeinflussen. Von Seiten des Bauträgers waren keine äußeren Verschattungsmöglichkeiten vorgesehen worden, die Erwerber der Häuser haben jedoch in unterschiedlicher Weise selbst eine Verschattung nachgerüstet. In Kapitel 4.2.12 wird noch auf den Einfluss des Lüftungsverhaltens auf die sommerlichen Temperaturen eingegangen.

Bei den Niedrigenergiehäusern liegen die Raumtemperaturen zwischen 23,5 °C und 25,1 °C. Der Mittelwert der sieben ausgewerteten Häuser erreicht mit 24,2 °C fast die Höhe desjenigen in den Passivhäusern. Die Schwankungsbreite zwischen niedrigster und höchster Temperatur ist dabei etwas niedriger als bei den Passivhäusern.

Am wärmsten Tag des Auswertzeitraumes (18.06.2002), an dem das Tagesmittel der Außentemperatur 28,3 °C betrug, war die Verteilung der Einzelwerte der Passivhäuser ähnlich wie im Juli 1999, der Mittelwert aller Gebäude lag mit 25,7 °C um 2,6 °C unter der Außentemperatur (Abbildung 4.2.5-6). Die Messwerte der Niedrigenergiehäuser lagen zwischen 24,9 °C und 26,9 °C. Somit war die Streuung geringer, als im Juli 1999. Der Mittelwert lag leicht unter dem der Passivhäuser. Das Temperaturniveau ist sowohl bei den Niedrigenergie- als auch bei den Passivhäusern als durchaus gut zu bezeichnen.

Abbildung 4.2.5-5: Mittlere Raumlufttemperaturen der einzelnen Häuser im Juli 1999

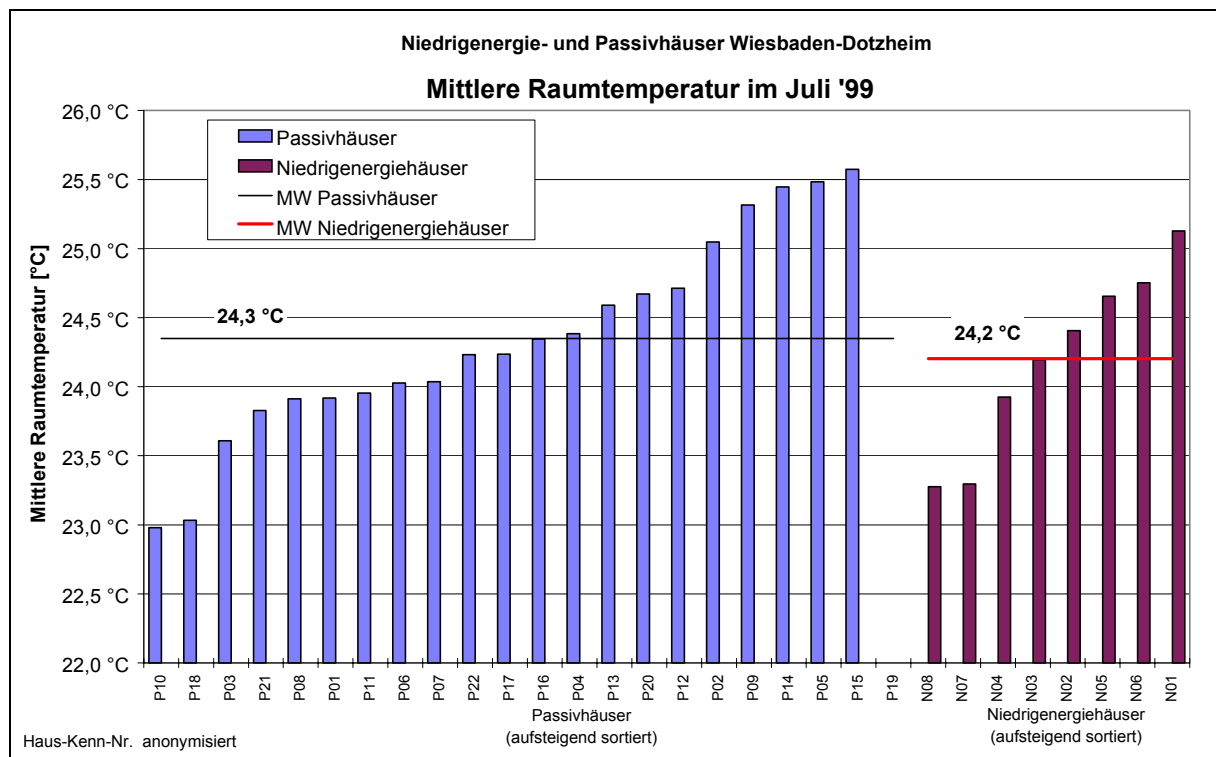
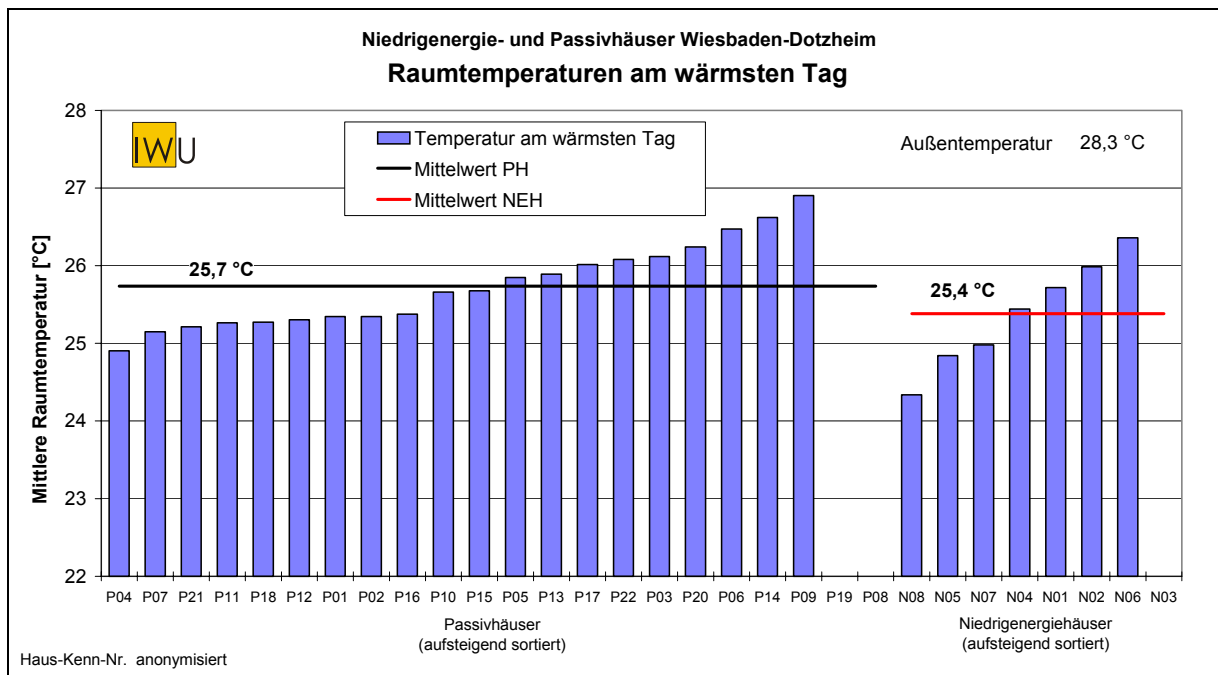


Abbildung 4.2.5-6: Raumlufttemperaturen am wärmsten Tag der Messperiode (18.06.02)



4.2.6 Warmwasserverbrauch

Die Warmwasserverbräuche der Passiv- und Niedrigenergiehäuser blieben im untersuchten Zeitraum annähernd konstant oder sind gesunken (Tabelle 4.2.6-1). Im Mittel wurde in den Passivhäusern 27,5 l Warmwasser pro Person und Tag gezapft, in den Niedrigenergiehäusern waren es 23,9 l/(P*d). Die Streuung der Verbrauchswerte erreicht den Faktor sieben (9,5 l/(P*d) bis 67,4 l/(P*d)). Die mittlere Zapftemperatur, die aus Einzelmessungen, Berechnungen im Sommerhalbjahr und über die Zusatzmessungen in einem Passivhaus (siehe Kapitel 4.2.6.1) bestimmt wurde, lag mit 41,6 °C relativ niedrig, wobei man berücksichtigen muss, dass in den Gebäuden keine Zirkulationsleitungen existieren und die Zapftemperatur stark von der Vorlauftemperatur im Nahwärmenetz der Reihe abhängt.

Die DIN V 4701-10 nennt einen Warmwasserverbrauch von 23 l pro Person bei einer Zapftemperatur von 50 °C [68], der Energie-Pass Heizung/Warmwasser [69] setzt als Standardwert bei 50 °C 35 l/(P*d) an. Auf dieses Temperaturniveau umgerechnet, ergeben sich im Mittel für die Passivhäuser Verbrauchswerte von 20,7 l/(P*d) und 18,8 l/(P*a) für die Niedrigenergiehäuser. Die Warmwasserverbräuche in der Siedlung sind somit als eher gering einzustufen. Dies ist umso beachtlicher, da vielfach - normalerweise nicht vorhandene - Warmwasserverbraucher (Waschmaschine, Spülmaschine) an der Warmwasserversorgung angeschlossen sind.

Abbildung 4.2.6-1 zeigt den geordneten Wärmeverbrauch zur Warmwasserbereitung pro Person und Jahr für den Messzeitraum sowie die Streuungen der Werte bei den einzelnen Gebäuden. Der Mittelwert liegt bei den Passivhäusern mit 300 kWh/(P*a) höher als bei den Niedrigenergiehäusern (253 kWh/(P*a)). Die Streuung der Verbrauchswerte liegt zwischen den

Passivhäusern beim dem Faktor 10, bei den Niedrigenergiehäusern immer noch beim Faktor 5,5. Die Streuung im jeweiligen Haus ist dagegen meist gering. Exemplarisch zeigt Abbildung 4.2.6-2 die geordneten Messwerte für das Jahr 1999/2000.

Tabelle 4.2.6-1: Durchschnittliche Warmwasserverbräuche sowie Wärmeverbrauch für die Warmwasserbereitung in den Niedrigenergie- und Passivhäusern

	Verbrauch pro Haus (absolut) [m³]			
	01.10.98-30.09.99	01.07.99-30.6.00	01.07.00-30.6.01	01.07.01-30.6.02
Passivhäuser	33,0	34,1	34,7	33,4
Niedrigenergiehäuser	31,3	26,6	26,5	27,7
	Verbrauch personenspezifisch [l/(P*d)]			
	01.10.98-30.09.99	01.07.99-30.6.00	01.07.00-30.6.01	01.07.01-30.6.02
Passivhäuser	26,7	27,6	28,3	27,2
Niedrigenergiehäuser	26,9	23,0	22,8	23,1
	Verbrauch Wärme für Warmwasser pro Haus (absolut) [kWh/a]			
	01.10.98-30.09.99	01.07.99-30.6.00	01.07.00-30.6.01	01.07.01-30.6.02
Passivhäuser	1039	1041	1040	912 *
Niedrigenergiehäuser	1028	820	841	700 *
	Verbrauch Wärme für Warmwasser personenspezifisch [kWh/(P*a)]			
	01.10.98-30.09.99	01.07.99-30.6.00	01.07.00-30.6.01	01.07.01-30.6.02
Passivhäuser	305	307	313	276 *
Niedrigenergiehäuser	319	251	262	182 *
	Verbrauch Wärme für Warmwasser flächenspezifisch [kWh/(m²*a)]			
	01.10.98-30.09.99	01.07.99-30.6.00	01.07.00-30.6.01	01.07.01-30.6.02
Passivhäuser	10,1	10,1	10,1	8,8 *
Niedrigenergiehäuser	10,8	8,6	8,8	7,4 *

* Datenausfall Reihe B 13.05.02-30.06.02

Abbildung 4.2.6-1: Geordneter Warmwasserverbrauch pro Person in den einzelnen Häusern mit den Minima und Maxima

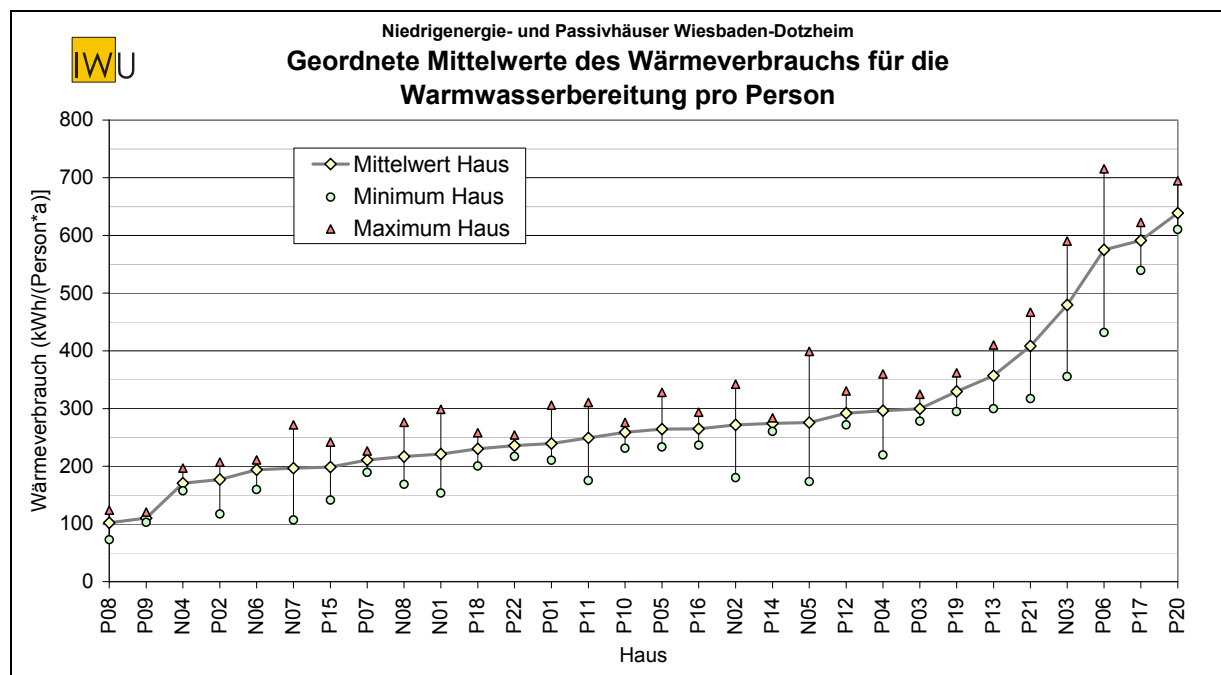
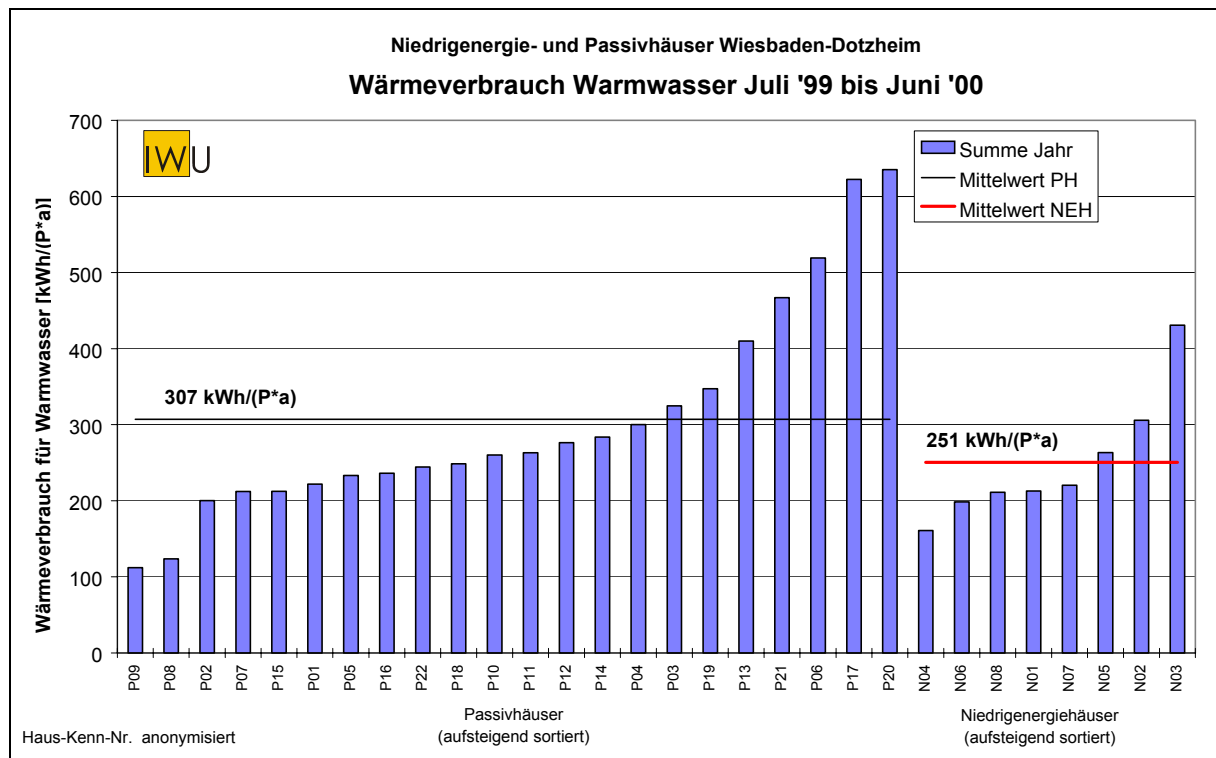


Abbildung 4.2.6-2: Wärmeverbrauch für die Warmwasserbereitung in den Einzelhäusern



4.2.6.1 Überprüfung der Ansätze zur Berechnung des Energieaufwands für Warmwasser und Heizung

Bei den vorangegangenen Berechnungen des Energieaufwands für die Warmwasserbereitung Q_{WW} wurde auf der Basis der gemessenen Warmwasserverbräuche (Messung in Litern, Auflösung 10 l) der Energieaufwand zur Erwärmung des Warmwassers berechnet. Dabei gingen in die Berechnung Annahmen ein, die auf der Grundlage von Einzelmessung getroffen wurden. Aus dem berechneten Q_{WW} ergibt sich durch Subtraktion von der bezogenen Gesamtwärmemenge der Anteil der Heizwärme für das Gebäude. Somit ist eine möglichst exakte Bestimmung von Q_{WW} wichtig für die Energiebilanz des Gebäudes.

Annahmen wurden einerseits bei der tatsächlichen Zapftemperatur, andererseits bei der Kaltwassertemperatur in der Übergabestation des Hauses getroffen. Die Kaltwasser-Verteilleitung verläuft in der gedämmten Hülle unter den Häusern und führt somit zu einer Vorerwärmung des kalten Trinkwassers, was sich jedoch besonders bei kleinen Zapfmengen auswirkt. Im Verlauf der messtechnischen Überprüfung der Häuser wurden zu verschiedenen Terminen zuerst so lange kaltes Wasser gezapft, bis sich eine konstante Temperatur eingestellt hat. Anschließend wurden 10 Liter warmes Wasser gezapft und die Zapfzeit, die Mitteltemperatur nach 5 und 10 Liter sowie die Mischtemperatur der Teilmengen bestimmt.

Diese Messungen wurden verwendet um einen Jahresverlauf der Kaltwassertemperatur sowie der Zapftemperaturen in den einzelnen Häusern abzuschätzen. In den Sommermonaten Mai bis September wurde unterstellt, dass kein Heizwärmebedarf aufgetreten ist und die Zapftemperaturen so angepasst, dass weder negative noch positive Heizwärmebeiträge in der

Monatssumme entstanden. Die angesetzten Zapftemperaturen lagen jedoch sehr niedrig, so dass eine Unsicherheit bezüglich der Genauigkeit dieses Berechnungsansatzes bestand. Eine weitere mögliche Fehlerquelle war die Erfassung des Warmwasservolumens.

Um diese Fragen zu klären, wurden durch das Passivhaus-Institut zusätzliche Messungen in einem Passivhaus mit dem Ziel durchgeführt, die Genauigkeit der Volumenmessung mit den vorhandenen Warmwasserzählern zu überprüfen sowie ein Berechnungsverfahren zu entwickeln, um ohne die Kenntnis der Warm- und Kaltwassertemperaturen den Energieaufwand für die Warmwasserbereitung berechnen zu können [70]. Dazu gehen die Lage des Hauses in der Reihe, die Vorlauftemperatur im Heizhaus und das Zapfvolumen ein. Die genaue Vorgehensweise und der Berechnungsalgorithmus sind im Anhang dokumentiert.

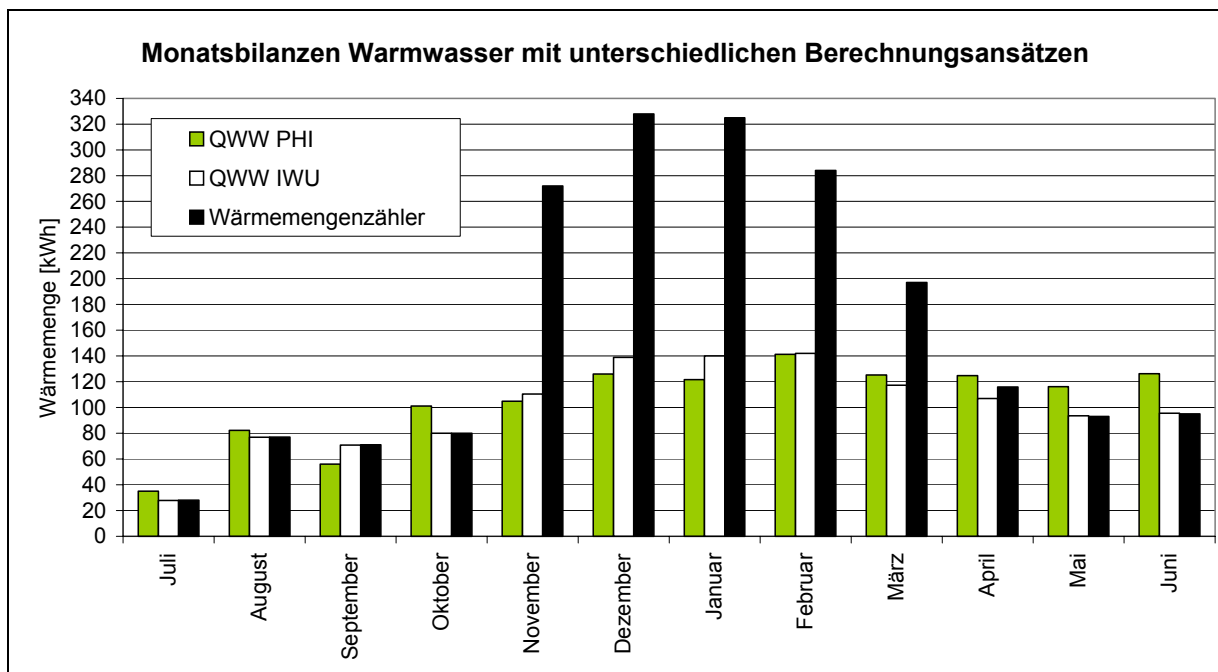
Warmwasservolumen

Über einen Zeitraum von 22 Tagen wurde das Warmwasservolumen parallel zu den Warmwasserzählern mit zusätzlich eingebauten Wärmemengenzählern gemessen und ausgewertet. In dieser Zeit erfassten die Wärmemengenzähler 3080 Liter, der Warmwasserzähler 3090 Liter. Es trat somit lediglich eine Differenz von 10 Litern oder 0,3 % auf, die einem einzigen Warmwasserimpuls entspricht[70]. Die Genauigkeit der Messung des Warmwasservolumens ist somit als gut zu bezeichnen.

Wärmemenge Warmwasser und Heizung

Mit dem im Anhang beschriebenen Verfahren wurde für das Messjahr vom 1.7.1999 bis zum 30.6.2000 der Energieaufwand zur Warmwasserbereitung im untersuchten Haus bestimmt und mit den Auswertungen des IWU für den gleichen Zeitraum verglichen (Abbildung 4.2.6.1-1).

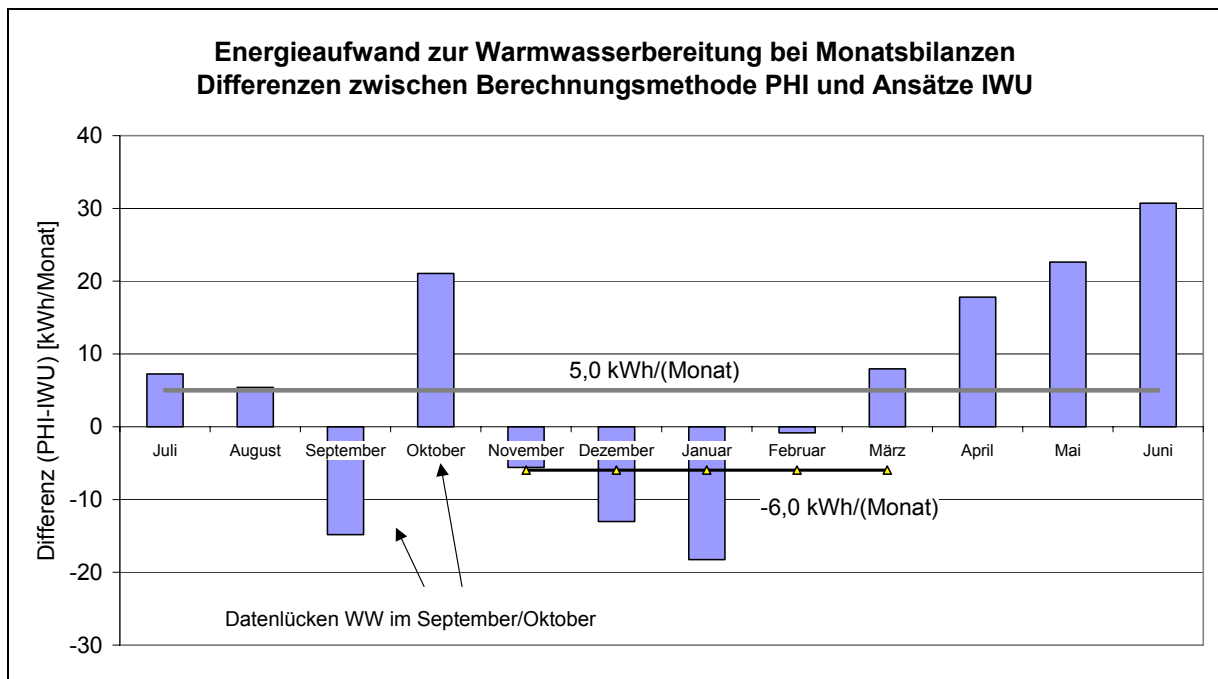
Abbildung 4.2.6.1-1: Monatsbilanzen des Energieaufwands zur Warmwasserbereitung und die gemessene Gesamtwärmemenge



In den Monaten Mai bis Oktober waren die Energieverbräuche zur Warmwasserbereitung bei der Auswertung des IWU in gleicher Höhe wie die gemessene Gesamtwärme, da die Zapftemperaturen auf eine ausgeglichene Monatsbilanz hin angepasst wurden. Bei dem Berechnungsverfahren aus der Vorlauftemperatur des Heizmediums ergibt sich ein höherer Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung, als von dem Wärmemengenzähler erfasst wurde. In der Summe wurden 96,3 kWh, entsprechend 17 % zuviel ermittelt. Ende September und Anfang Oktober traten Datenlücken in den Nachmittagsstunden auf, so dass in diesen beiden Monaten die Ergebnisse trotz Korrektur des Warmwasservolumens nicht die gleiche Tendenz aufweisen (Abbildung 4.2.6.1-2).

In der Heizperiode von November bis März lag der Berechnungsansatz der IWU-Auswertung 29,8 kWh über dem des PHI. Daraus ergibt sich ein leichter Minderverbrauch bei der Heizwärme von 0,27 kWh/(m²*a) entsprechend 3,8 %. Bei einer Messgenauigkeit der Wärmemengenzähler von +/- 90 kWh in der Jahressumme ist der zusätzliche Fehler als gering einzustufen.

Abbildung 4.2.6.1-2: Differenzen der Berechnungsmethoden zur Warmwasserbereitung



Fazit

Die Zusatzmessungen haben in der Heizzeit nur eine geringe Abweichung von 0,27 kWh/(m²*a) zwischen der Bestimmung des Wärmeverbrauchs zur Warmwasserbereitung über abgeschätzte Warm- und Kaltwassertemperaturen und der Bestimmung über die Vorlauftemperatur des Heizmediums ergeben. Somit wurden die Annahmen bezüglich der Temperaturen und die berechneten Heizenergieverbräuche bestätigt.

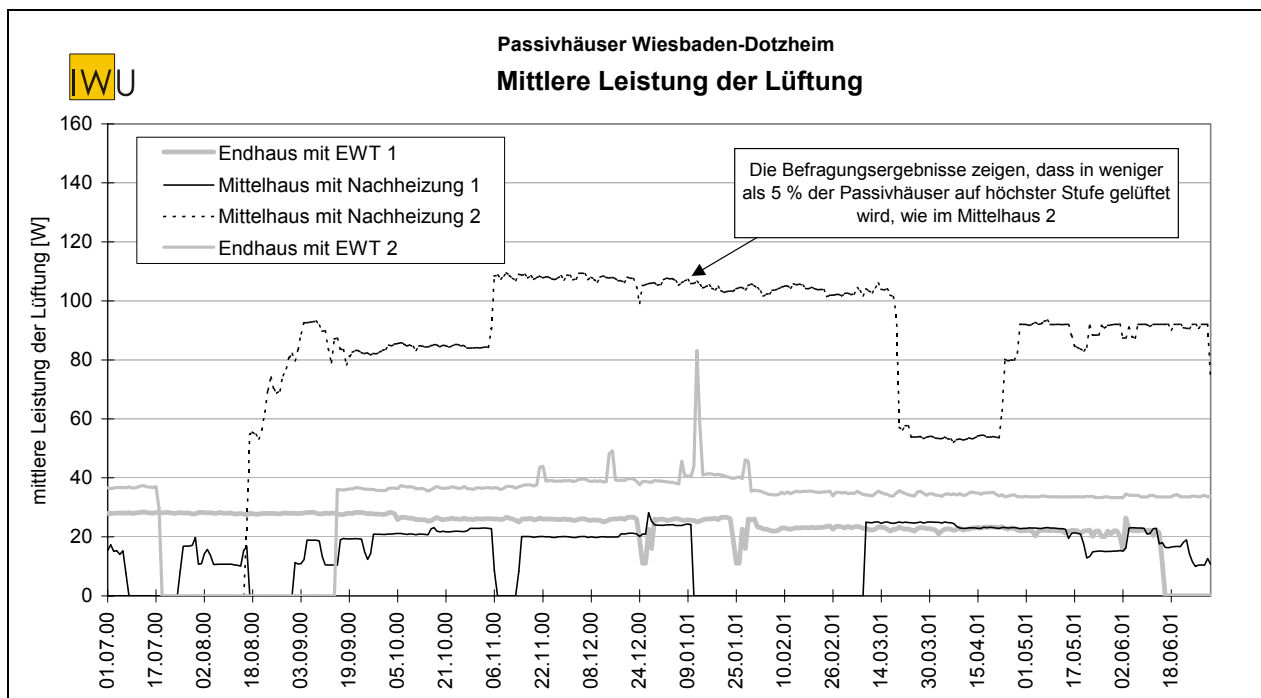
4.2.7 Lüftungsanlagen

In vier der 22 Passivhäuser wurde die Lüftungsanlage genauer vermessen. Zwei Anlagen befanden sich in Reihenmittelhäusern ohne und zwei in Endhäusern mit einem Erdreichwärmetauscher. Im Rahmen des erweiterten Messprogramms wurden in diesen Häusern die Temperaturen (Außen-, Zu-, Ab- und Fortluft) und die Stromverbräuche der Lüftungsanlage gemessen. Die Reihenmittelhäuser besitzen zur Frostfreihaltung einen Wärmetauscher in der Abluft, so dass bei diesen Gebäuden zusätzlich die Ablufttemperatur nach dem Nachheizregister gemessen wurde.

Lüftungsstrom

Bei der Analyse der Lüftungsstromverbräuche (Abbildung 4.2.7-1) fällt auf, dass die Bewohner der Häuser sehr unterschiedlich mit den Einstellmöglichkeiten ihrer Lüftungsanlage umgehen. In drei Häusern werden die Anlagen relativ konstant sowohl im Sommer wie auch im Winter auf einer niedrigen Stufe betrieben. Nur an wenigen Tagen wurde gezielt die Betriebsstufe verändert. Beim Endhaus 2 fällt z. B. die Stoßlüftung an einzelnen Tagen auf. Zeiten, in denen die Verbräuche auf Null zurückgehen, entstanden durch Datenausfälle. Im Mittelhaus 2 wird während des gesamten Winters die Lüftung auf höchster Stufe betrieben und im Frühjahr dann etwas reduziert. Da die Höhe der täglichen Verbräuche aber unterschiedlich ist, ist anzunehmen, dass die Anlage nicht balanciert betrieben wurde.

Abbildung 4.2.7-1: Lüftungsstromverbräuche in vier Passivhäusern im Messjahr 2000/01



Anmerkung: Die 4 Häuser wurden zufällig ausgewählt und repräsentieren nicht alle Häuser desselben Typs. Mittelhaus 2 betreibt die Anlage fast ständig auf höchster Stufe, was (nach den Befragungsergebnissen, vgl. 6.3.1) untypisch ist.

Massenstromverhältnis und Rückwärmzahl

Da die Regelung der Lüftungsanlagen mit separaten, steten Einstellmöglichkeiten für Zu- und Abluft versehen ist und somit durch ein Verstellen eines Reglers, z. B. nach einer Stoßlüftung, eine Disbalance zwischen Zu- und Abluft entstehen kann, die Luftmassenströme aber nicht gemessen wurden, ist eine genaue Berechnung von Rückwärmzahlen für die vier Gebäude nicht möglich. Außerdem führen Verschmutzung der Filter zu einer Störung des Gleichgewichts im Lüftungssystem. So wurde bei einem Endhaus mit Erdreichwärmetauscher (nicht hier in der Auswertung enthalten) festgestellt, dass der Abluftvolumenstrom durch einen verschmutzten Abluftfilter auf die Hälfte gesunken war.

Bei der Auswertung der Messergebnisse der Lüftungsanlage wurde auf der Basis von Tageswerten nach der Formel:

$$\Phi \cdot \mu = \Phi \cdot \frac{\dot{m}_{Ab}}{\dot{m}_{Zu}} = \frac{\Delta \mathcal{G}_{Zu}}{\Delta \mathcal{G}_{max}} = \frac{\mathcal{G}_{Zu} - \mathcal{G}_{Außen}}{\mathcal{G}_{Ab} - \mathcal{G}_{Außen}}$$

das Produkt aus trockener Rückwärmzahl mit dem Massenstromverhältnis zwischen Zu- und Abluft bestimmt. Aus den unter bestimmten Randbedingungen bestimmten Rückwärmzahlen (siehe weiter unten) von Zu- und Abluftseite lässt sich anschließend das Massenstromverhältnis berechnen.

Abbildung 4.2.7-2 zeigt für alle Messjahre die resultierenden Massenstromverhältnisse. In allen vier Gebäuden wurde wiederholt ein starkes Abfallen des Massenstromverhältnisses beobachtet, nach dem dann die Verhältniszahl sprunghaft wieder anstieg. In den Gebäuden werden normaler Weise zweimal im Jahr die Filter der Lüftungsanlage gewechselt. Da die Filter für alle Häuser gemeinsam beschafft werden, erfolgt der Filterwechsel auch ungefähr zur gleichen Zeit. Vor den Filterwechseln sinkt das Massenstromverhältnis stark ab - d.h. durch verschmutzte Abluftfilter sinkt der Abluftvolumenstrom deutlich ab. In den Extremfällen mit einem Massenstromverhältnis von 0,4 bedeutet das, dass lediglich noch ca. 50 m³/h Abluft aus dem Gebäude befördert werden. Hieraus lässt sich die Forderung ableiten, dass in diesem Lüftungssystem die Luftfilter öfter gewechselt werden sollten.

Der starke Abfall des Volumenstroms auf der Abluftseite führt auch zu einem Rückgang der Zulufttemperatur. Dies soll exemplarisch für ein Endhaus mit Erdreichwärmetauscher gezeigt werden (Abbildung 4.2.7-3). Vor dem Filterwechsel lag die Zulufttemperatur bei ca. 16 °C, obwohl der Erdreichwärmetauscher einen Luftstrom mit konstant 10,5 °C liefert, die Zuluftseite somit nur um 6 K erwärmt wurde. Nach dem Filterwechsel, die Einstellung der Lüftungsanlage blieb, wie aus dem Stromverbrauch ersichtlich, konstant, stieg die Zulufttemperatur schlagartig auf 20 °C an.

Die Rückwärmzahlen liegen bei den Mittelhäusern im Mittel bei 0,80, bei den Endhäusern zwischen 0,81 und 0,84 (Tabelle 4.2.7-1). Bei der Berechnung wurden unplausible Extremwerte unter 0,6 (Filterverschmutzung) und über 0,95 (Disbalance der Lüftungsanlage) nicht bei der Mittelwertbildung berücksichtigt. Die Mittelhäuser haben mit einer Rückwärmzahl von 0,8 die Planungsvorgaben eingehalten. Bei den Endhäusern wurde der Planungswert von 0,87 nur mit neuen Filtern erreicht. Dann ergaben sich jedoch Rückwärmzahlen bis 0,91.

Abbildung 4.2.7-2: Massenstromverhältnisse zwischen Abluft und Zuluft in den untersuchten Gebäuden

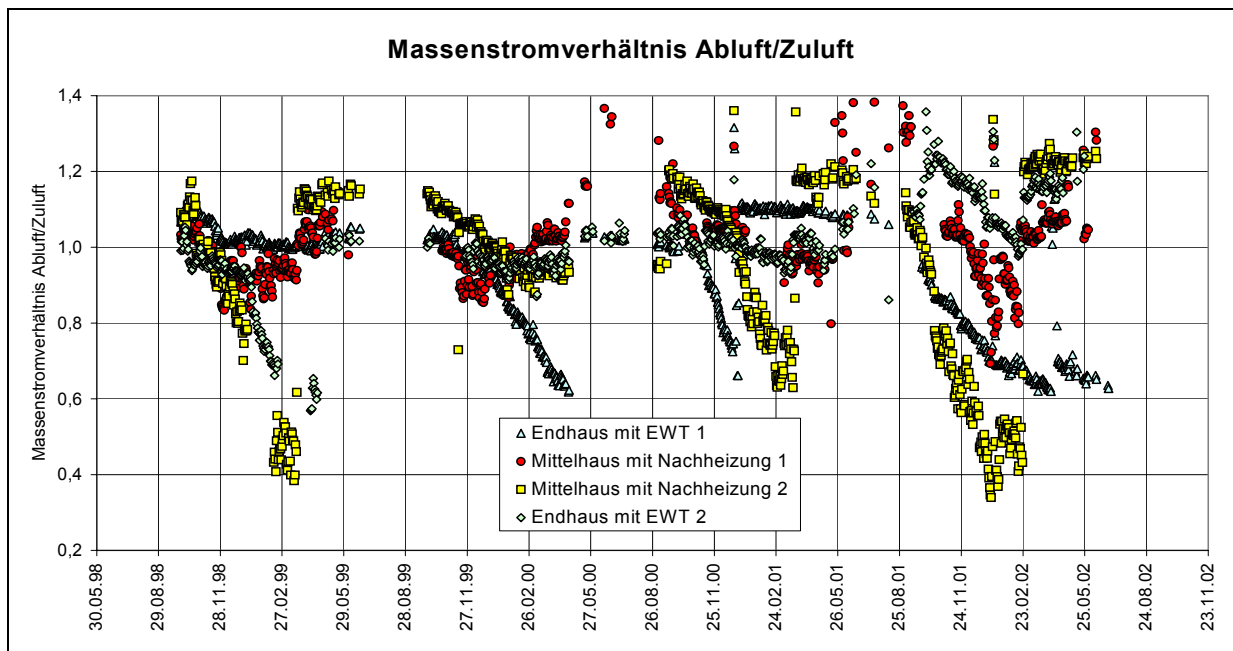
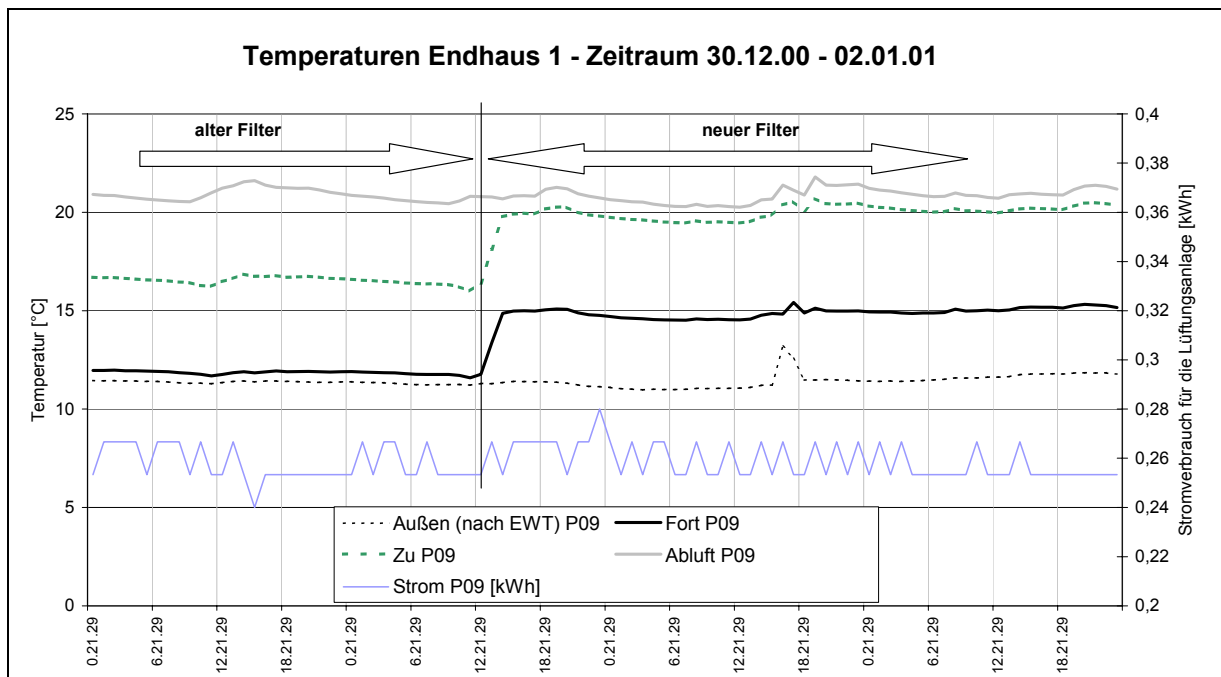


Tabelle 4.2.7-1: Mittlere Rückwärmzahlen (Extremwerte unter 0,6 und über 0,95 wurden nicht berücksichtigt)

	Berechnete trockene Rückwärmzahlen			
	Endhaus mit Erdreich-WT 1	Mittelhaus mit Nachheizung 1	Mittelhaus mit Nachheizung 2	Endhaus mit Erdreich-WT 2
Mittelwert	0,81	0,81	0,80	0,84

Abbildung 4.2.7-3: Verlauf der Temperaturen der Lüftungsanlage in einem Endhaus mit Erdreichwärmetauscher über drei Tage, in denen der Abluftfilter gewechselt wurde



Temperaturen in der Lüftungsanlage

Der Erdreichwärmetauscher temperiert die kalte Außenluft in den beiden Endhäusern auf mindestens 7,3 °C vor (Tabelle 4.2.7-2). Im Gegensatz dazu liegt das niedrigste Tagesmittel der Außenlufttemperatur bei den Häusern ohne Erdreichwärmetauscher bei -7,8 °C. Somit garantiert der Erdreichwärmetauscher die Frostfreihaltung der Wärmerückgewinnung. Die Zulufttemperatur sank während der Messphase auf minimal 14,1 °C mit und 10,4 °C ohne Erdreichwärmetauscher, wobei hier wieder die verschmutzten Abluftfilter als Ursache für die niedrigsten Werte ausgemacht werden konnten. Im vierjährigen Mittel lag die Zulufttemperatur aller vier Häuser zwischen 19,2°C und 20,6°C, der Komfort in den Häusern ist somit sehr gut. Die höchsten Temperaturspitzen der Zuluft reichten von 27,0 °C bis 33,7 °C. Letzterer Wert wurde jedoch durch das Nachheizregister im Januar 2000 erzielt. Da die Lüftungsanlagen keinen Sommer-Bypass besitzen, wird, wenn die Bewohner die Lüftungsanlage ganzjährig konstant betreiben, auch an sehr warmen Tagen die Zuluft u.U. noch von der Abluft erwärmt, besonders nachts. Hier könnten Veränderungen der Lüftungsanlage das Sommerklima optimieren.

Tabelle 4.2.7-2: Außenluft- und Zulufttemperaturen in den Häusern mit und ohne Erdreichwärmetauscher im Vergleich (alle vier Messjahre)

	Tagesmitteltemperatur nach dem Erdreichwärmetauscher [°C]		Tagesmitteltemperatur der Außenluft [°C]	
	Endhaus mit EWT 1	Endhaus mit EWT 2	Mittelhaus mit Nachheizung 1	Mittelhaus mit Nachheizung 2
Minimum	8,0	7,3	-7,0	-7,8
Maximum	28,0	26,4	25,4	26,2
Mittelwert	14,1	13,5	11,1	9,7
	Tagesmitteltemperatur der Zuluft [°C]			
	Endhaus mit EWT 1	Endhaus mit EWT 2	Mittelhaus mit Nachheizung 1	Mittelhaus mit Nachheizung 2
Minimum	15,1	14,1	14,1	10,2
Maximum	28,1	27,5	33,7	27,0
Mittelwert	20,6	20,4	20,4	19,2

Erdreichwärmetauscher

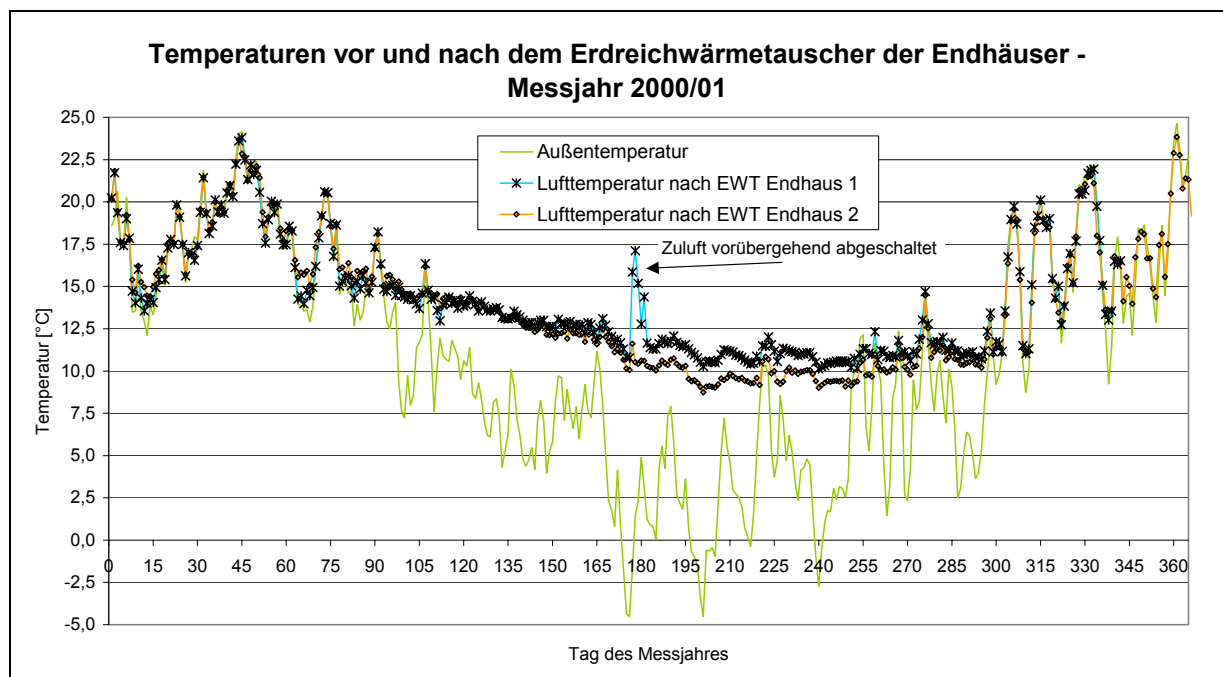
Über den Erdreichwärmetauscher wurden in der Summe zwischen 730 kWh und 1150 kWh Wärme pro Jahr der Außenluft zugeführt. Bei einem Heizwärmeverbrauch in gleicher Größenordnung konnte der Erdreichwärmetauscher somit beträchtlich zur Energieeinsparung in den Endhäusern beitragen. Die mittlere Heizleistung der beiden vermessenen Erdreichwärmetauscher in der Heizperiode (hier Oktober bis März) liegt zwischen 220 W und 265 W. Die maximale gemessene Heizleistung der Erdreichwärmetauschers lag bei 770 W. Da die Regelung des Erdreichwärmetauschers den Bypass einschaltet, sobald die Außentemperatur über der Temperatur im Erdreichwärmetauscher liegt, kann er nicht im Sommer zur Kühlung eingesetzt werden (siehe Tabelle 4.2.7-3).

Tabelle 4.2.7-3: Heizleistung der Erdreichwärmetauscher

	Endhaus mit EWT 1			Endhaus mit EWT 2		
	Nachheizung EWT in der HP [kWh]	mittlere Leistung in der HP [W]	max. Heizleistung [W]	Nachheizung EWT in der HP [kWh]	mittlere Leistung in der HP [W]	max. Heizleistung [W]
1999/2000	1097	251	596	732	231	567
2000/2001	1096	250	696	959	219	579
2001/2002	1136	261	767	1156	265	708

Abbildung 4.2.7-4 zeigt den Temperaturverlauf von Außentemperatur und der Temperatur vor der Wärmerückgewinnung (nach dem Erdreichwärmetauscher und der Umschaltklappe des Bypasses) im Messjahr 2000/2001. Man erkennt deutlich, dass die Regelung den Außenluftstrom über den Erdreichwärmetauscher führt, wenn die Außenlufttemperatur unter die Temperatur im Erdreichwärmetauscher fällt. Diese liegt im Sommer bei ca. 14 °C und fällt im Verlauf des Winters bis auf ca. 10 °C. Ab April wird die Außenluft wieder über den Bypass angesaugt. Beide untersuchten Gebäude weisen einen sehr ähnlichen Temperaturverlauf und eine ähnliche Regelcharakteristik auf. Nachdem im Dezember beim Endhaus 1 die Zuluft einige Tag abgestellt war (Eingangstemperatur an der Wärmerückgewinnung steigt durch Transmission im Lüftungskanal stark an), verlaufen die beiden Temperaturkurven zwar synchron, aber nicht mehr auf dem gleichen Niveau. Möglicherweise wurde der Zuluftventilator in Endhaus 1 nicht mehr auf den gleichen Volumenstrom wie zuvor eingestellt.

Abbildung 4.2.7-4 Verlauf von Außen- und der Temperatur am Ausgang des Erdreichwärmetauschers



Nachheizregister

In den Häusern ohne Erdreichwärmetauscher ist für die Frostfreihaltung der Wärmerückgewinnung ein zusätzliches Heizregister in der Abluft eingebaut. Dies ist möglich, da die Wärmerückgewinnung dafür sorgt, dass nicht mehr als 20 % der Nachheizwärme über die

Fortluft abgegeben werden. Je nach Raumlufttemperatur im Gebäude und der Betriebsweise des Lüftungsgeräts werden zwischen 110 kWh und 1230 kWh an Wärme pro Heizperiode der Luft zugeführt. Als mittlere Leistung (des Nachheizregisters) an Heiztagen ergeben sich zwischen 25 W und 610 W, die maximale Heizleistung liegt zwischen 300 W und 1600 W. Bei den Ergebnissen fällt auf, dass die beiden untersuchten Häuser sehr unterschiedliche Verbräuche für die Nachheizung aufweisen.

Tabelle 4.2.7-4: Heizleistung der Nachheizregister

	Mittelhaus 1			Mittelhaus 2		
	Nachheizung in der HP [kWh]	mittlere Leistung an Heiztagen [W]	max. Heizleistung [W]	Nachheizung in der HP [kWh]	mittlere Leistung an Heiztagen [W]	max. Heizleistung [W]
1999/2000	442	126	1054	111	25	307
2000/2001	19 *	5 *	154 *	521	115	1096
2001/2002	253	75	597	1231	609	1597

* Datenlücke in der Heizperiode

Abbildung 4.2.7-5 Nachheizleistung des Abluftheizregisters bei zwei Passivhäusern

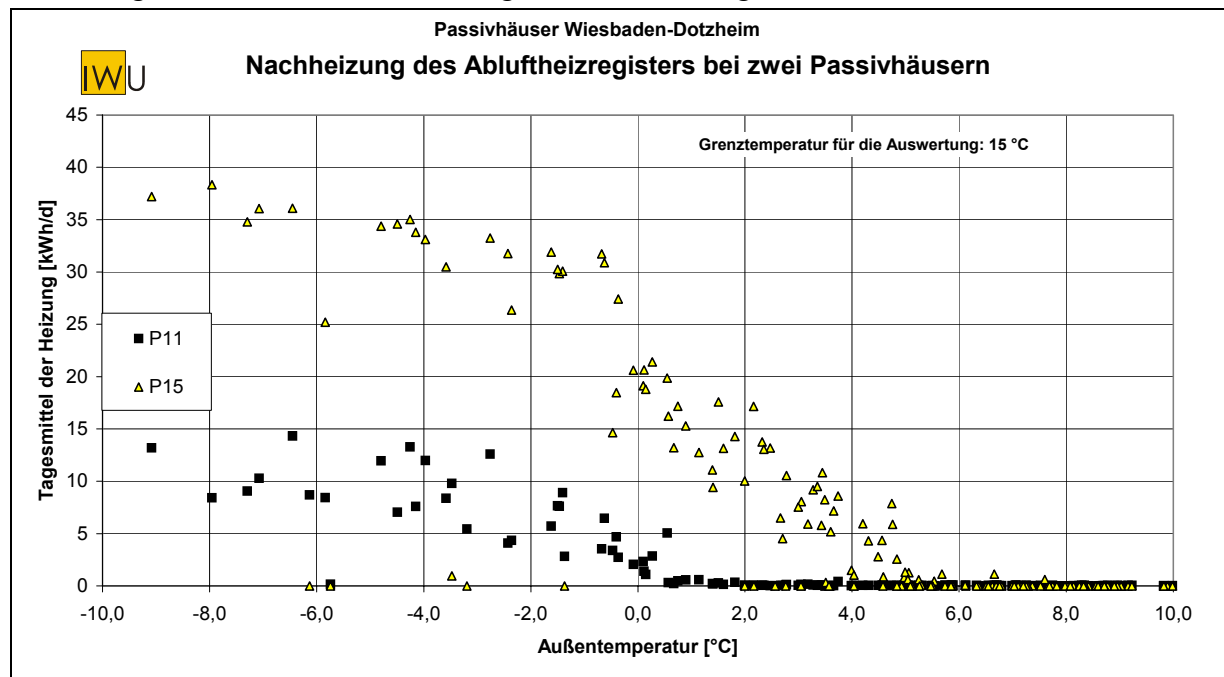


Abbildung 4.2.7-5 zeigt den Verlauf der Nachheizleistung aufgetragen über die Außentemperatur. Man erkennt, dass die Regelung des Nachheizregisters in einem Haus bei ca. 0,5 °C und in einem bei ca. 5 °C die Wärmeabgabe startet. Die Wärmeabgabe steigt danach linear an, aber auf ein sehr unterschiedliches Niveau. Bei sehr tiefen Außentemperaturen ist keine weitere Steigerung der Heizleistung zu erkennen. Im Fall der oberen Kurve (P15) ist eine Begrenzung durch die Heizleistung des Nachheizregisters möglich, beim anderen Haus ist eine Erklärung schwieriger. Es wird jedoch deutlich, dass hier noch ein Optimierungspotenzial in der Lüftungstechnik, das durch eine exakte Regelung erschlossen werden kann, liegt. Die betrachteten Ergebnisse unterliegen jedoch den in Kapitel 4.1.4 angegebenen Fehlergrenzen, so dass eine detaillierte Auswertung erschwert wird.

4.2.8 Haushaltsstromverbrauch

Die Haushaltsstromverbräuche wurden durch regelmäßige Handablesungen ermittelt (Tabelle 4.2.8-1). Sowohl bei den absoluten Stromverbräuchen als auch bei den flächen- bzw. personenspezifischen Werten ist ein leichter Anstieg im Laufe der Jahre festzustellen. Abbildung 4.2.8-1 zeigt die geordnete Verteilung der absoluten Verbräuche in den einzelnen Häusern (ohne Gemeinschaftsstromverbrauch) sowie die Minima und Maxima. Im Vergleich zu anderen Messgrößen streuen die Stromverbräuche der Einzelhäuser über die Messjahre wenig. In der Abbildung sind Niedrigenergie- und Passivhäuser gemeinsam sortiert.

Tabelle 4.2.8-1: Gemessene Stromverbräuche

	Verbrauch pro Haus (absolut) [kWh/a]			
	01.10.98-30.09.99	01.07.99-30.6.00	01.07.00-30.6.01	01.07.01-30.6.02
Passivhäuser	2968	3086	3196	3310
Niedrigenergiehäuser	3380	3165	3258	3323
	Verbrauch personenspezifisch [kWh/(P*a)]			
	01.10.98-30.09.99	01.07.99-30.6.00	01.07.00-30.6.01	01.07.01-30.6.02
Passivhäuser	859	891	931	966
Niedrigenergiehäuser	1150	1088	1097	1129
	Verbrauch flächenspezifisch [kWh/(m ² *a)]			
	01.10.98-30.09.99	01.07.99-30.6.00	01.07.00-30.6.01	01.07.01-30.6.02
Passivhäuser	28,8	29,9	31,1	32,2
Niedrigenergiehäuser	36,1	33,9	34,7	35,4

Die Passivhäuser streuen über alle Messjahre bei den personenspezifischen Werten zwischen 473 kWh/(P*a) und 1584 kWh/(P*a). Im Mittel wurde ein Stromverbrauch von 912 kWh/(P*a) erreicht. Bei den Niedrigenergiehäusern fiel die personenspezifische Streuung wegen eines Hauses mit nur einer Person deutlich größer aus (594 kWh/(P*a) - 3054 kWh/(P*a)) als bei den absoluten Verbräuchen. Im Mittel lagen die Niedrigenergiehäuser mit 1165 kWh/(P*a) jedoch über den Passivhäusern, obwohl bei diesen mit der Zu- und Abluftanlage zwei Ventilatoren vorhanden sind (Gesamtleistung zwischen 16 bis 60 W gegenüber 40 W bei der Abluftanlage). Diese müssen jedoch aufgrund der stromsparenden Bauart bei Normalbetrieb zu keinem Mehrverbrauch gegenüber den Abluftanlagen der Niedrigenergiehäuser führen. Als Beispiel der Ergebnisse ist in Abbildung 4.2.8-2 für das Messjahr 1999/2000 der personenspezifische Verbrauch geordnet dargestellt.

Abbildung 4.2.8-1: Mittlere Haushaltsstromverbräuche und die Minima und Maxima der Einzelhäuser

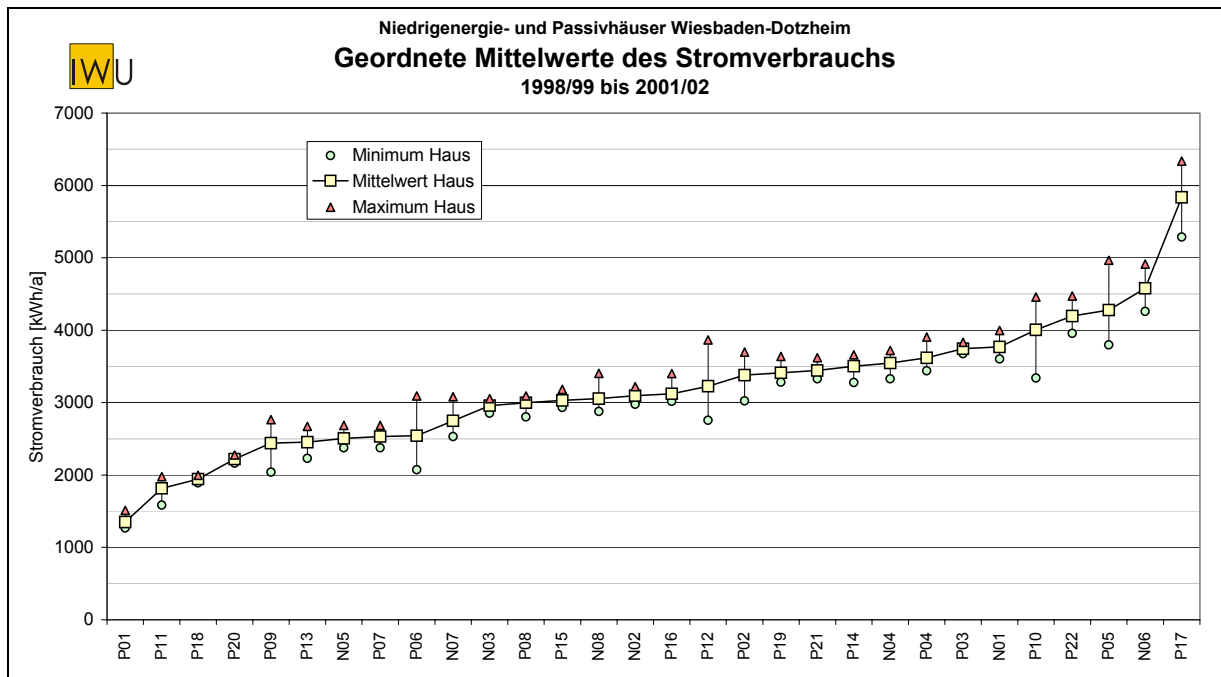


Abbildung 4.2.8-2: Personenbezogene Haushaltsstromverbräuche in den einzelnen Wohnungen in der Messperiode 1999/2000

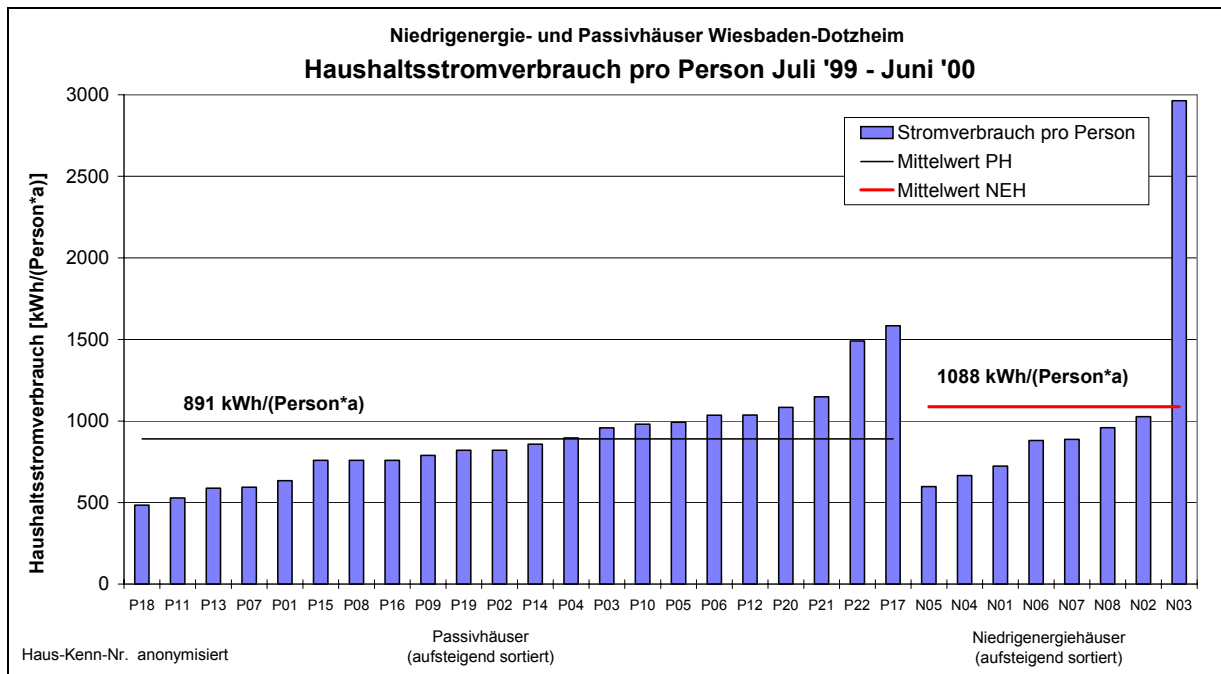
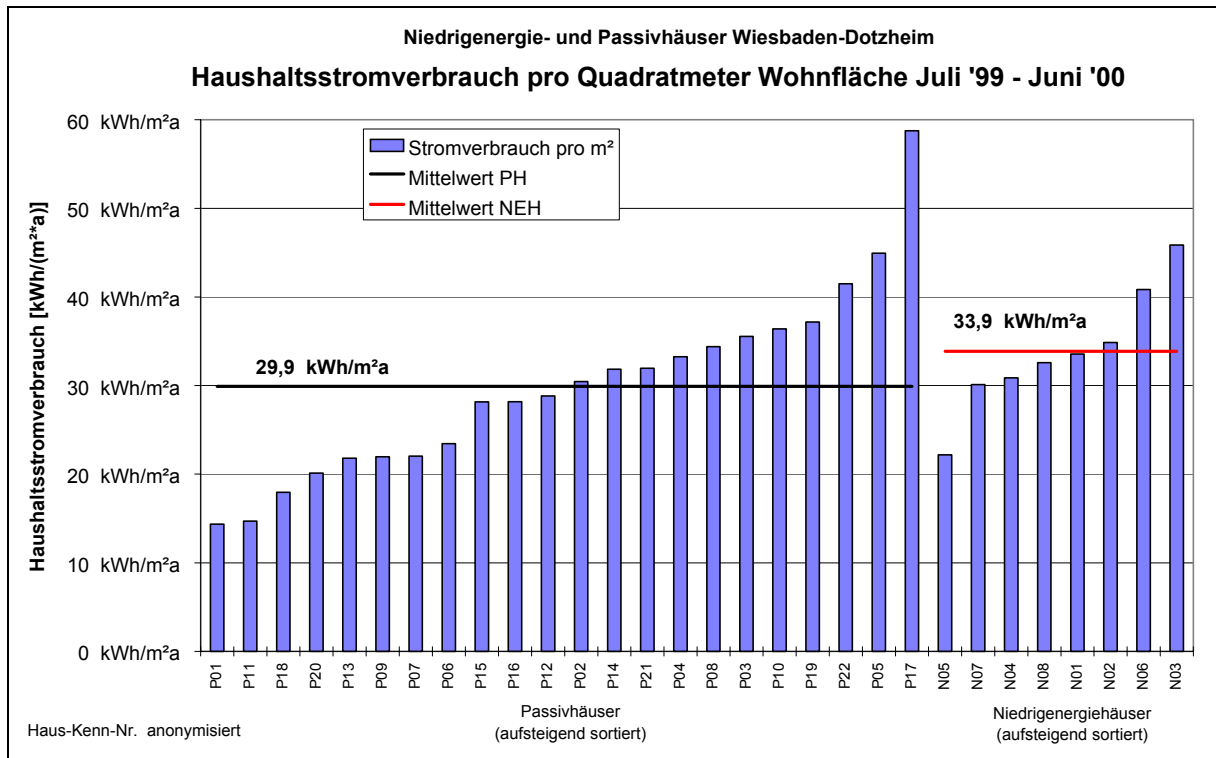


Abbildung 4.2.8-3: Flächenspezifischer Stromverbrauch der einzelnen Wohnungen in der Messperiode 1999/2000 (ohne Gemeinschaftsstromverbrauch)



Wohnflächenbezogen wurden im Untersuchungszeitraum bei den Passivhäusern 30,5 kWh/m², bei den Niedrigenergiehäusern dagegen 35,0 kWh/m² Haushaltsstrom verbraucht (Abbildung 4.2.8-3).

Eine Untersuchung der Einflussgrößen auf den Stromverbrauch erfolgt in Kapitel 7.

4.2.9 Fensteröffnungsverhalten

Seit November 2000 wurde in 21 Passiv- und 7 Niedrigenergiehäusern die Öffnungsdauer der einzelnen Fenster aufgezeichnet. Dabei wurden sowohl gekippte als auch ganz geöffnete Fenster einheitlich als geöffnet aufgezeichnet und konnten nicht unterschieden werden. Befanden sich mehrere Fenster in einem Raum, so wurde der Zustand aller Fenster pro Mittelungsintervall addiert, d.h. wenn ein Fenster mindestens gekippt war, wurde für den Raum ein offenes Fenster ausgegeben.

Die gemessenen Fensteröffnungsdauern in Minuten pro Fenster und Tag finden sich in Tabelle 4.2.9-1. In der Heizperiode von November 2000 bis März 2001 wurde bei den Passivhäusern im Mittel jedes Fenster 53 Minuten geöffnet, die Niedrigenergiehäuser erreichten 128 Minuten. In der zweiten Heizperiode glichen sich die Fensteröffnungszeiten beider Häusertypen deutlich an, da sowohl bei den Passivhäusern als auch bei den Niedrigenergiehäusern in der Heizperiode 2001/2002 ca. 92 Minuten Fensteröffnung gemessen wurden. Bei 13 der 21 Passivhäuser lag der Unterschied zwischen diesen beiden Messjahren unter +/- 20 Minuten Öffnungsdauer pro Fenster. Bei den 8 verbleibenden Passivhäusern ergaben sich zum Teil Veränderungen von mehreren Stunden. Bei drei dieser Häuser waren die Monate Dezember und Januar nahezu unverändert. Besonders im März 2002 wurde aber bis zu 90 Minuten länger pro Fenster gelüftet als im März 2001. Im März 2002 lag das Monatsmittel der Außentemperatur nur 0,5 K über dem des Vorjahres, die Solarstrahlung war jedoch um ca. 75 % erhöht, so dass diese längeren Öffnungszeiten als Reaktion auf die verstärkte solare Einstrahlung interpretiert werden können. Die verbleibenden fünf Passivhäuser mit großen Abweichungen zwischen den einzelnen Jahren zeichnen sich durch Nutzungsänderungen aus, da Fenster in bestimmten Räumen deutlich länger, oder auch kürzer geöffnet wurden. Somit sind die Schwankungen der Fensteröffnungszeiten einzelner Heizperioden plausibel zu erklären.

Tabelle 4.2.9-1: Mittelwerte der gemessenen Fensteröffnungsdauer in beiden Heizperioden

Fensteröffnungsdauer [min/(d*Fenster)]	01.11.00-30.6.01	01.07.01-30.6.02
Passivhäuser		
Mittelwert Heizperiode (Nov -Mrz)	53	91
Mittelwert Jahr		286
Heizperiodenmittelwert Taglüfter	21	34
Heizperiodenmittelwert Nachtlüfter	119	203
Niedrigenergiehäuser		
Mittelwert Heizperiode (Nov -Mrz)	128 (1)	92
Mittelwert Jahr		317

(1) In einigen Gebäuden liegen Messwerte erst im Verlauf des November vor

Um diesen Anstieg bei den Passivhäusern zu erklären, wurden die Mittelwerte für die im Laufe des Kapitels genauer erläuterten Nutzergruppen der Tag- und Nachtlüfter getrennt in Tabelle 4.2.9-1 aufgelistet. Dabei zeigt sich bei den sogenannten Taglüftern eine Erhöhung der Fensteröffnungsdauer um ca. 60 %, bei den Nachtlüftern um 70 %.

In Abbildung 4.2.9-1 sind die Mittelwerte aller Passiv- und aller Niedrigenergiehäuser zusammen mit dem jeweiligen Monatsmittel der Außentemperatur miteinander verglichen. Für den Zeitraum von Anfang Juli 2001 bis Ende Juni 2002 zeigt die Abbildung die mittlere tägliche Fensteröffnungsdauer eines Hauses des entsprechenden Typs in Stunden pro Fenster. Bei den Passivhäusern ist im Verlauf des Winters (November bis März) zuerst ein Absinken der Öffnungsdauer von 1,75 h auf 0,9 h im Januar zu erkennen. Am Ende der Kernheizperiode im Februar und März werden die Fenster wieder länger geöffnet. Im März standen die Fenster in der Summe 2 h pro Tag offen.

Bei den Niedrigenergiehäusern ist der Verlauf ähnlich. Nicht nur in der Heizperiode, sondern auch während des Sommers und in der Übergangszeit liegen die Fensteröffnungszeiten der Niedrigenergiehäuser in der Größenordnung der Werte der Passivhäuser. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass bei der Bestimmung der Monatsmittelwerte bei den Niedrigenergiehäusern nur 7 Gebäude vermessen wurden und durch Datenlücken unterschiedlich viele Messwerte in die Berechnungen eingingen.

Abbildung 4.2.9-2 zeigt daher die Anzahl der Tagesmittelwerte, die pro Monat bei der Mittelwertbildung berücksichtigt wurden. Im ersten Messjahr (November 2000 bis Juni 2001) lagen bei den Passivhäusern in der Heizperiode 95 % aller möglichen Messwerte vor. In der zweiten Heizperiode konnten sogar 99 % der möglichen Messwerte in die Mittelwertbildung einfließen. Über das gesamte Messjahr betrachtet repräsentieren die Monatsmittelwerte ca. 95% der maximal theoretisch zur Verfügung stehenden Messwerte.

Bei den Niedrigenergiehäusern waren weniger Häuser bei den Messungen involviert, durch Datenlücken wurde die Zahl der auswertbaren Tageswerte zusätzlich reduziert. In der Heizperiode 2000/01 flossen 85 % der theoretisch möglichen Werte in die Berechnungen ein, in der Heizperiode 2001/02 81 %. Jedoch ergaben sich in den Sommermonaten mehr Ausfälle, so dass hier die Messwerte nicht mehr sinnvoll auswertbar sind. Daher wird im Folgenden für die Niedrigenergiehäuser nur die Heizperiode untersucht.

Abbildung 4.2.9-1: Mittlere Öffnungsdauer der Fenster bei den Niedrigenergie- und Passivhäusern

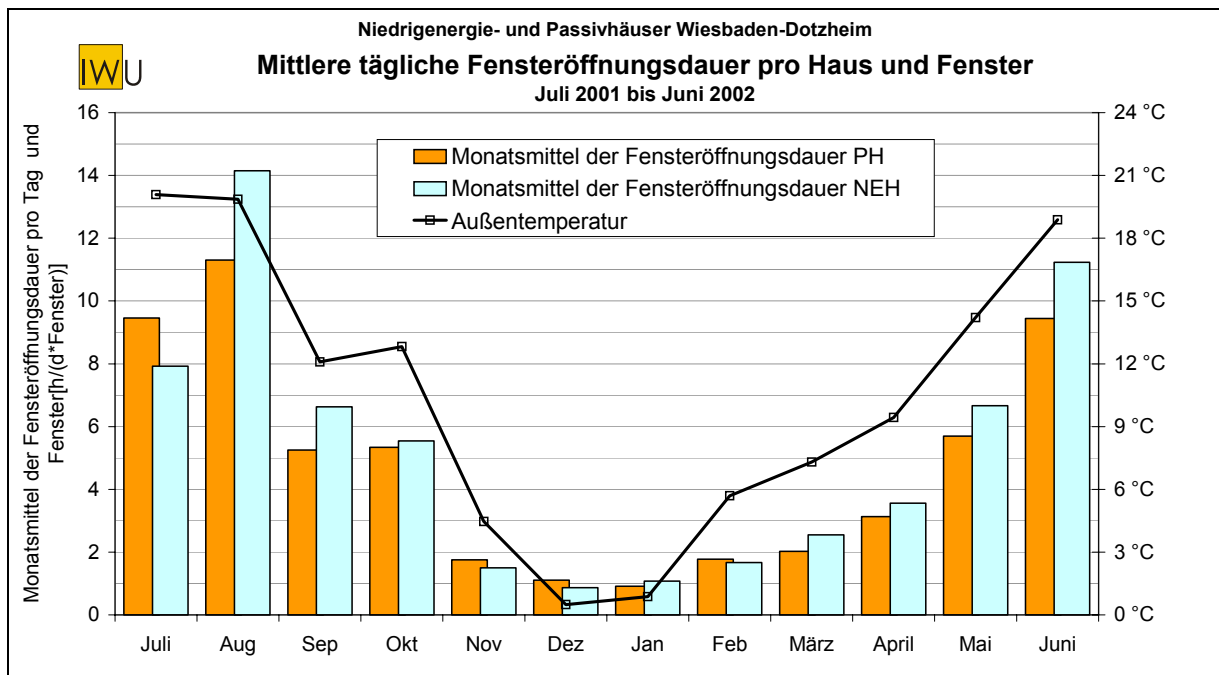


Abbildung 4.2.9-2: Anzahl der Tageswerte, die in die Berechnung der Monatsmittelwerte eingingen

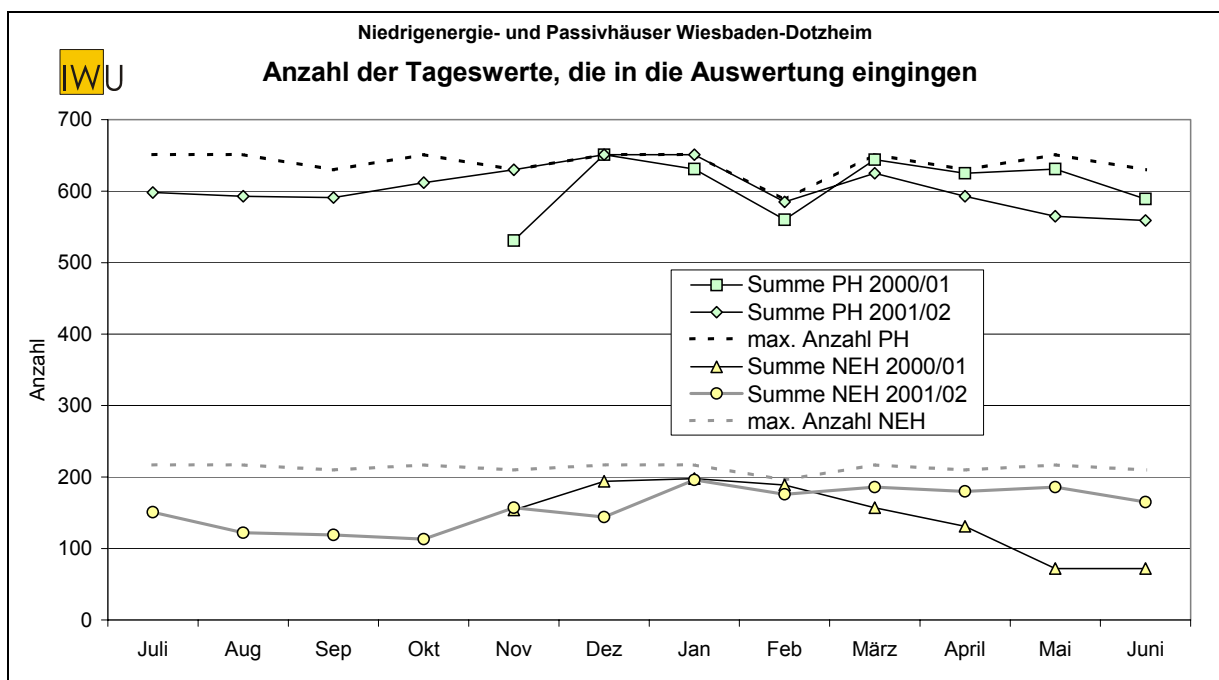
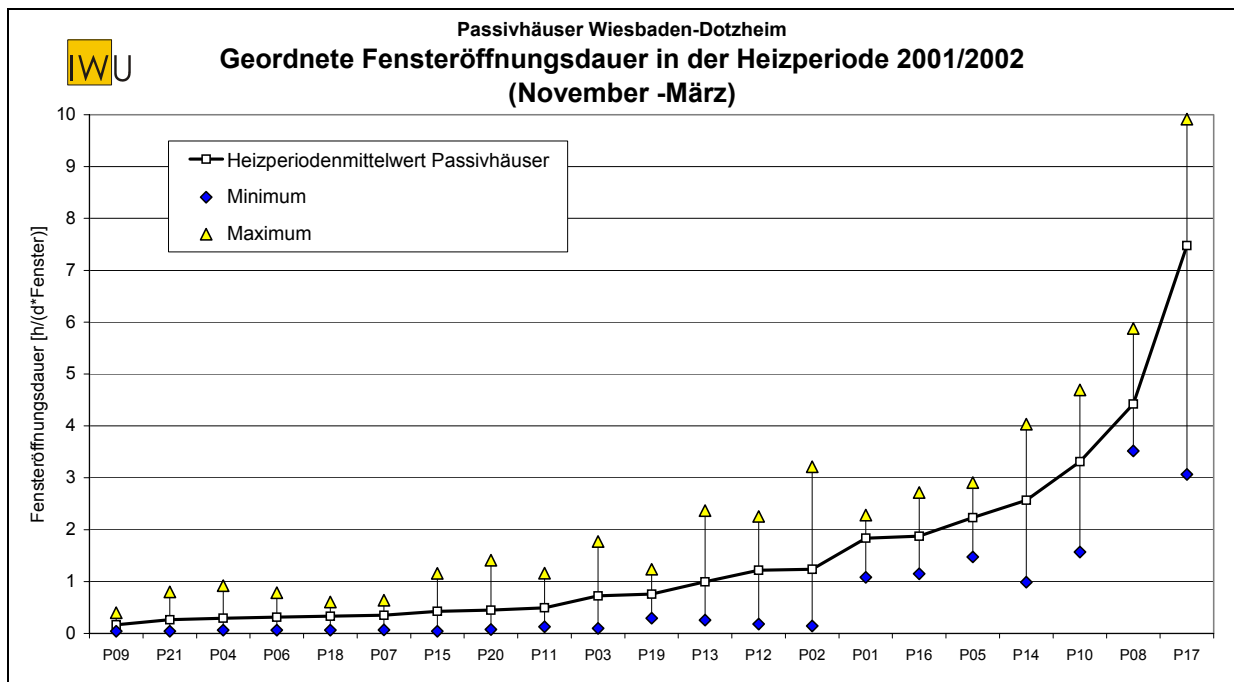


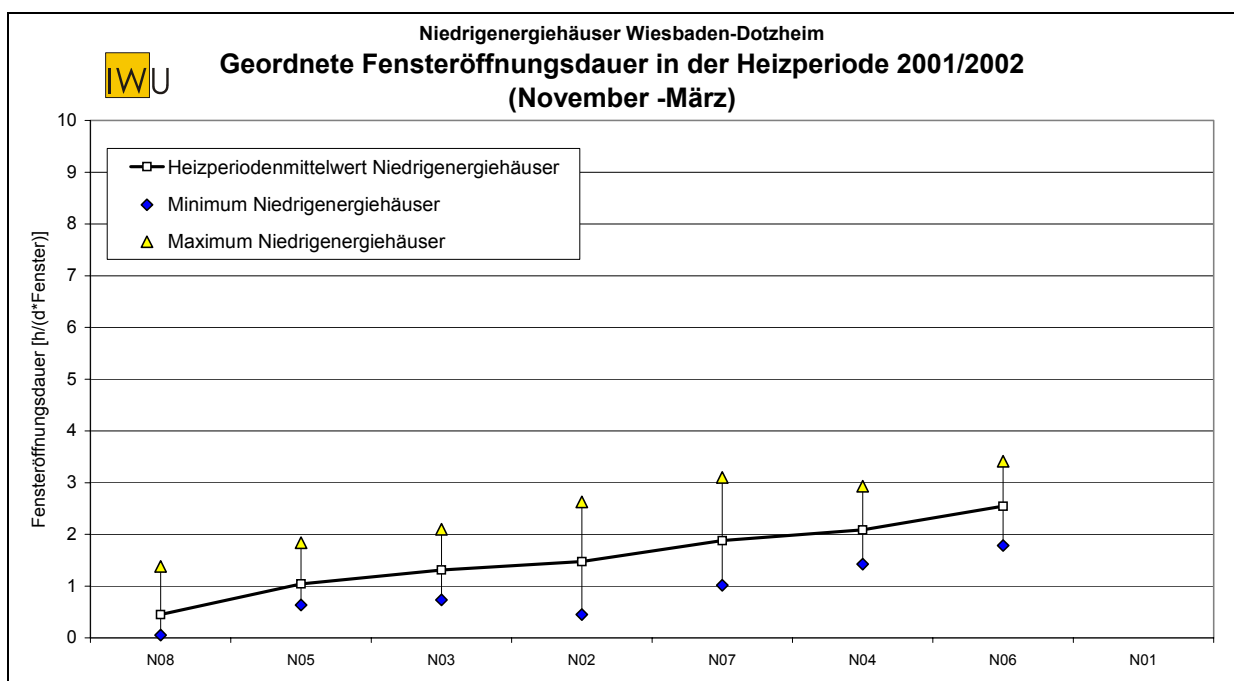
Abbildung 4.2.9-3 zeigt die geordneten mittleren Öffnungsdauern der Fenster eines jeden Hauses im Winter 2001/2002. Bei 14 Gebäuden sinken die Minima der Fensteröffnungszeiten auf unter 0,5 h/(d*Fenster). Dabei entwickeln sich die Monatswerte überwiegend wie in Abbildung 4.2.6-1 – von November bis Januar sinken die Fensteröffnungsdauern kontinuierlich und ab Februar ist wieder ein Anstieg zu beobachten.

Abbildung 4.2.9-3: Messwerte der Passivhäuser für die Fensteröffnungszeiten je Fenster



Bei 7 Passivhäusern liegen die Minima bei $1 \text{ h}/(\text{d} \cdot \text{Fenster})$ oder darüber. Hier handelt es sich um Häuser, in denen nachts in Schlafräumen gelüftet wird. Eine genauere Betrachtung der Tagesprofile und der daraus resultierenden Einteilung der Nutzer folgt weiter unten in diesem Kapitel. Der Mittelwert aller Passivhäuser weicht mit $1,5 \text{ h}/(\text{d} \cdot \text{Fenster})$ deutlich vom Median ab ($0,76 \text{ h}/(\text{d} \cdot \text{Fenster})$). Das bedeutet, dass die Mehrzahl aller Passivhäuser deutlich weniger die Fenster öffnet, als dies durch den Mittelwert ausgedrückt wird.

Abbildung 4.2.9-4: Messwerte der Niedrigenergiehäuser für die Fensteröffnungszeiten je Fenster



Bei den Niedrigenergiehäusern fällt eine Beurteilung aufgrund der deutlich geringeren Anzahl an Gebäuden schwerer (Abbildung 4.2.9-4). Es treten jedoch keine extremen Schwankungen zwischen minimalen und maximalen Fensteröffnungsdauern wie bei den Passivhäusern auf. Obwohl der Mittelwert in der Heizperiode mit $1,5 \text{ h}/(\text{d} \cdot \text{Fenster})$ nahezu identisch mit demjenigen der Passivhäuser ist, wird hier mehr über die Fenster gelüftet, da der Median mit $1,48 \text{ h}/(\text{d} \cdot \text{Fenster})$ sehr nahe am Mittelwert liegt.

Zur Einordnung dieser Fensteröffnungszeiten sollen die Passivhäuser mit Messwerten aus Gebäuden mit Lüftungsanlagen aus einer anderen Studie verglichen werden [71]. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass in der verwendeten Untersuchung mit 29 Gebäuden sowohl Lüftungsanlagen mit mechanischer Zu- und Abluft und Wärmerückgewinnung als auch reine Abluftanlagen zusammen betrachtet wurden. Diese Gebäude wurden in drei Nutzergruppen nach der Länge ihrer Fensteröffnungszeit aufgeteilt. Die Viellüfter öffneten umgerechnet ca. 6,5 h am Tag jedes Fenster, die Normallüfter erreichten ca. 2,5 h und die Weniglüfter 0,3 h Fensteröffnung je Tag und Fenster.

Für die Passivhäuser in Abbildung 4.2.9-3 ergibt sich eine mittlere Fensteröffnungsdauer von $1,5 \text{ h}/(\text{d} \cdot \text{Fenster})$, in den Monaten Dezember und Januar nur $1,0 \text{ h}/(\text{d} \cdot \text{Fenster})$. Dies bedeutet, dass die Bewohner der Passivhäuser im Mittel weniger die Fenster öffnen als die Normallüfter in der Vergleichsuntersuchung. Betrachtet man die Nacht- und Taglüfter der Passivhäuser, die im folgenden Kapitel erläutert werden, getrennt, so ergeben sich $0,6 \text{ h}/(\text{d} \cdot \text{Fenster})$ Fensterlüftung für die Taglüfter und $3 \text{ h}/(\text{d} \cdot \text{Fenster})$ für die Nachtlüfter. Somit liegen die Taglüfter nahe an den Weniglüftern bei [71], die Nachtlüfter etwas über den Normallüftern der Vergleichsuntersuchung. Auch bei Berücksichtigung der oben erwähnten unterschiedlichen anlagentechnischen Ausstattung kann jedoch festgestellt werden, dass die Passivhausbewohner in Wiesbaden wenig bis normal die Fenster öffnen, im Durchschnitt jedenfalls deutlich weniger als Bewohner anderer Häuser mit Lüftungsanlagen.

Nutzerprofile

Betrachtet man sich die Zeitpunkte und den Verlauf der Fensteröffnungen im Winter, erkennt man, dass bei langen Lüftungszeiten überwiegend nachts ein einzelnes Fenster geöffnet bleibt. Dieses Fenster liegt immer in einem Schlafräum im Obergeschoss und wird in den Morgenstunden meist geschlossen. Die Abbildungen 4.2.9-5 und 4.2.9-6 zeigen exemplarisch an zwei Gebäuden unterschiedliches Bewohnerverhalten.

Abbildung 4.2.9-5: Fensteröffnung in einem Passivhaus mit Nachlüftung im Verlauf von 2 Tagen im Dezember

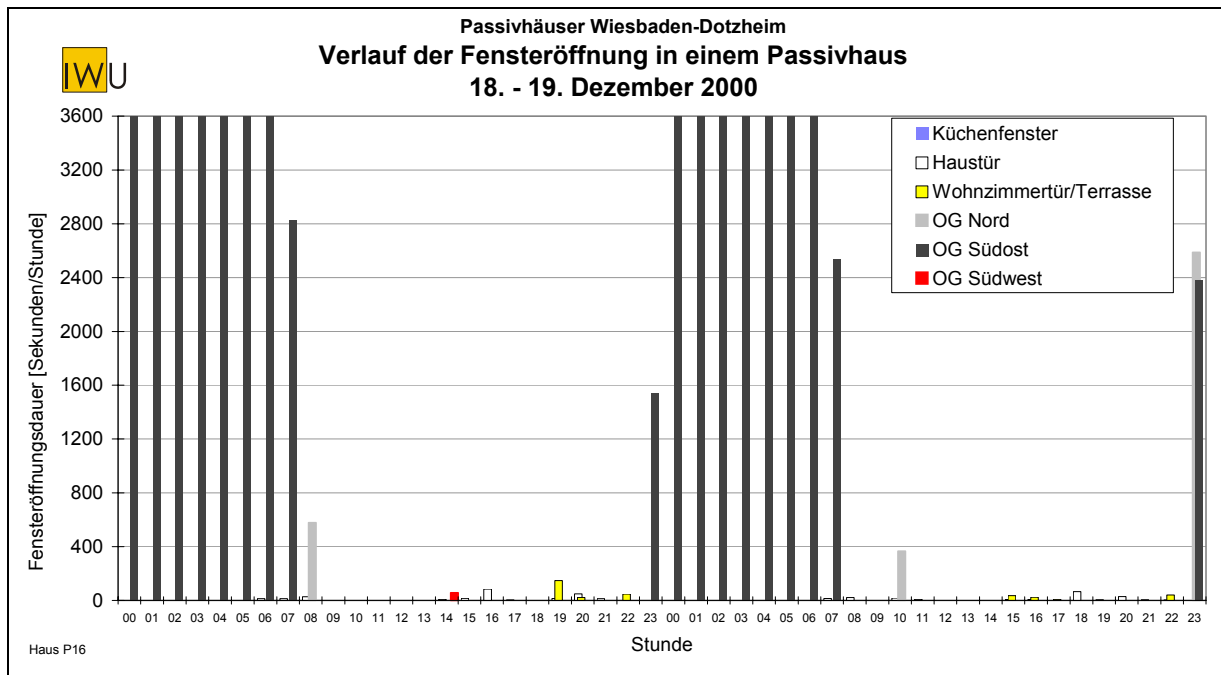


Abbildung 4.2.9-6: Fensteröffnung in einem Passivhaus mit nur kurzen Öffnungszeiten im Verlauf von 2 Tagen im Dezember

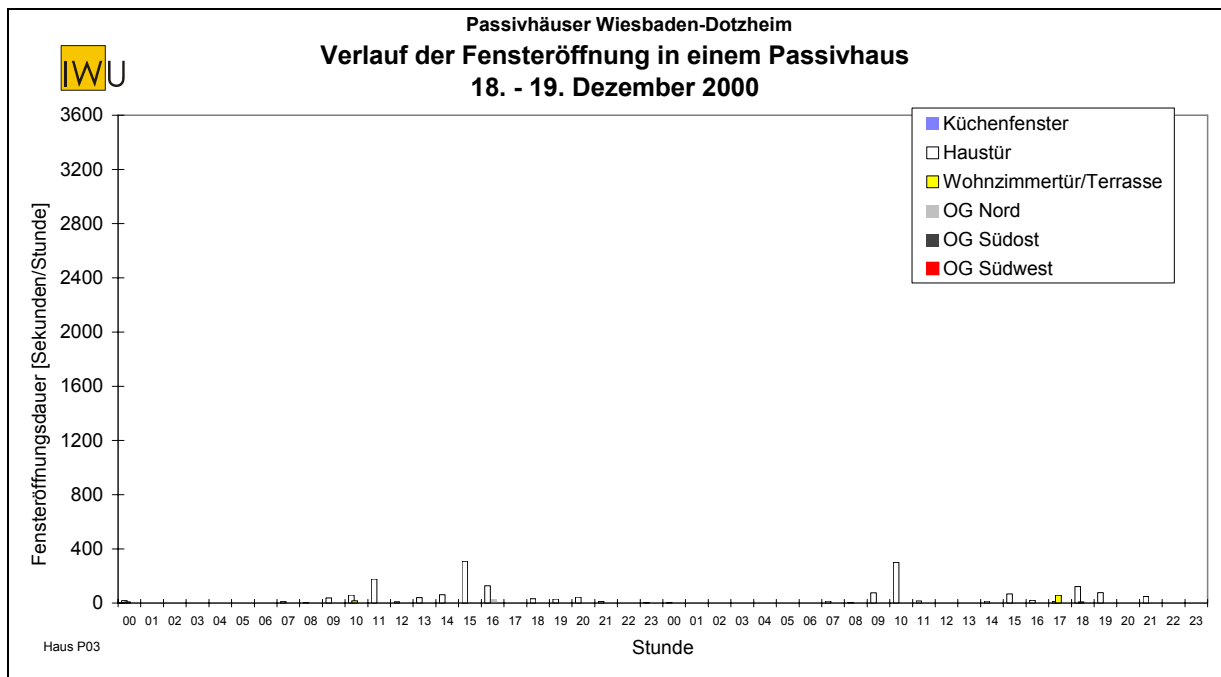


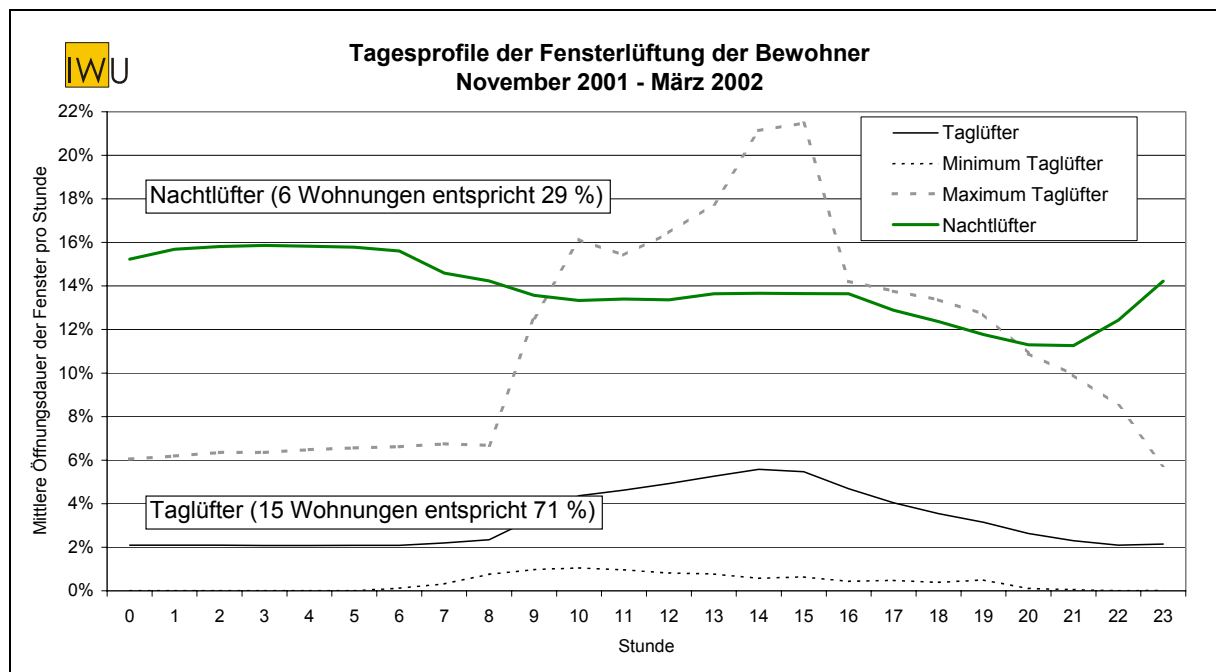
Abbildung 4.2.9-5 zeigt ein Haus, in dem im südöstlichen Obergeschosszimmer jede Nacht das Fenster geöffnet bleibt. In den Morgenstunden wird es dann nach dem Aufstehen der Bewohner geschlossen. Im nördlichen Obergeschosszimmer wird tagsüber öfters gelüftet sowie in manchen Nächten ebenfalls dauergelüftet. Alle anderen Fenster bleiben geschlossen. Im abgebildeten Zeitraum lagen die Außentemperaturen bei ca. $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. In einem anderen Haus sind in dieser Zeit mit tiefen Außentemperaturen alle Fenster durchgängig geschlossen, nur die Türen werden kurz geöffnet (Abbildung 4.2.9-6).

Die beiden ausgewählten Beispiele sind typisch für die beiden anfangs beschriebenen Gruppen kurzer und langer Fensteröffnungszeiten. Die Häuser mit nächtlicher Dauerlüftung deuten darauf hin, dass es eine Gruppe von Bewohnern gibt, die in Schlafräumen die Fenster nachts öffnen möchten. Daher wurden eine Gruppe der „Nachtlüfter“ und eine Gruppe der „Taglüfter“ definiert. Zu den Nachtlüftern werden diejenigen gezählt, die von November bis März in mindestens 30 % aller Nächte in der Zeit von 01:00 – 05:00 mindestens ein Fenster konstant geöffnet haben. Zu den Taglüftern gehören alle, die nicht zu den Nachtlüftern zählen.

Abbildung 4.2.9-7 zeigt die typischen Tagesgänge der beiden Nutzergruppen. Die Taglüfter halten nachts die Fenster überwiegend geschlossen und lüften zu einem geringen Teil (max. 6 % der Fenster eines Hauses in der jeweiligen Stunde) tagsüber. Die Bandbreite der Gruppe der Taglüfter ist jedoch beträchtlich. Neben Häusern, in denen auch tagsüber kaum mehr als die Haus- und Terrassentüren geöffnet werden, gibt es ebenso Nutzer, die nachts im Mittel ca. 6 % der Fenster geöffnet halten und tagsüber sehr stark lüften.

Das Tagesprofil der Nachtlüfter zeichnet sich durch ca. 6 Stunden Dauerlüftung während der Nacht bei mindestens einem Fenster aus. Im Verlauf des Tages reduziert sich die mittlere Öffnungsdauer der Fenster, wobei in der Mittagszeit, wie bei den Taglüftern, ein geringfügiges kurzes Ansteigen der Öffnungszeiten feststellbar ist. Bei den untersuchten Passivhäusern fallen 29 % der Haushalte in die Kategorie Nachtlüfter, die überwiegende Mehrheit ist den Taglüftern zuzurechnen (71 %). In einer Untersuchung von Künzel [72] wurde bei einer Befragung von 2000 repräsentativen Haushalten 1979 von 34 % der Befragten angegeben, dass sie im Schlafzimmer das Fenster länger als eine Stunde geöffnet halten. Somit stimmen die Bewohner der Passivhäuser gut mit dem vor über 20 Jahren ermittelten Durchschnitt des Lüftungsverhaltens überein.

Abbildung 4.2.9-7: Charakteristische Tagesprofile der Nutzergruppen



Betrachtet man nur die Monate November bis Februar, der März ist bereits nicht mehr vollständig zur Heizperiode zu zählen, so verschieben sich in der Mittagszeit die Kurve der Taglüfter und nachts die der Nachtlüfter um ca. 2 % nach unten. Das extreme Maximum bei den Normallüftern am Nachmittag reduziert sich auf maximal 15 % Fensteröffnung pro Stunde und Fenster. Dies verdeutlicht, dass im März die Bewohner der Häuser sich bereits in ihrem Lüftungsverhalten umstellen – ohne dass sich dadurch negative Auswirkungen auf den Heizwärmeverbrauch ergeben.

Witterungsabhängigkeit der Fensterlüftung

Eine hohe direkte Korrelation zwischen Fensteröffnungsdauer in der Heizzeit und dem Heizwärmeverbrauch ist nicht feststellbar. Niedrige Verbrauchswerte kommen auch bei langen Fensteröffnungszeiten vor. Umgekehrt gibt es auch Gebäude, die relativ kurze Öffnungszeiten aufweisen und einen hohen Heizwärmeverbrauch erreichen. Andere Einflussfaktoren sind hier offensichtlich dominierend (vgl. Kapitel 6.4).

Abbildung 4.2.9-8: Zusammenhang zwischen Fensteröffnungsdauer im Heizwärmeverbrauch im Januar 2002

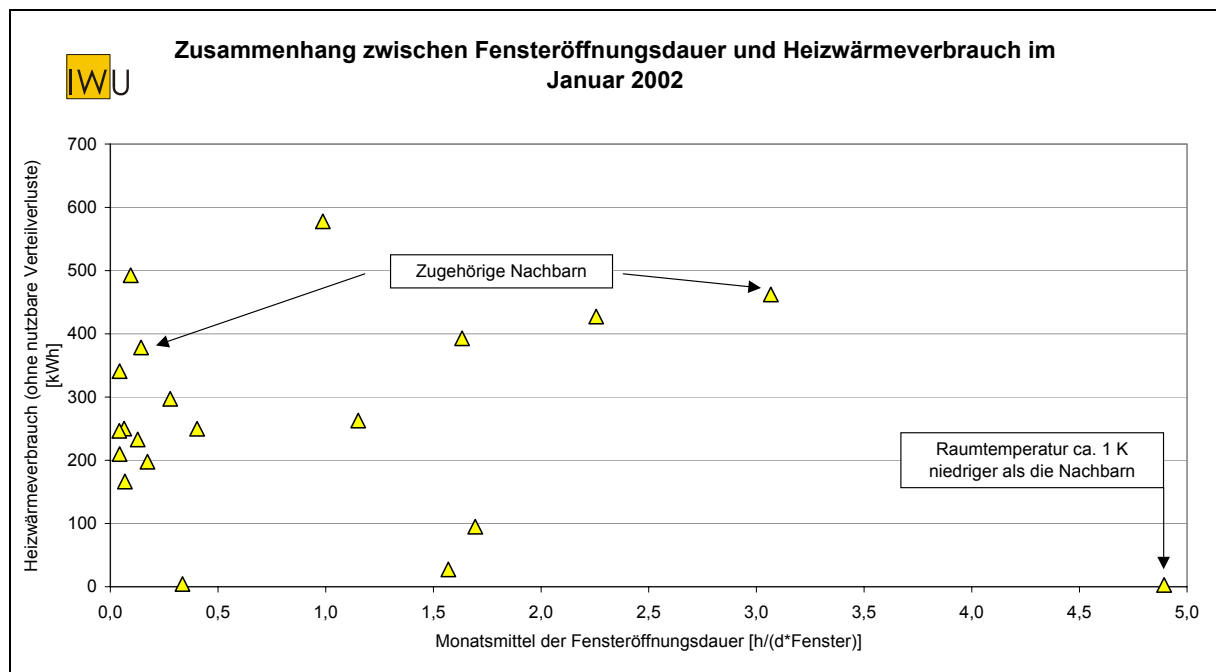


Abbildung 4.2.9-8 zeigt exemplarisch den Heizwärmeverbrauch im Januar 2002 in Abhängigkeit von der Fensteröffnungsdauer. Im linken Teil des Diagramms befinden sich viele Passivhäuser mit kurzen Fensteröffnungszeiten und stark variierenden Heizwärmeverbräuchen. Bei zunehmender Fensteröffnungsdauer treten sowohl niedrige als auch hohe Verbräuche auf. Das Gebäude mit einem Extremwert von fast 5 Stunden Fensteröffnung pro Tag und sehr geringem Heizwärmeverbrauch hat einen Großteil des Januars ein Fenster in einem Südraum dauerhaft geöffnet (entspricht bei 7 Räumen mit Fenstern ca. 3,5 h Fensteröffnung pro Tag und Fenster). Es ist davon auszugehen, dass es sich um eines der kleinen Galeriefenster handelt (ca. 40 cm Höhe), das mit einer Jalousie versehen ist. Der geringe Luftaustausch über ein solches gekipptes Fenster (siehe Beitrag Kapitel 5) führt dann nur zu geringen Wärmeverlusten. Gleichzeitig liegt die Raumtemperatur in diesem Gebäude um mindestens 1 K unter der der Nachbarhäuser. Diese heizen somit das Gebäude mit den langen Öffnungszeiten mit. Eines dieser Nachbargebäude weist bei kurzen Fensteröffnungszeiten und Raumtemperaturen von 20,5 °C vergleichsweise hohe Heizwärmeverbräuche auf. Als Fazit kann festgehalten werden, dass bei den hier untersuchten Passivhäusern die gemessenen Fensteröffnungszeiten den Heizwärmeverbrauch nicht alleine bestimmen, sondern weitere Faktoren eine wichtige Rolle spielen.

Untersucht man jedoch den Zusammenhang zwischen der mittleren täglichen Heizleistung (aller Häuser) und der Fensteröffnungsdauer, so ist deutlich zu erkennen, dass Fenster nur bei geringen Heizleistungen, d. h. hoher Außentemperatur oder hohem Strahlungsangebot geöffnet werden. An kalten, trüben Tagen mit hoher Heizleistung bleiben die Fenster der Räume überwiegend geschlossen (Abbildung 4.2.9-9). Die Gruppe der Normallüfter öffnet bei hohen Heizleistungen überhaupt nicht die Fenster. Mit abnehmender Heizleistung steigt hier die Öffnungsdauer stark an.

Bei den Nachtlüftern ist der Zusammenhang zwischen Heizleistung und Fensteröffnungsdauer deutlich geringer. Hier liegen offensichtlich Gewohnheiten vor, die nicht durch die einströmende kalte Außenluft beeinflusst werden.

Abbildung 4.2.9-9: Zusammenhang zwischen Fensteröffnungsdauer und Heizlast

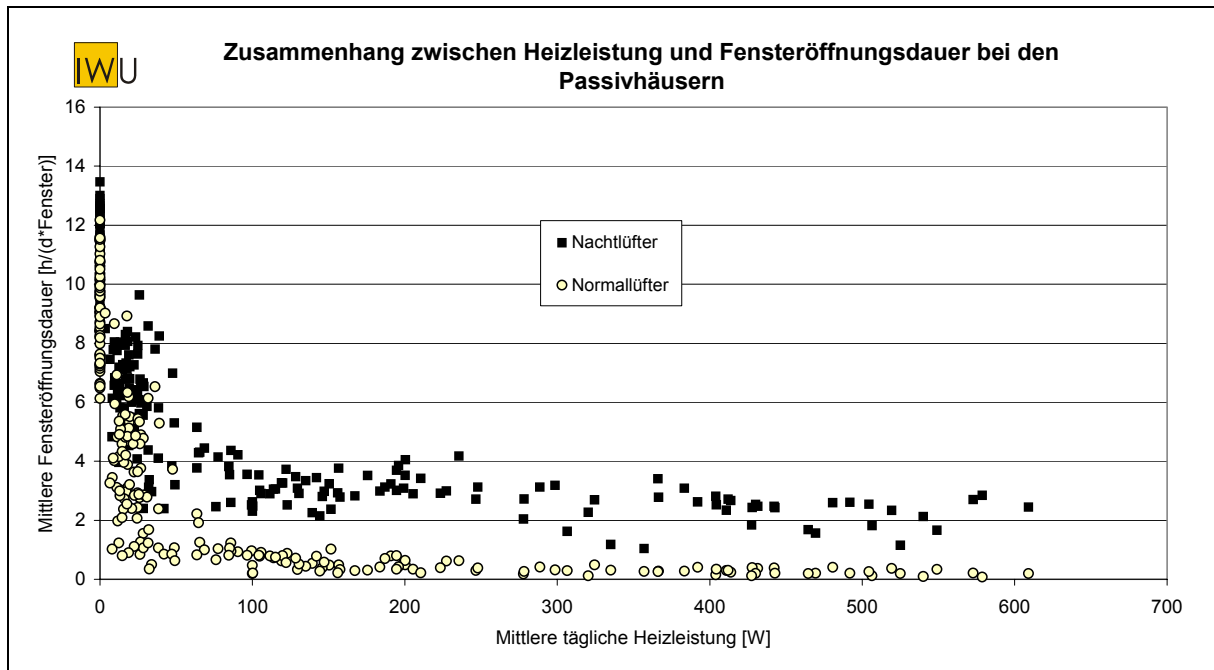
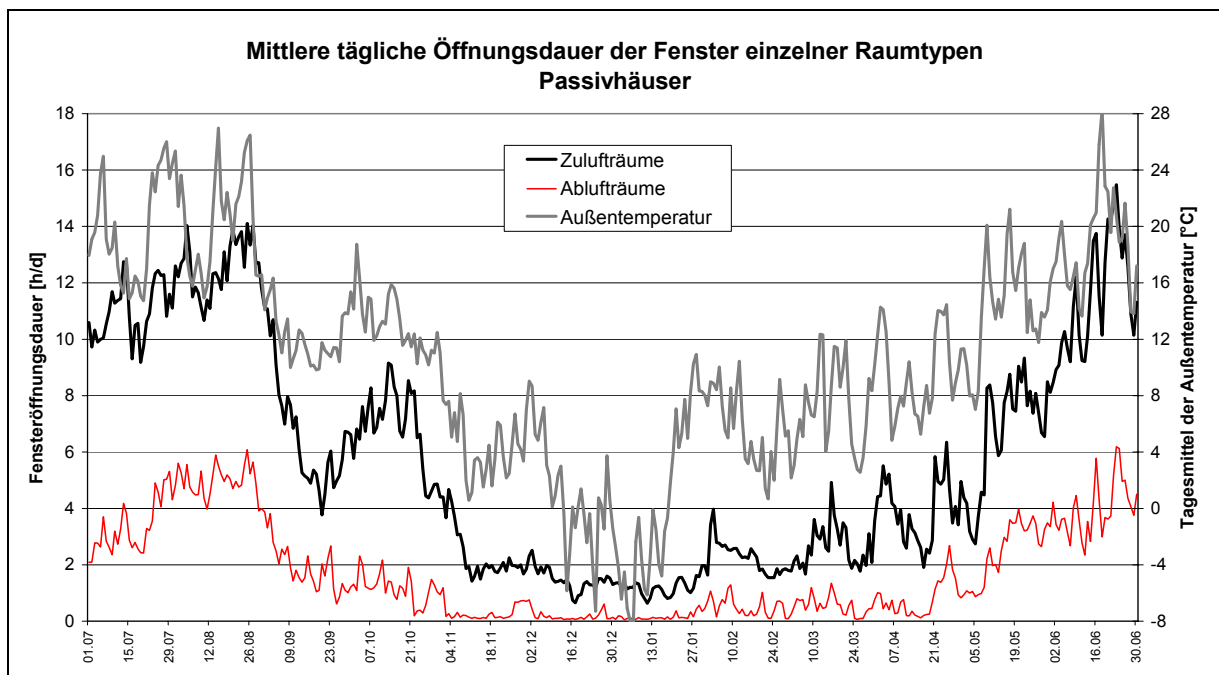


Abbildung 4.2.9-10: Fensteröffnungsdauer der Zu- und Ablufträume im Jahresverlauf

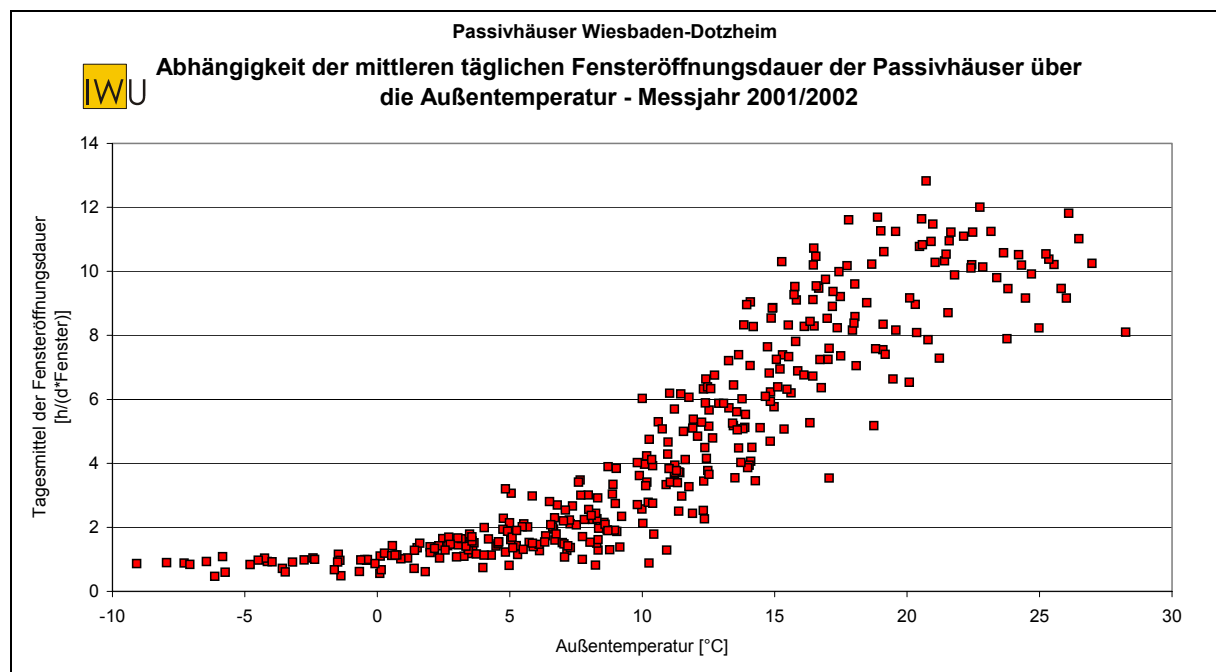


Jahresverlauf der Fensteröffnung

Abbildung 4.2.9-10 zeigt die Entwicklung der Öffnungszeiten über ein Messjahr. Bei den vermessenen Gebäuden treten im Winter sehr geringe Fensteröffnungszeiten auf, die bis in den März keinen Einfluss der Außentemperatur erkennen lassen. Erst ab Mitte März reagieren die Bewohner deutlich auf die Schwankungen der Außentemperatur. Im Frühjahr wird deutlich mehr über die Fenster gelüftet als in der Heizperiode. Die Öffnungszeiten der Fenster in Zulufräumen liegen aufgrund ihrer größeren Anzahl auf einem höheren Niveau als die Abluftfenster.

Abbildung 4.2.9-11 zeigt die Abhängigkeit der Fensteröffnungsdauer von der Außentemperatur, wobei nicht zwischen Nacht- und Normallüftern unterschieden wurde, da die Daten beider Gruppen einen ähnlichen Verlauf aufweisen. Bei niedrigen Außentemperaturen bis ca. 5 °C verändern sich die Fensteröffnungsdauern kaum. Ab ca. 8 °C steigen die täglichen Fensteröffnungsdauern fast linear mit einer nahezu konstanten Streubreite an. Ab ca. 18 °C tritt eine Sättigung der Werte ein. Bei hohen Außentemperaturen ist schließlich wieder ein leichtes Absinken der Fensteröffnungsdauern zu erkennen, um weniger warme Luft von Außen in das Gebäude einströmen zu lassen.

Abbildung 4.2.9-11: Zusammenhang zwischen Fensteröffnungsdauer und Außentemperatur



Betrachtet man bei den Normallüftern den Einfluss der Klimaparameter solare Einstrahlung in horizontaler, Süd- und Nordrichtung, Außentemperatur und Windgeschwindigkeit und -richtung, so sind für den Zeitraum Juli 2001 bis Ende Juni 2002 hohe Korrelationen für Horizontalstrahlung ($r=69\%$), Solarstrahlung Nord ($r=73\%$) und Außentemperatur ($r=86\%$), deutlich geringere für die Solarstrahlung in Südrichtung ($r=29\%$) festzustellen. Bei den Nachtlüftern ist die statistische Abhängigkeit von den Klimaparametern vergleichbar (E_{hor} : $r=72\%$; E_{Nord} : $r=78\%$; ϑ_A : $r=88\%$, $E_{\text{Süd}}$: $r=29\%$). In beiden Fällen ist das Lüftungsverhalten

stark klimaabhängig und in kalten und strahlungsarmen Perioden wird sehr viel weniger über die Fenster gelüftet (Tabelle 4.2.9-2).

In der Heizperiode sinken die Korrelationen mit den Klimaparametern daher deutlich. Nur die Außentemperatur lässt mit $r=60\%$ bei den Normallüftern und $r=59\%$ bei den Nachtlüftern noch einen Einfluss auf die Fensteröffnungsdauer erkennen. Für die Horizontalstrahlung ergeben sich im Winter nur noch Korrelationskoeffizienten von $r=39\%$ bzw. $r=28\%$. Windgeschwindigkeit und Windrichtung lassen keinen Einfluss auf die Fensteröffnungsdauer erkennen.

Tabelle 4.2.9-2: Korrelationskoeffizienten der gemessenen Klimaparameter mit der Fensteröffnungszeit

	$E_{\text{horizontal}}$	E_{Nord}	$E_{\text{Süd}}$	$\vartheta_{\text{Außen}}$	Windrichtung	v_{Wind}
Juli 2001- Juni 2002						
Normallüfter	0,69	0,73	0,29	0,86	-0,02	-0,21
Nachtlüfter	0,72	0,78	0,29	0,88	-0,01	-0,20
November 2001-März 2002						
Normallüfter	0,39	0,39	0,25	0,60	0,06	-0,11
Nachtlüfter	0,28	0,29	0,13	0,59	0,07	0,01

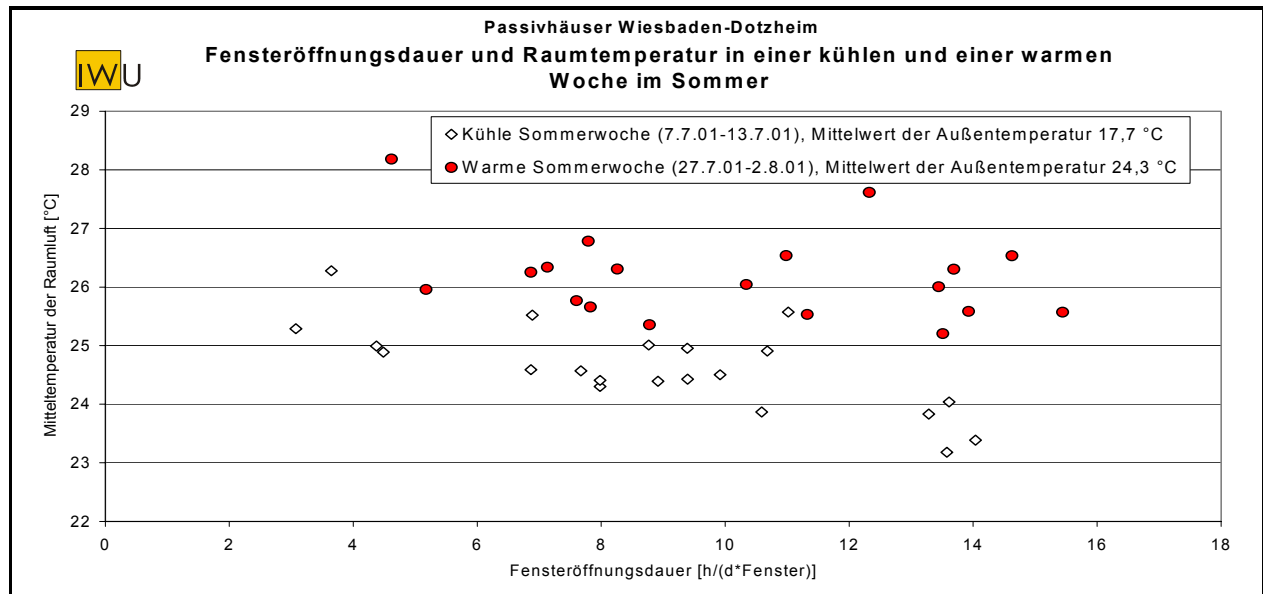
Rechnet man die mittleren täglichen Fensteröffnungsdauern auf stündliche Werte um und vergleicht diese mit Messwerten aus anderen Projekten, so wird in den Passivhäusern in Wiesbaden deutlich weniger über die Fenster gelüftet als in anderen Gebäuden.

Fensteröffnung im Sommer

Die sommerlichen Temperaturen in den Passivhaus-Wohnungen werden beeinflusst durch die Verschattung der Südfenster (Ost- und Westfenster gibt es nicht), die inneren Wärmequellen, die Temperaturen der jeweiligen Nachbarhäuser sowie Umfang und Zeitpunkt der Fensteröffnung. In Abbildung 4.2.9-12 ist die Raumtemperatur der einzelnen Häuser über die Fensteröffnungsdauer für eine Sommerwoche mit niedrigen Außentemperaturen (Mittelwert $17,7\text{ °C}$) und eine mit hohen Außentemperaturen (Mittelwert $24,3\text{ °C}$) aufgetragen. Man erkennt, dass in der kühlen Woche die Häuser mit längerer Fensteröffnung bis zu 2 °C niedrigere Raumtemperaturen aufweisen. In der warmen Sommerwoche ist die Streuung zwar deutlich größer, bei längeren Fensteröffnungszeiten liegen jedoch im Mittel immer noch tiefere Raumtemperaturen vor.

Dieses Ergebnis ist überraschend, da lange Fensteröffnungszeiten im Sommer dazu führen sollten, dass warme Außenluft verstärkt in die Gebäude strömt und diese erwärmt. Nur mit einer Nachtkühlung können die Raumtemperaturen normalerweise gesenkt werden. In Abbildung 4.2.9-13 ist das Verhältnis von Taglüftung (von 9 Uhr bis 20 Uhr) und Nachtlüftung (von 21 Uhr bis 8 Uhr) als dimensionslose Zahl gegenüber der mittleren Raumtemperatur in der kühlen und der warmen Woche aufgetragen.

Abbildung 4.2.9-12: Zusammenhang zwischen Fensteröffnungsdauer und sommerlicher Raumtemperatur für die einzelnen Wohnungen

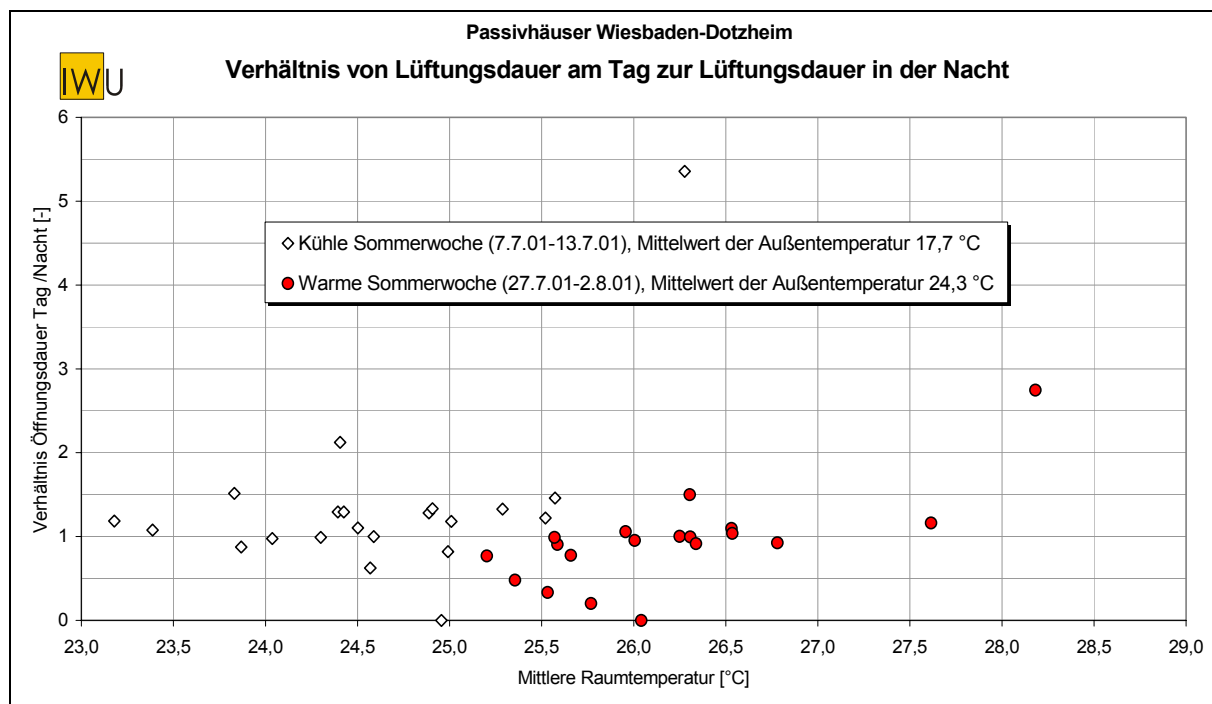


In der kühlen Sommerwoche wird 20 % mehr tagsüber gelüftet als nachts (Median des Verhältnisses Tag-/Nachtlüftung 1,2). Dabei muss berücksichtigt werden, dass einige Tage zuvor die Außentemperaturen höher lagen und die Wohnungen bereits erwärmt waren. Somit konnte auch tagsüber eine Abkühlung der Räume erfolgen. Bei niedrigen Raumtemperaturen herrscht ungefähr gleichviel Tag- wie Nachtlüftung vor, wobei es deutliche Ausreißer nach oben und unten gibt. Erst bei sehr langen Öffnungszeiten am Tag (rechter Ausreißer) sind auch die zu erwartenden höheren Raumtemperaturen zu erkennen.

In der warmen Woche lag der Median-Wert des Verhältnisses von Tag- zu Nachtlüftung bei 1,0. Es wurde somit häufiger nachts gelüftet was bei Gebäuden mit niedrigen Raumtemperaturen besonders zu erkennen ist. Auch in der warmen Sommerwoche findet sich ein Haus, das mit viel Taglüftung die höchste Raumtemperatur erreicht. Die Häufung des Verhältnisses zwischen Tag- und Nachtlüftung von eins deutet auf Fenster hin, die im Sommer dauerhaft geöffnet sind. Da die Raumtemperaturen aber kaum steigen, ist mit gekippten Fenstern zu rechnen, über die im Sommer aufgrund des geringen thermischen Antriebs und der bei heißen Wetterlagen geringen Windgeschwindigkeiten nur wenig Luft ausgetauscht wird.

Auch im Sommer reagieren die Bewohner der Passivhäuser somit meist richtig und lüften an warmen Tagen etwas mehr in der Nacht und an kühlen Tagen bei hohen Raumtemperaturen auch tagsüber, wenn dies zu einer Abkühlung der Räume führt.

Abbildung 4.2.9-13: Verhältnis von Tag- zu Nachtlüftung im Sommer und ihr Einfluss auf die Raumtemperatur für die einzelnen Wohnungen



Zusammenfassung der Messergebnisse zur Fensterlüftung

Das Fensteröffnungsverhalten der Bewohner in Passivhäusern kann sowohl einen beträchtlichen Einfluss auf die Heizwärmeverbräuche im Winter als auch auf die Raumtemperaturen im Sommer haben. Die Messergebnisse aus den Passivhäusern in Wiesbaden-Dotzheim lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

Die Bewohner der Passivhäuser in Wiesbaden reagieren in ihrem Fensteröffnungsverhalten sehr stark auf die Außentemperatur. Drei Viertel aller Passivhäuser lüften im Winter weniger als eine Stunde pro Tag und Fenster. Diese verbleibende Fensterlüftung zusätzlich zur Lüftungsanlage führt aber nicht zu einem deutlichen Anstieg des Heizwärmeverbrauchs gegenüber der Projektierung.

Die Bandbreite der Fensteröffnungsdauer im Winter ist sehr hoch. Es zeichnet sich eine Gruppe von Bewohnern ab, die nachts in mindestens einem Raum ein Fenster dauerhaft geöffnet haben. Die Fenster werden bei den meisten Häusern im Kernwinter praktisch gar nicht geöffnet. In der Regel stellt sich also das „richtige“ Fensteröffnungsverhalten von alleine ein. Bezüglich der Fensteröffnung im Sommer sind keine so ausgeprägten Verhaltensmuster zu erkennen. An extrem heißen Sommertagen führt grundsätzlich eine intensive Nachtlüftung und ein Geschlossenhalten der Fenster bei Tag zu tieferen Raumtemperaturen. Obwohl die Bewohner mehrfach über ein solches optimales Verhalten informiert wurden, haben nur wenige danach gehandelt. Aufgrund des Temperatenausgleichs infolge der Wärmeströme durch die Wohnungstrennwände und anderer möglicher Einflüsse (fehlende Verschattung, innere Wärmequellen) sind in diesen Wohnungen jedoch keine besonders niedrigen Temperaturen erreicht worden.

Trotz des nicht-optimalen Lüftungsverhaltens bleibt die Mehrzahl der Wohnungen an heißen Sommertagen jedoch auf einem insgesamt akzeptablen Temperaturniveau von max. 26 bis 27°C. Dies liegt auch daran, dass im Sommer das Tagesmittel der Außentemperatur unter den Raumtemperaturen liegt und somit lange Fensteröffnungszeiten im Mittel zu einer Reduktion der Raumtemperaturen führen (siehe Kapitel 6).

4.2.10 Versorgungstechnik

Die Stadtwerke Wiesbaden speisen an den Heizhäusern Nahwärme in die jeweilige Reihe ein. Dort wird sie in einem 1000 Liter Speicher für die Verteilung an die einzelnen Häuser gepuffert. Die Verteilung erfolgt durch gut gedämmte Leitungen (doppelte Dämmstoffdicke gegenüber Heizungsanlagen-Verordnung) unter den Häusern innerhalb der thermischen Hülle der Gebäude. Die dabei auftretenden Verluste belaufen sich auf ca. 22,5 MWh/a in Reihe C und 20 MWh/a in Reihe B. Von den gesamten Verlusten kann aber der den Häusern ein Teil der Wärme für die Gebäudebeheizung genutzt werden (ca. 4,5 kWh/(m²*a)). Es verbleiben ca. 10 kWh/(m²*a) in Reihe C und 9 kWh/(m²*a) als echter Verlust der Haustechnik (Tabelle 4.2.10-1). Die Verluste liegen in der reinen Passivhausreihe C zwischen 28 % und 32 %, in Reihe B mit den Niedrigenergiehäusern bei 24 % und 28 % bezogen auf die Gesamteinspeisung. Auf die Wärmeabnahme bezogen, betragen die Verluste bis über 50 %.

Dieser im Vergleich zu konventionellen Gebäuden niedrige Anteil an Verlusten liegt bei den Passivhäusern jedoch in der Größenordnung des Heizwärmeverbrauchs. Durch die kontinuierliche, nicht witterungsgeführte Betriebsweise des Versorgungsnetzes zur Warmwasserbereitung sind die Verbesserungsmöglichkeiten begrenzt.

Tabelle 4.2.10-1: Wärmeeinspeisung, Verbrauch und Verluste

	Wärme Reihe C [kWh/a]			
	01.10.98-30.09.99	01.07.99-30.6.00	01.07.00-30.6.01	01.07.01-30.6.02
Einspeisung Nahwärme	52950	47916	47868	47846
Verbrauch Häuser	30310	27765	25559	23191 (1)
Verluste gesamte Reihe	22640	20151	22309	24655 (1)
Nutzbare Verluste	6926	6926	6926	6926
Verbleibende Verluste	15714	13226	15383	17729 (1)
Verluste [%]	30%	28%	32%	37% (1)
Verluste [kWh/(m ² *a)]	10,2	8,6	10,0	11,5 (1)
	Wärme Reihe B [kWh/a]			
	01.10.98-30.09.99	01.07.99-30.6.00	01.07.00-30.6.01	01.07.01-30.6.02
Einspeisung Nahwärme	59659	53482	51064	46141 *
Verbrauch Häuser	36109	33961	31210	28328 *
Verluste gesamte Reihe	23550	19521	19854	17813 *
Nutzbare Verluste	6731	6731	6731	6731 *
Verbleibende Verluste	16819	12790	13123	11082 *
Verluste [%]	28%	24%	26%	24%
Verluste [kWh/(m ² *a)]	11,2	8,6	8,8	7,4

(1) Ausfall eines WMZ

* Datenausfall Reihe B 13.05.02-30.06.02

4.2.11 Vergleich verschiedener Versorgungsvarianten

Direkt nach der Errichtung der Niedrigenergie- und Passivhäuser, wurde die Nahwärmeversorgung über eine mobile Öl-Heizzentrale gespeist. Seit November 1999 ist das Nahwärmenetz der untersuchten Siedlung an die nahe gelegene Horst-Schmitt-Klinik angeschlossen. Das gasmotorische Blockheizkraftwerk (638 kW_{th} und 495 kW_{el}, η_{th} 48,5 %, η_{el} 37 %) im Krankenhaus wurde aufgrund der zusätzlichen Wärmelast im Fernwärmeversorgungsgebiet ca. 20 % größer dimensioniert. Bei einer gesamten Wärmeabgabe in das Nahwärmenetz von 4500 MWh liefern die Motoren 900 MWh. Somit stammen ca. 20 % der Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplung [73]. Die restliche Wärmeerzeugung erfolgt in einem Gaskessel. Die Wärmeverluste im Nahwärmenetz können bis zum Übergabepunkt der Stadtwerke im Heizhaus zu ca. 5 % abgeschätzt werden [74]. Die Übergabeschnittstelle liegt für die Nahwärmeversorgung im Heizhaus jeder Reihe.

Aufgrund dieser Daten ergibt sich für die Siedlung ein Primärenergie-Koeffizient für die Nahwärmeversorgung bis zum Übergabepunkt im Heizhaus von 1,14 kWh_{PE}/kWh_{End}. Die äquivalenten CO₂-Emissionen (Bilanzzeitraum 100 Jahre) betragen 226 g/kWh_{End}. Die Berechnungen wurden mit GEMIS 3.1 durchgeführt [75].

Zur Beurteilung der Nahwärmeversorgung wurde zum Vergleich eine dezentralen Variante mit Gas-Brennwerttherme berechnet, bei der unterstellt wurde, dass die Warmwasserbereitung ohne Zirkulation im Durchlauferhitzerbetrieb erfolgt. Die Wärmeübergabe findet im einzelnen Haus statt. Hier ist jedoch der geringe Wirkungsgrad der Therme bei der Warmwasserbereitung im Sommer zu berücksichtigen (55 %). Der Anteil des Energieaufwands für warmes Wasser liegt bei 50% des Gesamtwärmeverbrauchs.

Durch den niedrigen Anteil der Kraft-Wärme-Kopplung an der Gesamtversorgung (nur 20 %) schneidet die Primärenergiebilanz der Fernwärmeversorgung nur wenig besser ab, als Häuser, die über Gaskessel in den Heizhäusern der einzelnen Reihen versorgt würden (Tabelle 4.2.11-1).

Tabelle 4.2.11-1: Primärenergie- und Kohlendioxidemissionsfaktor der Nahwärmeversorgung und einer alternativen dezentralen Gas-Brennwert-Versorgung für die Passivhäuser

	Nahwärmeversorgung mit 20 % BHKW	dezentrale Versorgung mit Gaskessel
PE-Faktor [kWh _{PE} /kWh _{End}]	1,14	1,16
CO ₂ _{Äqui} -Faktor (100a) [g/kWh _{End}]	226	253

Tabelle 4.2.11-2 zeigt den Primärenergieverbrauch der Passivhäuser in Reihe C. Dargestellt sind die Varianten der Nahwärmeversorgung, so wie sie vor Ort realisiert ist, die dezentrale Versorgung mit Gas-Brennwertthermen in jedem Gebäude sowie die Nahwärmeversorgung, wie vor Ort realisiert, unter Berücksichtigung der Fotovoltaikanlagen, die auf 14 der 15 Gebäude der Reihe C montiert wurden. Bei letzteren wurde der eingespeiste Solarstrom von

den Haushaltsstromverbräuchen abgezogen. Bei den Stromverbräuchen wurde bei allen Varianten der Anteil der Messtechnik von 2,1 kWh/m² EBF herausgerechnet.

Die Wärmeversbräuche der Nahwärmevarianten beinhalten die Verluste der Verteilung ab dem Heizhaus. Dabei ergibt sich ein Primärenergieverbrauch von 123,4 kWh/(m²*a) für Heizung, Warmwasser, Hilfs- und Haushaltsstrom (Nahwärme). Das Ziel 120 kWh/(m²*a) zu erreichen, wurde somit trotz des Stromverbrauchs, der höher ausfiel als geplant, nur knapp verfehlt. Unter Berücksichtigung des solar erzeugten Stroms, reduziert sich der Primärenergieverbrauch bei der Nahwärmeversorgung auf unter 100 kWh/(m²*a).

Tabelle 4.2.11-2: Primärenergieverbrauch und CO₂-Emissionen der Reihe C für Heizung, Warmwasser und Haushaltsstrom für das Messjahr 2000/2001

	Nahwärme	Gas-Brennwert	Nahwärme+PV
Haushaltsstromverbrauch	46024 kWh	45289 kWh	33424 kWh
Wärmeverbrauch ges.	47868 kWh	47237 kWh	47868 kWh
Energiebezugsfläche	1539,0 m ²	1539,0 m ²	1539,0 m ²
Primärenergieverbrauch	123,4 kWh/m ² a	122,1 kWh/m ² a	99,3 kWh/m ² a
CO ₂ -Äquivalent-Emissionen	27,6 kg/m ² a	28,0 kg/m ² a	22,0 kg/m ² a

Die dezentrale Gas-Brennwertversorgung weist einerseits geringere Verluste bei der Wärmeverteilung auf, andererseits muss für warmes Wasser ungefähr doppelt so viel Energie aufgewendet werden, wie für die Heizung. Dies führt in der Summe dazu, dass die dezentrale Versorgung und die Nahwärmeversorgung energetisch und bei den CO₂-Emissionen gleichwertig sind.

Die Berechnungen zeigen, dass eine Nahwärmeversorgung mit nur 20 % Kraft-Wärme-kopplungsanteil keine ökologischen Vorteile bringt. Erst bei einem höheren KWK-Anteil von 30 % (besser 50 %) an der Jahresarbeit kann sie ihre Vorteile ausspielen.

5 Lüften durch Fensteröffnen

Wie bereits dargestellt wurde, öffnen die Bewohner der Niedrigenergie- und Passivhaussiedlung auch in der Heizperiode gelegentlich die Fenster. Dies betrifft vor allem die Niedrigenergiehäuser. Aber auch in einigen der Passivhäuser bleiben die Fenster nicht ständig geschlossen. Passivhäuser sind andererseits potentiell besonders sensibel auf zusätzliche Wärmeverluste, da die anspruchsvolle funktionale Anforderung nicht nur niedrigen Heizenergieverbrauch, sondern auch hohen Komfort bei gleichzeitig begrenzter Möglichkeit von Wärmezufuhr garantieren muss [76]. Der Heizenergieverbrauch in den Passivhäusern ist so gering, dass die Anforderung offenbar erfüllt wird; durch das Verhalten der Nutzer wird die Zielsetzung nicht gefährdet [77]. Grundlagen für die Bestimmung des Fensterluftwechsels und dessen Einfluss sollen in diesem Kapitel dargestellt werden, und zwar:

- experimentelle Untersuchung der Lüftungsanlagen in den Niedrigenergie- und Passivhäusern in Bezug auf Zu- und Abluftmengen, Luftwechsel und Lüftungseffizienz
- experimentelle Untersuchung der Auswirkung des Fensteröffnens mittels Tracer-gasmessungen in ausgewählten Niedrigenergie- und Passivhäusern in der Siedlung in Wiesbaden
- theoretische Untersuchungen mit einem Gebäudesimulationsprogramm zu den Auswirkungen des Fensteröffnens auf Luftwechsel und Heizenergiebedarf anhand von Referenzgebäuden.

Die experimentellen Untersuchungen und deren Grundlagen werden in Abschnitt 5.1 beschrieben. Die theoretischen Überprüfungen der Berechnungsansätze sind Inhalt des Abschnitts 5.2.

Die Analyse des Einflusses der gemessenen Fensteröffnungszeiten auf die individuellen Heizenergieverbräuche der Passivhäuser in Wiesbaden ist in Kapitel 6.3.2 sowie 6.4.5 bzw. 6.4.6 dargestellt.

5.1 Messungen von Luftaustauschkennzahlen mit Einsatz von Tracergas

Ziel der messtechnischen Untersuchungen war es, Luftwechsel und weitere Luftaustauschkennzahlen zu bestimmen, und zwar einerseits für die Lüftungsanlage allein, andererseits bei einem geöffneten Fenster.

Hierzu wurden zwei Messmethoden eingesetzt:

- Mit einem Lüftungsmessgerät wurden die Zu- und Abluftvolumenströme an den Zu- und Abluftventilen bzw. (bei den Niedrigenergiehäusern) an den Zuluftöffnungen gemessen. Diese Untersuchungen wurden in mehreren Niedrigenergiehäusern und zwei

Passivhäusern durchgeführt und sind im Anhang dokumentiert. Den gesamten absoluten Luftwechsel kann man aus diesen Messungen nur bestimmen, wenn das Gebäude dicht ist und die Fenster geschlossen sind.

- Mit einem Spurengas wurde die relative (volumenbezogene) Luftwechselrate bestimmt. Die Messungen mit dem Lüftungsmessgerät dienen hier zur Eichung auf absolute Volumenströme. Im Gegensatz zum Lüftungsmessgerät ist diese Messmethode auch anwendbar, wenn der Luftaustausch mit der Umgebung nicht allein über die Lüftungsanlage stattfindet. Zusätzlich konnten daher mit dieser Methode auch Luftwechsellmessungen bei geöffneten Fenstern durchgeführt werden. Ferner wurden weitere Luftaustauschkennzahlen mit der Spurengasmethode ermittelt (Luftalter, Luftaustauschwirkungsgrad).
Diese Messungen wurden exemplarisch für die ganze Siedlung in je einem Niedrigenergie- und einem Passivhaus durchgeführt.

Die Messungen wurden vom Passivhaus Institut durchgeführt und sind im Anhang dokumentiert.

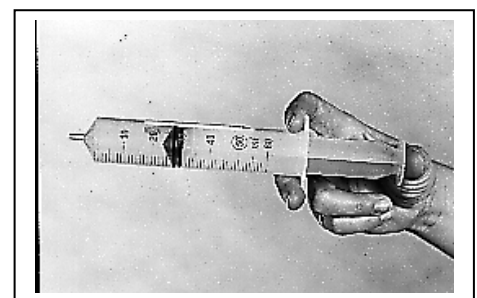
Im Folgenden werden Grundlagen, Aufbau und Ergebnisse der Spurengasmessungen zusammenfassend dargestellt. Die absoluten Messungen mit dem Lüftungsmessgerät werden für die Eichung der relativen Volumenströme verwendet.

5.1.1 Messung von Luftaustauschkennzahlen

Der Luftwechsel ist definiert als der Luftaustausch mit der Umgebung. Die Luftwechselrate ist der Luftaustausch, bezogen auf das Raumluftvolumen bzw. auf das in den Luftaustausch einbezogene Volumen. Der Kehrwert ist die nominale Zeitkonstante. Die Luftwechselrate kann mit einem Spurengas gemessen werden, wenn dieses gleichmäßig im Raum verteilt ist.

Abbildung 5.1.1-1: Einbringen von SF₆ in den Raum

Als Spurengase kommen Gase in Betracht, die ungiftig und chemisch inaktiv sind, und bei denen keine Adsorption an Oberflächen im Gebäudeinneren auftritt; ferner muss jede natürliche Konzentration weit unter der Messkonzentration liegen [78]. Es gibt eine Reihe verschiedener Spurengase, am häufigsten werden Kohlendioxid, Lachgas und Schwefelhexafluorid verwendet.



Bei der hier vorliegenden Messung wurde SF₆ eingesetzt. Es hat den Vorteil, dass in niedrigen Konzentrationen (im ppb-Bereich) gemessen werden kann und die Proben bereits während des Versuchs gaschromatografisch ausgewertet werden können.

Die wichtigsten Messmethoden für Spurengasmessungen sind:

Die Konzentrationsabfall-Methode

Bei der Abklingmethode wird Tracergas vor Beginn der Messung in den Versuchsraum eingebracht und gründlich mit der Raumluft vermischt, so dass zu Beginn der Messung im gesamten Raum eine gleichmäßige Tracergasanfangskonzentration vorhanden ist. Durch den Luftaustausch kommt es zu einem Konzentrationsabfall, der unter der Voraussetzung vollständiger Durchmischung exponentiell ist und daher mit einer Regressionsmethode ausgewertet werden kann. Das Ergebnis ist die nominale Zeitkonstante bzw. der Luftwechsel. Die Tracergasmenge und das Raumluftvolumen müssen dazu nicht bekannt sein. Vorteilhaft ist es außerdem, dass mit der Regressionsmethode schon bei wenigen Messpunkten bzw. kurzen Messdauern der Fehler gering ist; vor allem bei kleinen Luftwechseln ebenso wie bei der Auswertung von Differenzen (z.B. hier beim Fensterluftwechsel), ist dieser Vorteil von Bedeutung.

Da das anfangs zugeführte Indikatorgas dabei verbraucht wird, eignet sich diese Methode vor allem für einmalige, kurzfristige Messungen mit nicht zu großem Luftwechsel.

Puls-Methode

Zu Beginn der Messung wird kurzzeitig eine kleine Menge Tracergas in den Raum eingebracht und sofort gründlich mit der Raumluft durchmischt. Kurzzeitig heißt, dass die Einspritzzeit wesentlich kürzer ist als die nominale Zeitkonstante. Der Indikatorgasverbrauch ist geringer, der Fehler aber größer, denn es muss auch die eingebrachte Tracergasmenge bekannt sein.

Konstant-Emissions-Methode

Bei diesem Verfahren wird ebenfalls der Konzentrationsverlauf über der Zeit gemessen. Im Gegensatz zur Abklingmethode wird aber die Tracergaszufuhr in den Prüfraum erst bei Versuchsbeginn gestartet und dann über den gesamten Messzeitraum konstant gehalten. Die vollständige Durchmischung ist bei dieser Methode schwieriger zu erreichen, da hier das Tracergas während der Aufnahme von Messwerten eingeblasen und vermischt wird, während bei der Konzentrationsabfall-Methode bereits vor Beginn der Messung durchmischt wird. Die Methode mit konstanter Tracergaszufuhr ist besonders zur Durchführung längerfristiger Messungen und Messungen größerer Luftwechsel geeignet. Da der Massenstrom des Tracergases möglichst genau gemessen werden muss, ist diese Methode aufwändiger als die Abklingmethode. Zudem muss das effektive Raumluftvolumen, das am Luftaustausch beteiligt ist, bekannt sein.

Unter stationären Bedingungen stellt sich nach einiger Zeit ein Gleichgewichtszustand ein. Der Luftwechsel kann dann direkt aus der gemessenen Gleichgewichtskonzentration, dem Raumluftvolumen und der konstanten Tracergaszufuhr F berechnet werden, ohne dass eine Regressionsanalyse nötig ist. Der Messfehler jedoch deutlich größer als bei der Abklingmethode.

Konstant-Konzentrations-Methode

Vor Beginn der Messung wird Tracergas in den Raum gegeben und mit der Luft vermischt, bis die gewünschte Konzentration erreicht ist. Während der Messung wird dieser Sollwert durch eine geeignete Regeleinrichtung konstant gehalten. Gaskonzentration und Tracergaseintrag werden über die Zeit gemessen und aufgezeichnet. Der Luftstrom und der Luftwechsel sind zu der Tracergas-Einblasrate proportional, wodurch die Auswertung der Messergebnisse einfach ist. Die Herstellung der konstanten Konzentration ist jedoch sehr aufwändig. Diese Methode eignet sich zur automatischen und längerfristigen Aufzeichnung des Luftwechsels [79].

Tracergasmessungen sind generell zur Ermittlung von Luftwechselraten sehr geeignet, wenn eine gleichmäßige Durchmischung der Raumluft erreicht werden kann. Dies funktioniert gut bei mittleren Luftwechselraten, kann jedoch bei großen Luftwechselraten nicht unbedingt gewährleistet werden. Noch schwieriger sind extrem kleine Luftwechselraten: Hier sind die Zeitkonstanten sehr hoch, entsprechend lange ist die erforderliche Messdauer. Die Messergebnisse sind jedoch sehr stark von den Momentanbedingungen abhängig, ein stationärer Zustand kann schon aufgrund der Außenklimaveränderungen nicht hergestellt werden. Letzteres hat auch zur Folge, dass einzelne Messungen immer nur ein Momentanbild wiedergeben und nicht ohne Weiteres auf einen mittleren Luftwechsel über einen Zeitraum geschlossen werden kann. Wichtige Einflussgrößen sind die Windgeschwindigkeit und -richtung, die Innenraum- und Umgebungstemperaturen.

Der Luftwechsel allein reicht nicht aus, die Raumluftqualität zu bewerten, da er keine Auskunft über die Luftverteilung im Gebäude gibt. Zur Beschreibung der Raumluftqualität und der Güte der Raumbelüftung müssen weitere Kenngrößen herangezogen werden [80],[81].

Die Lüftungseffektivität bewertet die Effizienz des Luftaustausches im untersuchten Raum. Der Luftaustauschwirkungsgrad stellt ein Maß für den Grad der Durchmischung von Frischluft und Raumluft dar. Es lassen sich durch ihn Aussagen über die Art des Strömungsverhaltens im Raum ableiten. Bei Messungen zur Ermittlung des Luftwechsels wird dagegen durch das künstliche Herbeiführen einer homogenen Durchmischung eine Aussage über die sich natürlich einstellende Luftverteilung und Strömungsbedingungen unmöglich gemacht.

Eine wichtige Bewertungsgröße für die Raumluftqualität ist das Luftalter. Dieses ist einmal lokal zu bewerten für die Aufenthaltszonen; für das gesamte Gebäude kann ein durchschnittliches Luftalter bestimmt werden. Dies ist mit begrenztem Aufwand, d.h. begrenzt vielen Messstellen nur dann möglich, wenn ein Abluftkanal vorhanden ist, durch den die gesamte Raumluft abströmt und in welchem die Abluftkonzentration gemessen werden kann. In einem Raum mit ausschließlich natürlicher Lüftung ist also nur der globale Luftwechsel, nicht aber das durchschnittliche Alter der Raumluft oder der Luftaustauschwirkungsgrad messbar.

Messungen nach der Konzentrationsabfall-Methode

Die Messungen in Wiesbaden wurden mit der Konzentrationsabfall-Methode durchgeführt. Alle Ausführungen beziehen sich daher im Folgenden auf diese Methode.

Wenn die Luft im Raum ideal durchmischt ist, so ist die Konzentration des Tracergases in der den Raum verlassenden Luft immer identisch zur Raumluftkonzentration und die Änderung der Konzentration ist bei der Abklingmethode $c'(t) = -nc(t)$, wobei n die Luftwechselrate ist und $1/n$ die Zeitkonstante. Wird die zeitliche Entwicklung der Spurengaskonzentration gemessen, so lässt sich n mittels einer Regressionsanalyse der Logarithmen der Konzentration in Abhängigkeit von der Zeit bestimmen. Diese Auswertungsmethode ist bei guter Durchmischung sehr vorteilhaft, da bereits bei vergleichsweise kurzen Messdauern die Fehlergrenzen klein werden.

Ist die Luft im Raum nicht ideal durchmischt, so ist eine Regressionsanalyse nicht möglich, da weder die Konzentrationsverläufe im Raum übereinstimmen, noch die lokalen Konzentrationen exponentiell von der Zeit abhängen. Zum Luftwechsel (das ist die Rate der zugeführten Frischluft) kommen zur Charakterisierung der Strömungsverhältnisse und der Qualität der Luftführung weitere Kenngrößen hinzu; der Luftwechsel muss gegebenenfalls mit anderen Methoden bestimmt werden.

Sei $c(x,t)$ die Konzentration des Spurengases in Abhängigkeit von Ort und Zeit, $c_e(t)$ die durchschnittliche Konzentration der exfiltrierten Luft. Wird diese in ein Abluftsystem geführt, so kann diese Konzentration in der Abluft gemessen werden.

Ist $U(t)$ die Gesamtmenge Spurengas im Raum, also $U(t) = \int_V c(x,t) dV$ das Integral über das Raumluftvolumen, so ist (Abluftmenge = Zuluftmenge, setzt für die Messung voraus, dass die Abluft praktisch vollständig über die Anlage abgeführt wird) die Zeitableitung

$$U'(t) = -nV * c_e(t) \text{ oder}$$

$$c_e(t) = -1/(nV) U'(t) = -1/(nV) d/dt \int_V c(x,t) dV.$$

Das Zeitintegral der Abluftkonzentration (Normierungsgröße) ist

$$\int_0^\infty c_e(t) dt = 1/(nV) U(0) = 1/(nV) \int_V c(x,0) dV. \text{ Daraus folgt}$$

$$n = U(0)/V * 1 / \int_0^\infty c_e(t) dt = 1/V * \int_V c(x,0) dV / \int_0^\infty c_e(t) dt$$

Bei vollständiger Mischung zu Versuchsbeginn ist $1/V * \int_V c(x,0) dV$ gerade die Abluftkonzentration $c_e(t)$ zum Zeitpunkt $t=0$.

Das lokale Luftalter ist der Erwartungswert der Zeit, wobei die Wahrscheinlichkeitsdichte bei der Abklingmethode durch die lokale Zeitableitung der Konzentration gegeben ist. Das durchschnittliche Luftalter ist der Mittelwert über alle lokalen Luftalter, der aber praktisch messtechnisch kaum zu bestimmen ist. Wegen der vollständigen Durchmischung zu Beginn der Messung ist dieser aber gleichzeitig der Erwartungswert der Zeit, wobei die Wahrscheinlichkeitsdichte durch die Konzentration im Abluftkanal gegeben ist. $\tau_a = \int U(t) dt / U(0) = \int (tc_e(t) dt) / \int c_e(t) dt.$

Die durchschnittliche Verweilzeit ist immer doppelt so groß wie das durchschnittliche Luftalter. Der Luftaustauschwirkungsgrad ist definiert als Verhältnis von Zeitkonstante zu Verweilzeit bzw. das halbe Verhältnis von Zeitkonstante zu Luftalter. Der Luftaustauschwirkungsgrad lässt sich demnach berechnen als die Hälfte des Zeitintegrals über die Abluftkonzentration, dividiert durch das Zeitintegral über die mittlere Raumluftkonzentration.

$$\eta_a = 1 / (2 * n * \tau_a) = 1 / (2 * \int U(t) dt / U(0) * U(0) / V * 1 / \int_0^\infty c_e(t) dt)$$

$$= \int_0^\infty c_e(t) dt / (2 * \int U(t) dt / V)$$

bzw. $\eta_a = 1 / (2 * n * \tau_a) = 1 / (2 * c_e(0) / \int_0^\infty c_e(t) dt * \int (t c_e(t) dt) / \int (c_e(t) dt))$

$$= (\int c_e(t) dt)^2 / (2 * c_e(0) * \int t * c_e(t) dt) .$$

Alle Luftalter (lokale oder mittlere) lassen sich ebenso wie der Luftwechsel nur unter stationären Bedingungen berechnen. Für den Luftwechsel (Voraussetzung: ständige Durchmischung!) reichen allerdings relativ kurze Zeitspannen für die Messung aus, wenn nach der Regressionsmethode ausgewertet wird. Anders bei den anderen Kennwerten:

Zur Berechnung dieser Kenngrößen müssen nämlich stets Zeitintegrale bis ∞ gebildet werden. Messwerte liegen immer nur für einen endlichen Zeitraum vor; der Rest muss abgeschätzt werden, z.B. durch eine exponentiell abfallende Näherung nach dem Betrachtungszeitraum. Da aber auch Zeiterwartungswerte zu berechnen sind, entstehen durch diesen nicht messtechnisch erfassten Zeitraum sehr große Unsicherheiten. Der Messzeitraum muss daher deutlich größer als die (nominalen) Zeitkonstanten sein. Besonders bei geringen Luftwechseln muss daher über einen sehr langen Zeitraum gemessen werden, zu denen auch annähernd stationäre Bedingungen herrschen müssen. Messungen zu Luftalter und Lüftungseffektivität und auch Luftwechsel bei nicht vollständiger Durchmischung sind daher sehr viel aufwändiger als Luftwechsellmessungen bei vollständiger Durchmischung.

Tabelle 5.1.1-1: Überblick über die verwendeten Begriffe. (Konzentrationsabfall-Methode)

Luftaustauschkennzahlen		Einheit
Luftwechsel	n	1/h
nominale Zeitkonstante	τ_n	h
durchschn. Verweilzeit	τ_v	h
es gilt stets:		
Verweilzeit >= Zeitkonstante	$\tau_v \geq \tau_n$	
Verdrängung	$\tau_v = \tau_n$	
Durchmischung	$\tau_v = 2 * \tau_n$	
Kurzschlussströmung	$\tau_v > 2 * \tau_n$	
durchschn. Luftalter	τ_a	h
es gilt stets:		
Alter = halbe Verweilzeit	$\tau_v = 2 * \tau_a$	
Verdrängung	$\tau_n = 2 * \tau_a$	
Durchmischung	$\tau_n = \tau_a$	
Kurzschlussströmung	$\tau_n < \tau_a$	
Luftaustauschwirkungsgrad	η_a	-
= Zeitkonstante / Verweilzeit	$\eta_a = \tau_n / \tau_v$	
	$\eta_a = \tau_n / (2 * \tau_a)$	
	$\eta_a \leq 1$	
vollst. Verdrängung	$\eta_a = 1$	
vollst. Durchmischung	$\eta_a = 0,5$	
unvollst. Verdrängung	$\eta_a > 0,5$	
Kurzschlussströmung	$\eta_a < 0,5$	
lokales Luftalter	τ_p	h
lokale Luftaustauschkennzahl	$\varepsilon_a = \tau_a / \tau_p$	-
	$\varepsilon_a = \tau_v / (2 * \tau_p)$	
Formeln für vollst. Durchmischung zu Messbeginn		
lokales Luftalter ist Erwartungswert der Zeit (Wahrscheinlichkeitsdichte ist die lokale Konzentrationsänderung)	$\tau_p = \int t * c'(t) dt / \int c'(t) dt$	
	$\tau_p = \int c(t) dt / c(0)$	
durchschnittliches Luftalter	Messung im Abluftkanal	
(Erwartungswert der Zeit, Wahrscheinlichkeitsdichte: Konzentration im Abluftkanal)	$\tau_a = \int t * c_e(t) dt / \int c_e(t) dt$	

5.1.2 Versuchsaufbau

Der Luftwechsel wurde exemplarisch während zweier je viertägiger Messkampagnen im März 2002 und im Mai 2002 gemessen. Die Versuchsgebäude waren ein Passivhaus und ein Niedrigenergiehaus mit je 108 m² Wohnfläche. Es wurde jeweils bei geschlossenen und gekippten Fenstern gemessen. Bei geschlossenen Fenstern wurden zusätzlich Luftalter und Lüftungseffektivität bestimmt.

Tabelle 5.1.2-1: Überblick über die Messungen

	1. Messung	2. Messung
Passivhaus (mit Wärme- rückgewinnung)	Luftwechsel bei geschlossenem Fenster	Luftwechsel bei geschlossenem Fenster
	Luftwechsel bei einem gekippten Fenster (Nord)	Luftwechsel bei einem gekippten Fenster (Nord)
	Luftalter an 6 Stellen bei geschlossenem Fenster	Luftwechsel bei einem gekippten Fenster (Süd)
		Luftwechsel bei Querlüftung
	Luftalter an 6 Stellen bei einem gekippten Fenster	Luftalter an 6 Stellen bei einem gekippten Fenster und geschlossenen Innentüren
Niedrigenergiehaus (mit Abluftanlage)	Luftwechsel bei geschlossenem Fenster	Luftwechsel bei geschlossenem Fenster
	Luftwechsel bei einem gekippten Fenster (Nord)	Luftwechsel bei einem gekippten Fenster (Nord)
		Luftwechsel bei einem gekippten Fenster (Süd)
	Luftalter an 6 Stellen bei geschlossenem Fenster	Luftalter an 6 Stellen bei einem gekippten Fenster und geschlossenen Innentüren

Voraussetzung für die Messung des Luftwechsels ist bei Auswertung mit der Regressionsmethode eine gute Durchmischung der Raumluft.

Diese Voraussetzung ist in der Praxis nicht immer gegeben. Tatsächlich kann ein Regressionsansatz dann zu fehlerhaften Ergebnissen führen, wenn nur an einer Stelle gemessen wird und gleichzeitig die Durchmischung nicht gewährleistet ist. Beim experimentellen Design wurden deshalb Ventilatoren vorgesehen, um einer idealen Durchmischung so nahe wie möglich zu kommen. Außerdem wurde an mehreren Stellen gemessen. Ziel war es, einen möglichst repräsentativen Querschnitt durch das Gebäude zu erfassen. Daher wurde in jedem Raum, der einen hinreichend großen Anteil des gesamten Raumluftvolumens repräsentiert, ein Messfühler platziert. Die Messfühler wurden in folgenden Räumen angebracht:

Wohnzimmer, Küche, Kinderzimmer links und rechts, Schlafzimmer und Bad. Innerhalb der Räume wurden Positionen ausgesucht, die selbst wieder als repräsentativ für den jeweiligen Raum gelten können.

Offen blieb zunächst die Frage, wie gut die Durchmischung innerhalb des Raums funktioniert. Tatsächlich konnte diese Frage durch die parallel durchgeführte Luftaltermessung geklärt werden: Beim Luftalter wurde zur Ermittlung der Raumluftqualität im Aufenthaltsbereich während der Normalnutzung kein Ventilator betrieben, und es wurde z.T. an mehreren verschiedenen Messstellen im Raum gemessen. Dabei zeigte sich experimentell, dass es praktisch keine Unterschiede zwischen den Messstellen in einem Raum gibt. Das war eher überraschend, denn die Räume sind zum Teil sehr hoch, und es war erwartet worden, dass sich den Positionen in Bodennähe und auf der vorhandenen Galerie deutliche Unterschiede ergeben würden. Diese gute Durchmischung wird selbst dann erzielt, wenn kein Ventilator in Betrieb ist, wenn das Raumluftvolumen also nicht aktiv durchmischt wird. Die natürlichen Luftströmungen im Raum reichen im Fall der untersuchten Wohngebäude in Wiesbaden aus. Dies bedeutet gleichzeitig, dass bei der Luftwechselformung der größte Teil des Wohnbereichs mit den sechs Messfühlern recht gut repräsentiert wird.

Messkampagne im März

Tabelle 5.1.2-2: Klima während der Messzeiträume im März.

Uhrzeit	Außentemperatur øC				Windrichtung Grad				Windgeschwindigkeit			
	1. Tag	2. Tag	3. Tag	4. Tag	1. Tag	2. Tag	3. Tag	4. Tag	1. Tag	2. Tag	3. Tag	4. Tag
8:00	8.1	7.5	12.0	7.7	219	246	267	248	0.4	2.1	1.7	1.9
9:00	9.5	7.7	11.8	8.8	88	254	261	257	0.7	1.4	2.1	1.9
10:00	10.2	8.1	12.0	9.6	83	246	257	273	0.8	1.7	1.5	2.5
11:00	13.0	8.3	13.5	7.9	140	246	272	299	1.3	1.7	1.4	2.7
12:00	14.0	8.3	13.8	8.5	220	248	286	290	1.7	1.6	2.7	3.0
13:00	14.8	8.8	14.1	8.9	229	247	278	288	2.7	2.3	2.5	2.3
14:00	14.4	9.2	15.1	10.3	239	256	274	306	3.3	2.5	2.8	4.0
15:00	14.1	9.2	14.6	10.6	231	249	273	322	3.1	2.2	2.9	3.5
16:00	14.5	9.9	13.3	8.9	225	255	252	330	3.9	2.5	2.5	3.9
17:00	14.2	10.2	13.4	8.3	218	256	273	336	3.4	2.4	2.4	4.4
18:00	13.8	9.3	13.0	7.8	224	248	260	342	3.5	2.4	2.2	4.2
19:00	13.5	8.8	10.9	6.8	221	247	263	237	3.6	1.8	2.5	3.0
20:00	11.7	8.5	9.8	6.2	236	248	242	201	5.0	1.5	1.6	1.5
21:00	9.4	8.1	9.4	5.6	230	247	247	275	2.9	1.9	1.4	1.2
22:00	9.7		9.4		229		274		2.8		1.9	
23:00	10.2		9.7		231		304		2.7		2.9	
0:00	10.4		9.5		231		299		2.9		2.1	
1:00	10.4		9.1		238		288		2.5		2.0	
2:00	9.8		8.6		244		254		2.5		1.3	
3:00	9.5		7.7		250		251		2.4		1.9	
4:00	9.1		7.6		244		251		2.3		2.1	
5:00	8.4		7.3		245		249		2.6		1.8	
6:00	8.0		7.5		245		254		2.5		1.8	
7:00	7.8		7.6		245		252		2.2		1.8	
8:00	7.5		7.7		246		248		2.1		1.9	
9:00	7.7		8.8		254		257		1.4		1.9	
MW 9-20	13.1	8.8	12.9	8.6	196	250	266	290	2.8	2.0	2.2	3.1

Die erste Messkampagne wurde im März 2001 bei noch winterlichen Klimabedingungen durchgeführt. Die Temperaturen lagen während der Messzeiträume zwischen 8 und 15 °C (5-Tage Mittel 9.9°C), die Windgeschwindigkeiten im 5-Tage-Mittel 2,0 m/s, überwiegend westlich (Durchschnitt 251°; Südrichtung: 180°)

2. Messkampagne im Mai

Die zweite Messkampagne fand erst im Mai statt. Das Wetter war bereits sommerlich, die Temperaturunterschiede zwischen außen und innen waren z.T. sehr gering. Damit entfielen die Temperaturdifferenzen als wesentliche Antriebskraft weitgehend. Die winterlichen Luftwechselraten konnten auf diese Weise nicht reproduziert werden. Interessant ist das Ergebnis dennoch im Hinblick auf die Luftwechselraten, die in der Übergangszeit und im Sommer auftreten, wenn die Fenster bereits erheblich mehr geöffnet werden (vgl. Abbildung 4.2.9-1), und wenn zudem über den Fensterluftwechsel auch eine Kühlung erwünscht ist.

Tabelle 5.1.2-2: Klimabedingungen während der Messzeiträume im Mai

	1. Tag	5/13/02		2. Tag	5/14/02		3. Tag	5/15/02		4. Tag	5/16/02	
Uhrzeit	Außentemperatur øC	Windrichtung g Grad	Windgeschwindigkeit m/s	Außentemperatur øC	Windrichtung g Grad	Windgeschwindigkeit m/s	Außentemperatur øC	Windrichtung Grad	Windgeschwindigkeit m/s	Außentemperatur øC	Windrichtung g Grad	Windgeschwindigkeit m/s
9:00	12.1	149	0.43	12.6	240	3.6	13.6	237	1.4	17.2	78	0.7
10:00	12.5	159	0.57	13.5	240	4.3	15.3	233	1.9	19.3	152	0.7
11:00	13.1	109	0.66	14.3	233	3.0	15.9	232	1.9	20.4	131	0.9
12:00	14.4	93	0.65	14.5	235	2.9	16.4	243	1.6	21.4	138	1.3
13:00	15.9	93	0.78	15.0	241	4.0	17.2	235	1.3	22.6	143	1.1
14:00	18.2	161	1.15	15.4	239	4.1	18.8	239	1.6	23.8	204	1.0
15:00	19.3	132	1.47	14.1	242	3.0	18.7	233	1.3	24.7	214	1.1
16:00	20.2	131	1.19	16.2	238	3.0	19.6	210	1.2	25.2	231	1.0
17:00	20.4	131	0.78	15.4	242	2.8	20.3	258	1.5	25.4	231	0.8
18:00	20.7	153	1.17	14.7	275	1.6	20.3	249	0.6	25.4	202	0.7
19:00	20.1	151	0.94	13.5	265	1.0	19.9	208	0.5	24.9	207	0.5
20:00	18.7	110	0.89	12.8	278	0.5	18.3	265	0.2	23.1	182	0.3
21:00	17.2	55	0.53	12.6	248	1.1	16.6	303	0.2	20.8	299	0.4
22:00	16.2	57	0.46	12.2	266	0.8	15.9	299	0.3	20.6	319	0.4
23:00	15.8	51	0.44	11.9	247	0.8	15.4	328	0.3			
0:00	15.2	105	0.39	11.5	251	0.9	15.0	333	0.3			
1:00	14.7	310	0.24	11.2	254	1.0	15.0	305	0.3			
2:00	14.8	197	0.33	11.2	258	1.0	14.2	200	0.3			
3:00	14.6	230	1.11	10.8	255	0.6	13.8	315	0.4			
4:00	14.2	241	2.78	10.2	267	0.5	13.5	287	0.4			
5:00	13.1	244	3.54	9.8	263	0.6	13.1	176	0.4			
6:00	11.7	248	2.42	9.6	262	0.4	13.0	45	0.3			
7:00	11.3	246	2.88	10.6	244	1.1	14.3	53	0.5			
8:00	11.8	240	2.72	12.3	234	1.3	14.9	57	0.9			
9:00	12.6	240	3.63	13.6	237	1.4	17.2	78	0.7			
10:00	13.5	240	4.30	15.3	233	1.9	19.3	152	0.7			

5.1.3 Messergebnisse

Zunächst wurde der absolute Luftwechsel über die Anlage, also bei geschlossenen Fenstern, mit einem Lüftungsmessgerät (Flow Finder) bestimmt. Dabei werden die Förderströme an den Zu- und Abluftventilen gemessen; die relative Messgenauigkeit beträgt 5%. Im Passivhaus wurde diese Messung genutzt, um die stufenlos regelbaren Ventilatorleistungen so einzustellen, dass die ursprünglich projektierten 120 m³/h auf der Zu- und auf der Abluftseite erreicht wurden. Bei den Niedrigenergiehäusern wurde zur Bestimmung des Zuluftvolumenstroms die Gerätehaube auf die Zuluftöffnungen über den Fenstern gesetzt.

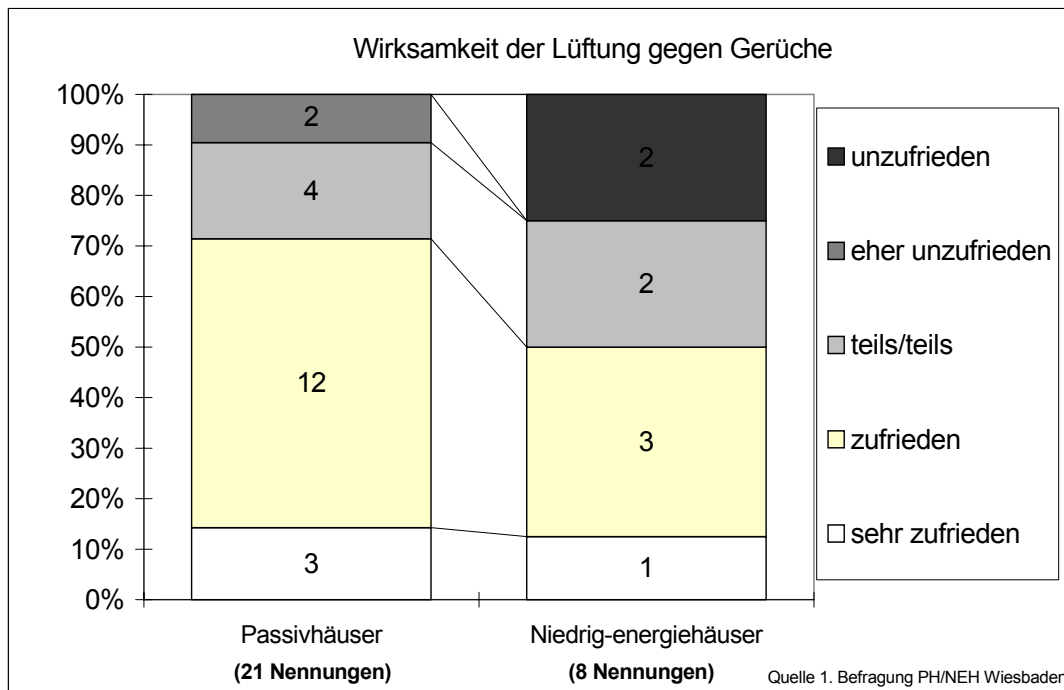
Abb. 5.1.3-1: Messung mit FlowFinder

im Niedrigenergiehaus (Foto: PHI)



Dabei wurden erstaunlich geringe Luftwechsel im Niedrigenergiehaus gemessen. Auf der Abluftseite wurden zu verschiedenen Zeitpunkten 35 – 39 m³/h gemessen, die Summe der Volumenströme durch die feuchtegeregelten Zuluftöffnungen lag bei 17-30 m³/h; der Rest strömt vermutlich über Undichtheiten ein (für die Passivhäuser waren im Rahmen der Qualitätssicherung die Luftdichtheit überprüft und nachgebessert worden [82], für die Niedrigenergiehäuser nicht). Dies entspricht einer Luftwechselrate von 0,13 bis 0,15 1/h. Kontrollmessungen in mehreren weiteren Niedrigenergiehäusern der Siedlung bestätigten diesen Befund. Damit kann das Lüftungssystem der Niedrigenergiehäuser nur einen Grundluftwechsel bereitstellen. Es ist vor dem Hintergrund nicht erstaunlich, dass in den Niedrigenergiehäusern in der Heizperiode 2 ½ mal so viel gelüftet wird wie in den Passivhäusern (Messergebnisse 2000/2001). Trotz des häufigen Fensteröffnens wird die Wirksamkeit der Gesamtlüftung von den Niedrigenergiehausbewohnern häufiger als bei den Passivhausbewohnern weniger gut bewertet.

Abbildung 5.1.3-2: Bewertung der Wirksamkeit der Lüftungsanlage in Bezug auf Abfuhr von Gerüchen. Passivhäuser und NEH im Vergleich



Bei den Passivhäusern kann die Förderleistung der Ventilatoren auf einer Skala von 0 bis 100 manuell eingestellt werden (getrennt für Zu- und Abluftseite). Kurz nach dem Einzug waren die Lüftungsanlagen einreguliert worden. Bei der jeweils individuell markierten Einstellung für „normal“ sollte so auf Zu- und Abluftseite ein Volumenstrom von 120 m³ gefördert werden. Bei dem untersuchten Passivhaus wurde vor der Tracergasmessung die Einstellung mit dem Lüftungsmessgerät erneut eingestellt, so dass die Messungen beim projektierten Luftwechsel stattfanden. Es zeigte sich dabei, dass die Einstellungen nicht mehr genau stimmten; die vorgefundene Markierung wich in beiden Fällen um 5-10 Skalenteile von der gemessenen ab.

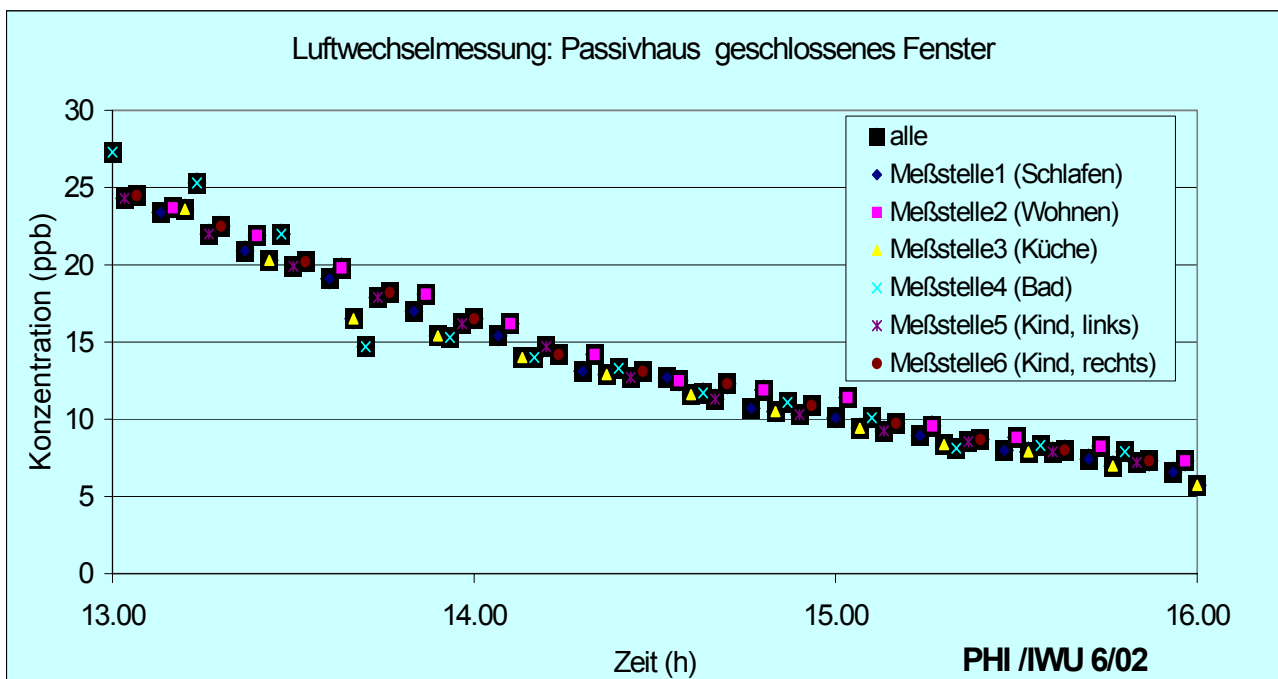
Indikatorgasmessungen

Abb. 5.1.3-3: Ansaugstelle
(Foto: PHI)



Das Spurengas Schwefelhexafluorid wurde zunächst gleichmäßig in allen Räumen des jeweiligen Hauses (Niedrigenergie- oder Passivhaus) eingebracht und bei ausgeschalteter Lüftungsanlage mit Einsatz von Ventilatoren verteilt. Zu Messbeginn wurden die Versuchsbedingungen hergestellt: Die Lüftungsanlage wurde eingeschaltet und je nach Messung gegebenenfalls Fenster geöffnet. Während der Messung wurde kein weiteres Tracergas eingebracht. Mit Schläuchen wurden von insgesamt 7 Messstellen (6 in Räumen und eine in der Abluft) Luftprobenvolumina angesaugt und von einem Gaschromatographen ausgewertet. Die Dauer eines Messzyklus hängt ab von der Anzahl der Messstellen und dauerte in diesem Fall 14 Minuten.

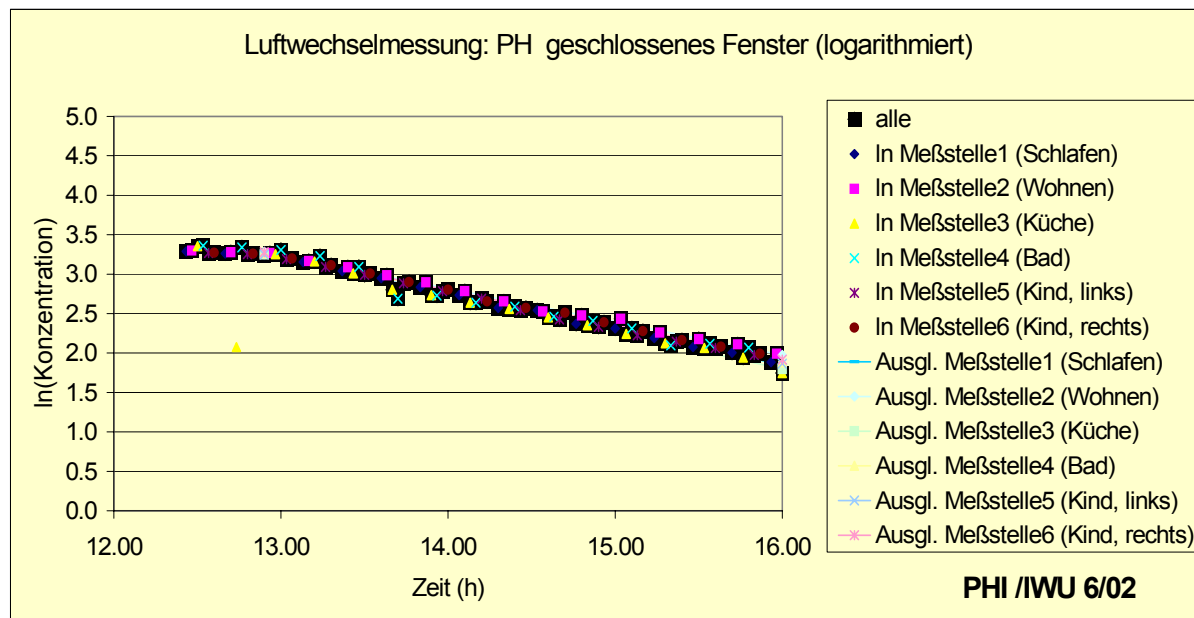
Abbildung 5.1.3-4: Verlauf der Tracergaskonzentration bei der Luftwechsellmessung im Passivhaus am 22.3.2002 an 6 Messstellen im Raum



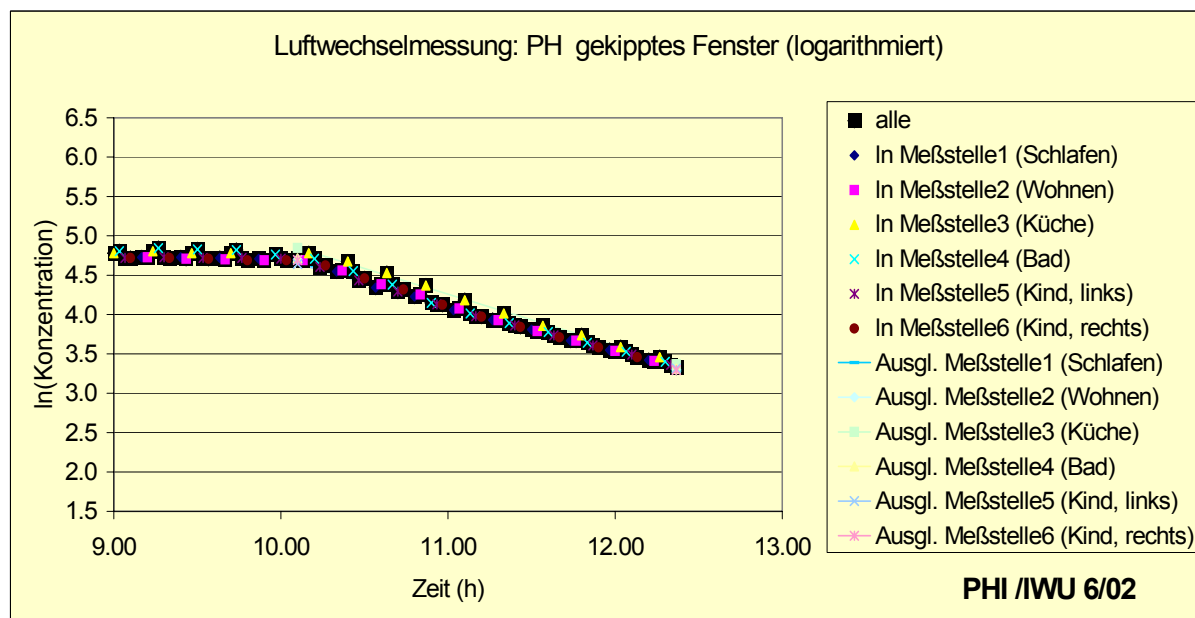
Da im Gegensatz zum Lüftungsmessgerät mit der Tracergasmessung nie direkt absolute Größen bestimmt werden, sondern immer nur relative, ist das Ergebnis zunächst keine absolute ausgetauschte Luftmenge, sondern eine Luftwechselrate, die mit einer Regressionsmethode bestimmt wird. Die Abbildungen zeigen den linearen Verlauf der Logarithmen der Tracergaskonzentrationen. Die so gemessenen relativen Konzentrationen konnten mit der absoluten Messung des Lüftungsmessgeräts verglichen werden, um so zunächst das teilnehmende Luftvolumen zu bestimmen. Im nächsten Schritt wurden dann aus der zunächst ebenfalls relativen Messung des Fensterluftwechsels mittels Tracergas absolute Volumenströme berechnet.

Abbildung 5.1.3-5: Verlauf der Logarithmen der Spurengaskonzentrationen bei geschlossenem und geöffnetem Fenster an 6 Messstellen in verschiedenen Räumen des Passivhauses. Deutlich zu erkennen sind die gute Durchmischung, der lineare Verlauf sowie die größere Steigung beim geöffneten Fenster.

a) geschlossenes Fenster



b) gekipptes Fenster



1. Messkampagne (März 2002)

Während der Luftwechselformungen im März herrschten noch winterliche Außentemperaturen von 8-10°C, die Windgeschwindigkeiten lagen zwischen 1,7 und 3,4 m/s. Damit ist diese Situation für die Heizperiode nicht untypisch, soweit die Zeiten im Vordergrund stehen, in denen Fensteröffnungen auch auftreten. Die Bewohner richten sich mit ihrem

Fensteröffnungsverhalten auch nach dem Wetter (vgl. Abschnitte 4.2.9, 6.3.2). Wenn es kalt und windig ist, bleiben nach den vorliegenden Mess- und Befragungsergebnissen Fenster eher geschlossen.

Konzentrationsverläufe zu weiteren Messungen sind im Anhang wiedergegeben. Das hier untersuchte Fenster ist das kleine Nordfenster, das auch am häufigsten von den Bewohnern geöffnet wird (vgl. Abschnitt 4.2.9). In beiden Fällen – mit oder ohne geöffnetes kleines Fenster - gelingt die Durchmischung der Raumluft im Passivhaus sehr gut. Im Fall des Niedrigenergiehauses, in dem eine stärker gerichtete Strömung aufgrund des durch die Abluftanlage erzeugten Unterdrucks herrscht, gelingt die Durchmischung ausreichend, aber nicht ganz so gut; der Messfehler wird dadurch größer.

Auswertung der Luftwechsellmessungen

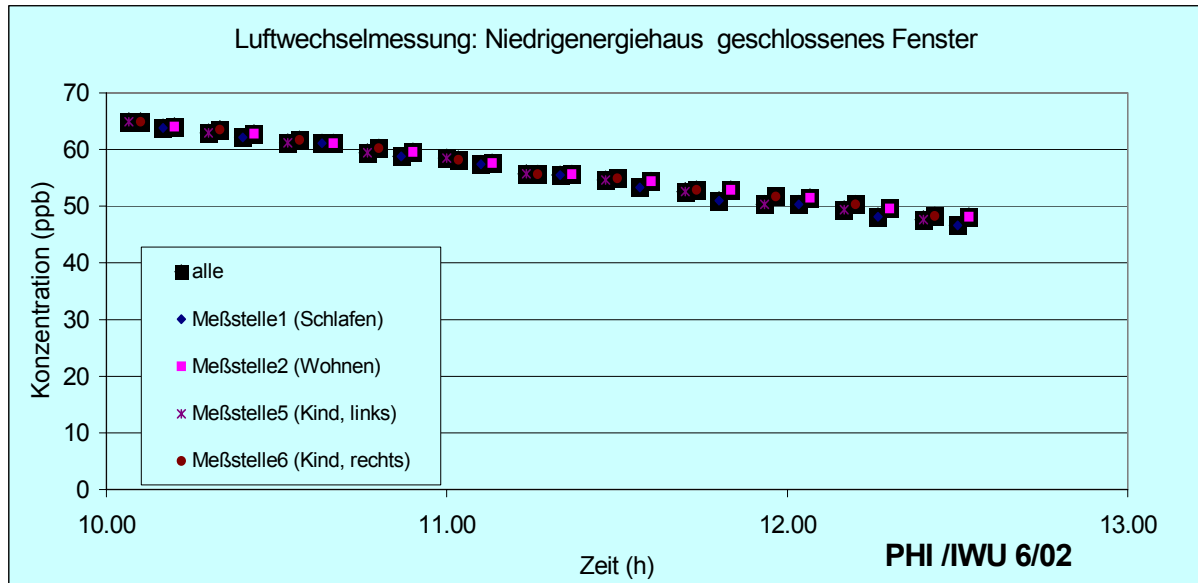
Bei der Auswertung der Tracergas-Messergebnisse wurden verschiedene Ansätze verfolgt: Zunächst wurde vom Passivhaus Institut jede einzelne Messstelle ausgewertet und ein zugehöriger Raumluftwechsel bestimmt. Bei den meisten Messungen waren die Bestimmtheitsmaße sehr hoch. Der Nachteil ist allerdings, dass jede Messstelle etwa nur im Viertelstundenabstand beprobt wird, so dass die Anzahl der zuzuordnenden Messwerte begrenzt ist. Daher entstehen annehmbare, aber allen aufgrund der geringen Zahl von Messwerten noch nennenswerte Konfidenzbereiche. Bei der Auswertung für den Gesamtluftwechsel sind alle Messstellen zu betrachten; die Unterschiede zwischen den Messstellen führen ebenfalls zu Fehlerschranken. In den daraus berechneten Gesamtluftwechsel gehen beide Fehlerschranken ein.

Unter der Annahme der idealen Durchmischung ist es aber ebenso gerechtfertigt, die – in unterschiedlichen Räumen im Wechsel ermittelten – Messergebnisse insgesamt als Zeitreihe zu betrachten und daraus mittels Regressionsanalyse den Luftwechsel zu bestimmen. Selbst bei kleinen Abweichungen zwischen den Räumen (z.B. „hinken“ Ablufträume in der Tendenz Zulufräumen „hinterher“) sind die daraus ermittelten Fehlerschranken für den Regressionskoeffizienten, d.h. den Luftwechsel, aufgrund der größeren Zahl der Messdaten wesentlich geringer.. Nachteil ist, dass sich die Messergebnisse Konzentrationen auf diese Weise nicht mit dem repräsentierten Raumluftvolumen gewichten lassen. In Fällen, in denen die vollständige Durchmischung zwischen den Räumen offenbar nicht zu 100% erreicht wurde, ist das folgende Vorgehen sinnvoll: die Messwerte jeder Messstation werden zunächst zeitlich interpoliert und anschließend wird das nach repräsentiertem Luftvolumen gewichtete Mittel gebildet. Der Konzentrationsverlauf gibt in diesen Fällen den durchschnittlichen Konzentrationsabfall sehr plausibel wieder; Nachteil sind die methodischen Probleme bei der Fehlerbetrachtung.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die verschiedenen Ansätze bei der Auswertung bei der Luftwechsellmessung zu ausgezeichnet übereinstimmenden Ergebnissen kommen, und dass die Konfidenzintervalle nur vergleichsweise klein sind. Damit hat sich gezeigt, dass zumindest

unter den Bedingungen, die im März in und außerhalb der Gebäude herrschten, die Messbedingungen gut herzustellen waren, insbesondere, dass für diese Messung eine hinreichend gute Durchmischung der Raumluft nicht nur in einem einzelnen Raum, sondern auch im Gesamtgebäude sehr gut herzustellen war.

Abbildung 5.1.3-6: Konzentrationsverlauf in den Zulufräumen des Niedrigenergiehauses: minimaler Luftwechsel über die Abluftanlage



Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse für das Passivhaus: Demnach beträgt die Luftwechselrate 0,45 1/h bei geschlossenem Fenster, die zusätzliche Fensterluftwechselrate ist 0,17 1/h; der zugehörige Fensterluftwechsel beträgt 48,8 m³/h (+- 7,6 m³/h). Im Niedrigenergiehaus zeigt sich in Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Lüftungsmessgeräts, dass der Luftwechsel über die Lüftungsanlage mit 0,15 1/h bei geschlossenem Fenster nur sehr gering ist (vgl. Abbildung 5.1.3-6). Der zusätzliche Fensterluftwechsel beträgt 44,6 m³/h, der Gesamtluftwechsel wird damit durch das gekippte Fenster verdoppelt, ist aber immer noch wesentlich geringer als im Passivhaus nur mit Lüftungsanlage. Der Fehler ist mit +-17,5 m³/h deutlich höher. Dies liegt daran, dass aufgrund der geringen Luftwechsel im NEH der Konzentrationsabfall nur mit großem Zeitaufwand zu messen ist und dass zudem die Durchmischung der Raumluft nicht so gut gelingt wie im Passivhaus.

Tabelle 5.1.3-1: Ergebnisse der Luftwechsellmessungen im Passivhaus und im Niedrigenergiehaus

Daten aus 1. Messung	PH geschlossen	PH gekippt Nord	NEH geschlossen	NEH Nordfenster gekippt
Luftwechsel	0.446	0.617	0.148	0.318
	±	±	±	±
Kofidenzintervall	0.014	0.021	0.042	0.011
Mittelwert aus Einzelmesspunkten: (ungewichtet)				
	0.446	0.616	0.147	0.317
	±	±	±	±
	0.035	0.041	0.040	0.043
Fensterluftwechselrate		0.171		0.170
(Differenz)		±		±
1/h		0.026		0.044
Luftvolumen	286		263	
	±		±	
m^3	11.2		77.7	
Fensterluftwechsel		48.8		44.6
		±		±
m^3/h		7.6		17.5
PHI /IWU 2002				

Die so ermittelten Luftvolumenströme um 50 m³/Stunde repräsentieren natürlich nur einen einzelnen Zeitpunkt; zu anderen Wind- und Temperaturbedingungen werden die Messergebnisse erheblich abweichen können. Dennoch scheint diese Größenordnung durchaus für die Heizperiode vernünftig zu sein:

Wie in Kapitel 6 gezeigt wird, tragen die gemessenen Fensteröffnungszeiten sowohl in der absoluten Höhe des durchschnittlichen Heizwärmeverbrauchs als auch bei der Erklärung der Nutzerstreuung zur Erklärung bei, wenn die Luftwechsel bei einem gekippten Fenster zwischen 50 und 60 m²/h liegen, wobei außer dem relativ kleinen Nordfenster natürlich z.T. auch andere Fenster gekippt werden. Die Balkontüren im Süden führen zu einem deutlich höheren Luftwechsel, während die Oberlichter (ebenfalls im Süden, bei der Messung der Fensteröffnungszeiten nicht von den Balkontüren zu unterscheiden), zu einem noch geringeren Luftwechsel führen. Bei einem Luftwechsel in dieser Größenordnung würde der zusätzliche Heizenergieverbrauch bei gut 2 kWh/(m²a) im Durchschnitt liegen, wenn die Fensteröffnungszeiten unterstellt werden, die in der Heizperiode 2000/2001 in Wiesbaden

beobachtet wurden (vgl. Kapitel 6). Dieses Ergebnis passt gut zu den Messergebnissen für den Heizenergieverbrauch (vgl. Abschnitt 6.4.6).

Selbstverständlich kann aus den Ergebnissen der beschriebenen Tracergasmessungen nicht auf andere Fenster (mit anderen Abmessungen und Bauarten) und nicht auf andere Gebäude geschlossen werden. Die lokalen Klima- und Strömungsverhältnisse können eine große Rolle spielen. Im Hinblick auf das untersuchte Fenster in Wiesbaden ist auch anzumerken, dass das Nordfenster sehr klein ist und außerdem in gekipptem Zustand nur einen sehr geringen Öffnungsquerschnitt (durch geringe Kippweite, breite Fensterfalze und Einbau in die Laibung) aufweist, was den Luftvolumenstrom begrenzt, aber vermutlich auch nicht untypisch ist für Passivhäuser. Interessanterweise wurden Luftwechsel im Bereich um $60 \text{ m}^3/\text{h}$ für gekippte Fenster im Winter oft beobachtet; dies trifft sowohl für Messungen in Testräumen zu [79] als auch für weitere Spurengasmessungen, die vom PHI in weiteren Passivhäusern in längerfristig angelegten Messkampagnen parallel durchgeführt wurden [83].

Abbildung 5.1.3-7: Kleine Lüftungsquerschnitte bei gekipptem Nordfenster

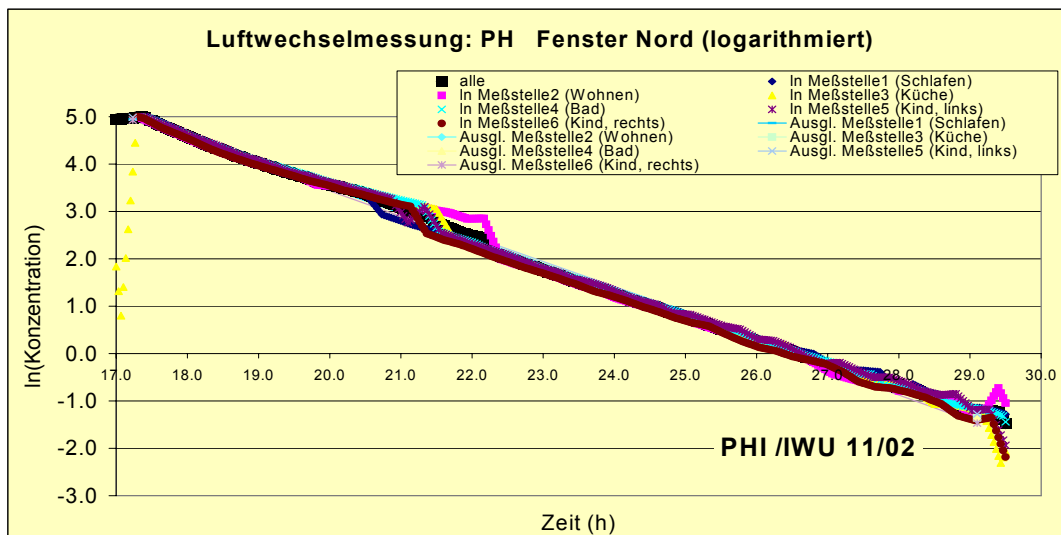


2. Messkampagne im Mai 2002

Während der zweiten Messkampagne im Mai war das Wetter bereits eher sommerlich. Da auch keine hohen Windgeschwindigkeiten auftraten, waren die Luftwechsel durch die geöffneten Fenster, wie zu erwarten, wesentlich geringer. Tatsächlich waren sie insbesondere bei der Luftwechselformung im Passivhaus so gering, dass längere Öffnungszeiten notwendig sind, um einen wesentlichen Kühlungseffekt im Sommer zu erreichen. Zusätzlich zu den Untersuchungen im März wurde auch ein größeres gekipptes Balkonfenster (Südfenster) untersucht.

Exemplarisch sind in Abbildung 5.1.3-8 und 5.1.3-9 die Konzentrationsverläufe bei geöffnetem Nordfenster gezeigt (die Konzentrationsverläufe weiterer Versuche im Anhang).

Abbildung 5.1.3-8: Konzentrationsverlauf (logarithmiert) bei geöffnetem Nordfenster im Mai



Die Fensterluftwechsel beim Nordfenster waren sehr viel geringer als bei der Messung im März. Die Luftwechsel durch das gekippte Südfenster sind erheblich höher, was auf die größeren Querschnitte zurückzuführen ist. Bei der Zuordnung der gemessenen Fensteröffnungszeiten (Abschnitt 4.2.9) ist zu beachten, dass neben der Balkontür noch ein weiteres Südfenster auf der Galerie vorhanden ist, das sehr klein ist (halb so hoch wie das Nordfenster). Für dieses Fenster wurden keine Spurengasmessungen durchgeführt.

Bei den Messungen mit geöffneten Fenstern wurden regelmäßig plötzlich eintretende Konzentrationsabfälle beobachtet, die nacheinander in den verschiedenen Räumen auftraten. Offensichtlich wurde durch kurzfristig wirkende, aber nicht bekannte Ereignisse (Windstoß, weiteres kurzzeitig geöffnetes Fenster o.ä.) zusätzliche Luftwechsel erzeugt. Bei der Auswertung wurden sowohl die Gesamtluftwechsel (einschließlich des kurzfristigen Zusatzluftwechsels) als auch der Luftwechsel unter stationären Bedingungen, bei denen der Zusatz-Konzentrationsabfall herausgerechnet wurde, berechnet. In jedem Fall werden, bedingt

durch solche Ereignisse, die Schwankungen der Konzentrationen größer. Aus diesem Grunde wurde zusätzlich zu dem für die Märzmessung beschriebenen Vorgehen als weitere Auswertungsmethode für den Luftwechsel eine Interpolation und Mittelung aus allen Messstellen in den Wohnräumen vorgenommen. Insbesondere im Falle der zusätzlich untersuchten Querlüftung mit einem geöffneten Nord- und Süd Fenster lässt sich eine Durchmischung nicht erzielen, jedoch noch eine Größenordnung für den Luftwechsel mit dementsprechend großen Unsicherheiten bestimmen. Alle Ergebnisse sind in den Tabellen 5.1.3-2 bis 5.1.3-4 dokumentiert.

Abbildung 5.1.3-9: Konzentrationsverlauf (logarithmiert) bei geöffnetem Süd Fenster im Mai

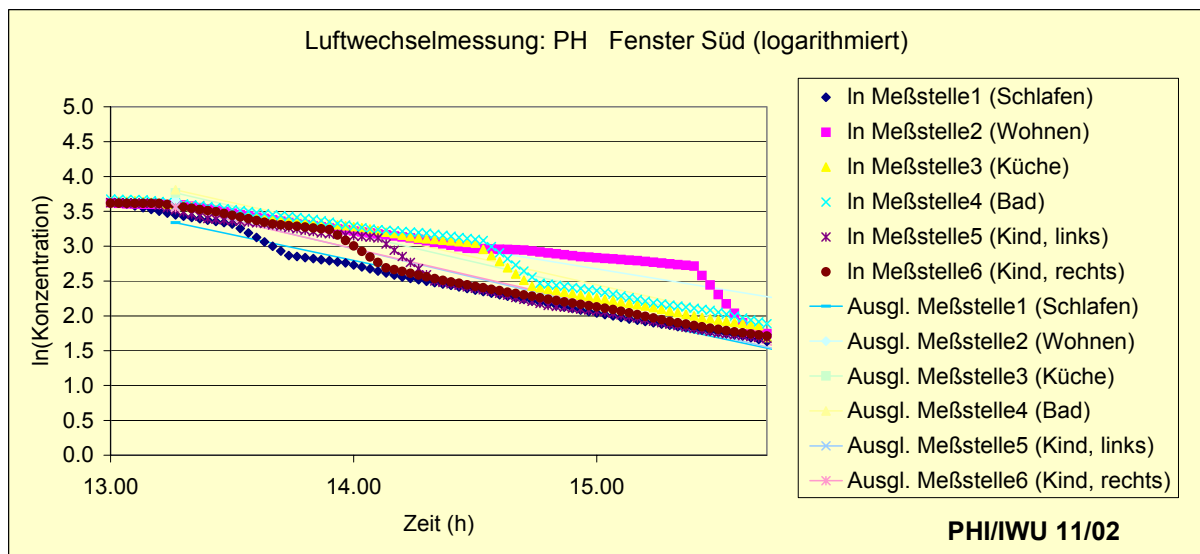
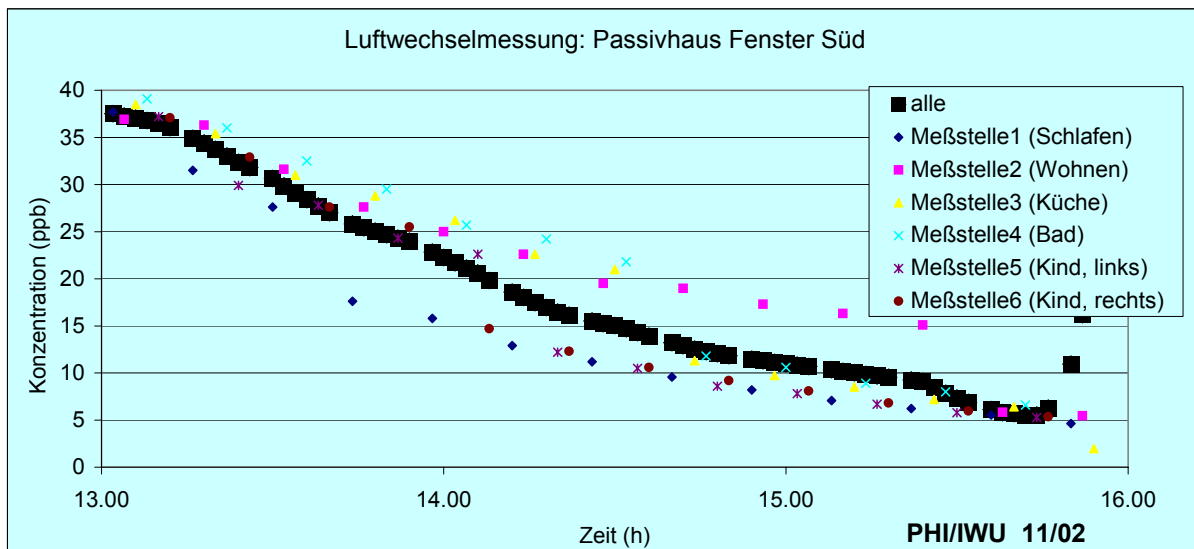


Abbildung 5.1.3-10: Konzentrationsverlauf (absolut) mit Interpolation und Mittelwert über den Raum



Die gemessenen Fensterluftwechsel liegen

- beim gekippten Nordfenster im Passivhaus (je nach Temperaturdifferenz) nur noch bei 9 – 20 m³/h
- beim gekippten Nordfenster im Niedrigenergiehaus bei 42 m³/h. Hierbei spielen neben Witterungseinflüssen möglicherweise auch die anderen Druckverhältnisse im Innenraum der Niedrigenergiehäuser eine Rolle.
- beim gekippten Südfenster (Balkontür) mit wesentlich höheren Fehlerquoten (eine gute Durchmischung ist nur schwer zu erreichen) auf 70- 80 m³/h (Passivhaus) bzw. bis 90 m³/h (Niedrigenergiehaus).

Damit lässt sich eine ausreichende Sommerkühlung nur bei sehr ausgiebiger Lüftung erreichen. Dies entspricht genau der Beobachtung: In den Passivhäusern in Wiesbaden werden durchschnittlich die Fenster bereits im Frühsommer mehr als 7 Stunden pro Tag und Raum gekippt oder geöffnet. Abbildung 5.1.3-11 zeigt den Vergleich der individuellen Lüftungsdauern im Sommer und Winter; die Messergebnisse sind dabei aufsteigend nach den Fensteröffnungszeiten im Winter sortiert.

Abbildung 5.1.3-11: Fensteröffnungen in den Passivhäusern und Niedrigenergiehäusern in Wiesbaden im Vergleich: Öffnungszeiten in der Heizperiode und im Sommer (Mai/Juni 2001). Sortiert nach Messergebnissen im Winter 2000/2001.

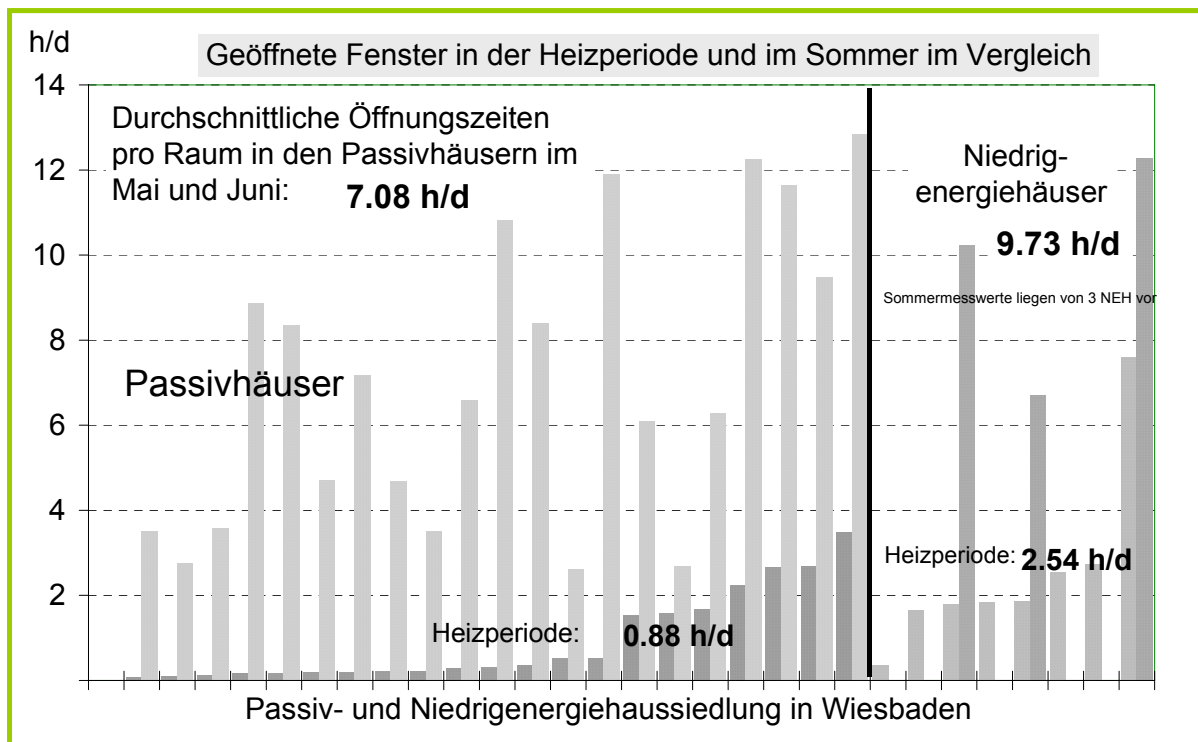


Tabelle 5.1.3-2: Ergebnisse für den Luftwechsel bei geschlossenem und geöffnetem Nordfenster im Passivhaus im Mai 2002.

Daten aus 2. Messung	PH geschlossen	PH Nordfenster Nachmittag	PH Nordfenster Nacht	PH Nordfenster
Luftwechsel	0.46 +- 0.012 /h	0.524 +- 0.013 /h	0.493 +- 0.006 /h	0.535 +- 0.004 /h
Mittelwert aus Einzelmeßpunkten:				
	0.457	0.526	0.490	0.536
	+ -	+ -	+ -	+ -
	0.030	0.033	0.013	0.013
Fenster (Differenz)		0.064	0.033	0.075
		+ -	+ -	+ -
		0.018	0.013	0.013
aus Einzelmeßstellen		0.069	0.034	0.079
		+ -	+ -	+ -
		0.045	0.033	0.033
Luftwechsel	Luftvolumen	Luftwechsel		
	277	17.8	9.1	20.9
	+ -	+ -	+ -	+ -
	11	5.0	3.6	3.6

PHI/IWU 2002

Tabelle 5.1.3-3: Ergebnisse für den Luftwechsel bei geschlossenem und geöffnetem Nordfenster im Niedrigenergiehaus im Mai 2002.

Daten aus 2. Messung	NEH geschlossen	NEH Nordfenster	NEH Südfenster
Luftwechsel	0.136 +- 0.009 /h	0.282 +- 0.01 /h	0.442 +- 0.164 /h
Mittelwert aus Einzelmeßpunkten:			
	0.125	0.283	0.477
	+ -	+ -	+ -
	0.028	0.019	0.102
Fenster (Differenz)		0.146	0.306
		+ -	+ -
		0.013	0.164
Luftwechsel	Luftvolumen		
	286	41.7	87.4
	+ -	+ -	+ -
	29	5.7	47.9

PHI/IWU 2002

Nennenswerte Luftwechsel treten erst bei Querlüftung auf. Allerdings war der entsprechende Versuch in Bezug auf den Luftwechsel sehr schwierig auszuwerten, da eine Durchmischung in diesem Fall praktisch nicht mehr möglich war (vgl. Tabelle 5.1.3-4). Neue, systematische Untersuchungen mit Tracergas-Messmethoden in bewohnten Wohnungen im Sommer und mit dynamischen Gebäudesimulationen zeigen, dass für ausreichende Luftwechsel, die zu einer Kühlung wesentlich beitragen können, mehrere Fenster geöffnet sein sollten, am besten in verschiedenen Stockwerken [84].

Tabelle 5.1.3-4: Ergebnisse für den Luftwechsel bei geschlossenem und geöffnetem Südfenster sowie Querlüftung im Passivhaus im Mai 2002.

Daten aus 2. Messung	PH geschlossen	PH Südfenster korrigiert	PH Südfenster	PH Südfenster interpoliert	PH Querlüftung	PH Querlüftung interpoliert
Luftwechsel	0,46 +- 0,012 /h	0,572 +- 0,052 /h	0,758 +- 0,079 /h	0,709 +- 0,059 /h	1,148 +- 0,153 /h	1,123 +- 0,07 /h
Mittelwert aus Einzelmeßpunkten:						
	0.457	0.586	0.725	0.723	1.314	1.298
	+-	+-	+-	+-	+-	+-
	0.030	0.124	0.191	0.189	0.440	0.421
Fenster (Differenz)		0.112	0.298	0.249	0.688	0.599
		+-	+-	+-	+-	+-
		0.053	0.080	0.060	0.153	0.072
Luftwechsel	Luftvolumen	Luftwechsel				
	277	31.0	82.6	69.0	190.7	166.1
	+-	+-	+-	+-	+-	+-
	11	14.7	22.3	16.9	43.1	21.0
PHI/IWU 2002						

Lüftungseffizienz

Zur Beurteilung der Raumluftqualität und der Wirksamkeit des Lüftungssystems wurden außerdem Messungen zum Luftalter durchgeführt. Zur Messung des Luftalters müssen Erwartungswerte der Zeit gebildet werden, wobei im Falle der hier eingesetzten Abklingmethode die Wahrscheinlichkeitsdichte durch die Konzentration des Spurengases gegeben ist. Diese Zeitintegrationen können nur bei hinreichend langer Messdauer durchgeführt werden; die Messdauer sollte dabei mindestens 2 bis 3 mal so lang sein wie die nominale Zeitkonstante. Da die Luftwechselraten gering sind, dauert die Messung entsprechend lange; die Messungen wurden z.T. über Nacht durchgeführt. Die folgende Tabelle zeigt die Auswertung der Messungen bei geschlossenen Fenstern.

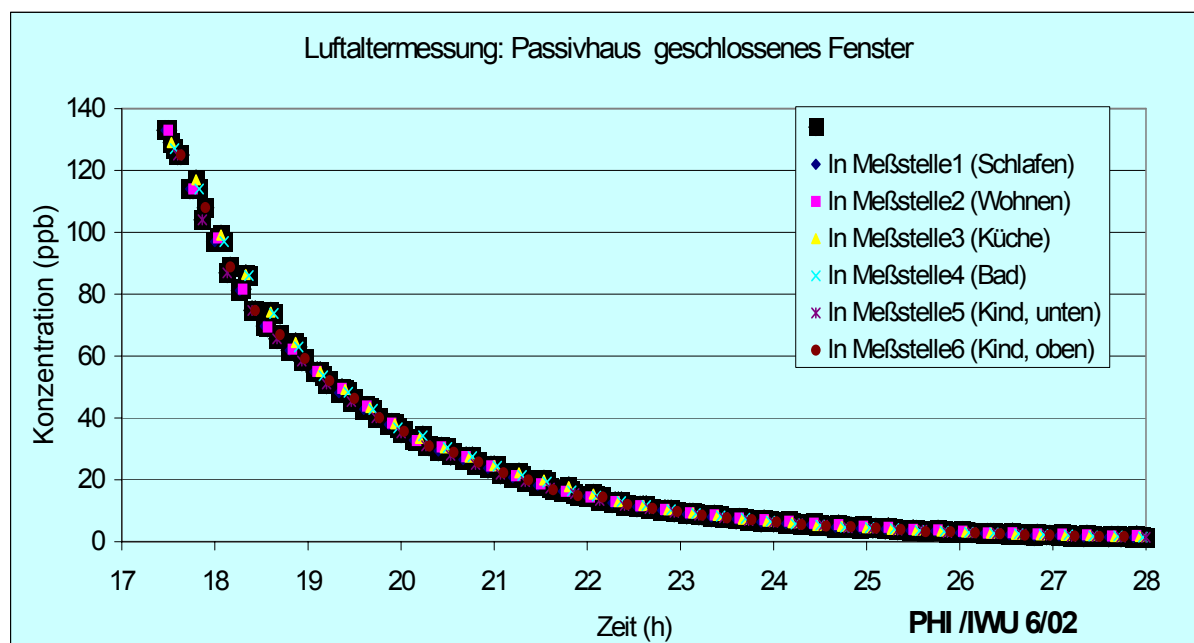
Tabelle 5.1.3-5: Ergebnisse zum Luftalter und zum Luftaustauschwirkungsgrad in einem Passivhaus und einem Niedrigenergiehaus in Wiesbaden

Ergebnisse der Luftaltermessungen März 2002 geschlossenes Fenster	Passivhaus	Niedrigenergiehaus		
	3/18/02	11:40 - 6:00	11:40 - 19:00	20:00 - 6:00
Luftwechsel (1/h)	0.44	0.20	0.20	0.18
Luftalter: Bestimmung aus der Abluft (h)	2.10	4.77	4.73	5.17
mittleres Luftalter: Bestimmung aus der Raumluft	2.0	4.96	4.89	6.21
Luftaustauschwirkungsgrad (-)	55%	0.52	0.52	55%

PHI/IWU 1/03

Die Luftwechselrate wurde ebenfalls mit einem Integrationsverfahren bestimmt. Im Passivhaus stimmt sie sehr gut mit der aus der Regression berechneten überein, wodurch die beiden Verfahren gut validiert sind. Im Passivhaus beträgt das mittlere Luftalter im Mittel 2-2,1 Stunden. Der Luftaustauschwirkungsgrad ist mit 0,55 etwas besser als die ideale Durchmischung. Er ist zu erklären aus der gerichteten Durchströmung von den Zuluft- in die Ablufträume. An den gemessenen Aufenthaltsbereichen der Zulufräume ist die Situation noch günstiger: die Werte für das lokale Luftalter liegen durchgängig bei 2 Stunden. Damit kann mit dem eingestellten Luftwechsel eine gute Raumluftqualität sichergestellt werden. In einem der hohen Räume wurden zwei Messfühler unten und auf der Galerie angebracht: die Messergebnisse unterschieden sich nicht. Innerhalb eines Raumes kann damit von guter Durchmischung ausgegangen werden. Dies steht in Übereinstimmung mit Raumluftströmungsuntersuchungen: Demnach ist innerhalb eines Raumes der Luftaustauschwirkungsgrad mit 0,5 (entspricht idealer Durchmischung) am höchsten, wenn zur Luftverteilung Weitwurfdüsen eingesetzt werden (dies ist in Wiesbaden der Fall) [85].

Abbildung 5.1.3-12: Passivhaus: Gute Raumluftdurchmischung auch ohne Ventilator. Die einzelnen Messstellen zeigen praktisch keine Konzentrationsunterschiede.



Im Niedrigenergiehaus zeigt sich, dass aufgrund der geringen Luftwechselraten die jeweiligen Zeiträume gleichmäßiger Nutzung zu kurz sind, um Luftalter und Luftaustauschkennzahlen mit hoher Genauigkeit zu bestimmen. Der Messzeitraum teilt sich offensichtlich in den Abend, in dem die Bewohner aktiv sind und die Nacht, die eigentlich getrennt untersucht werden müssten. Der Fehler ist daher größer als beim Passivhaus. Dennoch lässt sich mit Sicherheit feststellen, dass die gemessenen mittleren Luftalter unakzeptabel hoch sind (vgl. Tabelle 3). Die Luftaustauschkennzahl liegt ebenso wie beim Passivhaus im Bereich der idealen Durchmischung. Die lokalen Luftalter jedoch, die in Zulufräumen des Aufenthaltsbereichs gemessen wurden, sind noch deutlich höher; alle liegen über 5 Stunden. Damit ist auch die relevante lokale Lüftungswirksamkeit bei der Zu- und Abluftanlage im Passivhaus deutlich besser als bei der Abluftanlage im Niedrigenergiehaus. Die Abbildung zeigt, dass insbesondere in der Nacht, wenn die Bewohner nicht aktiv sind, die einzelnen Messstellen sehr unterschiedliche Spurengaskonzentrationen aufweisen. Insbesondere in den Zulufräumen, also den Wohnräumen, geht die Konzentration nur sehr langsam zurück. Dies bedeutet, dass die Luft dort länger verweilt und die Luftalter dementsprechend hoch sind.

Tabelle 5.1.3-6 zeigt die lokalen Luftalter im Passivhaus und im Niedrigenergiehaus im Vergleich. In Tabelle 5.1.3-7 sind die lokalen Luftaustauschkennzahlen dokumentiert.

Abbildung 5.1.3-12: Niedrigenergiehaus: Die Luftdurchmischung ist wesentlich schlechter als im Passivhaus. In den Wohnräumen geht die Tracergaskonzentration deutlich langsamer zurück als in den Ablufträumen.

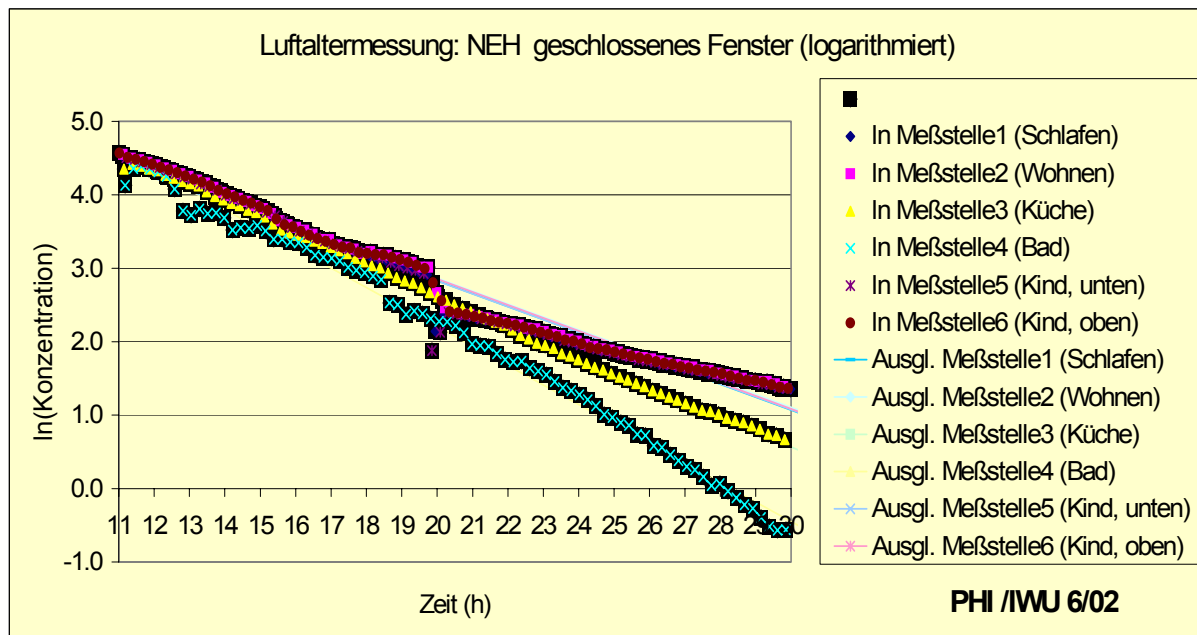


Tabelle 5.1.3-6: Lokale Luftalter im Passivhaus und im Niedrigenergiehaus im Vergleich.

Lokale Luftalter (h) τ_a März 2002	Passivhaus	Niedrigenergiehaus
Meßstelle1 (Schlafen)	2.0	5.2
Meßstelle2 (Wohnen)	2.1	5.2
Meßstelle3 (Küche)	2.0	4.8
Meßstelle4 (Bad)	2.0	3.8
Meßstelle5 (Kind, unten)	2.1	5.1
Meßstelle6 (Kind, oben)	2.0	5.2

PHI/IWU 1/03

Nach diesen Messergebnissen ist festzustellen, dass die Zu- und Abluftanlagen in den Passivhäusern sich in Bezug auf die Herstellung einer guten Luftqualität bewährt haben. Sie sind den Abluftanlagen in den Niedrigenergiehäusern sowohl in Bezug auf ausreichende Luftmengen als auch in Bezug auf die Luftmengenverteilung überlegen. Dies deckt sich mit den Bewertungen der Bewohner, die in den Passivhäusern besser ausfallen als in den Niedrigenergiehäusern (Abb. 5.1.3-2, s.a. Abschnitt 6.3.1).

Tabelle 5.1.3-7: Lokale Luftaustauschkennzahlen im Passivhaus und im Niedrigenergiehaus im Vergleich.

Lokale Luftaustauschkennzahlen τ_a / τ_p	Passivhaus	Niedrigenergiehaus 11:30 - 6:00
	Meßstelle1 (Schlafen)	1.05
Meßstelle2 (Wohnen)	1.02	0.92
Meßstelle3 (Küche)	1.03	0.99
Meßstelle4 (Bad)	1.02	1.26
Meßstelle5 (Kind, unten)	1.02	0.93
Meßstelle6 (Kind, oben)	1.05	0.92

5.1.4 Bewertung und weiterer Forschungsbedarf

Tracergasmessmethoden sind ein geeignetes Instrument zur Untersuchung von Luftwechselraten und Luftaustauschkennzahlen bei der Bewertung von Raumluftqualität und Wirksamkeit des Lüftungssystems. Die Messergebnisse für den Winter tragen zur Erklärung des beobachteten Heizenergieverbrauchs und der Nutzerstreuung bei, wenn geeignete Bilanzmodelle (PHPP Monatsverfahren [86]) verwendet werden. Somit ist die Messmethode in Verbindung mit geeigneten Modellen zur Strömungssimulation und zum Energieverbrauch geeignet, auch den zusätzlichen Heizenergieverbrauch zu erklären und zu projektieren.

Im Sommer kann über das Kippen einzelner Fenster allein nicht immer ein wesentlicher Luftwechsel erzeugt werden; zusätzliche Maßnahmen zur Kühlung sind angebracht (vgl. auch [84]).

Eine Übertragung auf andere Gebäude, Fensterbauarten und andere Außenklimabedingungen ist aber nicht ohne weiteres möglich. Um zu einer realistischen Einschätzung des Fensterluftwechsels zu kommen, die es auch erlaubt, geeignete Modelle zur Quantifizierung und Validierung zu entwickeln, müssen erheblich mehr Messungen durchgeführt werden. Diese Messungen müssen sowohl das Spektrum typischer Klimabedingungen abdecken und somit einen längeren Zeitraum umfassen als auch an Fenstern unterschiedlicher Größe und Bauart sowie an unterschiedlichen Gebäuden durchgeführt werden.

5.2 Rechnerische Bestimmung des Volumenstroms bei Fensterlüftung

In [87] wurde der Einfluss eines gekippten Fensters auf den Heizwärmebedarf von Passivhäusern theoretisch untersucht. Grundlage waren dynamische Simulationsrechnungen mit dem Programm TAS, bei denen sowohl das Temperaturverhalten als auch die Gebäudedurchströmung berücksichtigt wurden. Es zeigte sich, dass der Heizwärmebedarf deutlich durch ein gekipptes oder geöffnetes Fenster ansteigt. Diese damals berechneten Ergebnisse werden durch die in der Gartenhofsiedlung Lummerlund durchgeführten Messungen in diesem Umfang nicht bestätigt. Diese Diskrepanz zwischen Berechnung und Messung war Anlass, die Modellansätze und Parameter der Berechnung noch einmal kritisch zu hinterfragen.

Das Simulationsprogramm TAS berücksichtigt wie andere Gebäudedurchströmungsprogramme auch gekippte Fenster als Öffnung in der Fassade. Es wird vermutet, dass ein wesentlicher Anteil der Differenzen zwischen Rechnung und Messung in dieser einfachen Modellbildung liegt. Die Strömungsverhältnisse an einem gekippten Fenster sind deutlich komplexer als an einer Öffnung.

Ziel des folgenden Abschnittes ist es, das Modell zu analysieren und zu verfeinern, mit dem ein gekipptes Fenster in die Berechnung eingebunden wird. Untersucht wird der Einfluss

1. der speziellen Geometrie der Öffnungsfläche beim gekippten Fenster (Zunahme der Öffnungsweite mit der Fensterhöhe)
2. der dreidimensionalen Ausbildung der Fensterfalz
3. der Fensterlaibung
4. und von Turbulenzen im Windfeld.

Die einzelnen Korrekturen werden dabei in einer Form angegeben, dass sie in den üblichen Gebäudedurchströmungsprogrammen berücksichtigt werden können. Mit dem so verfeinerten Berechnungsansatz wird der Einfluss von gekippten Fenstern auf den Heizwärmebedarf von Passivhäusern berechnet.

Die Verbesserung der Modellbildung des gekippten Fensters ist neben der Anwendung im Simulationsprogramm TAS von allgemeinem Interesse. Zwar gibt es Berechnungsansätze bzw. Programme, die die hier behandelten Aspekte punktuell berücksichtigen. Jedoch weisen auch diese Ansätze noch Defizite auf:

- So ist mit dem Rechenverfahren von [88] ein empirischer Berechnungsansatz gegeben, der aus Messdaten abgeleitet wurde. Dieser Ansatz kann jedoch nicht in Gebäudesimulationsprogramme oder andere komplexere Berechnungen eingebaut werden, da die Höhe des Volumenstroms nicht aus Druckdifferenzen am Fenster sondern über empirische Koeffizienten aus der Außentemperatur und der Windgeschwindigkeit ermittelt wird. Die Übertragbarkeit auf andere Fenstersituationen ist ebenfalls eingeschränkt, da nach Maas befriedigende Ergebnisse nur mit einem

messtechnisch ermittelten Durchflussverhältnis erreicht werden. Gemessene Durchflussverhältnisse liegen aber nur für das von Maas untersuchte Fenster vor.

- Das Gebäudedurchströmungsprogramm COMIS berücksichtigt den in Abschnitt 0 untersuchten Einfluss der mit der Fensterhöhe zunehmenden Öffnungsweite. Der Einfluss der Fensterfalz (Abschnitt 0) wird im Cd-Wert berücksichtigt. Der Cd-Wert wird in COMIS damit nicht konstant angenommen - wie in dieser Untersuchung -, sondern es ist eine Berechnungsgleichung angegeben, über die der Cd-Wert in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel und dem Breiten zu Höhenverhältnis bestimmt werden kann. Die Berechnungsgleichung berücksichtigt jedoch nur eine bestimmte geometrische Situation. Bei anderen (geometrischen) Randbedingungen, z.B. stärkeren Rahmenprofilen von Passivhausfensterrahmen, kann die Gleichung zu einer fehlerhaften Einschätzung des Cd-Wertes führen. Nicht berücksichtigt wird bei COMIS zudem der Einfluss der Fensterlaibung und der Turbulenzen im Windfeld.

Die bestehenden Ansätze und Rechenprogramme sind wichtige Schritte auf dem Weg zu einer korrekten Berechnung des Zuluftvolumenstroms über ein gekipptes Fenster. Es sind aber immer noch offene Fragen vorhanden. Die vorliegende Untersuchung will in diesem Bereich einen Beitrag leisten.

5.2.1 Der Luftvolumenstrom über ein gekipptes Fenster

Zunächst werden die allgemeinen Ansätze zur Berechnung des Luftvolumenstroms über ein geöffnetes Fenster in Anlehnung an die in [89] dargestellten Ausführungen erläutert.

Ein Luftaustausch findet am gekippten Fenster über die beiden seitlichen vertikalen Flächen und die obere horizontale Fläche statt. Wird der übliche Fall betrachtet, dass die Außenluft kälter ist als die Raumluft, ergibt sich im unteren Teil der Seitenflächen ein Zuluftvolumenstrom. Die Abluft verlässt den Raum über die oberen Bereiche der Seitenflächen und über die horizontale Fläche (siehe Abb. 5.2-1).

$$Gl. 1 \quad \dot{V}_{FE} = \dot{V}_{O,Ab} + \dot{V}_{S,L,Ab} + \dot{V}_{S,R,Ab} + \dot{V}_{S,L,Zu} + \dot{V}_{S,R,Zu}$$

mit

\dot{V}_{FE}	Volumenstrom über das gesamte Fenster
$\dot{V}_{O,Ab}$	Volumenstrom über die obere horizontale Öffnung
$\dot{V}_{S,L,Ab}$	Abluftvolumenstrom über die linke seitliche Öffnung
$\dot{V}_{S,R,Ab}$	Zuluftvolumenstrom über die rechte seitliche Öffnung
$\dot{V}_{S,L,Zu}$	Zuluftvolumenstrom über die linke seitliche Öffnung
$\dot{V}_{S,R,Zu}$	Abluftvolumenstrom über die rechte seitliche Öffnung

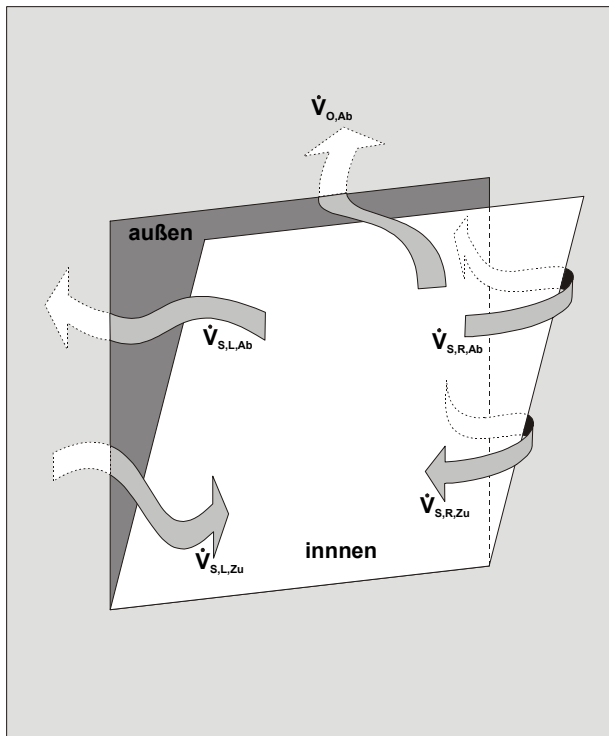


Abb. 5.2-1: Teilvolumenströme am gekippten Fenster

Für die weiteren Berechnungen wird angenommen, dass die Strömungsverhältnisse an der linken und rechten vertikalen Seitenfläche identisch sind. Gl. 1 lässt sich damit vereinfachen zu:

$$\text{Gl. 2} \quad \dot{V}_{FE} = \dot{V}_{O,Ab} + 2 \dot{V}_{S,Ab} + 2 \dot{V}_{S,Zu}$$

Allgemein lässt sich der Luftvolumenstrom durch Öffnung in der Gebäudehülle in folgender Form beschreiben:

$$\text{Gl. 3} \quad \dot{V} = A \cdot v,$$

mit

A Öffnungsfläche

v Strömungsgeschwindigkeit.

Für die bei gekippten Fenstern auftretende turbulente Strömung ergibt sich die Strömungsgeschwindigkeit aus dem Zusammenhang

$$\text{Gl. 4} \quad \Delta p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \zeta \cdot v^2$$

$$\text{Gl. 5} \quad v = \sqrt{\frac{\Delta p \cdot 2}{\rho \cdot \zeta}}$$

mit

Δp Druckdifferenz

ρ Dichte

ζ Widerstandsbeiwert

Unter Verwendung der Beziehung

$$\text{Gl. 6} \quad C_d = \sqrt{\frac{1}{\zeta}}$$

mit

C_d Öffnungsbeiwert

folgt die bekannte Gleichung zur Berechnung des Volumenstroms über größere Öffnungen in der Gebäudehülle (turbulente Strömungsform):

$$\text{Gl. 7} \quad \dot{V} = A \cdot C_d \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p}$$

Die Wurzel kann nur aus einem positiven Wert gezogen werden. Mathematische Schwierigkeiten ergeben sich deswegen bei negativen Werten der Druckdifferenz. Deswegen muss der Absolutwert der Druckdifferenz verwendet werden. Um das Vorzeichen wieder herzustellen, wird ein Ausdruck

$$\text{Gl. 8} \quad \sigma = \frac{\Delta p}{|\Delta p|}$$

ergänzt, der den Wert 1 oder -1 annehmen kann. Gl. 7 schreibt sich damit zu

$$\text{Gl. 9} \quad \dot{V} = A \cdot C_d \cdot \left(\frac{2}{\rho}\right)^{0,5} \text{abs}(\Delta p)^{0,5} \sigma$$

Mit dieser Gleichung können die Strömungsvorgänge an einem geöffneten Fenster prinzipiell quantifiziert werden.

Die Druckdifferenz Δp ergibt sich beim gekippten Fenster als Überlagerung unterschiedlicher Teil-Druckdifferenzen.

$$\text{Gl. 10} \quad \Delta p = \Delta p_{TF} + \Delta p_{TG} + \Delta p_W + \Delta p_i + \dots$$

mit

Δp_{TF} Druckdifferenz aufgrund von Thermik über die Höhe des Fensters

Δp_{TG} Druckdifferenz aufgrund von Thermik über die Höhe des Gebäudes

Δp_W Druckdifferenz aufgrund von Windkräften

Δp_i Druckdifferenz des Gebäudevolumens gegen Umgebungsdruck z.B. durch Disbalancen der Lüftungsanlagen

5.2.2 Spezielle Geometrie des gekippten Fensters

An einem Fenster herrschen Druckdifferenzen, die durch Thermik hervorgerufen werden (Kamineffekt). Diese Druckdifferenzen ergeben sich dadurch, dass die Abnahme der Luftdichte mit der Höhe je nach Temperaturniveau unterschiedlich stark ausfällt. Temperaturdifferenzen zwischen Raum und Umgebung führen also zu Druckdifferenzen.

Aufgrund der speziellen Geometrie nimmt die horizontale Öffnungsweite beim gekippten Fenster mit der Höhe zu. Zur Berechnung des Luftvolumenstroms wird häufig eine über die Höhe konstante Öffnungsweite angenommen. Dieses Ersatzmodell entspricht bildlich gesprochen einem Schiebefenster (siehe Abb. 5.2-4). Durch diese Vereinfachung tritt ein Fehler in der Berechnung auf. Im Folgenden wird dieser Fehler quantifiziert und ein Korrekturfaktor abgeleitet, über den dieser Einfluss in der Berechnung berücksichtigt werden kann. Hierzu wird nach einer allgemeinen Darstellung der Berechnungsansätze

- die Berechnungsgleichung für das Ersatzmodell (Schiebefenster) sowie
- die Berechnungsgleichung für die genauere Berechnung (Schwerpunktansatz) aufgestellt und
- durch Kombination dieser Ansätze ein Korrekturfaktor ermittelt.

Für die weiteren Berechnungen wird angenommen, dass das Fenster in einen ideal dichten und ideal durchmischten Raum eingebaut ist. Beeinflussungen durch das Gebäude ergeben sich damit nicht.

5.2.2.1 Thermik über die Höhe des Fensters

Die thermisch induzierte Druckdifferenz zwischen zwei Öffnungen in der Fassade lässt sich nach [89] wie folgt berechnen:

$$\text{Gl. 11} \quad \Delta p_T = -\rho_N \cdot \Theta_N \cdot g \cdot \Delta h \cdot \left(\frac{1}{\Theta_a} - \frac{1}{\Theta_i} \right).$$

mit

ρ_N	Dichte bei Normzustand (z. B. 0°C)
Θ_N	absolute Temperatur bei Normzustand
g	Erdbeschleunigung
Δh	Höhendifferenz zwischen den Öffnungen (h_2-h_1)
Θ_a	Absolutwert der Außentemperatur
Θ_i	Absolutwert der Innentemperatur in der Höhe h .

Wird die Höhe vom Fußpunkt des Fensters aus gemessen gilt
 $h_1 = 0$.

Wird h_2 durch die Höhe h ersetzt ergibt sich

$$\text{Gl. 12} \quad \Delta p_{T,h} = -\rho_N \cdot \Theta_N \cdot g \cdot h \cdot \left(\frac{1}{\Theta_a} - \frac{1}{\Theta_i} \right).$$

Aus Gl. 12 ist ersichtlich, dass die Druckdifferenz linear mit der Höhe ansteigt. Die Druckdifferenz in der Höhe h lässt sich schreiben als:

$$\text{Gl. 13} \quad \Delta p_{T,h} = h \cdot \frac{\Delta p_{ges}}{h_{ges}}$$

mit

Δp_{ges} maximale Druckdifferenz aufgrund von Thermik bei h_{ges}

h Höhe h

$\Delta p_{T,h}$ Druckdifferenz aufgrund von Thermik in der Höhe h

Zunächst ergeben sich aus Gl. 12 nur negative Werte für die Druckdifferenz und damit den Volumenstrom (Ausströmung). Bei dem hier betrachteten geöffneten Fenster in einem ideal dichten Raum (Gebäude) muss jedoch genauso viel Luft in das Gebäude hinein wie hinaus strömen. Das heißt, es muss die Massenstrombilanz erfüllt sein:

$$\text{Gl. 14} \quad \dot{m}_{Zu} = \dot{m}_{Ab}$$

mit

\dot{m}_{Zu} Zuluftmassenstrom

\dot{m}_{Ab} Abluftmassenstrom

Im Weiteren wird eine einheitliche mittlere Dichte für den zu- und abströmenden Luftvolumenstrom verwendet

$$\text{Gl. 15} \quad \rho = \frac{\rho_{Zu} + \rho_{Ab}}{2},$$

weswegen auch die Volumenstrombilanz ausgeglichen sein muss

$$\text{Gl. 16} \quad \dot{V}_{Zu} = \dot{V}_{Ab}.$$

Wie in Abb. 5.2-1 dargestellt, tritt in der Realität im unteren Fensterbereich eine Einströmung, im oberen eine Ausströmung auf. Mathematisch bedeutet dies, dass im unteren Fensterbereich eine positive Druckdifferenz, im oberen eine negative Druckdifferenz herrschen muss (Vorzeichenkonvention). Es ergibt sich also eine Parallelverschiebung des Druckniveaus um den Betrag Δp_K (siehe Abb. 5.2-2):

$$\text{Gl. 17} \quad \Delta p_{TF,h} = h_h \cdot \frac{\Delta p_{ges}}{h_{ges}} + \Delta p_k$$

mit

$\Delta p_{TF,h}$ Druckdifferenz aufgrund von Thermik über das Fenster in der Höhe h

Δp_k Druckkorrektur am Fußpunkt des Fensters.

Da Druck und Strömungsgeschwindigkeit sich kontinuierlich ändern, muss es eine druckneutrale Höhe geben, bei der die Druckdifferenz und damit auch die Strömungsgeschwindigkeit null ist (siehe Abb. 5.2-2). Die Lage der druckneutralen Höhe lässt sich ausdrücken als

$$\text{Gl. 18} \quad h_{nz} = h_{ges} \cdot f_{nz}$$

mit

h_{nz} Höhe der druckneutralen Zone vom Fußpunkt des Fensters aus gemessen

f_{nz} Faktor zur Beschreibung der druckneutralen Fensterhöhe

Wegen des linearen Anstieges der Druckdifferenz entspricht Δp_k nun gerade der Bedingung

$$\text{Gl. 19} \quad \Delta p_k = -f_{nz} \Delta p_{ges}$$

und

$$\text{Gl. 20} \quad \Delta p_{TF,h} = \Delta p_{ges} \cdot \left(\frac{h_h}{h_{ges}} - f_{nz} \right)$$

Der Zuluftvolumenstrom über ein gekipptes Fenster aufgrund von Thermik über die Höhe des Fensters berechnet sich damit zu

$$\text{Gl. 21} \quad \dot{V}_{Zu,TF} = 2 \cdot \int_{h=0}^{h=h_{ges} \cdot f_{nz}} t_h \cdot C_d \cdot \left(\frac{2}{\rho_h} \right)^{0,5} \text{abs}(\Delta p_{TF,h})^{0,5} \sigma dh$$

mit

$\dot{V}_{Zu,TF}$ Zuluftvolumenstrom aufgrund von Thermik über die Höhe des Fensters

t_h Öffnungsweite in der Höhe h

ρ_h Dichte in der Höhe h

Für die Berechnung wird angenommen, dass die Dichte des über das Fenster strömenden Luftvolumens über die Höhe des Fensters konstant ist. Außerdem wird das Integral über die Wurzel des Druckes vereinfachend dahingehend gelöst, dass die Wurzel aus einem mittleren Druck gezogen wird. Dies ermöglicht es, die thermisch induzierte Druckdifferenz bei der Berechnung der gesamten Druckdifferenz nach Gl. 10 einfach zu integrieren. Der Fehler hierdurch ist gering, so dass diese Vereinfachung bei der vorliegenden Genauigkeit der Gesamtberechnung zulässig ist. Gl. 21 vereinfacht sich damit zu:

$$\text{Gl. 22} \quad \dot{V}_{Zu,TF} = A_{Zu} \cdot C_d \cdot \left(\frac{2}{\rho}\right)^{0,5} \text{abs}(\Delta\bar{p}_{TF,Zu})^{0,5} \sigma$$

mit

A_{Zu} Fläche der Zuluftöffnung (beide Seitenflächen)

$\Delta\bar{p}_{TF,Zu}$ mittlere Druckdifferenz an der Zuluftöffnung aufgrund von Thermik über die Höhe des Fensters

Die Besonderheit des gekippten Fensters liegt darin, dass die Öffnungsweite an den Seitenflächen mit der Höhe zunimmt und eine zusätzliche horizontale Öffnungsfläche vorliegt. Hierdurch wird die Lage der druckneutralen Höhe beeinflusst. Den Verlauf der Öffnungsweite und der Druckdifferenz zeigt Abb. 5.2-2. Die Fensterhöhe ist als normierter Wert angegeben, um die Aussagen auf Fenster mit unterschiedlicher Größe übertragen zu können.

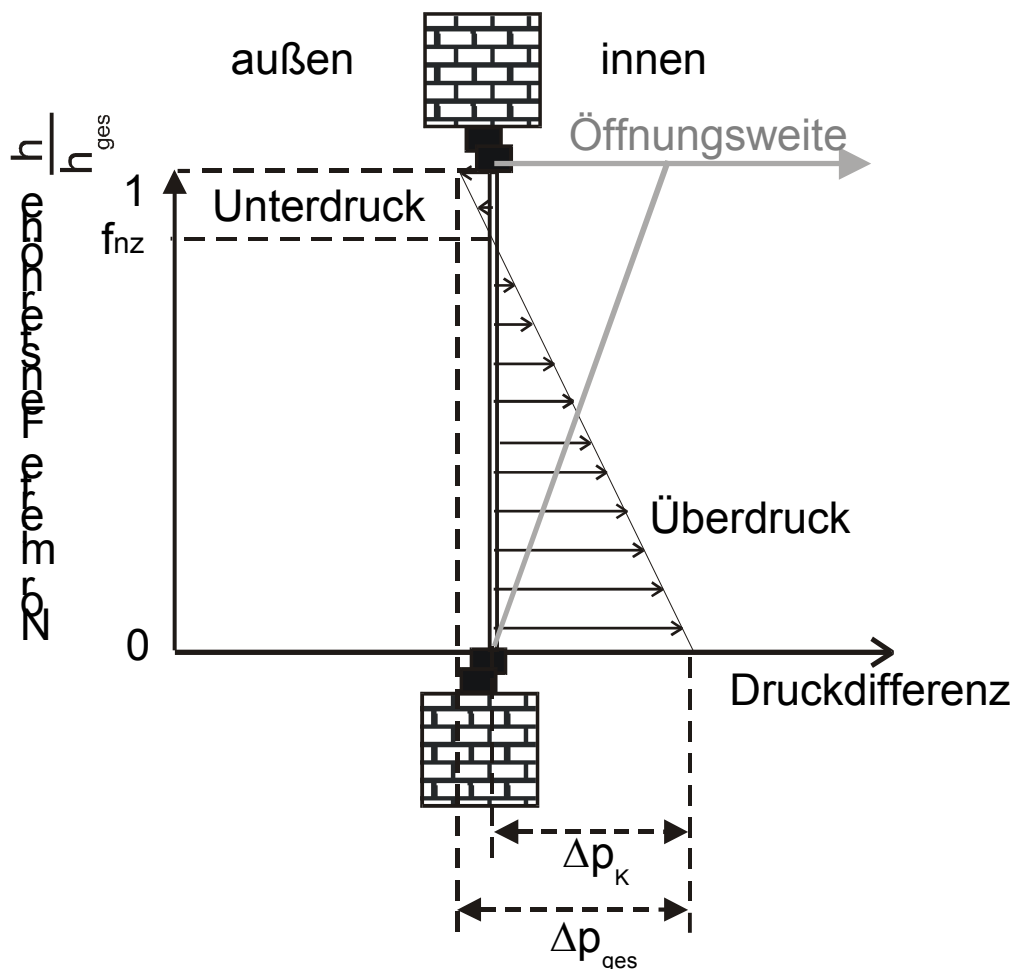


Abb. 5.2-2: Verlauf von Druckdifferenz und Öffnungsweite bei einem gekippten Fenster

Der Volumenstrom in Abhängigkeit von der Fensterhöhe berechnet sich aus der Überlagerung dieser beiden Effekte. Wird das Fenster in mehrere horizontale Segmente unterteilt und für jedes Segment der Volumenstrom über Gl. 21 bestimmt, ergibt sich beispielsweise der in Abb. 5.2-3 dargestellte Verlauf.

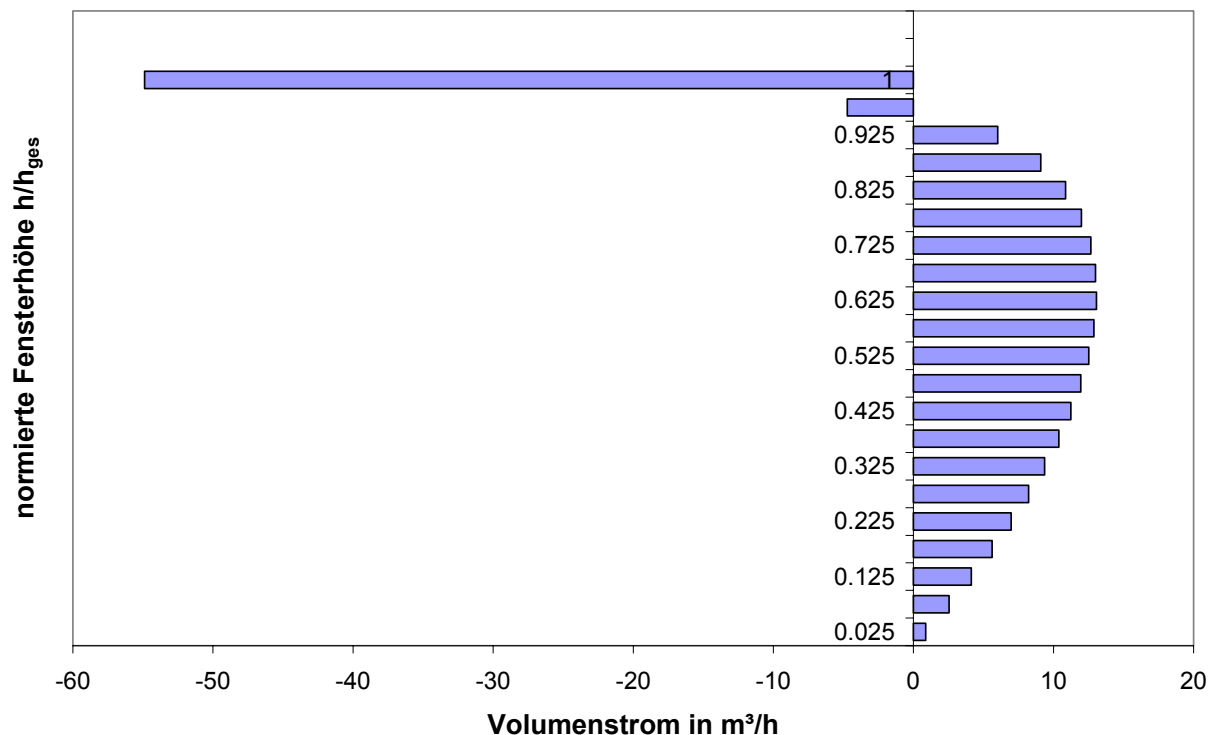


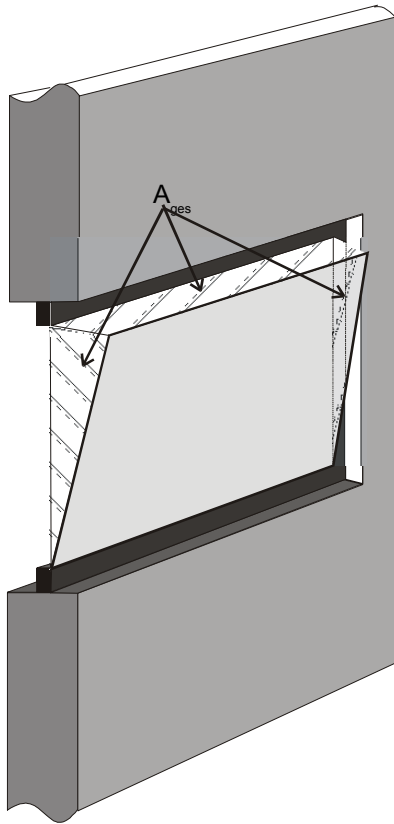
Abb. 5.2-3: Volumenstrom über ein gekipptes Fenster

Ausgehend vom Fußpunkt des Fensters nimmt der Zuluftvolumenstrom zunächst zu. In der Höhe von 0,6 m erreicht er sein Maximum und fällt dann aufgrund der abnehmenden Druckdifferenz ab, bis er bei einer Höhe von etwa 0,93 den Wert Null erreicht. Mit weiter zunehmender Höhe, tritt ein Abluftvolumenstrom aus dem Raum heraus auf. Dieser nimmt erst kontinuierlich zu. Bei der normierten Höhe von 1 tritt ein sprunghafter Anstieg auf. Begründet wird dieser durch den Volumenstrom über die obere horizontale Öffnungsfläche \dot{V}_o , der vollständig der Höhe 1 zugewiesen wird. Die Volumenströmbilanz über das gesamte Fenster ist ausgeglichen (Voraussetzung: Dichte konstant).

5.2.2.2 Ersatzmodell „Schiebefenster“

Zur Berechnung des mittleren Drucks an der Zuluftöffnung aus Gl. 22 wird in der Praxis häufig eine über die Fensterhöhe konstante Öffnungsweite angenommen. Die konstante Öffnungsweite hat einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis. Anschaulich entspricht die konstante Öffnungsweite einem Schiebefenster. Allein der optische Eindruck von Abb. 5.2-4 verdeutlicht bereits, dass dieses Ersatzmodell einen Fehler beinhaltet, da beim gekippten Fenster die Öffnungsweite mit der Höhe zunimmt. Die über das Fenster auftretende durch Thermik induzierten Druckdifferenz wird beim Ersatzmodell überschätzt und damit ein zu hoher Volumenstrom berechnet.

Gekipptes Fenster



Ersatzdarstellung: Schiebefenster

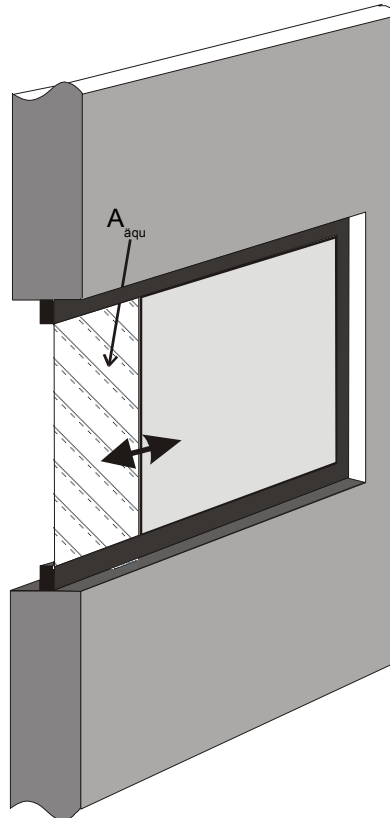


Abb. 5.2-4 Vergleich des gekippten Fensters mit dem üblicherweise verwendeten Modells des Schiebefensters

Zunächst wird der Berechnungsansatz des Ersatzmodells „Schiebefenster“ erläutert. Der Volumenstrom wird über Gl. 22 berechnet, d.h. es besteht die Aufgabe die Öffnungsfläche und die mittlere Druckdifferenz zu quantifizieren. In Abb. 5.2-5 ist der Verlauf der Druckdifferenz und der Öffnungsweite für das Modell des Schiebefensters qualitativ dargestellt.

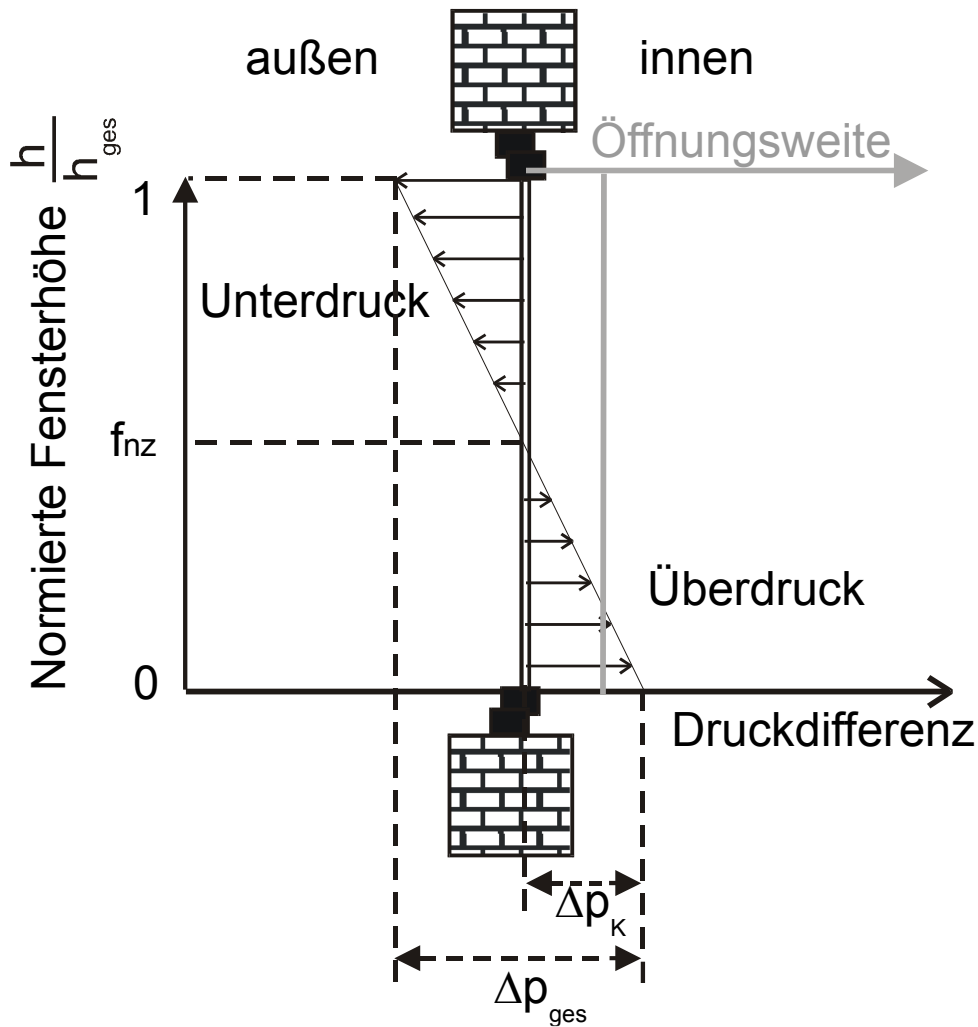


Abb. 5.2-5 : Druckdifferenz aufgrund des Kamineffektes (Thermik) und der Öffnungsweite für das Ersatzmodell „Schiebefenster“

Die Öffnungsfläche verteilt sich in der Ersatzdarstellung zu gleichen Teilen auf Zu- und Abluftöffnung:

$$\text{Gl. 23} \quad A_{Zu} = A_{Ab} = \frac{1}{2} A_{ges}$$

mit

A_{Ab} Fläche der Abluftöffnung.

Der Zu- und der Abluftöffnungsfläche muss nun eine Druckdifferenz zugewiesen werden. Da die Druckdifferenz sich linear ändert, kann bei konstanter Öffnungsweite der jeweilige Mittelwert herangezogen werden.

Für die mittlere Druckdifferenzen ergibt sich aus Gl. 17 für diesen Fall:

$$\text{Gl. 24} \quad \Delta \bar{p}_{Zu,TF} = -\frac{1}{4} \Delta p_{ges}$$

$$\text{Gl. 25} \quad \Delta \bar{p}_{Ab,TF} = \frac{1}{4} \Delta p_{ges}$$

Der Zu- bzw. Abluftvolumenstrom berechnet sich somit für das Ersatzmodell „Schiebefenster“ zu

$$\text{Gl. 26} \quad \dot{V}_{Zu,TF} = -\dot{V}_{Ab,TF} = C_d \left(\frac{2}{\rho} \right)^{0,5} \frac{A_{ges}}{2} \text{abs} \left(-\frac{1}{4} \Delta p_{ges} \right)^{0,5} \sigma$$

5.2.2.3 Genauere Berechnung mit dem „Schwerpunktansatz“

Im Folgenden wird ein Ansatz zur Berechnung des Volumenstroms über ein gekipptes Fenster hergeleitet. Hierzu wird der sogenannte Schwerpunktansatz herangezogen. Dabei werden die einzelnen Teilvolumenströme aus Abb. 5.2-1 über Gl. 22 berechnet. Die Öffnungsfläche entspricht dabei der jeweiligen Teilfläche. Als mittlere Druckdifferenz wird die Druckdifferenz im Schwerpunkt der jeweiligen Teilfläche angesetzt. Dies entspricht einem mit der Öffnungsweite gewichteten mittleren Druck. Für eine Seitenfläche ist das Prinzip in Abb. 5.2-6 dargestellt.

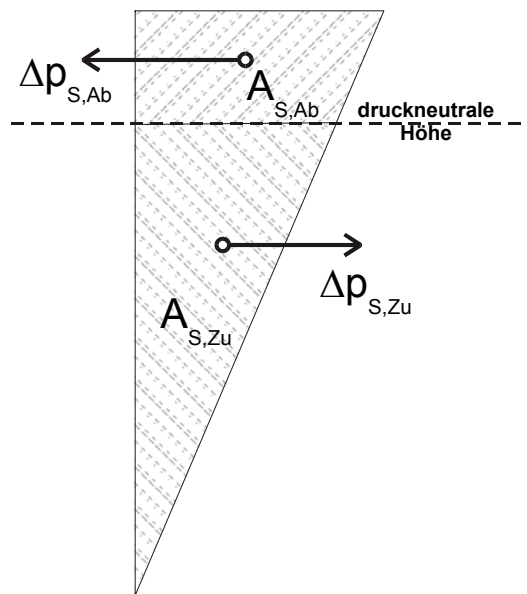


Abb. 5.2-6: Prinzip des Schwerpunktansatzes der Seitenfläche eines gekipptes Fensters

Vereinfachend wird für die folgenden Berechnungen angenommen:

- Der Schwerpunkt eines Dreiecks wird bei 2/3 der Höhe angenommen, was für kleine Öffnungswinkel gerechtfertigt ist.
- Die Öffnungsweite t bei einer Fensterhöhe h_{ges} und einem Öffnungswinkel α wird durch den Ausdruck $t = h_{ges} \tan \alpha$ angenähert (siehe Abb. 5.2-7). Die Drehbewegung des Flügels wird damit vernachlässigt, was für kleine Öffnungswinkel akzeptiert werden kann.

- Es wird zunächst ein zweidimensionales Modell des Fensters betrachtet. Der Einfluss der dreidimensionalen Ausprägung der Fensterfalz wird in Abschnitt 0 untersucht.
- Es wird ein einheitlicher Wert der Dichte für Zu- und Abluftvolumenstrom angesetzt, der dem Mittelwert aus Innen- und Außendichte entspricht (siehe Gl. 15).

Zuluftvolumenstrom im unteren Bereich der seitlichen Fensterflächen, $\dot{V}_{s,Zu}$

Die Öffnungsfläche A_{zu} berechnet sich unter Verwendung der in Abb. 5.2-7 dargestellten geometrischen Größen und Beziehungen zu

$$\text{Gl. 27} \quad A_{zu} = \frac{1}{2} h_{nz} \cdot h_{nz} \cdot \tan \alpha .$$

Mit

$$\text{Gl. 28} \quad h_{nz} = h_{ges} \cdot f_{nz}$$

folgt

$$\text{Gl. 29} \quad A_{zu} = \frac{1}{2} f_{nz}^2 \cdot h_{ges}^2 \cdot \tan \alpha .$$

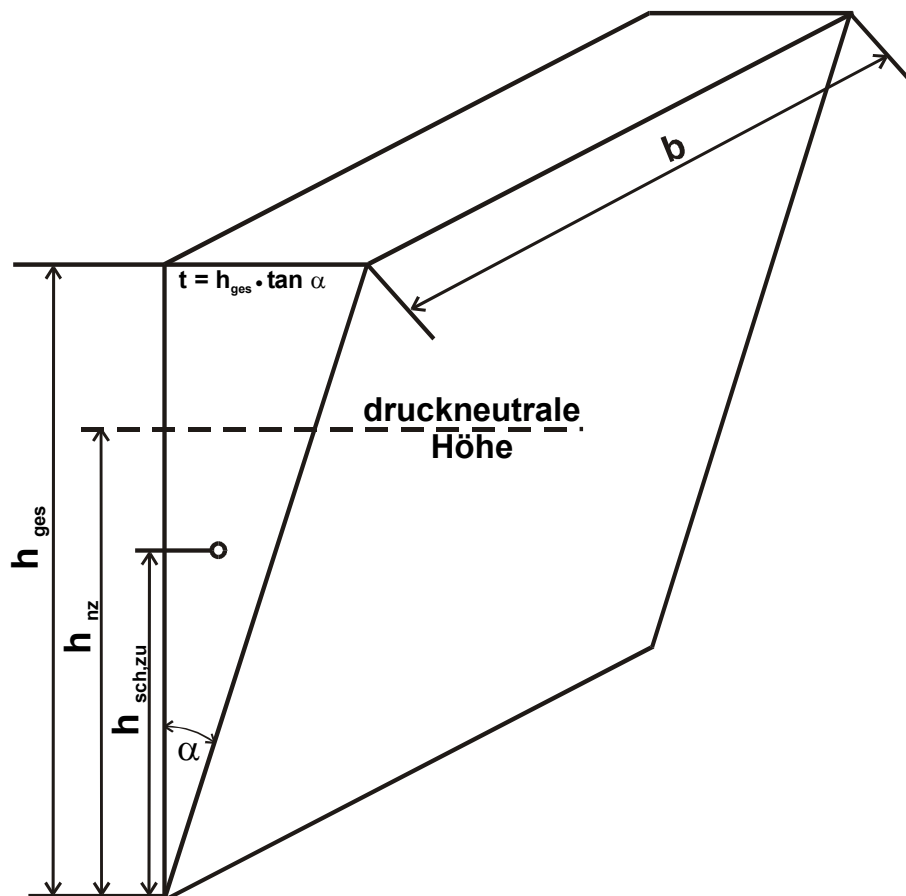


Abb. 5.2-7: Geometrische Bezeichnungen an einem gekippten Fenster

Unter Verwendung der oben genannten Vereinfachung beträgt die Höhe des Flächenschwerpunktes:

$$\text{Gl. 30} \quad h_{Sch,Zu} = \frac{2}{3} \cdot h_{nz} = \frac{2}{3} \cdot f_{nz} \cdot h_{ges}$$

mit

$h_{Sch,Zu}$ Höhe des Flächenschwerpunktes der Teilfläche A_{Zu} .

Die Druckdifferenz im Schwerpunkt des unteren Dreiecks lässt sich damit unter Berücksichtigung von Gl. 17 schreiben als

$$\text{Gl. 31} \quad \Delta \bar{p}_{TF,Zu} = \frac{2}{3} \cdot f_{nz} \cdot h_{ges} \cdot \frac{\Delta p_{ges}}{h_{ges}} - f_{nz} \cdot \Delta p_{ges} = -\frac{1}{3} \cdot f_{nz} \cdot \Delta p_{ges}$$

Der Zuluftvolumenstrom berechnet sich nach Gl. 22 zu

$$\dot{V}_{TF,Zu} = 2 \dot{V}_{S,Zu} = C_d \left(\frac{2}{\rho} \right)^{0,5} 2 A_{Zu} \text{abs}(\Delta \bar{p}_{TF,Zu})^{0,5} \sigma$$

$$\text{Gl. 32} \quad \dot{V}_{TF,Zu} = C_d \cdot \left(\frac{2}{\rho} \right)^{0,5} \cdot f_{nz}^2 \cdot h_{ges}^2 \cdot \tan \alpha \cdot \text{abs} \left(-\frac{1}{3} \cdot f_{nz} \cdot \Delta p_{ges} \right)^{0,5} \cdot \sigma$$

Abluftvolumenstrom über obere horizontale Fläche $\dot{V}_{O,Ab}$

Die Öffnungsfläche berechnet sich zu

$$\text{Gl. 33} \quad A_o = h_{ges} \cdot \tan \alpha \cdot b$$

mit

A_o obere horizontale Öffnungsfläche

b lichte Fensterbreite.

Wird die Fensterbreite über eine entsprechende Verhältniszahl auf die Fensterhöhe bezogen

$$\text{Gl. 34} \quad b = h_{ges} \cdot f_{b/h}$$

mit

$f_{b/h}$ Verhältnis von Fensterbreite zu Fensterhöhe,

lässt die Öffnungsfläche sich wie folgt schreiben:

$$\text{Gl. 35} \quad A_o = h_{ges} \cdot \tan \alpha \cdot h_{ges} \cdot f_{b/h} = h_{ges}^2 \cdot \tan \alpha \cdot f_{b/h}$$

Die mittlere Druckdifferenz ergibt sich zu

$$\text{Gl. 36} \quad \Delta p_o = \Delta p_{ges} - f_{nz} \cdot \Delta p_{ges} = \Delta p_{ges} \cdot (1 - f_{nz})$$

mit

Δp_o Druckdifferenz an der oberen, horizontalen Öffnungsfläche.

Der Abluftvolumenstrom über die obere horizontale Öffnung berechnet sich damit nach folgender Gleichung

$$\dot{V}_{TF,Ab,0} = C_d \cdot \left(\frac{2}{\rho}\right)^{0,5} \cdot A_o \cdot abs(\Delta p_o)^{0,5} \cdot \sigma$$

Gl. 37
$$\dot{V}_{TF,Ab,0} = C_d \cdot \left(\frac{2}{\rho}\right)^{0,5} \cdot h_{ges}^2 \cdot \tan \alpha \cdot f_{b/h} \cdot abs(\Delta p_{ges} \cdot (1 - f_{nz}))^{0,5} \cdot \sigma$$

Abluftvolumenstrom über die seitlichen vertikalen Flächen $\dot{V}_{TF,Ab,S}$

Etwas leichter gestaltet sich die Berechnung des Volumenstroms über die seitlichen vertikalen Flächen. Die Gesamtfläche einer Seite kann zusammengesetzt werden aus einem Rechteck und einem Dreieck (siehe Abb. 5.2-8).

Gl. 38
$$A_S = A_R + A_D = h_{nz} \cdot \tan \alpha \cdot h_{rz} + \frac{1}{2} \cdot h_{rz}^2 \cdot \tan \alpha$$

mit

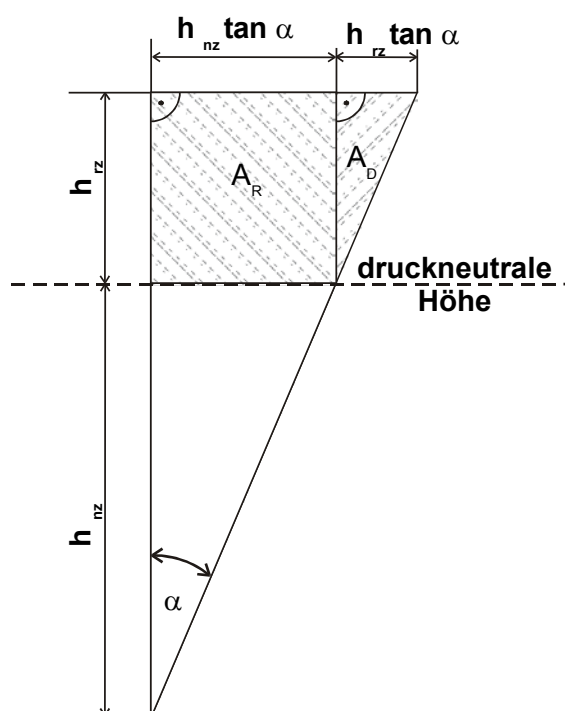
A_S obere vertikale Öffnungsfläche für Abluftvolumenstrom

A_R Teilfläche Rechteck

A_D Teilfläche Dreieck

h_{rz} Abstand der druckneutralen Höhe vom Fensterscheitelpunkt

Abb. 5.2-8: Weitere geometrische Bezeichnungen der Seitenfläche eines gekippten Fensters



Unter Verwendung der Beziehung

$$\text{Gl. 39} \quad h_{rz} = h_{ges} - h_{nz} = h_{ges} \cdot (1 - f_{nz})$$

schreibt sich Gl. 38 zu

$$\begin{aligned} \text{Gl. 40} \quad A_S &= h_{ges} \cdot f_{nz} \cdot \tan \alpha \cdot h_{ges} \cdot (1 - f_{nz}) + \frac{1}{2} \cdot h_{ges}^2 \cdot (1 - f_{nz})^2 \cdot \tan \alpha \\ &= h_{ges}^2 \cdot \tan \alpha \cdot (f_{nz} (1 - f_{nz}) + \frac{1}{2} (1 - f_{nz})^2) = h_{ges}^2 \cdot \tan \alpha \cdot (f_{nz} - f_{nz}^2 + \frac{1}{2} - f_{nz} + \frac{1}{2} f_{nz}^2) \end{aligned}$$

$$\text{Gl. 41} \quad A_S = \frac{1}{2} h_{ges}^2 \tan \alpha \cdot (1 - f_{nz}^2)$$

Der Schwerpunkt der Fläche wird bestimmt, indem die Schwerpunkte der Teilflächen flächengewichtet gemittelt werden.

$$\text{Gl. 42} \quad h_{Sch,S} = \frac{h_{Sch,R} \cdot A_R + h_{Sch,D} \cdot A_D}{A_R + A_D}$$

mit

$h_{Sch,S}$ Höhe des Schwerpunktes der oberen vertikalen Flächen

$h_{Sch,R}$ Höhe des Schwerpunktes der Teilfläche Rechteck

$h_{Sch,D}$ Höhe des Schwerpunktes der Teilfläche Dreieck

$$\begin{aligned} \text{Gl. 43} \quad h_{Sch,S} &= \frac{\left(h_{nz} + \frac{1}{2} h_{rz} \right) \cdot h_{nz} \tan \alpha \cdot h_{rz} + \left(h_{nz} + \frac{2}{3} h_{rz} \right) \cdot \frac{1}{2} h_{rz}^2 \tan \alpha}{h_{nz} \tan \alpha \cdot h_{rz} + \frac{1}{2} h_{rz}^2 \tan \alpha} \\ &= \frac{\left(h_{ges} f_{nz} + \frac{1}{2} h_{ges} (1 - f_{nz}) \right) \cdot h_{ges} f_{nz} + \left(h_{ges} f_{nz} + \frac{2}{3} h_{ges} (1 - f_{nz}) \right) \cdot \frac{1}{2} h_{ges} (1 - f_{nz})}{h_{ges} f_{nz} + \frac{1}{2} h_{ges} (1 - f_{nz})} \\ &= \frac{\left(f_{nz} + \frac{1}{2} (1 - f_{nz}) \right) \cdot h_{ges} f_{nz} + \left(f_{nz} + \frac{2}{3} (1 - f_{nz}) \right) \cdot \frac{1}{2} h_{ges} (1 - f_{nz})}{f_{nz} + \frac{1}{2} (1 - f_{nz})} \\ &= \frac{\left(f_{nz} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} f_{nz} \right) \cdot h_{ges} f_{nz} + \left(f_{nz} + \frac{2}{3} - \frac{2}{3} f_{nz} \right) \cdot \frac{1}{2} h_{ges} (1 - f_{nz})}{f_{nz} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} f_{nz}} \\ &= \frac{\frac{1}{2} (1 + f_{nz}) \cdot h_{ges} f_{nz} + \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} f_{nz} \right) \cdot \frac{1}{2} h_{ges} (1 - f_{nz})}{\frac{1}{2} (1 + f_{nz})} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= h_{ges} f_{nz} + \frac{\left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} f_{nz}\right) \cdot h_{ges} (1 - f_{nz})}{(1 + f_{nz})} \\
&= h_{ges} f_{nz} + \frac{\frac{1}{3} h_{ges} (2 + f_{nz})(1 - f_{nz})}{(1 + f_{nz})}
\end{aligned}$$

$$\text{Gl. 44} \quad h_{Sch,S} = h_{ges} f_{nz} + \frac{h_{ges} (2 - f_{nz} - f_{nz}^2)}{3 \cdot (1 + f_{nz})}$$

Die an den oberen vertikalen Seitenflächen anstehende Druckdifferenz berechnet sich damit zu

$$\Delta p_S = \left(h_{ges} f_{nz} + \frac{h_{ges} (2 - f_{nz} - f_{nz}^2)}{3 \cdot (1 + f_{nz})} \right) \cdot \frac{\Delta p_{ges}}{h_{ges}} - \Delta p_{ges} f_{nz}$$

$$\text{Gl. 45} \quad \Delta p_S = \Delta p_{ges} \frac{2 - f_{nz} - f_{nz}^2}{3 + 3f_{nz}}.$$

Der Volumenstrom durch die beiden oberen vertikalen Flächen lässt sich damit über folgende Formel bestimmen:

$$\begin{aligned}
\dot{V}_{TF,Ab,S} &= C_d \left(\frac{2}{\rho} \right)^{0,5} 2A_S \text{abs}(\Delta p_S)^{0,5} \sigma \\
\text{Gl. 46} \quad \dot{V}_{TF,Ab,S} &= C_d \left(\frac{2}{\rho} \right)^{0,5} h_{ges}^2 \tan \alpha (1 - f_{nz}^2) \cdot \text{abs} \left(\Delta p_{ges} \frac{2 - f_{nz} - f_{nz}^2}{3 + 3f_{nz}} \right)^{0,5} \sigma.
\end{aligned}$$

Bestimmen der druckneutralen Höhe

Um den Volumenstrom über die oben angegebenen Berechnungsgleichungen zu bestimmen, muss die Lage der druckneutralen Höhe bekannt sein. Diese kann über die Massenstrombilanz oder, bei der hier angenommenen einheitlichen Dichte, über die Volumenstrombilanz bestimmt werden:

$$\text{Gl. 47} \quad \left| \dot{V}_{TF,Zu} \right| = \left| \dot{V}_{TF,Ab,O} + \dot{V}_{TF,Ab,S} \right|$$

Zum Erstellen der Bilanz werden die Gleichungen Gl. 32, Gl. 37 und Gl. 46 in Gl. 47 eingesetzt. Der Ausdruck

$$C_d \left(\frac{2}{\rho} \right)^{0,5} h_{ges}^2 \tan \alpha \Delta p_{ges}^{0,5}$$

lässt sich herauskürzen. Wenn auf den Ausdruck σ verzichtet wird, sind die Volumenströme immer positiv. Somit kann das Bilden der Beträge entfallen. Es ergibt sich

$$\text{Gl. 48} \quad f_{nz}^2 \text{abs} \left(-\frac{1}{3} f_{nz} \right)^{0,5} = f_{b/h} \text{abs} (1 - f_{nz})^{0,5} + (1 - f_{nz}^2) \text{abs} \left(\frac{2 - f_{nz} - f_{nz}^2}{3 + 3f_{nz}} \right)^{0,5}$$

bzw. nach Umstellung die Gleichung

$$Gl. 49 \quad f_{b/h} = \frac{f_{nz}^2 \operatorname{abs}\left(-\frac{1}{3}f_{nz}\right)^{0,5} - (1-f_{nz}^2) \operatorname{abs}\left(\frac{2-f_{nz}-f_{nz}^2}{3+3f_{nz}}\right)^{0,5}}{\operatorname{abs}(1-f_{nz})^{0,5}},$$

Gl. 49 verdeutlicht, dass die normierte druckneutrale Höhe f_{nz} nur noch vom Breiten-Höhen-Verhältnis des Fensters $f_{b/h}$ abhängig ist. Aufgrund der komplexen Struktur von Gl. 49 wird der Zusammenhang zwischen beiden Größen mit Hilfe des Solvers im Tabellenkalkulationsprogramm Excel ermittelt und das Ergebnis grafisch dargestellt. Die Auflösung von Gl. 49 in die Form

$$Gl. 50 \quad f_{nz} = f(f_{b/h})$$

wird dann in Form der Regressionsgeraden angegeben.

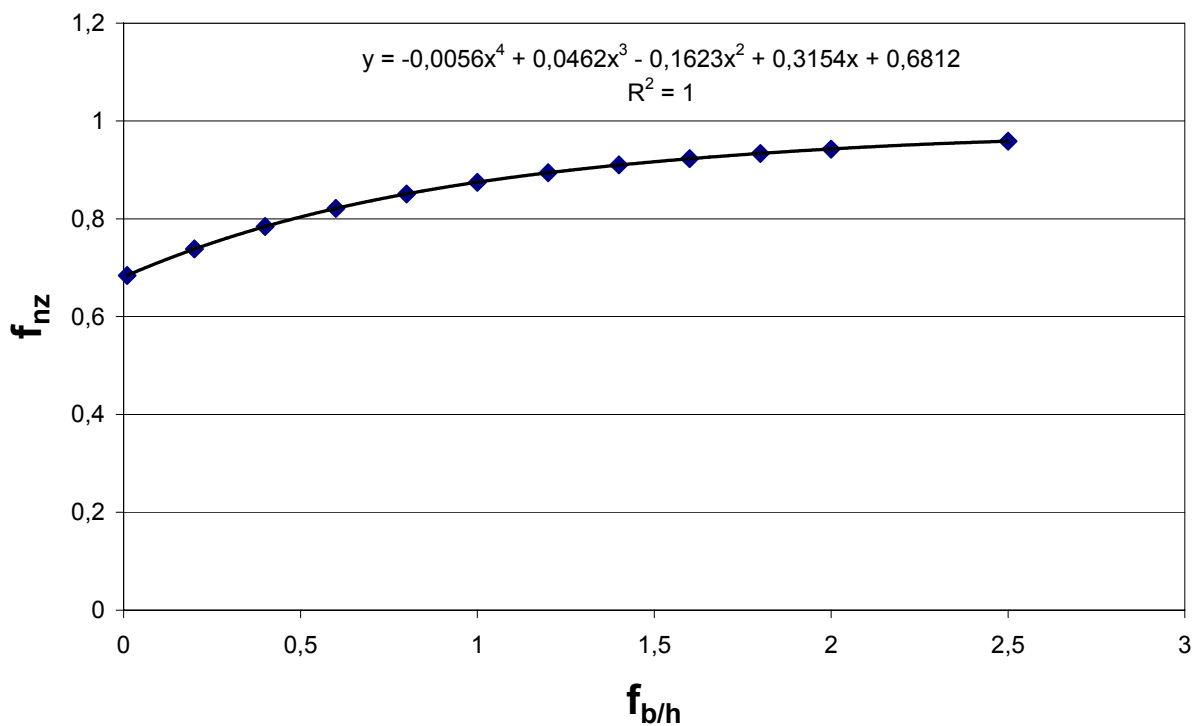


Abb. 5.2-9: Lage der normierten druckneutralen Höhe f_{nz} in Abhängigkeit vom Fensterbreiten- zu Höhenverhältnis $f_{b/h}$

Die funktionale Beziehung aus Gl. 50 lässt sich somit in folgender Form schreiben

$$Gl. 51 \quad f_{nz} = -0,0056f_{b/h}^4 + 0,0462f_{b/h}^3 - 0,1623f_{b/h}^2 + 0,3154f_{b/h} + 0,6812$$

Wird ein Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,99$ akzeptiert, kann der Zusammenhang von Gl. 50 durch folgende Beziehung gut angenähert werden:

$$Gl. 52 \quad f_{nz} = -0,0499f_{b/h}^2 + 0,2266f_{b/h} + 0,6945$$

Damit lässt sich der Zu- und Abluftvolumenstrom aufgrund der thermisch induzierten Druckdifferenz über Gl. 32, Gl. 37 und Gl. 46 berechnen.

5.2.2.4 Korrektur des Ersatzmodells „Schiebefenster“

Korrektur der Berechnungsgleichungen

Um weiterhin den einfachen Berechnungsansatz der Ersatzdarstellung beibehalten zu können, müssen die komplexen Strömungsverhältnisse des gekippten Fensters auf das Modell des Schiebefensters transformiert werden. Wie oben bereits erwähnt, wird die durch Thermik induzierte Druckdifferenz in der Ersatzdarstellung überschätzt. Um den gleichen Volumenstrom zu berechnen, muss die Fensterhöhe und damit die Druckdifferenz korrigiert werden. Ziel der folgenden Umformungen ist es, die korrigierte Fensterhöhe h_{kor} bzw. den entsprechenden Korrekturfaktor f_h

$$Gl. 53 \quad h_{kor} = f_h h_{ges}$$

mit

h_{kor} korrigierte Fensterhöhe

f_h Quotient aus korrigierter und tatsächlicher Fensteröffnungshöhe,

zu finden, bei der sich der mit der Ersatzdarstellung der gleiche Volumenstrom (Thermik) berechnet, wie für das gekippte Fenster mit dem Schwerpunktansatz.

Betrachtet wird der Zuluftvolumenstrom \dot{V}_{Zu} , der beim gekippten Fenster im unteren Bereich der vertikalen Öffnungsflächen auftritt. Dabei wird unterstellt, dass es im oberen Fensterbereich ein Abluftvolumenstrom gleicher Größe gibt.

Ausgangspunkt der folgenden Überlegungen ist, dass der Zuluftvolumenstrom über das gekippte Fenster dem Zuluftvolumenstrom der Ersatzdarstellung entspricht. Hierzu werden Gl. 32 und Gl. 7 gleichgesetzt.

$$Gl. 54 \quad \dot{V}_{TF,Zu} = C_d \left(\frac{2}{\rho} \right)^{0,5} f_{nz}^2 h_{ges}^2 \tan \alpha \operatorname{abs} \left(-\frac{1}{3} f_{nz} \Delta p_{ges} \right)^{0,5} \sigma$$

$$= C_d \left(\frac{2}{\rho} \right)^{0,5} A_{Zu} \operatorname{abs}(\Delta p_{Zu,kor})^{0,5} \sigma$$

mit

$\Delta p_{Zu,kor}$ korrigierte Druckdifferenz für den Zuluftvolumenstrom in der Ersatzdarstellung für Thermik über die Fensterhöhe

Nach Kürzen ergibt sich

$$Gl. 55 \quad f_{nz}^2 h_{ges}^2 \tan \alpha \operatorname{abs} \left(-\frac{1}{3} f_{nz} \Delta p_{ges} \right)^{0,5} = A_{Zu} \operatorname{abs}(\Delta p_{Zu,kor})^{0,5} .$$

Die Fläche der Zuluftöffnung A_{zu} entspricht nach Gl. 23 der halben Gesamtöffnungsfläche.

$$Gl. 56 \quad A_{zu} = \frac{1}{2} A_{ges}$$

Unter Verwendung der oben durchgeführten geometrischen Betrachtungen berechnet sich die gesamte Öffnungsfläche nach folgender Gleichung:

$$Gl. 57 \quad A_{ges} = h_{ges}^2 \tan \alpha + b h_{ges} \tan \alpha = h_{ges}^2 \tan \alpha (1 + f_{b/h}).$$

Wird dies in Gl. 55 berücksichtigt, ergibt sich nach Kürzen

$$Gl. 58 \quad f_{nz}^2 h_{ges}^2 \tan \alpha \operatorname{abs} \left(-\frac{1}{3} f_{nz} \Delta p_{ges} \right)^{0,5} = \frac{1}{2} h_{ges}^2 \tan \alpha (1 + f_{b/h}) \operatorname{abs}(\Delta p_{Zu, kor})^{0,5}$$

bzw.

$$Gl. 59 \quad f_{nz}^2 \operatorname{abs} \left(-\frac{1}{3} f_{nz} \Delta p_{ges} \right)^{0,5} = \frac{1}{2} (1 + f_{b/h}) \operatorname{abs}(\Delta p_{Zu, kor})^{0,5}.$$

Die Druckdifferenz $\Delta p_{Zu, kor}$ ergibt sich aus Gl. 24, wobei statt Δp_{ges} die korrigierte Druckdifferenz Δp_{kor} eingesetzt wird. Δp_{kor} ergibt sich wiederum nach Gl. 13 aus der korrigierte Fensterhöhe h_{kor} (Gl. 53).

$$Gl. 60 \quad \Delta p_{Zu, kor} = -\frac{1}{4} \Delta p_{kor} = -\frac{1}{4} h_{kor} \frac{\Delta p_{ges}}{h_{ges}} = -\frac{1}{4} f_h h_{ges} \frac{\Delta p_{ges}}{h_{ges}} = -\frac{f_h}{4} \Delta p_{ges},$$

Wird diese Beziehung in Gl. 58 eingesetzt, folgt

$$Gl. 61 \quad f_{nz}^2 \operatorname{abs} \left(-\frac{1}{3} f_{nz} \Delta p_{ges} \right)^{0,5} = \frac{1}{2} (1 + f_{b/h}) \operatorname{abs} \left(-\frac{f_h}{4} \Delta p_{ges} \right)^{0,5}.$$

Aus dieser Beziehung kann die Druckdifferenz herausgekürzt werden und es ergibt sich der Ausdruck

$$Gl. 62 \quad f_{nz}^2 \operatorname{abs} \left(-\frac{1}{3} f_{nz} \right)^{0,5} = \frac{1}{2} (1 + f_{b/h}) \operatorname{abs} \left(-\frac{f_h}{4} \right)^{0,5}.$$

Die für die Bildung des Ersatzmodells wichtige Größe f_h lässt sich daraus wie folgt bestimmen

$$Gl. 63 \quad f_h = 4 \left(\frac{f_{nz}^4 \frac{1}{3} f_{nz}}{\frac{1}{4} (1 + f_{b/h})^2} \right) = \frac{16}{3} \frac{f_{nz}^5}{(1 + f_{b/h})^2}.$$

Der Korrekturfaktor f_h ist damit nur noch abhängig von der Lage der druckneutralen Zone f_{nz} und dem Breiten zu Höhenverhältnis des Fensters $f_{b/h}$. Da f_{nz} nun seinerseits eine Funktion von $f_{b/h}$ ist (Gl. 51), ist die erforderliche Höhenkorrektur f_h nur abhängig vom Breiten zu Höhenverhältnis $f_{b/h}$ des Fensters.

Der Verlauf von f_h in Abhängigkeit vom Breiten- zu Höhenverhältnis $f_{b/h}$ zeigt Abb. 5.2-10. Dargestellt ist hier auch der Faktor K_{kip} , der beschreibt, wie hoch der Volumenstrom der

korrigierten Ersatzdarstellung (gekipptes Fenster) bezogen auf die nicht korrigierte Ersatzdarstellung (Schiebefenster) ist.

$$\text{Gl. 64} \quad K_{kip} = \frac{\dot{V}_{Kip}}{\dot{V}_{Schieb}}$$

mit

\dot{V}_{Kip} Volumenstrom über gekipptes Fenster

\dot{V}_{Schieb} ohne Korrektur mit der Ersatzdarstellung berechneter Volumenstrom

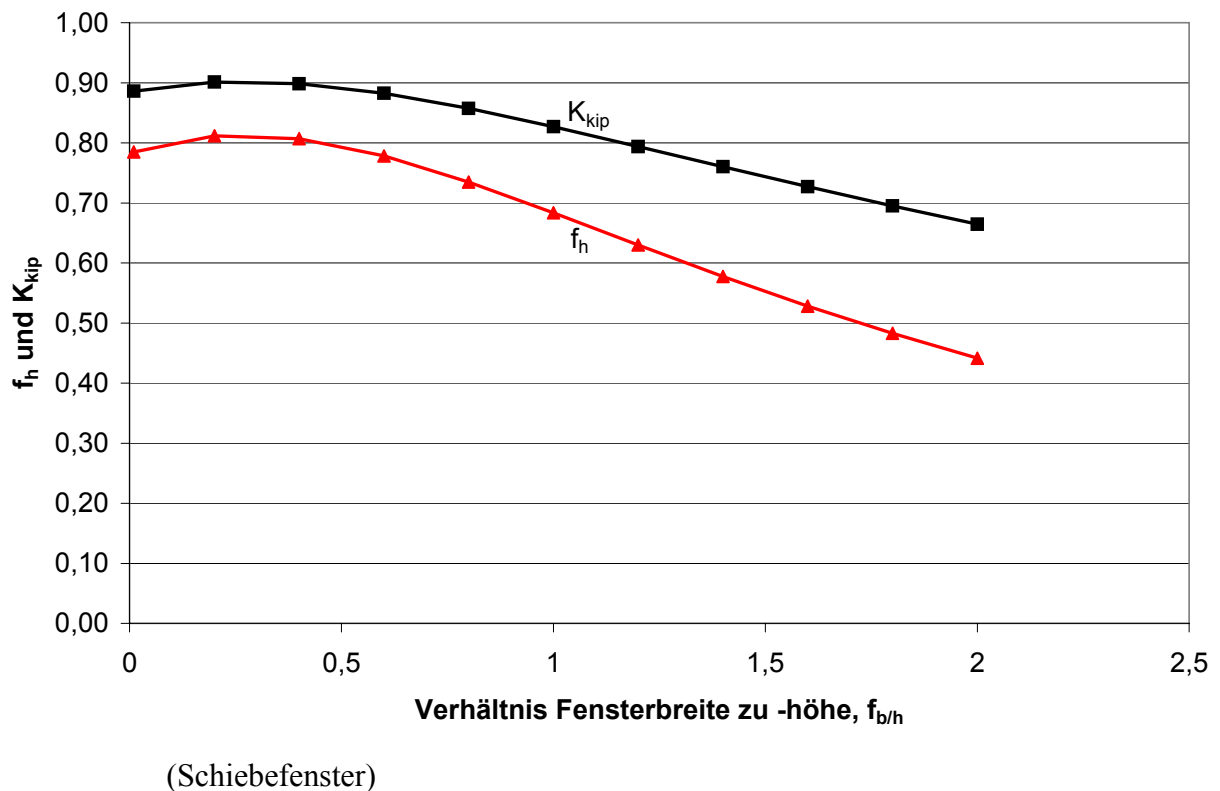


Abb. 5.2-10: Verlauf von f_h und K_{kip} für unterschiedliche Breiten- zu Höhenverhältnisse eines Fensters

Wie der Verlauf von K_{kip} zeigt, wird der Volumenstrom bei der Ersatzdarstellung „Schiebefenster“ aufgrund der über die Höhe gleichbleibenden Öffnungsfläche überschätzt. Für die üblichen Fensterformate ($0,5 \leq f_{b/h} \leq 2$) beträgt der Volumenstrom über ein gekipptes Fensters nur 70 % bis 90 % des für das Schiebefenster berechneten Wertes. Um dies zu berücksichtigen, muss die Fensterhöhe zur Bestimmung der Druckdifferenz durch Thermik mit dem Faktor f_h korrigiert werden. f_h zeigt einen ähnlichen Verlauf wie K_{kip} , liegt aber für die üblichen Fensterformate ($0,5 \leq f_{b/h} \leq 2$) zwischen 45 % und 80 % der tatsächlichen Fensterhöhe. Der Zusammenhang zwischen f_h und $f_{b/h}$ kann über Gl. 51 und Gl. 63 berechnet werden. Wird ein Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,999$ als ausreichend angesehen, ist aber auch eine Bestimmung über folgenden funktionalen Zusammenhang möglich:

$$\text{Gl. 65} \quad f_h = 0,0954 f_{b/h}^3 - 0,3577 f_{b/h}^2 + 0,1627 f_{b/h} + 0,788.$$

Damit ist eine einfache Möglichkeit aufgezeigt, die Ersatzdarstellung derart zu korrigieren, dass der Einfluss der höhenabhängigen Öffnungsfläche des gekippten Fensters abgebildet wird. Diese Form wird als „korrigierte Ersatzdarstellung“ bezeichnet. Der Zu- bzw. Abluftvolumenstrom aufgrund des Kamineffektes (Thermik) berechnet sich damit nach folgender Formel:

$$\text{Gl. 66} \quad \dot{V}_{TF,Zu} = -\dot{V}_{TF,Ab} = C_d \left(\frac{2}{\rho} \right)^{0,5} \frac{A_{ges}}{2} \text{abs} \left(-\frac{f_h}{4} \Delta p_{ges} \right)^{0,5} \sigma.$$

5.2.3 Einfluss der Falzausbildung

In den bisherigen Berechnungen wurde das Fenster als zweidimensionales Bauteil betrachtet, d.h. es bestand aus zwei Ebenen (Blendrahmen und Flügelrahmen), die gegeneinander gekippt wurden. In der Realität weist das Fenster jedoch eine dreidimensionale Struktur auf. Blendrahmen (feststehend) und Flügelrahmen (beweglich) greifen im geschlossenen aber auch im gekippten Zustand ineinander (siehe Abb. 5.2-11). Die dreidimensionale Ausprägung des Fensterrahmens wird als Fensterfalz bezeichnet.

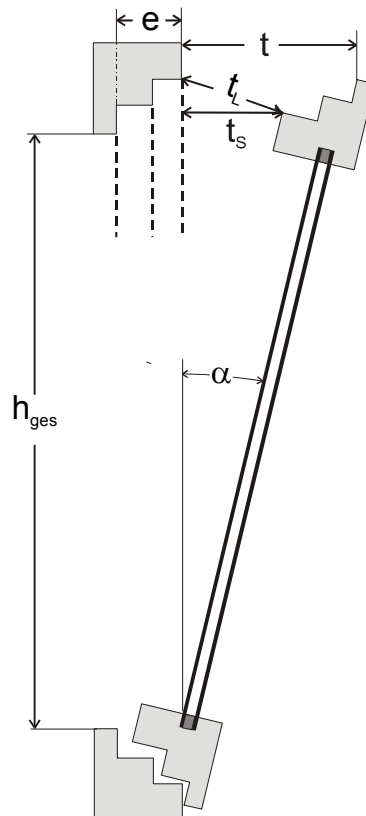


Abb. 5.2-11: Geometrische Größen am dreidimensionalen Modell des gekippten Fensters

Wird das Fenster gekippt, bewirkt die Ausbildung der Fensterfalz eine Verkleinerung der Öffnungsfläche. Wird die tatsächliche lichte Öffnungsfläche (gemessen) $A_{ges,l}$ auf die berechnete Öffnungsfläche A_{ges} (Gl. 57) bezogen, ergibt sich ein Korrekturfaktor f_A :

Gl. 67
$$f_A = \frac{A_{ges,l}}{A_{ges}}$$

mit

f_A Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Verkleinerung der Öffnungsfläche durch die Falzausbildung

$A_{ges,l}$ aus Messungen ermittelte lichte Öffnungsfläche des Fensters

Der Korrekturfaktor f_A ist abhängig von der geometrischen Ausbildung der Fensterfalz und der Öffnungsstellung. Aufgrund der komplexen dreidimensionalen Struktur ist eine mathematische Beschreibung sehr aufwändig. Daher werden einige Fenster vermessen und hieraus erste Hinweise abgeleitet. Aufgrund der geringen Anzahl der untersuchten Fenster sind die folgenden Werte noch nicht als wissenschaftlich belastbar anzusehen, sondern müssen durch weitere Untersuchungen untermauert werden. Die wesentlichen Größen der vermessenen Fenster sind in Tab. 5.2-1 zusammenfassend dargestellt.

Auf der Grundlage der vermessenen Fenster lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Der Öffnungswinkel wird in der Praxis in der Regel so gewählt, dass unabhängig von der Fenstergröße eine lichte Öffnungsweite im oberen horizontalen Bereich von etwa 9 cm bis 10 cm erreicht wird.
- Die Reduktion der Öffnungsfläche gegenüber der rein zweidimensionalen Betrachtung liegt zwischen 0,42 und 0,73. Eine eindeutige Abhängigkeit von f_A ist nicht festzustellen, was sicherlich auch auf Messfehler zurückzuführen ist.

Die Auswertungen zeigen, dass die Verwendung der lichten Öffnungsweite t_s (Oberkante Fensterflügel > seitlicher Fensterrahmen; siehe Abb. 5.2-11) eine brauchbare Abschätzung zur Ermittlung des „lichten“ Öffnungswinkel und damit der „lichten“ Öffnungsfläche ist.

Ist die Messung dieses Abstandes nicht möglich, kann der Einfluss der Fensterfalz alternativ zunächst mit einem Reduktionsfaktor von $f_A = 0,7$ für normale Rahmen und von $f_A = 0,5$ für Passivhausrahmen berücksichtigt werden.

Fenster	Beschreibung	Höhe	Breite	Öffnungsweite		Öffnungs-winkel	Ein-stand	f_A
				licht	brutto			
		h_{ges}	b	t_l	t	α	e	
		m	m	m	m	Grad	m	-
Fernseh-zimmer, JK	2-fach Iso-Vgl. in Holzrahmen	0,993	0,873	0,096	0,134	7,1	0,04	0,71
Gäste WC, JK	2-fach Iso-Vgl. in Holzrahmen	0,745	0,676	0,098	0,140	9,7	0,035	0,69
Terrassentür JK	2-fach Iso-Vgl. in Holzrahmen	1,87	0,87	0,094	0,129	3,8	0,035	0,67
Terrassentür MG	2-fach Iso-Vgl. in Kunststoffrahmen	2,095	0,775	0,095	0,135	3,5	0,046	0,64
Arbeitszimmer MG	2-fach Iso-Vgl. in Kunststoffrahmen	1,288	1,26	0,085	0,149	6,3	0,06	0,49 ¹
Badezimmer, MG	2-fach Iso-Vgl. in Kunststoffrahmen	0,944	0,61	0,09	0,143	7,9	0,044	0,68
FE-klein RF	2-fach Iso-Vgl. in Holzrahmen, 1970	0,52	0,75	0,097	0,138	13,4	0,039	0,73
FE-mittel RF	2-fach Iso-Vgl. in Holzrahmen, 1970	1,18	1,12	0,095	0,133	6,1	0,039	0,68
FE-groß RF	2-fach Iso-Vgl. in Holzrahmen, 1970	1,44	0,82	0,087	0,125	4,8	0,039	0,64
NEH WB Nord; MG	2-fach Iso-Vgl. in Kunststoff 1998	0,91	0,82	0,103	0,180	10,4	0,05	0,69
NEH WB Nord; WE	2-fach Iso-Vgl. in Kunststoff 1998	0,91	0,82	0,095	0,160	9,2	0,05	0,66
NEH WB Süd; MG	2-fach Iso-Vgl. in Kunststoff 1998	1,97	0,54	0,106	0,175	4,9	0,05	0,56
NEH WB Süd; WE	2-fach Iso-Vgl. in Kunststoff 1998	1,97	0,54	0,11	0,150	4,2	0,053	0,66
Terrassentür PH-Kran.	3-fach WSV in Holzrahmen	2,08	0,88	0,068	0,120	3,1	8,7	0,62
PH WB Nord	3-fach WSV in Holzrahmen	0,91	0,82	0,08	0,180	9,3	0,08	0,42
PH- WB Süd	3-fach WSV in Holzrahmen	2,07	0,613	0,095	0,145	4	0,078	0,49

Tab. 5.2-1: Wichtige Kenngrößen aus der Vermessung unterschiedlicher Fenster

1 nur zweiteilige Fensterfalz

Diese Annahme steht in Übereinstimmung mit den Untersuchungen von [88]. Hier wird die tatsächliche Öffnungsfläche über ein sogenanntes Durchflussverhältnis aus der maximal möglichen Öffnungsfläche bei einem um 90° gedrehten Fensterflügel berechnet.

$$\text{Gl. 68} \quad A_{ges} = \theta A_{90}$$

mit

θ Durchflussverhältnis (siehe [88])

A_{90} maximale Öffnungsfläche des Fensters bei Öffnungswinkel von 90°

Maas stellt die Werte des aus den geometrischen Zusammenhängen theoretisch berechneten Durchflussverhältnisses dem Durchflussverhältnis gegenüber, dass aus der Messung der Volumenströme ermittelt wurde. Für die Brutto-Öffnungsweite von 14 cm (entspricht bei Berücksichtigung der Falzausbildung etwa den Werten für die lichte Öffnungsweite aus Tab. 5.2-1) beträgt der gemessene Wert des Durchflussverhältnisses nur 73 % des theoretisch berechneten Werts. Dies entspricht etwa den hier gefundenen Werten des Korrekturfaktors für die Fensterfalz. Der hier gefundene Einfluss der Fensterfalz könnte also die von Maas festgestellten Unterschiede zwischen gemessenem und berechnetem Durchflussverhältnis erklären.

Über die hier durchgeführten Betrachtungen hinaus werden in [88] die Differenzen zwischen berechnetem und gemessenem Durchflussverhältnis für unterschiedliche Öffnungsweiten bestimmt. Es zeigt sich, dass die Unterschiede geringer werden, wenn die Öffnungsweite reduziert wird. Bei einer brutto Öffnungsweite von 4 cm sind der gemessene und berechnete Wert identisch. Wird die brutto Öffnungsweite weiter reduziert, liegt das gemessene Durchflussverhältnis sogar über den berechneten Werten. Diese Abhängigkeit wird im nächsten Abschnitt in Abb. 5.2-12 verwendet.

5.2.4 Öffnungsbeiwert

Eine wesentliche, aber unbekannte Größe zur Berechnung des Volumenstroms über ein gekipptes Fenster ist der Öffnungsbeiwert C_d (Gl. 6). Um eine plausible Annahme treffen zu können, ist in Abb. 5.2-12 der durch Thermik induzierte Volumenstrom für unterschiedliche Temperaturdifferenzen aufgetragen. Zum einen sind die Messwerte (Regressionsgerade) aus [88] dargestellt zum anderen Volumenströme, die sich aus einem theoretischen Berechnungsansatz von [90] ergeben. Diesen Referenzwerten werden Ergebnisse gegenübergestellt, die sich aus dem Schwerpunktansatz berechnen. Angenommen wird dabei ein Öffnungsbeiwert von $C_d = 0,62$, wie er in dem Programm TAS als Standardwert verwendet wird. Die Falzausbildung wird entsprechend den hier durchgeführten Untersuchungen und den Ergebnissen aus [88] wie folgt berücksichtigt:

Brutto Öffnungsweite 14 cm	$f_A = 0,7$	Quelle: Tab. 5.2-1
Brutto Öffnungsweite 4 cm	$f_A = 1$	Quelle: [88]

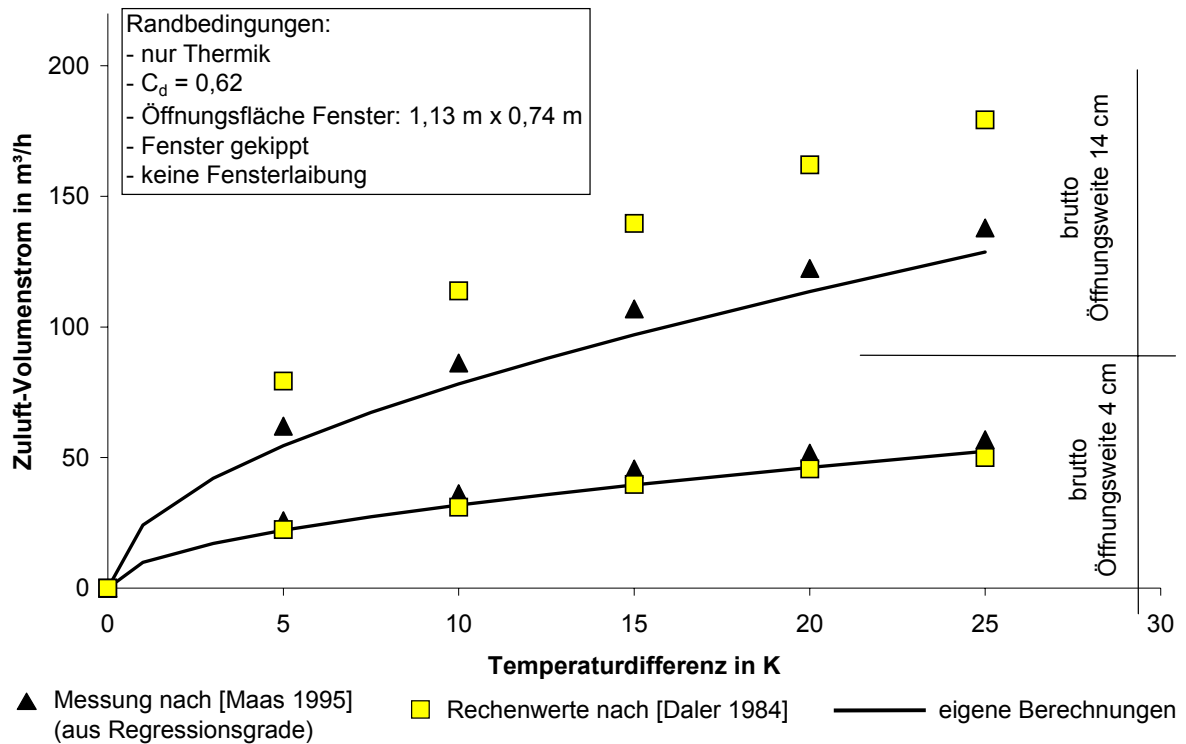


Abb. 5.2-12: Zuluftvolumenstrom über ein Fenster aufgrund der thermischen Auftriebskräfte in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz innen-außen

Wird in den hier durchgeführten Berechnungen ein Öffnungsbeiwert von $C_d=0,62$ angesetzt (Literaturwert für Öffnungen mit scharfen Kanten, die große Räume verbinden), stimmen die berechneten Volumenströme weitgehend mit der in [88] aus den Messwerten ermittelten Regressionsgerade überein. Dies gilt für beide Werte der Öffnungsweite.

Unterschiede zu der Berechnung von [90] ergeben sich für die brutto Öffnungsweite von 14 cm. Dies liegt im wesentlichen daran, dass bei den Werten nach [90] kein Korrekturfaktor f_A für die Öffnungsfläche berücksichtigt wurde.

Für die Berechnung des Volumenstroms über ein gekipptes Fenster scheint ein Öffnungsbeiwert von $C_d = 0,62$ eine brauchbare Näherung zu sein.

5.2.5 Einfluss der Fensterlaibung

In der Realität wird der Volumenstrom über das Fenster durch die innere Fensterlaibung und den Fenstersturz reduziert. Eine mathematische Beschreibung dieses Einflusses ist aufgrund der komplexen Strömungsverhältnisse sehr schwierig. Eine Einschätzung des Einflusses kann über Messungen erfolgen. Erschwert wird dies jedoch dadurch, dass es nur wenige Messungen zum Luftvolumenstrom über ein gekipptes Fenster vorliegen. Maas hat kontinuierliche Messungen über einen längeren Zeitraum mit unterschiedlichen Klimabedingungen und Öffnungsstellungen durchgeführt [88]. Diese werden im folgenden herangezogen, um den Einfluss der Fensterlaibung (im Folgenden wird unter dem Begriff Fensterlaibung auch der Fenstersturz subsummiert) zu untersuchen.

Der Einfluss der Fensterlaibung wird umso größer sein, je mehr die lichte Öffnungsweite t_l den Abstand zwischen Flügelrahmen und Laibung s überschreitet. Da die Öffnungsweite mit der Höhe und dem Öffnungswinkel α ansteigt, nimmt der Laibungseinfluss abhängig von diesen Größen zu.

In den weiteren Berechnungen wird dieser Effekt über einen einfacheren Ansatz abgebildet. Die Abminderung des Volumenstroms aufgrund der Fensterlaibung wird durch einen Reduktionsfaktor berücksichtigt, der wie folgt definiert ist:

$$\text{Gl. 69} \quad f_L = \frac{\dot{V}_L}{\dot{V}}$$

mit

f_L Reduktionsfaktor Fensterlaibung

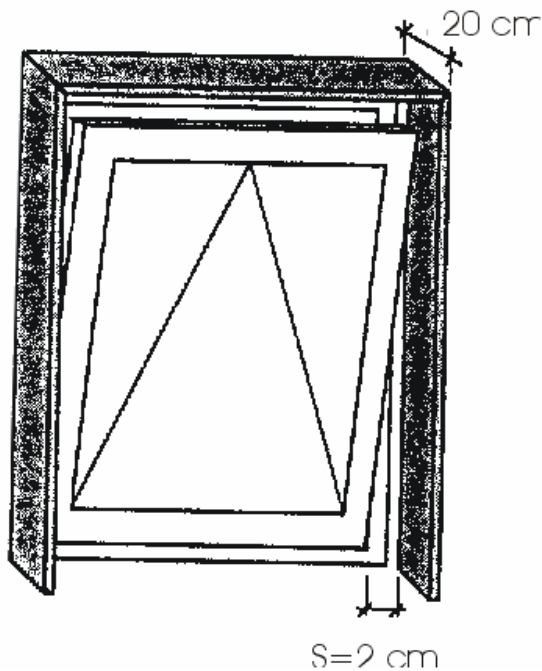
\dot{V}_L Volumenstrom unter Berücksichtigung des Einflusses der Fensterlaibung

Über den Reduktionsfaktor werden alle Volumenströme (Gl. 2) im gleichen Verhältnis vermindert.

$$\text{Gl. 70} \quad \dot{V}_{FE} = f_L \cdot (\dot{V}_o + \dot{V}_{S,Ab} + \dot{V}_{S,Zu})$$

Quantifiziert wird der Reduktionsfaktor Fensterlaibung auf Grundlage der Messwerte, die ebenfalls in [88] dokumentiert sind. Untersucht wird dort die Beeinflussung des Zuluftvolumenstroms durch eine Fensterlaibung mit einer Tiefe von 20 cm und einem Abstand zwischen Wand und Flügelrahmen von $s = 2$ cm (siehe Abb. 5.2-15). Aus dem Vergleich des gemessenen Volumenstroms mit und ohne Fensterlaibung kann deren Einfluss quantifiziert werden.

Abb. 5.2-13: Skizze des in [88] vermessenen Fensters mit Fensterlaibung; Bild



Ohne an dieser Stelle genauere Untersuchungen anstellen zu können wird vermutet, dass die Übertragung des gemessenen Laibungseinflusses auf andere Situationen über einen Faktor am plausibelsten erfolgt, der wie folgt definiert ist:

$$\text{Gl. 71} \quad \beta = \frac{t}{s}$$

mit

- β Verhältnis von brutto Öffnungsweite t zu Abstand von Laibung und Flügelrahmen s
- t brutto Öffnungsweite nach Abb. 5.2-11
- s Abstand der Laibung zum Flügelrahmen

Den physikalischen Verhältnissen noch näher würde ein mit der lichten Öffnungsweite gebildeter Faktor kommen. Da der Zusammenhang zwischen brutto und lichter Öffnungsweite für das untersuchte Fenster jedoch in [88] nicht gegeben ist, und hier auch insbesondere für kleine Öffnungsweiten nicht triviale geometrische Verhältnisse vorliegen, wird auf einen entsprechenden Bezug verzichtet.

Aus den Messungen von Maas ergibt sich der in Abb. 5.2-14 dargestellte Zusammenhang.

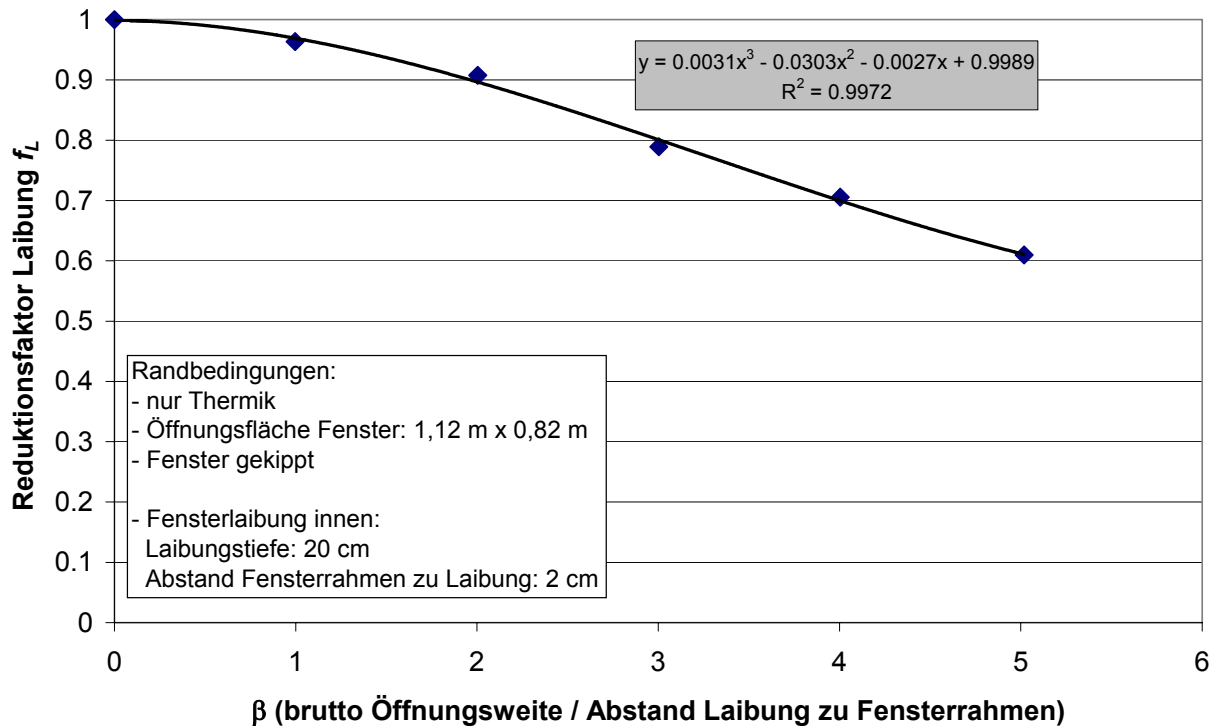


Abb. 5.2-14: Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung der Fensterlaibung in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel; Grundlage: Messergebnisse aus [88]

Die Messwerte können durch die eingezeichnete Regressionskurve mit hoher Genauigkeit wiedergegeben werden. Für den Korrekturfaktor ergibt sich damit folgender Zusammenhang:

$$Gl. 72 \quad f_L = 0,0031 \beta^3 - 0,0303 \beta^2 - 0,0027 \beta + 0,9989$$

Die Auswirkung der innenliegenden Fensterlaibung auf den Volumenstrom ist für das in [88] untersuchte Fenster in Abb. 5.2-15 dargestellt. Berechnet wird der Volumenstrom mit dem hier vorgestellten Schwerpunktansatz.

Für eine kleine brutto Öffnungsweite von 4 cm ist der Einfluss der Fensterlaibung gering. Dies ist plausibel, da die lichte Öffnungsweite nur im oberen Fensterbereich größer ist als der Laibungsabstand s . Der Reduktionsfaktor beträgt in diesem Fall $f_L = 0,9$.

Ganz anders sieht sie Situation für die brutto Öffnungsweite von 10 cm aus. Hier beträgt der Reduktionsfaktor für die Fensterlaibung $f_L = 0,61$. Da dieser Faktor in linearem Zusammenhang zum Zuluftvolumenstrom steht, reduziert sich dieser in gleichem Maß. Der deutliche Einfluss ist plausibel, da die Fensterlaibung die Öffnungsfläche entscheidend reduziert.

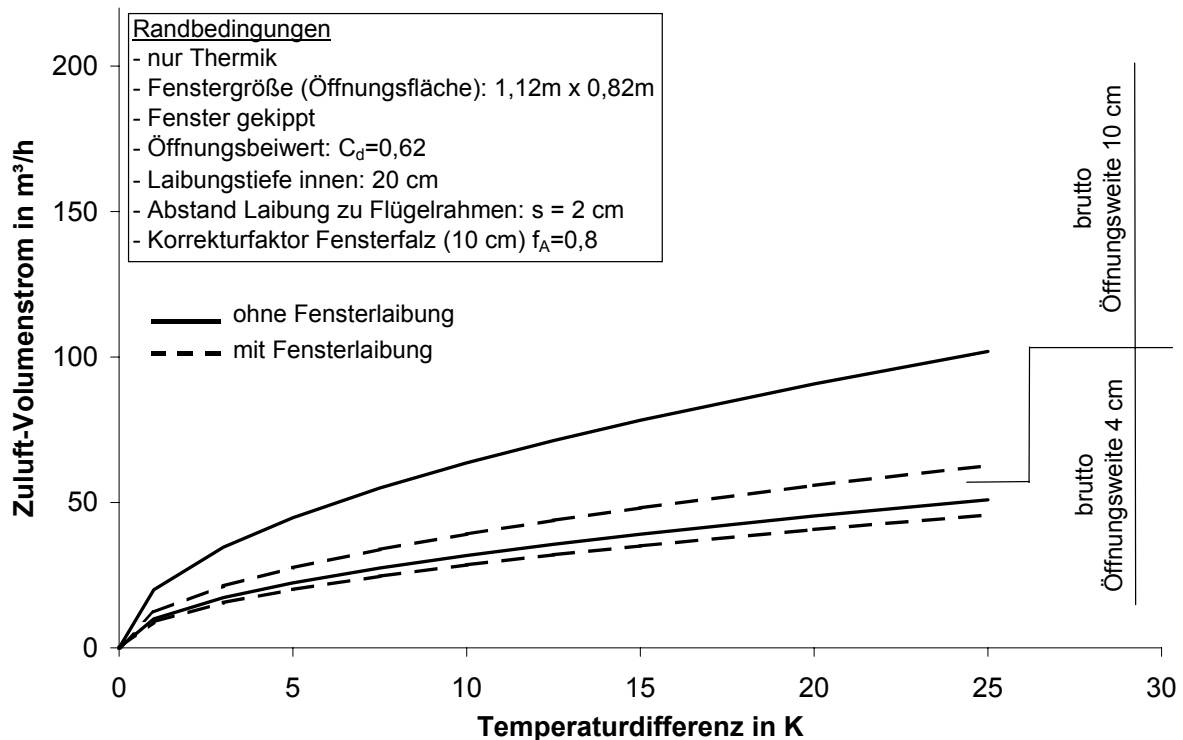


Abb. 5.2-15: Einfluss der inneren Fensterlaibung auf den Zuluftvolumenstrom über ein gekipptes Fenster

Der hier angegebene Reduktionsfaktor f_L gilt nur für die Fenstergeometrie, die den Messungen zugrunde liegt. Eine Übertragung auf andere Situationen ist auf dieser einfachen Datenbasis noch nicht möglich. Dies gilt insbesondere auch für Fenster mit nur einer seitlichen Laibung. Um die Ergebnisse auf andere geometrische Situationen zu übertragen, müssten weitere Untersuchungen vorgenommen werden. Da die Fensterlaibung einen entscheidenden Einfluss auf den Volumenstrom über ein gekipptes Fenster hat, sollten diese Untersuchungen jedoch unbedingt erfolgen.

5.2.6 Windinduzierter Volumenstrom

Die bisherigen Untersuchungen haben sich mit dem Zuluftvolumenstrom beschäftigt, der aufgrund von thermisch induzierten Druckdifferenzen über das Fenster auftritt. Die Windgeschwindigkeit wurde für diese Untersuchungen mit 0 m/s angesetzt.

Die durch Wind erzeugten Druckdifferenzen tragen jedoch wesentlich zum Volumenstrom über ein gekipptes Fenster bei. Nach [89] ergibt sich die an der Fassade durch Windkräfte induzierte Druckdifferenz über folgende Gleichung

$$\text{Gl. 73} \quad \Delta p_w = C_p \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2$$

mit

Δp_W Druckdifferenz aufgrund von Windkräften

C_p Winddruckbeiwert

w Windgeschwindigkeit in m/s

Die Winddruckbeiwerte werden entsprechend [89] angesetzt und sind in Tab. 5.2-3 dokumentiert. Sie sind als Mittelwert über die gesamte Fassade angegeben. Zugrundegelegt wurde ein niedriges Gebäude (bis zu drei Stockwerken) mit einem Länge/Breiten-Verhältnis von 2:1. Die Referenzhöhe für die Windgeschwindigkeit ist die Gebäudehöhe.

geschützte Lage					
	Windrichtung	Nordfassade	Ostfassade	Südfassade	Westfassade
Nord	0	0.06	-0.3	-0.3	-0.3
	45	-0.12	0.15	-0.38	-0.32
Ost	90	-0.2	0.18	-0.2	-0.2
	135	-0.38	0.15	-0.12	-0.32
Süd	180	-0.3	-0.3	0.06	-0.3
	225	-0.38	-0.32	-0.12	0.15
West	270	-0.2	-0.2	-0.2	0.18
	315	-0.12	-0.32	-0.38	0.15

Tab. 5.2-2: Winddruckbeiwerte nach [89] für eine geschützte Lage

freie Lage					
	Windrichtung	Nordfassade	Ostfassade	Südfassade	Westfassade
Nord	0	0.5	-0.9	-0.7	-0.9
	45	0.25	0.2	-0.8	-0.6
Ost	90	-0.5	0.8	-0.5	-0.35
	135	-0.8	0.2	0.25	-0.6
Süd	180	-0.7	-0.9	0.5	-0.9
	225	-0.8	-0.6	0.25	0.2
West	270	-0.5	-0.35	-0.5	0.8
	315	0.25	-0.6	-0.8	0.2

Tab. 5.2-3: Winddruckbeiwerte nach [89] für eine freie Lage

Der Zuluftvolumenstrom über ein gekipptes Fenster aufgrund von windinduzierten Druckdifferenzen berechnet sich für den Fall eines ideal dichten Raumes ausgehend von Gl. 9 zu

$$\text{Gl. 74} \quad \dot{V}_{W,Zu} = C_d \left(\frac{2}{\rho} \right)^{0,5} \frac{A_{ges}}{2} \text{abs}(\Delta p_{W,Zu})^{0,5} \sigma$$

$$\text{Gl. 75} \quad \dot{V}_{W,Ab} = C_d \left(\frac{2}{\rho} \right)^{0,5} \frac{A_{ges}}{2} \text{abs}(\Delta p_{W,Ab})^{0,5} \sigma$$

mit

$\Delta p_{W,Zu}$ windinduzierte Druckdifferenz an der Zuluftöffnung

$\Delta p_{W,Ab}$ windinduzierte Druckdifferenz an der Abluftöffnung.

Wegen des ideal dichten Raumes muss gleichzeitig gelten

$$\text{Gl. 76} \quad \dot{m}_{Zu} = \dot{m}_{Ab}$$

bzw. bei der Annahme einer konstanten Dichte der Luft

$$\text{Gl. 77} \quad \rho = \frac{\rho_{Zu} + \rho_{Ab}}{2}$$

$$\text{Gl. 78} \quad \dot{V}_{Zu} = \dot{V}_{Ab}$$

Bei der Berechnung des Luftvolumenstroms tritt ein Problem auf, das an folgendem Gedankenmodell verdeutlicht werden soll. Unterstellt wird ein ideal dichter Raum mit einem gekippten Fenster in einer Fassade. Die Raumtemperatur und die Umgebungstemperatur sind identisch, so dass keine thermisch induzierten Druckdifferenzen auftreten. Wird das Fenster nun mit einer gewissen Windgeschwindigkeit angeströmt, berechnet sich unabhängig von der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung ein Zuluftvolumenstrom über das Fenster von Null. Der Grund liegt in der Tatsache, dass die Windgeschwindigkeit für das gesamte Gebäude und die Winddruckbeiwerte über die gesamte Fassade konstant sind. Wird ein Fenster – wie in der Ersatzdarstellung (siehe Abb. 5.2-5) üblich – durch eine Zu- und eine Abluftöffnung modelliert, berechnet sich aus Gl. 73 für beide Öffnungen die gleiche windinduzierte Druckdifferenz.

Dieses Modell unterstellt ein völlig ungestörtes Windfeld, so dass auf allen Öffnungsflächen des gekippten Fensters genau die gleichen Winddruckkräfte einwirken. Dies stellt jedoch in der Realität die Ausnahme dar. Grund hierfür sind die lokalen Turbulenzen im Windfeld, die unterschiedlichen Geometrien von Ein- und Ausströmung, Pulsationseffekte u.a.. Diese Störungen führen dazu, dass auch über ein gekipptes Fenster in einem dichten Raum eine Ein- und Ausströmung auftritt. Diese Tatsache belegen auch Messungen des Zuluftvolumenstroms von Maas. In [88] werden die in Abb. 5.2-16 dargestellten Messwerte und Regressionsgeraden ausgewiesen. D. h. es gibt einen Luftaustausch über ein gekipptes Fenster auch in einem weitgehend dichten Raum.

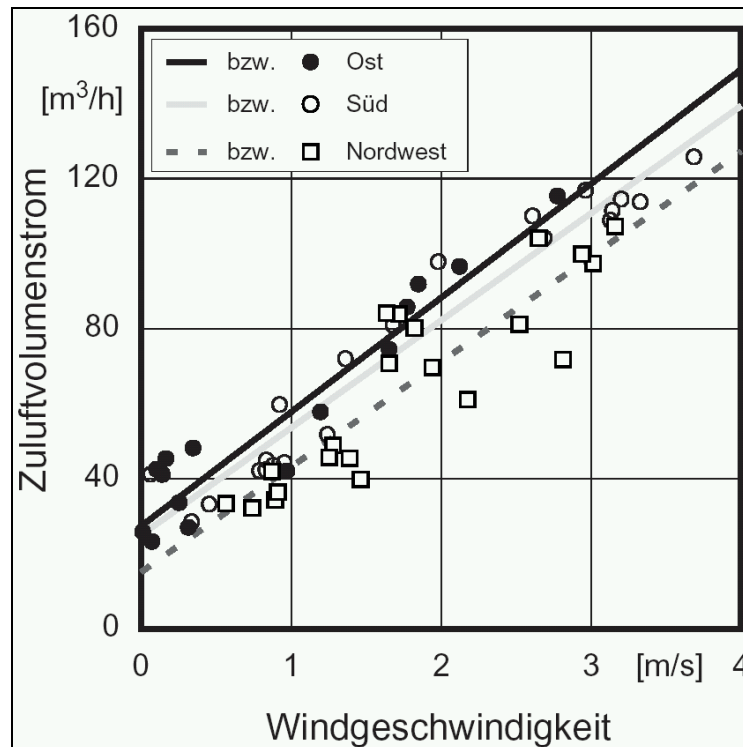


Abb. 5.2-16: Zuluftvolumenstrom in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. Stunden-Mittelwert. Kippstellung der Fenster von 12 cm. Temperaturdifferenz $2K < \Delta\theta < 4K$. [88; Bild 6.8]

Die Abbildung der tatsächlichen Druckverteilung an einem Fenster ist komplex und nur sehr mathematisch zu beschreiben. Für die Berechnung des Luftvolumenstroms wird folgendes einfaches Modell verwendet:

Es wird angenommen, dass sich die windinduzierten Druckdifferenzen Δp_W an der Zu- und Abluftöffnung um einen Betrag $2 \Delta p_{W,Dif}$ voneinander unterscheiden.

$$\text{Gl. 79} \quad \Delta p_{W,Dif} = \Delta p_W \cdot f_W$$

mit

f_W Korrekturfaktor für gestörtes Windfeld.

Die Druckdifferenzen berechnen sich damit zu

$$\text{Gl. 80} \quad \Delta p_{W,Zu} = \Delta p_W + \Delta p_{W,Dif}$$

$$\text{Gl. 81} \quad \Delta p_{W,Ab} = \Delta p_W - \Delta p_{W,Dif}$$

Diese Korrektur trägt dem Umstand Rechnung, dass die Druckdifferenzen an Zu- und Abluftöffnung an einem realen Fenster im Normalfall nicht ausgeglichen sein werden. Das Vorzeichen von $\Delta p_{W,Dif}$ wird dabei so gewählt, das die Korrektur die durch Thermik induzierte Druckdifferenz verstärkt.

Der Zahlenwert von $\Delta p_{W,Dif}$ muss empirisch ermittelt werden. Hierzu stehen die Messdaten aus [88] bzw. der dort entwickelte empirische Berechnungsansatz zur Verfügung. Die

Übereinstimmung des empirischen Berechnungsansatzes mit den Messwerten zeigt Abb. 5.2-17.

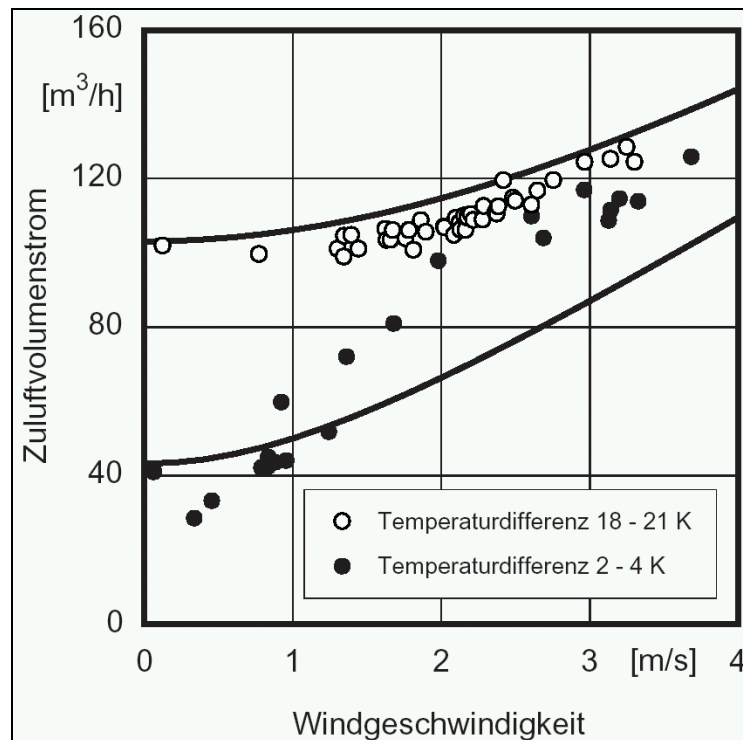


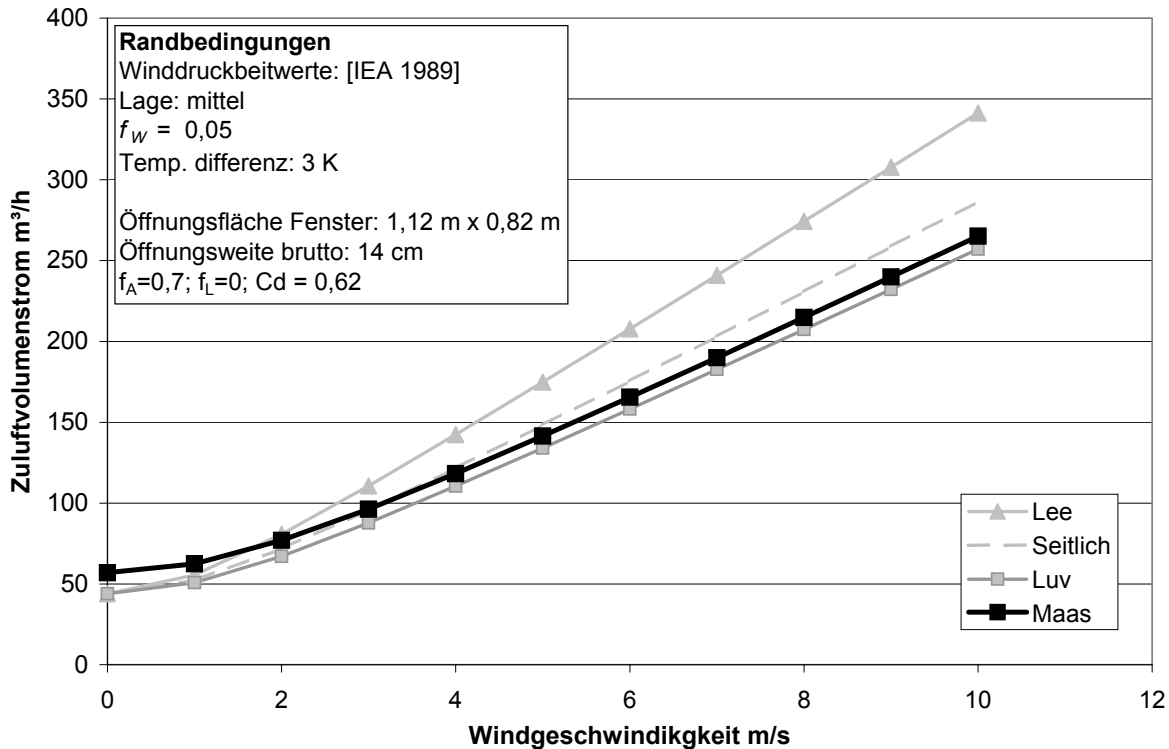
Abb. 5.2-17: Zuluftvolumenstrom in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für Messung und Rechnung. Stunden-Mittelwerte. Kippstellung des Fensters von 12 cm. [88; Bild 7.6]

Die Messwerte aus [88 oben] können recht gut abgebildet werden, wenn einen Zahlenwert von

$$Gl. 82 \quad f_w = 0,05$$

in Gl. 79 angesetzt wird. Dies gilt jedoch zunächst nur für die hier verwendeten Winddruckbeiwerte (Tab. 5.2-2 und Tab. 5.2-3) nach [89]. Die Übereinstimmung des auf diese Weise berechneten Zuluftvolumenstroms mit dem Berechnungsansatz aus [88] zeigen Abb. 5.2-18. Da bei Maas nicht nach der Lage (frei oder geschützt) unterschieden wird, wird in Abb. 5.2-18 eine mittlere Lage angenommen. Diese wird erreicht, indem die Winddruckbeiwerte aus Tab. 5.2-2 und Tab. 5.2-3 gemittelt werden. Die Abhängigkeit von der Windrichtung ergibt sich bei dem hier vorgestellten Berechnungsansatz aus den jeweils unterschiedlichen Winddruckbeiwerten.

Der Einfluss der Winddruckbeiwerte verdeutlicht aber auch, dass der gesamte Berechnungsansatz nach Gl. 74 und Gl. 75 nur eine Einschätzung der Größenordnung des Volumenstrom erlaubt und keine exakte Berechnung darstellt. Um eine höhere Genauigkeit zu erzielen, müssen die Winddruckbeiwerte für die individuelle Situation ermittelt werden, wozu



Experimente im Windkanal erforderlich sind.

Abb. 5.2-18 : Vergleich des windinduzierten Zuluftvolumenstroms über ein gekipptes Fenster in einem dichten Raum nach [88] und dem hier vorgestellten Berechnungsansatz

5.2.7 Verbesserte Berechnungsgleichung für den Volumenstrom über ein gekipptes Fenster

Werden die diskutierten Verbesserungen in der Modellierung des Volumenstroms über ein gekipptes Fenster berücksichtigt, ergeben sich folgende Berechnungsgleichungen für den Zu- und den Abluftvolumenstrom:

$$\text{Gl. 83} \quad \dot{V}_{Zu} = C_d \left(\frac{2}{\rho} \right)^{0,5} f_A f_L \frac{A_{ges}}{2} \text{abs}(\Delta p_W (1 + f_W) + \frac{f_h}{4} \Delta p_{ges} + \Delta p_{\Sigma})^{0,5} \sigma$$

$$\text{Gl. 84} \quad \dot{V}_{Ab} = C_d \left(\frac{2}{\rho} \right)^{0,5} f_A f_L \frac{A_{ges}}{2} \text{abs}(\Delta p_W (1 - f_W) - \frac{f_h}{4} \Delta p_{ges} + \Delta p_{\Sigma})^{0,5} \sigma$$

mit

Δp_{Σ} Summe aus sonstigen Druckdifferenzen, wie Thermik über das Gebäude, Innendruck aufgrund der Disbalance der Lüftungsanlage, ...

5.2.7.1 Validierung des Berechnungsansatzes

Die Genauigkeit des Berechnungsansatzes wird überprüft, indem er mit dem empirischen Ansatz von Maas, dem Gebäudedurchströmungsprogramm COMIS und den in Abschnitt 5.1 und Anhang beschriebenen Tracergasmessungen verglichen wird.

Der Vergleich mit dem Berechnungsansatz von [88] geschieht für unterschiedliche Temperaturdifferenzen (0 bis 30 Kelvin) und Windgeschwindigkeiten von 0, 3 und 6 m/s.

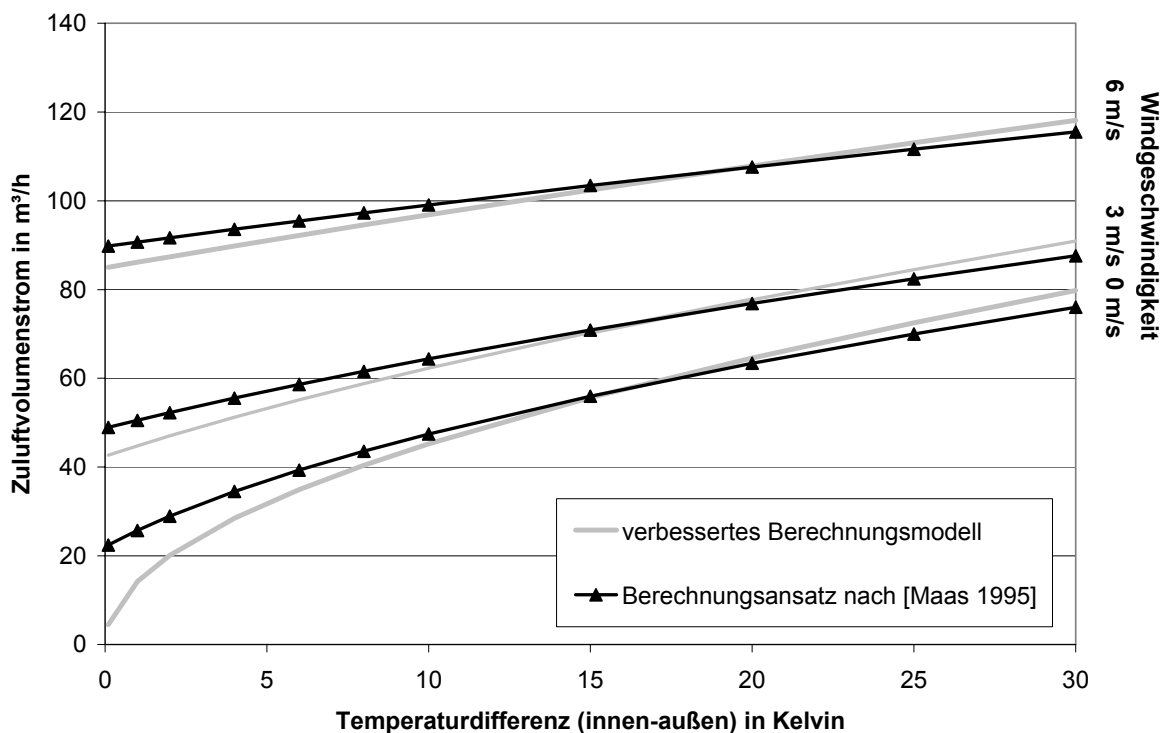
Die in den Berechnung zur Modellierung des Fensters verwendeten Parameter sind in Tab. 5.2-4 zusammengefasst.

Beschreibung	Einheit	Variable	Verbesserter Ansatz	Maas 1995
Lichte Fensterhöhe	m	h_{ges}	1,12	1,12
Lichte Fensterbreite	m	b	0,82	0,82
Öffnungswinkel	Grad	α	7,17	7,17
Brutto Öffnungsweite	m	t	0,14	0,14
Durchflussverhältnis (ohne Rahmen)	-		-	0,2172
Einfluss Fensterlaibung	-	f_L	0,56	0,56
Durchflussverhältnis (mit Rahmen)	-		-	0,1216
Öffnungsbeiwert	-	C_d	0,62	
Einfluss Fensterfalz	-	f_A	0,7	-
Korrekturfaktor Fensterhöhe	-	f_h	0,75	-
Winddruck-Korrekturfaktor	-	f_W	0,05	
Orientierung Fenster	-	-	luv	
Lage	-	-	Mittel	

Tab. 5.2-4: Randbedingungen für die Berechnung

Abb. 5.2-19 zeigt den Vergleich der berechneten Volumenströme. Das hier entwickelte Berechnungsmodell wird mit „verbessertes Berechnungsmodell“ bezeichnet.

Abb. 5.2-19: Vergleich der mit dem verbesserten Berechnungsmodell berechneten Volumenströme mit dem Berechnungsansatz aus [88]



Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Berechnungsansätzen. Nennenswerte Unterschiede ergeben sich bei einer Windgeschwindigkeit von 0 m/s für kleine Temperaturdifferenzen. Der Berechnungsansatz von Maas weist auch ohne treibende Kräfte (Temperaturdifferenz und Wind) einen Zuluftvolumenstrom auf. Bei derart kleinen treibenden Kräften ist die rechnerische Bestimmung des Zuluftvolumenstroms jedoch ohnehin schwierig, so dass diese Differenzen nicht weiter diskutiert werden.

COMIS ist ein Programm zur Berechnung der Gebäudedurchströmung. Es ist koppelbar mit dem dynamischen Simulationsprogramm TRYNSYS, so dass durch Iteration die gekoppelte Berechnung des dynamischen Temperaturverhaltens und der Gebäudedurchströmung realisiert werden kann.

In COMIS ist ein extra Modul zur Berechnung des Volumenstroms über ein Kippfenster vorhanden. Dabei wird die in Abschnitt 0 behandelte Zunahme der Öffnungsweite über die Fensterhöhe berücksichtigt. Der Einfluss der dreidimensionalen Ausprägung der Fensterfalz wird in dem Cd-Wert berücksichtigt. Dieser wird in COMIS abhängig vom Öffnungswinkel α und dem Breiten zu Höhenverhältnis $f_{b/h}$ bestimmt. Die Korrektur des Cd-Wertes ist jedoch nur für eine Fenstergeometrie berechnet worden, weswegen die Übertragbarkeit auf andere Situationen eingeschränkt ist. Eine Berücksichtigung des Einflusses des turbulenten Windfeldes erfolgt in COMIS nicht. Deswegen wird der folgende Vergleich der Berechnungen für die Windgeschwindigkeit $v=0$ m/s durchgeführt.

In COMIS wird der Volumenstrom über das gekippte Fenster berechnet, indem es in unterschiedliche Flächen-Segmente zerlegt wird analog zu der Darstellung in Abb. 5.2-1. Für jedes Segment wird unter Berücksichtigung aller Einflussparameter die Druckdifferenz berechnet (Windgeschwindigkeit, Thermik im Gebäude, aufgeprägte Druckdifferenzen, ...). Für den folgenden Vergleich wird ein Berechnungsansatz verwendet, der in [91] definiert ist. Für den hier betrachteten kleinen Öffnungswinkel von $\alpha = 7,17^\circ$ stimmen die mit diesem Berechnungsansatz ermittelten Volumenströme weitgehend mit den Rechenergebnissen von COMIS überein.

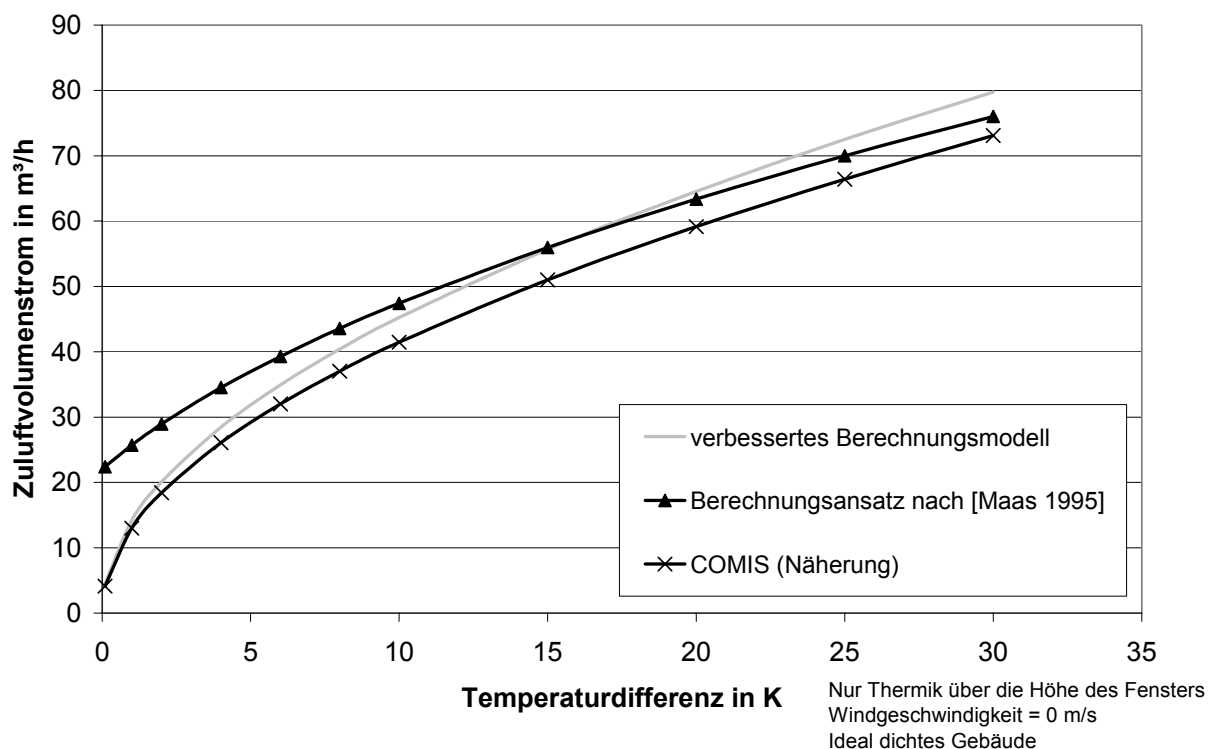


Abb. 5.2-20: Vergleich des berechneten Zuluftvolumenstroms über ein gekipptes Fenster für unterschiedliche Berechnungsansätze (Windgeschwindigkeit = 0 m/s)

Die mit COMIS berechneten Werte des Zuluftvolumenstroms liegen bei dem betrachteten Beispiel etwas niedriger als nach dem hier entwickelten verbesserten Berechnungsmodell sowie dem Ansatz nach [88]. Die Unterschiede zum verbesserten Berechnungsansatz werden noch größer, wenn die Windgeschwindigkeit mit berücksichtigt wird, da der Einfluss der Turbulenzen im Windfeld in COMIS nicht berücksichtigt wird. Die von COMIS berechneten Werte für den Zuluftvolumenstrom werden damit geringer sein. Vor dem Hintergrund der Unschärfe in den Randbedingungen kann jedoch gesagt werden, dass mit den drei Ansätzen eine ähnliche Einschätzung des Zuluftvolumenstroms über ein gekipptes Fenster erfolgt.

Im weiteren werden die Berechnungsergebnisse mit den in Abschnitt 5.1 beschriebenen Tracergasmessungen verglichen. Die in der Berechnung verwendeten Modellparameter für das Nord- und das Südfenster sind in Tab. 5.2-5 dokumentiert.

Beschreibung	Einheit	Variable	Nordfenster	Südfenster
Lichte Fensterhöhe	m	h_{ges}	0,91	2,07
Lichte Fensterbreite	m	b	0,82	0,61
Öffnungswinkel	Grad	α	9,3	4
Brutto Öffnungsweite	m	t	0,18	0,145
Öffnungsbeiwert	-	C_d	0,62	0,62
Einfluss Fensterlaibung	-	f_L	0,76	0,88
Einfluss Fensterfalz	-	f_A	0,42	0,49
Korrekturfaktor Fensterhöhe	-	f_h	0,71	0,81
Winddruck-Korrekturfaktor	-	f_W	0,05	0,05
Lage	-	-	Mittel	Mittel

Tab. 5.2-5: Randbedingungen für die Berechnung des Nord- und Südfensters im Passivhaus in Wiesbaden Lummerlund

Den Vergleich der Zuluftvolumenströme von Tracergasmessung und Rechnung zeigt Tab. 5.2-6.

Der im März (M1) über das gekippte Nordfenster gemessenen Zuluftvolumenstrom stimmt gut mit dem berechneten Wert überein.

Die Messungen im Mai (M2 bis M4) eignen sich weniger gut für die Validierung des Berechnungsansatzes, da nur geringe Temperaturdifferenzen und Windgeschwindigkeiten vorherrschten. Es wirken damit nur geringe treibende Kräfte, so dass lokale Einflüsse (die in dem Berechnungsansatz nicht erfasst sind) an Bedeutung gewinnen. Zudem weisen die Konzentrationsverläufe der Tracergasmessungen Sprünge auf, die nicht eindeutig interpretiert werden können (siehe Abschnitt 5.1 und Anhang). Je nach Auswerteansatz ergeben sich unterschiedliche Werte für den Zuluftvolumenstrom, die alle in Tab. 5.2-6 aufgeführt sind.

Für das gekippte Südfenster (M2) liegt der berechnete Wert innerhalb des Bereiches, der sich je nach Auswerteansatz aus den Messungen ergibt.

Die Messperiode im Mai mit gekipptem Nordfenster ist in zwei einzelne Bereiche aufgeteilt worden. Die Aufteilung ist in den Tracergasmessungen begründet, da sich die Konzentrationsabnahme in diesen beiden Zeitintervallen deutlich unterscheidet (siehe Abschnitt 5.1).

Für das erste Zeitintervall (M3: 18:00 bis 21:00) stimmen gemessener und berechneter Zuluftvolumenstrom trotz geringer treibender Kräfte gut überein.

	Zeitraum	Fenster	Temp.-diff.	Wind-geschw	Zuluftvolumenstrom			
					Tracergas-Messung			Rechnung
						korrigiert	interpol.	
			K	m/s	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h
M1	22. März 02; 10:00 bis 13:00	Nord	12,8	2,7	48 +/-8			48
M2	15. Mai 02; 15:00 bis 18:00	Süd	4,3	1,3	82 +/- 22	31 +/- 15	69 +/- 17	69
M3	15 Mai 02 18:00 bis 21:00	Nord	4,2	0,3	18 +/-5		21 +/- 4	20
M4	15 Mai 02 21:00 bis 8:00	Nord	8,7	0,3	9 +/-4			28

Tab. 5.2-6: Vergleich von gemessenem und berechnetem Zuluftvolumenstrom

Im zweiten Zeitintervall (M4: 21:00 bis 8:00) ergeben sich deutliche Differenzen. Hier verwundert es, dass der gemessene Zuluftvolumenstrom trotz größerer Temperaturdifferenz sinkt. Entweder sind hierfür Messfehler verantwortlich oder lokale Einflüsse, die in der Berechnung nicht erfasst werden.

Werden beide Zeiträume zusammengefasst und die Anfangs- und Endkonzentration interpoliert, rücken Messung und Rechnung wieder näher zusammen.

Insgesamt liegt der berechnete Luftwechsel insbesondere bei größeren treibenden Kräften in dem Bereich der gemessenen Werte. Das hier vorgestellte verbesserte Fenstermodell scheint somit den Zuluftvolumenstrom mit ausreichender Genauigkeit beschreiben zu können. Trotzdem ist eine Validierung mit weiteren Messdaten sinnvoll, um die Verlässlichkeit der Rechenergebnisse weiter zu untermauern und die Sicherheit für Anwender zu erhöhen.

5.2.8 Einfluss der Modellverbesserungen auf den Heizwärmebedarf und den Luftwechsel

Die hier vorgenommenen Modellverbesserungen haben wesentlichen Einfluss auf den berechneten Luftvolumenstrom über ein gekipptes Fenster und damit auf den Anstieg des Heizwärmebedarfs. Im folgenden wird die Veränderung des berechneten Heizwärmebedarfs

aufgrund der Modellverbesserungen am Beispiel eines Reihemittelhauses in Passivhausbauweise in der „Gartenhofsiedlung Lummerlund“ in Wiesbaden dargestellt.

Ausgehend von einem einfachen Modellansatz werden die einzelnen Korrekturfaktoren schrittweise berücksichtigt und deren Auswirkungen auf den berechneten Heizwärmebedarf dargestellt. Zunächst wird der Fall einer gekippten Balkontür betrachtet, wobei unterschiedliche Öffnungszeiten angenommen werden. In einem zweiten Schritt wird dann der Einfluss der Fenstergröße auf den Heizwärmebedarf dargestellt, und angegeben, welche mittleren Luftwechsel sich für die jeweiligen Fälle einstellen. Abschließend werden aus Messungen ermittelte mittlere Fensteröffnungsprofile für die Gartenhofsiedlung Lummerlund in der Berechnung berücksichtigt und damit der für diesen Fall berechnete Anstieg des Heizwärmebedarfs ermittelt.

5.2.8.1 *Berechnungsmethodik*

Die Berechnung des Zuluftvolumenstroms über ein gekipptes Fenster erfolgt über die Gl. 83 unter Berücksichtigung von Gl. 76 (Massenstrombilanz über Fenster ausgeglichen). Dabei werden für die Berechnung des Luftvolumenstroms wie bisher auch folgende Annahmen und Vereinfachungen getroffen:

- Das Gebäude ist ideal dicht
- Die Lüftungsanlage ist abgeglichen, d.h. der Zu- und Abluftmassenstrom sind identisch
- Die Dichte der zu- und abströmenden Luft sind identisch und entsprechen dem Mittelwert der Innen- und Außendichte.

Weiter wird in den Simulationsrechnungen angenommen, dass die zu Verfügung stehende Heizleistung in den Räumen nicht begrenzt ist; d.h. jederzeit die Raumtemperatur von 20°C gehalten werden kann.

Als Klimadaten werden die stündlichen Werte des Testreferenzjahres Frankfurt am Main (TRY 06) verwendet.

Für jede Stunde des Jahres wird Gl. 83 der Zuluftvolumenstrom über das gekippte Fenster und der dadurch erzeugte Lüftungswärmeverlust berechnet. Die stündliche Berechnung der zusätzlichen Lüftungswärmeverluste gewährleistet, dass der Einfluss und die Korrelation von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Außentemperatur bei dem gekippten Fenster korrekt abgebildet wird.

Die Stundenwerte werden zu Monatswerten aufsummiert und als zusätzlicher monatlicher Lüftungswärmeverlust in das Monatsverfahren der stationären Bilanzrechnung integriert. Verwendet wird dabei das Gebäudemodell aus [92] für ein Reihemittelhaus in Passivhausstandard mit einer Gebäudebreite von 6 m. Die Berechnung des Heizwärmebedarfs mit dem Monatsbilanzverfahren stellt sicher, dass die Beeinflussung des Ausnutzungsfaktors

und der Heizzeit mit berücksichtigt wird. Betrachtet werden im folgenden die in Tab. 5.2-7 aufgeführten Öffnungsintervalle.

	Stellung	Zeitraum [h]	Zeitpunkt	Interpretation
Basisvariante	geschlossen	-	-	
1 Stunde	Gekippt	1	8:00	Morgendliches Lüften
8 Stunden	Gekippt	8	22:00 bis 6:00	Schlafen bei gekipptem Fenster
16 Stunden	Gekippt	16	6:00 bis 22:00	Fenster Tags gekippt
24 Stunden	Gekippt	24	0:00 bis 24:00	Fenster ständig gekippt

Tab. 5.2-7: Variantenbeschreibung für Untersuchung zur Lüftungszeit

Betrachtet werden in diesem Abschnitt zwei unterschiedliche Fenster. Bei ihnen handelt es sich im wesentlichen um die in Abschnitt 0 beschriebenen Passivhausfenster (siehe Tab. 5.2-5). Jedoch ist bei der Variante FE-groß angenommen, dass das Fenster nicht nur an einer sondern an beiden Seiten direkt von einer Fensterlaibung umgeben ist.

Die in der Berechnung angenommenen Modellparameter sind in Tab. 5.2-8 zusammenfassend dargestellt.

Beschreibung	Einheit	Variable	FE-groß	FE-klein
			3-fach Wärmeschutzverglasung in Passivhaus-Holzrahmen	
Lichte Fensterhöhe	m	h_{ges}	2,07	0,91
Lichte Fensterbreite	m	B	0,61	0,82
Öffnungswinkel	Grad	α	4	9,3
Brutto Öffnungsweite	m	t	0,145	0,18
Öffnungsbeiwert	-	C_d	0,62	0,62
Einfluss Fensterlaibung	-	f_L	0,72*	0,76*
Einfluss Fensterfalz	-	f_A	0,49	0,42
Korrekturfaktor Fensterhöhe	-	f_h	0,81	0,71
Winddruck- Korrekturfaktor	-	f_w	0,05	0,05
Lage	-	-	Mittel	Mittel

*) Abstand zur Laibung links und rechts = 2,5 cm; Abstand zum Sturz: 4,7 cm

Tab. 5.2-8: Randbedingungen für die Berechnung des Nord- und Südfensters im Passivhaus in Wiesbaden Lummerlund

5.2.8.2 Nicht korrigiertes Berechnungsmodell

Ausgangspunkt für die folgenden Berechnungen ist zunächst das nicht korrigierte Berechnungsmodell eines Schiebefensters. Betrachtet wird die in Abb. 5.2-21 dargestellte gekippte Balkontür. Diese entspricht weitgehend auch dem in [87] betrachteten Fall.

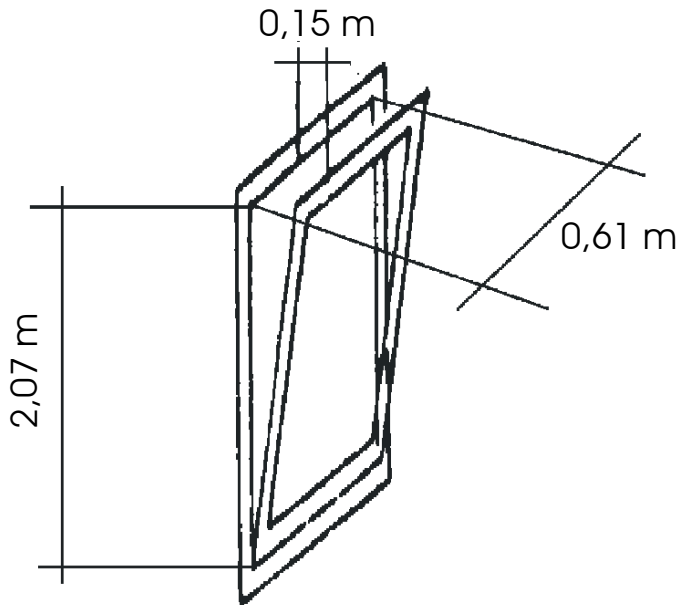


Abb. 5.2-21: Modell der gekippten Balkontür

Für die Berechnung wird das Ersatzmodell des Schiebefensters verwendet (siehe Abb. 5.2-4). Die Öffnungsweite ist damit über die Höhe konstant.

Die gesamte Öffnungsfläche des gekippten Fensters berechnet sich aus Fensterhöhe und Breite sowie dem Öffnungswinkel α über folgende Formel

$$A_{ges} = h_{ges}^2 \cdot \tan \alpha \cdot (1 + f_{b/h}).$$

mit

A_{ges}	Öffnungsfläche des gekippten Fensters
h_{ges}	Öffnungshöhe des Fensters
α	Öffnungswinkel
$f_{b/h}$	Verhältnis von Fensterbreite b zu Fensterhöhe h_{ges}

Für dieses einfache Modell ergibt sich die in Abb. 5.2-22 dargestellte Zunahme des Heizwärmebedarfs für das betrachtete Reihenmittelhaus im Passivhausstandard.

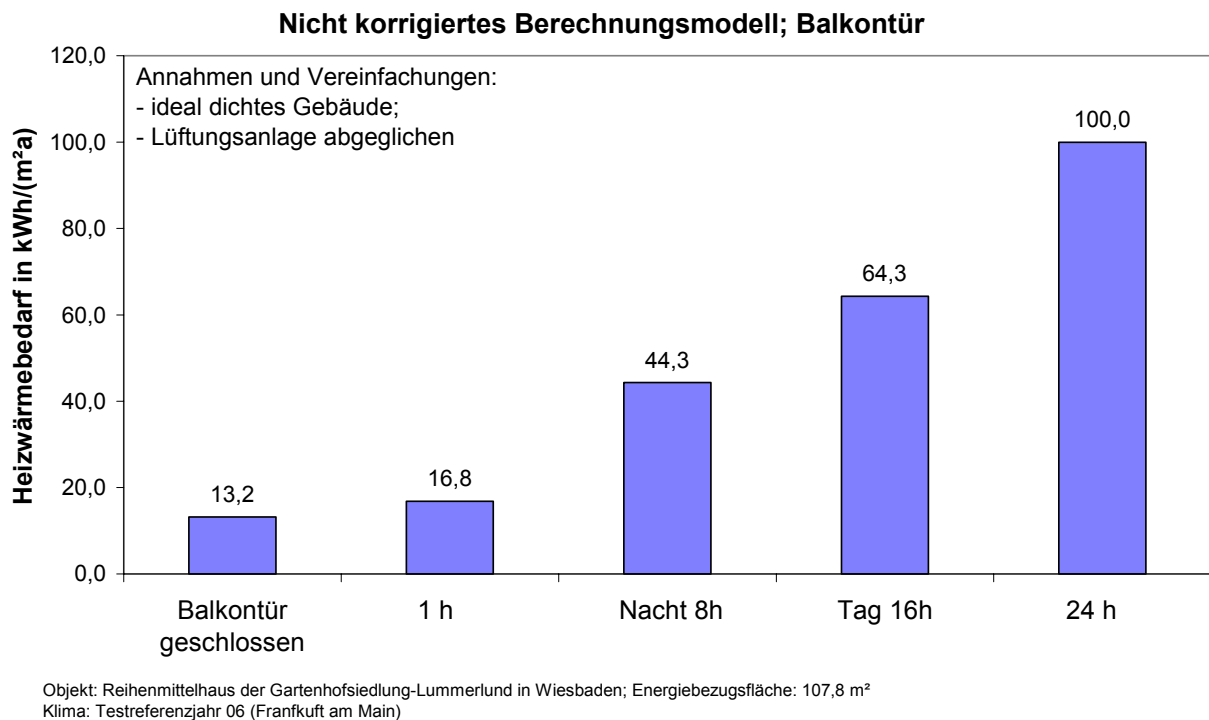


Abb. 5.2-22: Spezifischer Heizwärmebedarf bei unterschiedlich lang gekippter Balkontür für den Fall des „nicht korrigierten Berechnungsmodells“

Es zeigt sich ein deutlicher Anstieg des Heizwärmebedarfs durch die geöffnete Balkontür. Während sich für die eine Stunde gekippte Balkontür noch ein geringer Anstieg berechnet, erhöht sich bei einer dauernd (24 h) gekippten Balkontür der Heizwärmebedarf auf 100 kWh/(m²a).

Die hier berechnete Abhängigkeit ist sogar noch deutlich größer als in [87] angegeben. Der Grund liegt in folgenden Punkten:

- Die Wohnfläche der hier betrachteten Wohneinheit ist mit 107,8 m² geringer als in [87] mit 156 m². Gleichzeitig sind der Luftwechsel über das gekippte Fenster und damit der Absolutwert der zusätzlichen Lüftungswärmeverluste identisch, da diese bei dem hier unterstellten ideal dichten Gebäude unabhängig von dem Gebäude selbst sind. Damit steigt der flächenspezifische Energiekennwert stärker an.
- In [87] wird von 22:00 bis 6:00 Uhr eine Nachtabsenkung auf 15°C vorgenommen, während hier die Raumtemperatur konstant 20°C beträgt.
- Die Öffnungsfläche der Balkontür in [87] war etwas geringer als hier angenommen.

Wird der Einfluss dieser Punkte herausgerechnet, bleibt immer noch eine Differenz im Ergebnis von ca. 8 kWh/(m²a). Dieser Unterschied ist wahrscheinlich auf das in TAS verwendete leicht modifizierte Berechnungsverfahren zurückzuführen. Die hier mit dem nicht korrigierten Berechnungsmodell ermittelten Ergebnisse stimmen somit weitgehend mit den Untersuchungen aus [87] überein.

5.2.8.3 Einfluss der Modellverbesserungen

In den vorangehenden Kapiteln wurden mehrere Verbesserungen bei der Modellbildung eines gekippten Fensters aufgezeigt. Im Folgenden wird dargestellt, welchen Einfluss diese Verbesserungen auf den Anstieg des Heizwärmebedarfs haben. Ausgangspunkt für den Vergleich ist die Variante „nicht korrigiertes Berechnungsmodell“ aus Abschnitt 0.

Hiervon ausgehend werden folgende Veränderungen in den Berechnungen vorgenommen:

- f_h Die Höhe des Fensters wird um den Faktor f_h entsprechend Gl. 65 korrigiert. Damit wird berücksichtigt, dass die Öffnungsfläche bei einem gekippten Fenster mit der Höhe zunimmt.
- f_A Die dreidimensionale Ausprägung der Fensterfalz wird berücksichtigt, indem ein entsprechender Korrekturfaktor für die Öffnungsfläche $f_A = 0,49$ angesetzt wird.
- f_L Der Einfluss der Fensterlaibung wird über den Korrekturfaktor $f_L = 0,72$ entsprechend Abb. 5.2-14 berücksichtigt. Wie erwähnt ist dies nur eine Abschätzung, da noch nicht geklärt ist, ob und wie die Ergebnisse aus Abb. 5.2-14 auf andere Geometrien übertragen werden können.
- f_W Der Turbulenzanteil im Windfeld wird durch eine Korrektur der am Fenster angreifenden Druckdifferenzen entsprechend Abschnitt 0 berücksichtigt.

Die Auswirkungen dieser Modellverbesserungen auf den Heizwärmebedarf zeigt Abb. 5.2-23.

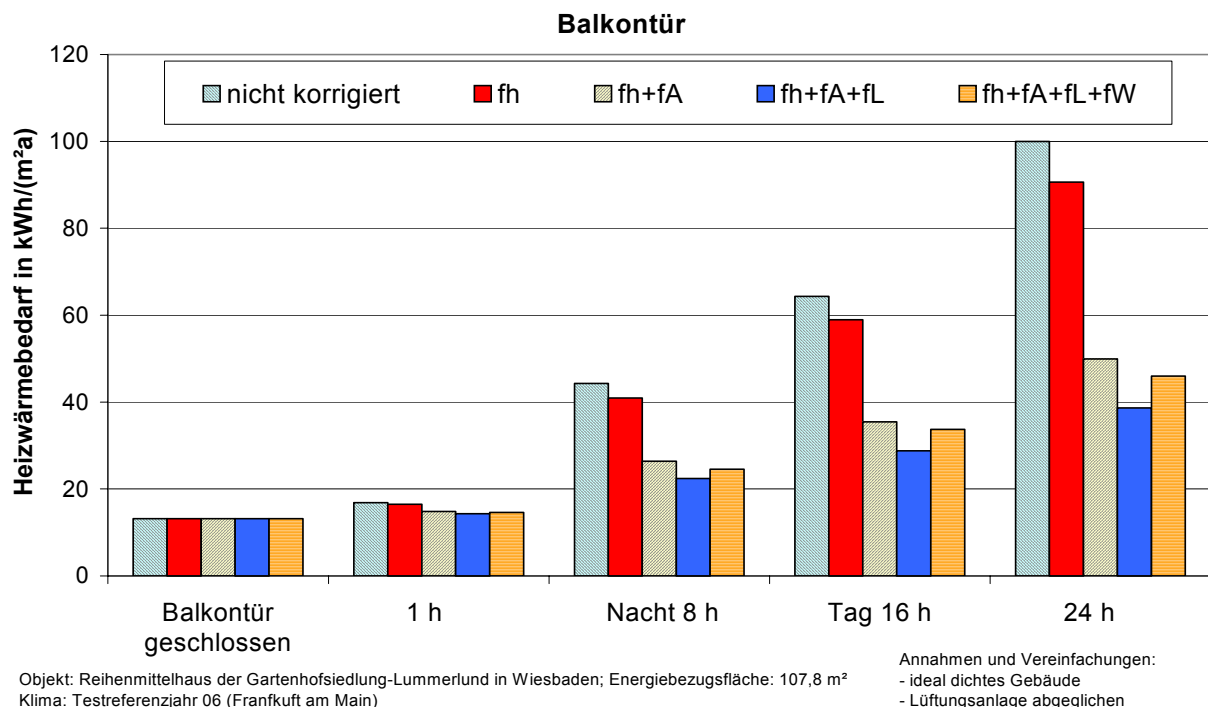


Abb. 5.2-23 : Einfluss der Modellverbesserungen auf den Heizwärmebedarf

Es wird deutlich, dass die Modellverbesserungen den Heizwärmebedarf wesentlich beeinflussen. Diese Auswirkungen werden dabei umso größer, je länger die Balkontür geöffnet ist. Der Einfluss der einzelnen Maßnahmen wird im Folgenden nach einander diskutiert, wobei beispielhaft der Fall der dauerhaft gekippten Balkontür (24 h) betrachtet wird.

Wird in der Berechnung die spezielle Geometrie des gekippten Fensters über einen entsprechenden Korrekturfaktor berücksichtigt, reduziert sich der durch Thermik über das Fenster hervorgerufene Volumenstrom entsprechend Abb. 5.2-10 auf 90 % des Ausgangswertes. Das Breiten-Höhen-Verhältnis der gekippten Balkontür beträgt $f_{b/h} = 0,3$. Je nach Öffnungszeit hat dies eine Reduktion des Heizwärmebedarfs um bis zu 10 % (bei 24 Stunden gekippt) zur Folge.

Eine deutliche Reduktion des Heizwärmebedarfs ergibt sich, wenn bei den Simulationsrechnungen die tatsächliche lichte Öffnungsfläche angesetzt wird, indem ein Korrekturfaktor für die dreidimensionale Ausprägung der Fensterfalz von $f_A = 0,49$ berücksichtigt wird. Die um gut 50 % verkleinerte Öffnungsfläche hat eine Reduktion im Heizwärmebedarf bei einem 24 Stunden gekippten Fenster von 45 % zur Folge. Unter Berücksichtigung von f_h und f_A reduziert sich der Heizwärmebedarf von 100 auf 50 kWh/(m²a).

Eine weitere Reduktion ergibt sich, wenn der Einfluss der Fensterlaibung berücksichtigt wird. Der Reduktionsfaktor beträgt $f_L = 0,72$, d.h. es tritt nur noch 72% des Volumenstroms auf, der sich ohne Berücksichtigung der Laibung berechnet. Bei einem 24 Stunden gekippten Fenster hat dies eine Reduktion des Heizwärmebedarfs um 23 % zur Folge.

Die Turbulenzanteile im Windfeld führen nun wiederum zu einem Anstieg der zusätzlichen Lüftungswärmeverluste und damit des Heizwärmebedarfs. Für die dauerhaft gekippte Balkontür (24 h) entspricht der Anstieg etwa 20 %.

Werden alle vier Effekte berücksichtigt

- Korrektur des Ersatzmodells „Schiebefenster“: $f_h = 0,81$
- Einfluss der dreidimensionalen Ausprägung der Fensterfalz: $f_A = 0,49$
- Einfluss der Fensterlaibung: $f_L = 0,72$
- Einfluss der Turbulenzanteile im Windfeld: $f_W = 0,05$,

führt dies zu einer entscheidend anderen Einschätzung des Einflusses einer gekippten Balkontür auf den Heizwärmebedarf eines Passivhauses.

5.2.8.4 Einfluss der Fenstergröße

Die bisherigen Berechnungen wurden für eine ca. 2 m hohe Balkontür durchgeführt. Im folgenden soll dargestellt werden, welche Auswirkungen die Fenstergröße auf den Anstieg des Heizwärmebedarfs hat. Hierzu wird der Anstieg des Heizwärmebedarfs zusätzlich für das in der

Gartenhofsiedlung am häufigsten geöffnete Fensters im Obergeschoss Nord berechnet. Bei diesem Fenster handelt es sich um ein relativ kleines Fenster mit den Abmaßen: Höhe=0,91 m; Breite=0,82 m.

In den weiteren Berechnungen wird das verbesserte Berechnungsmodell verwendet, d.h. es werden alle vier Modellverbesserungen berücksichtigt. Die Fenstergeometrie und die Randbedingungen der Berechnung sind in Tab. 5.2-8 zusammengestellt.

Die Auswirkungen der Fenstergröße auf den Heizwärmebedarf zeigt Abb. 5.2-24.

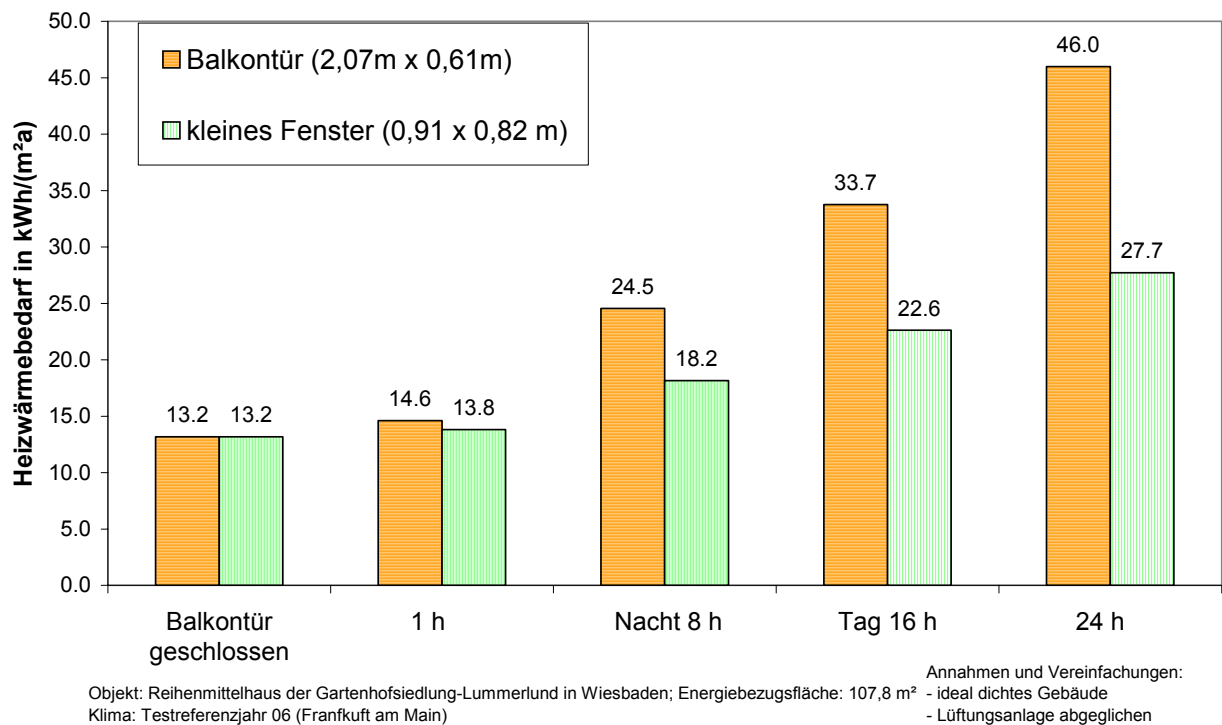


Abb. 5.2-24: Einfluss der Fenstergröße auf den Heizwärmebedarf

Die Größe des Fensters hat einen deutlichen Einfluss auf den Heizwärmebedarf. Dieser Einfluss wird umso größer, je länger das Fenster geöffnet wird.

Beim morgendlichen Kippen des Fensters für eine Stunde reduziert sich der Anstieg des Heizwärmebedarfs von 1,4 kWh/(m²a) bei der Balkontür auf 0,6 kWh/(m²a) beim kleinen Fenster. Schlafen die Bewohner bei gekipptem Fenster (8 Stunden) liegt der Anstieg des Heizwärmebedarfs zwischen 11,4 kWh/(m²a) im Falle der Balkontür und 5,0 kWh/(m²a) bei dem kleinen Fenster. Bei einem für 16 Stunden gekippten Fenster berechnet sich für die Balkontür ein zusätzlicher Heizwärmebedarf von 20,6 kWh/(m²a), wohingegen dieser beim kleinen Fenster nur bei 9,4 kWh/(m²a) liegt. Für ein 24 Stunden, d.h. dauerhaft gekipptes Fenster beträgt der Anstieg des Heizwärmebedarfs zwischen 32,8 kWh/(m²a) und 14,5 kWh/(m²a).

Es sei noch einmal bemerkt, dass die hier ausgewiesenen flächenspezifischen Werte entscheidend von der Größe der Wohneinheit beeinflusst werden. Weiterhin muss bei der Interpretation bedacht werden, dass in den Berechnungen eine konstante Raumtemperatur von 20°C (keine Nachtabsenkung) angenommen wurde und zu jedem Zeitpunkt ausreichend Heizleistung zur Verfügung steht, um diese 20°C zu halten.

Mittlerer Luftwechsel

Einen Eindruck von dem Jahresgang des zusätzlichen Luftvolumenstroms über ein gekipptes Fenster geben die folgenden Abbildungen. Um eine größere Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse zu erreichen, wird der Luftwechsel nicht mit dem Luftvolumen der bisher untersuchten Wohneinheit aus der „Gartenhofsiedlung Lummerlund“ berechnet, sondern für eine Wohneinheit von 100 m² Energiebezugsfläche und einer mittleren Raumhöhe von 2,5 m. Der zusätzliche Luftwechsel über ein gekipptes Fenster aus Abb. 5.2-25 und Abb. 5.2-26 sowie Tab. 5.2-9 und Tab. 5.2-10 bezieht sich somit auf ein Luftvolumen von 250 m³. Angegeben werden die Luftwechsel für die Balkontür und das kleine Fenster (siehe Tab. 5.2-8). Neben den monatlichen Werten zeigt die ganz rechte Säulengruppe einen Mittelwert für die Monate Oktober bis März.

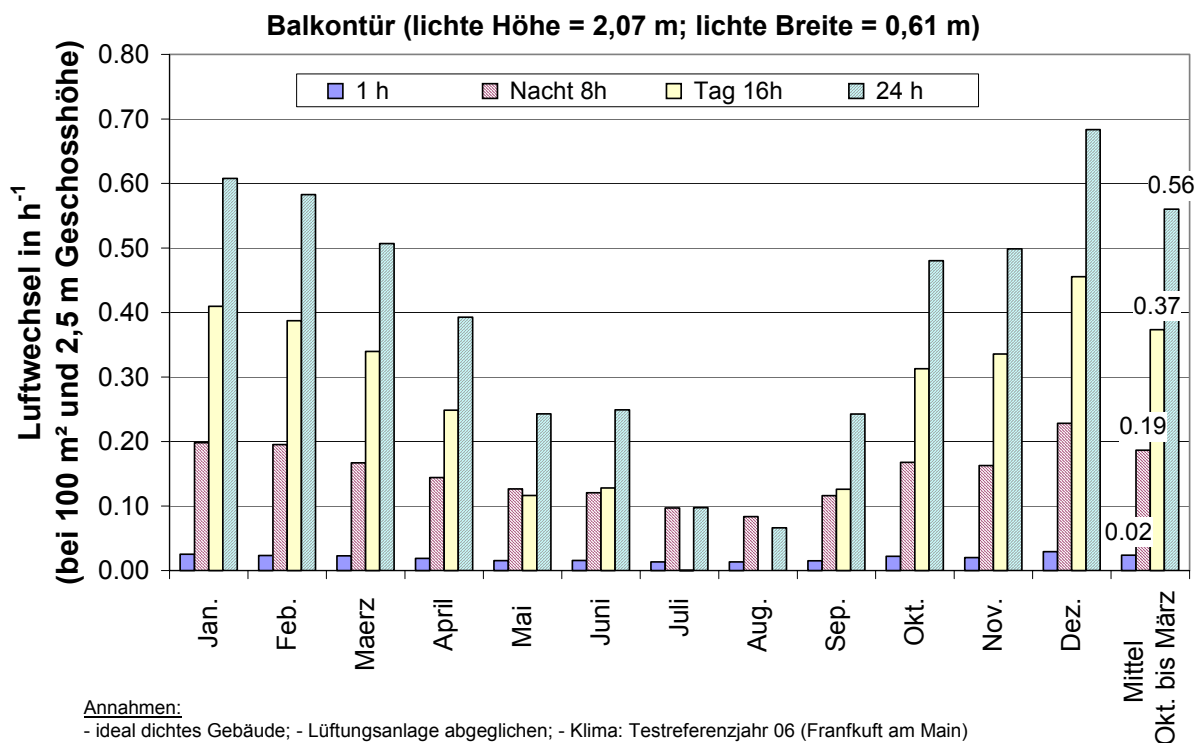


Abb. 5.2-25: Zusätzlicher Luftwechsel durch eine gekippte Balkontür bezogen auf ein Luftvolumen von 250 m³

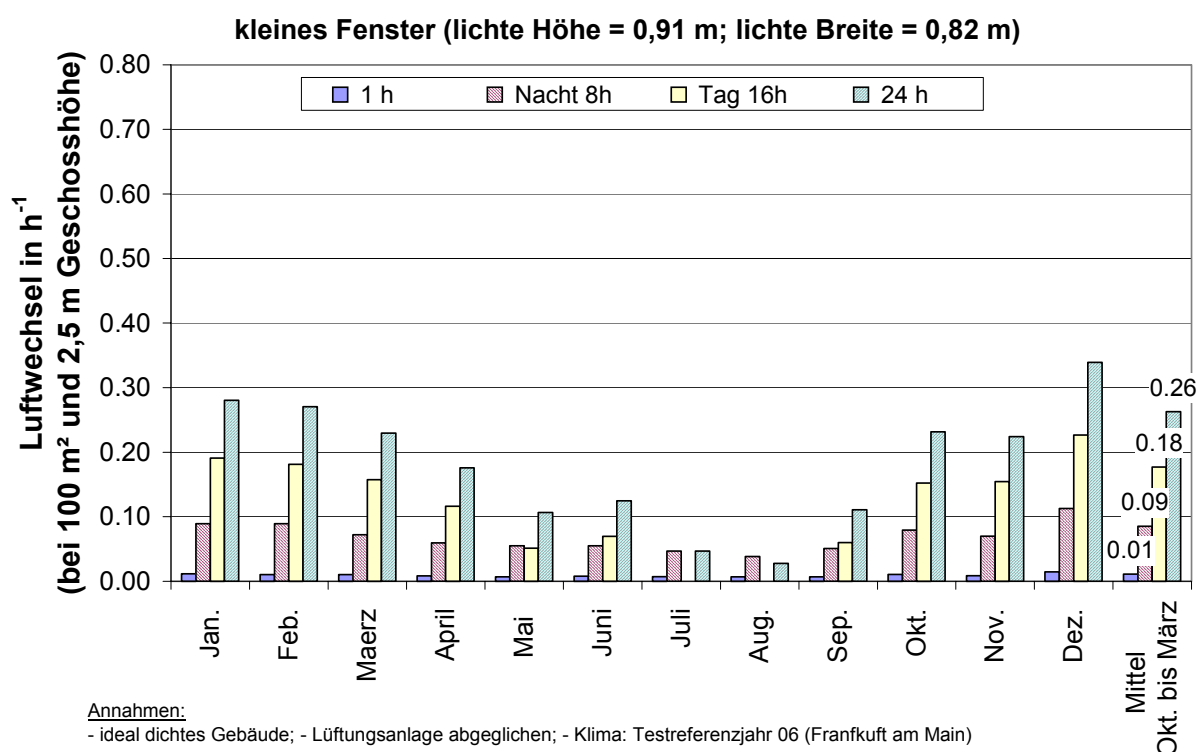


Abb. 5.2-26: Zusätzlicher Luftwechsel durch ein kleines, gekipptes Fenster bezogen auf ein Luftvolumen von 250 m³

Deutlich wird auch aus dieser Darstellung der hohe Einfluss der Fenstergröße. Während eine dauerhaft gekippte Balkontür in den Monaten Oktober bis März im Mittel zu einem zusätzlichen Luftwechsel von 0,56 h⁻¹ führt, liegt dieser für das kleine Fenster nur bei 0,26 h⁻¹ (jeweils bezogen auf eine Wohneinheit mit 100 m² Grundfläche und einer Raumhöhe von 2,5 m).

Zu erkennen ist auch der Jahresgang des zusätzlichen Luftwechsel. Der Anstieg in den kalten Monaten ist auf die zunehmende Druckdifferenz durch Thermik aufgrund der größere Temperaturdifferenz innen-außen zurückzuführen. Diese größere Temperaturdifferenz bewirkt aber gleichzeitig einen Anstieg der spezifischen Lüftungswärmeverluste je m³ Zuluftvolumenstrom. Da die Temperaturdifferenz innen-außen damit in zweifacher Weise einwirkt, können die zusätzlichen Lüftungswärmeverluste über ein gekipptes Fenster nicht mit einer über die Heizzeit gemittelten Außentemperatur berechnet werden, sondern es ist eine höhere zeitliche Auflösung erforderlich.

Um den Zusammenhang zwischen zusätzlichen Lüftungsverlusten und der Außentemperatur zu berücksichtigen, wird in den vorliegenden Berechnungen der zusätzliche Lüftungswärmeverlust in Stundenintervallen bestimmt. Eine derart hohe Zeitauflösung ist in stationären Bilanzverfahren nicht möglich. Es muss hier aber wenigstens eine Monatsbilanz durchgeführt werden. Als Orientierung sind in Tab. 5.2-9 und Tab. 5.2-10 die berechneten Werte des Zuluftvolumenstroms über ein gekipptes Fenster als Monatsmittelwerte angegeben.

Bakontür (lichte Höhe, Breite: 2,07 x 0,61 m) Zusätzlicher Zuluftvolumenstrom in m³ pro Monat				
	1 h	Nacht 8 h	Tag 16 h	24 h
Jan.	4.725,8	36.888,5	76.178,1	113.066,5
Feb.	3.929,5	32.850,1	65.041,0	97.891,1
Maerz	4.224,1	31.096,4	63.164,8	94.261,3
April	3.390,7	25.943,2	44.733,3	70.676,5
Mai	2.849,5	23.516,2	21.704,7	45.220,9
Juni	2.811,0	21.756,9	23.090,2	44.847,2
Juli	2.524,4	18.085,0	39,7	18.124,7
Aug.	2.507,1	15.556,7	-3.235,6	12.321,0
Sep.	2.745,2	20.936,0	22.743,2	43.679,2
Okt.	4.126,2	31.176,1	58.183,9	89.360,1
Nov.	3.665,2	29.312,1	60.444,9	89.757,0
Dez.	5.472,8	42.430,0	84.719,1	127.149,0
Ges.	42.971,3	329.547,2	516.807,4	846.354,4

Tab. 5.2-9: Zusätzlicher Zuluftvolumenstrom über eine gekippte Balkontür in m³ pro Monat

kleines Fenster (lichte Höhe, Breite: 0,91 x 0,82 m) Zusätzlicher Zuluftvolumenstrom in m³ pro Monat				
	1 h	Nacht 8h	Tag 16h	24 h
Jan.	2.144,4	16.605,0	35.512,1	52.117,2
Feb.	1.736,3	14.973,3	30.451,8	45.425,1
Maerz	1.911,3	13.431,2	29.246,2	42.677,4
April	1.492,7	10.717,4	20.901,8	31.619,2
Mai	1.285,1	10.261,5	9.526,3	19.787,7
Juni	1.416,9	9.883,6	12.530,7	22.414,3
Juli	1.327,4	8.661,4	-5,0	8.656,4
Aug.	1.272,3	7.148,2	-2.006,5	5.141,7
Sep.	1.233,8	9.174,7	10.756,2	19.930,9
Okt.	1.984,4	14.709,5	28.335,5	43.045,0
Nov.	1.578,1	12.546,7	27.779,9	40.326,6
Dez.	2.719,3	20.924,4	42.166,8	63.091,2
Ges.	20.102,1	149.036,9	245.195,7	394.232,7

Tab. 5.2-10: Zusätzlicher Zuluftvolumenstrom über eine gekipptes kleines Fenster in m³ pro Monat

5.2.9 Rechnerischer Einfluss von gekippten Fenstern am Beispiel der Gartenhofsiedlung

Nachdem bisher systematische Untersuchungen durchgeführt wurden, soll nun der hier beschriebene Berechnungsansatz auf die Situation in der Gartenhofsiedlung in Wiesbaden angewandt werden. Der Vergleich des berechneten Anstiegs des Heizwärmebedarfs mit dem gemessenen Heizwärmebedarf gibt Hinweise, ob die Rechenergebnisse in einer plausiblen Größenordnung liegen.

Um die konkrete Situation in der Gartenhofsiedlung exakt abzubilden, müssen

1. die geometrischen Abmessungen der Fenster
2. das tatsächliche Fensteröffnungsverhalten
3. die realen thermischen Eigenschaften der Wohneinheit für die stationäre Bilanzrechnung (U-Werte, Hüllfläche, Dichtheit, Wärmebrücken, Interne Gewinne usw.)

4. und das reale Klima

in der Berechnung berücksichtigt werden.

In der Berechnung können diese Punkte nicht exakt abgebildet, sondern nur angenähert werden.

1. Die geometrischen Abmessungen werden entsprechend Tab. 5.2-8 gewählt
2. Das Fensteröffnungsverhalten wird über mittlere Profile ausgewertet, die aus den Messdaten des realen Fensteröffnungsverhaltens erstellt wurden. Dies ist weiter unten beschrieben.
3. Das Gebäudemodell für die stationäre Bilanz wird entsprechend [92] gewählt
4. Als Klima wird das Testreferenzjahr TRY 06 (Frankfurt am Main) verwendet

Die Berechnungsmethodik entspricht der aus Abschnitt 0, d.h. es wird

1. zunächst für jede Stunde des Jahres der zusätzliche Zuluftvolumenstrom abhängig von der Temperaturdifferenz (innen-außen), der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung für das jeweilige Fenster berechnet. Unter Berücksichtigung der Temperaturdifferenz werden hieraus die stündlichen Werte der zusätzlichen Lüftungswärmeverluste bestimmt.
2. Die stündlichen Werte der zusätzlichen Lüftungswärmeverluste werden monatsweise aufsummiert, in die Monatsbilanz nach PHPP integriert (siehe Abschnitt 6.4.6) und hierüber der Jahresheizwärmebedarf bestimmt.

Fensteröffnungsprofile

Um die Beeinflussung des Heizwärmebedarfs durch die gekippten Fenster zu berechnen, muss ein Zeitprofil für die Öffnungshäufigkeit der Fenster unterstellt werden. Hierzu werden die gemessenen Fensteröffnungszeiten aus der Gartenhofsiedlung Lummerlund ausgewertet (Messjahr 2001/2002) und hieraus ein mittleres Öffnungsverhalten bestimmt. In den

Messungen wird nicht zwischen gekipptem und ganz geöffnetem Fenster unterschieden. Für die folgenden Profile wird angenommen, dass jede Fensteröffnung einem gekippten Fenster entspricht. Entwickelt werden die folgenden drei Profile:

1. Durchschnitt: Mittelwert aus allen 21 Passivhaus-Wohneinheiten
2. Taglüfter: Mittelwert aus 15 Wohneinheiten, bei denen ein Anstieg der Fensteröffnungshäufigkeit am Tag festgestellt wurde
3. Nachtlüfter: Mittelwert aus 6 Wohneinheiten, bei denen ein Anstieg der Fensteröffnungshäufigkeit während der Nacht festzustellen war.

Die gemessenen Profile werden für die Berechnung auf schematische Profile reduziert, wobei sichergestellt ist, dass die Summe der täglichen Öffnungszeiten von gemessenen und in der Rechnung angenommenen Profilen übereinstimmt. Abb. 5.2-27 zeigt die gemessenen und für die Berechnung unterstellten Zeitprofile. Angegeben ist jeweils die Anzahl der je Wohneinheit geöffneten Fenster. Die Nachkommastellen ergeben sich aus der Mittelwertbildung.

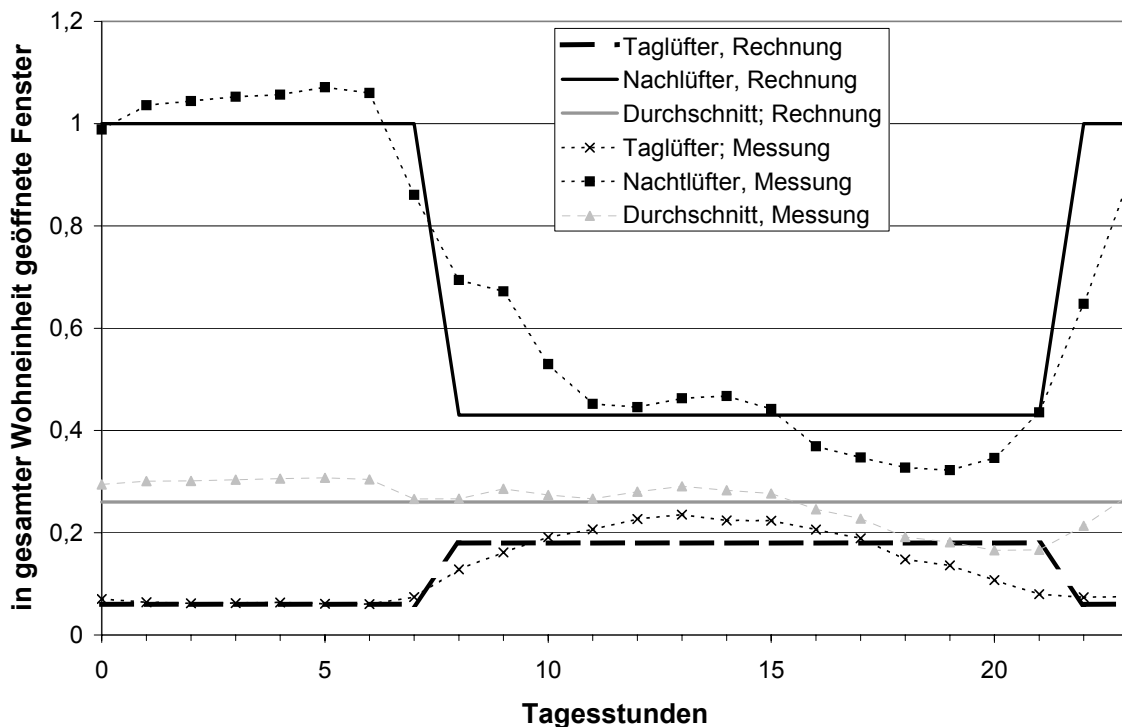


Abb. 5.2-27: Gemessene mittlere Fensteröffnungsprofile und in den Berechnungen angesetzte vereinfachte Profile

Für diese Öffnungsprofile wird der Heizwärmebedarf für das kleine Fenster und die Balkontür berechnet. Das kleine Fenster repräsentiert dabei geöffnete Nordfenster die Balkontür geöffnete Südfenster oder die Haustür. Die Ergebnisse der Berechnung zeigt Abb. 5.2-28.

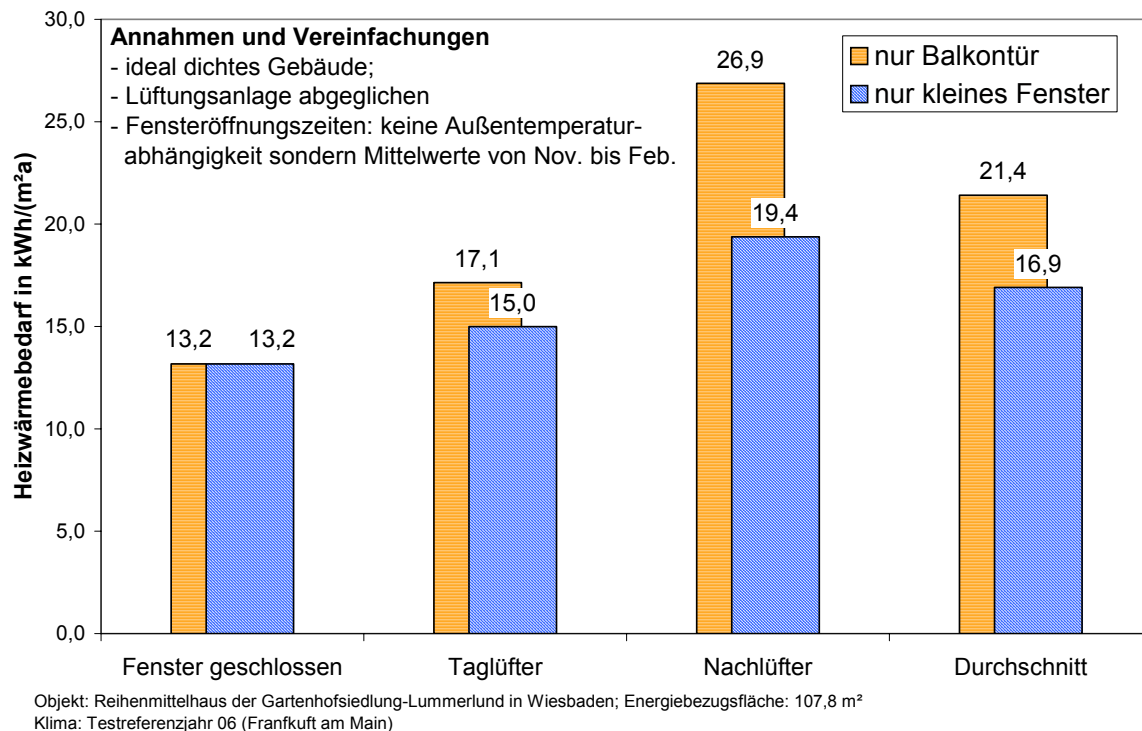


Abb. 5.2-28: Berechneter Heizwärmebedarf bei Annahme der in der Gartenhofsiedlung gemessenen mittleren Fensteröffnungszeiten

Für die Taglüfter ergibt sich unter diesen Annahmen mit dem hier vorgestellten Berechnungsansatz ein Anstieg des Heizwärmebedarfs von 1,8 kWh/(m²a) für das kleine Fenster und von 3,9 kWh/(m²a) für die Balkontür. Dieser geringe Anstieg ist nicht so sehr auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Fenster vorwiegend während der Tagesstunden geöffnet werden, sondern vielmehr darauf, dass die Fensteröffnungshäufigkeit bei den Taglüftern im Mittel gering ist.

Deutlicher fällt der Anstieg bei den Nachlüftern aus. Hier führt das gekippte kleine Fenster zu einem Anstieg des Heizwärmebedarfs um 6,3 kWh/(m²a), die gekippte Balkontür zu einem Anstieg um 13,7 kWh/(m²a). Der wesentliche Grund ist die längere Öffnungszeit der Fenster, die sogar in den Tagstunden deutlich über der der Taglüfter liegt.

Im Mittel über alle Bewohner liegt der Anstieg des Heizwärmebedarfs bei 3,7 kWh/(m²a), wenn ausschließlich das kleine Fenster gekippt wird, und bei 8,2 kWh/(m²a), wenn ausschließlich die Balkontür gekippt wird. Im Durchschnitt ergibt sich eine Fensteröffnungshäufigkeit von 0,25 h pro Stunde. Anders ausgedrückt wird je Wohneinheit im Mittel ein Fenster für jeweils 15 Minuten pro Stunde gekippt.

In der Heizperiode 2000/2001 entfallen 58% aller Öffnungsvorgänge auf kleine Nord-Fenster und 42% aller Öffnungsvorgänge auf Südfenster bzw. die Haustür. Im Weiteren wird angenommen, dass bei den Süd-Fenstern stets die Balkontür geöffnet wird und nicht die kleinen Oberlichter im Obergeschoss (bei den Messungen nicht unterschieden). Da aufgrund der

geringeren Fensterhöhe über die Oberlichter ein deutlich geringerer Zuluftvolumenstrom auftritt, stellen die im weiteren berechneten Werte also eine obere Grenze dar.

Werden die oben angegebenen Verhältnisse zwischen Nord- und Südfenster in der Berechnung berücksichtigt, ergibt sich ein mittlerer Heizwärmebedarf von 18,8 kWh/(m²a), was einem Anstieg von 5,6 kWh/(m²a) entspricht.

Bei der Interpretation dieses Ergebnisses sind folgende Punkte zu beachten:

- Die Fenster werden in der Berechnung nicht gleichzeitig geöffnet. Es tritt somit keine Querlüftung auf.
- Jeder gemessene Öffnungsvorgang wird als gekipptes Fenster interpretiert.
- Die aus den Messdaten zu erkennende Abhängigkeit der Fensteröffnungshäufigkeit von der Außentemperatur ist nicht berücksichtigt, sondern es wird ein mittleres Profil (Mittelungszeitraum: November bis Februar) angesetzt. Der tatsächliche Anstieg des Heizwärmebedarfs wird deswegen geringer ausfallen.
- Ein Teil der gemessenen Fensteröffnungen auf der Südseite entfällt in der Realität auf die kleinen Oberlichter. In den Berechnungen wird davon ausgegangen, dass immer die Balkontür geöffnet wurde.
- Bei dem Heizwärmebedarf handelt es sich um flächenspezifische Wert. Der berechnete zusätzlicher Zuluftvolumenstrom (und damit die Lüftungswärmeverluste) ist jedoch unabhängig von der Größe der Wohneinheit. Er ergibt sich aus der Fenstergeometrie und den treibenden Kräften. Die Beeinflussung des Heizwärmebedarfs wird in den Berechnungen also umso größer ausfallen, je kleiner die Wohneinheit ist.

5.2.10 Bewertung und weiterer Forschungsbedarf

Insgesamt führen die hier vorgestellten Verbesserungen im Berechnungsmodell zu einer deutlichen Reduktion des berechneten Zuluftvolumenstroms über ein gekipptes Fenster. Damit ergibt sich auch ein geringerer Einfluss von gekippten Fenstern auf den Heizwärmebedarf als dies in früheren Berechnungen bestimmt wurde [87]. Für die Gartenhofsiedlung würde sich bei Verwendung der Klimadaten des Testreferenzjahres 06 (Frankfurt am Main) in Verbindung mit den gemessenen Fensteröffnungszeiten ein Anstieg des Heizwärmebedarfs von im Mittel 5,6 kWh/(m²a). Zwar ist selbst dieser geringere Anstieg in den gemessenen Werten des Heizwärmebedarfs nicht festzustellen. Unter der Berücksichtigung der Vereinfachungen und unklaren Randbedingungen liegt der berechnete Heizwärmebedarf jedoch in einer plausiblen Größenordnung.

Bei der Interpretation der Ergebnisse muss bedacht werden, dass die hier vorgestellten Modellverbesserungen in vielen Punkten noch nicht wissenschaftlich abgesichert sind, sondern zunächst plausible Ansätze darstellen. Zudem sind mehrere Einflüsse nicht berücksichtigt. Weiterer Forschungsbedarf existiert bei folgenden Punkten:

Weitere Validierung bzw. Ausbau der hier aufgestellten Ansätze

- Einfluss der Fensterfalz: Der Einfluss der Fensterfalz auf die tatsächliche lichte Öffnungsweite wird derzeit aufgrund von einigen empirischen Messungen beschrieben. Die Spanne des Korrekturfaktors reicht dabei von $0,42 \leq f_A \leq 0,73$. Notwendig ist ein mathematisches Modell, mit dem die tatsächliche lichte Öffnungsweite in Abhängigkeit der wesentlichen Parameter beschrieben werden kann. Daraus können verlässliche Aussagen zum Korrekturfaktor in Abhängigkeit der entscheidenden Parameter gemacht werden.
- Einfluss der Fensterlaibung: Die quantitativen Angaben zum Einfluss der Fensterlaibung basieren auf 6 Messwerten, die für ganz bestimmte geometrische Bedingungen (Fenstergröße, Abstand zur Fensterlaibung) ermittelt wurden. Weitere Messungen unter verschiedenen Randbedingungen sind erforderlich. Für die Übertragung der Messergebnisse auf andere Situationen wurde ein spezieller Ansatz aufgestellt (siehe Abb. 5.2-14). Dieser Ansatz muss verbessert und durch weitere Messungen verifiziert werden.
- Einfluss des turbulenten Windfeldes: Der hier getroffene Ansatz baut nur auf die Messwerte aus [88] auf. Der Ansatz ist durch weitere Messungen zu verifizieren. Zudem muss der Einfluss der Orientierung noch genauer untersucht werden.

Bisher nicht berücksichtigte Aspekte:

- Ideal dichtes Gebäude: In den vorliegenden Berechnungen wurde ein ideal dichtes Gebäude unterstellt. Dies ist für Passivhäuser mit einer hohen Dichtheit zunächst zulässig. Soll der Ansatz auch auf weniger dichte Gebäude übertragen werden, muss geklärt werden, wie die Einbindung des Fensters in das Gebäude den Zuluftvolumenstrom in Abhängigkeit von der Dichtheit der Gebäudehülle beeinflusst.
- Einfluss der Lüftungsanlage: In den bisherigen Untersuchungen wurde eine abgegliche Lüftungsanlage unterstellt (Zuluftmassenstrom = Abluftmassenstrom). Wegen der Verschmutzung der Filter ist der abgegliche Zustand in der Realität jedoch der Ausnahmefall. Die Disbalance der Lüftungsanlage kann je nach Situation den Volumenstrom über ein gekipptes Fenster erhöhen oder verringern. Es wird dabei ein deutlicher Einfluss erwartet. Aus diesem Grund sind Untersuchungen erforderlich, die den Einfluss der Lüftungsanlage auf den Fensterluftwechsel analysieren.
- Nicht berücksichtigt in den vorliegenden Untersuchungen sind u.a. der Einfluss von Gardinen, Vorhängen, Rollläden usw. Diese stellen einen zusätzlichen Strömungswiderstand dar und reduzieren damit den Volumenstrom.
- Weitere Stichpunkte sind: Einfluss der Außenlaibung, der thermischen Schichtung im Raum, lokaler Luftströmungen (aufwärtsgerichteter Luftstrom durch Heizkörper oder Erwärmung der Außenwand durch solare Einträge), Einfluss der durch die Lüftungsanlage im Raum induzierten Lüftströmungen.

In Anbetracht der Tatsache, dass die Energiebilanz wesentlich vom Luftwechsel über ein gekipptes Fenster beeinflusst wird, sollten diese Fragen möglichst bald geklärt werden.

5.3 Luftwechsellmessergebnisse in ausgewählten Niedrigenergiehäusern und die Bedeutung für die Energiebilanz

Die Verbrauchsmessungen in den Niedrigenergiehäusern haben deutlich geringere Heizwärmeverbräuche ergeben (ca. 60 % unter den Berechnungen, bei einzelnen Häusern über 80 % zu wenig), als dies aufgrund der Planungswerte zu erwarten gewesen wäre. Im Zusammenhang mit den exemplarischen Luftwechselbestimmungen mit Tracergas in je einem Niedrigenergie- und einem Passivhaus wurden die Volumenströme über die Zu- und Abluftventile in dem untersuchten Niedrigenergiehaus überprüft. Die vorgefundenen Volumenströme waren zu gering (was auch durch die Tracergasmessungen bestätigt wurde), so dass noch weitere Niedrigenergiehäuser lüftungstechnisch vermessen wurden.

Die Komponenten der Abluftanlagen stammen von der Firma Aereco. In den Fensterrahmen sitzen feuchtegesteuerte Zuluftelemente, in Küche und Badezimmer wurden ebenfalls feuchtegesteuerte Abluftelemente montiert, die über Flexrohr (Badezimmer ca. 1 m, Küche ca. 5 m inklusive Rohrschalldämpfer) an die Ventilatorbox angeschlossen sind. Der Hersteller empfiehlt zweijährliche Reinigungsintervalle beim Ventilator, die Abluftventile sollten alle 1 bis 3 Monate gereinigt werden. Bei der untersuchten Anlage muss davon ausgegangen werden, dass seit dem Einzug vor vier Jahren der Ventilator noch nicht gereinigt worden war.

Tabelle 5.3.1-1 zeigt die Volumenströme (mit FlowFinder von Oliver Kah vom Passivhaus-Institut gemessen) vom 13.05.2002. Es wurden vier der acht im Messprogramm beteiligten Gebäude untersucht. Im Mittel erreichten die Häuser einen Abluftvolumenstrom von 34 m³/h, über die Zuluftelemente wurden 31 m³/h Frischluft gemessen. Normalerweise sollten in einem Gebäude mit Küche und Badezimmer, das WC hat einen eigenen kleinen Rohrventilator mit Taster und Nachlauf, 100 m³/h Volumenstrom bei Zu- und Abluft erreicht werden. Der Luftaustausch erreicht somit nur ca. ein Drittel des Sollwerts.

Tabelle 5.3.1-1: Gemessene Zu- und Abluftvolumenströme in den Abluftanlagen einiger Niedrigenergiehäuser [93]

	Summe Zuluft [m ³ /h]	Summe Abluft [m ³ /h]
N04	36	29
N02	28,5	ca. 34 nach Reinigung des Filters in der Küche 44 m ³ /h
N08	30	36
N05	29	36
Mittelwert	31	34

Jeweils nur Summe von Zu- und Abluft

Die Abluftanlage im Haus N05 wurde daraufhin detailliert untersucht und gereinigt. Dabei wurden sowohl Volumenströme als auch Druckdifferenzen gemessen.

Vor der Reinigung der Anlage erreichte der Abluftventilator eine Druckdifferenz (Abluft zu Fortluft) von 92 Pa, an den Abluftventilen fiel fast die gesamte Druckdifferenz zum Raum hin ab. Die Volumenströme waren gegenüber der ersten Messung leicht angestiegen, da der Filter

in der Küche bereits gereinigt worden war und eine Undichtigkeit an der Einbindung der Abluft in die Ventilatorbox behoben werden konnte.

Um den Ventilator untersuchen zu können, musste die Verkleidung des engen Spitzbodens über der Sanitärzelle abgeschraubt, der elektrische Anschluss abgeklemmt und auch der Abluftschlauch von der Ventilatorbox entfernt werden. Diese Einbausituation macht eine Reinigung durch die Bewohner nahezu unmöglich, allein aufgrund der Tatsache, dass Arbeiten am elektrischen Anschluss durch Nicht-Fachleute nicht zulässig sind. Aber selbst wenn der Ventilator nicht demontiert wird, ist eine gründliche Reinigung wegen der Einbaulage kaum möglich.

Bei der Reinigung des Ventilators wurden erhebliche Verschmutzungen mit Staub im Ventilatorgehäuse und an den Schaufeln festgestellt (siehe Fotos). Das Abluftrohr war sowohl an der Ventilatorbox als auch am Ventil in der Küche verschmutzt. Hier scheint sich die Tatsache, dass im Badezimmer kein Abluftfilter eingebaut war, negativ ausgewirkt zu haben.

Tabelle 5.3.1-2 zeigt die gemessenen Differenzdrücke und Volumina im System. Bei der Messung schwankten einzelne Werte jedoch stark, so dass sich kleinere Differenzen in der Gesamtbilanz ergeben.

Tabelle 5.3.1-2 Gemessene Differenzdrücke und Volumenströme in einer Abluftanlage

	Vor Reinigung des Ventilators	Nach Reinigung des Ventilators	Nach Reinigung der Ventile
Differenzdruck Ventilator	92 Pa	112 Pa	
Differenzdruck Ventil Bad	97 Pa	114 Pa	118 Pa
Differenzdruck Ventil Küche	94 Pa	110 Pa	106 Pa
Volumenstrom Abluft	34 m ³ /h Bad 12 m ³ /h Küche	45 m ³ /h Bad 16 m ³ /h Küche	42 m ³ /h Bad 18 m ³ /h Küche (24 m ³ /h ohne Filter)

Nach der Reinigung des Ventilators war der Differenzdruck von 92 auf 112 Pa angestiegen, der Gesamtvolumenstrom stieg von 46 auf 61 m³/h. Aus der Ventilator Kennlinie des Herstellers kann für Luftmengen zwischen 30 und 200 m³/h eine konstante Pressung von ca. 120 Pa erwartet werden. Somit ist nach der Reinigung von einer ordnungsgemäßen Funktion des Ventilators auszugehen.



Abdeckung des Ventilators im verschmutzten Zustand



Verschmutzter Metallfilter in der Küche



Demontierter Abluftventilator



Schmutz aus den Ventilatorschaufeln



Ventilatorbox vor der Reinigung



Blick in den Abluftkanal an der Ventilatorbox



Verschmutztes Abluftventil im Badezimmer



Verschmutztes Abluftventil in der Küche
(Metallfilter entfernt)

Abbildung 5.3.1-1: Bilder von der Reinigung der Abluftanlage

Die anschließende Reinigung der recht gut zugänglichen Abluftventile erbrachte nur noch eine Verschiebung der Volumenströme zwischen Bad und Küche, nicht aber eine Erhöhung des Gesamtvolumenstroms. Im Badezimmer hatte sich durch den Einbau in der Decke viel Staub hinter den Stellklappen angesammelt, so dass nicht von einer ordnungsgemäßen Regelbarkeit vor der Reinigung ausgegangen werden kann. Die Luftfeuchte im Bad lag während der Messung bei 63 %. Die Raumlufttemperatur betrug 23 °C. Welche Abluftelemente in diesem Gebäude montiert waren, konnte nicht ermittelt werden. Der Hersteller gibt bei der gemessenen Luftfeuchtigkeit einen Volumenstrom von 60 m³/h bzw. 45 m³/h (je nach Abluftelement) an. Im ersten Fall würde der gemessene Volumenstrom um 25 % unter dem Sollwert liegen, bei den kleineren Abluftelementen würde der Sollwert im Bad erreicht. Das Hauptproblem bei dieser Abluftanlage liegt somit bei dem Abluftventil in der Küche. Obwohl 110 Pa Druckdifferenz über das Ventil gemessen wurden und der Hersteller einen Nenndruckabfall von 100 Pa angibt, werden nur 18 m³/h erreicht. Da der Öffnungsspalt nach der Reinigung fast die gleiche Breite wie im Badezimmer aufweist, ist der große Volumenstromunterschied nicht zu erklären.

Fazit:

Bei der Planung von Abluftanlagen dieses Typs muss die Raumluftfeuchte-abhängige Regelung des Abluftvolumenstromes berücksichtigt werden. Dies ist insbesondere dann schwierig, wenn die Raumluftfeuchte starken Schwankungen unterworfen ist, wie in Bädern. Dadurch wird nicht nur die absolute Abluftmenge verändert, sondern auch die Luftmassenverteilung innerhalb des Gebäudes. Zu berücksichtigen ist, dass mit dieser Regelung, bei im Winter bei üblichen Raumluftfeuchten von ca. 40 %, anstelle der benötigten Volumenströme von 100 m³/h nur noch 35 m³/h erreicht werden. Weiterhin ist unklar, ob der Regelbereich der Ventile im Laufe der Jahre konstant bleibt. Bei der Montage ist eine Einregulierung der Ventile und die Dokumentation der Werte unbedingt erforderlich, damit auch die Voreinstellung kontrolliert werden kann.

Ob die Raumluftheuchte-abhängige Regelung gemäß der Planungen funktioniert, konnte bei den Messungen nicht überprüft werden. Die Anlagen sollen jedoch laut Herstellerunterlagen nur einen Grundluftwechsel zur Vermeidung von Feuchteschäden liefern (in keinem der Niedrigenergiehäuser wurde von den Bewohnern von Feuchteschäden berichtet, d.h. diese Anforderung wurde von den Anlagen, auch aufgrund des hohen energetischen Standards der Gebäudehülle, erfüllt), die Luftqualität steht dabei nicht im Vordergrund.

Auswirkungen des reduzierten Luftwechsels auf die Energiebilanz der Niedrigenergiehäuser

Die gemessenen mittleren Heizwärmeverbräuche der Niedrigenergiehäuser (ein 3,8m breites Endhaus wird bei den folgenden Betrachtungen wegen fehlender Gebäudedaten nicht berücksichtigt) lagen zwischen 19 und 22 kWh/(m²*a) (siehe Tabelle 5.3.1-3).

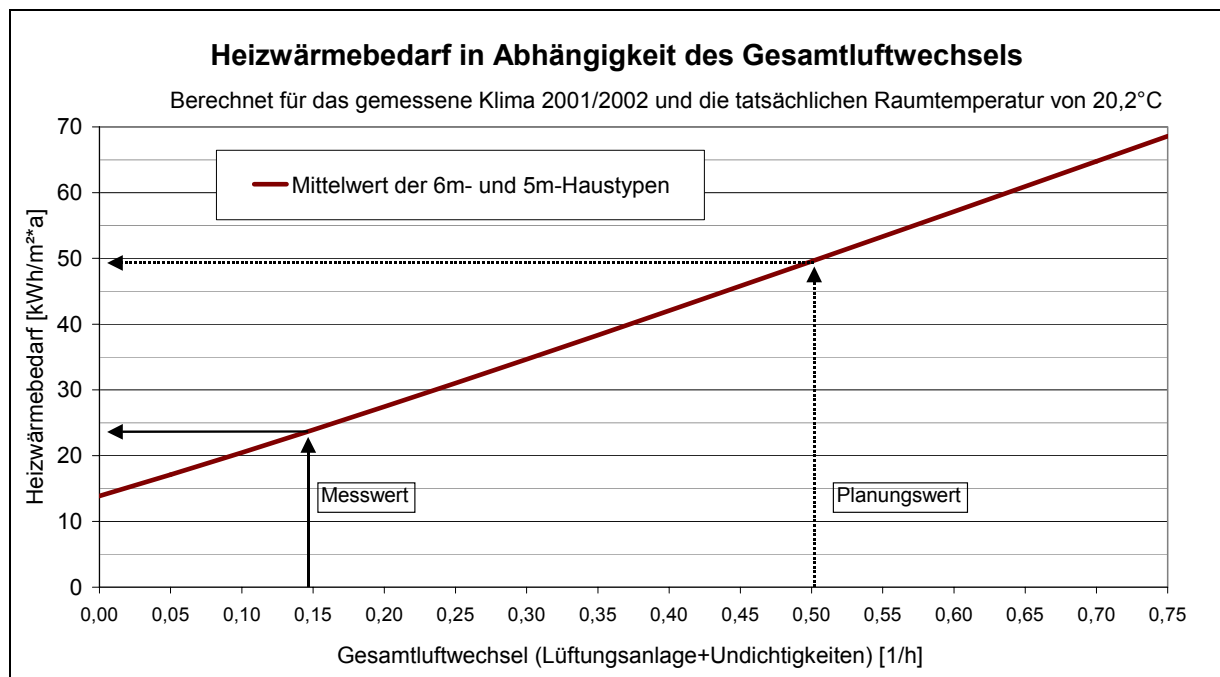
Tabelle 5.3.1-3: Gemessene Heizwärmeverbräuche und Raumtemperaturen der Niedrigenergiehäuser

	Heizwärmeverbrauch der Niedrigenergiehäuser (ohne 3,80m Haus) inkl. Wärmeabgabe Verteilleitungen	Mittlere Raumtemperatur der Niedrigenergiehäuser
1998/99	21,5 kWh/(m ² *a)	19,8 °C
1999/2000	20,5 kWh/(m ² *a)	19,7 °C
2000/01	18,9 kWh/(m ² *a)	19,6 °C
2001/02	21,0 kWh/(m ² *a)	20,2 °C

So ergibt sich bei der Energiebilanz im Mittel ein Heizwärmebedarf von 55 kWh/(m²*a); erfolgt die Auslegung nach Ablufträumen (40 m³/h im Bad und 60 m³/h in der Küche – das WC wird nur bei Bedarf zusätzlich gelüftet), liegt der Heizwärmebedarf bei 49 kWh/(m²*a) (jeweils mit einer Restundichtigkeit der Gebäudehülle von 0,1 1/h gerechnet). Der gemessene Verbrauch liegt somit um 59 % bzw. 63 % unter dem berechneten Heizwärmebedarf.

Bei Tracergasmessungen in einem der Niedrigenergiehäuser wurde bei geschlossenen Fenstern ein Gesamtluftwechsel im Gebäude von 0,15 1/h gemessen. Berechnet man den Luftwechsel über die Abluftanlage (siehe Tabelle 5.3.1-1), ergibt sich ein Anlagenluftwechsel von 0,1 1/h , d.h. beide Werte passen gut zusammen (beim Gebäudeluftwechsel addiert sich zum Anlagenluftwechsel noch ein zusätzlicher Luftaustausch über die Undichtigkeiten, die bei diesen sehr dichten Gebäuden gering sind). Wie in unten stehender Abbildung 5.3.1-1 ersichtlich, ergibt sich für diesen Luftwechsel, wenn er als Mittelwert für alle Niedrigenergiehäuser eingesetzt wird, ein Heizwärmebedarf von ca. 23,2 kWh/(m²*a) – der gemessene mittlere Heizwärmeverbrauch liegt somit nur noch ca. 9 % unter dem berechneten Wert, was bei der pauschalierten Betrachtung (nur Mittelwert aller NEH, keine Wärmeströme zwischen den Häusern,..) bereits eine recht gute Übereinstimmung ergibt. Wird unterstellt, dass alle Niedrigenergiehäuser ähnlich niedrige Luftwechselraten aufweisen, kann damit der geringe Heizwärmeverbrauch der Niedrigenergiehäuser überwiegend erklärt werden. Die verbleibende Abweichung könnte sich aus den internen Lasten der Häuser erklären (hoher Stromverbrauch und hohe Personenbelegungsdichte).

Abbildung 5.3.1-1: Mittlerer Heizwärmebedarf der Niedrigenergiehäuser in Abhängigkeit des Gesamtluftwechsels des Hauses



Auswirkungen auf die Luftqualität in den Niedrigenergiehäusern

Ein solch geringer Gesamtluftwechsel, wie er in einem der Niedrigenergiehäuser gemessen wurde, wirkt sich auch auf die Luftqualität in den Aufenthaltsräumen aus. Die Lüftungsanlage soll besonders im Schlaf- und Wohnbereich kontinuierlich für eine hohe Luftqualität sorgen. Um überprüfen zu können, ob dieses Qualitätskriterium gewährleistet ist, wurde im Schlafzimmer des entsprechenden Hauses über einen Zeitraum von 3 Wochen der Kohlendioxidgehalt der Raumluft alle 15 Minuten gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.3.1-2 für einen charakteristischen Zeitraum über 4 Tagen dargestellt. Es ist deutlich der Anstieg der CO₂-Konzentration in der Raumluft in der Nacht zu erkennen. Die Konzentration steigt bis auf maximal 3600 ppm an. Als Richtwert wurden von Pettenkofer 1000 ppm empfohlen, die DIN 1946 nennt 1500 ppm als Obergrenze in Wohnräumen. Dieser Wert wird in jeder Nacht deutlich überschritten. In den Morgenstunden sinkt die CO₂-Konzentration durch Fensterlüftung schlagartig ab. Das Niveau der Grundkonzentration der Umgebungsluft wird aber erst nach einer längeren Fensterlüftungsdauer erreicht. Auch hier muss wieder berücksichtigt werden, dass keinerlei Informationen darüber vorliegen, ob die Fenster gekippt oder ganz geöffnet waren. Die kurzen Öffnungszeiten in Abbildung 5.3.1-2, die zu einem starken Abfall der CO₂-Konzentration führen, deuten auf vollständig geöffnete Fenster hin. Zum Vergleich ist eine anschließende Messung der CO₂-Konzentration in einem Passivhaus abgebildet (Abbildung 5.3.1-3). Nachts steigt die CO₂-Konzentration bis auf maximal 900 ppm an. Tagsüber wird von den Bewohnern teilweise recht lange gelüftet, was im April energetisch unproblematisch ist und den CO₂-Gehalt nur noch geringfügig reduziert. Auch ohne zusätzliche Fensterlüftung sinkt der Kohlendioxidgehalt der Luft im Laufe des Tages auf das Niveau der

Grundkonzentration der Umgebungsluft. Die Pettenkofer-Grenze wird im gesamten Zeitraum von 3 Wochen, in denen gemessen wurde, nicht überschritten.

Abbildung 5.3.1-2: Verlauf der Kohlendioxid-Konzentration im Schlafzimmer des untersuchten Niedrigenergiehauses

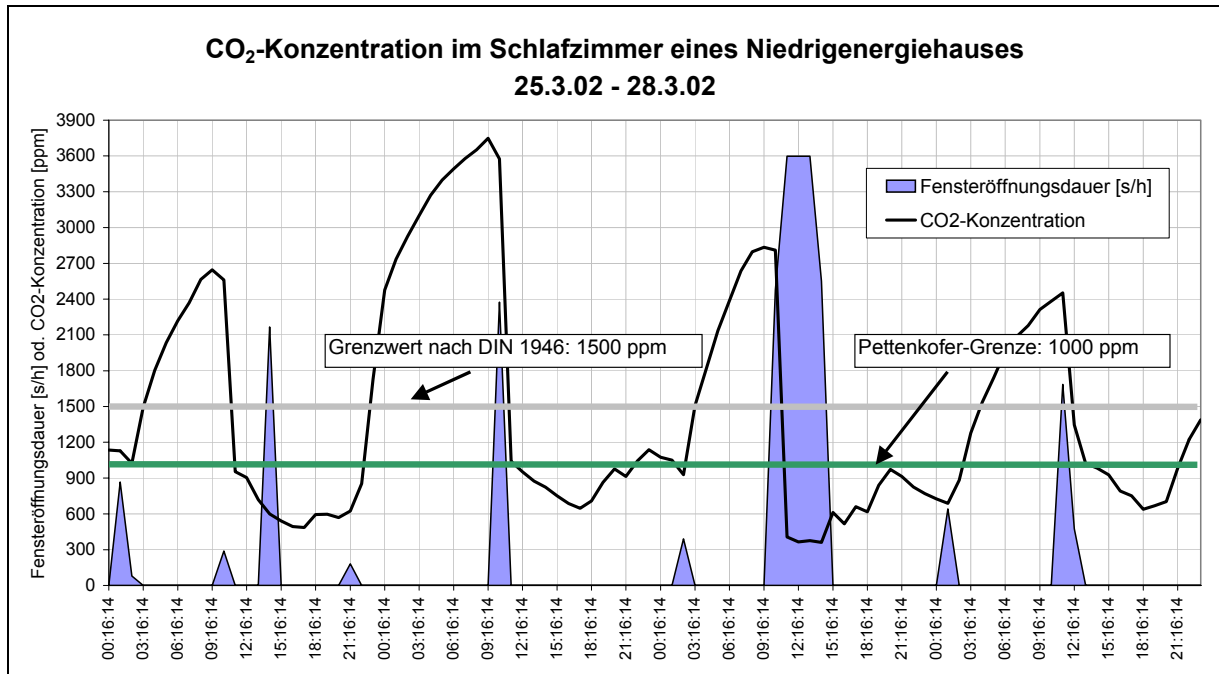
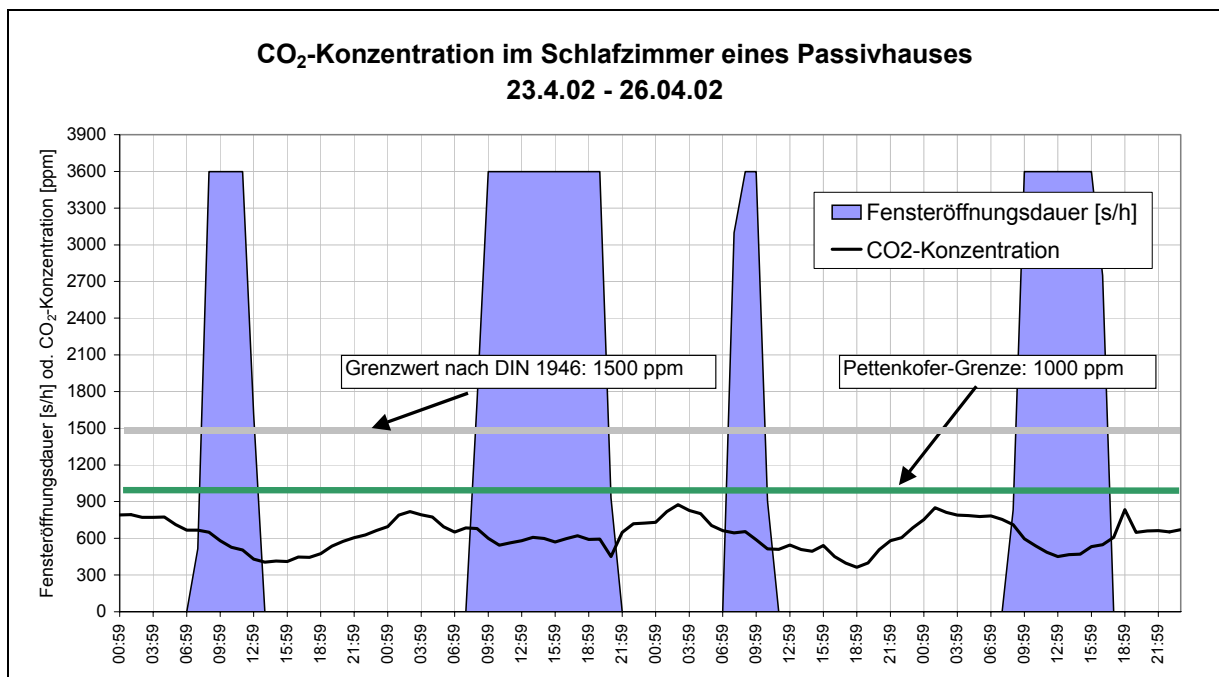


Abbildung 5.3.1-3: Verlauf der Kohlendioxid-Konzentration im Schlafzimmer eines Passivhauses



Aus lufthygienischer Sicht kann aus den Ergebnissen der CO₂-Messungen für den untersuchten Zeitraum ein klarer Vorteil der Lüftungsanlage mit mechanischer Zu- und Abluft gegenüber der reinen Abluftanlage, die lediglich eine Grundlüftung bewirkt, festgestellt werden. Nur die

Lüftungsanlage mit mechanischer Zu- und Abluft führt auch in den Nachtstunden zu guten Werten bei der Kohlendioxid-Konzentration. Die Investitionen in die Lüftungsanlage führen somit nicht nur zu geringeren Heizwärmeverbräuchen, sondern auch zu einer deutlich verbesserten Luftqualität.

Demgegenüber stellt sich bei Abluftanlagen dieses Typs die Frage, ob der Einbau in einem energetisch so hochwertigen Niedrigenergiehaus sinnvoll ist, da außer in den Randbereichen der Fenster keine Tauwassergefahr gegeben, eine Verbesserung der Luftqualität bei dem hier eingebauten System aber nicht festzustellen ist. Da Niedrigenergiehäuser üblicher Weise aber deutlich mehr bauphysikalisch kritische Stellen aufweisen, darf dieses Ergebnis aus dem untersuchten Gebäude in Wiesbaden so nicht auf andere Niedrigenergiehäuser übertragen werden.

Grundsätzlich sollte auch in Niedrigenergiehäusern eine mechanische Lüftung mit ausreichender Frischluftzufuhr eingeplant werden.

5.4 Alternative Methoden zur messtechnischen Erfassung von Fensteröffnungszeiten

5.4.1 Analyse der Raumlufthtemperaturen

Im Rahmen des Gesamtprojekts wurde ebenfalls die Möglichkeit untersucht, inwieweit durch eine hochaufgelöste Messung der Raumtemperaturen festgestellt werden kann, ob im zugehörigen Raum Fenster geöffnet sind. Dazu wurden die Messwerte für das Passivhaus P07 im Zeitraum vom 7.3. bis zum 31.3.2002 ausgewertet. In dieser Zeit wurden die alle 3 Sekunden aufgenommenen Temperaturen und Fensteröffnungszeiten als 5 Minuten-Mittelwerte bzw. -Summen abgespeichert.

Als Kriterium einer Fensteröffnung wurde eine Temperaturänderung von minimal 0,4 °C innerhalb von 30 Minuten festgelegt. Dieser Grenzwert ergibt sich durch einen Aufschlag von 0,1 °C auf die Messgenauigkeit der verwendeten Fühler. Ein Fenster wurde als offen in die Auswertung aufgenommen, wenn es innerhalb diesen Zeitraums nach den Daten der Fensterkontakte mindestens 10 Minuten geöffnet gewesen war.

Im Verlauf der drei untersuchten Wochen waren nur wenige Stunden feststellbar, die bei geschlossenem Fenster eine Temperaturdifferenz über dem soeben definierten Grenzwert für Fensteröffnung aufweisen (3 Stunden im Erdgeschoss, 1 Stunde im Obergeschoss Süd, 2 Stunden im Obergeschoss Nord). Umgekehrt blieben aber auch bei einem überwiegenden Teil der Zeit mit geöffneten Fenstern die Innentemperaturen konstant. Bei einer Differenz von mehr als 12 °C zwischen der Innen- und Außentemperatur ($\Delta\vartheta_{I-A}$) konnte nur in 21 % der Zeitintervalle im Erdgeschoss (6 von 29 Fällen) eine Fensteröffnung über eine Veränderung der Raumtemperatur festgestellt werden. Im Obergeschoss war bei 50 % der Intervalle mit geöffneten Südfenstern (4 von 8 Fällen) und bei 18 % der Intervalle mit geöffnetem Nordfenster (6 von 34 Fällen) eine Fensteröffnung festzustellen.

Mit steigenden Außentemperaturen (bzw. geringerer Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außen) nehmen die Zeitintervalle mit geöffneten Fenstern im Haus zu. Gleichzeitig nimmt der Anteil der Intervalle mit feststellbaren Temperaturveränderungen im Innenraum ab. Bei einer Temperaturdifferenz zwischen innen und außen von mindestens 8 °C konnte im Erdgeschoss 19 % (30 von 159 Fällen), im Obergeschoss Süd 6 % (9 von 142 Fällen) und im Obergeschoss Nord 10 % (18 von 180 Fällen) der Intervalle mit geöffneten Fenstern über die Temperaturschwankungen erkannt werden.

Tabelle 5.4.2-1: Anteil erkannter offener Fenster bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen

Temperaturdifferenz Innen-Außen	Anteil erkannter offener Fenster [%]		
	Erdgeschoss	Obergeschoss süd	Obergeschoss nord
> 8	19	6	10
> 10	11	22	9
> 12	21	50	18

Wenn man die Windrichtung und -geschwindigkeit in die Auswertung mit einbezieht und nur die Fensteröffnungszeiten betrachtet, in denen der Wind mit einer Mindeststärke auf dem jeweiligen geöffneten Fenster stand, kann vermehrt eine gleichzeitige Veränderung der Innentemperatur festgestellt werden. Allerdings nimmt dann auch die Zahl der Zeitintervalle mit geöffneten Fenstern stark ab. Die Windstärke für die beiden Orientierungen der Fassaden in Süd- und Nordrichtung wurde für einen senkrecht auf dem jeweiligen Fenster stehenden Vektor umgerechnet. Im Untersuchungszeitraum erreichten die Maxima der Windgeschwindigkeit für Fenster in Nordrichtung 4,9 m/s und für ein Südfenster 4,0 m/s.

Bei einem Windvektor Süd/Nord über 1 m/s ergeben sich für die Innentemperaturen des Erdgeschosses bei $\Delta\vartheta_{I-A}$ von mindestens 8 °C in 55 % und bei $\Delta\vartheta_{I-A}$ von mindestens 12 °C in 47 % der Fälle nennenswerte Temperaturschwankungen. Im Obergeschoss liegt die Erkennungsrate je nach $\Delta\vartheta_{I-A}$ zwischen 0 % und 57 %. Auch eine Verlängerung der minimalen Fensteröffnungszeiten von 10 auf 20 Minuten, damit ein Intervall in die Auswertung aufgenommen wird, ergibt keine höheren Anteile an erkannten offenen Fenstern. Somit ist zwar ein Einfluss von Windrichtung und -geschwindigkeit feststellbar, eine sichere Erkennung offener Fenster ist auch unter Einbeziehung dieses Klimaparameters nicht möglich.

Als Ergebnis lässt sich feststellen, dass die Schwankungen der Rauminnentemperaturen keine sicheren Rückschlüsse auf die Öffnungszeit der entsprechenden Fenster zulassen. Je größer die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen ist, desto mehr steigt auch die Chance ein offenes Fenster an den Veränderungen der Raumtemperaturen zu erkennen. Die große Zahl der Fensteröffnungen bei mildem Klima kann aber nicht mehr mit diesem Verfahren messtechnisch erfasst werden.

Die Ursachen dafür liegen zum einen darin, dass keine Informationen vorliegen, ob das Fenster ganz geöffnet oder nur gekippt war, was zu einem geringeren Luftaustausch und somit zu einer langsameren Temperaturabnahme führt. Außerdem sind die Raumtemperaturfühler nicht in der Nähe der Fenster montiert, sondern an einer Innenwand, auf die keine direkte Solarstrahlung treffen kann. Durch die thermische Trägheit des Gebäudes kann kaum eine Veränderung der Raumtemperatur in kurzer Zeit an den Fühlern auftreten. Ein weiterer Grund liegt in der Lüftungsanlage, die warme Luft von der den Fenstern gegenüberliegenden Innenwand auf die Fenster zu transportiert und somit einen Luftschleier bildet, der ein schnelles Verteilen der kalten Außenluft im Raum verhindert. Schließlich werden bei extremen Wettersituationen mit großen Temperaturdifferenzen zwischen Innen- und Außenluft kaum die Fenster geöffnet. Liegt die Außentemperatur nur wenig unter der Raumtemperatur ist der thermische Antrieb und damit der Luftaustausch über das Fenster geringer, so dass auch in diesem Fall kaum Veränderungen festgestellt werden können.

Ein auswertbares Messverfahren lässt sich aus dem Abfall der Raumtemperatur daher kaum ableiten. Die einzigen Fälle, bei denen sinnvolle Ergebnisse denkbar sind, wären Wetterlagen mit großen Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen und vollständig geöffneten Fenstern, die erfahrungsgemäß selten auftreten. Daher wurde dieses Verfahren nicht weiter untersucht.

5.4.2 Automatische Druckmessung

Als alternative Methode zur Beantwortung der Frage, ob in einem Gebäude Fenster geöffnet sind, ohne dafür Kontakte an allen Fenstern montieren zu müssen, wurde das Verfahren der Differenzdruckmessung an der Lüftungsanlage (DrD) entwickelt, in der Praxis erprobt und messtechnisch evaluiert. Vorteile des Verfahrens liegen darin, dass keinerlei Veränderungen an den Fenstern des zu untersuchenden Gebäudes vorgenommen werden müssen. Die messtechnischen Komponenten können in die Lüftungsanlage integriert werden.

Die messtechnische Überprüfung in einem der Passivhäuser ergab sehr gute Bestimmungsgenauigkeiten für den Zustand der Fenster von über 99 %. Dabei ist jedoch nur eine Unterscheidung zwischen "alle Fenster geschlossen" oder "mindestens ein Fenster offen" möglich.

Potentielle Anwendungsfälle sind neben Messprojekten die automatische Anpassung des Betriebs der Lüftungsanlage an das Verhalten der Bewohner im Sommer wie im Winter oder eine Kontrollfunktion für die Bewohner, ob z. B. beim Verlassen des Hauses alle Fenster geschlossen sind.

Eine ausführliche Darstellung des DrD-Verfahrens und die Diskussion der Messergebnisse findet sich in dem zugehörigen, separaten Bericht.

6 Determinanten für Energieverbrauch, Komfort und Zufriedenheit

6.1 Bewohnerbefragungen

6.1.1 Untersuchungskonzept und energierelevante Fragestellungen bei der Befragung

Im Rahmen der sozialwissenschaftlichen Untersuchung wurden die Haushalte der beiden Hauszeilen der Siedlung in Wiesbaden befragt, in denen auch die Messungen durchgeführt wurden. Damit waren in diese Befragung insgesamt 22 Passivhäuser und 8 Niedrigenergiehäuser einbezogen.

Der gesamte Untersuchungszeitraum, in dem sowohl Messungen als auch Befragungen durchgeführt wurden, betrug zwei Jahre. Im Verlauf dieses Zeitraums wurden parallel zu den Messungen insgesamt vier Befragungen durchgeführt. Damit wird nicht nur eine Momentaufnahme möglich, sondern die Eindrücke und Bewertungen der Nutzer können über einen längeren Zeitraum sowohl in möglichen jahreszeitlichen Schwankungen als auch in ihrer mittelfristigen Entwicklung verfolgt werden. In der Zwischenzeit gab es Rückmeldungen, es wurden Probleme behoben und die Fragen der Bewohner beantwortet, so dass die Auswirkungen dieser Maßnahmen in den folgenden Befragungen verfolgt werden konnten.

Die erste Befragung fand im Frühsommer 2000 statt, die zweite während der Heizperiode Anfang 2001. Die dritte Befragung wurde nach dem Sommer 2001 durchgeführt, die letzte abschließende nach dem Winter 2002.

Passivhäuser und Niedrigenergiehäuser wurden stets parallel befragt, so dass die Ergebnisse für die verschiedenen Haustypen miteinander verglichen werden konnten. In der dritten und vierten Befragung konnte zusätzlich eine Kontrollgruppe einbezogen werden. Dabei handelte es sich um Bewohner ähnlicher Reihenhäuser aus der Umgebung, die gleichzeitig mit den Häusern der Passiv- und Niedrigenergiehaussiedlung oder kurz danach gebaut und bezogen worden waren, aber kein Energiesparkonzept aufweisen.

Die Befragungen sind auch aus Sicht der Forschung zur rationellen Energienutzung aus mehreren Gründen von besonderem Interesse:

- Neben den messtechnisch erfassten Größen liefern die Bewohnerbefragungen zusätzliche Informationen, die zur Erklärung der beobachteten Verbrauchswerte herangezogen werden können.
- Die Bewohner liefern Informationen über Probleme und Unzulänglichkeiten bei der Bauausführung. Günstigenfalls können sie direkt behoben werden. In jedem Fall kann

Problemen zukünftig vorgebeugt werden, soweit die Problembereiche hinreichend genau erfasst, dokumentiert und ausgewertet werden.

- Die Bewohner geben Hinweise auf Verbesserungsmöglichkeiten bei der Planung, die für zukünftige Projekte Berücksichtigung finden können.
- Die Bewohner geben Informationen darüber, welche Informationen sie über die Energiesparhäuser wünschen, an welchen Stellen sie sich unsicher fühlen, wo sie eine „Betriebsanleitung“ benötigen.
- Entspricht das reale Verhalten der Bewohner den Erwartungen? Falls es Abweichungen gibt: Welche Gründe gibt es dafür? Liegt es daran, dass die Erwartungen unrealistisch oder unangemessen sind, oder liegt es an mangelnden Informationen?
- Schließlich erhält man Rückkopplungen darüber, welche Informationen überhaupt angekommen sind. In welcher Weise müssen Informationen angeboten werden, um ihren Zweck zu erfüllen?
- Subjektive Bewertung der Bewohner: Sind sie zufrieden, akzeptieren sie das Konzept, bewerten sie es als Komfortgewinn, gibt es auch Nachteile?
- Welche Rückwirkungen haben Bewertung und Akzeptanz auf das Verhalten?
- Sind die Erfahrungen der Bewohner verallgemeinerbar?
- Wie kommunizieren die Bewohner ihre Erfahrungen?

Im Mittelpunkt stehen also einerseits die Fragen, ob die Zielsetzung erreicht wird, ob Konzept und Nutzerwünsche zusammenpassen bzw. Nutzerkompatibilität durch entsprechende Maßnahmen erreicht werden kann; andererseits, ob es eine realistische Perspektive für die Umsetzung in einem größeren Maßstab gibt. Bewohner sind stets wichtige Multiplikatoren. Mindestens im Bekanntenkreis verleihen sie ihrer Zufriedenheit oder Unzufriedenheit Ausdruck. Das Maß der Akzeptanz durch die Bewohner ist also ein wichtiger Indikator dafür, ob das Konzept Nachahmer findet. Diese Frage entscheidet auch darüber, ob Akteure hier ein lohnendes Betätigungsfeld oder einen Markt sehen. Nur wenn sich ein Markt entwickelt, kann ein Energiesparkonzept ökologisch relevant werden.

Abbildung 6.1.1-1: Interaktion von Gebäude, Nutzer und Energiebilanz sowie Erfassung von Energiebilanz und Nutzerverhalten durch Messung und Befragung

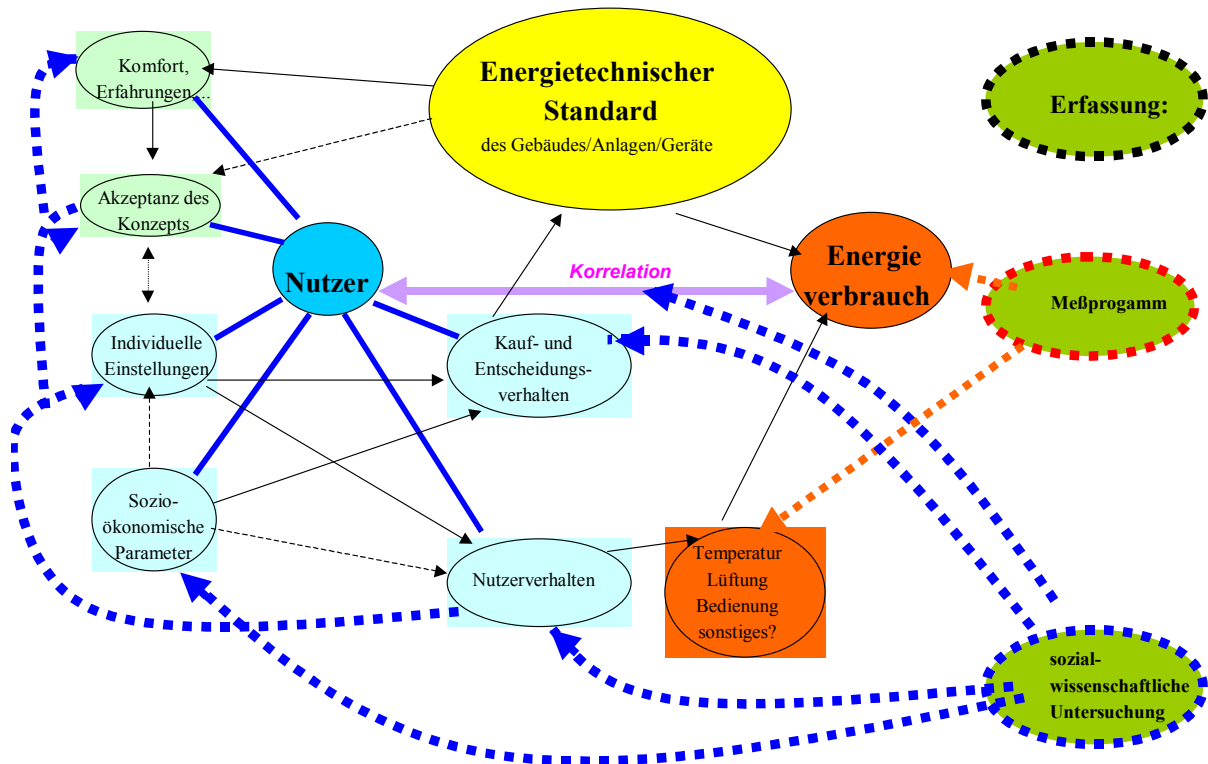


Abbildung 6.1.1-1 veranschaulicht den Einfluss der gebäudeseitigen und technischen Maßnahmen einerseits und den der Nutzer andererseits auf den Energieverbrauch: Der energietechnische Standard determiniert den Energieverbrauch bei einem bekannten oder auch bei einem durchschnittlichen Nutzerverhalten. Die Nutzer nehmen darauf Einfluss über ihr Entscheidungs- und Kaufverhalten (z.B. Haushaltsgeräte) sowie über ihr aktuelles Wohnverhalten. Beides ist geprägt von individuellen Einstellungen und Komfortansprüchen. Die Einstellungen selbst sind aber ebenfalls abhängig von den Erfahrungen mit dem Gebäude und dessen Gebäudekonzept: Denn die Erfahrungen dem Gebäude und dessen Akzeptanz sind wichtige Einflussgrößen auf die Einstellungen und damit auf das Nutzerverhalten. Abbildung 6.1.1-1 zeigt darüber hinaus den Bereich der jeweiligen Erfassung der beschriebenen Größen durch Messprogramm und sozialwissenschaftliche Untersuchung.

Über die Zielgröße „Energieverbrauch“ hinaus ist die Erfassung der subjektiven Bewertung ein eigener Untersuchungsgegenstand. Damit werden nicht nur Antworten auf die Frage gegeben, ob das Konzept funktioniert und die Zielsetzung erreicht wird, sondern auch Hinweise auf zukünftige Umsetzungsperspektiven gegeben. (vgl. Tabelle 6.1.1-1).

Tabelle 6.1.1-1: Erfassung von Verhalten und subjektiver Bewertung (aus [94])

Nutzerverhalten im Passivhaus			
Bedeutung	reales Verhalten		subjektive Bewertung
	Erreichen der Zielsetzung		Akzeptanz des Konzepts
Überprüfung	Messergebnisse Temperaturen Energieverbrauch sonstige Verbrauchswerte Beobachtungen	Fragen zum Bewohnerverhalten Umgang mit Heizung Lüftung Fenstern	Fragen zur Bewertung Behaglichkeit Heizung Lüftung Raumlufqualität Wohnzufriedenheit
	Messprogramm	Sozialwissenschaftliche Evaluation	

Das sozialwissenschaftliche Konzept für die Untersuchung der Siedlung in Wiesbaden, die Befragungen sowie die Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Forschung sind in einem gesonderten Bericht dokumentiert [95]. Es zeigte sich dabei, dass die Bewohner der untersuchten Häuser in der Siedlung Lummerlund in Wiesbaden sich von der Kontrollgruppe, z.B. in Bezug auf Umwelt- und Energiebewusstsein, nicht unterscheiden [96]. Damit sollten die Ergebnisse für diese Siedlung auf einen großen potentiellen Nutzerkreis, insbesondere Eigentümer von Reihenhaus-Neubauten, übertragbar sein.

Nach dem Bau der Passivhaussiedlung in Wiesbaden sind eine große Anzahl weiterer Passivhäuser gebaut worden [97]. Gleichzeitig mit der hier vorliegenden Untersuchung wurden auch die Bewohner in einer ähnlichen Reihenhaussiedlung in Hannover-Kronsberg befragt [98]. Einen ganz anderen Nutzerkreis erschließen die sozialwissenschaftlichen Untersuchungen des sozialen Geschosswohnungsbaus in Kassel Marbachshöhe [99], [100]. Beide Projekte wurden im Rahmen des Europäischen Cepheus-Projekts [101][102] begleitet und messtechnisch ausgewertet [103], [104], [105].

Im Folgenden werden in diesem Kapitel die Aspekte behandelt, die in unmittelbarem Zusammenhang mit der Frage stehen, ob die Zielsetzungen in Bezug auf Energieeinsparung und Komfort erreicht wurden. Es zeigte sich, dass ein wichtiges Instrument zunächst die gezielte Information der Bewohner ist. Dazu reicht es nicht aus, sie einmalig beim Einzug zu informieren, denn zu diesem Zeitpunkt gehen die Informationen in der Vielzahl der Belastungen im Zusammenhang mit Baufertigstellung und Einzug unter. Viele Fragen tauchen erst später auf. In Abschnitt 6.1.2 sind die Informationen dokumentiert, die die Bewohner während des Untersuchungszeitraums erhielten.

In den folgenden Abschnitten 6.2 bis 6.4 werden die für die Passiv- und Niedrigenergiehäuser entscheidenden Aspekte Raumklima und Komfort, Lüftung sowie Einfluss der Nutzer auf den Heizenergieverbrauch behandelt.

6.1.2 Bewohnerinformationen

Bei der Präsentation des Baugebiets und des Bauprojekts durch Rasch & Partner wurde gleichzeitig eine fachliche Information über Niedrigenergie- und Passivhäuser durch das Passivhaus Institut gegeben. Obwohl über Passivhäuser zu diesem Zeitpunkt nur die Erfahrungen aus Darmstadt Kranichstein vorlagen, entschieden sich etwa die Hälfte der Interessenten für ein Passivhaus.

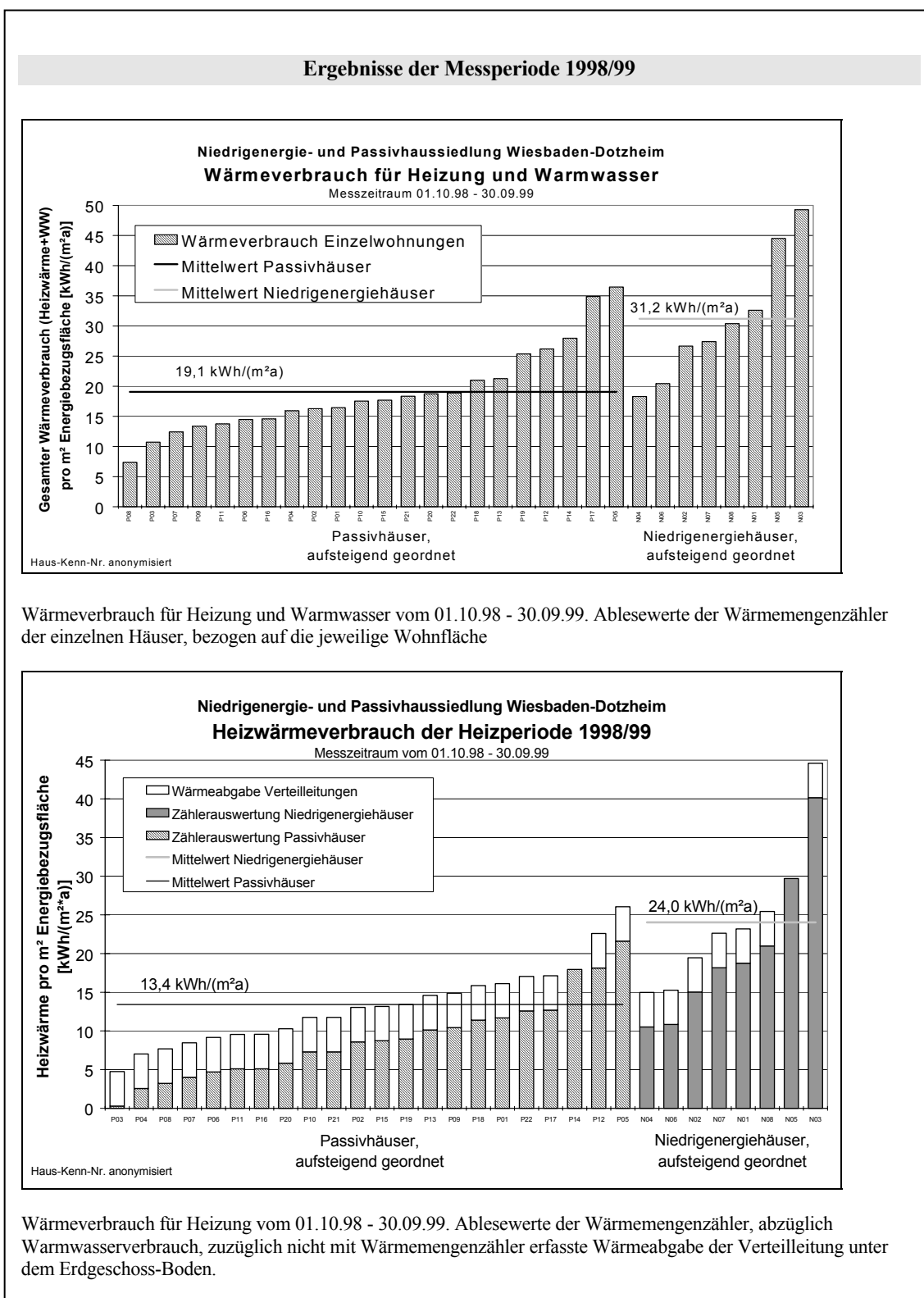
Eine spezielle Nutzerinformation/Nutzerhandbuch für die Häuser gab es nicht. Von dem Haustechnik- Ingenieurbüro InPlan wurde – getrennt für Niedrigenergie- und Passivhäuser – eine kurze Anlagenbeschreibung für Wärmeversorgung, Wasserversorgung und die Lüftungsanlage zusammengestellt und an die Bewohner verteilt. Zusätzlich wurde von dem Ingenieurbüro Ende 1997 für die Passivhäuser eine Einführung vor Ort angeboten. Zu diesem Termin wurde insbesondere die für die Bewohner ungewohnte Lüftungsanlage erklärt, auf den erforderlichen Filterwechsel hingewiesen und die Bedeutung der markierten Einstellungen an der Zu- und Abluft erklärt.

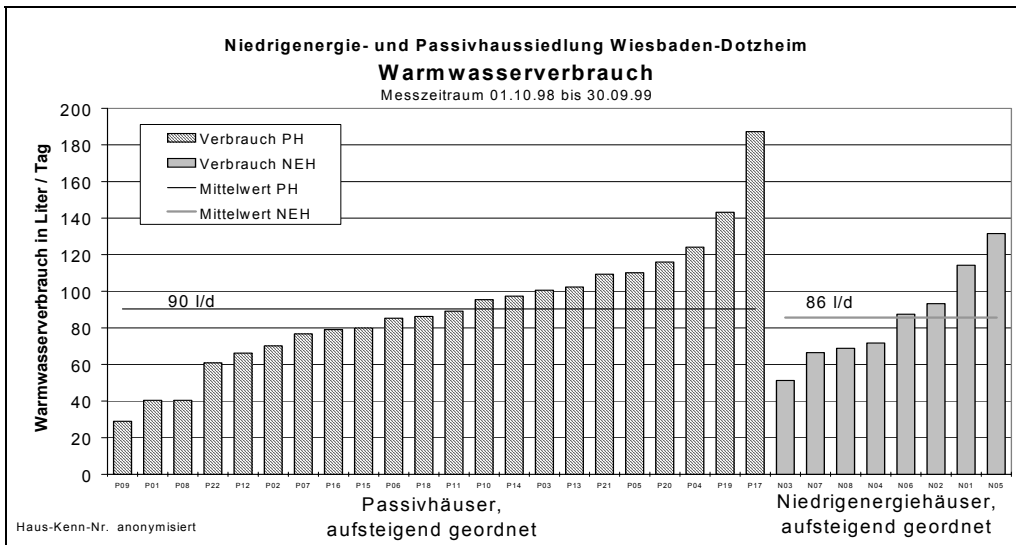
Die Bewohner der Häuser, in denen die Messungen durchgeführt werden (Reihe B und C), wurden im April 2000 über die Messergebnisse des ersten Messjahres 1998/99 informiert. Sie erhielten Balkendiagramme zu den Größen Wärmeverbrauch, Heizwärmeverbrauch, Warmwasserverbrauch, Haushaltsstromverbrauch und mittlere Raumlufttemperaturen, auf denen die entsprechenden (anonymisierten) Verbräuche bzw. Werte der einzelnen Häuser dargestellt und die Werte des jeweils angeschriebenen Haushalts markiert wurden. So konnte jeder Haushalt seinen Verbrauch ablesen und sich im Verhältnis zu seinen Nachbarn einordnen. Einen Monat später bot das Institut Wohnen und Umwelt eine Veranstaltung vor Ort an, in der diese Messergebnisse erläutert und die geplanten Interviews sowie die Erweiterung des Messprogramms (Messung der Fensteröffnungszeiten) vorgestellt wurden. Auf dieser Veranstaltung waren Bewohner von 22 Haushalten anwesend.

Sowohl hier als auch im Verlauf der ersten Interviewserie zwischen Ende Mai und Mitte Juni fragten die Bewohner nach Informationen über das richtige Lüften im Sommer, um die Häuser kühl zu halten, sowie das richtige Heizen im Winter. Auch bestand Bedarf nach Hinweisen zu den Abständen beim Wechsel der diversen Filter der Lüftungsanlage und zum Reinigungsbedarf ihrer Komponenten.

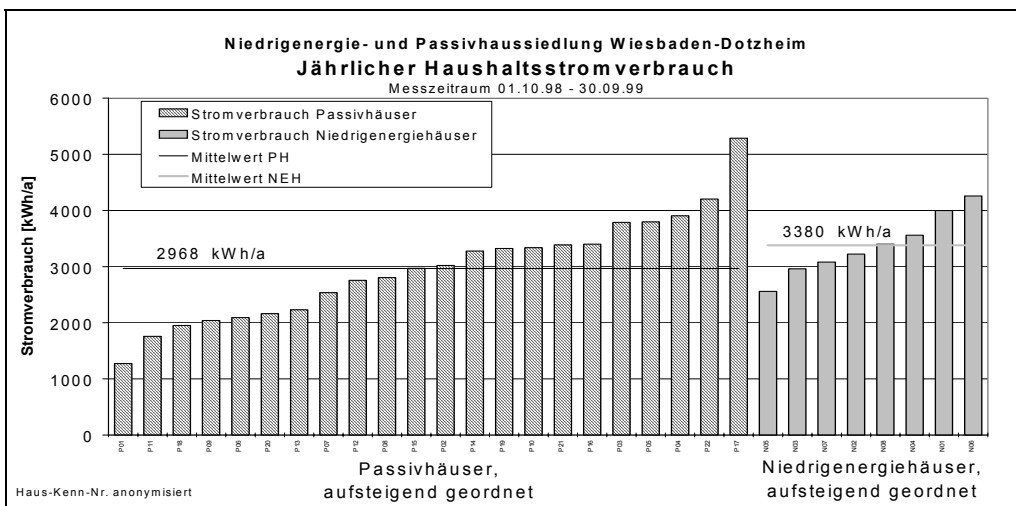
Anfang Juli 2000 erhielten die Haushalte vom Institut deshalb schriftliche Hinweise zu Verschattung und Lüftung im Sommer. Ein Informationsblatt zum Heizen wurde zur Heizperiode 2001/2002 versendet.

Abbildung 6.1.2-1: Rückmeldung vom April 2000

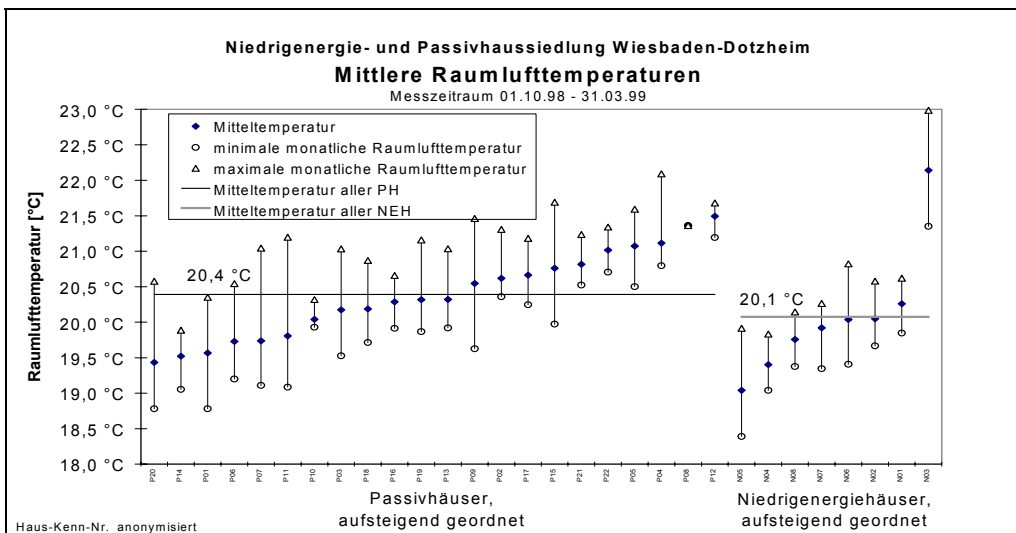




Gemessene Warmwasserverbräuche vom 01.10.98 - 30.09.99

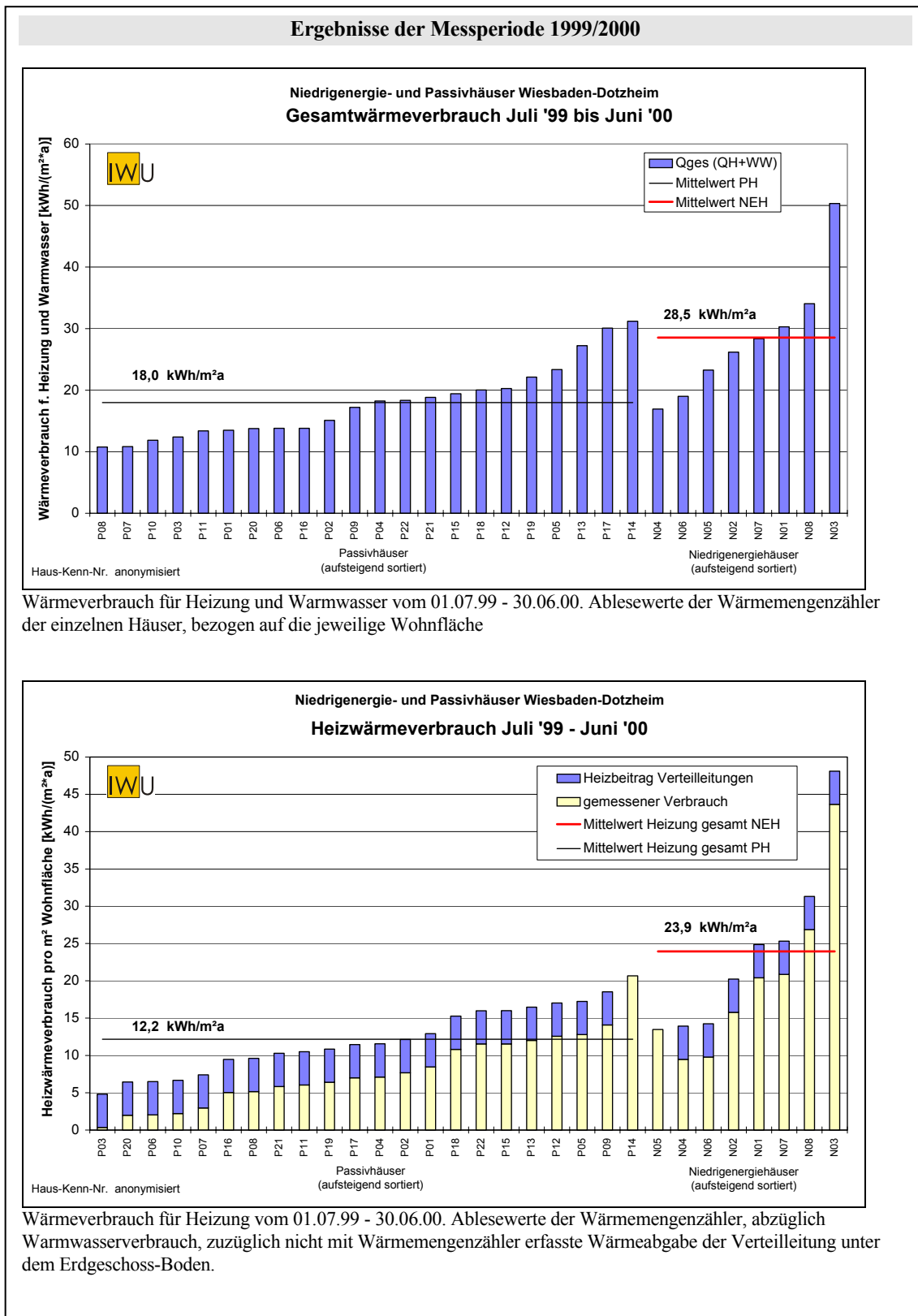


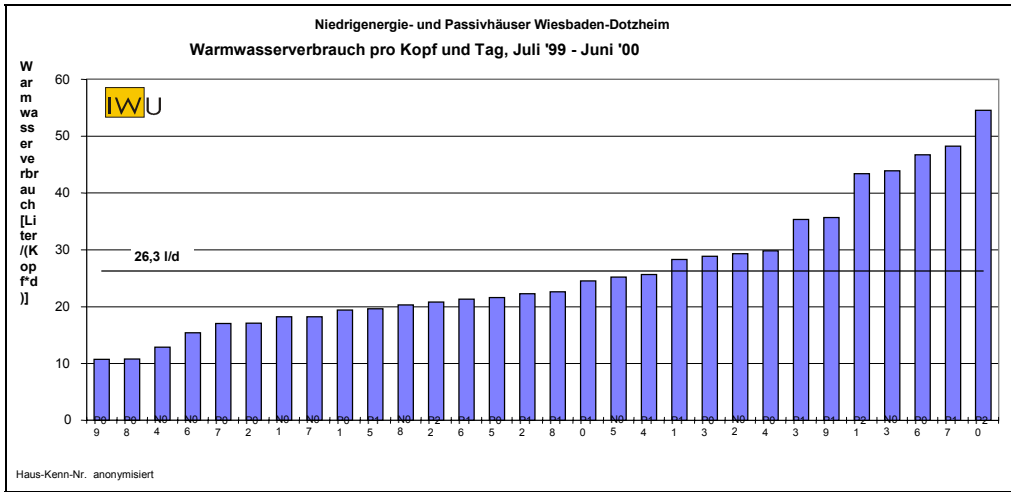
Haushaltsstromverbrauch vom 01.10.98 - 30.09.99



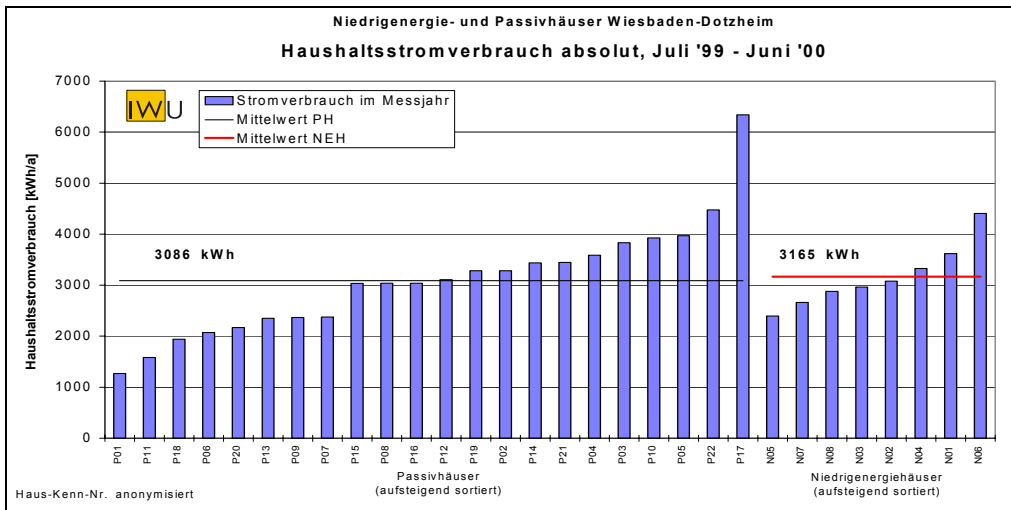
Mittlere monatliche Gebäudetemperaturen in der Heizperiode vom 01.10.98 - 31.03.99 sowie die minimale und maximale monatliche Gebäudetemperatur in diesem Zeitraum

Abbildung 6.1.2-2: Rückmeldung vom März 2001

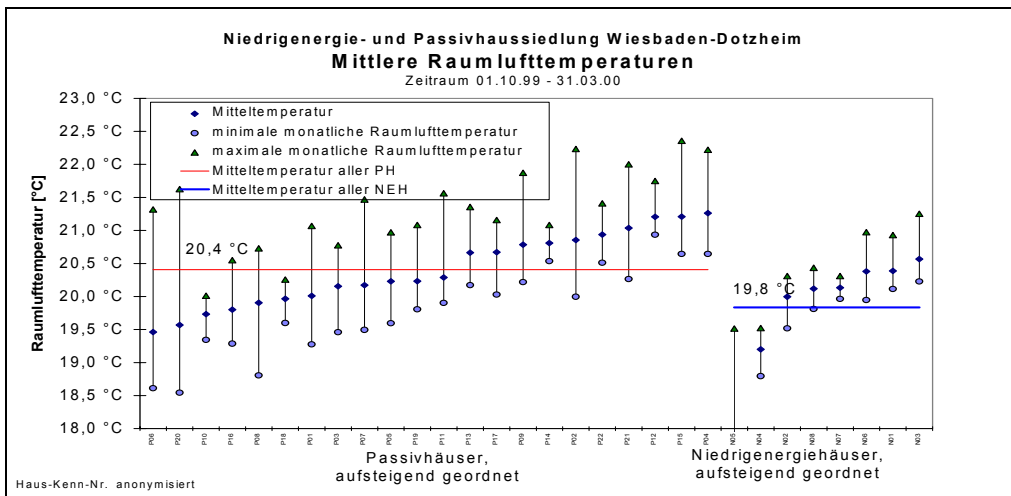




Gemessene Warmwasserverbräuche vom 01.07.99 - 30.06.00



Haushaltsstromverbrauch vom 01.07.99 - 30.06.00



Mittlere monatliche Gebäudetemperaturen in der Heizperiode vom 01.10.99 - 31.03.00 sowie die minimale und maximale monatliche Gebäudetemperatur in diesem Zeitraum

Heizen im Passivhaus / Niedrigenergiehaus

Regulierung der Heizung

Mit dem **zentralen Heizungsregler** (Raumthermostat mit Zeitschaltuhr) am Treppenaufgang schalten Sie die Wärmezufuhr für Ihr Haus an oder ab. Liegt die Temperatur am Ort des Heizungsreglers unterhalb der eingestellten Soll-Temperatur, wird die Wärmezufuhr eingeschaltet. Der zentrale Heizungsregler ist für das Einstellen von Zeiten der Absenkung zuständig, während die gewünschten Raumtemperaturen durch die Stellung der Thermostatventile bestimmt werden sollen. Deshalb sollte die am zentralen Heizungsregler eingestellte Temperatur über der gewünschten Raumtemperatur liegen (z.B. 22 zu 20 °C).

Unter der Voraussetzung, dass die Wärmezufuhr über den zentralen Heizungsregler eingeschaltet ist, bestimmen die **Thermostatventile** die Wärmeabgabe des einzelnen Heizkörpers. Der Einstellwert 3 entspricht einer Raumtemperatur von ca. 20°C. Häufig ist nur eine geringe Zuheizung durch die Heizkörper erforderlich. Diese müssen daher nicht vollflächig warm werden, um den Raum zu beheizen.

Höhe der Raumtemperatur

Da einem Passivhaus / Niedrigenergiehaus normalerweise wenig Heizenergie zugeführt werden muss, sind die Heizkörper entsprechend klein ausgelegt. Deshalb können Sie die Raumtemperaturen nicht in kurzer Zeit um mehrere Grade erhöhen. Wenn Sie in der Lage sein wollen, spontan eine bestimmte Höhe der Raumtemperatur zu erreichen, sollte die üblicherweise in den Räumen herrschende Temperatur nicht mehr als zwei Grad darunter liegen.

Die Höhe der üblich herrschenden Raumtemperatur hat zwar etwas Einfluss auf Ihren Heizenergieverbrauch, doch ist dieser Einspareffekt im Verhältnis zu „normalen“ Häusern gering. Würde z.B. in allen Wohnungen Ihrer Reihenhausreihe die Durchschnittstemperatur um ein Grad gesenkt, so hätte dies rechnerisch bei durchschnittlicher Lüftung in einem Passivhaus eine Einsparung von ca. 2 kWh / m²a, in einem Niedrigenergiehaus von 3 – 4 kWh / m²a zur Folge. Die Absenkung der Raumtemperaturen in nur einem Haus hat einen noch geringeren Effekt, da ein kühleres Haus durch seine wärmeren Nachbarhäuser mitgeheizt wird.

Absenken der Raumtemperatur

Da ein Passivhaus / Niedrigenergiehaus aufgrund der guten Wärmedämmung seine Wärme nur langsam an die Außenluft abgibt, hat **das stundenweise Absenken** der Temperatur (niedrigere Soll-Temperatur am Zentralen Heizungsregler, Abdrehen der Thermostatventile) fast keinen Effekt.

Steht das Haus **tageweise oder länger** leer, während die Raumtemperatur stark abgesenkt oder die Heizung ganz ausgeschaltet wird, kühlt auch ein Passivhaus / Niedrigenergiehaus stärker aus und das Aufheizen der kühler gewordenen Wände benötigt aufgrund der beschränkten Heizleistung der Heizkörper Zeit. Deshalb müssen Sie bei niedriger Absenkttemperatur damit rechnen, dass es einen halben Tag oder länger dauern kann, bis Sie die üblichen Raumtemperaturen wieder erreicht haben.

Lüften im Passivhaus

Lüften im Winter

Die Zu- und Abluftanlage ist für eine Nutzung des Gebäudes mit 4-5 Personen ausgelegt und sollte Sie ausreichend mit Frischluft versorgen. In Zeiten eines erhöhten Frischluftbedarfs kann dieser über die Maximalstellung der Lüftungsanlage abgedeckt werden.

Eine gelegentliche zusätzliche Stoßlüftung über kurze Zeit erhöht aber den Energieverbrauch nicht maßgeblich. Dies gilt im Prinzip auch für ein vorübergehend gekipptes Fenster.

Am Steuerungskasten der Lüftungsanlage sollten im Winter Zuluft und Abluft immer auf jeweils denselben Betriebszustand – Minimal, Normal oder Maximal – eingestellt werden.

Lüften im Sommer

Wenn die Außentemperatur die Raumtemperatur übersteigt, bringt jede Lüftung mehr Wärme ins Haus. Sie halten deshalb Ihr Haus am kühlfsten, wenn Sie tagsüber die Fenster geschlossen lassen und die Lüftungsanlage ganz abschalten. Dadurch sparen Sie den Strom für die Lüftungsanlage.

Wenn Sie zur Verbesserung der Luftqualität (insbesondere im Bad) den Abluftteil der Lüftungsanlage betreiben, können Sie die Zuluft dabei ganz herunter drehen und somit 50 % des Betriebsstroms sparen.

Nachdem abends die Außentemperatur unter die Raumtemperatur abgesunken ist, sollten Sie soviel Fensterlüftung wie möglich zulassen. Am meisten bringen die frühen Morgenstunden.

Die Lüftungsanlage bringt bei offenen Fenstern kaum einen zusätzlichen Luftaustausch, so dass sie dann auch ganz abgeschaltet werden kann.

Lüften im Niedrigenergiehaus

Lüften im Niedrigenergiehaus im Winter

Die Abluftanlage ist für eine Nutzung des Gebäudes mit 4-5 Personen ausgelegt und sollte Sie ausreichend mit Frischluft versorgen.

Eine gelegentliche zusätzliche Stoßlüftung über kurze Zeit erhöht aber den Energieverbrauch nicht maßgeblich. Dies gilt im Prinzip auch für ein vorübergehend gekipptes Fenster, das wie ein vergrößertes Zuluftventil wirkt. Andere Räume erhalten dann deutlich weniger Frischluft.

Lüften im Niedrigenergiehaus im Sommer

Wenn die Außentemperatur die Raumtemperatur übersteigt, bringt jede Lüftung mehr Wärme ins Haus. Sie halten deshalb Ihr Haus am kühlfsten, wenn Sie tagsüber die Fenster geschlossen lassen und die Lüftungsanlage ganz abschalten. Dazu müssen Sie den Schalter der Lüftungsanlage im Sicherungskasten betätigen. Sie sparen dadurch den Strom für die Abluftanlage.

Sollte in diesem Fall der Luftaustausch – insbesondere im Bad - nicht ausreichen, müssen Sie auch im Sommer die Abluftanlage betreiben.

Nachdem abends die Außentemperatur unter die Raumtemperatur abgesunken ist, sollten Sie soviel Fensterlüftung wie möglich zulassen. Am meisten bringen die frühen Morgenstunden.

Die Lüftungsanlage bringt bei offenen Fenstern kaum einen zusätzlichen Luftaustausch, so dass sie dann auch ganz abgeschaltet werden kann.

Wartung der Lüftungsanlage im Passivhaus

Die Wartung der Lüftungsanlage beschränkt sich auf die halbjährliche Reinigung des Filters im Küchenabluftelement und den jährlichen Wechsel des Frischluft- und des Abluftfilters.

Bei dem **Küchen-Abluftelement** sollte etwa halbjährlich der Schmutzfilter (Metallgewebe) herausgenommen und mit Wasser und Spülmittel (Spülmaschine) gereinigt werden. Dazu muss die Blende des Abluftelements aufgeklappt werden.

Folgende zwei Filter sollten zur Vermeidung von Schmutzablagerungen etwa jährlich gewechselt werden:

- **Frischlufffilter** (nordseitig außen unter dem Steg am Hauseingang)
Nach Lösen der beiden oberen und unteren Halteklammern kann der Deckel nach vorne abgenommen und der Filter aus dem Dichtband herausgezogen werden. Die Kammern des neuen Taschenfilters sind vor dem Einschieben aufzufalten, ein evtl. vorhandener Kunststoff-Steg sollte entfernt werden; die Taschen sollten senkrecht stehen. Beim Einschieben des Filters ist auf dichten Sitz am Dichtband sowie bündigen Abschluss vorne zu achten, damit der Deckel wieder dichtschießend angesetzt werden kann.
- **Abluftfilter** im Abstellraum (unter der Decke an der Wand zum WC)
In den Mittelhäusern befindet sich der Filter in der linken Gehäusehälfte des Lufterhitzers; nach Lösen der 4 Kreuzschlitzschrauben kann der Deckel ab- und der Filter herausgenommen werden. In den Endhäusern befindet sich der Filter in dem Gehäuse; der Deckel kann nach dem Öffnen der Schnappverschlüsse abgenommen werden.



Filterkasten Frischluft



Lufterhitzer mit Filter bei Mittelhaus



Filterkasten bei Endhaus

Der Zuluft-Filter sollte der Filterklasse F7, der Abluft-Filter der Filterklasse G4 entsprechen. Beide Filter sind (Filter G4 als Rollenware) bei der Firma HTH in Frankfurt erhältlich.

Die Einstellung der **Zuluft- und Abluftelemente** sollte nicht verändert werden, da die Wirksamkeit der Anlage nur bei ausgeglichener Zu- und Abluftmenge gegeben ist.

Eine Wartung der Zuluftelemente und des Abluftelements im Bad ist nicht erforderlich. Bei starker Verschmutzung können sie feucht abgewischt werden.

Wartung der Lüftungsanlage im Niedrigenergiehaus

Wartung der Zu- und Abluftelemente

Eine Wartung der Zuluftelemente ist nicht erforderlich. Bei starker Verschmutzung können sie feucht abgewischt werden.

Das **Bad-Abluftelement** sollte etwa halbjährlich gereinigt werden. Nach Abnahme des mittleren Gitters kann der Schmutz abgesaugt oder feucht abgewischt werden. Die Klappe kann nach Herstelleranleitung herausgenommen und gereinigt werden.

Beim **Küchen-Abluftelement** sollte etwa halbjährlich der Schmutzfilter (Metallgewebe) herausgenommen und mit Wasser und Spülmittel (Spülmaschine) gereinigt werden. Dazu müssen die drei Verblendungsteile des Abluftelements abgezogen werden.

Einstellung der Zu- und Abluftelemente

Die Höhe der durch die Lüftungsanlage zugeführten Frischluftmenge können Sie über eine Einstellmöglichkeit an den Zu- und Abluftelementen regeln. Diese Einstellmöglichkeit ist allerdings nicht für ein ständiges Ändern, sondern für die grundsätzliche Anpassung an Ihre Bedürfnisse gedacht.

a) Zuluftelemente (im Fensterrahmen):

Die Stellung „**.**“ führt zu einem geringeren, die Stellung „**+**“ zu einem höheren Luftaustausch (vgl. Herstellerbeschreibung).

b) Abluftelemente (Küche, Bad):

Eine Einstellmöglichkeit für vier Stufen befindet sich unter der kleinen Schutzkappe an der Schmalseite des Elementes. Die Grundstellung ist die Stellung 3. In der Stellung 1 wird im Tagesmittel eine geringere, in der Stellung 4 eine höhere Luftaustauschrate erreicht.

6.2 Raumklima und Komfort

6.2.1 Überblick und Einordnung

Die Bewertung des Wohnens und dabei insbesondere der Behaglichkeit sind von besonderer Bedeutung für die Rückkopplung, die Bewohner von Niedrigenergiehäusern und Passivhäusern geben und damit auch für den möglichen Multiplikatoreffekt.

Die Bewohner wurden bei der 1. Befragung nach ihrer Zufriedenheit befragt, insbesondere in Bezug auf:

- Innenklima im Winter
- Innenklima im Sommer
- Heizsystem
- Handhabung des Heizsystems
- Warmwasserversorgung
- Handhabung der Lüftung
- Wirksamkeit der Lüftung (Gerüche)
- Das Haus insgesamt.

Alle Zufriedenheitsbewertungen erfolgten auf einer Skala von 1 bis 5. Dabei bedeuten

- | | | |
|---|---|-------------------|
| 1 | - | sehr zufrieden |
| 2 | - | zufrieden |
| 3 | - | teils/teils |
| 4 | - | weniger zufrieden |
| 5 | - | unzufrieden |

Bei den drei folgenden Befragungen wurde ebenfalls eine fünfteilige Skala benutzt, jedoch in umgekehrter Reihenfolge. Zu Vergleichszwecken werden die Daten gegebenenfalls umgerechnet.

Da eine Reihe der Fragen mit den Fragen in den früheren Untersuchungen zu Passiv- und Niedrigenergiehäusern [35] und [36] übereinstimmen, wird ein direkter Vergleich möglich. Ergänzt man den Vergleich zwischen den ersten Passivhaus- Wohnungen und den Niedrigenergiehaus-Wohnungen in [38] (vgl. Abschnitt 2.1.2), so liegen die Ergebnisse der Siedlung in Wiesbaden wieder in demselben positiven Bereich. Den Vergleich zwischen

- Passivhaus Darmstadt Kranichstein
- Hessischen Niedrigenergiehäusern
- Passivhäusern in Wiesbaden
- Niedrigenergiehäusern in Wiesbaden

gibt Abbildung 6.2.1-1 wieder. (Zum Zwecke der Vergleichbarkeit wurden die Zahlenwerte 1 - 5 für die Siedlung in Wiesbaden in umgekehrter Reihenfolge zugeordnet).

Vergleicht man die Ergebnisse der Passivhäuser und der Niedrigenergiehäuser in Wiesbaden, so sind die Unterschiede zwischen den Bewertungen der beiden Gruppen in keinem Fall signifikant (bei einem Signifikanzniveau von 5 %).

Tabelle 6.2.1-1: Zufriedenheit: Mittelwerte, Standardabweichung und Median für die Passivhäuser, die Niedrigenergiehäuser und die Gesamtheit in Wiesbaden

Frage	Passivhäuser			Niedrigenergiehäuser			Insgesamt		
	Mittelwert	Standardabweichung	Median	Mittelwert	Standardabweichung	Median	Mittelwert	Standardabweichung	Median
Wie zufrieden sind Sie mit dem Heizsystem?	1.76	0.62	2	1.63	0.52	2	1.72	0.59	2
Wie beurteilen Sie die Handhabbarkeit des Heizsystems in Ihrem Haus?	2.43	0.93	2	2.75	0.71	3	2.52	0.87	2
Zufriedenheit mit Innenklima im Winter?	1.67	0.8	2	1.75	0.71	2	1.69	0.76	2
Zufriedenheit mit Innenklima im Sommer	2.52	1.08	2	3.00	1.07	3	2.66	1.08	3
Zufriedenheit mit Warmwasserversorgung?	2.71	1.15	2	3.13	1.46	3	2.83	1.23	3
Wirksamkeit der Lüftung gegen Gerüche?	2.24	0.83	2	2.88	1.46	2.5	2.41	1.05	2
Beurteilung der Handhabung des Lüftungssystems	1.85	1.14	1.5	2.14	1.07	2	1.93	1.11	2
Zufriedenheit mit dem Haus insgesamt	2.00	1.12	2	1.50	0.53	1.5	1.86	1.01	2

Skala: 1 sehr zufrieden, 2 zufrieden, 3 teils/teils, 4 weniger zufrieden, 5 unzufrieden

Tabelle 6.2.1-2 Häufigkeiten der Zufriedenheit in den Passivhäusern

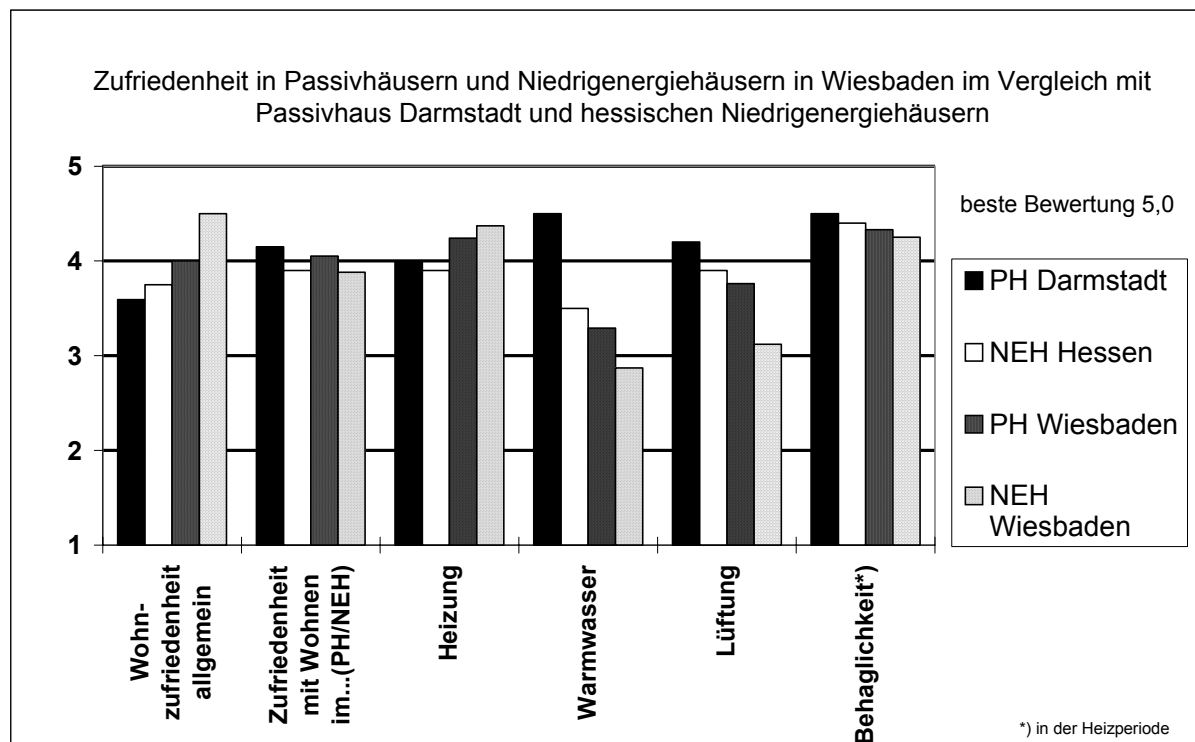
Passivhäuser	Wie zufrieden sind Sie mit Heizsystem?	Wie beurteilen Sie die Handhabbarkeit des Heizsystems in Ihrem Haus?	Zufriedenheit mit Innenklima im Winter?	Zufriedenheit mit Innenklima/Sommer?	Zufriedenheit mit Warmwasser-versorgung?	Wirksamkeit der Lüftung gegen Gerüche?	Beurteilung der Handhabung des Lüftungssystems	Zufriedenheit mit Haus insgesamt?
sehr zufrieden	7	3	10	4	2	3	10	8
eher zufrieden	12	9	9	7	9	12	6	7
teils/teils	2	6	1	5	5	4	2	3
eher unzufrieden		3	1	5	3	2	1	1
sehr unzufrieden					2		1	1
Gesamt	21	21	21	21	21	21	20	20

Tabelle 6.2.1-3: Häufigkeiten der Zufriedenheit in den Niedrigenergiehäusern

Niedrigenergie-häuser	Wie zufrieden sind Sie mit Heizsystem?	Wie beurteilen Sie die Handhabbarkeit des Heizsystems in Ihrem Haus?	Zufriedenheit mit Innenklima im Winter?	Zufriedenheit mit Innenklima/Sommer?	Zufriedenheit mit Warmwasser-versorgung?	Wirksamkeit der Lüftung gegen Gerüche?	Beurteilung der Handhabung des Lüftungssystems	Zufriedenheit mit Haus insgesamt?
sehr zufrieden	3		3	1	1	1	2	4
eher zufrieden	5	3	4	1	2	3	3	4
teils/teils		4	1	3	2	2	1	
eher unzufrieden		1		3	1		1	
sehr unzufrieden					2	2		
Gesamt	8	8	8	8	8	8	7	8

Fast immer sind die Ergebnisse bei den Passivhäusern ein wenig günstiger als bei den Niedrigenergiehäusern. Nur in Bezug auf die allgemeine Wohnzufriedenheit ist es umgekehrt; die Bewohner von Niedrigenergiehäuser sind also nicht kritischer als die der Passivhäuser (vgl. auch Abbildung 6.2.2-1).

Abbildung 6.2.1-1: Zufriedenheit im Vergleich: Passivhaus Darmstadt, hessische Niedrigenergiehäuser, Passivhäuser Wiesbaden und Niedrigenergiehäuser Wiesbaden (Skala von 1 bis 5; beste Bewertung hier einheitlich: 5,0; vgl. auch Abbildung 2.1.2-1)



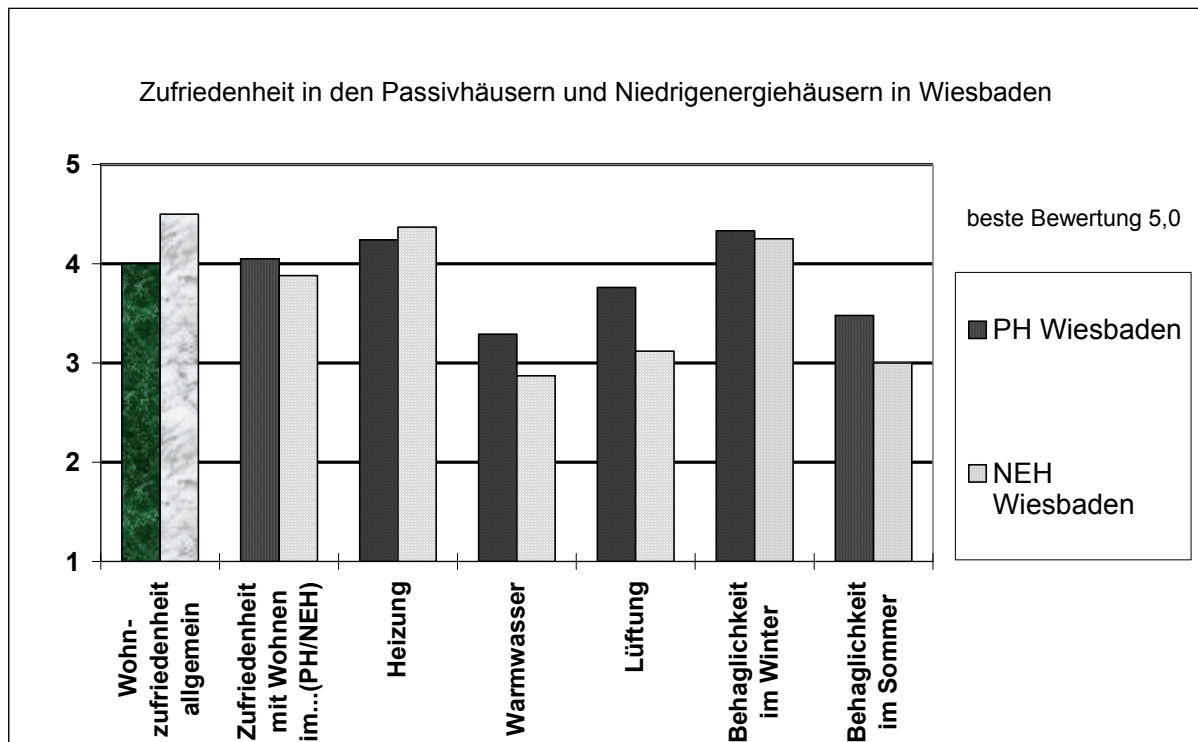
In der Abbildung sind die durchschnittlichen Bewertungen innerhalb der vier Gruppen (Passivhaus Darmstadt, hessische Niedrigenergiehäuser, Passivhäuser in Wiesbaden und Niedrigenergiehäuser in Wiesbaden) gezeigt. Bewertungen wurden dabei auf einer Skala von 1 bis 5 vergeben (hier: 5,0=“sehr zufrieden“).

6.2.2 Temperaturen und Bewertung des Raumklimas

Von zentraler Bedeutung sind vor allem die Antworten zur Zufriedenheit mit dem Raumklima. Mit dem winterlichen Raumklima sind fast alle Bewohner zufrieden bis sehr zufrieden (Mittelwert 1,69 auf einer Skala von 1 bis 5). Die Passivhausbewohner sind etwas zufriedener als die Bewohner der Niedrigenergiehäuser. Die Mittelwerte betragen 1,67 und 1,75. Der Unterschied ist allerdings nicht signifikant auf einem Signifikanzniveau von 5 %.

Die Zufriedenheit mit dem winterlichen Raumklima korreliert weder signifikant mit Raumtemperaturen noch mit anderen Zufriedenheitskriterien (auch nicht mit der Zufriedenheit mit dem Heizsystem); dies gilt sowohl für die Gesamtstichprobe als auch für die Passivhäuser allein.

Abbildung 6.2.2-1: Behaglichkeit im Winter und im Sommer: Passivhäuser und Niedrigenergiehäuser in Wiesbaden (Skala von 1 bis 5; beste Bewertung hier einheitlich: 5,0)

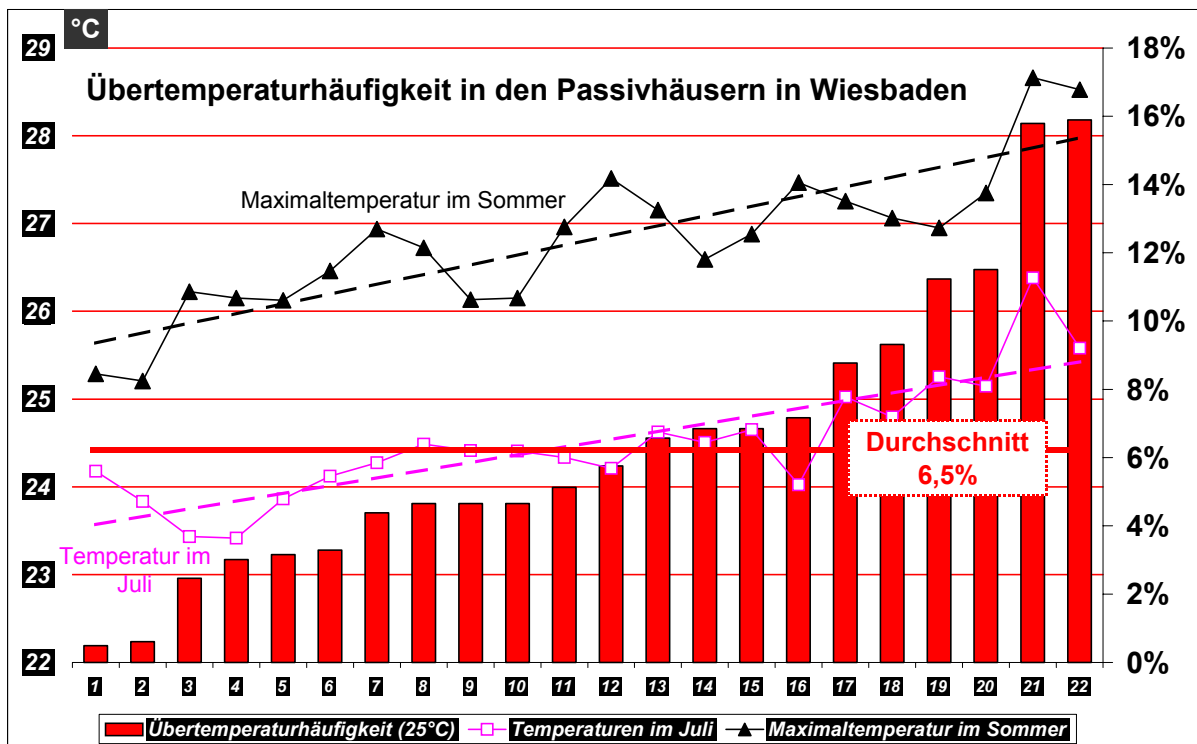


Die Bewertung der Innenraumtemperatur korreliert nicht signifikant mit der tatsächlich gemessenen Raumlufthtemperatur. Bei der ersten Befragung scheint sich noch ein (bei 5% Signifikanzniveau nicht signifikanter) Zusammenhang zu ergeben, der aber bei der 2. Befragung nicht reproduziert werden konnte (Abbildung 6.2.2-2). Die Bewertung in den Passivhäusern ist damit nicht abhängig von der tatsächlich gemessenen Raumlufthtemperatur. Auffällig ist ferner, dass Temperatur im Winter und Temperatur im Sommer stark korrelieren. Dies spricht dafür, dass die jeweiligen Toleranzbereiche der Bewohner gegeneinander verschoben sind. Wer höhere Temperaturen wünscht, stellt sie sich im Winter ein und lässt sie im Sommer zu; wer im Winter auf einem niedrigeren Temperaturniveau fährt, möchte es auch im Sommer kühler haben.

Mit einer mittleren Bewertung (Durchschnitt 2,66 auf einer Skala von 1 bis 5) ist das Sommerklima gut bis zufriedenstellend, aber nicht ganz so gut bewertet wie das Winterklima. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Verschattungseinrichtungen vom Bauträger nicht vorgesehen waren und bei Bedarf von den Erwerbern selbst nachgerüstet wurden. Dies geschah nur teilweise und im Hinblick auf den Sonnenschutz auch nicht optimal. Außerdem sind die Personenbelegungen relativ hoch, und der Stromverbrauch ist höher als projiziert, so dass die inneren Wärmelasten im Sommer vergleichsweise hoch sind (vgl. Kap. 7).

Eine angenehme Temperatur kann in der Regel im Sommer ohne aktive Kühlung nur mit etwas größerem Aufwand eingestellt werden; die Voraussetzungen sind dafür in Passivhäusern eher günstiger als in Häusern im Bestand. Das Vorhandensein von Verschattungseinrichtungen hat nach den vorliegenden Befragungsergebnissen wenig Einfluss auf die Zufriedenheit mit dem sommerlichen Innenklima. Nahe liegend ist es anzunehmen, dass Verschattungseinrichtungen von denjenigen angebracht werden, die auch niedrigere Temperaturen bevorzugen. Dafür spricht auch, dass die tatsächlich gemessene Sommertemperatur praktisch nicht korreliert mit der Zufriedenheit im Sommer (vgl. Abbildung 6.2.2-5).

Abbildung 6.2.2-4: Gemessene Übertemperaturhäufigkeiten, Sommertemperaturen und Maximaltemperaturen im Jahr 2001.



Ein Maß für die Behaglichkeit im Sommer ist die Übertemperaturhäufigkeit, d.h. der Anteil der Zeit, während der Innentemperaturen über 25°C auftreten [106]. Als noch komfortabel gilt ein Zeitanteil von maximal 10%. Abbildung 6.2.2-4 zeigt die im Jahr 2001 bei den Passivhäusern gemessenen Übertemperaturhäufigkeiten: Demnach wird der Grenzwert von 10% nur in wenigen Wohnungen überschritten; die überwiegende Mehrzahl der Bewohner zeigt, dass zu hohe Innenraumtemperaturen vermeidbar sind. Es treten im Durchschnitt über alle Passivhäuser Übertemperaturen in 6,5% der Zeit auf (zum Vergleich: Niedrigenergiehäuser 7,5%). Geht man in Übereinstimmung mit den Messergebnissen der Tracergasmessungen (Kap 5.1) sowie der Fensteröffnungsdauern im Sommer (Kap. 4.2.9) davon aus, dass der durchschnittlich erreichte Luftwechsel zwischen 0,8 und 1,0 1/h in den Passivhäusern liegt, so passt dieses Ergebnis sehr gut zur Projektierung des Sommerfalls mit dem Verfahren PHIS [106]. Wie Tabelle 6.2.2-1 zeigt, ergibt sich mit diesem Verfahren bei einem Luftwechsel von

0,9 1/h sowie einer temporären Verschattung von 5% (bezogen auf das Sommerhalbjahr) eine Übertemperaturhäufigkeit von 6,8%.

Tabelle 6.2.2-1: Projektierung des Sommerfalls für ein Passiv-Reihenhaus in Wiesbaden

Passivhaus-Projektierung S O M M E R F A L L

Klima: **Wiesbaden 2001**
 Objekt: **Passivhaus Reihenmittelhaus**
 Standort: **Wiesbaden**

Innentemperatur: **20** °C
 Gebäudetyp/Nutzung: _____
 Energiebezugsfläche A_{EB}: **1.07,8** m²
 Standard-Personenbelegung: **4** Pers

spez. Kapazität: **204** Wh/K pro m² WFL
 Übertemperaturgrenze: **25** °C

Bauteile	Temperaturzone	Fläche m ²	U-Wert W/(m ² K)	Reduktionsfaktor f _{R,Sommer}	H _{Sommer} Wärmeleitwert
1. Fassade	A	53	0.13	0.92	6.3
2. Perimeter	A	12	0.15	0.92	1.7
3. Dach	D	66	0.10	0.82	4.0
4. Boden	B	65	0.13	1.00	8.4
5. Giebel	A	0	0.11	0.92	0.0
6.		0	1.77	1.00	0.0
7.				1.00	
8. Fenster	A	23	0.89	1.00	20.3
9. Wbrücken außen (Länge/m)	A	61	-0.03	0.92	-1.7
10. Wbrücken Boden (Länge/m)	B	1	0.92	1.00	0.9

Transmissionsleitwert außen H_{T,e} **30.7** W/K
Transmissionsleitwert Erdreich H_{T,g} **9.3** W/K

Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmeübertragers: **80%** wirksames Luftvolumen V_L: **108** m³ A_{EB}: **1.078** m² lichte Raumhöhe: **2.50** m = **270** m³

ankreuzen: freie Lüftung (Fenster+Fugen): Sommerlüftung Luftwechsel: **1/h** **0.90**
 nur mechan. Abluft: **0.00** 1/h
 Zu- und Abluft wie Winterbetrieb mit WRG
 Zu-/Abl. ohne WRG: **0.00** 1/h

energetisch wirksamer Luftwechsel n_L: **0.900** + **0.000** * (1 - **0.000**) + **0.000**

Lüftungsleitwert außen H_{V,e} **80.0** W/K
Lüftungsleitwert Erdreich H_{V,g} **0.0** W/K

Ausrichtung der Fläche	Winkel-faktor Sommer	Versch.-faktor Sommer	Rück-reflektion	g-Wert (senkr. Einstr.)	Fläche m ²	Verglasungsanteil	Apertur m ²
1. Ost	0.84	1.00	0.95	0.000	0.0	0%	0.0
2. Süd	0.84	0.66	0.95	0.600	16.2	56%	2.9
3. West	0.84	1.00	0.95	0.000	0.0	0%	0.0
4. Nord	0.84	0.78	0.95	0.600	6.7	58%	1.4
5. Horizontal	0.84	1.00	0.95	0.000	0.0	0%	0.0

Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S Summe **4.4** m²/m² **0.04** W/m²

spezif. Leistung q_i: **2.10** W/m² AEB: **108** m² = **226** W **2.1** W/m²

Innere Wärmequellen Q_i

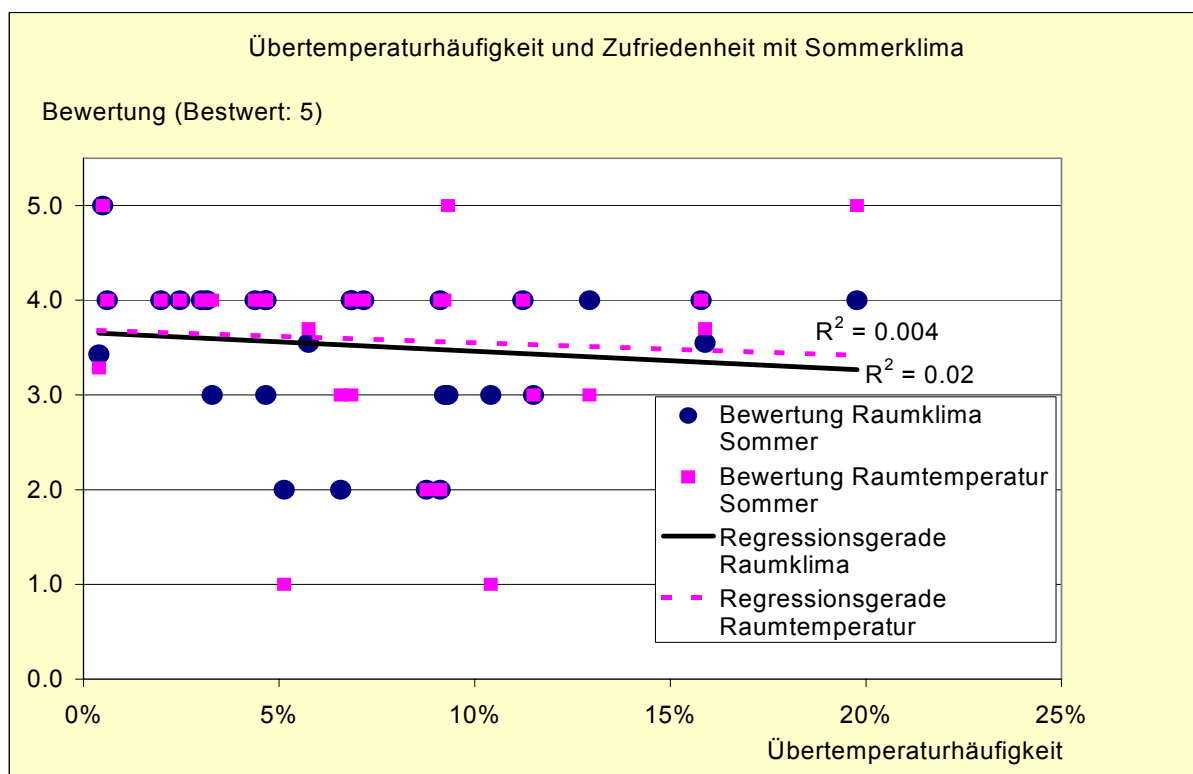
Übertemperaturhäufigkeit h_J ° J_{max} **6.8%** bei der Übertemperaturgrenze $\vartheta_{max} = 25$ °C

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

- PHPP 2002 Blatt Sommer -

In Abbildung 6.2.2-5 ist die Korrelation zwischen Übertemperaturhäufigkeit und den Bewertungen des sommerlichen Raumklimas sowie der sommerlichen Innentemperaturen dargestellt: Einen Zusammenhang gibt es in beiden Fällen nicht. Wer höhere Temperaturen als angenehm empfindet oder zu tolerieren bereit ist, wird auch weniger unternehmen, sie zu vermeiden.

Abbildung 6.2.2-5: Übertemperaturhäufigkeit und Bewertung des Sommerklimas



Das Innenklima wurde auf einer Skala von 1-5 bewertet; beste Bewertung: 5

Einflussgrößen auf Sommerklima

Eine der wichtigsten Einflussgrößen auf die Sommertemperatur ist der Luftwechsel im Sommer [107]. Die Antriebskräfte im Sommer sind nur gering. Wie die Tracergasmessungen (Abschnitt 5.1) zeigten, wird durch die Fenster im Sommer in der Regel weniger Luft ausgetauscht als im Winter. Ein nennenswerter Kühleffekt wird daher am besten durch sehr ausgiebiges Fensteröffnen erreicht, was von der Mehrheit der Haushalte auch praktiziert wird. Abbildung 6.2.2-6 zeigt die Auswirkung der Fensteröffnung auf die Sommertemperaturen (Übertemperaturen). Der Zusammenhang ist hochsignifikant. Andere Einflussgrößen wie Verschattung sowie Determinanten für innere Wärmequellen (Personen, Anwesenheit, Stromverbrauch) können dagegen zu einer Erklärung der beobachteten Sommertemperaturen nicht mehr beitragen. Die (physikalisch) wirksamste Größe ist mit den Fensteröffnungen bereits erfasst.

Zu berücksichtigen ist dabei allerdings, dass die z.T. nachgerüsteten Verschattungseinrichtungen wohl eher nur begrenzt wirksam sind. Normalerweise können Vorhandensein und Nutzung von Verschattungselementen einen höheren Einfluss haben. Speziell in Wiesbaden benutzen offenbar diejenigen Bewohner Verschattungseinrichtungen, die auch bereits über Fensterlüftung kühlen, so dass ein zusätzlicher Einfluss der Verschattung nicht beobachtbar ist.

Als ein weiterer bedeutender Einflussfaktor erweist sich jedoch die Raumlufttemperatur in der Heizperiode (Abbildung 6.2.2-7): Je höher diese ist, desto höher ist sie auch im Sommer. Dies

spricht erneut dafür, dass es vor allem die Bewohner selbst sind, die über ihre Sommer-
temperatur entscheiden und sie auch weitgehend einstellen können.

Abbildung 6.2.2-6: Fensteröffnungsdauer im Sommer 2001 und Übertemperaturhäufigkeit

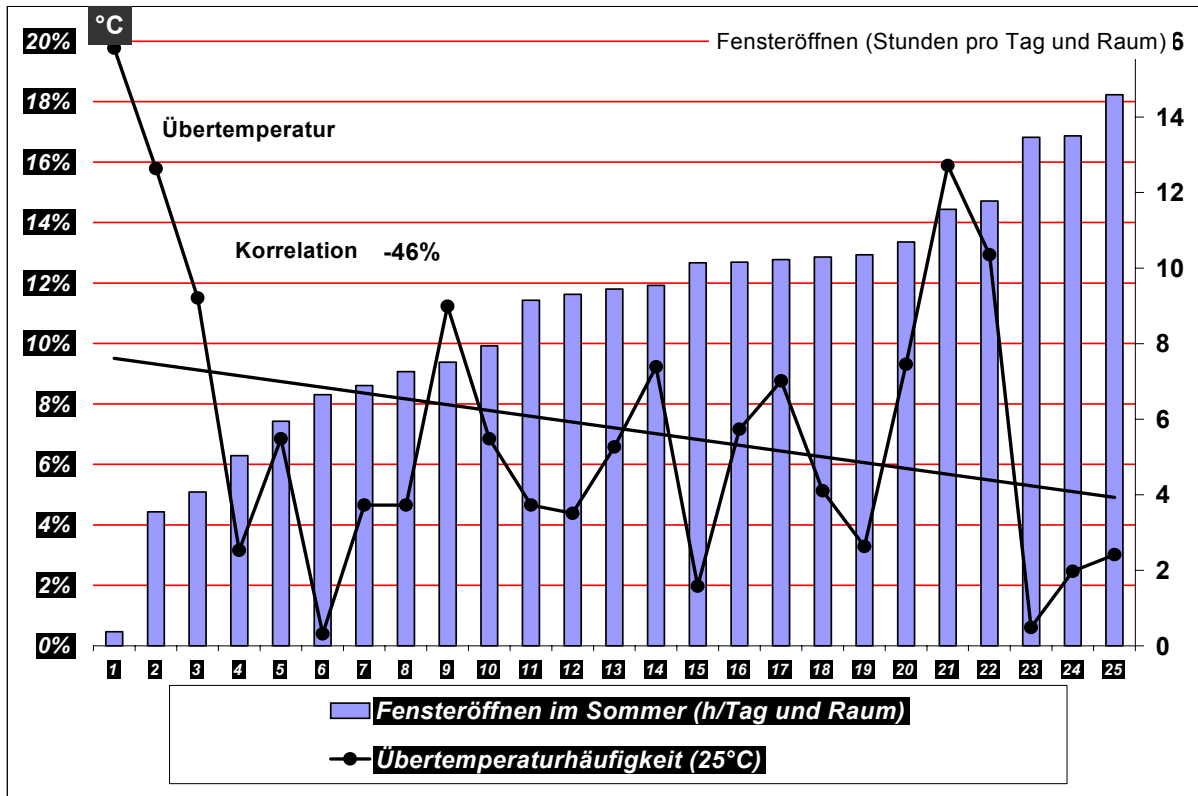
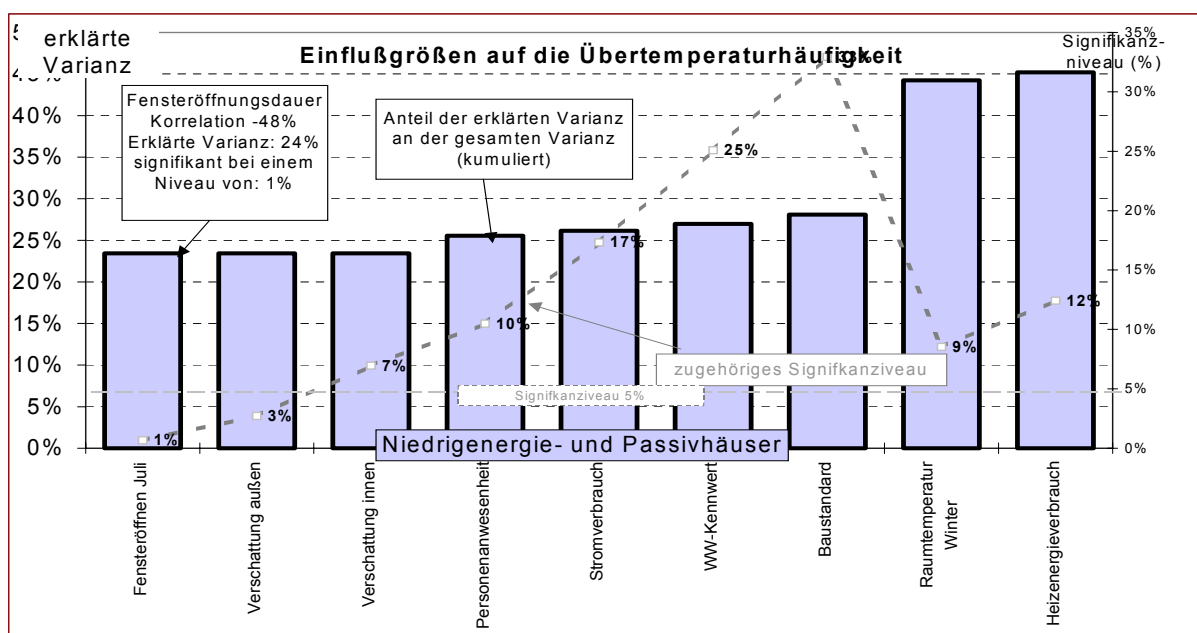


Abbildung 6.2.2-7: Einflussgrößen auf die Übertemperaturhäufigkeit



6.2.3 Luftfeuchtigkeit

Bei fast allen Bewertungsfragen ergibt sich ein überwiegend positives bis sehr positives Bild. Auffällig ist eine davon abweichende Bewertung der Luftfeuchtigkeit. Sowohl in den Passiv- als auch in den Niedrigenergiehäusern in Wiesbaden wurde mehrfach angegeben, dass die Luft zu trocken sei. Der Mittelwert liegt auf einer Skala von 5 (deutlich zu feucht (1) – etwas feucht (2) – genau richtig (3) – etwas zu trocken (4) – deutlich zu trocken (5))

bei 3.89, also bei „etwas zu trocken“. Dieses Ergebnis ist signifikant von „genau richtig“ verschieden. Dies ist insofern bemerkenswert, da der Mensch nicht über ein Organ verfügt, mit dem er die Luftfeuchtigkeit direkt beurteilen kann – er ist auf indirekte Hinweise angewiesen.

Tabelle 6.2.3-1: Empfundene Luftfeuchtigkeit: Häufigkeiten der Befragungsergebnisse

Anzahl der Aussagen	Passivhäuser	Niedrigenergiehäuser
etwas feucht	0	1
genau richtig	4	3
etwas trocken	12	2
deutlich zu trocken	5	1

Der Unterschied zwischen Passivhäusern (Mittelwert 4,05) und Niedrigenergiehäusern (Mittelwert 3,43) ist dabei nicht signifikant bei einem 2-seitigen Test (Signifikanzniveau von 5 %). Dies ist verwunderlich, da bei den Passivhäusern der projizierte Luftwechsel mit 0,5/h noch relativ hoch ist, während die feuchteabhängigen Zuluftöffnungen bei den Abluftanlagen der Niedrigenergiehäuser den Luftwechsel offenbar stark verringern und daher – aufgrund der stets vorhandenen inneren Feuchtequellen - eher zu größeren Luftfeuchtigkeiten führen sollten. Zur Einordnung der Aussagen wurden die Bewohner gebeten, zusätzlich auch die Gründe für ihre Bewertung zu nennen (vgl. Tabelle 6.2.3-2). Unabhängig vom Haustyp gaben die Bewohner, die die Luft für zu trocken hielten, vor allem trockene Schleimhäute und rasche Verdunstung an. Daher sollten sich diese Eindrücke anhand von Messergebnissen verifizieren lassen.

Einzelmessungen, die versuchsweise in einem der Häuser durchgeführt wurden, in denen die Luft als „deutlich zu trocken“ bezeichnet wurde, zeigten jedoch, dass die Luftfeuchtigkeit in der Übergangszeit (Oktober) bei 50 – 60 % lag und im Kernwinter (Ende Dezember und Januar) überwiegend zwischen 40 und 50 % (Abbildung 6.2.3-1). 30 % relative Luftfeuchtigkeit wurden nicht unterschritten; lediglich an zwei extrem kalten Tagen im Januar (16. und 17.1.01) lag die Luftfeuchtigkeit knapp unter 35 %. Man muss daher davon ausgehen, dass eine Reihe von Bewohnern auch Luftfeuchtigkeiten zwischen 30 und 40 %, z.T. sogar zwischen 40 und 50% bereits als trocken empfindet – im Gegensatz zu gängigen Richtlinien. Bei der Dimensionierung der Lüftungsanlage ist diesem Umstand Rechnung zu tragen, indem zu hohe Luftwechsel vermieden werden. Die in Wiesbaden projizierten Luftwechselraten bewegen sich eher an der Obergrenze der Empfehlungen für Passivhäuser ([108], vgl. auch Abschnitt 6.3.1).

Tabelle 6.2.3-2: Empfundene Luftfeuchtigkeit und darauf bezogene Aussagen der Bewohner

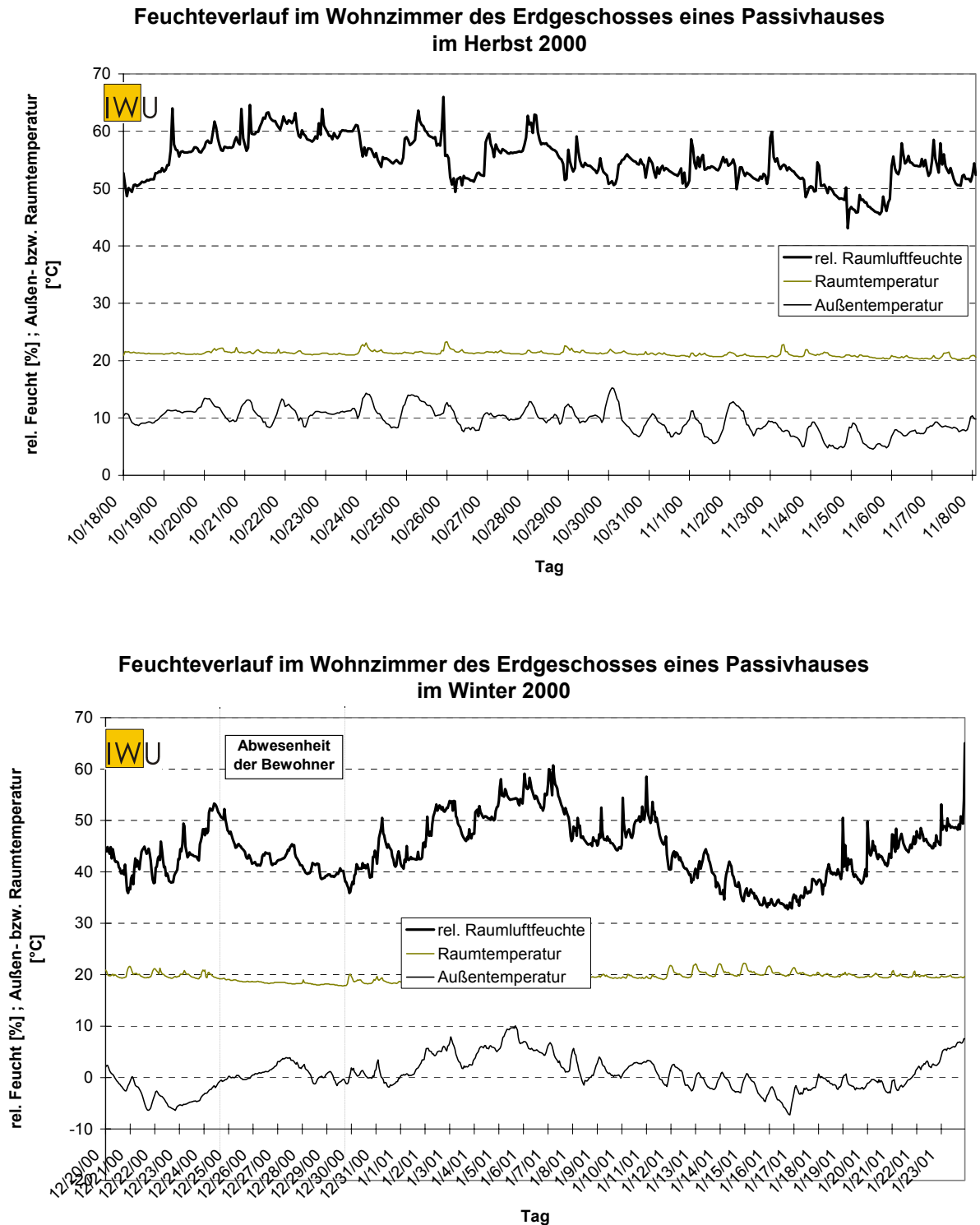
a) Niedrigenergiehäuser

Niedrigenergiehäuser		körperlich spürbar (Schleimhäute, Kontaktlinsen, Durst)	körperliche Beeinträchtigungen (krank, Husten, bei Heuschnupfen)	Verdunstung /Trockenheit beobachtbar (Wäsche, Pflanzen, Aquarium)	körperlich positiv (Allergikern geht es besser)	Pflanzen geht es gut
Empfindung der Luftfeuchtigkeit?	genau richtig					
	etwas trocken	2		1		
	deutlich zu trocken	1				
Treten Probleme in bestimmten Situationen/Zeiträumen auf?	nein					
	ja	3		1		
Wann treten/traten Probleme auf?	Sommer (Hitze)					
	Winter(Kälte)	3		1		
	bei geschlossenem Fenster					
Wann treten/traten Probleme auf?	Sommer (Hitze)					

b) Passivhäuser

Passivhäuser		körperlich spürbar (Schleimhäute, Kontaktlinsen, Durst)	körperliche Beeinträchtigungen (krank, Husten, bei Heuschnupfen)	Verdunstung/ Trockenheit beobachtbar (Wäsche, Pflanzen, Aquarium)	körperlich positiv (Allergikern geht es besser)	Pflanzen geht es gut
Empfindung der Luftfeuchtigkeit?	genau richtig	1		2		
	etwas trocken	8	1	5	1	1
	deutlich zu trocken	5	2	3		
Treten Probleme in bestimmten Situationen/Zeiträumen auf?	nein	6	1	3	1	1
	ja	7	2	4		
Wann treten/traten Probleme auf?	Sommer (Hitze)	1	1			
	Winter (Kälte)	6	1	4		
	bei geschlossenem Fenster	1				
Wann treten/traten Probleme auf?	Sommer (Hitze)	1		1		

Abbildung 6.2.3-1: gemessene Luftfechtigkeiten in einer Passivhauswohnung



Im nächsten Schritt wurde untersucht, ob die subjektive Empfindung der Bewohner sich überhaupt mit objektiv messbaren Werten in Zusammenhang bringen lässt. Da die Luftfeuchtigkeit nicht kontinuierlich erfasst wurde, wurde stattdessen der Zusammenhang zwischen den physikalischen Einflussgrößen auf die Luftfeuchtigkeit mit den Beurteilungen der Bewohner untersucht. Die wichtigsten Einflussgrößen sind der Luftwechsel (höherer Luftwechsel führt zu

geringerer Luftfeuchtigkeit im Winter), die Anzahl der (anwesenden) Personen, denn diese geben vor allem direkt Feuchte ab, sowie die Raumlufttemperatur (eine höhere Raumlufttemperatur senkt die relative Luftfeuchtigkeit). Mit keinem dieser Parameter konnte eine direkte Korrelation gefunden werden (vgl. Abbildung 6.2.3-2 und 6.2.3-3). Auch dieses Ergebnis spricht dafür, dass in jedem Fall die Bewertung der Luftfeuchtigkeit sehr subjektiv geprägt ist.

Abbildung 6.2.3-2: Zahl der durchschnittlich anwesenden Personen (als Maß für den Feuchteintrag) und Beurteilung der Luftfeuchtigkeit

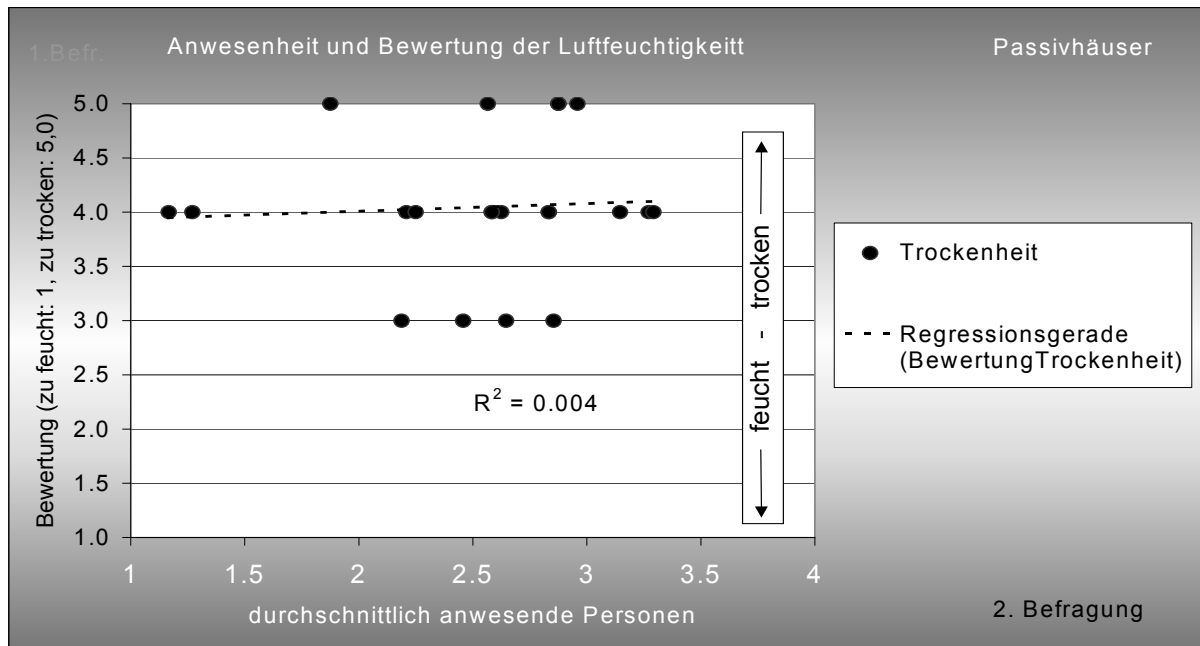
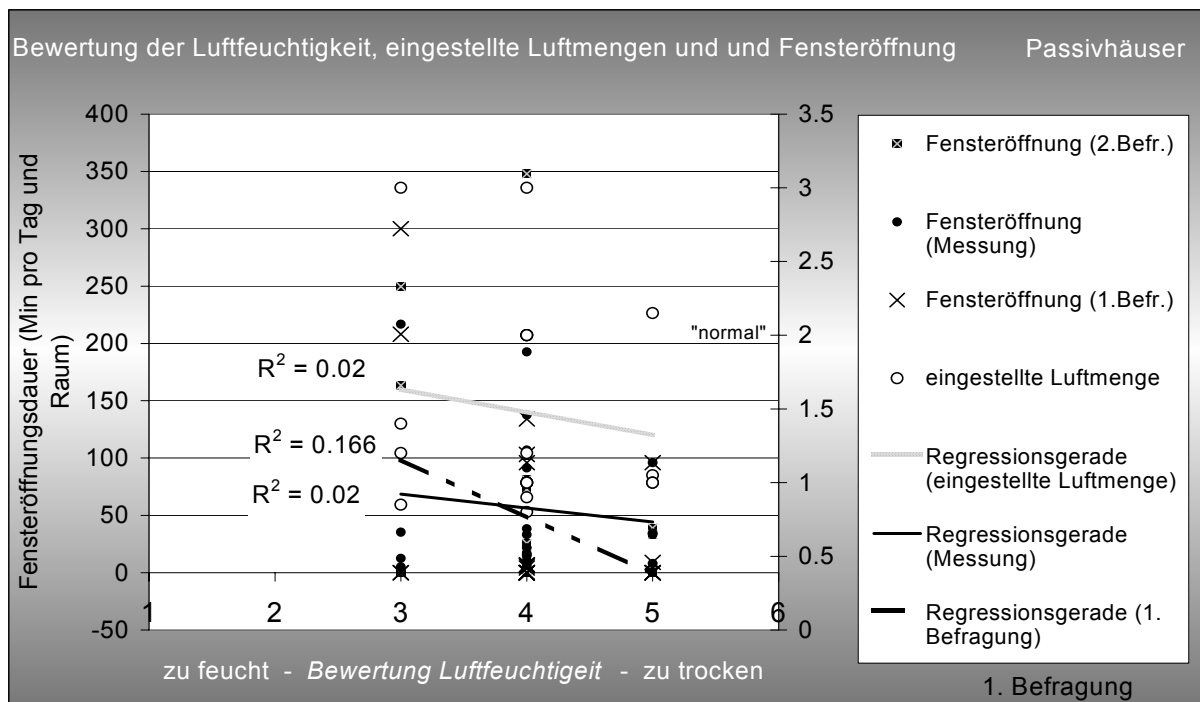


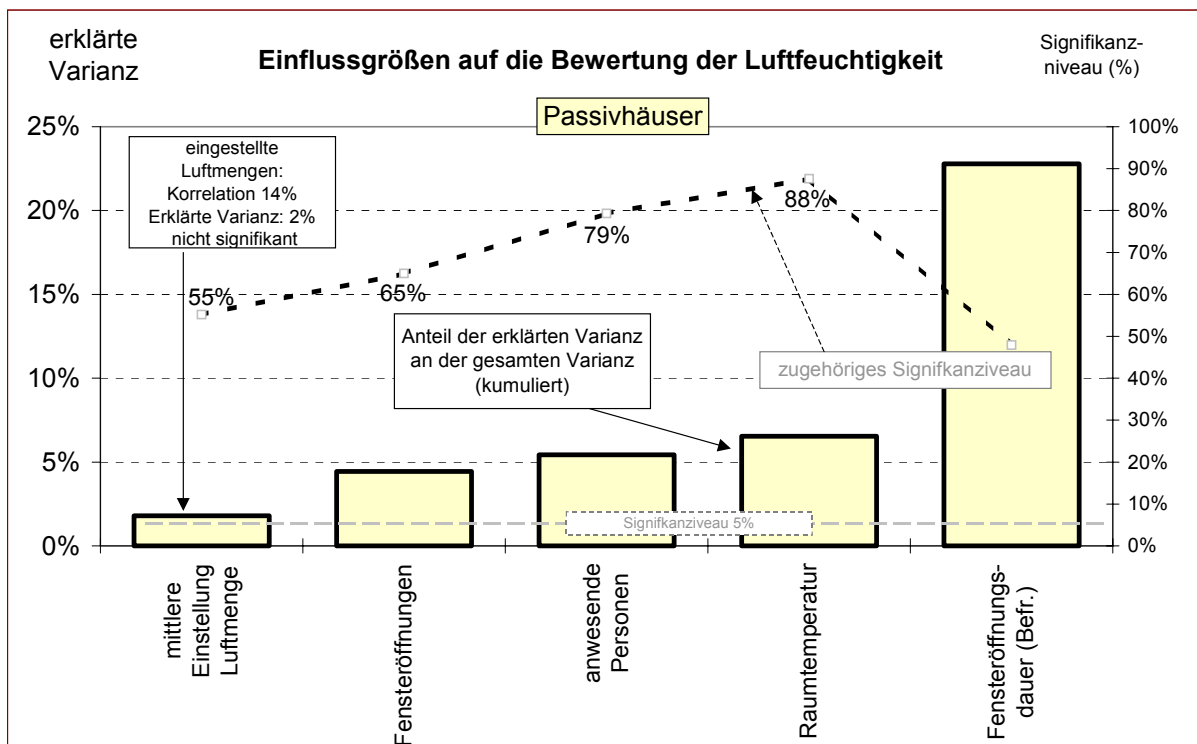
Abbildung 6.2.3-3 Frischluftzufuhr und Beurteilung der Luftfeuchtigkeit



Auch die Kombination dieser Einflussgrößen in einer Regressionsanalyse führt nicht zu einer Erklärung (vgl. Abbildung 6.2.3-4). Nur etwa 7% der beobachteten Varianz lassen sich damit erklären. Anders sieht es aus mit erfragten Angaben zum Fensteröffnungsverhalten: Es scheint einen deutlichen Einfluss zu geben zwischen Fensteröffnungszeiten und der Empfindung von trockener Luft – anders allerdings als erwartet, denn höhere Fensteröffnungsdauern sind korreliert mit als feuchter bewerteter Luft. Da sich dieser Zusammenhang allerdings mit den gemessenen Fensteröffnungszeiten nicht nachvollziehen lässt, zeigt diese Beobachtung vor allem, dass bei der Interpretation erfragter Daten in Bezug auf objektive Sachverhalte eine gewisse Vorsicht geboten ist.

Die offenbar sehr unterschiedlichen Empfindungen der Luftfeuchtigkeit zeigen, dass der Spielraum für die Planung der Luftmengen nicht groß ist. Umso sorgfältiger müssen Lüftungsanlagen geplant werden, um auch bei geringen Luftwechselraten eine gute Luftqualität zu gewährleisten.

Abbildung 6.2.3-4 Einflussgrößen auf die Beurteilung der Luftfeuchtigkeit



6.3 Lüftung

6.3.1 Lüftungsanlagen

6.3.1.1 Einstellung und Bewertung der Lüftungsanlagen

In den Passivhäusern wird die benötigte Frischluft über einen hocheffizienten Wärmetauscher vorerwärmt. Die Einregulierung der Lüftungsanlagen erfolgte durch das planende Ingenieurbüro Inplan. Zuluft und Abluftseite können von den Nutzern unabhängig voneinander manuell eingestellt werden. Jeweils drei ausbalancierte Einstellungen wurden an den Skalen für Zu- und Abluftventilator markiert: „normal“ (120 m³/h), „minimal“ (90 m²/h) und „maximal“ (150 m²/h). Die mittlere Einstellung ist für den Normalbetrieb bei Anwesenheit der Bewohner gedacht, die „minimale“ für den Fall der Abwesenheit und der Maximalbetrieb für Zeiten erhöhten Frischluftbedarfs (Kochen, Badbenutzung, hohe Personenzahl). Es war vorgesehen, dass die Anlagen mit diesen drei balancierten Einstellungen gefahren werden, vorzugsweise in der Normalstellung bzw. bei vorübergehendem Mehr- oder Minderbedarf in der Maximal- oder Minimalstellung.

Über den Betrieb der Lüftungsanlagen liegen keine flächendeckenden Messungen vor. Exemplarisch werden kontinuierlich Daten in vier der Passivhaus-Wohnungen erhoben, die es erlauben, den Wärmebereitstellungsgrad zu berechnen sowie den Stromverbrauch für die Lüftungsanlage messtechnisch zu erfassen. Unter den vier Häusern sind 2 Mittelhäuser sowie 2 Endhäuser (letztere mit Erdreichwärmetauscher, vgl. Abschnitt 2.2.1 und 4.2.7). Abbildung 4.2.7-1 zeigt den Verlauf des Stromverbrauchs der Anlagen im Vergleich.

Bereits aus diesen Messungen ist erkennbar, dass die Lüftungsanlagen äußerst unterschiedlich betrieben werden. Sowohl das Gesamtniveau des Stromverbrauchs als auch die Schwankungen im zeitlichen Verlauf sind verschieden. Aus diesem Grunde wurden Fragen zum Betrieb der Lüftungsanlage in die Bewohnerbefragung einbezogen. Zunächst sollte dabei erfasst werden, ob die Lüftungsanlagen balanciert betrieben wurde, und ob die Einstellung „normal“ überwiegend von den Bewohnern akzeptiert wurde. Tabelle 6.3.1-1 zeigt die Ergebnisse der 1. Befragung. Demnach werden unterschiedliche Einstellungen bevorzugt; viele betreiben die Lüftungsanlage nicht in der Normalstellung, sondern offenbar überwiegend im Minimalbetrieb, andere im Maximalbetrieb.

Die 21 befragten Passivhausbewohner gaben an, die mit den markierten Einstellungen vorgesehenen Stufen zu benutzen. Im Winter stellten nach den Angaben der Bewohner

- 3 Haushalte überwiegend die Maximalstellung ein
- 8 Haushalte überwiegend die Normalstellung ein
- 8 Haushalte überwiegend die Minimalstellung ein

- 2 hatten Zuluft und Abluft unterschiedlich eingestellt, in beiden Fällen mit einem Zuluftüberschuss (Zuluft „normal“, Abluft „minimal“)

Tabelle 6.3.1-1: Einstellungen der Lüftungsanlage im Winter (Bewohneraussagen)

Passivhäuser	Zulufteinstellung im Winter					
	Immer minimal	immer normal	immer maximal	überwiegend normal	überwiegend maximal	selten o. nie minimal
immer minimal	8	1				
immer normal		7				
immer maximal			2			
überwiegend minimal						1
überwiegend normal				1		
überwiegend maximal					1	

In zwei Fällen wird die Lüftungsanlage nach Aussagen der Bewohner in Disbalance betrieben. Da diese Angaben noch recht unpräzise waren, wurde bei der 2. Befragung die Einstellung genauer abgefragt. Dabei stellte sich heraus, dass viele Nutzer nicht die vorgegebenen Einstellungen benutzen, sondern mit Zwischeneinstellungen offenbar auch experimentieren. Tabelle 6.3.1-2 zeigt die Einstellung der Lüftungsanlagen in den Passivhäusern, die in der 2. Befragung vor Ort angegeben wurden. Die Zahlenangaben geben die Einstellung relativ zur Markierung wieder. Dabei bedeutet 1 „minimal“, 2 „normal“ und 3 „maximal“. Mehr als die Hälfte der befragten Passivhausbewohner betreiben die Lüftungsanlage mit geringeren Luftmengen als vom planenden Ingenieurbüro vorgesehen. Lediglich 6 bevorzugen auf Zu- und Abluftseite (in etwa) die vorgesehenen Einstellungen, 2 der 21 Befragten betreiben die Lüftungsanlage im Maximalbetrieb. Die durchschnittliche Einstellung entspricht dem Mittelwert zwischen „normal“ und „minimal“. Überwiegend wird offenbar eine geringere Luftmenge als 120 m³ pro Stunde als ausreichend empfunden. Auf die Balance der Anlage achten nicht alle Bewohner: 8 Haushalte haben die Abluft- und Zuluftventilatoren unterschiedlich eingestellt. Auswirkungen im Vergleich zu den anderen Nutzern sind allerdings nicht erkennbar (vgl. Abschnitt 6.4). Dabei ist aber davon auszugehen, dass auch bei vorgesehener Einstellung die Balance der Volumenströme nach mehreren Jahren nicht mehr gegeben ist; die Luftvolumenströme hängen auch von der Filterverschmutzung ab. Vereinzelt bestätigen diese Vermutung (vgl. Abschnitt 5.1 und Anhang).

Vergleicht man die eingestellten Luftmengen mit den Bewertungen zur Luftqualität, so kann man feststellen, dass desto geringere Luftmengen eingestellt werden, je besser die Bewertungen ausfallen. In Bezug auf die Wirksamkeit gegen Gerüche ist dieser Zusammenhang sogar signifikant (Signifikanzniveau 5%). Wer zufrieden ist, neigt also dazu, die Luftmengen zurückzunehmen.

Tabelle 6.3.1-2: Einstellungen der Lüftungsanlage in der Heizperiode (2. Befragung)

Betrieb der Lüftungsanlage?	Einstellung Zuluft	Einstellung Abluft
ja	0.8	0.8
ja	0.9	0.8
ja	0.8	1
ja	1	1
ja	1	1
ja	1	1
ja	1.2	0.8
ja	1	1
ja	1	1
ja	1.3	0.8
ja	1.5	0.9
ja	1.6	0.8
ja	0.8	2
ja	2	2
ja	2	2
ja	2	2
ja	2	2
ja	2	2
ja	2	2.3
ja	3	3
ja	3	3

Die Einstellung 1 bedeutet „minimal“, 2 bedeutet „normal“, 3 bedeutet „maximal“. Dazwischenliegende Skaleneinstellungen sind interpoliert. Die Einstellungen (1,1), (2,2) sowie (3,3) sind die vom Ingenieurbüro bestimmten balancierten Einstellungen mit gleichem Zu- und Abluftvolumenstrom.

Auch bezüglich des Sommerbetriebs gibt es große Unterschiede. Bei einigen Bewohnern läuft die Anlage offenbar gleichmäßig durch, bei anderen wird sie zurück- oder ganz abgeschaltet.

In einem Fall wurde die Lüftungsanlage im Sommer ganz abgeschaltet. In 11 Wohnungen wurde die Einstellung im Sommer gegenüber der Heizperiode nicht verändert, die übrigen 10 hatten im Sommer überwiegend eine andere Einstellung als im Winter.

Nach den Angaben der Bewohner stellten im Sommer insgesamt

- 2 Haushalte überwiegend die Maximalstellung ein
- 3 Haushalte überwiegend die Normalstellung ein
- 10 Haushalte überwiegend die Minimalstellung ein.
- Ein Haushalt hat die Lüftungsanlage ganz außer Betrieb genommen.
- Fünf Haushalte hatten Zuluft und Abluft unterschiedlich eingestellt, in vier Fällen mit einem Abluftüberschuss, in einem mit einem Zuluftüberschuss.

Eine Schätzung des gesamten Stromverbrauchs der Anlagen aus den Einzelmessungen und den Angaben der Bewohner über den Betrieb ergibt einen Stromverbrauch für die Lüftung zwischen 0,3 und 0,35 Wh/m³ - soweit sich die Einstellungen der Lüftungsanlagen im projektierten Bereich bewegen und Maximaleinstellungen nur – wie geplant – kurzzeitig bei erhöhtem Bedarf eingestellt werden. Dies ist bei allen Haushalten bis auf zwei der Fall. Damit werden durchgehend Wärmebereitstellungsgrade über 80% erreicht unter der Voraussetzung, dass die Abluftfilter rechtzeitig vor zu starker Verschmutzung gewechselt werden (vgl. Abschnitt 4.2.7). Das Verhältnis von eingesparter Heizwärme zu eingesetztem Lüfterstrom liegt dann zwischen 9 und 10. Die Wärmerückgewinnungsgeräte arbeiten also mit hoher energetischer Effizienz.

Dieses gute Ergebnis wurde erreicht, obwohl passivhausgeeignete Lüftungsanlagen zum Zeitpunkt des Baus der Häuser nicht zur Verfügung standen. Die Wärmerückgewinnungsgeräte mussten ebenso wie die Anlagen in Darmstadt Kranichstein umgebaut werden. Ebenso wenig standen geeignete Planungswerkzeuge zur Verfügung. In der Zwischenzeit gibt es auf dem Markt eine wachsende Anzahl passivhausgeeigneter Lüftungsgeräte. Projektierungsinstrumente für die Planung von Passivhaus-Lüftungsanlagen wurden in der Zwischenzeit entwickelt [109].

Mit der Wirksamkeit der Lüftung gegen Gerüche sind die Bewohner überwiegend zufrieden (Tabelle 6.3.1-3). Eventuelle Probleme treten vor allem beim Kochen auf. Dies liegt daran, dass die Dunstabzugshaube nur mit Umluft betrieben wird, ein erhöhter Außenluftwechsel aber am Ort der Belastung nicht eingestellt werden kann. Eine Möglichkeit, den Luftwechsel zu Zeiten erhöhten Lüftungsbedarfs temporär zu erhöhen, sollte daher auf jeden Fall vorgesehen werden. Als Ursache für Geruchsbelastungen wurden aber auch der vergessene Filterwechsel genannt sowie Außenluftbelastungen (vgl. Tabelle 6.3.1-4).

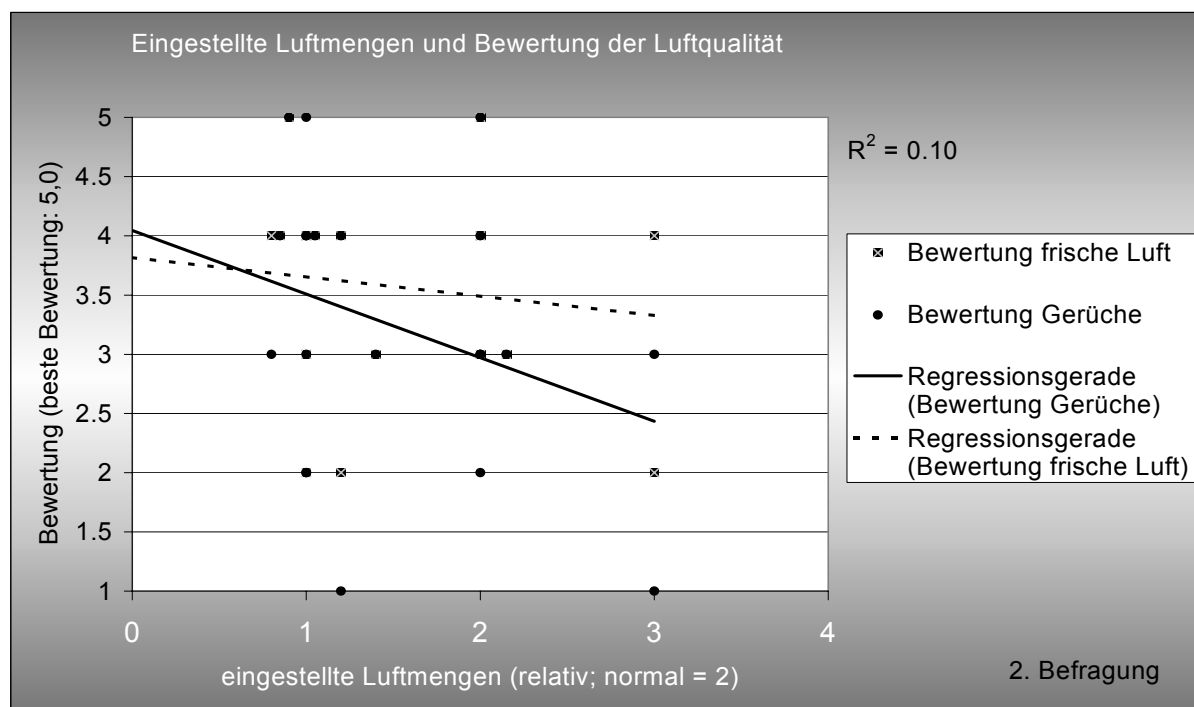
Ebenso sind die Bewohner mit der Handhabung der Lüftungsanlage zufrieden bis sehr zufrieden.

Das insgesamt positive Ergebnis zeigt, dass die Bewohner die Annehmlichkeiten und die Qualität der Lüftungsanlagen zu schätzen wissen. Werden sie jedoch nach Verbesserungsmöglichkeiten oder Wünschen im Einzelnen gefragt, wird eine Fülle von Punkten genannt (vgl. Tabelle 6.3.1-5), die zeigen, dass es einer besonderen Sorgfalt bei der Planung von Luftführung und Lüftungsanlagen bedarf, um eine optimale Luftqualität zu erhalten. Dies deckt sich mit der Erfahrung aus anderen Passivhausprojekten [110].

Tabelle 6.3.1-3: Zufriedenheit mit der Lüftungsanlage (Häufigkeiten der Antworten 1. Befragung)

	Wirksamkeit der Lüftung gegen Gerüche	Beurteilung der Handhabung des Lüftungssystems
Passivhäuser (insgesamt 21 befragte Bewohner)		
Sehr gut	3	10
Gut	12	6
Mittelmäßig	4	2
Nicht besonders gut	2	1
Schlecht		1
Niedrigenergiehäuser (insgesamt 8 befragte Bewohner)		
Sehr gut	1	2
Gut	3	3
Mittelmäßig	2	1
Nicht besonders gut		1
Schlecht	2	

Abbildung 6.3.1-1: Bewertung der Lüftung und Luftmengen



Am häufigsten wird der Wunsch nach geräuscharmen Lüftungsanlagen geäußert, an zweiter Stelle der Wunsch nach einer besseren Wirkung. In zwei Fällen wird auch die Luftmenge als zu hoch empfunden; die Ergebnisse zur empfundenen Raumluftfeuchtigkeit (Abschnitt 6.2.3) deuten darauf hin, dass das Problem einer für das subjektive Wohlbefinden eher zu hohen

Luftwechselrate weit häufiger ist, als es an dieser Stelle von den Bewohnern explizit identifiziert und genannt wird.

Tabelle 6.3.1-4: Eingeschränkte Wirksamkeit der Lüftung gegen Gerüche: Bewohneraussagen

Anzahl der Nennungen	Passivhäuser	Niedrigenergiehäuser
beim Kochen	3	2
wenn Filter zu lange in Gebrauch	1	
bei Rauchentwicklung im Freien	1	
Gesamtzahl der Befragten	21	8

Tabelle 6.3.1-4: Verbesserungswünsche für die Lüftungsanlage: Häufigkeit der Nennungen (Mehrfachnennungen möglich)

	Passivhäuser	Niedrigenergiehäuser
leisere Anlage	6	1
bessere Filter gegen Außengerüche, Staub, Schadstoffe	3	0
effizientere Wirkung	2	2
lüftet zu stark, starker Luftstrom	2	0
keine Probleme oder Wünsche	1	1
deutlichere Skala	1	0
Verzicht auf Reinigung der Filter	1	0
Anzeige für Filterwechsel	1	0
genauere Informationen über Bedienung	1	0
geschlossene Außenrohre d. Lüftung	1	0
Versteckte Führung der Lüftungsrohre	1	0
Zuluft: sollte abschaltbar sein	0	1
Platzierung: ungünstig, zu hoch	0	1

Gerade der Wunsch nach möglichst geringen Schallemissionen wird besonders häufig genannt. Dies ist vor dem Hintergrund der Tatsache zu sehen, dass der Bauträger ursprünglich - unter Einhaltung aller Normen – aus Kostengründen auf Schalldämpfer zwischen Wärmetauscher und Lüftungseinlass verzichtet hatte. Nach den ersten Klagen wurde dieser auf Veranlassung des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser [53] nachgerüstet, wodurch jedenfalls die Mehrheit der Bewohner zufriedengestellt werden konnte: 6 Haushalte wünschen aber immer noch eine leisere Anlage. Bei Wohnungslüftungsanlagen ist in Bezug auf Ventilatorgeräusche also besondere Vorsorge geboten, um zu verhindern, dass die Lüftungsanlagen von den Bewohnern wieder außer Betrieb genommen werden. Die Einhaltung der Normen reicht bei weitem nicht aus. Der Grund liegt darin, dass es vor allem in der Nacht sehr ruhig ist; Passivhäuser sind bei geschlossenen Fenstern sogar besonders gegen Schall von außen

geschützt. Jedes sonst tagsüber kaum wahrgenommene Geräusch fällt dann auf und kann als störend empfunden werden.

Schlussfolgerung

Die Lüftungsanlage wird von allen Bewohnern angenommen. Sie liefert in den Passivhäusern – wie Spurengasmessungen und Einschätzungen der Bewohner bestätigen - eine gute Luftqualität und hat eine hohe energetische Effizienz, obwohl zum Zeitpunkt der Errichtung der Gebäude noch keine passivhausgeeigneten Lüftungsanlagen zur Verfügung standen. Die Qualität wurde erst durch einen Umbau erreicht. Da auch an dieser Stelle Kostengünstigkeit die höchste Priorität hatte, gibt es jedoch – im Vergleich zu späteren Projekten – geringfügige Einschränkungen bei der Nutzung, die es nicht erlauben, einen erhöhten Lüftungsbedarf im Wohnbereich, insbesondere in der Küche, unkompliziert einzustellen. Gleichzeitig sind die Wohnungsgrundrisse sehr offen. Dies führt punktuell zu einer erhöhten Geruchsbelastung während des Kochen. Mit diesen Einschränkungen ist bei modernen passivhausgeeigneten Lüftungsanlagen nicht mehr zu rechnen.

6.3.2 Fensteröffnen: Bewohnerbefragung und Vergleich mit der Messung

Zu den Fensteröffnungen lagen bis zum Herbst 2000 keine Messergebnisse vor.

In der ersten Befragung im Frühsommer 2000 wurden die Bewohner rückwirkend befragt nach ihren Fensteröffnungszeiten *in der Heizperiode*, vor allem im Kernwinter (Dezember oder Januar).

Fast alle Bewohner öffnen Fenster in dem Umfang, in dem sie es wünschen. Nur ein Bewohner eines Niedrigenergiehauses sowie zwei der Passivhausbewohner würden ihre Fenster gerne öfter öffnen. 7 von 8 der Niedrigenergiehaushalte sowie 11 von 21 befragten Passivhaushalten gaben an, ihre Fenster auch während der Heizperiode zu öffnen. Dies geschah aber in sehr unterschiedlichem Ausmaß (vgl. Tabelle 6.3.2-1)

Für jeden Raum wurde darüber hinaus abgefragt

- wie oft die Fenster im Durchschnitt gekippt werden
- wie lange sie dabei im Durchschnitt gekippt sind
- wie oft die Fenster im Durchschnitt ganz geöffnet werden
- wie lange sie dabei im Durchschnitt ganz offen stehen.

Das Ergebnis der Befragung ist (sortiert nach durchschnittlicher Gesamtöffnungszeit) in Tabelle 6.3.2-1 wiedergegeben.

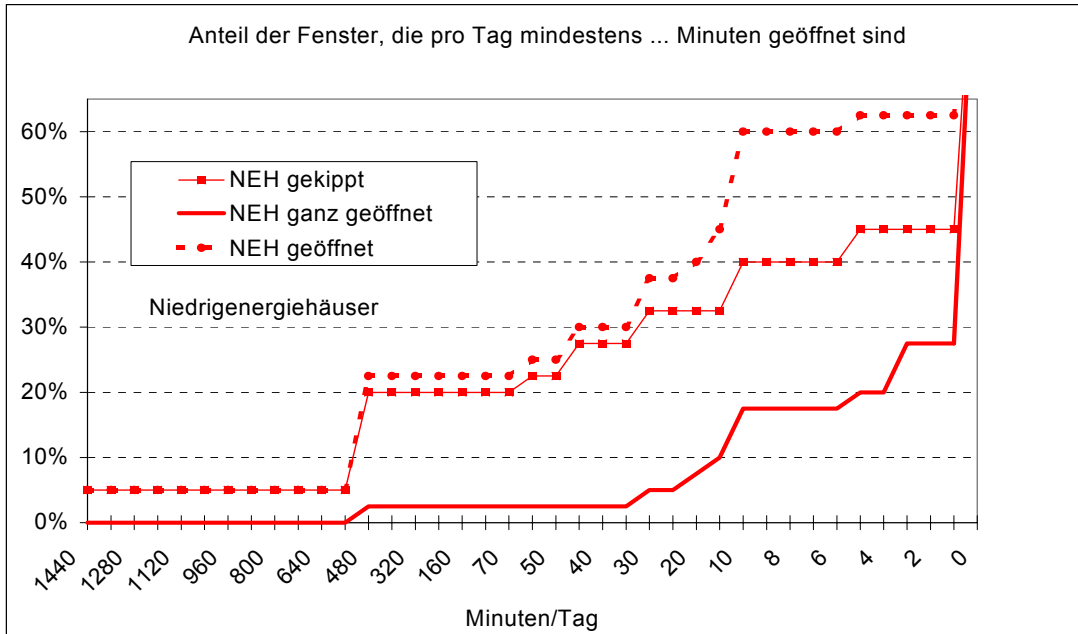
Tabelle 6.3.2-1: Geöffnete Fenster in Passiv- und Niedrigenergiehäusern (Bewohneraussagen der 1. Befragung)

Nr.	Haustyp	FENSTER öffnen	würde gern öfter öffnen	geöffnet	davon gekippt	davon ganz geöffnet
		(Aussage)		Minuten pro Tag und Raum	Minuten pro Tag und Raum	
1	PH	nein		0	0	0
2	PH	nein		0	0	0
3	PH	nein		0	0	0
4	PH	nein		0	0	0
5	PH	nein	ja	0	0	0
6	PH	nein		0	0	0
7	PH	sehr selten		0	0	0
8	PH	sehr selten		0	0	0
9	PH	sehr selten		0	0	0
10	PH	sehr selten		0	0	0
11	NEH	nein		0	0	0
12	PH	ja		4	0	4
13	PH	ja		6	6	0
14	PH	ja	ja	6	0	6
15	PH	ja		7	0	7
16	PH	ja		9	6	3
17	NEH	ja		9	0	9
18	NEH	ja		25	22	3
19	NEH	ja		30	24	6
20	PH	ja		96	96	0
21	PH	ja		96	96	0
22	NEH	ja	ja	100	4	96
23	PH	ja		103	96	7
24	PH	ja		134	112	22
25	PH	ja		208	198	10
26	NEH	ja		288	288	0
27	NEH	ja		292	288	4
28	PH	ja		300	300	0
29	NEH	ja		576	576	0
		Anzahl "ja"		Minuten/d und Raum		
	alle PH	11	2	46	43	3
	alle NEH	7	1	165	150	15

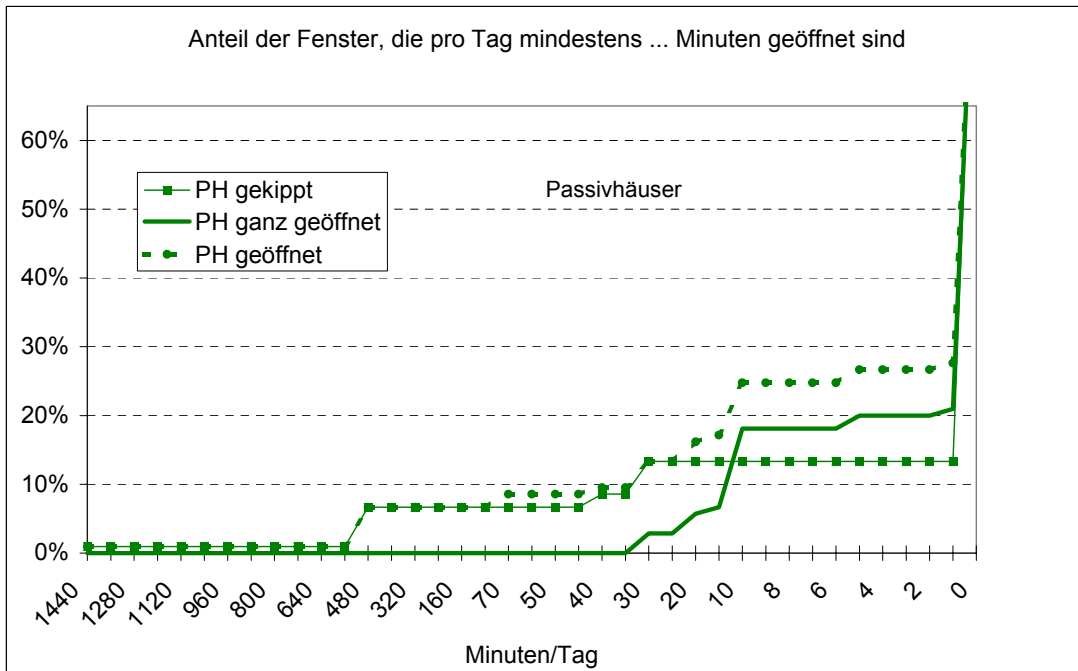
Abbildung 6.3.2-1: Summenkurve geöffneter Fenster (Bewohneraussagen)

Die Grafik stellt kumulativ dar, wie viele Fenster (Anteil in % auf der y-Achse) mindestens so lange geöffnet sind, wie es der auf der x-Achse angegebenen Dauer entspricht

a) Niedrigenergiehäuser



b) Passivhäuser

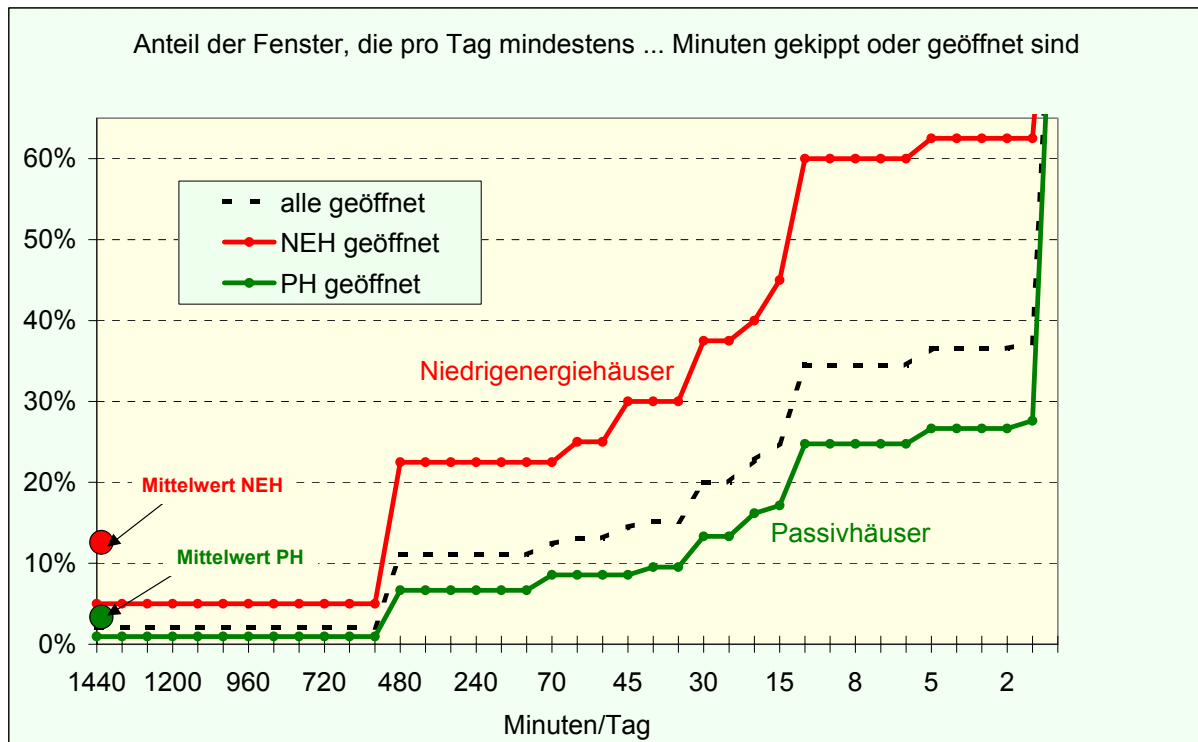


Nach diesen Aussagen haben Bewohner der Niedrigenergiehäuser ihre Fenster im Durchschnitt 165 Minuten pro Tag und Raum geöffnet oder gekippt. Das entspricht einer Öffnungsrate von 11 %. In Passivhäusern sind dagegen die Fenster nur 46 Minuten geöffnet/gekippt (3 %), und

zwar überwiegend gekippt. In den Niedrigenergiehäusern wird nach diesen Angaben also im Durchschnitt dreimal so viel gelüftet.

Abbildung 6.3.2-2: Summenkurven geöffneter Fenster

Gesamtergebnis, Passivhäuser und Niedrigenergiehäuser im Vergleich



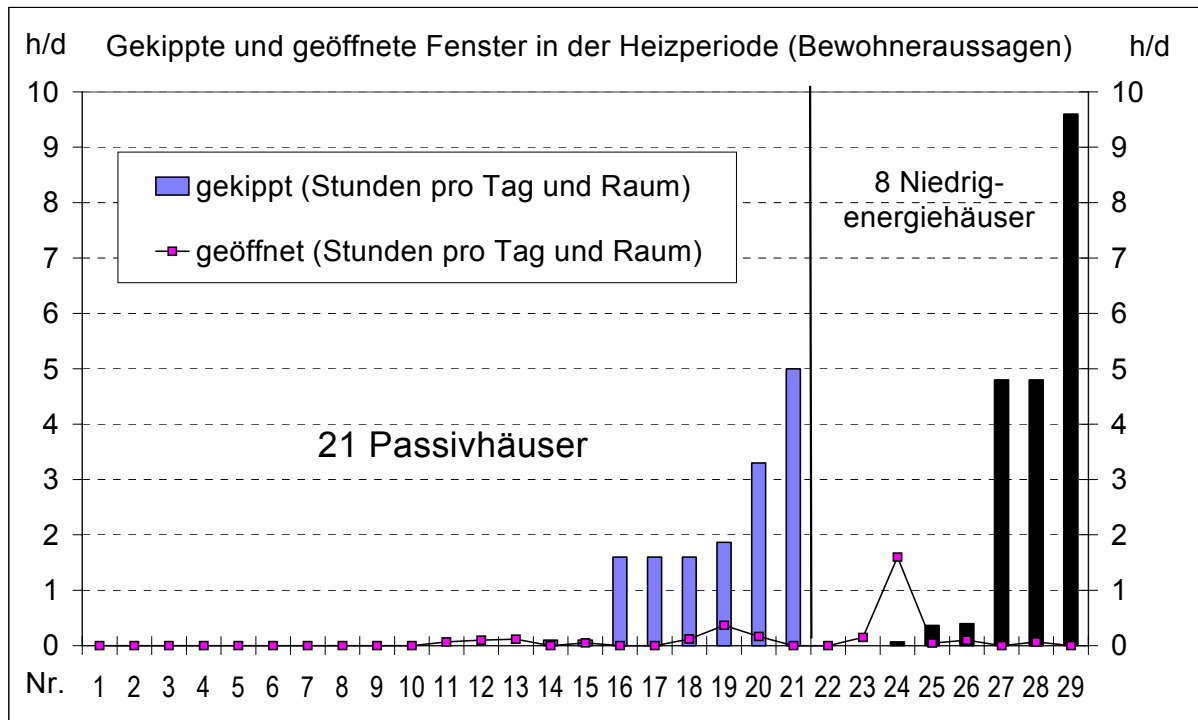
Die unmittelbaren Auswirkungen des erfragten Fensteröffnungsverhaltens auf den Heizenergieverbrauch sind kaum erkennbar (vgl. Abschnitt 6.4). Es gibt keine direkte Korrelation zwischen angegebenem (erfragtem) Lüftungsverhalten und Heizwärmeverbrauch. Dabei sind die individuellen Unterschiede sehr ausgeprägt: Ein Niedrigenergiehaushalt sowie 10 von den Passivhaushalten öffnen ihre Fenster selten oder nie, andere in durchaus erkennbarem Umfang, der aber offenbar insgesamt immer noch wenig Auswirkungen hat.

In Abbildung 6.3.2-1 und 6.3.2-2 sind die Summenkurven für geöffnete sowie gekippte Fenster für Passivhäuser und Niedrigenergiehäuser gezeigt. Deutlich zu erkennen ist, dass es vereinzelt Fenster gibt, die – nach den Bewohneraussagen – ständig gekippt sind (ganz links in der Grafik). Dies ist aber bei Passivhäusern die Ausnahme. In mehreren Häusern (Anstieg der Kurven bei 480 Minuten vor allem bei den Niedrigenergiehäusern) sind die Schlafzimmerfenster nachts gekippt.

Insgesamt werden aber nur 13 % der Räume länger als 15 Minuten pro Tag gelüftet, bei den Niedrigenergiehäusern sind es 33 %. Deutlich ist, dass es hier einen signifikanten Unterschied

zwischen den Niedrigenergie- und den Passivhäusern der Siedlung gibt, und dass ferner der Umfang der Fensterlüftung bei den Passivhäusern nicht sehr hoch ist (vgl. Abbildung 6.3.2-3).

Abbildung 6.3.2-3: Fensteröffnen in der Heizperiode: durchschnittliche Zeit pro Tag und Raum in Niedrigenergie- und Passivhäusern nach Bewohneraussagen [111]



Trotz der großen individuellen Unterschiede gibt es kaum eine Korrelation zwischen angegebenem (erfragtem) Lüftungsverhalten und Heizwärmeverbrauch. Bei den Niedrigenergiehäusern erscheint dies eher plausibel: Durch den Abluftventilator wird ein Unterdruck erzeugt, die Frischluft strömt sowohl durch die Zuluftöffnungen als auch durch eventuell geöffnete Fenster nach, und die Leistung des Abluftventilators bestimmt über weite Bereiche den Volumenstrom. In einem ausbalancierten System wie in den Passivhäusern führen dagegen geöffnete Fenster eher zu einem zusätzlichen Luftwechsel, bei dem der zusätzliche Lüftungswärmeverlust nicht durch die Wärmerückgewinnung reduziert werden kann.

Tatsächlich zeigen die Untersuchungen in Kapitel 5, dass der Luftwechsel durch Fenster eher geringer ausfällt als nach früheren Simulationen erwartet. Dennoch dürfte nach den Spurengasmessungen in einer Märzwoche (Kap 5.1) die erheblichen Unterschiede bei der Fensteröffnung zu deutlichen Auswirkungen führen. Dass diese dennoch nicht unmittelbar erkennbar sind, ist einerseits dadurch bedingt, dass nach wie vor andere Einflüsse bedeutender sind (vgl. Abschnitt 6.4.) und nur bei ihrer Berücksichtigung die Auswirkungen des Fensteröffnens erkennbar werden, andererseits könnte es auch daran liegen, dass die Bewohner z.T. nicht gleichmäßig die Fenster öffnen, sondern sich auch nach dem Wetter richten. Um diesen Zusammenhängen auf die Spur zu kommen, wurde ein Jahr später erneut nach den Fensteröffnungen gefragt, mit leicht veränderter sowie erweiterter Fragestellung (vgl. Tab. 6.3.2-2). Die Aussagen sind überwiegend recht stabil, einige der Bewohner schienen jedoch ihr Fensteröffnungsverhalten geändert zu haben oder relativ ungleichmäßig zu schätzen. Vor allem

im Mittel stimmen die Angaben sehr gut überein. Die angegebenen Fensteröffnungszeiten betragen in der 2. Befragung bei den Passivhäusern im Durchschnitt 53 Minuten pro Tag und Raum, bei den Niedrigenergiehäusern 131 Minuten pro Tag und Raum. Die Korrelation der Aussagen aus der ersten und zweiten Befragung (bezogen auf die Gesamtöffnungsdauer) beträgt 81% bei den Passivhäusern und 33% bei den Niedrigenergiehäusern (vgl. Abbildungen 6.3.2-4 und 6.3.2-5).

Tabelle 6.3.2-2: Bewohneraussagen zur Fensteröffnung nach der Heizperiode 2000/2001. Die Häuser sind nach der angegebenen Gesamtöffnungsdauer geordnet. Auf der Nordseite befinden sich nur kleine Fenster. Auf der Südseite können sowohl die Terrassen- und Balkontüren als auch die kleinen Fenster auf der Galerie geöffnet werden.

2. Befragung Minuten pro Tag u. Raum	Nordfenster		Südfenster		Gardinen oder Rolläden	wetter- abhängig
	gekippt	ganz geöffnet	gekippt	ganz geöffnet		
PH	0	0	0	0		
PH	0	0	0	0		
PH	0	0	0	0		
PH	0	0	0	0		ja
PH	0	0	0	0		
NEH	2	0	0	0		
PH	2	0	2	0		ja
PH	4	0	0	0		
PH	6	0	0	0		
PH	1	1	0	3		
PH	3	3	0	4		ja
PH	8	0	2	0		ja
PH	8	0	8	0		ja
PH	32	0	0	0		
PH	49	0	1	1		ja
NEH	5	12	0	48		
PH	65	0	2	0		ja
PH	3	0	74	0		
PH	140	4	0	2	ja	
NEH	127	0	15	6		ja
PH	161	0	1	0		
NEH	1	0	160	17		
PH	0	15	170	20	ja	ja
NEH	0	0	230	0		
PH	164	0	161	1		ja
NEH	154	0	280	0		
PH	492	0	0	7		ja
NEH	180	0	320	3	ja	ja
NEH	485	10	13	30		ja
PH	114	0	580	2	ja	ja

Abbildung 6.3.2-4: Vergleich der Angaben zu den Fensteröffnungszeiten in der ersten und zweiten Befragung (Gesamtöffnungsdauern) bei allen untersuchten Häusern der Niedrigenergie- und Passivhaussiedlung in Wiesbaden

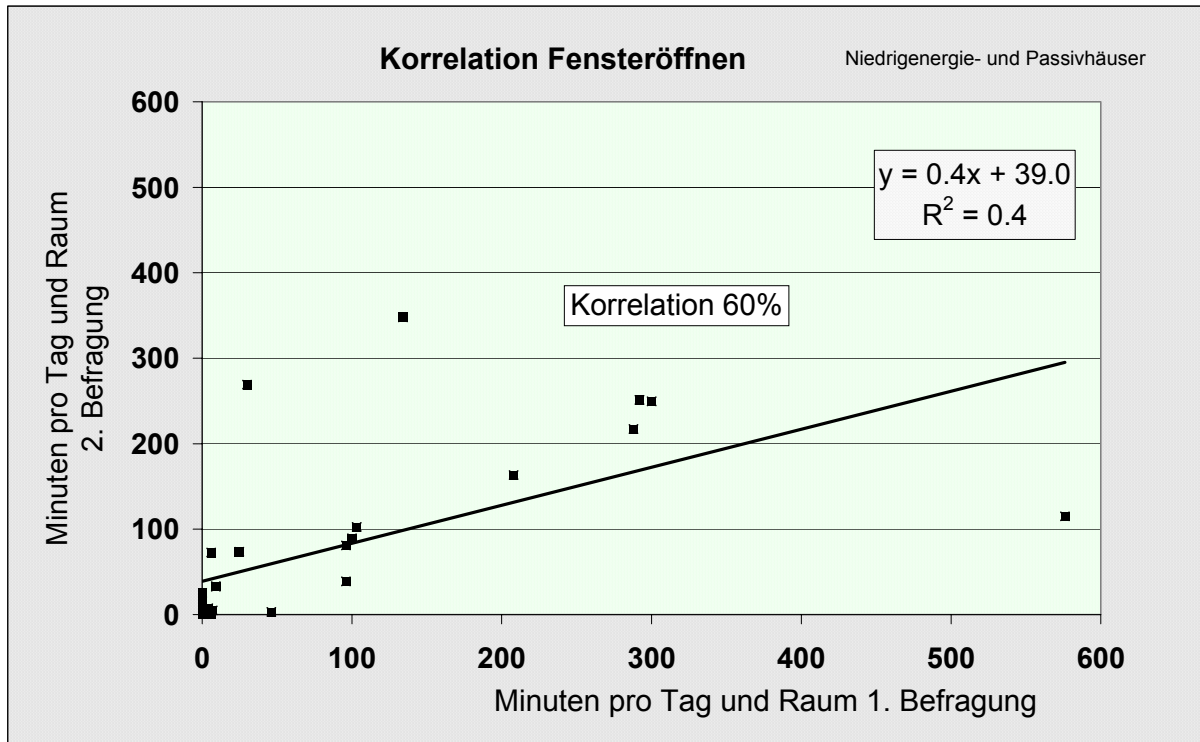
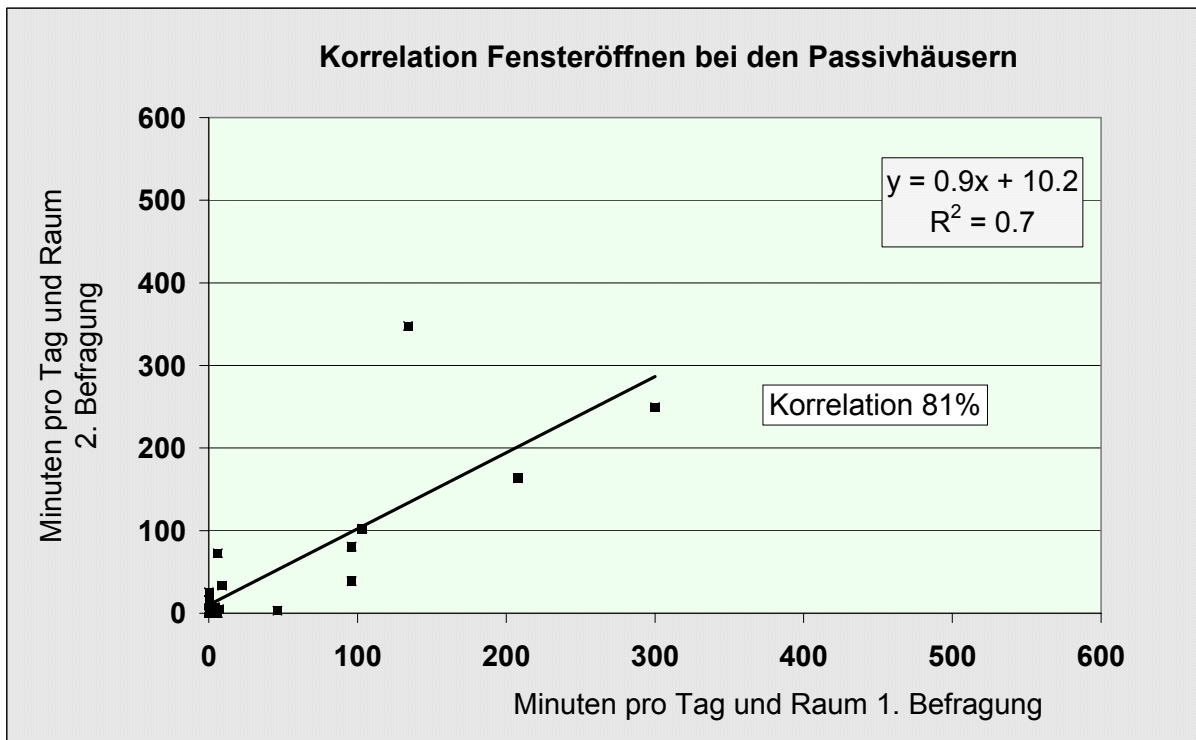
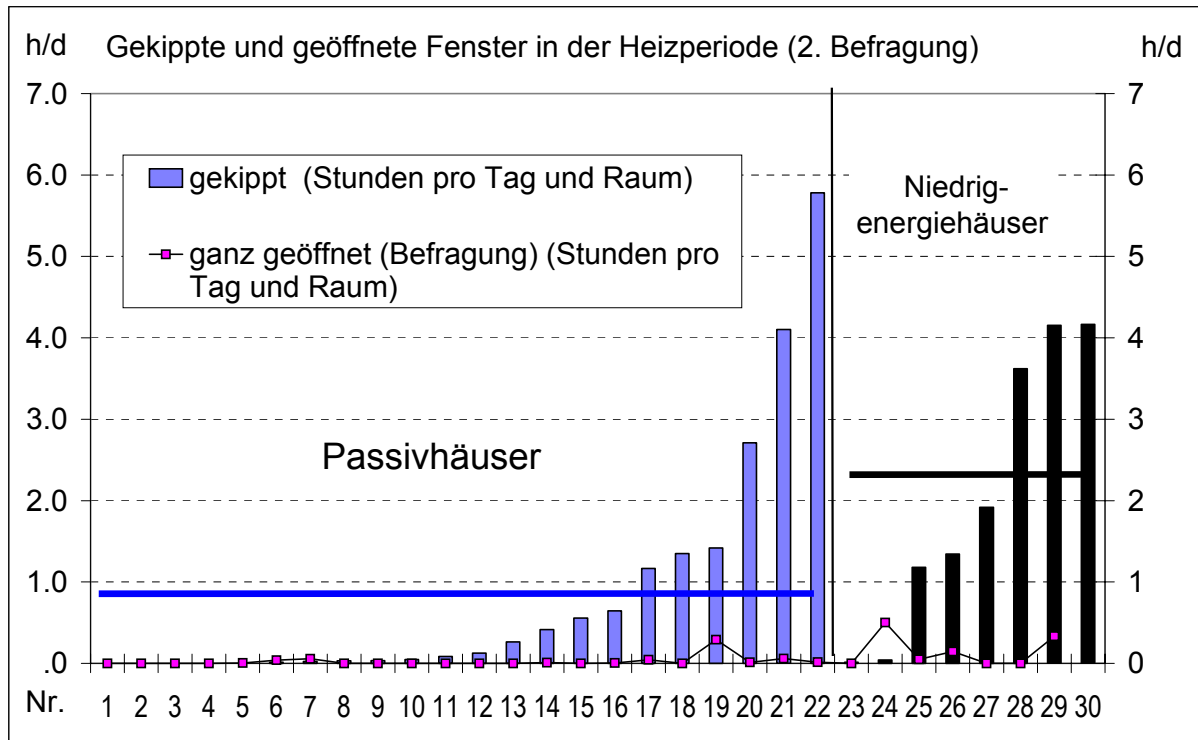


Abbildung 6.3.2-5: Vergleich der Angaben zu den Fensteröffnungszeiten in der ersten und zweiten Befragung (Gesamtöffnungsdauern) bei den untersuchten Passivhäusern



Aus Tabelle 6.3.2-2 wird auch deutlich, dass viele Bewohner sich nach dem Wetter richten, vor allem diejenigen, die häufiger die Fenster öffnen. Insgesamt 14 Haushalte gaben an, dass ihr Fensteröffnungsverhalten vom Wetter abhängig sei. Diese Aussagen stehen in Übereinstimmung mit den Messergebnissen aus Abschnitt 4.2.9 (Abbildungen 4.2.9-9 bis 4.2.9-11).

Abbildung 6.3.2-6: Gekippte und geöffnete Fenster nach Bewohneraussage in den Niedrigenergie- und Passivhäusern in der 2. Befragung



Der naheliegendste Grund für das Fensteröffnen, nämlich der Bedarf nach einer höheren Frischluftqualität wird durch das Befragungsergebnis nicht bestätigt. Die Korrelation zwischen der Bewertung der Lüftungsanlage in Bezug auf frische Luft und dem Ausmaß des Fensteröffnens in der 2. Befragung nach der Heizperiode 2000/2001 ergibt nur eine Korrelation von 12% (16% bei den Passivhäusern) und ist damit nicht signifikant. Dasselbe gilt für die Aussagen in Bezug auf Gerüche. Auch die überwiegend bevorzugten Einstellungen der Lüftungsanlage (vgl. Abschnitt 6.3.1), die bei den Passivhäusern mit einem geringeren Luftvolumenstrom gefahren werden als vorgesehen, geben auf ein Frischluftproblem keinen Hinweis.

Abbildung 6.3.2-7: Fensteröffnungszeiten und Bewertung der Lüftungsanlage in Bezug auf frische Luft

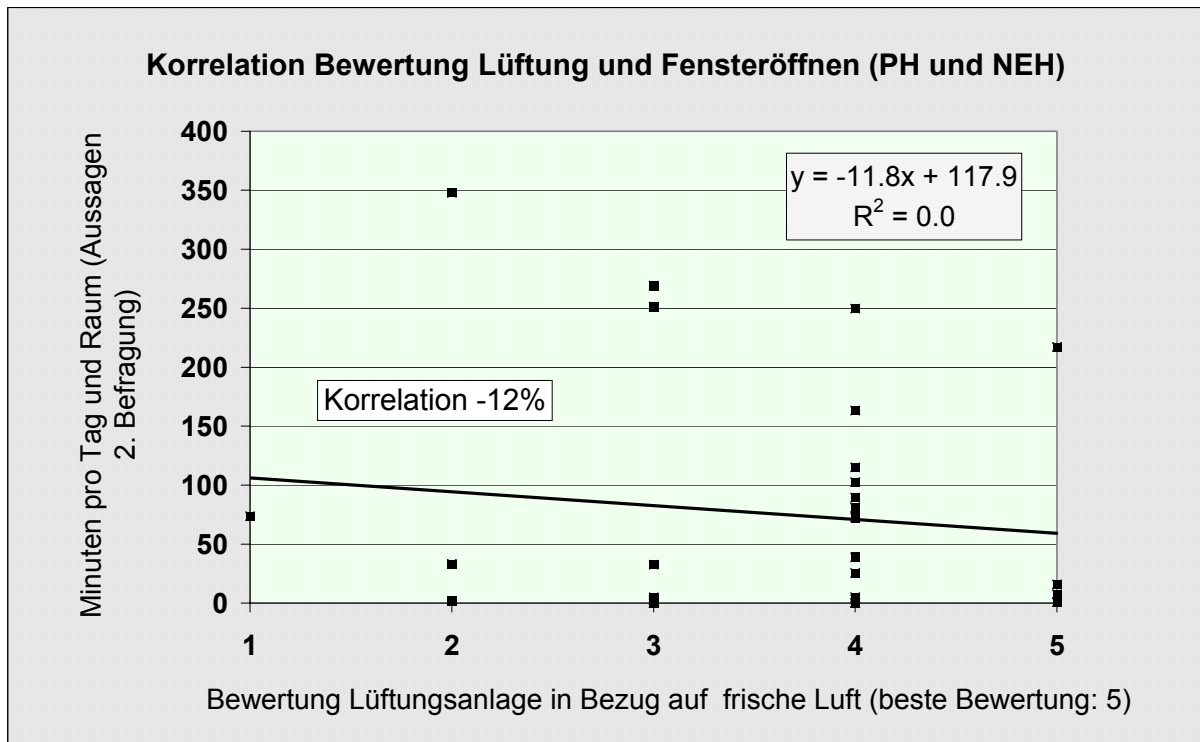
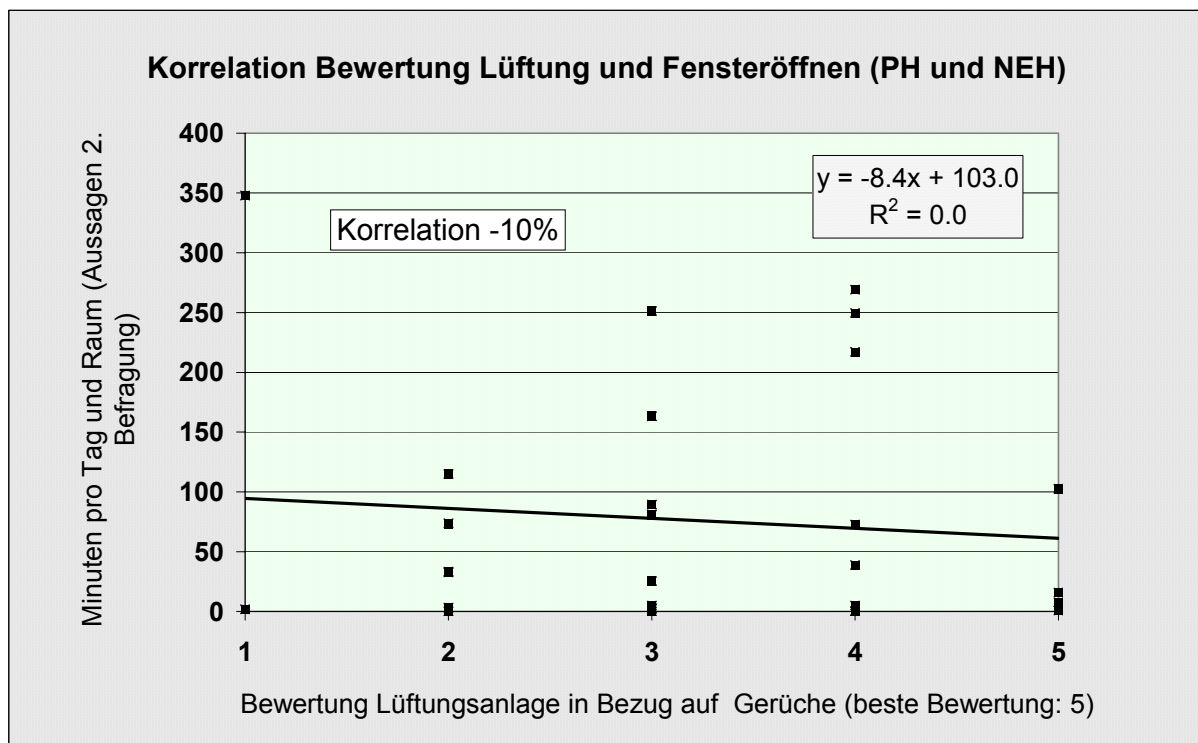


Abbildung 6.3.2-8: Fensteröffnungszeiten und Bewertung der Lüftungsanlage in Bezug auf Abführen von Gerüchen



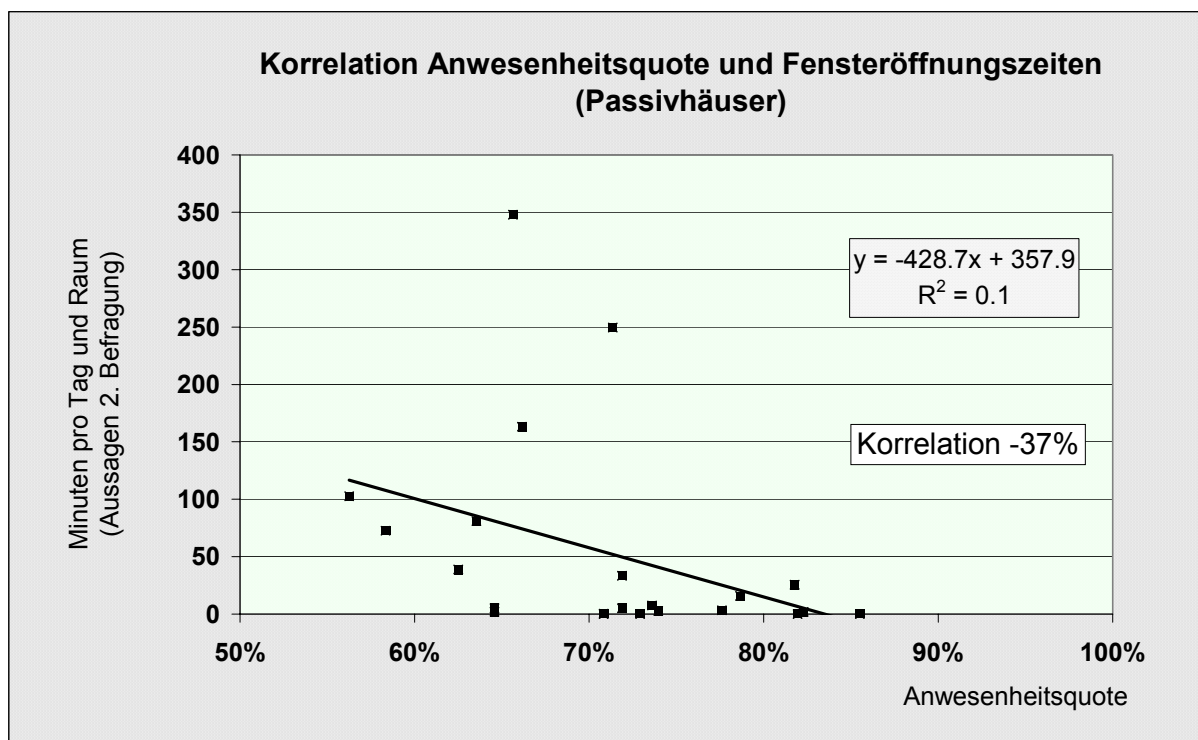
Fensterlüftung und Anwesenheit

Je höher die Anwesenheitsquote ist, desto weniger wird – nach Aussagen der Bewohner – mit den Fenstern gelüftet. Die Korrelation zwischen Anwesenheitsquote und Fensteröffnungsdauer beträgt bei den Niedrigenergiehäusern –33%, bei den Passivhäusern –37%. Dies deckt sich auch mit den Messergebnissen.

Dies bedeutet, dass die Lüftungsanlage ausreicht, die bewohnerbedingten Belastungen der Raumluft abzuführen. Das zeigt auch die Beantwortung der Frage nach der Wirksamkeit der Lüftung gegen Gerüche (s.o.). Allerdings werden Gerüche stärker wahrgenommen, wenn Bewohner nach Abwesenheit wieder ins Gebäude kommen. Wird in der Zwischenzeit die Lüftungsanlage nur auf einer schwachen Stufe betrieben, so können auch geringfügige Gerüche von Möbeln Teppichen oder aus Kleidung wahrgenommen werden. Ein höherer Bedarf nach Frischluft bei häufigerer Abwesenheit ließe sich so erklären.

Damit wird auch die naheliegende Vermutung, dass der höhere Heizenergieverbrauch, der bei höherer Anwesenheitsquote zu beobachten ist, (vgl. Abschnitt 6.4.4) durch zusätzliches Fensteröffnen zustande kommen könnte, widerlegt.

Abbildung 6.3.2-9: Geöffnete Fenster (gekippt oder ganz geöffnet) und Anwesenheit (Passivhäuser)



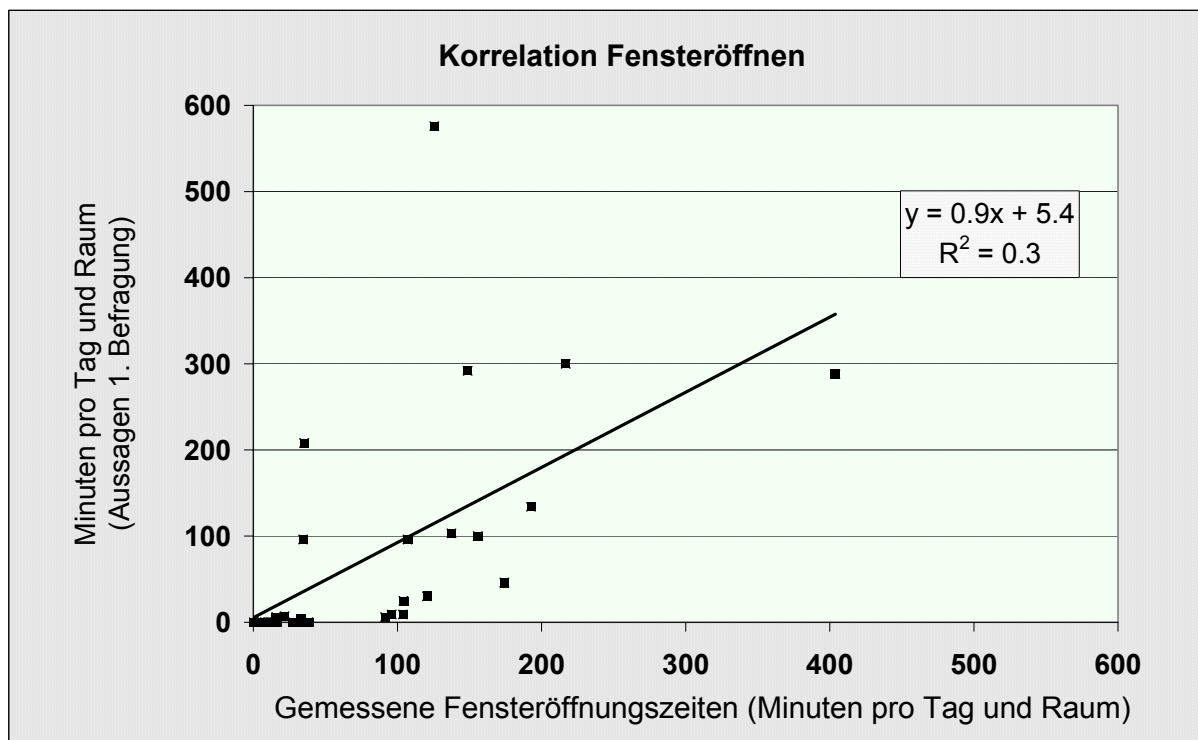
Vergleich von Messung und Befragung

Ab der Heizperiode 2000/2001 wurden die Fensteröffnungen auch mittels Fensterkontakten gemessen (vgl. Kapitel 4.2.9). Damit lassen sich über die subjektive Einschätzung der Bewohner hinaus die Fensteröffnungszeiten über einen längeren Zeitraum zuverlässig erfassen. Zwischen gekippten und ganz geöffneten Fenstern kann allerdings auf diese Weise nicht unterschieden werden.

Der Vergleich der Messergebnisse mittels Fensterkontakten und der Befragung zeigt, dass bei den Passivhäusern das Gesamtniveau der Fensterlüftung in der Heizperiode sehr gut übereinstimmt, während die Niedrigenergiehausbewohner die Dauer ihrer Fensteröffnungen im Mittel subjektiv zu überschätzen scheinen. Die erste Befragung bezieht sich auf die Heizperiode 1999/2000, die 2. Befragung und die hier verwendeten Messergebnisse beziehen sich auf die Heizperiode 2000/2001.

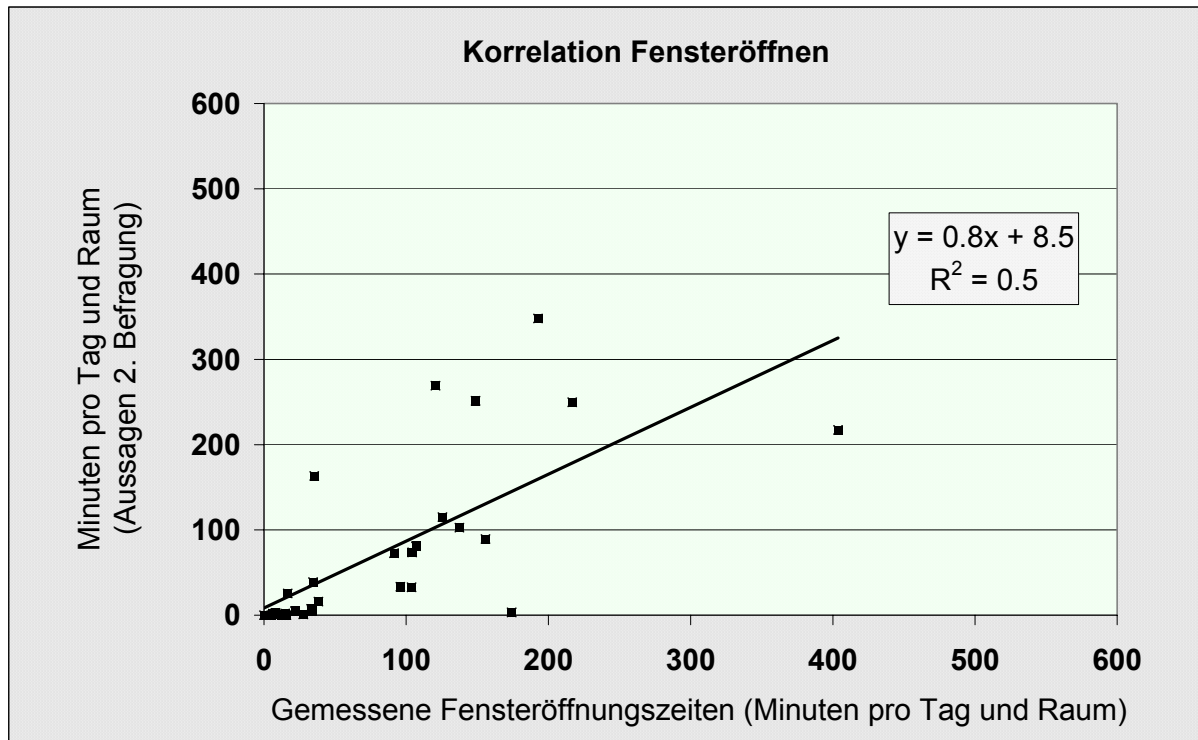
Die Korrelation zwischen erster Befragung und Messung (Abbildung 6.3.2-10) ist erwartungsgemäß mit 58% geringer als mit 70% zwischen zweiter Befragung und Messung (Abbildung 6.3.2-11), da die Bewohner ihr Öffnungsverhalten z.T. auch geändert haben. In jedem Fall ist die Korrelation hochsignifikant.

Abbildung 6.3.2-10: Korrelation von Bewohneraussagen aus der 1. Befragung und Messergebnissen 2000/2001 zur Fensteröffnung im Winter (Passivhäuser und Niedrigenergiehäuser)



Eine noch bessere Übereinstimmung erhält man bei den Passivhäusern allein: Die Korrelation zwischen erster Befragung und Messung beträgt 67%, zwischen Messung und zweiter Befragung 74% (Abbildung 6.3.2-12).

Abbildung 6.3.2-11: Korrelation von Bewohneraussagen aus der 2. Befragung und Messergebnissen 2000/2001 zur Fensteröffnung im Winter (Passivhäuser und Niedrigenergiehäuser)



In einigen Fällen gibt es jedoch erhebliche Abweichungen zwischen den Ergebnissen der Messungen und der Einschätzung der Bewohner. Abbildung 6.3.2-13 zeigt die Ergebnisse der Bewohneraussagen, und zwar sortiert nach den Messergebnissen. Die am weitesten links auf der Abszisse erscheinenden Häuser öffnen gemäß der Messungen ihre Fenster am wenigsten.

Erstaunlich ist in jedem Fall die gute Übereinstimmung im Durchschnitt: Bei der 2. Befragung wurden die durchschnittlichen Fensteröffnungszeiten bei den Passivhäusern sehr genau geschätzt. Der Unterschied beträgt mit 0,92 Stunden pro Fenster und Tag bei der Befragung und 0,88 Stunden pro Tag bei der Messung (Durchschnittswerte im Zeitraum November bis Februar) nur wenige Prozent.

Immer noch gut, aber nicht ganz so gut wie bei den Passivhäusern ist die Übereinstimmung bei den Niedrigenergiehäusern: Bei der ersten Befragung lagen die Angaben durchschnittlich 8% über, bei der zweiten Befragung 14% unter dem durchschnittlichen Messergebnis von 2,54 Stunden pro Tag und Raum.

Abbildung 6.3.2-12: Korrelation von Bewohneraussagen der 2. Befragung und der Messung der Heizperiode 2000/2001 bei den Passivhäusern

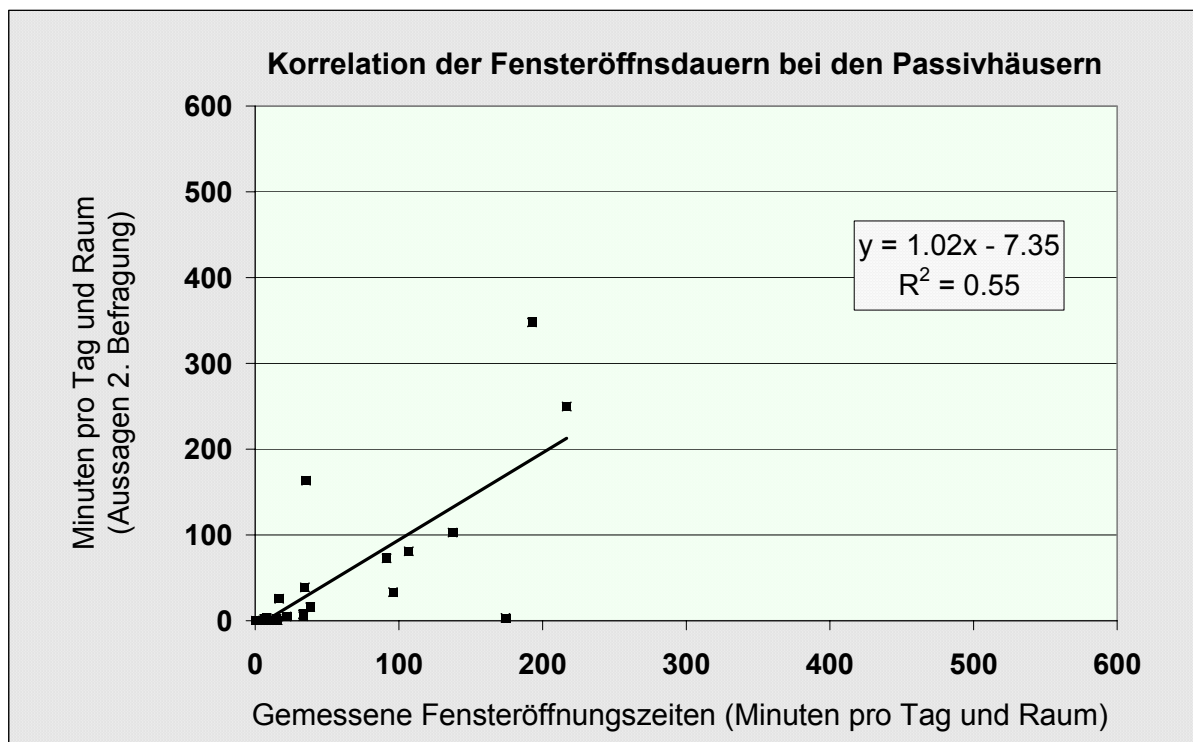
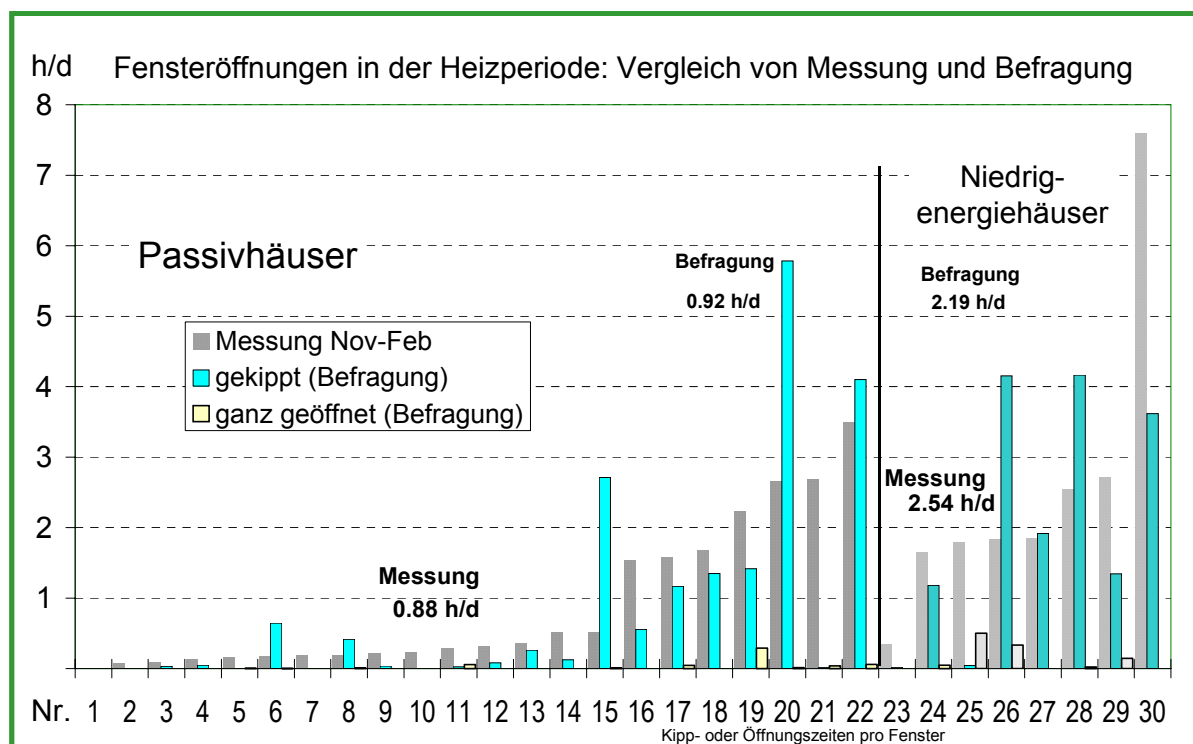


Abbildung 6.3.2-13 Fensteröffnungen in der Heizperiode: Vergleich von Messung und Befragung

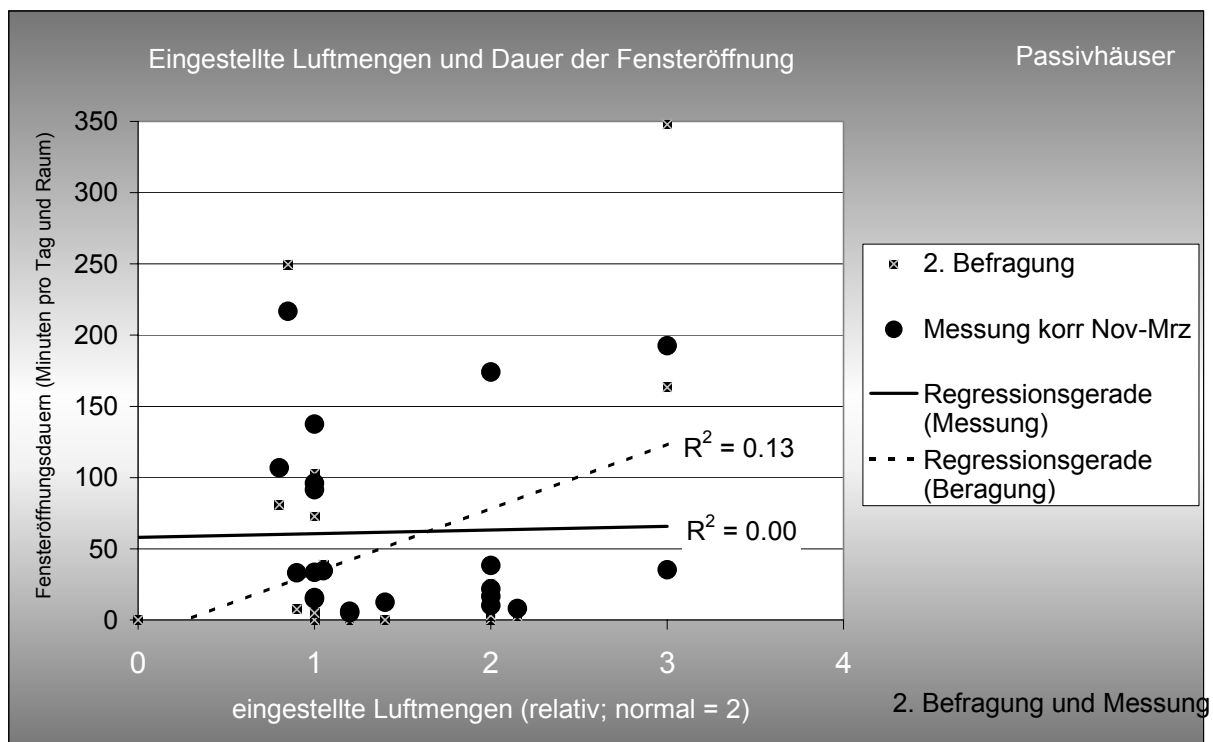


Damit ist gezeigt, dass Befragungen geeignet sind, eine Einschätzung über den Umfang der Fensteröffnung zu geben, sofern eine entsprechende Aufmerksamkeit der Bewohner vorausgesetzt werden kann. Die Aufmerksamkeit ist bei den Bewohnern der Passivhäuser offenbar sehr hoch, bei denen der Niedrigenergiehäuser etwas geringer. Insgesamt wird aber sowohl das Gesamtniveau sehr gut wiedergegeben als auch hohe Korrelationen zwischen angegebenen und gemessenen Werten erreicht.

Dies bedeutet aber noch nicht, dass die Genauigkeit der Befragungen ausreicht, um auch die Zusammenhänge mit anderen Faktoren oder die Einflüsse des Fensteröffnens auf den Heizwärmeverbrauch im Einzelnen hinreichend genau zu beschreiben:

So scheint es zum Beispiel eine signifikant positive Korrelation zwischen den eingestellten Luftmengen an der Lüftungsanlage und den Fensteröffnungsdauern zu geben (Abb. 6.3.2-14, gestrichelt) – demnach hätten Bewohner, die bereits die Luftmengen hoch einstellen auch einen deutlich erhöhten zusätzlichen Frischluftbedarf, der über die Fenster gedeckt wird. Tatsächlich ist dies aber lediglich der eigene subjektive Eindruck. Ein Zusammenhang zwischen den Einstellungen der Lüftungsanlage und den *gemessenen* Fensteröffnungszeiten ist nicht vorhanden (vgl. Abbildung 6.3.2-14).

Abbildung 6.3.2-14: Eingestellte Luftmengen der Lüftungsanlage und Fensteröffnungsdauern bei den Passivhäusern



Am deutlichsten wird die Auswirkung des Unterschieds zwischen den Erhebungsarten der Fensteröffnungszeiten, wenn versucht wird, die Auswirkungen mehrerer Einflussgrößen auf den Heizenergieverbrauch zu erfassen. Mit einer Regressionsanalyse sowie mit einer

Gebäudesimulation, in der die Auswirkungen der Einflussgrößen direkt physikalisch nachvollzogen werden, können die Ursachen für die Schwankungen beim Verbrauch identifiziert werden. Dabei zeigt sich, dass der Heizwärmeverbrauch mit den vorhandenen Befragungsergebnissen nicht ausreichend erklärt werden kann (vgl. Abschnitte 6.4.5, 6.4.6).

Messung und Befragung: Fensteröffnungen im Sommer

Durch die Messungen wird bestätigt, dass im Sommer erheblich mehr mit den Fenstern gelüftet wird als im Winter (vgl. Abbildung 6.3.2-15). Übereinstimmend ergeben sich aus Messungen und Befragungen Fensteröffnungszeiten (einschließlich Kippen) von im Durchschnitt zwischen 7 und 9 Stunden pro Tag und Raum im Frühsommer. Während des Sommers kommt es zu einer weiteren Steigerung bis zu 10-11 Stunden im August (s.a. Abschnitt 4.2.9). Dies führt zu einer wirkungsvollen Kühlung der Gebäude im Sommer (vgl. Abschnitt 6.2.2). Die Abweichungen zwischen Messungen und Befragung sind generell etwas höher als in der Heizperiode.

Die Korrelation zwischen Mess- und Befragungsergebnissen ist im Sommer deutlich geringer, aber mit 45% immer noch signifikant (Signifikanzniveau 5%) (Abbildung 6.3.2-16). Dies zeigt vor allem, dass die Bewohner mit den Fenstern innerhalb der Heizperiode sehr viel aufmerksamer und sorgfältiger umgehen als außerhalb.

Abbildung 6.3.2-15: Fensteröffnungen in der Heizperiode und im Sommer(August) im Vergleich

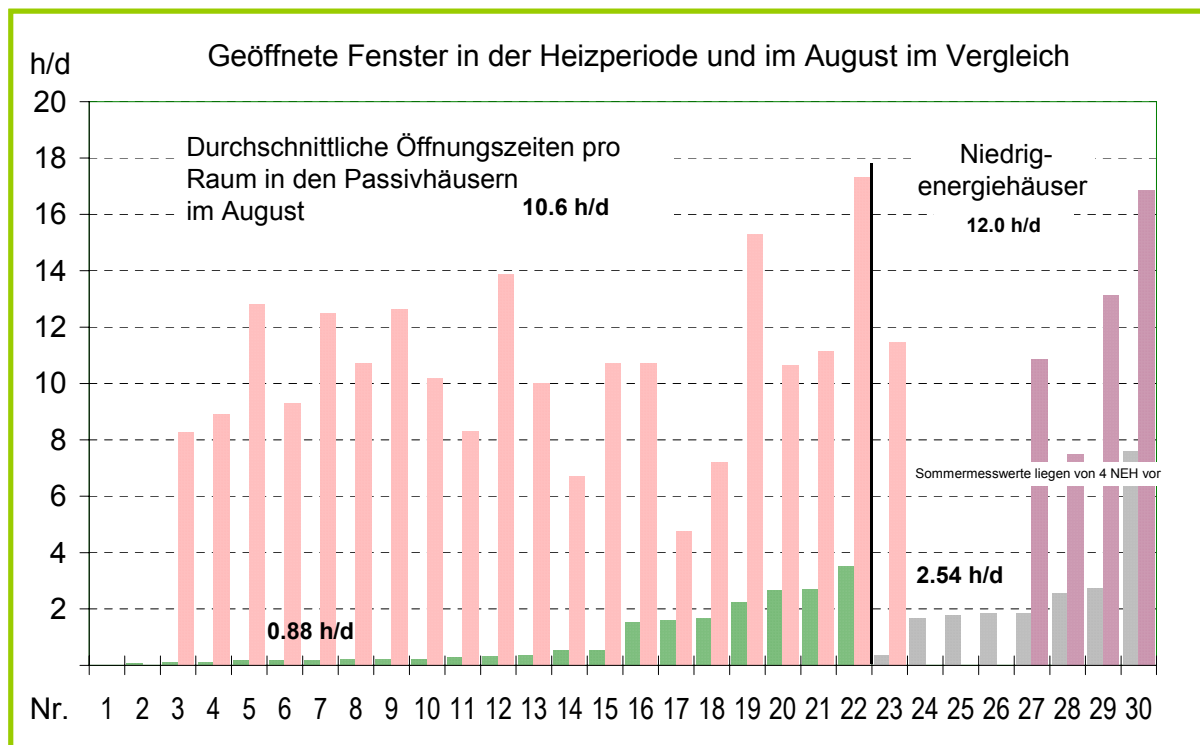


Abbildung 6.3.2-16: Vergleich von Mess- und Befragungsergebnissen im Sommer (3. Befragung /Messergebnisse von Mai-Juni 2001; Niedrigenergie- und Passivhäuser)

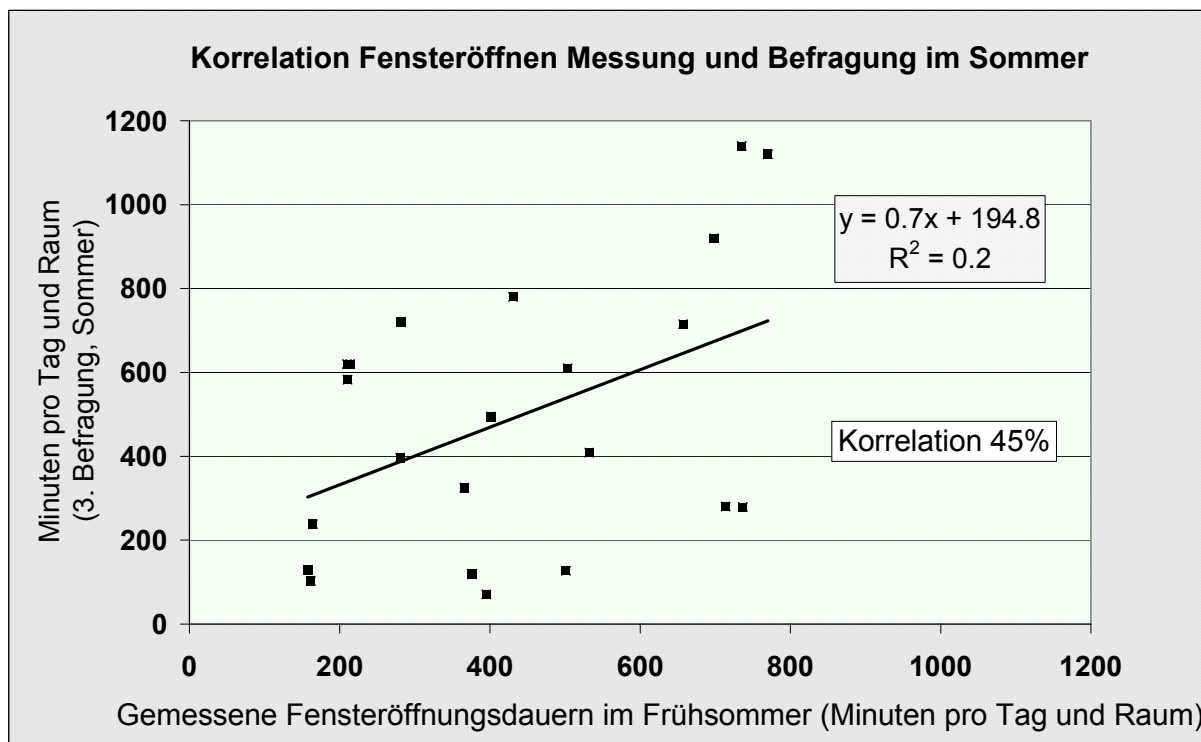
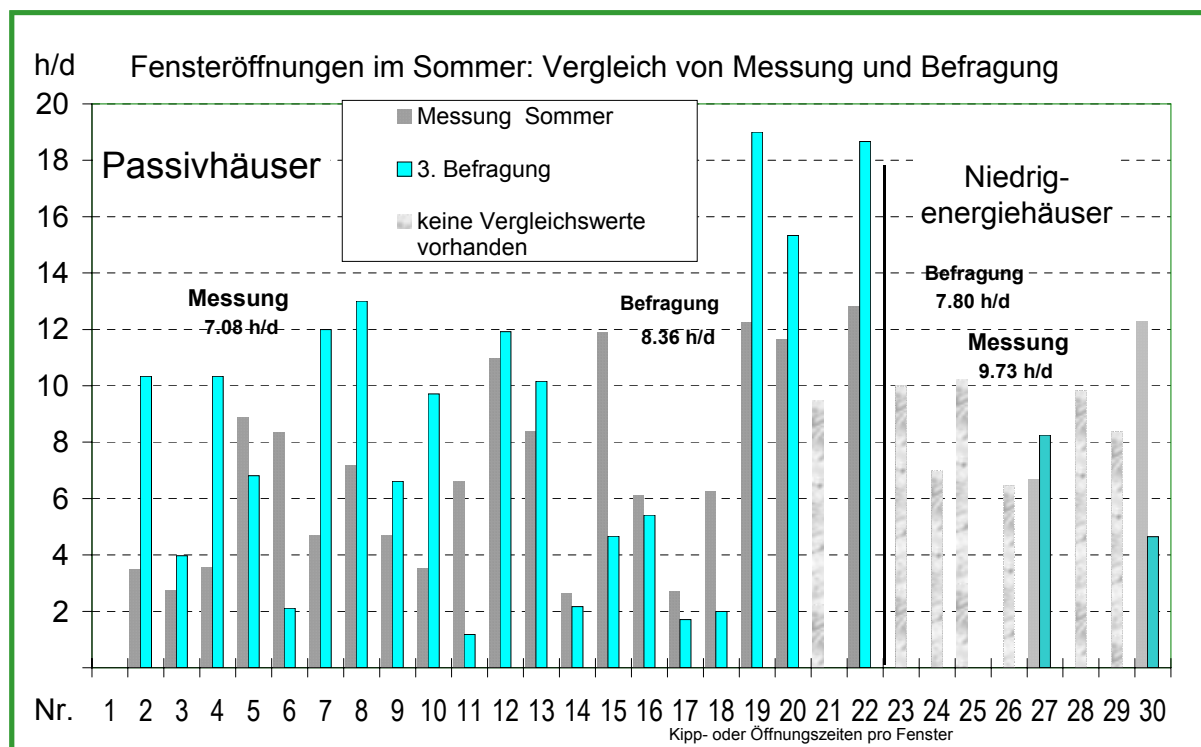


Abbildung 6.3.2-17: Vergleich von Mess- und Befragungsergebnissen im Sommer (3. Befragung /Messergebnisse von Mai-Juni 2001) sortiert nach Fensteröffnungszeiten in der Heizperiode



Bereits im Frühsommer wird über die Fenster bei den Passivhäusern etwa 9 mal so lange gelüftet wie in der Heizperiode, in den Niedrigenergiehäusern ist es dreimal so lange. Darüber hinaus werden vermehrt die Fenster auch ganz geöffnet und nicht nur gekippt. Alle Bewohner öffnen - trotz Lüftungsanlage – die Fenster im Sommer. Dabei ist die Nutzerstreuung auch hier sehr hoch.

Die Ursache hierfür ist nicht unmittelbar bekannt. Die Vermutung, dass die Frage nach der Bewertung des sommerlichen Innenklimas hierfür eine Rolle spiele, kann nicht bestätigt werden, es gibt keinen statistisch nachweisbaren Zusammenhang. Allerdings gibt es eine positive Korrelation zwischen Umfang der Fensteröffnung im Winter und im Sommer, die aber (bei einem Signifikanzniveau von 5%) ebenfalls nicht signifikant ist.

Sehr deutlich wird dagegen, dass es gelingt, durch verstärktes Fensteröffnen die sommerlichen Innentemperaturen zu senken. Die Korrelation zwischen zeitlicher Dauer des Fensteröffnens und der Raumlufttemperatur im Sommer beträgt -68% bei den Passivhäusern. (vgl. Abbildung 6.3.2-19). Dies entspricht den Erwartungen [112]. Es spricht auch einiges dafür, dass genau die Senkung der Temperaturen von den Bewohnern gewünscht wird: Die Raumtemperaturen in der Heizperiode und im Sommer sind positiv korreliert. Bewohner, die weniger heizen, wünschen anscheinend auch im Sommer eine geringere Raumlufttemperatur, die sie durch entsprechendes Verhalten auch erreichen können.

Abbildung 6.3.2-18: Vergleich des Fensteröffnungsverhaltens im Winter und im Sommer.

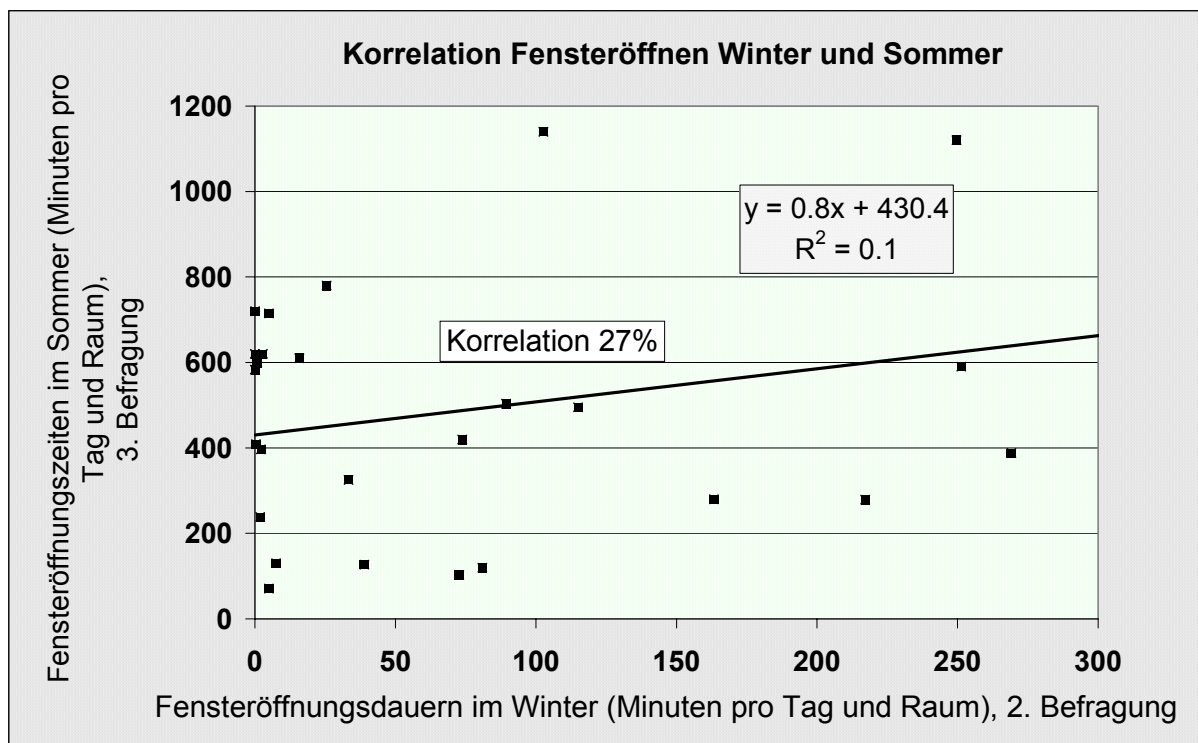
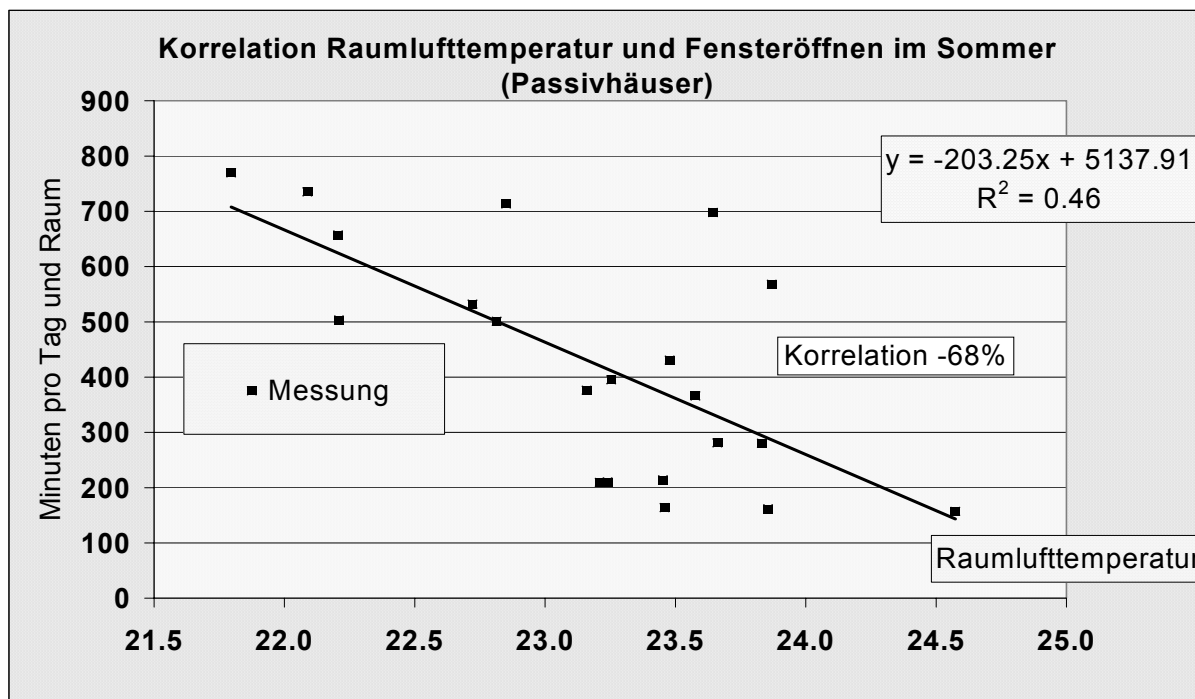


Abbildung 6.3.2-19: Fensteröffnen und Raumlufitemperaturen im Sommer.



Insgesamt gehen die Bewohner, insbesondere die der Passivhäuser sehr bewusst mit ihren Fenstern um. Dies gilt vor allem für die Heizperiode. Das Fensteröffnen wird nicht über begrenzte Zeiträume ausgedehnt, die meisten Bewohner richten sich darüber hinaus nach dem Wetter. Bei den Passivhausbewohnern stellt sich im Mittel ein vernünftiges Fensteröffnungsverhalten von selbst ein, da die Bewohner im Kernwinter offensichtlich wenig Bedürfnis nach zusätzlicher Fensteröffnung verspüren. Dementsprechend sind, wie im folgenden Abschnitt 6.4 gezeigt werden wird, auch die Auswirkungen auf den Heizwärmeverbrauch zwar vorhanden, aber nicht sehr hoch. Unter der Voraussetzung eines verantwortungsvollen Umgangs mit den Fenstern zeigt sich, dass das Passivhaus in der Praxis weniger empfindlich ist gegen einzelnes, auch länger anhaltendes Fensteröffnen als oftmals befürchtet.

6.4 Einflussgrößen auf den Heizenergieverbrauch

Als die wichtigste Einflussgröße erweist sich der bauliche Standard. Mit einer Korrelation von regelmäßig über 50% mit dem Heizwärmeverbrauch dominiert er alle anderen Einflussgrößen.

An nächster Stelle in ihrer Bedeutung stehen die Raumlufthtemperatur und weitere messtechnisch erfasste Größen, insbesondere weitere Verbrauchswerte (Strom, Warmwasser).

Neben den messtechnisch erfassten Größen liefern die Bewohnerbefragungen zusätzliche Informationen, die zur Erklärung der beobachteten Verbrauchswerte herangezogen werden können. Dabei werden sowohl statistische Verfahren benutzt als auch Energiebilanzverfahren. Im Folgenden werden zunächst rein statistische Analysen vorgestellt. Die Analyse auf der Basis der Energiebilanzen wird in Abschnitt 6.4.6 dargestellt werden.

6.4.1 Raumlufthtemperaturen

Als nutzerbedingte Einflussgröße ist zuallererst die Raumlufthtemperatur zu erheben. Der Einfluss der Raumlufthtemperatur ist einerseits physikalisch am einfachsten zu erfassen und zweitens auch zu messen. In dieser Untersuchung wurden die Bewohner zusätzlich gefragt, welche Temperatur sie am zentralen Heizungsregler eingestellt hatten; dabei waren sowohl Temperaturen für den Tag- als auch für den Nachtbetrieb (Absenkungsphase, die auch tagsüber z.T. aktiviert wird). Es stellt sich heraus, dass es zwischen diesen Größen praktisch keine Korrelation gibt. (vgl. Abbildung 6.4.1-1a und 6.4.1-1b).

Offenbar wird die zentrale Heizungsregelung von vielen der Bewohner nicht genutzt. Insbesondere bei höheren eingestellten Temperaturen wird vor allem über die Thermostatventile an den Heizkörpern geregelt.

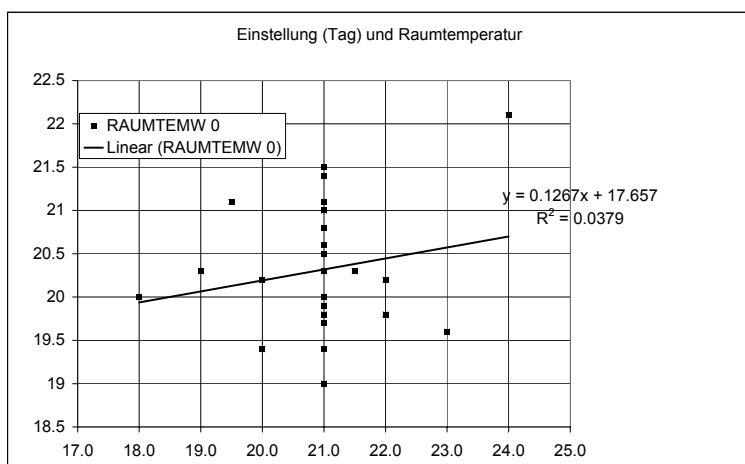
Die Einstellungen wurden meistens nur erfragt und nicht überprüft.

Die Temperatur ist eine der wichtigsten nutzerbedingten Einflussgrößen auf den Heizwärmeverbrauch. Isoliert betrachtet, ist der Zusammenhang zwischen den beiden Größen zunächst innerhalb der untersuchten Gesamtgruppe nicht signifikant: So beträgt die Korrelation zwischen Raumlufthtemperatur in der Heizperiode 1998/1999 nur 24%, ein Jahr später 19%, 2 Jahre später ebenfalls 24%.

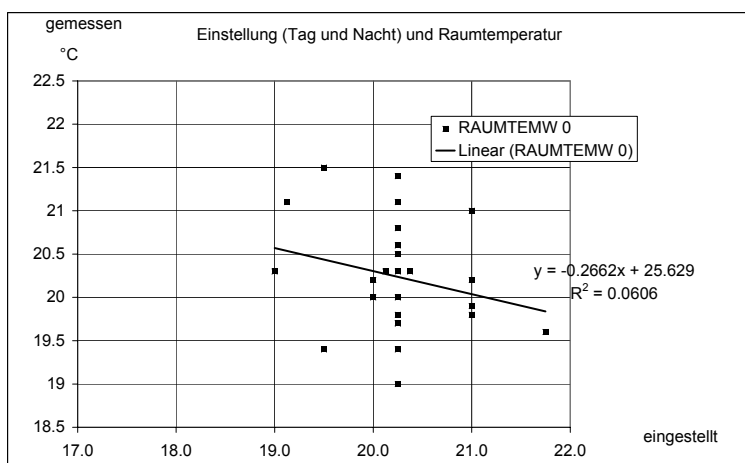
Der Grund ist vor allem darin zu suchen, dass der bauliche Unterschied zwischen den Niedrigenergiehäusern und Passivhäusern immer noch dominant ist, obwohl er in diesem Fall nicht sehr hoch ist. Betrachtet man nämlich die Passivhäuser allein, so hat die Raumlufthtemperatur eine weitaus höhere Bedeutung:

Abbildung 6.4.1-1: Raumlufthemperaturen: Vergleich von eingestellter Temperatur am zentralen Heizungsregler (Bewohneraussagen) und gemessenen Raumlufthemperaturen.

a) Korrelation zwischen eingestellter Tagestemperatur und gemessener Raumlufthemperatur



b) Korrelation zwischen eingestellter Temperatur (gemittelt aus Tag- und Absenktemperatur) und gemessener Raumlufthemperatur



Auffällig ist allerdings, dass der unmittelbare statistische Zusammenhang in den verschiedenen Jahren recht unterschiedlich ausfällt. In der Heizperiode 1998/1999 beträgt er nur 28%, in der Heizperiode 2000/2001 dagegen 63%. Aus diesem Grund kann der Einfluss der Raumlufthemperaturen nicht isoliert betrachtet werden; erst mit anderen Einflüssen zusammen ergibt sich ein klares Bild über den Beitrag der einzelnen Einflussgrößen (vgl. Abschnitt 6.4.5 und 6.4.6).

Abbildung 6.4.1-1: Korrelation zwischen Heizwärme und Raumlufttemperatur

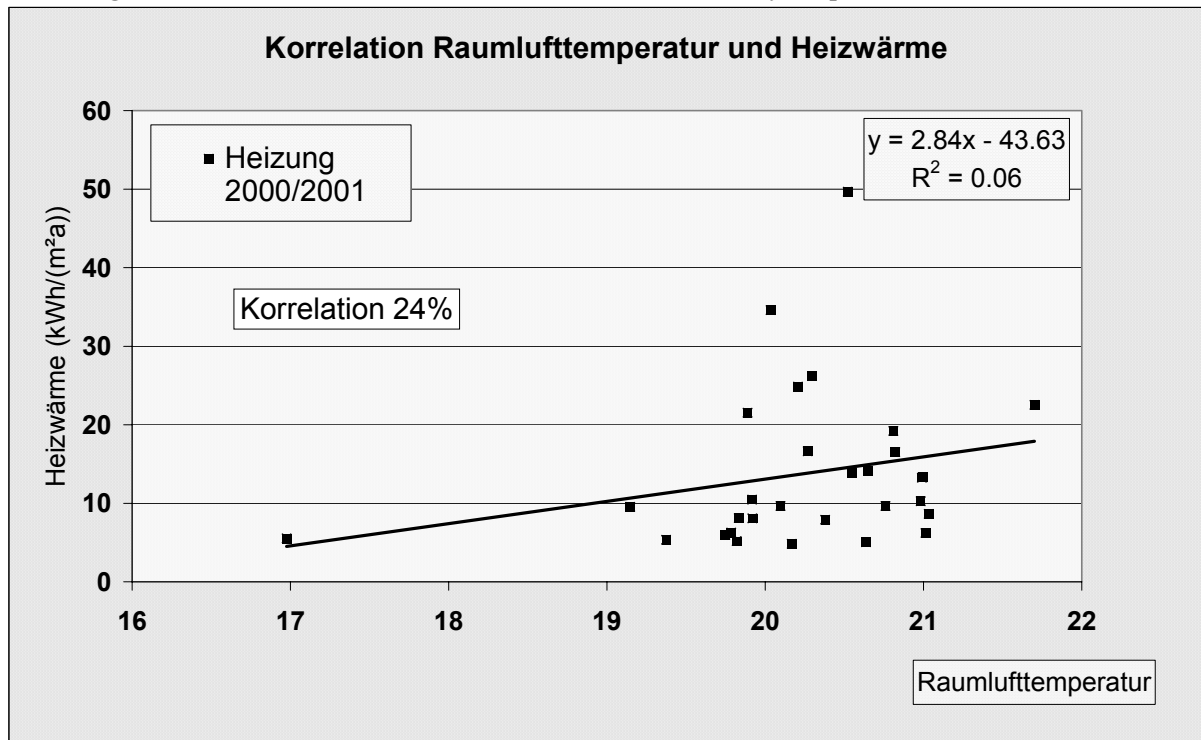
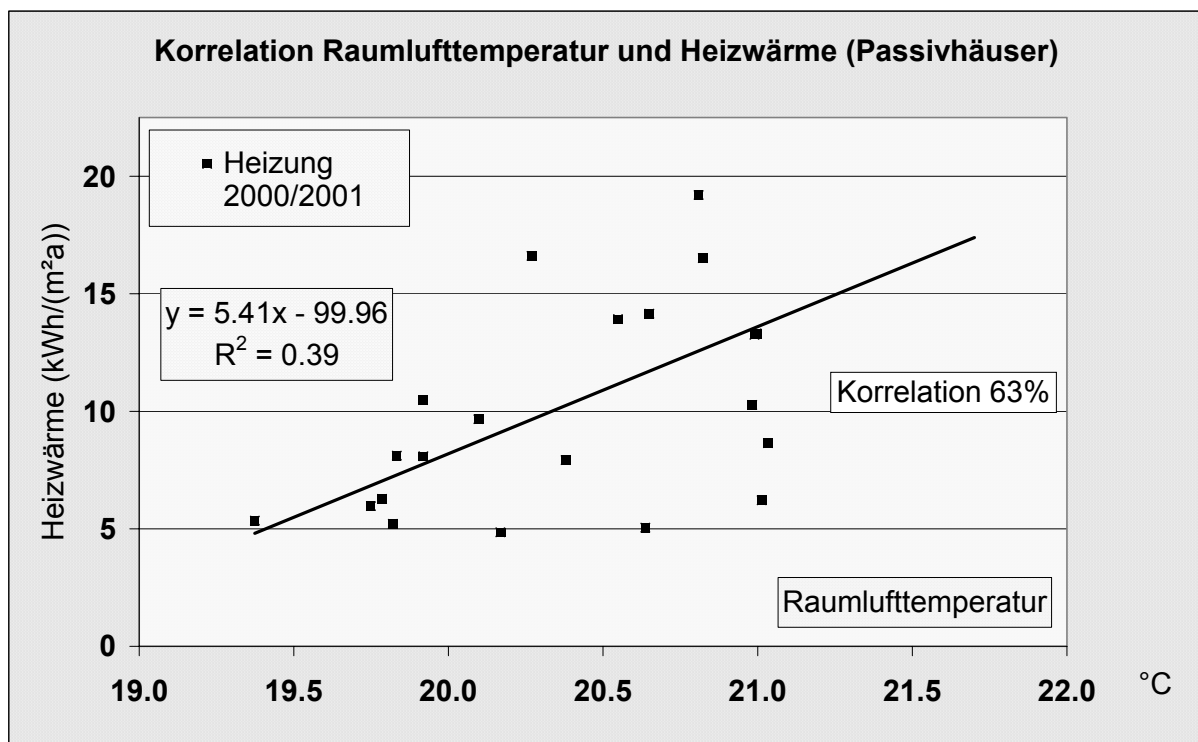


Abbildung 6.4.1-3. Korrelation zwischen Heizwärmeverbrauch und Raumlufttemperatur bei den Passivhäusern 2001/2002



6.4.2 Einfluss des Fensteröffnens

Die Ergebnisse zu den Fensteröffnungszeiten wurden bereits in den Abschnitten 4.2.9 und 6.3.2 dargestellt. Hier soll untersucht werden, ob ein nachweisbarer Einfluss des Fensteröffnungsverhaltens, das sowohl durch die Messung mit den Fensterkontakten als auch in mehreren Befragungen sehr detailliert erfasst wurde, besteht. Auf der Basis der Befragungsergebnisse zum Fensteröffnen und der Messergebnisse zum Heizenergieverbrauch kann ein Einfluss zunächst – d.h. ohne Berücksichtigung anderer Einflussgrößen - nicht nachgewiesen werden. Die scheinbare Korrelation in Abbildung 6.4.2-1 erklärt sich aus dem unterschiedlichen Fensteröffnungsverhalten in den Passiv- und Niedrigenergiehäusern. Betrachtet man die Passivhäuser allein, ist die Korrelation sogar negativ (Abbildung 6.4.2-2). Auch zwischen gemessenen Fensteröffnungsdauern und Heizwärmeverbrauch gibt es zunächst noch keine direkte Korrelation. Dafür gibt es mehrere Gründe:

- Zum einen ist z.B. bekannt, dass Nutzer in Zeiten geringerer Außentemperaturen und höheren Windanfalls, also dann, wenn das Fensteröffnen einen größeren Einfluss auf den Verbrauch hat, die Fenster stärker geschlossen halten [113]. Von den Bewohnern wurde bestätigt, dass das Wetter bei ihrem Fensteröffnungsverhalten eine Rolle spielt (vgl. Abschnitt 6.3.2) und deckt sich mit den Messergebnissen (Abbildung 4.2.9-9 – 4.2.9-11).
- Es gibt Einflüsse, die deutlich wichtiger sind als die (in diesen Häusern verbliebene) Fensterlüftung, so dass der letztere Einfluss erst dann erkannt werden kann, wenn die anderen Einflüsse berücksichtigt sind. Tatsächlich ist unter diesen Umständen der Einfluss des Fensteröffnens nachweisbar (vgl. Abschnitte 6.4.5 und 6.4.6).

Vor allem liegt es an der Bedeutung anderer dominanter Einflussgrößen, durch die ein unmittelbares Erkennen der Zusammenhänge erschwert wird, vor allem dann, wenn diese auch untereinander korrelieren. Interessanterweise ist nämlich die mittlere Raumtemperatur bei denjenigen, die Fenster häufiger öffnen, signifikant geringer (vgl. Abb. 6.4.2-4). Diese Bewohner sind offenbar im Durchschnitt mit einem niedrigeren Temperaturniveau zufrieden. Dies spielt eine sehr wichtige Rolle, denn vor allem die Temperaturen und die damit verbundenen Transmissionswärmeverluste entscheiden über den Verbrauch.

Darüber hinaus zeigt dieses Ergebnis, dass ein häufigeres Fensteröffnen (oder gar undichtere Gebäude) für die Mehrheit der Nutzer, die die Fenster ja nicht oder nur selten öffnet, zu Komforteinbußen (oder höherem Verbrauch) führen würde. Auf die Forderung einer ausreichenden Luftzufuhr über die kontrollierte Lüftung sowie luftdichte Gebäude für Passivhäuser kann im Interesse der Bauschadensfreiheit, des Komforts und der Selbstbestimmung der Nutzer nicht verzichtet werden.

Abbildung 6.4.2-1: Fensteröffnungsverhalten und Heizenergieverbrauch (2. Befragung) in den Niedrigenergie- und Passivhäusern – Niedrigenergiehäuser öffnen die Fenster häufiger

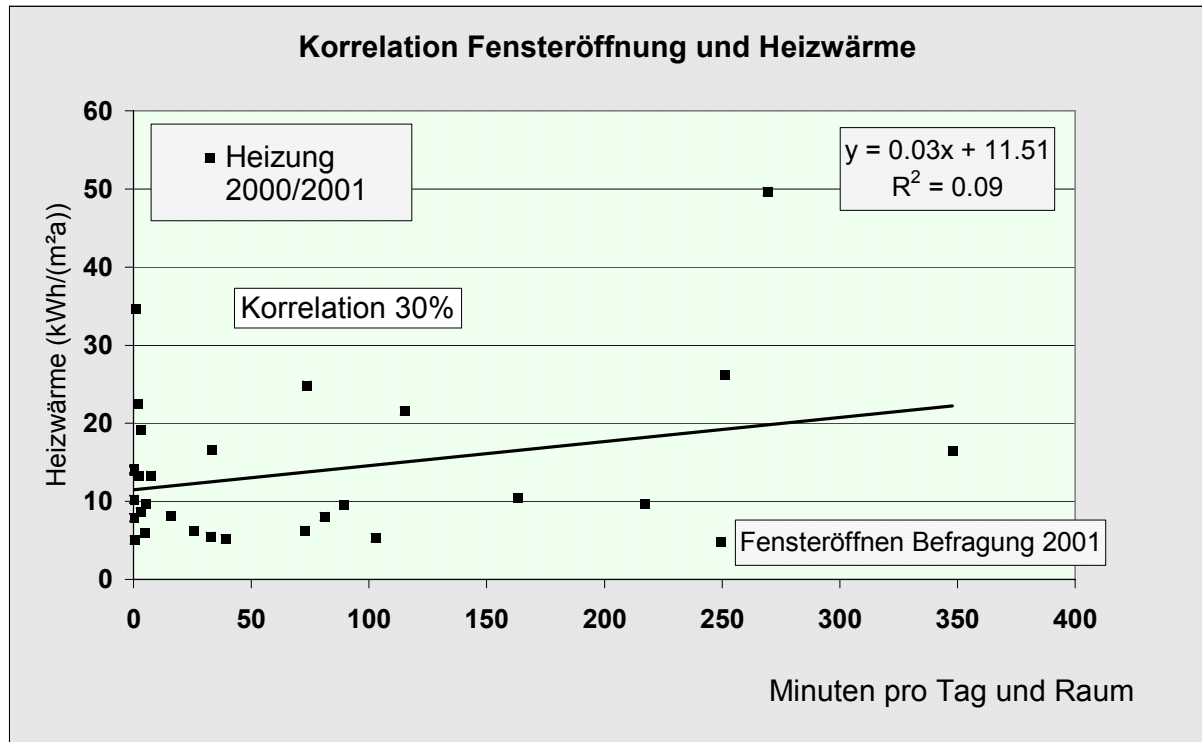


Abbildung 6.4.2-2: Fensteröffnungsverhalten und Heizenergieverbrauch in den Passivhäusern

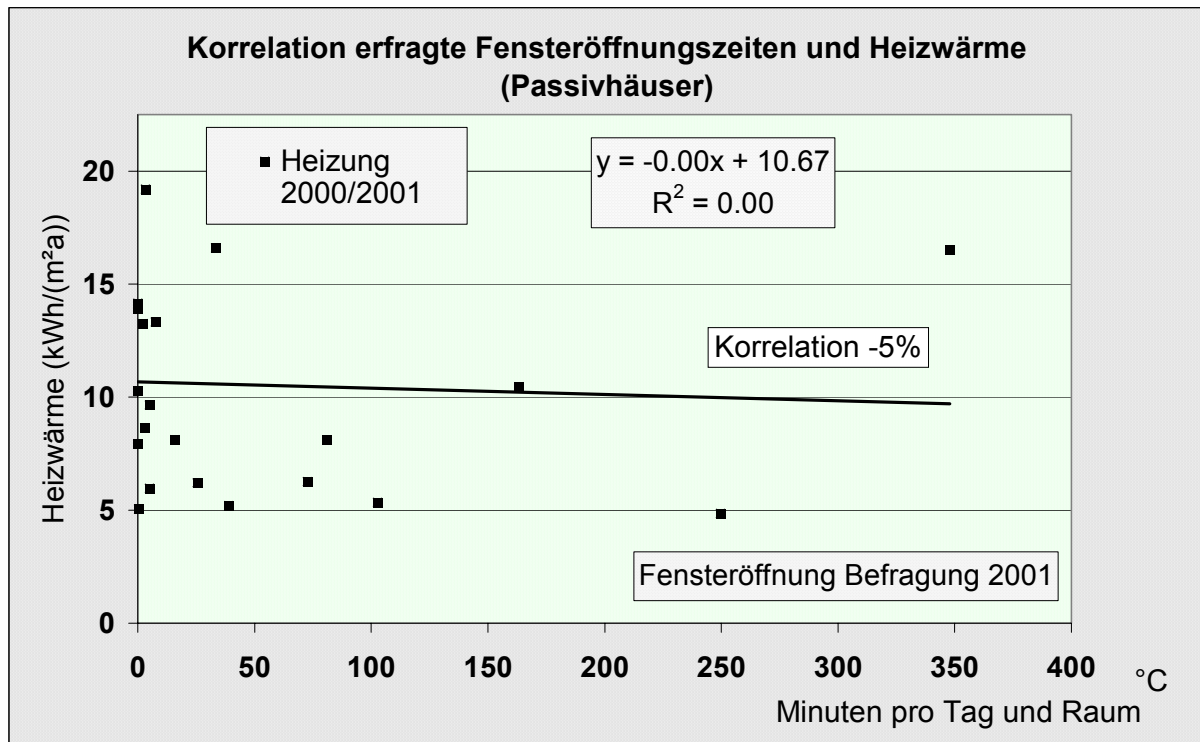


Abbildung 6.4.2-3: Korrelation zwischen gemessenen Fensteröffnungsdauern und Heizwärmeverbrauch bei den Passivhäusern; zur Interpretation vgl. auch Abb. 6.4.2-4 unten

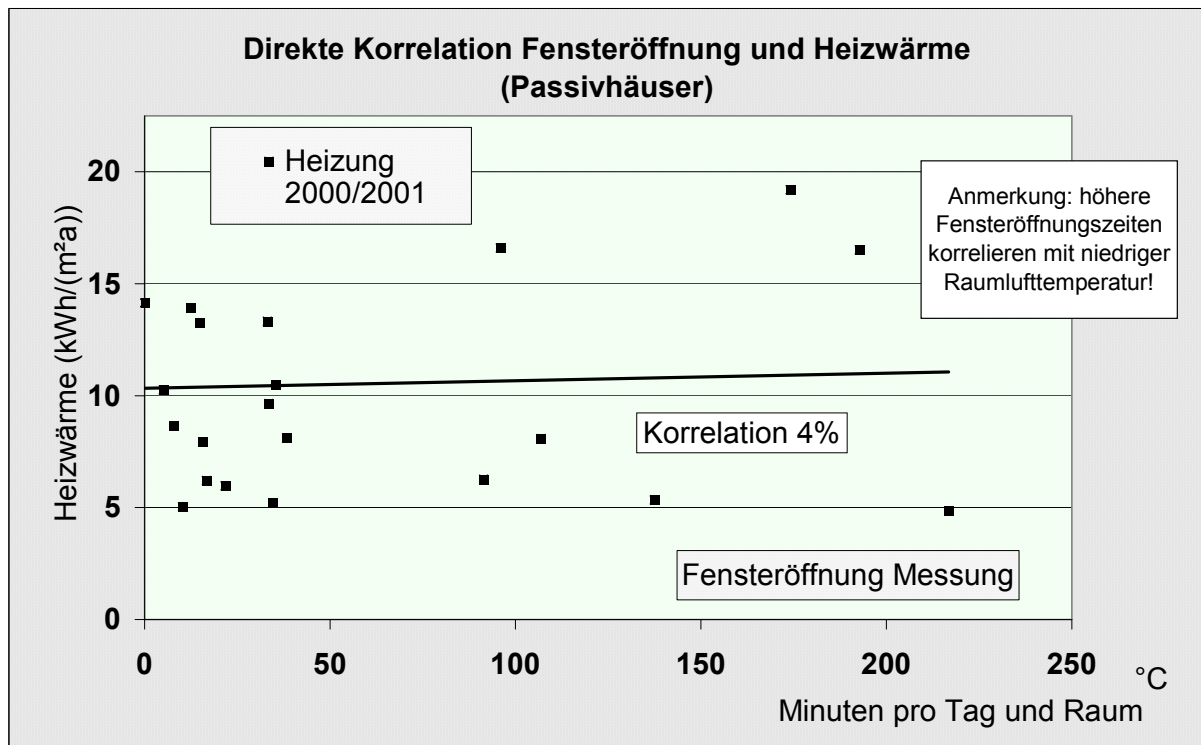
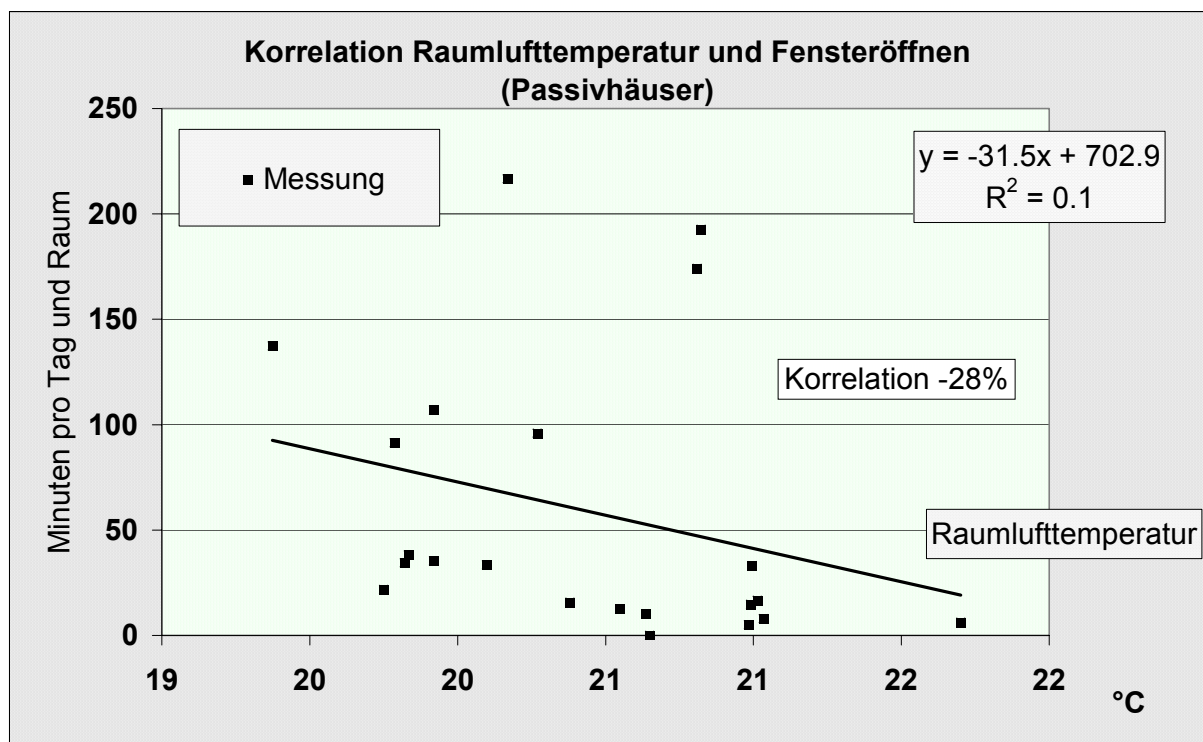


Abbildung 6.4.2-4: Korrelation zwischen gemessenen Fensteröffnungsdauern und Raumlufttemperatur bei den Passivhäusern: Haushalte mit höheren Fensteröffnungszeiten haben im Durchschnitt geringere Raumlufttemperaturen; dies ist eine Erklärung für die geringe direkte Korrelation zwischen Fensteröffnungszeiten und Verbrauch (Abb.6.4.2-3)

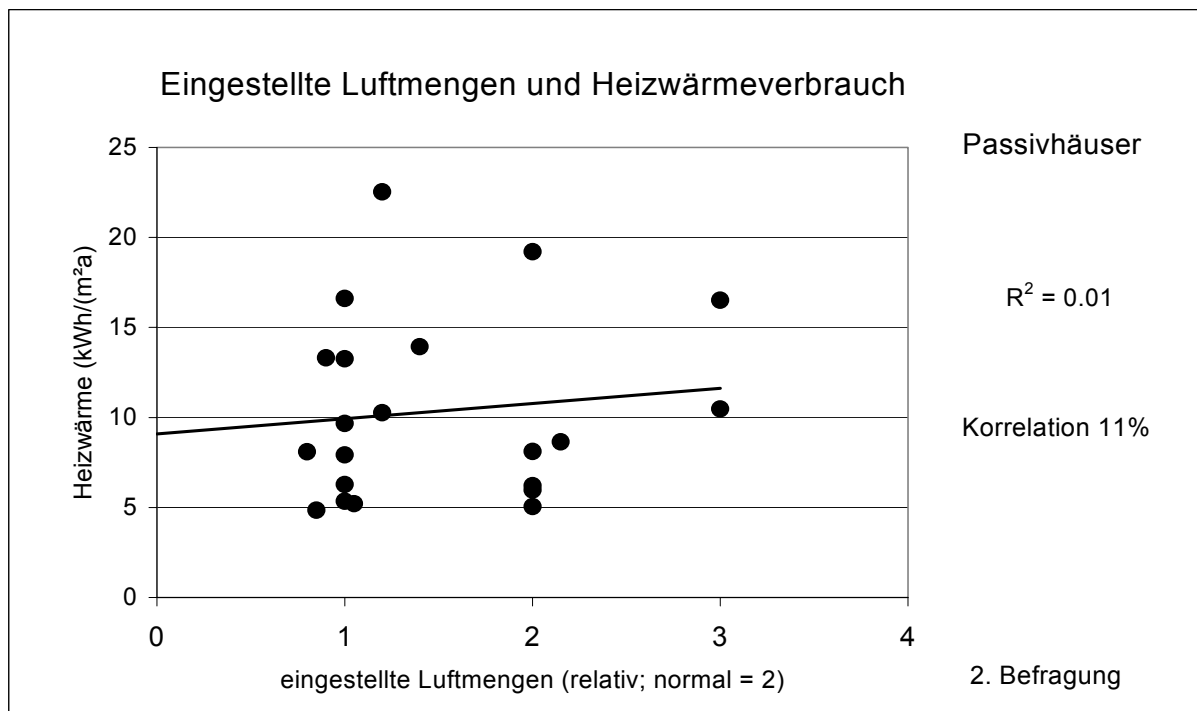


6.4.3 Betrieb der Lüftungsanlage

An den Ventilatoren des Gegenstromwärmetauschers lassen sich die Zuluft- und die Abluftseite getrennt regeln. Bei Einmessung der Anlagen wurden jeder der drei Luftwechselraten „normal“ (etwa 0,5/h), „minimal“ und „maximal“ balanciert eingestellt und die jeweiligen Positionen der Ventilatoren individuell bei jeder Anlage festgehalten und markiert. Es war vorgesehen, dass die Anlagen mit diesen drei balancierten Einstellungen gefahren werden, vorzugsweise in der Normalstellung bzw. bei vorübergehendem Mehr- oder Minderbedarf in der Maximal- oder Minimalstellung (vgl. Abschnitt 6.3.1). Hier soll untersucht werden, ob die Einstellung der Lüftungsanlage den Heizwärmeverbrauch beeinflusst. Einen direkten Zusammenhang gibt es nicht, die geringe Korrelation wäre nicht einmal bei einem einseitigen Test mit Signifikanzniveau 25% signifikant und muss daher hier als zufällig angesehen werden.

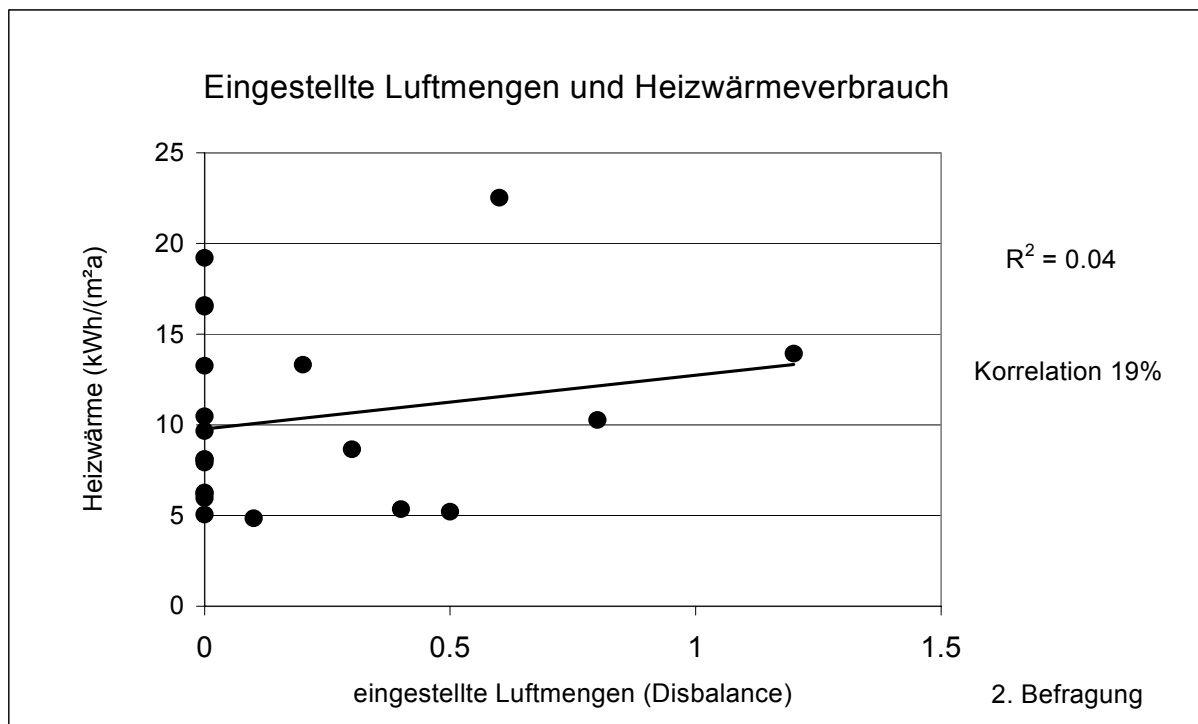
Bei der zweiten Befragung wurde ebenfalls erfasst, ob die Lüftungsanlagen balanciert betrieben werden. Ist dies nicht der Fall, geht ein Teil des Luftvolumenstroms an dem Gegenstromwärmetauscher vorbei und führt zu erhöhten Wärmeverlusten. Es wurde untersucht, ob die anhand der Einstellungen bei Zu- und Abluftventilator vermutete Disbalance mit dem Heizwärmeverbrauch korreliert ist. Die Korrelation beträgt 19% und wäre bei erst bei einem einseitigen Test mit Signifikanzniveau 20% signifikant; ein statistischer Zusammenhang ist damit keinesfalls erwiesen.

Abbildung 6.4.3-1 Heizenergieverbrauch und Einstellung der Lüftungsanlage in den Passivhäusern



Abszisse: Relative Einstellungen der Lüftungsanlage. „normal“=2, „minimal“=1, „maximal“=3, „aus“=0. Dazwischenliegende Einstellungen interpoliert.

Abbildung 6.4.3-2: Disbalance bei der Ventilatoreinstellung und Heizwärmeverbrauch



6.4.4 Innere Quellen: Stromverbrauch, Warmwasserverbrauch und Anwesenheit

Bei den geringen Verbräuchen der Niedrigenergiehäuser und der Passivhäuser spielen die inneren Wärmequellen in der Heizenergiebilanz eine wesentliche Rolle. Als innere Wärmequellen wirken insbesondere:

- Die Abwärme der elektrischen Geräte
- Die Wärmeabgabe der Warmwasserrohre
- Die anwesenden Personen.

Alle Einflussgrößen verringern den Heizenergiebedarf.

Die Korrelation zwischen spezifischem Stromverbrauch und spezifischem Heizenergieverbrauch erweist sich als positiv. Bewohner mit hohem Stromverbrauch verbrauchen auch mehr Heizenergie. Allerdings ist diese Korrelation nicht signifikant. Dennoch ist bemerkenswert, dass sich ein höherer Stromverbrauch mit mehr Abwärmeleistung nicht in einer Verringerung der Heizenergie bemerkbar macht, sondern – beobachtbar – in einer erhöhten Raumlufttemperatur. Dieser Effekt wird vor allem dann deutlich, wenn man nicht alle Häuser betrachtet, sondern nur die Passivhäuser. Er könnte zwei Ursachen haben: Einerseits könnten Bewohner mit hohem Stromverbrauch auch höhere Raumlufttemperaturen wünschen, andererseits könnten die vorhandenen Regeleinrichtungen nicht schnell genug auf erhöhte Quellen reagieren. Für beide Vermutungen konnten keine bestätigenden Hinweise gefunden

werden: Der Stromverbrauch korreliert nicht mit den sommerlichen Innentemperaturen, und andererseits sind die Haushalte mit höherem Stromverbrauch nicht unzufriedener als die mit niedrigerem. Die durch erhöhte innere Wärmequellen bewirkte Temperaturerhöhung im Winter liegt offensichtlich im Toleranzbereich.

Keine Korrelation ist erkennbar zwischen Heizenergieverbrauch und Warmwasserverbrauch. Hier kompensieren sich möglicherweise auch zwei Effekte: allgemeines Verbrauchsverhalten (positive Korrelation) und Verminderung der Heizenergie bei erhöhtem Warmwasserverbrauch mit damit verbundener erhöhter innerer Quelle.

Schließlich spielt für die Heizenergiebilanz die Anwesenheit von Personen eine erhebliche Rolle. Erwachsene Personen tragen 100 Watt (trockene) Heizleistung bei.

Allerdings gibt es keinen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen dem Wert für die durchschnittlich anwesenden Personen und dem Heizenergieverbrauch. Aufschluss gibt die Untersuchung der tatsächlichen Anwesenheit der dort wohnenden Personen: Je höher die Anwesenheitsquote ist, desto höher ist der Verbrauch. Anwesende Personen tragen also durch ihre Aktivitäten zu einer Erhöhung des Heizenergieverbrauchs (höhere Einstellung der Raumtemperatur als bei Abwesenheit, oder häufigeres Fenster- und Türenöffnen) bei. Oder: Höhere Anwesenheit entsteht durch Kleinkinder oder ältere Leute, die die Wohnung weniger verlassen als Berufstätige, und die gleichzeitig ein höheres Temperaturniveau wünschen. Tatsächlich ist die Anwesenheitsquote stark mit der Raumlufttemperatur korreliert. Zwar werden auch die Fenster weniger geöffnet (6.3.2), der Effekt der Erhöhung der Raumlufttemperatur ist jedoch dominant und führt zu einem höheren Heizwärmeverbrauch.

6.4.5 Empirische Einflussgrößen im Vergleich

Die wichtigste Einflussgröße auf den Heizenergieverbrauch in der Passivhaussiedlung ist der wärmetechnische Standard. Er dominiert alle anderen Einflussgrößen. Bezogen auf die Gesamtmenge der untersuchten Häuser der Siedlung, ist es die einzige statistisch signifikante Einflussgröße. Die Bedeutung aller anderen Einflussgrößen lässt sich nur dann korrekt erfassen, wenn man sie - ergänzend oder alternativ – für die Gebäudetypen getrennt untersucht.

Sieht man sich die Einflussgrößen im Einzelnen an, so zeigt sich, dass für den spezifischen Heizenergieverbrauch vor allem die folgenden Einflussgrößen relevant sind:

- der wärmetechnische Standard
- die Raumlufttemperatur als bedeutendste nutzerbedingte Einflussgröße
- In geringerem Maße:
 - Haushaltsgröße (negative Korrelation – entspricht der physikalischen Erklärung: höhere innere Wärmequellen senken den Heizenergieverbrauch).
 - Wohnungsgröße (negative Korrelation – entspricht der physikalischen Erklärung: höhere Kompaktheit senkt Verluste und Heizenergiebedarf). Die Wohnungsgröße liefert

auch dann noch ein Erklärungspotenzial, wenn die Haushaltsgröße (Anzahl der Personen) bereits berücksichtigt wurde.

- Die Anwesenheitsquote, d.h. die faktische Anwesenheitsdauer pro Person. Die Korrelation ist positiv, d.h. anwesende Personen erhöhen mit ihrem Verhalten den Heizenergieverbrauch; demgegenüber tritt die Bedeutung der Erhöhung der inneren Wärmequellen offenbar in den Hintergrund.
- Der (spezifische) Stromverbrauch. Die Korrelation ist positiv. Bewohner mit hohem Stromverbrauch verbrauchen auch mehr Heizenergie. Tatsächlich schlägt sich ein höherer Stromverbrauch mit mehr Abwärmeleistung nicht in einer Verringerung der Heizenergie nieder, sondern – beobachtbar – in einer erhöhten Raumlufthtemperatur.
- Die gemessenen Fensteröffnungsdauern.

Keinen statistisch beobachtbaren Einfluss haben entgegen der Erwartung:

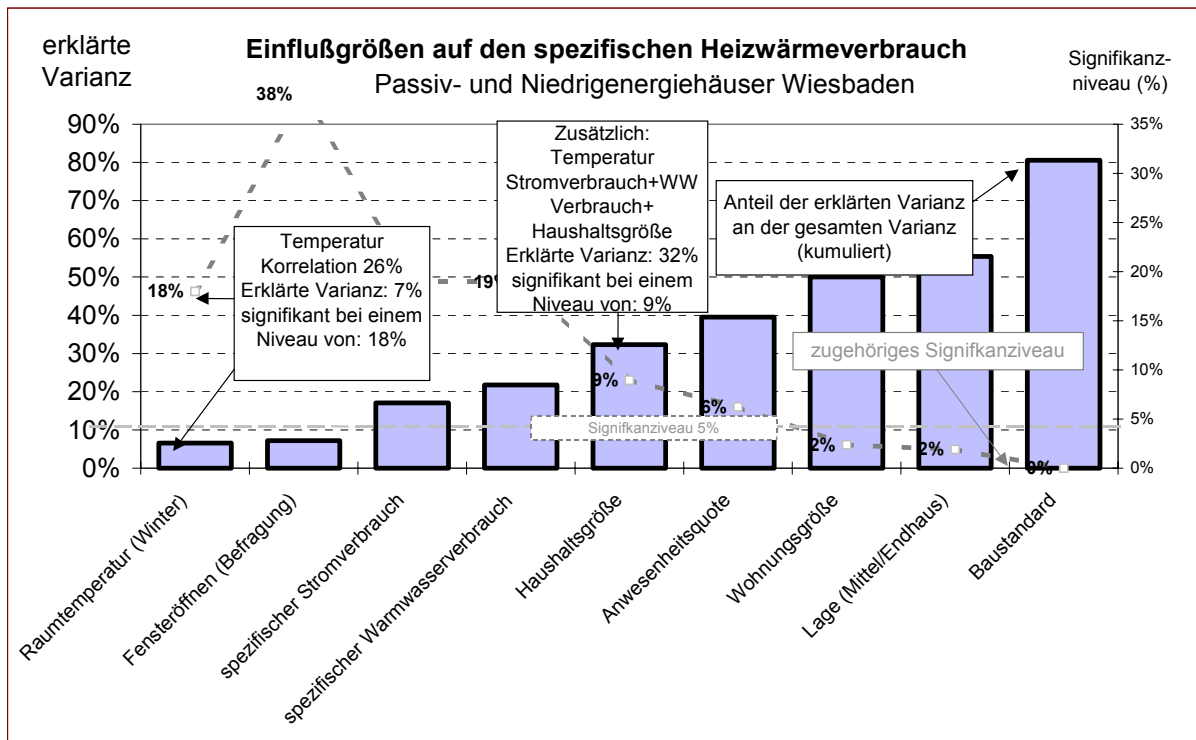
- das von den Bewohnern angegebene Fensteröffnungsverhalten.
- der Warmwasserverbrauch.

Als wichtigste Einflussgröße auf den Heizenergieverbrauch erweist sich der bauliche Standard, (d.h. der Unterschied zwischen Niedrigenergie- und Passivhaus), der mit einer Korrelation von über 60% bei den untersuchten Häusern alle nutzerbeeinflussten Größen weit dominiert. Dieses Ergebnis wird erzielt, obwohl der Unterschied zwischen den Gebäuden nicht so groß ist, wie es die Bezeichnungen vermuten lassen: Die beiden Haustypen unterscheiden sich nur im Standard der Fenster und in der Wärmerückgewinnung. Ansonsten sind sie baulich gleich, vor allem betrifft dies die sehr gute Dämmung der opaken Flächen. Niedrigenergiehäuser dieses Standards werden in der Literatur meistens als Ultra- Häuser oder 3-Liter-Häuser bezeichnet.

Die statistische Regressionsanalyse zeigt den Zusammenhang nicht nur paarweise zwischen einzelnen Daten, sondern bezieht mehrere Variablen zur Erklärung einer Zielgröße (hier: Heizwärmeverbrauch) ein. Das Bestimmtheitsmaß r^2 ist dann nicht wie im zweidimensionalen Fall ein Maß für die Güte der Beschreibung durch eine Regressionsgerade, sondern für die Güte der Beschreibung durch eine Regressionshyperebene im $(n+1)$ -dimensionalen Raum (bei n Einflussgrößen und einer Zielgröße). Das Bestimmtheitsmaß wird desto größer, je mehr Einflussgrößen einbezogen werden. Allerdings steigt dadurch nicht notwendigerweise die Signifikanz des Ergebnisses, denn je mehr Einflussgrößen herangezogen werden, umso besser lässt sich die Hyperebene anpassen. Sind einzelne Einflussgrößen dominant, so wird der Einfluss weiterer Größen oft nicht im direkten Vergleich mit den Zielgrößen, sondern erst durch die Regressionsanalyse erkannt und korrekt bewertet.

Die folgenden Abbildungen zeigen jeweils den Anteil an der gesamten Varianz, den die Einflussgrößen, die auf der Abszisse angegeben sind, statistisch erklären können. Dabei wird jede weitere Einflussgröße (von links nach rechts) als *zusätzliche* Einflussgröße betrachtet. Je mehr Einflussgrößen, desto höher ist das Erklärungspotenzial; das Bestimmtheitsmaß muss deshalb von links nach rechts zunehmen.

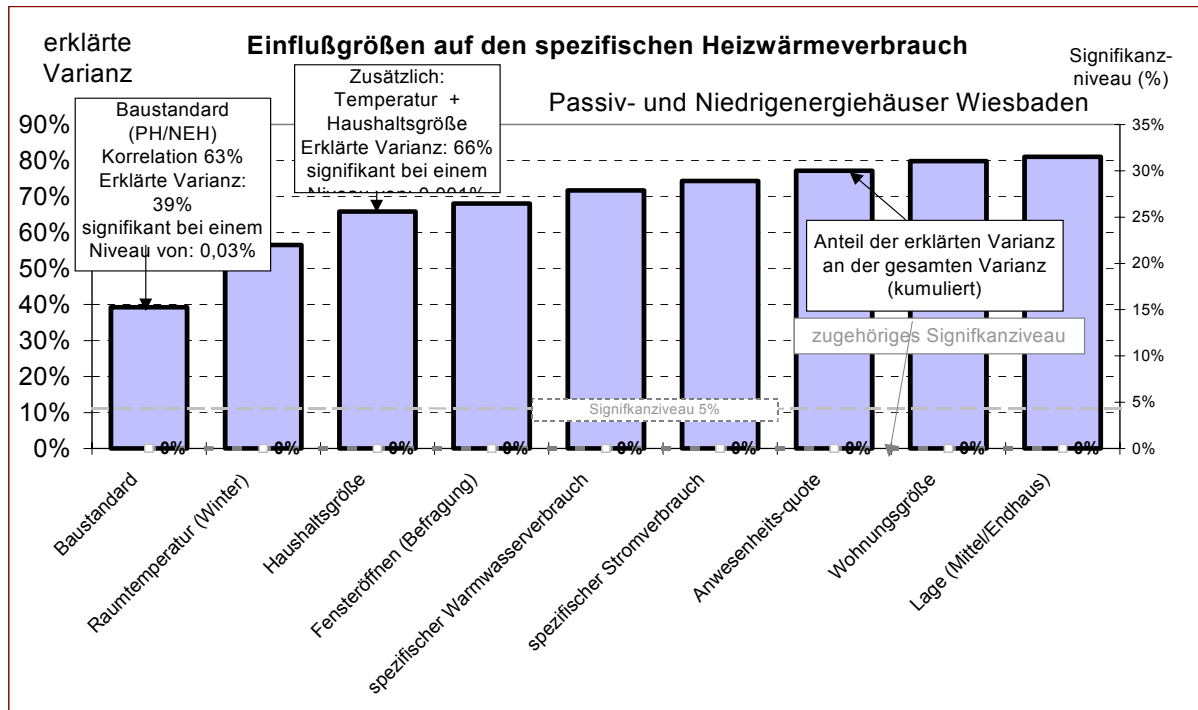
Abbildung 6.4.5-1: Einflussgrößen auf den spezifischen Heizenergieverbrauch. Erklärte Varianz (kumuliert) und Signifikanz.: Raumtemperatur als erste erklärende Variable



Die Balken geben wieder, welcher Anteil der beobachteten Varianz durch die bis zu dem Punkt auf der Abszisse angegebenen Variablen erklärt wird. Der zugehörige Wert auf der gestrichelten Linie zeigt das minimale Signifikanzniveau, bei dem dieses Ergebnis noch signifikant wäre. Zum Vergleich ist auch (als Parallele zur Abszisse) das Signifikanzniveau von 5 % eingezeichnet.

Mit den oben genannten Einflussgrößen lässt sich etwa die Hälfte der beobachteten Varianz erklären (vgl. Abbildung 6.4.5-1). In dieser und den folgenden Abbildungen ist jeweils aufgetragen, welchen Anteil der empirisch beobachteten Varianz durch die auf der Abszisse aufgeführten Einflussgrößen erklärt werden kann. Die durchgezogene Linie gibt den kumulierten Anteil der erklärten Varianz aller bis dahin aufgeführten Einflussgrößen an. Die verbleibende Varianz ergibt sich aus den quadratischen Abweichungen von der durch die angegebenen Einflussgrößen definierten Regressions-Hyperebene. Die gestrichelte Linie ist ein Maß für die Signifikanz des beobachteten Ergebnisses: Je kleiner der Wert, desto größer die Signifikanz der beobachteten (mehrdimensionalen) Korrelation. Das Ergebnis ist signifikant bei einem Signifikanzniveau von 5 %, wenn der Ordinatenwert unter 0,05 liegt, also unterhalb der markierten gestrichelten waagerechten Geraden. Mit den nutzerbedingten Einflussgrößen ist bei einem Signifikanzniveau von 5 oder auch 10 % keine Signifikanz erreichbar – erst bauliche Größen, die einen Einfluss auf den spezifischen Heizenergieverbrauch haben (Größe der wärmetauschenden Fläche, Kompaktheit) verbessern die Signifikanz erheblich.

Abbildung 6.4.5-2: Einflussgrößen auf den spezifischen Heizenergieverbrauch. Erklärte Varianz (kumuliert) und Signifikanz: Baulicher Standard als erste erklärende Variable



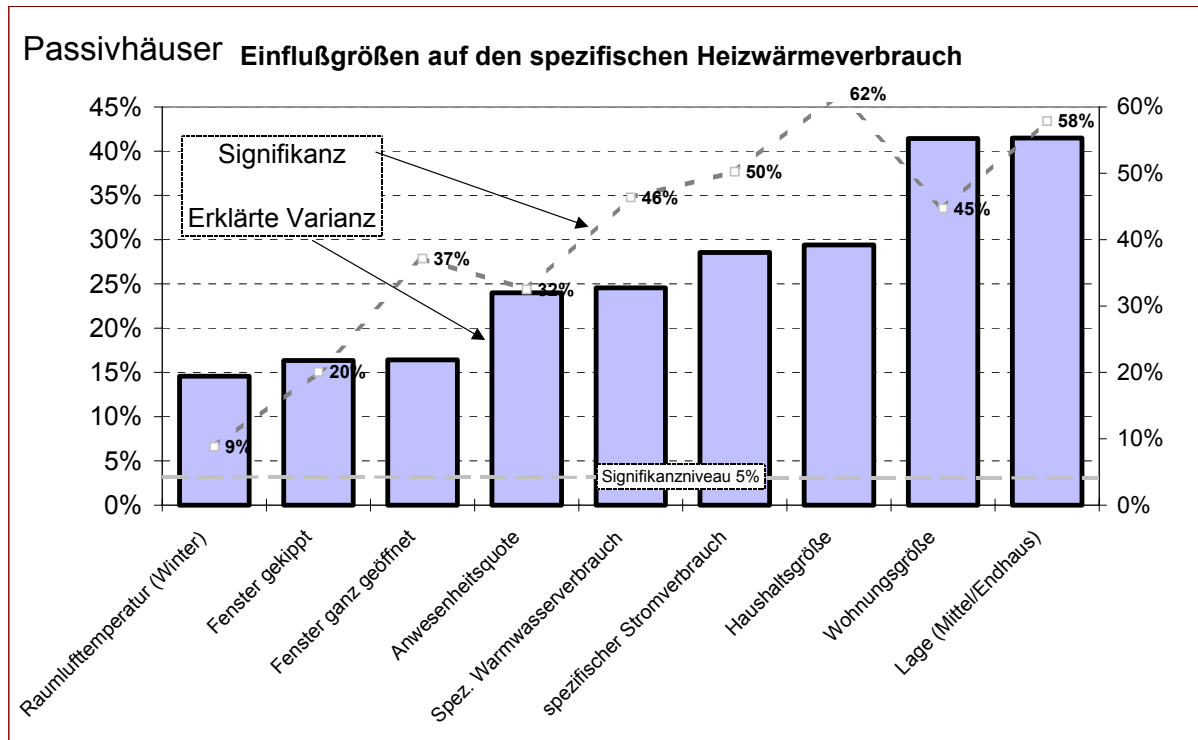
Den größten Einfluss hat aber ganz offenbar der wärmetechnische Standard. Mit der Information „Passivhaus oder Niedrigenergiehaus“ führt jede Regressions- und Varianzanalyse zu einem hochsignifikanten Ergebnis, und insgesamt können zusammen mit den vorher genannten Einflussgrößen ca. 80 % der beobachteten Varianz erklärt werden (Abbildung 6.4.5-1 und In Abbildung 6.4.5-2 sind durch den hohen Einfluss des Baustandards (Niedrigenergie- oder Passivhaus) alle Ergebnisse bereits bei einem Signifikanzniveau unter 0,1% signifikant.

Da der bauliche Einfluss stark dominant ist, werden im folgenden die Passivhäuser betrachtet¹. Abbildung 6.4.5-3 zeigt die Auswirkungen der oben diskutierten Einflussgrößen für die Passivhäuser.

Die höchste Korrelation ($r=40\%$) besteht erwartungsgemäß mit der Raumlufttemperatur. Sie trägt aber nur 16% (Bestimmtheitsmaß r^2) zur beobachteten Varianz bei; dies ist nicht signifikant bei einem Signifikanzniveau von 5%, d.h. die Wahrscheinlichkeit, daß ein Bestimmtheitsmaß in mindestens dieser Höhe beobachtet wird, wäre auch dann, wenn ein Zusammenhang gar nicht bestände, noch höher als das gegebene Signifikanzniveau 5%.

¹ Für diese Untersuchung wurden sowohl Messergebnisse als auch Befragungsdaten benötigt. Da nur 21 von 22 Passivhäusern befragt werden konnten, wurden an dieser Stelle auch die Messwerte für das betroffene Haus nicht einbezogen.

Abbildung 6.4.5-3: Empirische Einflussgrößen auf den Heizenergieverbrauch für die Passivhäuser: Erfragte Fensteröffnungszeiten als 2. und 3. Einflussgröße Erklärte Varianz und Signifikanz (kumuliert)



Der Wert auf der Ordinate gibt an, welcher Anteil der beobachteten Varianz durch die angegebenen Einflussgrößen erklärt wird, und zwar kumuliert von links nach rechts. Der zugehörige Wert auf der gestrichelten Linie zeigt das minimale Signifikanzniveau, bei dem dieses Ergebnis noch signifikant wäre. Das bedeutet: Ein Bestimmtheitsmaß in dieser Größe oder größer hätte man mit einer Wahrscheinlichkeit in Höhe des Signifikanzniveaus auch dann erwartet, wenn in Wirklichkeit gar kein Zusammenhang bestände. Zum Vergleich ist auch (als Parallele zur Abszisse) das Signifikanzniveau von 5% eingezeichnet.

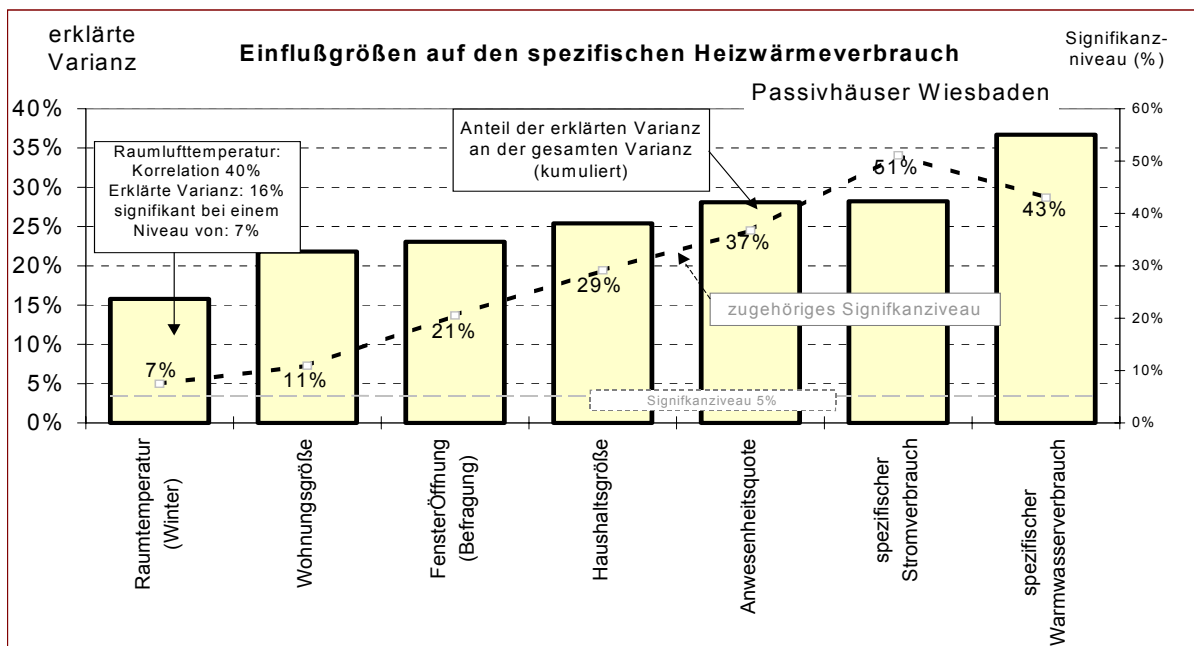
Werden weitere Einflussgrößen einbezogen, so kann ein größerer Anteil der Varianz erklärt werden. Hier können auch solche Größen eine Rolle spielen, bei denen eine direkte Korrelation (aufgrund des Einflusses anderer Parameter) mit der Zielgröße gar nicht erkennbar ist. Als die wichtigsten empirisch ermittelten Parameter erweisen sich nach der Raumlufttemperatur die Kompaktheit (Wohnungsgröße), die Anwesenheitsquote (durchschnittliche Anwesenheitszeit pro Person) und der spezifische Warmwasserverbrauch. Keinen Erklärungsbeitrag liefern die erfragten Fensteröffnungszeiten (vgl. Abbildung 6.4.5-3). Zusammen mit den ansonsten wichtigsten erklärenden Variablen bei den Passivhäusern, nämlich Raumlufttemperatur und Kompaktheit (hier: Wohnungsgröße) liefern die Fensteröffnungsdaten aus der 1. Befragung insgesamt 21%, aus der 2. Befragung 23% erklärte Varianz (vgl. Abbildungen 6.4.5-4 und 6.4.5-5).

Das Bild ändert sich, sobald gemessene Fensteröffnungszeiten anstelle von erfragten einbezogen werden (obwohl die Ergebnisse von Messung und Befragung nicht nur im Gesamtniveau gut übereinstimmen, sondern auch signifikant miteinander korreliert sind, vgl. Abschnitt 6.3.2).

Bei den Fensteröffnungsdaten aus der Messung beträgt der Anteil der erklärten Varianz mit drei Variablen 29%. Insgesamt kann gut die Hälfte der beobachteten Varianz empirisch erklärt werden (Abbildung 6.4.5-6). Dazu werden sieben Variablen benötigt. In dieser Gruppe von Variablen liefert auch der gemessene spezifische Stromverbrauch einen Erklärungsbeitrag, der ohne Einbeziehung gemessener Fensteröffnungszeiten nicht beobachtet werden kann. Mit denselben Variablen erhält man nur einen Beitrag von 37% bzw. 43%, wenn statt der gemessenen Fensteröffnungsdaten die erfragten verwendet werden.

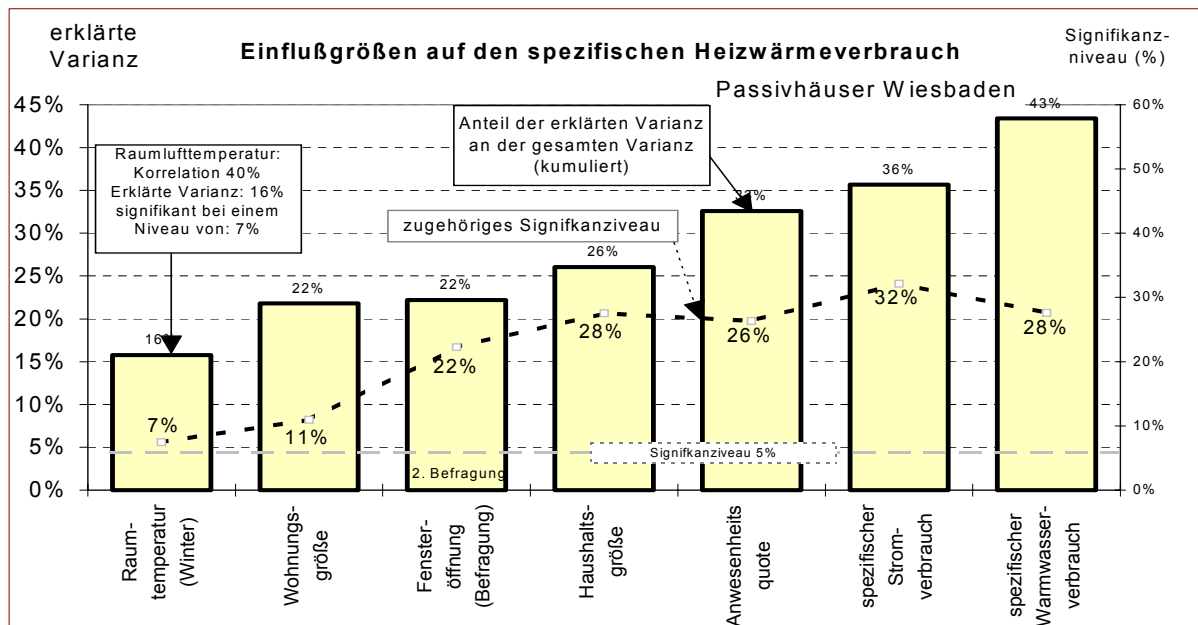
Je höher jedoch die zur Erklärung herangezogene Anzahl der Variablen ist, desto geringer ist die Signifikanz des Ergebnisses. Man erhält mit keiner Kombination von Einflussgrößen ein signifikantes Ergebnis bei einem Signifikanzniveau von 5 % (gestrichelte Linie in Abbildung 6.4.5-6).

Abbildung 6.4.5-4: Empirische Einflussgrößen auf den Heizenergieverbrauch für die Passivhäuser



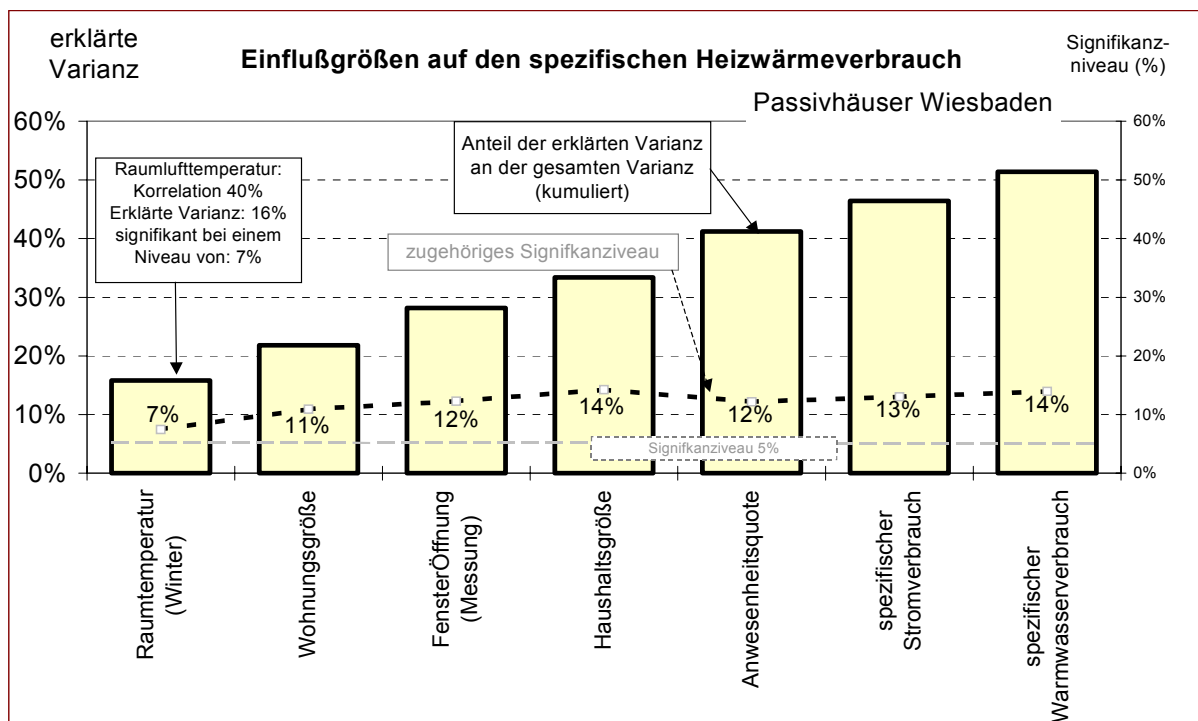
Erklärte Varianz und Signifikanz (kumuliert) für den Heizwärmeverbrauch 1998/1999. Verwendet wurden Messergebnisse aus derselben Messperiode und Befragungsergebnisse der ersten Befragung. Der Wert auf der linken Ordinate gibt an, welcher Anteil der beobachteten Varianz durch die angegebenen Einflussgrößen erklärt wird, und zwar kumuliert von links nach rechts, so dass die erklärte Varianz stets zunimmt. Der zugehörige Wert auf der gestrichelten Linie zeigt das minimale Signifikanzniveau, bei dem dieses Ergebnis noch signifikant wäre. Zum Vergleich ist auch (als Parallele zur Abszisse) das Signifikanzniveau von 5 % eingezeichnet. Ein signifikantes Ergebnis ist mit dieser Auswahl von Variablen nicht erreichbar.

Abbildung 6.4.5-5 : Empirische Einflussgrößen auf den Heizenergieverbrauch für die Passivhäuser



Fensteröffnungszeiten: Daten aus der 2. Befragung.

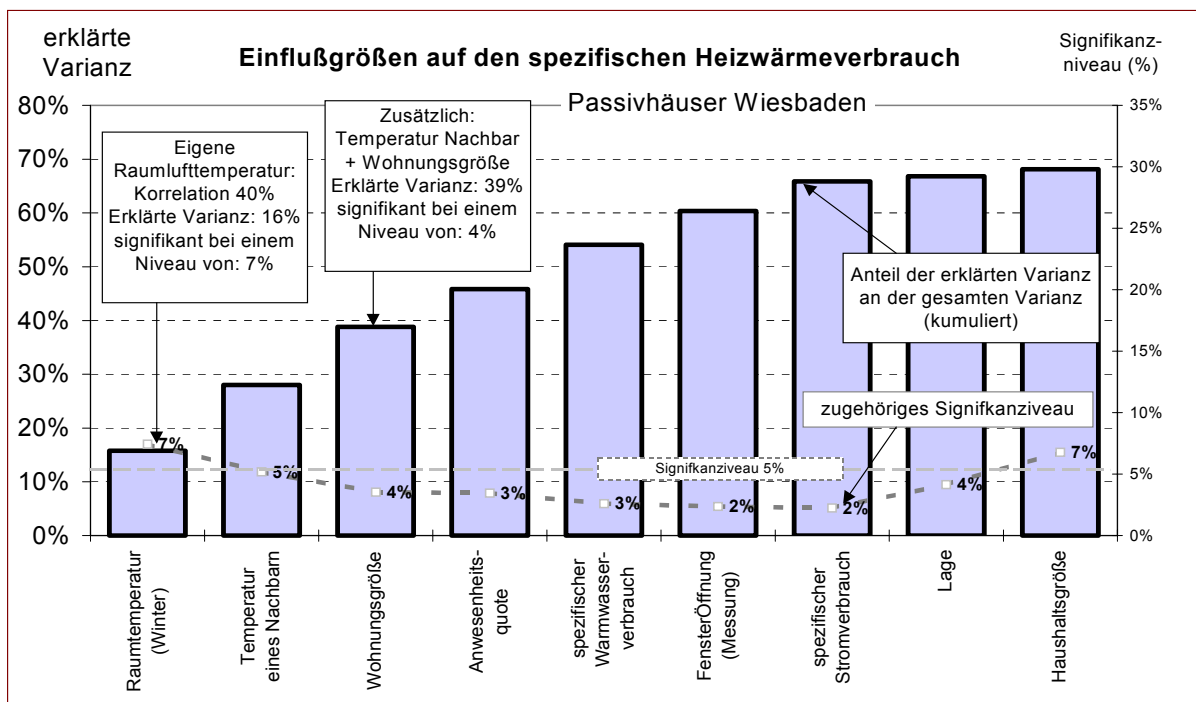
Abbildung 6.4.5-6: Empirische Einflussgrößen auf den Heizenergieverbrauch für die Passivhäuser unter Einbeziehung gemessener Fensteröffnungsdauern



Die Abbildung zeigt (von links nach rechts kumuliert) den Anteil der Varianz, der durch die Variablen erklärt wird. Die Auswahl der Variablen unterscheidet sich durch die Verwendung von Messergebnissen zur Fensteröffnung anstelle von Befragungsergebnissen.

Die Raumlufttemperaturen wirken als ohnehin bedeutendste Einflussgröße nicht nur direkt auf die Höhe der Wärmeverluste an die Außenluft, sondern auch indirekt über die Querwärmeströme zwischen den Nachbarn. Das Nachbarschaftsverhältnis kann über die Regressionsanalyse nur einbezogen werden, wenn die Temperaturen der Nachbarn als zusätzliche Einflussgröße berücksichtigt werden. In diesem Fall lässt sich ein deutlich höherer Anteil der beobachteten Verbrauchsstreuung erklären (vgl. Abbildung 6.4.5-7).

Abbildung 6.4.5-7: Empirische Einflussgrößen auf den Heizenergieverbrauch für die unter zusätzlicher Einbeziehung der Temperatur eines Nachbarn als zusätzlicher Einflussgröße

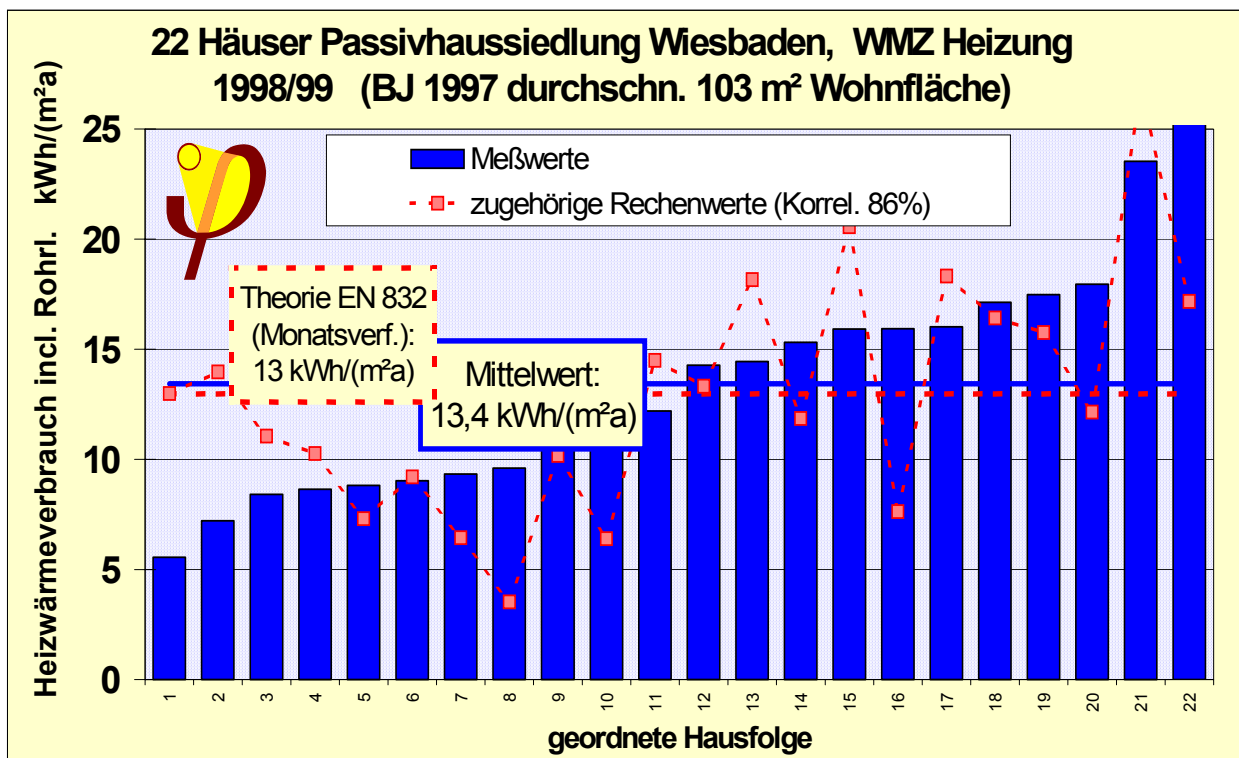


6.4.6 Analyse mit Energiebilanzen

Für die Analyse des Einflusses baulicher und nutzerbedingter Einflussparameter stehen nicht nur statistische Verfahren zur Verfügung. Eine genauere Analyse kann auf der Basis der Energiebilanzen der Gebäude durchgeführt werden.

Für diese Untersuchung wurde vom Passivhaus Institut ein Gesamtmodell der Siedlung erstellt und der Einfluss der baulichen Parameter sowie der Daten der laufenden Messung untersucht [114]. Mit den verfügbaren Messdaten zum Heizenergie-, Warmwasser- und Stromverbrauch sowie den Raumlufttemperaturen ermittelte das PHI bereits eine Korrelation zwischen berechnetem und gemessenem Heizwärmeverbrauch von 86 % für Passiv- und Niedrigenergiehäuser bzw. 67 % für die Passivhäuser allein [114].

Abbildung 6.4.6-1: Vergleich von gemessenem und berechnetem Heizwärmeverbrauch (Aus [114]).

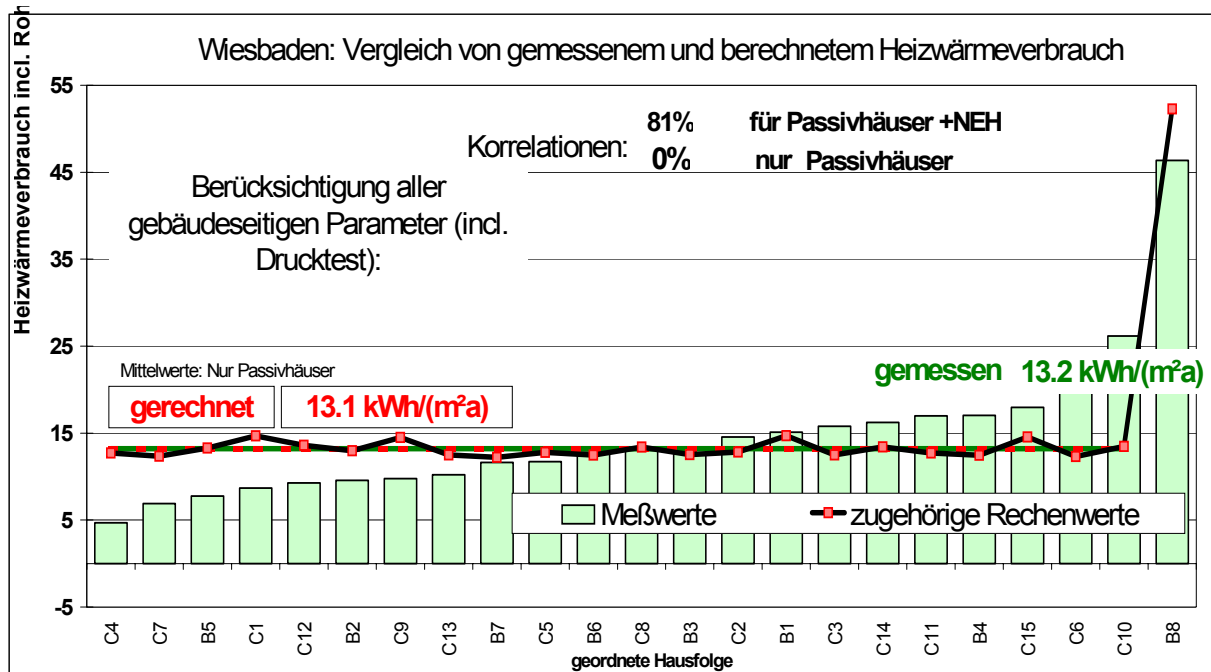


Auf der Basis des Monatsverfahrens im PHPP wurden die individuellen Heizwärmeverbräuche berechnet und mit den gemessenen verglichen. Bei der Berechnung berücksichtigt wurden: alle baulichen Parameter (Wärmeschutz, Lage der Häuser, Drucktestergebnisse), die gemessenen Raumlufttemperaturen sowie die gemessenen Energieverbräuche für Haushaltsstrom und Warmwasser [114]

Es zeigte sich, dass die Bedeutung des baulichen Standards hier noch weit deutlicher als bei der statistisch-empirischen Analyse eingeht; die Korrelation zwischen gemessenem und berechnetem Energieverbrauch beträgt bei ausschließlicher Berücksichtigung der Gebäudedaten immer noch ca. 80%. Werden dagegen nur noch die Passivhäuser betrachtet, so erhält man mit

den verbleibenden baulichen Unterschieden (Größe der Häuser, Lage und Drucktestergebnisse) mit derselben Methode überhaupt keine Korrelation (0%).

Abbildung 6.4.6-2 Vergleich von gemessenem und berechnetem Heizwärmeverbrauch bei ausschließlicher Berücksichtigung der baulichen Parameter



Auch hier erwiesen sich die Innentemperaturen als stärkster nutzerbedingter Einflussfaktor: Mit einer Korrelation von 67 % zwischen gemessenem und berechnetem Energieverbrauch bei den Passivhäusern erreicht man bereits eine sehr gute Übereinstimmung. Allein mit den oben genannten Daten aus der laufenden Messung ist die Signifikanz bereits sehr hoch, da es sich nicht wie bei der statistischen Analyse um mehrere, sondern nur um eine Einflussgröße („berechneter Heizwärmebedarf“) handelt. Mit der Methode der Energiebilanzen werden mit einer einzigen Variablen (berechneter Energieverbrauch auf der Basis der Raumlufttemperaturen) somit bereits 44 % (r^2) der gesamten Varianz bei den Passivhäusern erklärt. Die Aussagekraft unter Verwendung des Gebäudemodells ist offenbar viel höher als die nur statistische Analyse (erklärte Varianz: 16 %, s. o.) ohne physikalisches Modell.

Die Wahrscheinlichkeit, eine positive Korrelation in mindestens dieser Höhe zu erzielen, wäre nur 0,03%, wenn in Wirklichkeit gar keine Abhängigkeit bestände. Die Signifikanz des empirischen Einflusses der oben betrachteten Einflussgrößen (inkl. der Befragungsdaten und zusätzlich der gemessenen Fensteröffnungsdauern) liegt dagegen bei 14% (vgl. Abbildung 6.4.5-6), ist also bei üblichen Signifikanzniveaus nicht als signifikant anzusehen.

Die Analyse wurde vom IWU mit den Befragungsdaten sowie den zusätzlichen Messdaten ergänzt. Dabei zeigte sich, dass die erfragten Daten in Bezug auf die Einstellungen der Lüftungsanlage, der Anwesenheitszeiten (innere Wärmequellen) und des Fensteröffnungsverhaltens zur Erklärung nicht beitragen. Eine noch bessere Übereinstimmung

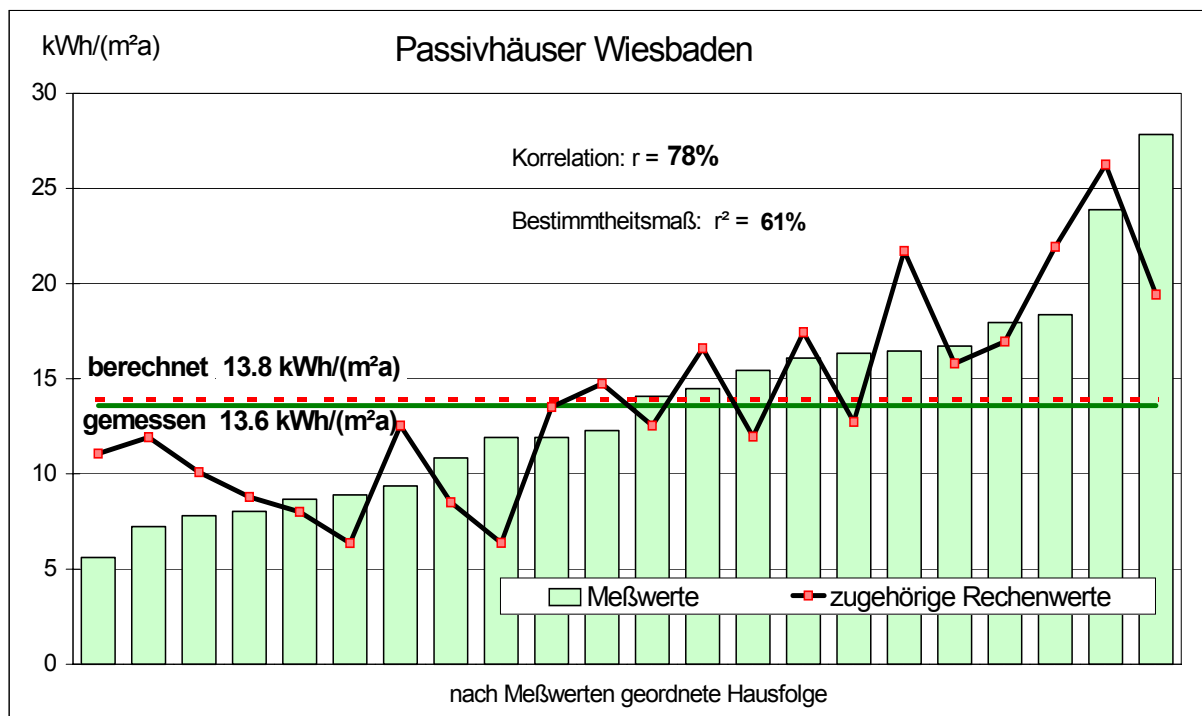
erhält man dagegen, wenn man *gemessene* Werte berücksichtigt: der spezifische Stromverbrauch und die gemessenen Fensteröffnungszeiten tragen deutlich zur Erklärung bei. Keinen Einfluss haben die erfragten und vor Ort protokollierten Einstellungen der Lüftungsanlagen: Es muss davon ausgegangen werden, dass deren Einmessung nicht so präzise erfolgte, dass aus den Einstellungen auf die genauen Luftwechselraten und eventuellen Disbalancen geschlossen werden kann. Die genauen Zu- und Abluftraten sind auch nicht zeitlich konstant, sondern hängen insbesondere von der Filterverschmutzung ab.

Das Ergebnis bzgl. der Fensteröffnungen überrascht zum Teil: Die Ergebnisse von Messung und Befragung stimmen nämlich nicht nur im Gesamtniveau sehr gut überein, sondern sind auch gut korreliert (vgl. Abschnitt 6.3.2); dennoch sind die individuellen Einschätzungen (ohne begleitende Protokollierung) insgesamt nicht geeignet, um einen Erklärungsbeitrag zu liefern bzw. Bilanzmodelle zu validieren.

Wie schon bei der statistischen Analyse stellt sich jedoch heraus, dass bei der Einzelbeurteilung der Fenstermesswerte diese von bedeutenderen Einflussgrößen überlagert werden, während im Gesamtzusammenhang ihr Effekt deutlich erkennbar ist und zur Erklärung beiträgt. Da nicht genau bekannt ist, welchen zusätzlichen Luftwechsel geöffnete Fenster verursachen und die Ergebnisse und Simulationen von Kapitel 5 sich entweder nur auf bestimmte Wettersituationen beziehen oder ebenfalls unsicher sind, wurde hier ein anderer Weg beschritten: Der durchschnittliche Fensterluftwechsel pro geöffnetem Fenster wurde variiert und der Luftwechsel bestimmt, bei dem eine möglichst hohe Korrelation zwischen gemessenem und berechnetem Energieverbrauch erzielt wird. Dieses Optimum wird bei einem Luftwechsel von etwa 50-60 m³/h pro geöffnetem (normalerweise gekipptem) Fenster erreicht. Dies ist in recht guter Übereinstimmung mit von anderer Seite durchgeführten Untersuchungen [79] und trifft das Messergebnis der in einer Märzwoche durchgeführten Spurengasuntersuchungen (Abschnitt 5.1 und Anhang), scheint aber die Simulationsergebnisse eher zu unterschätzen (vgl. Kap. 5). Andererseits würde der dadurch induzierte zusätzliche Luftwechsel, der dann im Durchschnitt bei 0,04/h liegt, auch in seiner Höhe zu einem Heizwärmeverbrauch führen, der unter Berücksichtigung der übrigen Einflussparameter dem gemessenen Heizenergieverbrauch entspricht. Der zusätzliche Luftwechsel würde nach den Berechnungsergebnissen gerade die Heizwärmeeinsparung durch die zusätzlichen inneren Wärmequellen kompensieren, die sich aus hoher Personenbelegung, überdurchschnittlich hohen Anwesenheitszeiten sowie gegenüber der Projektierung erhöhtem Stromverbrauch ergeben.

Die Übereinstimmung zwischen den so berechneten und den gemessenen Werten ist mit einer minimalen Abweichung zwischen den Mittelwerten (von 0,3 kWh/(m²a) und einer Korrelation von 78% bzw. Bestimmtheitsmaß r^2 von 61 % recht gut (Abbildung 6.4.6-3); die Signifikanz des Zusammenhangs ist, da es sich nicht wie bei der statistischen Analyse um mehrere, sondern nur um eine Einflußgröße („berechneter Heizwärmebedarf“) handelt, außerordentlich hoch: die Wahrscheinlichkeit, eine positive Korrelation in mindestens dieser Höhe zu erzielen, wäre nur 0,001%, wenn in Wirklichkeit gar keine Abhängigkeit bestände.

Abbildung 6.4.6-3: Passivhäuser in Wiesbaden: Vergleich von berechnetem und gemessenem Heizwärmeverbrauch. Die gemessenen Verbrauchswerte sind als Säulen dargestellt, die berechneten als durchgezogene Linie.



Individuelle Heizwärmeverbräuche, berechnet mit einem Gesamtmodell der Gebäude [114] auf der Basis des Monatsverfahrens im PHPP [115] und Vergleich mit den gemessenen Daten. Bei der Berechnung berücksichtigt wurden: alle baulichen Parameter (Wärmeschutz, Lage der Häuser, Drucktestergebnisse), die gemessenen Raumlufttemperaturen und Verbrauchswerte für Haushaltsstrom und Warmwasser, Angaben zu den Einstellungen der Lüftungsanlage, gemessene Fensteröffnungsdauern.

7 Strom- und Primärenergieverbrauch

7.1 Bedeutung des Stromverbrauchs

Passivhäuser sind Energiesparhäuser, die neben der funktionalen Anforderung an die Heizwärme eine ökologische Anforderung erfüllen müssen. Der Maßstab hierfür ist der Verbrauch an Primärenergie; der Grenzwert liegt derzeit bei 120 kWh/(m²a) [62], [116]. Zur Einhaltung eines niedrigen Primärenergiekennwerts ist vor allem der Stromverbrauch zu begrenzen.

Vorreiter ist auch hier das Passivhaus Darmstadt Kranichstein. In diesem Projekt wurde erstmalig gezeigt, dass mit einer konsequenten Ausstattung an stromsparenden Geräten der Stromverbrauch um mehr als die Hälfte gegenüber dem durchschnittlichen Haushaltsstromverbrauch gesenkt werden kann – trotz des zusätzlichen Verbrauchs der Lüftungsanlage. Während der Durchschnitt im Bestand für Strom allein für Haushaltsgeräte, Hilfsenergien und Beleuchtung bei etwa 33 kWh/(m²a) liegt, betrug der gemessene Stromverbrauch im Passivhaus in Darmstadt im Durchschnitt über alle vier Haushalte und insgesamt vier Messperioden nur 11,7 kWh/(m²a) – bereits einschließlich der Lüftungsanlage (mit einem zusätzlichen Kochgasverbrauch von 2,5 kWh/(m²a) [117],[118].

Damit war sogar der Gesamtendenergieverbrauch (für Heizung, Warmwasserbereitung, Haushaltsstrom und Strom für den Betrieb der Lüftungsanlage) mit ca. 32 kWh/(m²a) geringer als der durchschnittliche Haushaltsstrom im Bestand [119]. Dies zeigt, dass eine konsequente Ausstattung mit sparsamen Haushaltsgeräten, Leuchtstofflampen statt Glühlampen sowie mit effizienten Pumpen und Lüftern auch in der Praxis den gewünschten Erfolg bringt.

In der Siedlung in Wiesbaden war es nicht nur wegen der Einhaltung des ökologisch motivierten Verbrauchskriteriums [120] wichtig, den Stromverbrauch zu begrenzen. Im Gegensatz zu den Häusern in Darmstadt Kranichstein, die ein ausgesprochen komfortables Sommerklima aufweisen, war nicht geklärt, ob es im Sommer in dieser ersten Passivhaussiedlung zu Überhitzungen kommen könnte - bei einer Kombination von weniger massiver Bauweise (Mischbauweise), möglicherweise dichter Personenbelegung sowie hohen inneren Wärmequellen durch hohen Stromverbrauch. Da in Passivhäusern vor allem die Wärmelasten, also auch die inneren Wärmequellen, das Sommerklima verschlechtern [121], war es bereits aus diesem Grund ratsam, diese möglichst gering zu halten. Um einen niedrigen Stromverbrauch zu erreichen, bot der Bauträger Rasch & Partner Anreize. Bei Nachweis eines geringen Gesamtbedarfs für Kühlschrank, Gefriergerät, Spülmaschine Waschmaschine und Beleuchtung erhielten die Käufer der Passivhäuser eine Prämie (Rückerstattung aus dem Kaufpreis) in Höhe von 3500 DM. Auf diese Weise wurde der finanzielle Spielraum dafür geschaffen, gegebenenfalls auch neue Geräte zu beschaffen. Eine Hilfe für die Beschaffung effizienter Geräte sind Listen geeigneter, möglichst sparsamer Geräte [122], [123].

Das Entscheidungskriterium des Bauträgers für die Rückerstattung bezog allerdings nicht alle wesentlichen Geräte ein. Es wurden auch keine besonderen Hilfen für die Beschaffung geboten. Genauso wenig wurde a posteriori festgestellt, ob die im Zuschussantrag angegebenen Geräte dann auch wirklich angeschafft und eingesetzt wurden. Insofern ist das Projekt im Hinblick auf die Konsequenz der Stromsparmaßnahmen nicht mit dem Stromsparprojekt im Passivhaus Darmstadt vergleichbar. Innerhalb dieses Messprojekts und der zugehörigen Befragung sollen u.a. die folgenden Fragen geklärt werden:

- Ist das Konzept eines finanziellen Anreizes wirksam, d. h. führte das Konzept überhaupt zu einer Stromeinsparung? War der Anreiz attraktiv? Wie viele Erwerber beteiligten sich daran?
- Gibt es einen Unterschied zwischen den gemessenen Stromverbräuchen bei den denjenigen Erwerbern, die eine Rückerstattung bekamen und denjenigen, die sie nicht beantragten oder das Kriterium nicht erreichten?
- Lassen sich die Stromverbräuche aufgrund der Angaben über die Geräte nachvollziehen?

Der Stromverbrauch ist im übrigen, da er mindestens in derselben Größe liegt wie der Heizenergieverbrauch, eine nicht unmaßgebliche Determinante in der Heizenergiebilanz. Die Abwärme der Geräte trägt als „innere Wärmequelle“ zur Beheizung bei und reduziert den Heizwärmebedarf.

Im Sommer allerdings wirken innere Wärmequellen störend. Die zusätzlichen inneren Energieeinträge verursachen Übertemperaturen und lassen sich nur schwer abführen. Der Stromverbrauch gehört daher zu den wichtigsten Einflussfaktoren für den sommerlichen Komfort [124].

7.2 Ergebnisse zum Stromverbrauch

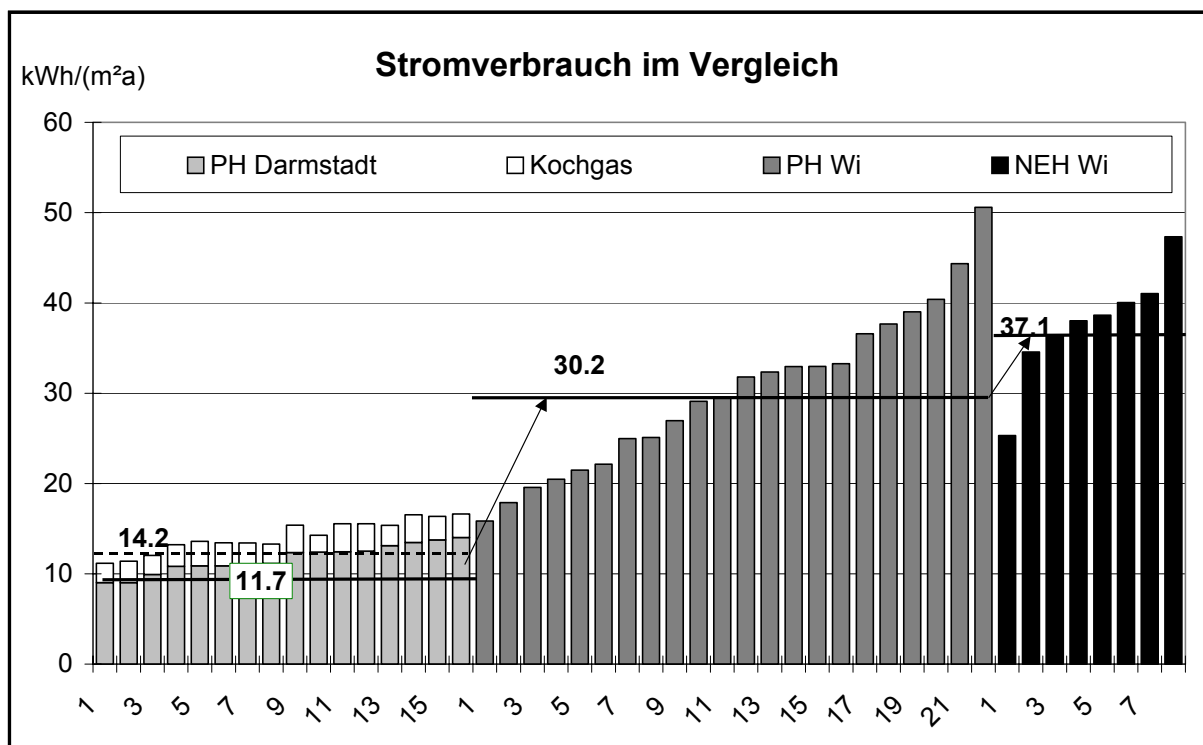
Von insgesamt 21 befragten Bewohnern der Passivhäuser gaben 20 an, eine Förderung durch Rasch und Partner beantragt und erhalten zu haben. Demnach hielten alle, die eine Förderung beantragt hatten, die Anforderung ein und erhielten die Förderung. Ein Erwerber hatte keine Förderung beantragt.

In den Niedrigenergiehäusern wurde die Beschaffung sparsamer Geräte nicht gefördert. Die Erwerber der Niedrigenergiehäuser erhielten also keine Rückerstattung aus dem Kaufpreis.

Der individuelle Stromverbrauch der Passivhäuser lag im Mittel in der Periode 1998/1999 bei 2968 kWh pro Jahr [125]. Die Niedrigenergiehäuser der Halbzeile B verbrauchten dagegen mit 3380 kWh pro Jahr 14 % mehr Strom als die Passivhäuser. Der Verbrauch der Niedrigenergiehäuser lag dabei – unter Berücksichtigung des zusätzlichen Stromverbrauchs für die Abluftanlage – im Bereich des statistischen Durchschnitts. Die Stromkennwerte der Passivhäuser und Niedrigenergiehäuser zeigt Abbildung 7.2.1.

Damit ist bereits erkennbar, dass der Anreiz auch zu einem Erfolg führte, einer deutlich messbaren Reduktion des Stromverbrauchs. Allerdings werden die Potenziale, die bei einer konsequenten Ausstattung wie im Passivhaus Darmstadt nachweisbar vorhanden sind, bei weitem nicht ausgeschöpft. Die im Passivhaus Darmstadt erzielten Kennwerte elektrischer Energie – 4 Haushalte in vier Messperioden – sind ebenfalls in Abbildung 7.2.1 dargestellt.

Abbildung 7.2-1: Stromkennwerte im Vergleich: a) Darmstadt-Kranichstein, b) Wiesbaden - Passivhäuser und c) Wiesbaden – Niedrigenergiehäuser (1998/1999) (jeweils Messergebnisse)



Vom Bauträger wurde allerdings nur ein Teil der möglichen Stromverbraucher erhoben und bewertet. Wichtige Stromverbraucher, z.B. Wäschetrockner, zusätzlichen Beleuchtungseinrichtungen, Elektronik wurden gar nicht einbezogen. Eine Beratung war mit der Förderung ebenfalls nicht verbunden.

Die vom Bauträger erfassten Daten konnten zur Analyse des Stromverbrauchs verwendet werden. Sie umfassten

- Effizienz (Normverbrauch) von Kühlschränken und (sofern vorhanden) Gefriergeräten
- Effizienz (Normverbrauch) von Geschirrspülmaschinen und Waschmaschinen
- Kalt- oder Warmwasseranschluss von Geschirrspülmaschinen
- Kalt- oder Warmwasseranschluss (d.h. 2 Anschlüsse) bei den Waschmaschinen
- Effizienz von mindestens 8 Lampen.

Nicht erhoben wurden dagegen die folgenden Daten, die für den zukünftigen Stromverbrauch maßgeblich sind:

- Die Art des Wäschetrocknens
- Bei Benutzung eines Wäschetrockners: dessen Effizienz (Normverbrauch)
- Die Effizienz der tatsächlichen Beleuchtung
- Ausstattung und Benutzung von Elektronik und Kleingeräten
- Eventuelle Doppelausstattung mit stromverbrauchenden Geräten
- Angaben zum Nutzungsumfang

Die beiden letzten Punkte sind schwieriger zu erfassen. In der Regel wird hier einfach von durchschnittlichem Nutzerverhalten ausgegangen, wie auch im Passivhaus Projektierungs Paket [62]. Die unterschiedliche Nutzung führt selbstverständlich zu einer Nutzerstreuung, aber im Mittel zu einer korrekten Projektierung. Die Pauschalierung dieser Ansätze ist vergleichbar zur Vorgehensweise bei der Heizenergie, bei der standardmäßig von einer mittleren Innentemperatur von 20° C sowie – sofern keine Lüftungsanlage vorhanden ist – von einem standardisierten Luftwechsel ausgegangen wird, vgl. z. B. [126]. Die Nutzerstreuungen gleichen sich auch hier, eine der Projektierung entsprechende Ausführung vorausgesetzt, aller Erfahrung nach aus. In Bezug auf Elektronik und Kleingeräte wird der Einfluss meistens überschätzt; außer in Extremfällen ist die Bedeutung für den Stromverbrauch begrenzt.

Die ersten drei Punkte wurden dagegen weder erhoben noch bei den Stromsparmaßnahmen berücksichtigt; sie haben aber einen wesentlichen und zudem systematischen Einfluss: Die Nichtbeachtung führt grundsätzlich zu einer Erhöhung des Stromverbrauchs, der sehr bedeutend sein kann.

Die Personenzahl hat wesentlichen Einfluss auf den tatsächlichen Stromverbrauch; viele Dienstleistungen, die mit elektrischer Energie erbracht werden, sind der Personenzahl direkt proportional (gleiche Effizienz vorausgesetzt). Die Personenzahl wurde ebenfalls nicht erhoben. Dieses Vorgehen ist völlig korrekt: Abgesehen davon, dass die Personenzahl bei Projektierung nicht bekannt sein muss und sich im Zeitverlauf auch ändert, kann die (hier mit einem Zuschuss) zu bewertende Effizienz nur mit einer einheitlichen Standardbelegung berechnet werden. Dies gilt insbesondere für den Nachweis der Einhaltung eines Ökologie-Kriteriums (z.B. Primärenergie): Hohe Personenbelegungen würden sonst „bestraft“, und das, obwohl der auf die Personenzahl bezogene Energie- und Ressourcenverbrauch geringer ist als bei niedriger Personenbelegung.

Tabelle 7.2-1: Wohnflächenbezogene und personenbezogene Kennwerte für den Stromverbrauch in den Passivhäusern und Niedrigenergiehäusern in Wiesbaden

Passivhäuser																						
Kennwert kWh/(m²a)	15,9	17,9	19,6	20,5	21,5	22,2	25,0	25,1	27,0	29,1	29,6	31,8	32,4	32,9	33,0	33,3	36,6	37,7	39,0	40,4	44,3	50,6
personenbezogener Stromverbrauch kWh/P	527	597	643	673	700	735	736	784	797	857	862	872	888	969	979	986	1016	1109	1158	1184	1364	1452
Niedrigenergiehäuser																						
Kennwert kWh/(m²a)	25,3	34,6	36,5	38,0	38,6	40,0	41,0	47,3	zum Vergleich: Passivhaus Kranichstein Strom und Kochgas													14,2
personenbezogener Stromverbrauch kWh/P	682	745	833	885	1073	1119	1179	3057														633

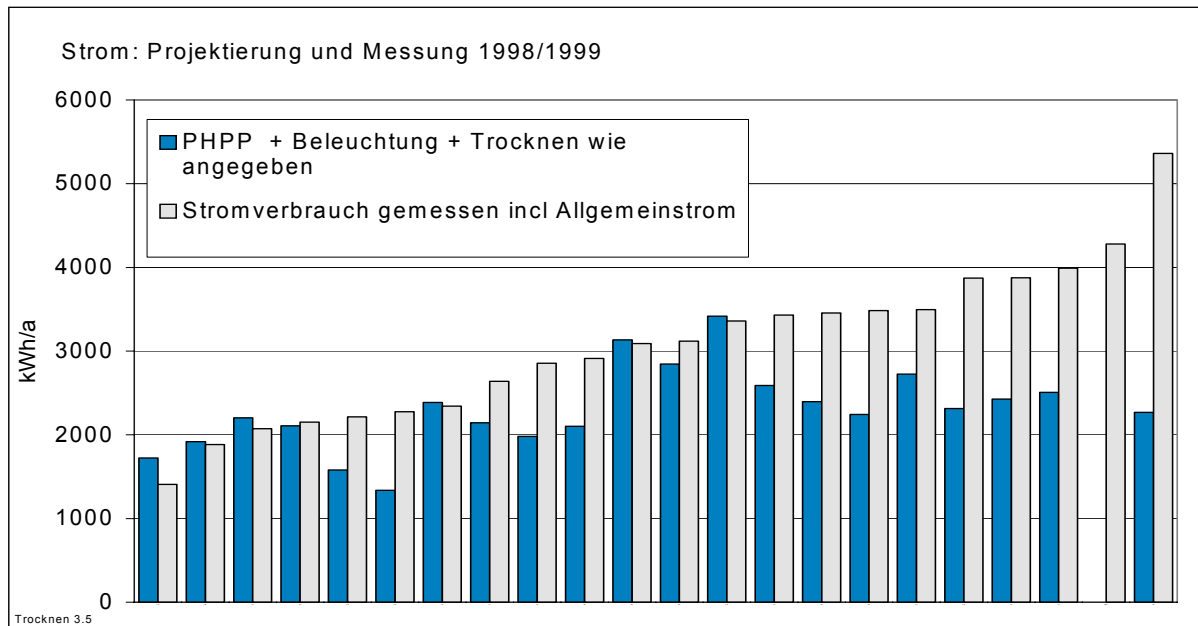
Beim Vergleich von projektiertem und gemessenem Stromverbrauch muss daher vor allem die tatsächliche Personenzahl berücksichtigt werden.

Die Personenbelegung in der Siedlung Wiesbaden-Lummerlund ist überdurchschnittlich hoch. Dies erklärt zum Teil die höheren gemessenen Stromverbräuche, wie aus Tabelle 7.2-1 erkennbar ist. Ebenso spielen aber auch zusätzliche Energiedienstleistungen (wie z. B. maschinelles Trocknen – s. o.) eine Rolle. Die Befragung der Bewohner sollte auch dazu dienen, eine Erklärung für die gemessenen Stromverbräuche zu finden. Deshalb wurden folgende Sachverhalte abgefragt:

- die Art des Wäschetrocknens (potenziell hoher Verbrauch bei konventionellen Wäschetrocknern)
- die Art der Beleuchtung (sowohl Umfang der Beleuchtung als auch Effizienz der eingesetzten Beleuchtungskörper)
- die a posteriori-Ausstattung mit Haushaltsgeräten
- der Anschaffungszeitpunkt der Geräte
- Ausstattung mit Elektronik (normalerweise im Haushalt ein eher überschätzter Verbrauch, kann im Einzelfall aber durchaus auch Mitursache für Abweichungen nach oben sein).

Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund der insgesamt vorhandenen Informationen bei ca. zwei Drittel der Haushalte der gemessene Stromverbrauch plausibel erklärt werden kann bzw. im Bereich der zu erwartenden Schwankungen liegt. Das restliche Drittel zeigt eine deutliche systematische Abweichung nach oben. Eine mögliche Erklärung liegt darin, dass der tatsächliche Einsatz der einzelnen Geräte und Lampen, wie sie im Zuschuss-Antrag angegeben worden waren, nicht überprüft wurde. Hier besteht ein Unterschied zu den Passivhäusern in Darmstadt, bei denen die projektierten Geräte tatsächlich eingesetzt wurden und der Stromverbrauch dann auch fast genau der Projektierung entsprach.

Abbildung 7.2-3: Vergleich von Projektierung und Messung mit dem Passivhaus-Projektierungs-Paket (PHPP,[62]). Analyse auf Basis der Bewohnerangaben



7.3 Einflussgrößen auf den Stromverbrauch

Ähnlich wie beim Heizenergieverbrauch stellt sich die Frage, wie sich die Nutzerstreuungen erklären lassen.

Äußerst geringe Unterschiede liefern die Ergebnisse des Zuschussantrags. Fast alle Haushalte machten Angaben, die relativ knapp zur Erreichung des Kriteriums für den Zuschuss führten. Es wird im Nachhinein auch kaum möglich sein, die tatsächlichen Normverbräuche der eingesetzten Geräte zu erheben. Die allein damit verbundenen Unsicherheiten machen einen Teil der Abweichungen plausibel.

Hier seien exemplarisch einige Ergebnisse festgehalten, die sich aus den Befragungen ergeben.

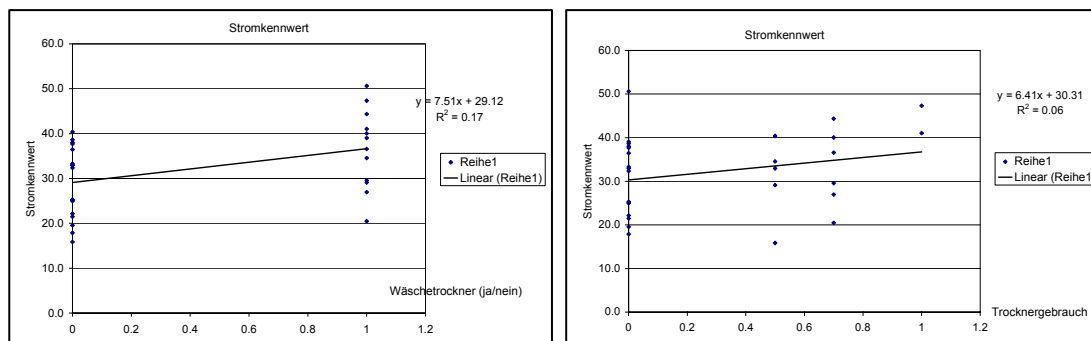
Die mit Abstand wichtigste Einflussgröße ist die Zahl der Personen. Allein diese Einflussgröße erklärt mehr als 20 % der beobachteten Varianz.

Ein besonders hoher Stromverbraucher ist ein elektrischer Wäschetrockner. 8 von 21 Passivhausbewohnern besitzen einen elektrischen Wäschetrockner. Auf die Frage, wie die Bewohner die Wäsche überwiegend trocknen (getrennt nach Sommer und Winter), gaben bis auf zwei Niedrigenergiehaushalte alle Befragten an, nicht ausschließlich den Trockner zu benutzen, sondern auch auf der Leine zu trocknen.

Abbildung 7.3-1: Elektrische Wäschetrockner und Stromverbrauch

a) Besitz

b) Benutzung (Bewohnerangaben)



Bei einer entsprechenden Bewertung der Aussagen (maschinelles Trocknen zwischen 0 % und 100 %) ergibt sich, dass die Korrelation zwischen den Aussagen zur Benutzung eines elektrischen Wäschetrockners und dem Stromverbrauch zwar erkennbar (Korrelationskoeffizient 25 %), aber nicht signifikant ist. Dagegen ist der Besitz eines elektrischen Wäschetrockners sehr deutlich korreliert mit der Höhe des Stromverbrauchs (signifikant bei einem Signifikanzniveau von 5 % in einem einseitigen Test), was der Erwartung entspricht.

Den Bewohnern sollte daher ein Trockenraum zur Verfügung stehen, damit sie nicht auf einen elektrischen Wäschetrockner angewiesen sind. Eine Alternative bietet ein Trockenschrank, der so eingebunden wird, dass er ohne Heizung betrieben werden kann [127].

Die erzielte Einsparung von etwa 12% gegenüber den Niedrigenergiehäusern zeigt, dass durch Anreize die Bewohner zur Beschaffung effizienter Haushaltsgeräte motiviert werden können. Trotz der nicht geringen Förderung (3500 DM pro Haushalt) wurde das Potenzial aber nicht annähernd ausgeschöpft. In Nachfolgesiedlungen wurden weitergehende Konzepte umgesetzt, die auch eine Beratung umfassten. Es zeigt sich, dass mit solchen Konzepten erheblich mehr erreicht werden kann und ein höheres Einsparpotenzial ausgeschöpft werden kann, selbst dann, wenn der finanzielle Anreiz geringer ist. Ein gut dokumentiertes Beispiel ist die CEPHEUS-Siedlung in Hannover [128].

7.4 Ergebnisse zum Primärenergieverbrauch

Im Messjahr 2000/2001 betrug der spezifische Fernwärmeverbrauch der Passivhäuser für Heizung, Warmwasserbereitung einschließlich der Wärmeverluste 29,6 kWh/(m²a). Zur Bewertung von Gebäude und Haustechnik muss noch der Hilfsstromverbrauch hinzugerechnet werden. Dieser beträgt ca. 2,7 kWh/(m²a), davon gut 2 kWh/(m²a) für die Lüftung mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung. Damit werden 20,6 kWh/(m²a) an Heizwärme eingespart (Mittelhäuser ohne Erdreichwärmetauscher). Für die Wärmeverteilung werden zusätzlich 0,66 kWh/(m²a) Strom benötigt.

Für die Bewertung des gesamten Energiekonzepts für die Siedlung ist es zum besseren Vergleich zweckmäßig, keine auf die zufällige Versorgungsstruktur bezogenen lokalen Daten, sondern globale Durchschnittsdaten zu verwenden. Für die primärenergetische Bewertung werden typische Daten für diese Versorgungsstruktur verwendet, die mit GEMIS berechnet wurden [75]. Für den Strommix wird ein Primärenergiefaktor von 2,94 angesetzt, für die Nahwärmeversorgung mit Kraft-Wärmekopplung ein Primärenergiefaktor von 1,02 (berechnet für 35% Kraft-Wärme-Kopplung). Im Vergleich dazu sind in der folgenden Tabelle auch die Daten, die für die primärenergetische Bewertung von der ENEV verwendet werden, angegeben.

Primärenergiefaktoren	verwendet (nach GEMIS)	zum Vergleich: ENEV
Nahwärme 35% KWK	1.02	0.7
Strom	2.94	3

Für die Einordnung in die Gesamtbilanz sind auch die Daten zur Größe der Objekte sowie zur Personenbelegung von Bedeutung. Die Personenbelegung in den Passivhäusern in Wiesbaden ist mit 3,6 Personen pro Haus und knapp 29 m² pro Person recht hoch. Dadurch sind die inneren Wärmequellen höher als in vielen anderen vergleichbaren Neubauprojekten. In Bezug auf die primärenergetische und CO₂ –Bewertung pro Person schneiden die Häuser daher besonders gut ab.

Tabelle 7.4-1: Größe und Personenbelegung

Daten	Projekt Wiesbaden Lummerlund			Personenbelegung	
	Anzahl Häuser	Wohnfläche (m ²)	Personen (2001)	Personen pro Haus	m ² pro Person
PH	22	2274	79	3.6	28.8
NEH	8 (von 24)	761	29	3.6	26.2
gesamt	30 (von 46)	3035	108	3.6	28.1

Primärenergie – Messergebnisse 2000/2001

Abbildung 7.4.-1 Primärenergieverbrauch der Passivhäuser in Wiesbaden (primärenergetische Bewertung nach GEMIS)

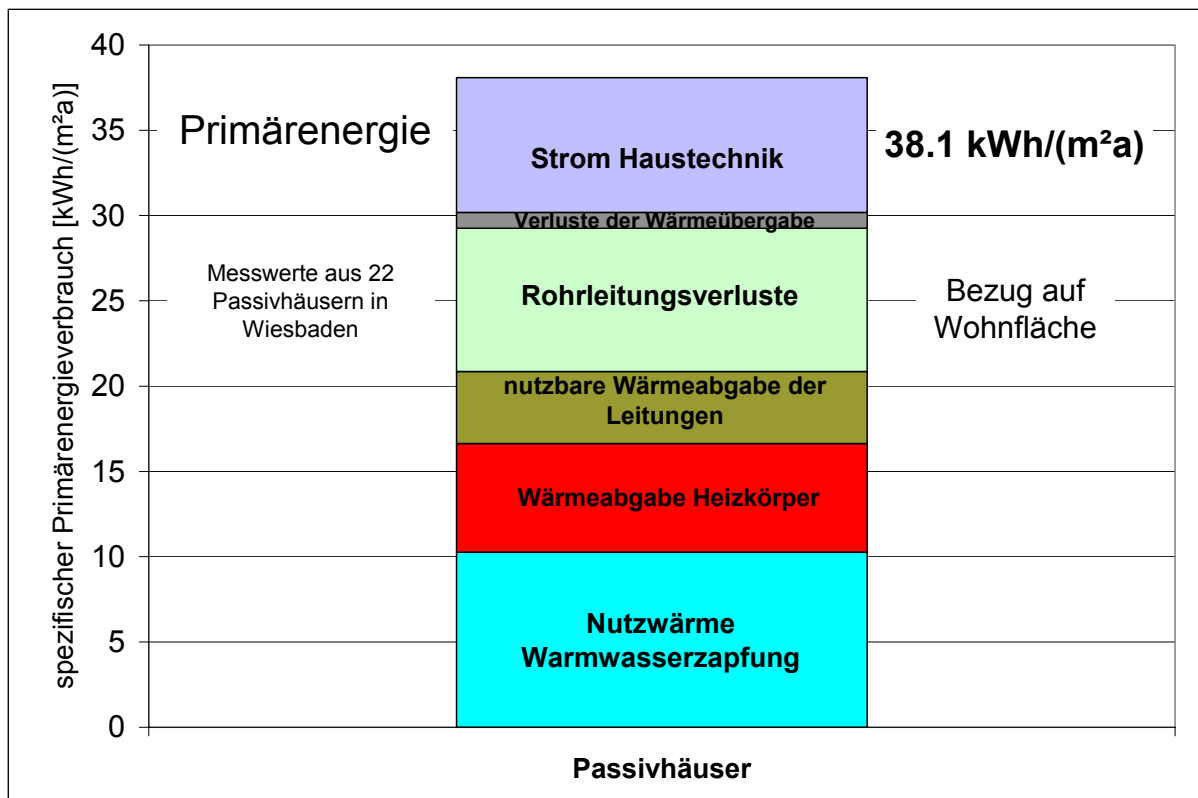
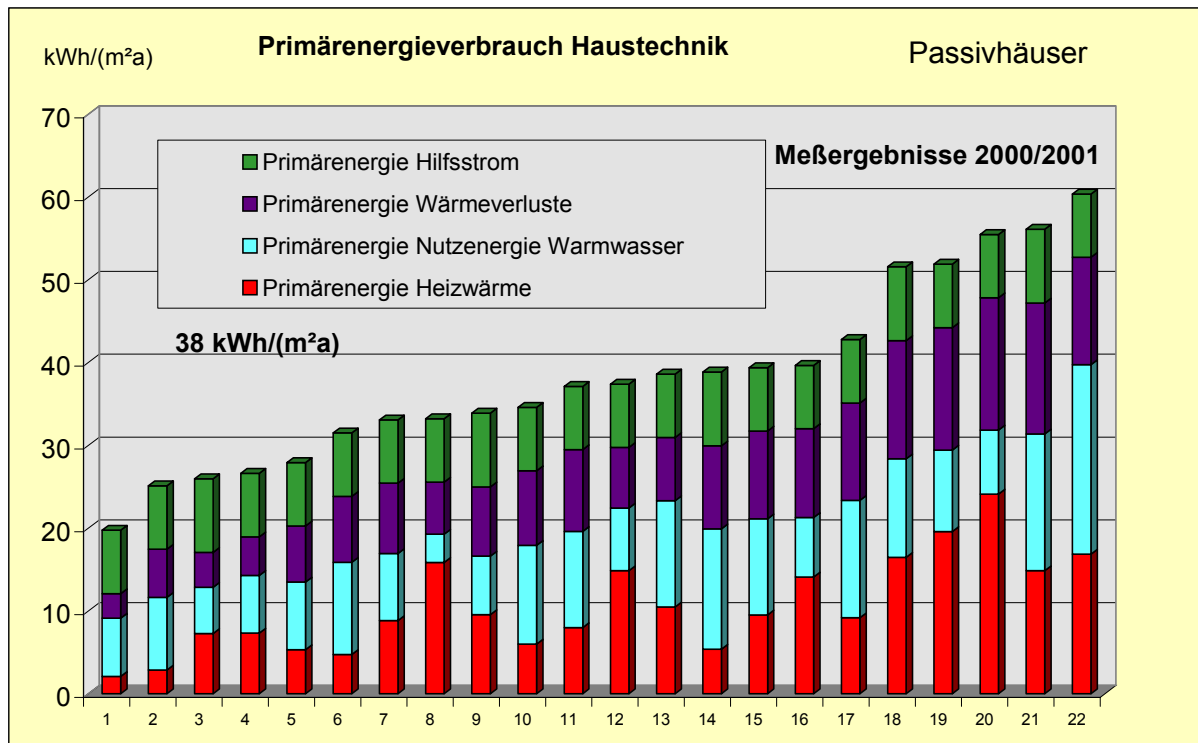


Abbildung 7.4-2: Primärenergie (Gebäude und Haustechnik) Nutzerstreuung (primärenergetische Bewertung nach GEMIS)



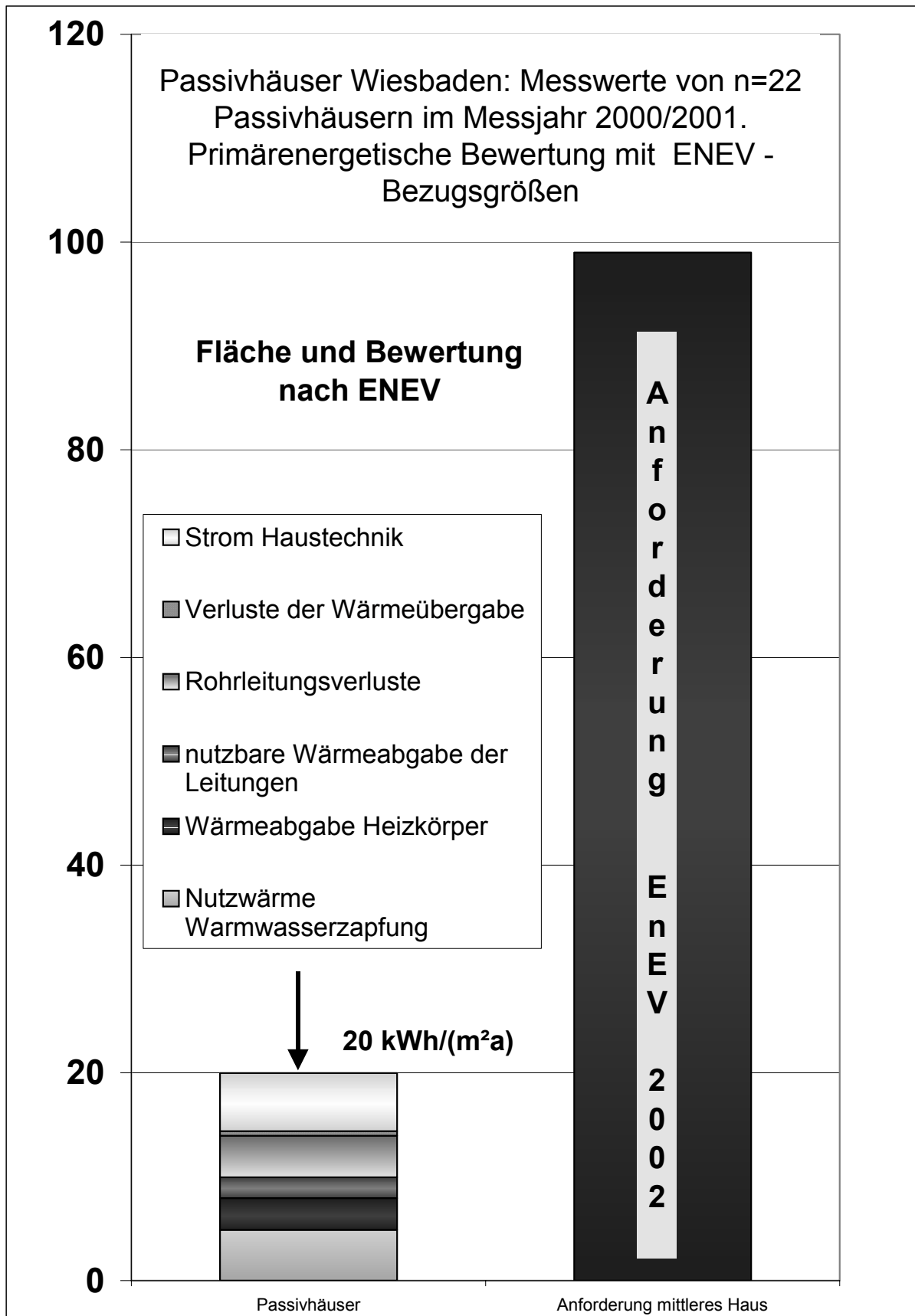
Bei der bisher vorgenommenen primärenergetischen Bewertung wurden die Wohnflächen und die Primärenergiefaktoren nach GEMIS verwendet. Der gesamte Primärenergieverbrauch für die Haustechnik im Messjahr 2000/2001 ist dann 38,1 kWh/(m²a) für die Passivhäuser. Verwendet man allein die Primärenergiebewertungsfaktoren nach der EnEV mit der günstigeren Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung, so beträgt der Primärenergieaufwand 28,8 kWh/(m²a) bei Bezug auf Wohnfläche.

Die größte Abweichung ergibt sich aber, wenn auch die EnEV-Bezugsgrößen verwendet werden: Das 6m-Haus mit 108 m² Wohnfläche hat eine Bezugsfläche nach der EnEV von 153 m², im Durchschnitt vermindern sich alle Verbrauchsgrößen allein dadurch um 30,7%. Damit würde die Primärenergiebewertung der gemessenen Verbrauchswerte nach der EnEV auf 20,3 kWh/(m²a) sinken.

Zum Vergleich zeigt die folgende Abbildung 7.4-3 die Aufteilung des Primärenergieverbrauchs für Heizung, Lüftung und Warmwasser gemäß den Primärenergiefaktoren und den Bezugsgrößen der EnEV.

Die Ergebnisse eines Messjahres können natürlich nicht wirklich mit dem Berechnungsergebnis nach der EnEV verglichen werden; bereits die für die EnEV vorgeschriebenen Randbedingungen lassen realistische Ergebnisse nicht erwarten [129]. Aus diesem Grunde wurde der Vergleich mit einem realistischen Berechnungs- und Projektierungsverfahren vorgenommen (Tabelle 7.4-2).

Abbildung 7.4-3 Primärenergetische Bewertung der Messergebnisse 2000/2001 nach der EnEV



(Bezugsfläche und Primärenergiefaktoren gemäß der Energieeinsparverordnung 2002)

Tabelle 7.4-2: Primärenergiekennwerte und Aufwandszahlen im Vergleich: Messergebnisse, Berechnung mit dem Passivhaus Projektierungs Paket und mit der EnEV.

Heizwärme und Primärenergie im Vergleich		gemessen	berechnet PHPP	berechnet PHPP	Heizwärme berechnet ENEV
<i>Berechnung für: Referenzhaus</i>					
Bezugsfläche	m ²	103.4	103.4	103.4	149.0
		2000/2001 (Durchschnitt)	Klima: Wiesbaden 2000/2001	ohne Berücksichtigung der WRG	
Heizwärme	kWh/a	1074	1063	3257	2966
Heizwärme bezogen auf Wohnfläche	kWh/(m ² a)	10.4	10.3	31.5	28.7
<i>Heizwärme bezogen auf ENEV-Fläche</i>	<i>kWh/(m²a)</i>	7.2	7.1	21.9	19.9
Nutzenergie Warmwasser	kWh/a	1040	1120	1120	1863
gesamte Nutzenergie	kWh/a	2114	2183	4377	4829
Primärenergie	kWh/a	3937	4559	4559	6912
Primärenergie bezogen auf Wohnfläche	kWh/(m ² a)	38.1	44.1		66.9
<i>Primärenergie bezogen auf ENEVfläche</i>	<i>kWh/(m²a)</i>	26.4	30.6		46.4
Anforderung	kWh/(m ² a)				98.5
in Bezug auf Anforderung	%	27%	31%		47%
Anlagenaufwandszahl	-	1.9	2.1	1.0	1.4
Primärenergie berechnet mit ENEV-Faktoren	kWh/a	2975	3467	3467	6912
bezogen auf Wohnfläche	kWh/(m ² a)	28.8	33.5		66.9
<i>bezogen auf ENEVfläche</i>	<i>kWh/(m²a)</i>	20.0	23.3		46.4
Anforderung	kWh/(m ² a)				98.5
in Bezug auf Anforderung	%	20.3%	24%		47%
Anlagenaufwandszahl	-	1.4	1.6	0.8	1.4

Berechnung für: Referenzhaus

Klima: Wiesbaden 2000/2001

Monatsverfahren

Grundlagen des Vergleichs: Messergebnisse aus 22 Passivhäusern in Wiesbaden. Berechnungen für ein Referenzhaus (mittleres Haus aus 5m. und 6m-Häusern sowie Mittel- und Endhäusern).

Grau hinterlegt: Primärenergiebewertung mit EnEV-Faktoren. Kursiv: Bezug auf EnEV-Bezugsfläche

In der ersten Spalte sind die gemessenen Werte für das Jahr 2000/2001 wiedergegeben (Durchschnitt aus n=22 Passivhäusern). Die 2. Spalte enthält Berechnungsergebnisse für ein Referenzhaus, das entsprechend den Anteilen von 5m- und 6m- Häusern sowie von Mittel- und

Endhäusern gebildet wurde. Alle Werte wurden mit dem Passivhaus Projektierungspaket 2002 (PHPP) ermittelt [130]. Der gemessene Heizwärmeverbrauch von Juli 2000 bis Juni 2001 betrug $10,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, bezogen auf die Wohnfläche; mit dem PHPP wurden für das Klima in Wiesbaden 2000/2001 $10,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ berechnet.

Das Verfahren nach der EnEV, dokumentiert in der letzten Spalte, berechnet einen wesentlich höheren (absoluten) Heizwärmebedarf, was aber aufgrund der Zuordnung der Lüftungstechnik zu erwarten ist und unten diskutiert wird. Entscheidend ist dagegen, ob die Endergebnisse, die Berechnungsergebnisse für den Primärenergieverbrauch, kompatibel sind.

Der gesamte Primärenergieverbrauch, projiziert nach dem PHPP hätte $44 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ betragen – in guter Übereinstimmung mit dem tatsächlich gemessenen, etwas niedrigeren Wert von $38,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Ursache für diese Abweichung sind ein etwas geringerer Warmwasserverbrauch, und, auch dadurch bedingt etwas geringere Wärmeverluste, so dass Messung und Berechnung mit dem PHPP in ausgezeichneter Übereinstimmung stehen.

Bei Verwendung der EnEV-Primärenergiefaktoren wäre der berechnete Primärenergieaufwand $33,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, bezogen auf die Wohnfläche. Vergleich man diesen Wert nun allerdings mit dem Ergebnis des EnEV-Verfahrens, so stellt man fest, dass sie erheblich voneinander abweichen. Mit $66,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ist das nach dem Verfahren der EnEV berechnete Ergebnis für die Primärenergie doppelt so hoch wie der mit dem PHPP berechnete Wert. Angesichts der vorliegenden Messergebnisse kann das EnEV-Verfahren nicht als realistisch angesehen werden – zumindest nicht für Gebäude mit dem hier vorliegenden sehr niedrigen Wärmebedarf.

Vergleich mit dem Anforderungsniveau

In Bezug auf die Anforderung werden nach dem EnEV-Verfahren 47% des Anforderungsniveaus erreicht, mit dem PHPP sinkt der berechnete Primärenergiebedarf aber auf 24%. Gemessen wurden 20,3%.

Für diese Bewertung wurden einheitlich die Primärenergiebewertungsfaktoren der EnEV verwendet – auch wenn diese im Vergleich zu Gemis bei der Kraft-Wärme-Kopplung zu optimistisch sind. Begründet war dies in einer Vorgabe für einen projektübergreifenden Vergleich im Rahmen der IEA Task 28 [131], in den die Passivhäuser in Wiesbaden einbezogen wurden [132]. In diesem Vergleich wurden auf der Basis von Messergebnissen unterschiedliche Gebäude- und Anlagenkonzepte miteinander verglichen. Die Gebäude erreichten Primärenergiekennwerte (für Heizung und Warmwasser), die durchweg bei einem Fünftel bis einem Drittel des Anforderungsniveaus der Energieeinsparverordnung liegen. Bei den Projekten handelte es sich überwiegend um Passivhäuser, die innerhalb des Vergleichs auch ausgezeichnete Ergebnisse erzielten. Außer der Passivhaussiedlung in Wiesbaden waren die Projekte Passivhaussiedlung Stuttgart (Architekt Rudolf, [133]) Passivhaussiedlung Neuenburg (Rasch), Passiv-Mehrfamilienhaus Freiburg, Projekte des Passivhausförderprogramms der EnBW, 5 Passivhausprojekte aus der Schweiz sowie die CEPHEUS-Teilprojekte

Cepheus Austria, Reihenhäuser Hannover und Geschosswohnungsbau Kassel [134] einbezogen.

Vergleichbare oder bessere Primärenergiekennwerte erreichten nur Projekte mit einem hohen Anteil an Kraftwärmekopplung, was auf die Stromgutschrift zurückzuführen ist. Allerdings ist die Stromgutschrift bei einer generellen Bewertung durchaus als problematisch anzusehen [135]; die günstigen Werte werden nur mit Stromgutschriften aus dem bestehenden konventionellen Stromversorgungspark mit nur geringen Anteilen an Kraftwärmekopplung und regenerativen Energiequellen erreicht.

Aufwandszahlen

Die Anlagenaufwandszahl, d.h. das Verhältnis von Primärenergieverbrauch zu Nutzwärmeverbrauch ist nach dem PHPP 2,0 (1,5 mit den EnEV-Primärenergiefaktoren), gemessen wurden 1,9 (1,4 mit den EnEV-Primärenergiefaktoren) in der Periode 2000/2001.

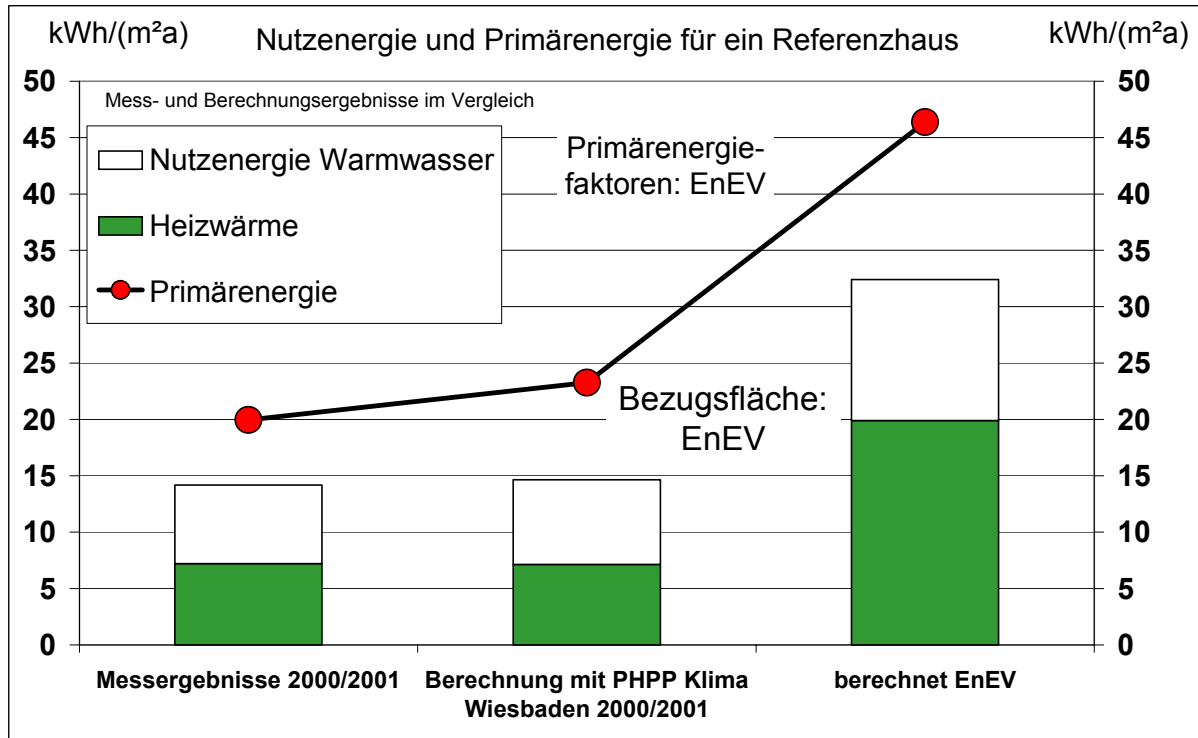
Die Systematik der EnEV ist allerdings hier eine andere: Die EnEV unterstellt in ihrer Berechnung, dass die in der ausgetauschten Luft enthaltene Enthalpie zunächst das Gebäude verlässt, um anschließend von der Lüftungsanlage wieder zugeführt zu werden. Dies ist weder physikalisch richtig noch erlaubt dieses Vorgehen eine funktionale Dimensionierung des Heizenergiebedarfs [136]. Passivhäuser lassen sich auf diese Weise nicht projektieren.

Ebenso wenig existieren hierzu Messergebnisse, denn tatsächlich findet dieser hypothetische Enthalpiestrom nicht statt, so dass er auch nicht messtechnisch erfasst werden kann. Um diesen Rechengang der EnEV nachzuvollziehen und eine vergleichbare Aufwandszahl zu ermitteln, können wiederum ausschließlich Berechnungsergebnisse herangezogen werden. Dies geschieht in der 3. Spalte der obigen Tabelle. Unter ansonsten gleichen Randbedingungen wird mit dem PHPP der Heizwärmeverbrauch für dasselbe Gebäude ohne Wärmerückgewinnung berechnet. Der Heizenergiebedarf würde für dieses Gebäude 31,8 statt 11,2 kWh/(m²a) betragen (bezogen auf die Wohnfläche). Der Primärenergieaufwand bleibt natürlich gleich (wie Spalte 2), die Aufwandszahl sinkt aber – allein durch die Bewertung der Wärmerückgewinnung als „Heizung“ auf 1,0 (GEMIS) bzw. 0,8 (EnEV-Primärenergiefaktoren). Wie bereits diskutiert, hat sie mit der Realität nichts zu tun, sondern dient ausschließlich als Vergleich zu der Bewertung nach dem EnEV-Verfahren. Das Ergebnis der EnEV für die Aufwandszahl ist 1,3 (statt 0,8 bei realistischer Berechnung auf derselben Datenbasis).

Diese Ergebnisse zeigen, dass das Verfahren unrealistisch ist. Schwerer wiegt, dass sich Passivhäuser mit dem Verfahren nach der EnEV nicht projektieren lassen [136]. Gerade im Hinblick auf die hervorragenden Ergebnisse, die Passivhäuser in Bezug auf die ökologische Bewertung erzielen, ist es nicht zu vertreten, dass Passivhäuser mit einem ungeeigneten Rechenverfahren zu bewerten sind. Förderprogramme für Passivhäuser sind daher auf der Basis der EnEV nicht möglich.

Abbildung 7.4-4: Vergleich von Messung und Berechnung, bezogen auf ein Referenz-Passivhaus in Wiesbaden (Durchschnitt aus n=22 Häusern). Die Primärenergie wurde einheitlich mit dem Verfahren der EnEV berechnet.

Hier: Energiebezugsfläche der EnEV



Gesamte Primärenergiebewertung

Das Gebäude ist ein Gesamtsystem, in dem alle Energieströme erfasst werden müssen, die über die Gebäudehülle ausgetauscht werden. Gerade bei energieeffizienten Gebäuden liefert der Haushaltsstrom oft den größten Einzelbeitrag zur Primärenergie. Seine Berücksichtigung ist aber nicht nur in Bezug auf die primärenergetische und Klimaschutzbewertung geboten, sondern auch deswegen, weil diese Energieströme nicht voneinander unabhängig sind. Der gesamte Primärenergieverbrauch für alle Energieströme über das Gebäude ist damit das geeignete Bewertungskriterium.

Bei realistischen Primärenergiefaktoren (s.o.) wäre die Passivhaus-Zielsetzung (120 kWh/m²a) knapp verfehlt. Der Grund ist ausschließlich darin zu suchen, dass Maßnahmen zur Stromeinsparung nicht konsequent genug betrieben wurden. Da zur Bewertung oft die Primärenergiefaktoren der EnEV herangezogen werden, muss aber zu Vergleichszwecken auch erwähnt werden, dass aufgrund der optimistischen Bewertung der Fernwärme für die Passivhaussiedlung in Wiesbaden ein günstigeres Ergebnis erzielt würde (115 kWh/(m²a), vgl. Abbildung 7.4-7).

Abbildung 7.4-5: Endenergieverbrauch der Passivhäuser in Wiesbaden

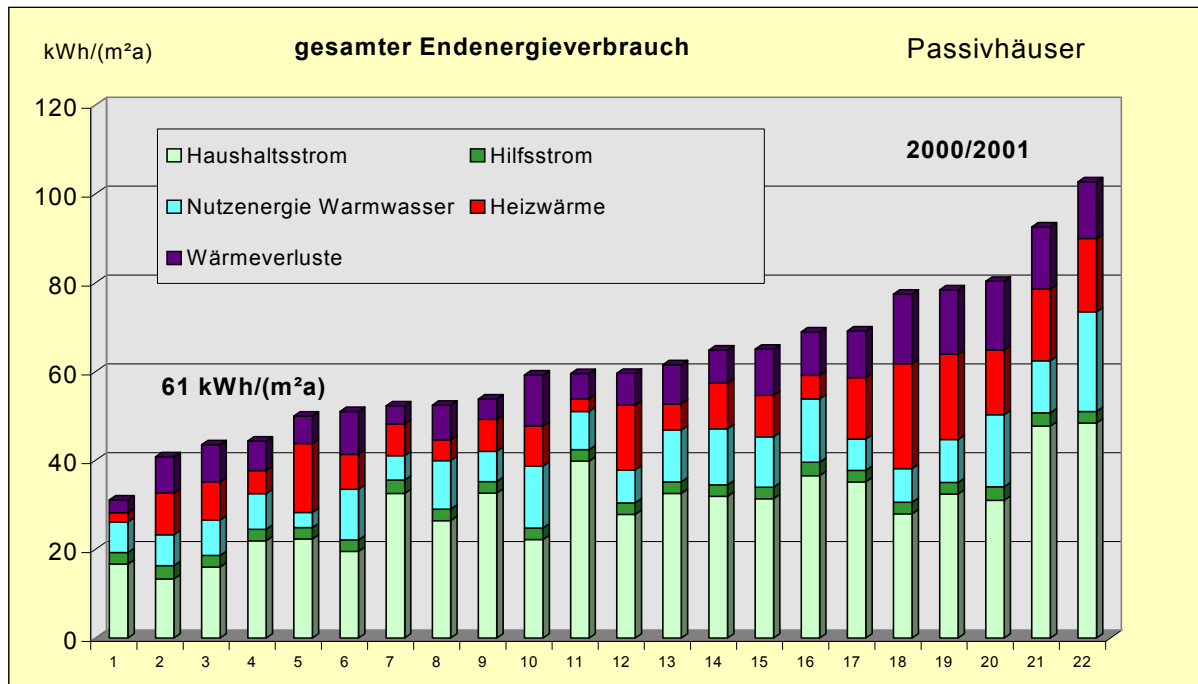


Abbildung 7.4-6: Primärenergieverbrauch der Passivhäuser in Wiesbaden (Primärenergiefaktoren nach GEMIS; Bezug auf Wohnfläche).

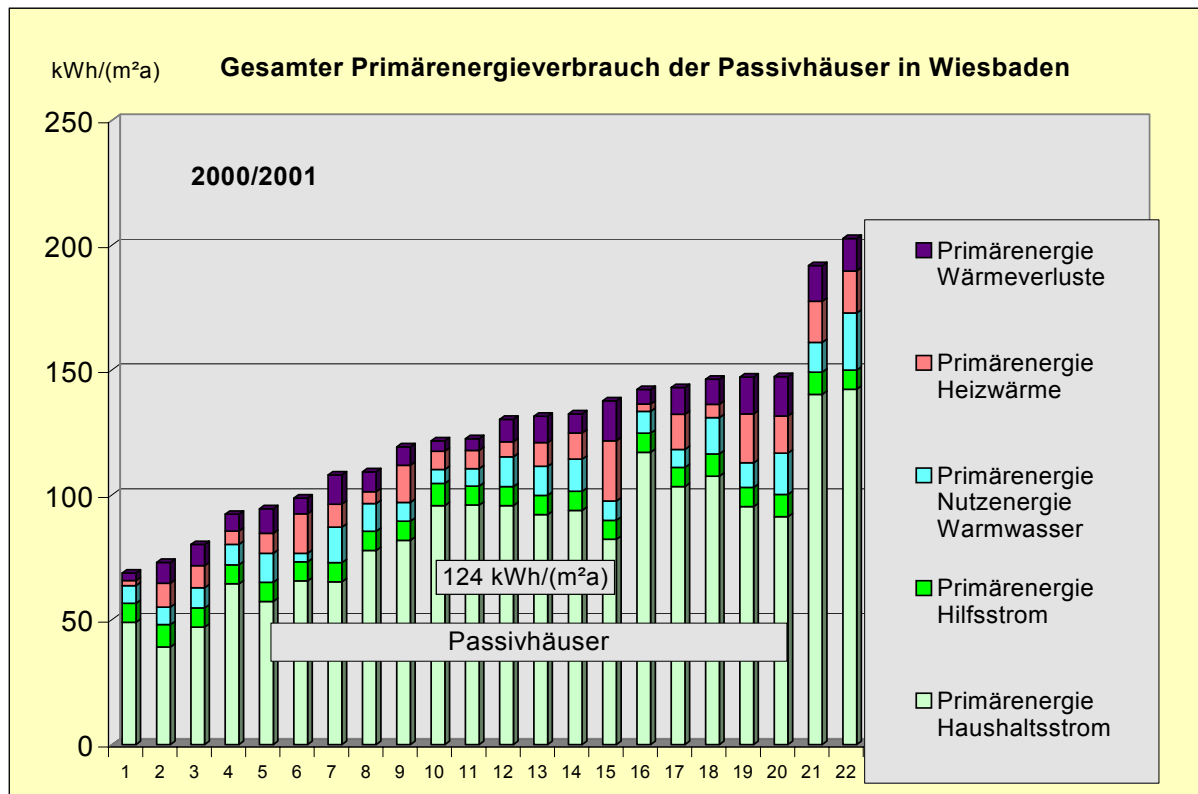
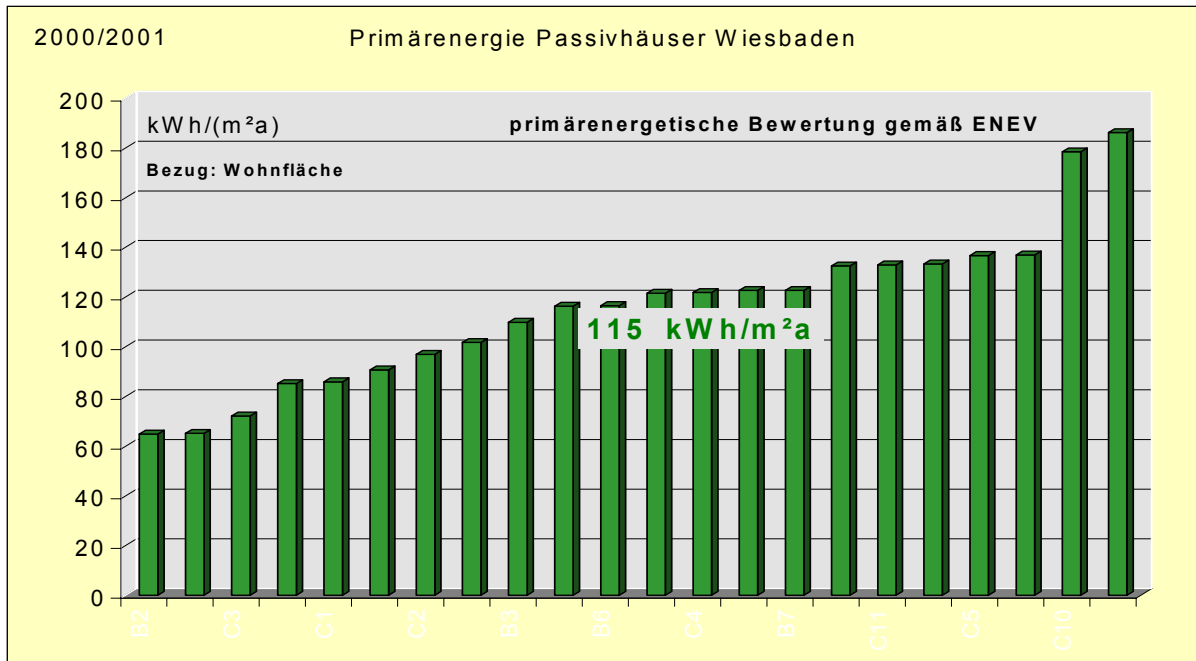


Abbildung 7.4-7: Primärenergieverbrauch der Passivhäuser in Wiesbaden (Bezug auf Wohnfläche)



In dieser Abbildung wurden die gemessenen Daten mit den in der EnEV vorgegebenen Primärenergiefaktoren bewertet. Der Bezug erfolgt jedoch weiterhin auf die Wohnfläche und nicht auf die Bezugsfläche der EnEV.

8 Schlussfolgerung und Ausblick

Die erste Passivhaussiedlung hat die hoch gesteckten Erwartungen in Bezug auf einen extrem geringen Heizenergieverbrauch in vollem Umfang erfüllt: Gegenüber vergleichbaren Häusern nach der zum Zeitpunkt des Baus der Häuser gültigen Wärmeschutzverordnung werden mehr als 85 % Heizwärme eingespart. Der gemessene Heizwärmebedarf lag in der zweiten bis fünften Heizperiode durchschnittlich zwischen 10,2 und 13,4 kWh pro m² Wohnfläche und Jahr. Dieses Ergebnis entspricht der Projektierung. Die beobachtete Nutzerstreuung lässt sich mit den unter Berücksichtigung der nutzerbedingten Einflussgrößen rechnerisch reproduzieren. Die eingesetzten Projektierungsinstrumente haben sich damit bewährt. Die funktionale Anforderung für den Passivhausstandard – gesamter Heizwärmeverbrauch unter 15 kWh/(m²a) bezogen auf die Wohnfläche - wurde in jedem Messjahr erfüllt.

Der Primärenergieverbrauch für Heizung, Warmwasser und Lüftung wird gegenüber den Anforderungen der EnEV um 73% unterschritten. Bei einer Bewertung mit den dort festgesetzten Primärenergiefaktoren beträgt die Einsparung sogar 80%.

Das Verfahren der EnEV ist jedoch nicht geeignet, messtechnisch reproduzierbare Verbrauchswerte zu berechnen. Schwerer wiegt, dass es nicht möglich ist, mit dem Verfahren der EnEV die funktionalen Anforderungen für den Passivhausstandard zu erfüllen. Auf der Basis der EnEV lässt sich somit kein geeignetes Kriterium für den Passivhausstandard herleiten. Bei einem Förderprogramm für Passivhäuser sollte daher auf bewährte Projektierungswerkzeuge für Passivhäuser zurückgegriffen werden, die im Rahmen der hier vorliegenden Auswertung der Passivhaussiedlung Wiesbaden ihre Zuverlässigkeit unter Beweis gestellt haben.

Im Gegensatz zur Heizenergie wird das wirtschaftliche Einsparpotenzial an elektrischer Energie im Bereich des Haushaltsstroms bei der hier ausgewerteten Siedlung noch nicht ausgeschöpft.

Zur Erreichung des geringen Heizenergieverbrauchs ist neben dem hohen Wärmeschutzstandard eine Lüftungsanlage mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung unverzichtbar. Die angestrebte hohe Effizienz wurde – bei zum damaligen Zeitpunkt erhöhtem Aufwand – erreicht; Voraussetzung ist ein regelmäßiger Filterwechsel, der den Bewohnern auf einfache Weise ermöglicht werden sollte. Die Lüftungsanlage wird von allen Bewohnern genutzt und als Komfortgewinn bewertet. Wichtig ist dabei, dass die Anlagen leise sind und dass die Luftmengen vom Nutzer unproblematisch eingestellt werden können, auch bei vorübergehend höherem Bedarf z.B. beim Kochen.

Die Bewohner nutzen darüber hinaus die Möglichkeit, die Fenster auch öffnen zu können. Dies geschieht vorzugsweise im Sommer, wobei die Fensteröffnung einen wesentlichen Beitrag dazu leistet, die Häuser kühl zu halten. Wie in der Siedlung in Wiesbaden der Fall, muss aus diesem Grunde in jedem Wohnraum ein offenbares Fenster vorhanden sein.

Im Winter bereitet es den Bewohnern keine Mühe, verantwortungsvoll mit den Fenstern umzugehen, so dass weder die Funktion der Häuser noch das Einsparziel in Frage gestellt werden. Bauphysikalische Berechnungen und messtechnische Untersuchungen zeigten dabei, dass der durch gekippte Fenster induzierte zusätzliche Luftwechsel geringer ist als von üblichen Simulationsprogrammen berechnet. Dies deckt sich mit der Beobachtung eines nur wenig beeinflussten Heizenergieverbrauchs. Für eine genauere Quantifizierung des Fensterluftwechsels über das Beispiel dieser Reihenhaussiedlung hinaus sind sowohl für die rechnerische Modellierung als auch im messtechnischen Bereich (Spurengasmessungen) weitere Untersuchungen erforderlich.

Die oftmals geäußerte Befürchtung, dass Bewohner von Passivhäusern die Zielsetzung in Bezug auf Behaglichkeit oder den Heizenergieverbrauch gefährden, erweist sich mit den Ergebnissen dieser Untersuchung als unbegründet. Der Passivhausstandard und die damit verbundenen Qualitätsanforderungen haben sich nicht nur technisch bewährt, sondern auch als nutzergerecht erwiesen. Die Nutzer haben höhere Spielräume sowohl bei der Wahl der Raumlufttemperatur als auch beim Umgang mit den Fenstern als zuvor oft prognostiziert wurde. Entscheidend für diese Gestaltungsmöglichkeiten ist die Gutmütigkeit der Gebäude, die auf baulicher und technischer Seite allerdings die Einhaltung hoher Qualitätskriterien unverzichtbar voraussetzt. Insbesondere auch in Bezug auf die Luftdichtheit und die kontrollierte Lüftung mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung haben sich die für Passivhäuser geforderten Zielwerte im Hinblick auf Bauschadensfreiheit, Energieeinsparung, Komfort und nutzerorientierter Gestaltung bewährt.

Die Bewohner sind zufrieden und loben den hohen Komfort in den Wohnungen. Dass die Zielsetzungen in Bezug auf minimalen Heizenergieverbrauch und gleichzeitig hohe Behaglichkeit erreicht wurden, war nicht selbstverständlich. In dieser ersten Passivhaussiedlung wurde die Qualität durch eine intensive Beratung und wissenschaftliche Begleitung gesichert. Inzwischen stehen erprobte und fortlaufend weiterentwickelte Planungshilfsmittel sowie eine wachsende Zahl passivhausgeeigneter Produkte zur Verfügung, deren Einsatz Planung und Bauausführung von Passivhäusern erleichtert und bau- und kostenseitige Optimierungen erlaubt. Eine Qualitätssicherung ist zusätzlich in jedem Fall zu empfehlen.

Wird dies beachtet, steht einer weiteren - aus ökologischen Gründen wünschenswerten - Verbreitung des Passivhausstandards nichts entgegen.

Ausblick

Wie auch durch die vorliegende Studie bestätigt wird, haben Passivhäuser eine so geringe Heizlast, dass sie prinzipiell allein über die Zuluft der ohnehin vorhandenen Lüftungsanlage beheizt werden können. Damit kann ein separates Heizsystem entfallen und es können zusätzlich Kosten gespart werden. Dieser weitere Schritt wurde innerhalb des Europäischen Thermie-Projekts CEPHEUS vollzogen, u.a. in einer Reihenhause-Siedlung in Hannover [137]. Inzwischen wurde auch dort messtechnisch überprüft, dass das Konzept der Zuluftnachheizung funktioniert [138]. Auf dieser Basis wird es zudem möglich, mit Lüftungs-Kompaktgeräten die erforderliche Haustechnik auf ein Minimum zu reduzieren [139]. Auch diese haben zwischenzeitlich in Passiv-Reihenhäusern den Praxistest bestanden [140].

Passivhäuser haben den Anwendungsbereich der südorientierten Reihenhäuser längst überschritten. Die zunehmend auf dem Markt verfügbaren passivhausgeeigneten Baukomponenten ermöglichen Passivhäuser fast beliebiger Größe und Orientierung [141], (die allerdings in weniger günstigen Situationen, insbesondere bei wenig kompakten Einfamilienhäusern und unerfahrenen Bauträgern, auch etwas teurer ausfallen können [142]). Bewährt haben sich Passivhäuser darüber hinaus bereits als Verwaltungsgebäude [143], als Fabrik [144] und im sozialen Wohnungsbau [145], [146]. Bauträger, Wohnungsbaugesellschaften und Fertighaushersteller schätzen nach einer Umfrage das Marktpotenzial für Passivhäuser auf 16000 bis 30000 Wohneinheiten im Jahr 2005 und zusätzliche 60000 bis 120000 bis zum Jahr 2010 [147].

Im Rahmen des Europäischen Thermie-Projekts CEPHEUS entstanden 221 Passivhaus-Wohneinheiten an 14 Standorten in fünf europäischen Ländern [148]. Die Passivhaus-Zielsetzung konnte auch hier in fast allen Fällen erreicht werden [149]. Im Vergleich zum jeweils gültigen Wärmeschutzstandard im Neubau wurden durchschnittlich 84% Heizwärme eingespart [150].

Bis Mitte 2002 entstanden allein in Deutschland ca. 2600 Passivhaus-Wohneinheiten [151]. Qualitätsgeprüfte Passivhäuser erreichten nach den vorliegenden Messergebnissen regelmäßig die Passivhaus-Zielsetzung [152]. Die Antwort auf die Frage der erfolgreichen Übertragbarkeit des Passivhauskonzepts ist von der Praxis bereits vorweggenommen. Damit ist jedoch die weitere Verbreitung noch keineswegs gesichert. Für die zukünftige Entwicklung wird es entscheidend sein, dass die Qualitätsstandards bei den Bauprodukten, bei der Planung und bei der Ausführung von Passivhäusern eingehalten werden

9 Literatur

- [1] W. Feist: Niedrigenergiehäuser in Dänemark und Schweden, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1986
- [2] W. Feist: Forschungs- und Demonstrationsgebäude Niedrigenergiehaus Schrecksbach. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1989
- [3] A. Fingerling : Eine Geschichte der Niedrigenergiehäuser bis zum Passivhaus. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1996
- [4] W. Feist: Forschungsprojekt Passive Häuser. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1988
- [5] W. Feist (Hrsg.): Energieeinsparung in Gebäuden. Hessisches Ministerium für Wirtschaft und Technik, Darmstadt, 1990
- [6] W. Feist: Bauvorbereitendes Forschungsprojekt Passive Häuser. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1989
- [7] B. Steinmüller, R. Bruno: The Energy Requirements of Buildings. In: Energy of Buildings 2 (1979) 225-235
- [8] B. Steinmüller: Zum Energiehaushalt von Gebäuden. Systemanalytische Betrachtungen anhand vereinfachter dynamischer Modelle. Aachen/Berlin 1981
- [9] W. Feist: Passivhäuser in Mitteleuropa. Darmstadt/Kassel 1993
- [10] V. Korsgard: Zero Energy House. Kopenhagen, 1977.
- [11] W.A. Shurcliff: Super Insulated Houses and Double Envelope Houses. Massachusetts 1981
- [12] H. Hörster (Hrsg.): Wege zum energiesparenden Wohnhaus, Hamburg 1980.
- [13] Passivhaus Darmstadt Kranichstein. Broschüre. Hessisches Umweltministerium/Institut Wohnen und Umwelt, Wiesbaden 1990, überarbeitete Auflage 1994
- [14] E. Hinz, W. Feist: Niedrigenergiehaus Schrecksbach: Abschlussbericht. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1992

-
- [15] W. Eicke-Hennig, M. Jäkel, J. Zeller: 30 Niedrigenergiehäuser in Hessen Abschlussbericht. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1997
- [16] W. Feist, J. Werner: Erste Messergebnisse aus dem Passivhaus Darmstadt Kranichstein. In: gi (1993), S. 240-249
- [17] W. Feist: 10 Jahre Passivhaus in Darmstadt Kranichstein. In: Bundesbaublatt, 1/2001
- [18] W. Feist: Kostengünstige Passivhäuser in Mitteleuropa. Passivhaus Institut, Darmstadt 1999
- [19] W. Feist: Passivhaus Darmstadt Kranichstein. In Bundesbaublatt, 2/1992
- [20] J. Knissel, W. Feist: Passivhaus Groß Umstadt. In: Bundesbaublatt 5/1997
- [21] W. Feist, J. Werner: Gesamtenergiekennwert $< 32 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. In: Bundesbaublatt 2/1994
- [22] W. Feist: Thermische Gebäudesimulation. C.F. Müller Verlag, Heidelberg 1994
- [23] W. Feist, T. Loga: Vergleich von Messung und Simulation. In: Energiebilanz und Temperaturverhalten. Passivhaus Institut, Darmstadt 1997
- [24] T. Kirtschig, J. Werner, W. Feist: Thermische Behaglichkeit im Passivhaus. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1998
- [25] W. Feist: Der Härtestest: Passivhäuser im strengen Winter 1996/1997. In: GRE-inform, 12/1997
- [26] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser: Materialwahl, Ökologie und Raumlufthygiene. Protokollband Nr. 8. Darmstadt 1997
- [27] W. Feist u.a.: Wirtschaftlichkeit von Niedrigenergiehäusern. In Sonnenenergie und Wärmetechnik, 4/1994
- [28] W. Feist: Passivhäuser – Behaglichkeit ohne Heizung. In: Tagungsband zur 1. Passivhaustagung, Passivhaus Institut, Darmstadt 1996
- [29] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 1. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1996
- [30] Protokollbände des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser. Passivhaus Institut, Darmstadt 1996-2003

-
- [31] W. Feist: Ökonomie des energiesparenden Bauens. In: Protokollband Nr. 11 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser. Passivhaus Institut, Darmstadt 1997
- [32] Nutzerverhalten. Protokollband Nr. 9 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, Darmstadt 1997
- [33] W. Feist: Meßergebnisse zur Nutzerstreuung des Energieverbrauchs bei ausgewerteten Bauprojekten. Protokollband AKKP Nr. 9: Nutzerverhalten. Passivhaus Institut, Darmstadt 1997
- [34] Hessisches Ministerium für Wirtschaft und Technik: Passivhaus Darmstadt Kranichstein. Broschüre, Wiesbaden 1991
- [35] B. Rohrman: sozialwissenschaftliche Evaluation des Passivhauses in Darmstadt. Passivhaus Bericht Nr. 11, Institut wohnen und Umwelt, Darmstadt 1994
- [36] B. Rohrman: Sozialwissenschaftliche Evaluation hessischer Niedrigenergiehäuser. Epsilon Team/Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1995
- [37] W. Feist, W. Ebel: Nutzereinflüsse und Wohnverhalten im Passivhaus. In: Tagungsband zur Tagung der Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute. Nürnberg 1999
- [38] W. Feist, W. Ebel: Ergebnisse der wissenschaftlichen Untersuchungen zum Nutzerverhalten im Passivhaus Darmstadt Kranichstein. In: Protokollband Nr. 9 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Darmstadt 1997
- [39] L. Grün: Luftqualität im Passivhaus; in: Tagungsband 2. Passivhaustagung Passivhausinstitut, Darmstadt 1998
- [40] W. Feist, Ergebnisse der Luftqualitätsmessungen im Passivhaus Darmstadt Kranichstein. In: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 8: Materialwahl und Raumluftthygiene. Passivhaus Institut, Darmstadt 1997
- [41] Bewohner haben das Wort: 10 Jahre im Passivhaus. In: EnergieEffizientes Bauen, 4/2000
- [42] T. Martus, T. , M. Großklos, T.Loga: Passivhäuser „Gartenhofsiedlung Lummerlund“ in Wiesbaden - Projektdarstellung. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 2001
- [43] F. Rasch. . Kostengünstiges Bauen von Passivhäusern In Protokollband Nr. 11 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser . Darmstadt: Passivhaus Institut 1997

-
- [44] F. Rasch: Kostengünstige Passivhäuser – realisierte Siedlungsprojekte. In: Tagungsband der 2. Passivhaus Tagung. Passivhaus Institut, Darmstadt 1998
- [45] F. Rasch: Passivhäuser und Superniedrigenergiehäuser in Mischbauweise. In: Das Passivhaus – Baustandard der Zukunft? Passivhaus Institut, Darmstadt 1998
- [46] W. Feist, T. Loga: Wärmedämmung und Reduzierung von Wärmebrücken; in: Tagungsband der 1. Passivhaus-Tagung; Passivhaus-Institut, Darmstadt 1996
- [47] W. Feist: Qualitätskriterien Passivhaus - Anforderungen an Passivhaus geeignete Komponenten; in: Tagungsband 2. Passivhaustagung, Passivhausinstitut, Darmstadt 1998
- [48] PHPP –Modelle der Passivhaussiedlung in Wiesbaden. Passivhaus Institut 1998 – 2001.
- [49] J. Schnieders, M. Such: Untersuchungen der Luftdichtheit in der Niedrigenergie- und Passivhaussiedlung Lummerlund in Wiesbaden-Dotzheim. Passivhaus Institut, Darmstadt 1998
- [50] R. Pfluger, Rainer: Projektierung von Lüftungsanlagen in Tagungsband der 3. Passivhaustagung, Energieinstitut Vorarlberg/Passivhaus Institut, Dornbirn/Darmstadt 1999
- [51] W. Feist: Lüftung im Passivhaus. Passivhausbericht Nr. 8, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1994
- [52] W. Feist: Passivhäuser - Stand der Entwicklung (Lüftungstechnik) in Tagungsband der 2. Passivhaustagung, Passivhaus Institut Darmstadt, 1998
- [53] J. Werner: Fachbeurteilung Lüftung/Schall, ebök im Auftrag des PHI. Passivhausinstitut, Darmstadt 1997
- [54] N. Stärz: Passivhäuser – Versorgung mit Nah-/Fernwärme? In: Tagungsband der 2. Passivhaus Tagung. Passivhaus Institut, Darmstadt 1998
- [55] W. Feist: Passivhäuser: Stand der Entwicklung. In: Tagungsband der 2. Passivhaus Tagung. Passivhaus Institut, Darmstadt 1998
- [56] C. Bisanz: Heizlastauslegung im Passivhaus. Passivhaus Institut, Darmstadt 1998
- [57] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser: Passivhaus Versorgungstechnik. Passivhaus Institut, Darmstadt 2000
- [58] Passivhaus-Reihenhäuser: Über die Zuluft beheizbar? CEPHEUS-Bericht Nr. 5. Passivhaus Institut, Darmstadt 1998

-
- [59] R. Pfluger, S. Peper: Ergebnisse der Messungen in der Passivhaussiedlung Hannover Kronsberg. In: Tagungsband zur 4. Passivhaustagung, Passivhaus Institut/Passivhaus Dienstleistungs GmbH, Darmstadt 2000
- [60] T. Loga, M. Großklos: Nutzerverhalten und –einfluss: Erste Messergebnisse aus der Passivhaus-Siedlung in Wiesbaden. in: Tagungsband zur 3. Passivhaustagung. Energieinstitut Vorarlberg/Passivhaus Institut, Dornbirn/Darmstadt 1999
- [61] W. Feist, T. Loga, M. Großklos: Durch Messungen bestätigt. Jahresheizenergieverbrauch bei 22 Passivhäusern in Wiesbaden unter 15 kWh/m² Wohnfläche. In Bundesbaublatt, 3/2000
- [62] Passivhaus Projektierungspaket (PHPP), 3. Auflage 2000. Passivhaus Institut, Darmstadt 1998/1999/2000
- [63] T. Loga, M. Großklos, W. Feist: Ein Jahr in der Gartenhofsiedlung Lummerlund. In: Tagungsband zur 4. Passivhaustagung. Passivhaus Institut, Darmstadt 2000
- [64] W. Feist: Messergebnisse zur Nutzerstreuung des Energieverbrauchs bei ausgewerteten Bauprojekten. In Protokollband Nr. 9 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser. Passivhaus Institut, Darmstadt 1997
- [65] Sonnenenergie - Mitteilungsblatt der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie, DWD-Strahlungswetterberichte, fortlaufend aktualisiert, Solar Promotion Verlag, München
- [66] Marc Großklos: Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch von Niedrigenergie- und Passivhäusern, Arbeitskreis Energieberatung Thüringen an der Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, 1999
- [67] Deutsches Institut für Normung: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs (DIN V 4108-6), Vornorm, November 2000
- [68] Deutsches Institut für Normung: Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen, Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung (DIN V 4701-10), Vornorm, Januar 2001
- [69] T. Loga, U. Imkeller: Energie-Pass Heizung/Warmwasser; IWU, Darmstadt 1997
- [70] S.Peper, R. Pfluger, W. Feist: Messung und Auswertung zur Warmwasser-Energiebilanz Passivhäuser Wiesbaden. Im Auftrag des Institut Wohnen und Umwelt, Passivhaus Institut, Darmstadt 2002

-
- [71] Reiß, J.; Erhorn, H.; Ohl, J.: Klassifizierung des Nutzerverhaltens bei Fensterlüftung, in „Heizung, Lüftung Haustechnik (HLH)“ 8/2001
- [72] Künzel, H.: „Repräsentativumfrage über die Heiz- und Lüftungsverhältnisse in Wohnungen“, in „Der Gesundheits-Ingenieur“, 9/1979
- [73] Telefonische Auskunft von Herrn Dr. Schneider, Stadtwerke Wiesbaden (ESWE) am 07.02.2001
- [74] Telefonische Auskunft von Herrn Dr. Schneider, Stadtwerke Wiesbaden (ESWE) am 20.03.2001
- [75] Öko-Institut; Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit: GEMIS - Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme, Version 3.10b (Dezember 1999)
- [76] W. Feist: Haustechnik im Passivhaus. Fachinformation. Passivhaus Institut, Darmstadt 1998
- [77] W. Ebel, M. Großklos, T. Loga: Bewohnerverhalten und -einfluss in Passivhäusern. In: Tagungsband zur 6. Passivhaus Tagung in Basel. FHBB/PHI, Basel 2002
- [78] VDI 4300: Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen, Blatt 7, Beuth Verlag , Berlin 2001.
- [79] A. Maas: Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung. Gesamthochschule Kassel, 1995
- [80] M.W. Liddament: Technical Note 21. A Review and Bibliography of Ventilation Effectiveness. Air infiltration and Ventilation Centre, Berkshire, UK
- [81] W. Raatschen: Lüftungseffektivität. In: Klima Kälte Heizung, 1988
- [82] J. Schnieders, M. Such: Untersuchungen der Luftdichtheit in der Niedrigenergie- und Passivhaussiedlung Lummerlund in Wiesbaden-Dotzheim. Passivhaus Institut, Darmstadt 1998
- [83] O. Kah, R. Pfluger, S. Peper, W. Feist: Kontinuierliche Luftwechseluntersuchung in bewohnten Passivhäusern. In: Tagungsband zur 7. Passivhaustagung in Hamburg, Passivhaus Institut, Darmstadt 2003

-
- [84] Passivhaus Institut: Lüftungsstrategien für den Sommer. Protokollband des Arbeitskreises Kostengünstige Passivhäuser Nr. 22, Darmstadt 2003
- [85] Passivhaus Institut (Hrsg.): Dimensionierung von Lüftungsanlagen in Passivhäusern. Protokollband des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser 17, PHI, Darmstadt 1999
- [86] W. Feist, E. Baffia, J. Schnieders, R. Pfluger, O.Kah: Passivhaus Projektierungspaket, 4. Auflage 2002. PHI, Darmstadt 2002
- [87] Knissel, J.; T. Loga: Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch in Passivhäusern; in: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband 9; Passivhausinstitut; Darmstadt 1997
- [88] Maas, Anton: Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung; Dissertation am Fachbereich Architektur der Gesamthochschule Kassel; Kassel, 1995
- [89] Baumgartner T., H. Bley, D. Brühwiler, P. Hartmann, H. Moor, W. Raatschen, U. Steinemann, L. Trepte: Luftaustausch in Gebäuden – Handbuch für die praktische Anwendung von Berechnungsmethoden; Fachinstitut Gebäude-Klima e.V.; Danziger Straße 20; D-74321 Bietigheim-Bissingen; 1989; Deutsche Bearbeitung des englischen Originals: Air Infiltration Calculation Techniques – An Applications Guide, by Martin W. Liddament; AIVC; 1986
- [90] Daler, R.; Hirsch, E.; Haberda, F.; Knöberl, U. und Krüger, W.: Bestandsaufnahme von Einrichtungen zur freien Lüftung im Wohnungsbau; Bundesministerium für Forschung und Technologie, Forschungsbericht T 84-028, 1984
- [91] Weber; A.: Modell für natürliche Lüftung durch Kippfenster; Beitrag zum TRNSYS Usertag; Stuttgart 1997
- [92] W. Feist: Wissenschaftliche Auswertung von Messungen in Passivhäusern/Niedrigenergiehäusern der Siedlung Wiesbaden Lummerlund. Studie im Auftrag des Instituts Wohnen und Umwelt, Passivhaus Institut, Darmstadt 2001
- [93] O.Kah: Bestimmung von Luftaustausch-Kennzahlen in einem Niedrigenergiehaus und einem Passivhaus. Passivhausinstitut, im Auftrag des IWU, Darmstadt 2002
- [94] W. Feist, W. Ebel: Ergebnisse der wissenschaftlichen Untersuchungen zum Nutzerverhalten im Passivhaus Darmstadt Kranichstein. In: Nutzerverhalten, Protokollband Nr. 9 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Darmstadt 1997

-
- [95] A. Flade, S.Hallmann, G. Lohmann, A. Flade, B.Mack: Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern aus sozialwissenschaftlicher Sicht. Institut Wohnen und Umwelt Darmstadt 2003
- [96] S. Hallmann, G. Lohmann, B. Mack: Wohnzufriedenheit und Wohnerfahrungen in der Siedlung Wiesbaden-Lummerlund. In: Tagungsband zur 7. Passivhaustagung in Hamburg, Passivhaus Institut, Darmstadt 2003
- [97] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser: Architekturbeispiele. Protokollband Nr 21, Passivhaus Institut, Darmstadt 2002
- [98] M. Danner: Nutzererfahrungen in der Passivhaussiedlung „Lummerlund“ in Hannover – Kronsberg. In: Tagungsband zur 7. Passivhaustagung. Passivhaus Institut, Darmstadt 2003
- [99] H.Hübner, A. Hermelink: Gestaltung von Passivhäusern für Mieter. In: Tagungsband zur 6. Passivhaus-Tagung. FHBB/ Passivhaus-Institut, Basel 2002
- [100] H. Hübner, A. Hermelink: Sozialer Mietwohnungsbau gemäß Passivhausstandard. In: Tagungsband zur 7. Passivhaustagung in Hamburg, Passivhaus Institut, Darmstadt 2003
- [101] CEPHEUS: Cost Efficient Passive Houses as European Standards. EU Thermie, Europäische Kommission, DG XVII, Energy, . Projektdarstellung PHI/Stadtwerke Hannover, 2001
- [102] W. Feist, J. Schnieders, R. Pfluger: Energieeffizientes Bauen in Europa. Erkenntnisse aus dem CEPHEUS-Projekt. In: Bauphysik 1/2002
- [103] R. Pfluger, S. Peper: Ergebnisse der Messungen in der Passivhaussiedlung Hannover Kronsberg. In: Tagungsband zur 4. Passivhaustagung, Passivhaus Institut/Passivhaus Dienstleistungs GmbH, Darmstadt 2000
- [104] S. Peper, W. Feist, O. Kah: Messtechnische Untersuchung und Auswertung Klimaneutraler Passivhaussiedlung in Hannover Kronsberg. CEPHEUS Projektinformation, Stadtwerke Hannover/Passivhaus Institut. Hannover/Darmstadt 2001
- [105] R. Pfluger, W. Feist: Kostengünstiger Passivhaus-Geschoßwohnungsbau in Kassel Marbachshöhe . CEPHEUS-Projektinformation, Passivhaus Institut, Darmstadt 2001
- [106] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser: Der Sommerfall. Protokollband Nr. 15, Passivhaus Institut, Darmstadt 1999

-
- [107] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser: Lüftungsstrategien für den Sommer. Protokollband Nr. 22, Passivhaus Institut, Darmstadt 2003
- [108] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser: Dimensionierung von Lüftungsanlagen in Passivhäusern., Passivhaus Institut, Darmstadt 1999
- [109] R. Pfluger: PHLuft. Passivhaus Institut, Darmstadt 1999; unter www.passiv.de
- [110] R. Pfluger: Luftführung in Passivhäusern – Planungsrichtlinien und Erfahrungen. PHI 1999/7, Darmstadt 1999
- [111] W. Ebel: Passivhaussiedlung Wiesbaden: Wenig Heizenergie und zufriedene Bewohner. In: EnergieEffizientes Bauen 2/2001.
- [112] W. Feist: Passivhaus Sommerklima Studie. PHI 1998/10. Passivhaus Institut, Darmstadt 1998
- [113] EMPA: Luftwechsel in Wohnbauten. Fenster-Lüftungsverhalten der Bewohner zweier Mehrfamilienhäuser in Abhängigkeit vom Außenklima. Dübendorf, 1981
- [114] W. Feist: Wissenschaftliche Auswertung von Messungen in Passivhäusern/Niedrigenergiehäusern der Siedlung Wiesbaden Lummerlund. Studie im Auftrag des Instituts Wohnen und Umwelt, Passivhaus Institut, Darmstadt 2001
- [115] Passivhaus Projektierungs Paket (PHPP). 3. Auflage, Passivhaus Institut, Darmstadt 2000
- [116] W. Feist: Primärenergiebilanz und Passivhaus Kriterien. In: Protokollband des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Nr. 13, Passivhaus Institut, Darmstadt 1998
- [117] W. Ebel, W. Feist: Ergebnisse zum Stromverbrauch im Passivhaus Darmstadt Kranichstein. In: Stromsparen im Passivhaus. Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 7, Passivhaus Institut, Darmstadt 1997
- [118] W. Feist, W. Ebel: Der elektrische Energieverbrauch im Passivhaus Darmstadt. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1999
- [119] W. Feist, J. Werner: Energiekennwert $< 32 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. In: Bundesbaublatt, Feb. 1994
- [120] T. Loga: Primärenergiebilanz der Passivhäuser Wiesbaden. In Protokollband Nr. 5 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser „Energiebilanz und Temperaturverhalten“. Passivhaus Institut, Darmstadt 1997

-
- [121] W. Feist: Passivhaus Sommerklima Studie. Passivhaus Institut, Darmstadt 1999
- [122] K. Michael u.a.: Energiesparinformation Nr.16. Niedrig Energie Institut/Hessisches Umweltministerium, Detmold/Wiesbaden 1997
- [123] Elektrische Geräte für Passivhäuser. Cepheus- Information. Passivhaus Institut, Darmstadt 1999
- [124] W. Feist, W. Ebel: Grenzen des Passivhausstandards. In: „Stadtplanerische Instrumente zur Umsetzung von Passivhäusern“. Protokollband AKKP Nr. 19, Passivhaus Institut, Darmstadt 2000
- [125] T. Loga, M. Großklos, W. Feist: Ein Jahr in der Gartenhofsiedlung Lummerlund. In: Tagungsband zur 4. Passivhaustagung. Passivhaus Institut, Darmstadt 2000
- [126] Institut Wohnen und Umwelt: Leitfaden Energiebewußte Gebäudeplanung. Hessisches Umweltministerium, Wiesbaden.
- [127] W. Feist u.a.: Wäschetrocknen im Trockenschrank: Messergebnisse und Nutzererfahrungen in einem Passivhaus. PHI 2000/3, Passivhaus Institut, Darmstadt 2000
- [128] S. Peper, W. Feist, O. Kah: Messtechnische Untersuchung und Auswertung Klimaneutraler Passivhaussiedlung in Hannover Kronsberg. CEPHEUS Projektinformation, Stadtwerke Hannover/Passivhaus Institut. Hannover/Darmstadt 2001
- [129] T. Loga, N. Diefenbach, R. Born: Guter Ansatz, schwache Standards: die neue Energiesparverordnung. Stellungnahme zum Kabinettsbeschluss vom 7.3.2001. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 2001
- [130] PHPP. Passivhaus Projektierungs Paket. Passivhaus Institut, 4. Auflage 2002
- [131] K. Voss, R. Hastings: Sustainable Solar Housing. In: Tagungsband zur 6. Passivhaustagung. FHBB/PHI, Basel 2002
- [132] K.Voss, M. Wall, R. Hastings: Der Beitrag erneuerbarer Energien im Passivhaus – Analysemethodik und Ergebnisse. In: Tagungsband zur 7. Passivhaustagung, PHI Darmstadt 2003
- [133] J. Reiß: Ergebnis des Forschungsvorhabens „Meßtechnische Validierung des Energiekonzepts einer großtechnisch umgesetzten Passivhausentwicklung in Stuttgart-Feuerbach. In: Tagungsband zur 7. Passivhaustagung, PHI Darmstadt 2003

:

-
- [134] J. Schnieders, W. Feist, R. Pfluger, O. Kah: CEPHEUS Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung, Endbericht. Passivhaus Institut/Stadtwerke Hannover, Darmstadt/Hannover 2001
- [135] N. Diefenbach: Bewertung der Wärmeerzeugung in KWK-Anlagen und Biomasse-Heizsystemen. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 2002
- [136] W. Feist: Stellungnahme zur Vornorm DIN V 2108 Teil 6 aus der Sicht der Passivhausentwicklung. CEPHEUS-Bericht Nr. 39. Passivhaus Institut, Darmstadt 2001
- [137] J. Schnieders, W. Feist: Passiv-Reihenhäuser: über die Zuluft beheizbar? Simulation des thermischen Gebäudeverhaltens bei Variation ausgewählter Parameter und bei Zuluft-Nachheizung. Passivhaus Institut, Darmstadt 1998
- [138] R. Pfluger, S. Peper: Ergebnisse der Messungen in der Passivhaussiedlung Hannover Kronsberg. In: Tagungsband zur 4. Passivhaustagung, Passivhaus Institut/Passivhaus Dienstleistungs GmbH, Darmstadt 2000
- [139] W. Feist: Haustechnik im Passivhaus. In: Tagungsband zur 1. Passivhaus Tagung, Passivhaus Institut, Darmstadt 1996.
- [140] A. Bühring, C. Russ: Lüftungs-Kompaktgeräte: Meßergebnisse, Erfahrungen, Hersteller. Tagungsband zur 5. Passivhaus Tagung. Böblingen 2001
- [141] Stadtplanerische Instrumente zur Umsetzung von Passivhäusern. Passivhaus Institut, Darmstadt 2000
- [142] Ulmer Passivhaussiedlung im Sonnenfeld. In: Die Wohnungswirtschaft 12/2000
- [143] A. Spieler u. a.: Passiv-Verwaltungsgebäude. Erste Betriebserfahrungen mit dem Wagner-Passiv-Solarhaus. In: 4. Passivhaus Tagung, Passivhaus Institut/Passivhaus Dienstleistung GmbH, Darmstadt 2000
- [144] M. Zimmer: Bau der ersten Passivhaus Fabrik. 4. Passivhaus Tagung, Passivhaus Institut/Passivhaus Dienstleistung GmbH, Darmstadt 2000
- [145] R. Pfluger, W. Feist: Kostengünstiger Passivhaus-Geschosswohnungsbau in Kassel Marbachshöhe. Passivhaus Institut, Darmstadt 2000
- [146] E. Schneider: Passivhäuser – Energiebilanz und Nutzerverhalten. In: Bundesbaublatt 1/2001

-
- [147] J. Witt: Passivhäuser: Nischenprodukt oder Zukunftsmarkt? Eine Marktpotenzialstudie. In: 3. Passivhaustagung, Energieinstitut Vorarlberg/Passivhaus Institut, Dornbirn/Darmstadt 1999
- [148] Cost Efficient Passive Houses as European Standard. EU Thermie, Passivhaus Institut, Darmstadt 1998
- [149] J. Schnieders, W. Feist, R. Pfluger, O. Kah: CEPHEUS: Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung. Passivhaus Institut, Darmstadt 2001
- [150] W. Feist, J. Schnieders, R. Pfluger: Energieeffizientes Bauen in Europa. Erkenntnisse aus dem CEPHEUS Projekt. In: Bauphysik 2002, Heft 1, S. 10-24
- [151] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr 21, Passivhaus Institut, Darmstadt 2002
- [152] W. Feist: Passivhaus 2000: Erfolgreiche Praxis des energieeffizienten Bauens. In: Bauzentrum, Dez 2000.



ANHANG

- A Messung und Auswertung zur Warmwasser-Energiebilanz der Passivhäuser Wiesbaden-Lummerlund

- B Messung von Luftaustauschkennzahlen in einem Passiv- und einem Niedrigenergiehaus der Siedlung in Wiesbaden

Nur in der gedruckten Fassung enthalten