

Gebäudesanierung „Passivhaus im Bestand“ in Ludwigshafen / Mundenheim

**Messung und Beurteilung der energetischen
Sanierungserfolge**



Auftraggeber
GAG Ludwigshafen am Rhein



Mit Fördermitteln des Programms
ExWoSt des Landes Rheinland-Pfalz



RheinlandPfalz

MINISTERIUM DER FINANZEN

Dezember 2008



**PASSIV
HAUS
INSTITUT**

Dr. Wolfgang Feist

Gebäudesanierung „Passivhaus im Bestand“ in Ludwigshafen / Mundenheim

Messung und Beurteilung der energetischen Sanierungserfolge

Autoren:

Dipl.-Ing. Søren Peper
Prof. Dr. Wolfgang Feist

Unter Mitarbeit von:

Dipl.-Ing. Wolfgang Hasper
Dipl.-Energiewirtin Cornelia Baumgärtner
Dipl.-Ing. Vahid Sariri
Dipl.-Ing. Tanja Schulz
Dipl.-Ing. Patricia Inhofer
Dipl.-Phys. Jürgen Schnieders
Dr. Witta Ebel

Herausgeber:

PASSIVHAUS INSTITUT
Dr. Wolfgang Feist
Rheinstr. 44/46
D-64283 Darmstadt
Tel: 06151 / 82699-0
Fax: 06151 / 82699-11
E-Mail: mail@passiv.de
www.passiv.de

Darmstadt Dezember 2008

Dieser Bericht entstand im Auftrag der GAG Ludwigshafen mit Fördermitteln des Programms Experimenteller Wohnungs- und Städtebau (ExWoSt) vom Ministerium der Finanzen des Landes Rheinland Pfalz.

Titel des Forschungsauftrages:
„Wissenschaftliche Begleitung und messtechnische Untersuchung zum Projekt „Passivhaus im Bestand“ Mundenheim Süd-Ost / Ludwigshafen“

Wir danken den Bewohnern für ihre stete Bereitschaft unsere Messungen zu unterstützen und die diversen Störungen über sich ergehen zu lassen.

Wir danken insbesondere dem Mieterbetreuer Hr. Herrle und den Mitarbeitern der TWL Ludwigshafen für ihre aktive Unterstützungen während der Messung.

***Verantwortlich ist man nicht nur für das,
was man tut,
sondern auch für das,
was man nicht tut.***

Laotse





Inhaltsverzeichnis

1	EINFÜHRUNG UND KURZFASSUNG	3
2	PROJEKT- UND GEBÄUDEVORSTELLUNG	12
2.1	Eindrücke und Details der energetischen Sanierungsmaßnahmen	16
2.2	Sanierte Gebäude	19
2.2.1	Haustechnik	22
2.2.1.1	Lüftungsgeräte	24
2.2.2	Energiebilanzen	27
3	QUALITÄTSSICHERUNG	31
3.1	Luftdichtheit	31
3.2	Thermographische Untersuchung	35
3.2.1	Außenthermographien	36
3.2.2	Innenthermographien	43
3.2.3	Thermographien Nahwärmeübergaberaum	52
3.3	Luftmengen und Lüftungsgeräte im PHiB	55
4	ZIELSETZUNGEN UND MESSKONZEPT	58
4.1	Aufbau der Messtechnik	59
4.2	Position und Spezifikation der Messstellen	61
4.2.1	Zentrale Hauptzähler	61
4.2.1.1	Wärmemengenzähler	61
4.2.1.2	Elektrozähler	62
4.2.2	Dezentrale Wärmemengenmessung	63
4.2.3	Temperaturmessungen	63
4.2.4	Raumluftqualität	65
4.2.4.1	Luftfeuchtigkeit	65
4.2.4.2	CO ₂ -Konzentration	66
4.2.4.3	Fensterkontakte	67
4.3	Tabellarische Übersicht der Messgeräte	68
5	MESSDATENAUSWERTUNG	69
5.1	Wetterdaten	70
5.2	Raumlufttemperaturen und -qualitäten	75
5.2.1	Raumtemperaturen	75
5.2.1.1	Raumtemperaturen nach Gebäudestandards	79
5.2.1.2	Raumtemperaturen nach Geschoss und Gebäudestandards	81
5.2.1.3	Temperaturen nach Raumnutzungsart	82
5.2.1.4	Sommertemperaturen	85
5.2.2	Raumluftfeuchte	88
5.2.2.1	Bewertung des Feuchterisikos	92
5.2.3	CO ₂ -Messungen	98
5.2.3.1	Konzentrationen im Winterzeitraum	98
5.2.3.2	Übersicht Konzentrationsintervalle Winterzeitraum	106
5.2.3.3	Konzentrationen im Sommerzeitraum	108



5.3	Fensterlüftung.....	110
5.4	Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser	117
5.4.1	Gesamter Wärmebezug.....	117
5.4.2	Heizwärmeverbrauch der einzelnen Wohnungen	120
5.4.2.1	Heizwärmeverbrauch bei vollständiger WRG.....	122
5.4.2.2	Wärmestrom PHiB zum NEH	124
5.4.3	Heizwärme und Verteilung.....	125
5.4.3.1	Vergleich der PHPP-Berechnung mit den Messdaten.....	127
5.4.3.2	Heizungsunterbrechungen	130
5.4.3.3	Wärmeübergabe Keller	132
5.4.4	Heizleistung	133
5.4.4.1	Heizleistung nach Geschossen	135
5.4.4.2	Heizkurve	137
5.4.5	Referenzgebäude Bestand	139
5.4.6	Wärmeverbrauch Warmwasser	143
5.5	Stromverbrauch	150
5.5.1	Haushaltsstromverbrauch.....	150
5.5.2	Strom Lüftungsanlagen.....	151
5.5.3	Allgemeinstrom.....	154
5.5.4	PV Strom	156
5.6	Warmwassermenge.....	158
5.7	Energiebilanz.....	159
5.7.1	Endenergie Wärme.....	159
5.7.2	Gesamte End- und Primärenergie	161
5.7.3	Primärenergie Heizung, Warmwasser und Technikstrom PHiB.....	162
5.7.4	Energieverbrauch bei Standardbedingungen	163
5.7.5	Primärenergieverbrauch nach EnEV	164
6	GLOSSAR.....	167
7	QUELLENANGABEN.....	169
8	ANHANG.....	173

1 Einführung und Kurzfassung

Bei der Komplettsanierung der beiden aneinander angrenzenden Wohnungsbauten in Ludwigshafen Mundenheim standen von Anfang an energetische Gesichtspunkte im Mittelpunkt. Eines der beiden Gebäude wurde mit Passivhauskomponenten so weitreichend saniert, dass es nahezu den Standard eines Passivhaus-Neubaus entspricht. Die Messungen belegen den Sanierungserfolg in vollem Umfang. Nicht nur der Energieverbrauch ist auf ein sehr niedriges Niveau gesunken, sondern auch die gute Luftqualität und die hohe Sicherheit gegenüber Feuchteschäden sind überzeugend.

Es handelt sich bei den Gebäuden um klassische Wohnungsbauten aus dem Jahr 1965 mit je drei Vollgeschossen und 12 Wohnungen. Eigentümer der beiden Gebäude ist die GAG Ludwigshafen. Die typischen Zweispänner sind vollständig unterkellert. Bei der Sanierung im Jahr 2005/2006 wurden die ursprünglich gleichgroßen Wohnungen in jeweils eine kleinere (51,6 m²) und in eine größere (73,5 m²) verändert. Außerdem wurden der zurückspringende Teil der Balkone bis zur Fassade durch neue Fenster in Wohnraum verwandelt. Der Rest der Balkonplatte wurde abgetrennt, womit sehr große konstruktive Wärmebrücke beseitigt werden konnten. Stattdessen wurden Stahl-Balkonanlagen auf eigenen Fundamenten vor den Wohnzimmern errichtet. Alle Elektro- und Sanitäreinrichtungen wurden ebenso erneuert wie die Innen- und Außentüren und die Fenster. Jedes der beiden Gebäude verfügt nach der Sanierung über insgesamt 750 m² beheizte Wohnfläche.

Das westliche Gebäude wurde mit Passivhauskomponenten energetisch hochwertig ausgestattet (Haus 1 und 3). Der Bauherr, die GAG Ludwigshafen, bezeichnet das Gebäude als „Passivhaus im Bestand“, die Abkürzung „**PHiB**“ wird im folgenden in diesem Bericht verwendet. Jede Wohnung wurde mit einem Komfortlüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung ausgestattet. Die Beheizung erfolgt, wie beim klassischen Passivhauskonzept üblich, über die Nachheizung der Zuluft (Hydraulisches Nachheizregister mit ca. 900 W maximaler Heizleistung). Dazu ist nur ein sehr kurzes Leitungsnetz im Flur notwendig (abgehängte Decke). Nur im Badezimmer ist noch ein Heizkörper vorhanden. Die Fassadendämmung wurde passivhaustauglich mit 300 mm Hartschaum ausgeführt, als Fenster kamen Dreischeibenverglasungen in gedämmten Rahmen zum Einsatz.

Das baugleiche angrenzende östliche Gebäude (Haus 5 und 7) wurde ebenfalls hochwertig, aber in einem nicht ganz so anspruchsvollen energetischen Standard saniert. Es wurden dabei viele Maßnahmen aus der Beratungstätigkeit des Passivhaus Institut für das PHiB übertragen bzw. komplett übernommen. Hier sind die erhöhte Luftdichtheit, Dämmdetails auch von häufig vernachlässigten Bereichen (Treppenhauskopf, Kellerabgang, Befestigung Fenster, etc.) und diverse weitere Details zu nennen. Diese Maßnahmen erwiesen sich für die Sanierung als vergleichsweise einfach und kostengünstig ausführbare Verbesserungen gegenüber der heute überwiegend üblichen Vorgehensweise. Die gesetzlichen Anforderungen an den Wärmeschutz nach der Energiesparverordnung 2004 (EnEV 2004) wurden auch bei dem östlichen Gebäudeteil weit übertroffen. Dieser Gebäudeteil wird hier als



„Niedrigenergiehaus“, im Folgenden mit „**NEH**“ abgekürzt, bezeichnet. In diesem Gebäude wird konventionell über die Fenster gelüftet. Die Dämmstoffstärke der Fassaden beträgt 120 mm, bei den Fenstern wurden aus energetischer Sicht gute konventionelle Produkte eingesetzt.

Das Passivhaus Institut hatte in der Planungs- und Ausführungsphase die Aufgabe der energetischen Bilanzierung (PHPP Erstellung, Wärmebrückenberechnung), der Beratung zu allen energetischen Fragestellungen und der Beratung zur Qualitätssicherung übernommen. Gegenstand der hier vorgelegten Forschungsarbeit ist die wissenschaftlichen Messung und Beurteilung der energetischen Sanierungserfolge. Diese beinhaltet die Messung aller energetisch relevanten Größen und der Raumluftqualität. Zur Beurteilung der Luftwechsel im NEH wurden in drei Wohnungen die Fensteröffnungszeiten aufgezeichnet. Genauso waren die Untersuchung der Luftdichtheit und eine thermographische Untersuchung nach der Sanierung Aufgaben des Passivhaus Instituts.

Bei beiden Gebäuden wurde eine sehr gute Luftdichtheit festgestellt. Das PHiB unterschreitet mit $n_{50} = 0,46 \text{ h}^{-1}$ sogar die strenge Anforderung an Passivhausneubauten deutlich. Das NEH liegt mit $n_{50} = 0,72 \text{ h}^{-1}$ nur geringfügig darüber. Die Messergebnisse stellen - insbesondere für Sanierungsgebäude - sehr gute Werte dar, die normalerweise bei Standardneubauten bei weitem nicht eingehalten werden. Dass diese sehr guten Werte in beiden Gebäudeteilen eingehalten werden konnten, zeigt die hohe Reproduzierbarkeit der bei Passivhausstandard empfohlenen Maßnahmen zur Sicherstellung der Luftdichtheit [Peper 1999].

Bei der thermographischen Untersuchung wurden die Unterschiede der Gebäudequalität sichtbar. Insbesondere die Sockelwärmebrücke und die geringere Fensterqualität im NEH sind klar erkennbar. Neben einigen kleineren Mängeln waren insbesondere die Wärmebrücken der überdurchschnittlich massiven Balkonankerplatten sichtbar. Ein bauphysikalischer Mangel liegt hier allerdings nicht vor, solange die Innenraum-Luftfeuchtigkeiten nicht unzulässig hoch werden. Diese Ergebnisse der Thermographie bestätigen die vom PHI im Voraus durchgeführten Berechnungen.

Im Rahmen der Begleitmessung wurden über den gesamten Zeitraum alle Sensoren in 10 Minuten Auflösung gemessen. Damit wurden die Verbrauchsdaten für Heizwärme, Strom und Warmwassererwärmung vollständig erfasst und mit ihnen die Projektierungsdaten überprüft. In jeweils drei Wohnungen je Gebäude wurden zusätzlich die Raumluftqualität (Feuchte und CO_2 -Konzentration) sowie - in den drei im NEH - die Fensteröffnungszeiten gemessen.

Durch die wissenschaftlichen Begleitmessungen liegen etwa von April 2006 bis April 2008 auswertbare Messdaten vor. Als verwendeter Bilanzjahreszeitraum wird der 01. Mai 2007 bis 30. April 2008 verwendet, der den kälteren Winter beinhaltet.

Messergebnisse Heizung und Warmwasser

Der **Heizwärmeverbrauch** (Zählermesswerte Wohnungen) für das PHiB beträgt im Bilanzjahreszeitraum **16,4 kWh/(m²a)** bezogen auf die beheizte Wohnfläche (EBF). Dabei lag die flächengewichtete mittlere **Raumtemperatur** im Winter mit **22,7 °C** vergleichsweise hoch. Bei zwei Wohnungen wurde, aufgrund eines Verständnisproblems, die Wärmerückgewinnung der Lüftungsgeräte nicht vollständig genutzt. Der Messwert würde sonst in diesem Zeitraum nochmals niedriger ausfallen (unter 15 kWh/(m²a)).

Die Temperaturmessung ergab, dass die Wohnungen im PHiB im Durchschnitt um 2,1 K wärmer waren als im Nachbargebäude. Es scheint, dass die Bewohner des PHiB den hohen Gebäudestandard nutzen, um nahezu kostenlos die gewünschte Wohlfühltemperatur einzustellen. Die an der ungedämmten Trennwand der beiden Gebäude angrenzenden Wohnungen haben im Winter 2007/2008 einen mittleren Temperaturunterschied von sogar 3,1 K. Dies führte zu einem Wärmestrom vom PHiB zum NEH, welcher im PHiB zu einer Verbrauchserhöhung am Wärmezähler geführt hat. Unter Berücksichtigung dieses Wärmeabflusses ist die tatsächlich im PHiB verbrauchte Heizwärme um **2,0 kWh/(m²a)** niedriger und beträgt nur **14,4 kWh/(m²a)**.

Zu dem gemessenen Heizwärmeverbrauch der Einzelzähler in den Wohnungen muss noch der nutzbare Anteil der Wärmeabgabe der Heizwärmeverteilung addiert werden. Die Auswertung mit dem Bilanzmodell unter den gemessenen Randbedingungen ergab einen Wert von 3,8 kWh/(m²a) als nutzbare Wärme aus den Verteilungen. Der Gesamtwert des Heizwärmeverbrauchs (ohne den Querwärmestrom zum NEH) beträgt dann **18,2 kWh/(m²a)**. Damit wurden sehr niedrige Verbrauchswerte realisiert, wie sie sonst nur aus dem Passivhaus-Neubaubereich bekannt sind. Die nicht nutzbaren Anteile der Heizwärmeverteilung ergibt sich zu 4,1 kWh/(m²a) (Verteilungsverluste). Der gesamte Heizwärmebezug inkl. der Verteilungswärmeverluste des PHiB beträgt somit 24,4 kWh/(m²a).

Der Vergleich mit dem Heizwärmeverbrauch eines ähnlichen aber unsanierten Referenzgebäudes in der Nähe zeigt im gleichen Winter Heizwärmeverbrauchswerte von **141 kWh/(m²a)**. Damit wurde beim PHiB (bei Standardbedingungen) eine **Reduktion um 87 %** auf nur 13 % des Verbrauchs praktisch umgesetzt und messtechnisch validiert.

Die maximale tagesmittlere **Heizleistung** im PHiB wurde mit **9,7 W/m²** gemessen. Sie liegt damit im Winter 2007/2008, trotz der typisch altbaubedingten verbleibenden Wärmebrücken durch die aufsteigenden Kellerwände so niedrig wie für einen Passivhaus-Neubau gefordert. Es verbleiben trotz der relativ knapp ausgelegten Heizregister (12,1 W/m²) ausreichende Leistungsreserven, auch für den Fall von noch deutlich kälteren Wintern. Weiter konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Höhe der Heizleistung und der Lage nach Geschossen festgestellt werden.

Der Wärmeverbrauch für die gesamten **Warmwasserversorgung** (Speicherladung) ergibt sich im PHiB zu **24,9 kWh/(m²a)**. Der Nutzwärmeverbrauch für das Trinkwarm-



wasser beträgt $15,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und liegt damit fast gleichauf mit dem Heizwärmeverbrauch des Gebäudes. Für den Ausgleich der Wärmeverluste der Zirkulationsleitung werden $7,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ benötigt, was 29 % der gelieferten Energiemenge für die Warmwasserversorgung entspricht.

Messergebnisse Sommertemperaturen

Die gemessenen Übertemperaturstunden im Sommer 2007 sind sehr gering und liegen deutlich unter den Grenzwerten nach [DIN 4108-T2]. Die wärmste Wohnung zeigt Überschreitung der für die Region gültigen 27 °C -Grenze in nur 2,6 % der Jahresstunden. Die geforderten maximal 10 % werden deutlich unterschritten. Ein nennenswerter Unterschied zwischen den Gebäuden wurde dabei nicht festgestellt.

Insgesamt kann zu den Sommertemperaturen in den Wohnungen festgestellt werden, dass ein sehr gutes Ergebnis im Bezug auf den sommerlichen Wärmeschutz erzielt wird. Überhitzungen sind auch in deutlich wärmeren Sommern nicht zu erwarten.

Messergebnisse Stromverbrauch

Die Analyse der Stromverbräuche ergibt einen gesamten Mittelwert über die 24 Wohnungen von **$30,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$** . Für die nur im PHiB vorhandenen Komfortlüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung wurde ein Stromverbrauch von $3,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ermittelt. Der Betrieb der hocheffizienten Lüftungsanlagen erbringt nicht nur Behaglichkeitsvorteile, sondern auch eine deutliche Primärenergieeinsparung. Schon in anderen Untersuchungen vergleichbarer Geräte konnte gezeigt werden, dass eine Kilowattstunde des eingesetzten Stroms ein Vielfaches an Wärme zurückgewinnt.

Wird der Stromverbrauch der Lüftungsgeräte in den 12 Wohnungen mit Wärmerückgewinnung gesondert bilanziert und nicht dem Haushaltsstrom zugerechnet, ergibt sich der mittlere Haushaltsstromverbrauch aller 24 Wohnungen zu $28,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Er liegt damit etwas unterhalb des Durchschnittwertes für den Haushaltsstromverbrauch in Deutschland. Die Allgemein- und Heizungsstromverbräuche liegen mit 2,3 bis $3,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ im erwarteten und üblichen Rahmen.

Im zweiten Bilanzjahr speisen die großen Solarstromanlagen auf den Süddächern der beiden Gebäude $16,5$ und $17,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ PV-Strom in das öffentliche Stromnetz.

Messergebnisse Fensterlüftung und Luftwechsel

Die Luftwechsel der Wohnungen im PHiB wurden über Volumenstrommessungen an den Zuluft einlässen und Abluftauslässen bestimmt. Sie lagen zwischen **0,35 und 0,47 h⁻¹**.

Für das über die Fenster belüftete NEH wurden zur Abschätzung der Luftwechselraten die 15 Fenster bzw. Fenstertüren (zum Balkon) von drei Wohnungen mit handelsüblichen Fensterkontakten ausgerüstet. Aus den Messdaten der zeitlich hochaufgelösten Fensteröffnungszeiten wurden mit einem Rechenmodell die Lüftungsvolumenströme bestimmt.

Die Luftwechsel der drei untersuchten Wohnungen im NEH liegen im Kernwinter zwischen **0,10 und 0,26 h⁻¹** (Mittelwert 0,19 h⁻¹ für die 3 Wohnungen). Diese Luftwechsel werden hauptsächlich durch die Fenster in den Schlafzimmern verursacht: Ohne die Luftwechsel der Schlafzimmer geht der Luftwechsel je nach Wohnung um den Faktor 1,6 bis 3,7 zurück. Die rechnerisch verbleibenden Luftwechsel sind dann mit 0,07 bis 0,09 nur noch minimal. Aber gerade in den Schlafzimmern werden zumindest in der Nacht die Rollläden geschlossen und die Fenster bleiben ggf. offen. Dies wurde z.B. am frühen Morgen der thermographischen Untersuchung festgestellt. Diese Tatsache wird in der Messung und damit im Rechenmodell nicht abgebildet. Die mit dem Modell ermittelten Werte liefern daher eine eher **obere Abschätzung des Luftwechsels**.

Die individuellen Messdaten zeigen auch den Zusammenhang zwischen höheren Luftwechseln und damit verbundenen höheren Heizwärmeverbrauch.

Zur Abschätzung der Lüftungswärmeverluste wurde außerdem die PHPP-Energiebilanz für das NEH mit unterschiedlichen Luftwechseln als der unsichersten verbliebenen verbrauchsrelevanten Randbedingung variiert. Aus der Anpassung ergab sich ein Luftwechsel von ca. **0,15 h⁻¹**. Dieser stimmt gut mit den davon unabhängigen Berechnungen aus dem Fensterlüftung der drei Wohnungen überein.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die mit dem fensterbelüfteten NEH erreichten durchschnittlichen Luftwechselraten um 0,15 h⁻¹ deutlich geringer sind als die im PHiB festgestellten mit 0,35 bis 0,47 h⁻¹. Diese Tatsache ist auch an den Unterschieden in der Luftfeuchte und den CO₂-Konzentrationen abzulesen; sie wirken sich natürlich auch auf den Heizwärmeverbrauch aus. Mit Fensteröffnungszeiten im Kernwinter von durchschnittlich täglich 2,4 bis 6,2 Stunden je Fenster handelt es sich im Übrigen um relativ lange Lüftungszeiten – trotzdem wird eine nur unzureichende Lüfterneuerung erreicht. Die Nutzer sind mit einer „Regelung“ der Fensterlüftung i.a. überfordert. Das erklärt die vielen auch anderer Orts berichteten Probleme mit feuchten Wohnungen nach dem Einbau von neuen, dichten Fenstern. Akute Probleme dieser Art gibt es bei diesem Bauprojekt nicht (siehe nächster Abschnitt), das ist aber vor allem darauf zurück zu führen, dass ein



sehr gutes Wärmedämmniveau vorliegt und Wärmebrücken sorgfältig reduziert wurden.

Messergebnisse Luftfeuchtigkeit und Raumluftqualität

Die Untersuchung der Raumluftfeuchte wurde in den sechs genauer untersuchten Wohnungen durchgeführt. Sie zeigt, dass die Luft in den Wohnungen des NEH im Mittel um gut 5 % rF höhere (relative) Feuchtigkeiten aufweisen als die im PHiB. Dies ist konsistent mit den niedrigeren Luftwechsell in nur über die Fenster belüfteten NEH. Im PHiB fällt eine Wohnung auf, in der zeitweise relative Luftfeuchten von unter 30 % herrschen. Die Werte sind nicht als kritisch zu bewerten und Abhilfe wäre durch einen niedriger eingestellten Luftwechsel einfach herbeizuführen. Es zeigt sich, dass die relative Feuchte hier insbesondere deshalb niedriger ist, weil die Raumtemperatur mit über 23 °C besonders hoch ist.

Im NEH dagegen fällt eine Wohnung auf, die deutlich oberhalb des Gesamtfeldes der Wohnungen liegt. Hier werden im Tagesmittel zeitweise fast 60 % erreicht. Die Auswertung der Fensteröffnungszeiten in der entsprechenden Wohnung zeigen, dass relativ wenig gelüftet wurde. Nur so kann es zu diesem höheren Wert kommen. Ein so hoher Feuchtwert wäre in einer Wohnung mit Lüftungsanlage bei normaler Nutzung nicht zu erwarten. Die Wohnung war zur Zeit der Messungen mit nur zwei Personen belegt. Eine höhere Belegung ist bei der Wohnungsgröße (73,5 m²) durchaus denkbar und würde bei gleichem Lüftungsverhalten einen noch höheren Luftfeuchtwert erwarten lassen.

Zur Beurteilung eines möglichen Feuchterisikos wurden die Oberflächentemperaturen an den kritischen Bereichen der Wärmebrücken durch die massiven Balkonankerplatten untersucht. Es zeigt sich, dass die zulässige Oberflächentemperatur im NEH im Bereich der Wärmebrücke nicht mehr eingehalten wird. Bei den tatsächlich gemessenen Raumlufttemperaturen und Luftfeuchtigkeitswerten im NEH besteht trotz des bereits verbesserten Wärmeschutzes im Bereich der Wärmebrücke **keine** hohe Sicherheit für den Feuchteschutz. In einem kälteren Winter können durchaus längere Zeiträume entstehen, bei denen die relative Feuchte auf der Oberfläche der Innenwand längere Zeit die 80 % Grenze überschreitet und eine Sporenauskeimung ermöglicht.

In den 6 Wohnungen wurden auch dauerhaft die CO₂-Konzentration der Raumluft gemessen. CO₂ ist die Leitgröße für die Raumluftqualität für alle Gebäude, in denen die Luftbelastungen hauptsächlich durch die Nutzung durch Personen bedingt ist, insbesondere bei Wohngebäuden. Im PHiB wurden nur in 8 % der Winterstunden die 1500 ppm CO₂-Grenze überschritten. Im NEH wurden dagegen bei über einem Fünftel der Winterstunden (21 %) diese Grenze überschritten. Die am wenigsten belüftete Wohnung im NEH zeigt deutlich die schlechteste Raumluftqualität, hier werden im Schlafzimmer sogar in 800 Stunden des Winters eine Grenze von 3000 ppm CO₂ überschritten. **Diese Ergebnisse zeigen, dass ohne Lüftungs-**

anlage eine hohe Luftqualität nicht unabhängig vom Nutzerverhalten gewährleistet werden kann.

Fazit Energiebilanzen

Im PHiB werden im zweiten Bilanzjahr insgesamt **47,3 kWh/(m²a)** Wärme für Heizung und Warmwasser bezogen. Darin sind alle nutzbaren und nichtnutzbare Verluste enthalten und der Querwärmestrom zum Nebenhaus (2 kWh/(m²a)) abgezogen. Zu diesem Gesamtverbrauch sind noch die Wärmeverluste der Nahwärmeübergabestation mit abgeschätzten 1,4 kWh/(m²a) zu addieren.

Zur Bilanzierung der gesamten Endenergie werden zusätzlich zum Bereich Wärmebezug auch alle Stromverbräuche im Gebäude (Haushalts-, Allgemein und Technikstrom) addiert. Für das PHiB ergibt sich dann insgesamt ein Endenergieverbrauch von **87,3 kWh/(m²a)** (inklusive Haushaltsstrom!). Durch die primärenergetische Bewertung ergibt sich der gesamte Primärenergieverbrauch zu **133,5 kWh/(m²a)** (inklusive Haushaltsstrom!). Dabei wirkt sich der Stromverbrauch durch den hohen Primärenergiefaktor sehr stark aus. Der Haushaltsstrom mit dem Einzelanteil von 58 % der gesamten primärenergetischen Aufwendungen ist im PHiB dominant. Damit wird deutlich, wo nach der erfolgten energieoptimierten Sanierung der Gebäudehülle der Fokus weiterer Einsparbemühungen liegen muss. Wird der auf dem Dach erzeugte Solarstrom, ebenfalls primärenergetisch bewertet, bilanziell berücksichtigt, verbleiben **89,0 kWh/(m²a)**.

In einem Sanierungsgebäude so niedrige Verbrauchswerte zu realisieren ist als großer Erfolg zu bewerten. Das Konzept „Passivhaus im Bestand PHiB“ ist in allen Punkten „aufgegangen“, die Ergebnisse bestätigen die Bemühungen. Dieses hohe energetische Qualitätsniveau bei gleichzeitig guten Luftqualitäten und hohem Schutz gegenüber Feuchteschäden ist nur bei einem optimal sanierten Gebäude zu erreichen. Diese Immobilie stellt die Mieter durch hohe Raumqualität und niedrige Energiekosten zufrieden. Das erbringt dem Betreiber des Gebäudes durch die gute Vermietbarkeit und ausbleibende Schadensfälle weitere erhebliche Vorteile. Damit ist das Gebäude sehr gut für die nächsten Jahre gerüstet.

Für den Vergleich der beiden Gebäudeteile müssen die messtechnischen Ergebnisse auf einheitliche Randbedingungen bezogen werden. Dies betrifft insbesondere die unterschiedlichen Raumtemperaturen sowie die ganz verschiedenen Luftwechselraten in den beiden Gebäuden. Daher werden die Messwerte im Verhältnis der Jahres-Bilanzierung (Heizwärme inkl. nutzbare Anteile der Heizwärmeverteilung) mit der Anpassung der Bedingungen ($n_L = 0,44$, $t_i = 20,0$ °C) umgerechnet. Die nichtnutzbaren Verteilverluste werden unverändert addiert. Das mildere Klima des Untersuchungszeitraumes hat ebenfalls Einfluss auf die Ergebnisse. Zur Gebäudebewertung wird hier das auch bei der Projektierung der Gebäude verwendete Standardklima für den Standort Mannheim verwendet. Die primärenergetisch günstige Nahwärmeversorgung hat ebenfalls nichts mit den realisierten Gebäude-



qualitäten zu tun. Diese könnten bei identischer Bauweise auch an einem anderen Ort, mit anderer Versorgung realisiert werden. Um die baulichen Aspekte klar von den versorgungsseitigen zu trennen, wird rechnerisch eine klassische Erdgasversorgung unterstellt. Dabei wird der Primärenergiefaktor für Erdgas mit $1,1 \text{ kWh}_{\text{Pri}}/\text{kWh}_{\text{End}}$ verwendet.

Mit diesen Standardbedingungen (Raumtemperatur, Standardklima Mannheim, Primärenergiefaktoren) ist ein direkter Vergleich der Gebäudequalitäten möglich. Das Ergebnis für alle Energieaufwendungen (Heizung, Warmwasser, Technik-, Allgemein- und Haushaltsstrom) zeigt Abbildung 1.

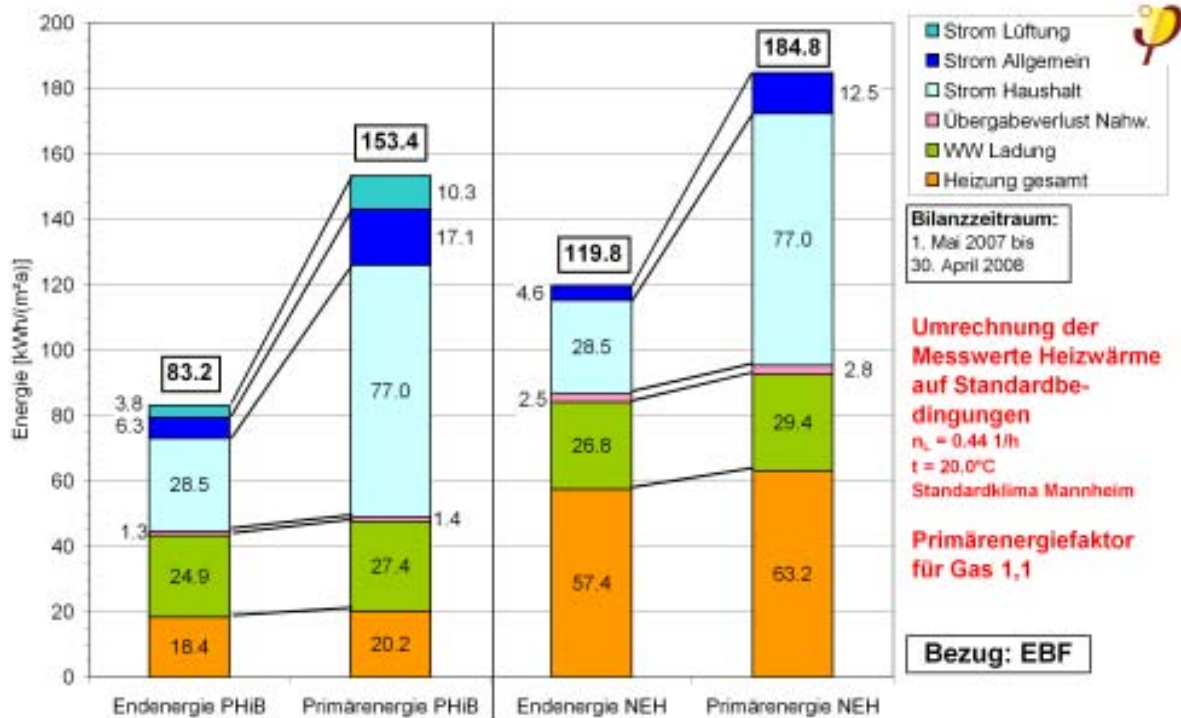


Abbildung 1: End- und Primärenergieverbrauch (Haustechnik) der beiden Gebäude im zweiten Bilanzjahr umgerechnet auf Standardbedingungen. Alle angegebenen Verbrauchswerte beziehen sich auf die Energiebezugsfläche (EBF).

Bei diesen Standardbedingungen ergeben sich die Endenergiewerte vom PHiB zu $83,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, primärenergetisch bewertet zu $153,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Mit dem gesamten Endenergiebezug vom NEH von $119,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ergibt sich ein Mehrverbrauch von 44 %. Primärenergetisch bewertet beträgt der Gesamtwert $184,8$ und liegt so 20 % über dem Ergebnis vom PHiB. Der Mehrverbrauch beträgt ein Fünftel.

Für die gesetzliche Anforderung nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) werden nur die Energieströme für die Heizung, die Warmwassererwärmung sowie die für den Technik- oder Hilfsstrom (Heizung, Lüftung) berücksichtigt. Dabei wird nach der EnEV nicht die Energiebezugsfläche (EBF) verwendet sondern die (hier 28 %) größere Gebäudenutzfläche A_N . Für die Nahwärmeversorgung wird der testiert Wert vom Netzbetreiber ($0,6 \text{ kWh}_{\text{Pri}}/\text{kWh}_{\text{End}}$) angesetzt.



Der zulässige gesetzliche Anforderungswert für den Jahres-Primärenergiebedarf der beiden Gebäude nach der EnEV 2007 berechnet sich zu $90,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2 A_{\text{NA}})$, bezogen auf die fiktive Gebäudenutzfläche A_{N} . Für das PHiB, mit dem gemessenen Jahres-Primärenergieverbrauch (ohne Haushaltsstrom) von nur $31,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2 A_{\text{NA}})$, entspricht dies einer **Unterschreitung der gesetzlichen Anforderungen für den Neubau um 66 %**.

Das PHiB unterschreitet - sogar mit diesen primärenergetisch bewerteten Messwerten - die Anforderungen an den Bedarfswert der „KfW 40“ Förderung (Kreditanstalt für Wiederaufbau) deutlich. Dabei wird in der Berechnung für diese Förderung nach den Anforderungen der EnEV 2007 sogar mit einer Raumtemperatur von nur 19 °C gerechnet. Die Messwerte wurde aber dennoch auf die 1 K höheren Standardbedingungen von 20 °C umgerechnet.

Der Erfolg dieses Projektes „PHiB“ ist im Ergebnis ablesbar: Aus einem Altbau mit sehr hohen Verbrauchswerten wurde ein energetisch sehr hochwertiges Gebäude mit sehr gutem thermischen Komfort, deutlich verbesserter Raumluftqualität und dauerhafter Schadensfreiheit aufgrund der hohen Oberflächentemperaturen, das sich nur wenig von einem Passivhaus-Neubau unterscheidet.



2 Projekt- und Gebäudevorstellung

Die beiden untersuchten Gebäude in Ludwigshafen Mundenheim wurden etwa im Jahr 1965 erbaut. Es handelt sich um typische Bauten aus dieser Zeit. Die Gebäude haben drei Vollgeschosse (EG bis 2. OG). Sie verfügen über jeweils 12 Wohnungen und zwei Hauseingänge mit Treppenhäusern. Es handelt sich um klassische Zweispanner. An der Trennwand sind die Gebäude um 3,2 m gegeneinander versetzt. Die Gebäudebreite beträgt jeweils ca. 31 m, die Tiefe ohne Balkone etwa 11,3 m. Die Gebäude sind voll unterkellert und weitgehend baugleich. Die Ausrichtung der Hauptfassaden ist genau Nord-Süd orientiert.



Abbildung 2: Altbauzustand der beiden Gebäude im Dezember 2004 (Südfassade).



Abbildung 3: Gebäude nach erfolgter Sanierung (Südfassade).

Die Sanierung erfolgte von Januar 2005 bis April 2006. Dabei wurden auch Veränderungen an den Grundrissen vorgenommen. Die zuvor gleichgroßen Wohnungen wurden in jeweils eine kleinere ($51,6 \text{ m}^2$) und eine größere Wohnung ($73,5 \text{ m}^2$) verändert, indem ein Zimmer der jeweils anderen Wohnung zugeschlagen wurde.

Außerdem wurden die zurückspringenden Balkone bis zur Fassade durch neue Fenster in Wohnraum umgewandelt und der Rest der Balkonplatte abgetrennt. So wurden die Baukörper um 12 große konstruktive Wärmebrücken erleichtert und zusätzlich der Wohnraum vergrößert. Es wurden neue Stahl-Balkonanlagen auf eigenen Fundamenten vor den Wohnzimmern errichtet. Der Rücksprung der Treppenhauseinfassade um 1,1 m wurde beibehalten.

Erneuert wurden auch alle Elektro- und Sanitärleitungen und Anlagen, sowie alle Türen und Fenster. Die Schornsteine wurden ebenso entfernt wie die nordseitigen Kellereingänge.

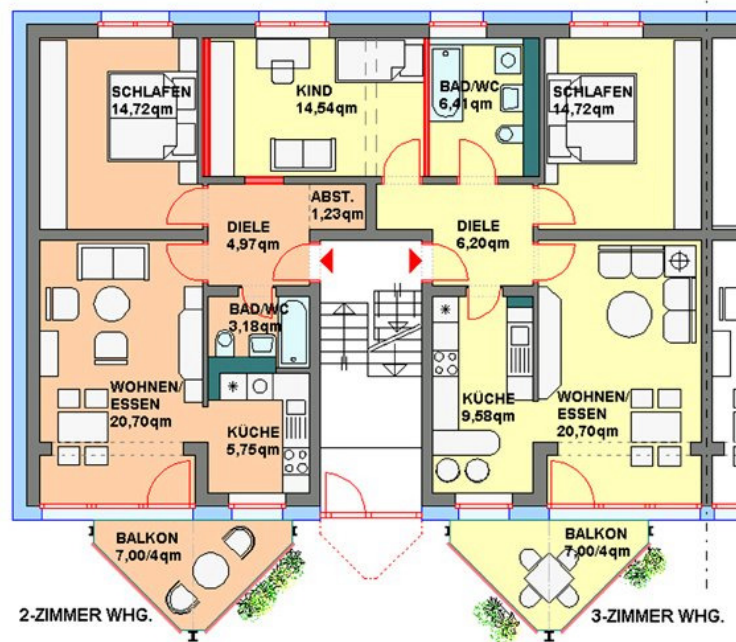


Abbildung 4: Grundriss EG mit zwei Wohnungen, mit dem Hauseingang und Treppenhaus. Die anderen drei Eingänge und die jeweils beiden Geschosse sind identisch aufgeteilt (Quelle: GAG Ludwigshafen).

Im Mittelpunkt der Sanierung stand von Beginn an der energetische Aspekt. So wurde das eine, westliche Gebäude, mit Passivhauskomponenten energetisch hochwertig ausgestattet (Haus 1 und 3). Der Bauherr, die GAG Ludwigshafen, bezeichnet das Gebäude als „Passivhaus im Bestand“, die Abkürzung „**PHiB**“ wird im folgenden in diesem Bericht verwendet. Dieser wird im Folgenden in diesem Bericht verwendet.

Das baugleiche angrenzende östliche Gebäude (Haus 5 und 7) wurde ebenfalls hochwertig, aber in einem nicht ganz so anspruchsvollen energetischen Standard saniert. Es wurden dabei viele Maßnahmen aus der Beratungstätigkeit des Passivhaus Institut für das PHiB übertragen bzw. komplett übernommen. Hier sind die erhöhte Luftdichtheit, Dämmdetails auch von häufig vernachlässigten Bereichen (Treppenhauskopf, Kellerabgang, Befestigung Fenster, etc.) und diverse weitere Details zu nennen. Diese Maßnahmen erwiesen sich für die Sanierung als vergleichsweise einfach und kostengünstig ausführbare Verbesserungen gegenüber der heute überwiegend üblichen Vorgehensweise. Die gesetzlichen Anforderungen an den Wärmeschutz nach der Energiesparverordnung 2004 (EnEV 2004) wurden auch bei



dem östlichen Gebäudeteil weit übertroffen. Dieser Gebäudeteil wird hier als „Niedrigenergiehaus“, im Folgenden mit „NEH“ abgekürzt, bezeichnet. In diesem Gebäude wird konventionell über die Fenster gelüftet. Die Dämmstoffstärke der Fassaden beträgt 120 mm, bei den Fenstern wurden aus energetischer Sicht gute konventionelle Produkte eingesetzt.

Tabelle 1: Projektdaten zu den beiden Gebäuden in der Hoheloogstraße in Ludwigshafen.

Gebäudetyp	Mehrfamilien-Wohnhaus
Anzahl Vollgeschosse	3
Anzahl Wohnungen	2 x 12 Wohnungen (51,6 und 73,5 m ²)
Baujahr	1965
Sanierung	Januar 2005 bis April 2006
Wiederbezug nach Sanierung	01. April 2006
Energiebezugsflächen (EBF)	750,2 m ² PHiB und 750,2 m ² NEH
Gebäudenutzfläche A_N (nach EnEV)	960 m ² PHiB und 960 m ² NEH
A/V-Verhältnis	0,35
Bruttovolumen	41.000 m ³
Wärmeversorgung	Nahwärmenetz (Gas-BHKW mit Spitzenlastkessel) Entfernung zum Heizhaus: ca. 20 m

Einige der Projektbeteiligten sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Projektbeteiligte.

Bauherr	GAG Ludwigshafen
Architektur	GAG Ludwigshafen
Haustechnikplanung	IBB Ing.-Büro Baumgartner / Mörlenbach
Beratung zur Qualitätssicherung, Energiebilanzen, Wissenschaftliche Begleitung und Messungen	Passivhaus Institut / Darmstadt
Förderung	Land Rheinland-Pfalz EXWOST

Die Gebäude befinden sich in Ludwigshafen Mundenheim, in der Hoheloogstraße 1 und 3 bzw. 5 und 7. Die Lage der Gebäude und des Heizhauses der Nahwärmeversorgung geht aus dem Luftbild hervor.



Abbildung 5: Luftbild der Gebäude und Umgebung (Quelle: Google Maps).

In Tabelle 3 sind einige thermische Eckdaten der Gebäudehülle zusammengestellt.

Tabelle 3: Übersicht einiger thermischer Kennwerte von Regelbauteilen der beiden Gebäude nach der Sanierung.

	PHiB	NEH
Bauteil	U-Wert [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	U-Wert [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
Decke über 2. OG	0,11	0,15
Außenwand (WDVS)	0,1 (300 mm PS Hartschaum $\lambda = 0,032 \text{ W}/(\text{mK})$)	0,24 (120 mm PS Hartschaum $\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{mK})$)
Kellerdecke	0,17	0,51
Außentür	1,20	1,85
Fenster	$U_w = 0,95$ (Küche) $U_g = 0,6$ / $g = 0,51 \%$	$U_w = 1,44$ (Küche) $U_g = 1,10$ $g = 0,63 \%$

Das Passivhaus Institut hatte in der Planungs- und Ausführungsphase die Aufgabe der energetischen Bilanzierung (PHPP Erstellung, Wärmebrückenberechnung), der Beratung zu allen energetischen Fragestellungen und der Beratung zur Qualitätssicherung übernommen. Gegenstand der hier vorgelegten Forschungsarbeit ist die wissenschaftlichen Messung und Beurteilung der energetischen Sanierungserfolge. Diese beinhaltet die Messung aller energetisch relevanten Größen und der Raumluftqualität. Zur Beurteilung der Luftwechsel im NEH wurden in drei Wohn-



ungen die Fensteröffnungszeiten aufgezeichnet. Genauso waren die Untersuchung der Luftdichtheit und eine thermographische Untersuchung nach der Sanierung Aufgaben des Passivhaus Instituts.

2.1 Eindrücke und Details der energetischen Sanierungsmaßnahmen.

Um auch einen optischen Eindruck der Sanierungsmaßnahmen zu bekommen sind in diesem Abschnitt einige Fotos von den Bauarbeiten am Gebäude zusammengestellt. Dabei handelt es sich um eine unvollständige Übersicht, mit dem Schwerpunkt auf die, aus energetischer Sicht, relevanten Maßnahmen und Besonderheiten. Die Abbildungen sind jeweils in den Bildunterschriften kommentiert.



Abbildung 6: Links: Die Entfernung der auskragenden Balkonplatte ist erfolgt. Rechts: Der alte innenliegende Rollladen über dem Fenster wurde entfernt. Die Rollladenkästen stellen immer eine große Wärmebrücke und eine große Undichtheit dar. Später wurden fassadenbündig außenliegende Rollläden montiert.



Abbildung 7: Montierte neue Fensterrahmen im Bereich des ehemaligen Balkons (jetzt Wohnzimmer). Von innen sind die massiven Lastabtragungswinkel sichtbar (Pfeile).



Abbildung 8: 300 mm Dämmstoffblöcke an der Nordfassade des PHiB sowie Fenster- und Fensterbankmontage.



Abbildung 9: Montage der Innendämmung im Treppenhauskopf des PHiB (links) und Dämmung des Treppenhauskopfes vom Dachraum aus (rechts).



Abbildung 10: Links: Anschluss der Fassadendämmung an die Dämmung auf dem Fußboden des Dachbodens im PHiB und an der Innenseite der Giebelwand hochgezogene Dämmung. Die Giebelwände sind durchgehend auch von außen gedämmt. Rechts: Kontrolle am Abschluss der hochgezogenen Giebelwanddämmung.



Abbildung 11: Montage eines der Vordächer über dem Eingangsbereich im Fassadenrückprung. Die verbleibende Wärmebrücke ist in der Energiebilanz berücksichtigt.



Abbildung 12: Massive Balkonankerplatten vor Montage der Balkone (links für eine Hauseingangsseite mit Kreisen markiert).



Abbildung 13: Links: Dämmung der Kellerdecke mit alukaschierten Dämmplatten. Rechts: Unterbrechung der Dämmung wg. der Rohrleitungsführung. Diese wurden später mit in die Dämmschicht einbezogen.

2.2 Sanierte Gebäude

Die Gebäude wurden im April 2006 fertiggestellt und wieder bezogen. Die folgenden Bilder geben einen optischen Außeneindruck der Fassaden nach der erfolgreichen Sanierung.



Abbildung 14: Südfassade des PHiB mit der vorgestellten Balkonanlage und der Solarstromanlage auf dem Dach.



Abbildung 15: Giebelwand (West) und Nordfassade des PHiB kurz vor Bezug der Wohnungen.



Abbildung 16: Südfassade des NEH mit Balkon- und Solarstromanlage.



Abbildung 17: Nordfassade des NEH. Im Hintergrund ist das PHiB zu erkennen.



Abbildung 18: Eingangsbereich des NEH mit Vordach.



2.2.1 Haustechnik

Die Wohnungen im PHiB werden, wie in einem klassischen Passivhaus-Neubau, mittels jeweils eines kleinen Nachheizregisters über die Zuluft beheizt. In diesem Gerät streicht die im Lüftungsgerät durch die Wärmerückgewinnung (WRG) vorgewärmte Zuluft über die durch Heizungswasser erwärmten Rohre. Dabei wird, bei Temperaturen bis maximal ca. 55 °C, die restliche Nacherwärmung der Zuluft erreicht. Die Höhe der Nacherwärmung (Leistung des Heizregisters) wird über die Wunschtemperatur am handelsüblichen „Thermostat“ im Wohnzimmer geregelt. Nur im Badezimmer befindet sich ein Zusatzheizkörper, um dort die nach Norm geforderte Temperatur von 24 °C auch in kurzer Zeit erreichen zu können.

Zuerst waren Heizregister mit zu geringer Leistung montiert worden (etwa die Hälfte der notwendigen Leistung). Nach dem Tausch zeigte die Überprüfung der neuen Heizregister im normalen Betrieb (Zuluftstrom nach Auslegung) eine Heizleistung von 890 W (+4/-10 % Messgenauigkeit). Die Auslegungsheizlast nach PHPP für die große Wohnung mit 73,5 m² beträgt 1149 W, von denen 102 W durch den Badheizkörper abgedeckt werden. Die restlichen 1047 W werden mit den jetzt vorhandenen Nachheizregistern zu 85 % durch die Zuluftnacherwärmung erbracht. Durch die Beschränkung der verfügbaren Heizleistung auf 85 % des Sollwertes für den Auslegungsfall sind Temperaturrückgänge tagsüber um maximal etwa 0,6 K gegenüber dem Sollwert (in einer Kälteperiode) möglich [Feist 2005]. Nach der Komfortgleichung von Fanger' [DIN EN ISO 7730] ist eine Abweichung in dieser Höhe ohne großen Einfluss auf die Behaglichkeit und wird daher meist nicht bemerkt. Wichtig ist, dass grundsätzlich im Winter alle Wohnungen beheizt werden. Wenn die Temperaturen benachbarter Wohnungen unter 18 °C sinken, könnte ansonsten die Leistung in der betroffenen Wohnung nicht ausreichen.

Bei einer Sanierung eines Gebäudes verbleiben im Normalfall immer Wärmebrücken durch die aufsteigenden Kellerwände. Aus diesem Grund ist genau zu prüfen, ob sich eine reine Luftnachheizung mit einer engen Leistungsbegrenzung (um 10 W/m²) realisieren lässt. Dieser ambitionierte Schritt zur Sanierung auf quasi Passivhaus-Neubaustandard wurde bei dem PHiB besritten.

Das NEH wird klassisch über Heizkörper, die sich in jedem Zimmer im Brüstungsbereich der Fenster befinden, beheizt.

Die Warmwasserversorgung ist bei beiden Gebäuden gleich ausgeführt. Sie erfolgt über je einen zentralen Warmwasserspeicher im Keller von Haus 5 (Nahwärmeübergaberaum). Von diesem wird jede Wohnung des jeweiligen Gebäudes versorgt.

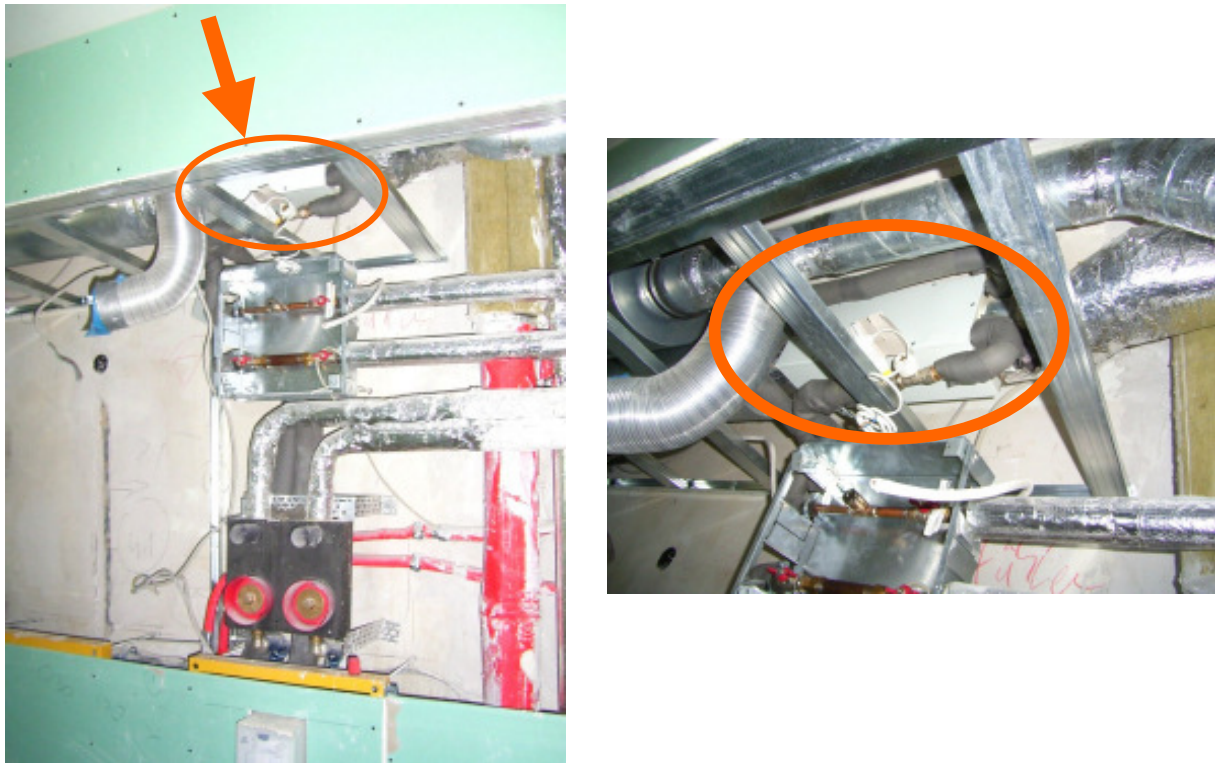


Abbildung 19: Nachheizregister (weißer Kasten) in der noch offenen Vorwandinstallation in einem Badezimmer.

Die Heizregister der Wohnungen im PHiB befinden sich in der Vorwandinstallation der Badezimmer unterhalb der Decke. Dort sind die Lüftungsrohre verlegt. Das Zuluftrohr wird an das Heizregister angeschlossen. Das Heizregister ist vom Heizkreis des Gebäudes mit Vor- und Rücklaufleitung versorgt. Die Zuluft wird nach dem Heizregister über die abgehängte Decke im Wohnungsflur in das Wohnzimmer und in die ein oder zwei Schlaf- bzw. Kinderzimmer geführt. Auf diesem Weg kann die Wärme gemeinsam mit der Frischluft in der Wohnung verteilt werden. Auf weitere haustechnische Installationen zur Wärmeversorgung kann dadurch verzichtet werden. Damit entfallen alle Rohrleitungen und Heizkörper vor den Fenstern der Aufenthaltsräume. Einzig die Heizfläche im Badezimmer wird noch hydraulisch versorgt. Da die vertikalen Versorgungsstränge durch die Badezimmer führen, ist die benötigte Rohrleitung vergleichsweise kurz.

Im NEH wird dagegen klassisch verfahren: In jeder Wohnung muss horizontal jeder Heizkörper vor den Fenstern mit Vor- und Rücklaufleitung versorgt werden.

Die beiden Gebäude werden von der gemeinsamen Nahwärmeübergabestation im Keller von Haus 5 versorgt. Dort befinden sich auch die beiden Warmwasserspeicher. Die Übergabestation verfügt über eine Leistung von 65 kW und ist ausgelegt für eine indirekte Wärmeübergabe 70/45 °C.



Abbildung 20: Westwand des Nahwärmeübergaberaumes mit der Nahwärmeregulierung, dem Wärmeübertrager und den Heizkreispumpen. Die beiden Erdleitungen werden durch die Außenwand in den Raum eingeführt (rechts im Bild).

Die Wärmezentrale befindet sich in ca. 20 m Luftlinie neben dem benachbarten Wohnblock. Sie ist ausgerüstet mit einem Gas-BHKW (72 kW thermisch und 42 kW elektrisch) und einem Spitzenkessel der bivalent versorgt wird (Erdgas/Heizöl). Er hat eine Leistung von 250 kW. Als Pufferspeicher sind 2 x 2 m³ installiert. Die Heizzentrale versorgt ein Nahwärmenetz von insgesamt 210 m Länge, welches auf die Temperaturen 90/55 °C ausgelegt ist. Insgesamt umfasst das Versorgungsgebiet der Heizzentrale 18 Gebäude mit 108 Wohnungen (6410 m² Wohnfläche).

2.2.1.1 Lüftungsgeräte

Im Bauteil mit Passivhausqualität (PHiB) wurde jede Wohneinheit mit einem Komfortlüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung ausgestattet. Vorteil dieser Anordnung war neben der leichten individuellen Regelbarkeit der Verzicht auf aufwändige Brandschutzanforderungen.

Entsprechend der Projektierungsregeln für Passivhäuser [PHPP 1998-2007] wurden die Luftmengen auf den hygienischen Bedarf der Bewohner ausgelegt (30 m³/h je Person), Nebenbedingung war die Sicherung von Mindest-Abluftmengen in Küchen und Bädern. Eine Zonierung der Grundrisse in Zuluft-, Überström- und Abluftbereiche ermöglicht eine effiziente Nutzung der ausgetauschten Luftvolumina. Dafür wurden Überströmöffnungen an den Zimmertüren vorgesehen.

Besonderes Augenmerk während der Planung galt neben exzellentem Schallschutz (Schalldruckpegel in Zulufräumen ≤ 25 dB(A), Ablufträumen ≤ 30 dB(A)) der Vermei-

derung langer kaltluftführender Kanäle im beheizten Bereich und deren luftdichter Einbindung in die Gebäudehülle.



Abbildung 21: Komfortlüftungsgerät mit kurzen kaltluftführenden Kanälen (Fort- und Außenluftrohr). Im linken Bild noch ohne Dämmung und mit den wohnungsseitigen Schalldämpfern. Rechtes Bild: Eindichtung in die Gebäudehülle durch Gipsverguss und montierter dampfdiffusionsdichter Wärmedämmung. Dieser Bereich über den Geräten wurde später zusätzlich noch mit Zellulosedämmstoff ausgefüllt um die Wirkung der kalten Leitungen zu minimieren.

Für die planungsgemäße Funktion von Komfortlüftungsgeräten ist eine qualifizierte Einregulierung der Anlagen von zentraler Bedeutung. Für die von den Handwerkern durchgeführte Einstellungen wurden daher vom Passivhaus Institut Vorgaben gemacht und Hilfestellungen gegeben. Die Ergebnisse der Einregulierung der Lüftungsgeräte und Ventile (Balance zwischen Zu- und Abluft) ist in Abschnitt 3.3 dargestellt.



Abbildung 22: Luftführung mit Rohrleitungen und Telefonie-Schalldämpfern in der abgehängten Decke im Flurbereich einer Wohnung während der Bauzeit.



Abbildung 23: Links: Geöffnetes Lüftungsgerät mit dem zentralen Wärmeübertrager (WRG), links dem Außenluftventilator sowie den Luftfiltern (einer ist demontiert). Rechts: Lüftungsgerät in der schallgedämmten Einhausung in einem der Badezimmer zwischen Spiegel und Außenwand.



Abbildung 24: Links: Bedienelement des Lüftungsgerätes und Stoßlüftungstaster. Die Taster „CO₂“ und „%RH“ sind bei den Geräten ohne Funktion. Rechts: Außen- und Fortluftelemente auf der Fassade.



Abbildung 25: Zuluftventil Wohn- und Schlafzimmer, Abluftventil Bad und Abluftventil mit einfach demontierbarem Fettfilter in der Küche (von links nach rechts). Der Fettfilter aus Edelstahl sollte durch die Bewohner selber regelmäßig, nach Sichtkontrolle, gereinigt werden (Abspülen/ Spülmaschine).

Im NEH wird konventionell über die Fenster gelüftet. Zusätzlich verfügen die sechs kleineren Wohnungen mit innenliegenden Badezimmern über einen kleinen Abluftventilator mit Nachlaufschaltung (7 min).

2.2.2 Energiebilanzen

Mit Hilfe des „Passivhaus Projektierungs Paketes“ (PHPP) wurde die energetische Planung der beiden Gebäudesanierungen vom Passivhaus Institut durchgeführt. Die wärmetechnischen Daten sind in übersichtlicher Form in den Arbeitsmappen des PHPP dokumentiert.

Während der Planungsphase wurden die normalen Standardrandbedingungen des PHPP verwendet:

- Standard-Raumtemperatursollwert 20 °C
- Standard-Klimadaten für den Standort Mannheim
- Standard Luftdichtheit für Passivhäuser ($n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$)
- Standard-Warmwassernachfragedaten (25 Liter/Person/Tag bei 60 °C).
- Standard-Lüftungsauslegung nach DIN 1946 (Gleicher Ansatz für beide Gebäude: Luftwechsel $0,44 \text{ h}^{-1}$)
- Personenbelegung nach Plandaten: 24 Personen
- Primärenergiefaktor Nahwärme: $0,7 \text{ kWh}_{\text{Pri}}/\text{kWh}_{\text{End}}$

Die realen Bedingungen weichen von den Standardbedingungen im PHPP ab. So werden durch den Nutzer z.B. von der Normtemperatur 20 °C abweichende Raumtemperaturen gewünscht und realisiert. Es gibt Abweichungen bei der angenom-



menen Personenzahl, den realen Wetterbedingungen, der Höhe der internen Wärmequellen und auch von der Ausführungsqualität der Gebäudehülle und der technischen Systeme. In diesem Abschnitt werden die "Plandaten" dokumentiert, mit denen während der Planung der beiden Gebäude gearbeitet wurde. Sie kennzeichnen den Stand des Wissens, wie er vor Baufertigstellung, Bezug und Beginn des Messprogramms vorlagen.

In Abbildung 26 ist das Nachweisblatt (Objektdatenblatt) aus der PHPP-Bilanz für das PHiB dargestellt. Für das PHiB sind damit fast die Anforderungen an einen Passivhaus-Neubau erfüllt: Der Heizwärmebedarf ist mit gut $16 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ nur geringfügig höher als die strengen Passivhaus Vorgaben für den Neubau. Der rechnerische Primärenergiebedarf für Warmwasser, Heizung und Hilfsstrom ist mit $45 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, bezogen auf die Energiebezugsfläche, sehr gering. Besonders wichtig ist der Gesamt-Primärenergiebedarf inkl. auch der Haushaltsanwendungen von elektrischem Strom. Mit vorab berechneten $111 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ wird das Passivhaus-Neubau-Kriterium sogar gut eingehalten, wobei dies den Einsatz stromsparender Hausgeräte und Beleuchtungsmittel voraussetzt.

Ganz anders sieht es beim Nachweis mit den gleichen Standardbedingungen im NEH aus (Abbildung 27). Hier zeigt der Heizwärmebedarf gut $50 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ an. Der rechnerische Primärenergiebedarf für Warmwasser, Heizung und Hilfsstrom beträgt $71 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, bezogen auf die Energiebezugsfläche. Der Gesamt-Primärenergiebedarf inkl. auch der Haushaltsanwendungen von elektrischem Strom ergibt sich bei der Vorabrechnung zu $137 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Für die KfW-Förderung wird im PHPP-Nachweis auch der Primärenergie-Kennwert für die Haustechnik ausgewiesen. Dabei wird auf die größere, theoretische Gebäudenutzfläche A_N Bezug genommen (960 m^2). Das PHiB hält danach die Kriterien der „KfW 40“ Anforderungen, das NEH die der „KfW 60“ Anforderungen ein.



Passivhaus Nachweis



Objekt:	Passivhaus im Bestand, Mundenheim SO		
Standort und Klima:	Ludwigshafen am Rhein		Mannheim
Straße:	Hooheloostraße lund 3		
PLZ/Ort:	67065 Ludwigshafen-Mundenheim		
Land:	Deutschland/ RP		
Objekt-Typ:	Geschloßwohnungsbau		
Bauherr(en):	GAG Ludwigshafen am Rhein		
Straße:	Wittelsbachstraße 32		
PLZ/Ort:	67061 Ludwigshafen am Rhein		
Architekt:	GAG Ludwigshafen am Rhein		
Straße:	Wittelsbachstraße 32		
PLZ/Ort:	67061 Ludwigshafen am Rhein		
Haustechnik:	GAG Ludwigshafen am Rhein		
Straße:	Wittelsbachstraße 32		
PLZ/Ort:	67061 Ludwigshafen am Rhein		
Baujahr:	2004		
Zahl WE:	12		
Umbautes Volumen V_e :	3000.0	m ³	
Personenzahl:	24.0		
Innentemperatur:	20.0	°C	
Interne Wärmequellen:	2.1	W/m ²	

Kennwerte mit Bezug auf Energiebezugsfläche			
Energiebezugsfläche:	750.24	m ²	
Verwendet:	Jahresverfahren		PH-Zertifikat: Erfüllt?
Energiekennwert Heizwärme:	16.15	kWh/(m²a)	15 kWh/(m ² a) <input type="checkbox"/>
Drucktest-Ergebnis:	0.60	h⁻¹	0.6 h ⁻¹ <input checked="" type="checkbox"/>
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung, Hilfs- u. Haushalts-Strom):	111	kWh/(m²a)	120 kWh/(m ² a) <input checked="" type="checkbox"/>
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Hilfsstrom):	45	kWh/(m²a)	
Primärenergie-Kennwert Einsparung durch solar erzeugten Strom:	53	kWh/(m²a)	
Heizlast:	13.5	W/m²	
Übertemperaturhäufigkeit:	0.0%	über	25 °C

Kennwert mit Bezug auf Nutzfläche nach EnEV			
Nutzfläche nach EnEV:	960.0	m ²	
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Hilfsstrom):	35.2	kWh/(m²a)	40 kWh/(m ² a) <input checked="" type="checkbox"/>

Abbildung 26: Nachweisblatt aus dem PHPP mit Standardbedingungen für das PHiB.



Passivhaus Nachweis



Objekt:	Passivhaus im Bestand; Mundenheim SO		
Standort und Klima:	Ludwigshafen am Rhein		Mannheim
Straße:	Hoeheloostraße 5 und 7		
PLZ/Ort:	67065 Ludwigshafen-Mundenheim		
Land:	Deutschland/ RP		
Objekt-Typ:	Geschosswohnungsbau		
Bauherr(en):	GAG Ludwigshafen am Rhein		
Straße:	Wittelsbachstraße 32		
PLZ/Ort:	67061 Ludwigshafen am Rhein		
Architekt:	GAG Ludwigshafen am Rhein		
Straße:	Wittelsbachstraße 32		
PLZ/Ort:	67061 Ludwigshafen am Rhein		
Haustechnik:	GAG Ludwigshafen am Rhein		
Straße:	Wittelsbachstraße 32		
PLZ/Ort:	67061 Ludwigshafen am Rhein		
Baujahr:	2004		
Zahl WE:	12	Innentemperatur:	20.0 °C
Umbautes Volumen V_e :	3000.0 m ³	Interne Wärmequellen:	2.1 W/m ²
Personenzahl:	24.0		
Kennwerte mit Bezug auf Energiebezugsfläche			
Energiebezugsfläche:	750.24 m ²		
	<i>Verwendet:</i>	<i>Jahresverfahren</i>	<i>PH-Zertifikat: Erfüllt?</i>
Energiekennwert Heizwärme:	50.28 kWh/(m²a)	15 kWh/(m ² a)	-
Drucktest-Ergebnis:	0.60 h⁻¹	0.6 h ⁻¹	✓
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung, Hilfs- u. Haushalts-Strom):	137 kWh/(m²a)	120 kWh/(m ² a)	-
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Hilfsstrom):	71 kWh/(m²a)		
Primärenergie-Kennwert Einsparung durch solar erzeugten Strom:	53 kWh/(m²a)		
Heizlast:	25.1 W/m²		
Übertemperaturhäufigkeit:	0.0%	über 25 °C	
Kennwert mit Bezug auf Nutzfläche nach EnEV			
Nutzfläche nach EnEV:	960.0 m ²		
		<i>Anforderung: Erfüllt?</i>	
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Hilfsstrom):	55.8 kWh/(m²a)	40 kWh/(m ² a)	-

Abbildung 27: Nachweisblatt aus dem PHPP mit Standardbedingungen für das NEH

3 Qualitätssicherung

Das Passivhaus Institut war bei den beiden Gebäuden neben der messtechnischen Erfassung und Bewertung auch mit der Planungsberatung, der Aufstellung der Energiebilanzen und der Beratung zur Qualitätssicherung befasst. Die Ergebnisse der durchgeführten Luftdichtheitsuntersuchungen und der thermographischen Untersuchung werden in diesem Abschnitt dargestellt.

3.1 Luftdichtheit

Die Luftdichtheit der Gebäude wurde bei den Luftdichtheitsmessungen am 20./21.12.2005, 30.01.2006, 09.03.2006 sowie am 20.03.2006 vom Passivhaus Institut überprüft. Vorausgegangen waren intensive Beratungen während der Planungs- und der Qualitätssicherungsphase. Die Gebäude wurden je Hauseingang insgesamt überprüft indem die Geräte in die Haustüröffnungen eingebaut wurden und alle bereits vorhandenen Wohnungs- und Zimmertüren geöffnet wurden. Die Messungen wurden nach [DIN EN 13829] durchgeführt. Vor den Messungen wurden die Gebäude präpariert (Verschließen der Außen- und Fortluftrohre und Abflussleitungen, etc.).

Zusätzlich wurden zwei Wohnungen im PHiB und zwei im NEH einzeln gemessen. Bei allen Messungen wurde bei 50 Pa Unterdruck im gesamten Gebäude bzw. der Wohnung eine Leckagesuche durchgeführt.

Bei den ersten beiden Messterminen am 20./21.12.2005 und am 30.01.2006 wurden noch diverse Leckagen lokalisiert. Dies waren insbesondere Leckagen an der luftdichten Ebene vor der Innendämmung im Treppenhauskopf der Häuser und im Eingangsbereich über dem Haustürbereich. Auch die Scheibendichtung der Festverglasung neben der Haustür zeigte einige Schwachpunkte. An einigen Verbindungen vom Fensterblendrahmen zur Innenputzebene konnten Schwachstellen lokalisiert werden, wie auch an einigen Vergüssen der Rohrleitungen zum Keller. Die Abdichtung der Lüftungsrohre zum Innenputz der Außenwand war aufgrund der Enge an dieser Stelle nicht einfach zu lösen. Hier wurden dennoch nur wenige Leckagen gefunden.

Diese Leckagen wurden der Bauleitung aufgezeigt. Nach erfolgten Nachbesserungen wurden am 09.03.2006 die Abnahmemessung der vier Hauseingänge durchgeführt.



Abbildung 28: Links: Nicht fachgerecht verklebte luftdichte Ebene und Wärmebrücke im Bereich der Fensterlaibung im Treppenhauskopf. Rechts: Abgelöste (transparente) Folie bei der Innendämmung im Treppenhauskopf durch nicht fachgerechten Untergrund und durch zu große Spannungen auf die Folie durch das Gewicht der Dämmung.

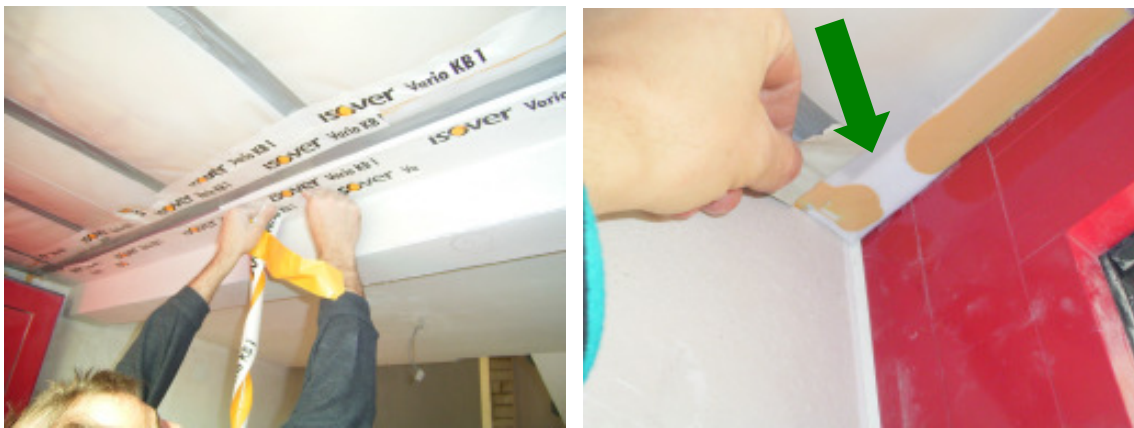


Abbildung 29: Links: Decke im Eingangsbereich, Nachbesserungen der Ablebung durch den Trockenbauer. Rechts: Mangelhafte Verklebung des Haustürelements zur Wand. Der Kleber ist nicht durchgängig aufgebracht, die Folie am Fensterrahmen nicht luftdicht angeschlossen worden.



Abbildung 30: Links: Leckagen an der Durchführung der Lüftungsrohre durch die Außenwand. Rechts: Leckage am Verguss der Rohrleitungsdurchführung zum Keller.



Abbildung 31: In der Haustür (links) und in einer Wohnungstür (rechts) eingebaute Blower Door mit der zugehörigen Messeinrichtung.

Für das PHiB ergab sich im Mittel der beiden Eingänge ein n_{50} -Wert von **0,46 h⁻¹**, im NEH ergab er sich zu **0,72 h⁻¹**. Die strenge Anforderung an Passivhausneubauten für die Luftdichtheit von $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$ wurde damit im PHiB deutlich unterschritten. Dies ist selbst bei (Standard-) Neubauten nicht der Normalfall. Die gesetzliche Anforderung für Gebäude mit Lüftungsanlage beträgt n_{50} -Wert von $1,5 \text{ h}^{-1}$. Wie das Ergebnis zeigt, profitierte auch das NEH erheblich von der Beratung und wissenschaftlichen Begleitung des Nachbargebäudes PHiB. Die Messergebnisse stellen - insbesondere für Sanierungsgebäude - hervorragende Werte dar. Dass diese sehr guten Werte in beiden Gebäudeteilen eingehalten werden konnten, zeigt die hohe Reproduzierbarkeit der bei Passivhausstandard empfohlenen Maßnahmen zur Sicherstellung der Luftdichtheit [Peper 1999]

Tabelle 4: Ergebnisse der Luftdichtheitsmessungen der vier Hauseingänge vom 09.03.2006.

Haus	Gebäude	n_{50} -Wert [h ⁻¹]
Haus 1	PHiB	0.43
Haus 3	PHiB	0.49
Haus 5	NEH	0.63
Haus 7	NEH	0.81

Zusätzlich wurden am 09.03. und am 20.03.2006 vier einzelne Wohnungen auf ihre Luftdichtheit untersucht. Aus dem Grund der Vergleichbarkeit wurden in beiden Gebäuden jeweils die zwei von der Lage identischen Wohnungen geprüft. Es wurde



jeweils eine Wohnung im EG und eine im 2. OG, jeweils an den außenliegenden Giebelwänden, gemessen. Bei diesen sind die größten externen Leckagemöglichkeiten gegeben. Bei den Messungen werden die internen Leckagen zu den Nachbarwohnungen mit gemessen. Diese sind energetisch aber nicht von Interesse, weil das Gebäude als eine thermische Einheit betrachtet wird. Die Messungen sollen in erster Linie die Größenordnung in den Unterschieden der Dichtheitswerte aufzeigen. Außerdem dienten Sie auch der Leckagensuche, bei der nach Möglichkeit nach internen und externen Leckagen unterschieden wurde.

Tabelle 5: Ergebnisse der fünf Luftdichtheitsmessungen von Einzelwohnungen.

Haus	Whg.	Gebäude	n_{50} -Wert [h ⁻¹]	Bemerkung
Haus 1	2.OG / rechts	PHiB	0.73	
Haus 1	EG / links	PHiB	0.84	
Haus 7	EG / links	NEH	2.12	
Haus 7	EG / links	NEH	2.04	Wohnungstürzarge abgeklebt
Haus 7	2.OG / rechts	NEH	1.04	

In der Wohnung im Haus 7, EG/links wurde die Messung wiederholt. Der Einbau-rahmen der Blower Door war in der Wohnungstürzarge eingebaut. Es stellte sich dann heraus, dass die Zarge selbst zur Wand hin sehr undicht war. Energetisch ist dies in erster Linie unerheblich, da es sich um eine Leckage zum Treppenhaus handelt. Für die Untersuchung der Luftdichtheit der einzelne Wohnung war es allerdings notwendig die Zarge umlaufend abzukleben. Es wurde eine leichte Verbesserung des n_{50} -Wertes erreicht.

Insgesamt sind die beiden untersuchten Wohnungen im PHiB deutlich luftdichter als die beiden im NEH. Wie vermutet sind aber alle Einzelwerte höher als der entsprechende Gesamtwert des Hauses. Der Anteil der internen Leckagen kann auf diesem Weg nicht bestimmt werden. Dazu wäre eine Schutzdruckmessung mit einem weiteren Gerät notwendig gewesen.

3.2 Thermographische Untersuchung

Die thermographische Untersuchung der beiden Gebäude von außen wurde am 21. Dezember 2007 in den Morgenstunden zwischen 5:30 und 8:00 Uhr durchgeführt. Danach wurden zwei Wohnungen im EG sowie die Treppenhäuser und der Nahwärmeübergaberaum mit der IR-Kamera untersucht (8:15 bis 12:30 Uhr).

Der Untersuchungstag war mit $-6,9\text{ °C}$ der Tag mit der niedrigsten Stundenmitteltemperatur am Standort in dem Winter 2007/2008. Im Untersuchungszeitraum der IR-Außenaufnahmen steigerte sich die Außentemperatur von $-5,4$ auf $-4,8\text{ °C}$. Auch der Tag zuvor war mit einer Tagesmitteltemperatur von $-3,0\text{ °C}$ bereits sehr kalt. Während der Erstellung der Außenthermographien gab es keine Niederschläge. Damit waren für die Aufnahme der IR-Bilder sehr günstige Witterungsbedingungen gegeben.

Tabelle 6: Randbedingungen der thermographischen Untersuchung

Außentemperatur Vortag 20.12.2007 (Mittelwert)	$-3,0\text{ °C}$
Außentemperatur 21.12.2007 Mittelwert 5:30 bis 8:00 Uhr	$-5,1\text{ °C}$
Windbedingungen (Mittelwert 5:00 bis 8:00 Uhr) (in 6 m Höhe, Wetterstation [Zimen])	schwacher Wind 1,2 m/s
Niederschlag	kein Niederschlag
rel. Luftfeuchte (Mittelwert 5:30 bis 8:00 Uhr)	98%
Gebäude	vollständig bewohnt und beheizt
Emissionsgrad der opaken Wandflächen	0,93

Die thermographischen Aufnahmen wurden mit dem hochauflösenden Thermographiesystem „VARIOSCAN high resolution“ der Firma Jenoptik (Jena) erstellt. Zur Bearbeitung der Aufnahmen wurde das Programm „IRBIS+ V2.2“ der Firma InfraTec GmbH (Dresden) verwendet.

Tabelle 7: Geräteparameter des verwendeten Thermographie-Systems

Geräteparameter des Thermographie-Systems	
Messgerät	VARIOSCAN 3021 ST, Fa. Jenoptik
Spektralbereich (μm)	8 bis 12
Aufnahmesystem	Scansystem
Detektormaterial	HgCdTe
Temperaturauflösung bei 30 °C (K)	$\pm 0,03$
Bildformat (Pixel)	360 x 240



3.2.1 Außenthermographien

Die Temperaturskala der dargestellten Bilder ist bei allen Außenaufnahmen gleich skaliert, um eine bessere Vergleichbarkeit herzustellen (- 8 bis + 6 °C). Zum Teil werden mehrere IR-Bilder zu einem Bild zusammengefügt. Nach Möglichkeit wird dem Thermogramm das entsprechende Foto aus ähnlicher Perspektive beigelegt. Diese Fotos wurden erst gegen Mittag, nach Abschluss der Innenuntersuchungen aufgenommen. Zu dieser Zeit hatte es begonnen zu schneien. Veränderungen zwischen dem Thermogramm und dem Foto in Bezug auf z.B. Fensterstellungen oder Rollladenstellungen sind durch diese zeitliche Differenz begründet.

Von den knapp 200 aufgenommenen Außenthermogrammen wird hier nur eine kleine Auswahl dargestellt.

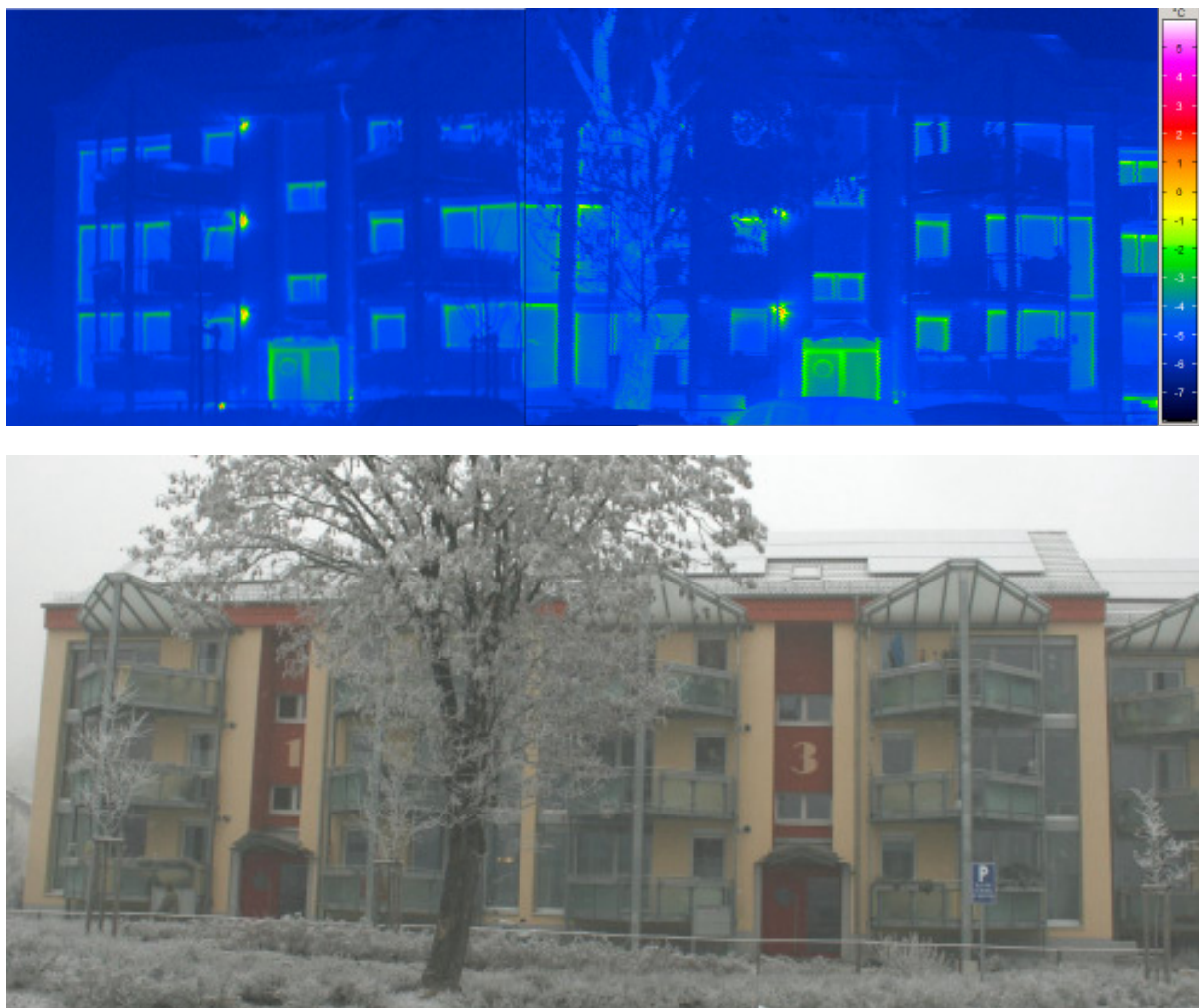


Abbildung 32: Gesamtansicht Südfassade PHiB (Haus 1 + 3).

An der Südfassade des PHiB sind einheitliche Oberflächentemperaturen zu erkennen. In dieser Übersichtsaufnahme kann der Erfolg einer lückenlosen Dämmung abgelesen werden. Die Fortlufttemperaturöffnungen zeichnen sich punktförmig als wärmste Bereiche ab.

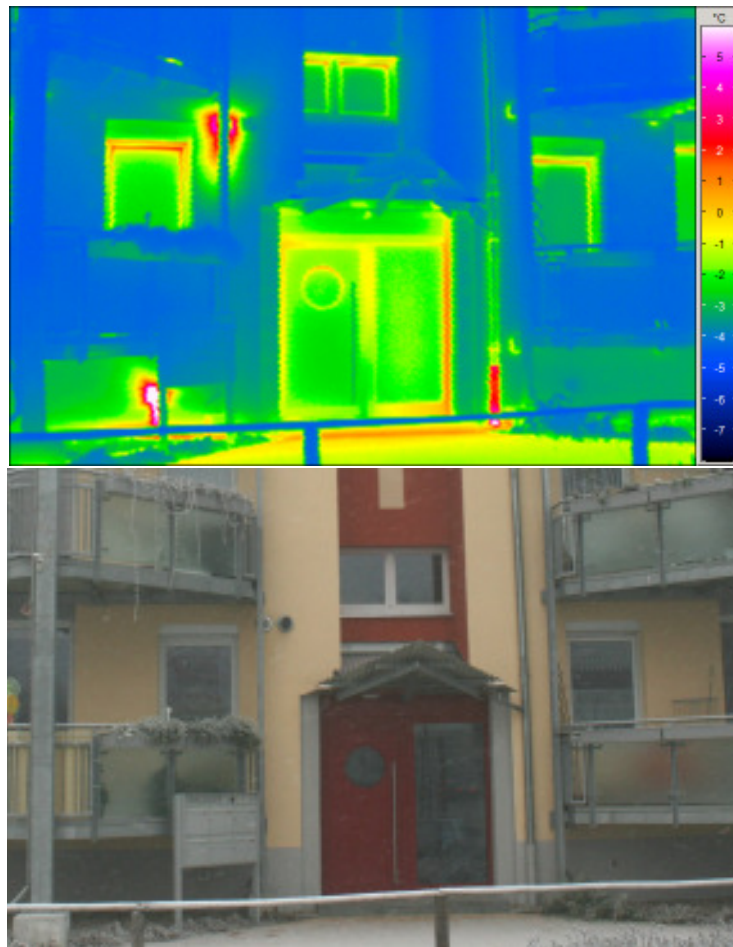


Abbildung 33: Detail Hauseingang PHiB (Südfassade).

Bei näherer Betrachtung eines Eingangsbereichs des PHiB fallen als wärmste Bereiche die Fortluftdüse der Wohnung und der Kellerlüftung (unter dem linken EG Balkon) auf. Die wärmsten Bereiche der Fenster sind am Glasrand zu erkennen. Dies ist auch bei Passivhausfenstern normal. Die vorgehängten Rollladenkästen über den Fenstern sind etwa 2 K wärmer als die Wandoberfläche. Die verwendeten oberen Rahmenverlängerungsprofile bieten damit noch Optimierungspotential.

Der Wärmedurchgang des Haustürelements ist höher als der der Wohnungsfenster. Dabei muss zusätzlich berücksichtigt werden, dass es in der Wohnung wärmer ist als im Treppenhaus. Der Unterschied zwischen der Oberflächentemperatur der beiden Bauteile bestätigt die planerischen U-Werte der Bauteile. Das Regenfallrohr rechts neben der Tür mündet in den „warmen“ Abwasserkanal, weshalb es hier im untersten Bereich (Standrohr) rot erscheint (ca. + 6 °C). An zwei Stellen sind Wärmebrücken durch die Balkonbefestigungen zu erkennen (rechts der Haustür). Diese massiven Metallanker durchstoßen die Dämmschicht ohne thermische Trennung. Der punktförmige Wärmedurchgangskoeffizient eines Ankers wurde mit Hilfe der 3D-Berechnung zu $\chi = 0,23 \text{ W/K}$ ermittelt. Damit erhöhen die 24 Anker eines Gebäudes (je Balkon zwei Stück) den Heizwärmeverbrauch um $0,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Die Befestigungsanker sind weiter unten im Abschnitt 5.2.2.1 genauer untersucht worden.

Alle Bereiche die nicht im direkten Strahlungsaustausch mit dem kalten Nachthimmel stehen („verschattet sind“), kühlen nicht so stark herunter und erscheinen damit als



wärmere Oberflächen. So haben z.B. die höheren Wandoberflächentemperaturen unter den Balkonen und dem Vordach keine geringere Dämmwirkung zur Ursache.

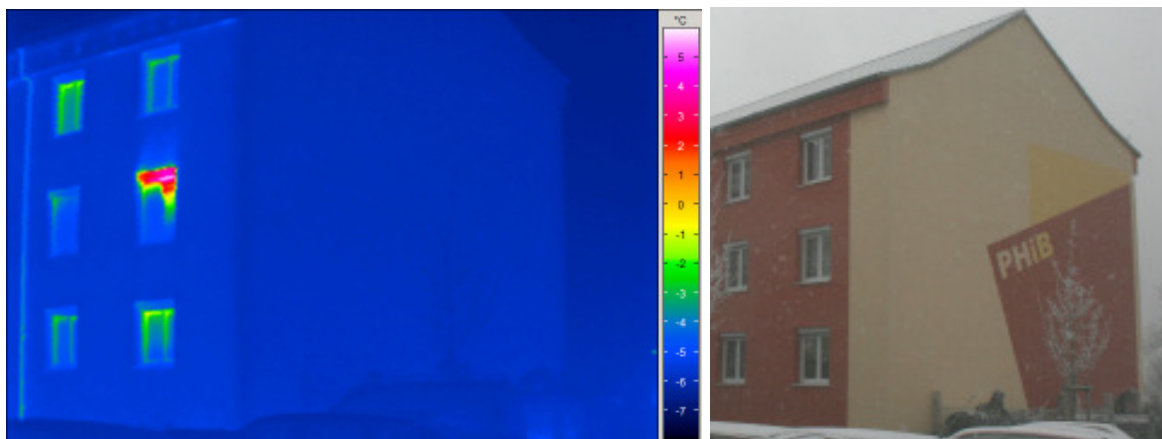


Abbildung 34: Giebelwand (West) des PHiB.

Die Giebelwand des PHiB zeigt eine perfekte Dämmschicht ohne jegliche Störungen. Die gut gedämmte Fassade ist kaum von der Umgebung zu unterscheiden. Das Thermogramm zeigt an der Nordfassade ein hinter dem Rollladen geöffnetes Fenster.

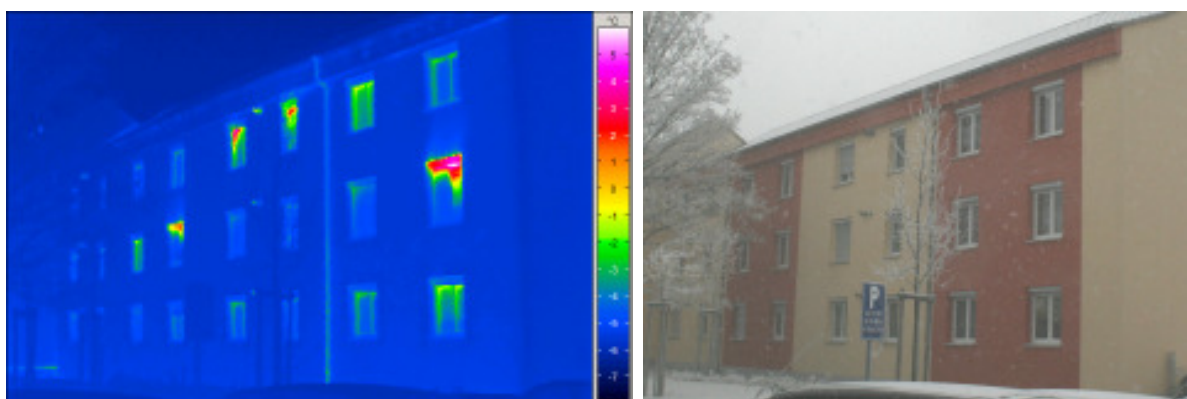


Abbildung 35: Nordfassade PHiB und im Hintergrund (links) das NEH.

Die Nordfassade des PHiB zeigt auf der Gesamtansicht ebenfalls keinerlei Auffälligkeiten. Als Hotspots sind drei Fortluftrohre und mehrere geöffnete Fenster erkennbar. Links unten im Hintergrund ist horizontal die Wärmebrücke am Sockel des NEH auszumachen.

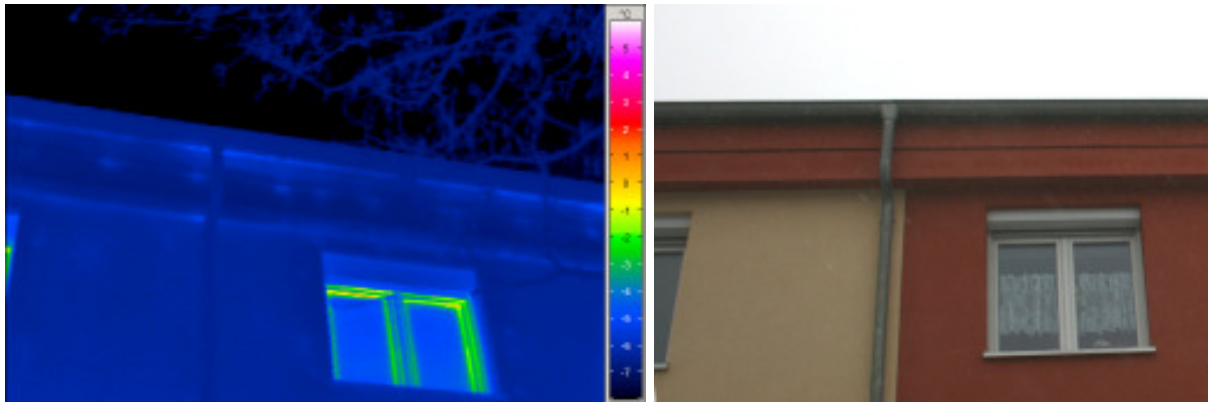


Abbildung 36: Detail Nordfassade mit Dachüberstand/Traufpunkt vom PHiB.

Am Traufpunkt des PHiB (hier Nordfassade) lassen sich keine Auffälligkeiten erkennen. Im Dachraum befindet sich der ungeheizte Dachboden. Sichtbar ist horizontal die „verschattete“ Kante. Durch die hinterlüftete Holzverkleidung des Traufpunktes können keine Aussagen zu den Temperaturen der dahinterliegenden Bereiche gemacht werden. Bei den minimal helleren (wärmeren) Punkten kann es sich um Befestigungspunkte der Holzverkleidung handeln.

Aufgrund des Rücksprungs der Fassadendämmung zur Perimeterdämmung und des Einsatzes einer herkömmlichen Sockelendschiene aus Metall gibt es eine Sockelwärmebrücke, die in Abbildung 37 deutlich zu erkennen ist. Im Unterschied zum PHiB gibt es im NEH Kellerfenster, welche sich optisch deutlich im IR-Bild absetzen. Hinter den vollständig bzw. zu 75 % geschlossenen Rollläden sind zwei geöffnete Schlafzimmerfenster an den hohen Temperaturen zu erkennen.

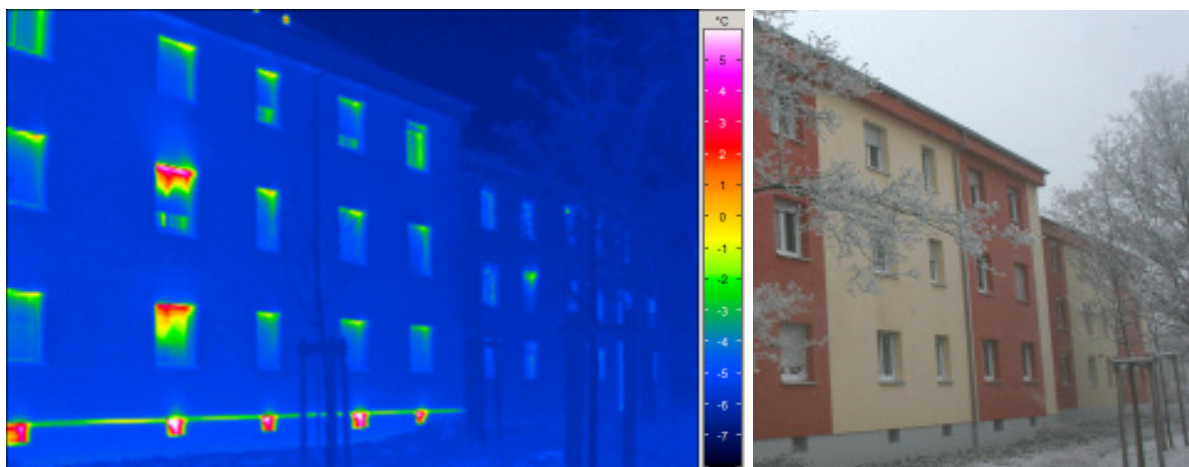


Abbildung 37: Nordfassade NEH.

Der Rücksprung der Gebäudetrennwand zwischen den beiden Gebäuden ist in Abbildung 38 aufgenommen. Dazu wurden drei Thermogramme montiert. Beim NEH



(rechts) fallen die wärmeren Kellerfenster, die Sockelwärmebrücke und der leicht wärmere Traufbereich auf. Sichtbar - sogar aus der größeren Entfernung - ist der Unterschied der Fensterqualitäten: Die Temperatur am oberen Glasrand sind bei den unverschatteten NEH Fenstern ca. 1 bis 2 K höher als die im PHiB.

Die Giebelwand (Ostfassade) vom NEH in Abbildung 39 zeigt auch eine einheitliche Temperatur. Eine Ausnahme bildet nur wieder die horizontal sichtbare Sockelwärmebrücke. Die Oberflächentemperatur der Fassade liegt zwischen - 6 bis - 5,5 °C, die Sockelwärmebrücke erwirkt eine Temperaturerhöhung um ca. 3 K (siehe Temperaturprofil in Abbildung 40).

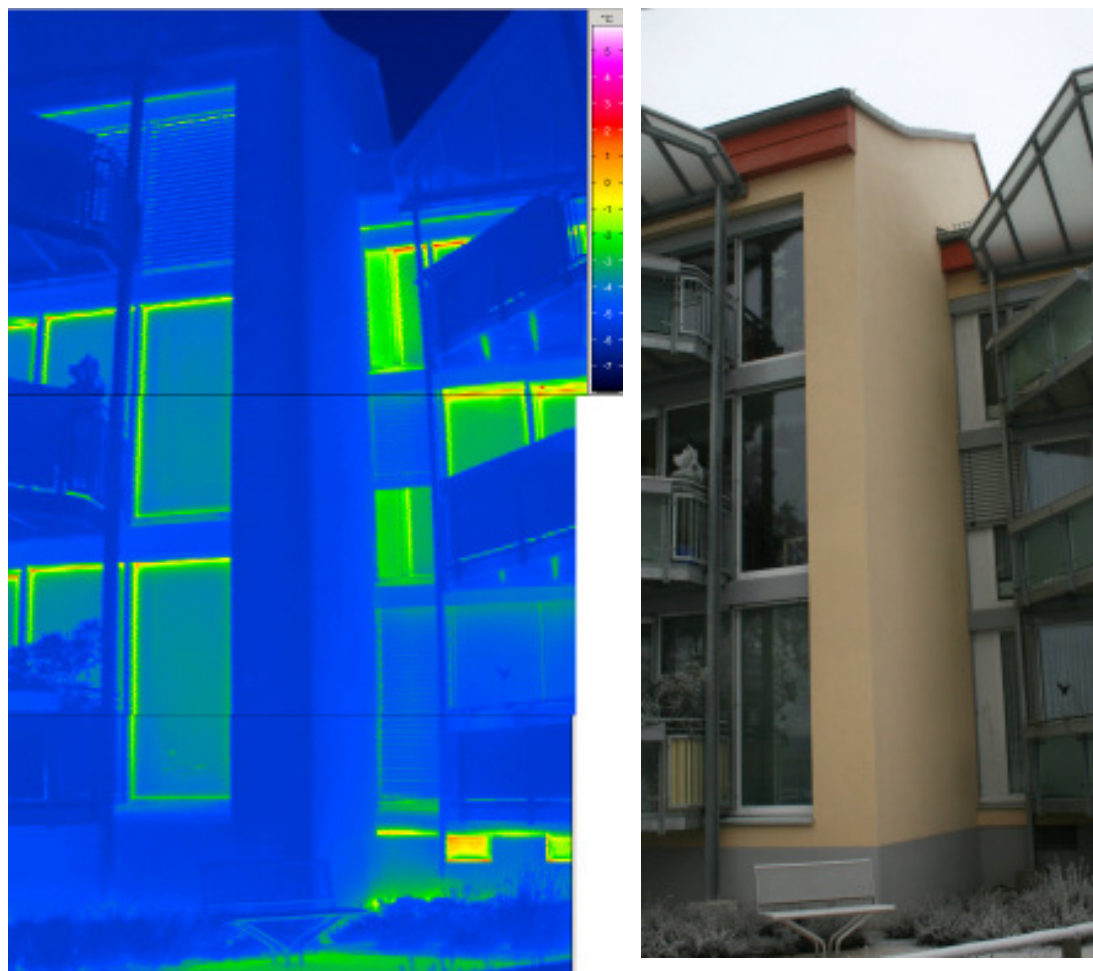


Abbildung 38: Gebäudetrennwand zwischen dem PHiB (links) und dem NEH (rechts).

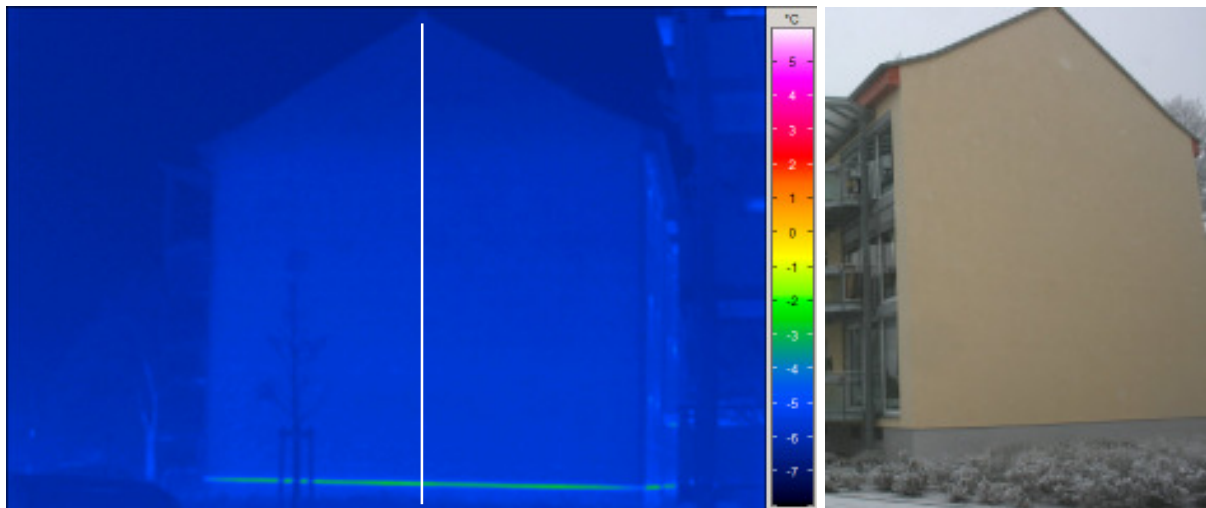


Abbildung 39: Giebelwand des NEHs (Ostfassade). Die weiße Linie markiert die Lage des in der nächsten Abbildung dargestellten Temperaturprofils.

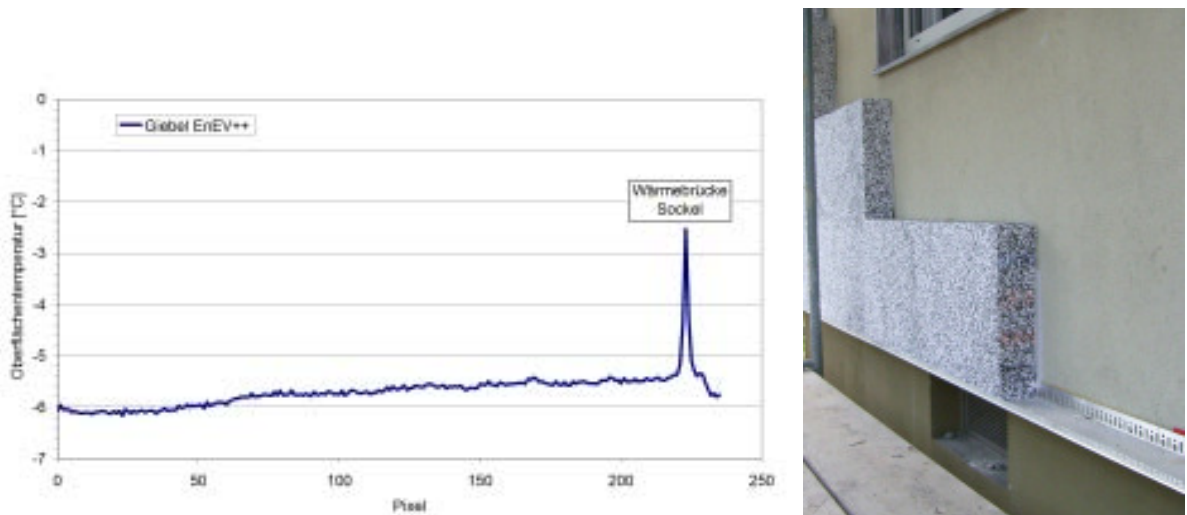


Abbildung 40: Vertikales Temperaturprofil entlang der Giebelwand der in Bild Abbildung 39 eingezeichneten Linie. Foto von der Montage der Wärmedämmung auf der Abschlusschiene.

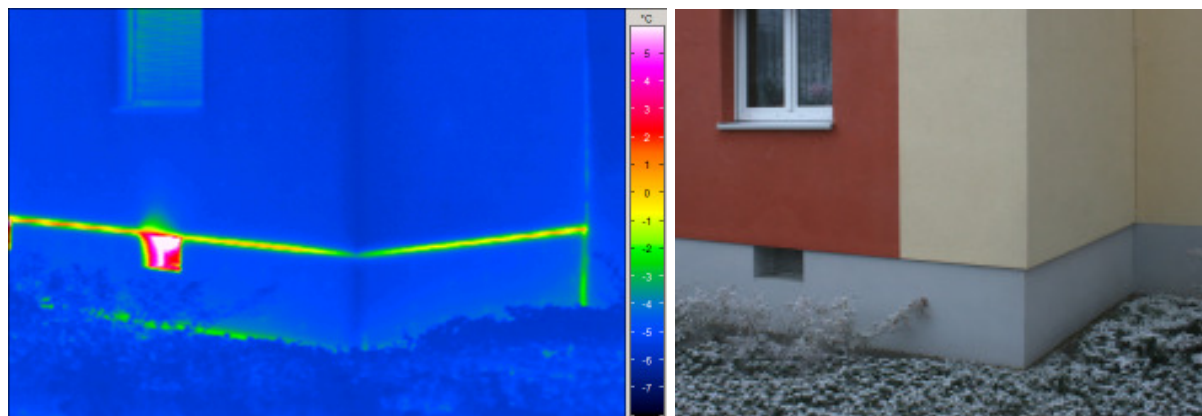


Abbildung 41: Trennwand zwischen den beiden Gebäudeteilen mit Versatz (Nordfassade). Rechts im Bild beginnt das PHiB.



Auf der Nordfassade ist das Ende der Sockelwärmebrücke beim Übergang zum PHiB gut zu erkennen. Auch beim Übergang der Perimeterdämmung zum Erdreich ist beim NEH ein wärmerer Streifen erkennbar.

Insgesamt zeigen die Außenthermogramme keine Mängel an den Fassaden. Beachtenswert sind nur die Wärmebrücken der Balkonanker, optimierbar die Details der Rollläden bzw. der Rahmenverlängerungsprofile. Die Wirkung einer Ausführung mit herkömmlicher metallischer Sockelendschiene wie im NEH ist zudem deutlich sichtbar und sollte vermieden werden. Sichtbar sind auch die thermischen Unterschiede zwischen den beiden Gebäuden. Diese sind aber nicht vergleichbar mit z.B. einem unsanierten Altbau. Zum direkten Vergleich wurde ein Altbau in Sichtweite des PHiB thermographiert (Abbildung 42). Hier sind deutlich die Schwachpunkte durch die uneinheitlichen Temperaturen der Fassade sichtbar. Geschossdecken, Stürze und Rollladenkästen zeichnen sich ab.

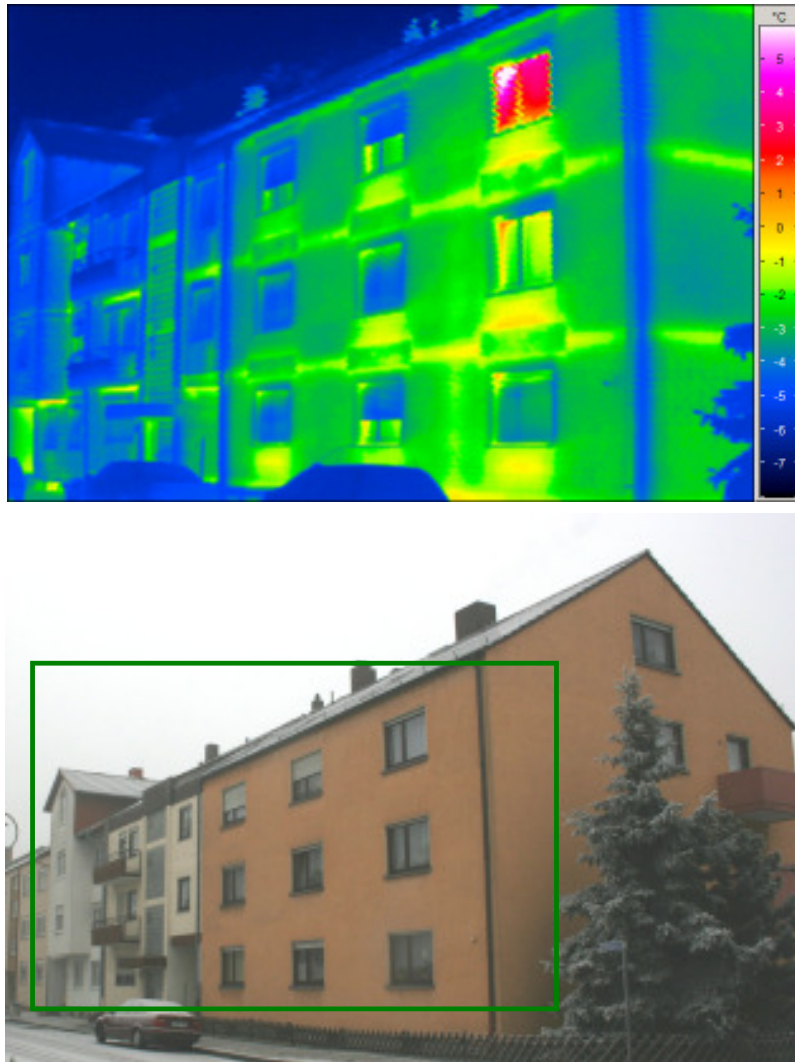


Abbildung 42: Vergleichsbild mit einem unsanierten Nachbarhaus (Weinbietstraße, Ecke Wegelnburgstraße).

3.2.2 Innenthermographien

Bei den Innenthermographien der beiden Wohnungen im EG wird einheitlich die Temperaturskala von + 12 bis + 26 °C verwendet. Von den etwa 100 erstellten Thermographiebildern in den Wohnungen wird hier nur eine kleine Auswahl dargestellt.

Es muss beachtet werden, dass die Raumtemperaturen in den beiden untersuchten Wohnungen deutlich voneinander abgewichen sind. In der Wohnung im PHiB wurden zur Zeit der Untersuchung 23,3 °C, in der EG Wohnung im NEH dagegen 20,3 °C gemessen. Dieser Temperaturunterschied von 3 K macht sich auf den Thermographiebildern an den unterschiedlichen Oberflächen deutlich bemerkbar. Die Wärmebrücken durch die Balkonanker wurden in beiden Gebäuden auch bei den Innenthermographien sichtbar. Sie werden - wie in Abschnitt 5.2.2.1 untersucht.



EG Wohnung im PHiB

In der Wohnung sind (bis auf die Wärmebrücke der massiven Balkonanker) nur wenige Auffälligkeiten festgestellt worden.

Die Küchenwand grenzt westlich an den Rücksprung des Treppenhauses. Daher war der Bereich für eine IR-Betrachtung von Interesse. In der vertikalen Kante wie auch am Wand/Decken-Anschluss ist eine ca. 1,5 K kühlere Oberfläche (ca. 20,5 °C) erkennbar. Bei der vertikalen Kante handelt es sich um einen geometrischen Effekt, der durch die Außenecke bedingt ist. Die fast genau gleiche, minimale, unkritische Temperaturabsenkung ist in der anderen Küchenecke (Decke-Außenfassade) zu beobachten (Abbildung 44).

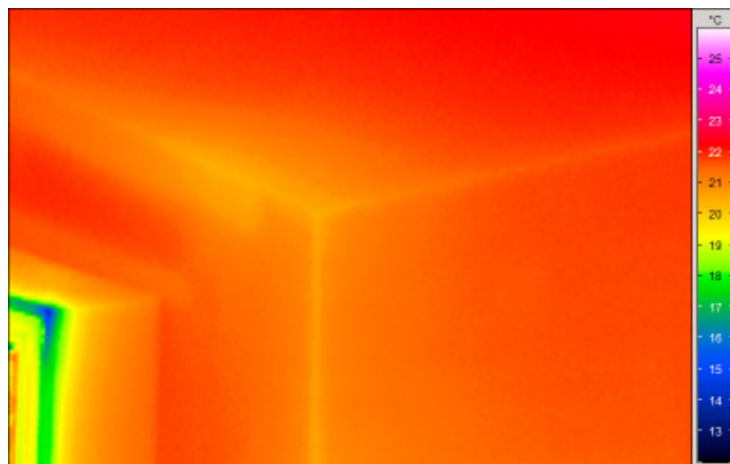


Abbildung 43: Kante und Ecke in der Küche der PHiB Wohnung (Richtung Hauseingang).

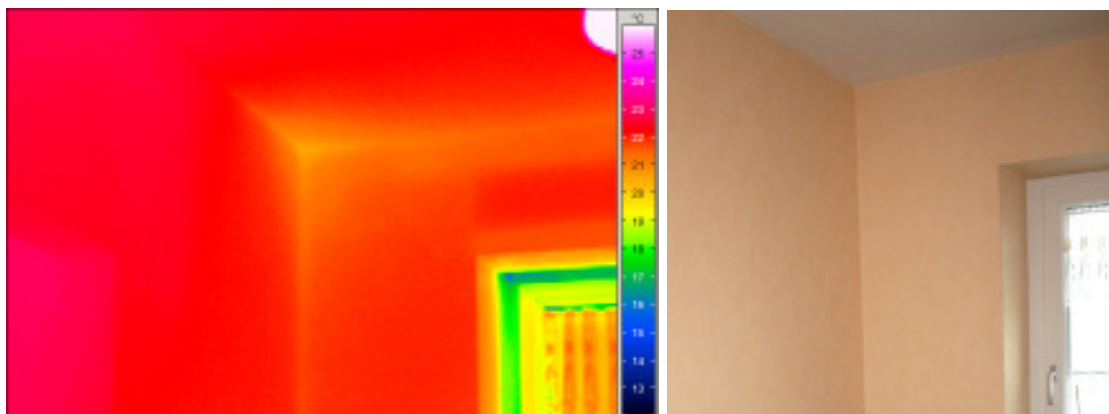


Abbildung 44: Decken-Wand Kante und Ecke in der Küche der PHiB Wohnung (Richtung Balkon).

In der unteren Ecke Fußboden/Außenwand/Trennwand zum Wohnzimmer in der Küche findet eine Abkühlung auf ca. 18,7 °C statt. Diese Oberflächentemperatur ist unkritisch. Die Abkühlung hat ihre Ursache in dem massiven Balkonanker (vgl. entsprechendes Bild von der anderen Zimmerecke und Beurteilung in Abschnitt 5.2.2.1).

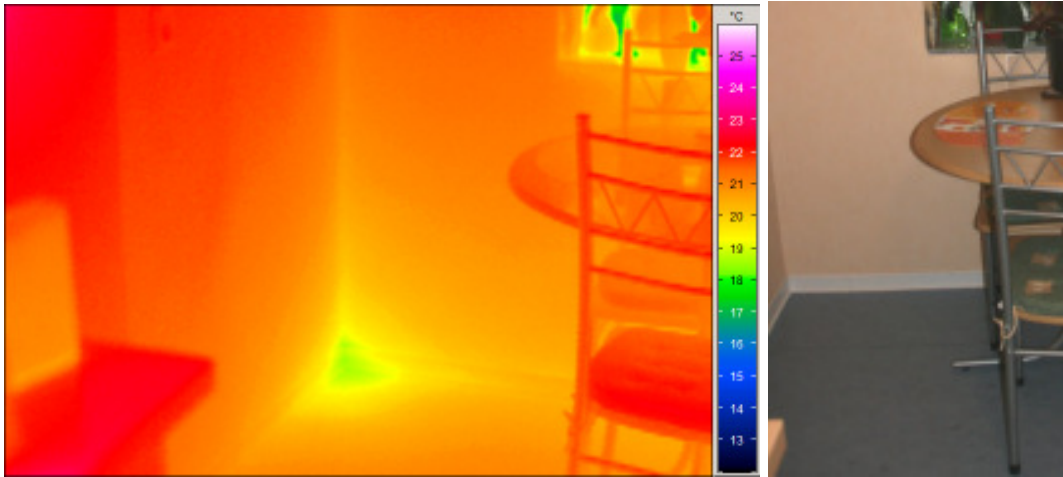


Abbildung 45: Fußboden-Wand Kante und Ecke in der Küche der PHiB Wohnung (Richtung Balkon). Wärmebrückeneffekt aufgrund des massiven Balkonankers.

Die vorgehängten Rollladenkästen sind bei der Innenthermographie nicht zu erkennen. Bei diesem Fensteranschluss in der Nordfassade gibt es in der rechten oberen Ecke einen kleinen Schwachpunkt (Minimal 14,2 °C). Vermutlich besteht hier eine Undichtheit der Blendrahmeneinbindung.

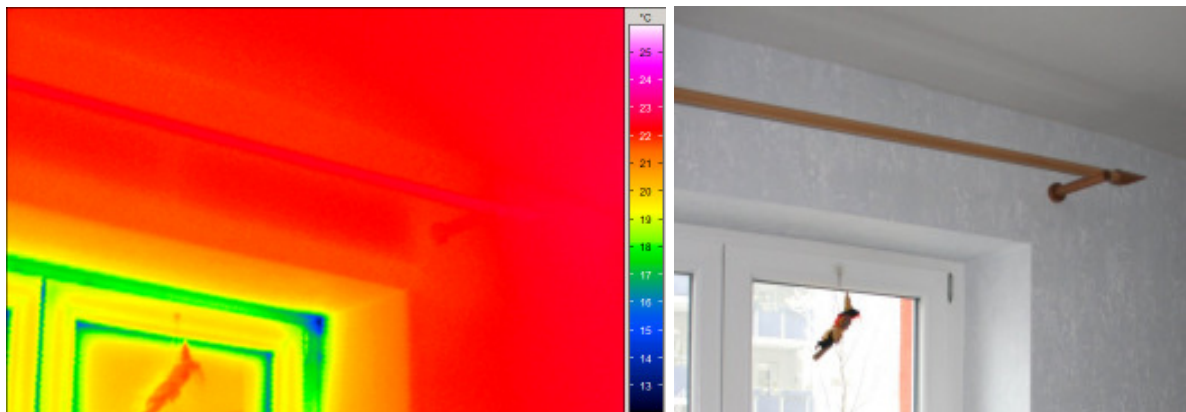


Abbildung 46: Fenster-Wand Detail im Nord-Ost-Zimmer der Wohnung im PHiB.

An der Fenstertür zum Balkon wurden an der Bandseite eine massive Undichtheit festgestellt. Die Tür war stark verzogen und muss nachgearbeitet werden. Die Oberflächentemperaturen liegen unter 10 °C. Dieser Mangel wurde der GAG gemeldet und sollte nachgebessert werden.

An zwei weiteren Fenstern wurden niedrigere Oberflächentemperaturen lokalisiert, die ebenfalls auf weitere Undichtheiten hinweisen.

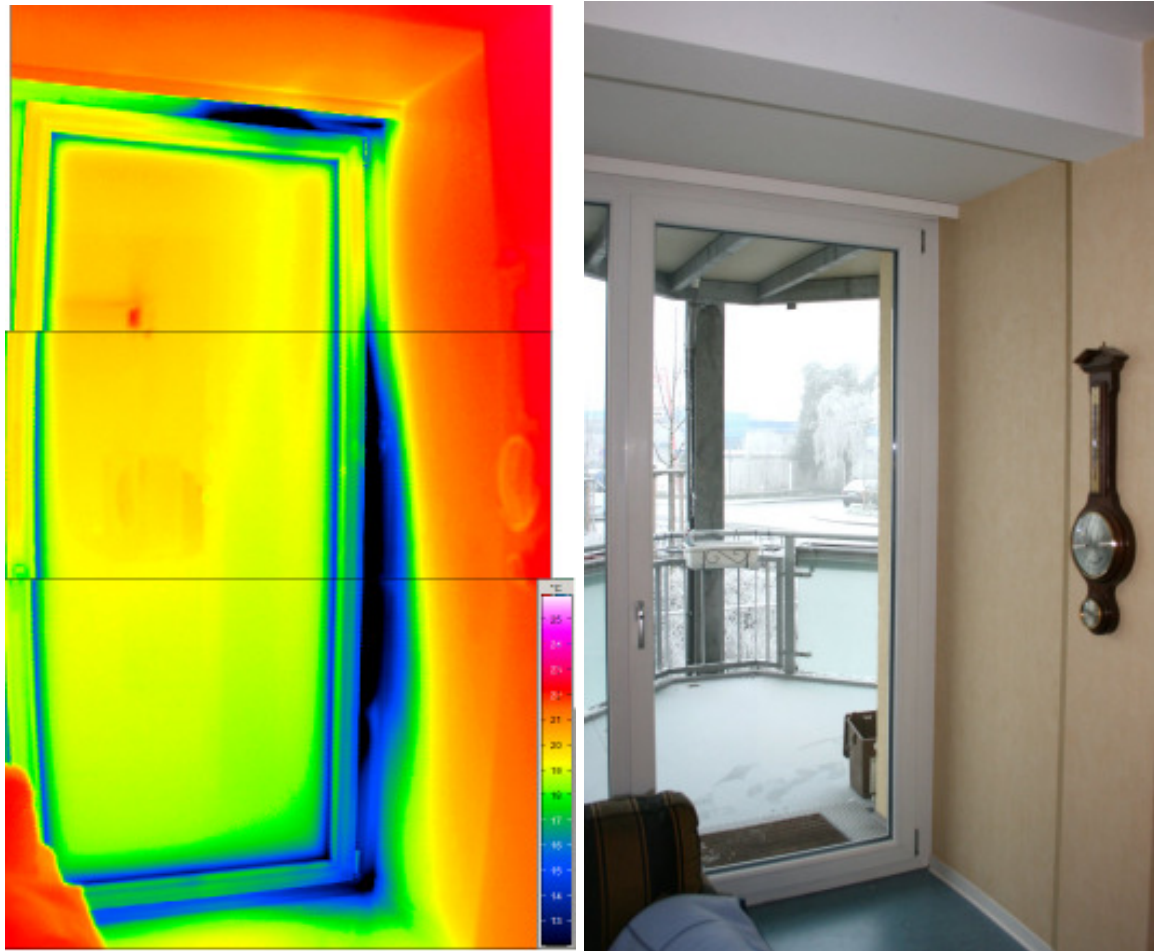


Abbildung 47: Undichte Fenstertür zum Balkon im Wohnzimmer der PHiB Wohnung.

EG Wohnung im NEH

Die EG Wohnung im NEH grenzt an die östliche Giebelwand. Die Kante im Nord-Ost Zimmer stellt damit eine geometrische Wärmebrücke dar. Die Oberflächentemperatur in der Kante muss geometrisch bedingt niedriger liegen als in der Regelwandfläche. In Abbildung 48 beträgt der Unterschied der Oberflächentemperatur von der Wandfläche zur Minimaltemperatur in der Kante 1,6 K. Die Kante ist mit minimal 16,1 °C warm.

Ähnliche Temperaturen finden sich in der Kante bzw. Ecke in der Küche (Richtung Rücksprung Eingangsbereich) in Abbildung 49. Auch hier findet sich die mit minimal 16,7 °C unkritische Oberflächentemperatur.

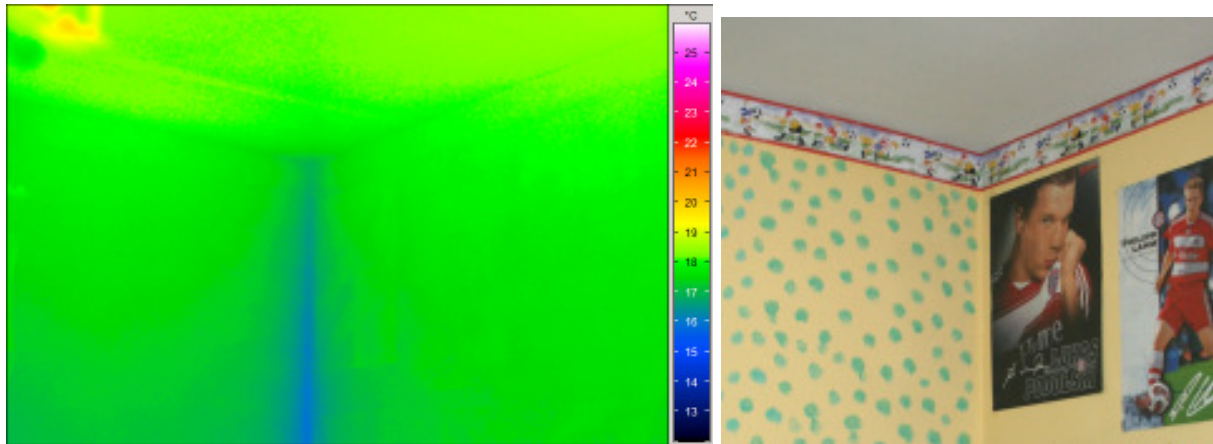


Abbildung 48: Außenkante im Nord-Ost Zimmer der NEH EG Wohnung.

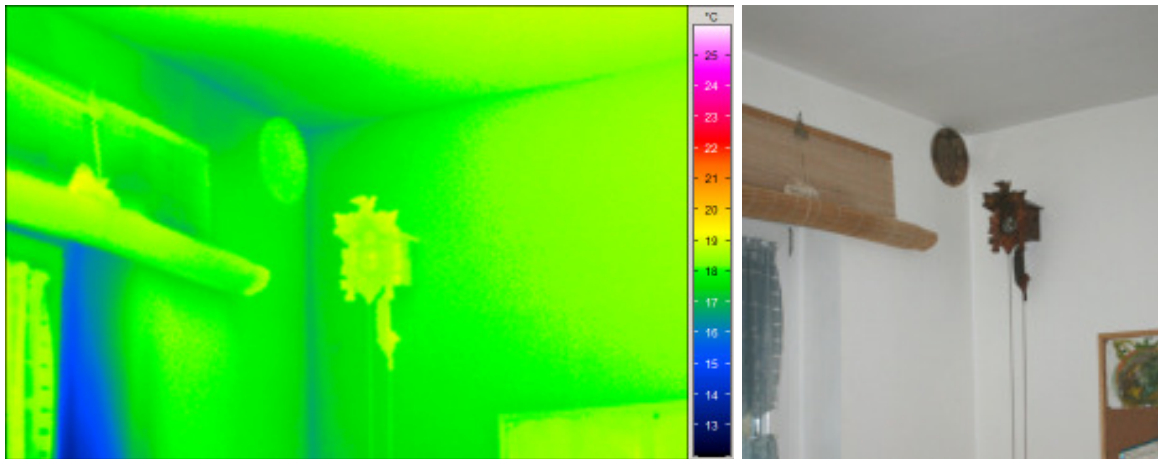


Abbildung 49: Außenkante der Küche zum zurückgesetzten Eingangsbereich des Hauses (NEH).

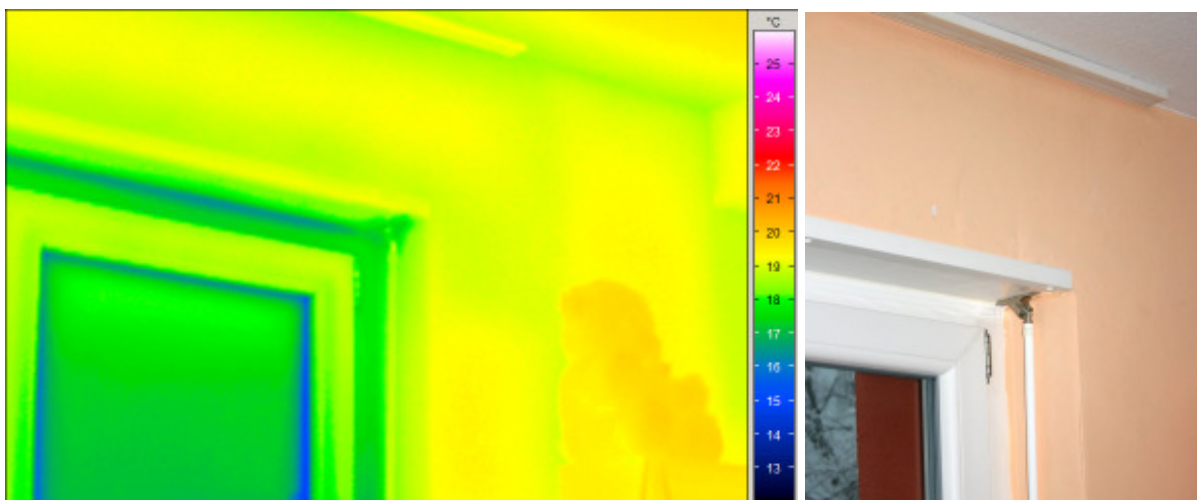


Abbildung 50: Fensterdetail mit Rollladenkurbel vom Nordzimmer der NEH EG-Wohnung.



Der Rollladenkasten verursacht eine Abkühlung der Oberflächentemperaturen (Abbildung 50) auf minimal 16 °C.

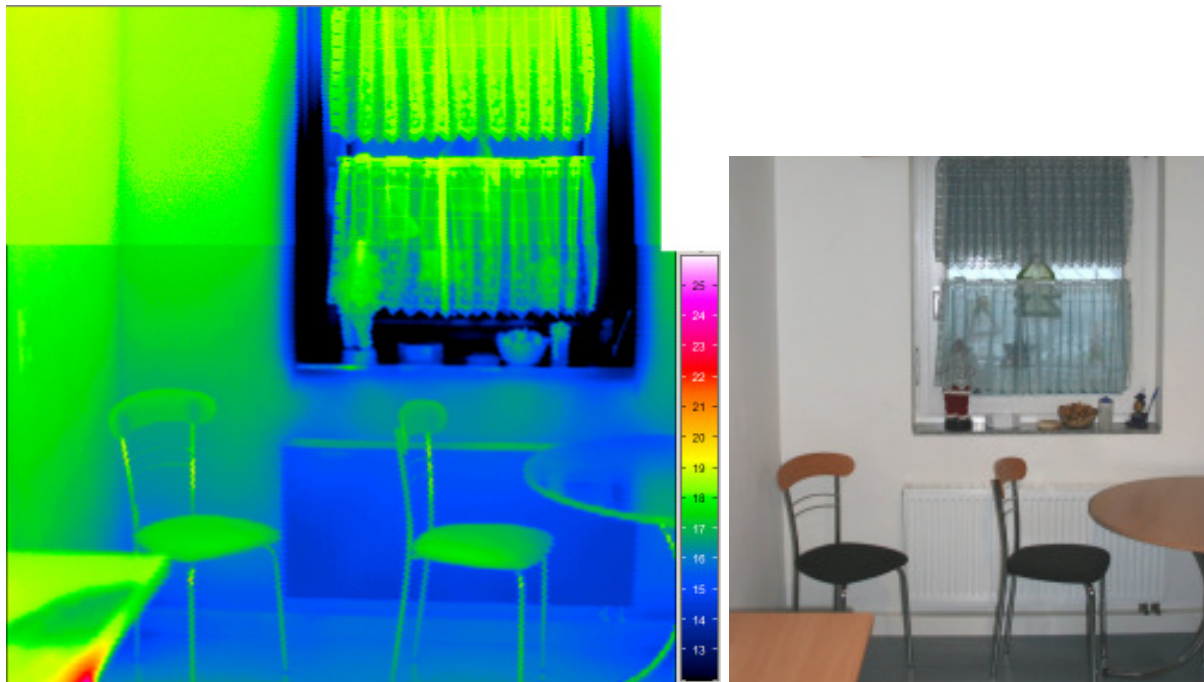


Abbildung 51: Küchenfenster über dem abgeschalteten Heizkörper.

In der Küche der Wohnung wurden am Küchenfenster über dem abgeschalteten Heizkörper minimale Temperaturen am Fensterrahmen von nur 5,6 °C gemessen. Dies deutet möglicherweise auf einen Einbaumangel hin. Denkbar ist allerdings auch, dass direkt vor dem Untersuchungstermin das Fenster kurzzeitig gekippt war. Die Temperaturverteilung am Rahmen deutet darauf hin.

Im Kinderzimmer wurden ebenfalls am Fenster über dem abgedrehten Heizkörper sehr niedrige Oberflächentemperaturen gemessen. Auf dem unteren Blendrahmen wurden Minimaltemperaturen von nur knapp 8 °C festgestellt. Da z.B. im Badezimmer nicht so niedrige Oberflächentemperaturen an den baugleichen Fenstern festgestellt wurden, ist auch im Kinderzimmer denkbar, dass zuvor kurz gelüftet wurde. Werden so niedrige Oberflächentemperaturen ohne Lüftungsvorgänge erreicht, liegt ein Mangel in der Dämmung und/oder der Luftdichtheit vor.

Die Temperaturen zeigen, dass bei der herkömmlichen Fensterqualität ($U_w = 1,44 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) zum Ausgleich des Kaltluftabfalls am Fenster ein Heizkörper notwendig ist, um hohe Behaglichkeit zu erreichen.

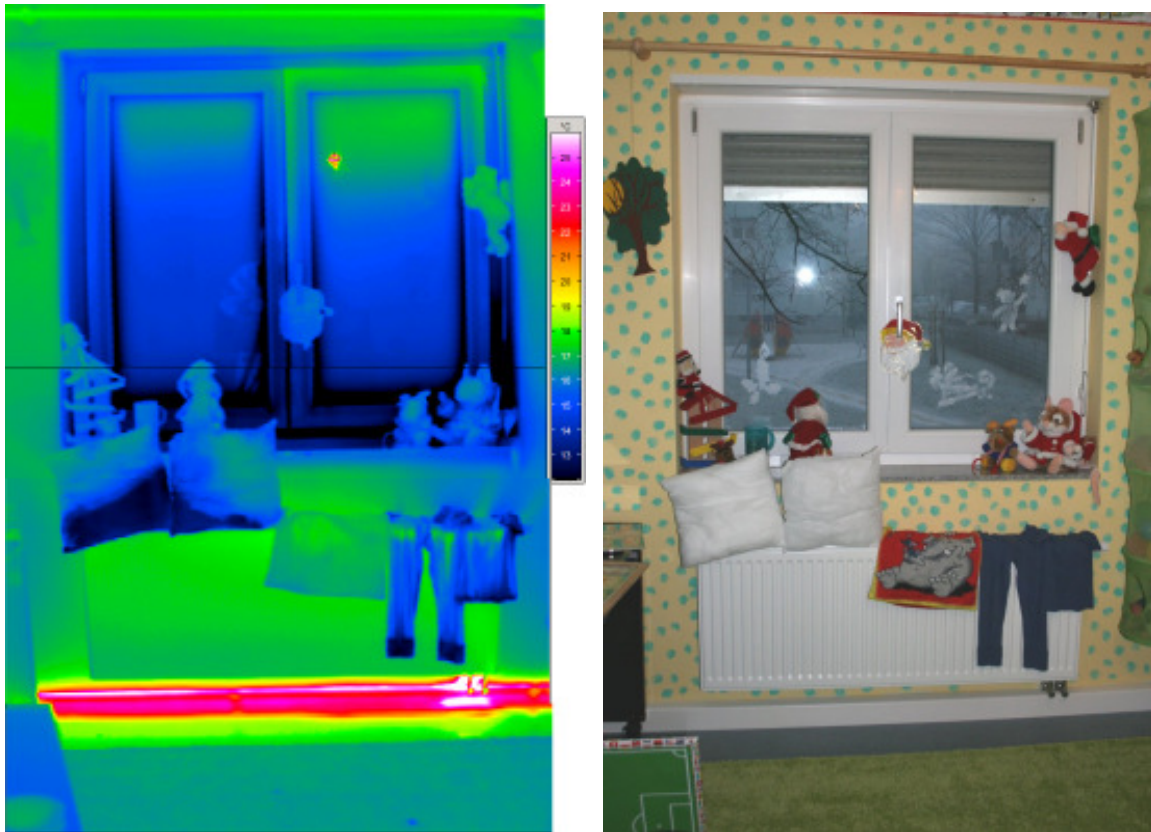


Abbildung 52: Fenster im Kinderzimmer mit abgedrehtem Heizkörper und warmen Heizungsverteilungen in der Sockelleiste. Bei dem Hotspot auf der Verglasung handelt es sich um eine Spiegelung der Lampe.

Thermographie Treppenhäuser

Zur Darstellung der Thermographien der beiden untersuchten Treppenhäuser wird einheitlich die Temperaturskala von + 8 bis + 22 °C verwendet. In den nur indirekt beheizten Treppenhäusern der Gebäude zeigt sich eine Temperaturschichtung, wie sie auch aus der Untersuchung [Peper 2005] bekannt ist. Dort wurde dieser Sachverhalt genauer untersucht.

Die Stahltür zum unbeheizten Dachraum im PHiB zeigt an der Bandseite Undichtigkeiten mit Temperaturen unter 10 °C (Abbildung 53). Dies ist ein Schwachpunkt, bei dem Verbesserungen möglich wären. Im Treppenhaus ist nicht mit höheren Luftfeuchtigkeiten zu rechnen, womit zeitweise kühlere Temperaturen nicht zwangsläufig als problematisch zu bewerten sind.

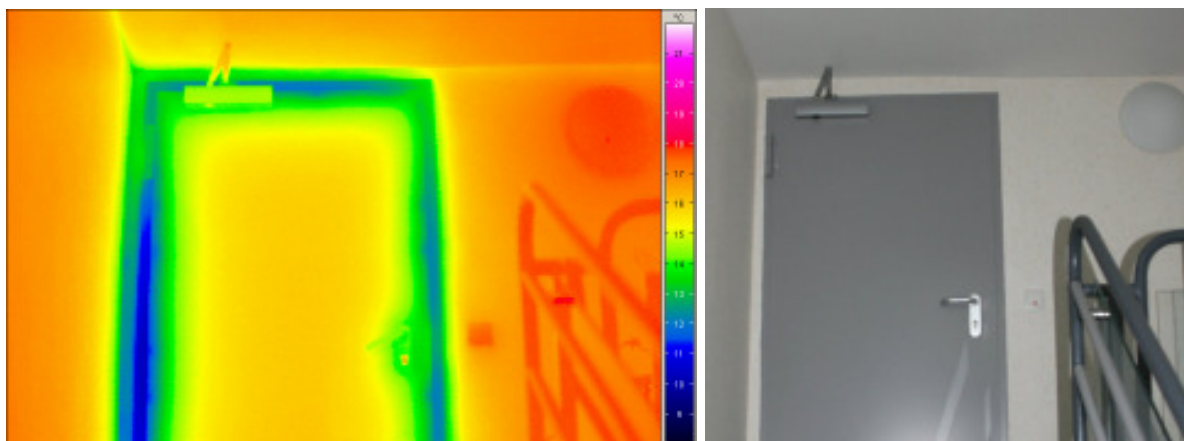


Abbildung 53: Bodenraum Zugangstreppe im Treppenhaus vom PHiB.

Die Untersuchung des Innendämmungsbereiches in beiden Treppenhausköpfen zeigt in der Fläche im PHiB Temperaturen um 17,5 °C, im NEH liegen sie in der Größenordnung zwischen 13 und 14 °C (Abbildung 53 und Abbildung 54). Die genauen Raumlufthtemperaturen in den beiden Treppenhäusern sind nicht bekannt. Die Dämmung ist unterschiedlich stark ausgeführt worden. Im PHiB sind 200 mm eingebracht, im NEH nur 120 mm.

An den Übergängen der Innendämmung zu den Seitenwänden verspringt die Dämmebene von der Innendämmung zur Außendämmung um den Treppenhauskopf (im Dachraum). Einen Wechsel der Dämmebenen stellt immer einen Schwachpunkt dar. Die minimalen Temperaturen wurden hier mit 9,7 °C im NEH und mit 13,9 °C im PHiB gemessen. So kann in den kältesten Wochen im NEH kein Kondensat ausgeschlossen werden.

Die Dachflächenfenster entsprechen in beiden Gebäuden nicht den Passivhausanforderungen. Dachflächenfenster stellen aufgrund der notwendigen Position in der Dachebene (Wasserführung) immer einen thermischen Kompromiss dar. Aufgrund der besseren Verglasungsqualität beträgt der U_w des Dachflächenfensters im PHiB 1,2 und im anderen Standard 1,7 W/(m²K). Die gemessenen Minimaltemperaturen an den Fenstern liegen mit 5,7 (NEH) und 8,9 °C (PHiB) sehr niedrig.

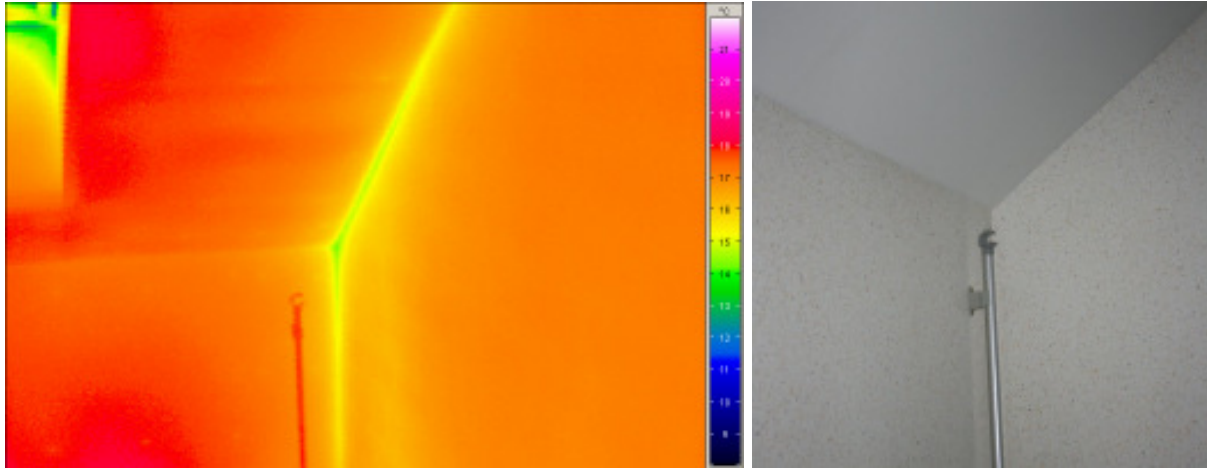


Abbildung 54: Treppenhauskopf im PHiB mit dem innengedämmten Bereich und dem Anschluss zur Innenwand.

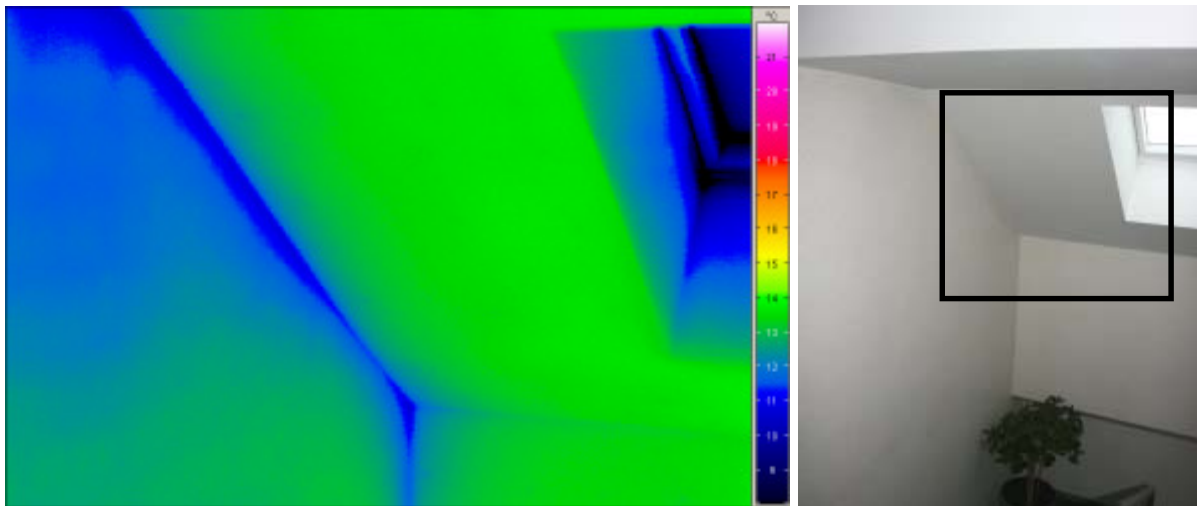


Abbildung 55: Treppenhauskopf Anschluss Innendämmung (an der Dachschräge) an die Innenwand im NEH.

Die Haustür im NEH (Abbildung 56) zeigt im unteren Bereich leichte Undichtheiten. Es wurden Minimaltemperaturen von 6,5 °C gemessen. Haustüren stellen aufgrund der starken Nutzung einen typischen Schwachpunkt der Gebäudehülle dar. Die Luftdichtheit (z.B. Absenk- oder Auflaufdichtungen) sollten regelmäßig überprüft und gewartet werden.

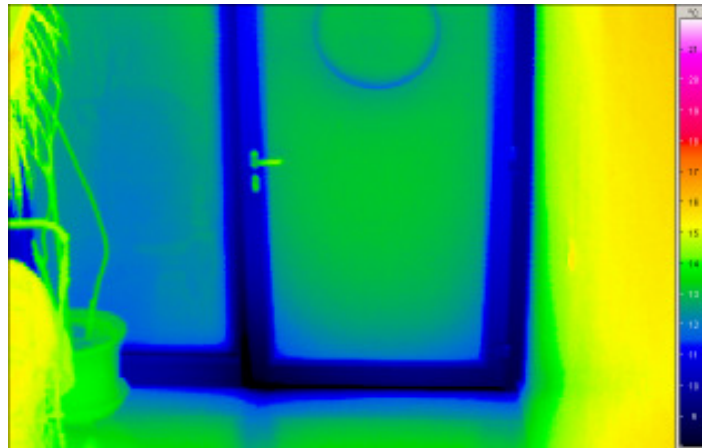


Abbildung 56: Unterer Teil der Haustür im NEH.

3.2.3 Thermographien Nahwärmeübergaberaum

Der kleine Nahwärmeübergaberaum im Keller von Haus 5 mit allen zentralen wärmetechnischen Einrichtungen (Speicher, Wärmeübertrager, Pumpen, etc.) zeigt ganzjährig, trotz entfernter Fensterverglasung, eine sehr hohe Raumtemperatur (vgl. Abbildung 126 in Abschnitt 5.4.3.3). Nach erfolgten Nachdämmarbeiten der Rohrleitungen und Armaturen lag diese immer noch bei 31 °C.

Um einen Eindruck der Hauptursache für die hohe Temperaturabstrahlung in diesem Raum zu bekommen, wurden dort Thermogramme angefertigt. Zur Darstellung der viel höheren Oberflächentemperaturen als im Wohnungsbereich, wird die Skala von 25 bis 50 °C verwendet.

Trotz Dämmung, auch z.B. der Absperrhähne, sind aufgrund der zahlreichen Durchdringungen, typische hohe Oberflächentemperaturen ablesbar. In Abbildung 57 betragen sie um 36 °C auf der Dämmstoffoberfläche. Die ungedämmten Teile (Pumpen und Temperatursensoren etc.) sind entsprechend noch deutlich wärmer. Die Rohrleitungen und Einbauten auf der gegenüberliegenden Wand zeigen ein ganz ähnliches Bild (Abbildung 58).

Auch die beiden Warmwasserspeicher tragen nennenswert zu dem Wärmeeintrag in den Raum bei. Die Oberflächentemperatur der Kunststoffummantelung beträgt 24 (unten) bis knapp 30 °C (oben).

Insgesamt muss festgestellt werden, dass sich Verbesserungen nur durch vom Standard abweichende Dämmstoffstärken erreichen lassen. Nur bei der Verwendung von industriell vorgefertigten Dämmstoffformteilen kann der Anteil an den nicht nutzbaren Verteilverlusten wirtschaftlich reduziert werden. Diese Verluste steigen prozentual bei Gebäuden mit niedrigen Heizwärmeverbräuchen stark an. Daher müssen sie - nach der Optimierung der Gebäudehülle - deutlich stärker in den Fokus rücken!

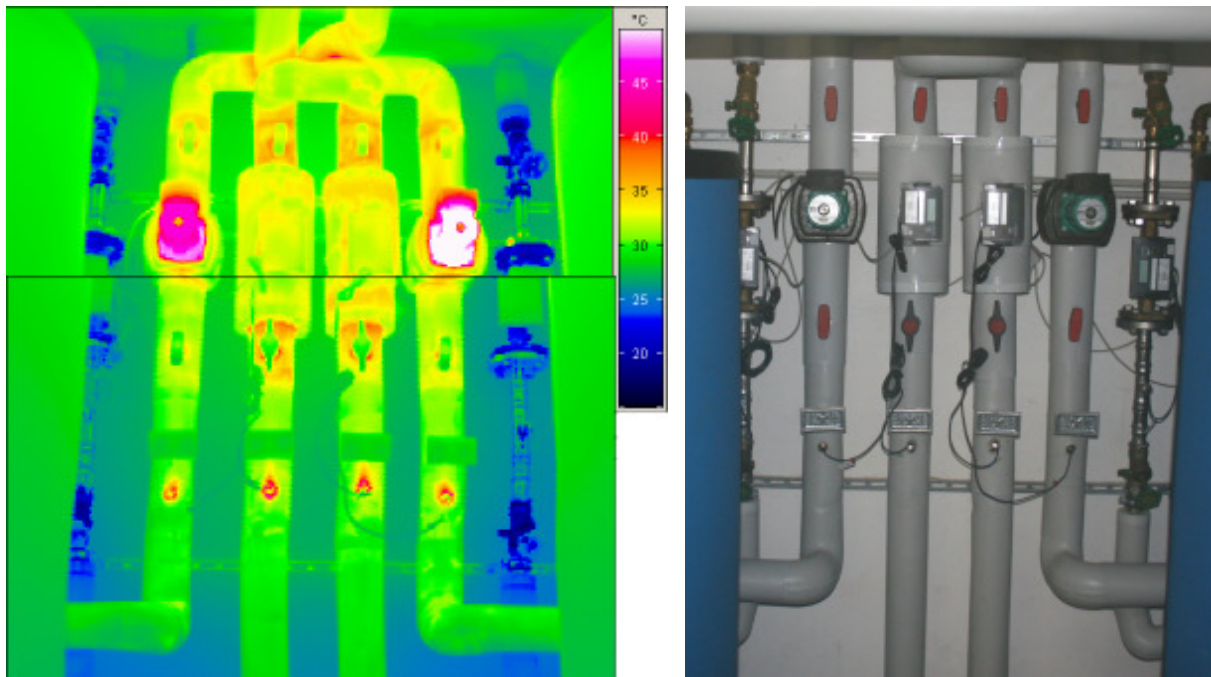


Abbildung 57: Hydraulik Installationen für die Warmwasserversorgung (Wärmemengenzähler, Warmwasserpumpen) zwischen den beiden Warmwasserspeichern. Bei den beiden äußeren, ungedämmten Rohren mit WMZ handelt es sich um die Kaltwasserleitungen (Zulauf Warmwasserbereitung).

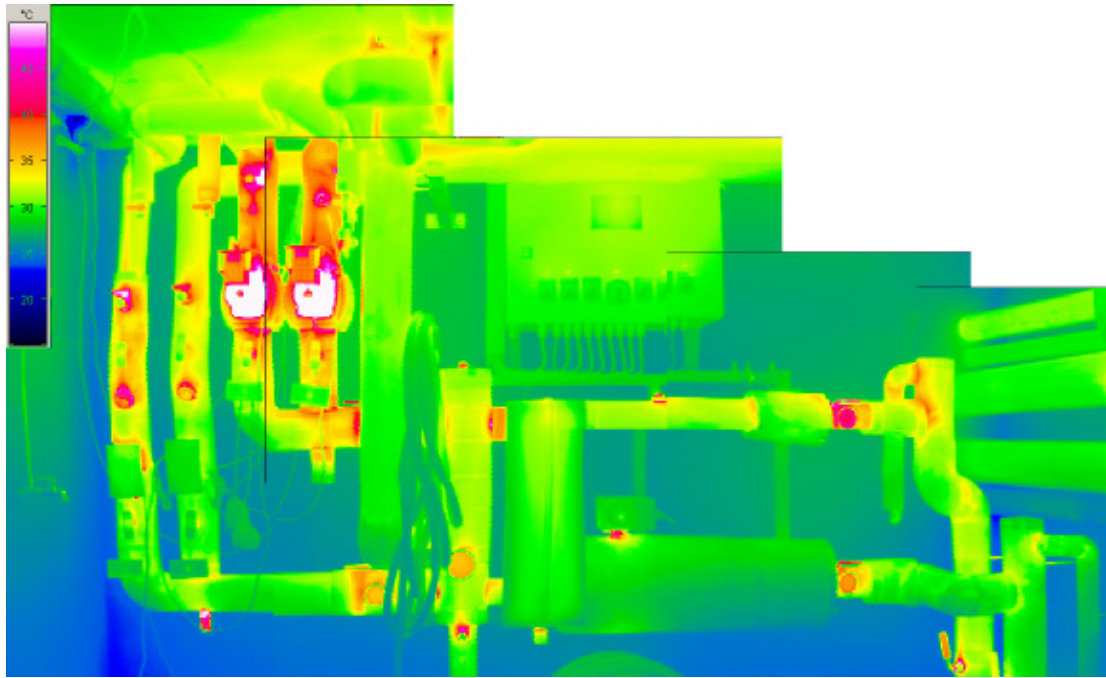


Abbildung 58: Installationswand im Nahwärmeübergaberaum mit Übergabestation, Heizkreispumpen, Wärmeübertrager und WMZ.

3.3 Luftmengen und Lüftungsgeräte im PHiB

Bei der Inbetriebnahme der Lüftungsgeräte wurden die 12 Lüftungsanlagen durch die Montagefirma eingeregelt. Dafür wurden mit einem Volumenstrommessgerät (Nulldruckkompensationsverfahren mit Stützventilator) alle Zu- und Abluftventile eingemessen und die Luftmengen nach den Vorgaben des Haustechnikplaners eingeregelt. Besonders wichtig war dabei das Herstellen der Balance zwischen Zu- und Abluft. Vom PHI wurde dafür eine Einweisung mit den Monteuren der Haustechnikfirma durchgeführt. In einem extra erstellten Protokollblatt wurden die Einstellparameter einer jeden Wohnung ausgefüllt. Darin waren auch weitere Einstellparameter der Lüftungsgeräte einzutragen (z.B. die Einschalttemperatur für die elektrische Frostschutzheizung). Die 12 Inbetriebnahmeprotokolle vom 16.03.2006 liegen dem PHI vor.

Der Wartungsdienst führt zweimal jährlich Wartungen an den Lüftungsgeräten durch (Kontrolle, Filterwechsel).



Abbildung 59: Volumenstrommessung an einer Zuluftdüse im Wohnzimmer einer Wohnung des PHiB vor Fertigstellung der Gebäude.

Am 30.04.2008, also gut zwei Jahre nach der Inbetriebnahme der Anlagen, wurde in fünf Wohnungen vom PHI eine Nachmessung der Volumenströme mit dem gleichen Messgerät durchgeführt. Es wurden verschiedene Verschmutzungen an den Küchenfettfiltern (Abluftventil), einem Abluftventil im Badezimmer sowie ein deutlich verschmutztes Abluftfilter in einem der Geräte festgestellt. Die Bewohner hatten unterschiedliche Verhaltensweisen bezüglich der Reinigung der Abluftdüsen, bzw. des



Fettfilters in ihrer Küche. Der Abluftfilter wäre in Kürze von der Wartungsfirma gereinigt oder ausgetauscht worden.

Nach den entsprechenden Reinigungen wurden in den fünf Wohnungen die Messungen durchgeführt. Zum Teil wurde vorab auch im verschmutzten Zustand gemessen, um den Effekt einschätzen zu können. Aufgrund von Einbaumöbeln in einer Küche und durch starke Unebenheiten einer Wandfläche konnten in zwei der fünf Wohnungen nicht alle Ventile vermessen werden. Diese Wohnungen können daher nicht mit dem gesamten Volumenstrom bzw. der daraus errechneten Luftwechselrate angegeben werden. In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der Messungen dargestellt.



Abbildung 60: Demontierter Fettfilter vom Küchenabluftventil (links) und demontierter, stark verschmutzter Abluftfilter aus dem Lüftungsgerät (rechts).



Tabelle 8: Gemessene Volumenströme und daraus berechnete Luftwechsel der Messungen am 16.03.2006 und 30.04.2008 in den 12 Wohnungen des PHiB.

Whg.	16.03.2006		30.04.2008	
	Volumenstrom [m ³ /h]	Luftwechsel [h ⁻¹]	Volumenstrom [m ³ /h]	Luftwechsel [h ⁻¹]
D	61	0,46		
E	62	0,47		
F	61	0,46		
K	61	0,46		
N	61	0,46		
T	84	0,44		
V	84	0,44		
W	85	0,45	72	0,38
X	84	0,44	71	0,37
AA	84	0,44		
AB	60	0,45		
AD	85	0,45	66	0,35
Mittelwert		0,45		0,37

Die Volumenströme sind je nach Wohnungsgröße unterschiedlich projiziert und eingestellt. Bei der Erstmessung hat sich der mittlere Luftwechsel zu 0,45 h⁻¹ ergeben. Die drei Wohnungen, die bei der Nachmessung ausgewertet werden konnten, verfügten mit 0,37 h⁻¹ über etwas reduzierte Luftwechsel.

Es ist angeraten, auch die Wärmetauscher in regelmäßigen Abständen zu reinigen. Laut den Angaben des Geräteherstellers sollte hier zumindest alle zwei Jahre eine Sichtkontrolle und ggf. eine Reinigung (Durchspülen) durchgeführt werden.



4 Zielsetzungen und Messkonzept

Die Forschungsziele der Begleitforschung gliedern sich in die folgenden Schwerpunkte: wissenschaftliche Analyse

- des Wärme- und Endenergieverbrauchs,
- der Raumtemperaturen und des Sommerverhaltens,
- der Raumluftqualität.

Mit der Begleitmessung sollen die Verbrauchsdaten für Heizwärme, Strom und Warmwassererwärmung erfasst werden. Diese Daten dienen der Erfolgskontrolle des Projektes, des Weiteren können die Projektierungsdaten überprüft werden. Über die Erfassung der Wärmeverbräuche werden die Endenergieverbräuche ermittelt. Die Erfassung der gesamten vom Wärmeerzeuger gelieferten Energie, dient der Bestimmung der Primärenergieverbräuche. Die Temperaturmessung in allen Wohnungen ist zur Untersuchung der thermischen Behaglichkeit und zur Beurteilung der Wärmeverbräuche erforderlich.

Ein Schwerpunkt der Messungen widmet sich der Raumluftqualität. Von besonderem Interesse ist hier die Abhängigkeit der Luftqualität von dem jeweils umgesetzten Lüftungskonzept: Während im Gebäudeteil mit Passivhausqualität (PHiB) je eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung in jeder Wohneinheit für kontinuierlichen Luftaustausch sorgt, wurde im anderen Gebäudeteil mit verbessertem Standard (Niedrigenergie) darauf verzichtet. Hier wird konventionell nur über die Fenster gelüftet, lediglich in den innenliegenden Bädern der kleinen Wohnungen wurden Abluftventilatoren mit kurzen Nachlaufzeiten (6 min) eingebaut. Ein Ziel der Messkampagne war es daher, in jeweils drei Wohnungen der beiden Gebäudeteile vertiefende Messdaten zur Luftqualität zu erheben. Hierzu wurden in den Hauptaufenthaltsräumen neben der Raumlufttemperatur auch die relative Luftfeuchte und der Kohlendioxidgehalt fortlaufend gemessen. Im Bauteil NEH wurden zusätzlich auch die Fensteröffnungsvorgänge der je 5 Fenster/Fenstertüren aufgezeichnet.

Mit diesem Projekt können erstmals Sanierungsgebäude am gleichen Ort und im gleichen Zeitraum mit einander verglichen werden.

4.1 Aufbau der Messtechnik

Im Gebäude wurde ein Zweidraht-M-Bus-Messnetz (gem. [DIN EN 1434-3]) installiert. Ein sog. „M-Bus-Master“ (Pegelwandler) ist mit dem zentralen Messrechner verbunden. Alle Sensoren des Messnetzes (Raumlufttemperatur, relative Feuchte, CO₂-Konzentration, Wärmemengenzähler, Wasseruhren) sind direkt oder über Analog/Digital-Wandler (A/D-Wandler) mit dem M-Bus-Netz verbunden.

Nach der Installation können alle Einzelgeräte über ihre dreistellige Primäradresse und 8-stellige Sekundäradresse angesprochen und die Daten ausgelesen werden. Es handelt sich dabei um eine direkte digitale Übertragung der Werte. Die Messstellen werden zeitlich hochaufgelöst in 10-minütigen Intervallen mit 2400 Baud abgefragt und die Daten auf dem zentralen PC abgespeichert. Dieser ist mit einer ISDN-Karte zur Datenfernübertragung über das Telefonnetz für die regelmäßige Kontrolle der Messdaten ausgestattet. Zur sicheren Abschaltung und selbstständigen Wiederaufnahme der Messung im Fall von Ausfällen im öffentlichen Stromnetz ist der Messrechner über eine unterbrechungsfreie Spannungsversorgung (USV) angeschlossen. Der schematische Aufbau des Messnetzes ist in Abbildung 62 dargestellt.



Abbildung 61: Messzentrale im Keller von Haus 5 (NEH).

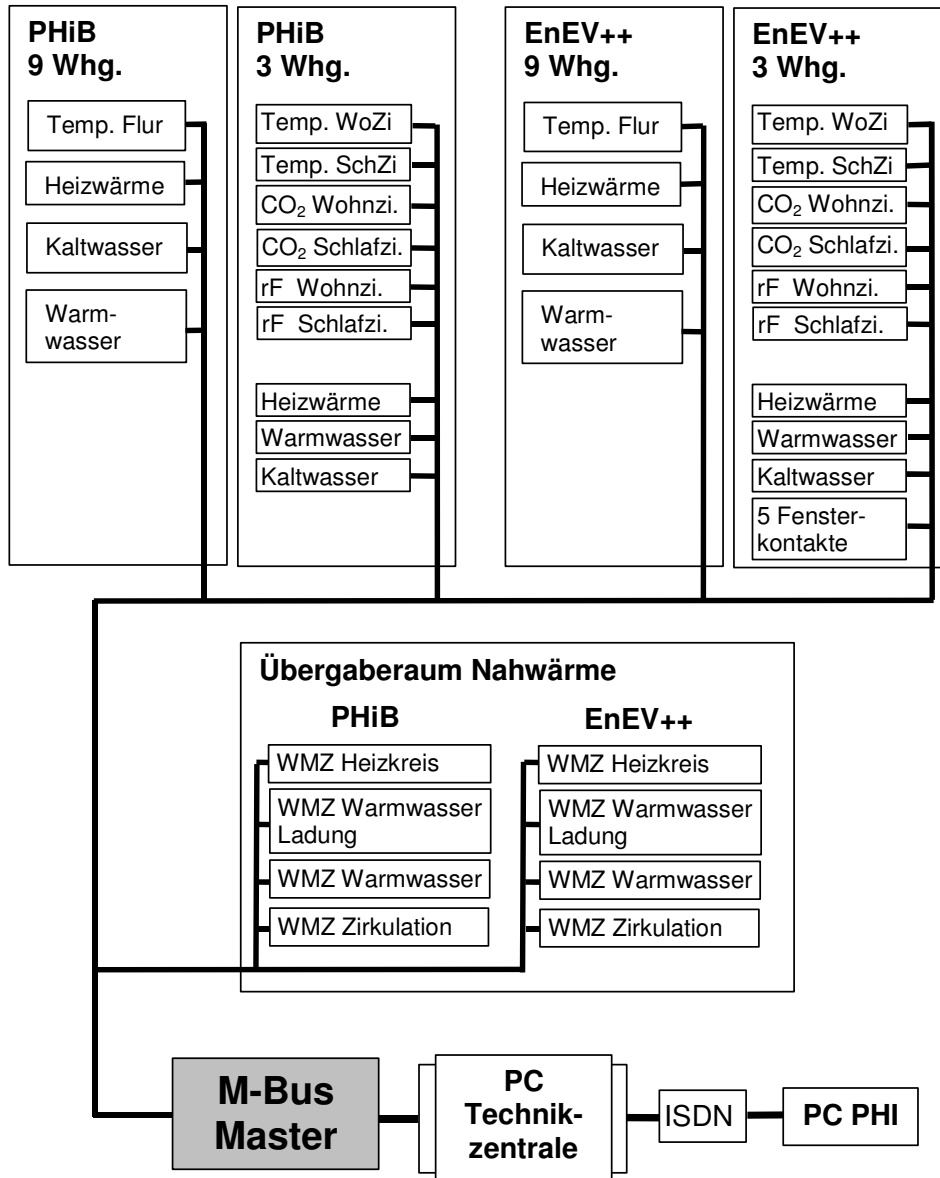


Abbildung 62: Schematischer Aufbau der messtechnischen Anlage mit Sensoren, Messnetz und Bus-Master.

4.2 Position und Spezifikation der Messstellen

Die für die Begleitmessung benötigten Messeinrichtungen werden in diesem Abschnitt spezifiziert. Dabei wird unterschieden nach Zählern und Messeinrichtungen für Verbräuche des Gesamtgebäudes, wohnungsweisen Messungen (z.B. Wärmemenge, Raumlufttemperatur/-feuchte), sowie den raumweisen Temperatur- und Luftqualitätsmessungen. Die Position der Sensoren in den Wohnungen sind den Plänen im Anhang des Berichtes zu entnehmen.

4.2.1 Zentrale Hauptzähler

Als zentrale Zähler gibt es die Wärmemengenzähler im Nahwärmeübergaberaum und die Elektrozähler in den Kellern.

4.2.1.1 Wärmemengenzähler

Die zentrale Wärmeversorgung wird für beide Gebäude über einen Nahwärmeanschluss von der dem gegenüberliegenden Wohnhaus angegliederten Heizzentrale realisiert (Entfernung ca. 20 m). Diese besteht aus einem Gas-BHKW und Gas-Spitzenlastkessel. Nach der Übergabe im Keller von Haus 5 wird die Wärme aufgeteilt auf den Anwendungsbereich Heizung und Warmwasserbereitung. Für die Warmwasserbereitung ist jeweils ein Pufferspeicher je Gebäude vorhanden. Diese befinden sich beide in dem Übergaberaum.

Im Übergaberaum befinden sich Wärmemengenzähler (WMZ) zur Erfassung der Gesamt-Energieströme für Heizung und Warmwasserbereitung getrennt nach Verbrauchsbereich PHiB und NEH. Zudem werden die Wärmeverluste der Warmwasserzirkulationsleitungen gemessen. Alle zentralen WMZ sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Tabelle 9: Zentrale Wärmemengenzähler im Übergaberaum Gebäude 5.

#	Bereich	Messung
1	PHiB	Wärmeverbrauch Raumheizung
2	PHiB	Wärmeverbrauch Trinkwarmwasserbereitung
3	PHiB	Wärmeverbrauch Trinkwarmwasser
4	PHiB	Wärmeverluste Trinkwarmwasserzirkulation
5	NEH	Wärmeverbrauch Raumheizung
6	NEH	Wärmeverbrauch Trinkwarmwasserbereitung
7	NEH	Wärmeverbrauch Trinkwarmwasser
8	NEH	Wärmeverluste Trinkwarmwasserzirkulation

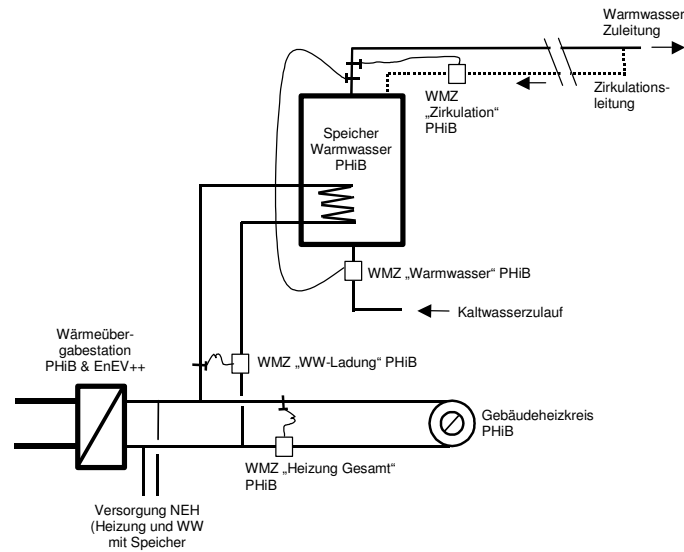


Abbildung 63: Vereinfachtes Hydraulikschema der Haustechnik für das PHiB mit den Zählereinrichtungen (WMZ). Der symmetrische Aufbau für das NEH ist angedeutet.



Abbildung 64: Wärmemengenzähler für Warmwasser- und Zirkulationsverbrauch im Übergaberaum (Haus 5) nach erfolgter Wärmedämmung der Rohrleitungen.

Durch die zentrale Anordnung der WMZ werden die überwiegenden Anteile der Leitungswärmeabgaben der Rohrleitungen mit erfasst.

4.2.1.2 Elektrozähler

Für die Erfassung des Stromverbrauches im Gebäude wurde auf die wohnungsweisen Zähler des Versorgungsunternehmens zurückgegriffen (Landis&Gyr MM 2000). Die Zählerstände wurden manuell abgelesen, um den Beitrag elektrischer Energie zu den internen Wärmequellen jeder Wohneinheit abschätzen zu können. Baugleiche Zähler erfassen für jeden Treppenaufgang Allgemestromverbräuche. In Haus 5 befindet sich ein weiterer Zähler für den Hilfsenergieverbrauch der Technikzentrale (220V ISKRA E72F-01). Der Strombedarf der Messtechnik wurde separat erfasst.

Um den Beitrag der Wohnungslüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung zum Stromverbrauch im PHiB zu bestimmen, wurden bei einer Anzahl dieser Geräte eine Messung mit Hilfe von mobilen Verbrauchsdatenerfassungsgeräten durchgeführt.

Neben den an der eigentlichen Gebäude-Energiebilanz ausgerichteten Messungen wurde der Ertrag der beiden Photovoltaikanlagen auf den Dächern am Einspeisestromzähler (Landis&Gyr Dialog Drehstromzähler ZMD 120ASER 53) abgelesen.

4.2.2 Dezentrale Wärmemengenmessung

Um eine umfassende Bilanzierung durchführen zu können, wurden in allen 24 Wohnungen (je 12 im PHiB und im NEH) ebenfalls Wärmemengenzähler vorgesehen. So ist ein hochaufgelöstes Bild der jeweiligen Wärmeverbräuche ebenso gegeben wie eine Bilanzierung der Leitungswärmeverluste aus den Differenzen der im Übergaberaum gemessenen Wärmeverbräuche und den wohnungsweisen Verbräuchen.

Alle eingesetzten WMZ sind vom Hersteller Hydrometer, Typ Sharky Heat.



Abbildung 65: Wärmemengenzähler Heizwärme und Wasseruhren (Kalt-/Warmwasser) im Bad jeder Wohneinheit (Bauphase).

4.2.3 Temperaturmessungen

Zur Messung der Raumtemperaturen wurden M-Bus Temperatursensoren eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine Sonderentwicklung nach Vorgaben des Passivhaus Instituts.



Als Mess-Sensor für die Raumluftmessung werden langzeitstabile Platin-Widerstände (Pt 100) der höchsten Genauigkeitsklasse (Klasse: 1/10 DIN B) verwendet. Die Umsetzermodule geben alle 6:40 Minuten eine Mittelwerttemperatur aus, die über das Bussystem ausgelesen und zentral gespeichert wird.

Die Elektronikbausteine der Sensoren sind in Unterputzdosen montiert und mit geschlitzten Deckeln (Belüftung) abgedeckt. Alle Sensoreinheiten wurden vor Einbau im Labor kalibriert und in situ einer weiteren Kalibriermessung unterzogen.

In allen Wohnungen des Gebäudes wurde die Kerntemperatur erfasst. In der Mehrzahl der Fälle erfolgte die Messung im Flur, in je drei Wohnungen im PHiB und im NEH wurde alternativ in Wohn- und Schlafzimmer, zusammen mit der vertiefenden Luftqualitätsuntersuchung, gemessen. Die Lage der Temperatursensoren kann den Grundrissen im Anhang entnommen werden.

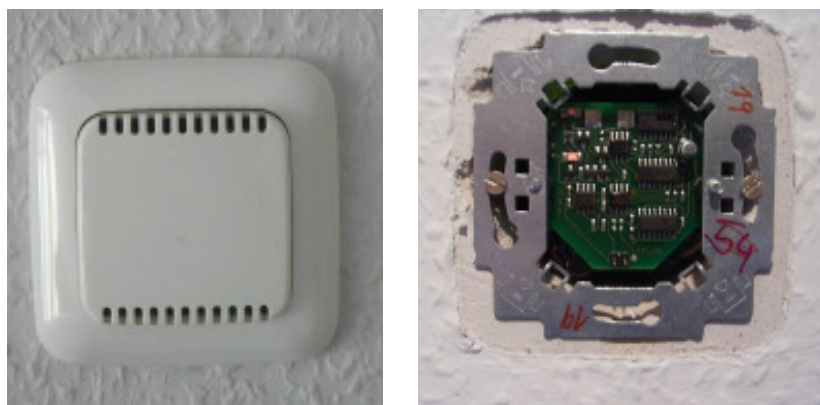


Abbildung 66: Montiertes M-Bus Temperaturmodul mit und ohne Abdeckung.

Kalibrierung der Temperatursensoren

Um die Raumtemperaturmessung im Gebäude unter realen Bedingungen zu kalibrieren, wurde im März 2005 für jede der 30 Messstellen in den bewohnten Wohnungen eine in situ Kalibriermessung durchgeführt. Dabei wurden je Messstelle ca. 60-minütige Perioden aufgezeichnet und in die Auswertung übernommen.



Abbildung 67: In situ Kalibriermessung eines Temperatursensors. Links im Bild der Referenztemperatursensor.

4.2.4 Raumluftqualität

Zur Überprüfung der Raumluftqualität werden in den sechs genauer untersuchten Wohnungen wieder in jeweils Wohn- und Schlafzimmer die Luftfeuchtigkeit und die CO₂-Konzentration gemessen.



Abbildung 68: Eingesetzte Sensoren für die Luftqualitätsmessung: Relative Feuchte (oben) und CO₂-Konzentration (unten).

4.2.4.1 Luftfeuchtigkeit

Die relative Luftfeuchtigkeit der Raumluft wird in den 12 Zimmern mit Sensoren der Firma Galltec vom Typ „Hygro-Temp-Sensor WL3/5“ gemessen. Die Geräte arbeiten mit kapazitiven Feuchtesensoren. Kapazitive Sensoren beinhalten eine feuchte-



empfindliche Polymerschicht, welche sich zwischen zwei Metallelektroden befindet. Durch die Änderung der Dielektrizitätskonstante bei veränderten Luftfeuchtegehalten ändert sich die Kapazität dieses Dünnschichtkondensators. Das Messsignal ist direkt proportional zur relativen Feuchte und unabhängig vom Umgebungsdruck.

Der Hersteller gibt die Genauigkeit der Sensoren mit $\pm 3\%$ bei 23 °C im Bereich von 40 bis 60 % an. Im restlichen Arbeitsbereich wird sie mit $\pm 5\%$ angegeben.

4.2.4.2 CO₂-Konzentration

Zur Messung der CO₂-Konzentrationen wurden Sensoren der Fa. Dittrich (Gasmesssystem MF420-IR-LC) mit einem Messbereich von 0 bis 3000 ppm eingesetzt. Dabei handelt es sich um einen „Zweistrahl-Infrarotsensor“ mit Messküvette mit linearem Ausgangssystem und 24 Volt Versorgungsspannung. Die Genauigkeit wird mit $\pm 2\%$ (entspricht $\pm 60\text{ ppm}$) angegeben.

Im Hersteller-Datenblatt zu dem Sensoren wird angegeben: „In normalen Anwendungen ist eine Kalibrierung nicht notwendig, sie kann jedoch bei Bedarf durch den Fachmann erfolgen“.



Abbildung 69: Eingesetzte CO₂-Sensoren (Foto: Hersteller).

Die Sensoren wurden am 16.02.2005 (vor Einbau) und am 26.09.2007 im PHI kalibriert. Bei der Untersuchung der 12 Sensoren zeigte sich, dass nur zwei von zwölf Sensoren, die vom Hersteller angegebene Genauigkeit einhalten. Bei der Kalibrierung der 12 Sensoren wurden bei der Prüfgas-Konzentration von 1515 ppm maximale Abweichungen von minus 390 und plus 450 ppm festgestellt.

Die Kalibrierung der 12 Sensoren wurde jeweils mit zwei Prüfgasen (Sollwerte 0 ppm und 1500 ppm CO₂) in einem Kalibriergehäuse durchgeführt. Für jeden Sensor wurde während der mehrstündigen Messung jeweils ein Kalibrierwert (lineare Abweichung und Offset) bestimmt. Diese wurden für die Auswertung verwendet um aus den Rohmesswerten einen korrigierten Messwert zu bestimmen.

Die Dauermessungen zeigten dann, dass die Drift der Sensoren unterschiedlich groß war. Eine dritte Kalibrierung wurde am 18.06.2008 durchgeführt und gab Aufschluss über das Langzeitverhalten der Geräte.

Üblicherweise werden solche Sensoren - wie der Hersteller ausdrücklich empfiehlt - unkalibriert montiert und dann jahrelang verwendet. Die hohen absoluten

Abweichungen vom Realwert und die z.T. sehr hohe Drift zeigen, dass sich diese CO₂-Sensoren nicht für Regelungsanwendungen in der Lüftungstechnik eignen.

Durch die drei Kalibrierungen (vor, innerhalb und nach dem Untersuchungszeitraum) konnte die Datenqualität deutlich verbessert und die zeitliche Drift herausgerechnet werden.

4.2.4.3 Fensterkontakte

Zur Überwachung der Fensteröffnungsvorgänge im Gebäudeteil NEH wurden Fensterkontakte MVS-B der Fa. Roto, passend zu dem eingesetzten Fenstersystem, eingesetzt. Diese zeigen ein Öffnen des Fensters (Kipp- oder Drehöffnung) mit Hilfe eines Reedkontaktes an.

Da die Datenerfassungsperiode des zentralen Messsystems (10 min) nur eine wenig befriedigende zeitliche Auflösung des Signals ermöglicht hätte, wurde jeweils ein Zähler zwischengeschaltet, der in jeder Erfassungsperiode einen der tatsächlichen Fenster-Öffnungszeit proportionalen Anstieg von Zähleinheiten ausgibt.



Abbildung 70: Kontaktelement im Blendrahmen zur Erfassung der Fensteröffnungsvorgänge. Betätigung durch Magneten am Beschlag des Flügelrahmens.

Die Betätigungsmagnete für den Reedkontakt werden in einer Öffnung des Flügelrahmenbeschlages für die Verriegelung eingesetzt. Hier zeigten sich anfänglich konstruktive Schwächen des Systems, indem die Magnete aus ihrer Halterung fielen und damit das Messsignal ausfiel. Diese Schwäche konnte im Verlauf der Messung durch das PHI verbessert werden.



4.3 Tabellarische Übersicht der Messgeräte

Tabelle 10: Zusammenstellung der Messgeräte mit Angaben zu Messzweck und –ort, Hersteller und Messgenauigkeit.

Messgröße	Messort	Einheit	Spezifikation	Hersteller	Messgenauigkeit
Messungen in den Wohnungen					
Raumtemperatur	Zimmer der Wohnungen 1 bis 24	C°	PT 100, Unterputzdose	Fa. DENEG	Pt 100 DIN Klasse 1/10 B
Fensterstellung	3 Wohnungen im NEH	Sek. offen	MVS-B Fensterkontakt / Reetkontakt	Fa. Roto	VdS-Klasse B
CO ₂ -Konzentration	6 Wohnungen	ppm CO ₂	MF420IR-LC-CO2-3000	Fa. J. Dittrich	± 2% entspricht ± 60ppm
Feuchte, Lufttemperatur	6 Wohnungen	% / C°	Hygro-Temp-Sensor KWL3/5	Fa. Galltec	± 3% r.F. ± 1C°
WMZ Heizungswärme	Heizung 24 Wohnungen und beide Heizkreise	kWh	Sharky Heat 770	Fa. HYDRO-METER	Klasse C
WMZ Warmwasser	Warmwasserladung, Entnahme und Zirkulation	kWh	Sharky Heat 770	Fa. HYDRO-METER	Klasse C
Wassermenge Warmwasser	Warmwasserleitung Trinkwasser, Wohnungen 1 bis 24	m ³	Sharky Heat 770	Fa. HYDRO-METER	Klasse C
Wassermenge Kaltwasser	Wasserleitung Wohnungen 1 bis 24	m ³	MK M-Bus S / Scampy 742	Techem (Herst. Hydrometer)	Klasse B

5 Messdatenauswertung

In diesem Abschnitt werden die Messdaten bezüglich der Fragestellungen des Projektes ausgewertet. Die Daten wurden im Zeitraum von April/Mai 2006 bis Ende April 2008, also über einen Zeitraum von 24/25 Monaten, aufgezeichnet. Die Daten wurden in 10 Minuten Auflösung gemessen und aufgezeichnet. Die jeweiligen Besonderheiten und abweichenden Datenverfügbarkeiten werden in den betreffenden Abschnitten angegeben.

Für die Untersuchung werden zwei Jahreszeiträume als Bilanzzeiträume gewählt.

Tabelle 11: Verwendete Zeiträume der beiden Bilanzjahre.

Jahr	Zeitraum
Bilanzjahr 1	01. Mai 2006 bis 30. April 2007
Bilanzjahr 2	01. Mai 2007 bis 30. April 2008

Jedes Bilanzjahr teilt sich auf in einen Sommer-, Winter und Kernwinterzeitraum.

Tabelle 12: Aufteilung eines Bilanzjahres in Teilzeiträume.

Sommer	01. Mai bis 30. September
Winter	01. Oktober bis 30. April
Kernwinter	01. November bis 28./29. Februar

Im folgenden Abschnitt werden die Wetterdaten des Messzeitraumes dargestellt und untersucht. Es zeigt sich, dass der Zeitraum des zweiten Bilanzjahres kälter und damit näher am langjährigen Standardklima, liegt als das erste Bilanzjahr. Für die genauere Auswertung wird daher der zweite Zeitraum verwendet.



5.1 Wetterdaten

Die Messdaten der Außenlufttemperatur und Außenfeuchte wurden mit stand-alone Datenloggern in 15 Minuten Auflösung gemessen und abgespeichert. Die Logger waren auf der Nordfassade des Gebäudes im 2. Obergeschoss unter dem Dachüberstand im 2. OG montiert. So konnte direkte Sonnenbestrahlung ausgeschlossen werden.

Wettermessdaten zur horizontalen Globalstrahlung, zur Windstärke sowie Windrichtung wurden ergänzt durch Messdaten der Station „Ludwigshafen-Mundenheim“ vom Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (Zentrales Immissionsmessnetz „Zimen“). Die Messstation befindet sich nur etwa 530 m von den Gebäuden entfernt.

Eine Übersicht über die tagesmittleren Außenlufttemperaturen während der Gesamtzeit der Untersuchung zeigt Abbildung 71, die der relativen Außenfeuchte Abbildung 72.

Die tagesmittleren Außentemperaturen im Untersuchungszeitraum liegen zwischen +30,0 und -4,6 °C, die relative Feuchten zwischen 33,4 und 100%.

Werden die stundenmittleren Temperaturen untersucht ergeben sich die folgenden Minima und Maxima:

Tabelle 13: Minimal und maximale stundenmittlere Außenlufttemperaturen und relative Außenluftfeuchten in den beiden Bilanzjahren.

Stundenwert	Außentemperatur [°C]		Relative Feuchte [%]	
	Minima	Maxima	Minima	Maxima
Bilanzjahr 1: Mai 06 bis April 07	- 6,0	36,6	16,5	100
Bilanzjahr 2: Mai 07 bis April 08	- 6,9	36,8	14,1	100



Abbildung 71: Tagesmittlere Außenlufttemperatur vom 21.04.2006 bis zum 01.05.2008.

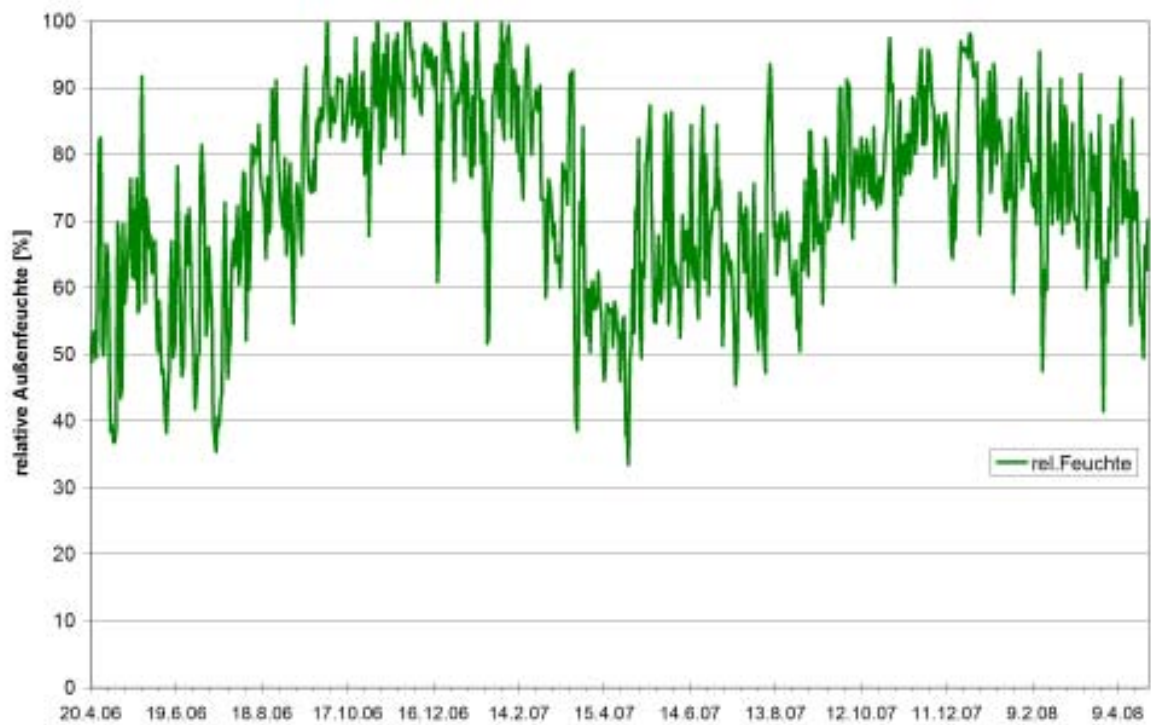


Abbildung 72: Tagesmittlere relative Außenluftfeuchte vom 21.04.2006 bis zum 01.05.2008.

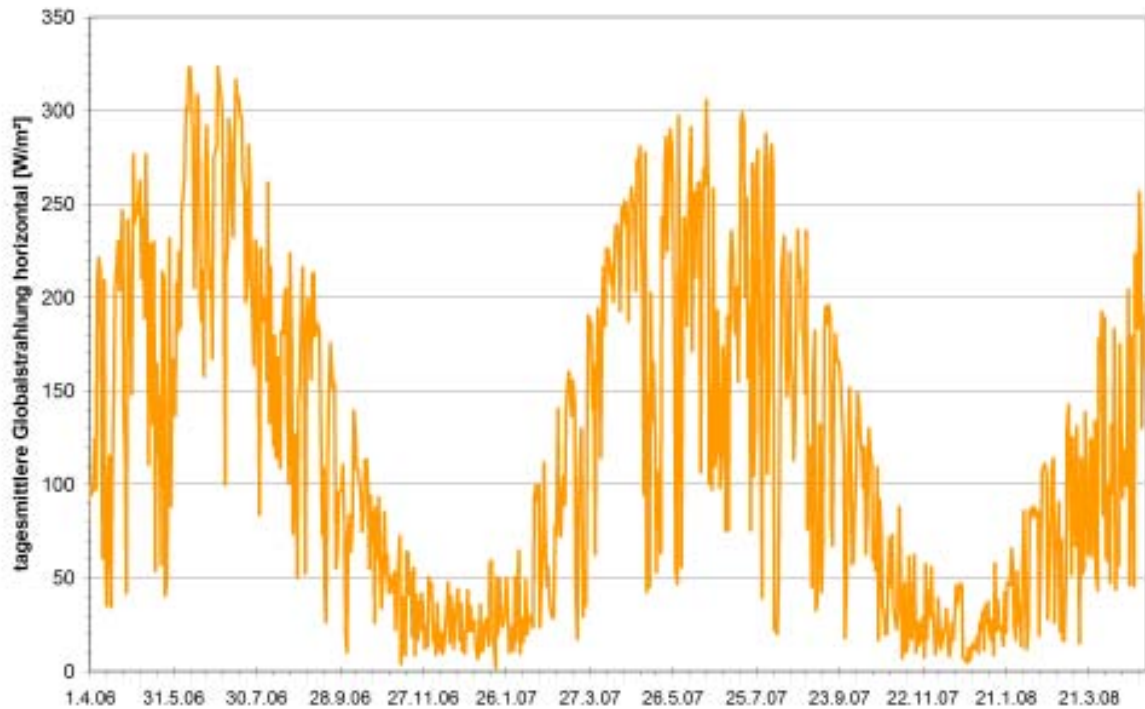


Abbildung 73: Tagesmittlere horizontale Globalstrahlung vom 01.04.2006 bis zum 01.05.2008 (Datenquelle: [Zimen]).

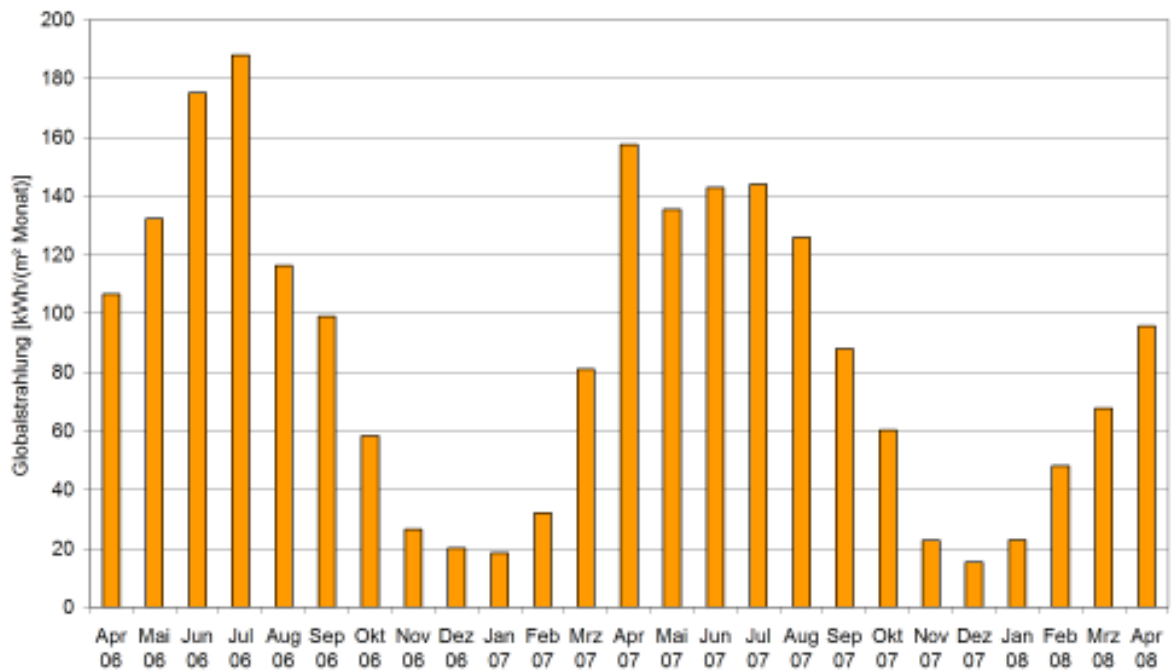


Abbildung 74: Monatssummen der horizontalen Globalstrahlung von April 2006 bis April 2008 (Datenquelle: [Zimen]).

An den Daten der Globalstrahlung ist zu erkennen, dass im Sommer 2007 höhere Einstrahlung verzeichnet wurden, als im Folgesommer 2008. Die Summe der Global-

strahlung in den Monaten Mai bis September betrug 2007 711 kWh/m², in den Sommermonaten des nächsten Jahres waren es 637 kWh/m².

Für die beiden untersuchten Heizperioden 2006/07 und 2007/08 (jeweils 01. Oktober bis 30. April) sowie die beiden vollständigen Bilanzjahre 01. Mai 2006 bis 30. April 2007 und 01. Mai 2007 bis 30. April 2008 werden in Tabelle 14 die Außentemperatur-Mittelwerte und die Globalstrahlungssummen aufgelistet und mit den Standarddaten nach DIN 4108 Teil 6 verglichen.

Tabelle 14: Wetterdaten der Außenlufttemperatur (Mittelwerte) und der Summen der horizontalen Strahlung in den unterschiedlichen Zeiträumen innerhalb der Messzeit und zum Vergleich die Standardwerte aus der Norm DIN 4108-T6 für den Standort Mannheim.

	Außentemperatur (Mittelwerte) [°C]	Horizontale Strahlung (Summen) [kWh/m ²]
Heizperiode 2006/07	9,7	394
Heizperiode 2007/08	6,8	333
Bilanzjahr 1: Mai 06 bis April 07	14,1	1105
Bilanzjahr 2: Mai 07 bis April 08	11,8	969
Heizperiode Standard (DIN 4108-T6, Mannheim)	5,3	355
Standardjahr (DIN 4108-T6, Mannheim)	10,2	1046

Die gemessenen mittleren Außentemperaturen in den Heizperioden sind beide höher als die des Standardjahres aus der DIN 4108-T6. Dabei ist die Heizperiode 2007/2008 noch deutlich näher am Standardwert als die des Vorjahres. Bei der Globalstrahlung verhält es sich anders: Die Summe der Standard-Heizperiode liegt zwischen den beiden gemessenen Heizperioden.

Der Vergleich der **monatlichen** Messdaten der beiden Bilanzjahre mit dem Standardwetter aus der DIN 4108-T6 zeigt deutlich, dass es sich um wärmere Messjahre handelt (Abbildung 75). Nur in zwei Sommermonaten ist die mittlere Temperatur jeweils eines Messjahres niedriger als die des Standardwetters.

Bei den horizontalen Globalstrahlungswerten (Abbildung 76) verhält es sich etwas anders: In sieben Monaten liegt die Monatssumme der Globalstrahlung des Standards zwischen den Messdaten der beiden Bilanzjahreswerte. Die Strahlungssummen des ersten Bilanzjahres sind im April und Juli auffällig hoch.

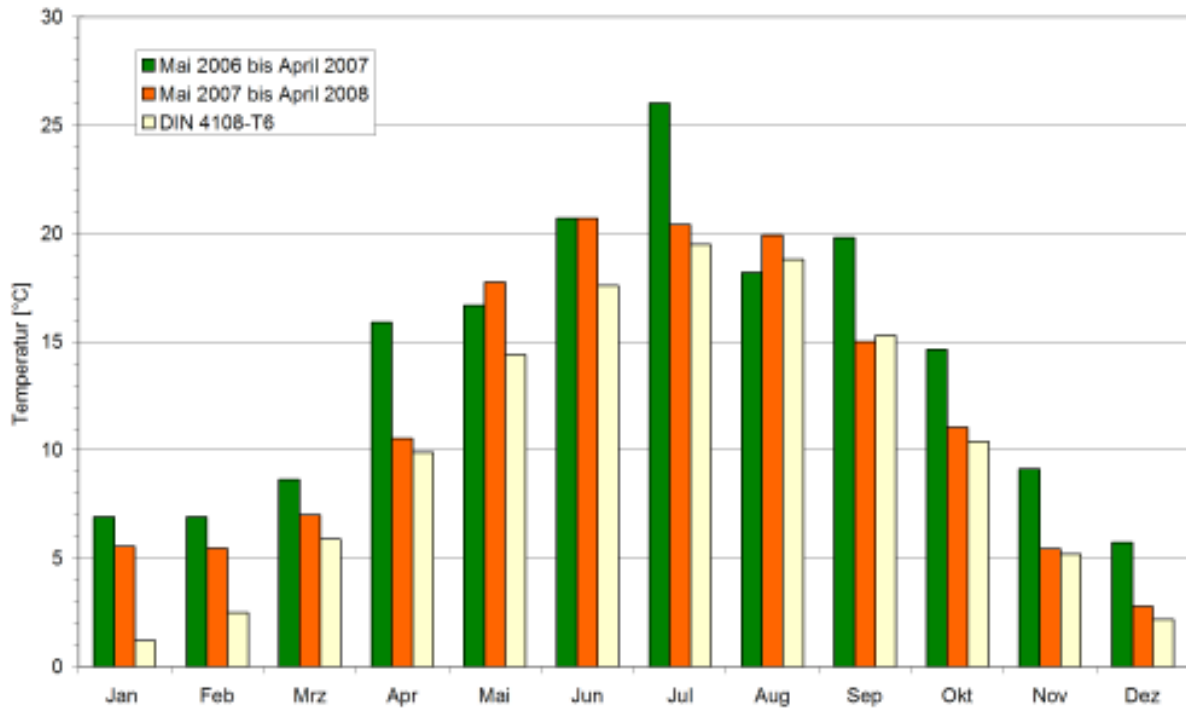


Abbildung 75: Vergleich der gemessenen Außentemperaturdaten in den beiden Bilanzjahren im Vergleich mit den Standardtemperaturen aus DIN 4108-T6 für den Standort Mannheim (Datenquelle Messwerte: [Zimen]).

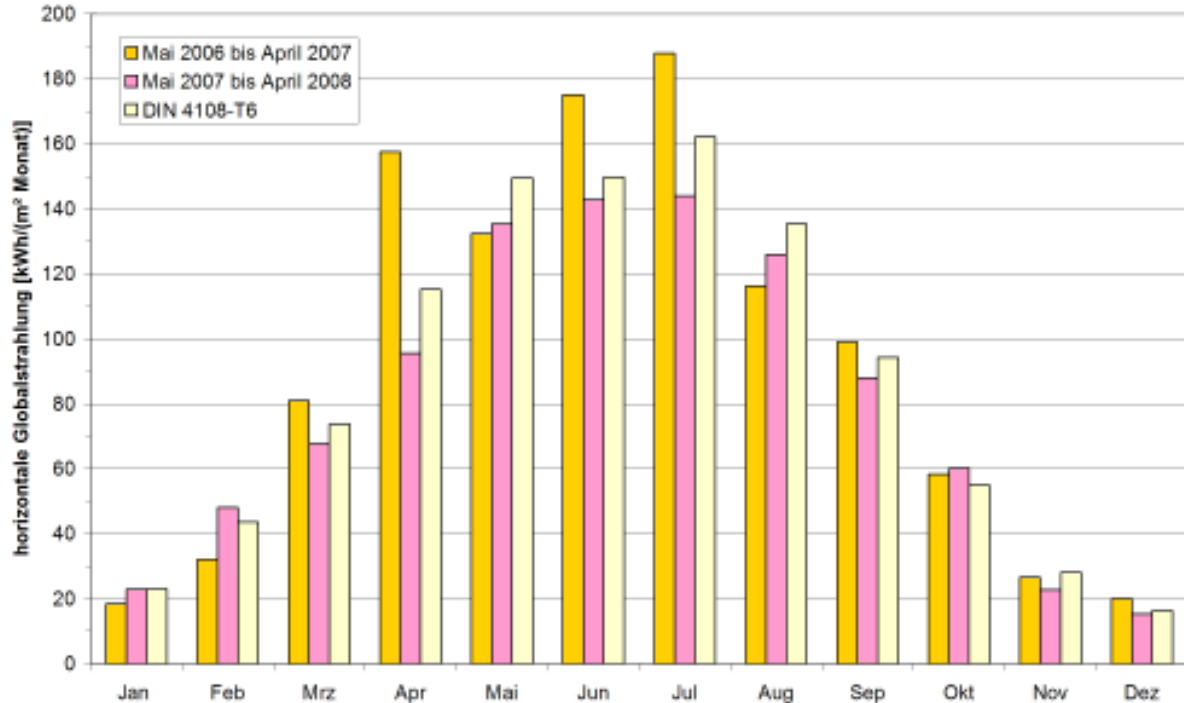


Abbildung 76: Vergleich der gemessenen horizontalen Globalstrahlung in den beiden Bilanzjahren im Vergleich mit den Standardtemperaturen aus DIN 4108-T6 für den Standort Mannheim (Datenquelle Messwerte: [Zimen]).

5.2 Raumlufttemperaturen und -qualitäten

In diesem Abschnitt werden Untersuchungen der winterlichen und sommerlichen Raumlufttemperaturen in den 24 Wohnungen vorgestellt. Zur Beurteilung der Raumluftqualität und den Auswirkungen der unterschiedlichen Lüftungsstrategien dient die Analyse der relativen Luftfeuchtigkeit und der Konzentrationen des Leitgases CO₂. Im Normalfall wird für diese Untersuchungen mit Tages- und Stundenmittelwerten gearbeitet.

5.2.1 Raumtemperaturen

Während der gesamten Messzeit wurden die Raumtemperaturen in allen 24 Wohnungen gemessen. In 18 Wohnungen wurden die Temperaturen in den Wohnzimmern (Kernzone der Wohnung) gemessen. In den genauer untersuchten zweimal drei Wohnungen wurden jeweils zwei Räume (Schlaf- und Wohnzimmer) gemessen. So ergeben sich insgesamt 30 Temperaturmessstellen in den beiden Gebäuden.

Eine Übersicht über die tagesmittleren Temperaturverläufe im Gesamtzeitraum in allen Wohnungen ergänzt mit dem Außentemperaturverlauf zeigt Abbildung 77. Es ist gut zu erkennen, dass sich das Temperaturfeld der Wohnungen im Winter im Gegensatz zum Sommer deutlich aufspreizt: Im Winter wählt der Nutzer selber die von ihm gewünschte Temperaturhöhe aus, was zu der größeren Bandbreite führt. Im Sommer kann der Nutzer dies in der Hauptsache „nur“ durch passive Maßnahmen, wie den Einsatz der Außenverschattung, beeinflussen. Die höheren Sommertemperaturen im Sommer 2006 im Vergleich zum Folgesommer haben ihre Ursache vermutlich in den noch nicht voll funktionsfähigen bzw. noch nicht richtig eingesetzten Außenverschattungen.

Die maximale tagesmittlere Raumtemperatur während der Messzeit betrug 30,5, die minimale 16,0 °C. Es ist zu erkennen, dass zwei Messstellen im ersten Winter (2006/2007) fast dauerhaft sehr niedrige Temperaturen aufweisen. Beide Wohnungen weisen im folgenden Winter deutlich höhere Temperaturen um 20 °C auf. Zwei weitere Raumtemperaturen sind in der Zeit von ca. 20.12.2006 bis 30.01.2007 deutlich abgefallen. Dabei handelt es sich um eine Wohnung mit zwei Temperaturmessstellen. In allen diesen Wohnungen wurde in diesen „kühleren“ Zeiträumen entsprechend wenig geheizt.

Im zweiten Winter 2007/2008 ist das Temperaturband in den Wohnungen noch breiter. Die Zeiten, in denen einzelne Wohnungen deutlich aus diesem Temperaturband nach unten abweichen, sind geringer.

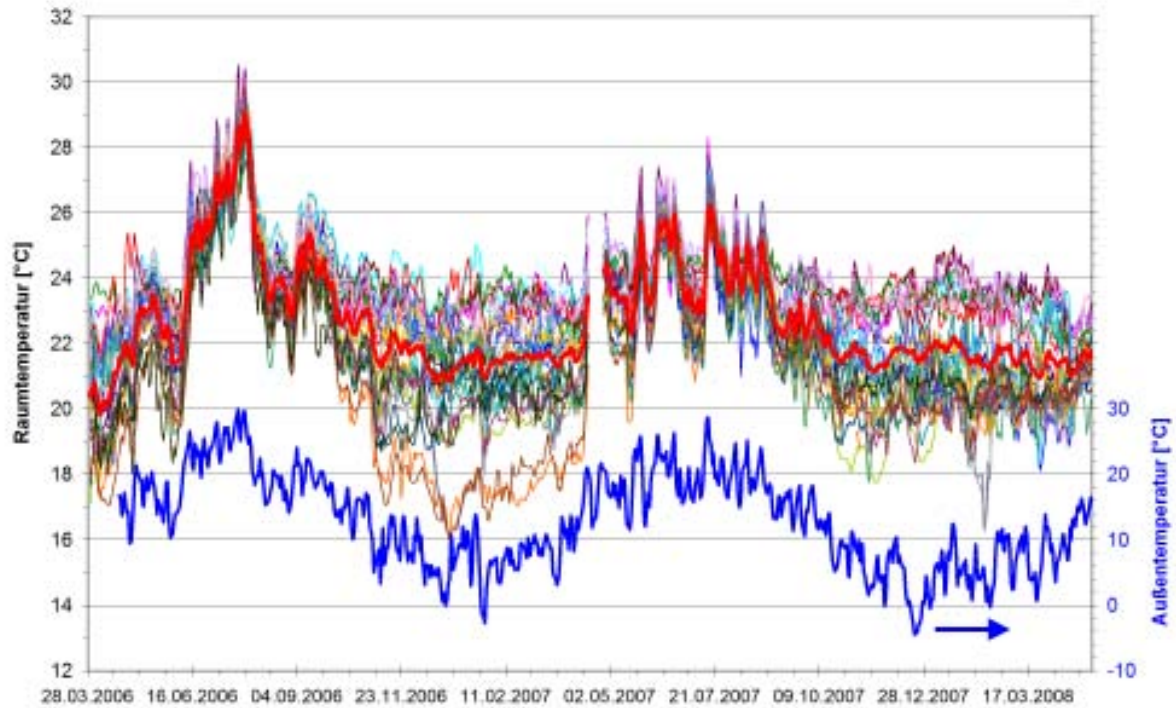


Abbildung 77: Tagesmittlere Raumtemperaturverläufe und die Außentemperatur während der gesamten Messzeit. Die dicke rote Line stellt den flächengewichteten Temperaturmittelwert dar.

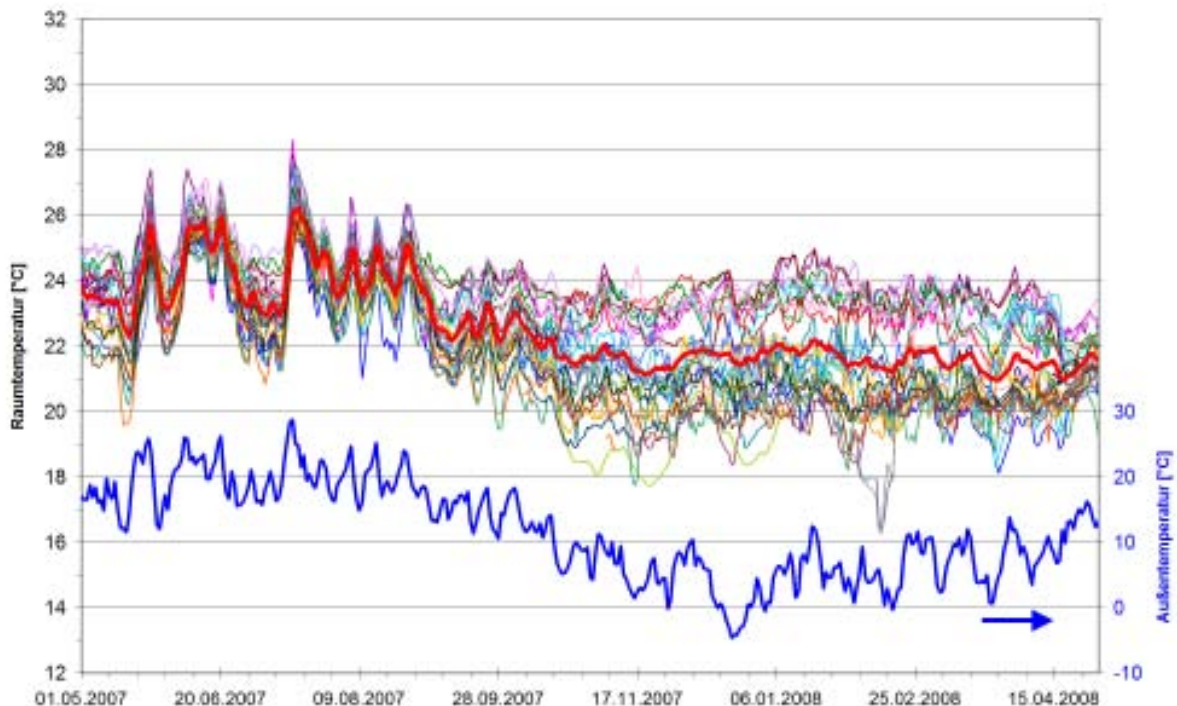


Abbildung 78: Tagesmittlere Raumtemperaturverläufe und die Außentemperatur im zweiten Jahresbilanzzeitraum. Die dicke rote Line stellt den flächengewichteten Temperaturmittelwert dar.

Als Detail aus Abbildung 77 ist in Abbildung 78 nur das näher untersuchte zweite Bilanzjahr vom 01. Mai 2007 bis zum 30. April 2008 dargestellt. Auch hier ist die

Unterscheidung der Sommer- und Winterzeiträume augenfällig. Die mittlere Temperatur in den Wohnungen übersteigt 26°C kaum, im Winter werden 21°C im Mittel nie unterschritten. Die mittlere Raumtemperatur im Winter (01. Oktober 2007 bis 30. April 2008) beträgt $21,7^{\circ}\text{C}$, die im Kernwinter (November bis Februar) liegt mit ebenfalls $21,7^{\circ}\text{C}$ gleichauf.

Betrachtet man in Abbildung 79 nur den Winterzeitraum vom zweiten Bilanzjahr, ist die Ausdehnung des Temperaturbandes noch besser zu erkennen. Das Kernfeld des Bandes spreizt sich über mehr als $4,5\text{ K}$.

Die wenigen Wohnungen mit zeitweise niedrigeren Raumtemperaturen sind noch besser zu erkennen. In der Analyse zeigt sich eine deutliche Korrelation mit den Heizwärmeverbräuchen: Bei allen Wohnungen mit den zeitweise niedrigeren Temperaturen wurden in den entsprechenden Zeiträumen wenig oder gar nicht geheizt. Weitere Untersuchungen zu den Heizwärmeverbräuchen folgen im Abschnitt 5.4.3.2.

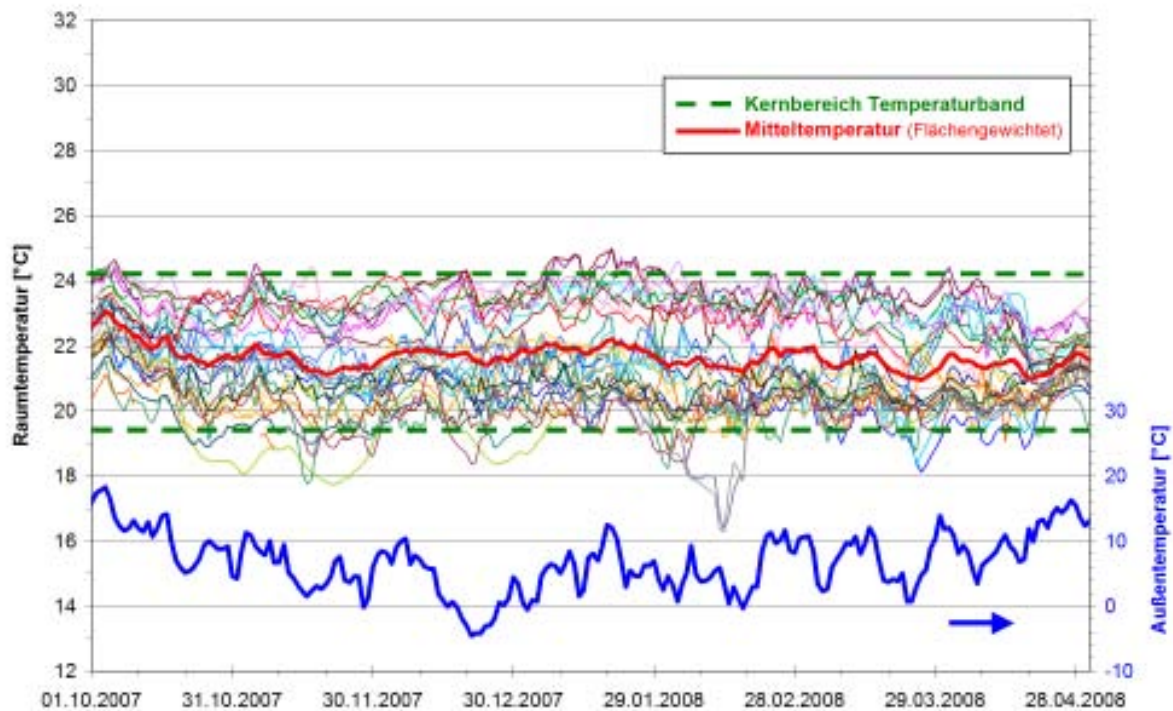


Abbildung 79: Tagesmittlere Raumtemperaturverläufe und der Außentemperaturverlauf im Winter 2007/2008.

Zur Beurteilung des Nutzereinflusses ist die mittlere Temperatur der Gebäude eine wesentliche Bestimmungsgröße. Dazu werden die flächengewichteten Mittelwerte aller 24 Wohnungen (30 Messstellen) in den entsprechenden Sommer- und Winterzeiträumen berechnet. Die Mittelwerte sind in Tabelle 15 dargestellt. Zum Vergleich sind auch die Daten aus dem ersten Bilanzjahr aufgeführt.


Tabelle 15: Flächengewichtete Raumtemperaturmittelwerte der 24 Wohnungen.

Sommer 2006	01.05.2006 bis 30.09.2006	24,5 °C
Winter 2006/2007	01.10.2006 bis 30.04.2007	21,8 °C
Kernwinter 2006/2007	01.11.2006 bis 29.02.2007	21,5 °C
Sommer 2007	01.05.2007 bis 30.09.2007	23,9 °C
Winter 2007/2008	01.10.2007 bis 30.04.2008	21,7 °C
Kernwinter 2007/2008	01.11.2007 bis 29.02.2008	21,7 °C

Die Temperaturmittelwerte aller einzelnen Wohnungen (bzw. der 30 Messstellen) für das zweite Bilanzjahr sind in Abbildung 80 dargestellt. In einer Wohnung (Bezeichnung „AC“) sind die Daten der Temperaturmessung im zweiten Bilanzjahr nicht nutzbar, daher fehlen diese im Diagramm. Es ist auffällig, dass im Bezug auf die Wintertemperaturen 13 Messstellen unter dem Durchschnitt und 11 deutlich darüber liegen, aber nur 5 in der Nähe des Mittelwertes. Es gibt also zwei hauptsächliche winterliche Temperaturniveaus der unterschiedlichen Wohnungen. Dieser Umstand soll im Folgenden näher untersucht werden.

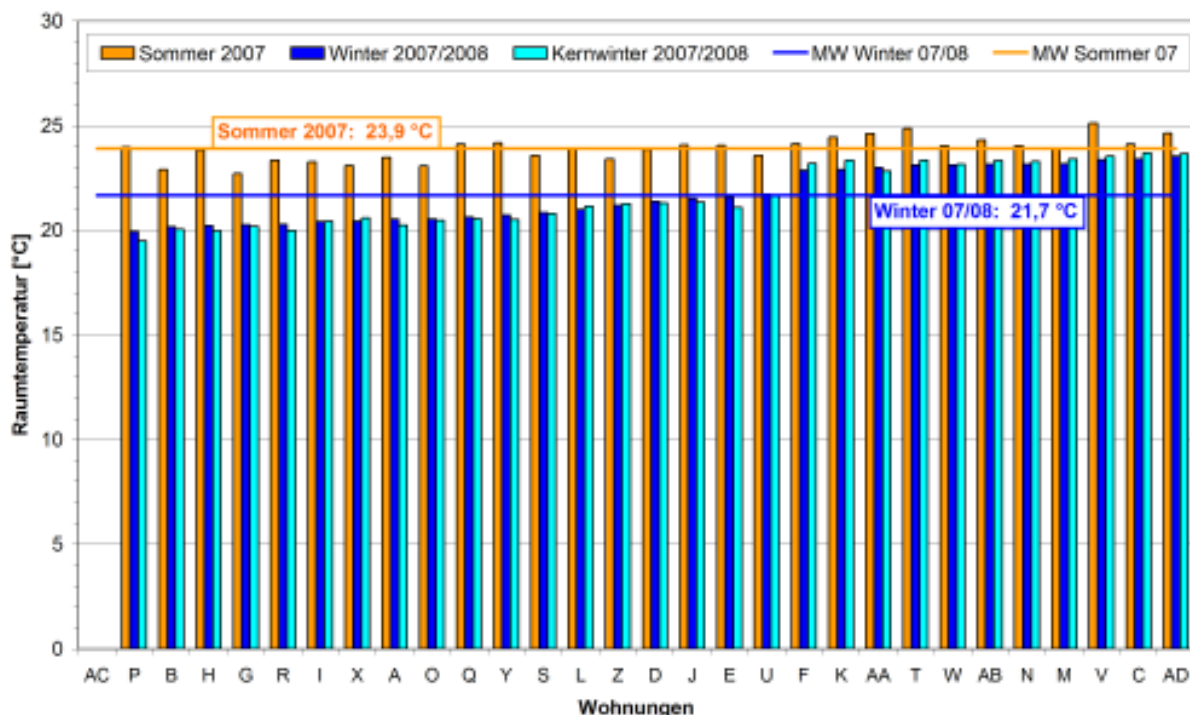


Abbildung 80: Mittlere Raumtemperaturen in den 24 Wohnungen (30 Messstellen) im Sommer (01.05.2007 bis 30.09.2007), Winter (01.10.2007 bis 30.04.2008) und im Kernwinter (01.11.2007 bis 29.02.2008) und flächengewichtete Gesamtmittelwerte. Die Daten sind aufsteigend nach den Wintertemperaturen dargestellt.

5.2.1.1 Raumtemperaturen nach Gebäudestandards

Zur Analyse der oben festgestellten unterschiedlichen Temperaturniveaus der Wohnungen werden die gemessenen Temperaturen je Gebäude PHiB/NEH flächengewichtet zusammengefasst. Dabei zeigt sich, dass es einen sehr deutlichen Unterschied im Temperaturniveau der beiden Gebäudeteile gibt. Im Winter 2007/2008 zeigt Abbildung 81 einen Unterschied zwischen den mittleren Temperaturen von erheblichen etwa 2 K.

Die Ursache der deutlich unterschiedlichen winterlichen Temperaturen ist in der Temperaturwahl der Bewohner begründet. Wie weiter unten bei der Auswertung der Heizwärmeverbräuche und der Heizleistung gezeigt wird, stand mit Sicherheit in beiden Gebäuden dauerhaft ausreichend Heizleistung zur Verfügung. Wir vermuten, dass die Bewohner höhere Temperaturen wählen, wenn diesen Behaglichkeitsanforderungen keine erheblichen Mehrkosten gegenüberstehen. Der Nutzer temperiert dann rein nach Komfortansprüchen.

Die Theorie besagt, dass bei höheren Oberflächentemperaturen der besser wärmegeprägten Außenbauteilen (Fenster, Wände) niedrigere Raumlufthtemperaturen bei gleicher Behaglichkeit ausreichen. Die Ursache dafür ist in der operativen Temperatur begründet, welche sich etwa zur Hälfte aus der Raumlufthtemperatur und zur anderen Hälfte aus der Oberflächentemperatur aller Umfassungsflächen zusammensetzt. Diese Tatsache wird in hochwärmegeprägten Gebäuden allerdings augenscheinlich überlagert von einem höheren Temperaturanspruch der Bewohner, der ja nahezu „kostenneutral“ zu befriedigen ist.

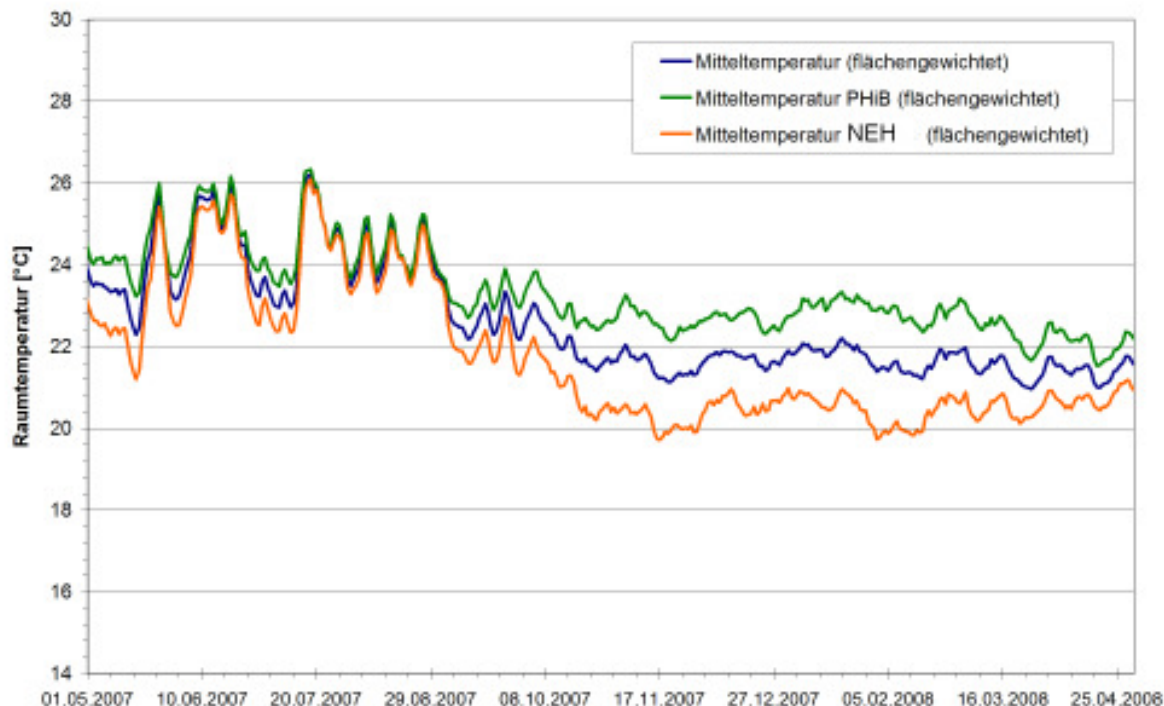


Abbildung 81: Flächengewichtete Raumtemperaturverläufe aller 24 Wohnungen gemeinsam und getrennt nach den beiden energetischen Standards während des zweiten Bilanzjahres.

Die Temperaturmittelwerte der beiden Standards liegen im Winter 07/08 genau 2,1 K auseinander, im Kernwinter sogar 2,4 K (siehe Tabelle 16). Das es sich dabei nicht um eine einmalige Situation handelt, zeigt der Vergleich zum Winter davor: Die Mittelwerte liegen im PHiB 2,4 K höher als im NEH.

Die mittlere Raumtemperatur von **22,7 °C** ist im Vergleich zu anderen untersuchten Passivhäusern relativ hoch. Bisher wurden Messwerte von 21,1 bis 21,6 °C vorgefunden ([Peper 2001], [Pfluger/Feist 2001], [Peper 2004], [Peper 2005]). In [Ebel 2003] ist bereits ein Vergleich zwischen den Raumtemperaturen in Passivhäusern und Niedrigenergiehäusern (NEH) ermittelt worden. Dort wurden im Winter (Oktober bis März) in den Passivhäusern nur 20,4 °C gemessen in den NEH im Mittel 19,8 °C. Das Niveau liegt damit deutlich niedriger, die Differenz beträgt nur 0,6 K.

Tabelle 16: Flächengewichtete Temperaturmittelwerte getrennt nach den beiden Gebäudestandards in Ergänzung zu Tabelle 15.

		PHiB	NEH	Differenz
Sommer 2006	01.05.2006 bis 30.09.2006	24,9 °C	24,1 °C	0,8 K
Winter 2006/2007	01.10.2006 bis 30.04.2007	23,0 °C	20,6 °C	2,4 K
Kernwinter 2006/2007	01.11.2006 bis 29.02.2007	22,7 °C	20,3 °C	2,4 K
Sommer 2007	01.05.2007 bis 30.09.2007	24,3 °C	23,5 °C	0,8 K
Winter 2007/2008	01.10.2007 bis 30.04.2008	22,7 °C	20,6 °C	2,1 K
Kernwinter 2007/2008	01.11.2007 bis 29.02.2008	22,8 °C	20,4 °C	2,4 K

Auffällig ist, dass die Temperaturen in den Passivhäusern im Kernwinter sogar noch geringfügig - um 0,1 K - höher liegen als im gesamten Winterzeitraum. Bei den NEH Wohnungen ist es im Mittel andersherum: Die Temperatur liegt im Kernwinter 0,2 K niedriger als im Gesamtwinter.

Im Sommer liegen die Temperaturen nicht so weit auseinander. Das PHiB ist im Mittel aber immer wärmer als das NEH. Im Sommer 2007 waren es 0,8 K, genau wie im Sommer davor. Dafür ist die Hauptursache vermutlich, dass die Wohnungen im PHiB bereits mit höheren mittleren Temperaturen vom Winter in den Sommer „gestartet“ sind. Die bessere Dämmung hat hier neben der Verschattung und der Nachtlüftung über die Fenster nur eine untergeordnete Wirkung. Der „Sommerfall“ wird im Abschnitt 5.2.1.4 genauer untersucht.

5.2.1.2 Raumtemperaturen nach Geschoss und Gebäudestandards

Für die Untersuchung der Heizlast in den Gebäuden ist, im entsprechenden Abschnitt, insbesondere das Erdgeschoss mit seinen verbleibenden Wärmebrücken zum unbeheizten Keller hin, von Interesse. Daher werden hier die mittleren Raumtemperaturen in beiden Gebäuden nach Etagen untersucht.

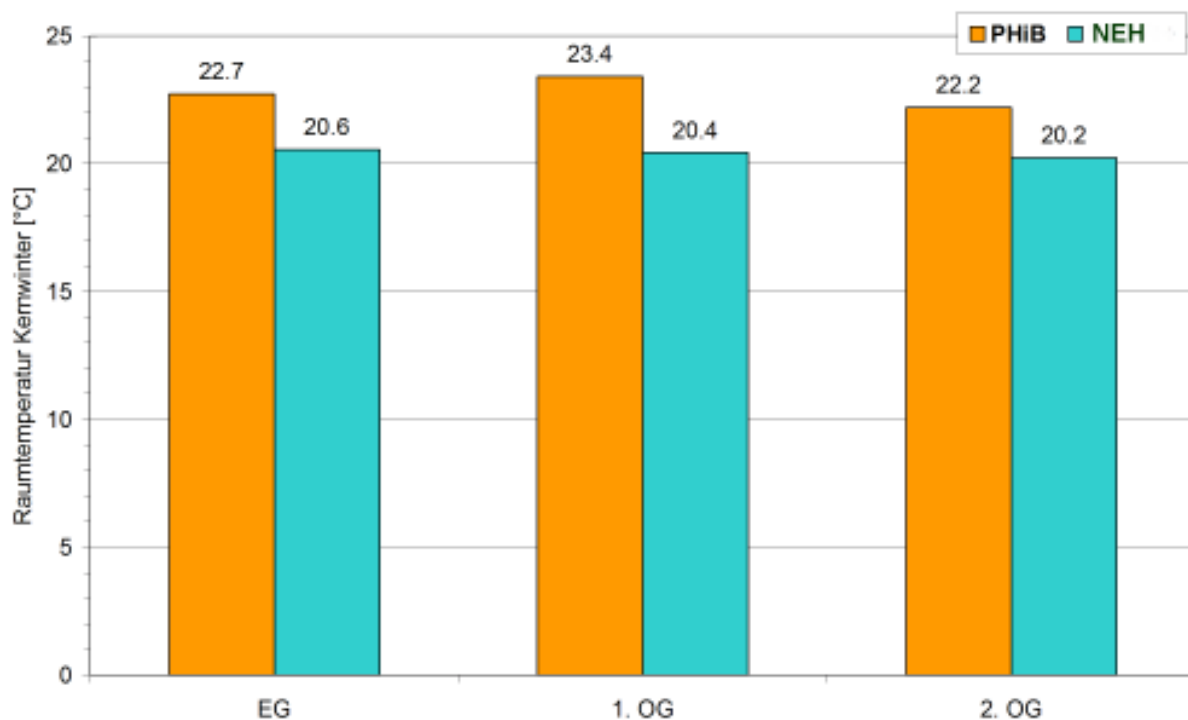


Abbildung 82: Mittlere flächengewichtete Raumtemperaturen im Kernwinter 2007/2008 (01.11.2007 bis 29.02.2008), unterschieden nach Gebäuden und Geschossen.

Es zeigt sich, dass die Temperaturen in den drei Etagen im NEH deutlich einheitlicher sind, als die im PHiB. Im NEH gibt es einen schwachen Trend zu höheren Temperaturen bei den tieferen Etagen (oben „wärmer“, unten „kühler“). Die Unterschiede sind mit 0,2 K Schritten aber sehr gering. Im PHiB ist die wärmste Etage im Kernwinter in der Mitte des Gebäudes (1. OG) und die „kühlste“ mit 22,2 °C im 2. OG, der Unterschied beträgt immerhin 1,2 K. Ganz unten im Gebäude ist es mit



der mittleren Kernwintertemperatur von 22,7 °C um 0,7 K „kühler“ als in der Ebene darüber. Insgesamt betrachtet liegen die Raumtemperaturen im PHiB relativ hoch und die Unterschiede innerhalb eines Gebäudes sind als eher marginal zu bezeichnen.

Betrachtet man in Abbildung 83 die mittleren Kernwintertemperaturen im Einzelnen nach den vier Hauseingängen, verschieben sich die Trends innerhalb der Gebäude etwas. Insbesondere der Unterschied zwischen den Raumtemperaturen in Haus 1 und 3 im 2. OG fällt auf.

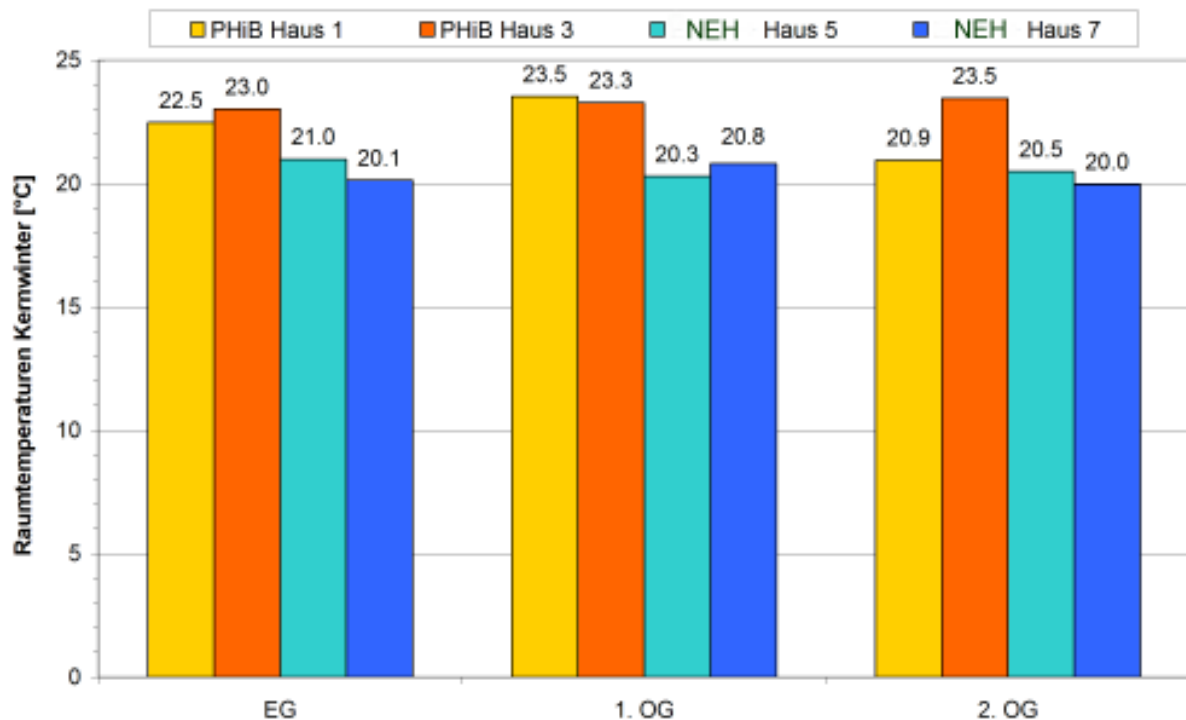


Abbildung 83: Mittlere flächengewichtete Raumtemperaturen im Kernwinter 2007/2008 (01.11.2007 bis 29.02.2008) unterschieden nach den vier Hauseingängen und Geschossen.

Insgesamt kann bei den Betrachtungen der Raumtemperaturen nach Lage der Wohnungen abgeleitet werden, dass die Nutzerwünsche bzw. Einstellungen über die Temperaturhöhe entscheiden und nicht die Lage der Wohnung im Gebäude.

5.2.1.3 Temperaturen nach Raumnutzungsart

In drei Wohnungen des PHiB und in drei des NEH sind jeweils zwei Temperaturmessstellen vorhanden. Sie sind jeweils im Wohnzimmer (Südseite) und im Schlafzimmer (Nordseite) direkt neben der Zimmertür montiert. In diesen sechs Wohnungen werden die Räume auch nach der Raumplanung genutzt.

Bei diesen Wohnungen kann der Unterschied zwischen den Raumtemperaturen innerhalb einer Wohnung untersucht werden. Dazu werden die Temperaturverläufe vom Winter 2007/2008 getrennt nach den beiden Gebäuden dargestellt. Die Wohnungen wurden nur für diese beiden Diagramme durchnummeriert (römisch) und jeweils das Wohn- und Schlafzimmer markiert.

PHiB Temperaturen

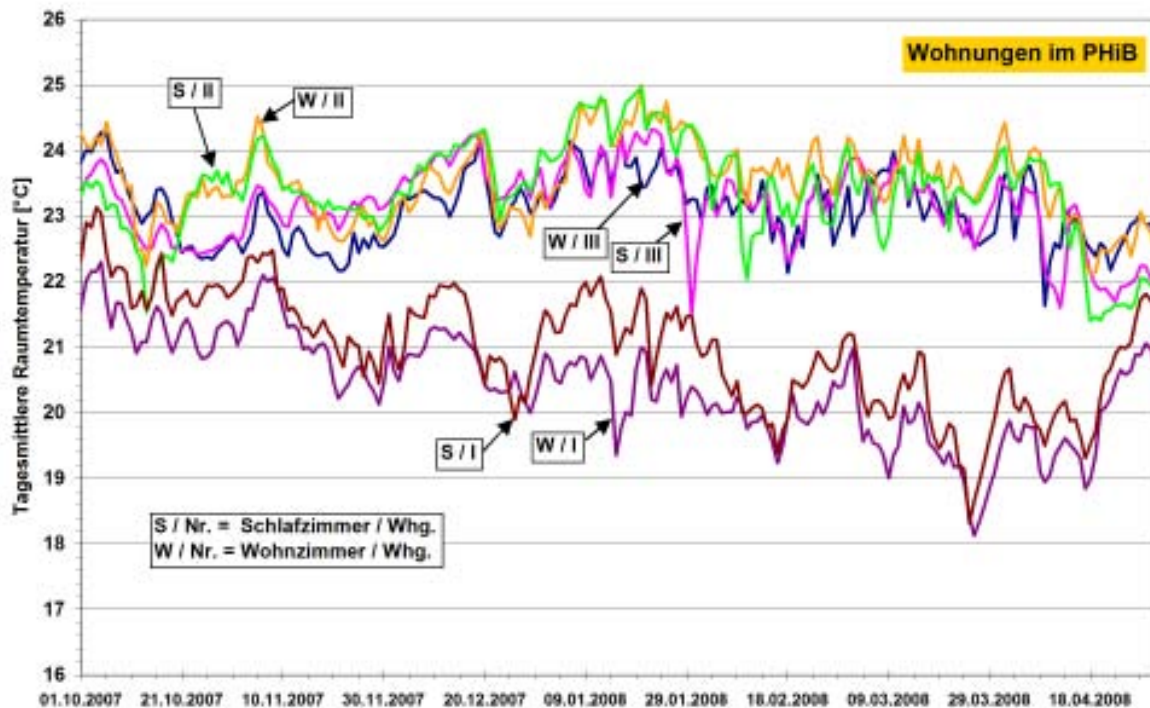


Abbildung 84: Tagesmittlere Raumtemperaturverläufe der drei Wohnungen mit je zwei Temperaturmessstellen im PHiB.

Bei den Temperaturverläufen im PHiB (Abbildung 84) fällt zunächst auf, dass zwei Wohnungen (Whg. II: 23,5 °C und Whg. III: 23,1) ein deutlich höheres Temperaturniveau haben als die dritte (Whg. I: 20,7 °C). In diesen beiden Wohnungen sind die Temperaturen in den beiden untersuchten Räumen im Mittel jeweils nahezu gleich temperiert. Der Unterschied zwischen Schlaf- und Wohnraum beträgt bei beiden nur 0,1 K. Einmal ist das Schlafzimmer um diesen Betrag wärmer, das andere Mal kälter. In Wohnung I ist das Wohnzimmer im Mittel 0,6 K kühler als das Schlafzimmer. Man erkennt an den Verläufen, dass in den Wohnungen nicht durchgehend eines der beiden Zimmer wärmer, bzw. kühler ist; sie wechseln sich ab. In Whg. I überwiegt deutlich sichtbar die etwas höhere Temperatur im Schlafzimmer.

Über die bevorzugten Stellungen der Zimmertüren in diesen Wohnungen ist nichts bekannt. Zu den Bewohnern bestand während der Messungen persönlicher Kontakt. Es wurde von den Mietern nicht geäußert, dass sie mit der Temperaturverteilung unzufrieden seien. Die vermutlich höheren elektrischen Verbräuche im Wohnzimmer (Beleuchtung, Fernseher, Kerzen, o.ä.) und die Südausrichtung der Wohnzimmer führen im Tagesmittel damit nicht zu höheren bzw. nennenswert höheren Raumtemperaturen. Da augenscheinlich nicht durch Fensterlüftungen eingegriffen wird, kann nicht von dem Bedürfnis ausgegangen werden, diese Temperaturdifferenzierung aktiv zu verändern.

Aus anderen Untersuchungen [Peper 2002] zu dieser Fragestellung in Passivhäusern ist bekannt, dass in Einzelfällen die Schlafzimmertemperatur durch Fensterlüftung um mehrere Kelvin abgesenkt wurden (vgl. auch [AkkP-25]). Dieses Ver-



halten konnte hier nicht festgestellt werden. Der in der sozialwissenschaftlichen Untersuchung eines Passivhauses in Kassel [Hermelink 2004] geäußerte Wunsch der Mieter nach niedrigeren Schlafzimmertemperaturen schlägt nicht signifikant auf die Zufriedenheit der Nutzer mit der Temperatur in ihrem Schlafzimmer durch. In [Danner 2001] wurde bereits gezeigt, dass sich die Bewohner in Passivhäusern an die auch im Winter höheren Schlafzimmertemperaturen mit der Zeit gewöhnen.

Temperaturen NEH

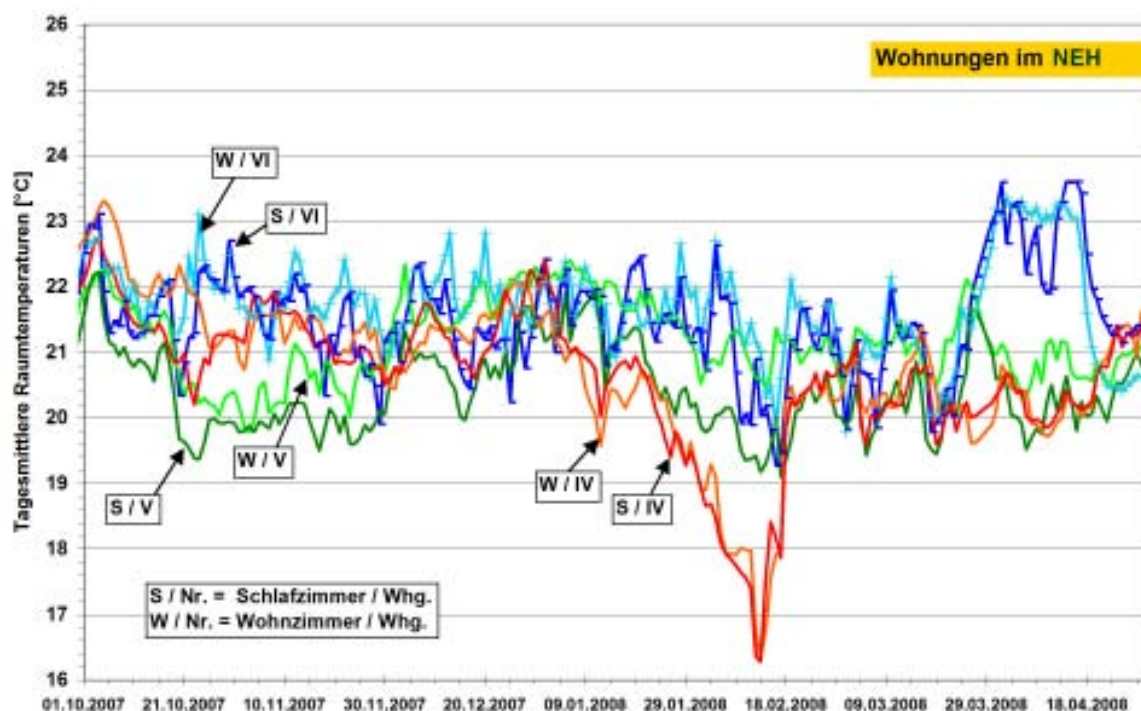


Abbildung 85: Tagesmittlere Raumtemperaturverläufe der drei Wohnungen mit je zwei Temperaturmessstellen im NEH.

Die Temperaturverläufe der drei Wohnungen im NEH (Abbildung 85) liegen – bis auf wenige Ausreißer – näher zusammen als die im PHiB. Sie betragen im Mittel des dargestellten Zeitraumes in Whg. IV 20,7 °C, in Whg. V 20,8 °C und in Whg. VI 21,6 °C. Der Mittelwert von Whg. IV liegt durch die Absenkung Ende Januar bis Mitte Februar 2008 niedriger. In diesem Zeitraum wurde die Heizung abgestellt (vermutlich wegen Abwesenheitszeit). In Whg. VI ist es gerade anders herum: hier wurden im Zeitraum Ende März bis Mitte April 2008 augenscheinlich höhere Raumtemperaturen gewünscht und realisiert.

Im NEH sind im Mittel des untersuchten Winters 2007/2008 in den drei Wohnungen die Wohnzimmer etwas wärmer als die Schlafzimmer. Allerdings betragen die Unterschiede hier auch nur 0,1 K (Whg. IV), 0,2 K (Whg. VI) und 0,8 K (Whg. V). Hier kann nicht von deutlich kühleren Schlafzimmern gesprochen werden. Nur in Whg. V ist während überwiegenden Zeiten eine Tendenz erkennbar. Durch die

raumweise Regelbarkeit der Temperatur mittels handelsüblicher Heizkörper im NEH wurde eine größere Temperaturdifferenz erwartet. Häufig wird in Bezug auf hochwärmegeämmte Gebäude mit nur einem Nachheizregister der Wunsch bzw. die Frage nach dem „kalten Schlafzimmer“ artikuliert. Zumindest an diesen drei Wohnungen zeigt sich, dass in dem Nicht-Passivhaus, in dem diese „Anforderung“ erfüllt wird, die Möglichkeit der individuellen Temperaturregelung nicht wahrgenommen wird.

5.2.1.4 Sommertemperaturen

Zur Untersuchung der sommerlichen Raumtemperaturen werden die Stundenmittelwerte der Messung herangezogen. Es gilt zu überprüfen, ob es zu sommerlichen Überhitzungen gekommen ist.

Zur Beurteilung der Sommertemperaturen wird die Anzahl der sogenannten „Überhitzungsstunden“ untersucht. In der [DIN 4108-T2] ist der Grenzwert für die sommerlichen Innentemperaturen nach Sommer-Klimaregionen festgelegt. Ludwigshafen zählt zur wärmsten Klimaregion („sommerheiß“), was bedeutet, dass maximal 10 % der Jahresnutzungsstunden über dem Grenzwert der Innentemperatur von 27 °C liegen sollten. In der „gemäßigten“ Sommer-Klimaregion wären es 26, in der „sommerkühlen“ 25 °C.

Werden die mittleren Stundentemperaturen eines gesamten Jahres und von jeder Messstelle absteigend sortiert, so kann die Anzahl der Überhitzungsstunden abgelesen werden. In Abbildung 86 ist der obere Teil (1000 Stunden) der sortierten Jahresstunden aus dem zweiten Bilanzjahr dargestellt. Dieses Bilanzjahr verfügte über insgesamt 8780 Stunden, womit der 10 %-Grenzwert bei 878 Stunden feststeht.

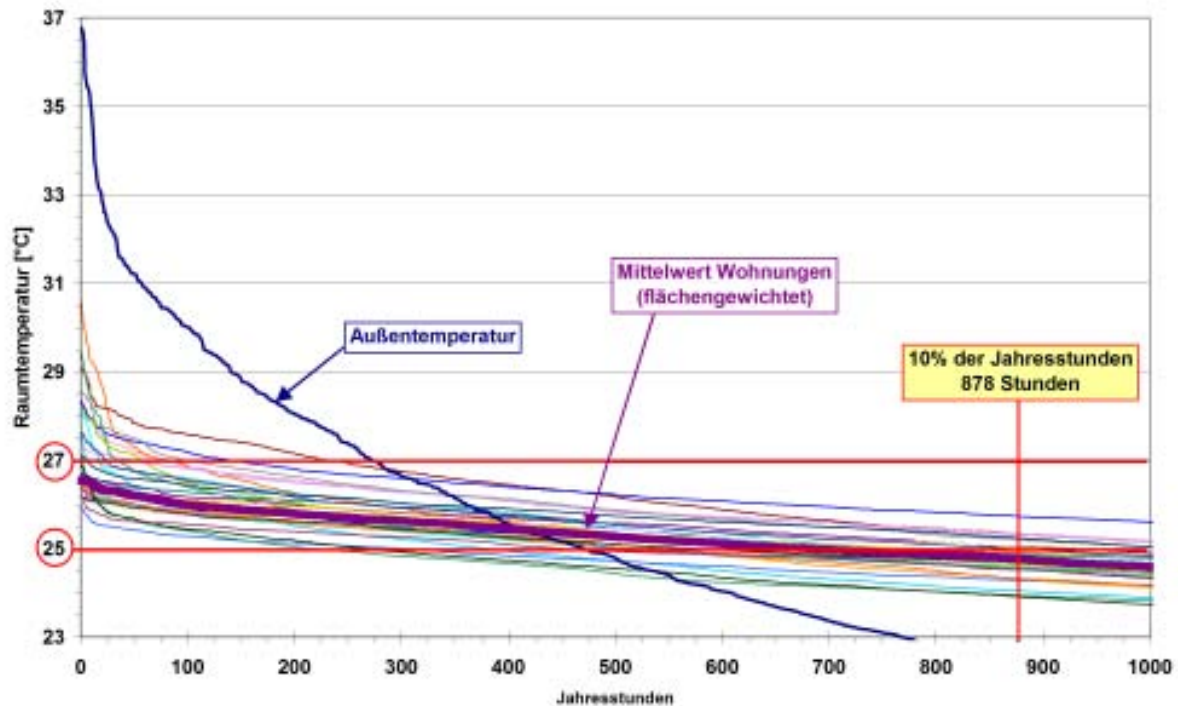


Abbildung 86: Oberer Ausschnitt der absteigend sortierten Temperaturen der Jahresstunden des zweiten Bilanzjahres (Stundenmittelwerte). Die Grenzwerte 25°C/10% und 27°C/10% sind eingetragen.

Untersucht man die 27 °C-Anforderung, so zeigt sich, dass die Wohnung mit den meisten Überschreitungsstunden nur eine Überschreitung von 229 Stunden aufweist, was nur 2,6 % der Jahresstunden entspricht. Diese Wohnung befindet sich im 1. OG, und ist damit nicht eine der exponiertesten, wie die im 2. OG. Auch die Wohnung mit den höchsten gemessenen Raumtemperaturen befindet sich nicht - wie erwartet werden könnte - im 2. OG, sondern im EG.

Untersuchen wir die strengere 25 °C-Grenze, zeigt sich, dass die mittlere Wohnungstemperatur sogar diese 10 % Anforderung deutlich unterschreitet. Es finden sich nur 8 der 30 Messstellen in den 24 Wohnungen, welche diese strengere Marke überschreiten. Diese befinden sich in zwei EG-Wohnungen, in einer im 1. OG und fünf im 2. OG. Hier ist eine Tendenz zu „Überschreitungen“ der Raumtemperaturen bei den Wohnungen im 2. OG zu erkennen. Eine ursächliche Begründung ist damit aber aufgrund der beiden EG- und der 1. OG-Whg. nicht gegeben. Den größten Einfluss auf die Sommertemperaturen haben die Höhe der internen Wärmequellen (insbesondere des Stromverbrauchs) und an erster Stelle die Nutzung der Außenverschattungen.

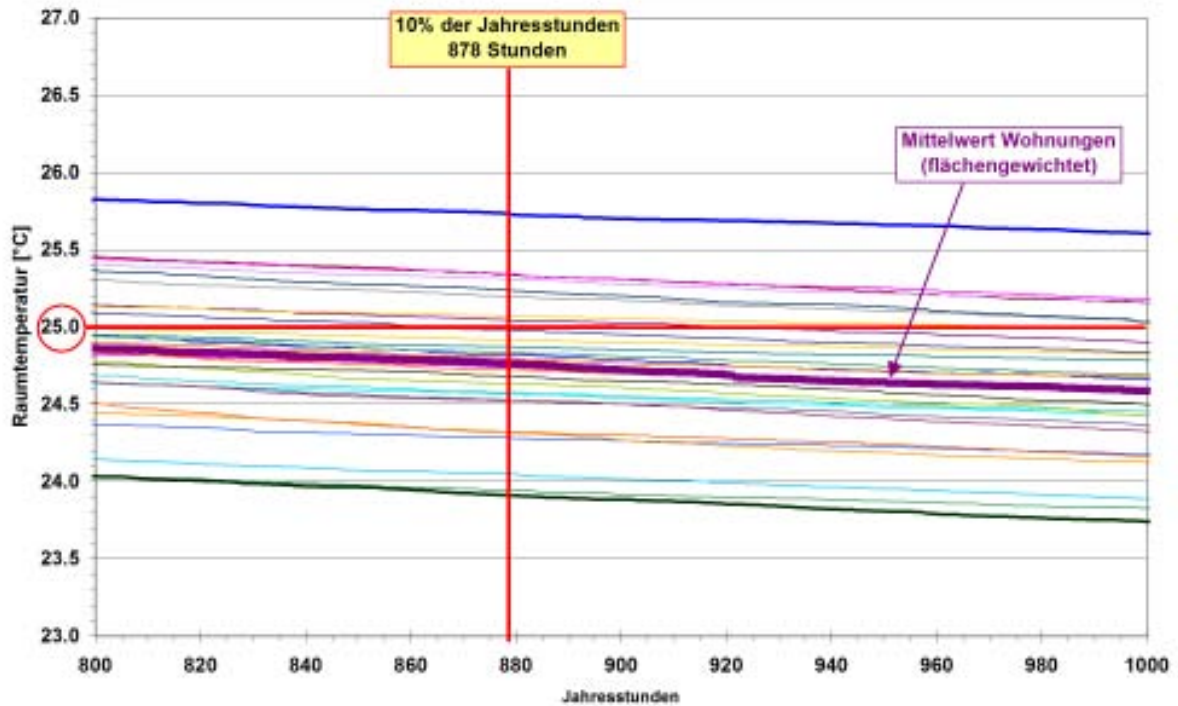


Abbildung 87: Ausschnitt der absteigend sortierten Temperaturen der Jahresstunden (Stunde 800 bis 1000) des zweiten Bilanzjahres (Stundenmittelwerte) um den 25 °C/10%-Grenzwert.

Bei der Betrachtung der kernsommerlichen Raumtemperaturen nach Geschossen und Hauseingängen kann ebenfalls nicht die Tendenz zu höheren Temperaturen in den oberen Geschossen gefunden werden. In Abbildung 88 sind unterschiedliche Sortierungen je Hauseingang zu finden.

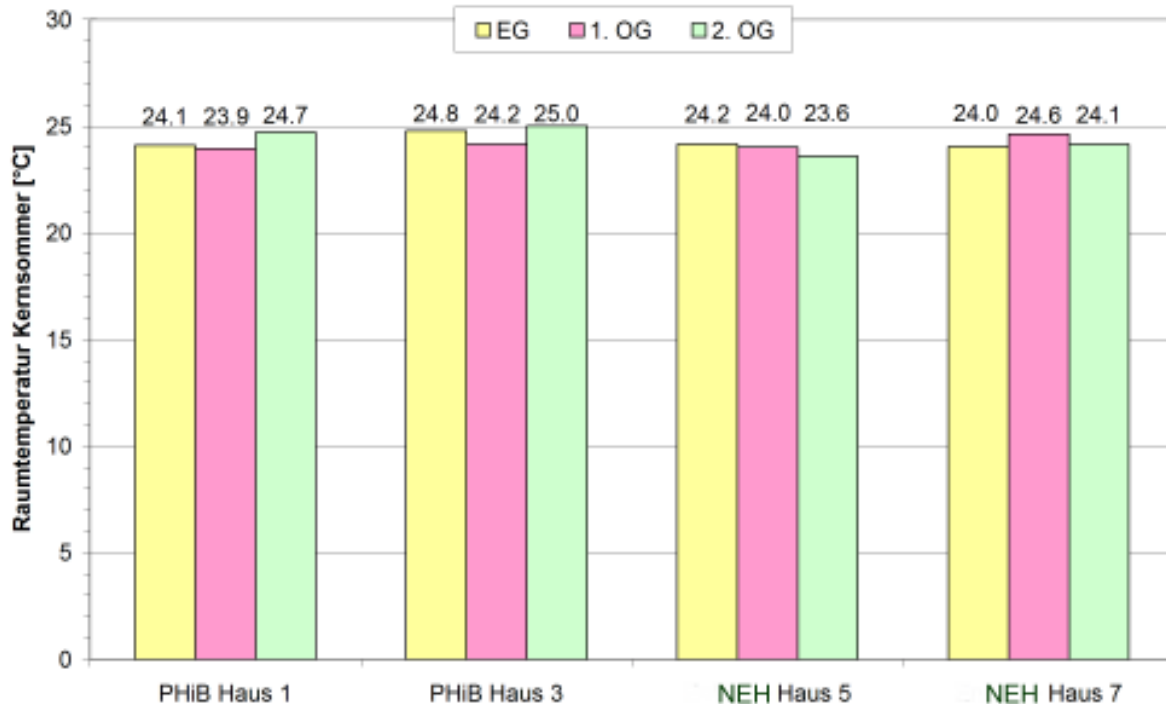


Abbildung 88: Mittlere Raumtemperaturen im Kernsommer 2007 (01.07.2007-01.09.2007) unterschieden nach den vier Hauseingängen und Geschossen.

Insgesamt kann zu den Sommertemperaturen in den Wohnungen festgestellt werden, dass ein sehr gutes Ergebnis in Bezug auf den sommerlichen Wärmeschutz erzielt wird. Überhitzungen sind auch in deutlich wärmeren Sommern nicht zu erwarten.

5.2.2 Raumlufffeuchte

Ein weiterer Parameter zur Beurteilung der Behaglichkeit im Raum ist die Raumlufffeuchte. Diese wurde ebenfalls in den sechs intensiver untersuchten Wohnungen der beiden Gebäude während der gesamten Untersuchungszeit gemessen. Je Wohnung wird dabei auch wieder das Schlaf- und das Wohnzimmer vermessen. Einen Überblick über die Tagesmittelwerte der relativen Raumlufffeuchte des zweiten Bilanzjahres inkl. der relativen Außenlufffeuchte und der Außenlufftemperatur zeigt Abbildung 89.

Erwartungsgemäß liegen die relativen Feuchten im Sommer enger zusammen als im Winter. In der kälteren Jahreszeit fächert sich das Bild der Wohnungen weiter auf. Der Zusammenhang mit der Außenlufftemperatur ist deutlich abzulesen. Fast immer liegen die relativen Feuchtwerte im Tagesmittel in den Wohnzimmern ÜBER denen der Schlafzimmer. Das wurde nicht erwartet.

Eine Wohnung im PHiB fällt mit im Vergleich niedrigeren Werten auf. Es gibt im Winter längere Zeiten mit relativen Luftfeuchten unter 30 %. Hier ist vermutlich ein etwas zu hoher Luftwechsel eingestellt, die Feuchtequellen sind sehr niedrig bzw. die Bewohner wenig zu Hause. Hier könnte durch entsprechende Maßnahmen bei Bedarf gegengesteuert werden.

Eine Wohnung im NEH zeigt gegenteilig relative Feuchteverläufe deutlich oberhalb des Gesamtfeldes der Wohnungen. Hier werden im Tagesmittel zeitweise fast die 60 % erreicht. Über Wochen liegen die Tagesmittelwert zumindest im Wohnzimmer (dünne rote Kurve) dieser Wohnung im NEH deutlich über 50 % relative Feuchte. Dieser Zustand wird weiter unten bewertet.

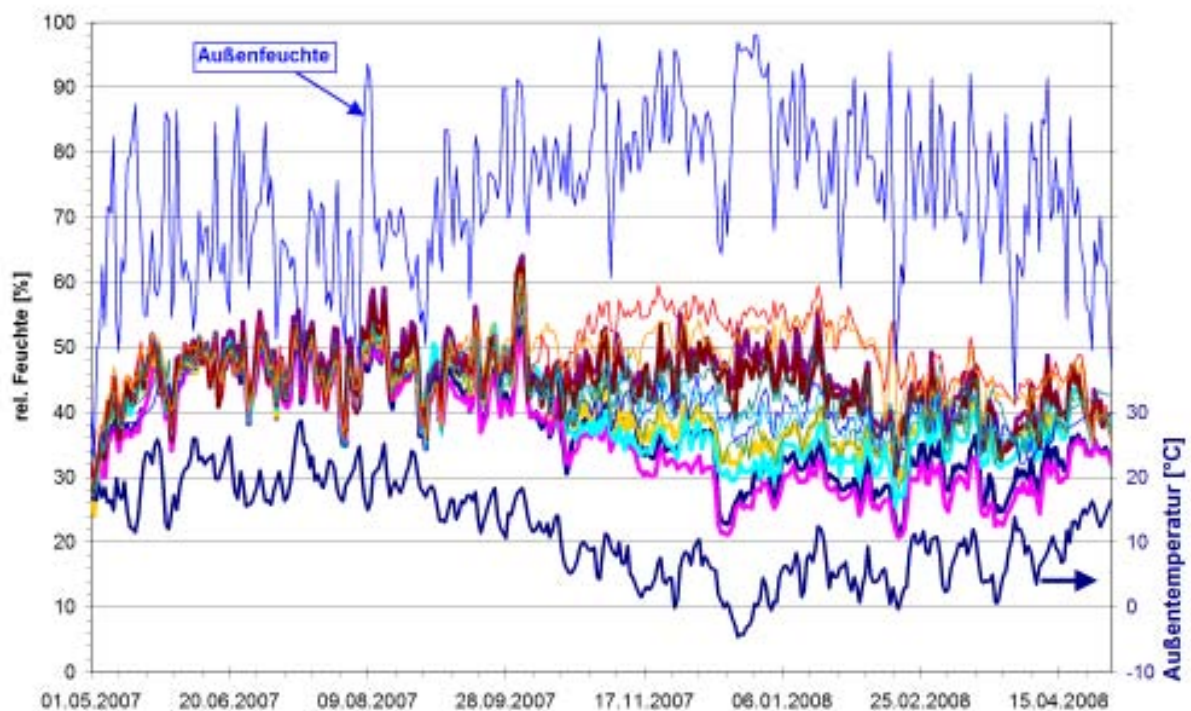


Abbildung 89: Verlauf der tagesmittleren relativen Raumlufffeuchten im zweiten Bilanzjahr (01.05.2007 bis 30.4.2008) in sechs Wohnungen (jeweils Wohn- und Schlafzimmer). Die Feuchteverläufe der Messpunkte im PHiB sind fett gezeichnet. Zusätzlich ist der Verlauf der Außenluftfeuchte sowie der Außentemperatur eingetragen.

Um die Feuchten in den Wohnräumen beurteilen zu können, muss berücksichtigt werden, dass in den Wohnungen z.T. deutlich unterschiedliche Raumtemperaturen herrschen. Daher ist es notwendig auf die absoluten Feuchtegehalte umzurechnen. Dieser Wassergehalt der Luft ist dann von der Temperatur unabhängig und damit vergleichbar.

Nach der Umrechnung der Werte in absolute Feuchtegehalte (Abbildung 90) fällt zunächst die starke Veränderung der Lage des Außenfeuchteverlaufs auf. Im Sommer ist eine sehr starke Deckung der Verläufe der absoluten Außenluftfeuchte und der in den Räumen festzustellen. Die Kopplung an die Außenluft ist durch die geöffneten Fenster sehr hoch. Nur bei den kurzzeitigen Senken der absoluten



Außenluftfeuchte weisen die Wohnungen höhere Werte auf. Im Winter sind die absoluten Außenluftfeuchten deutlich niedriger als in den Wohnungen.

Im Winter spreizt sich das Band in den Wohnungen wieder deutlich weiter auf. Allerdings liegt das „Mittelfeld“ dichter beieinander, nur der untere und obere Ausreißer sind weiterhin deutlich zu erkennen.

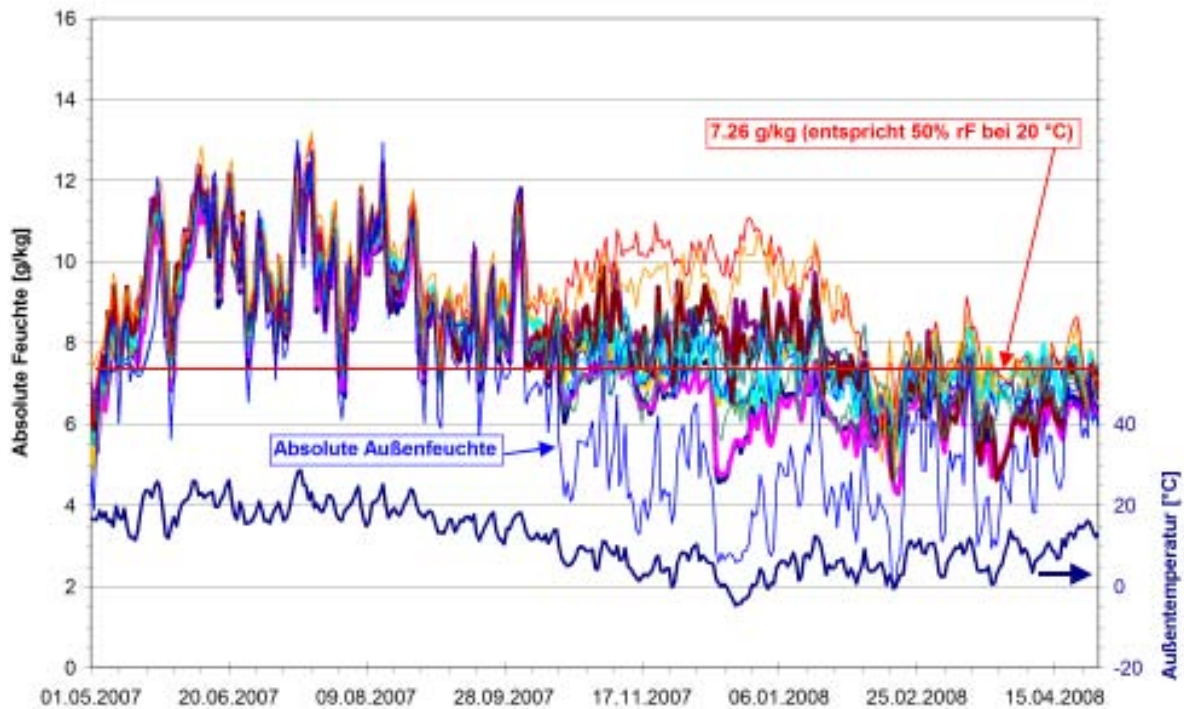


Abbildung 90: Verlauf der tagesmittleren ABSOLUTEN Raumlufffeuchten im zweiten Bilanzjahr (01.05.2007 bis 30.04.2008) in sechs Wohnungen (jeweils Wohn- und Schlafzimmer). Die Feuchteverläufe der Messpunkte im PHiB sind fett gezeichnet. Zusätzlich ist der Verlauf der Außenluftfeuchte sowie der Außenlufttemperatur eingetragen.

Um die Situation im Winter besser bewerten zu können, ist in Abbildung 91 der Bereich des Kernwinters 2007/2008 im Detail dargestellt. Zur besseren Beurteilung der Kurven sind vier absolute Feuchtegehalte mit der Entsprechung der relativen Feuchte angegeben. Dabei ist jetzt zu erkennen, dass die Wohnung mit den niedrigsten Werten an nur zwei Tagen die 30 % rF/20°C-Linie streift und nicht unterschreitet. Die niedrigen relativen Feuchten haben ihre Ursache in der besonders hohen Raumtemperatur in dieser Wohnung. Die Wohnung wurde über einen längeren Zeitraum im Winter über 23 °C geheizt. Im Januar 2008 werden sogar mehrere Tage über 24 °C gemessen. Die kurzzeitigen Senken der relativen Feuchte Mitte Dezember 2007 und Mitte Februar 2008 entstehen durch das starke Aufheizen der Wohnung: Um den 15.12.2007 wurde die Raumlufftemperatur im Mittel von 23 °C in etwa 5 Tagen auf Werte über 24 °C angehoben. Bei Betrachtung der absoluten Feuchte ist die Reduzierung nicht so stark wie bei der Betrachtung der relativen Feuchten.

Die noch wärmere Wohnung (Whg. II in Abbildung 84) mit Temperaturen über einen längeren Zeitraum über 24 °C verfügt über deutlich höhere Feuchtwerte, wenn auch diese am unteren Rand des Gesamtfeldes liegen.

Auch bei der Betrachtung der absoluten Werte, fällt die eine Wohnung im NEH mit sehr hohen Feuchtwerten auf: Sie liegen mehrere Monate über 8,7 g/kg, entsprechend 60 % rF bei 20 °C. Sogar die fast 10 g/kg (60 % rF bei 22 °C) werden dabei sehr lange überschritten. Diese Situation muss bauphysikalisch näher betrachtet werden, um das Risiko von erhöhter Wasseraktivität $a_w > 80\%$ oder gar der Tauwassergefahr zu bewerten. Dies erfolgt im nächsten Abschnitt.

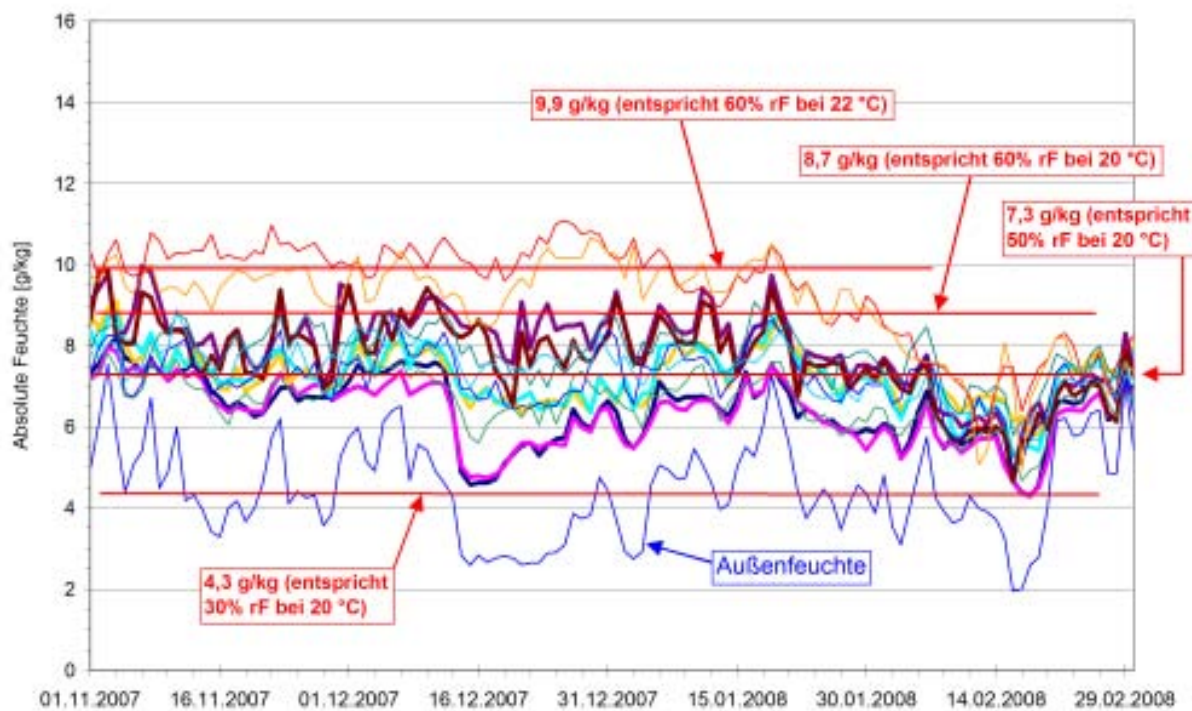


Abbildung 91: Verlauf der tagesmittleren ABSOLUTEN Raumlufffeuchten im Kernwinter 2007/2008 (01.11.2007 bis 29.02.2008) in den sechs Wohnungen (jeweils Wohn- und Schlafzimmer). Die Feuchteverläufe der Messpunkte im PHiB sind fett gezeichnet. Zusätzlich ist der Verlauf der Außenlufffeuchte eingetragen.

Vor der Beurteilung eines möglichen Schadenrisikos durch einen höheren Feuchtwert werden die Mittelwerte der sechs Wohnungen zusammenfassend dargestellt. Abbildung 92 zeigt, dass die Mittelwerte im Kernwinter 2007/2008 zwischen 6,4 und 9,2 g/kg liegen. Die Mittelwerte je Gebäudestandard zeigen an, dass im PHiB etwas niedrigere Werte realisiert wurden. Auch wenn bei 12 Sensoren in 6 Wohnungen die statische Aussage nicht ausreichend gesichert ist, kann eine Tendenz festgestellt werden. Die Differenz der Mittelwerte beträgt 0,75 g/kg, entsprechend 5,2 %rF/20 °C (siehe Tabelle 17) für den gesamten Kernwinter.

Insbesondere der deutlich höhere Einzelwert der Wohnung Y fällt ins Gewicht. Im NEH wird nur über die Fenster und die temporäre Badabluft (nur kleine Whg.) gelüftet. Ein so hoher Feuchtwert ist in einer Wohnung mit funktionierender Lüftungsanlage bei normaler Nutzung nicht zu erwarten. Die Auswertung der Fenster-



öffnungszeiten der entsprechenden Wohnung Y zeigen, dass relativ wenig gelüftet wurde. Nur so kann es zu diesen höheren Wert kommen. Die Wohnung war zur Zeit der Messungen mit nur zwei Personen belegt. Eine höhere Belegung ist bei der Wohnungsgröße (73,5 m²) durchaus denkbar und würde bei gleichem Lüftungsverhalten einen noch höheren Luftfeuchtwert erwarten lassen.

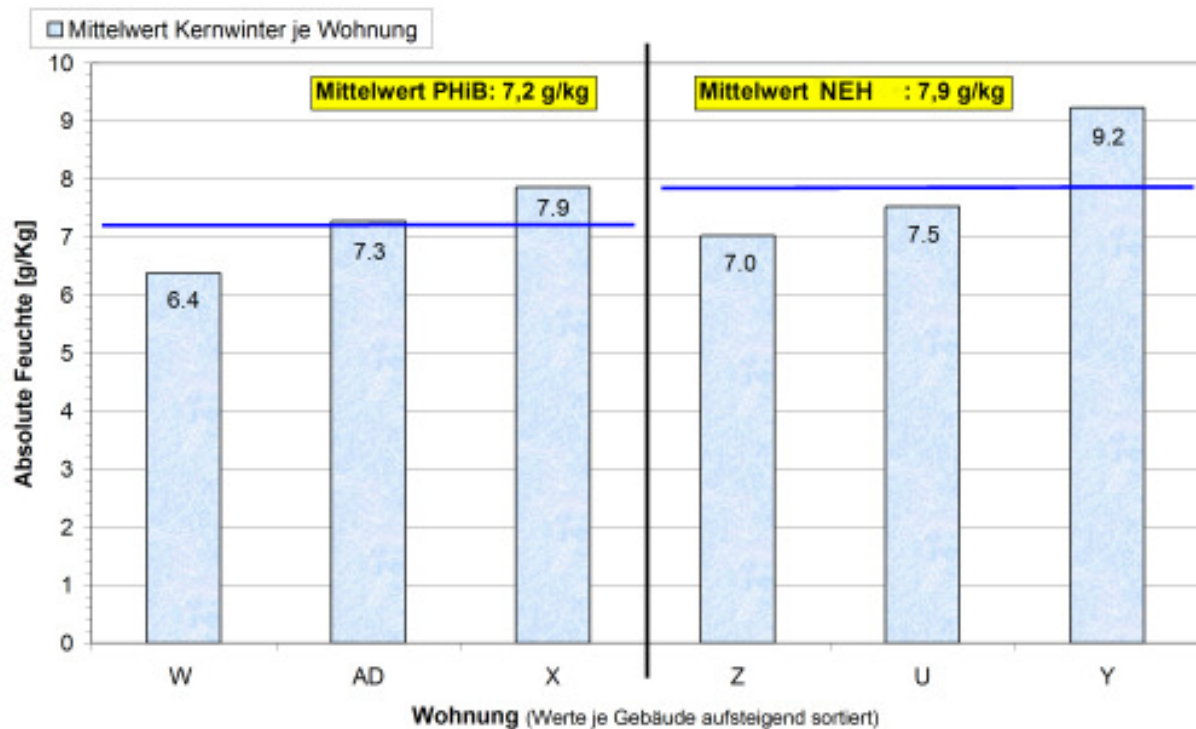


Abbildung 92: Mittelwerte in den sechs Wohnungen. Die gesamten Mittelwerte der je drei Wohnungen eines Gebäudestandards sind zusätzlich eingetragen.

Tabelle 17: Gesamte Mittelwerte aus Abbildung 92 und der zugehörigen berechneten relativen Raumluftfeuchte bei 20 °C.

	Wassergehalt [g/kg]	Entspricht rF [%] bei 20 °C
Mittelwert PHiB	7,17	49,4
Mittelwert NEH	7,93	54,6

5.2.2.1 Bewertung des Feuchterisikos

Entscheidend für die Bewertung des Schadensrisiko durch höhere Innenraumfeuchten sind die Innenoberflächentemperaturen der gesamten Gebäudehülle. Nach [EN ISO 13788] und [Sedlbauer 2002] sind Werte über 80 % rF an der Innen-

oberfläche als kritisch anzusehen. Damit beginnt die Problematik lange bevor der sichtbare Tauwasseranfall (100 % rF auf der Oberfläche) auftritt. Bei typischen Standardbedingungen (relative Raumluftfeuchte 50 % / 20 °C) liegt die kritische Temperaturgrenze der Oberflächentemperatur bei minimal 12,6 °C, wogegen erst bei 9,3 °C Tauwasser auftritt. Die Zusammenhänge sind in [Feist 2003] detailliert untersucht und beschrieben.

Bei dem hier vorliegenden NEH ist bereits ein deutlich weitergehender Dämmstandard realisiert worden, als zur Einhaltung der gesetzlichen Mindestanforderungen notwendig. Dennoch sind durch die aufsteigenden nicht thermisch getrennten Kellerwände und die massiven Befestigungspunkte der vorgesetzten Balkone Wärmebrücken verblieben. An diesen Punkten gilt es, die Oberflächentemperatur näher zu betrachten. Bei der durchgeführten Innenthermographie (vgl. auch Abschnitt 3.2) sind die massiven Befestigungspunkte der Balkone auf der Innenseite aufgefallen. Daher wurde zusätzlich eine dreidimensionale Wärmestromberechnung durchgeführt. Es wird dafür nach den Bedingungen der [DIN 4108-T2] mit $t_{in} = 20$ °C und $\phi_i = 50$ % sowie erhöhtem Wärmeübergangswiderstand (innen) $R_{Si} = 0,25$ (m²K)/W und der Außenlufttemperatur von -5 °C gerechnet. Der erhöhte Wärmeübergangswiderstand berücksichtigt, dass z.B. Möbel oder Vorhänge vor der Außenwand positioniert sind. Die Berechnungen ergeben, dass bei der Wanddämmung des NEH mit $D = 120$ mm ($\lambda = 0,035$ W/(mK)) die minimale Oberflächentemperatur von 13,3 °C erreicht wird. Damit wird die Grenze nach [DIN 4108-T2] von 12,6 °C nicht unterschritten, die Anforderungen werden eingehalten. Im PHiB ergibt sich bei der realisierten Dämmstärke von $D = 300$ mm ($\lambda = 0,032$ W/(mK)) die noch höhere unkritische Minimaltemperatur von 15,8 °C.

Die Außentemperatur lag während der Durchführung der Außenthermographie am 21. Dezember 2007 (6:00 bis 9:00 Uhr) mit im Mittel -5,1 °C fast genau bei den Normbedingungen. Die Wärmebrücke wurde in zwei Wohnungen jeweils im EG untersucht. Dabei wurden die Balkonanker (bzw. die Wandbereiche in der Küche, wo diese von außen befestigt sind) von innen und außen thermographiert. Im Wohnzimmer (offener Durchgang zur Küche) der Wohnung im PHiB wurden zur Zeit der Untersuchung 23,3 °C gemessen. Im Flur der Wohnung im NEH waren es 20,5 °C. Damit lagen im Bezug auf die Innentemperaturen abweichende Bedingungen von dem Normstandard vor.



Abbildung 93: Balkonbefestigungspunkt (Balkonanker) im EG neben einer Haustür.

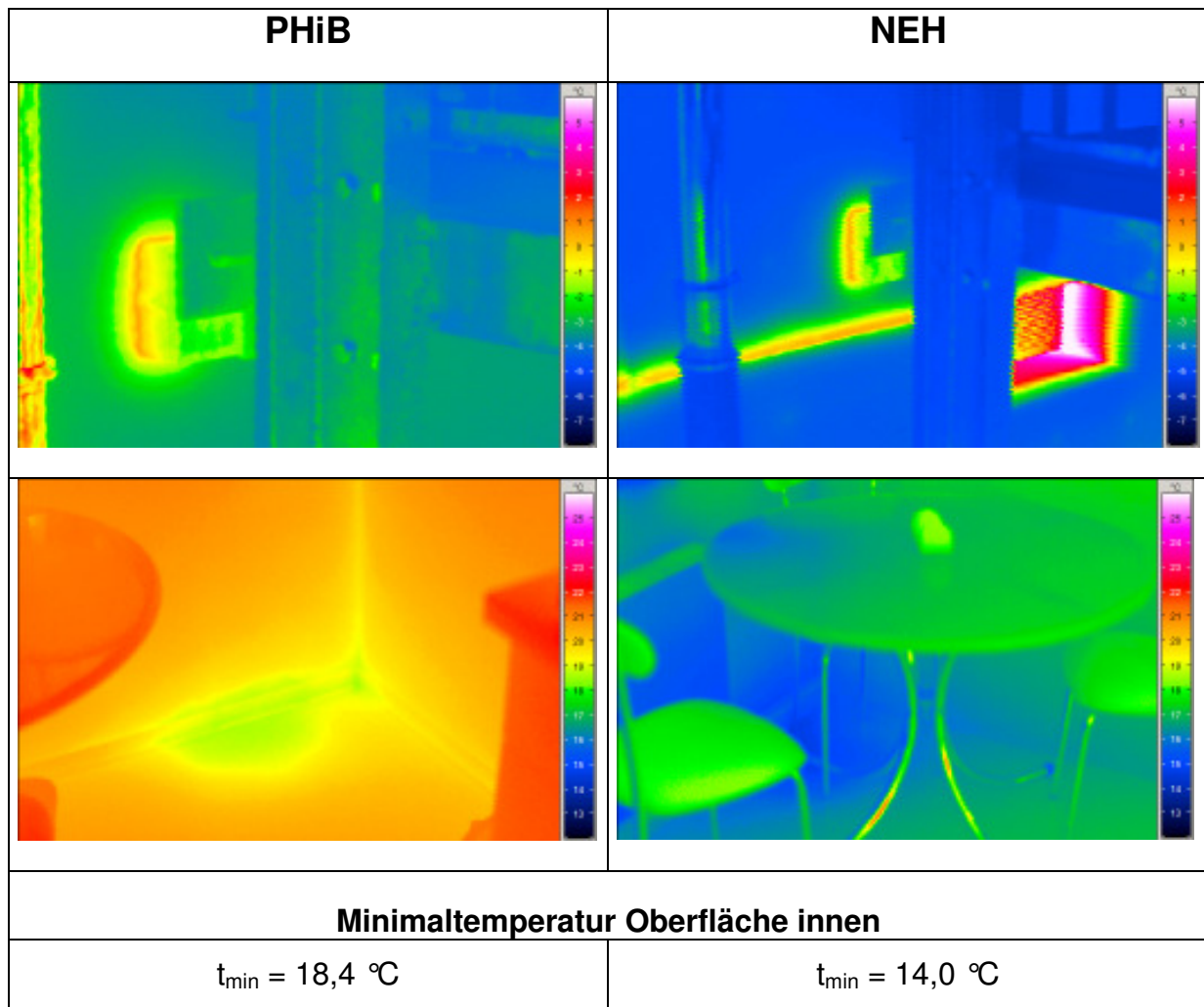


Abbildung 94: Außen- und Innenthermographien der Wärmebrücke „Balkonanker“ bei den beiden Gebäuden im EG. Die mit der Thermographie festgestellte Minimaltemperatur auf der Innenseite ist jeweils unter den IR-Bildern angegeben.

Als minimale Oberflächentemperatur wurden im PHiB im Bereich des Balkonankers $18,4 \text{ °C}$, beim NEH $14,0 \text{ °C}$ gemessen. Beide Temperaturen liegen über der zulässigen Minimaltemperatur von $12,6 \text{ °C}$. Allerdings gilt diese nur bei den Normbedingungen. Da die unterschiedlichen Raumtemperaturen ebenfalls einen Einfluss auf die gemessene Oberflächentemperatur haben und in einigen Wohnungen auch höhere Luftfeuchtigkeiten gemessen wurden (siehe oben), wurden die Bedingungen in der 3D-Simulation variiert.

Es wurden mit 22 °C und 60% eine höhere Innentemperatur und Innenraumfeuchte für die Rechnung eingestellt. Diese Werte entsprechen etwa den Messwerten aus der einen Wohnung im NEH. Niedrigere Außentemperaturen wurde nicht gewählt, da diese am Standort Ludwigshafen nicht über eine längere Zeit zu erwarten sind. Mit dieser Veränderung der Innenraumluftbedingungen erhöht sich auch die Grenze der minimalen Oberflächentemperatur, bei der die 80% Grenze der relativen Feuchte an der Oberfläche gerade nicht überschritten wird [EN ISO 13788]. Die minimale Oberflächentemperatur steigt von $12,6 \text{ °C}$ auf $17,4 \text{ °C}$ an. Dabei muss auch



berücksichtigt werden, dass bei höherer Oberflächentemperatur und gleichzeitiger Überschreitung der 80 %-Grenze das Schimmelpilzwachstum drastisch erhöht ist.

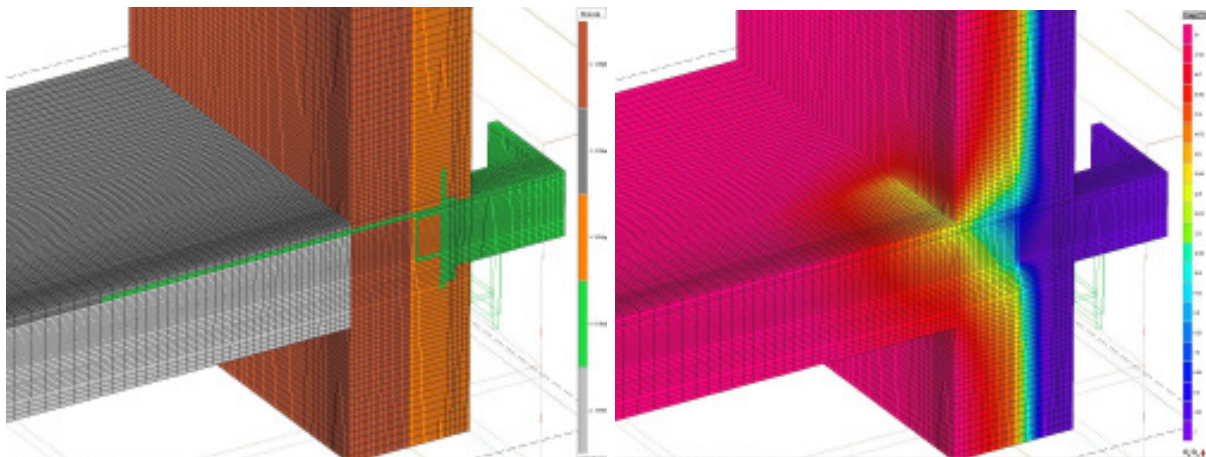


Abbildung 95: Beispielhafte Grafiken der 3D-Simulationsrechnung einer Balkonankerplatte. Dargestellt sind die Konstruktion (links) sowie die Temperaturverteilung (rechts) für eine gerechnete Variante beim NEH.

Die Ergebnisse der Variationen sind in Tabelle 18 zusammengestellt. Es zeigt sich, dass die zulässige Oberflächentemperatur im NEH im Bereich der Wärmebrücke NICHT mehr eingehalten wird. Damit steigt die Wasseraktivität dort auf über 0,8. Selbst wenn der geringere Wärmeübergangswiderstand (R_{Si} -Wert = $0,13 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$) verwendet wird, kann die Temperaturgrenze im NEH Gebäude NICHT eingehalten werden.

Tabelle 18: Ergebnisse der 3D-Wärmestromberechnungen der Innenoberflächentemperatur im Bereich der Befestigung des Balkonankers.

PHiB	NEH	Zulässige minimale Oberflächentemperatur
Standardbedingungen [DIN 4108-T8] $t_{in} = 20 \text{ °C} / 50 \% rF / R_{Si} = 0,25 \text{ (m}^2\text{K)/W} / t_{au\beta en} = -5 \text{ °C}$		
$t_{min} = 15,8 \text{ °C}$	$t_{min} = 13,3 \text{ °C}$	$t_{min} = 12,6 \text{ °C}$
$t_{in} = 22 \text{ °C} / 60 \% rF / R_{Si} = 0,25 \text{ (m}^2\text{K)/W} / t_{au\beta en} = -5 \text{ °C}$		
$t_{min} = 17,5 \text{ °C}$	$t_{min} = 14,7 \text{ °C}$	$t_{min} = 17,4 \text{ °C}$
$t_{in} = 22 \text{ °C} / 60 \% rF / R_{Si} = 0,13 \text{ (m}^2\text{K)/W} / t_{au\beta en} = -5 \text{ °C}$		
$t_{min} = 18,2 \text{ °C}$	$t_{min} = 15,9 \text{ °C}$	$t_{min} = 17,4 \text{ °C}$



Die niedrige Außentemperatur muss eine längere Zeit vorherrschen, bevor es zu einer Feuchteproblematik, also zum Schimmelwachstum kommen kann. In [Sedlbauer 2001] sind die unterschiedlichen Bedingungen aus der Literatur aufgeführt, bei denen Sporenauskeimung und erstes sichtbares Myzelwachstum erwartet werden. Nach den Literaturquellen wird bei 75 bis 80 % relativer Feuchte das Wachstum erwartet, wenn 6 bis 12 Stunden pro Tag die kritischen Bedingungen herrschen. Diese müssen (je nach Literaturquelle) zusätzlich an 5 aufeinanderfolgenden Tagen vorhanden sein. Im Winter 2007/2008 wurden am Standort Ludwigshafen die -5 °C nur an insgesamt 23 Stunden, verteilt auf 5 Tage unterschritten. Das Gefahrenpotential war in diesem Winter damit nicht vorhanden.

Die gemessenen erhöhten Raumlufffeuchtigkeiten können bei größerer Belegungsdichte ohne mechanischer Lüftung durchaus auch noch weiter steigen. Bei Wohnungen mit kontrollierter Wohnraumlüftung sind solche Werte NICHT zu erwarten.

Es zeigt sich, dass bei den höheren tatsächlich gemessenen Raumtemperaturen und Luftfeuchtigkeitswerten bei dem NEH (mit bereits verbessertem Wärmeschutz) im Bereich der Wärmebrücke **keine hohe Sicherheit** für den Feuchteschutz besteht. In einem kälteren Winter können durchaus längere Zeiträume entstehen, bei denen die relative Feuchte auf der Oberfläche der Innenwand längere Zeit die 80 % Grenze überschreitet und eine Sporenauskeimung ermöglicht.

Ein bauphysikalischer Mangel liegt hier allerdings nicht vor, solange die Innenraumluftfeuchtigkeiten nicht unzulässig hoch werden.



5.2.3 CO₂-Messungen

In den 12 intensiver untersuchten Zimmern der 6 Wohnungen wurden auch dauerhaft die CO₂-Konzentration der Raumluft gemessen. CO₂ ist die Leitgröße für die Raumluftqualität für alle Gebäude, in denen die Luftbelastungen hauptsächlich durch die Nutzung durch Personen bedingt ist, insbesondere bei Wohngebäuden. Bei höheren CO₂-Konzentrationen wird vereinfacht davon ausgegangen, dass die Konzentration von anderen Luftschadstoffe ebenfalls erhöht ist.

In [Schulze Darup 2002] wurden verschiedene Luftschadstoffe (u.a. VOC, Pentan, Styrol, Schimmelpilze, Radon) in der Raumluft in Passivhäusern untersucht. Es wurde insbesondere die Reduktion der Schadstoffe von der Bauphase bis nach Bezug untersucht. Insgesamt wird der Vorteil von Lüftungsanlagen im Wohnungsbau auf die Raumluftqualität herausgestellt. Es wird beschrieben, „dass bei Standardgebäuden ohne Lüftungsanlage in vielen Fällen mit höheren Schadstoffgehalten gerechnet werden muss, als allgemein angenommen wird“. Die Luftqualitätsuntersuchungen der ersten Passivhäuser in Darmstadt Kranichstein bescheinigten bereits eine sehr hohe Luftqualität [AKKP 8] [Feist 1995].

Andere Studien zeigen, dass die Konzentrationsfähigkeit von Personen bei niedrigen CO₂-Konzentrationen höher ist [Wargocki 2000], [Fanger 2003] und [Shaughnessy 2005]. Bei höheren Konzentrationen können vereinzelt Müdigkeit, Konzentrationschwäche etc. auftreten [UBA 2000].

In der aktuellen Norm [EN 13779] werden vier „RAL-Klassen“ zur Beurteilung der CO₂-Konzentration in der Raumluft angegeben. Diese RAL-Klassen geben Konzentrationen über der Außenluft von bis zu 400 ppm („RAL 1“) bis über 1000 ppm („RAL 4“) an. Für Arbeits- und Versammlungsräume, welche über raumluftechnische Anlagen verfügen, legt die [DIN 1946-2], in ihren gesundheitstechnischen Anforderungen daher fest, dass der Luftaustausch so geregelt sein muss, dass die CO₂-Konzentration 1500 ppm nicht überschreitet.

Die bei der Messung eingesetzten Sensoren haben einen Messbereich bis max. 3000 ppm CO₂. Die Messgenauigkeit wird vom Hersteller mit +/- 60 ppm angegeben.

5.2.3.1 Konzentrationen im Winterzeitraum

Die Messung der CO₂ Konzentrationen in den Wohnungen werden hier unterteilt in einen Winter- und einen Sommerzeitraum. Von besonderem Interesse ist der Winterzeitraum, da davon ausgegangen wird, dass die Fenster im PHiB überwiegend geschlossen bleiben können. Der Luftwechsel wird im PHiB durch die Lüftungsanlage sichergestellt.

Die zwölf CO₂-Sensoren waren nach der zweiten Kalibrierung im PHI vollständig am 16. Oktober 2007 ab 9:00 Uhr wieder in Betrieb. Daher werden hier als Winterzeitraum 2007/2008 die Daten vom 16.10.2007, 9:00 Uhr bis zum 30.04.2008, 24:00 Uhr ausgewertet. Innerhalb diese Zeitraumes gab es noch einen längeren Datenausfall

aufgrund einer Busstörung (26. bis 31. März 2008). Die gesamte Stundenzahl in diesem Untersuchungszeitraum beträgt damit 4625 Stunden.

Die stundenmittleren Messdaten werden zur Analyse raumweise absteigend nach der CO₂-Konzentration sortiert. An den so entstandenen Kurven kann besser abgelesen werden, was für Konzentrationen in den einzelnen Räumen vorlagen. In Abbildung 96 zeigt sich für das PHiB, dass die Konzentrationen von zwei der drei untersuchten Wohnungen sehr niedrig lagen. Die 1500 ppm CO₂ wurden nur wenige Stunden überschritten. Nur die Konzentrationen in den beiden Räumen der Wohnung X liegen merklich höher. Die höchsten Werte werden hier im Schlafzimmer gemessen.

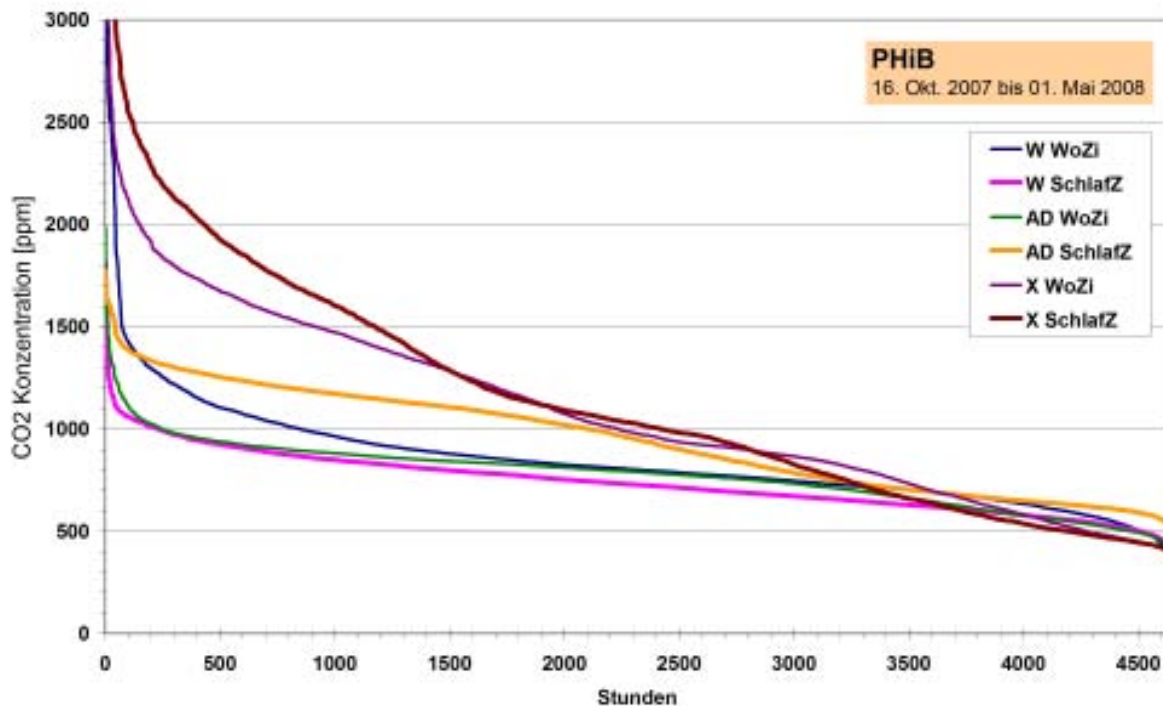


Abbildung 96: Stunden-Messdaten der CO₂-Konzentrationen der drei Wohnungen im PHiB im Winter 2007/2008 absteigend sortiert. Der untersuchte Zeitraum umfasst insgesamt 4625 Stunden.

Wird diese eine Wohnung mit den höheren Konzentrationen näher untersucht, ergeben sich 915 bzw. 1175 Stunden Überschreitung der 1500 ppm CO₂. Dies kann in der Detailansicht von Abbildung 97 abgelesen werden. Diese Stundenzahlen entsprechen immerhin 20 bzw. 25 % des gesamten Untersuchungszeitraumes im Winter. Dieser Umstand wurde genauer untersucht.



Tabelle 19: Anzahl der Stunden über 1500 ppm CO₂-Konzentration in den drei Wohnungen im im NEH Gebäude Winterzeitraum 2007/08.

	über 1500 ppm CO ₂	
	Stunden	Anteil an der Untersuchungszeit
Whg. W WoZi	73	2%
Whg. W SchlafZ	6	0%
Whg. AD WoZi	11	0%
Whg. AD SchlafZ	43	1%
Whg. X WoZi	915	20%
Whg. X SchlafZ	1175	25%

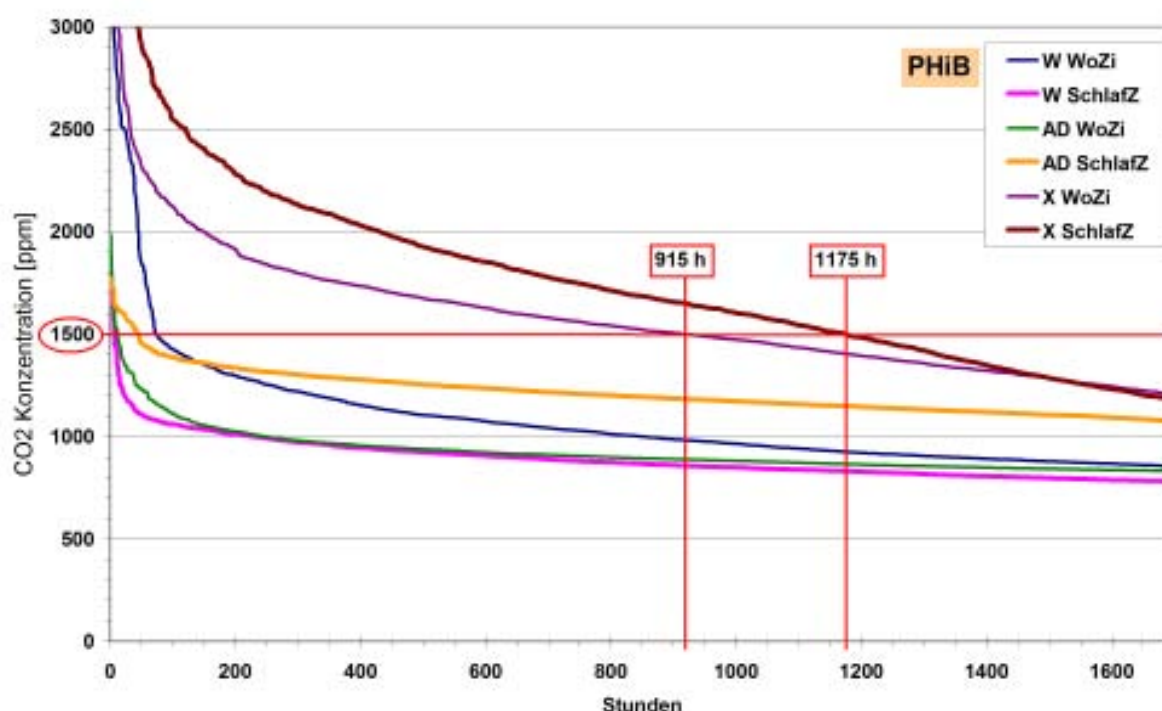


Abbildung 97: Detailansicht aus Abbildung 96 zu den Stunden-Messdaten der CO₂-Konzentrationen während der Wintermonate.

Der zeitliche Verlauf der CO₂-Konzentration in der Wohnung X wird über den Winterzeitraum dargestellt, um ihn genauer zu untersuchen. Dafür ist es notwendig den Kurvenverlauf der Stundendaten beider Zimmer zu glätten. Daher werden in Abbildung 98 gleitende 15-Stunden Mittelwerte verwendet.

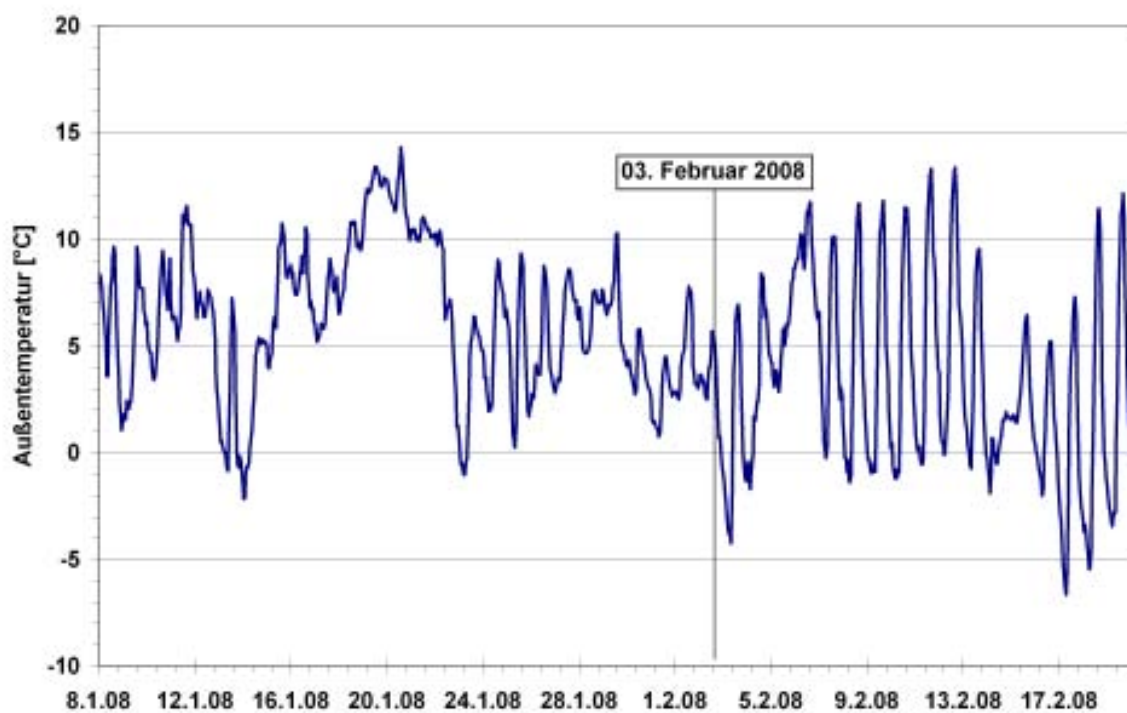
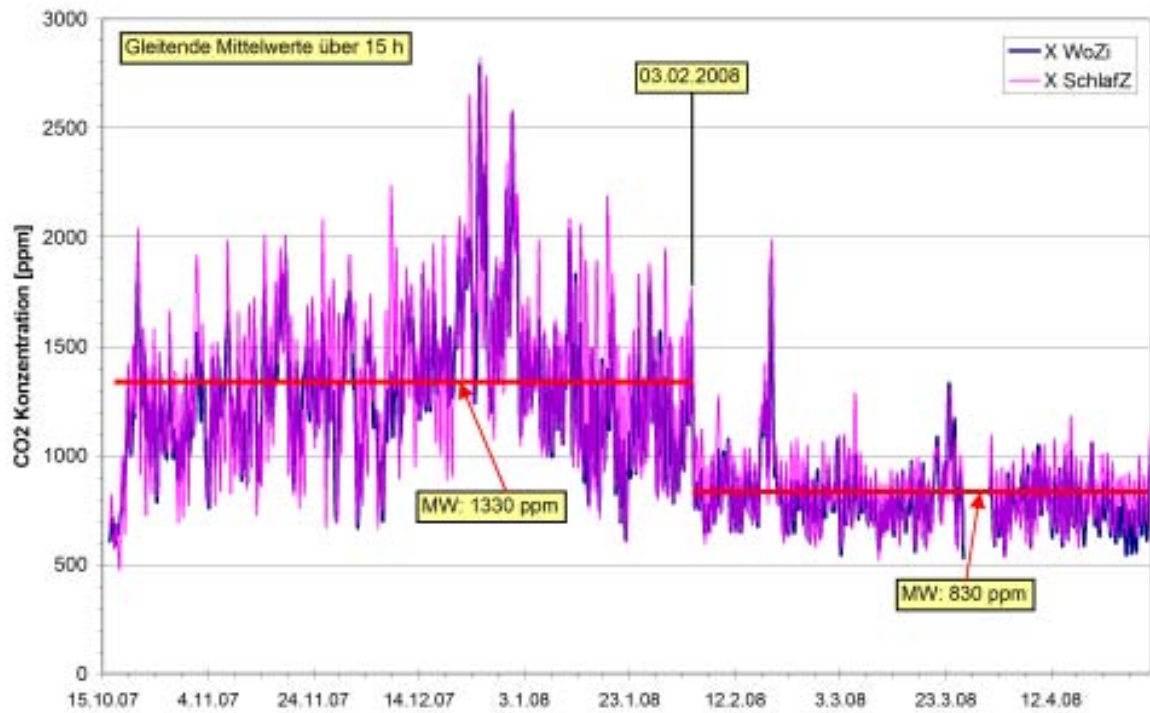
Es zeigt sich, dass am 03. Februar 2008 schlagartig eine deutliche Reduzierung der CO₂-Konzentration gemessen wurde. Vor diesem Zeitraum wurden als Mittelwert etwa 1330 ppm, danach nur noch 830 ppm CO₂ gemessen. Solche schlagartigen Veränderungen gibt es sonst in den Wohnungen nur kurzzeitig z.B. durch Abwesenheit der Bewohner (z.B. Urlaub). Längere Abwesenheit ist hier nicht die Ursache.

Bei der Nachmessung der Volumenströme in dieser Wohnung am 30. April 2008 durch Mitarbeiter des PHI, wurden keine besonderen Abweichungen gegenüber den anderen Wohnungen festgestellt. Die Messwerte der Luftvolumenströme lagen in Stellung „3“ (Normalbetrieb) mit 8 (Zuluft) bzw. 19 m³/h (Abluft) unter dem Sollwert von 84 m³/h. Dieser Zustand des geringeren Volumenstroms wird aber vermutlich nicht schlagartig am 03. Februar 2008 eingetreten sein und würde die deutliche Konzentrationsstufe auch nicht erklären. Die verbleibende Luftmenge von 76 bzw. 65 m³/h dürfte noch ausreichend für niedrigere, als die gemessenen CO₂-Konzentrationen sein.

Vor der Volumenstrommessung wurde allerdings bemerkt, dass das Abluftventil im Bad auffällig verschmutzt war. Die Abluftmenge war dort dadurch deutlich niedriger. Vor der Reinigung wurde die niedrigere Abluftmenge im Bad durch eine etwas höhere Abluftmenge der Küchenabluft teilkompensiert. Die Anlage reagiert „gutmütig“ auf solche Art Einflüsse bzw. Störungen. An den Daten der gemessenen CO₂-Konzentrationen ist keine Veränderung durch die Reinigung erkennbar.

Die Bewohner (2 Erwachsene und 1 Kleinkind) geben an, die Lüftungsanlage im Winter fast ausschließlich auf Stufe 3 (Normalstufe für diese Wohnung) zu betreiben. Sie empfinden die Luftqualität in ihrer Wohnung als durchaus gut – es gibt keinen Grund für Klagen (Persönliche Aussage der Bewohner). Der Sommerzeitraum (Abbildung 106 weiter unten im Abschnitt „Konzentrationen Sommer“) verfügt über deutlich niedrigere CO₂-Werte, vergleichbar mit den Konzentrationen nach dem 03. Februar 2008. Die Bewohner geben an, außerhalb der Heizzeit (Betrieb ohne WRG / Bypassaktivierung durch die Mieter) deutlich mehr über die Fenster zu lüften als in der Winterzeit. Am 03. Februar 2008 und in den Tagen danach herrschten allerdings winterliche Außentemperaturen mit Minimaltemperaturen um und sogar unter Null Grad (Abbildung 99). Dies ist damit eindeutig kein Zeitpunkt um auf „Sommerbetrieb“ umzustellen.

Es wird daher vermutet, dass die Lüftungsanlage doch auf niedriger Stufe betrieben wurde oder ein Mangel vorlag, der sich nicht mehr rekonstruieren lässt. Denkbar ist auch, dass häufiger Besuch in der Wohnung zu höheren CO₂-Konzentrationen geführt hat. Mit der Anpassung der Luftmenge kann hier Abhilfe geschaffen werden. Der deutliche Sprung und die Daten aus den anderen Wohnungen zeigen, dass die Luftmenge ausreichend ist, um die Luftqualitäten für 2 bis 3 Personen sicherzustellen.



In Wohnung W im PHiB können (vgl. Abbildung 96 und Abbildung 97) nur wenige Stunden mit einer deutlichen Überschreitung der 1500 ppm CO₂ beobachtet werden. Hier ist ein sehr deutlicher steiler Anstieg der Konzentrationen in den sortierten Stundendaten zu erkennen. Dies zeigt wenige Tage mit deutlicher Überschreitung bei sonst stabil sehr niedrigen Werten an.

Der zeitliche Verlauf der Stundendaten der CO₂-Konzentrationen der beiden Zimmer von Wohnung W zeigt die Ursache: Die Tage mit den Überschreitungen liegen vollständig in der Weihnachtszeit und zum Jahreswechsel 2007/2008. Es ist also eine höhere Belegung und evtl. auch verstärkte Kerzennutzung zu vermuten. Weiter ist anzunehmen, dass die Bewohner nicht unbedingt die Lüftungsanlage auf höhere Luftmengen umgestellt haben. So hätte den kurzzeitigen Überschreitungen effektiv entgegengewirkt werden können, falls es überhaupt als Störung wahrgenommen worden wäre.

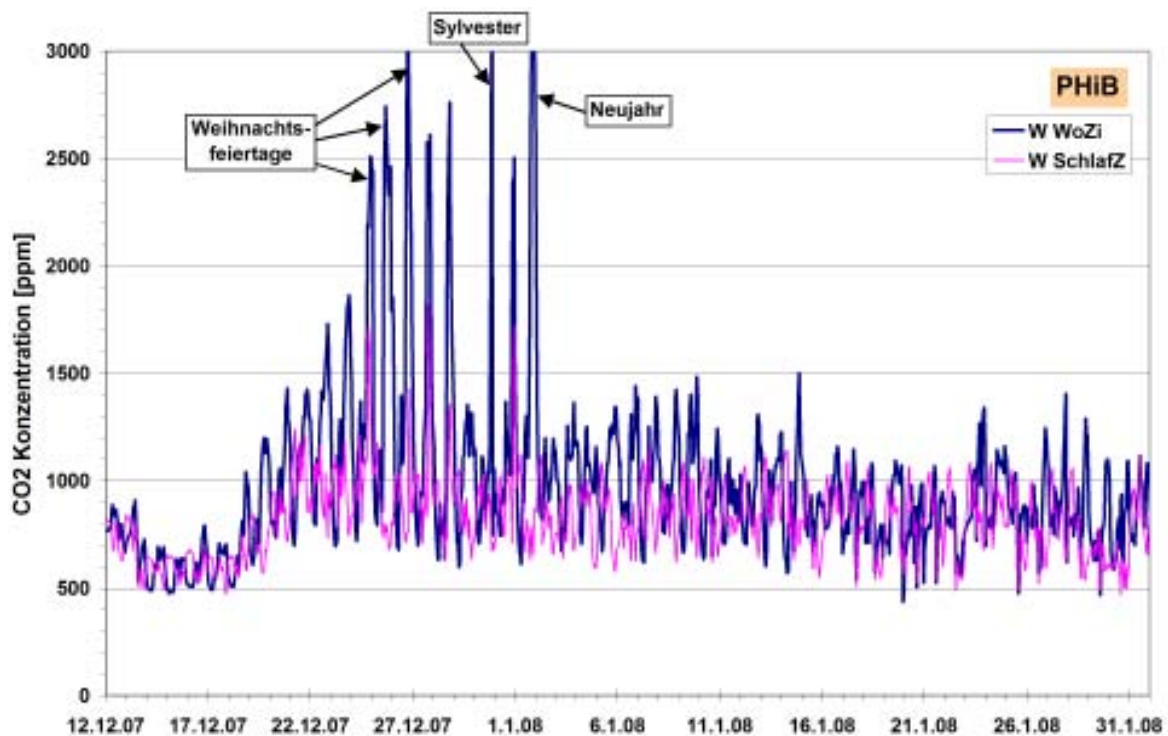


Abbildung 100: Stunden-Messdaten der CO₂-Konzentrationen in Wohnung W im PHiB um die Jahreswende 2007/2008.

CO₂-Konzentration in den NEH Wohnungen

Im NEH werden in den drei untersuchten Wohnungen deutlich häufiger Überschreitungen der 1500 ppm CO₂ festgestellt (Abbildung 101). Insbesondere in einem Schlafzimmer wurden ca. 800 h der Messbereich von 3000 ppm überschritten. Das entspricht 17 % der untersuchten Winterzeit.



In der Detailansicht (Abbildung 102) sind für diese Wohnung im NEH auch wieder die Stunden über der 1500 ppm Grenze eingetragen: Das Wohnzimmer zeigt 1302 h, das Schlafzimmer sogar 1659 h über dem Grenzwert. Das sind entsprechend 28 und 36 % der Untersuchungszeit. Hier kann nicht mehr von guter Raumluftqualität gesprochen werden. Die Wohnung wurde von zwei Personen bewohnt.

Aber auch die Wohnung U erreicht mit der Winterlüftung keine ausreichend gute Raumluftqualität. Hier liegen Überschreitungen von 23 und 27 % vor. In Tabelle 20 sind die Daten der Überschreitung der 1500 ppm Grenze zusammengestellt.

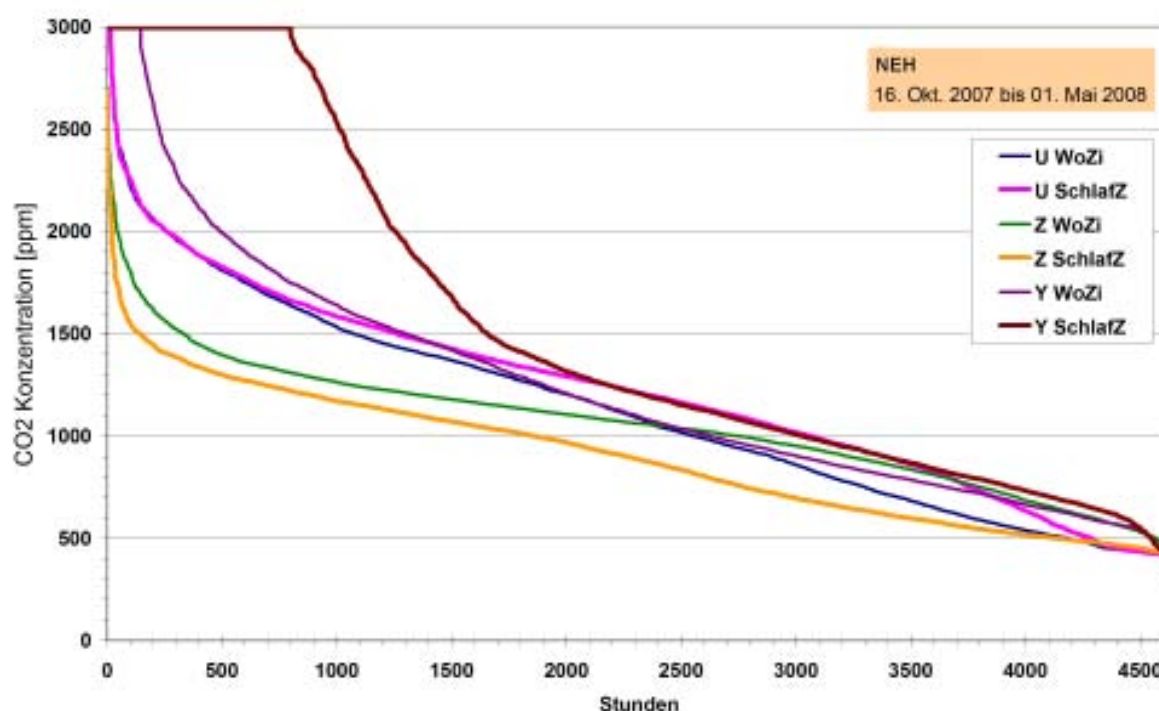


Abbildung 101: Stunden-Messdaten der CO₂-Konzentrationen der drei Wohnungen im NEH im Winter 2007/2008 absteigend sortiert. Der untersuchte Zeitraum umfasst insgesamt 4625 Stunden.

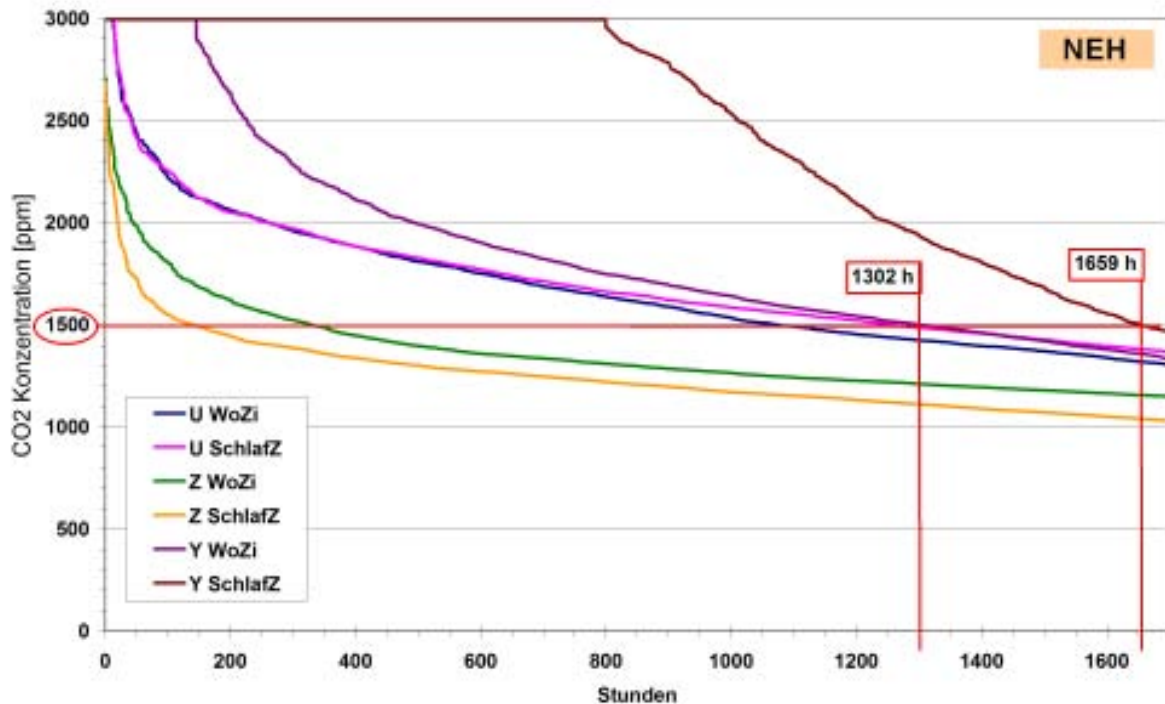


Abbildung 102: Detailansicht aus Abbildung 101 zu den Stunden-Messdaten der CO₂-Konzentrationen während der Wintermonate in den drei NEH Wohnungen.

Tabelle 20: Anzahl der Stunden über 1500 ppm CO₂-Konzentration in den drei Wohnungen im NEH im Winterzeitraum 2007/08.

	über 1500 ppm CO ₂	
	Stunden	Anteil an der Untersuchungszeit
Whg. U WoZi	1073	23%
Whg. U SchlafZ	1261	27%
Whg. Z WoZi	329	7%
Whg. Z SchlafZ	142	3%
Whg. Y WoZi	1302	28%
Whg. Y SchlafZ	1659	36%

Wie stark die Luftqualität mit dem Nutzerverhalten (Anwesenheit, Personenzahl, Lüftungsverhalten) zusammenhängt, zeigt die folgende Abbildung. In Wohnung Y, mit den sehr häufigen Überschreitungen sogar des Messbereichs der eingesetzten Sensoren, fand ein Mieterwechsel statt. Der zeitliche Verlauf der Konzentrationen zeigt eine deutliche Änderung der CO₂-Konzentrationen. Die Mieter sind Anfang Februar 2008 aus der Wohnung ausgezogen. Danach wurde die Wohnung wieder bewohnt und die Messdaten lassen, aufgrund der gleichen Personenzahl, auf deutlich längere tägliche Fensterlüftungszeiten schließen. Dies wird durch die



Messung der Fensteröffnungszeiten deutlich bestätigt: Der berechnete Fensterlüftungsvolumenstrom verdoppelt sich etwa!

Die Beobachtung zeigt, dass ohne Lüftungsanlage eine hohe Luftqualität nicht unabhängig vom Nutzerverhalten gewährleistet werden kann.

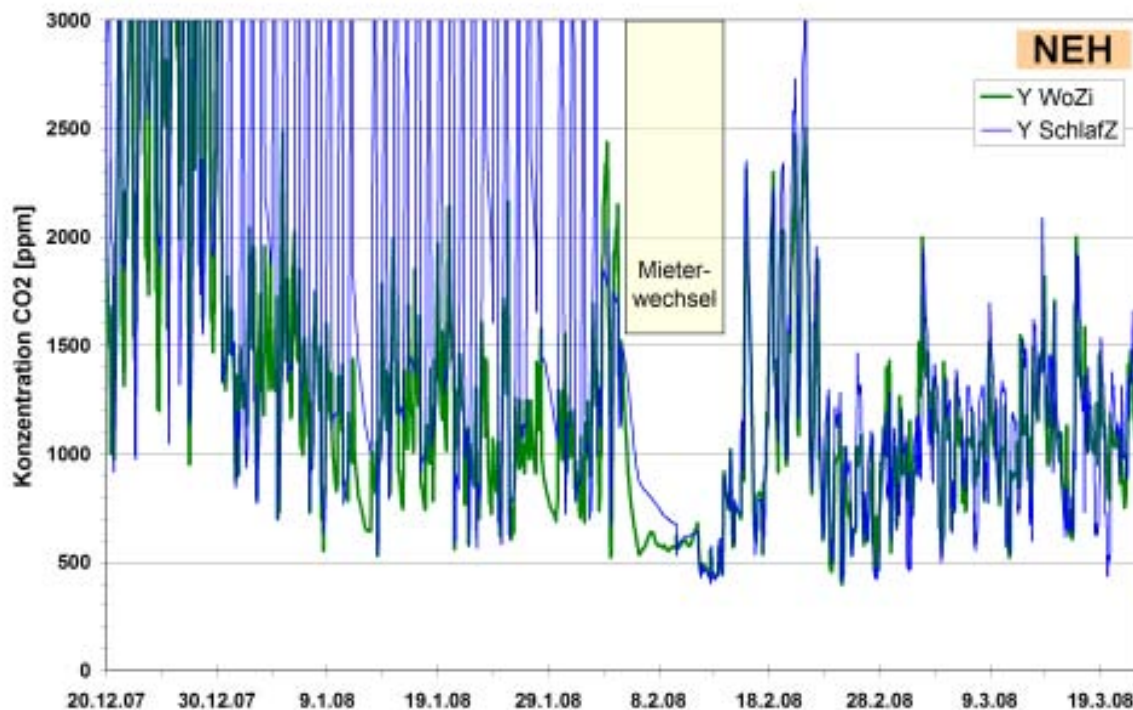


Abbildung 103: Stunden-Messdaten der CO₂-Konzentrationen in Wohnung Y im NEH um den Zeitpunkt des Mieterwechsels herum.

5.2.3.2 Übersicht Konzentrationsintervalle Winterzeitraum

Die Einteilung der gemessenen winterlichen CO₂-Konzentrationen in Konzentrationsintervalle und die Angabe der jeweiligen Häufigkeit (Stundenzahl) erleichtert die Übersicht. Diese Darstellung wird getrennt für beide Gebäude erstellt. Der Vergleich der beiden Darstellungen von Abbildung 104 (PHiB) und von Abbildung 105 (NEH) zeigt die niedrigeren Konzentrationen im PHiB - dies, obwohl die eine Wohnung im PHiB ebenfalls höhere CO₂-Konzentrationen aufweist.

Der Großteil der Stundendaten befindet sich unter 1000 ppm CO₂, eine Wohnung hat fast ausschließlich Konzentrationen in diesem Intervall. Im PHiB sind insgesamt 71 % der Stundendaten unter 1000 ppm, 21 % im Intervall 1000 bis 1499 ppm. Nur wenige Stunden sind oberhalb der 1500 ppm CO₂ Grenze angesiedelt. In der Summe der drei Wohnungen sind es **8 %** der Stunden. In den drei NEH Wohnungen sind es dagegen mit insgesamt **21 %** über 1500 ppm deutlich mehr. Hier ist der Anteil der



Stunden unter 1000 ppm mit 43 % auch deutlich geringer als in den PHiB Wohnungen.

Es muss insgesamt berücksichtigt werden, dass es sich bei den 6 vermessenen Wohnungen mit den 12 untersuchten Zimmern, um eine statistisch kleine Anzahl handelt. Es kann hier nur eine Tendenz abgeleitet werden. Über weitere Randbedingungen, wie die Anwesenheitszeiten der Personen, gibt es keine Informationen. Die Wohnungen sind jeweils mit 2 bis 3 Personen belegt.

Die 500 h Unterteilung (Gitternetzlinie der x-Achse in den Darstellungen) entspricht knapp 11 % der gesamten Stundenzahl (4625 h).

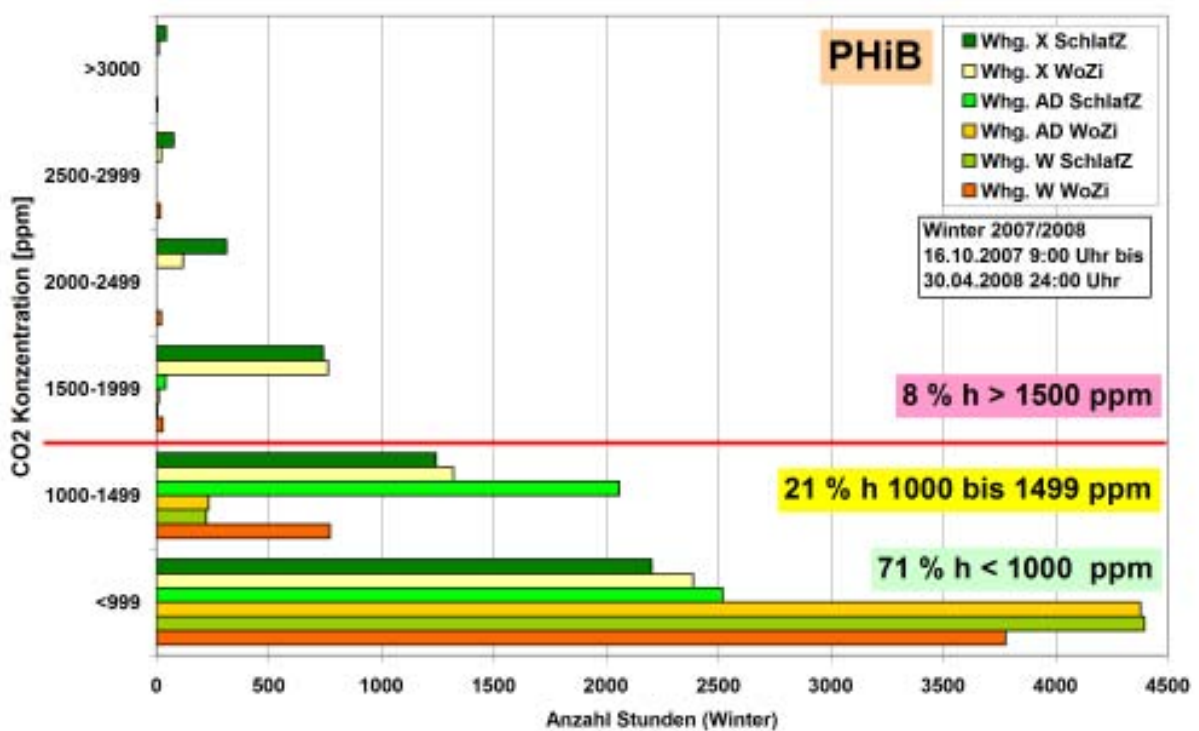


Abbildung 104: Gemessene CO₂-Konzentrationen im PHiB in der Winterzeit. Anzahl der Stunden je Konzentrationsbereich.

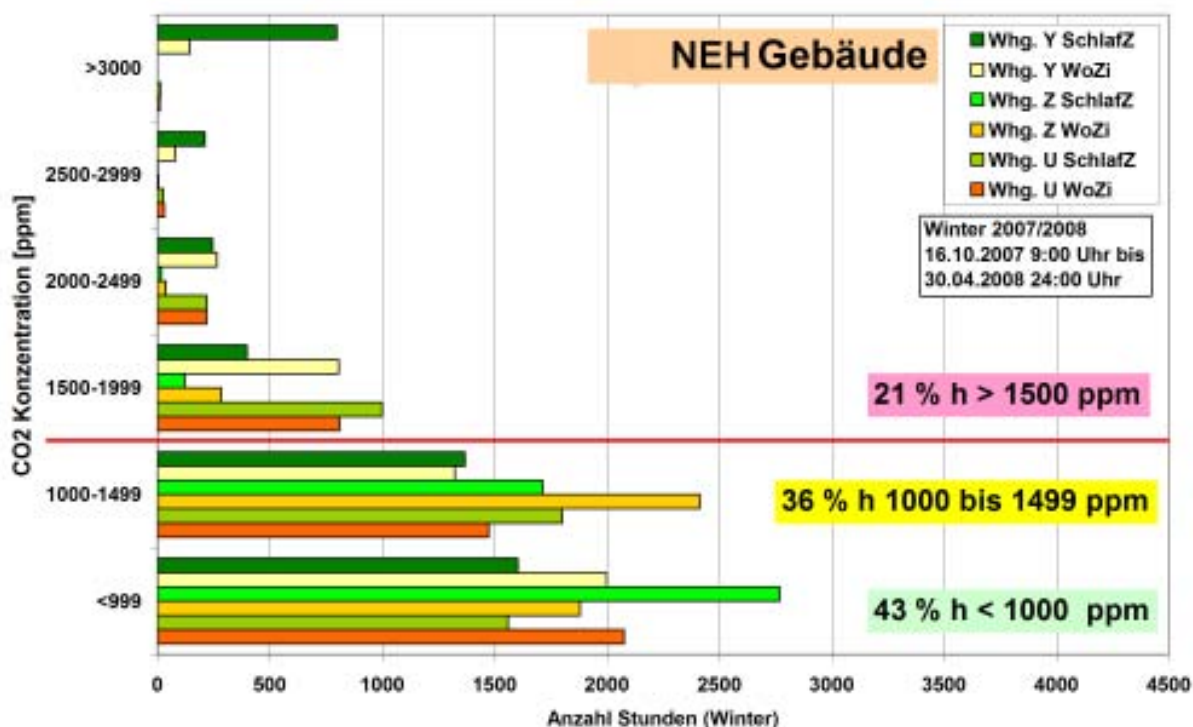


Abbildung 105: Gemessene CO₂-Konzentrationen im NEH in der Winterzeit. Anzahl der Stunden je Konzentrationsbereich.

5.2.3.3 Konzentrationen im Sommerzeitraum

In den Sommermonaten des Jahres 2007 zeigen sich in beiden Gebäuden in fast allen 12 Zimmern vergleichbare niedrige CO₂-Konzentrationen. Es wird in beiden Gebäuden hauptsächlich über die Fenster gelüftet. Dies belegt auch die Auswertung der Fensterkontakte in den NEH Wohnungen.

Nur das Schlafzimmer der Wohnung Y zeigt auch im Sommer noch deutlich höhere Konzentrationen. Sie liegen 191 h über der 1500 ppm Grenze von insgesamt 2888 h (entspricht 7 % Überschreitung). Hier zeigt sich, dass bei einem individuellen Lüftungsverhalten über die Fenster die hohe Luftqualität sogar im Sommer nicht sichergestellt ist.

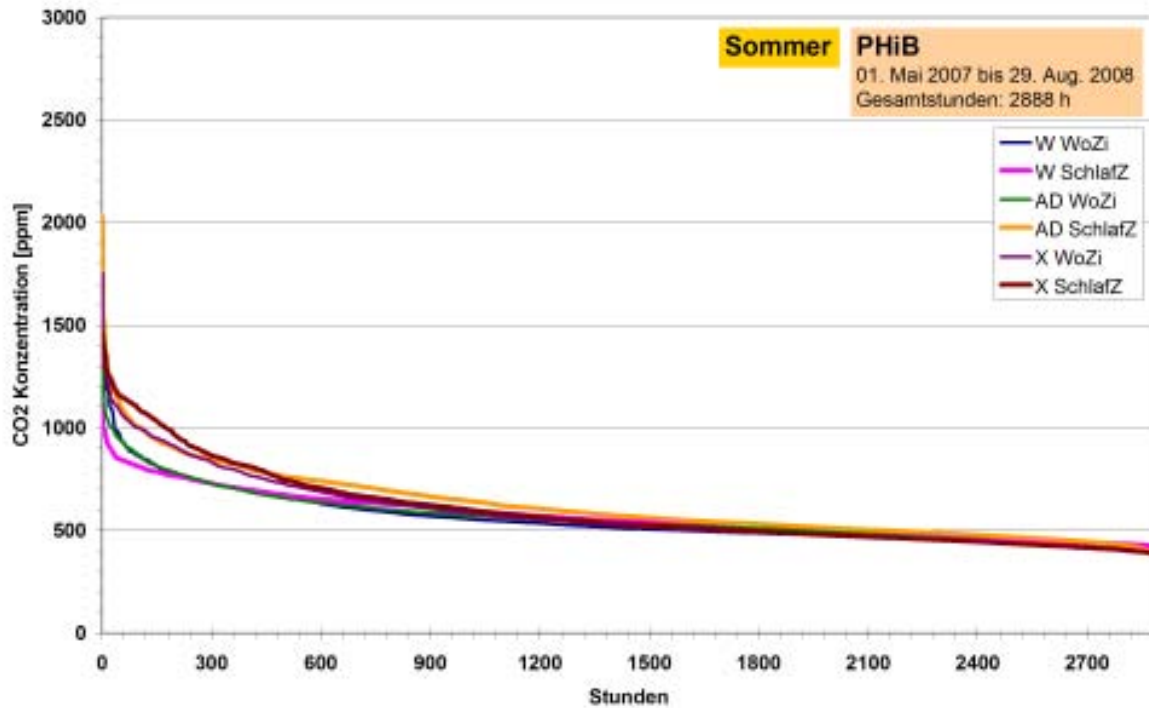


Abbildung 106: Stunden-Messdaten der CO₂-Konzentrationen im PHiB während der Sommermonate 2007.

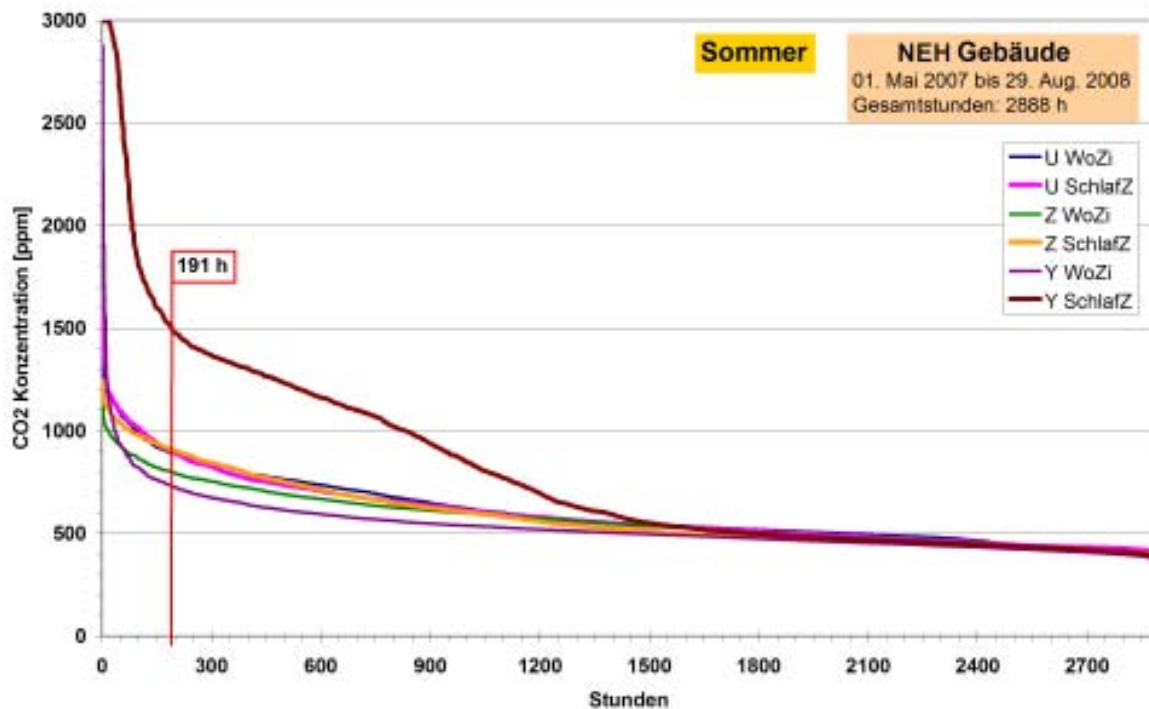


Abbildung 107: Stunden-Messdaten der CO₂-Konzentrationen im NEH während der Sommermonate 2007.



5.3 Fensterlüftung

Zur Abschätzung der über die Fenster realisierten Luftwechselraten im NEH wurden die 15 Fenster bzw. Fenstertüren (zum Balkon) mit handelsüblichen Fensterkontakten ausgerüstet. Der Einbau der Reedkontakte erfolgte durch die Fensterbau-firma. Die Kontakte wurden mit der nachgelagerten Messtechnik verbunden. Durch die verwendeten 15 Impulsgeber können die Öffnungszeiten der einzelnen Fenster in sehr hoher zeitlicher Auflösung gemessen werden. Da jedes Fenster zur Vereinfachung nur mit einem Reedkontakt ausgerüstet wurde, kann nicht zwischen gekipptem und ganz geöffnetem Fenster unterschieden werden.

Zahlreiche Reedkontakte zeigten während der Messzeit Störungen, sie wurden beim Schließen der Fenster z.T. zerstört. Weder der Hersteller noch die Montagefirma konnten die Mängel beseitigen. Aus diesem Grund wurden die Reparaturen vom PHI durchgeführt. Bei den zahlreichen Ortsterminen wurde immer wieder ein Abgleich der Fensterstellungen mit den Signalen der messtechnischen Anlage durchgeführt. Nur so konnten über den langen Zeitraum die Fehlerhäufigkeit und Ausfalllänge der Kontakte begrenzt werden. Da bei den Ortsterminen vereinzelt die Rollläden vor den Fenstern geschlossen waren, konnten die Kontrollen nicht immer vollständig durchgeführt werden.

Aus den Messdaten der Fensteröffnungszeiten wurden die Luftvolumenströme bestimmt. Dazu wurden in einem numerischen Modell auf Basis von Stundendaten folgende Parameter berücksichtigt:

1. Fensterabmessungen und lichte Öffnungsflächen (unter Berücksichtigung der Laibungen)
2. Fensteröffnungszeiten
3. Windgeschwindigkeit
4. Temperaturdifferenz (Raum- gegenüber Außentemperatur)

Aus diesen Daten wurde der Lüftungsvolumenstrom jeder Wohnung aufgrund des Windeinflusses und aufgrund der Temperaturdifferenz abgeschätzt. Es handelt sich tendenziell um eine untere Abschätzung, da Querlüftungseffekte nicht berücksichtigt wurden, ebenso wie im Modell nur gekippte Fenster angenommen wurden. Die einseitige Lüftung wurde angesetzt, da keine Informationen zur Stellung der Innentüren vorhanden waren.

Als zusätzliche Unsicherheit bei der Berechnung kommt hinzu, dass keine Informationen über die Stellung der Rollläden vor den Fenstern gemessen wurden. Es kann also zeitweise nicht ausgeschlossen werden, dass ein Fenster geöffnet ist, der Rollladen aber den Luftwechsel verhindert oder einschränkt. Der Luftwechsel wäre in solchen Fällen dann entsprechend kleiner als berechnet. Bei der thermographischen Untersuchung zeigte sich, dass bei zwei der drei Schlafzimmerfenster die Fenster gekippt waren, aber gleichzeitig die Rollläden ganz bzw. etwa $\frac{3}{4}$ geschlossen waren. Die Untersuchung wurde am kältesten Tag (21.12.2008) des

gesamten Untersuchungszeitraumes durchgeführt. Wie weiter unten beschrieben wird, steht in der Wohnung mit den längsten Lüftungszeiten im Schlafzimmer fast dauerhaft das Fenster offen (91 % der Kernwinterzeit, restliche Fenster der Wohnung im Mittel nur 10 %). Ein Großteil des berechneten Luftwechsels dieser Wohnung erfolgt über dieses eine Fenster. Es kann allerdings nach den Beobachtungen vom 21.12.2008 vermutet werden, dass der Rollladen zumindest nachts geschlossen ist. Damit reduziert sich der mit dem Modell berechnete Luftwechsel sehr stark. In der zweiten Wohnung wurde der vollständig geschlossene Rollladen bei geöffnetem Fenster vorgefunden. Für diese Wohnung ergibt sich ein ähnliches Bild (Schlafzimmerfenster 63 % der Kernwinterzeit geöffnet, restliche Fenster im Mittel nur 7 %). Wird dies bei der Beurteilung berücksichtigt, handelt es sich um eine eher **obere Abschätzung der realen Luftwechsel**.

Die Windmessung erfolgt in ca. 6 m Höhe in freier Lage (Wetterstation [Zimen]). Das Gebäude ist viel stärker verbaut. Daher wurde die Windgeschwindigkeit nur anteilig berücksichtigt. Die schwache Exponiertheit des Gebäudes kann in dem Modell als Anteil der Windgeschwindigkeit variiert werden. Bei der Auswertung zeigte sich dann wie erwartet, dass der Wind gegenüber dem thermischen Antrieb (Temperatureinfluss) einen sehr geringen Einfluss auf den Luftwechsel ausübt.

Der dominierende Antrieb für den Luftwechsel bei geöffnetem Fenster ist die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen (Temperaturantrieb).

Das Ergebnis der Berechnungen ist der Lüftungsvolumenstrom einer jeden Wohnung zu jeder Stunde. Dafür werden die Ergebnisse der fünf einzelnen Fenster einer Wohnung zu einem Wohnungswert addiert. Als Beispiel werden in Abbildung 108 und Abbildung 109 die Stundendaten der Volumenströme für zwei der drei Wohnungen in einem Zeitausschnitt von 11 Tagen dargestellt.

Es ist ein deutlicher Unterschied im Lüftungsverhalten der Nutzer zu erkennen: In Wohnung Y werden die Fenster nur für kürzere Lüftungsvorgänge geöffnet. Dazwischen findet kein Luftwechsel statt. In dem dargestellten Dezemberzeitraum werden Maximalwerte bis zu 180 m³/h erreicht. In Wohnung Z dagegen liegen die Spitzenwerte nur bei 120 m³/h. Es besteht aber dauerhaft, mit nur minimalen Unterbrechungen, ein Grundluftwechsel um 40 m³/h. Dazu sind nahezu immer ein oder mehrere Fenster der Wohnung geöffnet.

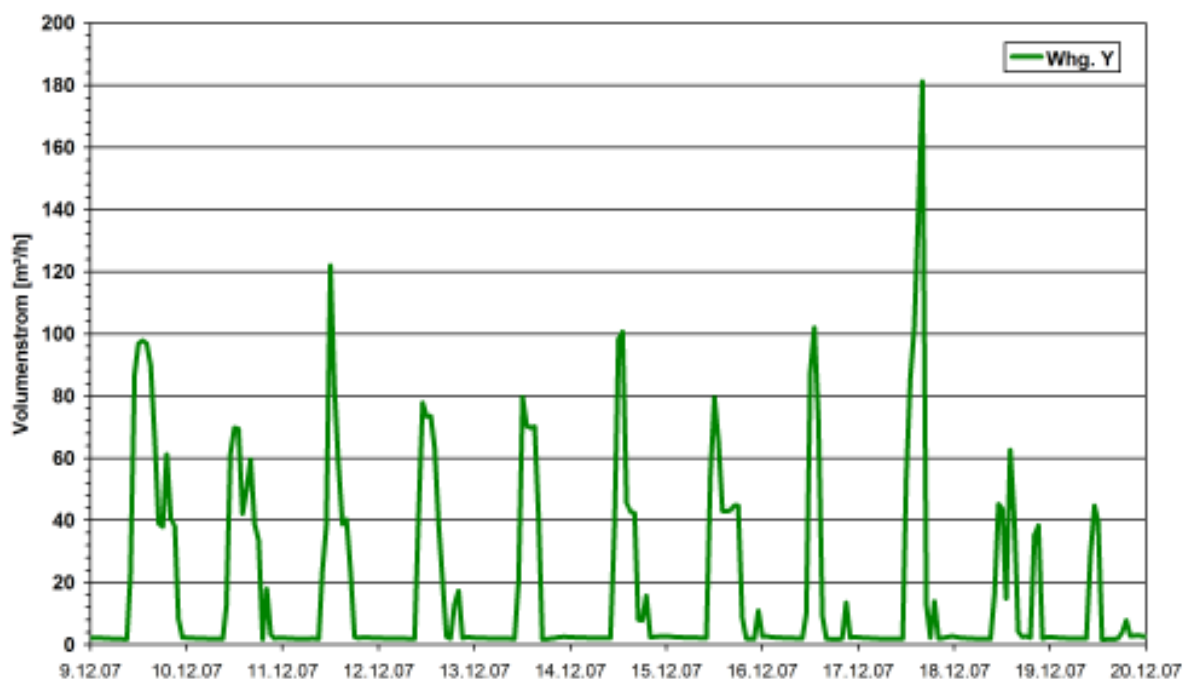


Abbildung 108: Stundenmittelwerte der berechneten Volumenströme aufgrund der Fensteröffnungszeiten in Wohnung Y im NEH (09.12.2007 bis 19.12.2007).

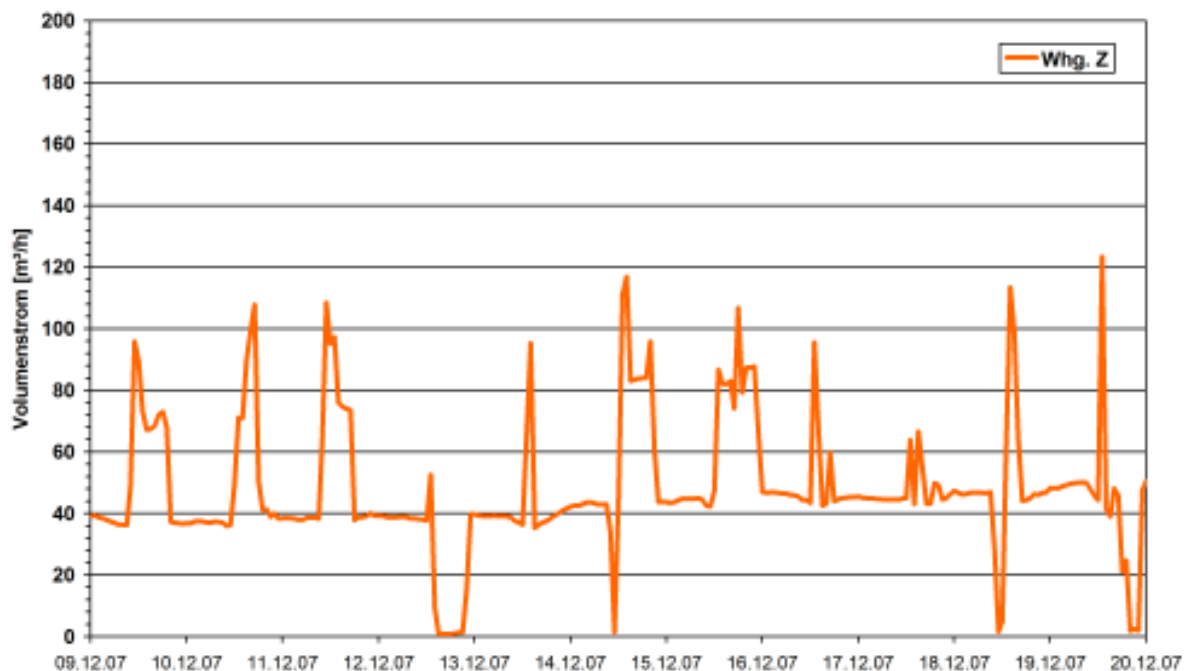


Abbildung 109: Stundenmittelwerte der berechneten Volumenströme aufgrund der Fensteröffnungszeiten in Wohnung Z im NEH (09.12.2007 bis 19.12.2007).

Werden die berechneten Volumenströme aller drei untersuchten Wohnungen über den Winterzeitraum dargestellt, ist es notwendig mit gleitenden Mittelwerten zu arbeiten. Nur dann können in der Grafik die Unterschiede zwischen den Wohnungen

abgelesen werden. In der Darstellung für die Wohnungen (Abbildung 110) sind deutliche Unterschiede zwischen den drei Wohnungen ablesbar.

Zu Beginn der dargestellten Zeit ist bei allen drei Wohnungen ein starker Rückgang der Volumenströme zu erkennen. Das Detail des Anfangszeitraumes in Abbildung 111 mit der ergänzten Außentemperatur zeigt eindeutig die starke Korrelation der Fensterlüftungsvolumenströme mit der Außenlufttemperatur: Wenn die sommerlichen Temperaturen zurückgehen, es draußen kälter wird, reduzieren die Bewohner die Fensteröffnungszeiten (Lüftungsvolumenströme) bis zu einem gewissen Niveau.

In den Wintermonaten pendeln die Volumenströme der drei Wohnungen dann auf unterschiedlichen Niveaus. Es gibt die „Viellüfter“ mit Werten zwischen 40 und 60 m³/h, die „Weniglüfter“ mit Werten zwischen 5 und 20 m³/h sowie die Nutzer im Mittelfeld.

Die extremen Veränderungen der Luftmengen ab dem 05. Februar 2008 in Wohnung Y sind mit einem Mieterwechsel begründet. Die neuen Nutzer haben ein deutlich unterschiedliches Verhalten gegenüber den Vormietern. Der Luftvolumenstrom steigt auf ein Niveau um 40 m³/h. Auch die Veränderung bei Wohnung U hat ihre Ursache in einem Auszug der Mieter: Sie haben die Wohnung ab etwa Mitte April 2008 nicht mehr genutzt, der Luftwechsel fällt schlagartig auf Null ab. Vorher gibt es – für die Wohnung - untypisch hohe Volumenströme.

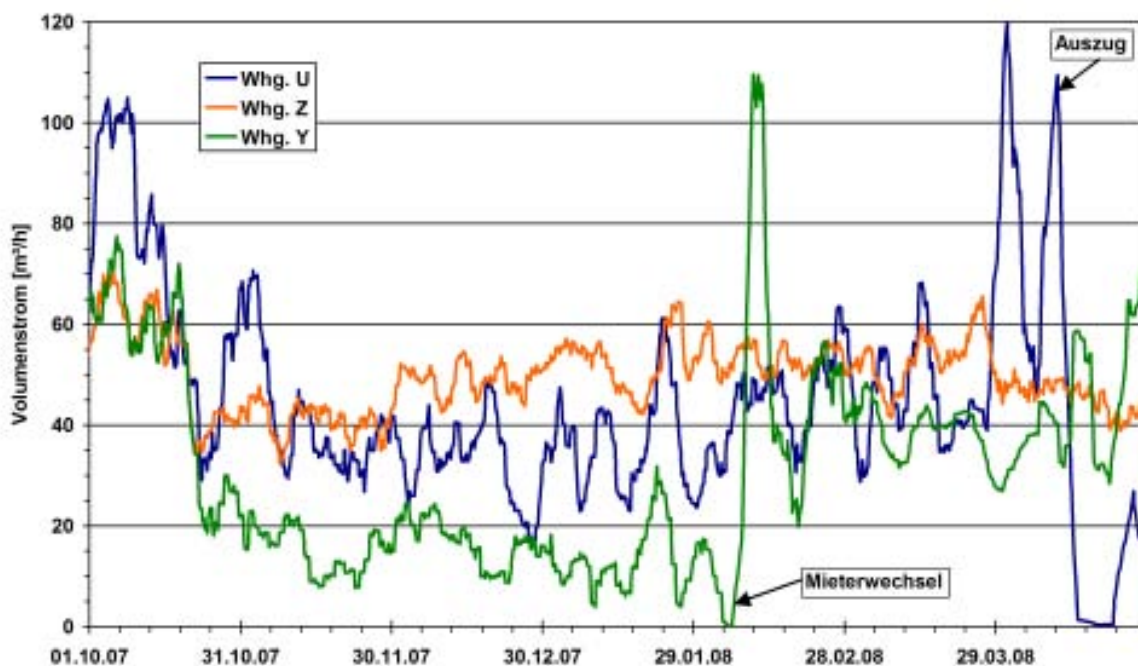


Abbildung 110: Berechnete Volumenströme aufgrund der Fensteröffnungszeiten in den drei Wohnungen im NEH (01.10.2007 bis 26.04.2008). Die Stundendaten sind hier als gleitender 3-Tages Mittelwert dargestellt.

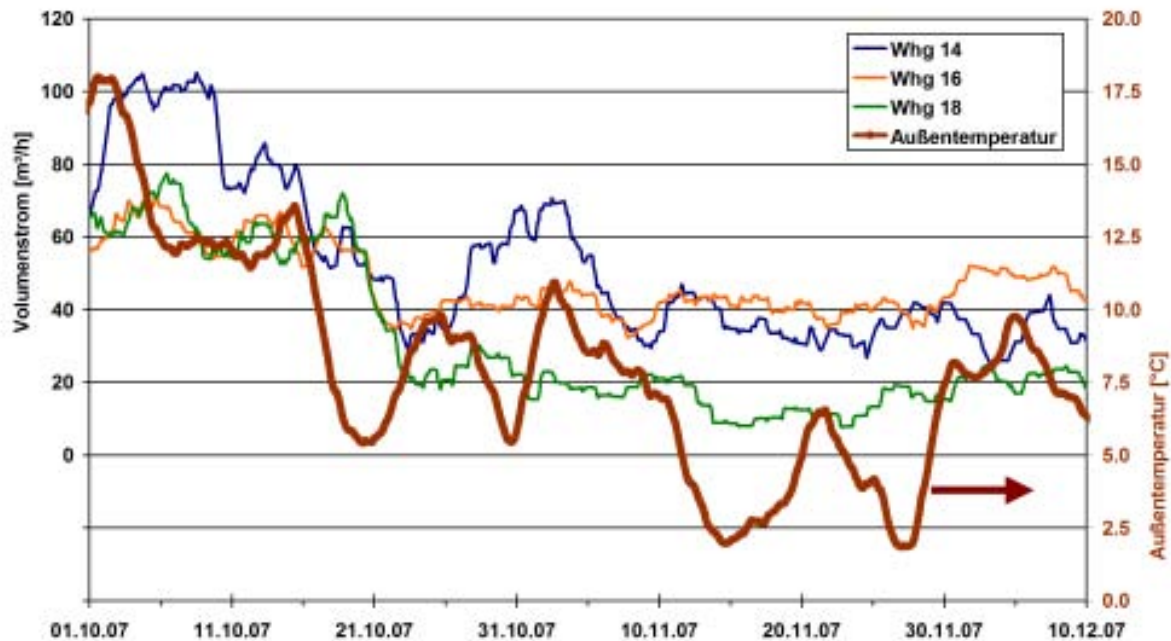


Abbildung 111: Detail (01.10. bis 09.12.2007) der Daten aus Abbildung 110 ergänzt mit dem gleitenden Mittelwert der Außentemperatur.

Die berechneten Volumenströme passen damit sehr gut zu den Ereignissen, die von den Wohnungen bekannt sind (Bewohnerauszüge).

Die gemessenen Öffnungszeiten der 15 Fenster, die der Berechnung zugrunde liegen, schwanken je Fenster zwischen 1% und 91% der Gesamtzeit des Kernwinters. Jeweils für die drei Wohnungen gemittelt sind die Fenster 10%, 18% bzw. 26% der Zeit geöffnet. Die über den Zeitraum gemittelte durchschnittliche Öffnungszeit pro Fenster liegt damit in den 3 Wohnungen zwischen 2,4 und 6,2 Stunden pro Tag. Es handelt sich um einen Durchschnittswert, es können also auch einige Fenster der Wohnung dauerhaft geschlossen sein und andere dagegen viel länger geöffnet.

In [Ebel 2003] werden die gemessenen durchschnittlichen Fensteröffnungszeiten in Niedrigenergiehäusern (mit feuchtegesteuerten Abluftanlagen) in der Heizperiode (Nov. bis März) mit 2,1 und 1,5 Stunden pro Tag und Fenster angegeben. Das ist deutlich weniger als bei den drei Wohnungen des untersuchten NEH festgestellt wurde. Diese Wohnungen verfügen allerdings auch über keine Abluftanlage.

Tabelle 21 legt den Schluss nahe, dass sich der Unterschied im höheren Luftwechsel, wie erwartet, auch auf den Energieverbrauch auswirkt: In Wohnung Y mit dem niedrigen Lüftungsvolumenstrom ist der Heizwärmeverbrauch nicht einmal halb so hoch wie in Wohnung Z. Der Unterschied in den Raumtemperaturen und auch der unterschiedliche Stromverbrauch (interne Wärmequellen) können diesen Unterschied nicht erklären. Das unterschiedliche Lüftungsverhalten ist hier als Hauptursache deutlich zu erkennen. In Wohnung U als „Mittellüfter“ wird die höchste Raumlufttemperatur realisiert, was den Heizwärmeverbrauch erhöht. In dieser Betrachtung wird

jede Wohnung vereinfacht über den ganzen Zeitraum betrachtet, d.h. Mieterwechsel werden nicht berücksichtigt.

Tabelle 21: Lüftungsverhalten, Heizwärme- und Stromverbrauch sowie mittlere Raumtemperaturen der drei untersuchten Wohnungen im NEH im Winter 2007/2008 bzw. im zweiten Bilanzjahr.

	Fenster-Lüftungsverhalten	Heizwärmeverbrauch 2007/2008	Raumtemperatur Kernwinter	Stromverbrauch 2007/2008
Wohnung	[/]	[kWh/(m ² a)]	[°C]	[kWh/(m ² a)]
U	„Mittellüfter“	28,5	21,5	24,8
Y	„Weniglüfter“	14,3	20,9	26,1
Z	„Viellüfter“	31,0	21,3	23,1

Aus den Volumenströmen kann mit Hilfe des Raumvolumens der Luftwechsel berechnet werden. Dies wurde unterschieden nach der gesamten Winterzeit (01.10.2007 bis 30.04.2008) und der Kernwinterzeit (01.11.07 bis 29.02.08). Die Ergebnisse sind in Tabelle 22 zusammengestellt.

Tabelle 22: Berechnete Luftwechsel der drei untersuchten Wohnungen im NEH im Winter 2007/2008.

[h ⁻¹]	Whg. U	Whg. Z	Whg. Y
n _L Winter (01.10.07 bis 30.04.2008)	0,23	0,26	0,15
n _L Kernwinter (01.11.07 bis 29.02.08)	0,20	0,26	0,10

Die Luftwechsel der Wohnungen liegen im Kernwinter zwischen 0,10 und 0,26 h⁻¹ (Mittelwert 0,19 h⁻¹). Diese Luftwechsel werden hauptsächlich durch die Fenster in den Schlafzimmern verursacht: Ohne die Luftwechsel der Schlafzimmer geht der Luftwechsel je nach Wohnung um den Faktor 1,6 bis 3,7 zurück. Die rechnerisch verbleibenden Luftwechsel sind dann mit 0,07 bis 0,09 nur noch minimal.

Bei den Ergebnissen der Berechnungen muss berücksichtigt werden, dass es sich nur um eine kleine Stichprobe von drei Wohnungen handelt, die nicht auf das ganze Gebäude übertragen werden kann.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die erreichten Luftwechsel mit im Mittel 0,19 h⁻¹ im NEH deutlich geringer sind als die im PHiB festgestellten mit 0,35 bis 0,47 h⁻¹ (vgl. Tabelle 8). Diese Tatsache ist auch an den Unterschieden in der Luftfeuchte und den CO₂-Konzentrationen abzulesen; sie wirken sich natürlich auch auf den Heizwärmeverbrauch aus. Informationen dazu sind in den entsprechenden Kapiteln dargestellt. Eine ausreichende Luftqualität kann damit im NEH nicht durchgängig garantiert werden – obwohl mit durchschnittlichen Fensteröffnungszeiten im Kernwinter von täglich 2,4 bis 6,2 Stunden je Fenster relativ lange Fensterlüftungszeiten beobachtet werden.



Die weiter unten ausgeführte energetische Auswertung für das NEH (vgl. Abschnitt 5.4.3.1) zeigt, dass bei einem Luftwechsel um $0,15 \text{ h}^{-1}$ die größte Übereinstimmung des Bedarfswertes mit dem Verbrauchswert vorhanden ist. Da es sich bei dem hier berechnetem Mittelwert $0,19 \text{ h}^{-1}$ um eine obere Abschätzung des Fensterluftwechsels handelt, passt dies sehr gut zu der Luftwechselrate $0,15 \text{ h}^{-1}$.

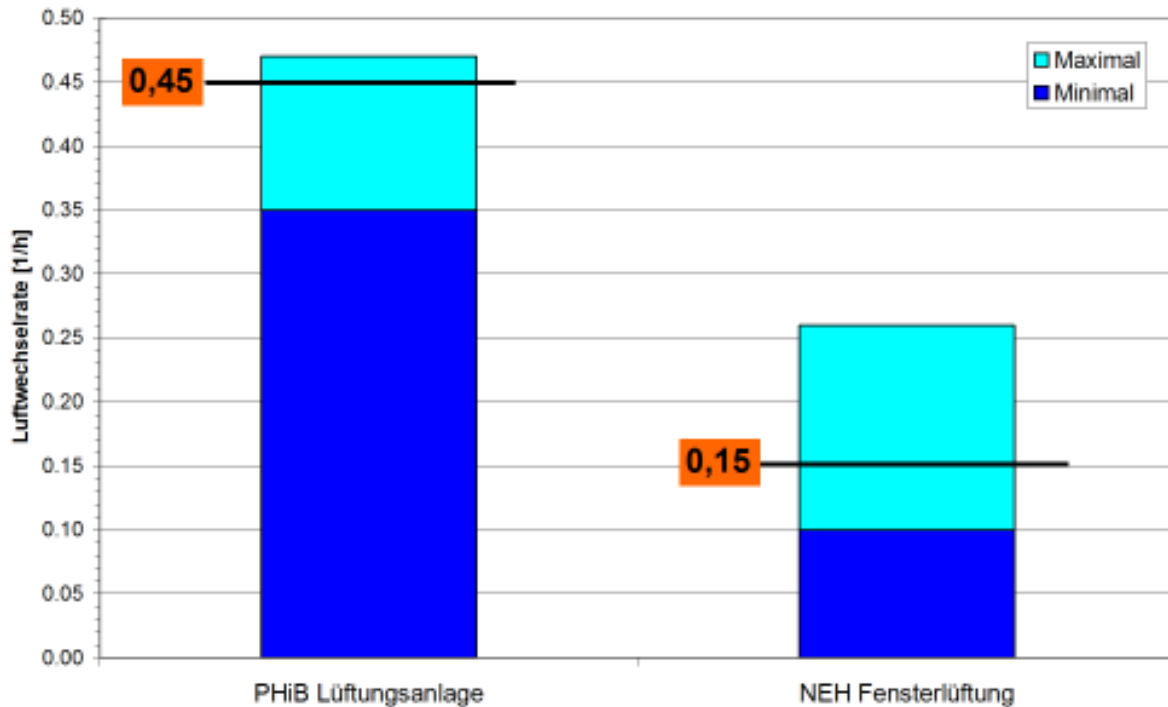


Abbildung 112: Gemessene und berechnete Luftwechselraten in den beiden Gebäuden (Fensterlüftung im Vergleich zur Lüftung über Lüftungsanlagen).

Die Nutzer sind mit einer „Regelung“ der Fensterlüftung i.a. überfordert. Das erklärt die vielen auch anderer Orts berichteten Probleme mit feuchten Wohnungen nach dem Einbau von neuen, dichten Fenstern. Akute Probleme dieser Art gibt es bei diesem Bauprojekt nicht (siehe nächster Abschnitt), das ist aber vor allem darauf zurück zu führen, dass ein sehr gutes Wärmedämmniveau vorliegt und Wärmebrücken sorgfältig reduziert wurden.

5.4 Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser

Die Energieversorgung für Heizung und Warmwasser wird für die beiden Gebäude durch einen gemeinsamen Nahwärmeanschluss bereitgestellt. Der Übergaberaum mit Warmwasser-Wärmeübertrager, zwei Warmwasserspeichern und den zentralen Wärmezählern befindet sich im Keller von Haus 5 (NEH). Von hier aus wird die Wärme in beide Gebäude verteilt. Für das Monitoring wurden je Gebäude folgende zentrale Wärmezähler realisiert:

- Heizung gesamt
- Warmwasserladung des Speichers („WW-Ladung“)
- Warmwasserentnahmen Speicher („Warmwasser“)
- Zirkulation Warmwasser („Zirkulation“)

In dem Übergaberaum sind damit insgesamt acht Wärmemengenzähler für die Untersuchung vorhanden. In jeder der 24 Wohnungen ist jeweils ein Wärmezähler zum Erfassen der Heizwärme installiert. Außerdem ist in jeder Wohnung noch ein Warm- und ein Kaltwasserzähler vorhanden, mit denen die Wassermengen erfasst werden.

In der gesamten Untersuchung wird die Energiebezugsfläche (EBF) von 750,2 m² je Gebäude zugrunde gelegt. Die nach EnEV bestimmte Gebäudenutzfläche A_N ist mit 960 m² je Gebäude um 28 % deutlich größer. Diese wird hier nicht verwendet.

Die Messdaten zu den Wärmeverbräuchen der Wohnungen liegen belastbar von April 2006 bis April 2008 vor, die Daten der Hauptwärmezähler ab Mai/Juni 2006. Für die Auswertung wird als Bilanzjahr der 01. Mai 2007 bis 30. April 2008 gewählt. Der davor liegende Jahreszeitraum wird teilweise als Vergleichszeitraum verwendet.

5.4.1 Gesamter Wärmebezug

Die Übergabestation der Nahwärmeversorgung für beide Gebäude befindet sich im Technikeller von Haus 5. Von hier werden beide Warmwasserspeicher beladen und die Heizkreise der beiden Gebäude direkt angefahren. Die Übergabestation verfügt über keinen fernablesbaren Wärmezähler, der für die Messungen nutzbar wäre. Nach Abbildung 63 wird die für die beiden Gebäude gelieferte Wärme mit vier zentralen Wärmezählern erfasst. Zwei messen die beiden Heizkreise (PHiB und NEH), die anderen zwei messen den Wärmebezug für die Warmwasserbereitung (WW-Ladung) vom PHiB und von dem NEH Warmwasserspeicher.

Die monatlichen Energieverbräuche sind in Abbildung 113 und Abbildung 114 dargestellt. Der typische zyklische Verlauf des Heizwärmeverbrauchs ist bei beiden Gebäuden zu erkennen, genauso wie der dagegen relativ konstante Wärmebezug für



die Warmwasserbereitung. Der Energiebezug beim NEH ist wie erwartet höher als im PHiB.

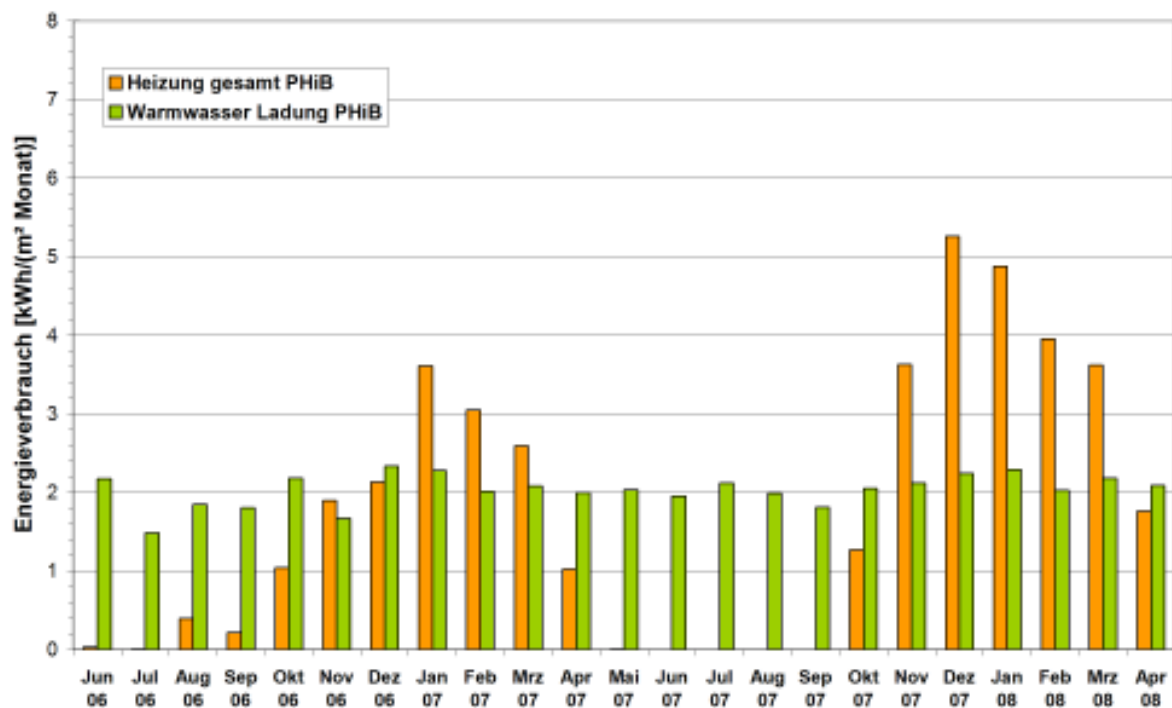


Abbildung 113: Monatlicher Energiebezug des PHiB von der Nahwärmeübergabestation.

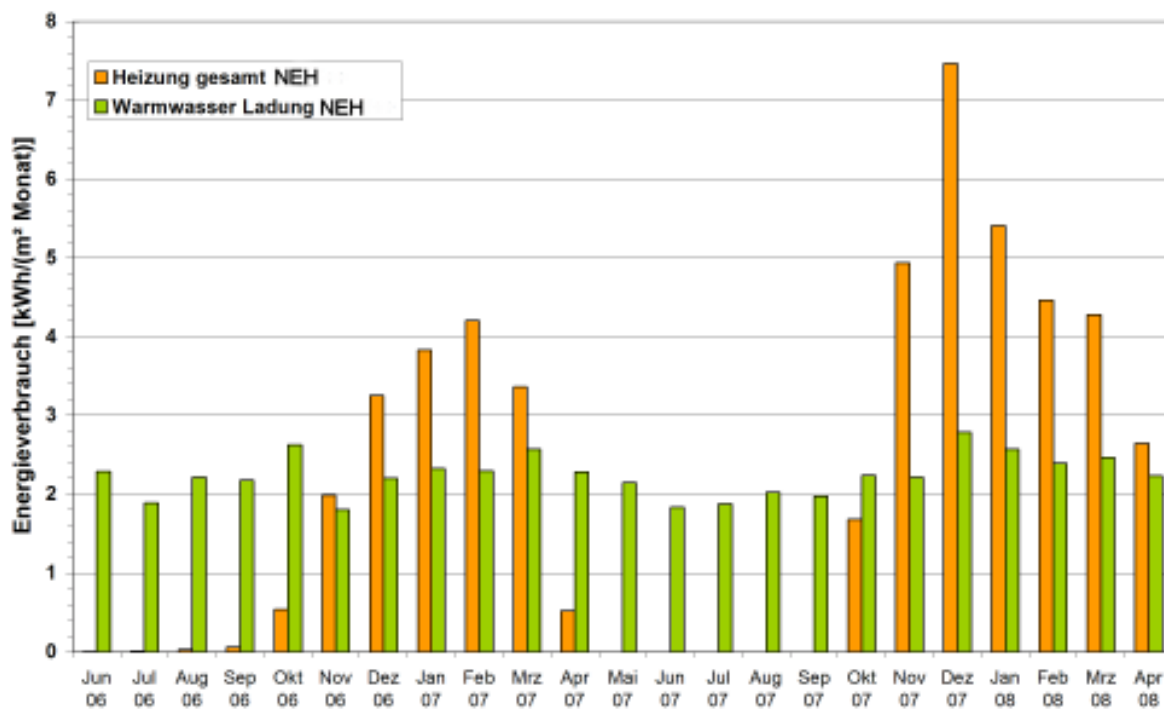


Abbildung 114: Monatlicher Energiebezug des NEH von der Nahwärmeübergabestation.

In den dargestellten 23 Monaten beträgt der mittlere monatliche Verbrauch für die Warmwasserversorgung im PHiB 2,0 und im NEH 2,2 kWh/(m² Monat). Die spezifischen Verbräuche für die Warmwasserbereitung schwanken im PHiB zwischen 1,5 und 2,3 kWh/(m² Monat). Im NEH liegen sie mit 1,8 bis 2,8 kWh/(m² Monat) etwas höher.

In der Summe für Heizung und Warmwasserbereitung inkl. der nutzbaren und nicht nutzbaren Speicher- und Verteilverluste ab den vier Hauptzählern werden im zweiten Bilanzjahr (01. Mai 2007 bis 30. April 2008) unter Berücksichtigung der Querwärmeströme zwischen den Gebäuden (Erläuterung weiter unten) die folgenden spezifischen Endenergieverbräuche gemessen:

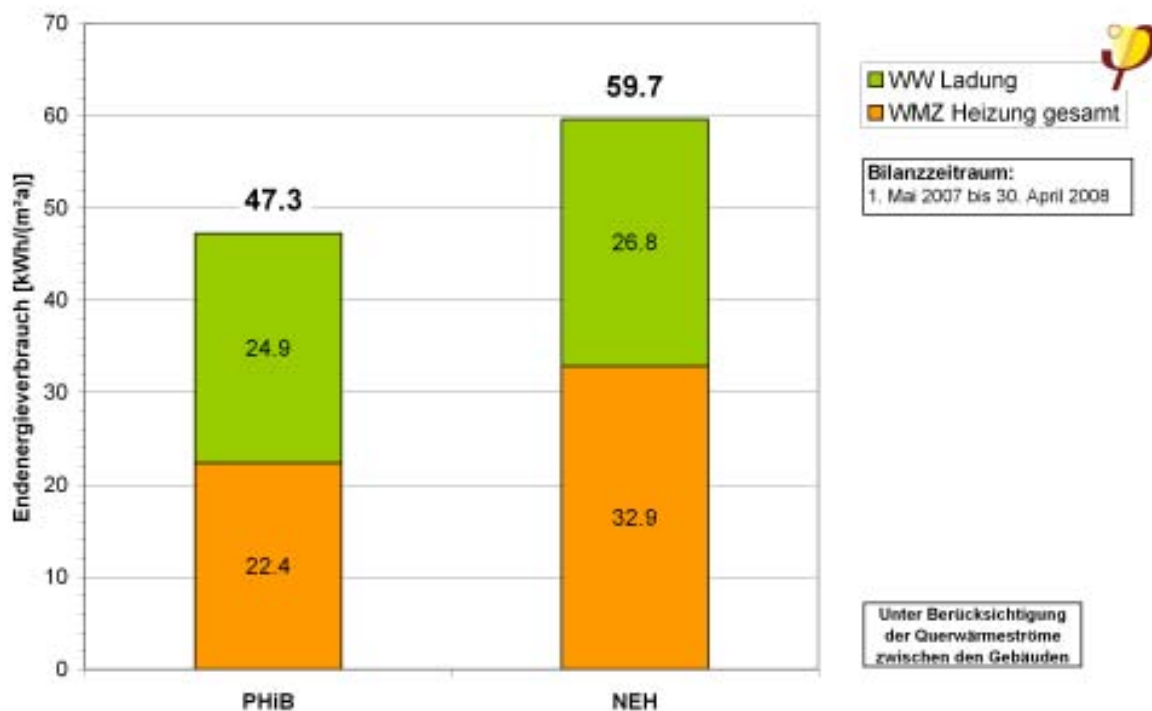


Abbildung 115: Summen der gesamten spezifischen Wärmeverbräuche (Endenergie Wärme) der beiden Gebäude im zweiten Bilanzjahr (inkl. aller Verluste; bezogene Wärme unter Berücksichtigung der Querwärmeströme zwischen den beiden Gebäuden).

Um einen ungewollten Heizwärmeverbrauch in den Sommermonaten zu verhindern wurde daraufhin gewirkt, dass Jahresschaltuhren für die Unterbrechung der Stromversorgung der beiden Heizkreispumpen montiert werden. In anderen Gebäuden wurden derartige ungewollte sommerliche Heizwärmeverbräuche immer wieder festgestellt. Die Regelung der Übergabestation konnte diese Aufgabe nicht erfüllen. Der Einbau der Schaltuhren wurde erst im Sommer 2007 realisiert. Die vorgeschlagenen und die tatsächlich eingestellten Schaltzeiten sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.



Tabelle 23: Schaltzeiten der Jahresschaltuhren zur Unterbrechung der Heizkreispumpen.

	Heizung an	Heizung aus
Vorgeschlagene Schaltzeiten		
PHiB	01. November	15. April
NEH	01. Oktober	30. April
Eingestellte Schaltzeiten (nach Wärmeverbrauchsmessung)		
PHiB	19. Oktober	15. April
NEH	19. Oktober	01. Mai

Im August und September 2006 - also vor dem Einbau der Schaltuhren - sind noch Heizwärmeverbräuche gemessen worden. Die Abschaltung im April 2007 beider Heizkreise wurde per Hand ausgeführt (Unterbrechung der Stromversorgung).

5.4.2 Heizwärmeverbrauch der einzelnen Wohnungen

Die gesamten Wärmeverbräuche der beiden Heizkreise teilen sich auf in die Heizwärmeverbräuche der einzelnen Wohnungen und der durch die Verteilungen abgegebenen Wärmemengen. Mit den Wärmemengenzähler der einzelnen Wohnungen werden die Heizwärmeverbrauchswerte der 24 Wohnungen einzeln erfasst.

Im zweiten Bilanzjahr wurden im PHiB spezifische Wärmeverbräuche zwischen 0,0 und 38,9 gemessen. Der Mittelwert in dieser Heizperiode 2007/2008 lag im Durchschnitt im

PHiB bei 16,4 kWh/(m²a).

Damit wird im PHiB ein Heizwärmeverbrauch gemessen wie er aus Passivhaus-Neubauten üblich ist. Für ein saniertes Gebäude ist damit ein extrem niedriger Verbrauchswert erreicht worden. Das Projekt ist damit als sehr erfolgreich zu bewerten.

Der sehr milde Winter vom Vorjahr 2006/2007 führte zu deutlich noch niedrigeren Heizwärmeverbräuchen: Durchschnittlich wurden im PHiB nur 9,1 kWh/(m²a) verbraucht.

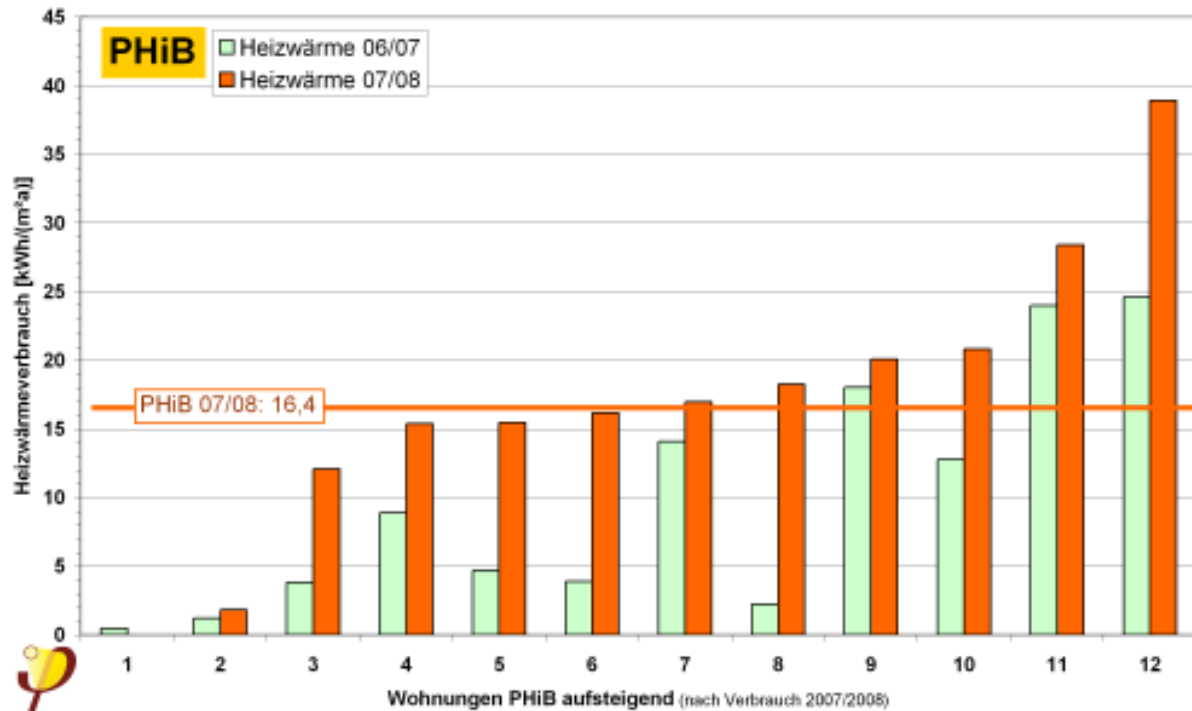


Abbildung 116: Heizwärme (Bezug inkl. Querwärmeströme zum NEH) der einzelnen Wohnungen des PHiB in den beiden Bilanzzeiträumen. Es ist der mittlere Heizenergieverbrauch für das Bilanzjahr 01. Mai 2007 bis 30. April 2008 eingetragen.

Für die Beurteilung der Heizwärmeverbräuche spielen neben der Lüftung vor allem die Raumlufttemperaturen eine entscheidende Rolle. In Abbildung 117 werden für beide Gebäudeteile (PhiB und NEH) die Messwerte für Heizwärme und Raumlufttemperatur in den einzelnen Wohnungen miteinander korreliert. Die Abbildung zeigt zunächst wieder die deutlich höheren Raumtemperaturen im PHiB gegenüber dem NEH. Die Korrelation ist beim PHiB etwas stärker ausgeprägt. Allerdings darf die Aussage aufgrund der relativ kleinen Anzahl der Wohnungen nicht überbewertet werden. Im NEH sind dazu nur 11 Wertepaare vorhanden, da eine Temperaturmessstelle in diesem Winter ausgefallen war. Beim PHiB gibt es zwei, beim NEH eine Wohnung, die quasi gar nicht mehr aktiv beheizt wird. Deren Bewohnern reicht die Raumtemperatur, die sich aufgrund der Querwärmeströme aus den umliegenden wärmeren Wohnungen einstellt. Dieser Effekt ist in [Pfluger/Feist 2001] für hochwärmedämmte Gebäude näher untersucht worden.

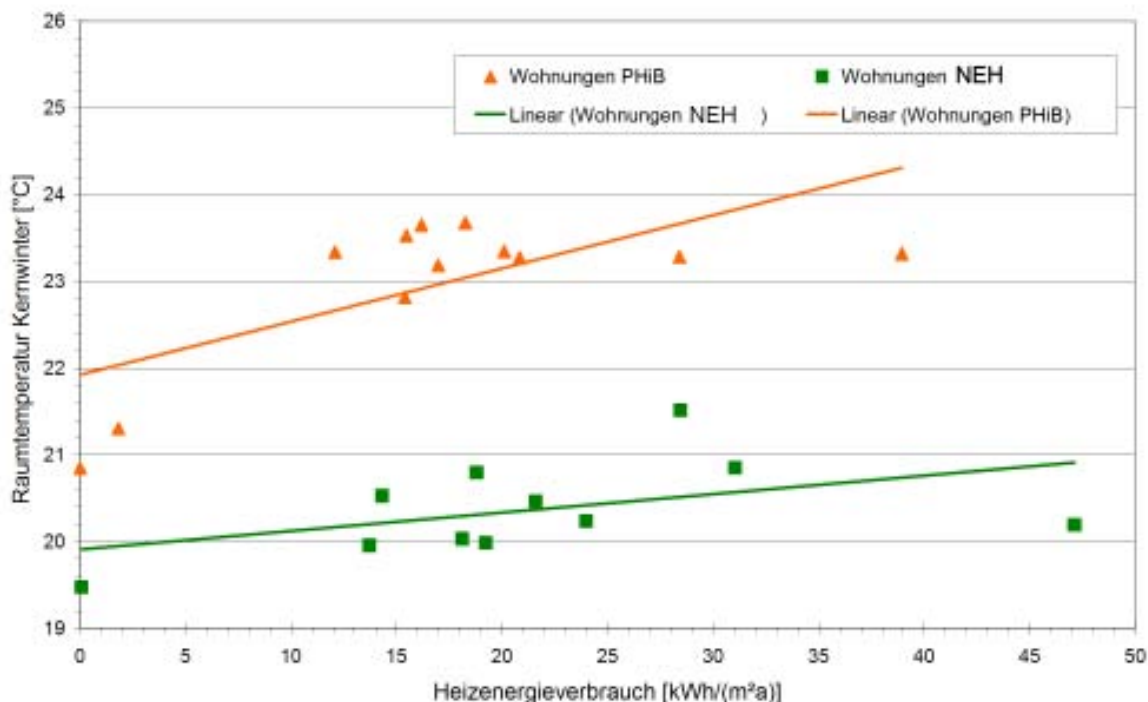


Abbildung 117: Korrelation zwischen der Raumtemperatur im Kernwinter (November bis Februar) und dem Heizwärmeverbrauch im zweiten Winter.

5.4.2.1 Heizwärmeverbrauch bei vollständiger WRG

Der Heizwärmeverbrauch im Vorjahr 2006/2007 war - durch den sehr milden Winter deutlich niedriger. Im Mittel sind die Heizwärmeverbräuche im zweiten Jahr deutlich höher. Es fällt allerdings der vom ersten zum zweiten Jahr überdurchschnittliche höhere Heizwärmeverbrauch einzelner Wohnungen auf. Im PHiB sind es fünf Wohnungen (die laufenden Nummern 3, 5, 6, 8, und 12 in Abbildung 116). Von zwei dieser Wohnungen (laufende Nummer 8 und 12) ist aufgrund der Angaben der Mieter bekannt, dass der **Bypass** ihrer Lüftungsgeräte (Umgehung des Wärmetauschers des Lüftungsgerätes im Sommer) **den gesamten Winter lang aktiviert** war. Diese Fehlbedienung trat auf, obwohl eine kurze und einfache Anleitung des Vermieters in der zugänglichen Geräteverkleidung eingeklebt ist.

Die verwendeten Geräte verfügen serienmäßig über eine automatische Deaktivierung der Bypassfunktion, wenn ein eingestellter Temperaturgrenzwert um 2 K unterschritten wird. Dieser Grenzwert ist werkseitig auf 10 °C eingestellt, womit die Wärmerückgewinnung (WRG) bei der angesaugten Außenlufttemperatur von 8 °C aktiviert wird. Damit wurde aber der energetische Effekt der Wärmerückgewinnung zum Teil – nämlich bei Außentemperaturen über 8 °C – **nicht genutzt**. In den Stunden ohne WRG-Funktion musste die Heizung die gesamte notwendige Nachheizung erbringen um die gewünschte Raumtemperatur zu erreichen. Damit ist der gemessene Heizwärmeverbrauch deutlich höher, als er mit der vorgesehenen vollständigen WRG-Nutzung zu erwarten gewesen wäre. Diese beiden Wohnungen hatten im Winter 2007/2008 mit 23,2 und 23,5 °C außerdem noch relativ hohe

mittlere Raumtemperaturen. Bei den anderen, ebenfalls mit einem deutlichen Unterschied im Heizwärmeverbrauch zwischen den beiden Zeiträumen auffälligen Wohnungen, ist die gleiche **Fehlbedienung** zu vermuten. Es ist naheliegend, dass die Umstellung einfach vergessen wurde, ob nun mangels Kenntnis oder fehlender Aufmerksamkeit. Für die Zukunft sollte daraus der Schluss gezogen werden, dass in einem solchen Fall eine Umstellung entweder automatisch erfolgen oder vom Verwalter veranlasst werden muss, um eine einwandfreie Funktion zu gewährleisten.

Für eine Abschätzung der Auswirkung der zeitweisen Umgehung der WRG auf den Heizwärmeverbrauch wird moderat angenommen, dass neben den beiden bekannten Wohnungen nur noch in einer weiteren diese Fehlbedienung vorgekommen wurde. Mit den gemessenen stundenmittleren Raumtemperaturen der jeweiligen Wohnung, den Außentemperaturen und den entsprechenden projizierten Luftvolumenströmen (Stellung „Grundlüftung“) sowie dem Wärmerückgewinnungsgrad der Wärmetauscher (moderater Ansatz: WRG 75 %) werden die Lüftungswärmeverluste des Winters 2007/2008 berechnet. Es werden zum einen der Lüftungsverlust ohne WRG, als zweites mit WRG und als letztes mit der Funktion der WRG unter 8 °C Außentemperatur abgeschätzt.

Es ergibt sich ein **Mehrverbrauch durch die Fehlbedienung** in den einzelnen Wohnungen **zwischen 6,2 und 6,9 kWh/(m²a)**. Das entspricht einer 54 %igen Anhebung der Lüftungswärmeverluste gegenüber dem vollständigen Einsatz der WRG. Die Ergebnisse der Berechnungen für drei der Wohnungen sind in Abbildung 118 dargestellt.

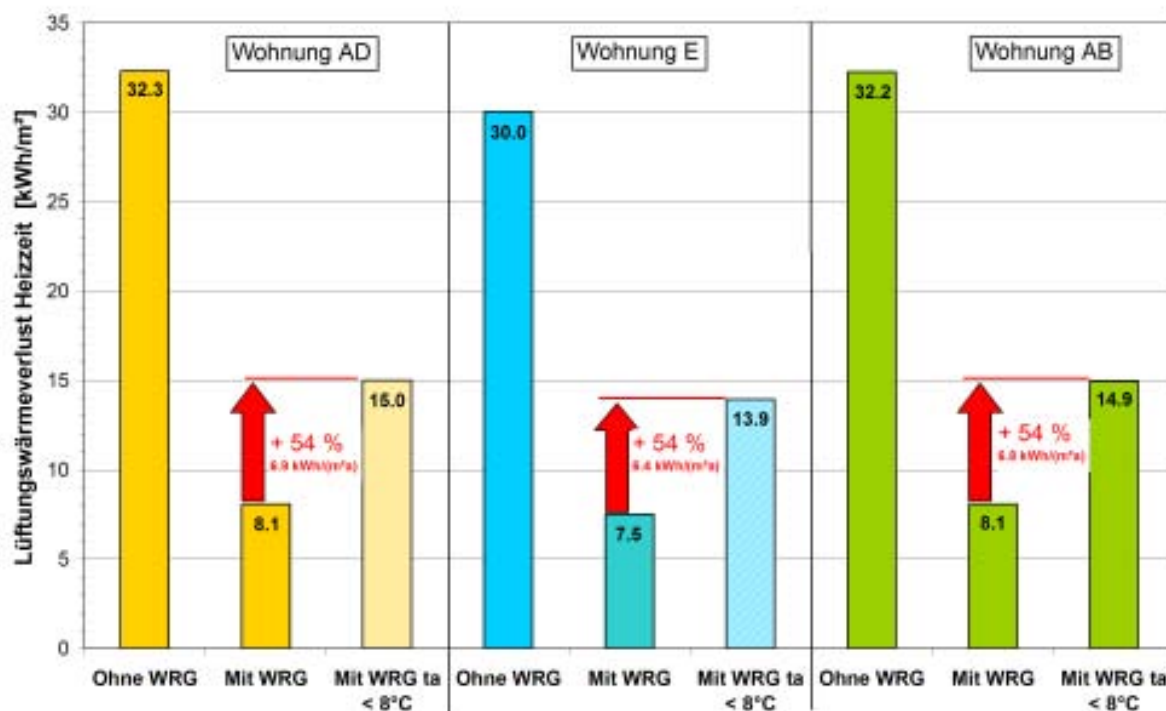


Abbildung 118: Berechnete Lüftungswärmeverluste während der gesamten Winterperiode (01. Oktober 2007 bis 30. April 2008) mit und ohne WRG, sowie mit WRG erst unter 8 °C Außentemperatur.



Um diese Beträge (6,4 bis 6,9 kWh/(m²a)) würden bei vollständiger WRG-Nutzung die Heizwärmeverbräuche niedriger ausfallen, als die Messwerte. Daher werden bei den drei Wohnungen die reduzierten Heizwärmeverbräuche angesetzt. Der Mittelwert für das gesamte PHiB wäre bei korrektem Betrieb um ca. 1,5 kWh/(m²a) geringer als der Zählerwert, d.h. **14,9 kWh/(m²a)**.

Der Ausreißer der Wohnung mit dem höchsten Heizwärmeverbrauch wird durch diese Fehlbedienung erklärt und passt dann auch besser in die Normalverteilung der Verbrauchswerte.

Es muss kritisch angemerkt werden, dass es zweifelhaft erscheint, die Umschaltung der Lüftungsanlage von Sommer- auf Winterbetrieb weitgehend der Aufmerksamkeit des Nutzers zu überlassen. Auf jeden Fall ist der eingestellte Temperaturwert für die automatische Umschaltung mit 8°C viel zu gering.

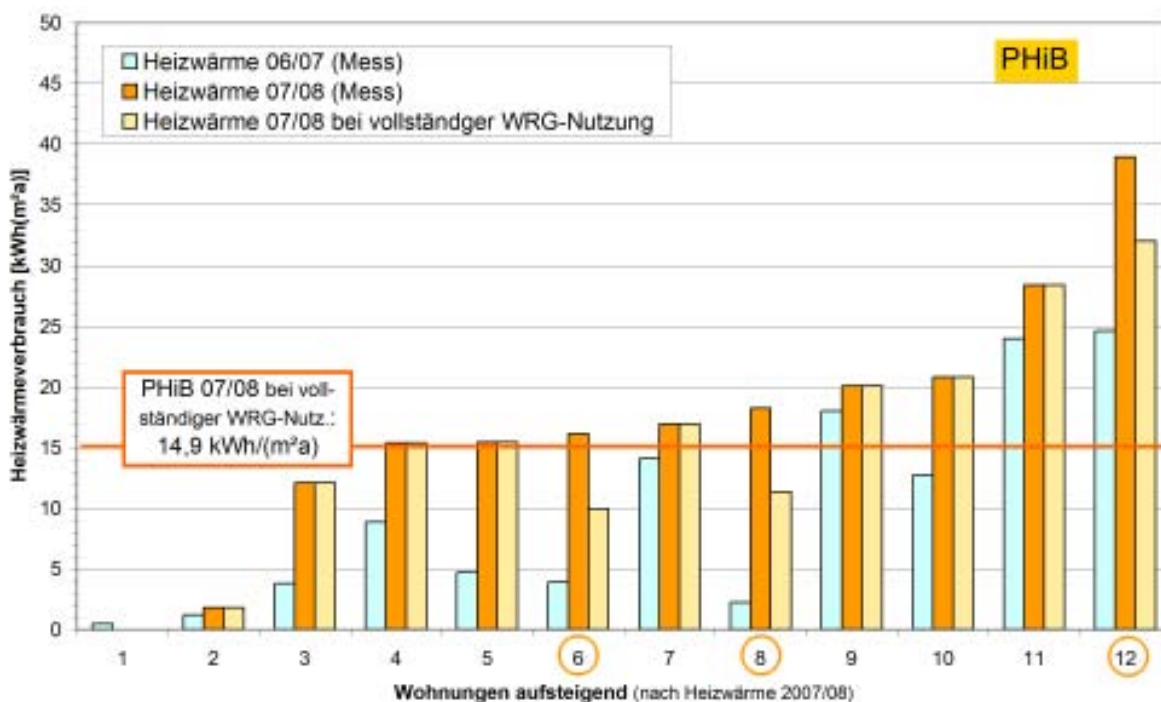


Abbildung 119: Heizwärme (Bezug ohne Querwärmeströme) in den einzelnen Wohnungen in den beiden Bilanzzeiträumen für das PHiB. Ergänzend zu Abbildung 116 ist für das PHiB der Heizwärmeverbrauch in drei Wohnungen (Kreismarkierung) reduziert worden, so als wenn dort die WRG vollständig genutzt worden wäre (siehe Abbildung 118). Als Mittelwert ist der Heizenergieverbrauch für das Bilanzjahr 01. Mai 2007 bis 30. April 2008 mit der Reduzierung durch die vollständige WRG-Nutzung in den drei Wohnungen dargestellt.

5.4.2.2 Wärmestrom PHiB zum NEH

Die oben dargestellten Temperaturmessungen ergaben, dass die Wohnungen im PHiB im Winter im Durchschnitt um 2,1 K wärmer waren als im Nachbargebäude. Es

scheint, dass die Bewohner den hohen Gebäudestandard nutzen, um nahezu kostenlos die gewünschte Wohlfühltemperatur einzustellen. Aufgrund der massiven, ungedämmten Trennwand zwischen den Gebäuden hat diese winterliche Temperaturdifferenz allerdings einen Wärmestrom von den drei angrenzenden Wohnungen im PHiB zum NEH zur Folge.

Untersucht man nur die sechs an die Trennwand der Gebäude angrenzenden Wohnungen, haben diese im Winter 2007/2008 einen mittleren Temperaturunterschied von sogar 3,1 K. Daraus errechnet sich ein Wärmestrom vom PHiB zum NEH, durch den der Verbrauch des NEH vermindert, und der im PHiB während der Heizperiode 2007/2008 zu einer Verbrauchserhöhung von **2,0 kWh/(m²a)** führte (bezogen auf die Wohnfläche des gesamten Gebäudes). Um diesen Betrag wäre der mittlere Heizwärmeverbrauch des PHiB nochmals niedriger, wenn die Wohnungen gleich warm beheizt wären. Der Messwert vom PHiB sinkt durch diesen Effekt auf **14,4 kWh/(m²a)**. Bei den weiteren Betrachtungen wird der um diese 2 kWh/(m²a) korrigierte Messwert verwendet.

5.4.3 Heizwärme und Verteilung

Ein Teil der im Übergaberaum an den Heizkreis des entsprechenden Gebäudes übergebenen Wärmemenge wird auf dem Weg zur Messstelle (Wärmezähler in den einzelnen Wohnungen) an die Umgebung abgegeben. Die Wärme die im Keller – außerhalb der thermischen Hülle – abgegeben wird, dient nicht der Raumerwärmung der Wohnungen. Daher wird diese Wärmemenge als „Verteilungsverlust“ (bzw. „Verteilung Heizung Verlust“) bezeichnet. Der Anteil der Wärmeabgabe über die Verteilungen, der innerhalb der thermischen Hülle erfolgt, beheizt das Gebäude und reduziert den wohnungsweise gemessenen Heizwärmeverbrauch. Daher wird diese Rohrleitungswärmeabgabe als „Verteilung Heizung nutzbar“ bilanziert.

Die gesamte Verteilwärmemenge ergibt sich je Gebäude aus der Differenz des Haupt-Wärmemengenzählers „Heizkreis“ im Übergaberaum zur Summe der 12 Heizungs-zähler in den Wohnungen. Die Aufteilung in nicht nutzbare und nutzbare Anteile erfolgt nach den Leitungslängen der Heizwärmeverteilleitungen (bis zu den Wärmemengenzählern) im unbeheizten und im beheizten Bereich. Zur Bestimmung des für die Beheizung des Gebäudes nutzbaren Anteils aus der innerhalb der Gebäudehülle abgegebenen Wärmemenge wurde der Grenznutzungsgrad monatsweise berechnet. Wenn z.B. im April die Heizkreispumpe aktiv ist (Verteilleitung gibt Wärme ab), eine Wohnung aber keinen Heizbedarf hat (Wunschtemperatur ist erreicht), ist die Wärme aus der Verteilleitung nicht nutzbar. Mit diesen beiden Parametern Leitungslängenanteil und Grenznutzungsgrad werden die gesamten Verteilwärmemengen aufgeteilt.

Die nutzbaren Anteile der Verteilung stellen einen Beitrag zur Raumheizung dar. Sie müssen dem Heizwärmeverbrauch, der über die einzelnen Wohnungswärmemengenzähler ermittelt wurden, zugeschlagen werden. Im PHiB wurden im Winter 2007/2008 zusätzliche 3,8 kWh/(m²a) als nutzbare Anteile ermittelt. Der Gesamtwert des Heizwärmeverbrauchs (ohne den Querwärmestrom zum NEH) beträgt dann **18,2 kWh/(m²a)**. Die restlichen 4,1 kWh/(m²a) sind nicht nutzbare Verteilverluste.



Abbildung 120 zeigt die zugehörige Heizwärmebilanz des PHiB. Damit beträgt der nicht nutzbare Verteilverlust 17 % der gesamten gelieferten Heizwärme. Dieser Wert ist vergleichsweise moderat. Die weitere Reduktion ist nur durch verbesserte Rohrleitungs­dämmung zu erreichen. Nicht enthalten in der Betrachtung sind die Über­gaber­verluste der Nahwärmestation und der Nahwärmeleitung.

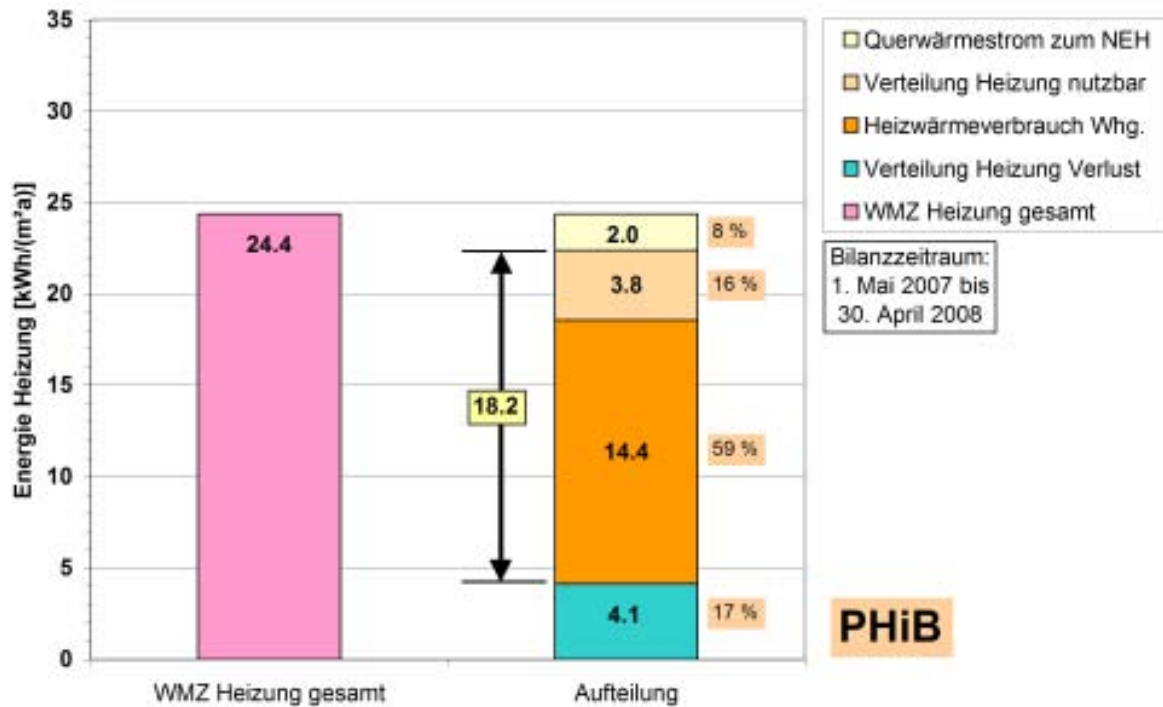


Abbildung 120: Wärmebezug Heizung des PHiB für das zweite Bilanzjahr einschließlich Verteilverluste und Querwärmestrom zum NEH. Die nutzbaren Anteile der Heizwärmeverteilung wurden zusätzlich zu den abgelesenen Zählerwerten als Heizwärme berücksichtigt. Der untere Balken in der Grafik ist der verbleibende Verlust aus der Verteilung. Es wird deutlich, dass nur ein Teil der zentral abgelesenen Heizwärme auch tatsächlich für das Gebäude nutzbar ist.

Im NEH ergibt sich, durch die nutzbaren Verteilungsanteile von 3,0 kWh/(m²a) und unter Berücksichtigung des Querwärmestroms vom PHiB ein Heizwärmegesamtverbrauch von 26,3 kWh/(m²a) und nicht nutzbare Verteilverluste von 6,6 kWh/(m²a) für das zweite Bilanzjahr. Die Verteilverluste liegen damit etwas höher als im PHiB.

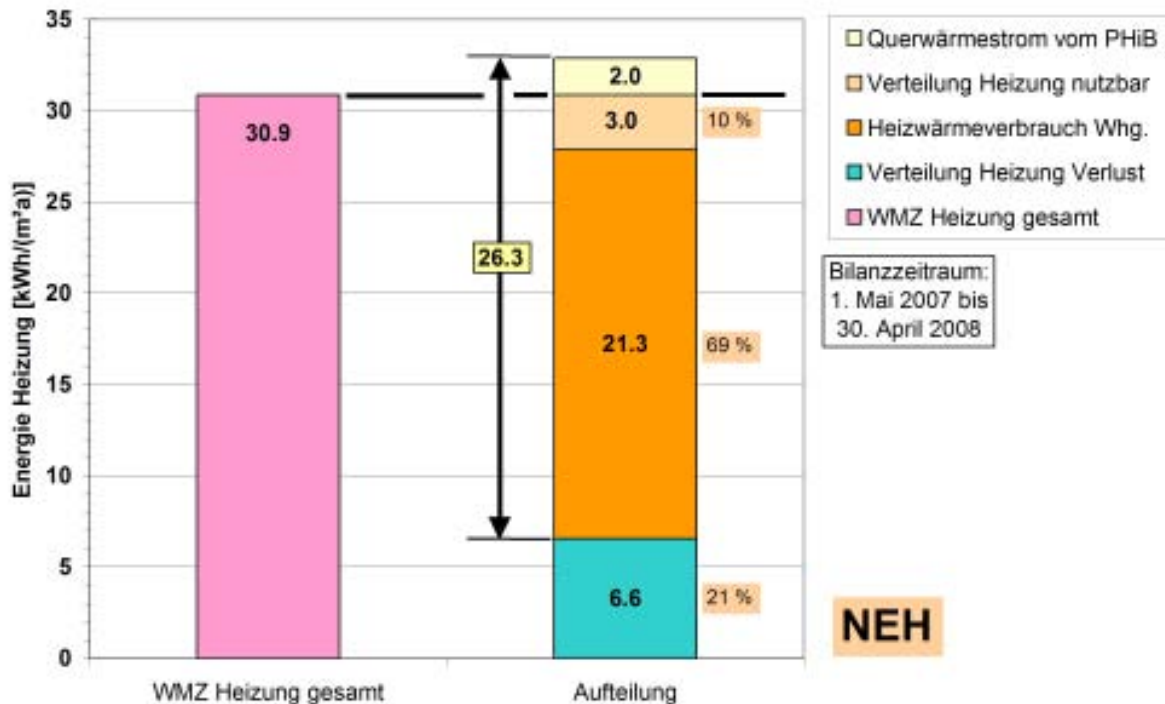


Abbildung 121: Wärmebezug Heizung des NEH Gebäudes für das zweite Bilanzjahr einschließlich der Verteilverluste und des bezogenen Querwärmestroms vom PHiB.

5.4.3.1 Vergleich der PHPP-Berechnung mit den Messdaten

Bei der PHPP-Berechnung wurden während der Planung das Standardklima vom Standort Mannheim sowie die Standardinnentemperatur von 20 °C verwendet. Während und nach der Realisierung der beiden Sanierungen wurden die beiden PHPP-Bilanzen fortlaufend aktualisiert. So wurden z.B. die Innendämmung im Treppenhauskopfbereich, die Wärmedämmung vom Treppenhaus zum Keller, die Wärmebrücke der Balkonhalterungen und die gemessenen Luftdichtheitswerte nachgetragen.

PHiB Vergleich

Für das PHiB ergibt sich damit in diesem „Standard-PHPP“ ein Heizwärmebedarf von 15,5 kWh/(m²a). Das ist für eine Sanierung ein sehr guter Wert, es wird damit so gut wie Neubau-Passivhausstandard erreicht.

Werden statt des Standardklimas die gemessenen Außentemperaturen in diesem PHPP berücksichtigt, reduziert sich der Heizwärmebedarf in dem relativ milden Winter 2007/2008 auf 12,2 kWh/(m²a). Berücksichtigt man dann noch die gemessenen mittleren Innentemperaturen von 22,7 °C, lassen diese den Heizwärmebedarf auf 19,8 kWh/(m²a) deutlich ansteigen.



Der Unterschied zwischen dem (unter Berücksichtigung der gemessenen Raumtemperaturen und Klimabedingungen) mit dem PHPP berechneten Heizwärmebedarfs, mit dem gemessenen Heizwärmeverbrauch (inkl. nutzbarer Heizwärmeverteilenergie und abzüglich des Querwärmestroms) beträgt nur noch 1,6 kWh/(m²a). Der Wert ist bei der möglichen Genauigkeit der Rechnung, wie auch der vorhandenen Genauigkeit der Messung als sehr gut einzustufen.

Die größte verbleibende „Unsicherheit“ bei der Berechnung des Bedarfswertes ist der Luftwechsel: Im PHPP ist in allen Fällen mit einem projektierten mittleren Luftwechsel von $n_L = 0,44 \text{ h}^{-1}$ gerechnet worden. Über die tatsächlichen Einstellungen der Luftvolumenströme durch die Nutzer ist nichts genaueres bekannt. Bei der Variation des Luftwechsels im PHPP auf den Wert von $n_L = 0,3 \text{ h}^{-1}$ reduziert sich der Heizwärmebedarf beispielsweise von den 19,8 auf 18,0 kWh/(m²a). Unter diesen Bedingungen würde der berechnete und der gemessenen Heizwärmeverbrauch genau übereinstimmen.

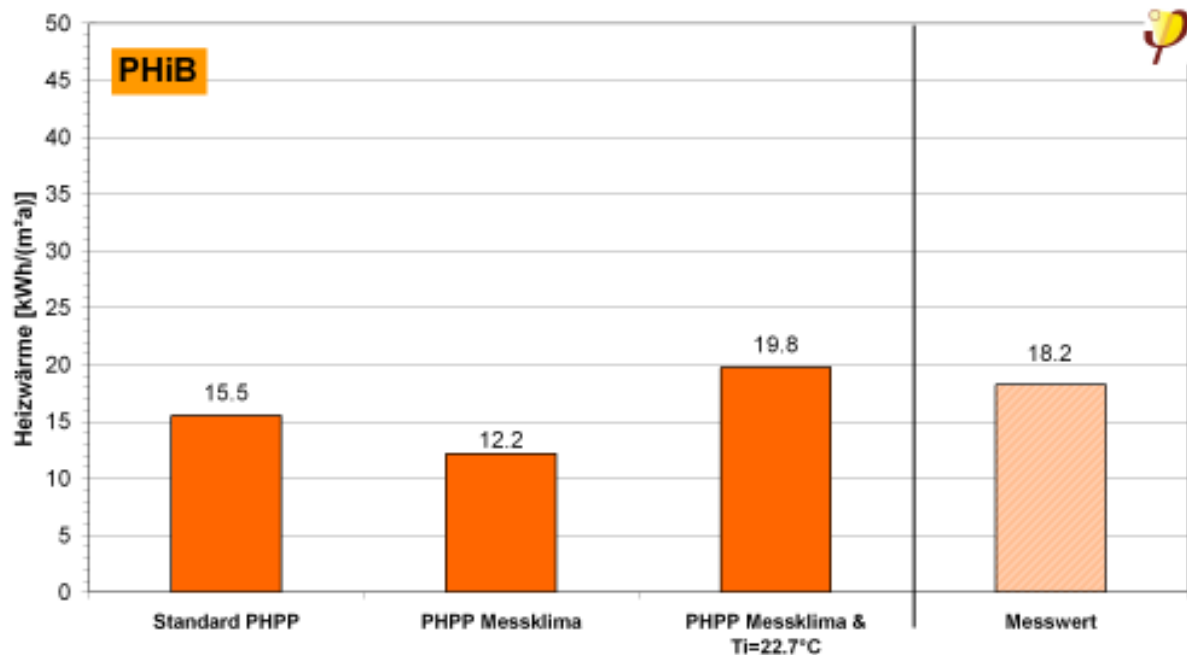


Abbildung 122: Heizwärmebedarf des PHiB nach den Ergebnissen der PHPP-Berechnungen mit Anpassung der gemessenen Außentemperatur (01.05.2007 bis 30.04.2008) und der mittleren Raumtemperatur im Winter (22,7 °C) im Vergleich zum Messwert des Heizwärmeverbrauchs inkl. der Energie der nutzbarer Heizwärmeverteilung und abzüglich des Querwärmestroms zum NEH.

Vergleich mit dem NEH

Die PHPP-Bilanz wurde ebenfalls für das NEH Gebäude aufgestellt. Auch hier wurden die bereits beim PHiB diskutierten Einflussgrößen in der Bilanz berücksichtigt. Beim NEH wurde zusätzlich berücksichtigt, dass sich im Keller des Gebäudes (Haus 5) die Nahwärmeübergabestation sowie die Warmwasserspeicher

befinden. Dadurch ist dieser Kellerraum deutlich wärmer (vgl. Abschnitt 5.4.3.3), mit entsprechender Auswirkung auf die Energiebilanz: Der Heizwärmebedarf ist, bezogen auf die gesamte Wohnfläche des NEH allein durch die Heizungsanlage im Keller um mehr als 2 kWh/(m²a) niedriger als sie ohne Heizungsanlage gewesen wäre.

Durch den Querwärmestrom und den Anteil der nutzbaren Heizwärmeverteilung steigt der Heizwärmeverbrauch des NEH auf 26,3 kWh/(m²a).

Nach Berücksichtigung dieser Einflussgrößen ergibt sich eine sehr große Abweichung von der mit den gemessenen Außen- und Innentemperaturen angepassten PHPP-Bilanz zu dem gemessenen Heizwärmeverbrauchswert. Die Differenz beträgt 16,5 kWh/(m²a), beim Heizwärmebedarfswert von 42,8 kWh/(m²a).

Die Ursache dafür zeigt die Variation des Luftwechsels: Der Rechenwert wurde mit dem hygienisch notwendigen Luftwechsel aus der Projektierung von $n_L = 0,44 \text{ h}^{-1}$ ermittelt. Der Luftwechsel in dem über das Fenster belüfteten Gebäude ist allerdings deutlich niedriger. Die Variation des Luftwechsels in der PHPP-Berechnung zeigt, dass bei einem Luftwechsel um $0,15 \text{ h}^{-1}$ im Rahmen der Mess- und Rechengenauigkeit eine Übereinstimmung des Bedarfswertes mit dem Verbrauchswert, zu erwarten ist (Abbildung 123). Die Untersuchungen der Raumluftfeuchte, der CO₂-Konzentration sowie der Auswertung der Fensteröffnungen von diesem Gebäude belegen den sehr niedrigen Luftwechsel im NEH.

Messungen in Niedrigenergiehäusern in Wiesbaden zeigen Luftwechselraten bis zu Minimalwerten von 0,14 bzw. 0,15 h⁻¹ [Ebel 2003]. Diese niedrigen Werte wurden gemessen, obwohl diese Gebäude mit (feuchtegesteuerten) Abluftanlagen belüftet werden. Damit sind Luftwechsel in der Größenordnung um 0,15 h⁻¹ bei ausschließlich fenstergelüfteten Wohnungen in einer durchaus realistisch Größenordnung und werden durch die vorliegende Untersuchung bestätigt.

Die für das NEH sehr niedrigen Heizwärmeverbräuche werden nur auf Kosten der schlechteren Luftqualität realisiert. Damit kann man nicht von einem nachhaltigen Konzept sprechen. Dagegen wird im PHiB – bei gesicherter Luftqualität – ein dauerhaft niedriger Heizwärmeverbrauch sichergestellt.

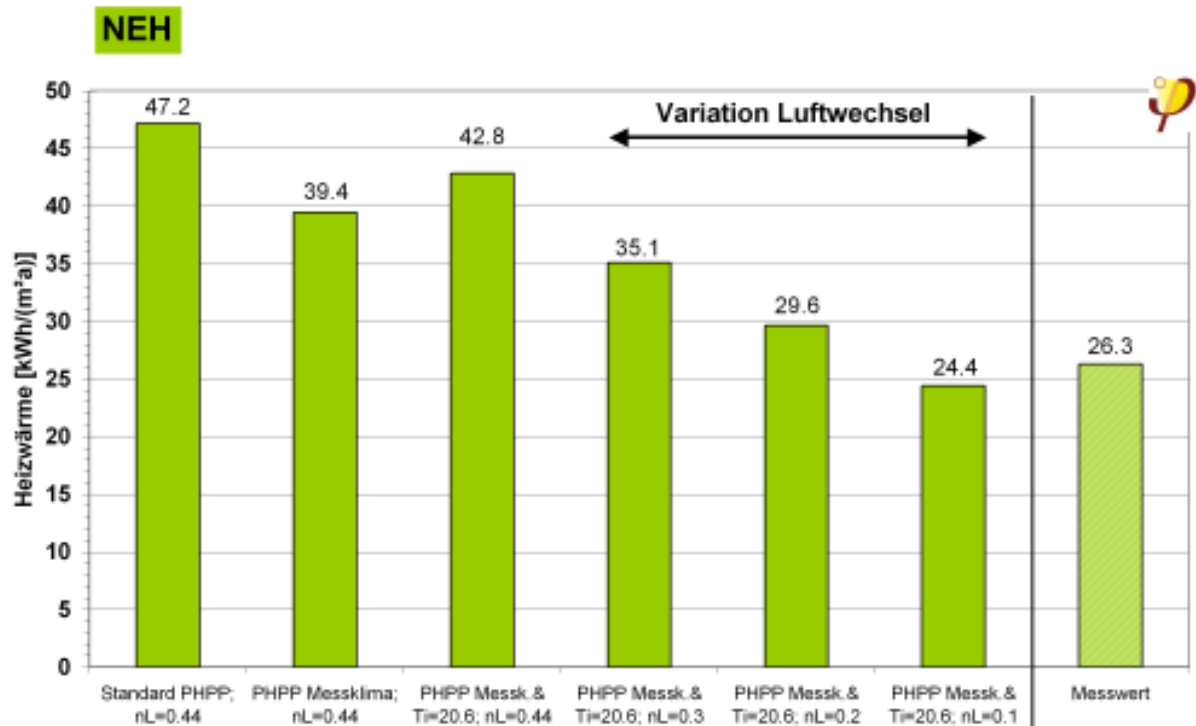


Abbildung 123: Heizwärmebedarf des NEH nach den Ergebnissen der PHPP-Berechnungen mit Anpassung der gemessenen Außentemperatur (01.05.2007 bis 30.04.2008) und der mittleren Raumtemperatur im Winter (20,6 °C). Die Höhe des Luftwechsels (über die Fenster) wurde bei diesen Berechnungen variiert; es zeigt sich, dass er einen wesentlichen Einfluss auf den Heizwärmebedarf hat. Als Vergleich ist der Messwert des Heizwärmeverbrauchs dargestellt (inkl. Querwärmestrom vom PHiB und nutzbare Heizwärme der Verteilung).

Bei der Bewertung der Verbrauchswerte muss auch berücksichtigt werden, dass neben dem zu geringen Luftwechsel auch die Raumtemperaturen um mehr als 2 K niedriger sind als im PHiB. Das NEH würde bei vergleichbarem Luftwechsel ($nL = 0,44 \text{ h}^{-1}$) **und** der höheren Raumlufttemperatur von 22,7 °C (wie im PHiB) etwa **56 kWh/(m²a)** Heizwärme benötigen.

5.4.3.2 Heizungsunterbrechungen

Bei der Betrachtung der Raumtemperaturen und Heizleistungen einzelner Wohnungen kann die Ursache für Temperaturabsenkungen untersucht werden. Im PHiB ist bei der Untersuchung der Raumtemperaturen in Abschnitt 5.2.1 eine Wohnung aufgefallen, in der zeitweise niedrigere Temperaturen herrschten. Die Raumtemperatur senkt sich etwa ab dem 22.12.2007 von ca. 21 bis 22 °C auf Werte bis minimal 18,7 °C ab. Die Heizleistung dieser Wohnung E ist in Abbildung 124 als gleitender Mittelwert über 6 Stunden dargestellt, damit die Werte besser ablesbar sind. In der Zeit mit der niedrigsten Raumtemperatur senkt sich die Heizleistung ebenfalls auf

Werte um 50 bis 100 Watt ab. Mit dem fast gleichzeitigen Ansteigen der Außentemperatur steigt die Innentemperatur - auch ohne nennenswerte Heizleistung - leicht an. Am 08. Januar 2008 steigt die Heizleistung sprunghaft auf Werte um 300 Watt an. Dies wirkt sich auf die Raumtemperatur merkbar aus; sie steigt auf Werte deutlich über 21,5 °C an. Ab dem 13. Januar 2008 steigt die Heizleistung der Wohnung auf knapp 450 W nochmals schlagartig an. Bei gleichzeitig ansteigender Außentemperatur werden, vor einer erneuten Leistungsreduzierung 23,4 °C erreicht.

Es bleibt damit festzuhalten, dass die Temperaturabsenkung aufgrund der sehr starken Reduzierung der Heizleistung auf Werte nahe Null erfolgte. Selbst dann wurden 18,5 °C allerdings nicht unterschritten. Auch bei nennenswerter Beheizung war die Heizleistung in der PHiB Wohnung von 51,6 m² mit - in diesem Zeitraum - maximal 500 Watt sehr gering (entspricht max. 9,7 W/m²).

Generell ist anzumerken, dass eine Heizungsunterbrechung wie z.B. eine Nachtabsenkung in energieeffizienten Wohnbauten keinen Sinn macht. Diese Gebäude zeichnen sich durch eine besonders hohe thermische Trägheit aus. Auch die Abschaltung der Heizung bei z.B. Abwesenheit (Winterurlaub) ist daher nicht notwendig. Es reicht aus, die Wunschtemperatur am Raumthermostat etwas zurückzunehmen.

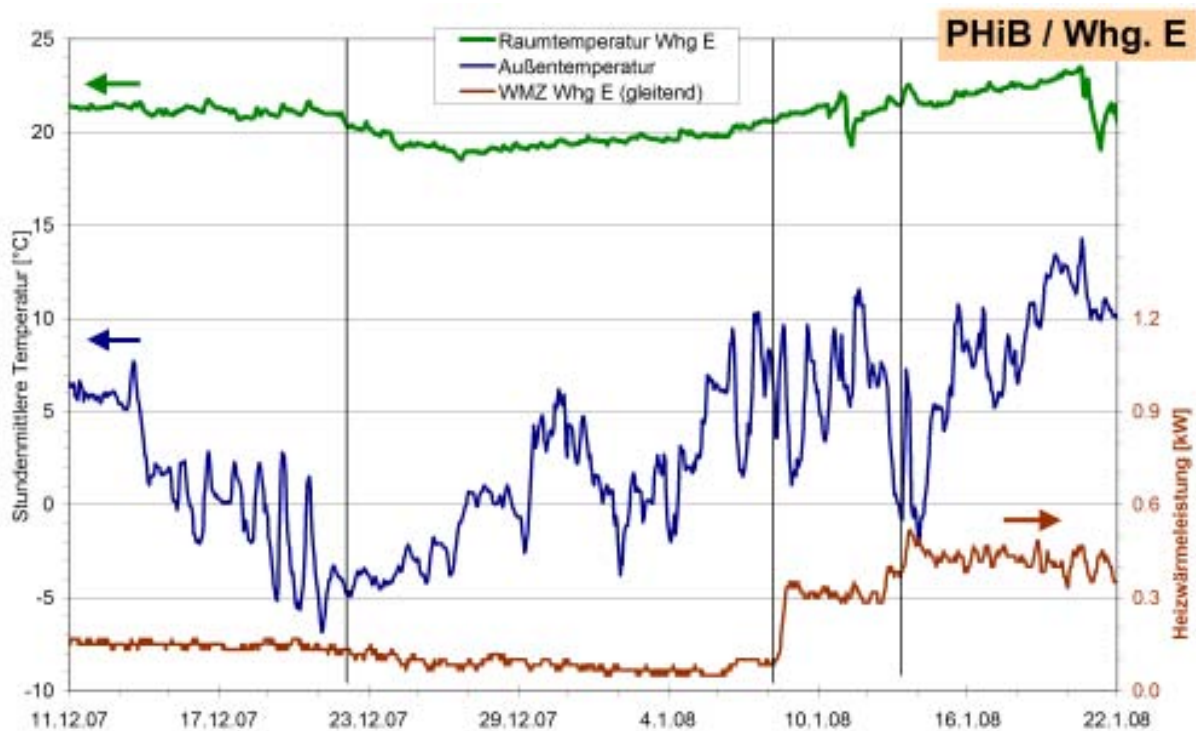


Abbildung 124: Heizungsreduzierung in einer Wohnungen im PHiB, dargestellt mit Raumtemperatur und Heizleistung sowie der Außentemperatur (Stundenmittelwerte).

In Wohnung Y (73,5 m²) im NEH zeigt Abbildung 125 ebenfalls eine Temperaturabsenkung bei reduzierter Heizleistung. Es wurden minimal 15,4 °C gemessen. Die Heizleistungen beim „wieder Anheizen“ liegen allerdings deutlich höher. Im dargestellten Zeitraum liegt die maximale Heizlast bei ca. 4500 Watt (entspricht etwa 61 W/m²).

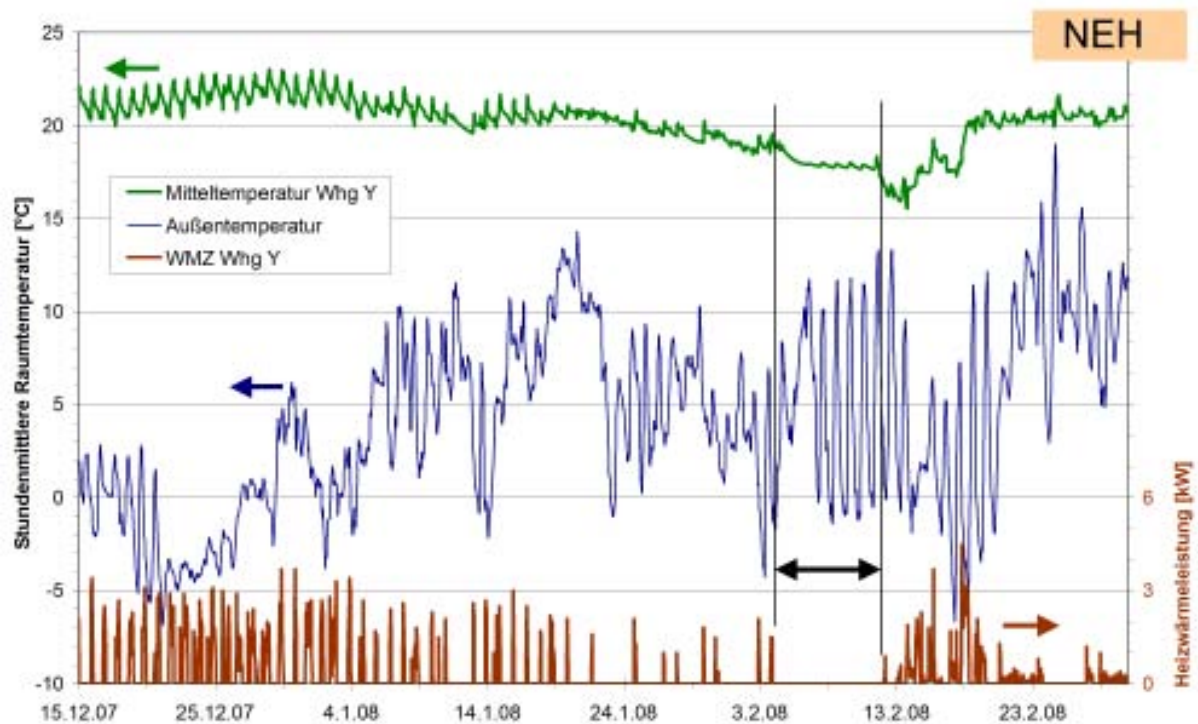


Abbildung 125: Heizungsabschaltung in einer Wohnungen im NEH. Dargestellt sind Raumtemperatur, Heizleistung und Außentemperatur (Stundenmittelwerte).

Im NEH zeigen auch die anderen Wohnungen, bei denen zeitweise niedrige Raumtemperaturen gemessen wurden, zu diesen Zeiten reduzierte Heizleistungen.

5.4.3.3 Wärmeübergabe Keller

Die Nahwärmeübergabestation für beide Gebäude, inkl. der zentralen Technik (Wärmeübertrager Warmwasser, Warmwasserspeicher, Wärmezähler), befindet sich in einem relativ kleinen Raum. Die Wärmedämmung von Leitungen und Speichern ist in Standardqualität ausgeführt. Die Nahwärmeversorgung wird das gesamte Jahr über betrieben, da sie auch die Warmwasserbereitung versorgt. Durch diese Umstände ist der Übergaberaum ganzjährig sehr warm.

Mittels Datenlogger (Typ HoBo H8) wurde die Raumtemperatur in dem Kellerraum über fast den gesamten Untersuchungszeitraum gemessen. In Abbildung 126 sind die tagesmittleren Temperaturdaten dargestellt, die aus den 10 Minuten Messdaten erzeugt wurden. Es zeigen sich sehr hohe Raumtemperaturen bis maximal 37 °C. Durch das dauerhafte Öffnen des Kellerfensters und die Verbesserung der Rohrleitungs- und Armaturendämmung (Ende März 2007), reduziert sich die Raumtemperatur deutlich. Für das zweite Bilanzjahr ergibt sich eine mittlere Temperatur von 31,1 °C.

Diese dauerhaft sehr hohe Raumtemperatur in dem Kellerraum macht das Verbesserungspotential deutlich, welches zur Verringerung der Übergabe- und Speicher- und Verteilverluste vorhanden ist.

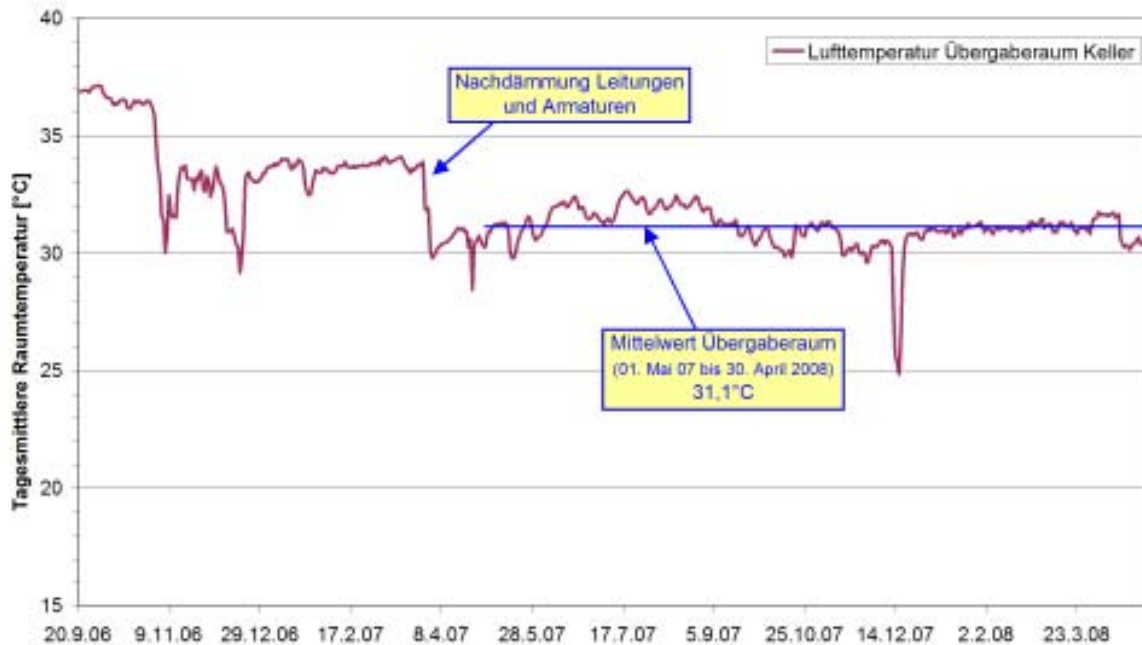


Abbildung 126: Tagesmittlere Raumtemperatur im Nahwärme-Übergaberaum von Haus 5 (NEH).

5.4.4 Heizleistung

Entsprechend der funktionalen Definition des Passivhausstandards muss sich ein Passivhaus mit der Wärmeleistung, welche sich mit der hygienisch notwendigen Luftmenge in das Gebäude transportieren lässt, beheizen lassen [PHI 1996] [Feist 2001]. Begrenzt wird die Heizleistung durch die maximale Temperatur von etwa 55 °C am Heizregister (Beginn der Staubverschmelzung). Je nach Objekt beträgt die maximal Heizleistung ca. 10 W/m², im PHiB waren nach dem PHPP aus der Planungsphase 13,5 W/m². Diese geringe Leistung muss ausreichen, die Restheizung des Gebäudes sicher zu stellen. Auf der dadurch möglichen Vereinfachung des Heizsystems beruht eine Investitionskosteneinsparung bei Passivhäusern („Kostensprung“).

Mittels der Messdaten der beiden zentralen Wärmezähler kann der gesamte Leistungsbezug, inkl. der Verteilung, ermittelt werden. Der Verlauf der tagesmittleren Heizleistung in den beiden Gebäuden im Winter 2007/2008 ist in Abbildung 127 dargestellt. Als maximale Heizleistung wurden im PHiB nur **9,7 W/m²** gemessen. Die Leistung ist der Summenwert aus der Gesamtheit aller Luft-Nachheizregister und Badheizkörper der 12 Wohnungen. Die abgenommene tagesmittlere Leistung entspricht so niedrigen Werten, wie sie aus Passivhaus-Neubauten bekannt sind.



Im NEH werden mit **maximal 17,7 W/m²** fast doppelt so hohe maximale Leistungen benötigt, um das Gebäude zu beheizen. Hier erfolgt die Beheizung ausschließlich über Heizkörper.

Es ist ablesbar, dass sich die Heizlast, insbesondere bei niedrigen Außentemperaturen, deutlich zwischen den Gebäuden unterscheidet: Werden etwa +10 bis +5 °C tagesmittlere Außentemperatur unterschritten, steigt die Heizlast im NEH deutlich stärker an, als im thermisch trägeren PHiB. Die maximale Heizlast im NEH Gebäude wird einen Tag nach dem kältesten Tag gemessen. Im PHiB wird das Maximum erst 5 Tage später gemessen.

Im Diagramm (Abbildung 127) können auch gut die Zeitpunkte vom Beginn und vom Ende der aktiven Beheizung abgelesen werden. Der Beginn ist bei beiden Gebäuden am 19. Oktober 2007, das Ende beim PHiB am 15. April 2008, beim NEH etwas später, am 01. Mai 2008. Dies entspricht den Schaltzeiten der Jahreszeitschaltuhr für die Heizkreispumpe (vgl. Tabelle 23 in Abschnitt 5.4.1).

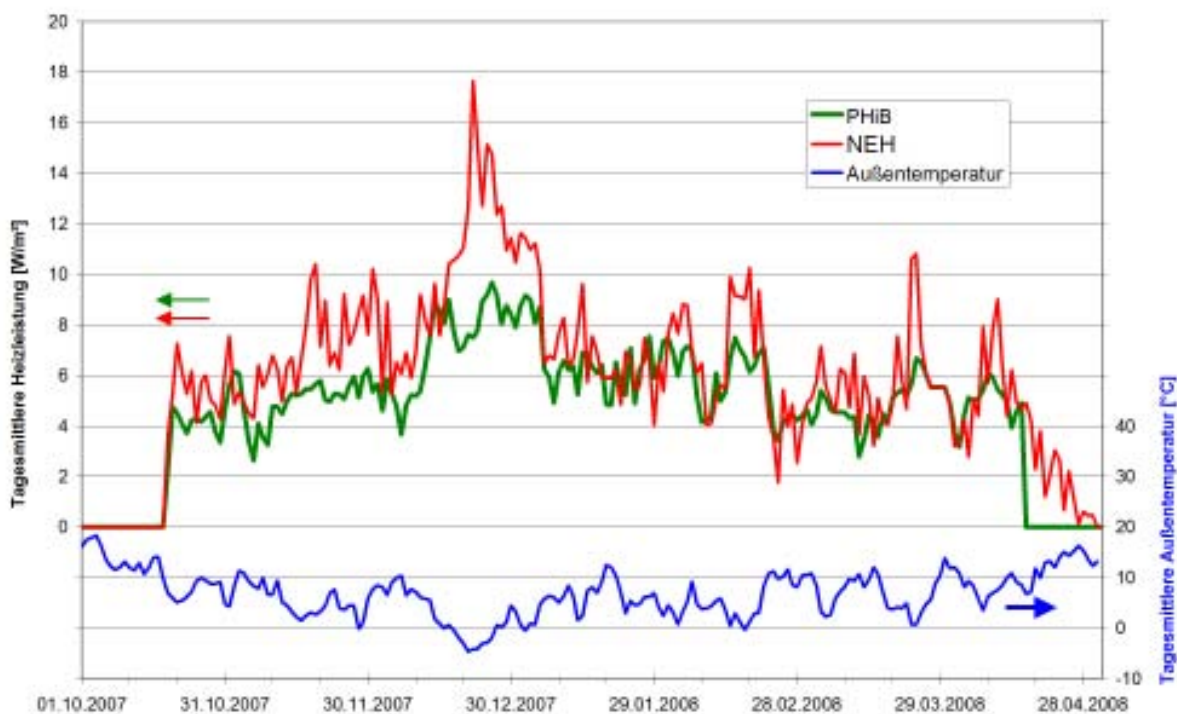


Abbildung 127: Spezifische tagesmittlere Heizleistung im Winter 2007/2008, gemessen an den Heizkreisgesamtzählern von beiden Gebäuden. Zusätzlich ist die tagesmittlere Außentemperatur aufgetragen.

Zwischen der gesamten Heizleistung inkl. der Heizwärmeverteilung eines Gebäudes und der Summe, der in den einzelnen Wohnungen gemessenen Leistungen, besteht ein deutlicher Unterschied. Der Unterschied ist, wie auch beim Heizwärmeverbrauch, durch die Wärmeabgabe der Verteilungen gegeben. Der Verlauf jeweils beider spezifischer Leistungen der Gebäude ist in Abbildung 128 dargestellt.

Der Unterschied zwischen der zentral gemessenen Leistung und der Wohnungssumme ist im PHiB, mit im Mittel $1,8 \text{ W/m}^2$, etwas größer als der Unterschied im NEH mit $1,5 \text{ W/m}^2$.

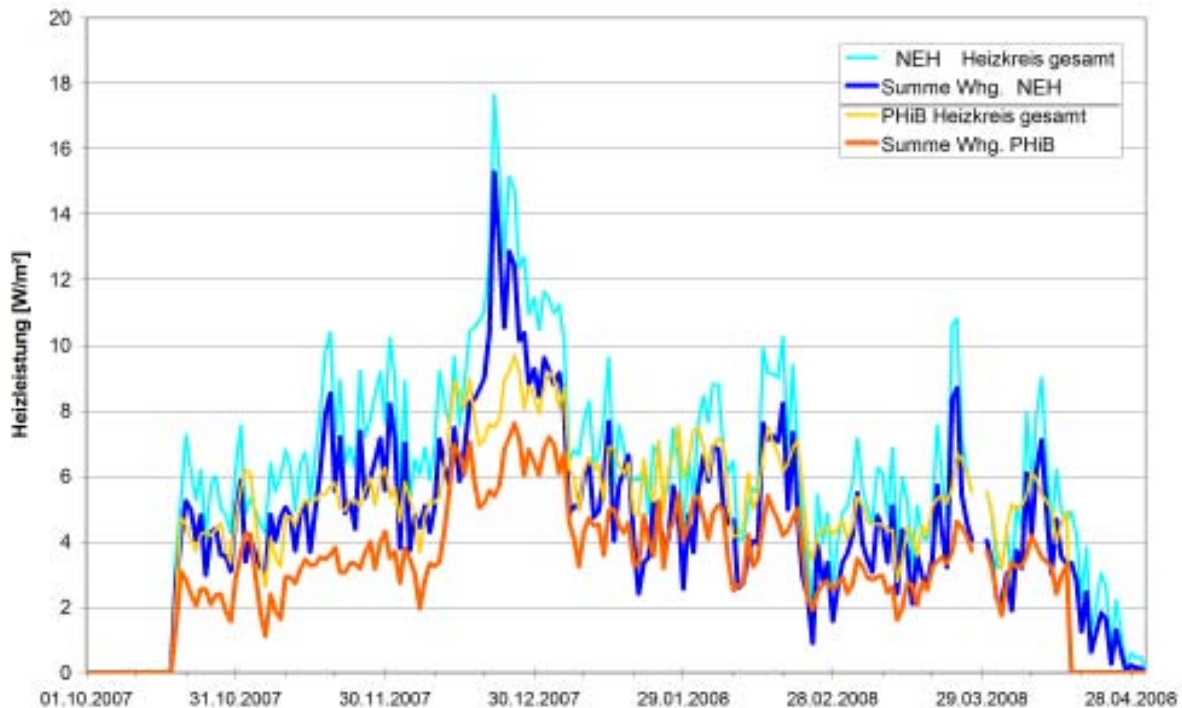


Abbildung 128: Spezifische tagesmittlere Heizleistung im Winter 2007/2008, gemessen an den Heizkreisgesamtzählern und als Summe der je 12 einzelnen Wohnungszähler von beiden Gebäuden.

5.4.4.1 Heizleistung nach Geschossen

Von Interesse bei einer Sanierung mit verbleibenden Wärmebrücken zum unbeheizten Keller, ist die Heizleistung, insbesondere der Erdgeschosswohnungen. Daher werden für jedes Gebäude die tagesmittleren Heizleistungen aus den Wohnungswärmezählern je Etage ermittelt.

Im PHiB zeigt sich dabei in Abbildung 129, dass die Heizleistung im Erdgeschoss zwischen der vom 1. OG und der vom 2. OG liegt. Während der ersten fast 2 Monate ist die Heizleistung im 1. OG deutlich am höchsten. Die höchste Raumtemperatur wurde ebenfalls im 1. OG festgestellt (Abschnitt 5.2.1.2, Abbildung 82), was die höheren Heizleistung bedingt. Erst am Ende der Heizzeit ist die Heizleistung im EG etwa einen Monat dauerhaft höher, als in den beiden anderen Geschossen.

Damit kann im PHiB kein Zusammenhang zwischen der Heizleistung und der Lage der Wohnung festgestellt werden. Die unterschiedlichen Höhen der gewünschten und realisierten Raumtemperaturen scheint einen solchen Effekt - falls vorhanden - zu überlagern.



Die Verteilung der Heizleistung im NEH ist anders „sortiert“: Hier wird die höchste Leistung im EG, die mittlere im 1. OG und die niedrigste im 2. OG gemessen. Also von unten nach oben abnehmend. Die gemessenen Raumtemperaturen je Etage liegen deutlich dichter zusammen.

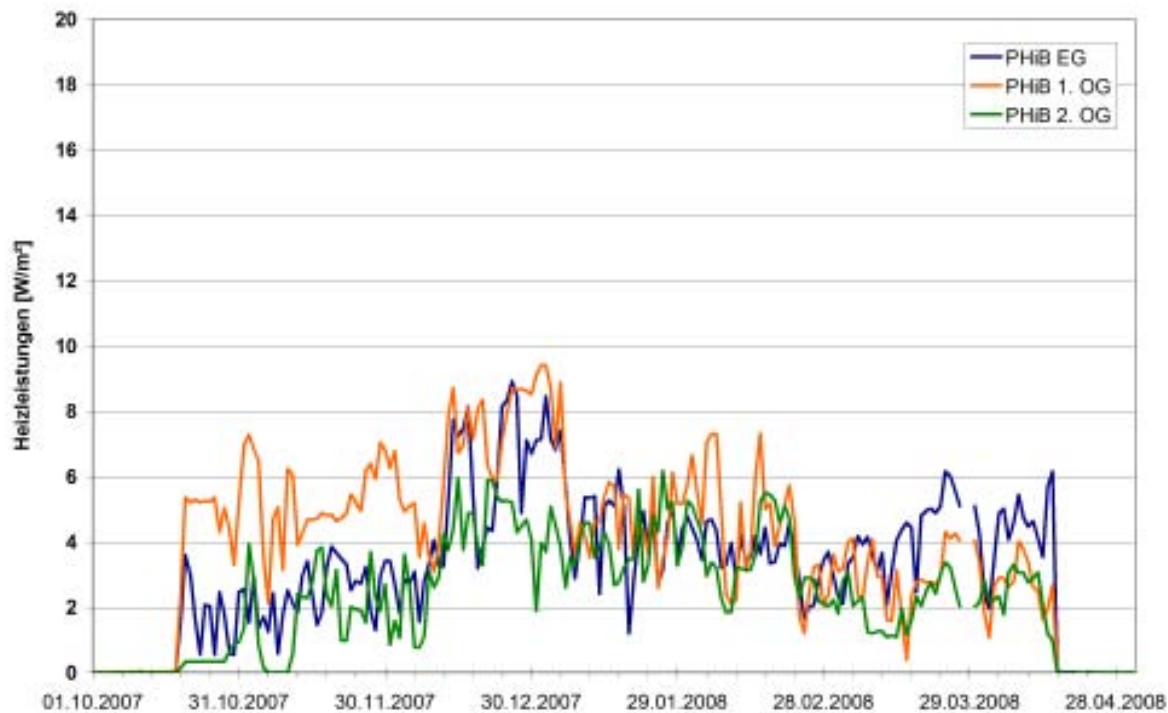


Abbildung 129: Heizleistung nach Etagen im PHiB im Winter 2007/2008.

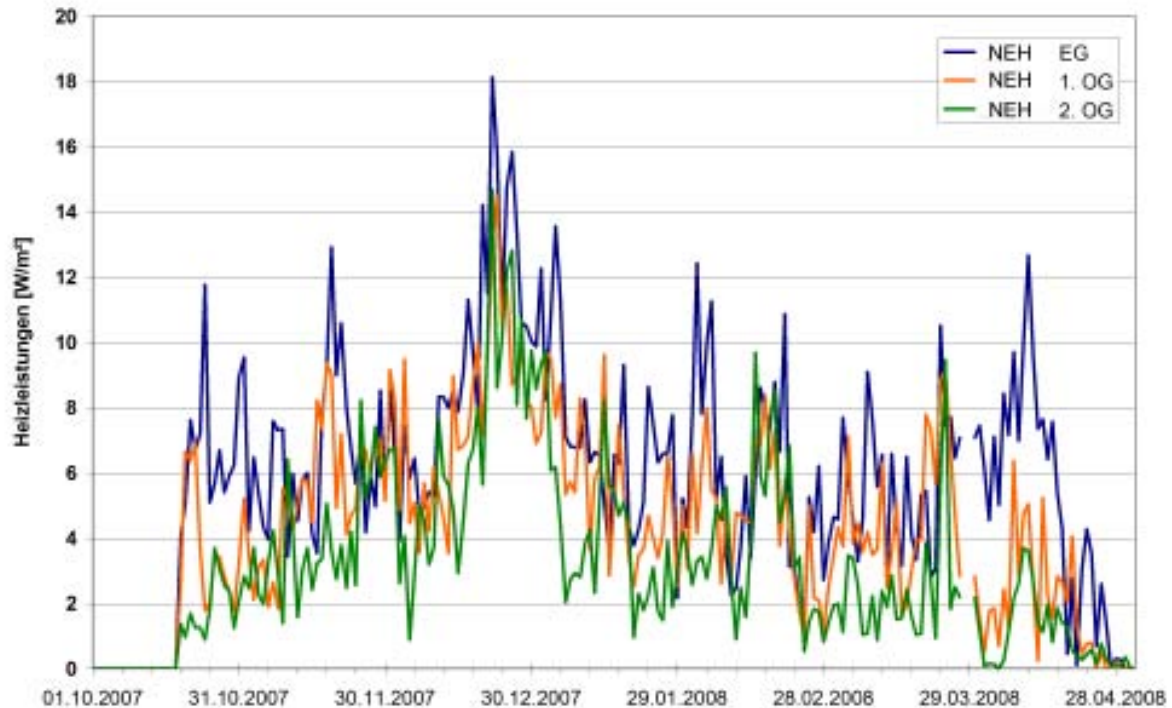


Abbildung 130: Heizleistung nach Etagen im NEH im Winter 2007/2008.

5.4.4.2 Heizkurve

Neben der Beurteilung der direkt gemessenen Heizleistungen ist eine Einordnung dieser über der Außentemperatur, im Verhältnis zur Heizgraden bzw. Heizkurve hilfreich. Die theoretische Heizkurve eines Gebäudes wird aus den Daten der Gebäudehülle (Flächen, U-Werte), der Lüftungsanlagen (Luftmengen und Wärmehückgewinnung) und der inneren Wärmequellen sowie der mittleren Innentemperatur bestimmt. Sie ist zur Beurteilung der Abhängigkeit der Heizlast von der Außentemperatur notwendig.

Die theoretische Heizkurve zeigt an, welche Heizleistung dem Gebäude zugeführt werden müsste, wenn die solaren Gewinne vernachlässigt werden. Sie berechnet sich nach der Formel:

$$Q_p = H/A * (T_i - T_a) - q_i$$

Mit:

Q_p :	Zuzuführende Heizleistung pro Energiebezugsfläche	[W/m ²]
H :	Spezifische Wärmeverluste des Gebäudes	[W/K]
A :	Energiebezugsfläche	[m ²]
T_i :	Innentemperatur	[°C]
T_a :	Außentemperatur	[°C]
q_i :	Spezifische interne Gewinne	[W/m ²]



Die Kennwerte der Heizgraden wurden den aktualisierten PHPP-Bilanzen und den Messwerten entnommen. Beim NEH wurde die angepasste PHPP-Bilanz mit dem reduzierten Luftwechsel von $n_L = 0,1 \text{ h}^{-1}$ verwendet.

Der Abstand der gemessenen tagesmittleren Leistungen von der theoretischen Heizgerade senkrecht nach unten ist vor allem auf passiv genutzte Solarstrahlung zurückzuführen. Die Messpunkte, die sich über der Geraden befinden, zeigen Aufheizvorgänge (z.B. nach Heizungsabsenkungen, Zusatzlüftung, etc.) an.

Das Diagramm in Abbildung 131 zeigt für das PHiB, dass ab etwa $12,5 \text{ °C}$ Außentemperatur - bis auf einen Ausreißer - kaum noch nennenswert Heizleistungen gemessen wurden. Nur wenige Tagespunkte liegen oberhalb der theoretischen Heizkurve. Das Gebäude ist in Bezug auf die Heizleistung einem sehr hochwertigen Passivhaus-Neubau gleich zu setzen.

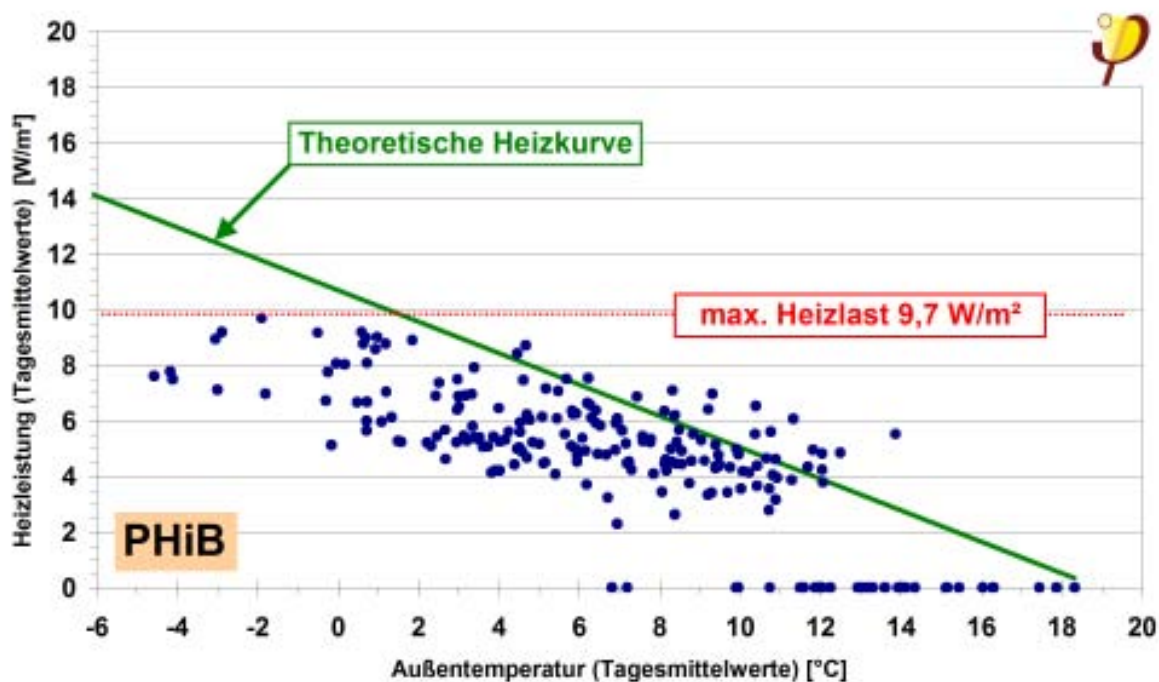


Abbildung 131: Tagesmittlere Heizleistungen über der Außentemperatur sowie die berechnete theoretische Heizkurve für das PHiB (Heizzeit 01.10.2007 bis 30.04.2008).

Beim NEH sind auch oberhalb von 14 °C Außentemperatur noch nennenswerte Heizleistungen zu verzeichnen (Abbildung 132). Auch hier befinden sich nur wenige Messpunkte über der theoretischen Heizkurve.

Es fällt auf, dass die Messpunkte in einem Band parallel zur Heizkurve liegen, also mit ihr kontinuierlich bei sinkender Außentemperatur ansteigen. Anders ist es beim PHiB: Das Feld der Messpunkte hat eine geringere Steigung als die Gerade. Das bedeutet, dass an kälteren Tagen real niedrige Heizleistungen benötigt werden als

theoretisch - ohne Berücksichtigung der solaren Einflüsse - berechnet. Das hat seine Ursache in der Wetterlage in Mitteleuropa. An besonders kalten Tagen herrscht im Normalfall klares Wetter mit höherer Solarstrahlung. Diese reduziert dann die notwendige Heizleistung. Dies macht sich im PHiB, durch den größeren Anteil der Solarwärme an der Gesamtbilanz, stärker bemerkbar.

Bei beiden Gebäuden ist aufgrund der gemessenen Raumtemperaturen davon auszugehen, dass die Heizleistungen dauerhaft ausgereicht haben. Die Wärmezufuhr war zu jeder Zeit ausreichend.

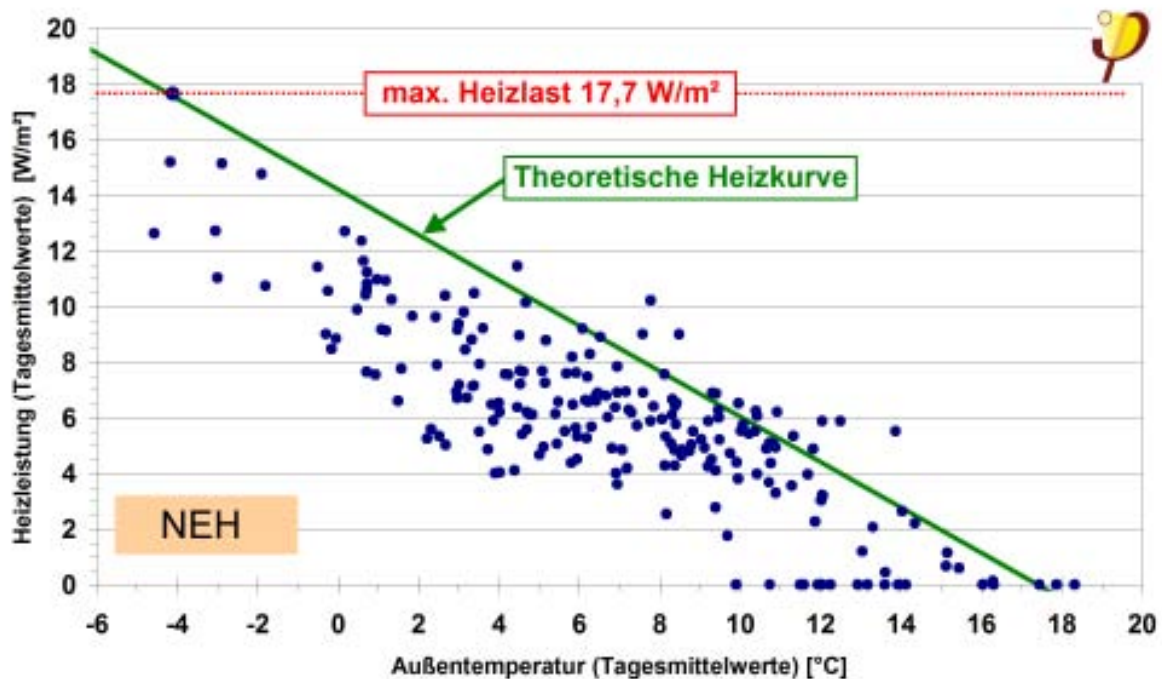


Abbildung 132: Tagesmittlere Heizleistungen über der Außentemperatur und die berechnete theoretische Heizkurve für das NEH (Heizzeit 01.10.2007 bis 30.04.2008).

5.4.5 Referenzgebäude Bestand

Um die Erfolge der Sanierungen im Bezug auf den Energieverbrauch einschätzen und verdeutlichen zu können, wird ein Vergleich mit einem sehr ähnlichen unsanierten Objekt durchgeführt.

Das Gebäude befindet sich in etwa 300 m Entfernung zur Hoheloogstraße. Es ist, wie die Gebäude in der Hoheloogstraße ebenfalls ca. 1960 erbaut. Der Block mit vier Hauseingängen verfügt über 28 Wohnungen, mit einer Energiebezugsfläche von insgesamt 1321 m². Die Wohnungen sind zwischen 38 und 52 m² groß, wobei zwei Wohnungen zu einer Einheit mit 104 m² zusammengelegt wurden. Das Gebäude wird mit Erdgas versorgt, jede Wohnung verfügt über einen eigenen Gaszähler. Die



Wohnungen werden ausschließlich über die Fenster gelüftet. Das Gebäude ist auf beiden Hauptfassadenseiten stark verschattet.

Die Informationen zum Gebäude (Grundrisse, etc.) wurden vom Eigentümer, der GAG Ludwigshafen, zur Verfügung gestellt. An Hand der Pläne wurden die Energiebezugsflächen ermittelt. Mit einer Befragung per Telefon, per Postkarten und auch vor Ort wurde ermittelt, welche Wohnungen mit Gasherden kochen, um dies bei der Auswertung der Gasverbräuche berücksichtigen zu können. Die Befragung ergab, dass 10 der 28 Wohnungen mit Gas kochen.



Abbildung 133: Links: Westlicher Teil der Nordfassade des unsaniertes Wohngebäudes in der Nähe der Hoheloostraße mit sehr ähnlicher Bauweise. Es dient bei der Untersuchung als Referenzgebäude. Rechts: Teil der verschatteten Südfassade des Gebäudes.

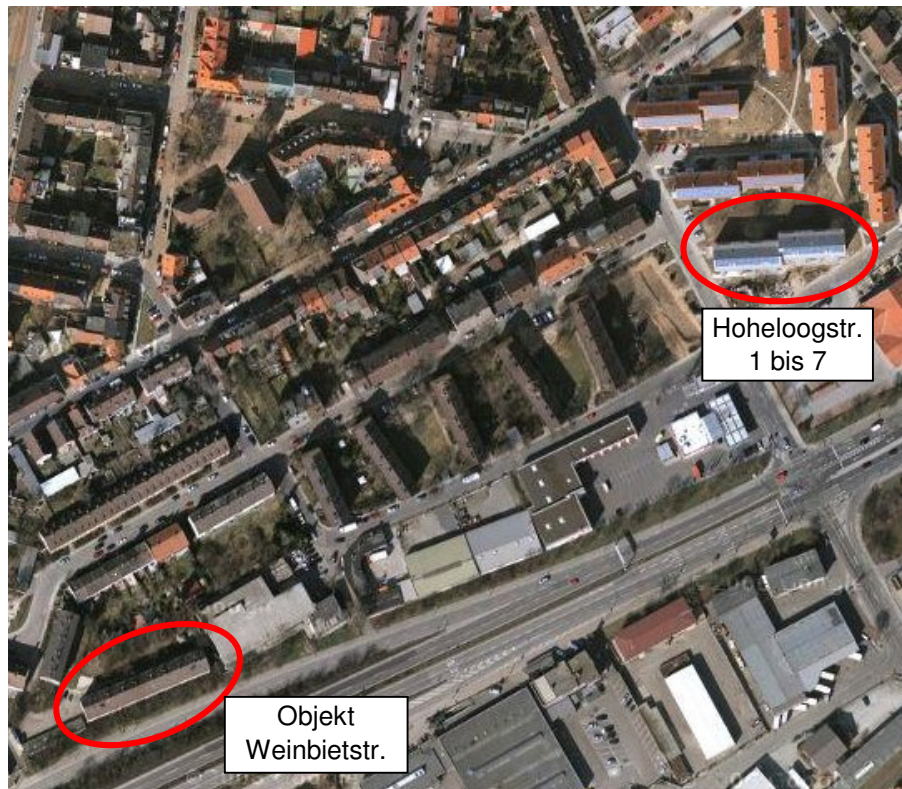


Abbildung 134: Luftbild zur Lage der untersuchten Gebäude in Ludwigshafen Mundenheim (Quelle: www.maps.google.de).

Ab September 2006 bis Juli 2008 wurden alle Gaszähler der Wohnungen, etwa in Monatsabständen abgelesen. Dies erfolgte bei den zahlreichen Ortsterminen durch Mitarbeiter des Passivhaus Instituts, insbesondere aber durch den Mieterbetreuer der GAG.

Aus den Ablesungen wurden die monatlichen Gasverbräuche berechnet und in Energiemengen umgerechnet (1 m^3 Gas entspricht 10 kWh). Die Heizgeräte befinden sich alle in den Wohnungen, womit die Umwandlungs- und Verteilverluste innerhalb der thermischen Bilanzgrenze anfallen. Daher wurde vereinfacht der gesamte Gasverbrauch herangezogen.

Bei den Wohnungen mit Gasherden wurde, gemäß der nach den Messergebnisse zu durchschnittlichen Kochgasverbräuchen aus [Peper 2005] ein Abzug von $0,29 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ Monat})$ in Ansatz gebracht. Nach Informationen des Vermieters erfolgt in 18 der 28 Wohnungen auch die Warmwassererwärmung über Erdgasverbrennung. Bei der Auswertung müssen daher die Wohnungen in zwei Gruppen geteilt werden: Bei der einen wird der reine Heizwärmeverbrauch ermittelt bei der anderen die Summe aus Heizwärmeverbrauch und Wärmeverbrauch zur Warmwasserbereitung. Diese Summenwerte können nicht weiter aufgeteilt werden.

Da die Messdatenablesung erst später begonnen wurde als die Datenerfassung in den sanierten Gebäuden, ergeben sich zwei überlappende Jahreszeiträume. Das



zweite Bilanzjahr ist vollständig identisch mit dem der Hauptuntersuchung und wird hier dargestellt.

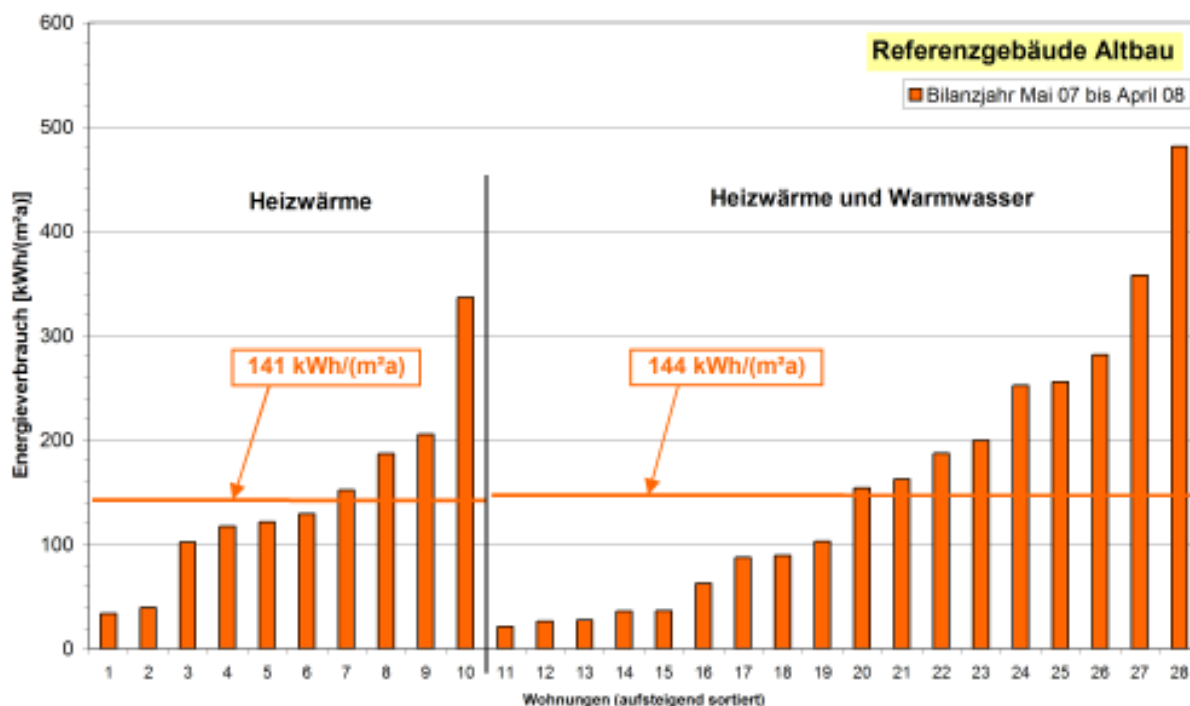


Abbildung 135: Energieverbrauch der 28 Wohnungen im Referenzgebäude in der Weinbierstraße im zweiten Bilanzjahr. In 10 Whg. ist der Heizwärmeverbrauch, in 18 der Heizwärme- und Warmwasserverbrauch zusammen dargestellt.

Im zweiten Bilanzjahr ergibt sich ein Heizwärmeverbrauch von $141 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ im Mittel der 10 Wohnungen ohne Warmwasserbereitung über die Gasthermen. Die Verbräuche liegen zwischen 34 und $336 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

In den 18 Wohnungen mit gemeinsamen Verbrauchsdaten für Heizung und Warmwassererwärmung ergibt sich ein mittlerer Messwert von $144 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Dieser liegt damit, zumindest im Mittel, fast gleichauf, wie der der 10 Wohnungen ohne Warmwasserbereitung. Die Verbrauchswerte schwanken im zweiten Bilanzjahr zwischen 21 und $481 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Weitere Informationen über die Nutzung, Leerstand, Personenbelegung, Raumtemperaturen etc. sind nicht bekannt. Im ersten Bilanzjahr (nicht dargestellt) ergibt sich ein deutlicherer Unterschied zwischen den beiden Gruppen (mit und ohne Warmwasser), als im zweiten. Allerdings kann bei der geringen Anzahl der Wohnungen mit reiner Heizwärmeerzeugung (ohne Warmwasser), auch in diesem Zeitraum die Differenz NICHT als Energieverbrauch zur Warmwassererzeugung gewertet werden.

Der Vergleich der Heizwärmeverbräuche des zweiten Bilanzjahres der drei unterschiedlichen energetischen Gebäudestandards ist in Abbildung 136 dargestellt. Vom PHiB und vom NEH wird der gemessene Heizwärmeverbrauchswert umgerechnet auf Standardbedingungen (20 °C und Luftwechsel $n_L = 0,44 \text{ h}^{-1}$; Standardklima Mannheim) zuzüglich der nutzbaren Verteilverluste verwendet (Berechnung erfolgt in Abschnitt 5.7).

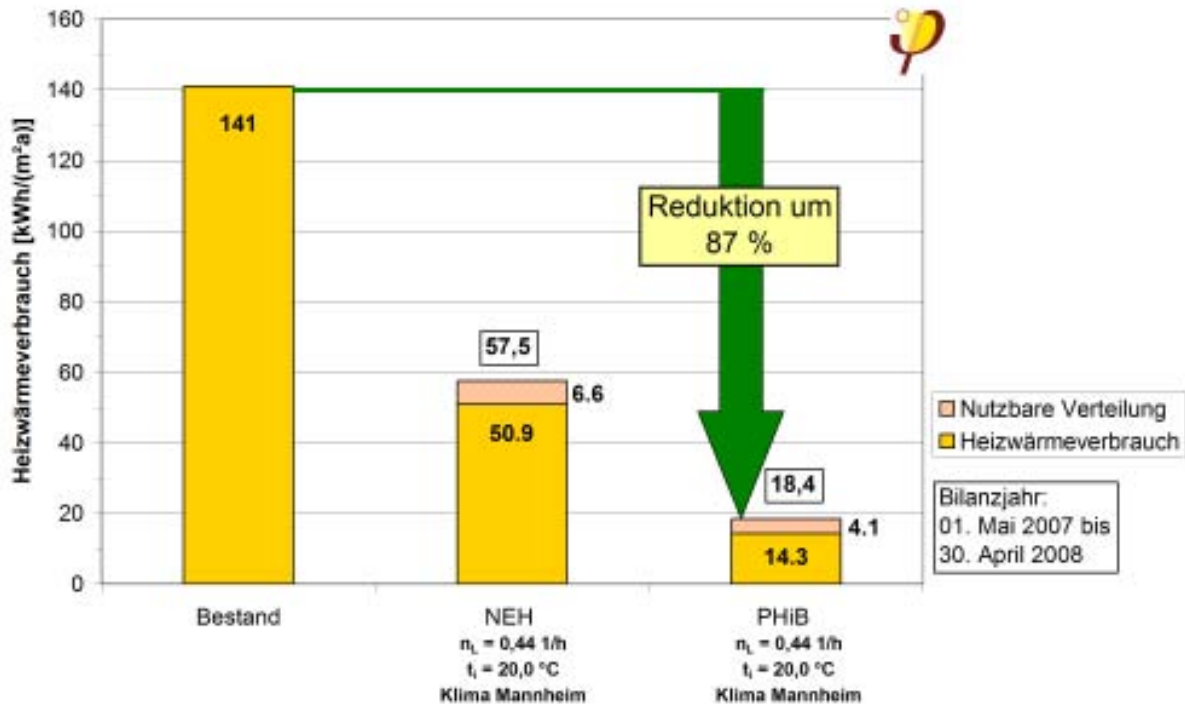


Abbildung 136: Vergleich der gemessenen Heizwärmeverbräuche umgerechnet auf Standardbedingungen der drei unterschiedlichen Gebäudestandards am Standort Ludwigshafen Mundenheim vom 2. Bilanzjahr (01. Mai 2007 bis 30. April 2008).

Durch diese konsequente Sanierung im Falle des PHiB wurde eine Heizwärmereduktion von 87 % erreicht. Der Wert zeigt, dass das enorme Potential, welches bei der Sanierung von typischen Bestandsgebäuden vorhanden ist, auch tatsächlich erschlossen wurde! Es wird etwa Neubau-Passivhausstandard erreicht, wenn konsequent vorgegangen wird und passivhaustaugliche Komponenten verwendet werden.

Im NEH beträgt die Reduktion 59 %, allerdings bei deutlich geringerer Sicherheit gegenüber Tauwasserausfall an den verbleibenden Wärmebrücken und deutlichen Komforteinbußen durch aufwendige Herstellung ausreichender Fensterlüftungszeiten, wie sie für einen gute Innenraumluftqualität erforderlich sind.

5.4.6 Wärmeverbrauch Warmwasser

Die Warmwasserversorgung der Wohnungen erfolgt über die beiden Warmwasserspeicher im Übergaberaum von Haus 5. Die Speicher werden von der Nahwärme (Sekundärkreislauf) gespeist. Für beide Speicher gibt es jeweils einen Wärmemengenzähler für Warmwasserladung und Warmwasserentnahme. Der Energiebezug (Speicherladung) über die Monate ist bereits in Abschnitt 5.4.1 dargestellt. Die Messwerte für die Warmwasserladung der Speicher für das zweite Bilanzjahr ist dort bereits mit **24,9 kWh/(m²a)** für das PHiB und mit **26,8 kWh/(m²a)** für das NEH angegeben worden.



Aus den Warmwasserspeichern wird zum einen Warmwasser zur Nutzung entnommen, zum anderen ist eine Zirkulationsleitung vorhanden. Diese sorgt für die schnelle Versorgung mit Warmwasser an den Zapfstellen der Wohnungen. Die Aufwendungen für die Zirkulation werden jeweils mit einem Wärmemähler erfasst.



Abbildung 137: Die beiden Warmwasserspeicher und die vier zentralen Wärmemengenzähler für Warmwasser- und Zirkulationswärmemengen im Übergabekellerraum von Haus 5.

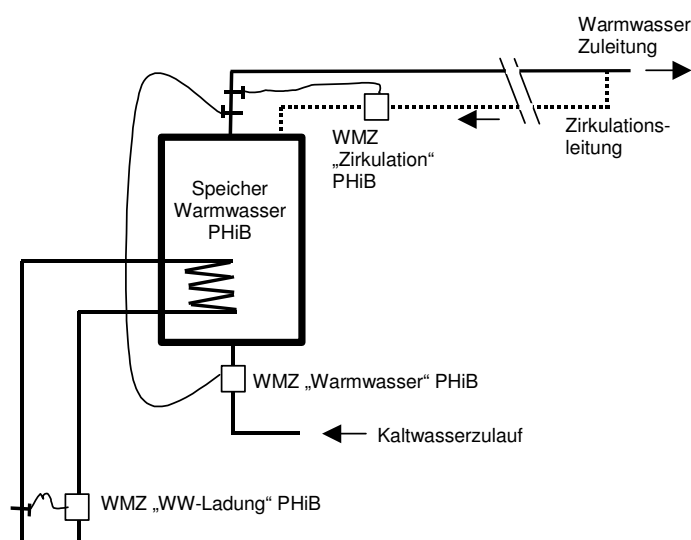


Abbildung 138: Detail aus Abbildung 63 vom Hydraulikschemata der Haustechnik für das PHiB. Dargestellt ist nur der Warmwasserversorgungsteil mit den entsprechenden Wärmemengenzählern. Der Aufbau der Technik für das NEH ist identisch.

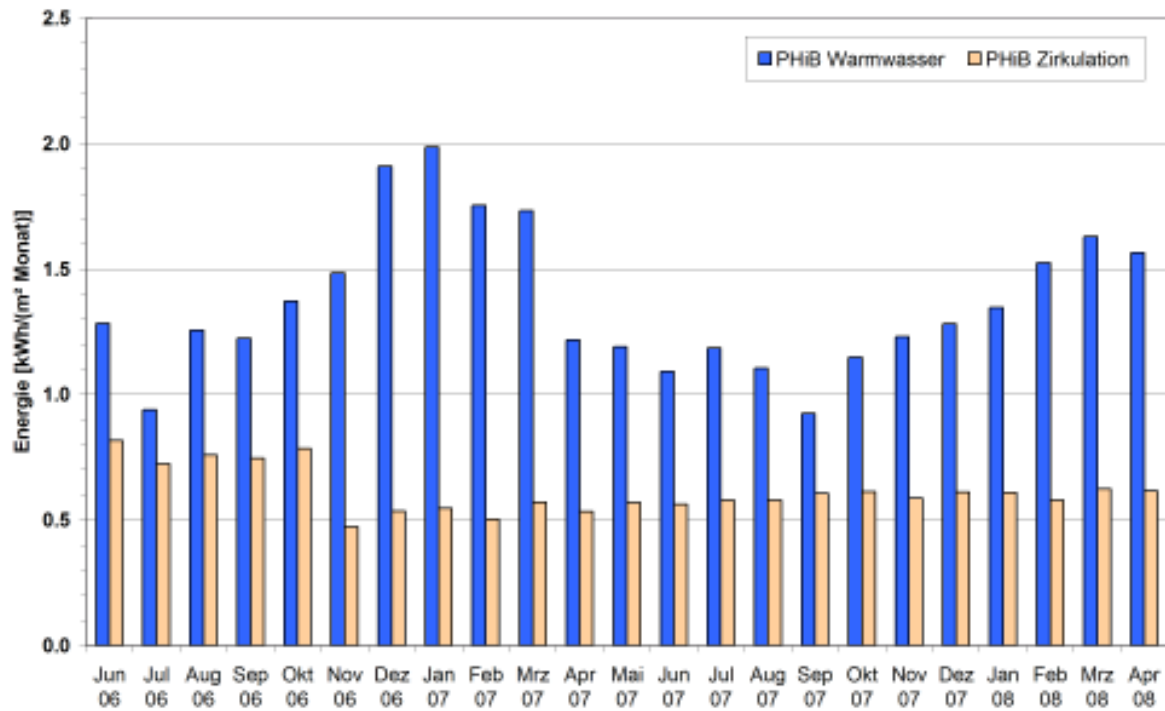


Abbildung 139: Monatliche spezifische Wärmeverbräuche durch die Warmwasserentnahme aus dem zentralen Speicher und der Zirkulation im PHiB.

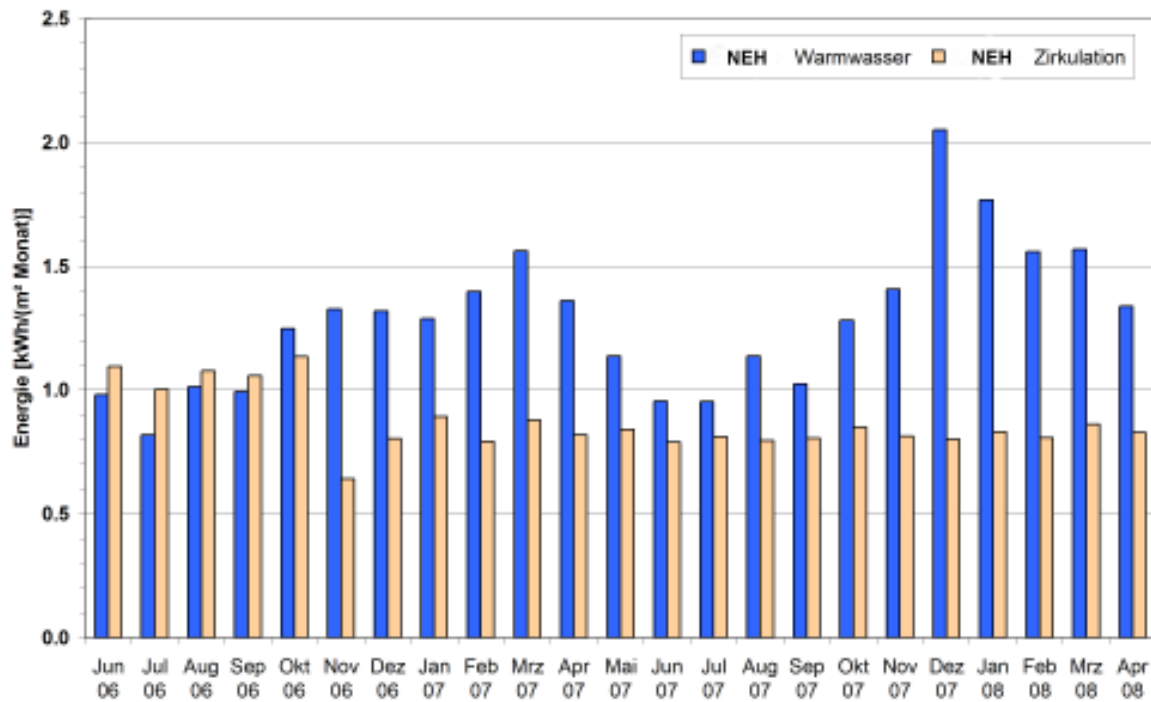


Abbildung 140: Monatliche spezifische Wärmeverbräuche durch die Warmwasserentnahme aus dem zentralen Speicher und Zirkulation im NEH.



Die monatlichen Verbräuche der Warmwasserentnahme (blaue Säulen) schwanken zwischen 0,9 und 2,0 kWh/(m²Monat) im PHiB (Abbildung 139). Im NEH schwanken sie zwischen 0,8 und 2,1 kWh/(m²Monat) (Abbildung 140). Es ist abzulesen, dass der Warmwasserverbrauch auch einer deutlichen Sommer-Winter-Schwankung unterliegt.

Zirkulation

Die gemessenen monatlichen Wärmeverbräuche für die Warmwasserzirkulation schwanken zwischen 0,5 und 0,8 kWh/(m²Monat) im PHiB und zwischen 0,6 und 1,1 kWh/(m²Monat) im NEH.

Bei den Zirkulations-Wärmeverbräuchen fällt auf, dass es ab November 2006 in beiden Gebäuden einen deutlich niedrigeren monatlichen Verbrauch gibt. Diese Reduktion hat ihre Ursache im Einbau von Tagesschaltuhren am 02.11.2006 durch das PHI. Mit diesen werden die Laufzeiten der beiden Zirkulationspumpen eingeschränkt. Diese Maßnahme reduziert nicht nur den Wärme- sondern auch den Stromverbrauch.

Der monatliche Wärmeverbrauch beim PHiB wird damit durchschnittlich um 0,19 kWh/(m² Monat) und beim NEH um sogar 0,26 kWh/(m² Monat) reduziert. Das entspricht einer spezifischen jährlichen Einsparung von 2,3 kWh/(m²a) beim PHiB, bzw. 3,1 kWh/(m²a) beim NEH. Die absoluten Zahlen der Einsparung von rund 1750 bzw. 2330 kWh/a machen deutlich, dass diese einfache Maßnahme sehr effektiv ist.



Abbildung 141: Montierte handelsübliche Tagesschaltuhren zur Steuerung der beiden Zirkulationspumpen. Diese einfache Zwischenschaltung war möglich, da die Stromversorgung der Pumpen über Steckdosen erfolgt.

Weiterhin auffällig ist der Unterschied in der Höhe der Zirkulations-Wärmeverbräuche zwischen den beiden Gebäuden. In der Jahressumme wird im NEH 38 % mehr Energie für die Zirkulation benötigt. Der relativ geringe Unterschied in den Warmwasser- bzw. Zirkulationsleitungslängen erklärt diesen Mehraufwand nicht.

Bei der Untersuchung der 10 Minuten Messdaten der beiden Zirkulationswärmemähler in Abbildung 142 und Abbildung 143 zeigt sich ein deutlicher Unterschied im Volumenstrom der Zirkulationspumpen: An einem typischen Tag (11. Januar 2008)

werden im NEH insgesamt 2809 Liter/Tag und PHiB nur 1908 Liter/Tag umgewälzt. Das ist im PHiB etwa ein Drittel weniger. Die VL- und RL-Temperaturen sind dabei in beiden Gebäuden sehr ähnlich.

In den beiden Darstellungen der 10 Minuten Daten des 24 Stundenzeitraumes sind auch sehr gut die eingestellten Schaltzeiten zu erkennen. In der Nacht sind etwas längere Ausschaltzeiträume programmiert. Tagsüber werden die Pumpen 20 bzw. 30 Minuten pro Stunde betrieben. An einem Tag summieren sich die Anlaufzeiten im PHiB auf 420 Minuten, die Pumpe für das NEH Gebäude dagegen läuft insgesamt 610 Minuten. Dieser Unterschied in der Betriebszeit entspricht etwa dem unterschiedlichem täglichem Volumenstrom und der unterschiedlichen Energieaufwendung.

Vom PHI wurden die Schaltzeit für beide Häuser gleich eingestellt. Für die Verstellung ist eine nachträgliche „Optimierung“ (bzw. Verstellung) als Ursache zu suchen.

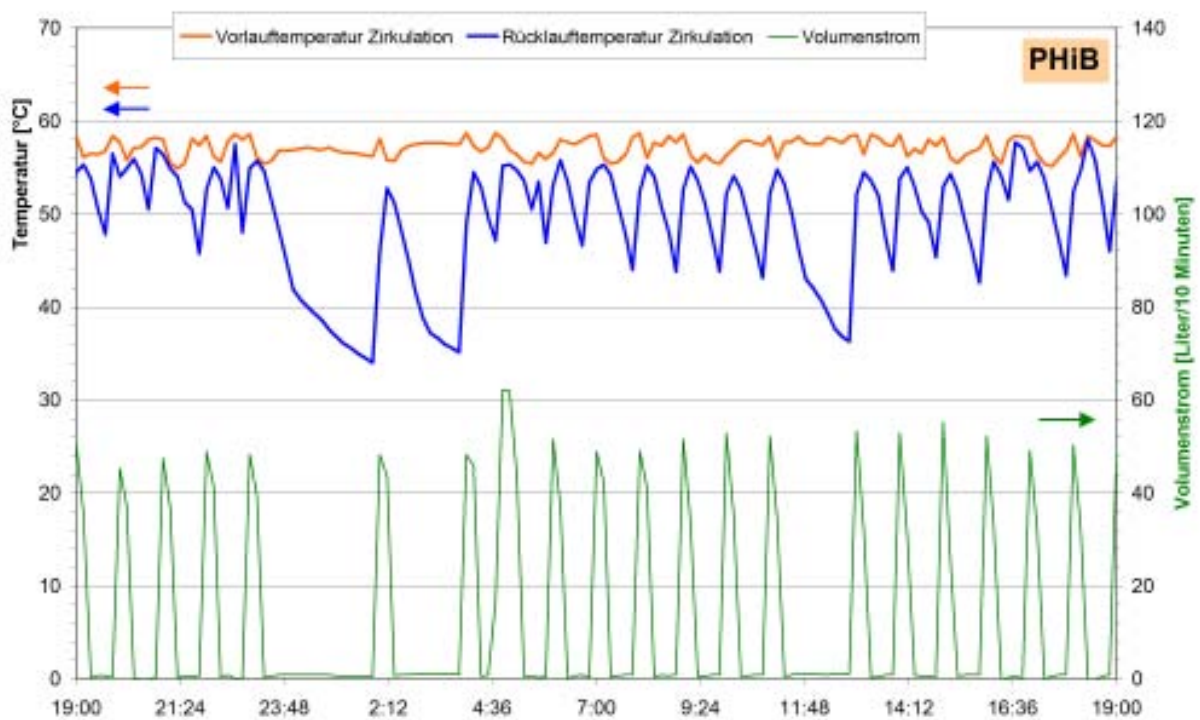


Abbildung 142: Vor- und Rücklauftemperaturen sowie der Volumenstrom der Zirkulationsleitung für das PHiB (10 Minuten Messdaten).

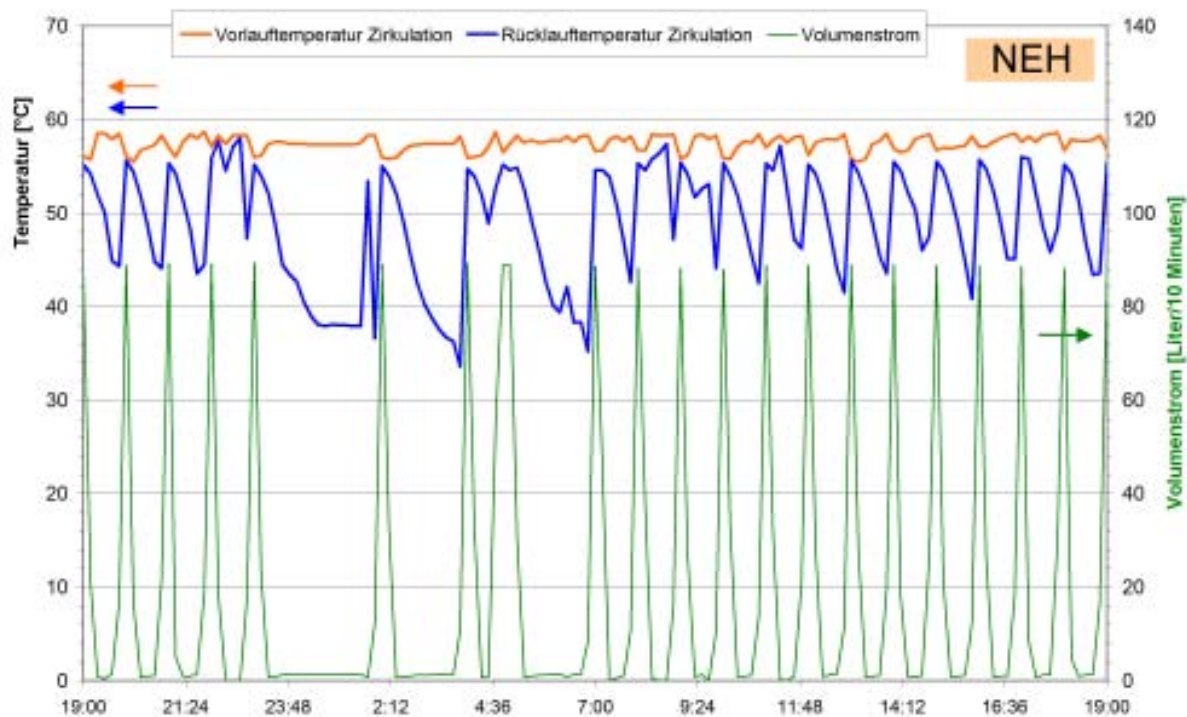


Abbildung 143: Vor- und Rücklauftemperaturen sowie der Volumenstrom der Zirkulationsleitung für das NEH (10 Minuten Messdaten).

Jahresverbrauch

Im zweiten Bilanzjahr ergeben sich im PHiB die Jahresverbräuche für die Warmwasserentnahme zu $15,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, für den Ausgleich der Wärmeverluste der Zirkulationsleitung werden $7,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ benötigt. Gegenüber der Speicherbeladung verbleibt ein „Bilanzrest“ von $2,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Dieser enthält die Speicherverluste. Allerdings ist der Wert nicht einfach diesen gleich zu setzen, da auch die gesamte Messunsicherheit in diesem Differenzbetrag enthalten ist.

Der mittlere Energieverbrauch für die Warmwasserbereitstellung ist im PHiB fast genau so groß wie der Heizwärmeverbrauch einer durchschnittlichen Wohnung des Hauses (Abbildung 144).

Im NEH (Abbildung 145) sind die Zirkulations-Wärmeverbräuche mit $9,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ entsprechend höher. Der Warmwasserverbrauch mit $16,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ liegt nur etwas über dem im PHiB. Der Unterschied ist allein durch die Nutzung zu erklären. Der Anteil der Zirkulationwärme ist mit 37 % der gesamten Wärmemenge der Speicherbeladung deutlich höher als im PHiB.

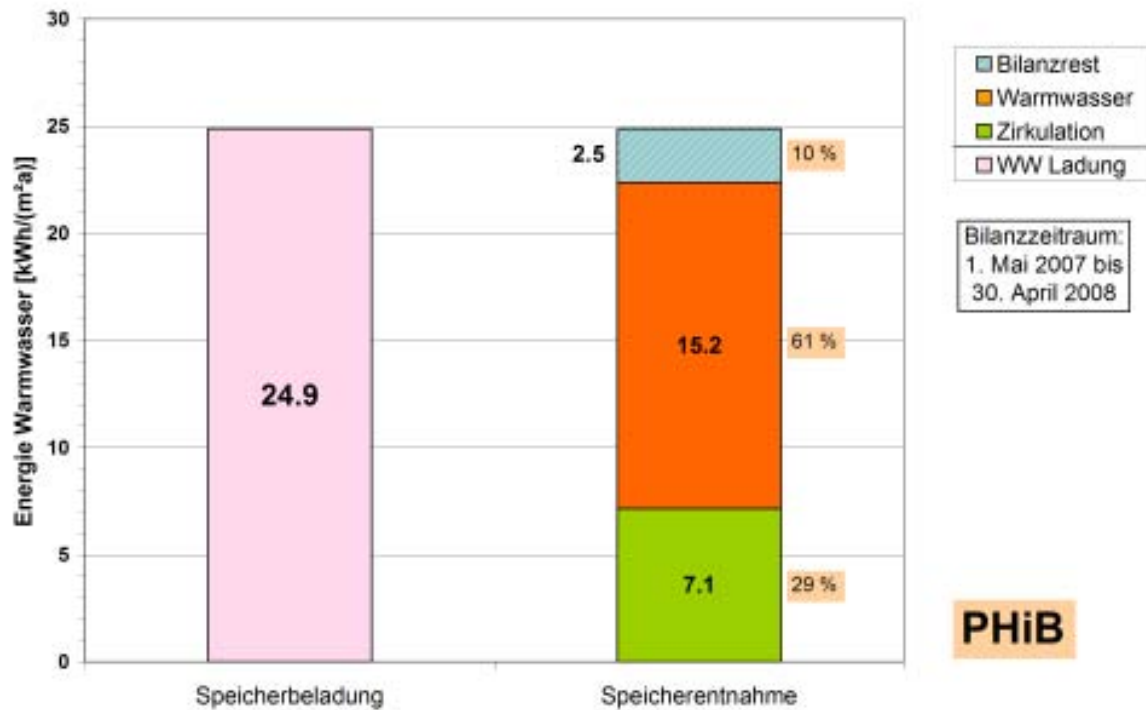


Abbildung 144: Energieverbrauch zur Warmwasserversorgung des PHiB im zweiten Bilanzjahr.



Abbildung 145: Energieverbrauch zur Warmwasserversorgung des NEH im zweiten Bilanzjahr.

Die Rohrleitungswärmeverluste der Warmwasserversorgung innerhalb und außerhalb der thermischen Gebäudehülle können hier, aufgrund der Zähleranordnung, nicht differenziert bestimmt werden.



5.5 Stromverbrauch

Die Messung des Haushaltsstromverbrauchs steht nicht im Vordergrund dieses Begleitprojektes. Um dennoch die Primärenergieverbräuche der Gebäude genau bestimmen zu können, wurden die Haushaltsstromzähler bei den zahlreichen Orts-terminen durch PHI-Mitarbeiter abgelesen. Die Zähler befinden sich in den Haus-technikkellern der 4 Häuser. Stromzähler der gemeinschaftlichen Stromverbräuche (Treppenhaus- und Außenlicht), der Stromverbrauch der Warmwasser- und Heiz-kreisumpen sowie der Nahwärme Übergabestation (nur in Haus 5) wurden ebenfalls zeitgleich abgelesen. Ebenso auch die beiden Einspeisezähler der großen Solar-stromanlagen (PV-Anlagen).

5.5.1 Haushaltsstromverbrauch

Die Haushaltsstromverbräuche der einzelnen Wohnungen beinhalten alle klassisch- en Verbräuche der Haushaltsanwendungen. Dazu gehört die Beleuchtung, Kochen, Waschmaschine, PC, TV, div. elektronische Kleingeräte. Die Warmwasserbereitung erfolgt nicht elektrisch, sondern zentral über die Nahwärmeversorgung.

Zusätzlich beinhalten die Stromverbräuche der 12 Wohnungen im PHiB auch noch den Lüftungsstrom (inkl. elektrischem Frostschutz und der kompletten Regelung). Dieser wird im nächsten Abschnitt noch gesondert untersucht.

Die Messwerte aller Wohnungen ergeben Haushaltsstromverbräuche zwischen 12,8 und 48,4 kWh/(m²a). Der gesamte **Mittelwert über die 24 Wohnungen** ergibt sich zu **30,4 kWh/(m²a)**. Die Einzelwerte sind Abbildung 146 zu entnehmen.

Betrachtet man die Stromverbräuche der beiden Gebäuden separat, ergibt sich ein großer Unterschied: Der mittlere Stromverbrauch im PHiB beträgt 37,3 kWh/(m²a), der im NEH dagegen nur 23,5 kWh/(m²a). Dieser deutliche Unterschied kann nicht allein mit dem zusätzlichen Stromverbrauch der Lüftungsgeräte erklärt werden. Im folgenden Abschnitt 5.5.2 wird dieser mit 3,8 kWh/(m²a) ermittelt. Zieht man den Verbrauch vom gesamten mittleren Haushaltsstrom der PHiB Wohnungen ab, verbleiben noch immer 33,5 kWh/(m²a). Damit ist der verbleibende Haushalts- stromverbrauch der Wohnungen im PHiB noch immer um durchschnittlich 10 kWh/(m²a) höher als der in den NEH. Es sind keine weiteren Information über die Ausstattung mit Elektrogeräten bzw. unterschiedliche Nutzung der Geräte vor- handen. Sicher ist, dass der unterschiedlich hohe Stromverbrauch nicht mit dem thermischen Energiestandard des Gebäudes zusammenhängt. Daher wird bei weiteren Betrachtungen der gesamte Mittelwert der 24 Wohnungen verwendet.

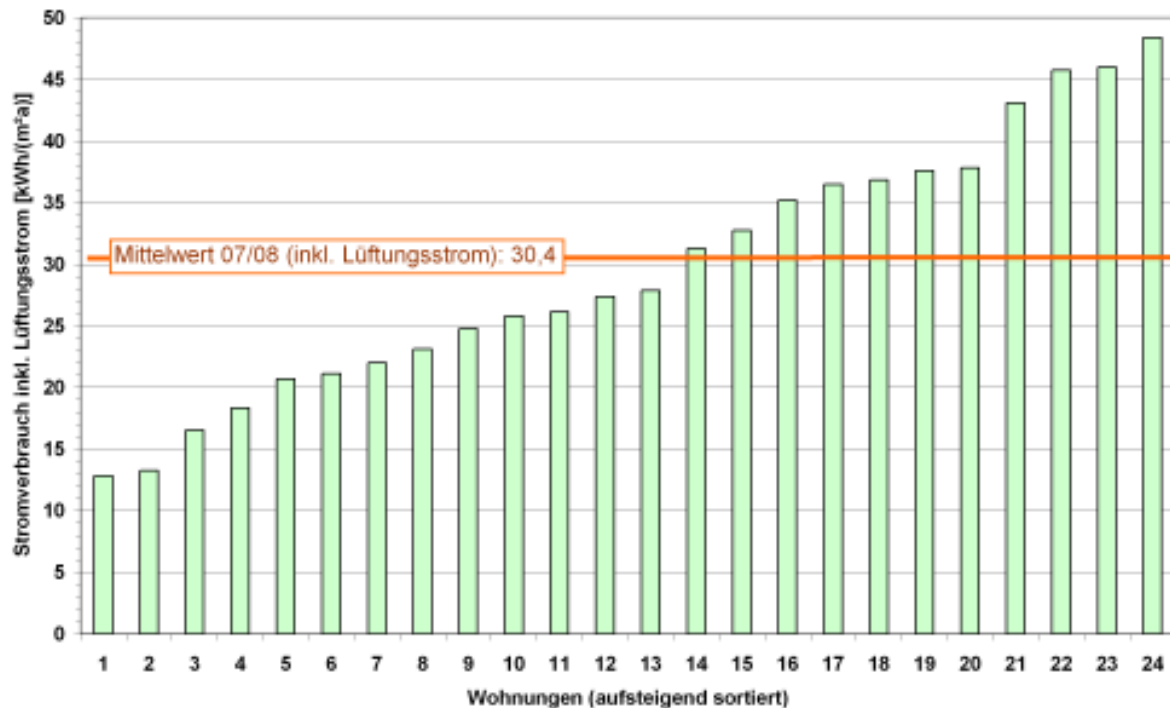


Abbildung 146: Spezifischer Stromverbrauch der 24 Wohnungen im zweiten Bilanzjahr (01. Mai 2007 bis 30. April 2008) sowie der Mittelwert. Die Werte der 12 Wohnungen im PHiB enthalten auch den Lüftungsstrom.

5.5.2 Strom Lüftungsanlagen

In einer Zusatzmessung wurden in fünf zufällig ausgewählten Wohnungen des PHiB Stromzähler zur Messung des Lüftungsstromverbrauchs montiert. Es wurden Zwischensteckergeräte verwendet, womit die gesamte Stromaufnahme inkl. dem elektrischem Froschutz und der kompletten Regelung der Geräte erfasst wird. Mit den Messungen wurden im September 2006 begonnen und sie wurden bis nach dem Ende der Messzeit im Mai 2008 fortgeführt. Die Zähler sind nicht auf der Datenerfassungsanlage aufgelegt. Sie wurden bei einigen Ortsterminen und auch durch die Mieter selber (telefonische Anfragen) abgelesen.

Aus den Daten wurden Verbrauchs- und Leistungswerte berechnet. Diese Größen sind je nach eingestellten Luftmengen (Lüftungsstufe) unterschiedlich groß. Die elektrische durchschnittliche Dauerleistung (Mai 2007 bis April 2008) schwankt je Gerät zwischen 18,9 und 41,4 W. Die spezifischen Jahresverbräuche liegen zwischen 2,3 und 7,0 kWh/(m²a), der flächengewichtete Mittelwert ergibt sich zu **3,8 kWh/(m²a)**. Abbildung 147 kann entnommen werden, dass die spezifischen höchsten Verbräuche in den beiden kleineren Wohnungen ermittelt wurden. Das hat seine Ursache darin, dass es sich um gleichgroße Geräte handelt, die ggf. nur mit unterschiedlichen Luftmengen (Lüftungsstufen) betrieben werden. Durch den relativ großen Unterschied zwischen den Verbrauchswerten der beiden kleineren Wohnungen ist allerdings der erhebliche Einfluss der Betriebsweise/Einstellung ablesbar.



Abbildung 147: Stromverbrauch der Lüftungsgeräte in fünf Wohnungen im PHiB (Zeitraum: Zweites Bilanzjahr).

Dieser hier gemessene mittlere Stromverbrauchswert ist etwas höher als der in der Queranalyse von zahlreichen untersuchten Passivhausprojekten ermittelte Lüftungsstromverbrauch von 3,3 kWh/(m²a) [Peper 2008]. Dort wurden Lüftungs-Einzelwohnungsgeräte mit sehr niedrigen Verbräuchen, bis hinunter zu 2 kWh/(m²a) vorgefunden. In der Untersuchung eines Passivhauses mit 19 Wohnungen [Peper 2004] waren Lüftungsgeräte vom gleichen Hersteller wie in diesem Projekt eingesetzt. In dieser Begleituntersuchung ergab die Messung von zwei dieser Geräte den gleichen Stromverbrauchswert von 3,3 kWh/(m²a) wie in der Hoheloostraße. Die genaue Übereinstimmung muss bei den wenigen Geräten allerdings als Zufall gewertet werden.

Beim Einsatz von Lüftungsgeräten mit hochwertigeren Ventilatoren bzw. reduzierten Standby-Verbräuchen der Regelung (Einhaltung des Stromeffizienzkriteriums für das Zertifikat als passivhausgeeignete Komponente mit 0,45 W/m³/h) und der Reduktion der Sommerbetriebszeiten ist eine deutliche Reduzierung des Stromverbrauchs möglich.

Es bleibt zu berücksichtigen, dass diesen zusätzlichen elektrischen Aufwendungen für die Lüftungsanlagen, die durch das Wärmerückgewinnungssystem im Gebäude zurückgehaltene Wärme, gegenübersteht. So wurde z.B. in der Siedlung in Hannover-Kronsberg eine Arbeitszahl in der Winterperiode von 16,5 messtechnisch ermittelt. Dies bedeutet, dass für jede Kilowattstunde Strom beachtliche 16,5 kWh Wärme zurückgewonnen werden [Peper 2002]. Der Betrieb dieser hocheffizienten Lüftungsanlagen erbringt damit nicht nur Behaglichkeitsvorteile, sondern auch eine

deutliche Primärenergieeinsparung. Dieser Zusammenhang ist im PHiB mit etwas veränderten Zahlenwerten genauso vorzufinden.

Zieht man je Wohnung den gemessenen Stromverbrauch für die Komfortlüftung von dem gemessenen gesamten Haushaltsstromverbrauch ab, ergibt sich der reine **Haushaltsstromverbrauch ohne Lüftungsstrom**. Für die fünf Wohnungen verbleiben dann Haushaltsstromverbräuche zwischen 24,9 und 44,7 kWh/(m²a). Der Anteil des Lüftungsstroms am Gesamtstromverbrauch dieser fünf Wohnungen schwankt zwischen 5 und 19 % (Abbildung 148).

Setzt man den in den fünf Wohnungen gemessenen mittleren Lüftungsstromverbrauch von 3,8 kWh/(m²a) für alle Wohnungen mit Lüftungsgeräten an, reduziert sich der Haushaltsstromverbrauch für diese dementsprechend; der gesamte Mittelwert aller 24 Wohnungen beträgt dann 28,5 kWh/(m²a). Damit liegt der reine Haushaltsstromverbrauch etwas unterhalb des Durchschnittswertes für den Haushaltsstromverbrauch in Deutschland.

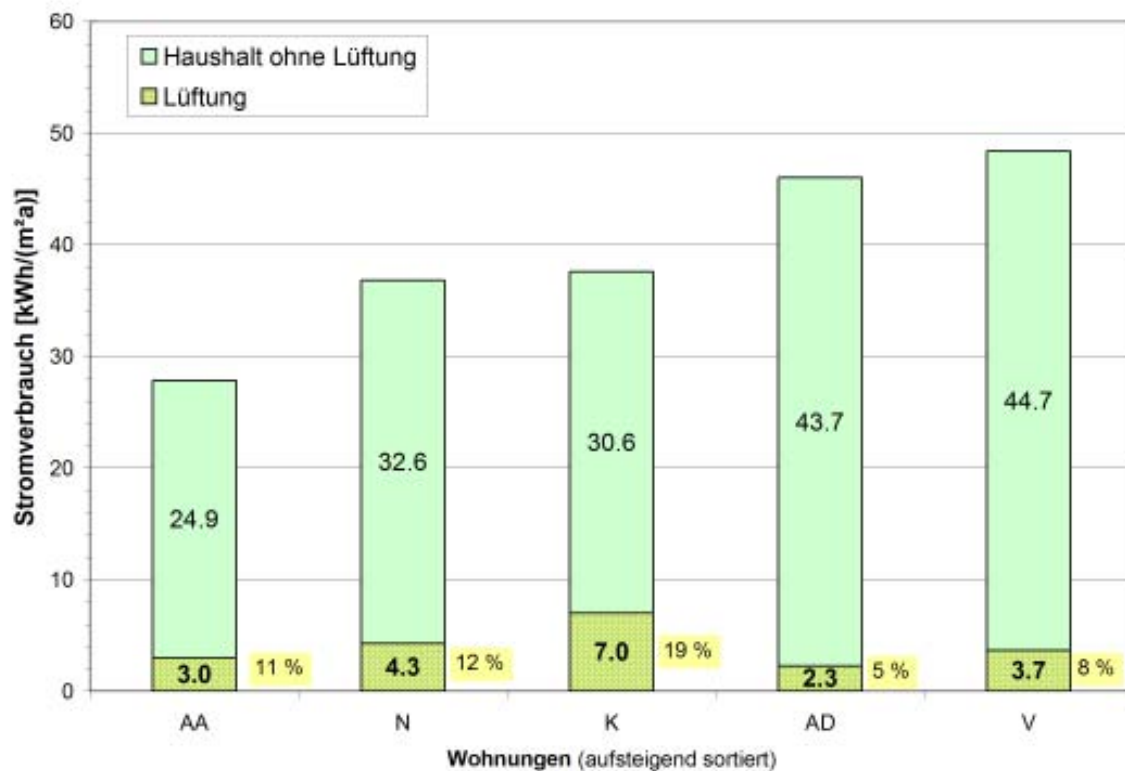


Abbildung 148: Stromverbrauch Haushalt ohne Lüftungsstrom und Lüftungsstrom der fünf Wohnungen aus Abbildung 147 (Zeitraum: Zweites Bilanzjahr).

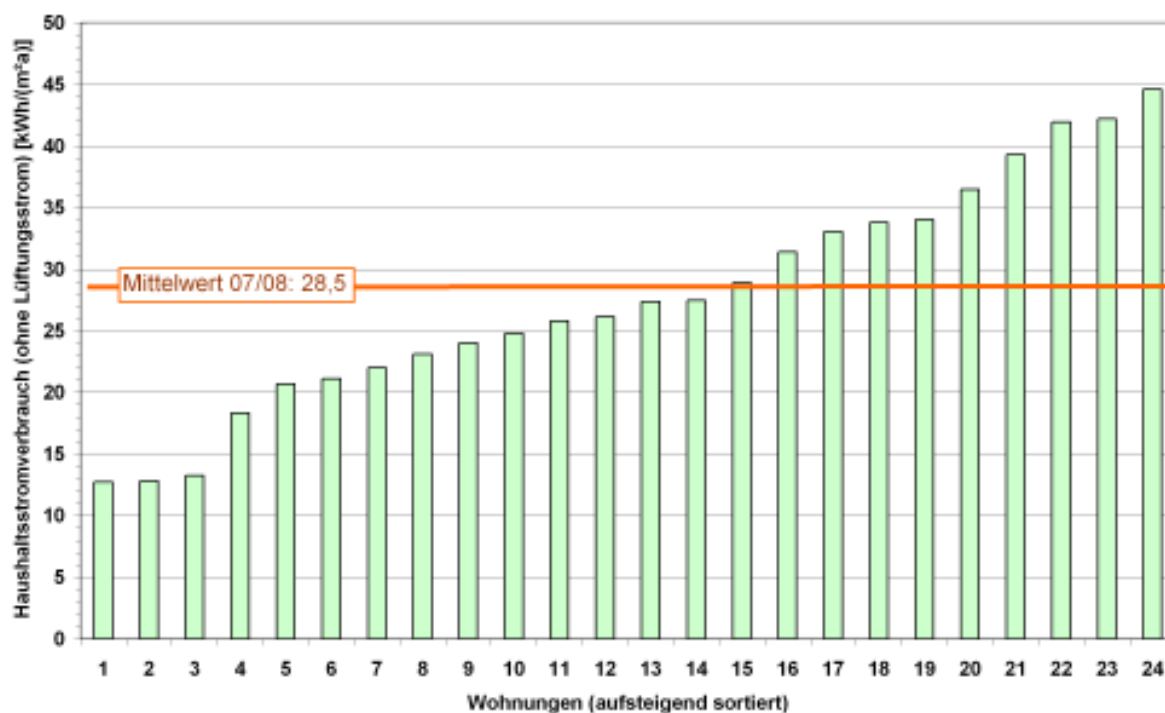


Abbildung 149: Haushaltsstromverbrauch der 24 Wohnungen OHNE Lüftungsstromverbrauch. Bilanzzeitraum 01. Mai 2007 bis 30. April 2008.

5.5.3 Allgemeinstrom

Die Stromverbräuche für Treppenhaus-, Keller- und Außenbeleuchtung werden je Hauseingang über gesonderte Stromzähler erfasst.

Im PHiB wird je Hauseingang im Keller ein kleiner Abluftventilator betrieben um eine Grundlüftung des Kellers sicher zu stellen. Dieser wird ebenfalls über die jeweiligen Allgemeinstromzähler erfasst.

Die Stromverbräuche der Regelung der Nahwärmeübergabestation, der Heizkreis- und Warmwasserpumpen, also der Summe für die gesamte zentrale Wärmeversorgung werden über einen eigenen Stromzähler in Haus 5 erfasst. Dieser Stromverbrauch wird - anteilig vom gesamten Wärmebezug (Heizung plus Warmwasser) - auf die beiden Gebäude verteilt.



Abbildung 150: Abluftventilator im Keller von Haus 1 und Haus 3 (links) und Überströmelement in der Wand von dem Kellerraum zum Kellerflur (rechts).

Der für die Begleitmessungen notwendige Strom (Messrechner, Sensoren, Bus-Master, etc) wird ebenfalls über den Zähler „Strom Heizung“ erfasst. Durch einen Unterzähler wird der reine Messtechnikstrom gemessen und konnte dann herausgerechnet werden.

Die spezifischen Allgemiestromverbräuche für das zweite Bilanzjahr sind in Abbildung 151 dargestellt. Aufgrund der Zuordnung der Stromverbräuche für die Wärmeversorgung („Strom Heizung“) anteilig nach dem Gesamtwärmebezug auf die beiden Gebäude, ist der Wert für jeweils zwei der vier Hauseingänge gleich hoch.

Der höhere Allgemiestromverbrauch im PHiB hat seine Ursache vermutlich allein im Dauerbetrieb der beiden Kellerlüfter. Dies macht $1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ aus, was bei Dauerbetrieb einer Leistung von etwa 45 W je Gerät entspricht. Hier wäre eine Optimierung, ggf. auch durch eine Schaltuhr, sinnvoll. Der Betrieb des Ventilators im Sommer erscheint aus Überlegungen zur Kellerfeuchtigkeit nicht als sinnvoll.

Insgesamt bewegen sich die Allgemein- **und** Heizungsstromverbräuche mit Werten zwischen $2,3$ bis $3,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ im erwarteten und üblichen Rahmen.

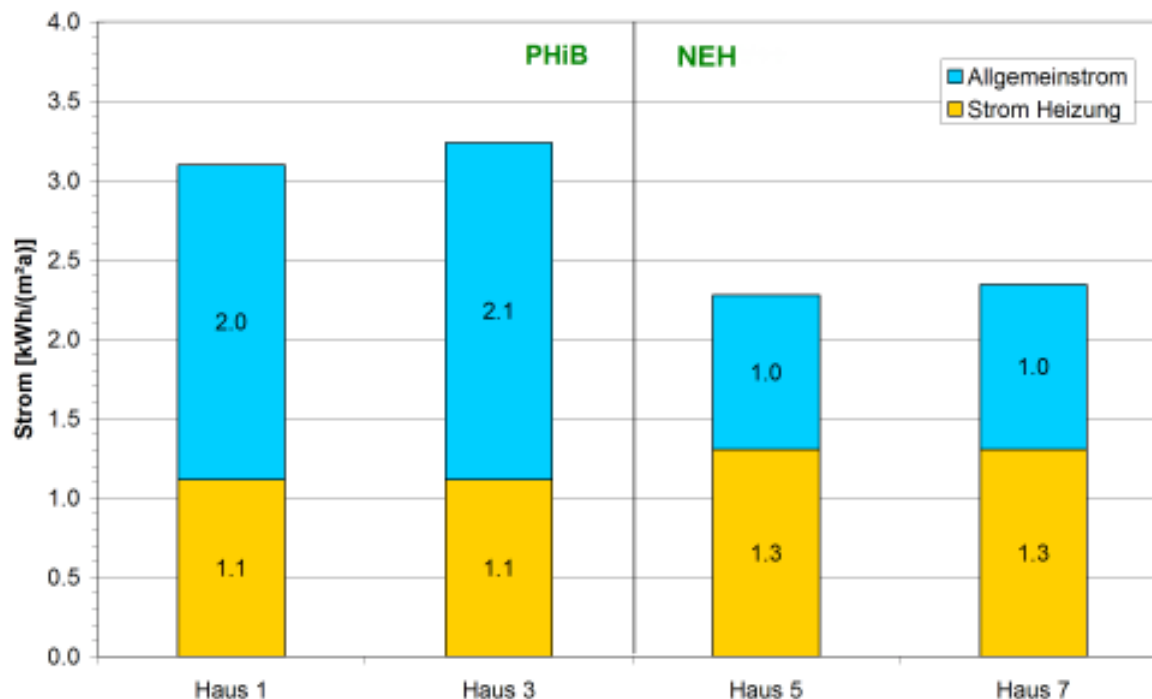


Abbildung 151: Spezifischer Stromverbrauch für allgemeine bzw. gemeinschaftliche Anwendungen zugeordnet nach den der vier Hauseingängen.

Werden die Heizungs- und Allgemeinstromverbräuche **und die Haushaltsstromverbräuche** inkl. des Lüftungsstroms gemeinsam berücksichtigt ergibt sich ein Gesamtmittelwert für beide Gebäude von 33,1 kWh/(m²a).

5.5.4 PV Strom

Die beiden Solarstromanlagen mit 105 bzw. 102 Quadratmeter Fläche sind auf den Süddächern montiert. Betrieben wird die PV-Anlage durch den Bauherren, die GAG Ludwigshafen. Der Strom wird vollständig in das öffentliche Versorgerstromnetz eingespeist. Aus den Ablesungen der beiden Einspeisezähler ergibt sich für das zweite Bilanzjahr ein spezifischer Ertrag für die beiden Gebäude von 16,5 bzw. 17,1 kWh/(m²a). Als Bezugsfläche dient hier auch wieder die EBF der Gebäude.



Abbildung 152: Solarstromanlage auf den Süddächern beider Gebäude.

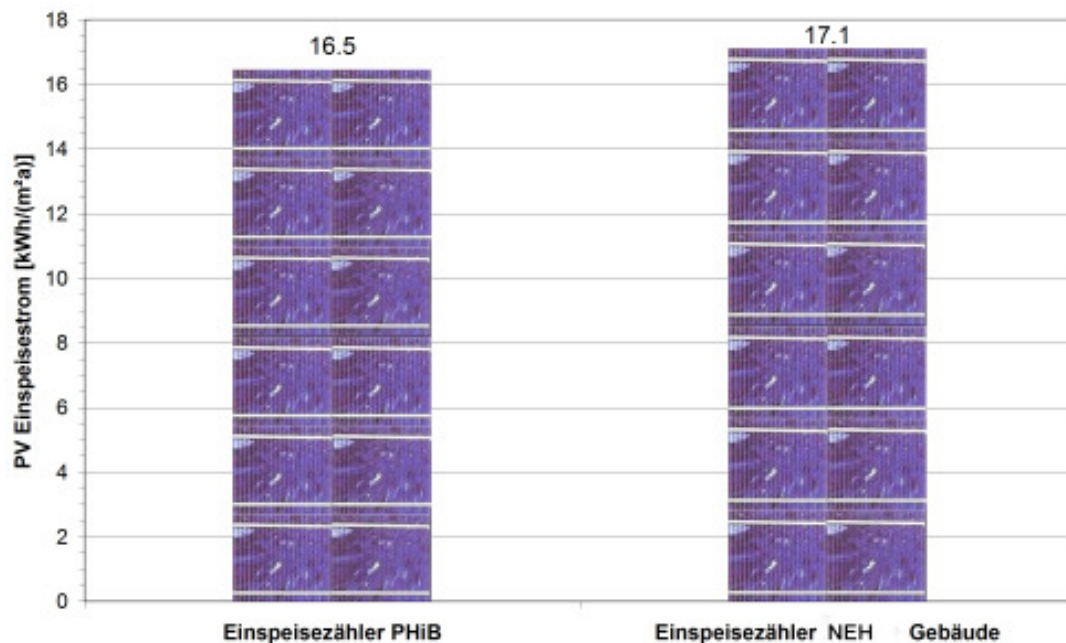


Abbildung 153: PV-Solarstromanlage auf dem Gebäudedach.

Bezieht man die Solarstromerträge auf die Fläche jeweilige Fläche der Anlage (105 bzw 102 m²) ergeben sich pro Quadratmeter PV-Zellen ein spezifischer Ertrag von 122,6 bzw. 120,9 kWh/(m²_{PV}a). Bei der gesamten Solareinstrahlung des Jahreszeitraumes von 969 kWh/(m²a) entspricht das einem Nutzungsgrad von 12,7 bzw. 12,5 %. Das sind für PV-Anlage typische Nutzungsgrade.



5.6 Warmwassermenge

Die Warmwassermengen der einzelnen Wohnungen wurden aus Gründen der Abrechnung ebenfalls erfasst. Diese Zähler sind mit M-Bus Schnittstellen ausgerüstet und wurden über die messtechnische Anlage aufgezeichnet.

Die gemessenen Warmwassermengen schwanken im zweiten Bilanzjahr zwischen 62,3 und 709,2 Liter/(m²a). Der gesamte Mittelwert aller Wohnungen ergibt sich zu 377 Liter/(m²a).

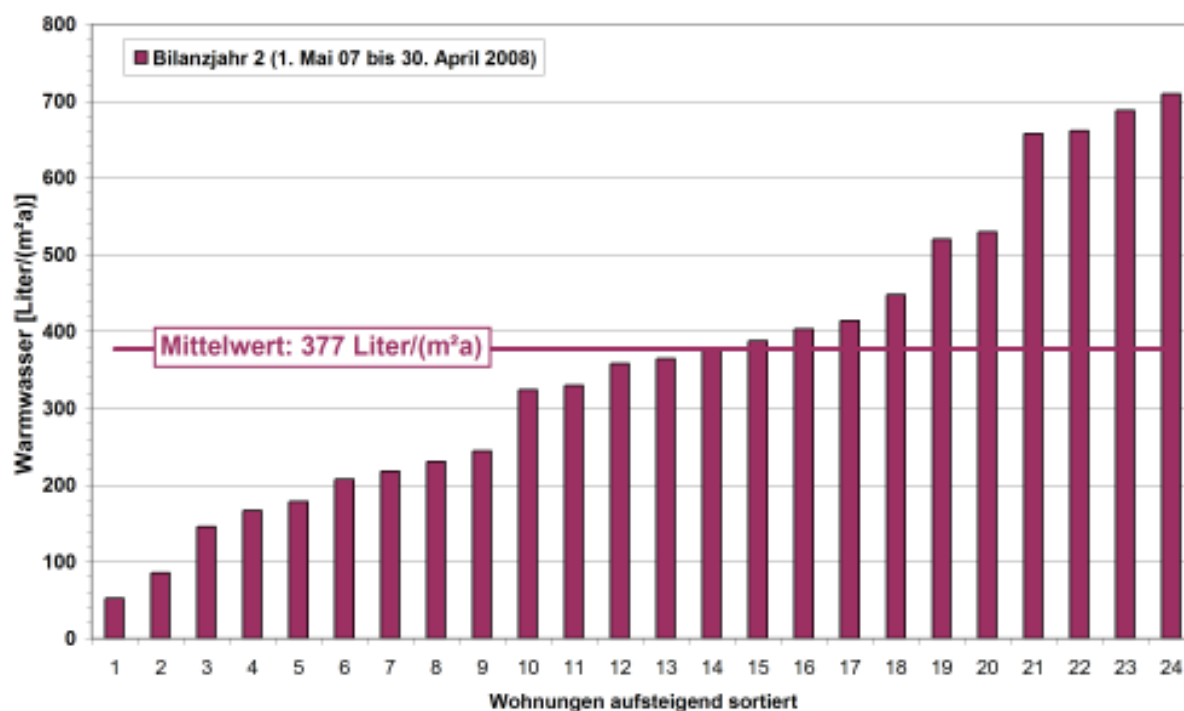


Abbildung 154: Warmwasserverbrauch im zweiten Bilanzjahr in den 24 Wohnungen und die Mittelwerte der beiden Gebäude.

5.7 Energiebilanz

Die kompletten Energiebilanzen werden für die Gebäude mit Daten des aussagekräftigeren zweiten Bilanzjahres aufgestellt. Zuerst wird die komplette Wärmeseite bilanziert, dann folgen die Gesamtbilanzen der End- und der Primärenergie.

5.7.1 Endenergie Wärme

Im PHiB werden insgesamt **49,3 kWh/(m²a)** Wärme bezogen. Die Bilanzgrenze ist dabei mit den vier Hauptwärmemengenzählern (Heizung- und Warmwasserbezug) gegeben. Die beiden Verbrauchssektoren Heizung und Warmwasser sind nahezu gleich groß. Wie sich die Wärmeverbräuche in den beiden Verbrauchsgruppen weiter aufteilen zeigt Abbildung 155. Insgesamt 64 % der eingesetzten Wärme wird „direkt“ verbraucht, wobei die Energie des Warmwasserbezugs auch noch einen Teil Wärmeabgabe der Rohrleitungen enthält. Die restlichen 36 % dienen indirekt als Heizung (Verteilung Heizung nutzbar), dem Komfort schnell Warmwasser zu erhalten (Zirkulation) oder stellen nicht nutzbare Verluste dar (Speicherverlust, Rohrleitungen außerhalb der thermischen Hülle).

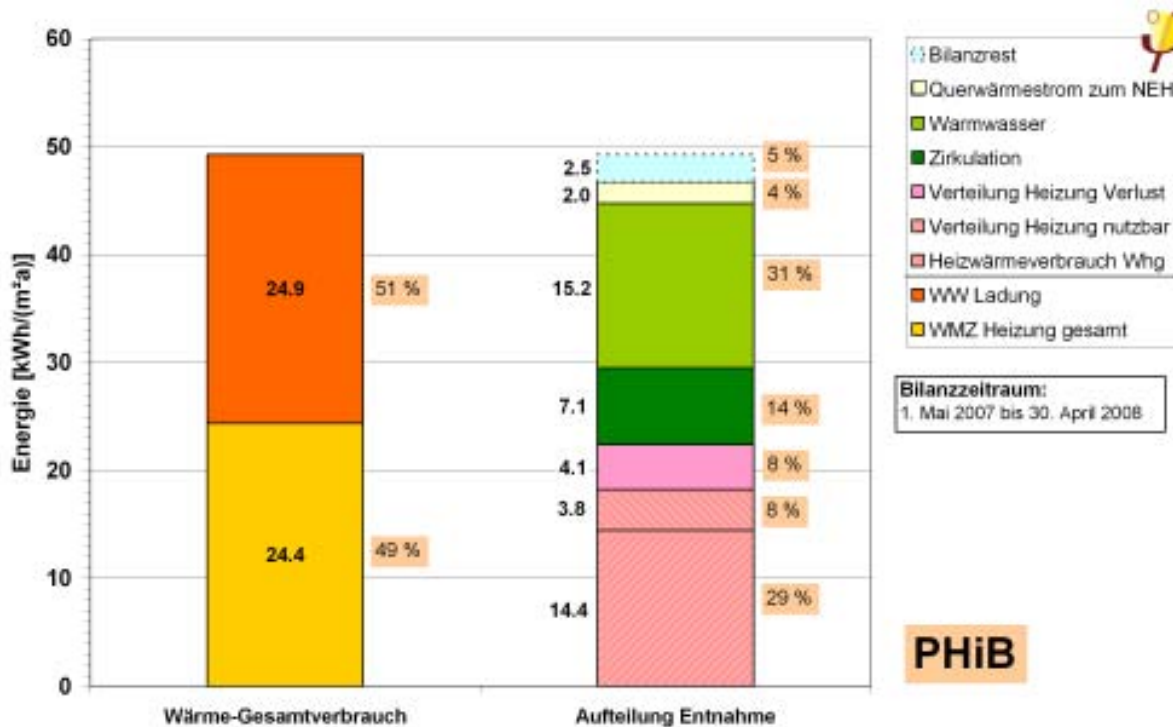


Abbildung 155: Aufteilung des gemessenen Endenergie-Wärmebezugs im PHiB für das zweite Bilanzjahr (01. Mai 2007 bis 30. April 2008).



Beim NEH (Abbildung 156) ist der gesamte Wärmebezug einschließlich des Querwärmestroms vom PHiB mit 59,7 kWh/(m²a) höher als im PHiB. Die Verteilung ist etwas in Richtung der Heizwärme und der Zirkulationsverluste verschoben.

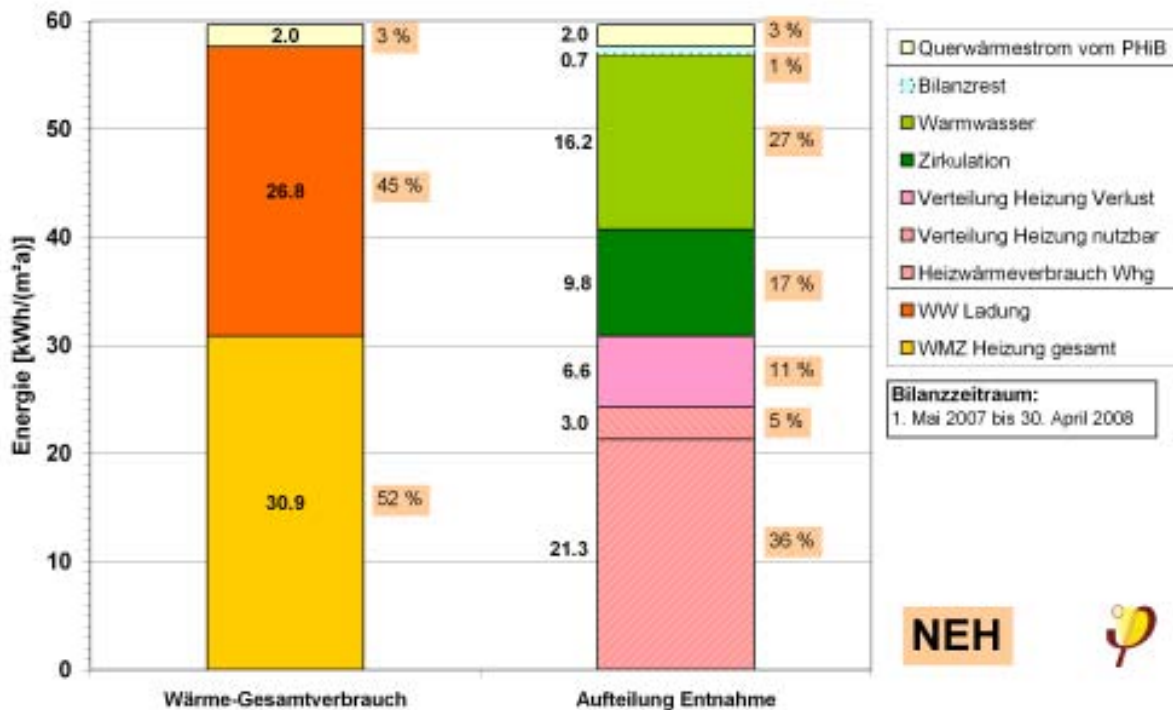


Abbildung 156: Aufteilung des gemessenen Endenergie-Wärmebezugs im NEH für das zweite Bilanzjahr (01. Mai 2007 bis 30. April 2008).

Wärmeverlust Nahwärmeübergabestation

Zu dem gemessenen gesamten Wärmebezug (Bilanzgrenze Hauptwärmehähler im Keller) kommen noch additiv die Wärmeverluste der Nahwärmeübergabestation mit Wärmeübertrager und allen Rohrleitungen bis zu den vier Wärmemengenzählern hinzu. Diese Wärmemenge konnte aufgrund der Zählerposition nicht gemessen werden. Daher wird sie pauschal mit jeweils 3 % des gesamten Wärmebezugs abgeschätzt.

Für das PHiB ergibt sich damit ein Zusatz von **1,4 kWh/(m²a)**, beim NEH von **1,8 kWh/(m²a)**.

5.7.2 Gesamte End- und Primärenergie

Zur Bestimmung der gesamten Endenergieverbräuche werden die Wärme- und Stromverbräuche addiert. Der oben abgeschätzte Wärmeverbrauch der Nahwärmeübergabestation wird dabei mit berücksichtigt. Im zweiten Bilanzjahreszeitraum beträgt die Summe der **Endenergie für das PHiB insgesamt 87,3 kWh/(m²a)**. Dabei ist der deutlich größte Einzelsektor der Haushaltsstrom (33 %). Der Wärmebezug für Heizung und Warmwasser beträgt zusammen gut die Hälfte des gesamten Endenergieverbrauchs.

Entscheidend für die ökologische Bewertung des Gebäudes ist die Primärenergie. Diese ist ein Maß für die Umweltbelastungen durch den Betrieb des Gebäudes und bewertet die Einsparung gegenüber herkömmlichen Gebäuden. Dazu werden die gesamten Endenergieverbräuche des Gebäudes primärenergetisch bewertet. Diese Bewertung erfolgt mit sog. Primärenergiefaktoren, welche auch die Herstellungenergie der vorgelagerten Prozesskette der unterschiedlichen Energieträger berücksichtigen. Nach [Gemis] beträgt der Primärenergiefaktor für den Deutschen Strommix $2,7 \text{ kWh}_{\text{Pri}}/\text{kWh}_{\text{End}}$. Das Nahwärmenetz des Betreibers TWL (Technische Werke Ludwigshafen) wird von einem Gas-BHKW und Gas-Spitzenkesseln aus dem ca. 20 m entfernten Heizhaus gespeist. Nach [ZICON 2005] beträgt der Primärenergiefaktor unter Berücksichtigung der Stromgutschrift für das Nahwärmenetz $0,6 \text{ kWh}_{\text{Pri}}/\text{kWh}_{\text{End}}$. Dieser Faktor enthält bereits den Wärmeverlust der Erdleitungsstrasse zum Heizraum in Haus 5 (nach [DIN 4107-T 10] berechnet).

Um eine Vorstellung der Größenordnung der Wärmeabgabe der Erdleitungsstrasse zu haben wird diese hier grob abgeschätzt: Die Wärmeverlustleistung der Erdtrasse beträgt bei einem angenommenen ψ -Wert von $0,59 \text{ W/mK}$ für VL- und RL-Rohr gemeinsam etwa 30 W/m Trassenlänge. So ergeben sich bei 20 m Trassenlänge jährlich etwa $3,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ für beide Gebäude.

Werden die Endenergieverbräuche (siehe oben) mit diesen beiden Faktoren bewertet, ergibt sich ein **Primärenergiewert von 133,5 kWh/(m²a)**. Es muss beachtet werden, dass dieser Primärenergieverbrauch alle Energieanwendungen des Gebäudes (eben insbesondere auch den Haushaltsstrom) enthält. Für eine Sanierung eines Gebäudes und tatsächlichen Messwerten ist dies ein gutes Ergebnis. Allerdings sind die besonders hohen Haushaltsstromverbräuche dominant: Sie lassen mit dem Einzelanteil von 58 % der primärenergetischen Aufwendungen, alle anderen Anwendungen weit zurück. Damit wird deutlich, wo nach der erfolgten energieoptimierten Sanierung der Gebäudehülle der Fokus weiterer Einsparbemühungen liegen muss.

Dies gilt auch für den Lüftungsstrom: Bei Verwendung von energieeffizienteren Ventilatoren und reduziertem Sommerlüftungsbetrieb könnte hier der Stromverbrauch nochmals deutlich reduziert werden. Auch der Allgemiestromverbrauch im PHiB könnte durch reduzierten sommerlichen Kellerlüftungsbetrieb und effizientere Ventilatoren noch verringert werden.

Wird die Solarstromanlage auf dem Gebäudedach des PHiB rechnerisch berücksichtigt, muss der Anteil des erzeugten und eingespeisten Solarstromes ebenfalls primärenergetisch mit dem Faktor 2,7 bewertet werden. Der Solarstromertrag be-



rechnet sich dann zu 44,5 kWh/(m²a) für das zweite Bilanzjahr. Dieser Ertrag könnte bei der Beurteilung dem Gebäude gutgeschrieben, also vom gesamten Primärenergieverbrauch abgezogen werden. Die Primärenergie-Summe reduziert sich dann auf **89,0 kWh/(m²a)**.

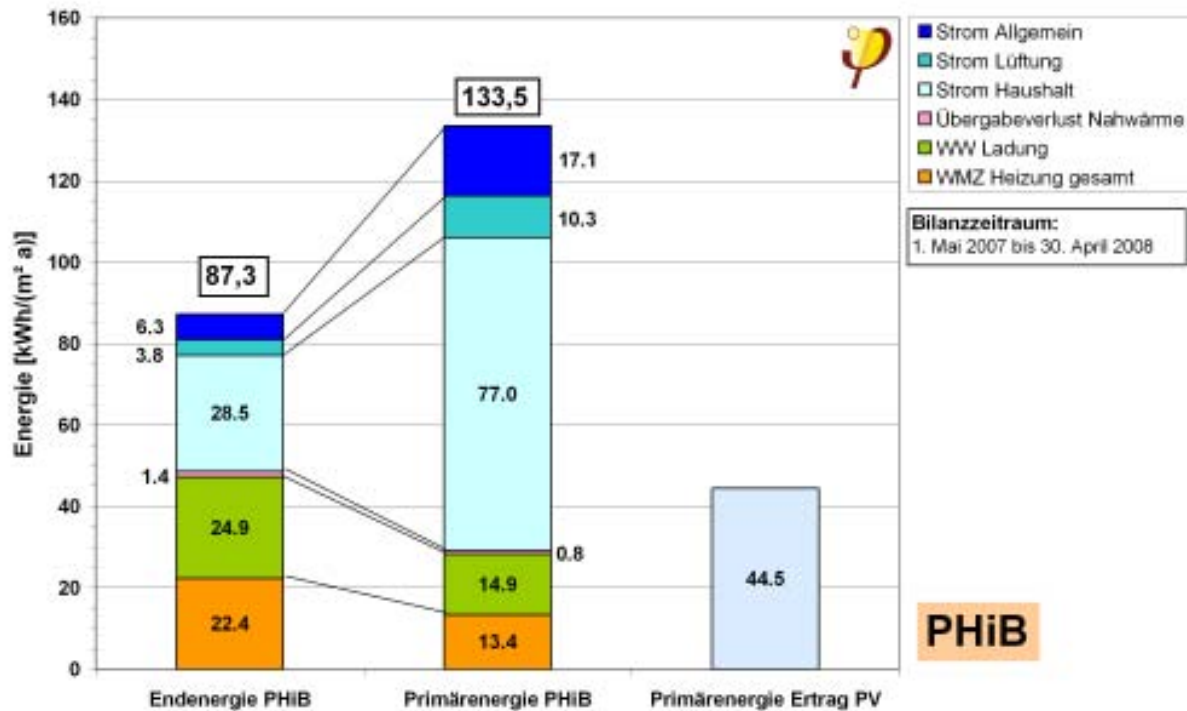


Abbildung 157: End- und Primärenergiebilanz des PHiB im zweiten Bilanzjahr.

5.7.3 Primärenergie Heizung, Warmwasser und Technikstrom PHiB

Die gesetzlichen Anforderungen der EnEV betrifft nur die Wärmeseite einschließlich der Haustechnik, der Haushaltsstrom bleibt unberücksichtigt. Für das PHiB ergibt sich als Summe der gemessenen Endenergie Heizung, Warmwasserbereitung und Technikstrom (Heizung, Lüftung) 53,6 kWh/(m²a). Der zugehörige Primärenergieverbrauch beträgt 42,4 kWh/(m²a) für das PHiB. Dabei liegt weiterhin - anderes als in der EnEV - die Energiebezugsfläche (EBF) zu Grunde. Die Anforderung des KfW40-Neubaus wird damit weit unterschritten (siehe 5.7.5).

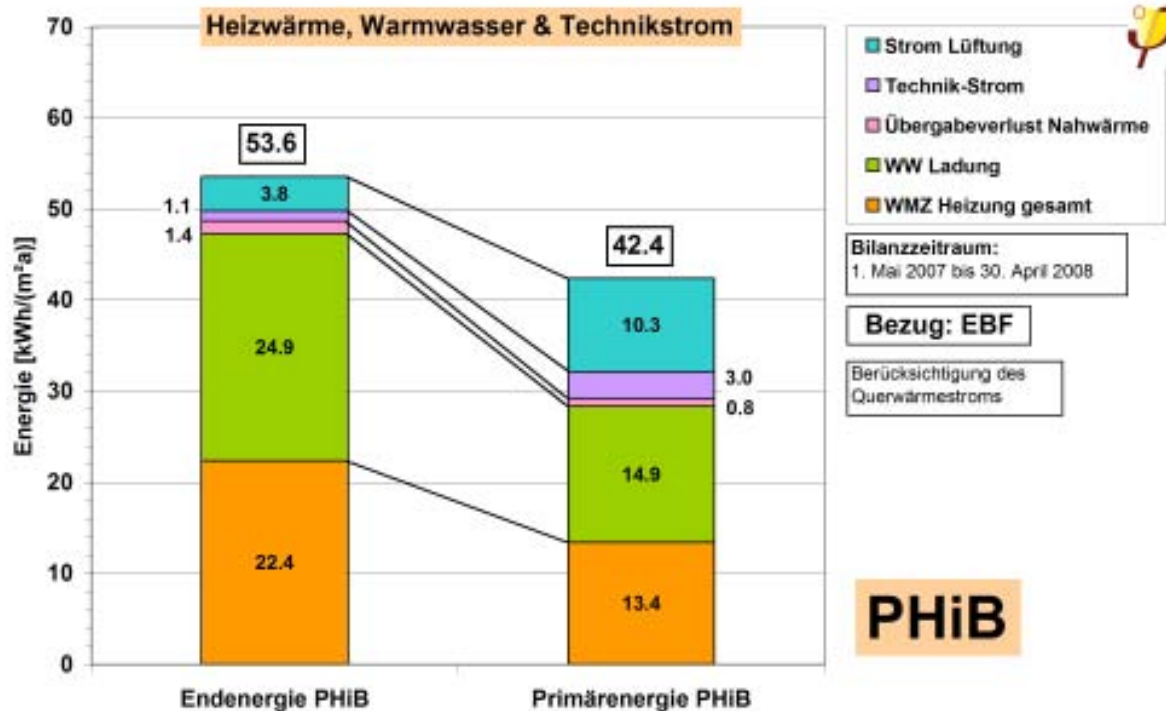


Abbildung 158: End- und Primärenergieverbrauch nur für Heizwärme, Warmwasser und Technikstrom im PHiB (Bezugsfläche ist weiterhin die EBF).

5.7.4 Energieverbrauch bei Standardbedingungen

Für den Vergleich der beiden Gebäudeteile müssen die messtechnischen Ergebnisse auf einheitliche Randbedingungen bezogen werden.

Dies betrifft insbesondere die unterschiedliche Raumtemperatur sowie der ganz unterschiedlich hohe Luftwechsel in den beiden Gebäuden. Daher werden die Messwerte im Verhältnis der PHPP-Bilanzierung (Heizwärme inkl. nutzbare Anteile der Heizwärmeverteilung) mit der Anpassung der Bedingungen ($n_L = 0,44$, $t_i = 20,0$ °C) umgerechnet. Die nichtnutzbaren Verteilverluste werden unverändert addiert. Das mildere Klima des Untersuchungszeitraumes hat ebenfalls Einfluss auf die Ergebnisse. Daher wird hier das auch bei der Projektierung der Gebäude verwendete Standardklima für den Standort Mannheim verwendet.

Die realisierte primärenergetisch günstige Nahwärmeversorgung hat nichts mit den realisierten Gebäudequalitäten zu tun. Diese könnten bei identischer Bauweise auch an einem anderen Ort, mit anderer Versorgung realisiert werden. Um nicht eine Verzerrung der Effekte durch die Versorgungsart zu bekommen, wird rechnerisch auf eine klassische Erdgasversorgung umgestellt. Daher wird der Primärenergiefaktor für Erdgas mit $1,1 \text{ kWh}_{\text{Pri}}/\text{kWh}_{\text{End}}$ verwendet.

Mit diesen Standardbedingungen ist ein direkter Vergleich der Gebäudequalitäten erst möglich. Das Ergebnis für alle Energieaufwendungen (Heizung, Warmwasser, Technik-, Allgemein- und Haushaltsstrom) zeigt Abbildung 159.

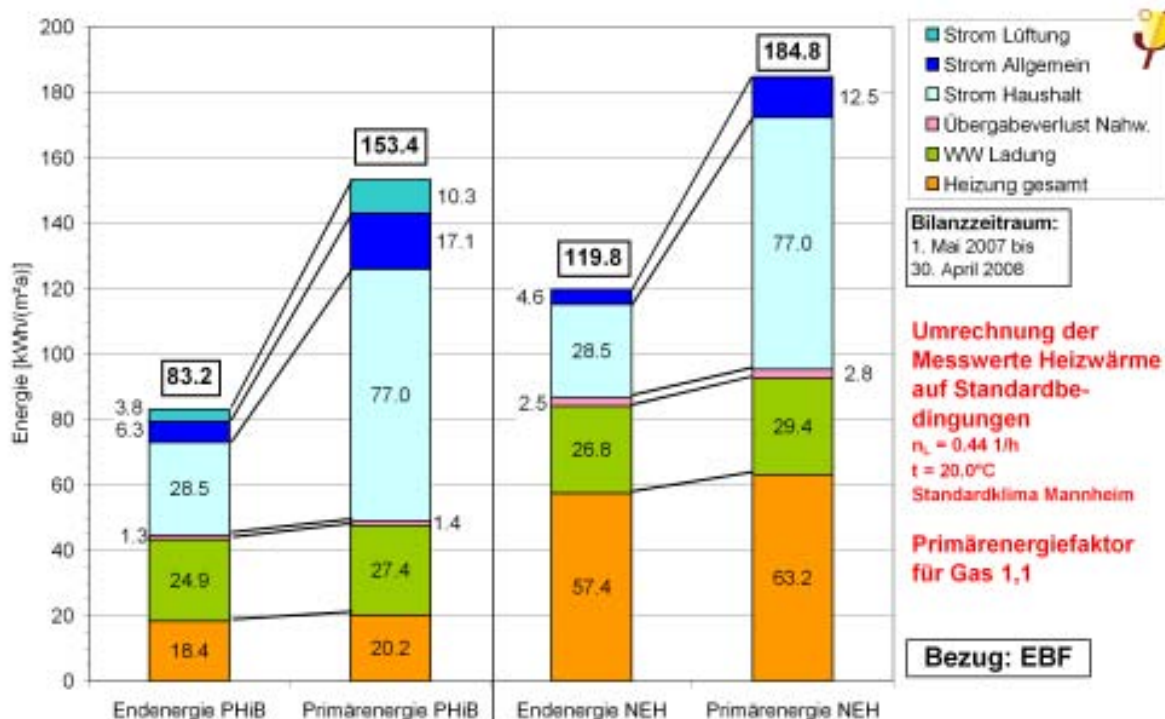


Abbildung 159: End- und Primärenergie für Heizwärme, Warmwasser und Technikstrom der beiden Gebäude bei Standardbedingungen und dem Primärenergiefaktor von Erdgas.

Bei der Betrachtung der Endenergie ergibt sich beim NEH ein Mehrverbrauch von 44 %, **primärenergetisch bewertet von 20 %**. **Der Mehrverbrauch beträgt also ein Fünftel**. Dieser zeigt den doch erheblichen Unterschied zwischen den beiden realisierten Gebäuden bzw. den Erfolg der konsequenten Sanierung des PHiB. Ebenso verdeutlicht die Darstellung die besondere Bedeutung eines effizienten Umgangs mit elektrischem Strom im Haushalt.

5.7.5 Primärenergieverbrauch nach EnEV

Wie oben beschrieben, werden für die gesetzliche Anforderung nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) nur die Energieströme für die Heizung, die Warmwassererwärmung sowie für den Technik- oder Hilfsstrom (Heizung, Lüftung) berücksichtigt. Dabei wird nach der EnEV nicht die Energiebezugsfläche (EBF) verwendet sondern die (hier 28 %) größere fiktive Gebäudenutzfläche A_N . Für die Bestimmung der Primärenergie werden in der EnEV die Primärenergiefaktoren nicht nach [Gemis] sondern nach [DIN V 4701-T 10] verwendet. In der Ergänzung zur Norm vom Dezember 2006 ist der Primärenergiefaktor für Strom mit $2,7 \text{ kWh}_{\text{Pri}}/\text{kWh}_{\text{End}}$ dem Gemis Wert angepasst worden. Mit diesem wird die Endenergie Technikstrom (Heizung, Lüftung) bewertet. Für die Nahwärme wird der testierte Wert des Netzbetreibers ($0,6 \text{ kWh}_{\text{Pri}}/\text{kWh}_{\text{End}}$) verwendet [ZICON 2005].

Werden die gemessenen Verbräuche der Gebäude nach der Umrechnung auf Standardbedingungen nur für diese Anwendungen auf die Gebäudenutzfläche A_N

bezogen (960 m²) und entsprechend bewertet, ergibt sich ein **Primärenergieverbrauch von 31,2 kWh/(m²a) für das PHiB, bzw. 43,3 kWh/(m²a) für das NEH**. Der Unterschied beträgt damit fast 40 %. Die Einzelwerte sind in Abbildung 160 dargestellt.

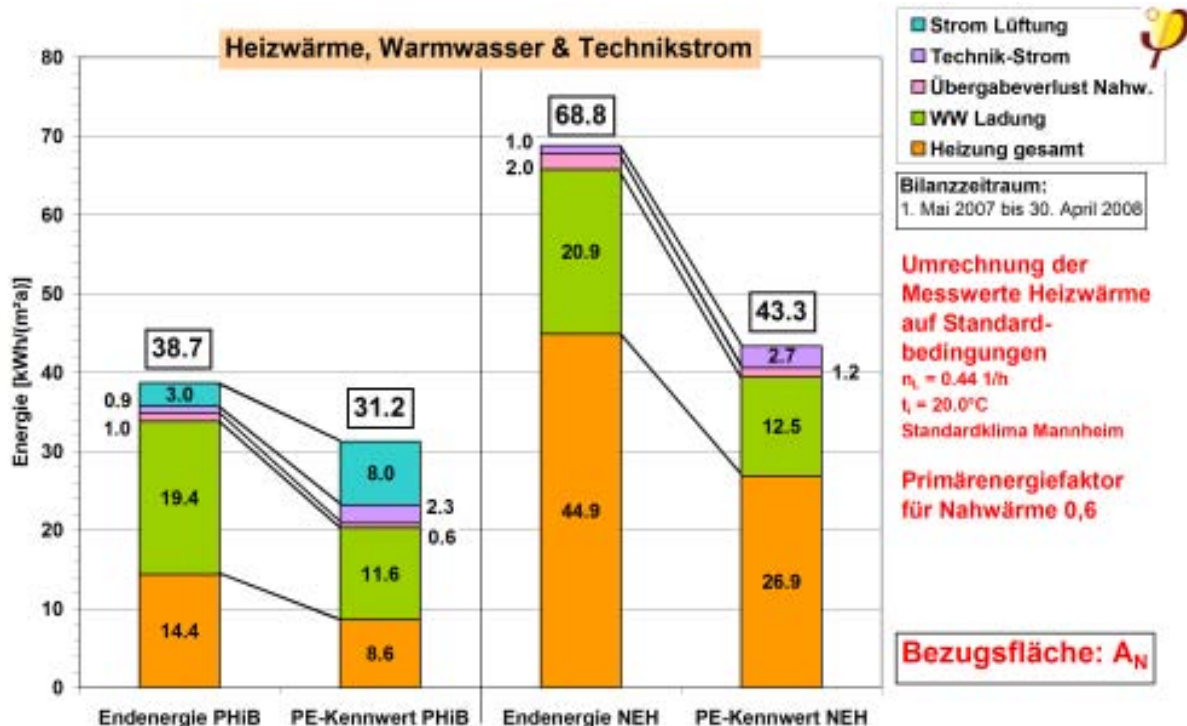


Abbildung 160: End- und Primärenergie für das PHiB und das NEH im zweiten Bilanzjahr. Bilanziert werden nur die Heizung, Warmwasser und Technik- sowie Lüftungsstrom im Bezug auf die Gebäudenutzfläche A_N nach der EnEV 2007.

Anforderung Förderprogramm KfW 40

Das PHiB unterschreitet - sogar mit diesen primärenergetisch bewerteten Messwerten - die Anforderungen an den Bedarfswert der „KfW 40“ Förderung (Kreditanstalt für Wiederaufbau) deutlich. Dabei wird in der Berechnung für diese Förderung nach den Anforderungen der EnEV 2007 sogar mit einer Raumtemperatur von nur 19 °C gerechnet. Die Messwerte wurde aber dennoch auf die 1 °C höheren Standardbedingungen von 20 °C umgerechnet.

Anforderungswert nach EnEV 2007

Zum Vergleich mit den gesetzlichen gültigen Anforderungen wird nach der **EnEV 2007** der **zulässige Jahres-Primärenergiebedarf der Gebäude für Heizung, Warmwasser inkl. Technikstrom bestimmt**. Die Berechnung ergibt einen gesetzlichen Anforderungswert **90,8 kWh/(m²a)**. Das ist der Rechenwert der bei einer



solchen Komplettanierung nach der Verordnung zwingend einzuhalten ist. Die Bezugsfläche ist dabei wieder die viel größere Gebäudenutzfläche A_N .

Für das PHiB mit dem Primärenergiewert von nur 31,2 kWh/(m²a) entspricht dies einer **Unterschreitung der gesetzlichen Anforderung um 66 %**. Daran ist abzulesen, wie erfolgreich der tatsächlich realisierte Verbrauch ist. Aus einem Altbau mit sehr hohen Verbrauchswerten wurde ein energetisch sehr hochwertiges Gebäude mit sehr gutem thermischen Komfort, deutlich verbesserter Raumluftqualität und dauerhafter Schadensfreiheit aufgrund der hohen Oberflächentemperaturen.

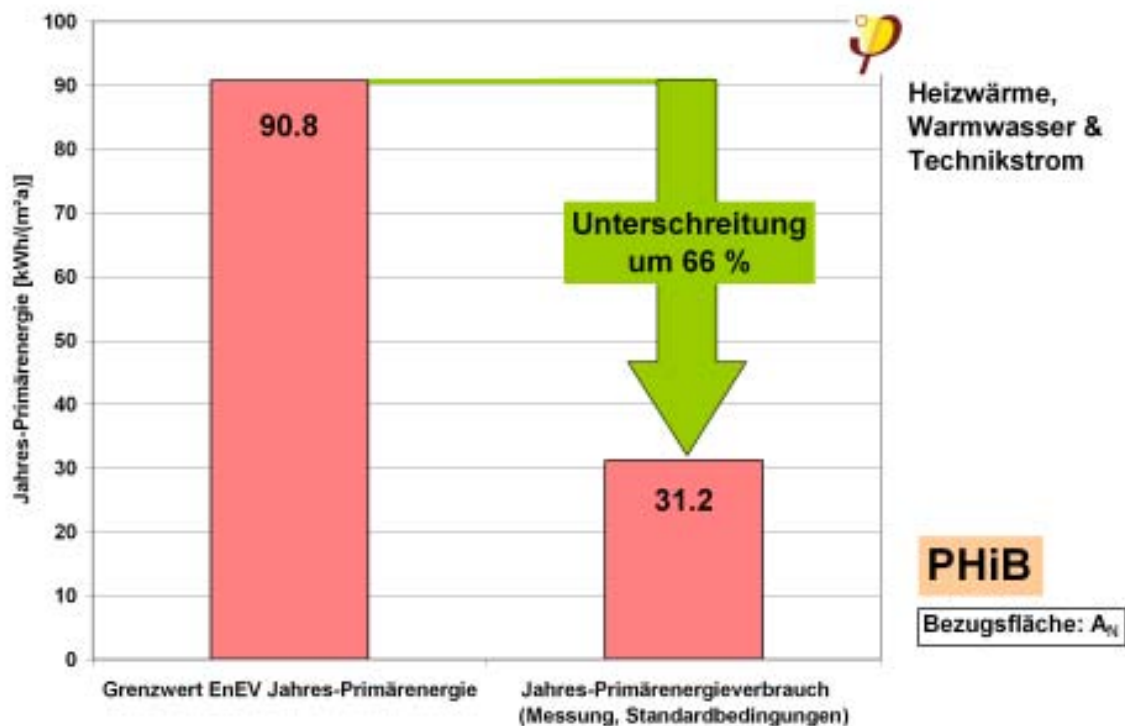


Abbildung 161: Vergleich der Jahres-Primärenergie-Anforderung nach EnEV 2007 (Heizung, Warmwasser und Hilfsstrom) mit dem tatsächlichen Jahres-Primärenergie-Verbrauch vom PHiB nach Umrechnung auf Standardbedingungen. Als Bezugsfläche dient hier aufgrund der EnEV-Anforderung die A_N .

6 Glossar

Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung

Eine Lüftungsanlage sorgt ständig automatisch für eine gute Innenraumluft, transportiert Feuchtigkeit ab und verbessert den Wohnkomfort deutlich. Durch die Lüftungsanlage dürfen keine Zugluft und keine Geräuschbelastungen entstehen. Die Anlage besteht aus dem eigentlichen Lüftungsgerät, einem möglichst kurzen Rohrnetz sowie Zu- und Abluftventilen. Das Lüftungsgerät enthält neben zwei stromsparenden Ventilatoren, der Steuerung und mehreren Luftfiltern eine Wärmerückgewinnungseinheit als Kernstück. Dabei werden hauptsächlich Plattenwärmeübertrager („Wärmetauscher“) verwendet, in welchen die Wärme der Abluft an den kälteren Außenluftstrom übertragen wird. So wird die Luft „passiv“ auf minimal ca. 16 °C vorerwärmt, ohne dass sich die Luftströme dabei vermischen. Bei Passivhäusern muss die Wärmerückgewinnung (WRG) einen Wärmebereitstellungsgrad von min. 75 % aufweisen. Es müssen also min. 75 % der Wärme in der Abluft an die Zuluft übertragen werden. Durch diese Technik werden die Lüftungswärmeverluste drastisch reduziert. Ohne Wärmerückgewinnung sind die niedrigen Heizwärmeverbräuche eines Passivhauses nicht zu realisieren.

Nachheizregister (Wärmeversorgung)

Die geringe notwendige Heizwärme kann in einem Passivhaus, aufgrund der sehr niedrigen Heizleistung (max. 10 W/m²), über die Lüftungsanlage zugeführt und verteilt werden (Grundlage der Passivhausdefinition). So kann auf ein eigenes hydraulisches Heizungsnetz mit Heizkörpern und Rohrleitungen verzichtet werden. Zur Nacherwärmung der Zuluft kann ein Nachheizregister eingesetzt werden. In diesem Gerät streicht die im Lüftungsgerät durch die Wärmerückgewinnung (WRG) vorgewärmte Zuluft (min. ca. 16 °C) über die durch Heizungswasser erwärmten Rohre. Dabei wird, bei Temperaturen bis maximal ca. 55 °C (Beginn der Staubverschmelzung), die restliche Nacherwärmung der Zuluft erreicht. Die Höhe der Nacherwärmung wird über die am Thermostat einzustellende Wunschtemperatur geregelt. Bei der Beheizung über ein oder mehrere Nachheizregister ist nur im Badezimmer eine Zusatzbeheizung (z.B. kleiner Heizkörper), aufgrund der Anforderungen an die schnelle Beheizbarkeit auf 24 °C, notwendig. Ein Passivhaus kann auch klassisch über raumweise Heizkörper beheizt werden.

Querwärmestrom

Als Querwärmestrom wird ein unbeabsichtigter Wärmestrom bezeichnet, der sich aufgrund einer Temperaturdifferenz zwischen zwei Bereichen einstellt. Dies kann z.B. zwischen Wohnungen in einem Mehrfamilienhaus oder auch zwischen zwei direkt aneinander angrenzenden Gebäuden der Fall sein. Die Höhe des sich einstellenden Wärmestroms hängt vom Wärmewiderstand der jeweiligen Trennwand und der Temperaturdifferenz ab. In Mehrfamilienhäusern wird dieser Effekt zwischen benachbarten Wohnungen umgangssprachlich auch als „Wärmeklau“ bezeichnet.



Volumenstrommessung (Einregelung Lüftung)

Eine funktionsgerechte Lüftungsanlage verfügt über Zulufräume, Überströmbereiche und Ablufträume. Durch eine gerichtete Strömung durch das Gebäude bzw. die Wohnung kann die Luftmenge mehrfach genutzt werden. Es ist notwendig, die Zu- bzw. Abluftmenge für jeden Raum (außer den Überströmbereichen (Flure)) festzulegen. Die Planungswerte müssen durch die Einstellung eines jeden Zu- und Abluftventils umgesetzt werden. Die Einstellung kann mit Hilfe der Volumenstrommessung am jeweiligen Ventil erfolgen. Der Luftvolumenstrom wird dabei mit einem geeigneten Messgerät gemessen und durch das Einstellen des Ventils angepasst.

Neben den Volumenströmen der einzelnen Räume muss sichergestellt werden, dass der für die ganze Einheit (Haus/Wohnung) berechnete Luftvolumenstrom eingeregelt wird. Dabei ist es wichtig, dass der Außenluftmassenstrom gleich dem Fortluftmassenstrom ist. Es ist notwendig, eine möglichst balancierte Lüftungseinstellung zu erreichen. Sonst ergeben sich unerwünschte Ex- bzw. Infiltrationsmassenströme durch vorhandene Restleckagen.

Wärmebrücke

Eine Wärmebrücke ist ein punkt-, linienförmiger oder flächiger Bereich der Gebäudehülle, dessen Wärmedämmqualität aufgrund einer „Störung“ verschlechtert ist. Dabei gibt es konstruktive (durch Materialwechsel) und geometrische (z.B. Außenkante eines Gebäudes) Wärmebrücken. Geometrische Wärmebrücken lassen sich im Regelfall nicht vermeiden. Konstruktive Wärmebrücken haben ihre Ursache normalerweise durch die höhere Wärmeleitfähigkeit eines Bauteils/Baumaterials im Regelaufbau der thermischen Gebäudehülle (Dach, Wand, Boden). Ein typisches Beispiel ist eine auskragende Balkonplatte, welche während der Heizzeit wie eine „Kühlrippe“ die Wärme aus dem Gebäude nach außen ableitet.

7 Quellenangaben

- [AKKP 8] Feist, W.: Ergebnisse der Luftqualitätsmessungen im Passivhaus. In: Protokollband Nr. 8 „Materialwahl, Ökologie und Raumlufthygiene“ des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, Darmstadt 1997
- [AkkP-25] Temperaturdifferenzierung in der Wohnung; Protokollband Nr. 25 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III; Passivhaus Institut; Darmstadt 2004.
- [Danner 2001] Danner, M.: Wohnen in der Passivhaussiedlung Lummerlund im Neubaugebiet Hannover-Kronsberg, Abschlußbericht zur Sozialwissenschaftlichen Evaluation. U Konzept Agentur für Umweltkommunikation e.V., Universität Lüneburg, Lüneburg, 2001.
- [DIN EN 1434-3] DIN EN 1434-3: Wärmezähler, Teil 3: Datenaustausch und Schnittstellen. Beuth-Verlag, Berlin, Februar 1997.
- [DIN 1946-2] DIN 1946 Teil 2: Raumluftechnik, Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln), Januar 1994
- [DIN EN ISO 7730] DIN EN ISO 7730:1995-9: Gemäßigtes Umgebungsklima, Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit, Deutsches Institut für Normung:, Beuth-Verlag, Berlin, September 1995.
- [EN 13779] DIN EN 13779: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage, Beuth Verlag, Berlin 2005.
- [EN ISO 13788] EN ISO 13788: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Ausgabe: 2001-11 (Deutsche Fassung: EN ISO 13788:2001).
- [DIN EN 13829] DIN EN 13829, Ausgabe Februar 2001: Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden. Differenzdruckverfahren. Deutsche Fassung EN 1329:2000, CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel



- [DIN V 4107-T 10] DIN V 4701, Teil 10: Energetische Bewertung von heiz- und raumluftechnischen Anlagen, Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung. Beuth Verlag, 2003. Mit der Ergänzung DIN V 4701-10/A1 Dez. 2006
- [DIN 4108-T2] DIN 4108-2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz; Beuth Verlag, April 2003
- [Ebel 2003] Ebel, W.; Großklos, M.; Knissel J.; Loga, T.; Müller, K.: „Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern“, Eine vergleichende Analyse der Nutzerfaktoren am Beispiel der „Gartenhofsiedlung Lummerlund“ in Wiesbaden-Dotzheim, IWU 04/03, Darmstadt 2003
- [Fanger 2003] Fanger, P. Ole; Wargocki, P.: Effektiver arbeiten in gesundem Raumklima. Neue Forschungsergebnisse über den Zusammenhang zwischen Raumlufqualität und menschlichem Leistungsvermögen. In: Klima Fach.Journal 2002/2003. IHKS Industrieverband Heizungs-, Klima- und Sanitärtechnik Bayern, Sachsen und Thüringen e.V., Planegg.
- [Feist 1995] Feist, W.: Gute Luft – aber wie? In: Reader zur 7. EUZ Baufachtagung „Gute Luft – wenig Energie“, Springe 1995
- [Feist 2001] Feist, W.: Gestaltungsgrundlagen Passivhäuser. Verlag Das Beispiel, Darmstadt 2001
- [Feist 2003] Feist, Wolfgang: Wärmebrücken und Verbesserung der Luftdichtheit im Altbau. In: Einsatz von Passivhaustechnologien bei der Altbau-Modernisierung; Protokollband Nr. 24 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III; Passivhaus Institut; Darmstadt 2003.
- [Feist 2005] Feist, Wolfgang: Heizlast in Passivhäusern – Validierung durch Messungen; Endbericht IEA SHC TASK 28 / ECBCS ANNEX 38 – Forschungsvorhaben im Rahmen der nationalen Beteiligung an der Arbeitsgruppe 'Sustainable Solar Housing' der Internationalen Energie Agentur IEA; Passivhaus Institut, 2005
- [Gemis] Fritsche, U.; Leuchtner, J.; Matthes, F.C.: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 4.12, Öko-Institut, Darmstadt September 2002.
- [Hermelink 2004] Hermelink, A.: Werden Wünsche wahr? Temperaturen in Passivhäusern für Mieter. In Protokollband Nr. 25 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III; Passivhaus Institut; Darmstadt 2004.



- [Peper 1999] Peper, S., Feist, W.: Luftdichte Projektierung von Passivhäusern, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 7, Passivhaus Institut, Darmstadt, 1999; 4. Auflage 2002.
- [Peper 2001] Peper, S., Feist, W., Kah, O., Meßtechnische Untersuchung und Auswertung; Klimaneutrale Passivhaussiedlung in Hannover-Kronsberg, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 19, Passivhaus Institut, Darmstadt 2001.
- [Peper 2002] Peper, S. Feist, W.: Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg; Analyse im dritten Betriebsjahr, Endbericht Mai 2001 bis April 2002, i.A. der Stadtwerke Hannover AG, Darmstadt, Juli 2002.
- [Peper 2004] Peper, S.; Feist, W.; Pfluger, R.: Ein nordorientiertes Passivhaus. Messtechnische Untersuchung und Auswertung von 19 Wohnungen im Passivhaus-Standard in Frankfurt-Bockenheim, Gremppstraße, Endbericht, Passivhaus Institut, Darmstadt, Dezember 2004.
- [Peper 2005] Peper, S.; Schnieders, Jürgen; Feist, Wolfgang: Mehrgeschoss-Passivhaus Hamburg-Pinnasberg. Endbericht, Passivhaus Institut, Darmstadt, September 2005
- [Peper 2008] Peper, S.; Passivhaus-Heizsysteme in der Praxis. Ergebnisse und Erfahrungen aus der Feldmessung. In: Heizsysteme im Passivhaus - Statistische Auswertung und Systemvergleich. Protokollband Nr. 38 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase IV; Passivhaus Institut; Darmstadt 2008.
- [Pfluger/Feist 2001] Pfluger, Rainer; Feist, Wolfgang: Meßtechnische Untersuchung und Auswertung, Kostengünstiger Passivhaus-Geschoßwohnungsbau in Kassel-Marbachshöhe, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 15, Fachinformation PHI-2001/2. Darmstadt 2001
- [PHI 1996] Feist, W: Passivhäuser - Behaglichkeit ohne Heizung. Passivhaus Institut: Tagungsband zur 1. Passivhaustagung in Darmstadt. Passivhaus Institut, Darmstadt 1996
- [PHPP 1998-2007] Wolfgang Feist, Jürgen Schnieders, Rainer Pfluger, Berthold Kaufmann und Oliver Kah: PHPP Passivhaus Projektierungs Paket 2007. Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser, Fachinformation PHI-2007/1, Darmstadt, Passivhaus Institut, Juni 2007.
- [Sedlbauer 2001] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen, Dissertation Universität Stuttgart (2001).



- [Sedlbauer 2002] Sedlbauer, K.; Gabrio, Th.; Krus, M.: Schimmelpilze – Gesundheitsgefährdung und Vorhersage; Gesundheitsingenieur 123 (2002), Heft 6, S. 285ff.
- [Schulze Darup 2002] Schulze Darup, B. (Hrsg.): Passivhaus-Projektbericht, Energie und Raumluftqualität, Messtechnische Evaluierung und Verifizierung der energetischen Einsparpotentiale und Raumluftqualitäten an Passivhäusern in Nürnberg. Verlag des AnBus e.V., Fürth 2002.
- [Shaughnessy 2005] Shaughnessy, R.; Haverinen- Shaughnessy, U.; Nevalainen, A.; Moschandreas, D.: “Carbon dioxide concentrations in classrooms and association with student performance: a preliminary study”. In Indoor Air 2005 - Proc. 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 1: 373-376, Beijing (China), 2005
- [UBA 2000] Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden, erarbeitet von der Innenraum-Lufthygienekommission des Umweltbundesamtes, Berlin, Juni 2000
- [Wargocki 2000] Wargocki, P.; Wyon, DP.; Sundell, J.; Clausen, G.; Fanger, PO.: „The Effects of Outdoor Air Supply Rate in an Office on Perceived Air Quality” Sick Building Syndrome (SBS) Symptomes an Productivity”. Indoor Air Vol 10, No. 4:222-236, 2000
- [Zimen] Wettermessdaten vom Zimen-Luftmessnetz im Referat Immissionen des Landesamtes für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz. Messstation: Ludwigshafen-Mundenheim.
- [ZICON 2005] Testierung des Primärenergiefaktors für Nah-/Fernwärme aus KWK nach Energieeinsparverordnung. Für das Nah-/Fernwärmenetz „Hoheloostraße in Mundenheim Süd-Ost“, Ludwigshafen. Erstellt von der ZICON GbR, Ludwigshafen.

8 Anhang

Im Anhang sind jeweils ein typischer Grundriss vom PHiB und vom NEH dargestellt. In den Grundrissen sind die Positionen der Messsensoren (Temperatur, relative Feuchte und CO₂-Konzentration eingetragen).

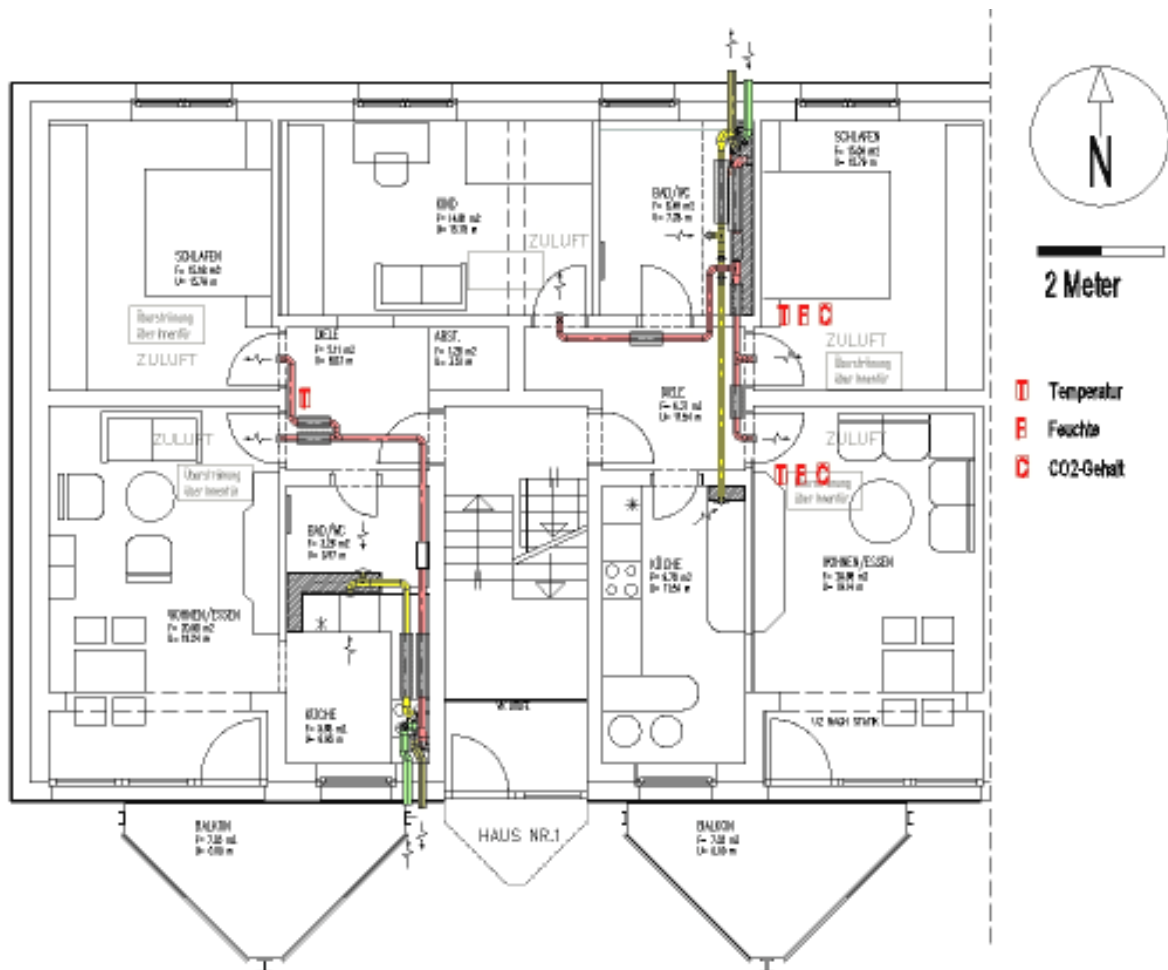


Abbildung 162: Grundriss (EG) der westlichen Haushälfte des PHiB (Haus 1) mit den Sensoren in den beiden dargestellten Wohnungen (Quelle: GAG Ludwigshafen/ Büro Baumgartner). Die Lüftungstechnik der beiden Wohnungen ist in den Grundrissen dargestellt. Die andere Haushälfte (Haus 3) ist genau symmetrisch, die anderen beiden Geschossen der beiden Häuser sind identisch.

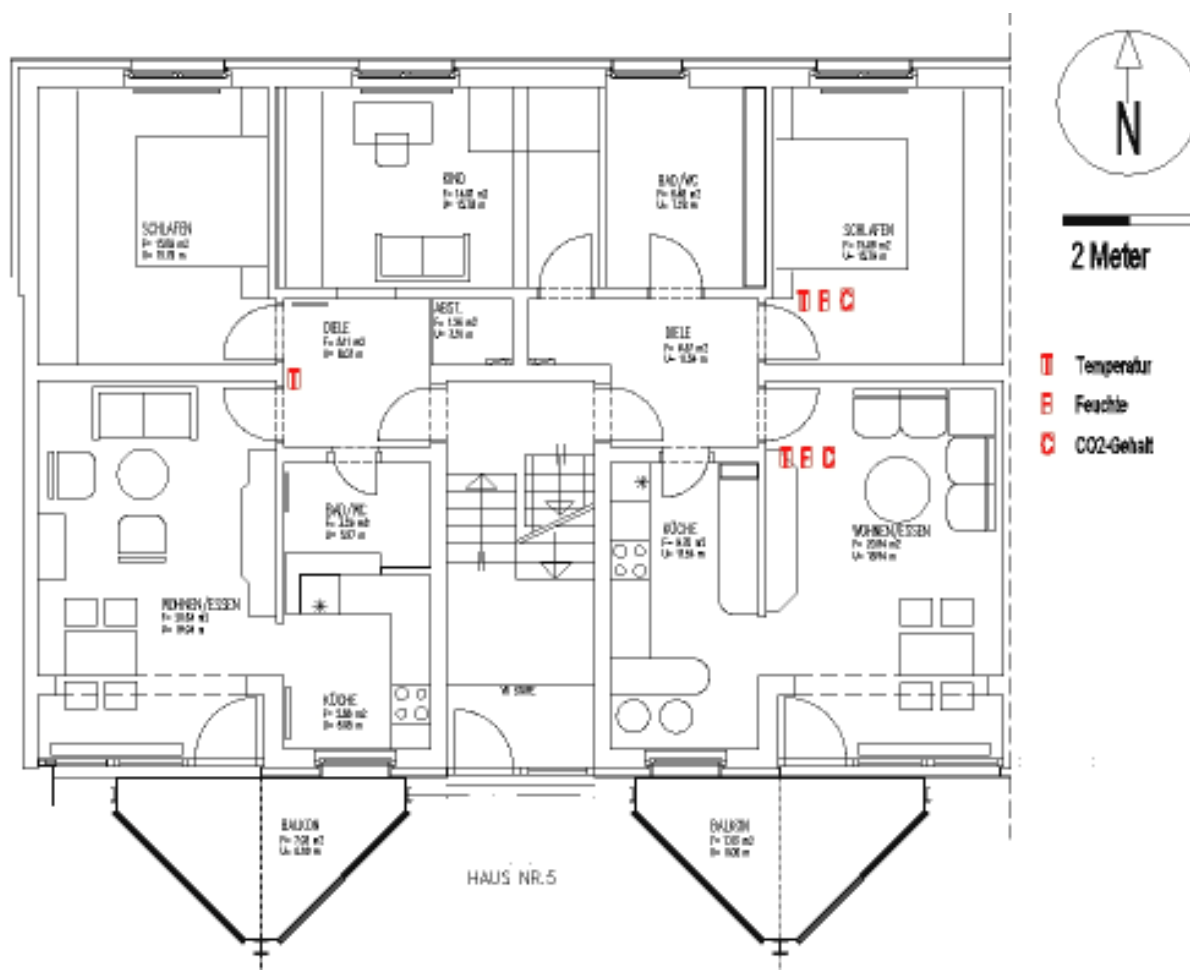


Abbildung 163: Grundriss (EG) westlichen Haushälfte des NEH (Haus 5) mit den Sensoren in den beiden dargestellten Wohnungen (Quelle: GAG Ludwigshafen/ Büro Baumgartner). Die andere Haushälfte (Haus 7) ist genau symmetrisch, die anderen beiden Geschosse der beiden Häuser sind identisch.