



**PASSIV  
HAUS  
INSTITUT**

*Dr. Wolfgang Feist  
Rheinstr. 44-46  
D64283 Darmstadt*

# **Sanierung mit Passivhauskomponenten**



## **Messtechnische Untersuchung und Auswertung Tevesstraße Frankfurt a.M.**



Im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft,  
Verkehr und Landesentwicklung, Wiesbaden

Bauherr: ABG Frankfurt Holding GmbH

Darmstadt Februar 2009



**PASSIV  
HAUS  
INSTITUT**

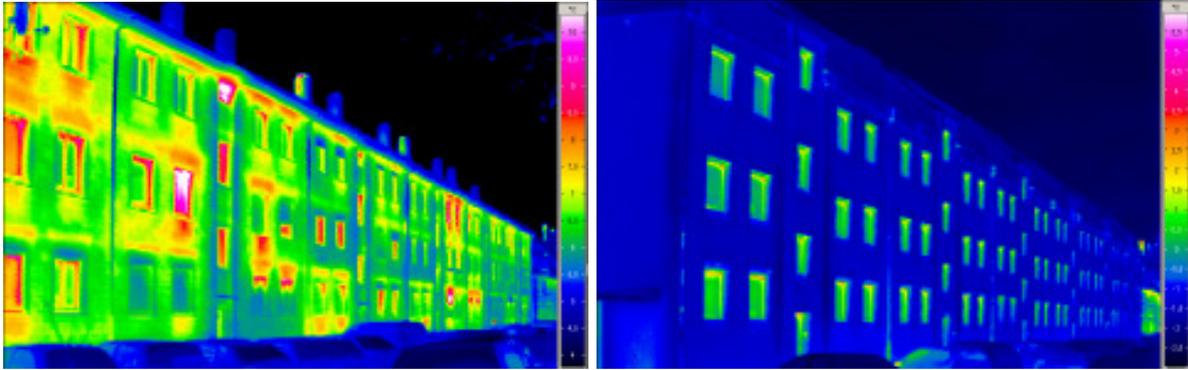
**Dr. Wolfgang Feist**  
**Rheinstr. 44-46**  
**D64283 Darmstadt**

# **Sanierung mit Passivhauskomponenten**

## **Messtechnische Untersuchung und Auswertung Tevesstraße Frankfurt a.M.**

<p><b>Autoren:</b> Dipl.-Ing. Søren Peper M.Phys. Jessica Grove-Smith Prof. Dr. Wolfgang Feist</p> <p><b>Unter Mitarbeit von:</b> Dipl.-Ing. Wolfgang Hasper Dipl.-Phys. Jürgen Schnieders Dr. Rainer Pfluger Henning Aust</p> <p><b>Herausgeber:</b> PASSIVHAUS INSTITUT Dr. Wolfgang Feist Rheinstr. 44/46 D-64283 Darmstadt Tel: 06151 / 82699-0 Fax: 06151 / 82699-11 E-Mail: mail@passiv.de www.passiv.de</p> <p><b>Darmstadt, Februar 2009</b></p>	<p><b>Dieser Bericht entstand im Auftrag Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Wiesbaden</b></p> <p><b>Titel des Forschungsauftrages:</b> Wissenschaftliche Begleitung und messtechnische Untersuchung zur Demonstration von Passivhaus Gebäudetechnik in der Altbaumodernisierung (am Beispiel Tevesstraße 36-54, Friedrich Ebert-Siedlung, Frankfurt a.M.)</p> <p>Wir danken dem Bauherren der ABG Frankfurt Holding, insbesondere Hr. Junker, Hr. Braun und Hr. Wagner. Ebenso danken wir den Bewohnern für ihre Bereitschaft unsere Messungen zu unterstützen.</p> <p>Unser Dank geht auch an Hr. Theobald von der ABG für seine Auskünfte und Hilfe sowie dem Bewohner Hr. Zschaler für die Zählerablesungen. Des Weiteren danken wir den Architekten, faktor 10 (Darmstadt) sowie dem Haustechnikplanungsbüro IBB (Mörlenbach).</p>
--	--

Haftungsausschluss: Die Informationen in dieser Schrift wurden nach bestem Wissen zusammengestellt. Eine Haftung für den Inhalt kann jedoch trotz sorgfältiger Bearbeitung und Korrektur nicht übernommen werden. Dies gilt insbesondere für Detailzeichnungen und Hydraulik-schemata, die in jedem Fall als Prinzipskizzen zu verstehen sind, in denen nicht immer alle baulich relevanten Komponenten enthalten sein müssen.



***Jede Reise beginnt  
mit einem ersten Schritt***

*Laotse*



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>PROJEKTKURZBESCHREIBUNG .....</b>	<b>11</b>
2.1	Energiebezugsfläche .....	14
2.2	Wohnungsbelegung.....	15
<b>3</b>	<b>AUFGABENSTELLUNG UND MESSKONZEPT .....</b>	<b>17</b>
3.1	Messtechnik.....	19
3.1.1	Wärmemengenzähler .....	20
3.1.2	Energie für Warmwasser .....	23
3.1.3	Raumtemperaturmessung .....	24
3.1.4	Tabellarische Übersicht der Messgeräte .....	26
<b>4</b>	<b>MESSERGEBNISSE .....</b>	<b>27</b>
4.1	Wetterdaten.....	28
4.2	Außen- und Raumtemperaturen.....	32
4.2.1	Raumtemperaturen nach Geschossen .....	36
4.2.2	Kälteste Winterstunde.....	39
4.2.3	Sommer- und Übertemperaturen.....	39
4.3	Energieverbrauch Wärme.....	45
4.3.1	Zentraler Energiebezug .....	46
4.3.1.1	Wärmelieferung Kessel .....	47
4.3.2	Heizwärmeverbrauch.....	50
4.3.2.1	Heizwärmeverbrauch der einzelnen Wohnungen.....	50
4.3.2.2	Heizwärme und Verteilung .....	56
4.3.2.3	Vergleich PHPP / Messdaten .....	59
4.3.2.4	Heizlast.....	62
4.3.2.5	Heizkurve .....	68
4.3.3	Wärmeverbrauch Warmwasserbereitung .....	70
4.3.3.1	Zirkulation.....	73
4.3.3.2	Energie Warmwasser Einzelwohnungen.....	76
4.3.3.3	Solare Warmwasserbereitung .....	83
4.3.3.4	Bilanz Warmwasser.....	87
4.3.4	Warmwassermenge.....	89
4.4	Stromverbrauch.....	90
4.4.1	Allgemein- und Technikstrom .....	93
4.4.2	Stromverbrauch Lüftungsanlagen.....	95
<b>5</b>	<b>ENERGIEBILANZEN.....</b>	<b>98</b>
5.1	Endenergie Wärme.....	98

<b>5.2</b>	<b>Gesamte End- und Primärenergie.....</b>	<b>99</b>
5.2.1	Gesamter Endenergieverbrauch Einzelwohnungen .....	101
5.2.2	Primärenergie Heizung, Warmwasser und Technikstrom.....	102
<b>6</b>	<b>KOMPAKTAGGREGAT .....</b>	<b>105</b>
<b>6.1</b>	<b>Einzelwohnung mit Kompaktgerät.....</b>	<b>105</b>
6.1.1	Raumtemperaturen.....	108
6.1.2	Energieverbrauch für Warmwassererzeugung .....	112
6.1.3	Energieverbrauch Badheizkörper .....	114
6.1.4	Lüftung.....	119
6.1.5	Stromverbrauch .....	125
6.1.6	Energiebilanz.....	131
6.1.7	Fazit Kompaktgerät .....	134
<b>7</b>	<b>LITERATUR .....</b>	<b>135</b>



# 1 Zusammenfassung

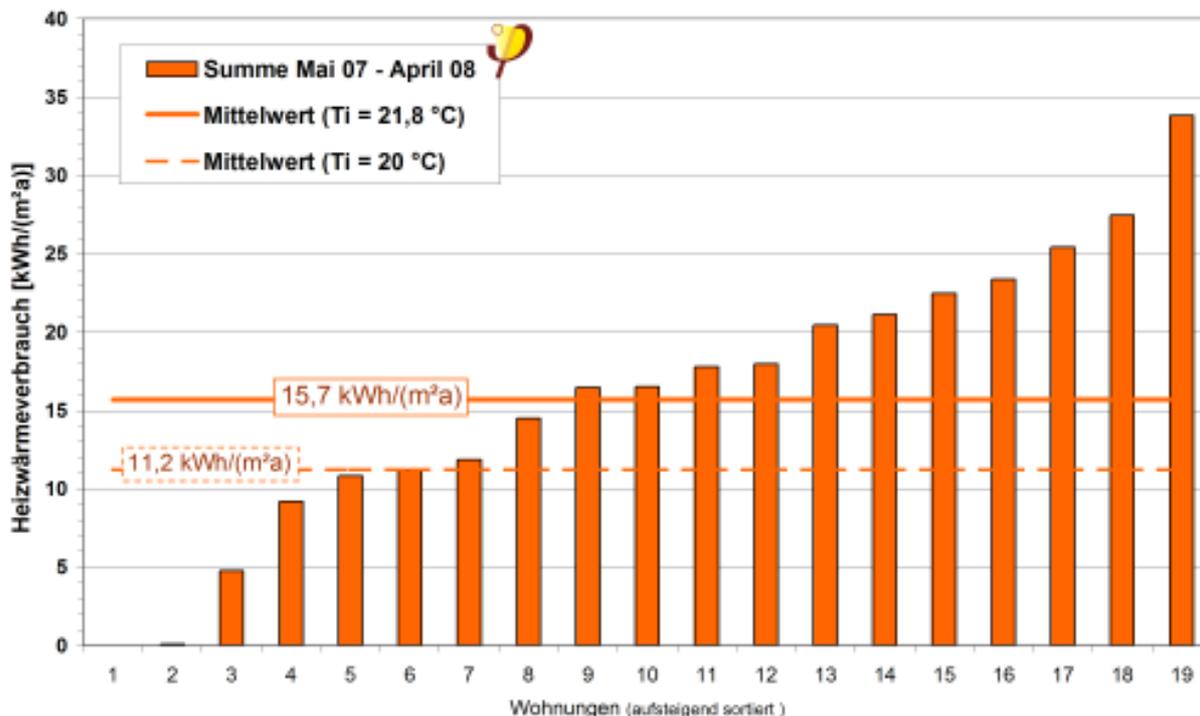
Aus den beiden stark angegriffenen Altbauten der 50er Jahre sind nach der erfolgreichen Totalsanierung 53 aktuelle Wohnungen mit modernen Grundrissen entstanden. Die beiden Gebäude werden nach der Anzahl der Hauseingänge als 4er Block (20 Whg.) und 6er Block (33 Whg.) bezeichnet. Energetisch wurden bei dieser erfolgreichen Sanierung zum Passivhaus sehr anspruchsvolle Ziele verfolgt und erreicht. Die Projektvorstellung und die Qualitätssicherungsmaßnahmen sind den zugehörigen Forschungsberichten [Pfluger 2009] und [Kaufmann 2009] zu entnehmen.

Die Analysen der über zweijährigen messtechnischen Begleitung (Juni 2006 bis Juli 2008) der beiden Gebäude zeigen, dass bei dieser Sanierung tatsächlich Passivhaus-Neubauniveau erreicht wurde. Mit den Messdaten der über 100 Sensoren wird neben dem Sanierungserfolg der Energieverbrauch für die Warmwasserversorgung sowie der Stromverbrauch der einzelnen Wohnungen näher untersucht. Außerdem wird das Kompaktgerät, welches in einer Wohnung installiert ist, beurteilt.

## Extrem geringer Heizwärmeverbrauch

In den zentral versorgten, messtechnisch näher untersuchten 19 Wohnungen des kleineren Blocks („4er Block“) beträgt der gemessene Heizenergieverbrauch (Zählerablesung) in den Wohnungen  $15,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ , inkl. des minimalen ungewollten Sommerverbrauchs von  $0,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Wird auf die Bilanz-Standardtemperatur von  $20 \text{ °C}$  zurückgerechnet, beträgt der Heizwärmeverbrauch nur noch  $11,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Im deutlich milderen Vorjahr liegt der Messwert mit  $8,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  noch deutlich niedriger.

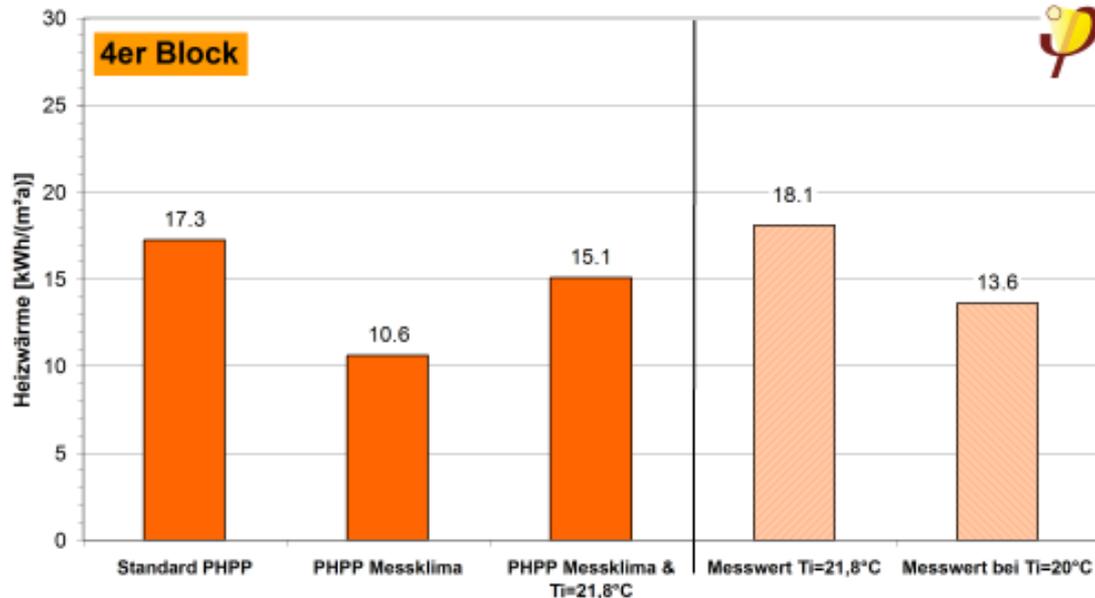
Wird noch der nutzbare Anteil der Wärmeabgabe der zentralen Wärmeverteilung mit  $2,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  berücksichtigt, waren in Summe  $18,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  zur Beheizung eingesetzt. Dabei lagen die Raumtemperaturen in der Heizzeit (Oktober bis April) mit  $21,8 \text{ °C}$  in einem sehr komfortablen Bereich. Rechnet man die Raumtemperatur auf den Standardwert von  $20 \text{ °C}$  um, reduziert sich der Heizwärmeverbrauch auf nur  $13,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Vor der Sanierung lag der rechnerische Bedarfswert bei etwa  $290 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Das entspricht einer Reduktion um 95 %, auf nur 5 % des Ausgangsbedarfs. In den 33 Wohnungen des größeren Gebäudes werden  $17,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  zuzüglich  $3,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  nutzbare Anteile der Wärmeabgabe der Wärmeverteilung zur Beheizung verbraucht. Das sind in Summe  $21,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Dieser Block hat geringfügig höhere Verbrauchswerte aufgrund der damals noch nicht vollständigen Vermietung (fehlende interne Gewinne, Beheizung der leeren Wohnungen auf hohe Temperaturen).



**Abbildung 1: Heizwärmeverbrauch der 19 zentralversorgten Wohnungen im kleineren Gebäude (4er Block) im zweiten Bilanzjahr, flächengewichteter Mittelwert sowie flächengewichteter Mittelwert umgerechnet auf 20 °C Innentemperatur.**

Der Vergleich mit den PHPP-Bedarfswerten<sup>1</sup> nach Anpassung mit den realen Wetterbedingungen (Außentemperatur und Solarstrahlung) sowie der tatsächlichen Raumtemperatur zeigt im kleineren Gebäude eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Verbrauchswerten. Dabei muss berücksichtigt werden, dass in jeweils zwei Wohnungen pro Gebäude die Wärmerückgewinnung erst stark verspätet aktiviert wurde und einige Wohnungen nicht bewohnt waren. Im Rahmen der Messgenauigkeit und der möglichen Genauigkeit der Bilanzrechnung ist die Übereinstimmung ausgezeichnet und bestätigt die hohe Validität des PHPP als Energiebilanzierungswerkzeug ebenso wie als Planungstool auch für die hochenergieeffiziente Sanierung.

<sup>1</sup> PHPP: Passivhaus Projektierungs Paket. Bilanzierungswerkzeug für die Projektierung von Passivhäusern. Herausgegeben vom Passivhaus Institut, Dr. Wolfgang Feist.



**Abbildung 2: Heizwärmebedarf des 4er Blocks (kleineres Gebäude) nach den Ergebnissen der PHPP-Berechnungen. Schrittweise werden die gemessene Außentemperatur und die Solarstrahlungswerte (01.05.2007 bis 30.04.2008) sowie die mittlere Raumtemperatur im Winter ( $T_i = 21,8 \text{ °C}$ ) angepasst. Im Vergleich dazu dargestellt werden die Messwert des Heizwärmeverbrauchs inkl. der Energie der nutzbaren Heizwärmeverteilung (ohne Sommerheizung) und die Messwerte umgerechnet auf die Standardinnentemperatur von  $20 \text{ °C}$ .**

## Heizlast

Die maximale tagesmittlere Heizlast der 19 Wohnungen des 4er Blocks betrug nur  $7,4 \text{ W/m}^2$ . Im 6er Block (größeres Gebäude) wurden maximal  $8,7 \text{ W/m}^2$  gemessen. Damit wurden ebenso niedrige Heizlasten wie im Passivhaus-Neubau realisiert. Bei der Untersuchung der Heizlast nach Etagen sind die höchsten – wenn auch noch immer sehr niedrigen – tagesmittleren Heizleistungen mit  $9,1 \text{ W/m}^2$  im DG festgestellt worden. Im EG lagen die Raumtemperaturen im Mittel niedriger als in den Geschossen darüber. Die verbliebenen Wärmebrücken haben sich bei der Heizlast (max.  $5,9 \text{ W/m}^2$ ) kaum bemerkbar gemacht.

## Warmwasser und Strom

Der nicht regenerative Gesamtaufwand zur Warmwassererzeugung (Speicherladung) beträgt im 4er Block  $20,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Die restliche Speicherbeladung erfolgt solarthermisch ( $7,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ). Dem Warmwasserspeicher werden  $21,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  Warmwasser entnommen. Außerdem werden für die Zirkulation allein 20 % der Wärme ( $5,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ) benötigt.

Mittels modifizierter Wärmezähler konnten nicht wie üblich nur die Warmwassermengen jeder Wohnung, sondern auch deren Energieinhalte bestimmt werden. Das ist aufgrund der fehlenden Messung der Kaltwassertemperatur im Mehrfamilienhausbereich sonst nicht möglich. Normalerweise können nur zentrale Energieverbrauchswerte gemessen werden. In diesem Projekt konnten auch Zapfprofile und Verluste der Warmwasserverteilung ermittelt werden. Nach diesen Messungen ver-

brauchen die Einzelwohnungen im 4er Block im Bilanzjahr im Mittel  $19,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  für die Warmwassernutzung. Gegenüber dem am Speicher gemessenen Warmwasserwärmeverbrauch bedeutet dies, dass  $2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  für die Verteilung benötigt werden, zusätzlich zum Zirkulationsverlust. Der Energieverbrauch zur Warmwassererwärmung liegt damit - wie im Passivhaus üblich - etwa gleichauf mit dem Heizwärmeverbrauch.

### **Stromverbrauch**

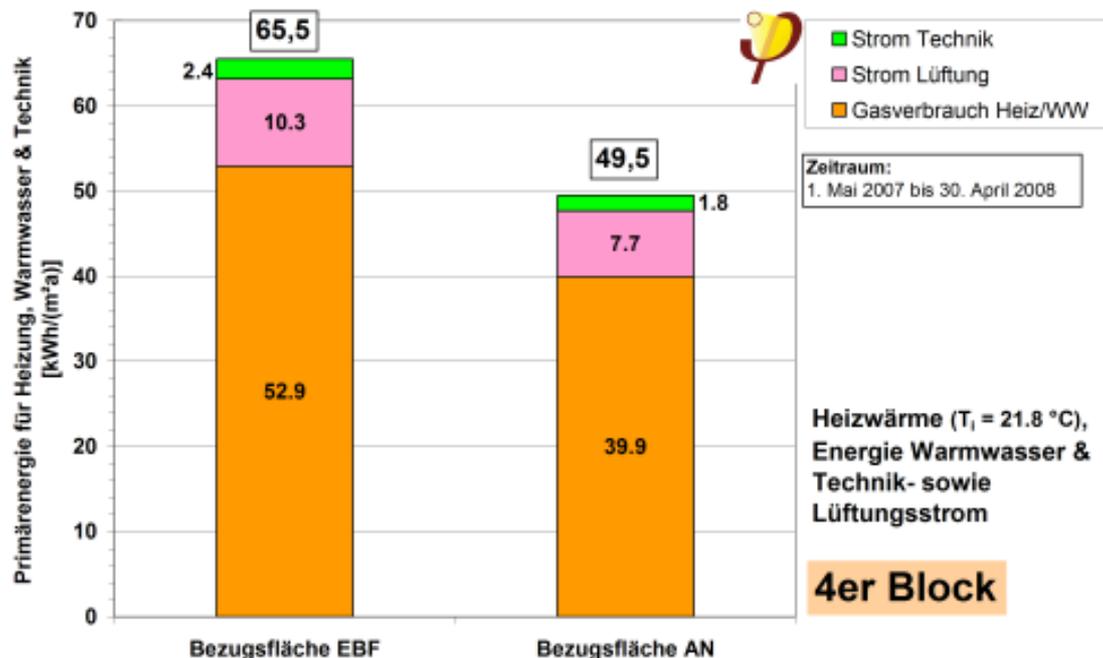
Die Stromverbräuche der Wohnungen im 4er Block enthalten auch den Verbrauch der dezentralen Lüftungsgeräte. Diese Haushaltsstromverbräuche weisen eine große Bandbreite zwischen  $4,8$  und  $69,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  auf. Im Mittel werden  $33,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  verbraucht. Die mittlere elektrische Leistung der Wohnungen während einer typischen Sommerwoche beträgt  $2,9 \text{ W}/\text{m}^2$ , während einer Winterwoche  $4,2 \text{ W}/\text{m}^2$ . Bei zwei zeitweise leerstehenden Wohnungen wurden nahezu konstante elektrische Leistungen von  $21,5$  bzw.  $25,8 \text{ W}$  gemessen (entsprechend  $0,63$  bzw.  $0,30 \text{ W}/\text{m}^2$ ). Vermutlich wurde hier jeweils nur die Lüftungsanlage betrieben. Werden die Lüftungsanlagen nur während der sieben kühlen Monate betrieben, ergibt sich nach den Stichproben ein Lüftungsstromverbrauch von  $3,2$  bzw.  $1,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Der relativ hohe Stromverbrauch von  $3,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  kommt durch die untypisch kleine Wohnfläche der betreffenden Wohnung von nur  $34 \text{ m}^2$  zustande. Die Ergebnisse zeigen, dass der Stromverbrauch der Geräte noch weiter optimiert werden sollte.

### **Energiebilanz**

Der gesamte gemessene Endenergieverbrauch des 4er Blocks beträgt  $83,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ , wobei der aufgrund der höheren Raumtemperatur erhöhte Heizwärmeverbrauch sowie die minimale Sommerheizung enthalten sind (unkorrigierte Messwerte). Die energetische Qualität des 4er Blocks kann anhand des Primärenergieverbrauchs für alle Aufwendungen (Heizung, Warmwasser und alle elektrischen Verbräuche) beurteilt werden. Verwendet werden die Primärenergiefaktoren nach [Gemis]. Es ergibt sich damit ein Primärenergieverbrauch von  $148,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Für eine Sanierung ist dies ein sehr guter Messwert. Dabei stellt mit  $60 \%$  den größten Anteil der Haushaltsstromverbrauch inkl. Lüftungsstrom. Hier sind nach der erfolgreichen energetischen Optimierung der Gebäudehülle die größten weiterführenden Potentiale zu erkennen.

Betrachtet man nur den eingeschränkten Bereich für Heizung, Warmwasser und Technik- sowie Lüftungsstrom ergibt sich primärenergetisch ein Wert von  $65,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Werden die gemessenen Primärenergieverbräuche des Gebäudes nur für diese Anwendungen auf die Gebäudenutzfläche  $A_N$  bezogen ( $1334 \text{ m}^2$ ), ergibt sich ein Primärenergieverbrauch von  $49,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  für den 4er Block, eine um fast  $25 \%$  niedrigere Zahl als beim Bezug auf die Wohnfläche. Dabei lagen die gemessenen Raumtemperaturen im Winter 2007/2008 im Mittel mit  $21,8^\circ\text{C}$  um  $1,8 \text{ K}$  über der Standardtemperatur für die PHPP Bilanz ( $20^\circ\text{C}$ ) und  $2,8 \text{ K}$  über der Bilanzierungstemperatur der EnEV ( $19^\circ\text{C}$ ). Bezieht man die Daten auf die niedrigere Raumtemperatur von  $19^\circ\text{C}$  nach der EnEV, ergibt sich als Primärenergiewert bei Bezug auf  $A_N$  ein Wert von nur noch  $43,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Damit wurde der niedrige, be-

rechnete Energiebedarf messtechnisch validiert. Obwohl es sich um eine Sanierung handelt, und obwohl einige Effekte wie nicht vollständige Vermietung oder die teilweise deutlich verspätete Aktivierung der Wärmerückgewinnung Mehrverbräuche verursacht haben, wurde sogar die (rechnerische) KfW 40-Anforderung für Neubauten in der Feldmessung praktisch erreicht.



**Abbildung 3: Gemessener Primärenergieaufwand für Heizung, Warmwasser und Technikstrom des 4er Blocks bezogen auf die reale Energiebezugsfläche (beheizte Wohnfläche) und auf die fiktive Fläche  $A_N$  bei der tatsächlich gemessenen winterlichen Raumtemperatur von  $21,8 \text{ °C}$ .**

Insgesamt zeigt das erfolgreich realisierte Sanierungsprojekt die hervorragende Übertragbarkeit des Einsatzes von Passivhauskomponenten auf die Altbausanierung. Verbrauchswerte und Heizleistungen wie im Passivhaus Neubau wurden messtechnisch nachgewiesen. Damit ist belegt, dass das sehr große Potential an Altbauten aus den 1950er Jahren energetisch hocheffizient saniert werden kann. Jede Sanierung, die auf weniger anspruchsvollem Niveau ausgeführt wird, stellt eine vertane Chance dar. Diese wird unter ernsthaften wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht korrigiert werden können. Der einmalige Mehraufwand bei der Sanierung dieser Wohnungen um den hier erreichten Standard zu erhalten, ist jedoch nicht nur ökonomisch vertretbar, sondern sogar attraktiv. Dadurch beweist dieses Projekt, dass eine Reduktion des Primärenergiebedarfs in Wohngebäuden im Bestand auf deutlich weniger als ein siebtel des ursprünglichen Wertes in der Praxis erreichbar ist.

## Kompaktgerät

In einer der Wohnungen wurde ein Wärmepumpen-Kompaktgerät der Fa. Viessmann installiert, vermessen und energetisch bewertet. Bei einem Kompaktgerät sind die Haustechnikkomponenten für Lüftung, Warmwasserbereitung und Raumheizung in einem einzigen Gerät integriert. Der Heizwärmebedarf wird dem Wohnraum zum größten Teil über die Zuluft zugeführt, in dieser Wohnung ist im Badezimmer ein

zusätzlicher Heizkörper installiert. Wie in den restlichen Wohneinheiten auch, wird die Zuluft zunächst über einen Wärmetauscher passiv vorerwärmt. Der restliche Energiebedarf wird von einer Wärmepumpe zur Verfügung gestellt, indem der Fortluft Enthalpie entzogen und dem internen Hydraulikkreislauf Wärme zugefügt wird. Darüber hinaus ist das Kompaktgerät mit einem direktelektrischen Heizstab ausgerüstet, um temporäre Spitzenlasten abdecken zu können.

Die Anwendung von Kompaktgeräten ist durch die Vermeidung des Verteilsystems gerade für bestehende Bausubstanz besonders interessant. Von Vorteil sind durch die monovalente elektrische Versorgung auch die geringen Grundkosten und die abrechnungstechnischen Vereinfachungen. Allein durch den elektrischen Stromverbrauch des Kompaktgerätes kann eine Aussage über den gesamten Versorgungsenergieverbrauch (Heizung, Lüftung, Warmwasser) der Wohneinheit getroffen werden.

Im Rahmen der messtechnischen Begleitung wurden im System zusätzlich zwei Wärmemengenzähler installiert, um den Energieverbrauch des Badheizkreises und für das Trinkwarmwasser nachvollziehen zu können. Mit einer Analyse der gemessenen Lufttemperaturen lässt sich der Energieverbrauch der Zuluftnacherwärmung abschätzen.

Im Jahreszeitraum Mai 2007 bis April 2008 wurde ein unerwartet hoher elektrischer Gesamtverbrauch des Gerätes von 39,4 kWh/(m<sup>2</sup>a) (Endenergie gesamt) gemessen. Das entspricht primärenergetisch einem Verbrauch von 106,3 kWh/(m<sup>2</sup>a). Davon wurden 57 % für den Kompressor der Wärmepumpe und 0,5 % für den Heizstab verwendet. Die restlichen 42,5 % des Stromverbrauchs setzen sich aus der Leistungsaufnahme der Lüftung und dem Hilfsstrom für den internen Kreislauf und die Regelung zusammen. Die Jahresarbeitszahl für das gesamte Kompaktgerät konnte zu 1,2 abgeschätzt werden. Damit ergibt sich in der Heizperiode ein Heizwärmeverbrauch von 21,4 kWh/(m<sup>2</sup> a). Der gemessene Energieverbrauch für die Warmwasserzapfungen beträgt 11,5 kWh/(m<sup>2</sup>a). In anderen Projekten wurden bei anderen Kompaktgeräten Jahresarbeitszahlen von über 2,5 gemessen.

Im Vergleich zu anderen Feldmessungen mit Kompaktgeräten, bei denen sehr gute Ergebnissen erzielt wurden, zeigt sich, dass das Gerät nicht optimal arbeitet. Zusammengefasst besteht in folgenden Bereichen Verbesserungspotential zur Einschränkung des Gesamtstromverbrauchs: Eine Verringerung der Speicherverluste, eine abgestimmte Regelung des Badheizkreises um einen taktenden Betrieb der Wärmepumpe zu vermeiden, die Unterbindung der „Sommerheizung“ über die Zuluft als Beiprodukt der Speichererwärmung, sowie eine Überprüfung der Sommerbypasseinstellungen für eine frühere Aktivierung der Wärmerückgewinnung.

*Eigentümerin und Bauherr der beiden Gebäude ist die ABG Frankfurt Holding GmbH. Die Architektur, Planung und Bauleitung wurde vom Büro faktor 10 aus Darmstadt durchgeführt. Die wissenschaftliche Begleitung wurde vom Passivhaus Institut durchgeführt und durch das Hessische Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung (Wiesbaden) finanziert.*

## 2 Projektkurzbeschreibung

Die sanierten Bestandsgebäude befinden sich in Frankfurt a. M. ca. 4 km westlich des Hauptbahnhofes in der Friedrich Ebert Siedlung (Ecke Teves- / Sondershausenstraße). Es handelt sich um zwei Wohnungsbaublöcke aus den 50er Jahren, mit ehemals insgesamt 60 Wohneinheiten, die als Zweispännerkonstruktion jeweils sechs Wohnungen über einen Hauseingang bzw. Treppenaufgang erschließen.

Die Gebäudeeigentümerin, die ABG Frankfurt Holding, hatte sich entschlossen, die beiden Gebäude, welche einen erheblichen Modernisierungstau aufwiesen, grundlegend zu erneuern. Daher wurden beide Gebäude bis zum Frühjahr 2005 leergezogen, nachdem allen Bewohnern ein Ausweichquartier angeboten worden war. Alle Bewohner erhielten eine Option nach der Sanierung wieder zurückzukehren. Die beiden Geschosswohnungsbauten werden durch sehr konsequente bauliche Wärmeschutzmaßnahmen nachträglich bis nahe an den Passivhaus-Standard herangeführt.



**Abbildung 4: Südfassade des 6er Blocks und Giebelwand (Süd) des 4er Blocks der sanierten Gebäude direkt nach der Fertigstellung.**

Nach der Sanierung hat sich die Wohnungszahl durch Zusammenlegung und Aufstockung der Gebäude auf 53 reduziert. Die Grundrissänderungen bezogen sich im Wesentlichen auf die Zusammenlegung zweier Wohnungen zu einer, um auch für Familien zeitgemäßen Wohnraum zu schaffen. So entstanden bis zu 80 m<sup>2</sup> große Wohnungen. Das alte Dachgeschoss wurde komplett abgetragen. Dort wurde ein neues Staffelgeschoss mit etwa 2/3 der Grundrissfläche des Gebäudes geschaffen. Das Gebäude in der Tevesstraße 36 bis 46 weist 6 Hauseingänge (kurz „6er Block“) mit insgesamt 33 Wohneinheiten, das in der Tevesstraße 48 bis 54 verfügt über 4 Hauseingänge (kurz „4er Block“) mit 20 Wohneinheiten.



**Abbildung 5: Westfassade des sanierten 4er Blocks direkt nach der Fertigstellung.**

Die Gebäude werden über zentrale Erdgaskessel (Brennwert) in zwei Heizungskellern mit Wärme für Warmwasser und Heizung versorgt. Zusätzlich sind noch kleine solarthermische Anlagen auf den Dächern montiert, welche die Warmwassererzeugung unterstützen. Die Wohnungen werden, neben den Badheizkörpern, über die Zuluft beheizt. Nur in den Wohnungen im EG sind noch kleine Zusatzheizkörper montiert, um die etwas höhere Heizwärmeleistung zur Verfügung zu stellen. Diese ergibt sich in der Hauptsache durch die verbleibenden Wärmebrücken zum Keller.

Eine Wohnung im 4er Block wird nicht von der zentralen Haustechnikanlage versorgt; in dieser wurde ein Wärmepumpen-Kompaktgerät installiert. In einem Kompaktgerät sind die Haustechnikkomponenten für Lüftung, Warmwasserbereitung und Raumheizung platzsparend in einem einzigen Gerät integriert. Die Versorgung erfolgt monovalent mit elektrischem Strom.

Der Ausgangszustand der beiden Gebäude wurde detailliert untersucht (energetische Qualität und PHPP-Berechnungen, Haustechnik, Luftdichtheit, Thermographie) und in [Pfluger 2009] dokumentiert. Die Sanierungsmaßnahmen mit allen Einzelschritten (energetische Qualität, Varianten, Wärmebrücken, PHPP-Berechnungen, Haustechnik, Luftdichtheit, Thermographie) sind in [Kaufmann 2009] beschrieben.

Tabelle 1: Projektedaten

<b>Baujahr</b>	ca. 1951
<b>Baubeginn Sanierung</b>	Frühjahr 2005
<b>Fertigstellung Sanierung 4er Block</b>	Juni 2006
<b>Energiebezugsflächen (EBF)</b>	4er Block: 1.350 m <sup>2</sup> 6er Block: 2.244 m <sup>2</sup>
<b>Gebäudenutzfläche A<sub>N</sub> (nach EnEV)</b>	4er Block: 1.788 m <sup>2</sup> 6er Block: 2.885 m <sup>2</sup>
<b>A/V-Verhältnis</b>	4er Block: 0,45 1/m 6er Block: 0,46 1/m
<b>Bruttovolumen</b>	4er Block: 5.589 m <sup>3</sup> 6er Block: 9.015 m <sup>3</sup>
<b>Anzahl der Wohnungen</b>	4er Block: 20 6er Block: 33
<b>Wärmeversorgung</b>	Zentrale Erdgasversorgung für Heizung und Warmwasser in zwei Heizräumen (Brennwertkessel) Kompaktgerät in einer Wohnung
<b>Bauherr</b>	ABG Frankfurt Holding GmbH
<b>Architektur / Bauleitung</b>	faktor 10, Darmstadt
<b>Haustechnikplanung</b>	Ingenieurbüro IBB, Mörlenbach
<b>Planungsberatung / Qualitätssicherung / Wissenschaftliche Begleitung / Messtechnische Untersuchung</b>	Passivhaus Institut, Darmstadt
<b>Förderung der wissenschaftlichen Begleitung und Untersuchung</b>	Hessische Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Wiesbaden



Abbildung 6: Detail der Westfassade des sanierten 4er Blocks.

## 2.1 Energiebezugsfläche

Die Energiebezugsflächen (EBF) der beiden sanierten Gebäude betragen für Haus 36 bis 46 (6er Block) 2244 m<sup>2</sup> und für Haus 48 bis 54 (4er Block) 1350 m<sup>2</sup>. Insgesamt sind damit 3594 m<sup>2</sup> sanierter Wohnraum geschaffen worden. Die EBF entspricht der Wohnfläche unter Abzug von nicht beheizten Flächen wie z.B. den Balkonen. Die genannten Energiebezugsflächen sind nicht zu verwechseln mit den deutlich größeren fiktiven Bezugsflächen „A<sub>N</sub>“ („Gebäudenutzfläche“), die z.B. für die Berechnungen nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) verwendet werden. Diese, für den Energiebezug falsche, weil pauschal aus dem Gebäudeaußenvolumen berechnete Fläche, würde auf noch deutlich niedrigere Kenngrößen führen. Sie beträgt für den 4er Block 1788 m<sup>2</sup> (plus 32%) und für den 6er Block 2885 m<sup>2</sup> (plus 29%), für beide Gebäude zusammen 4673 m<sup>2</sup> (plus 30%).

Bei der Untersuchung wird der 4er Block aufgrund der Versorgungsstruktur (19 Whg. über zentrale Gasheizung, eine Whg. mit Kompaktgerät) aufgeteilt in den die EBF 1309,3 m<sup>2</sup> (Zentralheizung) und die 40,8 m<sup>2</sup> (Kompaktgerät).

**Tabelle 2: Energiebezugs- und Gebäudenutzflächen der beiden sanierten Gebäude.**

[m <sup>2</sup> ]	Haus 36 bis 46 (6er Block)	Haus 48 bis 54 (4er Block)
Energiebezugsfläche (EBF)	2244	1350 Zentralversorgt: 1309 Dezentral versorgt: 41
Gebäudenutzfläche A <sub>N</sub>	2885	1788

### Wohnungsgrößen 4er Block

Die Wohnungen im 4er Block werden in dieser Untersuchung genauer untersucht. Daher sind von diesen auch die einzelnen Energiebezugsflächen von Interesse. Eine Zusammenstellung der Flächen der 19 zentralversorgten Wohnungen zeigt Tabelle 3. Die Energiebezugsflächen liegen zwischen 34 und 86 m<sup>2</sup>. Die mittlere Fläche der 19 Wohnungen beträgt 68,9 m<sup>2</sup>.

Tabelle 3: Aufsteigend sortierte Energiebezugsflächen (beheizte Wohnfläche) der 19 zentralversorgten Wohnungen im 4er Block.

Wohnung	EBF [m <sup>2</sup> ]
1	34,0
2	41,0
3	41,0
4	49,0
5	62,6
6	62,6
7	62,9
8	63,0
9	63,4
10	66,2
11	84,0
12	84,2
13	84,3
14	84,7
15	84,8
16	84,9
17	85,2
18	85,8
19	86,0
<b>Summe</b>	<b>1309,3</b>

## 2.2 Wohnungsbelegung

Bei der Datenauswertung ist von Interesse, ob eine Wohnung zur Zeit der Untersuchung bewohnt oder unbewohnt war. Dazu wurden Monatsdaten des Vermietungsstands von der Wohnungsverwaltung ausgewertet. Es ergibt sich ein unterschiedliches Bild sowohl vom ersten zum zweiten untersuchten Jahreszeitraum als auch zwischen den beiden Gebäuden. Dabei wirkt sich besonders aus, dass der 6er Block etwas später fertiggestellt und bezogen wurde. Im ersten Jahreszeitraum ist die Belegung bei beiden Gebäuden noch geringer als im zweiten Jahr. Die Belegung vom zweiten Untersuchungszeitraum (Jahreszeitraum: Mai 2007 bis April 2008) und der Heizzeit aus diesem Zeitraum (sieben Monate: Oktober 2007 bis April 2008) werden hier ausgewertet und vorgestellt.

Allen bewohnten Wohnungen wurden je Monat der Wert „1“ zugeteilt, den unbewohnten der Wert „0“. Bei den 19 zentralversorgten Wohnungen des 4er Blocks ergibt sich damit für den Jahreszeitraum eine maximale Summe von  $19 \times 12 = 228$  „Vermietungsmonaten“, was der vollständigen Belegung entsprechen würde (im 6er Block sind es entsprechend 396). Für Mietverhältnisse die am 15. eines Monats beginnen oder enden wurde entsprechend der Wert 0,5 vergeben.

Nach diesem System ergeben sich im 4er Block im zweiten Bilanzjahr 217,5 (entspricht 95 %) und im 6er Block 312,5 Vermietungsmonate (entspricht 79 %). Nur für den Winter betrachtet steigen die Anteile auf 97 % (4er Block) bzw. 83 % (6er Block) an.

Damit wird deutlich, dass der genauer untersuchte 4er Block in diesem Bilanzjahr fast vollständig belegt war.

**Tabelle 4: Wohnungsbelegung im zweiten Bilanzjahr (Mai 2007 bis April 2008) und der zweiten Heizzeit (Oktober 2007 bis April 2008). Die Angaben sind als „Vermietungsmonate“ und prozentual aufgeführt.**

		<b>4er Block</b> (19 Whg.)	<b>6er Block</b> (33 Whg.)
Zweiter Untersuchungszeitraum (Gesamtjahr)	Maximal mögliche Vermietungsmonate	228	396
	Tatsächliche Vermietungsmonate	217,5 (95 %)	312,5 (79 %)
Heizzeit 2007/2008	Maximal mögliche Vermietungsmonate	133	231
	Tatsächliche Vermietungsmonate	129 (97 %)	192 (83 %)

Die dezentral versorgte Wohnung war im gesamten Untersuchungszeitraum dauerhaft vermietet.

### 3 Aufgabenstellung und Messkonzept

Ziel der Messungen an den beiden energetisch hochwertig sanierten Gebäuden ist die Überprüfung der Funktion des Passivhauskonzeptes auch im Altbau bei verbleibenden Wärmebrücken. Das bedeutet, dass der Einsatz der Zulufterwärmung als hauptsächliche Wärmequelle in der praktischen Umsetzung auch für die Altbaumodernisierung messtechnisch untersucht wird. Dabei sind insbesondere die Heizleistung in den EG Wohnungen von Interesse, bei denen ergänzend noch eine kleine Heizfläche in den Fluren vorhanden ist. Es erfolgt eine Erfolgskontrolle der Projektziele auch zum gesamten Primärenergieverbrauch der Wohnungen über einen Zeitraum von zwei Jahren.

Alle Messdaten werden alle 10 Minuten über Bustechnik zentral auf einem Messrechner abgefragt und abgespeichert.

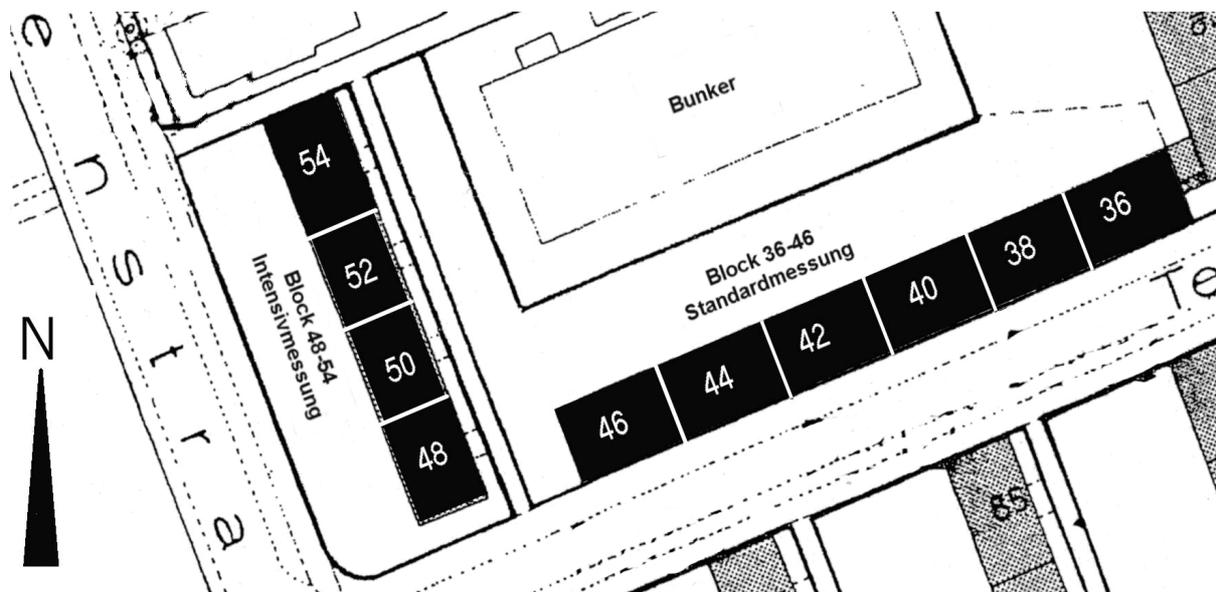
Das Messkonzept sieht zur Erreichung der Zielsetzungen eine Aufteilung in eine Standard- und eine Intensivmessung vor.

Mit der **Standardmessung** werden im 6er Block (Tevesstraße Nr. 36 bis 46) alle zentralen Wärmemengen der Heizungs- und Warmwasserversorgung dauerhaft erfasst und ausgewertet.

Bei der **Intensivmessung** im 4er Block (19 Wohnungen, Tevesstraße Nr. 48 bis 54) erfolgt neben der Erfassung der zentralen Zähler, zusätzlich auch eine Vermessung der einzelnen Wohnungen. Durch die Anordnung der Wärmemengenzähler an den zentralen Stellen und in den einzelnen Wohnungen können auch die Energiemengen bestimmt werden, die aufgrund der Wärmeverteilung anfallen. Dies betrifft sowohl die Heizwärme wie auch die Energie zur Warmwassererwärmung. Zur Beurteilung gehört auch die Messung und Aufzeichnung jeweils einer Raumtemperatur (Kernbereich der Wohnung) in jeder intensiv vermessenen Wohnung. Diese sollen Aussagen über das Temperaturverhalten in der Heizperiode und zum Sommerkomfort ermöglichen. Außerdem sind die 19 Wohnungen mit Stromzählern ausgestattet, welche ebenfalls über die zentrale Erfassung ausgelesen werden. Darüber können Information über die Haushaltsstromverbräuche ermittelt werden.

In einer der Wohnungen 20 Wohnungen des 4er Blocks ist als alleinige haustechnische Versorgungseinheit ein **Passivhauskompaktgerät** im Einsatz. Es soll überprüft werden, ob das Gerät auf die Gebäude- und Nutzeranforderungen im Bereich der Bestandssanierung angepasst arbeiten. Bei dem Kompaktaggregat handelt es sich – wie oben bereits erwähnt - um ein monovalentes System. Die Heizwärme- als auch die Warmwasserversorgung erfolgt elektrisch mittels Wärmepumpe und die ggf. zeitweise notwendige Warmwassernachheizung direkt elektrisch (Heizstab). Das Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung ist ebenfalls in das System integriert. Die Wärmeversorgung für die Raumwärme erfolgt zum einen über ein Nachheizregister (Zulufterwärmung) als auch über einen externen Heizkörper im Badezimmer. Über die Wärmeabgabe des Gerätes (Kompressorabwärme etc.) wird der Aufstellraum und damit die Wohnung ebenfalls erwärmt. Eine detaillierte Messung der abgegebenen Heizwärme wäre daher sehr aufwendig. Direkt gemessen

wurden die elektrischen Leistungsaufnahmen des gesamten Kompaktgerätes, des Kompressors der Wärmepumpe und der Heizstäbe, sowie die Wärmemengen des Warmwasserverbrauchs und der Badheizung. Eine rechnerische Abschätzung des Heizwärmeverbrauchs kann somit unter Zugrundelegung einer berechneten Aufwandszahl der Wärmepumpe erfolgen. Hierbei werden plausible Werte für die Wärmeabgabe des Gerätes sowie Speicher- und Verteilverluste angesetzt.



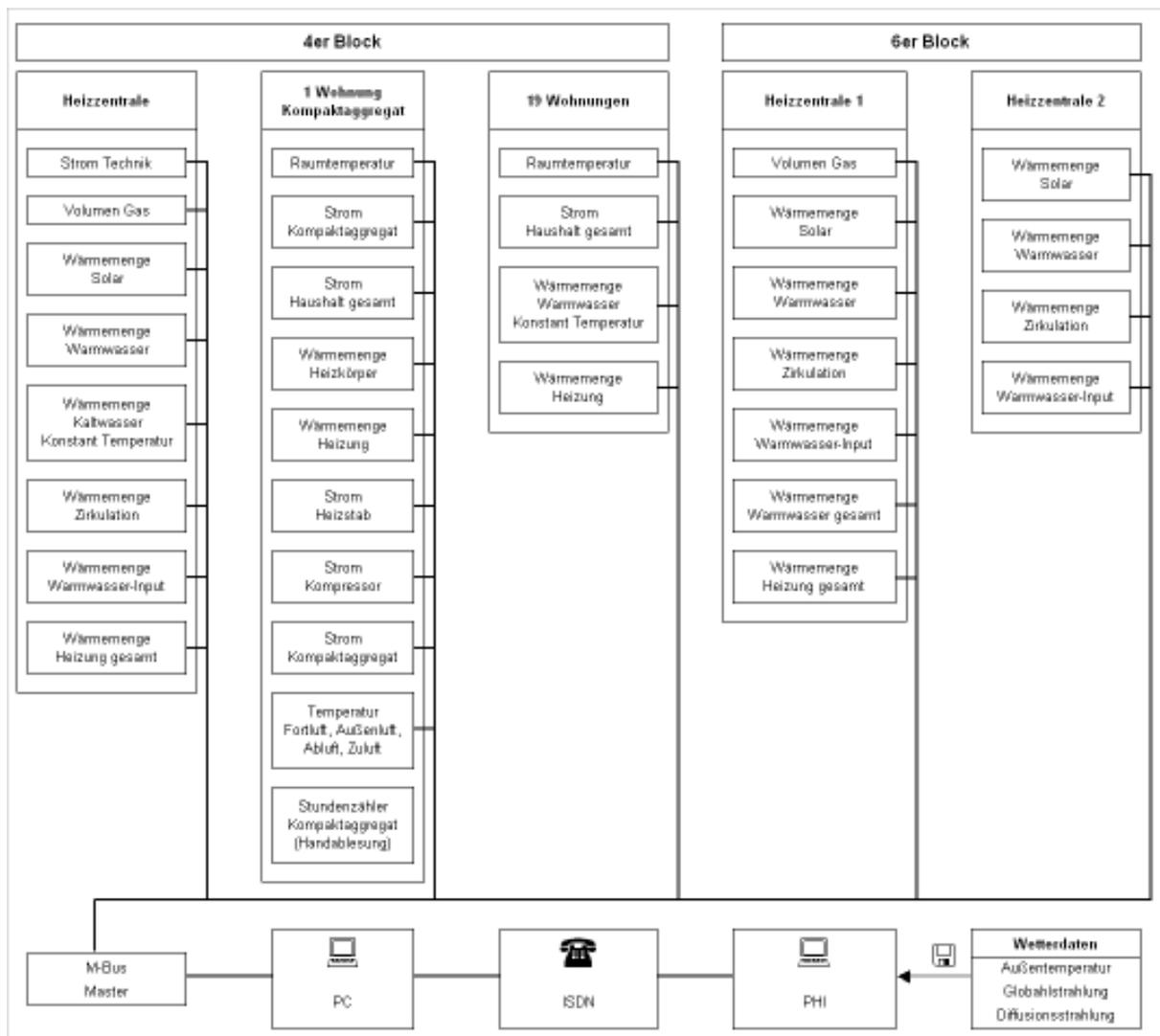
**Abbildung 7: Lageskizze der beiden Wohnblocks und Aufteilung nach Intensivmessung und Standardmessung.**

Für die Einordnung und Interpretation der gemessenen Verbrauchsdaten und Raumtemperaturen sind die klimatischen Randbedingungen notwendig. Die Zahl der Heizgradtage und die solaren Gewinne wirken sich signifikant auf den Heizwärmeverbrauch aus. Um den messtechnischen Aufwand gering zu halten und trotzdem aussagekräftige Wetterdaten verwenden zu können, werden Wetterdaten vom Deutschen Wetterdienst (DWD) bezogen. Es ergeben sich nur geringe Abweichungen durch die Verwendung der Wetterdaten vom nächstgelegenen Standort Geisenheim.

## 3.1 Messtechnik

Für die Standard- und die Intensivmessung sind die Wohnungen wie oben beschrieben mit unterschiedlicher Messtechnik ausgestattet.

Im Keller von Haus 50 ist die zentrale Messdatenerfassungsanlage mit M-Bus Master, Spannungsversorgung der Sensoren, Messrechner und Telefonanschluss installiert. Zwischen den beiden Gebäuden ist ein Verbindungskabel für die Messtechnik verlegt. Einen Überblick über das M-Bus Netz mit allen eingesetzten Sensoren ist in Abbildung 8 dargestellt.



**Abbildung 8: Aufbau der Datenerfassung mit M-Bus-Netz, Messrechner und Datenübertragung über ISDN.**

Die über die M-Bus-Zentrale in 10 Minuten Abstand abgefragten Daten der über 100 Sensoren und Zähler werden auf dem Messrechner aufgezeichnet. Die Daten

werden über die Telefonleitung zur Datenkontrolle und Auswertung regelmäßig ausgelesen.



**Abbildung 9: Messrechner mit unterbrechungsfreier Stromversorgung (USV), Bus-Master und zentraler Spannungsversorgung der Sensoren sowie Telefonanschluss zum Datentransfer im Keller von Haus 50.**

### 3.1.1 Wärmemengenzähler

In den zentralen Technikellern mit der Versorgungstechnik befinden sich auch die zentralen Wärmemengenzähler (WMZ) zur Erfassung der Gesamtenergieströme für Heizung und Warmwasserbereitung. Die Anordnung der Technik ist in beiden Gebäuden gleich, mit dem Unterschied, dass im 6er Block zwei Gaskessel und auch zwei Warmwasserzentralen vorhanden sind. Die Anordnung der zentralen Technik und der Wärmemengenzähler gehen aus Abbildung 10 und Abbildung 11 hervor.

Die Wärme- und Warmwasserversorgung einer Wohnung im 4er Block mit der Anordnung der Wärmezähler in der Wohnung ist schematisch vereinfacht in Abbildung 12 dargestellt.

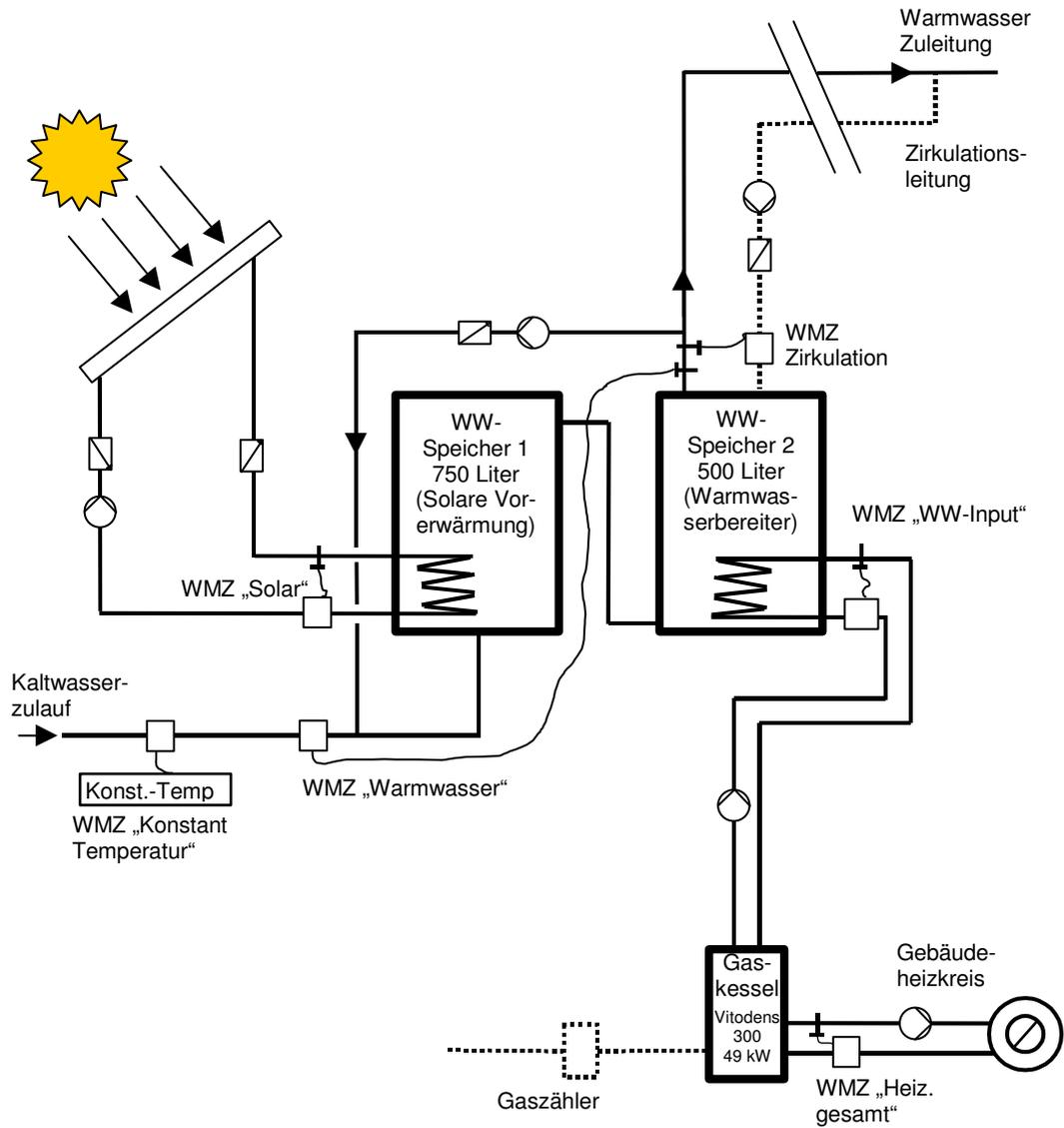
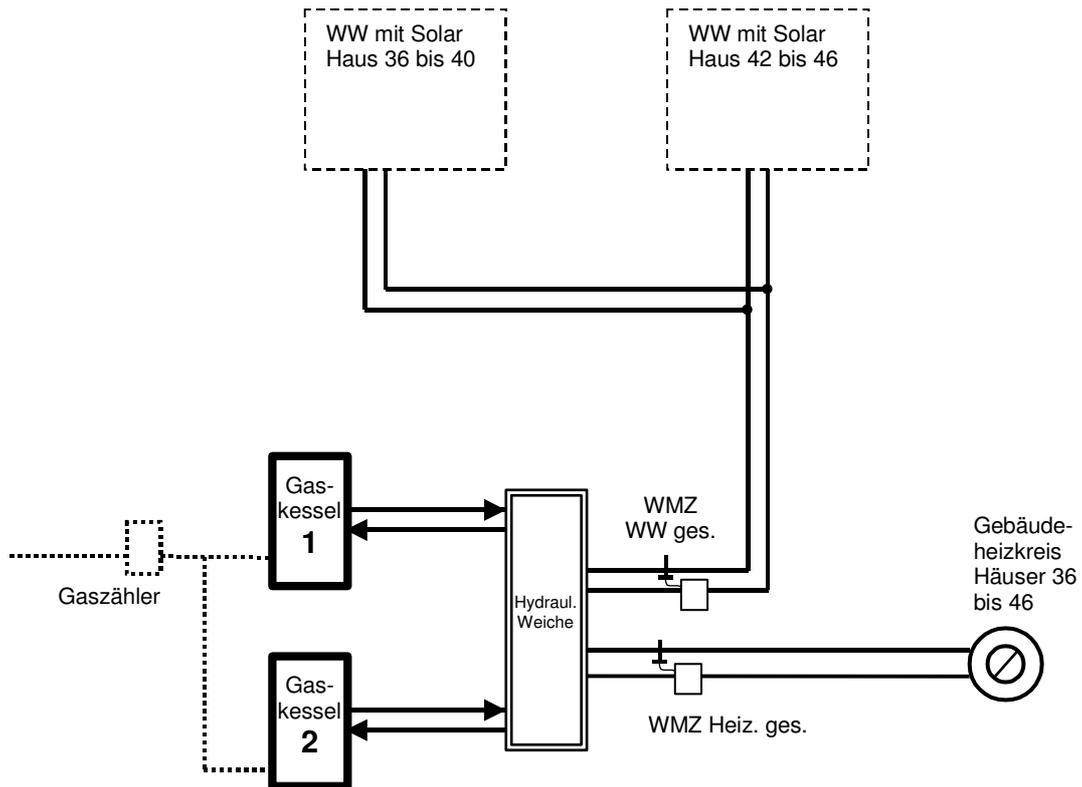
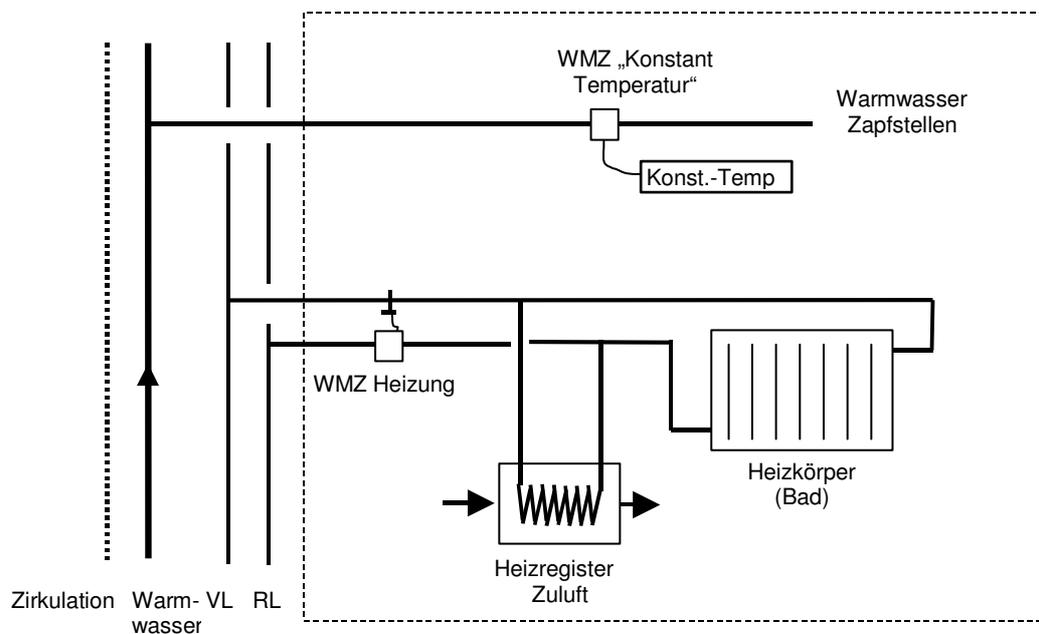


Abbildung 10: Schematisches Hydraulikschema der zentralen Wärmeversorgung im 4er Block mit den installierten Wärmemengenzählern (WMZ).



**Abbildung 11: Schematisches Hydraulikschema der zentralen Wärmeversorgung im 6er Block mit den installierten Wärmemengenzählern (WMZ). Die beiden gestrichelten Kästen enthalten jeweils die gleiche Anordnung der Warmwasserbereitung wie in Abbildung 10 dargestellt.**



**Abbildung 12: Hydraulikanordnung und Wärmemessung in einer einzelnen, zentralversorgten Wohnung des 4er Blocks (schematisch).**

### 3.1.2 Energie für Warmwasser

Die Messung des Energieverbrauchs für das genutzte Warmwasser jeder einzelnen Wohnung in Mehrfamilienhäusern ist nicht trivial. Normalerweise liegen bei Messprojekten nur die Warmwasser-Mengen vor. Da die Zapftemperaturen durch die zeitlichen Zapfabstände und Zapflängen stark variieren können, ist eine Berechnung der Energiemengen aus der gezapften Warmwassermengen nicht mit vertretbarer Fehlergröße möglich. Um diese Verbräuche dennoch messen zu können, muss die jeweilige Wassermenge (Durchfluss) mit der jeweiligen Wassertemperatur bilanziert werden.

Zur Messung der Energiemengen des Warmwasserverbrauchs je Wohnung wurde für das Projekt ein eigenes Messverfahren entwickelt, welches im Folgenden erläutert wird:

Bei einer typischen Warmwasserversorgung, kommt das Warmwasser nur durch ein Warmwasserrohr in die Wohnung. Es gibt keine Vor- und Rücklaufleitung wie bei der Heizungsversorgung. Zur Messung wurden in jeder Wohnung handelsübliche Wärmemengenzähler eingebaut. Die Volumenmessteile der Zähler mit dem jeweiligen Temperatursensor (normalerweise „Rücklauf“) wurde in die Warmwasserleitung eingebaut. Am „Vorlauf“-Temperatursensor wurde vor Ort ein selbstgewickelter Konstantwiderstand angelötet und fixiert (anstelle eines Pt100 Widerstandes). Dieser „täuscht“ dem Zähler dauerhaft eine ca. 82 °C warme Vorlauftemperatur vor. Der Zähler berechnet damit und der realen Zapftemperatur mit hoher zeitlicher Auflösung eine „falsche“ Energiemenge. Die richtige anzusetzende Temperaturdifferenz ist die Differenz zwischen der Zapf- und der Kaltwassertemperatur im Hausanschluss des Gebäudes. Die Kaltwassertemperatur in der Wohnung ist ebenfalls nicht nutzbar, da sie von den Nutzungsintervallen und der Nutzungsdauer des Kaltwassers abhängt. Der Messort der realen Kaltwassertemperatur (Hausanschluss im Keller) ist zu weit entfernt von den 19 Zählern der Wohnungen, um sie mit vertretbarem direkt an den WMZ zu verwenden. Dazu wäre ein Umbau der Wärmezähler notwendig gewesen, der nur sehr aufwendig und mit dem Hersteller zu realisieren wäre.

Aus diesem Grund ist zur Referenzmessung im Keller ein weiterer präparierter WMZ in der Kaltwasserleitung, kurz nach der Hauseinführung, installiert. Dieser ist ebenfalls mit einem Konstantwiderstand am Vorlauftemperatursensor ausgestattet.

Die Zähler werden über den M-Bus ebenfalls im 10 Minuten Intervall ausgelesen. Aus den Messdaten der „falschen“ Energiemengen können nun - mit hinreichend großer Genauigkeit - mittels der gemessenen Kaltwassertemperatur die realen Energiemengen berechnet werden. Die exakten Konstanttemperaturen eines jeden Zählers werden dazu ebenfalls verwendet.

Auf diese Weise ist es möglich, die Energiemengen der Warmwasserversorgung der einzelnen Wohnungen zu bestimmen und damit die Nutzerstreuung auch in diesem Bereich quantitativ zu beschreiben. So kann auch der Anteil der Wärmemenge bestimmt werden, der durch die Warmwasserverteilung nicht in den Wohnungen verbraucht wird.



**Abbildung 13:** Installierte Wärmemengen- (schwarz) und Wasserzähler (rund) in einer der 19 Wohnungen im 4er Block. In der Installationsdose hinter dem WMZ in der Bildmitte befindet sich der gewickelte Konstantanwiderstand für die Warmwassermessung.

### 3.1.3 Raumtemperaturmessung

Die Raumtemperaturen wurden mit M-Bus Temperatursensoren gemessen. Dabei handelt es sich um eine Sonderentwicklung nach Vorgaben des Passivhaus Instituts. Als Messsensor für die Raumluftmessung werden langzeitstabile Platin-Widerstände (Pt 100) der höchsten verfügbaren Genauigkeitsklasse (Klasse: 1/10 DIN B) verwendet. Die Elektronikbausteine der Sensoren sind in Unterputzdosen montiert und mit geschlitzten Deckeln (Belüftung) abgedeckt. In allen 20 Wohnungen des 4er Blocks wurden so die Kerntemperaturen im Wohnraum bzw. Flurbereich erfasst.

Alle Sensoreinheiten wurden vor Einbau im Labor kalibriert. Um die Raumtemperaturmessung im Gebäude zusätzlich unter realen Bedingungen zu kalibrieren, wurden im Oktober 2006 für jede der 20 Messstellen Kalibriermessung in den Wohnungen durchgeführt. Dabei wurden je Messstelle ca. 60-minütige Perioden der Raumluft- und der Oberflächentemperatur aufgezeichnet und in die Auswertung übernommen.



**Abbildung 14: Messaufbau bei den Kalibriermessungen der Temperaturmessstellen in den Wohnungen des 4er Blocks. Unter der Temperaturmessstelle befindet sich die Steuereinheit des Lüftungsgerätes der Wohnung.**

### 3.1.4 Tabellarische Übersicht der Messgeräte

Messgröße	Messort	Einheit	Spezifikation	Hersteller	Messgenauigkeit
<b>Messungen in den Wohnungen (4er Block)</b>					
WMZ Warmwasser	Warmwasserleitung Trinkwasser, Bad	kWh	Sharky Heat 770 Qp=0.6	Fa. Hydrometer	Klasse C
WMZ Heizwärme	Heizungsleitung, Bad	kWh	Sharky Heat 773 Qp=0.6	Fa. Hydrometer	Klasse C
Lufttemperatur	Wohnzimmer / Flur	°C	PT 100 Unterputzdose	Fa. Deneg	Pt 100 DIN Klasse 1/10 B
Stromverbrauch Wohnungen	Unterverteilung Wohnung	kWh	DVH 3113	Fa. Glock Energiezähler	Klasse 2
Stromverbrauch Whg. mit Kompaktgerät	Unterverteilung Wohnung, Kompressor und Heizstab	kWh	DVH 3113	Fa. Glock Energiezähler	Klasse 1 und 2
Temperaturen Luftkanäle	5 Luftkanäle Kompaktgerät	°C	Pt 100 mit 4 Leitmessung	Fa. Inor	Pt 100 DIN Klasse 1/10 B
<b>Zentrale Messungen Gebäudetechnik</b>					
WMZ Solarerträge	Heizzentrale, Solaranlage Haus 48	kWh	E-THXKA Qp=1.5, CALEC	Hydrometer / Aquametro Messtechnik GmbH	Besser EN-1434-1
WMZ Solarerträge	Heizzentrale, Haus 40 & 44	kWh	E-THXKA Qp=0.6, CALEC	Hydrometer / Aquametro Messtechnik GmbH	Besser EN-1434-1
Wärmemengenzähler Heizwärme & Warmwasser	Heizzentrale, Heizung	kWh	Sharky Heat 773 Qp=0.6 bis 1.5	Fa. Hydrometer	Klasse C
Gaszähler	Heizzentralen	m <sup>3</sup>	G16 / G4 mit Impulsnehmer	H. Pipersberg jr GmbH	<0.5%

## 4 Messergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die Messdaten bezüglich der Fragestellungen des Projektes ausgewertet. Die Daten wurden im Zeitraum von Juni/Juli 2006 bis Ende April 2008 (z.T. Juli 2008), also über einen Zeitraum von 22/24 Monaten, aufgezeichnet. Die jeweiligen Besonderheiten und abweichenden Datenverfügbarkeiten sind in den betreffenden Abschnitten angegeben.

Für die Untersuchung werden zwei Jahreszeiträume als Bilanzzeiträume gewählt (Tabelle 5). Diese Aufteilung wird bei der Auswertung der Wärmemengen (Abschnitt 4.3) näher erläutert.

**Tabelle 5: Verwendete Zeiträume der beiden Bilanzjahre.**

<b>Jahr</b>	<b>Zeitraum</b>
Bilanzjahr 1	01. August 2006 bis 31. Juli 2007
Bilanzjahr 2	01. Mai 2007 bis 30. April 2008

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

In der Auswertung werden neben den Daten der beiden gesamten Gebäude auch die Wohnungen im 4er Block differenziert untersucht. Dabei wird aufgrund der zentralen Versorgung von 19 Wohnungen und der einen, dezentral mittels Kompaktgerät versorgten Wohnung, die Auswertung aufgeteilt. Die einzelne Wohnung wird im Abschnitt 6 separat untersucht.

Die einzelnen Wohnungen werden für diesen Bericht mit Buchstaben bezeichnet. Die Buchstabenzuordnung ist, um den Datenschutz zu gewährleisten, eindeutig aber unsortiert durchgeführt.

Dieser Messdatenauswertung ist die Untersuchung [Kah 2005] vorausgegangen, in der bereits die Luftqualität vor und nach der Sanierungsmaßnahme gemessen wurde.

## 4.1 Wetterdaten

Die für die Untersuchung benötigten Wetterdaten wurden als Stundenmittelwerte vom Deutschen Wetterdienst bezogen. Die nächstgelegene Wettermessstation für die Messgrößen Außentemperatur und direkte und diffuse Globalstrahlung befindet sich in Geisenheim am Rhein, ca. 48 km vom Gebäudestandort entfernt. Die durch die räumliche Distanz entstehenden Abweichungen sind als gering anzunehmen. Die Gebäude befinden sich am offenen Rand der verdichteten städtischen Bebauung, was bei der Temperaturmessung eine nur geringe Abweichung zur Messstelle im ländlicherem Geisenheim erwarten lässt.

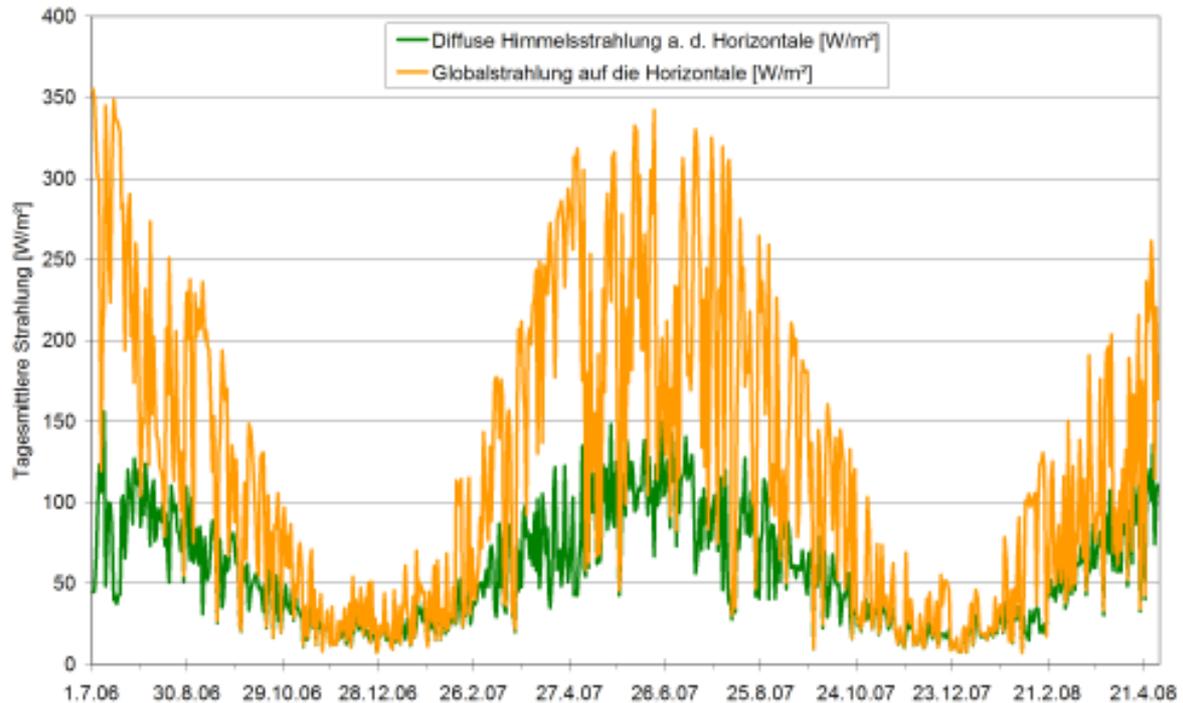
Dokumentiert werden hier die aus den Stundendaten ermittelten Tagesmittelwerte für den Zeitraum 01. Juli 2008 bis zum 30. April 2008.



**Abbildung 15: Tagesmittlere Außentemperatur vom gesamten Untersuchungszeitraum vom Standort Geisenheim (Quelle DWD).**

Die tagesmittlere Außentemperatur zeigt einen typischen Jahresgang: Die Temperaturen bewegen sich zwischen maximal 27,8 und minimal minus 5,5°C. Es ist zu erkennen, dass der Winter 2006/2007 milder ausgefallen ist als der nachfolgende Winter 2007/2008.

Die solare Globalstrahlung auf die Horizontale zeigt ebenfalls den erwarteten typischen Jahresgang. Dabei liegen die tagesmittleren Messdaten der Direktstrahlung zwischen 7 und 355 W/m<sup>2</sup>.



**Abbildung 16: Tagesmittlere diffuse und direkte Strahlung auf die Horizontale vom gesamten Untersuchungszeitraum vom Standort Geisenheim (Quelle DWD).**

Die minimalen, maximalen und mittleren Messdaten können der Tabelle 6 entnommen werden.

Für den Winter 2006/2007 (01.10.2006 bis 30.04.2007) ergibt sich eine mittlere Temperatur von 8,6°C und eine mittlere Direktstrahlung von 85,2 W/m<sup>2</sup>. In dem kühleren Folgewinter 2007/2008 (01.10.2007 bis 30.04.2008) lag die mittlere Temperatur mit 5,9°C und einer mittleren Direktstrahlung von 70,8 W/m<sup>2</sup> deutlich niedriger.

**Tabelle 6: Minimale, maximale und mittlere Messdaten der Mittelwerte in unterschiedlichen Zeiträumen**

	<b>Globalstrahlung [W/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Diffusstrahlung [W/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Außentemperatur [°C]</b>
<b>Jahrzeitraum 1 (1.8.06-31.7.07)</b>			
Max	342,2	149,9	27,0
Min	7,2	7,1	-4,8
Mittelwert	128,1	61,3	12,4
<b>Jahreszeitraum 2 (1.5.07-30.4.08)</b>			
Max	342,2	149,9	27,0
Min	7,1	7,0	-5,5
Mittelwert	119,8	60,6	10,6
<b>Sommer 2007 (1.5.07- 30.9.07)</b>			
Max	342,2	149,9	27,0
Min	9,8	9,6	9,8
Mittelwert	187,9	88,0	17,2
<b>Winter 06/07 (1.10.06-30.4.07)</b>			
Max	313,4	122,8	20,3
Min	7,2	7,1	-4,8
Mittelwert	85,2	39,3	8,6
<b>Winter 07/08 (1.10.07-30.4.08)</b>			
Max	261,6	135,6	17,4
Min	7,1	7,0	-5,5
Mittelwert	70,8	40,9	5,9

Im näher untersuchten zweiten Jahreszeitraum (Mai 2007 bis April 2008) zeigen die stundenmittleren Messdaten der Außenlufttemperatur den Minimalwert von -7,6 °C (24.03.08, 5:00 Uhr) und den Maximalwert von 34,3 °C (15.07.2007, 17:00 Uhr).

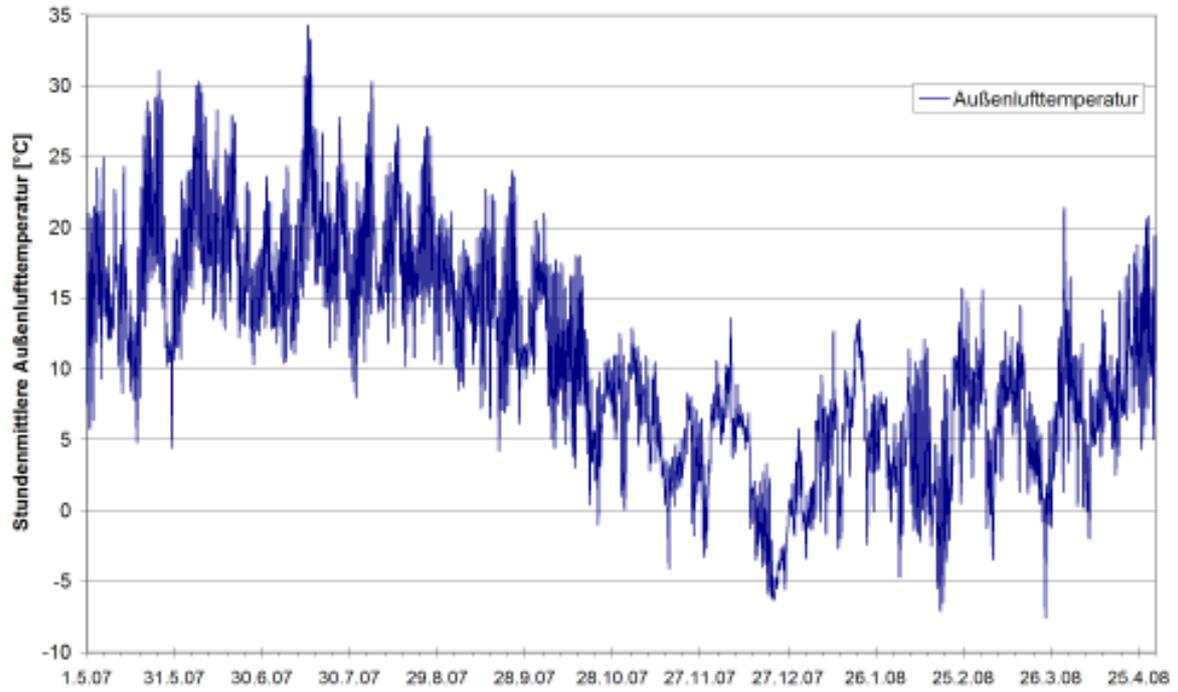
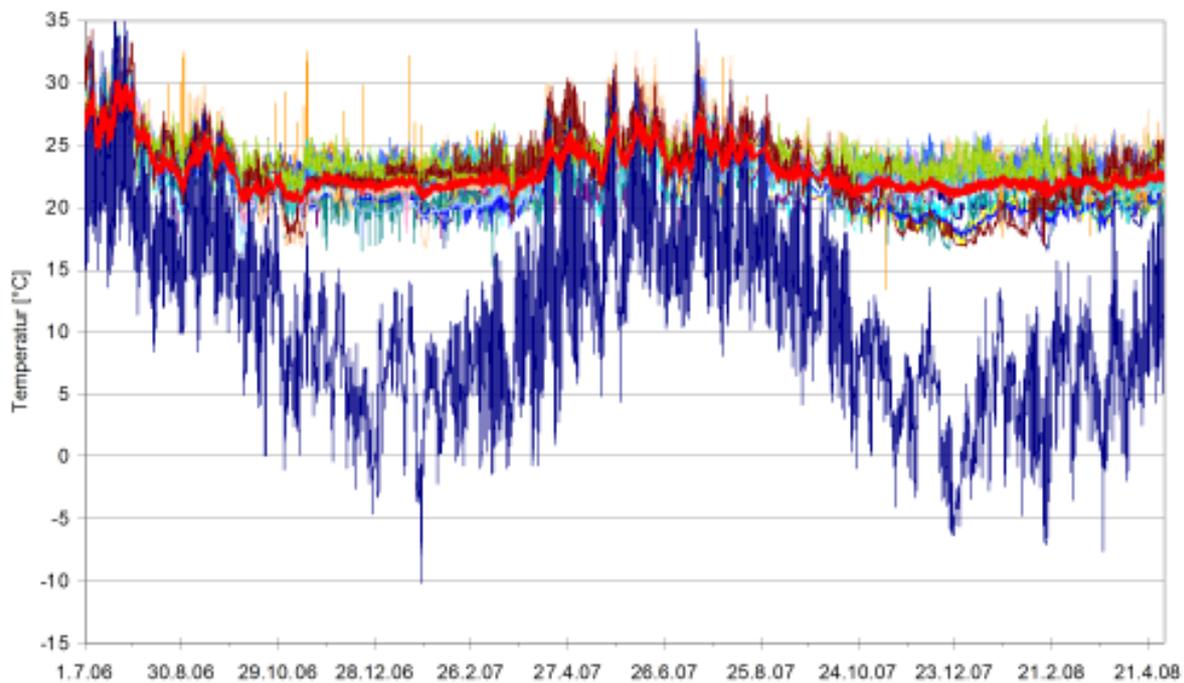


Abbildung 17: Stundenmittlere Außentemperatur vom Jahreszeitraum 1. Mai 2007 bis 30. April 2008 vom Standort Geisenheim (Quelle DWD).

## 4.2 Außen- und Raumtemperaturen

Die Raumtemperaturmessungen aus den 19 zentral versorgten Wohnungen des 4er Blocks liegen für den gesamten Untersuchungszeitraum vor. Als Überblick werden hier die Messdaten als Stundendaten dargestellt. Zusätzlich sind die flächengewichtete mittlere Gebäudetemperatur und die Außenlufttemperatur dargestellt (Abbildung 18).

Bei den dann folgenden Diagrammen sind zeitliche Ausschnitte der Stundendaten dargestellt: Zum einen der zweite Jahreszeitraum (01. Mai 2007 bis 30. April 2008) sowie der gesonderte Winterzeitraum 2007/2008.



**Abbildung 18: Stundendaten der Außen- und der Raumtemperaturen der 19 Wohnungen des 4er Blocks sowie der Mittelwert (Flächengewichtung) der Wohnungen (rot) für den Zeitraum 01.07.2006 bis 30.04.2008.**

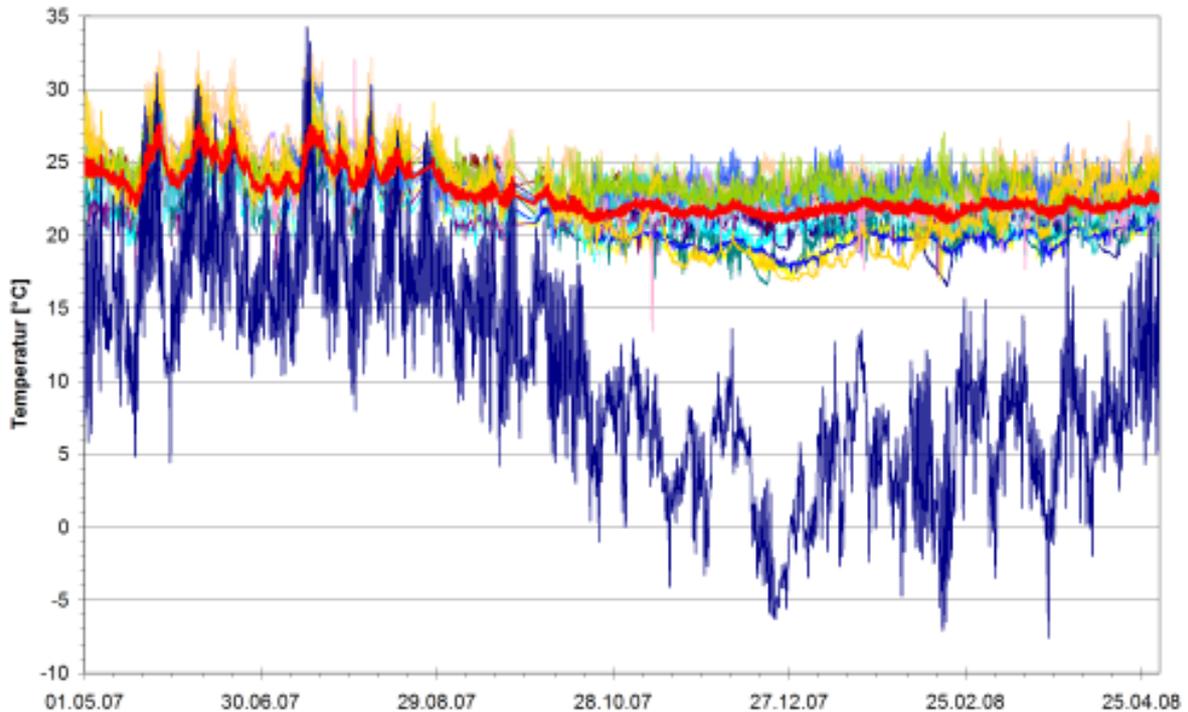


Abbildung 19: Detail der Stundendaten aus Abbildung 18 für den Zeitraum 01.05.2007 bis 30.4.2008. Der flächengewichtet Mittelwert der Wohnungen ist rot dargestellt.

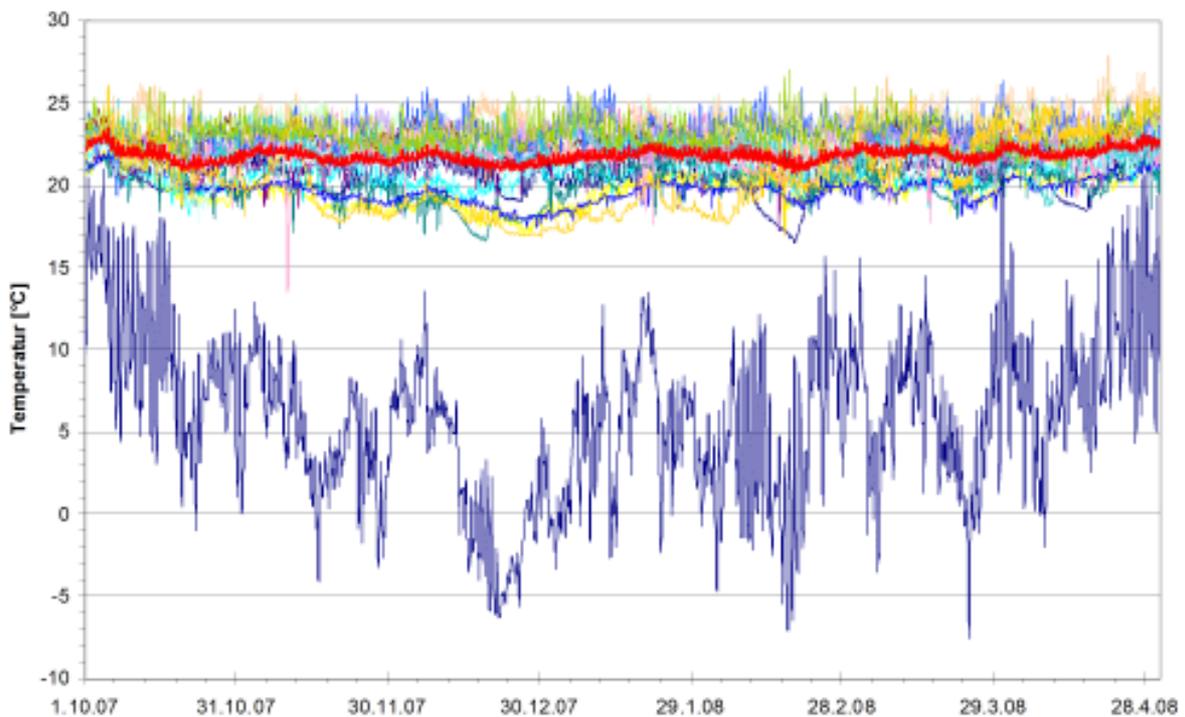


Abbildung 20: Stundentemperaturdaten vom Winterzeitraum (1.10.2007 bis 30.04.2008) aus Abbildung 19. Der flächengewichtet Mittelwert der Wohnungen ist rot dargestellt.

Die Wintertemperaturen vom 01.10.2007 bis zum 30.04.2008 betragen im flächengewichteten Mittel der Wohnungen 21,8°C. Die minimale flächengewichtete Stunden-Mitteltemperatur betrug 20,8°C, die maximale 23,5°C. Während der Heizzeit verlaufen die Raumlufttemperaturen relativ gleichmäßig.

Einzelne Wohnungen zeigen zeitweise geringe Temperaturen bis - als Extremwert - minimal 13,5 °C. Dabei ist zu unterscheiden zwischen einzelnen kurzzeitigen Fensterlüftungen und un- bzw. schwachbeheizten Wohnungen (Urlaub oder unbewohnt). Bei letzteren herrschen die niedrigeren Temperaturen ggf. auch längere Zeit vor. Hier fällt besonders die gelbe Kurve in Abbildung 20 auf: Die Temperaturen waren über Wochen deutlich am niedrigsten. In der Wohnung hat ein Mieterwechsel stattgefunden (Mitte Februar 2008). Es ist anzunehmen, dass die Wohnung von November 2007 bis Mitte Februar 2008 nicht bewohnt war. Eine aktive Beheizung erfolgte in diesem Winter nur vom 5. bis zum 13. November 2007 und ab dem 12.02.2008. Zur Zeit der festgestellten Minimaltemperaturen war die Wohnung damit weder bewohnt noch beheizt.

Es gibt eine weitere Wohnung (dunkelblaue Kurve) mit dauerhaft relativ niedriger Raumtemperaturen. Diese wurde in dem Winter - mit der Ausnahme von 2 Tagen - nicht beheizt. So wurden in der Wohnung absolut nur 7,5 kWh Heizwärme verbraucht (entsprechend 0,09 kWh/(m<sup>2</sup>a)). Die Temperaturen lagen dabei am unteren Rand des Temperaturfeldes, im Mittel bei 19,7°C. Im Kernwinter (01. November 07 bis 29. Februar 2008) bei 19,3°C. Die Wohnung war während der gesamten Zeit bewohnt (Analyse des Warmwasserverbrauchs). Für eine unbeheizte Wohnung zeigen sich mit den 19,3 bzw. 19,7°C sehr hohe winterlichen Temperaturen. Da der Stromverbrauch bei der Wohnung ebenfalls sehr niedrig ausfällt, wird die Wohnung in der Hauptsache durch Personenwärme, passive Solarwärme, der Wärme aus der Heizungs- und Warmwasserverteilung sowie durch Querwärmeströme der Nachbarwohnungen beheizt. Durch diese unterschiedlichen Effekte so hohe Raumtemperaturen zu erreichen ist nur bei einer sehr gut wärmedämmten Gebäudehülle möglich.

Die gemessenen Temperaturmittelwerte sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

**Tabelle 7: Übersicht der gemessenen Temperaturmittelwerte im Winter 2007/08 der 19 Wohnungen im 4er Block und der Außentemperatur.**

<b>Mittelwerte</b>	Innen- temperatur (flächengewichtet)	Außen- temperatur
Winter (01.10.2007 bis 30.04.2008)	21,8 °C	+ 5,9 °C
Kernwinter (01.11.2007 bis 29.02.2008)	21,7 °C	+ 4,0 °C

Die mittleren Temperaturen der einzelnen Wohnungen im Winter 2007/2008 (01.10.2007 bis 30.04.2008) liegen in einem Band zwischen 19,7 bis 23,8°C

(Mittelwert 21,8°C). Im Kernwinter (01.11.07 bis 29.02.2008) zwischen 19,0 und 23,7°C (Mittelwert 21,7°C). Wärmere und kühlere Wohnungen sind in jeder Etage, an Giebelwänden wie auch im „Gebäudekern“ (also umgeben von benachbarten Wohnungen) zu finden. Das zeigt, dass es je nach Nutzerbedarf geregelt werden kann.

Im Sommer 2007 (01.05.2007 bis 30.09.2007) liegen die mittleren Wohnungstemperaturen zwischen 22,6 und 25,9°C (flächengewichteter Mittelwert 24,2°C).

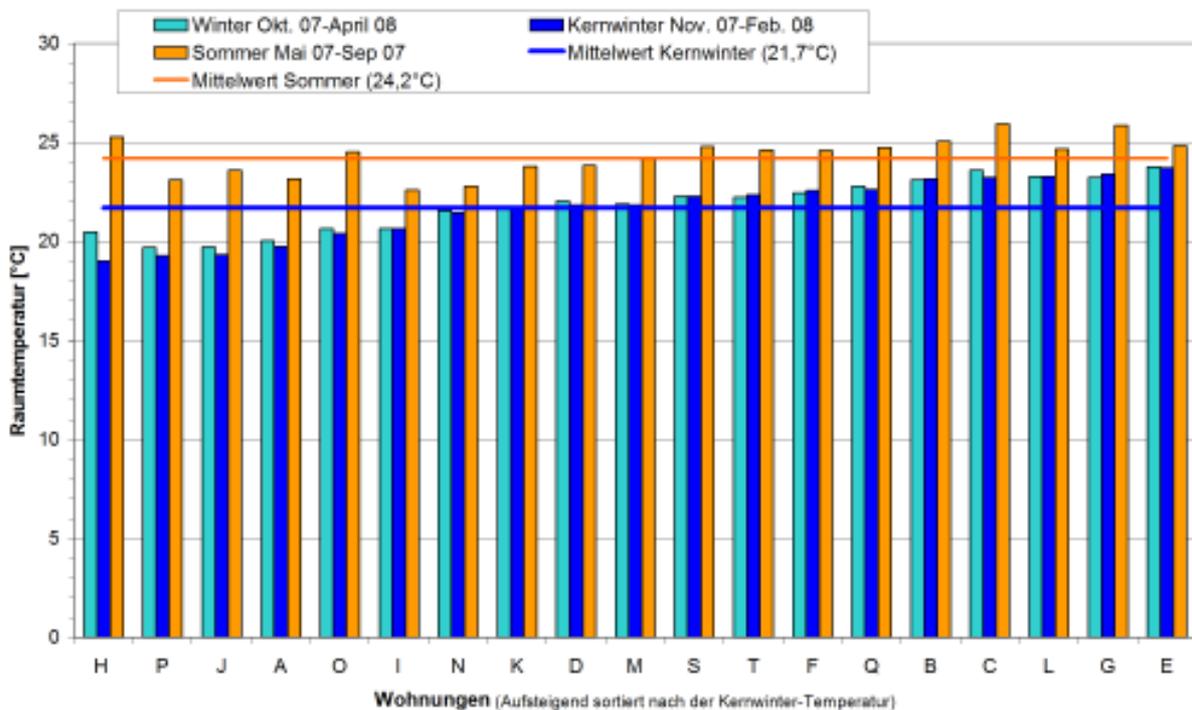
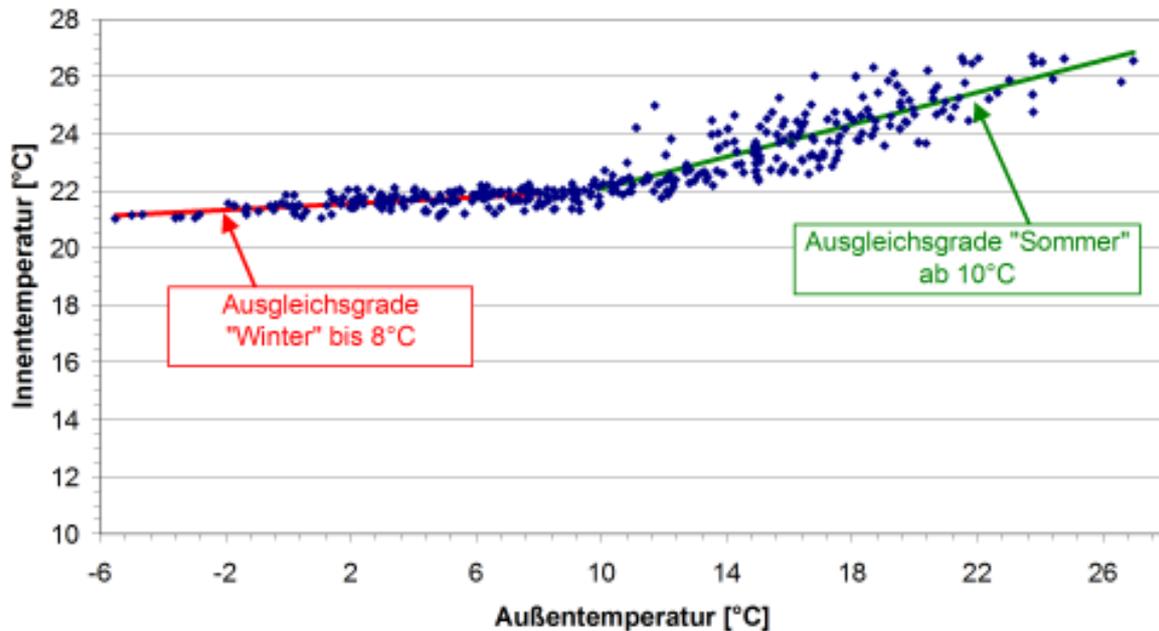


Abbildung 21: Wohnungsweise und gesamte Mittelwerte der Raumtemperaturen im Sommer 2007, im Winter und Kernwinter 2007/2008 der 19 Wohnungen. Die Wohnungen sind aufsteigend sortiert nach der Kernwintertemperatur.



**Abbildung 22: Korrelation zwischen Außen- und Raumtemperaturmittelwert der 19 Wohnungen (Tagesmittelwerte) im Jahreszeitraum (01.5.07 bis 30.4.08).**

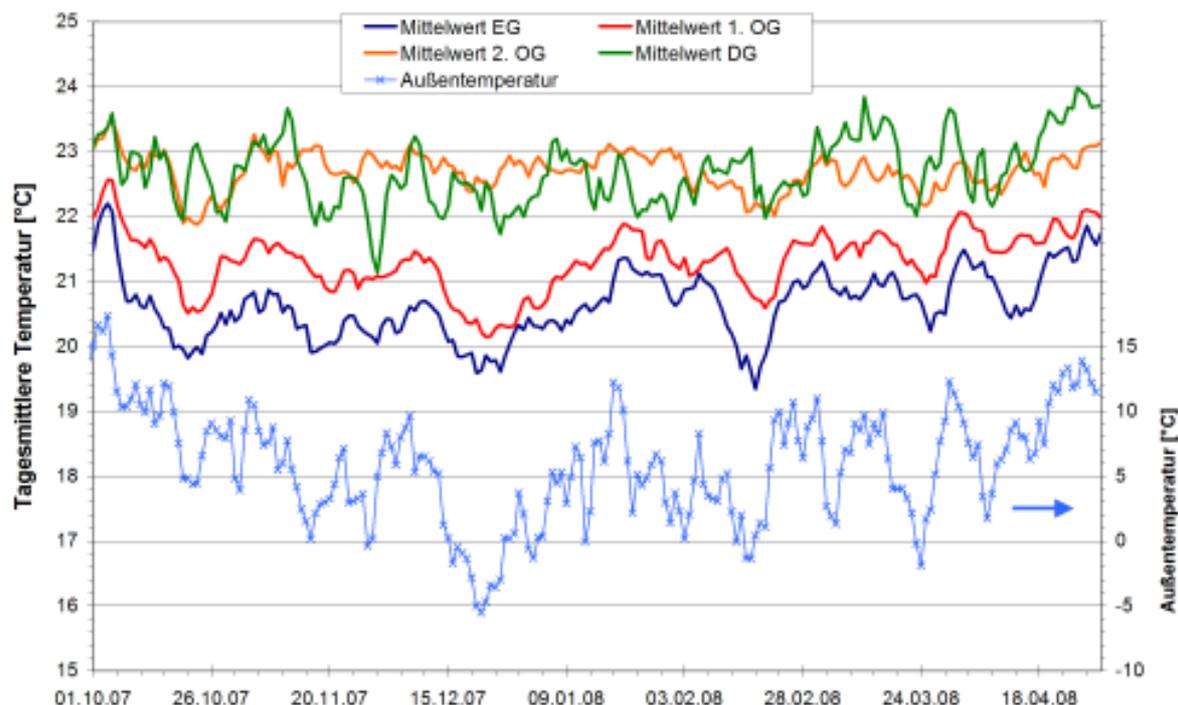
Um den Zusammenhang zwischen der Außen- und der Innenraumtemperatur zu untersuchen sind in Abbildung 22 die mittleren Raumtemperatur der 19 Wohnungen über den Außentemperaturen aufgetragen (jeweils Tagesmittelwerte). Die Ausgleichsgerade im Bereich der Außentemperaturen bis maximal 8 °C zeigt einen fast waagerechten Verlauf (0,06 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 Tagesaußenmittelwert wurde mit - 5,5 °C gemessen, wobei die Innentemperaturen im Mittel über 21 °C lagen. Bei einer größeren Anzahl kälterer Tage (z.B. unter Null Grad) ist zu erwarten, dass die Innentemperatur ebenfalls in dem Bereich um 21 °C liegen würde. Die Ausgleichsgerade würde dann eine noch geringere Abweichung vom waagerechten Verlauf aufweisen.

## 4.2.1 Raumtemperaturen nach Geschossen

Für die Untersuchung sind die winterlichen Raumtemperaturen je nach Etage von Interesse. Bei der späteren Beurteilung der Heizlast des Gebäudes muss geklärt werden, ob im Erdgeschoss aufgrund der verbleibenden Wärmebrücken zum unbeheizten Keller höhere Heizlasten aufgetreten sind. Für diese Analyse ist die Kenntnis der mittleren Raumtemperaturen im 4er Block nach Etagen eine Voraussetzung.

Der Verlauf der Temperaturen im Winter 2007/2008 zeigt deutliche Unterschiede der Niveaus der mittleren Geschosstemperaturen. Die mittleren Temperaturen steigen

vom EG zum 2. OG und nehmen im DG wieder leicht ab. Dabei beträgt die mittlere Temperatur im EG überwiegend noch deutlich über 20 °C (Mittelwert 20,6 °C).



**Abbildung 23: Tagesmittlere flächengewichtet Raumtemperaturen im 4er Block der Geschosse im Winter 2007/2008 im Vergleich zur Außentemperatur.**

Die Mittelwerte der Raumtemperaturen eines jeden Geschosses im 4er Block für den Winter 2007/2008 und den Kernwinter 2007/2008 sind in Abbildung 24 dargestellt. Das es allerdings durchaus deutliche Unterschiede der mittleren Wohnungstemperaturen innerhalb eines Geschosses gibt, zeigt Abbildung 25. So finden sich z.B. im 1. OG zwei Wohnungen die deutlich um 2 bis 3 K kühler sind als die drei restlichen Wohnungen der Etage. Auch im EG liegen Differenzen von über 2 K zwischen den Wohnungen vor. Das zeigt, dass die Bewohner die Raumtemperaturen wie von ihnen gewünschten einregeln.

Die mit Abstand kühlfste Wohnung im DG war von November 2007 bis Mitte Februar nicht bewohnt. Daher erklärten sich hier die niedrigen Temperaturen während der „Kernwinter“ Zeit.

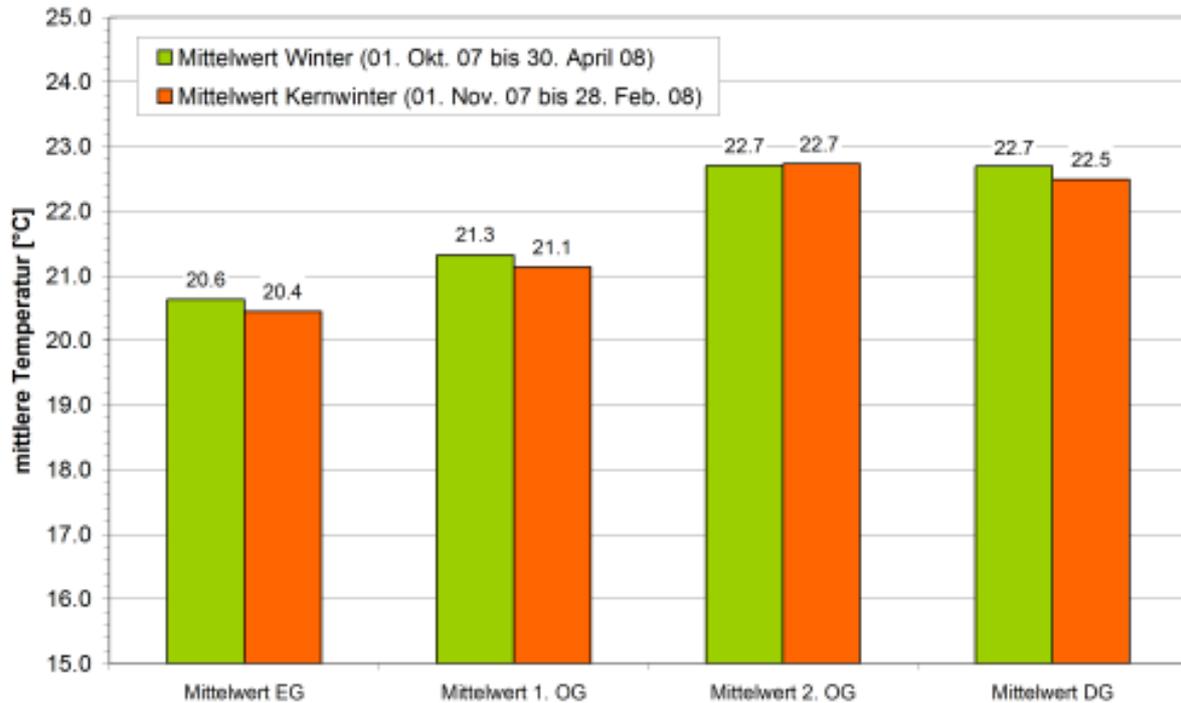


Abbildung 24: Mittlere winterliche Raumtemperaturen (Winter: 01.10.2008 bis 30.04.2009, Kernwinter: 01.11.2008 bis 29.02.2008) nach Etagen im 4er Block.

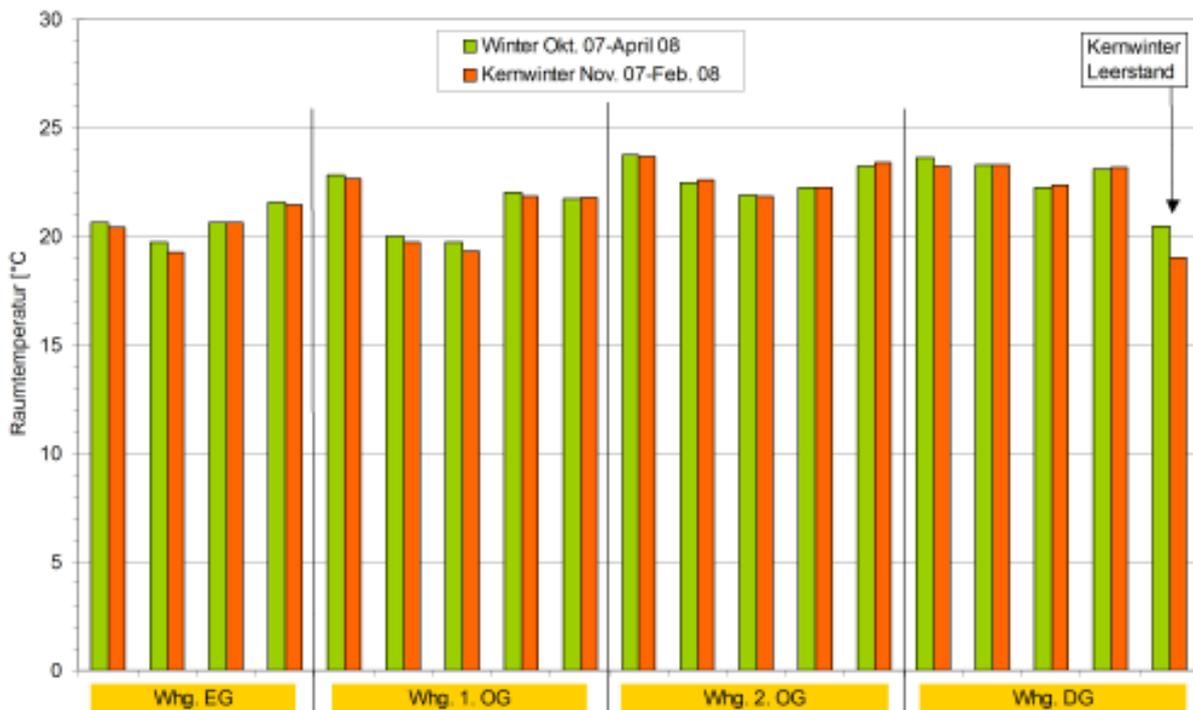
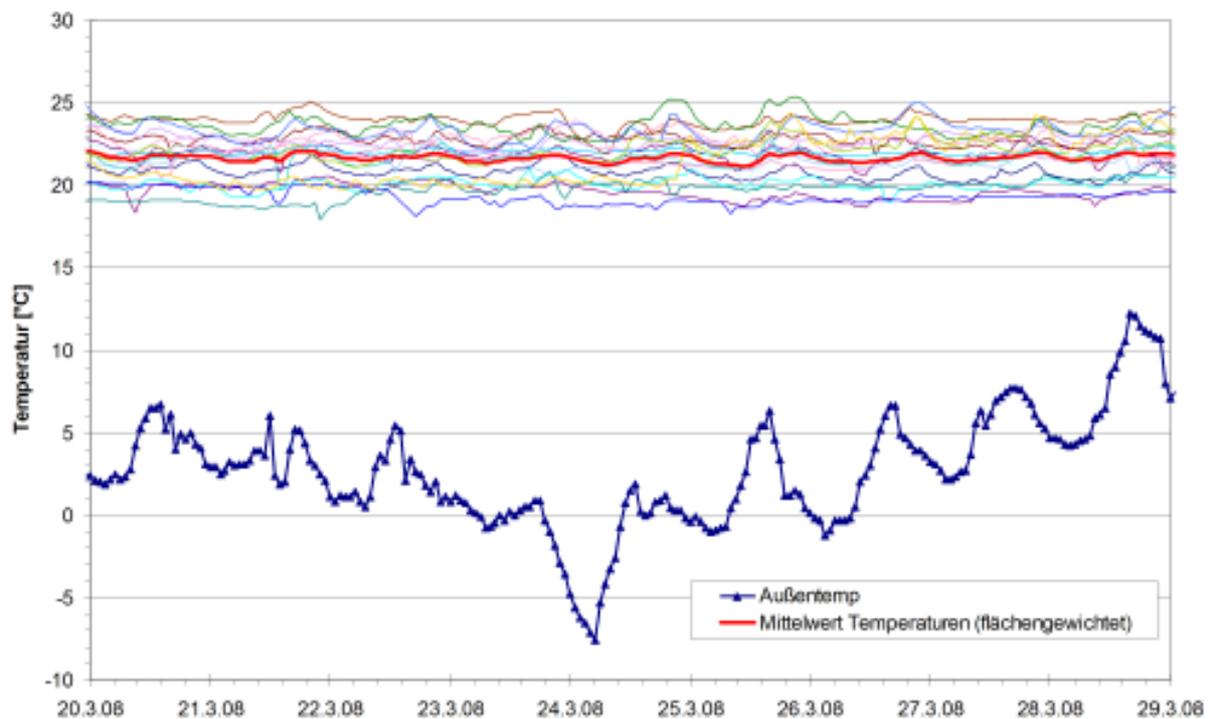


Abbildung 25: Mittlere winterliche Raumtemperaturen aller Wohnungen im 4er Block im Winter (01.10.2008 bis 30.04.2009) und Kernwinter (01.11.2008 bis 29.02.2008) nach Etagen.

## 4.2.2 Kälteste Winterstunde

Die niedrigste stundenmittlere Außentemperatur im Winter 2007/2008 wurde mit  $-7,6^{\circ}\text{C}$  am 24. März 2008 um 5:00 Uhr gemessen. In den Stunden danach steigt die Außentemperatur deutlich auf Werte über  $0^{\circ}\text{C}$  an. An den folgenden Tagen zeigt sich ein stetige Erhöhung der Außentemperatur. Wie Abbildung 26 zeigt gibt es keine Veränderung der Raumtemperaturen zu den Zeiten der niedrigen Außenlufttemperaturen. Dies zeigt nochmals, die hohe Trägheit des Gebäudes und das funktionierende Regelungsverhalten der Nachheizung.



**Abbildung 26:** Stundendaten der Raumtemperaturen der 19 Wohnungen und der Außenlufttemperatur um die Stunde mit der niedrigsten gemessenen Außenlufttemperatur ( $-7,6^{\circ}\text{C}$  am 24.03.2008 um 5:00 Uhr) im Winter 2007/2008.

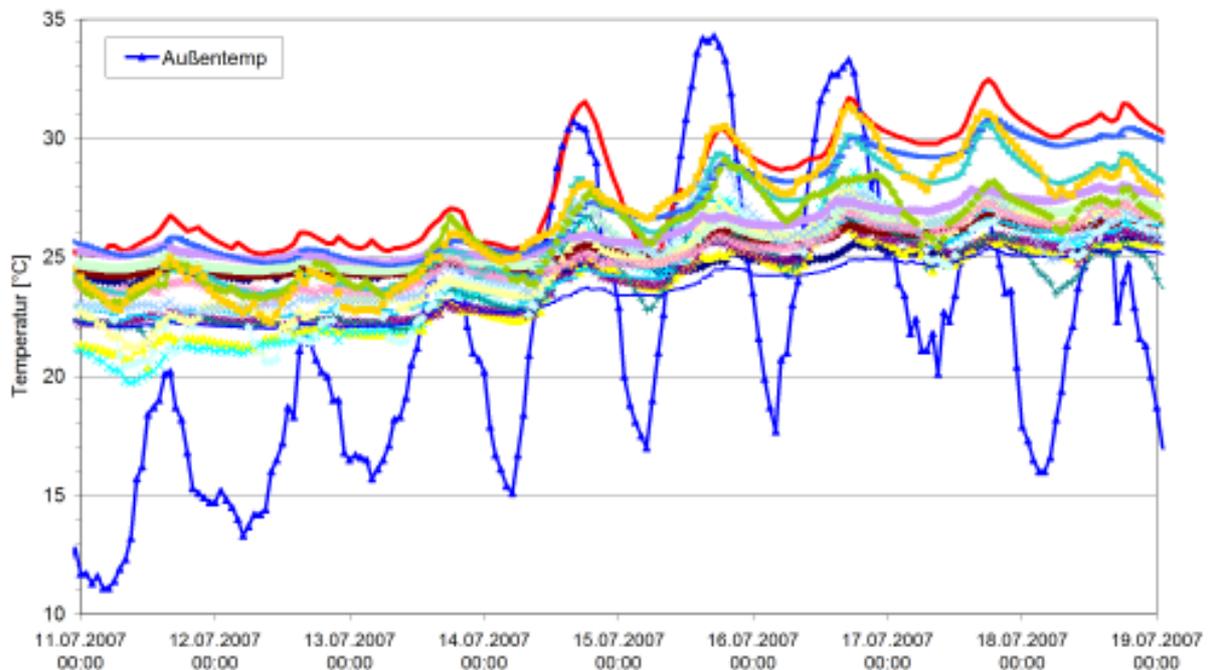
## 4.2.3 Sommer- und Übertemperaturen

Zur Beurteilung der Raumlufttemperaturen und der Behaglichkeit ist auch die Untersuchung der sommerlichen Temperaturen von großer Bedeutung.

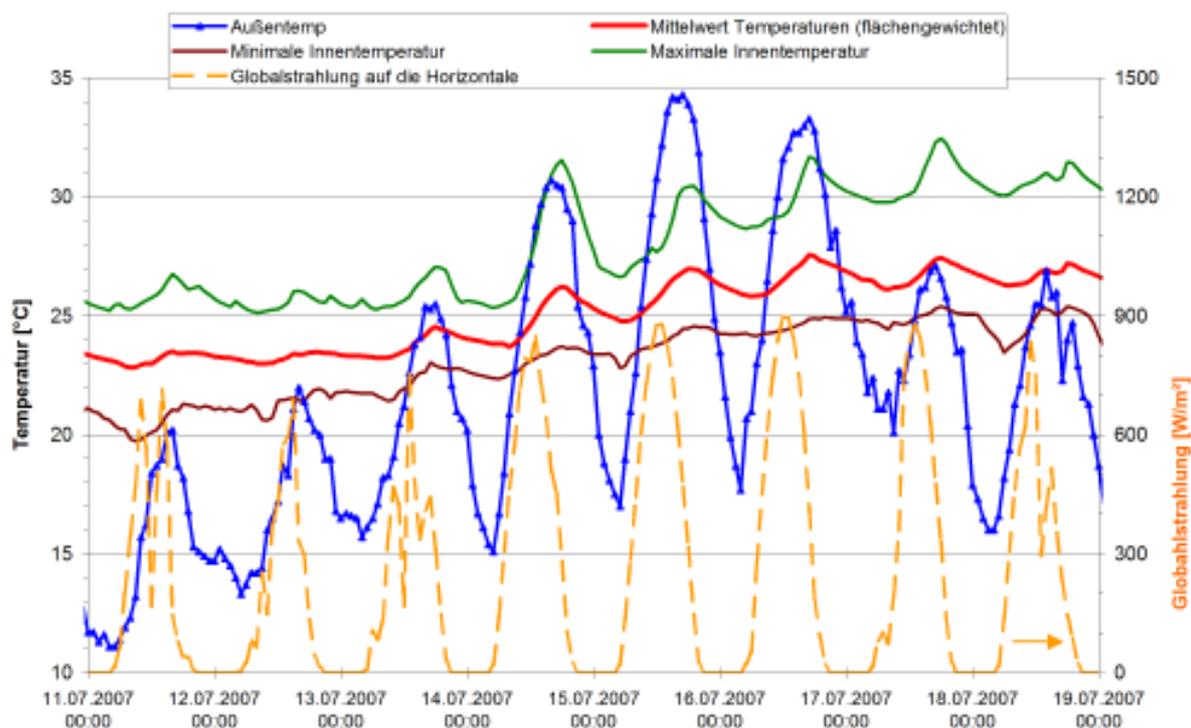
Die maximale stundenmittlere Außentemperatur im Sommer 2007 betrug  $34,3^{\circ}\text{C}$ . Bei der maximalen Temperatur kann nicht von einer extremen Hitzeperiode gesprochen werden, wie sie beispielsweise im Sommer 2003 mit Temperaturen bis  $39^{\circ}\text{C}$  vorlag. Es handelt sich aber um eine typische Hitzewoche mit stetig ansteigenden Außentemperaturen bis zum Höhepunkt am 15. Juli 2007. Die Solarstrahlung erreicht vier Tage in Folge Stundenwerte um  $900\text{ W/m}^2$ . Dies deutet an diesen Tagen auf einen

nahezu wolkenlosen Himmel hin. Nach einer Aufheizphase von einigen Tagen verringern sich die Außentemperaturen relativ schnell wieder auf Werte von deutlich unter 30°C (siehe Abbildung 27 und Abbildung 28). Auch an den Tagen der maximalen Temperaturen kühlt sich in der Nacht die Außenluft deutlich ab. Es wird ein maximaler nächtlicher Minimalwert von 17,7°C erreicht. Damit ist ein großes Nachtkühlungspotential über zusätzliche Fensterlüftung vorhanden.

Die Temperaturen in den Wohnungen steigen in dieser warmen Zeit auf maximal 30,5°C am Tag mit der höchsten Außentemperatur und am nächsten Tag - trotz fallender Außentemperatur - auf 31,6°C an (Stundendaten). Abbildung 27 zeigt, dass sich die vier wärmsten Wohnung deutlich vom Temperaturfeld der anderen absetzen. Es handelt sich dabei um vier der fünf Wohnungen im Dachgeschoss. Die Temperaturen in den anderen Wohnungen sind deutlich niedriger.



**Abbildung 27: Stundendaten der Raumtemperaturen der 19 Wohnungen und der Außenlufttemperatur im Zeitraum mit den maximalen gemessenen Außenlufttemperaturen im Sommer 2007.**



**Abbildung 28: Stundendaten der minimalen, mittleren und maximalen Raumtemperaturen der 19 Wohnungen und der Außenlufttemperatur sowie der Globalstrahlung im Zeitraum mit den maximalen gemessenen Außenlufttemperaturen im Sommer 2007.**

Im Mai 2007 (Abbildung 29) gab es auch schon einen sehr warmen Zeitraum mit Außentemperaturen bis 31,1 °C und gemessenen Globalstrahlungen bis 900 W/m<sup>2</sup>. In dieser Phase wurde die höchste Raumtemperatur mit 32,6 °C gemessen (26.05.2007 17:00 Uhr). In dieser Zeit sind es drei der fünf DG-Wohnungen die sich deutlich vom Temperaturfeld der restlichen Wohnungen absetzen. Die vierte und fünfte Wohnung im DG hat nur zeitweise erhöhte Raumtemperaturen gegenüber dem Rest des Gebäudes.

Die vor der Fassade stehenden Bäume verschatten die DG-Wohnungen verschieden stark (siehe Abbildung 31). Interessant ist, dass es sich bei den DG-Wohnungen mit den höchsten Raumtemperaturen nicht um die mit der geringsten Verschattung handelt. Dies zeigt, dass der Unterschied zwischen den DG-Wohnungen auch stark durch das Nutzerverhalten (Nachtlüftungsverhalten, Höhe der innere Wärmequellen) bestimmt wird.

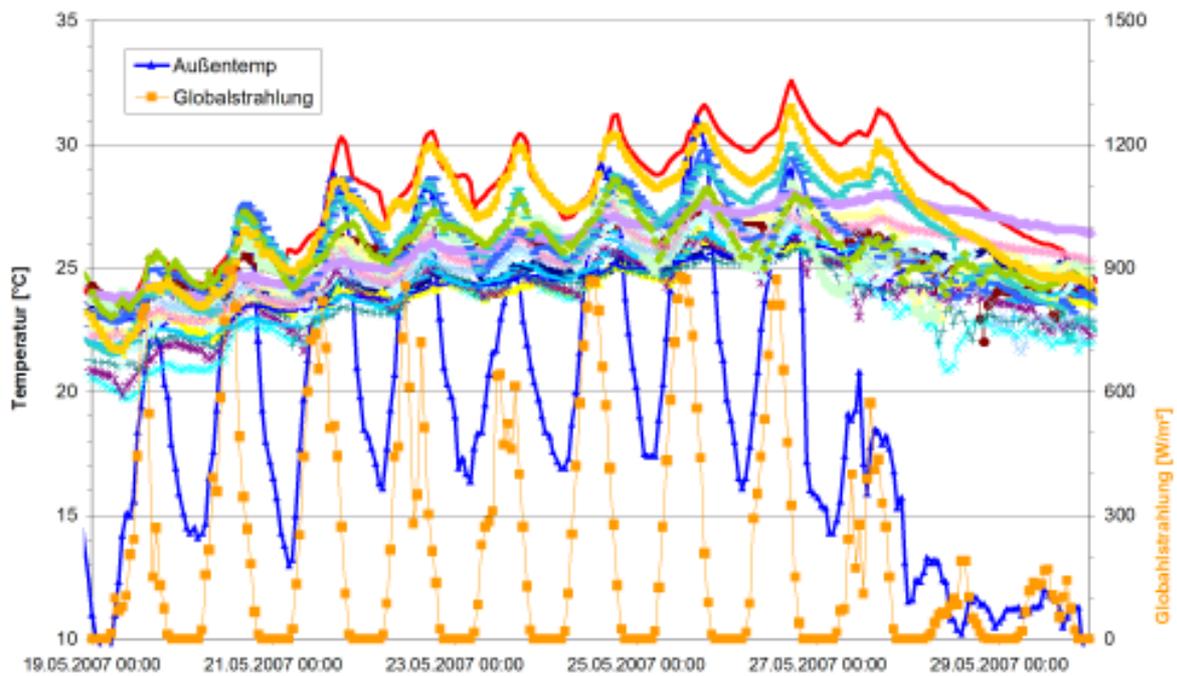


Abbildung 29: Stundendaten der Raumtemperaturen der 19 Wohnungen, der Außenlufttemperatur sowie der Globalstrahlung im Zeitraum mit der maximalen gemessenen Raumlufttemperaturen im Sommer 2007.

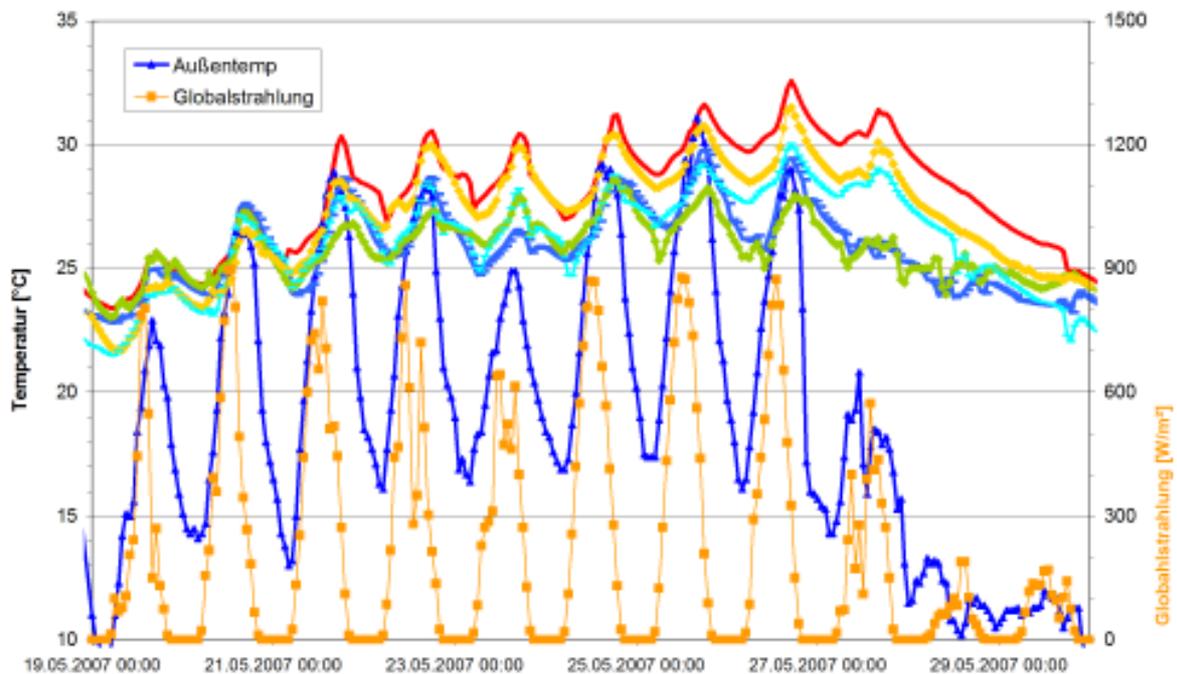


Abbildung 30: Darstellung von Abbildung 29 mit nur den Wohnungen im DG.



Abbildung 31: Süd-West- und Westfassade der Gebäude Tevesstraße 48 bis 54.

Zur Beurteilung der Raumtemperaturen werden die stündlichen Temperaturmessdaten als aufsteigend sortierte Jahresdauerlinien dargestellt. So kann die Beurteilung der Temperaturen im Bezug auf die Behaglichkeitsgrenze nach [DIN 4108-T2] erfolgen. In Abbildung 32 ist nur der obere Teil der Jahresdauerlinien der 19 Wohnungen sowie der Außentemperatur des gesamten Jahres (01.05.2007 bis 30.04.2008) dargestellt.

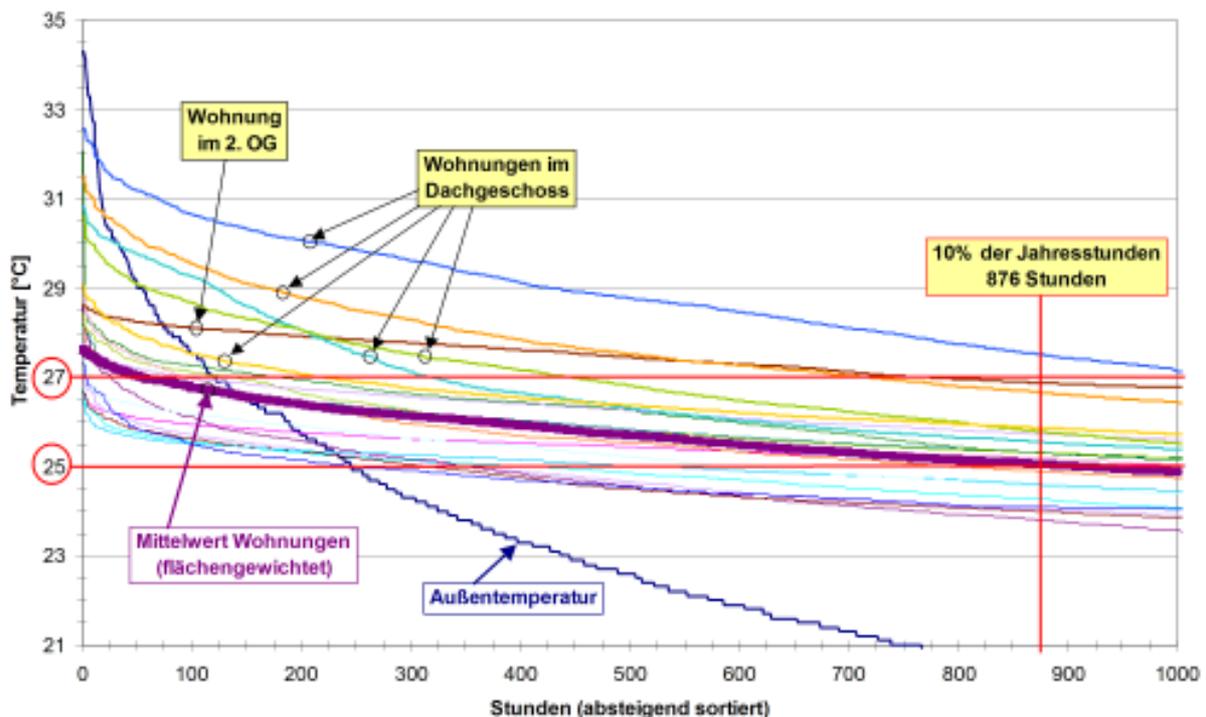


Abbildung 32: Teilausschnitt der Jahresdauerlinie den 19 Raumtemperaturen, deren flächengewichtetem Mittelwert sowie der Außenlufttemperatur (Stundendaten). Eingezeichnet ist die Komfortgrenze mit 10 % der Jahresstunden sowie die 25 und die 27 °C Grenze.

Der Ausschnitt der Jahresdauerlinie zeigt die 10 %-Grenze (876 Stunden) der gesamten Jahresstunden. Nach [DIN 4108-T2] ist der Grenzwert der Innentemperatur, der an nicht mehr als 10 % der Jahresstunden herrschen sollte, in „sommerheißen“ Regionen auf 27 °C festgelegt. Der Standort der sanierten Gebäude in Frankfurt wird nach der DIN 4108-T2 der „sommerheißen“ Region zugeordnet. In „sommerkühlen“ Regionen gilt der schärfere Grenzwert von 25 °C/10% der Stundenzahl. Die mittlere Temperatur der 19 Wohnungen (breite lila Kurve) zeigt an, dass dieses Behaglichkeitskriterium im Gebäudemittel sehr gut eingehalten worden ist: Es wird sogar ziemlich genau das strengere 25 °C-Kriterium erfüllt.

Werden die Temperaturkurven der einzelnen Wohnungen betrachtet zeigt sich, dass nur eine einzige Wohnung den Grenzwert von 27 °C nicht einhält. Dabei handelt es sich um eine Dachgeschosswohnung. Auffällig ist, dass die höheren Temperaturen alle in den Dachgeschosswohnungen auftreten, so wie es bereits weiter oben bei der Untersuchung der Sommertemperaturen festgestellt wurde. Nur eine weitere Wohnung im 2. OG liegt noch im wärmeren Bereich. Bei dieser ist allerdings zu berücksichtigen, dass sie in den warmen Monaten (bis Anfang September 2007) nicht bewohnt war. Hier würden die Raumtemperaturen sicherlich niedriger liegen, wenn durch den Nutzer eingegriffen worden wäre.

Auch wenn mit der einen Ausnahme im DG die Temperatur-Anforderungen der Norm eingehalten werden, muss festgestellt werden, dass die Temperaturen in den Dachgeschosswohnungen in den Sommermonaten relativ hoch liegen. Nur acht der 20 Wohnungen halten die Empfehlungen für Passivhäuser ein. Die Aussage zu den Übertemperaturstunden des gesamten Baukörpers nach PHPP ist hier für die einzelnen Dachgeschosswohnungen nicht aussagekräftig. Das Passivhaus Institut hatte in der Planungsphase des Gebäudes bereits darauf hingewiesen, dass außenliegende Verschattungen, zumindest auf der Westseite der Dachgeschosswohnungen, ange-raten sind. Nur so können bei der offenen, unverschatteten Situation des Baukörpers Richtung Westen moderate Innentemperaturen auch im Sommer sichergestellt werden.

Im Sommer 2008 beklagten sich einige Bewohner aus den Dachgeschossen, dass eine konsequente Nachtlüftung zur Reduzierung der Temperaturen nicht möglich ist. Wenn die Fenster gekippt werden, kann - durch die freie Lage der Westfassade – das Regenwasser leicht in die Wohnung eindringen. Um die Temperatursituation zu verbessern, wurde daher vom Eigentümer entschieden Verschattungen im Dachgeschoss nachzurüsten. Es ist sicher zu erwarten, dass bei Nutzung der nachzurüstenden Verschattungen die Temperaturen auch in den oberen Wohnungen deutlich niedriger ausfallen werden.

## 4.3 Energieverbrauch Wärme

Die Auswertung der Energieverbräuche für die Wärmeversorgung (Heizung/Warmwasser) erfolgt für den zentralen Energiebezugs der beiden Gesamtgebäude (4er Block und 6er Block). Im 4er Block können aufgrund der vorhandenen Zähler auch die einzelnen Wohnungen analysiert werden. Untersucht wird der gesamte Zeitbereich von August 2006 bis April 2008 (z.T. bis Juli 2008). Dabei werden zwei Jahreszeiträume zur Bilanzierung verwendet:

**Jahreszeitraum 1:** 01. August 2006 bis 31. Juli 2007

**Jahreszeitraum 2:** 01. Mai 2007 bis 30. April 2008

Die Zeiträume überschneiden sich mit den Monaten Mai, Juni, Juli 2007. Die Zeiträume wurden so gewählt, da vor August 2006 die Wohnungen, auch im zuerst fertiggestellten 4er Block, noch nicht überwiegend bezogen waren. Ziel ist es zwei komplette Jahreszeiträume zur Verfügung zu haben. Innerhalb der beiden Zeiträume werden so vollständig die beiden Winter 2006/2007 und 2007/2008 abgedeckt. Wie die Untersuchung der Außentemperaturen der beiden Winterzeiträume zeigt, war der Winter 2006/2007 sehr milde. Da zusätzlich im ersten Bilanzjahr die Wohnungen noch nicht vollständig belegt waren wird der zweite Jahreszeitraum mit dem repräsentativen Winter 2007/2008 in den Fokus der Auswertung gestellt.

Außerdem werden die in Tabelle 8 genannten Aufteilung der Zeiträume verwendet

**Tabelle 8: Aufteilung eines Bilanzjahres in Teilzeiträume.**

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

Als Bezugsflächen aller Auswertungen werden die Energiebezugsflächen (EBF) der Gebäude aus Abschnitt 2.1 dieses Berichtes verwendet. Sie betragen für Haus 36 bis 46 (6er Block) 2244 m<sup>2</sup> und für Haus 48 bis 54 1350 m<sup>2</sup>, insgesamt 3594 m<sup>2</sup>. Sie sind nicht zu verwechseln mit der deutlich größeren fiktiven Bezugsfläche „A<sub>N</sub>“ („Gebäudenutzfläche“), 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 für den 4er Block 1788 m<sup>2</sup> (plus 32%) und für den 6er Block 2885 m<sup>2</sup> (plus 29%), für beide Gebäude zusammen 4673 m<sup>2</sup> (plus 30%).

**Bei der Untersuchung wird der 4er Block aufgrund der Versorgungsstruktur (19 Whg. über zentrale Gasheizung, eine Whg. mit Kompaktgerät) aufgeteilt in die Wohnung mit dem Kompaktgerät (beheizte Wohnfläche: 40,8 m<sup>2</sup>) und das übrige Gebäude (beheizte Wohnfläche: 1309,3 m<sup>2</sup>).**

### 4.3.1 Zentraler Energiebezug

Als Basisgröße für die Untersuchung des Energieverbrauchs der beiden Gebäude dient die Messung des Gasverbrauchs direkt an den beiden Gaszählern. In den beiden Jahreszeiträumen wurden die folgenden Gasverbräuche gemessen:

Tabelle 9: Spezifischer Gasbezug in den beiden Jahreszeiträumen

Gasbezug	Jahreszeitraum 1	Jahreszeitraum 2
	01. Aug. 06 – 31. Juli 2007	01. Mai 07 – 30. April 08
4er Block	3,58 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	4,81 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
6er Block	3,92 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	5,22 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>

Der Energieinhalt von Erdgas (H<sub>u</sub>) wird vereinfacht mit 10 kWh/m<sup>3</sup> angesetzt. Die spezifischen Monatswerte liegen zwischen 0,8 und 8,0 kWh/(m<sup>2</sup> Monat). Die Monatsmittel vom 4er- und im 6er-Block betragen 3,0 und 3,6 kWh/(m<sup>2</sup> Monat) im ersten Bilanzjahr und 4,0 bzw. 4,4 kWh/(m<sup>2</sup> Monat) im zweiten Bilanzjahr. Bereits am Gasbezug kann gut der „Sockel-Verbrauch“ für die Warmwasserbereitung in den Sommermonaten sowie die Verbrauchserhöhung in der Heizzeit gegenüber dem Sommerverbrauch abgelesen werden.

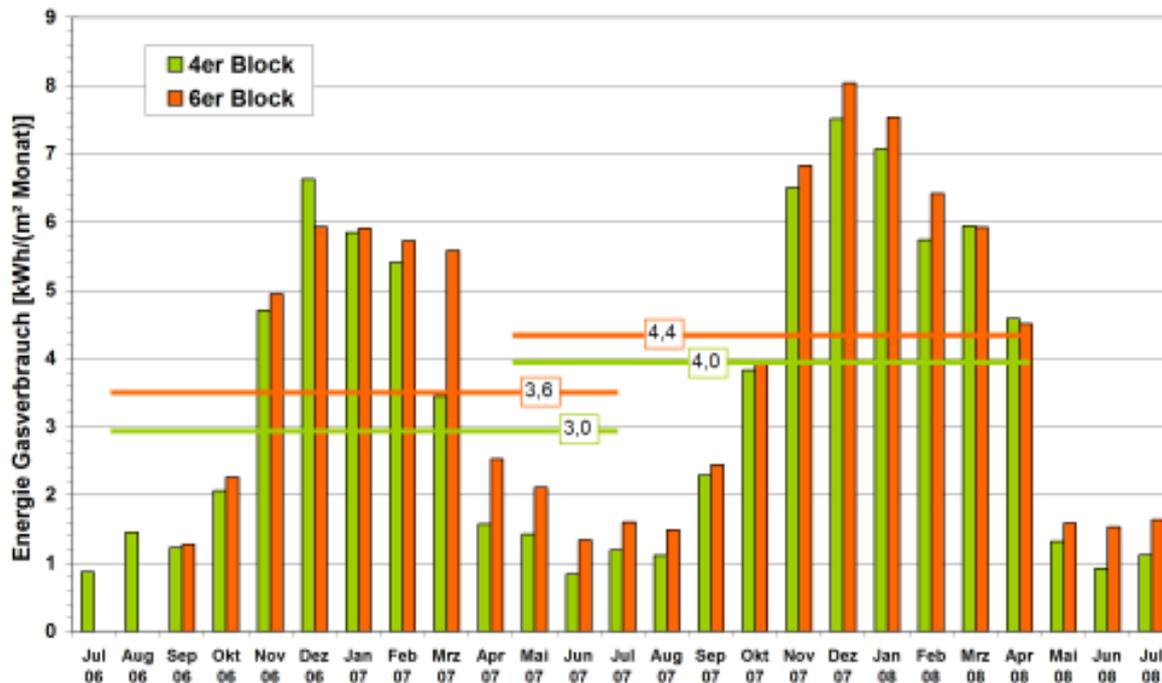


Abbildung 33: Monatliche Gasverbrauchswerte über den Zeitraum Juli 2006 bis Juli 2008 und die mittleren Verbräuche in den beiden Bilanzjahren in den beiden Wohngebäuden. Im Juli und August 2006 war im 6er-Block noch kein Gaszähler montiert.

### 4.3.1.1 Wärmelieferung Kessel

Die Wärmeversorgung in den beiden Gebäuden erfolgt über drei zentrale Gasbrennwertkessel in den Kellern. Nach den Kesseln wird die Wärme zum einen direkt den Heizkreisen zugeführt und zum anderen der Warmwasserversorgung mit den zentralen Warmwasserspeichern. Die Energiemengen im Verlauf der Monate in den beiden Gebäuden wird in Abbildung 34 für den 4er Block und in Abbildung 35 für den 6er Block dargestellt. Die verwendeten Zähler wurden im 6er Block später installiert, daher liegen die vollständigen Daten hier erst ab August/September 2006 vor.

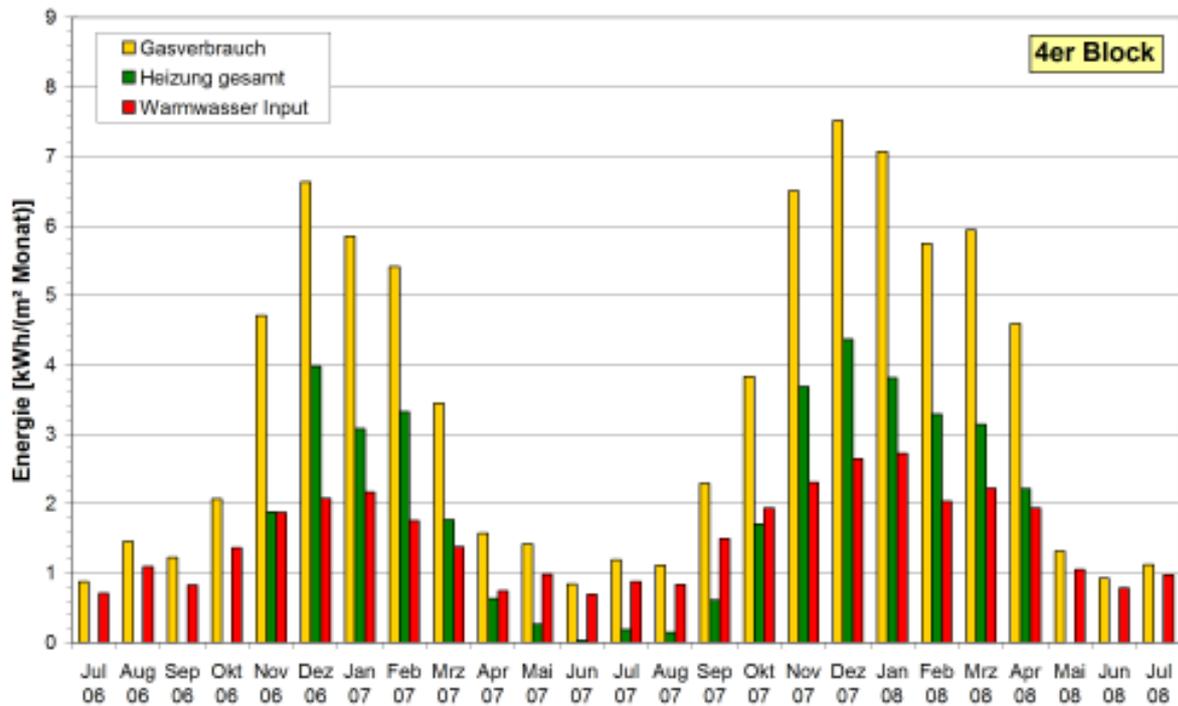
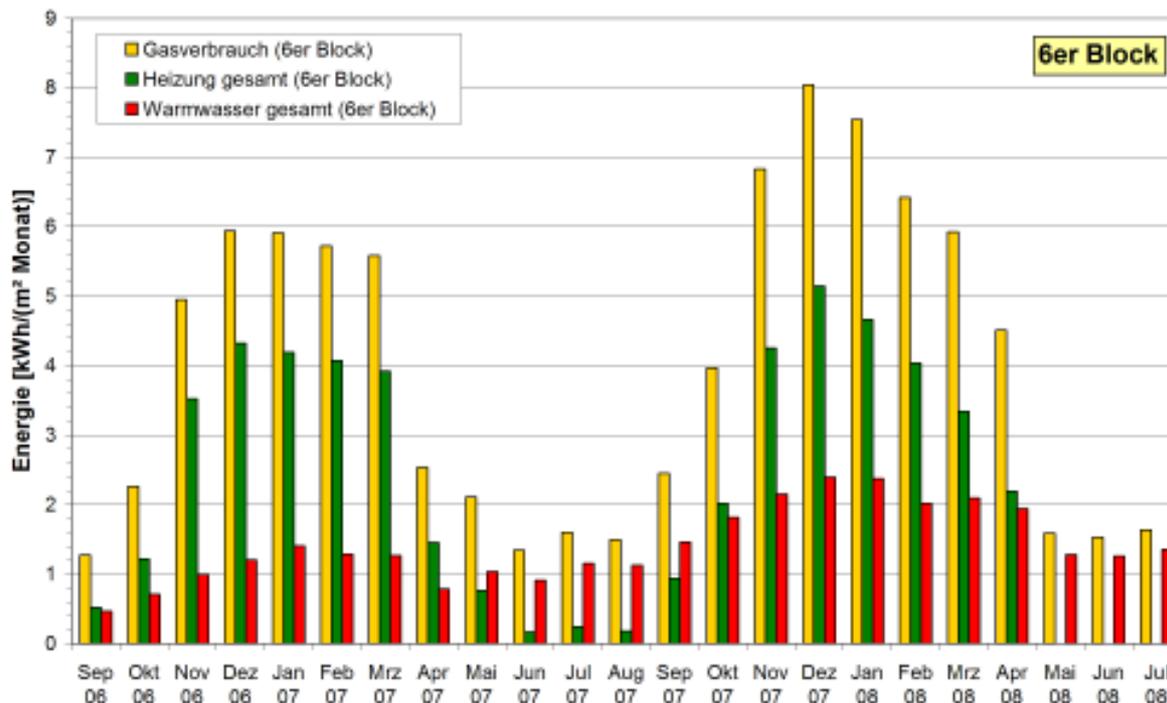


Abbildung 34: Monatswerte des Gasverbrauchs und der gelieferten Wärme an Heizkreis und Warmwasserbereitung von Juli 2006 bis Juli 2008 im 4er Block.



**Abbildung 35: Monatswerte des Gasverbrauchs und der gelieferten Wärme an Heizkreis und Warmwasserbereitung von September 2006 bis Juli 2008 im 6er Block.**

Die Daten zeigen eine deutliche jahreszeitliche Schwankung auch bei dem Energieverbrauch zur Warmwassererzeugung. Dies hat seine Ursache in der Hauptsache durch die Nutzung der solaren Warmwasserbereitung. Der Warmwasserverbrauch im Vergleich vom ersten zum zweiten Jahreszeitraum zeigt, dass zunächst deutlich weniger Wohnungen belegt waren. Dies fällt im 6er Block stärker aus als im 4er Block.

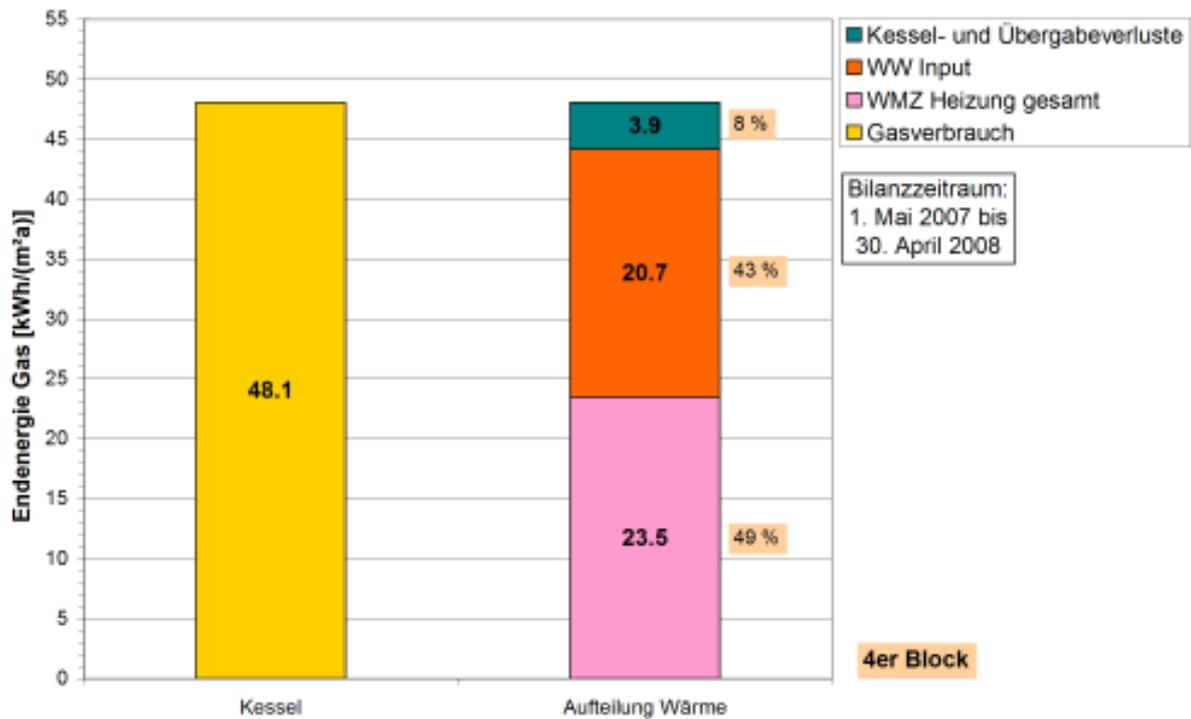
Die Summen der beiden Bilanzjahreszeiträume aus Abbildung 34 und Abbildung 35 sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

**Tabelle 10: Summen der beiden Jahresbilanzzeiträume für den spezifischen Gasbezugs, den spezifischen zentralen Heizwärmeverbrauch und den spezifischen Aufwand zur Warmwassererwärmung.**

kWh/(m <sup>2</sup> a)	Summe Aug. 06 - Juli 07	Summe Mai 07 - April 08
<b>4er Block</b>		
Gas	35,8	48,1
Heizung	15,2	23,5
WW-Input	15,8	20,7
<b>6er Block</b>		
Gas	39,2	52,2
Heizung	24,8	27,9
WW-gesamt	11,4	20,5

Auf die einzelnen Messergebnisse wird in den Abschnitten zum Thema Heizwärme- und Warmwasserverbrauch noch näher eingegangen.

Bei dem pauschalen Ansatz von 10 kWh je 1 m<sup>3</sup> Erdgas ergeben sich im zweiten Bilanzjahr in den Gebäuden Verluste von 3,8 bzw. 3,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) durch Umwandlungs- und Übergabeverlusten vom Kessel und Wärmeabgabe der Leitungen bis zu den Wärmehählern. Dies entspricht 7 bzw. 8% der verbrauchten Energie.



**Abbildung 36: Kesselbilanz 4er Block im zweiten Jahreszeitraum.**

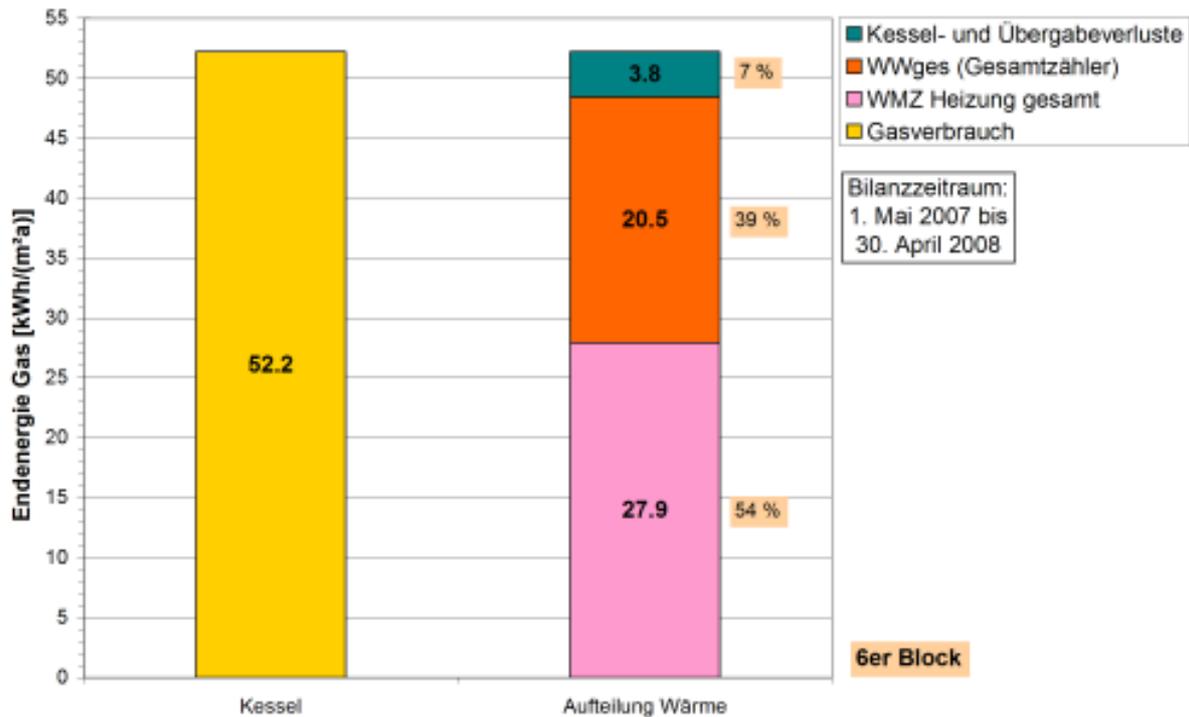


Abbildung 37: Kesselbilanz 6er Block im zweiten Jahreszeitraum.

## 4.3.2 Heizwärmeverbrauch

Der gesamte gemessene Heizwärmeverbrauch je Gebäude teilt sich auf in den Verbrauch in den Wohnungen (WMZ Wohnungen) und der genutzten und der nicht genutzten Verteilwärme. Die Wärmemengen der Wärmeverteilung werden im 4er Block aus der Differenz des Hauptwärmehählers der Heizung zu der Summe der Wohnungszähler ermittelt. Die so ermittelten Anteile werden für den 6er Block, in dem keine Messung in den einzelnen Wohnungen erfolgt, übernommen.

### 4.3.2.1 Heizwärmeverbrauch der einzelnen Wohnungen

Mit den Wärmemengenzähler der 19 einzelnen, zentralversorgten Wohnungen im 4er Block werden die Heizwärmeverbrauchswerte einzeln erfasst. Im zweiten Bilanzjahr wurden spezifische Heizwärmeverbräuche zwischen 0,0 und 33,8 kWh/(m²a) gemessen. Der flächengewichtete Mittelwert in dieser Jahresperiode 2007/2008 lag im Durchschnitt bei

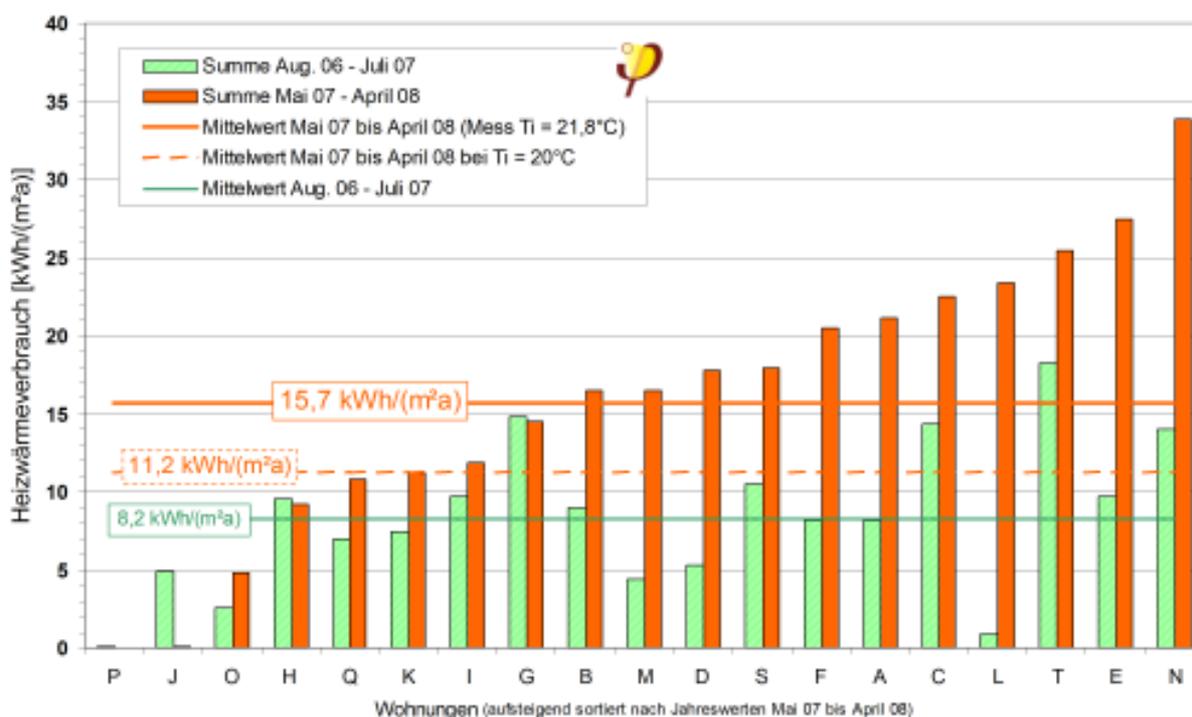
**15,7 kWh/(m²a).**

Es liegt damit ein Messwert für den Heizwärmeverbrauch vor, wie er sonst bei Passivhaus-Neubauten üblich ist. In diesem Jahresverbrauchswert sind auch geringe unnötige Heizwärmeverbräuche in den Sommermonaten enthalten (siehe Aus-

fürungen im nächsten Abschnitt). Für ein saniertes Gebäude liegt damit ein extrem niedriger Verbrauchswert vor. Das Projekt kann damit als sehr erfolgreich bewertet werden. Der sehr milde Winter vom Vorjahr 2006/2007 führte zu mittleren, deutlich noch niedrigeren Heizwärmeverbräuchen: Durchschnittlich wurden im 4er Block nur 8,2 kWh/(m<sup>2</sup>a) verbraucht.

Es muss berücksichtigt werden, dass die mittlere Innentemperatur während des Winters 2007/2008 mit im 4er Block gemessenen 21,8 °C deutlich über den in der PHPP-Bilanz verwendeten 20 °C liegt. Mit dem PHPP wurde für den 4er Block ein Zusatzverbrauch von knapp 2,5 kWh/(m<sup>2</sup>a) pro Kelvin Temperaturerhöhung ermittelt. Für die durchschnittlich 1,8 K wärmeren Wohnungen liegt der Verbrauch damit um immerhin 4,5 kWh/(m<sup>2</sup>a) höher als in der Berechnung. Der Mittelwert für den in den Wohnungen gemessenen Heizwärmeverbrauch sinkt bei der Umrechnung auf 20 °C damit auf nur noch

**11,2 kWh/(m<sup>2</sup>a).**



**Abbildung 38: Heizwärmeverbrauch der 19 zentralversorgten Wohnungen inkl. der geringen Sommerheizung im 4er Block in den beiden Bilanzjahren jeweils mit dem flächengewichteten Mittelwert und dem Mittelwert bei umgerechnet 20 °C Innentemperatur im Winter 2007/2008.**

Die beiden Wohnungen („P“ und „J“) bei denen im zweiten Winter keine Heizwärmeverbräuche festgestellt wurden, waren beide während der gesamten Zeit vermietet. Die Wohnung „P“ befindet sich sogar im EG, wo durch die verbliebenen Wärmebrücken zum Keller durchaus - im Verhältnis - „erhöhte“ Heizlasten denkbar wären. Wie weiter unten gezeigt wird, liegt Wohnung „P“ etwas über dem mittleren Stromverbrauch und verfügt über den höchsten Verbrauch an Warmwasser. Beides deutet darauf hin, dass die Wohnung nicht nur vermietet sondern auch dauerhaft bewohnt war. In Wohnung „J“ wird von allen Wohnungen am wenigsten Strom

verbraucht und nur wenig Warmwasser benötigt. Hier liegt entweder eine sehr sparsamer Verbrauch vor oder die Wohnung wurde nur teilweise genutzt.

## Sommerheizung

In den oben aufgeführten Jahres-Heizwärmeverbräuchen sind auch die Energiemengen der Sommermonate (Mai bis inkl. September) enthalten. Bei der Summe der Heizwärmeverbräuche der 19 Wohnungen in Abbildung 39 ist zu erkennen, dass im 4er Block auch im Sommer 2007 Heizwärme verbraucht wurde. Dagegen endet die Beheizung im Winter 2007/2008 wie gewünscht genau im April 2008. Zur Vermeidung der meist unnötigen Sommerheizwärmeverbräuche wurden auf Anraten des PHI Jahreszeitschaltuhren montiert bzw. der Wartungsdienst mit der Umstellung beauftragt (nur Warmwasserbetrieb). Diese verhindern die Beheizung in den Sommermonaten.

Der Verbrauch war im Sommer mit knapp 300 kWh, entsprechend  $0,23 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ Sommer})$  nicht besonders hoch aber dennoch unnötig. Bringt man diesen Wert beim Heizwärmeverbrauch in Abzug, reduziert er sich unmerklich auf **15,5 kWh/(m<sup>2</sup>a)**.

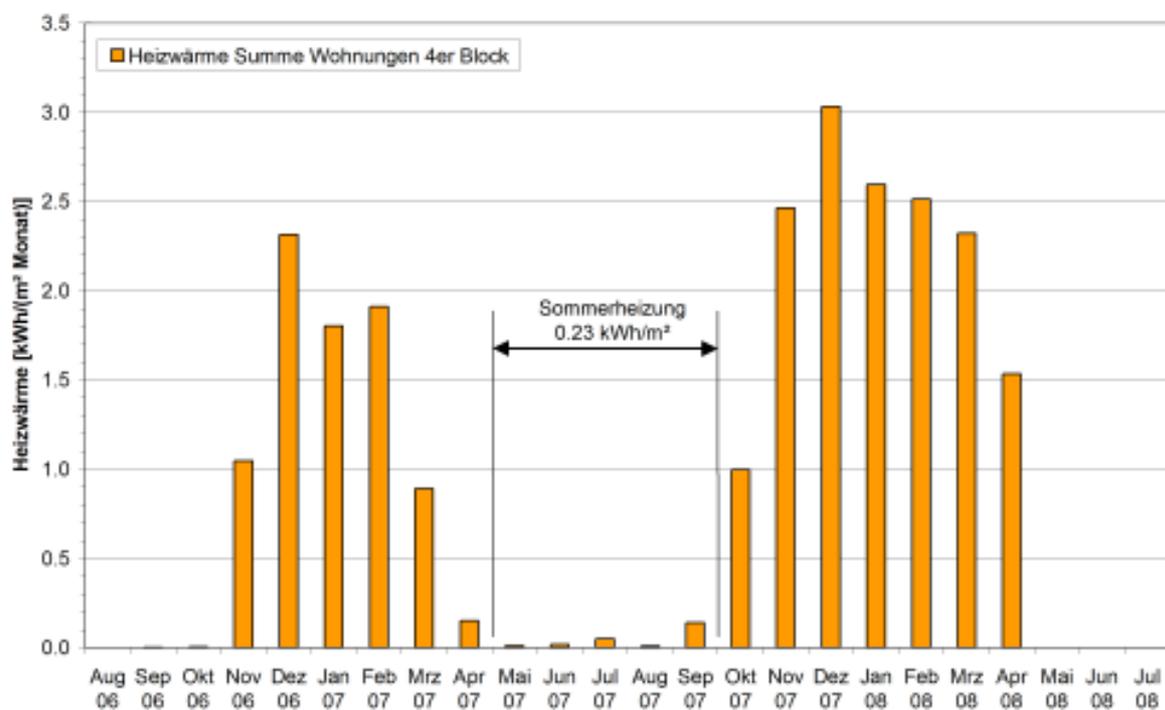


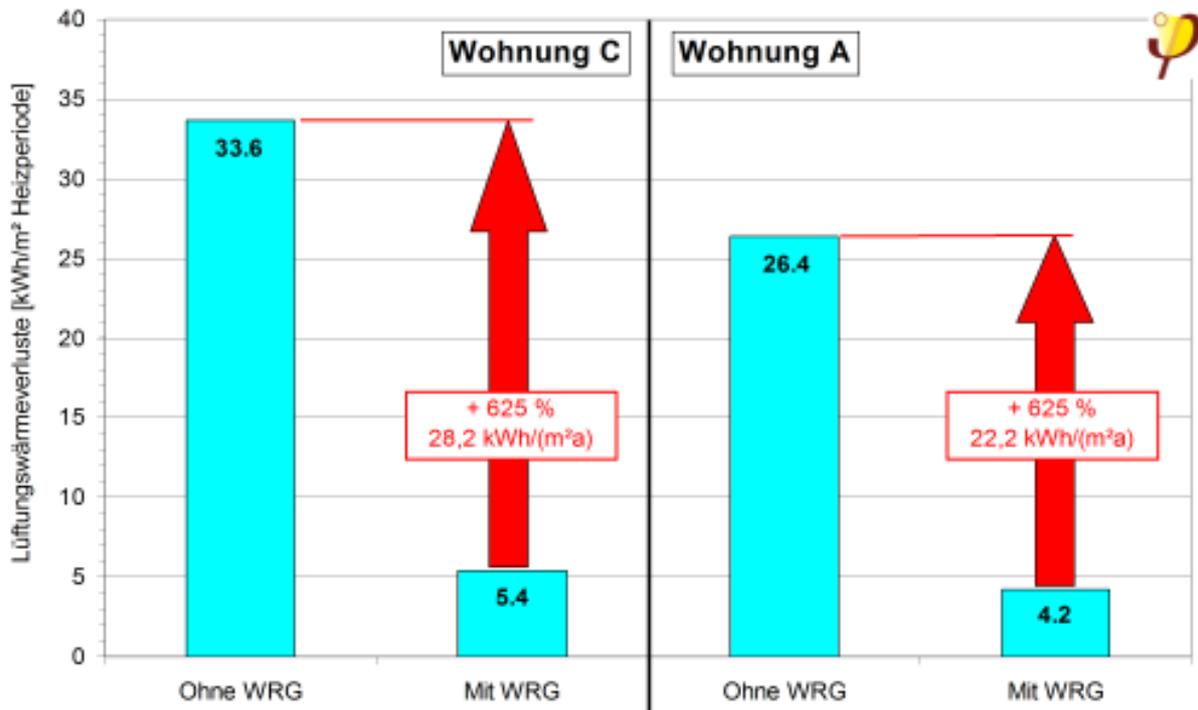
Abbildung 39: Summe der Heizwärmeverbräuche der 19 Einzelwohnungen des 4er Blocks über die Monate des Messzeitraumes.

## Wärmerückgewinnung

Die Lüftungsgeräte von 4 der 19 Wohnungen im 4er Block sind ohne einfache Umstellung der Bypassfunktion (Umgehung des Wärmetauschers im Sommerbetrieb) über einen Bedienknopf ausgestattet. Bei diesen Geräten muss im Zuge der Wartung im Herbst die Bypassfunktion deaktiviert werden, um die Wärmerückgewinnung („WRG“) nutzen zu können. Dies ist schon lange vor dem eigentlichen Heizbetrieb sinnvoll und notwendig. Im Winter 2007/2008 erfolgte die Umstellung bei zwei Geräten erst verspätet am 12./13. November 2007, bei den anderen beiden noch später.

Je nach Temperaturwahl der Bewohner (Regelthermostat) musste in dieser betroffenen Wohnung die Nachheizung ohne die „Grundversorgung“ der WRG den notwendigen Temperaturhub erbringen. Je nach Außentemperatur und Luftvolumenstrom führt dies zu deutlichem Mehrverbrauch. Für die beiden noch nach Mitte November 2007 umgestellten Geräte soll hier zur Verdeutlichung der Einfluss des WRG-Betriebes gezeigt werden. Aus den mittleren, geplanten Luftvolumenströmen der Wohnungen, den gemessenen Außen- und der jeweiligen gemessenen Innentemperaturen sowie dem Wärmebereitstellungsgrad von  $\eta = 84 \%$  können die Lüftungswärmeverluste mit und ohne Wärmerückgewinnung berechnet werden.

Der Lüftungswärmeverlust ohne WRG-Betrieb nimmt, im Verhältnis zu den im Passivhaus üblichen Heizwärmeverbräuchen, mit 33,6 und 26,4 kWh/(m<sup>2</sup>a) gewaltige Dimensionen an. Ohne den Betrieb der WRG würden sich die Heizwärmeverbräuche beim Nennvolumenstrom der Geräte um 28,2 bzw. 22,2 kWh/(m<sup>2</sup>a), gegenüber der dauerhaften Nutzung der WRG, erhöhen. Die tatsächlichen gemessenen Heizwärmeverbräuche der beiden Wohnungen reduzieren sich - je nach Umschaltungstermin - um einen Betrag innerhalb der angegebene Größe (Abbildung 40). Der Gesamtmittelwert aller Wohnungen würde sich entsprechend niedriger liegen.



**Abbildung 40: Lüftungswärmeverluste von zwei Wohnungen mit und ohne Betrieb der Wärmerückgewinnung der Lüftungsanlage.**

Im 6er sind 18 Wohnungen mit den Lüftungsgeräten ausgerüstet, die von Hand durch den Wartungsdienst umgestellt werden müssen. Hier sind ebenfalls zwei Wohnungen deutlich verspätet gewartet worden, womit sich der gleiche Effekt ergibt wie der oben dargestellte.

**Es ist dringend angeraten, die Wartungstermine zur Umschaltung der Geräte Anfang Oktober durchzuführen und sich dies umgehend vom Wartungsdienst bescheinigen zu lassen.**

Wann die Mieter mit dem anderen Gerätetyp, welche per Knopfdruck zwischen Sommer- und Winterbetrieb umstellen können, tatsächlich umstellen ist nicht bekannt. Hier kommt es bei verspäteter Umstellung zum gleichen Effekt. **Um dieses gewaltige Einsparpotential nutzen zu können, sollten die Mieter unbedingt über die Bypassfunktion und die Umstelltermine unterrichtet sein.**

### Korrelation Heizwärme und Raumtemperatur

In Abbildung 41 ist der Zusammenhang der winterlichen Heizwärmeverbräuche der 19 Wohnungen mit den jeweiligen mittleren winterlichen Raumtemperaturen dargestellt. Die Tendenz zu höheren Raumtemperaturen bei höheren Verbräuchen ist zu erkennen. Die Ausreißer zeigen allerdings, dass sich neben der Raumtemperatur weitere Einflüsse deutlich auswirken:

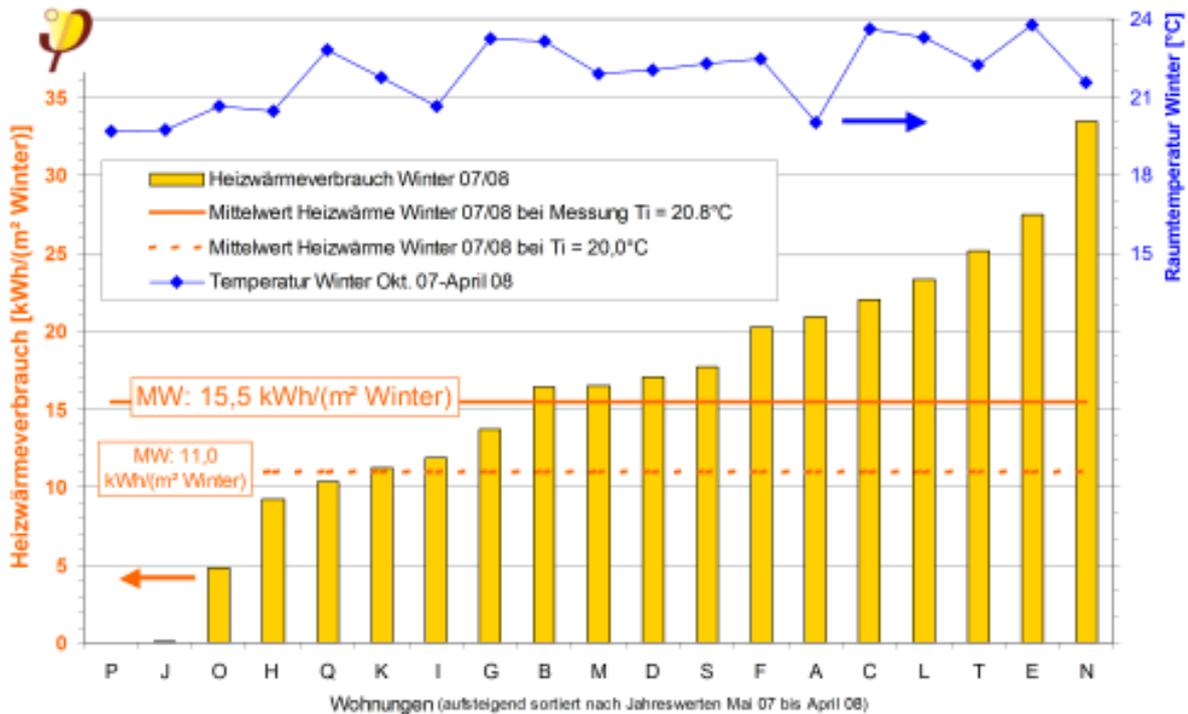


Abbildung 41: Heizwärmeverbrauch der 19 Wohnungen des 4er Blocks im Winterzeitraum (ohne die minimalen Sommergebäude) und mittlere winterliche Raumtemperaturen (01. Oktober 2007 bis 30. April 2008). Der Mittelwert für die Heizwärmeverbräuche ist für die Messung mit der Innentemperatur von 21,8 °C und für die Umrechnung auf die Standardbedingung von 20 °C eingetragen.

Die Korrelation der Daten (aus Abbildung 41) in Abbildung 42 ist sichtbar aber mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,35$  nicht besonders ausgeprägt. Die Ausreißer sind deutlich zu erkennen. Die Steigung der Korrelationsgeraden beträgt 0,088 K/(kWh/(m² Winter)). Entsprechend steigt der Heizwärmeverbrauch je Kelvin Temperaturerhöhung um 11,4 kWh/(m² Winter). Zum großen Teil resultiert aus einer Temperaturerhöhung in einer Wohnung eines Mehrfamilienhauses mit einer hochwertigen Dämmung der Außenwände ein Querwärmestrom zu den umgebenen Nachbarwohnungen. **Nur ein geringer Teil des höheren Heizwärmeverbrauchs der Einzelwohnung führt zu einem tatsächlichen Mehrverbrauch des Gesamtgebäudes.** Dieser Zusammenhang wurde bereits in einem Mehrfamilien-Passivhaus in Kassel-Marbachshöhe in [Pfluger/Feist 2001] nachgewiesen. Wenn die Querwärmeströme in dem dort erstellten Modell berücksichtigt werden ergibt sich auch ein deutlich höheres Bestimmtheitsmaß  $R^2$ . Dieser Zusammenhang gilt genauso für dieses Gebäude.

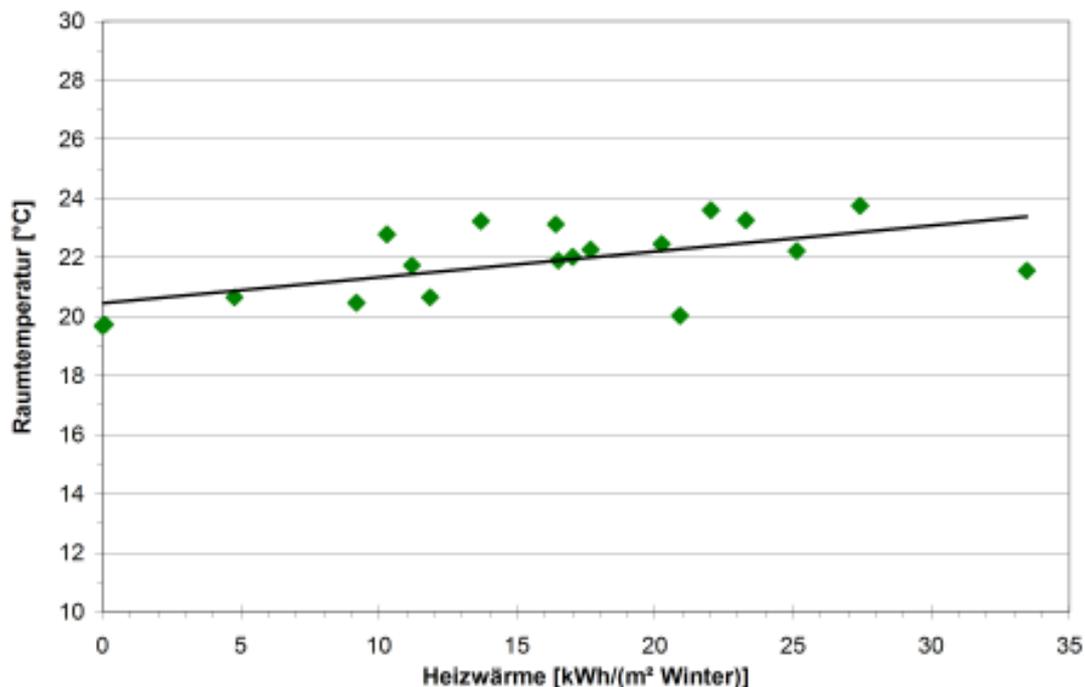


Abbildung 42: Korrelation der Winter-Raumtemperaturen und der wohnungsweisen Heizwärmeverbräuche der 19 Whg. aus Abbildung 41.

### 4.3.2.2 Heizwärme und Verteilung

Ein Teil der im Heizraum an den Heizkreis des jeweiligen Gebäudes übergebenen Wärmemenge wird auf dem Weg zu den Messstelle in den Wohnungen (einzelne Wärmezähler) an die Umgebung abgegeben. Die Wärme die im Keller – außerhalb der thermischen Hülle – abgegeben wird, dient nicht der Raumerwärmung der Wohnungen. Daher wird diese Wärmemenge als „Verteilverlust“ (bzw. „Verteilungs Verlust“) bezeichnet. Der Anteil der Wärmeabgabe über die Verteilleitungen, der innerhalb der thermischen Hülle erfolgt, beheizt das jeweilige Gebäude und ist nicht in dem wohnungsweise gemessenen Heizwärmeverbrauch enthalten. Daher wird diese Rohrleitungswärmeabgabe als „Verteilung nutzbar“ berücksichtigt.

Die gesamte Verteilwärmemenge ergibt sich im 4er Block aus der Differenz des Haupt-Wärmemengenzählers „Heizkreis gesamt“ im Heizraum zur Summe der 19 Heizungszähler in den Wohnungen. Die Aufteilung in nicht nutzbare und nutzbare Anteile erfolgt nach den Leitungslängen der Heizwärmeverteilleitungen (bis zu den Wärmemengenzählern) im unbeheizten und im beheizten Bereich. Zur Bestimmung des für die Beheizung des Gebäudes nutzbaren Anteils aus der innerhalb der Gebäudehülle abgegebenen Wärmemenge wurde der Grenznutzungsgrad monatsweise berechnet. Wenn z.B. im April die Heizkreispumpe aktiv ist (Verteilleitung gibt Wärme ab), eine Wohnung aber keinen Heizbedarf hat (Wunschtemperatur ist erreicht), ist die Wärme aus der Verteilleitung nicht nutzbar. Mit diesen beiden

Parametern Leitungslängenanteil und Grenznutzungsgrad werden die gesamten Verteilwärmemengen aufgeteilt.

Die nutzbaren Anteile der Verteilung stellen einen Beitrag zur Raumheizung dar. Sie müssen dem Heizwärmeverbrauch, der über die einzelnen Wohnungswärmemengenzähler ermittelt wurden, zugeschlagen werden. Im 4er Block wurden im Winter 2007/2008 zusätzliche **2,6 kWh/(m<sup>2</sup>a)** als nutzbare Anteile ermittelt. Der Gesamtwert des Heizwärmeverbrauchs beträgt dann **18,1 kWh/(m<sup>2</sup>a)**. Bei den restlichen **4,2 kWh/(m<sup>2</sup>a)** handelt es sich um nicht nutzbare Verteilverluste. Die zugehörige Heizwärmeaufteilung zeigt Abbildung 43. Damit beträgt der nicht nutzbare Verteilverlust 19 % der im 4er Block gesamten gelieferten Heizwärme. Eine weitere Reduktion ist durch verbesserte Rohrleitungsdämmung zu erreichen. Nicht enthalten in der Betrachtung sind die Wärmeverluste zwischen Kessel und dem Heizkreiswärmezähler und die Umwandlungs- und Stillstandsverluste des Heizkessels. Diese sind im Abschnitt 4.3.1.1 berücksichtigt.

Bei den Standardbedingungen von 20 °C Innentemperatur (siehe Ausführung weiter oben) würde der Heizwärmeverbrauch ohne den minimalen Sommerverbrauch und inklusive der nutzbaren Verteilverluste nur noch **11,0 kWh/(m<sup>2</sup>a) + 2,6 kWh/(m<sup>2</sup>a) = 13,6 kWh/(m<sup>2</sup>a)** betragen.

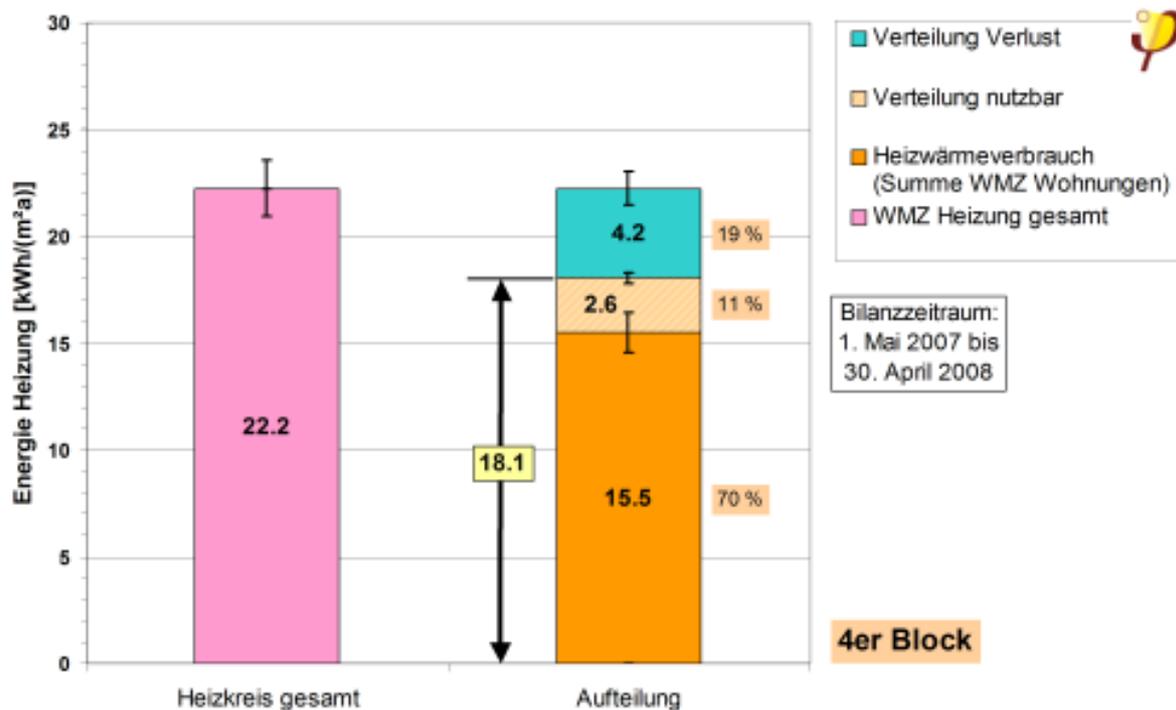


Abbildung 43: Wärmebezug Heizung des 4er Blocks für das zweite Bilanzjahr (ohne Sommerheizung und bei gemessener Innentemperatur von  $T_i = 21,8 \text{ °C}$ ) und dessen Aufteilung in Heizwärme (direkt in den Wohnungen gemessen) und in die nutzbaren und nicht nutzbaren Anteile aus der Heizwärmeverteilung.

## 6er Block

Im 6er Block wurde der Heizwärmeverbrauch in den einzelnen Wohnungen nicht gesondert erfasst, hier ist nur der zentrale Wärmehähler „Heizkreis gesamt“ im Einsatz. Aus diesem Grund kann die Differenz zwischen Heizwärmelieferung und Summe der Wohnungsverbräuche nicht messtechnisch ermittelt werden. Da die Gebäude technisch nahezu identisch sind (Leitungsämmung etc.) werden die Monatswerte<sup>2</sup> der ermittelten Anteile der gesamten gelieferten Heizwärme zum Anteil der Wärmemenge der Verteilung (Summe nutzbar und nicht nutzbar) aus dem 4er Block übernommen. Die Aufteilung der Heizwärme in nutzbare und nichtnutzbare Anteile erfolgt analog dem 4er Block mit Hilfe des Grenznutzungsgrades und der Leitungslängenanteile innerhalb und außerhalb der thermischen Hülle. Das Ergebnis ist in Abbildung 44 dargestellt. Dabei wurde der unnötige und ungewollte Heizwärmeverbrauch in den Sommermonaten abgezogen. Am Hauptzähler im Keller beträgt dieser Sommerverbrauch immerhin 2,6 kWh/(m<sup>2</sup>a) (entspricht 5150 kWh/a) und liegt damit deutlich höher als im 4er Block. Hier macht sich die erst im Folgejahr realisierte zentrale Abschaltung des Heizkreises deutlich bemerkbar.

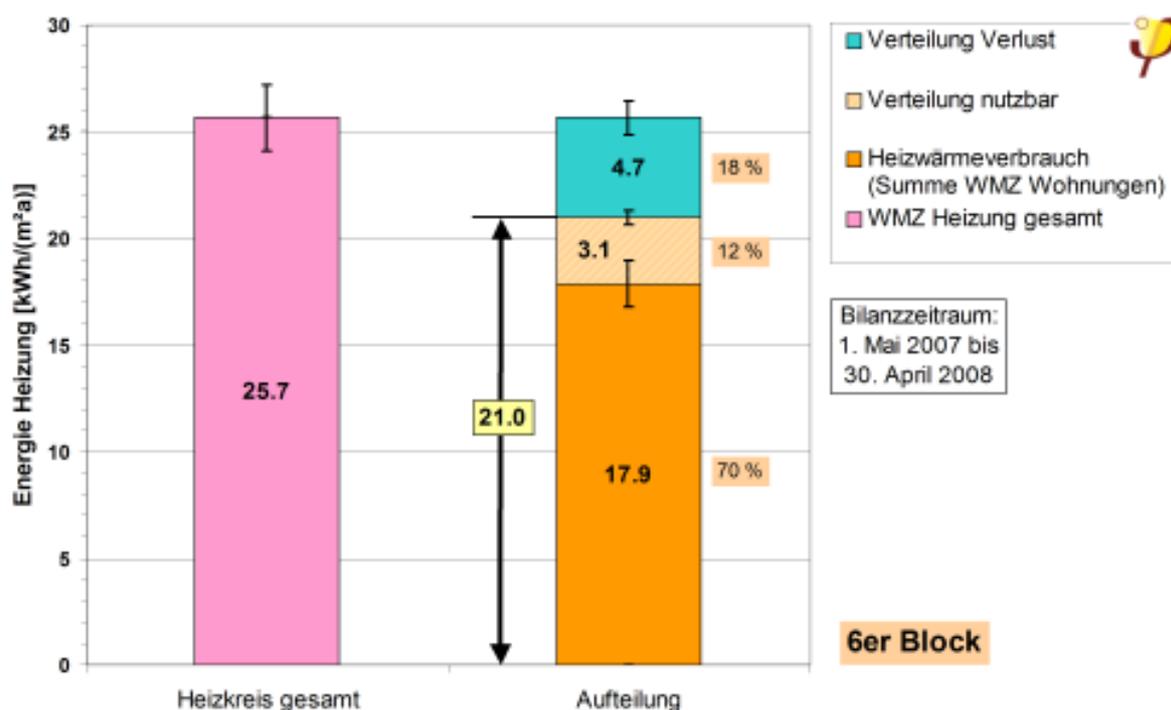


Abbildung 44: Wärmebezug Heizung des 6er Blocks für das zweite Bilanzjahr (ohne Sommerheizung) und dessen berechneter Aufteilung in Heizwärme Wohnungen und in die nutzbaren und nicht nutzbare Anteile aus der Heizwärmeverteilung.

<sup>2</sup> Der daraus berechnete Jahreswert der gesamten Wärmeverteilung im 6er Block weicht aufgrund der unterschiedlichen monatlichen Heizwärmeverbräuche (Bezugswerte) von der Summe des 4er Blocks ab.

Der Heizwärmeverbrauch der Wohnung wurde für den 6er Block mit **17,9 kWh/(m<sup>2</sup>a)** ermittelt. Inklusive der nutzbaren Anteile der Wärmeverteilung von **3,1 kWh/(m<sup>2</sup>a)** ergibt sich der Wert zu **21,0 kWh/(m<sup>2</sup>a)**, was 82 % der gesamten gelieferten Heizwärme entspricht. Damit fallen 4,7 kWh/(m<sup>2</sup>a), entsprechend 18 % als Wärmeverteilungsverlust an.

Im 6er Block sind in einigen Wohnungen im DG während des zweiten und dritten Winters Störungen in der Beheizung aufgetreten. Zeitweise konnten dadurch die gewünschten Raumtemperaturen nicht erreicht werden. Ursache waren wiederkehrende Luftansammlungen an den höchsten Punkten des hydraulischen Systems. Die Wasser/Luft-Nachheizregister sind als höchstliegende Verbraucher montiert und daher direkt betroffen. Da keine automatischen Entlüfter verwendet wurden, traten die Probleme wiederholt auf. Nach Analyse des Problems soll der Einbau von Automatikentlüftern Abhilfe schaffen. Die Haustechnikplaner wollen in Zukunft die Abgänge der Heizregister räumlich etwas tiefer anschließen um das Problem zu umgehen.

Deutlich wird an der Problematik, dass insbesondere bei den geringen Wärmeverbrauchswerten, eine gut Hydraulikplanung und die exakte Ausführung der geplanten Rohrleitungsführung sehr wichtig sind. Das betrifft genauso auch die Anforderungen an die Dichtheit des gesamten Hydrauliksystems.

### 4.3.2.3 Vergleich PHPP / Messdaten

Zur Validierung bzw. Überprüfung der Bilanzberechnung mit dem PHPP (Heizwärmebedarf) können die Messdaten (Heizwärmeverbrauch) herangezogen werden. Bei der PHPP-Berechnung wurden während der Planung das Standardklima vom Standort Frankfurt sowie die Standardinnentemperatur von 20 °C verwendet. Während und nach der Realisierung der Sanierung wurden die beiden PHPP-Bilanzen fortlaufend aktualisiert (vgl. [Kaufmann 2009]). So wurden z.B. Wärmebrücken (Rohrleitungen an der Außenfassade, Kellerabgang, etc.) und die gemessenen Luftdichtheitswerte nachgetragen. Ein Vergleich mit Messdaten ist nur dann sinnvoll, wenn durch die Anpassungen ein, soweit irgend möglich, realitätsnahes PHPP vorliegt.

Für den 4er Block ergibt sich in den „Standard-PHPPs“ ein Heizwärmebedarf von 17,3 kWh/(m<sup>2</sup>a), für den 6er Block von 17,4 kWh/(m<sup>2</sup>a). Werden anstelle des Standardklimas Frankfurt a.M. die gemessenen Außentemperaturen in den PHPPs berücksichtigt, reduzieren sich die Heizwärmebedarfswerte in dem etwas milderen Winter 2007/2008 auf 10,6 bzw. 10,4 kWh/(m<sup>2</sup>a).

Berücksichtigt man dann die im 4er Block gemessenen mittleren Innentemperaturen im Winter von 21,8 °C, lassen diese den Heizwärmebedarf wieder auf 15,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) ansteigen. Der Messwert des Heizwärmeverbrauchs inkl. der nutzbaren Anteile der Wärmeverteilung liegt mit 18,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) damit 3,0 kWh/(m<sup>2</sup>a) höher als der Rechenwert.

Als nennenswerte Abweichungen zwischen der PHPP-Berechnung und den Messwerten des 4er Blocks sind insbesondere folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Eine der 19 Wohnungen war dreieinhalb Monate während der Heizperiode 2007/2008 nicht bewohnt. Hier wurde zwei Kernwintermonate überhaupt nicht geheizt. Die Wohnung verfügt über den viertniedrigsten Verbrauchswert (vgl. Abbildung 38 in Abschnitt 4.3.2.1). Wäre die Wohnung dauerhaft bewohnt gewesen, wäre ein höherer Heizwärmeverbrauch zu vermuten. So fällt der Mittelwert aller Wohnungen etwas niedriger aus.
- Im PHPP ist der Wärmebereitstellungsgrad der Lüftungsgeräte mit 85 % angesetzt. Eine Prüfstandsmessung des eingesetzten Gerätetyps ergab einen um 1% niedrigeren Messwert. Berücksichtigt man diesen Wert im PHPP, führt dies auf eine geringe Erhöhung des PHPP Bilanzwertes.
- Die weiter oben geschilderte verspätete Aktivierung der Wärmerückgewinnung führt im 4er Block zu höheren Heizwärmeverbräuchen von zwei Wohnungen.

Bei den aufgeführten Punkten handelt es sich zwei mal um Effekte die den Unterschied zwischen den PHPP-Bedarfswerten zu den Verbräuchen verkleinern, einmal um einen Effekt der ihn vergrößert. Sie heben sich damit zum Teil weg. Die genauen Größen können nicht vollständig berechnet werden. Der Unterschied von 3,0 kWh/(m<sup>2</sup>a) ist bei Berücksichtigung dieser Effekte und auch bei der möglichen Genauigkeit der Rechnung, wie auch der vorhandenen Genauigkeit der Messung als sehr gut einzustufen.

Wie oben bereits ausgeführt ergibt die Umrechnung des Messwertes von 18,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) auf die Standardtemperatur von 20 °C einen Heizwärmeverbrauch von nur noch 13,6 kWh/(m<sup>2</sup>a). Verglichen mit dem berechneten Heizwärmebedarf vom Altbauzustand des 4er Blocks mit rund 290 kWh/(m<sup>2</sup>a) [Pfluger 2009] ergibt sich eine Einsparung von 95 %.

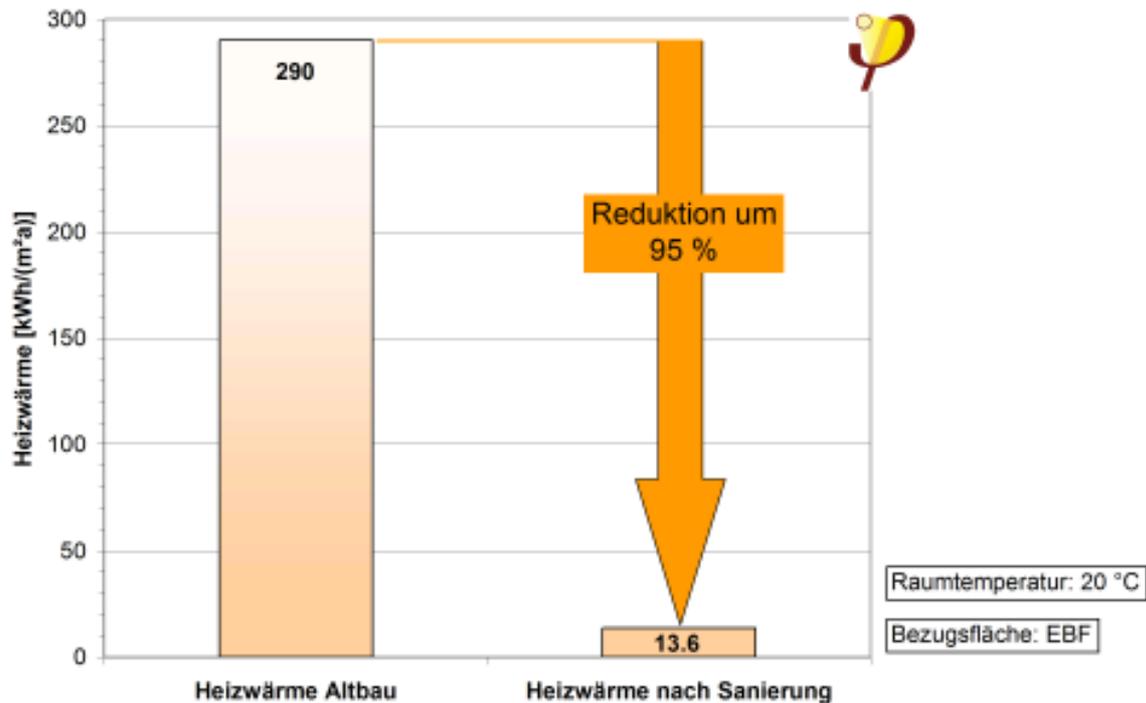
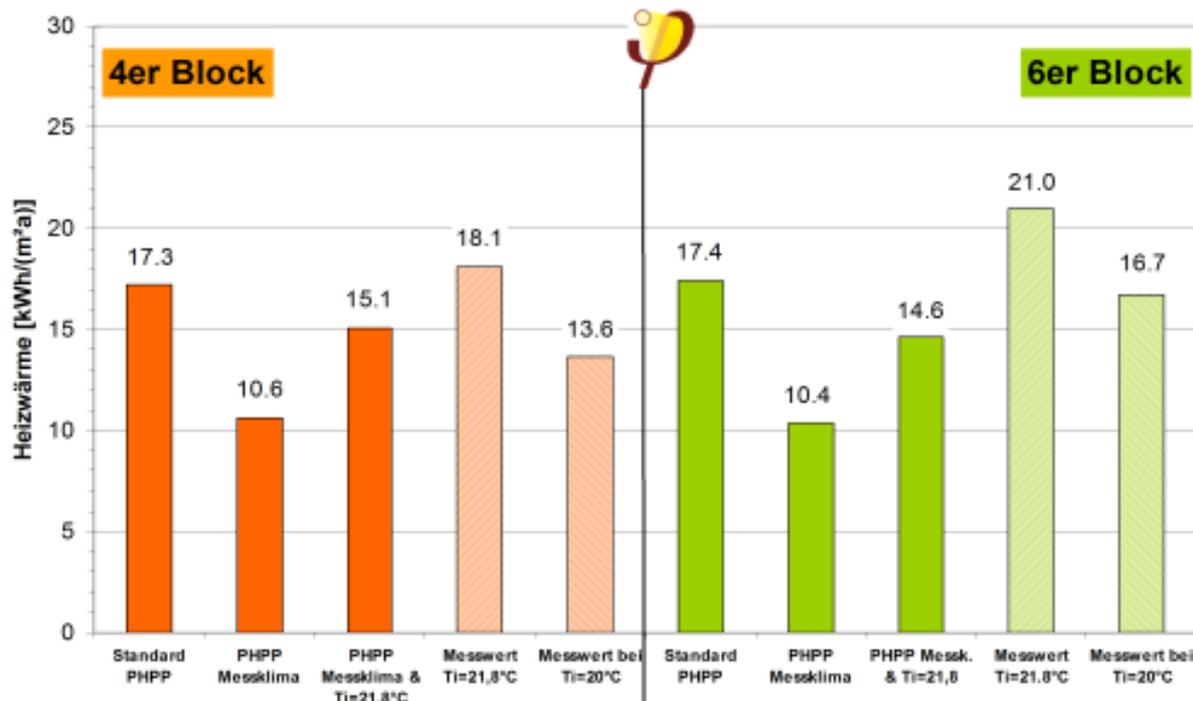


Abbildung 45: Vergleich des gemessenen Heizwärmeverbrauchs (berechnet auf 20 °C Raumtemperatur) mit dem berechneten Heizwärmebedarfs des Altbauzustands (4er Block).

Im **6er Block** wurden keine Temperaturmessungen in den Wohnungen durchgeführt. Vereinfacht wird hier die gleiche mittlere Raumtemperatur von 21,8 °C während der Winterzeit angenommen. Damit „klettert“ der Heizwärmebedarfswert bei den tatsächlichen Klimabedingungen von 10,4 auf 14,6 kWh/(m²a). Der Messwert des Heizwärmeverbrauchs inkl. der nutzbaren Anteile der Wärmeverteilung liegt im 6er Block mit 21,0 kWh/(m²a) um 6,4 kWh/(m²a) darüber. Dieser deutliche Unterschied kommt – neben der Unsicherheit der tatsächlichen Raumtemperatur und den oben genannten Gründen – insbesondere aufgrund der geringeren Belegung des Gebäudes zustande. Hier sind immerhin fünf der 33 Wohnungen während der Kernwinterzeit dauerhaft, sowie eine zeitweise, nicht vermietet. Es wurde nachträglich bekannt, dass in einigen der nicht bewohnten Wohnungen relativ hohe Sollwerte mit den Raumthermostaten eingestellt waren. Trotz fehlender Bewohner (und damit fehlender interner Wärmequellen) wurde hier unbemerkt auf relativ hohe Raumtemperaturen geheizt. Der Messwert entspricht einem Heizwärmeverbrauch von 16,7 kWh/(m²a) bei der Standardinnentemperatur von 20 °C.



**Abbildung 46: Heizwärmebedarf** der beiden Gebäude nach den Ergebnissen der PHPP-Berechnungen. Schrittweise sind die gemessene Außentemperatur und die Solarstrahlungswerte (01.05. 2007 bis 30.04.2008) sowie die mittlere Raumtemperatur im Winter im 4er Block ( $T_i = 21,8 \text{ °C}$ ) angepasst. Im Vergleich dargestellt sind die Messwerte des Heizwärmeverbrauchs inkl. der Energie der nutzbaren Heizwärmeverteilung (ohne Sommerheizung) und die Messwerte umgerechnet auf die Standardinnentemperatur von  $20 \text{ °C}$ .

Insgesamt kann festgestellt werden, dass im Rahmen der Messgenauigkeit und der möglichen Genauigkeit der Bilanzrechnung die Übereinstimmung der Ergebnisse ausgezeichnet ist. Dies bestätigt die hohe Qualität des PHPP als Energiebilanzierungswerkzeug ebenso wie als Planungstool auch für die hochenergieeffiziente Sanierung.

#### 4.3.2.4 Heizlast

Die klassische Passivhausbeheizung nutzt die vorhandenen Zuluftleitungen zur Wärmeverteilung im Gebäude und kann dafür auf ein hydraulisches Netz verzichten. Entsprechend der funktionalen Definition des Passivhausstandards muss sich ein Passivhaus mit der Wärmeleistung, welche sich mit der hygienisch notwendigen Luftmenge in das Gebäude transportieren lässt, beheizen lassen [PHI 1996] [Feist 2001]. Begrenzt wird die Heizleistung durch die maximale Temperatur von etwa  $55 \text{ °C}$  am Heizregister (Beginn der Staubverschmelzung). Je nach Objekt beträgt die tagesmittlere maximal Heizleistung ca.  $10 \text{ W/m}^2$ . Nach dem PHPP aus der Planungsphase sind für die Tevesstraße  $11,3 \text{ W/m}^2$  bzw.  $10,9 \text{ W/m}^2$  ermittelt worden. Diese geringe Leistung muss ausreichen, die Restheizung des Gebäudes sicher zu stellen.

In den beiden Gebäuden in der Tevesstraße sind in den EG- und OG-Wohnungen Heizregister vom Typ WHR 125, Fa. Helios eingesetzt worden. Die Geräte verfügen bei einer Vorlauftemperatur von 55 °C je nach Luftvolumenstrom und Wassermenge über Heizleistungen von etwa 300 bis 630 Watt. Bei einer höheren Vorlauftemperatur von 75 °C steigen die Leistungen auf etwa 600 bis fast 1300 Watt an. In den Mittelgeschossen wurden etwas leistungsschwächere Geräte Fa. Vallox, Typ WNH 801 eingesetzt. Nach Messungen des PHI erbringen diese Geräte eine Heizleistung etwa 430 Watt bei einer Vorlauftemperatur von ca. 59 °C und etwa 85 m<sup>3</sup>/h Luftvolumenstrom. Die Messwerte liegen damit deutlich unter den Angaben des Herstellers.



**Abbildung 47: Verwendete Heizregister über den Lüftungsgeräten während der Bauzeit.**

In den Badezimmern ist für die schnelle Aufheizung jeweils ein kleiner Handtuchheizkörper montiert. Dieser ist in jeder Wohnung installiert und verfügt über eine Heizleistung von gut 300 Watt bei einer Vorlauftemperatur 55 °C.

Bei einer Sanierung muss aufgrund der Begrenzung der Luftbeheizbarkeit überprüft werden, ob die Heizleistung bei verbleibenden Wärmebrücken auch in den EG Wohnungen ausreichen wird. Die Berechnungen für diese beiden Objekte zeigten, dass in den EG Wohnungen je ein kleiner Heizkörper notwendig ist (siehe dazu die Berechnungen in [Kaufmann 2009]). Diese wurden an den Flurwänden unterhalb der Decke realisiert und sind nur 70 mal 40 bzw. 80 mal 40 cm groß. Im 4er Block beträgt die geringe Heizleistung dieser Zusatzheizkörper im EG jeweils 270 Watt, im 6er Block jeweils 310 Watt. Die Leistungsangaben gelten wieder für eine Vorlauftemperatur von 75 °C und einer Rücklauftemperatur von 55 °C [Petrausch 2009].



**Abbildung 48: Heizkörper an der Flurwand unter der Decke einer EG Wohnung.**

In den EG Wohnungen wird damit die Heizleistung neben dem Wasser/Luft - Heizregister mit den beiden Heizflächen in Bad und Flur sicher gestellt. In den restlichen Wohnungen gibt es nur die klassische Lufterwärmung und den Badheizkörper. Insgesamt ergeben sich in den Wohnungen als Summe der Heizquellen die folgenden installierten Heizleistungen:

**Tabelle 11: Verfügbare Heizleistungen der Wohnungen nach der Lage im Gebäude und dem Standardvolumenstrom (bei Vorlauftemperaturen von 55 bzw. 59 °C).**

Lage der Wohnung	Luftvolumenstrom	Verfügbare Heizleistung W/m <sup>2</sup>
<b>DG</b>	Whg. mit kleinstem Volumenstrom	<b>13.7</b>
	Whg. größtem Volumenstrom	<b>19.9</b>
<b>Mittel-geschosse</b>	Whg. mit kleinstem Volumenstrom	<b>9.6</b>
	Whg. größtem Volumenstrom	<b>18.6</b>
<b>EG</b>	Whg. mit kleinstem Volumenstrom	<b>12.9</b>
	Whg. größtem Volumenstrom	<b>24.4</b>

Bei höheren Vorlauftemperaturen (z.B. 75 °C) steigt die Heizleistung deutlich an.

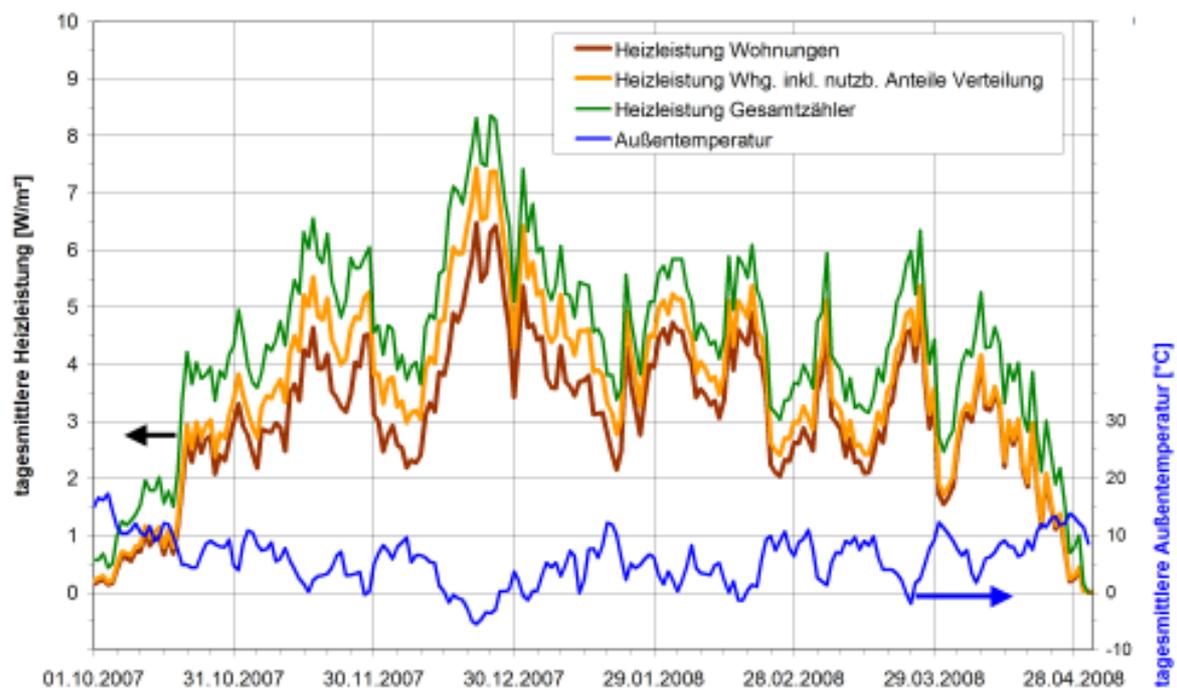
Die Heizleistungen der unterschiedlichen Heizquellen sind in Tabelle 11 aufaddiert. Tatsächlich versorgt der Badheizkörper bei geschlossener Zimmertür in erster Linie nur das Badezimmer. Die Heizleistung darf nicht auf die gesamte Wohnungen angerechnet werden. Bei den Messungen mittels Wärmezähler wird allerdings nur der Wärmebezug der gesamten Wohnung gemessen. Eine Unterscheidung ist damit hier nicht möglich.

Anhand der Messdaten soll die tatsächlich benötigte Heizleistung überprüft werden. Die Messdaten des zentralen Heizungszählers geben Aufschluss über den gesamten Heizleistungsbezug inkl. der Verteilung. Die Summen der 19 Wohnungszähler „Heiz-

wärme“ zeigen den Bezug ohne die Verteilleistung an. In Abbildung 49 ist zusätzlich noch der Anteil der nutzbaren Heizleistung aus der Wärmeverteilung bestimmt worden. Dies erfolgte nach den im vorigen Abschnitt beschriebene Verfahren. Dargestellt ist der Verlauf der tagesmittleren Heizleistung für den 4er Block im Winter 2007/2008 für alle drei Größen. Im Diagramm ist auch ablesbar, dass eine nennenswerte aktive Beheizung am 18.10.2007 beginnt und etwa am 27.04.2008 endet.

Als tagesmittlere maximale Heizleistung sind im 4er Block in dem Winter nur **8,4 W/m<sup>2</sup>** (Zentralzähler inkl. Verteilungsheizleistung) bzw. **6,5 W/m<sup>2</sup>** (Summe Wohnungen) gemessen worden. Die Leistung der Wohnungen ist der Summenwert aus der Gesamtheit aller Luft-Nachheizregister und Badheizkörper der 19 Wohnungen sowie der Flurheizkörper der EG Wohnungen. Die mittlere Heizleistung der 19 Wohnungen im Kernwinter (November 2007 bis Februar 2008) beträgt nur **3,7 W/m<sup>2</sup>**. Betrachtet man den Mittelwert des Gesamtzählers im Keller für den Kernwinter beträgt dieser **5,2 W/m<sup>2</sup>**.

Die abgenommene Leistung entspricht damit so niedrigen Werten, wie sie aus Passivhaus-Neubauten bekannt sind. Die installierte verfügbare Heizleistung ist in diesem Winter auf jeden Fall ausreichend (vgl. Tabelle 11).



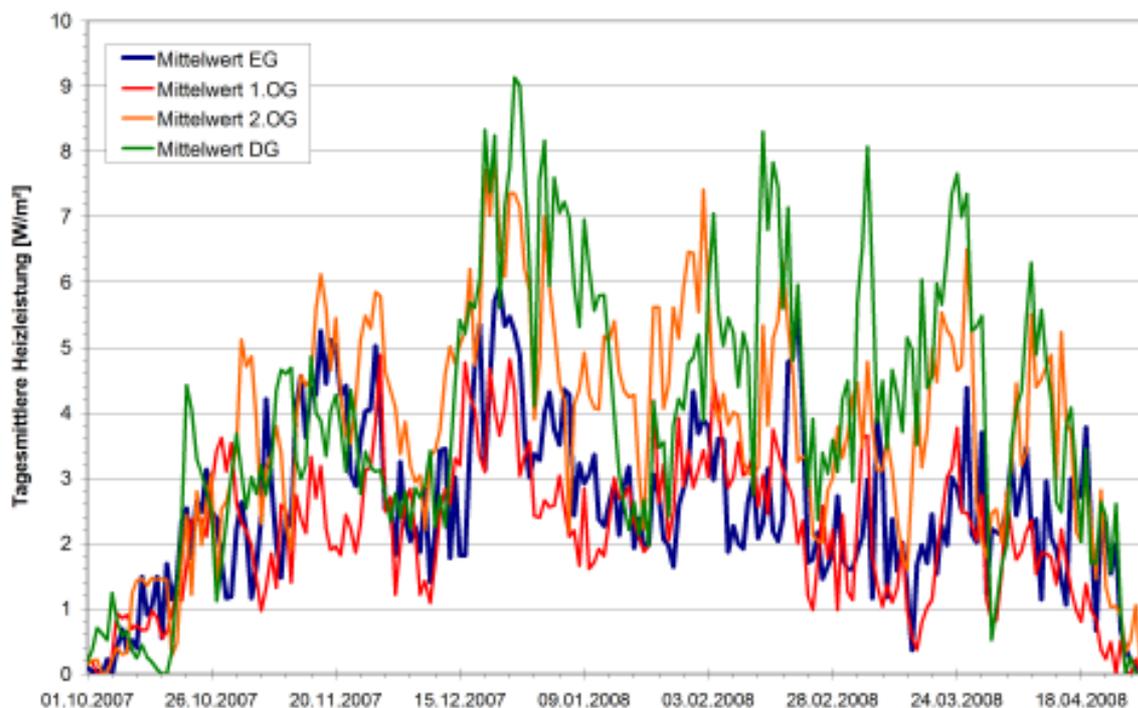
**Abbildung 49: Tagesmittlere Heizlast der 19 Wohnungen, der Wohnungen inkl. der nutzbaren Anteile der Wärmeverteilung und des gesamt Wärmezählers (Keller) sowie die Außentemperatur im Winter 2007/2008.**

## Heizlast nach Etagen

Neben diesen sehr niedrigen mittleren Heizleistungen des gesamten Gebäudes gilt es die Heizleistungen der Etagen zu untersuchen. Dazu werden die Heizleistungen der Wohnungen einer Etage summiert und auf die gemeinsame Energiebezugsfläche der Etage bezogen. Diese sind ebenfalls im Verlauf des Winters 2007/2008 in Abbildung 50 dargestellt. Es zeigt sich, dass die höchste Heizleistung im DG mit einem noch immer sehr moderaten Tagesmittelwert von  $9,1 \text{ W/m}^2$  gemessen wurde. Der niedrigste tagesmittlere Maximalwert der vier Geschosse ergibt sich mit nur  $4,9 \text{ W/m}^2$  im 1. OG.

**Tabelle 12: Gemessene maximale tagesmittlere Heizleistungen im Winter 2007/2008 und mittlere Heizlast im Kernwinter (November 2007 bis Februar 2008) je Etage im 4er Block.**

	Maximale tagesmittlere Heizleistung Winter 2007/08 [W/m <sup>2</sup> ]	Mittelwert Heizleistung im Kernwinter 2007/08 [W/m <sup>2</sup> ]	Installierte Heizleistung nach Tabelle 11 (min/max) [W/m <sup>2</sup> ]
EG	5,9	3,2	12,9 / 24,4
1. OG	4,9	2,7	9,6 / 18,6
2. OG	8,1	4,6	
DG	9,1	4,6	13,7 / 19,9



**Abbildung 50: Spezifische tagesmittlere Heizleistung der einzelnen Etagen im 4er Block im Verlauf des Winters 2007/2008.**

Im EG wird mit  $5,9 \text{ W/m}^2$  die zweitniedrigste maximale tagesmittlere Heizleistung gemessen. Die Raumlufftemperaturen, die in Abschnitt 4.2.1 nach Etagen untersucht wurden, verhalten sich ähnlich der mittleren gemessenen Heizleistungen: Die niedrigeren tagesmittleren Heizleistungen im EG und 1. OG spiegeln sich als niedrigere mittlere Wintertemperaturen in den beiden Etagen wieder. Bei der näheren Untersuchung der beiden unteren Etagen zeigt sich, dass es im Kernwinter im EG im Durchschnitt um  $0,7 \text{ K}$  kühler ist als im 1. OG. Der Mittelwert der tagesmittleren Heizleistung vom Kernwinter ist im EG aber um  $0,5 \text{ Watt/m}^2$  höher als im 1. OG. Hier macht sich möglicherweise ein geringer Einfluss aufgrund der verbleibenden Wärmebrücken zum Keller hin bemerkbar.

Insgesamt ist - im Vergleich zu den verfügbaren Heizleistungen – festzustellen, dass auch bei der Untersuchung nach Etagen die Heizleistung überall deutlich ausgereicht haben. Es bestehen ausreichend Reserven auch für kältere Winter. Wenn die Vorlauftemperatur angehoben wird, steigt die verfügbare Heizleistung gegenüber den in Tabelle 11 genannten Werten deutlich an und die Reserven würde sich nochmals erhöhen. Die Vorlauftemperaturen in den Wohnungen lagen an kalten Wintertagen mit Temperaturen bis  $74 \text{ °C}$  bereits über den Angaben in Tabelle 11 (VL =  $55 \text{ °C}$ ).

## Heizleistung 6er Block

Der Verlauf der tagesmittleren Heizleistung im 6er Block (39 Wohnungen) ist sehr ähnlich der im 4er Block. Im 6er Block existieren nur die Daten des Heizwärmegesamtzählers im Keller. Diese beinhalten so auch die gesamten Verteilungswärme (genutzte und nicht nutzbare Anteile). Der maximale Tagesmittelwert der Heizleistung ist mit  **$8,7 \text{ W/m}^2$**  nur marginale  $0,3 \text{ W/m}^2$  größer als der im 4er Block gemessene. Der Mittelwert im Kernwinter (November 2007 bis Februar 2008) liegt mit  $6,2 \text{ W/m}^2$  höher als der im 4er Block ( $5,2 \text{ W/m}^2$ ) festgestellte. Vermutlich spielt hier der etwas geringere Vermietungsstand des 6er Blocks eine Rolle. Fehlende interne Wärmequellen (Personen und Stromverbräuchen) können bei ähnlichen Temperatursollwerten zu höheren Heizlasten bzw. Heizwärmeverbrauch führen. Auffällig ist in Abbildung 51 insbesondere der ausgeprägte Peak Mitte November: Hier wird die höchste Heizleistung bei Außentemperaturen knapp über Null Grad festgestellt. Im 4er Block wird die höchste Heizleistung erst später, um die Weihnachtszeit, gemessen. Die Messwerte sind aber in beiden Gebäuden als sehr gering zu bewerten.

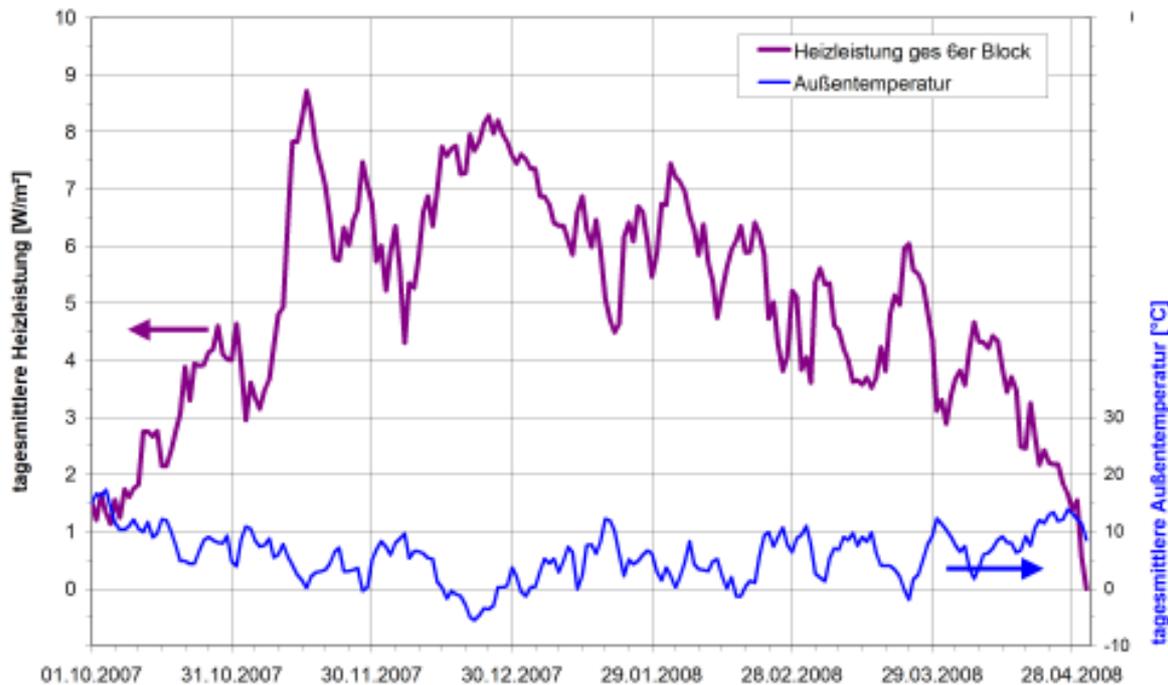


Abbildung 51: Tagesmittlere Heizleistung des zentralen Heizungs Zählers (Keller) vom 6er Block (39 Whg.) sowie die Außentemperatur im Winter 2007/2008 (Tagesmittelwerte).

### 4.3.2.5 Heizkurve

Zur Beurteilung des Gebäudes ist die Einordnung der Heizleistung über der Außentemperatur, im Verhältnis zur Heizgraden bzw. Heizkurve hilfreich. Die theoretische Heizkurve eines Gebäudes wird aus den Daten der Gebäudehülle (Flächen, U-Werte), der Lüftungsanlagen (Luftmengen und Wärmerückgewinnung) und der inneren Wärmequellen sowie der mittleren Innentemperatur bestimmt. Sie ist zur Beurteilung der Abhängigkeit der Heizlast von der Außentemperatur notwendig.

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

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

Mit:

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

Die Kennwerte der Heizgraden wurden den aktualisierten PPHP-Bilanzen und den Messwerten entnommen.

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

Abbildung 52 zeigt für den 4er Block, dass bei Außentemperaturen ab 13,5 °C keine nennenswerten Heizleistungen gemessen wurden. Nur wenige Tagespunkte liegen oberhalb der theoretischen Heizkurve. Wie oben beschrieben reduziert die Solarstrahlung die notwendige Heizleistung, wodurch die Messpunkte unter der theoretischen Heizkurve liegen.

Das Gebäude ist auf jedem Fall in Bezug auf die Heizleistung einem sehr hochwertigen Passivhaus-Neubau gleich zu setzen.

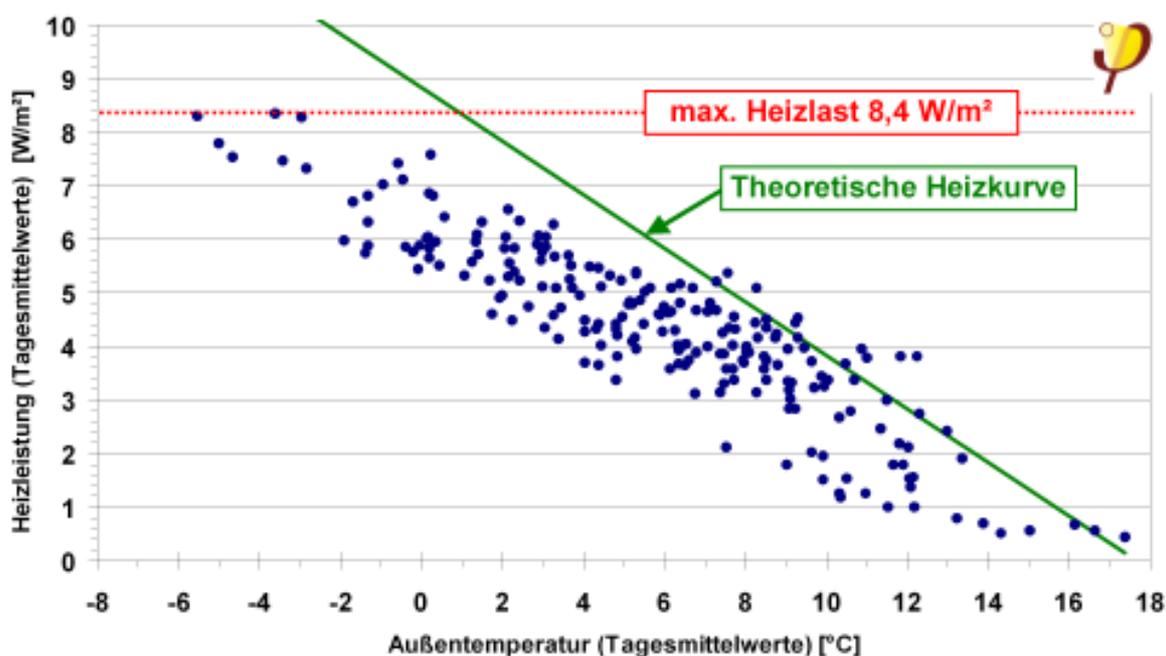
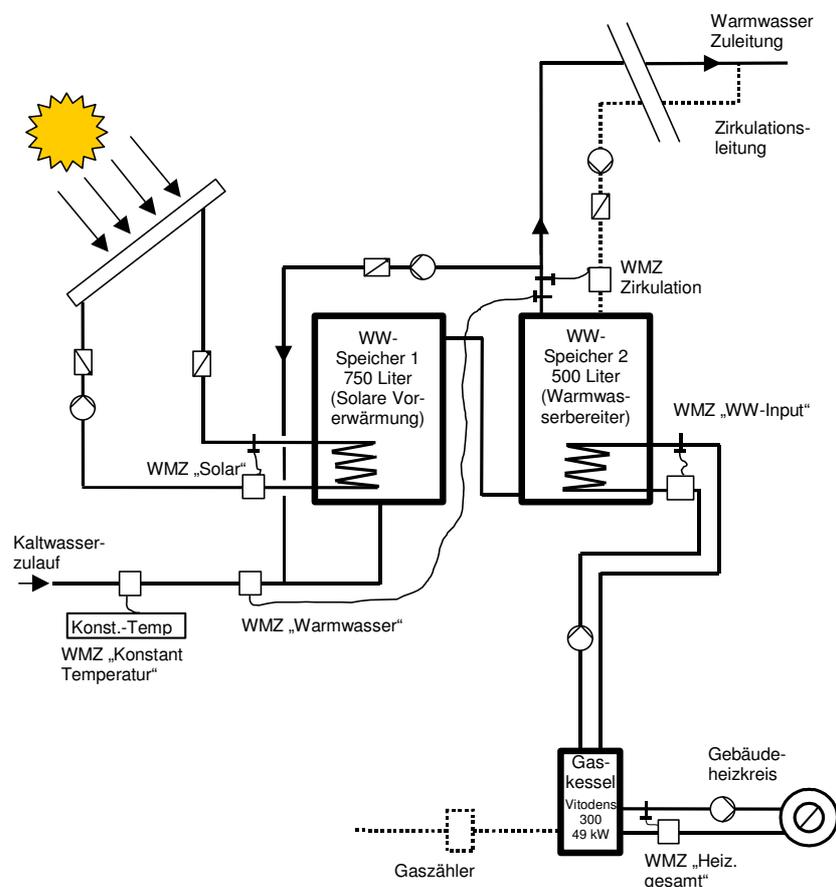


Abbildung 52: Tagesmittlere Heizleistungen aufgetragen über der Außentemperatur sowie die berechnete theoretische Heizkurve für den 4er Block (01.10.2007 bis 30.04.2008).

### 4.3.3 Wärmeverbrauch Warmwasserbereitung

Die Warmwasserbereitung erfolgt über die zentralen Kessel in den Kellern der Gebäude. Über einen Rohrwärmetauscher werden zentrale Warmwasserspeicher von je 500 Liter Inhalt geladen. Aus diesen werden die Wohnungen und die Zirkulationsleitungen versorgt. Im 4er Block befindet sich ein zentraler Warmwasserspeicher, im 6er Block gibt es zwei. Über jeweils einen vorgelagerten Solarspeicher (750 Liter) wird das Kaltwasser vorerwärmt bevor es in den Warmwasserspeicher gelangt. Wenn der Solarspeicher eine Grenztemperatur erreicht hat, also ausreichend mit Solarwärme beladen wurde, erfolgt eine Umschichtung in den Warmwasserspeicher. Die schematische Anordnung der zentralen Versorgungstechnik vom 4er Block aus Abbildung 10 ist hier nochmals dargestellt:



**Abbildung 53: Schematisches Hydraulikschema der zentralen Wärmeversorgung im 4er Block mit den montierten Wärmemengenzählern (WMZ). Die Abbildung ist identisch zu Abbildung 10.**

Die gesamte Beladung des Warmwasserspeichers vom Gaskessel wird über den Wärmemengenzähler (WMZ) „WW-Input“ gemessen. Die Messung der gesamten Wärmeentnahme Warmwasser für die Wohnungen wird mittels des Wärmemengenzählers „Warmwasser“ durchgeführt. Die eingespeicherte Solarwärme wird über den separaten Wärmemengenzähler „Solar“ erfasst.

Aus den Warmwasserspeichern wird zum einen Warmwasser zur Nutzung entnommen, zum anderen ist eine Zirkulationsleitung vorhanden. Diese sorgt für die

schnelle Versorgung mit Warmwasser an den Zapfstellen der Wohnungen. Die Aufwendungen für die Zirkulation werden mit dem Wärmehähler „Zirkulation“ erfasst.

Bilanziert man monatlich den Warmwasserspeicher im 4er Block ergeben sich für die Speicherbeladung (Solar und WW-Input) Monatssummen zwischen 1,8 und 2,9 kWh/(m<sup>2</sup>Monat). Die Differenz zu den Monatssummen der Wärmeentnahme aus dem Speicher in Abbildung 54 ergibt sich durch die Messgenauigkeit der Wärmehähler und den Speicherverlusten. Der Verlauf der Monatsbilanzen zeigt insbesondere auch die über die Jahreszeiten wechselnden Solarerträge. Insgesamt steigen die Verbräuche im zweiten Bilanzjahr aufgrund der steigenden Belegung der Wohnungen.

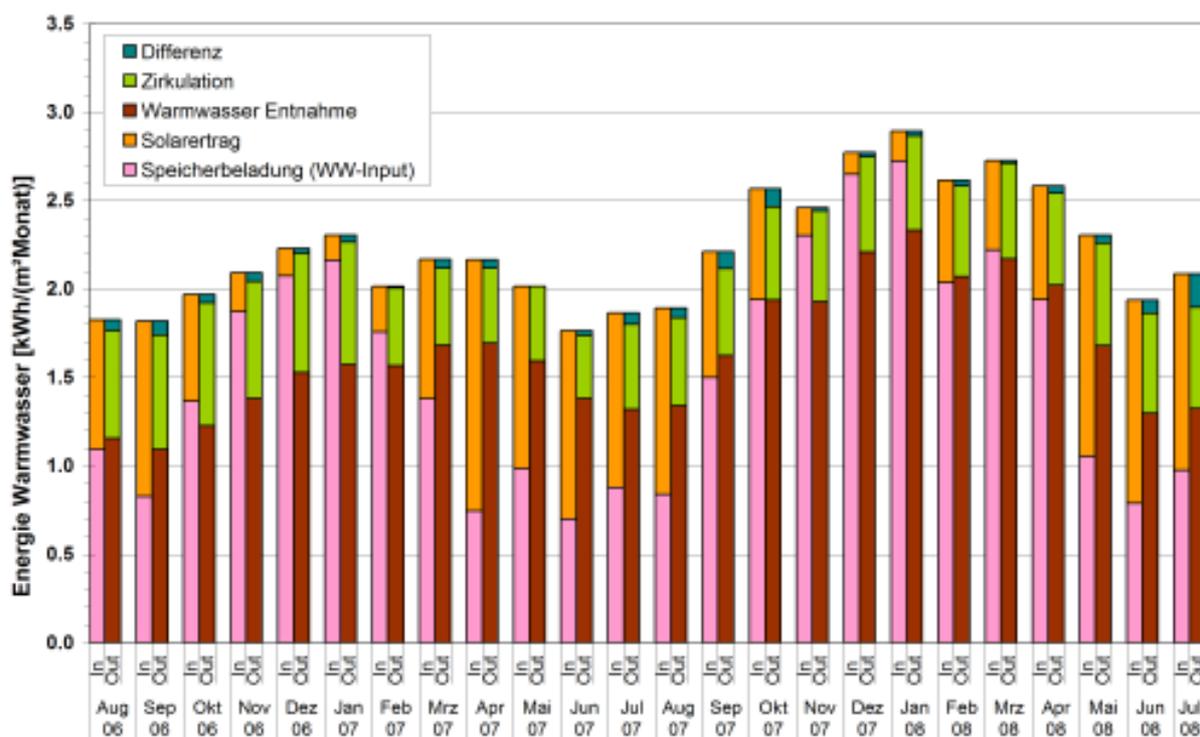


Abbildung 54: Monatsbilanzen des Warmwasserspeichers im 4er Block über die gesamte Messzeit.

Die Jahressummen der Energieverbräuche für die **Warmwasserbeladung** (WW-Input) der Speicher durch die Heizkessel (rosa Säulen) sind bereits weiter oben im Abschnitt 4.3.1.1 in Tabelle 10 aufgeführt. Für das zweite Bilanzjahr (Mai 2007 bis April 2008) betragen sie im **4er Block 20,7** und im **6er Block** fast gleichauf **20,5 kWh/(m<sup>2</sup>a)**. Die Monatswert liegen im 4er Block zwischen 0,7 und 2,7 kWh/(m<sup>2</sup>Monat) und im 6er Block zwischen 0,4 und 2,2 kWh/(m<sup>2</sup>Monat).

Die monatlichen Energieverbräuche der **Warmwasserentnahme** (dunkel rote Säulen) schwanken im 4er Block zwischen 1,1 und 2,3 kWh/(m<sup>2</sup>Monat); Im 6er Block schwanken sie zwischen 0,1 und 1,7 kWh/(m<sup>2</sup>Monat). Es ist abzulesen, dass der Warmwasserverbrauch auch einer deutlichen Sommer-Winter-Schwankung unterliegt.

Die Jahressummen der Energieverbräuche der Warmwasserentnahme sind in der folgenden Tabelle aufgelistet:

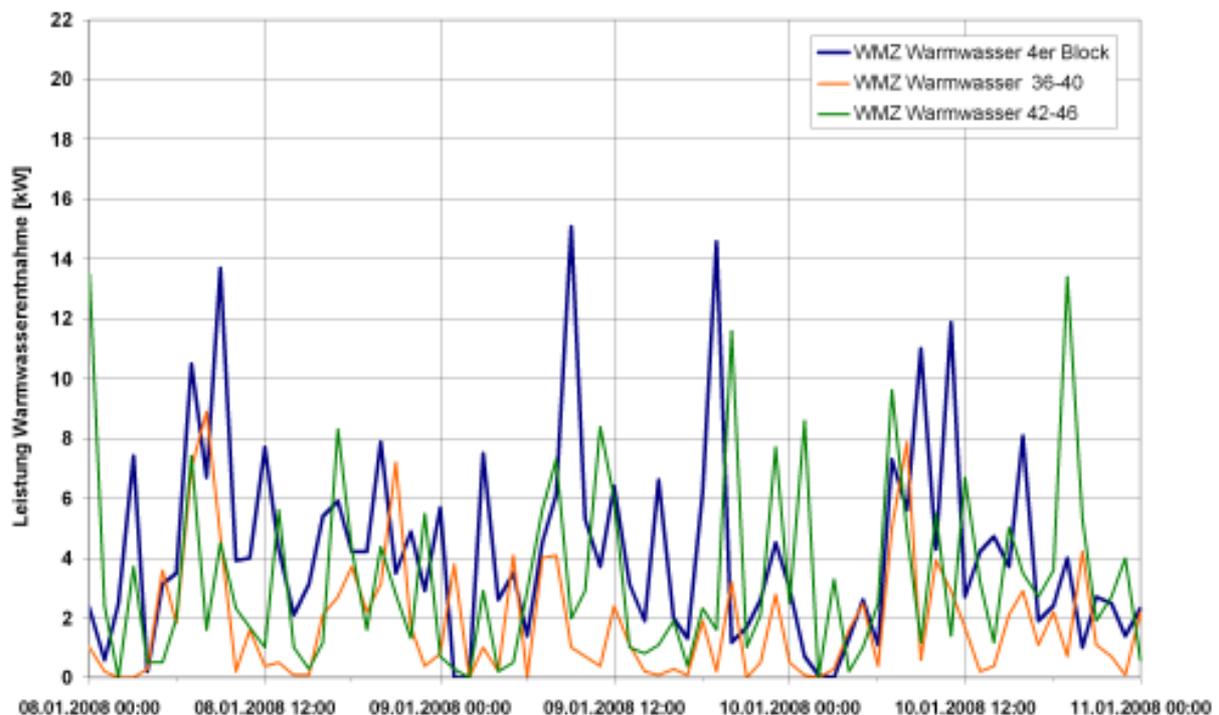
**Tabelle 13: Summen der beiden Jahresbilanzzeiträume für den spezifischen Energieaufwand der Warmwasserentnahme aus den Warmwasserspeichern.**

Warmwasser kWh/(m <sup>2</sup> a)	Summe Aug. 06 - Juli 07	Summe Mai 07 - April 08
4er Block	17,2	21,9
6er Block	6,7	15,1

Auch hier ist die geringere Belegung im 6er Block zu erkennen, die Warmwasserverbräuche sind deutlich geringer als im 4er Block. Die Höhe der Energieaufwendungen für die Warmwasserverbräuche sind damit, wie auch bei Passivhausneubauten üblich, in der gleichen Größenordnung wie die Heizwärmeverbräuche.

Die mittleren Warmwassertemperaturen am Speicherausgang über die gesamte zweite Bilanzzeit (Mai 2007 bis April 08) liegen im 4er Block mit 55,5 °C deutlich niedriger als im 6er Block mit 63,2 bzw. 60,4 °C. Dies Messdaten stellen einen Mittelwert des gesamten Messzeitraumes, unabhängig von den Volumenströmen, dar.

Bei der Untersuchung der Warmwasserentnahme aus den drei zentralen Speichern der Gebäude zeigen sich mehrere, nicht besonders ausgeprägte Spitzen an den drei dargestellten Wochentagen (Abbildung 55). Diese sind über den Tag verteilt, es gibt allerdings auch nennenswerte Entnahmen in den Nachtstunden. Damit sind die erwarteten, typischen Morgen- und Abendspitzen nicht zu finden.



**Abbildung 55: Stundenwerte der Heizleistung der Warmwasserentnahme aus den Speichern an drei beispielhaften Wochentagen im Januar 2008.**

### 4.3.3.1 Zirkulation

Der monatliche Energieaufwand zum Betrieb der Zirkulationsleitung schwankt im 4er Block zwischen 0,35 und knapp 0,7 kWh/(m<sup>2</sup> Monat). Im 6er Block wird getrennt in den beiden Warmwasseranlagen gemessen. Die Monatswert liegen hier in sehr ähnlicher Größenordnung zwischen 0,29 und ebenfalls knapp 0,7 kWh/(m<sup>2</sup> Monat).

Abbildung 56 kann entnommen das sich im 4er Block durch Änderungen an der Betriebsweise deutliche Unterschiede in den Energieaufwendungen für den Zirkulationsbetrieb ergeben haben. Auf Anraten des PHI wurde in diesem Gebäude am 12.03.2007 eine Nachtpause der Zirkulationspumpe von 22:00 bis 3:00 Uhr bzw. 23:00 bis 2:00 Uhr eingerichtet. Die Daten zeigen, dass es darüber hinaus noch andere Veränderungen bzw. Einflüsse auf die Wärmeverbräuche der Zirkulation gegeben haben muss: Der Verbrauch ist nach anfänglich relativ hohen Werten (0,66 kWh/(m<sup>2</sup>Monat)) im Februar bis Juni 2007 besonders niedrig und verbleibt ab Juli 2007 wieder auf etwas höherem aber reduziertem Niveau (0,53 kWh/(m<sup>2</sup>Monat)). Die Veränderungen haben sich hier dauerhaft mit niedrigeren Energieaufwendungen ausgewirkt.

Im 6er Block liegen bei beiden Anlagen relativ gleichmäßige Verbräuche vor. Nur bei der Anlage von Haus 36 bis 40 gibt es von November 2006 bis Februar 2009 eine kurzfristige deutliche Verbrauchsreduktion, deren Ursache unbekannt ist. Im Zeitraum ab März 2007 liegt der Monatsmittelwert bei 0,59 bzw. 0,64 kWh/(m<sup>2</sup>Monat). Der flächengewichtete Mittelwert für den gesamten 6er Block ergibt sich zu 0,62 kWh/(m<sup>2</sup>Monat).

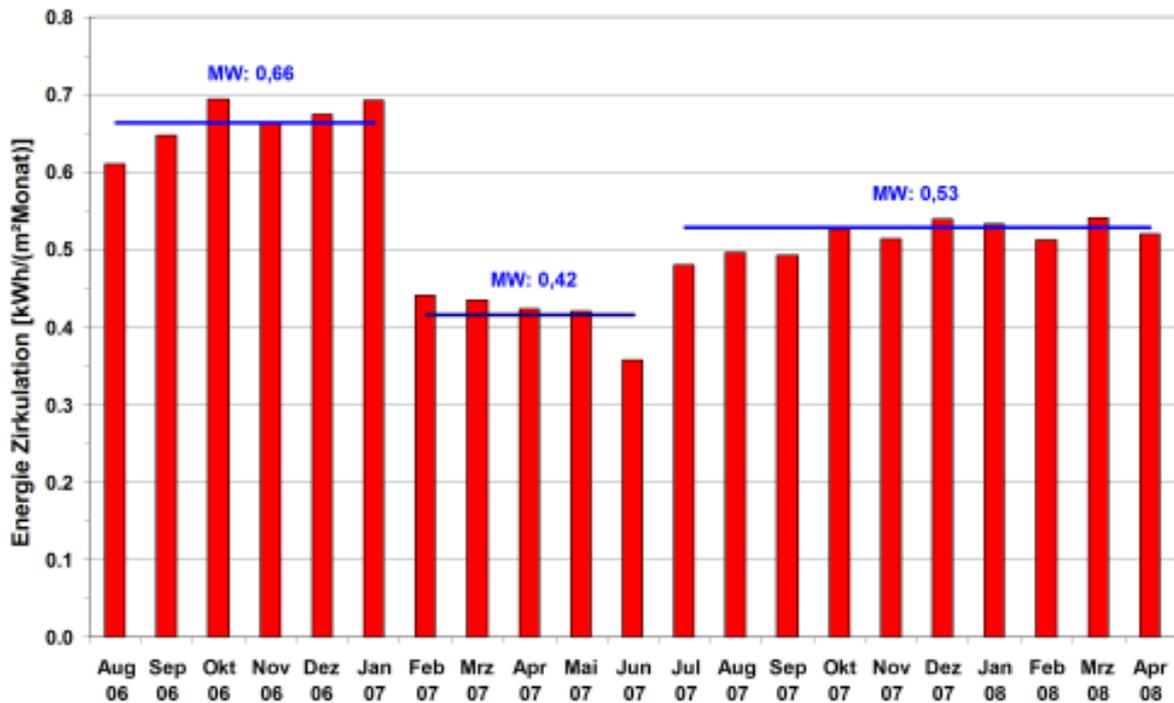


Abbildung 56: Energieaufwendung für den Zirkulationsbetrieb im 4er Block während der Untersuchungszeit.

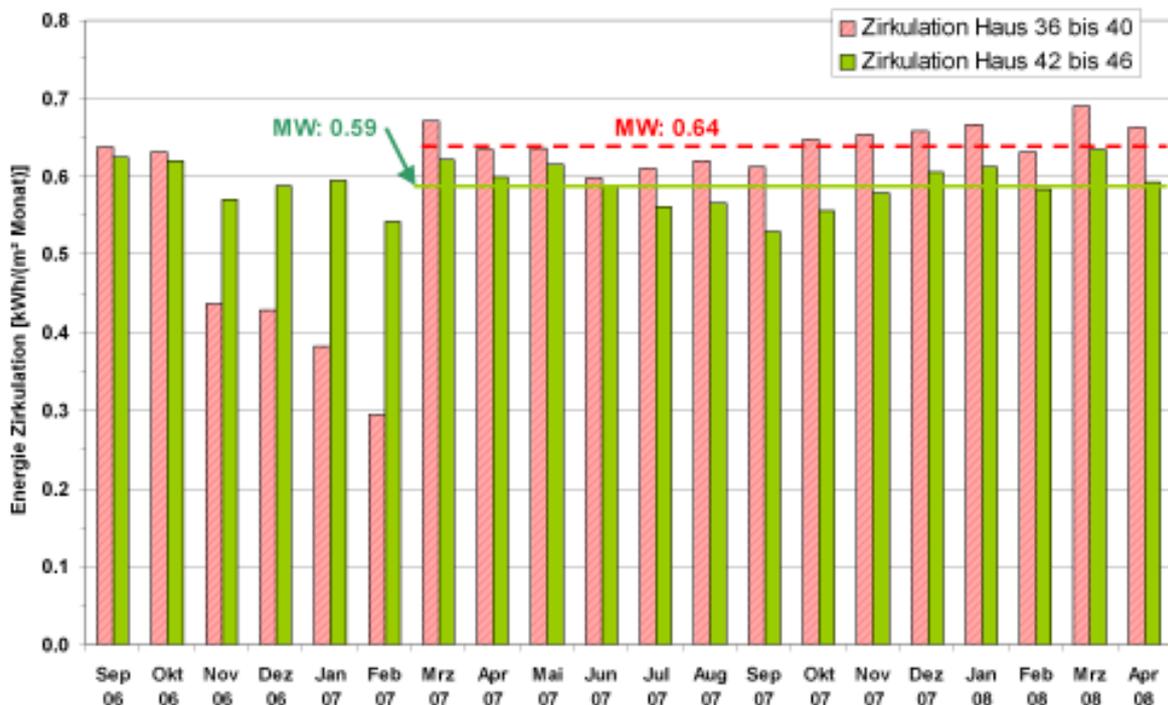


Abbildung 57: Energieaufwendung für den Zirkulationsbetrieb der beiden Anlagen im 6er Block während der Untersuchungszeit.

Die Stundendaten von beliebigen fünf Beispieltagen zeigen am gemessenen Volumenstrom der Zirkulationsleitungen die nächtlichen Unterbrechungen des Volumenstroms im 4er Block. Die Pumpen im 6er Block werden durchgehend betrieben. Der Volumenstrom im 4er Block ist mit Werten um 250 Litern/h höher als der der Einzelanlagen im 6er Block mit jeweils etwa 160 Litern/h.



**Abbildung 58: Volumenstrom der Zirkulationsleitung der drei Anlagen in den beiden Gebäuden in der Beispielzeit 15.01.2008 bis 19.01.2008 (Stundendaten).**

Die Darstellung in Abbildung 59 zeigt, dass durch die nächtliche Unterbrechung die Rücklauftemperatur der Zirkulation, wie zu erwarten ist, in den Betriebspausen abkühlt. Die anderen Rücklauftemperaturen bleiben auch während der Nacht auf gleichem Niveau. Insgesamt liegen die Warmwassertemperaturen im 6er Block höher als im 4er Block.

Durch die niedrigere Temperatur und insbesondere den zeitlichen Unterbrechungen ergibt sich im 4er Block eine Einsparung im Wärmeverbrauch, wie auch beim Pumpenstrom. Die Vorlauftemperatur entspricht etwa der gezapften Warmwassertemperatur. Sie liegt im 4er Block an den Beispieltagen im Mittel bei 55,8 °C wogegen die beiden anderen Anlagen mit 63,3 bzw. 61,3 °C deutlich höher liegen. Klagen von den Bewohnern über eine Komforteinbuße durch die Unterbrechung sind nicht bekannt. In Tabelle 14 ist der Erfolg auf der thermischen Seite ablesbar: Während der Wärmebedarf im ersten Jahreszeitraum in beiden Gebäuden noch gleichauf liegt, ergibt sich im zweiten Bilanzzeitraum ein Unterschied von 1,5 kWh/(m<sup>2</sup>a). Die im 4er Block ausgeführten Verbesserungen durch z.B. eine sehr einfache Schaltuhr sind leider nicht auch im 6er Block umgesetzt worden.

Betrachtet man nur die Mittelwerte der letzten gleichbleibenden Monatswerte in Abbildung 56 und Abbildung 57 liegt der Wert im 4er Block um  $0,09 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{Monat})$  niedriger, das entspricht im Jahr  $1,08 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Im 6er Block entspricht das einer Energiemenge von absolut  $2420 \text{ kWh}$ . Bei moderatem Ansatz des Wärmepreises von  $0,08 \text{ €/kWh}$  ergibt das eine jährliche Einsparung von rund  $190,- \text{ €/a}$ . Dabei ist der eingesparte Strom noch nicht berücksichtigt. Mit der jährlichen Einsparung ließen sich jedes Jahr mehrere Schaltuhren installieren.

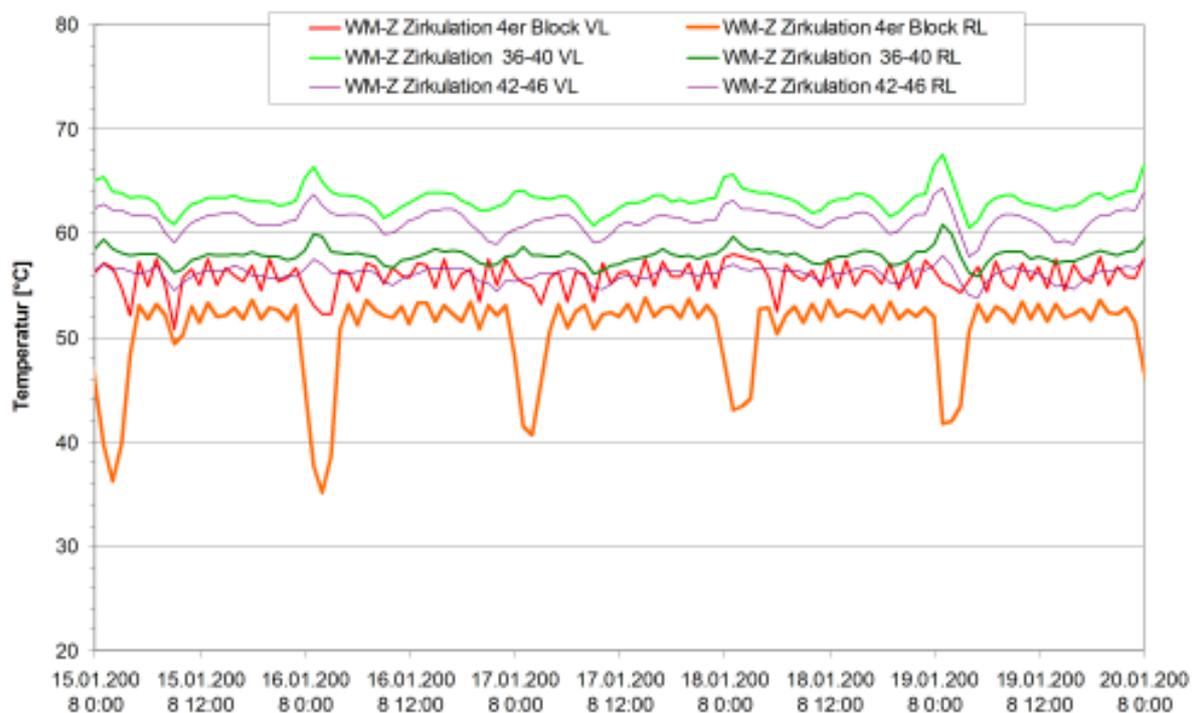


Abbildung 59: Vor- und Rücklauftemperaturen der Zirkulationsleitungen der drei Anlagen während der Beispielzeit 15.01.2008 bis 19.01.2008 (Stundendaten).

Tabelle 14: Summen der beiden Jahresbilanzzeiträume für die spezifischen Energieverbräuche des Zirkulationsbetriebs.

Zirkulation $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	Summe Aug. 06 - Juli 07	Summe Mai 07 - April 08
4er Block	6,5	5,9
6er Block	6,4	7,4

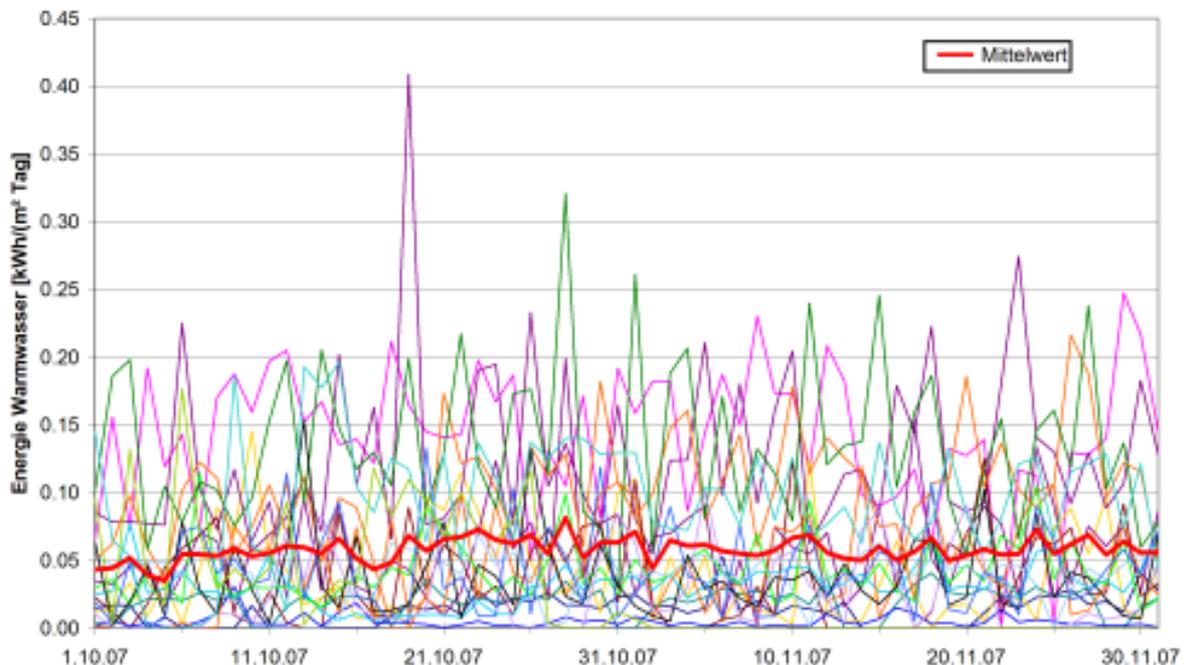
### 4.3.3.2 Energie Warmwasser Einzelwohnungen

Mit dem im Abschnitt 3.1.2 beschriebenen, speziell entwickeltem Messverfahren können die tatsächlichen Energiemengen der Warmwasserversorgung der einzelnen Wohnungen des 4er Blocks bestimmt werden. Dazu sind die gemessenen Ener-

giemengen, Volumenströme und die Warmwasser- wie auch die „konstante“ Rücklauf-temperatur notwendig. Außerdem wird die Kaltwassertemperatur vom Hauptwasseranschluss im Keller benötigt. Die Daten werden in der zeitlich maximalen Auflösung (10 min Daten) verrechnet.

Mit den Energiemengen der Warmwasserverbräuche kann die Nutzerstreuung auch in diesem Bereich quantitativ beschrieben werden. Der Anteil der Wärmemenge, der durch die Warmwasserverteilung nicht in den Wohnungen verbraucht wird kann so ebenfalls bestimmt werden.

Die Warmwasserenergiemengen streuen wie erwartet relativ stark: Während der zweiten Bilanzperiode wurde der maximale Wert mit  $0,56 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{Tag})$  festgestellt, der Mittelwert des Zeitraumes beträgt  $0,054 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{Tag})$ . In dem beispielhaften Zeitausschnitt vom 01.10. bis zum 30.11.2007 in Abbildung 60 (Tageswerte) ist die starke Streuung zu erkennen.



**Abbildung 60: Tageswerte der gemessenen Warmwasserenergiemengen der 19 Wohnungen und des flächengewichteten Mittelwertes im 4er Block während der Beispielzeit 01.10. bis 30.11.2007.**

Die Darstellung der Monatssummen der Energiemengen des Warmwasserverbrauchs der 19 Wohnungen in Abbildung 61 zeigt deutlicher die großen Unterschiede zwischen den Wohnungen. Am Mittelwert ist auch der jahreszeitliche Unterschied zwischen Sommer und Winter zu erkennen: Das Minimum des mittleren Wertes wird im Sommer mit  $1,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{Monat})$  festgestellt; im Winter steigt der Verbrauch bis maximal  $2,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{Monat})$  an.

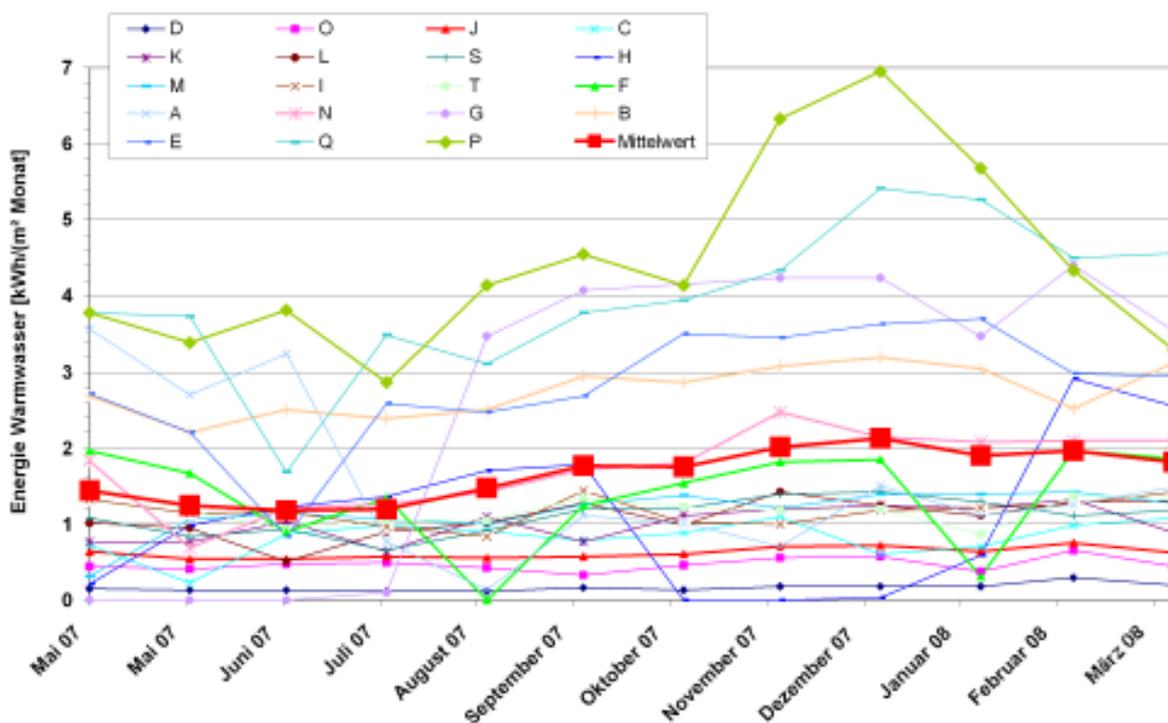


Abbildung 61: Monatssummen der gemessenen Warmwasserenergiemengen der 19 Wohnungen und des flächengewichteten Mittelwertes im 4er Block im zweiten Bilanzjahr.

Die Verbrauchssummen der 19 Wohnungen während der beiden Bilanzzeiträume sind in Abbildung 62 dargestellt. Der gesamte Mittelwert im zweiten Bilanzjahr beträgt **19,9 kWh/(m<sup>2</sup>a)**. Auch hier zeigen sich sehr große Unterschiede zwischen den Wohnungswerten aufgrund des unterschiedlichen Nutzerverhaltens (Nutzerstreuung). Dabei ist zu beachten, dass insbesondere im ersten Bilanzzeitraum einige Wohnungen nicht den gesamten Zeitraum bzw. in zwei Fällen gar nicht bewohnt waren. Im zweiten Bilanzzeitraum sind davon nennenswert nur zwei Wohnungen betroffen. Ganz besonders ins Auge fällt der extrem unterschiedliche Verbrauch in Wohnung „A“, der einen Mieterwechsel als Ursache hat.

Im zweiten Bilanzjahr liegen die spezifischen Werte zwischen 2,0 und 53,2 kWh/(m<sup>2</sup>a), was einem Faktor von 27 entspricht. Es sind damit sehr große Unterschiede in der Warmwassernutzung festzustellen: Der geringste Verbrauch liegt 90 % unter, der höchste Verbrauch 167 % über dem Mittelwert. Die Standardabweichung beträgt 13,9 kWh/(m<sup>2</sup>a), die Standardabweichung vom Mittelwert 3,2 kWh/(m<sup>2</sup>a).

Das PHPP setzt einen Warmwasserverbrauch von 25 Liter/(Person Tag) bei 60 °C als Standard an. Das entspricht bei der angenommenen Energiebezugsfläche von 35 m<sup>2</sup>/Person einem Energieaufwand von 15,1 kWh/(m<sup>2</sup>a). Der hier gemessene Wert von 19,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) liegt etwas höher, vermutlich ist die Wohnfläche pro Person allerdings auch geringer.

Der weiter oben in Tabelle 13 ausgewiesene Energieinhalt der dem Speicher entnommenen Warmwassermenge (zweites Bilanzjahr) von 21,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) liegt damit um 2,0 kWh/(m<sup>2</sup>a) höher als der in den Wohnungen gemessene Verbrauchsmittelwert. Diese Differenzenergiemenge wird bei der Verteilung des Warmwassers an das Gebäude abgegeben. Insgesamt muss für die Verteilung allerdings deutlich mehr Energie aufgewendet werden, da auch die Zirkulation berücksichtigt werden muss (siehe vorheriger Abschnitt).

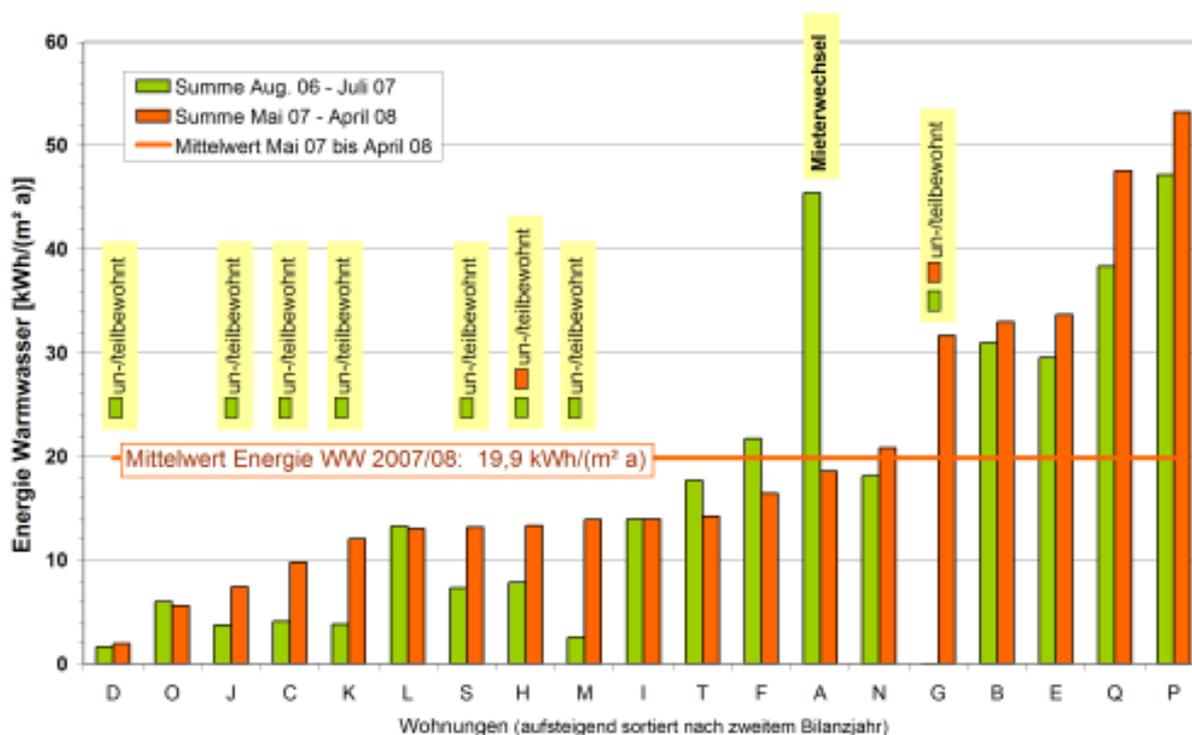
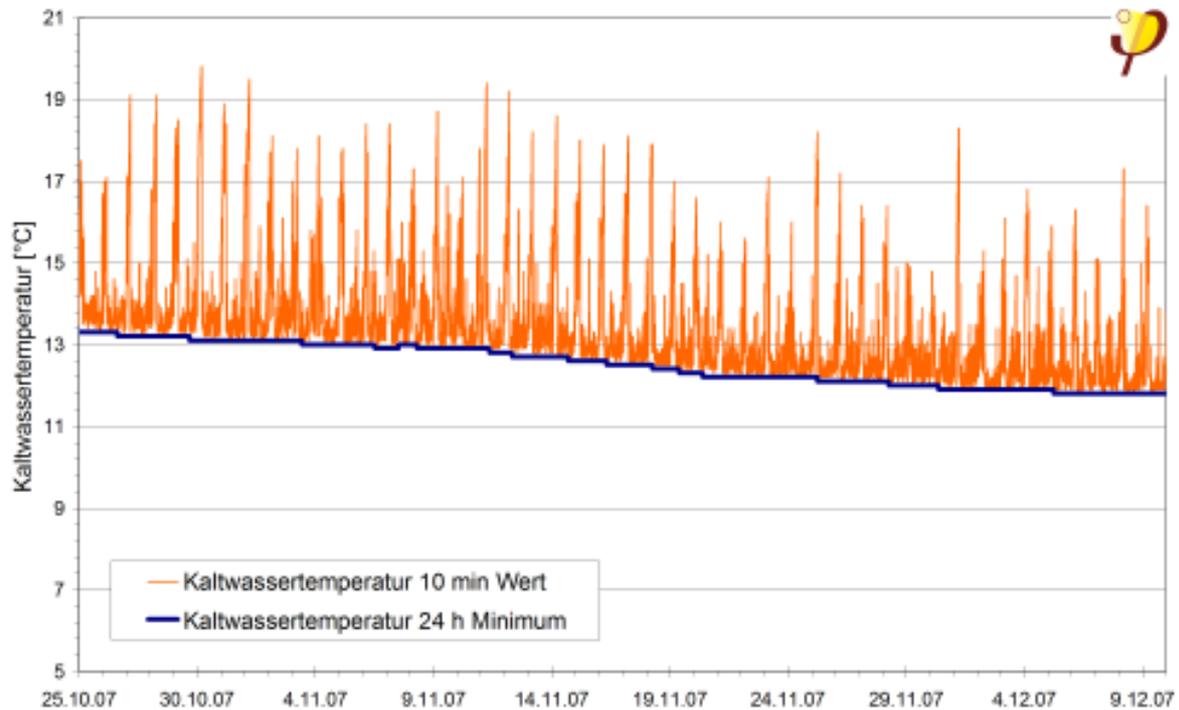


Abbildung 62: Energieinhalt des verbrauchten Warmwassers der 19 Wohnungen im 4er Block für beide Jahresbilanzzeiträume sowie der Mittelwert für den zweiten Bilanzzeitraum. Die Wohnungen sind aufsteigend sortiert nach dem Verbrauch im zweiten Bilanzzeitraum dargestellt. Wohnungen die un- oder teilbewohnt waren sind gesondert gekennzeichnet ebenso ein Mieterwechsel.

### Kaltwassertemperatur

Für die Ermittlung der Warmwasser-Energiemengen je Wohnung, wurde die Kaltwassertemperatur benötigt. Die Erwärmung des Kaltwassers im Technikeller bei geringer bzw. unterbrochener Zapfung muss als Störung dieser Temperaturmessung ausgeschlossen werden. Daher wurden aus den 10-Minuten Daten der Kaltwassertemperatur vom WMZ „Konst-Temp“ im Kaltwasserzulauf des Gebäudes die 24-Stunden Minima verwendet. Die Wasserleitung ist etwa in 1,2 m unterhalb der Außenoberfläche in das Gebäude eingeführt.

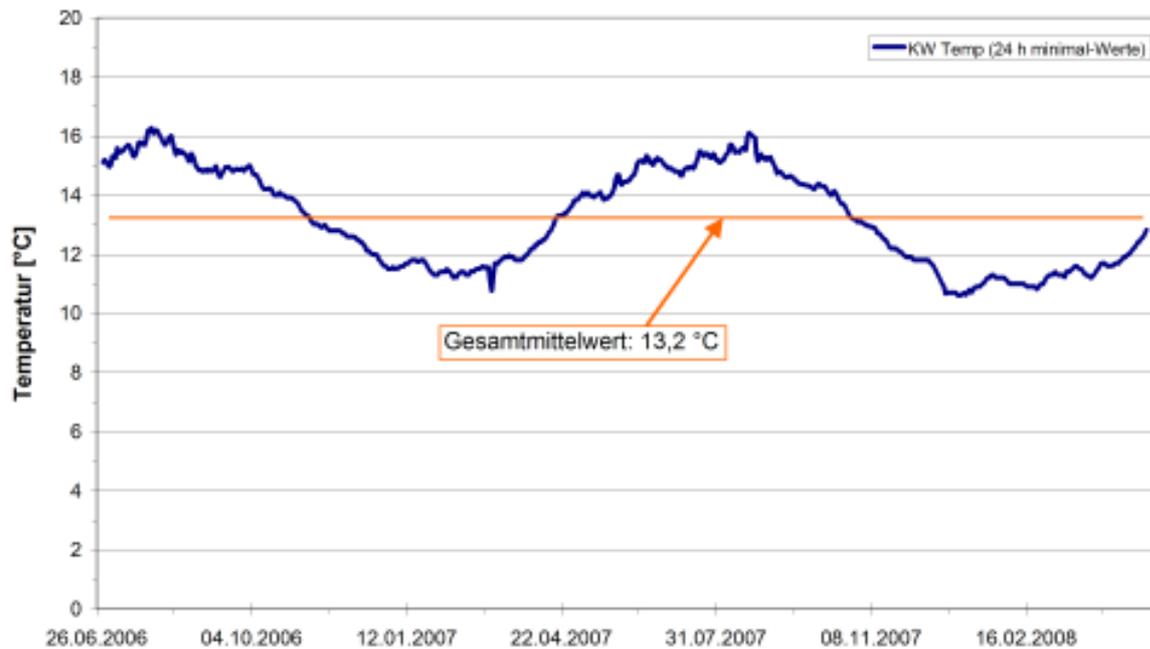
Die gemessenen Temperaturen liegen zeitweise um mehr als 7 K höher als die festgestellten Kaltwassertemperatur (Minimalwerte). In Abbildung 63 ist für einige Wochen der Zusammenhang grafisch dargestellt.



**Abbildung 63: Detail der gemessenen Kaltwassertemperatur der Hauptwasserleitung im Keller von Block 4 vom 25.10. bis zum 9.12.2007. Dargestellt ist auch der Verlauf der zugehörigen 24-Stunden Minimalwerte, der aus den 10-Minuten Messdaten bestimmt wurde.**

In Abbildung 64 ist die ermittelte und für die Berechnungen verwendete Kaltwassertemperatur für den gesamten Messzeitraum dargestellt. Minimal sind 10,6 °C, maximal 16,3 °C gemessen worden. Es ist deutlich die jahreszeitliche Schwingung der Temperatur ablesbar. Üblicherweise werden Kaltwassertemperaturen von 10 bis 12 °C angenommen. Bei dieser Messung liegen die Werte deutlich darüber.

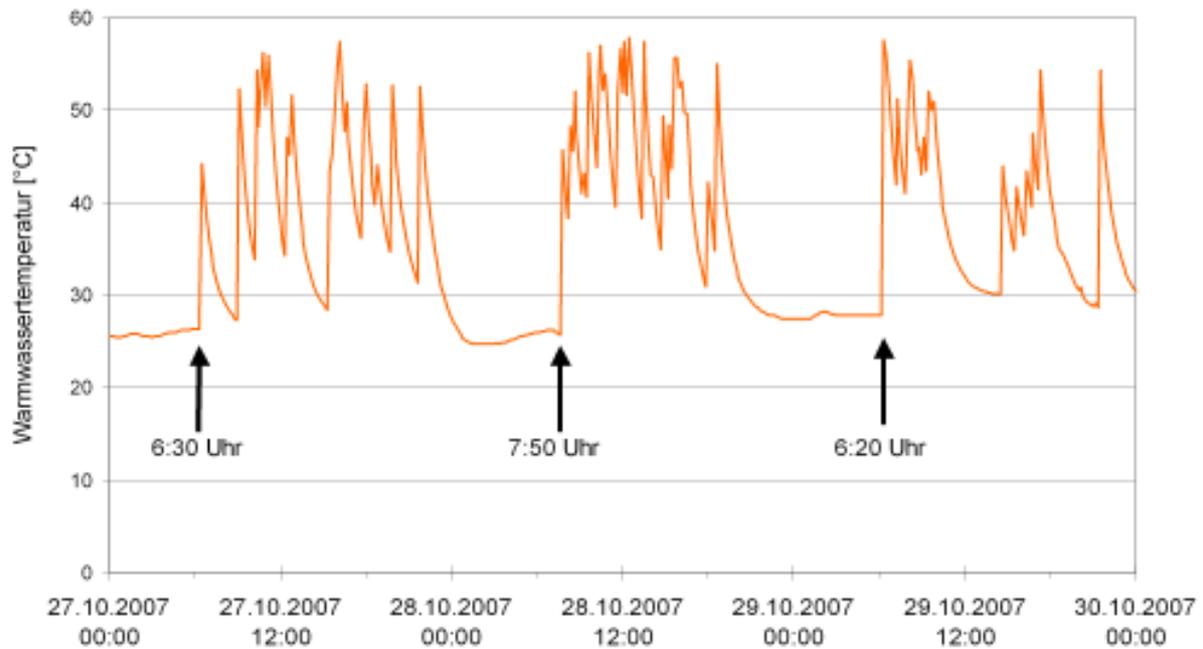
Der Mittelwert des gesamten Messzeitraumes wurden mit 13,2 °C gemessen (01.07.2006 bis 30.4.2008), im zweiten Bilanzjahr liegt er mit 13,1 °C fast gleichauf.



**Abbildung 64:** Kaltwassertemperatur der Hauptwasserleitung im Keller von Block 4 während der gesamten Messzeit. Dargestellt ist der Verlauf der gleitenden 24-Stunden Minimalwerte, der aus den 10-Minuten Temperaturdaten ermittelt wurde.

## Warmwassertemperatur

Die Warmwassertemperaturen werden von den WMZ für den Warmwasserverbrauch in den Wohnungen aufgezeichnet. Sie steigen bei längeren Zapfvorgängen auf das tatsächlich vorhandene Temperaturniveau, erreichen dies bei Kurzzapfungen dagegen nicht. Wenn über eine längere Zeit nicht gezapft wird, kühlt sich die gemessene Wassertemperatur langsam ab in Richtung des Temperaturniveaus des umgebenen Raums. An Hand des Beispiels der 10-Minuten Messdaten einer Wohnung können so sehr gut die einzelnen Zapfvorgänge und die Nachtpausen festgestellt werden (Abbildung 65).



**Abbildung 65: Beispiel eines Warmwassertemperaturverlaufs einer Wohnung im 4er Block über drei Tage im Oktober 2007 (10-Minuten Daten).**

Anhand der maximalen Warmwassertemperaturen kann das tatsächlich vorhandene Warmwasserniveau in den Wohnungen ermittelt werden. Die Messwerte liegen zwischen 53,6 und 57,6 °C, wobei die Temperaturen mit größerer Entfernung zum Warmwasserspeicher im Keller von Haus 48 abnehmen. Die kleinste Temperatur wurde in Haus 54 die höchste in Haus 48 festgestellt. Der Mittelwert der maximalen Warmwassertemperaturen im Zeitraum Oktober 2007 bis April 2008 beträgt 55,4 °C.

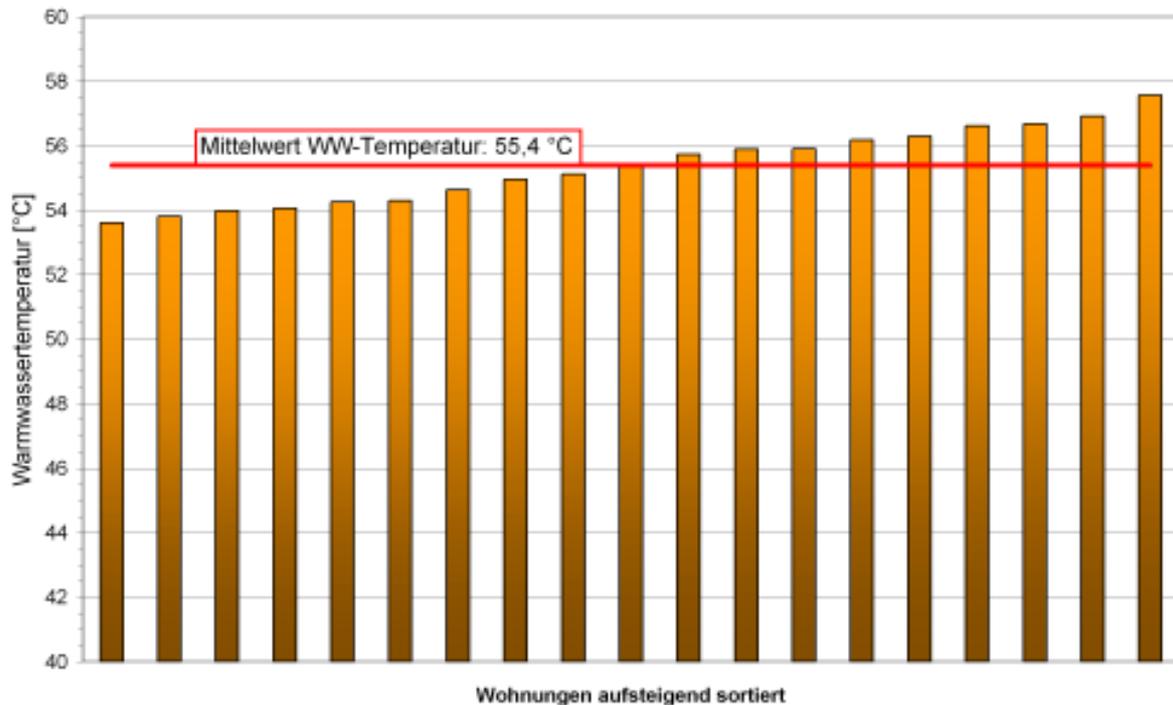


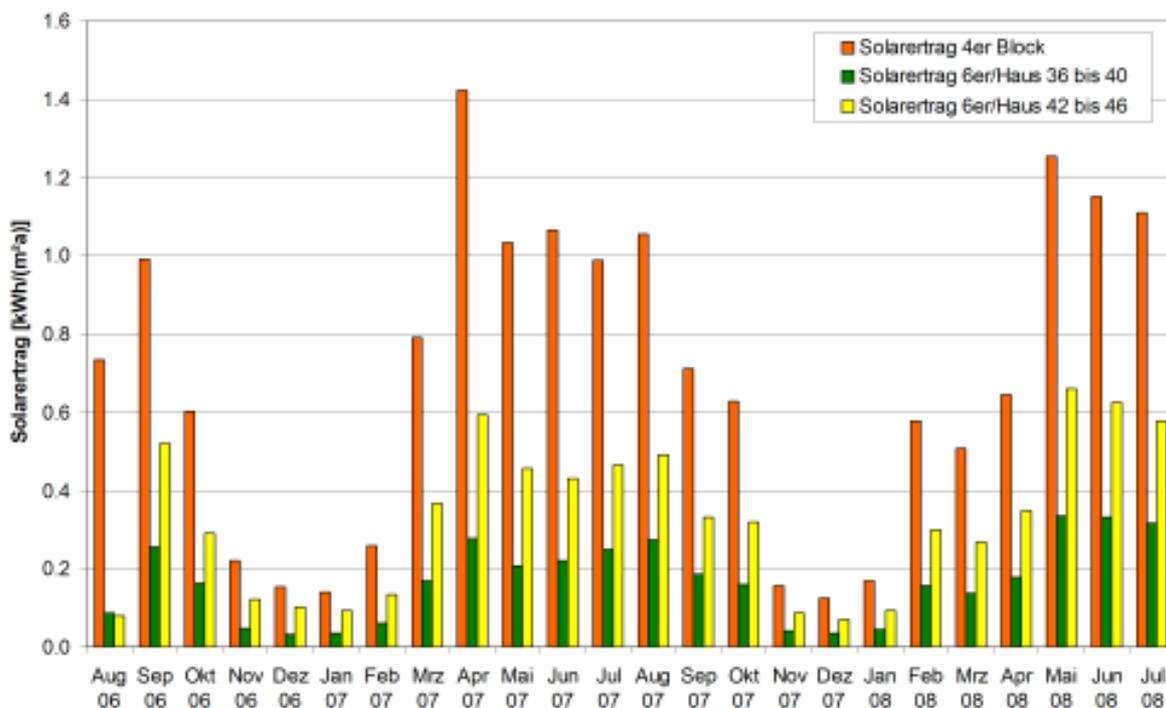
Abbildung 66: Mittelwerte der maximalen Warmwassertemperaturen der 19 Wohnungen (6er Block) im Zeitraum Oktober 2007 bis April 2008 und der gesamte Mittelwert.

### 4.3.3.3 Solare Warmwasserbereitung

Zur Unterstützung der Warmwasserversorgung sind auf den Gebäuden thermische Solaranlagen installiert. Sie sind südausgerichtet. Auf dem 4er Block ist ein mehrreihiges, aufgeständertes Feld aus 10 Modulen auf dem Flachdach installiert. Auf dem 6er Block sind auf den sechs Schrägdächern über den Treppenhäusern jeweils drei Module montiert. Die gesamte Absorberfläche der Anlage auf dem 4er Block beträgt 23 m<sup>2</sup>, für die Anlagen von Haus 36 bis 40 und Haus 42 bis 46 jeweils 20,7 m<sup>2</sup> (Summe 6er Block: 41,4 m<sup>2</sup>). Im 4er Block stehen damit durchschnittlich pro Wohneinheit nur 1,2 m<sup>2</sup> Absorberfläche zur Verfügung, im 6er Block sind es fast gleichauf nur 1,3 m<sup>2</sup> pro WE. Anders ausgedrückt stehen in beiden Gebäuden 180 cm<sup>2</sup> Absorberfläche je m<sup>2</sup> Energiebezugsfläche zur Verfügung. Es handelt sich damit um verhältnismäßig kleine Anlagen.

Nach der Inbetriebnahme der Solaranlage vom 4er Block im Juli 2006 wurde vom PHI bei der regelmäßigen Datenkontrolle festgestellt, dass die Anlage täglich Vormittags gegen ca. 11:00 Uhr abschaltet und keine Energie mehr eingespeichert wird. Mitte August wurde das Problem durch die ausführende Firma als fehlerhafte Reglereinstellung erkannt und behoben. Es wurde nicht planungsgemäß vom Solarspeicher in den Warmwasserspeicher umgepumpt.

Messdaten der Solar-Wärmezähler liegen vom 4er Block ab dem 13.07.2006 und vom 6er Block ab dem 16.08.2006 vor.



**Abbildung 67: Spezifischer Solarertrag der drei Solaranlagen während der gesamten Messzeit. Die Anlagen auf dem 6er Block gingen erst etwa Mitte August in Betrieb.**

Beim Verlauf der Ertragsmessdaten ist neben dem deutlichen Jahresgang Sommer/Winter bereits zu erkennen, dass die ähnlich großen Anlagen des 6er Blocks gegenüber dem 4er Block deutlich weniger Ertrag erwirtschaftet.

Die Spitzenwerte der Erträge liegen im 4er Block bei über 1,4 kWh/(m²a) im 6er Block/Haus 42 bis 46 sind es maximal 0,66 kWh/(m²a). Die Anlage von Haus 36 bis 40 erbringt nochmals deutlich weniger Ertrag. Auch dabei muss berücksichtigt werden, dass der 6er Block geringer belegt war und dadurch die Warmwasserabnahme geringer ausfällt. Wenn der Speicher noch aufgeheizt ist, kann nur weniger oder sogar keine weitere Wärme eingespeichert werden. Haus 36 bis 40 war noch deutlich geringer belegt als Haus 42 bis 46.

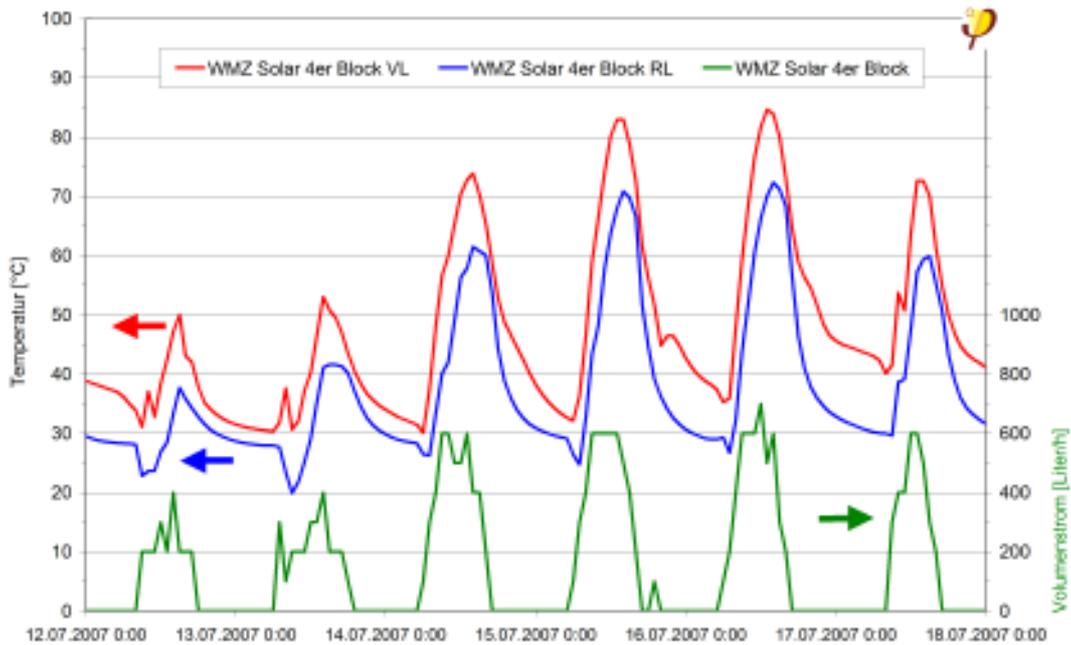
Die Jahressummen der beiden Bilanzzeiträume zeigen den drastischen Unterschied zwischen den Erträgen.

**Tabelle 15: Summen der beiden Jahresbilanzzeiträume für den spezifischen Solarertrag.**

<b>Solarertrag kWh/(m²a)</b>	<b>Summe Aug. 06 - Juli 07</b>	<b>Summe Mai 07 - April 08</b>
4er Block	8,4	7,7
6er Block / Haus 36 – 40	1,8	1,9
6er Block / Haus 42 – 46	3,7	3,7

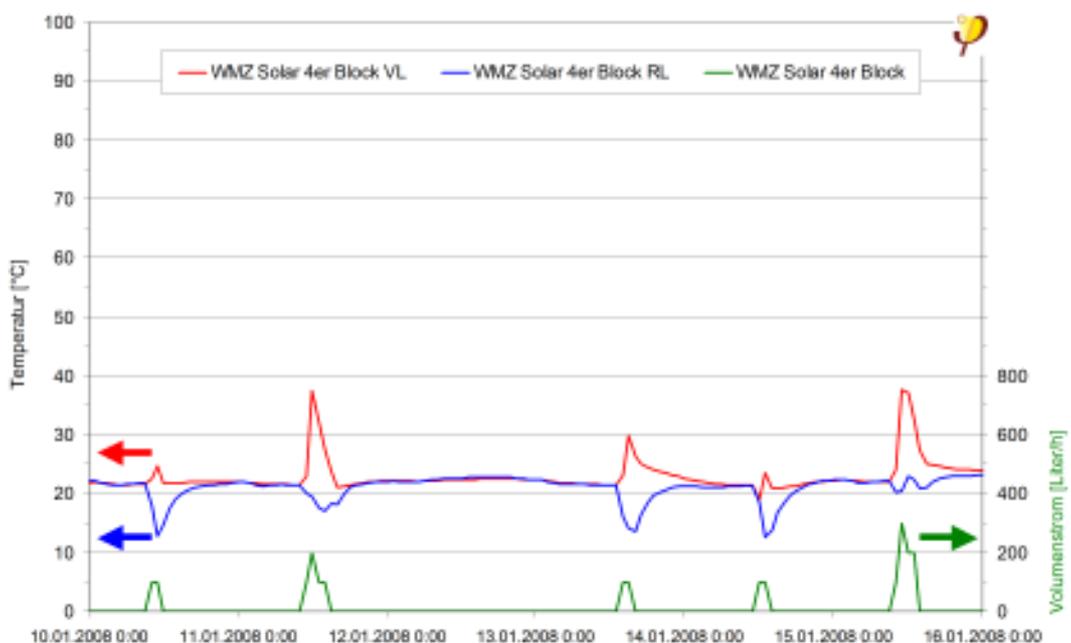
Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 68 die Vor- und Rücklauf temperaturverläufe sowie die Volumenströme der Anlage auf dem 4er Block während einer Hitzeperiode

mit hohen Einstrahlungswerten im Juli 2007 dargestellt. Die Vorlauftemperatur steigt bis ca. 85 °C an, die Pumpe fördert bis über 600 Liter pro Stunde.



**Abbildung 68: Vor- und Rücklauftemperaturen sowie Volumenstrom der Solaranlage des 4er Blocks während einer Hitzeperiode im Sommer 2007 (Stundendaten).**

Zum Vergleich dazu zeigen die Daten von typischen, strahlungsarmen Wintertage fast keinen Solaranlagenbetrieb (Abbildung 69). Die Energieerträge der dargestellten Zeiträume im Sommer und Winter sind dementsprechend grundlegend unterschiedlich (Tabelle 16).



**Abbildung 69: Vor- und Rücklauftemperaturen sowie Volumenstrom der Solaranlage des 4er Blocks an beispielhaften Wintertagen im Januar 2008 (Stundendaten).**

Tabelle 16: Summen der absoluten Solarerträge in den Beispielzeiträume im Sommer und Winter von je 5 Tagen.

Absoluter Solarertrag [KWh]	Summe von sechs Sommertagen 12.07. – 17.07.2007	Summe von sechs Wintertagen 10.01. – 15.01.2008
4er Block	319	26
6er Block / Haus 36 – 40	71	6
6er Block / Haus 42 – 46	127	14

Dass die drei Anlagen aufgrund der gleichen Ausrichtung nahezu zeitgleich reagieren ist Abbildung 70 zu entnehmen. Man erkennt hier wieder den deutlichen Unterschied zwischen den Ertragsmengen. Auch die Darstellung der Erträge in den beiden Bilanzjahren bezogen auf die Absorberfläche, zeigt den deutlichen Unterschied (Abbildung 71).

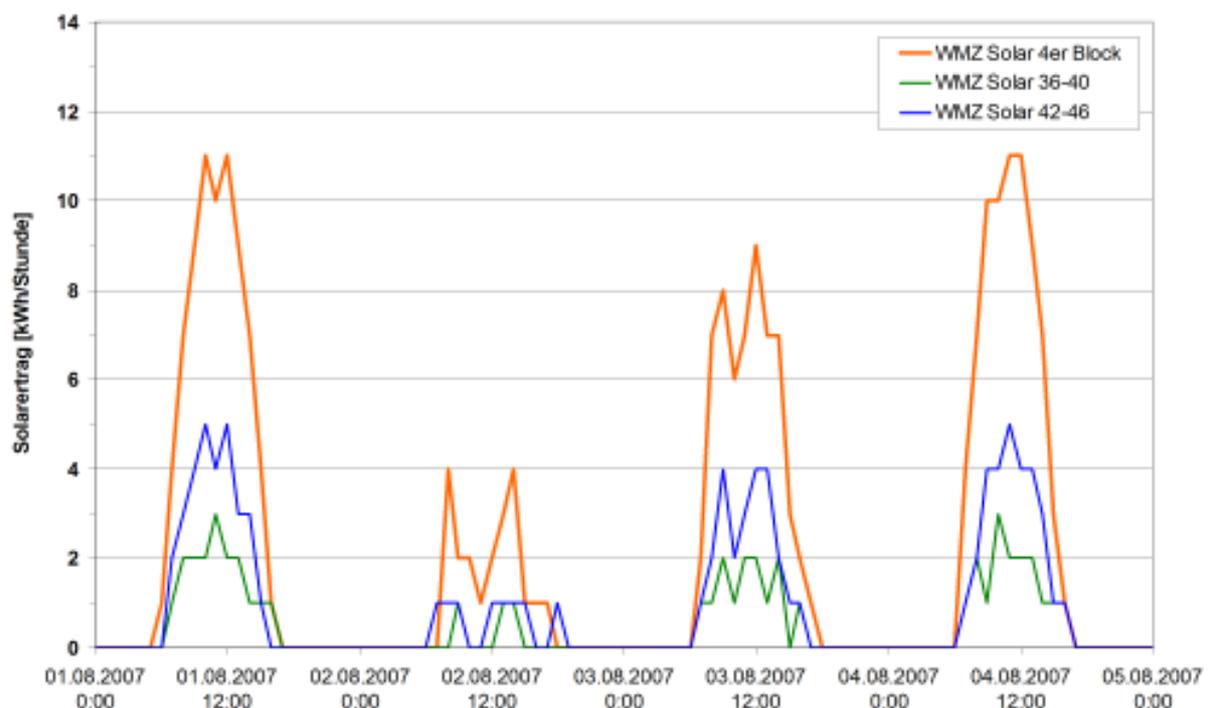


Abbildung 70: Solarerträge der drei thermischen Solaranlagen an vier beispielhaften Sommertagen im August 2007 (Stundendaten).

Der entscheidende Unterschied ist in der Verrohrung der Anlagen zu finden. Die Solarleitungen werden im 4er Block mit einer Vor- und einer Rücklaufleitung in einem Schacht durch die Geschosse in den Technikeller geführt. Im 6er Block ist die Situation ganz anders: Von jedem der 6 Felder ist eine eigene Vor- und Rücklaufleitung in den Keller geführt. Diese verlaufen auf der alten Außenfassade, in der neuen Außendämmung. Im Keller müssen die beiden jeweils äußeren Felder noch

zum Speicher im jeweils mittleren Hauseingang verspringen (etwa eine Hausbreite). Damit sind hier bei der vergleichbaren Kollektorfläche deutlich über drei mal so lange Leitungen verbaut worden. Hauptsächlich bedingt durch die damit auch deutlich höheren Verluste dieser Leitungen ist der Ertrag der beiden Anlagen so viel geringer.

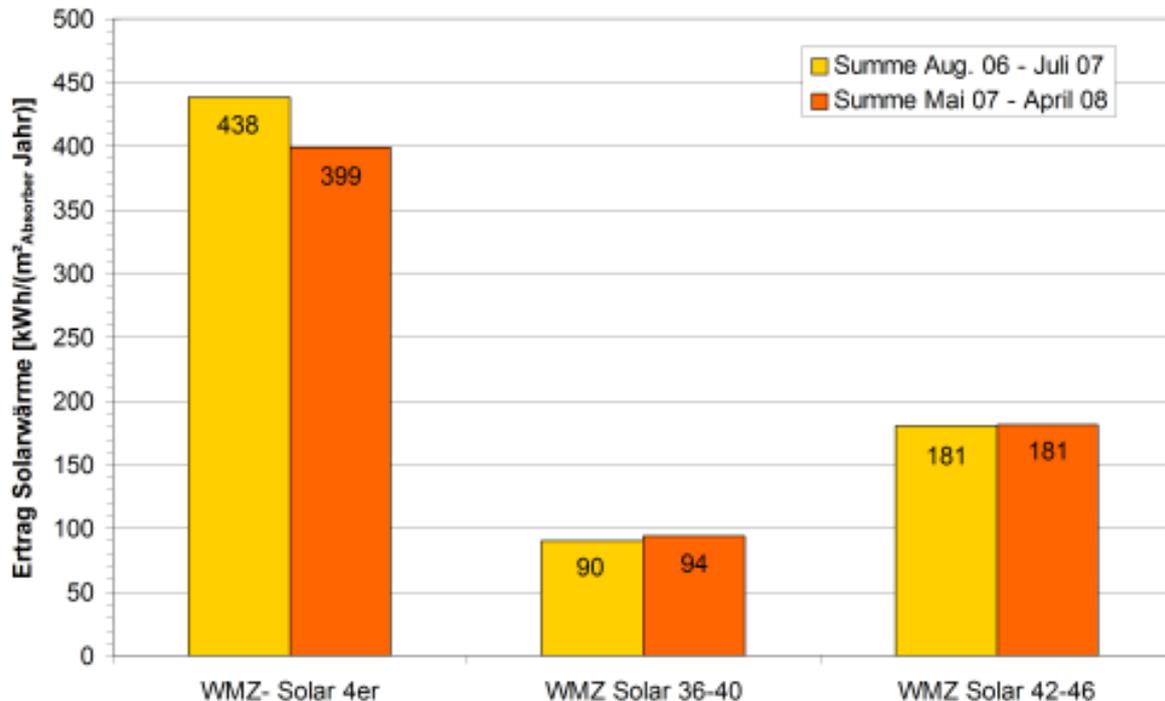


Abbildung 71: Spezifischer Solarertrag bezogen auf die Absorberflächen der drei Anlagen in den drei Bilanzzeiträumen.

#### 4.3.3.4 Bilanz Warmwasser

In einer Zusammenstellung der oben ausgewerteten Energieverbräuche der Warmwasserbereitung und dem Warmwasserverbrauch kann eine Gesamtbilanz der Wärmeströme erstellt werden. Im zweiten Bilanzjahr ergeben sich im 4er Block auf der Speicherladungsseite 20,7 kWh/(m<sup>2</sup>a) die vom Gaskessel erzeugt werden und 7,7 kWh/(m<sup>2</sup>a) die solarthermisch erzeugt werden. Der regenerativ erzeugte Anteil beträgt damit 27 %.

Der Jahresverbrauch der Warmwasserentnahme aus dem Speicher beträgt 19,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) zuzüglich der 2,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) für die Verteilung über die Rohrleitungen. Für den Ausgleich der Wärmeverluste der Zirkulationsleitung werden 5,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) benötigt. Der Bilanzrest enthält alle Messunsicherheiten und den Speicherwärmeverlust. Daher wurde der reine Speicherwärmeverlust theoretisch zu 1,8 kWh/(m<sup>2</sup>a) ermittelt.

Im 6er Block ergibt sich ein ähnliches Bild, die Warmwasserbeladung und -entnahme fallen insgesamt, aufgrund der niedrigeren Belegung, geringer aus. Der Solarertrag ist wie beschrieben mit nur 2,8 kWh/(m²a) deutlich geringer. Die dauerhaft betriebene Zirkulation führt zu spezifisch höheren Verbrauchswerten.

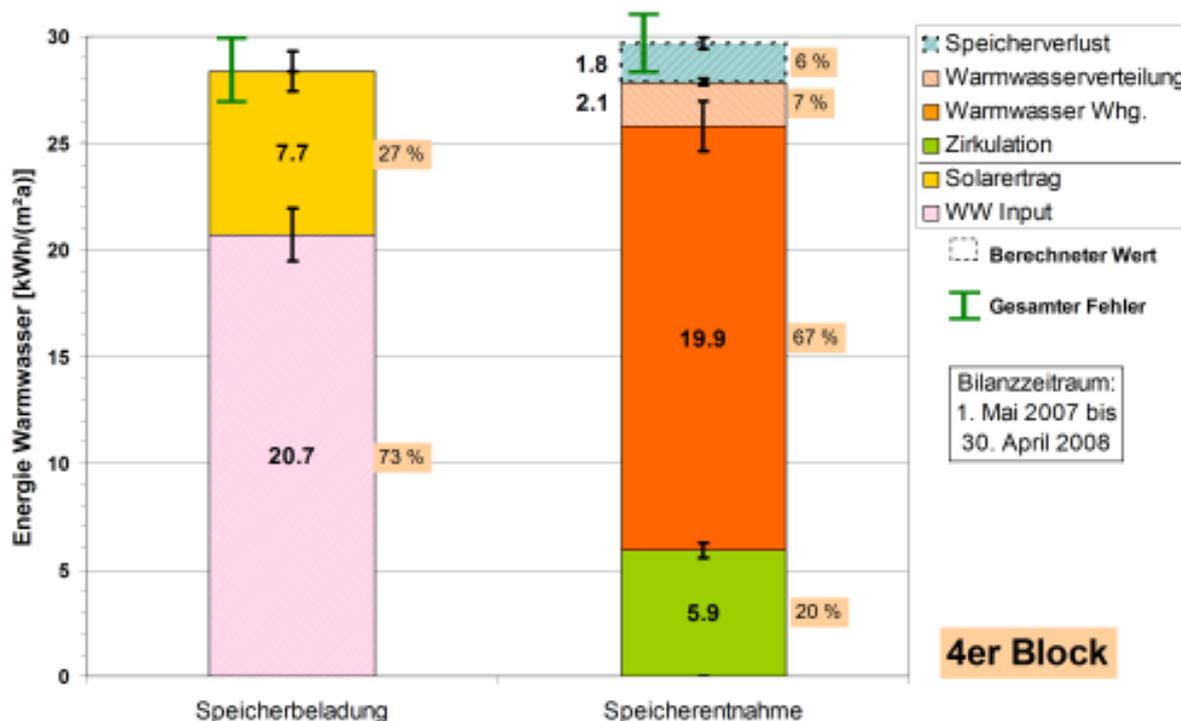


Abbildung 72: Energieverbrauch zur Warmwasserversorgung im 4er Block (2. Bilanzjahr).

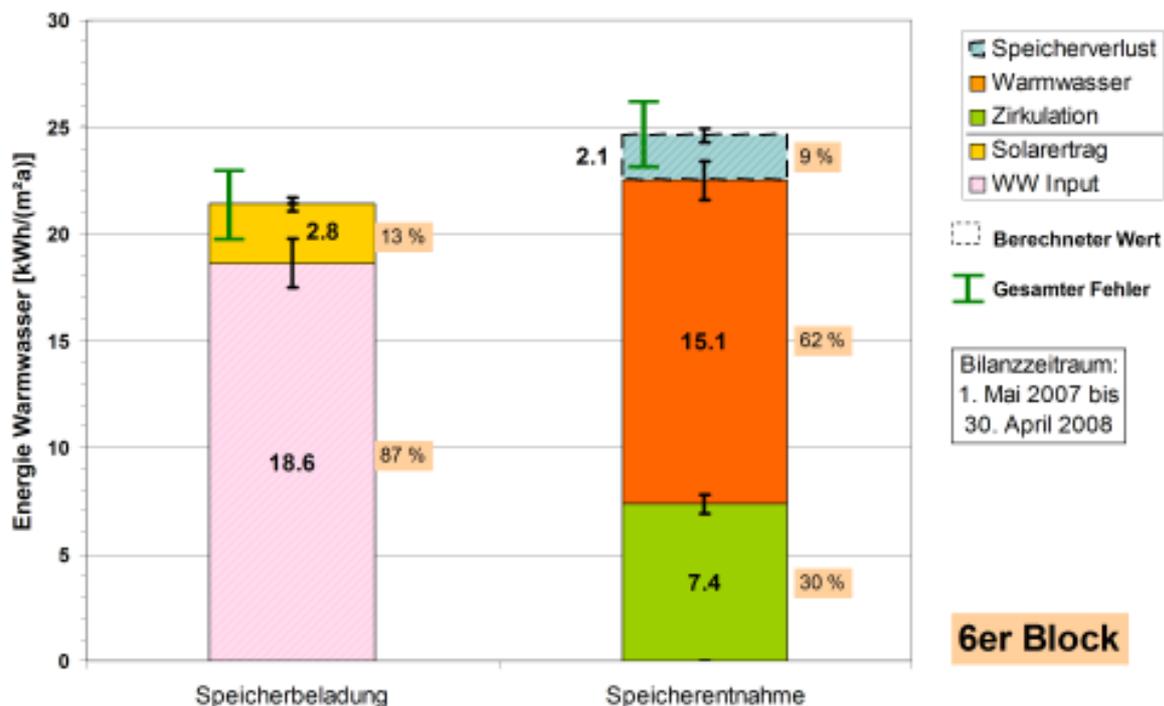


Abbildung 73: Energieverbrauch zur Warmwasserversorgung im 6er Block (2. Bilanzjahr).

### 4.3.4 Warmwassermenge

Die Warmwassermengen der einzelnen Wohnungen werden über die Wärmemengenzähler in den Wohnungen ebenfalls erfasst. Der gemessene Warmwasserverbrauch schwankt im zweiten Bilanzjahr zwischen 54 und 1136 Liter/(m<sup>2</sup>a). Der gesamte Mittelwert aller Wohnungen im zweiten Bilanzjahr ergibt sich zu 443 Liter/(m<sup>2</sup>a). Damit wird deutlich mehr Warmwasser verbraucht als nach dem Standardansatz im PHPP, jedoch liegt bei dieser Messung die Warmwassertemperatur niedriger als die im PHPP angesetzten 60 °C und die Wohnfläche pro Person ist vermutlich geringer.

Auffällig ist wieder der deutliche Unterschied im Wasserverbrauch durch den Mieterwechsel in Wohnung „A“. Wie bei der energetischen Betrachtung müssen hier auch wieder die nur zum Teil be- bzw. unbewohnten Wohnungen berücksichtigt werden.

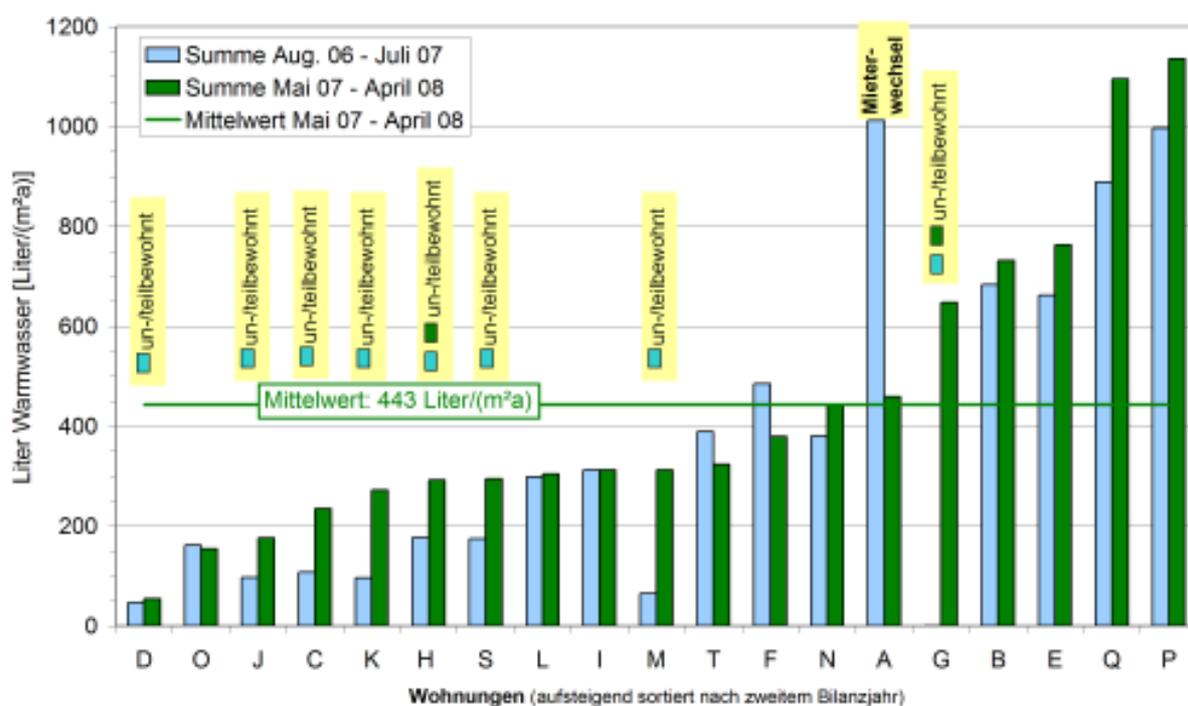


Abbildung 74: Warmwasserverbrauch der 19 Wohnungen (4er Block) im ersten und zweiten Bilanzjahr sowie der Mittelwerte vom zweiten Bilanzjahr.

## 4.4 Stromverbrauch

Mit den für die Messbegleitung in den Wohnungen des 4er Blocks montierten Stromzählern werden die elektrischen Verbräuche gemessen und über die Messdatenerfassung in 10 Minuten Auflösung abgefragt. Die Haushaltsstromverbräuche der einzelnen Wohnungen beinhalten alle Verbräuche der Haushaltsanwendungen. Dazu gehört die Beleuchtung, Kochen, Waschmaschine, PC, TV und div. elektronische Kleingeräte. Die Warmwasserbereitung erfolgt nicht elektrisch, sondern wie oben beschrieben zentral über die Gaskessel. Zusätzlich beinhalten die Stromverbräuche der Wohnungen auch noch den Lüftungsstrom (inkl. elektrischem Frostschutz und der kompletten Regelung).

Die Messwerte der 19 zentralversorgten Wohnungen des 4er Blocks ergeben Haushaltsstromverbräuche zwischen 4,8 und 69,9 kWh/(m<sup>2</sup>a). Der gesamte **Mittelwert der 19 Wohnungen** ergibt sich im zweiten Bilanzjahr zu **33,0 kWh/(m<sup>2</sup>a)**. Die Einzelwerte, auch des ersten Bilanzjahres, sind Abbildung 75 zu entnehmen. Insbesondere bei den Messdaten des ersten Jahreszeitraumes muss wieder berücksichtigt werden, dass nicht alle Wohnungen dauerhaft bewohnt waren.

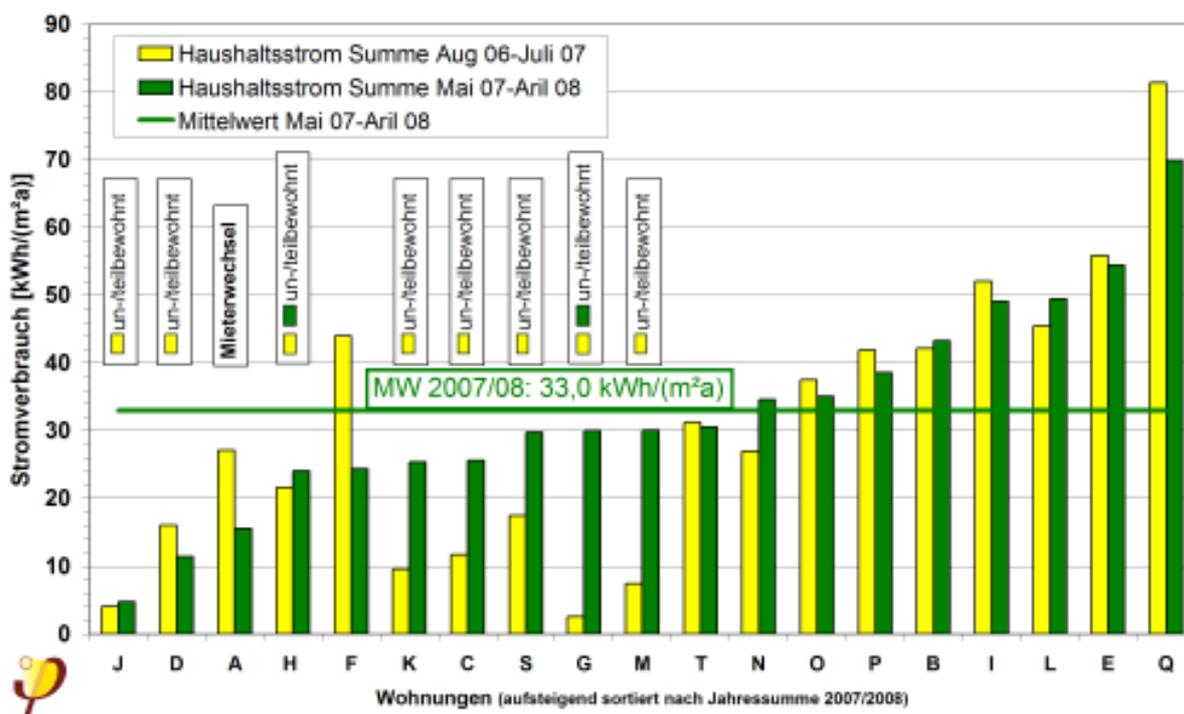
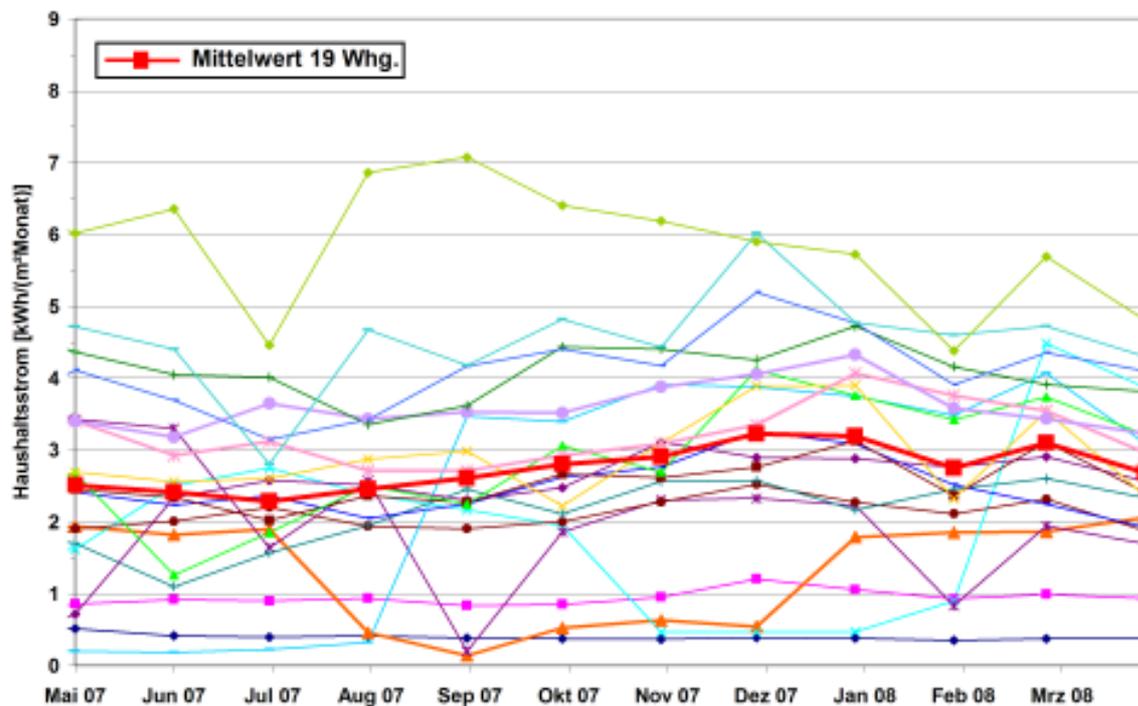


Abbildung 75: Haushaltsstromverbrauch inkl. Lüftungsstrom der 19 Wohnungen im 4er Block für die beiden Bilanzzeiträume.

Der Verlauf der monatlichen Stromverbräuche im zweiten Bilanzjahr in Abbildung 76 zeigt die sehr unterschiedlichen Nutzungen in den Wohnungen. Der eingetragene, flächengewichtete Mittelwert lässt die jahreszeitlichen Unterschiede deutlich werden: Der minimale mittlere Monatsverbrauchswert wird im Juli 2007 mit 2,3 kWh/

(m<sup>2</sup> Monat) gemessen. Im Winter steigt der Mittelwert bis auf 3,2 kWh/(m<sup>2</sup> Monat) an (Dezember 2007).



**Abbildung 76:** Verlauf des Haushaltsstromverbrauchs der 19 Wohnungen und des flächengewichteten Mittelwertes des 4er Blocks im zweiten Bilanzjahr (Monatswerte). In den elektrischen Verbräuchen sind die Lüftungsgeräte enthalten.

Betrachtet man die spezifische elektrische Leistung nur an einem einzelnen, typischen Wintertag ist ein deutlicher Tagesgang zu erkennen (Abbildung 77). Eine Wohnung war zu dieser Zeit nicht bewohnt, die Leistung ist daher hier nicht dargestellt. Die höchsten Leistungen werden in den Abendstunden gemessen. Der höchste flächengewichtete Mittelwert wurde mit 8,4 W/m<sup>2</sup> um 20:00 Uhr gemessen. In den Nachtstunden liegen die Mittelwerte um 1,6 W/m<sup>2</sup>. Insgesamt gesehen sind die Unterschiede zwischen den Wohnungen sehr groß, es werden Leistungsspitzen bis 41 W/m<sup>2</sup> gemessen. Hier macht sich das Nutzerverhalten sehr stark bemerkbar; die Ausstattung mit Geräten, deren Qualität und die Nutzungsweise.

Der deutliche Unterschied zwischen den Wohnungen bzw. deren Nutzern wird auch sichtbar, wenn man sich eine ganze Winterwoche mit typischen elektrischen Leistungswerten ansieht. In Abbildung 78 sind die minimalen und die maximalen spezifischen Leistungen sowie der flächengewichtete Mittelwert der 18 bewohnten Wohnungen dargestellt. Auch hier sind die Tagesgänge gut erkennbar. Die Minimalwerte stammen fast durchgängig von einer Wohnung. In dieser wird die Lüftungsanlage - wenn überhaupt - nur zeitweise betrieben. Ob ein Kühlschrank als „Dauerverbraucher“ vorhanden war bzw. genutzt wurde und zeitweise abgeschaltet werden, bleibt unklar. Es wird längere Zeit keine elektrische Leistung abgenommen.

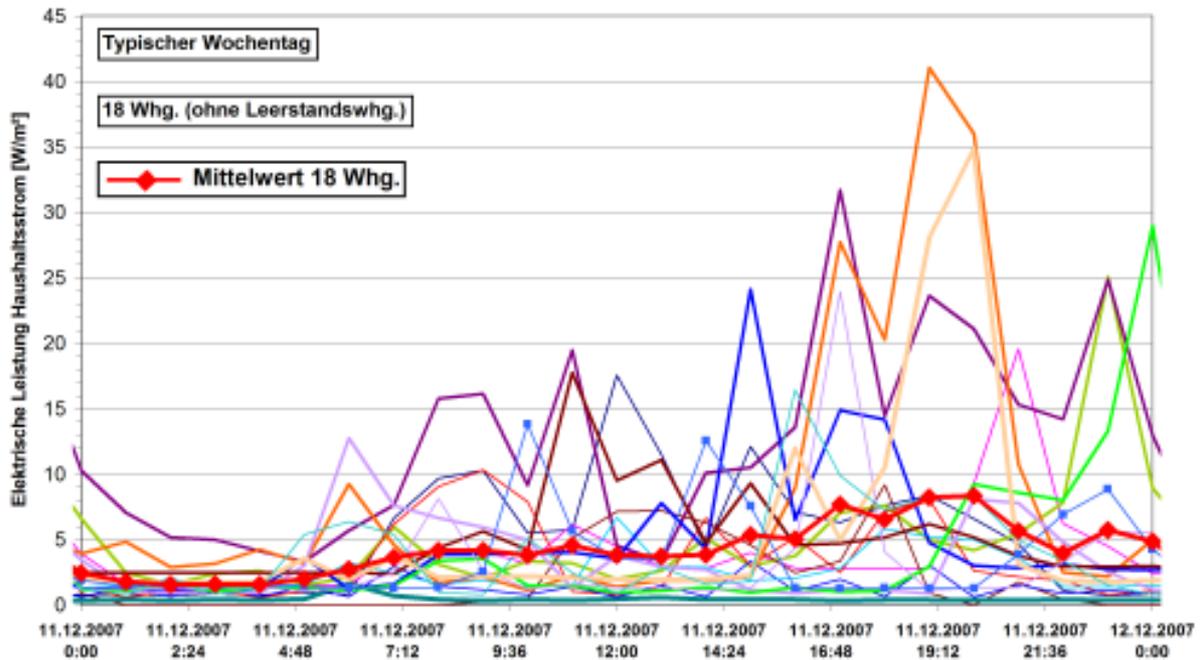


Abbildung 77: Stundenwerte der elektrischen Leistung von 18 Wohnungen und dem flächengewichteten Mittelwert im 4er Block an einem typischen Wintertag (11.12.2007). Die 19. Wohnung ist nicht dargestellt, da sie zu dieser Zeit unbewohnt war.

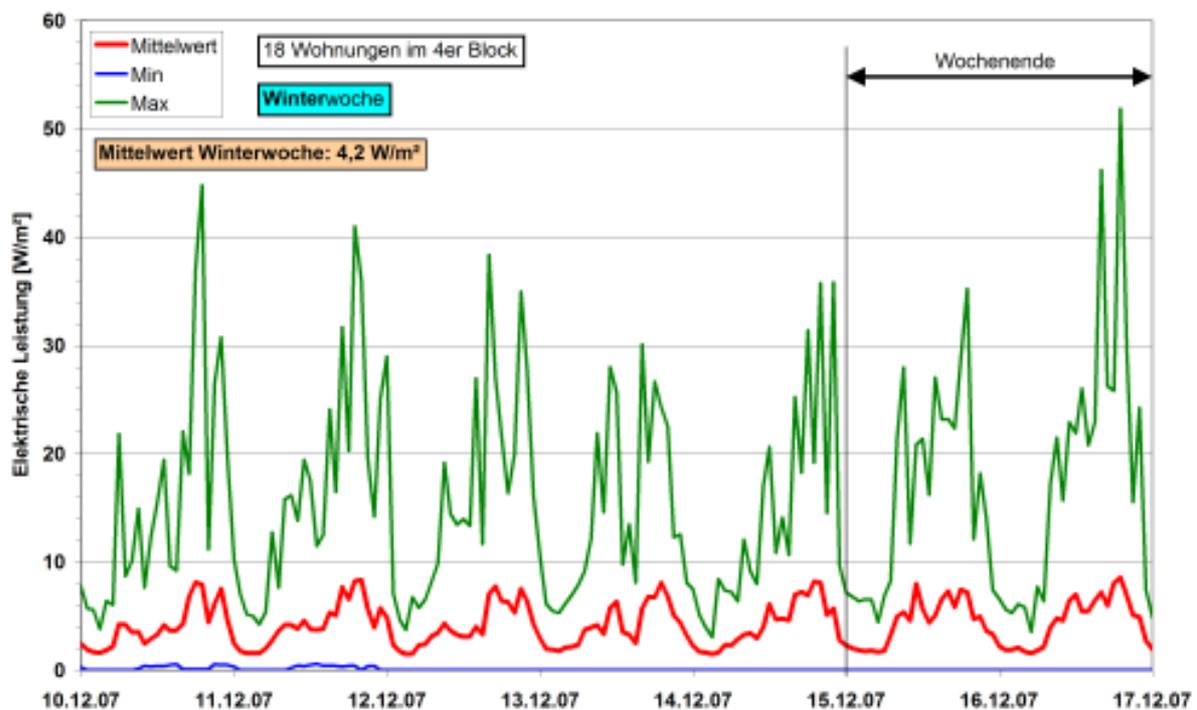
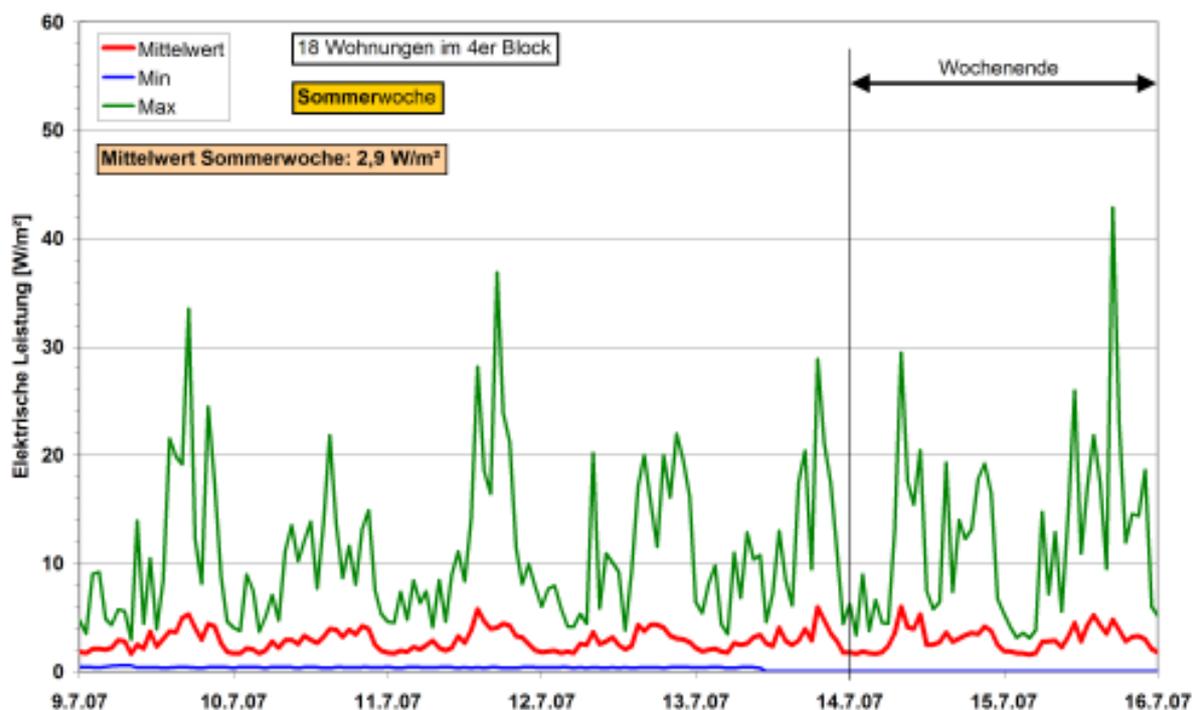


Abbildung 78: Stundenwerte der elektrischen Leistung von 18 Wohnungen und dem flächengewichteten Mittelwert im 4er Block in einer typischen WINTERWOCHE (10.12. bis 16.12.2007). Die Messwerte einer Wohnung sind nicht berücksichtigt, da sie zu dieser Zeit unbewohnt war.

Die mittlere elektrische Dauerleistung der 18 bewohnten Wohnungen beträgt in der typischen Winterwoche 4,2 W/m<sup>2</sup>. Als Maximalwert wurden in dieser Woche 51,9 W/m<sup>2</sup> gemessen.

Die gleiche Darstellung ist in Abbildung 79 für eine typische Sommerwoche zusammengestellt. Die maximalen Lastspitzen liegen mit 42,9 W/m<sup>2</sup> deutlich niedriger, der Gesamtmittelwert mit 2,9 W/m<sup>2</sup> ebenfalls. Auch hier fallen die Minimalleistungen ab einem Datum auf Null zurück und stammen dann immer von der gleichen Wohnung. Dabei handelt es sich allerdings nicht um die gleiche Wohnung wie die in der Winterwoche.



**Abbildung 79: Stundenwerte der elektrischen Leistung von 18 Wohnungen und dem flächengewichteten Mittelwert im 4er Block in einer typischen SOMMERWOCHE (09.07. bis 15.07.2007). Die Messwerte einer Wohnung sind nicht berücksichtigt, da sie zu dieser Zeit unbewohnt war.**

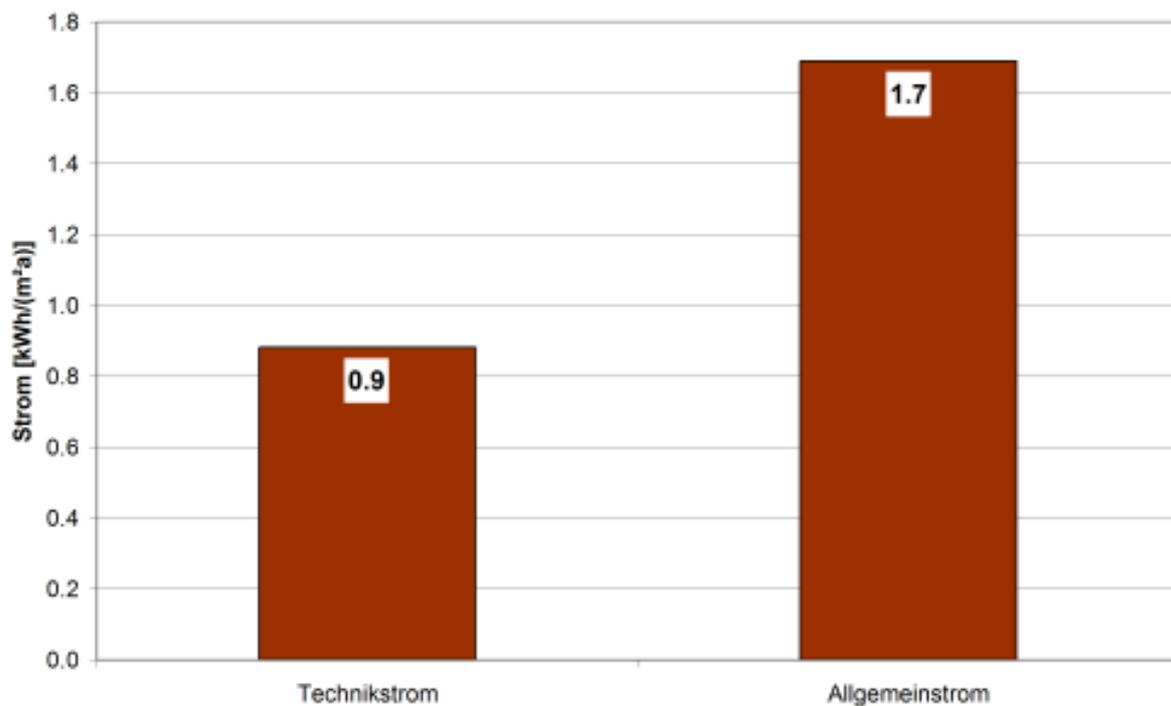
#### 4.4.1 Allgemein- und Technikstrom

Die Allgemenstromverbräuche für z.B. Treppenhaus-, Keller- und Außenbeleuchtung werden je Hauseingang über gesonderte Stromzähler in den Kellern erfasst. Zur Sicherstellung der Grundlüftung der Keller werden kleine Abluftventilatoren betrieben. Diese werden ebenfalls über die jeweiligen Allgemenstromzähler erfasst. Diese Stromzähler wurden nicht auf der Messdatenerfassungsanlage aufgeschaltet. Die Verbrauchsdaten sind daher den Versorgerabrechnungen entnommen. Der Verbrauchszeitraum weicht etwas von dem für diese Untersuchung festgelegten zweiten Bilanzjahr ab. Bei den Verbräuchen ist aber keine nennenswerte Schwankung zu erwarten. Daher können die Daten problemlos für das zweite Bilanzjahr verwendet werden.

Die spezifischen Allgmeinstromverbräuche inkl. des Stromverbrauchs für die Kellerlüftung im zweiten Bilanzjahr betragen im Mittel **1,7 kWh/(m<sup>2</sup>a)**.

Der sog. Technikstrom für die diversen Pumpen, Solarstation, Regelung, Kessel etc. wird im 4er Block mittels eines gesonderten Stromzählers auf der Messdatenerfassung aufgezeichnet. Der für die Begleitmessungen notwendige Strom (Messrechner, Sensoren, Bus-Master, etc) wird ebenfalls über diesen Stromkreis abgenommen. Durch einen Unterzähler wird der reine Messtechnikstrom gemessen und konnte dann vom Technikstrom abgezogen werden. Am Technikstromverbrauch ist - wie zu erwarten war – eine jahreszeitliche Schwankung zu erkennen: Im Winter liegen die Werte aufgrund der Heizungspumpen etc. höher. Der Technikstrom im 4er Block ergibt sich zu **0,9 kWh/(m<sup>2</sup>a)**.

Insgesamt bewegen sich die Allgemein- und Technikstromverbräuche mit diesen Werten im üblichen Rahmen.



**Abbildung 80: Technik- und Allgmeinstromverbrauch im zweiten Bilanzjahr.**

Werden die Technik- und Allgmeinstromverbräuche **und die Haushaltsstromverbräuche** inkl. des Lüftungsstroms gemeinsam berücksichtigt ergibt sich ein mittlerer Gesamtverbrauch von **35,6 kWh/(m<sup>2</sup>a)**.

## 4.4.2 Stromverbrauch Lüftungsanlagen

Wie oben geschildert, sind die Stromverbräuche der Lüftungsgeräte im Messwert der Haushaltsstromverbräuche bereits enthalten. In einer anderen vergleichbaren Untersuchung mit zum Teil baugleichen Lüftungsgeräten wurde ein spezifischer mittlerer Messwert von 3,8 kWh/(m<sup>2</sup>a) ermittelt [Peper 2008]. Die Geräte wurden – trotz der nicht innenliegenden Badezimmer – ganzjährig betrieben.

Bei den zwei, im zweiten Bilanzjahr zeitweise nicht vermieteten Wohnungen zeigen die elektrischen Verbrauchswerte einen sehr gleichmäßigen Verlauf. Der eine Leerstandszeitraum liegt im Sommer, der andere im Winter. Da die Wohnungen nicht vermietet waren, ist davon auszugehen, dass keine Stromverbraucher außer der jeweiligen, festinstallierten Lüftungsanlage vorhanden war. Die entsprechenden elektrischen Leistungen der beiden Wohnungen betragen im Mittel 25,8 bzw. 21,5 W/m<sup>2</sup>. Das entspricht einer spezifischen Leistung von 0,30 bzw. 0,63 W/m<sup>2</sup>. In Abbildung 81 und Abbildung 82 sind für beide Wohnungen die gemessenen elektrischen Leistungen einer Beispielwoche dargestellt.

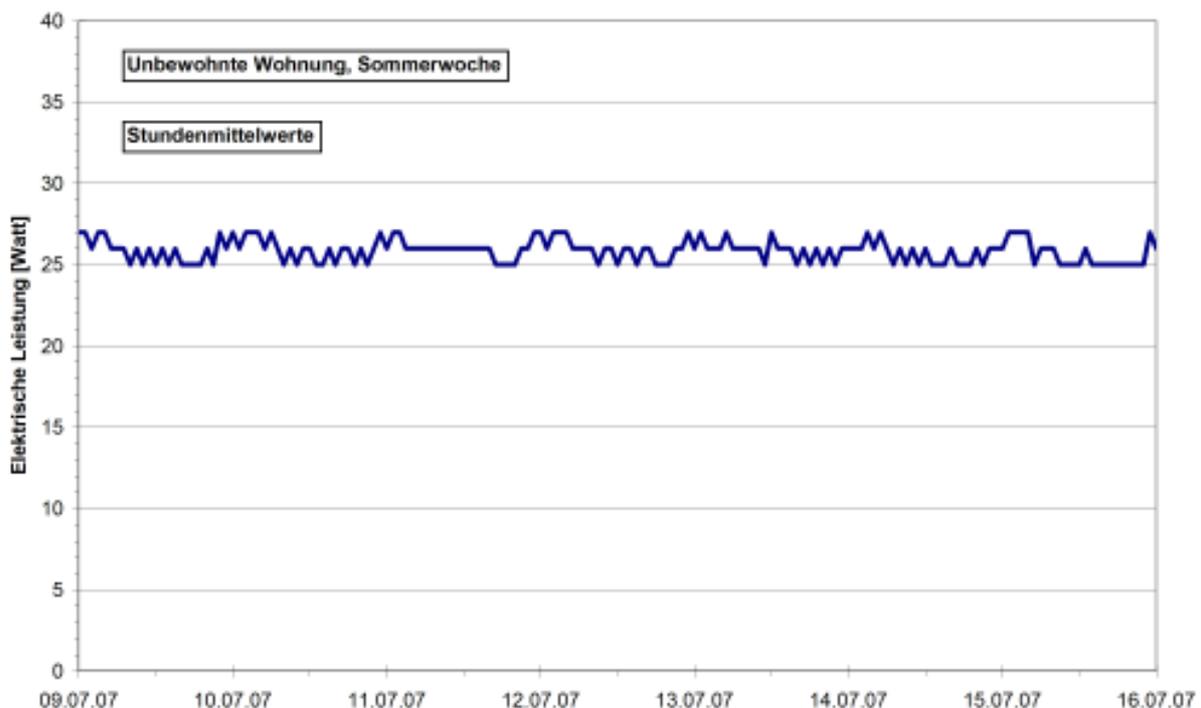
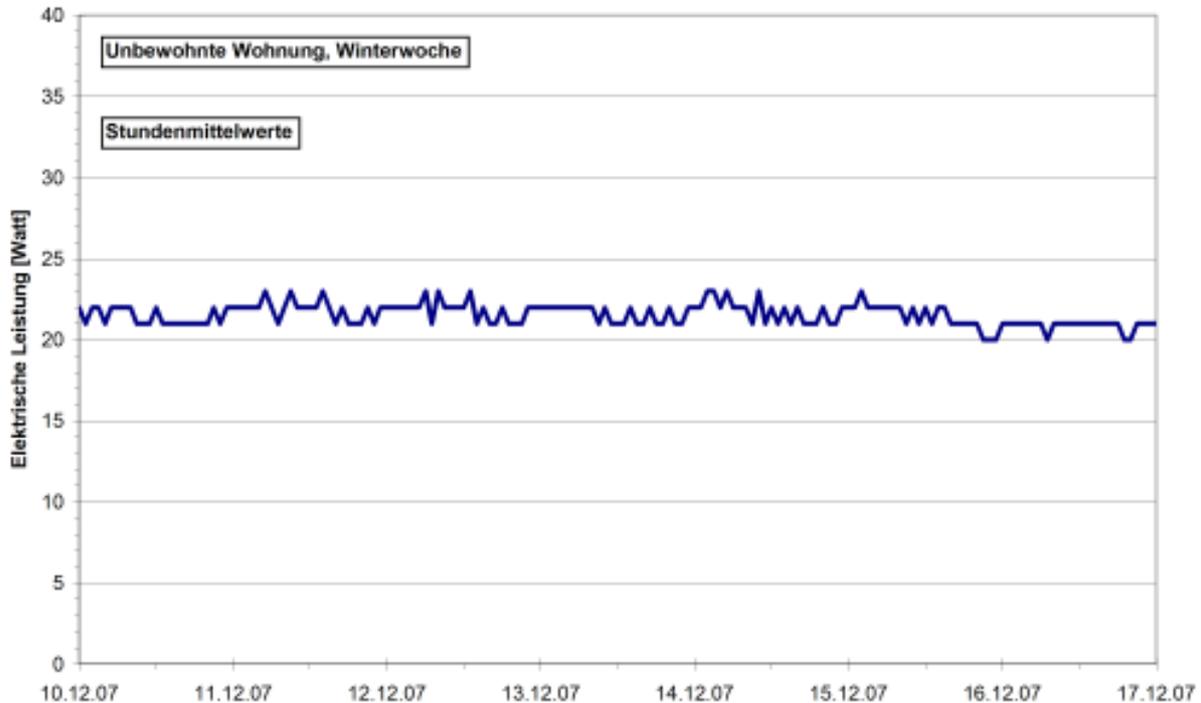


Abbildung 81: Stundenmittelwerte der elektrischen Leistung einer zeitweise im Sommer unvermieteten Wohnung im 4er Block (Messdaten einer Beispielwoche).



**Abbildung 82: Stundenmittelwerte der elektrischen Leistung einer zeitweise im Winter unvermieteten Wohnung im 4er Block (Messdaten einer Beispielwoche).**

Über die eingestellten Lüftungsstufen der Geräte in den beiden Wohnungen, während der unvermieteten Zeit, ist nichts bekannt. Berechnet man aus den gemessenen Leistungen einen Jahresverbrauch für den Lüftungsstrom, ergeben sich bei ganzjährigem Betrieb 2,6 bzw. 5,5 kWh/(m<sup>2</sup>a). Rein funktional und energetisch betrachtet ist es ausreichend die Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung während der Heizzeit zu betreiben. Setzt man dazu vereinfacht die Monate Oktober bis einschließlich April an, reduzieren sich die Stromverbräuche auf 1,5 bzw. 3,2 kWh/(m<sup>2</sup>a). Der jeweils zweite, relativ hohe Wert entsteht, trotz der nahezu gleichen elektrischen Leistungen, durch die sehr kleine Wohnung: Die Energiebezugsfläche beträgt nur 34 m<sup>2</sup>, womit es sich um die mit Abstand kleinst Wohnung des 4er Blocks handelt.

In der oben genannten Untersuchung [Peper 2008] schwankten die elektrischen durchschnittlichen Dauerleistungen (Jahreswerte: Mai 2007 bis April 2008) der fünf untersuchten Geräten zwischen 18,9 und 41,4 W. Die spezifische Werte betragen damit 2,3 bis 7,0 kWh/(m<sup>2</sup>a), der flächengewichtete Mittelwert ergab dort - wie bereits erwähnt - einen Wert von 3,8 kWh/(m<sup>2</sup>a).

Damit liegen die beiden stichprobenhaft festgestellten Werte in der Tevesstraße in einer ähnlichen Größenordnung.

Bereits bei der Analyse der fünf vermessenen Geräte wurde in [Peper 2008] festgestellt, dass es notwendig ist, die Leistungsaufnahme der Regelung der Geräte zu verringern. So wäre eine deutliche Reduktion des Stromverbrauchs möglich und

unbedingt angeraten. Ziel muss es sein, mindestens die Einhaltung des Stromeffizienzkriteriums für das Zertifikat als passivhausgeeignete Komponente mit  $0,45 \text{ Wh/m}^3$  zu gewährleisten. Auch die Einschränkung der Sommerbetriebszeiten der Lüftungsanlagen würde die Stromverbräuche reduzieren.

Es bleibt zu berücksichtigen, dass diesen zusätzlichen elektrischen Aufwendungen für die Lüftungsanlagen die durch das Wärmerückgewinnungssystem im Gebäude zurückgehaltene Wärme gegenübersteht. So wurde z.B. in der Passivhausiedlung in Hannover-Kronsberg eine Arbeitszahl in der Winterperiode von 16,5 messtechnisch ermittelt. Dies bedeutet, dass für jede Kilowattstunde Strom beachtliche  $16,5 \text{ kWh}$  Wärme zurückgewonnen werden [Peper 2002]. Der Betrieb dieser hocheffizienten Lüftungsanlagen erbringt damit nicht nur Behaglichkeitsvorteile, sondern auch eine deutliche Primärenergieeinsparung. Dieser Zusammenhang ist bei den Gebäuden in der Tevesstraße, mit etwas veränderten Zahlenwerten genauso vorzufinden.

## 5 Energiebilanzen

Als Zusammenführung der energetischen Messdaten werden die kompletten Energiebilanzen mit Daten des aussagekräftigeren zweiten Bilanzjahres aufgestellt. Als erstes werden die kompletten Wärmeseiten bilanziert, dann folgen die Gesamtbilanzen der End- und der Primärenergie.

### 5.1 Endenergie Wärme

Aus den oben dargestellten Messwerten wird hier zunächst für beide Gebäude die Wärmeseite der Endenergieverbräuche und deren Aufteilung zusammengestellt.

Für den 4er Block ergibt sich ein gesamter spezifischer Energiebezug von 55,8 kWh/(m<sup>2</sup>a), der sich aus 48,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) Gasbezug und 7,7 kWh/(m<sup>2</sup>a) Solarwärmeertrag zusammensetzt. Die Aufteilung der Wärmeentnahme nach den unterschiedlichen Verbrauchsgruppen zeigt Abbildung 83: Insgesamt werden 64 % der eingesetzten Wärme „direkt“ verbraucht. Die restlichen 36 % dienen indirekt als Heizung (Verteilung Heizung nutzbar, Verteilung Warmwasser), dem Komfort schnell Warmwasser zu erhalten (Zirkulation) oder stellen nicht nutzbare Verluste dar (Speicherverlust, Rohrleitungen außerhalb der thermischen Hülle). Die Sommerheizung wird dabei auch als unbeabsichtigt und daher „indirekter“ Verbrauch berücksichtigt. Die beiden Verbrauchssektoren Heizung und Warmwasser verfügen über die gleiche Größenordnung.

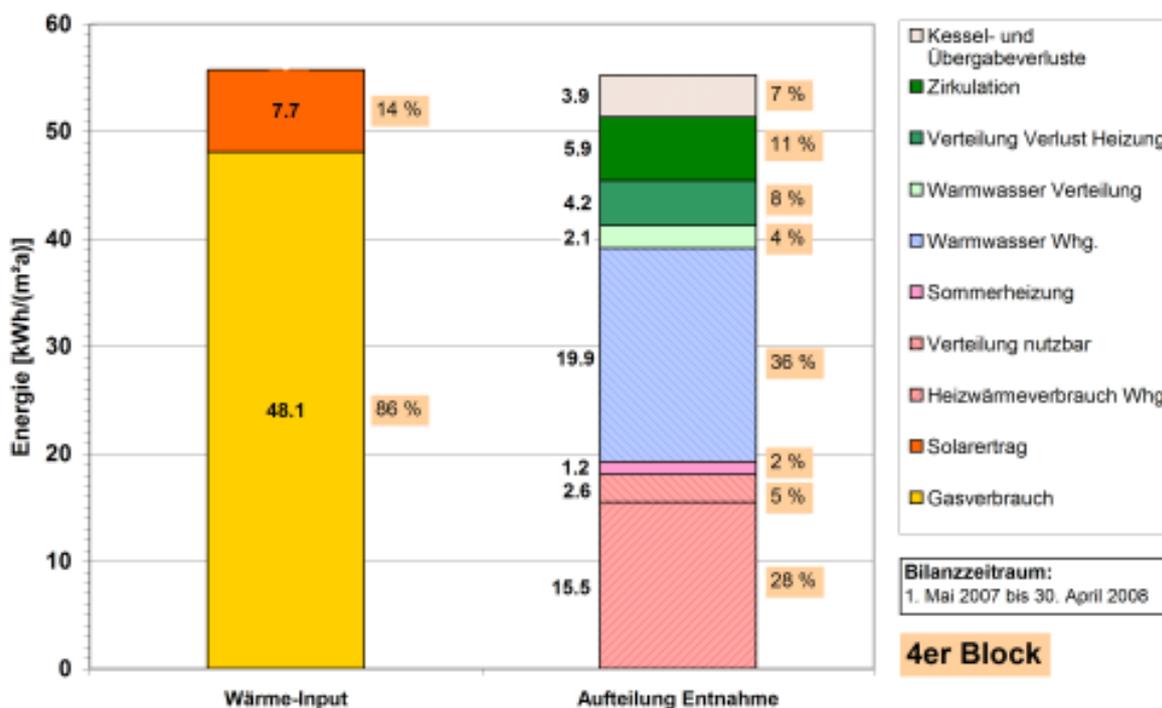


Abbildung 83: Energiebilanz der gesamten Wärmeseite des 4er Blocks im zweiten Bilanzjahr.

Ein ähnliches Bild, mit dem deutlich geringerem Solarertrag, ist in Abbildung 84 für den 6er Block zusammengestellt. Hier ist die Aufteilung in Warmwasserentnahme der Wohnungen und entnommenem Warmwasser am Speicher nicht möglich, da die Sondermessung nur im 4er Block durchgeführt wurde. Daher wird, wie auch sonst üblich, nur der Warmwasserverbrauch angegeben, der an den beiden Speicherabgängen gemessen wurde.

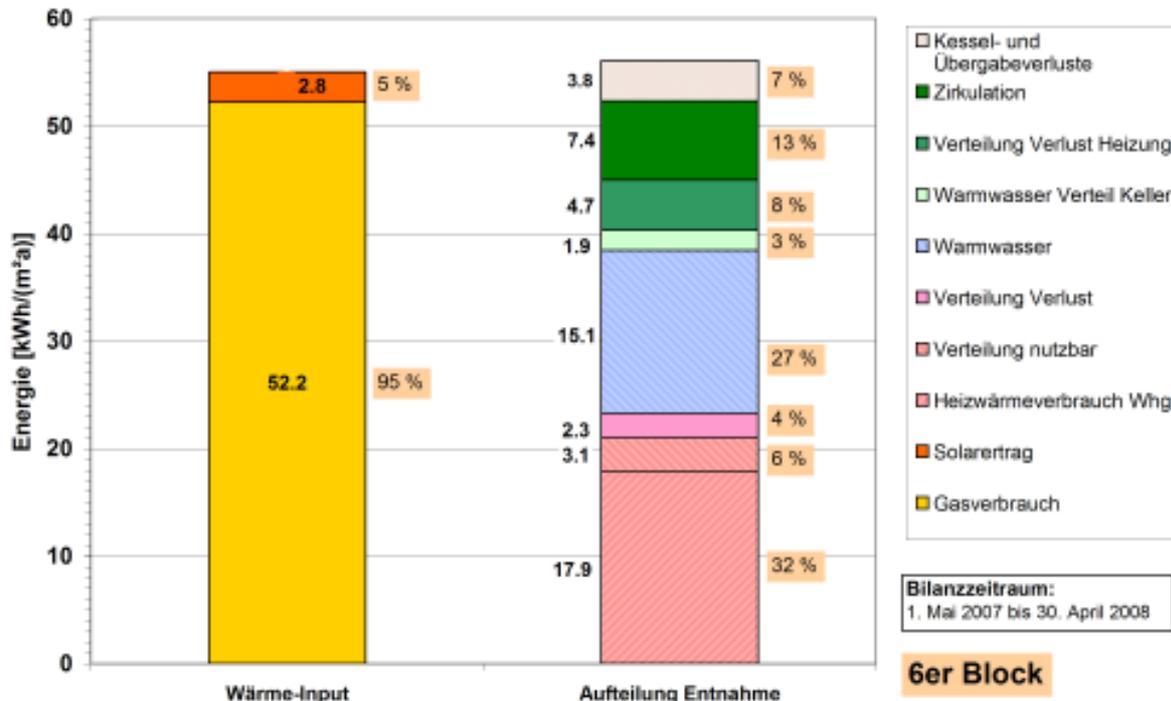


Abbildung 84: Energiebilanz der gesamten Wärmeseite des 6er Blocks im zweiten Bilanzjahr.

## 5.2 Gesamte End- und Primärenergie

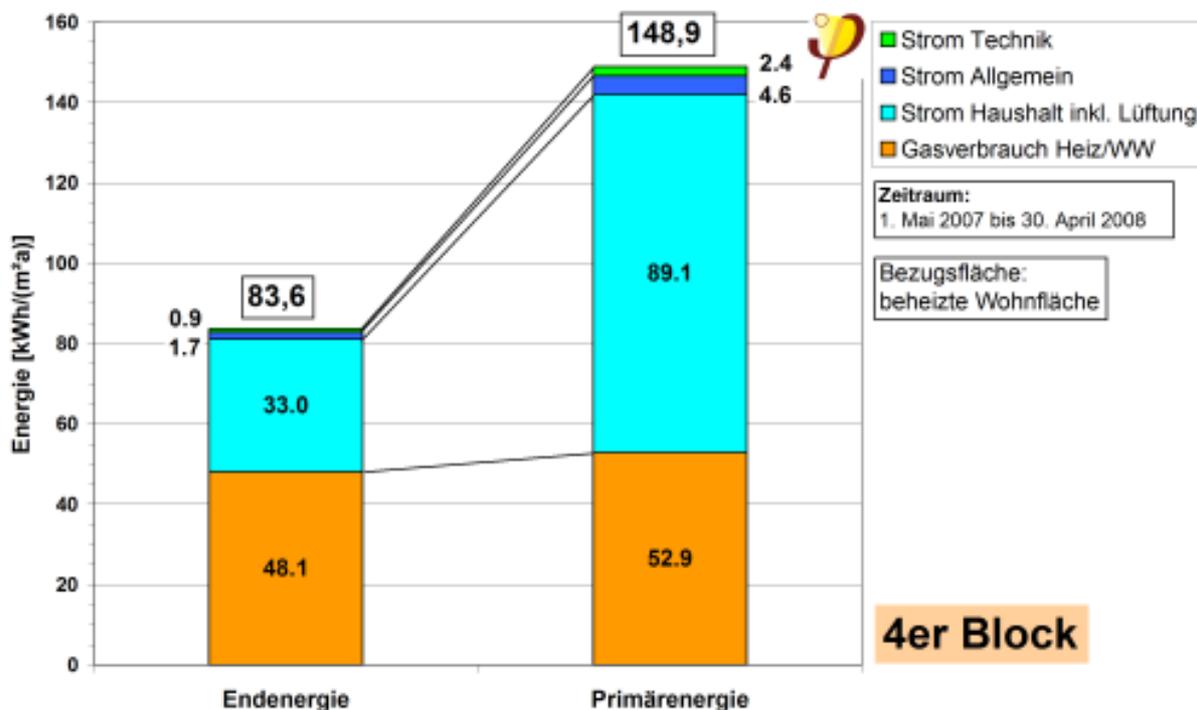
Die elektrischen Verbräuche wurden nur im 4er Block messtechnisch erfasst. Daher können auch nur für diese Gebäude die gesamten Energieverbräuche zusammengestellt werden.

Zur Bestimmung der gesamten Endenergieverbräuche werden die Wärme- und Stromverbräuche addiert. Im zweiten Bilanzjahreszeitraum beträgt die Summe der nicht erneuerbaren **Endenergie für den 4er Block insgesamt 83,6 kWh/(m²a)**. Da der Gasverbrauch für Warmwasser und Heizung gemeinsam gemessen wurden und dargestellt sind, stellen diese den größten Einzelposten (57%). Wenn die Wärmeseite noch in Heizung und Warmwasser unterteilt wird, stellt mit 39% der Haushaltsstrom (inkl. Lüftungsstrom) den größten Einzelverbraucher.

Entscheidend für die ökologische Bewertung des Gebäudes ist die Primärenergie. Diese ist ein Maß für die Umweltbelastungen durch den Betrieb des Gebäudes und bewertet die Einsparung gegenüber herkömmlichen Gebäuden. Dazu werden die

gesamten Endenergieverbräuche des Gebäudes primärenergetisch bewertet. Diese Bewertung erfolgt mit sog. Primärenergiefaktoren, welche auch die Herstellungenergie der vorgelagerten Prozesskette der unterschiedlichen Energieträger berücksichtigen. Nach [Gemis] beträgt der Primärenergiefaktor für Erdgas 1,1 und für den deutschen Strommix 2,7  $\text{kWh}_{\text{Pri}}/\text{kWh}_{\text{End}}$ .

Werden die Endenergieverbräuche mit den Primärenergiefaktoren bewertet, ergibt sich für das Gebäude ein **Primärenergiewert von 148,9  $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$** . Es muss beachtet werden, dass dieser Primärenergieverbrauch alle Energieanwendungen des Gebäudes (eben insbesondere auch den Haushaltsstrom) enthält. Für eine Sanierung eines Gebäudes und tatsächlichen Messwerten ist dies ein sehr gutes Ergebnis. Bei Passivhaus-Neubauten mit vergleichbaren Stromverbräuchen ergeben sich ähnliche End- und Primärenergiewerte. Mit einem Anteil von 60 % sind die Haushaltsstromverbräuche allerdings dominant. Weitere Bemühungen müssen in Zukunft – nach der Optimierung der Gebäudehülle – auf der Reduktion der Stromverbräuche gelegt werden. Dies gilt für Sanierungen wie für Neubauten gleichermaßen.



**Abbildung 85: Gesamter End- und Primärenergieverbrauch des 6er Blocks im zweiten Bilanzjahr (Bezugsfläche: Beheizte Wohnfläche).**

Die thermische Solaranlage auf dem Gebäudedach reduziert den Einsatz des nichtregenerativen Energieträgers Erdgas. Der Ertrag ist hier in der Aufstellung durch einen reduzierten Erdgaseinsatz berücksichtigt. Betrachtet man den Solarertrag gesondert kann er primärenergetisch mit dem Faktor 1,1 bewertet werden (Erdgas-substitution). Es ergibt sich dann ein Wert von 8,4  $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  Solarwärme für das zweite Bilanzjahr.

## 5.2.1 Gesamter Endenergieverbrauch Einzelwohnungen

Um die Nutzerstreuung darzustellen, können die direkt in den Wohnungen gemessenen Verbräuche (Heizung, Warmwasser und Haushaltsstrom inkl. Lüftungsstrom) als Summenwert dargestellt werden. Die allgemeinen Stromverbräuche, wie auch die Anteile der Wärmeverteilung von Heizwärme und Warmwasser sowie die Umwandlungs- sowie Verteilverluste des Kessels sind dabei nicht berücksichtigt. Sie stellen für alle Wohnungen einen gleichgroßen Sockelbetrag dar. Ebenso wird dabei nicht unterschieden zwischen der Herkunft der Energie zur Warmwassererzeugung (Erdgas bzw. Solarthermie).

Die Summen der drei Verbrauchsbereiche der 19 Wohnungen des 4er Blocks ergeben für das zweite Bilanzjahr Messwerte zwischen 12,3 und 128,3 kWh/(m<sup>2</sup>a). Der flächengewichtete Mittelwert beträgt 68,5 kWh/(m<sup>2</sup>a). Dabei sind Haushalte zu finden, die sehr wenig bzw. gar nicht heizen aber deutlich höhere Verbrauchswerte beim elektrischen Verbrauch und/oder dem Warmwasserverbrauch aufweisen (hohe interne Lasten reduzieren den Heizwärmeverbrauch).

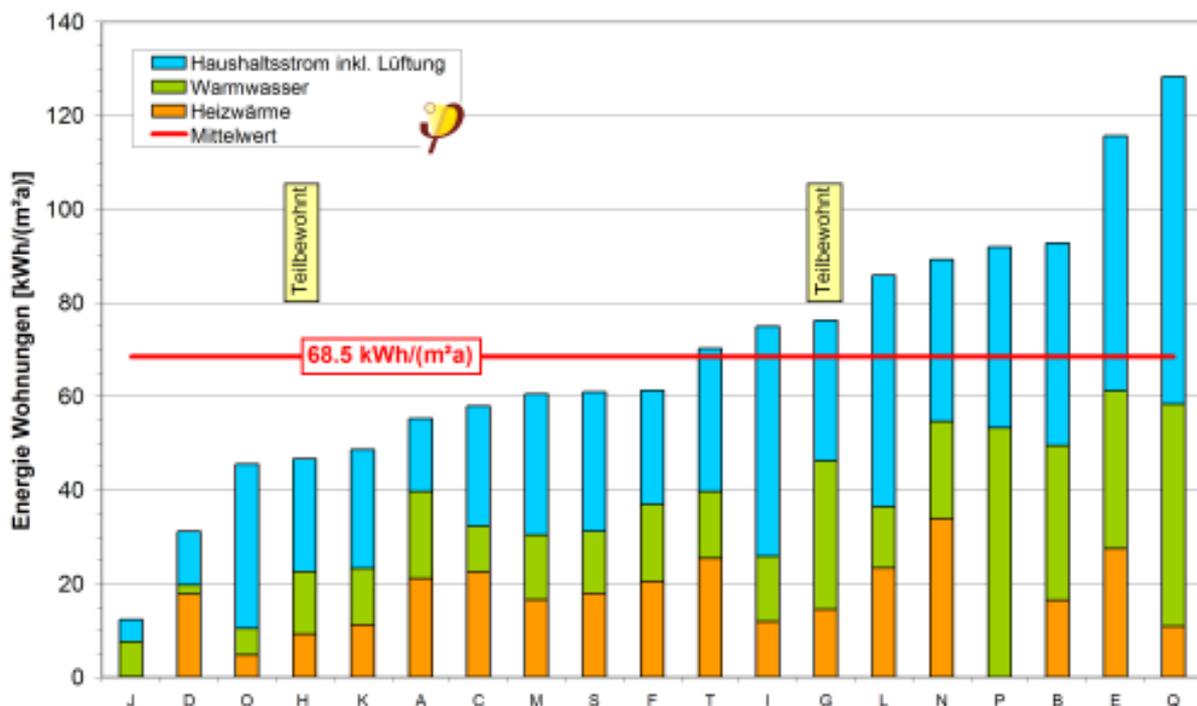


Abbildung 86: Summen aller direkt in den Wohnungen gemessenen Energieverbräuche der 19 Wohnungen im 4er Block (zweites Bilanzjahr).

## 5.2.2 Primärenergie Heizung, Warmwasser und Technikstrom

Die gesetzlichen Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) betreffen nur die Wärmeseite einschließlich der Haustechnik. Der gesamte Haushaltsstrom bleibt dabei unberücksichtigt. Für den Vergleich mit den Anforderungen der ENEC wurde dieser Wert hier ebenfalls ermittelt.

Für den 4er Block ergibt sich als Summe der gemessenen Endenergie Heizung, Warmwasserbereitung und Technikstrom (Heizung, Lüftung) 52,8 kWh/(m<sup>2</sup>a). Der zugehörige Primärenergieverbrauch – berechnet mit den weiter oben genannten Primärenergiefaktoren nach [Gemis] - beträgt für den 4er Block **65,5 kWh/(m<sup>2</sup>a)**. Dabei liegt weiterhin - anderes als in der EnEV - die Energiebezugsfläche (beheizte Wohnfläche) zu Grunde.

Werden die gemessenen Primärenergieverbräuche des Gebäudes nur für diese Anwendungen auf die Gebäudenutzfläche  $A_N$  bezogen (1334 m<sup>2</sup>), ergibt sich ein **Primärenergieverbrauch von 49,5 kWh/(m<sup>2</sup>a) für den 4er Block**, eine um fast 25 % niedrigere Zahl als beim Bezug auf die Wohnfläche. Die Einzelwerte für die Bereiche Erdgasverbrauch (Heizung/Warmwasser), Strom Technik und Strom Lüftung sind in Abbildung 87 dargestellt. Dabei lagen die gemessenen Raumtemperaturen im Winter 2007/2008 im Mittel mit 21,8 °C um 1,8 K über der Standardtemperatur für die PHPP Bilanz (20 °C) und 2,8 K über der Bilanzierungstemperatur der EnEV (19 °C). Bezieht man die Daten auf die niedrigere Raumtemperatur von 19 °C nach der EnEV, ergibt sich als Primärenergiewert bei Bezug auf  $A_N$  ein Wert von nur noch **43,7 kWh/(m<sup>2</sup>a)**. Damit wurde der niedrige, berechnete Energiebedarf messtechnisch validiert. Obwohl es sich um eine Sanierung handelt, und obwohl einige Effekte wie nicht vollständige Vermietung oder die teilweise deutlich verspätete Aktivierung der Wärmerückgewinnung Mehrverbräuche verursacht haben, wurde sogar die (rechnerische) KfW 40-Anforderung für Neubauten in der Feldmessung praktisch erreicht.

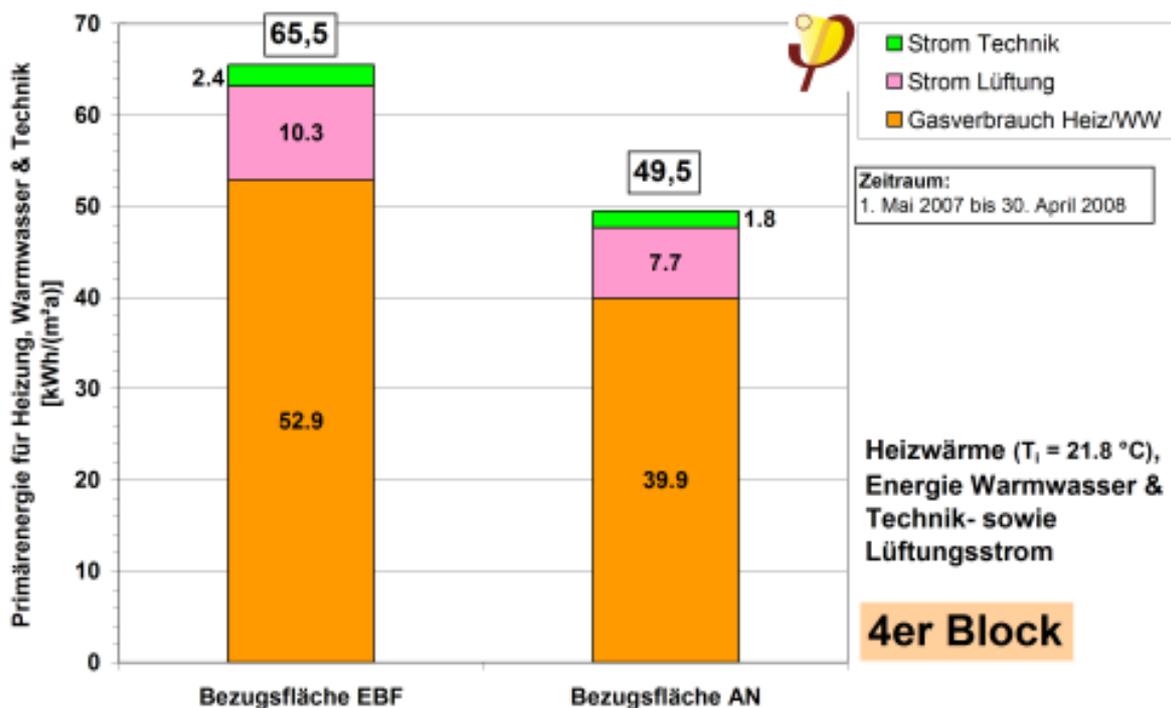


Abbildung 87: Messwerte des Primärenergieverbrauchs des 4er Blocks nur für Heizung, Warmwasser und Technikstrom inkl. Lüftungsstrom in Bezug auf die Energiebezugsfläche (EBF) und die theoretische Gebäudenutzfläche  $A_N$ .

### Anforderungswert nach EnEV 2007

Nach der **EnEV 2007** kann der **zulässige Jahres-Primärenergiebedarf der Gebäude für Heizung, Warmwasser inkl. Technikstrom** bestimmt werden. Nach der gesetzlich gültigen Anforderung ergibt sich ein Maximalwert von **83,0 kWh/(m²a)**. Das ist der Rechenwert, der bei einer solchen Komplettanierung nach der Verordnung zwingend einzuhalten ist. Die Bezugsfläche ist dabei wieder die 32 % größere Gebäudenutzfläche  $A_N$ .

Der primärenergetische Messwert des 4er Blocks, berechnet auf 19 °C Raumtemperatur und bezogen auf die Fläche  $A_N$ , beträgt, wie oben beschrieben, 43,7 kWh/(m²a). Dies entspricht damit einer **Unterschreitung der gesetzlichen Anforderung um 47 %**. Daran ist abzulesen, wie erfolgreich der tatsächlich realisierte Verbrauch ist. Aus einem Altbau mit sehr hohen Verbrauchswerten wurde ein energetisch sehr hochwertiges Gebäude mit sehr gutem thermischen Komfort, deutlich verbesserter Raumluftqualität und dauerhafter Schadensfreiheit aufgrund der hohen Oberflächentemperaturen.

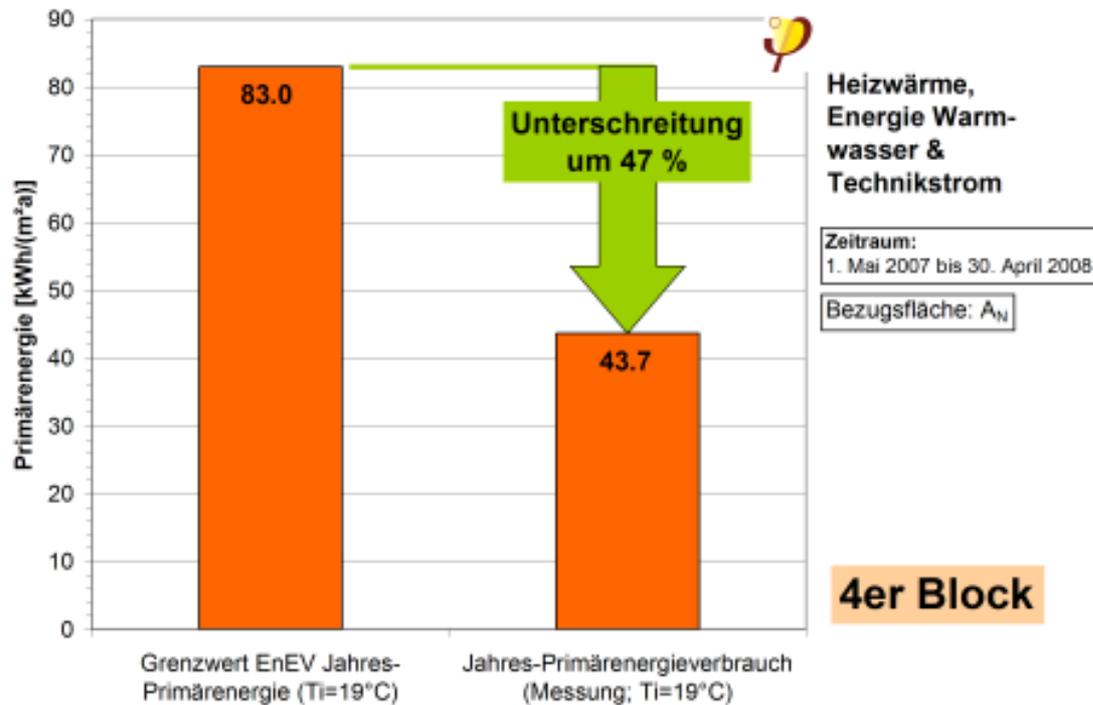


Abbildung 88: Vergleich der Jahres-Primärenergie-Anforderung nach EnEV 2007 (Heizung, Warmwasser und Hilfsstrom) mit dem tatsächlichen Jahres-Primärenergie-Verbrauch vom 4er Block nach Umrechnung auf die Raumtemperatur von 19 °C. Als Bezugsfläche dient hier aufgrund der EnEV-Anforderung die  $A_N$ .

## 6 Kompaktaggregat

In einer Wohnung des 4er Blocks ist zur Wärme- und Warmwasserversorgung – wie oben bereits erwähnt - ein Kompaktaggregat bzw. Kompaktgerät installiert worden. Diese Wohnung wird nicht über die Heizzentrale versorgt sondern ist ausschließlich monovalent mit Strom versorgt. Aus diesem Grund wird diese Wohnung im Folgenden komplett getrennt untersucht und bewertet.

### 6.1 Einzelwohnung mit Kompaktgerät

Um die Eigenschaften eines dezentralen, monovalenten Versorgungssystems zu untersuchen wurde eine der sanierten Wohneinheiten mit einem Wärmepumpen-kompaktgerät ausgestattet. In einem Kompaktgerät sind alle Haustechnikkomponenten für die Warmwasserbereitung, Raumheizung und Lüftung in einem einzigen Gerät auf kleinem Raum integriert. Der gesamte Energieverbrauch wird von einer Kleinstwärmepumpe zur Verfügung gestellt, mit Unterstützung durch ein direkt-elektrisches Nachheizelement zur Abdeckung von temporären Lastspitzen. Die Heizwärme wird dem Raum generell über die Zuluft zugeführt, oft kann optional ein zusätzlicher Heizkreis angeschlossen werden.

Kompaktgeräte sind eine bewährte und sehr effiziente Versorgungstechnik von Passivhäusern, es gibt inzwischen mehrere Hersteller mit einer Auswahl an Geräten. Von Vorteil gegenüber anderen Versorgungssystemen sind zum Einen die Kompaktheit und die Kombination der verschiedenen Haustechnikkomponenten. Zum Anderen führen die hohe erzielbare Effizienz zu sehr guten primärenergetischen Verbrauchswerten und somit zu geringen Grundkosten mit abrechnungstechnischen Vereinfachungen durch die monovalente elektrische Versorgung. In der Altbau-sanierung ist die Anwendung von Kompaktgeräten besonders Interessant, da weitgehend auf komplexe Verrohrungen etc. in der bestehenden Bausubstanz verzichtet werden kann.

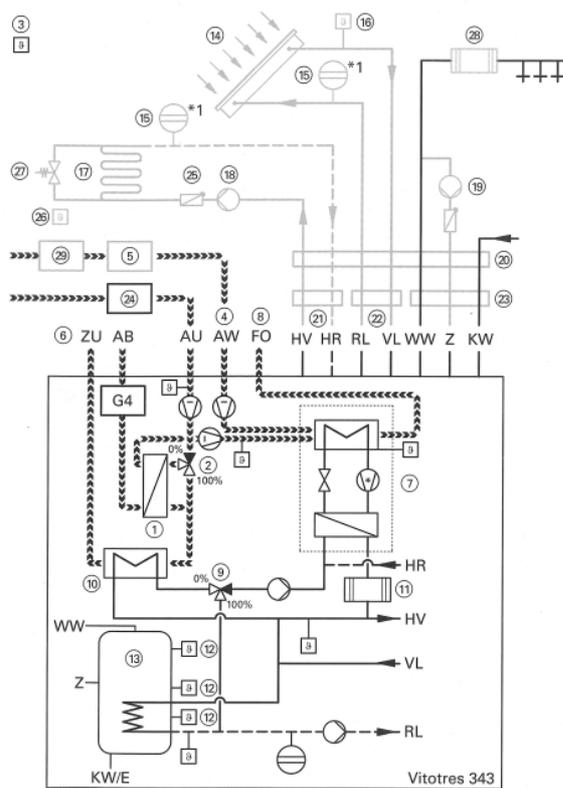
In [Kaufmann 2009] ist für alle Wohnungen der beiden sanierten Wohnblöcke eine Parameterstudie für die Heizlast und Dimensionierung des Heizsystems in Abhängigkeit der Wohnfläche, Personenbelegung und Wohnungslage aufgeführt. Zusammengefasst wurde hier festgestellt, dass sich im Durchschnitt ein Kompaktgerät mit einer thermischen Wärmepumpenleistung von 1,5 kW gut eignet. Mit dieser Dimensionierung kann der Wärmebedarf weitgehend unabhängig von der Belegungsdichte von der Wärmepumpe versorgt werden, so dass die direkt-elektrische Nachheizung nur für besonders hohen Komfort z.B. zur schnellen Wiederaufheizung des Speichers benötigt werden sollte. Die Raumbeheizung sollte in jedem Fall problemlos über die Zuluft und einen kleinen Badheizkörper bereitgestellt werden können.

Im Rahmen dieses Projekts wurde zur dezentralen Versorgung durch ein Passivhauskompaktaggregat das Gerät Vitotres 343 von Fa. Viessmann ausgewählt. Entsprechend den beschriebenen Auswahlkriterien hat die Wärmepumpe eine

thermische Wärmeleistung von 1,5 kW, bei einer maximalen elektrischen Leistung von 0,7 kW. Die Wärmepumpe entzieht der Fortluft (also fortluftseitig hinter dem Wärmetauscher) Enthalpie und überführt diese als Wärme dem internen Hydraulikkreislauf, der dann alternativ oder gleichzeitig die Zuluft oder den Wasserspeicher aufheizt. Zur Vermeidung von übermäßigen Abtauzeiten und Erhöhung der Wärmepumpenheizleistung ist das Vitotres mit einer zweiten Außenluftansaugung als Wärmequelle für die Wärmepumpe ausgestattet. Die Kühlleistung der Wärmepumpe im Umkehrbetrieb beträgt 1 kW. Das elektrische Heizelement kann dem Heizkreislauf stufenweise bis 6 kW zugeschaltet werden. Die integrierte Lüftungsanlage ist für Volumenströme zwischen 70 und 250 m<sup>3</sup>/h ausgelegt. Die Größe des integrierten Speichers beträgt 250 Liter.

In Abbildung 89 ist das Anlagenschema des Vitotres 343 dargestellt. Abbildung 90 veranschaulicht die Kompaktheit und den internen Aufbau des Geräts.

Anlagenschema



## Vitotres 343

- ③ Raumtemperatursensor
- ④ Außenluftfilter F7

## Zubehör

- ⑤ Erdwärmeübertrager
- ⑥ Membran-Ausdehnungsgefäß (nur für Optionen Solarkreis und Zusatz-Heizkreis erforderlich; auch bei Einsatz beider Optionen nur einmal erforderlich)
- ⑦ Anschlusskonsole
- ⑧ Außenluftfilter G4

## Zubehör für Option Zirkulation

- ⑨ Zirkulationspumpe
- ⑩ Erweiterung Zirkulation

## Zubehör für Option Solarkreis

- ⑪ Sonnenkollektoren bis 5 m<sup>2</sup> Vitosol 100 oder bis 3 m<sup>2</sup> Vitosol 200/250/300
- ⑫ Kollektortemperatursensor
- ⑬ Erweiterung Solarkreis

## Zubehör für Option Zusatz-Heizkreis

- ⑭ Universalsheizkörper oder Fußbodenheizungssystem
- ⑮ Heizkreispumpe
- ⑯ Erweiterung Heizkreis
- ⑰ Rückschlagklappe
- ⑱ Raumthermostat
- ⑲ Überströmventil

- AB Abluft
- AU Außenluft
- AW Außenluftzuführung zur Wärmepumpe
- E Entleerung
- FO Fortluft
- HR Heizungsrücklauf
- HV Heizungsvorlauf
- KW Kaltwasser
- RL Solarrücklauf
- VL Solarvorlauf
- WW Warmwasser
- Z Zirkulation
- ZU Zuluft
- >>> Luftführung

\*1Alternativ im Solarkreis oder Zusatz-Heizkreis.

- ① Wärmerückgewinnung
- ② Sommerbypass
- ③ Raumtemperatursensor
- ④ Außenluftzuführung der Wärmepumpe
- ⑤ Erdwärmeübertrager
- ⑥ Zuluft
- ⑦ Luftwärmepumpe
- ⑧ Fortluft
- ⑨ 3-Wege-Ventil
- ⑩ Zuluftregister
- ⑪ Elektro-Heizung
- ⑫ Speichertemperatursensoren
- ⑬ Speicher-Wassererwärmer

Abbildung 89: Anlagenschema des Vitotres 343 aus [Viessmann 2004]. Ein Erdwärmeübertrager (5) sowie ein Solarkreis (14, 16, 22) sind *nicht* angeschlossen.

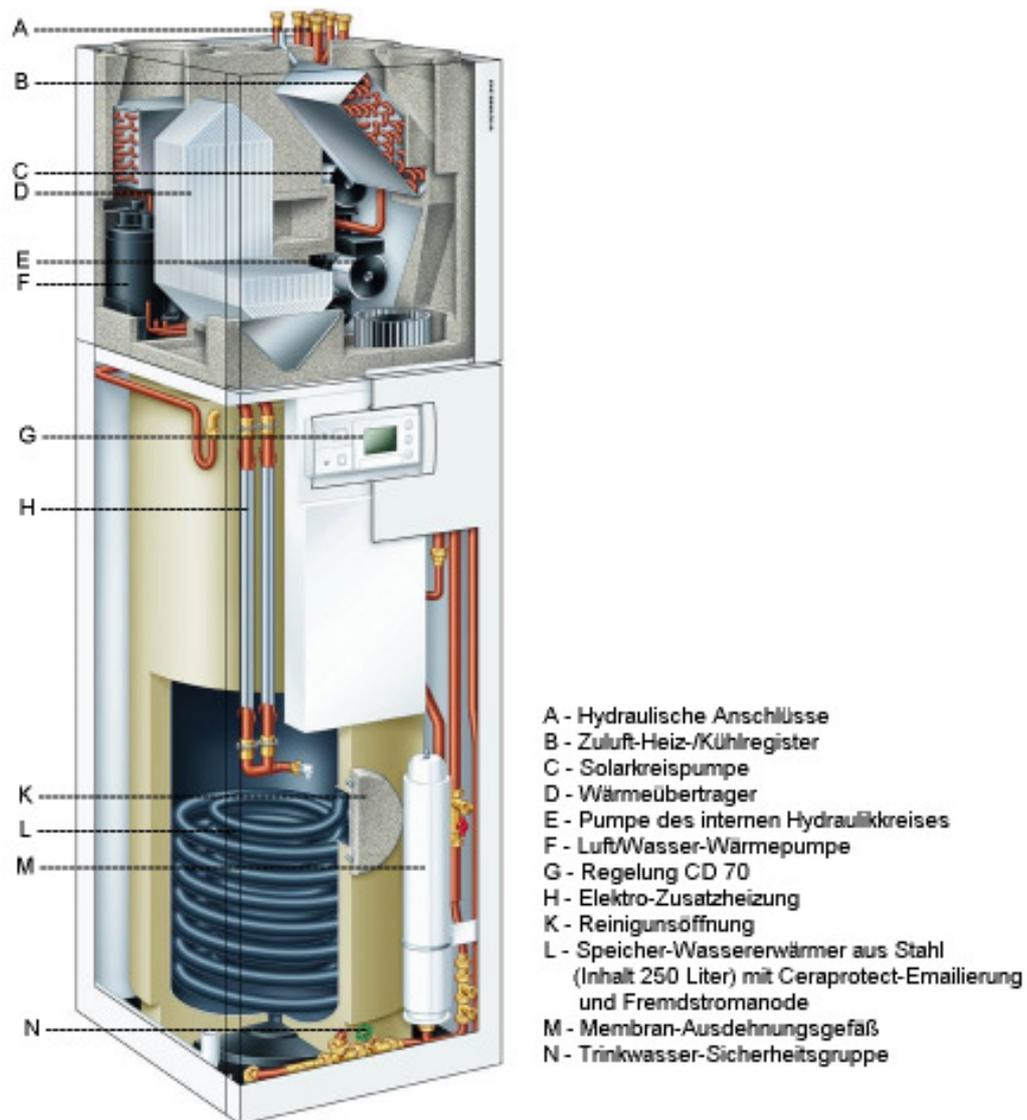
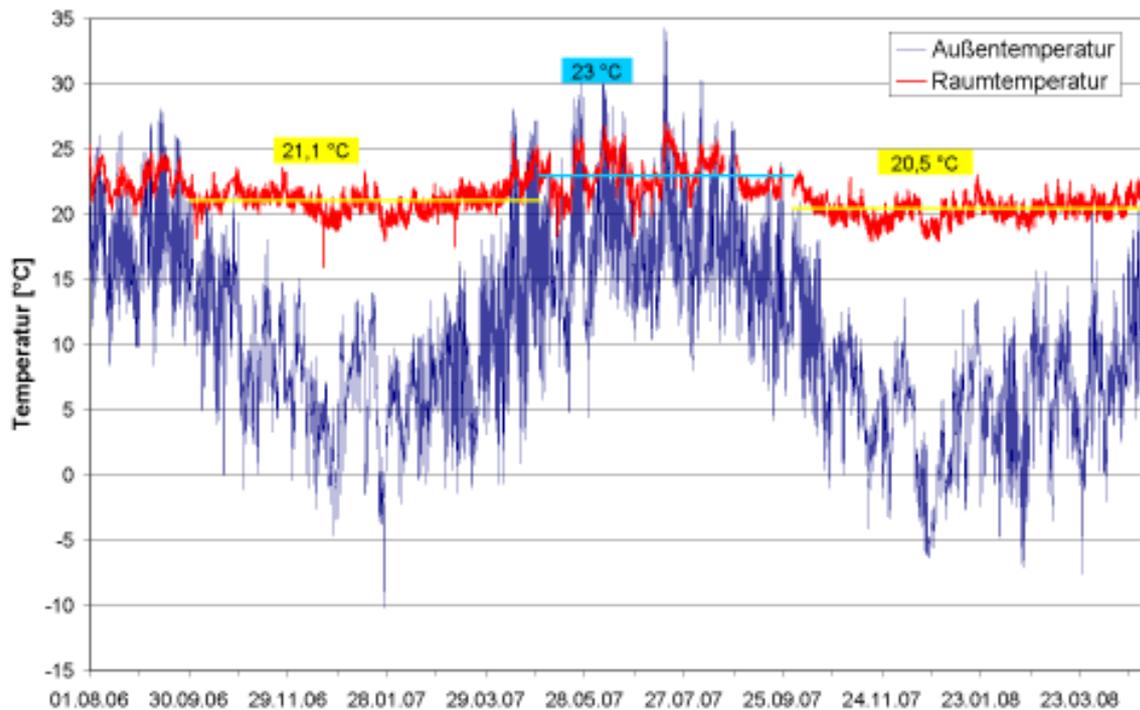


Abbildung 90: Komponenten des Vitotres 343 von Firma Viessmann [Viessmann 2006].

In den nächsten Abschnitten werden die Messergebnisse der Untersuchung des Geräts im Feldtest vorgestellt. Zunächst werden die realisierten Temperaturverhältnisse im Raum beschrieben, es folgen eine Analyse der Datenaufzeichnung beider installierten Wärmemengenzähler (Warmwasser und Badheizkörper) und eine Beschreibung und Auswertung der Lüftungstechnik. Abschließend wird aus allen aufgezeichneten Daten für die energetische Bewertung des Kompaktgeräts unter den gegebenen Umständen und Annahmen eine Bilanz aufgestellt. Die Energiebezugsfläche der Wohnung beträgt 40,76 m<sup>2</sup>.

## 6.1.1 Raumtemperaturen

Die gemessenen stundenmittleren Raumtemperaturen der Beispielwohnung mit Kompaktgerät sind in Abbildung 91 für den gesamten Untersuchungszeitraum im Vergleich zu den Außentemperaturen am Standort Geisenheim (vgl. 4.1) dargestellt. In Tabelle 17 sind die mittleren, maximalen und minimalen Temperaturen für verschiedene Zeiträume zusammengefasst.



**Abbildung 91: Stundenmittelwerte der Raum- und Außentemperaturen vom gesamten Untersuchungszeitraum (August 2006 bis einschließlich April 2008) sowie die mittlere Raumtemperatur verschiedener Zeiträume.**

Im Mittel wird sowohl während den Wintermonaten mit 21,1 °C (2006/2007) und 20,5 °C (2007/2008) als auch im Sommer mit 23 °C eine behagliche Temperatur realisiert.

Auffallend sind zwei kurzzeitige Absenkungen der Raumtemperatur im Winter 2006/2007, welche vermutlich durch zusätzlich Fensterlüftung entstanden sind (Minimaltemperaturen am 20. Dezember 2006: 15,94 °C und am 10. März 2007: 17,53 °C). Im November und Dezember 2007 sind außerdem zwei Zeitbereiche mit generell recht niedrigen Raumtemperaturen erkennbar. In beiden Fällen läuft das Kompaktgerät im gewohnten Betrieb weiter, ohne eine erkennbare zusätzliche Heizleistung. Dies deutet darauf hin, dass diese kühleren Temperaturen im Bereich der vom Bewohner zu den jeweiligen Zeiten eingestellten Solltemperatur lagen. Die erste kühle Zeitspanne wurde dadurch verursacht, dass zu diesem Zeitpunkt die

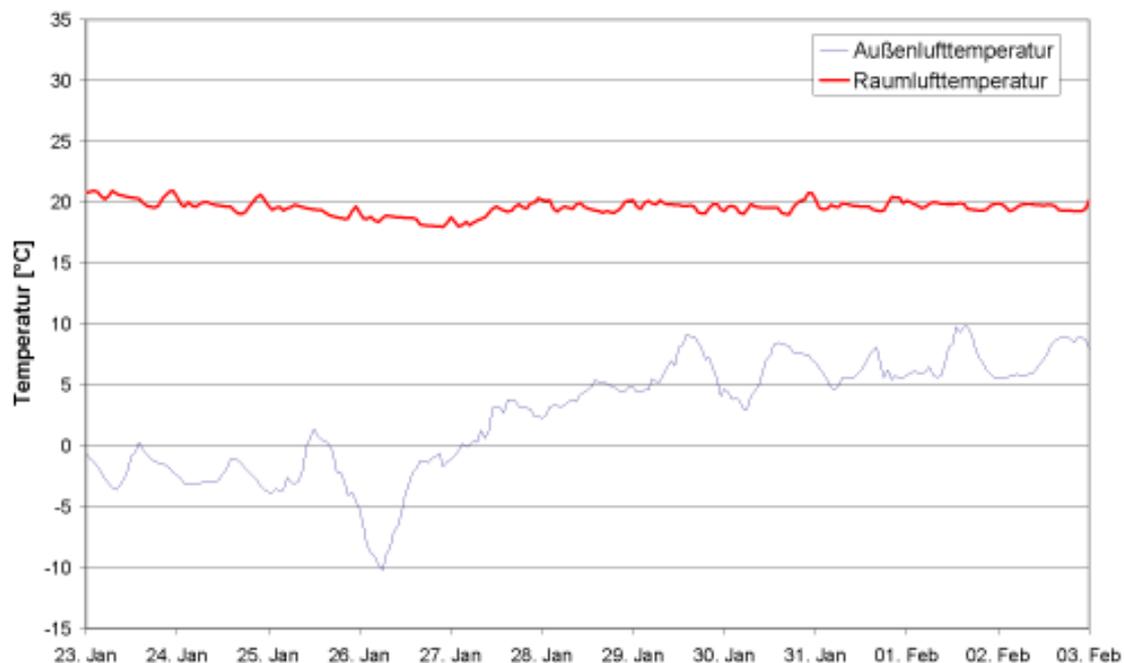
Wärmerückgewinnung des Lüftungsgeräts noch nicht eingeschaltet war (siehe Abschnitt 6.1.4). Der zweite Zeitbereich im Dezember 2007 trat während einer generell sehr kalten Periode auf – die Außenluft lag hier fast durchgehend unter 0 °C.

**Tabelle 17: Minimale, maximale und mittlere Werte der gemessenen stundenmittleren Raum- und Außentemperatur in unterschiedlichen Zeiträumen.**

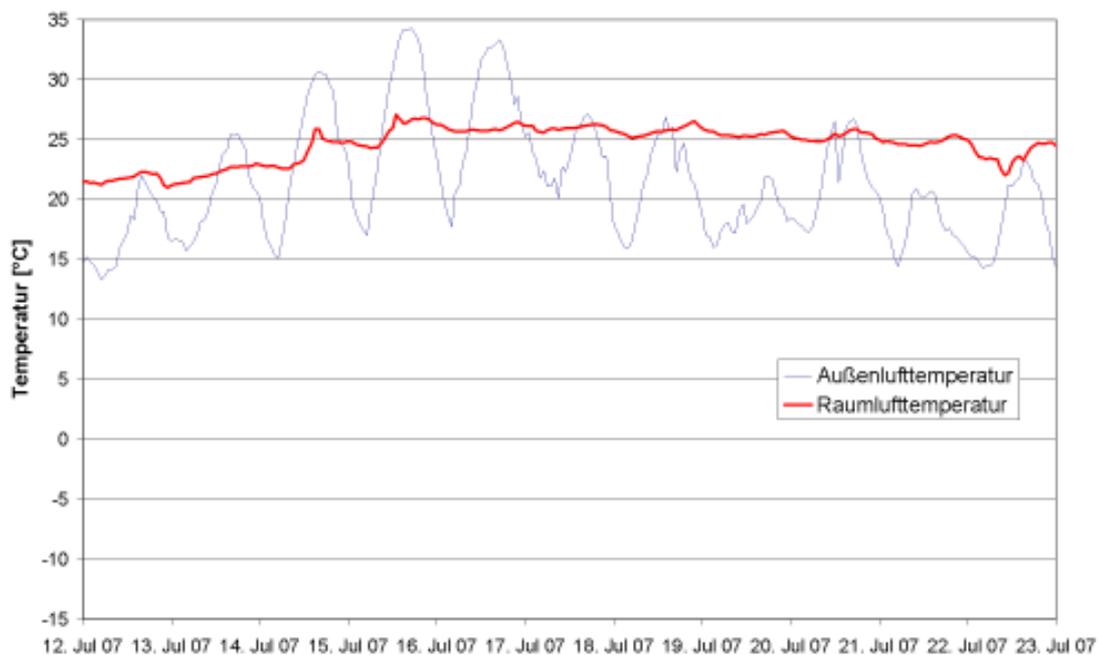
	<b>Raumtemperatur [°C]</b>	<b>Außentemperatur [°C]</b>
<b>Jahrzeitraum 1</b> (1.8.06-31.7.07)		
Max	27.1	34.3
Min	15.9	-10.2
Mittelwert	21.8	12.4
<b>Jahreszeitraum 2</b> (1.5.07-30.4.08)		
Max	27.1	34.3
Min	17.9	-7.6
Mittelwert	21.5	10.6
<b>Winter 06/07</b> (1.10.06-30.4.07)		
Max	25.9	28.1
Min	15.9	-10.2
Mittelwert	21.1	8.6
<b>Sommer 2007</b> (1.5.07- 30.9.07)		
Max	27.1	34.3
Min	18.2	4.2
Mittelwert	23.0	17.2
<b>Winter 07/08</b> (1.10.07-30.4.08)		
Max	23.4	21.4
Min	17.9	-7.6
Mittelwert	20.5	5.9

Die gemessenen Durchschnittswerte stimmen sehr gut mit den Temperaturen im restlichen Gebäude überein (vgl. Abschnitt 4.2). Im Winter 2007/2008 liegt der flächengewichtete Mittelwert der Raumtemperaturen im gesamten Gebäude bei 21,8 °C und im Erdgeschoss bei 20,6 °C. Die betrachtete „Musterwohnung“ liegt im Erdgeschoss und weist in diesem Zeitraum eine vergleichbare mittlere Temperatur von 20,5 °C auf. Im Sommer 2007 liegen die Raumtemperaturmittelwerte der restlichen Wohnungen im Gebäude zwischen 22,6 und 25,9 °C. In diesem Fall liegt die mittlere Raumtemperatur mit 23 °C am unteren Ende dieser Temperaturspanne, was wiederum mit der Lage der Wohnung zusammenhängt. Generell weicht die Raum-

temperatur selbst bei sehr kalten und sehr warmen Außentemperaturen nicht wesentlich vom durchschnittlichen Wert ab (Abbildung 92 und Abbildung 93).



**Abbildung 92: Stundenmittlere Raum- und Außentemperaturen im Zeitraum der niedrigsten gemessenen Außentemperatur (Minimum der Außentemperatur: -10,2°C am 26. Januar 2007 um 6:00)**



**Abbildung 93: Stundenmittlere Raum- und Außentemperaturen im Zeitraum der höchsten gemessenen Außentemperatur (Maximum der Außentemperatur: 34,3°C am 15. Juli 2007 um 17:00)**

## Überhitzung

Ein Ausschnitt der Jahresdauerlinie des zweiten jährlichen Auswertungszeitraums zwischen Mai 2007 und April 2008 (Abbildung 94) zeigt deutlich, dass das Behaglichkeitskriterium nach [DIN 4108-T2] (vgl.4.2.3) sehr gut eingehalten wird. Die Komfortgrenze liegt bei 10 % der Jahresstunden. Nur während 4 % der Jahresstunden ist es in der Wohnung wärmer als 25 °C. Die an diesem Standort nach [DIN 4108-T2] geltende 27 °C Grenze wird nur für eine Stunde im gesamten Messzeitraum überschritten.

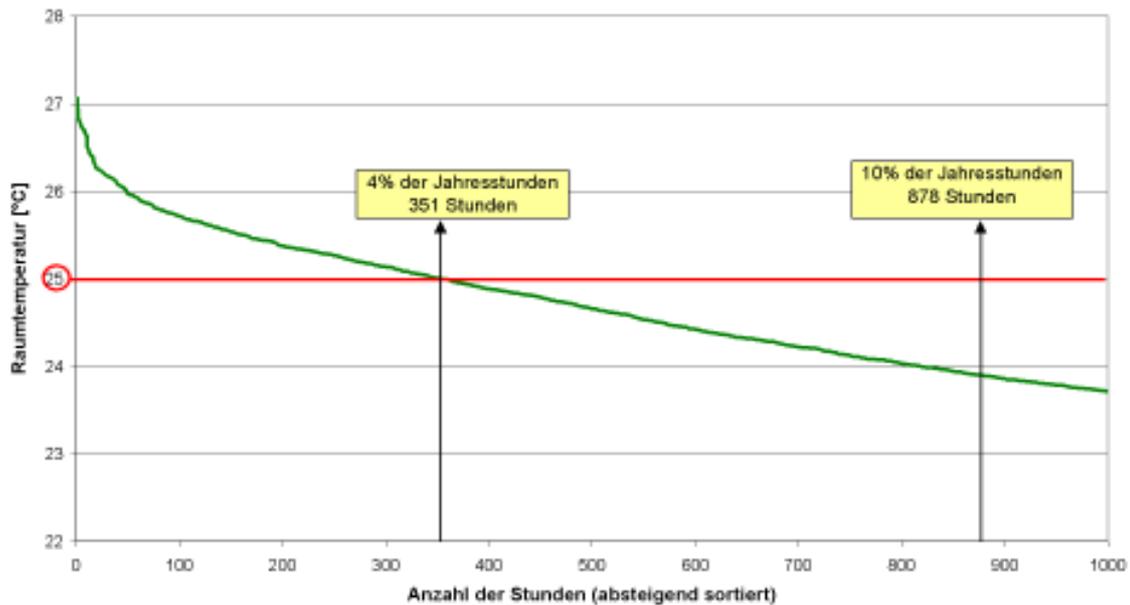


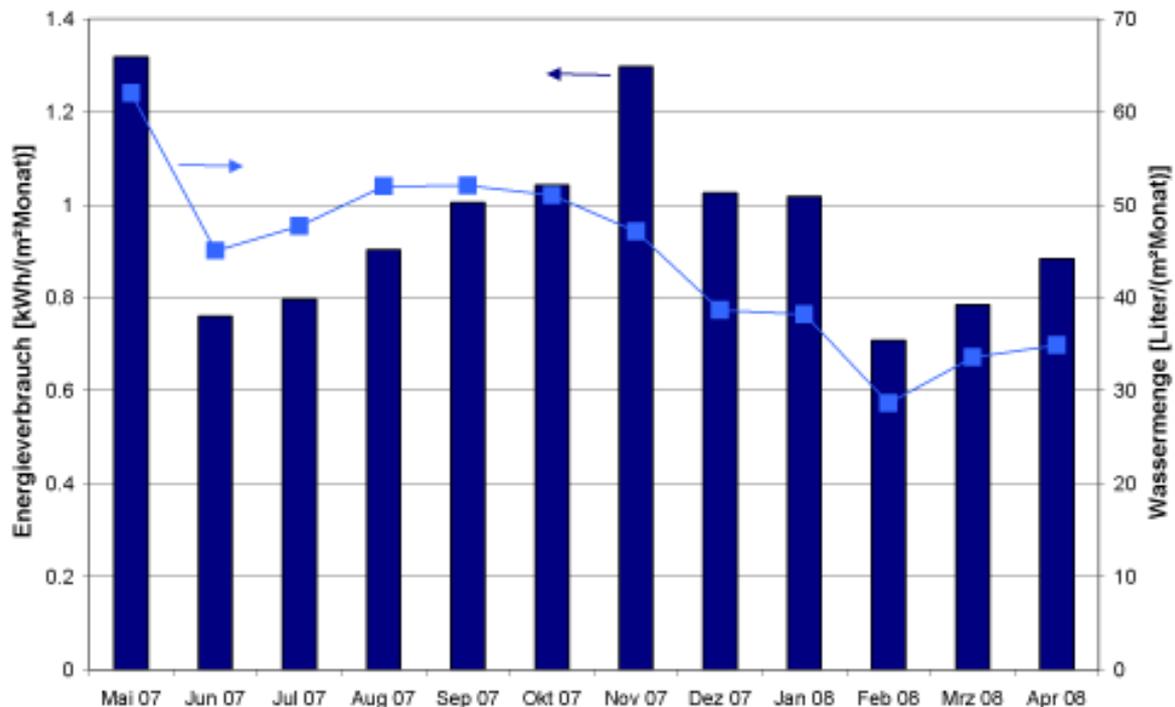
Abbildung 94: Teilausschnitt der Jahresdauerlinie (Stundendaten von Mai 2007 bis April 2008). Markiert ist die 25 °C Grenze und die Komfortgrenze bei 10% der Jahresstunden.

## 6.1.2 Energieverbrauch für Warmwassererzeugung

Der Energieverbrauch für die Warmwassererwärmung ist sehr stark abhängig vom Nutzerverhalten. Es gab während des gesamten Untersuchungszeitraumes keinen Mieterwechsel in der betreffenden Wohnung und nur wenige längere Abwesenheitszeiträume. Der Energieverbrauch durch die Warmwasserzapfung während der beiden jährlichen Auswertungszeiträume war daher sehr ähnlich (Tabelle 18). Im Mittel beträgt der Verbrauch 11,6 kWh/(m<sup>2</sup>a). Für den zweiten jährlichen Auswertungszeitraum sind der monatliche Energie- und Wasserverbrauch in Abbildung 95 dargestellt.

**Tabelle 18: Gemessener jährlicher Warmwasserverbrauch.**

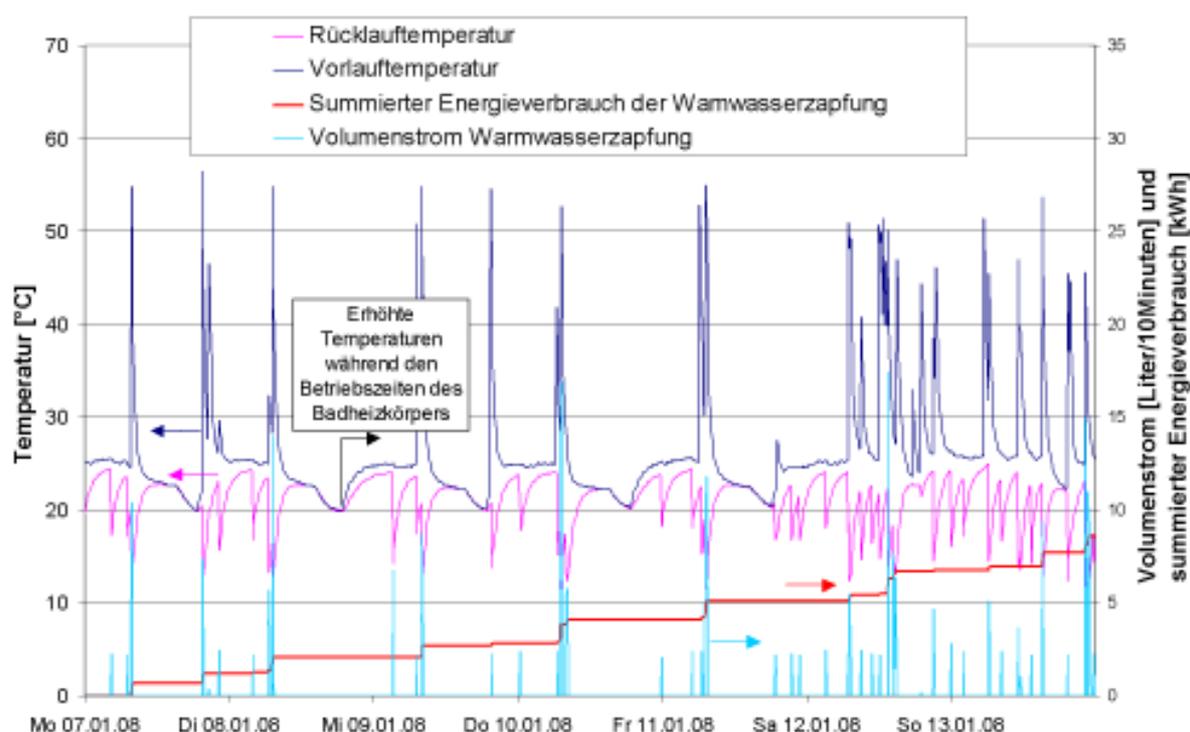
	Energie [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	Wassermenge [Liter/(m <sup>2</sup> a)]
Auswertungszeitraum 1: August 2006 – Juli 2007	11,7	567,8
Auswertungszeitraum 2: Mai 2007 – April 2008	11,5	531,0



**Abbildung 95: Monatliche Summe des Energieverbrauchs und der Menge des verbrauchten Warmwassers für den zweiten Auswertungszeitraum, Mai 2007 bis April 2008.**

Die gemessenen Vor- und Rücklauftemperaturen, das gezapften Wasservolumen und die entsprechenden Wärmemengen sind in Abbildung 96 beispielhaft für eine Woche im Januar 2008 graphisch dargestellt. Hier ist u.a. eine Wechselwirkung mit

dem Badheizkreislauf deutlich zu erkennen: Während den Betriebszeiten vom Badheizkörper steigen, bedingt durch die Wärmeabgabe der Heizungsrohre an die Umgebung, auch die Temperaturen des Warmwasservor- und -rücklaufes an. Diese und ähnliche Wechselwirkungen erschweren die Messung und Auswertung der tatsächlichen Energieverbrauchswerte der einzelnen Abnehmer (Warmwasser, Heizung, Lüftung).



**Abbildung 96: Beispielwoche für den Warmwasserverbrauch im Januar 2008 (10 Minuten Daten).**

Der Warmwasserspeicher wird vom Kompaktgerät täglich zu einer programmierten Uhrzeit auf eine eingestellte Temperatur erhitzt. Die gewählten Einstellungen führen zu einer täglichen Erhitzung um 18 Uhr auf 55 °C, mit einem Anstieg von 5 K/h. Ein wesentliches Einsparpotential besteht darin, diese Temperatur z.B. auf 50 °C zu reduzieren. Zur Abtötung von Keimen könnte eine zusätzliche Aufheizung auf eine höhere Temperatur einprogrammiert werden, die nicht täglich sondern nur einmal wöchentlich stattfindet.

Die thermischen Speicherverluste durch die Trinkwassererwärmung sind im Datenblatt des Vitotres 343 mit 100 W angegeben [Viessmann 2006], basierend auf Messungen gemäß EN 255-3. Diese Verluste werden dem Aufstellungsraum als Abwärme zugeführt und führen im zweiten Auswertungszeitraum monatlich zu einer Beheizung von durchschnittlich 1,8 kWh/(m<sup>2</sup>Monat) bzw. insgesamt 21,6 kWh/(m<sup>2</sup>a). Der Anteil von 12,6 kWh/(m<sup>2</sup>a) während der Heizzeit (Oktober bis einschl. April) ist zu 100% für die Raumbeheizung nutzbar. Im Sommer hingegen sinkt der Nutzungsgrad

nach dem Monatsverfahren des [PHPP 2007] in diesem Fall bis auf 40 % im heißesten Monat Juli, d.h. bis zu 60 % dieser Verluste von 9 kWh/(m<sup>2</sup>a) zwischen Mai und September sind unerwünscht und tragen zu möglichen Übertemperaturen bei. Der Energieverbrauch der Speicherverluste beträgt insgesamt 190 % des gemessenen Energieinhaltes der Warmwasserzapfung. Bei einer geringen Personenbelegung mit geringem Warmwasserverbrauch ist dieser hohe Verlustanteil nicht außergewöhnlich. Die unerwünschten Sommerheiz- und Speicherverluste sollten jedoch auf ein Minimum reduziert werden, z.B. mittels einer verbesserten Dämmung des Speichers. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass zumindest im Sommer gegenüber diesem speziellen System ein Elektro-Durchlauferhitzer eine effizientere Lösung zur Warmwasserbereitung darstellen würde.

Den Autoren ist klar, dass dies ein vernichtendes Urteil bezüglich der Effizienz des hier eingebauten Gerätes darstellt. Es ließ sich leider nicht vollständig klären, ob es sich hierbei um einen Ausreißer der Geräteserie oder um ein grundsätzliches Problem in der Technik, insbesondere des Dämmkonzepts des Speichers und der Regelung, handelt. Aus anderen Projekten in denen andere Kompaktgerätetypen über mehrere Jahre im praktischen Betrieb vermessen worden sind, geht jedoch hervor, dass das Prinzip der Fortluftwärmepumpe als Wärmeerzeuger für die Warmwasserbereitung im Sommer Jahresarbeitszahlen über 2,5 in der Praxis erreichen kann. Die grundsätzlich übliche Gerätekonfiguration funktioniert somit sehr wohl – allerdings gibt es offensichtliche Schwächen des hier konkret untersuchten Gerätes.

### 6.1.3 Energieverbrauch Badheizkörper

Die Heizzeit des Zusatzheizkreises ist auf den Zeitraum vom 15. Oktober bis einschließlich 31. März in der Regelung des Geräts voreingestellt. Innerhalb dieses Zeitraums können vom Nutzer zusätzlich die täglichen Betriebszeiten sowie die Vorlauftemperatur des Heizkreises am Kompaktgerät geregelt werden um somit einen hohen Komfort mit geringem Energieverbrauch zu erreichen. Die manuelle Konfiguration der Schaltzeiten des Badheizkreises ist nicht eindeutig, was schnell zu einer Fehleinstellung führen kann, wenn der Nutzer sich nicht intensiv mit der Regelung des Geräts beschäftigt. In den folgenden Abschnitten und Absätzen wird gezeigt, dass alle Fehleinstellungen unnötigerweise zu einem erheblichen Mehrverbrauch führen.

**Tabelle 19: Gemessener jährlicher Energieverbrauch des Zusatzheizkreises.**

	Verbrauch [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	Durchfluss [Liter]
Auswertungszeitraum 1: August 2006 – Juli 2007	1,1	3032,8
Auswertungszeitraum 2: Mai 2007 – April 2008	0,3	557,1

Es fällt auf, dass vom Zusatzheizkreis im ersten Winter 2006/2007 mehr als drei mal so viel Heizwärme verbraucht wurde als im folgenden Winter 2007/2008 (Tabelle 19) obwohl die Außentemperaturen milder waren. Der Vergleich von Abbildung 97 und Abbildung 98 verdeutlicht, dass der Zusatzheizkreis in den beiden Heizperioden sehr unterschiedlich geregelt war. Im ersten Winter war das Kompaktgerät noch nicht korrekt in Betrieb genommen und eingestellt worden wodurch sich ein deutlich erhöhter Energieverbrauch ergeben hat. Zwischen den beiden Heizperioden wurden diverse Veränderungen und Einstellungen vorgenommen um den Betrieb zu verbessern.

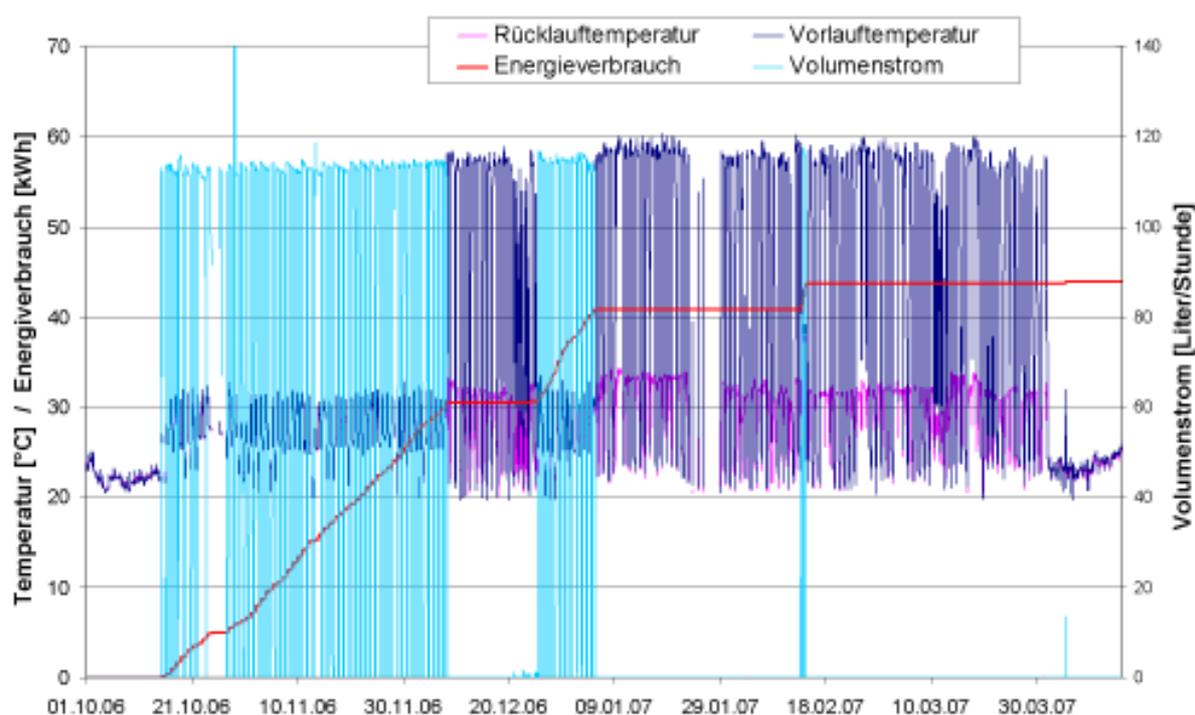
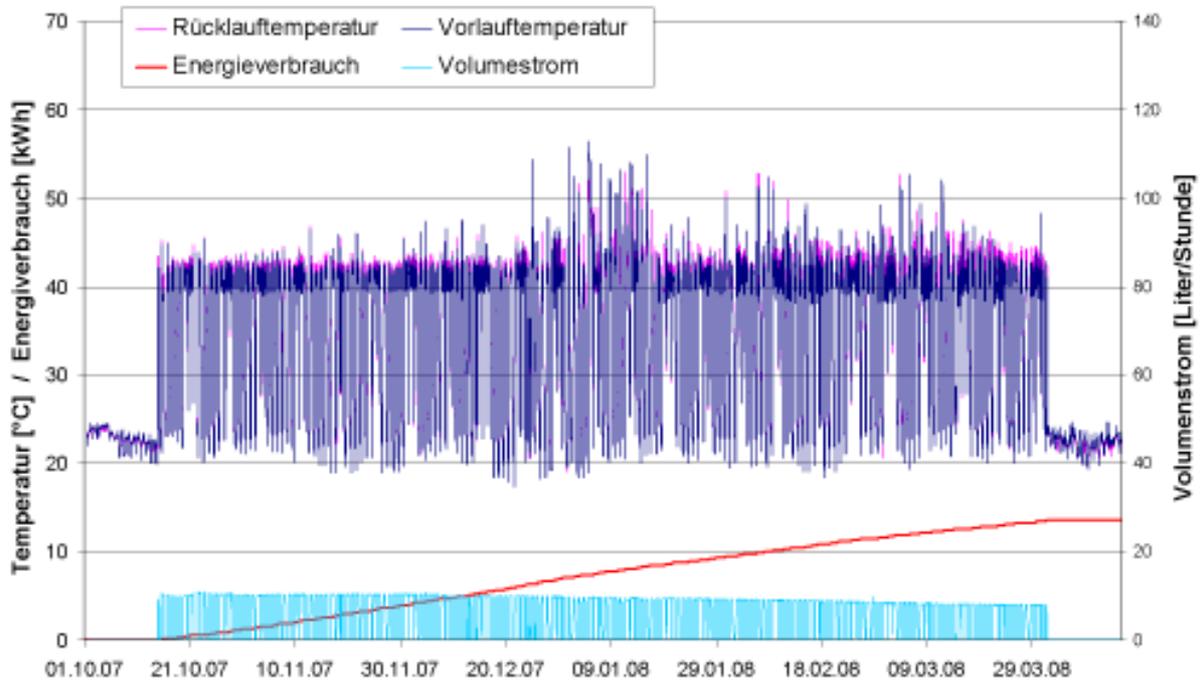


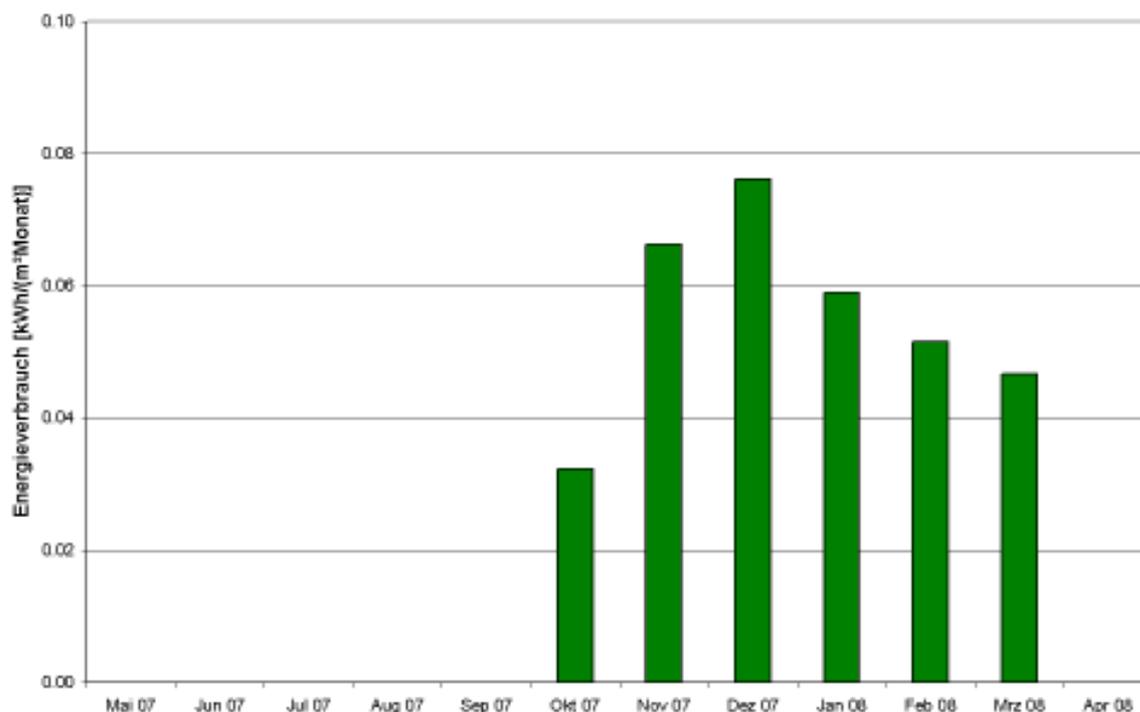
Abbildung 97: Zusatzheizkreis im Winter 2006/2007: Stundendaten der Vor- und Rücklauf-temperaturen, Volumenstrom sowie der summierte Energieverbrauch.



**Abbildung 98: Zusatzheizkreis im Winter 2007/2008: Stundendaten der Vor- und Rücklauf-temperaturen, Volumenstrom sowie der summierte Energieverbrauch.**

Während der ersten Heizzeit (2006/2007) weisen die Daten auf zwei unterschiedliche Betriebsweisen hin (Abbildung 97). Zu Beginn der Heizperiode wurde ein sehr hoher Volumenstrom von durchschnittlich 103 Litern pro Stunde gemessen, bei relativ niedrigen Vor- und Rücklauftemperaturen (beide um 28 °C) und einer sehr geringen Temperaturdifferenz. In diesem Modus wurde ein hoher Wärmemengenverbrauch von durchschnittlich ca. 0,7 kWh/Tag gemessen. Gegen Ende der selben Heizperiode wurde der Heizkreis auf eine andere Art geregelt. Hier ist der große Temperaturunterschied zwischen Vor- und Rücklauf auffallend, obwohl der Wärmemengenzähler keinen Volumenstrom und somit auch keine Wärmemenge aufgezeichnet. Das System hat hier versucht zu heizen, jedoch war der Wasserzufluss des Badheizkörpers gesperrt.

Im zweiten Winter (2007/2008) weisen die Daten auf einen sehr gleichmäßigen Betrieb des Zusatzheizkreises hin. Der durchschnittliche Volumenstrom ist mit 8,7 Litern pro Stunde deutlich geringer als im Vorjahr. Die Vor- und Rücklauftemperaturen befinden sich im Bereich von 40 °C und weisen erneut nur eine sehr kleine Temperaturdifferenz auf. In diesem Jahr wurde ein relativ konstanter Wärmemengenverbrauch von durchschnittlich 0,08 kWh/Tag aufgezeichnet. Der monatliche Verbrauch während des gesamten zweiten Auswertungszeitraumes (Mai 2007 bis April 2008) ist in Abbildung 99 dargestellt.



**Abbildung 99: Monatlicher Energieverbrauch des Zusatzheizkreises im zweiten Auswertungszeitraum Mai 2007 bis April 2008.**

#### **Regelung des Badheizkreises im zweiten Auswertungszeitraum (Mai 07-April 08):**

Aus der Datenanalyse geht hervor, dass die Regelung des Badheizkreises mit für die Höhe des Energieverbrauchs vom Kompaktgerät ausschlaggebend ist. Die generelle Steuerung sowie die Einstellung einer angemessenen Vorlauftemperatur und der Vorrang gegenüber der Zuluftheizung und Warmwassererzeugung spielen eine signifikante Rolle für eine effiziente Nutzung.

In Abbildung 100 ist der zeitlich geregelte Betrieb des Badheizkreises deutlich zu erkennen: Ein durchgängiger Nachtbetrieb zwischen 18 Uhr und 7 Uhr morgens unter der Woche und ein fast ununterbrochener Wochenendbetrieb, bis auf Absenkungen um die Mittagszeit. Dies entspricht den manuell eingestellten Betriebszeiten und der gewählten Vorlauftemperatur von 40 °C. Sobald diese Temperatur für einen gewissen Zeitraum unterschritten wird, geht die Wärmepumpe in Betrieb um den Vorlauf wieder zu erhöhen. Dies führt zu einem taktenden Betrieb der Wärmepumpe die ganze Nacht hindurch, was die Effizienz deutlich beeinträchtigt. Am Wochenende ist ein kontinuierlicher Betrieb der Badheizung am Kompaktgerät eingestellt, die Unterbrechungen werden durch die tägliche geregelte Aufheizung des Warmwasserspeichers mit Vorrangbetrieb verursacht (vgl. Abschnitt 6.1.2). Unter der Woche geben die geregelten Schaltzeiten einen Betrieb ab 16 Uhr vor, welcher aber durch die regelmäßige Speichererwärmung für zwei Stunden verzögert wird.

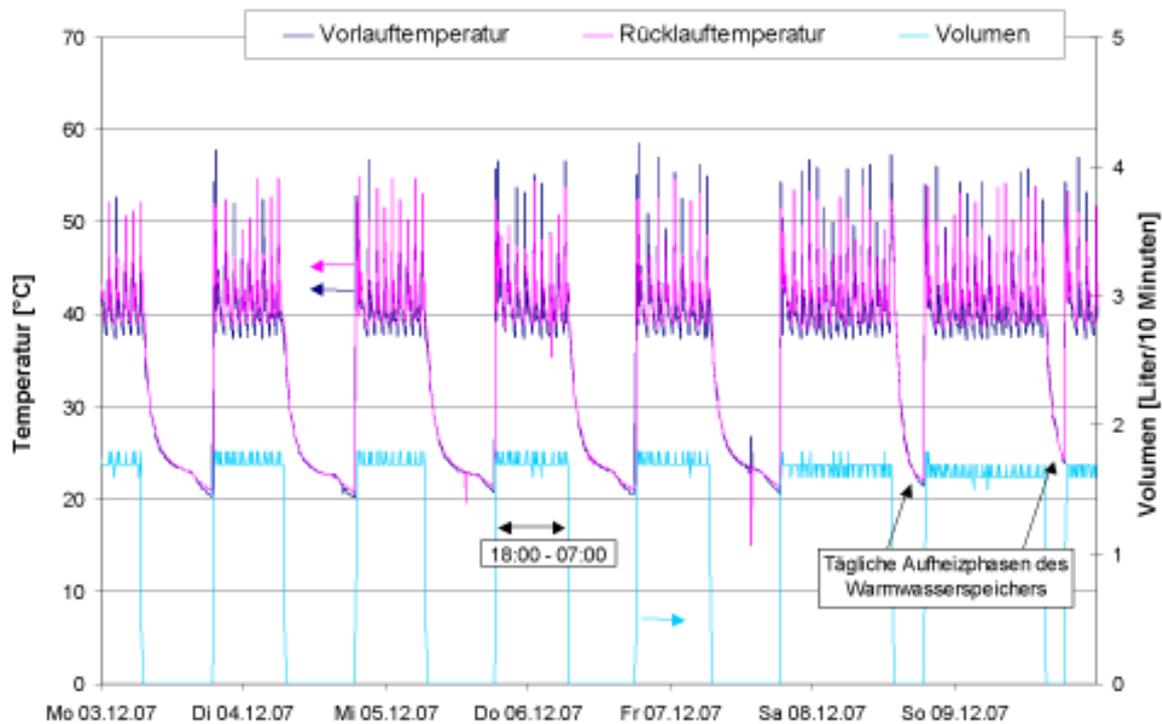


Abbildung 100: 10 Minuten Daten der Badheizung für eine Beispielwoche im Dezember 2007.

Ausschließlich während den Betriebszeiten des Badheizkreises wurde ein Stromverbrauch des Wärmepumpenkompressors von durchschnittlich  $4,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  aufgezeichnet. Dies ist mehr als 14 mal die Energiemenge, die der Wohnung über den Badheizkreis letztendlich zugeführt wurde ( $0,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ). Die Wärmeabgabe des Badheizkörpers wird - unabhängig vom Kompaktgerät - von einem Thermostat geregelt. Bedingt durch die ungünstige zeitliche Steuerung des Heizkreises wird hier mehr Energie von der Wärmepumpe zur Verfügung gestellt als der Abnehmer, also der Badheizkörper, tatsächlich an den Raum abgibt. Die überschüssige Energie kommt dem Raum als Abwärme des Geräts zugute, die nicht direkt messbar ist. Im ungünstigsten Fall kann die Umsetzung der Wärmepumpe durch den taktenden Betrieb einer direktelektrischen Beheizung gleichgesetzt werden (dies entspricht einer Leistungszahl von 1), somit beträgt die durch Verluste des Badheizkörperbetriebs verursachte Abwärme mindestens  $4,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ .

In den manuell anpassbaren Schaltzeiten des Badheizkreises wurde der Betrieb des Heizkreises zwischen 22:45 und 6:00 auf „reduziert“ gestellt. Dies ist irreführend, da es nur unter bestimmten Randbedingungen, die hier nicht erfüllt werden, tatsächlich zu einem reduzierten Betrieb kommen kann. Von uns wird angenommen, dass der durchgehende nächtliche Betrieb, der einen hohen unnötigen Stromverbrauch verursacht, vom Nutzer nicht beabsichtigt war. Um Missverständnisse zu vermeiden,

sollten diese Grundeinstellungen des Geräts eindeutiger sein oder von einem Fachmann vorgenommen werden.

Ein weiteres, weniger bedeutendes Einsparpotential besteht darin, die Beheizung über den Badheizkreis während längeren Abwesenheitszeiten zu reduzieren oder sogar ganz abzustellen. Im Oktober 2006 lässt sich an den Aufzeichnungen des Warmwasser-Wärmemengenzählers erkennen, dass die Wohneinheit temporär unbewohnt war. Die Badheizung läuft in diesem Zeitraum weiterhin jede Nacht hindurch. Durch Einstellung des Ferienprogramms besteht die Möglichkeit den Heizkreis auf Frostschutzüberwachung zu reduzieren ohne die täglichen Schaltzeiten manuell anpassen zu müssen.

## 6.1.4 Lüftung

Im Kompaktgerät Vitotres 343 kann auch der Volumenstrom mit einem zeitlichen Lüftungsprogramm vorprogrammiert werden, dies ermöglicht z.B. eine tägliche Absenkung während Abwesenheit der Bewohner. Der Nutzer hat jederzeit die Möglichkeit, diese Grundeinstellung temporär zu übersteuern, in dem er an der Fernsteuerung oder einem Drehregler am Gerät selber den momentan gewünschten Volumenstrom einstellt. Der momentane Soll- und Istwert des Volumenstroms ist am Gerät jederzeit ablesbar, auch die Drehzahl der Ventilatoren ist prozentual angegeben.

Während der vorliegenden messtechnischen Begleitung wurden weder der Volumenstrom noch die Ventilatorenleistungen separat gemessen. Aus den aufgezeichneten Temperaturen geht hervor, dass die Anlage durchgängig in Betrieb war und die Schaltzeiten des Lüftungsprogramms umgesetzt wurden. Um Abschätzungen für die Energieverbräuche treffen zu können liegt der Daten-auswertung eine Lüftereffizienz von  $0,45 \text{ Wh/m}^3$  nach [Viessmann 2006] zugrunde und die Annahme, dass zu jedem Zeitpunkt der eingestellte Volumenstromsollwert der Lüftungsschaltzeiten vom Gerät konstant zur Verfügung gestellt wurde. Der Nennvolumenstrom ist nach den hygienischen Anforderungen ausgelegt, dies führt im Normalbetrieb zu einem Volumenstrom von ca.  $70 \text{ m}^3/\text{h}$  (Mindestvolumenstrom der Anlage).

### Zuluftheizung

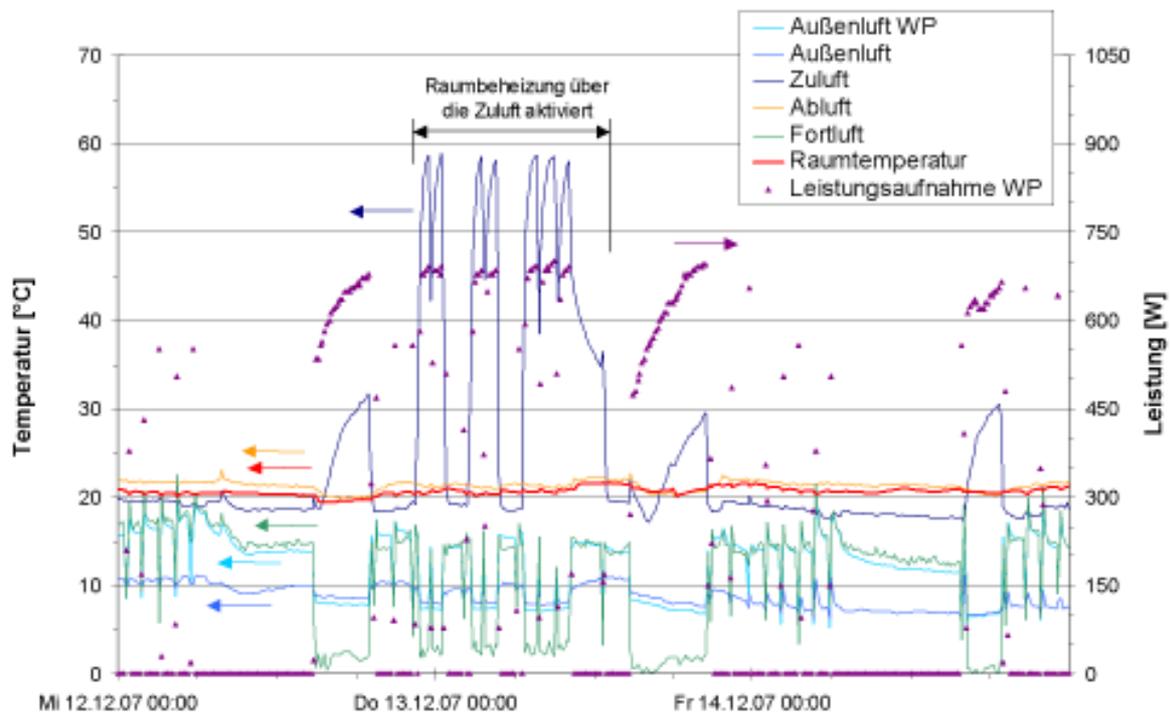
In dem installierten System ist eine Wärmezufuhr hauptsächlich über die Zuluft vorgesehen, mit gelegentlicher Unterstützung durch einen Badheizkörper. Die Aktivierung der Zuluftnachheizung wird automatisch über den Raumtemperatursensor und eine einstellbare Hysterese gesteuert.

Bei der Datenanalyse fallen zwei Merkmale besonders auf:

- Eine effektive Beheizung über die Zuluft findet nur sehr selten statt.

- Die Zuluft wird täglich ganzjährig über den gesamten Auswertungszeitraum um etwa die gleiche Zeit um 10 bis 15 K aufgeheizt, unabhängig von den Temperaturverhältnissen.

Im zweiten Winter (2007/2008) wird die Raumbeheizung über die Zuluft nur ein einziges mal erkennbar aktiviert, in der Nacht vom 13. Dezember 2007 (Abbildung 101). Es ist wahrscheinlich, dass der Bewohner zu diesem Zeitpunkt die Raum-Solltemperatur hochgestellt hat da aus den Daten keine Raumtemperaturabsenkung erkennbar ist, die eine automatische Beheizung aktiviert hätte. Für diese temporäre Zuluftbeheizung wurde für den Kompressor der Wärmepumpe eine Leistungsaufnahme von 4,7 kWh über einen Zeitraum von ca. 10 Stunden aufgezeichnet. Bei einem angesetzten Volumenstrom von 95 m<sup>3</sup>/h (Partylüftung) wurde eine Energiezufuhr von ca. 9,2 kWh über die Zuluft berechnet. Hieraus ergibt sich für die Wärmepumpe in dieser Periode eine Leistungszahl von 2 (ohne Berücksichtigung elektrischer Hilfskomponenten).

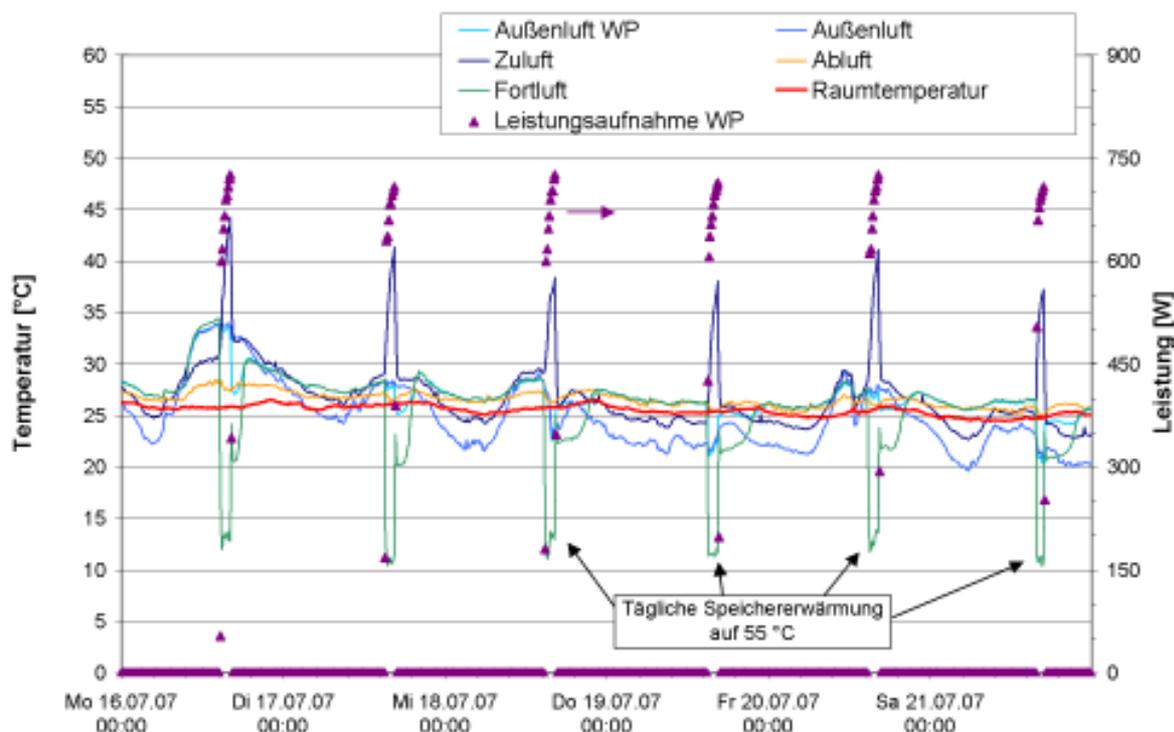


**Abbildung 101:** Ein Beispiel für die Raumbeheizung über die Zuluft am 13. Dezember 2007. Bei gleichzeitigem Betrieb wechseln sich die Pumpen für die Zuluftbeheizung und den Badheizkreis im zweistündigen Takt ab.

Da insgesamt außer am 13. Dezember 2007 keine nennenswerte aktive Beheizung über die Zuluft stattgefunden hat, muss der Heizwärmebedarf der Wohneinheit auf eine andere Weise gedeckt worden sein. Wie bereits beschrieben, wird dem Heizkreis von der Wärmepumpe bedingt durch die Steuerung des Badheizkreises und der Speichererwärmung für den Warmwasserverbrauch eine Menge an überschüssiger Energie zur Verfügung gestellt, die als Abwärme und

Speicherverluste zur Raumheizung beitragen. Diese Abwärme und die sonstigen internen Wärmequellen reichen aus um den Sollwert der Raumtemperatur zu halten.

Die tägliche Zulufterwärmung um 10 bis 15 K (Abbildung 102) ist ein „Nebenprodukt“ der vorprogrammierten Speichere Erwärmung um 18:00 Uhr (vgl. Abschnitt 6.1.2). Besonders im Sommer ist diese zusätzliche Wärmequelle im Raum unerwünscht, sie trägt zu möglichen Übertemperaturen bei und sollte daher im Sommer dringend unterbunden werden.



**Abbildung 102:** Die 10 Minuten Daten einer Beispielwoche im Juli 2007: Als „Nebenprodukt“ der täglichen Speichere Erwärmung wird das ganze Jahr hindurch die Zuluft aufgeheizt.

Unter der Annahme, dass zu jedem Zeitpunkt tatsächlich die im Gerät einprogrammierten Volumenströme zur Verfügung standen und eventuelle temporäre manuelle Einstellungen des Bewohners vernachlässigbar sind, kann berechnet werden, wie viel Energie dem Raum insgesamt über die tägliche Zulufterwärmung zugeführt wurde. Hierfür wurde für jeden Monat eine mittlere Rückwärmezahl nach [VDI 2071] angesetzt. Zwischen Mai 2007 und April 2008 betrug die Wärmezufuhr als „Nebeneffekt“ der Speichere Erwärmung etwa  $5,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ , aufgeteilt in  $1,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  während des Sommers (unerwünscht) und  $3,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  im Winter (nutzbar). Hinzu kommen  $0,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  für die aktive Zuluftheizung im Dezember. In Abbildung 103 ist der Jahresverlauf mit monatlichen Werten grafisch dargestellt.

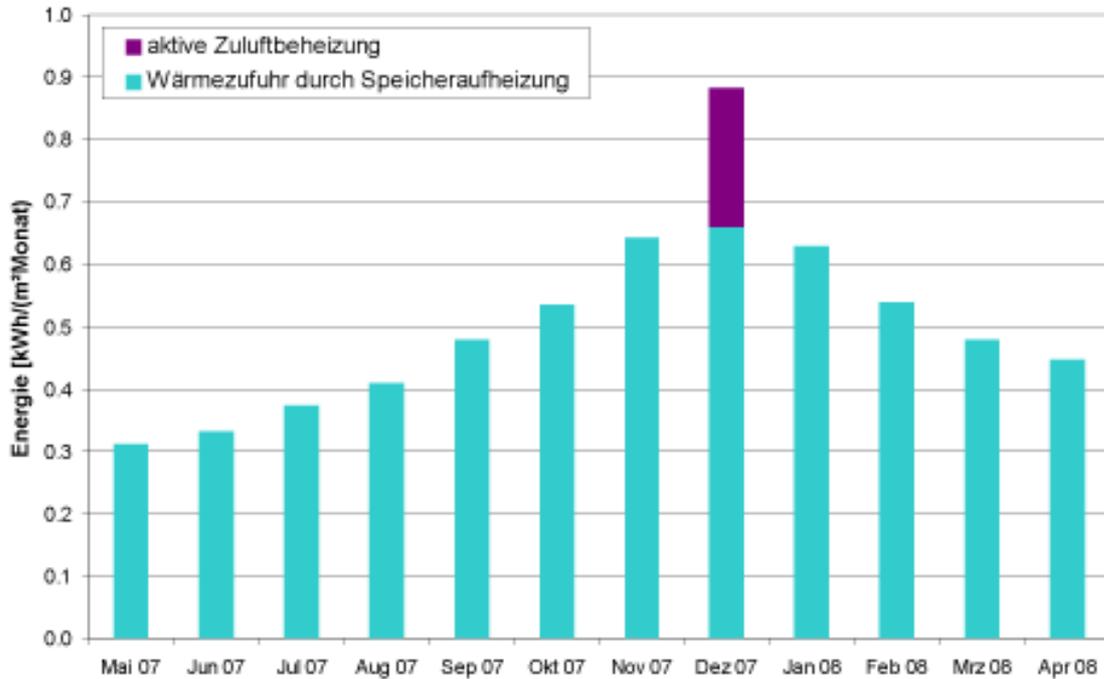


Abbildung 103: Dem Raum im zweiten Auswertungszeitraum monatlich über die Zuluft zugeführte Heizwärme.

## Wärmerückgewinnung

Eine Grundlage zur Heizenergieeinsparung in Passivhäusern ist die passive Vorerwärmung der Zuluft während der Heizperiode mit Hilfe eines hocheffizienten Wärmeübertragers zur Wärmerückgewinnung aus der Abluft. Dem technischen Datenblatt zufolge hat das Vitotres 343 einen Wärmebereitstellungsgrad von über 80%.

Eine Berechnung der tatsächlichen Rückwärmezahl des installierten Geräts wurde anhand der gemessenen Lufttemperaturen während des zweiten jährlichen Auswertungszeitraums (Mai 2007 bis April 2008) durchgeführt. Unter der Annahme, dass die Massenströme der Zu- und Abluft zu jedem Zeitpunkt ausbalanciert sind, können zwei Berechnungsmethoden angewendet werden.

Nach der VDI-Richtlinie [VDI 2071] gilt die folgende Gleichung zur Berechnung der Rückwärmezahl:

$$\eta = \frac{T_{ZU} - T_{AU}}{T_{AB} - T_{AU}}$$

Bei den gemessenen Temperaturverhältnissen über einen komplette Heizperiode (2007/2008), führt dies zu einem mittleren Wert von **78,1 %**. Für die Energiebilanz einer Wohneinheit kann dieser Wert jedoch nicht verwendet werden, da nicht die entscheidenden Werte am Durchtrittspunkt der Luftströme für die Bilanzgrenze ver-

wendet werden. Zudem wird hier der Effekt des Ventilatorstroms nicht ausgewiesen sondern der passiven Wärmerückgewinnung zugeschrieben.

Vom Passivhaus Institut wird daher für die Berechnung des effektiven trockenen Wärmebereitstellungsgrades folgende Formel verwendet:

$$\eta = \frac{T_{AB} - T_{FORT} + \frac{P_{el}}{\dot{m} \times c_p}}{T_{AB} - T_{AU}}$$

Da der Volumenstrom und die zugehörigen Leistungsaufnahmen der Ventilatoren nicht separat gemessen wurden, kann auch dieser Wärmebereitstellungsgrad nur unter den bereits genannten Annahmen bestimmt werden. Das Ergebnis ist nach dieser Auswertung ein mittlerer Wärmebereitstellungsgrad von **69,3 %**.

### Sommerbypass

Die Datenauswertung bestätigt, dass in der warmen Jahreszeit ein Sommerbypass verwendet wurde um die Wärmerückgewinnung zu umgehen und somit nicht zur unerwünschten Überwärmung des Wohnraumes beizutragen. Der Zeitpunkt an dem der Bypass geschlossen wurde, ist deutlich an einer Erhöhung des Zulufttemperaturniveaus und Senkung der Fortlufttemperatur zu erkennen (Abbildung 104). Diese Aktivierung der Wärmerückgewinnung findet jedoch erst zu einem auffällig späten Zeitpunkt statt. Vor diesem Zeitpunkt hat keine aktive Beheizung über die Zuluft stattgefunden, die Solltemperatur im Raum wurde allein durch interne Wärmequellen (Personen und Geräte, inklusive der Abwärme des Kompaktgeräts) gehalten. Die Wärmeabgabe des Kompaktgeräts war durch die Regelung des Badheizkreises überdurchschnittlich hoch, der Gesamtverbrauch des Kompaktgeräts könnte mit einer früheren Aktivierung der Wärmerückgewinnung zur passiven Beheizung anstelle der aktiven Beheizung über den Badheizkreis erheblich gesenkt werden.

Die Wärmerückgewinnung wird vom Gerät unter bestimmten Bedingungen automatisch durch den Sommerbypass umgangen und wieder in Betrieb genommen. Hierfür muss der Temperaturunterschied zwischen Soll- und Istwert der Raumtemperatur einen einstellbaren Hysterese-Wert über- bzw. unterschreiten, zur Öffnung des Bypasses wird zusätzlich geprüft, ob die Außenlufttemperatur um den eingestellten Hysterese-Wert unter der Fortlufttemperatur liegt. Den Daten ist zu entnehmen, dass diese Einstellung auch während der Heizperiode dazu führen kann, dass die Wärmerückgewinnung temporär umgangen wird (Abbildung 105). Hier wurde durch den Badheizkreis geheizt und gleichzeitig durch Öffnung des Bypasses wieder gekühlt. Dieser kontraproduktive Effekt sollte z.B. durch eine saisonale Sperrung des Bypasses vermieden werden.

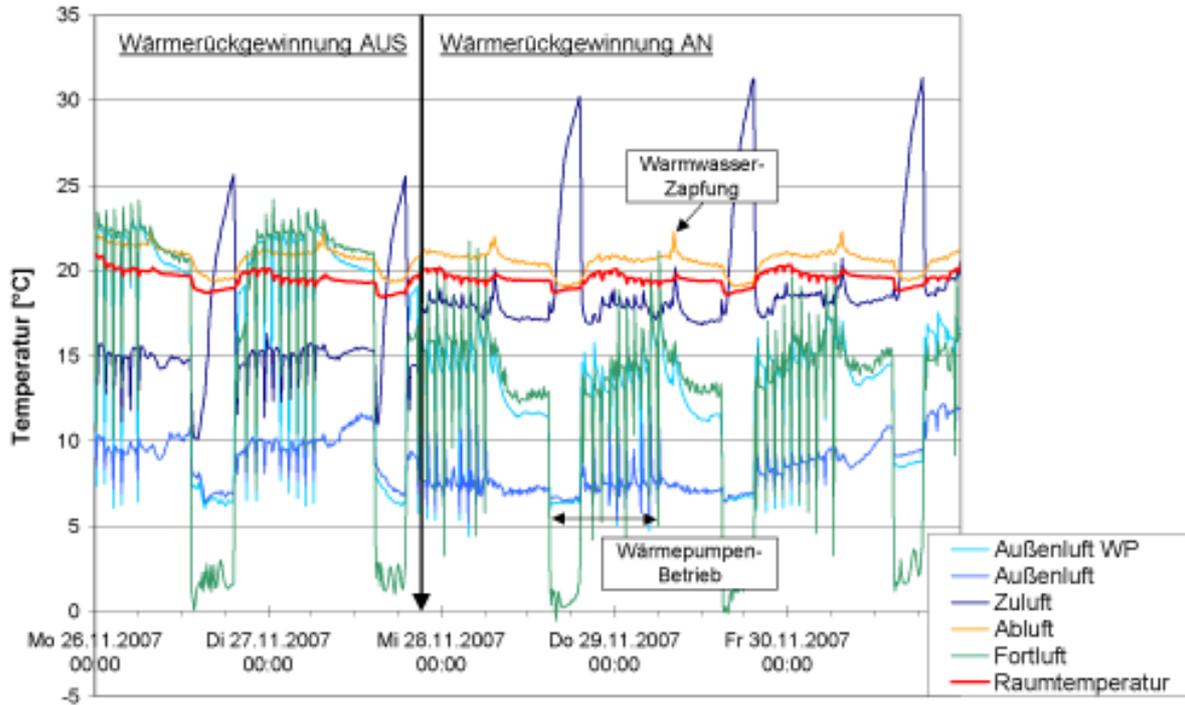


Abbildung 104: Die Einschaltung der Wärmerückgewinnung geht aus den Temperaturmessungen eindeutig hervor: Ab dem 27. November 2007 um ca. 21 Uhr liegt die Zuluft- deutlich über der Fortlufttemperatur.

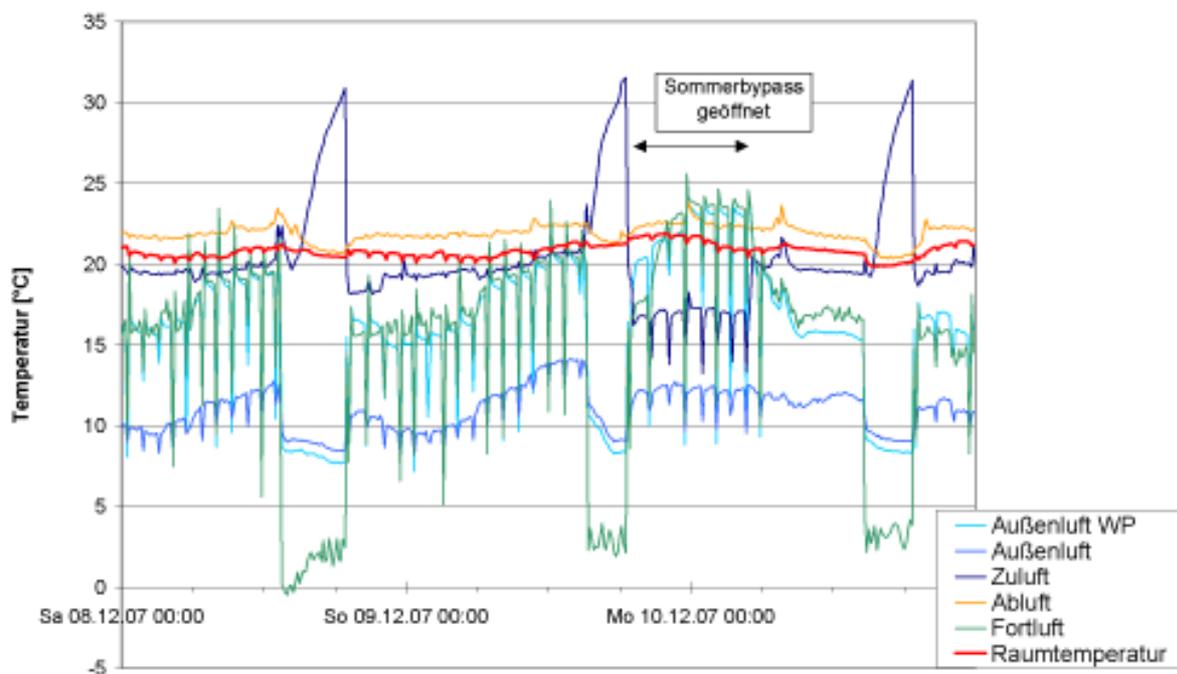


Abbildung 105: Beispiel einer temporären Öffnung des Sommerbypasses der Wärmerückgewinnung während der Heizperiode 2007/2008 (am 09. Dezember 2007 um 19 Uhr für etwa 10 Stunden).

## 6.1.5 Stromverbrauch

Durch die monovalente Versorgung des Kompaktgeräts kann allein durch dessen elektrischen Stromverbrauch eine Aussage über den Versorgungsenergieverbrauch (Heizung, Lüftung, Warmwasser) der Wohneinheit getroffen werden. Der gesamte Energiebedarf wird zentral von diesem einen Gerät zur Verfügung gestellt und verteilt. Die Datenauswertung ermöglicht eine Aufteilung der zur Verfügung gestellten Energie auf die verschiedenen Abnehmer.

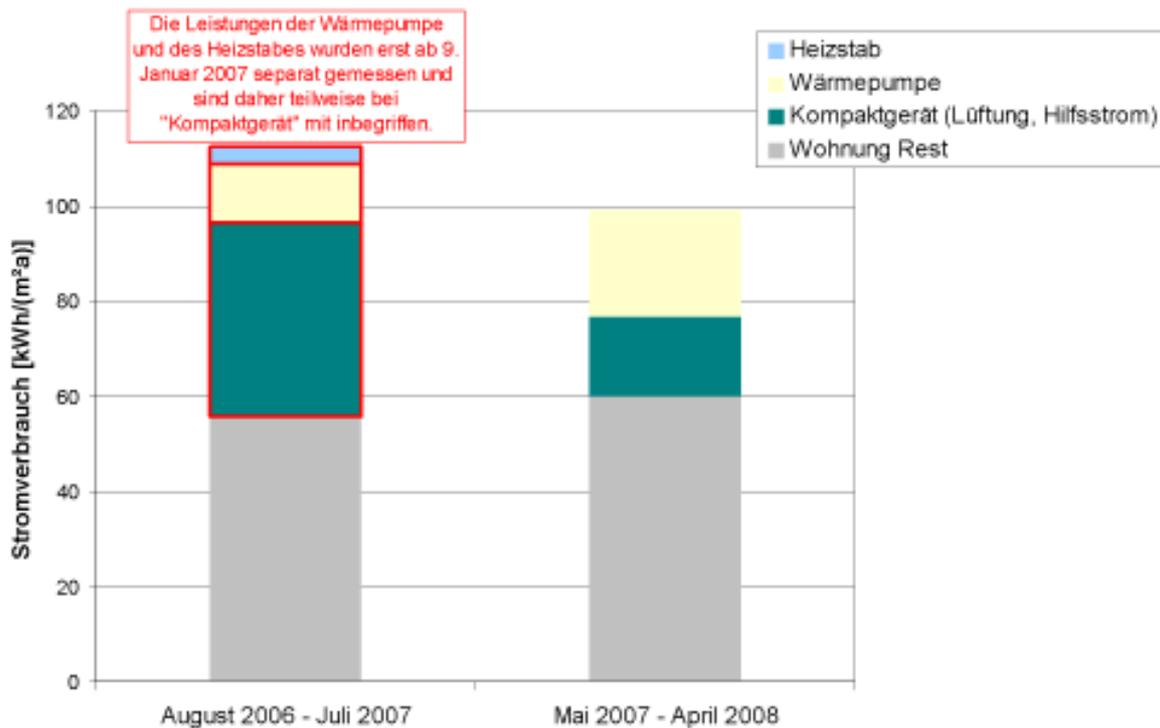
Insgesamt sind in der Wohnung vier Stromzähler installiert mit denen die jeweiligen Verbräuche aufgezeichnet wurden. Es gibt einen Hauptzähler für den Gesamtverbrauch der Wohnung mit einem Unterzähler für das Kompaktgerät. Zusätzlich werden gesondert die Leistungen bzw. Verbräuche des Wärmepumpenkompressors und des Heizstabs protokolliert. Die gemessenen Daten sind in Tabelle 20 und Tabelle 21 aufgelistet und in Abbildung 106 grafisch dargestellt. Der Vergleich der beiden vermessenen jährlichen Auswertungszeiträume bestätigt die Verursachung eines merklichen Mehrverbrauchs im ersten Jahreszeitraum durch eine schlechtere Regelung des Geräts.

**Tabelle 20: Die gemessenen Stromverbräuche zwischen August 2006 und Juli 2007. Die Verbräuche von Heizstab und Kompressor wurden erst ab Januar 2007 separat aufgezeichnet.**

	Verbrauch [kWh/(m <sup>2</sup> a)]		Verbrauch [kWh/(m <sup>2</sup> a)]
Kompaktgerät	56,6	→ Unterzähler im Kompaktgerät	
Haushaltsstrom	55,7		Heizstab > 3,6
<b>Summe</b>	<b>112,3</b>		Kompressor > 12,3
			Rest (Lüftung & Hilfsstrom) < 40,7

**Tabelle 21: Die gemessenen Stromverbräuche zwischen Mai 2007 und April 2008.**

	Verbrauch [kWh/(m <sup>2</sup> a)]		Verbrauch [kWh/(m <sup>2</sup> a)]
Kompaktgerät	39,4	→ Unterzähler im Kompaktgerät	
Haushaltsstrom	59,8		Heizstab 0,2
<b>Summe</b>	<b>99,2</b>		Kompressor 22,4
			Rest (Lüftung & Hilfsstrom) 16,8



**Abbildung 106: Vergleich der gemessenen Stromverbräuche über die beiden jährlichen Auswertungszeiträume.**

Primärenergetisch betrachtet liegt der gemessene Energieverbrauch für die Versorgung der Wohneinheit (Warmwasser, Heizung, Lüftungs- und Technikstrom) *ohne* Berücksichtigung des Haushaltstroms unter Anwendung des Primärenergiefaktors für Strom von 2,7 nach [Gemis] im ersten Auswertungszeitraum bei 152,81 kWh/(m<sup>2</sup>a) und im zweiten bei 106,3 kWh/(m<sup>2</sup>a). Diese Werte sind deutlich höher als der vergleichbare Primärenergieverbrauch (ohne Haushaltsstrom) der restlichen zentral versorgten Wohnungen im 4er Block mit 65,5 kWh/(m<sup>2</sup>a). Das installierte Kompaktgerät bietet in diesem Fall mit der eingestellten internen Regelung offensichtlich keine vorteilhafte Alternative als Versorgungssystem.

In anderen bereits realisierten Projekten schneiden Kompaktgeräte weitaus besser ab. Bei Projektmessungen des Fraunhofer ISE wurden durchschnittliche Kompaktgerätestromverbräuche von nur 14 kWh/(m<sup>2</sup>a) nachgewiesen [Bühning 2003]. Ein Teil des Warmwassererhitzung wurde hier jedoch durch einen angeschlossenen Solarkreis zur Verfügung gestellt. Aus dem Abschlussbericht zur messtechnischen Validierung des Energiekonzepts einer Passivhaussiedlung in Stuttgart-Feuerbach [Reiß 2003] gehen für die Bereitstellung von Warmwasser und für die Raumbeheizung Stromverbräuche der Wärmepumpe und des Heizstabes von insgesamt 9,7 kWh/(m<sup>2</sup>a) (Mittelwert der Wohneinheiten) hervor. Dieser Wert beträgt weniger als die Hälfte des hier gemessenen vergleichbaren Verbrauchs von 22,6 kWh/(m<sup>2</sup>a) und weist somit auf einen wesentlich effizienteren Betrieb hin. Die Ergebnisse der vorliegenden Auswertung sollten daher nicht falsch interpretiert werden; das Prinzip des Kompaktgeräts und die Umsetzung haben sehr großes Potential als hocheffizientes Versorgungssystem, jedoch müssen das Gerätedesign und die Inbetriebnahme

korrekt durchgeführt werden. Die Regelung des Geräts ist grundlegend für den effizienten Betrieb.

Wie zu erwarten, ist der gesamte Energieverbrauch der Wohnung in den Wintermonaten wesentlich höher als in den Sommermonaten (Abbildung 107). Hierbei bildet der Haushaltsstromverbrauch einen „Grundsockel“ von durchschnittlich 4,9 kWh/(m<sup>2</sup>Monat). Hinzu kommt der Verbrauch des Kompaktgeräts (inkl. Wärmepumpe und Heizstab) von durchschnittlich 2 kWh/(m<sup>2</sup>Monat) im Sommer (Mai bis September) und 4,2 kWh/(m<sup>2</sup>Monat) während den Wintermonaten (Oktober bis April). Diese Mittelwerte wurden aus den aufgezeichneten Daten zwischen Mai 2007 und April 2008 ermittelt.

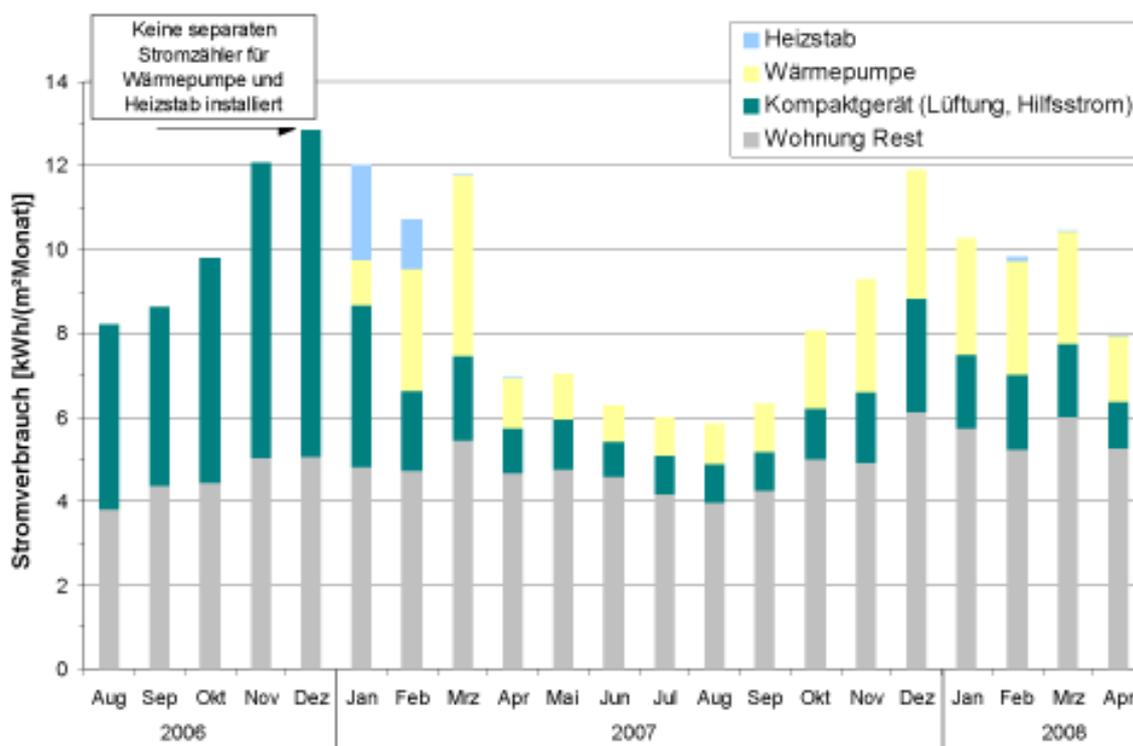


Abbildung 107: Die gemessenen monatlichen Stromverbräuche der Wärmepumpe, des Heizstabs, der restlichen Kompaktgerätkomponenten (Lüftung, Pumpen, Regelung etc.) und der restlichen Wohnungsnutzung.

## Elektrische Leistungsaufnahmen der Komponenten im zweiten Auswertungszeitraum (Mai 2007 und April 2008)

### Lüftung und Hilfsstrom

Über den kompletten Jahreszeitraum hinweg sind 42,6 % der gesamten Leistungsaufnahme des Kompaktgeräts der Lüftung und dem Hilfsstroms für den internen Kreislauf und die Regelung zuzuschreiben (16,8 kWh/(m<sup>2</sup>a)). Dieser Wert hängt stark von der Effizienz der eingesetzten Pumpen, Ventilatoren und Regelungstechnik ab. Da nur teilweise Information zu den Kennwerten der internen Komponenten vorliegt, können im Rahmen dieses Berichts nur Abschätzungen zum elektrischen Verbrauch einiger internen Komponenten gemacht werden.

Nach [Wolf 2009] beträgt die elektrische Leistungsaufnahme der Regelung (ohne Verbraucher) bereits 12 W. Über einen gesamten Jahreszeitraum summiert sich dieser Verbrauch auf 2,6 kWh/(m<sup>2</sup>a) was bereits 15,4 % des Hilfsstromverbrauchs ausmacht. Für die interne Pumpe wurde über das Jahr hinweg eine Betriebszeit von 1157 Stunden aufgezeichnet. Bei einer elektrischen Leistungsaufnahme zwischen 45 W und 110 W (je nach Betriebsstufe) führt dies zu einem Verbrauch zwischen 1,3 kWh/(m<sup>2</sup>a) und 3,1 kWh/(m<sup>2</sup>a), also 7,6 – 18,6 % des Gesamthilfsstromverbrauchs. Die Außen- und Fortluftventilatoren laufen das ganze Jahr hindurch, unter Annahme einer Lüftereffizienz von 0,45 Wh/m<sup>3</sup> und konstanter Umsetzung der einprogrammierten Volumenströme ergibt sich hieraus eine elektrische Leistungsaufnahme von ca. 8 kWh/(m<sup>2</sup>a) bzw. 48 % des Jahreshilfsstroms. Dies ist der Hauptverbraucher. Hinzu kommt der zusätzliche Außenluftventilator der bei Wärmepumpenbetrieb den erforderlichen Mindestvolumenstrom zur Verfügung stellt. Die Betriebszeit der Wärmepumpe beträgt ca. 1429 Stunden im Jahr (16 % der Gesamtstundenanzahl).

### Heizstab

Der Anteil der Leistungsaufnahme des Heizstabes beträgt über das gesamte Jahr hinweg nur 0,5 % des Gesamtstromverbrauchs des Kompaktgerätes. Die direktelektrische Beheizung über den Heizstab ist hysteresegesteuert und wird nur dann aktiviert, wenn die Heizleistung der Wärmepumpe nicht ausreicht (stufenweise mit 2 kW, 4 kW oder 6 kW, je nach Bedarf). In den Einstellungen des Geräts kann die Funktion der Beheizung über den Heizstab für das Warmwasser oder für die Raumbeheizung (Zuluft und Badheizkreis) unabhängig voneinander aktiviert bzw. deaktiviert werden. Im betrachteten Zeitraum wird die Elektroheizung *ausschließlich* zur Erwärmung des Warmwassers genutzt. Der Verbrauch beträgt 0,18 kWh/(m<sup>2</sup>a). Die Leistung der Wärmepumpe hat bis auf wenige Ausnahmen also ausgereicht um die gewünschte Warmwassertemperatur zur Verfügung zu stellen.

## Wärmepumpe

Mit einem Anteil von 56,9 % der Jahresleistungsaufnahme des Kompaktgeräts stellt die Wärmepumpe den Hauptverbraucher dar. Der Betrieb ist in den Sommermonaten und während der Heizperiode sehr unterschiedlich (Abbildung 108 und Abbildung 109), wodurch im Sommer ein durchschnittlicher monatlicher Stromverbrauch von 1 kWh/(m<sup>2</sup>Monat) und im Winter von 2,5 kWh/(m<sup>2</sup>Monat) entstanden sind.

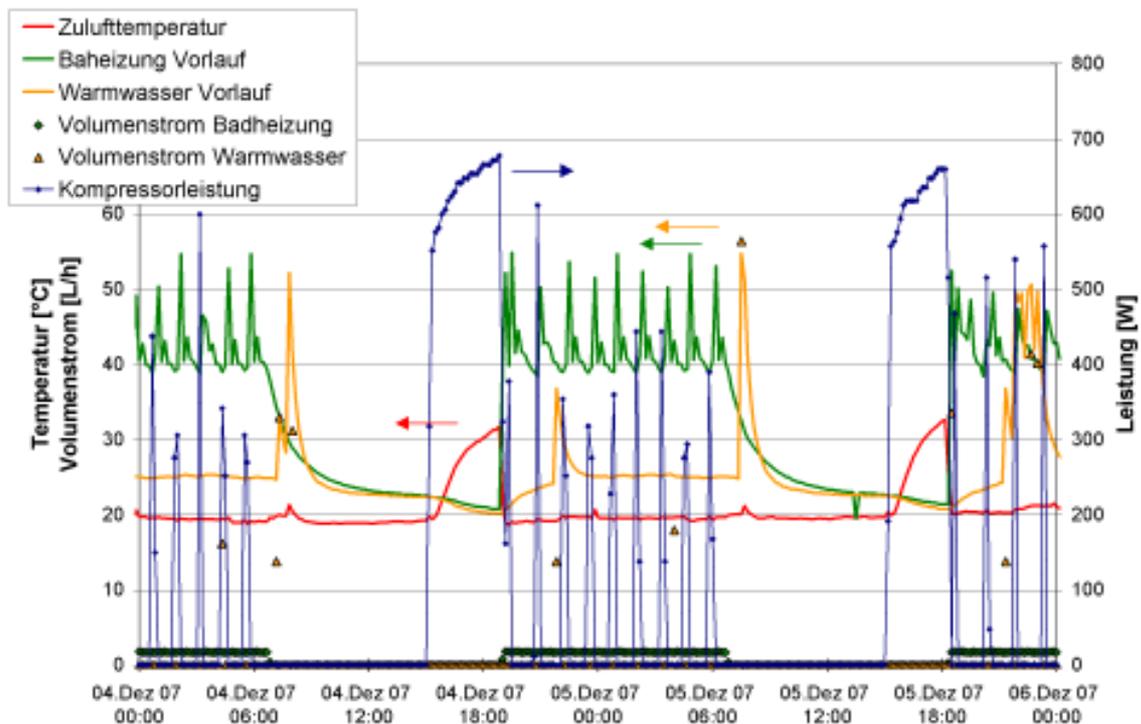


Abbildung 108: Beispiel für den täglichen Betrieb der Wärmepumpe während der Heizperiode 2007/2008 (Ausschnitt: 10 Minuten Daten am 4. und 5. Dezember 2007).

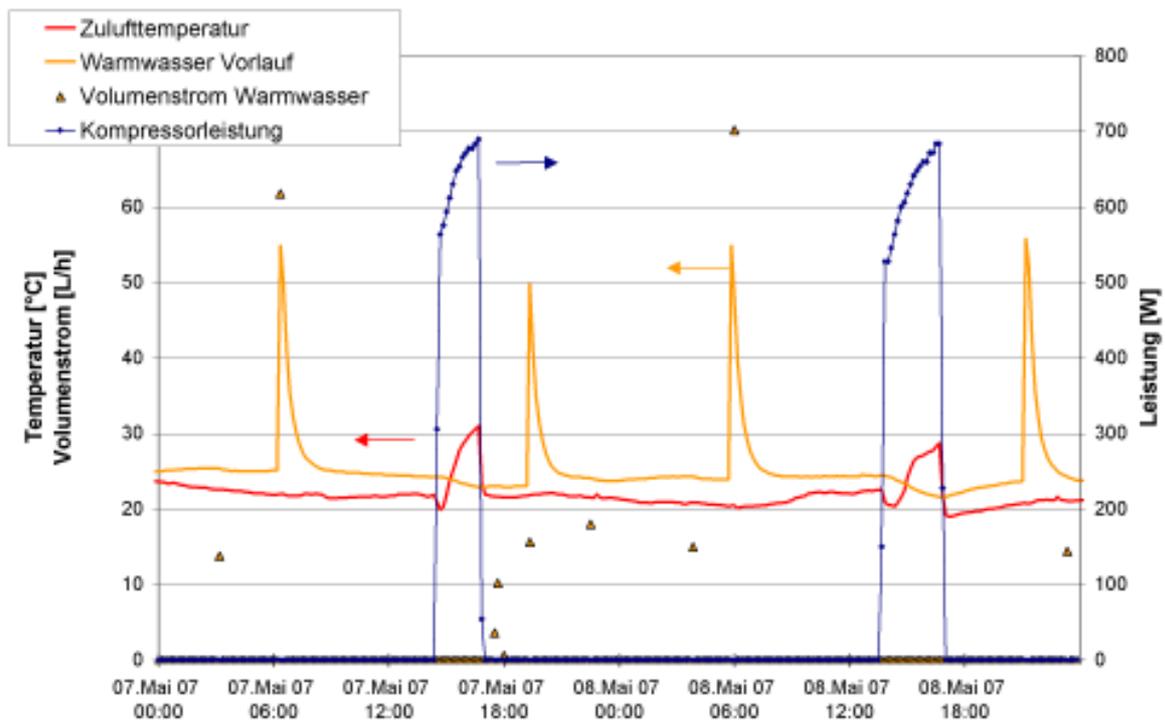


Abbildung 109: Beispiel für den täglichen Betrieb der Wärmepumpe im Sommer (Ausschnitt: 10 Minuten Daten am 7. und 8. Mai 2007).

## 6.1.6 Energiebilanz

Außerhalb der Heizperiode stellt die Wärmepumpe ausschließlich den Energiebedarf für das Trinkwarmwasser zur Verfügung. Aus den Daten geht hervor, dass ein Teil der hierbei erzeugten Energie der Zuluft zugeführt wird (vgl. Abschnitt 6.1.4) und die Speicherverluste den Energieverbrauch durch die eigentliche Warmwasserzapfung deutlich überschreiten. Im Winter ist der Energieverbrauch der Wohnung höher, zusätzlich zur Trinkwassererwärmung muss aktiv geheizt werden, wodurch sich die Betriebsbedingungen und der resultierende Stromverbrauch der Wärmepumpe ändern. Die Raumheizung geschieht zum Teil über den Betrieb des Badheizkreises, wobei nur ein Bruchteil der Energie über den Badheizkörper selbst abgegeben wird und der Rest dem Raum über die Geräteabwärme sowie Speicherverluste zugeführt wird. Die aktive Beheizung über die Zuluft wird nur einmal im gesamten Auswertungszeitraum aktiviert. Der monatliche gemessene Energieverbrauch im Vergleich mit der Leistungsaufnahme der Wärmepumpe und des Heizstabes sind in Abbildung 110 dargestellt. Hier ist wiederum deutlich zu erkennen, dass während der Heizperiode ein wesentlicher Anteil der Heizwärme dem Raum *nicht* kontrolliert über die Zuluft oder den Badheizkörper sondern über Abwärme und Speicherverluste zugeführt wurde.

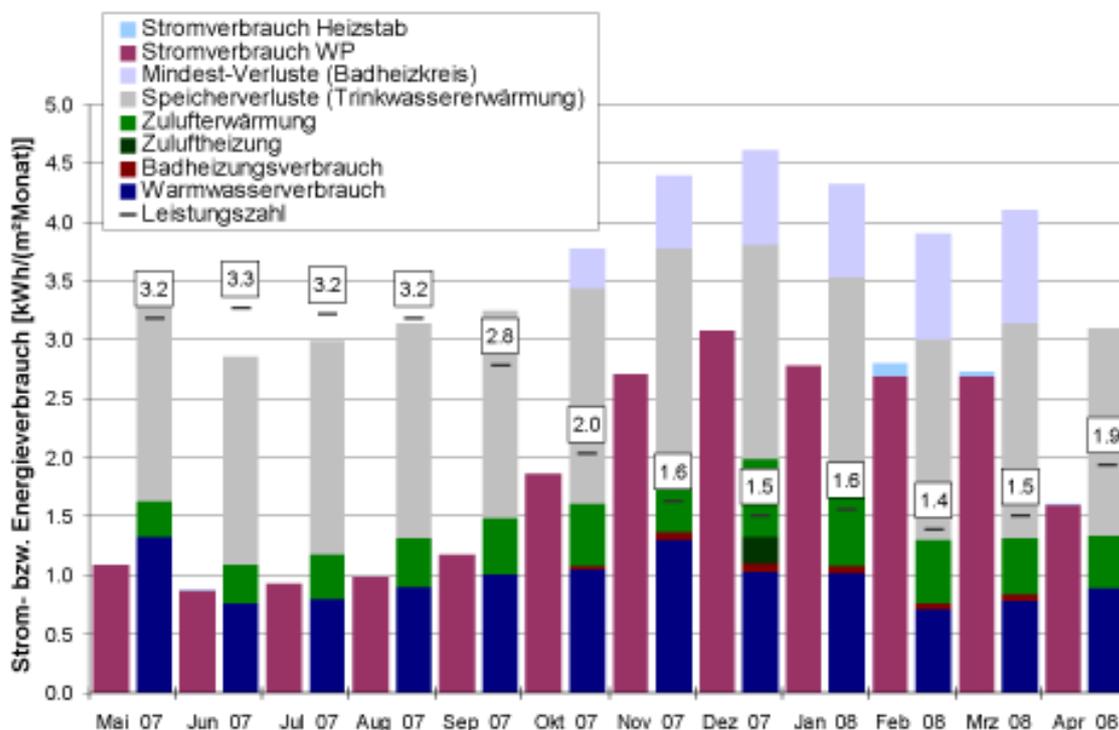


Abbildung 110: Die monatlichen Stromverbräuche des Kompressors und Heizstabes im Vergleich zum aufgezeichneten und abschätzbaren monatlichen Energieverbrauch, sowie die aus diesen Werten resultierende Leistungszahl. Die Speicherverluste durch die Trinkwassererwärmung sind nach [Viessmann 2006] zu 100 W angesetzt, die Mindest-Verluste des Badheizkreises wurden mit einer pessimistischen Arbeitszahl von 1 für die Wärmepumpe abgeschätzt.

Die Effizienz der Wärmepumpe hängt von den Temperatur- und Betriebsverhältnissen ab. In der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung des Geräts [DIBt 2005] sind für die Leistungsziffer (ohne Berücksichtigung der elektrischen Leistungsaufnahme der Ventilatoren) abhängig von der Außenlufttemperatur bei einem Volumenstrom zwischen 70 und 107 m<sup>3</sup>/h folgende Bereiche angegeben: Für die Zulufterwärmung zwischen 1,3 und 1,6, für den Heizungsbetrieb zwischen 2,5 und 3,1 und für die Warmwasserbereitung 1,7 bei einer Außenlufttemperatur von 4 °C. Nach [Bühning 2004] liegt die Leistungszahl der Wärmepumpe (bei deaktiviertem Heizstab) unter dem Messvorgang der DIN EN 225 unter Sommerbedingungen für die Entnahme von Warmwasser bei 2,26 und unter winterlichen Bedingungen bei 2,74.

Aus den gemessenen Daten kann eine Abschätzung der Leistungszahl für jeden Monat getroffen werden (Abbildung 110). Über die Sommerperiode (Mai bis September), also für die Trinkwassererwärmung, ergibt sich eine Leistungszahl im Bereich von 3,1. Diesem Wert liegt ausschließlich der Stromverbrauch des Kompressors zu Grunde ohne Berücksichtigung von elektrischen Hilfskomponenten. Die Wärmeabgabe setzt sich zusammen aus abgeschätzten Werten für die Erwärmung der Zuluft (ungewollte „Sommerheizung“) und thermische Verluste im Aufstellungsraum sowie dem gemessenen Energieverbrauch durch die Warmwasserzapfung. Im Winter führt die gleiche Berechnungsmethode unter zusätzlicher Berücksichtigung des Heizstabes zu Wärmeerzeugung und der Zuluftheizung sowie des Badheizkreises für die Wärmeabgabe zu einer Leistungszahl von ca. 1,6. Hierbei sind auch die Mindestverluste des Badheizkreises inbegriffen, unter der pessimistischen Annahme dass die Leistungszahl der Wärmepumpe im taktenden Nachtbetrieb bei einem Minimum von 1 liegt. Die tatsächlich realisierte Leistungszahl liegt womöglich über 1,6 - mit diesem Ansatz liegt die Bewertung des Geräts auf der sicheren Seite. Die Leistungszahl der Wärmepumpe über den gesamten Jahreszeitraum liegt dann bei 1,9 (ohne Berücksichtigung weiterer elektrischer Hilfskomponenten) und die Jahresarbeitszahl des gesamten Kompaktgeräts bei 1,2 (inkl. der Hilfssysteme).

Über den gesamten Jahreszeitraum ergibt sich mit den ausgewerteten Leistungszahlen ein Heizwärmeverbrauch von 32,3 kWh/(m<sup>2</sup>a) (Abbildung 111). Davon werden 10,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) dem Raum während der Sommerperiode zugeführt und 21,4 kWh/(m<sup>2</sup>a) im Winter (Abbildung 112). Sollte die Wärmepumpe tatsächlich im Badheizkreisbetrieb eine höhere Leistungszahl von z.B. 2 erreichen können, erhöht sich der Heizwärmeverbrauch im Winter auf 26,2 kWh/(m<sup>2</sup>a). Die Wärmeabgabe des Geräts während der Sommermonate als Beiprodukt der Warmwassererwärmung ist zum großen Teil nicht nutzbar und trägt zur Überwärmung bei. Der Verbrauch während der Heizperiode allein ist aussagekräftig über den energetischen Standard der Wohnung. Im Vergleich zu den restlichen sanierten Wohnungen in der Tevestraße ist der berechnete Heizwärmebedarf relativ hoch, befindet sich aber im Rahmen der gemessenen Bandbreite.

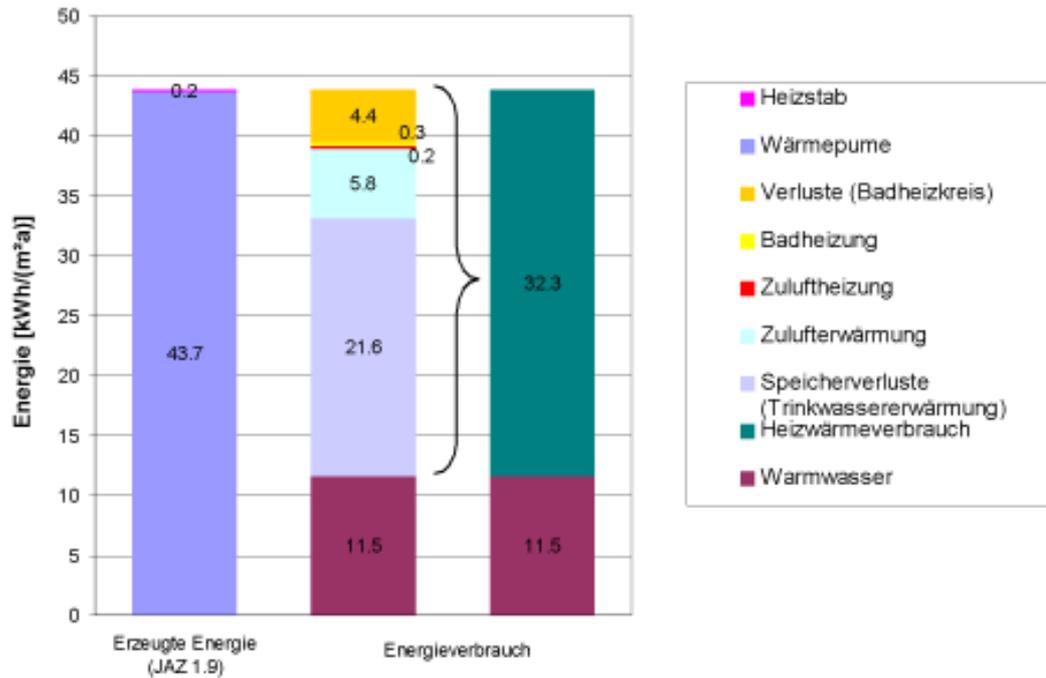


Abbildung 111: Jahresbilanz des Energieverbrauchs für Warmwasser und Heizwärme, unter der Annahme einer Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe von 1,9.

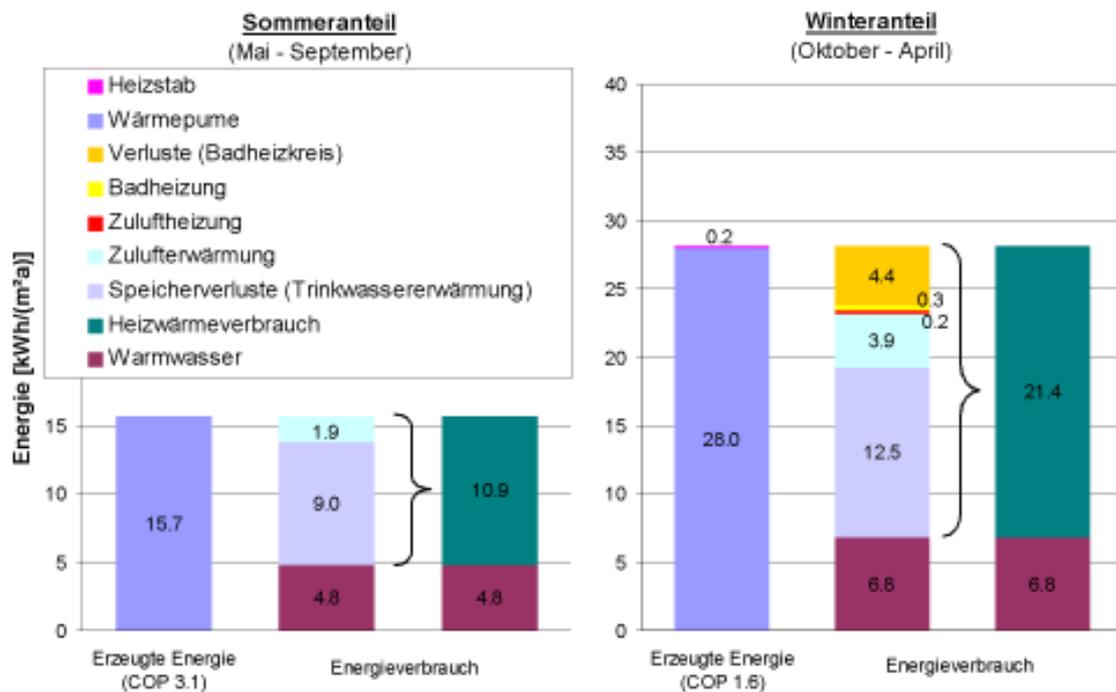


Abbildung 112: Die jährlichen Energieverbräuche aufgeteilt auf die Sommer- und Winterperioden, unter der Annahme durchschnittlicher Leistungszahlen der Wärmepumpe von 3,1 im Sommer und 1,6 im Winter.

## 6.1.7 Fazit Kompaktgerät

Die Versorgung der Beispielwohnung durch ein Kompaktgerät hat sich in diesem Fall nicht als vorteilhaft erwiesen. Der Stromverbrauch für die Versorgung der Wohnung (Warmwasser, Heizung und Lüftung – *ohne* Haushaltsstrom) liegt bei 39,4 kWh/(m<sup>2</sup>a) und hat somit einen Primärenergiekennwert von 106,3 kWh/(m<sup>2</sup>a), 60% mehr als der durchschnittliche Kennwert der restlichen sanierten Wohnungen. Der Heizwärmeverbrauch der Wohneinheit konnte mit einer abgeschätzten Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe während der Wintermonate zu etwa 21,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) berechnet werden.

Die Auswertung der Daten zeigt, dass der unerwartet hohe Stromverbrauch vor allem mit der Regelung und Einstellung des installierten Geräts zusammenhängt. Zusammengefasst besteht in folgenden Bereichen Verbesserungspotential zur höheren Effizienz des Gerätes: Eine Verringerung der Speicherverluste, eine abgestimmte Regelung des Badheizkreises um einen taktenden Betrieb der Wärmepumpe zu vermeiden, die Unterbindung der „Sommerheizung“ über die Zuluft als Beiprodukt der Speichererwärmung, sowie eine Überprüfung der Sommerbypasseinstellungen für eine frühere Aktivierung der Wärmerückgewinnung. Die Wärme wird dem Raum kaum kontrolliert über die Zuluft zugeführt, da ein Großteil des Bedarfs bereits von der Abwärme des Geräts und durch die Speicherverluste abgedeckt wird. Um die Vorlauftemperatur des Badheizkreises zu halten läuft die Wärmepumpe während der Heizperiode im taktenden Betrieb die ganze Nacht hindurch, was sich negativ auf die Leistungszahl auswirkt. Mit einer kontrollierten Beheizung auch über die Zuluft könnten höhere Leistungszahlen der Wärmepumpe erzielt werden. Auch in [Bühning 2003] wird darauf hingewiesen, dass die Abstimmung der Regelung verschiedener Komponenten in einem Kompaktgerät zu einem unnötigen Mehrverbrauch führen kann. Ein Hauptproblem hierbei liegt darin, dass die Problematik vom Bewohner möglicherweise unerkannt bleibt und nur bei einer unerwartet hohen Stromrechnung Rückfragen gestellt werden. Es ist also essentiell, dass die Geräte intensiv unter verschiedenen realen Bedingungen über längere Zeiträume getestet und beobachtet werden um eine optimale Regelung entwickeln zu können. Die Einstellungen sollten soweit wie möglich und sinnvoll automatisiert und vereinfacht werden um Fehler bei der Inbetriebnahme und manueller Programmierung zu vermeiden. Die korrekte Inbetriebnahme durch Fachpersonal zur Anpassung des Geräts an die Gegebenheiten einer Wohneinheit und deren Nutzung ist grundlegend für den energieeffizienten Betrieb. Das Kompaktgeräte zur optimalen Versorgung von Passivhäusern durchaus geeignet sind, zeigen die Ergebnisse der Messprojekte anderer Autoren [Bühning 2003, Reiß 2003].

## 7 Literatur

- [Bühning 2003] Bühning, A.: Lüftungs-Kompaktgeräte: Vom Einfamilienhaus zum Mehrfamilienhaus – Konzepte und Messergebnisse; In: Tagungsband der 7. internationalen Passivhaustagung, Hamburg 2003; Passivhaus Institut; Darmstadt 2003
- [Bühning 2004] Bühning, A.: Messergebnisse und neue Entwicklungen zu Passivhaus-Kompaktgeräten mit Abluftwärmepumpe; In: Protokollband Nr. 26 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser „Neue Passivhaus-Gebäudetechnik mit Wärmepumpen“; Passivhaus Institut; Darmstadt 2004
- [DIBt 2005] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-51.4-173, System-Kompakt-Tower „Vitotres 343“; Deutschen Institut für Bautechnik; Berlin 2005
- [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
- [Feist 2001] Feist, W.: Gestaltungsgrundlagen Passivhäuser. Verlag Das Beispiel, Darmstadt 2001
- [Gemis] Fritsche, U.; Leuchtner, J.; Matthes, F.C.: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 4.12, Öko-Institut, Darmstadt September 2002.
- [Kah 2005] Kah, O: Messtechnischer Vergleich zur Luftqualität vor und nach der Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten, Demonstrationsvorhaben Tevesstraße 36-54. Passivhaus Institut, Darmstadt, April 2005.
- [Kaufmann 2009] Kaufmann, B.; Pfluger, R.; Peper, S.; Feist, W.: Sanierung mit Passivhauskomponenten, Planungsbegleitende Beratung und Qualitätssicherung Tevesstraße Frankfurt a.M. Passivhaus Institut, Darmstadt 2009.
- [Peper 2002] Peper, S. Feist, W.: Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg; Analyse im dritten Betriebsjahr, Endbericht Mai 2001 bis April 2002, i.A. der Stadtwerke Hannover AG, Darmstadt, Juli 2002.
- [Peper 2008] Peper, S.; Feist, W.: Gebäudesanierung “Passivhaus im Bestand” in Ludwigshafen / Mundenheim, Messung und Beurteilung der energetischen Sanierungserfolge. Passivhaus Institut, Darmstadt 2008.

- [Petrausch 2009] Petrausch, A.: Schriftliche Mitteilung zur Haustechnikausstattung von Haustechnikplaner im Januar 2009, Büro IBB Baumgartner.
- [Pfluger/Feist 2001] Pfluger, R.; Feist, W.: Meßtechnische Untersuchung und Auswertung, Kostengünstiger Passivhaus-Geschoßwohnungsbau in Kassel-Marbachshöhe, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 15, Fachinformation PHI-2001/2. Darmstadt 2001.
- [Pfluger 2009] Pfluger, R.; Kaufmann, B.; Peper, S.; Feist, W.: Sanierung mit Passivhauskomponenten, Untersuchung zu den Bestandsgebäuden Tevesstraße Frankfurt a.M. Passivhaus Institut, Darmstadt 2009.
- [PHPP 2007] Feist, W., Schnieders, J., Pfluger, J., Kaufmann, B. und Kah, O.: Passivhaus Projektierungs Paket 2004. Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser, Fachinformation PHI-2004/1, Darmstadt, Passivhaus Institut, Juni 2007.
- [PHI 1996] Feist, W: Passivhäuser - Behaglichkeit ohne Heizung. Passivhaus Institut: Tagungsband zur 1. Passivhaustagung in Darmstadt. Passivhaus Institut, Darmstadt 1996.
- [Reiß 2003] Reiß, J., Erhorn, H.: Messtechnische Validierung des Energiekonzeptes einer großtechnisch umgesetzten Passivhausentwicklung in Stuttgart-Feuerbach; IBP-Bericht WP 117/2003; Fraunhofer Institut für Bauphysik; Stuttgart 2003
- [VDI 2071] VDI 2071 Blatt 1: Wärmerückgewinnung in raumluftechnischen Anlagen; Begriffe und technische Beschreibungen; VDI-Verlag; Düsseldorf 1981.
- [Viessmann 2004] Planungsanleitung, Vitores 343 Kompakt-Heizzentrale für das Passivhaus; Viessmann Werke GmbH&Co KG, Allendorf 2004
- [Viessmann 2006] Datenblatt, Vitotres 343 Compact-Energy-Tower für das Passivhaus; Viessmann Werke GmbH&Co KG, Allendorf 2006
- [Wolf 2009] Schriftliche Mitteilung von Herr Bernhard Wolf (Fa. Viessmann) vom 17. Februar 2009.