



**PASSIV
HAUS
INSTITUT**

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

Monitoring

Altbausanierung zum Passivhaus

Verbrauch · Raumluftqualität · Kellerfeuchte



**Messtechnische Untersuchungen an den
Sanierungsbauten Tevesstraße Frankfurt a.M.**



Im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Wiesbaden

Bauherr: ABG Frankfurt Holding GmbH

Darmstadt Juli 2011



**PASSIV
HAUS
INSTITUT**

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

Monitoring

Altbausanierung zum Passivhaus

Verbrauch · Raumlufthqualität · Kellerfeuchte

**Messtechnische Untersuchungen an den
Sanierungsbauten Tevesstraße Frankfurt a.M.**

<p>Autoren: Dipl.-Ing. Søren Peper Dr. Jürgen Schnieders Prof. Dr. Wolfgang Feist</p> <p>Unter Mitarbeit von: Florian Meffert Henning Aust Armin Bangert Jonas Menk</p> <p>Herausgeber: PASSIVHAUS INSTITUT Dr. Wolfgang Feist Rheinstr. 44/46 D-64283 Darmstadt Tel: 06151 / 82699-0 Fax: 06151 / 82699-11 E-Mail: mail@passiv.de www.passiv.de</p> <p>Darmstadt, Juli 2011</p>	<p>Dieser Bericht entstand im Auftrag Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Ver- braucherschutz, Wiesbaden</p> <p>Titel des Forschungsauftrages: “Messtechnische Untersuchung und wissenschaftliche Auswertung der rela- tiven Raumlufftfeuchte in 19 Passivhaus- wohnungen sowie Untersuchungen der Kellerfeuchte im Zusammenhang mit dem Luftwechsel“</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. Unser Dank geht auch an Hr. Rempe und Hr. Theobald von der ABG für Ihre Hilfe.</p>
--	--

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

Inhaltsverzeichnis

1	ZUSAMMENFASSUNG.....	3
2	PROJEKTKURZBESCHREIBUNG	9
2.1	Energiebezugsfläche	12
3	AUFGABENSTELLUNG UND MESSKONZEPT.....	14
3.1	Messtechnik.....	15
3.1.1	Wärmemengenzähler	17
3.1.2	Energie für Warmwasser	20
3.1.3	Raumtemperatur, Feuchte und CO ₂ -Konzentration.....	21
3.1.4	Außenmessung	22
3.1.5	Strommessung Lüftung und Luftmengen.....	23
3.1.6	Temperatur und Feuchte im Keller	23
3.1.7	Tabellarische Übersicht der Messgeräte	24
4	MESSERGEBNISSE	25
4.1	Wetterdaten.....	25
4.2	Außen- und Raumtemperaturen.....	28
4.2.1	Niedrigste Außentemperatur.....	31
4.2.2	Sommer- und Übertemperaturen.....	32
4.3	Energieverbrauch Wärme.....	34
4.3.1	Zentraler Energiebezug	36
4.3.1.1	Wärmelieferung Gaskessel	37
4.3.2	Heizwärmeverbrauch.....	40
4.3.2.1	Heizwärmeverbrauch der einzelnen Wohnungen.....	40
4.3.2.2	Sommerheizung	43
4.3.2.3	Heizwärme und Verteilung	47
4.3.2.4	Vergleich PHPP / Messdaten	50
4.3.2.5	Heizlast.....	53
4.3.3	Wärmeverbrauch Warmwasserbereitung	54
4.3.3.1	Zirkulation.....	56
4.3.3.2	Energie Warmwasser Einzelwohnungen.....	58
4.3.3.3	Solare Warmwasserbereitung	61
4.3.3.4	Bilanz Warmwasser.....	64
4.4	Stromverbrauch.....	65
4.4.1	Allgemein- und Technikstrom	66
4.4.2	Stromverbrauch Lüftungsanlagen.....	67
4.5	Luftwechsel.....	69
4.5.1	Maschinelle Luftwechselraten.....	69
4.5.2	Gemessenes Lüftungsverhalten	74
4.5.2.1	Frostschutz und Standby.....	78
4.5.2.2	Sommerlüftung	80

4.6	Raumlftuntersuchungen.....	82
4.6.1	CO ₂ -Konzentrationen.....	82
4.6.2	Luftfechtigkeiten	91
4.7	Wärmerückgewinnungsgrad Lüftung.....	96
5	ENERGIEBILANZEN.....	100
5.1	Endenergie Wärme.....	100
5.2	Gesamte End- und Primärenergie.....	101
5.2.1	Primärenergie Heizung, Warmwasser und Technikstrom.....	103
6	UNTERSUCHUNG DER KELLERFEUCHTIGKEIT.....	106
6.1	Hintergrund.....	106
6.2	Messdatenerfassung und Luftvolumenströme.....	107
6.2.1	Messergebnisse Temperaturen und Luftfeuchte	112
6.2.2	Simulationsrechnungen	121
6.2.3	Referenzfall wie gebaut	122
6.2.4	Parameterstudien zu Luftwechsel und Luftdichtheit	124
6.2.5	Wieviel Kellerdämmung?	127
6.3	Fazit aus der Auswertung der Kellermessungen	128
7	LITERATUR	129



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. Unser Dank gilt allen Beteiligten die das Projekt ermöglicht haben und insbesondere dem Hessischen Ministerium, welches die Forschungsarbeit ermöglicht hat.

1 Zusammenfassung

Sanierung mit Passivhauskomponenten

Das Projekt Tevesstraße/Frankfurt a.M. der ABG wurde bereits 2005/2006 mit Passivhauskomponenten modernisiert. Durch die Gesamtsanierung der beiden Geschosswohnungsbauten aus den 1950er Jahren entstanden 53 attraktive Wohnungen mit modernen Grundrissen. Es handelt sich um zwei Gebäude mit vier bzw. sechs Hauseingängen („4er Block“ mit 20 Wohnungen und „6er Block“ mit 33 Wohnungen). Mit der Sanierung unter Verwendung von Passivhauskomponenten wurden auch energetisch sehr anspruchsvolle Ziele verfolgt und erreicht. Die Gebäude wurden vor und während der Sanierung intensiv wissenschaftlich untersucht und begleitet. Die detaillierte Projektvorstellung mit der Beschreibung der Qualitätssicherungsmaßnahmen dieser erfolgreichen Sanierungsprojekte sind den schon publizierten Forschungsberichten [Pfluger et al. 2009] und [Kaufmann et al. 2009] zu entnehmen.

Bereits das vorausgehende zweijährige Monitoring der Gebäude von Juni 2006 bis Juli 2008 zeigte, dass bei dieser Sanierung tatsächlich Passivhaus-Neubauniveau erreicht werden konnte [Peper et al. 2009]. Die hier vorliegende, erweiterte Fortsetzung des Monitorings bestätigt diesen Erfolg auch für die Messungen bis November 2010.

Durch die Erweiterung der messtechnischen Ausstattung konnten jetzt zusätzlich auch Fragen zur Luftqualität (Feuchte und CO₂-Konzentration) in den Wohnungen im Zusammenhang mit den realisierten Luftwechselraten untersucht werden. Außerdem wurden Fragen zum Umgang mit Kellerräumen unter hochwärmedämmten Gebäuden beantwortet und Planungshinweise dazu gegeben.

Energieverbrauch

Die zentralversorgten 19 Wohnungen im 4er Block verbrauchten im dritten untersuchten Bilanzjahr 2009/2010 im Durchschnitt nur **21,6 kWh/(m²a) Heizwärme** (Messung Wärmezähler der 19 Wohnungen) bei einer mittleren Raumtemperatur von 22,4 °C. Darin ist immer noch ein geringer Sommerheizungsanteil von 0,16 kWh/(m²a) enthalten. Dieser Messwert für den Heizwärmeverbrauch bei einem sanierten Gebäude liegt auf einem extrem niedrigen Niveau - bei gleichzeitig sehr komfortablen Raumtemperaturen. Der Heizwärmeverbrauch liegt nur wenig über den üblicherweise in Passivhaus-Neubauten erreichten Verbrauchswerten. Das Projekt ist damit auch in der dritten Heizperiode sehr erfolgreich, und die Ergebnisse erweisen sich als stabil. Damit zeigt sich auch, dass Ängste in Bezug auf die Dauerhaftigkeit der mit der Passivhaustechnik zu erreichenden Erfolge unbegründet sind – insbesondere die entscheidenden Komponenten Luftdichtheit, Wärmedämmung und Fenster erweisen sich als sehr robust.

Wird der Heizwärmeverbrauch mit dem Bilanzprogramm PHPP¹ von der erhöhten Innentemperatur von 22,4 °C auf Standardbedingungen (20 °C) zurückgerechnet, ergibt sich ein Heizwärmebedarf von nur noch **16,5 kWh/(m²a)**. Der Unterschied von ca. 5 kWh/(m²a), weniger als 2% der erzielten Einsparung, ist vernachlässigbar gering. Der sogenannte „Rebound-Effekt“, wie er hier mit der Temperaturerhöhung tatsächlich beobachtet werden kann, schmälert den Erfolg des Passivhausstandards nicht; weil der verbleibende Verbrauchswert so gering ist, dass selbst eine maximale Steigerung des Dienstleistungsumfanges (Innentemperaturerhöhung) nur geringe Effekte hat.

Das Ergebnis zeigt umso deutlicher, dass das Passivhaus zuverlässig ist, und die realen Verbrauchswerte mit allen (Rebound-) Effekten sehr gering sind. Insbesondere wenn auch noch beachtet wird, dass aufgrund zum Teil deutlich verspäteter Wartung der Lüftungsanlagen die Wärmerückgewinnung nach dem Sommer zu spät in Betrieb genommen wurde – auch dies beweist die Robustheit des Konzepts.

Im 4er Block wurden im Winter 2009/2010 2,2 kWh/(m²a) als nutzbare Wärmeabgabe der Heizwärmeverteilung ermittelt. Der Gesamtwert des mit der Berechnung zu vergleichenden Heizwärmeverbrauchs beträgt dann **23,6 kWh/(m²a)**. Zusätzlich entstanden 3,7 kWh/(m²a) nicht nutzbare Verteilverluste. Zurückgerechnet auf Standardbedingungen (20 °C Innentemperatur) beträgt der Heizwärmebedarf ohne den minimalen Sommerverbrauch inklusive der nutzbaren Verteilverluste **18,5 kWh/(m²a)**.

Im **6er Block** liegen die Heizwärmeverbrauchswerte mit **18,7 kWh/(m²a)** inkl. 1,8 kWh/(m²a) nutzbarer Anteil der Wärmeverteilung noch niedriger. Der nichtnutzbare Anteil der Heizwärmeverteilung beträgt dort 2,9 kWh/(m²a). Die Innenraumtemperaturen wurden in diesem Block nicht gemessen, so dass hier nur die absoluten Verbrauchswerte wiedergegeben werden.

Gegenüber dem Altbauzustand konnte durch die Sanierung eine **Einsparung um 94 %** erreicht werden – es werden also **nur noch 6 %** der vorher notwendigen Heizwärme benötigt!

Im Rahmen der Messgenauigkeit und der möglichen Genauigkeit der Bilanzrechnung besteht eine sehr gute Übereinstimmung der Messergebnisse mit der PHPP Berechnung. Dies bestätigt erneut die hohe Qualität des PHPP als Energiebilanzierungswerkzeug ebenso wie als Planungstool auch für die hochenergieeffiziente Sanierung (vgl. die entsprechenden Ergebnisse in [Schnieders et al. 2001], [Feist 2001], [Ebel et al. 2003], [Peper et al. 2004], [Schulze Darup et al 2005], [Peper/Feist 2008]).

Die gemessenen **Heizlasten** mit Mittelwerten im Kernwinter von nur **5,5 bzw. 9,5 W/m²** und tagesmittleren Spitzenwerten von 13,5 W/m² zeigen ebenfalls passivhaus-typische Werte wie beim Neubau.

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

Mit dem Energieverbrauch für **Warmwasser (15,9 bzw. 21,0 kWh/(m²a))** und dem **Gesamtstrom** (Haushalts-, Lüftungs-, Allgemein- und Technikstrom: **33,7 kWh/(m²a)**) im 4er Block) beträgt der gesamte Endenergieverbrauch (inkl. Haushaltsstrom!) **83,3 kWh/(m²a)**. Primärenergetisch bewertet ergeben sich insgesamt **146,0 kWh/(m²a)**. Mit einem Anteil von 60 % sind die Haushaltsstromverbräuche dabei absolut dominant. An der Bilanz ist erkennbar, dass aufgrund der sehr hochwertigen Sanierung vor allem Bemühungen auf die weitere Energieeffizienzverbesserung bei den Stromverbrauchswerten gelegt werden sollte. Dies gilt generell für Sanierungen als auch für Neubauten.

Betrachtet man nur die **Energieaufwendungen für Heizung, Warmwasserbereitung und Technikstrom** (Heizung, Lüftung), so ergibt sich als Summe im 4er Block der gemessenen Primärenergieverbrauch von nur **62,0 kWh/(m²a)**. Hier liegt weiterhin - anders als in der EnEV - die Energiebezugsfläche A_{EBF} (entspricht der beheizten **Wohnfläche**) zu Grunde. Der in der EnEV verwendete Bezug der Verbrauchswerte auf die rein rechnerisch bestimmte **Gebäudenutzfläche A_N** ergibt Primärenergiewerte von **46,8 kWh/(m²a)**. Die gesetzliche Anforderung der EnEV für Neubauten bei diesem Projekt wird somit um 52 % unterschritten. Eine sorgfältig geplante Altbau-Modernisierung kann somit, wie dieses Beispiel zeigt, mit vertretbarem Aufwand bereits heute erheblich niedrigere Verbrauchswerte erzielen als es das gegenwärtige Anforderungsniveau für Neubauten vorschreibt. Die Effizienz dieses Beispiels liegt vielmehr bereits bei dieser 2005/6 durchgeführten Modernisierung bei dem von der Europäischen Union mit der Neufassung der Gebäuderichtlinie (EBPD) 2010 auf dem für das Jahr 2020 geforderten Anforderungsniveau der „Nearly Zero Energy Buildings“ [EPBD 2010].

Luftqualität und Luftwechsel

Die Untersuchung der dezentralen Lüftungsanlagen in 15 Wohnungen des 4er Blocks ergab Luftvolumenströme zwischen **48 und 143 m³/h**. Daraus ergeben sich je nach Wohnungsgröße und Lüftungsstufe einstellbare Luftwechselraten zwischen **0,25 und 1,42 1/h**; als **Mittelwert** ergab sich für den **Kernwinter** eine **Luftwechselrate** von **0,37 1/h**.

Die Leistungsaufnahmen der Geräte liegen zwischen 16,3 und 98,4 W (Stufen 1 bis 4 bzw. 5). Der Anforderungswert für Passivhaus geeignete Lüftungsgeräte von maximal 0,45 Wh/m³ im Einsatzbereich der Geräte wird bei diesem nicht zertifizierten Gerät leider in den höheren Lüftungsstufen deutlich überschritten. Hier sind weitere Optimierungen der Stromeffizienz bei den Geräten angeraten; diese sind ohne weiteres möglich, denn die dazu erforderlichen Technologien sind am Markt verfügbar (vor allem eine Reduktion der Standby-Verluste). Dabei ist der elektrische Gesamtverbrauch der Lüftungsanlagen inkl. Regelung und Frostschutz mit durchschnittlich **3,1 kWh/(m²a)** immer noch ökologisch und ökonomisch gut vertretbar, jedoch noch weiter verbesserbar.

Zur Nutzung der Lüftungsanlagen bleibt festzuhalten, dass weder im Winter noch im Sommer ein allgemeiner Trend abzuleiten ist; es ist eine sehr breite Nutzungstreu-

ung vorhanden. Das ist übrigens positiv zu bewerten – die Nutzer nutzen ihre Anlagen nach ihren unterschiedlichen Bedürfnissen.

Die CO₂-Konzentration stellt neben der relativen Luftfeuchtigkeit einen wichtigen Parameter zur Bewertung der Raumlufqualität dar. Von Interesse bei der Untersuchung der Raumlufqualität ist insbesondere der Winterzeitraum, bei dem die Fenster vermutlich überwiegend geschlossen bleiben und dadurch – je nach Nutzung der mechanischen Lüftungsanlagen - höhere CO₂-Konzentration zu erwarten sind als im Sommer.

Bei der Bewertung der 15 Wohnungen ergab sich aus den Messungen, dass die Luftqualität der IDA Klassen 1 bis 3 insgesamt zu 95,4% der Winterzeit vorherrschte. Die CO₂-Konzentrationen zeigen damit deutlich, dass in den Wohnungen **gute bis sehr gute Raumlufqualitäten und nur selten mittlere Raumlufqualitäten** vorhanden sind (siehe Abbildung 1). Nur in zwei Wohnungen gibt es häufigere Überschreitungen der 1422 ppm Grenze (entspricht IDA 4 „niedrige Luftqualität“). In diesen zwei Wohnungen war die Luftwechselrate nicht optimal an die Bewohnerzahl angepasst, die beiden Anlagen könnten problemlos etwas höher eingestellt werden. Im Vergleich dazu, zeigen andere Untersuchungen, sehr viel schlechtere Luftqualitätsklassen in fenstergelüfteten Wohnungen ([Peper/Feist 2008], [Kah et al. 2010]).

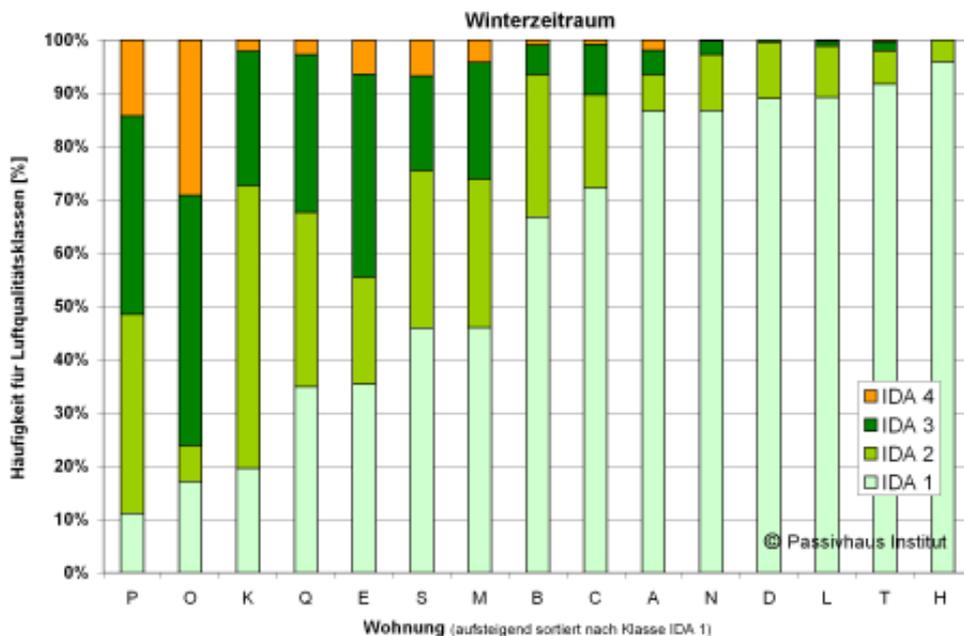


Abbildung 1: Anteil der gemessenen CO₂-Konzentration nach den Konzentrationsklassen „IDA“ in den 15 Wohnungen. Untersucht wurde der Winterzeitraum vom 15.10.2009 bis zum 30.04.2010 abzüglich des Datenausfalls (Gesamtstundenzahl 4225 Stunden; entspricht 100%). Die Wohnungen sind aufsteigend nach dem Anteil der Konzentrationsklasse „IDA 1“ sortiert.

Im Zusammenhang mit den ausreichenden Luftmengen muss auch immer die relative Luftfeuchte betrachtet werden. Zu große Luftwechselraten würden im Winter niedrige Feuchtigkeiten in der Raumluf erzeugen. Die Mittelwerte für die relativen Luftfeuchtigkeiten der 15 einzelnen Wohnungen während der Winterperiode zeigen

eine Bandbreite zwischen 25 und 40 %rF. Als gesamter Mittelwert ergibt sich im kalten Kernwinter von November 2009 bis Ende Februar 2010 der noch akzeptable Wert von **32,7 % rF**. Dabei fallen vier Wohnungen mit niedrigen Luftfeuchten auf. Bei diesen liegen sehr niedrige Belegungsdichten (und damit geringe Feuchtequellen), zugleich aber relativ hohe Luftwechselraten und zudem hohe Raumlufttemperaturen vor. Alle Punkte tragen zu den niedrigen Messwerten der relativen Luftfeuchte bei. Da dort gleichzeitig auch sehr niedrige CO₂-Konzentrationen festgestellt wurden, könnte hier bei Bedarf durch eine Reduktion der Luftmenge die relative Feuchte problemlos weiter angehoben werden.

Untersuchung zur Kellerfeuchte

Wird in Altbauten, so wie im vorliegenden Fall, die Kellerdecke nachträglich gedämmt, so resultiert durch den geringeren Wärmeeintrag aus den darüberliegenden Räumen eine niedrigere Raumtemperatur im Keller. Dichtere ggf. dauerhaft verschlossene Kellerfenster reduzieren den zuvor vorhandenen Außenluftwechsel im Keller, die gleiche Auswirkung hat die Verbesserung der Luftdichtheit zwischen Keller und Erdgeschoss. Die veränderte Situation kann dazu führen, dass die relative Feuchte im Keller größer wird. Es stellt sich daher die Frage, ob und wie reagiert werden muss, um unerwünschte Effekte durch die höhere Feuchte zu vermeiden.

Aus diesen Gründen wurde der Keller eines der Häuser messtechnisch näher untersucht. Neben Dauermessungen der Temperatur und Luftfeuchte wurde u.a. auch die Luftdichtheit der Kellerräume untersucht und die Luftwechselrate der dort vorhandenen Abluftanlage gemessen. Zusätzlich wurde für den Keller ein 1-Zonen-Modell im dynamischen thermischen Simulationsprogramm DYNBIL aufgesetzt. Das Programm erlaubt auch die Berechnung von Raumluft- und Bauteilfeuchten. Der Luftwechsel im Keller wurde entsprechend den Messergebnissen von Ventilatorstrom, gemessenen Luftmengen und Blower-Door-Messung in einer Tabelle mit Stundenwerten an die Simulation übergeben.

Die durchgeführten Messungen zeigen, dass im Keller dieses modernisierten Altbaus *keine* kritischen Feuchteverhältnisse auftreten. In den Sommermonaten kommt es vereinzelt zu relativen Luftfeuchtigkeiten von über 80%, die jedoch nur wenige Tage andauern. In den Wintermonaten beträgt die relative Feuchte um 50%. Wie die Simulation zeigt, liegen Luft- und Strahlungstemperatur im Keller stets nahe beieinander, daher ist bei diesen Bedingungen nicht mit Schimmel zu rechnen, sofern nicht weitere Feuchtebelastungen vorhanden sind.

Es wurde deutlich, dass eine Feuchtesteuerung des Abluftventilators nur in Verbindung mit guter Luftdichtheit der Kellerräume den gewünschten Effekt erzielen kann – wie das realisierte Beispiel zeigt, können Kellerräume im modernisierten Altbau immer noch erstaunlich undicht sein. Der Simulation zufolge wäre unter günstigen Bedingungen eine Reduzierung der relativen Feuchte um etwa fünf Prozentpunkte möglich.

Aus der Simulation ergeben sich sinnvolle Luftwechselraten zwischen 0,5 und 2 h⁻¹. Soll der Keller ohne weiteren regelungstechnischen Aufwand belüftet werden, erscheint dies auch durch ausreichend große Leckagen bzw. planmäßig hergestellte,

nicht zu große Lüftungsöffnungen möglich. Umgekehrt sind auch für eine feuchtegesteuerte Lüftung motorisch zu betätigende Lüftungsöffnungen zweckmäßig, um zu Zeiten mit hoher Außenluftfeuchte den Infiltrationsluftwechsel zu begrenzen. Sollen auch entfernt gelegene Räume über einen zentral angeordneten Abluftventilator belüftet werden, sind ohnehin eine luftdichte Hülle sowie qualifizierte Außenwandluftdurchlässe und Überströmöffnungen erforderlich.

Eine sinnvolle und zuverlässige Maßnahme stellt unabhängig von der Lüftungsstrategie stets die thermische Ertüchtigung der Kellerwände dar, ggf. ergänzt durch eine ins Erdreich ragende Dämmschürze. Damit können die Kellertemperaturen gewöhnlich so weit angehoben werden, dass keine Feuchteprobleme auftreten.

Fazit und Ausblick

Das Projekt in der Tevesstraße hat sehr frühzeitig die sehr ehrgeizige Zielsetzung verfolgt, trotz der Einschränkungen bei einem Altbau dem Passivhausstandard so nahe wie möglich zu kommen. Dank motivierter Akteure und der sehr intensiven Begleitung wurde dieses Ziel erreicht. In dem vorliegenden Bericht wird gezeigt, dass nicht nur der Verbrauch dauerhaft niedrig ist, sondern dass die Bewohner einen hohen Komfort und gute Luftqualität genießen, und dass der Wärmeschutz auch nicht zu Nachteilen an anderer Stelle führt. Die Altbaumodernisierung mit Passivhaus-Komponenten ist nach der erfolgreichen Realisierung mehrerer Pilotprojekte nun bereit für die breite Umsetzung. Mit EnerPhit [Bastian 2011] wird ein Standard definiert, der bei einer entsprechend sorgfältig ausgeführten Planung und Ausführung von den meisten Altbauten nach der Durchführung aller Sanierungsschritte (vgl. [AKKP 39]) mit Passivhauskomponenten erreicht werden kann.

2 Projektkurzbeschreibung²

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 Modernisierungsstau 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 2: 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 m² große Wohnungen. Das alte Dachgeschoss wurde komplett abgetragen. Dort wurde ein

² Die Kurzbeschreibung des Projektes ist nahezu unverändert dem Vorgängerbericht [Peper et al. 2009] entnommen. Details zu der Sanierung können [Kaufmann et al. 2009] entnommen werden.

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 auf. Das in der Tevesstraße 48 bis 54 verfügt über 4 Hauseingänge (kurz „4er Block“) mit 20 Wohneinheiten.



Abbildung 3: 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. Das Gerät ist in [Peper et al. 2009] separat intensiv untersucht worden.

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

Tabelle 1: Eckdaten zum dem Sanierungsprojekt.

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



Abbildung 4: 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 m²** und für Haus 48 bis 54 (4er Block) **1350 m²**. Insgesamt sind damit 3594 m² sanierter Wohnraum geschaffen worden.

Die EBF entspricht der Wohnfläche unter Abzug von nicht beheizten Flächen wie z.B. den Balkonen (daher auch „beheizte Wohnfläche“). Die genannten Energiebezugsflächen sind nicht zu verwechseln mit den deutlich größeren fiktiven Bezugsflächen „A_N“ („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 m² (plus 32%) und für den 6er Block 2885 m² (plus 29%), für beide Gebäude zusammen 4673 m² (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 m² (Zentralheizung) und die 40,8 m² (Kompaktgerät).

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

[m ²]	Haus 36 bis 46 (6er Block)	Haus 48 bis 54 (4er Block)
Energiebezugsfläche (EBF) (Beheizte Wohnfläche)	2244	1350 Zentralversorgt: 1309 Dezentral versorgt: 41
Gebäudenutzfläche A _N	2885	1788

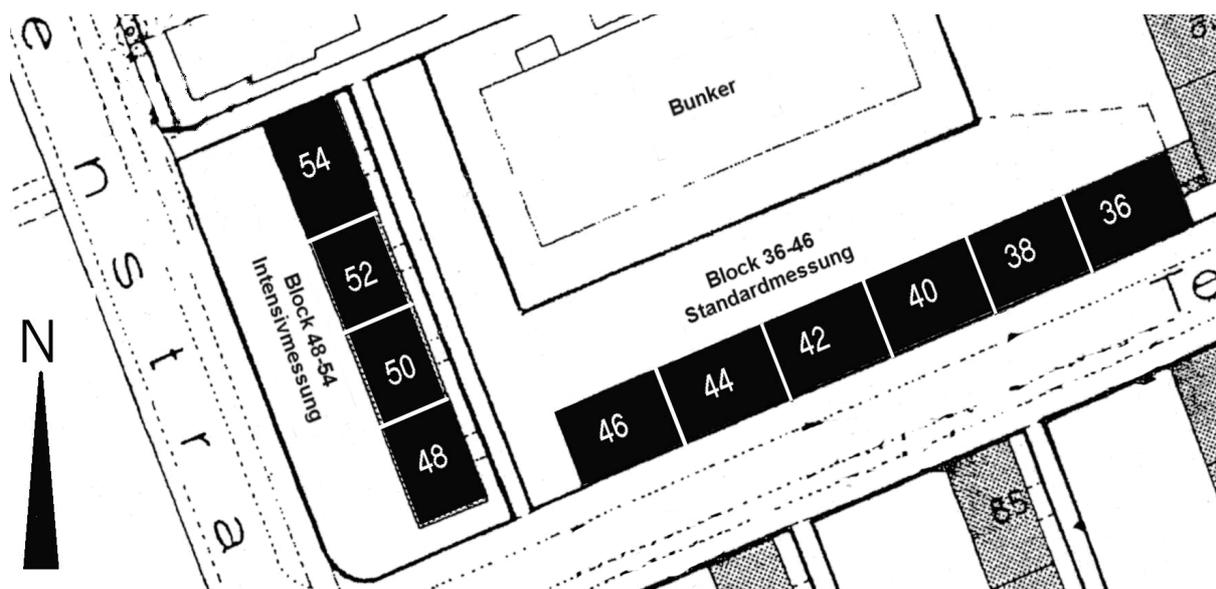


Abbildung 5: Lageskizze der beiden Wohnblocks und Aufteilung nach Intensivmessung und Standardmessung.

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 m². Die mittlere Fläche der 19 Wohnungen beträgt **68,9 m²**.

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

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

3 Aufgabenstellung und Messkonzept

Bei der vorausgehenden messtechnischen Untersuchung der energetisch hochwertig sanierten Gebäude standen insbesondere die Überprüfung der Funktion des Passivhauskonzeptes im Vordergrund (Raumtemperaturen, Heizleistung, Warmwasser, Haushaltsstrom, Primärenergieverbrauch, etc.) Besonderes weil es sich um eine Altbauanierung mit überwiegend, ausschließlicher Zuluftheizung mit verbleibenden Wärmebrücken zum Keller handelt, standen diese Themen zuerst im Fokus.

In dieser jetzt ergänzenden Untersuchung werden die Temperaturen und Verbrauchsdaten (alle Energieströme) in gleicher Form ebenfalls gemessen und untersucht. Zusätzlich stehen zwei neue Bereiche im Mittelpunkt der erweiterten Messung:

- 1) Untersuchung der **Luftqualität** in den Wohnungen (Temperatur, relative Feuchte und CO₂-Konzentration) im Zusammenhang mit den **Luftwechselraten**. Dabei werden auch die Stromverbräuche für die Lüftungsanlagen untersucht.
- 2) Untersuchung der **Luftfeuchte im Keller**: Aufgrund des verringerten Wärmeeintrags von den Wohnungen im EG, den zugemauerten Kellerfenstern sowie einer mechanischen Belüftung ergibt sich für die Kellerräume eine neue Situation. Bisher liegen keine Erfahrungen oder Planungshinweise vor, wie systematisch mit unbeheizten Kellern von neuen oder sanierten energieeffizienten Gebäuden umgegangen werden soll. Daher werden an diesem Gebäude Messdaten zur Beurteilung der Kellerluftfeuchte erfasst. Mit Hilfe der Messdaten können dann kritische Bedingungen durch eine Parametervariation (Simulation) des Luftwechsels und der Kellerdämmung festgestellt werden. Daraus werden Planungsempfehlungen zu sinnvollen Kellerluftwechselraten abgeleitet.

Zusätzlich werden zwei Wohnungslüftungsgeräte energetisch im Betrieb vermessen (Bestimmung des Wärmebereitstellungsgrades).

Die zentral erfassten Messdaten wurden weiterhin alle 10 Minuten über Bustechnik auf einem zentralen Messrechner gespeichert. Das Messkonzept sieht zur Erreichung der Zielsetzungen unverändert 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.

Für die **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 für die Wärmeverteilung verbraucht werden. Dies betrifft sowohl die Heizwärme wie auch die Energie zur Warmwassererwärmung. Die

einzelne Wohnung, welche durch das Kompaktgerät versorgt wird, ist nicht mehr Gegenstand dieser Untersuchung.

Für das erweiterte Messkonzept musste die bisherige Messtechnik in den bewohnten (!) Wohnungen umgebaut und erweitert werden. Die bisherige Temperaturmessung im Kernbereich der Wohnungen wurden demontiert. Anstelle der Sensoren wurden Kombisensoren zur Messung der CO₂-Konzentration, der relativen Feuchte sowie der Raumlufttemperatur montiert. Die in den Wohnungen vorhandenen, busfähigen Stromzähler wurden von der Messung des gesamten Haushaltsstroms umgebaut auf die Erfassung nur des Lüftungsstromes (inkl. Steuerung, Regelung und Frostschutz). Dabei gaben die Bewohner von 15 der 19 Wohnungen ihre Zustimmung zu den messtechnischen Umbauten. In den restlichen vier Wohnungen konnte die Messung nicht verändert werden. Die Wärmemengen für Warmwasser und Heizung konnten dort aber unverändert weiter erfasst werden, sodass dazu Aussagen über alle 19 Wohnungen gemacht werden können.

Für die Kelleruntersuchung wurde im Keller von Haus 50 die Dauermessung mit drei Temperatur-/Feuchtesensoren ergänzt, sowie mit einem Kombisensor im Außenbereich. Die Lüftungsgeräte wurde mittels temporärer Messtechnik (Sensoren mit autarkem Datenlogger) während mehrerer Wintermonate in zwei Wohnungen untersucht.

Für die Einordnung und Interpretation der gemessenen Verbrauchsdaten und Raumtemperaturen sind wieder 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 hessischen Luftmessnetz des HLUg (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie) bezogen.

3.1 Messtechnik

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

Im Keller von Haus 50 ist die zentrale Messdatenerfassungsanlage mit M-Bus Master, Spannungsversorgung aller Sensoren, Messrechner und Telefonanschluss installiert. Zwischen den beiden Gebäuden ist ein Verbindungskabel für die Messtechnik verlegt. Im Keller von Haus 50 sind in drei Räumen zusätzlich Temperatur-/Feuchtesensoren montiert sowie außen am Gebäude eine Außenmessstelle (Temperatur, relative Feuchte, CO₂-Konzentration). Einen Überblick über das M-Bus Netz für die Dauermessung mit allen eingesetzten Sensoren ist in Abbildung 6 dargestellt.

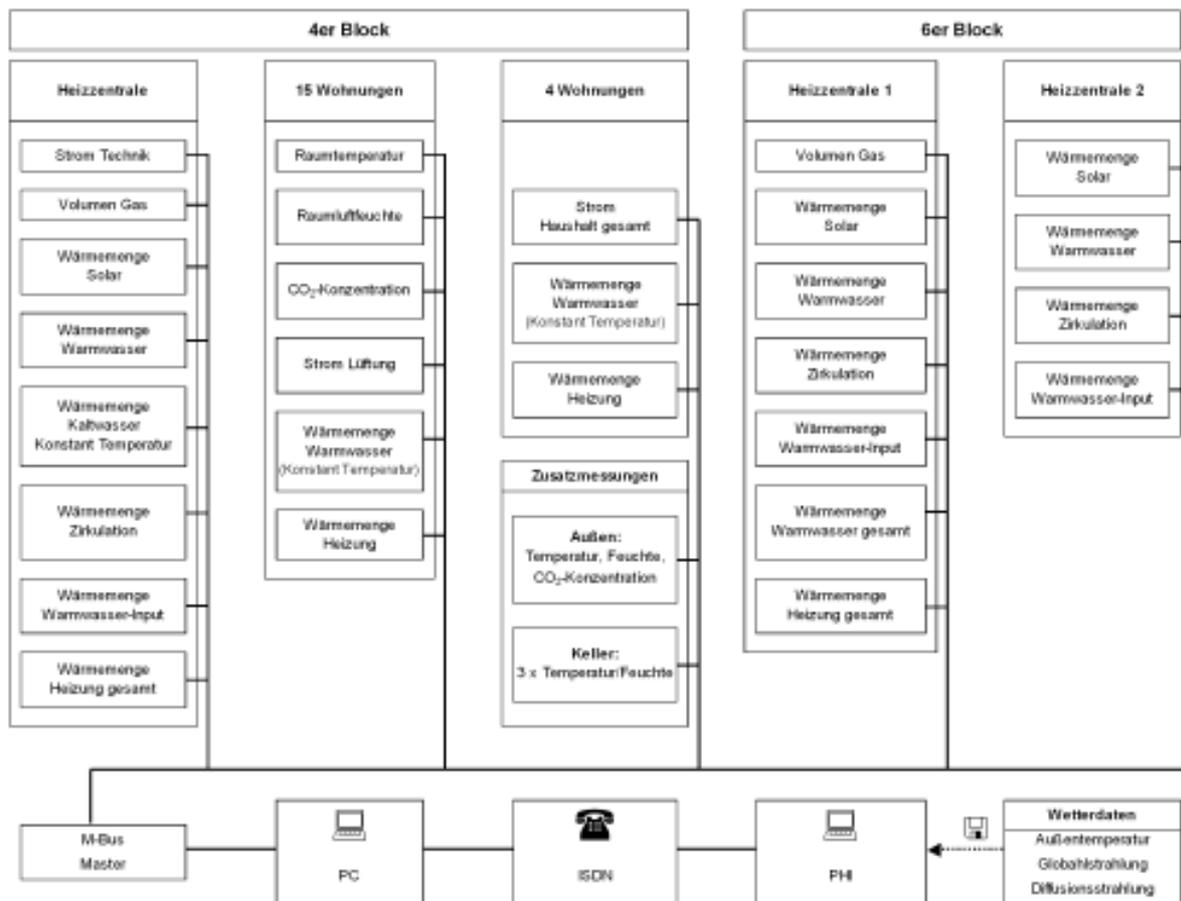


Abbildung 6: Aufbau der veränderten Datenerfassung zur Dauermessung mit M-Bus-Netz, Messrechner und Datenübertragung über ISDN.

Die über die M-Bus-Zentrale in 10 Minuten Abstand abgefragten Daten der über 120 Sensoren und Zähler werden auf dem Messrechner aufgezeichnet. Die Daten werden über die Telefonleitung zur Datenkontrolle und Auswertung regelmäßig ausgelesen.



Abbildung 7: 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 Technikkellern mit der Versorgungstechnik befinden sich unverändert 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 9 und Abbildung 10 hervor. Die Wärme- und Warmwasserversorgung einer Wohnung im 4er Block mit der Anordnung der Wärmezähler in der Wohnung ist schematisch vereinfacht in Abbildung 11 dargestellt.



Abbildung 8: Im Heizungskeller montierte zentrale Wärmemengenzählern (WMZ) in noch ungedämmten Leitungen.

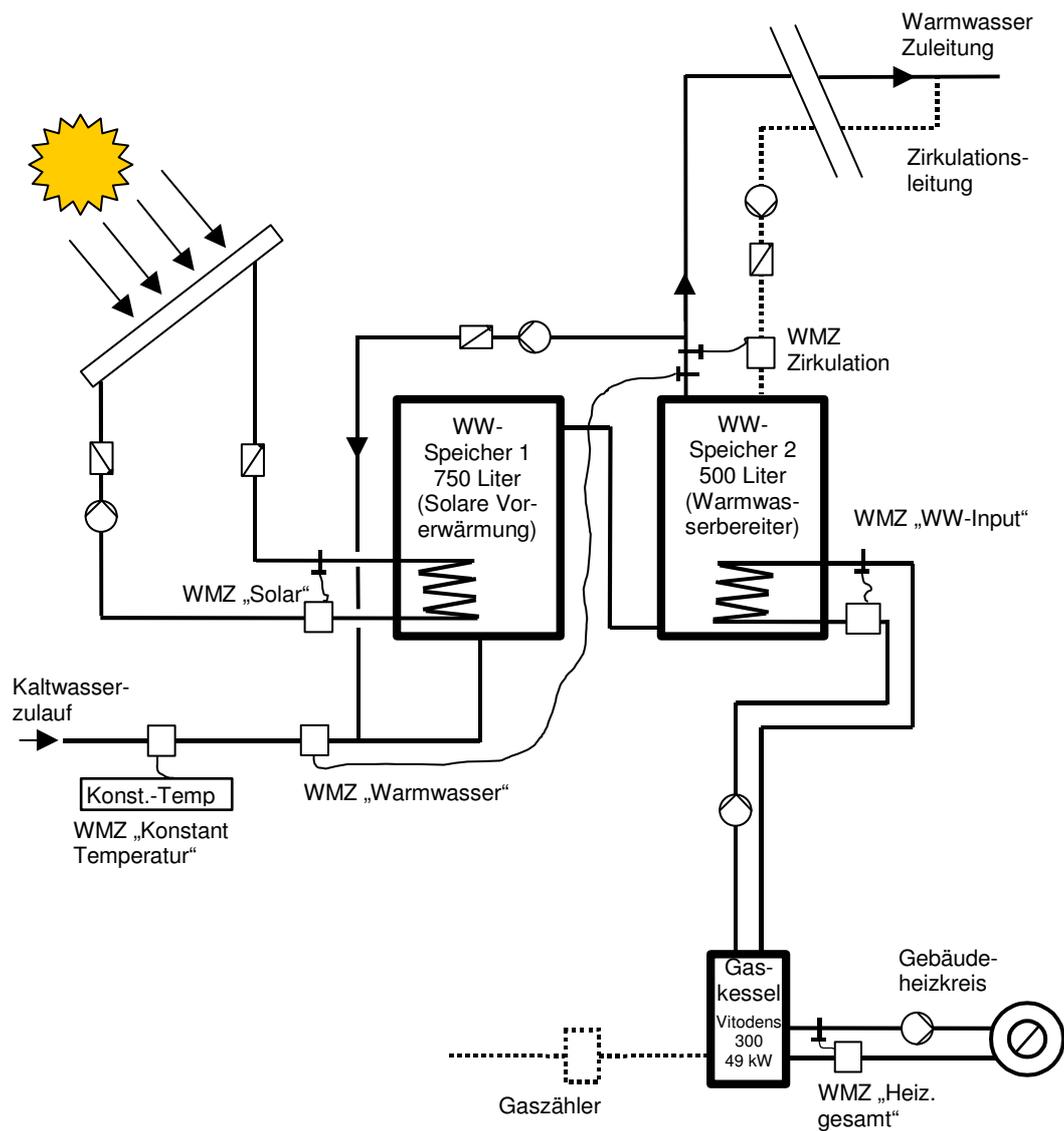


Abbildung 9: Schematisches Hydraulikschema der zentralen Wärmeversorgung im 4er Block mit den installierten Wärmemengenzählern (WMZ).

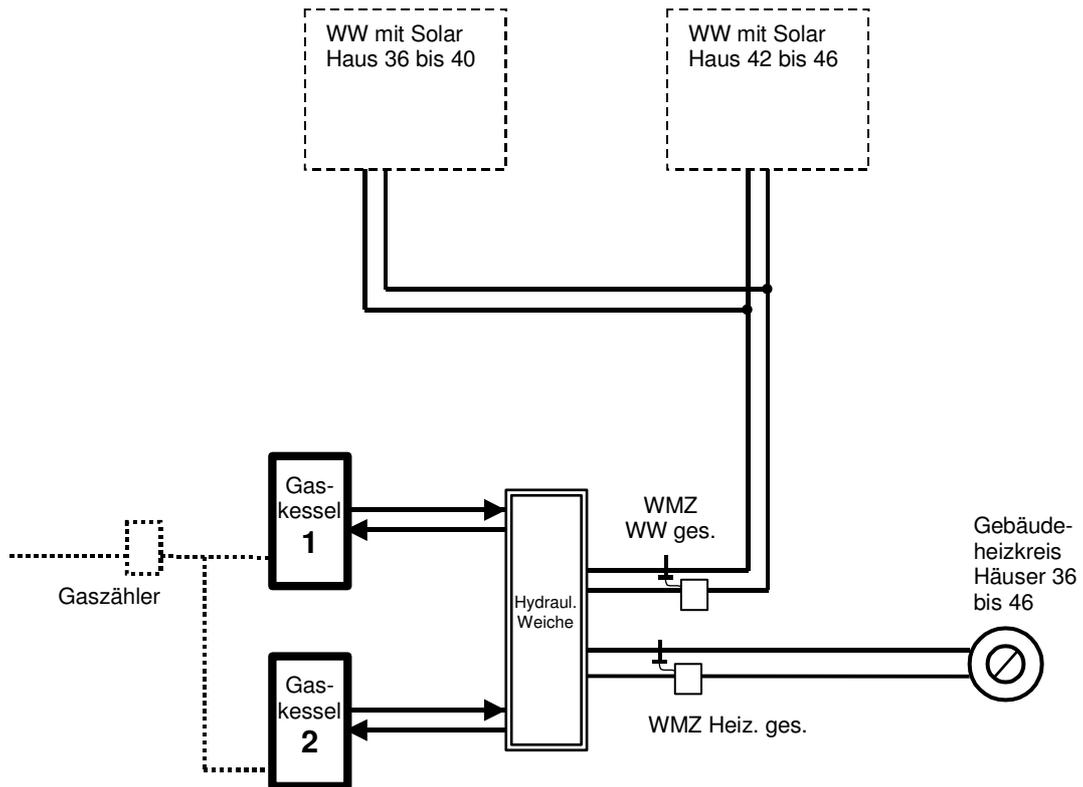


Abbildung 10: Schematisches Hydraulikschema der zentralen Wärmeversorgung im 6er Block mit den installierten Wärmemengenzählern (WMZ). Die beiden gestrichelten Kästen enthalten jeweils die gleiche Anordnung der Warmwasserbereitung wie in Abbildung 9 dargestellt.

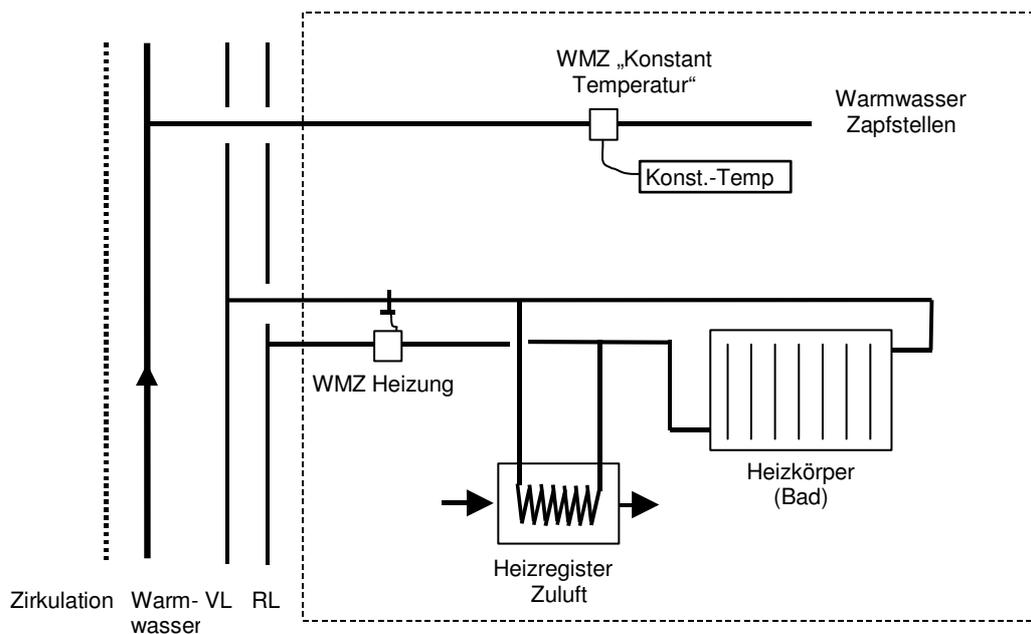


Abbildung 11: Hydraulikanordnung und Wärmehähler in einer einzelnen, zentralversorgten Wohnung des 4er Blocks (schematisch).

3.1.2 Energie für Warmwasser

Die Möglichkeit der Messung der tatsächlichen Energieverbräuche für den Warmwasserverbrauch in den einzelnen Wohnungen wurde unverändert verwendet. Die Beschreibung wird hier daher aus [Peper et al. 2009] zitiert:

„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 Aufwand 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 12: Installierte Wärmemengen- (schwarz) und Wasserzähler (rund) in einer der 19 Wohnungen im 4er Block. In der Installationsdose hinter dem WMZ in der Bildmitte (Pfeil) befindet sich der gewickelte Konstantanwiderstand für die Warmwassermessung. Der rechte WMZ erfasst den Verbrauch für die Beheizung der Wohneinheit.

3.1.3 Raumtemperatur, Feuchte und CO₂-Konzentration

Die bisherige Temperaturmessung mittels M-Bus-Temperatursensoren (Sonderanfertigung) wurden demontiert. An gleicher Stelle wurden Kombisensoren zur Messung von Raumtemperatur, relativer Feuchte und der CO₂-Konzentration montiert. Zusätzlich wurden damit M-Bus Signalumsetzer notwendig (A/D-Wandler). Diese wurden als extra flache Sonderanfertigung in einem Gehäuse unter dem Sensor angeordnet. Nach dem Umbau der zentralen Spannungsversorgung wurden die Sensoren in Betrieb genommen. Die Umbauarbeiten mussten in den bewohnten Wohnungen in Einzelabstimmung mit den Mietern erfolgen.

Nach der Inbetriebnahme wurden bei weiteren Ortsterminen für alle 15 Sensoren Kalibriermessungen für die Temperatur- und Feuchtemesswerte von min. 1 bis 2 Stunden durchgeführt. Mit diesen Daten wurden die Dauermesswerte der Temperatur- und Feuchte wenn notwendig korrigiert.



Abbildung 13: Montierter Kombisensor mit Bus-Umsetzer (links) und Messaufbau einer der Kalibriermessungen (Temperatur und relative Feuchte) in einer Wohnungen des 4er Blocks. Unter der Temperaturmessstelle befindet sich die Steuereinheit des Lüftungsgerätes der Wohnung.

3.1.4 Außenmessung

Zur Erfassung der Außenluftbedingungen (CO₂-Konzentration, Temperatur und relative Feuchte) wurde unter einem Balkon im EG eine Dauermessung montiert. Dabei wurde ein CO₂-Sensor (0...2000 ppm) sowie ein Temperatur-/Feuchtesensor verwendet und auf die bestehende Anlage aufgelegt.



Abbildung 14: Außenmessstelle unter einem EG Balkon auf der Westseite.

3.1.5 Strommessung Lüftung und Luftmengen

Gleichzeitig mit der Montage der Kombisensoren in den 15 Wohnungen wurden durch eine Fachfirma in den Unterverteilungen jeder Wohnung die busfähigen Stromzähler des vorausgehenden Monitorings umgebaut. Von der Messung des gesamten Haushaltsstroms inkl. der Lüftungsgeräte wurde die Verkabelung so geändert, dass nur noch jeweils das Lüftungsgerät (inkl. Regelung und elektrischem Frostschutzregister) erfasst wurde.



Abbildung 15: Busfähiger Stromzähler in der Unterverteilung einer Wohnung.

Überwiegend bei den gleichen Ortsterminen wurden die Volumenströme der Lüftungsanlagen in allen Lüftungsstufen gemessen. Das Vorgehen dazu ist in Abschnitt 4.5 beschrieben.

3.1.6 Temperatur und Feuchte im Keller

Auf die im Keller verwendeten Sensoren und deren Anordnung wird im Abschnitt 6 eingegangen.

3.1.7 Tabellarische Übersicht der Messgeräte

Aufgeführt sind in der folgenden Tabelle die Messgeräte bzw. Sensoren welche für die Dauermessung eingesetzt waren.

Messgröße	Messort	Einheit	Spezifikation	Hersteller	Messgenauigkeit
Messungen in den Wohnungen (4er Block)					
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 relative Luftfeuchte CO ₂ -Konzentration	Wohnzimmer / Flur	°C/% rF, ppm CO ₂	EE80	Fa. E+E	± 0,3 K ± 3% rF (30...70% rF) ± 50 ppm + 2% v. MW
Stromverbrauch Lüftung	Unterverteilung Wohnung	kWh	DVH 3113	Fa. Glock Energiezähler	Klasse 2
Messungen Keller (Haus 50)					
Lufttemperatur und relative Feuchte	3 Kellerräume	°C/% rF	EE10	Fa. E+E	± 0,4 K ± 2% rF (40...60% rF)
Messungen Außenluft					
Lufttemperatur und relative Feuchte	Außenluft	°C/% rF	D12-20FT	Fa. Airflow	± 0,3 K ± 2% rF
CO ₂ -Konzentration	Außenluft	ppm CO ₂	EE80-2CTF3/T04	Fa. E+E	± 50 ppm + 2% v. MW
Zentrale Messungen Gebäudetechnik					
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 ³	G16 / G4 mit Impulsnehmer	H. Pipersberg jr GmbH	< 0.5%

4 Messergebnisse

Für dieses Forschungsprojekt wurden Messdaten über etwa 13 Monate (15. Oktober 2009 bis 6.12.2010) erhoben. Diese ergänzen die bisherigen Messungen aus der vorausgehenden Untersuchung (Juni/Juli 2006 bis Ende April 2008; 24 Monaten) [Peper et al. 2009]. In dem dazwischen liegenden Zeitraum wurde die Messdatenerfassung ebenfalls weiterbetrieben. Die spezifischen Fragen des aktuellen Projektes zur Luftqualität in den Wohnungen und zur Feuchte im Kellerbereich werden für das letzte Untersuchungsjahr für den 4er Block analysiert. Die Wärmeverbräuche (Heizung, Warmwasser etc.) können über drei komplette Bilanzjahre ausgewertet und diskutiert werden. Dabei wurden - neben den detaillierten Verbräuchen im 4er Block - auch wieder die Gesamtverbräuche im 6er Block erhoben. Die jeweiligen Besonderheiten und ggf. abweichenden Datenverfügbarkeiten sind in den betreffenden Abschnitten angegeben.

Abweichend von der vorausgehenden Untersuchung werden drei Jahreszeiträume als Bilanzzeiträume gewählt (Tabelle 4):

Tabelle 4: Verwendete Zeiträume der drei vollständige Bilanzjahre.

Jahr	Zeitraum
Bilanzjahr 1	01. Mai 2007 bis 30. April 2008
Bilanzjahr 2	01. Mai 2008 bis 30. April 2009
Bilanzjahr 3	01. Mai 2009 bis 30. April 2010

Als Grundlage werden im nächsten Abschnitt die Wetterdaten der Messzeiträume dargestellt.

4.1 Wetterdaten

Die für die Untersuchung benötigten Wetterdaten wurden als Stunden-, Tages- und Monatsmittelwerte vom hessischen Luftmessnetz des HLUG (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie) bezogen. Der Vergleich mit den ab Oktober 2009 am Gebäude gemessenen Temperatur ergab, dass die Messstation in Frankfurt Höchst sehr ähnliche Werte liefert (Entfernung 5,8 km). Diese wurden für die durchgängige Temperaturmessung verwendet. Die Außenfeuchte wird nur für die Analysen im letzten Jahreszeitraum benötigt. Da sich dabei deutliche Abweichungen zu den Messdaten vom Standort Frankfurt Höchst ergeben haben, werden die Messdaten verwendet, welche direkt am Gebäude erhoben wurden.

Die nächstgelegene HLUG Messstation, bei der die Messgröße Globalstrahlung erfasst wird, befindet sich auf dem Kleinen Feldberg im Taunus, ca. 19 km vom Gebäudestandort entfernt. Die durch die räumliche Distanz entstehenden Abweichungen sind als gering anzunehmen.

Dokumentiert werden hier die Tagesmittelwerte für den Zeitraum 01. Mai 2007 bis zum 01. Dezember 2010.



Abbildung 16: Tagesmittlere Außentemperatur vom gesamten Untersuchungszeitraum vom Standort Frankfurt Höchst (Quelle HLUG).

Die tagesmittleren Außentemperaturen zeigen die typischen Jahrgänge. Die maximale tagesmittlere Außentemperatur im gesamten dargestellten Zeitraum wurde mit 29,2°C am 10.07.2010 festgestellt; die minimale Außentemperatur betrug -12,2°C am 19.12.2009.

Für den näher untersuchten Zeitraum Oktober 2009 bis November 2010 sind in Abbildung 17 die Stundenmittelwerte dargestellt. In diesem Zeitraum wurde der stundenmittlere Maximalwert am 10.07.2010 um 17:00 Uhr mit 36,6°C gemessen. Minimal wurden -10,6°C am 27.1.10 um 8:00 Uhr erreicht.

Die solare Globalstrahlung auf die Horizontale zeigt im gleichen Zeitraum ebenfalls einen typischen Jahrgang (Tagesmittelwert siehe Abbildung 18). Dabei betragen die tagesmittleren Messdaten der Direktstrahlung bis 355 W/m².

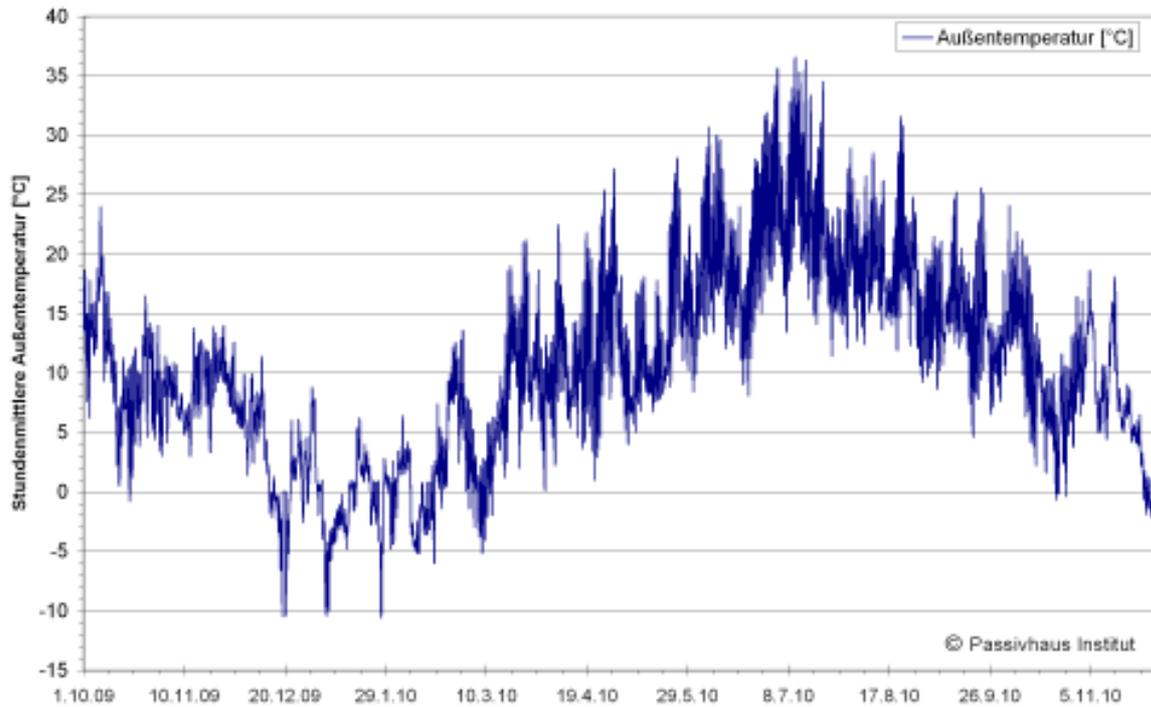


Abbildung 17: Stundenmittlere Außentemperatur vom 1.10.2009 bis zum 1.12.2010 vom Standort Frankfurt Höchst (Quelle HLUG).

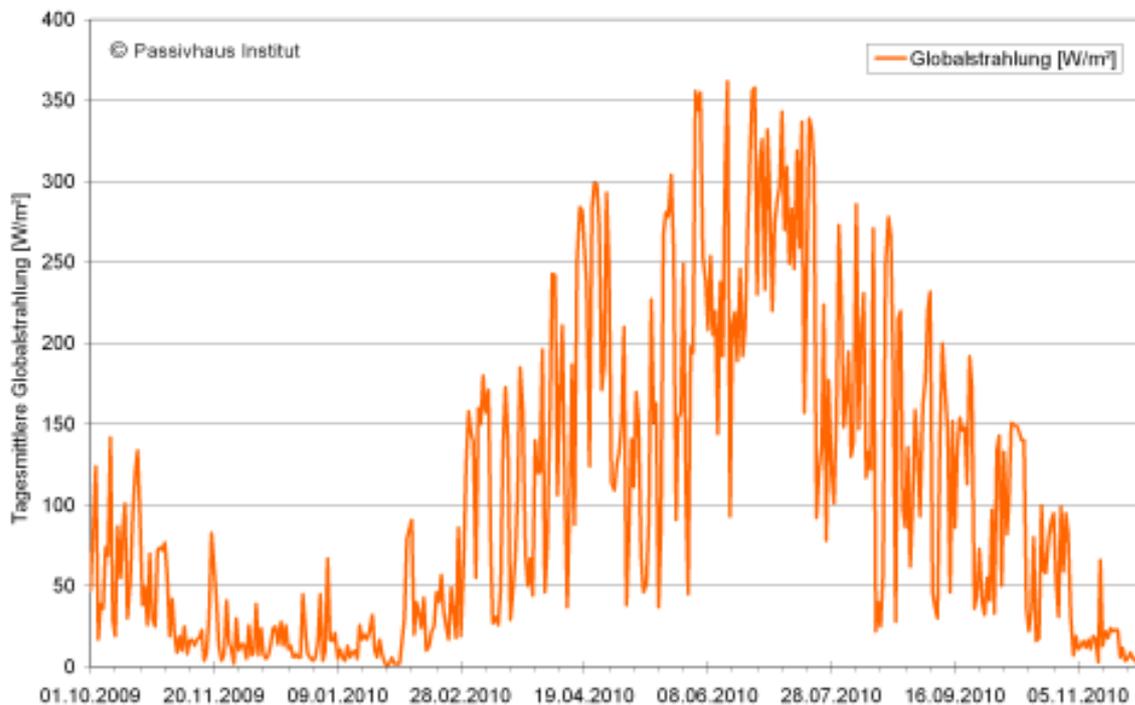


Abbildung 18: Tagesmittlere Globalstrahlung horizontal vom 1.10.2009 bis zum 1.12.2010 vom Standort Kleiner Feldberg (Quelle HLUG).

4.2 Außen- und Raumtemperaturen

Wie beschrieben konnten nach der Umrüstung der Raumluftsensoren in den Wohnungen in 15 der 19 zentral versorgten Wohnungen des 4er Blocks Raumtemperaturmessungen durchgeführt werden. Als Überblick werden hier die Messdaten als Stundendaten dargestellt. Zusätzlich sind die flächengewichtete mittlere Gebäudetemperatur und die Außenlufttemperatur dargestellt (Abbildung 19).

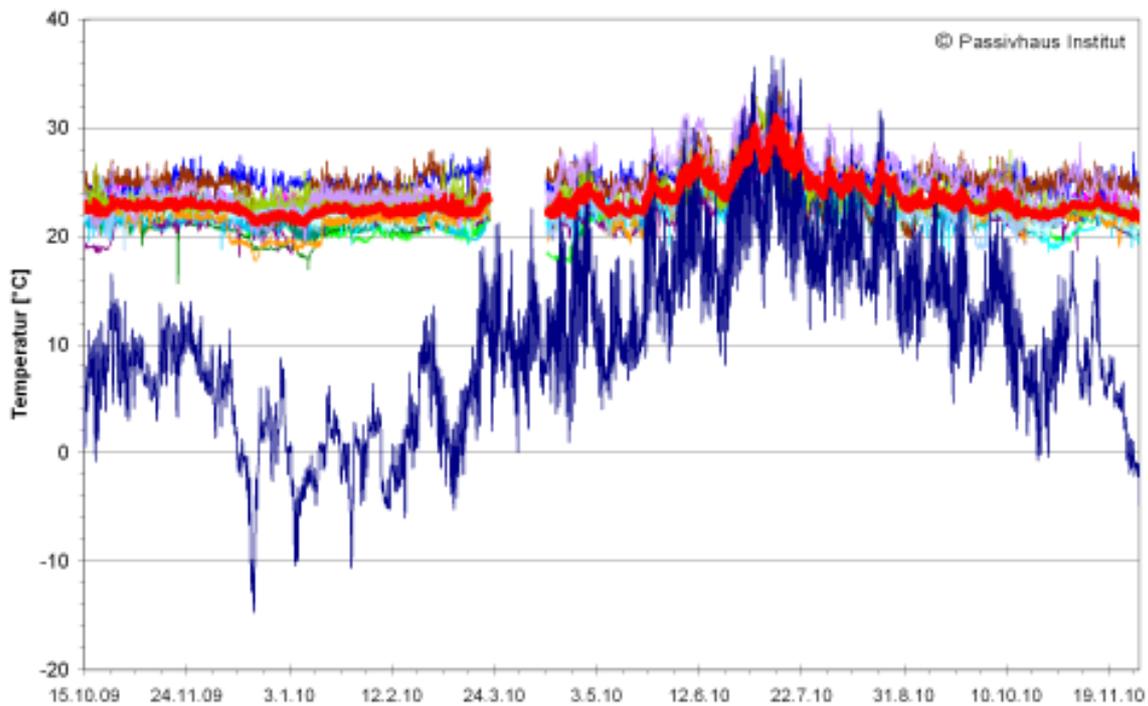


Abbildung 19: Stundendaten der Außen- und der Raumtemperaturen der 15 untersuchten Wohnungen des 4er Blocks sowie der Mittelwert (Flächengewichtung) der Wohnungen (rot) für den Zeitraum 15.10.2009 bis 01.12.2010.

Bei den beiden folgenden Diagrammen sind zeitliche Ausschnitte der Stundendaten dargestellt: Zum einen der Winterzeitraum (15. Oktober 2009 bis 30. April 2010) sowie der gesonderte Sommerzeitraum 01. Mai bis 30.09.2010.

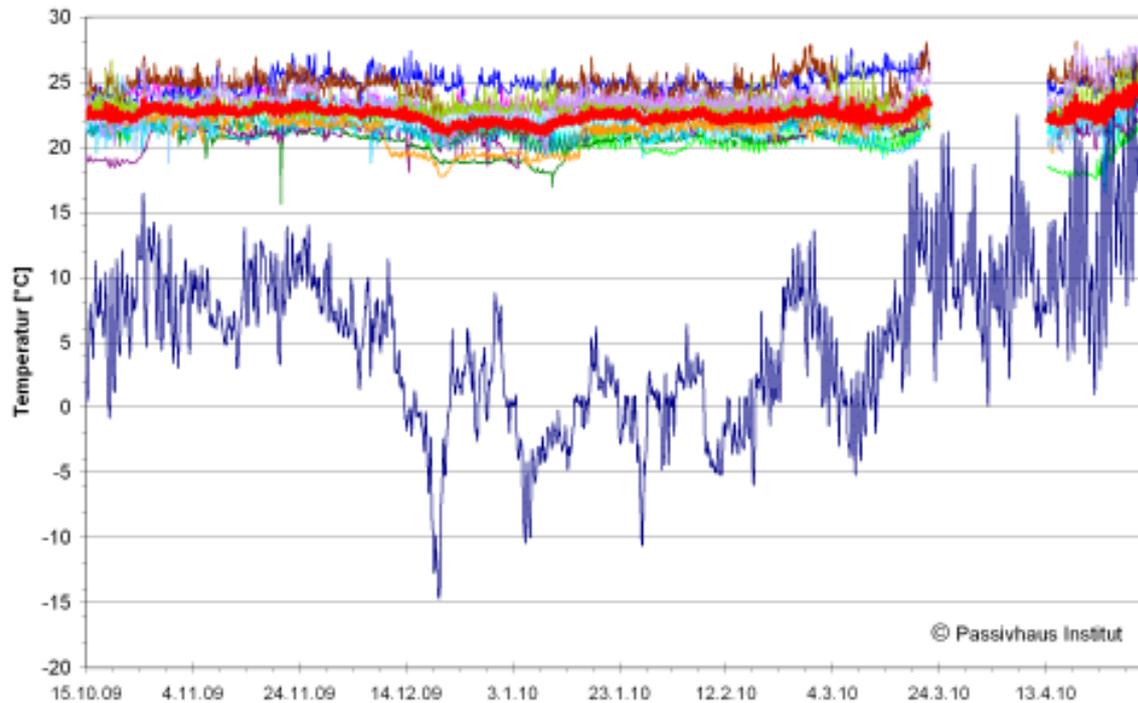


Abbildung 20: Detail der Stundendaten aus Abbildung 19 für den Winterzeitraum 15.10.2009 bis 30.4.2010. Der flächengewichtet Mittelwert der Wohnungen ist wieder rot dargestellt.

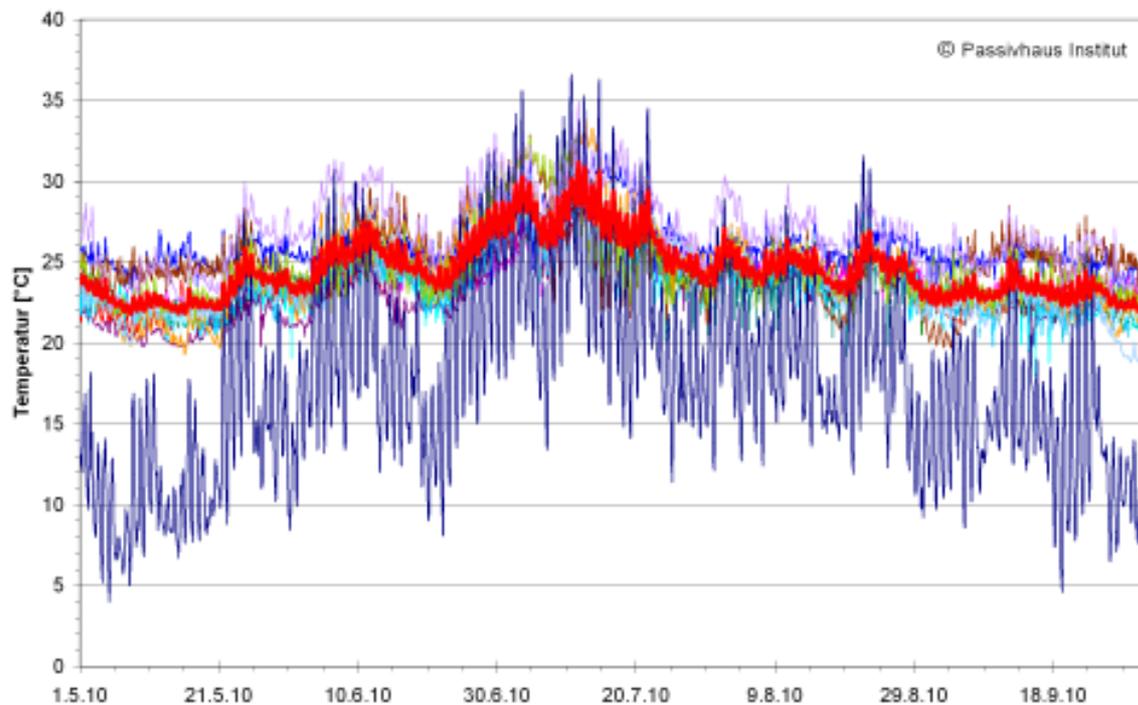


Abbildung 21: Stundenmittlere Temperaturdaten vom Sommerzeitraum (01.05. bis 01.10.2010) aus Abbildung 19. Der flächengewichtet Mittelwert der Wohnungen ist ebenfalls wieder rot dargestellt.

Die in den unterschiedlichen Zeiträumen gemessenen flächengewichteten Mittelwerte sind der folgenden Tabelle zu entnehmen. Eine Flächenwichtung ist notwendig, da die Sensoren jeweils unterschiedliche Wohnflächengrößen repräsentieren.

Tabelle 5: Flächengewichtete Temperaturmittelwerte der Raumlufitemperaturmessungen in den 15 Wohnungen in unterschiedlichen Zeiträumen.

Zeitraum	Mittelwert Temperatur [°C]
Gesamtjahr: 01.11.2009 bis 30.11.2010	23,3
Winter: 15.10.09 bis 30.04.2010	22,4
Kernwinter: 01.11.09 bis 28.02.2010	22,3
Sommer: 01.05. bis 30.09.2010	24,6

Während der Heizzeit verlaufen die Raumlufitemperaturen relativ gleichmäßig. Im Sommer werden im flächengewichteten Mittelwert der 15 Wohnungen maximal 31,2 °C erreicht.

Gegenüber der Messung im Winter 2007/2008 (siehe [Peper et al. 2009]) mit einer flächengewichteten Mitteltemperatur der Wohnungen von 21,8 °C sind die Wohnungen im Winter 2009/2010 mit **22,4 °C** um 0,6 K wärmer beheizt (vgl. Tabelle 6).

Tabelle 6: Übersicht der gemessenen Temperaturmittelwerte im Winter 2007/08 der Wohnungen im 4er Block und der Außentemperatur im Vergleich zu der aktuellen Messung im Winter 2009/2010.

Mittelwerte	Innen- temperatur (flächengewichtet)	Außen- temperatur	Innen- temperatur (flächengewichtet)	Außen- temperatur
	Quelle: [Peper et al. 2009]			
Winter	01.10.2007 bis 30.04.2008		15.10.09 bis 30.04.10	
	21,8 °C	5,9 °C	22,4	5,4 °C
Kernwinter	01.11.2007 bis 29.02.2008		01.11.09 bis 28.02.10	
	21,7 °C	4,0 °C	22,3	3,1 °C

Im Winter sind wieder vereinzelt Wohnungen mit zeitweise relativ niedrigen Raumtemperaturen zu erkennen. Dabei ist zu unterscheiden zwischen einzelnen kurzzeitigen Fensterlüftungen und un- oder schwachbeheizten Wohnungen (vermutlich Urlaub) wobei die niedrigeren Temperaturen dann über einen längeren Zeiten anhalten. Dabei werden nur in drei Wohnungen die 20 °C für längere Zeit unterschritten.

Zwei Wohnungen fallen dagegen durch verhältnismäßig hohe winterliche Raumtemperaturen um 25 °C auf. Die Mittelwerte der winterlichen und kernwinterlichen Temperaturen in Abbildung 22 zeigen, dass der gesamte Temperaturbereich zwischen 20 und 25 °C abgedeckt wird. Es kann erneut keine Verbindung zwischen der Lage der Wohnung und der Höhe der Raumlufttemperatur festgestellt werden. Dieser Umstand zeigt, dass die Temperaturhöhe je nach Nutzerwunsch geregelt werden kann. Nähere Untersuchungen sind dazu bereits in [Peper et al. 2009] dargestellt worden.

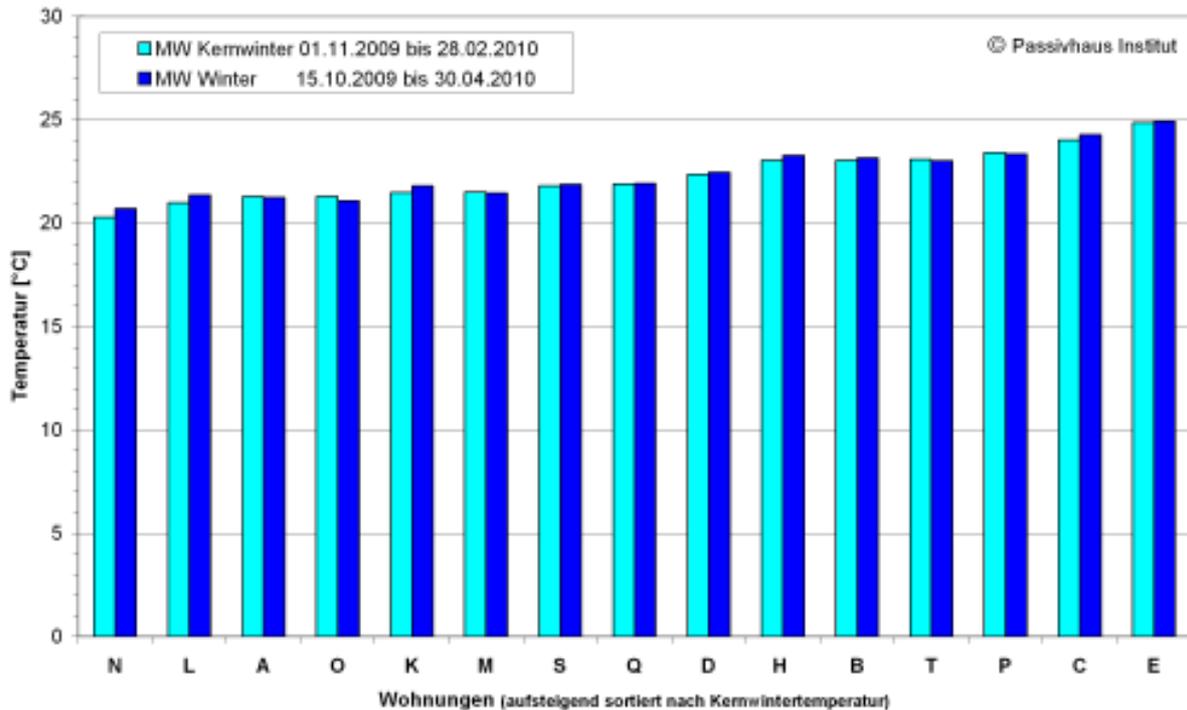


Abbildung 22: Raumtemperaturmittelwerte der 15 Wohnungen im Winter und Kernwinter. Die Wohnungen sind aufsteigend sortiert nach der Kernwintertemperatur.

4.2.1 Niedrigste Außentemperatur

Die niedrigste stundenmittlere Außentemperatur im Winter 2009/2010 wurde am 20.12.2009 um 3:00 Uhr mit $-14,7$ °C gemessen. Am 05., 06. und 27. Januar 2010 wurde dann jeweils noch kurz die -10 °C knapp unterschritten. In der mittleren Raumlufttemperatur der Wohnungen machen sich die Zeiten mit niedrigen Außentemperaturen nur sehr gering bemerkbar.

Zwei Wohnungen zeigen in einem längeren Zeitraum (09.12.2009 bis 15.01.2010 bzw. 18.12.2009 bis 12.01.2010) Temperaturen unter 20 °C und fallen damit aus dem typischen Temperaturband heraus (vgl. Abbildung 23). Zumindest von den Bewohnern der einen Wohnung ist für diesen Zeitraum bekannt, dass Sie die Wohnung zu dieser Zeit nicht bewohnt haben. Es wurden keine höheren Raumtemperaturen benötigt oder gewünscht. Von der zweiten Wohnung liegen keine Informationen von den Bewohnern vor.

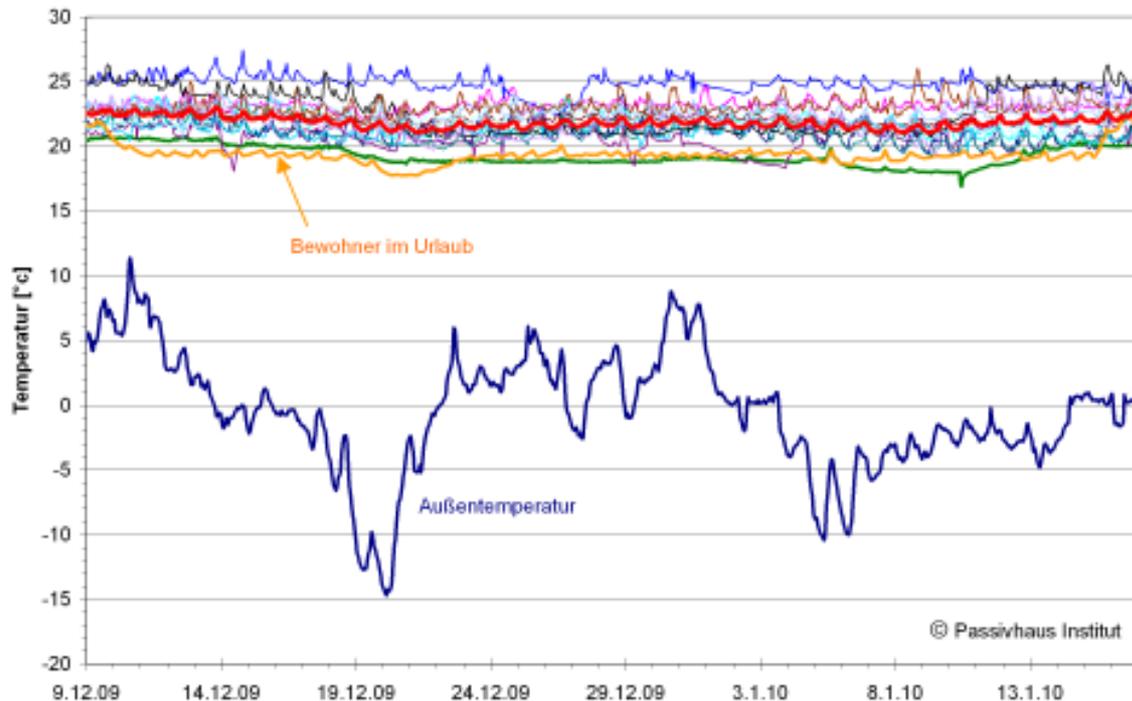


Abbildung 23: Stundenmittelwerte der Raumtemperaturen der 15 Wohnungen und der Außentemperatur um die kältesten Wintertage. Der flächengewichtete Mittelwert ist wieder in rot dargestellt.

Die Bewohner von zwei Wohnungen berichteten dem PHI dennoch von zu niedrig empfundenen Raumtemperaturen. Bei der einen Wohnungen ergaben die Untersuchungen zusammen mit dem Haustechnikplanungsbüro, dass das eingesetzte Nachheizregister zu gering dimensioniert war. Nach dem Austausch gegen ein leistungsstärkeres waren die Bewohner zufrieden. In der zweiten Wohnung ergab die Analyse, dass die Position des Raumthermostaten direkt neben dem Heizkörper im Flur nicht sinnvoll gewählt war. Abhilfe wurde geschaffen, indem der Thermostat in das Wohnzimmer verlegt wurde.

4.2.2 Sommer- und Übertemperaturen

Als maximale stundenmittlere Außentemperatur wurde im Sommer 2010 der Messwert von 36,6 °C ermittelt. Bei dieser maximalen Temperatur kann durchaus von einer hohen aber nicht extremen Höchsttemperatur gesprochen werden. Im Sommer 2003 wurden beispielsweise Temperaturen bis 39 °C erreicht.

Entgegen der Beratung des PHI wurden in den oberen Wohnungen bisher keine außenliegenden Verschattungen auf der Westseite nachgerüstet. Dies wäre aufgrund der nur geringen natürlichen Verschattung (Bäume) in Richtung Westen sehr wünschenswert (siehe Abbildung 24). Die Ergebnisse der Untersuchung im Sommer 2007 zeigten bereits, dass die sommerlichen Temperaturen höher als gewünscht ausgefallen waren. Einige Bewohner der Wohnungen im DG haben sich aufgrund der hohen sommerlichen Temperaturen beschwert.

Wie auch bei der vorausgegangenen Untersuchung werden die sommerlichen Temperaturen der Wohnungen auf Überhitzungshäufigkeit untersucht. Die sommerliche Behaglichkeit wird anhand der absteigend sortierten Temperaturstunden einer jeden Wohnung untersucht.



Abbildung 24: Westfassade der Gebäude Tevesstraße 48 bis 54.

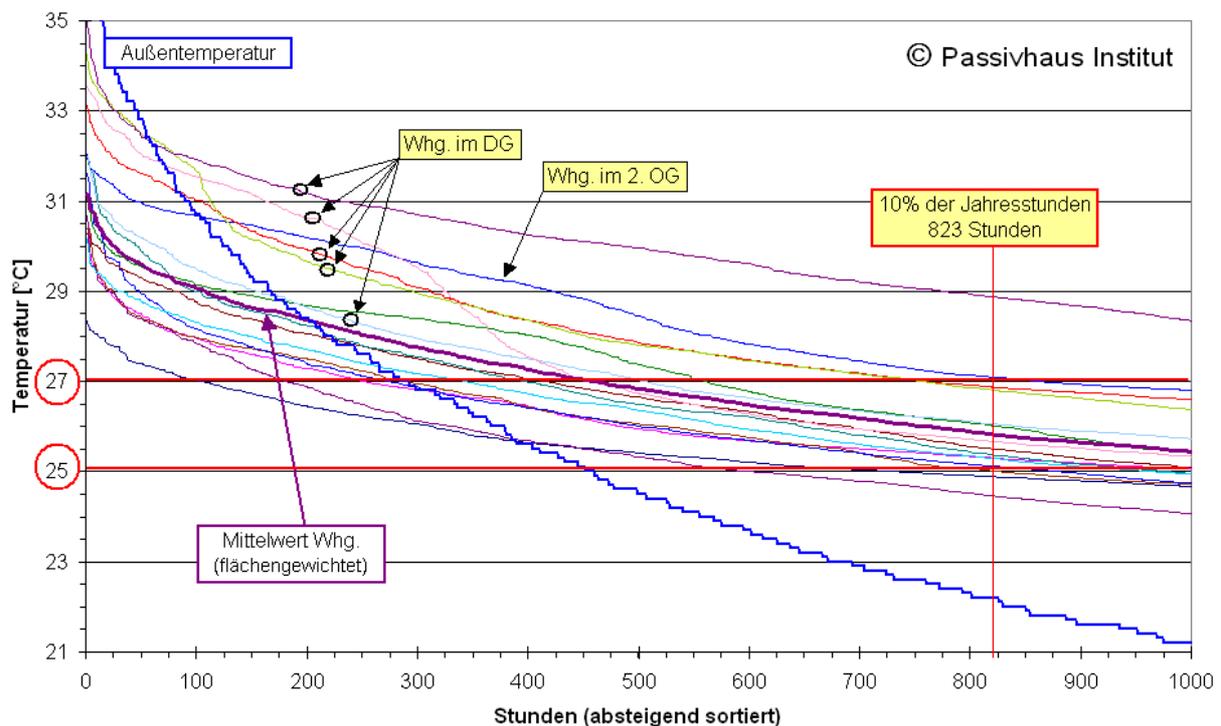


Abbildung 25: Absteigend sortierte Stundenmittelwerte der Raumtemperaturen der 15 Wohnungen und der Außenlufttemperatur im Sommerzeitraum 2010 (01.05.2010 bis 30.09.2010). Dargestellt sind jeweils nur die wärmsten 1000 Stunden der Jahreslinie. Die Komfortgrenze mit 10% der Jahreslinie sowie die 25 und die 27 °C Grenze ist eingetragen.

Die aufsteigend sortierten stündlichen Temperaturmessdaten werden zur Feststellung der Behaglichkeitsgrenze nach [DIN 4108-T2] herangezogen. In Abbildung

25 sind jeweils die wärmsten 1000 Stunden der 15 Wohnungen sowie die der Außentemperatur des gesamten Jahres (15.10.09 bis 14.10.2010) dargestellt. Bedingt durch den Datenausfall (22.03. bis 13.04.2010) ergeben sich insgesamt 8231 Jahresstunden. Die 10 %-Grenze der Jahresstunden liegt damit bei 823 Stunden. 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; diese wird regionsunabhängig auch für Passivhäuser gefordert.

Die mittlere Temperatur der 15 Wohnungen (breite lila Kurve) in Abbildung 25 zeigt an, dass das strengere Behaglichkeitskriterium im flächengewichteten Gebäudemittel nicht eingehalten worden ist: Das strengere 25°C-Kriterium wird mit 1273 Stunden deutlich überschritten. Betrachtet man die Temperaturkurven der einzelnen Wohnungen zeigt sich, dass nur drei Wohnungen den Grenzwert von 25 °C einhalten. Bei den wärmsten Wohnungen handelt es sich wieder um die Dachgeschosswohnungen und eine Wohnung im 2. OG. Die Anforderung der DIN mit der 27 °C Grenze für sommerheiße Gebiete wird nur von zwei Wohnungen überschritten; von einer mit 1650 h über 27 °C allerdings extrem (3305 h über 25 °C). Von der letzteren ist allerdings bekannt, dass die Wohnung tagsüber überwiegend nicht genutzt wurde.

Auch für diese Sommerperiode ist festzustellen, dass trotz überwiegender Einhaltung der Temperatur-Anforderungen der Norm die Temperaturen in den Dachgeschosswohnungen in den Sommermonaten zu hoch liegen. Gegenüber der Untersuchung des Sommers 2007 hat sich die Situation noch weiter verschlechtert. Damals wurde bereits festgehalten, dass die Aussage zu den Übertemperaturstunden des gesamten Baukörpers nach PHPP für die einzelnen Dachgeschosswohnungen nicht aussagekräftig ist. Nur durch außenliegende Verschattung können bei der offenen, unverschatteten Situation des Baukörpers moderate Innentemperaturen auch im Sommer sichergestellt werden.

4.3 Energieverbrauch Wärme

Um den direkten Vergleich zu der bisherigen Auswertung [Peper et al. 2009] zu ermöglichen, werden die Energieverbräuche für die Wärmeversorgung (Heizung/Warmwasser) vom Vorgehen her identisch durchgeführt. Aufgrund der unveränderten Zählerausstattung kann die Analyse der zentralen Energiebezüge wieder für beide Gesamtgebäude (4er und 6er Block) erfolgen. Im 4er Block können aufgrund der vorhandenen Zähler auch die einzelnen Wohnungen analysiert werden.

Untersucht wird ein Zeitbereich, der weit über den Jahreszeitraum dieser Untersuchung hinausgeht. Es ist jetzt möglich, drei vollständige Jahre zu untersuchen. Zur Bilanzierung werden die folgenden drei Jahreszeiträume verwendet:

Jahreszeitraum 1: 01. Mai 2007 bis 30. April 2008

Jahreszeitraum 2: 01. Mai 2008 bis 30. April 2009

Jahreszeitraum 3: 01. Mai 2009 bis 30. April 2010

Soweit bekannt ist, waren die Wohnungen - zumindest im 4er Block - während der Zeiträume fast zu 100% durchgehend vermietet. Zur Auswertung werden jeweils, wie bereits im Abschnitt zu den Temperaturen ausgeführt, die Zeiträume Sommer, Winter und Kernwinter nach Tabelle 7 unterschieden

Tabelle 7: Aufteilung eines Bilanzjahres in Teilzeiträume.

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

Für die Auswertungen werden als Bezugsflächen die Energiebezugsflächen (EBF) (entspricht der beheizte Wohnfläche) der Gebäude aus Abschnitt 2.1 dieses Berichtes verwendet. Sie betragen für Haus 36 bis 46 (6er Block) **2244 m²** und für Haus 48 bis 54 **1350 m²**, insgesamt 3594 m². Die energetischen Auswertungen werden aufgrund der vollständigen Wärmemengenzählerausstattung auch weiterhin für die gesamten Gebäude durchgeführt. Eine Ausnahme bildet nur eine Wohnung im 4er Block, welche nicht über die zentrale Gasheizung und solare Warmwasserunterstützung versorgt wird. Diese Wohnung (EBF: 41 m²) ist mit einem Kompaktgerät ausgerüstet und wird damit monovalent elektrisch versorgt. In diesem Bericht wird diese einzelne Wohnung nicht untersucht. Detaillierte Ausführungen dazu sind [Peper et al. 2009] zu entnehmen. Die zentralversorgte Energiebezugsfläche des 4er Blocks reduziert sich daher auf **1309 m²**.

Die nach dem Umbau der Raumluftsensoren bezüglich der Luftqualität (CO₂-Konzentration und relative Feuchte) und Raumtemperatur untersuchten 15 Wohnungen des 4er Blocks verfügen über eine Energiebezugsfläche von **1014 m²**.

Gebäudenutzfläche A_N

Die Energiebezugsflächen sind nicht zu verwechseln mit der deutlich größeren fiktiven Bezugsfläche „A_N“ („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 Energiekenngrößen führen. Sie beträgt für den 4er Block 1788 m² (plus 32%) und für den 6er Block 2885 m² (plus 29%), für beide Gebäude zusammen 4673 m² (plus 30%).

4.3.1 Zentraler Energiebezug

Der nicht erneuerbare Endenergieverbrauch der beiden Gebäude wird als Gasverbrauch direkt an den beiden Gaszählern gemessen. In den drei Jahreszeiträumen wurden die folgenden Gasverbräuche gemessen:

Tabelle 8: Spezifischer Gasbezug der beiden Gebäude während der drei Jahre.

Gasbezug	Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3
	01. Mai 07 bis 30. April 08	01. Mai 08 bis 30. April 09	01. Mai 09 bis 30. April 10
4er Block	4,81 m ³ /m ²	5,12 m ³ /m ²	4,70 m ³ /m ²
6er Block	3,92 m ³ /m ²	5,22 m ³ /m ²	4,99 m ³ /m ²

Für diese Untersuchung wird der Energieinhalt von Erdgas (H_u) wieder vereinfacht mit 10 kWh/m³ bewertet.

Die spezifischen Monatswerte des Gasbezugs liegen zwischen 0,7 und 9,0 kWh/(m² Monat). Die Mittelwerte der Monatsverbräuche vom 4er- und im 6er-Block liegen in den drei Jahren zwischen 3,9 und 4,4 kWh/(m² Monat). 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.

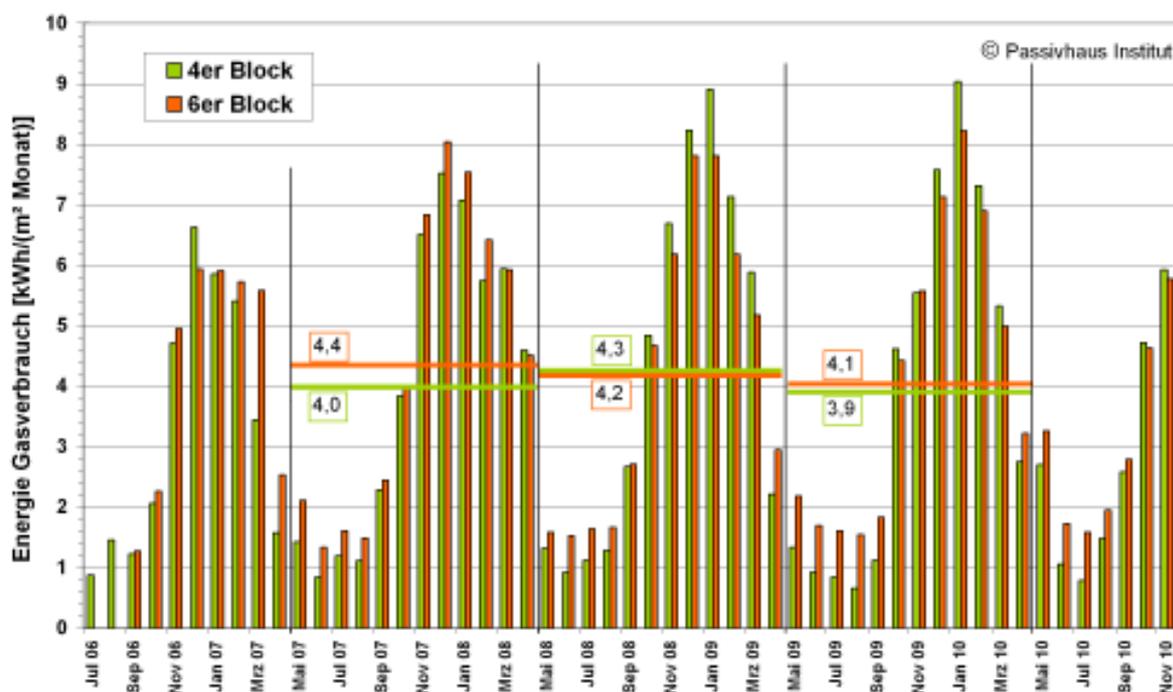


Abbildung 26: Monatliche Gasverbrauchswerte über den gesamten Messzeitraum und die mittleren Verbräuche in den drei Bilanzjahren in den beiden Wohngebäuden. Im Juli und August 2006 war im 6er-Block noch kein Gaszähler montiert.

4.3.1.1 Wärmelieferung Gaskessel

In den Kellern der Gebäude befinden sich zur Wärmeversorgung drei zentrale Gasbrennwertkessel. Nach der Erzeugung in den Kesseln wird die Wärme zum einen direkt den Heizkreisen zugeführt und zum anderen der Warmwasserversorgung mit drei zentralen Warmwasserspeichern. Die Energiemengen in den beiden Gebäuden im Monatsverlauf ist in Abbildung 27 für den 4er Block und in Abbildung 28 für den 6er Block dargestellt.

Die deutliche jahreszeitliche Schwankungen sind erwartungsgemäß - aufgrund der solaren Warmwasserbereitung - auch beim Energieverbrauch zur Warmwassererzeugung zu erkennen. Aufgrund der unvollständigen Belegung der Wohnungen im ersten Winterzeitraum (2006/2007) sind die Verbräuche in dieser Zeit nicht repräsentativ.

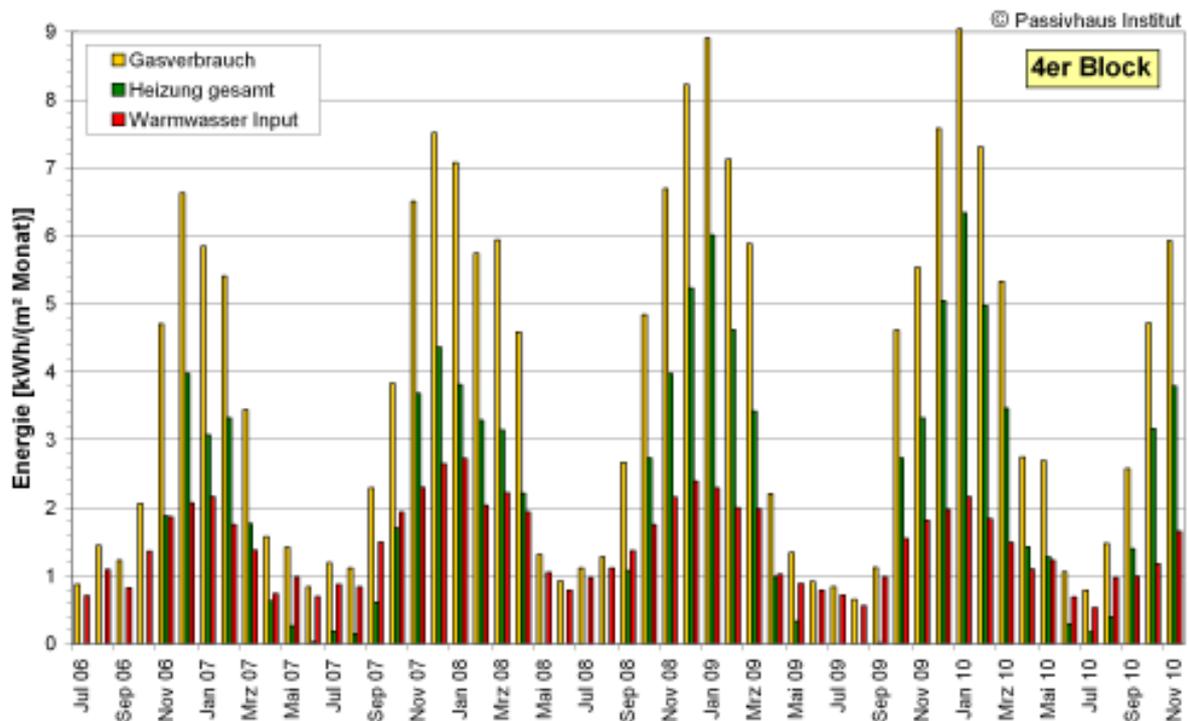


Abbildung 27: Spezifische Monatswerte des Gasverbrauchs und der gelieferten Wärme an den Heizkreis und die Warmwasserbereitung für die gesamte Messzeit im 4er Block.

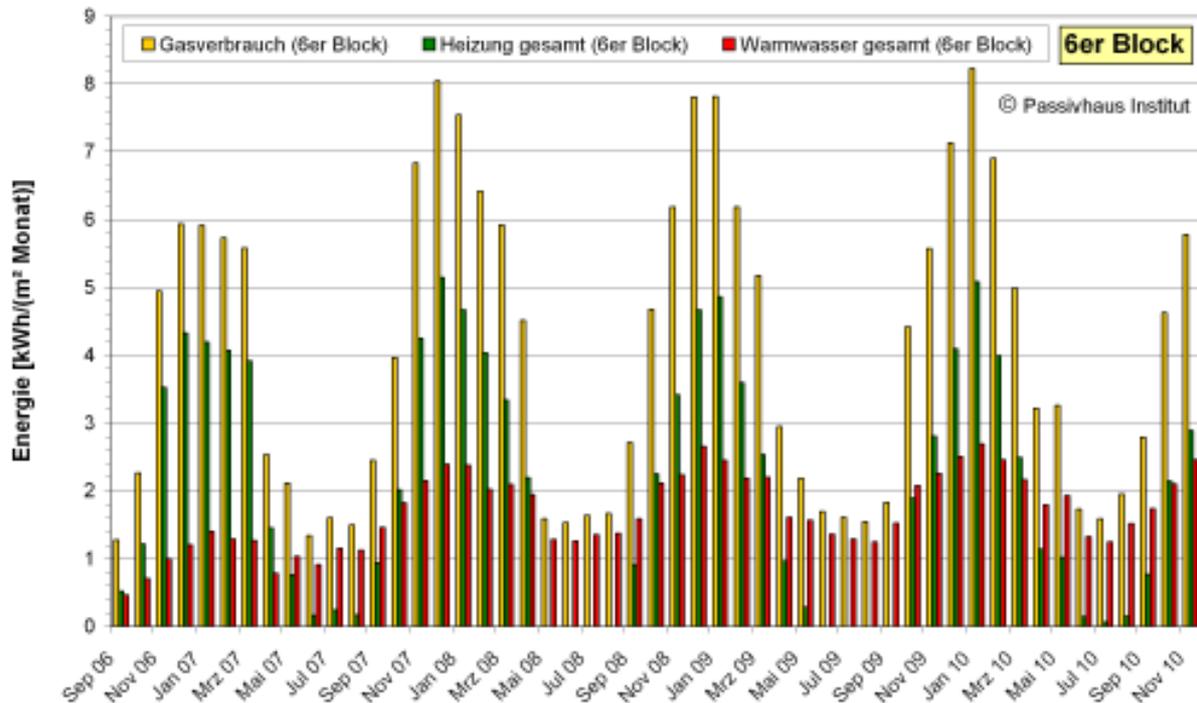


Abbildung 28: Spezifische Monatswerte des Gasverbrauchs und der gelieferten Wärme an den Heizkreis und die Warmwasserbereitung für die gesamte Messzeit im 6er Block. Die verwendeten Zähler wurden im 6er Block etwas später installiert, daher liegen die vollständigen Daten hier erst ab August/September 2006 vor.

Die Summen der drei Bilanzjahreszeiträume aus Abbildung 27 und Abbildung 28 sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 9: Summen der drei Bilanzzeiträume für die spezifischen Größen Gasbezug, zentraler Heizwärmeverbrauch und Aufwand zur Warmwassererwärmung.

[kWh/(m ² a)]	Summe Mai 07 - April 08	Summe Mai 08 - April 09	Summe Mai 09 - April 10
4er Block			
Gas	48,1	51,2	47,0
Heizung	23,5	28,1	27,7
WW-Input	20,7	18,9	15,9
6er Block			
Gas	52,2	49,9	49,4
Heizung	27,9	23,2	21,8
WW-Input	18,6	20,5	23,0

Die Höhe der Energieaufwendungen für die Warmwasserverbräuche sind damit, wie bei Passivhausneubauten üblich, in der gleichen Größenordnung wie die Heizwärmeverbräuche.

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

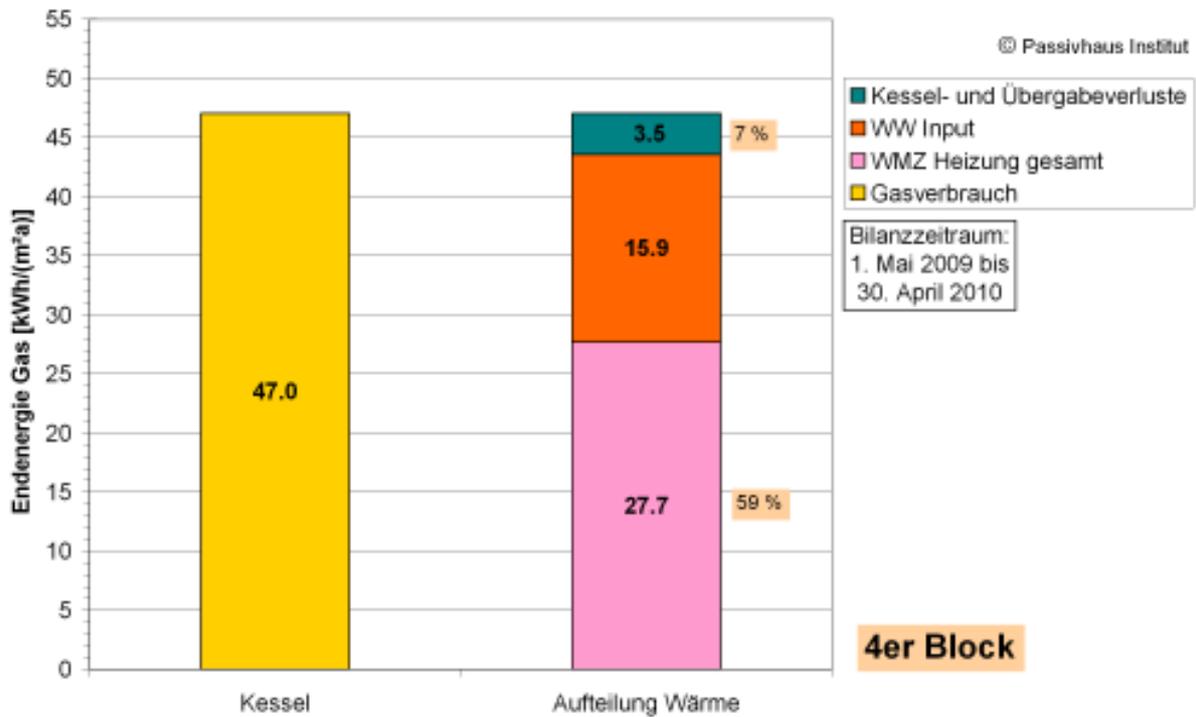


Abbildung 29: Kesselbilanz 4er Block im dritten Jahreszeitraum 2009/2010.

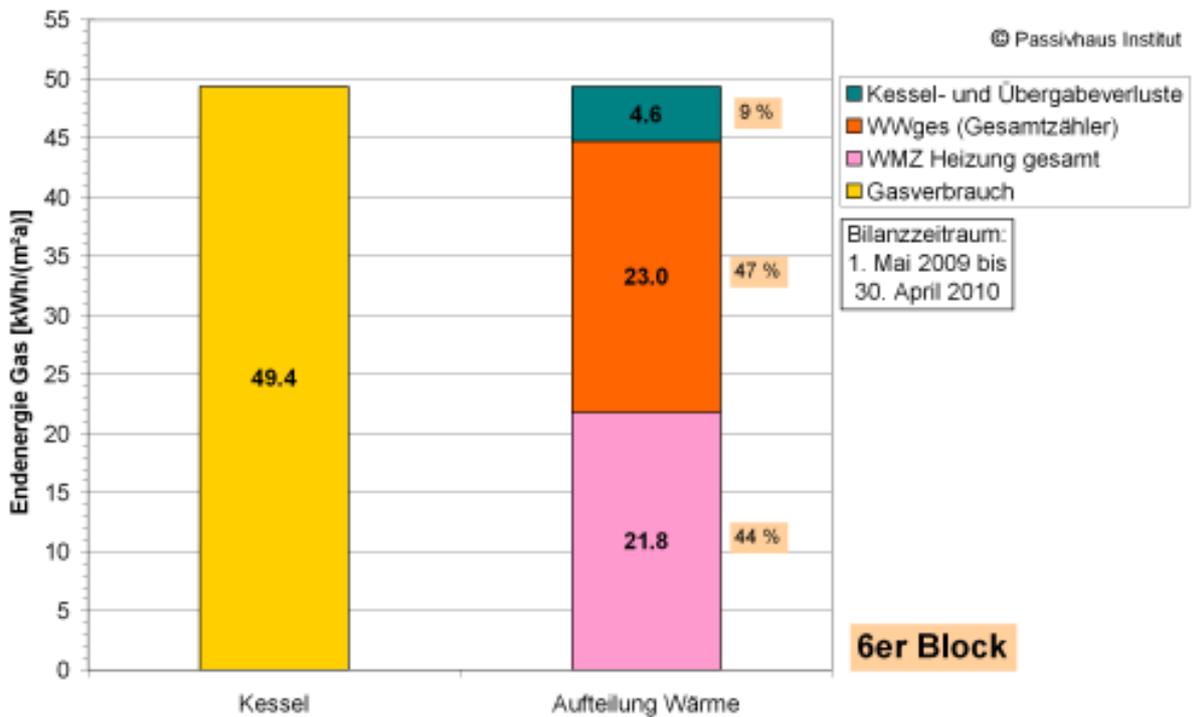


Abbildung 30: Kesselbilanz 6er Block im dritten Jahreszeitraum 2009/2010.

Bei dem verwendeten pauschalen Ansatz von 10 kWh je 1 m³ Erdgas ergeben sich im dritten Bilanzjahr 2009/2010 für die Gebäude Kessel- und Übergabeverluste in den Heizungsräumen von 3,5 bzw. 4,6 kWh/(m²a). Darin sind neben den Umwandlungs- und Übergabeverlusten vom Kessel auch die Wärmeabgabe der Leitungen bis zu den zentralen Wärmezählern enthalten. Dies entspricht 7 bzw. 9% der gelieferten Energie.

4.3.2 Heizwärmeverbrauch

Es wird erneut so vorgegangen, dass für den Heizwärmeverbrauch der gemessene Verbrauch in den Wohnungen (WMZ Wohnungen) und die Anteile der Wärmeabgabe der Verteilleitungen berücksichtigt werden. Dabei wird zwischen der genutzten und der nicht genutzten Verteilwärme unterschieden. Die Wärmemengen der Wärmeverteilung werden im 4er Block aus der Differenz des Hauptwärmezählers Heizung mit der Summe der 19 Wohnungszähler berechnet. 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 19 Wärmemengenzähler der zentralversorgten Wohnungen im 4er Block werden die Heizwärmeverbrauchswerte einzeln erfasst. Im dritten Bilanzjahr 2009/2010 wurden spezifische Heizwärmeverbräuche zwischen 0,0 und 33,8 kWh/ (m²a) gemessen. Der flächengewichtete Mittelwert in dieser Jahresperiode betrug

21,6 kWh/(m²a).

Damit liegt dieser Messwert für den Heizwärmeverbrauch für ein saniertes Gebäude auf einem extrem niedrigem Niveau. Es handelt sich um einen Heizwärmeverbrauch der nur geringfügig über den üblicherweise in Passivhaus-Neubauten erreichten Verbrauchswerten liegt. Das Projekt kann damit auch in der dritten vollständigen Heizperiode als sehr erfolgreich bewerten werden.

Der Heizwärmeverbrauchs ist größer als der Messwert der ersten vollständigen Heizperiode 2007/2008 von 15,7 kWh/(m²a). Dabei müssen die folgenden Punkte berücksichtigt werden:

- Die mittlere Innentemperatur während des Winters (4er Block 22,4 °C) liegt erneut deutlich über den Standardbedingungen von 20 °C.
- Die realen Klimadaten (Globalstrahlung und Außentemperatur) sind in jedem Bilanzzeitraum abweichend.
- Es wurde erneut eine geringe „Sommerheizung“ festgestellt (siehe Ausführungen im nächsten Abschnitt).

Eine Umrechnungs- und Vergleichsmöglichkeit der ersten beiden Effekte ergibt sich mit der vorhandenen PHPP Bilanz: Mit den gemessenen Klimadaten und der er-

höhten Innentemperatur im 4er Block ergibt sich ein rechnerischer Zusatzverbrauch von **5,1 kWh/(m²a)**. Der Mittelwert für den in den Wohnungen gemessenen Heizwärmeverbrauch sinkt damit bei der Umrechnung auf 20 °C auf nur noch

16,5 kWh/(m²a).

Der Unterschied von 5 kWh/(m²a) oder weniger als 2% der erzielten Einsparung ist vernachlässigbar gering – sog. „Rebound-Effekte“, wie sie hier mit der Temperaturerhöhung vorliegen, können den Erfolg des Passivhausstandards kaum reduzieren; das liegt letztlich daran, dass der verbleibende Verbrauchswert so gering ist, dass selbst eine massive Steigerung des Dienstleistungsumfangs (eben z.B. der Temperatur) nur geringe Effekte hat.

Damit wird deutlich, dass für einen realen Verbrauchswert mit allen (Rebound-) Effekten ein sehr gutes Ergebnis erreicht wurde. Die Darstellung der Wärmeverbräuche der einzelnen Wohnungen in Abbildung 31 zeigt eine ausgeprägte aber typische Nutzerstreuung; die Verbrauchswerte bewegen sich zwischen 0 und 48 kWh/(m²a).

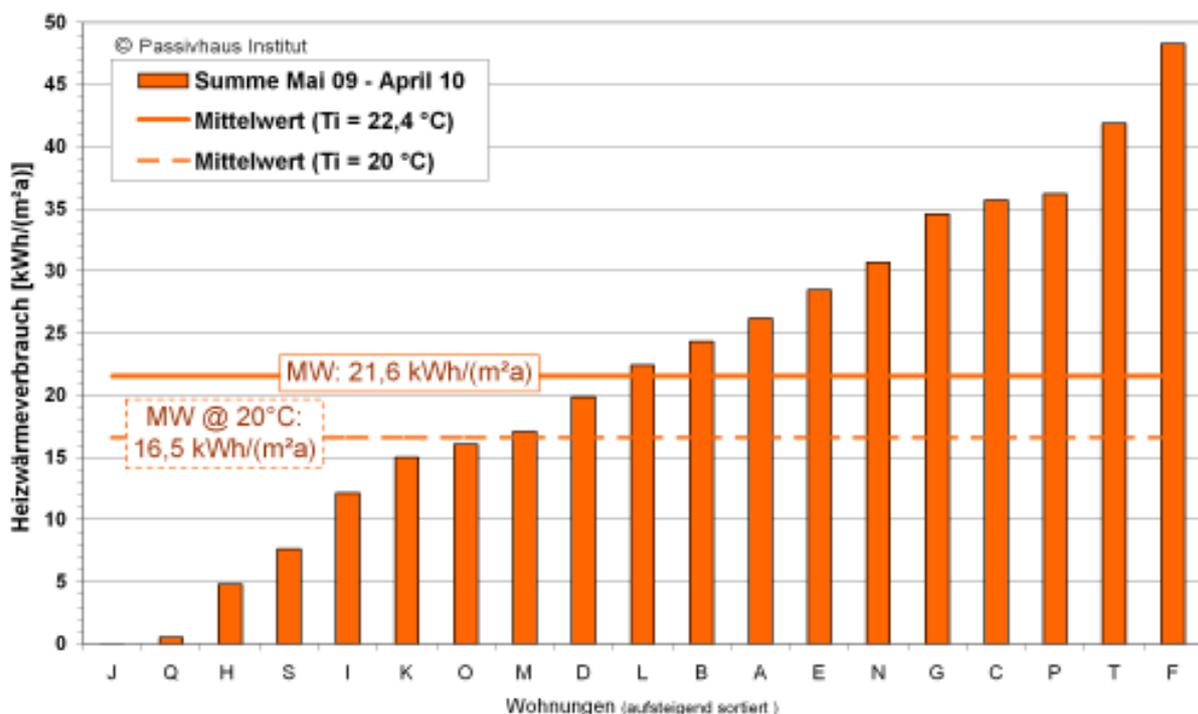


Abbildung 31: Heizwärmeverbrauch der 19 zentralversorgten Wohnungen inkl. der geringen Sommerheizung im 4er Block im dritten Bilanzjahr 2009/2010. Neben dem flächengewichteten Mittelwert ist auch der Mittelwert bei umgerechnet 20 °C Innentemperatur eingetragen.

Nach den vorliegenden Informationen waren alle Wohnungen im 4er Block dauerhaft vermietet. Auffällig sind insbesondere die beiden Wohnungen mit keinem oder nahezu keinem Heizwärmeverbrauch („J“ und „Q“). Ebenso die beiden Wohnungen mit dem spezifisch höchsten Verbräuchen. Wie auch bei der ersten Analyse zeigt sich, dass nicht die Lage der Wohnung für diese Extremwerte ausschlaggebend sind.

Vielmehr sind es Nutzerfaktoren wie Raumtemperaturen, Stromverbrauch, Anwesenheitsdauern, Einstellung der Lüftungsanlagen (Luftwechsel), etc. So verfügen z.B. drei der fünf Wohnungen mit den niedrigsten Heizwärmeverbräuche über überdurchschnittliche Haushaltsstromverbräuche. In diesen Wohnungen wird die Wärme dann verstärkt durch interne Wärmequellen wie Beleuchtung, Elektrogeräte oder Kochanwendungen eingebracht.

Einen eindeutigen Hinweis auf den deutlichen Nutzereinfluss findet sich, wenn die Heizwärmeverbräuche der Wohnungen in den drei unterschiedlichen Bilanzzeiträumen betrachtet werden. In Abbildung 32 sind die Messwerte jeder Wohnung für die drei Jahre dargestellt, aufsteigend sortiert nach dem letzten Messjahr. Dabei fallen einige Wohnungen mit extremen Verbrauchsunterschieden auf: Die Niedrigstverbraucher „Q“ und „H“ lagen in den beiden Vorjahren deutlich höher. Die Wohnung „P“ hatte im ersten Jahr gar keinen messbaren Heizwärmeverbrauch, liegt jetzt aber im obersten Bereich.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass sich die Verbräuche trotz der erheblichen aber üblichen Nutzerstreuung auf sehr niedrigem Niveau befinden. Entscheidend bei solchen Projekten ist immer der flächengewichtete Mittelwert des gesamten Gebäudes. Weitere Zusammenhänge zur Verbrauchsstreuung sind z.B. in den Ausführungen in [Feist 2004] dargestellt.

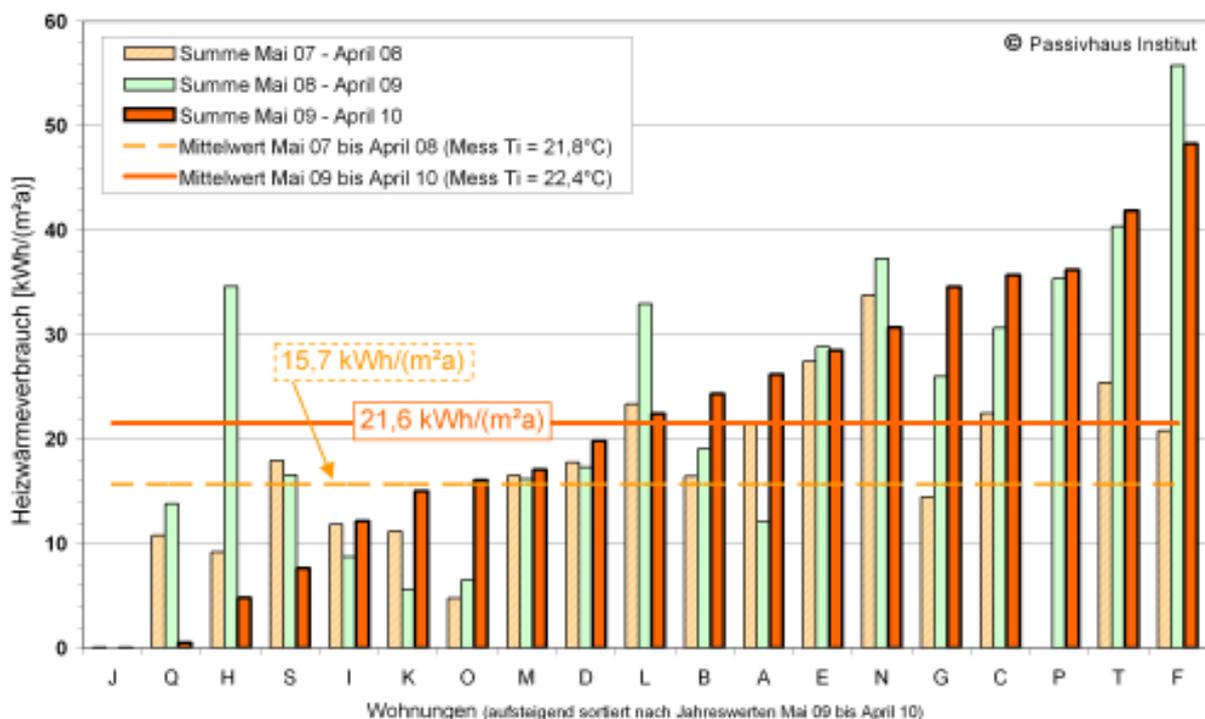


Abbildung 32: Heizwärmeverbrauch der 19 zentralversorgten Wohnungen inkl. der geringen Sommerheizung im 4er Block während der drei Bilanzjahre bei den jeweils unterschiedlichen Innentemperaturen. Die flächengewichteten Mittelwerte sind eingetragen; der Wert für das mittlere Jahr 2008/2009 ist zufällig gleichauf mit dem des dritten Messjahres (21,6 kWh/(m²a)). Die Raumtemperaturen im mittleren Jahr wurde nicht durchgehend gemessen und kann daher nicht dargestellt werden.

4.3.2.2 Sommerheizung

Wie oben bereits beschrieben handelt es sich bei den Messdaten der Heizwärme in den drei Bilanzjahren um Verbräuche jeweils eines gesamten Jahres. Damit sind Verbräuche außerhalb der hier definierten Heizzeit vom 01. Oktober bis 30. April mit enthalten. Diese werden hier als „Sommerheizung“ bezeichnet, da Sie zu Zeiten anfallen, in denen normalerweise keine Beheizung notwendig ist. Angeraten wird eine generelle Abschaltung der Heizungsversorgung in diesen Zeiträumen (Mai bis inkl. September). Leider ist eine solche Abschaltung in den Gebäuden technisch (Jahresschaltuhr) nicht realisiert worden. Die Umsetzung durch den Wartungsdienst auf ausschließlichen Warmwasserbetrieb während des Sommers scheint nicht, oder nur verspätet zu erfolgen.

Die Summen der Sommerheizverbrauchsweite während der vier Sommer sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Sie schwanken zwischen 0,16 und 1,47 kWh/(m²a), was absoluten Verbräuchen zwischen 204 und 1921 kWh/Sommer entspricht.

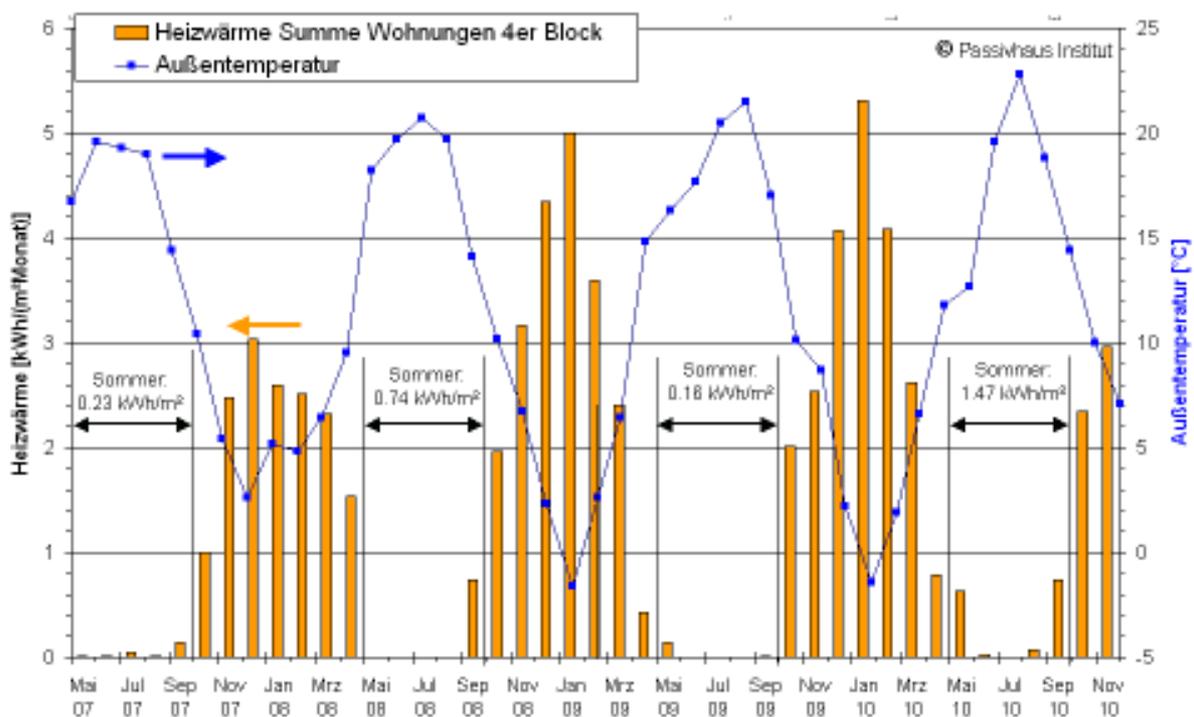


Abbildung 33: Summe der Heizwärmeverbräuche der 19 Einzelwohnungen des 4er Blocks über alle Monate des Messzeitraumes mit Angabe der Sommerheizwärmeverbräuche für die vier untersuchten Sommerzeiträume.

Wird der Sommergebrauch des untersuchten dritten Jahres (Mai 2009 bis April 2010) beim Heizwärmeverbrauch berücksichtigt, reduziert dieser sich geringfügig:

$$21,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}) - 0,16 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}) = \mathbf{21,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})}$$

Wärmerückgewinnung

Die Lüftungsgeräte einer jeden Wohnung müssen manuell zwischen Sommer- und Winterbetrieb (Bypass) umgeschaltet werden. Erfolgt dies nicht, fehlt im Winter der erhebliche Beitrag der Wärmerückgewinnung, die Lüftungswärmeverluste steigen erheblich und es muss deutlich mehr aktiv geheizt werden. Sollte die Wärmerückgewinnung (WRG) dagegen im Sommer aktiviert sein, würden sich deutlich höhere Raumtemperaturen ergeben, da die Wärme in der Wohnung zum Großteil nicht über die Lüftungsanlage abgeführt wird.

Die genauen Umschaltungstermine der Lüftungsgeräte von Sommerbetrieb ohne WRG (Bypass aktiv) auf den Winterbetrieb mit Wärmerückgewinnung sind nicht exakt bekannt. Eigentlich erfolgt die Umschaltung im Herbst und Frühjahr nur durch den Wartungsdienst der Lüftungsanlagen. Allerdings ist hier zu unterscheiden zwischen den beiden eingesetzten Gerätetypen. Bei dem größeren Gerätetyp (in 12 der 19 Whg. des 4er Blocks, Vallox KWL 090 D) kann vom Bewohner selber über das Bedienteil der Bypass geschaltet werden. Bei den Ortsterminen in allen Wohnungen wurde allerdings festgestellt, dass die Bewohner über diese Funktion nicht ausreichend unterrichtet waren. Dies wurde mit Hilfe mündlicher Unterrichtung und einem kurzen „Merkzettel“ vom PHI nachgeholt (siehe Abbildung 34). Bei den sieben kleineren Geräten (Typ: Vallox KWL 090 SC) im 4er Block muss zur Umstellung der Gerätedeckel abgenommen werden und die Bypassklappe von Hand umgelegt werden. Dies erfolgte ausschließlich durch den Wartungsdienst.

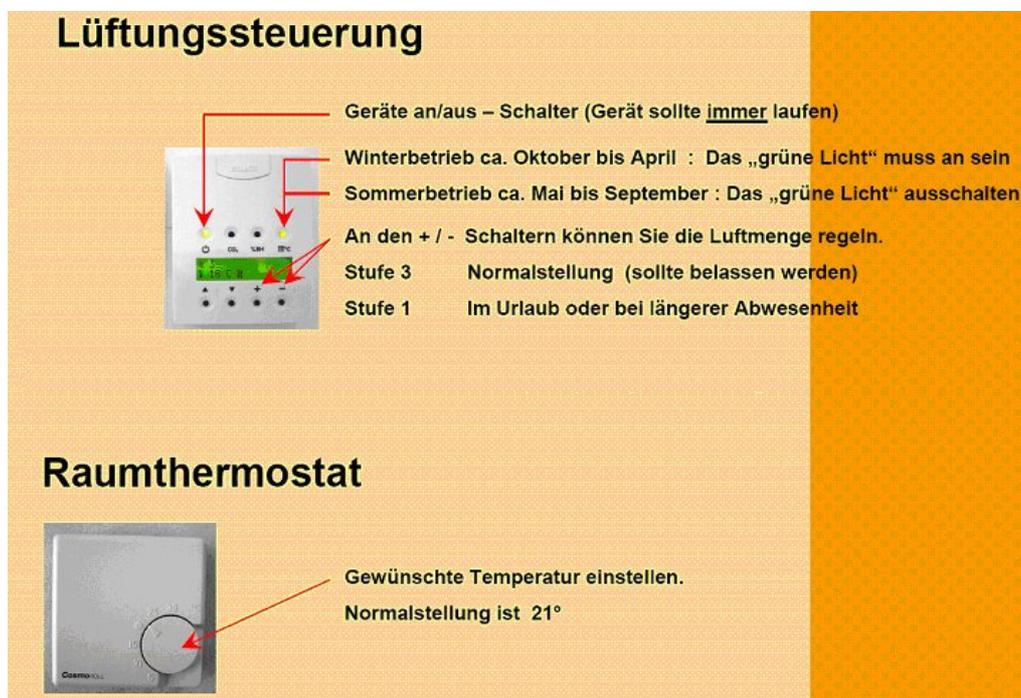


Abbildung 34: Kurzanleitung („Merkzettel“) für die Lüftungssteuerung der größeren Lüftungsgeräte und einen herkömmlichen Raumthermostat für die Anforderung des Nachheizregisters (Quelle: GAG Ludwigshafen, nach Vorgaben des PHI).

Bedingt durch die Insolvenz der Wartungsfirma wurden die Wartungen auch im Herbst 2009 wieder deutlich verspätet ausgeführt. Dadurch wurden dann auch die

Umstellung auf den Winterbetrieb viel zu spät umgesetzt. Eine Umstellung auf den Winterbetrieb deutlich vor Beginn der aktiven Gebäudebeheizung wäre auf jeden Fall sinnvoll. Je nach Außentemperatur ist dies etwa Anfang Oktober angeraten. Wie den Wartungsprotokollen der Wartungsfirma entnommen werden konnte, erfolgten die Umstellungen allerdings erst Ende November bzw. überwiegend Anfang bis Mitte Dezember 2009 (siehe Tabelle 10). In einer Wohnung (größerer Gerätetyp) konnte gar kein Termin realisiert werden, wodurch dann keine Wartung durchgeführt werden konnte.

Hinzu kommt, dass der vor Ort am 30.11.2009 angetroffene Wartungsmonteur durch einen Hinweis des PHI festgestellt hat, dass bisher der Bypass der Geräte der kleineren Baugröße immer genau zur falschen Jahreszeit aktiviert wurde. Nach seiner Aussage wurde die Anleitung bzw. die Funktion falsch verstanden und die Klappe falsch bedient (siehe Abbildung 35). Demnach erfolgte also in diesen Wohnungen im Winter immer keine Wärmerückgewinnung. Das betrifft sieben Geräte im 4er Block und 18 im 6er Block. Dieser Fehler wurde nun aufgeklärt und soll in Zukunft vermieden werden. Der Hersteller wurde davon ebenfalls informiert und vom PHI wurde vorgeschlagen, eine eindeutige Markierung („Sommer“ / „Winter“) im Gerät aufzudrucken. Das durchgängig keine WRG in den 7 Wohnungen aktiviert war ist aufgrund der niedrigen Heizwärmeverbräuchen aus der vorausgehenden Untersuchung [Peper et al. 2009] nicht plausibel.

Tabelle 10: Wartungstermine der Herbstwartung 2009 sowie der Frühjahrswartung 2010 im 4er Block (Quelle: Nach Wartungsprotokollen der Fa. „FA Haustechnik“, Vacha).

Whg.	Herbst 2009	Frühjahr 2010
A	07.12.2009	22.04.2010
B	07.12.2009	24.03.2010
C	02.12.2009	25.03.2010
D	01.12.2009	22.03.2010
E	01.12.2009	01.04.2010
F	14.12.2009	29.03.2010
G	01.12.2009	25.03.2010
H	07.12.2009	23.03.2010
I	keine Wartung	22.04.2010
J	30.11.2009	06.04.2010
K	01.12.2009	23.03.2010
L	01.12.2009	24.03.2010
M	30.11.2009	23.03.2010
N	01.12.2009	22.04.2010
O	07.12.2009	26.03.2010
P	30.11.2009	31.03.2010
Q	30.11.2009	31.03.2010
S	07.12.2009	22.03.2010
T	14.12.2009	23.03.2010

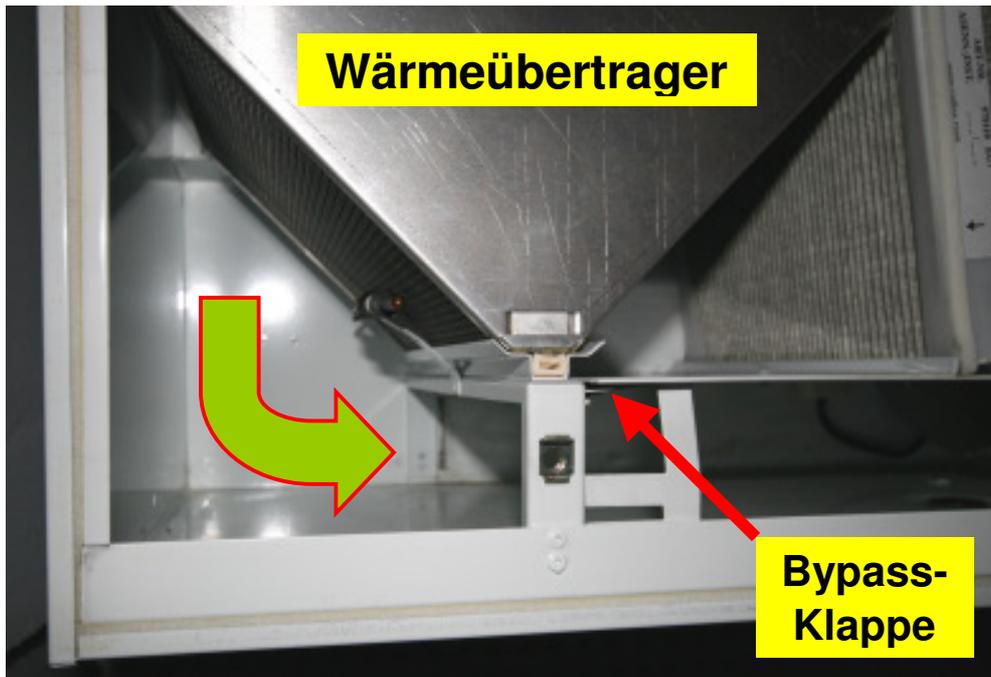


Abbildung 35: Unterer Bereich des geöffneten Lüftungsgerätes vom Typ Vallox 090 SC mit der hochgeklappten Bypassklappe (Winterbetrieb, Luft wird über den WRG geführt).

Aufgrund dieser unterschiedlichen Umstände (Fehleinstellung Wartungsdienst, Zeitpunkt Wartungstermine, Ausfall Wartungstermin, Verstellung Bypass durch Bewohner) kann nicht sicher ausgesagt werden, bei welchen Wohnungen tatsächlich die Wärmerückgewinnung im Winter nicht aktiviert war und bei welchen verspätet.

In Zeiträumen ohne WRG-Betrieb aber mit Heizbedarf (je nach Außentemperatur und Temperaturwahl der Bewohner) musste in den betroffenen Wohnung die Nachheizung ohne die „Grundversorgung“ der WRG den notwendigen Temperaturhub erbringen. Je nach Außentemperatur und Luftvolumenstrom führt dies zu deutlichem Mehrverbrauch. Bereits in [Peper et al. 2009] wurden die Auswirkungen exemplarisch für zwei Wohnungen berechnet: „Der Lüftungswärmeverlust ohne WRG-Betrieb nimmt, im Verhältnis zu den im Passivhaus üblichen Heizwärmeverbräuchen erheblichen Dimensionen an. Ohne den Betrieb der WRG würden sich die Heizwärmeverbräuche beim Nennvolumenstrom der Geräte um 28,2 bzw. 22,2 kWh/(m²a), 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. Der Gesamtmittelwert aller Wohnungen würde entsprechend niedriger liegen.“ Das gleiche gilt für alle betroffenen Wohnungen im 4er und im 6er Block. Wie bereits im Vorgängerbericht geschrieben gilt auch jetzt wieder:

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

Korrelation Heizwärme und Raumtemperatur

Der Zusammenhang der winterlichen Heizwärmeverbräuche der 19 Wohnungen mit den jeweiligen mittleren winterlichen Raumtemperaturen (15 Wohnungen) ist in Abbildung 36 dargestellt. Die Tendenz zu höheren Raumtemperaturen bei höheren Verbräuchen ist fast nicht zu erkennen. Die Korrelation der Wärmeverbräuche und der Raumtemperaturen ist mit einem Bestimmtheitsmaß von nur $R^2 = 0,11$ nicht signifikant. Die Temperaturerhöhung resultiert zum großen Teil in einer Wohnung eines Mehrfamilienhauses mit einer hochwertigen Dämmung der Außenwände aus dem 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 [Pflüger/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.

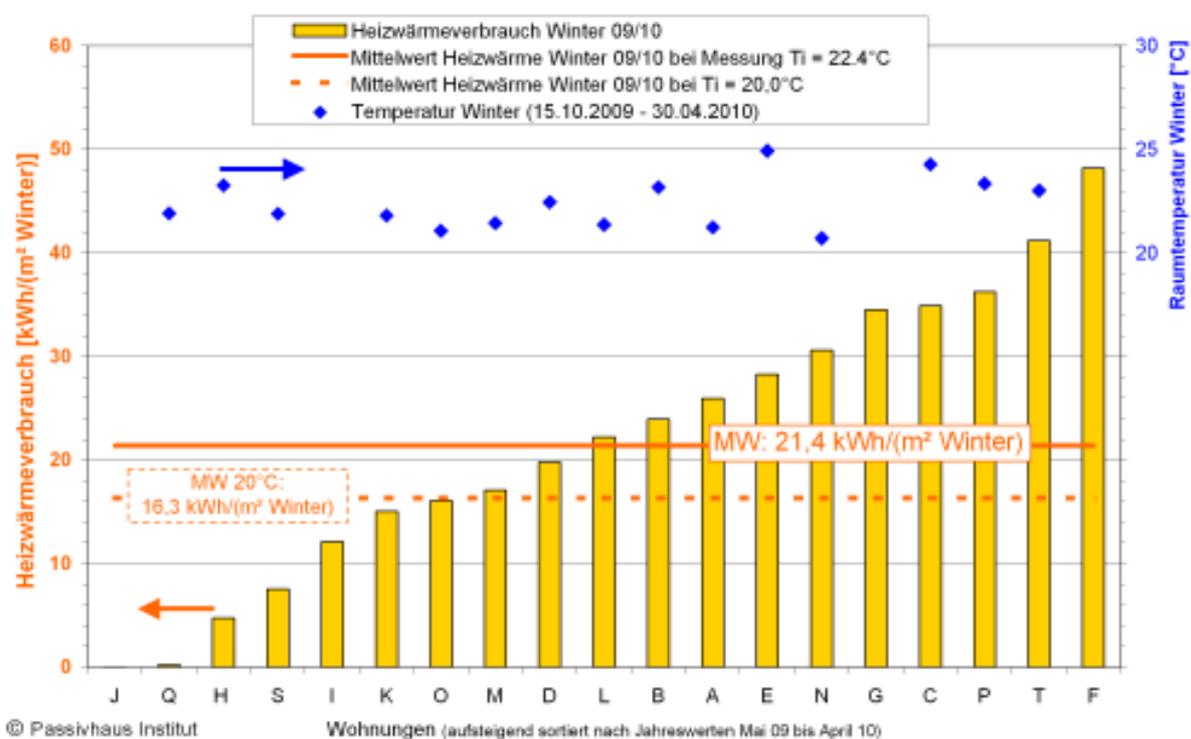


Abbildung 36: Heizwärmeverbrauch der 19 Wohnungen des 4er Blocks im Winterzeitraum 2009/2010 (ohne die minimalen Sommerverbräuche) und mit den mittleren winterlichen Raumtemperaturen (15. Oktober 2009 bis 30. April 2010). Der Mittelwert für die Heizwärmeverbräuche ist für die Messung mit der Innentemperatur von 22,4 °C und für die Umrechnung auf die Standardbedingung von 20 °C eingetragen.

4.3.2.3 Heizwärme und Verteilung

Die im Gebäude benötigte Heizwärme setzt sich zusammen aus dem in den Wohnungen gemessenen Heizwärmeverbrauch und dem nutzbarem Anteil der Wärme aus der Heizwärmeverteilung. Dieser kann aus der Differenz der zentral im

Keller abgegebenen Heizwärme und der in den einzelnen Wohnung des Gebäudes (4er Block) gemessenen Heizwärme bestimmt werden. Ein Teil dieser Differenz wird im unbeheizten Keller abgegeben und stellt im Bezug auf die Heizwärme innerhalb der thermischen Hülle einen Verteilverlust dar (Berechnung nach Leitungslängen). Bei der Verteilung innerhalb der thermischen Hülle muss unterschieden werden nach Wärmeabgabe, welche tatsächlich zur gewünschten Beheizung nutzbar ist und Anteilen die zu Zeiten anfallen, in denen sie eigentlich nicht benötigt werden. Wie bei der vorausgegangenen Auswertung wurde dazu 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. Diese nutzbaren Anteile der Verteilung stellen einen Beitrag zur Raumheizung dar. Sie müssen wieder dem Heizwärmeverbrauch, der über die einzelnen Wohnungswärmemengenzähler ermittelt wurden, zugeschlagen werden. Im 4er Block wurden im Winter 2009/2010 zusätzliche **2,2 kWh/(m²a)** als nutzbare Anteile ermittelt. Der Gesamtwert des Heizwärmeverbrauchs beträgt dann **23,6 kWh/(m²a)**. Bei den restlichen **3,7 kWh/(m²a)** handelt es sich um nicht nutzbare Verteilverluste. Die zugehörige Heizwärmeaufteilung zeigt Abbildung 37. Damit beträgt der nicht nutzbare Verteilverlust 14 % der im 4er Block gesamten gelieferten Heizwärme. Eine weitere Reduktion ist durch verbesserte Rohrleitungsdämmung zu erreichen. Durch die unveränderte Anordnung der Wärmemengenzähler sind wieder die Wärmeverluste zwischen Kessel und Heizkreiswärmehzähler und die Umwandlungs- und Stillstandsverluste des Heizkessels nicht enthalten. Diese werden im Abschnitt 4.3.1.1 berücksichtigt.

Bei den Standardbedingungen von 20 °C Innentemperatur (siehe Ausführung weiter oben in Abschnitt 4.3.2.1) würde der Heizwärmeverbrauch ohne den minimalen Sommerverbrauch aber inklusive der nutzbaren Verteilverluste nur noch $16,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}) + 2,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}) = \mathbf{18,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})}$ betragen.

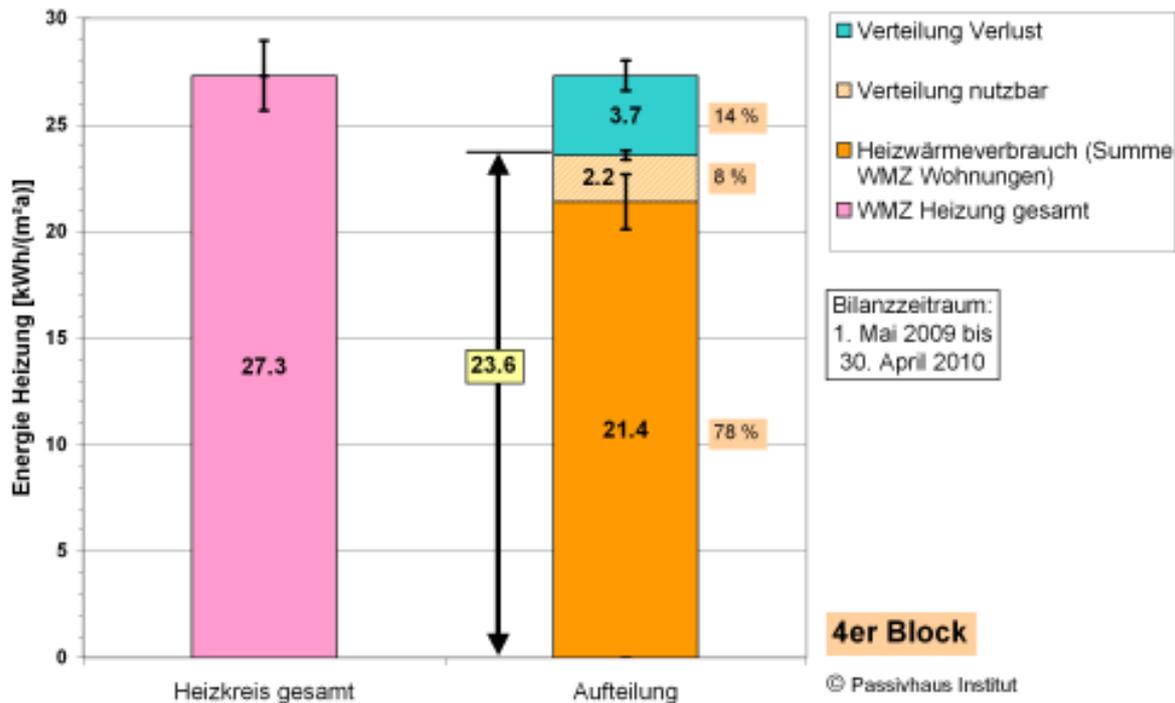


Abbildung 37: Wärmebezug Heizung des 4er Blocks für das dritte Bilanzjahr (ohne die geringe Sommerheizung und bei gemessener Innentemperatur von $T_i = 22,4 \text{ °C}$) und dessen Aufteilung in Heizwärme (direkt in den Wohnungen gemessen) und in die nutzbaren und nicht nutzbare Anteile aus der Heizwärmeverteilung.

6er Block

Wie bei dem vorausgehenden Messzeitraum wurde im 6er Block der Heizwärmeverbrauch in den einzelnen Wohnungen nicht gesondert erfasst, da nur ein zentraler Wärmezähler „Heizkreis gesamt“ vorhanden ist. Aus diesem Grund kann die Differenz zwischen Heizwärmelieferung und Summe der Wohnungsverbräuche nicht messtechnisch ermittelt werden. Da die Gebäude technisch nahezu identisch sind (Leitungs­dämmung etc.) werden die Monatswerte³⁾ der ermittelten Anteile der gesamten gelieferten Heizwärme zur Wärmemenge der Verteilung (Summe nutzbar und nicht nutzbar) aus dem 4er Block wieder 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 38 dargestellt. Dabei wurde der unnötige und ungewollte Heizwärmeverbrauch in den Sommermonaten abgezogen.

³⁾ Der daraus berechnete Jahreswert der gesamten Wärmeverteilung im 6er Block weicht aufgrund der unterschiedlichen monatlichen Heizwärmeverbräuche (Bezugswerte) von der Summe des 4er Blocks ab.

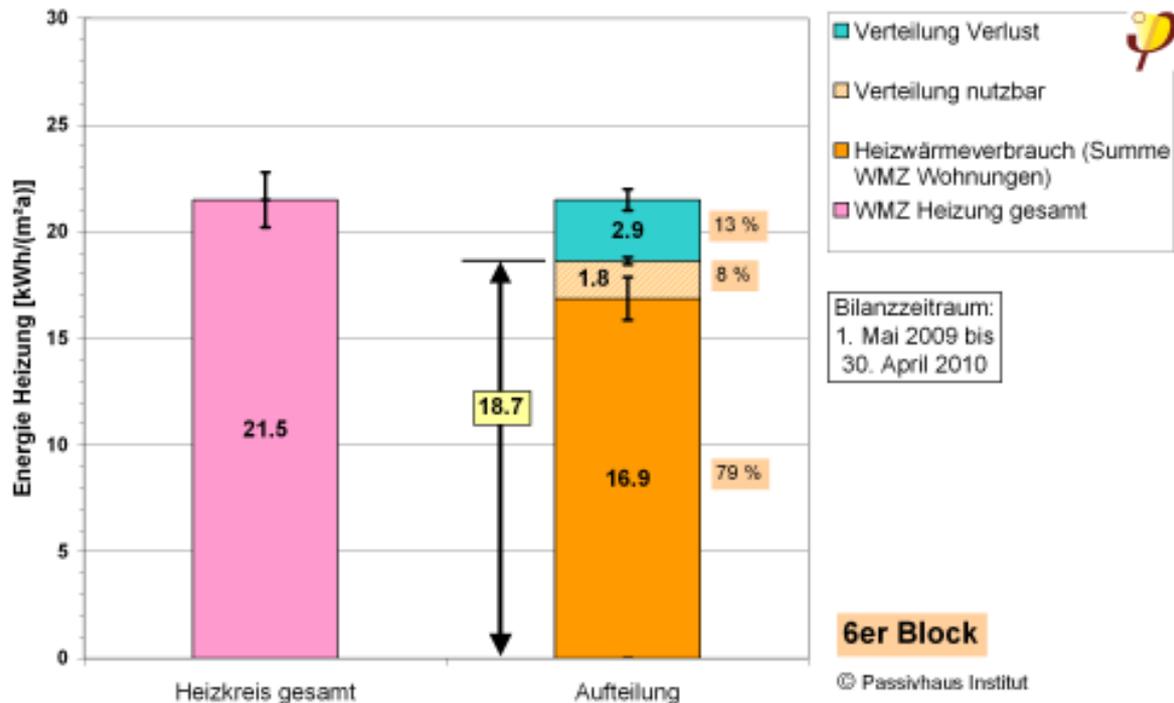


Abbildung 38: Wärmebezug Heizung des 6er Blocks für das dritte Bilanzjahr 2009/2010 (ohne Sommerheizung) und dessen berechneter Aufteilung in Heizwärme Wohnungen und in die nutzbaren und nicht nutzbare Anteile aus der Heizwärmeverteilung.

Der Heizwärmeverbrauch der Wohnung wurde für den 6er Block mit **16,9 kWh/(m²a)** ermittelt; damit ist er noch geringer als im 4er Block. Inklusive der nutzbaren Anteile der Wärmeverteilung von **1,8 kWh/(m²a)** ergibt sich der Wert zu **18,7 kWh/(m²a)**, was 87 % der gesamten gelieferten Heizwärme entspricht. Damit fallen 2,9 kWh/(m²a), entsprechend 13 % als Wärmeverteilverlust an.

Die im 6er Block während der ersten beiden Nutzungsjahre in einigen Wohnungen im DG aufgetretenen Mängel konnten durch den nachträglichen Einbau der fehlenden automatischen Entlüfter behoben werden.

4.3.2.4 Vergleich PHPP / Messdaten

Mit den Messdaten (Heizwärmeverbrauch) soll erneut die Validierung der Bilanzberechnung mit dem PHPP (Berechnung des Heizwärmebedarfs) durchgeführt werden. Die PHPP-Berechnung erfolgte in der Planungszeit wie üblich mit dem Standardklima des Standortes (hier: Frankfurt am Main) sowie mit der Standardinnentemperatur von 20 °C. Während und nach der Realisierung der Sanierung wurden die beiden PHPP-Bilanzen fortlaufend aktualisiert (vgl. [Kaufmann et al. 2009] (tatsächliche Luftdichtheit, zusätzliche Wärmebrücken, etc.). Auch nach den Berichtserstellung [Kaufmann et al. 2009] und [Peper et al. 2009] wurden noch neue Erkenntnisse eingepflegt, was eine geringfügige Abweichung zu den dort angegebenen Werten begründet. Ein Vergleich mit Messdaten ist nur dann sinnvoll, wenn durch die Anpassungen ein, soweit irgend möglich, realitätsnahes PHPP vorliegt.

Da die PHPP Berechnung die nicht notwendigen Sommerheizanteile nicht enthält, wohl aber die nutzbaren Anteile der Wärmeverteilung, werden die im vorausgehenden Abschnitt 4.3.2.3 ermittelten Verbräuche für den Vergleich verwendet.

Das PHPP gibt für den 4er Block einen Heizwärmebedarf von **16,9 kWh/(m²a)**, für den 6er Block von **16,8 kWh/(m²a)** bei **Standardbedingungen** aus. Werden anstelle des Standardklimas Frankfurt a.M. die gemessenen Außentemperaturen und Globalstrahlungswerte vom Zeitraum 2009/2010 in den PHPPs berücksichtigt, sinken die Heizwärmebedarfswerte auf **15,4 bzw. 15,3 kWh/(m²a)**.

Berücksichtigt man im PHPP zusätzlich die im 4er Block gemessenen mittleren Innentemperaturen während des Winters von 22,4 °C, lassen diese den Heizwärmebedarf wieder auf **20,5 kWh/(m²a)** ansteigen. Der weiter oben dargestellte Messwert des Heizwärmeverbrauchs inkl. der nutzbaren Anteile der Wärmeverteilung liegt mit 23,6 kWh/(m²a) damit 3,1 kWh/(m²a) höher als der Rechenwert. Im vorausgehend untersuchten Bilanzjahr 2007/2008 lag die Differenz zwischen PHPP-Bilanz und Messwert mit 3,0 kWh/(m²a) nahezu gleichauf.

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

1. Im PHPP ist der Wärmebereitstellungsgrad der Lüftungsgeräte weiterhin 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.
2. Die oben beschriebene, teilweise verspätete Abschaltung der Bypassfunktion der Lüftungsanlagen führt zu einer deutlichen Verbrauchserhöhung.
3. Angaben einzelner Mieter zu nächtlichen Fensteröffnungen bzw. in einem Fall zur Fensterlüftung im Schlafzimmer bei gleichzeitiger Abschaltung der Lüftungsanlage führen zu Verbrauchserhöhungen.

Bei den Punkten handelt es sich um Effekte die den Verbrauchswert erhöht haben. Die genauen Größen können nicht vollständig berechnet werden. Der Unterschied von 3,1 kWh/(m²a) ist bei Berücksichtigung dieser Effekte und auch bei der möglichen Genauigkeit der Rechnung, wie auch der vorhandenen Genauigkeit der Messung wiederum als sehr gut zu bewerten.

Wie oben bereits ausgeführt ergibt die Umrechnung des Messwertes Heizwärme der Wohnungen von 23,6 kWh/(m²a) auf die Standardtemperatur von 20 °C einen Heizwärmeverbrauch von nur noch **18,5 kWh/(m²a)** (ohne den geringen Sommerverbrauch). Verglichen mit dem berechneten Heizwärmebedarf vom Altbauzustand des 4er Blocks mit rund 290 kWh/(m²a) [Pfluger et al. 2009] ergibt sich eine **Einsparung von 94 %**.

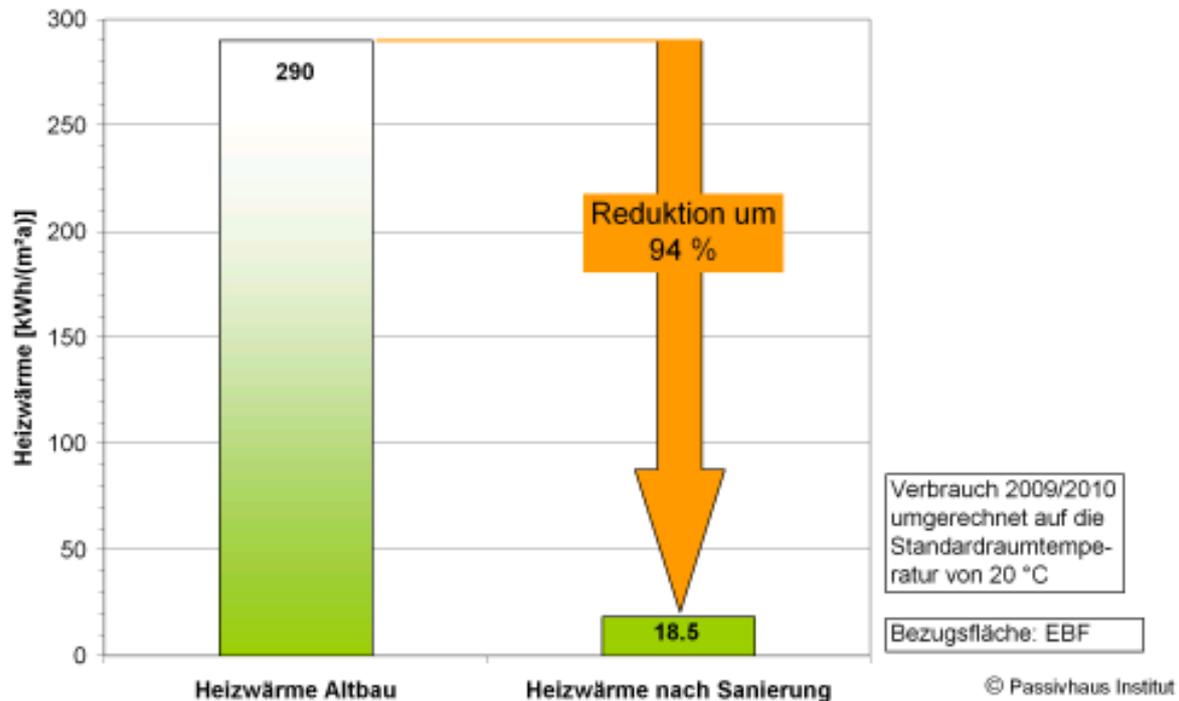


Abbildung 39: Vergleich des 2009/2010 gemessenen Heizwärmeverbrauchs (berechnet auf 20 °C Raumtemperatur) mit dem berechneten Heizwärmebedarf (PHPP-Bilanz) des Altbauzustands (4er Block).

Wie bei der vorausgegangenen Untersuchung konnte im **6er Block** keine Temperaturmessungen in den Wohnungen durchgeführt werden. Aufgrund der fehlenden Information wird die gleiche mittlere Raumtemperatur von 22,4 °C während der Winterzeit angenommen. Damit erhöht sich der Heizwärmebedarfswert (PHPP) bei den tatsächlichen Klimabedingungen (2009/2010) von **15,3 auf 20,4 kWh/(m²a)**. Der Messwert des Heizwärmeverbrauchs inkl. der nutzbaren Anteile der Wärmeverteilung liegt im 6er Block mit **18,7 kWh/(m²a) um 1,7 kWh/(m²a)** darunter. Diese geringe Abweichung ist fast erstaunlich, da in diesem Gebäude keine genaue Kenntnis der tatsächlichen Raumtemperaturen vorliegen und auch weiteren Details zu den Lüftungsanlageneinstellungen vorhanden sind. Abweichungen zwischen Mess- und Rechenwert sind im 6er Block zusätzlich auch durch vereinzelt zeitweisen Leerstand bedingt.

Der Messwert entspricht einem Heizwärmeverbrauch von nur **13,6 kWh/(m²a)** bei der Standardinnentemperatur von 20 °C.

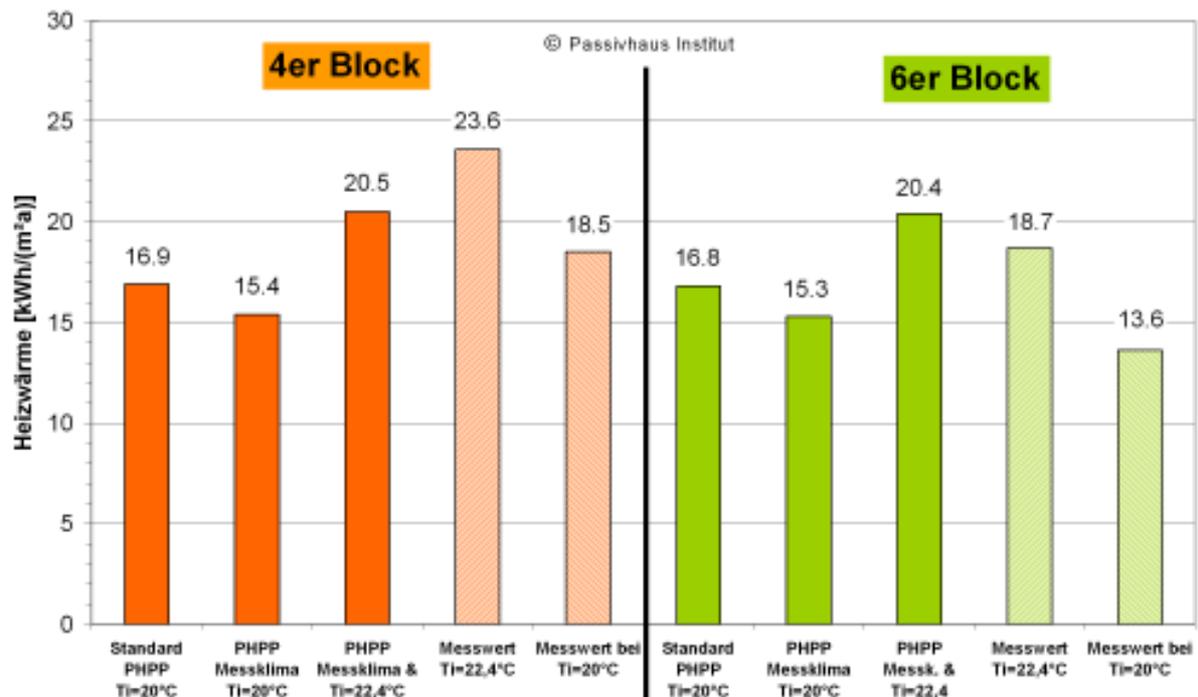


Abbildung 40: Heizwärmebedarf der beiden Gebäude nach den Ergebnissen der PHPP-Berechnungen. Schrittweise sind die gemessene Außentemperatur und die Solarstrahlungswerte (01.05. 2009 bis 30.04.2010) sowie die mittlere Raumtemperatur im Winter im 4er Block ($T_i = 22,4 \text{ °C}$) angepasst. Im Vergleich dargestellt sind die Messwerte des Heizwärmeverbrauchs inkl. der Energie der nutzbaren Heizwärmeverteilung (ohne Sommerheizung) und die Messwerte umgerechnet auf die Standardinnentemperatur von 20 °C .

Im Rahmen der Messgenauigkeit und der möglichen Genauigkeit der Bilanzrechnung besteht auch hier eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Dies bestätigt erneut die hohe Qualität des PHPP als Energiebilanzierungswerkzeug ebenso wie als Planungstool auch für die hochenergieeffiziente Sanierung.

4.3.2.5 Heizlast

Die gemessenen tagesmittleren Heizleistungen an den zentralen Wärmezählern in den Kellern zeigen im Winter 2009/2010 Werte bis maximal **13,5** (4er Block) bzw. **7,9** W/m^2 (6er Block). Darin sind die Anteile der Wärmeverteilung bereits enthalten. Die Messwerte vom 4er Block liegen damit deutlich höher als die im 6er Block. Als Ursache könnte eine durchschnittlich höhere Raumtemperatur möglich sein, was sich aufgrund der nicht vorhandenen Messung im 6er Block allerdings nur spekulieren lässt.

Für den Kernwinter (November 2009 bis Februar 2010) ergeben sich damit mittlere Heizleistungen über die gesamte Zeit von **9,5** bzw. **5,5** W/m^2 .

Auch wenn die Messwerte etwas höher sind als im vorher untersuchten Winter 2007/2008 liegen damit wieder niedrige Heizleistungen vor wie sie aus dem Passivhaus Neubau bekannt sind.

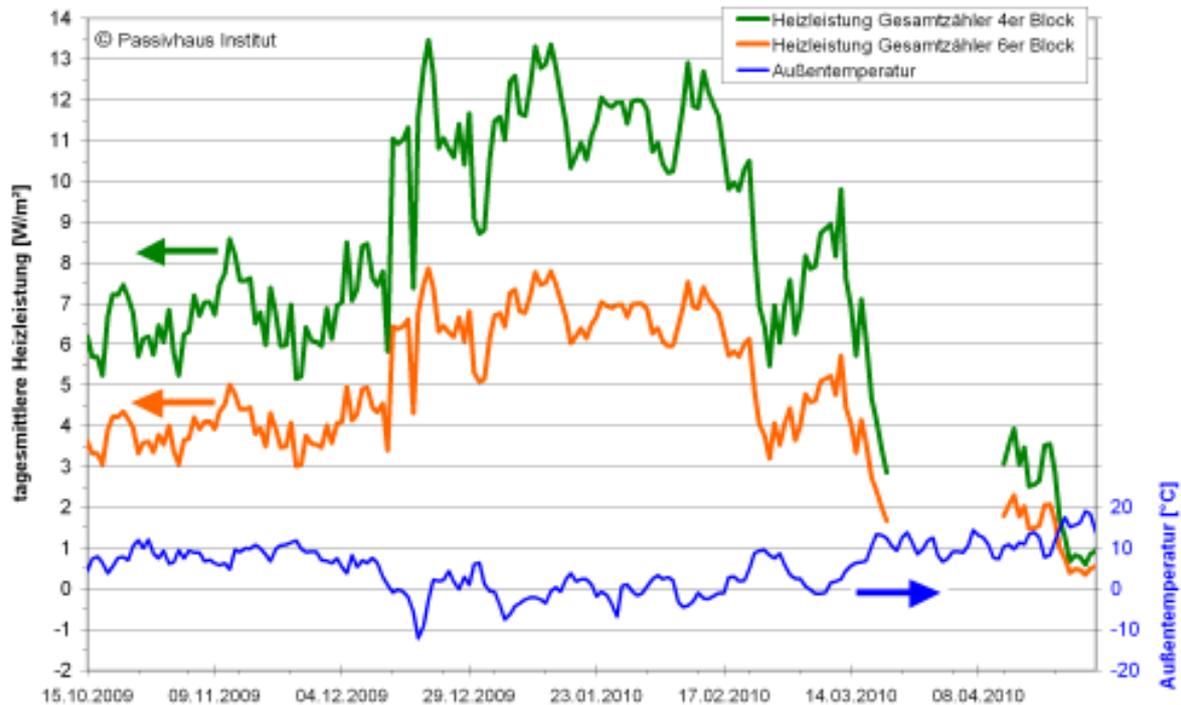


Abbildung 41: Tagesmittlere Heizleistung der Heizwärmegesamtzähler in den Kellern der Gebäude. Die Messwerte enthalten die Verteilverluste im Gebäude.

4.3.3 Wärmeverbrauch Warmwasserbereitung

Über die zentralen Kessel in den Kellern der Gebäude erfolgt die zentrale Warmwasserbereitung. Über Rohrwärmetauscher werden die zentralen 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 befinden sich zwei. Über jeweils einen vorgelagerten Solarpeicher (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 ist Abbildung 9 auf Seite 18 zu entnehmen.

Die Beladung des Warmwasserspeichers vom Gaskessel wird über den Wärmemengenzähler (WMZ) „WW-Input“ vollständig erfasst. 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 Wärmemengenzähler „Zirkulation“ erfasst.

Bilanziert man monatlich den Warmwasserspeicher im 4er Block ergeben sich für die Speicherbeladung (Solar plus WW-Input) vom Mai 2009 bis April 2010 Monatssummen zwischen 1,7 und 2,2 kWh/(m²Monat). Die Warmwasserentnahme beträgt in dieser Zeit monatlich zwischen 1,2 und 1,7 kWh/(m²Monat), die Warmwasserzirkulation benötigt relativ konstant 0,44 bis 0,49 kWh/(m²Monat). Die Differenz der Monatssummen der Wärmebeladung und der Wärmeentnahme des Speichers setzt sich zusammen aus dem Speicherverlust und den Messgenauigkeit der Wärmezähler.

Die Jahressummen der Energieverbräuche für die Warmwassererzeugung in den Speichern durch die Heizkessel (WW-Input) sind bereits weiter oben im Abschnitt 4.3.1.1 in Tabelle 9 aufgeführt. Diese, sowie die Summen der solaren Beladung der Speicher, die Warmwasserentnahme und der Wärmeverbrauch der Zirkulation sind zusammen in Tabelle 11 aufgelistet.

Tabelle 11: Summen der drei Jahresbilanzzeiträume für den spezifischen Energieaufwand der Warmwassererwärmung sowie der Warmwasserentnahme aus den Warmwasserspeichern.

[kWh/(m ² a)]	Summe Mai 07 - April 08	Summe Mai 08 - April 09	Summe Mai 09 - April 10
4er Block			
Warmwassererwärmung	20,7	18,9	15,9
Solar Input	7,7	8,0	7,6
Warmwasserentnahme	21,9	19,1	17,3
6er Block			
Warmwassererwärmung	18,6	20,5	21,0
Solar Input	2,8	3,2	2,9
Warmwasserentnahme	15,1	18,7	18,9

Der folgenden Abbildung 42 ist zu entnehmen, dass die Vorlauftemperaturen der Warmwasserentnahme an den drei Speichern deutlich unterschiedlich ist. In Haus 48 bis 54 (4er Block) sind sehr stabil VL-Temperaturen von ca. 52 °C gemessen worden, im 6er Block dagegen liegen sie rund 10 K höher. Dabei ist wiederum auffällig, dass die VL-Temperatur in Haus 42 bis 46 im Frühjahr auf ähnliche Werte wie im 4er Block abfällt, allerdings starken Schwankungen unterliegt. Bis zum Dezember 2010 erhöht sie sich wieder bis etwa auf das Anfangsniveau. Die Ursache für diese Schwankungen sind nicht bekannt. Die Rücklauftemperaturen werden im Kaltwasserzulauf der Warmwasserbereitung gemessen und sind daher sehr einheitlich (Jahresschwankung). Entsprechende Unterschiede können auch bei der Speicherbeladung durch die Heizkessel („WW-Input“) festgestellt werden. Die Speicherbeladung erfolgt also auf unterschiedlichem Temperaturniveau. Diese Tatsache hat auch Einfluss auf den Energieaufwand zum Wärmeverbrauch bzw. den Speicherverlust. Die Messdaten stellen einen Mittelwert des gesamten Messzeitraumes, unabhängig von den Volumenströmen, dar. Die Unterschiede der VL-Temperaturen wurden auch in der vorherigen Untersuchung festgestellt, allerdings haben sie sich noch weiter verstärkt.

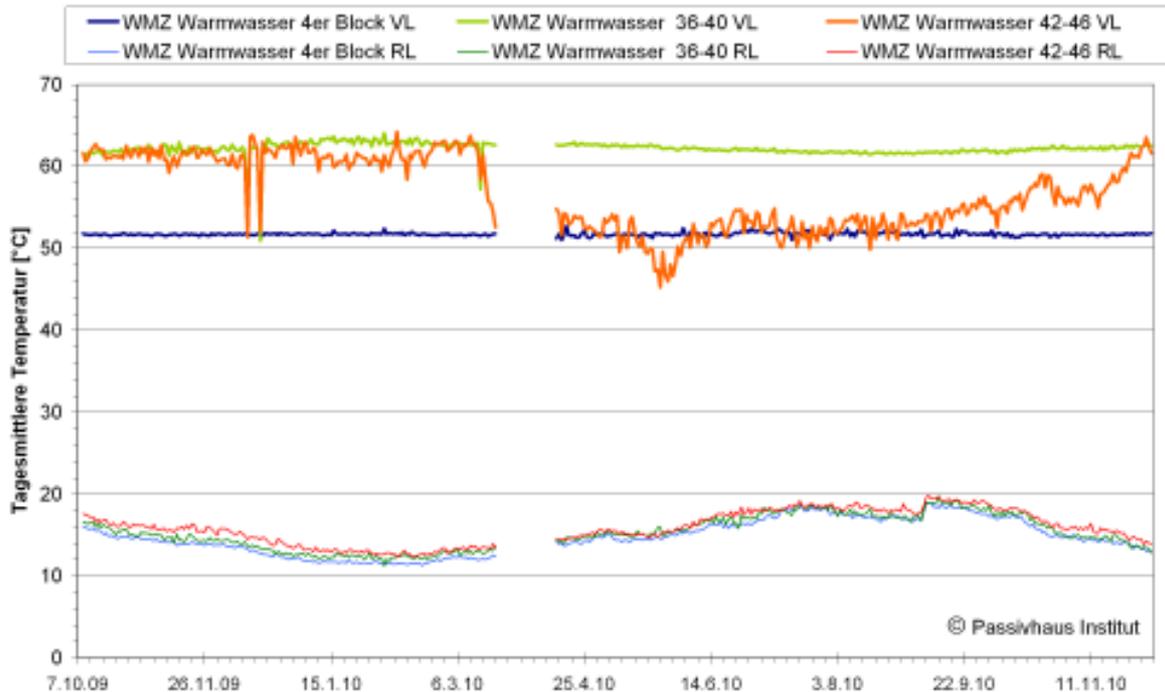


Abbildung 42: Tagesmittelwerte der Vor- und Rücklauftemperaturen der Warmwasserentnahme aus den drei Speichern vom 07.10.2009 bis zum 5.12.2010. Berücksichtigt sind unabhängig von Zapfvorgängen alle Zeiten.

4.3.3.1 Zirkulation

Der Wärmeverbrauch für die Warmwasserzirkulation wird für den gesamten Messzeitraum untersucht. Die monatlichen Aufwendungen der drei Anlagen für die Wassererwärmung während der drei Messjahre schwanken zwischen 0,36 und 0,69 kWh/(m² Monat). Dabei werden im 4er Block u.a. durch den Einsatz einer Schaltuhr (Nachtabschaltung der Pumpe zwischen 22:00 bis 3:00 Uhr bzw. 23:00 bis 2:00 Uhr) niedrigere Werte erreicht (Abbildung 43). Diese Zeitschaltuhr wurde auf Anraten des PHI eingebaut. Bereits in [Peper et al. 2009] konnte gezeigt werden, dass der Einbau der Schaltuhr auch finanziell sinnvoll ist. Leider wurden die beiden anderen Anlagen im 6er Block nicht entsprechend nachgerüstet. Für den 4er Block musste festgestellt werden, dass bereits ab dem 30.04.2008 die Schaltuhr außer Funktion gesetzt wurde; die Nachtabschaltung endet an diesem Tag. In der Abbildung ist ein Anstieg der Verbrauchswerte ersichtlich. Allerdings kann das spätere Absinken der Verbräuche nicht eindeutig mit erneuten Laufzeitunterbrechung durch die Schaltuhr begründet werden.

Die relativ starken Schwankungen von allen drei Anlagen zu Beginn der Messzeit ist durch unterschiedliche Belegungen und Einregulierungen der Anlagen begründet. Die Ursache der deutlichen Verbrauchsreduktion ab April 2010 in Haus 42 bis 46 ist nicht bekannt.

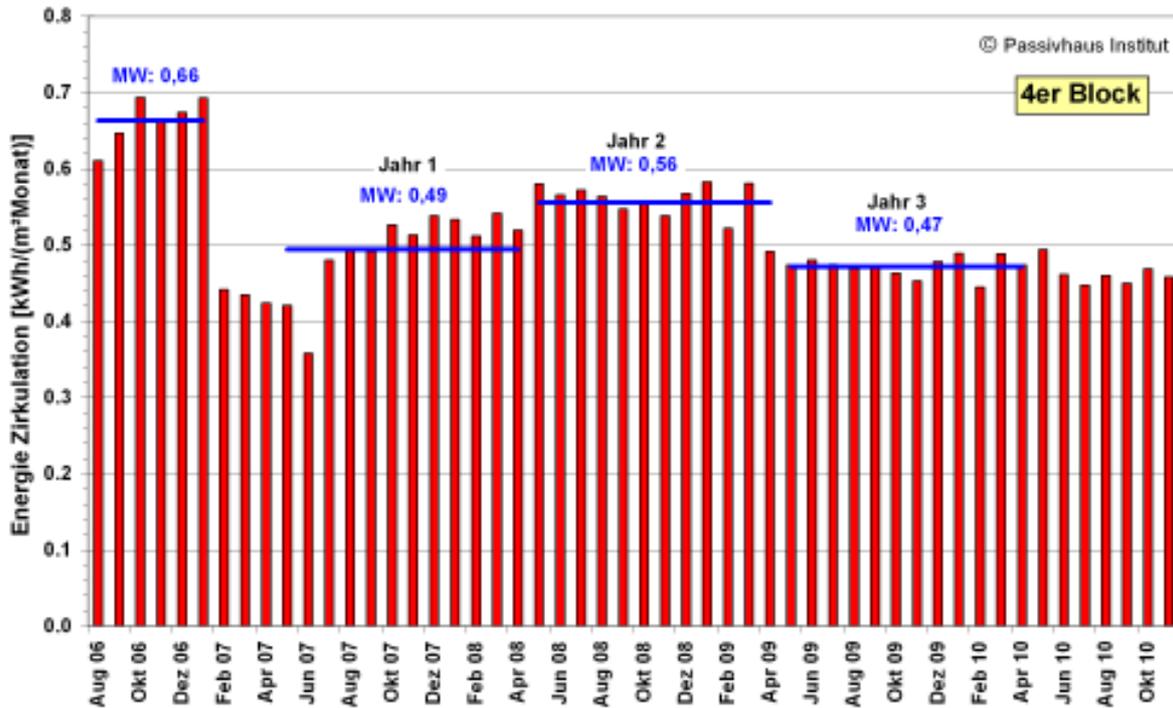


Abbildung 43: Energieaufwendung für den Zirkulationsbetrieb im 4er Block (Haus 48 bis 54) während der Untersuchungszeit.

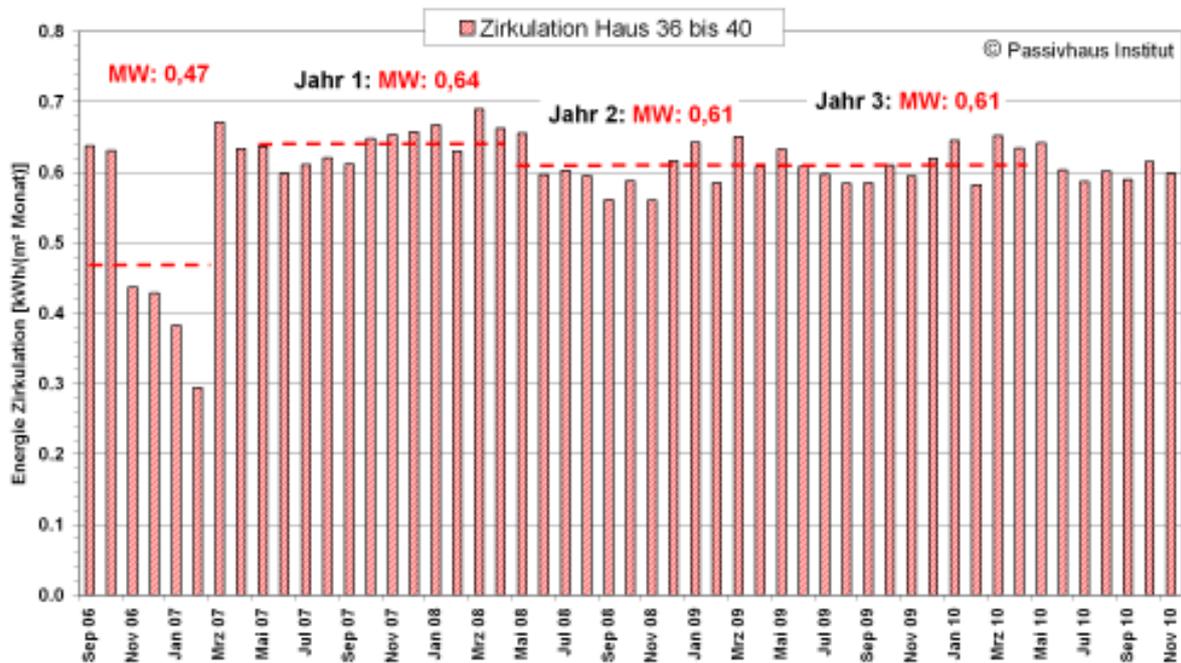


Abbildung 44: Energieaufwendung für den Zirkulationsbetrieb für Haus 36 bis 40 während der gesamten Untersuchungszeit.

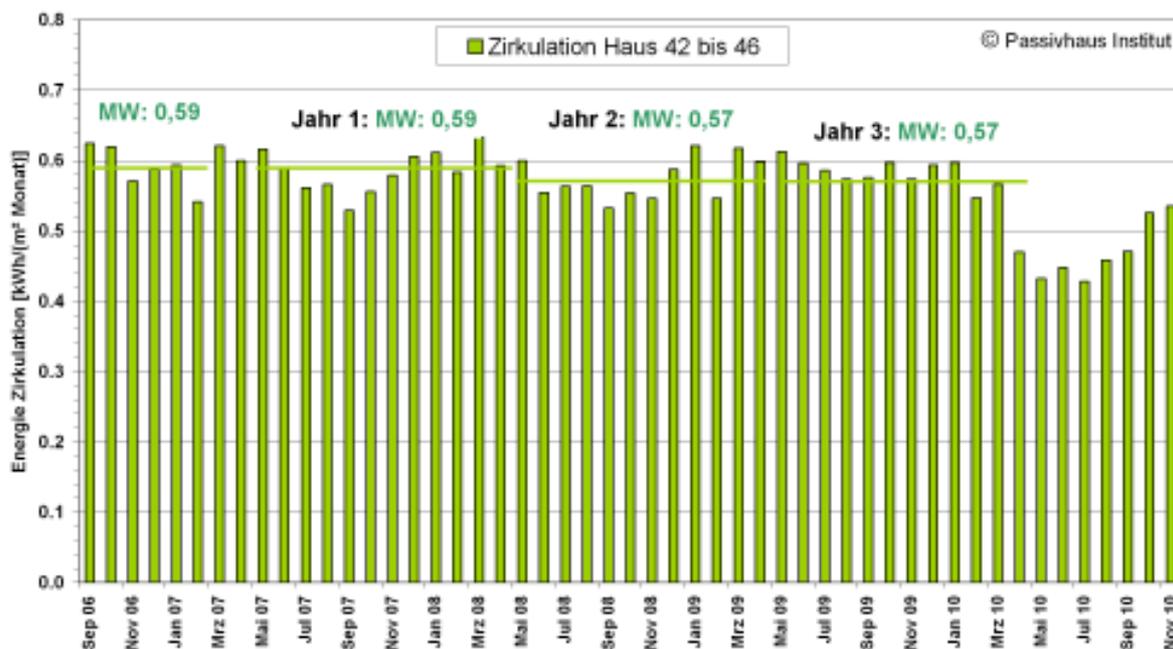


Abbildung 45: Energieaufwendung für den Zirkulationsbetrieb für Haus 42 bis 46 während der gesamten Untersuchungszeit.

Die spezifischen Verbräuche für beide Blöcke als Jahressummen der drei Zeiträume ist der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 12: Summen der beiden Jahresbilanzzeiträume für die spezifischen Energieverbräuche des Zirkulationsbetriebs.

Zirkulation kWh/(m²a)	Summe Mai 07 - April 08	Summe Mai 08 - April 09	Summe Mai 09 - April 10
4er Block	5,9	6,7	5,7
6er Block	7,4	7,1	7,1

4.3.3.2 Energie Warmwasser Einzelwohnungen

Die Möglichkeit der Bestimmung der Warmwasserverbräuche in den Einzelwohnungen des 4er Blocks wurde bereits im vorausgehenden Messbericht beschrieben. Da diese Auswertung erneut wieder durchgeführt wurde, wird der Abschnitt hier zur Erklärung zitiert: „Mit dem im Abschnitt 3.1.2 beschriebenen, speziell entwickelten Messverfahren können die tatsächlichen Energiemengen der Warmwasserversorgung der einzelnen Wohnungen des 4er Blocks bestimmt werden. Dazu sind die gemessenen Energiemengen, Volumenströme und die Warmwasser- wie auch die „konstante“ Rücklaufstemperatur 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.“

Durch den langen Messzeitraum können die ermittelten Verbräuche der 19 Wohnungen von drei vollständigen Bilanzzeiträumen in Abbildung 46 dargestellt werden. Die Mittelwerte der Bilanzjahre haben sich Jahr für Jahr reduziert. Von **19,9 über 17,8 bis zu 15,9 kWh/(m²a)**. Die Einzelwerte der Wohnungen zeigen wieder große Unterschiede aufgrund des unterschiedlichen Nutzerverhaltens. Die extremen Unterschiede bei den Wohnungen „N“, „L“, „P“ und „Q“ haben Mieterwechsel als Ursache. Im dritten Bilanzjahr zeigen die spezifischen Werte der Wohnungen zwischen 0,8 und 36,6 kWh/(m²a) eine sehr große Streuung. Bei der Wohnung mit dem geringsten Verbrauch handelt es sich um eine dauerhaft bewohnte Wohnung mit einem Bewohner. Im dritten Bilanzjahr (Mai 2009 bis April 2010) liegt der geringste Verbrauch 95 % unter, der höchste Verbrauch 130 % über dem Mittelwert. Die Standardabweichung beträgt 9,5 kWh/(m²a), die Standardabweichung vom Mittelwert 2,2 kWh/ (m²a).

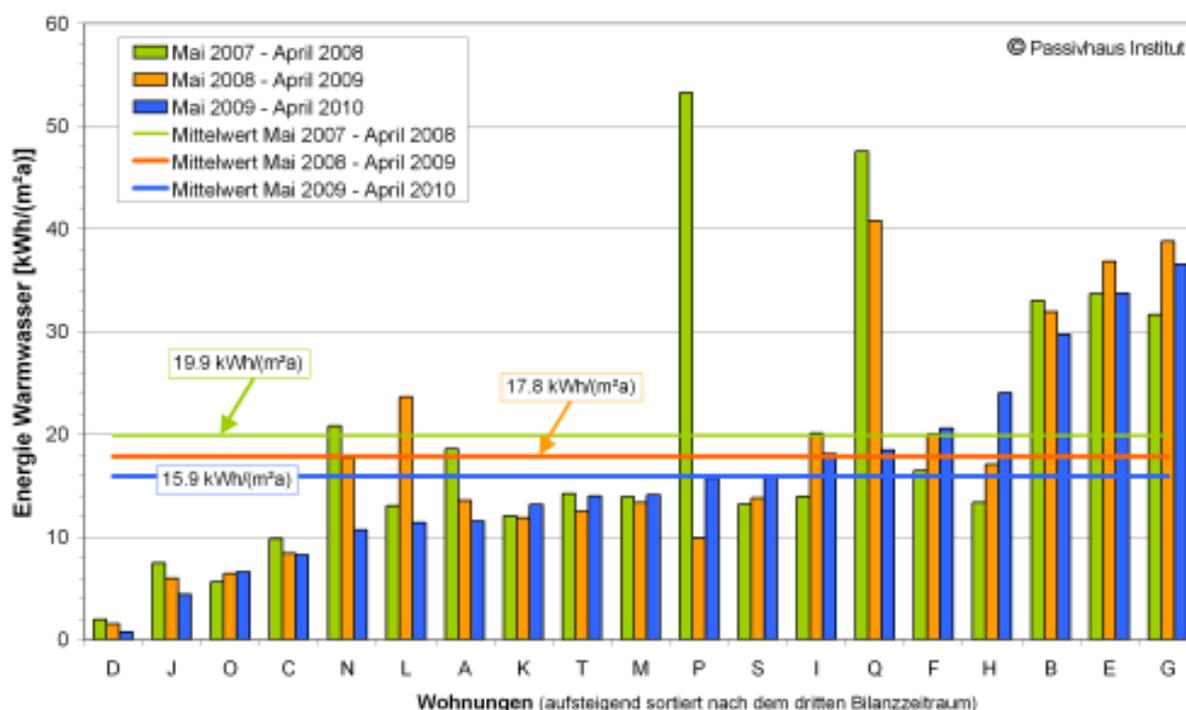


Abbildung 46: Energieinhalt des verbrauchten Warmwassers der 19 Wohnungen im 4er Block für die drei Jahresbilanzzeiträume sowie den drei zugehörigen flächengewichteten Mittelwerten.

Erneut kann der Vergleich mit dem Ansatz aus dem PPHP gezogen werden: Das PPHP setzt einen Warmwasserverbrauch von 25 Liter/(Person Tag) bei 60 °C als Standard an. Das entspricht bei der angenommenen Energiebezugsfläche von 35 m²/Person einem Energieaufwand von 15,1 kWh/(m²a). Der hier im dritten Jahr gemessene Wert von 15,9 kWh/(m²a) liegt fast gleichauf damit. Im dritten Bilanzjahr,

lag die Wohnfläche pro Person auch etwa in der gleichen Größenordnung wie im PHPP angesetzt. Die Temperatur allerdings lag im Mittel niedriger als 60 °C.

Im dritten Bilanzjahr wurde dem Warmwasserspeicher im Keller 17,3 kWh/(m²a) zur Versorgung entnommen (siehe Tabelle 11 auf Seite 55). Der in den Wohnung gemessene Energieinhalt durch den Warmwasserverbrauch von 15,9 liegt damit um 1,4 kWh/(m²a) niedriger. 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).

Kaltwassertemperatur

Aufgrund des gleichen Vorgehens bei der Auswertung wie im Vorläuferbericht wurde für die Ermittlung der Warmwasser-Energiemengen je Wohnung wieder die Kaltwassertemperatur benötigt. Die Erwärmung des Kaltwassers im Technikeller bei geringer bzw. unterbrochener Zapfung muss als Störung dieser Temperaturmessung berücksichtigt werden. Daher wurden wieder 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 Messung der Temperatur erfolgt wenige Meter nach dem Eintritt der Hauptleitung in den Keller.

In Abbildung 47 ist die ermittelte und für die Berechnungen verwendete Kaltwassertemperatur für den gesamten Messzeitraum dargestellt. Es ist deutlich die jahreszeitliche Schwingung der Temperatur ablesbar, die Amplitude beträgt etwa 5,8 K. Der Mittelwert über den gesamten Messzeitraum von 52 Monaten beträgt 13,2 °C. Damit liegt die Temperatur über der sonst üblicherweise angenommenen Kaltwassertemperaturen von 10 bis 12 °C. Auffällig ist der Temperaturversatz Anfang September 2010 mit einem Temperatursprung von rund 2,4 K. Durch eine zweite, völlig unabhängige Temperaturmessung in der gleichen Wasserleitung konnte überprüft werden, dass es sich um keinen Messfehler handelt. Möglicherweise haben versorgungsseitige Änderungen der Leitungsführung o.ä. zu der plötzlichen Temperaturänderung geführt.

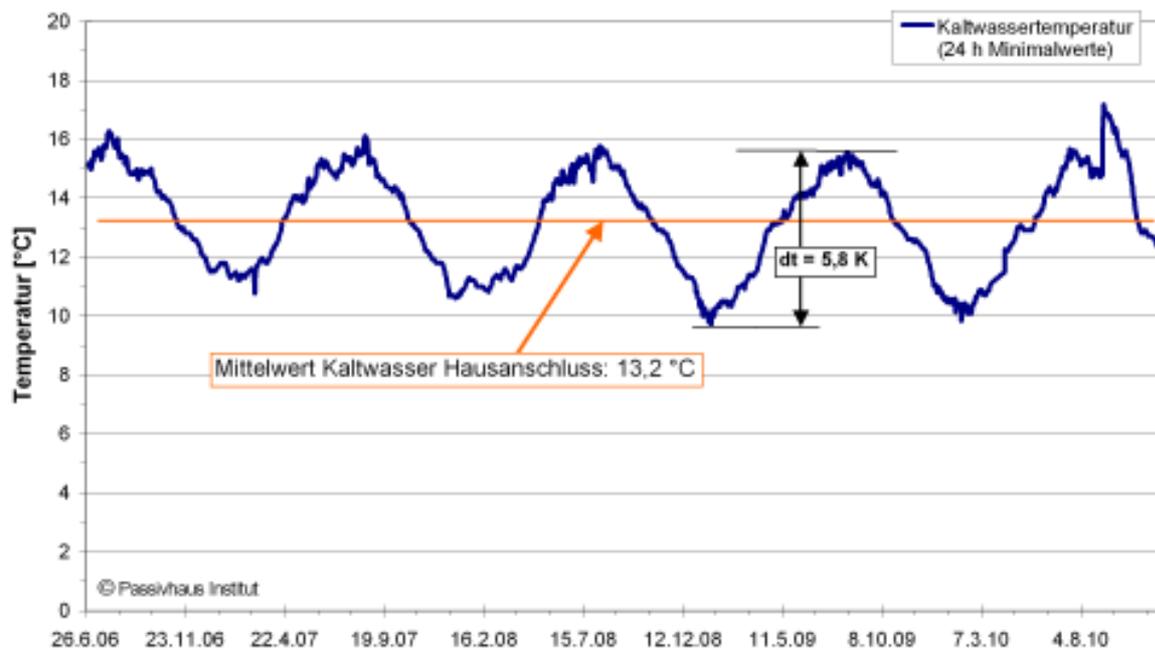


Abbildung 47: Gemessene Kaltwassertemperatur in der Hauptwasserleitung im Keller von Block 4 vom 26.06.2006 bis zum 5.12.2010. Dargestellt ist der Verlauf des 24-Stunden Minimalwertes, der aus den 10-Minuten Messdaten bestimmt wurde.

4.3.3.3 Solare Warmwasserbereitung

Die solarthermische Ausstattung der Gebäude ist unverändert: „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 m², für die Anlagen von Haus 36 bis 40 und Haus 42 bis 46 jeweils 20,7 m² (Summe 6er Block: 41,4 m²). Im 4er Block stehen damit durchschnittlich pro Wohneinheit nur 1,2 m² Absorberfläche zur Verfügung, im 6er Block sind es fast gleichauf nur 1,3 m² pro WE. Anders ausgedrückt stehen in beiden Gebäuden 180 cm² Absorberfläche je m² Energiebezugsfläche zur Verfügung. Es handelt sich damit um verhältnismäßig kleine Anlagen.“ (Zitat aus [Peper et al. 2009]).

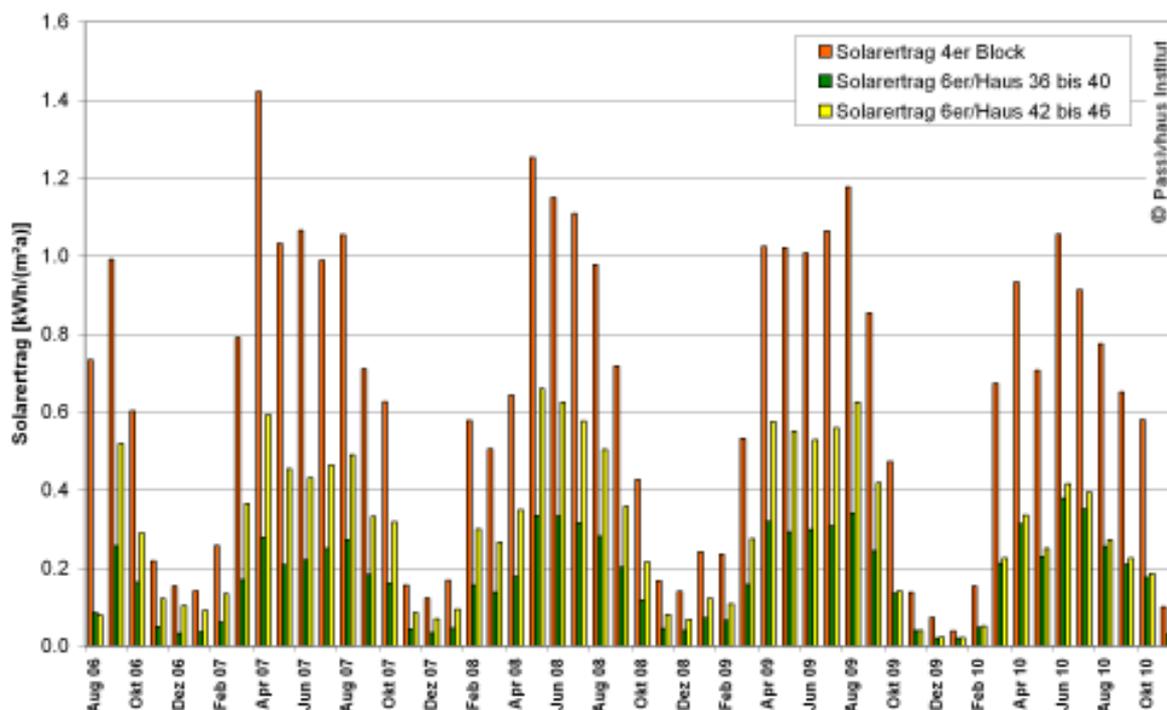


Abbildung 48: Monatsdaten der spezifischen Solarerträge der drei Solaranlagen während der gesamten Messzeit.

Es ist deutlich der Jahresverlauf (Sommer/Winter) sowie der Unterschied zwischen den Erträgen der Anlagen zu erkennen. Die Erträge der beiden ähnlich großen Anlagen des 6er Blocks sind deutlich geringer als die des 4er Blocks. Die Jahressummen der drei Bilanzzeiträume zeigen den drastischen Unterschied zwischen den Erträgen. Für die drei Bilanzjahre sind diese bereits weiter oben in Tabelle 11 angegeben. Zur Veranschaulichung sind sie hier auch grafisch dargestellt (Abbildung 49).

Die weiteren Untersuchungen zu den Unterschieden der drei kleinen Anlagen sind [Peper et al. 2009] zu entnehmen: „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.“

In Abbildung 50 sind zusätzlich die Solarerträge bezogen auf die Absorberflächen der drei Anlagen ausgewertet.

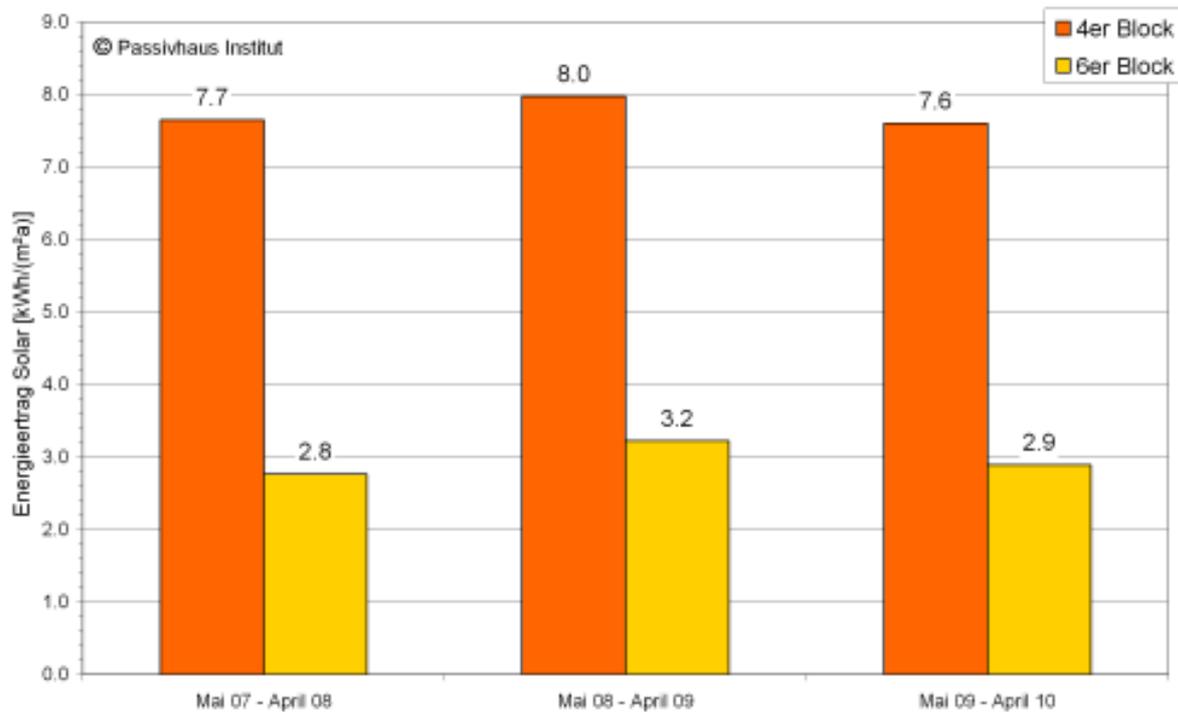


Abbildung 49: An die Warmwasserspeicher gelieferten Solarerträge der thermischen Solaranlagen in den drei Bilanzjahren für den 4er und den 6er Block (Summe beider Anlagen auf dem 6er Block).

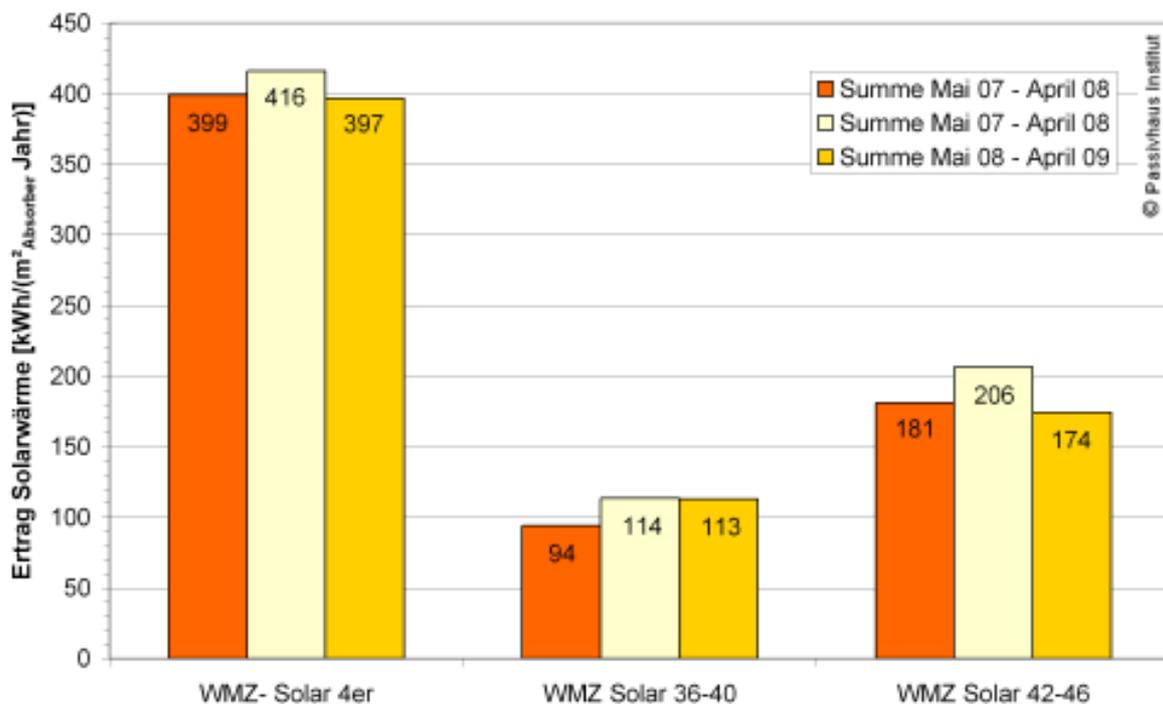


Abbildung 50: Spezifische in die Speicher gelieferte Solarertrag bezogen auf die Absorberflächen der drei Anlagen in den drei Bilanzzeiträumen.

4.3.3.4 Bilanz Warmwasser

Die Gesamtbilanz der Warmwasserversorgung kann aus den oben genannten Verbräuchen aufgestellt werden. Für das dritte Bilanzjahr (Mai 2009 bis April 2010) ergeben sich im 4er Block auf der Speicherbeladungsseite 15,9 kWh/(m²a), die vom Gaskessel erzeugt werden und 7,6 kWh/(m²a), die solarthermisch eingespeichert werden. Der regenerativ erzeugte Anteil beträgt damit 32 %. Auf der Entnahmeseite werden in den Wohnungen 15,9 kWh/(m²a) zuzüglich der 1,4 kWh/(m²a) für die Verteilung über die Rohrleitungen benötigt. Für den Ausgleich der Wärmeverluste der Zirkulationsleitung werden 5,7 kWh/(m²a) eingesetzt. Der Bilanzrest enthält alle Messunsicherheiten und den Speicherwärmeverlust. So wird der reine Speicherwärmeverlust (behaftet mit den genannten Fehlergrenzen) zu 1,8 kWh/(m²a) ermittelt. Zufällig ist die mit dem Gaskessel aufgebrachte Energiemenge etwa so groß wie die in den Wohnungen direkt verbrauchten Energie (beides 15,9 kWh/(m²a)). Betrachtet man die Bilanz auf diese Weise, wird die Größenordnung des solarthermischen Ertrags komplett für Verluste von Speicher und Verteilung aufgezehrt.

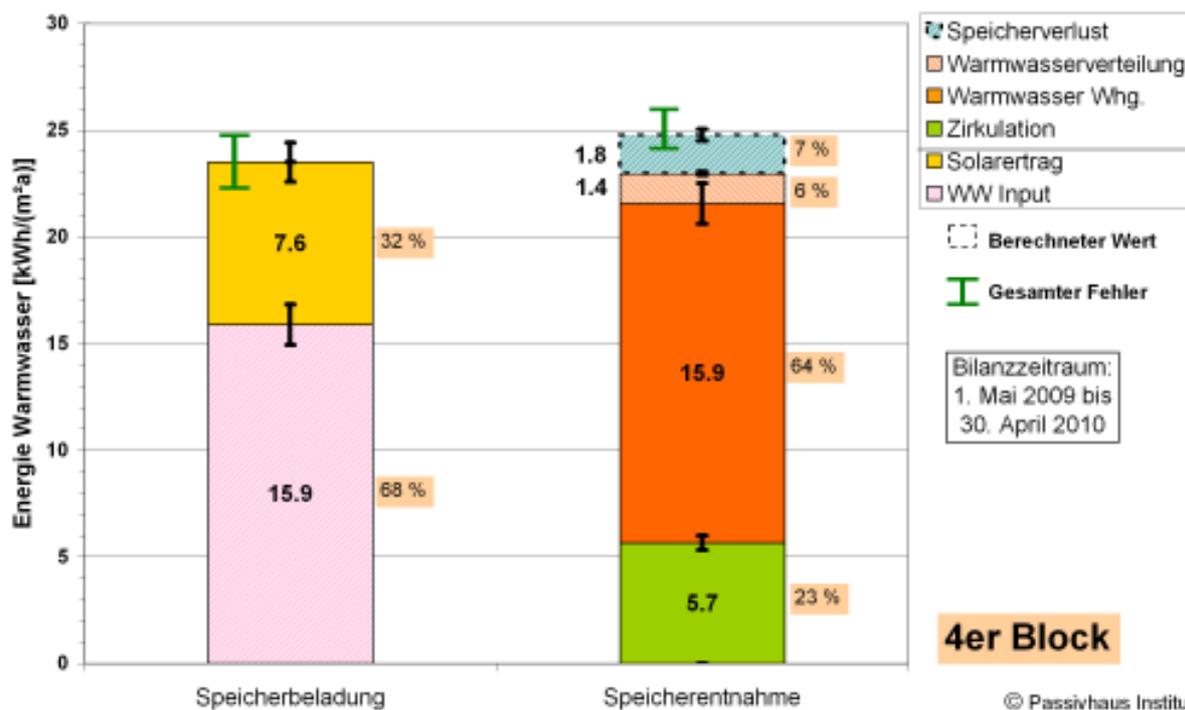


Abbildung 51: Energieverbrauch zur Warmwasserversorgung im 4er Block (3. Bilanzjahr).

Im 6er Block ergibt sich erneut ein ähnliches Bild für die Warmwasserbeladung und -entnahme. Hier kann aufgrund der geringeren Zählerausstattung in den Wohnungen nicht zwischen dem Warmwasserverbrauch und der Warmwasserverteilung unterschieden werden. Der Solarertrag ist wie beschrieben mit nur 2,9 kWh/(m²a) deutlich geringer. Die Zirkulation führt zu spezifisch etwas höheren Verbrauchswerten.

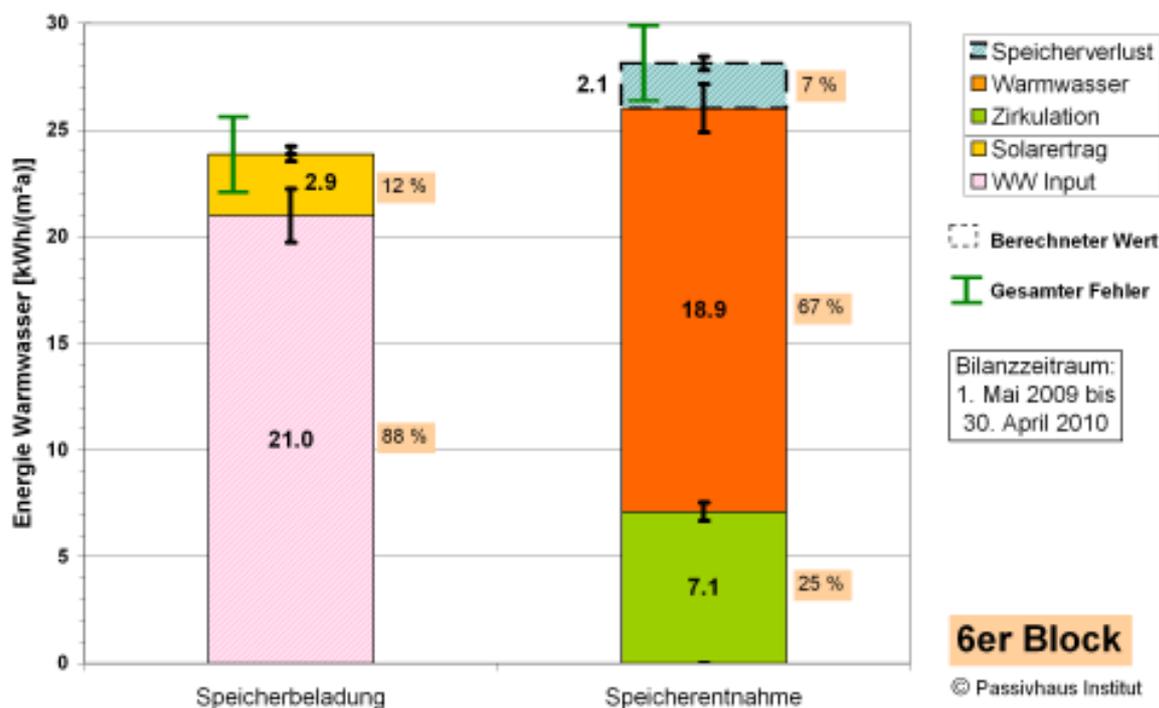


Abbildung 52: Energieverbrauch zur Warmwasserversorgung im 6er Block (3. Bilanzjahr).

4.4 Stromverbrauch

Die in den Wohnungen zusätzlich für das vorausgehende Monitoring montierten Stromzähler wurden für das aktuelle Projekt umgebaut. Durch diese Änderung erfassen die Zähler nur noch den Stromverbrauch der einzelnen Lüftungsgeräte. Diese Daten werden im Abschnitt 4.4.2 und 4.5 verwendet und ausgewertet. Um auch noch Aussagen zum gesamten Stromverbrauch der Wohnungen machen zu können, wurden bei mehreren Ortsterminen alle in den Kellern montierten Stromzähler des Energieversorgers (Abrechnungszähler) abgelesen. Mittels der Ablesungen kann eine Aussage zum Jahresstromverbrauch der Einzelwohnungen gemacht werden. Um genau einen Jahresverbrauch zu ermitteln wurden zwischen den Werten der beiden letzten Ablesungen interpoliert. Damit ergibt sich ein vom üblich verwendeten Bilanzjahreszeitraum abweichender Jahreszeitraum. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass dies bei einer Gesamtjahresbetrachtung eine nur geringe Abweichung erzeugt. Die Ablesungen erfolgten nur im 4er Block.

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 4,7 und 61,3 kWh/(m²a). Der gesamte **Mittelwert der 19 Wohnungen** ergibt sich im zweiten Bilanzjahr zu **33,7 kWh/(m²a)**. Damit liegt der Verbrauch im Mittel um nur 0,7 kWh/(m²a) höher als der im ersten untersuchten Jahreszeitraum (siehe [Peper et al. 2009]). Der mittlere Verbrauch ist damit relativ konstant. Die Jahresverbräuche der einzelnen Wohnungen sind Abbildung 50 zu entnehmen.

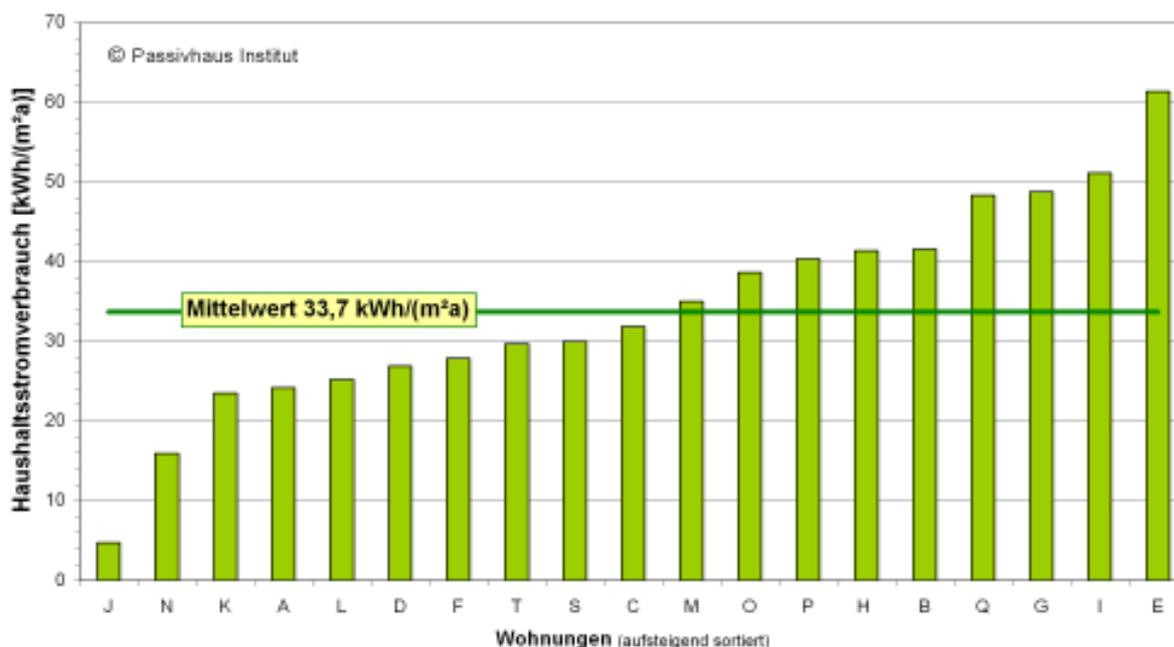


Abbildung 53: Haushaltsstromverbrauch inkl. Lüftungsstrom der 19 Wohnungen im 4er Block für den Jahreszeitraum 24.09.2009 bis 23.09.2010.

4.4.1 Allgemein- und Technikstrom

Die Stromverbräuche für z.B. Treppenhaus-, Keller- und Außenbeleuchtung, Brandschutzanlage etc. werden je Hauseingang über gesonderte Stromzähler in den Kellern erfasst. Zur Sicherstellung der Grundlüftung der Keller werden kleine Abluftventilatoren betrieben (siehe dazu die Auswertungen im Abschnitt 6). Diese Stromverbräuche werden auch über die jeweiligen Allgemeinstromzähler erfasst. Bei den diversen Ortsterminen wurden die Allgemeinstromzähler je Hauseingang ebenfalls abgelesen. Der Verbrauchszeitraum weicht dementsprechend auch von dem für diese Untersuchung festgelegten Bilanzjahr ab.

Die spezifischen Stromverbräuche für diese hausgemeinschaftlichen Aufwendungen inkl. des Stromverbrauchs für die Kellerlüftung betragen im Mittel **2,7 kWh/(m²a)**. Sie sind damit gegenüber der ersten Auswertung deutlich angestiegen. Der Technikstrom für die diversen Pumpen, Solarstation, Regelung, Kessel etc. wird im 4er Block mittels eines gesonderten Stromzählers mittels der Messdatenerfassung aufgezeichnet. Der für die Begleitmessungen notwendige Strom (Messrechner, Sensoren, Bus-Master, etc) wird ebenfalls über diesen Stromkreis versorgt. Durch einen

Unterzähler wird der Messtechnikstrom gemessen und vom Technikstrom abgezogen. Der Technikstrom für den gesamten 4er Block ergibt sich zu **0,85 kWh/(m²a)**. Er ist damit fast unverändert zur Untersuchung im vorausgehenden Zeitraum (0,88 kWh/(m²a)).

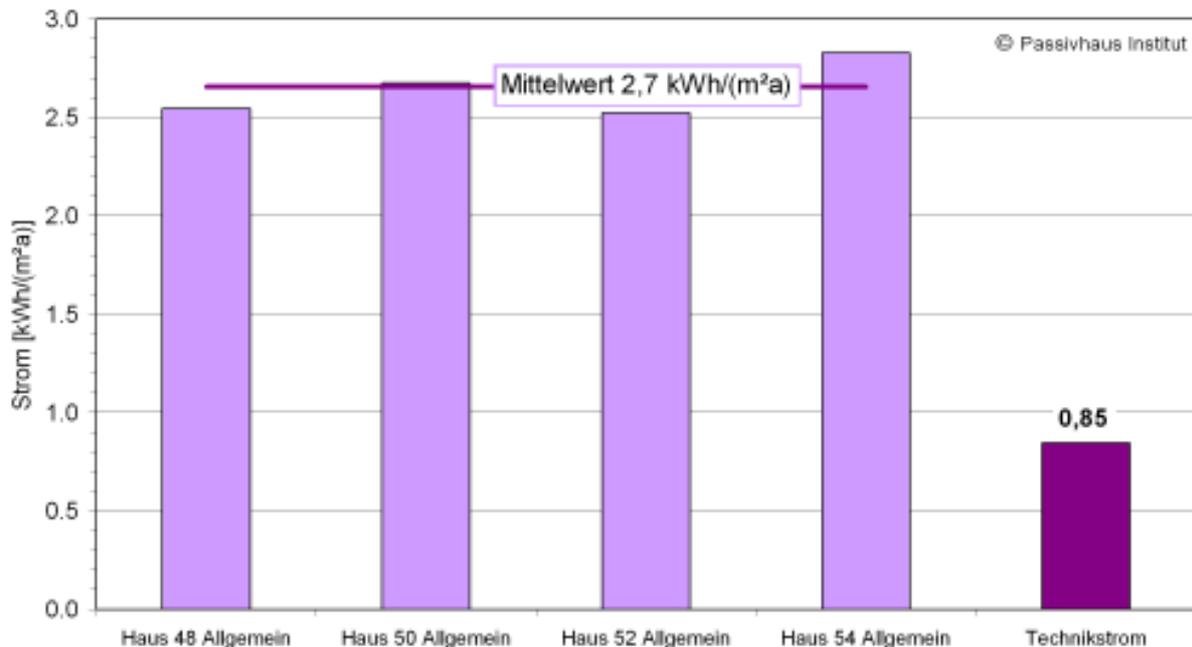


Abbildung 54: Jahresverbrauch von Technik- und Allgemeinstrom (24.09.2009 bis 23.09.2010). Der Mittelwert des Allgemeinstroms sowie der Technikstrom sind auf die gesamte Wohnfläche des Gebäudes bezogen. Die Einzelwerte des Allgemeinstroms der vier Hauseingänge ist jeweils auf die Wohnfläche der jeweiligen Eingänge bezogen.

Insgesamt müssen die Stromverbräuche aller Anwendungen aufsummiert werden. Technik-, Allgemeinstrom- und die **Haushaltsstromverbräuche** inkl. des Lüftungsstroms ergeben einen mittleren Gesamtverbrauch im 4er Block von **37,2 kWh/(m²a)**. Im Zeitraum der vorherigen Untersuchung hat sich mit 35,6 kWh/(m²a) ein etwas niedriger Wert ergeben.

4.4.2 Stromverbrauch Lüftungsanlagen

Die Stromverbräuche der Lüftungsanlagen sind in den oben dargestellten Verbräuchen des Haushaltsstroms vollständig enthalten. In diesem Abschnitt werden die Verbräuche von 15 der 19 Wohnungen dargestellt, bei denen nach dem Umbau die gesonderten Zähler nur für die Lüftungsgeräte vorhanden sind.

In der vergleichbaren Untersuchung [Peper/Feist 2008] mit zum Teil baugleichen Lüftungsgeräten wurde ein spezifischer, mittlerer Stromverbrauch der Lüftungsanlagen von 3,8 kWh/(m²a) gemessen. Die Geräte wurden – trotz der nicht innenliegenden Badezimmer – ganzjährig betrieben. Das ist vergleichbar mit diesem Projekt; die Sommerabschaltung der Geräte erfolgt nur in wenigen Wohnungen (vgl. Abschnitt 4.5.2).

Die Jahreswerte der Stromverbräuche schwanken je nach Nutzung zwischen 1,0 bis 4,7 kWh/(m²a). Im Durchschnitt ergeben sich **3,1 kWh/(m²a)**. In den Werten sind Verbräuche der elektrischen Frostschutzregister bereits enthalten. Diese konnten durch die in Abschnitt 4.5.1 dargestellte Untersuchung ebenfalls berechnet werden. Die elektrischen Frostschutzregister sind nicht im kleineren Gerätetyp vorhanden, in zwei Geräten war die Funktion zusätzlich nicht aktiviert. Damit ist die Funktion der elektrischen Frostschutzregister in 7 der 15 Wohnungen aktiviert. Nur in 5 dieser 7 Wohnungen wurden elektrische Verbräuche für den Frostschutz gemessen. Die Frostschutzgrenztemperaturen sind vermutlich unterschiedlich hoch eingestellt und die Nutzung der Geräte ist deutlich unterschiedlich (siehe Abschnitt 4.5.2). In Abschnitt 4.5.2.1 sind die Frostschutzaufwendungen genauer dargestellt, sie liegen zwischen **0,11 und 0,28 kWh/(m²a)**.

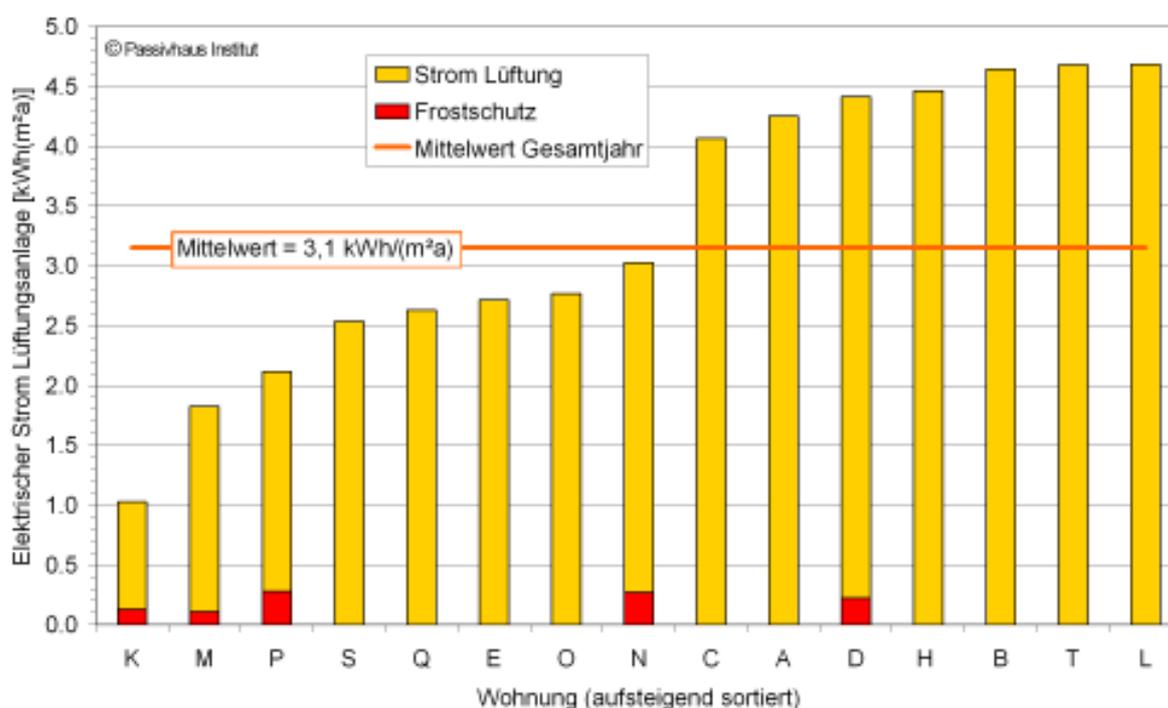


Abbildung 55: Spezifischer Jahresstromverbrauch der Lüftungsgeräte inkl. Regelung und Frostschutzregister in 15 Wohnungen (01.11.2009 bis 31.10.2010).

Aus hygienischen und energetischen Gründen ist es ausreichend, wenn die Lüftungsgeräte nur in der Heizzeit betrieben würden. Dadurch könnten die Stromverbräuche noch deutlich reduziert werden.

Den elektrischen Stromverbräuchen müssen die durch die Wärmerückgewinnung im Gebäude zurückgehaltene Wärme gegenüber gestellt werden. Der Betrieb der Lüftungsanlagen erbringt nicht nur Behaglichkeitsvorteile, sondern auch eine deutliche Primärenergieeinsparung. Dieser Zusammenhang wird bei der genaueren Untersuchung von zwei Geräten in Abschnitt 4.7 analysiert.

4.5 Luftwechsel

Zur Bewertung der Raumluftqualität mittels der CO₂-Konzentration und der Raumluftfeuchte ist die Kenntnis der Lüftungsvolumenströme und der daraus abgeleiteten Luftwechselraten die zentrale Größe. In diesem Messprojekt konnten die Volumenströme indirekt über die Stromverbräuche der dezentralen Lüftungsgeräte gemessen werden. Unter der Annahme, dass in der Winterzeit die Fensterlüftung in Wohnungen mit Lüftungsanlagen einen vernachlässigbaren Anteil am Luftwechsel hat, wurden damit die Luftwechselraten bestimmt.

4.5.1 Maschinelle Luftwechselraten

Für das vorausgehende Messprojekt am Gebäude wurden die einzelnen Wohnungen mit zusätzlichen Stromzählern mit Impulsausgängen zur Messung der gesamten Haushaltsstromverbräuche ausgerüstet. Zur Messung der Stromverbräuche nur der Lüftungsanlagen der Einzelwohnungen wurden die vorhandenen Stromzähler in 15 Wohnungen im September/Oktober 2009 umgerüstet. Damit konnten die Stromverbräuche der Lüftungsgeräte inkl. der Steuerung und dem elektrischem Frostschutz gemessen werden. Bei Abschaltung der Geräte wurden dadurch dann jeweils der Standby-Verbrauch erfasst.

In einem weiteren Schritt wurden vom PHI in den Wohnungen die Luftvolumenströme jedes Zu- und Abluftventils bei allen vorhandenen 4 bzw. 5 Lüftungsstufen gemessen. In drei Fällen waren am Regelgerät bis zu acht Lüftungsstufen freigegeben; welche dann ebenfalls gemessen wurden. Dies wurde allerdings nur in einer Wohnung durchgeführt und die Werte dann für die anderen übernommen. Wie sich später zeigt, werden diese hohen Stufen so gut wie nie genutzt.

Für die Messung wurde das Volumenstrommessgerät „Acin FlowFinder FF225“ mit Stützventilator eingesetzt. Die Messgenauigkeit aufgrund von Nichtlinearität, Hysterese und Wiederholbarkeit beträgt nach Herstellerangaben 3 bis 5 Prozent des abgelesenen Wertes, jedoch nie weniger als 2 m³/h. Die über 400 Einzelmessungen an den Lüftungsventilen ermöglichen auch Aussagen zur Balanceeinstellung (Zuluft-/Abluft) der Lüftungsanlagen.

Die Balance lag überwiegend unter dem Zielwert von maximal 10 % (vgl. [Werner/Laidig 1999]). Hier muss allerdings angemerkt werden, dass Werte deutlich über 10 % auch festgestellt wurden und dies nicht dauerhaft tolerabel ist. Der tatsächliche effektive Wärmebereitstellungsgrad der Anlagen sinkt dabei empfindlich ab und die deutlich vergrößerte Ex- bzw. Infiltration erhöht zusätzlich die Lüftungswärmeverluste. Hier ist in der Zukunft nur Abhilfe zu erreichen durch Lüftungsgeräte mit automatischer Volumenstrombalance.



Abbildung 56: Messung der Volumenströme an Zu- und Abluftventilen mit dem FlowFinder in den Wohnungen. Rechts sind ein Zuluft (oben) und ein Abluftventil (unten) abgebildet.

Nach den Volumenstrommessungen wurde aus den Langzeitstrommessungen die elektrische Leistungsaufnahme der Geräte bei den unterschiedlichen Lüftungsstufen ermittelt. Zum Teil wurden die Messungen später vor Ort nochmals stichprobenhaft mit Zwischenstecker-Leistungsmessgeräten überprüft. Zusätzlich gab es auch diverse Zusatzmessungen der Volumenströme an den Ventilen um z.B. den Einfluss des Bypassbetriebs zu erfassen.

Die Ergebnisse der Volumenstrommessungen sind in Tabelle 13 dargestellt. Es wird sichtbar, dass die höheren Stufen nur bei drei Geräten aktiviert sind. Generell sind Geräte mit digitalem Bediengerät (Vallox 090 D und zwei Nachfolgergeräte des gleichen Typs) sowie Geräte mit einem einfachen Fünf-Stufenschalter (Aus und Stufe 1 bis 4) (Vallox 090 SC) im Einsatz.

In der dann nachfolgenden Tabelle 14 sind die sich aus den gemessenen Lüftungsvolumenströmen und den jeweiligen Luftvolumen der Wohnungen ergebenden Luftwechselraten angegeben.

$$\text{Luftwechselrate } [n] = \frac{\text{Lüftungsvolumenstrom}}{\text{Luftvolumen Wohnung}} \left[\frac{1}{h} \right]$$

Tabelle 13: Gemessene Volumenströme bei den unterschiedlichen Lüftungsstufen in den 15 Wohnungen.

Volumenstrom	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6	Stufe 7	Stufe 8
Whg.	[m ³ /h]							
A	50	87	117	134				
B	60	87	104	120	132	143	164	
C	48	89	118	135				
D	52	65	81	101	120			
E	55	96	127	143				
H	50	87	117	134				
K	57	72	86	99	121			
L	49	59	76	94	115	143	164	186
M	54	63	82	101	120			
N	52	65	86	107	126			
O	48	91	121	142				
P	49	63	76	93	114			
Q	53	93	123	142				
S	52	63	80	102	123			
T	56	80	95	111	126	143	164	186

Die Luftvolumenströme liegen in den kleineren Wohnungen (Gerätetyp KWL090 SC) zwischen 48 und 143 m³/h, in den großen Wohnungen (Gerätetyp KWL090 D; bei den üblichen Stufen 1 bis 5) zwischen 60 und 132 m³/h.

Tabelle 14: Wohnungsluftvolumen und sich mit den Volumenströmen aus Tabelle 13 ergebene Luftwechselraten der 15 untersuchten Wohnungen.

	Volumen Whg.	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6	Stufe 7	Stufe 8
Whg.	[m ³]	Luftwechselrate							
		[1/h]	[1/h]	[1/h]	[1/h]	[1/h]	[1/h]	[1/h]	[1/h]
A	98,1	0,51	0,89	1,19	1,37				
B	172,4	0,35	0,50	0,60	0,69	0,77	0,83	0,95	
C	134,6	0,36	0,66	0,88	1,00				
D	203,4	0,26	0,32	0,40	0,50	0,59			
E	159,9	0,34	0,60	0,79	0,89				
H	94,4	0,53	0,92	1,24	1,42				
K	206,2	0,27	0,35	0,42	0,48	0,58			
L	173,5	0,28	0,34	0,44	0,54	0,66	0,82	0,95	1,07
M	201,8	0,27	0,31	0,40	0,50	0,59			
N	199,7	0,26	0,33	0,43	0,54	0,63			
O	148,1	0,32	0,61	0,82	0,96				
P	198,6	0,25	0,32	0,38	0,47	0,57			
Q	150,9	0,35	0,61	0,81	0,94				
S	202,1	0,26	0,31	0,39	0,50	0,61			
T	174,5	0,32	0,46	0,54	0,63	0,72	0,82	0,94	1,07

Die Luftwechselraten ergeben sich damit in den kleineren Wohnungen (Gerätetyp KWL090 SC) zu Werten zwischen 0,32 und 1,42 1/h, in den großen Wohnungen (Gerätetyp KWL090 D; bei den üblichen Stufen 1 bis 5) zwischen 0,25 und 0,77 1/h.

Aus der Messung der elektrischen Leistungsaufnahme der Lüftungsgeräte je Lüftungsstufe wurden Grenzwerte ableitet, um die elektrische Dauermessung jeweils einer Lüftungsstufe zuordnen zu können. Die gemessenen elektrischen Leistungen der Geräte sind in Tabelle 15 zusammengestellt. In Einzelfällen wurden Werte von vergleichbaren Wohnungen übernommen wenn sie nicht ausreichend genau waren, bzw. die Wohnung für die Messung nicht nochmals zugänglich war.

Die Messwerte der Leistungsaufnahme der Lüftungsgeräte liegen in den kleineren Wohnungen (Gerätetyp KWL090 SC) zwischen 19,3 und 98,4 W, sowie für die großen Wohnungen (Gerätetyp KWL090 D) zwischen 16,3 und 68,1 W (Stufen 1 bis 5).

Tabelle 15: Elektrische Leistungsaufnahme der Lüftungsgeräte in den unterschiedlichen Lüftungsstufen.

	Standby	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6	Stufe 7	Stufe 8
Whg.	[W]								
A	10,4	21,0	42,0	72,0	96,0	-	-	-	-
B	5,0	16,3	27,0	35,7	48,0	62,2	82,9	104,4	-
C	10,4	21,0	42,0	72,0	96,0	-	-	-	-
D	11,9	20,7	25,2	33,4	46,9	68,1	-	-	-
E	10,4	19,3	40,0	71,6	98,4	-	-	-	-
H	10,4	21,0	42,0	72,0	96,0	-	-	-	-
K	11,8	20,0	24,4	31,9	45,4	64,4	-	-	-
L	11,6	19,6	23,7	31,6	45,7	66,2	84,1	116,5	164,7
M	11,7	18,0	24,0	30,0	42,0	66,0	-	-	-
N	11,7	19,8	25,2	31,2	48,0	64,2	-	-	-
O	10,4	19,3	40,0	71,6	98,4	-	-	-	-
P	11,7	19,8	25,2	31,2	48,0	64,2	-	-	-
Q	10,4	19,3	40,0	71,6	98,4	-	-	-	-
S	11,7	19,8	25,2	31,2	48,0	64,2	-	-	-
T	4,8	16,4	27,1	34,8	46,2	59,8	79,6	101,5	127,2

Die Anforderungen des Passivhaus Instituts an energieeffiziente Lüftungsanlagen ist neben dem hohen Wärmebereitstellungsgrad auch ein minimierter Stromverbrauch zur Luftförderung. Der Maximalwert liegt bei **0,45 Wh/m³** im Einsatzbereich des Gerätes. Aus den Messdaten Volumenstrom und Leistungsaufnahme der Einzelgeräte können die Werte für jede Stufe eines jeden Gerätes berechnet werden.

Wie in Tabelle 16 dargestellt ergeben sich spezifische Messwerte zwischen 0,27 und 0,89 Wh/m³. Die höheren Lüftungsstufen liegen ggf. bereits außerhalb des Einsatzbereiches der Geräte. Es ist aber generell eine eindeutige Tendenz erkennbar: In den unteren Stufen wird der Maximalwert eingehalten, ab Stufe 3 wird der Grenzwert bereits von mehreren Geräten, wie auch vom Mittelwert aller Geräte überschritten. Daran wird deutlich, dass hier noch Verbesserungen in der Elektroeffizienz notwendig sind.

Tabelle 16: Elektrische Leistungsaufnahme je Kubikmeter geförderter Luft pro Stunde der Lüftungsgeräte in jeder Lüftungsstufe.

	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6	Stufe 7	Stufe 8
Whg.	[Wh/m ³]							
A	0,42	0,48	0,62	0,72	-	-	-	-
B	0,27	0,31	0,34	0,40	0,47	0,58	0,64	-
C	0,44	0,47	0,61	0,71	-	-	-	-
D	0,40	0,39	0,41	0,46	0,57	-	-	-
E	0,35	0,42	0,56	0,69	-	-	-	-
H	0,42	0,48	0,62	0,72	-	-	-	-
K	0,35	0,34	0,37	0,46	0,53	-	-	-
L	0,40	0,40	0,42	0,49	0,58	0,59	0,71	0,89
M	0,33	0,38	0,37	0,42	0,55	-	-	-
N	0,38	0,39	0,36	0,45	0,51	-	-	-
O	0,40	0,44	0,59	0,69	-	-	-	-
P	0,40	0,40	0,41	0,52	0,56	-	-	-
Q	0,36	0,43	0,58	0,69	-	-	-	-
S	0,38	0,40	0,39	0,47	0,52	-	-	-
T	0,29	0,34	0,37	0,42	0,47	0,56	0,62	0,68
MW	0,37	0,40	0,47	0,55	0,53	0,57	0,66	0,78

4.5.2 Gemessenes Lüftungsverhalten

An Hand der Messergebnisse aus dem vorhergehenden Abschnitt wurden die Dauer-messungen der elektrischen Leistungsaufnahme der Lüftungsgeräte ausgewertet. Dies erfolgte auf der Ebene der höchsten zeitlichen Auflösung der Messdaten (10 Minuten-Werte). Die Zuordnung zu den Lüftungsstufen erfolgte mit dem gleitenden Mittelwert der Leistungsmessdaten. Dadurch ließen sich vorhandene Überschneidungen der Leistungsbereiche bis auf unwesentliche, sehr geringe Zeitpunkte minimieren. Beispielhaft ist ein Ausschnitt eines Winterzeitraumes von einer Wohnung in Abbildung 57 dargestellt. Bei dieser beispielhaften Wohnung wurde relativ selten zwischen den Stufe geschaltet. Das Nutzerverhalten beim Schalten der Lüftungsstufen war in jeder Wohnung sehr unterschiedlich. Das ergibt auch die weitere Untersuchung des Nutzerverhaltens: Aus den ermittelten Lüftungsstufen wurden die Zeiträume des Betriebs je Stufe aufsummiert. Daraus ergibt sich die Darstellung in Abbildung 58 zu den zeitlichen Anteilen der einzelnen Schaltstufen. Die Gesamtzeit (100 %) ist dabei der Kernwinter vom 01.11.2009 bis zum 28.02.2010 mit insgesamt 2880 Stunden.

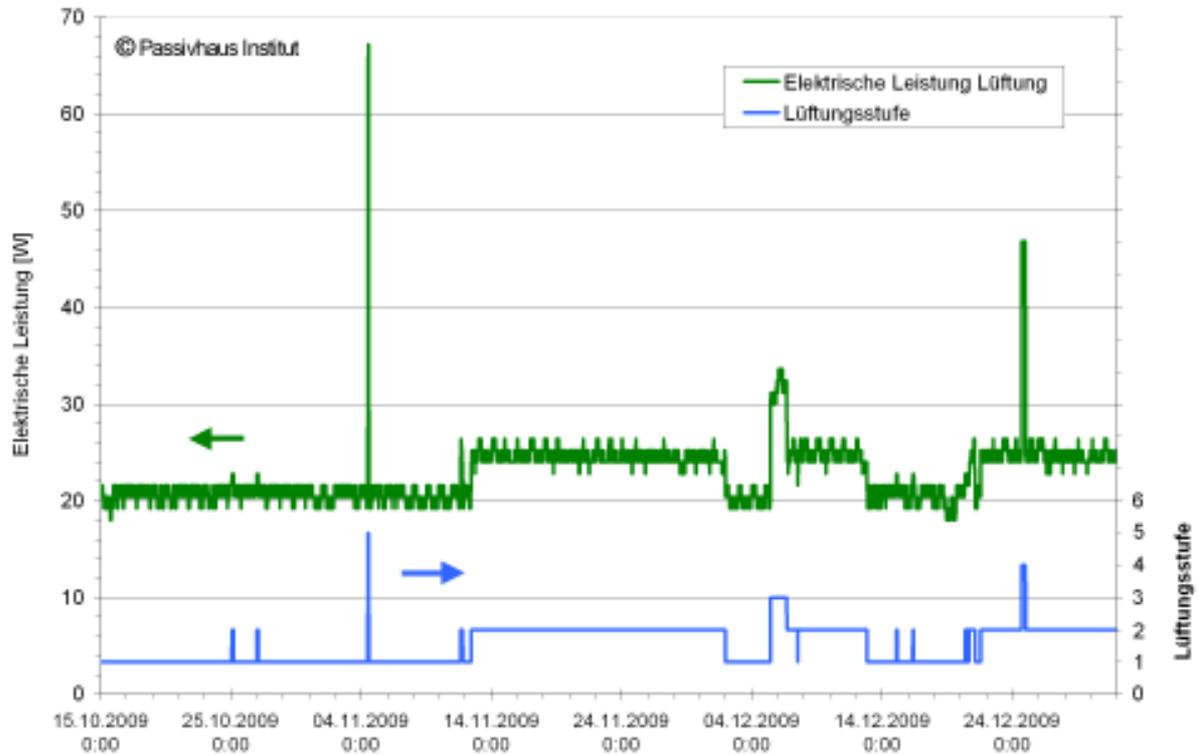


Abbildung 57: Beispielhafter Ausschnitt der elektrischen Leistungsmessung der Lüftungsanlage von Wohnung „S“ und den daraus ermittelten Lüftungsstufen (10 Minuten Daten).

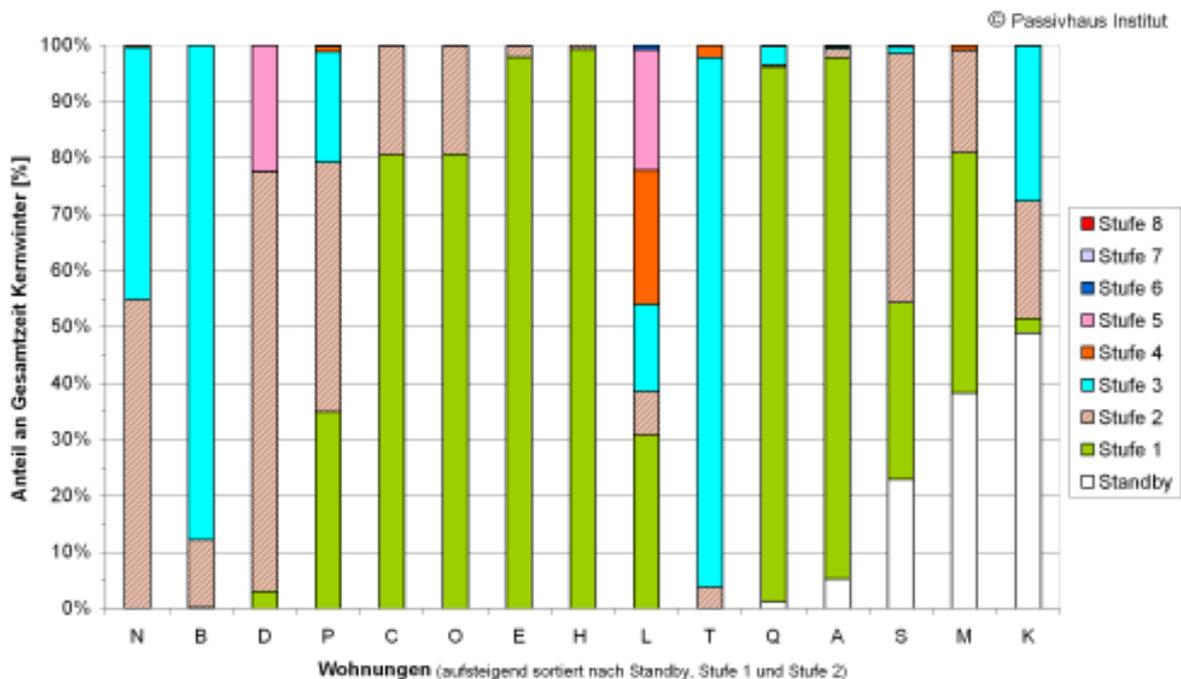


Abbildung 58: Im Kernwinter durch die Bewohner eingestellte Lüftungsstufen; dargestellt als Anteil an der Gesamtzeit (Kernwinter 01.11.2009 bis 28.02.2010, entspricht 2880 Stunden).

Mit Wohnung „E“ und „H“ zeigen sich in Abbildung 58 Wohnungen bei denen fast dauerhaft eine Stufe eingestellt wurde. Das andere Extrem ist Wohnung „L“ bei der 5 Stufen relativ gleichmäßig genutzt werden und augenscheinlich immer eine Bedarfsanpassung der Volumenströme erfolgt. Eine Abschaltung (Stellung: „Standby“) erfolgt im Kernwinter in dieser Wohnung gar nicht.

Es gibt allerdings auch drei Wohnungen bei denen die Lüftungsanlagen auch im Kernwinter längere Zeit abgeschaltet werden. Der Extremfall ist Wohnung „K“ mit einer Abschaltung von fast der halben Gesamtzeit. Die Bewohner schalten in der Nacht die Anlage immer komplett ab und lüften das Schlafzimmer über ein Fenster. Das ist nicht im Sinne des Betriebs einer hocheffizienten Lüftungsanlage. Auf der anderen Seite „funktioniert“ die Wohnung trotzdem – die Bewohner sind zufrieden und der Heizwärmeverbrauch der Wohnung liegt trotzdem im unteren Drittel (vgl. Abbildung 31 auf Seite 41). Aus Sicht einer optimalen Frischluftversorgung und der ausreichenden Wärmeversorgung bei der hier realisierten Beheizung über die Zuluft ist das Ausschalten der Lüftung in den Wintermonaten nicht zielführend und bringt keine Vorteile sondern eher Nachteile. Die Zuführung der ausreichenden Außenluftmenge über ein geöffnetes Fenster ist – aufgrund der Wind- und Temperaturabhängigkeit – nicht dauerhaft sichergestellt. Messungen von Luftwechselraten über Fenster zeigen deutlich unzureichende Luftwechselraten (vgl. [Peper/Feist 2008] und [Kah et al. 2010]).

Die Gründe der längeren Abschaltungsdauern der beiden anderen Wohnungen sind nicht näher bekannt. Denkbar sind Abschaltungen während Urlaubszeiten. Das ist in Bezug auf Raumlufttemperaturen in einem hochwärmegedämmten Mehrfamilienhaus aufgrund der starken thermischen Kopplung an die Nachbarwohnungen unproblematisch. Ein Absinken der Temperaturen in kritische Bereiche ist nicht möglich (keine Frostgefahr), vgl. dazu auch die Analyse zum Mehrfamilienhaus Kassel Marbachshöhe in [Pfluger/Feist 2001].

Zur Nutzung der Lüftungsanlagen bleibt festzuhalten, dass **kein allgemein gültiger Trend** abzuleiten ist. Es ist eine sehr breite Nutzungsstreuung vorhanden. Es liegen ganz unterschiedliche Wohnungsgrößen, Bewohnerzahlen, Alter der Bewohner, Anwesenheitszeiten und Lebensgewohnheiten (Kochen, Rauchen,...) vor sowie ganz unterschiedlicher Bedarf bzw. Wunsch nach regelndem Eingreifen. Daher kann auch aus den Schaltstufen allein keine eindeutig „richtige“ oder „falsche“ Nutzung abgeleitet werden.

Aus den Messdaten konnten dann die Luftvolumenströme und damit die Luftwechselraten ermittelt werden. Die entscheidende Zeit für die kontrollierte Lüftung ist der Winterzeitraum. In dieser Zeit kann im Regelfall mit nur sehr geringer zusätzlicher Fensterlüftung gerecht werden. Wenn vorhanden, würde diese den Luftwechsel auf jeden Fall weiter erhöhen. Die Analyse des maschinellen Luftwechsels führt damit auf realistische Werte die ggf. bei zusätzlicher Fensterlüftung nur höher ausfallen würden. Damit liegen wir mit der Betrachtung auf der „sicheren Seite“.

Zunächst werden die im Winter und Kernwinter realisierten mittleren Luftvolumenströme dargestellt. Sie liegen im Kernwinter zwischen 35 und 102 m³/h. Im Mittel über alle Wohnungen werden 62 m³/h ermittelt.

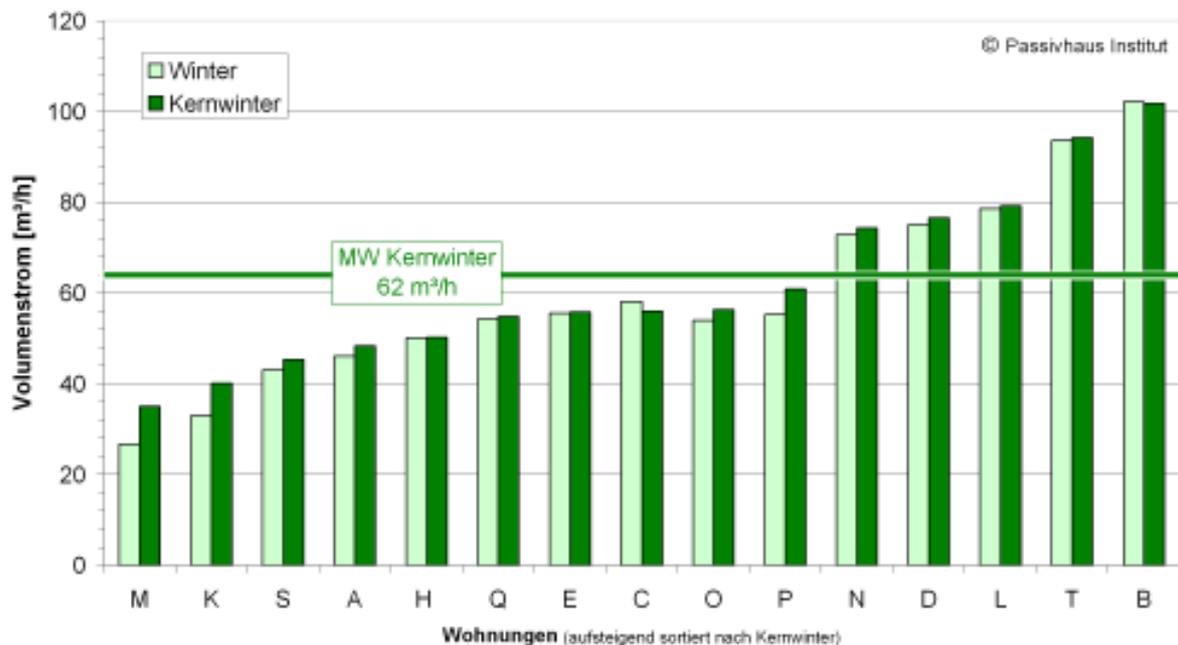


Abbildung 59: Mittlere Luftvolumenströme im Winter und Kernwinter 2009/2010 der 15 untersuchten Wohnungen.

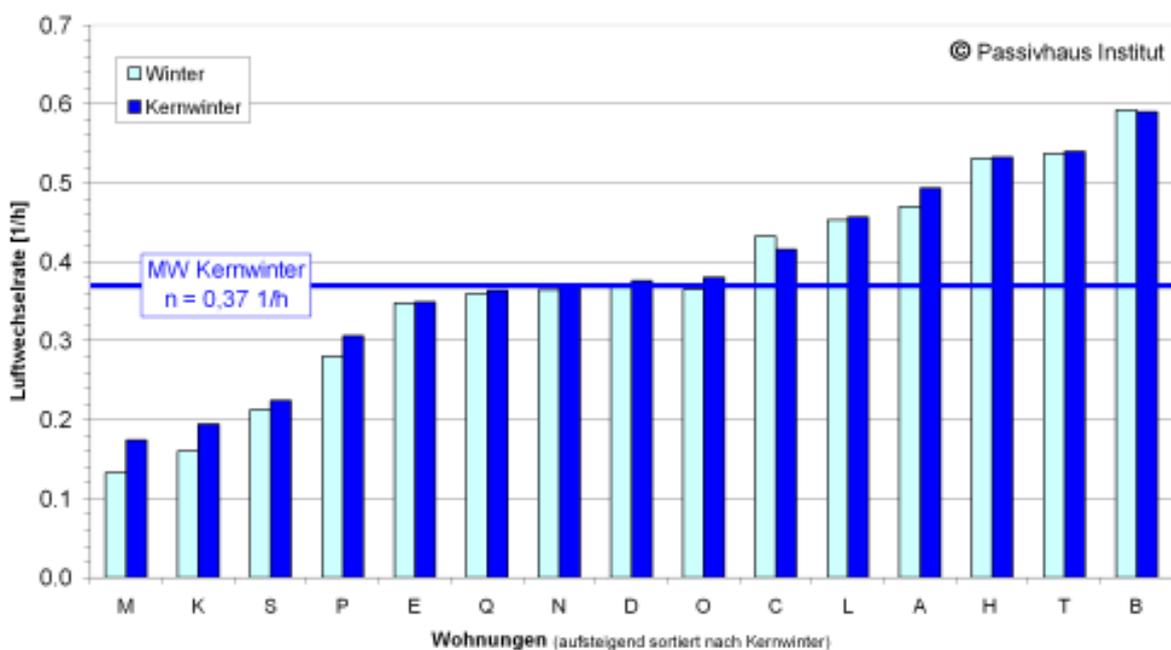


Abbildung 60: Durchschnittliche Luftwechselraten im Winter (15.10.2009 bis 30.04.2010) und Kernwinter (01.11.2009 bis 28.02.2010).

Eine vergleichbare Aussage zum Lüftungsverhalten ergibt sich erst bei der Verrechnung mit den Wohnungsgrößen zur Luftwechselrate. Durch die unter-

schiedlichen Wohnungsgrößen ergibt sich eine Verschiebung in der aufsteigenden Reihenfolge der Wohnungen. Die Ergebnisse der Auswertungen sind in Abbildung 60 wieder für die Winter- und Kernwinterzeit dargestellt. Im Mittel der 15 Wohnungen ergeben sich im Kernwinter Luftwechselraten zwischen **0,17 und 0,59 1/h**. Der Gesamtmittelwert über alle Wohnungen ergibt sich zu **0,37 1/h**. Der Unterschied zwischen der Winter- und der Kernwinterzeit ist fast durchgängig vernachlässigbar. Überwiegend wird im Kernwinter ein geringfügig größerer Luftwechsel über die Anlage erzielt. Das hängt vermutlich mit den wärmeren Tagen im März/April zusammen, an denen dann bereits etwas stärker Fensterlüftung betrieben wird; der Anlagenbetrieb wird dann reduziert.

Die drei Wohnungen „M“, „K“ und „S“ verfügen über die mit Abstand geringsten Luftwechselraten. Schon Abbildung 58 zeigt, dass in diesen drei Wohnungen die Lüftungsanlage am häufigsten abgeschaltet wurden („Standby“). Das führt dann zwangsläufig auf die festgestellten, geringen Luftwechselraten. Bei näherer Untersuchung des Lüftungsanlagenbetriebs für die drei Wohnungen im Winter zeigt sich:

Whg. M: Gerät überwiegend aus oder auf Stufe 1, selten auf höherer Stufe

Whg. K: Generell Abschaltung in jeder Nacht; Fensterlüftung

Whg. S: Vom 22.01. bis zum 20.03.2010 war die Anlage mit mehrfachen Unterbrechungen insgesamt ca. 45 Tage abgeschaltet ⁴⁾.

Mit diesen Betriebsweisen erklären sich die geringen Luftwechselraten. Unzufriedenheiten mit den Lüftungsanlagen haben diese Bewohner dabei nicht geäußert.

Der Mittelwert der Wohnungen von $n = 0,37$ 1/h würde ohne diese drei genannten Wohnungen auf **$n = 0,42$ 1/h** anwachsen. Dieser Wert liegt in der gleichen Größenordnung wie er auch bei z.B. der Untersuchung [Kah et al. 2010] für die Wohnungen mit kontrollierter Wohnraumlüftung ermittelt wurde. Die mittlere Luftwechselrate ergab sich dort zu 0,48 1/h.

4.5.2.1 Frostschutz und Standby

Bei der Auswertung der Gesamtstromverbräuche der Lüftungsanlagen wurden auch die elektrischen Frostschutzregister (Heizschlange im Außenluftstrang) mitgemessen. Wie weiter oben beschrieben gibt es 9 Geräte mit einem elektrischen Frostschutzregister, wobei die Betriebsweise „elektrische Vorheizung“ nur bei 7 Geräten freigegeben war (siehe dazu Ausführungen weiter unten). Die Gesamtstromverbräuche der Lüftungsgeräte sind weiter oben in Abschnitt 4.4.2 bereits ausgewertet worden.

Der Betrieb der Frostschutzregister setzt sich bei der Auswertung der elektrischen Leistungen mit Werten zwischen **170 und 260 W** deutlich vom Normalbetrieb ab. Auffällig ist, dass die Laufzeiten der Frostschutzregister sehr unterschiedlich aus-

⁴⁾ Auffällig ist, dass in dieser Wohnung im Sommer deutlich höhere Luftvolumenströme eingeschaltet wurden.

fallen. Je nach Betriebsweise der Anlage durch die Bewohner und vermutlich unterschiedlich eingestellten Grenztemperatur der Heizregister. So gingen im Winter 2009/2010 die Heizregister in 5 der 7 Wohnungen in Betrieb. Dabei lagen die Laufzeiten zwischen insgesamt **43 und 110 Stunden/Winter**. Das führt auf gemessenen Jahresverbräuche für den Frostschutz von 9,1 bis 23,8 kWh/a; entsprechend auf spezifische Verbräuche zwischen **0,11 und 0,28 kWh/(m²a)**. Bei angenommenen Kosten für den Strombezug von 0,22 €/kWh entspricht das in den fünf Wohnungen jährlichen Ausgaben für den Frostschutz der Lüftung zwischen 2,00 und 5,24 €. Insgesamt damit vernachlässigbare Größenordnungen, welche es bei solchen dezentral ausgerüsteten Mehrfamilienhäusern nicht rechtfertigt hydraulische Frostschutzregister zu installieren. Diese sind zwar primärenergetisch zumindest im Betrieb vorteilhaft aber in der Installation deutlich aufwendiger.

Tabelle 17: Laufzeiten, elektrische Leistung und Jahresverbrauch der Frostschutzregister der Lüftungsanlagen in fünf Wohnungen.

Whg.	Laufzeit Frostschutz	Mittlere elek. Leistung	Jahresverbrauch Frostschutz	Jahresverbrauch Frostschutz
	[h/a]	[W]	[kWh/a]	[kWh/(m ² a)]
P	110,0	217	23,8	0,28
N	90,2	258	23,3	0,27
D	109,8	172	18,9	0,22
K	42,8	260	11,1	0,13
M	47,7	190	9,1	0,11

Bei der genaueren Vermessung zweier Lüftungsgeräte zur Bestimmung der Wärmebereitstellungsgrade (siehe Abschnitt 4.7) ist aufgefallen, dass bei diesen der Frostschutz nicht wie geplant über das vorhandene elektrische Vorheizregister in der Außenluft erfolgt. Hier wird bei Frosttemperaturen eine zeitweise Abschaltung des Außen-Zuluft-Ventilators durchgeführt. Mit der Abluft wird dann der Wärmeübertrager erwärmt und ggf. abgetaut. Dabei handelt es sich um die Standardfunktion der Geräte im Auslieferungszustand. Bei den hier untersuchten ausschließlich über die Zuluft beheizten Wohnungen (Ausnahme Badheizkörper) ist diese Funktion kontraproduktiv, da gerade bei Frosttemperaturen die Zuluftbeheizung zeitweise unterbrochen wird. Auch für die Luftqualität (zeitweise geringere Außenluftmenge) stellt dies einen nicht optimalen Fall dar. Allerdings sind bezüglich der Luftqualität und der Beheizbarkeit keine Klagen der Bewohner dieser Wohnungen bekannt. Dennoch ist eine Aktivierung des vorhandenen Heizregisters und die Deaktivierung der Ventilatorabschaltung sinnvoll und wurde daher nach Abschluss der Messungen durch die Wartungsfirma durchgeführt.

Damit erklärt sich, dass bei diesen beiden Wohnungen bzw. Lüftungsgeräten kein Stromverbrauch für den Frostschutz gemessen wurde.

Standby

Eine Aussage zu den elektrischen Leistungen der abgeschalteten Lüftungsgeräte (Standby) ist auf Grund der Dauermessung ebenfalls einfach möglich. Dabei sind die drei erwähnten Geräte zu unterscheiden. In Tabelle 19 wird deutlich, dass das Nachfolgegerät des überwiegend eingesetzten Gerätetyps „Vallox 090 D“ über eine deutlich geringere Standby-Leistungsaufnahme verfügt; die Leistung wurde mehr als halbiert. Allerdings muss festgestellt werden, dass die Leistung damit noch immer deutlich über der vom Passivhaus Institut für die Zertifizierung von Lüftungsgeräten geforderten 1 W Grenze liegt. Hier sind weitere Verbesserungen notwendig.

Tabelle 18: Mittlere elektrische Leistungen in Standby-Stellung der eingesetzten Lüftungsgeräte.

Gerätetyp	Leistung Standby [W]
Vallox 090 SC	10,4
Vallox 090 D	11,7
Vallox 090 D Nachfolger	4,9

4.5.2.2 Sommerlüftung

Im Sommer macht der Betrieb der Lüftungsanlagen aus energetischer Sicht keinen Sinn; es lässt sich kein Lüftungswärmeverlust reduzieren. Natürlich ist es möglich, die Anlage auch im Sommer zu betreiben, wobei es zwingend sinnvoll ist den Bypass zu aktivieren um die Wohnung nicht unerwünscht aufzuheizen. Die Betriebsweise ist jedem Bewohner selbst überlassen. Für Allergiker kann sich bei entsprechender Filterqualität ein Vorteil auch bei Sommerbetrieb ergeben. Denkbar ist auch das gewünschte Ablüften von Küchen- und Bad-/WC-Gerüchen und Feuchtigkeiten auch im Sommer.

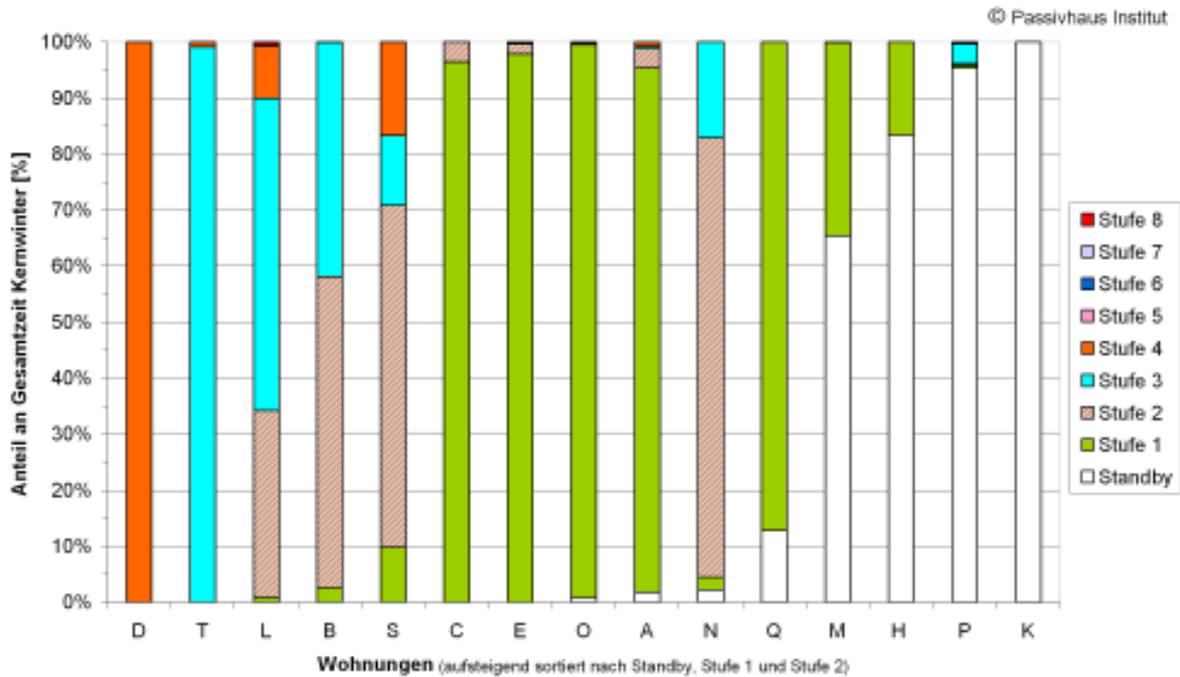


Abbildung 61: Eingestellte Lüftungsstufen im Sommer. Dargestellt als Anteil an der gesamten Sommerzeit (01.05.2010 bis 30.09.2010, entspricht 3672 Stunden).

Es zeigt sich, dass das Lüftungsverhalten noch deutlich unterschiedlicher ist als im Winterzeitraum. Die Darstellung der Lüftungsstufen im Sommer (01.05.2010 bis einschließlich zum 30.09.2010) zeigt nur eine Wohnung mit einer Komplettabschaltung. Insgesamt schalten nur 4 Wohnungen die Anlage im Sommer überwiegend ab. Es gibt auch zwei Wohnung („D“ und „S“), bei der die Anlage im Sommer mit höheren Lüftungsstufen betrieben wird als im Winter. Ob dies von den Bewohnern gezielt beabsichtigt ist weil z.B. nicht oder nur gering über Fenster gelüftet wird, ist nicht bekannt.

4.6 Raumlufuntersuchungen

Der Vorteil von energieeffizienten Gebäuden wird in den meisten Fällen mangels Messdaten auf den Energieverbrauchs-Vergleich reduziert. Der Vorteil der höheren Luftqualität durch den Einsatz einer Lüftungsanlage im Vergleich zur Fensterlüftung bleibt dabei außer acht. Mit dem Gebäude in der Tevesstraße 48 bis 54 konnte jetzt die Luftqualität bei einer statistisch belastbaren Anzahl von Wohnungen mit Lüftungsanlagen überprüft werden. Das ist auf Grund der zu erwartenden Streuung notwendig.

Die CO₂-Konzentration stellt neben der relativen Luftfeuchtigkeit einen wichtigen Indikator der Raumlufqualität dar, sie gilt als Leitparameter für die Luftqualität. Daher wurde die CO₂-Konzentrationen in der Raumluf sowie die relative Raumlufteuchte in den 15 Wohnungen (Kernzone) gemessen. Die CO₂-Konzentration und die Luftfeuchtigkeit werden im Zusammenhang mit den gemessenen Luftwechselraten aus dem vorausgehenden Abschnitt beurteilt.

4.6.1 CO₂-Konzentrationen

CO₂ ist die Leitgröße für die Raumlufqualität für alle Gebäude, in denen die Luftbelastungen hauptsächlich durch die Nutzung durch Personen bedingt ist, insbesondere bei Wohngebäuden. Bei höheren CO₂-Konzentrationen kann i.a. davon ausgegangen werden, dass die Konzentration von anderen Luftschadstoffe ebenfalls erhöht ist.

In [Schulze Darup 2002] wird beschrieben, „dass bei Standardgebäuden ohne Lüftungsanlage in vielen Fällen mit höheren Schadstoffgehalten gerechnet werden muss, als allgemein angenommen wird“. Die Luftqualitätsuntersuchungen der ersten Passivhäuser in Darmstadt Kranichstein bescheinigten bereits eine sehr hohe Luftqualität [AKKP 8] [Feist 1995]. Messungen vom PHI zum Vergleich zwischen Fensterlüftung und maschineller Lüftung zeigen eindeutig die besseren Luftqualitäten durch den Betrieb der Lüftungsanlagen [Kah et al. 2010].

Zusätzlich zu den bereits erwähnten vorausgegangenen messtechnischen Untersuchungen zu den Gebäuden in der Tevesstraße [Peper et al. 2009] wurden in [Kah 2005] bereits die Luftqualität vor und nach der Sanierungsmaßnahme gemessen. Dabei wurde beispielhaft in einer Wohnung (Wohnfläche 43 m²) mit zwei Bewohnern im 4er Block der Tevesstraße gemessen. Aus diesem Bericht der Voruntersuchung wird hier die CO₂-Messung im Dezember 2005 (vor der Sanierung) gezeigt. Zur Untersuchungszeit konnten die Bestandswohnungen ausschließlich über Fenster gelüftet werden. Die Luftdichtheit der Gebäude war allerdings deutlich geringer (vgl. [Kaufmann et al. 2009]).

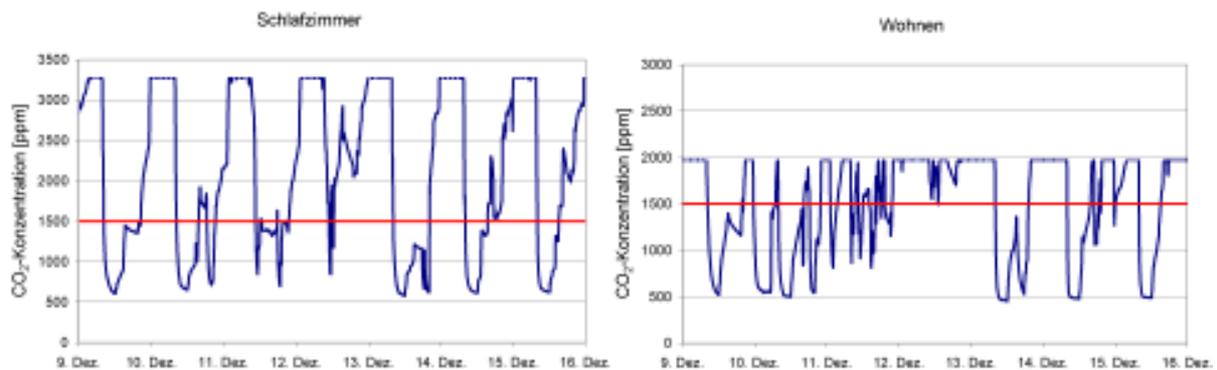


Abbildung 62: Messung der CO₂-Konzentration in Wohn- und Schlafzimmer in einer un-sanierten Wohnung in der Tevesstraße 48 bis 54 (ausschließlich Fensterlüftung) aus [Kah 2005]. Durch zwei unterschiedliche Sensoren sind die Messbereichsbergrenzen unterschiedlich.

Die CO₂-Konzentration zeigen an diesem Beispiel sehr häufige hohe Überschreitungen der damals gültigen 1500 ppm Grenze. Die Luftqualität kann nicht als ausreichend beurteilt werden. Die steilen Flanken im Schlafzimmer zeigen den Effekt von morgendlichen Fensteröffnungen. Im Wohnzimmer wurden im Zeitintervall von 18:00 bis 7:00 Uhr Überschreitungen der 1500 ppm Grenze von erheblichem Umfang festgestellt. Bei einer weiteren Untersuchung der Luftqualität in ausschließlich fenstergelüfteten, sanierten Wohnungen in Ludwigshafen im Kernwinter 2009/2010 [Kah et al 2010] zeigte sich ein ähnliches, ebenfalls ernüchterndes Ergebnis: Der Mittelwert von fünf Wohnungen ergibt eine Überschreitung der aktuellen 1400 ppm Grenze über 70 % der Messzeit. Die Werte der Überschreitung liegen zwischen 65 und 85 %. Bei ebenfalls dort untersuchten Wohnungen mit kontrollierter Lüftung zeigten sich deutlich bessere Raumluftqualitäten.

In der hier ausgewerteten Dauermessung von 2009/2010 zu den Gebäuden in Frankfurt a.M./Tevesstraße sind die Sensoren zur Messung der Luftkonditionen (Temperatur, relative Feuchte und CO₂-Konzentration) jeweils in den Kernzonen der Wohnungen angeordnet. Dies sind immer die Wohnzimmer bzw. Wohnzimmer/Flur Kombinationen. Nach [DIN EN 13779] werden die Luftqualitäten aktuell in die vier Klassen „IDA 1“ bis „IDA 4“ eingeteilt, wobei nach der Erhöhung gegenüber der CO₂-Konzentration der Außenluft unterschieden wird. Die Bereiche der Klassifizierung sind Tabelle 19 zu entnehmen.

Tabelle 19: Allgemeine Klassifizierung der Raumluftqualität (RAL) nach [DIN EN 13779].

Kategorie	Beschreibung	Erhöhung der CO ₂ -Konzentration gegenüber der Außenluft [ppm]	
		Üblicher Bereich	Standardwert
IDA 1	Spezielle Raumluftqualität	≤ 400	350
IDA 2	Hohe Raumluftqualität	400 – 600	500
IDA 3	Mittlere Raumluftqualität	600 – 1000	800
IDA 4	Niedrige Raumluftqualität	> 1000	1200

Da die Norm die Klassifizierung nach Werten über der Außenluftkonzentration angibt, wurde die tatsächliche CO₂-Außenkonzentration am Objekt während der gesamten Messdauer ebenfalls gemessen. Einen Überblick der Messung zeigt Abbildung 63.

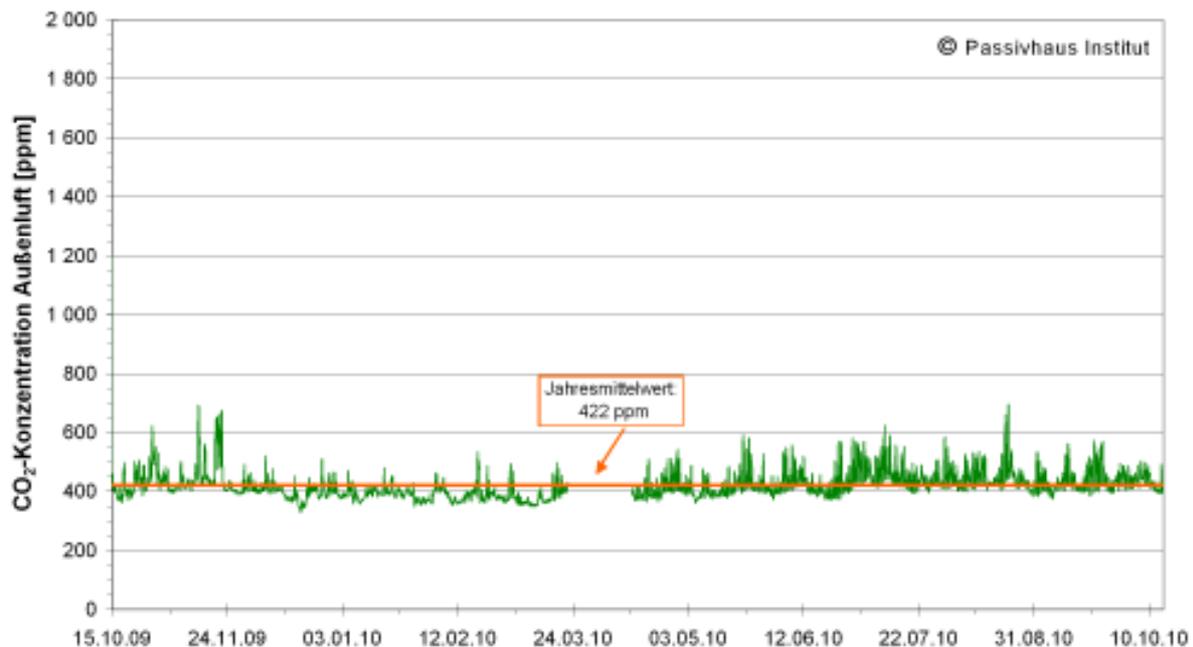


Abbildung 63: Konzentration des gemessenen Kohlendioxids in der Außenluft während eines gesamten Messjahres (15.10.2009 bis 14.10.2010) (Stundendaten).

Wie in Abbildung 63 zu sehen, gibt es erkennbare tägliche und jahreszeitliche Schwankungen in der Konzentration der Außenluft. In der Literatur [Ptak 2009] [Henninger 2005] werden als Ursache dafür insbesondere Einflüsse den Kraftfahrzeugverkehr und den Hausbrand angegeben. Aber auch die Einflüsse der Bio- und teilweise auch der Pedosphäre sind zu nennen; auch die urbane Vegetation hat einen nennenswerten Einfluss. Die Messwerte in Städten liegen generell höher als die des Umlandes. Schon vor einigen Jahren sind Messwerte in urbanen Räumen bis

600 ppm gemessen worden [Chmura et al. 2005]. Für eine städtische Lage liegen die Messwerte in der Tevesstraße damit in einem realistischen Bereich. Bei den wenigen Ausreißern könnten zeitbegrenzte, stabile Luftschichtungen ursächlich sein. Durch die bodennahe Position des Sensors ist aber auch eine Beeinflussung durch Personen nicht auszuschließen. Durch den geringen zeitlichen Einfluss der wenigen Peakwerte auf den Jahresmittelwert werden diese nicht gesondert herausgerechnet.

Der Mittelwert der CO₂-Außenkonzentration über den gesamten Jahreszeitraum ergibt sich zu 422 ppm. Dieser Wert wird als Außenkonzentration verwendet um die IDA Klassen als absolute Konzentrationen in der Raumluft zu bestimmen. Diese ergeben sich dann nach der folgenden Tabelle.

Tabelle 20: RAL Klassen der CO₂-Konzentration nach [DIN EN 13779] und der Außenkonzentrationsmessung.

Kategorie	Beschreibung	CO ₂ -Konzentration [ppm]
IDA 1	Spezielle Raumluft	≤ 822
IDA 2	Hohe Raumluftqualität	823 bis 1022
IDA 3	Mittlere Raumluftqualität	1023 bis 1422
IDA 4	Niedrige Raumluftqualität	≥ 1422

Für die nach Norm „mittlere Raumluftqualität“ sollte damit eine Grenze von 1422 ppm eingehalten werden. Die nach der Vorgängernorm DIN 1946 Teil 2 genannte Grenze von 1500 ppm ist somit noch weiter verschärft worden. Beispielhaft werden die Ergebnisse der CO₂-Konzentration in allen 15 Wohnungen in drei Einzelbildern für einen beispielhaften Winterzeitraum von vier Tagen dargestellt. Der Zeitraum vom 08. bis 11. Januar 2010 enthält ein Wochenende, bei denen ggf. durch längere Aufenthaltszeiten mit höheren Konzentrationen zu rechnen ist. Abbildung 64 zeigt die Messdaten der Wohnungen als Stundenwerte. Es wird deutlich, dass die 1422 ppm Grenze weitgehend eingehalten wird. Neben einigen kürzeren, völlig unkritischen Überschreitungen sticht eine Wohnung („O“) mit regelmäßiger, täglicher Überschreitung des Grenzwertes heraus. Zumindest während dieses beispielhaften Zeitraumes zeigt sich, dass die Nutzung dieser Wohnung (Personenzahl) und die von den Bewohnern eingestellte Luftmenge nicht gut aufeinander abgestimmt sind (Erläuterungen zu dieser Whg. im folgenden Absatz). In den restlichen Wohnungen zeigt sich ein gutes bis mittleres Raumluftqualitätsniveau. Wie beschrieben ist in anderen Untersuchungen belegt, dass bei Fensterlüftung im Mittel deutlich schlechtere Raumluftqualitäten vorliegen [Kah et al. 2010]). In Wohnung „N“ (braune Linie im mittleren Bild) kann zur dargestellten Zeit auf eine geringe Nutzung der Wohnung geschlossen werden; die Messwerte liegen meist nur gering über der Außenluftkonzentration.

Zur Analyse der auffällig hohen CO₂-Konzentrationen der einen Ausreißerwohnung „O“ wird diese noch näher betrachtet. Der Sensor im Wohnzimmer der kleinen Wohnung zeigt tagsüber regelmäßige deutlich das Ansteigen der CO₂-Konzentration im Raum. Der Zusammenhang mit der gemessenen Luftwechselrate zeigt im Beispielzeitraum deutlich die Auswirkung eines höheren Luftwechsels (Abbildung 65). Durch das Hochschalten auf einen höheren Volumenstrom (von 48 auf 91 m³/h) am 15.1.2010 um 11:00 Uhr steigt die CO₂-Konzentrationen deutlich geringer an. Es werden passable Werte um maximal 1600 ppm eingehalten. Für die diese Wohnung zeigt sich, dass der gut 0,3-fache Luftwechsel hier nicht ausreichend ist; besser wäre hier der Betrieb mit etwa 0,6-fachem Luftwechselrate. In der Norm [DIN 1946 T6] sowie im [PHPP] werden 30 m³/h/Person empfohlen. In Problemwohnungen könnte es sich daher als Lösungsansatz als durchaus sinnvoll erweisen, Luftmengen über eine CO₂-geführte Regelung einzustellen. Allerdings muss dann die Funktion des CO₂-Sensores auf Dauer regelmäßig überprüft werden.

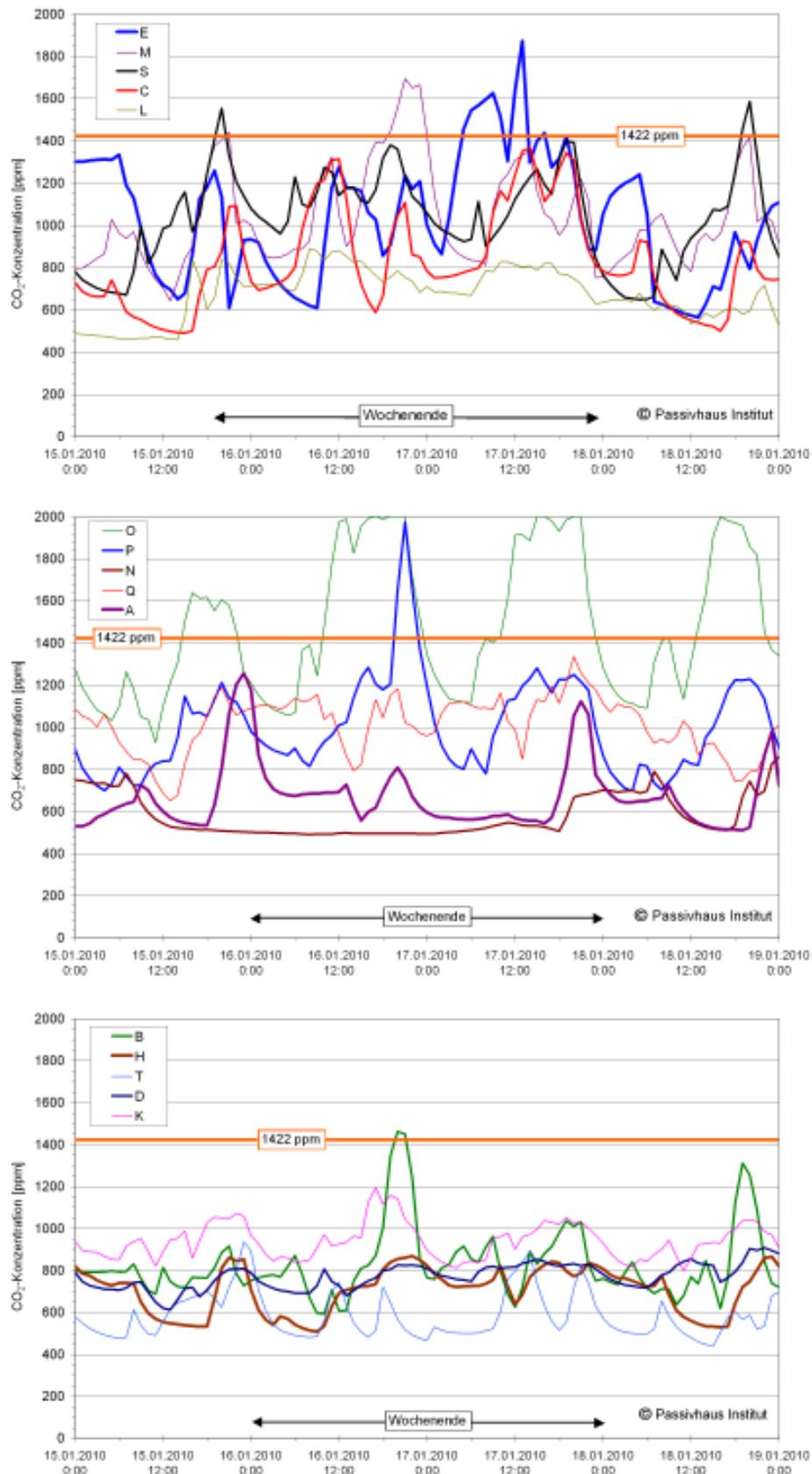


Abbildung 64: Verlauf der CO₂-Konzentration in den 15 Wohnungen an vier typischen Wintertagen 08. bis 11. Januar 2010 (der Zeitraum enthält ein Wochenende).

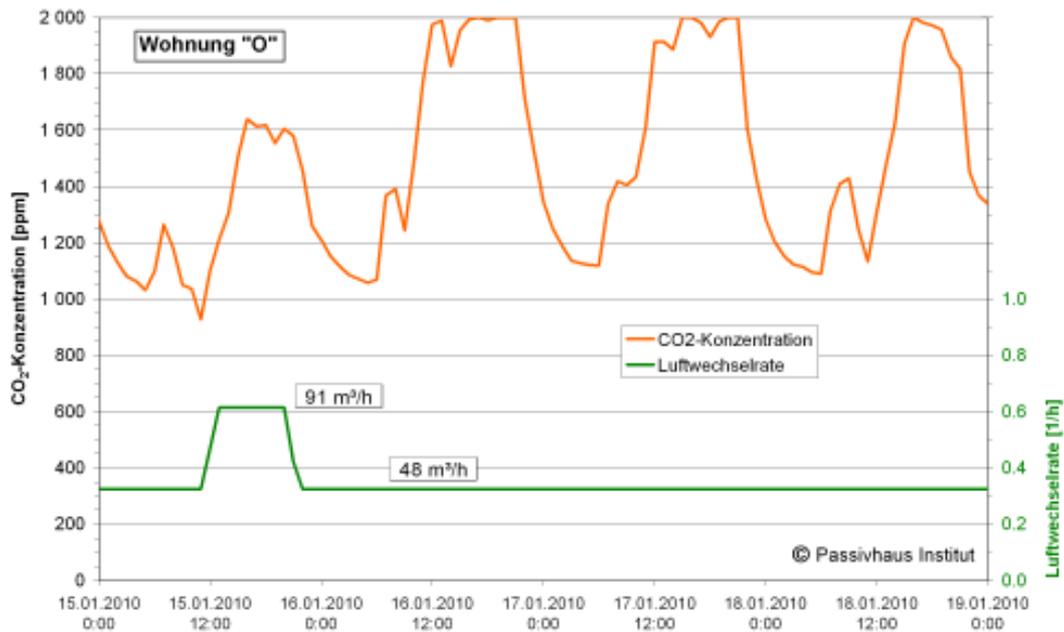


Abbildung 65: CO₂-Konzentraion und Luftwechselrate von Wohnung „O“ (höchste gemessene CO₂-Konzentrationen in Abbildung 64) im Beispielzeitraum. Hier wurde offensichtlich von den Bewohnern eine unangemessen geringe Frischluftmenge gewählt.

Beispielhaft soll für eine andere Wohnung („D“) mit durchgehend guter Luftqualität der CO₂-Konzentrationsverlauf über einen längeren Zeitraum dargestellt werden. In dieser Wohnung wurden nur selten Konzentrationen über 1000 ppm gemessen. Deutlich zeichnet sich die Urlaubszeit der Nutzer vom 13.02. bis zum 14.03.2010 mit sehr niedrigen Konzentrationen ab.

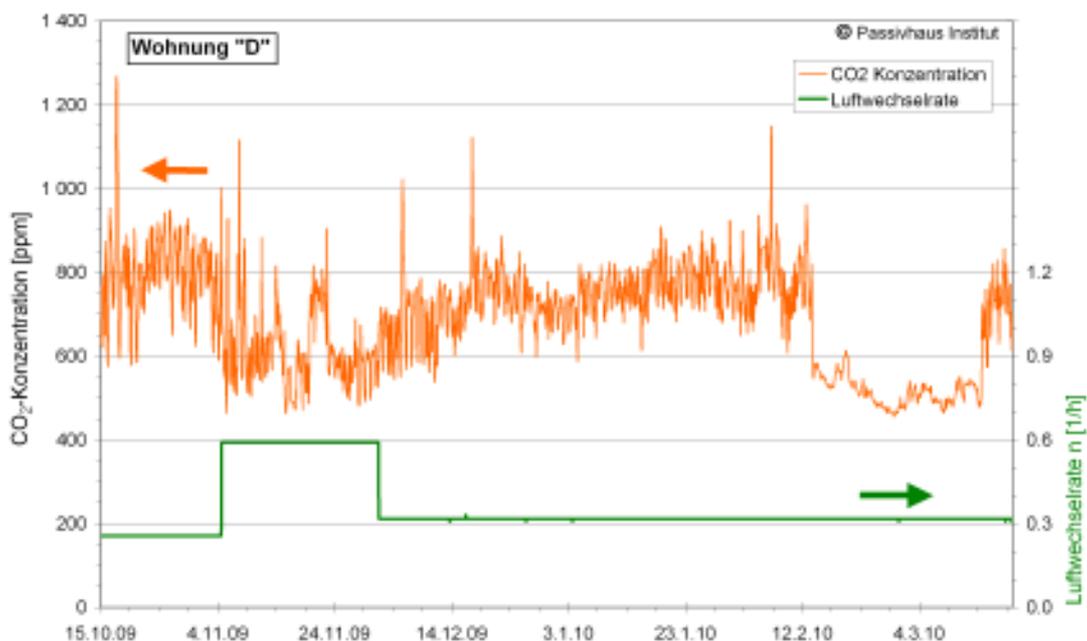


Abbildung 66: CO₂-Konzentraion und Luftwechselrate von Wohnung „D“ vom 15.10.2009 bis zum 20.03.2010.

Zur weiteren Qualifizierung der gemessenen CO₂-Konzentrationen werden die Stundenwerte jeder Wohnung absteigend sortiert dargestellt. In Abbildung 67 wird deutlich, dass zwei Wohnungen mit knapp 14 bzw. knapp 20% der Jahresstunden über der 1422 ppm Grenze deutlich herausfallen. In allen anderen Wohnungen gibt es dagegen mit maximal 3,5% nur kurzzeitige und daher unbedeutende Überschreitungen. Zu den meisten Zeiten liegen die CO₂-Konzentration im Bereich von den Luftgüteklassen IDA 1 bis IDA 3.

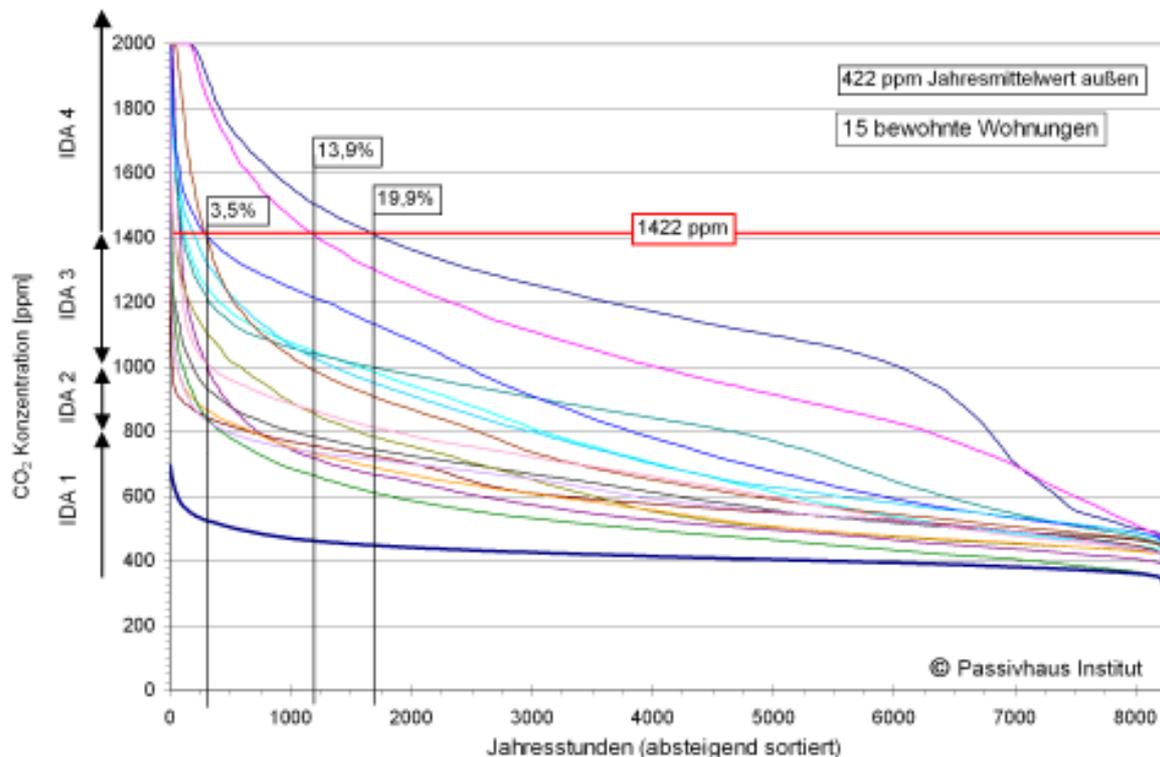


Abbildung 67: Absteigend sortierte Stundendaten der CO₂-Konzentration eines Jahres (Datenbasis: 8230 h; ohne den Zeitraum des Datenausfalls).

Von Interesse bei der Untersuchung der Raumluftqualität ist insbesondere der Winterzeitraum, bei dem die Fenster überwiegend geschlossen bleiben und dadurch – je nach Nutzung der mechanischen Lüftungsanlagen - höhere CO₂-Konzentration zu erwarten sind als im Sommer. Aus diesem Grund wurde gesondert nur der Winterzeitraum vom (15.10.2009 bis zum 30.04.2010) untersucht. Als Datenbasis liegen dabei je Wohnung 4225 Stundenwerte gemessen vor. Die CO₂-Konzentrationen wurden jeweils wieder den IDA Klassen zugeordnet und der Anteil der Klassen an den Gesamt-Winterstunden bestimmt. In Abbildung 68 sind die Ergebnisse abgebildet. Dabei wird deutlich, dass - bis auf erneut zwei Wohnungen (Whg. P und O) - nur ausnahmsweise kurzzeitige Überschreitungen der IDA 3 Klasse vorkommen. In den restlichen 13 Wohnungen kommt die Klasse „IDA 4“ mit Konzentrationen über 1422 ppm im Mittel nur in weniger als 5% vor.

Bei der Bewertung aller 15 Wohnungen gemeinsam ergibt sich, dass die Luftqualität der IDA Klassen 1 bis 3 insgesamt zu 95,4% der Winterzeit vorherrschte (siehe Tabelle 21). Ohne die beiden Ausreißerwohnungen mit der eindeutig zu gering eingestellten Luftmenge (Whg. P und O) steigt der Wert auf 98% der Gesamtzeit.

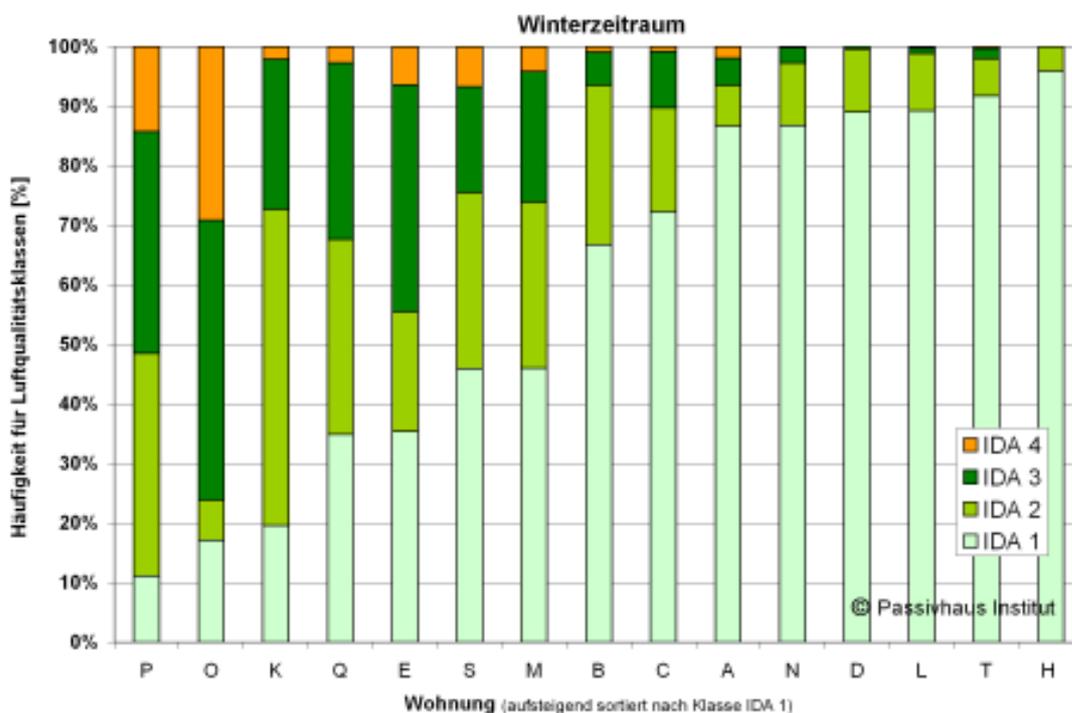


Abbildung 68: Anteil der gemessenen CO₂-Konzentration nach den Konzentrationsklassen „IDA“ in den 15 Wohnungen. Untersucht wurde der Winterzeitraum vom 15.10.2009 bis zum 30.04.2010 (gültige Daten für insgesamt 4225 Stunden). Die Wohnungen sind aufsteigend nach dem Anteil der Konzentrationsklasse „IDA 1“ sortiert.

Tabelle 21: Häufigkeit der IDA-Klassen nach [DIN EN 13779] im Winterzeitraum vom 15.10.2009 bis zum 30.04.2010 (gültige Daten für insgesamt 4225 Stunden) als Mittelwert aller 15 Wohnungen.

Kategorie	Beschreibung	Mittelwerte Häufigkeit IDA Klassen 1 bis 4
IDA 1	Spezielle Raumluf	59,3 %
IDA 2	Hohe Raumlufqualität	20,0 %
IDA 3	Mittlere Raumlufqualität	16,1 %
IDA 4	Niedrige Raumlufqualität	4,6 %

Die CO₂-Konzentrationen zeigen deutlich, dass in den Wohnungen gute bis sehr gute Raumlufqualitäten und nur selten mittlere Raumlufqualitäten vorherrschen.

Der Zusammenhang zwischen der Luftwechselrate und der CO₂-Konzentration ist insbesondere abhängig von den CO₂-Quellen und daher der Bewohneranzahl. Bei ansteigendem CO₂-Gehalt der Luft, bzw. durch den Bewohner subjektiv empfunden, „schlechter“ Luftqualität kann dieser die Anlage auf eine höhere Stufe einstellen. Je nach Nutzerverhalten wird von dieser Regelung mehr oder weniger stark Gebrauch gemacht (siehe Abschnitt 4.5.2).

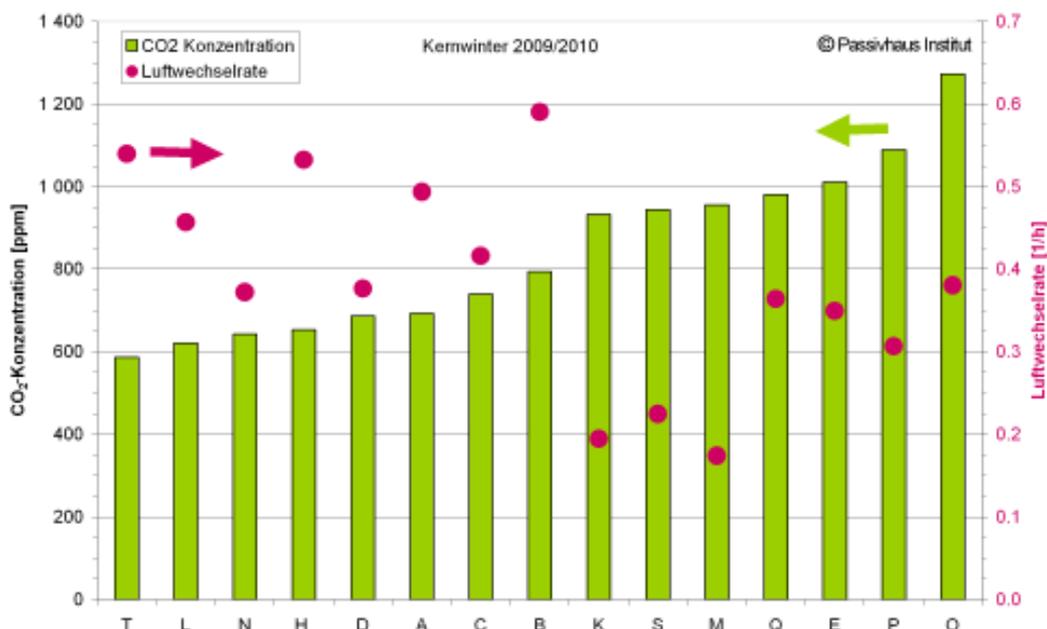


Abbildung 69: Mittlere CO₂-Konzentrationen und Luftwechselraten im Kernwinter 2009/2010.

4.6.2 Luftfechtigkeiten

Die Kombisensoren in den 15 Wohnungen messen auch die relative Raumluftfeuchte in den Wohnungen. Dabei steht insbesondere der Winterzeitraum im Fokus. Beim Lüften mit zu großen Luftmengen wird die Luft tendenziell zu trocken; wird zu wenig gelüftet, kann es zu hohen Luftfeuchtigkeitswerten kommen. Daher ist die Luftfeuchtigkeit in der Wohnung besonders beim „klassischen Passivhauskonzept“ mit der Beheizung über die Lüftungsanlage ein wichtiger zu prüfender Parameter. In der Vergangenheit gab es vereinzelte Projekte mit zu hoch projektierten Luftmengen und dann entsprechend niedriger Luftfeuchtigkeit. Im Sommer und der Übergangszeit stellen sich in der Regel höhere relative Feuchtewerte ein, da die wärme Außenluft deutlich mehr absolute Feuchtigkeit enthält als die kalte Außenluft im Winter.

Der Verlauf der Messdaten über das gesamte Jahr ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Dabei ist der Winter/Sommer-Unterschied deutlich zu erkennen.

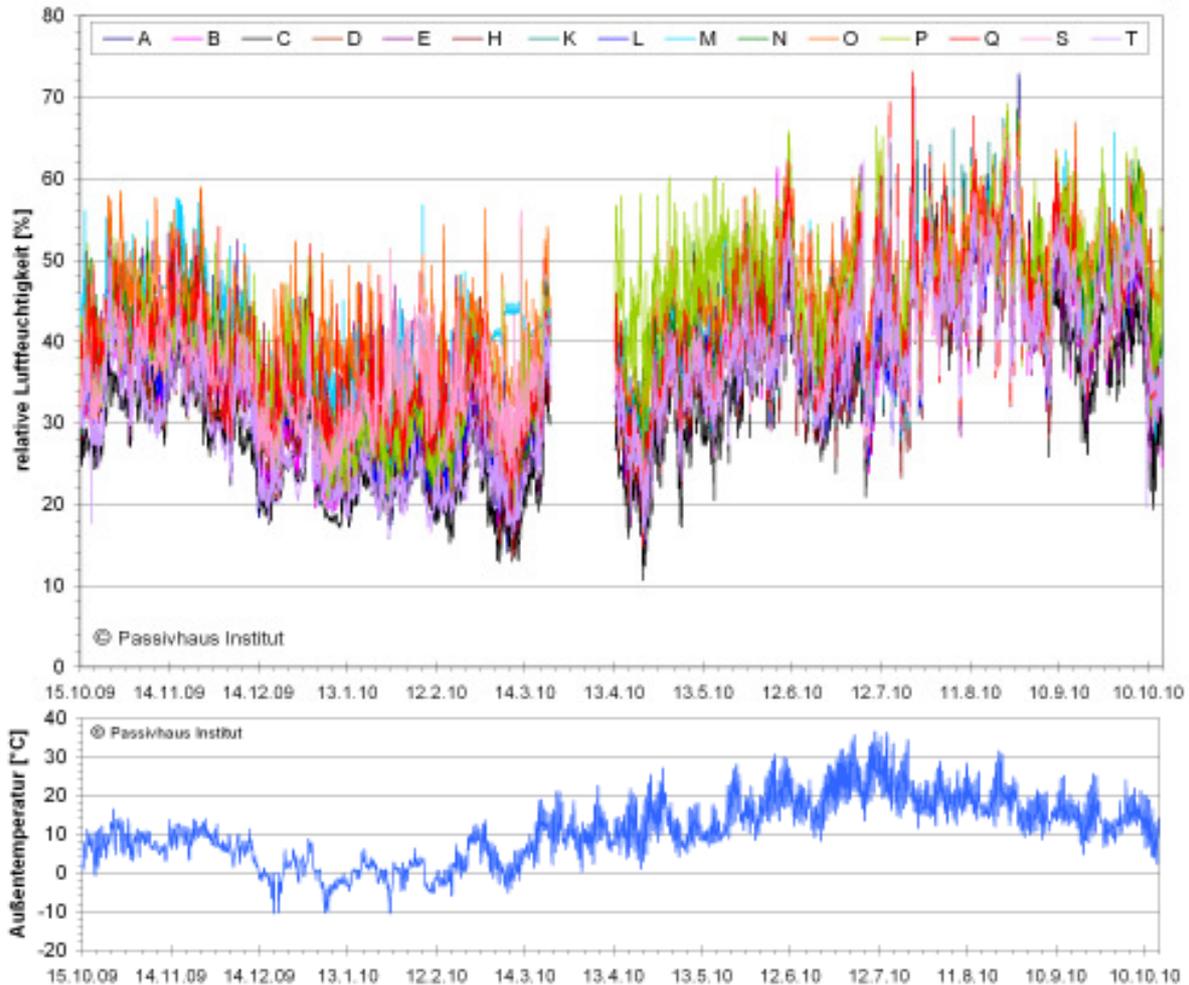


Abbildung 70: Verlauf der relative Luftfeuchte in den 15 Wohnungen im Gesamtzeitraum vom 15.10.2009 bis zum 14.10.2010 (Stundendaten). Darunter ist der Verlauf der Außentemperatur im gleichen Zeitraum dargestellt.

Es ist erkennbar, dass es im Winter Zeiträume gibt, bei denen die Messwerte in bestimmten Wohnungen zeitweise deutlich unter 20 % absinken. Verglichen mit anderen Messungen in Passivhäusern (z.B. [Peper/Feist 2008] und [Peper/Feist/Kah 2001]) handelt es sich damit in diesen Wohnungen um vergleichsweise niedrige Werte. Für den bereits im Abschnitt der CO₂ Untersuchung verwendeten beispielhaften Zeitausschnitt im Kernwinter (vgl. Abbildung 64) sollen auch die Raumluftfeuchten genauer untersucht werden.

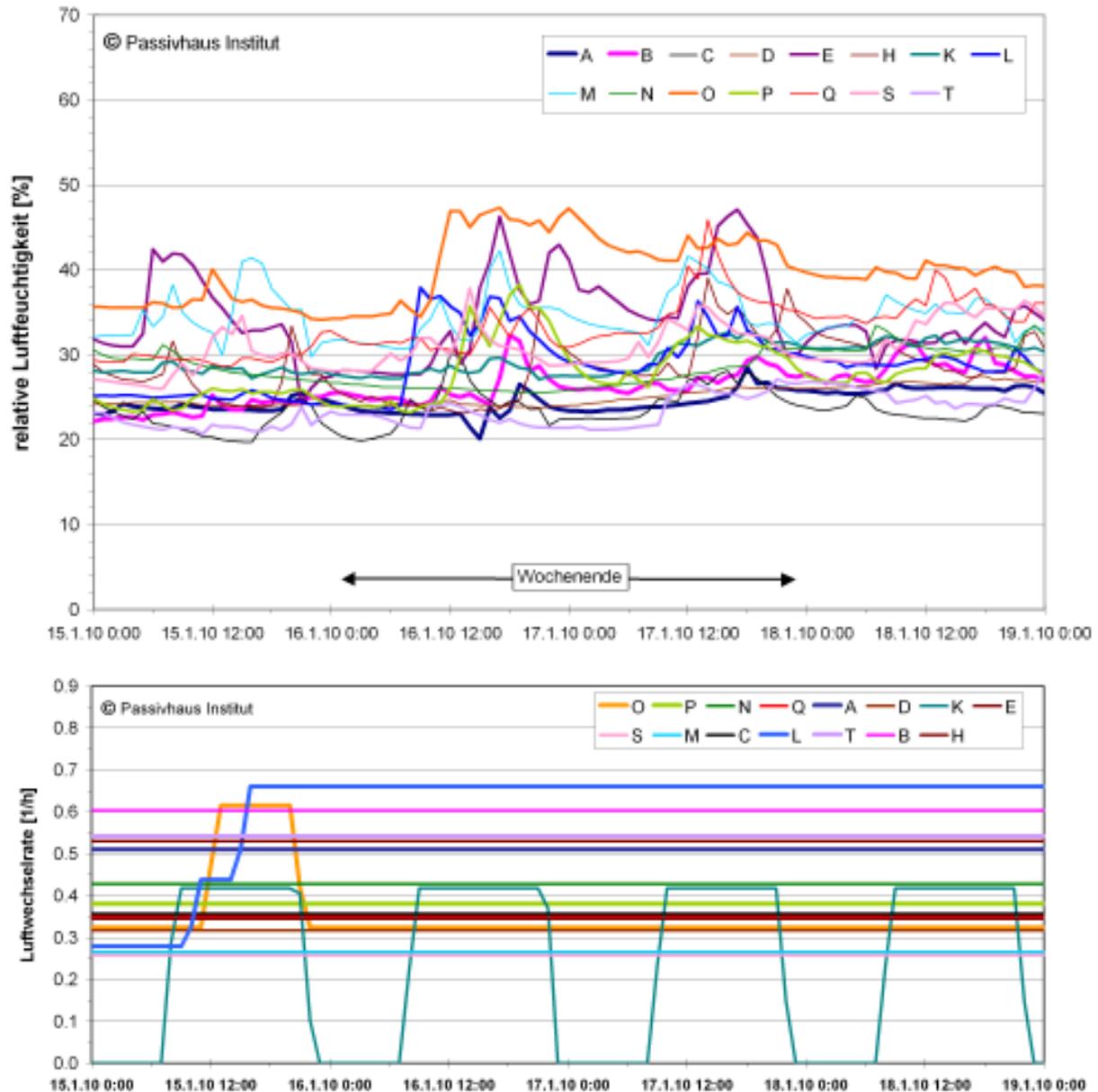


Abbildung 71: Detail aus Abbildung 70 der relativen Raumluftfeuchten für die beispielhaften Tage, welche auch bei der Analyse der CO₂-Konzentrationen verwendet wurde (Abschnitt 4.6.1) (Stundenwerte). Zusätzlich sind im unteren Teil die entsprechenden Luftwechselraten angegeben.

Im unteren Teil von Abbildung 71 wird zunächst deutlich, dass im dargestellten Zeitraum der vier Tage in nur drei Wohnungen überhaupt die Luftmenge verstellt wurde. Dabei ist insbesondere die Wohnung „K“ auffällig; hier wird - wie erwähnt – unkonventionell in jeder Nacht die Anlage komplett abgeschaltet. Die Wohnungen mit den niedrigsten relativen Luftfeuchten in diesem Zeitfenster sind die Wohnungen „C“, „T“, „A“ und „D“ mit Mittelwerten zwischen 23,4 bis 25,1 % rF. Dazu ist als weitere wichtige Information von Interesse, dass es sich bei **drei der vier Wohnungen** um Haushalte mit **nur einer Person** handelt. Zwei davon sind nach eigenen Angaben nur sehr selten zu Hause. Für diese Haushalte ist daher zu vermuten, dass es entsprechend nur sehr geringe Feuchtequellen (Duschen, Kochen,...) gibt. In den Ab-

wesendheitszeiten sind die Feuchtwerte nicht von Interesse; dies kann hier aber nicht differenziert werden. Zusätzlich ist eine der Wohnungen mit ca. 85 m² Fläche für nur einen Bewohner verhältnismäßig groß; der geringe Feuchteintrag einer Person verteilt sich dort auf das größere Luftvolumen, was zu niedrigeren Luftfeuchten führt. Nur eine der vier Wohnungen wird von 2 Personen bewohnt. Die CO₂-Konzentrationen dieser Wohnungen im gleichen Zeitraum zeigen sehr niedrige Konzentrationen (vgl. auch Abbildung 64 auf Seite 87). Die mittleren Werte der vier Wohnungen sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Aufgrund der Daten wird deutlich, dass die Luftwechselrate in allen vier Wohnungen maßvoll verringert werden könnte, ohne dabei schlechte Luftqualität zu erhalten. Dann würden die Werte der relativen Raumlufffeuchte merklich ansteigen.

Tabelle 22: Mittlere relative Luftfeuchte und CO₂-Konzentration im Zeitraum vom 15.01. bis einschließlich 18.01.2010 in den vier Wohnungen mit den niedrigsten relativen Luftfeuchtigkeiten in diesem Zeitraum (vgl. Abbildung 71).

	Relativen Luftfeuchtigkeit	CO₂- Konzentration
Whg.	[%]	[ppm]
C	23,4	827
T	23,4	585
A	24,5	671
D	25,1	772

Von Interesse sind auch bei der relativen Luftfeuchtigkeit wieder die Mittelwerte aller 15 Wohnungen während der Winter- bzw. Kernwinterperiode. Diese sind in Abbildung 72 dargestellt und zeigen eine Bandbreite zwischen 25 und 40 % rF. Als Mittelwert ergibt sich von November 2009 bis Ende Februar 2010 der **relativ niedrige aber noch passable Wert von 32,7 % rF**. Dort sind natürlich auch die oben beschriebenen Wohnungen mit den niedrigen Belegungsdichten und relativ hohen Luftwechselraten enthalten.

In den 15 Wohnungen wurden - wie bereits im Abschnitt 4.2 dargestellt – relativ hohe winterliche Raumtemperaturen realisiert (22,3 °C im Kernwinter als Mittelwert). Daher soll für die vier Wohnungen untersucht werden, in wie weit die höhere Raumtemperatur die relativ niedrigen Raumlufffeuchten mit verursacht. Die mittleren Raumtemperaturen für die vier Wohnungen in dem Zeitraum zeigen Werte zwischen 21,4 und 25,0 °C (siehe Tabelle 23). Rechnet man die relativen Feuchten bei den realen Raumtemperaturen auf Standardbedingungen von 20 °C um, erhöhen sich diese entsprechend. Die Werte liegen dann zwischen **26,7 und 31,6 % rF**. Es zeigt sich also, dass die relativ hohen Raumtemperaturen einen deutlichen Einfluss auf die relativ niedrigen Feuchtwerte haben. Aus diesem Grund sind in Abbildung 72 zusätzlich die Mittelwerte der absoluten Raumlufffeuchte dargestellt; deren Mittelwert beträgt im Kernwinter 5,5 g/kg (entspricht bei 20 °C 38 % rF).

Tabelle 23: Zugehörige mittlere Raumlufttemperaturen und umgerechnete relative Feuchten bei 20°C zu den Daten aus Tabelle 22 (Zeitraum 15.01. bis einschließlich 18.01.2010).

	Relativen Luftfeuchtigkeit	Raumtemperatur	Rel. Feuchte bei 20°C	CO ₂ -Konzentration
Whg.	[%]	[°C]	[%]	[ppm]
C	23,4	25,0	31,6	827
T	23,4	23,0	28,1	585
A	24,5	21,4	26,7	671
D	25,1	22,2	28,8	772

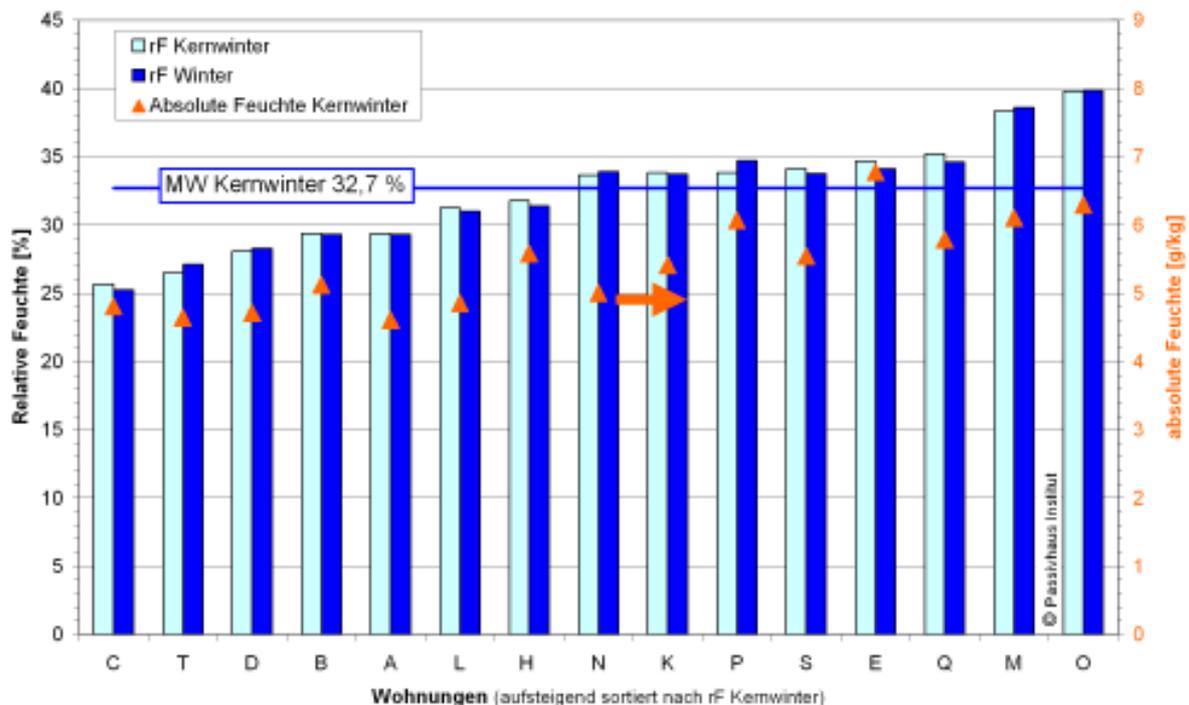


Abbildung 72: Mittelwerte der relativen Raumluftfeuchte im Winter und Kernwinter 2009/2010 in den 15 Wohnungen und auf der rechten Achse zusätzlich die mittleren absoluten Feuchtegehalte der Luft.

Beim Zusammenhang Luftwechselrate und relative Luftfeuchte gibt es diverse unabhängige Einflussfaktoren; insbesondere die Personenzahl und andere Feuchtequellen der Wohnung (Duschen, Kochen, Pflanzen, Trocknen). In Abbildung 73 sind beide Größen für den Kernwinter gemeinsam dargestellt. Die Korrelation der beiden ist mit 0,37 auch nur relativ schwach ausgeprägt.

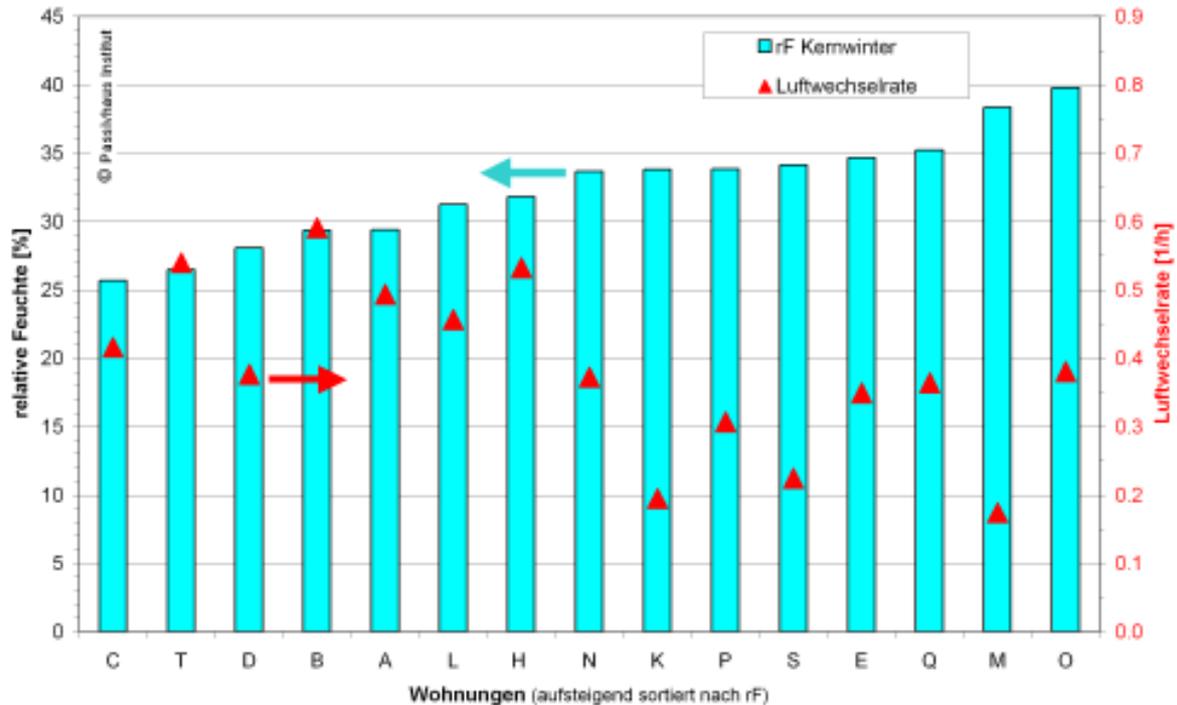


Abbildung 73: Mittelwerte der relativen Raumluftfeuchte und mittlere Luftwechselraten im Kernwinter 2009/2010 in den 15 Wohnungen.

4.7 Wärmerückgewinnungsgrad Lüftung

Um genauere Aussagen zu den energetischen Kenngrößen der eingesetzten Lüftungsgeräte machen zu können, wurden zwei Geräte (Nachfolger des Geräts Vallox KWL 90 D, gleiche Typenbezeichnung mit veränderten Ventilatoren) in der Feldmessung untersucht. Dazu sind am 30.11. und 14.12.2009 in zwei Wohnungen jeweils vier Sensoren zur Messung der vier Lufttemperaturen (Außen-, Fort-, Zu- und Abluft) direkt in den Kanälen über den Geräten montiert worden. Bei den Sensoren handelte es sich um Temperatur-Feuchte-Kombisensoren, daher konnte jeweils auch die relative Feuchte gemessen werden. Dadurch können auch die Zeiträume festgestellt werden, bei denen Kondensat auftritt. Die Sensoren eines Gerätes sind jeweils mit einem stand-alone Datenlogger zur Aufzeichnung der Messung verbunden. Die Messung wurden in beiden Wohnungen bis zum 15.03.2010 im 1 bzw. 2 Minuten-Raster aufgezeichnet.



Abbildung 74: Temperatur-Feuchte-Sensoren vor dem Einbau mit Manschette zum luftdichten Einbau im Lüftungsrohr (Bild links). Montierte Kombisensoren und Datenlogger über dem Lüftungsgerät einer Wohnung (Bild rechts).

Tabelle 24: Bei der temporären Zusatzmessung verwendete Messgeräte

	Gerät/Sensor	Typ	Spezifikation
1	Datenlogger	ALMEMO 2690-8 Fa. Ahlborn	5 galvanisch getrennte Messeingänge
2	Sensoren	Temp.-Feuchte Kombisensor im Kunststoffrohr mit Metallgitter- filter	Temperatur: NTC Typ N Genauigkeit -20 bis 0 °C: $\pm 0,4$ K 0 bis 70 °C: $\pm 0,1$ °C Feuchte: Kapazitiver Sensor Genauigkeit ± 2 % ($< 90\%$ rF) bei Nenntemperatur (25 °C ± 3 K)

Die Frostschutzschaltung der beiden Geräte schaltet den jeweiligen Außen-Zuluft-Ventilator bei Außenlufttemperaturen im Gerät unter Null Grad zeitweise aus. Damit soll das Einfrieren des Wärmeübertragers verhindert werden. Es handelt sich um den standardmäßigen Auslieferungszustand der Geräte. Dabei ist zu bedenken, dass während der Abschaltzeiten kein ausreichender Zuluftvolumenstrom vorhanden ist. Dies wirkt sich auf die Raumluftqualität aus und es verhindert vor allem die Beheizung über die Zuluft, gerade in der kältesten Zeit. Daher sollte nach Empfehlung des PHI die Frostfreihaltung über das in jedem Gerät vorhandene elektrische Frostschutzregister erfolgen. Bei den restlichen Geräten des Gebäudes wurde dies ausgeführt. Da die beiden Geräte nachträglich ausgetauscht wurden, hat bei der Montage niemand diese Funktion deaktiviert und das elektrische Frostschutzregister aktiviert. Aus den beiden betroffenen Wohnungen sind allerdings keine Klagen über nicht ausreichende Beheizung bekannt. Das ist eine weitere Bestätigung für die bereits mehrfach auch an anderen Orten festgestellte hohe Robustheit des Passivhauskonzeptes gegenüber Fehlern, wenn diese sich zumindest in gewissen Grenzen halten.

Bei den untersuchten Geräten wurde festgestellt, dass in den Wohnungen eine Disbalance der Volumenströme besteht. Aufgrund dieser verlässt bei Außenluftüberschuss ein Teil der warmen Raumluft die Wohnung durch Restleckagen in der Gebäudehülle, ohne dass Wärme zurückgewonnen werden kann. Bei Fortluftüberschuss verhält es sich entgegengesetzt: durch den Unterdruck in der Wohnung wird ein Teil der Zuluft direkt durch Restleckagen in der Gebäudehülle angesaugt. Auch in diesem Fall wird dieser Luftstrom nicht über die Wärmerückgewinnung geführt. Diese Teilluftvolumenströme erhöhen in beiden Fällen den Heizwärmeverbrauch der Wohnung.

Bei der Berechnung des effektiven Wärmebereitstellungsgrades eines Lüftungskonzeptes für die Energiebilanz der Wohnung muss die Disbalance der Lüftungsanlage daher berücksichtigt werden (induzierte Ex- und Infiltration). Die Lüftungswärmeverluste können mithilfe der Luftmassenströme und der zugehörigen Temperaturdifferenz mit und ohne Wärmerückgewinnung bestimmt werden. Bei der Berechnung mit Wärmerückgewinnung muss zusätzlich auch noch der elektrische Stromverbrauch der Lüftungsanlage berücksichtigt werden, der letztlich als freie Wärme innerhalb der thermischen Hülle verfügbar wird. Zur Berechnung des Lüftungswärmeverlust Einspargrades ($L_{\text{Einspargrad}}$) für eine Wohnung werden die berechneten Lüftungsverlustleistungen über die gesamte Messzeit aufsummiert und zueinander ins Verhältnis gesetzt:

$$L_{\text{Einspargrad}} = \frac{(\sum Q_{\text{ohneWRG}} - \sum Q_{\text{mitWRG}})}{\sum Q_{\text{ohneWRG}}}$$

Dieser Wert ist nicht zu verwechseln mit dem effektiven Wärmebereitstellungsgrades $\eta_{\text{WRG, t, eff}}$ eines Lüftungsgerätes, da beim $L_{\text{Einspargrad}}$ die gesamten erzwungenen Ex- und Infiltrationen mit berücksichtigt werden.

Bei diesem Vorgehen wurden die Zeiträume bei denen der Außen-Zuluft-Ventilator zeitweise abgeschaltet wurde („Frostschuttschaltung“) nicht berücksichtigt. Es ergab sich damit ein Lüftungswärmeverlust Einspargrad von **67 %**. Dabei ist darauf hin zu weisen, dass dieser relativ niedrige Wert zustande kommt, da

- a) eine relativ hohe Disbalance vorliegt (ca. 11 %) und
- b) die Fortlufttemperatur deutlich angehoben wird, da das Heizregister (ungedämmt) über dem Lüftungsgerät den kleinen Lüftungsverschlag und damit die Ablufttemperatur (ungedämmtes Wickelfalzrohr) vor dem Gerät erwärmt.

Bei der Auswertung der Messung wurde beobachtet, dass im Lauf der 3,5 Monate dauernden Messperiode der Lüftungswärmeverlust Einspargrad deutlich abgesunken ist. Der genaue Grund dafür ist nicht bekannt. Im etwa ersten Monat der Messung (08.12.2009 bis 02.01.2010) ist der Lüftungswärmeverlust Einspargrad relativ gleichbleibend. Wird wieder der Zeitraum der Abschaltung des Außen-Zuluft-Ventilators durch die Regelung (Frostschutz) (17. bis 22.12.2010) nicht berücksichtigt, ergibt sich ein deutlich höherer Lüftungswärmeverlust Einspargrad von im Mittel immerhin **77 %**.

Diese Werte der Feldmessung berücksichtigen sowohl den Einfluss von Disbalance und andere reale Einflüsse (Erwärmung der Zu- und damit auch der Fortluft durch das ungedämmte Heizregister) um Aussagen zur Gebäudeenergiebilanz machen zu können. Sie können daher nicht direkt verglichen werden mit den Bedingungen und Ergebnissen von Prüfstandsmessungen. Bei einer älteren Prüfstandsmessung des Vorgängermodells (auch Vallox KWL 90 D) ergab sich ein $\eta_{\text{WRG, t, eff}}$ von 84 %.

Als Ursache für das beschriebene Absinken des berechneten Lüftungswärmeverlust Einspargrad über die Monate kann das Absinken des Abluft-Fortluftvolumenstroms vermutet werden. Es liegen deutlich zu hohe Unterschiede der Volumenströme vor (Disbalance > 10%). Wird mittels der Messdaten zurückgerechnet, müssen sich zeitweise Disbalancen von deutlich über 20 % eingestellt haben. Wie beschrieben erzwingt der in der Wohnung vorhandene Außenluftüberschuss (Überdruck) eine Exfiltration der Raumluft über Restleckagen in der Gebäudehülle. Dieser Teil der warmen Raumluft entweicht direkt über die Gebäudehülle - komplett ohne Wärmerückgewinnung! Dadurch erhöht sich der Energieverbrauch der Wohnung in relevanter Größenordnung.

Die Messungen des zweiten Gerätes zeigte vom Beginn an eine noch deutlichere Disbalance der Luftvolumenströme. Für den optimalen Betrieb hätte dieses Gerät durch den Wartungsdienst besser eingeregelt werden müssen. Hier ergibt sich ein Lüftungswärmeverlust Einspargrad in der Anfangszeit von im Mittel 59 %.

Es bleibt auf jeden Fall festzuhalten, dass eine **automatisierte Massenstrombalance** für solche Geräte dringend angeraten ist. Der Einfluss auf den Wärmebereitstellungsgrad ist sehr groß und wird häufig unterschätzt. Dem hier beobachteten Absinken des Wärmebereitstellungsgrades während des Betriebs durch z.B. Filterverschmutzung muss entgegengewirkt werden. Dringend angeraten ist auch die erwähnte Umstellung der realisierten Frostschutzschaltung auf die vorhandenen elektrischen Vorheizregister. Außerdem ist auch unbedingt zu empfehlen, die Heizregister in solchen Anlagen mit Wärmedämmung auszurüsten. Mit diesen Maßnahmen ließe sich der auf dem Prüfstand gemessene Wärmebereitstellungsgrad auch im praktischen Einsatz näher kommen.

5 Energiebilanzen

Die kompletten Energiebilanzen des dritten Bilanzjahres werden in diesem Abschnitt durch Zusammenführung der energetischen Messdaten aufgestellt. Es wird zunächst die komplette Wärmeseite bilanziert, dann folgen die Gesamtbilanzen der End- und der Primärenergie sowie ein Vergleich mit den Anforderungen nach der EnEV.

5.1 Endenergie Wärme

Für den 4er Block ergibt sich ein gesamter spezifischer Energiebezug von 54,6 kWh/(m²a), der sich aus 47,0 kWh/(m²a) Gasbezug und 7,6 kWh/(m²a) Solarwärmeertrag zusammensetzt. Die Aufteilung der Wärmeentnahme nach den unterschiedlichen Verbrauchsgruppen zeigt Abbildung 75: Insgesamt werden 69 % der eingesetzten Wärme „direkt“ verbraucht. Die restlichen 31 % dienen indirekt als Heizung (Verteilung Heizung nutzbar, Verteilung Warmwasser), dem Komfort schnell Warmwasser zu erhalten (Zirkulation) oder stellen nicht nutzbare Verluste dar (Speicherverlust, Wärmeabgabe der Rohrleitungen außerhalb der thermischen Hülle). Die Sommerheizung wird dabei auch als unbeabsichtigt und daher „indirekter“ Verbrauch berücksichtigt. Den größten Anteil bei den „indirekten“ Verbrauchern stellen mit 13 % die Zirkulationswärmeverluste dar. Die beiden Verbrauchssektoren Heizung und Warmwasser verfügen über eine ähnliche Größenordnung. Damit sind die Messdaten, mit kleineren Verschiebungen, ähnlich den aus der vorherigen Untersuchung (01.05.2007 bis 30.04.2008).

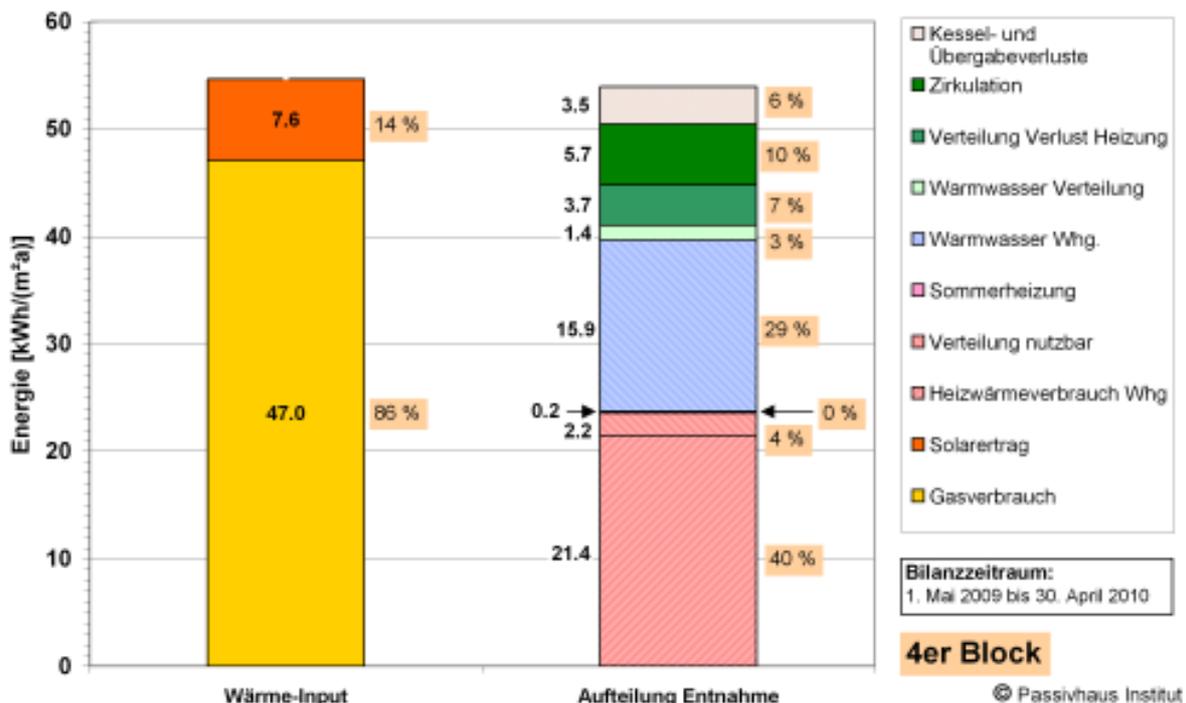


Abbildung 75: Energiebilanz der gesamten Wärmeseite des 4er Blocks im dritten Bilanzjahr.

Ein ähnliches Bild, mit deutlich geringeren Solarertrag, ergibt sich erneut für den 6er Block (Abbildung 76). Hier ist unverändert 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 („Warmwasser Verteilung“ ist damit darin enthalten).

Die Aufteilung fällt auf der Entnahmeseite etwas anders aus als im 4er Block. Die Kessel- und Übergabeverluste sind etwas höher, da eine größere und verzweigtere Anlagentechnik vorhanden ist.

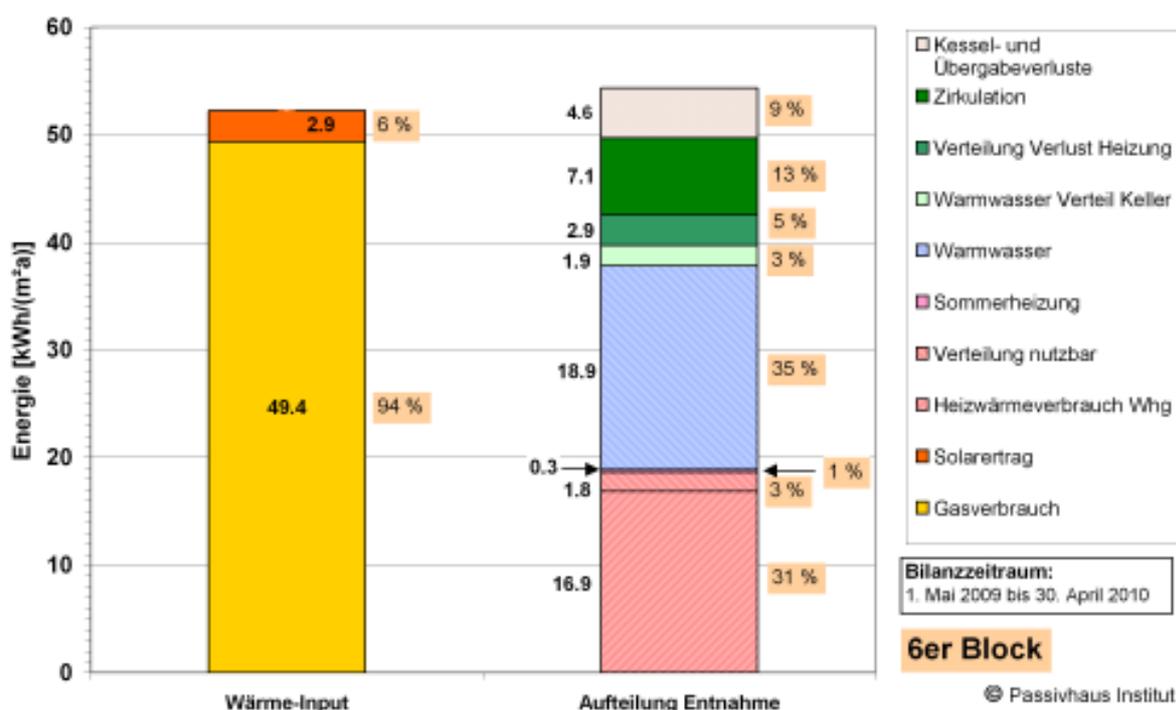


Abbildung 76: Energiebilanz der gesamten Wärmeseite des 6er Blocks im dritten Bilanzjahr.

Mit diesen Messergebnissen ist der niedrige, berechnete Energiebedarf nach den ex-ante Berechnungen mit PHPP [Kaufmann et al. 2009] auch als realer Verbrauch durch dieses Monitoring für das dritte Bilanzjahr nachgewiesen.

5.2 Gesamte End- und Primärenergie

Wie bei der Auswertung in [Peper et al 2009] werden die Ergebnisse der nicht erneuerbaren Endenergieverbräuche in diesem Abschnitt bilanziert und primär-energetisch bewertet. Die gesamte Zusammenstellung erfolgt aufgrund der eingeschränkten Messtiefe im 6er Block nur für den 4er Block.

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 83,3 kWh/(m²a)**.

Damit ist er fast unverändert gegenüber der vorausgehenden Untersuchung (83,6 kWh/(m²a)). Da der Gasverbrauch für Warmwasser und Heizung gemeinsam dargestellt sind, stellen diese den größten Einzelposten (56%). Dann folgt der Haushaltsstrom (inkl. Lüftungsstrom) mit einem Anteil von 40 %. Das Ergebnis ist in Abbildung 77 dargestellt.

Entscheidend für die ökologische Bewertung eines Gebäudes ist der Einsatz der Primärenergie. Diese Höhe ist ein Maß für die Umweltbelastungen durch den Betrieb des Gebäudes und bewertet die Einsparung gegenüber herkömmlichen Gebäuden. Aus diesem Grund werden die jeweiligen Endenergieverbräuche des Gebäudes mit sog. Primärenergiefaktoren bewertet. Diese berücksichtigen auch die Herstellungsenergie der vorgelagerten Prozesskette der unterschiedlichen Energieträger. Nach [Gemis] beträgt der Primärenergiefaktor für Erdgas 1,1 und für den deutschen Strommix 2,6 kWh_{Pri}/kWh_{End}. In der vorausgehenden Untersuchung war der PE-Faktor für Strom noch mit 2,7 kWh_{Pri}/kWh_{End} angesetzt.

Werden die Endenergieverbräuche mit den genannten Primärenergiefaktoren bewertet, ergibt sich für das Gebäude ein **Primärenergiewert von 146,0 kWh/(m²a)**. Es muss beachtet werden, dass dieser Primärenergieverbrauch alle Energieanwendungen des Gebäudes (eben insbesondere auch den Haushaltsstrom) enthält. Für eine Gebäudesanierung und tatsächliche Messwerte ist dies ein sehr gutes Ergebnis. Bei Passivhaus-Neubauten ergeben sich ähnliche End- und Primärenergiewerte. Mit einem Anteil von 60 % sind die Haushaltsstromverbräuche dabei dominant. An der Bilanz ist erkennbar, dass aufgrund der sehr hochwertigen Sanierung alle weitere Bemühungen auf der Reduktion der Stromverbräuche gelegt werden sollten. Dies gilt für Sanierungen wie für Neubauten gleichermaßen.

Der Einsatz der erneuerbaren Energie als **Solarwärme** ist in der Bilanz nur indirekt berücksichtigt. Die thermische Solaranlage auf dem Gebäudedach reduziert den Einsatz des nichtregenerativen Energieträgers Erdgas. Betrachtet man den Solarertrag gesondert muss er primärenergetisch mit dem Faktor 1,1 bewertet werden (Erdgas-substitution). Es ergibt sich für das dritte vollständige Bilanzjahr für den 4er Block ein Wert von 8,4 kWh/(m²a) Solarwärme.

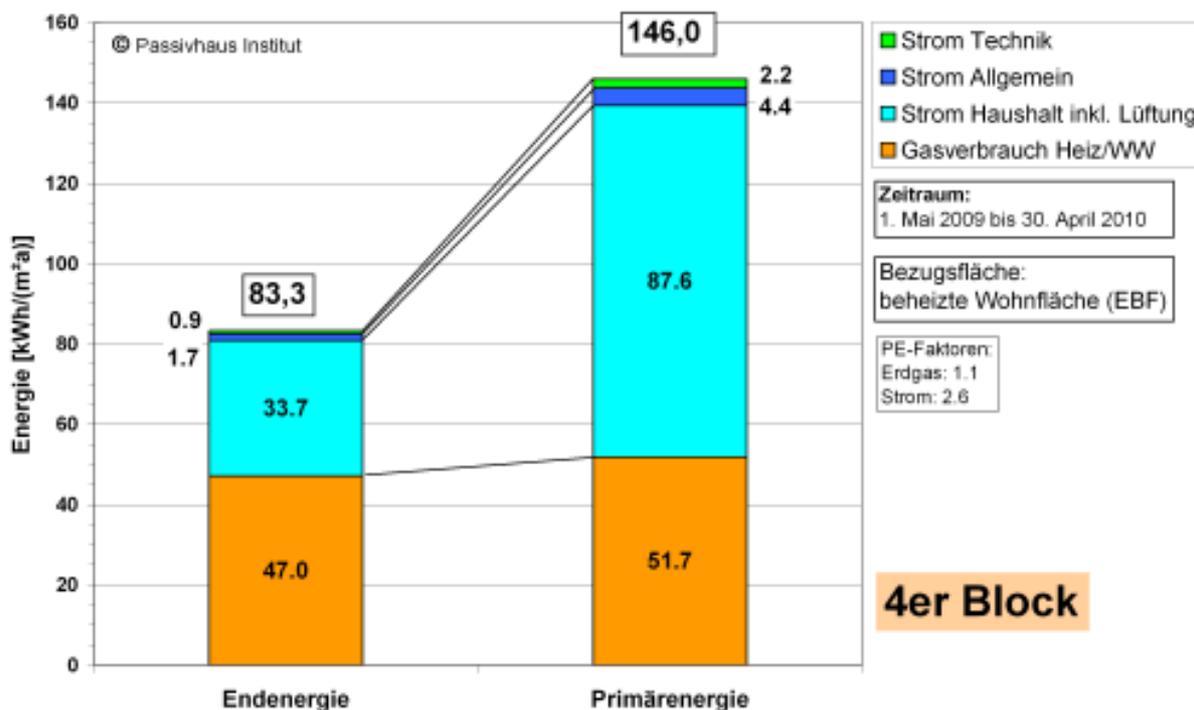


Abbildung 77: Gesamter End- und Primärenergieverbrauch des 4er Blocks im dritten Bilanzjahr (Bezugsfläche: Beheizte Wohnfläche EBF).

5.2.1 Primärenergie Heizung, Warmwasser und Technikstrom

Anders als bei der bisherigen Betrachtung ALLER Energieströme in dieser Untersuchung betreffen die gesetzlichen Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) nur die Wärmeseite einschließlich der Haustechnik. Der gesamte Haushaltsstrom bleibt dabei unberücksichtigt. Insbesondere bei energieeffizienten Gebäuden ist diese Beschränkung nicht sinnvoll. Für den Vergleich mit den Anforderungen der EnEV wurde dieser Wert hier aber trotzdem ermittelt.

Für den 4er Block ergibt sich als Summe der gemessenen Endenergie Heizung, Warmwasserbereitung und Technikstrom (Heizung, Lüftung) 51,0 kWh/(m²a). Der zugehörige Primärenergieverbrauch – berechnet mit den weiter oben genannten Primärenergiefaktoren nach [Gemis] - beträgt für den 4er Block **62,0 kWh/(m²a)**. Dabei liegt hier weiterhin - anderes als in der EnEV - die Energiebezugsfläche EBF (entspricht der beheizte Wohnfläche) zu Grunde.

Zum Vergleich der gemessenen Primärenergieverbräuche nach dem Verfahren der EnEV müssen die Verbräuche auf die deutlich größere – theoretisch ermittelte – Gebäudenutzfläche A_N (1734 m²) bezogen werden (bei der Betrachtung wurde die eine nicht zentral versorgte Wohnung herausgerechnet). A_N wird pauschal mittels Faktor aus dem Gebäudevolumen berechnet. Die virtuelle Fläche ergibt sich damit zu 32 % größer als die real beheizte Fläche (EBF), die beim PHPP verwendet wird. Bei dieser Betrachtung ergibt sich für den 4er Block ein **Primärenergieverbrauch**

von **46,8 kWh/(m²a)**. Der Wert erscheint damit entsprechend um 24 % niedriger als beim Bezug auf die tatsächlich beheizte Wohnfläche (EBF).

Die Einzelwerte für die Bereiche Erdgasverbrauch (Heizung/Warmwasser), Strom Technik und Strom Lüftung sind in Abbildung 78 dargestellt. Die gemessenen Raumtemperaturen lagen im Winter 2009/2010 im Mittel mit 22,4 °C um 2,4 K über der Standardtemperatur für die PHPP Bilanz (20 °C) und um 3,4 K über der Bilanzierungstemperatur der EnEV (19 °C). Nach Berechnungen des PHPP ergibt sich ein Heizwärmebedarfsänderung von 2,48 kWh/(m²a) je Kelvin Temperaturveränderung. Berücksichtigt man damit auch die niedrigere Raumtemperatur von 19 °C nach der EnEV in der Bilanz, ergibt sich als Primärenergiewert bei Bezug auf A_N nur noch **39,8 kWh/(m²a)**. Damit kann mit dieser **Sanierung** mit Passivhauskomponenten, trotz der teilweise deutlich verspäteten Aktivierung der Wärmerückgewinnung, sogar die (eigentlich nur rechnerische) „höchste“ KfW 40-Anforderung für **Neubauten** nachgewiesen werden.

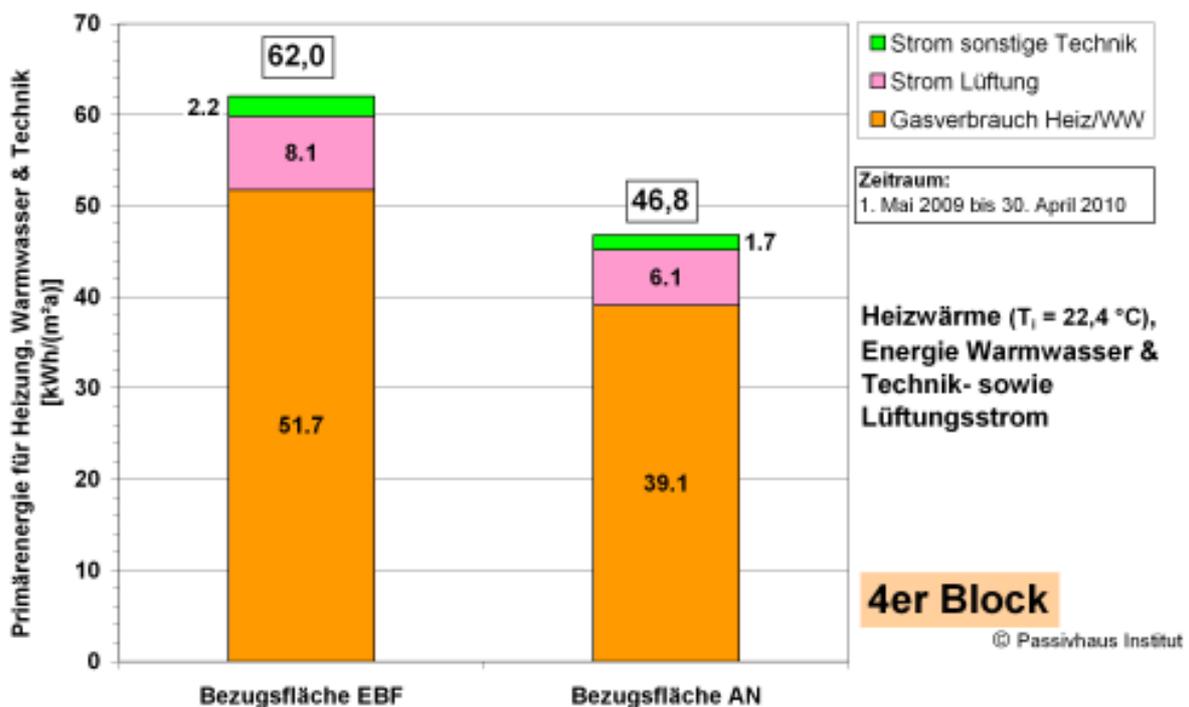


Abbildung 78: Messwerte des Primärenergieverbrauchs des 4er Blocks nur für Heizung, Warmwasser und Technikstrom inkl. Lüftungsstrom in Bezug auf die Energiebezugsfläche (EBF) und die theoretische Gebäudenutzfläche A_N (nach ENEV).

Anforderungswert nach EnEV 2007

Bereits für die vorausgehende Untersuchung wurde der **zulässige Jahres-Primärenergiebedarf der Gebäude für Heizung, Warmwasser inkl. Technikstrom** nach der **EnEV 2007** bestimmt. Nach der zur Zeit der Sanierung gesetzlich gültigen Anforderung ergibt sich ein Maximalwert von **83,0 kWh/(m²a)**. Das ist der Rechenwert, der bei der Komplettisanierung für diese Gebäude nach der Verordnung

zwingend einzuhalten ist. Die Bezugsfläche ist dabei wieder die 32 % größere „theoretische“ 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, 39,8 kWh/(m²a). Dies entspricht damit einer **Unterschreitung der gesetzlichen Anforderung um 52 %**. Daran ist abzulesen, wie erfolgreich der tatsächlich realisierte Energieverbrauch zu bewerten ist. Aus einem Altbau mit sehr hohen Verbrauchswerten (um 290 kWh/(m²a)) wurde ein energetisch sehr hochwertiges Gebäude mit sehr gutem thermischen Komfort, deutlich verbesserter und jetzt nachgewiesener Raumluftqualität, sowie dauerhafter Schadensfreiheit aufgrund der hohen Oberflächentemperaturen.

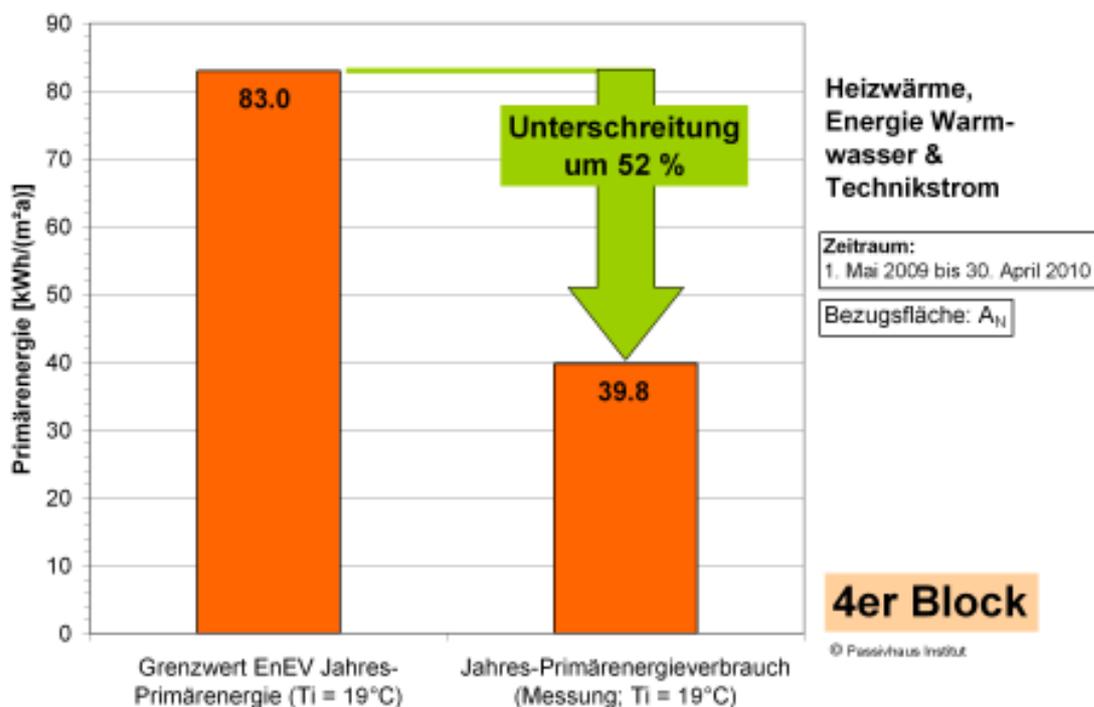


Abbildung 79: Primärenergie-Anforderung nach EnEV 2007 (Heizung, Warmwasser und Hilfsstrom) im Vergleich zum tatsächlichen Primärenergie-Verbrauch nach Umrechnung auf die Raumtemperatur von 19 °C. Als Bezugsfläche wird hier gemäß EnEV die „theoretische“ Gebäudenutzfläche A_N verwendet.

Kurzzusammenfassung:

Wesentliche Unterschiede der EnEV-Anforderung zum realisierten Projekt in der Tevesstraße:

1. Verbesserte Dämmung Außenwände
2. Verbesserte Dämmung Dach
3. Bessere Fenster (Dreifachverglasung, gedämmter Rahmen, optimierter Einbau)
4. Wärmerückgewinnung
5. Verbesserte Dämmung der Kellerdecke

6 Untersuchung der Kellerfeuchtigkeit

6.1 Hintergrund

Wird in Altbauten, so wie im vorliegenden Fall, die Kellerdecke nachträglich gedämmt, ergibt sich durch den geringeren Wärmeeintrag aus den darüberliegenden Räumen eine niedrigere Raumtemperatur. Dichtere, ggf. dauerhaft verschlossene Kellerfenster, reduzieren den zuvor vorhandenen Außenluftwechsel im Keller, die gleiche Auswirkung hat die Verbesserung der Luftdichtheit zwischen Keller und Erdgeschoss. Die veränderte Situation kann dazu führen, dass die relative Feuchte im Keller größer wird. Es stellt sich daher die Frage, ob und wie von Seiten des Planers bzw. Betreibers reagiert werden muss, um unerwünschte Effekte durch die höhere Feuchte zu vermeiden.

In [Schnieders 2009] wurde diese Thematik bereits theoretisch anhand von Simulationsrechnungen behandelt. Dort wurde in der Tat eine Verschlechterung der Feuchtesituation im Keller und damit ein erhöhtes Risiko von Schimmelwachstum festgestellt. Die Unterschiede zwischen Keller mit und ohne gedämmter Decke waren jedoch nicht sehr groß.

In der genannten Studie wurden zwei Möglichkeiten identifiziert, um das Risiko von Schimmelbildung im Keller zu verringern: gezieltes Lüften zur Feuchteabfuhr sowie Erhöhung der Oberflächentemperaturen im Keller. In der Zusammenfassung heißt es:

„Will man durch Lüften die Feuchteverhältnisse in einem Keller ohne nennenswerte Feuchtelasten verbessern, so führt eine einfache Erhöhung des Luftwechsels nicht zum Ziel. Auch saisonal verstärkte Lüftung im Sommer (um die Temperaturen zu erhöhen) bzw. im Winter (um die niedrige absolute Außenluftfeuchte zu nutzen) ist nicht zweckmäßig. Es sind jedoch Steuerungen und auch komplette Systeme am Markt, die immer dann verstärkt lüften (durch motorisches Öffnen der Kellerfenster und/oder Ansteuerung eines Ventilators), wenn die absolute Feuchte der Außenluft niedriger ist als diejenige der Raumluft. Besonders wirksam und gleichzeitig energieeffizient ist Querlüftung über motorisch öffnbare Fenster bzw. Lüftungsklappen.“

Eine merkliche Reduzierung der relativen Feuchte an den Oberflächen ergibt sich bei Erhöhung der Oberflächentemperaturen, die sich etwa durch ein Herunterziehen der Außenwanddämmung bis Oberkante Erdreich erreichen lässt. Das sollte man ohnehin tun, zum einen aus gestalterischen Gründen, zum anderen zur Gewährleistung ausreichender Oberflächentemperaturen an der Wärmebrücke, die in der Kante Kellerdecke - Außenwand im Erdgeschoss des Gebäudes besteht.“

Die in der Tevesstraße erhobenen Messdaten erlauben zum einen eine Beurteilung der Feuchteverhältnisse im Altbaukeller unter einer gut gedämmten Kellerdecke, zum anderen eine Validierung und ggf. Anpassung des vorhandenen Simulationsmodells. Wo gegenüber [Schnieders 2009] zusätzliche Erkenntnisse zu erwarten sind, werden anschließend weitere Parameterstudien durchgeführt.

6.2 Messdatenerfassung und Luftvolumenströme

Einen Schnitt der untersuchten Kellerräume in den Sanierungsbauten Tevesstraße zeigt Abbildung 80. Im Zuge der Modernisierung wurde die Wärmedämmung der Außenwand bis kurz vor Oberkante Erdreich heruntergezogen. Dabei wurden die Kellerfenster komplett verschlossen und überdämmt. Diese Lösung entschärft nicht nur die Wärmebrücken zwischen Keller und Erdgeschoss an der Durchdringung der Außenwände, sie führt auch zu höheren Kellertemperaturen, wodurch bei gleicher absoluter Feuchte der Kellerluft die relative Feuchte niedriger wird.

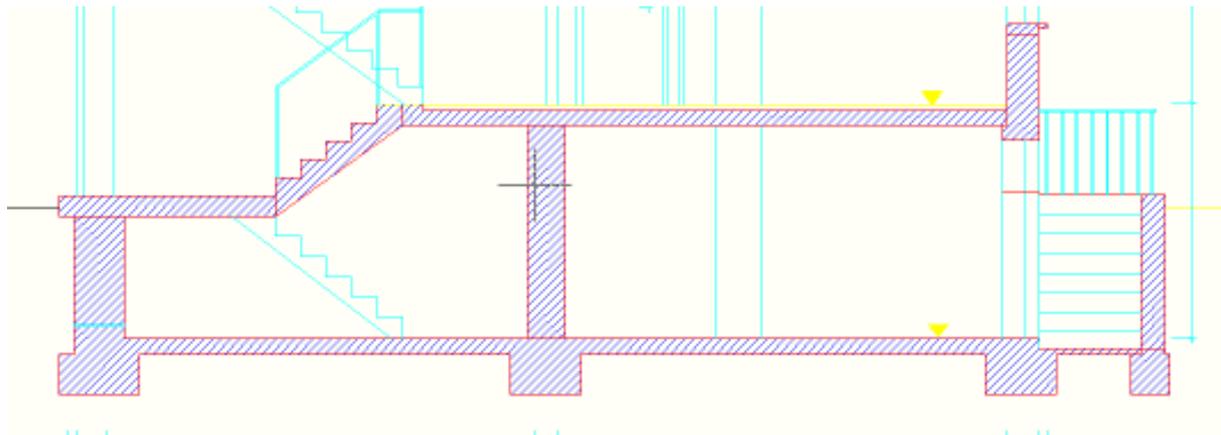


Abbildung 80: Schnitt Kellergeschoss Bestand Haus Tevesstraße 48 bis 54 (Quelle: Faktor 10, Darmstadt).

Um auch ohne Fenster eine ausreichende Belüftung sicherzustellen, wurden als Lüftungsöffnungen Rohre von ca. 80 mm Durchmesser in jedem Kellerraum installiert (vgl. Abbildung 81). Die Rohre sind mit Gittern versehen, die den freien Querschnitt noch etwas reduzieren. Im „Trockenraum“ befindet sich außerdem ein Abluftventilator. Damit dieser Ventilator auch den Fahrradkeller und die dahinterliegenden Kellerräume entlüften kann, befindet sich in der zentralen Trennwand eine Überströmöffnung. Der Trockenraum wird nach Kenntnis des Messteams *nicht* zum Wäschetrocknen genutzt, zusätzliche Feuchtequellen liegen wahrscheinlich nicht vor.

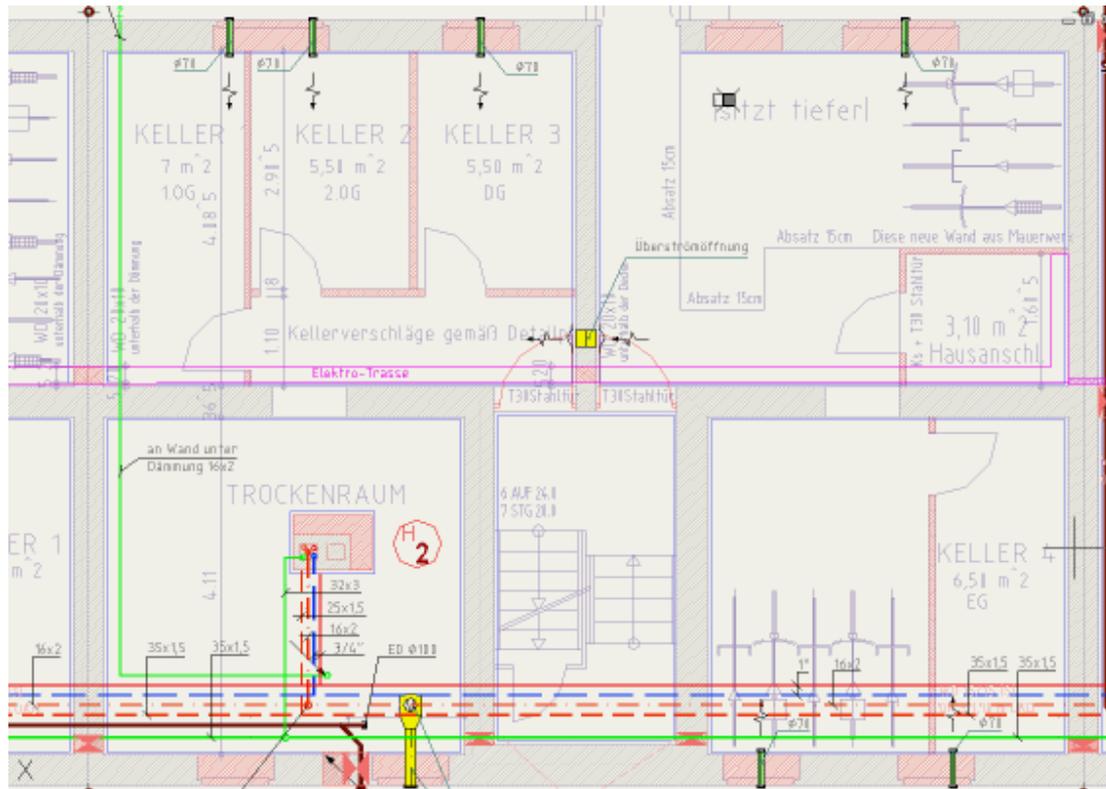


Abbildung 81: Grundriss Kellergeschoss Haus 50 mit Lüftungsanlage (Abluftventilator und Nachströmrohren) (Quelle: Faktor 10, Darmstadt).

Im Keller des Hauses Tevesstraße 50 wurden an drei Stellen Temperatur- und Feuchtesensoren installiert, nämlich im Fahrradkeller, in der o.g. Überströmöffnung und im Trockenraum. Zu Vergleichszwecken wurde auch in den Kellern der Häuser 52 und 54 etwa von August bis November 2010 jeweils ein mobiler Datenlogger (Typ HoBo H8 Pro) installiert. Abbildung 82 zeigt die Lage der Sensoren.

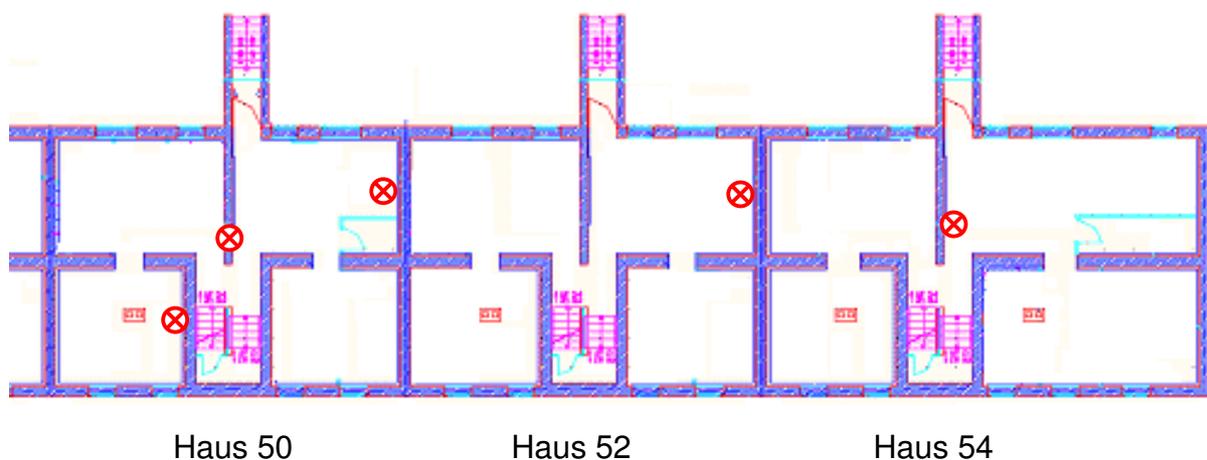


Abbildung 82: Lage der Sensoren im Kellergeschoss von Haus 50 bis 54 (Quelle: verändert nach Faktor 10, Darmstadt).

Die Temperatursensoren im Haus 50 besitzen eine Genauigkeit von $\pm 0,4$ K, für die Feuchtemessung beträgt die Genauigkeit $\pm 2\%$ r.F. bei relativen Feuchten zwischen 40 und 60 %, $\pm 3\%$ bei relativen Feuchten zwischen 10 und 90 %. Die Datenlogger in Haus 52 und 54 besitzen eine Genauigkeit von $\pm 0,2$ K für die Temperatur- und $\pm 3\%$ r.F. für die Feuchtemessung.

Die Sensoren in den Räumen von Haus 50 sind an der Unterkante der Begleitdämmung auf ca. 1,60 m Höhe über dem Boden montiert, der Sensor in der Überströmöffnung liegt auf 12 cm Höhe über dem Kellerfußboden (siehe Abbildung 83). Die Datenlogger in den Nachbarhäusern sind in der Mitte der Begleitdämmung angebracht, auf ca. 1,80 m Höhe (Abbildung 84).



Abbildung 83: Lage der fest verkabelten Temperatur- und Feuchtesensoren in Haus 50 in der Überströmöffnung und an einer Kellerinnenwand .



Abbildung 84: Temperatur- und Feuchtedatenlogger an einer Kellerinnenwand in Haus 52.

Im Keller wurden an mehreren Terminen mithilfe eines universellen Volumenstrommessgeräts (Acin FlowFinder FF225) Messungen der Luftvolumenströme durchgeführt. Die Messgenauigkeit aufgrund von Nichtlinearität, Hysterese und Wiederholbarkeit beträgt nach Herstellerangaben 3 bis 5 Prozent des abgelesenen Wertes, jedoch nie weniger als 2 m³/h.

Für den Abluftventilator wurde im intakten Zustand ein Volumenstrom von 185 m³/h gemessen. Davon strömen nur 42 m³/h (24 %) durch die Belüftungsrohre, der Rest gelangt durch diverse Leckagen in die Kellerräume. Bei *geschlossenen* Zuluftrohren fördert der Ventilator noch immer einen Volumenstrom von 178 m³/h, was die relativ hohe Undichtheit des Kellers verdeutlicht.

Dass im Keller erhebliche Leckagen vorhanden sind, zeigte auch eine Blower-Door-Messung am 22. Januar 2010, die einen n₅₀-Wert von 6,8 h⁻¹, entsprechend 1188 m³/h bei 50 Pa, lieferte. Im Regelbetrieb des Ventilators mit 185 m³/h (entspricht n = 1,1 1/h) lässt sich daraus mit den Korrelationen aus [EN 832] ein relativ geringer Infiltrationsvolumenstrom von 13 m³/h (n = 0,07 1/h) abschätzen. Bei balancierter Lüftung, d.h. ohne Unterdruck im Keller, würde der Infiltrationsvolumenstrom zusätzlich zum maschinellen Luftwechsel auf 83 m³/h (n = 0,48 1/h) anwachsen. Letzterer Wert kann auch für Phasen ohne aktive Lüftung des Kellers angesetzt werden.

Leckagen konnten vorwiegend an folgenden Punkten festgestellt werden:

- an der Unterkante der im oberen Bereich der Wand angebrachten Dämmplatten
- aus dem ehemaligen Schornstein im Trockenkeller
- an der Kabeldurchführung zum Nachbarhaus im Zählerraum

Aufgrund der Luftströmungen, die durch diese Öffnungen gelangen, vermutet das Messteam, dass erhebliche weitere, nicht lokalisierbare Leckagen vorhanden sind. Ob die Luft von außen, aus den angrenzenden Kellern oder aus den Wohnräumen in den Keller gelangt, war anhand der Blower-Door-Messung nicht feststellbar.



Abbildung 85: In der Kellerausgangstür montierte Blower Door (Haus 50) (links) und für die Messung abgeklebter Abluftventilator (rechts).



Abbildung 86: Leckagensuche während der Blower Door Messung im Keller von Haus 50. Fotos von nennenswerten Leckagen von links nach rechts: Kabelschacht zum Nachbarkeller, Kellertür zum Treppenhaus und Außenwand Anschluss der Begleitdämmung.

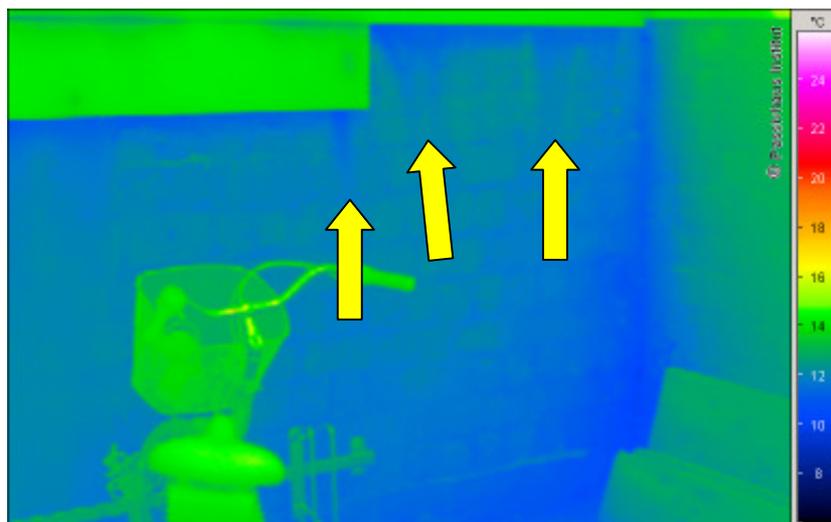


Abbildung 87: Thermographie im Kellerraum nach etwa 10 Minuten Unterdruckbedingungen. An der Außenwand unter dem Abschluss der Begleitdämmung sind leckagebedingte Auskühlungen erkennbar (Kaltluftfahnen).

Am Antriebsmotor des Ventilators musste am 11.11.09 ein Kondensator ersetzt werden, vorher lief er mit wesentlich geringerem Volumenstrom. Am 13.10.09 wurde beispielsweise ein Abluftvolumenstrom von 54 m³/h gemessen. Bei dieser Messung gelangten nur 17 m³/h (31 %) durch die Belüftungsrohre.

6.2.1 Messergebnisse Temperaturen und Luftfeuchte

Die gemessenen Temperaturen über den gesamten Messzeitraum zeigt Abbildung 88. Die Kellertemperaturen folgen deutlich erkennbar der Außenlufttemperatur, die Phasenverschiebung zwischen Außen- und Kellertemperatur beträgt wenige Wochen. Der relativ gute Wärmeschutz des Kellers macht sich jedoch bemerkbar: Die Mitteltemperatur liegt über 15 °C, die Temperaturschwankungen sind wesentlich geringer als diejenigen der Außenluft.

Auffallend sind die relativ großen Temperaturunterschiede zwischen den verschiedenen Kellerräumen. In den Wintermonaten liegt die Temperatur im Trockenraum um bis zu 3 K über derjenigen im Fahrradkeller, wobei eine starke Korrelation dieses Unterschiedes mit der Außenlufttemperatur festzustellen ist ($r^2 = 0,74$). Verantwortlich ist möglicherweise die Außentüre im Fahrradkeller, die einen deutlich schlechteren Wärmeschutz aufweist als die Kellerwände (konventionelle Stahl-Kellertür mit Fenster, geschätzter U-Wert um 1,8 W/(m²K), gelegentlich zumindest kurzzeitig geöffnet) und dadurch die Temperatur im Fahrradkeller reduziert. Auch die Wärmetrasse, die im Trockenraum verläuft, könnte eine Rolle spielen. Der Heizungskeller für den gesamten Block befindet sich im Haus 48. Er weist deutlich höhere Temperaturen auf als die übrigen Kellerräume. Möglicherweise beeinflusst er in gewissem Maße auch die Temperaturen im Keller von Haus 50 (vgl. auch die Erläuterungen zu Abbildung 89 unten).

Zu Beginn der Messperiode ist die Temperatur in der Überströmöffnung nochmals niedriger als diejenige im Fahrradkeller. Diese Differenz deutet auf eine Temperaturschichtung im Fahrradkeller hin, die jedoch vom 15.07.10 bis zum 15.10.10 allmählich verschwindet. Die Temperaturdifferenz zwischen Fahrradkeller und Überströmöffnung bleibt dann bis etwa zum 01.03.11 unbedeutend um danach wieder anzuwachsen.

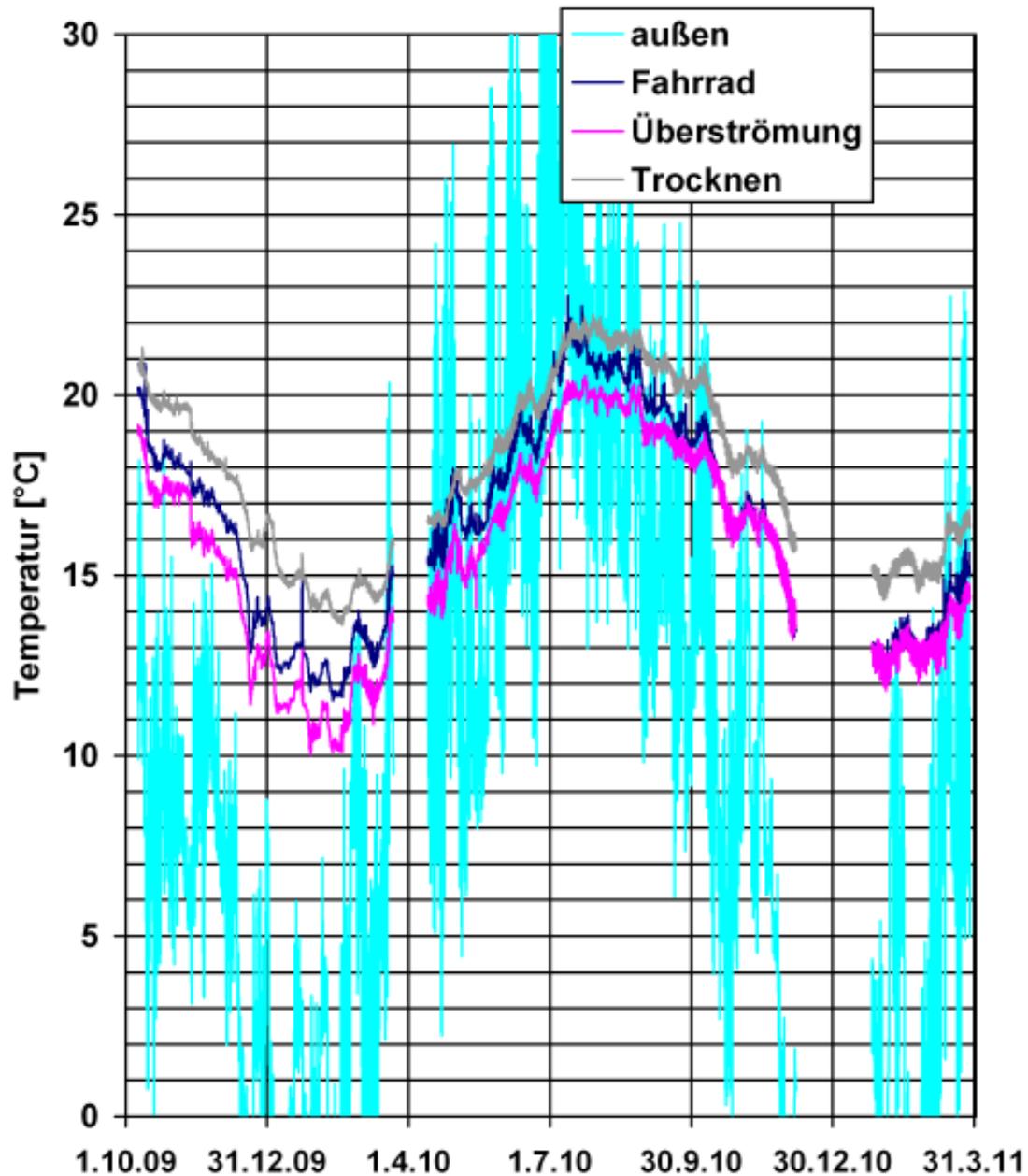


Abbildung 88: Temperaturen außen und in den Kellerräumen von Haus 50.

Die während einiger Monate zusätzlich in den Häusern 52 und 54 gemessenen Temperaturen liegen meist etwas unterhalb der in Haus 50 gemessenen (Abbildung 89). Die Differenz beträgt im Mittel 0,9 K für Haus 52 und 1,3 K für Haus 54. Ein solcher Temperaturabfall wäre konsistent mit einem nennenswerten Einfluss des Heizkellers in Haus 48.

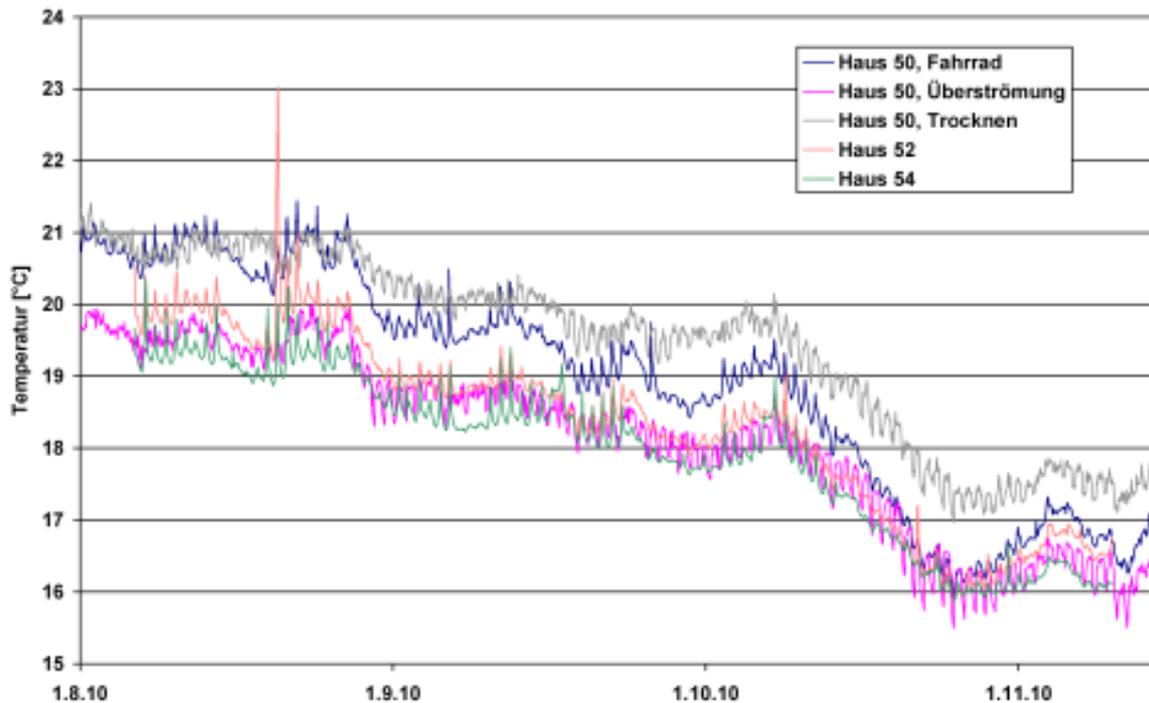


Abbildung 89: Temperaturen in den Kellerräumen von Haus 50, 52 und 54 in der Messperiode der mobilen Datenlogger.

Bei der Luftfeuchte (Abbildung 90) ist deutlich die feuchtepuffernde Wirkung der Bauteile im Keller zu erkennen. Die Schwankungen der absoluten Feuchte in der Kellerluft sind erheblich geringer als diejenigen in der Außenluft.

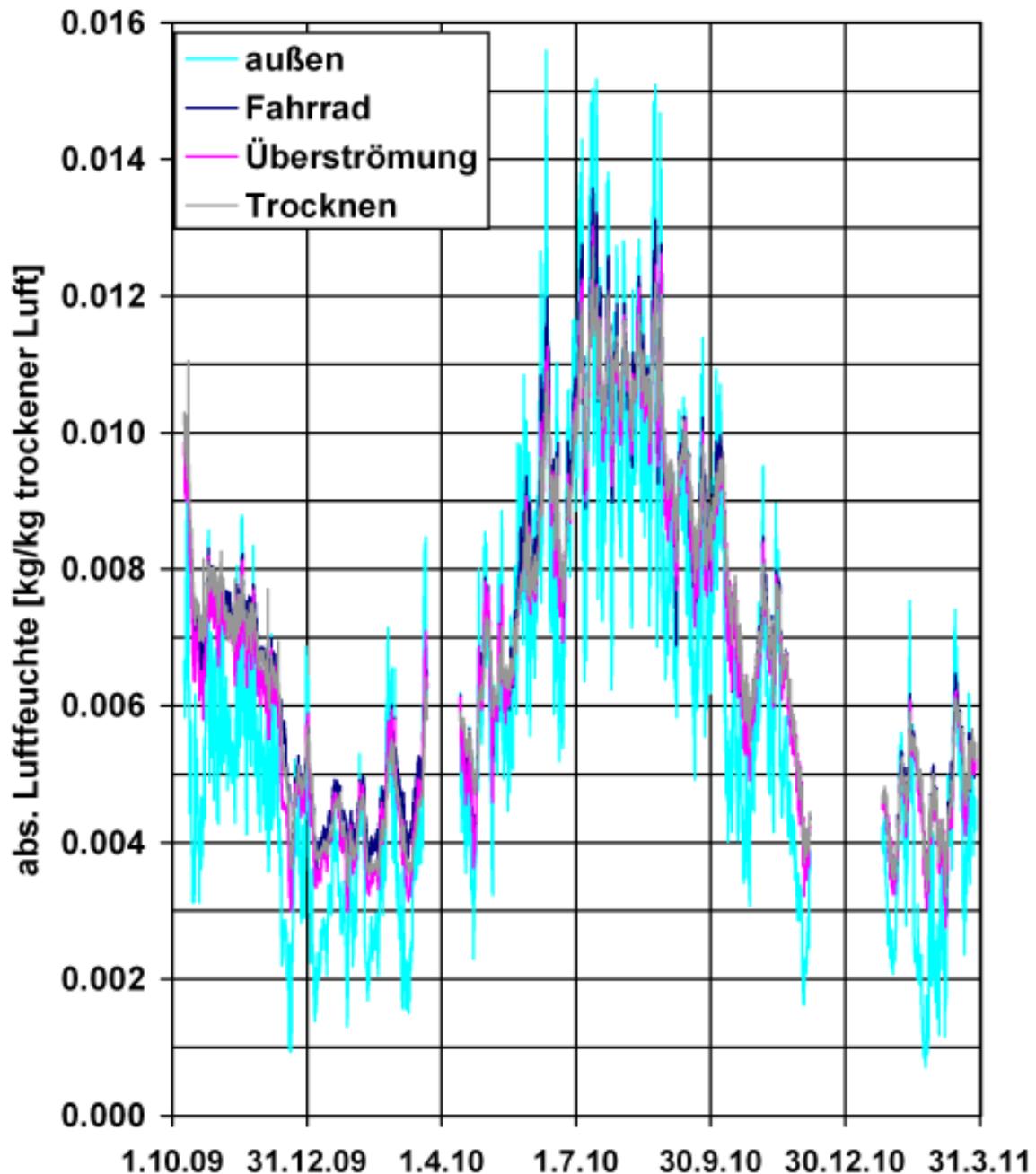


Abbildung 90: Absolute Luftfeuchte außen und in den Kellerräumen von Haus 50.

Insgesamt ist die Luft im Keller erkennbar feuchter als die Außenluft, im Durchschnitt um ca. 1 g/kg. Zwei mögliche Gründe kommen dafür in Frage: Einerseits sind sicherlich in gewissem Maße Feuchtequellen im Keller vorhanden, etwa durch nasse Fahrräder, nasse Kleidung oder aufsteigende Feuchte (Abbildung 91). Andererseits könnte eine Zuströmung von Luft aus den Wohnräumen über die vorhandenen Leckagen zusätzlich Feuchte in den Keller einbringen.



Abbildung 91: Ausblühungen im Sockelbereich der Kellerwand.

Die Luft in der Überströmöffnung ist in den ersten Monaten der Messung um etwa 0,3 g/kg trockener als diejenige an der Messstelle Fahrradkeller. Gegen Ende der Messperiode ist im Mittel keine bedeutende Abweichung mehr festzustellen; nun ist die Luft im Fahrradkeller immer dann etwas (max. 0,4 g/kg) trockener als diejenige in der Überströmöffnung, wenn die absolute Feuchte im Keller vergleichsweise gering ist – möglicherweise aufgrund der Feuchtespeicherung in den Baustoffen rund um die Überströmöffnung.

Der Vergleich mit den Häusern 52 und 54 zeigt erneut sehr ähnliche Werte (Abbildung 92). Von einzelnen Spitzen abgesehen liegt die Bandbreite aller gemessenen Luftfeuchten unter 2 g/m³.

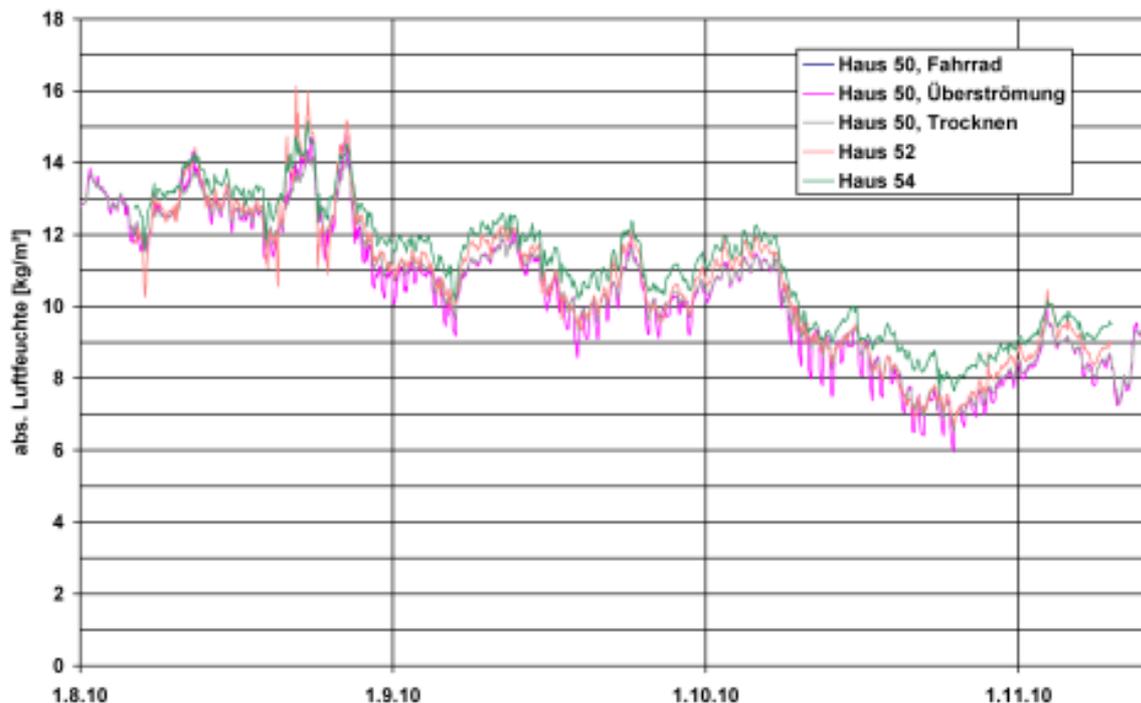


Abbildung 92: Absolute Luftfeuchte in den Kellerräumen von Haus 50, 52 und 54 in der Messperiode der mobilen Datenlogger. Für die mobilen Datenlogger lag die Feuchte nur in g/m^3 statt g/kg vor, daher zeigt das Diagramm diese Werte.

Ob ein Risiko für Bauschäden, insbesondere für Schimmelwachstum, im Keller besteht, kann am besten anhand der relativen Feuchte an den kritischen Oberflächen beurteilt werden. Ein Schimmelrisiko besteht, grob gesagt, wenn die Luftfeuchtigkeit an einer Oberfläche länger als einige Tage oberhalb von 80 % liegt.

Abbildung 93 zeigt die gemessenen relativen Luftfeuchten im gesamten Messzeitraum. Oberflächentemperaturen wurden nicht unmittelbar gemessen, immerhin deuten aber die Luftfeuchten selbst eher auf eine unkritische Situation hin: In den Wintermonaten, wenn Oberflächentemperaturen deutlich unterhalb der Raumlufttemperatur liegen können, beträgt die Feuchte meist unter 60 %. Werte oberhalb von 70 % treten nur im Sommer auf, oberhalb von 80 % liegt die Feuchte nur während weniger Perioden von einigen Tagen Dauer.

Die hier verfolgte Strategie, die Dämmung der Außenwände entlang der oberirdischen Kellerwände bis zur Erdoberfläche nach unten zu führen, wurde unabhängig vom Sanierungsprojekt Tevesstraße in [Schnieders 2009] vorgeschlagen. Sie bewährt sich allem Anschein nach gut, die erhöhten Temperaturen im Winter führen zu geringen relativen Feuchten.

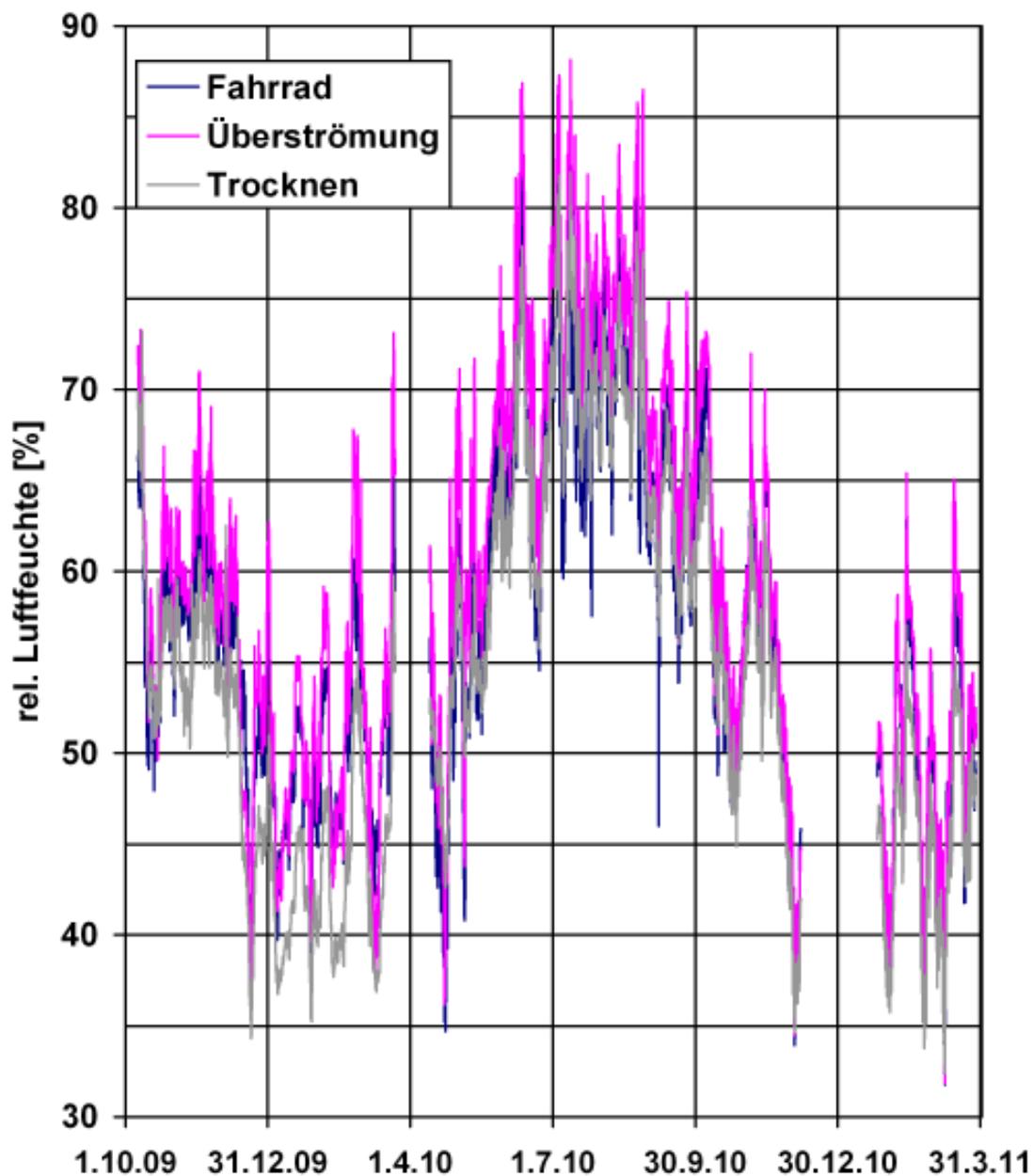


Abbildung 93: Relative Luftfeuchte in den Kellerräumen von Haus 50.

Der Abluftventilator wurde bis 14.5.2010 über eine Zeitschaltuhr betrieben. Laut Zeitprogramm sollte er täglich von 8 bis 20 Uhr eingeschaltet sein (Abbildung 94); ob das wirklich der Fall war, wurde messtechnisch nicht überprüft.



Abbildung 94: Zeitschaltuhr für die Steuerung des Abluftventilators.

Basierend auf den Ergebnissen aus [Schnieders 2009], die eine Feuchtesteuerung des Ventilators sinnvoll erscheinen lassen, wurde am 14.05.2010 die Steuerung des Ventilators verändert. Eine von einem Elektronikversand angebotene Feuchtesteuerung ([ELV 2008]), die den Ventilator nur bei absoluten Außenluftfeuchten unterhalb der absoluten Kellerfeuchte ansteuern soll, wurde eingebaut und in Betrieb genommen. Von diesem Zeitpunkt an wurde auch der Stromverbrauch im Keller messtechnisch erfasst, so dass die Betriebsweise des Ventilators in Verbindung mit der Feuchtesteuerung überprüft werden kann.

Ab 10.10.2010 betrug der gemessene Stromverbrauch im Keller Null, vermutlich war ab diesem Zeitpunkt die Steuerung defekt. Am 08.12.2010 wurde die Steuerung repariert. Bei den eingestellten Parametern funktioniert sie laut [ELV 2008] nach folgendem Algorithmus: Wenn die absolute Feuchte der Außenluft niedriger ist als diejenige der Raumluft, wird für eine Zeitdauer von 17 min der Ventilator eingeschaltet. Es folgt eine sogenannte Intervallzeit von 40 min, in der der Ventilator ausgeschaltet bleibt. Der Ventilator läuft also während 30% der Zeit. Höhere Laufzeitanteile sind in der Steuerung nicht einstellbar, vermutlich, um den Raum nicht übermäßig auszukühlen.

Wie Abbildung 95 zeigt, verhält sich das Gerät in Bezug auf die Laufzeiten wie vom Hersteller angegeben. Der intermittierende Betrieb führt auch bei kontinuierlicher Betriebsanforderung an die Regelung (das hieße, bei hohen Kellerfeuchten) zu unterschiedlichen Stundenmittelwerten, je nachdem, wie viele 10-Minuten-Werte mit Betrieb bzw. Stillstand in der jeweiligen Stunde zu liegen kommen. Das ist bei der Interpretation der in Abbildung 96 dargestellten Stromverbräuche zu beachten.

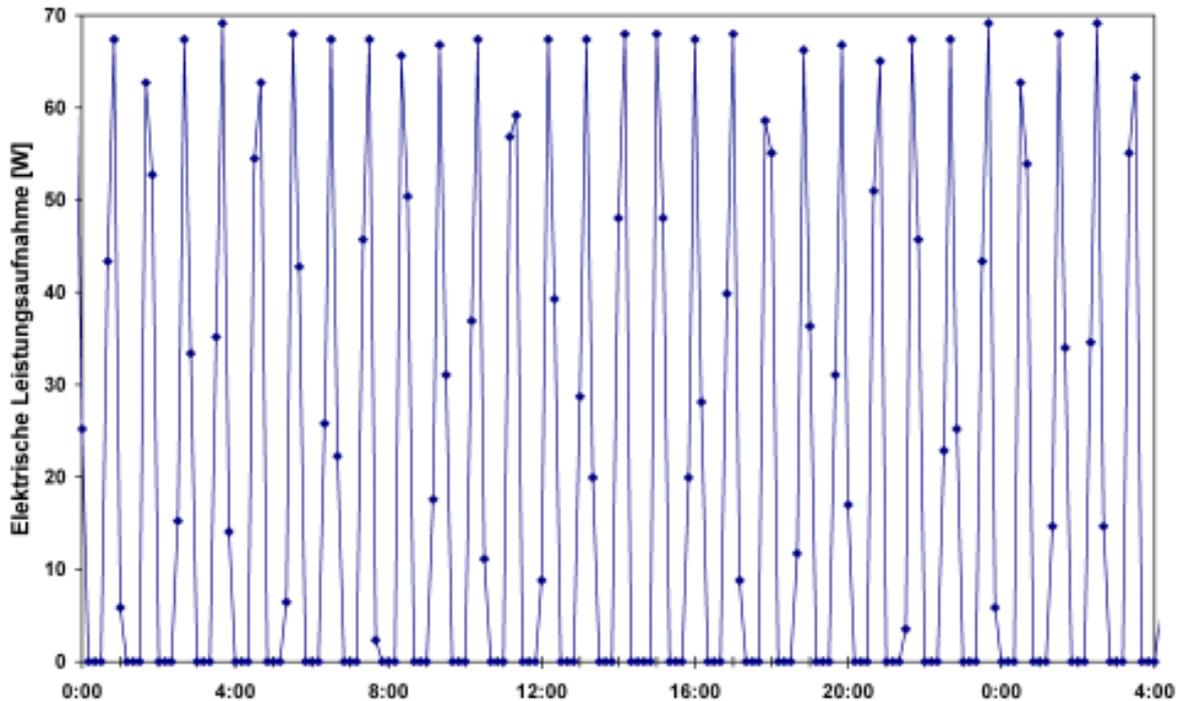


Abbildung 95: 10-Minuten-Werte des Ventilator-Stromzählers in einem typischen Zeitraum (ab 5.10.10, 0:00 Uhr)

Eine Analyse der Messdaten zeigt, dass die Steuerung bezüglich der Reaktion auf die Luftfeuchte nicht wie geplant funktionierte. In den Wochen nach dem Einbau (Abbildung 96 oben) ist noch zu erkennen, dass der Ventilator – spezifikationsgemäß – nicht in Betrieb ist, wenn die Außenluftfeuchte deutlich über der Kellerfeuchte liegt. Einige Monate später ist das Gegenteil der Fall. Die Korrelation von Ventilatorstrom und Feuchtedifferenz über einige Wochen ändert sich in diesem Zeitraum weitgehend kontinuierlich, es scheint also keine Fehlbedienung, sondern eher eine Drift in der Sensorik, ein Programmierfehler o.ä. vorzuliegen.

Es ist festzuhalten, dass die geplante experimentelle Untersuchung einer feuchte-gesteuerten Lüftung in der Praxis aufgrund der Fehler in der eingebauten Steuerung nicht realisiert werden konnte. Auch bei korrekter Funktion der Steuerung wäre aufgrund der langen Intervallzeit und der undichten Außenwände an diesem Objekt wohl kaum ein Effekt nachweisbar gewesen: Der mittlere Volumenstrom aufgrund von Infiltration bei abgeschaltetem Ventilator wurde oben zu 83 m³/h abgeschätzt, bei laufendem Ventilator ergibt sich unter Berücksichtigung der Intervallzeiten ein nur unwesentlich größerer mittlerer Volumenstrom von 117 m³/h. Dieser Unterschied wäre in den Messdaten in jedem Fall nicht eindeutig zu detektieren gewesen. Wie eine Feuchtesteuerung sich hätte ausgewirken können, wird im folgenden Abschnitt anhand von Simulationsergebnissen dargestellt.

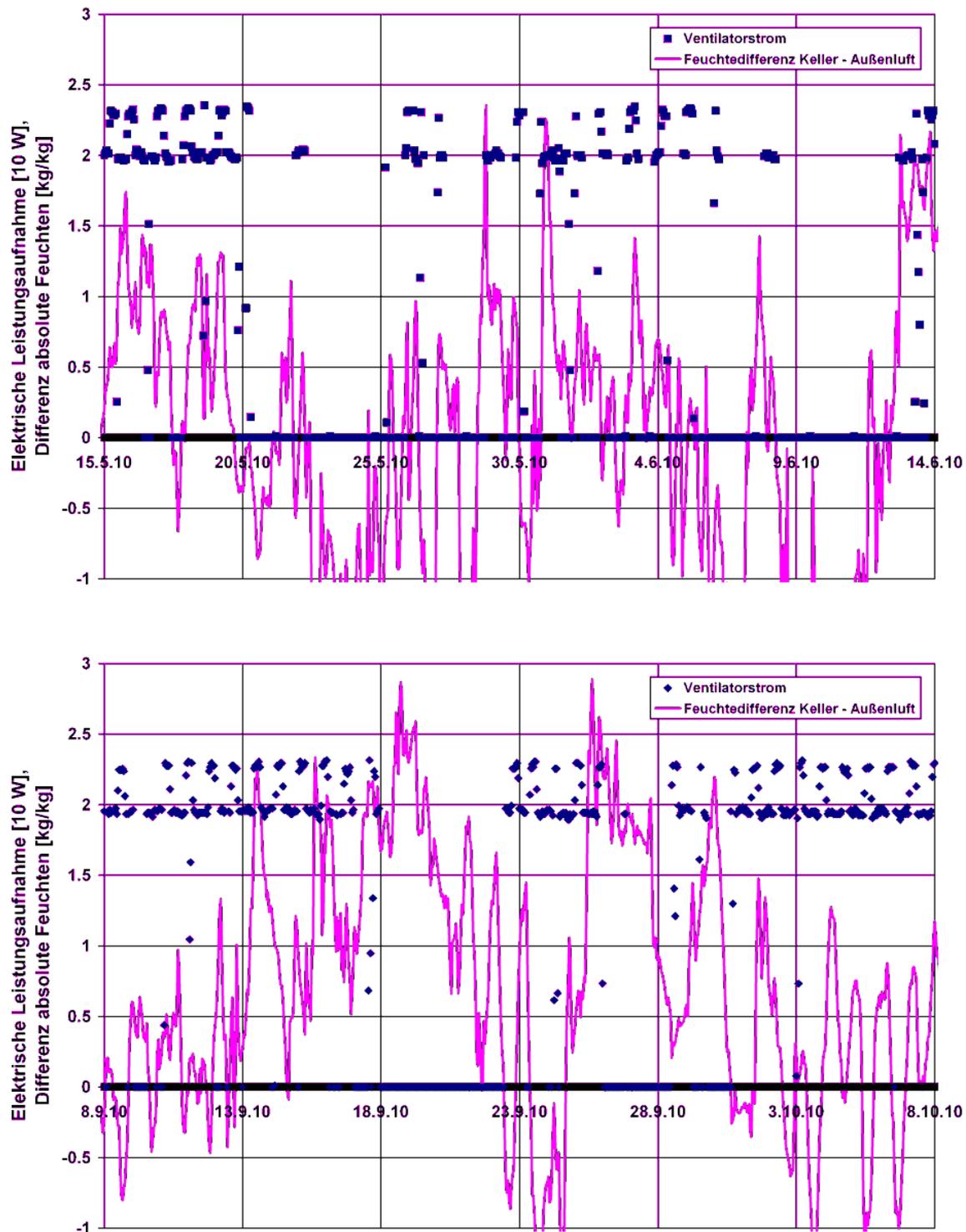


Abbildung 96: Betriebszeit des Ventilators und Feuchtedifferenz zwischen innen und außen in zwei verschiedenen Perioden. Um Entfeuchtung zu erreichen, müsste der Ventilator genau dann laufen, wenn die Feuchtedifferenz zwischen innen und außen positiv ist.

6.2.2 Simulationsrechnungen

Simulationsrechnungen zur Kellertemperatur und -feuchte waren vorwiegend aus zwei Gründen von Interesse. Zunächst sollten die Rechenalgorithmen, die bereits in

den Simulationen in [Schnieders 2009] verwendet wurden, am gemessenen Beispiel validiert werden. Die Konsequenzen unterschiedlicher Klimata, Dämmstandards und Lüftungsstrategien wurden in der genannten Arbeit bereits betrachtet, eine Wiederholung an dieser Stelle erübrigt sich. Als neuer Aspekt fiel in den Messungen der Einfluss der Luftdichtheit im Keller auf, die je nach baulicher Situation stark schwanken kann. Sämtliche Lüftungsstrategien mit variablen Luftvolumenströmen können nur dann gut funktionieren, wenn außerhalb der Ventilatorlaufzeiten keine hohen Infiltrationsströme auftreten.

Für den Keller wurde ein 1-Zonen-Modell im dynamischen thermischen Simulationsprogramm DYNBIL aufgesetzt. Das Programm erlaubt auch die Berechnung von Raumluft- und Bauteilfeuchten. Der Luftwechsel im Keller wurde entsprechend den oben beschriebenen Messergebnissen von Ventilatorstrom, gemessenen Luftmengen und Blower-Door-Messung in einer Tabelle mit Stundenwerten an die Simulation übergeben. Für die Temperaturen im Erdgeschoss über dem Keller standen leider keine Messwerte zur Verfügung. Hier wurden Mittelwerte aller in den Wohnungen gemessenen Temperaturen als Randbedingung verwendet.

Die Erdreichtemperaturen unterhalb der Bodenplatte und auf der Außenseite der erdberührten Kellerwände wurden vorab über eine zweidimensionale Simulation der Wärmeströme im Erdreich bestimmt, in der die gemessenen Außen- und Kellertemperaturen als Randbedingung angesetzt wurden. Diese Vorgehensweise führt zwangsläufig zu einer guten Wiedergabe der gemessenen Raumtemperaturen in der Simulation, da es sich bezüglich die Wärmeverluste durch das Erdreich – abgesehen von kleineren Effekten, die in der Wärmebrückenberechnung und der thermischen Simulation unterschiedlich behandelt werden – letztlich proportional zur Temperaturdifferenz zum Perimeter-Erdreich sind. Da der Schwerpunkt der hier durchgeführten Analyse die *Feuchte* im Keller ist und die erhobenen Messdaten ohnedies keine nähere Untersuchung der Wärmeverluste durch das Erdreich erlauben, ist die beschriebene Vorgehensweise hier angemessen.

6.2.3 Referenzfall wie gebaut

Die Parameter des Simulationsmodells wurden zunächst so gewählt, dass die tatsächlichen Gegebenheiten so gut wie möglich wiedergegeben werden. Wie Abbildung 97 zeigt, liegen die simulierten **Temperaturen** in diesem Fall um durchschnittlich 1,6 K unter den gemessenen.

Die Temperaturdifferenz ist deutlich mit der Außentemperatur korreliert ($r^2 = 0,69$). Würde man in der Simulation einen niedrigeren Außenluftwechsel ansetzen, weil z.B. ein Teil der Luft aus dem Nachbarkeller angesaugt wird, wäre eine bessere Wiedergabe der gemessenen Temperaturen möglich. Wie eine entsprechende Kontrollrechnung zeigte, verbleibt aber selbst im Extremfall eines völlig fehlenden Außenluftwechsels eine Temperaturdifferenz von ca. 1,0 K. Für die Keller in den Häusern 52 und 54, die den Messungen zufolge bei sonst gleichen Randbedingungen um ca. 1 K kühler sind, würden die gemessenen und die simulierten Temperaturen dann gut übereinstimmen. Denkbare Gründe für die verbleibenden

Differenzen könnten, wie oben erwähnt, beispielsweise auch interne Wärmegewinne aufgrund der durch den Keller verlaufenden Wärmetrasse oder die Abwärme des Heizungskellers im Haus 48 sein. Da die Temperaturen in der vorliegenden Studie nicht im Vordergrund des Interesses stehen, wurde die verbleibende Abweichung nicht weiter untersucht.

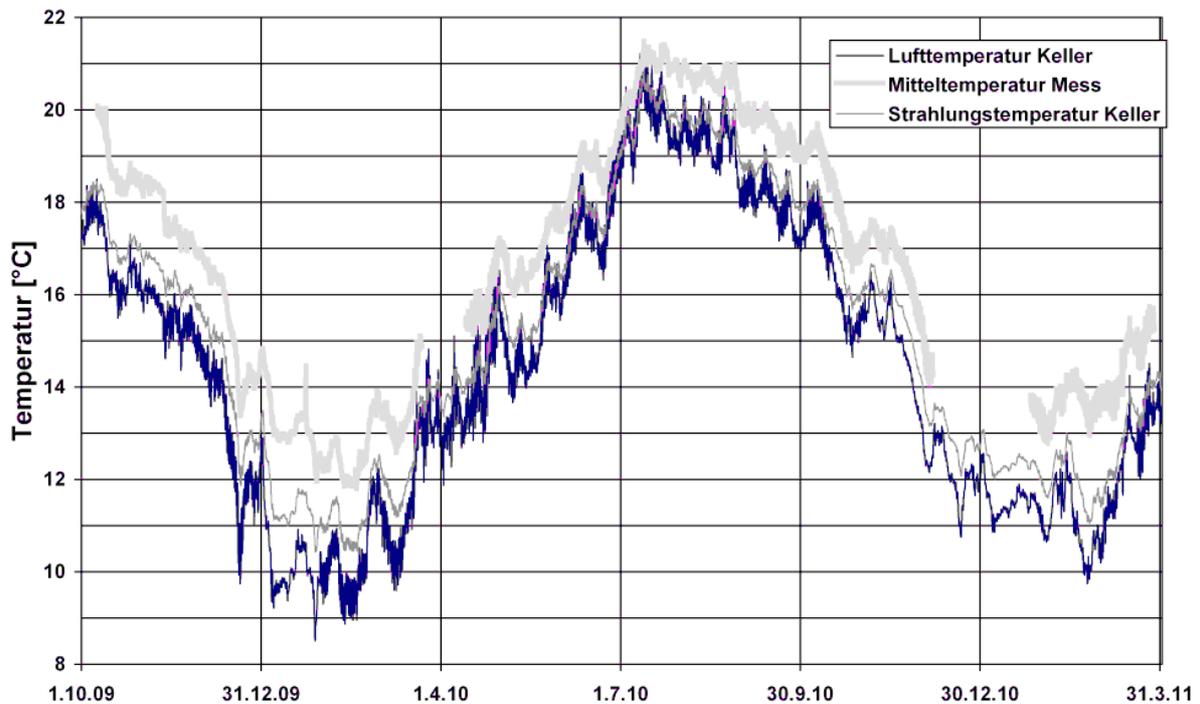


Abbildung 97: Gemessene und simulierte Temperaturen im Keller.

Die gemessenen und simulierten **absoluten Raumlufffeuchten** stimmen sehr gut überein (Abbildung 98). Das deutet darauf hin, dass die oben abgeschätzten Außenluftwechselraten realistisch sind und die Algorithmen des Simulationsprogramms grundsätzlich die Realität ausreichend genau abbilden. Die Erkenntnisse aus [Schnieders 2009] sind dadurch weiter abgesichert.

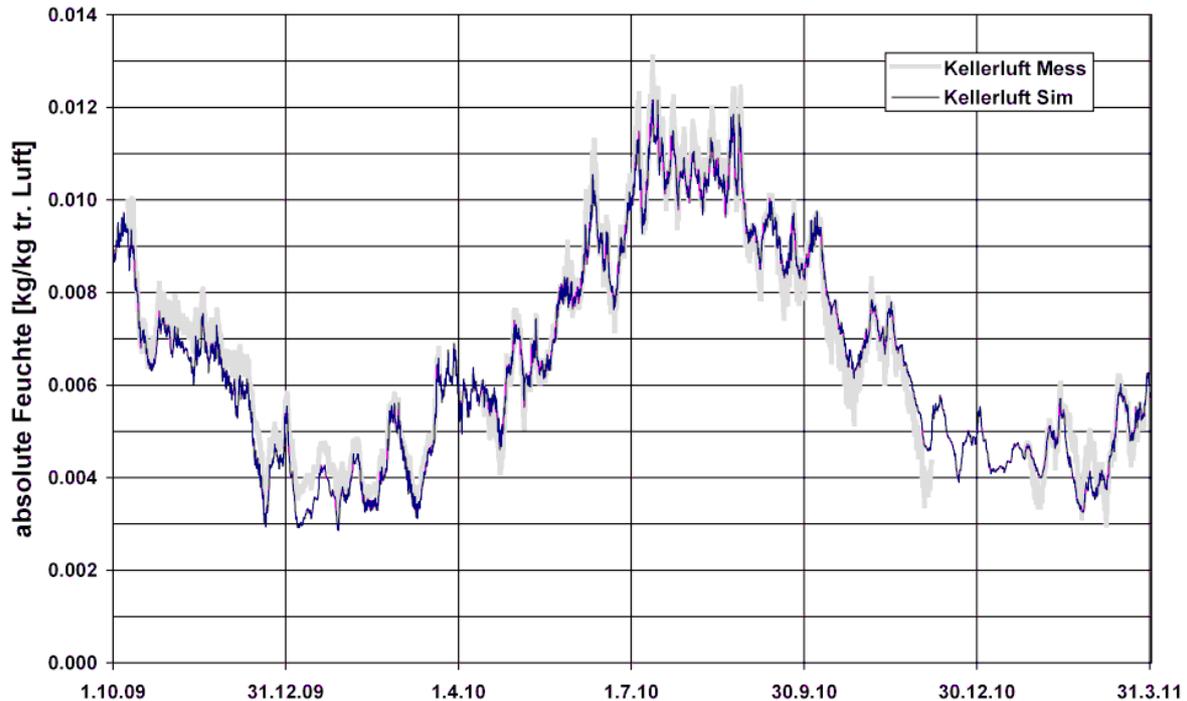


Abbildung 98: Gemessene und simulierte absolute Luftfeuchte im Keller.

6.2.4 Parameterstudien zu Luftwechsel und Luftdichtheit

Um den Einfluss unterschiedlicher Luftwechselraten und verschieden dichter Gebäudehüllen zu untersuchen, wurden einige Parameterstudien durchgeführt. Im ersten Schritt wurde untersucht, wie sich der Betrieb des Abluftventilators über eine Zeitschaltuhr während der wärmeren Stunden des Tages (Fall A) – wie gebaut – gegenüber einer gleichmäßigen Verteilung der geförderten Luftmenge über 24 Stunden (Fall B) auswirkt. Der Betrieb zu wärmeren Zeiten (tagsüber) hat zur Folge, dass dem Keller damit im Tagesdurchschnitt wärmere Luft zugeführt wird. Um den maximalen Einfluss dieser Betriebsweise zu illustrieren, wurde dabei der Infiltrationsluftwechsel auf Null gesetzt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 99 dargestellt.

Bereits ohne Infiltrationsluftwechsel gibt es keinen bedeutenden Unterschied zwischen beiden Betriebsweisen, für Gebäude mit realistischer Luftdichtheit wären die Auswirkungen – bei gleicher Gesamtluftmenge – sogar noch kleiner. Die Entfeuchtung funktioniert bei konstantem Luftwechsel etwas besser. Auch die Temperaturen, die sich im Keller einstellen, unterscheiden sich in beiden Fällen kaum. Eine verbesserte Entfeuchtung wird mit der Strategie „Tagbetrieb“ also nicht erzielt, trotzdem können natürlich andere Gründe (z.B. Lärmschutz) vorliegen, aus denen der Ventilator nur tags betrieben werden sollte.

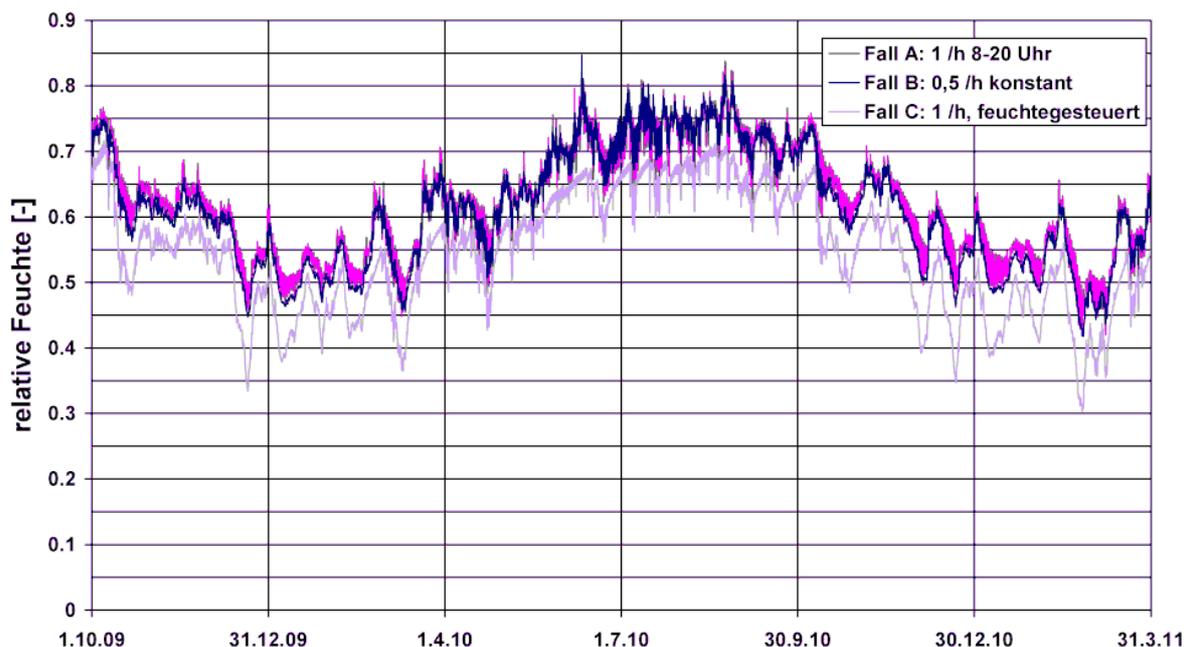


Abbildung 99: Relative Feuchte im Keller in drei verschiedenen Fällen: bei kontinuierlichem Betrieb des Ventilators, bei reinem Tagbetrieb sowie bei feuchtgesteuerter Lüftung. Alle Fälle für ideale Luftdichtheit des Kellers.

Der Gewinn, der sich durch eine Feuchtsteuerung der installierten Lüftung erzielen ließe, wurde ebenfalls untersucht (Fall C in Abbildung 99). Die relative Feuchte lässt sich damit gegenüber dem Referenzfall im Mittel um immerhin 7,5 Prozentpunkte reduzieren.

Bei weniger dichten Räumen ist der Effekt der Feuchtsteuerung erwartungsgemäß geringer. Tabelle 25 zeigt als Anhaltswert die Reduzierung der mittleren relativen Feuchte gegenüber dem Referenzfall mit Taglüftung bei jeweils identischer Gebäudedichtheit. Es zeigt sich, dass eine Feuchtsteuerung nur dann spürbaren Erfolg verspricht, wenn zu Zeiten, in denen nicht gelüftet werden soll, auch die Infiltration minimiert wird.

Tabelle 25: Einfluss der Luftdichtheit des Kellers auf den möglichen Gewinn durch eine Feuchtsteuerung

$n_{50} [h^{-1}]$	0	0.5	1	2	5	10
Reduzierung der rel. Luftfeuchte durch Feuchtsteuerung [Prozentpunkte]	7,5	6,7	6,1	5,1	2,9	1,0

Für die Planung ist schließlich von Interesse, wie sich unterschiedlich große Luftwechsel auswirken: Ein gewisser Mindestluftwechsel zur Abfuhr von Feuchtelasten etwa durch aufsteigende Feuchte sollte vorgesehen werden, sehr hohe Luftwechsel können andererseits bei hohen Außentemperaturen große Mengen Feuchte in den Raum transportieren. Abbildung 100 zeigt die Auswirkungen verschiedener mech-

anischer Luftwechselraten einerseits bei kontinuierlich laufender Lüftung und guter Luftdichtheit, andererseits bei feuchtegesteuerter Lüftung und besonders guter Luftdichtheit. Für das Beispiel zeigt sich, dass ein gewisser Mindestluftwechsel von ca. $0,5 \text{ h}^{-1}$ gegeben sein sollte, während höhere Luftwechsel vorwiegend zu stärkeren kurzzeitigen Schwankungen der Feuchte führen. Für einen mechanischen Luftwechsel von 5 h^{-1} erkennt man sogar, dass die Maximalfeuchten höher werden als bei einem kleiner ausgelegten Ventilator. Das ist darauf zurückzuführen, dass es zu ungünstigen Auskühlung der Räume bei niedrigen Außenluftfeuchten und -temperaturen kommt. Der reale Ventilatorluftwechsel im Keller von Haus 50 beträgt etwa $n = 1,1 \text{ h}^{-1}$.

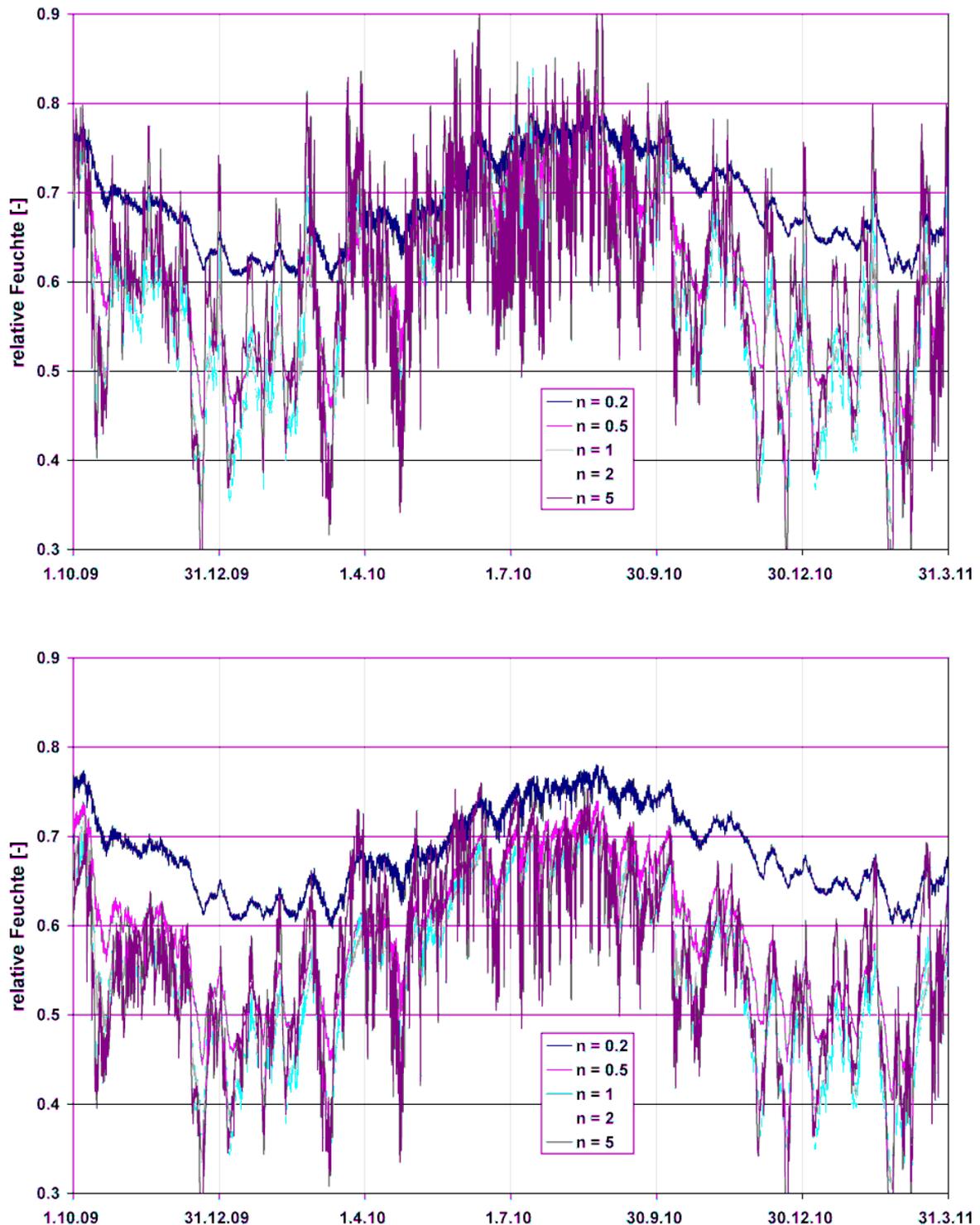


Abbildung 100: Relative Raumluftheuchten im Keller für verschiedene mechanische Luftwechsel. Oben: kontinuierliche Lüftung, $n_{50} = 1 \text{ h}^{-1}$, unten: feuchtgesteuerte Lüftung, $n_{50} = 0,5 \text{ h}^{-1}$.

6.2.5 Wieviel Kellerdämmung?

Welche Temperaturen sich in einem Keller einstellen, hängt von einer Vielzahl baulicher, insbesondere auch geometrischer Parameter und von der Nutzung ab.

Eine Parameterstudie zu dieser Fragestellung wurde bereits in [Schnieders 2009] durchgeführt. Dort ergab sich für Keller, die ganz, teilweise oder gar nicht oberhalb der Erdoberfläche liegen, dass bei Dämmung der Außenwand bis Oberkante Gelände die Feuchteverhältnisse unkritisch sind. Dieses Ergebnis wird durch die hier durchgeführten Messungen für einen teilweise im Erdreich liegenden Keller bestätigt.

6.3 Fazit aus der Auswertung der Kellermessungen

Die durchgeführten Messungen zeigen, dass im Keller des modernisierten Altbaus Tevesstraße mit einem U-Wert der Kellerdecke von $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ keine kritischen Feuchteverhältnisse auftreten. In den Sommermonaten kommt es vereinzelt zu relativen Luftfeuchtigkeiten von über 80%, die jedoch nur wenige Tage andauern. In den Wintermonaten beträgt die relative Feuchte um 50%. Wie die Simulation zeigt, liegen Luft- und Strahlungstemperatur im Keller stets nahe beieinander, daher ist bei diesen Bedingungen nicht mit Schimmel zu rechnen, sofern nicht weitere Feuchtebelastungen vorhanden sind.

Die im Objekt zeitweise installierte Feuchtesteuerung für den Abluftventilator funktionierte nicht wie geplant. Wie die Simulation zeigte, hätte die Luftfeuchte aufgrund der relativ hohen Infiltration und der durch die Steuerung reduzierten Luftmengen ohnehin nicht bedeutend abgesenkt werden können. Es wurde deutlich, dass eine Feuchtesteuerung nur in Verbindung mit guter Luftdichtheit der Kellerräume den gewünschten Effekt erzielen kann – wie das realisierte Beispiel Tevesstraße zeigt, können Kellerräume im modernisierten Altbau aber noch immer erstaunlich undicht sein. Der Simulation zufolge wäre unter günstigen Bedingungen eine Reduzierung der relativen Feuchte um etwa fünf Prozentpunkte möglich gewesen.

Aus der Simulation ergeben sich sinnvolle Luftwechselraten zwischen $0,5$ und 2 h^{-1} . Soll der Keller ohne weiteren regelungstechnischen Aufwand belüftet werden, erscheint dies auch durch ausreichend große Leckagen bzw. planmäßig hergestellte, nicht zu große Lüftungsöffnungen möglich. Umgekehrt sind für eine feuchtegesteuerte Lüftung motorisch zu betätigende Lüftungsöffnungen zweckmäßig, um zu Zeiten mit hoher Außenluftfeuchte den Infiltrationsluftwechsel zu minimieren. Sollen auch entfernt gelegene Räume über einen zentral angeordneten Abluftventilator belüftet werden, sind ohnehin eine luftdichte Hülle sowie qualifizierte Außenwandluftdurchlässe und Überströmöffnungen erforderlich.

Eine sinnvolle und zuverlässige Maßnahme stellt unabhängig von der Lüftungsstrategie stets die thermische Ertüchtigung der Kellerwände dar, ggf. ergänzt durch eine ins Erdreich ragende Dämmschürze. Damit können die Kellertemperaturen gewöhnlich so weit angehoben werden, dass keine Feuchteprobleme auftreten.

7 Literatur

- [AkkP 24] Einsatz von Passivhaustechnologien bei der Altbau-Modernisierung; Protokollband Nr. 24 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III; Passivhaus Institut, Darmstadt 2003.
- [AKKP 39] Schrittweise Sanierung mit Passivhauskomponenten. Protokollband Nr. 39 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase IV; Passivhaus Institut, Darmstadt 2009.
- [Bastian 2011] Bastian, Zeno: *EnerPHit*-Zertifizierung für die Altbaumodernisierung mit Passivhaus- Komponenten. In: Tagungsband zur 15. Internationalen Passivhaustagung Innsbruck. Passivhaus Institut, Darmstadt 2011
- [Chmura et al. 2005] Chmura, L.; Rozanski, K.; Necki, J.M.; Zimnoch, M.; Kuc, T. & A. Korus: Atmospheric concentrations of carbon dioxide and its isotopic composition in southern Poland: comparison of high-altitude site and a near-by urban environment. In: Biogeosciences Discussions, Vol. 2, 1849-1865. 2005
- [DIN 1946 T6] DIN 1946 Teil 6: Raumlufttechnik - Teil 6: Lüftung von Wohnungen Anforderungen, Ausführung, Abnahme; Beuth Verlag; Berlin 2009
- [DIN 4108-T2] Deutsches Institut für Normung: DIN 4108, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz; Beuth-Verlag, Berlin, April 2003
- [DIN EN 13779] Deutsches Institut für Normung: Lüftung in Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme. Beuth-Verlag, Berlin, September 2007
- [Ebel et al. 2003] Ebel, W.; Großklos, M.; Knissel, J.; Loga, T.; Müller, K.: Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern – Eine vergleichende Analyse der Nutzungsfaktoren am Beispiel der „Gartenhof-siedlung Lummerlund“ in Wiesbaden-Dotzheim, Endbericht; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt 2003
- [ELV 2008] ELV Elektronik AG: Gegen Feuchte und Schimmel – Luftentfeuchter-Steuerung FS20 LES. Bau- und Bedienungsanleitung. ELV, Leer 2008
- [EN 832] EN 832:1998, Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung des Heizenergiebedarfs - Wohngebäude, Dezember 1998

- [EPBD 2010] Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung). 19. Mai 2010
- [Feist 2001] Feist, Wolfgang: Stellungnahme zur Vornorm DIN V 4108 Teil 6:2001 aus Sicht der Passivhausentwicklung, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 39, Fachinformation PHI-2001/10, Darmstadt, Passivhaus Institut, 2001.
- [Feist 2004] Feist, Wolfgang: Wärmeübergabeverluste im Licht der baupraxis. In: Protokollband Nr. 28 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser „Wärmeübergabe- und Verteilverluste im Passivhaus“; Passivhaus Institut; Darmstadt September 2004.
- [Gemis] Fritsche, U.; Leuchtner, J.; Matthes, F.C.: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 4.6, Öko-Institut, Darmstadt September 2005.
- [Henninger 2005] Henninger, S.: Analyse der atmosphärischen CO₂-Konzentration am Beispiel der Stadt Essen. Essener Ökologische Schriften; Band 23; Westarp Wissenschaft-Verlags GmbH, Hohenwarsleben 2005
- [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 (unveröffentlicht).
- [Kah et al. 2010] Kah, O.; Peper, S.; Kaufmann, B.; Ebel, W.; Feist, W.; Bastian, Z.: Untersuchung zum Außenluftwechsel und zur Luftqualität in sanierten Wohnungen mit konventioneller Fensterlüftung und mit kontrollierter Lüftung. IEA SHC TASK 37, Passivhaus Institut, Darmstadt 2010.
- [Kaufmann et al. 2009] Kaufmann, B.; Pfluger, R.; Peper, S.; Feist, W.: Sanierung mit Passivhauskomponenten, Planungsbegleitende Beratung und Qualitätssicherung Tevesstraße Frankfurt a.M. Passivhaus Institut, Darmstadt 2009.
- [Passipedia] Passipedia: Online- Passivhaus Wissensdatenbank. www.passipedia.de
- [Ptak 2009] Patk, D.: Bodennahe CO₂-Konzentration in zwei Städten unterschiedlicher Topographie. Essener Ökologische Schriften; Band 28; Westarp Wissenschaft-Verlags GmbH, Hohenwarsleben 2009

- [Peper et al. 2004] Peper, S.; Feist, W.; Pfluger, R.: Ein nordorientiertes Passivhaus. Messtechnische Untersuchung und Auswertung von 19 Wohnungen im Passivhaus-Standard in Frankfurt-Bockenheim, Gremppstraße, Endbericht, Passivhaus Institut, Darmstadt, Dezember 2004.
- [Peper et al. 2009] Peper, Søren; Grove-Smith, Jessica; Feist, Wolfgang: Sanierung mit Passivhauskomponenten. Messtechnische Untersuchung und Auswertung Tevesstraße Frankfurt a.M. Passivhaus Institut; Darmstadt Februar 2009.
- [Peper/Feist 2008] Peper, S.; Feist, W.: Gebäudesanierung "Passivhaus im Bestand" in Ludwigshafen / Mundenheim, Messung und Beurteilung der energetischen Sanierungserfolge. Passivhaus Institut, Darmstadt 2008.
- [Peper/Feist/Kah 2001] S. Peper, W. Feist, O. Kah: Meßtechnische Untersuchung und Auswertung Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover Kronsberg, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 19, Endbericht Messzeitraum Oktober 1999 bis April 2001 Passivhaus Institut/ Stadtwerke Hannover, Darmstadt / Hannover 2001.
- [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 et al. 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] Feist, W., Schnieders, J., Pfluger, J., Kaufmann, B. und Kah, O.: Passivhaus Projektierungs Paket 2004. Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser, Fachinformation PHI-2007/1, Darmstadt, Passivhaus Institut, Juni 2007.
- [Schnieders et al. 2001] Schnieders, J.; Feist, W.; Pfluger, R.; Kah, O.: CEPHEUS-Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung, Endbericht, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 22, Fachinformation PHI-2001/9.
- [Schnieders 2009] Schnieders, J.: Einfluss von Kellerdeckendämmung auf die Feuchtebelastung von Kellerräumen; Passivhaus Institut; Darmstadt 2009. Download unter www.passiv.de

- [Schulze Darup et al 2005] Schulze Darup, Burkhard (Herausgeber): Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg – energetische Gebäudesanierung mit Faktor 10. Abschlussbericht der wissenschaftlichen Begleitforschung. Nürnberg 2005.
- [Werner/Laidig 1999] Werner, J.; Laidig, M.: Grundlagen der Wohnungslüftung im Passivhaus. In: Protokollband Nr. 17 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser „Dimensionierung von Lüftungsanlagen in Passivhaus“; Passivhaus Institut; Darmstadt Oktober 1999.