

## Ein nordorientiertes Passivhaus



**Messtechnische Untersuchung und Auswertung von 19 Wohnungen im Passivhaus-Standard in Frankfurt-Bockenheim, Grempstraße**

# Ein nordorientiertes Passivhaus

**Messtechnische Untersuchung und Auswertung von  
19 Wohnungen im Passivhaus-Standard in  
Frankfurt-Bockenheim, Gremppstraße**

**Passivhaus „Wohnen bei St. Jakob“**

## ENDBERICHT

im Auftrag der  
**Frankfurter Aufbau AG**  
Postfach 160353  
60066 Frankfurt a. M.

Mit Förderung durch die E.ON Sales and Trading GmbH

**Passivhaus Institut**  
Rheinstraße 44/46  
64283 Darmstadt

Dezember 2004

|  |  |
|--|--|
| <p><b>Autoren:</b><br/>Søren Peper<br/>Dr. Wolfgang Feist<br/>Dr.-Ing. Rainer Pfluger</p> <p><b>Herausgeber:</b><br/><b>PASSIVHAUS INSTITUT</b><br/>Rheinstr. 44-46<br/>64283 Darmstadt<br/><a href="http://www.passiv.de">www.passiv.de</a></p> | <p><b>Auftraggeber:</b><br/><b>Frankfurter Aufbau AG</b><br/>Postfach 160353<br/>60066 Frankfurt a. M.</p> <p>Titelfoto: Fotostudio Michels, Darmstadt</p> |
|--|--|

## Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 PASSIVHAUS FRANKFURT ST. JAKOB - EINFÜHRUNG UND ZUSAMMENFASSUNG .....</b>                 | <b>5</b>  |
| 1.1 EIN PASSIVHAUS IN NORDORIENTIERUNG?.....   | 5         |
| 1.2 DAS PASSIVHAUS FRANKFURT BEI ST. JAKOB .....   | 6         |
| 1.3 DIE BESTIMMUNGSSTÜCKE DER ENERGIEEFFIZIENZ, BERECHNETER ENERGIEBEDARF NACH PHPP .....      | 7         |
| 1.4 DAS WISSENSCHAFTLICHE BEGLEITPROGRAMM .....  | 12        |
| 1.5 MESSERGEWINNISSE .....   | 12        |
| 1.6 BEWERTUNG DER ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN.....                                       | 15        |
| <b>2 PROJEKTÜBERSICHT .....</b>  | <b>17</b> |
| <b>3 PROJEKTVORSTELLUNG .....</b>  | <b>19</b> |
| 3.1 ENERGIEBEZUGSFLÄCHEN UND BEWOHNERZAHL .....  | 24        |
| 3.1.1 Energiebezugsflächen.....  | 24        |
| 3.1.2 Bewohnerzahl.....  | 25        |
| 3.2 LUFTDICHTHEIT.....   | 26        |
| 3.3 ENERGIEBILANZ (PHPP) .....   | 27        |
| <b>4 THERMOGRAFISCHE AUFNAHMEN.....</b>  | <b>37</b> |
| 4.1 AUßENTHERMOGRAPHIE .....   | 37        |
| 4.2 THERMOGRAPHIE IM HEIZUNGSKELLER .....  | 43        |
| 4.3 INNENTHERMOGRAPHIE .....   | 46        |
| <b>5 DAS MESSKONZEPT .....</b>   | <b>50</b> |
| <b>6 AUFBAU DER MESSTECHNIK.....</b>   | <b>50</b> |
| <b>7 LAGE UND BEZEICHNUNG DER WOHNINHEITEN .....</b>   | <b>53</b> |
| <b>8 LAGE UND SPEZIFIKATION DER MESSSTELLEN .....</b>  | <b>55</b> |
| 8.1 ZENTRALE HAUPTZÄHLEREINRICHTUNGEN .....  | 55        |
| 8.2 STROMZÄHLER .....  | 57        |
| 8.3 ZÄHLEREINRICHTUNGEN IN DEN EINZELNNEN WOHNINHEITEN .....                                   | 58        |
| 8.4 RAUMLUFTTEMPERATUREN .....   | 59        |
| 8.4.1 Kalibrierung der Temperatursensoren.....   | 60        |
| 8.5 FEUCHTEMESUNG .....  | 62        |
| 8.6 WETTERSTATION .....  | 62        |
| <b>9 TABELLARISCHE ÜBERSICHT MESSGERÄTE .....</b>  | <b>63</b> |
| <b>10 MESSERGEWINNISSE.....</b>  | <b>65</b> |
| 10.1 KLIMADATEN.....   | 65        |
| 10.2 AUßen- UND RAUMTEMPERATUREN.....  | 67        |
| 10.2.1 Temperaturen Winterzeit .....   | 69        |
| 10.2.1.1 Temperaturunterschiede zwischen Ober- und Untergeschoss der Maisonette-Wohnungen..... | 72        |
| 10.2.2 Hitzeperiode .....  | 73        |
| 10.3 RAUMLUFTFEUCHTE .....   | 77        |
| 10.3.1 Behaglichkeitsuntersuchung.....   | 80        |

|  |            |
|--|------------|
| 10.3.2 Raumluftfeuchte Sommer.....                   | 81         |
| 10.4 ENERGIEVERBRÄUCHE .....                         | 83         |
| 10.4.1 Zentraler Energiebezug .....                  | 83         |
| 10.4.2 Wärmeverbrauch der einzelnen Wohnungen .....  | 85         |
| 10.4.2.1 Wärmeabgabe Rohrleitungen .....             | 86         |
| 10.5 HEIZWÄRMEVERBRAUCH.....                         | 88         |
| 10.5.1 Heizwärme Haus A.....                         | 89         |
| 10.5.2 Heizlasten Haus B .....                       | 91         |
| 10.6 WÄRMEVERBRAUCH WARMWASSER .....                 | 92         |
| 10.7 STROMVERBRAUCH.....                             | 94         |
| 10.7.1 Haushaltsstromverbrauch.....                  | 94         |
| 10.7.2 Lüftungsgerät .....                           | 96         |
| 10.7.2.1 Verbrauchsmessungen Lüftungsgeräte .....    | 98         |
| 10.8 WASSERVERBRAUCH .....                           | 99         |
| 10.8.1 Gesamtwassermenge .....                       | 99         |
| 10.8.2 Warmwassermenge .....                         | 99         |
| <b>11 ENERGIEBILANZEN .....</b>                      | <b>101</b> |
| 11.1 PRIMÄRENERGIE .....                             | 104        |
| 11.2 PRIMÄRENERGIE GESAMT .....                      | 105        |
| <b>12 VERGLEICH VON MESSUNG UND BERECHNUNG .....</b> | <b>107</b> |
| <b>13 LITERATUR .....</b>                            | <b>111</b> |
| <b>14 ANHANG .....</b>                               | <b>113</b> |
| 14.1 RESONANZEN .....                                | 126        |
| 14.2 GRUNDRISSSE .....                               | 113        |
| 14.3 BEHAGLICHKEITSDIAGRAMME .....                   | 123        |

# 1 Passivhaus Frankfurt St. Jakob - Einführung und Zusammenfassung

## 1.1 Ein Passivhaus in Nordorientierung?

Das Konzept Passivhaus ist aus der Synthese konsequent passiv solarer Architektur und hochwärmedämmender Gebäudehüllen (englisch "superinsulated") entstanden [Adamson 1987][Feist 1988]. Daher stand die "richtige" Orientierung zur Sonne immer relativ weit oben bei den Empfehlungen zum Entwurf von Passivhäusern. Zunächst war auch an eine Erfüllung der strengen Anforderungen an Passivhäuser nicht daran zu denken, eine so wichtiges energetisches Planungsoption ungenutzt zu lassen. In vielen populären Broschüren zum Passivhaus wird die "richtige Orientierung" sogar besonders herausgehoben.



Abbildung 1: Das ist die Nordseite von Haus B des Passivhauses Frankfurt bei St. Jakob: Hier befinden sich die Wohnfassaden mit Aussicht auf den Taunus - Ein Passivhaus in Nordorientierung? (Foto: Feist)

Umso mehr wird überraschen, dass die Wohnfassaden mit den großen Fenstern bei Haus B des hier behandelten Passivhauses nach Norden orientiert wurden (Abbildung 1) - also die "völlig falsche Orientierung" im Sinne der passiven Solar-energienutzung. Der Grund für diese Orientierung liegt in der unverbauten Aussicht von diesem Gebäudeteil auf den Feldberg im Taunus und die ungünstigen Verschattungsverhältnisse und städtebauliche Situation auf der gegenüberliegenden

Seite. Es wäre somit ein unvertretbare und unsinniger Ansatz gewesen, diesen Gebäudeteil zwanghaft in Richtung Süden zu orientieren. Solche Zwänge sind in innerstädtischen Lagen keine Besonderheit. Kann man unter solchen Umständen kein Passivhaus bauen, oder noch weitergehender, verbietet es sich, hier überhaupt zu bauen? Wir maßen uns nicht an, den letzten Teil der Frage umfassend beantworten zu können - dazu können wir nur einige Argumente beisteuern. Den ersten Teil der Frage, nämlich "Sind Passivhäuser auch mit nordorientierten Hauptfassaden möglich?" können wir auf der Basis der hier durchgeföhrten Begleitforschung empirisch begründet beantworten.



Abbildung 2: Die Aussicht vom Passivhaus bei St. Jakob in Richtung Taunus (Foto: Feist).

## 1.2 Das Passivhaus Frankfurt bei St. Jakob

Bauträger war die Frankfurter Aufbau AG. Die insgesamt 19 Wohnungen wurden als Eigentumswohnungen verkauft. Die neu gegründete Eigentümergemeinschaft "Wohnen bei St. Jakob" zeichnet sich durch vielfältige soziale Engagements aus.

Den Entwurf für den Mehrgeschosshausbau erstellte das Darmstädter Architekturbüro "faktor 10" (Geschäftsführer Folkmar Rasch und Petra Grenz). Das Projekt wurde während Planung und Bau durch das Passivhaus Institut begleitet, die Haustechnikplanung führte das Büro Baumgartner durch.

Die Wohnfläche beträgt insgesamt 1842 m<sup>2</sup>; die "Nutzfläche" A<sub>N</sub> nach EnEV demgegenüber 2289,8 m<sup>2</sup> und übersteigt die Wohnfläche um 24%. Alle im folgenden wiedergegebenen Ergebnisse beziehen sich, sofern nicht explizit anders vermerkt, auf die Wohnfläche.

Abbildung 3 zeigt die Ansicht beider Teile von der Südseite, aufgenommen vom Kirchturm St. Jakob. Das Bild lässt auf der rechten Seite die verschattete Situation für den Gebäudeteil B erkennen, der u.a. zu der Entscheidung geführt hat, die Wohnfassade dieses Teils zur gegenüberliegenden Seite hin auszurichten.



Abbildung 3: Südansicht des Passivhauses vom Kirchturm St. Jakob aus aufgenommen; links "Haus A" mit vorbildlicher Orientierung übergehend zum verglasten Treppenhaus, rechts Haus B von der Erschließungsseite aus mit nur geringem Fensterflächenanteil (Foto: Feist)

### 1.3 Die Bestimmungsstücke der Energieeffizienz, berechneter Energiebedarf nach PHPP

Das Passivhaus bei St. Jakob hat eine typische hochwärmegedämmte Gebäudehülle: Die vorgefertigten Fassadenelemente der Süd- und Nordwände aus außengedämmter Holzständerkonstruktion kommen auf insgesamt ca. 32 cm Dämmsstärke und haben eine U-Wert von  $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . In die Wandelemente wurden die Passivhausfenster mit Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und hochgedämmten Fensterrahmen ( $U_w = 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) bereits vor der Montage eingebaut (vgl. Abbildung 4). Auch das Dach wurde aus Holzleichtbauelementen mit Doppel-T-Trägern komplett vorgefertigt ( $U_r = 0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ). Die Tragkonstruktion im Innern und die Giebelwände bestehen aus vorgefertigten Betonelementen. Die Giebelwände wurden mit einem Wärmedämmverbundsystem mit 40 cm PS-Hartschaum gedämmmt, der U-Wert beträgt  $0,086 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Diese sehr dicke Dämmung war erforderlich, um unter den vorliegenden Bedingungen (ungünstige Nordorientierung) den Passivhausstandard dennoch zu erreichen. Unter den vorgefertigten Bodenplatten befinden sich 30 cm Dämmstoff ( $U_g = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ); nur der Bereich unter dem Treppenhausturm ist unterkellert, hier befindet sich die Heizzentrale.

Das gesamte Gebäude wurde konsequent nach den Prinzipien des wärmebrückenfreien Konstruierens entworfen [AkkP 16]. Der "Wärmebrückenzuschlag" würde umgerechnet auf die gesamte Gebäudehüllfläche  $0,006 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  betragen und ist vernachlässigbar gering (Ansatz in der EnEV für gute Detailausbildung:  $0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ). Die Luftdichtheit wird durch die Betonbodenplatte, die OSB-Platten in den Fassadenelementen und im Dach und konsequent luftdichte Anschlussdetails gewährleistet. Die Drucktestergebnisse lagen zwischen  $n_{50} = 0,2 \text{ h}^{-1}$  und  $0,45 \text{ h}^{-1}$ .

Als gesamte Baukosten gibt der Bauträger für Kostengruppe 300 + 400 für beide Blöcke zusammen 2.235.000 Euro (inkl. MWSt) an.



**Abbildung 4: Ein Fassadenelement mit Superdämmung und bereits eingebauten Fenstern am Kran; im Hintergrund bereits montierte Dachelemente (Foto: Feist; Elemententwicklung: Rasch, faktor 10).**

Jede Wohnung verfügt über ein eigenes Wohnungslüftungsgerät mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung (Wärmebereitstellungsgrad 84%), verwendet wurden Geräte der Firma Vallox. Die Zuluftverteilung in den Wohnungen erfolgt über kurze Verteilleitungen im Bad- und Flurbereich; die Zuluft wird über Weitwurfdüsen unter den Decken eingebracht, die Luftmengen wurden nach DIN 1946 projektiert. Die Luft strömt durch in den Türstürzen integrierte Überströmöffnungen in die Erschließungsbereiche und von dort weiter in Bad und Küche, wo sich Abluftventile befinden. Durch die gerichtete Durchströmung der Wohnung lässt sich mit sehr geringen Luftmengen (im durchschnittlichen Betrieb etwa 90 m<sup>3</sup>/h mit nicht wahrnehmbarer Luftbewegung) eine Abführungen aller Innenraumluftverunreinigungen nahe der Quellen erreichen.

Die Wärmezufuhr in den Wohnungen erfolgt über ein Zuluftnachheizregister - das Zuluftnetz ist damit zugleich Wärmeverteilnetz, so dass in diesem Gebäude die Vorteile der Passivhaus-Synergie zwischen Lüftungs- und Heizungssystem systematisch genutzt werden konnte. Dies gilt für beide Gebäudeteile, also auch für das nordorientierte Haus B. Im Bad gibt es einen kleinen Zusatzheizkörper. Damit wurde in den Passivhäusern bei St. Jakob konsequent das "klassische" Passivhaus-Konzept umgesetzt.

Die Wärmeerzeugung erfolgt zentral in einem Kellerraum mit einem Gasbrennwertkessel (Fabrikat Vitodens der Firma Viessmann). Von diesem Kessel wird die

Wärme über ein ganzjährig betriebenes Zweileiter-Heizverteilnetz mit konstanter Vorlauftemperatur über Steigstränge in die Wohnungen verteilt. Das gesamte Verteilnetz befindet sich bis auf kurze Anbindungsstücke innerhalb der thermischen Hülle. Die Warmwasserbereitung erfolgt wohnungsweise mit Wasser/Wasser-Durchlauferhitzern.

Eine Besonderheit sind in jeder Wohnung bereits eingebaute Trockenschränke für das Wäschetrocknen, die in den Abluftstrang der Wohnungslüftung integriert sind und eine hocheffiziente Wäschetrocknung mit extrem geringem Stromverbrauch erlauben [Feist 2000].

Im Zuge des Bauprojektes wurden für beide Gebäudeteile überschlägige PHPP-Berechnungen vom Büro Baumgartner für den Jahresheizwärmeverbrauch aufgestellt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen waren 12,8 kWh/(m<sup>2</sup>a) Heizwärmeverbrauch für Haus A und 15,2 kWh/(m<sup>2</sup>a) für Haus B. Bei der Erstellung dieses Berichtes zur wissenschaftlichen Auswertung wurden die PHPP-Berechnungen auf den aktuellen Stand des ausgeführten Objektes gebracht und die haustechnischen Daten ergänzt. Insbesondere durch die besseren Drucktest-Ergebnisse führt die Neuberechnung auf die geringfügig günstigeren Wert von 10,4 kWh/(m<sup>2</sup>a) für Haus A und 14,8 kWh/(m<sup>2</sup>a) für Haus B unter Standardrandbedingungen (d.h. bei 20 °C Raumlufttemperatur, mittlerem Frankfurter Klima und 2,1 W/m<sup>2</sup> inneren Wärmequellen). Die Berechnung nach PHPP zeigt, dass der Passivhausstandard auch für den nordorientierten Gebäudeteil klar eingehalten wird.

Für die Warmwasserbereitung wird mit einem Ansatz von 25 Liter pro Person und Tag (bei 60 °C) vom PHPP für Haus B ein Nutzwärmeverbrauch von 18 kWh/(m<sup>2</sup>a) sowie ein Verteil- und Speicherverlust von 7,4 kWh/(m<sup>2</sup>a) vorausbestimmt.

Inklusive des Hilfsstrombedarfs für die Lüftungsanlagen und die zentrale Heizungstechnik beträgt der rechnerische Primärenergiebedarf für Heizung, Warmwasser und Lüftung nach PHPP 55 kWh/(m<sup>2</sup>a) (Wohnfläche).

Die Passivhaus-Primärenergiegrenze inklusive Haushaltsstrom von 120 kWh/(m<sup>2</sup>a) wird beim Haus B nur dann eingehalten, wenn stromeffiziente Hausgeräte und Beleuchtungseinrichtungen verwendet werden, so dass der Stromverbrauch insgesamt auf unter 26,6 kWh/(m<sup>2</sup>a) gesenkt wird. Die Passivhausprojekte in Wiesbaden, Hannover und Darmstadt zeigen, dass dies mit heute verfügbarer Technik leicht erreicht werden kann.

## Passivhaus Nachweis



|   |   |                        |   |  |  |  |
|---|---|------------------------|---|--|--|--|
| Objekt:   | <b>Frankfurt St. Jakob; Block B</b>     |                        |   |  |  |  |
| Standort und Klima:   | <b>Frankfurt St. Jakob</b>              |                        | Frankfurt   |  |  |  |
| Straße:   | <b>Grimmpstraße 45-47</b>               |                        |   |  |  |  |
| PLZ/Ort:  | <b>Frankfurt am Main/Bockenheim</b>     |                        |   |  |  |  |
| Land:   | <b>Deutschland/Hessen</b>               |                        |   |  |  |  |
| Objekt-Typ:   | <b>Mehrfamilienhaus/Wohnungen</b>       |                        |   |  |  |  |
| Bauherren(en):  | <b>Frankfurter Aufbau AG</b>            |                        |   |  |  |  |
| Straße:   | <b>Gutleutstraße 40</b>                 |                        |   |  |  |  |
| PLZ/Ort:  | <b>Frankfurt am Main</b>                |                        |   |  |  |  |
| Architekt:  | <b>faktor 10 GmbH, Frau Petra Grenz</b> |                        |   |  |  |  |
| Straße:   | <b>Steubenplatz 12</b>                  |                        |   |  |  |  |
| PLZ/Ort:  | <b>64293 Darmstadt</b>                  |                        |   |  |  |  |
| Haustechnik:  | <b>IB Baumgartner</b>                   |                        |   |  |  |  |
| Straße:   | <b>Gross Breitenbach 25</b>             |                        |   |  |  |  |
| PLZ/Ort:  | <b>69509 Horlenbach</b>                 |                        |   |  |  |  |
| Baujahr:  | <b>2002</b>                             |                        |   |  |  |  |
| Zahl WE:  | <b>8</b>                                |                        |   |  |  |  |
| Umbauten Volumen V <sub>u</sub> :                                 | <b>2979.7</b>                           | m <sup>3</sup>         | Innentemperatur: <b>20.0</b> °C                                   |  |  |  |
| Personenzahl:   | <b>24.0</b>                             |                        |   |  |  |  |
| Internationale Wärmequellen: <b>2.1</b> W/m <sup>2</sup>          |   |                        |   |  |  |  |
| Kennwerte mit Bezug auf Energiebezugsfläche                       |   |                        |   |  |  |  |
| Energiebezugsfläche:  | <b>758.9</b>                            | m <sup>2</sup>         |   |  |  |  |
| Verwendet:  | <b>Jahresverfahren</b>                  |                        |   |  |  |  |
| Energiekenmwert Heizwärme:  | <b>14.8</b>                             | kWh/(m <sup>2</sup> a) | PH-Zertifikat: <b>erfüllt</b> <input checked="" type="checkbox"/> |  |  |  |
| Drucktest-Ergebnis:   | <b>0.30</b>                             | h <sup>-1</sup>        | 0.6 h <sup>-1</sup> <input checked="" type="checkbox"/>           |  |  |  |
| Primärenergie-Kennwert<br>(WW, Heizung, Hh- u. Haushalt Strom):   | <b>119</b>                              | kWh/(m <sup>2</sup> a) | 120 kWh/(m <sup>2</sup> a) <input checked="" type="checkbox"/>    |  |  |  |
| Primärenergie-Kennwert<br>(WW, Heizung und Strom):                | <b>55</b>                               | kWh/(m <sup>2</sup> a) |   |  |  |  |
| Primärenergie-Kennwert<br>Einsparung durch solar erzeugtes Strom: | <b>0</b>                                | kWh/(m <sup>2</sup> a) |   |  |  |  |
| Heizlast:   | <b>9.0</b>                              | W/m <sup>2</sup>       |   |  |  |  |
| Übertemperaturhäufigkeit:   | <b>0.4%</b>                             | über <b>25</b> °C      |   |  |  |  |

Abbildung 5: Nachweisblatt für den Passivhausstandard zu Haus B des Passivhauses bei St. Jakob; Neuberechnung auf Basis der am Bau realisierten Maße, Konstruktionsdetails und technischen Komponenten. Die Kriterien nach PHPP werden sämtlich erfüllt.

## Passivhaus-Projektierung

### ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME

|   |  |   |   |                               |              |
|---|--|---|---|-------------------------------|--------------|
| Klima: Frankfurt (Region 12)                        | InnerTemperatur: 20,0 °C                             |   |   |                               |              |
| Objekt: Frankfurt St. Jakob; Block B                | Gebäudetyp/Hausnutzung: Mehrfamilienhaus/Mietwohnung |   |   |                               |              |
| Standort: Frankfurt St. Jakob                       | Energiebezugsfläche $A_{EB}$ : 758,9 m²              |   |   |                               |              |
|   | Standard-Personenbeladung: 24,0 Pers pro m²          |   |   |                               |              |
|   | Energiebezugssfläche: kWh/m²/a                       |   |   |                               |              |
| <b>Wände</b>  | <b>Fläche m²</b>                                     | <b>U-Wert W/m²K</b>                         | <b>Temp.-Faktor <math>\xi</math></b>              | <b><math>G_1</math> kWh/a</b> | <b>kWh/a</b> |
| 1 Außenwand Außenluft                               | 747,1  | 0,103                                       | 1,00  | 76,4                          | 5888         |
| 2 Außenwand Erdreich                                |  |   | 0,57  |                               |              |
| 3 Dach/Decken Außenluft                             | 249,3  | 0,105                                       | 1,00  | 76,4                          | 2096         |
| 4 Bodenplatte                                       | 204,8  | 0,111                                       | 0,57  | 76,4                          | 985          |
| 5   |  |   | 1,00  |                               |              |
| 6   |  |   | 1,00  |                               |              |
| 7   |  |   | 0,75  |                               |              |
| 8 Fenster   | 135,9  | 0,885                                       | 1,00  | 76,4                          | 9183         |
| 9 Außentür  |  |   | 1,00  |                               |              |
| 10 Mbrücken außen (Länge/m)                         | 227,2  | 0,029                                       | 1,00  | 76,4                          | 498          |
| 11 Mbrücken Perimeter (Länge/m)                     |  |   | 0,57  |                               |              |
| 12 Mbrücken Boden (Länge/m)                         | 46,0   | 0,096                                       | 0,57  | 76,4                          | 191          |
| <b>Summe aller Hülleflächen</b>                     |  | 1397,1                                      |   |                               |              |
|   |  |   |   | <b>Durchs.</b>                | <b>18731</b> |
|   |  |   |   |                               | <b>24,7</b>  |
| <b>Transmissionswärmeverluste <math>Q_T</math></b>  |  |   |   |                               |              |
| Lüftungsanlage:                                     | verkämmtes Luftvolumen $V_L$                         |   | $A_{EB}$ m²                                       | lichte Raumhöhe m             |              |
| effektiver Wärmeübergangsfaktor $\beta_{EW}$        | 81%  |   | 758,9   | 2,50                          | = 1897,3     |
| Wärmeübergangsfaktor des Erdreichverbaus:           | γ_EW 0%  | $\tau_{L, \text{Auge}}$ 1h                  | $\Phi_{EW}$                                       | $\tau_{L, \text{Nacht}}$ 1h   |              |
| energetisch wirksamer Luftwechsel $n_L$             | 0,381  | (1 - 0,81) + 0,023 = 0,095                  |   |                               |              |
| <b>Lüftungswärmeverluste <math>Q_L</math></b>       | $V_L$ m³   | $n_L$ 1h                                    | $\varrho_{L, \text{Nacht}}$ kWh/a                 | $G_1$ kWh/a                   | kWh/a        |
|   | 1897   | 0,095                                       | 0,33  | 76,4                          | 4562         |
|   |  |   |   |                               | <b>6,0</b>   |
| <b>Summe Wärmeverluste <math>Q_V</math></b>         | $Q_T$ kWh/a  | $Q_L$ kWh/a                                 | <b>Reduktionsfaktor Nacht-/Wochenendabsenkung</b> |                               |              |
|   | 18731  | 4562  | ) 1,0 = 23293                                     |                               |              |
|   |  |   |   |                               | <b>30,7</b>  |
| Ausrichtung der Fläche                              | Reduktionsfaktor vgl. Blatt Fenster                  | g-Wert (max. Einzel)                        | Fläche m²   | Globalstr. Heizzeit           |              |
| 1 Ost   | 0,40   | 0,00  | 0,00  | 207                           | 0            |
| 2 Süd   | 0,27   | 0,51  | 48,82   | 320                           | 2175         |
| 3 West  | 0,40   | 0,00  | 0,00  | 213                           | 0            |
| 4 Nord  | 0,37   | 0,51  | 87,06   | 141                           | 2339         |
| 5 Horizontal  | 0,40   | 0,00  | 0,00  | 318                           | 0            |
| <b>Wärmeangebot Solarstrahlung <math>Q_S</math></b> |  |   |   | <b>Summe</b>                  | <b>4514</b>  |
|   |  |   |   |                               | <b>5,9</b>   |
| Interne Wärmequellen $Q_I$                          | $q_I$ kWh  | Länge Heizzeit da                           | spezif. Leistung $q_I$ W/m²                       | $A_{EB}$ m²                   | kWh/a        |
|   | 0,024  | 205   | 2,10  | 758,9                         | 7823         |
|   |  |   |   |                               | <b>10,3</b>  |
|   |  | Freie Wärme $Q_F$                           | $Q_F + Q_I$                                       |                               |              |
|   |  |   | 12336   |                               |              |
|   |  |   |   |                               | <b>16,3</b>  |
| Nutzungsgrad Wärmegewinne $\eta_Q$                  |  | Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten         | $Q_F / Q_V$                                       |                               |              |
|   |  |   | 0,53  |                               |              |
|   |  |   |   |                               |              |
| Wärmegewinne $Q_G$                                  |  | $(1 - (Q_F / Q_V)^2) / (1 - (Q_F / Q_V)^2)$ |   | 99%                           |              |
|   |  |   |   | kWh/a                         |              |
| Heizwärmebedarf $Q_H$                               | $Q_V - Q_I$  |   | 12089   |                               |              |
|   |  |   |   |                               | <b>15,9</b>  |
|   |  |   |   |                               |              |
|   |  | $Q_V - Q_G$                                 |   | 11204                         |              |
|   |  |   |   |                               | <b>14,8</b>  |
| Grenzwert   | <b>15</b>  | Anforderung erfüllt?                        | <b>ja</b>   |                               |              |

Abbildung 6: Heizwärmebedarfsberechnung nach PHPP für Haus B des Passivhauses

## 1.4 Das wissenschaftliche Begleitprogramm

Die hier vorliegende wissenschaftliche Begleituntersuchung wurde von der Frankfurter Aufbau AG mit Fördermitteln des E.ON Sales and Trading GmbH an das Passivhaus Institut beauftragt. Der Kern der Studie ist eine kontinuierliche zeitaufgelöste Messung der Energieverbräuche und der Parameter der thermischen Behaglichkeit sowie der Wetterdaten mit Schwerpunkt im Haus B. Darüber hinaus werden in diesem Bericht die Drucktestergebnisse und Ergebnisse der Infrarot-Thermographie wiedergegeben.

Das Messkonzept und die verwendete M-Bus-Technik werden in den Kapiteln 5 bis 8 dokumentiert. Die Messungen verliefen mit nur wenigen Störungen und Ausfällen.

## 1.5 Messergebnisse

### *Messzeitraum*

Weitgehend lückenlose Messaufzeichnungen liegen für das vollständige Jahr vom 1. Juni 2003 bis 31. Mai 2004 vor. Dieses wurde den Auswertungen zugrunde gelegt.

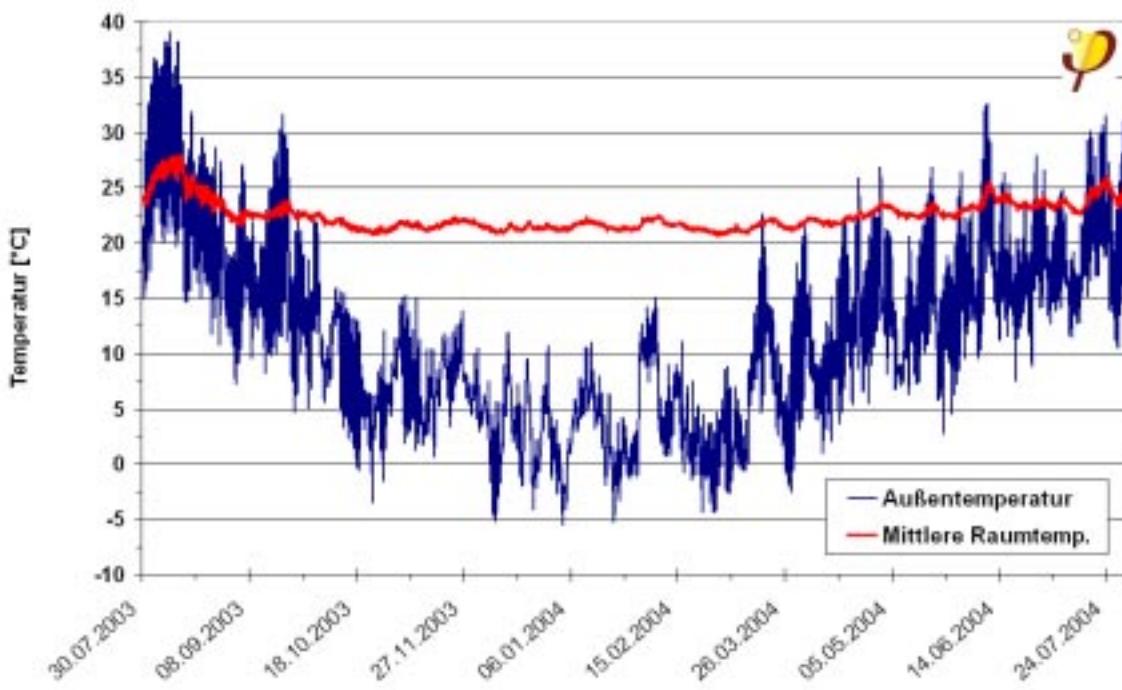
### *Wetterdaten*

Der Kernwinter im Messzeitraum war signifikant wärmer als die langjährigen Durchschnittsdaten am Standort, für die Heizzeit liegen die gemessenen Außentemperaturen um durchschnittlich 1,5 °C über den Daten nach DIN 4108-T6. Auch die Globalstrahlung war um etwa 10% höher als im Durchschnittsjahr. Auch die Sommermonate (insbesondere Juni und August 2003) waren extrem heiß, hier lagen die Messwerte sogar 5 °C über den langjährigen Mittelwerten. Dennoch dürfte das Wetter während des Messzyklus als eher typisch für das künftige Klima am Standard sein, zumal selbst vorsichtige Prognosen bzgl. des Klimawandels von Steigerungen der Durchschnittstemperaturen in Hessen um 1 bis 2 K ausgehen [Cramer 2004].

### *Raumtemperaturen, Behaglichkeit*

Die gemessenen Raumtemperaturen zeigen den für Passivhäuser gewohnten sehr gleichmäßigen Verlauf. Dabei werden sowohl im Winter mit durchschnittliche 21,3 °C als auch in den Hitzeperioden im Sommer ausgesprochen behagliche Zustände erreicht (Abbildung 7). In der extremen Hitzeperiode im August 2004 mit tagesmittleren Außentemperaturen am Standort von über 29 °C lagen die Mitteltemperaturen in den Wohnungen immer noch mehr als 3 K unter den Tagesmitteln der Außentemperatur und die Spitzenwerte um 11 K unter den Außenspitzen.

Die Raumtemperaturen in der Heizzeit liegen durchschnittlich um 1,3 K höher als der "ex-ante"-Berechnungsansatz im PHPP von 20 °C. Die in der EnEV-Berechnung verwendete Solltemperatur von nur 19 °C erweist sich hier abermals als realitätsfern. Die höheren Innentemperaturen in der Heizzeit kompensieren in etwa das mildere Wetter während der Messperiode.



**Abbildung 7:** Verlauf der gemessenen mittleren Raumtemperaturen (rot) und der Außenlufttemperatur im Messzeitraum. Im Winter werden behagliche 21,3 °C gehalten und selbst in den extremen sommerlichen Hitzeperioden des Jahres 2003 lagen die Innentemperaturen nur selten über 26°C, Maximalwerte bei 27,5 °C (bei Außenlufttemperaturen von über 39°C).

#### *Heizwärmeverbrauch*

Die mit den wohnungsweisen Wärmezählern in Haus B gemessene geregelte Wärmeabgabe für die Heizung lag im Mittel der 8 Wohnungen bei 8,5 kWh/(m<sup>2</sup>a); dazu kommt allerdings noch eine konstante nutzbare Wärmeabgabe der Verteilleitungen in den Wohnungen von 6,0 kWh/(m<sup>2</sup>a). Damit beträgt der gesamte

### **Heizwärmeverbrauch in Hausteil B 14,5 kWh/(m<sup>2</sup>a)**

und erfüllt das Passivhauskriterium. Der Verbrauch ist sogar ein wenig geringer als der rechnerisch ex ante bestimmte Wert (14,8 kWh/(m<sup>2</sup>a)). Die Einzelverbrauchswerte verteilen sich wie gewohnt in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Nutzeranforderungen über ein Spektrum von 7,5 bis 21 kWh/(m<sup>2</sup>a).

In Hausteil A sind die Heizwärmeverbräuche nicht direkt gemessen worden, sie lassen sich aber aus den wohnungsweisen Gesamtwärmeabgaben und den Warmwasserzapfungen (mit etwas geringerer Genauigkeit) berechnen. Es ergaben sich

### **Heizwärmeverbrauch in Hausteil A 10,5 kWh/(m<sup>2</sup>a)**

und damit um rund 4 kWh/(m<sup>2</sup>a) geringere Werte als in Teil B. Der Unterschied zwischen Hausteil A und Hausteil B entspricht ziemlich genau den von der PHPP-Berechnung her erwarteten zusätzlichen solaren Wärmegewinnen im südorientierten Hausteil A. Nun hätte man z.B. die Wärmedämmung der Fassadenteile in Hausteil A

um einen diesem Vorteil entsprechenden Betrag reduzieren können, da rein ökonomisch gesehen nur die Einhaltung des Passivhausstandards erforderlich war. In so weit lassen sich südorientierte Passivhäuser tatsächlich mit geringeren Investitionskosten errichten als nordorientierte.

#### *Warmwasserverbrauch und Wärmeverbrauch für die Warmwasserbereitung*

Die gemessenen Warmwasserwärmeverbräuche (Nutzwärme der Zapfungen) ergeben sich zu etwa 12 kWh/(m<sup>2</sup>a) (entsprechend 15,4 Liter gezapftes Warmwasser pro Person und Tag bei 60 °C) und sind damit deutlich niedriger als der Projektierungswert. Dies ist ein durchgängiges Ergebnis bei allen bisher in Deutschland messtechnisch begleiteten Passivhaus-Projekten, so dass die Frage einer Änderung der Projektionsansätze diskutiert werden muss.

#### *Verteilverluste*

Aus der Differenz der Hauptwärmezähler unmittelbar nach dem zentralen Pufferspeicher und der wohnungsweisen Gesamtwärmezähler ergibt sich eine deutlich höhere Wärmeabgabe der Verteilleitungen als nach der Projektierung. Auch wenn diese Wärmeabgabe zu etwa 38% als Heizwärme nutzbar ist, ergeben sich immer noch Verteilverluste in Höhe von 7,2 (Hausteil A) bzw. 10,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) (Hausteil B). Insgesamt gehen somit bei diesem Gebäude 23% des verbrauchten Erdgases für die Wärmeverteilverluste verloren; gegenüber dem projektierten Wert ist das fast eine Verdopplung. Hier liegen beträchtliche, sehr kostengünstig zu erschließende weitere Energieeinsparpotentiale; der Nachdruck liegt dabei bei der Planung kurzer Verteilstränge, bei der Wahl einer sehr guten Rohrleitungsdämmung und bei der sorgfältigen Ausführung der Dämmung, insbesondere gerade bei Armaturen, Abzweigen und Anschlüssen (vgl. die thermographischen Aufnahmen) [AkkP 28].

#### *Stromverbrauch der Wohnungslüftung*

Die Wohnungslüftungsgeräte haben im Durchschnitt deutlich weniger Strom verbraucht, als wir auf Basis der Kennwerte der Systeme erwartet hätten - der Standby-Verlust der Geräte ist nämlich deutlich höher als nach Empfehlung des PHI. Hier könnten also noch weitere Verbesserungen gegenüber dem ohnehin sehr guten Wert von 3,29 kWh/(m<sup>2</sup>a) Jahresstromverbrauch der Lüftungsanlagen erzielt werden. Die Wärmeeinsparung durch die Lüftungswärmerückgewinnung beträgt 19,2 kWh/(m<sup>2</sup>a). Je eingesetzter Kilowattstunde Hilfsstrom für die Lüftung werden daher 6,4 kWh Erdgas eingespart - die Lüftungswärmerückgewinnung ist somit auch bei diesem Passivhausprojekt eine hocheffiziente Technik zur Primärenergieeinsparung.

#### *Primärenergieverbrauch für Heizung, Lüftung und Warmwasserbereitung*

Insgesamt summiert sich die eingesetzte Primärenergie für die Gebäudetechnik auf

Heizung, Lüftung, Warmwasser 49,6 kWh/(m<sup>2</sup>a) primär (Wohnfläche),

etwa 10% weniger als nach der ex-ante-PHPP-Berechnung.

## *Primärenergieverbrauch für Haushaltsstrom, Heizung, Lüftung und Warmwasserbereitung*

Für den Gesamtwert für das Gebäude gelieferten nicht erneuerbaren Primärenergie gilt das Passivhaus-Kriterium nach PHPP mit der Anforderung 120 kWh/(m<sup>2</sup>a). Aus den Messungen ergeben sich für die Passivhäuser bei St Jakob mit den Gemis-Werten für die Primärenergiefaktoren insgesamt

### **119,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) Primärenergieverbrauch bezogen auf beheizte Wohnfläche für Haushaltsstrom, Heizung, Lüftung und Warmwasserbereitung (A&B im Mittel).**

In einem konventionellen Wohngebäude ist dieser nicht erneuerbare Primärenergieverbrauch etwa dreimal so hoch wie im beschriebenen Objekt. Damit erfüllt das Gebäude auch seitens der Messergebnisse alle Passivhaus-Anforderungen, obwohl der Haushaltsstromverbrauch etwas höher ist als nach der ex-ante-Berechnung; dies wird durch den geringeren Warmwasserverbrauch kompensiert.

Insgesamt stellt sich von den Verbrauchswerten heraus, dass das Gebäude alle Anforderungen an ein gutes Passivhaus auch im praktischen Betrieb vollständig erfüllt. Dies ist ein sehr gutes Ergebnis, zumal ganz konventionelle Technik verwendet wurde und der Gebäudeteil B sehr ungünstig orientiert ist.

## **1.6 Bewertung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen**

Die hohe wärmetechnische Qualität von Passivhaus-Bauteilen erlaubt eine solche, sehr weitgehende Abweichung von der "reinen Lehre" bei passiv solarer Orientierung. Dieser Bericht zeigt, dass bei guter Planung und entsprechender Ausführung eine solche nahezu unüberbietbar ungünstige Orientierung noch als Passivhaus funktionieren kann. Die installierten Heizleistungen des Zuluftheizsystems wurden mit großem Sicherheitsabstand in keiner der 19 Wohnungen benötigt - und dies wäre auch bei Winterbedingungen mit großer Kälte nicht der Fall. Dies gilt auch für die nordorientierten Wohnungen im Gebäudeteil B.

Die Behaglichkeit war in allen Wohnungen im Winter wie im Sommer ausgezeichnet. Innenthermographien zeigen eine extrem geringe Strahlungstemperatur-Asymmetrie, wie sie nur durch die gute Dämmung von Passivhaus-Bauteilen oder ansonsten durch großflächige Flächenheizungen erreichbar sind.

Das Projekt zeigt im Gesamtergebnis, dass Passivhäuser heute mit vielen Vorteilen für die Bewohner und für die Eigentümer auch in nahezu beliebigen innerstädtischen Lagen realisiert werden können. Die Baukosten waren im dokumentierten Objekt sogar eher gering, die verwendete Gebäudetechnik ist konventionell und kostengünstig. Trotzdem konnte ein extrem niedriger Energieverbrauch auch beim nordorientierten Gebäudeteil erreicht werden; von den Messwerten werden alle Passivhaus-Kriterien auch im praktischen Betrieb eingehalten. Trotz Wohnungs-

lüftung ist der Stromverbrauch der Wohnungen geringer als im Durchschnitt in Deutschland.

Weitere Effizienzverbesserungen wären vor allem durch eine sorgfältigere Dämmung der Wärmeverteilung sowie durch Reduzierung der Standby-Verluste der Elektronik erreichbar. Durch den Einsatz erneuerbarer Energiequellen (Solartechnik oder Biomasse-Nutzung) wäre bei einem solchen Projekt auch ein bilanzieller Null-Emissions-Status ohne unvertretbare Investitionskosten erreichbar.

Der Passivhausstandard hat sich bei der Wohnanlage nahe St. Jakob in Frankfurt Bockenheim als zielführend bzgl. sehr guter Behaglichkeit, gutem Bautenschutz und extrem niedrigem Energieverbrauch erwiesen.

## 2 Projektübersicht

### Mehrfamilien-Passivhaus „Wohnen bei St. Jakob“, Frankfurt

#### ADRESSE:

Gremppstraße 45-47  
60487 Frankfurt, Hessen

#### BAUHERR

Frankfurter Aufbau AG (FAAG)

#### ARCHITEKT:

faktor 10, Darmstadt  
P. Grenz, F. Rasch

#### FACHINGENIEURE:

Haustechnik:  
Ingenieurbüro Baumgartner (IBB)  
Mörlenbach

#### WISSENSCHAFTLICHE BEGLEITUNG:

Passivhaus Institut, Darmstadt

#### FERTIGSTELLUNG:

Ende 2002



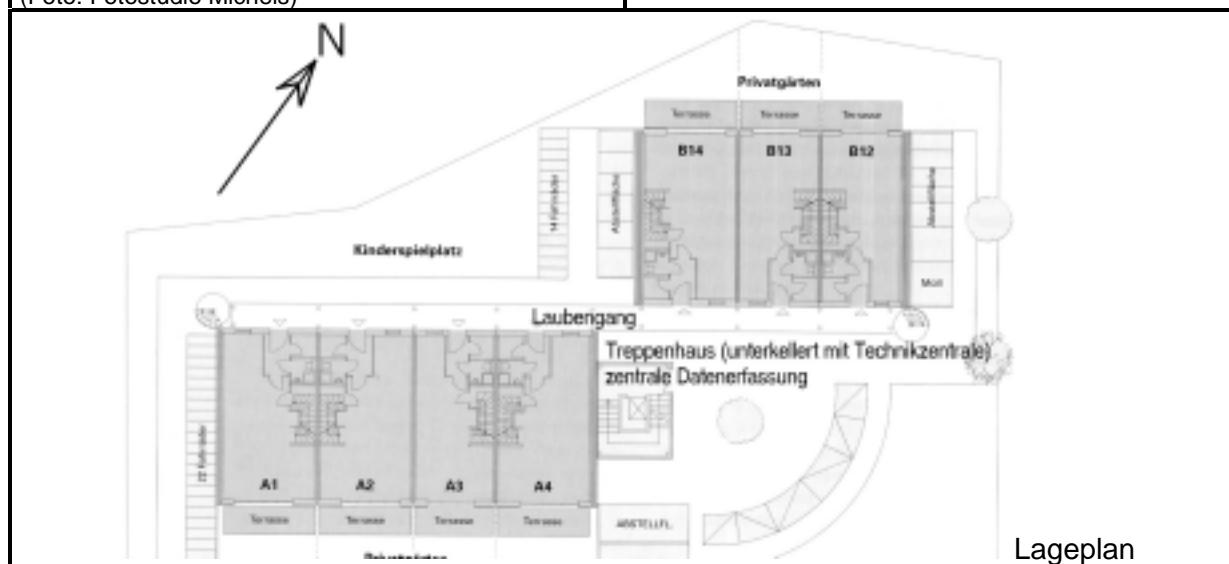
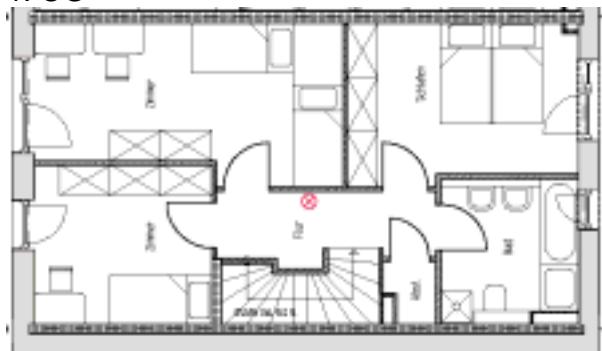
Ansicht von Süd-Ost  
(Foto: Fotostudio Michels)

#### Grundriss einer typischen Maisonette-Wohnung:

##### Erdgeschoss



##### 1. OG



|  |   |
|--|---|
| <p><b>Konstruktion</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Tragkonstruktion: vorgefertigte Betonelemente</li> <li>Außenwände: Holzständerkonstruktion mit 32 cm Dämmstärke (U-Wert 0,12 W/(m<sup>2</sup>K)).</li> <li>Fenster: Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung mit hochgedämmten Fensterrahmen (<math>U_w = 0,89 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math>)</li> <li>Dach: Holzleichtbauelementen mit Doppel-T-Trägern (<math>U_r = 0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math>)</li> <li>Giebelwände: Wärmedämmverbundsystem mit 40 cm PS-Hartschaum (U-Wert 0,086 W/(m<sup>2</sup>K))</li> <li>Bodenplatten 30 cm Dämmstoff (<math>U_g = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math>)</li> <li>Wärmebrückenfreies Konstruieren</li> <li>Lufdichtheitskonzept</li> </ul> | <p><b>Haustechnik</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Lüftung: Dezentrale Wohnungslüftungsgeräte mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung (Wärmebereitstellungsgrad 84%)</li> <li>Heizung: Luftheizung mit Zuluftnachheizer<br/>Bad: Hydraulischer Zusatzheizkörper</li> <li>Zweileiter-Heizverteilnetz</li> <li>Wohnungsweise Warmwasserbereitung mit Wasser/Wasser-Durchlauferhitzern</li> <li>Trockenschränke am Abluftstrang für das Wäschetrocknen</li> </ul> |
| <p><b>Kosten</b><br/>Kostengruppe 300 + 400<br/>2.235.000 € (inkl. MWSt)</p>   |  <p>Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung im Abstellraum einer Wohnung</p>  |

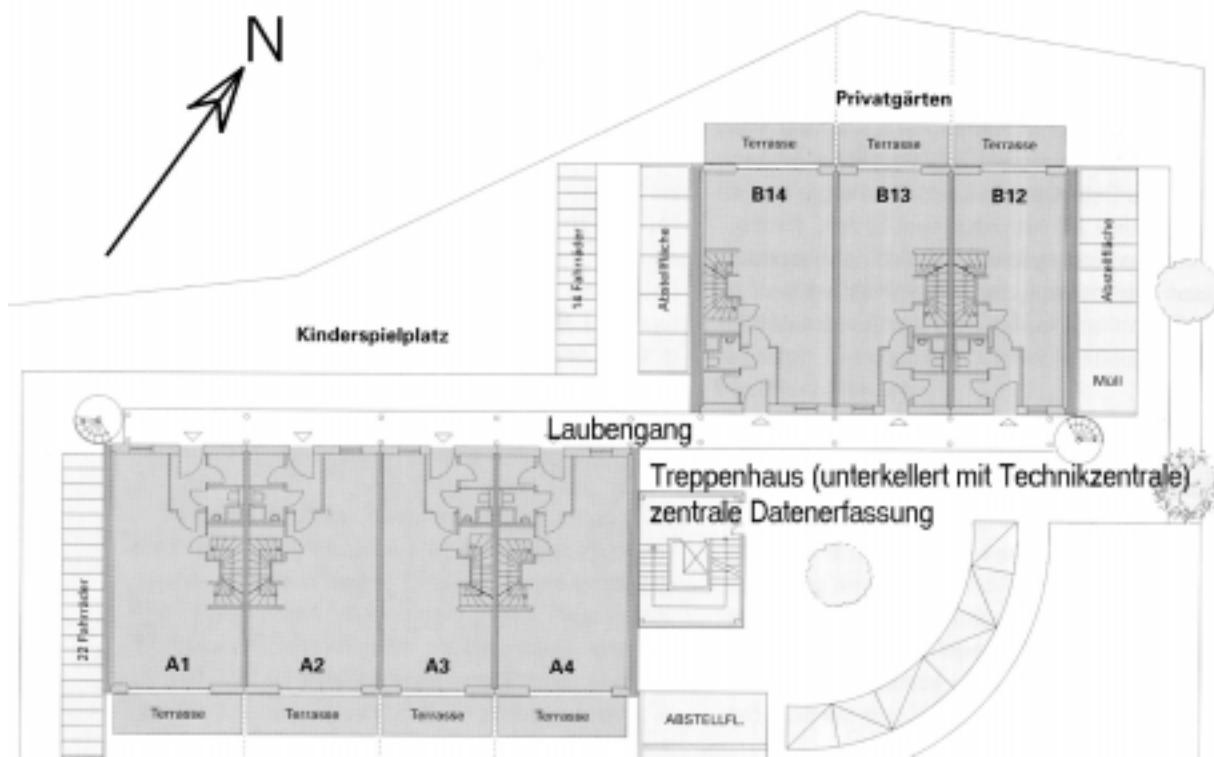
### 3 Projektvorstellung



**Abbildung 8: Modell zum Bauvorhaben „Wohnen bei St. Jakob“ (Haus A links, Haus B rechts)**  
(Quelle: Nach Broschüre „Wohnen bei St. Jakob“, innotecda 2002).

Das Bauvorhaben in Frankfurt Bockenheim (Grempstraße 45-47) „Wohnen bei St. Jakob“ umfasst insgesamt 19 Wohneinheiten in zwei viergeschossigen Mehrfamilienhäusern und gliedert sich in Haus A mit 11 Wohneinheiten und Haus B mit 8 Wohneinheiten. Beide Gebäude sind im Passivhaus Standard realisiert worden und werden bis auf den Badheizkörper ausschließlich über Warmwasser-Nachheizregister im Zuluftstrang beheizt. Die Gebäude sind in Mischbauweise als Betonskelett mit vorgehängten hochwärmegedämmten Fassaden- und Dachbauteilen (Holzleichtbau) realisiert. Nur die Beton-Giebelwände sind mit einem Wärmedämmverbundsystem ausgeführt. Die Gesamtwohnfläche (Energiebezugsfläche) beträgt ca. 1.840 m<sup>2</sup>. Es handelt sich dabei zwei Mehrfamilienwohnhäuser mit Erschließung über ein unbeheiztes Treppenhaus und Laubengänge. Eine Unterkellerung für Heizkessel, Warmwasserspeicher und Zählerschränke besteht nur im Bereich des Treppenhauskerns, hier befinden sich auch die Technikzentrale sowie die zentrale Datenerfassung für das Messprojekt.

Die Planung wurde vom Architekturbüro „faktor 10“ aus Darmstadt ausgeführt.



**Abbildung 9: Lageplan „Wohnen bei St. Jakob“, Haus A mit Treppenhaus und Haus B (Quelle: Nach Broschüre „Wohnen bei St. Jakob“, innotecda 2002)**

Der Bauträger Frankfurter Aufbau AG hat für das Projekt „Wohnen bei St. Jakob“ ein Grundstück am Ortsrand von Bockenheim auf Erbbaurechtsbasis übernommen. Die Ortsrandlage mit angrenzenden Gartengrundstücken erlaubt Richtung Norden einen Ausblick in den Taunus, zur Steigerung der Wohnqualität wurden im Haus B daher Terrassen und Balkone sowie großflächige Verglasungen in Nord-Ost-Richtung orientiert. Diese bezüglich der solaren Gewinne nicht optimierte Bauweise stellt ein Novum im Passivhaus-Geschosswohnungsbau dar, Haus B wurde daher mess-technisch detaillierter instrumentiert. Die Eigentumswohnungen haben sich sehr gut verkauft und wurden Ende 2002/Anfang 2003 bezogen.

**Tabelle 1: Projektbeteiligte an dem Passivhaus-Projekt „Wohnen bei St. Jakob“**

|                              |                                |            |
|------------------------------|--------------------------------|------------|
| Bauherr                      | Frankfurter Aufbau AG (FAAG)   | Frankfurt  |
| Architekten und Bauleitung   | faktor 10                      | Darmstadt  |
| Haustechnikplanung           | IBB, Ingenieurbüro Baumgartner | Mörlenbach |
| Wissenschaftliche Begleitung | Passivhaus Institut            | Darmstadt  |



Abbildung 10: Nordwestansicht Haus B mit großflächigen Verglasungen; Lageplan (Quelle: Nach Broschüre „Wohnen bei St. Jakob“, innotecda 2002)



Abbildung 11: Schnitt durch den Gebäudekörper (Quelle: Nach Broschüre „Wohnen bei St. Jakob“, innotecda 2002)



2003/10/ 3 11:37am

Abbildung 12: Gebäudeansicht aus Süd-Ost Richtung.



Abbildung 13: Detailansichten Laubengänge und Feuertreppe von Haus B (links) sowie Wohnungseingang und Durchgang zwischen den beiden Gebäuden (rechts)

Alle Wohnungen sind mit dezentralen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung ausgestattet. Die Geräte befinden sich immer im Abstellraum der Wohnung direkt an der Außenwand und sind mit sehr kurzen Außen- und Fortluftleitungen angeschlossen. Jede Wohnung verfügt über einen Wäschetrocken-schrank statt

eines elektrischen Wäschetrockners. Die Geräte sind jeweils im Badezimmer aufgestellt und an die Badezimmerabluft angeschlossen.



Abbildung 14: Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung im Abstellraum einer Wohnung.



Abbildung 15: Zwei Beispiele für die Anordnung der Außen- und Fortluftöffnungen bei den Gebäuden.



Abbildung 16: Überströmöffnung (links) und Zuluftelement (rechts) in einer der Wohnungen

## 3.1 Energiebezugsflächen und Bewohnerzahl

### 3.1.1 Energiebezugsflächen

Die Energiebezugsflächen der 19 Wohnungen in den beiden Blöcken A und B sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Energiebezugsfläche ist nicht zu verwechseln mit der Fläche, die nach der Energieeinsparverordnung angesetzt wird (diese wäre deutlich größer). Die Energiebezugsfläche ist die Wohnungsfläche berechnet nach DIN 277 unter Abzug von Flächen außerhalb der thermischen Hülle (z.B. Balkon).

Die gesamte Energiebezugsfläche beträgt 1842,0 m<sup>2</sup>. Haus A mit 11 Wohnungen verfügt über 1083,1 m<sup>2</sup> und Haus mit 8 Wohnungen verfügt über 758,9 m<sup>2</sup>. Die mittlere Energiebezugsfläche einer Durchschnittswohnung ergibt sich zu 96,9 m<sup>2</sup>.

In der Tabelle sind die Wohnungen aus Datenschutzgründen verschlüsselt bezeichnet (fortlaufend I bis XIX).

**Tabelle 2: Energiebezugsflächen der 19 Wohnungen in Haus A und B (verschlüsselte Whg.-Nummern).**

|              | Energiebezugsfläche<br>[m <sup>2</sup> ] |
|--------------|--|
| Whg. I       | 98.8                                     |
| Whg. II      | 116.9                                    |
| Whg. III     | 86.7                                     |
| Whg. IV      | 102.9                                    |
| Whg. V       | 86.7                                     |
| Whg. VI      | 98.8                                     |
| Whg. VII     | 116.9                                    |
| Whg. VIII    | 62.0                                     |
| Whg. IX      | 106.1                                    |
| Whg. X       | 116.9                                    |
| Whg. XI      | 62.0                                     |
| Whg. XII     | 116.4                                    |
| Whg. XIII    | 62.0                                     |
| Whg. XIV     | 86.7                                     |
| Whg. XV      | 102.9                                    |
| Whg. XVI     | 98.8                                     |
| Whg. XVII    | 102.9                                    |
| Whg. XVIII   | 114.7                                    |
| Whg. XIX     | 102.9                                    |
| <b>Summe</b> | <b>1842.0</b>                            |

Wird das detaillierter untersuchte Haus B separat betrachtet sind die Wohnungen mit den Buchstaben A bis H bezeichnet.

### 3.1.2 Bewohnerzahl

Die beiden Gebäude werden von insgesamt **59 Personen** bewohnt, davon sind 36 Erwachsene und 23 Kinder [Schulz 2004]. Die Verteilung nach Häusern ist der folgenden Tabelle zu entnehmen:

**Tabelle 3: Personenzahlen**

|            | Haus A | Haus B | Gesamt |
|------------|--------|--------|--------|
| Erwachsene | 20     | 16     | 36     |
| Kinder     | 15     | 8      | 23     |
| Summe      | 35     | 24     | 59     |

Tabelle 4: Personenzahlen je Wohnungen

| Person/Whg.  | Anzahl der Wohnungen<br>Haus A | Anzahl der Wohnungen<br>Haus B | Gesamt    |
|--------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------|
| 1            | 2                              | 0                              | 2         |
| 2            | 1                              | 4                              | 5         |
| 3            | 2                              | 0                              | 2         |
| 4            | 5                              | 4                              | 9         |
| 5            | 1                              | 0                              | 1         |
| <b>Summe</b> | <b>11</b>                      | <b>8</b>                       | <b>19</b> |

Die Energiebezugsfläche pro Person schwankt zwischen 23,3 und 62,0 m<sup>2</sup>/Person und liegt im Durchschnitt bei **31,2 m<sup>2</sup>/Person**.

### 3.2 Luftdichtheit

Eine Voraussetzung für ein energieeffizientes Gebäude stellt neben der guten Wärmedämmung und der Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung insbesondere auch die sehr gute Luftdichtheit der Gebäudehülle dar. Bei gut luftdichten Gebäuden können die In- und Exfiltrationsluftströme minimiert und so Bauschäden vorgebeugt werden. Für die Realisierung der guten Luftdichtheit wird der Grundstein bei der detailgenauen Planung gelegt. Die Einhaltung der hohen Luftdichtheitsanforderung wurde mit einzelnen Drucktestmessungen für jede Wohnung durch das Passivhaus Institut überprüft. Die Messungen wurden an einem optimalem Zeitpunkt, kurz nach dem Schließen der Gebäudehülle und vor dem Innenausbau vom 5. bis 7. November 2002 durchgeführt.



Abbildung 17: Eingebaute Blower Door in die Terrassentüren von zwei unterschiedlichen Wohnungen. Im linken Bild die Sicht von Außen mit noch fehlendem Gebläse und im rechten Bild die Sicht von innen während des Einbaues des Gebläses.

Bei den Messungen wurden keine größeren Leckagen gefunden. Die Messergebnisse zeigen die ausgezeichnete Luftdichtheit aller Wohnungen. Die Ergebnisse liegen zwischen  $n_{50} = 0,22$  und  $0,41 \text{ 1/h}$ , der Gesamtmittelwert beträgt  **$n_{50} = 0,29 \text{ 1/h}$** . Damit liegen sehr gute Voraussetzungen für die Einhaltung des Passivhaus-Standards vor.

Tabelle 5: Ergebnisse der Drucktestmessungen aller 19 Wohnungen

| Wohnung    | Messergebnis<br>[1/h] |
|------------|-----------------------|
| Whg. I     | 0.30                  |
| Whg. II    | 0.26                  |
| Whg. III   | 0.32                  |
| Whg. IV    | 0.30                  |
| Whg. V     | 0.31                  |
| Whg. VI    | 0.27                  |
| Whg. VII   | 0.25                  |
| Whg. VIII  | 0.39                  |
| Whg. IX    | 0.23                  |
| Whg. X     | 0.22                  |
| Whg. XI    | 0.34                  |
| Whg. XII   | 0.26                  |
| Whg. XIII  | 0.41                  |
| Whg. XIV   | 0.30                  |
| Whg. XV    | 0.30                  |
| Whg. XVI   | 0.26                  |
| Whg. XVII  | 0.31                  |
| Whg. XVIII | 0.28                  |
| Whg. XIX   | 0.31                  |

Tabelle 6: Mittelwerte der 19 Drucktestmessungen

|                      |                 |
|----------------------|-----------------|
| Haus A               | 0,29 1/h        |
| Haus B               | 0,28 1/h        |
| <b>Gesamtprojekt</b> | <b>0,29 1/h</b> |

### 3.3 Energiebilanz (PHPP)

Die wärmetechnischen Daten der Passivhäuser bei St. Jakob sind in übersichtlicher Form in den Arbeitsmappen des Passivhaus Projektierungs Paketes (PHPP) dokumentiert. Das PHPP wurde bei der Planung der Gebäude eingesetzt, jedoch nur bis zu einem Stand vor der Ausschreibung der Leistungen und der Ausführung fortgeführt. Daher fehlten im von den Planern erstellten PHPP u.a. die Daten der Gebäudetechnik. Für die Dokumentation dieses Berichtes wurde vom Passivhaus Institut ein komplettes PHPP auf der Basis der endgültigen Plandaten erstellt. In diese Gebäudedokumentation gehen die Ergebnisse der messtechnischen Begleitung nicht ein, sondern allein der Planungsstand. Insbesondere werden die normalen Standardrandbedingungen des PHPP verwendet:

Standard-Raumtemperatursollwert 20 °C

Standard-Klimadaten für den Standort Frankfurt (nach Daten des Testreferenzjahres)

Standard-Warmwassernachfragedaten (25 Liter/Person/Tag bei 60 °C).

Standard-Lüftungsauslegung nach DIN 1946

Personenbelegung nach Plandaten: 39 Personen in Haus A, 24 Personen in Haus B

Diese Standarddaten müssen nicht unbedingt den tatsächlich für das Messjahr vorliegenden Daten entsprechen. Letztere hängen vielmehr vom Nutzerverhalten, vom Wetter im Messzeitraum, von der Nutzung und auch von der Ausführungsqualität der Gebäudehülle und der technischen Systeme ab. Die in diesem Kapitel dokumentierten "Plandaten" werden im Bericht auch als "ex ante"-Daten bezeichnet. Sie kennzeichnen den Stand des Wissens, wie er vor Baufertigstellung, Bezug und Beginn des Messprogramms vorliegt.

Werden, wie im vorliegenden Fall, in einem bewohnten Projekt Messungen zur Behaglichkeit und zum Energieverbrauch durchgeführt, dann ist es auch möglich, auf der Basis der Messergebnisse (z.B. gemessene Raumtemperaturen, Wasserzapfungen und Wetterdaten) eine Nachberechnung der Energiebilanzen mit den gemessenen Randbedingungen (soweit verfügbar) durchzuführen. Diese, im nachhinein mit erweitertem Kenntnisstand durchgeführte Berechnung bezeichnen wir im Bericht als "ex post"-Berechnung. Sie wird im Kapitel 12 dargestellt.

Abbildung 18 zeigt das Nachweisblatt des PHPP für das (südorientierten) Haus A. Für diesen Gebäudeteil sind alle Anforderungen für die Zertifizierung als Passivhaus erfüllt: Der Heizwärmeverbrauch ist mit etwa 10 kWh/(m<sup>2</sup>a) sogar deutlich geringer als gefordert, ebenso das Drucktestergebnis mit 0,3 h<sup>-1</sup>. Der rechnerische Primärenergiebedarf für Warmwasser, Heizung und Hilfsstrom ist mit 51 kWh/(m<sup>2</sup>a) bezogen auf die Wohnfläche sehr gering. Worauf es ankommt, ist der Gesamt-Primärenergiebedarf inkl. auch der Haushaltsanwendungen von elektrischem Strom, welche die dominanten Verbräuche bei diesem Objekt bilden. Mit 119 kWh/(m<sup>2</sup>a) wird das Passivhaus-Kriterium hier eingehalten, wobei dies den Einsatz stromsparender Hausgeräte und Beleuchtungsmittel voraussetzt. Die Voraussetzungen dafür wurden bei den Passivhäusern z.B. durch den Einbau der Trockenschränke und die Verlegung von Warmwasseranschlüssen geschaffen.

## Passivhaus Nachweis

|   |   |   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
|---|---|---|-------------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|-------------------------------------|--|-----------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|----------------------------------|--|--|---|---------------------------------|--|--|-----------|-----------------------------|--|--|---------------------------|-------------|-------------------|--|
|   |   |   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| Objekt:   | <b>Frankfurt St. Jakob; Block A</b>     |   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| Standort und Klima:   | <b>Frankfurt St. Jakob</b>              | Frankfurt   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| Straße:   | <b>Grenzstraße 45-47</b>                |   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| PLZ/Ort:  | <b>Frankfurt am Main/Bockenheim</b>     |   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| Land:   | <b>Deutschland/Hessen</b>               |   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| Objekt-Typ:   | <b>Mehrfamilienhaus/Wohnungen</b>       |   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| Bauherren:  | <b>Frankfurter Aufbau AG</b>            |   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| Straße:   | <b>Gutleutstraße 40</b>                 |   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| PLZ/Ort:  | <b>Frankfurt am Main</b>                |   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| Architekt:  | <b>faktor 10 GmbH, Frau Petra Grenz</b> |   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| Straße:   | <b>Staubenplatz 12</b>                  |   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| PLZ/Ort:  | <b>64293 Darmstadt</b>                  |   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| Haustechnik:  | <b>IB Baumgartner</b>                   |   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| Straße:   | <b>Gross Breitenbach 25</b>             |   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| PLZ/Ort:  | <b>69509 Mörlenbach</b>                 |   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| Baujahr:  | <b>2002</b>                             |   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| Zahl WE:  | <b>11</b>                               | Innentemperatur: <b>20.0</b> °C                   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| Umbau des Volumen V <sub>U</sub> :  | <b>4176.0</b> m <sup>3</sup>            | Interne Wärmequellen: <b>2.1</b> W/m <sup>2</sup> |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| Personenzahl:   | <b>39.0</b>                             |   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| <b>Kennwerte mit Bezug auf Energiebezugsfläche</b> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Energiebezugsfläche:</td> <td><b>1083.1</b> m<sup>2</sup></td> <td>Verwendet: Jahresverfahren</td> <td>PH-Zertifikat: Erfüllt?</td> </tr> <tr> <td><b>Energiekennwert Heizwärme:</b></td> <td><b>10.4</b> kWh/(m<sup>2</sup>a)</td> <td><b>15 kWh/(m<sup>2</sup>a)</b></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Drucktest-Ergebnis:</td> <td><b>0.30</b> h<sup>-1</sup></td> <td>0.6 h<sup>-1</sup></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Primärenergie-Kennwert<br/>(WW, Heizung, HBs- u. Haushalt-Strom):</td> <td><b>119</b> kWh/(m<sup>2</sup>a)</td> <td>120 kWh/(m<sup>2</sup>a)</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Primärenergie-Kennwert<br/>(WW, Heizung und HBs):</td> <td><b>51</b> kWh/(m<sup>2</sup>a)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Primärenergie-Kennwert<br/>Einsparung durch solar erzeugten Strom:</td> <td><b>0</b> kWh/(m<sup>2</sup>a)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Heizlast:</td> <td><b>7.8</b> W/m<sup>2</sup></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Übertemperaturhäufigkeit:</td> <td><b>0.8%</b></td> <td>über <b>25</b> °C</td> <td></td> </tr> </table> |   |   | Energiebezugsfläche:                | <b>1083.1</b> m <sup>2</sup> | Verwendet: Jahresverfahren | PH-Zertifikat: Erfüllt? | <b>Energiekennwert Heizwärme:</b> | <b>10.4</b> kWh/(m <sup>2</sup> a) | <b>15 kWh/(m<sup>2</sup>a)</b> | <input checked="" type="checkbox"/> | Drucktest-Ergebnis: | <b>0.30</b> h <sup>-1</sup> | 0.6 h <sup>-1</sup> | <input checked="" type="checkbox"/> | Primärenergie-Kennwert<br>(WW, Heizung, HBs- u. Haushalt-Strom): | <b>119</b> kWh/(m <sup>2</sup> a) | 120 kWh/(m <sup>2</sup> a) | <input checked="" type="checkbox"/> | Primärenergie-Kennwert<br>(WW, Heizung und HBs): | <b>51</b> kWh/(m <sup>2</sup> a) |  |  | Primärenergie-Kennwert<br>Einsparung durch solar erzeugten Strom: | <b>0</b> kWh/(m <sup>2</sup> a) |  |  | Heizlast: | <b>7.8</b> W/m <sup>2</sup> |  |  | Übertemperaturhäufigkeit: | <b>0.8%</b> | über <b>25</b> °C |  |
| Energiebezugsfläche:  | <b>1083.1</b> m <sup>2</sup>            | Verwendet: Jahresverfahren                        | PH-Zertifikat: Erfüllt?             |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| <b>Energiekennwert Heizwärme:</b>   | <b>10.4</b> kWh/(m <sup>2</sup> a)      | <b>15 kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>                    | <input checked="" type="checkbox"/> |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| Drucktest-Ergebnis:   | <b>0.30</b> h <sup>-1</sup>             | 0.6 h <sup>-1</sup>                               | <input checked="" type="checkbox"/> |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| Primärenergie-Kennwert<br>(WW, Heizung, HBs- u. Haushalt-Strom):  | <b>119</b> kWh/(m <sup>2</sup> a)       | 120 kWh/(m <sup>2</sup> a)                        | <input checked="" type="checkbox"/> |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| Primärenergie-Kennwert<br>(WW, Heizung und HBs):  | <b>51</b> kWh/(m <sup>2</sup> a)        |   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| Primärenergie-Kennwert<br>Einsparung durch solar erzeugten Strom:   | <b>0</b> kWh/(m <sup>2</sup> a)         |   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| Heizlast:   | <b>7.8</b> W/m <sup>2</sup>             |   |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |
| Übertemperaturhäufigkeit:   | <b>0.8%</b>                             | über <b>25</b> °C                                 |                                     |                              |                            |                         |                                   |                                    |                                |                                     |                     |                             |                     |                                     |  |                                   |                            |                                     |  |                                  |  |  |   |                                 |  |  |           |                             |  |  |                           |             |                   |  |

Abbildung 18: PHPP-Nachweisblatt für Haus A des Passivhauses bei St. Jakob; Neurechnung auf Basis der am Bau realisierten Maße, Konstruktionsdetails und technischen Komponenten (zum Vergleich mit Haus B siehe Abbildung 5). Die Kriterien nach PHPP werden alle erfüllt.

Die Übersicht über die Daten der Gebäudehülle von Haus A gibt Abbildung 19. Etwa je ein Drittel der Wärmeverluste über die Gebäudehülle werden durch passiv solare Energie ( $9,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ), interne Wärmequellen ( $10,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ) und durch die Heizung ( $10,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ) mittels Zuluftheizregister und Badheizkörper erbracht. Für den Gebäudeteil "B" war die PHPP-Heizwärmebilanz bereits in der Einleitung in Abbildung 6 dokumentiert worden. Haus B hat wegen der geringeren Breite des Hauses ein etwas ungünstigeres A/V-Verhältnis, entscheidend ist jedoch, dass wegen der Nordorientierung der passiv solare Beitrag hier nur  $5,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  und somit nur 20% des Wärmeverlustes beträgt; daher fällt der Heizwärmeverbrauch nun höher aus, dieser liegt jedoch auch für den Gebäudeteil B mit  $14,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  immer noch unter der Passivhaus-Anforderung.

Die Aufbauten und U-Werte der Regelbauteile für Haus B werden in Abbildung 20 und Abbildung 21 dokumentiert. Diese Werte gelten (mit nur geringfügigen Abweichungen) auch für den Gebäudeteil A. Giebelwände, Dach, Bodenplatte, Fassadenelemente und die Dachterrasse weisen passivhaustypische U-Werte zwischen 0,08 und  $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  auf. Eine Infrarot-Thermographie (vgl. Kapitel 4) belegt, dass die hier berechneten U-Werte baupraktisch tatsächlich erreicht wurden.

Die Fensterabmessungen für den Gebäudeteil B werden in Abbildung 22 dokumentiert. Verwendet wurden (bis auf den unbeheizten Treppenhausturm) grundsätzlich Dreischeiben-Wärmeschutzverglasungen ( $U_g = 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) in speziell wärmegedämmten Passivhausfensterrahmen ( $U_f = 0,75 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ). Verwendet wurde außerdem ein thermisch getrennter Randverbund und es wurde auf einen weitgehend wärmebrückenreduzierten Einbau der Fenster in die Fassade geachtet. Der mittlere Fenster-U-Wert beträgt unter Berücksichtigung der Einbauwärmebrückenbeiträge  $0,89 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Die Verschattungssituation wurde für beide Gebäudeteile vom Passivhaus Institut im Auftrag der FAAG sehr sorgfältig bestimmt. Die Verschattung ist im Vergleich zu üblichen Passivhäusern mit nur 37% (Südseite Haus B) effektivem Apertureanteil sehr groß, sie ist aber typisch für innerstädtische Bebauungen. Etwas günstiger liegen die Verhältnisse für Haus A, weshalb dort auch eine bedeutendere passive Solarenergienutzung möglich war.

Die Wärmeverteilung ist rechnerisch vergleichsweise effizient: es ergeben sich Verluste in Höhe von  $7,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  oder knapp 40% des Nutzwarmwasserwärmeverbrauchs (vgl. Abbildung 23). Vorausgehende Messungen in Feldprojekten hatten gezeigt, dass eine effiziente Wärmeverteilung mit sehr geringen Verlusten auch in der Praxis erreichbar ist (z.B. im Passivhaus Darmstadt Kranichstein mit um  $4,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ). Auch bei der Planung der Passivhäuser bei St. Jakob wurde auf die Begrenzung der Leitungsverluste geachtet. Allerdings ist schon das gewählte Verteilnetz deutlich länger je Quadratmeter Wohnfläche.

Die Wohnungslüftung erfolgt mit wohnungsweisen Wärmerückgewinnungsgeräten mit hocheffizientem Gegenstrom-Wärmeübertrager. Projektiert wurde sie mit dem Lüftungsblatt des PHPP, das für den Gebäudeteil A in Abbildung 24 dokumentiert ist. Hier ergeben sich Standardzuluftmengen von knapp  $90 \text{ m}^3/\text{h}$  je Wohneinheit. Die Nutzer können die Luftmengen innerhalb gewisser Grenzen selbst am Bedienteil der Lüftungsanlage einstellen. Der Luftwechsel beträgt im Standardbetrieb  $0,36 \text{ h}^{-1}$ . Wir werden später an Hand der gemessenen Raumluftfeuchtigkeit diskutieren, ob sich diese Auslegung bewährt hat.

Passivhaus-Projektierung  
ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME

|   |  |  |   |                         |
|---|--|--|---|-------------------------|
| Klima:  | Frankfurt (Region 12)                              | Innentemperatur:                       | 20.0  | °C                      |
| Objekt:   | Frankfurt St. Jakob; Block A                       | Gebäudetyp/Nutzung:                    | Mehrfamilienhaus/Wohnung                    |                         |
| Standort:   | Frankfurt St. Jakob                                | Energiebezugsfläche $A_{EB}$ :         | 1083.1                                      | m <sup>2</sup>          |
| Bauteile:   | Temperaturzone                                     | Standard-Personenbeladung:             | 39.0  | Pers pro m <sup>2</sup> |
| 1 Außenwand Außenluft   | A  | Innenraumtemperatur $g_i$ :            | 76.4  | kWh/a                   |
| 2 Außenwand Erdreich  | B  | Temperatur-Faktor $\alpha$ :           | 1.00  |                         |
| 3 Dach/Decken Außenluft   | D  | Wärmedurchgangskoeffizient $\lambda$ : | 0.105                                       | W/m²K                   |
| 4 Bodenplatte   | B  | Wärmedurchgangskoeffizient $\lambda$ : | 0.111                                       | W/m²K                   |
| 5   | A  | Wärmedurchgangskoeffizient $\lambda$ : | 0.55  | W/m²K                   |
| 6   | A  | Wärmedurchgangskoeffizient $\lambda$ : | 1.00  | W/m²K                   |
| 7   | X  | Wärmedurchgangskoeffizient $\lambda$ : | 1.00  | W/m²K                   |
| 8 Fenster   | A  | Wärmedurchgangskoeffizient $\lambda$ : | 0.75  | W/m²K                   |
| 9 Außensturz  | A  | Wärmedurchgangskoeffizient $\lambda$ : | 1.00  | W/m²K                   |
| 10 Wände Außen (Länge/m)  | A  | Wärmedurchgangskoeffizient $\lambda$ : | 0.872                                       | W/m²K                   |
| 11 Wände Perimeter (Länge/m)  | P  | Wärmedurchgangskoeffizient $\lambda$ : | 0.028                                       | W/m²K                   |
| 12 Wände Boden (Länge/m)  | B  | Wärmedurchgangskoeffizient $\lambda$ : | 0.096                                       | W/m²K                   |
| Summe aller Flächen   |  | Summe aller Flächen                    | 1085.0                                      |                         |
| Transmissionswärmeverluste $Q_T$  |  | Summe                                  | 25534                                       | kWh(a)                  |
|   |  |  | 23.6  |                         |
| Lüftungsanlage:   | verbrauchtes Luftvolumen $V_L$ :                   | A <sub>EB</sub>                        | liche Raumhöhe                              |                         |
| effektiver Wärmebedarf, bezogen auf Wärmerückgewinnung                        | 81%  | 1083.1                                 | m   | m <sup>2</sup>          |
| Wärmebedarf, bezogen auf Wärmeleistungsfähigkeit des Erneuerbarenergiebedarf: | R <sub>ew</sub> 0 %                                | $\alpha_{R,L}$ Anlage                  | $\alpha_{R,L}$ Raum                         |                         |
| energetisch verbrauchter Luftwechsel $n_L$                                    | 0.364  | (1 - 0.81) + 0.021                     | = 0.090                                     |                         |
| Luftwärmeverluste $Q_L$   | $V_L$ m <sup>3</sup>                               | $n_L$ 1/h                              | $Q_L$ W/m²K                                 | $Q_L$ kWh/a             |
|   | 2708   | = 0.090                                | = 0.33                                      | = 6142                  |
| Summe Wärmeverluste $Q_V$   | $Q_T$ kWh/a  | $Q_L$ kWh/a                            | Reduktionsfaktor Nachts-/Wochenendabsenkung |                         |
|   | (25534 + 6142) * 1.0 = 31676                       |  | = 31676                                     | kWh(a)                  |
|   |  |  |   | 29.2                    |
| Ausrichtung der Fläche  | Reduktionsfaktor vgl. Blatt Fenster                | g-Wert (mark. Eintr.)                  | Fläche                                      | Globaler Heizbedarf     |
| 1 Ost   | 0.40   | = 0.00                                 | $\alpha_{R,L}$ m <sup>2</sup>               | $Q_H$ kWh/a             |
| 2 Süd   | 0.38   | = 0.51                                 | * 207                                       | = 0                     |
| 3 West  | 0.40   | = 0.00                                 | * 320                                       | = 8786                  |
| 4 Nord  | 0.32   | = 0.51                                 | * 213                                       | = 0                     |
| 5 Horizontal  | 0.40   | = 0.00                                 | * 65.74                                     | = 1514                  |
|   |  |  | * 141                                       |                         |
|   |  |  | * 318                                       | = 0                     |
| Wärmeangebot Solarstrahlung $Q_S$   | Summe  | 10310                                  | kWh(a)                                      | 9.5                     |
| Interne Wärmequellen $Q_I$  | $Q_S$ kWh/a  | $Q_I$ kWh/a                            | $Q_H$ kWh/a                                 |                         |
|   | 0.024 * 205 * 2.10 * 1083.1 = 11164                |  | = 11164                                     | 10.3                    |
| Nutzungsgrad Wärmegewinne $\eta_D$  | Freie Wärme $Q_F$                                  | $Q_S + Q_I$                            | $Q_H$ kWh/a                                 |                         |
|   |  | = 21474                                |   | 19.8                    |
| Wärmegewinne $Q_G$  | Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten                | $Q_F / Q_V$                            |   |                         |
|   |  | = 0.68                                 |   |                         |
|   | $(1 - (Q_F / Q_V)^5) / (1 - (Q_S / Q_V)^5) = 95\%$ |  |   |                         |
|   | $\eta_D * Q_V = 20377$                             |  |   | 18.8                    |
| Heizwärmebedarf $Q_H$   | $Q_V$ kWh/a  | $Q_H$ kWh/a                            |   |                         |
|   | $Q_V + Q_G = 11299$                                |  |   | 10.4                    |
|   | $Q_H$ kWh/a  | $Q_H$ kWh/a                            |   |                         |
|   |  |  |   |                         |

**Abbildung 19: Heizwärmebedarfsberechnung nach PHPP für Haus A des Passivhauses**

## **Passivhaus-Projektierung U-WERTE DER BAUTEILE**

**Abbildung 20:** Aufbauten und U-Werte der Regelbauteile (für Haus B, in Haus A weitgehend gleich) für Giebelwände, Dach und Bodenplatte (aus der PHPP-Dokumentation).

|  |                                  |                         |                            |                         |                            |                           |
|--|----------------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|
| <b>5</b>                                   | Dachterrasse                     |                         |                            |                         |                            |                           |
| Bauteil-Nr.                                | Bauteil-Bezeichnung              |                         |                            |                         |                            |                           |
|  | Wärmeübergangswiderstand [m²K/W] |                         |                            |                         |                            |                           |
|  | innen $R_{in}$ <b>0,13</b>       |                         |                            |                         |                            |                           |
|  | außen $R_{out}$ <b>0,04</b>      |                         |                            |                         |                            |                           |
| Teilfläche 1                               | k[W/mK]                          | Teilfläche 2 (optional) | k[W/mK]                    | Teilfläche 3 (optional) | k[W/mK]                    | Summe Breite              |
| 1. Beton                                   | <b>2,100</b>                     |                         |                            |                         |                            | Dicke [mm]                |
| 2. Dampfsperre                             |                                  |                         |                            |                         |                            | 250                       |
| 3. 1. Lage Wärmedämmung                    | <b>0,040</b>                     |                         |                            |                         |                            | 30                        |
| 4. 2. Lage Wärmedämmung                    | <b>0,030</b>                     |                         |                            |                         |                            | 100                       |
| 5. 3. Lage Wärmedämmung                    | <b>0,040</b>                     |                         |                            |                         |                            | 100                       |
| 6. Restaufbau ohne wärmetechnischen Belang |                                  |                         |                            |                         |                            | Summe                     |
|  |                                  |                         | Flächenanteil Teilfläche 2 |                         | Flächenanteil Teilfläche 3 | <b>48,0</b> mm            |
|  |                                  |                         |                            |                         |                            | U-Wert: <b>0,146</b> W/m² |

|  |                                  |                            |              |                            |         |                           |
|--|----------------------------------|----------------------------|--------------|----------------------------|---------|---------------------------|
| <b>6</b>                                   | Leichtbau- Fassade               |                            |              |                            |         |                           |
| Bauteil-Nr.                                | Bauteil-Bezeichnung              |                            |              |                            |         |                           |
|  | Wärmeübergangswiderstand [m²K/W] |                            |              |                            |         |                           |
|  | innen $R_{in}$ <b>0,13</b>       |                            |              |                            |         |                           |
|  | außen $R_{out}$ <b>0,04</b>      |                            |              |                            |         |                           |
| Teilfläche 1                               | k[W/mK]                          | Teilfläche 2 (optional)    | k[W/mK]      | Teilfläche 3 (optional)    | k[W/mK] | Summe Breite              |
| 1. Gipskarton                              | <b>0,305</b>                     |                            |              |                            |         | Dicke [mm]                |
| 2. OSB Platte                              | <b>0,130</b>                     |                            |              |                            |         | 13                        |
| 3. Mineralwolle MLG G35                    | <b>0,035</b>                     |                            | <b>0,130</b> |                            |         | 18                        |
| 4. Fermacellplatte                         | <b>0,360</b>                     |                            |              |                            |         | 140                       |
| 5. Styropor oder Steinwolle                | <b>0,040</b>                     |                            |              |                            |         | 15                        |
| 6. Restaufbau ohne wärmetechnischen Belang |                                  |                            |              |                            |         | 180                       |
|  |                                  | Flächenanteil Teilfläche 2 | <b>5,0%</b>  | Flächenanteil Teilfläche 3 |         | Summe                     |
|  |                                  |                            |              |                            |         | <b>36,6</b> mm            |
|  |                                  |                            |              |                            |         | U-Wert: <b>0,117</b> W/m² |

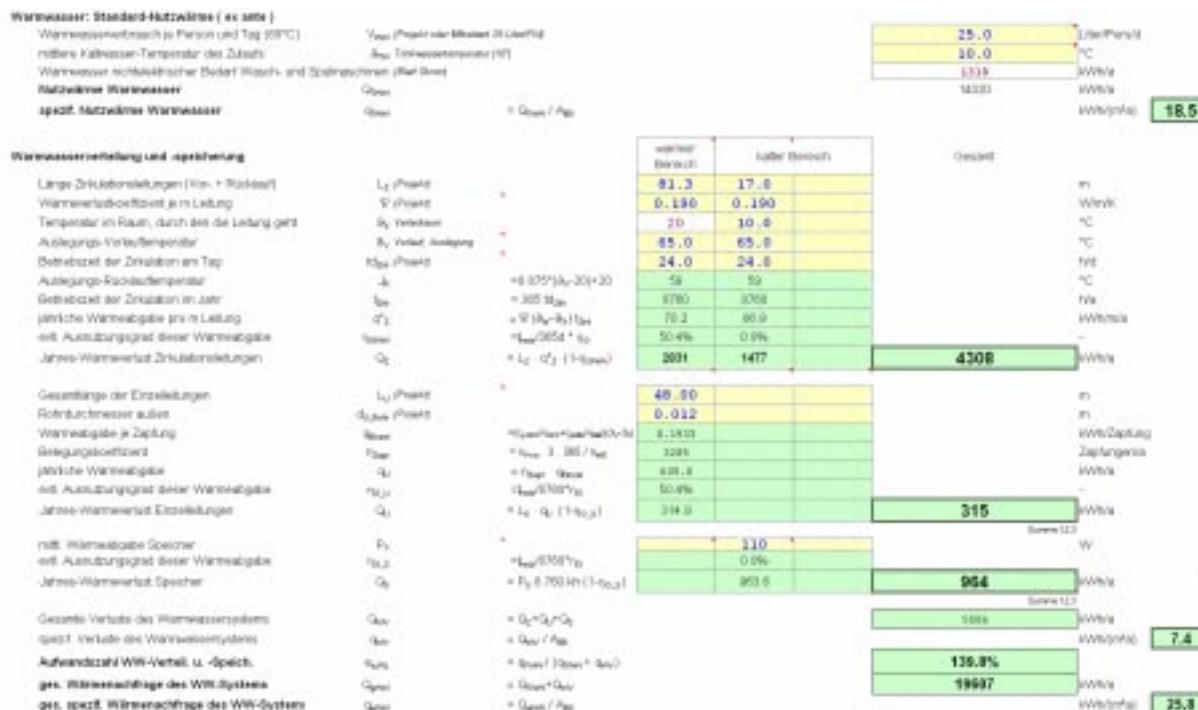
Abbildung 21: Aufbauten und U-Werte für die Dachterrasse und die Nord- und Südfassaden (aus der PHPP-Dokumentation).

Mit den Auslegungsluftmengen kann die Zuluft bei Begrenzung auf maximal 52 °C an der heißesten Stelle im Nachheizregister für Haus A 11,1 und für Haus B 11,6 W/(m<sup>2</sup> Wohnfläche) in die Räume einbringen. Dies ist etwas mehr als die Passivhausgrenze unter durchschnittlichen mitteleuropäischen Verhältnissen (10 W/m<sup>2</sup>). Die Wohnungen der innerstädtischen Bebauung bei St. Jakob sind insgesamt etwas dichter belegt als der Durchschnitt in Deutschland, wodurch sich günstigere Bedingungen für das Heizlastkriterium, jedoch auch schwieriger zu erfüllende Anforderungen für den Sommerfall und für die effiziente Nutzung von Haushaltsstrom einstellen.

## Passivhaus-Projektierung

## **REDUKTIONSFATOR SOLARE EINSTRAHLUNG, FENSTER-U-WERT**

**Abbildung 22: Dokumentation der Fensterabmessungen, Verglasungs- und Rahmenkennwerte in Haus B, Passivhaus bei St. Jakob in Frankfurt. Der mittlere Fenster-U-Wert beträgt unter Berücksichtigung der Einbauwärmebrückenbeiträge 0,89 W/(m<sup>2</sup>K).**



**Abbildung 23: Vorausberechnung des Warmwasser-Wärmebedarfs nach PHPP für Haus B des Passivhauses bei St. Jakob. Hier wurde die Standardannahme 25 Liter/Person/Tag bei 60°C verwendet, womit sich ein Nutzwärmebedarf von 18,5 kWh/(m²a) ergibt.**

## Passivhaus-Projektierung

### LÜFTUNGSDATEN

Objekt: Frankfurt St. Jakob; Block A

|  |                |      |                 |
|--|----------------|------|-----------------|
| Energiebezugsfläche $A_{EB}$                             | m <sup>2</sup> | 1083 | (Baut Objekt)   |
| Raumhöhe h:  | m              | 2.5  | (Baut Heizwert) |
| Raumluftvolumen Lüftung ( $A_{EB} \cdot h$ ) = $V_{BLT}$ | m <sup>3</sup> | 2708 | (Baut Heizwert) |

Auslegung Lüftungsanlage Standard-Betriebsart

|                       |                      |      |       |     |        |    |
|-----------------------|----------------------|------|-------|-----|--------|----|
| Personenbeliegung     | m <sup>2/P</sup>     | 28   |       |     |        |    |
| Anzahl Personen       | P                    | 39.0 |       |     |        |    |
| Frischluft pro Person | m <sup>3/(P·h)</sup> | 30   |       |     |        |    |
| Frischluftbedarf      | m <sup>3/h</sup>     | 1170 |       |     |        |    |
| Ablufträume           |                      |      | Küche | Bad | Dusche | WC |
| Anzahl                |                      |      | 11    | 11  |        | 9  |
| Abluftbedarf pro Raum | m <sup>3/h</sup>     | 60   |       | 40  | 20     | 20 |
| Abluftbedarf gesamt   | m <sup>3/h</sup>     | 1280 |       |     |        |    |

Auslegungsvolumenstrom (Maximum) m<sup>3/h</sup> 1280

Berechnung des mittleren Luftwechsels

| Betriebsarten | tagl. Betriebszeiten | Faktoren bezogl. Maximum | Luftvolumenstrom |   | Luftwechsel |
|---------------|----------------------|--------------------------|------------------|---|-------------|
|               |                      |                          | m <sup>3/h</sup> | 1h  |             |
| Maximum       | h/d                  | 1.00                     | 1280             |   | 0.47        |
| Standard      | 24.0                 | 0.77                     | 985              |   | 0.36        |
| Grundlüftung  |                      | 0.54                     | 689              |   | 0.25        |
| Minimum       |                      | 0.40                     | 512              |   | 0.19        |
| x Wohngebäude | Mittelwert           | 0.77                     | 985              |   | 0.36        |
|               |                      |                          |                  | mittlerer Luftaustausch (m <sup>3/h</sup> ) |             |
|               |                      |                          |                  | mittlerer Luftwechsel (1h)                  |             |

Infiltrationsluftwechsel nach DIN EN 832

| Windschutz-Koeffizienten e und f gemäß EN 832 |                           |   |       |      |                |
|---|---------------------------|---|-------|------|----------------|
| Koeffizient e für Abschirmungsklasse          | mehrere Einwirkungsseiten | eine Einwirkungssseite  |       |      |                |
| keine Abschirmung                             | 0.10                      | 0.03  |       |      |                |
| mäßige Abschirmung                            | 0.07                      | 0.02  |       |      |                |
| starke Abschirmung                            | 0.04                      | 0.01  |       |      |                |
| Koeffizient f                                 | 15                        | 20  |       |      |                |
|   | für Jahresbedarf          | für Heizlast  |       |      |                |
| Windschutzkoeffizient e                       | 0.07                      | 0.18  |       |      |                |
| Windschutzkoeffizient f                       | 15                        | 15  |       |      |                |
| Luftwechsel bei Druckfest                     | n <sub>50</sub>           | Netto-Luftvolumen für Druckfest V <sub>500</sub> m <sup>3</sup> |       |      |                |
|   | h/h                       | 0.30  | 0.30  | 2725 | m <sup>3</sup> |
| Art der Lüftungsanlage                        |                           |   |       |      |                |
| x Balancierte Passivhaustlüftung              | bitte ankreuzen           | bitte ankreuzen   |       |      |                |
| Reine Abluft                                  |                           |   |       |      |                |
| Abluftüberschuss                              |                           | 0.00  |       |      |                |
| Infiltrationsluftwechsel                      | n <sub>50,ref</sub>       | 0.00  |       |      |                |
|   | h/h                       | 0.021   | 0.053 |      |                |

Effektiver Wärmebereitstellungsgrad der Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung

|   |                     |       |   |
|---|---------------------|-------|---|
| x Gerät innerhalb der thermischen Hülle                     |                     |       |   |
| Gerät außerhalb der thermischen Hülle                       |                     |       |   |
| Wärmebereitstellungsgrad Gerät                              | n <sub>50,ref</sub> | 84%   |   |
| Leitwert Außenluftkanal                                     | W <sub>WPK</sub>    | 0.149 | Berechnung siehe Nebenrechnung                    |
| Länge des Außenluftkanals                                   | m                   | 33    |   |
| Leitwert Fortluftkanal                                      | W <sub>WPK</sub>    | 0.235 | Berechnung siehe Nebenrechnung                    |
| Länge des Fortluftkanals                                    | m                   | 22    | Innenraumtemperatur (°C)<br>mitl. Außentemp. (°C) |
| Temperatur des Aufstauraumes                                | °C                  | 20    | 26<br>4.4   |
| [nur eintragen falls Gerät außerhalb der thermischen Hülle] |                     |       |   |

Effektiver Wärmebereitstellungsgrad n<sub>50,eff</sub> 81%

Abbildung 24: Dokumentation der Auslegung Lüftung und der Lüftungstechnik an Hand des PHPP-Blattes von Haus A

## 4 Thermografische Aufnahmen

### 4.1 Außenthermographie

Im Zuge der Installation der Messtechnik wurden am 20.12.2002 thermografische Aufnahmen des Gebäudes gemacht. Die Außentemperatur lag bei -3°C, so dass aussagekräftige Bilder entstanden, welche die Funktion der thermischen Gebäudehülle überprüfen und dokumentieren. Abbildung 3 zeigt die Ansicht der Südfassade (Erschließungsseite) des Haus B, unterer Teil. Klar erkennbar sind die Fenster, wobei sowohl das Zentrum der Verglasungen als auch die Fensterrahmen eine gleichmäßige Oberflächentemperatur von um 0 °C aufweisen. Wärmebrücken beim Fenstereinbau sind konsequent vermieden worden; dagegen ist der Einfluss des Randverbundes der Dreischeibenverglasungen (trotz thermischer Trennung) als hellgrüner Streifen mit um 1,5 °C gut erkennbar; im oberen Bereich des Glasrandes steigen die Temperaturen infolge der Konvektionswalze des Argon-Gases in den Verglasungen sogar noch weiter auf bis ca. 2,5 °C an. Die Außenwandoberfläche hat in den unverschatteten Bereichen (ganz rechts) sowie im unteren Bereich des EG eine Temperatur von -2,0 °C und unterscheidet sich damit kaum von den Temperaturen frei stehender Objekte (z.B. der Betonsäule mit -2,2 °C). Je näher die Oberfläche an den Laubengängen liegt, desto stärker steigt die Temperatur aber an, z.B. auf -0,8 °C unter dem Laubengang im 3. OG. Dies ist nicht auf Wärmebrücken zurückzuführen (die Laubengänge sind frei vor die Fassade gestellt und nur an wenigen Punkten mit Edelstahlankern gegen Verkippen gesichert), sondern auf die Schattenwirkung der Laubengänge: Verschattet wird die Sicht zum kalten Nachthimmel und damit die langwellige Wärmeabstrahlung. Der Effekt kann, wenn auch in umgekehrter Auswirkung, auch im linken optischen Bild nachvollzogen werden: Hier erscheinen die Bereiche unter den Laubengängen dunkler. Alle beschriebenen Ergebnisse entsprechen den Erwartungen; die ausgezeichnete Wärmedämmung des Gebäudes ist auch in allen Details perfekt.



Abbildung 25: Südansicht Haus B, unterer Teil. Die Fassade weist eine einheitlich niedrige Oberflächentemperatur auf, die sich kaum von Gegenständen im Freien unterscheidet. Direkt unter den Laubengängen erscheint die Wandoberfläche etwas wärmer: Die Ursache dafür ist die hier verringerte Abstrahlung in den Nachthimmel. Fensterverglasung und Rahmen sind nur geringfügig wärmer als die Außenwandoberfläche. Der Randverbund ist jedoch gut erkennbar, insbesondere am oberen Glasrand, weil der Wärmebrückeneffekt hier durch die Konvektion im Glaszwischenraum verstärkt ist.

Abbildung 4 zeigt den oberen Teil der Südfassade von Haus B. Die Temperaturverteilung bzgl. der Außenbauteile wurde oben beschrieben. In beiden Bildern gut

erkennbar sind die Fortluftauslässe. Diese befinden sich im EG, im 2. OG und auf dem Dach. Die Außenwandoberfläche im obersten Geschoss ist gleichmäßig kälter, weil diese Oberfläche frei in den Himmel abstrahlen kann.

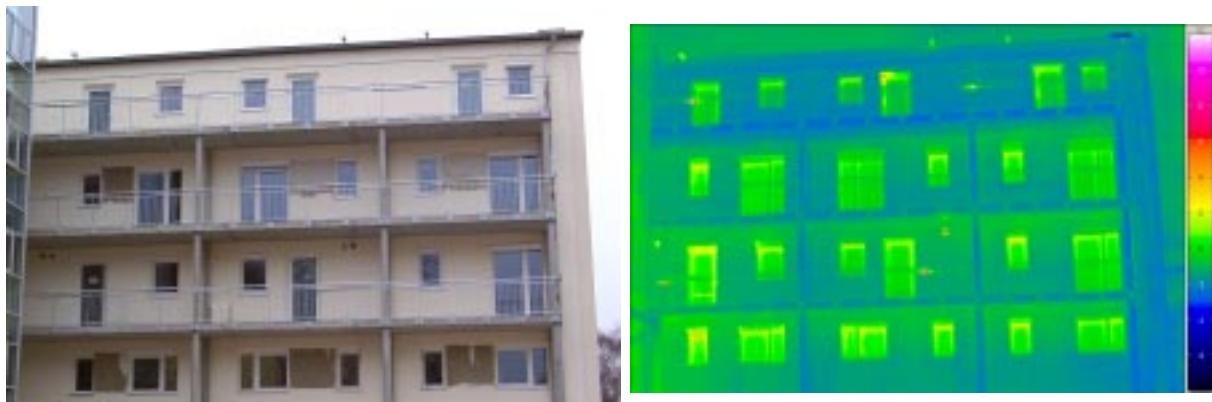


Abbildung 26: Südansicht Haus B, oberer Teil. Wie im vorausgehenden Bild sind die Fortluftauslässe der Wärmerückgewinnungsanlagen gut erkennbar. Die Fortluft hat zwar einen großen Teil ihrer Wärme an die Zuluft abgegeben, ist aber immer noch deutlich wärmer als die Außenluft. Da das oberste Geschoss gegen den Nachthimmel nicht abgeschirmt ist, sind die Oberflächentemperaturen dort etwas geringer.

In Abbildung 7 wird der Kontrast zwischen den geringen Wärmeverlusten des Passivhauses (links im Bild) und einem Altbau des Hospitals (rechts im Bild) deutlich. Die ohnehin schlecht gedämmte Außenwand des Altbauwerks weist klar erkennbare Wärmebrücken in Höhe der Betondecken aus (Oberflächentemperatur bis über 6°C), die Verglasungsüberflächen erreichen bis 8 °C, teilweise sind Fenster auch gekippt.

Auch die Südfassade von Haus A des Passivhauses zeigt wie erwartet ein gleichmäßig kühles Bild (Abbildung 28). Außenwandoberfläche und Fenster verhalten sich wie bereits beschrieben. Hier gibt es als Verschattungselement nur einen (wieder getrennt aufgestellten) Balkon im 1. OG. Am Altbau im Hintergrund (links) sind die wesentlich schlechter wärmegedämmten Fenster erkennbar.

Das oberste Geschoss springt hinter eine Terrasse zurück; die auf der Terrasse angebrachten Sichtschutzpaneelle verdecken auf der Aufnahme teilweise die Fenster. Ansonsten sind die Paneele, die komplett im Freien stehen, auf der thermographischen Aufnahme nicht von der Außenwandoberfläche zu unterscheiden - die Temperaturen liegen um -2,9 °C. Andeutungsweise kann man die Metallstäbe der Brüstungen erkennen (vor allem, wenn sie vor den Fenstern liegen). Der Temperaturunterschied zur Außenwand ist vor allem durch eine geringere Emissivität der Metalloberfläche bedingt.



Abbildung 27: Links Haus B des gut gedämmten Passivhauses (mit Außenwandoberflächen um  $-2^{\circ}\text{C}$  (blau), Fensteroberflächen um  $0^{\circ}\text{C}$ ), rechts eine konventionelle Außenwand des Hospitals mit Wandoberflächentemperaturen bis  $6^{\circ}\text{C}$  und Fensteroberflächen über  $12^{\circ}\text{C}$ .

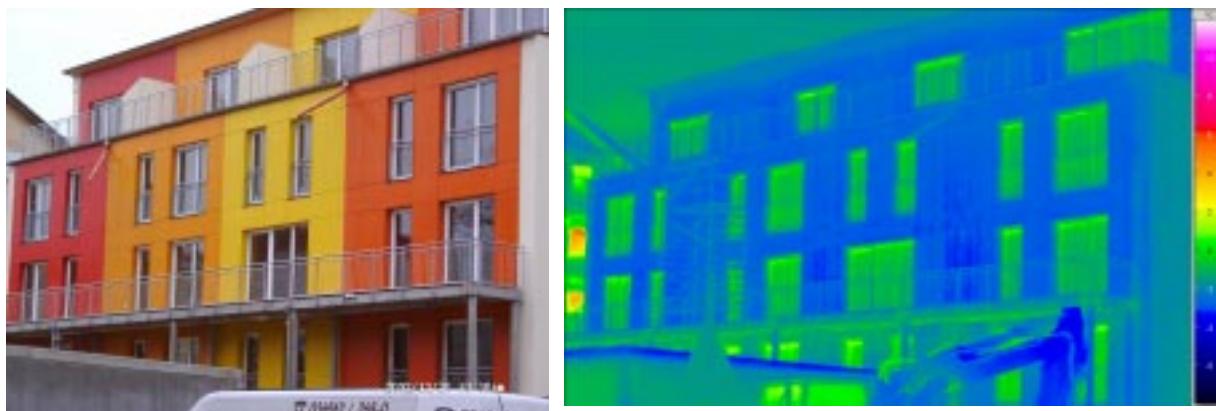


Abbildung 28: Südfassade von Haus A. Die Oberflächentemperatur der gedämmten Außenwand im obersten Geschoss ist nicht von der Temperatur der frei stehenden Sichtschutzwände unterscheidbar.

Abbildung 29 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt aus der Südfassade von Haus A. Die leicht höheren Wärmeverluste im Bereich des Verglasungs-Randverbundes sind hier gut erkennbar, andeutungsweise kann man auch den provisorischen Wasserspeier an der Dachrinne der Terrasse erkennen.



Abbildung 29: Vergrößerter Ausschnitt der Thermographie der Südfassade von Haus A. Allein der hellgrüne Streifen des Glasrandverbundes weist auf die dort höheren Wärmeverluste hin, die im Fenster-U-Wert bereits berücksichtigt wurden. Gut erkennbar sind die Metallstangen der Balkonbrüstungen.

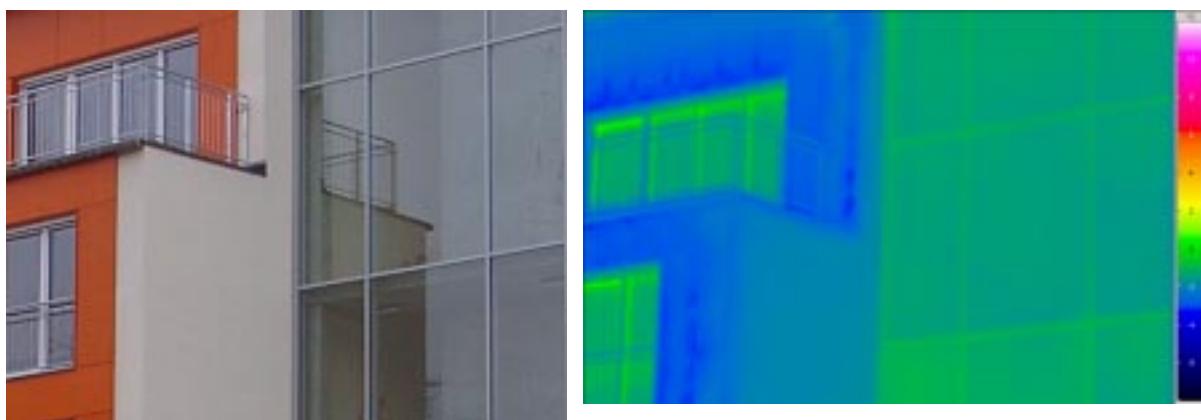


Abbildung 30: 2. und 3. OG von Haus A, Ostteil sowie das rechts angrenzende Treppenhaus. Das Treppenhaus ist unbeheizt und hat nur Zweischeiben-Verglasung.

In Abbildung 30 sieht man einen Teil der Giebelfassade (nach Osten) von Haus A und die Verglasung des angrenzenden unbeheizten Treppenhauses. Wegen der Solareinstrahlung am Vortag und der thermischen Masse der Betoneinbauten ist das Treppenhaus trotz fehlender Heizung etwas wärmer als Außenluft in den frühen Morgenstunden. Wegen der schlechter dämmenden Verglasung erscheinen die Oberflächen etwa gleich warm wie die der Fenster in Haus A.

Abbildung 31 zeigt ein Detail im EG (Eingangsbereich) des Haus B. Deutlich ist der Fortluftauslass mit Temperaturen um 5 °C zu erkennen, während sich an der Frischluftansaugung nur eine sehr schwache ringförmige Struktur (auf Grund einer geringfügigen Wärmebrückenwirkung des Rohres etwa 1 K höhere Temperatur) zeigt.

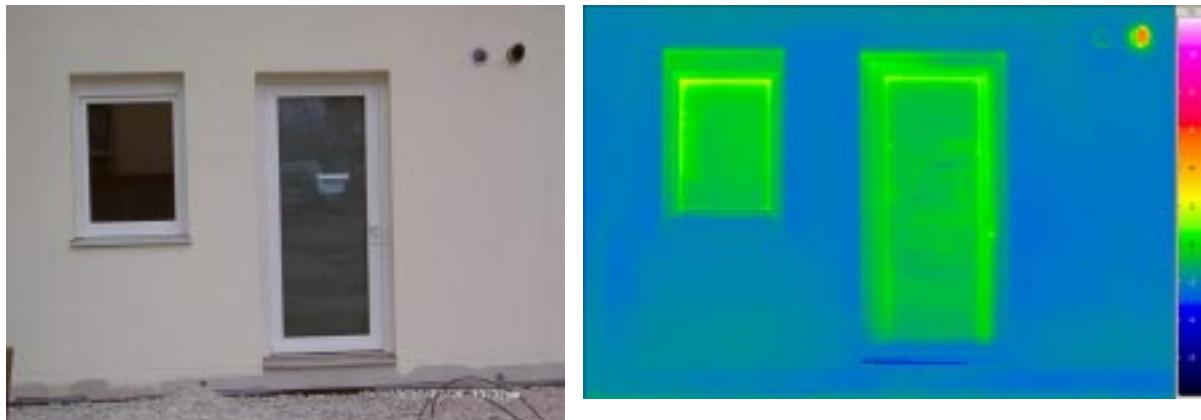


Abbildung 31: Eingangsbereich im EG von Haus B. In der rechten oberen Ecke links das Frischluftansauggitter (Temperatur wie Fassade), rechts der Fortluftausblasstutzen - die Fortluft ist mit um 5 °C etwas wärmer als die Außenluft.

Die Besonderheit von Haus B ist, dass die Wohnfassaden mit den großen Fenstern und die Balkone, Austritte und Terrassen nach Norden orientiert wurden. Die Ursache dafür liegt in der unverbauten Aussicht von diesem Gebäudeteil auf den Feldberg im Taunus. Die hohe wärmetechnische Qualität von Passivhaus-Bauteilen erlaubt eine solche, sehr weitgehende Abweichung von der "reinen Lehre" bei passiv solarer Orientierung. Dieser Bericht zeigt, dass bei guter Planung und entsprechender Ausführung eine solche nahezu unüberbietbar ungünstige Orientierung noch als Passivhaus funktionieren kann. Gegenwärtig setzt dies allerdings noch ein günstiges A/V-Verhältnis voraus. Abbildung 32 bis Abbildung 34 zeigen Details der Nordfassade von Haus B. Wieder sind die Wärmeverluste erwartungsgemäß sehr gering, es zeigen sich die bereits zuvor beschriebenen Einzelheiten. Die "helle Struktur" im unteren Ecke der linken Verglasung in Abbildung 32 ist das Spiegelbild des Thermographen! Da Glasoberflächen auch im IR-Bereich zu etwa 16% spiegelnd reflektieren, muss man bei der Interpretation von Thermographiebildern, die Verglasungen enthalten, etwas vorsichtig sein.

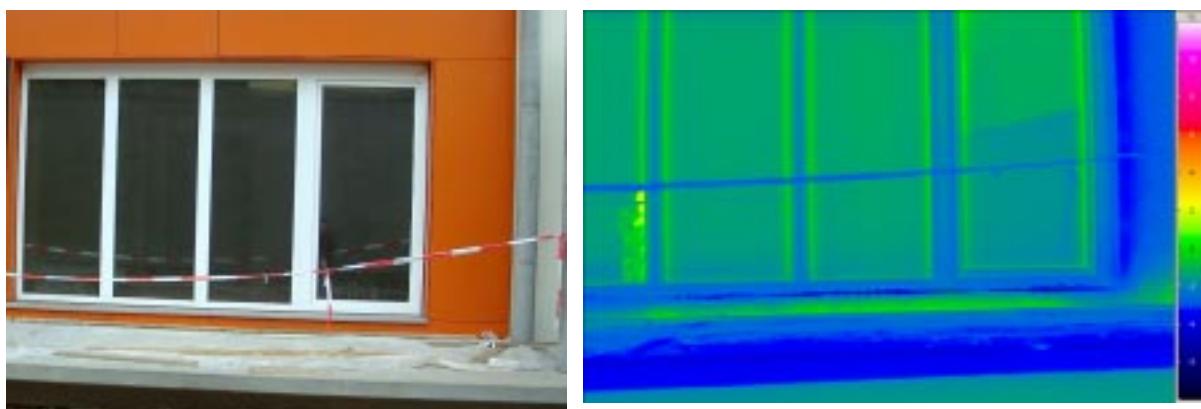


Abbildung 32: Terrasse EG auf der Nordseite von Haus B.

Auffällig ist das kurzzeitig geöffnete Fenster in Abbildung 33.



Abbildung 33: EG und 1. OG des Mittelteils von Haus B, Nordfassade. Das Fenster oben links war während der Thermographieaufnahme kurz geöffnet, jemand schaut heraus.

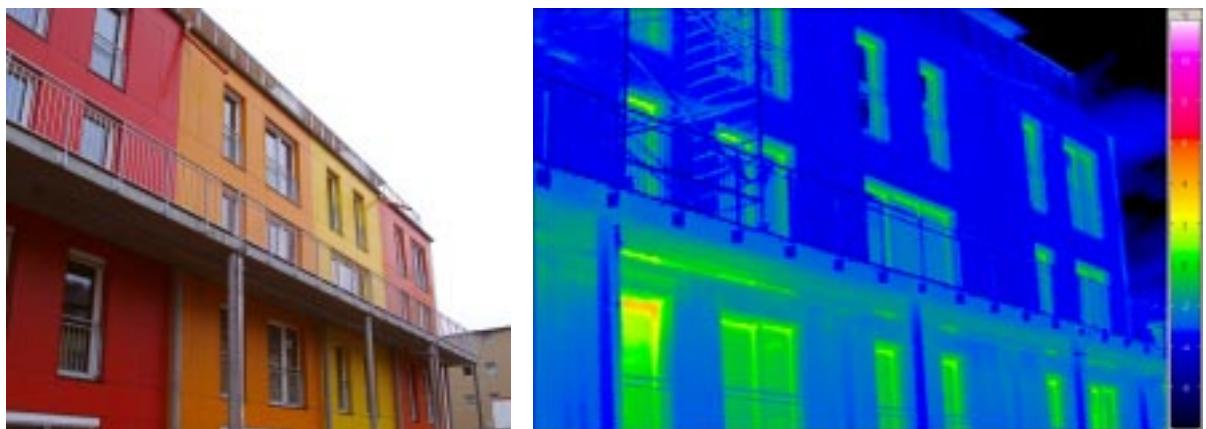


Abbildung 34: Nordfassade oben von Haus B. Das eben noch offene Fenster ist wieder geschlossen, eine leichte Temperaturfahne am Balkon darüber ist noch erkennbar.

Die Westgiebelwand des Passivhaus-Hauses B hat keine Fenster; dementsprechend gleichmäßig erscheint die Temperaturverteilung auf der Oberfläche, die aus dem Verputz eines Wärmedämmverbundsystems besteht (Abbildung 35). In höherer Temperaturauflösung zeigt sich, dass die Oberflächentemperatur am rechten Anschluss zum Gebäudeteil A leicht ansteigt, weil die dort liegenden Oberflächen mit zunehmendem Raumwinkel langwellige Strahlung mit diesem Gebäude und nicht mehr mit dem Himmel austauschen.

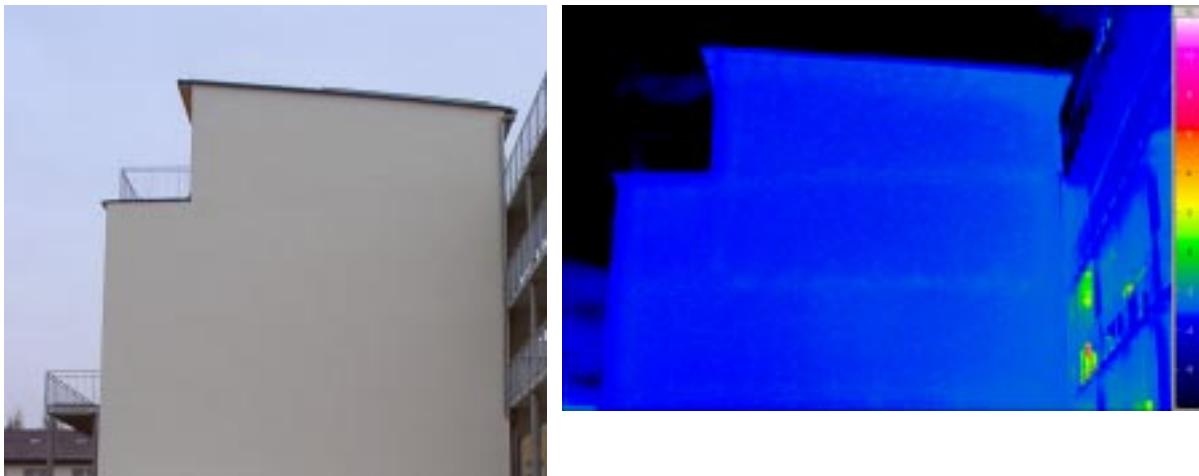


Abbildung 35: Die fensterlose Westgiebelwand von Haus B erscheint im Thermographiebild gleichmäßig blau, dies entspricht einer Oberflächentemperatur von um  $-3^{\circ}\text{C}$ . Die Wand ist als Betonwand mit 40 cm Wärmedämmverbundsystem ausgeführt.

Die Erschließung des Gebäudeteils A erfolgt über Laubengänge von der Nordseite. Die Nordfassade von Gebäudeteil A zeigt Abbildung 36. Wie schon bei den entsprechenden Bildern aus Haus B gibt es auch hier keine Auffälligkeiten. Bei der geländerparallelen etwa 1 m langen warmen Struktur am Geländer des obersten Laubengangs knapp unter dem Dachüberstand handelt es sich um eine Leuchte; auch am Geländer des unteren Laubengangs sind auf den Thermographieaufnahmen zwei Leuchten zu erkennen.

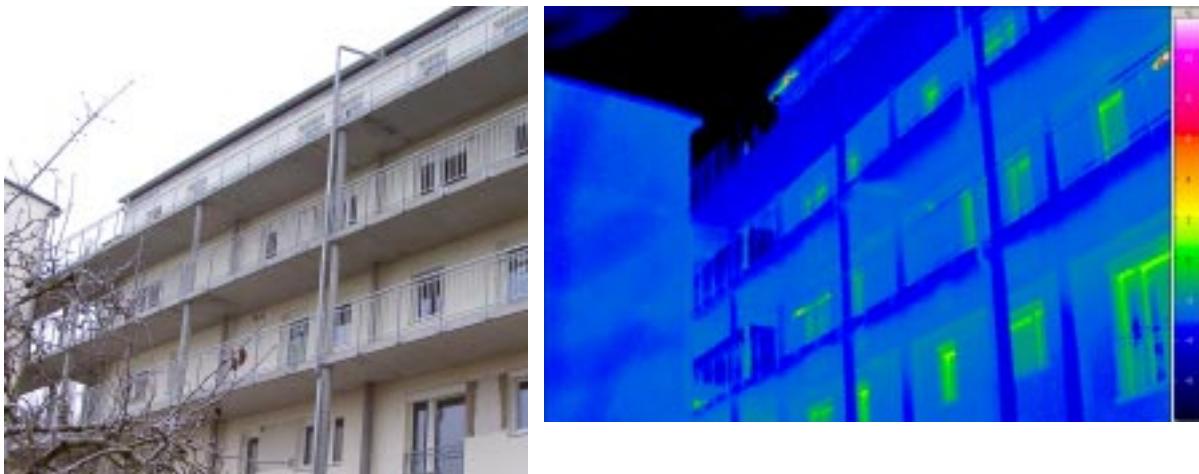


Abbildung 36: Nordfassade von Haus A mit der Laubengangerschließung. Die Thermographie zeigt keine Auffälligkeiten.

## 4.2 Thermographie im Heizungskeller

Das Gasbrennwertgerät weist (obwohl im Betrieb) nur Oberflächentemperaturen bis  $18^{\circ}\text{C}$  auf (Abbildung 37). Heiß sind dagegen die noch ungedämmten Heizwasser führenden Leitungen im unter Bereich (bis  $64^{\circ}\text{C}$ ), die Anschlussleitung zum Druckausgleichsgefäß und das Abgasrohr (bis  $39^{\circ}\text{C}$ ). Die ungedämmten Leitungen und die noch nicht gedämmten Anschlussverschraubungen zum Pufferspeicher weisen deutlich erkennbar hohe Wärmeverluste auf. Entlang der Speicherver schraubungen ist auf der Oberfläche der Speicherwärmung eine Konvektionsfahne erkennbar. Der Pufferspeicher hat im Bereich seiner regulären Dämmung nur eine

Oberflächentemperatur von etwa 15 °C. Die hier noch ungedämmten Leitungen sind später nachgedämmt worden. Dies erweist sich als sehr wichtig für einen vertretbar geringen Wärmeverlust der Haustechnik.

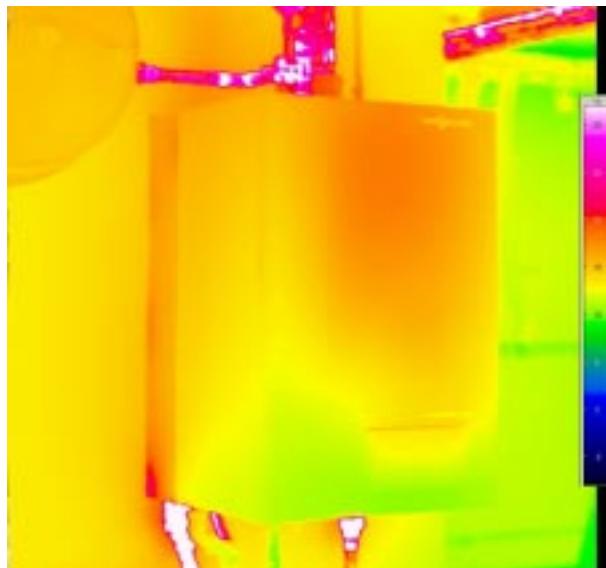


Abbildung 37: Das verwendete Gas-Brennwertgerät; es versorgt beide Gebäudeteile mit Heizwärme und Warmwasser; gut erkennbar sind die Anschlüsse der noch ungedämmten, warmen Heizwärmeleitungen sowie oben das Leitungsstück zum Druckausgleichsgefäß und die Abgasleitung.

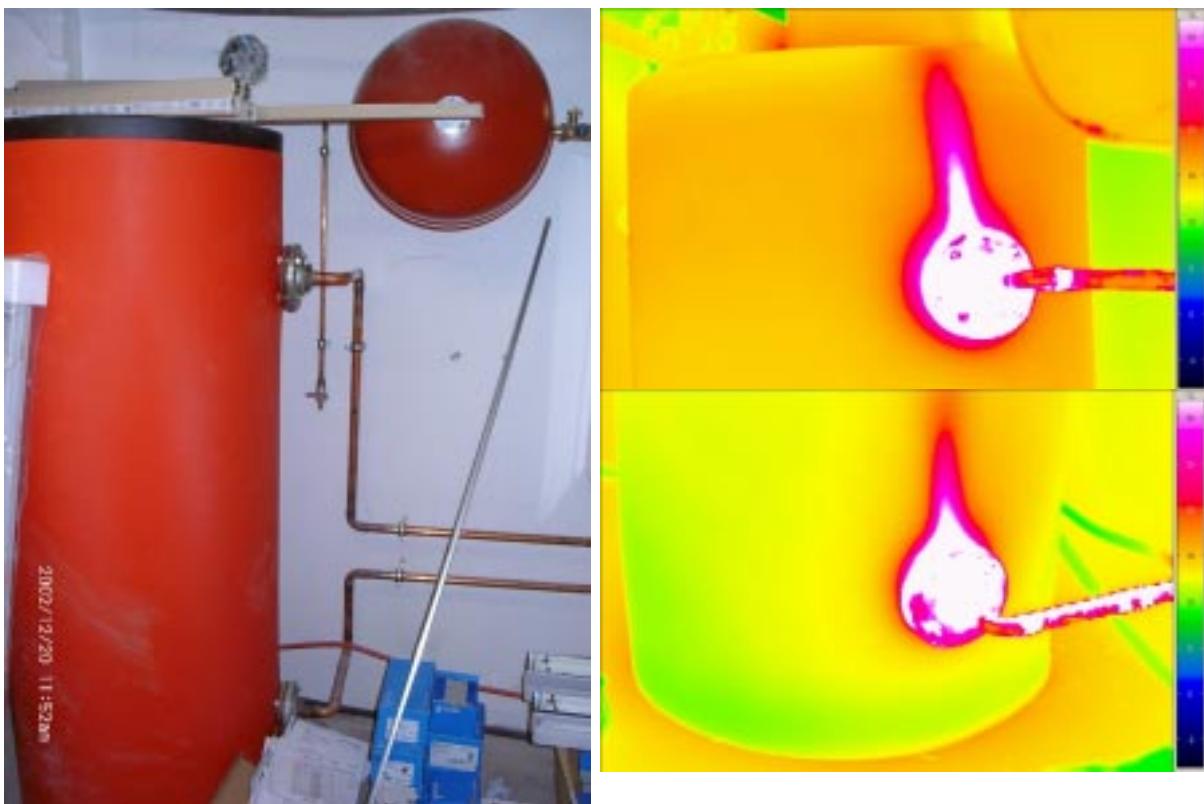


Abbildung 38: Der Pufferspeicher mit noch ungedämmten Anschlussmanschetten und Heizwärmeleitungen vom Gasbrennwertgerät; wie im Bilderbuch sind die Konvektionsfahnen über den Heizleitungsverschraubungen erkennbar. Diese Details wurden später korrekt nachgedämmt.

In Abbildung 39 ist die Pumpengruppe, die in ein vorgefertigtes Dämmelement eingesetzt ist, kontrastreich gegenüber den noch ungedämmten Leitungen und den metallischen Absperrschiebern zu erkennen. Die Pumpengehäuse dürfen wegen der Elektroniksteuerung nicht gedämmt werden und geben daher kräftig Wärme ab (vgl. [AkkP 28] für Vorschläge zur weiterführenden technischen Entwicklung).



Abbildung 39: Pumpengruppe und noch ungedämmte Rohrleitungen im Heizungskeller

### 4.3 Innenthermographie

Zu einem späteren Zeitpunkt wurden auch thermographische Aufnahmen in Innenräumen des Gebäudes gemacht. Diese bestätigen die Erwartung, dass die Raumumfassungsflächen eines supergedämmten Gebäudes ein gleichmäßiges Temperaturen mit nur wenig Unterschied zur Raumlufttemperatur annehmen. Die Außenlufttemperatur betrug während der Aufnahmen etwa 7 °C. In den Räumen herrschte zu Anfang etwa 21 °C Lufttemperatur, am Ende bis 1,5 K höher.

Abbildung 40 zeigt den Fußpunkt eines Südfensters im Wohnzimmer. Es gibt keinerlei Auffälligkeiten, insbesondere keine Undichtheit; die Fußbodenoberfläche liegt um 20°C; Spiegelbilder des Fensters sind auf dem Boden erkennbar. Deutlich ist auch der Temperaturrückgang durch den Randverbund am Glasrand zu sehen, der trotz thermisch getrennter Abstandhalter immer noch bedeutend (aber unkritisch bei ca. 17,3 °C) ist. Die Temperatur der Verglasungsüberfläche beträgt etwa 19,2 °C. Bei den während der Messung gegebenen Randbedingungen resultiert daraus eine nur extrem geringe Strahlungstemperatursymmetrie, durch welche die Bedingungen der ISO 7730 weit übererfüllt werden. Bei extrem niedrigen Außentemperaturen kann die Temperatur der Verglasungsüberfläche auch auf Werte von um 17°C abfallen. Dies würde auch unmittelbar vor dem Fenster immer noch der ASHRAE-Komfort-Klasse A entsprechen [ASHRAE 55/2003]. Auch die Oberflächentemperatur des Bodens ist für hohe thermische Behaglichkeit (Schuhe tragende Personen) ausreichend (ASHRAE-Komfort-Klasse A bei 19 bis 29°C eingehalten). Allerdings ist der vorhandene Parkettfußboden wegen des gegenüber Teppichböden höheren Wärmeeindringkoeffizienten nicht geeignet für barfußgehen oder nur Strümpfe bzw. Schuhe ohne feste Sohle.

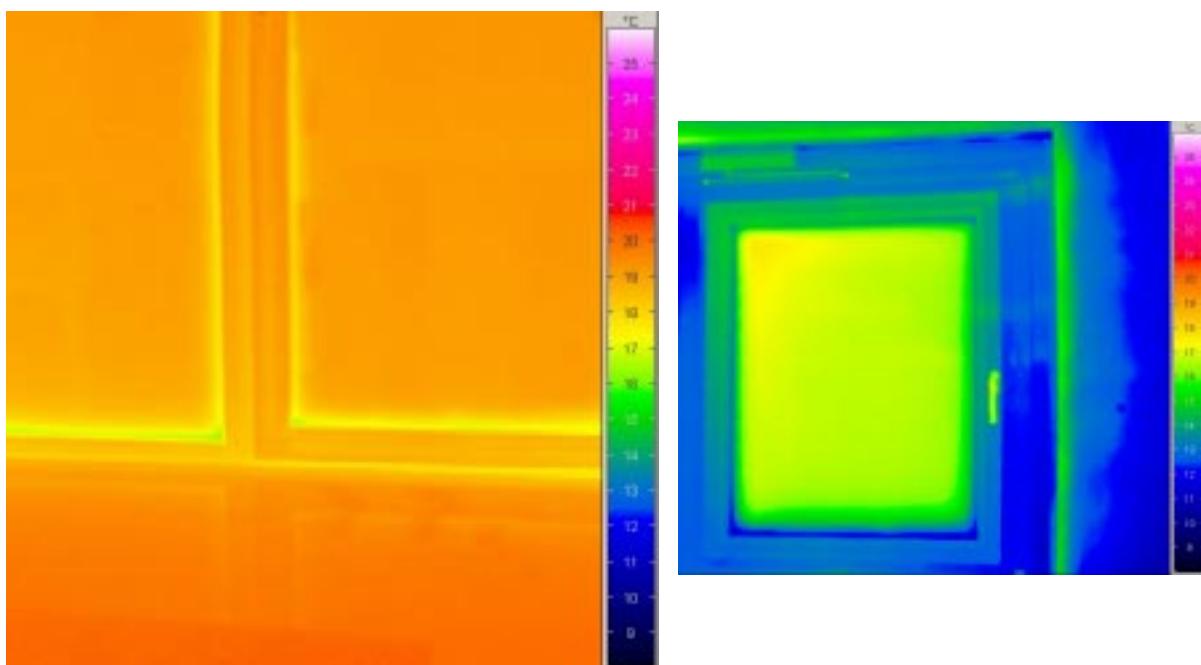


Abbildung 40: Innenthermographie einer Balkon-Fenstertür aus dem Passivhaus St. Jacob (links), rechts im Vergleich dazu die Thermographie einer konventionellen (neuen) Fenstertür in einem Bürogebäude mit nicht speziell gedämmtem Rahmen und Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung.

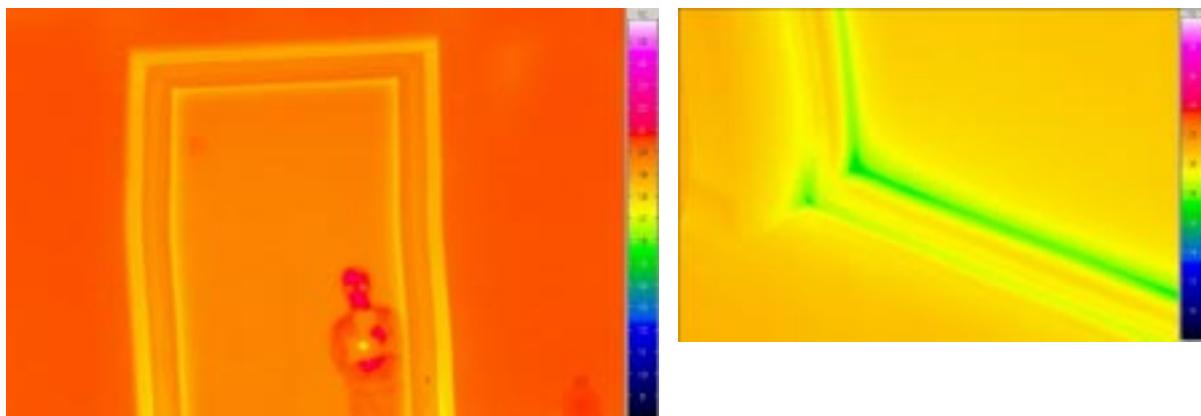


Abbildung 41: Fenstertür (mit Spiegelbild des Thermographen), Fensterecke.

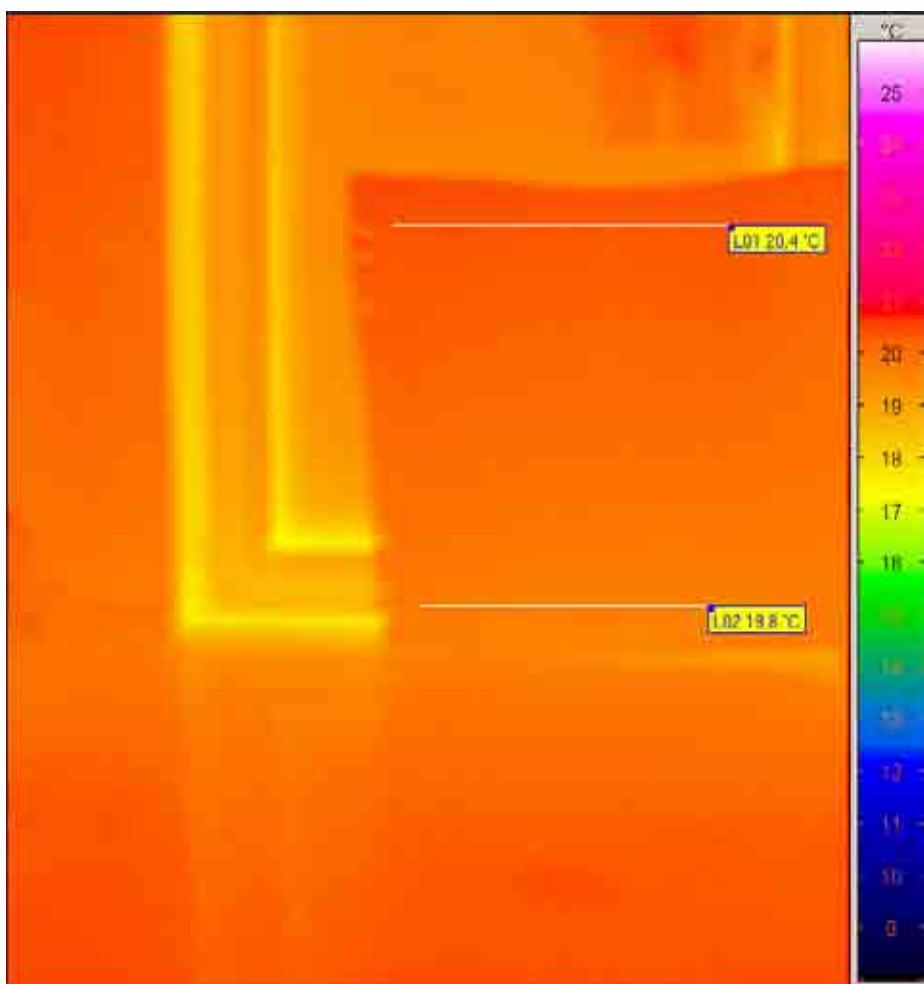


Abbildung 42: Messung der Lufttemperaturschichtung 30 cm vor einer Fenstertür.

Zur weiteren Behaglichkeitsbeurteilung wurde eine Messung der Temperaturschichtung vorgenommen: Ein Blatt Papier (Höhe 0,67 m) wurde frei im Raum, 30 cm vor einer Fenstertür aufgestellt. Die Thermographie erfolgt etwa 10 min nach der Aufstellung, nachdem sich ein vollständiges Temperaturgleichgewicht eingestellt hat. Die Temperaturverteilung auf dem Blatt ist sehr gleichmäßig. Es zeichnen sich keine Strömungspfade ab. Bei genauer Analyse kann man eine geringe Temperaturstratifikation messen. In Bodennähe beträgt die Lufttemperatur 19,8 °C, während sie in 0,67 m Höhe 20,4 °C beträgt: das stellt einen Temperaturgradienten von etwa 0,9

K/m dar. Für die strenge ASHRAE-Komfortklasse A darf der Gradient maximal 2 K/m sein, das PHI empfiehlt weniger als 1,5 K/m. Alle diese Werte werden im betreffenden Raum mit Abstand eingehalten und bleiben es auch, wenn niedrigere Außentemperaturen vorliegen.

Die aus der Weitwurfdüse unter der Decke ausströmende Frischluft dient zugleich der Heizung der Wohnräume. Am Auslassgitter wurde unter den hier vorliegenden Verhältnissen eine maximale Temperatur von 37 °C gemessen. Die Luft strömt wegen des Coanda-Effektes [AkkP 17] noch einige Zeit in einer Schicht von ca. 20 cm Höhe unter der Decke entlang; dabei vermischt sie sich mit der Raumluft und Geschwindigkeit und Temperaturen gleicht sich rasch an. Die Anfänge der Strömungsfahnen sind auf der Thermographie der Decke noch erkennbar (herzförmige Struktur, Temperaturen um 25°C). Die Temperatur der ungestörten Decke beträgt im Mittel etwa 21,3 °C.

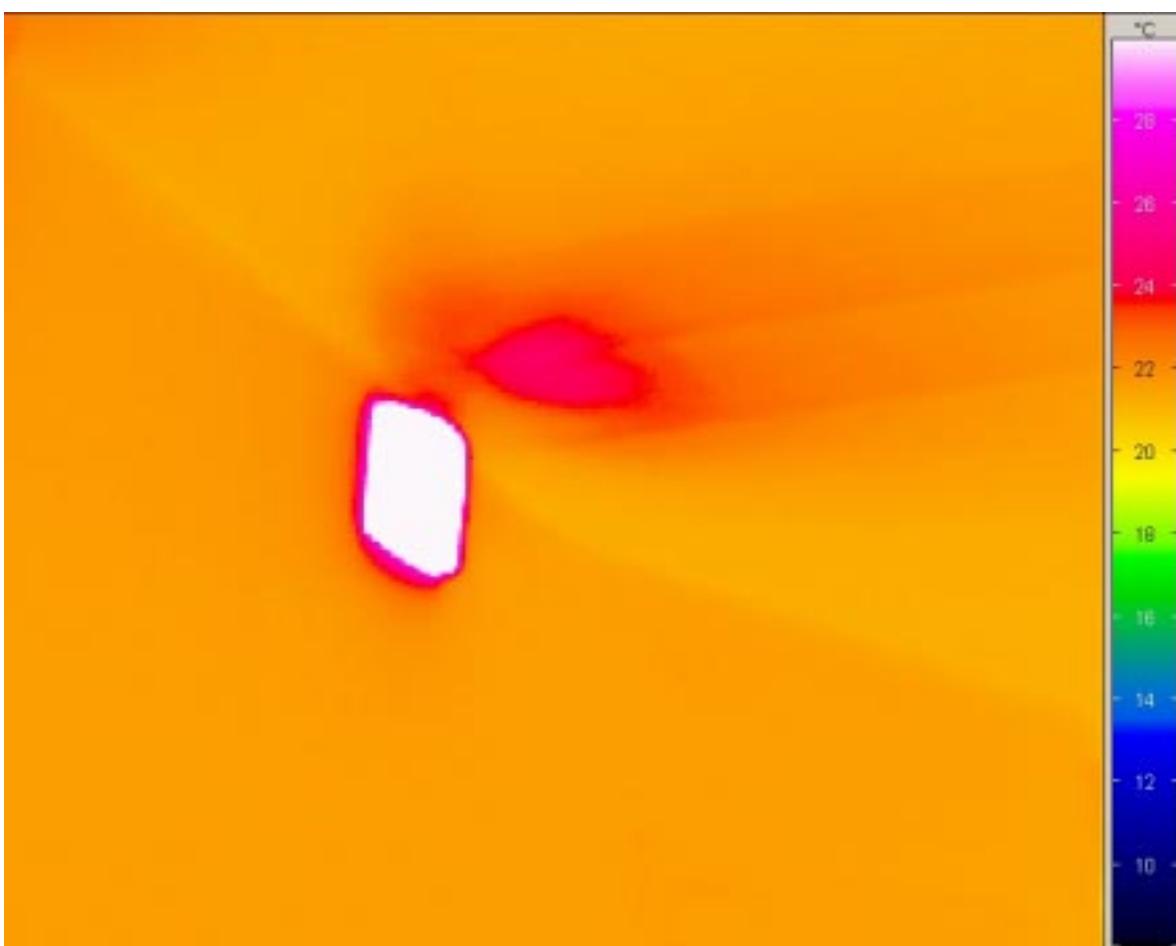


Abbildung 43: Zuluftauslass mit Weitwurfdüse. Temperatur im Zentrum bis 37 °C (Temperatur der austretenden Luft), Strömungsfahne an der Decke erkennbar (bis 25 °C).

Über die Thermographie hinaus wurden mit dem Messgerät: AIRFLOW TA5 Anemometer folgende Luftgeschwindigkeiten gemessen:

|  |                    |
|--|--------------------|
| Unmittelbar am Auslass:                  | bis zu 0,7 m/s;    |
| 50 cm vom Auslass 10 cm unter der Decke: | bis 0,25 m/s;      |
| am Boden in Knöchelhöhe:                 | 0,00 bis 0,06 m/s; |
| am Boden in 20 cm Höhe:                  | 0,01 bis 0,06 m/s; |

Nirgendwo im Raum lag die Luftgeschwindigkeit über 0,07 m/s, außer im Luftstrom bis 1 m Abstand vom Auslass unter der Decke (bis 10 cm unter der Decke), unter oder über Lampen und über Personen. Es handelt sich um außerordentliche geringe Luftgeschwindigkeiten im Aufenthaltsbereich. Nach ISO 7730 wären bis zu 0,12 m/s zulässig, allerdings bei den dort definierten Kriterien mit bis zu 15% Unzufriedenen. Unter den gemessenen Bedingungen ergeben sich nach dem "Draft-Risk"-Berechnungsalgorithmus der ISO 7730 weniger als 5% Unzufriedene. Niedrigere Luftgeschwindigkeiten sind nach Einschätzung der Autoren in einem bewohnten Raum unter üblichen Wohnraumbedingungen mit bauüblichen Mitteln nicht zu erreichen.

Zusammenfassend zeigen die Innenthermographie und die Messungen zum Raumluftfeld, dass in den Räumen des Passivhauses St. Jacob ausgezeichnete Behaglichkeitsbedingungen vorliegen. Die Temperaturunterschiede bei der Strahlungstemperatur, die Luftsichtung und das Luftbewegungsfeld führen auf Werte, die gut innerhalb der Bestbewertung (Klasse A nach ASHREA 55) liegen. Die Aufnahmen geben auch keinerlei Hinweise auf Wärmebrücken oder störende Undichtheiten in der Gebäudehülle. Die thermische Hülle der Passivhäuser in St. Jacob entspricht danach genau den planmäßigen Erwartungen.

## 5 Das Messkonzept

Ziel des Messkonzepts ist die vollständige Erfassung der Heizwärme, des Strom- und Warmwasserverbrauchs in beiden Gebäuden. Mit den Daten kann eine Erfolgskontrolle bezüglich der projektierten Bedarfsdaten durchgeführt werden. Es wird überprüft, ob das Passivhauskonzept auch unter den Umständen der überwiegenden Nordausrichtung der Hauptverglasungsanteile realisierbar ist.

Der Gesamtwärmeverbrauch für Heizung und Warmwasser wird jeweils für Haus A und Haus B separat gemessen und dient zur Bestimmung der Endenergieverbräuche. Im Technikkeller wird zur Bestimmung der Primärenergieverbräuche der zentrale Gaszähler ebenfalls erfasst. Zur Berechnung der wohnungsweisen Verbräuche sind alle 19 Wohnungen jeweils mit einem Wärmemengenzähler für den Wärmeverbrauch (Heizung und Warmwasser) sowie mit Kalt- und Warmwassierzählern ausgestattet. In den 8 Wohnungen von Gebäude B ist zusätzlich jeweils ein Wärmezähler zur Erfassung nur des Heizwärmeverbrauchs installiert. Auf diese Weise können für dieses Gebäude mit überwiegend nordorientierten Verglasungen differenzierte Aussagen über die Verbräuche gemacht werden.

Die wohnungsweise Erfassung und Auswertung der Raumtemperaturen im Haus B ermöglicht eine Aussage zum Temperaturniveau, zum thermischen Verhalten und zur Behaglichkeit in den Wohnungen. Darüber hinaus lassen sich Aussagen über die Verbrauchsstreuung und das Kopplungsverhalten einzelner Wohneinheiten machen. Typisch für den Geschosswohnungsbau sind thermische Kopplungseffekte zwischen einzelnen Wohneinheiten über die Geschossdecken und Trennwände. Verbrauchsunterschiede werden daher sowohl durch die gewählte Raumtemperatur der betreffenden Wohneinheit als auch der benachbarten Wohneinheiten bestimmt.

Aus der Temperaturstatistik in den Sommermonaten wird die Übertemperaturhäufigkeit bestimmt. Die Einhaltung der Behaglichkeitskriterien wird damit überprüft und Empfehlungen für das Lüftungsverhalten und die Verschattung abgeleitet.

Für die Untersuchung der Heizwärmeverbräuche werden die Messdaten aus der zweiten Heizperiode (Winter 2003/2004) des Gebäudes herangezogen, um Anlaufeffekte (Austrocknung, Einfahren der Haustechnik, unvollständiger Bezug der Wohneinheiten, etc.) möglichst ausschließen zu können. Zur Erfassung der Klimadaten ist auf dem Dach von Gebäude A eine Wetterstation montiert.

## 6 Aufbau der Messtechnik

Das Messkonzept basiert auf einem M-Bus-System (gem. DIN EN 1434-3), welches für den Datenaustausch im Bereich der Zählerauslesung bereits weite Verbreitung gefunden hat. Zahlreiche Zusatzkomponenten wie z. B. Analog-Digitalwandler ermöglichen den Aufbau komplexer Messsysteme mit geringem Verdrahtungsaufwand. Es handelt sich dabei um ein Zweidrahtsystem, welches mit mehreren hundert Metern Leitungslänge betrieben werden und beliebig verzweigt werden kann. Im Projekt „Wohnen bei St. Jakob“ bot sich dieses System nicht nur aufgrund der hohen Leitungslängen zwischen den Messwertaufnehmern in Haus A und B (insgesamt ca. 755 m) und der verzweigten Topologie der Verdrahtung (Zählerplätze, Wohneinheiten) an, sondern auch wegen der Möglichkeit zur kompletten Auslesung

der Wärmemengenzähler (Temperaturen, Volumenströme und Wärmeströme). Mit diesem Bus-System 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 Zählerwerte mit dem Vorteil der Datensicherheit, denn auch nach temporärem Ausfall des M-Bus-Netzes werden die tatsächlichen Zählerstände übermittelt; jeder Zähler arbeitet nämlich autonom weiter. Die Messstellen werden in 15-minütigen Intervallen mit mindestens 2400 Baud abgefragt und die Daten auf einem zentralen PC zur Datenerfassung abgespeichert. Dieser ist mit einer ISDN-Karte zur Datenfernübertragung und regelmäßigen Kontrolle der Messdaten ausgestattet.

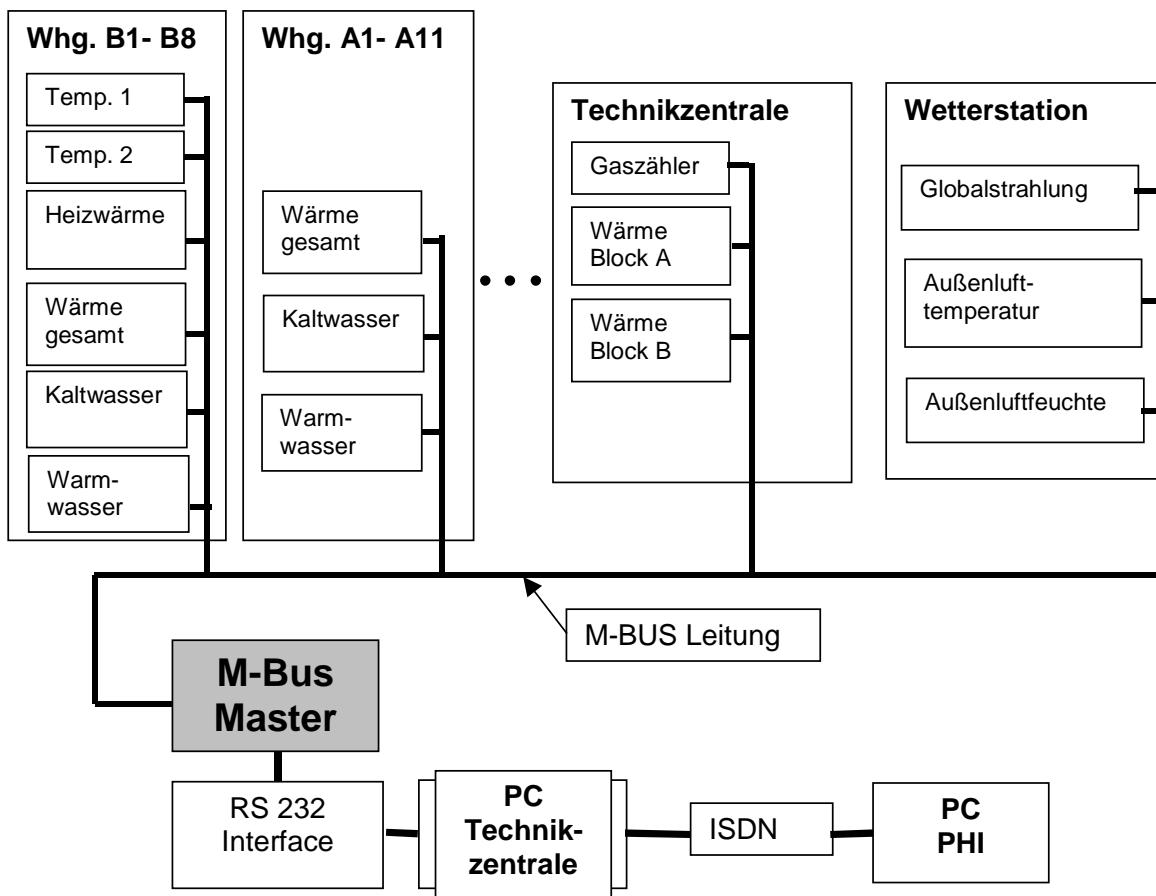


Abbildung 44: M-Bus - Schema der Messdatenerfassung mit Fernübertragung im Passivhaus „St. Jakob“.



**Abbildung 45: Messtechnik-PC im Technikkeller mit dem Schaltschrank der Wetterstation, Spannungsversorgung der Sensoren und dem M-Bus-Master.**

Für die M-Bus-Kommunikation wurden zwei Hauptstränge des Buskabels vom Technikraum unter dem Treppenhausturm ausgehend für Haus A und Haus B verlegt. Diese binden sowohl die Wärmemengenzähler und Wasseruhren als auch die Temperaturmessstellen der Wohneinheiten an. Zusätzlich wurden Stichleitungen von der zentralen Datenerfassung zu den Hauptwärmemengenzählern und zum Gaszähler verlegt. Für die Messung der Klimadaten wurde auf dem Dach von Gebäude A ein Wettermast installiert. Von dort wurde ein gemeinsames Sensorkabel bis zum Schaltkasten im Technikraum geführt.

Der M-Bus versorgt fast alle Einzelgeräte mit der Betriebsspannung von 42 V, die Versorgung ist kurzschlussfest. Die Temperatursensoren werden über zwei weitere separate Litzen von einem zentralen Netzteil mit 15 V Betriebsspannung versorgt.

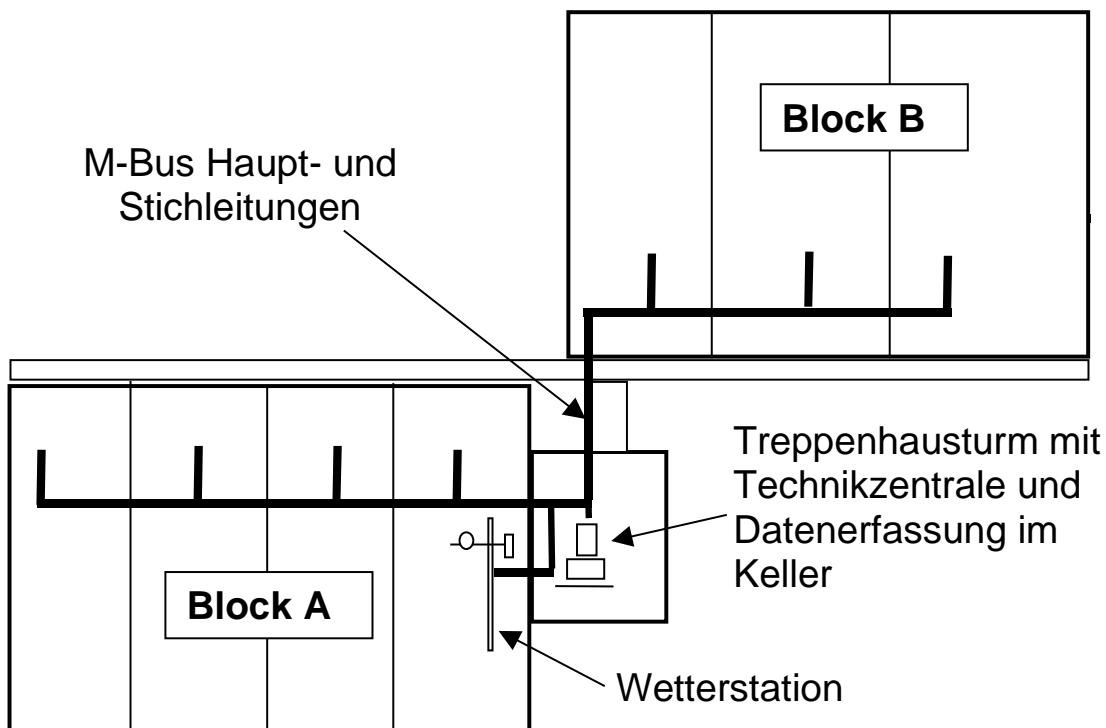


Abbildung 46: Schema der M-Bus Anbindung Haus A und B, des Technikraumes und der Wetterstation

## 7 Lage und Bezeichnung der Wohneinheiten

Sowohl in Haus A als auch in Haus B befinden sich im EG und 1. OG zweigeschossige Maisonette-Wohnungen (von unten nach oben begehbar), im 2. OG eingeschossige Wohnungen sowie im DG und 3. OG zweigeschossige Maisonette-Wohnungen (von oben nach unten begehbar).

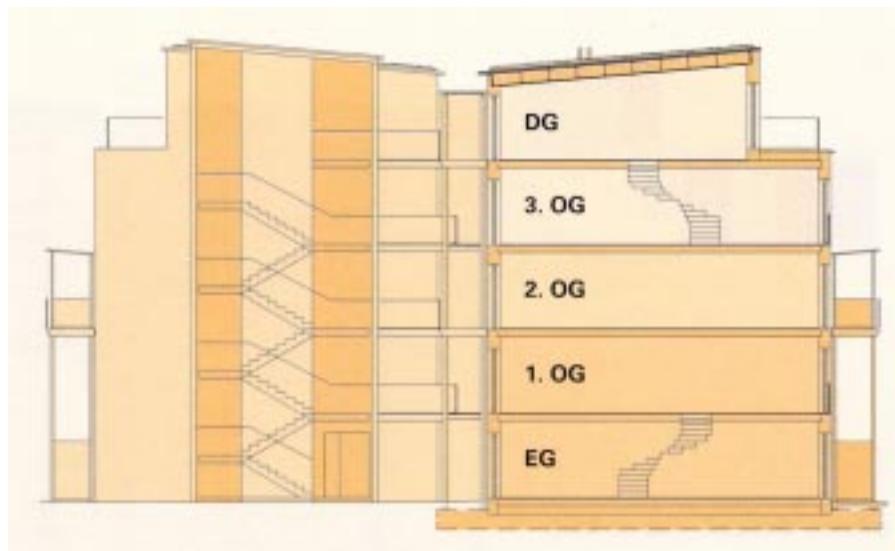


Abbildung 47: Schnitt durch Haus B (Quelle: Broschüre „Wohnen bei St. Jakob“, innotecda 2002)



Abbildung 48: Süd-Ost Ansicht von Haus A (links) und Haus B (rechts). Quelle: Broschüre „Wohnen bei St. Jakob“, innotecda 2002

Die Bezeichnung der Wohnungen und damit auch der Messstellen richtet sich nach den Architektenbezeichnungen der Wohneinheiten, die in Abbildung 49 schematisch wiedergegeben ist.

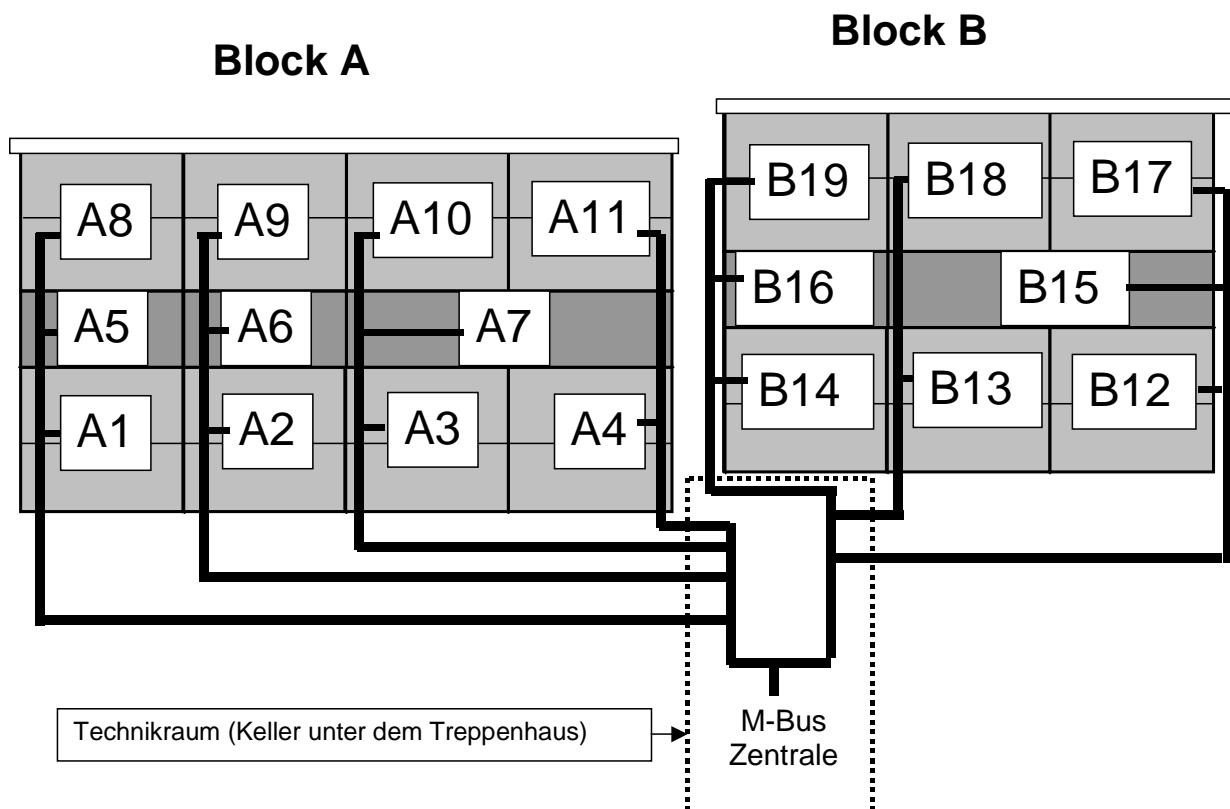


Abbildung 49: Bezeichnungen der Wohneinheiten und M-Bus-Topologie, Ansicht von Süd

## 8 Lage und Spezifikation der Messstellen

### 8.1 Zentrale Hauptzählereinrichtungen

Die Wärmebereitstellung sowohl für Heizung als auch für Warmwasser erfolgt für beide Blöcke über einen zentralen Brennwertgaskessel (Fa. Viessmann, Typ VITODENS). Der gesamte Gasverbrauch wird über einen speziellen temperaturkompensierten Balgengaszhäler mit Impulsausgang erfasst. Nach der Aufteilung des HauptwärmeverSORGungsstranges für Haus A und Haus B werden die Teilwärmemengen jeweils durch Wärmemengenzähler bestimmt (Ultraschall-Wärmezähler Fa. AAB, Typ F95, Qn 3,5). Sowohl in Haus A als auch in Haus B kann damit über die Differenz zwischen diesen Teilwärmemengen und der Summe der Wärmeverbräuche der jeweiligen Wohneinheiten auf die Wärmeabgabe der Verteilung geschlossen werden. Erfahrungsgemäß ist dieser Differenzbetrag mit Unsicherheiten behaftet, weil Haupt- und Unterzähler unterschiedliche Anlaufvolumenströme aufweisen.

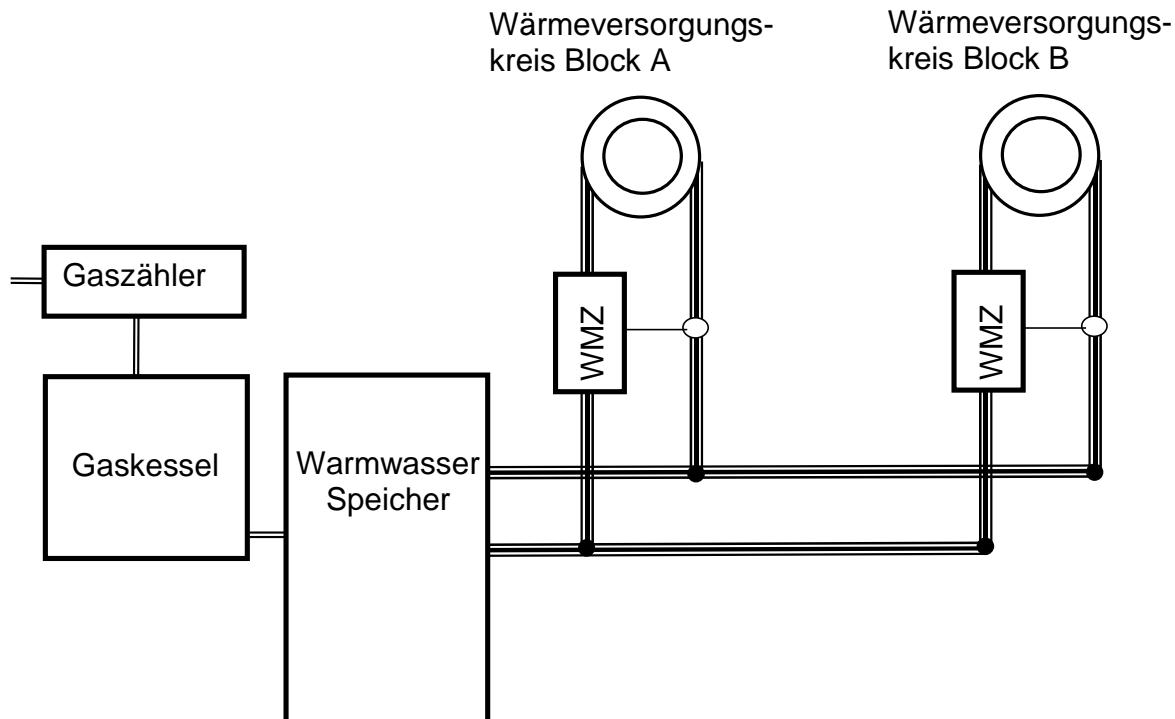


Abbildung 50: Strangschemata der Gas- und Wärmeversorgung mit Zählereinrichtungen



Abbildung 51: Wandhängender Gas-Brennwertkessel und dahinter der Warmwasserspeicher zur zentralen Wärmeversorgung (Heizung/Warmwasser) im Keller.



Abbildung 52: Die Rechenwerke der beiden zentralen Wärmemengenzähler für Haus A und B (links) und der Gaszähler mit Niederfrequenz-Impulsgeber (rechts)

## 8.2 Stromzähler

Die Stromzähler aller Wohneinheiten sind im Technikraum (Kellerraum unter dem Treppenhaus) zentral untergebracht und werden monatlich abgelesen. Diese erfassen jeweils die Summe aus Haushaltsstrom und Hilfsstrom für die Lüftungsanlagen. Die übrigen Hilfs- und Allgemeinstromverbräuche (Heizungspumpen, Beleuchtung, Fahrstuhl etc.) der beiden Wohnblöcke werden mit einem separaten Zähler erfasst.

Von einigen dezentralen Lüftungsgeräten in den Wohnungen wurde die Leistungsaufnahme separat durch Stichproben ermittelt. Der Stromverbrauch von zwei Lüftungsanlagen wurde über den Zeitraum von jeweils 217 Tagen mit Wirkleistungszählern gesondert erfasst.



Abbildung 53: Zählerfeld mit Haushalts-Stromzählern im Technikkeller

### 8.3 Zählereinrichtungen in den einzelnen Wohneinheiten

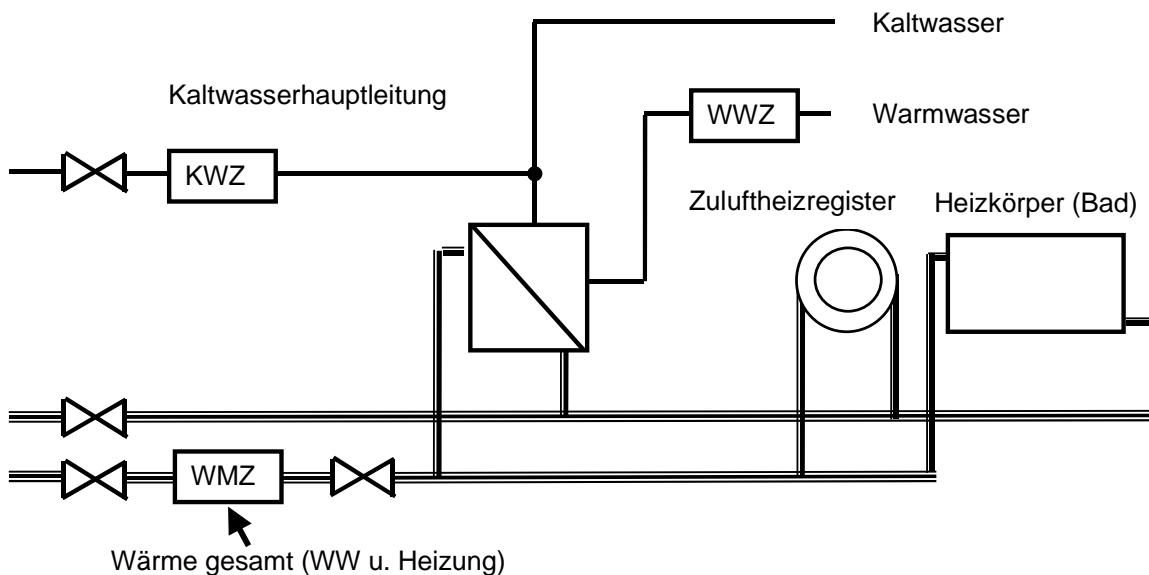


Abbildung 54: Zählereinrichtungen in den Wohnungen von Haus A

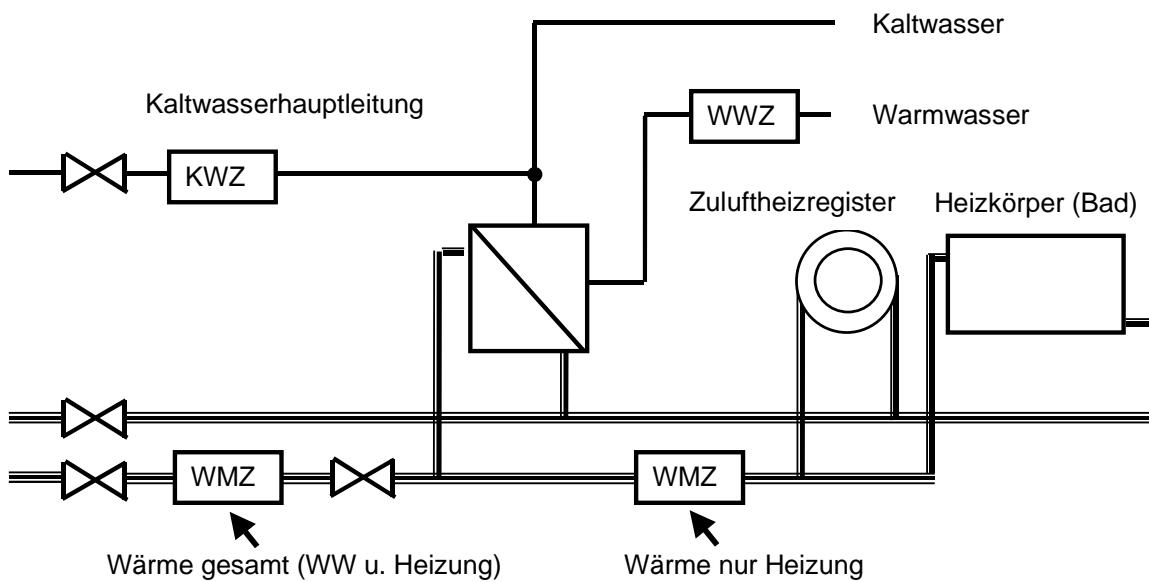


Abbildung 55: Zählereinrichtungen in den Wohnungen von Haus B

Die Zählereinrichtungen in den Wohnungen setzen sich zusammen aus den ohnehin für die Abrechnung von Warmwasser- und Heizwärmeverbrauch notwendigen Hauptzählern sowie zusätzlichen Zählern. Aus Kostengründen wurde nur Haus B mit zusätzlichen Wärmemengenzählern für die Heizung ausgestattet. Der Differenzbetrag zwischen dem Zählgewert des Gesamtwärmemengenzählers der Wohnung und dem Zählgewert des Wärmemengenzählers für die Heizwärme entspricht dem Wärmeverbrauch für die Warmwasserbereitung.

Im Haus A wurden nur die Hauptzähler für Kaltwasser- und Gesamtwärmeverbrauch sowie ein zusätzlicher Warmwasserzähler vorgesehen. Mit dieser wesentlich kostengünstigeren Variante ist die Bestimmung des reinen Heizwärmeverbrauchs nur mit einer gewissen Unsicherheit zu ermitteln. Eine Überprüfung der Einhaltung der projektierten Werte ist jedoch möglich.

Die verwendeten Zählertypen sind Abschnitt 9 zu entnehmen.

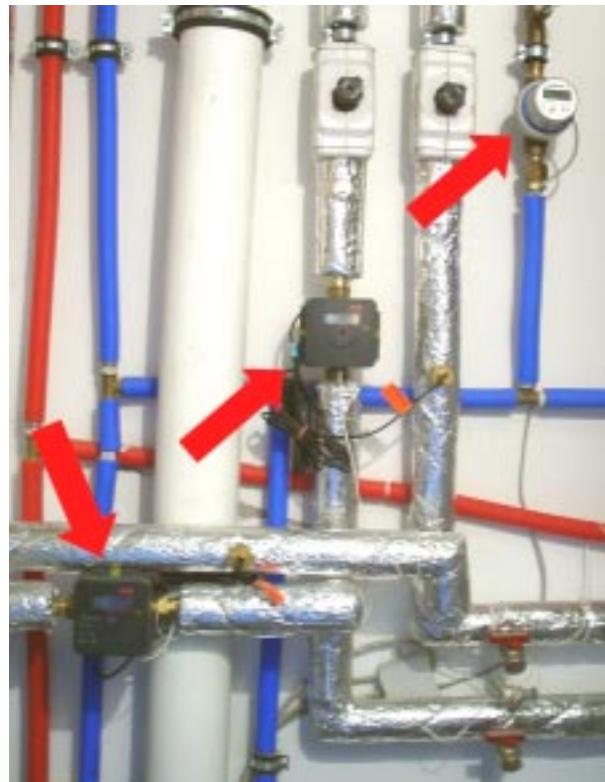


Abbildung 56: Konsole mit Plattenwärmübertrager in einer Wohnung zur Warmwasserbereitung (links) und die beiden Wärmemengenzähler und der Kaltwasserzähler in einer Wohnung von Haus B.

## 8.4 Raumlufttemperaturen

Zur Überprüfung der Behaglichkeit wurden im Haus B in allen Wohneinheiten jeweils zwei Raumtemperaturen mit M-Bus Temperatursensoren des Herstellers DENEG gemessen. Die M-Bus-Temperatursensoren sind eine Sonderentwicklung nach Vorgaben des Passivhaus Instituts. Als Mess-Sensor werden Pt 100 Widerstände der höchsten Genauigkeitsklasse (Klasse: 1/10 DIN) verwendet. Die Temperatursensoren geben alle 6,4 Minuten Mittelwerttemperaturen aus.

Durch die Anordnung von zwei Sensoren in jeder Wohnung kann in den Maisonettewohnungen auch die Temperaturverteilung über die beiden Stockwerke überprüft werden. Nur eine Wohnung bildet aufgrund ihrer Größe mit nur einer Temperatormessstelle eine Ausnahme. Die Sensoren sind überwiegend im Wohn-Esszimmerbereich und in den Fluren (Kernzone der Wohnungen) positioniert. Die

Lage der Temperatursensoren können den Grundrissen im Anhang entnommen werden.



Abbildung 57: M-Bus-Temperatursensor mit Pt 100 Widerstand mit und ohne Deckel und Blende.

#### 8.4.1 Kalibrierung der Temperatursensoren

Die Herstellerfirma der Temperatursensoren konnte die Kalibrierung nicht in der notwendigen Genauigkeit durchführen. Daher wurden alle Sensoren im PHI kalibriert. Die Kalibrierung wurde in einem Kellerraum mit nur sehr geringen tageszeitlichen Temperaturschwankungen und minimierten Störeinflüssen (z.B. Wärmestrahlung) durchgeführt. Um die spätere Einbausituation der Sensoren möglichst realitätsnah abzubilden, wurden die Module jeweils in einen Kalksandstein eingebaut und dort kalibriert. Zur Messung der Referenz-Temperatur wurde ein Laborgerät (ALMEMO Typ 3290-8 Fa. Ahlborn) mit eingesetzt. Mit der Kalibrierung wurden bei den 16 Sensoren eine Restabweichung von - 0,67 bis + 0,14 K realisiert. Der Mittelwert der Abweichungen lag bei - 0,34 K. Die verbleibenden Abweichungen konnten mit vertretbarem Zeitaufwand nicht verringert werden. Für die regelmäßige Online-Kontrolle der Messdaten konnten die Temperaturmesswerte gut überprüft werden. Nach den eigentlichen Kalibrierungen wurde jedes Modul einzeln im eingebauten Zustand in dem KS-Stein nochmals vermessen um die oben genannten Abweichungen vom Referenzwert festzustellen. Diese wurden bei der Messdatenumwandlung verwendet.



Abbildung 58: Temperaturmodul im eingebauten Zustand in einem KS-Stein für die Kalibrierung.

Um die Temperaturmessung im Objekt bei realen Bedingungen zu überprüfen, wurden stichprobenartig in drei Wohnungen Kontrollmessungen durchgeführt. Für die Referenztemperatur wurde ein Handmessgerät (ALMEMO Typ 2290-8, Fa. Ahlborn) verwendet. Die Messungen wurden jeweils mindestens 24 Stunden durchgeführt und mit den Messwerten der M-Bus Temperaturmessung verglichen.



Abbildung 59: Kalibriermessung in einer Wohnung

## 8.5 Feuchtemessung

Aus Kostengründen konnten keine Raumluft-Feuchtemessungen in den Wohnungen über die Messdatenerfassungsanlage realisiert werden. Um dennoch Aussagen über die Raumluftfeuchten in den Wohnungen machen zu können, wurden die 8 Wohnungen in Haus B vom PHI mit separaten Datenloggern (Fa. HOBO, Typ H8 Pro-Serie, Genauigkeit der Feuchtemessung  $\pm 3\%$ ) ausgestattet. Die Daten-Logger wurden am 6. Februar 2002 an die Bewohner verteilt. Nach zwei Zwischenauslesungen wurden die Geräte im Oktober 2004 wieder eingesammelt und die gesamten Daten ausgewertet. Die Logger haben die Temperatur- und Feuchtedaten im 15-Minuten Raster aufgezeichnet.

## 8.6 Wetterstation

Zur Erfassung der lokalen Klimadaten wurde eine Wetterstation, bestehend aus Solarimeter (CM 11, Fa. Kipp & Zonen) zur Messung der horizontalen Globalstrahlung sowie ein strahlungs- und wettergeschützter Außentemperatur- und Feuchtesensor aufgebaut (Fa. Kipp & Zonen). Da es sich um einen Mehrgeschoszbau im städtischen Umfeld handelt, gab es keine Möglichkeit zur Errichtung eines Wettermastes an repräsentativer Stelle innerhalb der Außenanlagen. Daher wurde auf dem Dach des Gebäudes (Haus A) ein Wettermast zur Befestigung der genannten Sensoren angebracht. Die zugehörigen Messverstärker, Blitzschutzeinrichtungen und die Spannungsversorgung sowie die M-Bus-Module mit A/D-Wandler sind in einem separaten Schaltschrank in der Technikzentrale im Keller installiert.



Abbildung 60: Wetterstation mit den Sensoren für Temperaturen, Feuchte und Strahlungsmessung auf dem Dach von Haus B.

## 9 Tabellarische Übersicht Messgeräte

Im Rahmen des Messprojektes werden die im letzten Abschnitt erläuterten stationär montierten Messstellen in 15-Minuten Intervallen über die Busleitungen ausgelesen und abgespeichert. Darüber hinaus werden für detailliertere Untersuchungen zusätzlich Datenlogger (Messgrößen: Temperatur und Feuchte) für eine bestimmte Zeit im Gebäude deponiert. Die folgenden Tabellen geben eine Übersicht über sämtliche Messstellen.

| 1. Wetterstation                  |                            |                  |                    |                 |
|-----------------------------------|----------------------------|------------------|--------------------|-----------------|
| Erfassung<br>(M-Bus/<br>Ablesung) | Messgröße                  | Messort          | Spezifikation      | Messgenauigkeit |
| M                                 | Außenlufttemperatur        | Dach, Wettermast | PT 100, Fa. Thies  | Klasse B        |
| M                                 | Außenluftfeuchte           | Dach, Wettermast | FE 09/1, Fa. Thies | ±2% r. F.       |
| M                                 | Globalstrahlung horizontal | Dach, Wettermast | Pyranometer CM 11  | ±1%             |

Tabelle 7: Meteorologische Daten

| 2. Wohnungsspezifische Messungen Haus A (11 Wohneinheiten) |                                     |                        |  |                                   |
|--|-------------------------------------|------------------------|--|-----------------------------------|
| Erfassung<br>(M-Bus/<br>Ablesung)                          | Messgröße                           | Messort                | Spezifikation  | Messgenauigkeit                   |
| A  | Haushaltsstrom + Hilfsstrom Lüftung | Technikzentrale Keller | Wirkstromzähler  | Zählerklasse 2, Verkehrsfehler 3% |
| M  | Warmwasserzähler                    | A1 bis A11             | Fa. Hydrometer, Typ: Scampy, Q <sub>n</sub> 1,5        | Metrol. Klasse C                  |
| M  | Kaltwasserzähler                    | A1 bis A11             | PolluMUK-E/SPX, Fa. Spanner Pollux, Q <sub>n</sub> 1,5 | Metrol. Klasse C                  |
| M  | Wärmemenge Heizung+ WW              | A1 bis A11             | Ultraschall-WMZ Typ: F95, Fa. ABB, Q <sub>n</sub> 1,5  | Metrol. Klasse C                  |

Tabelle 8: Messgrößen jeder Wohneinheit in Haus A

| 3. Wohnungsspezifische Messungen Haus B (8 Wohneinheiten) |                                     |                        |   |                                   |
|---|-------------------------------------|------------------------|---|-----------------------------------|
| Erfassung<br>(M-Bus/<br>Ablesung)                         | Messgröße                           | Messort                | Spezifikation   | Messgenauigkeit                   |
| A   | Haushaltsstrom + Hilfsstrom Lüftung | Technikzentrale Keller | Wirkstromzähler                                       | Zählerklasse 2, Verkehrsfehler 3% |
| M   | Warmwasserzähler                    | B12 bis B19            | Fa. Hydrometer, Typ: Scampy, Q <sub>n</sub> 1,5       | PTB Klasse C                      |
| M   | Kaltwasserzähler                    | B12 bis B19            | PolluMUK-E/SPX, Fa. Spanner Pollux Q <sub>n</sub> 1,5 | Metrol. Klasse C                  |
| M   | Wärmemenge Heizung+ WW              | B12 bis B19            | Ultraschall-WMZ Typ: F95, Fa. ABB, Q <sub>n</sub> 1,5 | Metrol. Klasse C                  |
| M   | Wärmemenge Heizung                  | B12 bis B19            | Ultraschall-WMZ Typ: F95, Fa. ABB, Q <sub>n</sub> 0,6 | Metrol. Klasse C                  |
| M   | Raumlufttemperatur                  | B12 bis B19            | M-Bus-Temperaturmodul mit Pt 100, Fa. DENEG           | Pt 100 der 1/10 DIN Klasse        |

Tabelle 9: Messgrößen jeder Wohneinheit in Haus B

| Verbrauchsmessung (Gesamt) |                          |                 |   |                                   |
|----------------------------|--------------------------|-----------------|---|-----------------------------------|
| Nr:                        | Messgröße                | Messort         | Spezifikation                                     | Messgenauigkeit                   |
| M                          | Wärmemenge Haus A gesamt | Technikzentrale | Ultraschall-WMZ, ABB, Typ F2, Q <sub>n</sub> 3,5  | PTB Klasse C                      |
| M                          | Wärmemenge Haus B gesamt | Technikzentrale | Ultraschall-WMZ, ABB, Typ F2, Q <sub>n</sub> 3,5  | PTB Klasse C                      |
| M                          | Gasvolumen Erdgas        | Technikzentrale | Elster-Balgengaszhäler mit Temperaturkompensation | Temp. Bereich - 5 °C bis 35 °C    |
| A                          | Stromverbrauch allgemein | Technikzentrale | Wirkstromzhäler mit Impulsausgang                 | Zählerklasse 2, Verkehrsfehler 3% |

Tabelle 10: Messung der Gesamtverbräuche in der Technikzentrale

## 10 Messergebnisse

In diesem Abschnitt werden Messdaten und Auswertungen für beide Gebäude dargestellt. Im Standardfall wird - neben der Dokumentation der Daten über den gesamten Messzeitraum - der Jahres-Zeitraum vom 1.6.03 bis zum 31.5.04 ausgewertet. Davon abweichend werden nur Zeiträume gewählt, wenn z.B. Hitzeperioden o.ä. betrachtet werden sollen, von denen Messdaten außerhalb dieses Jahres-Zeitraumes liegen. Die mittels der M-Bus-Sensoren gemessenen Raumtemperaturen liegen abweichend im Zeitraum 30.6.2003 bis zum 16.8.2004 vor.

### 10.1 Klimadaten

Die im gesamten Messzeitraum aufgezeichneten Klimadaten Außentemperatur, relative Luftfeuchte sowie Globalstrahlung werden hier als Tagesmittelwerte dokumentiert.

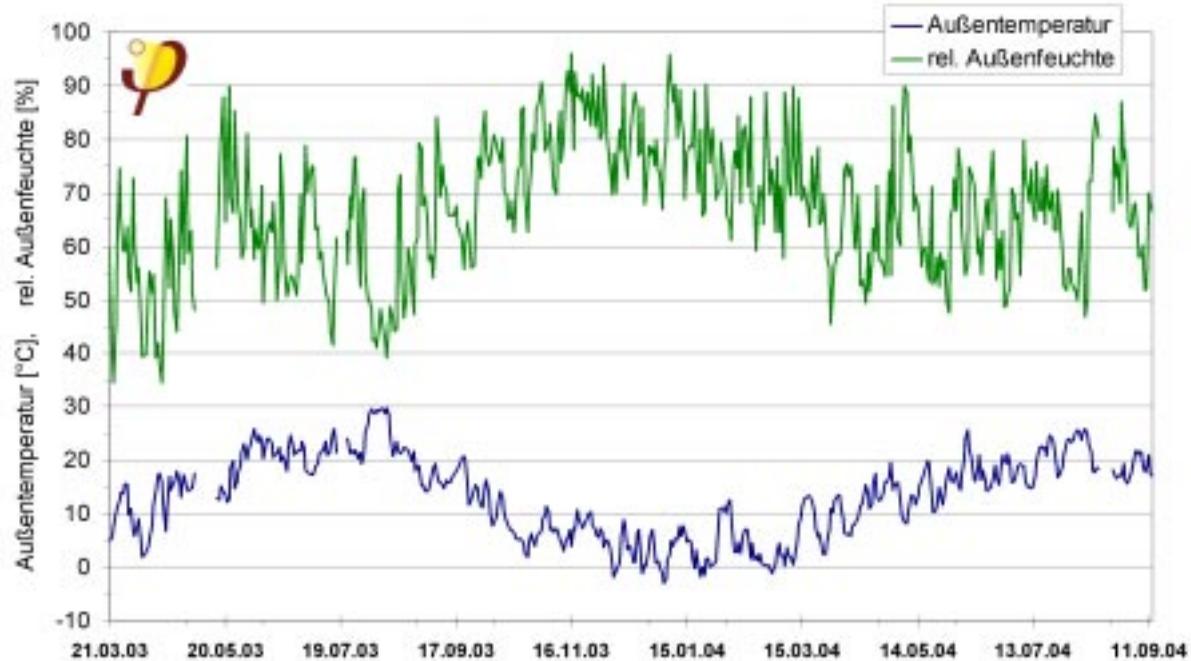
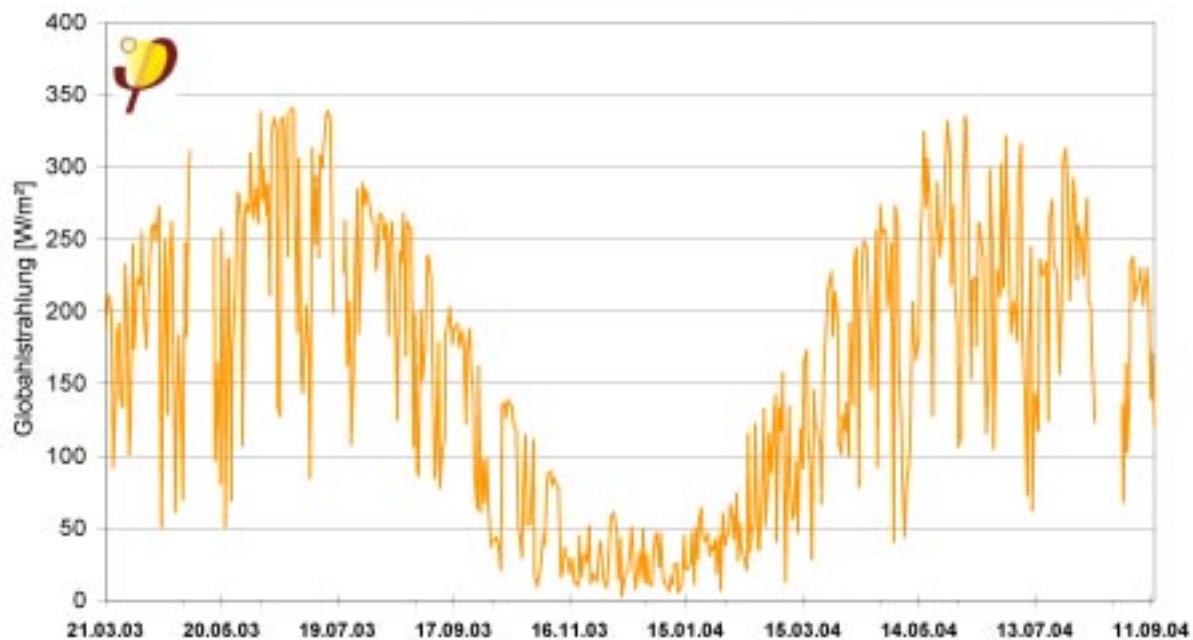


Abbildung 61: Tagesmittelwerte der gemessenen Außentemperatur und der relativen Außenfeuchte vom 21.03.2003 bis zum 13.09.2004.



**Abbildung 62:** Tagesmittelwerte der gemessenen Globalstrahlung vom 21.03.2003 bis zum 13.09.2004.

Die tagesmittleren Außenlufttemperaturen im Jahreszeitraum 1.6.03 bis zum 31.5.04 führen auf Jahresmittel von 11,7 °C, das Minimum betrug -3,0 °C und das Maximum 29,8 °C. Die minimalen, maximalen und mittleren Messdaten der Tagesmittelwerte können Tabelle 11 entnommen werden.

**Tabelle 11:** Minimale, maximale und mittlere Messdaten der Tagesmittelwerte in unterschiedlichen Zeiträumen

|                                     | Außentemperatur<br>[°C] | rel. Außenfeuchte<br>[%] |
|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| <b>Jahr<br/>(1.6.03-31.5.04)</b>    |                         |                          |
| Mittelwert                          | 11.7                    | 69.1                     |
| Min                                 | -3.0                    | 39.1                     |
| Max                                 | 29.8                    | 96.1                     |
|                                     |                         |                          |
| <b>Winter<br/>(1.10.03-30.4.04)</b> |                         |                          |
| Mittelwert                          | 6.3                     | 74.7                     |
| Min                                 | -3.0                    | 45.5                     |
| Max                                 | 19.7                    | 96.1                     |
|                                     |                         |                          |
| <b>Sommer<br/>(1.6.03- 30.9.04)</b> |                         |                          |
| Mittelwert                          | 20.9                    | 60.3                     |
| Min                                 | 11.4                    | 39.1                     |
| Max                                 | 29.8                    | 84.3                     |

## 10.2 Außen- und Raumtemperaturen

Die Temperaturmessungen in den 8 Wohnungen von Haus B über die fest installierten M-Bus-Temperatursensoren liegen auswertbar im Zeitraum von über einem Jahr vor (30. Juli 2003 bis zum 16.08.2004). Dabei ist die Zuordnung der 15 Temperatursensoren der 8 Wohnungen aus Datenschutzgründen verschlüsselt dargestellt.

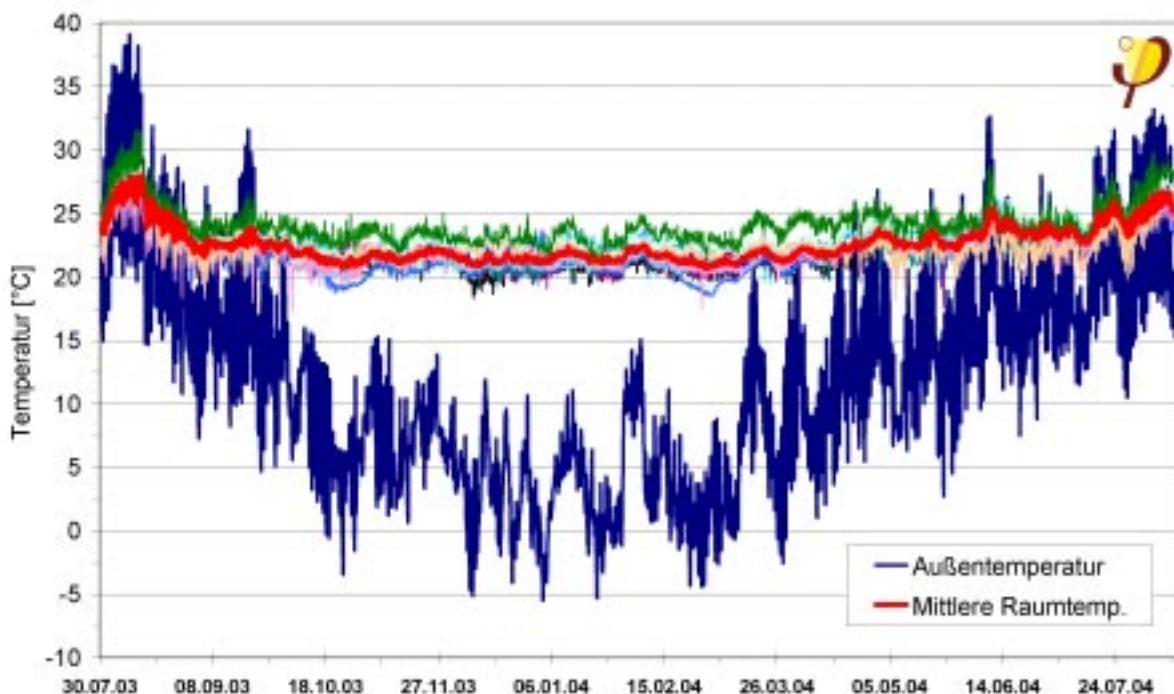


Abbildung 63: Stundendaten der Außen- und der Raumtemperaturen der 8 Wohnungen (15 Sensoren) sowie deren Mittelwert von Haus B im Zeitraum 30.07.03 bis zum 16.08.2004.

Zur besseren Übersichtlichkeit sind in Abbildung 64 zu allen Stundenwerten der Raumtemperaturen im gleichen Zeitraum die jeweiligen maximalen, minimalen und mittleren Werte dargestellt. Dabei ergeben sich als minimaler Messwert (Stundenmittel) 17,2 °C, als maximaler 31,7 °C und als mittlerer Wert im gesamten Zeitraum 22,6 °C.

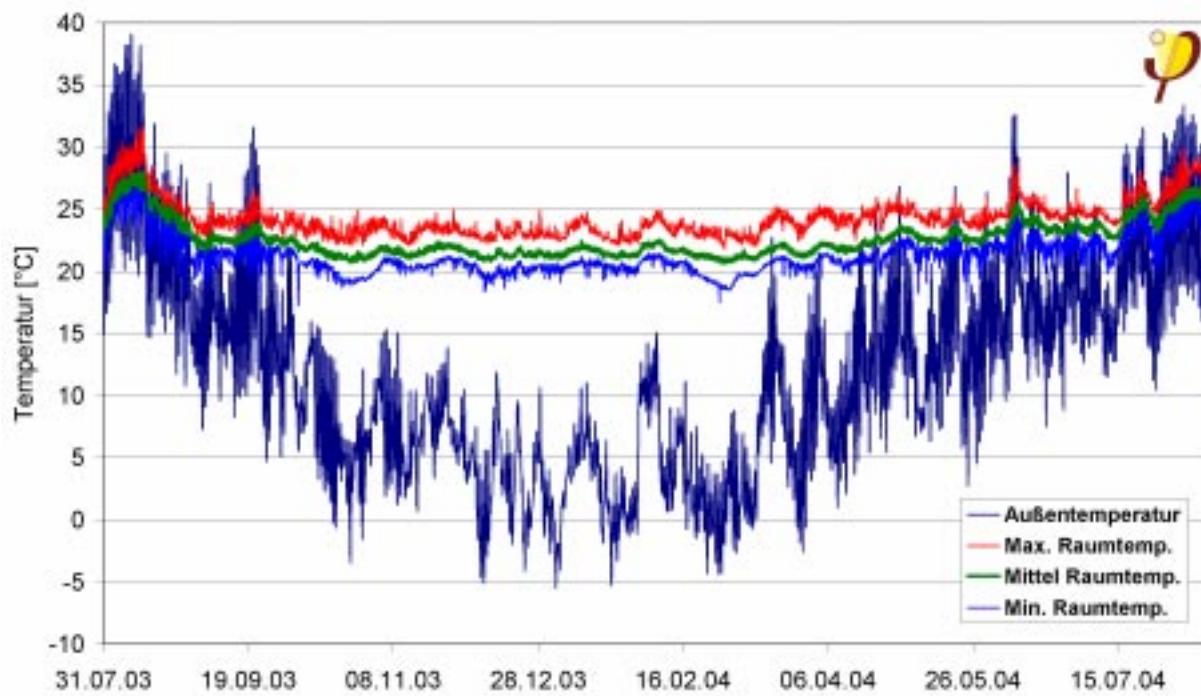


Abbildung 64: Stundendaten der Außen- und der maximalen, minimalen und mittleren Raumtemperaturen der 8 Wohnungen von Haus B im Zeitraum 30.07.03 bis zum 16.08.2004.

Zur besseren Erkennbarkeit der Raumtemperaturen werden diese in Abbildung 65 ohne den Außentemperaturverlauf dargestellt.

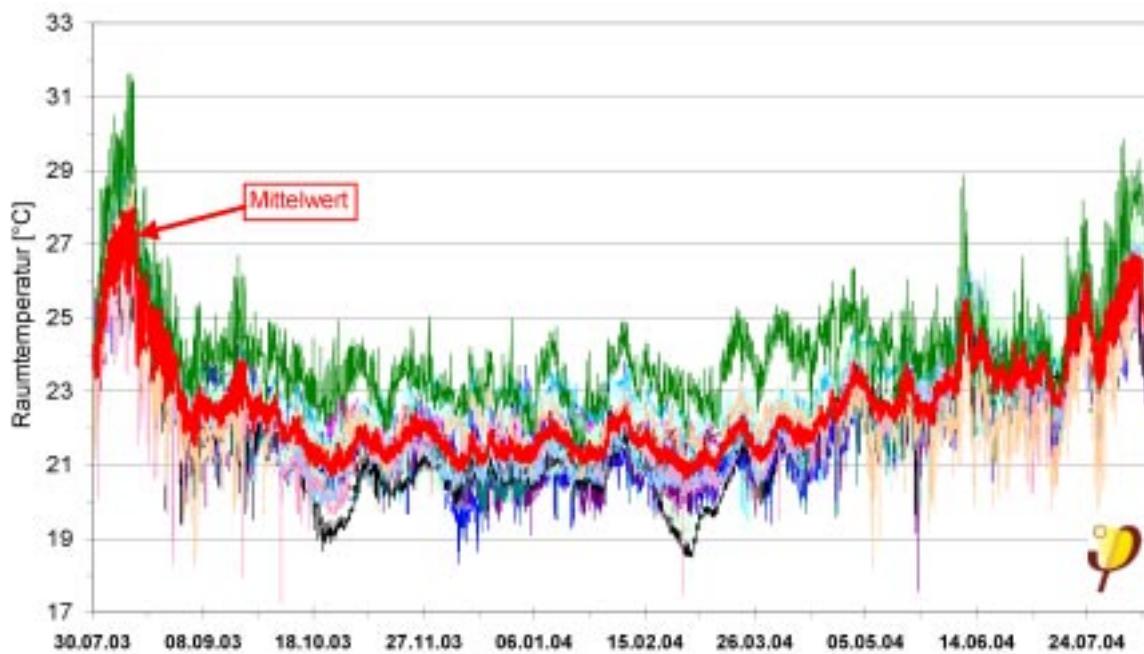


Abbildung 65: Stundendaten der Raumtemperaturen der 8 Wohnungen von Haus B im Zeitraum 30.07.03 bis zum 16.08.2004.

### 10.2.1 Temperaturen Winterzeit

Die Raumtemperaturen der Wohnungen von Haus B in der Winterzeit vom 1.10.2003 bis zum 30.04.2004 betragen im Mittel über die 15 Messstellen 21,6 °C. In der Kernwinterzeit vom 1.11.2003 bis zum 29.2.2003 lagen sie mit 21,5 °C fast genau in der gleichen Höhe. Die mittlere Winter-Außentemperatur betrug + 6,3 °C, die mittlere der Kernwinterzeit + 4,4 °C. Der niedrigste Stundenwert der Außentemperatur betrug moderate -5,5 °C am 03.01.2004. Die Raumtemperaturen verlaufen in der Heizzeit sehr gleichmäßig.

Tabelle 12: Übersicht der gemessenen Temperaturmittelwerte in Haus B

|   | Innen-temperatur | Außen-temperatur |
|---|------------------|------------------|
| Winter<br>(1.10.2003 bis 30.04.2004)    | 21,6 °C          | + 6,3 °C         |
| Kernwinter<br>(1.11.2003 bis 29.2.2003) | 21,5 °C          | + 4,4 °C         |

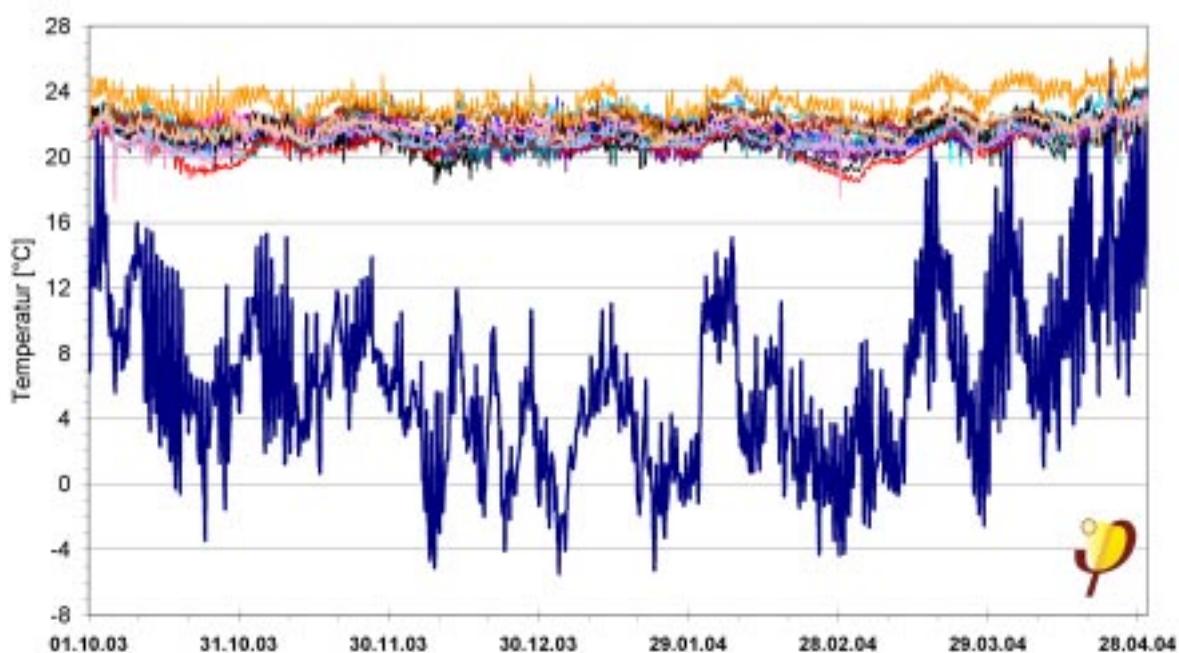
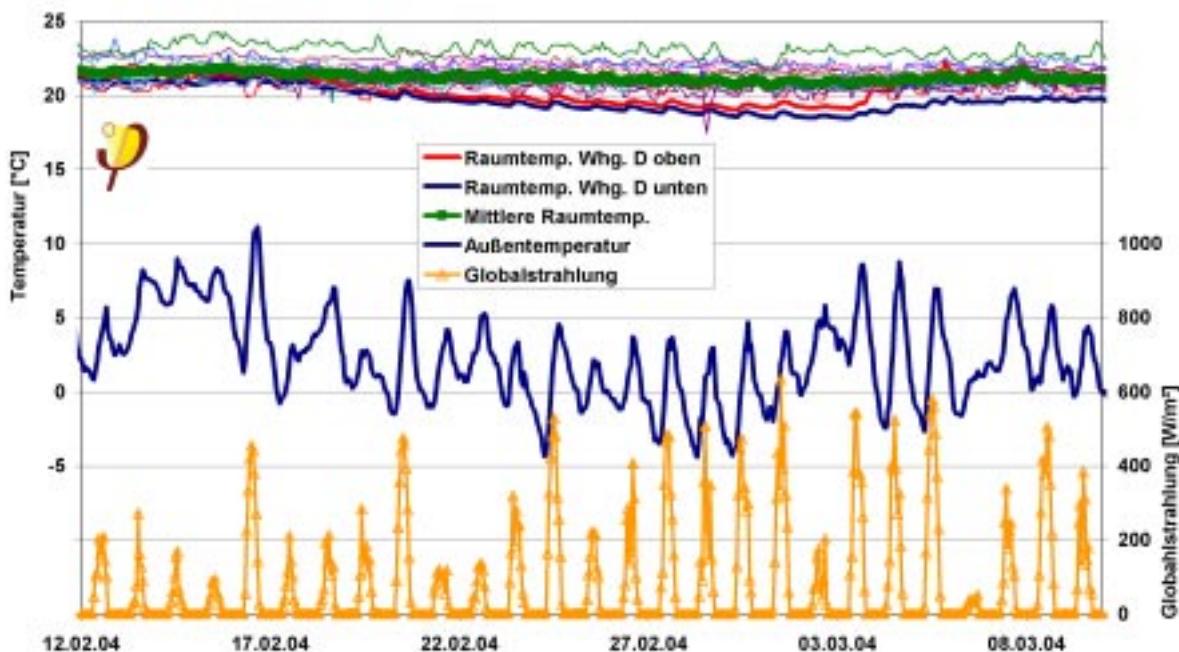


Abbildung 66: Außen- und Raumtemperaturverläufe in der Winterperiode 1.10.2003 bis zum 30.04.2004 (Stundendaten).



**Abbildung 67: Ausschnitt der Stundendaten der Raumtemperaturverläufe aller 8 Wohnungen von Haus B inkl. ihres Mittelwerts, Außentemperatur- und Globalstrahlungsverlauf in der Zeit vom 12.2. bis 10.03.2004.**

Im Winterzeitraum Ende Februar/Anfang März 2004 ist auffällig, dass die Raumtemperaturen einer Wohnung sichtbar absinken (Abbildung 67). Dabei handelt es sich um die Temperaturen in der oberen und der unteren Etage von Wohnung „D“. Als Minimum wurden in der unteren Etage 18,5 °C gemessen (Stundenmittelwert). Untersucht man in diesem Zeitraum den Wärmeverbrauch, so zeigt sich, dass im Zeitraum 15.2. bis 3.3.2004 die Wohnung so gut wie gar nicht beheizt wurde. Der Wärmemengenzähler für die Heizung hat in diesem Zeitraum den Verbrauch von nur 1,8 kWh gemessen (Abbildung 69). Ab dem 4.3.2004 steigt der Heizwärmeverbrauch wieder deutlich an, die Raumtemperaturen ebenfalls. Zur Aufheizung der Wohnung auf die gewünschten Raumtemperaturen wird in den folgenden beiden Tagen stärker geheizt als sonst üblich. Dazu war allerdings auch nur die mittlere Leistung von 390 Watt notwendig. Es ist anzunehmen, dass sich bei der heizfreien Zeit um eine Abwesenheitszeit der Bewohner handelt (Winterurlaub). Dabei ist anzumerken, dass es aus energetischer Sicht in einem so hochwärmegedämmten Gebäude *nicht* notwendig ist, die Heizung in einer solchen Abwesenheitszeit abzuschalten, bzw. die Solltemperatur deutlich abzusenken. Durch die geringen installierten Heizleistungen ist die Aufheizzeit nämlich relativ lang. Bemerkenswert ist, dass die Wohnung quasi auch ohne aktive Beheizung bei einer mittleren Außentemperatur von 1,1 °C nur auf 18,5 °C abgekühlt ist. Dies hat seine Ursache zum einen in der guten Wärmedämmung, also der Minimierung der Verluste nach Außen, in den Querwärmeströmen von den umgebenden Wohnungen und in der Wärmespeicherfähigkeit der massiven Innenbauteile.

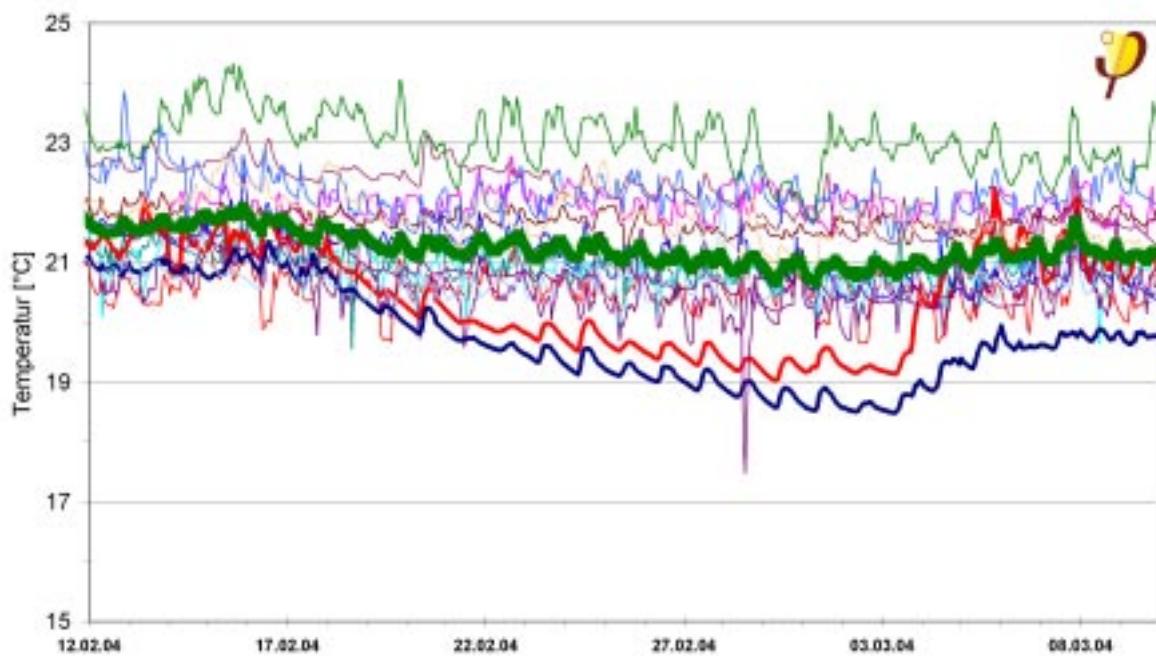


Abbildung 68: Raumtemperaturen und Mittelwert aus Abbildung 67 vergrößert im gleichen Zeitraum. Es sind zwei Temperaturgänge einer zeitweise unbeheizten Wohnung erkennbar (Rot: obere Etage, blau: untere Etage).

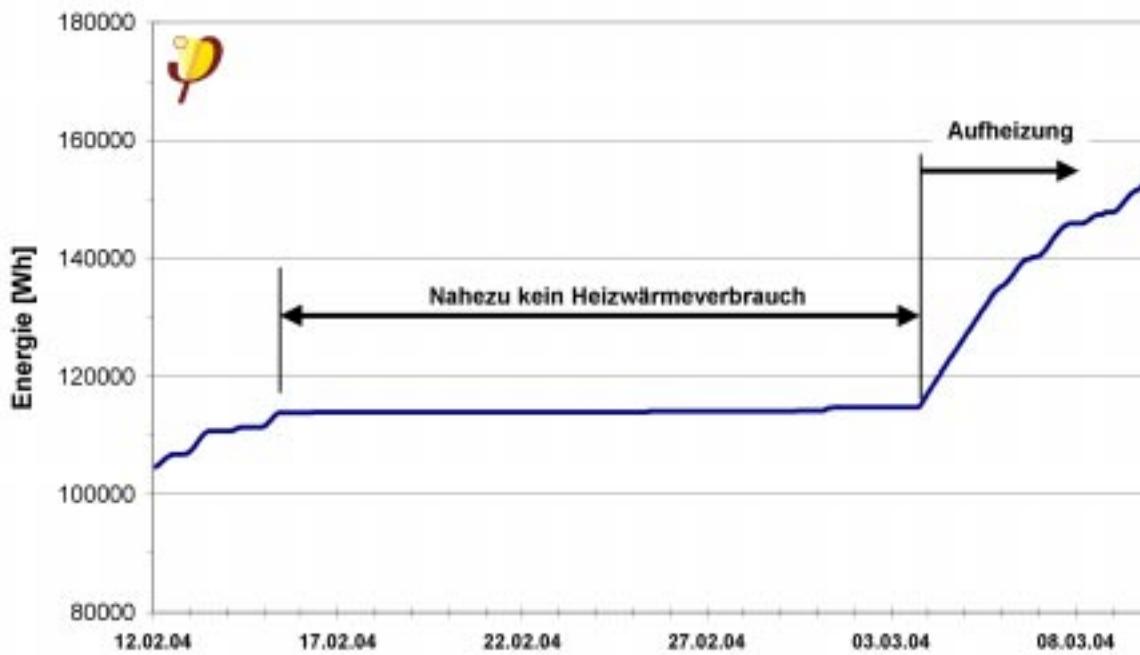


Abbildung 69: Zählerwerte des Wärmemengenzählers für die Heizung (15 Minuten Daten) der zeitweise fast unbeheizten Wohnung aus Abbildung 68.

Um den Zusammenhang zwischen der Außen- und der Innenraumtemperatur zu untersuchen sind die mittleren Raumtemperaturen der 15 Messstellen in den 8 Wohnungen über den Außentemperaturen aufgetragen (jeweils Tagesmittelwerte). Die Ausgleichsgerade im Bereich der Außentemperaturen bis maximal 5 °C zeigt einen fast waagrechten Verlauf (0,05 K Temperaturanstieg pro Kelvin Temperaturerhöhung der Außenlufttemperatur). Für niedrige Außentemperaturen ist damit ein

nur sehr geringer Einfluss auf das Innentemperaturniveau zu erkennen. Dies ist in der Hauptsache mit dem aktiven Reglereinfluss des Nachheizregisters begründet. Der niedrigste Tagesmittelwert wurde mit  $-3,0^{\circ}\text{C}$  gemessen, wobei die InnenTemperaturen im Mittel über  $21^{\circ}\text{C}$  liegen. Bei einer größeren Anzahl derartig kälterer Tage ist zu erwarten, dass die Innentemperatur ebenfalls in dem Bereich um  $21^{\circ}\text{C}$  liegen würde. Die Ausgleichsgerade würde dann eine noch geringere Abweichung vom waagerechten Verlauf aufweisen.

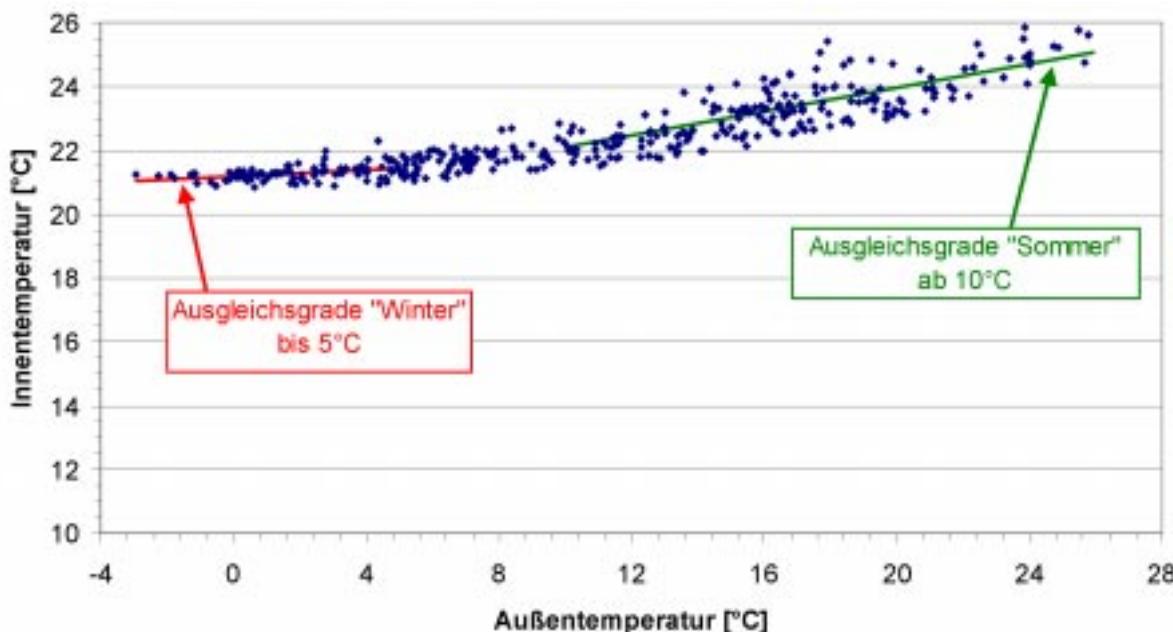


Abbildung 70: Korrelation zwischen Außen- und Raumtemperaturmittelwert aller 8 Wohnungen (Tagesmittelwerte) im Jahreszeitraum (19.9.03 bis 18.9.04).

Für höhere Temperaturen (ab  $10^{\circ}\text{C}$  AußenTemperatur) zeigt die zweite Ausgleichsgerade „Sommer“ ein ganz anderes Verhalten des Wohngebäudes: Hier zeigt sich eine deutlich größere Steigung von  $0,19\text{ K}$  Innentemperaturanstieg pro Kelvin Temperaturerhöhung der Außenlufttemperatur. Trotz der Dämpfung der täglichen AußenTemperaturschwankungen durch die Speichermasse und Nutzereingriffe wie Nachtlüftung ist der Einfluss auf die Innentemperatur wie erwartet größer als im Winter. Wäre das Gebäude nach Süden ausgerichtet und nur wenig verschattet, dann wäre die AußenTemperaturabhängigkeit durch den erhöhten Solareintrag noch deutlich größer.

#### 10.2.1.1 Temperaturunterschiede zwischen Ober- und Untergeschoss der Maisonette-Wohnungen

Die mittleren Raumtemperaturen der oberen und unteren Etagen der 6 Wohnungen in Haus B, welche über 2 Etagen angelegt sind, werden in Abbildung 71 verglichen. Dabei wird nur der Zeitraum des Kernwinters (1.11.2003 bis 29.02.2004) untersucht. Es zeigt sich, dass bei 5 der 6 Wohnungen die Temperaturen oben höher liegen als im unteren Teil der jeweiligen Wohnung. Nur bei einer Wohnung ist es umgekehrt (Differenz  $-0,36\text{ K}$ ). Im Mittel der 5 Wohnungen ist die Raumlufstemperatur oben  $0,76\text{ K}$  wärmer als unten. Durch den Auftrieb der warmen Luft und das offene Treppenhaus war dieser Trend zu erwarten. Es handelt sich durchweg um sehr geringe Temperaturunterschiede, die zu keiner Behaglichkeitsminderung führen.

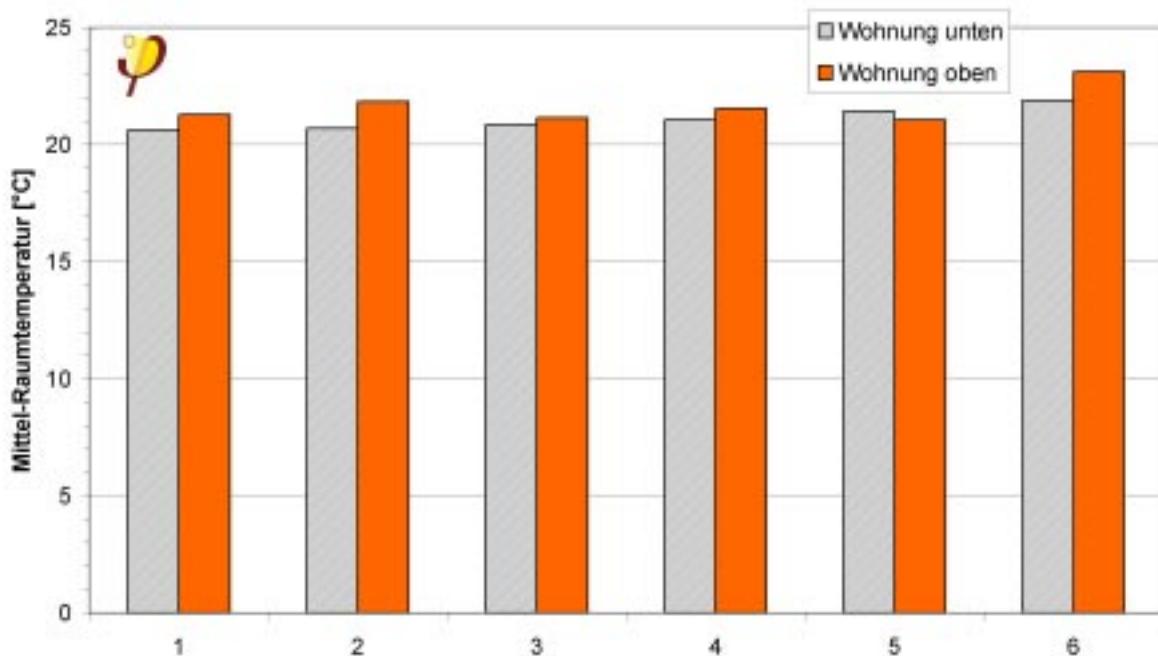


Abbildung 71: Mitteltemperaturen im Kernwinter (01.11.03 bis 29.02.2004) der 6 Wohnungen von Haus B welche über zwei Etagen angeordnet sind. Aufgetragen sind jeweils die mittleren Temperaturen in der unteren und der oberen Etage der jeweiligen Wohnung.

### 10.2.2 Hitzeperiode

In dem untersuchten Zeitraum gibt es sowohl im Sommer 2003 als auch im Sommer 2004 Hitzeperioden. Dabei wurde im Sommer 2003 ein sogenannter „Jahrhundert-Sommer“ mit Außenluft-Spitzenperaturen bis 39 °C gemessen. Besonders auffällig ist, dass die Hitzeperiode nicht wie üblich nach wenigen Tagen beendet war, sondern fast zwei Wochen andauerte. Es handelt sich damit um eine extreme Situation. Die Solarstrahlungsdaten deuten mit ihrer Gleichmäßigkeit auf einen tagelang nahezu wolkenlosen Himmel hin und zeigen hohe Strahlungseinträge. Nach einer Aufheizphase von 4 Tagen bleiben die Außentemperaturen auf nahezu gleichbleibendem Niveau (siehe Abbildung 72 und Abbildung 73).

Der maximale Temperaturmittelwert aller Wohnungen von Haus B wurde während der Hitzeperiode mit moderaten 28,0 °C gemessen (Stundendaten). Der Spitzenwert in der wärmsten Wohnung betrug in dieser Zeit 31,7 °C. Abbildung 72 zeigt, dass sich die wärmste Wohnung deutlich vom Temperaturfeld der anderen absetzt. Hierfür sind die Nutzereinflüsse ausschlaggebend. In der Abbildung sind die Ausgleichsgeraden der Außen- und der Mitteltemperatur für die Aufheizphase eingezeichnet (errechnet aus gleitenden 24 Stunden Mittelwerten). Die Außentemperatur hat sich an den vier Tagen im Tag-Nacht-Mittel um 9,25 K (2,5 K/Tag) erwärmt, die mittlere Raumtemperatur nur um 2,3 K (0,6 K/Tag). Daraus errechnet sich eine Temperaturdämpfung um einen Faktor 4,0 K/K. Hier zeigt sich, dass die gute Wärmedämmung des Gebäudes auch im Sommer ihre Vorteile hat. Wird ein übermäßiger Solareintrag verhindert (hier durch die Nordorientierung des Gebäudes) lassen sich auch - für Mitteldeutschland untypische - extreme Hitzeperioden gut beherrschen.

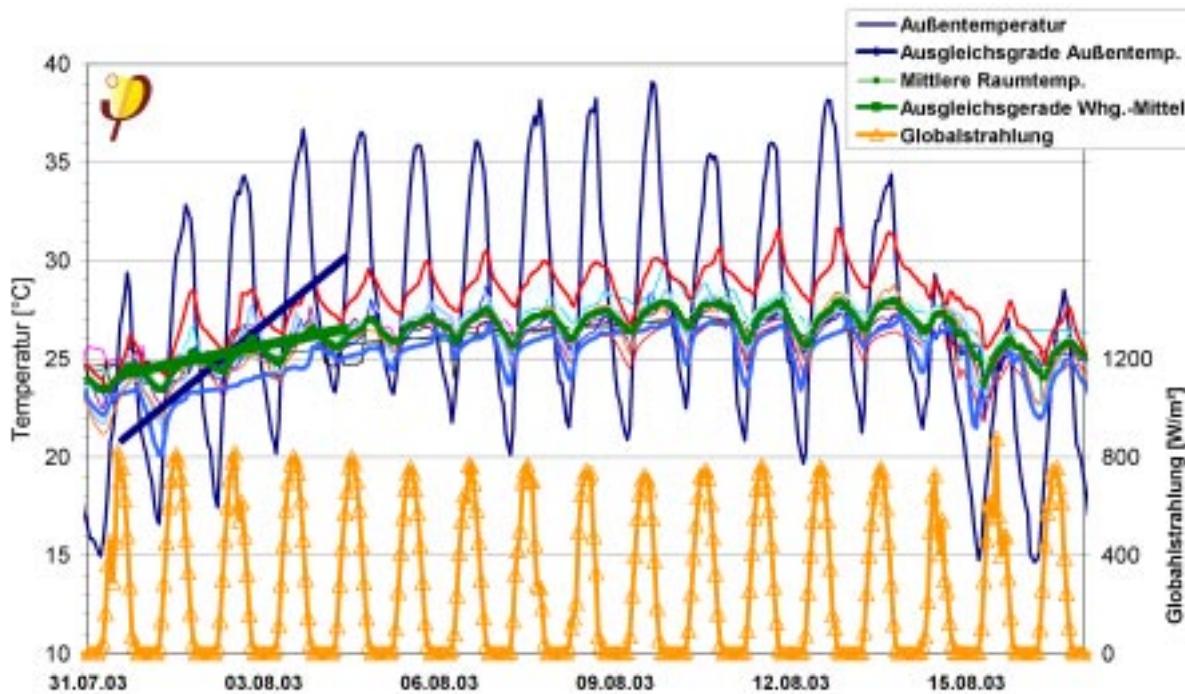


Abbildung 72: Außen-, Raumtemperaturen- und Globalstrahlungsverläufe in einer extremen Hitzeperiode. Es sind die Raumtemperaturen aller 8 Wohnungen von Haus B (15 Sensoren) von jeder Stunde sowie deren Mittelwert dargestellt (Stundendaten). Außerdem sind die Ausgleichsgeraden der Außen- und der mittleren Wohnungstemperatur in der Aufheizphase dargestellt.

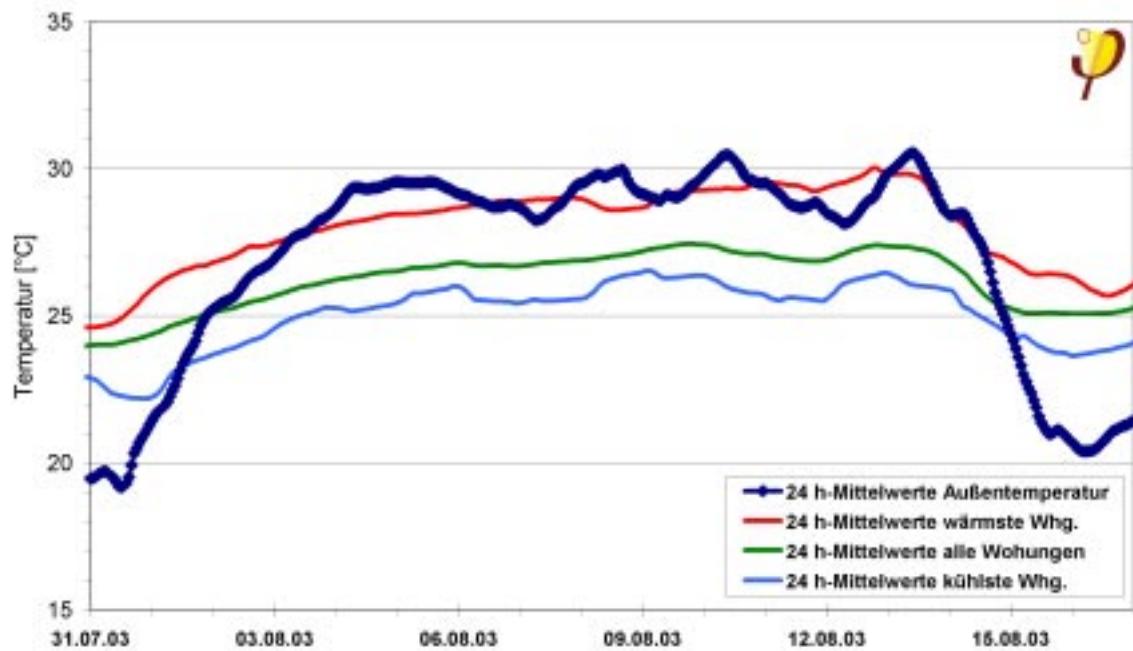


Abbildung 73: Gleitende 24-Stunden Mittelwerte der Außentemperatur, der Mitteltemperatur aller 15 Wohnungs-Temperatursmessstellen sowie der wärmsten und der kühnst Wohnungen der Daten aus Abbildung 72.

Die gleitenden Tag-Nacht-Mittelwerte (24 Stunden) zeigen, dass sich die Temperaturen der wärmsten Wohnung immer weiter der Höhe der Außentemperatur aneignen. Dies zeigt an, dass in dieser Wohnung keine erfolgreichen Maßnahmen durchgeführt wurden, um die Räume kühl zu halten. Ob dies als störend und

unerwünscht empfunden wurde, oder beabsichtigt war, ist nicht bekannt. Der Unterschied zu den anderen Wohnungen bzw. dem Mittelwerten ist unübersehbar. In der kühlssten Wohnung zeigt der gleitende Mittelwert, dass es möglich ist, die Temperatur in der Wohnung um durchschnittlich 3,4 K kühler zu halten als die Außentemperaturmittelwerte. Dieser Unterschied ist für die Bewohner deutlich spürbar und die Wohnung verfügt auch in der Hitzeperiode über ein sehr angenehmes Innenklima.

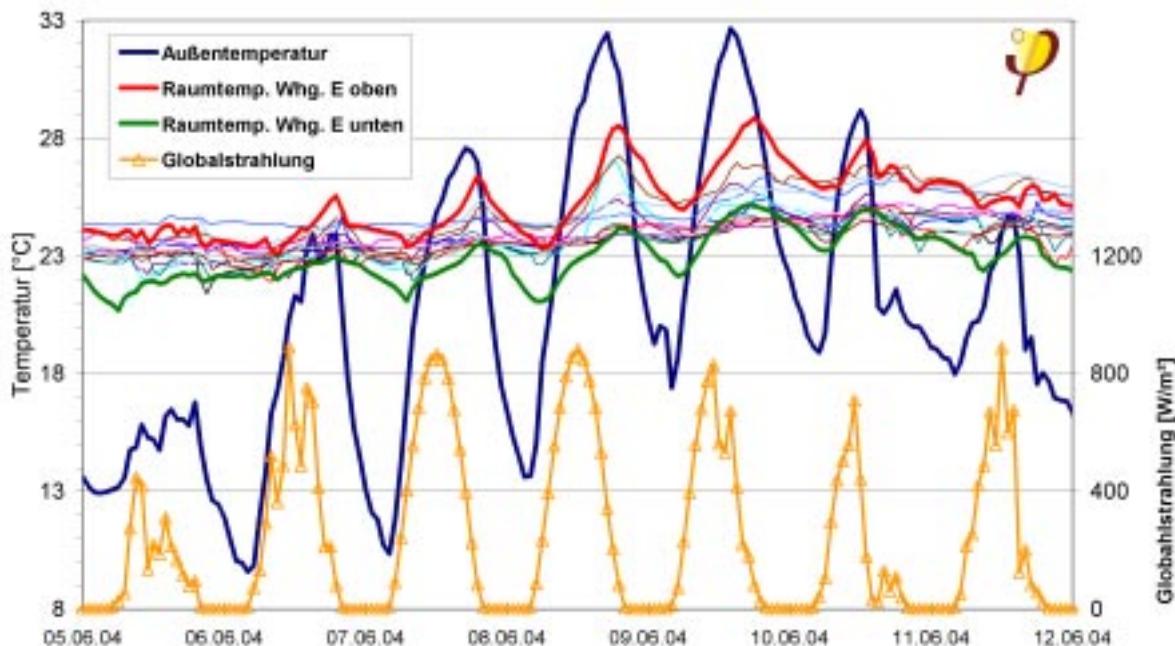


Abbildung 74: Raum- und Außentemperaturen sowie Solarstrahlungsdaten in einer typischen Hitzeperiode im Juni 2004 (Stundendaten).

Die für die Rheinebene typische Hitzeperiode im Sommer 2004 zeigt ebenfalls eine sehr moderate Aufheizung der Raumtemperaturen im untersuchten Passivhaus. Es wurden Außentemperaturen bis 32,7 °C gemessen (Stundendaten). Der Mittelwert aller Raumtemperaturen der Wohnungen erreichte maximal 25,5 °C. Der Maximalwert in der wärmsten Wohnung betrug 28,9 °C. Auffällig ist, dass während dieser Hitzeperiode die wärmste wie auch die kühlsste Temperatur in derselben Wohnung gemessen wurde. Dabei handelt es sich bei der höheren Temperatur um den Sensor im oberen Geschoss, er befindet sich im Küchen/Wohnzimmer Bereich. Der untere Sensor dagegen im fensterlosen Flur.

Wenn die Temperaturmessdaten als aufsteigend sortierte Jahresdauerlinien dargestellt werden, können die Jahresstunden-Anteile der Temperaturen gut im Bezug zur Behaglichkeitsgrenze dargestellt werden. In Abbildung 75 sind zunächst die Jahresdauerlinien eines gesamten Jahres der kühlssten und der wärmsten Wohnungstemperaturmessung, die mittlere Temperatur aller Wohnungsmessungen und die Außen temperatur dargestellt.

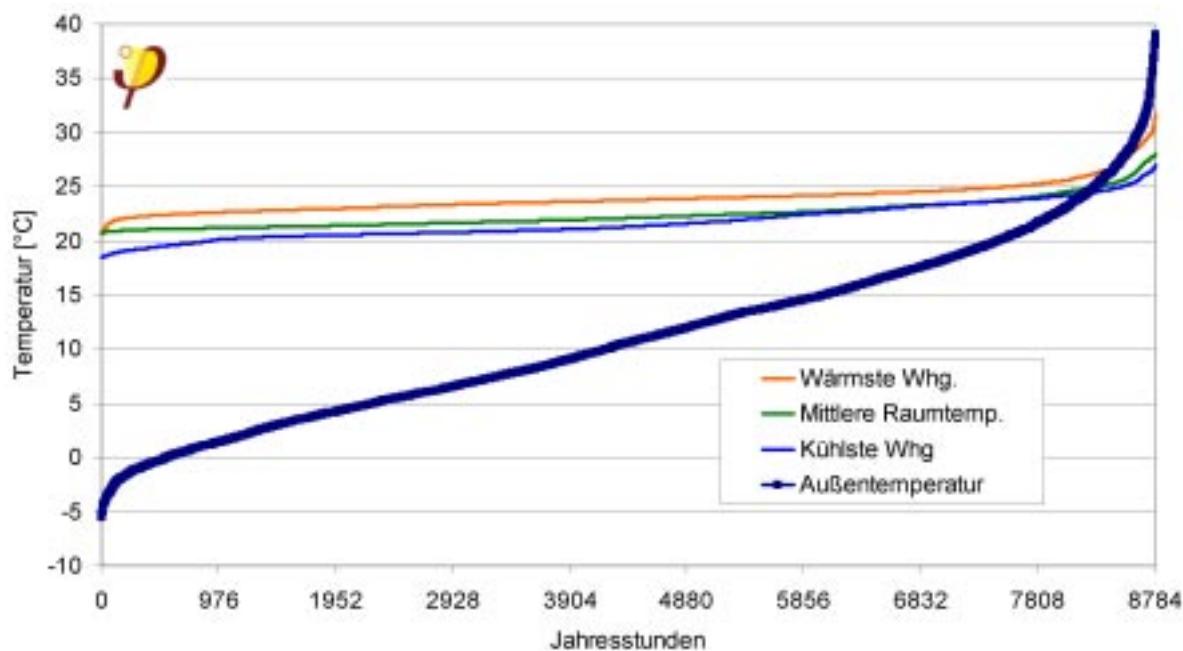


Abbildung 75: Jahresdauerlinie der Temperaturen in der wärmsten und in der kühlssten Wohnung, der mittleren Temperatur aller Wohnungen sowie der Außentemperatur (Stundendaten).

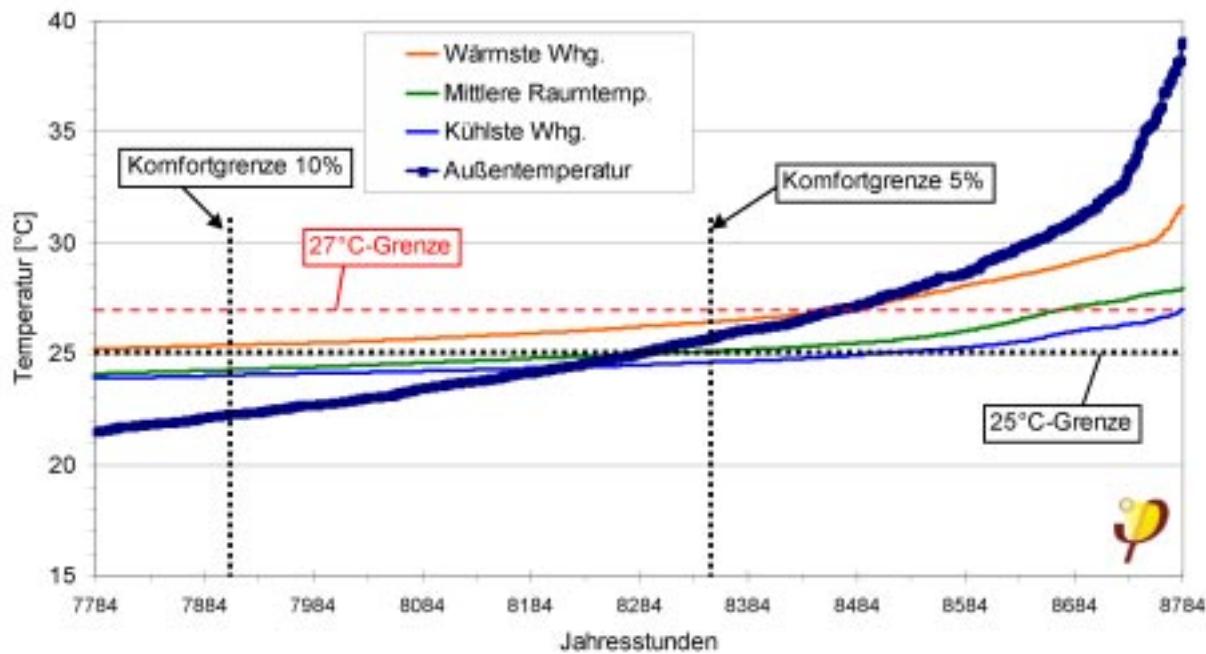


Abbildung 76: Teilausschnitt der Jahresdauerlinie der Temperaturen in der wärmsten und in der kühlssten Wohnung, der mittleren Temperatur aller Wohnungen sowie der Außentemperatur (Stundendaten). Eingezeichnet ist die Komfortgrenze mit 10 % der Jahresstunden.

Im Ausschnitt der Jahresdauerlinie (Abbildung 76) ist die Behaglichkeitsgrenze mit 10 % der gesamten Jahresstunden eingezeichnet (7906 Stunden entspricht 90 % der Jahresstunden). Nach [DIN 4108-T2] ist der Grenzwert der Innentemperatur der an nicht mehr als 10 % der Jahresstunden herrschen sollte mit 25 °C festgelegt. Dieser gilt allerdings für die „sommerkühle“ Region Deutschlands. Der Standort des

Passivhauses in Frankfurt wird nach der DIN 4108-T2 der „sommerheißen“ Region zugeordnet. Für diese wird der Grenzwert dort mit sogar 27 °C angegeben. Wir verwenden hier den schärferen Grenzwert von 25 °C / 10% der Stundenzahl. Die Kurve der mittleren Temperatur aller Wohnungen zeigt an, dass dieses Behaglichkeitskriterium sehr gut eingehalten worden ist: Die Überschreitung der 25 °C Geraden liegt bei nur 4,6 % der Jahresstunden (bei der kumulierten Stundenzahl 8287). Die wärmste Wohnung überschreitet den strengeren Grenzwert (25 °C) mit 14,0 % deutlich. Sie setzt sich allerdings generell von dem Temperaturfeld der untersuchten Wohnungen ab, wie bereits in Abbildung 65 und Abbildung 72 zu erkennen ist. Daher stellt das Ergebnis keinen repräsentativen Wert dar. Es zeigt vielmehr die Bedeutung des Nutzereinflusses. Den in der DIN 4108-T2 geforderten Grenzwert von 27 °C / 10 % hält diese Wohnung allerdings auch in der oberen Etage mit nur 4 % der Jahresstunden gut ein.

Es zeigt sich bei der Untersuchung der Raumtemperaturen, dass die Lage der Wohnungen nicht den entscheidenden Faktor für die Höhe der Raumtemperaturen darstellt. Die generelle Erwartung kühlere Wohnungen befänden sich im unteren Teil des Gebäudes, wärmere Wohnungen weiter oben, bestätigt sich nicht. Dies hat seine Ursache sicher auch in der überwiegenden Nordorientierung der Verglasungsflächen, aus dem ein geringerer Solareinfluss resultiert. Die Höhe der Raumtemperaturen wird insbesondere durch Faktoren wie Nutzungsgewohnheiten der Bewohner wie Belegungsdichte, interne Lasten (Stromverbräuche) und Sommerlüftungsverhalten bestimmt.

## 10.3 Raumluftfeuchte

Die Untersuchung der relativen Raumluftfeuchten wurde mit autarken Datenloggern durchgeführt. Die Logger messen die Feuchte- und Temperaturwerte. Da die Datenlogger an anderen Punkten und Höhen in den Wohnungen positioniert waren als die M-Bus-Temperatursensoren, gibt es geringfügige Abweichungen zwischen den Temperaturmesswerten. Ziel der Zusatzuntersuchung ist die Kontrolle der Behaglichkeitswerte in den maschinell belüfteten Wohnungen. Hier ist insbesondere die kalte Jahreszeit - wenn sehr wenig über die Fenster gelüftet wird - von Bedeutung. Zunächst wird die sog. Kernwinterzeit (1. November 2003 bis 29. Februar 2004). In Abbildung 77 ergibt sich der mittlere Wert der Raumluftfeuchte zu 36,4 % bei einer Raumlufttemperatur von 21,1 °C.

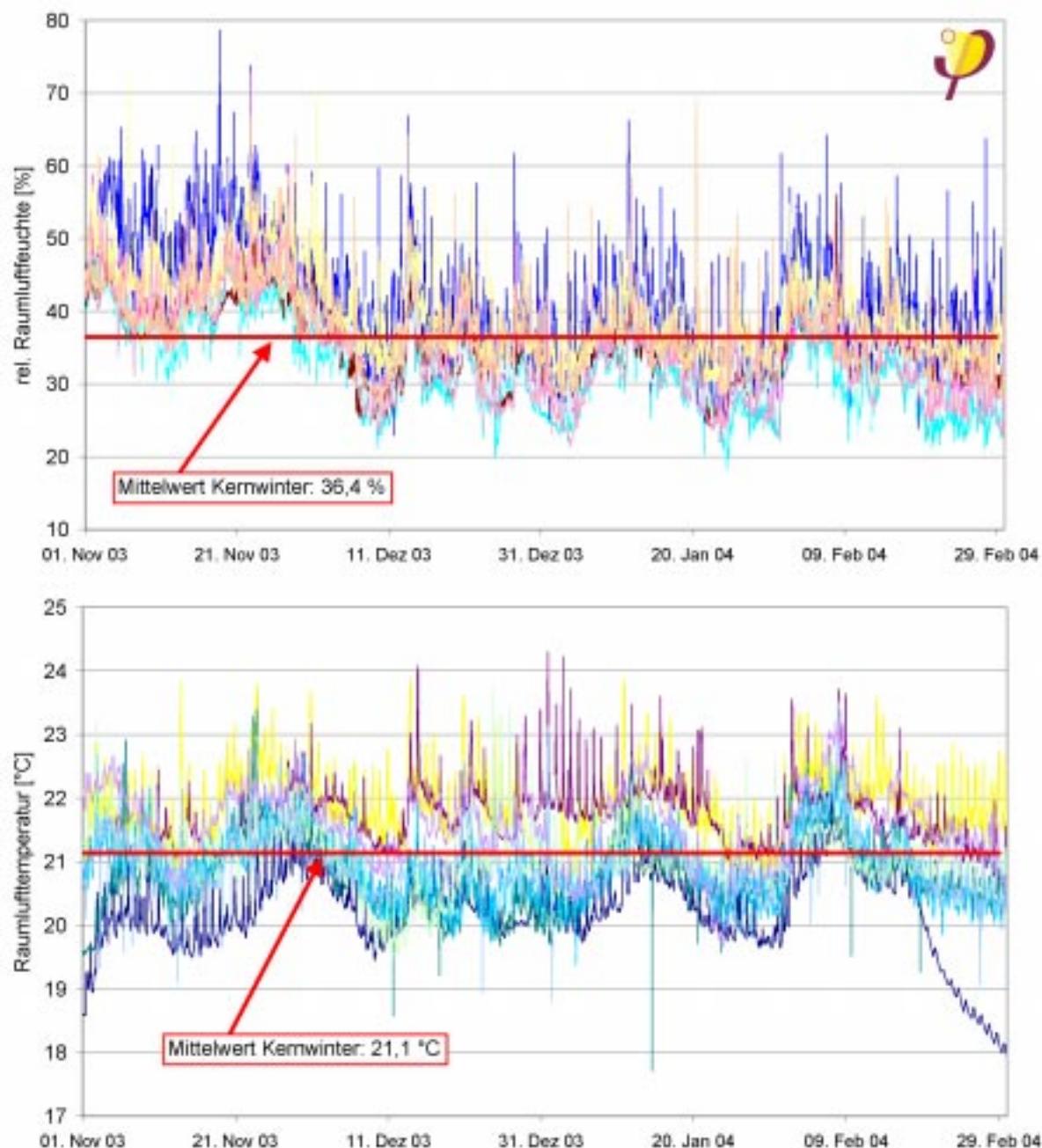


Abbildung 77: Messdaten (Datenlogger) der rel. Feuchte und der Temperatur der 8 Wohnungen von Haus B in der Kernwinterzeit 1. November 2003 bis 29. Februar 2004 (15 min Werte).

Für behaglichen Bedingungen ist eine rel. Raumluftfeuchte im Bereich von 30 bis 70 % anzustreben, die Hygienebedingung bzgl. Schimmelwachstum und Hausstaubmilben schränkt diesen Bereich in Passivhäusern auf ca. 60 % maximal, in konventionellen Häusern auf unter 50 % maximal ein. In Abbildung 78 sind die im Winter-Durchschnitt „trockneste“ und die „feuchteste“ Wohnung dargestellt. Trotz der annehmbaren Mittelwerte sind in der „trocknesten“ Wohnung zahlreiche Werte unter 30 % rel. Raumluftfeuchte gemessen worden. Gesundheitlich stellen diese zeitweisen Unterschreitungen kein Problem dar.

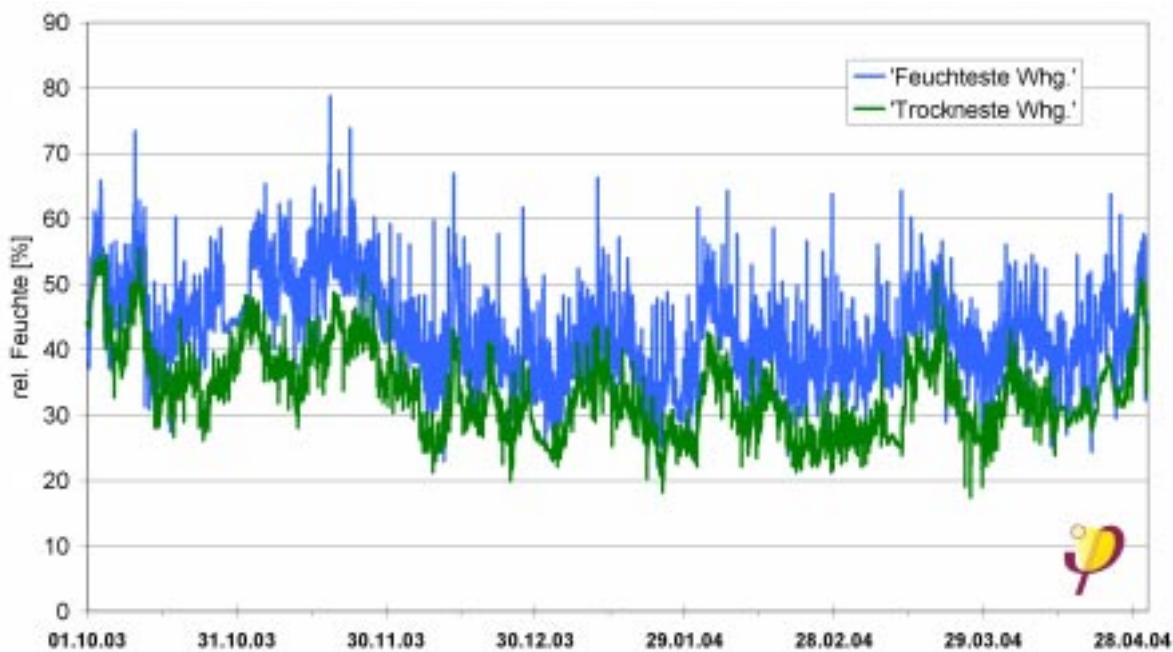


Abbildung 78: Messwerte der relativen Raumluftfeuchte der „feuchtesten“ und „trockensten“ Wohnung in Haus B in der Kernwinterzeit (Datenlogger, 15 min.).

Einen großen Einfluss auf die Feuchtebilanz einer Wohnung hat neben den Nutzungsgewohnheiten der Bewohner (Feuchtequellen: Kochen, Duschen, Zimmerpflanzen) insbesondere der Luftwechsel. Im Winter ist die kalte Außenluft absolut gesehen sehr trocken. Bei tendenziell trockner Luft in der Wohnung kann daher im Winter als erste Maßnahme die Luftfeuchte deutlich erhöht werden, wenn die Luftwechselrate durch die Lüftungsanlage reduziert wird. Die Lüftungsanlage sollte dann also auf einer niedrigeren Stufe betrieben werden, solange die Bewohner die Luftqualität als ausreichend gut beurteilen. Auf diesem Weg kann einfach und durch die Bewohner gut steuerbar die Luftfeuchte geregelt werden. In der tendenziell trockensten Wohnung kann vermutet werden, dass der Anlagenluftwechsel zur Wohnungsgröße und Bewohnerzahl zu hoch eingestellt war. Bei Bedarf kann hier einfach Abhilfe geschaffen werden.

Ein weiterer entscheidender Zusammenhang besteht zwischen der Raumlufttemperatur und der relativen Feuchte. Je höher die Raumluft bei gleicher enthaltener Wassermenge (absolute Feuchte) aufgeheizt wird, desto kleiner ist die relative Feuchte. Diese Tendenz ist bei den Mittelwerten der Messwerte der 8 Wohnungen im Kernwinter zu erkennen (Abbildung 79).

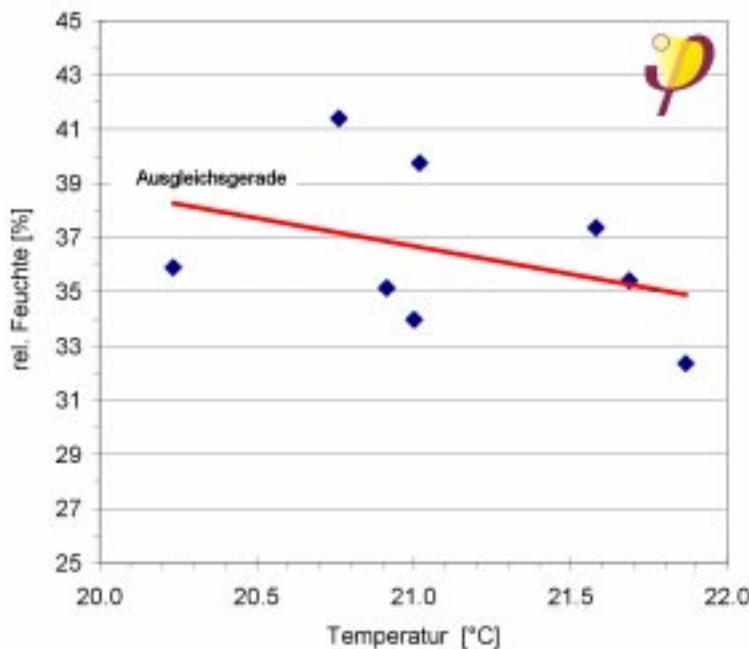


Abbildung 79: Korrelation der Mittelwerte der Raumlufttemperatur und rel. Raumluftfeuchte von den 8 Wohnungen von Haus B (aus den Datenlogger 15 min Daten, 1.11.03 bis 29.2.04)

### 10.3.1 Behaglichkeitsuntersuchung

Um eine übersichtliche Darstellung für eine Bewertung der Feuchtesituation zu erzeugen, sind die 15-Minuten Messdaten der Datenlogger zu Tageswerten gemittelt worden. Diese Messdaten sind je Wohnung in einem Feuchte-Temperatur-Diagramm dargestellt. Die Grenzkurve dieser „Behaglichkeits-Diagramme“ ist [RWE 2004] entnommen. In Abbildung 80 sind die Werte einer der 8 Wohnungen dargestellt (Der Feuchte-Mittelwert der dargestellte Wohnung liegt nahe am Mittelwert aller Wohnungen). Alle Tageswerte befinden sich ziemlich mittig innerhalb der Grenze „noch behaglich“. Auch bei den Diagramme der anderen Wohnungen, die im Anhang abgebildet sind, befinden sich alle Punkte innerhalb dieser Grenze. Eine Ausnahme bilden nur 4 Tageswerte der Wohnung, welche weiter oben bereits als zeitweise unbeheizt dargestellt wurde („Winterurlaub“). In dieser Zeit mit vermutlicher Abwesenheit der Bewohner gibt es vier Ausreißer durch die niedrigeren Raumtemperaturen. Diese Werte sind als unproblematisch zu bewerten, insbesondere wenn die Bewohner nicht anwesend waren.

Jede der Wohnungen zeigt eine andere Temperatur-Feuchte-Charakteristik in den Behaglichkeitsdiagrammen. Hier zeigt sich der individuelle Nutzereinfluss aus einer Vielzahl von Parametern. Die Messdaten zeigen gute Ergebnisse mit einer Tendenz zu eher niedrigeren, aber nicht zu niedrigen Raumluftfeuchten. Bei hygienisch ausreichendem Luftwechsel im Winter - also guter Luftqualität - ist dies ein gutes Ergebnis. Sollten dennoch höhere Luftfeuchtigkeiten erwünscht sein, können - wie oben bereits beschrieben - die Luftpunktmengen problemlos etwas reduziert werden.

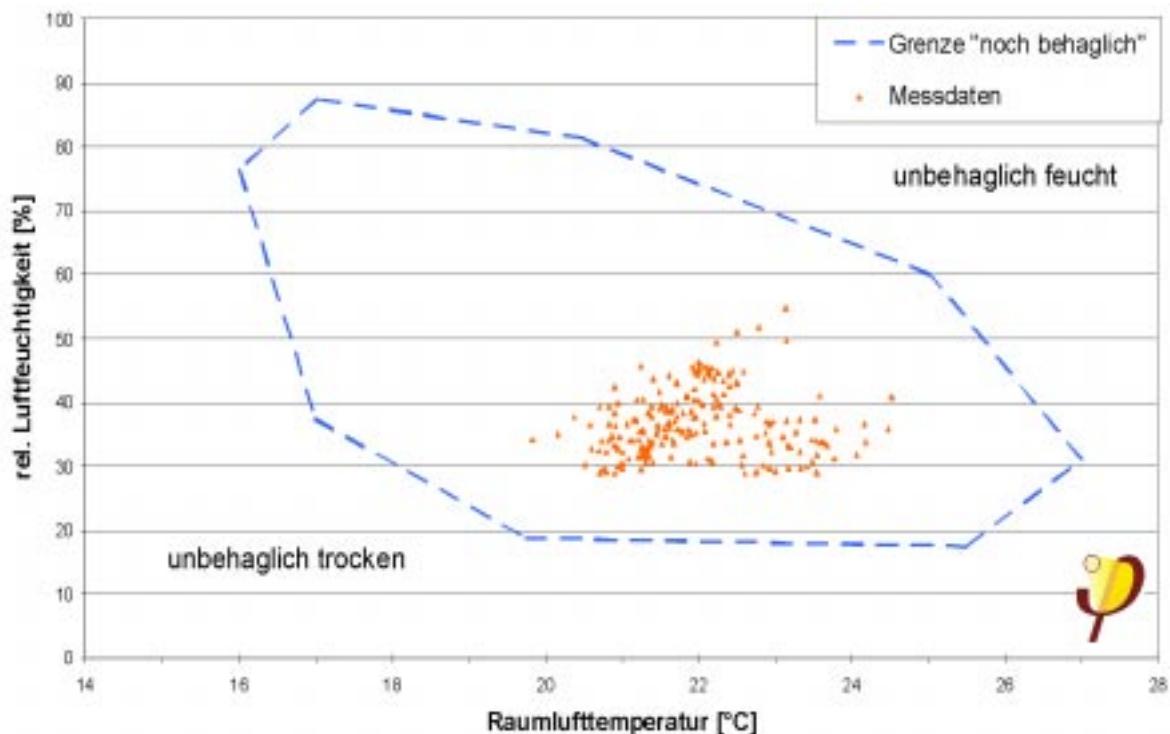


Abbildung 80: Behaglichkeitsdiagramm für eine der 8 Wohnungen von Haus B. Dargestellt sind Tagesmittelwerte der rel. Feuchte über der Raumtemperatur. Die Diagramme aller 8 Wohnungen sind im Anhang abgebildet.

### 10.3.2 Raumluftfeuchte Sommer

Mit den Feuchte-Temperatur-Datenloggern wurden auch in den Sommerzeiten kontinuierlich Messdaten aufgezeichnet. Im Mittel der 8 Wohnungen von Haus B ergibt sich in der Zeit von 1.6. bis zum 30.9.2003 ein Mittelwert von 48,3 % bei einer Mitteltemperatur von 24,1 °C.

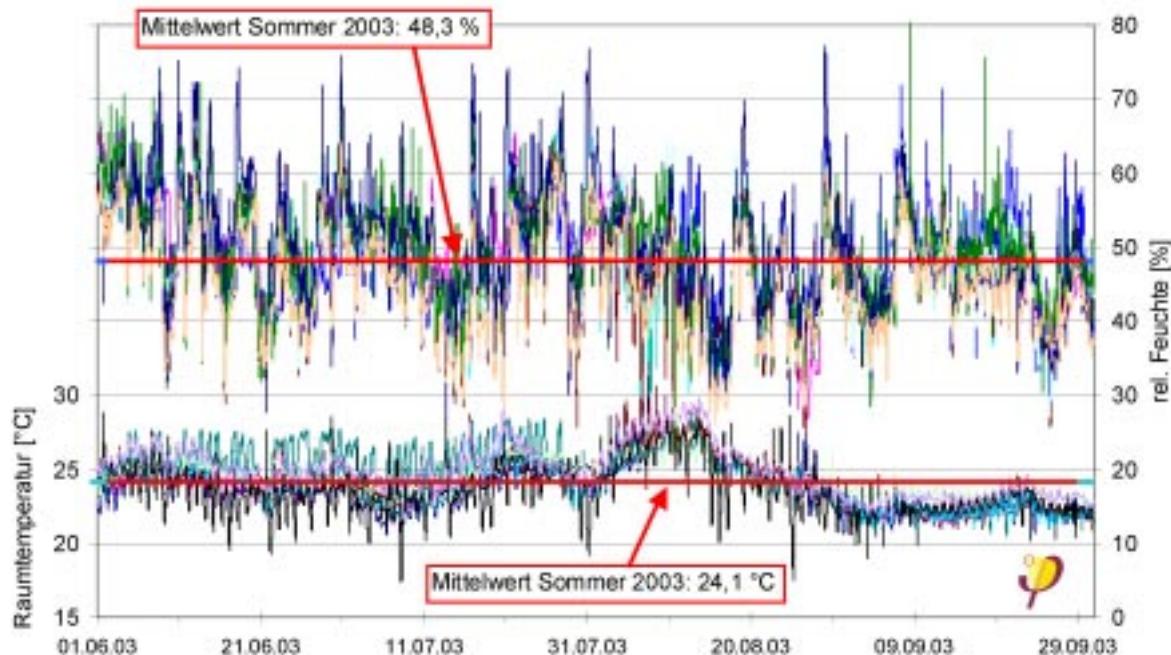


Abbildung 81: Relative Raumluftheumfeuchtigkeit und Raumlufttemperaturen in den 8 Wohnungen von Haus B in der Sommerzeit (1. Juni bis 30. September 2003) (Datenlogger, 15 Minuten-Daten).

Im folgenden Sommer 2004 (1.6. bis 30.9.2004) lagen die Mittelwerte der relativen Feuchte bei 48,1 % bei durchschnittlich 23,9 °C Raumtemperatur. In beiden Jahren bewegt sich das Feld der relativen Feuchtedaten in den Wohnungen im Sommer hauptsächlich zwischen 40 und 60 %. Die Messwerte stellen typische Feuchtewerte für die Sommerzeit dar.

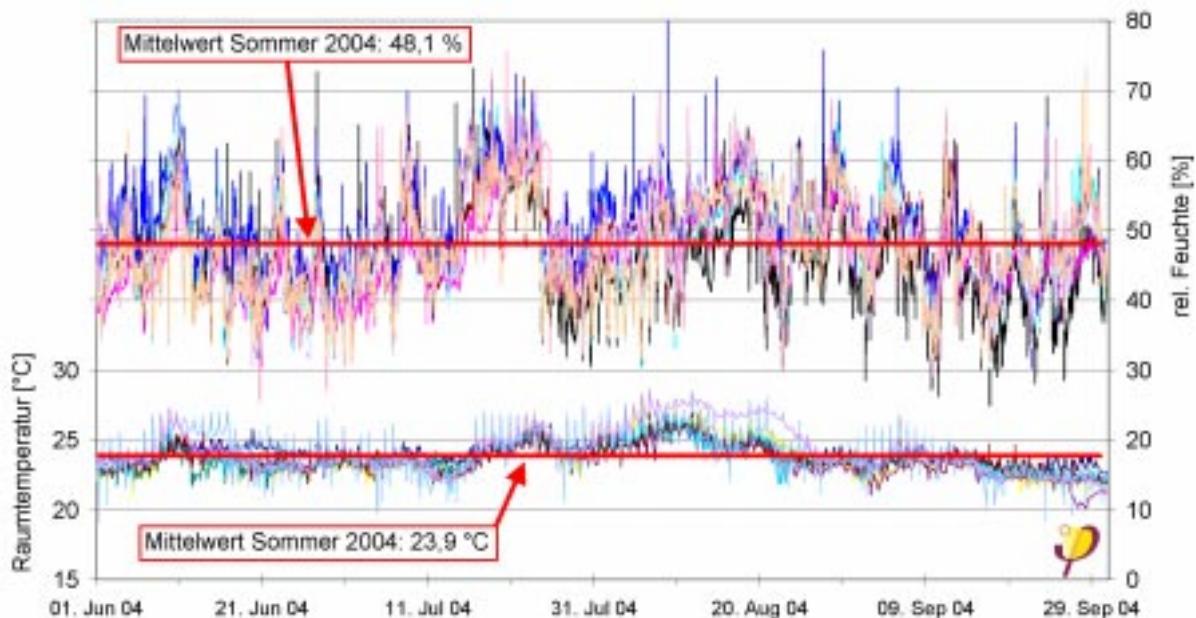


Abbildung 82: Relative Raumluftheumfeuchtigkeit und Raumlufttemperaturen in den 8 Wohnungen von Haus B in der Sommerzeit (1. Juni bis 30. September 2004) (Datenlogger, 15 Minuten-Daten).

## 10.4 Energieverbräuche

In diesem Abschnitt werden die Energieverbräuche der beiden Passivhäuser im Zeitraum vom **Juni 2003 bis Mai 2004** untersucht und dokumentiert. Als Bezugsflächen werden die **Energiebezugsflächen** der Gebäudes aus Abschnitt 3.1 dieses Berichtes verwendet. Sie betragen für Haus A 1083,1 m<sup>2</sup> und für Haus B 758,9 m<sup>2</sup>, insgesamt damit 1842,0 m<sup>2</sup>. Sie sind nicht zu verwechseln mit der deutlich größeren Bezugsfläche „A<sub>N</sub>“, die z.B. für die Berechnungen nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) verwendet wird. Diese, für den Energiebezug falsche, weil pauschal aus dem Gebäudeaußenvolumen berechnete Fläche würde auf **noch deutlich niedrigere Kenngrößen führen**. Sie beträgt 2290 m<sup>2</sup> für beide Gebäude zusammen und ist damit 24 % größer als die hier verwendete real beheizte Fläche.

### 10.4.1 Zentraler Energiebezug

Als Ausgangsgröße für die Untersuchung des Energieverbrauchs der beiden Passivhäuser dient die Messung des Gasverbrauchs direkt am Gaszähler. In dem untersuchten Jahreszeitraum wurden insgesamt 6646 m<sup>3</sup> Gas verbraucht. Die Monatswerte liegen zwischen 1,7 und 5 kWh/(m<sup>2</sup> Monat), im Monatsmittel bei 3,0 kWh/(m<sup>2</sup> Monat). Der Energieinhalt von Erdgas wird für die Umrechnung mit 10 kWh/m<sup>3</sup> angesetzt. Bereits am Gasbezug kann gut der „Sockel-Verbrauch“ für die Warmwasserbereitung in den Sommermonaten sowie die Verbrauchserhöhung in der Heizzeit abgelesen werden.

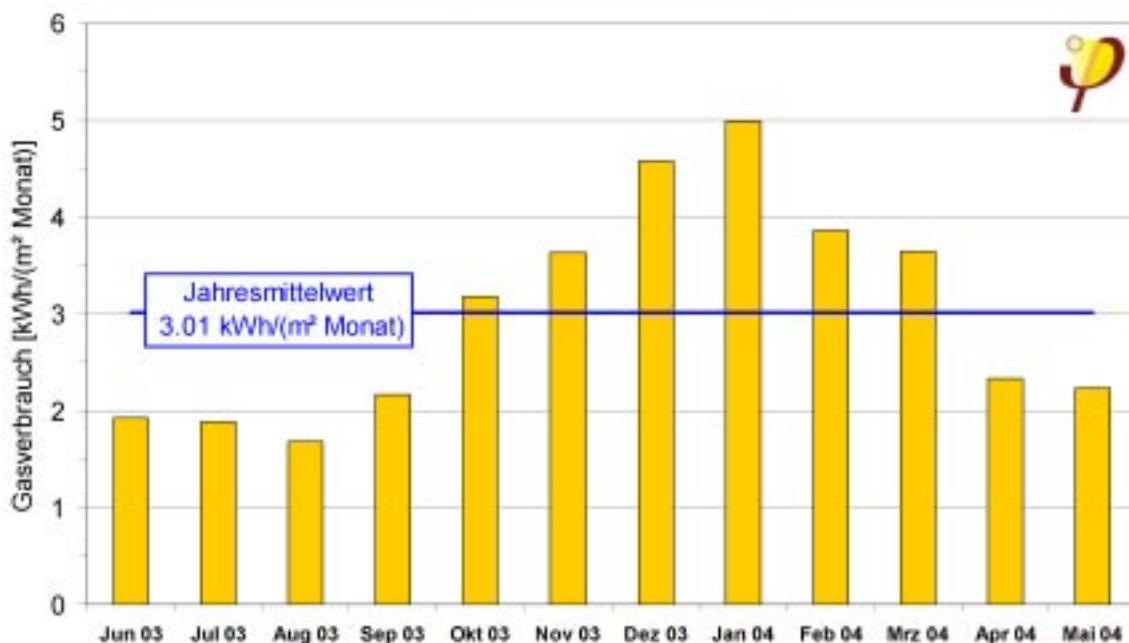


Abbildung 83: Monatliche Gasverbräuche in Bezug auf die gesamte Wohnfläche von Haus A und B.

Mit den beiden Hauptwärmeverzählern für Haus A und B im Technikkeller werden die Gesamtwärmeverbräuche für Heizung und Warmwasser inkl. der nutzbaren und nicht nutzbaren Rohrleitungsanteile gemessen, welche an die beiden Gebäude übergeben werden. Diese Wärmeenergie-Messdaten werden ebenfalls flächen-

bezogen ausgewertet und dargestellt. Die Monatsverbräuche von Haus A liegen zwischen 1,3 und 4,4 kWh/(m<sup>2</sup> Monat), die von Haus B deutlich höher zwischen 1,9 und 5,0 kWh/(m<sup>2</sup> Monat). Im Monatsmittel ergeben sich für Haus A 2,4 kWh/(m<sup>2</sup> Monat) für Haus B 3,0 kWh/(m<sup>2</sup> Monat). Als Jahressumme ergibt sich für Haus A ein Wert von 29,3 kWh/(m<sup>2</sup>a) und für Haus B 36,5 kWh/(m<sup>2</sup>a).

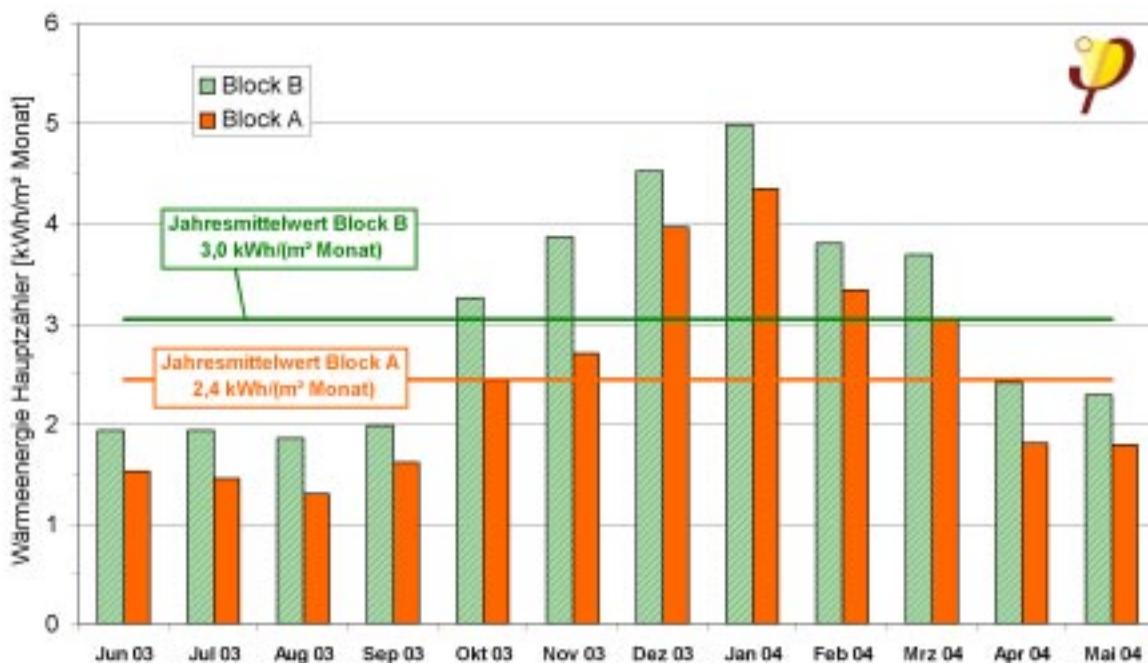


Abbildung 84: Monatswerte des Wärmenergiebezugs für Heizung und Warmwasserbereitung inkl. der nutzbaren und nicht nutzbaren Rohrleitungsanteilen (beide Haupt-Wärmemengenzähler) in Haus A und B im Jahreszeitraum Juni 2003 bis Mai 2004.

Die Jahressumme für den Gasverbrauch beträgt 36,1 kWh/(m<sup>2</sup>a), die des gesamten Wärmebezugs (Summe beider Hauptwärmemengenzähler) 32,3 kWh/(m<sup>2</sup>a) (siehe Abbildung 85). Die Differenz aus den beiden Jahressummen stellen die Umwandlungsverlust vom Kessel sowie die Speicher- und Rohrleitungsverluste im Technikkeller dar. Die Verluste im Kellerbereich betragen bei dieser konventionellen Wärmeversorgungstechnik 6982,2 kWh im Jahr und damit bezogen auf die gesamte Energiebezugsfläche 3,79 kWh/(m<sup>2</sup>a). Diese Wärmemenge wird außerhalb der thermischen Hülle des Gebäudes freigesetzt und kann daher nicht genutzt werden. Im Bezug auf die Verbrauchsdaten der Gebäude ist hier noch erhebliches Optimierungspotential vorhanden.

Die monatliche Entwicklung der Jahresdaten ist in Abbildung 86 dargestellt. Es ist zu beachten, dass die Verluste im Kellerbereich wegen der ganzjährigen Wärmeversorgung für die Warmwasserbereitung nicht nur in der Heizzeit anfallen. Die absoluten Verluste in den Sommermonaten fallen geringer aus als in der Heizzeit. Der oben angegebene Jahresverlustwert von 3,79 kWh/(m<sup>2</sup>a) darf damit nicht nur für die Heizzeit in Bezug zum - weiter unten dargestellten - reinen Heizwärmeverbrauch gesetzt werden.

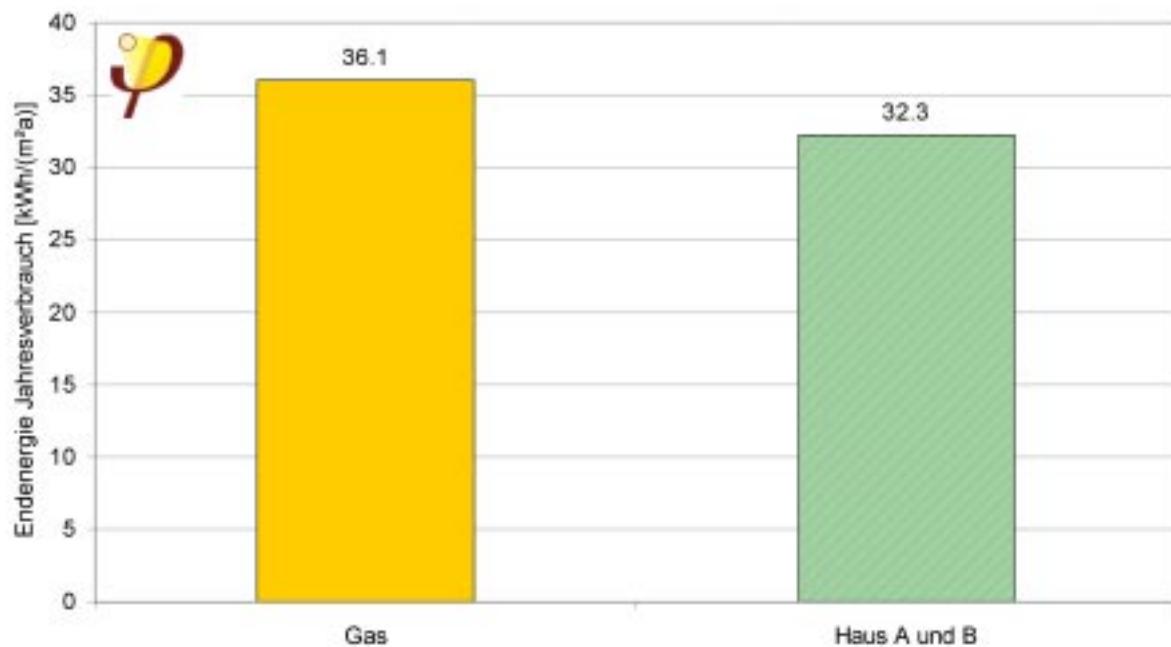


Abbildung 85: Flächenbezogene Jahressummen des Gasbezugs und der bezogenen Wärmemenge an den beiden Hauptwärmemengenzählern (Juni 2003 bis Mai 2004).

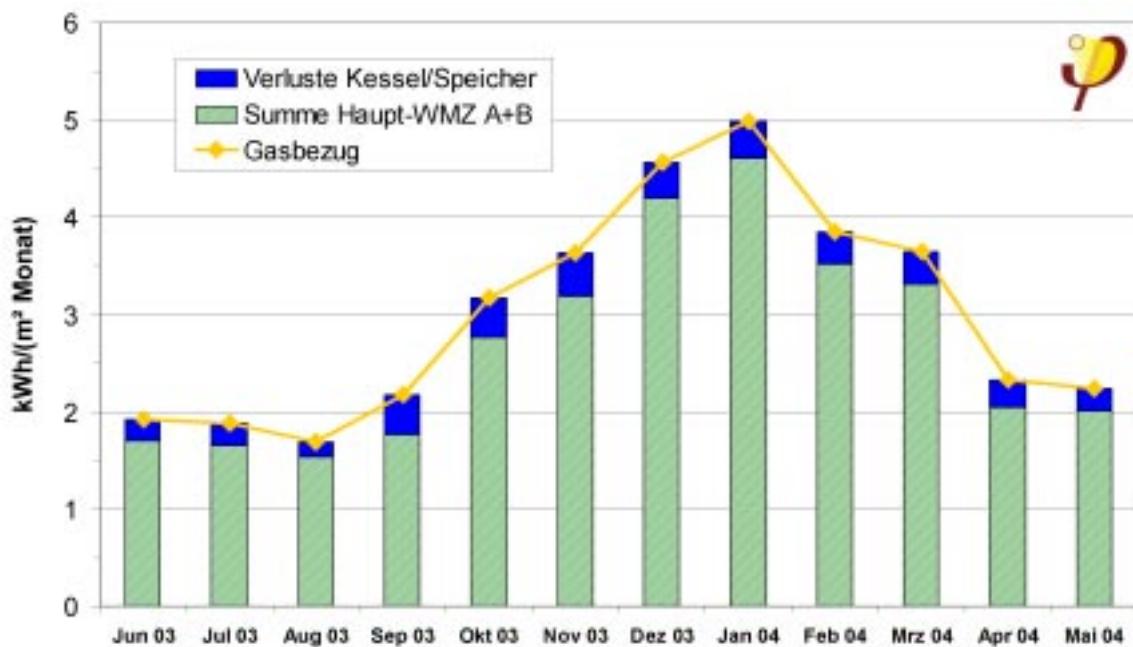


Abbildung 86: Umwandlungsverluste von Kessel, Speicherverluste sowie Rohrleitungsverluste im Keller als Differenz zwischen Gasbezug und gemessener Hauptwärmemenge (Juni 2003 bis Mai 2004).

#### 10.4.2 Wärmeverbrauch der einzelnen Wohnungen

In allen 19 Wohnungen wird mittels des jeweiligen Gesamtwärmezählers der Wärmeverbrauch für Warmwasser- **und** Heizung gemeinsam gemessen. Die Verbrauchsdaten liegen zwischen 4,9 und 35,4 kWh/(m<sup>2</sup>a). Als Jahresverbrauch ergibt sich im Mittel der 19 Wohnungen ein Verbrauch von **18,8 kWh/(m<sup>2</sup>a)** für die an den

Wärmemengenzählern (WMZ) gemessene Gesamtwärme Heizung **und** Warmwasser. Nicht berücksichtigt wird bei der Messung der Anteil der für die Raumwärme nutzbaren Wärmeabgabe der Wärmeversorgungsrohrleitungen. Dieser trägt, nur in der Heizzeit erwünscht, direkt zur Beheizung der Wohnungen bei.

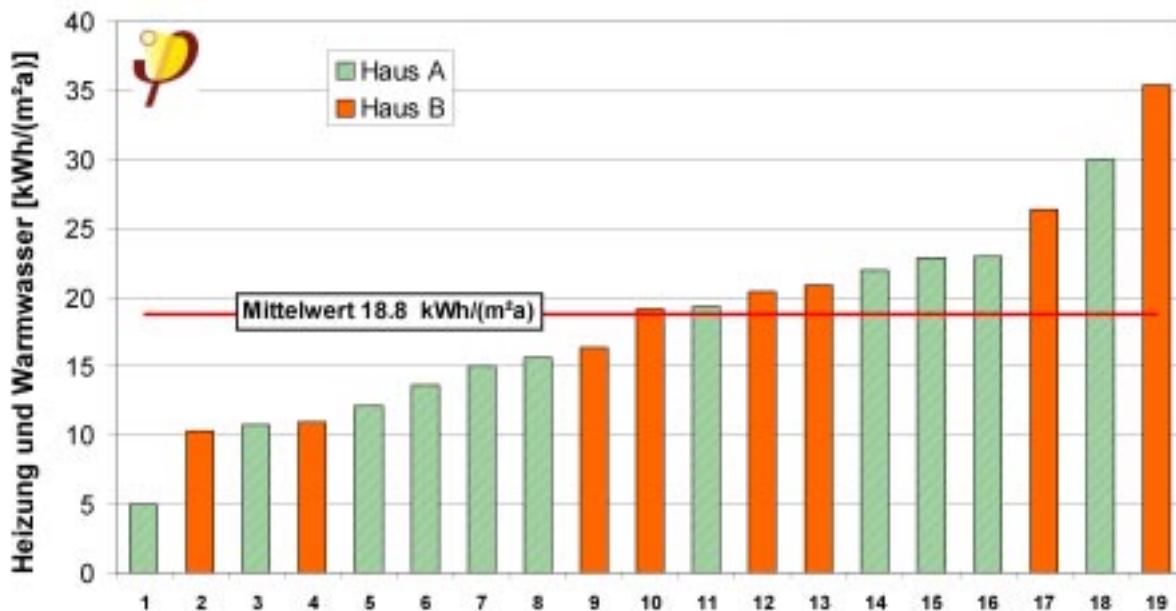


Abbildung 87: Nutzwärmeverbräuche je Quadratmeter Energiebezugsfläche für Heizung **UND** Warmwasser in der Zeit von Juni 2003 bis Ende Mai 2004 von allen 19 Wohnungen ohne die nutzbaren Rohrleitungsanteile (aufsteigend sortiert).

Die Bandbreite der unterschiedlichen Verbrauchswerte für die Nutzwärme Heizung **und** Warmwasser von -74 bis +86 % um den Mittelwert überraschen nicht, sie weisen die übliche Verteilung auf. Hier spiegeln sich insbesondere die unterschiedlichen Nutzergewohnheiten auf einem insgesamt sehr niedrigem Energieniveau wieder. Entscheidend ist, dass alle Wohnungen technisch funktionieren, ausreichend warm werden und dabei über gute Luftqualität verfügen.

#### 10.4.2.1 Wärmeabgabe Rohrleitungen

Aus der im Keller gelieferten Wärmemenge für jedes Haus (zwei Haupt-WMZ) und der Summe der bezogenen Wärmemengen für Heizung und Warmwasser (Gesamt-WMZ) aller Wohnungen eines Hauses ergibt sich - im gleichen Zeitraum betrachtet - jeweils eine Differenz. Diese beiden Beträge stellen die „Verbräuche“ für die Energieverteilung für Heizung und Warmwasser mit dem hydraulischen Rohrleitungsnetz dar. Sie können allerdings nicht pauschal als sogenannte „Verteilerverluste“ bezeichnet werden, da die Leitungsführung der Wärmeversorgung fast vollständig innerhalb der thermischen Hülle der Gebäude verläuft. In der Heizzeit ist ein Teil dieser Wärmeabgabe der Leitungen „nutzbar“ in dem Sinne, dass sie zur Raum erwärmung beiträgt. Nur der darüber hinaus gehende Wärmebedarf muss aktiv nachgeheizt werden und wird vom jeweiligen WMZ erfasst. Der andere Teil der Leitungswärmeabgabe (der unerwünscht im Sommer anfällt, bzw. in der Übergangszeit nur zu einer nicht benötigten Temperaturerhöhung führt) stellt dagegen einen nicht nutzbaren Verteilverlust dar.

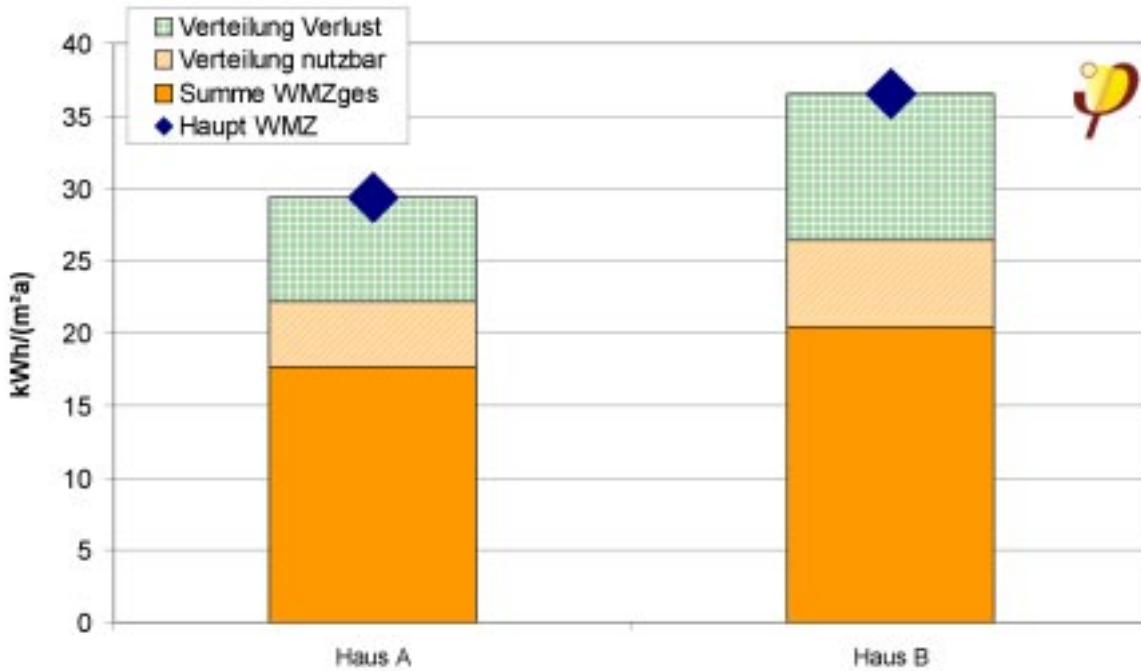


Abbildung 88: Die Differenz aus der Summe aller 8 bzw. 11 Wohnungs-WMZ je Haus und des jeweiligen Haupt-WMZ im Keller ergibt den jeweiligen Anteil der Wärmeabgabe der Verteilleitungen. Ein Teil dieser Wärmeabgabe ist für die RaumwärmeverSORGUNG nutzbar (Betrachtungszeitraum Juni 2003 bis Mai 2004).

Tabelle 13: Daten für Abbildung 88

|                          | Haus A<br>[kWh/(m <sup>2</sup> a)] | Haus B<br>[kWh/(m <sup>2</sup> a)] |
|--------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Haupt WMZ                | 29.3                               | 36.5                               |
| Summe WMZ <sub>ges</sub> | 17.7                               | 20.4                               |
| Verteilung nutzbar       | 4.5                                | 6.0                                |
| Verteilung Verlust       | 7.1                                | 10.1                               |

Die Verteilverluste bei Haus A betragen 7,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) (entspricht 24 % der gelieferten Wärme) bei Haus B 10,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) (entspricht 28 % der gelieferten Wärme). Der Unterschied in der Höhe der Verteilverlusten liegt vermutlich unter anderem in der Erdwärmeleitung begründet, welche nur für Haus B erforderlich war.

Insgesamt beträgt der Verteilungsverlust für beide Gebäude 8,3 kWh/(m<sup>2</sup>a), bzw. 26 % der gelieferten Wärme.

Tabelle 14: Jahreswärmeverbräuche aus Tabelle 13 für Haus A und B gemeinsam

|                          | Haus A und B<br>[kWh/(m <sup>2</sup> a)] |
|--------------------------|--|
| Haupt WMZ                | 32.3                                     |
| Summe WMZ <sub>ges</sub> | 18.8                                     |
| Verteilung nutzbar       | 5.1                                      |
| Verteilung Verlust       | 8.3                                      |

Die Verteilverluste sind in ihrer absoluten Größenordnung *nicht* untypisch für Mehrfamilienhäuser. Es zeigt sich, dass hier ein weiteres Optimierungspotential vorhanden ist.

## 10.5 Heizwärmeverbrauch

Die direkte Messung der Heizwärmeverbräuche wird mit den zusätzlichen WMZ nur in Haus B durchgeführt. Die Auswertung der Jahresverbräuche für die Heizwärme zeigt Verbrauchswerte zwischen 1,7 und 15,6 kWh/(m<sup>2</sup>a). Der Mittelwert für die 8 Wohnungen beträgt 8,5 kWh/(m<sup>2</sup>a).

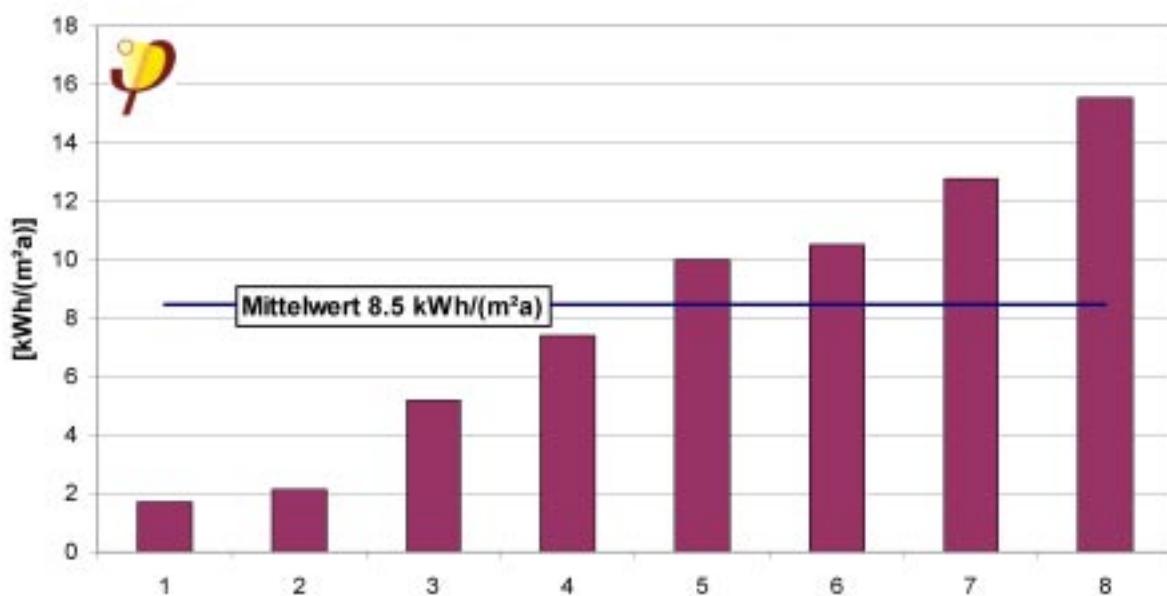


Abbildung 89: Gemessene Jahresheizwärmeverbräuche je Quadratmeter Energiebezugsfläche in den 8 Wohnungen von Haus B in der Zeit vom Juni 2003 bis Mai 2004 (aufsteigend sortiert). Nicht berücksichtigt sind dabei die nutzbaren Wärmeabgaben der Rohrleitungen.

Zu den wohnungsweise gemessenen Heizwärmeverbräuchen in Haus B müssen anteilig die nutzbaren Anteile der Wärmeverteilung von 6,0 kWh/(m<sup>2</sup>a) addiert werden. Diese führen zur Beheizung der Räume und müssen daher hier bilanziert werden (vgl. Abschnitt 10.4.2.1). Die sich dann ergebenden Verbrauchswerte für das gesamte Jahr liegen zwischen 7,7 und 21,6 kWh/(m<sup>2</sup>a) und betragen im Mittel für Haus B **14,5 kWh/(m<sup>2</sup>a)**.

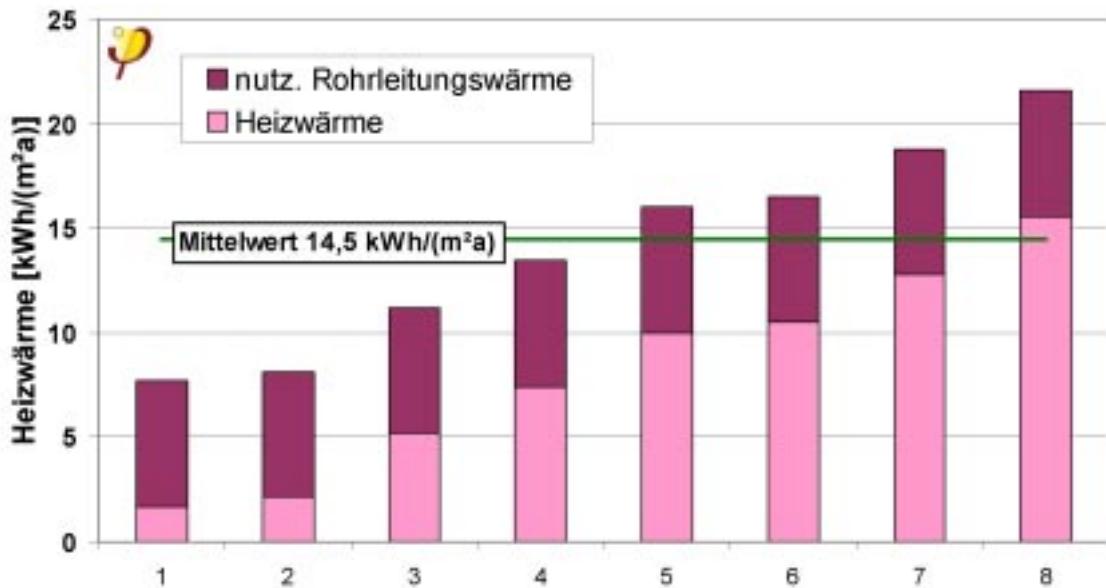


Abbildung 90: Gemessene Jahresheizwärmeverbräuche zuzüglich der nutzbaren Rohrleitungswärme je Quadratmeter Energiebezugsfläche in den 8 Wohnungen von Haus B in der Zeit vom Juni 2003 bis Mai 2004 (aufsteigend sortiert).

### 10.5.1 Heizwärme Haus A

In Haus A gibt es in den Wohnungen neben den Gesamt-WMZ keine zusätzlichen WMZ für den Heizwärmeverbrauch. Die Heizwärmeverbräuche können hier nur indirekt aus den anderen Messdaten bestimmt werden.

#### Vorgehen:

- Monatsweise Berechnung der spezifischen Energiemenge pro gezapften Kubikmeter Warmwasser für Haus B. Die Energie für die Warmwassererwärmung in Haus B ergibt sich als Differenz der Wärmemenge des jeweiligen Gesamtwärmemesszählers der Wohnung und des zugehörigen Heizungswärmemesszählers. Die Warmwassermengen sind gesondert kontinuierlich gemessen worden (siehe Auswertung weiter unten).
- Monatsweise Berechnung der Energie zur Warmwasserbereitung in Haus A aus den gemessenen Zapfmengen Warmwasser in den Wohnungen von Haus A unter Verwendung der spezifischen Monatswerte zur Warmwassererwärmung aus Haus B.
- Berechnung der Heizwärmeverbräuche in Haus A als Differenz der Gesamt-WMZ der Einzelwohnungen und der berechneten Warmwasserenergiemengen.

Die Methode der Ermittlung der Energieverbräuche über Differenzbildung führen zu erhöhten Fehlern, da alle Einzelmessfehler bei der Differenzbildung in den berechneten (kleineren) Wert eingehen. Die Verwendung der spezifischen Energiemengen der Warmwassererwärmung aus Haus B enthält weitere Vereinfachungen, da sich die Werte wohnungsweise nach Nutzung (Zapflängen und Häufigkeit) unterscheiden.

Die so durchgeführte Berechnung führt auf Jahres-Heizwärmeverbrauchswerte (Juni 2003 bis Mai 2004) inkl. der nutzbaren Leitungswärmeabgaben für Haus A zwischen 3,9 und 23,3 kWh/(m²a), im Mittel **10,5 kWh/(m²a)**.

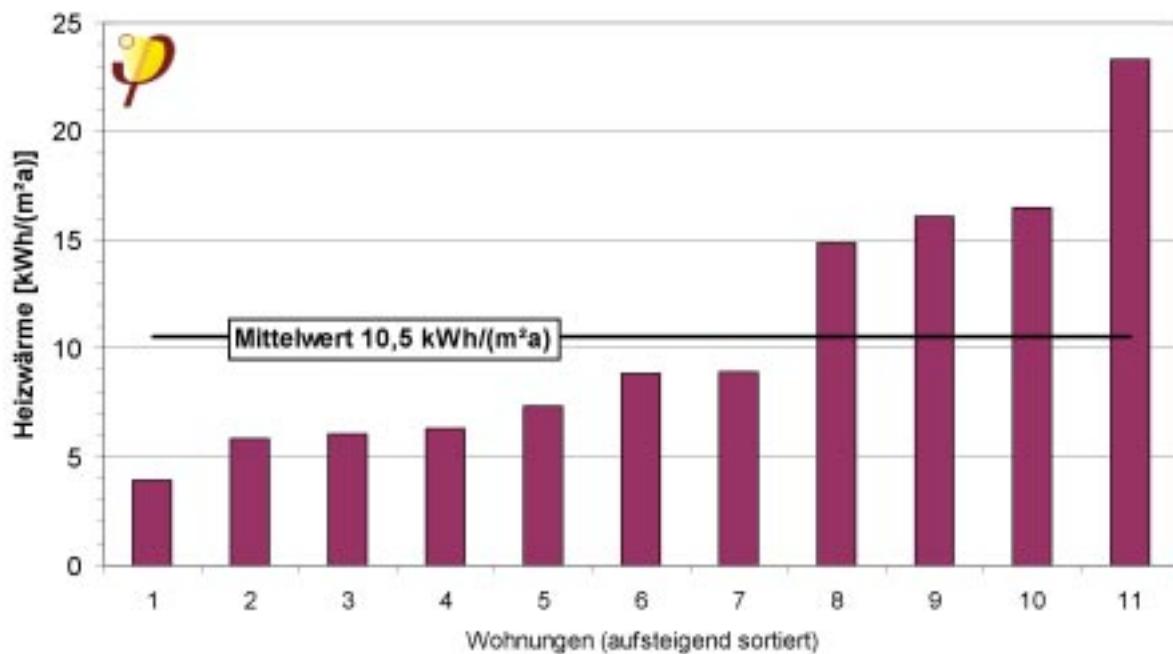


Abbildung 91: Gemessene Jahresheizwärmeverbräuche inkl. der nutzbaren Rohrleitungswärme je Quadratmeter Energiebezugsfläche in den 11 Wohnungen von Haus A in der Zeit vom Juni 2003 bis Mai 2004 (aufsteigend sortiert).

Für beide Häuser ergibt sich ein Mittelwert von 12,2 kWh/(m<sup>2</sup>a) für die Beheizung inkl. der nutzbaren Rohrleitungswärmeabgaben.

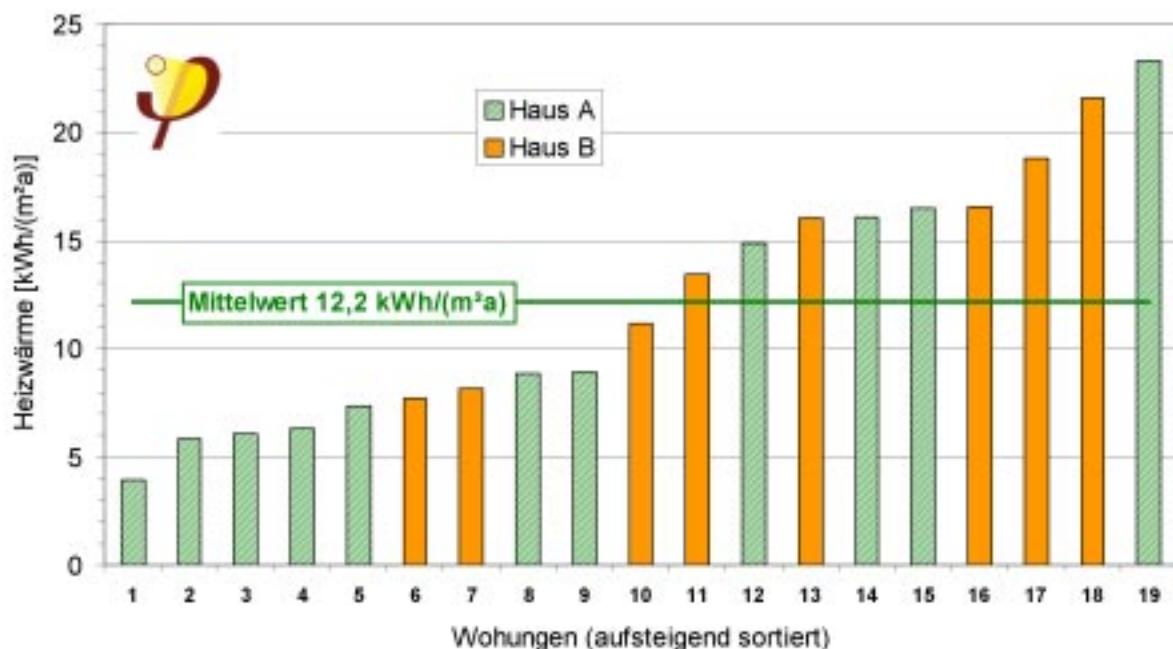


Abbildung 92: Jahresheizwärmeverbräuche zuzüglich der nutzbaren Rohrleitungswärme je Quadratmeter Energiebezugsfläche in allen 19 Wohnungen im Zeitraum von Juni 2003 bis Mai 2004 (aufsteigend sortiert).

### 10.5.2 Heizlasten Haus B

Die Heizleistungen in Passivhäusern sind - wenn ausschließlich über die Zuluft geheizt wird - nach der PHPP-Vorausberechnung auf  $11,6 \text{ W/m}^2$  begrenzt („Zuluftheizung“). Für höhere Leistungen wären auch höhere Lufttemperaturen notwendig, bei denen die Staubverschweilung und die damit verbundenen Geruchsbelastungen nicht ausgeschlossen werden könnten. Die Heizleistung in Haus B kann aus den Messdaten der 8 Heizungs-WMZ ermittelt werden. Den Verlauf während der Heizperiode 2003/2004 in Verbindung mit dem Außentemperaturverlauf zeigt Abbildung 93. Leicht zeitversetzt reagiert die Heizleistung auf den Verlauf der Außentemperatur. In dem dargestellten Leistungsverlauf sind auch die Leistungsanteile aus den nutzbaren Anteilen der Wärmeabgabe der Rohrleitungen enthalten.



Abbildung 93: Verlauf der Heizleistung in Haus B inkl. der nutzbaren Rohrleitungs-wärmeabgaben und Außentemperaturverlauf (1.10.2003 bis 30.4.2004).

Als maximaler Tagesmittelwert für die Heizleistung ergibt sich für Haus B ein Wert von  $6,0 \text{ W/m}^2$ . Die vorausberechnete Heizleistungsgrenze ist damit in der Heizperiode deutlich unterschritten worden. Dies liegt nicht an den installierten Wärmeabgabesystemen; diese könnten (auch wegen der zusätzlich vorhandenen Badheizkörper) eine erheblich höhere Leistung bereitstellen. Da die Wärmeverbräuche in Haus A noch niedriger liegen als in Haus B, ist davon auszugehen, dass auch dort die tagesmittleren Heizleistungen eingehalten werden.

Für hochwärmegedämmte Gebäude ist zur Beurteilung der Heizlasten die Bestimmung der theoretischen Heizgeraden hilfreich. Diese Gerade stellt die Abhängigkeit der Heizlast von der Außentemperatur dar. Die Heizgerade wird theoretisch bestimmt aus den Daten der Gebäudehülle (Flächen, U-Werte), der Lüftungsanlagen (Luftmengen und Wärmerückgewinnung) und der inneren Wärmequellen (Stromverbräuche, Personen) sowie der mittleren Innentemperatur. Der Abstand der gemessenen tagesmittleren Leistungen von der Geraden ist vor allem auf passiv genutzte Solarstrahlung zurückzuführen. Wie bei dem nordausgerichteten Haus B zu erwarten, ist der passive Solareinfluss hier eher gering. Es ist auch keine

Steigerung der Solarerträge an den kältesten und damit meist klaren, strahlungsreicheren Wintertagen abzulesen. Die Gerade schneidet die y-Achse (Abszisse) mit der Heizleistung „Null“  $\text{W/m}^2$  bei etwa  $16,5^\circ\text{C}$ , dieser Wert stellt damit die theoretische Heizgrenze dar. Nennenswerte Heizleistungen liegen allerdings bereits ab  $13,5^\circ\text{C}$  Außentemperatur nicht mehr vor.

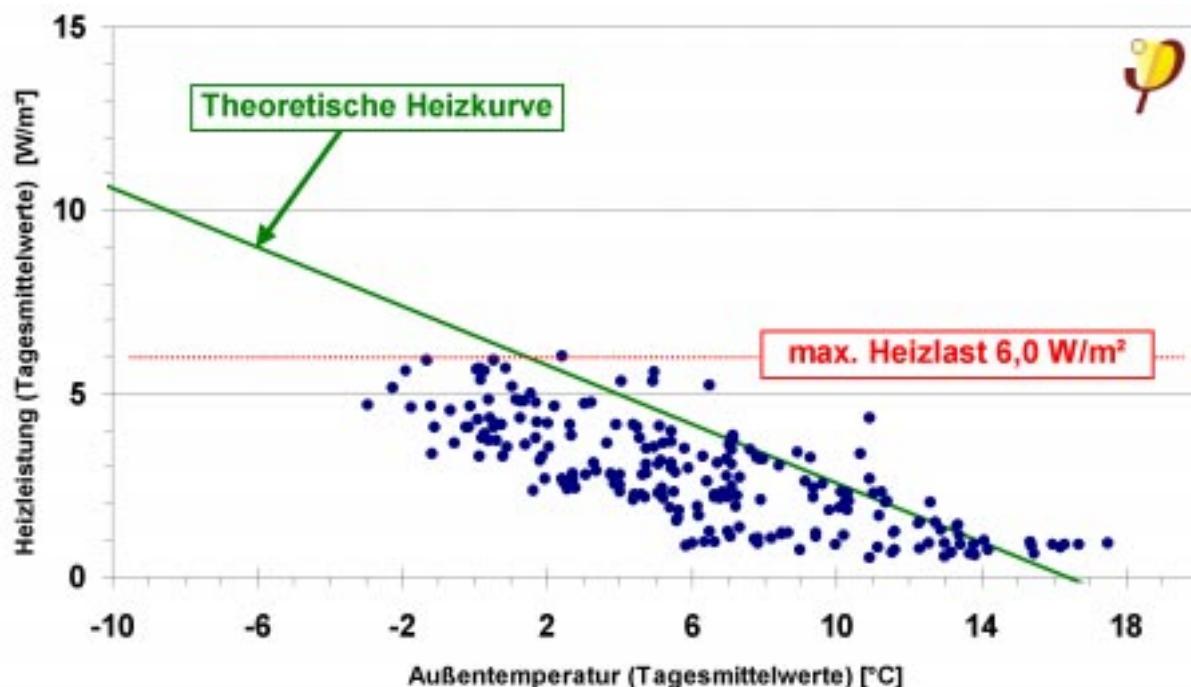


Abbildung 94: Tagesmittlere Heizleistungen inkl. der nutzbaren Rohrleitungswärmeabgaben von Haus B über der Außentemperatur aufgetragen (1.10.2003 bis 30.4.2004). Zusätzlich ist die theoretische Heizkurve eingezeichnet.

## 10.6 Wärmeverbrauch Warmwasser

Der Wärmeverbrauch für die Warmwassererwärmung in Haus B wird aus der Differenz des Gesamtwärmezählers einer Wohnung und des Heizungswärmezählers der Wohnung ermittelt. Für Haus B ergibt sich im Untersuchungszeitraum Juni 2003 bis Mai 2004 ein Mittelwert von  $12,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ , bei Verbrauchswerten zwischen  $7,5$  und  $19,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ . Wie für Passivhaus-Wohngebäude üblich, liegt der Verbrauch damit in ähnlicher Größenordnung wie der Wärmeverbrauch für die Raumheizung.

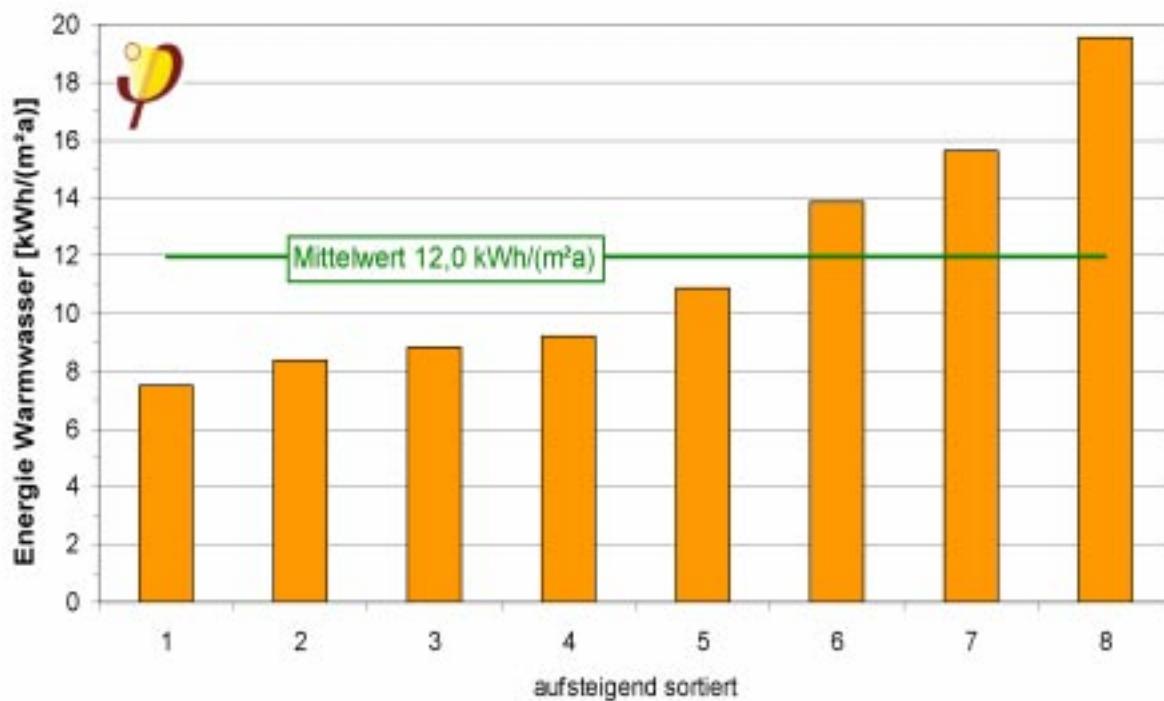


Abbildung 95: Wärmeverbrauch zur Warmwassererzeugung der 8 Wohnungen in Haus B in der Zeit von Juni 2003 bis Mai 2004 (aufsteigend sortiert).

Die Wärmeverbräuche für die Warmwasserbereitung in Haus A werden nach dem beschriebenen Vorgehen in Abschnitt 10.5.1 Punkt 2 ermittelt. Hier ergeben sich spezifische Verbrauchswerte der 11 Wohnungen zwischen 3,4 und 18,1 kWh/(m<sup>2</sup>a). Der Mittelwert liegt - fast gleichauf mit Haus B - bei 11,7 kWh/(m<sup>2</sup>a).

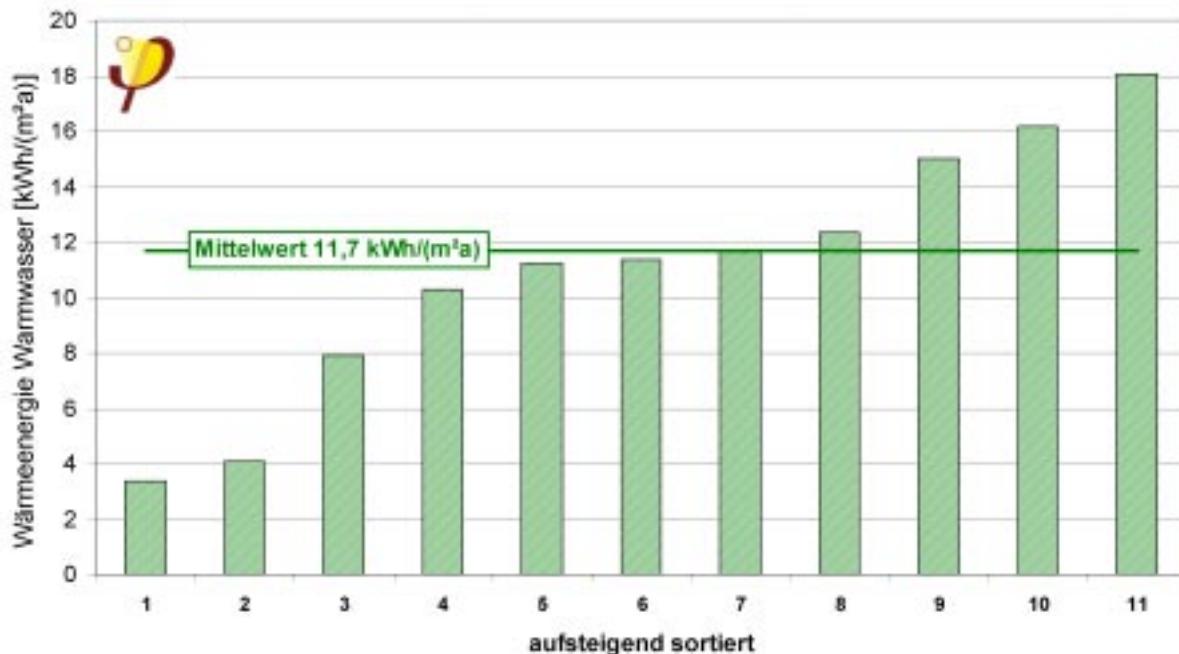


Abbildung 96: Wärmeverbrauch zur Warmwassererzeugung der 11 Wohnungen von Haus A in der Zeit von Juni 2003 bis Mai 2004 (aufsteigend sortiert).

Der Mittelwert beider Häuser für die Warmwasseraufheizung beträgt **11,8 kWh/(m<sup>2</sup>a)**.

## 10.7 Stromverbrauch

Die Stromverbräuche der 19 Wohnungen und der Allgemeinstromverbrauch wurden durch mind. monatliche Ablesungen der Haushaltsstromzähler erfasst. Die Zähler befinden sich zentral im Technikkeller. Dabei beinhaltet der Haushaltsstromverbrauch der Wohnungen auch den Verbrauch der dezentralen Lüftungsgeräte. Der sogenannte „Allgemeinstrom“ beinhaltet die elektrischen Verbräuche der Heizung, der Pumpen, der Außen-, Keller- und Treppenhausbeleuchtung, der Klingelanlage und des Fahrstuhls.

### 10.7.1 Haushaltsstromverbrauch

Der Verlauf der monatlichen Verbräuche in der Zeit vom Juni 2003 bis zum Mai 2004 zeigt für die Wohnungen Werte von 1,0 bis 4,6 kWh/(m<sup>2</sup> Monat). Die Einflüsse z.B. von Urlaubsabwesenheiten (August) und das Ansteigen in der Winterzeit ist bei vielen Wohnungen abzulesen. Der Allgemeinstrom, bezogen auf die gesamte Energiebezugsfläche, ist über das Jahr gesehen annähernd konstant. Im Mittel liegt der Monatswert bei 0,34 kWh/(m<sup>2</sup> Monat).

Die Jahres-Stromverbräuche aller 19 Wohnungen sind in Abbildung 98 dargestellt. Sie betragen je nach Wohnung zwischen 18,4 und 47,3 kWh/(m<sup>2</sup>a). Der Jahres-Mittelwert beträgt **29,4 kWh/(m<sup>2</sup>a)**. Der Wert ist im bundesdeutschen Vergleich etwas niedriger als der Durchschnittsverbrauch und das obwohl hier die Lüftungsgeräte bereits enthalten sind. Sie zählen in den meisten deutschen Haushalten noch nicht zur Standardausstattung. Zusätzlich ist allerdings der „Allgemeinstrom“ für Technikkeller (Heizung, Pumpen), Außen- Keller- und Treppenhausbeleuchtung, Klingelanlage und Fahrstuhl mit **4,0 kWh/(m<sup>2</sup>a)** zu berücksichtigen.

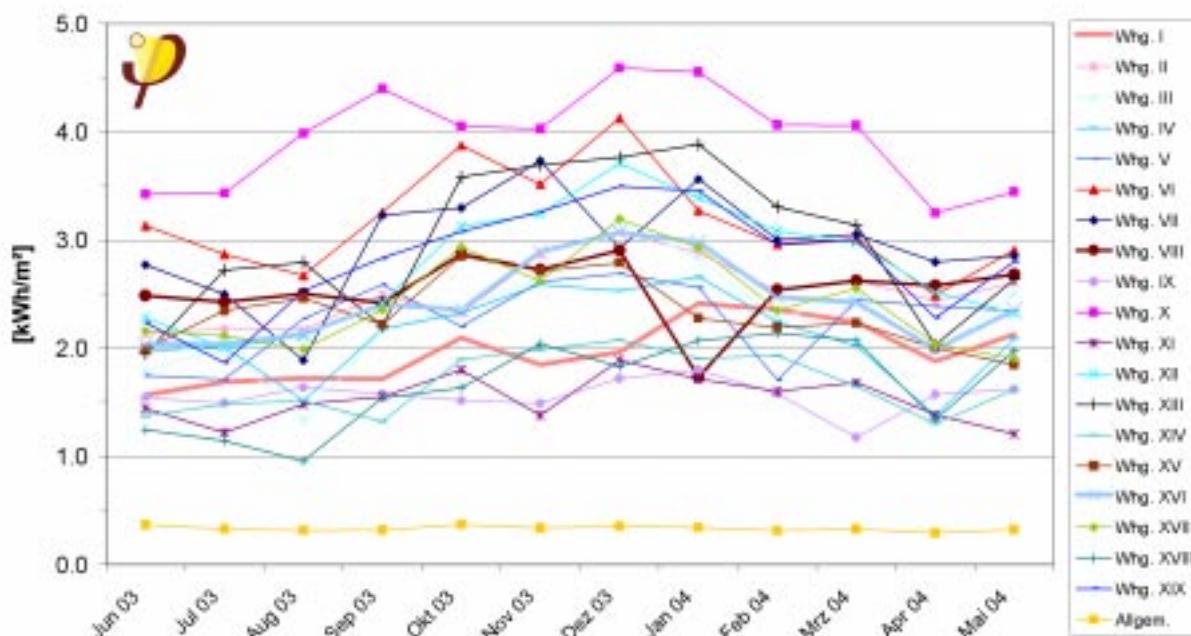


Abbildung 97: Monatliche Haushaltstromverbräuche inkl. Lüftungsanlagen aller 19 Wohnungen und des Allgemeinstroms pro Monat und je Quadratmeter Energiebezugsfläche (Juni 2003 bis Mai 2004). Der Allgemeinstrom ist auf die gesamte Energiebezugsfläche bezogen dargestellt.

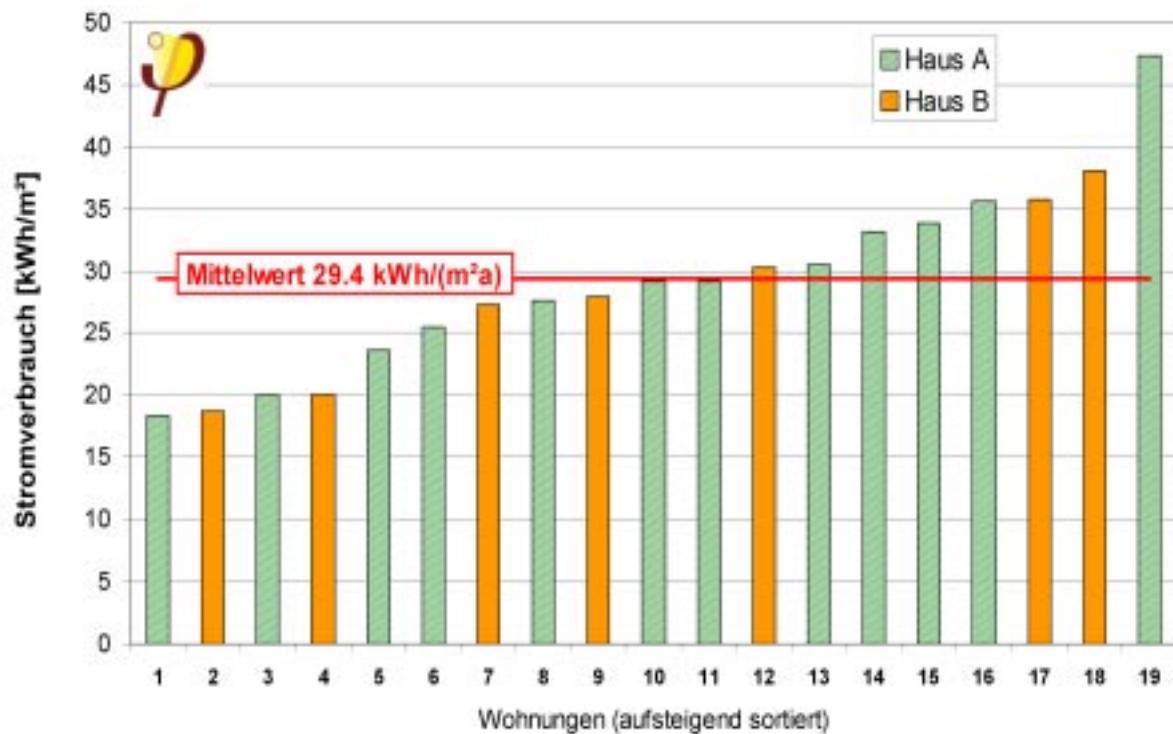


Abbildung 98: Flächenbezogener Jahres-Haushaltsstromverbrauch inkl. Lüftungsanlagen aller 19 Wohnungen im Zeitraum Juni 2003 bis Mai 2004.

Wird der Jahres-Stromverbrauch der beiden Häuser verglichen, zeigt sich, dass der Verbrauch in Haus A im Durchschnitt knapp 2 kWh/(m<sup>2</sup>a) höher liegt als in Haus B. In Haus B sind damit im Durchschnitt geringere innere Wärmequellen vorhanden, was zusätzlich zur Nordorientierung den Heizwärmeverbrauch erhöht.

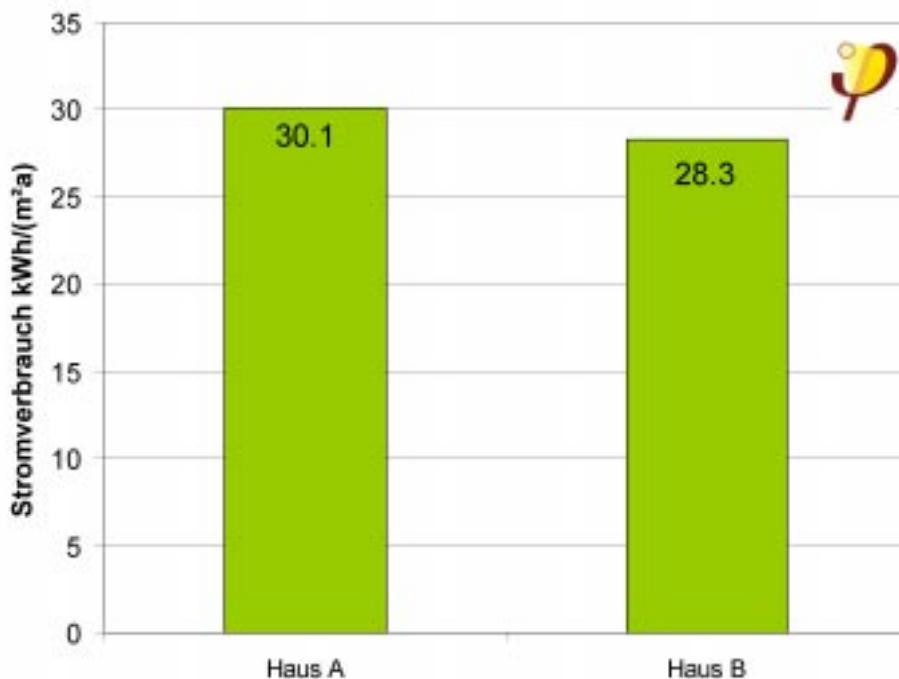


Abbildung 99: Flächenbezogener Jahres-Haushaltsstromverbrauch inkl. Lüftungsanlagen für Haus A und Haus B im Zeitraum Juni 2003 bis Mai 2004.

Abbildung 100 zeigt die Stromverbräuche pro Personen nach Haushaltsgrößen sortiert. Diese liegen zwischen 574 und 1890 kWh/(Person a). Bis auf die Dreipersonenhaushalte zeigt sich die erwartete Stufung der Mittelwerte nach Haushaltsgrößen: Je höher die Personenzahl in einem Haushalt, desto geringer der personenbezogene Verbrauch. Es gibt nur einen Haushalt mit 5 Personen, dieser wurde aus Datenschutzgründen hier nicht mit dargestellt.

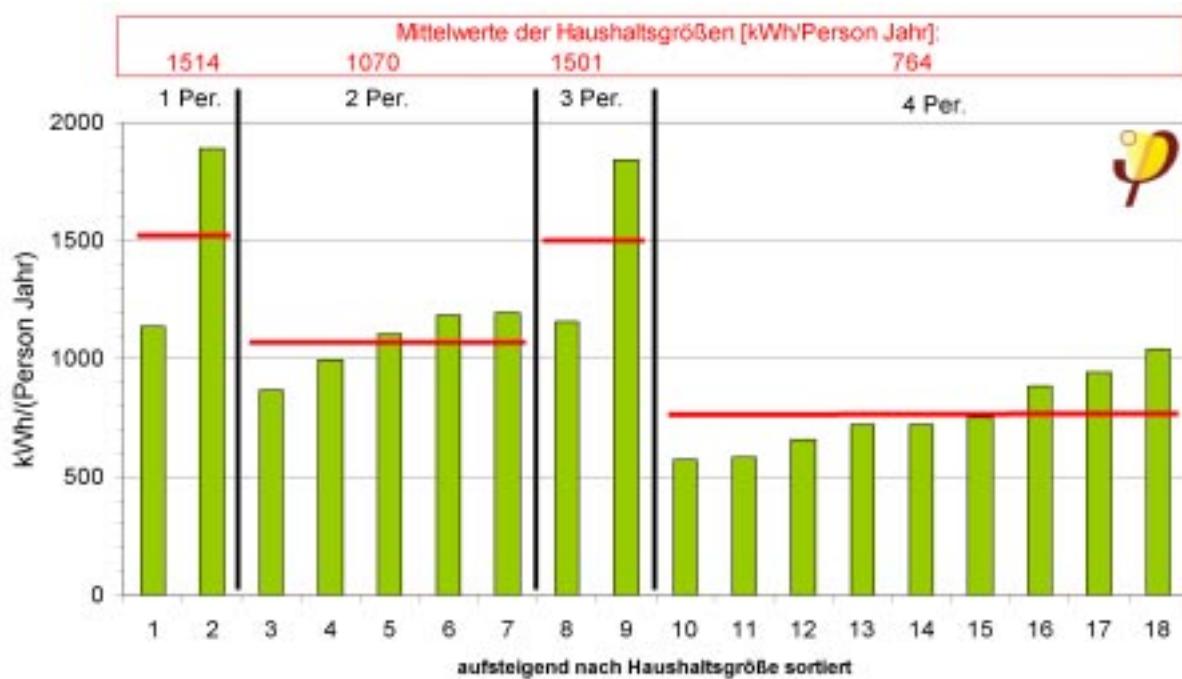


Abbildung 100: Jahresstromverbrauch pro Person sortiert nach Haushaltsgrößen (6.03 bis 5.04).

### 10.7.2 Lüftungsgerät

Der Haushaltsstromverbrauch der einzelnen Wohneinheiten wurde - wie oben bereits beschrieben - jeweils durch die Wohnungszähler im Keller über visuelle Ablesung mind. monatlich erfasst. Diese Verbräuche beinhalten jeweils auch den Stromverbrauch für Ventilatoren, Frostschutzheizung und Steuerung der Lüftungsgeräte. Um eine möglichst genaue Abschätzung für den Stromverbrauch der Lüftungsgeräte zu ermöglichen, wurden vor Bezug der Wohnungen (am 18.12.2002) und nach dem Bezug nochmals (am 15.05.2003) stichprobenartig in einigen Wohnungen die Leistungsaufnahme bei unterschiedlichen Ventilatorstufen gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 15 und Tabelle 16 dargestellt. Nach der Nutzeranweisung im Deckel der Bedienteile für die Lüftungsanlagen sollen nur die Stufen 4 bis 6 genutzt werden. Die Mittelwerte aller Messungen liegen für die zu nutzenden Stufen 4, 5, und 6 zwischen **33 und 64 Watt** elektrischer Leistungsaufnahme (Tabelle 17).

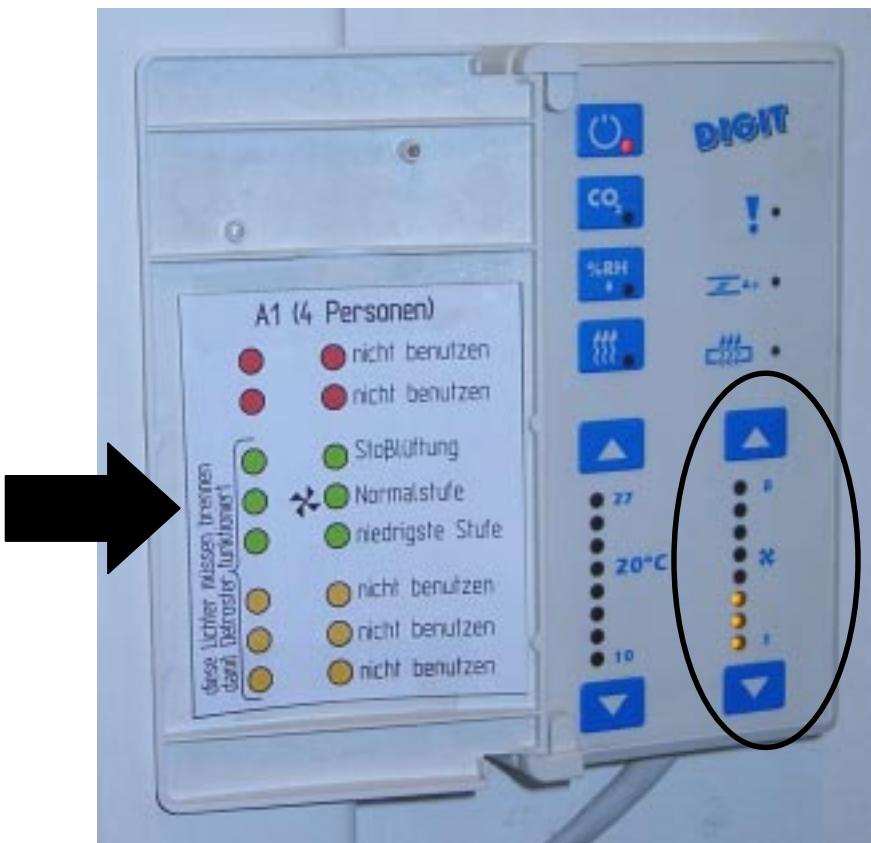


Abbildung 101: Bedienteil des Lüftungsgerätes im Abstellraum einer jeden Wohnung. Benutzt werden sollen nur die drei Stufen 4, 5 und 6 (Anzahl der rechts leuchtenden Dioden im Kreis)

Tabelle 15: Leistungsmessung vom 18.12.2002 der Lüftungsgeräte (Fa. Vallox) im eingebauten Zustand in ausgewählten Wohneinheiten. Grau unterlegt sind die drei Stufen, welche von den Bewohnern genutzt werden sollen.

| Lüfterstufe (= Anzahl der Leuchtdioden) | Wohnung V<br>[Watt] | Wohnung VI<br>[Watt] | Wohnung XIII<br>[Watt] | Wohnung XVII<br>[Watt] | Mittelwert<br>[Watt] |
|---|---------------------|----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| 1                                       | 15.2                | 15.6                 | 15                     | 15.2                   | <b>15</b>            |
| 2                                       | 18.5                | 18.8                 | 18                     | 19                     | <b>19</b>            |
| 3                                       | 25                  | 25                   | 24                     | 25                     | <b>25</b>            |
| 4                                       | 35                  | 35                   | 34                     | 36                     | <b>35</b>            |
| 5                                       | 50                  | 50.4                 | 49                     | 51                     | <b>50</b>            |
| 6                                       | 66                  | 66                   | 63                     | 66                     | <b>65</b>            |
| 7                                       | 91                  | 90                   | 85                     | 93                     | <b>90</b>            |
| 8                                       | 132                 | 124                  | 121                    | 130                    | <b>127</b>           |

**Tabelle 16: Leistungsmessung vom 15.05.2003 der Lüftungsgeräte (Fa. Vallox) im eingebauten Zustand in ausgewählten Wohneinheiten. Grau unterlegt sind die drei Stufen, welche von den Bewohnern genutzt werden sollen.**

| Lüfterstufe (= Anzahl der Leuchtdioden) | Wohnung VII<br>[Watt] | Wohnung X<br>[Watt] | Wohnung XVII<br>[Watt] | Mittelwert<br>[Watt] |
|---|-----------------------|---------------------|------------------------|----------------------|
| 1                                       |                       |                     |                        |                      |
| 2                                       |                       |                     |                        |                      |
| 3                                       | 23                    | 24                  | 24                     | <b>24</b>            |
| 4                                       | 32,8                  | 24                  | 34,4                   | <b>30</b>            |
| 5                                       | 48                    | 50,3                | 49                     | <b>49</b>            |
| 6                                       | 61,3                  | 64                  | 61,9                   | <b>62</b>            |
| 7                                       |                       | 89,9                | 88                     | <b>89</b>            |
| 8                                       |                       | 123                 | 120                    | <b>122</b>           |

**Tabelle 17: Mittelwerte aus den Leistungsmessungen der Lüftungsgeräte.**

| Lüfterstufe | Mittelwert<br>[Watt] |
|-------------|----------------------|
| 1           | 15                   |
| 2           | 19                   |
| 3           | 24                   |
| 4           | 33                   |
| 5           | 50                   |
| 6           | 64                   |
| 7           | 89                   |
| 8           | 124                  |

#### 10.7.2.1 Verbrauchsmessungen Lüftungsgeräte

Um den elektrischen Stromverbrauch der Lüftungsgeräte während der normalen Nutzung zu bestimmen wurden in zwei Wohnungen als Zusatzmessungen Zwischenzähler installiert. Über einen längeren Zeitraum (217 Tage) wurde der Verbrauch der beiden Geräte gemessen. In der einen Wohnung wurden - hochgerechnet auf ein gesamtes Jahr - 337,4 in der anderen 301,0 kWh/Jahr gemessen. Im Mittel der beiden Wohnungen ergibt sich ein Jahresstromverbrauch von 319,2 kWh/Jahr. Für alle 19 Wohnungen bezogen auf die gesamte Energiebezugsfläche ergibt sich ein spezifischer Verbrauch für die Lüftung von **3,29 kWh/(m<sup>2</sup>a)**.

Die gemessenen Verbräuche in den beiden Wohnungen während der 217 Tage entsprechen einer mittleren Leistung von 36,4 Watt. Nach den gemessenen Leistungsmittelwerten aus Tabelle 17 zeigt sich, dass zumindest in diesen beiden Wohnungen die Lüftungsanlage die überwiegende Zeit in der Grundlüftungsstufe 4 betrieben wurde. Nach Aussagen der Bewohner dieser Wohnungen betreiben sie die Anlagen auch in den Sommermonaten durchgehend.

## 10.8 Wasserverbrauch

Die Wasserverbräuche der Wohnungen werden mit Warm- und Kaltwasseruhren gemessen. Die Daten wurden über die M-Bus-Datenerfassung kontinuierlich aufgezeichnet. Im Auswertezeitraum wurden sie ebenfalls getrennt nach Kalt- und Warmwasser ausgewertet und dokumentiert. Dabei ist zu beachten, dass die Kaltwasserzähler den gesamten Wasserverbrauch einer Wohnung messen und die Warmwasserzähler als Unterzähler nur die Teilmengen, welche erwärmt werden. Die Anordnung der Zähler ist Abschnitt 8.3 zu entnehmen. Daher werden hier die Bezeichnungen „Gesamtwasser“ und „Warmwasser“ verwendet.

### 10.8.1 Gesamtwassermenge

Der gesamte Wasserbezug der einzelnen Wohnungen liegt zwischen 525 und 1211 Liter/(m<sup>2</sup> a), der Mittelwert für alle 19 Wohnungen beträgt 785,0 Liter/(m<sup>2</sup> a). Das entspricht Tagesverbräuchen von 54,8 bis zu 117,4 Liter/(Person Tag), im Mittel 67,1 Liter/(Person Tag). Laut Statistischem Bundesamt [Destatis 2004] betrug die Wasserabgabe an private Haushalte im Jahr 2001 durchschnittlich 127 Liter/(Person Tag).

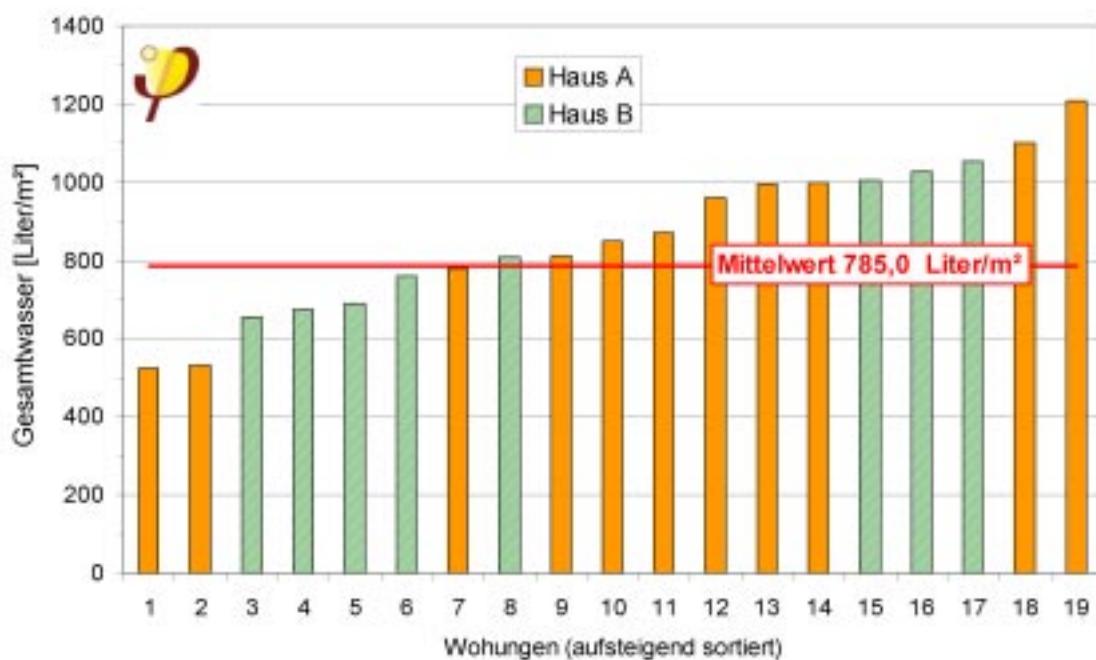


Abbildung 102: Jahres-Gesamtwassermengen pro Quadratmeter der 19 Wohnungen (Juni 2003 bis Mai 2004).

### 10.8.2 Warmwassermenge

Die Jahres-Warmwasserverbräuche sind wohnungsweise in Liter je Quadratmeter Energiebezugsfläche dargestellt. Sie betragen im untersuchten Jahreszeitraum zwischen 59 und 305 Liter/(m<sup>2</sup> a). Der mittlere Verbrauch bestimmt sich zu 204,2 Litern/(m<sup>2</sup> a). Das entspricht Tagesverbräuchen von 9,3 bis zu 33,0 Liter/(Person Tag), im Mittel 17,5 Liter/(Person Tag); zusammen mit den bereits unter Abschnitt 10.6 bestimmten Energieverbräuchen für die Warmwasserbereitung

ergibt sich daraus eine mittlere Temperaturdifferenz zwischen Kalt- und Warmwasser von 49,4 K. Das entspricht ziemlich genau den Standardansätzen im PHPP. Der Pro-Kopf-Wasserverbrauch ist allerdings deutlich geringer als herkömmliche Standardannahmen (25 Liter/(Tag Person) bei 60 °C). Dies war auch bereits bei den Siedlungsprojekten in Wiesbaden und Hannover so. Es muss daher überlegt werden, ob die Standardprojektierungsannahme für die Warmwasser Pro-Kopf-Verbräuche gesenkt werden sollten.

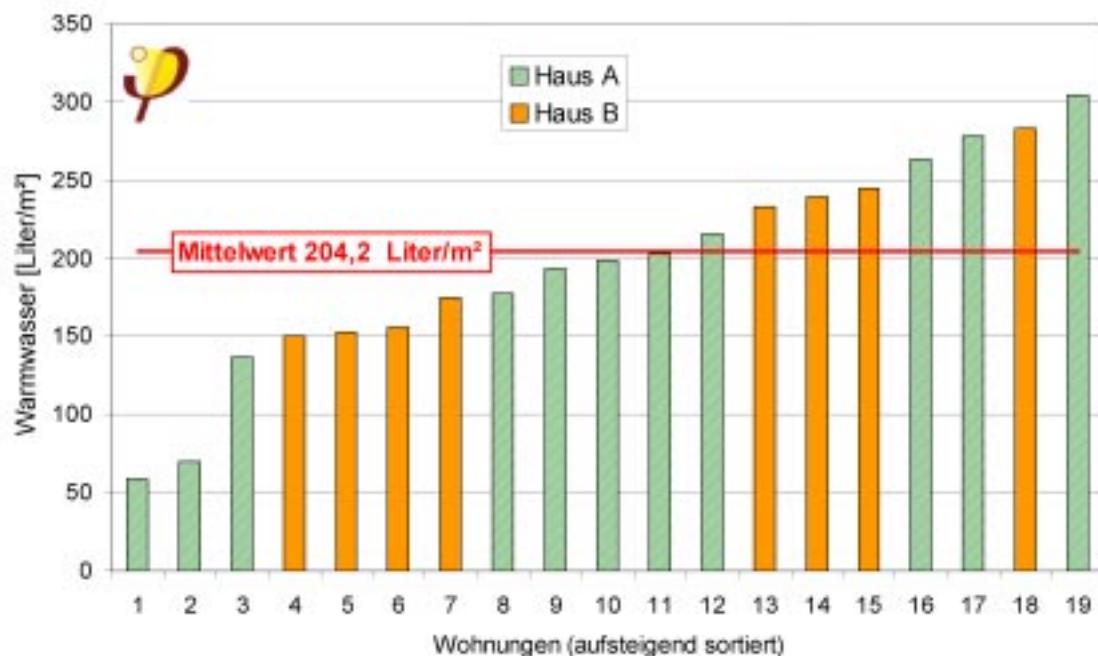


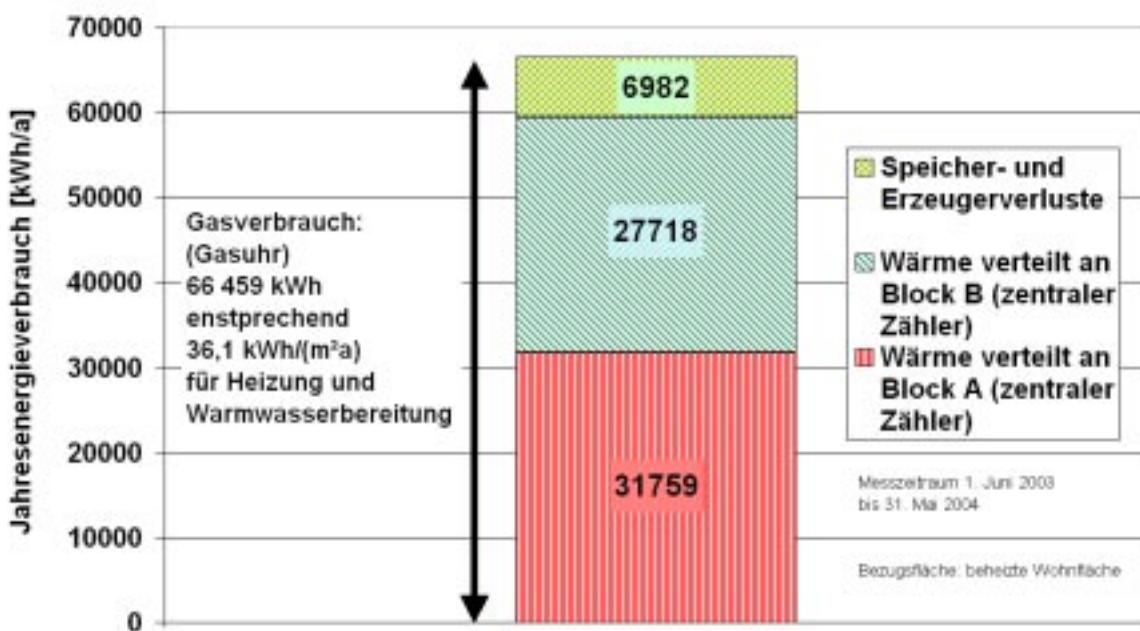
Abbildung 103: Warmwasserverbrauch pro m<sup>2</sup> im Zeitraum Juni 2003 bis Mai 2004 für alle 19 Wohnungen (aufsteigend sortiert).

## 11 Energiebilanzen

Die Messergebnisse mit der höchsten Genauigkeit stellen die an der temperaturkompensierten Gasuhr und an den beiden zentralen Wärmemengenzählern gemessenen Verbrauchswerte dar (vgl. Abbildung 104). Legt man den Gasverbrauch auf die gesamte Wohnfläche um, so ergeben sich  $36,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  Endenergieverbrauch für Heizung und Warmwasser (ohne Hilfsstrom). Dieser gemessene Verbrauch ist sogar um 13% geringer als der Wert nach der ex-ante-Berechnung mit dem PHPP; Hauptursache für den geringeren Verbrauch ist die geringere Warmwasserzapfung gegenüber den Standardannahmen. Ein eingehender Vergleich zwischen Rechnung und Messung erfolgt später.

Das gelieferte Erdgas wurde im Brennwertkessel in Wärme umgewandelt; ein zentraler Speicher sorgt für eine gleichmäßige Wärmelieferung. Nach dem Speicher teilt sich die Versorgung in zwei zentrale Wärmestränge für Haus A und für Haus B noch im Heizungskeller auf. Unmittelbar nach der Aufteilung werden die verteilten Wärmemengen mit zentralen Wärmemengenzählern gemessen. Abbildung 104 zeigt, dass zwischen der Gasuhr und den zentralen Zählern bereits 6982 kWh/a durch Verluste des Brennwertgerätes und des zentralen Speichers verloren gehen. Das entspricht einem Jahresnutzungsgrad der Wärmeerzeugung (inkl. Speicherung) von 89,5 % (Jahresaufwandszahl 111,7%).

**Messergebnisse 2003/2004 Passivhäuser bei St. Jakob / Frankfurt mit  $1842 \text{ m}^2$  Wohnfläche**



**Abbildung 104: Gemessener Gesamterdgasverbrauch und seine Aufteilung auf zentrale Erzeuger- und Speicherverluste sowie die an Haus A und an Haus B gelieferte Wärme**

Wie sich die Energieverbräuche in Haus B weiter auf die Verwendungszwecke aufteilen, zeigt Abbildung Abbildung 105. Die wohnungsweisen Einzelwärmmezähler für Heizwärme führen im Mittel bei Haus B auf eine wohnungsweise geregelte Heizwärmefuhr von  $8,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Die individuellen Wärmeverbräuche für die Warmwasserbereitung ergeben sich aus der Differenzbildung aller wohnungsweisen

Gesamtwärmezähler zu 12 kWh/(m<sup>2</sup>a) und damit deutlich weniger als der übliche Projektionsansatz. Die Differenz zwischen dem zentralen Wärmezähler in Strang B und den an den wohnungsweisen Zählern gemessenen Wärmemengen ist die Wärmeabgabe der Verteilleitungen sowie ein nicht genauer zu bestimmender Anteil möglicherweise unterhalb der Anlaufgrenzen der Einzelwärmezähler nicht mit gemessener verbrauchter Wärme. Kontrollen der Einzelwerte dieser Zähler im Zeitverlauf bei geringen Warmwasserzapfungen und definitiv abgestellter Heizung zeigen jedoch, dass dieser Messfehler im Bereich unter 2 kWh/(m<sup>2</sup>a) liegt.



Abbildung 105: Aufteilung des Endenergieverbrauchs an Erdgas in Haus B, Jahressummen.

Die Wärmeabgabe der Verteilleitungen summiert sich für Haus B zu beachtlichen 16,1 kWh/(m<sup>2</sup>a); sie sind deutlich höher als nach der ex-ante-Berechnung. Die vorliegenden Messergebnisse lassen nur den Schluss zu, dass bei der Installation der Leitungen erhöhte Wärmeverluste durch unzureichende Rohrleitungs- und Armaturendämmung vorliegen. Wie im Kapitel zum Heizwärmeverbrauch beschrieben, ist ein Teil der Wärmeabgabe der Verteilleitungen als interne Wärmeabgabe zu Heizzwecken nutzbar. Dieser nutzbare Anteil beträgt für Haus B 6,0 kWh/(m<sup>2</sup>a), so dass sich der gesamte Heizwärmeverbrauch für Haus B auf 14,5 kWh/(m<sup>2</sup>a) oder 36% der gelieferten Wärme summiert. Der verbleibende Verteilerverlust beträgt 10,1 kWh/(m<sup>2</sup>a), das sind 24,8% der gesamten verteilten Wärme. Der zeitliche Verlauf im Messjahr für die Aufteilung der Wärmelieferung an Haus B ist in Abbildung 106 dargestellt. Aus den Werten für Mai, Juni, Juli, August und September zeigt sich, dass die Anlage im Sommer überwiegend für die Kompensation der Rohrleitungsverluste arbeitet (Sommernutzungsgrad 49%).

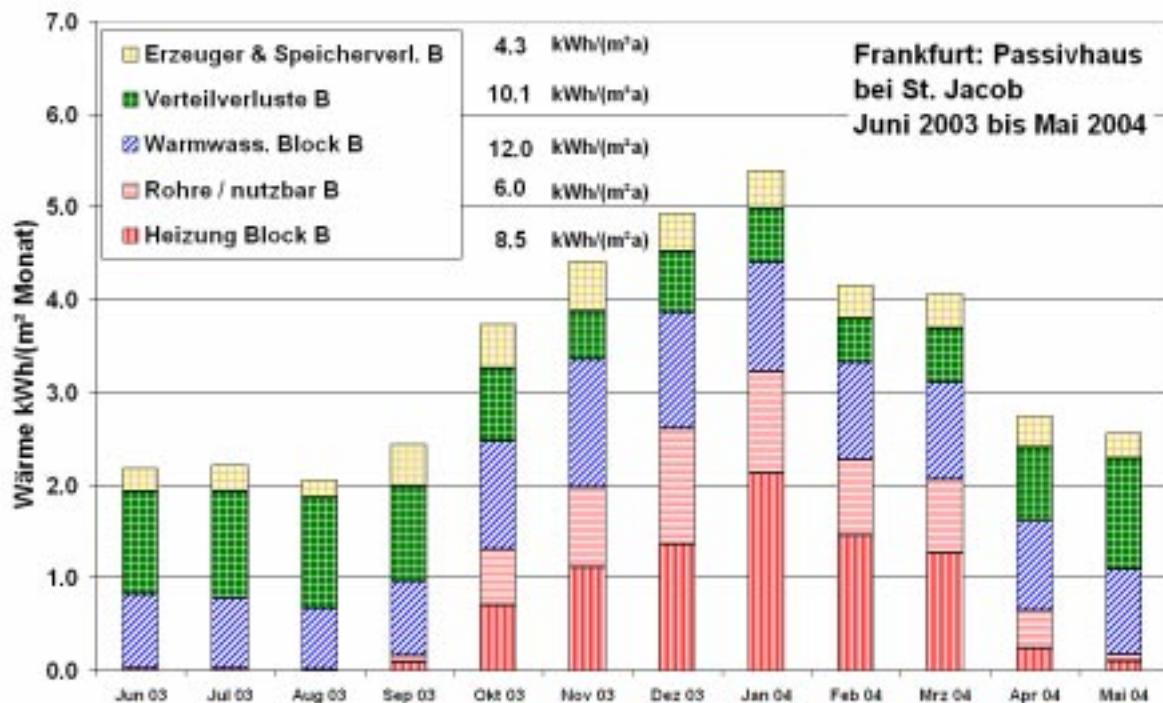


Abbildung 106 Monatsbilanzen für den Wärmeverbrauch in Haus B

In Haus A lässt sich die Wärmeabgabe der Verteilleitungen ebenfalls mit guter Genauigkeit aus der Differenz zwischen dem zentralen Strangzähler im Heizungskeller und der Summe der wohnungsweisen Gesamtzähler ermitteln: es ergeben sich hier  $11,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Der nutzbare Anteil dieser Leitungswärmeabgabe in Haus A lässt sich allerdings nur näherungsweise bestimmen, da in Haus A keine Einzelmessung der Heizwärmeverbräuche und der Raumtemperaturen vorgenommen worden sind. Aus den Hochrechnungen auf Basis der gemessenen Warmwasserzapfungen ergeben sich ungefähr  $4,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  nutzbare Wärmeabgabe der Verteilleitungen in Haus A, so dass die Leitungsverluste in diesem Gebäudeteil  $7,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  oder 22% der gesamten verteilten Wärme betragen. Durch sorgfältige Wärmedämmung der Leitungen könnte ein beachtliches Energiesparpotential erschlossen werden - dies ist übrigens für den sommerlichen Komfort in den Wohnungen von besonderer Bedeutung, da die nicht nutzbare Wärmeabgabe der Leitungen im Sommer sogar zu einer störenden Wärmelast wird.

Aus den einzeln für die Gebäudeteile A und B ermittelten Aufteilungen kann der Endenergieverbrauch des gelieferten Erdgases nun auch nach Verwendung zugeordnet werden. Dies zeigt Abbildung 107: Von den  $36,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  Erdgaslieferungen wurden  $12,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  (34%) für Heiznutzwärme,  $11,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  für Nutzwärme der Warmwasserbereitung (33%), 23% zur Kompensation der Verteilverluste und 11% als Erzeuger- und Speicherverluste aufgewendet.

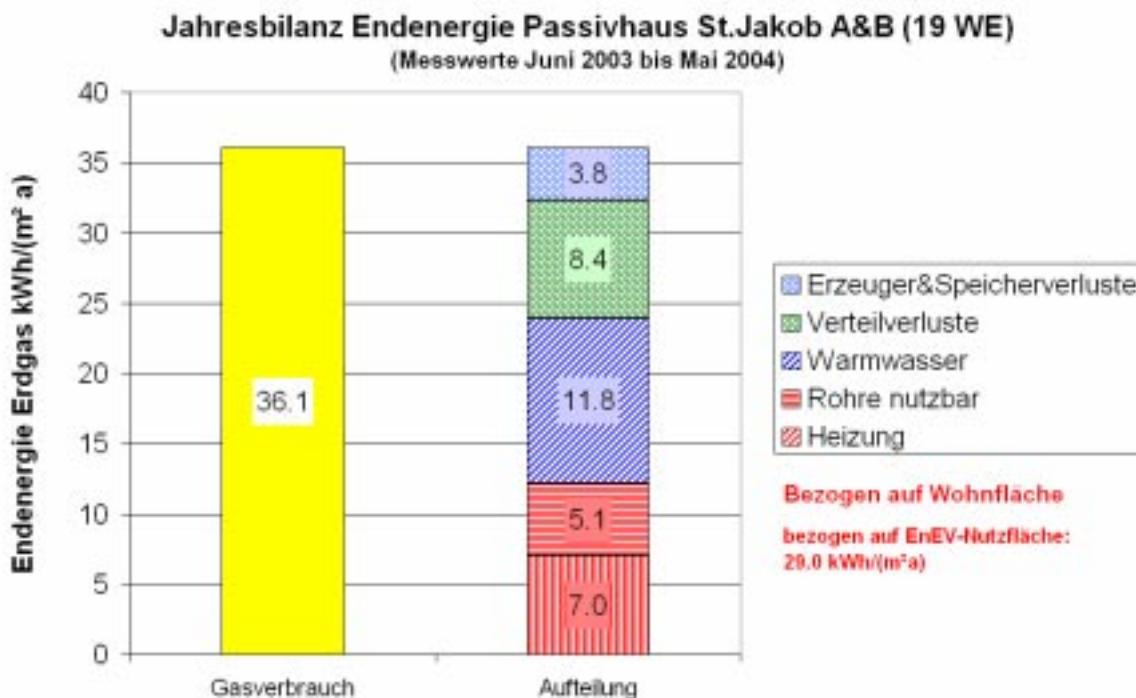


Abbildung 107 Aufteilung des Erdgasverbrauches auf Heizung, Warmwasser und Verteilverluste für beide Gebäudeteile zusammen (Zeitraum Juni 2003 bis Mai 2004)

## 11.1 Primärenergie

### Primärenergie für Heizung, Lüftung und Warmwasser

Zu den im letzten Abschnitt behandelten Gasverbräuchen kommen noch die Hilfsstromverbräuche für die Lüftung und für den Wärmeerzeuger und die Pumpen hinzu. Es hatte sich ergeben

Hilfsstromverbrauch Lüftung (aus Stichprobenmessung) 3,29 kWh/(m<sup>2</sup>a) Strom  
Hilfsstromverbrauch Heizzentrale (gerechnet auf Basis der Leistungsangaben und der Laufzeiten) 0,36 kWh/(m<sup>2</sup>a) Strom.

Mit dem Primärenergiefaktor für Erdgas von 1,1 kWh/kWh und für den Strommix in Deutschland 2,7 kWh/kWh [Gemis][PHPP] ergeben sich damit Primärenergieverbräuche für Heizung, Lüftung und Warmwasserbereitung von

|                    |                             |
|--------------------|-----------------------------|
| Erdgasbezug        | 39,7 kWh/(m <sup>2</sup> a) |
| Hilfsstrom Heizung | 1,0 kWh/(m <sup>2</sup> a)  |
| Hilfsstrom Lüftung | 8,9 kWh/(m <sup>2</sup> a)  |

und damit in der Summe bezogen auf die Wohnfläche 49,6 kWh/(m<sup>2</sup>a). Wählt man an dieser Stelle den Bezug auf die EnEV-Nutzfläche  $A_N$  und verwendet anstelle der Gemis-Werte die Primärenergiefaktoren nach DIN 4701 T10, so ergeben sich insgesamt rund 40 kWh/(m<sup>2</sup>a) Primärenergieverbrauch bezogen auf  $A_N$  für Heizung, Lüftung und Warmwasserbereitung.

Das ist ein sehr gutes Ergebnis, das sogar noch unter den Werten der "ex-ante"-Berechnung mit dem PHPP liegt.

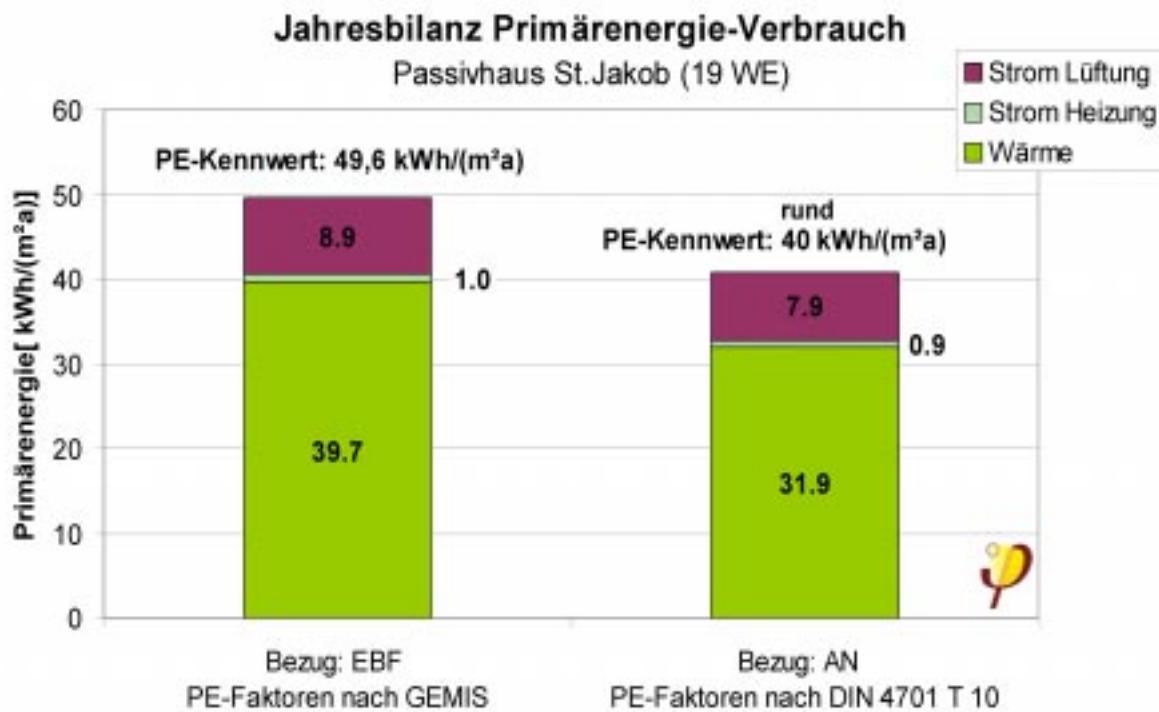


Abbildung 108: Primärenergie Jahresbilanz für Haus A und B (Zeitraum Juni 2003 bis Mai 2004).

Das Ergebnis zeigt, dass Passivhäuser auch in ungünstigen Lagen, sofern sie die PHPP-Kriterien einhalten, grundsätzlich auch sehr günstige Primärenergieverbrauchswerte nach EnEV-Bilanzgrenzen erreichen, selbst wenn dies gar nicht Gegenstand der Projektierung war. Das ist umso bemerkenswerter, weil die hier gemessenen Häuser ganz konventionelle Heiztechnik mit Erdgas verwenden, es keinerlei Installation von erneuerbaren Energieerzeugern gibt (was durchaus bei diesem Projekt möglich und sinnvoll gewesen wäre) und die konventionelle Technik auch noch unnötig erhöhte Leitungsverluste aufweist.

Das Ergebnis unterstreicht, dass die Passivhauskriterien zielführend sind für das Erreichen sehr niedriger Primärenergieverbrauchswerte. Schon durch etwas sorgfältigere Ausführung der technischen Installationen wären weitere Effizienzpotentiale von gut 5 kWh/(m<sup>2</sup>a) erschließbar, so dass auch mit ganz konventioneller Technik selbst in ausgesprochen ungünstigen städtebaulichen Lagen die KfW-40-Zielwerte mit Passivhaus-Gebäudehüllqualität und Wärmerückgewinnung erreichbar sind.

## 11.2 Primärenergie gesamt

Die Trennung zwischen Energiebedarf für die Gebäudetechnik und für den Haushaltsstrom ist aus physikalischer Sicht willkürlich, zumal die Wärmeabgabe der Elektrogeräte in der Wohnung gerade im Passivhaus nicht unbedeutend zur Heizung beiträgt (im hier behandelten Fall sind es etwa 35% der Gesamtwärmeverluste). Dies lässt sich bilanztechnisch nur mit Zurechnungsvereinbarungen abgrenzen - daher wurde für das PHPP schon von Anfang an der Weg beschritten, die gesamte Energielieferung an das Gebäude in die Bilanzen aufzunehmen, also auch den Haushaltsstrom einzubeziehen.

Nach den Stromzählerablesungen betrug der gesamte Haushaltsstromverbrauch für die Wohnungen in Gebäudeteil A 30,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) sowie für Gebäudeteil B 28,3 kWh/(m<sup>2</sup>a). Diese Werte sind wieder auf die Wohnfläche bezogen und sie enthalten den Stromverbrauch für die wohnungsweisen Lüftungsanlagen mit. Im Durchschnitt für das gesamte Objekt ergeben sich 29,4 kWh/(m<sup>2</sup>a) (Stromverbrauch inkl. Lüftung). Dieser Wert ist etwas höher als die ex-ante-Projektierung nach PHPP.

**Tabelle 18: Gesamtprimärenergieverbrauch im Passivhaus bei St. Jakob / Frankfurt. Bezogen sind alle Werte auf die beheizte Wohnfläche, Messjahr ist 01.06.2003 bis 31.05.2004.**

|  | PE-Faktor<br>Gemis          | 2.7<br>kWh <sub>P</sub> /<br>kWh <sub>E</sub> | 1.1<br>kWh <sub>P</sub> /<br>kWh <sub>E</sub> |                              |
|--|-----------------------------|---|---|------------------------------|
| Haus-<br>halts-<br>strom<br>inkl.<br>Lüftung | Strom<br>Technik<br>zentral | Strom<br>gesamt                               | Erdgas<br>gesamt                              | Primär-<br>energie<br>gesamt |
| kWh/<br>(m <sup>2</sup> a)                   | kWh/<br>(m <sup>2</sup> a)  | kWh/<br>(m <sup>2</sup> a)                    | kWh/<br>(m <sup>2</sup> a)                    | kWh/<br>(m <sup>2</sup> a)   |
| Verbrauch A                                  | 30.1                        | 0.29  | 30.4  | 32.8                         |
| Verbrauch B                                  | 28.3                        | 0.47  | 28.8  | 40.8                         |
| <b>Stromverbrauch A+B</b>                    | <b>29.4</b>                 | <b>0.36</b>                                   | <b>29.7</b>                                   | <b>36.1</b>                  |
|  |                             |   |   | <b>119.9</b>                 |

Die Messergebnisse zum Primärenergieverbrauch zeigt Tabelle 18 in der Übersicht. Der Primärenergieverbrauch wird vom Haushaltsstromverbrauch beherrscht (Beitrag 66%). Ganz eindeutig liegt daher der künftige Schwerpunkt zur weiteren Effizienzverbesserung über das Passivhaus hinaus bei effizienten Hausgeräten und effizienter Beleuchtungstechnik. Trotz des etwas höheren gemessenen Stromverbrauches wird das PHPP-Kriterium "120 kWh/(m<sup>2</sup>a)" für den gesamten Primärenergieverbrauch aller nicht erneuerbaren Energieaufwendungen im Haushalt für Haushaltsanwendungen, Lüftung, Heizung und Warmwasserbereitung zusammen durch das Gesamtobjekt gerade eben eingehalten:

Mit den Gemis-Werten für die Primärenergiefaktoren ergeben sich insgesamt

### **119,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) Primärenergieverbrauch bezogen auf beheizte Wohnfläche für Haushaltsstrom, Heizung, Lüftung und Warmwasserbereitung.**

In einem konventionellen Wohngebäude ist dieser nicht erneuerbare Primärenergieverbrauch etwa dreimal so hoch wie im beschriebenen Objekt.

## 12 Vergleich von Messung und Berechnung

In Kapitel 3.3 hatten wir die Ergebnisse der "ex-ante"-Berechnungen mit dem Passivhaus Projektierungspaket dokumentiert, in Kapitel 10 finden sich die Messergebnisse aus einem Jahr Betrieb des Passivhauses bei St. Jakob. Damit bietet sich bei diesem Projekt die Möglichkeit, Messergebnisse und Vorab-Berechnungen bei sorgfältig dokumentierten Gebäudedaten und vollständig relativ genau gemessenen Energiebilanzen zu vergleichen.

Interessant ist dabei vor allem der Vergleich der gemessenen Wärmeverbräuche mit den Rechenwerten. Abbildung 111 zeigt die Aufteilung der Wärmelieferungen an den Gebäudeteil B im Vergleich zwischen der Messung (links) und der ex-ante-Berechnung (rechts). Dieser Vergleich ist, auch wenn die Abweichung in der Gesamtsumme nicht übermäßig hoch ist, noch nicht überzeugend. Insbesondere weicht der Verbrauch an Warmwassererwärmung vom rechnerischen Bedarf deutlich ab. Solche Abweichungen können aber nicht überraschen, da die Randbedingungen während eines Messzeitjahres regelmäßig andere sind als in den Annahmen bei der ursprünglichen Projektierung. Die verwendeten Standard-Randbedingungen der ex-ante-Berechnung sind im Diagramm noch einmal angegeben.

Nun sind wir bei diesem Projekt auch noch in der glücklichen Lage, dass auch die in die Energiebilanzen eingehenden Randbedingungen quantitativ über das gesamte Messjahr mitgemessen wurden. Es ist daher möglich, die realen Randbedingungen mit denen der ex-ante-Projektierung zu vergleichen und das PHPP erlaubt es sogar, die gemessenen Randbedingungen in das Rechenverfahren einzusetzen und damit neue, unter realen Verhältnissen vorliegende Bilanzen neu zu berechnen. Diese neu bestimmten Bilanzen werden hier mit "ex-post"-Bilanzen bezeichnet. Die hier vorgestellte Analyse geht übrigens weit über das banale "hinterher ist man immer schlauer" hinaus: Nicht verändert wird nämlich das wärmetechnische Gebäudemodell, also die Daten für Wärmedämmung, Fenstergrößen und -orientierung, Verschattung, Verglasungsqualität sowie Luftmengen und Wärmebereitstellungssgrad des Lüftungssystems. Durch das Einsetzen der gemessenen äußeren Randbedingungen ist es daher möglich, zu überprüfen

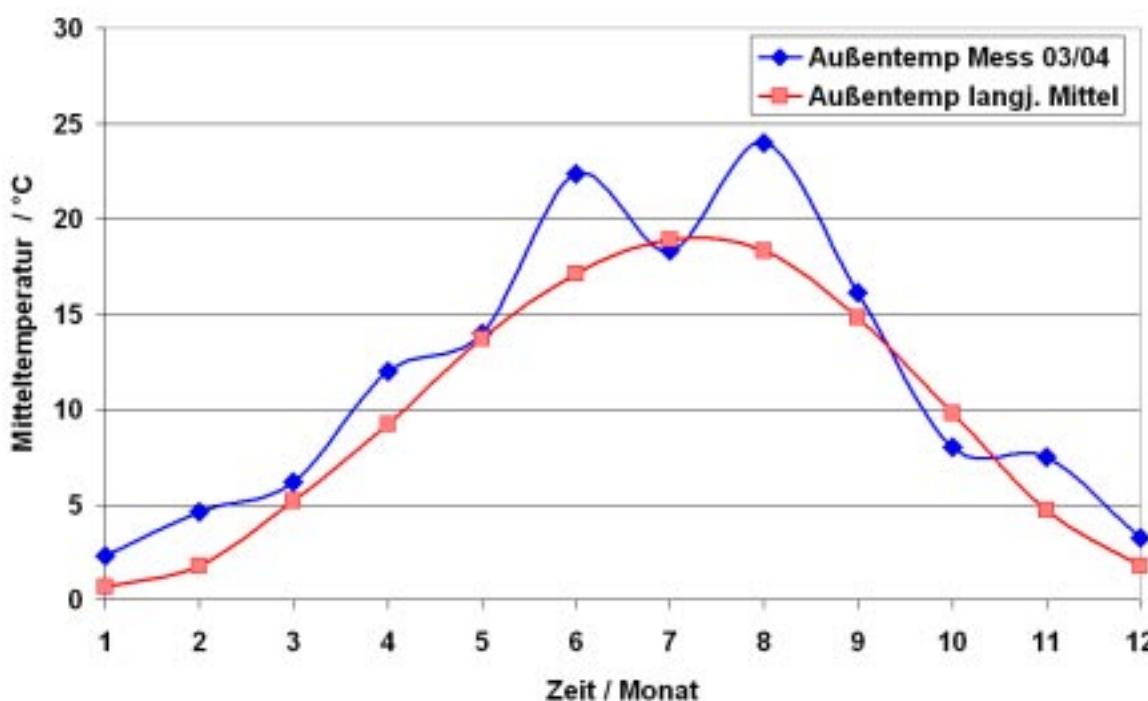
- ob die genannten Gebäudedaten mit den Messwerten korrespondieren und
- ob das Rechenmodell mit dem PHPP eine realitätsnahe Berechnung von Energiebilanzen erlaubt.

Zunächst werden hier die entscheidenden Unterschiede zwischen den Randbedingungen der ex-post-Berechnung gegenüber der ex-ante-Berechnung zusammengestellt (Tabelle 19). Zunächst gibt es signifikante Unterschiede zwischen den gemessenen Wetterdaten und dem langjährigen Durchschnittsklima am Standort Frankfurt. Die mittleren Außenlufttemperaturen der Messung lagen fast ganzjährig deutlich höher als die langjährigen Mittel (Abbildung 109). An Heiztagen betrug der durchschnittliche Temperaturunterschied fast  $1,5^{\circ}\text{C}$ , was sich in einer Reduktion der mittleren Wärmeverluste um fast 10% auswirkt. Auch die Globalstrahlung war um fast 10% höher als in durchschnittlichen Jahren (Abbildung 110). Diese günstigeren Randbedingungen werden aber wieder fast vollständig kompensiert durch die von den Nutzern gewählten um etwa  $1,3^{\circ}\text{C}$  höheren Raumsolltemperaturen in den Wohnungen. Insgesamt ändert sich durch die veränderten Randbedingungen der

rechnerische Heizwärmebedarf in Gebäudeteil A von 10,4 auf 9,6 kWh/(m<sup>2</sup>a) und in Haus B von 14,5 auf 14,1 kWh/(m<sup>2</sup>a).

**Tabelle 19: Unterschiede der Randbedingungen zwischen "ex ante" (oben) und "ex post" Berechnung mit dem PHPP**

|   | Wetterdaten                         |                                   | Nutzerdaten                  |                                   |                                | Leitungs-Dämmung               |  |
|---|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--|
|   | Außen-Temp.<br>Heizzeit<br>(Mittel) | Global-Str.<br>Heizzeit-<br>Summe | Raumluft -<br>Solltemperatur | pro-Kopf<br>Warmwasser<br>Zapfung | Zahl der<br>Bewohner in<br>"A" | Zahl der<br>Bewohner in<br>"B" | $\Psi$ - Wert der<br>Wärmeverteile-<br>leitungen |
| Unterschiede der<br>Randbedingungen               | °C                                  | kWh/m <sup>2</sup>                | °C                           | Liter/<br>Pers/d                  | Pers.                          | Pers.                          | W/(mK)   |
| ex ante - Berechnung<br>(Standard-Annahmen)       | 4.4                                 | 317.7                             | 20.0                         | 25.0                              | 39                             | 24                             | 0.19   |
| ex post - Berechnung<br>(aus Messwerten<br>03/04) | 5.9                                 | 348.3                             | 21.3                         | 15.4                              | 35                             | 24                             | 0.425  |



**Abbildung 109: Gemessene Monatsmittel der Außenlufttemperatur am Standort während der Monate des Messzyklus (Juni 2003 bis Mai 2004, blaue Raute) im Vergleich zu den Daten der langjährigen Klimaaufzeichnung des Deutschen Wetterdienstes gemäß [DIN 4108-T6] (rotes Quadrat). Bis auf die Monate Juli und Oktober 2003 war es im Messjahr immer deutlich wärmer als im langjährigen Mittel**

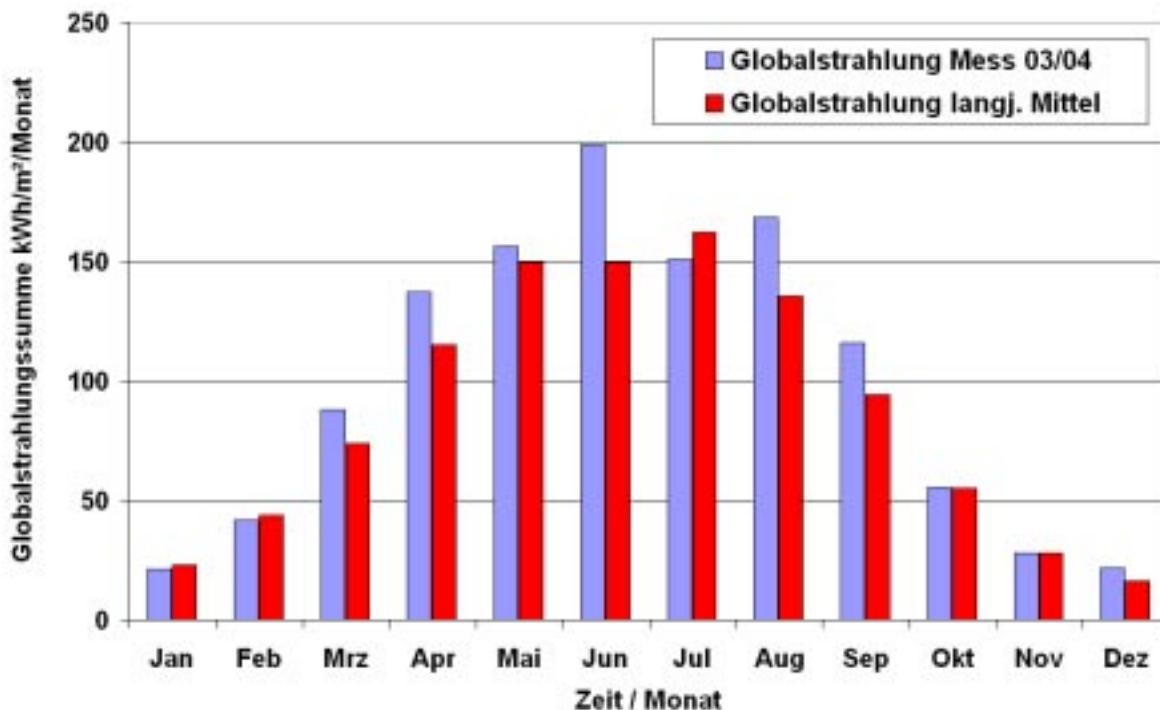


Abbildung 110: Vergleich zwischen den Monatssummen der Globalstrahlung (horizontal) gemessen mit der Wetterstation auf dem Dach des Passivhauses bei St. Jakob und den Werten des langjährigen Mittels

Gravierende Auswirkungen hat die gemessene, deutlich geringere Warmwasser-Zapfmenge von durchschnittlich nur 15,4 Liter/Pers/d (bei 60 °C) gegenüber dem Projektionsansatz von 25 l/Pers/d.

Weniger begeistert der erheblich höhere Wärmeverlust der Wärmeverteileitungen, der um etwa 120% höher ausfällt als nach der Projektierung vorausbestimmt. Dass durch sorgfältige Planung und Ausführung von hoch wärmegedämmten Verteilsystemen auch erheblich geringere Leitungsverluste erreichbar sind, haben die Messungen im Passivhaus Darmstadt Kranichstein gezeigt. Dort lagen die mittleren Leitungsverluste bei nur 4,4 kWh/(m<sup>2</sup>a) (im Vergleich zu 10,1 bei diesem Projekt). Wir sehen die Verringerungen der Leitungsverluste als eine der wichtigsten Aufgaben bei künftigen Projekten an; dadurch lassen sich die Energieverbräuche noch einmal um ca. 12% senken und die sommerliche interne Last verringern. Dem Thema Reduzierung von Wärmeverteil- und Wärmeübergabeverluste war eine eigene Sitzung des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser gewidmet [AkkP 28].

Abbildung 112 zeigt den Vergleich der gemessenen Wärmebilanz mit den rechnerischen Werten unter Verwendung der "ex-post"-Randbedingungen im PHPP für den Gebäudeteil B. Die Werte der Berechnung sind nun nahezu gleich den Wärmezählermesswerten aus dem Messprojekt. Dies zeigt, dass die Qualität des Baukörpers, insbesondere der gedämmten Gebäudehülle nicht bedeutend von den Planungsansätzen abweichen kann; das war auch durch die Thermographie bestätigt worden. Ferner zeigt das Ergebnis, dass der Bilanzrechgang des PHPP bei Verwendungen der korrekten Randbedingungen ziemlich gut zutreffende Berechnungen der Energiebedarfswerte erlaubt.

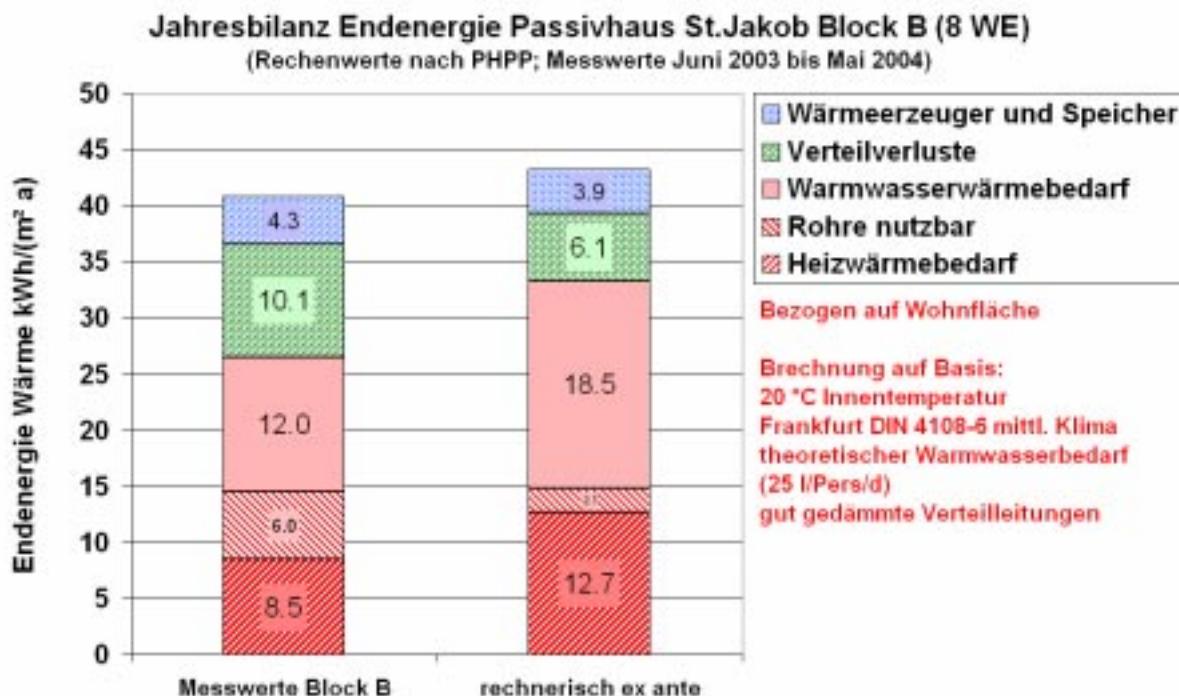


Abbildung 111: Vergleich zwischen den Messwerten des Wärmeverbrauches (links) und der "ex ante"-Berechnung mit den ursprünglichen theoretischen Randbedingungen des PHPP (im Text neben der Abbildung dokumentiert). Der Gesamtverbrauch ist niedriger als der vorausberechnete Wert; allerdings ist die Leitungswärmeabgabe höher als berechnet und dafür der Nutzwärmeverbrauch an Warmwasser deutlich niedriger als angenommen.

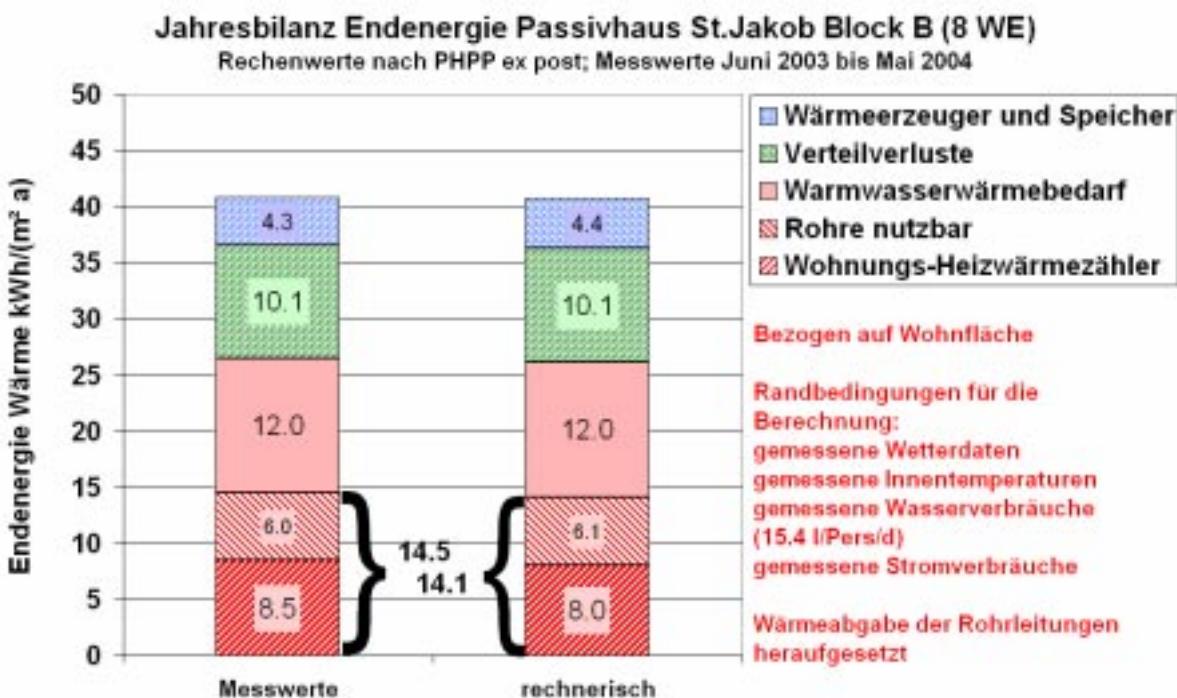


Abbildung 112: Vergleich zwischen Messung (links) und "ex post" berechnetem Bedarf mit PHPP, wobei so weit möglich gemessene Randbedingungen des Untersuchungsjahrs eingesetzt wurden (so z.B. die gemessenen Wetterdaten und die gemessene Innentemperatur). Die Leitungsverluste sind kongruent mit den Messwerten, wenn eine um 120% höhere Wärmeabgabe der Wärmeverteilung eingesetzt wird.

## 13 Literatur

- [Adamson 1987] Adamson, Bo: Passive Climatization of Residential Houses in People's Republic of China; Lund University, Report BKL 1987:2
- [AkkP 17] **Dimensionierung von Lüftungsanlagen in Passivhäusern.** Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 17, Herausgeber: Feist, Wolfgang; Darmstadt, Passivhaus Institut, Oktober 1999
- [AkkP 28] **Wärmeübergabe- und Verteilverluste im Passivhaus.** Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 28, Herausgeber: Feist, Wolfgang; Darmstadt, Passivhaus Institut, September 2004.
- [ASHRAE 55-2003] ASHRAE: **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy;** third public review, May 2003.
- [Cramer 2004] Cramer, Wolfgang: Regionale Auswirkungen des Klimawandels; Referat auf dem 8. Hessischen Klimaschutzforum, Wiesbaden 18.11.2004
- [Destatis 2004] Statistisches Bundesamt Deutschland: **Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung,** Wasserabgabe an private Haushalte, Stand 13.08.2003. Quelle: [www.destatis.de](http://www.destatis.de)
- [DIN EN ISO 7730] DIN EN ISO 7730: **Gemäßigtes Umgebungsklima;** Beuth Verlag, Berlin 1987.
- [DIN 4108-T2] Deutsches Institut für Normung: **DIN 4108, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden,** Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz; Beuth-Verlag, Berlin, April 2003
- [DIN 4108-T6] Deutsches Institut für Normung: Vornorm DIN 4108, **Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs;** Beuth-Verlag, Berlin, Juni 2003
- [Feist 1988] Feist, Wolfgang: **Forschungsprojekt Passive Häuser;** Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1988 (inzwischen: 2. Auflage als "Passivhaus-Bericht Nr. 1 mit Kommentierung aus dem Jahr 1995")
- [Feist 2000] Feist, W.; Ebel, W.; Stärz, N.: **Wäschetrocknen im Trockenschrank: Messergebnisse und Nutzererfahrungen in einem Passivhaus;** Passivhaus Institut; Darmstadt 2000.

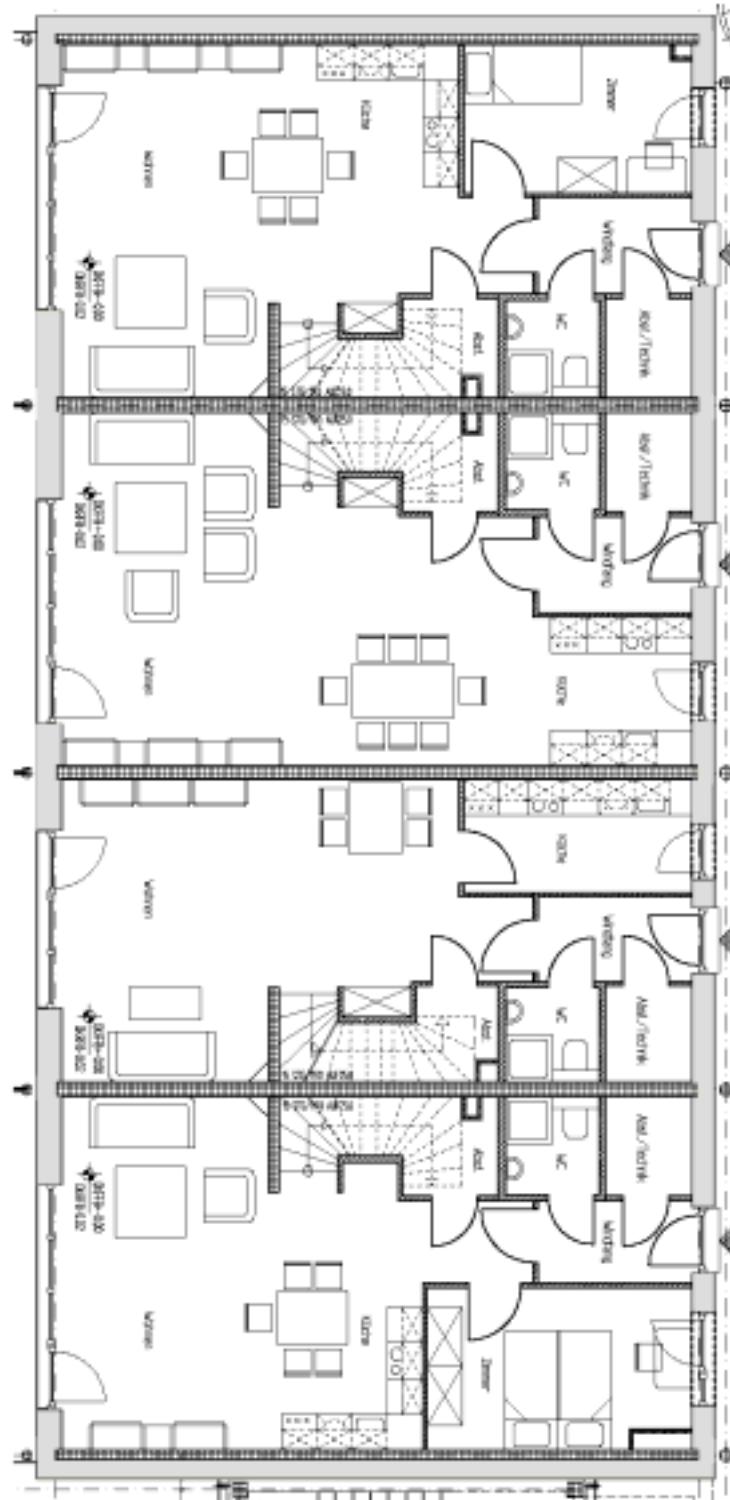
- [Gemis] Fritsche, U.; Leuchtner, J.; Matthes, F.C.: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 4.12, Öko-Institut, Darmstadt September 2002.
- [PHPP 2004] Feist, W.; Pfluger, R.; Kaufmann, B.; Schnieders, J.; Kah, O.: **Passivhaus Projektierungs Paket**, Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser, Fachinformation PHI-2004/1, Darmstadt, Passivhaus Institut, April 2004
- [RWE 2004] **RWE Bau-Handbuch**, 13. Ausgabe, VWEW Energiebuchverlag GmbH, Frankfurt am Main, Februar 2004
- [Schulz 2004] Schulz, Günter (Hausbewohner Grempstraße): persönliche Auskunft im November 2004

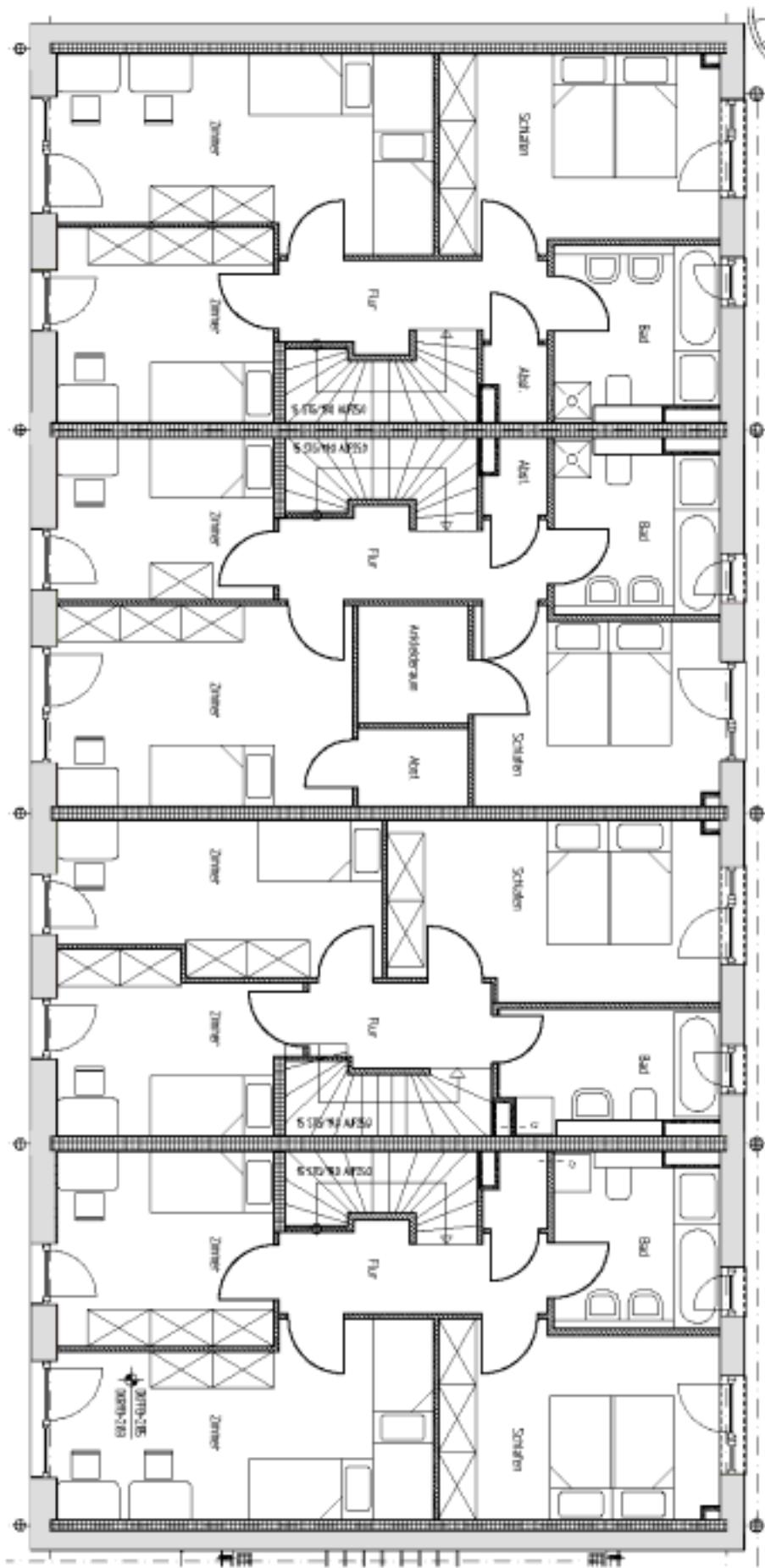
## 14 Anhang

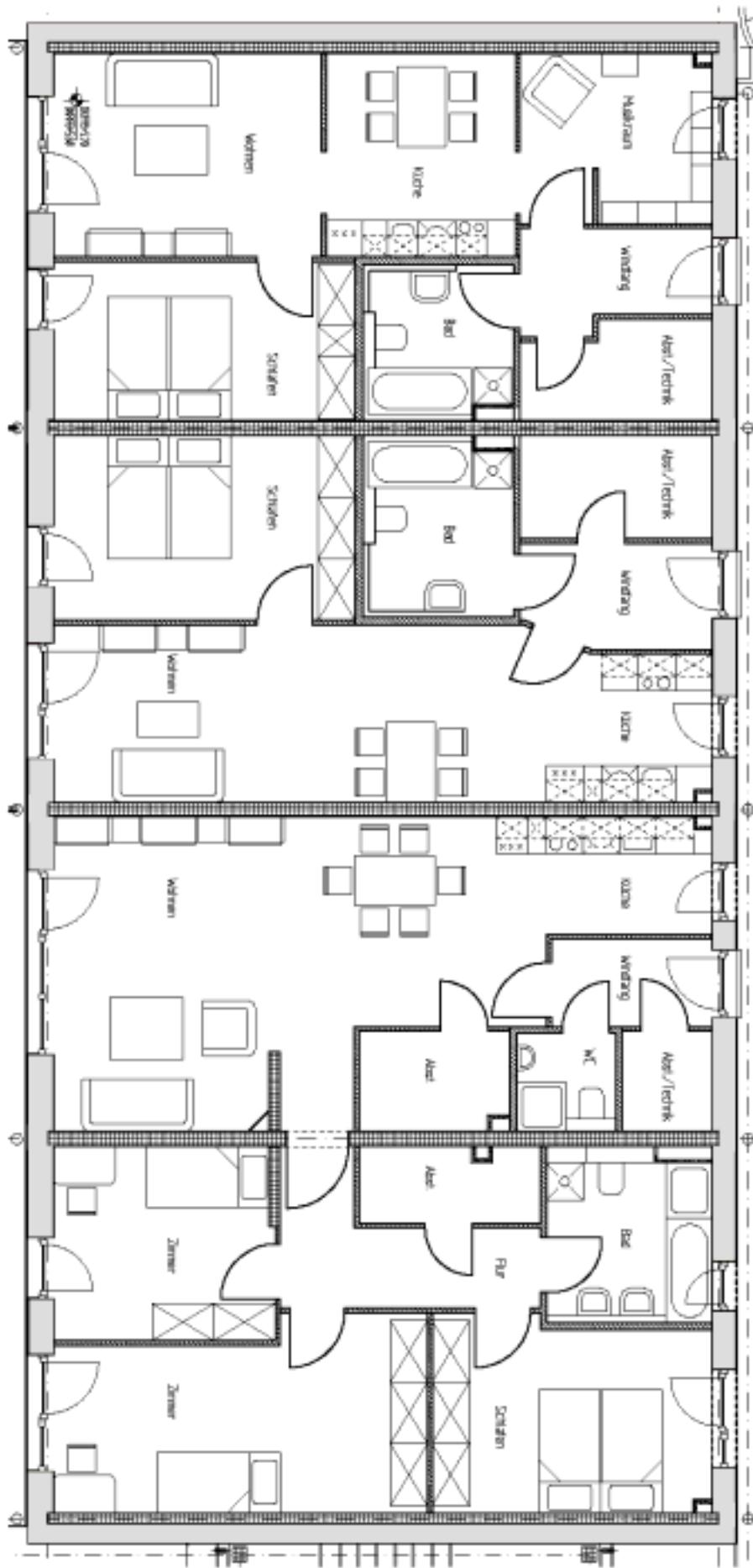
### 14.1 Grundrisse

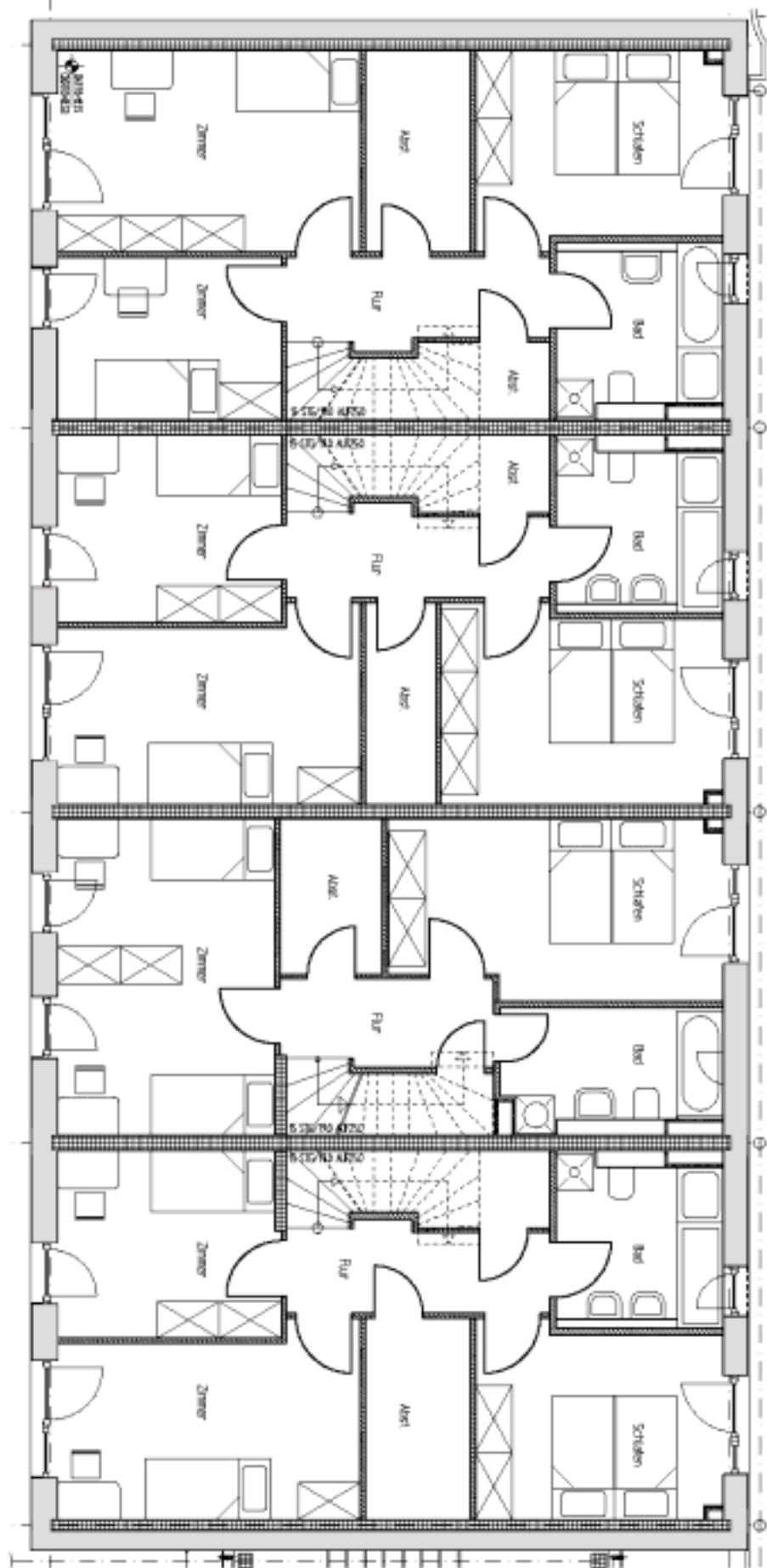
Alle hier dargestellten Grundrisse sind Pläne von der „faktor 10 GmbH“ aus Darmstadt (hier nicht maßstäblich dargestellt). In den Plänen von Haus B sind die Temperatur- und Feuchtemesspunkte ergänzt.

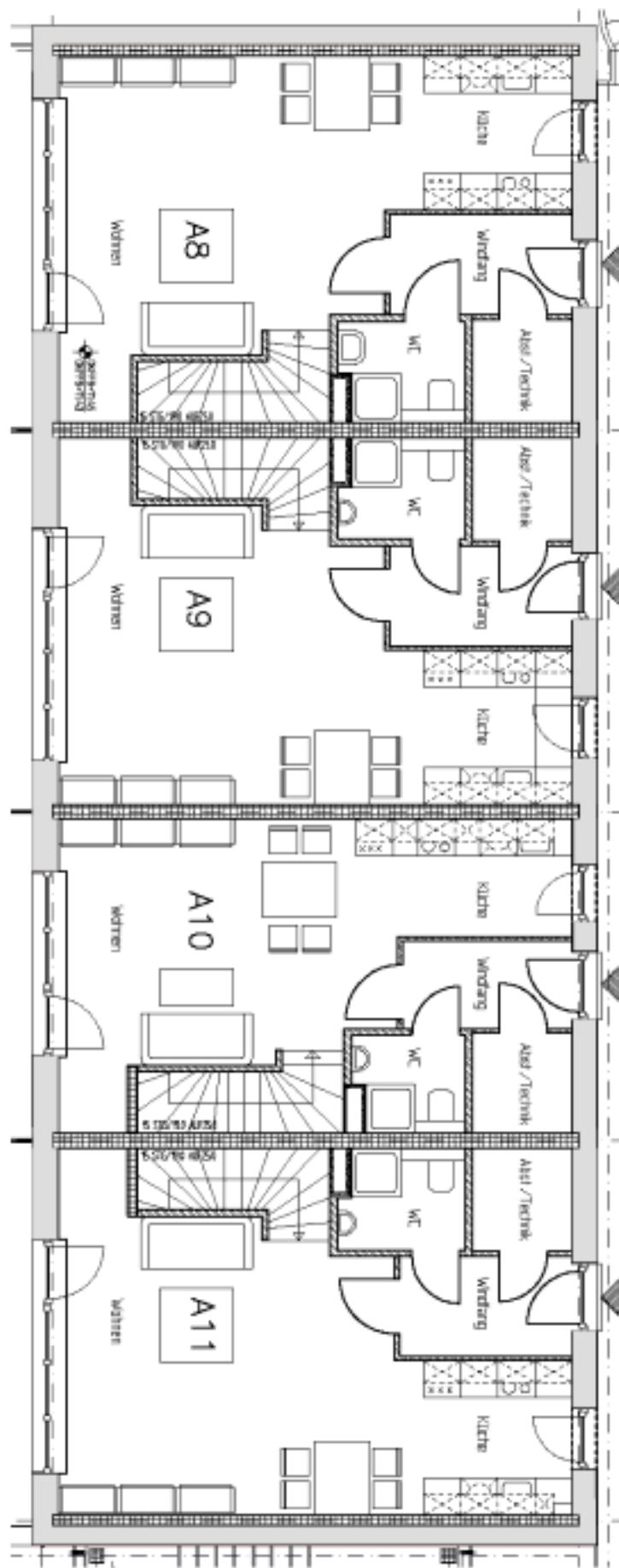
**Grundriss Haus A / EG**



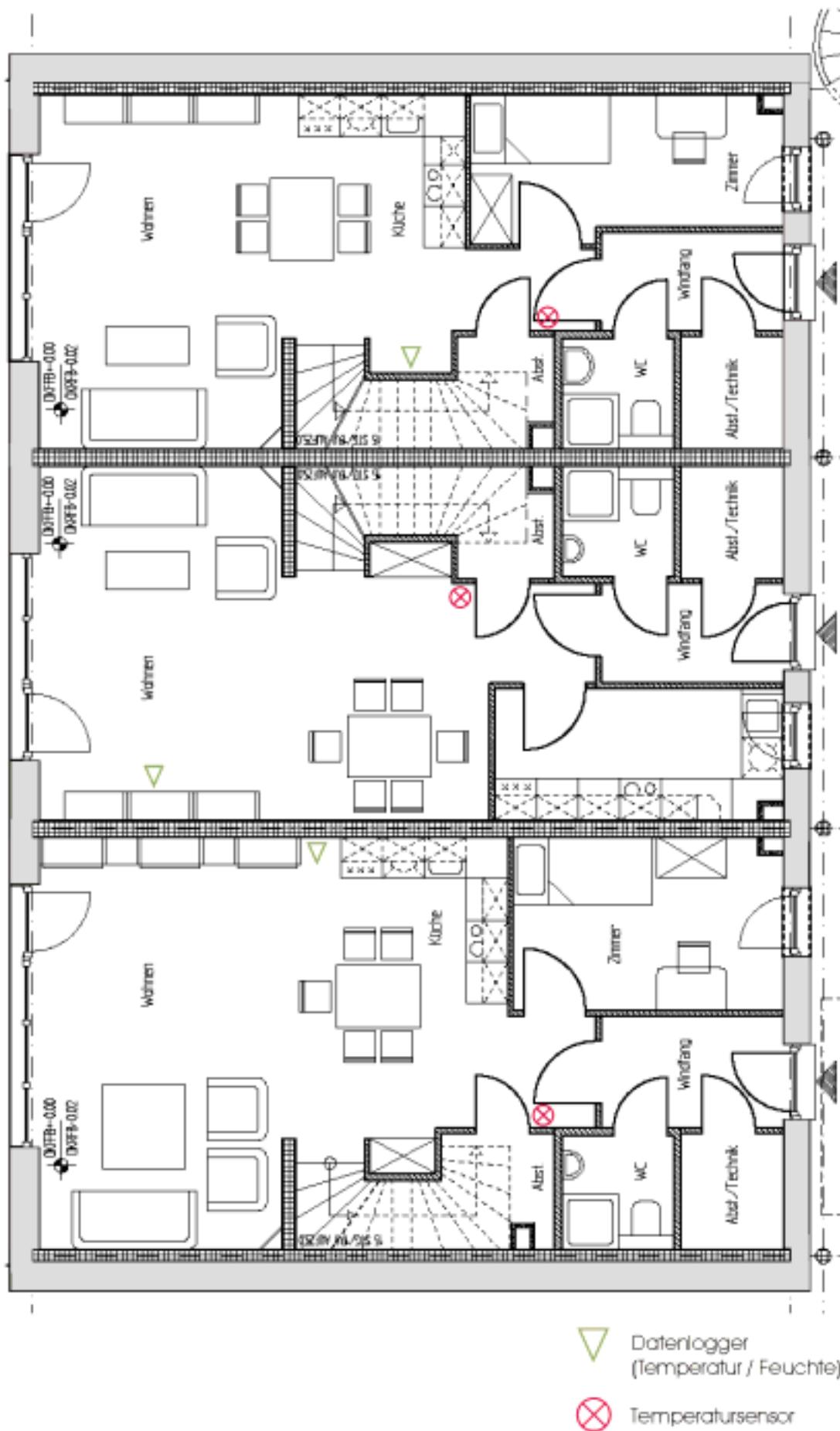
**Grundriss Haus A / 1. OG**

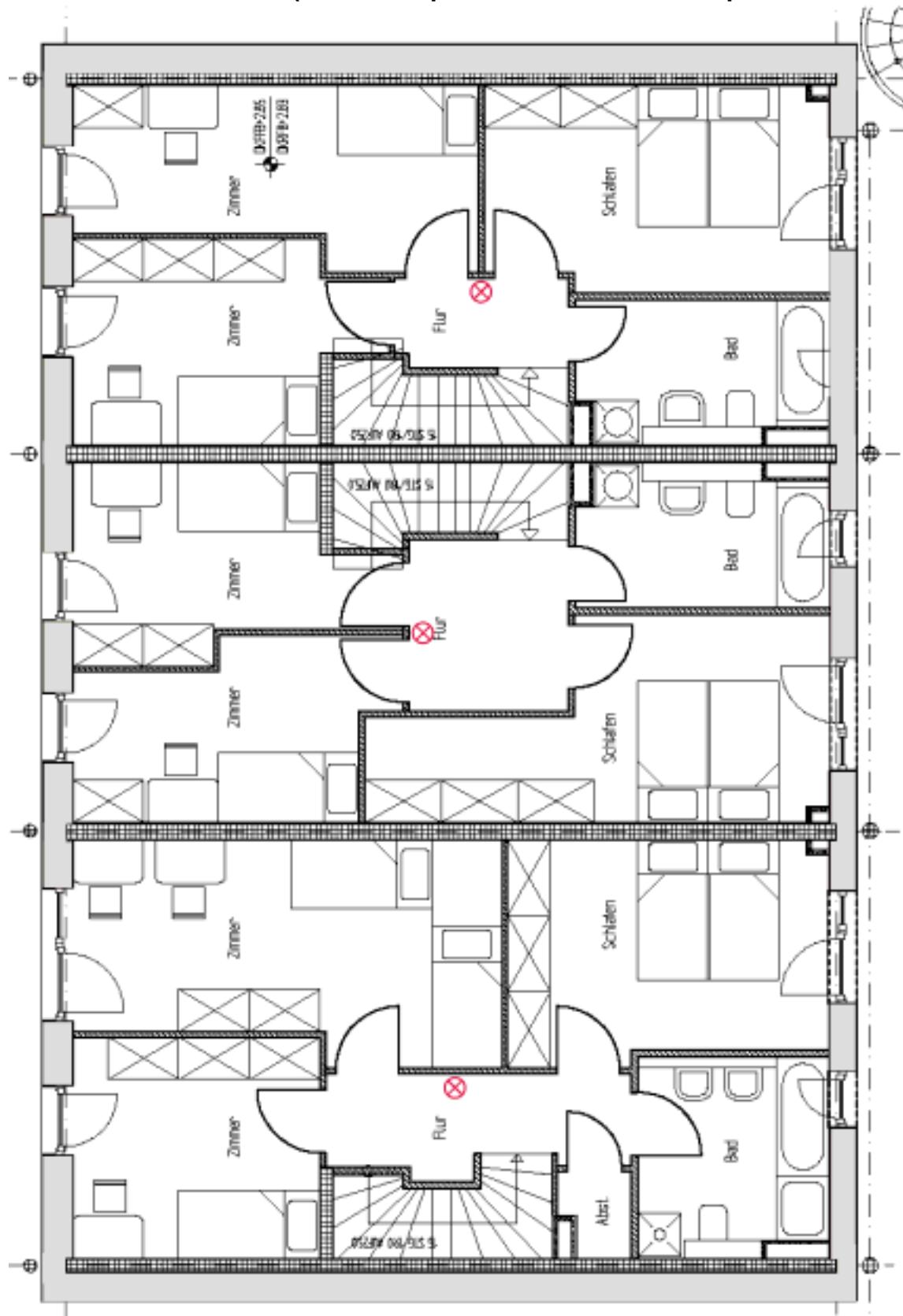
**Grundriss Haus A / 2. OG**

**Grundriss Haus A / 3. OG**

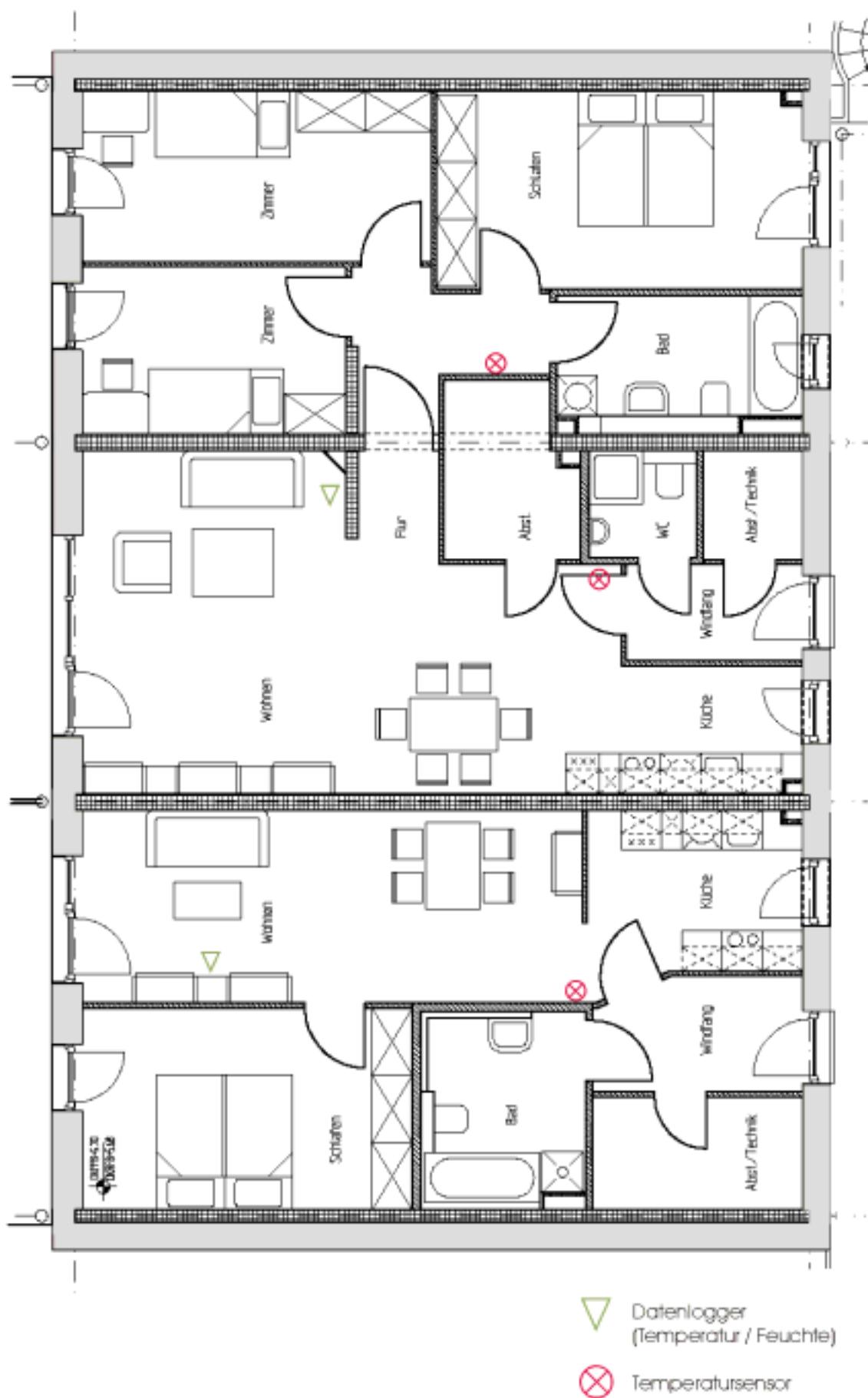
**Grundriss Haus A / DG**

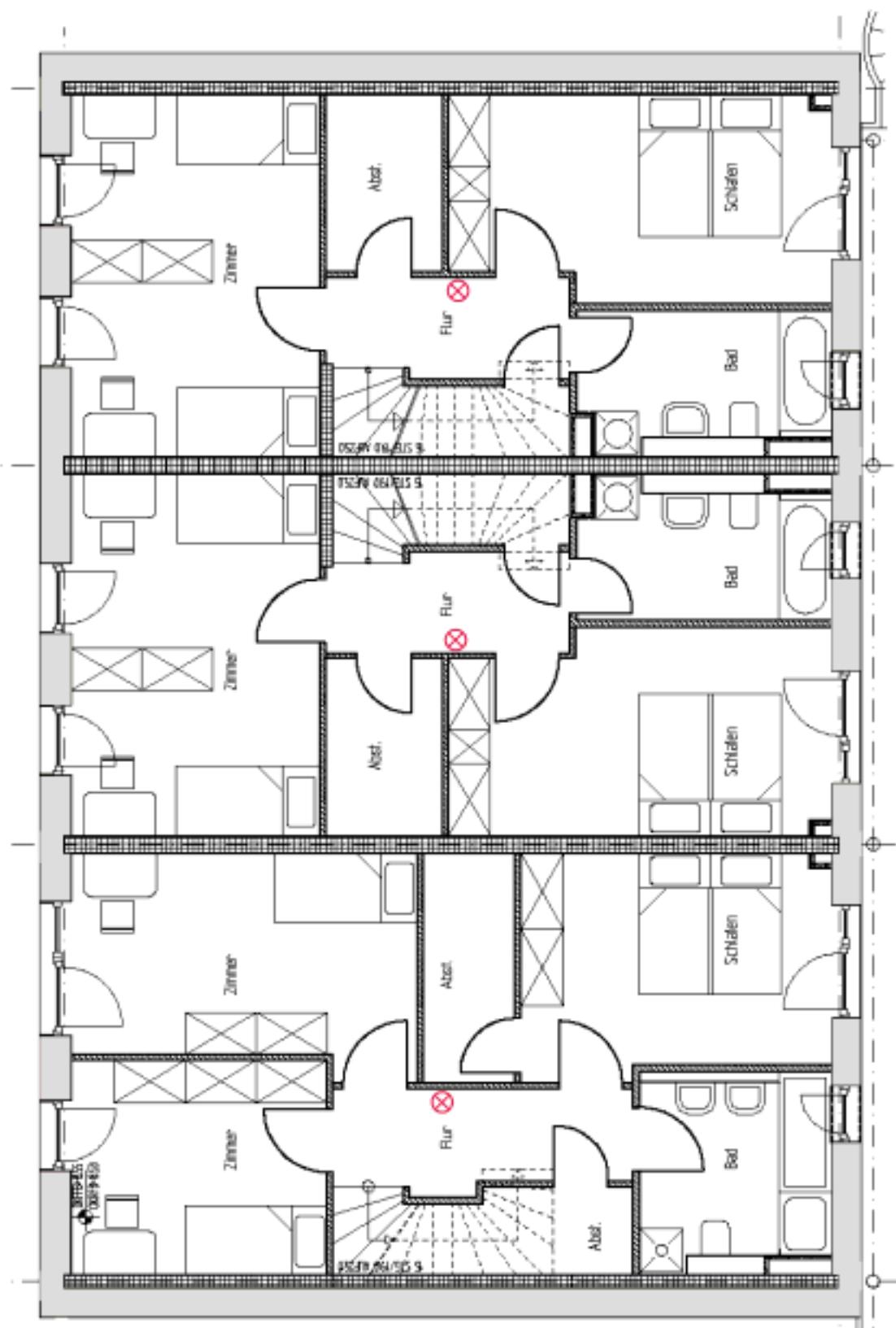
## **Grundriss Haus B / EG (mit Sensorpositionen der Raumtemperaturmessung)**



**Grundriss Haus B / 1. OG (mit Sensorpositionen der Raumtemperaturmessung)**

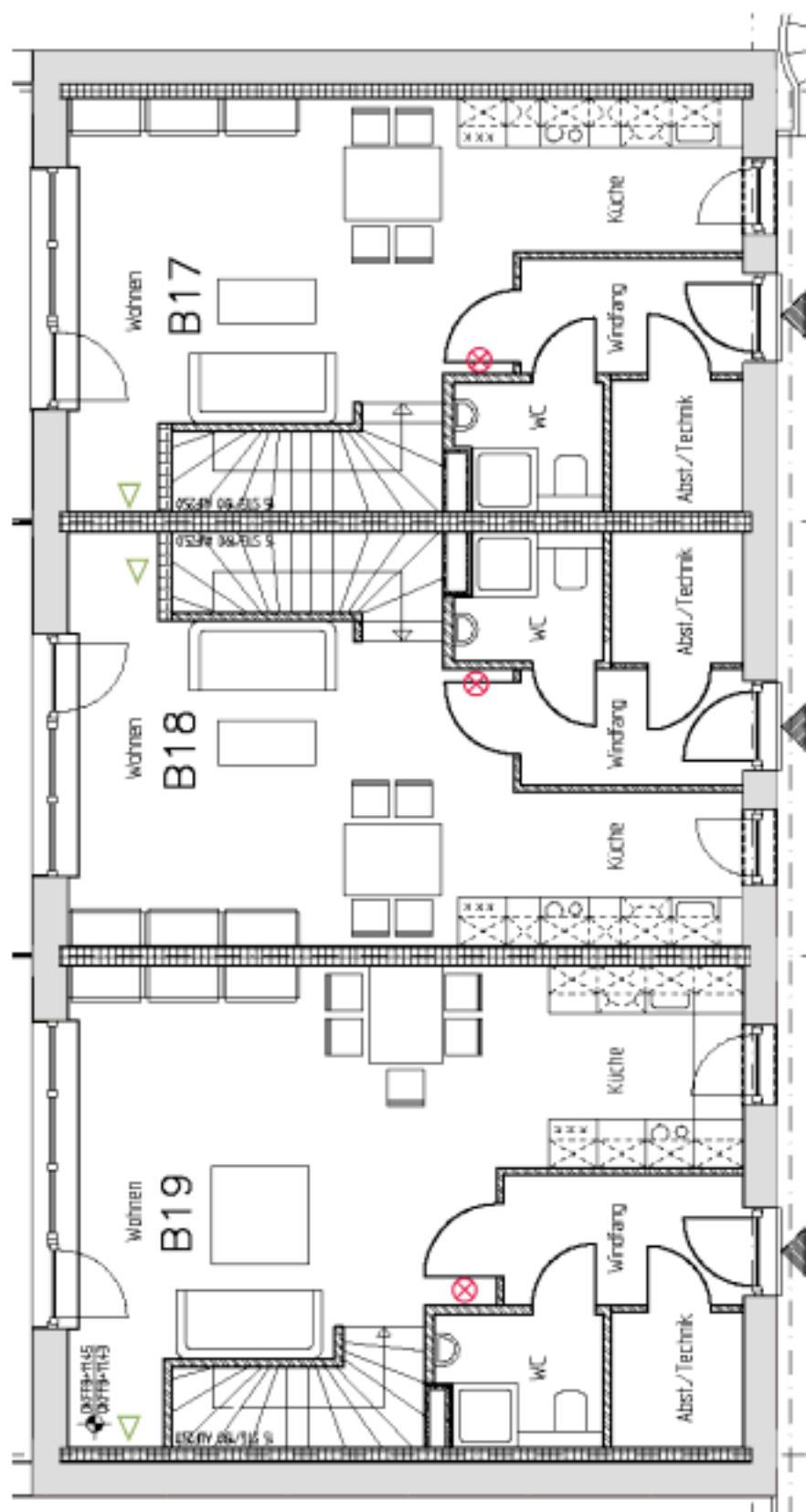
▼ Datenlogger  
(Temperatur / Feuchte)  
✖ Temperatursensor

**Grundriss Haus B / 2. OG (mit Sensorpositionen der Raumtemperaturmessung)**

**Grundriss Haus B / 3. OG (mit Sensorpositionen der Raumtemperaturmessung)**

▼ Datenlogger  
(Temperatur / Feuchte)

✖ Temperatursensor

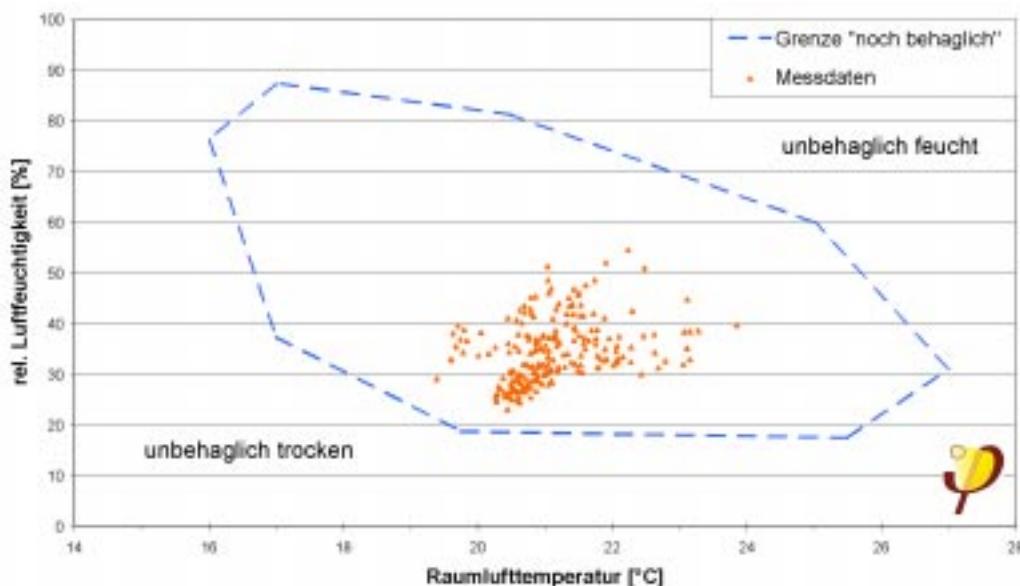
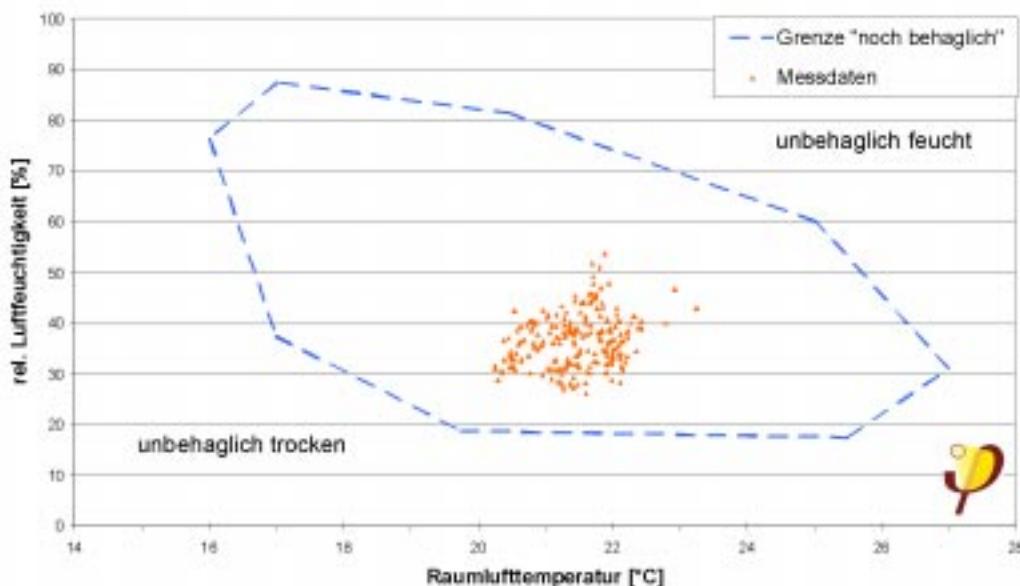
**Grundriss Haus B / DG (mit Sensorpositionen der Raumtemperaturmessung)**

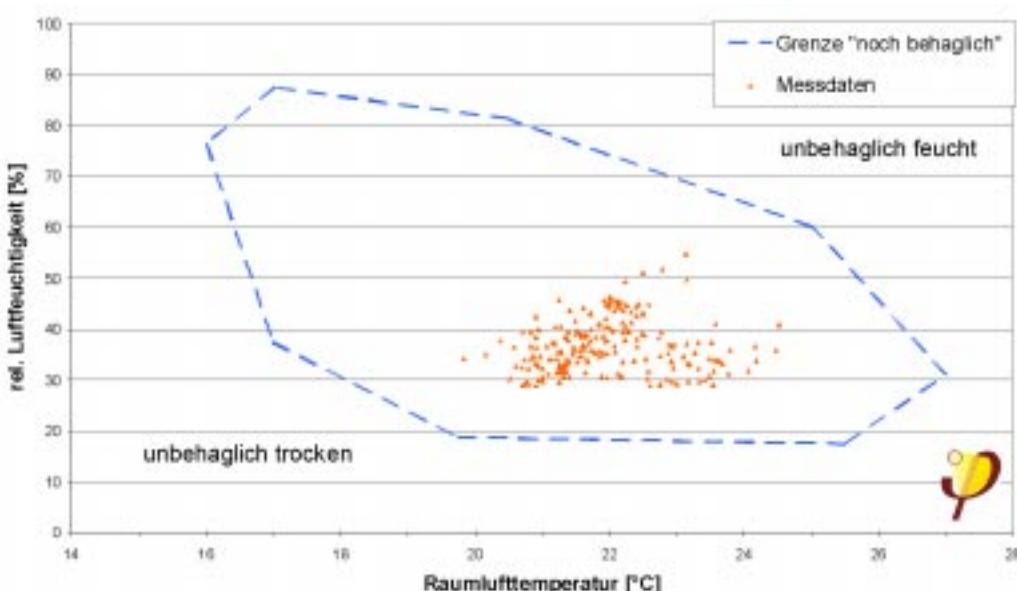
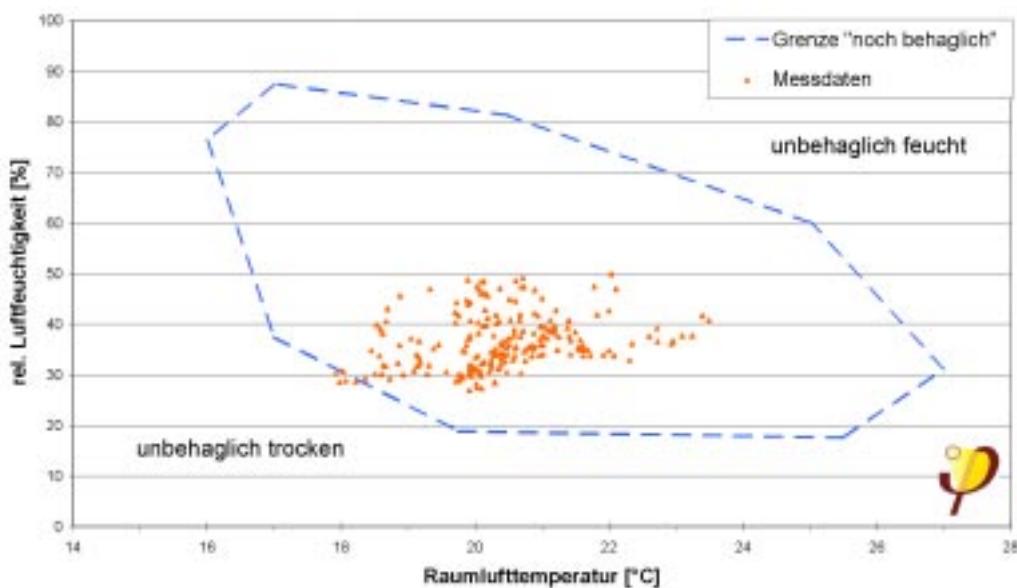
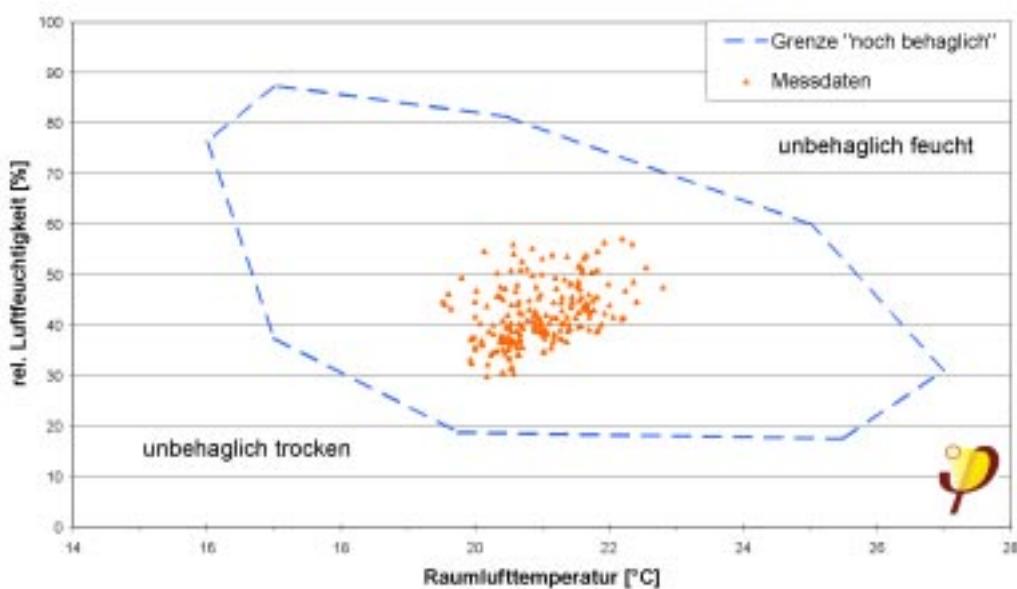
▼ Datenlogger  
(Temperatur / Feuchte)

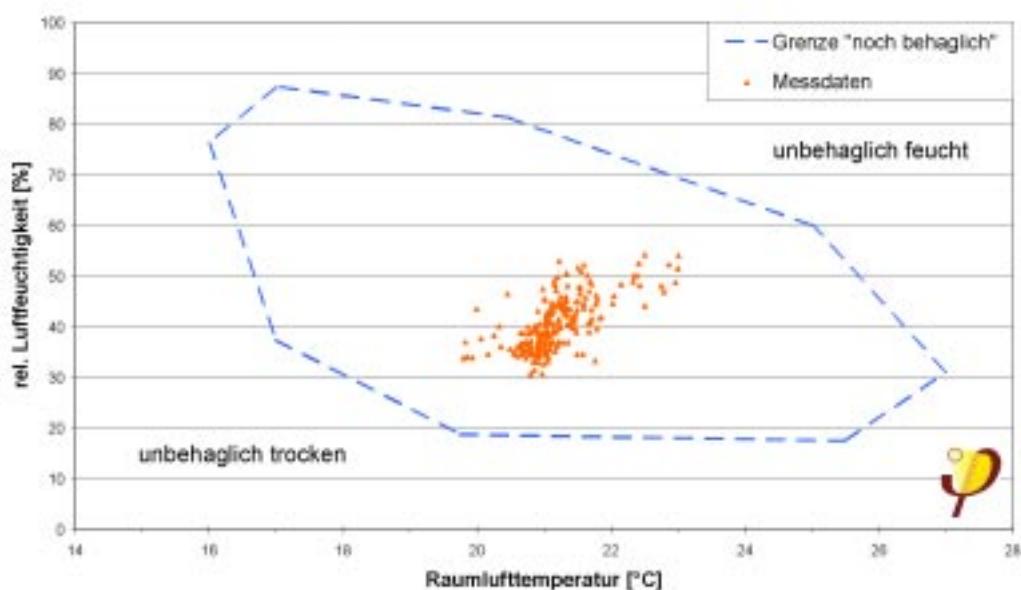
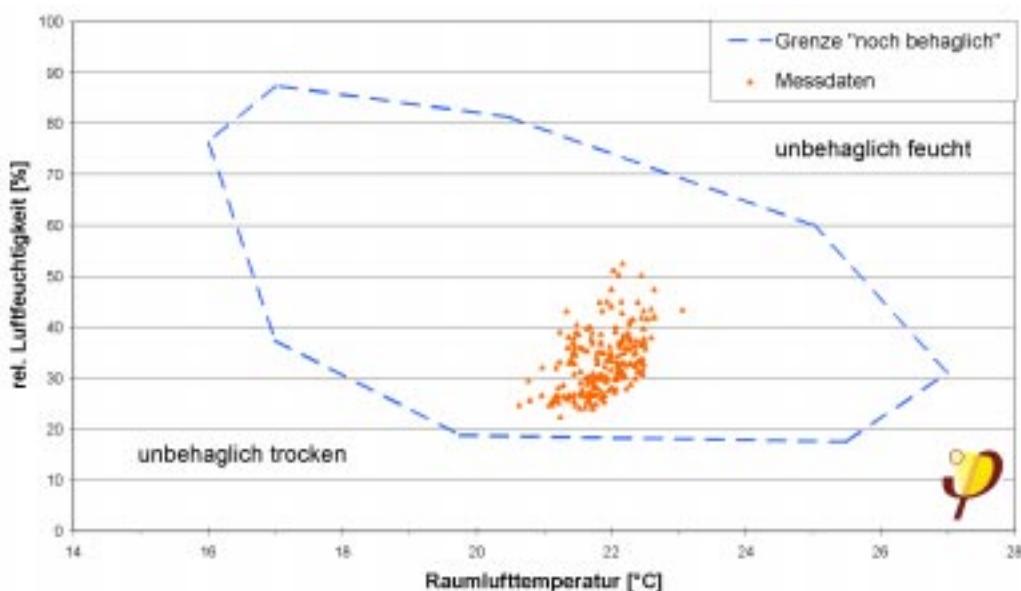
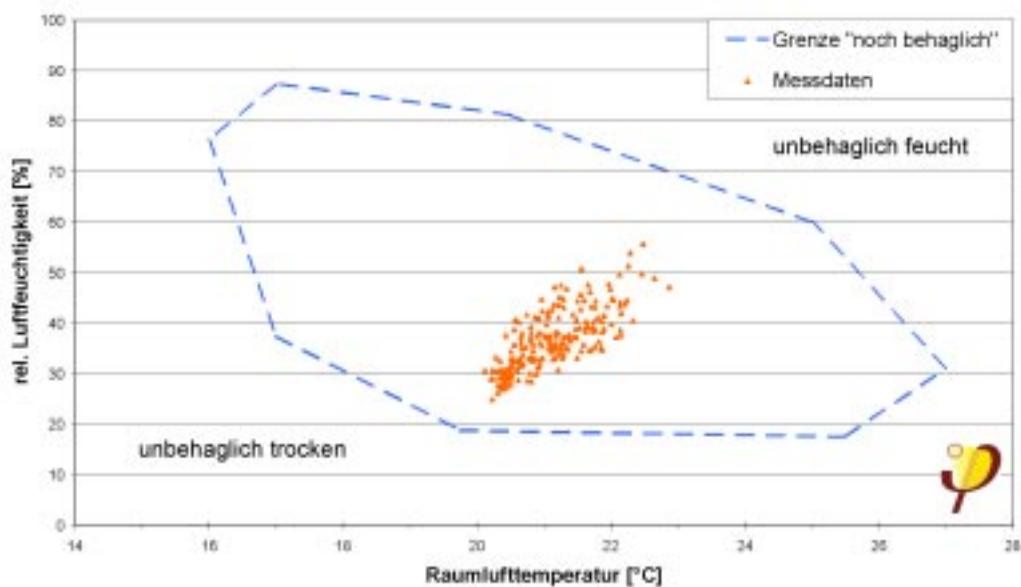
✖ Temperatursensor

## 14.2 Behaglichkeitsdiagramme

Für die Winterzeit 1.10.2003 bis zum 30.4.2004 sind hier die Tagesmittelwerte der Feuchte und Temperaturmessung (aus 15 Minuten Datenlogger-Messdaten) für die Wohnungen von Haus B in Behaglichkeitsdiagrammen dargestellt.







## 14.3 Resonanzen



Abbildung 113: Zeitungsartikel zum Passivhaus in der Grempstraße (BILD Frankfurt, 27. März 2003)



Abbildung 114: Folkmer Rasch (vorne links) spricht auf dem Richtfest am 27.09.2002; rechts Hr. Wagner, Geschäftsführer der FAAG.



Abbildung 115: Hoher Besuch: Der hessische Wirtschaftsminister Dr. Alois Rhiel (dritter von links) überzeugt sich von den Qualitäten der Passivhäuser im Gemeindezentrum von St. Jakob. Übrige Personen von links: Frank Junker (Frankfurt Holding), Wolfgang Feist (Passivhaus Institut), Gabriele Purper (Wirtschaftsministerium Hessen) (Foto: Weinmann/PHI am 24.11.2003)



Abbildung 116: Ortstermin: Herr Rasch (zweiter von links) erläutert die Vorzüge des Passivhauses bei St. Jakob. Übrige Personen von links: Dr. Schneider (Fa. Viessmann), Minister Rhiel, Dr. Kraft (KfW Bankengruppe, Frankfurt) und Dr. Feist. (Foto: Weinmann/PHI).