



Bergische Universität Wuppertal



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen

Energieoptimiertes Bauen: Demonstrationsbauvorhaben

Evaluierung eines Niedrigenergie- und Passivhauses in der
Sanierung – „Neue Bourse“, Wuppertal

Förderkennzeichen: 0329750U

Schlussbericht

Projektnehmer

Bergische Universität Wuppertal
Fachbereich D, Abteilung Architektur
Lehrgebiet Bauphysik und Technische Gebäudeausrüstung, b+tga
Prof. Dr.- Ing. Karsten Voss
Pauluskirchstr. 7
42285 Wuppertal

Wuppertal, Oktober 2008



Vorwort

Der vorliegende Abschlussbericht bezieht sich auf das Forschungsprojekt „Energieoptimiertes Bauen: Demonstrationsbauvorhaben: Evaluierung eines Niedrigenergie und Passivhauses in der Sanierung – Neue Burse“.

Das Projekt wurde im Rahmen des Förderkonzepts „Energieoptimiertes Bauen“ (EnOB), Teilbereich Energetische Verbesserung der Gebäudesubstanz (EnSan), von Mai 2004 bis Januar 2008 mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über den Projektträger Jülich unter dem Förderkennzeichen: 0329750U gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Die Projektbeteiligten:

Bergische Universität Wuppertal Fachbereich D, Abteilung Architektur Bauphysik und Technische Gebäudeausrüstung Prof. Dr.-Ing. Karsten Voss	Pauluskirchstraße 7 42285 Wuppertal
Architektur Contor Müller Schlüter	Kolkmannhaus Hofaue 55 42103 Wuppertal
Hochschul-Sozialwerk Wuppertal Anstalt des öffentlichen Rechts	Max-Horkheimer Straße 15 42119 Wuppertal

Der Bericht umfasst 113 Seiten, zuzüglich Anhang.

Bergische Universität Wuppertal,

Wuppertal, Oktober 2008

Prof. Dr.-Ing. Karsten Voss

Dipl.-Ing. Peter Engelmann
Projektleitung



1. Kurzfassung

Das Studentenwohnheim Burse wurde 1977 am Fuß der wenige Jahre zuvor gegründeten „Gesamthochschule Wuppertal“ errichtet. Mit rund 600 Wohnplätzen, aufgeteilt auf zwei Gebäude, errichtete das Hochschul- Sozialwerk Wuppertal (HSW) eines der damals größten Studentenwohnheime in Deutschland. Das Wohnheim gliedert sich in zwei voneinander getrennte, nahezu gleich große Baukörper. Nach intensiver Nutzung war das Gebäude baulich verbraucht und strukturell veraltet. Die fehlende Attraktivität des Wohnraumes führte zu Leerständen und zur Entstehung eines sozialen Brennpunktes.

Nach umfangreicher Sanierung wurde 2001 bei der Fertigstellung des ersten Bauabschnitts das Verbrauchsniveau eines Niedrigenergiehauses (NEH) angestrebt. Beim 2003 fertig gestellten zweiten Bauabschnitt wurde der Wärmeschutz wesentlich verbessert und eine zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung realisiert. Dieser Teil der "Neuen Burse" ist derzeit das größte Wohnhaus Deutschlands, das in Anlehnung an das Passivhaus-Konzept (PH) im Bestand realisiert wurde.

Die wissenschaftliche Auswertung der Sanierung und des Betriebs der „Neuen Burse“ im Rahmen des Forschungsprojekts EnOB begann ein Jahr nach Fertigstellung und Bezug des zweiten, mit Passivhauskomponenten sanierten Gebäudes. Im Rahmen des Energiemonitorings konnte ermittelt werden, dass im NEH der berechnete Heizwärmebedarf sogar unterschritten wird, was allerdings auf zu geringe Luftwechsel und damit mangelnde Raumluftqualität zurückzuführen ist. Im PH konnte ein anfänglich überhöhter Heizwärmeverbrauch durch umfangreiche Betriebsoptimierungen deutlich gesenkt werden, Probleme in der Betriebsführung und unangepasstes Nutzerverhalten führen jedoch zu einer leichten Überschreitung der errechneten Bedarfskennwerte.

Durch umfangreiche Untersuchungen, d.h. sowohl der messtechnischen Erfassung verbrauchsrelevanter Parameter, als auch der Einbeziehung der Nutzer durch Nutzerbefragungen, wird die spezielle Nutzungsform „Studentenwohnheim“ eingehend untersucht. Die hohe Nutzungsdichte stellt hohe Anforderungen an den Gebäudebetrieb, beispielsweise an die Lüftung und bedingt typische Verbrauchsmuster, wie einen hohen spezifischen Wärmeverbrauch der Trinkwassererwärmung.

Die Überschreitung von Planungswerten ist nicht zuletzt auch teilweise auf die Nutzer zurückzuführen. Für viele Bewohner ist ihr Apartment im Wohnheim die erste eigene Wohnung. Ein „richtiger“ Umgang mit dem Gebäude (Lüftung, Heizung, Entsorgung, Wasserverbrauch,...) muss vielfach erst „erlernt“ werden. Durch Mieterwechsel kommen beständig neue, „unerfahrene“ Nutzer hinzu, sodass sich im Schnitt immer nur eine Teilmenge ergibt, die das Gebäude kennt und sich „richtig“ verhält. Ein Lerneffekt, wie bei Objekten mit längeren Nutzungszeiten, stellt sich daher nur begrenzt ein.

Ein im Vergleich zum Altbau enorm verringerter Wärmeverbrauch, verknüpft mit hoher Qualität des Wohnkomforts sowie der Architektur zeigen in Form von Vollbelegung und Wartelisten für Wohnheimplätze den Erfolg der Sanierung für den Betreiber, das HSW.



1. Kurzfassung	3
2. Die Neue Burse	6
2.1. Der Bestand	6
2.2. Die Sanierung	8
2.2.1. Bauabschnitt Niedrigenergiehaus	11
2.2.2. Bauabschnitt Passivhaus	13
3. Durchführung des Monitorings	16
3.1. Messdatenerfassung	16
3.1.1. Stationäre Messtechnik	16
3.1.2. Langzeitmonitoring	18
3.1.3. Dezentrale Datenerfassung	19
3.2. Qualitätskontrolle	20
3.2.1. Tracergasmessung	20
3.2.2. Thermografie	21
3.3. Nutzerbefragung	22
3.4. Erfassung ökonomischer Randbedingungen	22
4. Analyse Energie	23
4.1. Jahresbilanzen des Energieverbrauchs	23
4.1.1. Endenergieverbrauch	24
4.1.1.1. Endenergieverbrauch Wärme	25
4.1.1.2. Endenergieverbrauch Strom	28
4.1.2. Primärenergieverbrauch und Klimagasemissionen	30
4.2. Analyse Heizwärmeverbrauch	33
4.2.1. Quantifizierung interner Lasten	34
4.2.2. Heizwärme Niedrigenergiehaus	36
4.2.3. Heizwärme Passivhaus	39
4.2.4. Untersuchung passiv-solarer Gewinne	42
4.2.5. Optimierungsmaßnahmen Heizwärmeversorgung	46
4.2.5.1. Maßnahmen im NEH	46
4.2.5.2. Bereitstellungsverluste im PH	46
4.2.5.3. Regelung der Luftheizung im PH	49



4.3. Wasserverbrauch und Trinkwassererwärmung	51
4.4. Stromverbrauch	56
4.4.1. Stromverbrauch TGA NEH	57
4.4.2. Stromverbrauch TGA PH	59
5. Nutzung und Nutzerakzeptanz	62
5.1. Raumlufthtemperaturen und Thermische Behaglichkeit	62
5.1.1. Raumlufthtemperatur und Komfort im Winter	62
5.1.1.1. Messungen im NEH	62
5.1.1.2. Messungen im PH	66
5.1.2. Raumlufthtemperatur und Komfort im Sommer	74
5.1.2.1. Messungen im NEH	75
5.1.2.2. Messungen im PH	77
5.2. Lüftung und Luftqualität	79
5.2.1. Lüftung und Luftqualität im NEH	79
5.2.1.1. Nutzung der Bedarfslüftung	80
5.2.1.2. Fensteröffnungszeiten im NEH	82
5.2.1.3. CO ₂ Konzentration im NEH	83
5.2.1.4. Optimierung der Lüftung im NEH	84
5.2.2. Lüftung und Luftqualität im PH	86
5.2.2.1. Betrieb der Lüftungsanlage	86
5.2.2.2. Fensteröffnungszeiten im PH	91
5.2.2.3. CO ₂ Konzentration im PH	93
5.3. Nutzerbefragung	94
5.3.1. Befragung im Sommer 2005	94
5.3.2. Nutzerbefragung im Winter 2005 / 2006	96
5.4. Erstellung eines Nutzerinfoblatts	105
6. Ökonomie	108
6.1. Investitionskosten	108
6.2. Baunutzungskosten	109
7. Literatur und Quellenangaben	112
8. Anhang	113



2. Die Neue Burse

Das Studentenwohnheim Burse wurde 1977 am Fuß der wenige Jahre zuvor gegründeten „Gesamthochschule Wuppertal“ errichtet. Für rasch steigende Studentenzahlen sollte schnell kostengünstiger Wohnraum erstellt werden. Mit rund 600 Wohnplätzen, aufgeteilt auf zwei Gebäude, errichtete das Hochschul- Sozialwerk Wuppertal (HSW) eines der größten Studentenwohnheime in Deutschland.

Das Wohnheim gliedert sich in zwei voneinander getrennte nahezu gleich große Baukörper, die in einer ausgeprägten Hanglage errichtet wurden.



Bild 1 Luftaufnahme der beiden sanierten Gebäude. Auf dem Bild ist der Kreuztypus der beiden Gebäude, sowie die Lage unmittelbar am Fuß des Hauptcampus der Bergischen Universität Wuppertal zu erkennen.
Bild: Google Earth

Die Gebäude weisen eine Höhe von 6 - 8 Geschossen auf, die jedoch durch die extreme Topographie von der Zufahrtssituation aus erheblich niedriger wirken. Die Baumasse ist als Kreuztypus mit jeweils 4 Schenkeln organisiert.

2.1. Der Bestand

Die beiden Gebäude des Wohnheims waren jeweils flügel förmig um ein zentrales, wenig belichtetes, Treppenhaus gruppiert. Zimmer mit 12 Quadratmetern sowie Wohngruppen mit 16 Personen führten zu starker Abnutzung. Zentrale Gemeinschaftsküchen und Sanitäreinheiten für bis zu 32 Personen, fehlende Medienanschlüsse, kleine, wenig Sonne einlassende Fenster – dieser Standard entsprach nicht mehr den heutigen Anforderungen. Nach intensiver Nutzung war das Gebäude baulich verbraucht und strukturell veraltet. Die fehlende Attraktivität des Wohnraumes führte zu Leerständen und zur Entstehung eines sozialen Brennpunktes.



Bild 2 Außenaufnahmen des Wohnheims Burse vor der Sanierung. Mit zwei sternförmigen Gebäuden und 600 Wohneinheiten eines der größten Wohnheime Deutschlands.
Bild: acms

Nach umfangreicher Bestandsaufnahme wurden in unterschiedlichen Szenarien Maßnahmen hinsichtlich ihrer Investitions- und Betriebskosten untersucht. Die Reduzierung der Sanierung auf Beseitigung bautechnischer Mängel zeigte sich als langfristig nicht wirtschaftliche Lösung, da die Situation der Vermietbarkeit und der stetig steigenden Betriebskosten auf diese Weise nicht verbessert werden konnte. Im Vergleich der Modernisierung gegenüber Totalabriss und Neubau wurden in einer Kostenabschätzung Kosteneinsparung um 25% ermittelt [acms]. Der wirtschaftliche Vorteil in der Nutzung der vorhandenen Bausubstanz lag vor allem in der durch die starke Hanglage begründeten aufwändigen Gründung für ein neues Gebäude. Die hinzu kommenden Kosten für den Rückbau des bestehenden Gebäudes hätten einen Neubau weiter verteuert.

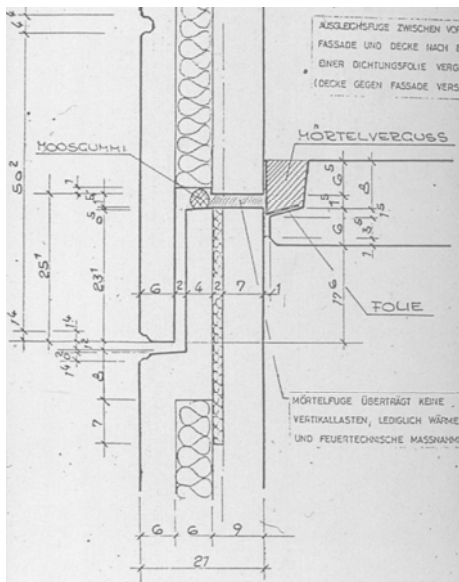


Bild 3 Schnitt durch die alte Fassade (links), sowie Bauschaden im Giebelbereich (rechtes Bild). Die undichte und unzureichend gedämmte Fassade führte zu hohem Heizwärmeverbrauch und durchfeuchtung ganzer Fassadenteile.
Bild: acms

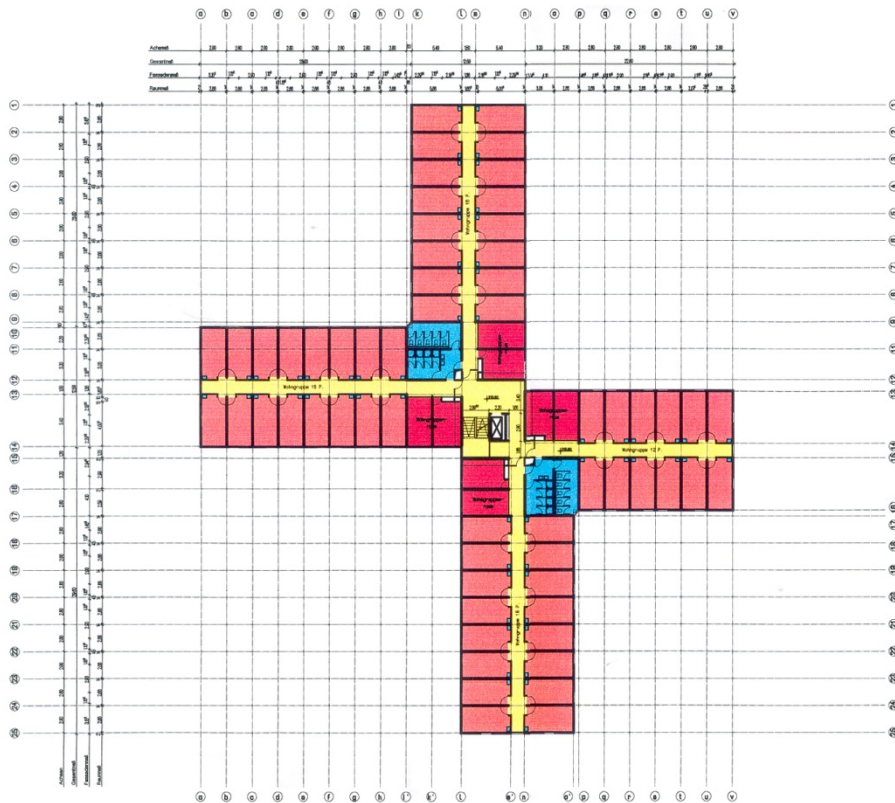


Bild 1 Grundriss eines der beiden Gebäude vor der Sanierung. Ein Flur mit 16 Wohneinheiten teilte sich eine Küche (rot markiert), die Sanitärräume (blaue Markierung) waren für 32 Benutzer vorgesehen, in einzelnen Zimmern gab es jeweils nur ein Handwaschbecken.
 Quelle: acms

2.2. Die Sanierung

Das HSW als Betreiber der Gebäude beschloss, nach einer Bedarfsanalyse für studentischen Wohnraum, zunächst das erste Gebäude der Burse zu sanieren. Nach dem Beschluss, das vorhandene Gebäude weiter zu nutzen, gab es zwei Vorgaben des Bauherren:

- Trotz einer gewünschten Vergrößerung der individuellen Räume für die Nutzer sollten möglichst keine Wohneinheiten wegfallen.
- Das Gebäude sollte neben der Schaffung moderner Infrastruktur (Einzel- Apartments, Internet-Zugang) auch unter energetischen Gesichtspunkten über die Mindest- Anforderungen an Gebäude zum Zeitpunkt des Umbaus hinausgehen.

Daraus wurde ein Sanierungskonzept entwickelt, bei dem zunächst die alte Fassade entfernt und das Gebäude anschließend komplett entkernt wurde. Die verbleibende Betonstruktur wurde durch eine Wabenstruktur aus Ortbeton erweitert und so die Zimmer um ca. 2m² vergrößert. So wurde genug Raum für ein Duschbad und eine Küchenzeile gewonnen. Die Wohngruppen wurden in Einzelapartments (an den Giebelseiten jeweils Zweier- WGs) umgewandelt.



Die Erweiterung diente auch der statischen Aussteifung des Gebäudes, sodass der zentrale Erschließungskern mitsamt den nicht mehr benötigten Gemeinschaftsräumen entfernt werden konnte. Die Erschließung des neuen Gebäudes erfolgt über ein vor die thermische Hülle gestelltes, vollverglastes Treppenhaus mit Lift.

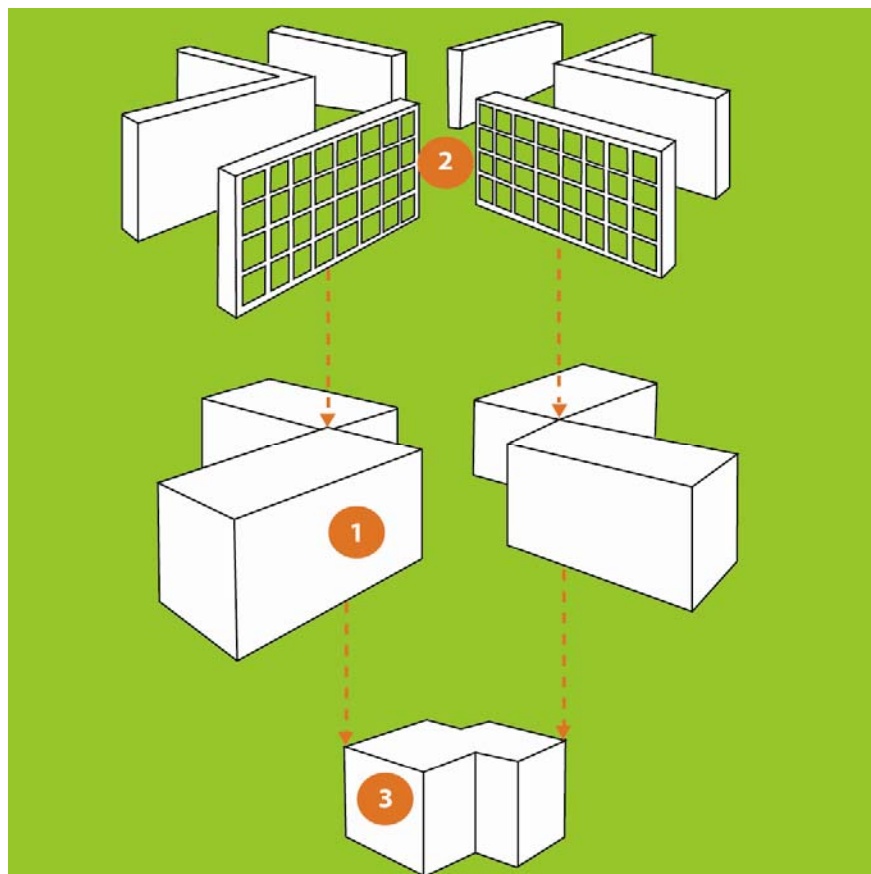


Bild 2 Schematischer Ablauf der Sanierung. Nach Entfernen der alten, vorgehängten Fassade wurde die Gebäudestruktur um zwei Meter erweitert. Die Erweiterung aus Ortbeton übernimmt auch die Aussteifung der Flügel, sodass der als Stütze dienende alte Kern mit den Gemeinschafts- und Erschließungsräumen entfernt werden konnte. Quelle: acms

Die neue Fassade wurde als Holzleichtbaukonstruktion ausgeführt, die vor der Montage weitestgehend vorgefertigt wurde. Bis zu 12 m große Elemente (vier Fenster) wurden inkl. Fenster vorgefertigt und am Gebäude montiert (siehe Bild 4).



Bild 4 Die neue Fassade wurde aus vorgefertigten Holzleichtbauelementen an die Baustelle geliefert und dort montiert.
Quelle: acms

Durch das offene Treppenhaus und große Glasflächen in den Eingangs-türen, sowie den giebelseitigen Türen zur Fluchttreppe können die Flure besser mit Tageslicht beleuchtet werden. Für die Flure wurde ein Farbkonzept entwickelt, das den Fluren, trotz der durch den Baukörper vorgegebenen Dimensionen einen individuellen Charakter verleiht. In Tab. 1 sind die Flächen der sanierten Gebäude aufgelistet. Durch die Erweiterung des Gebäudes konnten die Zimmer vergrößert werden, ohne dass es zu einer Verringerung der Wohneinheiten kam. Die Bruttogeschossfläche (BGF) konnte insgesamt, trotz Wegfall der Gebäudekerne, um 30% vergrößert werden.

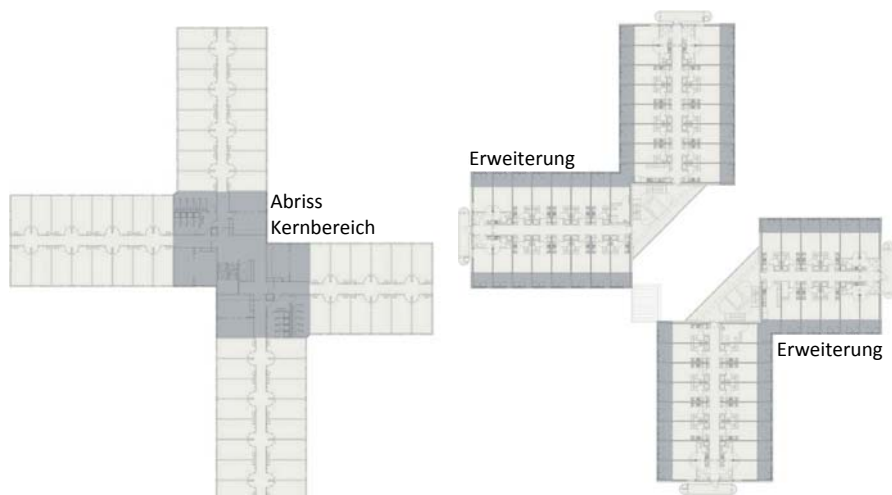


Bild 5 Grundriss eines Gebäudes vor und nach der Sanierung. Der Kernbereich mit Treppenhaus, Küchen und sanitären Anlagen wurde entfernt. Raum für Küchenzeile und Duschbad in den Apartments wurde durch die Erweiterung des Rohbaus mittels der vorgesetzten Wabenstruktur gewonnen.
Quelle: acms



Tab. 1 Flächenangaben der sanierten Bauabschnitte. Durch die Erweiterung der Gebäude konnte ein Flächengewinn um 30% bezogen auf die BGF erreicht werden (BGF des Altbaus: 14.334,50 m²).

	NEH	PH	Summe	Einheit
BRI	28.220,57	28.276,16	56.496,73	m ³
BGF	9.890,47	10.025,26	19.915,73	m ²
HNF	6.140,36	6.244,07	12.384,43	m ²
NNF	528,40	743,81	1.272,21	m ²
FF	446,67	217,40	664,07	m ²
VF	1.304,51	1.392,06	2.696,57	m ²
KF	1.470,53	1.427,92	2.898,45	m ²
NGF	8.419,94	8.597,34	17.017,28	m ²
Anzahl Wohneinheiten:	303	326	629	-

Die architektonische Qualität des Umbaus wurde mit mehreren Preisen ausgezeichnet, unter anderem: „Gutes Bauen 2000“ (Bund Deutscher Architekten, BDA), Bundesbauherrenpreis (BDA / Deutscher Städtetag), Architekturpreis Zukunft Wohnen 2004 (Bundesverband deutscher Zementindustrie e.V.), Deutscher Holzbaupreis (Bund Deutscher Zimmermeister).



Bild 6 Bilder der sanierten Gebäude. Die Sanierung wurde mit mehreren Architekturpreisen ausgezeichnet, darunter der „Bauherrenpreis 2001“, sowie der „Architekturpreis Zukunft Wohnen 2004“. Quelle: Tomas Riehle

2.2.1. Bauabschnitt Niedrigenergiehaus

Nach der Entscheidung, das Wohnheim zu sanieren, sollte die Ausführung des ersten Gebäudes nach Niedrigenergiestandard realisiert werden. Bild 7 zeigt den Grundriss eines Einzelapartments. Daran ist das



Versorgungskonzept von Heizwärme und Lüftung verdeutlicht. Die Sanierungsmaßnahmen liefen von September 1998 bis September 2000, zum Wintersemester 200/2001 wurde das Gebäude wieder bezogen [acms].

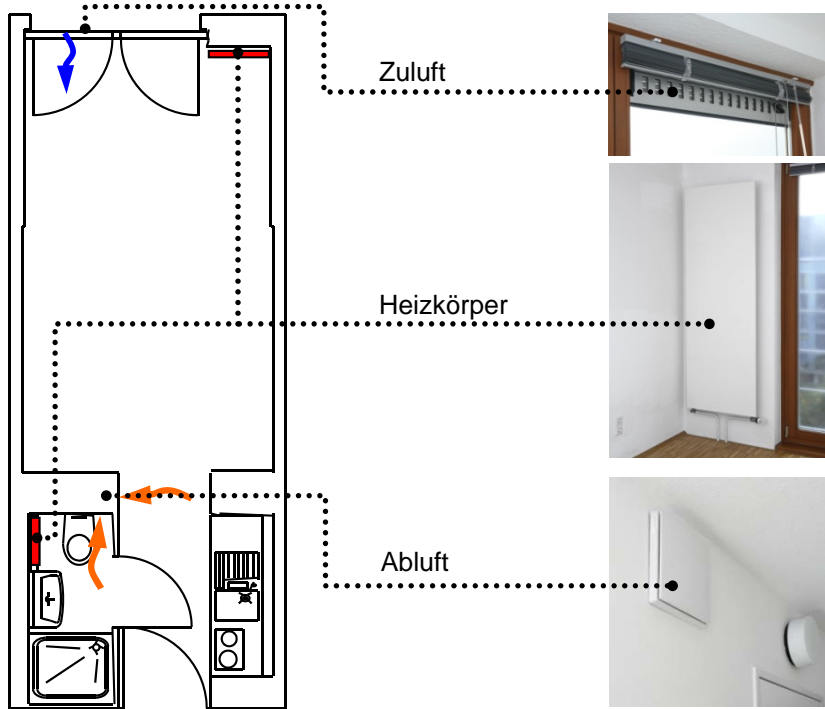


Bild 7 Grundriss eines Einzelapartments im NEH. Hervorgehoben sind die Heizkörper in Bad und Zimmer, sowie die Luftwege. Bad und Zimmer verfügen über bedarfsgesteuerte Abluftventilatoren, Außenluft strömt über ein Überströmelement in einem Fensterflügel nach.

Tab. 2 Gebäudedaten des ersten, als Niedrigenergiehaus ausgeführten Bauabschnitts

Außenwände	Dämmstärke 18 cm, U-Wert: 0,37 W/m ² K
Fenster	2 Scheiben Wärmeschutzverglasung U-Wert: 1,56 W/m ² K
Transmissionsverluste H_T	0,57 W/m ² K (H_T' gemäß EnEV) 0,62 W/m ² _{NGF} K
Lüftungswärmeverluste $H_{v,NGF}$	0,35 W/m ² _{NGF} K (bei $n=0,5 \text{ h}^{-1}$)
Lüftung	Fensterlüftung, dezentrale, bedarfsgesteuerte Abluft
Wärmeversorgung	Anschluss ans Fernwärmenetz der Wuppertaler Stadtwerke
Flächen	BGF: 9.890 m ² NGF: 8.420 m ² A_N : 6849 m ²
Heizwärmebedarf	68 kWh/m ² a (nach PHPP)



2.2.2. Bauabschnitt Passivhaus

Nach Fertigstellung des ersten Gebäudes wurde zunächst erneut der Bedarf für den Umbau des zweiten Gebäudes ermittelt. Ergebnis war, dass auch das zweite Gebäude entsprechend modernisiert werden sollte [Diederichs1999]. Aus den ersten Betriebserfahrungen im NEH hatte man bereits erkannt, dass eine moderne, dichte Gebäudehülle in Kombination mit der hohen Belegungsdichte im Wohnheim zu raumlufthygienischen Problemen führt. Es wurde beschlossen, bei ansonsten gleicher Struktur des Sanierungskonzepts, im zweiten Gebäude eine ventilatorgestützte Lüftungsanlage als Zu- und Abluftanlage zu integrieren.

Ausgehend von einer geplanten Wärmerückgewinnung wurde anschließend untersucht, unter welchen Bedingungen eine Sanierung auf Passivhausstandard realisierbar wäre. In einer Vorprojektierung wurden von der Passivhaus- Dienstleistungs- GmbH Berechnungen durchgeführt, die die notwendigen Parameter (Wärmeschutz, Dimensionierung und Qualität der Lüftung) festlegte [PHD2001].

In der Ausführung wurden die meisten dieser Parameter umgesetzt (Dämmstandard, passivhaustaugliche Fenster), speziell bei der Lüftung konnte die Qualität der Vorplanung aus konstruktiven- und aus Kostengründen nicht eingehalten werden (siehe ,5.2.2.1 Betrieb der Lüftungsanlage'). In einer Neuberechnung ergibt sich für das Gebäude ein Heizwärmebedarf von 26 kWh/m²a.

In Bild 8 ist ebenfalls anhand des Grundrisses eines Einzelapartments das Versorgungsschema für Heizwärme und Lüftung dargestellt.

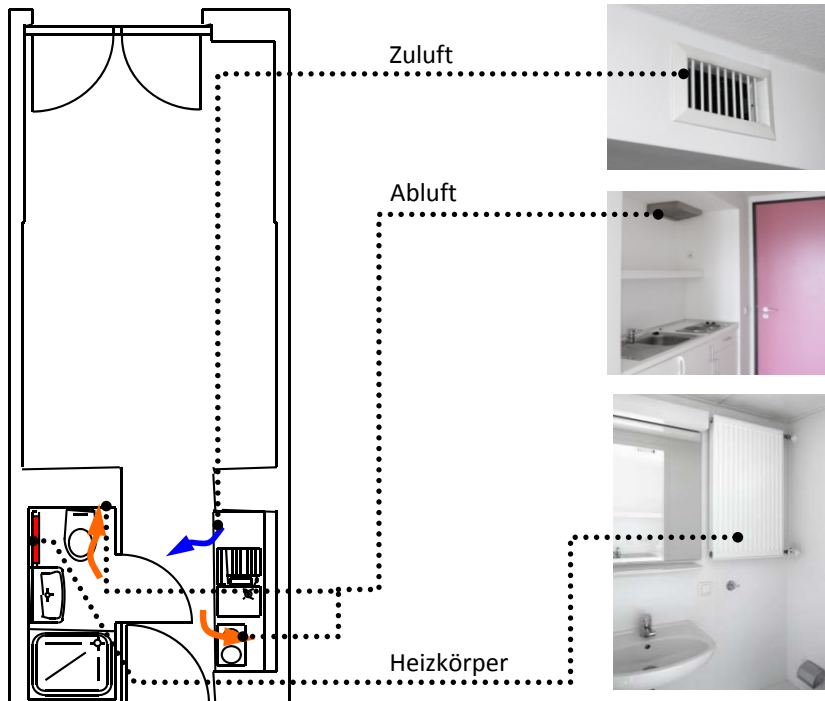


Bild 8 Grundriss Konzept der Heizung und Lüftung eines Einzelapartments im PH. Lediglich das Bad verfügt über einen Heizkörper. Im Zimmer wird benötigte Heizwärme über die zentrale Lüftungsanlage eingebracht. Durch die Lüftungsanlage wird dauerhaft Luft aus dem Bad und über der Küchenzeile abgesaugt, die dem zentralen Lüftungsgerät und der Wärmerückgewinnung auf dem Dach des Gebäudes zugeführt wird. Hier wird die Luft vorgewärmt und im Bedarfsfall nacherhitzt und anschließend in die Zimmer verteilt.

Im PH unterscheiden sich die Einzelapartments von den giebelseitigen Doppelapartments dadurch, dass bei diesen auch die Zimmer mit Heizkörpern ausgerüstet wurden.

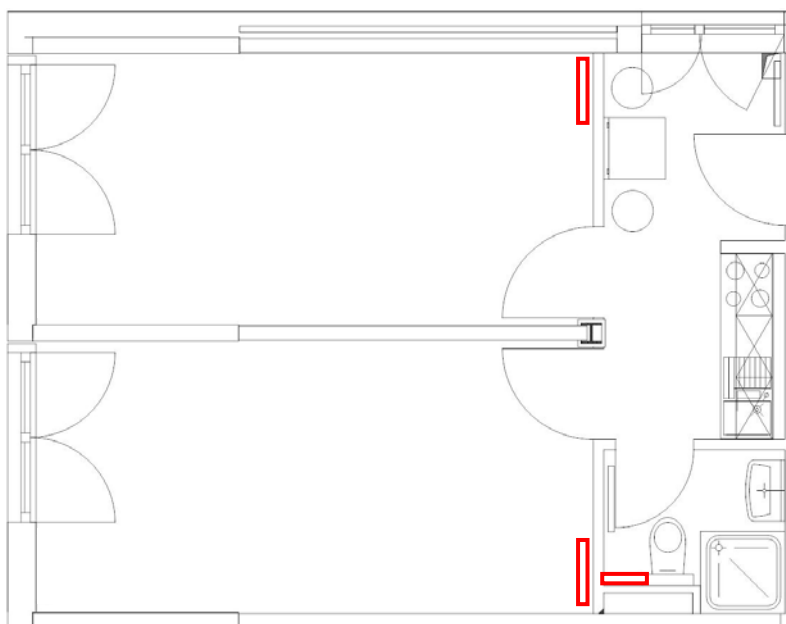


Bild 9 Grundriss einer Zweier-WG. In allen Fluren sind jeweils an den Giebelseiten entsprechende Doppelapartments angeordnet. Da das außenliegende Zimmer zwei Außenwände hat, beschloss man diese zusätzlich mit einem Heizkörper auszustatten. Ausgeführt wurden die Heizkörper in beiden Zimmern.



Tab. 3 Gebäudedaten des zweiten, mit Passivhauskomponenten sanierten Bauabschnitts

Außenwände	Dämmstärke 28 cm U-Wert: 0,15 W/m ² K
Fenster	3 Scheiben, U-Wert: 0,82 W/m ² K
Transmissionsverluste H_T	0,28 W/m ² K (H_T' gemäß EnEV) 0,30 W/m ² _{NGF} K
Lüftungswärmeverluste $H_{v,NGF}$	0,19 W/m ² _{NGF} K (bei $n=0,6 \text{ h}^{-1}$)
Lüftung	Zentrale Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung
Wärmeversorgung	Anschluss ans Fernwärmenetz der Wuppertaler Stadtwerke
Flächen	BGF: 10025 m ² NGF: 8597 m ² A_N : 8352 m ²
Heizwärmebedarf	26 kWh/m ² a (nach PHPP)



3. Durchführung des Monitorings

Um die Sanierungsmaßnahmen an der Neuen Bourse umfassend und ganzheitlich zu erfassen und zu bewerten, wurden die Bereiche Energieverbrauch, Nutzerakzeptanz und ökonomische Fragestellung mit verschiedenen Werkzeugen bearbeitet, bzw. unter verschiedenen Fragestellungen untersucht. In den folgenden Abschnitten werden die in den einzelnen Schwerpunkten genutzten Methoden und Werkzeuge dargestellt.

3.1. Messdatenerfassung

Um die Energieströme zum Betrieb des Gebäudes zu erfassen und zu bewerten wurden verschiedene Systeme zur Messdatenerfassung eingesetzt. Im Bereich der Haustechnik wurden an zentralen Stellen Verbrauchszähler und Temperaturfühler eingebaut.

Da zu Beginn des Monitorings beide Bauabschnitte bereits genutzt wurden, war eine nachträgliche Installation von Sensoren in den Apartments schwierig. Hier wurde mit dezentralen Erfassungsgeräten gearbeitet, die ihre Messgrößen intern speichern und deren Daten nach Abschluss der Messung ausgelesen und ausgewertet werden können.

Schließlich wurden Messungen zur Qualitätskontrolle verschiedener Bauteile durchgeführt, wie Tracergas- Messungen zur Prüfung der Lüftungsanlagen des PH oder Thermografieaufnahmen.

3.1.1. Stationäre Messtechnik

Zur Erfassung thermischer Energieströme wurden an den jeweiligen Hauptverteiltern in den Technikräumen der Gebäude Wärmemengenzähler in die einzelnen Heizkreise installiert. Im PH waren bereits in der Bauphase Unterzähler eingebaut worden, im NEH wurden sie im Winter 2004 nachgerüstet. Die Wärmemengenzähler wurden mit einer M-Bus Schnittstelle nachgerüstet über die sie in einem 5 min Zyklus von einem PC abgefragt wurden.

Der Stromverbrauch der TGA (im wesentlichen Pumpen und Lüftung im PH) wurde über Stromzähler erfasst. Diese waren mit einem Impulsausgang ausgerüstet, die Impulse wurden über ein M-Bus-fähiges elektronisches Zählwerk aufgenommen und so ebenfalls per M-Bus erfasst.

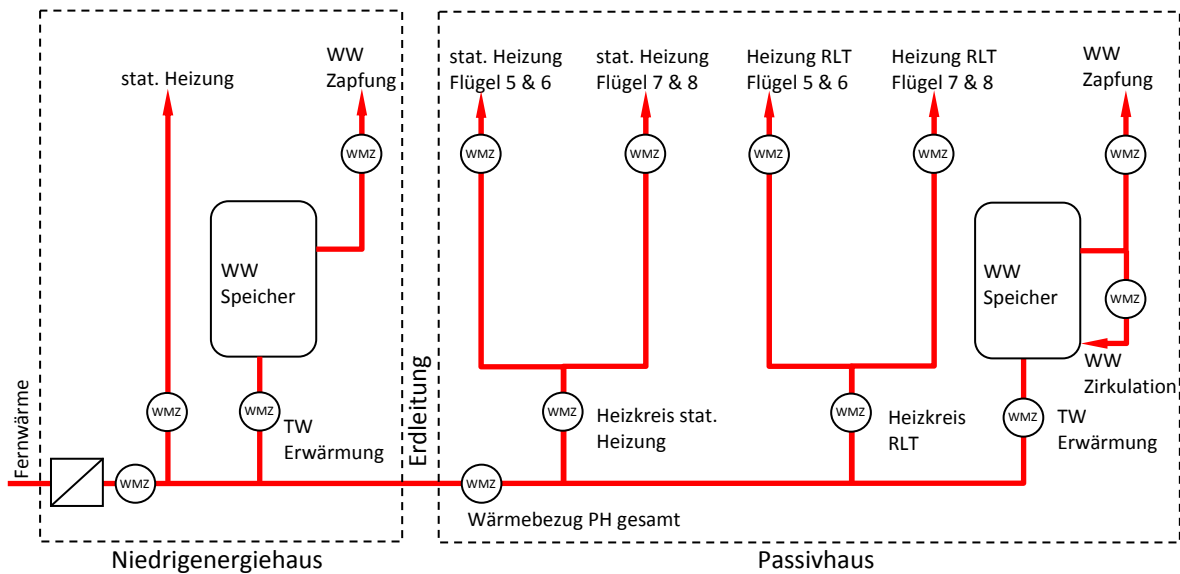


Bild 10 Schematischer Aufbau der Wärmeversorgung des Wohnheims und Lage der Wärmemengenzähler. Die Gebäude werden über einen Fernwärmeanschluss der Wuppertaler Stadtwerke (WSW) mit Fernwärme versorgt. Die Fernwärmeübergabestation steht im Technikraum des NEHs. Hier werden zunächst der Heizkreis der statischen Heizung im NEH und die Trinkwassererwärmung versorgt. Das PH ist über eine Erdleitung am Hauptverteiler des NEH angeschlossen. Im PH verteilt sich die Wärme auf den Heizkreis der statischen Heizflächen in den Bädern, den Heizregistern in den Lüftungsanlagen, sowie die Trinkwassererwärmung. Neben der primärseitigen Endenergie zur Trinkwassererwärmung wurde auch die Wärmemenge der Warmwasserzapfung gemessen, indem ein Wärmemengenzähler in der Kaltwasser- Zuleitung installiert wurde, der die entnommene Wärme aus Zapfmenge, Warmwasser- und Frischwassertemperatur ermittelt. Die Erfassung der Zirkulationsverluste konnte nur im PH realisiert werden, da es nach Montage eines WMZ in der Zirkulationsleitung des NEH zu massiven Störungen in der Netzhydraulik kam, die nicht behoben werden konnten.

Neben den Energiezählern wurden auch Temperaturen dauerhaft gemessen. In allen Lüftungsanlagen des PH wurden die Temperaturen der Luftströme an mehreren Stellen erfasst, in den Treppenhäusern des PH waren auf mehreren Ebenen Temperatursensoren installiert.

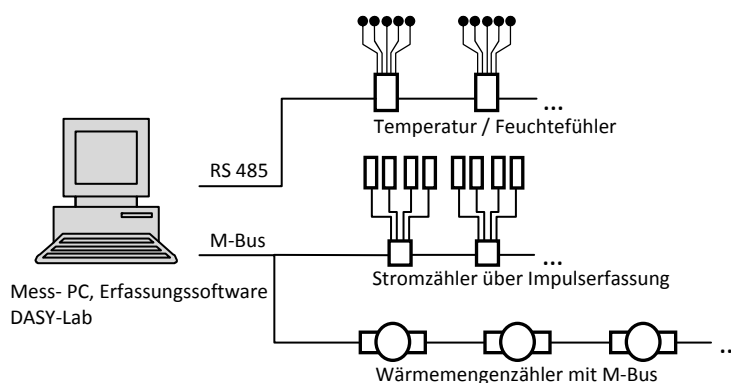


Bild 11 Prinzipskizze des Aufbaus der stationären Messtechnik. Ein PC erfasst über zwei Busleitungen (RS485 sowie M-Bus) Sensoren, bzw. Geräte. In der Erfassungssoftware (DASY-Lab 8.0) wurden Messdaten teilweise umgerechnet und in 5min Intervallen als Tagesdatensätze abgespeichert. Insgesamt wurden 110 Datenpunkte kontinuierlich erfasst.

Neben der zentralen Messdatenerfassung im Wohnheim wurde auf dem Campus Haspel eine Wettermessstation aufgebaut, mit der die meteorologischen Randbedingungen aufgezeichnet wurden. Hier wird



die Lufttemperatur, Luftfeuchte, Globalstrahlung, Diffusstrahlung, Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Niederschlagsmenge gemessen (siehe Bild 12).



Bild 12 Wetterstation auf dem Gebäude HB am Campus Haspel. Im linken Bild zu sehen ist ein Pyranometer mit Schattenring zur Erfassung der Diffusstrahlung, links daneben das Wetter-schutzgehäuse für Temperatur- und Feuchtesensor, rechts daneben der Trichter zur Niederschlagsmessung. Das rechte Bild zeigt den Masten mit Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsmessung, sowie einem Pyranometer zur Erfassung der Globalstrahlung.
 Bild: b+tga

Die Wetterdaten werden in 10sec Schritten gemessen und in einem Datenlogger gespeichert. Die Messdaten werden täglich automatisiert ausgelesen und bearbeitet. Die weitere Auswertungen und Bearbeitung der Daten erfolgt größtenteils über MS Excel.

Tab. 4 Jahreswerte (Kalenderjahr) der gemessenen Wetterdaten am Standort Campus Haspel 2005 bis 2007

2005	mittl. Temperatur [°C]	mittl. Globalstr. [W/m ²]	mittl. Diffusstr. [W/m ²]	Summe Niedersch. [mm]	mittl Windgeschw. [m/s]	Summe Globalstr. [kWh/m ²]	Summe Diffusstr. [kWh/m ²]
Jahr 2005	10.90	116.16	59.93	1082.80	1.52	1017.60	524,99
Jahr 2006	11.20	116.35	60.92	1111.20	1.63	1013.73	530,65
Jahr 2007	11.32	112.28	58.74	1442.20	1.66	975.57	510,25

3.1.2. Langzeitmonitoring

Nach Abschluss des Forschungsprojekts Ende Januar 2008 bleibt der größte Teil der fest installierten Messtechnik im Gebäude. Der Mess-PC wurde durch einen Datenlogger (ennovatis Smartbox) ersetzt, der Messwerte lokal speichert und per Ethernet Schnittstelle über das Internet ausgelesen werden kann.

Die Messdaten werden im Rahmen des EnOB- Monitor Langzeitmonitorings vom Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg ausgelesen, in eine Datenbank überführt und per Web- Frontend visualisiert, bzw. angemeldeten Benutzern zum Download zur Verfügung gestellt.

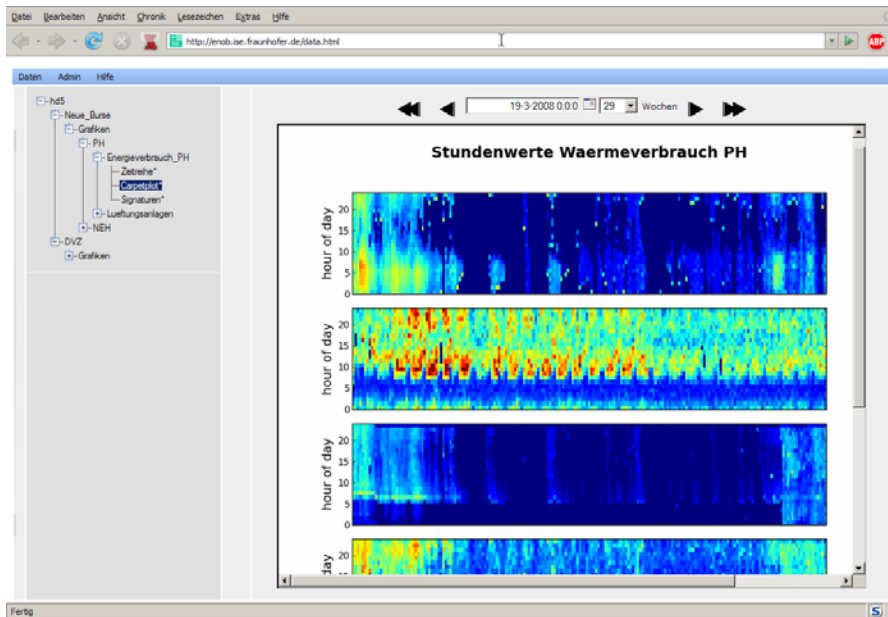


Bild 13 Online Visualisierung der Messdaten im Rahmen des Langzeitmonitorings. Alle relevanten Verbrauchsdaten werden weiterhin erfasst und stehen angemeldeten Benutzern als Visualisierung und zum Download bereit.

3.1.3. Dezentrale Datenerfassung

Da die Sanierungsmaßnahmen bei Beginn des Monitorings abgeschlossen und beide Gebäude bereits in Nutzung waren, war eine nachträgliche Installation von Sensorik in bereits genutzten Bereichen schwierig. Hier kamen größtenteils dezentrale Messgeräte zum Einsatz, die mit einem eigenen Messwertspeicher versehen, Messdaten aufnehmen, die später am PC bearbeitet werden können.



Bild 14 Eingesetzte Miniatur-Datenlogger. Mit Hilfe der streichholzsachtelgroßen Geräte konnten dezentral Lufttemperatur und Luftfeuchte, sowie Motorlaufzeiten und Fensteröffnungen über einen begrenzten Zeitraum gemessen und ausgewertet werden.

Diese Mini-Logger kamen vor allem bei Langzeitmessungen in Apartments zum Einsatz. Als Messgrößen wurden Lufttemperatur, rel. Luftfeuchte, Fensteröffnungszeiten sowie Motorlaufzeiten (Pumpen und Ventilatoren) erfasst.



Neben den dezentralen Langzeitmessungen wurden andere Messgrößen stichprobenartig einzeln, bzw. nur über kurze Zeiträume gemessen. Hierzu zählen Volumenstrom- Messungen an den Luft- Ein- und Auslässen in den Apartments, Messung der CO₂ Konzentration sowie die Messung der Thermischen Behaglichkeit nach DIN EN ISO 7730.



Bild 15 Messaufbau zur Messung des thermischen Komforts nach DIN EN 7730.

Gemessen werden die primärendominierenden physikalischen Faktoren des PMV-Modells: (Sensoren von rechts nach links) operative Temperatur, Lufttemperatur, Luftfeuchte und Luftbewegung.

3.2. Qualitätskontrolle

Neben der temporären dezentralen Erfassung einzelner Bereiche über einen beschränkten Zeitraum wurden auch Einzelmessungen durchgeführt, die hauptsächlich der Überprüfung von Qualitäten einzelner Bauteile dienen. Mit Hilfe einer Tracergasmessung wurden zwei der vier Lüftungsanlagen des PH auf interne Leckagen untersucht. Mit Hilfe von Thermografieaufnahmen wurden einzelne Bereiche des Gebäudes auf Wärmeverluste, bzw. Schwachstellen im Wärmeschutz überprüft.

3.2.1. Tracergasmessung

Ein wichtiges Kriterium beim Einsatz zentraler Lüftungsanlagen, wie beim Passivhaus der Fall, ist die Dichtheit des Lüftungsgeräts und des Kanalnetzes. Luftleckageströme können die energetische Wirksamkeit einer Lüftungsanlage mindern, etwa wenn die Luft nicht vollständig über den Wärmeübertrager der Wärmerückgewinnung strömt, oder lufthygienische Probleme mit sich bringen, beispielsweise das Überströmen von Abluft in den Zuluftkanal.



Um die Anlagen auf dem Dach des PH zu prüfen wurde eine sog. Tracergas- Messung in Auftrag gegeben. Diese wurde im November 2004 durch das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ausgeführt.



Bild 16 Tracergasmessung einer Lüftungsanlage auf dem Dach des Flügels 7 (PH). Durch Eintrag eines Indikatorgas und anschließender Messung der Gaskonzentration in allen Luftströmen können Aussagen über Luftleckagen in der Anlage gemacht werden. Die Lüftungsanlagen erwiesen sich in der Messung als hinreichend dicht.
Bild: b+tga

Bei der Tracergasmessung wird ein (in der Natur quasi nicht vorhandenes) Spurengas einem Luftstrom beigemischt. Aus der Konzentrationsmessung dieses Gases in anderen Luftströmen der Lüftungsanlage können so Rückschlüsse auf die Dichtheit der Anlage gezogen werden. Zwei der vier Lüftungsanlagen wurde überprüft (Flügel 7 und Flügel 8). Dabei zeigte sich, dass die Anlagen hinreichend dicht sind, also keine Probleme aufgrund interner Leckageströme auftreten. Der Bericht der Messung ist im Anhang beigeheftet.

3.2.2. Thermografie

Zur Überprüfung der Gebäudehülle wurden im Januar 2006 mehrere Außenthermografien der Gebäude durchgeführt. Dabei konnte an der Außenfassade keine Schwachstellen in Form von Wärmebrücken erkannt werden. Da es sich bei der Fassade um eine hinterlüftete Fassade (Bekleidung mit Faserzementplatten) handelt, sind Aussagen zur Qualität der Gebäudehülle schwierig.



Bild 17 Außenthermografie des Gebäudes. An der Fassade sind keine Auffälligkeiten zu entdecken. Durch die Fassadenkonstruktion mit hinterlüfteten Faserzementplatten sind eventuelle Wärmebrücke jedoch von außen kaum sichtbar. Lediglich die Überströmöffnungen in den Fenstern des NEH treten im Infrarotbild hervor. Bild: b+tga

Deutlich gemacht werden konnten teilweise Wärmeverluste der Lüftungsanlagen aufgrund ihrer Außenaufstellung auf dem Dach. Trotz Isolierung der Luftkanäle im Außenbereich kommt es zwangsläufig zu Wärmeverlusten an die Umgebung. Dies führt zu direkten Wärmeverlusten außerhalb der thermischen Hülle des Gebäudes, zudem reduziert sich die Wirksamkeit der Wärmerückgewinnung, der so genannte Wärmebereitstellungsgrad.

3.3. Nutzerbefragung

Neben der Erfassung physikalischer Parameter sollte im Zuge einer ganzheitlichen Analyse der Sanierungsmaßnahmen auch die Akzeptanz der Bewohner der Neuen Burse abgefragt werden.

Dazu wurde ein umfangreicher Fragebogen ermittelt und sowohl im Sommer, als auch im Winter eine Nutzerbefragung durchgeführt. Mit ca. 20% Rücklaufquote konnte aus den Antworten ein repräsentatives Meinungsbild der Bewohner ermittelt werden.

3.4. Erfassung ökonomischer Randbedingungen

Neben der Untersuchung der Sanierung aus technischer Sicht (Energieverbrauch, Nutzerakzeptanz) sollen auch ökonomische Fragestellungen beleuchtet werden.

Dazu wurden die Investitionskosten der Baumaßnahmen, sowie die Baunutzungskosten der beiden Gebäude ermittelt und verglichen.



4. Analyse Energie

Ein Schwerpunkt des Monitorings stellen Analyse und Auswertung des Energieverbrauchs der „Neuen Burse“ dar. Neben dem Vergleich zum Bestandsgebäude sind vor allem der Unterschiede der Gebäude untereinander von Interesse. Dabei wird untersucht, welcher Energieeinsatz benötigt wurde, um den Nutzern Wohnraum mit entsprechendem Komfort zur Verfügung zu stellen.

Dazu wurden die Energieströme für thermische Energie (Heizung und Trinkwassererwärmung) und elektrischer Hilfsenergie (Wärmeverteilung, Lüftung, Regelung), wie in Abschnitt ‚3.1 Messdatenerfassung‘ beschrieben, erfasst und analysiert. Zunächst werden die Jahresbilanzen des Energieverbrauchs vergleichend gegenübergestellt, anschließend erfolgt eine detaillierte Analyse der einzelnen Bereiche Heizwärme, Trinkwassererwärmung sowie elektrische Hilfsenergie.

4.1. Jahresbilanzen des Energieverbrauchs

In einer Jahresbilanz werden die benötigten Energiemengen der beiden Bauabschnitte als Jahressummen vergleichend gegenübergestellt und anschließend primärenergetisch bewertet. Dabei erfolgt auch ein Vergleich der Daten mit dem Energiebezug vor der Sanierung.

In Bild 18 ist der gesamte Endenergiebezug der beiden sanierten Bauabschnitte bezogen auf die Anzahl der Wohneinheiten (WE) aufgetragen. Zum Vergleich daneben jeweils der Verbrauch des Wohnheims vor der Sanierung, sowie ein Mittelwert, gebildet aus den Verbrauchsdaten der anderen Wohnheime des HSW.

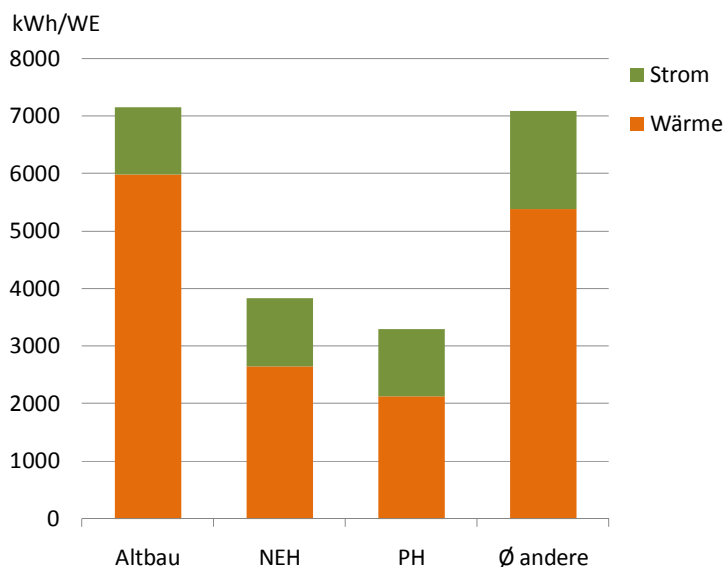


Bild 18 Endenergiebezug der beiden sanierten Gebäude (Mitte, Werte aus 2007), im Vergleich zum Altbau (links), sowie dem Durchschnitt der anderen Wohnheime des HSW. Die Verbrauchsdaten sind jeweils auf die Anzahl Wohneinheiten bezogen.



Die Daten für den Altbau sind Mittelwerte aus Abrechnungsdaten vor der Sanierung (Wärme: 1986 – 1998, Strom: 1986 – 1989), Daten für die Neue Borse beziehen sich auf das Jahr 2007, die Durchschnittswerte der anderen Wohnheime sind Mittelwerte der Jahre 2003-2007. In Bezug auf Stromverbrauch sind die Daten des Borse- Altbaus daher nicht mit aktuellen Werten zu vergleichen, da die Anzahl individueller elektrischer Geräte (PC, TV,...) stark zugenommen hat.

4.1.1. Endenergieverbrauch

Beim Vergleich des Endenergieverbrauchs der sanierten Bauabschnitte mit dem Bestandsgebäude zeigt sich zunächst die drastische Reduzierung des Energieverbrauchs um fast 75%.

Durch Optimierungsmaßnahmen während des Monitorings konnten weitere Reduktionspotentiale erschlossen, bzw. Wärmeverluste durch fehlerhafte Betriebsführung reduziert werden. In Bild 19 ist der Energieverbrauch vor und nach der Sanierung dargestellt. Bei den Säulen der sanierten Bauabschnitte sind zusätzlich die Werte aus dem Kalenderjahr 2005, ein Jahr nach Beginn des Monitorings, grau hinterlegt.

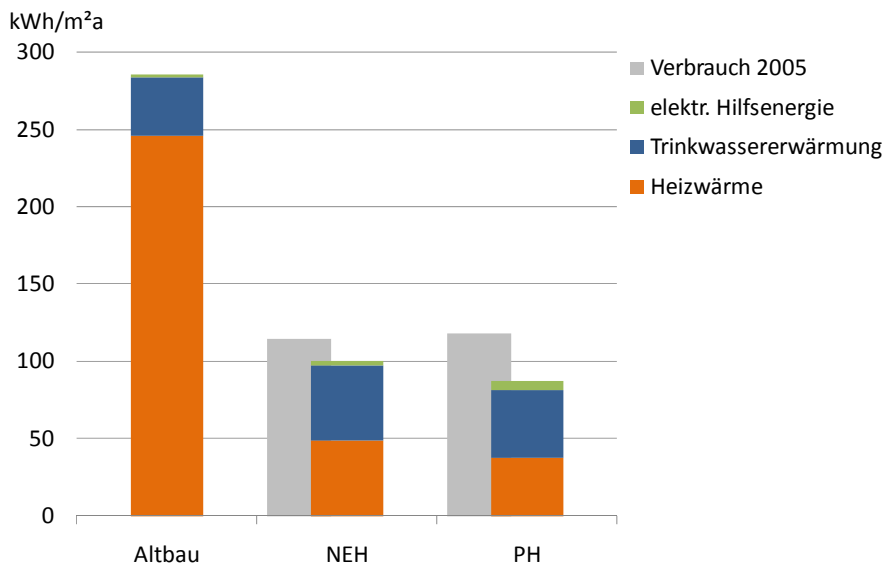


Bild 19 Vergleich des Endenergieverbrauchs vor der Sanierung mit den beiden sanierten Bauabschnitten im Jahr 2007. Grau hinterlegt sind die Messwerte aus 2005, ein Jahr nach Beginn des Monitorings.



Tab. 5 Verbrauchsdaten der beiden Bauabschnitte in den Jahren 2004 bis 2007, Bezugsfläche ist die Nettogeschossfläche NGF NEH: 8597m²; PH: 8597m², bzw. Anzahl Wohneinheiten [WE]: NEH: 303 + HSW- Verwaltung (9 Pers.), PH: 323. Die Werte für den Heizwärmeverbrauch sind witterungsbereinigt.

		Heizwärme		Trinkwassererwärmung		elektr. Hilfsenergie	
		[kWh/m ² a]	[kWh/WE]	[kWh/m ² a]	[kWh/WE]	[kWh/m ² a]	[kWh/WE]
NEH	2004	57.52 ¹	1598.40	- ²	- ²	- ²	- ²
	2005	56.21	1562.00	55.50	1542.27	2.86	79.48
	2006	50.24	1396.10	48.70	1353.30	2.81	78.09
	2007	49.36	1371.64	48.36	1343.86	2.68	74.47
PH	2004	65.00	1730.11	47.60	1266.98	- ²	- ²
	2005	63.12	1680.07	48.72	1296.79	6.27	166.89
	2006	38.63	1028.22	43.58	1159.98	6.00	159.70
	2007	37.98	1010.92	43.51	1158.11	6.07	161.57

4.1.1.1. Endenergieverbrauch Wärme

Die Verbrauchsmessungen für die Heizwärme liegen damit beim NEH deutlich unter dem errechneten Bedarfswert von 68 kWh/m²a (siehe 2.2.1 Bauabschnitt Niedrigenergiehaus), wohingegen im PH der Zielwert vor allem in den ersten Betriebsjahren deutlich überschritten wurde, bzw. der Verbrauch sogar höher lag als im NEH. Gründe für diese Abweichungen konnten im Laufe des Forschungsprojekts bestimmt und entsprechende Optimierungsmaßnahmen eingeleitet werden. Hintergründe des abweichenden Heizwärmeverbrauchs werden vor allem im anschließenden Kapitel ‚4.2 Analyse Heizwärmeverbrauch‘ analysiert.

Verglichen mit den üblichen Kennwerten in Wohngebäuden ist der spezifische Wärmeverbrauch der Trinkwassererwärmung hoch. Dabei spielt vor allem die für Wohnheime typische hohe Belegungsdichte eine Rolle. Sie liegt mit 27m²/Pers deutlich unter dem Bundesdurchschnitt von 42 m²/Pers³.

Im Vergleich zum Heizwärmeverbrauch zeigt sich, dass mit zunehmender Optimierung der Gebäudehülle und damit der Reduktion des Heizwärmeverbrauchs der Wärmeverbrauch zur Trinkwassererwärmung den Verbrauch dominiert. Details zum Wasserverbrauch werden im Abschnitt ‚4.3 Wasserverbrauch und ‘ diskutiert.

¹ Zwischenzähler zum Jahreswechsel 2004/05 installiert, Verbrauch aus Bilanz ermittelt

² 2004 noch kein Zähler vorhanden

³ Quelle: Statistisches Bundesamt, Bundesdurchschnitt 2006



Bild 20 bis Bild 22 zeigen Energieflussbilder der Messdaten aus dem Kalenderjahr 2007. Bezugsfläche ist jeweils die Netto- Geschossfläche NGF. Darstellung und Werte beziehen sich auf die an den Wärmemengenzählern gemessenen Verbräuche. Die Verbrauchsdaten zur Heizwärme sind nicht witterungsbereinigt, sie unterscheiden sich daher von den in Tab. 5 dargestellten Werten.

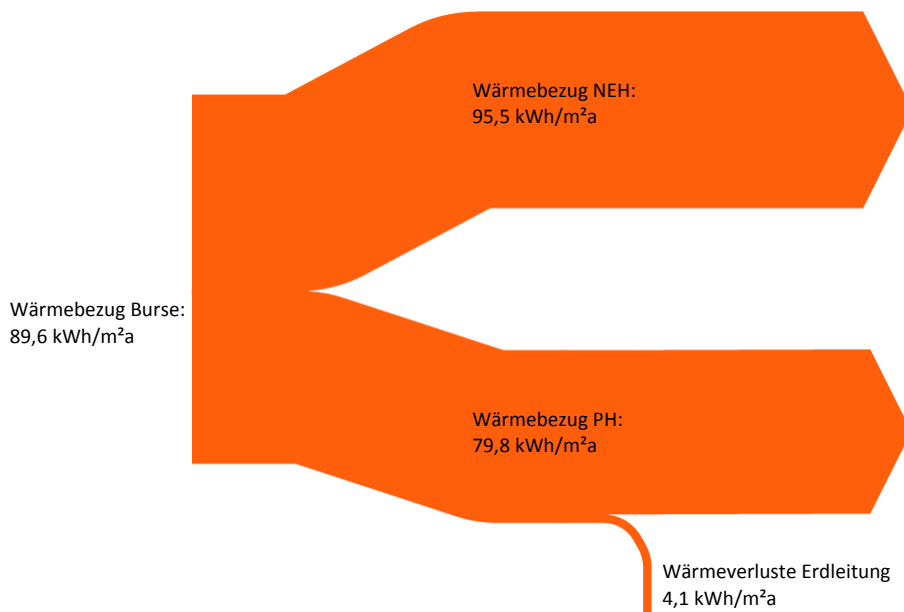


Bild 20 Energieflussbild des gesamten Wärmebezugs des Wohnheims für das Kalenderjahr 2007. Bezugsfläche sind die jeweiligen Nettogeschossflächen. Der Wärmebezug des gesamten Wohnheims ist auf die gesamte NGF(Summe NEH + PH) bezogen.

Die Übergabe der Fernwärme erfolgt im Technikraum des NEH, das PH ist über eine Erdleitung an den Sekundärkreis angeschlossen. Der Gesamtbezug des Gebäudes ist die gesamte abgenommene, vom Energieversorger in Rechnung gestellte Wärmemenge bezogen auf die gesamte NGF des Wohnheims.



Bild 21 Energieflussbild des NEH. Auffällig ist der hohe spezifische Wärmeverbrauch der Trinkwassererwärmung. Der Wärmeverbrauch zur Trinkwassererwärmung ist größer als der Heizwärmeverbrauch. Die angegebenen Daten sind nicht witterungsbereinigt – die Angaben für den Heizwärmeverbrauch weichen deshalb von den in Tab. 5 genannten Werten ab. Speicher- und Leitungsverluste der Trinkwassererwärmung wurden aus der Bilanzierung der Warmwasserspeicher errechnet.



Etwa die Hälfte des Wärmebezugs im NEH wird für die Trinkwassererwärmung benötigt. In Spitzenzeiten (volle Belegung des Wohnheims im Semester) werden bis zu 70 l/p,d Warmwasserverbrauch gemessen (siehe ,4.3 Wasserverbrauch und '). In der Jahressumme ergibt sich ein Wärmeverbrauch zur Trinkwassererwärmung, der mit 48 kWh/m²a knapp über dem Heizwärmeverbrauch liegt und damit den Wärmebezug des Gebäudes dominiert.

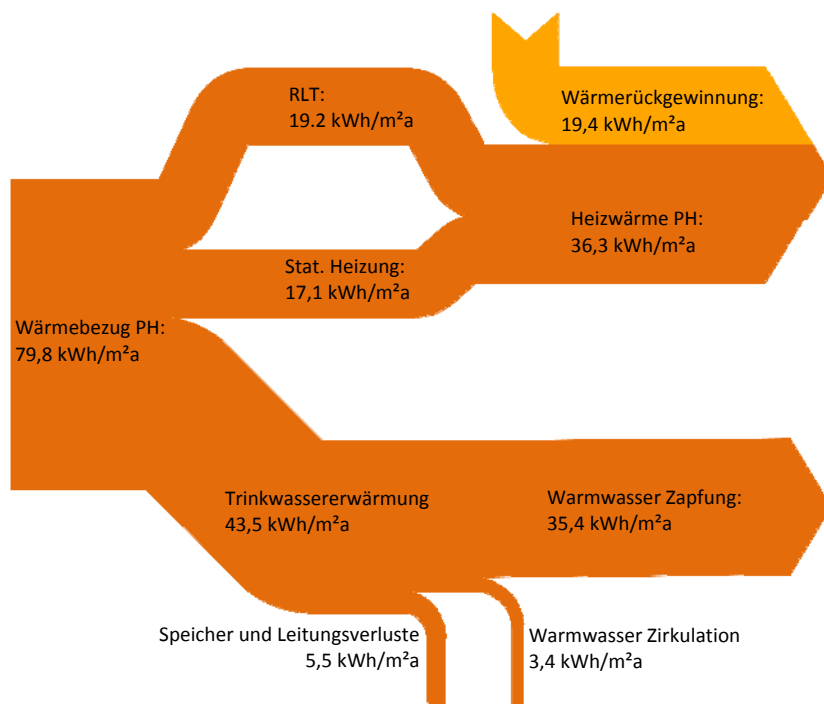


Bild 22 Energieflussbild des PH. Durch den geringeren Heizwärmeverbrauch dominiert hier der Wärmeverbrauch der Trinkwassererwärmung noch stärker. Durch den im Vergleich zum NEH deutlich geringeren Volumenstrom der WW-Zirkulation kommt es hier zu geringeren Zirkulationsverlusten. Der Beitrag der Wärmerückgewinnung wurde aus den gemessenen Lufttemperaturen in den Lüftungsanlagen rechnerisch ermittelt.

Bei der Betrachtung der Energieflüsse im PH zeigt sich, dass der Wärmeverbrauch der Trinkwassererwärmung durch den geringeren Heizwärmeverbrauch den gesamten Wärmebezug stärker dominiert. Die Beiträge zum Heizwärmeverbrauch setzen sich zusammen aus Wärme über die Heizflächen der Badheizkörper, über die Luftheizregister in den Lüftungsanlagen, sowie der aus der Abluft zurückgewonnenen Wärme aus der Wärmerückgewinnung. Das Ziel – einen Heizwärmeverbrauch unter 30 kWh/m²a zu erreichen, konnte auch 2007 nicht erreicht werden. Dies lag auch an einem Totalausfall der Heizungsregelung Ende 2006 und damit der vorübergehenden Außerkraftsetzung einiger bereits implementierten Optimierungsmaßnahmen.



4.1.1.2. Endenergieverbrauch Strom

Neben der Erfassung der thermischen Energie bei Heizung und Trinkwassererwärmung wurde auch der Verbrauch elektrischer Energie für Pumpen und Lüftungsventilatoren erfasst.

Im NEH konnte der Stromverbrauch der dezentralen Einzellüfter nicht getrennt gemessen werden, der Jahresstromverbrauch der Lüftung wurde aus der Leistungsaufnahme eines Einzellüfters und der aus Stichprobenmessungen ermittelten mittleren Laufzeit der Lüfter in Zimmer und Bad hochgerechnet (siehe Abschnitt 5.2.1.1 Nutzung der Bedarfslüftung).



Bild 23 Energieflussbild des Stromverbrauchs für Hilfsstrom. Wenngleich im NEH nur bedarfsgeführte Abluftventilatoren installiert sind, dominiert dennoch die Lüftung den Stromverbrauch für die TGA. Der Stromverbrauch der Lüfter wurde aus Messungen der Lüfternutzungs- und Laufzeiten hochgerechnet (siehe ‚5.2.1.1 Nutzung der Bedarfslüftung‘).

In beiden Gebäuden dominiert der Stromverbrauch der Lüftungsventilatoren den Energieverbrauch der Hilfsaggregate. Erwartungsgemäß ist der Stromverbrauch für elektrische Hilfsenergie im PH durch die dauerhaft laufenden Lüftungsmotoren deutlich größer als im NEH.

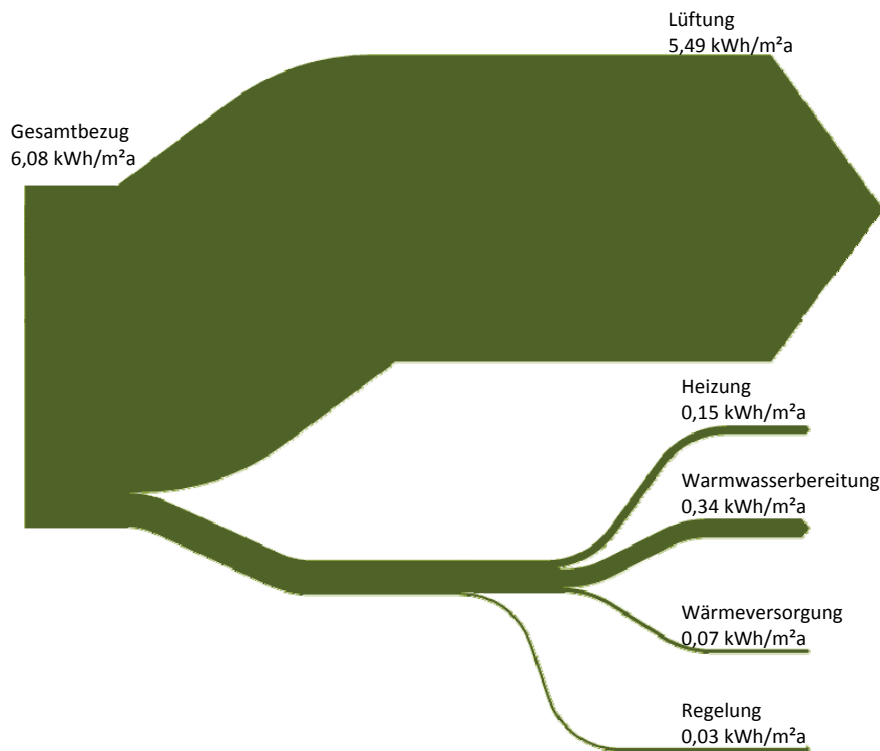


Bild 24 Aufteilung des Hilfsstromverbrauchs im PH. Durch die dauerhaft laufenden Lüftungsanlagen steigt der Anteil der Lüftung deutlich. Das PH ist über eine Erdleitung an die Wärmeversorgung des NEH angeschlossen. Die dazu benötigte Umwälzpumpe (Bezeichnung „Wärmeversorgung“) befindet sich im Technikraum des NEH, ihr Stromverbrauch wird aber dem PH zugerechnet. Der Stromverbrauch der Lüftungsanlage wurde nur nach Umstellung der Anlage auf leistungsreduzierten Betrieb gemessen. Für den ursprünglichen Betrieb (tagsüber Volllast, nachts Teillast) liegen keine gemessenen Verbrauchsdaten vor.

Tab. 6 Elektrischer Energieverbrauch für Pumpen, Regelung und Lüftung in Bezug auf Fläche und Anzahl der Wohnheimplätze für die beiden Gebäude, sowie die spezifische Leistungsaufnahme der Lüftung.

elektr. Hilfsenergie	NEH	PH
kWh/ m ² _{NGFA}	2,7	6,1
kWh/WE a	74,4	161,5
Spez. Leistung der Lüftung W/(m ³ /h)	0,37	0,44

Der nutzungsabhängige Stromverbrauch steht nur aus Abrechnungen der Energieversorger für beide Bauabschnitte gemeinsam zur Verfügung. Im Mittel der Jahre 2003 bis 2007 betrug der Verbrauch 820 MWh/a, bzw. ca. 1.300 kWh/WE elektrische Energie⁴. Zum Vergleich: ein bundesdurchschnittlicher „Single“- Haushalt bezieht im Jahr 2006 1790 kWh/a⁵. Im Verbrauch der „Neuen Burse“ enthalten ist der Strom zum Betrieb der technischen Anlagen, d.h. zum einen der gemessene Anteil für die TGA, sowie nicht erfasste Geräte, wie Aufzüge und Beleuchtung der Verkehrsflächen, sowie der Betrieb gemein-

⁴ Jahr 2007: Verbrauch 741 MWh, bzw. 1184 kWh/WE

⁵ Quelle: Pressemitteilung VDEW, September 2006. Im Bundesdurchschnitt ist jedoch auch ein Anteil elektr. Wassererwärmung (Trinkwassererwärmung, Spülmaschine, Waschmaschine), sowie elektr. Heizung enthalten.



schaftlicher Waschmaschinen und Trockner.

Der Anteil des TGA Stroms liegt mit 75.900 kWh/a bei 9% am Gesamtverbrauch, wobei der Anteil des NEH mit 3% halb so groß ist wie der des PH mit 6%.

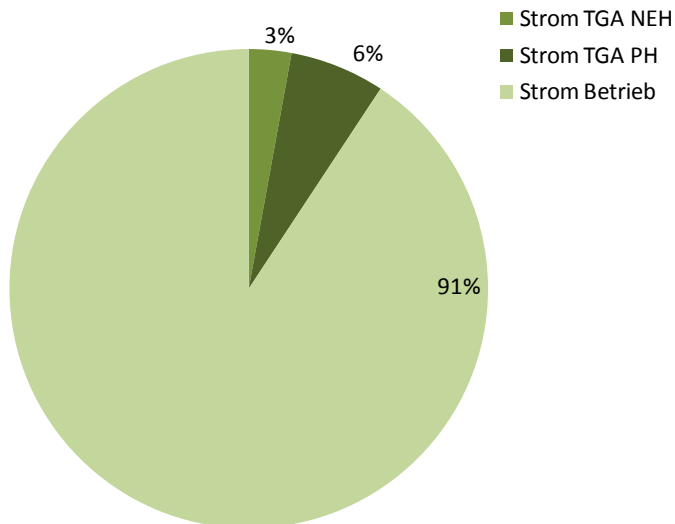


Bild 25 Anteil des Stromverbrauchs TGA am Gesamtstromverbrauch der Burse (Grundlage: Mittelwerte 2005 bis 2007). Im Betriebsstrom sind jedoch auch Anteile für Aufzüge und Treppenhaus- und Außenbeleuchtung enthalten, da diese ebenfalls nicht getrennt erfasst wurden.

4.1.2. Primärenergieverbrauch und Klimagasemissionen

Die Neue Burse wird mit Fernwärme der Wuppertaler Stadtwerke versorgt. Diese kommt größtenteils aus zwei KWK Kraftwerken in Elberfeld und Barmen (Kohlekraftwerk mit Fernwärmeauskoppelung in Elberfeld und Gas- und Dampfturbinenkraftwerk in Barmen).

Die Primärenergiefaktoren werden nach DIN 4701-10 gewichtet, für Fernwärme aus KWK ergibt sich ein Faktor von 0,7, für den Stromverbrauch der TGA (Strom für Pumpen, Lüftung, Regelungstechnik) 2,7. Um die Daten vergleichbar zu machen, wurden diese Faktoren auch für den Altbau angewandt, wenngleich die Fernwärme hier noch aus einem reinen Heizkraftwerk stammte.

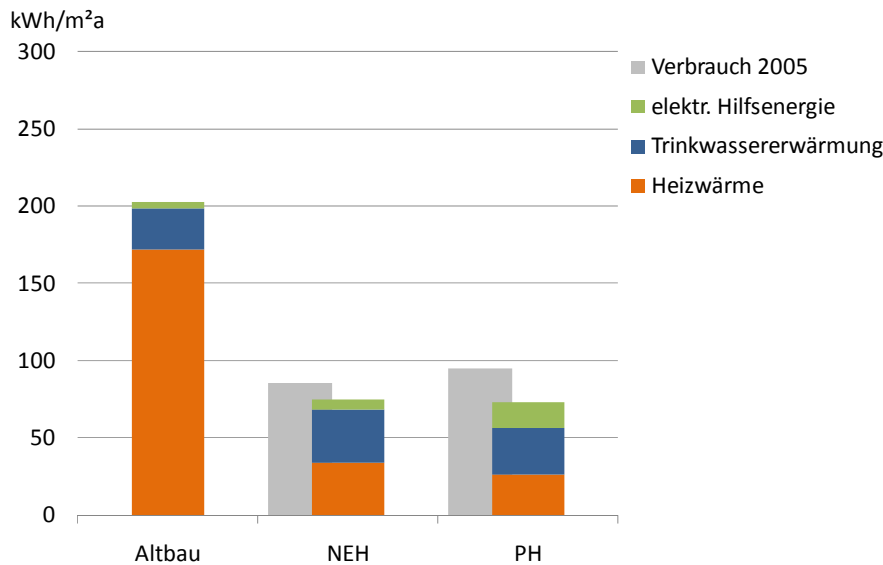


Bild 26 Primärenergetisch bewerteter Energieverbrauch des Wohnheims. Primärenergiefaktoren gemäß DIN 1946 Teil 10: Wärme: 0,7 (Fernwärme aus KWK), Strom: 2,7. Während 2005 das PH primärenergetisch mehr verbrauchte als das NEH, konnte durch Optimierungsmaßnahmen das Verhältnis angeglichen werden. Noch nicht Berücksichtigt sind Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität im NEH, die den Verbrauch von Wärme und Strom perspektivisch erhöhen.

Bei primärenergetischer Bewertung machen sich vor allem die unterschiedlichen Lüftungskonzepte bemerkbar. Im Passivhaus ist der Stromverbrauch der TGA durch die dauerhaft laufenden Lüftungsventilatoren und deren höhere spezifische Leistungsaufnahme deutlich höher als beim Niedrigenergiehaus.

Damit der Betrieb der Lüftungsanlage – unabhängig von der Frage der Lufthygiene – energetisch sinnvoll ist, müssen die Einsparungen im Bereich Heizwärme diesen Mehrverbrauch mehr als kompensieren. Dies war zu Beginn des Monitorings noch nicht der Fall, bei etwa gleichem Endenergieverbrauch war der spezifische Primärenergieverbrauch des PH höher als der des NEH (in Summe zu sehen in Bild 26 als grau hinterlegte Balken).

Durch Optimierungsmaßnahmen konnte der Heizwärmeverbrauch des PH jedoch soweit gesenkt werden, dass primärenergetisch kein Mehrverbrauch entsteht. Die niedrigen Verbrauchsdaten des NEH sind jedoch auf mangelnde Lüftung zurückzuführen (siehe ‚4.2.2 Heiz‘, bzw. ‚5.2.1 Lüftung und Luftqualität im NEH‘). Um im NEH ausreichende Luftqualitäten sicherzustellen, müssen die Abluftventilatoren häufiger, bzw. länger laufen. Dadurch erhöht sich der Anteil des Stromverbrauchs für die TGA und durch zwangsläufig zunehmende Lüftungsverluste auch der Heizwärmeverbrauch. Die hier getroffenen Maßnahmen schlagen sich jedoch durch die bisher erst begrenzte Umsetzung noch nicht auf die Messergebnisse nieder.

Tab. 7 Primärenergieverbrauchskennwerte des Wohnheims Neue Burse für die Kalenderjahre 2005 und 2007. Primärenergiefaktoren nach DIN 4108-10: Fernwärme aus KWK: 0,7, Strom: 2,7

NEH	PH
[kWh/m²a]	[kWh/m²a]



Jahr	2005	2007	2005	2007
Heizung	39,3	34,5	44,2	26,6
Trinkwassererwärmung	38,8	33,8	34,1	30,5
Hilfsenergie Pumpen, Regelung	2,2	1,5	1,9	1,5
Lüftung	5,5	7,0	15,0	14,8
Summe	85,8	76,8	95,2	73,4
Summe [kWh/WE]	2384	2134	2534	1954

Neben der primärenergetischen Bewertung des Energieverbrauchs sind in Tab. 8 für das Jahr 2007 auch die klimarelevanten Emissionen als Umrechnung in CO₂ Äquivalente aufgelistet.

Für die Bewertung der Wärme wurde auf Angaben der Wuppertaler Stadtwerke zurückgegriffen, die sich aus der Netto- Energieerzeugung aller ins Fernwärmenetz einspeisenden Kraftwerke ableitet. Mit 286 g/kWh_{th} liegt der Umrechnungsfaktor knapp über den im Rahmen einer Studie des Umweltbundesamts ermittelten Werten von 214 g/kWh_{th} [UBA2008].

Tab. 8 Durch die Energieversorgung des Wohnheims bedingte CO₂ Emissionen im Kalenderjahr 2007.

	NEH [kg CO ₂ /m ² a]	NEH [t/WE a]	PH [kg CO ₂ /m ² a]	PH [t/WE a]
Wärme WSW ⁶	28,6	0,80	23,7	0,63
Strom WSW ⁷ TGA	1,5	0,04	3,2	0,08
Strom gemis ⁸ TGA	1,8	0,05	3,9	0,10
Strom gemis Verbr. ⁹	27,4	0,76	28,6	0,76
Summe (Strom TGA)	30,1	0,84	26,9	0,71
Summe gesamt ¹⁰	56,0	1,56	52,4	1,39

Die CO₂ Emissionen pro Wohneinheit liegen damit deutlich unter 2 t/Kopf a die im Bundesdurchschnitt nur für den Bereich „Heizung“ ermittelt wurden¹¹. Wird nur der Energieverbrauch für die Heizwärme bewertet, reduzieren sich die spezifischen Emissionen im Wohnheim Neue Burse auf 0,4 t/WE a im NEH, bzw. 0,3 t/WE a im PH.

⁶ Faktor: 286 g/kWh Quelle: Wuppertaler Stadtwerke

⁷ Faktor: 525 g/kWh Quelle: Wuppertaler Stadtwerke, Stromkennzeichnung nach § 42 EWG

⁸ Faktor: 645 g/kWh Quelle: Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme, GEMIS, Vers. 4.4

⁹ Gesamter Strombezug des Wohnheims. NEH und PH nach Nutzern aufgeteilt, da keine getrennte Erfassung.

¹⁰ Grundlage sind die Stromkennwerte von „GEMIS“

¹¹ Quelle: Die CO₂ Bilanz des Bürgers, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Heidelberg, Juni 2007



4.2. Analyse Heizwärmeverbrauch

In den folgenden Abschnitten werden der Energieverbrauch zur Raumheizung genauer analysiert, sowie Mängelbeseitigungen und Optimierungsmaßnahmen dargestellt.

Um zunächst eine Einordnung der Verbrauchsdaten in das nutzungsspezifische Profil „Studentenwohnheim“ vorzunehmen, werden die Verbrauchsdaten des Wohnheims „Neue Burse“ mit anderen Wohnheimen des Hochschul-Sozialwerks Wuppertal verglichen. Datengrundlage für die Burse ist das Kalenderjahr 2007, die Daten der Vergleichsobjekte sind Mittelwerte aus 2003 bis 2007.

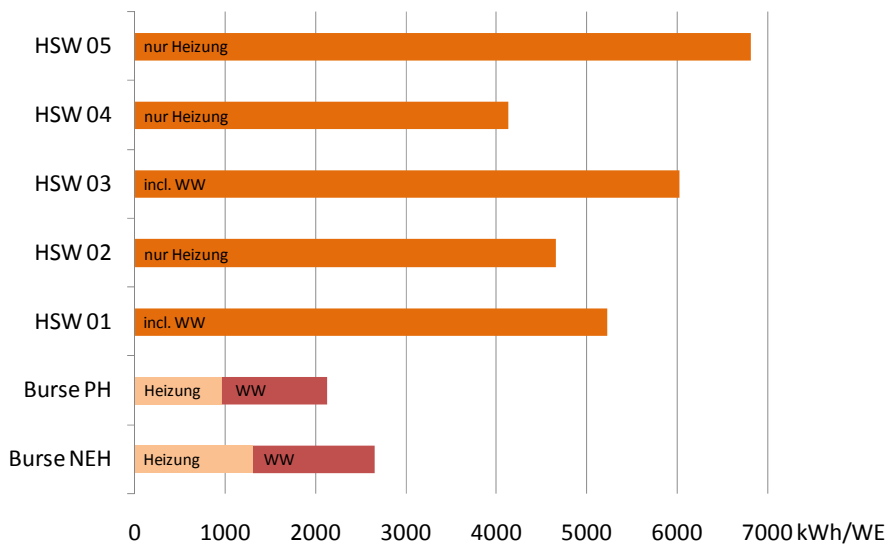


Bild 27 Vergleich des Wärmebezugs in kWh pro Wohneinheit für die Wohnheime des Hochschul-Sozialwerks Wuppertal. Bei einigen Wohnheimen erfolgt die Trinkwassererwärmung dezentral elektrisch, in diesen Fällen bezieht sich der Wärmeverbrauch nur auf die Heizung.

Vergleicht man den Wärmeverbrauch der „Neuen Burse“ mit anderen Wohnheimen des Betreibers, werden die enormen Einsparungen, vor allem in Bezug auf Heizwärme, deutlich.

Bei den anderen Wohnheimen handelt es sich teilweise um Altbaubestand (HSW 05), bis zu neueren Gebäuden (HSW 02, Baujahr 1996). Ein Wohnheim (HSW 02, Baujahr 1984) wurde 2007 saniert und soll nun ebenfalls Niedrigenergiehaus- Standard erreichen.

Schwerpunkt der folgenden Analysen bildet die Untersuchungen der sogenannten Heizkennfelder. Durch die vorangegangene Analyse der jährlichen Energiebilanzen können Verbrauchsdaten quantitativ verglichen werden, sie geben i.d.R. jedoch keine Auskunft über zeitliche Abhängigkeiten verschiedener Parameter.

In einem Heizkennfeld wird die gemessene Heizleistung als Tagesmittelwert über der tagesmittleren Außentemperatur aufgetragen (siehe [Hoffmann2005]). Als zusätzliche Analysemöglichkeit kann der real



gemessenen Heizleistung im Diagramm der theoretische Bedarf gegenübergestellt werden, der sich rechnerisch aus den Planungsdaten ergibt.

Entsprechend der stationären Wärmebilanz für Gebäude ist der Wärmeverlust des Gebäudes abhängig von Lüftungs- und Transmissionsverlusten, reduziert wird er durch innere Quellen und solare Gewinne (mit dem Nutzungsgrad η).

$$Q_H = (Q_T + Q_V)\Delta T - \eta(Q_i + Q_s) \quad \text{Gl. 1}$$

Bei fallenden Außentemperaturen steigen die Wärmeverluste, die durch Heizwärme ausgeglichen werden müssen. Dieser Heizwärmeeintrag wird grafisch als Messpunkt dargestellt. Lage und Streuung der Messpunkte geben Rückschlüsse auf Minderung der Heizlast, beispielsweise durch interne oder solare Gewinne.

Werden solare und interne Gewinne nicht mit berücksichtigt, ergibt sich eine lineare Abhängigkeit des Wärmeverlusts aus der Differenz von (nahezu konstanter) Innen- und Außentemperatur sowie den Lüftungs- und Transmissionsverlusten. Dieser, aus Planungsdaten rechnerisch hergeleitete Zusammenhang, kann als Gerade in das Diagramm eingetragen werden. Diese Gerade sollte die obere Schranke der gemessenen Verbrauchswerte bilden.

Im folgenden Abschnitt werden die Gebäude anhand dieser grafischen Analyseverfahren verglichen und untersucht.

4.2.1. Quantifizierung interner Lasten

Beim Vergleich des theoretischen Heizwärmebedarfs und des tatsächlich gemessenen Verbrauchs spielen interne Gewinne durch Personen, Elektrogeräte o.ä. eine bedeutende Rolle.

Interne Gewinne können im Heizfall einen Teil der nötigen Heizwärme substituieren. Bei der Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs gibt es je nach Rechenverfahren unterschiedliche Ansätze für die Quantifizierung der internen Lasten, die sich teilweise erheblich unterscheiden.

Der Jahresheizwärmebedarf der Neuen Burse wurde sowohl für das NEH als auch für das PH mit dem Passivhaus- Projektierungspaket [PHPP 99] abgeschätzt. Hier wurden $2,45 \text{ W/m}^2$ angesetzt.

Zur Bewertung und Analyse des gemessenen Heizwärmeverbrauchs wurden die inneren Gewinne erneut bilanziert. Dazu wurde auf gemessene Größen, wie Strom- und Wasserverbrauch, sowie Untersuchungen zur Ermittlung innerer Gewinne zurückgegriffen [Feist1998].



Aus dem mittleren Stromverbrauch des gesamten Wohnheims wurde mit Hilfe des gemessenen Stromverbrauchs der TGA (siehe ‚4.4 Stromverbrauch‘) der mittlere Stromverbrauch pro Apartment, bzw. pro m² NGF ermittelt. Nach [Feist1998] wurde die Wirksamkeit dieser inneren Lasten, sowie Wärmesenken im Apartment abgeschätzt. Die inneren Lasten aus dem elektrischen Energiebezug (ohne Strom zum Gebäudebetrieb) liegen bei 4,8 W/m². Da nicht 100% des Strombezugs auch im Zimmer genutzt werden (z.B. beim Kochen: Abschütten des heißen Wassers), wurde eine auf 85% reduzierte Leistung angesetzt, d.h. 4,0 W/m².

Weitere Gewinne (in der Heizperiode) kommen aus der Trinkwassererwärmung, speziell aus der Warmwasserzirkulation. Gemessen wurde eine ganzjährige mittlere Wärmeabgabe von 0,6 W/m². Nutzbar ist diese Wärme jedoch nur in der Heizperiode und auch dann nur zu einem Teil im Apartment selbst. Der Anteil der Warmwasserzirkulation reduziert sich demnach auf 0,2 W/m². Durch weitere Wärmetransportvorgänge über Wasser ergeben sich auch Wärmesenken (Kaltwasserabfluss, latente Wärme über Verdunstung) durch die dem Zimmer umgerechnet 1,3 W/m² entzogen werden.

Eine weitere maßgebliche Wärmequelle sind die Bewohner selbst. Geht man von einer mittleren, fühlbaren Wärmeleistung von 70 W/Person [DIN EN 13779] aus, ergibt sich in Bezug auf die NGF eine Wärmeleistung von 2,6 W/m². Diese Wärmeleistung ist jedoch nur bei Anwesenheit der Nutzer wirksam. Als Indikator für die Belegung des Wohnheims wurde auf gemessene Warmwasserzapfung des Wohnheims zurückgegriffen (siehe auch ‚4.3 Wasserverbrauch und ‘). Im Zeitraum der Heizperiode (Ansatz: 1.09. bis 30.04) wurde die mittlere tägliche Zapfleistung bestimmt und mit den Maxima der Zapfleistung (Annahme: max. Zapfleistung = volle Belegung) ins Verhältnis gesetzt. Durch den hohen Anteil Wochenendpendler, die geringe Belegung über die Weihnachtsfeiertage und die Wintersemesterferien ergibt sich eine durchschnittliche Anwesenheit von 70% (siehe Bild 28). Die inneren Wärmegewinne durch die Bewohner reduzieren sich dadurch auf 1,8 W/m².

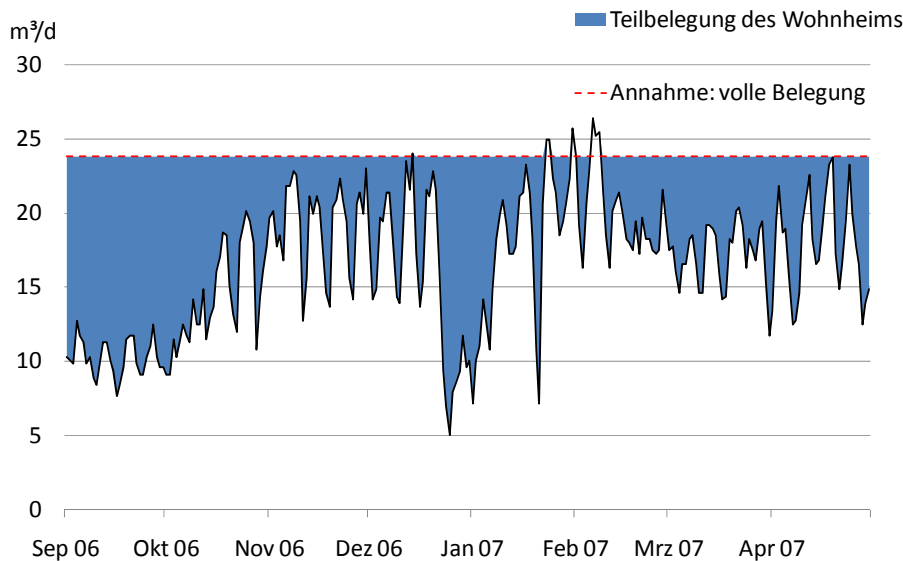


Bild 28 Grafische Darstellung der Belegung des Wohnheims anhand der Daten der gezapften Warmwassermengen am Beispiel des PH. Deutlich erkennbar sind die Wochenenden, sowie die geringe Belegung über den Jahreswechsel. Über den gesamten Zeitraum betrachtet ergibt sich ein Belegungsanteil von 70% der maximalen Auslastung.

Die Summe aus den inneren Gewinnen (elektrische Energie, Personenbelegung) und innere Senken ergeben im Mittel innere Lasten von $4,6 \text{ W/m}^2$. Dabei sind passive Wärmegewinne aus solarer Einstrahlung nicht berücksichtigt. Ihr Einfluss wird in den folgenden Abschnitten näher untersucht.

4.2.2. Heizwärme Niedrigenergiehaus

Im vorangegangenen Abschnitt hat sich gezeigt, dass der erste Bauabschnitt, das Niedrigenergiehaus, weniger Energie zur Beheizung benötigt, als planerisch berechnet.

Bei der Betrachtung der Heizkennlinie fällt auf, dass die Messwerte der eingebrachten Heizleistung deutlich unter der Geraden des theoretischen Heizwärmebedarfs liegen. Beim Einzeichnen der theoretischen Gerade wurde eine mittlere Innentemperatur von $22,7 \text{ °C}$ angenommen. Dieser Wert wurde in einer Langzeitmessung messtechnisch ermittelt (siehe auch Abschnitt 5.1.1 Raumlufttemperatur und Komfort im Winter). Werden die im vorangegangenen Abschnitt bestimmten internen Gewinne von $4,6 \text{ W/m}^2$ als stationäre Reduktion der Heizlast einberechnet, verschiebt sich die Kennlinie parallel nach unten. Die gemessene Heizleistung bleibt jedoch immer unter dieser Gerade, d.h. die auftretenden Verluste sind immer geringer als der theoretisch ermittelte Bedarf.

Aus Sicht der Wärmebilanz wäre eine Möglichkeit, dass interne Wärmegewinne (innere Quellen oder passiv solare Gewinne) größer sind als angenommen. Beides kann aufgrund weiterer Untersuchungen



ausgeschlossen werden – innere Wärmequellen wurde in Abschnitt ,4.2.1 Quantifizierung interner Lasten‘ abgeschätzt, passiv solare Gewinne werden im folgenden Abschnitt genauer analysiert.

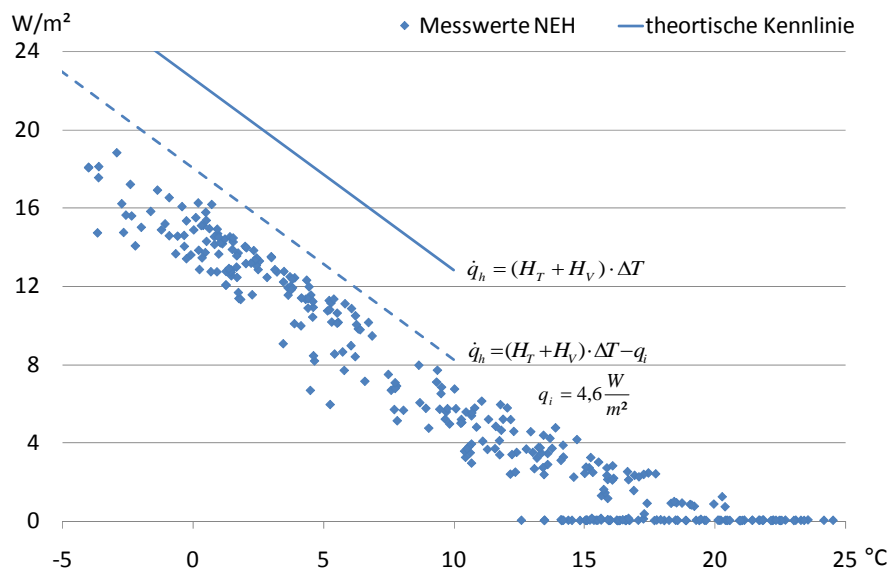


Bild 29 Heizkennlinie des NEH für das Jahr 2005. Zusätzlich zu den Messwerten ist die sich theoretisch ergebende Verlustleistung ohne Berücksichtigung innerer und solarer Quellen aufgetragen (durchgehende Gerade). Diese hängt nur von Lüftungs- und Transmissionsverlusten, sowie der Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenraum ab. Berücksichtigt man (konstante) innere Quellen, so verschiebt sich diese Kennlinie parallel nach unten (gestrichelte Linie).

Wie bei der Vorstellung der Gebäude beschrieben, wird das NEH über Fenster gelüftet, es gibt lediglich eine bedarfsgeführte Abluftanlage im Bad und im Zimmer. Messungen der Fensteröffnungszeiten (siehe Abschnitt ,5.2.1.2 Fensteröffnungszeiten‘), der Nutzung der Bedarfslüftung (siehe Abschnitt ,5.2.1.1 Nutzung der Bedarfslüftung‘) sowie der CO₂ Konzentration (siehe Abschnitt ,5.2.1.3 CO₂ Konzentration im NEH‘) haben gezeigt, dass in den meisten Apartments nur unzureichend (bis gar nicht) gelüftet wird. Durch fehlenden Luftaustausch sinken auch die Lüftungswärmeverluste. In Bild 30 ist in der Heizkennlinie (basierend auf Messdaten aus dem Jahr 2007) zusätzlich der theoretische Verlust eingetragen, der sich ergibt, wenn bei der Bestimmung der Lüftungswärmeverluste lediglich ein Luftwechsel von 0,2 h⁻¹ angenommen wird. Die Gerade korreliert mit den Messwerten und bestätigt die Annahme, dass der niedrige Heizwärmeverbrauch im NEH auf (bei Anwesenheit) unzureichende Lüftung zurückzuführen ist. Um diesem Problem entgegenzuwirken wurden die Laufzeiten der Abluftventilatoren im Bad angepasst (siehe dazu auch Abschnitt ,5.2.1 Lüftung und Luftqualität im NEH‘)

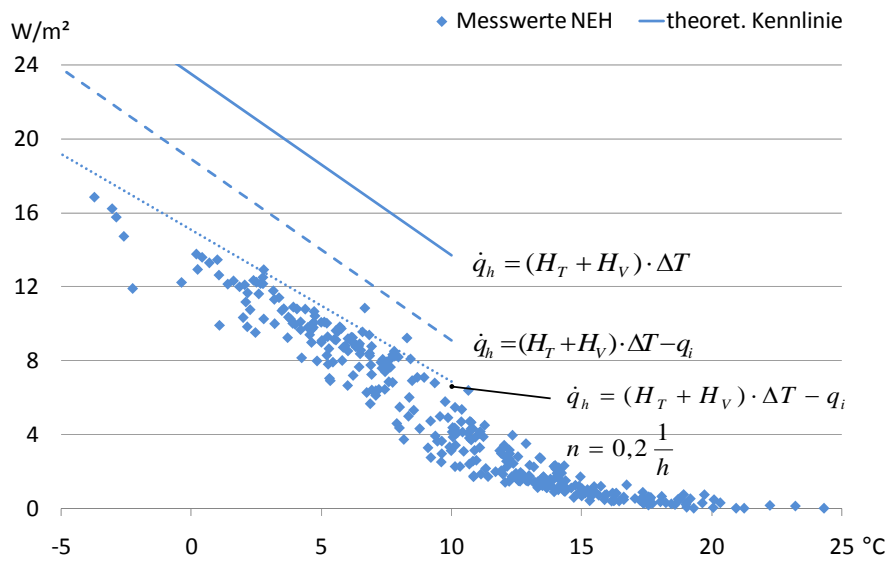


Bild 30 Heizkennlinie, aufbauend auf Messdaten aus 2007. Neben der Kennlinie aus den Planungsdaten und der Berücksichtigung innerer Quellen von $4,6 \text{ W/m}^2$ ist eine zusätzliche Kennlinie eingetragen, bei der für die Berechnung der Lüftungswärmeverluste nur ein Luftwechsel von $0,2 \text{ h}^{-1}$ angenommen wurde. Die sich daraus ergebende Kennlinie korreliert gut mit den gemessenen Werten. Messungen von CO_2 Konzentration und Fensteröffnungszeiten, sowie eine erneut durchgeführte Bilanzierung des Gebäudes bestätigen diese Werte (siehe nachfolgende Kapitel).

Die Fragestellung, inwiefern geringere Luftwechsel und damit geringere Lüftungswärmeverluste maßgeblich für den geringen Heizwärmeverbrauch des NEH sind, wurde auch anhand einer stationären Wärmebilanz basierend auf der Heizwärme-Bedarfsberechnung des PHPP überprüft.

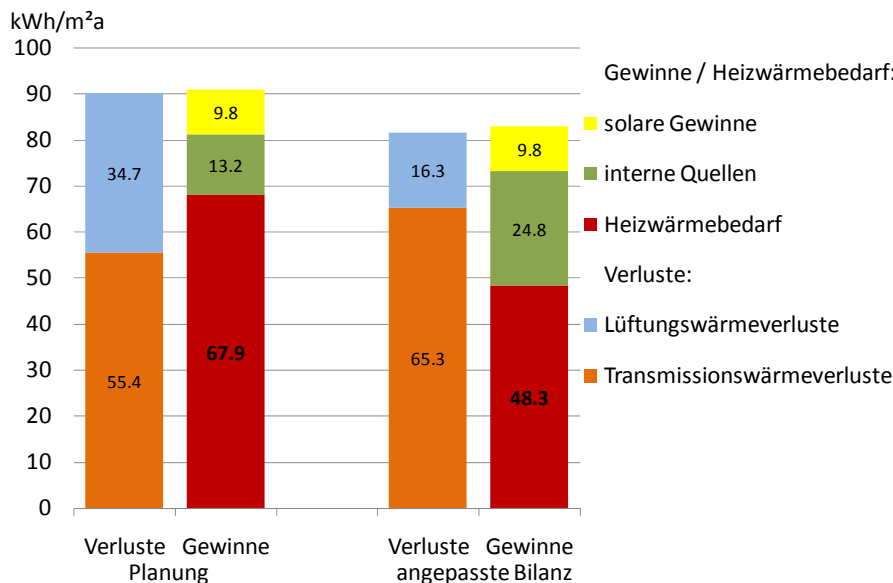


Bild 31 Vergleich der Wärmebilanz des NEH auf Basis der Planungsdaten, sowie einer mit Messdaten angepassten Bilanz. Bei dem in der Planung angenommenen Luftwechsel von $0,5 \text{ h}^{-1}$ und internen Gewinnen von $2,45 \text{ W/m}^2$ ergibt sich ein Heizwärmebedarf von $68 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. In der angepassten Bilanz sind die Transmissionsverluste aufgrund höherer Innentemperaturen größer, ein Luftwechsel von $0,2 \text{ h}^{-1}$ verringert die Lüftungswärmeverluste. Die inneren Quellen sind auf $4,6 \text{ W/m}^2$ angehoben. Daraus ergibt sich ein Heizwärmebedarf von $48 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, der mit dem gemessenen Verbrauch korreliert.

In Bild 31 sind die Wärmegewinne- und Verluste der Heizwärmebedarfsberechnung des NEH grafisch dargestellt. Im PHPP wurde in der Planung ein Luftwechsel von $0,5 \text{ h}^{-1}$ angesetzt, innere Quellen wurden mit $2,45 \text{ W/m}^2$ berücksichtigt. Der daraus resultierende Heizwärmebedarf liegt bei $68 \text{ kWh/m}^2\text{a}$.



In einer neuen Bilanzierung wurden die gemessenen höheren Raumlufttemperaturen berücksichtigt, aus der höhere Transmissionswärmeverluste resultieren. Die inneren Quellen wurden auf $4,6 \text{ W/m}^2$ angepasst, die solaren Gewinne bei den im PHPP ermittelten $9,8 \text{ kWh/m}^2$ belassen. Der Luftwechsel ist auf $0,2 \text{ h}^{-1}$ reduziert, damit verringern sich entsprechend die Lüftungswärmeverluste.

Die erneute Berechnung, unter Berücksichtigung gemessener Betriebsdaten ergibt einen Heizwärmebedarf von $48 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, der mit dem gemessenen Verbrauch von $49 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ korreliert.

4.2.3. Heizwärme Passivhaus

Beim PH ergaben sich zu Beginn des Monitorings erhebliche Abweichungen von berechnetem Heizwärmebedarf und tatsächlichem Verbrauch. Dies spiegelt sich auch in der Heizkennlinie wieder: die gemessene Heizleistung liegt zwar nahe der theoretische Kennlinie - allerdings ohne Berücksichtigung interner Gewinne (die theoretische Gerade wurde auch hier an die tatsächlich gemessenen Innentemperaturen von $22,2 \text{ °C}$ angepasst). Werden wie beim NEH interne Gewinne von durchschnittlich $4,6 \text{ W/m}^2$ angesetzt, so überschreiten die Messwerte durchgehend diese Schranke.

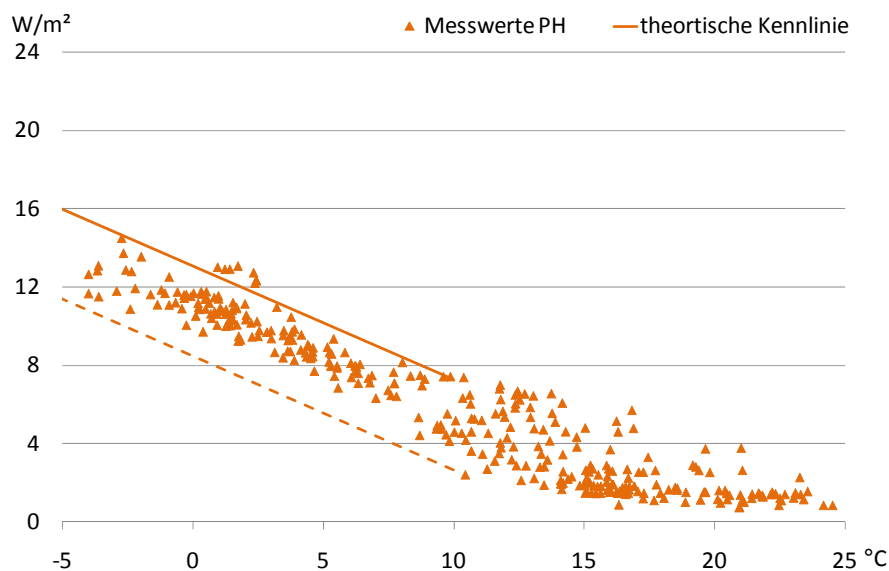


Bild 32 Heizkennlinie des PH für das Jahr 2005. Der gemessene Heizwärmeverbrauch liegt ganzjährig deutlich über der theoretischen Kennlinie, wenn konstante interne Gewinne von $4,6 \text{ W/m}^2$ angenommen werden. Eine weitere Unregelmäßigkeit sind Wärmeeinträge bei hohen Außentemperaturen. Ein Gebäude mit entsprechendem Wärmeschutz und einer Wärmerückgewinnung der Lüftung sollte ab 15 °C keine Heizwärme mehr benötigen. Hier wird jedoch kontinuierlich ein Verbrauch gemessen, es besteht ein beständiger „Grundsockel“ an Wärmeleistung.

Die Analyse der Messwerte aus den Heizkreisen des Gebäudes zeigte zwei Phänomene:

Zunächst gab es hohe spezifische Heizwärmeeinträge im statischen Heizkreis der Badezimmerheizkörper, auch in den Übergangszeiten, bzw. in Sommermonaten. Dies korrelierte auch mit teilweise sehr ho-



hen gemessenen Temperaturen in den Bädern (siehe Abschnitt ,5.1.1 Raumlufttemperatur und Komfort im Winter‘). Diese Wärmeeinträge wurden durch ein falsch angeschlossenes Mischventil verursacht. Statt der vorgesehenen außentemperaturgeführten Vorlaufregelung wurde der Heizkreis ganzjährig mit maximaler Vorlauftemperatur gefahren. Dieser Fehler im Mai 2005 behoben.

Zudem wurde auch über die Lüftung ganzjährig Wärme eingebracht. Hier handelte es sich in erster Linie um ein Problem der Netzhydraulik im RLT-Heizkreis, wodurch es zu Zirkulations- und Bereitstellungsverlusten kam (siehe Abschnitt ,4.2.5.2 Bereitstellungsverluste im PH‘). Diese Wärmeverluste konnten durch Eingriffe in die Regelungstechnik und Einbau zusätzlicher Komponenten größtenteils verhindert werden. Die Regelung der Heizwärmeversorgung und der Lüftungsanlagen erwies sich insgesamt als recht fehleranfällig, sodass es immer wieder zu nicht planungsgemäßem Betrieb der Anlagen kam.

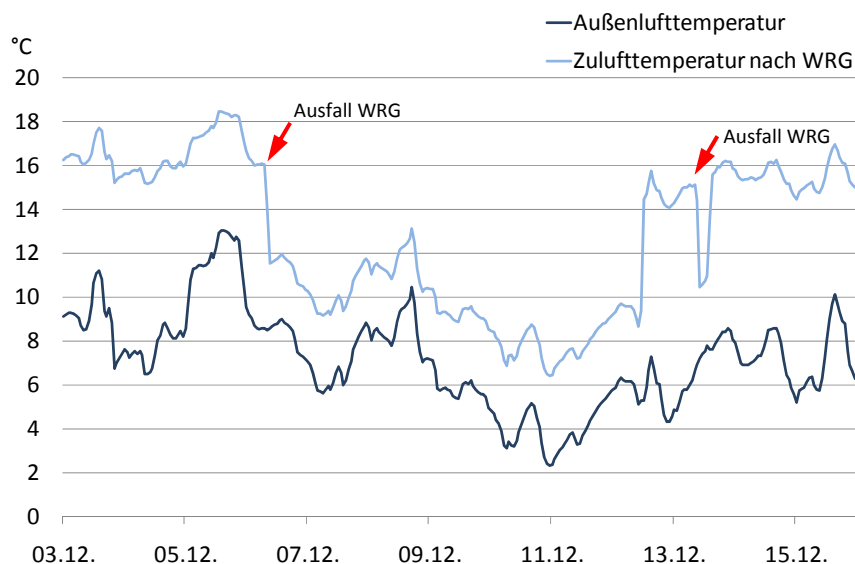


Bild 33 Ausschnitt aus dem Temperaturverlauf der Luftströme vor und nach der WRG im Flügel 6 des PH im Dezember 2006.

Am Einbruch der Temperaturen nach der Wärmerückgewinnung ist ein längerer (6.12. - 12.12.2006) und ein kurzer Ausfall (13.12.) der WRG zu erkennen.

Ein Ausfall der WRG wird nirgends angezeigt und ist direkt auch von außen nicht erkennbar. Durch das nachgeschaltete Heizregister merken auch die Nutzer nichts davon.

Durch Fehler bei der Ansteuerung der Bypassklappen kam es beispielsweise zu kurzzeitigem Ausfällen der Wärmerückgewinnung. Trotz Anzeige an der Regelung, die Wärmerückgewinnung sei zu 100% in Betrieb, war der Wärmeübertrager durch Lamellenklappen verschlossen und der Bypass vollständig geöffnet. Betroffen davon war in erster Linie der Flügel 6. Die Wärmerückgewinnung wurde schließlich per „Hand“ Einstellung im Regler fest auf 100% eingestellt.



Bild 34 Heizkennlinie des PH für das Jahr 2007. Heizwärmeeinträge bei hohen Außentemperaturen konnten deutlich verringert, aber nicht ganz verhindert werden. Nach wie vor liegt das Heizleistungsniveau deutlich über den Planungswerten.

Insgesamt konnte durch die Optimierungsmaßnahmen der Jahresheizwärmeverbrauch im Jahr 2007 auf 38 kWh/m²a reduziert werden. Wärmeeinträge bei hohen Außentemperaturen konnten jedoch aufgrund von Ausfällen oder Fehler in der Regelung nicht ganz vermieden werden.

Dass der passivhaustypische Heizwärmeverbrauch von weniger als 15 kWh/m²a nicht erreicht werden konnte, stellte sich bereits zu Beginn des Monitorings heraus – in erster Linie durch die geringere Qualität der Wärmerückgewinnung (siehe ‚2.2.2 Bauabschnitt Passivhaus‘). In Bild 35 ist noch einmal die Bilanz des Gebäudes mit Werten aus der Vorprojektierung (Heizwärmebedarf 15 kWh/m²a) der tatsächlichen Ausführung gegenübergestellt.

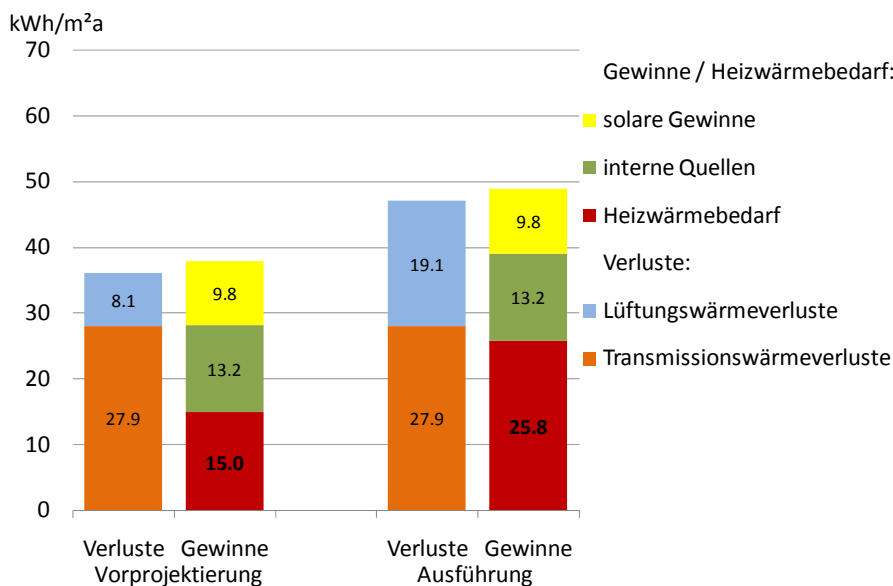


Bild 35 Wärmebilanzen des PH für die in der Vorprojektierung angenommenen Werte (Wärmebereitstellungsgrad der Lüftung: 85%) und Bilanz mit tatsächlich ausgeführter Anlage. Durch die geringere Wärmerückgewinnung steigen die Lüftungswärmeverluste und damit der Heizwärmebedarf auf 26 kWh/m²a. Durch nicht-nutzbare Anteile der internen und solaren Gewinne ist die Summe der „Gewinne“ etwas größer als die der „Verluste“.



In Bild 36 ist, ähnlich wie im vorangegangenen Abschnitt beim NEH, der Bilanz aus der Planung eine angepasste Bilanz, die Ergebnisse aus dem Monitoring enthält, gegenübergestellt.

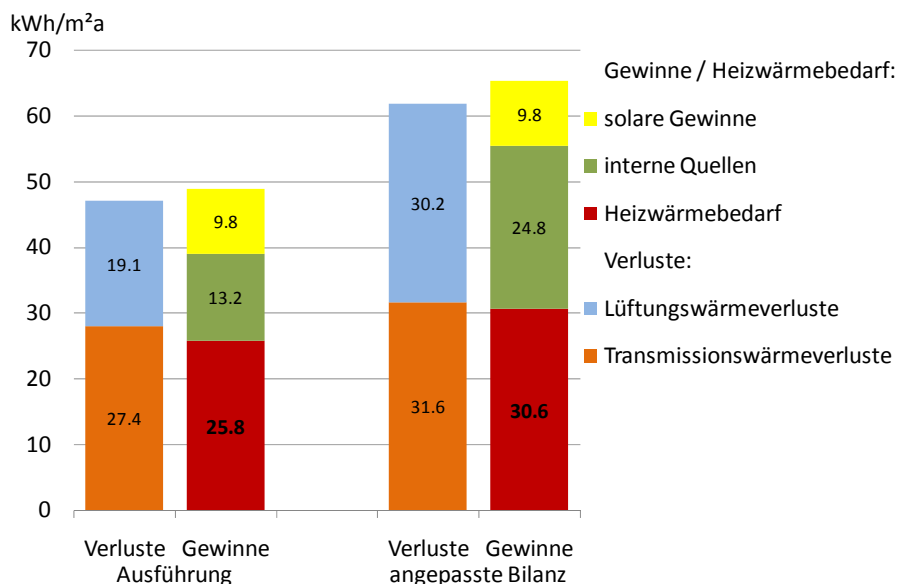


Bild 36 Vergleich des neu ermittelten Heizwärmebedarfs mit einer Bilanz, in die im Monitoring ermittelte Ergebnisse einfließen. Durch erhöhte Innentemperaturen erhöhen sich die Transmissionsverluste. Zusätzliche Fensterlüftung (und offen stehende Flurtüren) verschlechtern die Wärmerückgewinnung und erhöhen die Lüftungswärmeverluste. Einberechnet wurden auch die erhöhten inneren Gewinne von 4,6 W/m². Die Differenz zwischen dem Ergebnis der angepassten Bilanz und dem gemessenen Verbrauch lässt sich durch Fehler in der Regelung erklären.

Auch im PH erhöhen sich rechnerisch die Transmissionsverluste aufgrund höherer Innenraumtemperaturen. Zusätzliche Fensterlüftung, aber auch offen stehende Flurtüren verringern den Wärmebereitstellungsgrad der Lüftung und erhöhen damit die Lüftungswärmeverluste. Schließlich wurden auch die hohen internen Gewinne von 4,6 W/m² berücksichtigt, bei solaren Gewinnen wurde wie im NEH der Wert von 9,8 kWh/m²a aus der Vorplanung übernommen.

Aus der Bilanz resultiert ein Bedarf von knapp 31 kWh/m²a – gemessen wurden 2007 38 kWh/m²a. Die Differenz entspricht damit etwa den Wärmeverlusten, die durch Fehler in der Regelung zum Großteil außerhalb der Heizperiode aufgetreten sind (und daher in der Bilanz nicht berücksichtigt werden können).

4.2.4. Untersuchung passiv-solarer Gewinne

Während bei der Untersuchung der Heizkennlinie interne Gewinne nicht witterungs-, sondern eher belegungsabhängig sind und daher im Jahresmittel vereinfachend als konstant angenommen werden, spielt bei der Nutzung passiv solarer Gewinne das Klima die entscheidende Rolle.

Um die Sensitivität der Gebäude auf die Nutzung solarer Einstrahlung zur Reduktion des Heizwärmeverbrauchs zu untersuchen, werden die



Heizkennfelder um eine zusätzliche Dimension erweitert: neben der Abhängigkeit der Heizleistung von der Außentemperatur werden die Messwerte in verschiedene Klassen unterteilt, die sich in der Höhe des solaren Strahlungsangebots unterscheiden.

Dazu wurde zunächst die Einstrahlung in der Heizperiode untersucht. In Bild 37 ist die kumulierte Häufigkeit der solaren Einstrahlung am Standort Wuppertal in dieser Zeit aufgetragen. Die Werte beziehen sich auf das Tagesmittel der Globalstrahlung, in der Auswertung werden nur Tage berücksichtigt, an denen die Außentemperatur unter 12°C lag, Datengrundlage sind Tagesmittelwerte aus Messungen am Campus Haspel von Winter 2004 bis Frühling 2008.

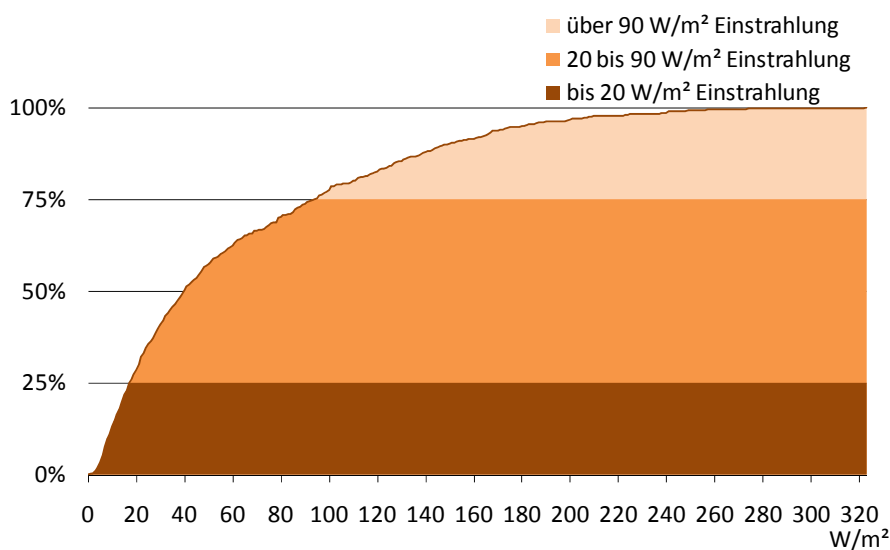


Bild 37 Untersuchung der Einstrahlungshäufigkeiten und daraus folgernde Unterteilung der Werte in drei Klassen. Grundlage bilden gemessene Einstrahlungsdaten von 2005 bis Frühjahr 2008. Die Einstrahlungsdaten sind Tagesmittelwerte, es wurden nur Werte von Tagen berücksichtigt, an denen die Außentemperatur unter 12 °C lag.

Die Einteilung in Klassen wurde so vorgenommen, dass jeweils 25% der Tage entweder sehr einstrahlungsarm (entspricht $<20 \text{ W/m}^2$) oder besonders einstrahlungsreich ($>90 \text{ W/m}^2$) sind, die restlichen 50% liegen zwischen diesen Schwellen. Anhand dieser Klassifizierung wurden die Messwerte für den Heizwärmeverbrauch zugeordnet und grafisch analysiert.

Bei ausgeprägt „solaren“ Gebäuden reduziert sich mit zunehmender Einstrahlung der Heizwärmebedarf. Im Heizkennfeld wird dies deutlich durch eine breite Streuung der Messwerte, bzw. geringe Heizwärmeeinträge na kalten, aber einstrahlungsreichen Tagen. Hintergrund ist der Zusammenhang, dass die Tage mit den tiefsten Außentemperaturen (und demnach theoretisch größtem Heizwärmebedarf) oft klar, also einstrahlungsreich sind. Kann das Gebäude das solare Strahlungsangebot nutzen, so liegt der höchste Heizwärmeverbrauch eher an Tagen mit weniger tiefen Außentemperaturen, aber geringen Einstrahlungswerten.



Durch die raumhohen Fenster der Bursa und damit dem hohen transparenten Teil der Fassade (54% Glasanteil) wäre eine gewisse Sensitivität auf solare Einstrahlung zu erwarten.

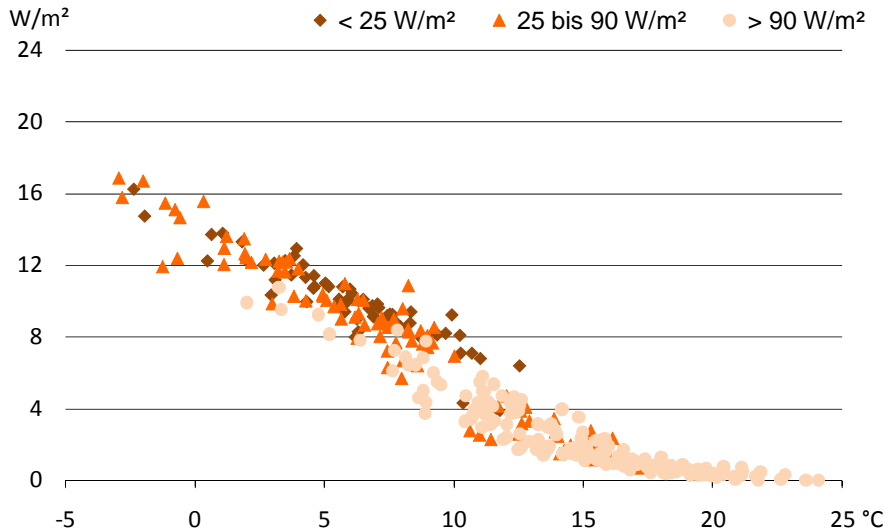


Bild 38 Abhängigkeit der eingebrachten Heizleistung von der solaren Einstrahlung für das NEH. Die Messwerte weisen keine große Streuung auf, die Heizleistung folgt in erster Linie der Außentemperatur, eine Korrelation zur Einstrahlung ist wenig ausgeprägt.

Für das NEH ergibt sich, wie in Bild 38 erkennbar, kaum ein signifikanter Zusammenhang zwischen hoher solarer Einstrahlung und niedrigem Heizwärmeverbrauch. Zwar wird an Tagen mit geringen Einstrahlungswerten eher mehr geheizt, hohe Einstrahlungswerte können den Verbrauch aber nicht deutlich senken.

Betrachtet man Kubatur des Gebäudes und die Lage der Apartments, wird klar, warum bei der Betrachtung des gesamten Gebäudes solare Gewinne wenig Einfluss haben (Bild 39). Durch die sternförmige Ausrichtung des Gebäudes ist je nach Tages- und Jahreszeit immer nur ein Teil des Gebäudes besonnt. D.h. Zimmer in Flügeln mit einer südorientierten Seite können durchaus solare Gewinne nutzen. Bei der Betrachtung des gesamten Gebäudes relativiert sich der Einfluss der Einstrahlung jedoch, sodass keine ausgeprägte Reaktion auf solare Einträge erkennbar wird.

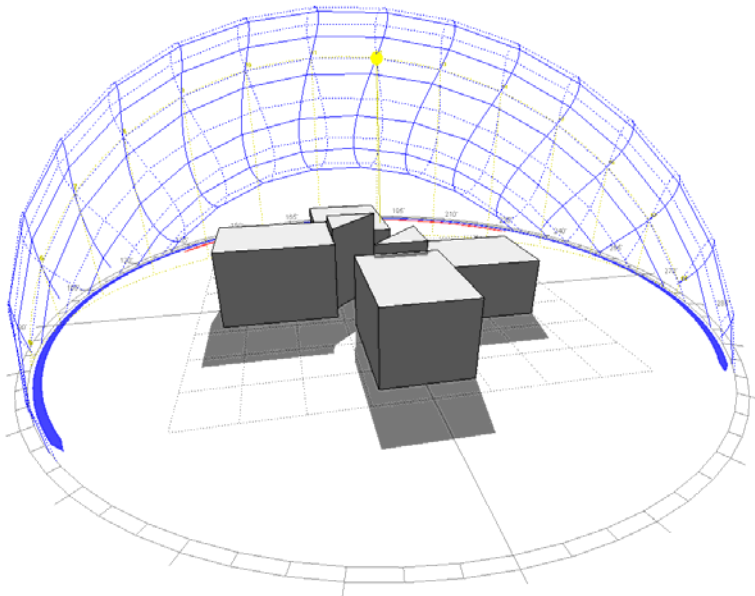


Bild 39 Darstellung eines schematischen Modells der Burse und des jährlichen Sonnenverlaufs (Darstellung aus Ecotect, Vers. 5.5).
 Wird eine Seite eines Gebäudeflügels voll besonnt, liegt die Rückseite im Schatten.

Im PH liegt von der Ausrichtung des Gebäudes die gleiche Situation vor. Hier könnten jedoch durch die Wärmerückgewinnung solare Gewinne auf einer Seite eines Gebäudeflügels auch auf der sonnenabgewandten Seite für eine Reduktion der Heizlast sorgen. Dennoch gibt es auch hier keine ausgeprägte Reaktion des Heizwärmeverbrauchs auf die solare Einstrahlung, wie in Bild 40 deutlich wird.

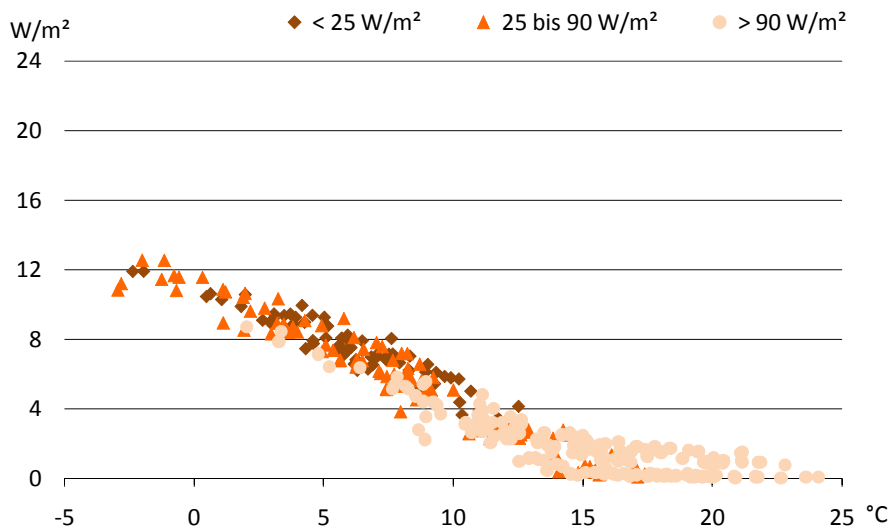


Bild 40 Auch beim PH ergibt sich keine sichtbare Reduktion der Heizleistung durch solare Einstrahlung. Die eingebrachte Heizleistung skaliert nahezu linear mit der Außentemperatur.



4.2.5. Optimierungsmaßnahmen Heizwärmeversorgung

Die im vorangegangenen Abschnitt festgestellten Probleme und technischen Mängel zogen eine Reihe von Änderungs- und Optimierungsmaßnahmen nach sich. In den folgenden Abschnitten werden diese Maßnahmen detailliert beschrieben und gegebenenfalls Auswirkungen gezeigt.

4.2.5.1. Maßnahmen im NEH

Im Niedrigenergiehaus wurden am Heizungssystem selbst keine Änderungsmaßnahmen durchgeführt. Probleme mit durchgehend laufenden Pumpen der statischen Heizung (siehe Abschnitt ‚4.4.1 Stromverbrauch TGA NEH‘) wurden dem Betreiber mitgeteilt, hatten jedoch kaum Auswirkungen auf den tatsächlichen Heizwärmeverbrauch. Die festgestellten Mängel in Bezug auf unzureichende Luftwechsel führten zu einer Anpassung der Abluftventilatoren im Bad, das Vorgehen ist in Abschnitt ‚5.2.1.4 Optimierung der Lüftung im NEH‘ detailliert beschrieben.

4.2.5.2. Bereitstellungsverluste im PH

Bei der Analyse der Heizwärmeeinträge wurde im vorangegangenen Abschnitt deutlich, dass es im PH ganzjährig zu Heizwärmeeinträgen kam, also auch außerhalb der Heizperiode. Die sommerlichen Wärmeeinträge wurden fast ausschließlich im Heizkreis der Luftheizung gemessen.

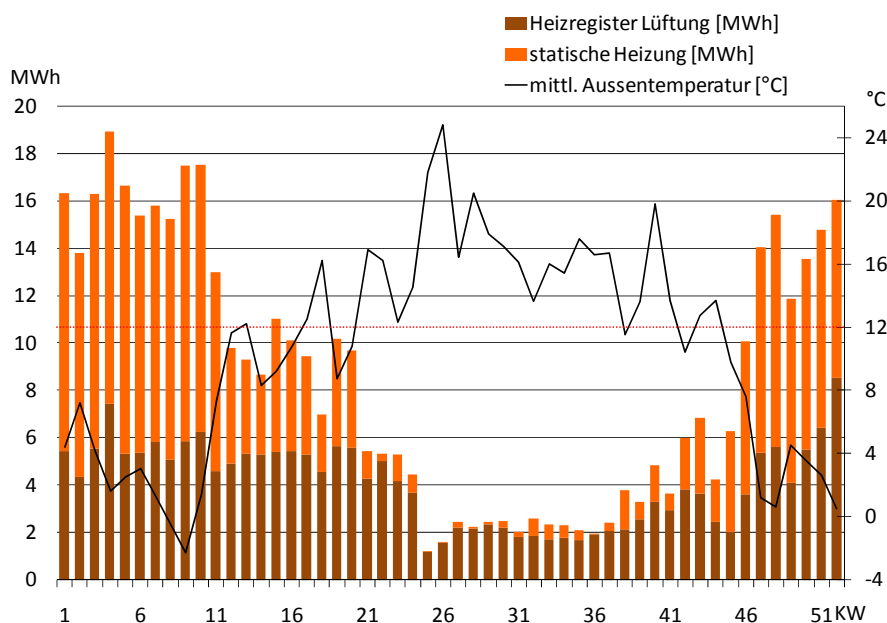


Bild 41 Auftragung wöchentlicher Heizwärmeeinträge im Jahr 2005 in Summe aus Wärme über die Heizkörper, sowie über die Lüftung. Deutlich sichtbar ist der durchgehende „Verbrauchssockel“ der Luftheizung.



Grund für diese Wärmeverluste war das Konzept der Heizwärmeverteilung. Die Lüftungsanlagen auf den Gebäudeflügeln verfügen über eigene, autarke Regelungseinheiten, die auch die Heizwärmezufuhr über die Heizregister in der Zuluft regeln. Die zentrale Umwälzpumpe im Technikraum, die die einzelnen Anlagen mit Wärme versorgt, lief unregelt das ganze Jahr durch, da es von den Anlagen auf dem Dach keine Rückmeldung an die Heizungsregelung im Technikraum gab, ob und wann in den Lüftungsanlagen eine Heizwärmeanforderung vorliegt. Das dauerhafte Zirkulieren in diesem Heizkreis verursachte beträchtliche Wärmeverluste. Verstärkt wurde der Effekt dadurch, dass die Anschlüsse – Pumpe, Mischventil und Rohrleitungen – des Zuluft- Heizregisters im Abluftkanal der Lüftungsanlage untergebracht sind, also ständig im Abluftstrom der Anlage standen (siehe Bild 42, bzw. Bild 43).

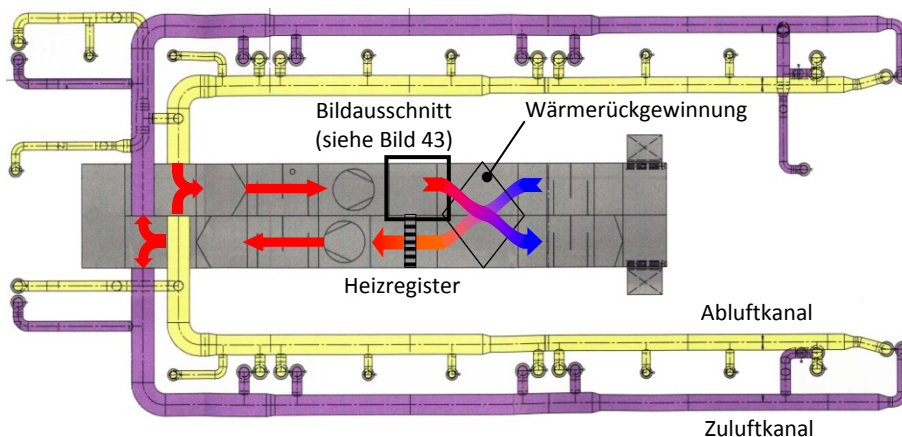


Bild 42 Schematische Draufsicht auf eine der Lüftungsanlagen mit Darstellung der Luftführung. Im folgenden Bild ist die Innensicht des hier schwarz umrandeten Bereichs des Abluftkanals zu sehen, in dem der Anschluss des Heizregisters untergebracht ist.



Bild 43 Blick in den Abluftkanal einer Lüftungsanlage. Im linken Bild sind hinten links die Platten des Wärmetauschers der Wärmerückgewinnung zu erkennen, im Vordergrund und auf dem rechten Bild ein Teil der Rohrleitungen und Anschlüsse des Heizregisters (das sich direkt daneben im Zuluftkanal befindet).

In Bild 44 ist der schematische Aufbau der Heizwärmeversorgung dargestellt. Um diese Zirkulationsverluste abzustellen wurde zunächst die vier Regelungseinheiten (Kieback & Peter LRP) mit der zentralen Regelung im Technikraum vernetzt (Kieback & Peter HRP).

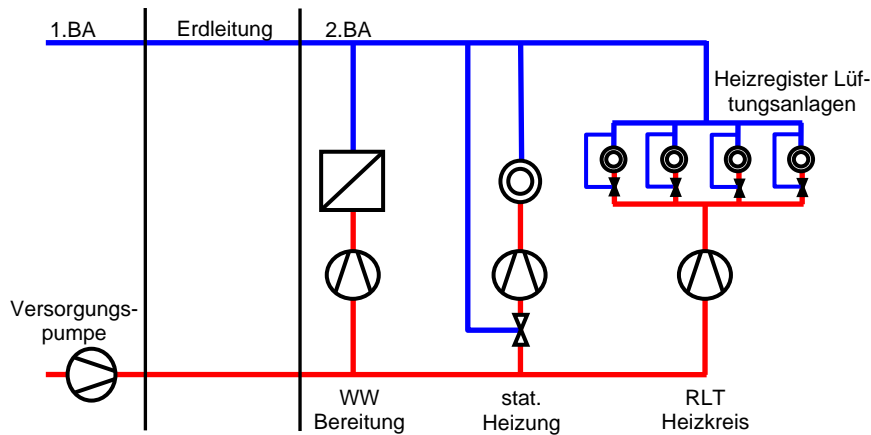


Bild 44 Schematische Darstellung der Wärmeversorgung des PH. Aus der Fernwärmeversorgung der WSW wird im NEH die Versorgung des PH ausgekoppelt. Im PH teilt sich der Kreislauf in Trinkwassererwärmung, sowie die Heizwärme für stat. Heizkörper und RLT auf. Die Versorgungspumpe im ersten BA ist so stark, dass kontinuierlich Wasser durch den RLT Kreis gedrückt wird

Die Umwälzpumpe für den RLT- Heizkreis wurde so in die Regelung eingebunden, dass sobald einer der Regler einer Lüftungsanlage eine Heizwärmeanforderung meldet, die zentrale Pumpe im Technikraum anspringt. Kommt keine Anforderung, schaltet die Pumpe (mit einem gewissen Nachlauf) ab.

Das alleinige Abschalten der Pumpe reichte jedoch noch nicht, um die Zirkulationsverluste abzustellen – auch bei abgeschalteter Umwälzpumpe zirkulierte Wasser durch den RLT- Heizkreis. Ursache war der Versorgungspumpe im Technikraum des NEH, die so stark ist, dass auch bei stillstehender RLT- Pumpe Wasser durch den Heizkreis zirkuliert. Um dies zu verhindern wurde zusätzlich ein elektrisch verstellbares Schließventil in den Kreise eingebaut, das nach abschalten der Umwälzpumpe den kompletten RLT- Heizkreis absperrt.

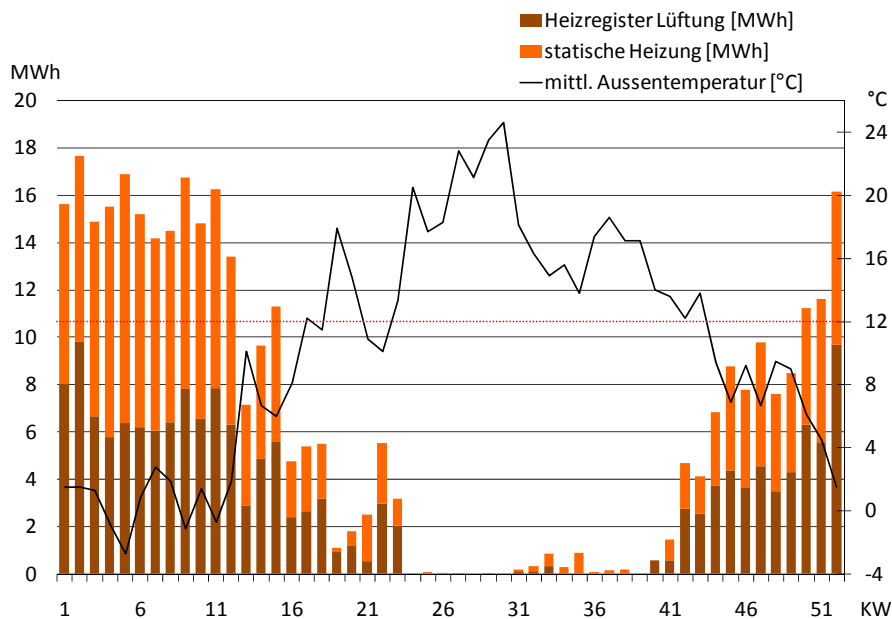


Bild 45 Auftragung wöchentlicher Heizwärmeinträge im Jahr 2006. Bereitstellungsverluste im RLT Heizkreis konnten durch geregeltes Abschalten der Umwälzpumpe, sowie das Schließen eines Absperrventils wirkungsvoll unterbunden werden.



Ein durch Ausfall im Oktober 2006 bedingter Austausch der zentralen Heizungsregelung führte dazu, dass viele der vorher durchgeführten Anpassungen nicht mehr aktiv waren. Bei der Wiederinbetriebnahme wurden einige Parameter (Heizkurve, Wärmeversorgung der RLT- Heizregister) nicht optimal eingestellt. Die Fehler zeigten sich erst nach Ende der Heizperiode, konnten durch unklare Zuständigkeiten im Bereich Heizwärmeversorgung erst Mitte des Jahres größtenteils abgestellt werden. Daher lief auch 2007 die Anlage nicht dauerhaft in optimiertem Betrieb (siehe auch ,4.4.2 Stromverbrauch TGA PH')

4.2.5.3. Regelung der Luftheizung im PH

Wesentliche Änderungen gab es bei der Regelungsstrategie der Heizwärmezufuhr über die Lüftung. Im ursprünglichen Konzept war vorgesehen, dass die Zulufttemperatur einen einstellbaren Mindestwert nicht unterschreitet. Diese Temperaturgrenze konnte über einen Fern-einsteller im Technikraum des PH getrennt für jeden Flügel eingestellt werden.



Bild 46 Fernbedienungselemente der Lüftungsregelungen im Technikraum des PH. Hier werden zentrale Betriebsparameter wie Lufttemperaturen und Störmeldungen angezeigt. Über ein Stellrad kann hier die Sollgröße für die Zulufttemperatur eingestellt werden.

In der Planung war vorgesehen, dass die Zulufttemperatur mit mind. 18°C eingeblasen wird, die zu deckende Heizleistung sollte über innere Quellen, bzw. bei Bedarf über den Badheizkörper ausgeglichen werden.

Die ersten Auswertungen des Heizwärmeverbrauchs zu Beginn des Monitorings zeigten eine deutliche Überschreitung des Jahresheizwärmebedarfs (65 kWh/m²a im Jahr 2004). Dabei wurden 80% der Wärme über den statischen Heizkreis und nur 20% über die Lüftung eingebracht. Damit war zum einen der Heizwärmeverbrauch deutlich zu hoch, zudem gab es offensichtlich Probleme mit dem Konzept der Heizwärmeversorgung über die Lüftung.



Um das bestehende Konzept zu überprüfen und alternative Strategien zur Sicherstellung der Heizwärmeversorgung zu untersuchen, wurden Simulationsrechnungen mit einer thermischen Gebäudesimulation durchgeführt, zum Einsatz kam TRNSYS 16.

Um das Verhalten des Gebäudes zu untersuchen, wurde ein so genanntes „Mehrzonenmodell“ angefertigt, in dem eine Ebene eines Flügels abgebildet wird. Aufgrund der sternförmigen Anordnung der Gebäudeflügel ergeben sich unterschiedlich stark ausgeprägte Nord- / Südausrichtungen der Apartments. Für die Simulation wurde eine Nordost- Südwest- Ausrichtung angenommen, was der Lage von Flügel 7 entspricht.

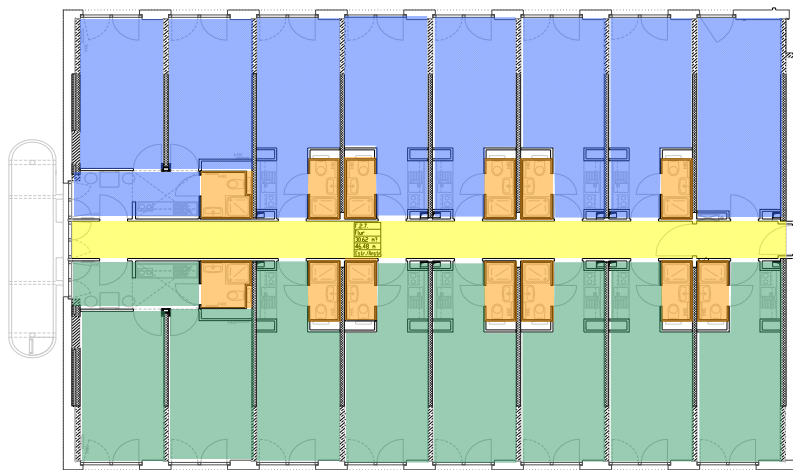


Bild 47 Grundriss einer Ebene eines Gebäudeflügels. Das Geschoss wurde in verschiedene farblich markierte Zonen unterteilt, für die jeweils bestimmte Randbedingungen gelten.

Die Räume einer Ebene wurden in verschiedene Zonen unterteilt, für die gemeinsame Randbedingungen gelten.

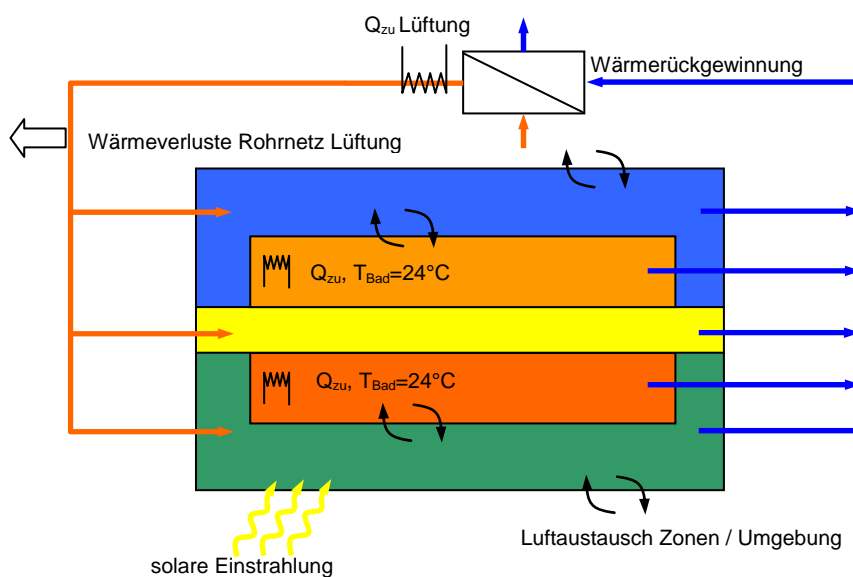


Bild 48 Die einzelnen Zonen stehen mit angrenzenden Zonen durch Luft- und Energieaustausch in Verbindung. Technische Anlagen wie die Lüftungsanlage werden im Modell nachgebildet, die meteorologischen Randbedingungen werden Wetterdaten eingelesen.



Ausgabe der Simulationsrechnung sind die berechneten Raumlufttemperaturen in den jeweiligen Zonen, sowie die Summe der zugeführten Energie an den jeweiligen Wärmequellen.

Das Ergebnis der Simulation war, dass das realisierte Prinzip der Beheizung des Gebäudes über die Sicherstellung einer Soll- Zulufttemperatur und der individuellen Raumanpassung über die Badheizkörper nicht in der Lage ist, die Ansprüche an angenehme Raumtemperaturen mit einem niedrigen Energieverbrauch zu verbinden.

Die energetisch optimale Lösung wäre das Nachrüsten von Heizkörpern in den Zimmern gewesen, da eine gemeinsame Heizwärmeversorgung von nord- und südausgerichteten Zimmern über ein zentrales Heizregister immer so ausgelegt sein muss, dass auch in Bezug auf solare Gewinne „ungünstig“ gelegene Zimmer ausreichend temperiert werden, was zwangsläufig eine zu hohe Heizwärmezufuhr in anderen Bereichen nach sich zieht.

Ein derartiger Eingriff hätte hohe Kosten durch Installation der Heizkörper und Mietausfall nach sich gezogen, daher wurde entschieden, eine Betriebsoptimierung der vorhandenen Anlage durchzuführen.

Die zentrale Änderung war die Umstellung von einer festen Zulufttemperatur auf einen ablufttemperaturgeführten Betrieb. Am Ferneinsteller im Technikraum (Bild 46) kann jetzt ein Sollwert für die Ablufttemperatur eingestellt werden. Fällt die gemessene Ablufttemperatur unter den eingestellten Wert, wird (mit einer hinterlegten Hysterese) über die Zuluft geheizt.

Der Heizwärmeverbrauch wurde durch mehrere Maßnahmen insgesamt auf 38 kWh/m²a (witterungsbereinigt) im Jahr 2007 reduziert, der Anteil der Luftheizung am gesamten Heizwärmeverbrauch beträgt jetzt 53% (siehe Bild 45).

4.3. Wasserverbrauch und Trinkwassererwärmung

Die Trinkwassererwärmung erfolgt in beiden Bauabschnitten ausschließlich über Fernwärme. In beiden Gebäuden wird Trinkwasser in zwei jeweils 1500l fassenden Pufferspeichern auf 55-60°C erwärmt. Die Anlagentechnik beider Gebäude unterscheidet sich im Prinzip nicht, lediglich Details wie der Volumenstrom der Warmwasserzirkulation sind unterschiedlich gelöst. Die Auswertung wird daher nicht nach Bauabschnitten getrennt.

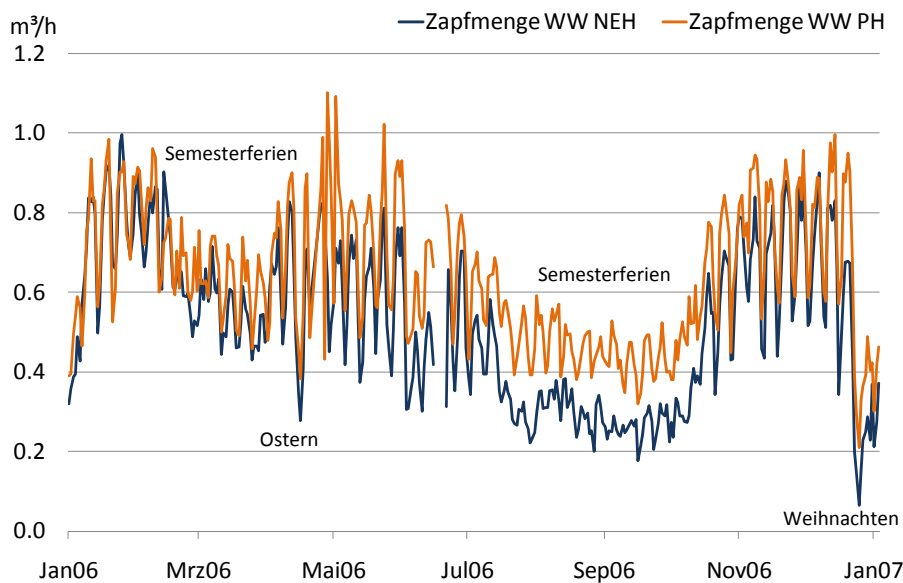


Bild 49 Verlauf der tagesmittleren Warmwasser- Zapfleistung in beiden Gebäuden im Jahresverlauf. Deutlich erkennbar sind zum einen der Wochenrhythmus, zum anderen der Semesterverlauf, sowie einzelne Feiertage.

Am Warmwasserverbrauch kann, wie im Abschnitt ‚4.2.1 Quantifizierung interner Lasten‘ bereits beschrieben, die aktuelle Belegung des Wohnheims gut angelesen werden.

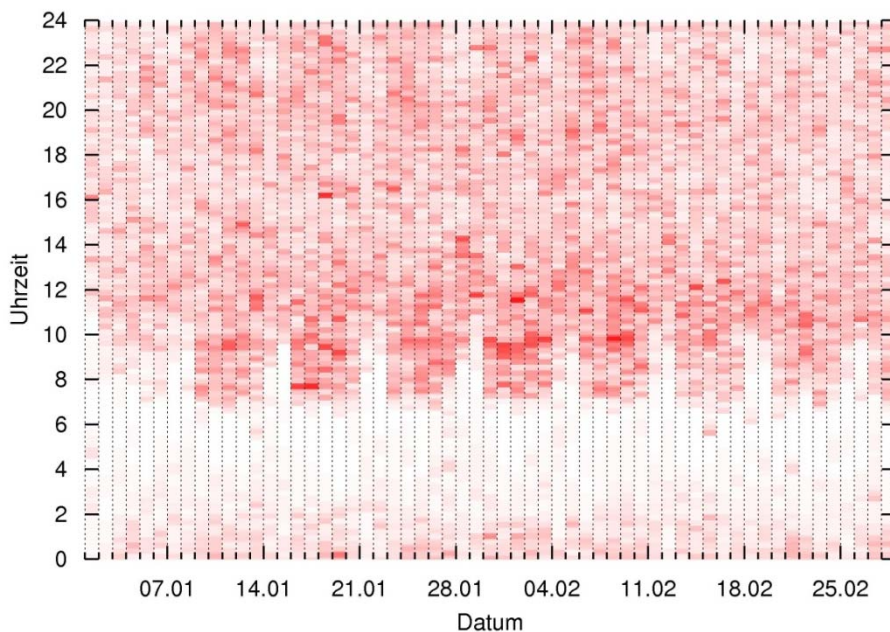


Bild 50 Carpet- Plot der Warmwasser- Zapfung in den Monaten Januar und Februar 2006 im PH. Ähnlich wie bei den Diagrammen zu Fensteröffnungszeiten sind hier auf der X- Achse die Tage gegen die Uhrzeit auf der Größenachse aufgetragen. Warmwasserzapfungen sind als rote Streifen dargestellt. Je intensiver die Färbung, desto größer die Zapfmengen. Auch hier sind die Wochenenden, sowie der Beginn des Studienbetriebs deutlich erkennbar. Erwartungsgemäß werden die größten Mengen morgens zwischen 7:30 und 10:00 Uhr abgenommen.

Bei der Datenerfassung ergeben sich Probleme bei geringer Zapfleistung. Um bei hoher Gleichzeitigkeit bei der Warmwasserzapfung hohe Druckverluste zu vermeiden, wurde ein Zähler mit einem Nenn- Durchfluss von 15 m³/h eingesetzt. Die tatsächliche Zapfleistung liegt aber i.d.R. deutlich darunter, meist unter der minimalen Durchflussmenge



des Zählers¹². Kleine Zapfmengen werden daher nicht zuverlässig erfasst, die Messdaten zur Warmwasserzapfung sind daher mit Unsicherheiten behaftet.

Der in Bild 49 dargestellte Verlauf der mittleren Warmwasserzapfung ist vom Verlauf den- noch plausibel. Während des Semesters ist der Warmwasserverbrauch in beiden Gebäuden ähnlich hoch, in den Sommersemesterferien macht sich bemerkbar, dass im PH zur Zeit der Messung im Schnitt Studenten höherer Semester aufhielten, die auch in den Semesterferien eher in Wuppertal bleiben, während im NEH der Anteil Studienanfänger höher ist.

¹² Minimale Durchflussmenge beim verwendeten Zähler: 200 l/h. Quelle: Herstellerangabe, Datenblatt Mehrstrahl- Hauswasserzähler M-N QN 15, Sensus Metering Systems GmbH



Nutzerbefragung).

Die Beladeleistung der Warmwasserspeicher unterscheidet sich allerdings nicht in gleichem Maße, d.h. im Sommer wurden für die Trinkwassererwärmung in beiden Bauabschnitten ähnliche Wärmemengen benötigt. Bei deutlich geringerer Wärmeentnahme müssten im NEH die Speicherverluste im Sommer stark ansteigen – dafür gab es jedoch keine Anhaltspunkte (wie eine erhöhte Raumlufttemperatur im Technikraum, die ebenfalls erfasst wurde).

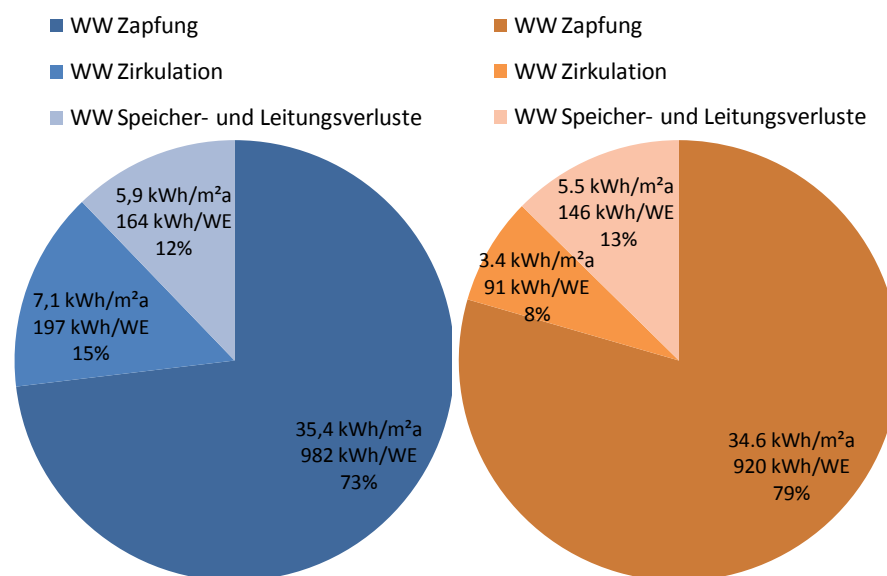


Bild 51 Aufteilung der Energie zur Trinkwassererwärmung im NEH (links) und PH (rechts), Datengrundlage: Kalenderjahr 2007.

Unterschiede zeigen sich in erster Linie bei den Zirkulationsverlusten. Im NEH ist der Volumenstrom in der Zirkulationsleitung etwa doppelt so groß, was zu nahezu doppelt so hohen Verlusten führt. Die Speicher- und Leitungsverluste ergeben sich aus der Energiebilanz der Speicher im Technikraum. Leitungsverluste im Gebäude werden nur bei den Zirkulationsverlusten erfasst.

Der Anteil an Zirkulationsverlusten ist in beiden Gebäuden, im Vergleich zu sonst im Wohnungsbau ermittelten Werten, bedingt durch die hohe Zapfmenge relativ gering.

In der Jahresbilanz ergibt sich bei beiden Gebäuden ein spezifischer Wärmeverbrauch, der gleich groß, bzw. größer ist als der Heizwärmeverbrauch. Potential zur Verbrauchsreduktion liegt hier zum großen Teil im individuellen Verhalten der Nutzer.

Aus technischen und organisatorischen Gründen werden die Mieten für die Apartments als Pauschalmieten abgerechnet, d.h. die Mieter bekommen keine getrennte Nebenkostenabrechnung. Sowohl die Nutzerbefragung, als auch persönliche Gespräche mit Bewohnern haben gezeigt, dass viele Bewohner die Pauschalmiete als „Energie-Flatrate“ ansehen, d.h. den pauschal bezahlten Energiebezug entsprechend nutzen.

In Bezug auf Wasser- bzw. Warmwasserverbrauch können andererseits mit einfachen Mitteln deutliche Einsparungen erzielt werden, wie das Beispiel des gesamten Wasserverbrauchs zeigt. Eine Reduktion des Primärenergieverbrauchs (und der CO₂ Emissionen) ließe sich durch den Einsatz regenerativer Energiequellen realisieren. Für den Einsatz



von solarthermischen Anlagen speziell bei Studentenwohnheimen wurden in anderen Forschungsprojekten umfangreiche Erfahrungen gesammelt [Bine2008]. Zentrales Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass die Solaranlagen möglichst nach dem (niedrigen) Trinkwasser-Wärmeverbrauch des Sommers ausgelegt werden, um unwirtschaftliche und die Lebensdauer der Kollektoren negativ beeinflussende Stillstandszeiten zu vermeiden. Durch diese eher knapp bemessenen Anlagen werden solare Deckungsraten der Trinkwassererwärmung von 15% bis 23% erreicht.

Tab. 9 Wasserverbrauch der beiden Bauabschnitte von 2004 bis 2006.

	NEH			PH		
	[m ³]	[m ³ /WE]	[l/ WE, d]	[m ³]	[m ³ /WE]	[l/WE, d]
2004	15415	50.9	139.4	12876	39.9	109.2
2005	15415	50.9	139.4	12513	38.7	106.1
2006	14753	48.7	133.4	11692	36.2	99.2
2007	15197	50.2	137.4	12356	38.3	104.8

Bei der Untersuchung, welche Ursache der durchgehend geringere Wasserverbrauch des PH hat, wurden die Sanitärinstallationen überprüft. Bei einer Stichprobenmessung zeigte sich, dass die im NEH Dusch- Armaturen mit einem Durchfluss von 17,5 l/min verwendet wurden, im PH wurden 12,5 l/min gemessen. Dies kann nicht auf alle Apartments verallgemeinert werden, zeigt aber, dass die standardmäßig eingebauten Duscharmaturen im PH sparsamer sind.

Ein weiterer Unterschied liegt in der Toilettenspülung. Während man beim NEH zum vorzeitigen stoppen der Spülung einen Hebel seitlich am Spülkasten hochziehen muss, ist der Spülkasten beim PH hinter einer Vorwandinstallation, die Bedienung erfolgt über einen Wippschalter, über den man den Spülvorgang auch wieder unterbrechen kann (das Volumen beider Spülkästen ist gleich).

Im Rahmen des Monitorings wurden auf Installationsebene nur begrenzt Optimierungsmaßnahmen in Bezug auf Wasser / Warmwasserverbrauch vorgenommen. In erster Linie wurden freiliegende Warmwasserleitungen isoliert, um die Speicher- und Verteilungsverluste zu verringern.

Zusätzlich werden die Bewohner durch ein Infoblatt (siehe ‚5.4 Erstellung eines Nutzerinfoblatts‘) auf das Thema „sparsamer Umgang mit Wasser und Energie“ sensibilisiert. Die Infoblätter werden seit Jahreswechsel 2007/08 an die Bewohner verteilt, ob ein messbarer Effekt durch Verbrauchsrückgang eintritt, kann im Langzeitmonitoring beobachtet werden.

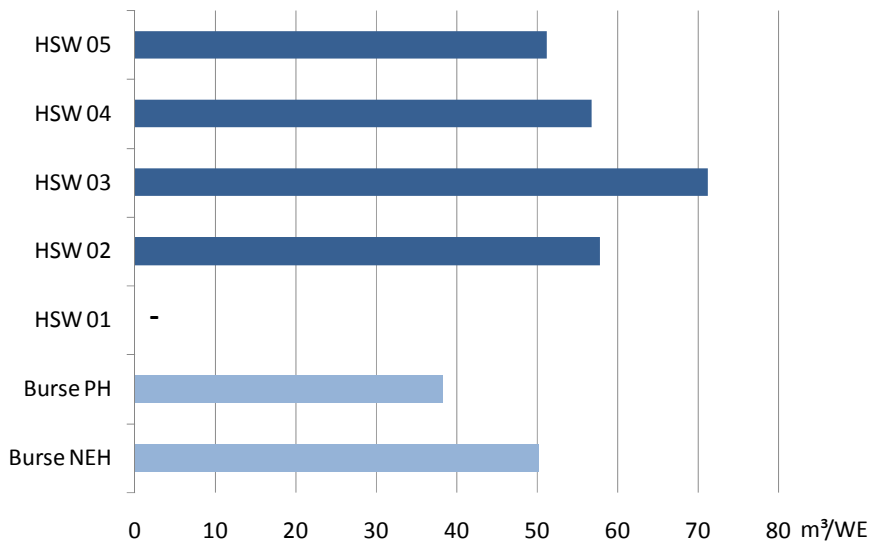


Bild 52 Vergleich des Wasserverbrauchs der Burse mit anderen Wohnheimen des HSW. Unterschiedliche Armaturen, bzw. Start-Stopp Tasten bei der Toilettenspülung haben erheblichen Einfluss auf den Gesamtverbrauch. Beim Wohnheim HSW01 lag ein Defekt an einem Wasserzähler vor, später führte ein lange Zeit nicht entdeckter Rohrbruch zu erhöhten Verbräuchen. Daher kann für dieses Wohnheim kein mittlerer Verbrauch angegeben werden.

Ein Vergleich des gesamten Wasserverbrauchs (siehe Bild 52) der Burse mit anderen Wohnheimen des HSW zeigt, dass auch in den anderen Wohnheimen ähnlich viel Wasser, bzw. tendenziell mehr verbraucht wird. Beim Wohnheim HSW01 ist der Verbrauch aufgrund eines defekten Wasserzählers nicht darstellbar.

4.4. Stromverbrauch

Im Rahmen des Monitorings wurde nur der Stromverbrauch der Haus-technik detailliert erfasst, d.h. der elektrische Energieverbrauch von Hilfsaggregaten wie Pumpen und Lüftungsmotoren.

Ein Vergleich des gesamten Stromverbrauchs der „Neuen Burse“ mit anderen Wohnheimen des HSW zeigt, dass diese mit einem Verbrauch von ca. 1200 kWh/WE dicht zusammenliegen. Deutlich höher liegt erwartungsgemäß der Stromverbrauch in drei Wohnheimen, bei denen die Trinkwassererwärmung dezentral elektrisch erfolgt (HSW02, HSW04, HSW05). Unterschiedliche Baustandards haben also keinen signifikanten Einfluss auf den gesamten Stromverbrauch.

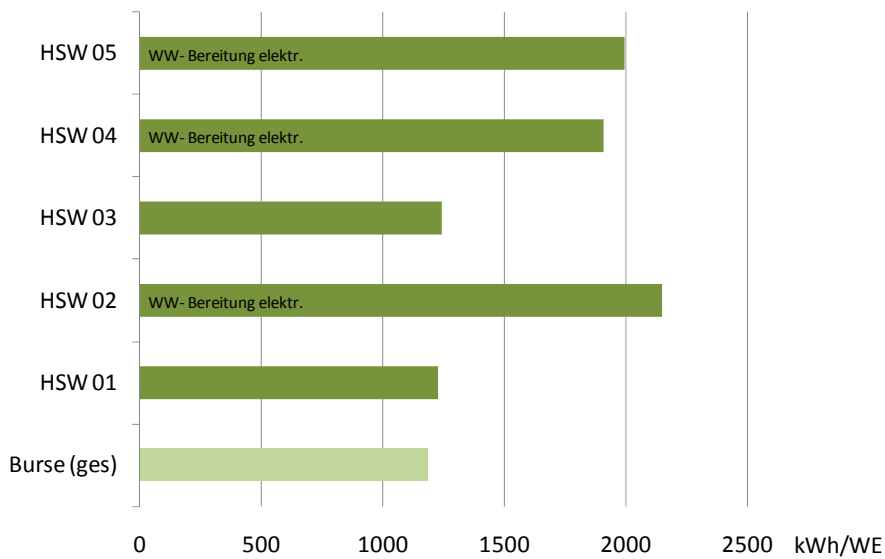


Bild 53 Vergleich des Strombezugs der HSW- Wohnheime. Für die Burse kann aufgrund gemeinsamer Erfassung kein nach Bauabschnitten aufgeteilter Verbrauch angegeben werden. Der Stromverbrauch liegt auf ähnlichem Niveau, deutlich erkennbar ist die elektrische Trinkwassererwärmung in drei der Wohnheime.

Dies bedeutet aber auch, dass die Burse trotz hohem technischen Standard (Aufzüge, Lüftungsanlage) bezogen auf die Anzahl Wohnheimplätze keinen höheren Gesamtverbrauch als andere Wohnheime hat.

4.4.1. Stromverbrauch TGA NEH

Der TGA- Stromverbrauch im NEH setzt sich zusammen aus dem Stromverbrauch der Pumpen für Heizung und Trinkwassererwärmung. Die dezentralen Lüfter der Abluftanlagen konnten nicht getrennt erfasst werden, hier wurde, wie in Abschnitt ,5.2.1.1 Nutzung der Bedarfslüftung' beschrieben, der Jahresverbrauch aus der Messung der Laufzeit einzelner Lüfter hochgerechnet.

Die Pumpen, die die Wärmeversorgung des PH sicherstellen befinden sich auch im NEH, wurden aber bei der Verbrauchsbilanzierung dem PH zugerechnet.

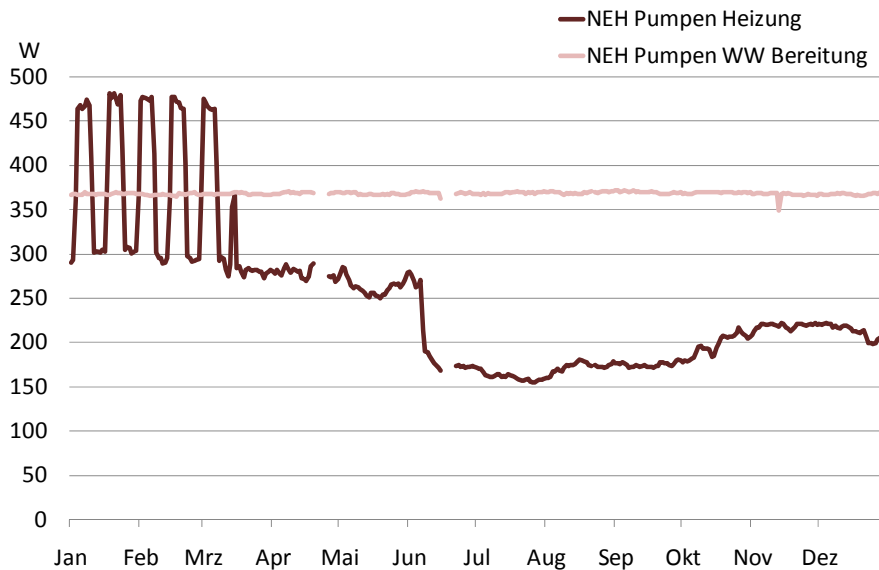


Bild 54 Verlauf der Summen tagemittleren Leistungen der Pumpen für Heizung und Trinkwassererwärmung im NEH im Jahr 2006. Die Pumpen zur Trinkwassererwärmung (Summe aus Pumpen zur Beladung der Speicher sowie der Zirkulationspumpen) laufen wie erwartet das ganze Jahr mit konstanter Leistung. Im Heizkreis befindet sich eine Doppelpumpe, die hohe Pumpenleistung von Jan bis März resultiert aus einer falschen Ansteuerung, bei der zeitweise beide Pumpen parallel liefen. Ab März lief nur noch eine Pumpe, die auch im Sommer nicht außer Betrieb ging.

Die Leistungsaufnahme der Pumpen zur Trinkwassererwärmung ist erwartungsgemäß das ganze Jahr über nahezu konstant. Bei den Pumpen des Heizkreises handelt es sich um Doppelpumpen. Die Regelung der Pumpen sieht vor, dass jeweils eine Pumpe 14 Tage in Betrieb ist, dann wechselt das System auf die andere Pumpe.

Im Jahreswechsel 2005/06 kam es zu einer Störung dieser Regelung – eine Pumpe lief durchgehend, die andere schaltete sich im 14 Tage-Rhythmus dazu, sodass es zu dem in Bild 54 erkennbaren Verlauf der Leistungsaufnahme kommt. Ab März lief durchgehend nur noch eine der Pumpen, die auch im Sommer nicht abschaltete. Korrigiert wurde dieser Fehler im Juni 2007 (siehe Bild 55). Aber auch nach der Fehlerbehebung schaltet die Heizungspumpe nicht zuverlässig bei hohen Außentemperaturen ab.

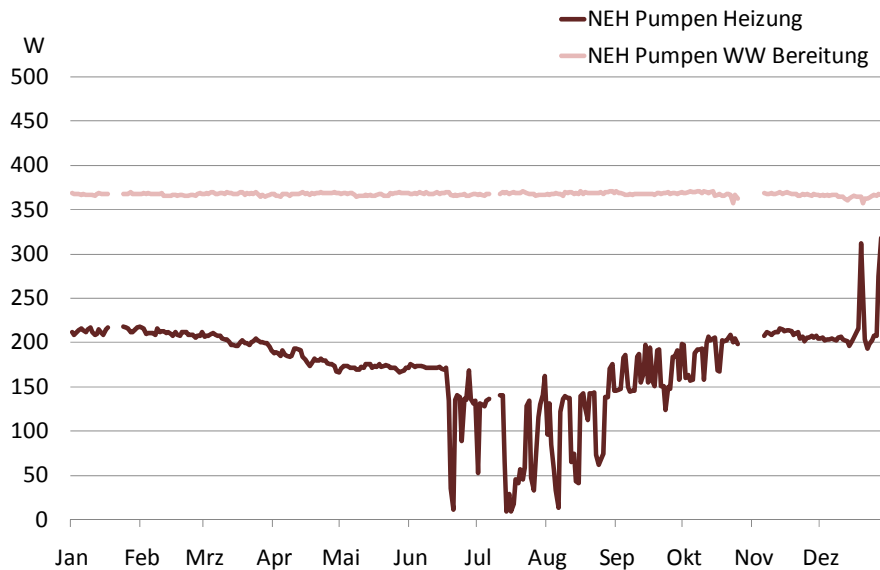


Bild 55 Summe der Pumpenleistungen im Jahr 2007. Die fehlerhafte Ansteuerung der Pumpen im Heizungskreis wurde im Juni behoben, die Pumpen schalten dennoch bei hohen Außentemperaturen nicht ab. Ein Eingriff in die DDC-Regelung der Anlage im NEH erwies sich auch an anderer Stelle als schwierig und fehleranfällig.

Das Beispiel der Pumpen im Heizkreis zeigt die Schwierigkeiten, die sich aus den in Abschnitt ,2.2.1 Bauabschnitt Niedrigenergiehaus‘ beschriebenen unklaren Zuständigkeiten bei der Regelungstechnik im NEH ergeben. Hinzu kommt, dass der Fehler keine Beschwerden von Nutzern nach sich zog und ohne die detaillierte Analyse im Rahmen des Monitorings erst später – oder gar nicht – bemerkt worden wäre. Trotz der auch im Sommer laufenden Pumpen kommt es im NEH aber nicht zu einem ausgeprägten Sommer- Heizbetrieb.

4.4.2. Stromverbrauch TGA PH

Am Stromverbrauch der Pumpen für die beiden Heizkreise (stat. Heizung und Luftheizung) werden die in Abschnitt ,4.2.5 Optimierungsmaßnahmen Heizwärmeversorgung‘ getroffenen Maßnahmen noch einmal deutlich.

Zum einen wurde durch das einbinden der Umwälzpumpe des RLT Heizkreises in die Heizungsregelung erreicht, dass die Pumpe witterungsabhängig abschaltet. Zudem wurde die im NEH befindliche Versorgungspumpe der Wärmeversorgung soweit wie möglich im der Leistung reduziert.

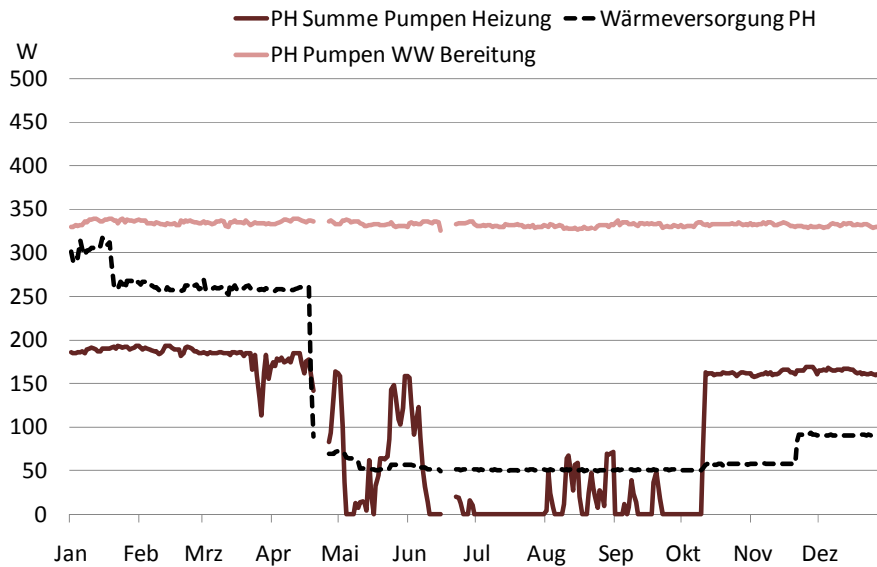


Bild 56 Summe der Pumpenleistungen im PH im Jahr 2006. Auch hier laufen die Pumpen der Trinkwassererwärmung mit gleichbleibender Leistung durch. Die Pumpen der Heizwärmeversorgung konnten wie im Abschnitt 4.2.5 Optimierungsmaßnahmen Heizwärmeversorgung beschrieben besser an die Witterung angepasst werden. Die Pumpe zur Wärmeversorgung des PH wurde in ihrer Leistung soweit reduziert, wie es die DDC Steuerung im NEH zulässt.

Im Oktober 2006 kam es zu einem Totalausfall und Austausch der Regelungseinheit der Heizung. Wie sich nach Ende der Heizperiode zeigte waren die geänderten Regelungsparameter nicht in das neue Gerät (gleicher Typ – Kieback & Peter HRP) übernommen worden. Sowohl für die Pumpe des statischen Heizkreises, als auch für die der Luftheizung waren zudem eher „konservative“ Regelungsparameter und Heizkurven hinterlegt.

Das zurücksetzen auf den ursprünglichen Zustand wurde auch hier durch unterschiedliche Zuständigkeiten der einzelnen Gewerke erschwert: die Heizungsanlage liegt in der Verantwortung des HSW während die Heizungsregelungs-Einheit im Besitz der Wuppertaler Stadtwerke ist. Für die Lüftungsanlagen gibt es einen Wartungsvertrag mit der Firma, die den Bau der Anlage damals ausgeführt hat. Diese hat auch die Änderungen an den Regelungseinheiten vorgenommen, d.h. das zusammenschalten der einzelnen Lüftungsanlagen und das aufschalten auf die Heizungsregelung.

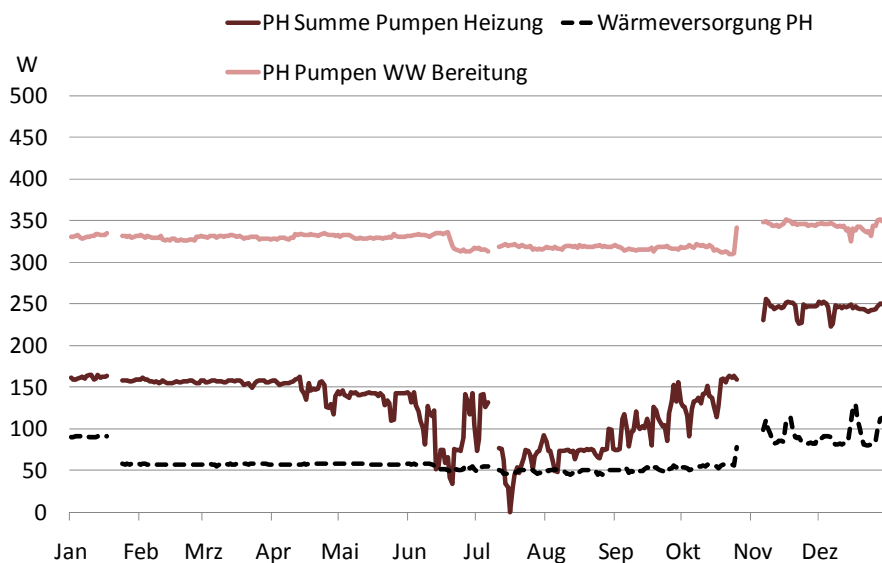


Bild 57 Verlauf des Pumpenstromverbrauchs im PH 2007. Nach Austausch der Heizungsregelung stellte sich nach Ende Heizperiode heraus, dass die vorher eingestellten Parameter nicht übernommen wurden. Die Heizungsregelung ist Eigentum der Stadtwerke, die Anpassung der Anlage im Vorjahr war aber durch die Lüftungsbaufirma, die einen Wartungsvertrag für die Lüftungsanlagen hat durchgeführt worden. Das Wiederherstellen des vorherigen Zustands gestaltete sich durch die unterschiedlichen Zuständigkeiten als schwierig.

Das PH reagiert aufgrund der im Abschnitt ,4.2.5.2 Bereitstellungsverluste im PH‘ beschriebenen Problematik sensibler auf unnötig laufende Umwälzpumpen. Durch das rücksetzen der Heizungsregelung kam es auch im Jahr 2007 zu Wärmeverlusten im Heizkreis.

Die Lüftungsanlagen auf den Gebäudeflügeln laufen 24h/Tag im Zu- und Abluftbetrieb, die Leistungsaufnahme der einzelnen Anlagen korreliert mit der Größe, bzw. der Anzahl der Ebenen der einzelnen Flügel. Im Mittel haben die Lüftungsanlagen eine spezifische Leistungsaufnahme von $0,44 \text{ W}/(\text{m}^3/\text{h})$.

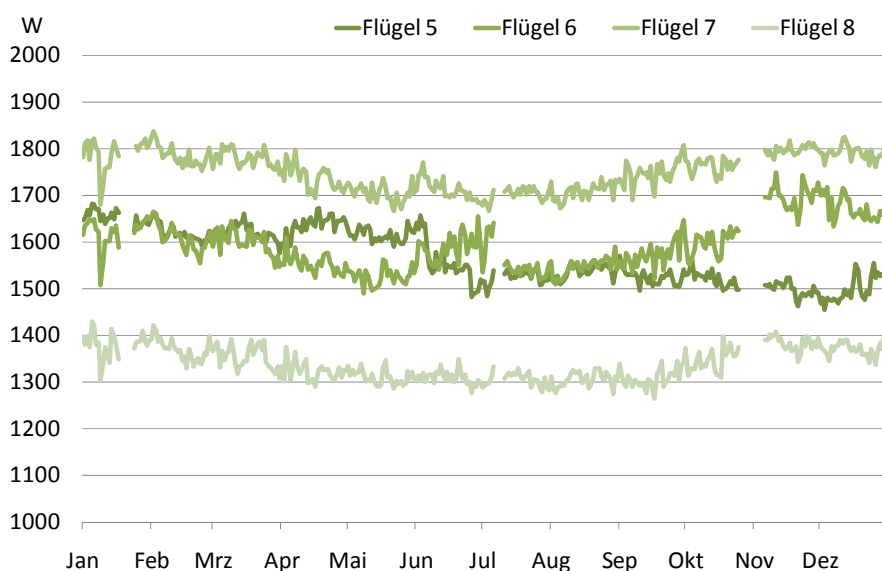


Bild 58 Leistungsaufnahme der Lüftungsanlagen im Jahr 2007. Außer dem Ausfall einer Anlage im Frühjahr 2006 durch einen Keilriemenschaden liefen die Anlagen störungsfrei dauerhaft im Ende 2004 umgestellten leistungsreduzierten Betrieb. Die Leistung der Anlagen entspricht der Größe der Gebäudeflügel (Anzahl Ebenen, d.h. Anzahl Apartments).

Außer einem Ausfall der Anlage auf Flügel 8 im Frühjahr 2006 liefen die Anlagen störungsfrei. Details zum Betrieb der Lüftungsanlage sind im Abschnitt ,5.2.2.1 Betrieb der Lüftungsanlage‘ beschrieben.



5. Nutzung und Nutzerakzeptanz

Nach Beschreibung und Analyse der Haustechnik wird in den folgenden Abschnitten die Nutzung der Bürse aus Nutzersicht untersucht. Es werden die Bereiche überprüft, die direkten Einfluss auf das Empfinden des Nutzers haben, bzw. auf die der Nutzer selbst einen direkten Einfluss nimmt.

In den Apartments wurden verschiedene Größen messtechnisch aufgenommen und analysiert. Zusätzlich wurden im Rahmen von Befragungen im Sommer und im Winter die Nutzer selbst auch direkt nach ihrem Empfinden und der Bewertung unterschiedlicher Parameter rund um das Wohnen in der Bürse befragt.

5.1. Raumlufttemperaturen und Thermische Behaglichkeit

Wie im Abschnitt ‚3.1 Messdatenerfassung‘ beschrieben, konnte in den bereits genutzten Zimmern keine festinstallierte Messtechnik eingebaut werden. Um dennoch Aussagen über die Temperaturen in den Apartments zu erhalten, wurden im Gebäude Mini-Logger verteilt, die Temperatur und Luftfeuchte messen und in 30min Zyklen abspeichern. Dabei wurde sowohl der thermische Komfort im Winter, als auch im Sommer überprüft.

Im PH kann zusätzlich zum Vergleich auf die dauerhaft gemessenen Ablufttemperaturen in den Lüftungsanlagen zurückgegriffen werden. Diese Werte sind jedoch Mischungstemperaturen aus Zimmern, Bädern und Fluren eines ganzen Gebäudeflügels (und damit gegensätzlich ausgerichteter Fassaden) und lassen daher kaum Rückschlüsse auf die Temperaturen in einzelnen Zimmern zu.

5.1.1. Raumlufttemperatur und Komfort im Winter

Zur Überprüfung des winterlichen Komforts wurden in beiden Bauabschnitten jeweils 20 Apartments mit Datenloggern ausgestattet, die Lufttemperatur- und Feuchte messen. Im PH wurde jeweils ein zweiter Logger im Bad installiert um den Einfluss der Temperaturen im Bad (wo Heizkörper installiert sind) auf die Zimmer zu untersuchen. Die Messung fand (wenn nicht anders angegeben) im Winter 2004/05 statt.

5.1.1.1. Messungen im NEH

Im Niedrigenergiehaus erfolgt die Beheizung der Zimmer konventionell über neben dem Fenster installierte Plattenheizkörper. Die Heizung



verfügt über eine außentemperaturgeführte Vorlauftemperaturregelung, die Heizkörper im Zimmer haben Thermostatventile.

Raumlufttemperatur

Die Messung der Raumlufttemperaturen in den Zimmern zeigen keine Auffälligkeiten. Die Temperaturen lagen im Messzeitraum im Mittel bei 22,7°C (arithmetisches Mittel: 22,7°C, Median: 22,5°C). Die in Bild 59 in den Temperaturverläufen auftretenden kurzzeitigen Ausreißer nach unten sind auf Fensterlüftung zurückzuführen.

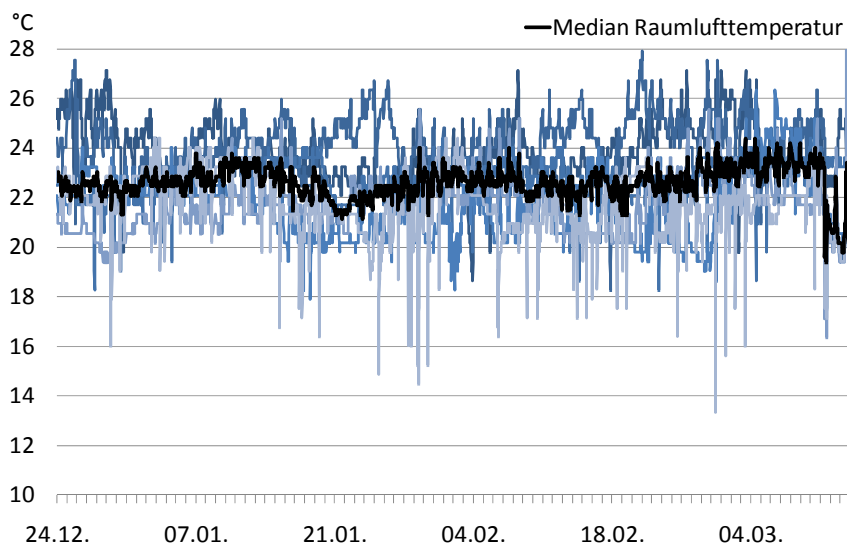


Bild 59 Verlauf der Raumlufttemperatur in allen gemessenen Zimmern des NEH. Zusätzlich eingefügt ist der sich aus den Einzelmessungen ergebende Mittelwert. Aus den gemessenen Daten ergibt sich für die Heizperiode 2004/05 ein Mittelwert von 22,7°C.

Wie bereits im Abschnitt ,4.2.4 Untersuchung passiv-solarer Gewinne ‘ sollen die gemessenen Temperaturen in den Zimmern ebenfalls hinsichtlich einer Korrelation zur solaren Einstrahlung untersucht werden. Dazu wurden, wie in Bild 60 dargestellt, Tagesmittelwerte der Temperaturmessungen aus Zimmern mit Südwest- bzw. Südostausrichtung, sowie Zimmer mit Nordost- bzw. Nordwestausrichtung gebildet und diese über der tagesmittleren Einstrahlung aufgetragen.

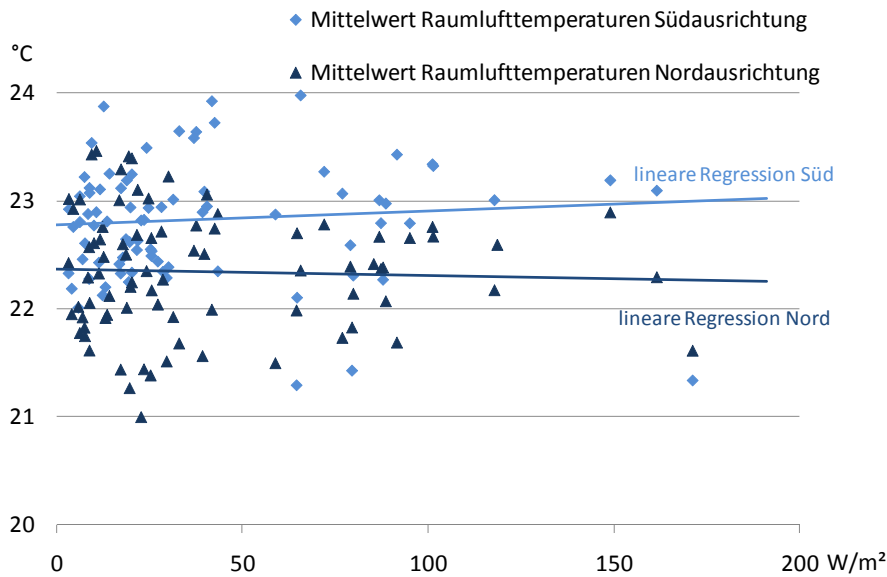


Bild 60 Korrelation von Einstrahlung und Temperaturen in den Zimmern. Erstaunlicherweise liegt das Temperaturniveau der primär südausgerichteten Zimmer nur wenig über dem der Zimmer im Norden. Die höchsten Temperaturen liegen nicht bei der höchsten Einstrahlung, die Temperatur nimmt in der Tendenz (lineare Regression) mit steigender Einstrahlung auch nur wenig zu.

In der grafischen Auswertung zeigt sich, dass sich bei Zimmern mit Südausrichtung im Schnitt bei höheren Einstrahlungen nur mit sehr schwacher Tendenz auch höhere Temperaturen einstellen und sich die Temperaturniveaus in der Ausrichtung insgesamt kaum signifikant unterscheiden. So wurden auch (in der Heizperiode) die höchsten Temperaturen nicht an den Tagen mit der höchsten Einstrahlung gemessen. Dies erstaunt insofern, da die großen Fensterflächen im Sommer zu problematischen Temperaturverhältnissen führen (siehe nachfolgender Abschnitt '5.1.2 Raumlufttemperatur und Komfort im Sommer'). Da einstrahlungsreiche Tage in der Heizperiode oft mit niedrigen Außentemperaturen zusammenfallen, wird angenommen, dass erhöhte Temperaturen durch solare Gewinne im Winter effektiv durch Fensterlüftung ausgeglichen werden.

Luftfeuchte

Neben der Lufttemperatur wurde auch die relative Luftfeuchte gemessen. Im vorangegangenen Kapitel zeigt sich, dass im NEH die Luftwechsel zu gering sind. Hier stellt also sich die Frage, ob die in den Zimmern anfallenden Feuchteinträge zuverlässig nach außen abgeführt werden können. In Bild 61 wird jedoch deutlich, dass sich durch die im Winter tendenziell trockene Außenluft und die recht hohen Temperaturen in den Zimmern, keine bedenklichen Feuchtigkeitswerte einstellen. Allerdings reichen durch den geringen Wassergehalt der Außenluft im Winter auch geringe Luftmengen für eine zuverlässige Feuchteabfuhr.

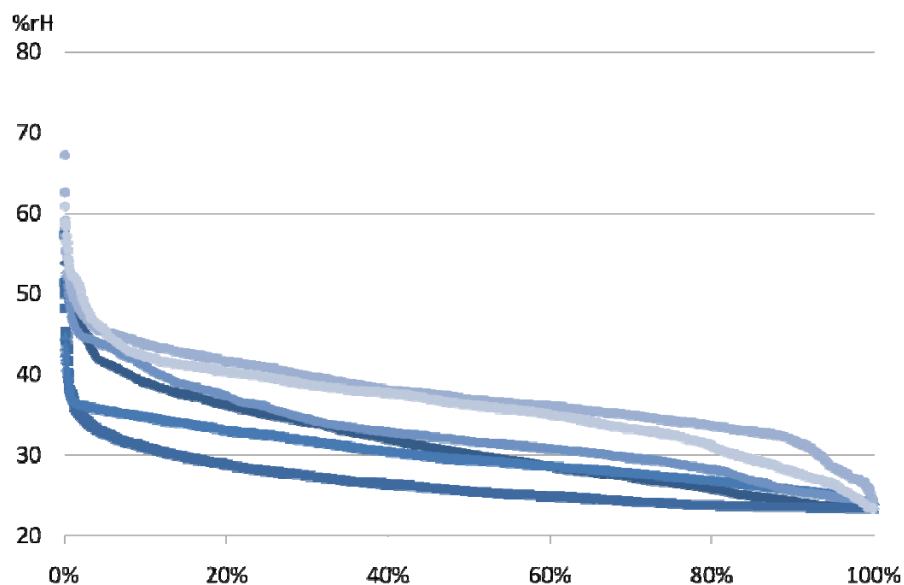


Bild 61 Häufigkeitsverteilung der relativen Luftfeuchte in der Heizperiode 2004/05 in den vermessenen Apartments des NEH.

Die geringeren Luftwechsel zeigen sich auch an den für die Heizperiode eher hohen Luftfeuchten. Die Messung fand ausschließlich im Zimmer statt, inwiefern Feuchteinträge im Bad zuverlässig abgeführt werden konnten, wurde nicht gemessen.

Thermische Behaglichkeit

Die thermische Behaglichkeit nach DIN EN ISO 7730 wurde auch direkt mit Hilfe eines entsprechenden Messaufbaus bestimmt (siehe ‚3.1.3 Dezentrale Datenerfassung‘). Gemessen die primär dominierenden physikalischen Randbedingungen des PMV Modells: Lufttemperatur, operative Temperatur, Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit. Als Tätigkeitsgrad wurde „sitzende Tätigkeit“ mit einer Metabolic rate von 1,2 met angenommen, der Bekleidungsgrad wurde mit 1,0 clo (lange Hose, lange Ärmel) angesetzt [EN7730].

Die Untersuchungen der thermischen Behaglichkeit konzentrierten sich auf das PH, da aufgrund der individuellen Wärmezufuhr über Heizkörper in den Zimmern im NEH keine Probleme vermutet wurden und auch keine Beschwerden vorlagen.

Im NEH wurden daher nur Stichprobenmessungen gemacht, in Bild 62 ist eine Messung für ein Zimmer im 1. Obergeschoss mit Nordost- Ausrichtung dargestellt.

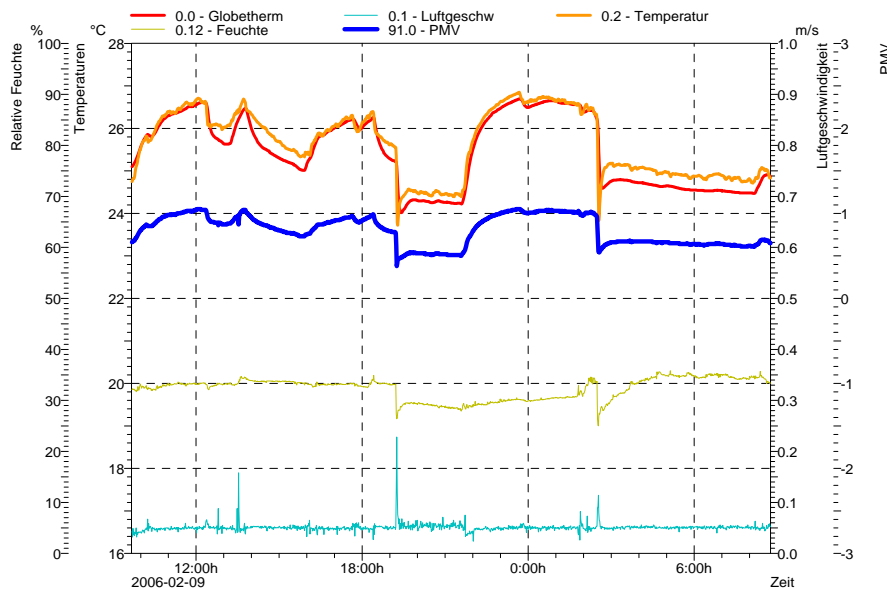


Bild 62 Verlauf der Messwerte sowie des daraus ermittelten PMV Wertes unter den gegebenen Annahmen (1,2 met, 1,0 clo). Die jeweiligen Messwerte sind an insgesamt vier Größenachsen aufgetragen – von links nach rechts: rel. Luftfeuchte, Temperatur, Luftgeschwindigkeit, PMV. Der PMV Wert liegt durchgehend im positiven Bereich – also in der Bewertung thermisch neutral bis warm. Bei den Temperaturmessungen ist die erkennbare Abweichung von operativer und Raumlufttemperatur interessant: sie zeigt, dass die Luft im Raum wärmer ist, als die Umschließungsflächen.

Der Messaufbau wurde nahe am Schreibtisch im Zimmer positioniert, der nahe am Fenster stand. Der resultierende PMV-Wert lag zwischen 0,3 und 1,0, also „thermisch neutral“ bis „warm“. Interessant ist die sichtbare Abweichung von Lufttemperatur und operativer Temperatur, die zeigt, dass die Umschließungsflächen kühler sind, als die Lufttemperatur. Primären Einfluss auf diesen Unterschied haben die großen Fensterflächen, die einen großen Anteil des Sichtwinkels am Messstandort haben. Insgesamt zeigten sich die Apartments im NEH jedoch unauffällig was den winterlichen Komfort betrifft.

5.1.1.2. Messungen im PH

Das Konzept der Heizwärmezufuhr unterscheidet sich deutlich von dem des NEH. Die Apartments eines Flügels werden zentral über ein Heizregister in der Zuluft beheizt, aus Komfortgründen und zur individuellen Nachheizung ist im Bad ein Heizkörper installiert. Lediglich in den Zimmern der Giebelapartments befindet sich auch im Zimmer ein Heizkörper.

Raumlufttemperaturen

In der Wintermessung der Raumlufttemperaturen sollte untersucht werden, ob durch die zentrale Beheizung der Zuluft in allen Zimmern ausreichende Temperaturen erreicht werden, oder ob es zu lokalen Unterschreitungen behaglicher Temperaturen kommt, bzw. Zimmer überwärmt werden.



Auch die Nutzung der Heizkörper in den Bädern wurde überprüft. Von Interesse war in erster Linie, inwiefern Heizwärmeeinträge im Bad Einfluss auf die Raumtemperatur im Zimmer haben. Dazu wurde sowohl im Zimmer als auch im Bad ein Messgerät platziert.

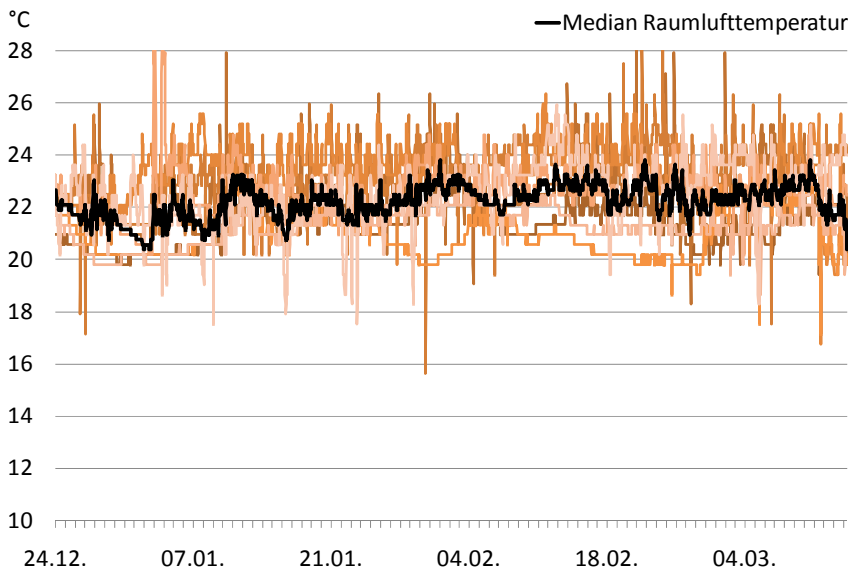


Bild 63 Verlauf der Raumlufthtemperatur in allen gemessenen Zimmern des PH. Zusätzlich eingefügt ist der sich aus den Einzelmessungen ergebende Mittelwert. Aus den gemessenen Daten ergibt sich für die Heizperiode 2004/05 ein Mittelwert von 22,2°C.

Bei der Betrachtung der gemessenen Lufttemperaturen in den Zimmern gibt es zunächst keine Auffälligkeiten. Die Temperaturen liegen im Mittel bei 22,2°C (arithmetisches Mittel: 22,2°C, Median: 22,1°C) und damit leicht unter dem Niveau des NEH.

Bei der Analyse der in den Bädern gemessenen Temperaturen stellt sich jedoch heraus, dass hier teilweise über längere Zeiträume enorm hohe Temperaturen herrschen (siehe Bild 64). Trotz Temperaturen über 35°C im Bad erwärmt sich das Zimmer nur wenig. Wie im Abschnitt 2.2.2 Bauabschnitt 'Passivhaus' dargestellt, verfügt das Bad über einen Radiator, ist aber Abluftzone. Bei geschlossener Badezimmertür gelangt also keine Wärme ins Zimmer (bzw. nur in geringem Maß über Transmission durch die Trennwände).

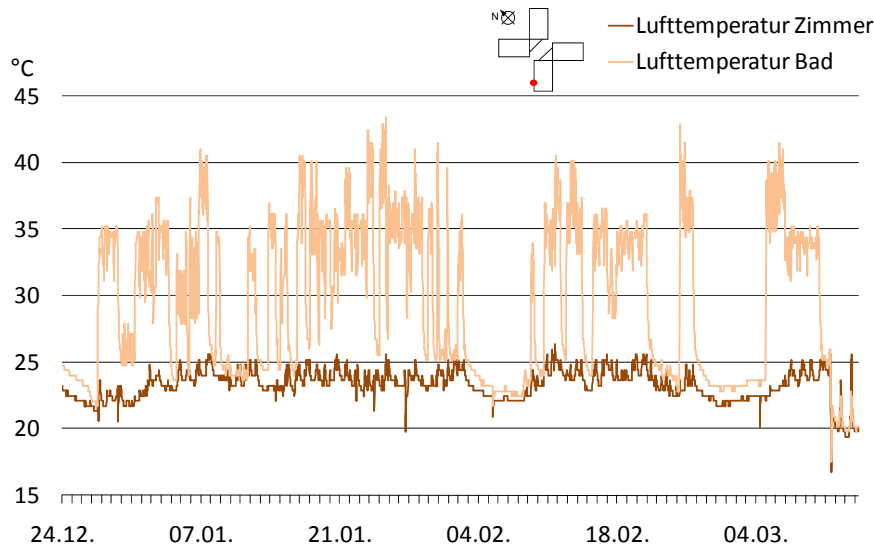


Bild 64 Verlauf der Raumlufttemperatur in Zimmer und Bad eines Apartments. Neben der Legende ist die Lage des Zimmers im Gebäudekomplex markiert. Hohe Temperaturen im Bad wirken sich nur begrenzt auf das Zimmer aus. Dass überhaupt so hohe Temperaturen entstehen konnten, lag am Defekt des Mischventils der statischen Heizung, wodurch die Vorlauftemperatur ungeregelt durchgehend bei etwa 60°C lag.

Durch die geringe Wirksamkeit der Wärmerückgewinnung, bzw. die zentrale Lüftungsanlage für den gesamten Flügel wirken sich die hohen Temperaturen im Bad nur kaum auf die dazugehörigen Zimmer aus. Die hohen Temperaturen im Bad während der Messung im Winter 2004/05 lassen sich auch auf einen Fehler in der Regelung zurückführen: Das Mischventil, das Außentemperaturgesteuert die Vorlauftemperatur im statischen Heizkreis regelt, war falsch angeschlossen. So wurden die Heizkörper immer mit der höchsten Temperatur aus der Fernwärmelieferung durchströmt (siehe Bild 65). Dieser Fehler wurde im März 2005 behoben, sodass jetzt die Heizleistung im Bad nun witterungsabhängig zur Verfügung steht.

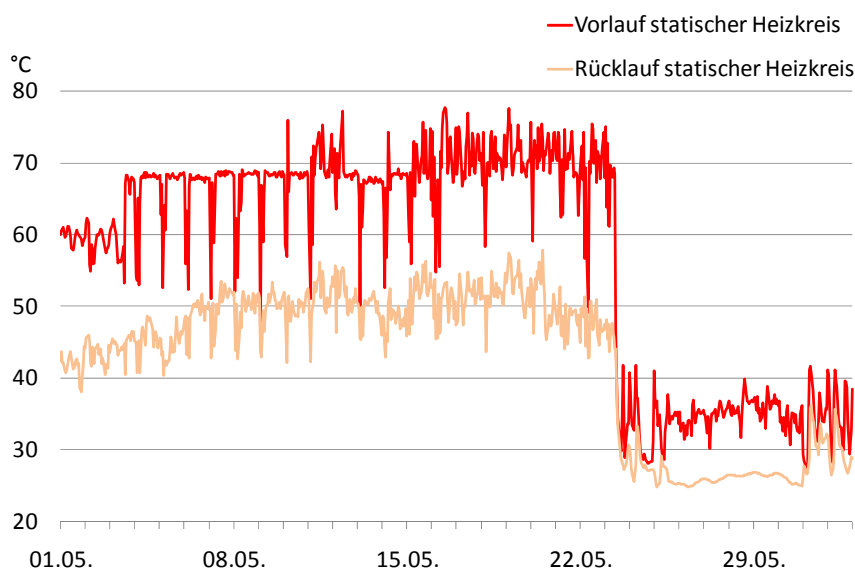


Bild 65 Vor- und Rücklauftemperaturen des statischen Heizkreises der Badezimmerheizkörper vor und nach Korrektur des defekten Mischventils. Seit der Korrektur wird die Vorlauftemperatur außentemperaturgeführt geregelt.



Die Logger wurden so im Gebäude verteilt, dass pro Flügel mindestens zwei Zimmer mit gleicher Ausrichtung vermessen wurden. Doch weder im NEH noch im PH konnten Korrelationen des Temperaturverlaufs mit der Lage der Zimmer innerhalb des Wohnheims festgestellt werden. Bild 66 zeigt den gemessenen Temperaturverlauf in Zimmer und Bad eines Apartments im PH, das die gleiche Ausrichtung wie das Zimmer in Bild 64 hat, lediglich in einem anderen Stockwerk liegt. Hier stellen sich auch ohne Nutzung des Badheizkörpers ausreichende Temperaturen ein, lediglich um die Weihnachtsfeiertage (keine Nutzung) kühlt das Zimmer auf 20°C aus.

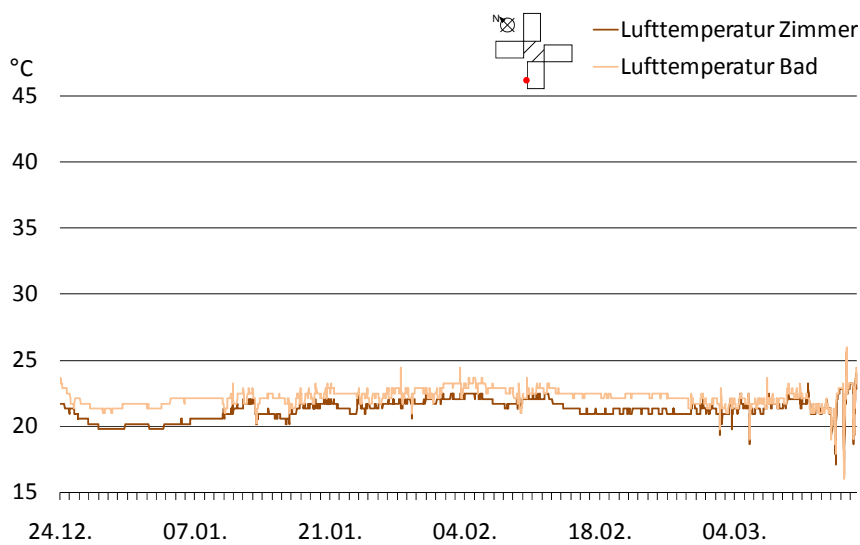


Bild 66 Verlauf der Raumlufttemperatur in Zimmer und Bad eines Apartments mit gleicher Lage innerhalb des Gebäudes. Hier wird gar nicht über den Badheizkörper geheizt.

Der Zusammenhang zwischen solarer Einstrahlung und den Temperaturen in den Zimmern zeigt sich im PH deutlicher als im NEH. Während die Nord-Zimmer kaum auf höhere solare Einstrahlung reagieren, zeigt sich im Süden erwartungsgemäß die Tendenz steigender Messwerte.

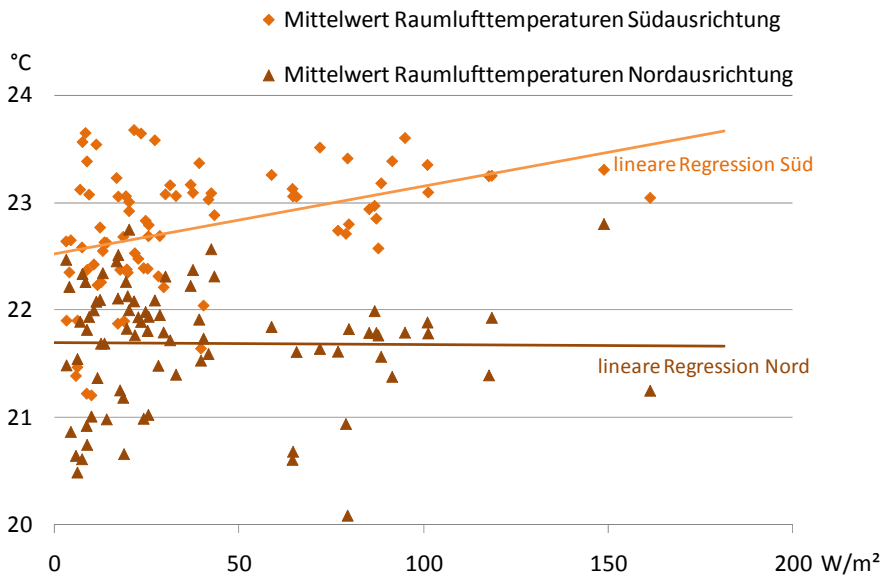


Bild 67 Korrelation von solarer Einstrahlung und Raumlufttemperatur im PH während der Heizperiode 2004/05. Hier unterscheiden sich die Temperaturprofile deutlicher als im NEH, wenngleich auch höhere Einstrahlung nicht absolute höhere Temperaturen nach sich ziehen, sondern die Streuung innerhalb der gemessenen Werte geringer wird.

Bei der grafischen Auswertung des Zusammenhangs zwischen Raumlufttemperatur und Einstrahlung fällt auf, dass auch im PH absolut gesehen in der Heizperiode die höchsten Raumlufttemperaturen nicht mit den höchsten Einstrahlungswerten zusammenfallen. Dies ist insofern verständlich, da einstrahlungsreiche Tage in der Regel mit tiefen Außentemperaturen zusammenfallen und sich der Effekt von größeren solaren Gewinnen mit höheren Wärmeverlusten überlagert. Allerdings nimmt die Tendenz aufgrund einer Verdichtung der Messwerte auf höherem Niveau zu. Zudem wird deutlich, dass die südausgerichteten Zimmer auch von geringer Einstrahlung profitieren – hier liegt das Temperaturniveau im Vergleich insgesamt deutlich höher. Der Grund, warum sich Zimmer in der Heizperiode nicht stärker erwärmen, wird wie im NEH im Lüftungsverhalten vermutet.

Luftfeuchte

Nach der Nachregulierung der Lüftungsanlage (siehe Abschnitt ,5.2.2.1 Betrieb der Lüftungsanlage') ergibt sich bei einem Zu- und Abluftvolumenstrom von $30 \text{ m}^3/\text{h}$ im Apartment ein Luftwechsel von ca. $0,7 \text{ h}^{-1}$. Damit besteht eine erhöhte Gefahr von zu trockener Luft im Winter. Wie in Bild 68 zu sehen, bestätigen die Messungen dies. 75% der Zeit liegt die relative Luftfeuchte unter 30%. Die verwendeten Messgeräte messen die Luftfeuchte nur bis minimal 25%, ein großer Teil der Messwerte (etwa 30%) unterschreitet diese Grenze.

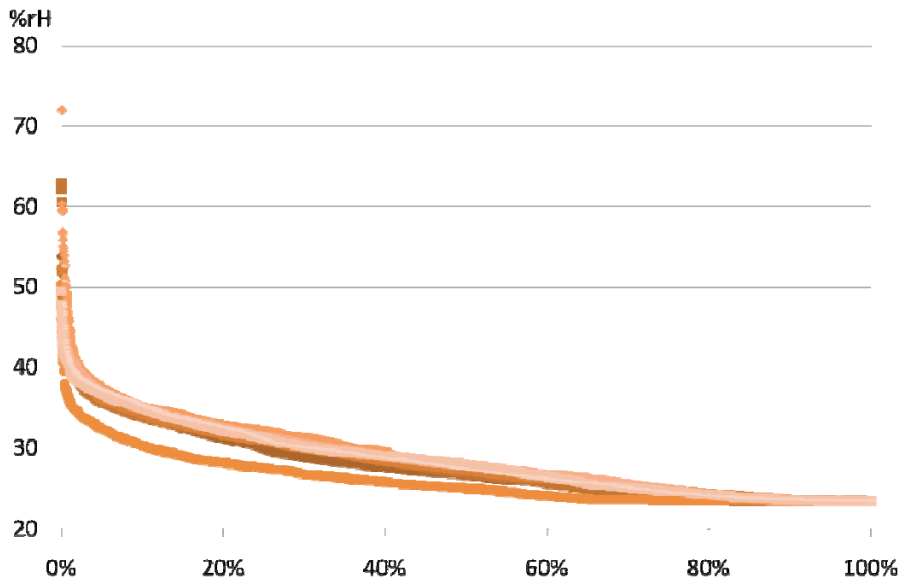


Bild 68 Häufigkeitsverteilung der relativen Luftfeuchte in der Heizperiode 2004/05 in den Apartments des PH. Über 50% der Zeit liegt die Luftfeuchte unter 30%. Dies wird von vielen Bewohnern als unangenehm trocken empfunden und trägt zu verstärkter Staubbildung bei (siehe auch Abschnitt ,5.3.2 Nutzerbefragung ‘).

Die trockene Luft wird von vielen Bewohnern auch als störend empfunden. Durch die trockene Luft kommt es auch vermehrt zu Staubbildung, was durch glatte Oberflächen wie den Parkettfußboden noch stärker wahrgenommen wird. Einige Nutzer waren daher der Auffassung, der Staub käme aus der Lüftungsanlage und klebten daher die Zuluftöffnungen ab (siehe auch Abschnitt 5.3.2 Nutzerbefragung).

Thermische Behaglichkeit

Auch im PH wurde der thermische Komfort nach DIN EN 7730 messtechnisch bestimmt. Durch die Messung sollte vor allem detailliert überprüft werden, inwieweit das vorhandene Heizungssystem über die zentrale Wärmezufuhr über die Lüftung ein behagliches Raumklima sicherstellen kann. Dabei wurden primär Räume untersucht, die „ungünstige“ Randbedingungen aufwiesen, wie Räume in den unteren Ebenen (größtmögliche Entfernung vom Luftheizregister) oder Zimmer, die nicht vollständig von anderen Apartments umschlossen sind. Die Messungen fanden im Dezember 2007 statt, während der Messung lag die Außentemperatur im Mittel bei 3°C bei geringer solarer Einstrahlung.

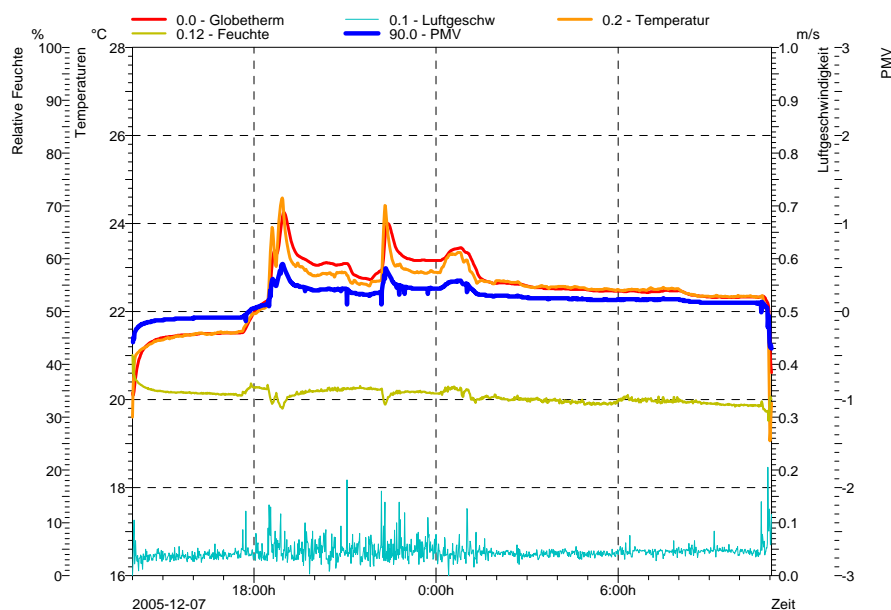


Bild 69 Verlauf der Messwerte sowie des daraus ermittelten PMV Wertes unter den gegebenen Annahmen (1,2 met, 1,0 clo) im PH, Eingangsebene, Nordwest- Ausrichtung, Zimmer grenzt an Treppenhaus. Lufttemperatur und operative Temperatur sind fast identisch. Bei Temperaturen um 22,5°C ergibt sich ein PMV von 0, also „thermisch neutral“. Der Nutzereindruck des Zimmers im Messzeitraum war „neutral“ bis „kühl“.

In Bild 69 sind die Messwerte eines Apartments dargestellt, das an ein Treppenhaus angrenzt, also zwei Außenwände hat. Im Gegensatz zu den Apartments an den Giebeln, wurden hier keine Heizkörper im Zimmer installiert. Der sich aus den Messwerten und entsprechenden Angaben ergebende PMV bewertet das Zimmer mit „thermisch neutral“, wohingegen die Nutzerin das Zimmer als „eher kühl“ empfand. Die beiden Temperaturspitzen um 19:00 und um 23:00 Uhr wurden durch den Einsatz eines elektrischen Heizlüfters hervorgerufen. Interessant ist, dass im PH i.d.R. fast kein Unterschied zwischen operativer- und Lufttemperatur festgestellt werden konnte. Hier zeigt sich der hohe Wärmeschutz – sowohl der Wände, als auch der Fenster ($U_w=0,78$).

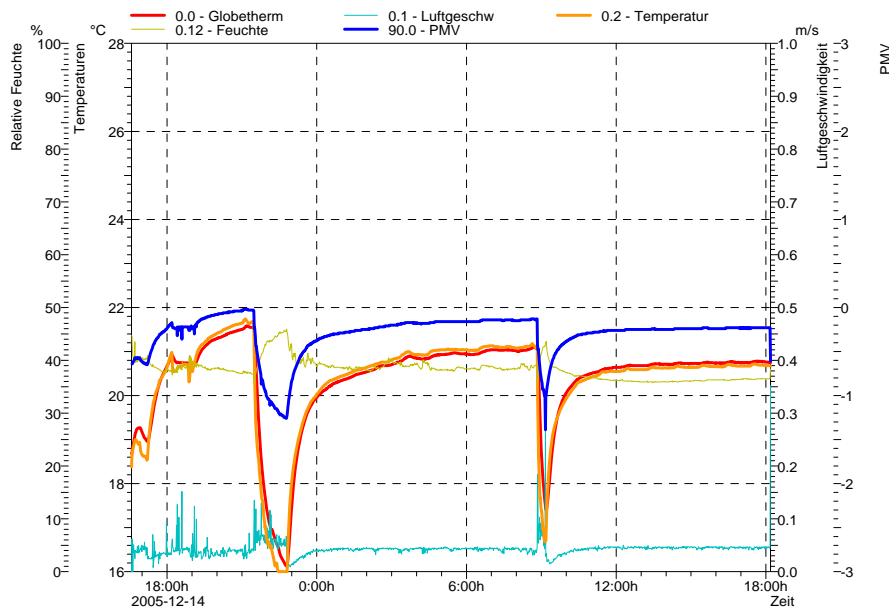


Bild 70 Messwerte eines Zimmers auf der untersten Ebene, südwest- ausgerichtet, mittig im Flur.

Bei der Temperaturmessung gibt es deutliche Einbrüche, die auf ausgiebiges Fensterlüften zurückzuführen sind. Die Temperatur stabilisiert sich bei ca. 21°C, der PMV ist leicht negativ, aber im Bereich „thermisch neutral“. Das Raumklima wurde vom Nutzer als „angenehm“ angegeben.

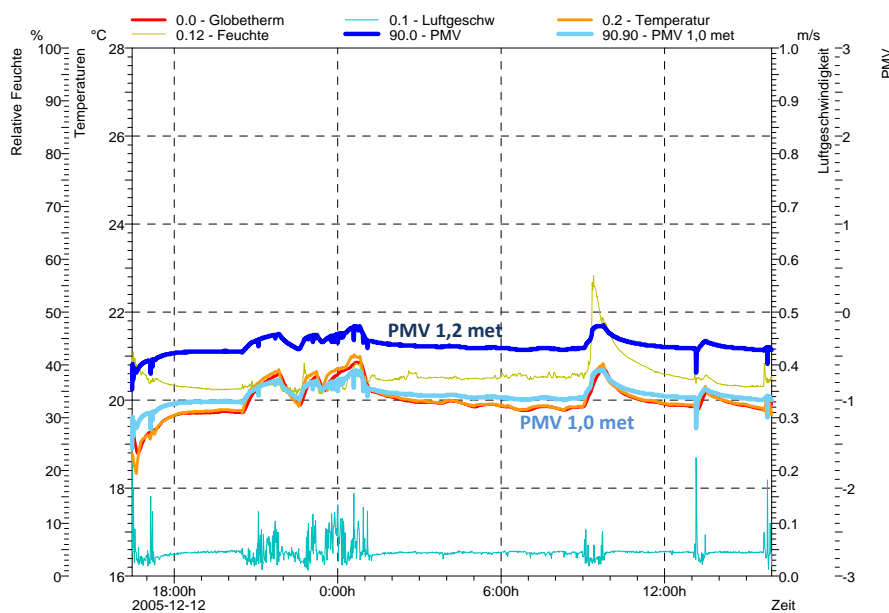


Bild 71 Messwerte eines Zimmers auf der untersten Ebene, südwest- ausgerichtet, einseitig ans Erdreich angrenzend.

Die gemessenen Temperaturen liegen bei 20°C, der PMV hat mit -0,5 die Tendenz zu „kühl“. Der Nutzer des Apartments fand die Bedingungen während der Messung als „neutral“, gab aber an, im Winter zeitweise Probleme mit der Temperatur im Zimmer zu haben. Zusätzlich ist der PMV-Verlauf für die Tätigkeit „entspanntes sitzen“ (1,0 met) eingetragen (hellblaue Linie). Der daraus resultierende PMV ist -1, also „kühl“. Die gemessenen Temperaturerhöhungen kamen durch die Badheizkörper, bzw. Öffnung der Tür zum Bad.

In den unteren Ebenen (siehe Bild 71 und Bild 70) ergaben die Messungen PMV Werte, die tendenziell negativ waren, also in Richtung „kühl“ zeigten, eine prinzipielle Unterschreitung von Behaglichkeitsgrenzen, die eine Funktionalität der Wärmeversorgung in Frage stellt, wurde jedoch nicht festgestellt. Allerdings ist zu beachten, dass die dargestellten PMV Werte sich auf vorgegebene „clothing“- sowie „metabolic-rates“ beziehen. Angenommen wurde eine „sitzende Schreibtischaktivität“ (1,2 met). „Entspanntes sitzen“ (abends vor dem Fernseher) mit 1,0 met führt zu deutlich niedrigeren PMV- Werten. In Bild



71 ist dazu zusätzlich der PMV-Verlauf für eine Metabolic Rate von 1,0 met eingezeichnet. Daraus resultiert ein PMV, der die meiste Zeit -1, also „kühl“ ergibt.

Zusammen mit der Messung konnten die Nutzer anschließend auf einer an den PMV angelehnten Skala angeben, ob sie das Raumklima während der Messung „angenehm“, „warm“ oder „kühl“ fanden.

Es zeigte sich, dass die meisten Ergebnisse mit dem gemessenen PMV Wert übereinstimmten, mit der Tendenz, dass PMV Werte von 0,5 bis 1,0 am ehesten als „angenehm“ empfunden wurden.

5.1.2. Raumlufttemperatur und Komfort im Sommer

Neben der Einhaltung der Komfortbedingungen im Winter – und dem damit verbundenen Verbrauch an thermischer und elektrischer Energie – wurde auch das sommerliche Verhalten der Gebäude untersucht. Sommerlicher Diskomfort durch Überhitzung der Apartments ziehen zwar für den Betreiber keine Konsequenzen in Form von Energieverbrauch oder Kosten nach sich, wirken sich aber auf die Zufriedenheit der Nutzer und damit auf die Attraktivität des Wohnheims aus.

Durch die raumhohen Fenster liegt der Fensterflächenanteil der Hauptfassaden bei 0,54. Für das Gebäude wurde ein Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes gemäß DIN 4108-2 gerechnet, der mit innenliegendem Sonnenschutz (weiß, reflektierend) knapp eingehalten wurde. Baulich wurde jedoch kein Sonnenschutz vorgesehen, die Mieter können sich bei Bedarf bei der Wohnheimverwaltung eine Alu- Jalousie zur Innenmontage abholen. Viele installieren jedoch andere Innenbehänge, i.d.R. primär als Sichtschutz.



Bild 72 Ansicht der Hauptfassade eines Flügels des NEH. Durch die raumhohen Fenster beträgt der Fensteranteil an der Fassade 54%.

Dies ermöglicht eine gute Tageslichtnutzung, birgt aber das Problem von hohen solaren Einträgen im Sommer und damit einhergehender Überhitzung der Zimmer. Ein außenliegender Sonnenschutz ist nicht vorgesehen, von den Nutzern wird in der Regel innen nur ein Sichtschutz montiert, der als Sonnenschutz unwirksam ist.



Von den meteorologischen Randbedingungen während des Monitorings war 2006 das Jahr mit den höchsten sommerlichen Belastungen.

Tab. 10 Monatsmittelwerte der Außentemperatur während des Monitorings. 2006 war bis Ende Juli der mit Abstand wärmste Sommer, lediglich im August brach die Temperatur stark ein. Die Betrachtungen des sommerlichen Komforts beziehen sich daher größtenteils auf Messungen aus 2006.

	2005 [°C]	2006 [°C]	2007 [°C]
Mai	13.8	14.7	15.0
Juni	17.7	17.8	18.0
Juli	18.2	23.7	17.7
August	16.5	15.9	17.1
September	16.7	18.7	13.6

Die Messungen der Zimmertemperaturen erfolgte zusammen mit der Erfassung der Fensteröffnungen (siehe 5.2.1.2, bzw. 5.2.2.2), die Datenlogger speichern sowohl die Öffnungs- und Schließvorgänge, als auch die Temperaturen. Für die Bewertung des sommerlichen Komforts wurden Daten vom 1.05. bis 1.10.2006 genutzt. Trotz größerem Datenausfall bei der Erfassung der Fensteröffnungszeiten, konnte ein Großteil der Temperaturdaten aus der Messung für eine Auswertung verwendet werden.

Aufgrund der eingesetzten Sensorik stehen für die Auswertung die Messwerte der Innenraumtemperaturen nur als Tagesmittelwerte zur Verfügung. Durch die Mittelwertbildung über einen Zeitraum von 24 Stunden werden auftretende Maximalwerte nur begrenzt berücksichtigt. Zur Bewertung des sommerlichen Komforts wurde auf die DIN EN 15251:2007 zurückgegriffen [EN15251].

5.1.2.1. Messungen im NEH

Die tagesmittleren Messwerte der Innenraumtemperatur werden gemäß des adaptiven Komfortmodells der DIN EN 15251 einem gleitenden Mittelwert der Außentemperatur gegenübergestellt, in den neben der tatsächlich an dem Tag herrschenden Außentemperatur auch Werte der Vortage mit eingehen. Zur Bewertung der Temperaturen im Raum werden drei Komfortklassen definiert, die den Anteil der unter diesen Bedingungen zufriedenen Nutzern definieren.

Als Bewertungskriterium ist in der Norm dafür die operative Temperatur vorgesehen – wie bei den Messungen des thermischen Komforts im vorangegangenen Kapitel gesehen (Abschnitt 5.1.1.1, bzw. 5.1.1.2), liegen operative- und Lufttemperatur eng zusammen.

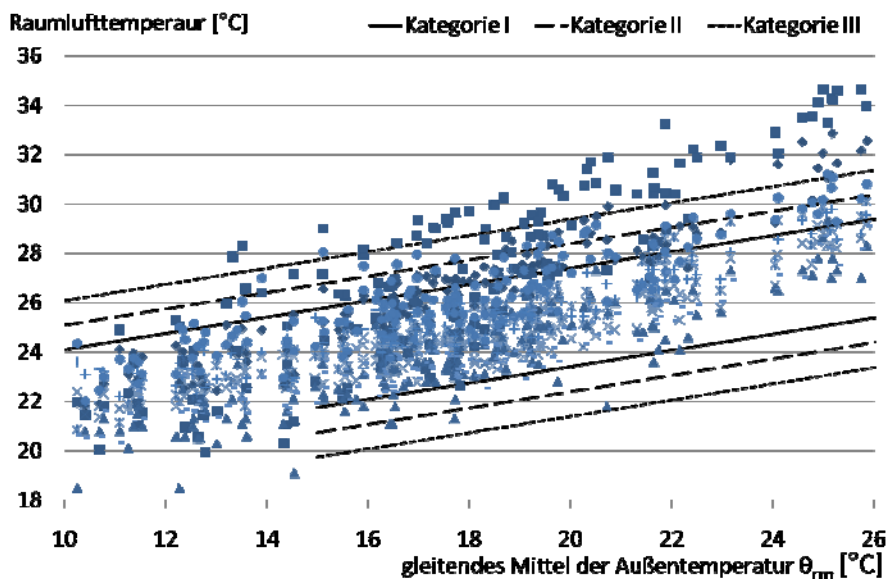


Bild 73 Auswertung gemessener Raumlufttemperaturen im NEH in Anlehnung an die nach EN 15251 definierten Komfortkriterien. In den Sommermonaten kommt es zu deutlichen Überschreitungen der Behaglichkeitsgrenzen. Am auffälligsten sind Zimmer mit Südost- Ausrichtung (Markierung: Quadrate und Rauten im Diagramm)

In der Auswertung zeigt sich, dass es im Sommer teilweise zu deutlicher Überschreitung der definierten Behaglichkeitsparameter kommt. Vor allem Zimmer mit Südost- Ausrichtung überschreiten häufig die in der Norm definierten Grenzen (ein Südost- ausgerichtetes Zimmer im dritten Obergeschoss überschreitet an 49% der gemessenen Tage die Kategorie I, 17% liegen über Kategorie II und 8% überschreiten auch die Kategorie III). Bei der Auswertung der Messdaten kann keine Aussage über die Anwesenheit der Bewohner gemacht werden. Bei Abwesenheit der Nutzer können geschlossene Fenster und ein nicht betätigter Sonnenschutz zu hohen Temperaturen führen, eine Bewertung nach EN 15251 ist aber nur bei Anwesenheit der Nutzer gültig.

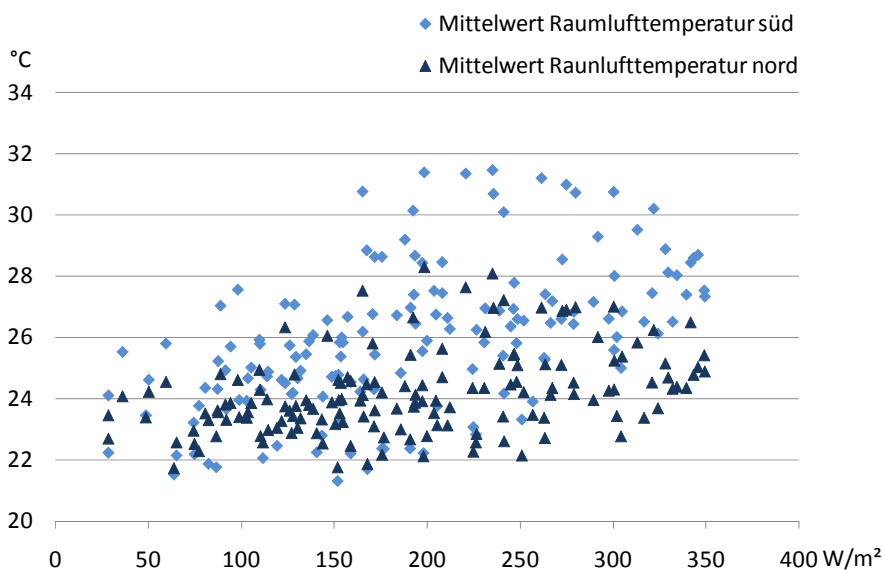


Bild 74 Korrelation von Globalstrahlung und Raumlufttemperaturen. Es wurden jeweils Zimmer mit NO, bzw. NW Ausrichtung zusammengefasst, ebenso SO und SW. Erwartungsgemäß steigt bei zunehmender Einstrahlung die Temperatur im Zimmer, auf den Südseiten stärker als im Norden.



Die Untersuchung auf eine Korrelation zwischen Einstrahlung und Temperatur im Zimmer, die ja im Winter kaum Unterschiede in der Ausrichtung der Zimmer zeigte, zeigt für den Sommer erwartungsgemäß einen deutlichen Zusammenhang zwischen Ausrichtung und Temperaturen in den Zimmern. In Bild 74 zeigt sich, dass sich ab einem Tagesmittel der Globalstrahlung von ca. 160W/m^2 in südausgerichteten Zimmern Temperaturen über 30°C einstellen.

5.1.2.2. Messungen im PH

Auch im PH wurden die im Zuge der Messung der Fensteröffnungszeiten erfassten Temperaturen zur Bewertung des sommerlichen Komforts genutzt. Im PH fehlen aufgrund von Ausfällen in der Sensorik Messwerte aus Südost- ausgerichteten Zimmern – also aus eben jenen Zimmern, die sich beim NEH als besonders problematisch darstellten. Die Bewertung des Komforts nach DIN EN 15251 zeigt dennoch häufige Überschreitungen der definierten Komfortklassen.

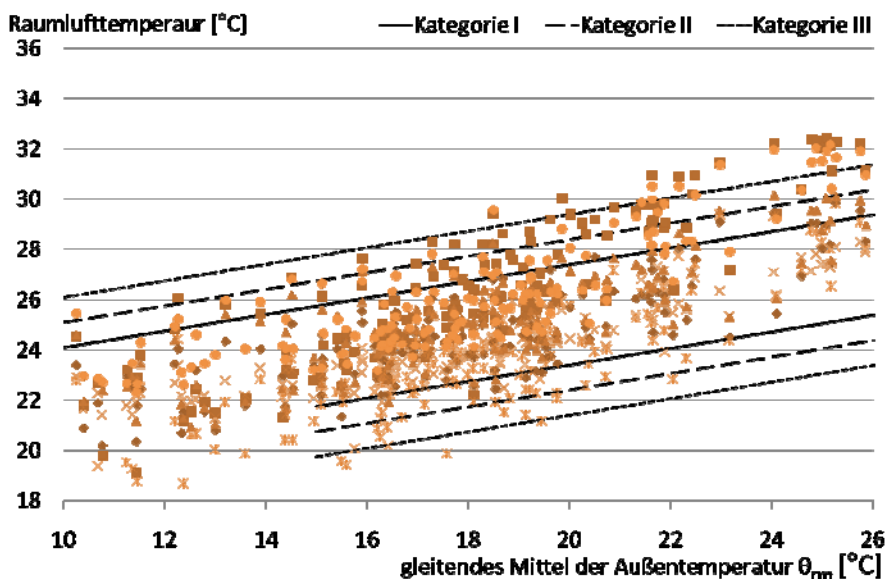


Bild 75 Auswertung gemessener Raumlufttemperaturen im PH. Auch hier entspricht die Markierung der Ausrichtung der Zimmer. Aufgrund von Ausfällen in der Sensorik stehen für die bei der Messung im NEH auffälligen Südost- ausgerichteten Zimmern keine Messdaten zur Verfügung.

In der grafischen Darstellung des Zusammenhangs zwischen Globalstrahlung und Zimmertemperatur (Bild 76) zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen nord- und südausgerichteten Zimmern. Aufgrund der geringeren zur Verfügung stehenden Messdaten (vor allem dem Fehlen von Daten aus Südostzimmern) kann daraus nicht abgeleitet werden, dass im PH die Ausrichtung für das sommerliche Raumklima weniger relevant wäre, bzw. sich die Zimmer im PH weniger häufig überhitzen.

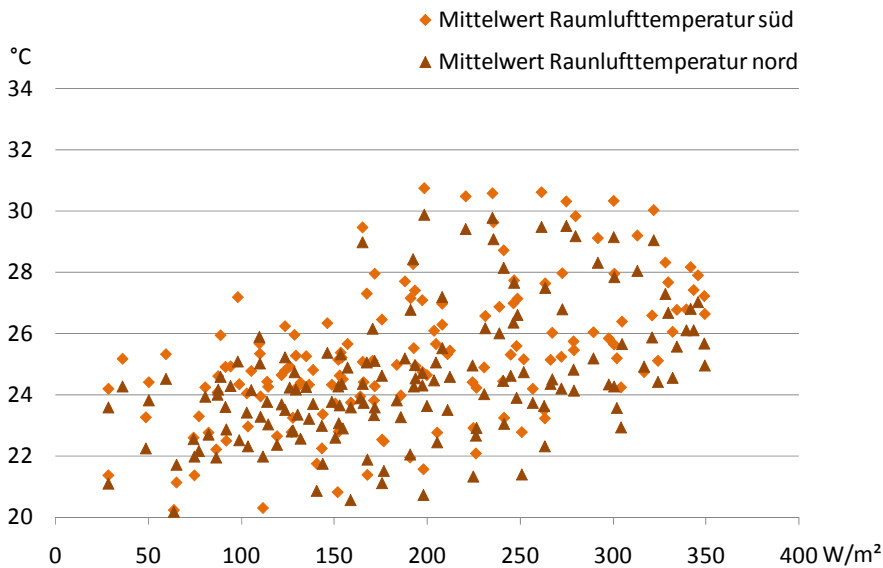


Bild 76 Korrelation von Einstrahlung und Raumtemperatur im PH. Hier stehen wie auch bei Bild 75 keine Messdaten für südostausgerichtete Zimmer zur Verfügung. Der Unterschied in der Ausrichtung der Zimmer scheint demnach geringer, dies kann aufgrund fehlender Daten jedoch nicht verifiziert werden.

Dauerhaft gemessen wurden die Temperaturen im Treppenhaus des PH. An jeweils drei Messpunkten (untere Ebene, Mitte, obere Ebene) wurde ein Temperatursensor installiert und die Temperatur kontinuierlich durch die zentrale Messdatenerfassung aufgezeichnet. In Bild 77 und Bild 78 sind die in den Treppenhäusern gemessenen Temperaturen in Abhängigkeit der Außentemperatur dargestellt.

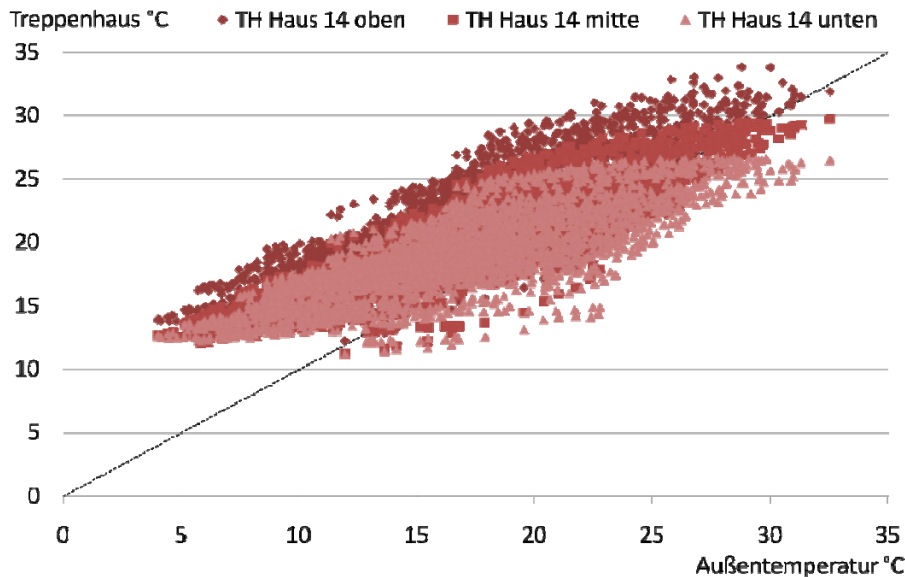


Bild 77 Korrelation von Stundenmittelwerten der Außentemperatur und Temperaturen im Treppenhaus in Haus 14 (Flügel 7 und 8) im Sommer 2006. In den oberen Ebenen erwärmt sich die Luft zwar über Außentemperaturwerte, eine Überhitzung über 30°C kommt jedoch kaum vor. Das Konzept, hohe sommerliche Lasten durch die Überhöhung des Treppenhauses durch ein zusätzliches Geschoss in Verbindung mit einer Auftriebslüftung über Klappen abzuführen, funktioniert.

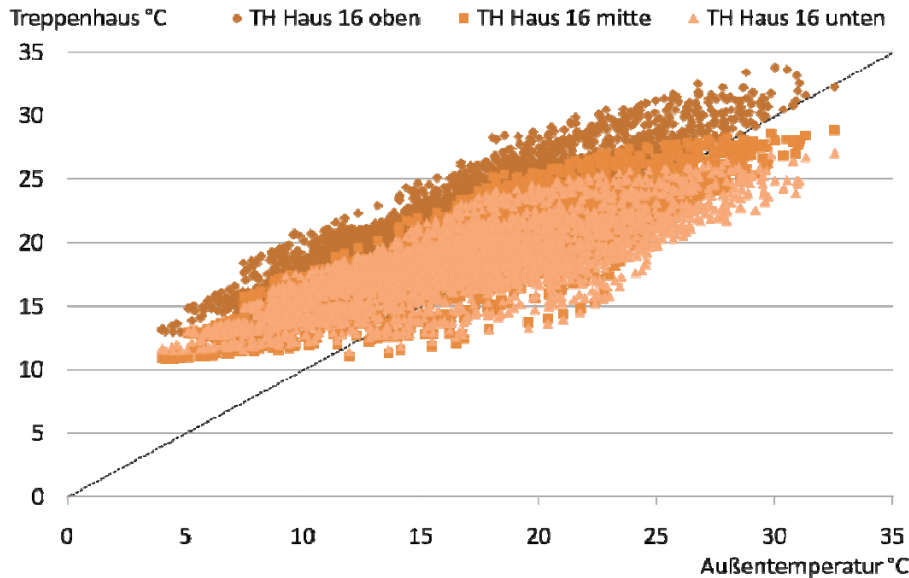


Bild 78 Korrelation von Stundenmittelwerten der Außentemperatur und Temperaturen im Treppenhaus in Haus 16 (Flügel 5 und 6) im Sommer 2006. Auch hier gibt es keine problematischen Überwärmungen des Treppenhauses, die sich negativ auf den Komfort in den Apartments auswirken könnten.

Trotz der Vollverglasung der Treppenhäuser gab es im Sommer keine Probleme mit Überhitzungen. Zum einen ist der Sonneneintrag in die Treppenhäuser begrenzt, da diese weitestgehend durch die Gebäude verschattet werden (siehe auch Bild 39 im Abschnitt ‚4.2.4 Untersuchung passiv-solarer Gewinne‘). Zudem funktioniert das Prinzip des Kamineffekts, durch den Wärmelasten im Sommer durch das Überhöhungsgeschoss abgeleitet werden.

5.2. Lüftung und Luftqualität

Neben Temperatur und Feuchte ist die Luftqualität ein weiteres entscheidendes Qualitätsmerkmal. Die Lüftungskonzepte der Gebäude unterscheiden sich dabei deutlich.

Um die tatsächlichen, nutzerinduzierten sowie nutzerunabhängigen Luftwechsel und Raumluftqualitäten zu untersuchen wurde in beiden Gebäuden Dauer und Umfang der Fensterlüftung untersucht. Im NEH wurde der Einsatz der bedarfsgeführten Abluftanlage überprüft. In beiden Gebäuden wurde zudem stichprobenhaft die CO₂ Konzentration der Raumluft gemessen, als Indikator für die Luftqualität.

5.2.1. Lüftung und Luftqualität im NEH

Die Apartments des NEH werden wie eingangs erwähnt über die Fenster gelüftet, im innenliegenden Bad befindet sich ein bedarfsgeführter Abluftventilator (der an den Lichtschalter gekoppelt ist), die Luft strömt aus dem Zimmer über Überströmger in der Badezimmertür nach.



Im Zimmer gibt es einen weiteren Abluftventilator, der im Bedarfsfall eingeschaltet werden kann. Das Nachströmen von Außenluft erfolgt über Überströmigitter in den Fenstern (siehe Abschnitt 2.2.1 Bauabschnitt Niedrigenergiehaus).

Um Aussagen über die tatsächlichen Luftwechsel in den Zimmern zu erhalten, wurde der Betrieb der Abluftventilatoren in Zimmer und Bad stichprobenhaft in zehn Apartments überprüft. Außerdem wurden in einigen Zimmern temporär Fensterkontakt- Messgeräte eingesetzt, die Öffnungs- und Schließvorgänge protokollieren. Begleitend wurde stichprobenhaft die CO₂ Konzentration im Raum gemessen.

5.2.1.1. Nutzung der Bedarfslüftung

Um die Nutzung der Abluftventilatoren in Bad und Zimmer zu prüfen, wurden die Lüftungsgeräte in einigen Zimmern mit Loggern versehen, die über die Detektion eines Magnetfelds den Betrieb der Lüftungsmotoren erfassen und protokollieren. Die Messung lief ein komplettes Kalenderjahr (Oktober 2005 bis Mitte November 2006).

Die Auswertung erfolgt über so genannte „Carpet Plots“, in denen der Betrieb des Geräts in Abhängigkeit von Datum und Uhrzeit dargestellt werden kann.

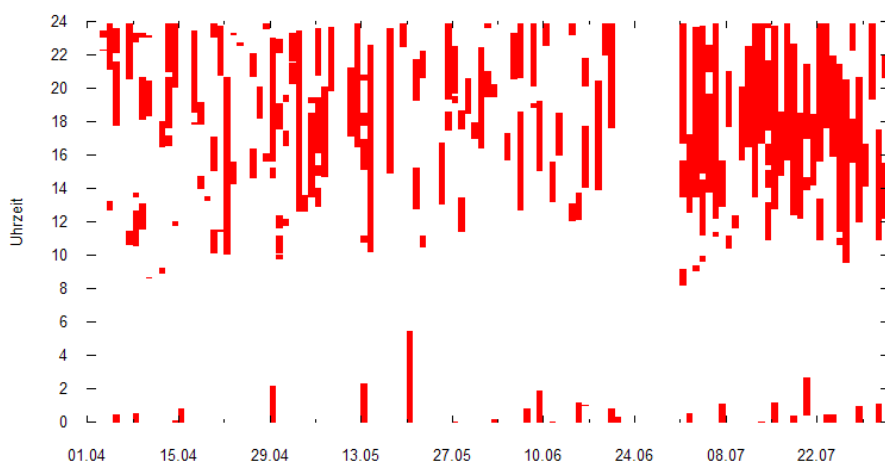


Bild 79 Carpet-Plot der Nutzung des Abluftventilators im Zimmer. Entlang der X- Achse sind Tage aufgetragen, an der Y- Achse der Tagesverlauf von 0:00 bis 24:00. Die roten Balken markieren jeweils den Betrieb des Lüfters. Der dargestellte Fall zeigt die ausgiebigste gemessene Nutzung des Lüfters. Bei einem Volumenstrom von 55 m³/h ergibt sich ein Luftwechsel von 1,2 h⁻¹ bei Betrieb des Lüfters. Bezogen auf die gesamte Messzeit ergibt sich aber auch im hier dargestellten Fall (ohne Fenster- und Fugenlüftung) ein Luftwechsel von 0,21 h⁻¹.

Die Nutzung der Abluftventilatoren im Zimmer ist recht unterschiedlich und hängt in erster Linie von der Nutzung der Küchenzeile ab. In den meisten Apartments wird der Lüfter nur wenig genutzt. Im Mittel über alle Messungen war der Lüfter an weniger als 5% des Messzeitraums in Betrieb. D.h. der Lüfter läuft im Mittel 1,2 h/d, bzw. induziert damit einen tagesmittleren Luftwechsel von 0,07 h⁻¹.

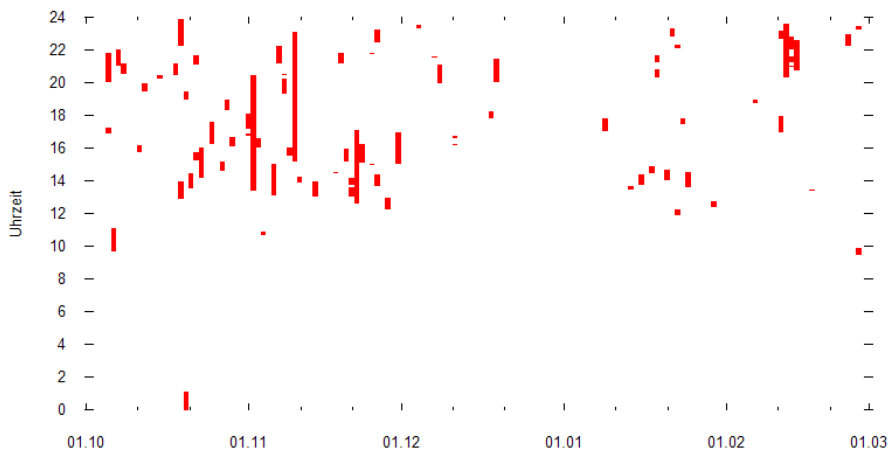


Bild 80 In den meisten anderen gemessenen Zimmern wurde der Abluftventilator deutlich weniger genutzt, wie sich bei dieser Auswertung der Laufzeiten zeigt.

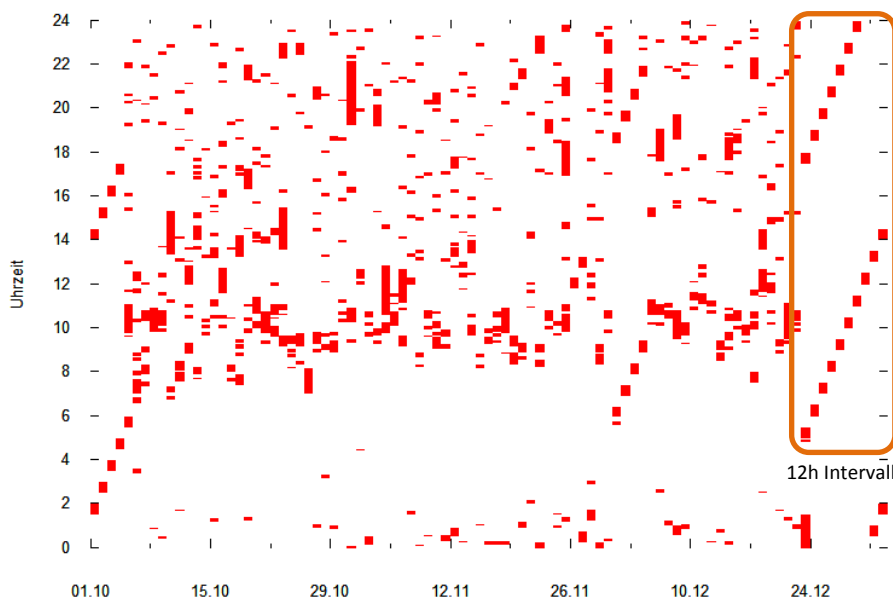


Bild 81 Lüfterlaufzeiten des Abluftventilators im Bad. Die Lüfter im Bad sind mit dem Lichtschalter gekoppelt und verfügen über zwei Betriebsstufen, eine (einstellbare) Nachlaufzeit, sowie eine Intervallschaltung. Bei Nichtbenutzung läuft der Lüfter im 12 h Turnus für 30 min. Dieser Betrieb ist ebenfalls gut an den diagonal verlaufenden Zeitreihen erkennbar.

Im Bad ist der Betrieb des Abluftventilators an den Lichtschalter gekoppelt, daraus ergeben sich zwangsläufig höhere Nutzungszeiten. Die Ventilatoren verfügen über zwei Betriebsstufen sowie eine Nachlaufregelung. Bei Nutzung des Bads läuft der Lüfter auf Grundlast mit einem Soll- Volumenstrom von $40 \text{ m}^3/\text{h}$ (Stichprobenmessung: $46 \text{ m}^3/\text{h}$), anschließend läuft das Gerät für 15min im Nachlauf auf Stufe 2 mit einem Soll- Volumenstrom von $60 \text{ m}^3/\text{h}$ (Stichprobenmessung: $55 \text{ m}^3/\text{h}$). Bei Nichtbenutzung des Bads läuft der Lüfter alle 12h für 30min in Grundlast. Bei der Messung der Laufzeiten konnte nur der Betrieb, nicht aber die Laststufe des Lüfters erfasst werden. Die Mittelung aller erfassten Ventilatoren im Bad ergibt eine mittlere Laufzeit von 12% in Relation zur Messzeit, bzw. im Mittel 2,9 h/d.



Bezogen auf einen Tag ergibt sich daraus ein Luftwechsel zwischen $0,11$ und $0,13 \text{ h}^{-1}$ (ohne Berücksichtigung von Fensterlüftung, bzw. Nutzung des Abluftventilators im Zimmer).

Durch die durchschnittliche Nutzung der Abluftventilatoren in Bad und Zimmer wird also kein ausreichender Luftwechsel sichergestellt, die Nutzer müssen in jedem Fall zusätzlich über die Fenster lüften.

5.2.1.2. Fensteröffnungszeiten im NEH

Um festzustellen, wie ausgeprägt über die Fenster gelüftet wird, wurde ein Teil der Zimmer mit Messgeräten ausgerüstet, die Öffnungs- und Schließvorgänge über einen Reed- Kontakt detektieren und diese Ereignisse mit einem Zeitstempel abspeichern.

Bei der Messung gab es einige Ausfälle durch leere Batterien. Die verwendeten Reed- Kontakte waren so angefertigt, dass bei geschlossenem Fenster ein Magnet am Fenster den am Fensterrahmen befestigten Schalter schließt, d.h. beim öffnen der Fenster auch der Schalter öffnete. War ein Fenster größtenteils geschlossen, floss durchgehend ein Prüfstrom durch den Schalter und führte zu einem vorzeitigen Ausfall der Batterie und damit teilweise zum kompletten Datenausfall des Loggers. Diese Ausfälle machten sich stärker beim PH bemerkbar, da dort mehr Fenster länger geschlossen blieben (siehe nachfolgender Abschnitt).

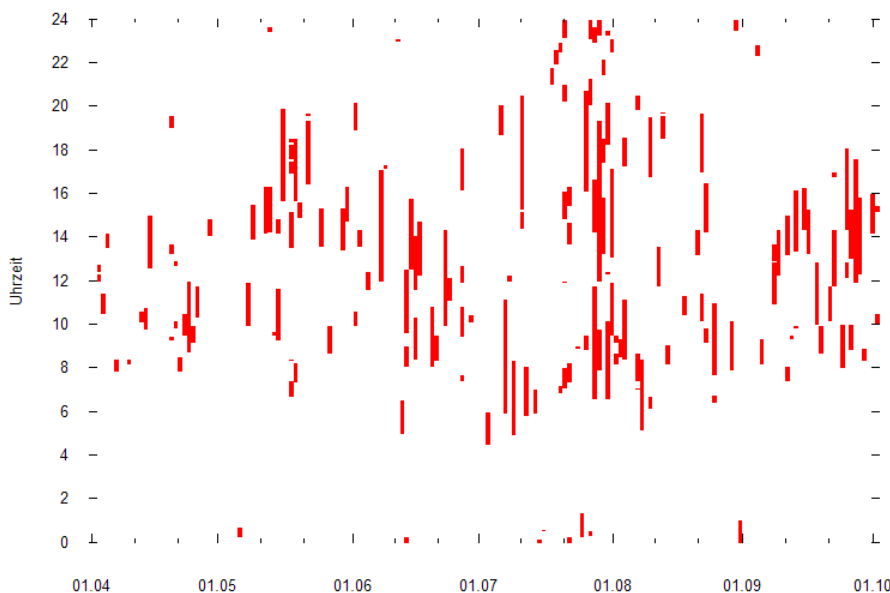


Bild 82 Typisches Bild der Fensteröffnungszeiten im NEH. Die Öffnungszeiten sind unregelmäßig und stark witterungsabhängig.



Es zeigt sich, dass nur wenige Nutzer regelmäßig über die Fenster lüften, eine Vielzahl der Bewohner eher unregelmäßig und witterungsabhängig. Die Fenster in der Burse lassen sich nur öffnen, nicht kippen. Da die Zimmer mit geölten Parkettböden ausgestattet sind, besteht bei Regen die Gefahr von Wasserschäden. Die Bewohner achten also darauf, dass die Fenster bei Abwesenheit geschlossen sind, was offensichtlich aber auch dazu führt, dass auch bei Nutzung der Zimmer und vor allem nachts die Fenster geschlossen bleiben.

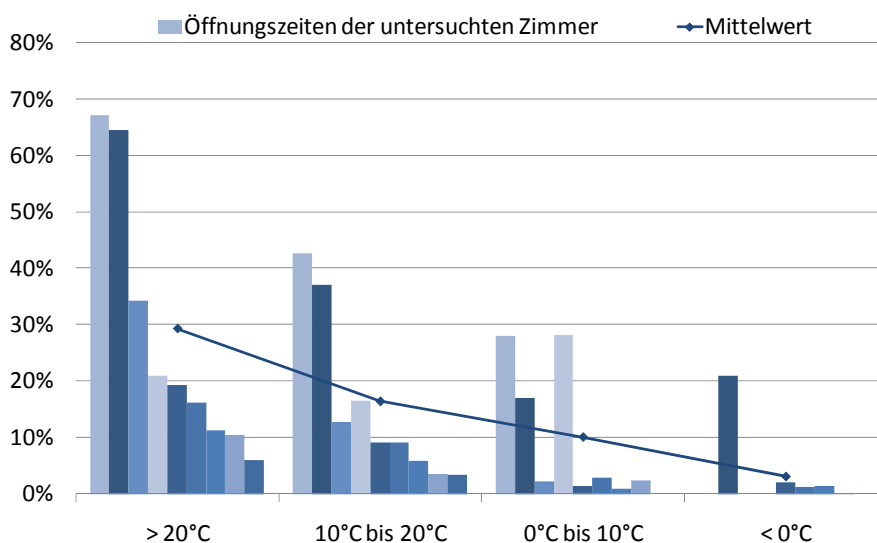


Bild 83 Abhängigkeit der Fensteröffnungszeit von der Außentemperatur der untersuchten Zimmer. Die %-Angaben beziehen sich auf die Zeit, an der bei entsprechenden Außentemperaturen das Fenster offen stand. Die Messgeräte sprechen dabei allerdings schon ab einer Öffnung von ca. 1 cm an, d.h. es kann keine Aussage über den Öffnungsquerschnitt bzw. die tatsächlichen Luftwechsel getroffen werden.

In Bild 83 wird deutlich, dass das Lüftungsverhalten witterungsabhängig ist. Während bei hohen Außentemperaturen in vielen Zimmern das Fenster eine gewisse Zeit offen steht, gehen die Öffnungszeiten bei kühler Witterung stark zurück. Durch diese Messung wird bestätigt, dass sich vor allem im Winter im NEH geringe Luftwechsel einstellen, die zwar wie in Abschnitt ‚4.2.2 Heizwärme Niedrigenergiehaus‘ den Heizwärmeverbrauch reduzieren, aber raumlufthygienisch bedenklich sind.

5.2.1.3. CO₂ Konzentration im NEH

Als messbarer Indikator für die Luftqualität wurde die CO₂ Konzentration der Raumluft genutzt. In der Außenluft herrscht eine CO₂ Konzentration von etwa 320 ppm (Parts per Million), die Konzentration im Raum sollte 1000 ppm, die so genannte Pettenkofer-Grenze, nicht überschreiten. Dies entspricht einer Klassifizierung der Raumluftqualität zwischen Kategorie II und III in der DIN EN 15251 (mittlere Raumluftqualität), die sich jedoch auf Nichtwohngebäude bezieht.

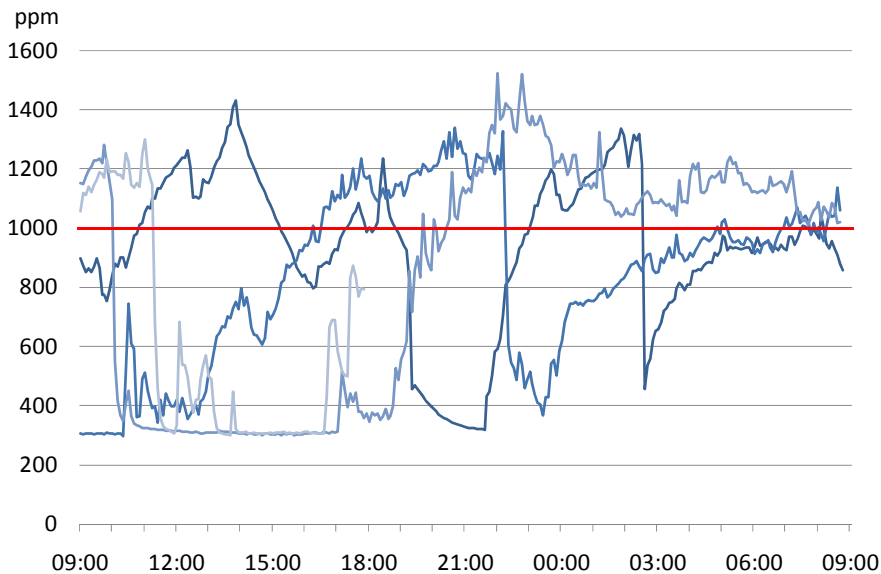


Bild 84 Verlauf der CO₂ Konzentration innerhalb einer 24h Messung in verschiedenen Zimmern des NEH. Eine Konzentration von 1000 ppm wird bei Anwesenheit einer Person schnell erreicht und überschritten. Durch Stoßlüftung kann die Luftqualität sehr schnell verbessert werden. Nachts hatten alle Nutzer die Fenster leicht geöffnet. Da die Messungen alle in den Wintermonaten stattfanden kann nachts von nicht geringen temperaturabhängigen auftriebsinduzierten Luftwechsell ausgegangen werden.

Bei Stichprobenmessungen der CO₂ Konzentration stellte sich heraus, dass bei geschlossenem Fenster und Anwesenheit einer Person die Schwelle von 1000 ppm schnell überschritten wird. Ohne zusätzliche Fensterlüftung stellen sich dauerhaft hohe Konzentrationen ein. Durch die geringe Größe der Apartments (Rauminhalt ca. 50 m³) kann durch kurze Stoßlüftung die Konzentration schnell gesenkt werden, gerade nachts ist dies jedoch nicht durchführbar.

5.2.1.4. Optimierung der Lüftung im NEH

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, wird im NEH nicht ausreichend über die Fenster gelüftet, die bedarfsgeführte Abluftanlage kann ebenfalls keine ausreichenden Luftwechsel sicherstellen.

In den Bädern der sind Abluftventilatoren, Typ Limodor LF 60 mit dem Steuermodul SINR 99300 installiert. Der Lüfter leistet in Grundlast laut Hersteller einen Volumenstrom von 40 m³/h, in Volllast 60 m³/h.

Um ausreichende Luftwechsel und damit einen raumlufthygienisch einwandfreien Zustand sicherzustellen, wäre ein (personenbezogener) Volumenstrom von 30 m³/h sinnvoll – dies ist mit der vorhandenen Anlage nicht zu realisieren. Ein dauerhaftes Betreiben des Lüfters in Grundlast würde zu unnötig hohen Lüftungswärmeverlusten führen und ist aus Lärmschutzgründen nicht akzeptabel.

Als Kompromiss wurden die Lüfter über das Steuermodul SINR 99300 auf einen Intervallbetrieb umgestellt. Die Steuerungsmodule lassen sich über Dip-Schalter in gewissem Umfang auf verschiedene Be-



triebsmodi umstellen. Der Betrieb des Lüfters vor und nach der Umstellung ist in Tab. 11 aufgelistet.

Tab. 11 Laufzeiten der Badlüfter vor und nach der Umstellung. Die Lüfter wurden auf einen Intervallbetrieb gestellt, sodass alle 3 Stunden der Lüfter für 60 min läuft, die Apartments also in einem 4 stündigen Rhythmus mit einem 0,9 fachen Luftwechsel gespült werden.

	Einschalten	Nachlauf	Intervallzeit	Intervalldauer
vorher	Teillast	7 min, Volllast	12 h	30 min, Teillast
geändert	Teillast	7 min, Teillast	3 h	60 min, Teillast

Die Auswirkung der Umstellung wurde durch eine Messung der CO₂ Konzentration überprüft. Dabei soll festgestellt werden, ob durch die geänderte Betriebsführung der Lüftung die CO₂ Konzentration der Raumluft unter der Pettenkofer- Grenze von 1000 ppm CO₂ gehalten werden kann.

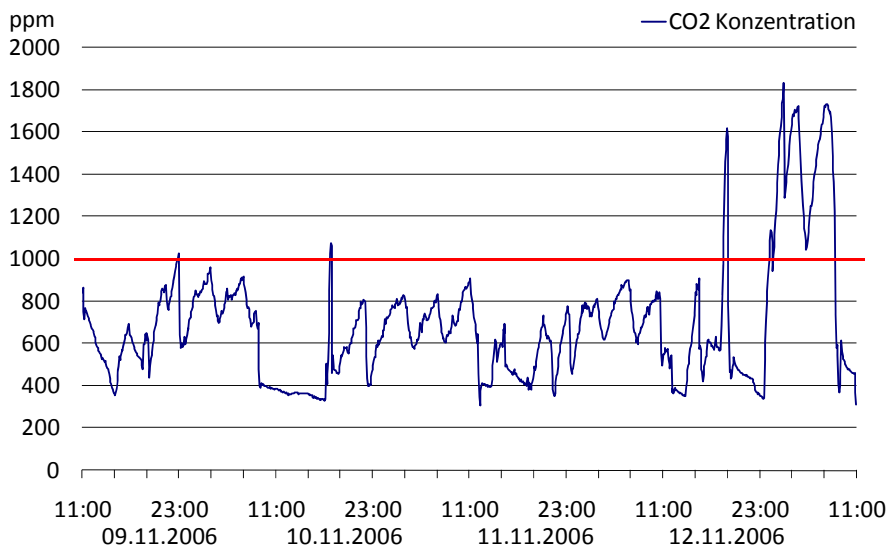


Bild 85 Verlauf der CO₂ Konzentration in einem Apartment des NEH nach umstellen des Badlüfters auf einen vierstündigen Intervallbetrieb.

Durch den Intervallbetrieb kann die CO₂ Konzentration auch bei geschlossenem Fenster (aber vollständig geöffnetem Überströmgitter) auf unkritischem Niveau gehalten werden. Lediglich wenn sich 2 Personen im Zimmer aufhalten (Nacht vom 12. – 13.11.2006) steigen die Konzentrationen schnell auf hohe Werte an.

Der geänderte Betrieb wurde zunächst in einem Flur des NEH durchgeführt, um Rückmeldungen der Nutzer in Bezug auf Lärmbelästigung abzuwarten. Der Intervallbetrieb wurde durch die Bewohner akzeptiert, es gab keine negativen Kritiken.

Die Umrüstung der Lüfterregelungen soll nach und nach in erster Linie bei Mieterwechseln durchgeführt werden. Da bis zum Ende der Messungen im Monitoring erst wenige Apartments umgerüstet wurden, macht sich die Umstellung in den Energieverbrauchsdaten noch nicht bemerkbar.



5.2.2. Lüftung und Luftqualität im PH

Die bei der Planung der Sanierung des zweiten BA bereits bekannten raumlufthygienischen Probleme im ersten BA führten, wie im ersten Abschnitt beschrieben, dazu, dass für den zweiten BA eine ventilator-gestützte Lüftung mit Zu- und Abluft zum Einsatz kommen sollte.

In der Planung wurde die Möglichkeit, den Verbrauchsstandard eines Passivhauses hinsichtlich des Heizwärmeverbrauchs zu erreichen mit Hilfe des Passivhaus- Projektierungspakets (PHPP) überprüft [PHD2001].

Dabei wurden auch Parameter zum Lüftungskonzept angenommen, die wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis des ermittelten Heizwärmebedarfs haben. Dies betrifft sowohl die Auslegung der Luftvolumenströme als auch den so genannten „Wärmebereitstellungsgrad“, die Angabe über die Wirksamkeit der Wärmerückgewinnung.

Um den in hiesigen klimatischen Bedingungen erreichbaren passivhaustypischen Jahresheizwärmeverbrauch von 15 kWh/m²a zu erreichen, wurde in der Vorprojektierung ein Wärmebereitstellungsgrad von 85% angenommen.

5.2.2.1. Betrieb der Lüftungsanlage

Für den Frischluftbedarf wurde in der Vorprojektierung eine Zuluftmenge von 30m³/h pro Apartment gewählt (ablufseitig aufgeteilt in 15m³/h in der Küche und 15m³/h im Bad). Durch die geringe Größe der Apartments ergibt sich daraus ein Luftwechsel von 0,7 1/h in Bezug auf ein Apartment – sodass nach DIN 1946-6 die Mindestanforderung an den Luftwechsel von 0,5 1/h, sowie einer Frischluftzufuhr von 30m³/h pro Person, eingehalten wird. Die Abluftmenge von 15m³/h für die fensterlosen, innenliegenden Bäder ist ausreichend, jedoch ist mit einer zentralen Anlage eine gleichmäßige Aufteilung auf 70 bis 98 Bäder pro Flügel schwierig in der Umsetzung. Für das gesamte (belüftete) Gebäude ergibt sich in der Vorprojektierung ein Luftwechsel von 0,6 h⁻¹.

Da die raumlufthygienischen Bedingungen bei der Sanierung des zweiten BAs der Burse ein Hauptgrund für den Einsatz einer ventilator-gestützten Dauerlüftung war, wurden bei der Auslegung der Lüftungsanlage deutlich höhere Volumenströme gewählt. Tagsüber wurden pro Apartment 90m³/h geplant (60m³/h für die Küche, 30m³/h für die Bäder). Dies entspricht den Standard- Anforderungen der DIN 1946-6 an entsprechende Räume (Küche und innenliegendes Bad) bei Wohnungslüftung. Nachts (23:00 bis 7:00) wurde die Anlage zur Vermeidung von Lärmbelästigung mit reduziertem Volumenstrom betrieben, der etwa



35 m³/h pro Apartment entspricht. Im Mittel ergibt sich für das gesamte belüftete Volumen ein Luftwechsel von 1,33 h⁻¹ (16h Volllast, Luftwechsel 1,55 h⁻¹, 8h verringerter Volumenstrom, Luftwechsel 0,88 h⁻¹). Vor allem in Bezug auf ein Apartment lag der Luftwechsel im Tagbetrieb mit 2,25 h⁻¹ damit deutlich zu hoch.

Die zu hoch eingestellten Volumenströme führten zu erhöhten Lüftungswärmeverlusten und verstärkten die Problematik von trockener Luft im Winter. Um die Luftmengen auf ein ausreichendes Maß zu reduzieren, wurde alle Lüftungsanlagen dauerhaft auf die leistungsreduzierte Nachtlüftung umgestellt, d.h. der Zu- und Abluftvolumenstrom auf 30 – 35 m³/h reduziert. Um die ausreichende Luftversorgung zu überprüfen, wurden exemplarisch in Flügel 7 (Flügel mit den meisten Ebenen und damit der größten Lüftungsanlage) die Volumenströme an allen Zu- und Abluftventilen gemessen. Die Messung erfolgte über eine Volumenstrom- Messhaube, die nach dem Thermo- Anemometer Prinzip den Massenstrom über eine definierte Fläche misst.

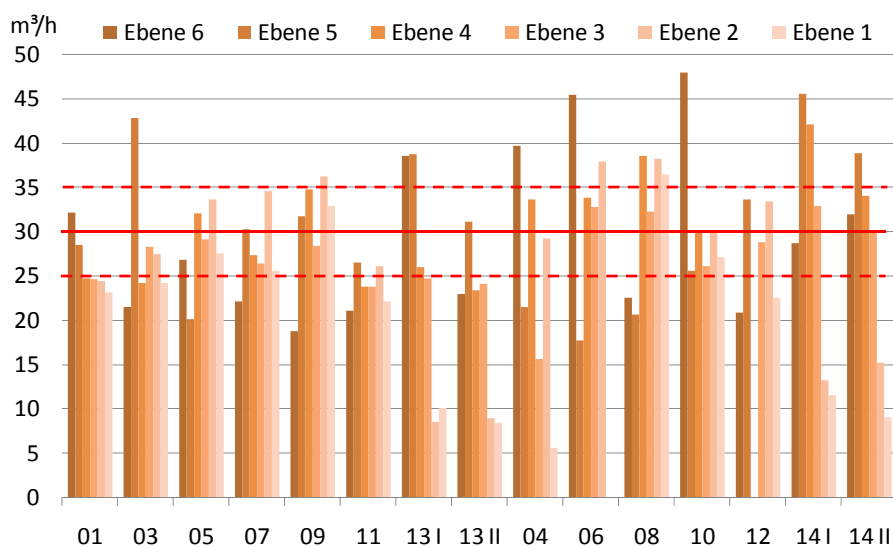


Bild 86 Zuluftvolumenströme im Flügel 7. Der gewünschte Volumenstrom von 30 m³/h kann innerhalb tolerierbarer Grenzen in den meisten Zimmern eingehalten werden. Größere Abweichungen ergeben sich vor allem bei den Giebelapartments der unteren Ebenen.

Bei der Messung der Volumenströme wurde zusätzlich festgestellt, dass in den Zuluftventilen der Giebelapartments Filterfliese steckten, die den Lüftungsstrang abdichteten. Die Fliese waren nach Inbetriebnahme vom Anlagenbauer zur Geräuschdämmung eingesetzt worden. Die Filterfliese wurden im gesamten Gebäude entfernt und anschließend der Zuluftvolumenstrom überprüft.

Stromzähler zur Erfassung des elektrischen Energieverbrauchs der Lüftungsanlagen wurden erst nach der Leistungsreduktion eingebaut, sodass keine Verbrauchswerte für den Betrieb im Zeitraum davor vorliegen.



Wärmebereitstellungsgrad

Die zweite Änderung gegenüber der Vorplanung betrifft die Wärmerückgewinnung. Aus wirtschaftlichen Gründen (Investition, Wartung) wurde ein Gerät der Firma Wolff (KG700) eingesetzt, das mit einem einfachen Kreuzstrom- Wärmetauscher zur Wärmerückgewinnung ausgestattet ist, der Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung liegt nach Herstellerangaben im Auslegungspunkt bei 70%. Zum Erreichen einer Heizwärmebedarfs von 15kWh wurde in der Vorprojektierung ein *Wärmebereitstellungsgrad* von 85% angesetzt [PHD2001]. Der Wärmebereitstellungsgrad gibt die Qualität der Wärmerückgewinnung bezogen auf die Grenzen der beheizten Hülle an, also wie viel von der Wärme aus der dem Gebäude entnommenen Luft für die eingebrachte Außenluft zurückgewonnen werden kann. Die Angabe bezieht sich also auf das ganze ‚System Lüftungsanlage‘, incl. Verteil-Leitungen außerhalb der thermischen Hülle.

Vor Reduktion des Volumenstroms lag der Temperaturwirkungsgrad der Wärmerückgewinnung bei 65% (also der nur der Wirkungsgrad des Wärmeübertragers der Lüftungsanlage selbst - gemessen wurden die Temperaturen der Luftströme unmittelbar am Wärmetauscher). In der reduzierten Stufe liegt er bei 71%, was das Optimum für einen einfachen Kreuzstromwärmetauscher angeht.

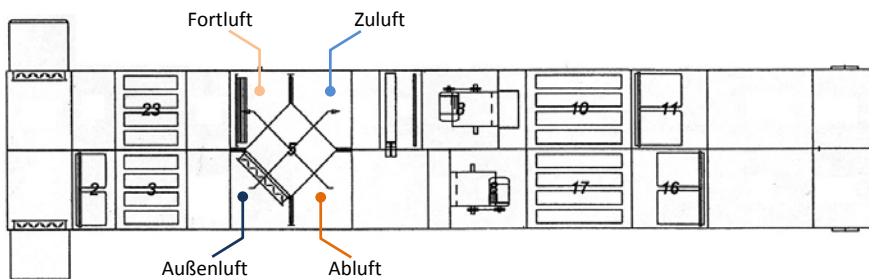


Bild 87 Skizze der Lüftungsanlage mit Lage der Sensoren der im Folgenden Dargestellten Messung. Im Abluftstrang ist bei der Temperaturmessung demnach die Abwärme des Motors enthalten, im Zuluftstrang nicht.

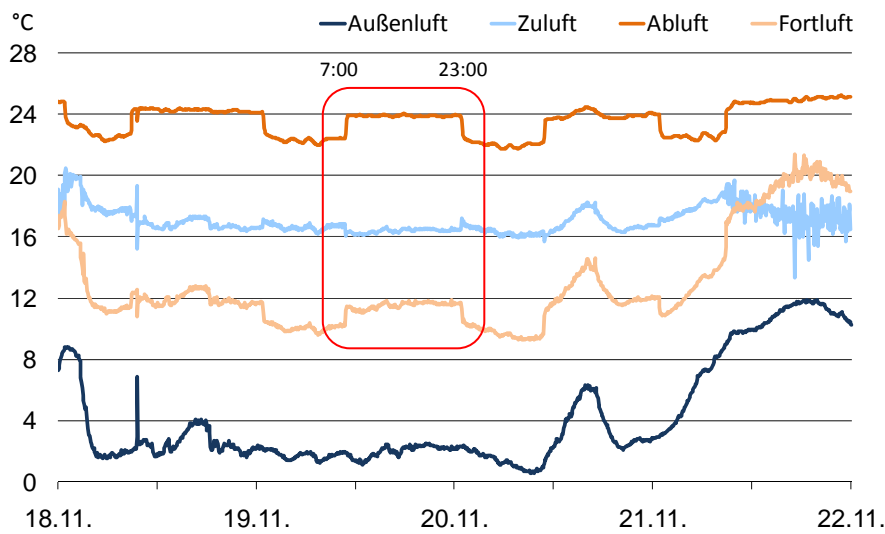


Bild 88 Temperaturverlauf der Luftströme unmittelbar am Wärmeübertrager der Wärmerückgewinnung bei aktiviertem Tag/ Nachtbetrieb am Beispiel des Flügels 7. Im Tagbetrieb (Leistungsaufnahme ca. 4,2 kW) von 7:00 bis 23:00 Uhr erwärmt sich die Abluft durch die höhere Leistung der Motoren. Durch den höheren Luftdurchsatz kann die Wärmerückgewinnung diese Wärme aber nicht nutzen – die Zulufttemperatur bleibt gleich, die Fortlufttemperatur steigt und der Wirkungsgrad sinkt auf 65%.

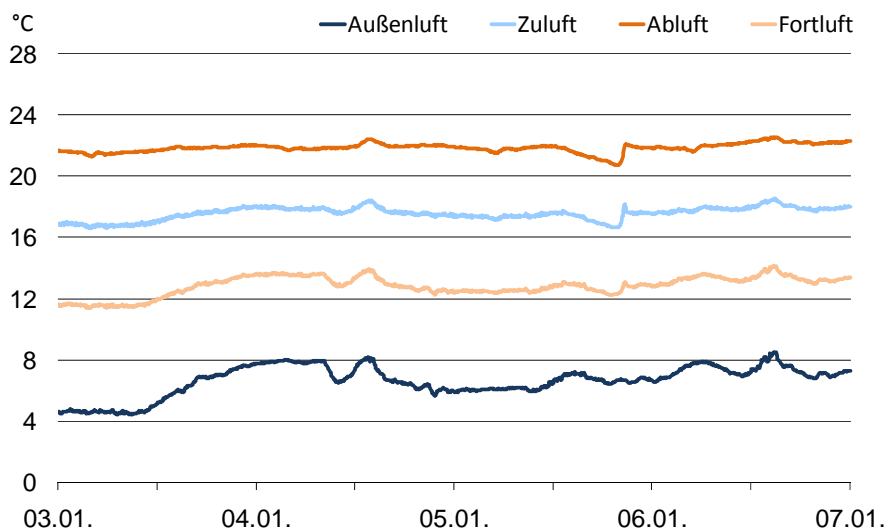


Bild 89 Temperaturverlauf der Luftströme nach Umstellung der Anlage auf dauerhaft leistungsreduzierten Betrieb (Leistungsaufnahme: ca. 1,4 kW, spezifische Leistung: 0,43 W/(m³/h)). Der Grundlastbetrieb reicht für einen ausreichenden Luftaustausch. Durch den geringeren Luftumsatz im Wärmeübertrager liegt dessen Wirkungsgrad jetzt bei 71-72%.

Neben der im Vergleich zur Vorplanung reduzierten Leistungsfähigkeit der Wärmerückgewinnung kommen zusätzliche Wärmeverluste aufgrund der Außenaufstellung der Anlage hinzu. Die Lüftungsanlage selbst, sowie die horizontale Verteilung der Lüftungsstränge befinden sich auf dem Dach des jeweiligen Gebäudeflügels.

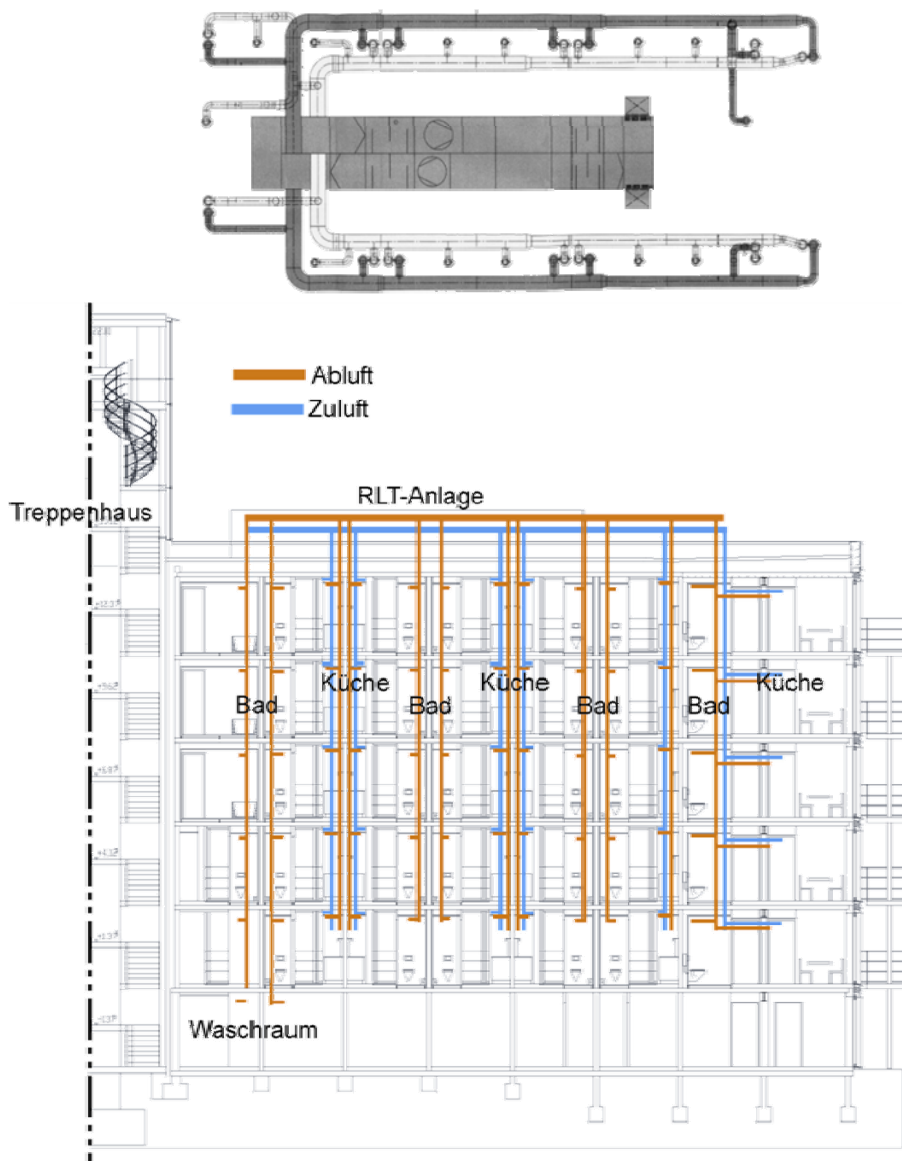


Bild 90 Draufsicht (oben) und Schnitt durch einen Gebäudeflügel (Flügel 5) mit Darstellung der Lüftungskanäle. Sowohl die Lüftungsanlage selbst, als auch die horizontale Verteilung der Lüftungsstränge befindet sich außerhalb der beheizten Hülle und führt im Winter zu Wärmeverlusten und Verringerung der Wärmerückgewinnung.

Sowohl die Lüftungsanlagen als auch die Rohrleitungen verfügen über eine Wärmedämmung (Anlage: Dämmung Hartpolyurethan, U-Wert $1,95 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Herstellerangabe), Leitungen: 20cm Mineralfaserdämmung), Wärmeverluste an die Umgebung sind im Winter unvermeidbar.

Eine Quantifizierung der Verluste in den Lüftungssträngen außerhalb der thermischen Hülle des Gebäudes ist schwierig. Durch Ergebnisse von Simulationsrechnungen und Thermografieaufnahmen der Anlage im Winter wurde zur erneuten energetischen Bilanzierung des Gebäudes eine Reduktion des Wärmebereitstellungsgrades, ausgehend von 70% Wirkungsgrad der Anlage selbst, auf 65% angesetzt.



5.2.2.2. Fensteröffnungszeiten im PH

Wie im NEH wurden auch im PH die Fenster einiger Zimmer mit Reed-Kontakten und Datenloggern ausgestattet. Wie schon beim NEH erwähnt, kam es auch bei der Messung im PH zu Ausfällen bei den Datenloggern durch leere Batterien. Hier waren die Ausfälle häufiger, da offensichtlich der Anteil an Nutzern, die das Fenster über lange Zeiträume geschlossen halten, größer ist.

Da im PH ein Grund- Luftaustausch durch die Lüftungsanlage sichergestellt wird, ist ein zusätzliches Lüften über die Fenster nur bei zusätzlichen Lasten nötig, etwa mehreren Personen im Raum oder beim kochen. Einige wenige Nutzer hatten aufgrund der Lüftung sogar das Zimmer so eingerichtet, dass das Fenster gar nicht mehr zu öffnen war. Bedingt durch die Ausfälle sind jedoch eher Daten aus Zimmern, die regelmäßig über die Fenster lüften verfügbar.

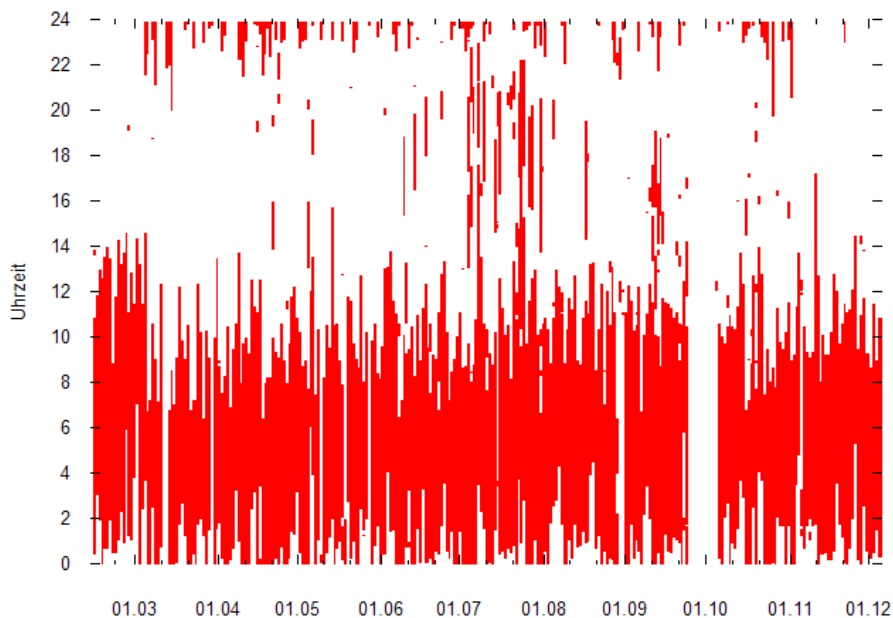


Bild 91 Extremes Beispiel von nachts dauerhaft geöffnetem Fenster. Obwohl über die Lüftungsanlage eine ausreichende Versorgung mit Frischluft sichergestellt ist, haben einige Bewohner das Bedürfnis, mit Außenluft zu lüften.

Beim Vergleich der verfügbaren Daten des Lüftungsverhaltens von NEH und PH lassen sich jedoch kaum Unterschiede im Fensterlüftungsverhalten feststellen. Obwohl über die Lüftungsanlage ausreichende Luftwechsel sichergestellt werden, lüften die Nutzer zusätzlich über die Fenster.

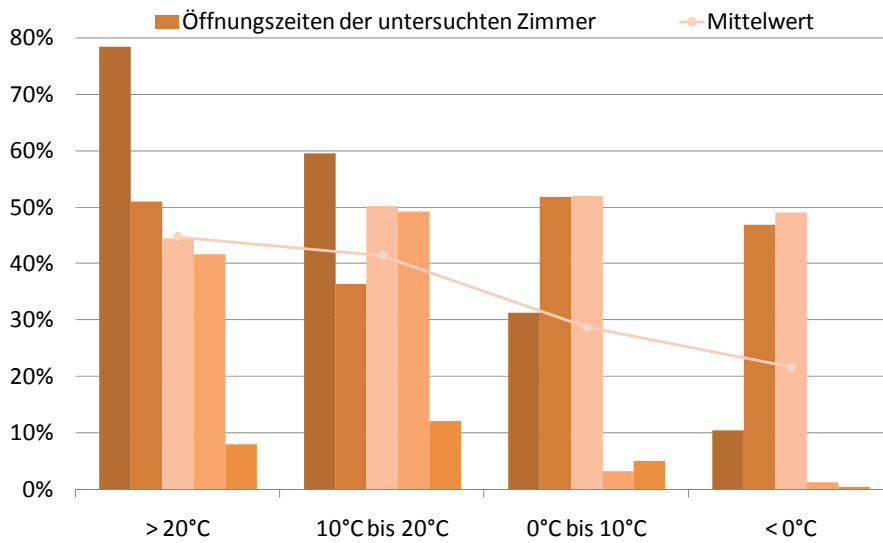


Bild 92 Zusammenhang von Außentemperatur und Fensterlüftung beim PH. Da es in den Apartments mit häufig geschlossenen Fenstern wie im Text beschrieben häufiger zu Ausfällen der Datenerfassung kam, sind eher die Fälle erfasst, bei denen stärker über die Fenster gelüftet wurde. Aus dem Diagramm kann daher nicht abgeleitet werden, dass im PH stärker über die Fenster gelüftet wird. Aus den verfügbaren Daten lässt sich jedoch ebenfalls die Tendenz zum witterungsabhängigen Fensterlüften ableiten.

Auch bei anderen Kontrollen des Lüftungsverhaltens, wie der Nutzerbefragung (siehe Abschnitt '5.3.2 Nutzerbefragung') oder Stichproben der Fensteröffnung bei einer Außenthemografie unterscheidet sich die beiden Bauabschnitte nur wenig. Während jedoch im NEH die Fensterlüftung für ausreichende Luftwechsel nötig ist, führt sie im PH zur Erhöhung von Lüftungswärmeverlusten, da auch bei geschlossenen Fenstern eine ausreichende Luftversorgung sichergestellt ist.

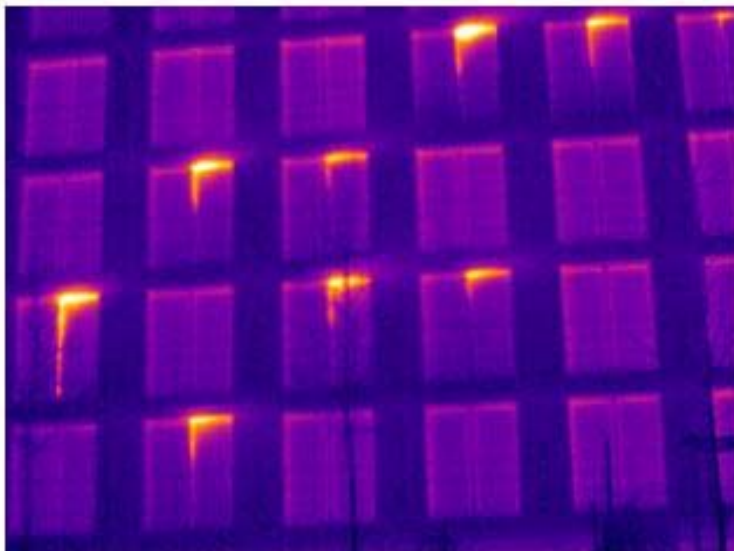


Bild 93 Thermografieaufnahme der Fassade des PH von außen zeigen teilweise geöffnete Fenster. Zum Zeitpunkt der Messung (morgens, 6:00 Uhr) herrschten Minusgrade, sodass es zu wirksamen auftriebsinduzierten Luftwechseln kommt. Bei der Betrachtung beider Gebäude unterscheidet sich die Anzahl offener Fenster jedoch kaum.



5.2.2.3. CO₂ Konzentration im PH

Auch im PH wurde stichprobenartig die CO₂ Konzentration in einzelnen Apartments gemessen.

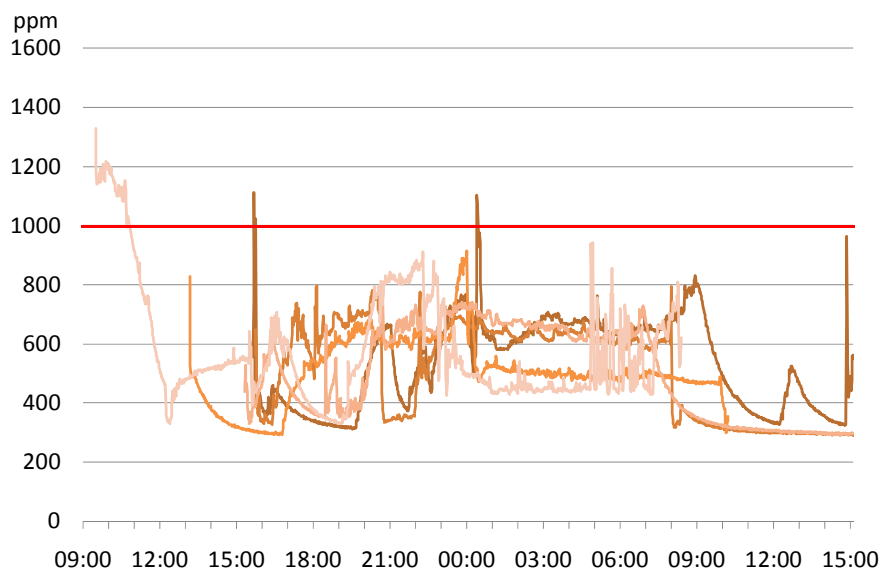


Bild 94 Verlauf der CO₂ Konzentration in verschiedenen Apartments des PH. Durch den kontinuierlichen Luftaustausch über die Zu- und Abluftanlage werden durchgehend CO₂ Konzentrationen unter 1000ppm erreicht, solange sich nur eine Person im Zimmer aufhält.

Durch den kontinuierlichen Luftaustausch durch die ventilatorgestützte Lüftung bleibt die CO₂ Konzentration durchgehend unter 1000 ppm, zumindest, solange sich nur eine Person im Raum aufhält.

Die Nutzer müssen also im Normalfall nicht zusätzlich über die Fenster lüften (außer bei zusätzlichen Lasten wie Besuch oder bei Benutzung der Küche). Auch bei geschlossenem Fenster ist eine – bezogen auf die CO₂- Konzentration – gute Luftqualität sichergestellt.



5.3. Nutzerbefragung

Die Wohnqualität in der Neuen Bourse wurde nicht nur messtechnisch untersucht, sondern auch direkt die Akzeptanz und Zufriedenheit der Nutzer abgefragt.

Dies wurde in Form einer Nutzerbefragung durchgeführt, einmal im Sommer und einmal im Winter. Die Fragebögen waren dabei von Aufbau ähnlich, lediglich sommer- und winterspezifische Fragestellungen wurden angepasst.

5.3.1. Befragung im Sommer 2005

In einer ersten Nutzerbefragung im Sommer 2005 stand die Zufriedenheit der Nutzer mit der vorhandenen Einrichtung, sowie deren Nutzung im Vordergrund [Kramp2005].

Die in Abschnitt ,5.1.2 Raumlufttemperatur und Komfort im Sommer‘ festgestellten Probleme mit sommerlichem Komfort wurden in der Befragung nur teilweise abgebildet, da es bis zur Durchführung der Befragung erst wenige sommerlichen Tage gegeben hat.

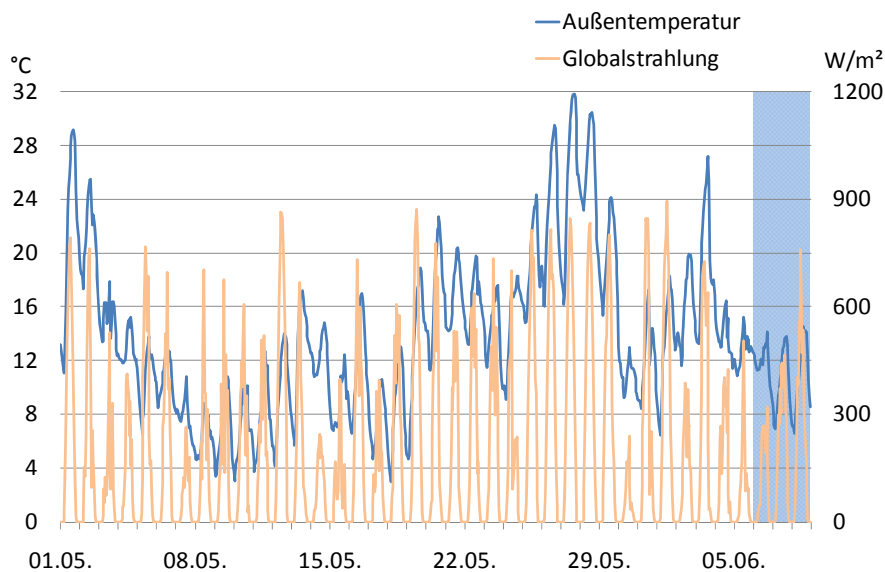


Bild 95 Wetterdaten vor- und während der Befragung (Zeitraum der Befragung ist blau hinterlegt). Die Woche vor der Befragung war größtenteils „durchwachsen“, d.h. kühl und regnerisch. Ende Mai gab es jedoch einige sehr sommerliche Tage.

Die Fragebögen wurden am 6.06.2005 ausgeteilt und am 8.06.2005 wieder eingesammelt. Die Rücklaufquote liegt mit 231 (NEH: 119 Abgaben, PH: 112 Abgaben) ausgefüllten Fragebögen bei 36%. Potentielle Einschränkungen des Wohnkomforts durch sommerliche Lasten waren bis zur Befragung erst an wenigen Tagen zu erwarten. Die Frage nach dem Empfinden des Raumklimas am Tag der Befragung zeigt aber schon, dass einige Nutzer die Temperaturen als „warm“ bis „zu warm“ empfanden.

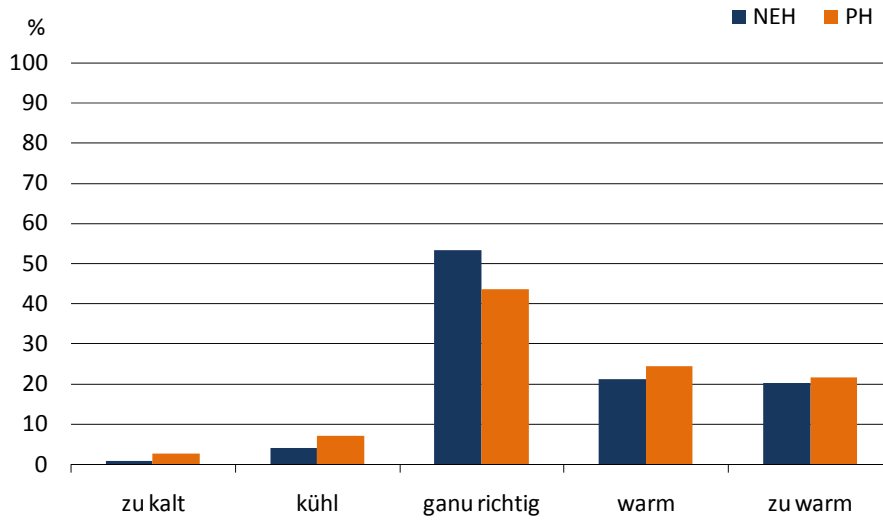


Bild 96 Wie im Verlauf der Wetterdaten zu sehen, gab es vor der Befragung einige sommerlichen Tage, aber noch keine längere Wärmeperiode. Dennoch zeigt sich in den Antworten nach dem Temperaturempfinden im Apartment die Tendenz zu „warm“ bis „zu warm“.

Untersucht wurde, ob die Einschätzung der Temperatur mit der Ausrichtung der Apartments korreliert. In Bild 97 sind die Angaben der Nutzer in Anlehnung an die PMV-Skala in Abhängigkeit der Ausrichtung der Zimmer (die aus der Angabe der Zimmernummer ermittelt werden kann) aufgetragen.

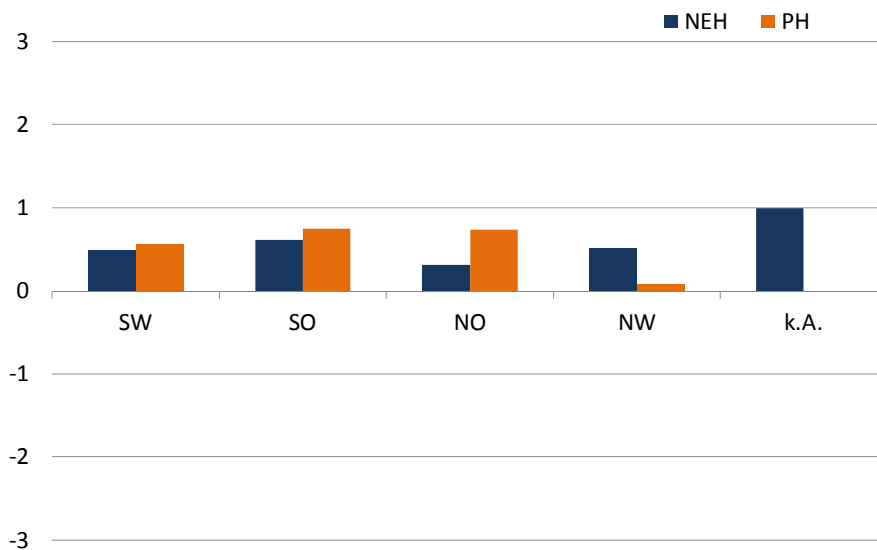


Bild 97 Angaben zum Temperaturempfinden in Anlehnung an die PMV Skala in Abhängigkeit der Ausrichtung der Zimmer in NEH und PH. Eine klare Tendenz, dass eine Ausrichtung vermehrt als „warm“ empfunden wird, ist nicht auszumachen. Wobei im PH am ehesten Zimmer mit Ostausrichtung, d.h. solaren Einträgen in den Morgenstunden, häufiger als „warm“ genannt werden.

Eine eindeutige Tendenz, dass südausgerichtete Zimmer eher als „zu warm“ empfunden werden, stellt sich jedoch nicht dar. Im PH gibt es eine leichte Tendenz zu Zimmer die teilweise nach Osten ausgerichtet sind. Dies wäre durch hohe morgendliche Solareinträge plausibel. Von der geographischen Lage (Hanglage) ist die Sicht nach Osten beim PH freier als im NEH.



Bei der Frage, wie zufrieden die Nutzer mit der Temperatur im Apartment insgesamt sind (von „sehr zufrieden“ über „mittelmäßig“ zu „sehr unzufrieden“), ergab sich bei beiden Gebäuden „mittelmäßig“. Das gleiche Ergebnis hat die Frage nach der prinzipiellen Zufriedenheit mit der Luftqualität im Apartment – in beiden Gebäuden beurteilen die Nutzer die Luftqualität als „mittelmäßig“, also Gründe werden im NEH jedoch häufig die nicht auf Kippe stellbaren Fenster genannt, im PH die erhöhte Staubbelastung. Die Frage, ob die Nutzer im PH es begrüßen, dass man zur ausreichenden Luftzufuhr die Fenster nicht mehr öffnen muss, beantworten 20% mit ja, 80% verneinen dies.

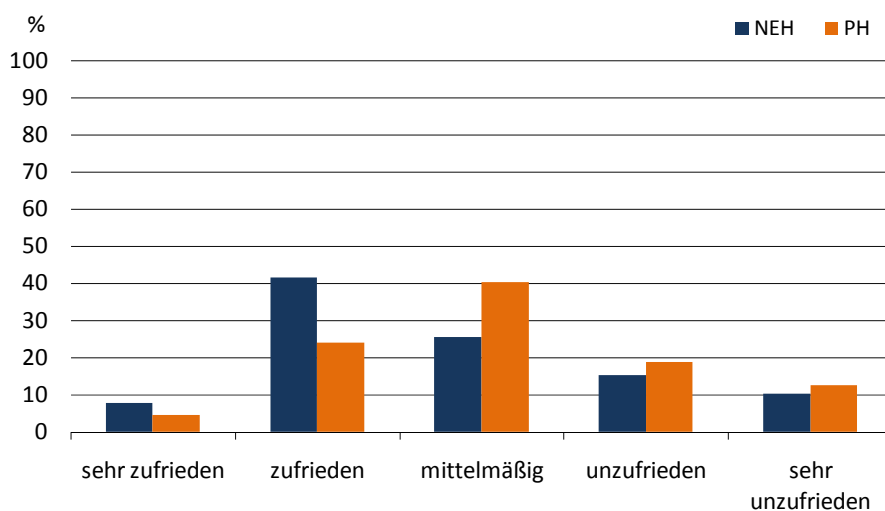


Bild 98 Frage nach der Zufriedenheit mit der Luftqualität im Apartment. Trotz der unzureichenden Luftwechsel sind die Bewohner des NEH eher mit der Luftqualität zufrieden als die Nutzer im PH.

Insgesamt zeigten sich die Nutzer „zufrieden“ bis „sehr zufrieden“ mit dem ihnen zur Verfügung gestellten Wohnraum. Als Besonders Vorteilhaft an der Neuen Burse wurde an erster Stelle die Nähe zur Universität genannt.

5.3.2. Nutzerbefragung im Winter 2005 / 2006

Um die Zufriedenheit der Nutzer im Gebäude zu evaluieren, wurde Anfang Februar 2006 eine zweite Nutzerbefragung durchgeführt. Die Fragebögen wurden am 6.02.2006 verteilt, die Bewohner konnten bis zum 13.02.2006 ausgefüllte Fragebögen in einer Box im Briefkastenraum abgeben. Schwerpunkt der Befragung war der Wohnkomfort in der Heizperiode. Der Rücklauf lag mit 161, bzw. 26% verwertbaren Fragebögen unter dem Ergebnis der Sommerbefragung 2005. Aus dem NEH gab es 90 Rückläufe, aus dem PH 71. Allerdings wurde im PH (vom Reinigungspersonal oder von Bewohnern) kurz vor Befragungsende ein Einwurfbüx mit ausgefüllten Fragebögen entfernt, d.h. Ergebnisse aus zwei Gebäudeflügeln liegen in deutlich geringerer Anzahl vor. Wie



viele Antworten dabei verlorengegangen ist nicht bekannt (es wurde erneut eine Abgabebox aufgestellt, die Anzahl der abgegebenen Fragebögen lag aber deutlich unter den anderen Boxen).

Der überwiegende Teil der Nutzer ist mit dem angebotenen Wohnraum zufrieden, signifikante Unterschiede zwischen den Gebäuden sind trotz unterschiedlichem Wärmeschutz und unterschiedlicher Lüftungstechnik nicht erkennbar.

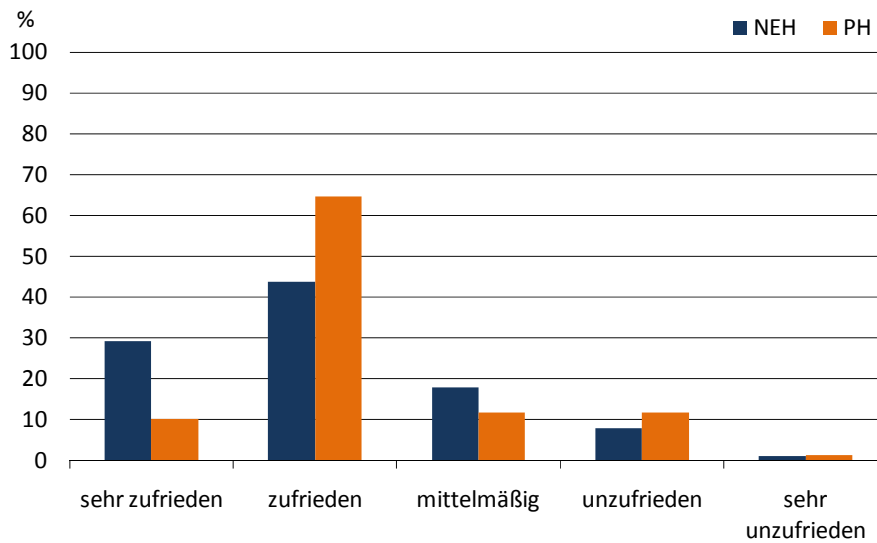


Bild 99 Zufriedenheit der Nutzer mit ihrem Apartment. Der größte Teil der Nutzer ist mit dem gebotenen Wohnraum „sehr zufrieden“ bzw. zufrieden (NEH: 73%, PH 75%), wobei bei den „zufriedenen“ Nutzer der Anteil „sehr Zufriedener“ im NEH überwiegt.

Die Auswertung der Fragebögen sollte vor allem zeigen, wo in Bezug auf den winterlichen Komfort aus Sicht der Nutzer besondere Vorzüge erwähnt werden, bzw. wo spezifische Mängel auftreten. Dabei soll untersucht werden, ob ein Zusammenhang mit den Gebäuden hergestellt werden kann, oder ob die Nennungen unabhängig vom Gebäudetyp sind.

Dazu wurde die Zufriedenheit verschiedener Komfort-Parameter abgefragt, d.h. die Zufriedenheit mit den Temperaturverhältnissen, der Raumluftqualität, mit Geräuschen und allgemeinen Dienstleistungen.

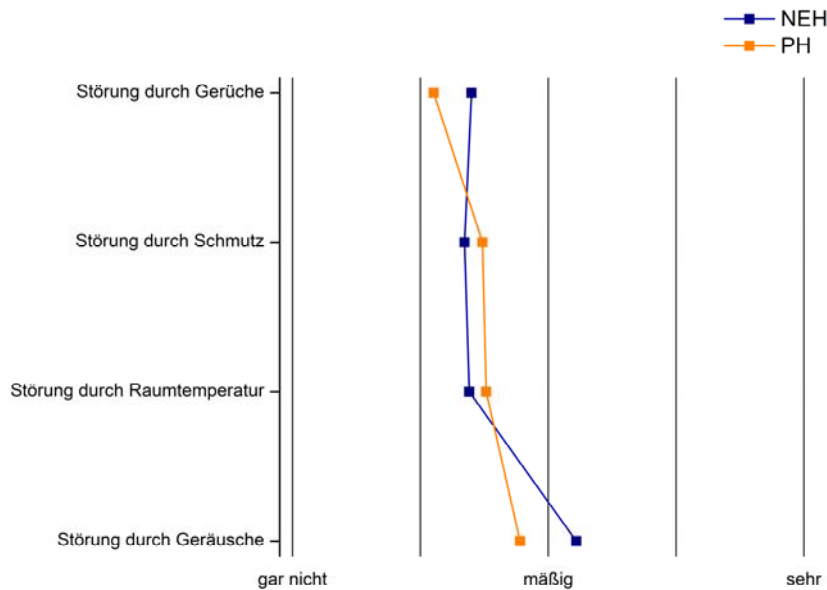


Bild 100 Auf die Frage, welche Gründe in den letzten Wochen den Wohnkomfort störten, gibt es nur geringe Unterschiede zwischen den Gebäuden. Dass es im 2. BA weniger Störung durch Gerüche gibt, ist ein Hinweis auf die bessere Luftqualität durch die Lüftungsanlage. Die größere Störung durch Geräusche im 1. BA ist durch die Lage erklärbar: der BA ist von Erschließungsflächen (Straße, Parkplatz) umgeben, während der 2. BA geschützter liegt.

Bei der Frage nach Störungen gab es keine herausragenden Unterschiede in den Antworten. Die Frage nach Störungen durch Geräusche zeigt den größten gebäudespezifischen Unterschied, daher soll dieser Punkt hier exemplarisch genauer dargestellt werden.

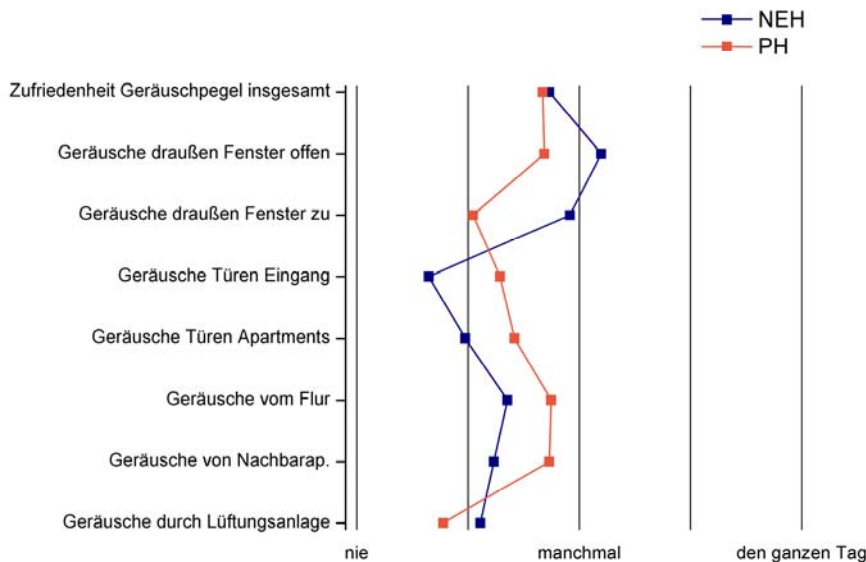


Bild 101 Ein detaillierter Vergleich der Gründe für Störungen durch Geräusche. Hier wird deutlich, dass die Gründe für Störungen im NEH vornehmlich von außen kommen, während im PH eher Geräusche im Wohnheim selbst störend wirken. Interessant ist auch, dass die dauerhaft laufende Lüftungsanlage im PH vom Geräusch als weniger störend empfunden wird, als die bedarfsgeführte Abluftanlage im NEH.

Ein weiterer wichtiger Punkt war, wie zufrieden die Bewohner mit dem Raumklima sind. Neben der Darstellung der Antworten zunächst die klimatischen Randbedingungen während der Befragung: in Bild 102 ist der Verlauf der Außentemperatur und der mittleren Einstrahlung zu



sehen. Die Außentemperatur lag während der Befragung im Mittel bei 2,3 °C, in den vier Wochen vor der Befragung bei 0,5 °C, die Temperaturen bewegten sich dabei zwischen 6,2 °C und -5,9 °C.

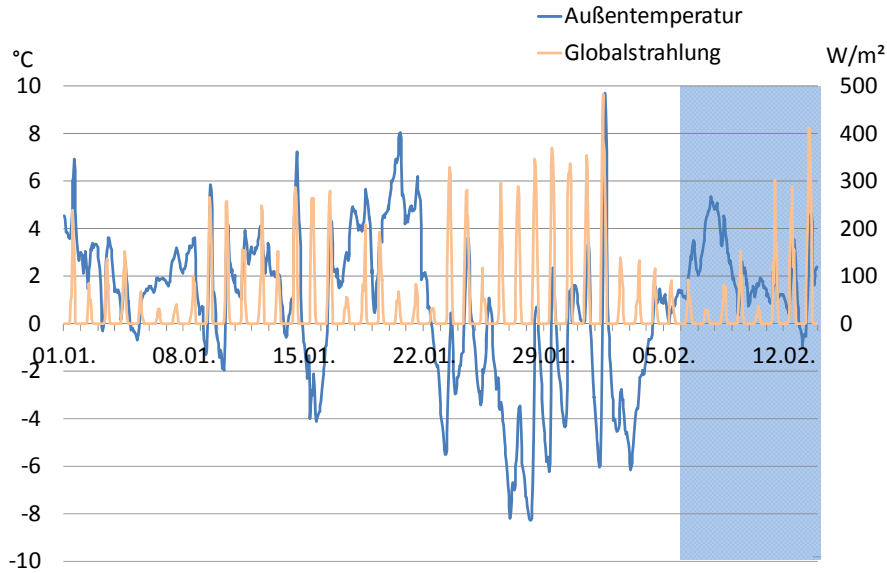


Bild 102 Klimatische Randbedingung vor und während der Befragung (Zeitraum der Befragung ist blau hinterlegt). Die Außentemperatur bewegt sich an den Tagen der Befragung um 2 °C, lediglich gegen Ende der Woche kommt es zu geringen solaren Einträgen. Kurz vor der Befragung war es mit Tiefstwerten von -8°C winterlich kalt.

Die Bewohner wurden sowohl nach ihrem aktuellen Empfinden, als auch nach dem Eindruck der letzten vier Wochen gefragt. Hierbei ist der Vergleich vor dem Hintergrund des unterschiedlichen Dämmstandards, sowie die Art der Heizwärmezufuhr interessant.

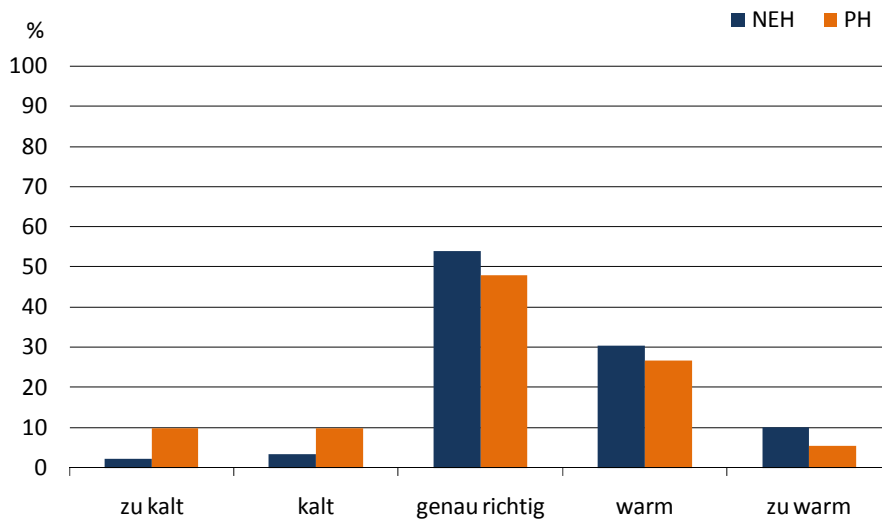


Bild 103 Vergleich des Temperaturempfindens zum Zeitpunkt der Befragung. Während der größte Teil der Bewohner das Raumklima als „genau richtig“ bezeichnet, liegt die Tendenz eher bei „zu warm“ als „zu kalt“ – wobei der Anteil an Nutzern, denen es „zu kalt“ ist eher im PH zu finden ist.

Trotz der typischen Wettersituation in der Heizperiode (nass – kalt) beurteilten die Nutzer die Raumtemperatur während der Befragung als „genau richtig“ mit der Tendenz zu „warm“. Hier gibt es nur geringe Unterschiede bei der Beurteilung der Gebäude. Anders stellt sich die Beurteilung des Temperaturempfindens der letzten vier Wochen dar.

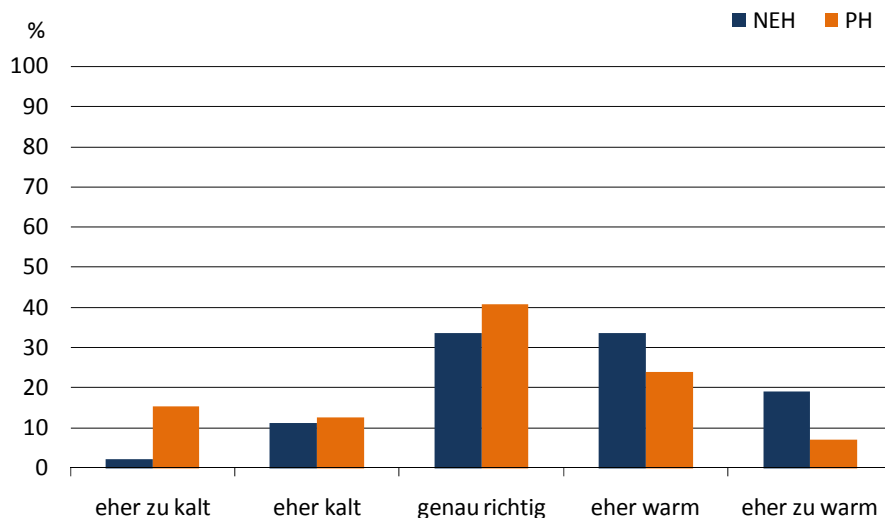


Bild 104 Vergleich des Temperaturempfindens der vergangenen vier Wochen. Hier ist im NEH nach wie vor eher die Tendenz zu „zu warm“, im PH nimmt der Anteil von „kalt“ bis „zu kalt“ deutlich zu. Ein Hinweis, darauf, dass das Konzept der Heizwärmezufuhr über die Lüftung im PH weniger gut angenommen wird, als die individuelle Regelbarkeit im NEH.

Bei der Frage nach dem Empfinden der Temperaturen der letzten Wochen (in denen Außentemperaturen unter 0 °C vorherrschten) geben die meisten nach wie vor „genau richtig“ bis „warm“ an, hier tendieren aber die Bewohner des NEH eher zu „zu warm“, während im PH ein nicht geringer Anteil „zu kalt“ angibt. Obwohl im Rahmen der messtechnischen Untersuchungen keine Unterschreitungen wichtiger Behaglichkeitsparameter nachgewiesen werden konnten, gibt es in der Heizperiode im PH öfter Beschwerden über zu geringe Temperaturen. Hier spielt auch eine Rolle, dass die Nutzer die Temperatur in ihrem Apartment nur begrenzt selbst regeln können – eine individuelle Anpassung ist nur über den Badheizkörper bei geöffneter Badezimmertür möglich.

Die Zufriedenheit mit den Regelmöglichkeiten der Temperatur im Raum wurde ebenfalls abgefragt – Ergebnisse in Bild 105.

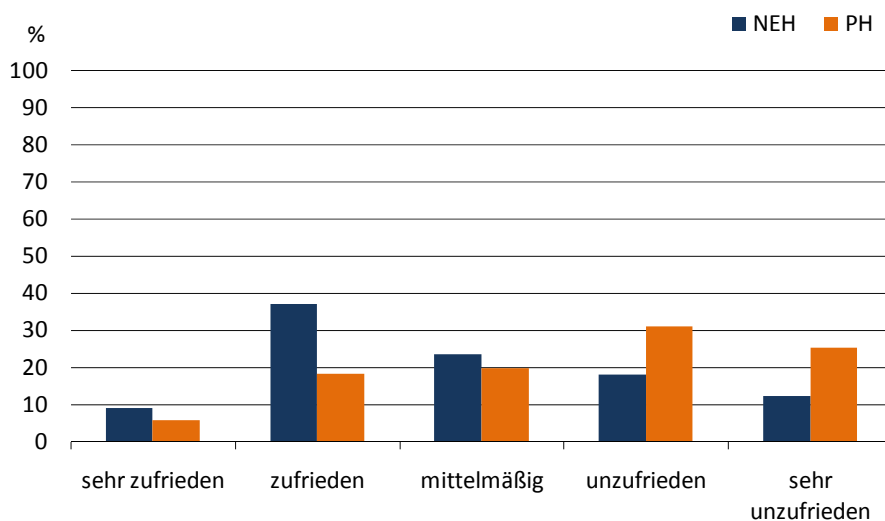


Bild 105 Frage, wie Zufrieden die Bewohner mit der Regelmöglichkeit der Temperatur im Zimmer sind. Hier zeigt sich deutlich, dass Bewohner im PH die fehlenden Eingriffsmöglichkeiten in die Heizungsregelung bemängeln.



Während im NEH 46% der Nutzer „sehr zufrieden“ bis „zufrieden“ mit den zur Verfügung stehenden Eingriffsmöglichkeiten in das Raumklima sind und 30% „unzufrieden“ bis „sehr unzufrieden“, sind im PH lediglich 24% glücklich mit der Regelung, 56% sind „unzufrieden“ bis „sehr unzufrieden“.

Die Frage nach der empfundenen Luftqualität soll überprüfen, ob die im PH durch Zwangslüftung sichergestellten Luftwechsel auch zu einer subjektiv besser empfundenen Luftqualität führt.

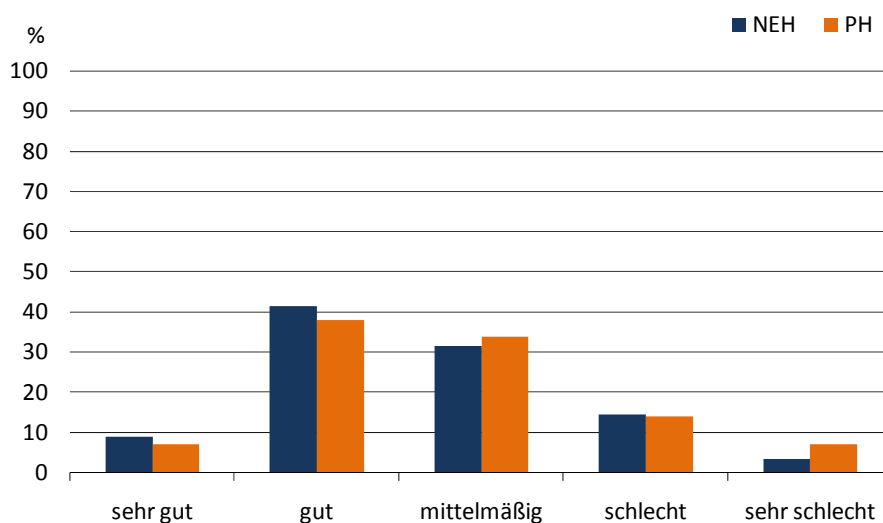


Bild 106 Bei der Frage nach der empfundenen Luftqualität wird das NEH leicht besser bewertet als das PH.

Bei der Angabe von Gründen und durch persönliche Gespräche stellte sich oft heraus, dass durch Unkenntnis über die vorhandene Lüftungsanlage die Erwartungshaltung an das System hoch war und Funktionalitäten (Klimatisierung, Dunstabzugshaube in der Küche) erwartet werden, die so nicht vorgesehen sind.

Trotz messbar besserer Luftqualität im PH wird das NEH leicht besser bewertet. Eine nicht unerhebliche Rolle spielt auch die in Abschnitt ‚5.2.2 Lüftung und Luftqualität im PH‘ angesprochene niedrige Luftfeuchte im PH, durch die es zu vermehrt Staubbildung kommt. Die Staubbelastung wurde häufig als Grund für die Unzufriedenheit mit der Luftqualität, bzw. der Lüftungsanlage genannt. Dabei wurde das Problem „trockene Luft“ selten als solches erkannt – wie Bild 107 zeigt, empfanden die meisten Nutzer die Luftfeuchte in den letzten vier Wochen vor der Befragung als „genau richtig“, viele auch „zu trocken“ – wobei sich dabei kein Unterschied zwischen den beiden Gebäuden zeigt.

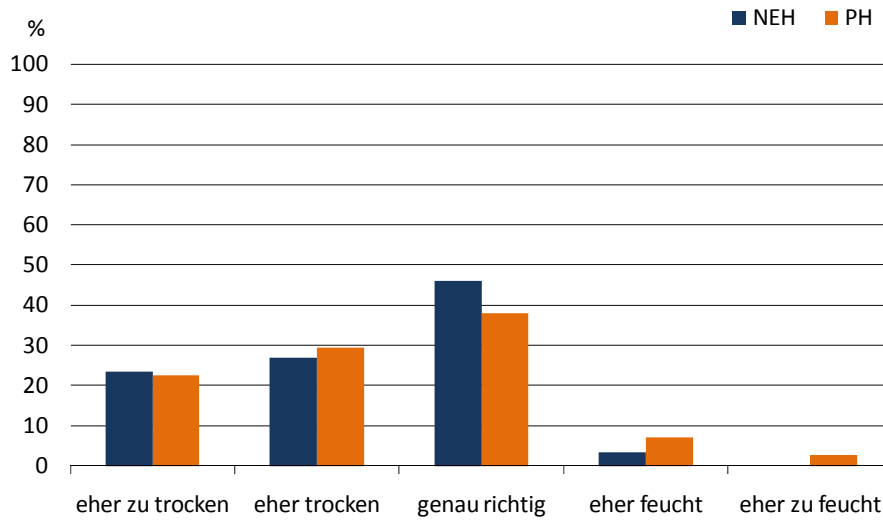


Bild 107 Bei der Frage nach der empfundenen Luftfeuchte zeigt sich trotz unterschiedlicher gemessener Werte kein Unterschied der Gebäude in der Bewertung der Nutzer. Die (wenigen) Angaben „feucht“ bis „zu feucht“ werden sogar eher im PH gemacht.

Bei der Fragestellung, inwiefern die Lage des Apartments innerhalb des Gebäudekomplexes - und damit solare Einträge - Einfluss auf das Temperaturempfinden haben, konnte aus den Antworten kein Zusammenhang hergeleitet werden. Aus der Angabe der Zimmernummer (die abgefragt und von über 93% der Befragten angegeben wurde) kann die Lage und Ausrichtung der Apartments festgestellt werden. Zwischen Ausrichtung und Temperaturempfinden ergab sich jedoch keine nachweisbare Übereinstimmung. Bereiche, in denen aufgrund ihrer Lage ein starker Einfluss der Einstrahlung zu erwarten gewesen wäre, wurden nicht anders bewertet, als Apartments, die größtenteils verschattet sind. Teilweise sind die Ergebnisse sogar entgegengesetzt: Flügel 8 hat eine unverschattete SO- Fassade, bei der die Ergebnisse der Befragung eher zu „kühl“ tendieren, sowie eine NW-Fassade, die nur wenig von solaren Einträgen profitiert – hier waren die Aussagen eher „zu warm“. Mit sechs Nennungen pro Fassade (Anzahl Apartments SO: 32, NW: 40) liegt dabei eine Aussage von 18% der Nutzer vor.

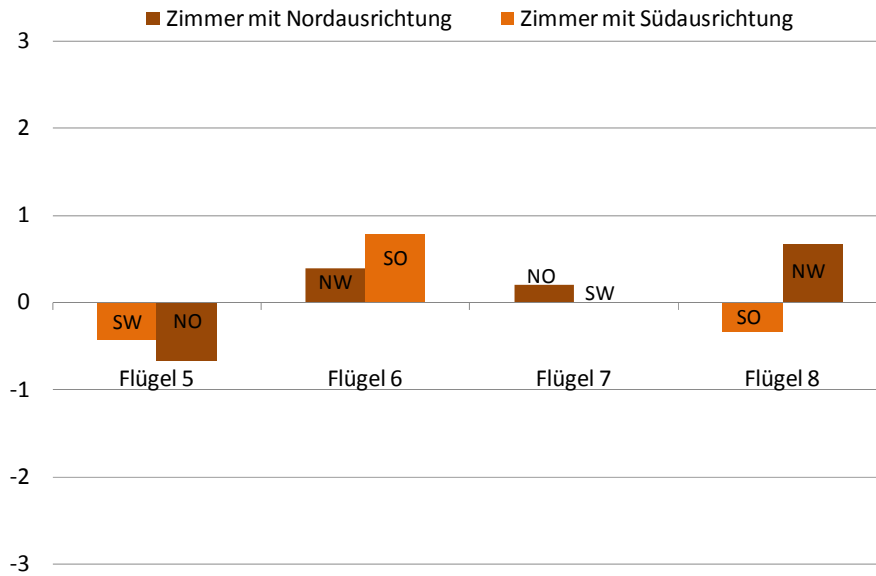


Bild 108 Abhängigkeit des Temperaturempfindens von der Ausrichtung im PH in Anlehnung an die PMV Skala (-3: zu kalt, +3: zu warm). In den sternförmig angeordneten Flügeln kann über die Zimmernummer die Ausrichtung ermittelt werden. Über den jeweiligen Balken ist die Himmelsausrichtung angegeben. Aus den Antworten ergibt sich kein Zusammenhang zwischen solaren Einträgen aufgrund der Lage und Behaglichkeitsempfinden der Bewohner.

Da im PH in den unteren Ebenen durch die größer werdenden Rohrlängen der Lüftungsanlage die Gefahr besteht, dass sie nicht ausreichend mit Wärme über die Lüftung versorgt werden, bzw. die oberen Ebenen zu stark erwärmt werden, wurde die Aussage nach dem momentanen Temperaturempfinden und dem Eindruck der letzten vier Wochen auch nach Ebenen sortiert betrachtet (Bild 109).

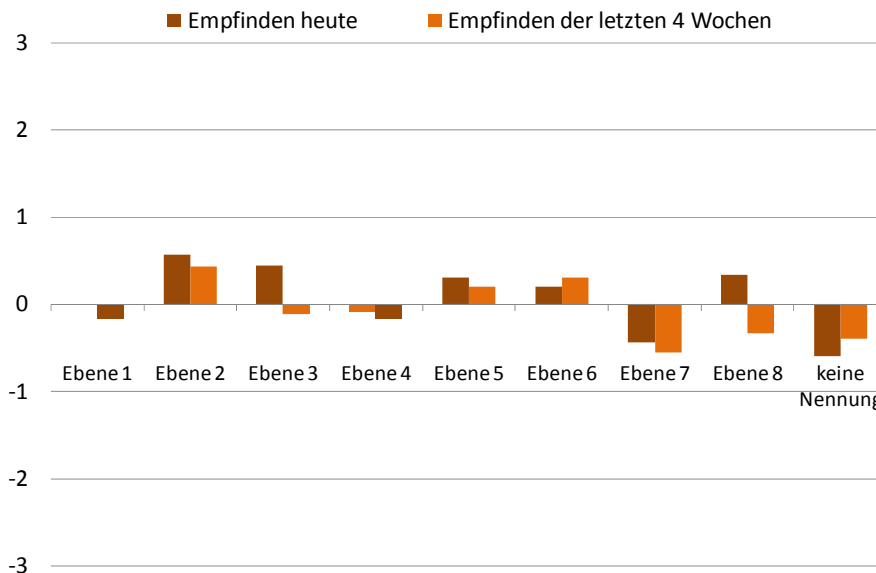


Bild 109 Empfundene Behaglichkeit am Befragungstag und im Rückblick der letzten vier Wochen. Auch hier lässt sich keine eindeutige Tendenz ablesen, wonach bestimmte Ebenen gehäuft als zu kalt oder zu warm empfunden werden.

Im Gegensatz zum NEH gibt es im PH jedoch einen zentralen Unterschied bei den Zimmern – die WG Zimmer an den Flurenden wurden mit Heizkörpern ausgestattet. Vom Konzept wollte man bei den giebel-



seitigen Zimmern Komforteinbußen durch zwei Außenwände vermeiden, es wurden schließlich beide Zimmer mit Heizkörpern ausgestattet (siehe ‚2.2.2 Bauabschnitt Passivhaus‘).

Dieser Unterschied schlägt sich in den Antworten nieder (Bild 110). Hier zeigt sich eine deutliche Tendenz, dass die primär über die Lüftung beheizten Zimmer eher als „kühl“ empfunden werden, als die WG-Zimmer, die über einen eigenen Heizkörper verfügen.

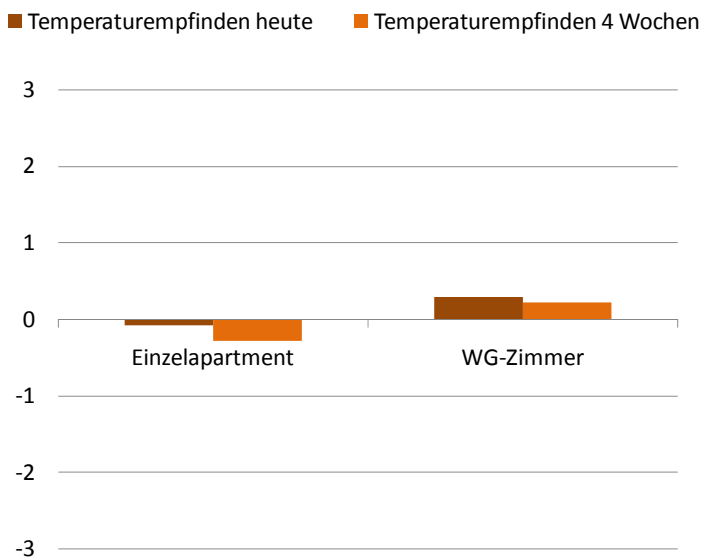


Bild 110 Empfundene Behaglichkeit am Befragungstag und im Rückblick der letzten vier Wochen in Abhängigkeit der Wohnform.

Die WG-Zimmer verfügen im Gegensatz zu den Einzelapartments über Heizkörper im Zimmer. Bewohner der Einzelapartments geben die Temperaturen in der Kälteperiode eher als „kühl“ an, während es in den WG-Zimmern eher „warm“ war.



5.4. Erstellung eines Nutzerinfoblatts

Ergebnisse der Nutzerbefragungen und Rücksprachen, sowohl mit Nutzern als auch mit dem Betreiber der Neuen Burse, haben gezeigt, dass ein großes Potential für einen effizienten Betrieb des Wohnheims in angepasstem Nutzerverhalten liegt.

Vor diesem Hintergrund wurde ein Nutzer- Infoblatt erstellt, das den Bewohnern Aufbau und Funktion ihres Zimmers erklärt und Handlungsempfehlungen gibt.



Bild 111 Vorder- und Rückseite der Nutzerinfo. Neben Informationen zum Zimmer selbst (im Innenteil) werden auf dem Umschlag allgemeine Kontaktdaten und Ansprechpartner im Studium und rund um die Burse genannt.

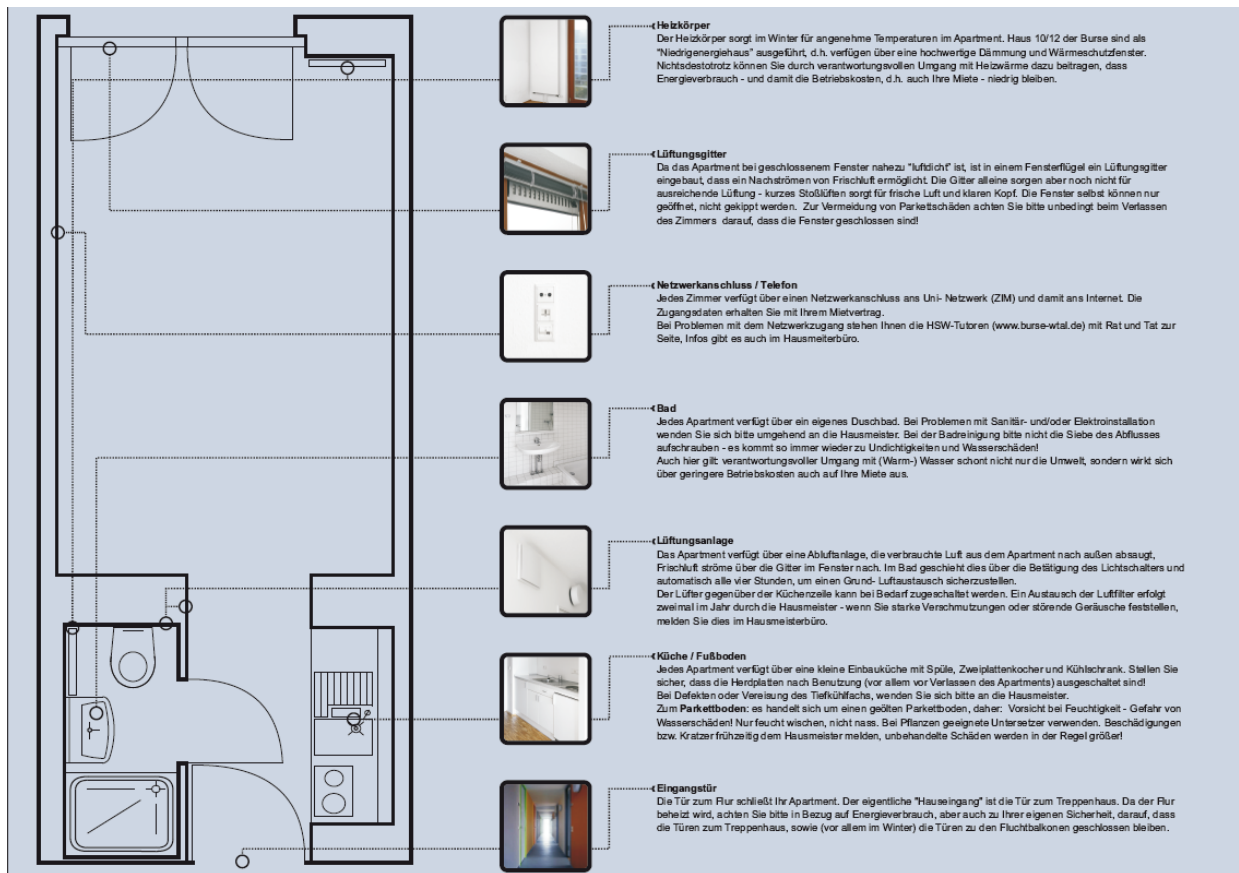


Bild 112 Innenteil der Nutzerinfo für das NEH. Die Nutzer werden mit technik-spezifischen Details wie Lüftung und Heizwärmeversorgung vertraut gemacht, es werden aber auch Informationen zu Details wie Internet- und Telefonanschluss genannt.

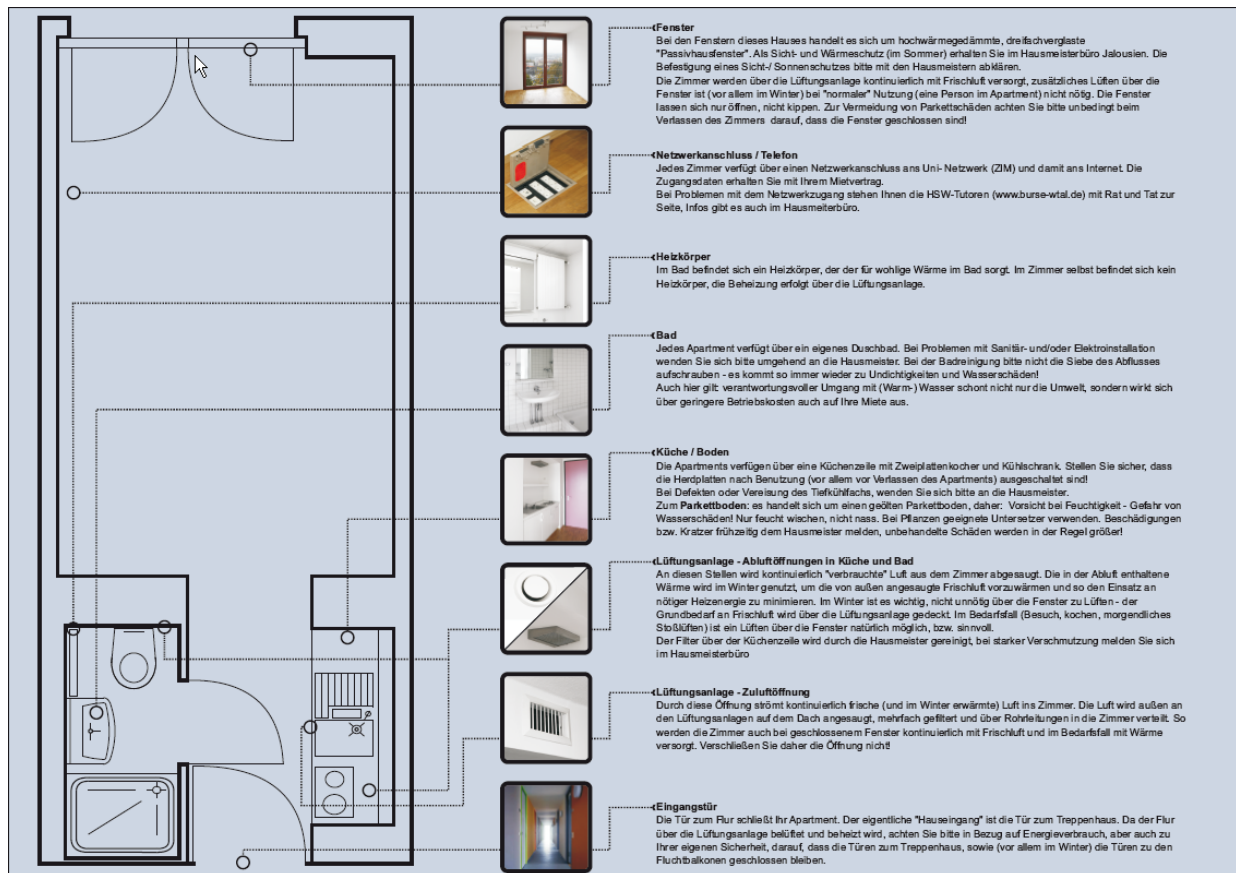


Bild 113 Innenteil der Nutzerinfo für das PH. Hier geht es vor allem darum, den Nutzern die Funktion und Betriebsweise der Lüftungsanlage näherzubringen. Da der Kenntnisstand in Bezug auf die Haustechnik bei den Nutzern in der Regel gering ist, soll über ein gewisses Maß an Aufklärung ein verbesserter Umgang mit dem Gebäude erreicht werden. Im PH betrifft das primär die Einschränkung unnötiger Fensterlüftung, aber auch der allgemeine Appell an sparsamen Umgang mit Ressourcen (z.B. Wasser)

Das Infoblatt wird seit Winter 2008 bei Neueinzug den neuen Nutzern übergeben, bzw. wurde bei den derzeitigen Nutzern verteilt. Inwiefern sich eine Reduktion der Verbrauchsdaten über angepasstes Nutzerverhalten einstellt, kann das Langzeitmonitoring der Neuen Burse zeigen.



6. Ökonomie

Neben der energetischen Zielsetzung der Sanierungsmaßnahmen sollen auch ökonomische Randbedingungen untersucht werden. Das Hochschul-Sozialwerk als Betreiber der Gebäude nimmt dabei als Bauherr eine gewisse Sonderstellung ein, da mit den vermieteten Studentenwohnungen keine Gewinne erwirtschaftet werden.

Die Wohnheime stehen dabei in Konkurrenz zum privaten Wohnungsmarkt. Für einen wirtschaftlichen Betrieb der Wohnanlagen, also eine hohe Auslastung, muss den Studenten ein attraktives Angebot geboten werden. Vorteile der Wohnheime sind in der Regel die räumliche Nähe zur Universität, günstige Mieten und – wie im Fall der Neuen Burse – pauschaler Internetzugang über einen Anschluss an das Netz der Hochschule.

Für die Sanierung der Burse, speziell für den zweiten Bauabschnitt, wurde in einem Gutachten die wirtschaftliche Tragfähigkeit kritisch beurteilt [Diederichs1999]. Durch die umfassende Modernisierung unter Berücksichtigung der starken Steigerung des Wohnkomforts, sowie der weit über die damaligen gesetzlichen Vorschriften hinausgehenden energetischen Zielsetzung konnten jedoch Fördermittel des Landes Nordrhein-Westfalen akquiriert werden, die die Maßnahmen ermöglichten.

6.1. Investitionskosten

In Bild 114 bzw. Tab. 12 sind die Investitionskosten der Kostengruppe 300 (Baukonstruktion) und 400 (Technische Anlagen) gemäß DIN 276 aufgetragen [DIN 276].

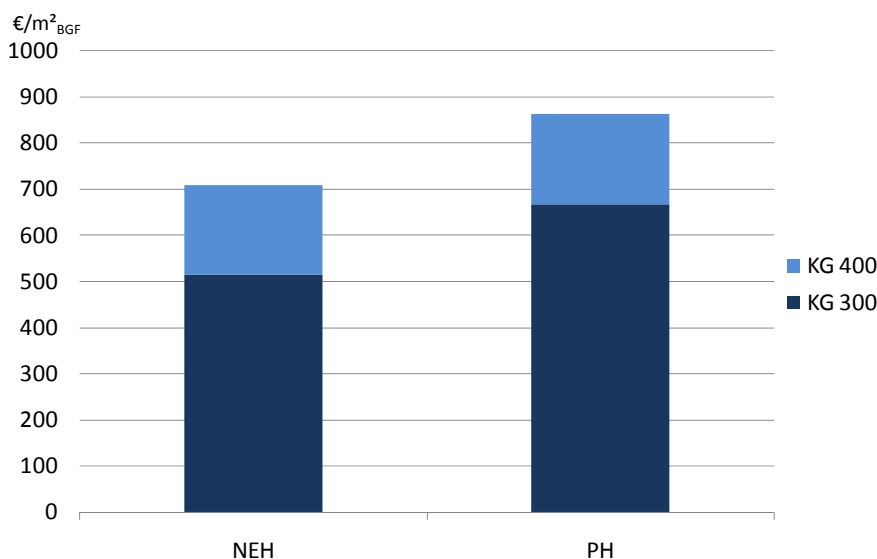


Bild 114 Vergleich der Investitionskosten der Kostengruppen 300 (Baukonstruktion) und 400 (Technische Anlagen) nach DIN 276.



Tab. 12 Investitionskosten der Sanierungsmaßnahmen in den Kostengruppen 300 und 400 gemäß DIN 276

	NEH	PH	
KG 300	514.53	667.91	€/m ² BGF
KG 400	193.72	194.71	€/m ² BGF
Summe	708.26	862.62	€/m ² BGF

Die Gebäude unterscheiden sich vor allem im Bereich der Baukosten, da im PH neben einer aufwändiger gedämmten Fassade auch Fenster mit Dreifachverglasung eingesetzt wurden (siehe auch Abschnitte 2.2.1, bzw. 2.2.2).

Die wesentlichen Unterschiede bei der Durchführung der Sanierung sind in Bild 115, bzw. Tab. 13 im Detail dargestellt.

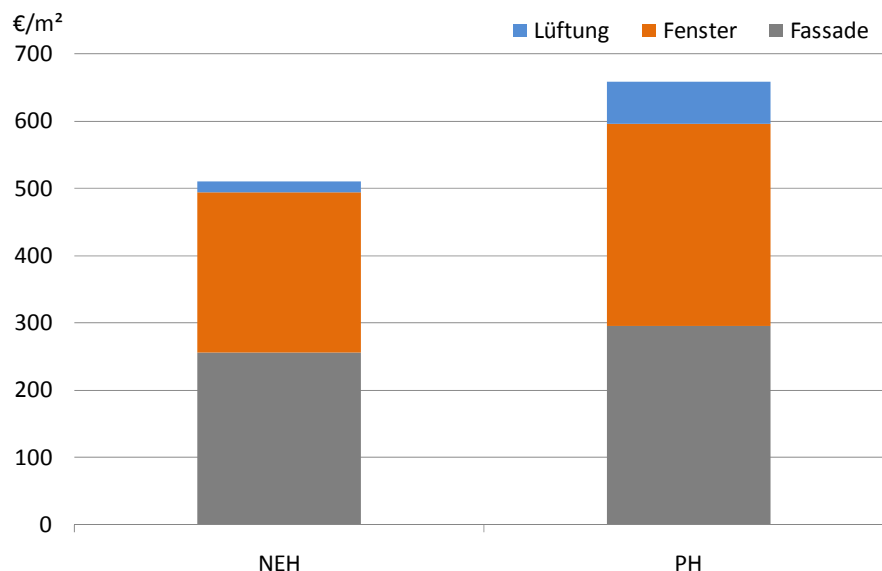


Bild 115 Vergleich der maßgeblich zur Kostendifferenz der Gebäude betragenden Kosten. Die Kosten für Fenster und Fassade beziehen sich jeweils auf die Fassadenfläche, die Kosten für die Lüftungsanlagen wurden auf die BGF bezogen. Vor allem die passivhaustauglichen Fenster sowie die Zu- und Abluftanlage zogen im PH höhere Investitionen nach sich.

Tab. 13 Spezifische Kosten für Fassade, Fenster und Lüftungsanlagen der jeweiligen Bauabschnitte. Der hochwertigere Wärmeschutz im PH zeigt sich in den höheren Kosten der Bauteile.

	NEH	PH	Bezugsfläche
Fassade	256	295	€/m ² Fassadenfläche
Fenster	239	302	€/m ² Fensterfläche
Lüftung:	15	62	€/m ² BGF

6.2. Baunutzungskosten

Eine wichtige Fragestellung bei der Untersuchung der Sanierungsmaßnahmen war, inwieweit der verbesserte Wärmeschutz des PH sich im



Vergleich zum NEH auf die Betriebskosten, oder Baunutzungskosten auswirkt.

Dazu muss gesagt werden, dass der Betreiber in der Ermittlung der Kosten keinen Unterschied zwischen den Gebäuden macht – das Wohnheim wird einheitlich verwaltet, entsprechend werden anfallende Kosten nicht nach Bauabschnitt getrennt. Die Mieten der Gebäude unterscheiden sich ebenfalls nicht. Eine Ermittlung der Baunutzungskosten nach DIN 18960 ist daher schwierig. Verbrauchsabhängige Kosten (Strom, Wärme, Wasser) können nach Bezug aufgeschlüsselt werden, bei anderen Kosten wird die Aufteilung weniger gut möglich, bzw. es fallen für beide Bauabschnitte die gleichen Kosten an (z.B. Winterdienst, Verwaltungskosten, etc.). Vor allem im Bereich Kapitalkosten ist eine Trennung nur unscharf möglich. In Bild 19 ist die Mietkalkulation für ein (unmöbliertes) Einzelapartment der Neuen Bourse dargestellt.

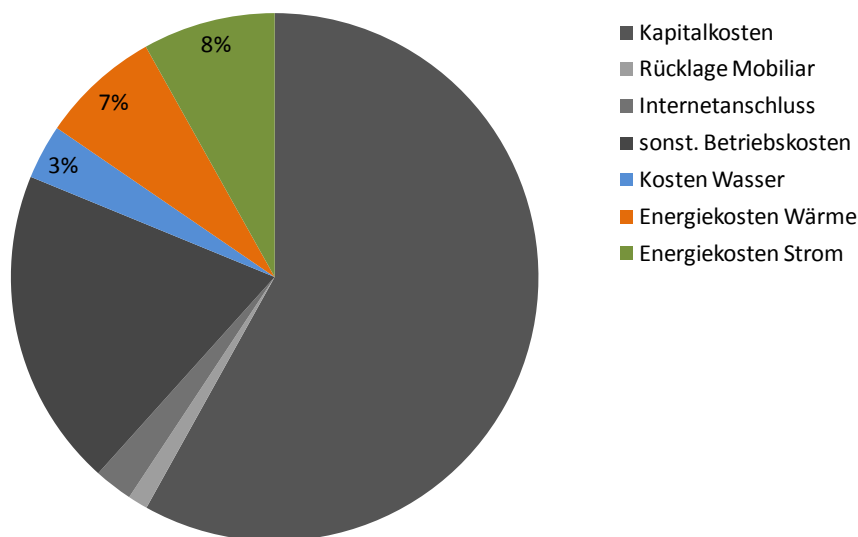


Bild 116 Mietkalkulation der Monatsmieten für die Neue Bourse für das Jahr 2007. Da das HSW keine Gewinne erwirtschaften darf, wird die Miete jedes Jahr neu kalkuliert. Farblich markiert sind die verbrauchsabhängigen Kosten. 82% der Kosten sind nicht direkt vom Nutzerverhalten abhängig. Bei einer Unterteilung der Kosten pro Gebäude ändert sich an diesen Anteilen sehr wenig, da der Strom-, Kalt- und Warmwasseranteil beider Gebäude ähnlich hoch ist.

Eine Aufteilung der Kosten pro Gebäude in Abhängigkeit des Energieverbrauchs ergibt in der monatlichen Betrachtung kaum Unterschiede, da sich der Strom- und Wasserverbrauch wenig unterscheidet. Die Unterschiede im Heizwärmeverbrauch relativieren sich in der Summe durch den hohen Wärmeverbrauch der Trinkwassererwärmung (siehe Verbrauchsdaten in Tab. 5 in Abschnitt ‚4.1.1 Endenergieverbrauch‘). Betrachtet man jedoch die Neue Bourse im Vergleich zum Durchschnitt der anderen Wohnheime des HSW, zeigt sich, dass dort die energieabhängigen Betriebskosten um 230 €/WE,a, oder 30% höher ausfallen (siehe Bild 117).

Umgerechnet auf eine monatliche Miete ergeben sich Mehrkosten von 19 €/Monat pro Wohneinheit. Daraus zeigt sich, dass die geringen



Energiekosten in der Neuen Bourse einen entscheidenden Anteil daran haben, dass den Studenten kostengünstiger Wohnraum zur Verfügung gestellt werden kann

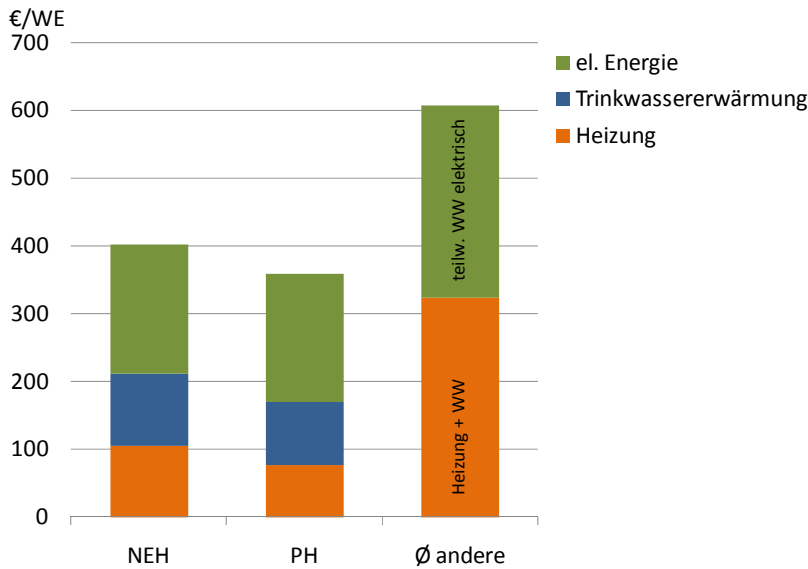


Bild 117 Energiekosten pro Wohneinheit und Jahr, im Jahr 2007. Durch den Kostenunterschied von Strom und Wärme verringert sich der Unterschied zwischen der Neuen Bourse und den anderen Wohnheimen des HSW von 50% bei der mengenmäßigen Betrachtung (siehe Bild 18 in Abschnitt ,4.1 Jahresbilanzen des Energieverbrauchs ') auf 30%. Pro Wohneinheit ergeben sich im Mittel um 230 €/a geringere energiebezogene Betriebskosten.

Sowohl im monetären Vergleich der sanierten Gebäude untereinander, als auch beim Vergleich mit anderen Wohnheimen wird jedoch der Aspekt der Wohnqualität kaum berücksichtigt. Die Attraktivität des Wohnangebots hat direkten Einfluss auf ein Mietausfallrisiko, bzw. Leerstände. Durch die Sanierung wurde die Wohnqualität erheblich gesteigert, eine nahezu 100%ige Auslastung der Neuen Bourse, bzw. Wartelisten auf einen Wohnheimplatz unterstreichen dies. Ein ebenfalls nicht monetär bewertbarer Effekt ist die große Öffentlichkeitswirkung der Sanierung der Neuen Bourse, einerseits durch die hohe architektonische Qualität und die in dem Zusammenhang gewonnenen Preise, aber auch die Signalwirkung durch die hohe Zielsetzung bei der energetischen Qualität der Gebäude. Für den Betreiber, das HSW, der immer auch mit günstigem Wohnraum auf dem privaten Wohnungsmarkt in Wuppertal konkurrieren muss, ebenfalls ein wichtiger Faktor.



7. Literatur und Quellenangaben

amcs	Architektur Contor Müller Schlüter, Hofaue 55, 42103 Wuppertal
Bine2008	Bine Informationsdienst, „Thermische Solaranlagen – Studentenwohnheim“, Bine Projektinfo 06/08, Bonn, 2008
Diederichs1999	C. J. Diederichs, P. Getto, T. Reisbeck, „Entscheidungsvotum für den Verwaltungsausschuss des HSW zur Sanierungsmaßnahme Studentenwohnheim „Burse“, Haus 2“, Bergische Universität Wuppertal, Lehr- und Forschungsgebiet Bauwirtschaft, Wuppertal, 1999
DIN 276	Normausschuss im Bauwesen, DIN 276 „Kosten im Hochbau“, Beuth Verlag, Berlin, Juni 1993
DIN 18960	Normausschuss Bauwesen, DIN 18960 „Nutzungskosten im Hochbau“, Beuth Verlag, Berlin, August 1999
EN15251	Normenausschuss Heiz- und Raumlufttechnik, Normenausschuss Lichttechnik Normenausschuss Maschinenbau, DIN EN 15251, „Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik“, Beuth Verlag, Berlin, August 2007
EN7730	Normenausschuss Ergonomie, DIN EN ISO 7730, „Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD Indexes und der lokalen thermischen Behaglichkeit, Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2003
Feist1999	W. Feist, „Innere Gewinne werden überschätzt“, Sonnenenergie und Wärmetechnik, Ausgabe 1/94, S. 19, Bielefelder Verlag GmbH & Co. KG, Bielefeld, 1994
gemis	Institut für angewandte Ökologie e.V. (Öko-Institut), „Globales Emissionsmodell Integrierter Systeme - GEMIS“, Version 4.4, Darmstadt, 2008
Hoffmann2005	C. Hoffmann, R. Hastings, K. Voss, „Wohnbauten mit geringem Energieverbrauch“, C. F. Müller Verlag, Heidelberg, November 2004
PHD2001	M. Such, „Wärmebedarfsberechnung für den Niedrigenergie und den Passivhausstandard“, Passivhaus Dienstleistung GmbH, Darmstadt, April 2004
PHPP99	Passivhaus Institut, „Passivhaus Projektierungspaket“, Ausgabe 1999, Darmstadt, 1999
Kramp2005	M. Kramp, „Faktoren der Energie und Ökonomie in Sanierungsmaßnahmen an Studentenwohnheimen am Beispiel „Neue Burse““, Masterarbeit, Bergische Universität Wuppertal, Lehrgebiet Bauphysik und Technische Gebäudeausrüstung, Wuppertal, September 2005
UBA2008	U. Fritsche, L. Rausch, „Bestimmung spezifischer Treibhausgas-Emissionsfaktoren für Fernwärme“, Umweltbundesamt (Herausgeber), Dessau-Roßlau, Mai 2008



8. Anhang

- I) Dichtigkeitsmessungen an Lüftungsanlagen des Studentenwohnheimes „Neue Burse“, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, Dezember 2004
- II) Evaluierung eines Niedrigenergie- und Passivhauses in der Sanierung, 3. EnSan Symposium "Raumluftechnik im Bestand", Stuttgart, März 2006
- III) Energie und Ökonomie in der Sanierung - das Studentenwohnheim "Neue Burse", Wuppertal, 10. Internationale Passivhaustagung, Hannover, Mai 2006
- IV) Studentisches Wohnen in Niedrigenergie- und Passivhäusern – Erfahrung aus Bestand und Neubau, 2. Internationales Anwenderforum Energieeffizienz + Bestand, Bad Staffelstein, Februar 2008
- V) Studentisches Wohnen im Passivhaus, Analyse von vier realisierten Studentenwohnheimen, 12. Internationale Passivhaustagung, Nürnberg, April 2008
- VI) Nutzerbefragung, Fragebogen Sommer 2005
- VII) Nutzerbefragung, Fragebogen Winter 2006