

Sanierung von drei kleinen Wohngebäuden in Hofheim



Endbericht Gesamtvorhaben

Autoren

Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt:
M. Großklos, N. Diefenbach, A. Enseling, G. Lohmann, U. Hacke

PlanungsgruppeDrei, Mühlthal:
S. Reuther, C. Weber

Energie & Haus, Darmstadt:
R. Feldmann

Fördermittelgeber des Forschungsprojekts:

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
(über den Projektträger Jülich, PTJ)
und

Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung
Förderkennzeichen 0329750V

Darmstadt, Oktober 2008

Anschriften der Autoren

IWU	Dipl.-Ing. Marc Großklos Dr. Nikolaus Diefenbach Dr. Andreas Enseling Dipl.-Soz. Günter Lohmann Dipl.-Soz. Ulrike Hacke Institut Wohnen und Umwelt GmbH Annastr. 15 64285 Darmstadt
PDREI	Dipl.-Ing. Architekt Stefan Reuther Dipl.-Ing. Architekt Christian Weber planungsgruppeDREI - Reuther, Stärz, Dreibholz Architekten und Ingenieure – Partnerschaft Ober-Ramstädter Str. 96 E 64367 Mühlthal
Energie & Haus	Dipl.-Ing. Rainer Feldmann Energie & Haus Ahastr. 9 64285 Darmstadt

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie und des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung unter dem Förderkennzeichen 0329750V gefördert.
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

IWU-Bestellnummer: 04/08

ISBN 978-3-941140-03-5



9 783941 140035

Institut Wohnen und Umwelt GmbH
Annastraße 15
D-64285 Darmstadt
Tel. 06151/2904-0

E-Mail: info@iwu.de
Internet: www.iwu.de

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Ablauf des Modernisierungsvorhabens	3
2.1	Bestandsbeschreibung	3
2.2	Sanierungsmaßnahmen.....	4
2.2.1	Allgemeine Sanierungsmaßnahmen.....	4
2.2.2	Energetische Modernisierung auf drei unterschiedliche Standards.....	6
2.3	Planungsphasen	9
2.3.1	Bestandsaufnahme	9
2.3.2	Entwurfsplanung	10
2.3.3	Genehmigungsplanung.....	11
2.3.4	Ausführungsplanung.....	11
2.4	Bauphase.....	14
2.5	Haustechnische Anlagen	20
3	Wärmebrücken und Luftdichtheit	28
3.1	Wärmebrücken und Thermografie	28
3.1.1	Berechnung der Wärmebrücken.....	28
3.1.2	Ergebnisse der Thermografie	32
3.2	Luftdichtheit und Blower-Door-Messungen.....	38
3.2.1	Luftdichtheitskonzept	38
3.2.2	Erfahrungen bei der Bauausführung.....	40
3.2.3	Luftdichtheitsmessungen	43
4	Auswertung des Messprogramms.....	47
4.1	Messaufbau	47
4.1.1	Datenqualität.....	50
4.2	Ergebnisse	51
4.2.1	Messwerte der Klimastation.....	51
4.2.2	Verbrauchswerte (Wärme, Warmwasser, Strom)	53
4.2.3	Temperaturen und Raumluftfeuchten	60
4.2.4	Fensteröffnung.....	71
4.2.5	Bilanzierung Heiz- und Anlagentechnik	76
4.2.6	Lüftungsanlagen	79
4.2.7	Betriebsweise der Anlagentechnik und Optimierungsvorschläge.....	87
4.2.8	GEDT-Elemente und Vakuumdämmung	95
5	Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Begleituntersuchung	101
5.1	Methodisches Vorgehen	101
5.2	Ergebnisse der Untersuchungen	103
5.3	Zusammenfassung	113
6	Vergleich der drei Energiesparstandards.....	115
6.1	Energiebilanz	115
6.1.1	Berechnung der Energiebilanz	115
6.1.2	Vergleich mit den Messwerten.....	121
6.1.3	Vergleich mit dem Zustand vor der Modernisierung	137
6.2	Kosten.....	139
6.2.1	Gesamtkosten.....	139
6.2.2	Einzelmaßnahmen.....	142

6.3	Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen	143
6.3.1	Referenzuntersuchungen	143
6.3.2	Methodik der Wirtschaftlichkeitsberechnung	145
6.3.3	Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen	148
6.3.4	Wirtschaftlichkeit aus Sicht des Investors.....	151
6.4	Untersuchung weiterer Maßnahmenpakete.....	156
7	Großelement-Dämmtechnik mit Vakuumdämmung.....	162
7.1	Aufgabenstellung	162
7.2	Aufbau der Elemente	163
7.3	Herstellung.....	167
7.4	Montage	174
7.5	Wärmetechnische Eigenschaften	184
7.5.1	Planwerte.....	184
7.5.2	Tatsächliche Werte unter Berücksichtigung der Bauausführung.....	186
7.5.3	Überblick: Gesamt-U-Werte.....	186
7.6	Ergebnisse des Messprogramms	187
7.7	Kosten.....	188
7.8	Lebenszyklusanalyse.....	189
8	Zusammenfassung.....	192
	Literatur	197
	Anhang I: Wärmebrückenberechnungen.....	199

1 Einleitung

Der vorliegende Bericht behandelt ein umfangreiches Modernisierungsvorhaben, das von der Hofheimer Wohnungsbau GmbH in den Jahren 2005/2006 an drei kleinen fast baugleichen Mehrfamilienhäusern in der Wilhelmstraße in Hofheim am Taunus durchgeführt wurde.

Dieses Vorhaben wurde durch ein Forschungsprojekt begleitet, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über den Projektträger Jülich (PTJ) und vom Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung gefördert und vom Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt, koordiniert wurde.

Die Begleitforschung hatte vor allem zwei inhaltliche Schwerpunkte:

- An den drei Gebäuden wurden unterschiedlich weitgehende Energiesparmaßnahmen realisiert. Dies sind der Neubaustandard nach Energieeinsparverordnung sowie der Energiesparhaus-60- und Energiesparhaus-40-Standard gemäß den von der Förderbank KfW bei der Neubauförderung angewendeten Definitionen. Da es sich um drei fast baugleiche Gebäude handelt, lässt sich ein direkter Vergleich der energetischen Qualitätsniveaus durchführen.
- Es wurde ein neues Konzept für den Fassaden-Wärmeschutz durch großformatige, vorgefertigte Dämmelemente (Großelement-Dämmtechnik – GEDT) in Verbindung mit Vakuumisulationspaneelen (VIP) entwickelt und angewendet.

Die Ergebnisse dieses Teilprojekts wurden ausführlich in einem separaten Endbericht dokumentiert [Mayr et al. 2007]. Im vorliegenden Bericht wird in Kapitel 7 ein Überblick über die wichtigsten Ergebnisse gegeben.

Forschungspartner sind neben dem IWU und dem Bauherrn die Planungsgruppe Drei, Nieder-Ramstadt, das Ingenieurbüro Gathmann Reyer und Teilhaber, Bochum, die Variotec Sandwichelemente GmbH, Neumarkt, das Institut für Fenstertechnik, Rosenheim und das Ingenieurbüro Energie & Haus, Darmstadt. Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über das Projektteam und die Aufgabenverteilung.



Abbildung 1-1: Projektpartner des Forschungsvorhabens

2 Ablauf des Modernisierungsvorhabens

2.1 Bestandsbeschreibung

Die drei freistehenden Gebäude in der Wilhelmstraße in Hofheim am Taunus wurden 1927 baugleich in Massivbauweise erstellt und sind voll unterkellert. In jedem der Häuser befinden sich zwei Wohnungen. Die Organisation der Grundrisse ist - abweichend vom üblichen Standard - mit den Wohnräumen zur Nordseite orientiert. Auf dieser Seite befindet sich auch die Wilhelmstraße, die als Ausfallstraße Hofheims nach Norden genutzt wird.

Die Sanitärbereiche orientieren sich nach Süden, im unsanierten Zustand stellten die kleinen Fenster die einzigen Öffnungen auf der Südfassade dar. Die Erschließung erfolgt über ein zentrales Treppenhaus auf der Westseite. Erdgeschoss und Obergeschoss sind als Wohnungen mit jeweils ca. 77 m² Nettogrundfläche ausgebildet.

Der Dachraum ist teilweise als beheizter Wohnraum, andererseits auch als Abstellfläche und Trockenboden genutzt. Das Dach war als Walmdach in Holzkonstruktion mit Biberschwanzdeckung ausgebildet. Die Sparren sind entsprechend der Nutzung teilweise mit Bimsdielen ausgemauert.

Anfang der 1980er Jahre wurden die Häuser ein erstes Mal saniert. Ihre Fassaden wurden im Erd- und Obergeschoss mit einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS) aus 5 cm starkem Styropor versehen, die alten Holzfenster wurden durch Kunststofffenster ersetzt. Die folgende Tabelle zeigt den Wärmeschutz der Bauteile vor der jetzigen Modernisierung.

Tabelle 2.1-1 Flächen und Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der Gebäudehülle vor der Modernisierung

	Fläche	U-Wert
	m ²	W/(m ² K)
Außenwand	206,7	0,7
Kellerdecke	93,1	1,9
oberste Geschossdecke	93,1	0,8
Fenster	22,3	2,8
Außentür	2,2	4,0

Die Wärmeerzeugung erfolgte je Gebäude zentral über einen im Keller installierten Gas-Wärmeerzeuger (atmosphärischer Kessel), die Warmwasserbereitung zentral über einen direkt beheizten Standspeicher.

Die Beheizung der Wohnflächen wurde über Kompaktheizkörper unter den Fensterflächen gewährleistet, die mit kurzen Anbindungen an die auf Putz verlegten, ungedämmten Steigleitungen angeschlossen waren. Die horizontale Verteilung war unter der Kellerdecke außerhalb der thermischen Gebäudehülle installiert.



Abbildung 2.1-1 Die drei Gebäude in der Wilhelmstraße vor der Modernisierung

2.2 Sanierungsmaßnahmen

Durch ihre Baugleichheit eigneten sich die Mehrfamilienhäuser sehr gut für eine vergleichende vorbildliche Sanierung mit unterschiedlichen energetischen Standards (EnEV-Neubau-Niveau, ESH-60-Niveau und ESH-40-Niveau).

Die vollständige Dämmung der Gebäudehülle und die Optimierung des beheizten Gebäudevolumens waren dabei grundlegend. Die Haustechnik wurde vollständig erneuert, die Wärmeerzeugung für Heizung und Warmwasser zentral in einem Gebäude untergebracht. Dem jeweiligen Energiestandard entsprechend kamen unterschiedliche Lüftungskonzepte zum Einsatz.

2.2.1 Allgemeine Sanierungsmaßnahmen

Die Sanierung erstreckte sich auf den Außen- und Innenbereich der Häuser. Im Außenbereich wurden bei allen drei Gebäuden folgende Maßnahmen verwirklicht:

- Neuerrichtung des Dachstuhl im Zuge der Erweiterung des Wohnraumes durch großzügigen Ausbau des Dachgeschosses mit Gauben nach Norden und Süden
- Wärmedämmung der gesamten Außenhülle (Ost-, Süd- und Westfassade mit WDVS, Nordfassade mit vorgefertigten Fassadenelementen) sowie des Walmdaches und der Kellerdecke
- Erneuerung der Dacheindeckung

- Austausch der Fenster
- Neuerrichtung von vorgestellten Loggien auf der Südseite
- Großzügige Öffnung im Loggienzimmer nach Süden

Im Innenbereich wurden grundsätzlich folgende Maßnahmen ergriffen:

- Einbau einer neuen zentralen Heiz-/Wärmeversorgung für alle drei Gebäude
- Sanierung aller Bäder und der Badsteigleitungen
- Erneuerung der Installation (Abwasser/Wasser/Elektro) in allen Geschossen
- Erneuerung der Elektro-Hauptversorgung sowie der Elektroinstallation in komplett-sanierten Wohnungen
- Erneuerung des Innenausbaus und der Oberflächen

Der Ablauf während der Modernisierung war in den drei Gebäuden unterschiedlich:

Wilhelmstraße 35 (ESH 60):

Die Wohnungen im Erd- und Obergeschoss blieben während der Umbaumaßnahmen bewohnt, das bereits vorher teilweise für Wohnzwecke genutzte Dachgeschoss war für die Dauer der Arbeiten unbewohnt.

Wilhelmstraße 37 (EnEV-Neubau):

Die Wohnung im Erdgeschoss blieb während der Umbaumaßnahmen bewohnt. Obergeschoss und Dachgeschoss waren für die Dauer der Arbeiten unbewohnt.

- Umbau von Obergeschoss und Dachgeschoss zu einer Maisonette-Wohnung
- Umbau der bestehenden Treppe ab Obergeschoss zu einer wohnungsinternen Treppe zum Dachgeschoss
- Abbruch der bestehenden Balkonanlage

Wilhelmstraße 39 (ESH 40):

Beide Wohnungen waren für die Dauer der Arbeiten unbewohnt.

- Errichtung der Heizzentrale für die drei Häuser in der bestehenden Waschküche im Kellergeschoss
- Umbau von Obergeschoss und Dachgeschoss zu einer Maisonette-Wohnung
- Umbau der bestehenden Treppe zu einer wohnungsinternen Treppe zum Dachgeschoss

2.2.2 Energetische Modernisierung auf drei unterschiedliche Standards

An den drei Gebäuden wurden jeweils unterschiedliche energetische Qualitätsniveaus realisiert:

- Wilhelmstraße 37: Neubau-Standard nach Energieeinsparverordnung (EnEV)
- Wilhelmstraße 35: Energiesparhaus 60 (ESH 60)
- Wilhelmstraße 39: Energiesparhaus 40 (ESH 40)

Die Energiesparhäuser sind entsprechend den Förderrichtlinien der KfW für energiesparende Neubauten definiert. Der Primärenergiebedarf darf hier maximal 60 bzw. 40 kWh pro Quadratmeter Gebäudenutzfläche A_N betragen. Darüber hinaus sind - wie bei der EnEV - jeweils Nebenanforderungen für den Wärmeschutz der Gebäudehülle (Kenngröße: spezifischer Transmissionswärmeverlust) zu erfüllen.

Bei den Gebäuden in Hofheim waren angesichts der vorliegenden Gebäudegeometrie¹ die in der folgenden Tabelle genannten Zielwerte einzuhalten.

Tabelle 2.2-1 Gebäudedaten und Zielwerte für den Primärenergiebedarf und den Transmissionswärmeverlust

	Wilhelmstr. 37: EnEV-Neubau	Wilhelmstr. 35: ESH 60	Wilhelmstr. 39: ESH 40
Wohnfläche A_W in m^2	190	182	190
Gebäudenutzfläche A_N nach EnEV in m^2	262	271	273
A/V-Verhältnis in m^{-1}	0,65	0,64	0,64
Primärenergiebedarf q_P in kWh/m^2a bezogen auf A_N	107	60	40
spez. Transmissionswärmeverlust H_T' in W/m^2K bezogen auf die thermische Hüllfläche	0,531	30 % unter EnEV: 0,375	45 % unter EnEV: 0,295

Die angegebenen Werte für die Wohnfläche A_W bzw. die Gebäudenutzfläche A_N nach EnEV und für das A/V-Verhältnis beziehen sich auf den modernisierten Zustand. Dass der Wert der tatsächlichen Wohnfläche im Allgemeinen deutlich niedriger liegt als die aus dem beheizten Gebäudevolumen abgeleitete Gebäudenutzfläche nach EnEV, ist aus verschiedenen Quellen bekannt. Im Allgemeinen gehen wir davon aus, dass zwischen beiden Flächen ein Verhältnis von etwa 0,8 besteht (z. B. [Diefenbach et al. 2006]). Im vorliegenden Fall sind die Abweichungen noch deutlich größer: Das Flächenverhältnis liegt bei etwa 0,7. Als Ursache ist hier das – im Verhältnis zum Wohnbereich – relativ große Treppenhaus zu nennen, das zum beheizten Gebäudevolumen zählt und daher in dem Wert für A_N mit berücksichtigt wird.

Bereits vor dem Start des Forschungsprojekts war durch Bauherrn und Planer die Entscheidung getroffen worden, eine gemeinsame Wärmeversorgung der drei Gebäude über einen im Keller der Wilhelmstraße 39 zu installierenden Holzpellet-Kessel zu realisieren. Es handelt sich hier also um ein kleines Nahwärmesystem. Aus diesem Grund bestand einerseits kein weiterer Spielraum für unterschiedliche Wärmeversorgungskonzepte in den drei Gebäuden, andererseits waren – wegen der Verwendung des erneuerbaren Energieträgers Biomasse - sehr günstige Voraussetzungen für die Einhaltung der Primärenergie-Zielwerte gegeben (siehe Kapitel 6.1).

¹ Die Höhe der Kennwerte ist insbesondere abhängig vom Verhältnis der thermischen Hüllfläche zum Gebäudevolumen (A/V-Verhältnis).

Die drei Gebäude unterscheiden sich vor allem hinsichtlich ihres Wärmeschutzes und Lüftungskonzeptes. Beim Wärmeschutz wurden folgende Maßnahmen ergriffen²:

Außenwanddämmung

- Aufbringen eines neuen Wärmedämmverbundsystems auf der vorhandenen Dämmung.
- Neue Gesamt-Dämmstoffstärken zwischen 9 cm (EnEV) und 25 cm (ESH 40)
- Ausnahme: Dämmung aller drei Straßenfassaden mit dem neuen Verfahren der Großelement-Dämmtechnik (GEDT) mit Vakuumdämmung (vgl. Kapitel 7). Hier bestehen keine Qualitätsunterschiede zwischen den Gebäuden.

Dachdämmung

- Zwischen- und Aufsparrendämmung
- Dämmstoffstärken zwischen 18 cm (EnEV) und 30 cm (ESH 40)

Kellerdeckendämmung

- Dämmstoffstärken zwischen 4 cm (EnEV) und 6 cm (ESH 60, ESH 40)

Fenster

- Fenster mit 2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung und leicht unterschiedlichen U-Werten in den Gebäuden nach EnEV/ESH 60-Standard einerseits und ESH 40-Standard andererseits
- Passivhausfenster mit 3-Scheiben-Verglasung an den Straßenfassaden (GEDT)

Wärmebrücken

- Minimierung der Wärmebrückenwirkung durch optimierte Planung (Näheres siehe Kapitel 3.1.1),

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die erreichten U-Werte der einzelnen Bauteile der thermischen Gebäudehülle.

² siehe auch nähere Angaben in Kapitel 6.2

Tabelle 2.2-2 Bauteilflächen und Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der modernisierten Gebäude**Abkürzungen: AW Außenwand, EG Erdgeschoss, OG Obergeschoss, KG Kellergeschoss, TH Treppenhaus**

	EnEV-Neubau		ESH 60		ESH 40	
	Fläche	U-Wert	Fläche	U-Wert	Fläche	U-Wert
	m ²	W/(m ² K)	m ²	W/(m ² K)	m ²	W/(m ² K)
1 AW	163,1	0,41	160,25	0,166	161,8	0,14
2 AW-TH	0,93	0,678	0,93	0,198	0,93	0,162
3 AW GEDT	56,48	0,19	57,72	0,19	58,21	0,19
4 Gaube Front*	21,94	0,258	12,17	0,213	12,17	0,195
5 Gaube Seite			9,76	0,256	9,76	0,288
6 Walmdach	110,5	0,272	110,5	0,203	111,6	0,162
7 Gaubendach	24,5	0,237	24,5	0,183	24,5	0,183
8 Treppe EG	7,51	2,019	7,51	0,669	7,51	0,453
9 Treppe OG	5,44	1,527	5,44	0,413	5,44	0,281
10 AW-TH Erde	0,74	2,295	0,74	0,2	0,74	0,163
11 Decke über KG	91,97	0,653	94,75	0,653	95,85	0,445
12 Kellerwand** U01/U02	5,01	2,167	5,01	0,364	5,01	0,301
13 Tür Kellerabgang	2,7	2	2,7	1,6	2,7	1,6
14 Kellertreppenwand	1,76	2,416	1,76	0,608	1,76	0,608
15 a Fenster Standard	8,24	1,38	8,24	1,38	8,24	1,16
15 b Fenster Standard	1,11	1,37	1,11	1,37	1,11	1,16
15 c Fenster Standard	6,08	1,38	6,08	1,38	6,1	1,16
16 Fenster WC	1,5	1,39	2,1	1,35	1,54	1,16
17 a Fenster Gaube	4,86	1,35	4,86	1,35	4,86	1,16
17 b Fenster Gaube	5,25	1,32	5,25	1,32	5,25	1,16
18 Fenster Balkon	3,3	1,31	8,1	1,28	8,1	1,16
19 Fenster GEDT	6,08	0,83	6,08	0,83	6,08	0,83
20 Eingangstür	2,17	1,68	2,17	1,68	2,17	1,3
21 Dachausstieg	1,1	1,4	1,1	1,4	1,1	1,4

*bei EnEV-Neubau: alle Gaubenflächen

** Keller zu Treppenhaus

Durch die Wärmeschutzmaßnahmen wurden die folgenden Werte für den spezifischen Transmissionswärmeverlust H_T' erreicht:

EnEV-Neubau: 0,484 W/m²KESH 60: 0,348 W/m²KESH 40: 0,294 W/m²K

In Kapitel 6.1 wird die Energiebilanz der Gebäude noch ausführlich erläutert. Es zeigt sich, dass mit den erreichten Werten von H_T' die Vorgaben für die beiden Standards EnEV-Neubau und Energiesparhaus 60 deutlich unterschritten wurden. Die vorgegebenen Standards wurden hier also nicht 1:1 umgesetzt, sondern es wurde insbesondere vor dem Hintergrund des guten Kosten/Nutzen-Verhältnisses und der hohen Lebensdauer von Wärmeschutzmaßnahmen entschieden, noch etwas bessere Werte zu erreichen. Im Fall des Energiesparhauses 40 erforderte die Einhaltung der noch deutlich ehrgeizigeren Anforderungen an den Wärmeschutz allerdings vor dem Hintergrund der Kostenoptimierung und baupraktischer Gesichtspunkte eine besondere Aufmerksamkeit. Der Zielwert wurde hier genau eingehalten.

Um die Anforderungen an die vorgegebenen energetischen Qualitätsstandards zu erfüllen, wären eigentlich bei der Gebäudelüftung keine besonderen Maßnahmen mehr notwendig gewesen. Es wurde aber entschieden, für den jeweiligen Gebäudestandard typische Lüftungskonzepte umzusetzen:

- EnEV-Neubau: freie Lüftung (Fensterlüftung)
- Energiesparhaus 60: gebäudezentrale Abluftanlage, Zuluftelemente unter der Fensterbank
- Energiesparhaus 40: kontrollierte Wohnungslüftung (Zu- und Abluft) mit Wärmerückgewinnung für jede der beiden Wohnungen

2.3 Planungsphasen

2.3.1 Bestandsaufnahme

Im Zuge der Grundlagenermittlung wurden alle vorhandenen Daten und Informationen zu den Gebäuden gesammelt. Für die drei Gebäude in der Wilhelmstraße lag ein unvollständiger Plansatz der ehemaligen Bauzeichnungen vor. Diese Bauzeichnungen wurden in Verbindung mit Fotos zu einer ersten vorläufigen Bestandsplanung zusammengefasst, die als Grundlage für das Bestandsaufmaß dienten.

Zum Zeitpunkt des Aufmaßes waren alle Wohnungen bewohnt. Die Gebäude wurden jeweils einzeln komplett vermessen, um die Baugleichheit dokumentarisch sicherzustellen. Es zeigten sich nur geringe Abweichungen in Form von nachträglich geschlossenen Zimmertüren und dem teilweisen Ausbau der Dachgeschosse.

Das mittlere Gebäude Wilhelmstraße 37 hatte in den 1970er Jahren einen Balkon im EG und OG erhalten. Wegen der Einbindung der Betonbalkonplatten in das Außenmauerwerk und der damit verbundenen Wärmebrücke stand schon in der Planungsphase der Abbruch des Balkons fest.

Für die Planung der Grundrissgestaltung und des Innenausbaus wurden Wand-, Boden- und Deckenaufbauten sowie der Verlauf der Versorgungsleitungen erfasst. Die Bausubstanz wurde überprüft. Die Massivdecke über dem Kellergeschoss besteht aus Stahlbeton. Die weiteren Decken sind als Holzbalkendecken mit Lehmfüllung und Einschieblingen ausgebildet. Die Geschosstreppen bestehen aus Eichenholz.

Die Dachkonstruktion wurde aufgenommen, die Lage der Mittelpfetten und die jeweiligen Stützen vermessen. Die statische Bemessung zeigte, dass die vorhandene Konstruktion für die geplanten Maßnahmen (Neuerrichtung der großzügigen Dachgauben, Auflast durch zusätzliche Wärmedämmung) wegen der zu geringen Holz-Querschnitte nicht genügend belastbar war. Ein Abriss des bestehenden Daches war aus diesem Grund unausweichlich.

Sämtliche tragenden Innenwände sind als 11,5 cm starke Fachwerkwände mit Ziegelausfachung bzw. 11,5 cm starke Mauerwerkswände ausgebildet, die Ausbauwände sind als 5 cm starke Bimsdielenwände hergestellt.

2.3.2 Entwurfsplanung

Wesentliche Gesichtspunkte der Entwurfsplanung waren die Zusammenlegung von Ober- und Dachgeschoss zu einer Maisonette-Wohnung und die Öffnung des Gebäudes nach Süden zum Garten. Der Erdgeschossgrundriss blieb weitgehend unverändert. Die beiden entstehenden Wohnungen dienen daher unterschiedlichen Ansprüchen an Wohnungsgröße, Zuschnitt und Zimmeranzahl. Bei der Änderung von Grundrissen im bewohnten Zustand muss die Belastung des Mieters berücksichtigt werden: Umfangreiche Maßnahmen, wie z. B. die Verlegung von Sanitärräumen oder ganzen Raumgruppen übersteigt dabei das hinzunehmende Maß des Mieters.

Für alle Wohnungen wurden Wohnraumerweiterungen durch vorgestellte Loggien geplant. Durch eine großflächige Verglasung im Bereich der Südfassade ist die Belichtung der Wohnung jetzt deutlich verbessert.

In den unbewohnten Bereichen wurde die bisherige allgemeine Geschosstreppe ab dem Obergeschoss durch die Stellung einer Trennwand im Treppenaug zur internen Wohnungstreppe umfunktioniert.

Wohn- und Esszimmer wurden durch einen raumhohen Durchgang miteinander verbunden. Dadurch wird der Ausblick in den Garten selbst aus dem nordorientierten Esszimmer möglich (Abbildung 2.3-1).

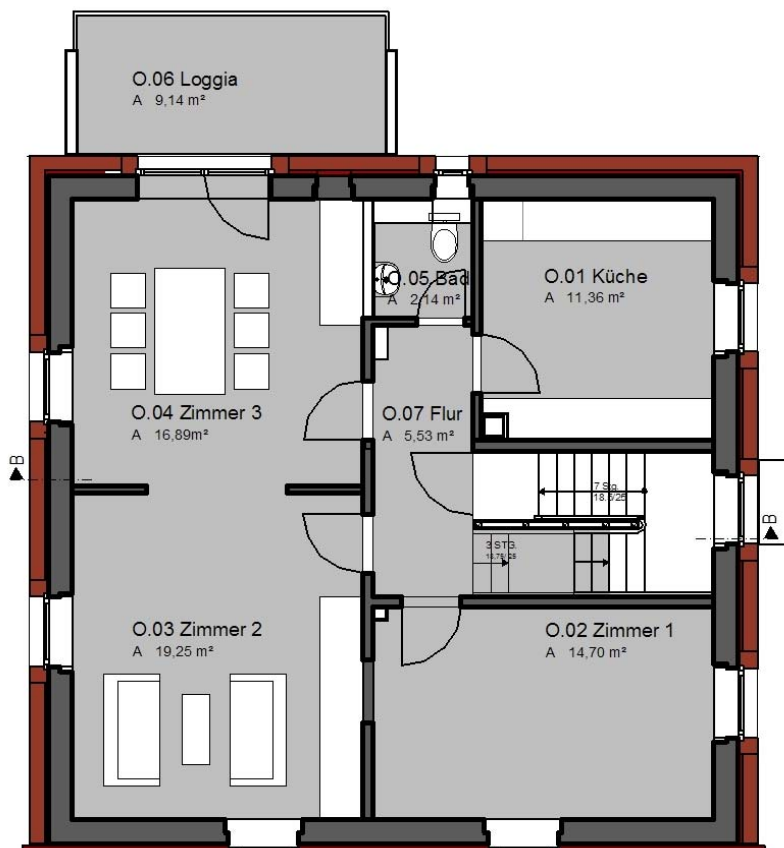


Abbildung 2.3-1 Grundrissänderungen im Obergeschoss ESH 40

Das Dachgeschoss erhielt durch die beiden Gauben einen großzügigen Außenraumbezug. Das Bad orientiert sich nach Norden. Die Abwasserleitungen wurden im ehemaligen Kaminzug verlegt.

Für die Lagerung der Pellets wurden verschiedene Varianten untersucht:

- Innenlagerung in Kellerraum
- Außenlagerung in unterirdischem Lagertank
- Außenlagerung in Silo

Aufgrund der hohen Kosten der beiden letztgenannten Lösungen sowie des begrenzten erforderlichen Lagervolumens wurde die Innenlagerung für die weiteren Planungsschritte favorisiert.

2.3.3 Genehmigungsplanung

Die Genehmigungsplanung bezog sich auf die Baumaßnahmen, die mit der energetischen Sanierung (Teilprojekt 1) in Verbindung standen. Die Errichtung der straßenseitigen Fassade (Teilprojekt 2) wurde in einem gesonderten Genehmigungsverfahren behandelt.

Durch die Neuerrichtung der Balkone und der Gauben sowie die Fülle der Baumaßnahmen war eine Baugenehmigung erforderlich. In Abstimmung mit dem Bauamt der Stadt Hofheim wurde die Maximalbreite für die Gauben festgelegt.

Für den Einbau der Pelletfeuerung mit Abgasableitung erfolgte die Abstimmung mit dem zuständigen Schornsteinfegermeister. Ferner wurden die Unterlagen für eine Landesförderung der Pelletfeuerung erarbeitet.

2.3.4 Ausführungsplanung

Ein Schwerpunkt der Ausführungsplanung war die Entwicklung von einfachen Konstruktionsprinzipien, die die spätere Ausführung der unterschiedlichen Sanierungsmaßnahmen vereinfachten. Im Einzelnen wurden Prinzipien zu folgenden Details entwickelt:

- Fenster
- Lüftung
- Verschattung
- Dachstuhl
- Gaube
- Dachdeckung

Die Planung und Ausführung der Gebäudetechnik ist in Abschnitt 2.5 separat dargestellt.

Fenster:

Für alle drei Gebäude wurden Fenster mit 2-Scheiben-Wärmeschutz-Verglasung ausgewählt. Die Fenster wurden grundsätzlich vor der Althaus-Fassade montiert. Diese Montage ist energetisch am günstigsten, da sie nahezu wärmebrückenfrei erfolgt. Das bereits vorhandene Wärmedämmverbundsystem musste im Anschlagbereich der Fenster entfernt werden. Die Abdichtung der Fenster erfolgte auf dem verputzten Mauerwerk. Aus dieser Montageart ergibt sich die Forderung nach einer Mindeststärke des Wärmedämmverbundsystems, damit der äußere Putzanschluss fachgerecht ausgeführt werden kann.

Lüftung:

Die drei verwirklichten Energie-Standards sind eng mit dem Lüftungskonzept verbunden. Es wurden drei den energetischen Standards angepasste Lüftungskonzepte verwirklicht (nähere Beschreibung siehe Kapitel.2.5):

ENEV-Neubau-Standard:

Das Haus erhielt keine Lüftungsanlage, es wird konventionell über die Fenster gelüftet (freie Lüftung).

KFW-60-Standard:

Das Haus wurde mit einer gebäudezentralen Abluftanlage ausgestattet, hierdurch wird eine Fensterlüftung zur Frischluftversorgung und Abfuhr von Feuchte und Schadstoffen überflüssig. Die Abluft wird in Bad/WC und Küche über ein Leitungssystem abgesaugt und durch die Kelleraußenwand ins Freie geblasen. Die Frischluft wird über Fensterbanklüfter in den Wohnräumen zugeführt. Als zusätzliche Zuluftelemente sind in den Fenstern der Wohnräume Falzlüfter angebracht.

KFW-40-Standard:

In diesem Haus wurde jede Wohnung mit einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ausgestattet. Die Luft wird in Bad/WC und Küche abgesaugt, die Frischluft wird über einen Wärmetauscher vorgewärmt und den Wohnräumen zugeführt. Die Verteilung der Zuluft erfolgt in der abgehängten Decke im Flur. Die zentrale Betriebstechnik der Lüftungsanlage ist wohnungsweise in der Küche installiert, so dass eine bedarfsgerechte Regelung durch den Mieter erfolgen kann.

Verdunklung:

Die Verdunklung erfolgt durch Vorbaurollläden. Der Wärmebrückeneffekt wurde damit in Verbindung mit der Montage der Fenster vor der Außenwand weitgehend minimiert, da sich der Rollladen vor der Dämmebene befindet. Durch die unterschiedlichen Dämmstärken der Außenwand werden die Rollladenkästen teilweise überdämmt, wodurch sich unterschiedliche Erscheinungsformen des Rollladen-/Fensterdetails ergeben. An den Nordfenstern (GEDT-Fassade) erfolgt die Verdunklung durch innen liegende Rollos.

Dachstuhl:

Durch die drei Energiestandards wurden unterschiedliche Dämmstärken im Dach notwendig. Das Dach als Holzkonstruktion ist ein wärmetechnisch inhomogenes Bauteil. Der Sparren als Vollholzquerschnitt verhält sich energetisch schlechter als eine konventionelle

Wärmedämmung. Die aufgetragene Aufsparrendämmung entschärft diesen Effekt durch eine Überdämmung der Vollholzquerschnitte der Sparren (Abbildung 2.3-2).

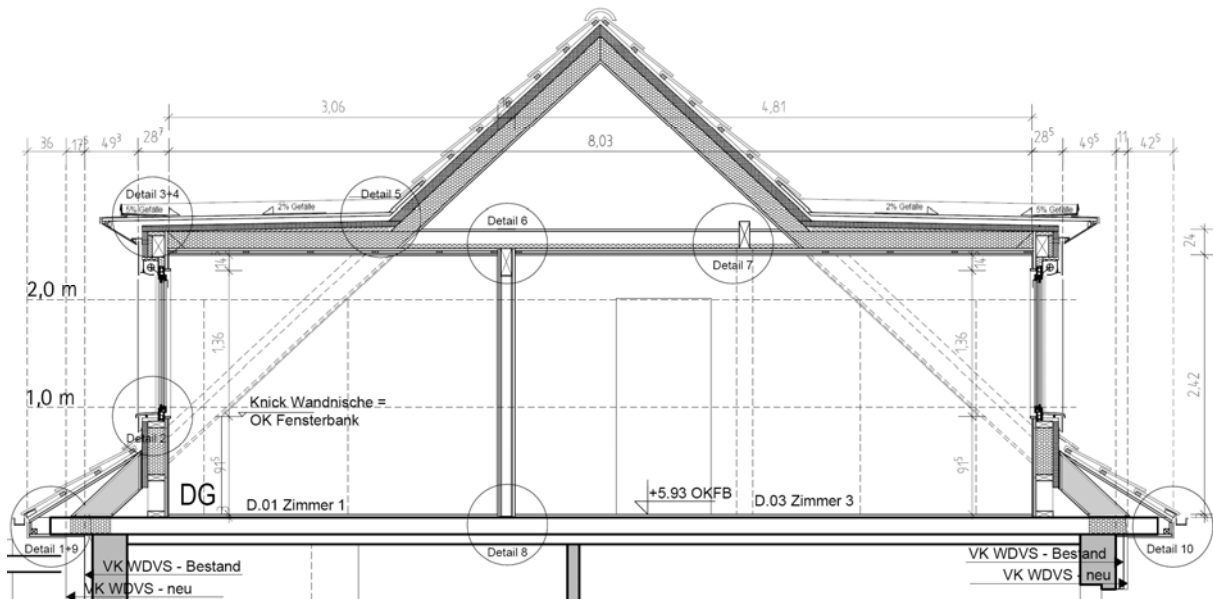


Abbildung 2.3-2 Aufbau Dachgeschoss am Beispiel ESH 60

Alle drei Häuser wurden konstruktiv mit einem identischen Dachstuhl ausgebildet. Die Maximallasten wurden aus dem am besten gedämmten Dachaufbau ermittelt. Die Haupttragkonstruktion besteht aus zwei massiven Mittelpfetten, die auf schrägen Stützen die Last aus Gaubenbalken und Gratsparren in die östliche und westliche Außenwand leiten. Dies hat den Vorteil, die Lasten aus dem Dach in die tragenden Wände im Obergeschoss zu leiten, ohne den Dachgeschossgrundriss durch Stützen zu stören. Die Zugkräfte aus dem horizontalen Schub werden über die vorhandenen Deckenbalken aufgenommen. Zwischen den Sparren wurde mit Mineralwolle WL035 gedämmt. Die Aufsparrendämmung WL050 wurde dem jeweiligen Energiestandard entsprechend mit einer Dicke von 2 - 14 cm eingebaut.

Gaube:

Durch die großen Gauben auf der Nord- und Südseite wurde der Dachraum erheblich aufgewertet. Großflächige Verglasungen belichten den Dachwohnraum. Entsprechend dem Dachstuhl wurde die Konstruktion bei allen drei Gauben gleich ausgeführt. Die Dämmunterschiede erfolgten durch die Aufsparrendämmung.

Dachdeckung:

Das äußere Erscheinungsbild der ehemaligen Dächer und insbesondere die Dachform sollte erhalten bleiben. Dadurch wurden auch die neuen Walmdächer mit Aufschieblingen ausgebildet. Durch die unterschiedlichen Stärken der Aufsparrendämmung ergeben sich unterschiedliche Außenabmessungen des Daches. Durch die entsprechende Wahl der Dachziegel und Koordinierung von Deckmaß und Dachüberstand kann eine umlaufende einheitliche Dachform bei allen drei Häusern erzielt werden.

Die Planung und vor allem die Anforderungen an die Bauausführung wurden in Leistungsverzeichnissen detailliert beschrieben, um die ausführenden Betriebe frühzeitig auf die Besonderheit der Bauaufgabe vorzubereiten.

Für die Bauphase wurden Baustelleninformationstage durchgeführt, die Interessierten einen Einblick in die Themenfelder einer vorbildlichen Energetischen Sanierung und in die Baumaßnahme im Allgemeinen geben konnten.

2.4 Bauphase

Vor Baubeginn wurde die Baustelleneinrichtung mit der Verkehrsbehörde der Stadt Hofheim abgestimmt. Da die Häuser direkt am einseitigen Gehweg stehen und die Wilhelmstraße als Einbahnstraße relativ schmal ist, wurden der Gehweg und ein Teilbereich der Fahrbahn für die Baustelleneinrichtung und Lagerung gesperrt. Der Gehweg wurde temporär, mit zweireihiger Anordnung von Bauzäunen geschützt, auf die Straße verlegt und der Straßenraum bis auf zulässige Mindestbreite verringert.

Mit den Umbauarbeiten wurde in der Wilhelmstraße 39 begonnen. Das Dachgeschoss wurde bis auf die massiven tragenden Treppenhauswände abgebrochen. Zusammen mit dem Statiker wurden Teile des Dielenbodens im Dachgeschoss geöffnet, um die Tragfähigkeit der bestehenden Deckenbalken vor Aufstellung des neuen Dachstuhls und der Gaubenwände zu überprüfen. Die vorhandenen Deckenbalken (Querschnitt 16/18) liegen parallel zur Wilhelmstraße und verlaufen durchgehend über die gesamte Hausbreite. Sie sind als Zweifeldträger mit einem Mittelaufleger im Bereich der 11,5 cm starken Mittelwand (Holz-Fachwerk mit Ziegelausfachung) ausgebildet. Die Bemessung ist für den Umbau und die neue Nutzung des Dachgeschosses ausreichend bemessen. Zusätzlich konnten hier die Gaubenwände ohne zusätzliche Unterstützung aufgelegt werden.



Abbildung 2.4-1 Errichtung des neuen Dachstuhls



Abbildung 2.4-2 Neue Dachgauben

Nachdem die Bäder entkernt und die Deckenöffnungen für die Steigleitungen durch die Rohbaufirma hergestellt waren, wurde die Heizungsrohrinstallation durchgeführt. Die bestehende Installation wurde komplett erneuert. Alle Hauptleitungen (Heizung, Trinkwasser, Abwasser) wurden im neuen Bad-Installationsschacht zusammengeführt. Hierbei war die Lage der Deckenbalken bestimmend für die Schachtbreite, da eine Schwächung der Balken zur Verlegung der Fallleitungen vermieden wurde. Innerhalb der Geschosse erfolgte die Heizungsverteilung in den Sockelleisten.

Die vorhandenen Fenster wurden in einem Arbeitsgang demontiert und durch neue Fenster mit Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung ersetzt.



Abbildung 2.4-3 Details beim Fenstereinbau: links: das alte WDVS ist um das Fenster herum ausgeschnitten, so dass dieses direkt auf der Bestandswand befestigt werden kann rechts: Die Lücke in der Dämmung ist bis zum Vorbaurollladen geschlossen

Auf der Südseite wurden als Zugang zu den vorgestellten Loggien und zur Verbesserung der Belichtungssituation große Wanddurchbrüche hergestellt. Dabei zeigte sich, dass das Außenmauerwerk entgegen vorheriger Annahmen zweischalig ausgebildet ist. Die Wandstärke wird nicht durch ein 30 cm starkes monolithisches Mauerwerk gebildet, sondern durch zwei tragende 11,5er Wände mit dazwischen liegender Luftschicht. Weitere Untersuchungen klärten die Konstruktion und den Umfang dieser signifikanten Änderung:

Die zweischaligen Außenwände beginnen auf der massiven Kellerdecke. Innenschale und Außenschale sind durch 30 cm lange Bindersteine punktuell miteinander verbunden. Auf Basis der Untersuchungen, die im Bereich der neuen Fensterdurchbrüche durchgeführt wurden, liegt diese Durchbindung bei ca. 4 - 5 Steinen je Quadratmeter. Im Deckenbereich über dem EG sind beide Schalen durch eine Binderlage miteinander verbunden. Das vorgefundene Steinformat ist Normalformat ($b \times h \times l = 11,5 \times 7,2 \times 24 \text{ cm}$). Der Mörtel neigt zur Sandung.

Die Deckenbalken liegen auf der kompletten Innenschale auf und sind somit im Bereich des Deckenaufagers mit dem Luftzwischenraum der beiden Mauerschalen verbunden.

Die Zweischaligkeit brachte Besonderheiten mit sich, die das Sanierungsvorhaben erschwerten:

- Die Lastabtragung verhält sich anders als in einem monolithischen Mauerwerk (siehe auch [Mayr et al. 2007])
- Das nachträgliche Einführen der Elektroinstallationen musste überdacht und in Außenwänden weitgehend vermieden bzw. sehr sorgfältig ausgeführt werden. Horizontale Schlitze in der Innenschale waren in jedem Fall zu vermeiden, da sie die Tragfähigkeit herabsetzen. Steck- und Schalterdosen wurden komplett eingegipst, um Öffnungen zwischen Innenraum und Luftzwischenraum zu vermeiden.
- Öffnungen in der Innenschale bzw. Außenschale sind durch die Luftschicht miteinander verbunden, d. h. jede Undichtigkeit in der äußeren Hüllfläche macht sich über die gesamte Außenwand bemerkbar
- Die Luftschicht ist über beide Geschosse trotz Binderlage miteinander verbunden. Temperaturdifferenzen in der Luftschicht führen zu Luftzirkulation im Zwischenraum, die auch Feuchte transportieren kann. Da man die Undichtigkeiten in den vorhandenen Wänden nur schwer lokalisieren kann, musste die luftdichte Ebene außen umso sorgfältiger ausgeführt werden. Bei dieser Konstruktion besteht keine nachvollziehbare Möglichkeit, die Undichten räumlich einzugrenzen.



Abbildung 2.4-4 Altbauwände mit zweischaligem Mauerwerk

Nach Ablösen der alten Wandbeläge zeigte sich darüber hinaus der schlechte Zustand der Innenputzflächen. Der Bestandputz wies in weiten Teilen schadhafte Stellen auf und neigte zu Sandung. Im Türenbereich mussten sämtliche Leibungen mit Gewebe überspannt und verputzt werden.

Durch die einzuhaltenden Trocknungszeiten ergaben sich wesentliche zeitliche Verschiebungen: In den unbewohnten Bereichen war es möglich, nicht nachträglich verputzte Wände und schnell abtrocknende Bereiche zeitlich früher zu bearbeiten. In den bewohnten Bereichen mussten die Arbeiten nacheinander und raumweise erfolgen.

Unter den Bodenbelägen waren zu einem früheren Zeitpunkt Spanplatten als zusätzliche Tragschichten eingebaut worden. Die darunter liegenden Dielen waren mit Spachtelmasse und Anstrich versehen, eigneten sich aber gut zur Aufarbeitung. Daher wurde die Planung während der Bauzeit an diesen Umstand angepasst und eine Aufarbeitung des Dielenbodens in allen Geschossen der drei Häuser durchgeführt, in denen es möglich war.

Mit dreiwöchigem Versatz starteten die Sanierungsarbeiten im Nachbarhaus, Wilhelmstraße 37. Der Zeitversatz ergab sich aus der kalkulierten Montagedauer eines Daches. Durch die notwendigen Voruntersuchungen konnte dieser Zeitrahmen nicht eingehalten werden. Eine zeitliche Verschiebung des gesamten Bauablaufs wurde dadurch notwendig. Die enge zeitliche Abstimmung der verschiedenen Ausbaugewerke war erforderlich, um die Beeinträchtigung der Mieter möglichst gering zu halten.

Einer intensiven Koordination bedurfte vor allem die Sanierung der Mieterbäder. Als Sanierungsdauer wurden drei Wochen angesetzt, die nach anfänglicher Überschreitung bei der Sanierung des letzten Bades eingehalten wurde. Für den Zeitraum stand den Mietern ein Badcontainer im Garten zur Verfügung.

Nach Fertigstellung aller Dach- und Gaubenarbeiten wurden die Häuser mit dem Wärmedämmverbundsystem (WDVS) versehen. Die Dämmung der bereits mit einem alten

WDVS versehenen Gebäude stellte sich als problemlos heraus. Die Verdübelung der neuen Dämmschicht erfolgte durch das alte WDVS hindurch in das Mauerwerk. Da sich die Fertigstellung der GEDT-Elemente auf den Straßenfassaden nicht zeitgleich mit den allgemeinen Maßnahmen terminieren ließ, wurde am Anschluss an die Nordfassade eine schmale Arbeitsfuge erstellt. Diese ermöglicht den nachträglichen Anschluss der vorelementierten Nordfassade und hebt diese gestalterisch von der Putzfassade ab.



Abbildung 2.4-5 Montage des Wärmedämmverbundsystems beim Energiesparhaus 40, links: Gesamtansicht, rechts: 20 cm neues auf 5 cm altem WDVS

Die Heizzentrale wurde im Keller der Wilhelmstraße 39 errichtet. Hierfür wurden ein Raum für die Holzpellet-Lagerung und ein Großteil der ehemaligen Waschküche benötigt. Das trichterförmige Holzpellet-Lager wird über Einblasstutzen von außen befüllt. Über eine Förderschnecke werden die Pellets aus dem Lager entnommen und mit einem Sauggebläse zum Heizkessel transportiert. Der Heizkreislauf der drei Gebäude verfügt über zwei Pufferspeicher. Über eine Nahwärmeleitung werden alle drei Gebäude mit Wärme versorgt. Entsprechend dem Bauablauf wurde die Bestands-Gebäudeheizungsanlage stillgelegt und ausgebaut, die Warmwasserversorgung der bewohnten Wohnungen erfolgte provisorisch über Elektro-Durchlauferhitzer (Näheres siehe Kapitel 2.5).

Bei der Dämmung der Kellerdecke zeigte sich, dass diese Arbeiten auch mit einem anpassungsfähigen Dämmstoff (Expandierter Polystyrol-Hartschaum, EPS) schwierig auszuführen waren. Es bedurfte einer engen Abstimmung zwischen Bauleitung und ausführender Firma, um Detaillösungen an schwierigen Installationspunkten zu verwirklichen. Wenn möglich, sollte die Installation an der Decke nach der Dämmmaßnahme erfolgen, um kleinteilige Dämmflächen an schwer zugänglichen Stellen zu vermeiden.



Abbildung 2.4-6 Dämmung der Kellerdecke und Befestigung mit Dübeln (während der Arbeiten)



Abbildung 2.4-7 Ansicht der fertig gedämmten und gespachtelten Kellerdecke; man erkennt die beengte räumliche Situation

Ein gemeinsames Ziel der Bauleitung und der Projektbegleitung war es, die verschiedenen Handwerker bereits frühzeitig mit einzubinden und in die Besonderheiten einer ehrgeizigen energetischen Modernisierung einzuweisen (Sorgfalt bei Anschlussdetails, Luftdichtheit und Vermeidung von Wärmebrücken, Abstimmung mit anderen Gewerken und mit der Bauleitung). Bereits bei der Ausschreibung war darauf geachtet worden, auf die Besonderheiten dieses Sanierungsvorhabens hinzuweisen und projektbegleitende Maßnahmen (Qualitätskontrollen, Blower-Door-Messung) anzukündigen, so dass sich die Anbieter darauf einstellen konnten. Die Kompetenz bzw. Erfahrungen der Anbieter im Hinblick auf Energiesparmaßnahmen wurden bei der Vergabe berücksichtigt. Während des Bauprozesses fand eine entsprechende Anleitung der Ausführenden statt.

Kommunikationsprobleme, wie sie für umfangreiche Bauvorhaben typisch sind, konnten dennoch auch in diesem Modernisierungsvorhaben nicht vollständig vermieden werden. Die Gesprächspartner bei der Vergabe und die Verantwortlichen auf der Baustelle waren vielfach nicht die gleichen. Auch der häufige Wechsel der auf der Baustelle eingesetzten Personen verursachte Abstimmungsprobleme.

Um die Besonderheiten des ehrgeizigen Modernisierungsvorhabens einer breiteren Fachöffentlichkeit und zwar insbesondere Architekten, Fachplanern und Handwerkern vorzustellen, wurden zwei „Baustellen-Informationstage“ durchgeführt (im September 2005 und im November 2006). Dabei wurden in einem in Nachbarschaft der Gebäude errichteten „Festzelt“ durch die Projektbeteiligten Fachvorträge gehalten und parallel dazu Führungen über die Baustelle bzw. – beim zweiten Termin – durch die fertigen Gebäude durchgeführt. Die Veranstaltungen hatten den Status von Weiterbildungsmaßnahmen der Architekten- und Ingenieurkammer Hessen und stießen auf eine große Resonanz (z. B. ca. 100 Teilnehmer beim zweiten Baustellen-Informationstag).

Insgesamt belegt der Ablauf der Sanierungsarbeiten die Möglichkeit für eine umfassende energetische Sanierung im bewohnten Zustand. Die damit verbundenen Anforderungen sind eine aufwändige aber zu lösende Aufgabe. Die unvorhersehbaren Faktoren bei einer umfassenden Sanierung im Bereich der Außenhülle und innerhalb der Wohnungen machen allerdings eine enge Zusammenarbeit von Planern, Wohnungsbauunternehmen, ausführenden Handwerkern und den Mietern notwendig.

Bei den durchgeführten Arbeiten in den vermieteten Wohnungen muss berücksichtigt werden, dass nur ein Teil energetisch begründet war (Fenster austausch, Montage Abluftanlage im ESH 60). Umfangreicheren Arbeiten waren auch wegen Baderneuerung und Neuverputzung des Treppenhauses erforderlich, die die Mieter in höherem Maß belasten. Der Sanierungsablauf wird von allen Beteiligten insgesamt als positiv bewertet. Aus Mietersicht zeigen dies insbesondere die Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung (siehe Kapitel 5).



Abbildung 2.4-8 Südfassade des Gebäudes im EnEV-Neubau-Standard nach der Modernisierung

2.5 Haustechnische Anlagen

Die Planung und Ausführung der haustechnischen Anlagen, insbesondere der Wärmeversorgung und Lüftung, sind im Folgenden noch einmal im Detail dargestellt.

Zentrale Wärmeerzeugung

Für die drei Gebäude wurde eine zentrale Wärmeerzeugung konzipiert. Diese wurde in dem endständigen Gebäude (ESH 40) installiert, die beiden nebenliegenden Gebäude (ESH 60 + EnEV-Gebäude) werden über kurze erdverlegte Nahwärmeleitungen bzw. Kellerleitungen versorgt.



Abbildung 2.5-1 Links: Nahwärmedurchführung in den Gebäudekeller, Mitte: Die Nahwärmeleitung im fertigen Zustand (im Vordergrund Teile der Abluftanlage), rechts: Antrieb der Pelletförderschnecke mit Saugrohranschluss

Als Wärmeerzeuger wurde ein Pelletkessel mit einer Nennleistung von 35 kW installiert, die Brennstofflagerung erfolgt in dem nebenliegenden Kellerraum. Aufgrund des Mieter-Waschmaschinenbereiches zwischen Pelletlager und Kessel erfolgt die Pelletförderung über Förderschnecke und Saugförderung.

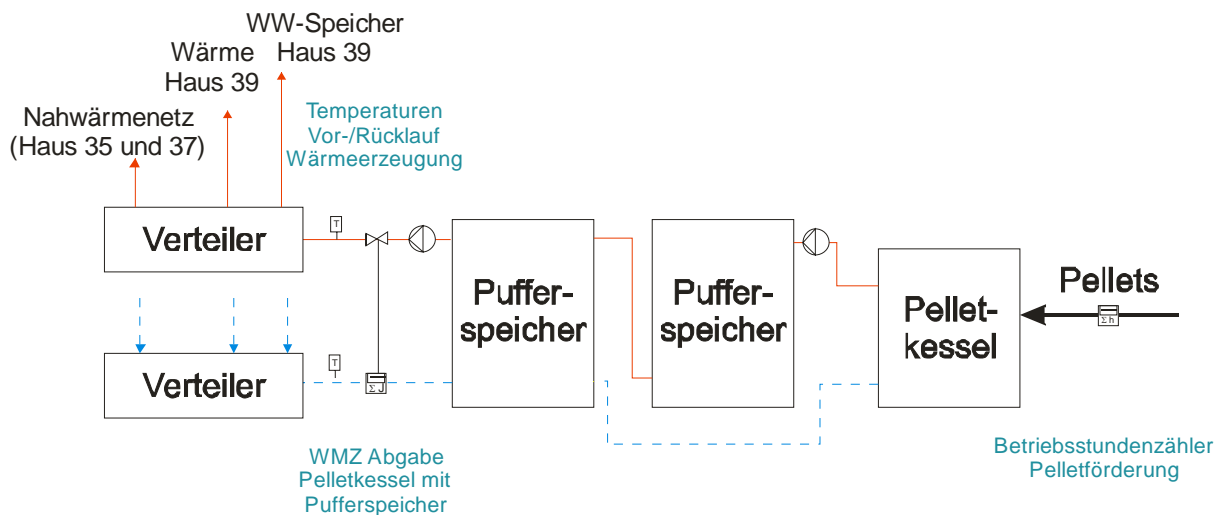


Abbildung 2.5-2 Schema der Wärmeerzeugung im Heizraum



Abbildung 2.5-3 Verteilung der Wärme im zentralen Heizraum, rechts Pelletkessel



Abbildung 2.5-4 Puffer- speicher während der Montage

Der Pelletkessel speist die erzeugte Wärme in zwei in Reihe geschaltete Pufferspeicher ein, aus diesen werden über einen Verteiler zwei Heizkreise (für Hs. Nr. 39 sowie Hs. Nr. 35 + 37) bedient. In jedem Gebäude ist ein Heizkreis mit witterungsgeführter Vorlauftemperaturregelung (Mischer) mit Vorrangschaltung für die Ladung des Warmwasserspeichers installiert. Je Gebäude ist ein zentraler Warmwasserspeicher (300 Liter) vorhanden, die Speicherladung erfolgt über einen eingebauten Wärmetauscher. Die Einzel-Regler der Gebäude sind mit der zentralen Kesselregelung verknüpft.

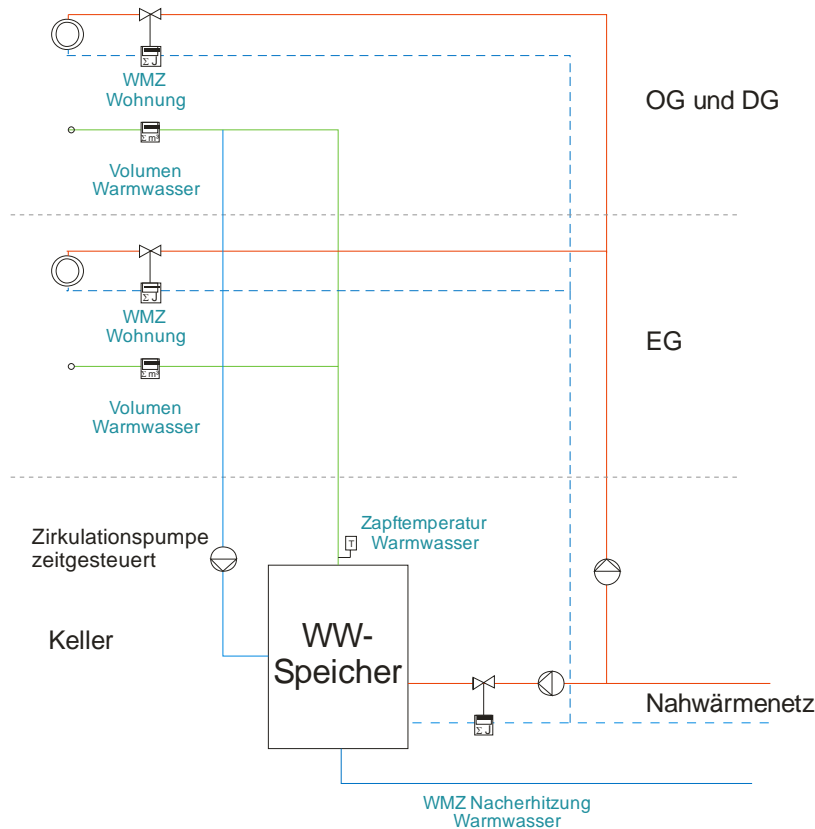


Abbildung 2.5-5 Schema der Versorgung mit Heizwärme und Warmwasser je Gebäude

Die Wärme-Verbrauchserfassung je Gebäude erfolgt über einen Wärmemengenzähler zur Erfassung der Heizwärme je Wohneinheit, der innerhalb der Wohnung installiert ist. Der Wärmeverbrauch zur Warmwasserversorgung wird je Gebäude im Speicherladekreis erfasst. Die Wärmeerzeugung des Pelletkessels einschließlich Pufferspeicher wird nach dem Pufferspeicher zur Einspeisung in die Heizwärmeverteilung gemessen (siehe Abbildung 2.5-2).

Beheizung

Die vorhandene Gebäude-Wärmeverteilung wurde komplett ersetzt. Um die Heizleitungen im Wesentlichen innerhalb der thermischen Hülle verlaufen zu lassen, wurde je Geschoss eine Horizontal-Verteilung aufgebaut. Die Vertikalverteilung erfolgt über eine Steigleitung vom Keller- bis Dachgeschoss im Installationsschacht der Bäder. Die Horizontalleitungen in den Wohnungen wurden in Sockelleisten verkleidet verlegt.

Die Heizkörper in den bewohnten Wohnungen wurden wieder an die neue Verteilung angeschlossen, in den weiteren Wohnungen einschließlich Dachgeschoss wurden neue Ventilheizkörper installiert. Alle Heizkörper wurden mit voreinstellbaren Vorlaufventilen/Rücklauf absperrbar/Thermostatkopf ausgestattet.

Wohnungslüftung

Abluftanlage im Energiesparhaus 60

Ein zentraler Abluftventilator im Keller saugt aus Bad und Küche jeder Wohnung die verbrauchte Luft ab. Die Ablufträume (Sanitäräume) sind in der Wohnung durch Telefoneschalldämpfer entkoppelt, zusätzlich wurden die Geschosse mit Schalldämpfern entkoppelt. Die vertikale Abluftleitung wurde in einen nicht mehr benötigten Schornsteinzug eingebaut, je Geschossabgang ist ein Brandschutzelement vorhanden.



Abbildung 2.5-6 Fensterbanklüfter im eingebauten Zustand



Abbildung 2.5-7 Innenansicht des Fensterbanklüfters



Abbildung 2.5-8: Abluftverteilung im Spitzboden

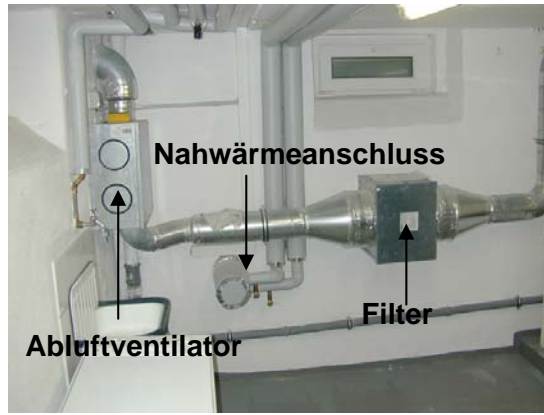


Abbildung 2.5-9: Abluftventilator und Filterbox im Keller

Die Abluftmenge wird mit der Feuchte der Raumluft verändert. Für das Bad ist ein Abluftelement mit Stoßlüftungsfunktion vorhanden, für die Küche ein Abluftelement mit konstantem Volumenstrom. Das Abluftelement in der Küche verfügt über einen regenerierbaren Fettfilter (d. h. die Reinigung kann in der Spülmaschine erfolgen).

Die Außenluft wird über schalldämmte Fensterbankelemente der Firma Siegenia zugeführt, der Einbau dieser Elemente erfolgte durch den Fensterbaubetrieb. Diese Lüftungselemente wurden unterhalb der Fensterbank montiert und ermöglichen die Luftzufuhr über einen gedämmten Kanal in den Innenraum. Die hier zuströmende Luftmenge ist regulierbar. Zusätzlich sind noch Falzlüfter vom Typ RegelAir in den Fenstern in diesem Gebäude vorhanden.

Der zentrale Abluftventilator wurde im Kellergeschoss mit einem vorgeschalteten G4-Filter eingebaut, die Fortluft wird im Sockelbereich ausgeblasen.

Die Auslegung der Anlage orientierte sich an der üblichen Personenbelegung der Wohnungen, bei einer Abluftmenge von 30 m³/Person und Stunde.

Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung im Energiesparhaus 40

Je Wohnung erfolgte der Einbau einer Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung (Kreuzgegenstromwärmetauscher). Die kompakte Einheit vom Typ Vallox KWL90 SE (Rückwärmezahl > 80 %) mit Ventilatoren/Wärmetauscher wurde in der Küche als wandhängendes Gerät montiert und mit einem schalldämmenden Einbauschränk verkleidet. Durch die Integration in die spätere Küchenzeile bleibt die Lüftungsanlage weitgehend unsichtbar, Schallemissionen werden unterdrückt. Die Ventilatoren verfügen über eine integrierte Konstantvolumenstromregelung und können durch den Nutzer in ihrer Luftleistung wohnungsweise dem Bedarf angepasst werden. Der Geräteschall in den angeschlossenen Leitungen wird durch Schalldämpfer reduziert. Die Führung von Außen- und Fortluft erfolgt direkt über die Außenwand.



Abbildung 2.5-10: Lüftungsgerät in der Küche mit den Wanddurchbrüchen für Außen- und Fortluft



Abbildung 2.5-11: Lüftungsgerät fertig eingebaut



Abbildung 2.5-12: Zuluftverteilung in der abgehängten Decke im Flur jeder Wohnung

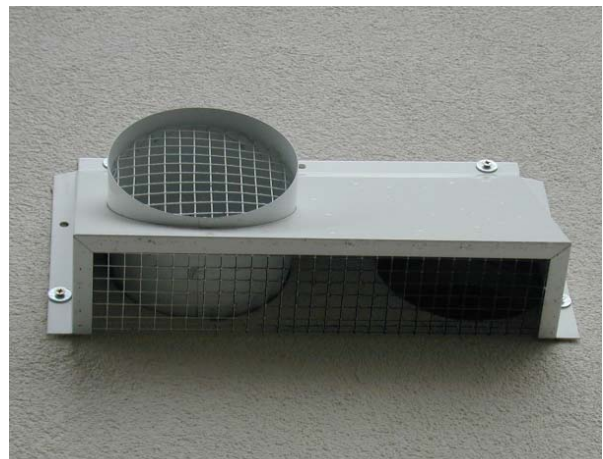


Abbildung 2.5-13: Aufsatzhaube für Frisch- und Fortluft (um eine Vermischung beider Lüftströme zu verhindern)

Ein integriertes elektrisches Vorheizregister mit Temperaturregelung verhindert das Zufrieren des Abluftstranges bei sehr niedrigen Außentemperaturen; die Außenluft wird so weit erwärmt, dass die Fortlufttemperatur nicht kälter als ca. $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist.

Das Verschmutzen des Wärmetauschers wird durch einen abluftseitig angeordneten Filter in Qualität G4 verhindert. Die Zuluft wird mit einem Feinfilter in der Qualität F7 gereinigt.

Die horizontale Leitungsführung erfolgt weitgehend im Flur bzw. im Bad in abgehängten Decken. Die einzelnen Räume in der Wohnung sind durch Telefoneschalldämpfer entkoppelt. Im Dachgeschoss der Maisonette-Wohnung sind die senkrechten Leitungen in einer verbreiterten Trockenbauwand geführt, die horizontale Führung erfolgt über den Spitzboden.

Die Auslegungs-Luftmenge orientiert sich auch hier an der üblichen Personenbelegung der Wohnungen, bei einer Zuluftmenge von 30 m³/Person, Stunde. Für die Erdgeschosswohnung mit 77 m² Wohnfläche werden 75 m³/h zugeführt, die Wohnung in Ober- und Dachgeschoss 105 m³/h.

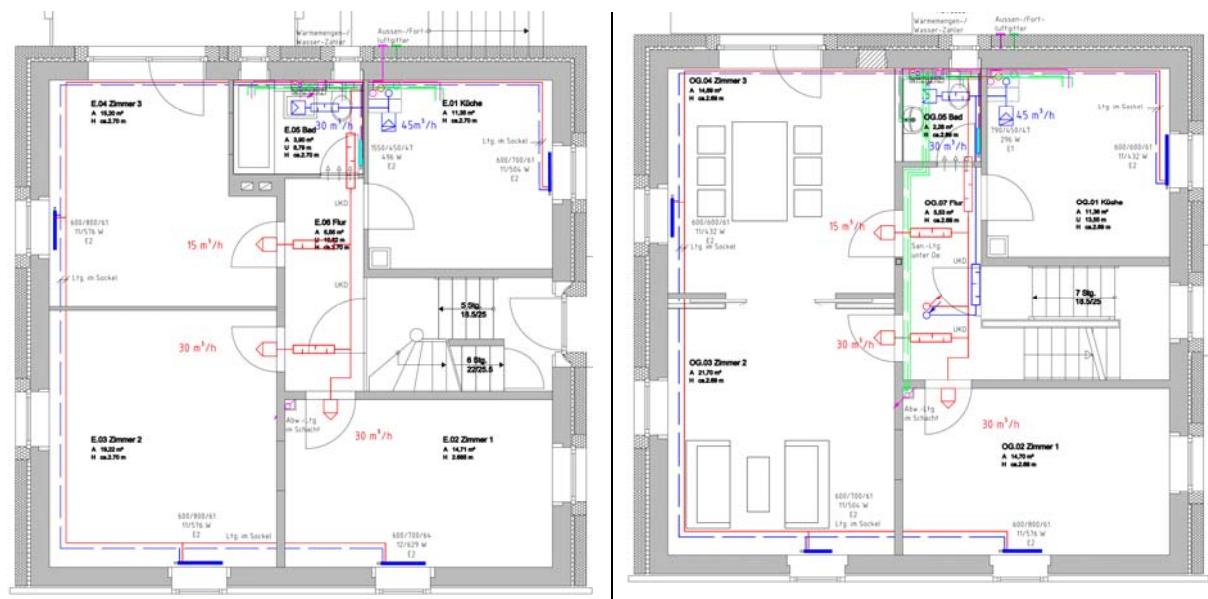


Abbildung 2.5-14 Lüftungsschema in Erd- und Obergeschoss

Die Zuluft wird über einstellbare Ventile (Weitwurf) in die Wohn- und Schlafräume verteilt. Die verbrauchte Luft wird über Abluftventile im Bereich von Küche und Bad/WC abgeführt. In der Küche verfügt das Abluftelement über einen vorgeschalteten auswaschbaren Fettfilter. Die Bäder erhielten Überströmelemente für Wandeinbau mit Schalldämmfunktion.

Sanitärinstallation

Infolge der Neugestaltung der Sanitärbereiche sowie Erweiterung im Dachgeschoss erfolgte die Neuinstallation der Sanitär- und Abwasserleitungen einschließlich der Sanitärobjekte und Armaturen.

Die Sanitär-Hauptleitungen wurden als Edelstahlleitungen, gedämmt nach EnEV, ausgeführt. Die Verbrauchserfassung erfolgt über Wohnungswasserzähler mit Absperrung in den Wohneinheiten, die Verteil- und Anschlussleitungen wurden aus flexiblem Kunststoffrohr ausgeführt.

Elektroinstallation

Die Elektroinstallation wurde im Bereich der Hauptversorgung zu den Wohnungen komplett erneuert. Die Hauptverteilung wurde nach Bestandsaufnahme im erforderlichen Maß erneuert.

Jede Wohnung erhielt eine neue Unterverteilung mit Stromkreisen je Raum, Gerätestromkreisen für die Küchenausstattung sowie Fehlerstromschaltern für Bad und Balkon-/Terrassensteckdose. In den unbewohnten Wohnungen wurde das komplette Leitungsnetz einschließlich der Schalter/Steckdosen erneuert.

Der Stromverbrauch der Wohneinheiten wird über Wohnungszähler in der Zählerverteilung im KG erfasst, ebenso der jeweilige Allgemeinstromverbrauch.

In der Wilhelmstraße 39 erfolgt zusätzlich die Erfassung des Stromverbrauchs für die gesamte Wärmeerzeugung und -Verteilung aller drei Gebäude.

3 Wärmebrücken und Luftdichtheit

Eine besondere Herausforderung beim energiesparenden Bauen sind die Anschlüsse verschiedener Bauteile. Dies gilt schon im Neubau, trifft aber im Gebäudebestand, wo weniger planerische Freiheitsgrade bestehen, da man sich ja an die gegebene Situation und die vorhandene Bausubstanz anpassen muss, in besonderem Maße zu. Besonders betroffen sind zwei wichtige Aspekte des energiesparenden Bauens: Die Wärmebrücken und die Luftdichtheit. Diese werden daher im folgenden Kapitel separat behandelt. Dabei wird insbesondere bei der Luftdichtheit auch auf die jeweiligen Messergebnisse eingegangen: In verschiedenen Phasen des Projekts, also auch bereits vor Abschluss der Arbeiten, fanden Thermografie- und Luftdichtheitsmessungen statt. Auf diese Weise war eine laufende Qualitätskontrolle im Sinne von „Meilensteinprüfungen“ möglich.

Am Ende wurden für Bestandsgebäude sehr gute Kennwerte bei den Wärmebrücken und befriedigende Ergebnisse bei der Luftdichtheit erreicht:

- Der spezifische Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB} beträgt $0,023 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Zum Vergleich: Ohne weiteren Nachweis werden für Altbauten laut EnEV pauschal $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angesetzt.
- Die Abschlussmessungen mit der „Blower Door“ ergaben Luftdichtheitswerte n_{50} zwischen $1,45$ und $1,7 \text{ h}^{-1}$. Angesichts der besonderen Schwierigkeiten dieses Sanierungsprojekts, insbesondere im Hinblick auf die zweischalige Außenwand, kann dieses Ergebnis noch als befriedigend angesehen werden.

3.1 Wärmebrücken und Thermografie

3.1.1 Berechnung der Wärmebrücken

Die energetischen Ziele, die mit der Sanierung in Hofheim verbunden sind, erfordern neben einer optimierten Dämmung der thermischen Hülle in der Fläche auch eine detaillierte Betrachtung und Verbesserung an Anschlüssen. Diese Details gehen über die Wärmebrückenverlustkoeffizienten Ψ bzw. den Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB} in die Energiebilanz der Gebäude mit ein und wirken sich direkt auch auf den Heizwärmeverbrauch aus. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden diese Detaillösungen bewertet und optimiert. Die Optimierung wirkte sich auch auf die erforderlichen Dämmstärken aus, da Verluste über Wärmebrücken durch verstärkte Dämmung an den Regeldetails kompensiert werden müssen. Die höchsten Anforderungen stellt das Energiesparhaus 40 an die energetischen Standards. Aus diesem Grund soll im Folgenden der Schwerpunkt auf die Darstellung der Wärmebrückendetails für dieses Gebäude gelegt werden. Die Wärmebrücken innerhalb der GEDT-Elemente und an den Anschlüssen sind detailliert in [Mayr et al. 2007] beschrieben. Bei der Bilanzierung wurden Wärmebrücken innerhalb der Konstruktion der GEDT-Elemente dem effektiven Gesamt-U-Wert der Elemente zugeschlagen, Anschlüsse an die GEDT (an WDVS, Dach, Perimeter und Fenster) werden in dem Wärmebrückenaufschlag berücksichtigt.

Abbildung 3.1-1 und Abbildung 3.1-2 zeigen den Horizontal- bzw. Vertikalschnitt durch das Gebäude. Die Kreise markieren die Stellen, an denen Wärmebrücken auftreten. Zusätzlich

liegen noch weitere Wärmebrücken in der Schnittebene Ost-West, die hier nicht dargestellt sind.

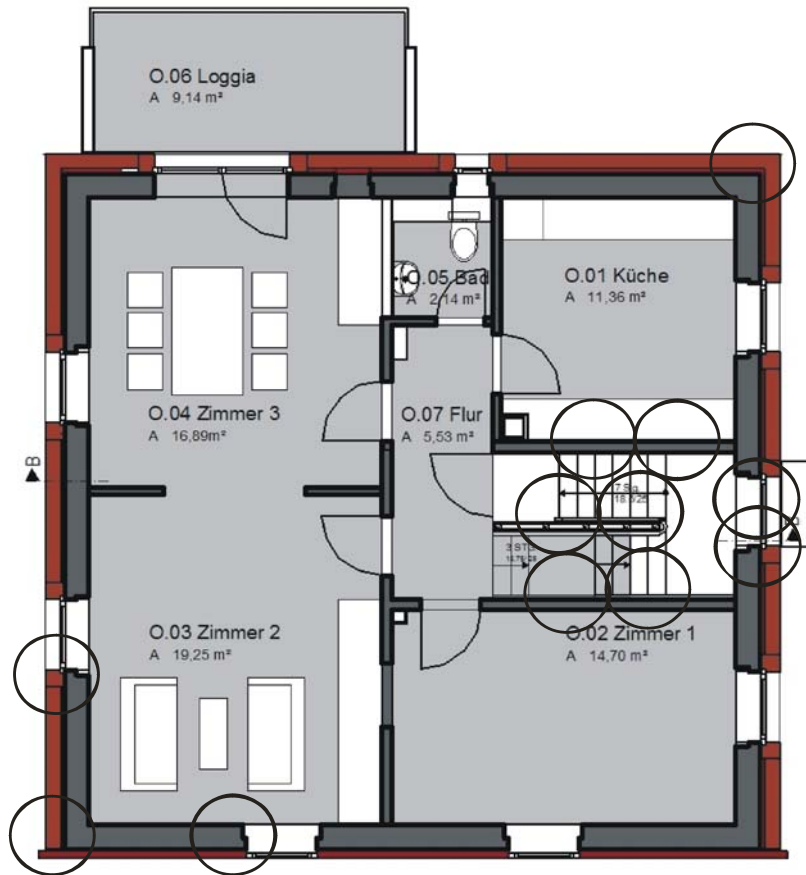


Abbildung 3.1-1 Wärmebrücken im ESH 40 (Horizontalschnitt)

Besonders aufwändig war die Berechnung der Situation am Kellerabgang, der zusammen mit dem Richtung Keller versetzten Eingangspodest die thermische Hülle bildet. Hier war eine Reihe von Berechnungen erforderlich um das Detail korrekt bilanzieren zu können. Alle Wärmebrücken sind im Anhang dokumentiert.

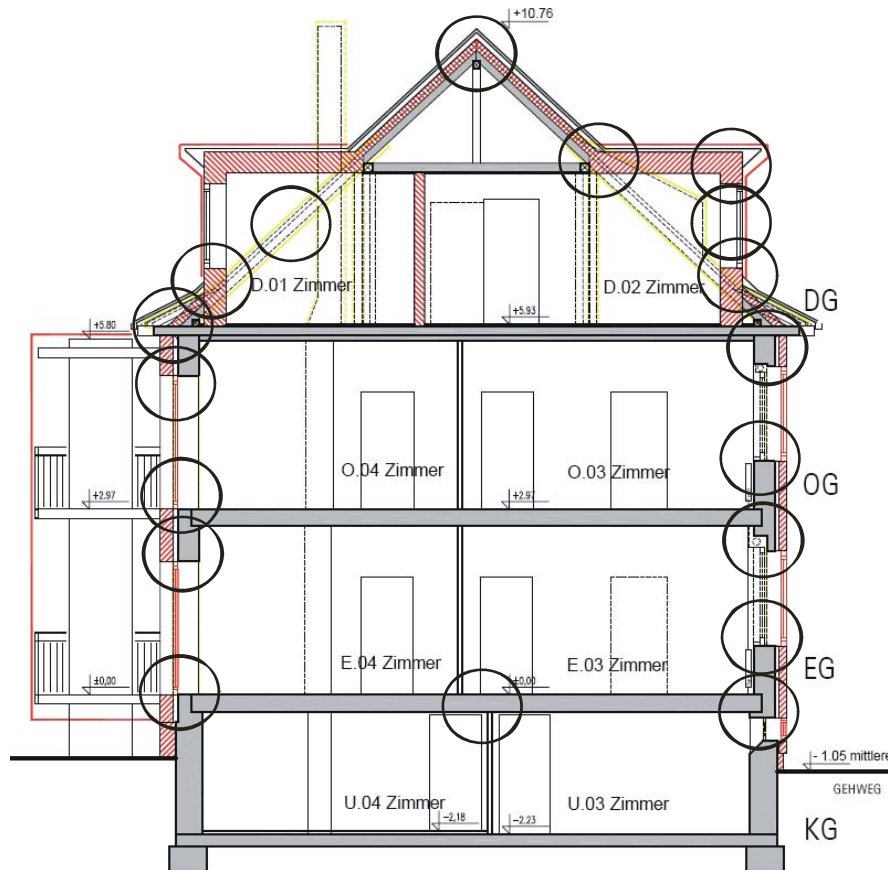


Abbildung 3.1-2 Wärmebrücken im ESH 40 (Vertikalschnitt)

Fasst man die einzelnen Wärmebrücken, die zu gleichen Bauteilen gehören durch Multiplikation mit den entsprechenden Längen der Wärmebrücken zusammen, so ergeben sich die Transmissionswärmeverluste, die in Abbildung 3.1-3 dargestellt sind (Balken). Im Dachbereich ergibt sich ein negativer Transmissionswärmeverlust von $-1,7 \text{ W/K}$. Grund sind die vielen Außenecken, die geometrische Wärmebrücken bilden und bei Außenmaßbezug zu einem negativen Wärmebrückenverlustkoeffizienten führen können. Die Länge der Wärmebrücken im Dachbereich summiert sich auf 118 m , wobei der Traufbereich zum Dach gerechnet ist. Ebenfalls negativ sind die Transmissionswärmeverluste über die Außenwandecken (WDVS und GEDT) mit $-1,0 \text{ W/K}$. Wegen der geringen Gesamtlänge von nur 24 m ist der Einfluss aber vergleichsweise gering. Den bedeutendsten Anteil bei den Wärmebrücken bildet das Kellerdeckenaufleger inklusive der Kellerfenster. Bei $42,6 \text{ m}$ Gesamtlänge der Wärmebrücken ergibt sich ein Transmissionswärmeverlust von $6,3 \text{ W/K}$. Die Kellerinnenwände ($5,1 \text{ W/K}$) und der Kellerabgang ($2,8 \text{ W/K}$) gehen bei Gesamtlängen zwischen 10 m und 20 m ebenfalls deutlich in die Bilanz mit ein. Die Gesamtlänge der Fenstereinbausituation summiert sich auf 113 m , trägt aufgrund der optimierten Einbausituation aber nur mit $1,4 \text{ W/K}$ zum Energieverlust bei. Schließlich ist noch der Einbau der Passivhausfenster in die GEDT-Elemente separat mit einer Gesamtlänge von 21 m und einem Transmissionswärmeverlust von $0,1 \text{ W/K}$ dargestellt. In der Summe ergeben sich 343 m Wärmebrücken und ein Transmissionswärmeverlust von 13 W/K . Somit sind die Wärmebrücken für $8,5 \%$ der Transmissionswärmeverluste verantwortlich (gesamtes Gebäude 152 W/K). Dividiert man den Transmissionswärmeverlust von 13 W/K durch die

gesamte Hüllfläche von 542,5 m², erhält man den Wärmebrückenaufschlag von 0,023 W/(m²K) für das Gebäude.

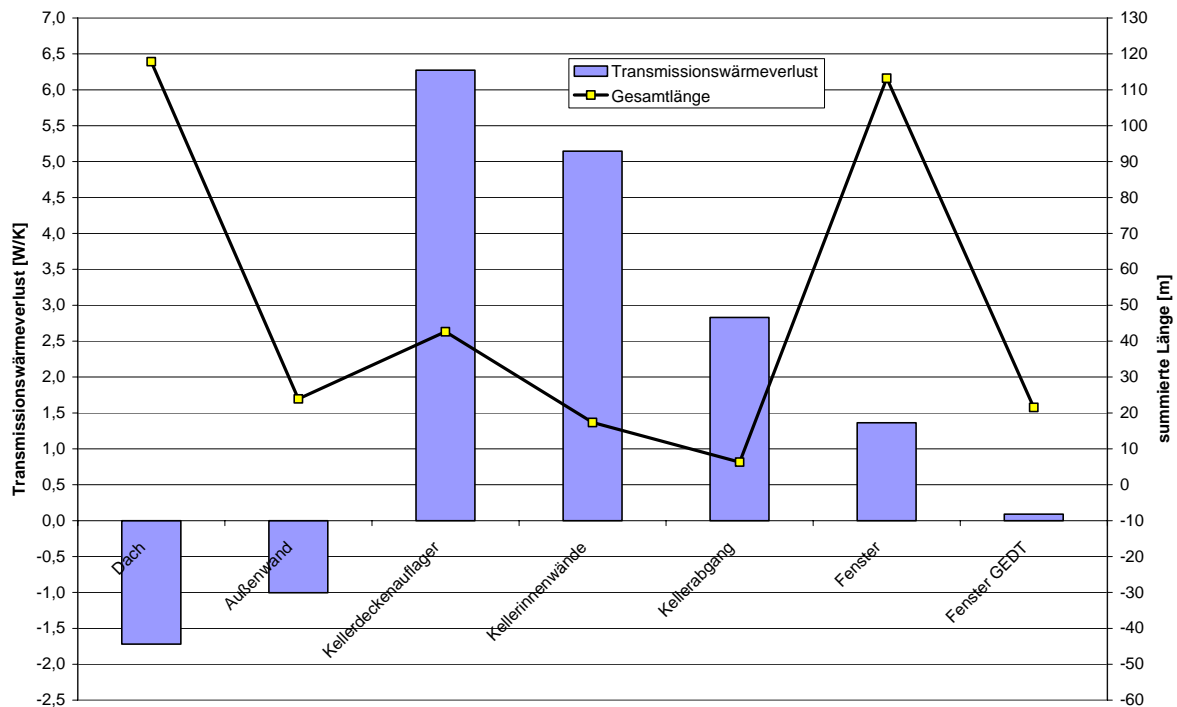


Abbildung 3.1-3 Transmissionswärmeverlust über Wärmebrücken und zugehörige Längen der Wärmebrücken (ESH 40)

Berechnet man die Auswirkungen von unterschiedlichen Wärmebrückenzuschlägen auf die Energiebilanz, ergeben sich die in Abbildung 3.1-4 dargestellten Werte. Für das ESH 40 (gelbe Rauten) berechnet sich ein Heizwärmebedarf von 52 kWh/(m²a) („Brutto-Wert“, d. h. ohne Berücksichtigung der Wärmerückgewinnung), wenn, wie für Altbauten meist erforderlich, der pauschale Wärmebrückenzuschlag von 0,1 W/(m²K) berücksichtigt wird. Kann über Gleichwertigkeitsnachweise nach DIN 4108 Beiblatt 2 der Wärmebrückenzuschlag mit 0,05 W/(m²K) angesetzt werden, ergeben sich 45 kWh/(m²a) Heizwärmebedarf. Mit beiden Wärmebrückenzuschlägen werden die Anforderungen an das Energiesparhaus 40 jedoch nicht erreicht, da H_T' nicht 45 % unter EnEV-Anforderungen liegt. Erst bei einem Aufschlag von 0,04 W/(m²K) werden für dieses Gebäude die Nebenanforderungen für H_T' erreicht. Mit dem detailliert berechneten Wert des Wärmebrückenzuschlags von 0,023 W/(m²K) ergibt sich ein Heizwärmebedarf von 42 kWh/(m²a), durch (theoretisch) vollständiges Vermeiden aller Wärmebrücken würde sich der Wert auf 37,8 kWh/(m²a) reduzieren.

Die Auswirkungen für das Gebäude nach EnEV-Neubau-Standard sind ebenfalls im Diagramm dargestellt. Der Wärmebrückenzuschlag liegt für dieses Gebäude in der gleichen Größenordnung, da die entwickelten Detaillösungen für alle Gebäude angewandt wurden. Eine vollständige Darstellung der Wärmebrückendetails für das ESH 40 findet sich im Anhang.

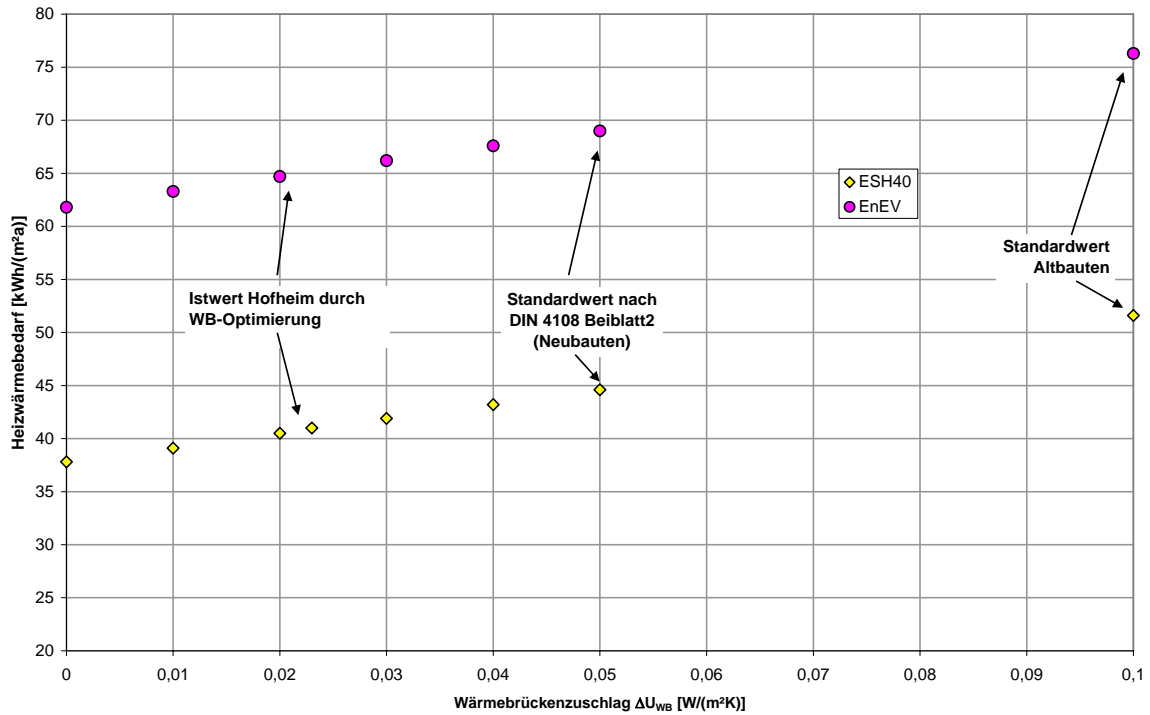


Abbildung 3.1-4 Heizwärmebedarf für ESH 40 und EnEV-Gebäude bei unterschiedlichen Wärmebrückenzuschlägen

3.1.2 Ergebnisse der Thermografie

Es wurden im Projektverlauf dreimal thermografische Aufnahmen der Gebäude durchgeführt: Im März 2005 im unsanierten Zustand, im März 2006 nach Durchführung der meisten Modernisierungsmaßnahmen aber noch vor Installation der Großdämmelemente an den Straßenfassaden und im Februar 2008 nach Durchführung aller Maßnahmen.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Situation zu den unterschiedlichen Zeitpunkten der Sanierung

Untersuchung der Gebäude vor der Modernisierung

Datum: 04.03.2005

Uhrzeit: 21:00 Uhr

Außentemperatur: -1,0°C

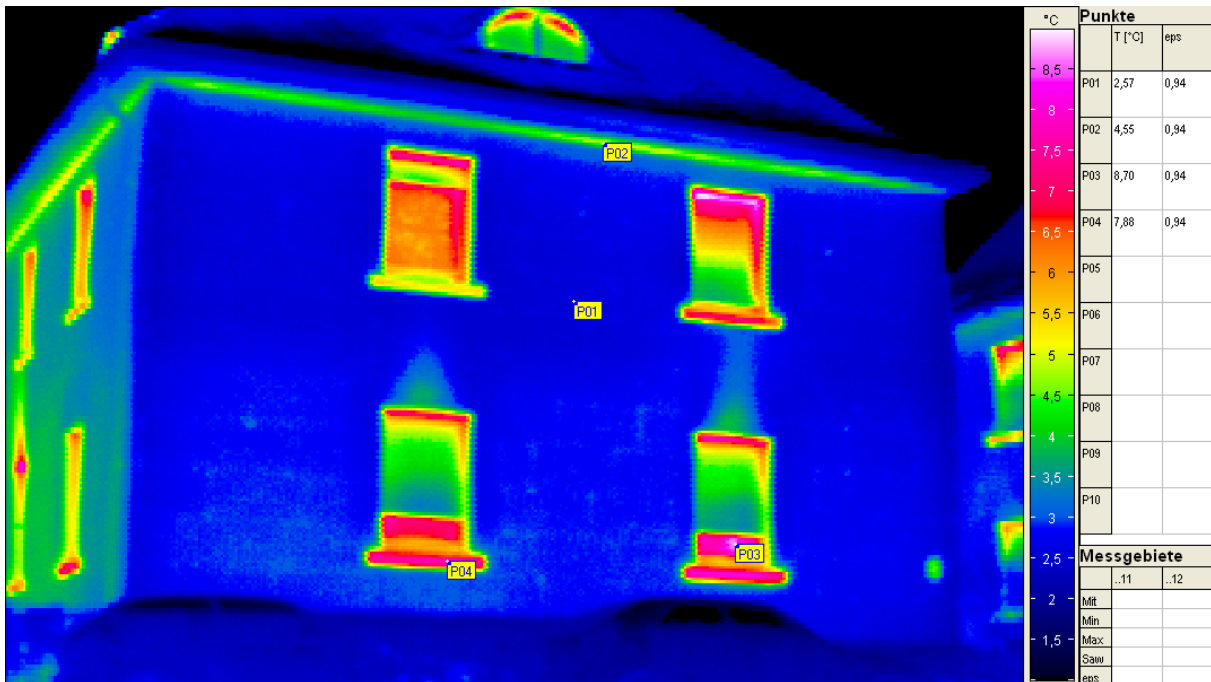


Abbildung 3.1-5 Eines der Gebäude vor der Modernisierung (Straßenfassade)

Die Aufnahme der Straßenseite des Gebäudes zeigt erhöhte Wärmeverluste im Bereich der Fenster. Einerseits haben die Verglasung (P03) und der Rahmen eine erhöhte Wärmeabstrahlung, andererseits stellen die massiven Fensterbänke (P04) Wärmebrücken dar. Die Außenwand weist eine homogene Wärmeabstrahlung auf (P01), was zum einen durch das Wärmedämmverbundsystem, zum anderen durch die Tatsache, dass es sich um ein zweischaliges Mauerwerk handelt, erklärt werden kann. Eine linienförmige Wärmebrücke ist im Bereich der Traufe zu erkennen (P02). Hierfür könnten einerseits die Holzbalkendecke über dem Obergeschoss, bzw. der Mauerkranz der Außenwand oder aber eine Undichtigkeit des zweischaligen Mauerwerks verantwortlich sein. Andererseits ist zu beachten, dass ein klarer Himmel eine deutlich niedrigere Temperatur als die Außenluft aufweist, so dass die Oberflächentemperaturen von Flächen, die wie hier nach unten zeigen und sich daher nicht im direkten Strahlungsaustausch mit dem Himmel befinden, höher liegen als bei anderen Flächen. Solche Situationen sind schwer zu interpretieren, es ist also nicht mit Sicherheit festzustellen, ob hier tatsächlich eine Wärmebrückenwirkung vorliegt und wie stark diese tatsächlich ist.

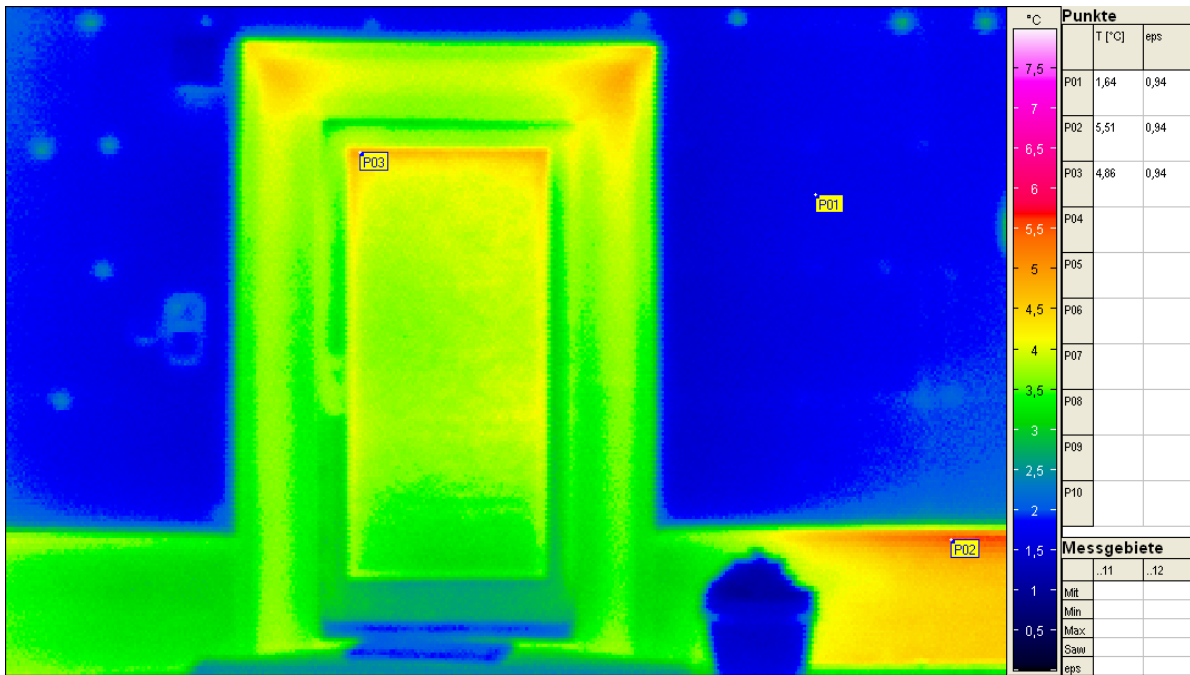


Abbildung 3.1-6 Bereich der Eingangstür (vor der Modernisierung)

Die Aufnahme des Eingangsbereichs des Gebäudes zeigt erhöhte Wärmeverluste im Sockelbereich unterhalb des Wärmedämmverbundsystems (P02). Die energetische Qualität der Tür ist nur bedingt zu bewerten, da das Treppenhaus nicht beheizt ist und somit ein geringerer Temperaturgradient vorliegt. Dennoch sind erhöhte Wärmeabstrahlungen im Bereich der Verglasung zu erkennen (P03). Als Vergleich dient die Oberflächentemperatur der Außenwand (P01).

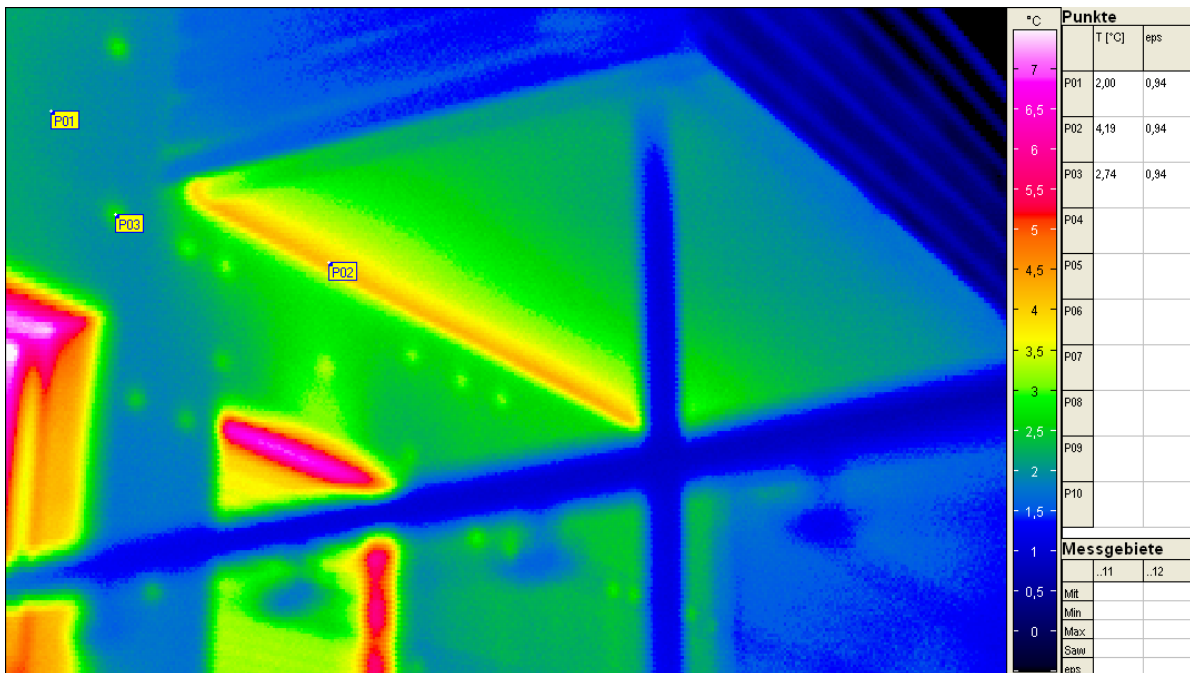


Abbildung 3.1-7 Balkons auf der Südseite (vor der Modernisierung)

Diese Aufnahme zeigt die linienförmige Wärmebrücke, welche durch die auskragende Balkonplatte hervorgerufen wird (P02). Es besteht hier eine deutliche Temperaturdifferenz zu der benachbarten Außenwand, die ja ebenfalls durch den Balkon vom kalten Nachthimmel

abgeschirmt wird. Hier ist also das Vorliegen einer Wärmebrücke in der Thermografie sehr sicher zu erkennen. Die einzelnen wärmeren Punkte im Bereich der Außenwand (P03) sind die Dübel des WDVS. Als Vergleichstemperatur ist die des ungestörten Außenwandbereichs angegeben (P01).

Untersuchung nach Abschluss der konventionellen Modernisierungsmaßnahmen

Datum: 04.03.2006
 Uhrzeit: 22:00 Uhr
 Außentemperatur: -1,0°C



Abbildung 3.1-8 Ansicht der noch ungedämmten Straßenfassaden drei Gebäude

Am rechten Bildrand ist zum Vergleich ein Nachbargebäude zu sehen, das – ebenso wie die untersuchten Gebäude vor der Modernisierung – mit einem dünnen, ca. 5 cm dicken Wärmedämmverbundsystem versehen ist. Die regelmäßigen hellen Punkte machen die verwendeten Dübel sichtbar. Die Oberflächentemperatur der Vergleichsfassade liegt deutlich niedriger als die Temperatur der Straßenfassaden in der Wilhelmstraße 35 - 39, da dort das Wärmedämmverbundsystem zur Vorbereitung der Montage der Großdämmelemente entfernt wurde. Gleichzeitig ist sie deutlich höher als die Temperaturen der nachträglich gedämmten Seitenwände der drei Gebäude.

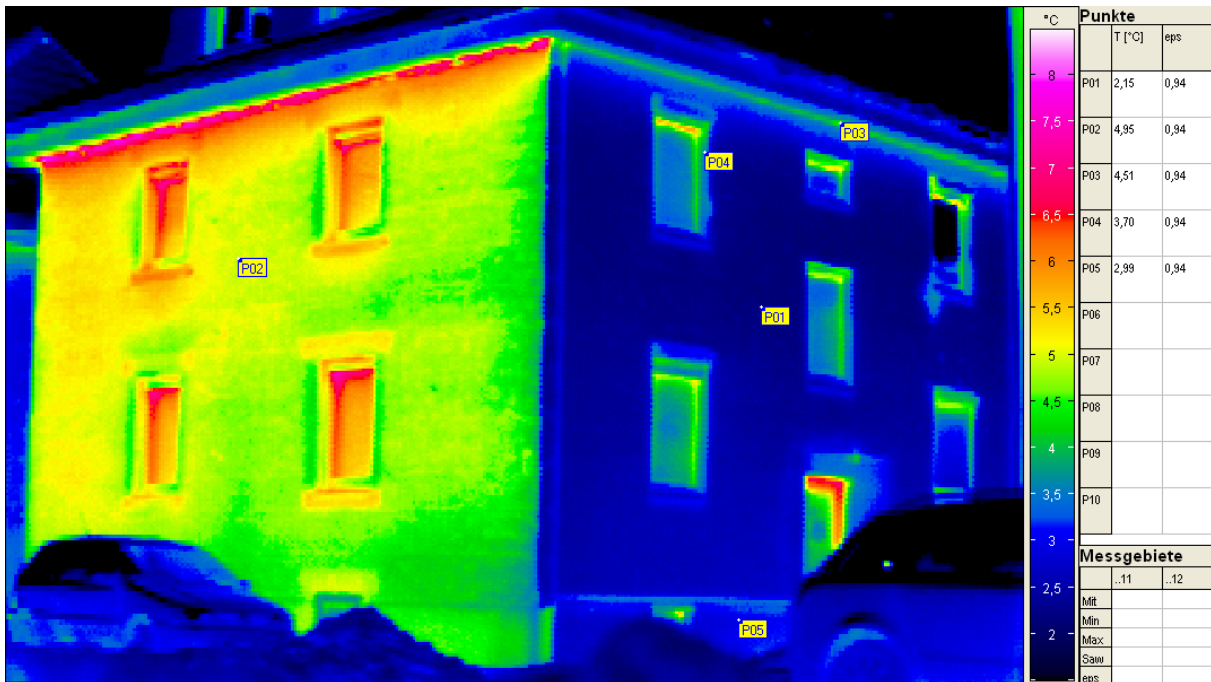


Abbildung 3.1-9 Vergleich der Straßenfassade (links, noch ungedämmt) mit einer fertig gedämmten Nachbarfassade (Energiesparhaus 40)

Auf dieser Aufnahme des teilsanierten Gebäudes ist - hier am Beispiel des Energiesparhaus 40 - noch einmal der Unterschied zwischen wärmegeämmter Außenwand (rechts, P01) und nicht gedämmter Wand (links, P02) deutlich zu erkennen. Die gedämmte Außenwand weist im Bereich der Fensterleibungen (P04) und des Sockels (P05) keine Wärmebrücken auf.

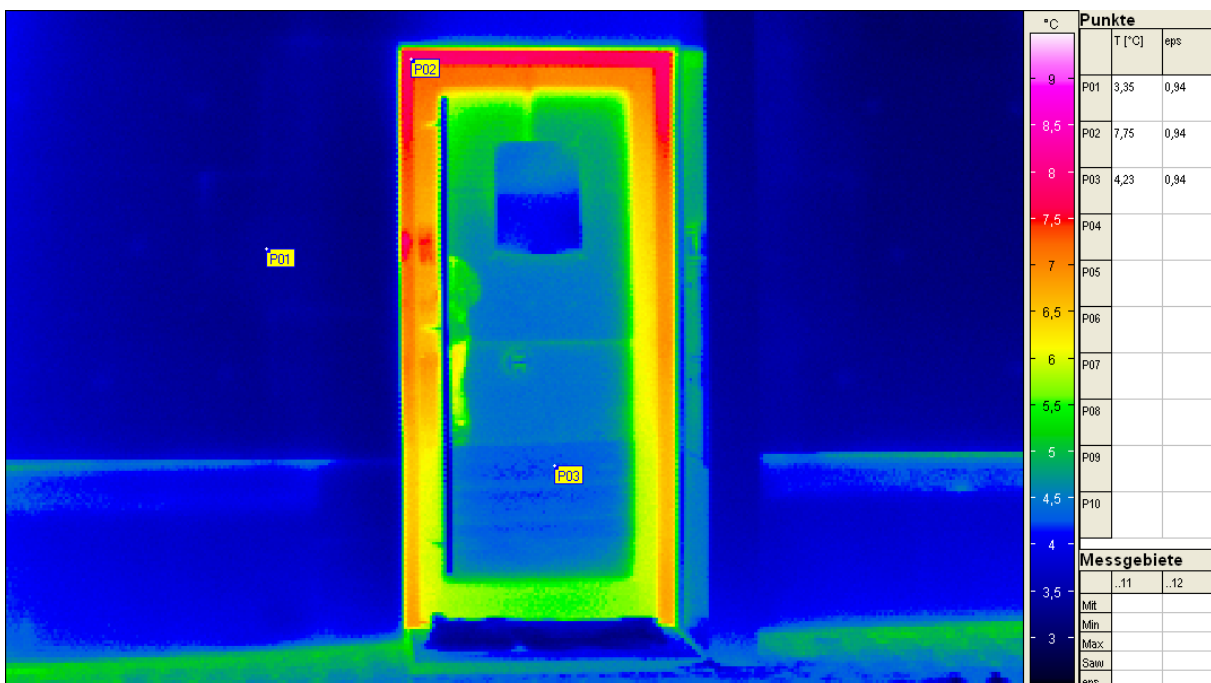


Abbildung 3.1-10 Eingangstür (EnEV-Neubau)

Der Vergleich von Abbildung 3.1-10 mit Abbildung 3.1-6 zeigt eine deutliche Verbesserung der Situation, insbesondere im Sockelbereich und im Bereich der Tür. Die erhöhten Temperaturen im Bereich des Blendrahmens (P02) können auf Wärmebrückeneffekte

und/oder den fehlenden bzw. stark reduzierten Strahlungsaustausch mit dem kalten Himmel zurückgeführt werden. Als Vergleich dient die Oberflächentemperatur der gedämmten Außenwand (P01).

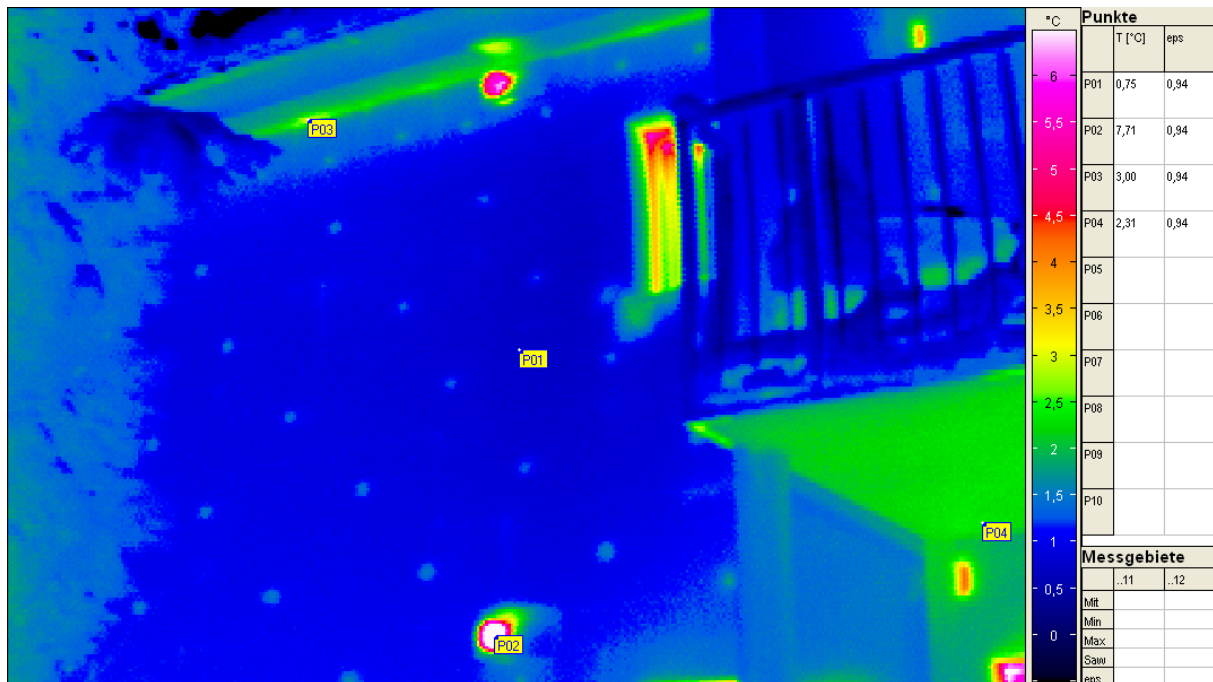


Abbildung 3.1-11 Ausschnitt Südfassade (Gartenseite, Energiesparhaus 40)

Diese Aufnahme zeigt die Rückseite des Gebäudes. Deutlich zu erkennen sind die beiden Wanddurchbrüche für die Lüftungsanlage (oben und unten, P02). P01 markiert zum Vergleich die Oberflächentemperatur der gedämmten Außenwand. Die erhöhte Temperatur im Bereich der Traufe P03 und die damit verbundene (scheinbare) linienförmige Wärmebrücke im Bereich der Traufkante ist wiederum nicht eindeutig zu interpretieren (so.). Eindeutiger ist die Situation wiederum im Bereich des Balkons (P04), wo nach der Sanierung keine Wärmebrücke mehr zu erkennen ist.

Untersuchung nach Abschluss aller Maßnahmen

Datum: 19.02.2008

Uhrzeit: 23:00 Uhr

Außentemperatur: -1,0°C

Die folgende Aufnahme zeigt ein Ergebnis von der abschließenden Thermografie der fertigen Gebäude (mit montierten GEDT-Elementen) an den Straßenfassaden.

Aufgrund der Hinterlüftung der Außenbekleidung an den Straßenfassaden sind hier kaum direkte Rückschlüsse auf die Qualität der Großdämmelemente möglich. Von Interesse ist immerhin die Anschlussfuge zwischen den Elementen und der konventionellen Dämmung auf den angrenzenden Fassaden mit leicht reduzierter Dämmung, die hier als leicht hell gefärbter vertikaler Strich an den Ecken aller Gebäude sichtbar ist. Eine Quantifizierung eventuell erhöhter Wärmeverluste ist allerdings – ebenso wie im Bereich des Dachüberstands (so.) - kaum möglich, da auch hier aufgrund des Rücksprungs der Anschlussfuge Abschattungseffekte gegenüber dem kalten Himmel bzw. Auswirkungen auf den Wärmeübergang zur Außenluft vorliegen können.



Abbildung 3.1-12 Fassaden der drei Hofheimer Gebäude mit Nachbarhäusern (im Vordergrund links und im Hintergrund rechts)

3.2 Luftdichtheit und Blower-Door-Messungen

3.2.1 Luftdichtheitskonzept

Bei Neubauten wird die luftdichte Ebene, die Konvektionsströmungen durch die Außenbauteile verhindern soll, meist durch Innenputz, Betondecken und Folien auf der Innenseite der Dächer gebildet. Bei den Häusern des Forschungsprojektes war dies aus mehreren Gründen nicht möglich. Die Wände bestehen aus einer zweischaligen Außenwand mit ca. 6 cm Luftschicht (siehe auch Kapitel 2.4). Die Holzbalkendecken (über EG und OG) liegen auf der inneren der beiden Wandschalen auf und durchdringen somit die Innenwand. Im Bereich der Decken kann kein Innenputz auf die Wand aufgebracht werden. Zusätzlich stellen Einbauten in der Außenwand (z. B. Elektroverteilung) Störungen des Innenputzes dar, die in den während der Sanierung vermieteten Wohnungen nicht ausgebessert werden konnten.

Bei Tests mit der Blower-Door und in den Raum eingebrachtem Rauch wurde festgestellt, dass es einen direkten Luftverbund über die gesamte Außenwand (alle Fassaden) gibt. Die Kellerdecke aus Beton schloss den Wohnbereich aber dicht gegen den Keller ab. Somit musste für die drei Gebäude des Forschungsprojektes eine andere Lösung für das Luftdichtheitskonzept gefunden werden.

Da das bestehende Wärmedämmverbundsystem (WDVS) mit Mörtelbatzen auf die Bestandswand aufgeklebt und zusätzlich gedübelt war (siehe Abbildung 3.2-1), war eine luftdichte Schicht auf dem Altputz der Bestandswand (zum alten WDVS) nicht gewährleistet. Das Luftdichtheitskonzept sah aus diesem Grund vor, die Außenseite des alten Wärmedämmverbundsystems als luftdichte Ebene vorzusehen. Diese Ebene war nahezu

unbeschädigt, zusätzlich wurde das neue WDVS vollflächig auf das bestehende aufgeklebt³. Diese Ebene wurde mit Folien an die Kellerdecke angedichtet. Im Traufbereich wurde die Folie vom Dach auf das alte WDVS geführt.

Die luftdichte Hülle wird somit gebildet durch:

- Kellerdecke und Kellertür im Treppenhaus
- Außenseite des alten WDVS (Außenputz plus Klebemörtel)
- Fenster und Außentüren
- Aufsparrendämmung/Unterspannbahn



Abbildung 3.2-1 Hohlraum zwischen Bestandswand und altem WDVS durch Verklebung des WDVS mit Batzen



Abbildung 3.2-2 Andichtung des alten WDVS (hintere Stufe) an den Kellersockel (Beton), darüber neues WDVS; anschließend wurde dieser Bereich mit Perimeterdämmung überdeckt

Bei den Anschlüssen der äußeren Hülle wurde auf sorgfältige und gewissenhafte Ausführung geachtet.

Da die Deckenbalken im Traufbereich über das Gebäude hinausragen, um den Dachüberstand zu bilden, wird die luftdichte Hülle im Gaubenbereich bis an die Gauben-Frontwand herangezogen. Bei Durchdringung der Folien-Dichtungsebene mit Leitungen wurden spezielle Dichtmanschetten eingesetzt.

³ Auf den Straßenfassaden wurde das vorhandene Wärmedämmverbundsystems vor Installation der Großdämmelemente entfernt. Da der Altputz der darunter liegenden Altwand (im Fall der Straßenfassaden) noch zu einem großen Teil intakt war, wurden im Fall der Straßenfassaden der Gebäude in der Wilhelmstraße 35 und 37 vor Anbringung der Großdämmelemente punktuelle Ausbesserungen vorgenommen, während die Nr. 39 (Energiesparhaus 40) vollflächig neu verspachtelt wurde.

3.2.2 Erfahrungen bei der Bauausführung

Anschluss Außenwand - Dach

Eines der größten Probleme im Hinblick auf das Luftdichtheitskonzept ergab sich im Bereich des Anschlusses der Dachkonstruktion am Fußpunkt. Ausschlaggebend hierbei war nicht nur die Zwischenluftschicht der Außenwand, sondern auch eine durch den Abbruch der alten Dachkonstruktion unzulängliche Mauerkrone der Außenwand. Die Bausituation und Detaillösung wurde zusätzlich durch die außenwanddurchstoßenden Deckenbalken der obersten Geschossdecke, die den Dachüberstand bildeten und auf denen die Fußschwelle der neuen Dachkonstruktion aufgelegt wurde, erschwert.



Abbildung 3.2-3: Mauerkrone unter Fußpfette, Ansicht von außen; seitlich sind die Balken des Dachüberstandes zu erkennen



Abbildung 3.2-4: Foliendichtung zwischen Fußpfette und Aufschiebling

Es musste daher eine Lösung geschaffen werden, bei der die innen liegende Dampfbremssfolie der Dachkonstruktion über geeignete Anschlüsse mit der luftdichtenden Klebeschicht des WDVS an der Außenwand verbunden werden kann.

Im Idealfall hätte eine neu aufgemauerte oder aufbetonierte Mauerkrone die Anschlusssituation wesentlich vereinfachen können, dies stellte aber keine Lösung für eine kurzfristige Umplanung im Zuge der Bauausführung dar. Selbst bei einer Berücksichtigung während der Planungsphase wäre diese Lösung dennoch unpraktikabel gewesen, da die Herstellung einer neuen Mauerkrone zu zeitintensiv und daher auch zu riskant hinsichtlich der Wetterbedingungen und der Regengefahr ist. Hier tritt ein grundsätzliches Dilemma der Gebäudesanierung bei Abbruch und Neuerrichtung einer Dachkonstruktion zu Tage. Abbruch und Neuerrichtung sollten im Bauablaufplan so organisiert sein, dass das Gebäude innerhalb von zwei Tagen annähernd wieder regendicht ist.

Als einfache und schnelle Lösung zur dauerhaften Abdichtung hätte ein breiter, unter die Schwelle gelegter Folienstreifen dienen können. Aber diese Lösung wurde für die Neuerrichtung als zu sehr hindernd bewertet und darüber hinaus bestand die Gefahr, dass die eingebaute Folie bei dieser Maßnahme beschädigt werden könnte. Somit hat man sich entschlossen, die notwendigen Folienstreifen nach Aufrichten der Dachkonstruktion innen und außen an die (gehobelte) Fußschwelle anzukleben und zu befestigen. Da aus baukonstruktiven und wirtschaftlichen Gründen die über die Außenwand hinaus stehenden Deckenbalken (die breits den alten Dachüberstand gebildet hatten) nicht abgeschnitten

werden konnten, musste die luftdichte Ebene auf der Außenseite der Fußschwelle als hoch diffusionsoffene Folie über die Balkenköpfe verlegt werden.

In der Wilhelmstraße 39 (ungünstigerweise zugleich das erste Gebäude im Sanierungszeitplan und das energetisch ehrgeizigste) wurde die Durchführung erschwert, da die Aufschieblinge für den neuen Dachüberstand bereits montiert waren. Hier wurde die Folie ersatzweise an die Unterspannbahn angeschlossen, gleichzeitig wurden besonders weitgehende Abdichtungsmaßnahmen an den Stößen und Durchdringungen der inneren Verkleidung der Dachkonstruktion vorgenommen.



Abbildung 3.2-5: Wilhelmstraße 37 - Folie vor Montage der Aufschieblinge um die Deckenbalken gelegt und an die Fußfette angedichtet



Abbildung 3.2-6: Außenansicht des Details links; untere Folie als Luftdichtung um Deckenbalken, die an WDVS angedichtet wird, obere ist die Unterspannbahn des Aufschieblings

Fensteranschlüsse

Auch im Bereich der Fenster zeigte sich, dass die Luftdichtigkeit nicht einfach zu realisieren war. Die aufgetretenen Probleme dürften typisch für Altbaumaßnahmen sein. Im vorliegenden Projekt kam besonders erschwerend hinzu, dass das vorhandene Mauerwerk und der Altputz ausgesprochen brüchig und „bröckelig“ waren, so dass sich nur mit Schwierigkeiten ein stabiler, gleichmäßiger und (für Verklebungen) sauberer Untergrund herausbilden ließ.

Die Fenster wurden aus wärmetechnischen Gründen in der Dämmebene eingebaut. Der Anschluss war aus den genannten Gründen weder außen noch innen einfach herzustellen. Dementsprechend waren – zumindest zu Beginn der Sanierungsarbeiten - vielfach Nachbesserungen notwendig. Hohl- und Fehlstellen zwischen Fensterrahmen und Mauerwerk wurden durch den Montagebetrieb mit Hilfe von teilweise mehrlagigen Kompribändern zu überbrücken versucht. Besser, aber auch wesentlich zeitintensiver ist es, vor der Fenstermontage sämtliche Abbruchstellen im Bereich der Fensteröffnungen gemäß dem Rohbauöffnungsmaß mit Ergänzungsmauerwerk oder mit Reparaturputz wieder eben herzustellen. Diese Beiputzarbeiten wurden dann an den notwendigen Stellen nachträglich durchgeführt.



Abbildung 3.2-7: Fenstereinbau, noch nicht in Ordnung!



Abbildung 3.2-8: Glattstrich auf Fensteranschlagn als Untergrund für Abdichtung

Durch das Vorsetzen der Fenster in die Dämmebene musste die Fensterleibung des Altmauerwerks auf der Wohnraumseite nachgebessert werden. Bei der Planung hat man sich für eine Trockenbauvariante entschieden und auf eine Nassverputzung verzichtet, da so die vermieteten Wohnungen schneller fertig gestellt werden konnten.

Nach Einbau der Fenster sollten die Abbruchstellen an der Fensterleibung mit Gipskartonplatten verkleidet werden. Als innere Abdichtung war eine dauerelastische Acrylabfugung zwischen Fensterrahmen und Gipskartonplatte geplant. Für eine dauerhafte Ausbildung ist hierfür eine staubfreie und durchgängige Fuge von ca. 5 mm erforderlich, was auf der Baustelle bei einigen Fenstern nicht vorzufinden war. Mögliche Lösungen für dieses Detail ergeben sich entweder durch den Einsatz einer Hinterfüllschnur oder durch Verwendung von Gipskartonstreifen mit Produktionskante an den Fensterrahmen. Da bei diesem Vorgehen allerdings mit sehr viel Verschnitt zu rechnen ist, sollte zumindest die Kante der Trockenbauplatte nach dem Bruch gerade abgezogen, angefast und mit einem Haftanstrich, der auch die Staubfreiheit erhöht, versehen werden.

Das übliche Luftdichtheitsproblem „Rolladenkasten“ wurde hier entschärft, indem (anders als im Zustand vor der Modernisierung) außen liegende Rolladenkästen montiert wurden (s. Abbildung 3.2-10). Weiterhin wurden bevorzugt – allerdings nicht durchgängig – Rolladenkurbeln statt Rolladengurten verwendet. Auch bei diesen war Aufmerksamkeit geboten, da die Montage in einigen Fällen nicht sorgfältig genug erfolgt war, so dass Nachbesserungen notwendig wurden.



Abbildung 3.2-9: Außen auf- gesetzte Rollladenkästen, hier beim Gebäude im EnEV-Neubau-Standard



Abbildung 3.2-10: Rollladenkurbel versetzt montiert, musste nachgearbeitet werden

3.2.3 Luftdichtheitsmessungen

Messungen der Luftdichtheit nach „Verfahren B“ (Prüfung der Gebäudehülle) der EN 13829 wurden in verschiedenen Phasen des Projekts durchgeführt. Grundsätzlich ist das wichtig, damit Undichtigkeiten frühzeitig erkannt und die entsprechenden Gegenmaßnahmen rechtzeitig eingeleitet werden können. Dies traf auch im vorliegenden Fall zu: Nachdem erste Testmessungen ungünstige Ergebnisse gezeigt hatten, konnten durch Nachbesserungen am Ende befriedigende Werte erreicht werden.



Abbildung 3.2-11: Drucktest – Luftfördereinrichtung im Kellerabgang eingebaut

Bewertung der Luftdichtheit im unsanierten Zustand

Im Mai 2005 wurde für das Gebäude Wilhelmstraße 39 eine Blower-Door-Messung für die Bestimmung der Luftdichtheit im IST-Zustand durchgeführt. Auf Grund der höchst undichten Tür zum Abstellraum im Dachgeschoss und der nicht abschließbaren Dachbodenluke konnte nur im Rahmen einer Unterdruckmessung ein n_{50} -Wert bestimmt werden. Bei einem angesetzten Nettoluftvolumen von 438 m³ ergab sich ein Messwert von 6,3 1/h. Erst durch das zusätzliche Abkleben der Dachbodenluke, der Tür zum Abstellraum und der Eingangstür, konnte ein Ergebnis für eine gemeinsame Unter- und Überdruckmessung erzielt werden. Mit diesen zusätzlichen Abdichtungsarbeiten ergab für sich das Gebäude immer noch ein n_{50} -Wert von 4,5 1/h durch weitere Undichtigkeiten in der Gebäudehülle.

Baubegleitende Messungen

Baubegleitende Luftdichtheitsmessungen wurden zunächst auf das Haus 39 (ESH 40 mit kontrollierter Lüftung) konzentriert. Die erste Messung wurde im September 2005 durchgeführt. Hier wurde allerdings noch keine vollständige Über- und Unterdruckmessreihe angefertigt, sondern nur im Rahmen einer Leckageortung eine vorläufige Luftdichtheit ermittelt. Die innenseitige luftdichte Ebene war zu diesem Zeitpunkt gemäß dem ursprünglichen Luftdichtheitskonzept im Wesentlichen fertig gestellt und auch noch zugänglich. Im Rahmen dieser Kontrollmessung wurde ein n_{50} -Wert für das Gesamtgebäude von ca. 3,7 1/h ermittelt. Dieser Wert lag mehr als doppelt so hoch wie der angestrebte Zielwert von 1,5 1/h und war somit nicht zufriedenstellend. Daher wurde vom Projektteam ein Maßnahmenkatalog zur Verbesserung der luftdichten Gebäudehülle erstellt⁴.

Im Oktober 2005 wurde die nächste Luftdichtheitsmessung durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt waren die Verbesserungsvorschläge im Wesentlichen umgesetzt und der armierte Grundputz war auch bis auf einige kleinere Fehlstellen auf das WDVS aufgetragen. Die Straßenfassade, an der später die GEDT befestigt wurden, war in der Fläche abgespachtelt und an die luftdichte Ebene des WDVS angeschlossen. Die alten Fenster und Rollladenkästen dieser Fassade waren jedoch noch vorhanden und durch eine Folie über den Fensterausschnitt abgedichtet. Somit konnte eine erste vollständige baubegleitende Unter- und Überdruckmessung zur Bestimmung der Luftdichtheit für das Haus 39 durchgeführt werden. Es wurde jeweils eine Messung mit geöffneter und ungeöffneter Dachbodenluke durchgeführt. Als Ergebnis wurde jeweils ein n_{50} -Wert von 2,4 1/h erreicht, wobei sich der Leckagevolumenstrom um ca. 750 m³ gegenüber der einzelnen Unterdruckmessung vom September verringert hatte.

Für ein Gebäude, das mit einer mechanisch betriebenen Lüftungsanlage ausgestattet werden sollte, war dieser Messwert aber weiterhin zu hoch. Beim Rundgang im Gebäude konnten zwar einige Fehlstellen an den Verklebungen festgestellt werden, aber große lokale und offensichtliche Undichtigkeiten in der thermischen Gebäudehülle, bei denen Außenluft ins Gebäude eindringt, waren nicht zu erkennen. Nach weiteren kleineren Verbesserungen und einem testweisen Abkleben der Rollladenkurbeln- und gurte veränderten sich die Messwerte nur minimal nach unten (auf 2,3 1/h).

⁴ Es kann hier nicht auf alle Einzelheiten eingegangen werden. Der Katalog umfasste sowohl die Überprüfung und Nachbesserung bereits geplanter Details als auch zusätzliche Maßnahmen. Der Umstand, dass insgesamt 26 Punkte benannt wurden, mag aber verdeutlichen, wie komplex die Frage der Luftdichtheit insbesondere bei Altbaumaßnahmen sein kann.

Allerdings waren zu diesem Zeitpunkt an der Nordfassade die alten Fenster und Rollladenkästen vorhanden und auch noch Nachbesserungen im Sockelbereich durchzuführen. Etwas später erst fiel außerdem auf, dass eine Verbindung des Installationsschachtes Kellergeschoss - Dachgeschoss mit dem Abseitenbereich zwischen Gaubenfrontwand und Aufschiebling/Steildach vorlag. Durch nachträgliches Ausgießen der Rohrdurchdringungen mit Spachtelmasse konnte diese Undichtigkeit behoben werden.

Nach diesen Änderungen wurde im November 2005 eine vorläufige Abschlussmessung für das Haus 39 (noch ohne Großdämmelemente) durchgeführt. Dabei konnte ein zufriedenstellender n_{50} -Wert von 1,2 1/h erzielt werden. Mit diesem Ergebnis konnte für das Haus 39 der Grenzwert, der eine Anrechnung der Lüftungswärmerückgewinnung im Berechnungsverfahren gemäß EnEV erlauben würde, erfüllt werden.

Im Juni 2006 konnte auch für die beiden Häuser 35 und 37 eine vorläufige Abschlussmessung ohne montierten GEDT vorgenommen werden. Ohne abgedichtete Straßenfensteröffnungen ergab sich jeweils ein Messwert von 2,0 1/h. Bei diesen beiden Gebäuden waren im Gegensatz zum Haus 39 die ungedämmten Straßenfassaden nicht nachträglich abgespachtelt worden.

Die Bauleitung ging davon aus, dass diese Maßnahme nicht erforderlich sei, da durch das später montierte GEDT mit fachgerecht ausgeführten seitlichen Anschlüssen die Luftdichtheit an der Straßenfassade hinreichend gewährleistet ist. Außerdem wurden vor Montage der GEDT sichtbare Schäden des Altputzes gespachtelt und die Metallbefestiger der GEDT mit einem Folienlappen auf den Putz gedichtet.

Abschlussmessung

Im Oktober 2006 wurden die GEDT-Elemente bei allen drei Gebäuden montiert und die letzten Bearbeiten im Perimeterbereich im Dezember 2006 abgeschlossen. Somit waren die nachträglichen Dämmmaßnahmen an den drei Gebäuden fertig gestellt und es konnten die abschließenden Luftdichtheitsmessungen gemäß DIN EN 13829 durchgeführt werden.

Für die Häuser 35, 37 und 39 wurden bei dieser Messung n_{50} -Werte von 1,66, 1,45 und 1,7 1/h erreicht. Bei ESH 60 (Haus 35) und beim EnEV-Neubau-Haus (Haus 37) reduzierte sich der Messwert gegenüber den baubegleitenden Messungen durch die neuen Fenster der Nordfassade und die Abdichtung in der GEDT-Ebene. Für das ESH 40 erhöhte sich der Wert, wobei die Gründe nicht bekannt sind. Möglicherweise liegt die Ursache in zusätzlichen Ankern, die bei der Montage der GEDT in der Elementfuge bis in die Bestandswand gebohrt und danach nicht korrekt am GEDT abgedichtet wurden.

Für die beiden Häuser mit mechanischer Lüftungsanlage wurde der EnEV-Zielwert von 1,5 1/h nicht erreicht. Auf Grund der Schwierigkeiten, die eine Gebäudesanierung zumeist mit sich bringt und die im vorliegenden Fall durch die besonderen Umstände beim Außenwandaufbau noch besonders schwer wogen, ist diese geringfügige (ca. 20 %ige) Grenzwertüberschreitung dennoch als ein befriedigendes Ergebnis anzusehen. Darüber hinaus hat das Verfehlen des Grenzwerts hier keine weiteren Konsequenzen, da es nur dazu führt, dass die Lüftungsanlagen bei der Energiebilanz für einen EnEV-Nachweis nicht angesetzt werden können. Weil aber andererseits die angestrebten energetischen Zielstandards durch die Kombination des sehr guten Wärmeschutzes mit der Biomasse-

Heizung auch ohne Lüftungsanlage eingehalten werden, ist dieser Umstand hier von untergeordneter Bedeutung⁵.

Im Übrigen lassen sich die Effekte einer erhöhten Undichtigkeit gemäß DIN EN 832 ungefähr abschätzen: So erhöht sich der jährliche Infiltrationsluftwechsel bei einer Differenz im n_{50} -Wert von 0,2 1/h (1,7 1/h gegenüber 1,5 1/h) um ca. 0,022 1/h. Bei einem angenommenen Wärmerückgewinnungsgrad der Lüftungsanlage von 80 % erhöhen sich damit der energetisch wirksame Luftwechsel und die Lüftungswärmeverluste nur um ca. 8 %. Denselben Effekt hätte (bei Erreichen von $n_{50} = 1,5$ 1/h) eine Reduzierung der Wärmerückgewinnung auf ca. 75 %⁶.

Die folgende Tabelle zeigt noch einmal zusammengefasst alle Ergebnisse der einzelnen Blower-Door-Messungen:

Nr.	Datum	Haus	Unterdruck [1/h]	Überdruck [1/h]	n50 [1/h]	Luftvolumen [m³]	Bemerkung
1	16.05.2005	39	6,29	0	6,3	326	IST-Zustand, nur Unterdruckmessung, Abbruch bei Überdruck, geschlossene Tür zum Abstellraum.
2	16.05.2005	39	4,33	4,65	4,5	326	IST Zustand, Bodentreppe und Tür zum Abstellraum abgeklebt.
3	16.05.2005	39	4,16	3,78	4,0	189	nur EG-Wohnung
4	16.05.2005	39	3,2	3,12	3,2	189	nur EG-Wohnung, Eingangselement abgeklebt
5	02.09.2005	39	3,71		3,7	550	nur Leckageortung - Unterdruckmessung
6	25.10.2005	39	2,51	2,28	2,4	613	baubegleitende Zwischenmessung, geschlossene Einschubtreppe,
7	25.10.2005	39	2,58	2,08	2,4	633	baubegleitende Zwischenmessung, offene Einschubtreppe,
8	03.11.2005	39	2,31	2,23	2,3	613	baubegleitende Zwischenmessung, geschlossene Einschubtreppe,
9	03.11.2005	39	2,28	2,21	2,3	613	baubegleitende Zwischenmessung, abgeklebte Einschubtreppe und Rollalldurchführungen
10	30.11.2005	39	1,47	1,09	1,2	613	Abschlussmessung ohne GEDT, geschlossen Einschubtreppe
11	30.11.2005	39	1,29	1,08	1,20	613	Abschlussmessung ohne GEDT
12	19.06.2006	35	2,03	2,04	2,00	613	Abschlussmessung ohne GEDT
13	20.06.2006	37	2,07	1,94	2,00	613	Abschlussmessung ohne GEDT
14	12.02.2007	35	1,72	1,61	1,66	613	Abschlussmessung Nutzungszustand, Außenluftdurchlässe abgeklebt
15	12.02.2007	37	1,53	1,36	1,45	613	Abschlussmessung Nutzungszustand
16	12.02.2007	39			1,70	613	Abschlussmessung Nutzungszustand, Lüftungsanlage/Wärmetauscher abgeklebt

Abbildung 3.2-12 Übersicht über die Ergebnisse der Luftdichtheitsmessungen

⁵ Eine genauere Energiebilanz findet sich Kapitel 6.1.1. Dort ist dokumentiert, dass selbst das am wenigsten gedämmte Gebäude Nr. 37 (EnEV-Neubau-Standard) ohne Lüftungsanlage den ehrgeizigen Primärenergie-Grenzwert des ESH 40 (also 40 kWh/m²a) unterschreitet.

⁶ Bei 80 % Wärmerückgewinnung:
 Anlagenluftwechsel $(1-0,8) \times 0,4$ 1/h + Restluftw. $(0,2+0,022)$ 1/h = 0,08 1/h + 0,222 1/h = 0,302 1/h, d. h. ca. 8 % mehr als ohne erhöhten Luftwechsel: 0,08 1/h + 0,2 1/h = 0,28 1/h
 Bei 75 % Wärmerückgewinnung: $(1-0,75) \times 0,4$ 1/h + 0,2 1/h = 0,3 1/h

4 Auswertung des Messprogramms

In den drei Gebäuden wurde eine umfangreiche kontinuierliche messtechnische Überprüfung des Erfolgs der energetischen Sanierung durchgeführt. Die zentralen Fragestellungen, die im Rahmen des Messprogramms beantwortet werden sollten, lauten:

- Wurden die angestrebten energetischen Standards bei den verschiedenen Gebäuden erreicht? Wo liegen ggf. Gründe für aufgetretene Abweichungen und wie ist der Komfort zu bewerten?
- Bewährt sich der Einsatz des Holzpelletkessels in Verbindung mit dem Nahwärmenetz und wie hoch sind die Verluste durch die Verteilung von Heizwärme und Warmwasser?
- Wie bewähren sich die drei unterschiedlichen Lüftungskonzepte (Fensterlüftung, gebäudezentrale Abluftanlage sowie mechanische Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung)?
- Wie entwickeln sich Temperatur und Luftausgleichsfeuchte in den GEDT-Elementen (in der Kerto-Schicht) und stellen sich möglicherweise bauphysikalisch ungünstige Situationen an Schwachstellen wie Durchdringungen und Fugen ein?

Die Messungen wurden zwischen Juni 2006 und April 2008 durchgeführt, somit stehen für die Auswertung zwei Heizperioden und fast zwei Sommer zur Verfügung. Einzelne Auswertungen der Anlagentechnik wurden bis September 2008 durchgeführt.

Um in den Wohnungen, in denen kein Mieterwechsel stattfand, einen Vergleich der Temperaturen und Fensteröffnungszeiten vor und nach der Sanierung durchführen zu können, wurden in vier Wohneinheiten diese Parameter auch vor der Sanierung über einen Zeitraum vom 15.12.2004 bis 30.03.2005 erfasst. Die Ergebnisse werden im Zusammenhang mit den Messwerten nach der Sanierung dargestellt und diskutiert.

4.1 Messaufbau

Folgende Parameter wurden kontinuierlich aufgezeichnet und als Stundenmittelwerte bzw. Stundensummenwerte von der Messdatenerfassung abgespeichert:

- die Wärmeerzeugung der Heizungsanlage (Einspeisung in Haus 39 in das Nahwärmenetz)
- die Wärmeabnahme durch die Warmwasserspeicher,
- die Wärmeabnahme in den einzelnen Wohneinheiten,
- Warmwasserverbräuche in den Wohneinheiten
- die Raumtemperaturen in mindestens zwei Räumen sowie ggf. in der Abluft je Wohneinheit,
- mindestens eine Raumlufffeuchte,
- die Volumenströme der Lüftungsanlage,
- Zuluft, Abluft, Fortluft sowie Außenlufttemperatur der Wärmerückgewinnung
- die Fensterstellung (getrennt nach gekippten und ganz geöffneten Fenstern)
- Haushaltsstromverbräuche der Wohneinheiten, Allgemeinstrom, Stromverbrauch der Heizung sowie der Messtechnik
- Laufzeiten von Pelletförderung und Kesselgebläse sowie Laufzeiten der Kesselladepumpe in der Heizzentrale über Betriebsstundenzähler

Zusätzlich war auf einem der Gebäude (ESH 60) eine Klimamessstation zur Erfassung von Außentemperatur, Windrichtung und -geschwindigkeit sowie der Solarstrahlung in horizontaler, Süd-, Nord-, West- und Ostrichtung montiert.

Zur Kontrolle der Großdämmelemente (GEDT) waren an sechs Stellen in einem GEDT (GEDT 39/3) in Haus 39 EG kombinierte Temperatur- und Feuchtefühler zur kontinuierlichen Überwachung sowie an 169 VIP-Panelen PT100-Temperaturfühler zur manuellen Funktionskontrolle eingebaut.

Die Grundstruktur der Messdatenerfassung besteht aus je einer zentralen Messdatenerfassung je Haus (T-Box der Firma Technotrade, Belgien), an die auf die Stockwerke verteilt dezentrale Messmodule der Firma Advantech angeschlossen sind. Sowohl die Verbindung der Messmodule mit der Zentrale im jeweiligen Gebäude als auch die drei Gebäude untereinander sind über Ethernet miteinander verbunden. Über einen zentralen ISDN-Router verschicken die Zentralen die Messdaten per E-Mail und ftp-Transfer. Außerdem kann über den Router eine Funktionskontrolle aller Fühler online durchgeführt werden. Im Folgenden werden die Messfühler und die Messtechnik in den Gebäuden zusammengestellt.

Tabelle 4.1-1: Übersicht über die eingesetzten Fühler und die Messdatenerfassung

Bezeichnung	Messfühler	Gemessene Größe / Auflösung / Genauigkeit
Temperaturfühler für Raumtemperatur, Lufttemperatur in der Lüftungsanlage, Vor- und Rücklauftemperatur Heizung, Kaltwassertemperatur, Speichertemperatur (als Rohranlegefühler),	PT100 Genauigkeit DIN A	°C / 0,005 °C / ± 0,15 °C
Bauteilfeuchte und Bauteiltemperatur Großdämmelement (kontinuierliche Messung)	Halbleitersensor Krah&Grote TRF 10tiny mit I2C-Schnittstelle	% rel. Feuchte als Ausgleichsfeuchte / 0,1 % rF / ± 2 % rF (bei 10-90 % rF) °C / 0,1 °C / ± 0,3 °C (bei T > 10 °C) bzw. 0,5 °C bei (0-40 °C)
Bauteiltemperatur Großdämmelement (Handmessung)	PT100 Genauigkeit DIN A	°C / 0,005 °C / ± 0,15 °C
Luftfeuchtefühler für Raumluft und Abluft	Kapazitiver Feuchtefühler	% rel. Feuchte / ± 2 % (bei 40..60 %rF) und ± 3 % (bei 10..90 % rF)
Volumenstrom Zu- und Abluft	Messblende Halton MSD-D125 mit Differenzdruckfühler Setra 267 MR6	0..50 Pa (Druckdifferenzfühler) entspr. 0.. 105 m³/h / 3 mPa / ± 1 Pa = ± 10,5 m³/h
Wärmemenge Nahwärme, Heizung Warmwasserspeicher	Ultraschall- Wärmemengenzähler Landis&Gyr 2WR5 Qn=0,6 (1,5)	kWh / 10 Wh / Klasse 3
Warmwasserverbrauch Erdgeschoss	Warmwasserzähler Techem puls S II mit Impulsausgang	Liter / 10 Liter / Klasse B

Stromverbrauch Haushaltsstrom, Allgemeinstrom, Stromverbrauch Heizung	Drehstromzähler (Ferrariszähler mit S0-Schnittstelle)	kWh / 2 Wh (teilweise 100 Wh) / ± 2%
Stromverbrauch Messtechnik, Lüftung	Wechselstromzähler AAD1 (mit S0-Schnittstelle)	kWh / 0,5 Wh / ± 5 %
Betriebszeit für Laufzeit Pelletförderung, Brennergebläse und Umwälzpumpe Heizkreis	Betriebsstundenmessung über Relais und Software	h / 1 sek. / ca. ± 2 sek.
Fensteröffnungszeiten	Funkkontakt, Zeitmessung über Software	h/h / 1sek. / ± 3 sek.
Solarstrahlung horizontal	Pyranometer Kipp&Zonen CMP3	W/m ² / 0,3 W/m ² / < 10 % für Tagssumme
Silizium-Strahlungsfühler	Solarzelle	W/m ² / 1 W/m ² / < 5 % für Monatssumme
Windgeschwindigkeit	Schalenanemometer Thies 4.3518.00	0,5 .. 50 m/s / 0,5 m/s / 3 % vom Messwert
Windrichtung	Windrichtungsgeber Thies 4.3129	0 .. 360 ° / 11,25 ° / 5 °
Außentemperatur	PT100 Genauigkeit DIN B	°C / ca. 0,05 °C / 0,3 °C

Messmodule

Messgröße	Bezeichnung	Gemessene Größe / Auflösung / Genauigkeit
Temperaturfühler PT100	Advantech Adam 6015 (RTD-Modul)	°C / 16 Bit / 0,05 % im Bereich 0..100 °C
Druckdifferenz, Feuchte, Solarstrahlung, Temperaturanalog (mit Messwandler), Windrichtung	Advantech Adam 6017 (Analog-Modul)	0..10 V bzw. 0..150 mV / 16 Bit / 0,1 %
Zähler, Fensterkontakte, Windgeschwindigkeit	Advantech Adam 6051 (Digital-Modul)	Status bzw. Zähler / 32 Bit
Temperatur Volumenstrom (Keller ESH 60)	ANAIN8-Erweiterung (12 Bit) für Technotrade TBox	°C / 0,1 °C / 0,35 °C Pa / 0,025 % / 0,1 Pa
Erfassung, Umrechnung und Speicherung aller Messdaten	Technotrade TBox	alle / /

Die folgenden Abbildungen zeigen die Messtechnik im Keller und in den Wohnräumen





Abbildung 4.1-1: Datenlogger im Keller (links oben) und Raumtemperaturfühler im Wohnzimmer (rechts oben), Messblende mit Differenzdruckfühler im Keller ESH 60 (links unten) sowie Unterverteilung im Erdgeschoss während der Montage (rechts unten)

4.1.1 Datenqualität

Im Verlauf der Messphase von über zwei Jahren treten immer wieder Ereignisse auf, die zum Verlust von einzelnen Messdaten führen können. Hier sind vor allem Stromausfälle und Übertragungsfehler zu nennen. Zusätzlich können Messdaten z. B. durch Störungen auf den Messleitungen unplausible Werte ergeben, so dass sie nicht in die Auswertung einfließen können, oder Defekte an Fühlern auftreten.

Die Anzahl der Datenlücken in den einzelnen untersuchten Gebäuden fällt unterschiedlich aus. Im ESH 40 und im EnEV-Neubau-Standard liegen die Anzahl der Datenlücken bei 0,8 % bzw. 0,4 % der Werte, bei den Zählern liegt die Ausfallquote nahe 0,0 %. Einzelne Fühler wurden erst später angeschlossen, so dass für diese anfangs keine Messwerte vorlagen (z. B. wurden die GEDT-Fühler erst im Oktober 2006 nach der GEDT-Montage angeschlossen).

Zusätzlich müssen besonders bei den eingesetzten Zählern Fehler bei der Erfassung der Impulse berücksichtigt werden. Diese Messfehler können durch die Monatsablesungen der Wärmemengenzähler erkannt und korrigiert werden. Bei der Erfassung des Wärmeverbrauchs (Heizung und Warmwasser) im ESH 40 traten hier Erfassungsfehler von 2,6 % bzw. 7,7 % auf. Diese Fehler wurden bei den Energiebilanzbetrachtungen durch die Ablesewerte der Wärmemengenzähler vollständig korrigiert.

Im ESH 60 traten durch Aussetzer im Datenlogger häufiger Datenlücken auf. Im Mittel fielen ca. 2,6 % der Messdaten aus, bei den Zählerdaten lag die Ausfallquote bei 3,3 %. Auch hier wurden die Datenlücken möglichst mit den monatlichen Zählerauslesungen korrigiert. Der Wärmemengenzähler im Dachgeschoss dieses Gebäudes fiel aufgrund eines defekten Temperaturfühlers in der ersten Heizperiode aus und somit konnten die Messergebnisse auch nicht nachträglich korrigiert werden. Da die Dachgeschosswohnung von den Mietern von EG und OG als Atelier oder Gästezimmer verwendet wird, ist die Wärmeabnahme in den drei Räumen jedoch gering. Trotzdem muss bei der Betrachtung der Verteilverluste beachtet werden, dass diese nun die nicht miterfasste Wärmemenge im Dachgeschoss beinhalten.

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Messwerte der Klimastation

Auf dem Dach des ESH 60 wurde eine Klimamessstation mit Fühlern für Solarstrahlung in horizontaler, Süd-, West-, Nord- und Ostrichtung, Außentemperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung installiert. Die Fühler wurden an einem ca. 1 m hohen Aufsparrenmast befestigt, der die luftdichte Gebäudehülle nicht durchdringt. Die Kabel wurden unter der Ziegelebene durch ein kleines Loch im Rahmen des Dachflächenfensters nach innen geführt. Dieses Loch konnte anschließend mit einer Dichtmasse wieder luftdicht verschlossen werden.

Das Pyranometer CM3 ist an der Spitze des Mastes befestigt, Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsmesse an einem Ausleger in Ost-West-Richtung. Die Silizium-Strahlungsfühler für die Einstrahlung in Süd-, West-, Nord- und Ostrichtung sind darunter angeordnet, und ganz unten befindet sich der strahlungsgeschützte Außentemperaturfühler (Abbildung 4.2-1).



Abbildung 4.2-1: Ansicht der Klimastation auf dem Dach des ESH 60

zeigt eine Übersicht der Monatsmittelwerte der Messstation auf dem Dach des ESH-60-Gebäudes. Der Mittelwert der Außentemperatur lag von Juni 2006 bis Mai 2007 bei 12,9 °C, im Zeitraum Mai 2007 bis April 2008 bei 10,4 °C. Das minimale Tagesmittel der Außentemperatur mit -5,6 °C wurde am 22.12.2007 gemessen. Die höchste Tagestemperatur wurde am 21.07.2006 mit 28,2 °C erreicht.

Die solare Einstrahlung auf die Horizontale (E hor) lag im ersten Messjahr bei 1217 kWh/m² im zweiten bei 1101 kWh/m². Im Winter und in der Übergangszeit erreicht die Solarstrahlung aus Südrichtung die Werte der Horizontalstrahlung bzw. überschreitet diese teilweise sogar, da die tief stehende Sonne mehr Energie auf die senkrechte Ebene einstrahlt. Hier kann

durch die neu geschaffenen Fenster auf der Südfassade der Gebäude verstärkt Sonnenenergie zur Beheizung der Gebäude genutzt werden.

Tabelle 4.2-1: Monatswerte der Klimastation auf dem ESH 60

	T Außen °C	V Wind m/s	E hor kWh/m ²	E Süd kWh/m ²	E Nord kWh/m ²	E West kWh/m ²	E Ost kWh/m ²
Jun. 06	18,7	1,9	186	93	59	94	85
Jul. 06	24,0	1,0	202	110	55	95	101
Aug. 06	16,5	0,9	122	77	38	58	59
Sep. 06	18,2	0,9	112	110	30	67	66
Okt. 06	13,2	0,8	64	80	19	45	32
Nov. 06	7,8	0,8	31	37	10	16	15
Dez. 06	4,6	0,7	24	29	8	13	11
Jan. 07	5,9	1,2	27	31	9	14	12
Feb. 07	5,5	0,8	38	42	12	24	18
Mrz. 07	7,6	1,3	92	97	24	61	50
Apr. 07	14,6	1,3	171	137	41	102	90
Mai. 07	15,9	1,3	148	86	46	72	77
Jun. 07	18,8	1,2	161	83	51	71	77
Jul. 07	18,2	1,4	155	82	49	74	78
Aug. 07	18,1	1,3	145	97	40	81	71
Sep. 07	13,6	1,4	93	82	27	63	50
Okt. 07	9,9	1,0	69	86	20	51	36
Nov. 07	4,8	1,1	30	29	10	13	14
Dez. 07	2,0	1,0	25	30	8	13	10
Jan. 08	4,4	1,1	29	30	9	15	13
Feb. 08	4,2	1,1	59	88	16	42	31
Mrz. 08	5,7	1,6	78	62	24	43	37
Apr. 08	8,9	1,5	109	71	33	50	53

In sind die gemessenen Werte aus Hofheim mit den Angaben für das langjährige Mittel der Klimaregion 12 (Mannheim) [DIN V 4108-6], an dessen Rand Hofheim liegt, zusammen gefasst. Man sieht, dass nicht nur die Temperaturen höher lagen als im langjährigen Mittel dieser Klimaregion, sondern auch die solare Einstrahlung horizontal und in Südrichtung im ersten Messjahr war um 16 % höher, im zweiten Messjahr lagen die Werte 3 - 5 % höher, was aber im Bereich der Messunsicherheit der Sensoren liegt. Auf den Einfluss der höheren Solarstrahlung auf die Heizenergieverbräuche wird in Kapitel 6.1.2 noch eingegangen.

Tabelle 4.2-2: Vergleich der Jahreswerte der Klimastation mit dem langjährigen Mittel für die Klimaregion 12 (Mannheim) der DIN V 4108-6:2003-06

	MW T Außen °C	Summe E hor kWh/m ²	Summe E Süd kWh/m ²	Summe E Nord kWh/m ²	Summe E West kWh/m ²	Summe E Ost kWh/m ²
2006/07	12,7	1217	928	349	662	615
2007/08	10,4	1101	825	333	589	546
Mittel laut DIN V 4108-6	10,2	1045	800	441	648	651

Abbildung 4.2-2 zeigt über ein halbes Jahr den Vergleich der gemessenen Tagesmittelwerte der Außentemperatur an der Messstation am ESH 60 und den Temperaturen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für den Flughafen Frankfurt. Man erkennt, dass trotz der Lage der Wilhelmstraße in einem Tal am Fuß des Taunus, die Temperaturen kaum voneinander abweichen (weniger als 1K). Gleichzeitig dient der Vergleich der Plausibilitätsprüfung der Messergebnisse der Klimastation.

Setzt man für die Gebäude eine mittlere Heizgrenztemperatur von 12 °C an, so ergeben sich im Zeitraum von Juni 2006 bis Ende Mai 2007 906,1 Kd (Kelvintage), im Zeitraum Mai 2007 bis Ende April 2008 dagegen 1380,5 Kd. Das langjährige Mittel der Wetterstation Frankfurt Flughafen liegt bei 1464 Kd. Im ersten Zeitraum lagen Heizgradtage somit nur bei 60 % des

langjährigen Mittelwertes, in der zweiten Periode wurden 92 % des langjährigen Mittelwertes für Frankfurt erreicht. Somit war die erste Heizperiode deutlich wärmer als üblich, was im Kapitel über die Verbrauchskennwerte noch diskutiert wird.

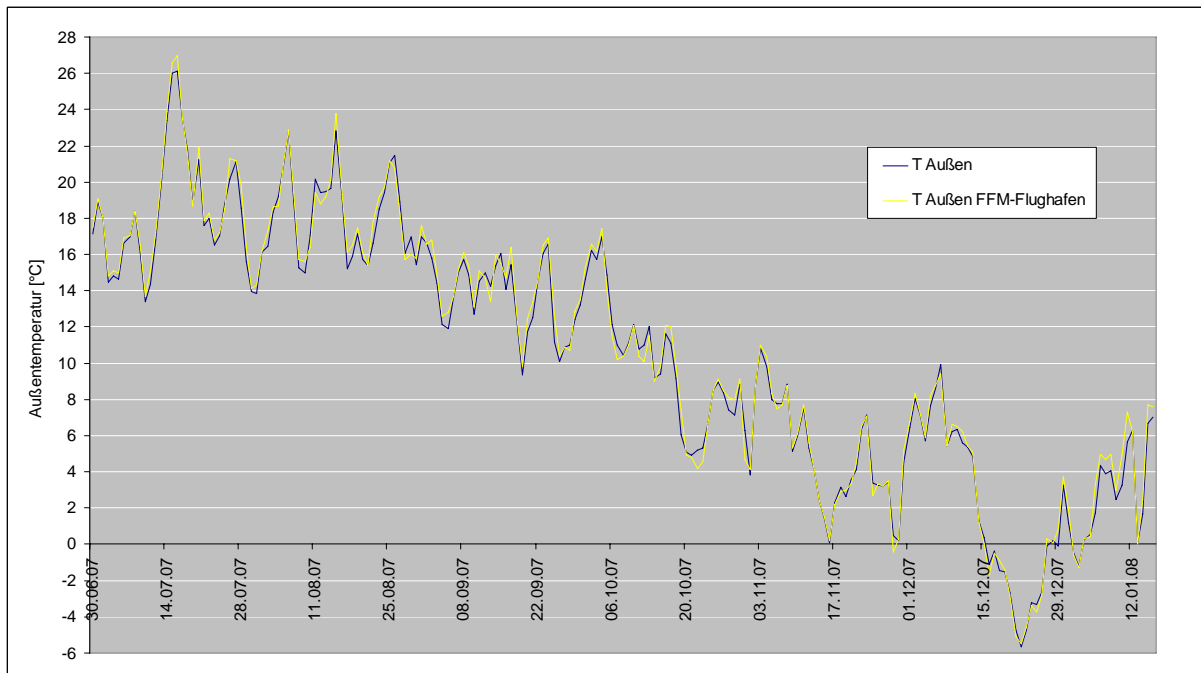


Abbildung 4.2-2: Vergleich der Messdaten für die Außentemperatur in der Wilhelmstraße in Hofheim und der Messstation Frankfurt-Flughafen des DWD

Die Monatsmittelwerte der Windgeschwindigkeit liegen sehr niedrig und ein Vergleich mit Messwerten der Messstation Frankfurt Flughafen (auf Basis von Windklassen in Beaufort) ergab, dass die Windgeschwindigkeiten dort nennenswert höhere Werte erreichen als in Hofheim. Der Grund liegt in der geschützten Lage der Gebäude in einem Talkessel mit Bebauung und hohen Bäumen in der Umgebung. Die Messdaten der Windrichtung konnten nicht sinnvoll ausgewertet werden, da aufgrund der niedrigen mittleren Windgeschwindigkeiten die Losreißgrenze der Windmessfahne, d. h. die Windkraft, die erforderlich ist, um die mechanische Trägheit der Windfahne zu überwinden, zu oft unterschritten war. Zu Zeiten geringer Windgeschwindigkeit liefert die Windfahne kein korrektes Ergebnis. In Starkwindzeiten ist dagegen der Wind sehr böig, so dass der Messwert stark schwankt und der Mittelwert nur eine begrenzte Aussagekraft aufweist.

4.2.2 Verbrauchswerte (Wärme, Warmwasser, Strom)

Im Folgenden werden die Verbrauchswerte für Heizung, Warmwasser und Strom für die einzelnen Gebäude dargestellt. Dabei werden die verschiedenen Arten des Energieverbrauchs getrennt erläutert. Die Gesamt-Energiebilanzen, ein Vergleich mit den berechneten Energiebedarfswerten sowie die Ergebnisse einer Klima- und Nutzungskorrektur sind in Kapitel 6.1.2 dargestellt.

Heizwärmeverbräuche

Die Verbrauchswerte für die Beheizung der drei Gebäudetypen lagen sehr niedrig, teilweise deutlich unter den vorausgerechneten Werten. zeigt die gemessenen Verbrauchsdaten.

Tabelle 4.2-3: Verbrauchsdaten der unterschiedlichen Gebäudetypen (Heizwärmeverbrauch)

	ESH40	ESH60	EnEV
absolut [kWh/a]			
2006/07	2826	5426	3757
2007/08	3382	6973	5208
auf Wohnfläche bezogen [kWh/(m ² a)]			
2006/07	14,4	27,7	19,2
2007/08	17,3	35,6	26,6
auf A _N bezogen [kWh/(m ² A _N a)]			
2006/07	10,4	20,0	14,3
2007/08	12,4	25,7	19,9

Im ersten, sehr milden Winter (siehe auch Kapitel 4.2.1) lag der Heizwärmeverbrauch im ESH 40 bei 14,4 kWh/(m²a) (auf die tatsächliche Wohnfläche bezogen). Im zweiten Jahr stieg der Verbrauch auf 17,3 kWh/(m²a) an. Dieser Anstieg von 20 % gegenüber der ersten Heizperiode ist geringer ausgefallen als beim ESH 60, bei dem der Heizwärmeverbrauch bei 27,7 kWh/(m²a) 2006/07 und 35,6 kWh/(m²a) 2007/08 lag; hier betrug der Anstieg durch den kälteren Winter 29 %. Im Haus nach dem EnEV-Neubau-Standard stieg der Verbrauch von 19,2 kWh/(m²a) auf 26,6 kWh/(m²a). Dies entspricht einer Erhöhung um 39 %. Dies zeigt, dass trotz des allgemein niedrigen Verbrauchsniveaus der Mehrverbrauch bei kälteren Temperaturen bei den energetisch hochwertigeren Varianten geringer ausfällt als beim EnEV-Neubau-Gebäude. Die Gründe für die gemessenen Verbrauchswerte werden in den folgenden Kapiteln und in Kapitel 6.1.2 weiter diskutiert.

Zusätzlich sind in auch die absoluten und die auf die Gebäudewohnfläche A_N nach EnEV bezogenen Verbrauchskennwerte dargestellt. Bei A_N-Bezug liegen die Kennwerte aufgrund der größeren Fläche noch niedriger.

In Abbildung 4.2-3 sind die monatlichen Verbrauchswerte für Heizwärme in den einzelnen Häusern dargestellt. Neben dem typischen Jahresgang beim Heizwärmeverbrauch bei allen drei Gebäuden fällt auf, dass beim ESH 60 auch im Sommer bei hohen Außentemperaturen teilweise nennenswert Heizwärme abgenommen wurde. Die Ursache liegt entweder im Nutzerverhalten in einer der Wohnungen des Gebäudes mit hohen Raumtemperaturen und wechselnder Belegung oder einer Fehlerfunktion im Nahwärmenetz (siehe Kapitel 4.2.7).

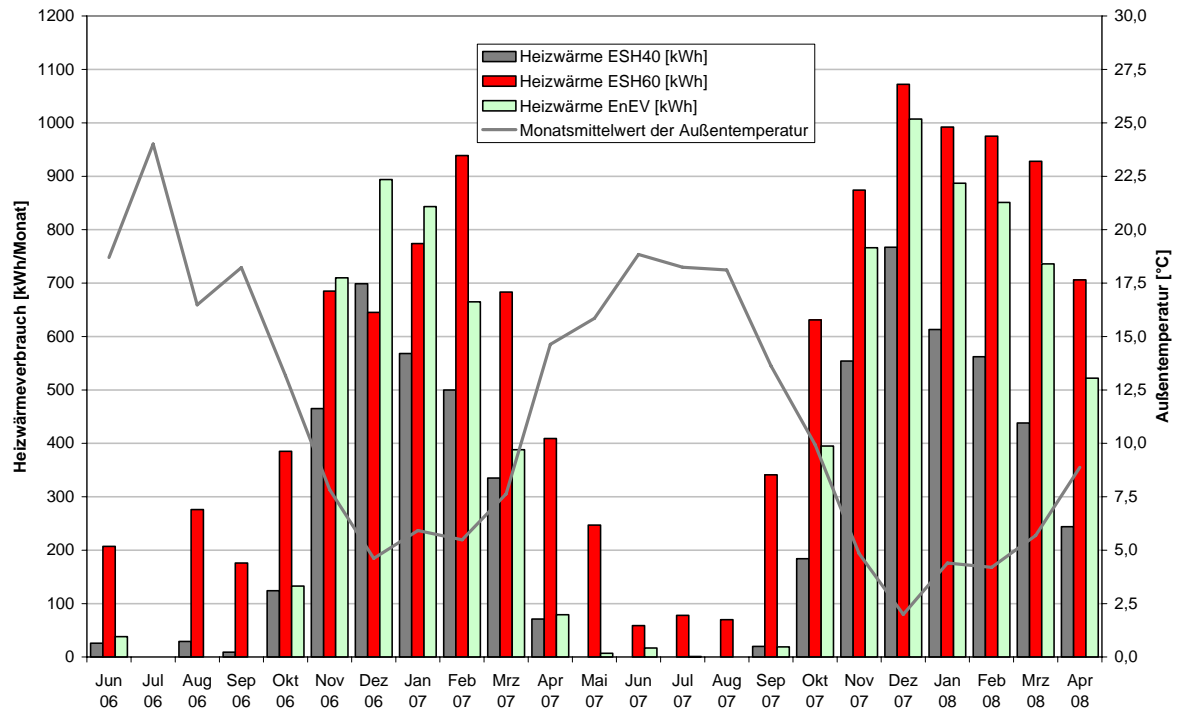


Abbildung 4.2-3 Monatliche Heizwärmeverbräuche der drei Gebäude und Monatsmittelwert der Außentemperatur

Berechnet man den verbrauchsgewichteten Mittelwert des Anteils der Erdgeschosswohnung am Gesamtverbrauch des Gebäudes, so zeigt sich, dass im ESH 40 die Erdgeschosswohnung 61 % der Heizwärme des Gebäudes verbraucht, im ESH 60 91 % und im EnEV-Neubau-Gebäude 49 %. Der Anteil an der Wohnfläche liegt jedoch nur bei 38 %. Gründe liegen hier wahrscheinlich in der im Vergleich zur Außenwand und zum Dach geringeren Dämmstoffdicke an der Kellerdecke, der Wärmebrücke an Kellerabgang und der starken Kopplung der beiden Wohneinheiten durch eine Holzbalkendecke, so dass die oberen Wohnungen (bei ESH 40 und ESH 60) mit ihren im Mittel deutlich niedrigeren Innentemperaturen teilweise durch die unteren mitgeheizt werden.

Fazit

Die gemessenen Verbrauchswerte liegen deutlich unter den vorausgerechneten Werten. Weiterhin fällt auf, dass sich nicht die im Vorfeld erwartete Reihenfolge bei den Verbräuchen der unterschiedlichen Gebäudetypen ergab. Allerdings lässt sich ein Teil der Abweichungen durch die Temperaturen im Winter und die Nutzung erklären. In Kapitel 6.1.2 werden die Bedarfswerte aus der Energiebilanz und die gemessenen Verbrauchswerte detailliert miteinander verglichen.

Warmwasserverbräuche

Die Personenbelegung und die Alterstruktur der drei Gebäude sind sehr verschieden. Im ESH 40 und im ESH 60 wohnen jeweils vier Personen, im EnEV-Neubau-Gebäude sind es nur zwei. Dies wirkt sich auch auf die Warmwasserverbräuche in den Häusern aus. Tabelle 4.2-4 zeigt die absoluten, die auf die Wohnfläche A_N (nach EnEV) bezogenen und die personenbezogenen Warmwasserverbräuche. Die niedrigsten Verbräuche wurden im ESH 60 mit ca. 14 Litern pro Person und Tag gemessen, die höchsten im ESH 40 mit 49 Litern

pro Person und Tag. Übliche Werte liegen nach [LEG] im Bereich von 30 l/P*d bei Mehrfamilien- und 34 l/P*d bei Einfamilienhäusern, nach [PHPP] bei 25 l/P*d bei 60 °C. Die Messwerte streuen somit stark um diese Richtwerte. Im zweiten Messjahr lagen alle Verbrauchswerte unter denjenigen des Vorjahres. Gründe für diese Verbrauchsverminderung konnten nicht gefunden werden.

Tabelle 4.2-4: Warmwasserverbräuche der drei Gebäude

	ESH40	ESH60	EnEV
	absolut [m ³]		
01.06.2006 - 31.05.2007	71,74	21,49	35,07
01.05.2007 - 30.04.2008	61,06	19,15	31,34
	Liter pro m ² A _N		
01.06.2006 - 31.05.2007	263	79	134
01.05.2007 - 30.04.2008	224	71	120
	Liter pro Person und Tag		
01.06.2006 - 31.05.2007	49,1	14,7	48,0
01.05.2007 - 30.04.2008	41,8	13,1	42,9

Um die Nutzwärme der gezapften Warmwassermenge berechnen zu können, müssen die Zapftemperatur und die Kaltwassertemperatur bekannt sein. Für die Zapftemperatur wurde die am Speicherausgang gemessene Speichertemperatur verwendet, da die Zirkulationspumpe für eine geringe Spreizung der Zapftemperatur im Gebäude sorgt. Die Kaltwassertemperatur wurde für alle Gebäude einheitlich aus dem Messwert eines Temperaturfühlers im Keller des ESH 40 bestimmt. Da in Zeiten ohne Wasserentnahme die Kaltwassertemperatur durch die Temperatur des Messraums stark beeinflusst wird (Stillstandstemperatur), wurde die Kaltwassertemperatur bei Warmwasserzapfungen in der entsprechenden Stunde ausgewertet. Auch Kaltwasserzapfungen (z. B. Toilettenspülung) führen zu einer Durchspülung der Kaltwasserleitung, da diese Volumina aber nicht aufgezeichnet wurden, diente allein die Warmwasserzapfung als Indiz für eine zumindest teilweise gespülte Leitung.

Abbildung 4.2-4 zeigt die drei Kurven für Kaltwassertemperaturen mit allen Messwerten, bei einer WW-Zapfung sowie bei einer WW-Zapfung von mindestens 50 Litern in der entsprechenden Stunde. Man erkennt, dass die Temperaturen bei WW-Zapfungen nahe beieinander liegen, bei Verwendung aller Messwerte sich aber bis zu 2 K höhere Temperaturen ergeben. Der Jahresverlauf ist in beiden gemessenen Jahren sehr ähnlich, nur im Juli 2006 lagen die Temperaturen ca. 2 K über denjenigen des Folgejahres.

Für die Auswertung wurden die Werte bei Zapfungen > 50 Liter für gleiche Monate des Jahres gemittelt und für den gesamten Monat als Kaltwassertemperatur angesetzt.

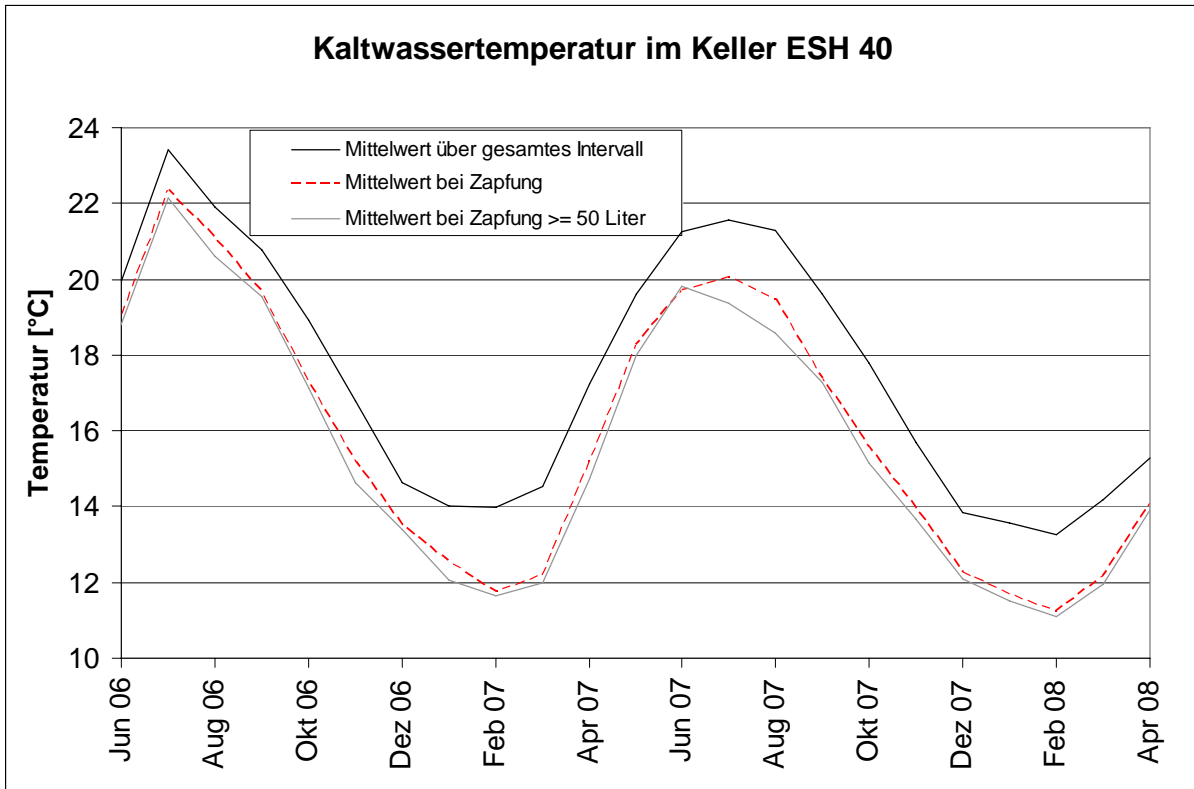


Abbildung 4.2-4: Kaltwassertemperatur bei unterschiedlichen Betriebszuständen

In Abbildung 4.2-5 sind die gemessenen Warm- und Kaltwassertemperaturen dargestellt. Die Temperaturen im ESH 60 und im EnEV-Haus liegen höher als im ESH 40. Auf die Gründe dafür wird in Kapitel 4.2.7 genauer eingegangen.

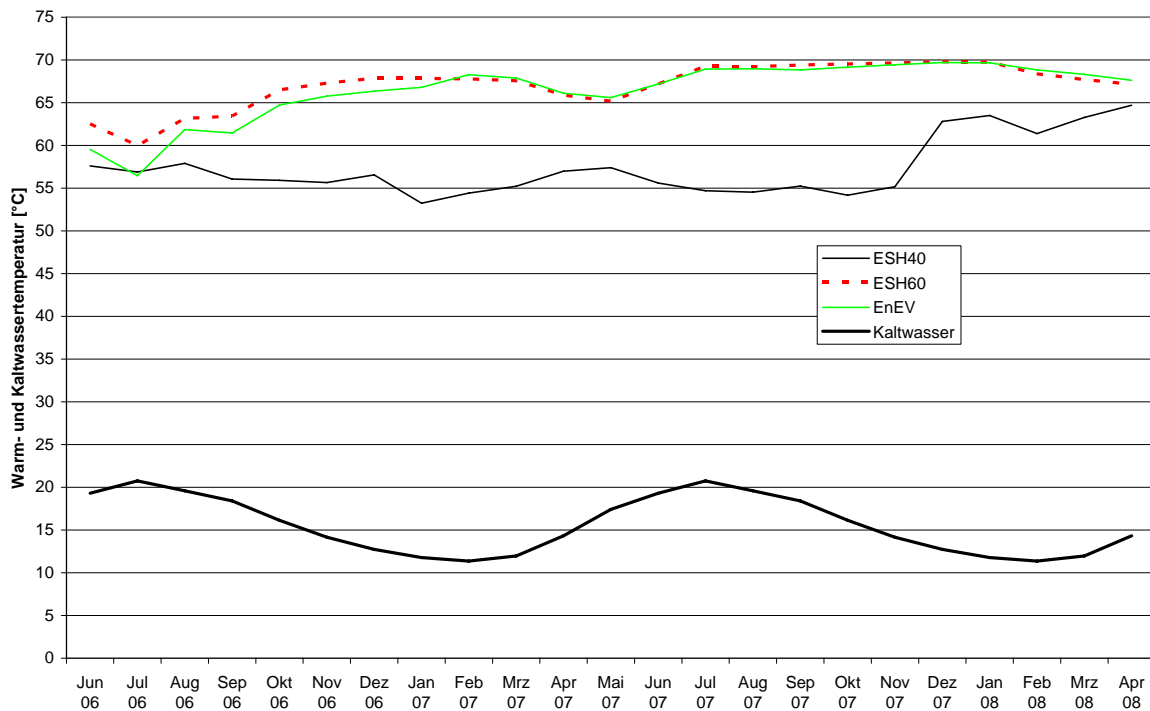


Abbildung 4.2-5: Verlauf von Warm- und Kaltwassertemperatur

Tabelle 4.2-5: Nutzwärmeverbräuche für Warmwasser Nachheizung Nahwärme Warmwasserspeicher (jeweils in kWh)

	ESH40			ESH60			EnEV		
	Q WW	Q Speicher	η_{ww}	Q WW	Q Speicher	η_{ww}	Q WW	Q Speicher	η_{ww}
01.06.2006 - 31.05.2007	3382	5744	59%	1010	4949	20%	1657	4049	41%
01.05.2007 - 30.04.2008	3020	5922	51%	972	4867	20%	1576	3929	40%

Im ESH 40 wurde im ersten Messjahr Warmwasser mit einem Wärmeinhalt von 3382 kWh gezapft. Für die Nacherwärmung des Warmwasserspeichers wurden 5744 kWh aufgewandt. Dies entspricht einem Nutzungsgrad bei der Warmwasserbereitstellung von 59 % (Tabelle 4.2-5). Dieser Wert enthält die Verluste des Speichers und der Zirkulationsleitungen. Bedingt durch die geringe Warmwasserabnahme (ca. 15 % niedriger) lag im zweiten Messjahr der Nutzungsgrad nur noch bei 51 %. Im ESH 60 wurde in beiden Messjahren nur ein Nutzungsgrad von 20 % erreicht. Gründe sind der deutlich geringere Warmwasserverbrauch (ca. 70 % niedriger), eine defekte Zeitschaltuhr der Zirkulationspumpe (ab 22.01.07) (siehe auch Kapitel 4.2.7), die fast 15 K höhere Speichertemperatur und die niedrigere Temperatur im Aufstellungsraum des Speichers. Der WW-Speicher des ESH 40 befindet sich im Heizraum mit dem Pelletkessel, in dem ganzjährig Temperaturen um 28 °C herrschen. Die Aufstellräume der beiden anderen Gebäude weisen dagegen Temperaturen zwischen 12 °C und 23 °C auf, so dass hier die Verluste zwangsläufig höher liegen.

Im EnEV-Neubau-Gebäude wird ein Nutzungsgrad von 40 % bei der Warmwasserbereitung erreicht, wobei der Warmwasserverbrauch nur bei 50 % des ESH 40 liegt. Die Warmwasser- und Kellertemperaturen in diesem Gebäude sind vergleichbar mit denjenigen des ESH 60.

Fazit

Die Schwankung der Warmwasserverbräuche in den drei Gebäude ist groß, im Mittel werden mit 37 bzw. 32 Litern pro Person und Tag jedoch die Planungswerte nach [LEG] erreicht. Die Effizienz der Warmwasserbereitung schneidet vergleichsweise schlecht ab, da einerseits die Speichergröße (300 Liter) im Vergleich zur versorgten Personenzahl recht groß ausfällt (ein Speicher dieser Größe würde normalerweise nur in Verbindung mit einer thermischen Solaranlage eingesetzt), andererseits sind durch die defekte Zirkulationssteuerung und den nicht optimierten Anlagenbetrieb Effizienzpotenziale noch nicht genutzt worden. In Kapitel 4.2.7 werden diese Potenziale ausführlicher erläutert.

Bei einem so ungewöhnlich geringen Warmwasserverbrauch wie im ESH 60 wäre eine direktelektrische Warmwasserbereitung an der Zapfstelle endenergetisch effizienter als die umgesetzte Variante mit Speicher und Zirkulationspumpe. Allerdings gilt dies für das ESH 40 und das EnEV-Gebäude nicht mehr. Da die Wärme in Hofheim aus dem regenerativen Energieträger Holzpellets gewonnen wird, wirkt sich der schlechte Nutzungsgrad der Warmwasserbereitung der Speicherlösung nicht so gravierend auf die Primärenergie und CO₂-Bilanz der Gebäude aus. Durch die in Abschnitt 4.2.7 vorgeschlagenen Optimierungen könnte der Nutzungsgrad zusätzlich weiter verbessert werden.

Stromverbräuche

In den Gebäuden wurden Verbräuche für Haushalts-, Allgemein-, Lüfter-, Messtechnik- und Anlagenstrom über separate Zähler erfasst. Tabelle 4.2-6 zeigt die Jahressummen der einzelnen Zähler als absolute, wohnflächenbezogene, A_N -bezogene und personenbezogene Werte. Die Verbräuche für den Messtechnikstrom sind bei den Allgemiestromzählern bereits abgezogen.

Tabelle 4.2-6: Stromverbräuche der drei Gebäude

	Haushaltsstrom			Allgemeinstrom			Lüftung		Heizung	Strom Messtechnik		
	ESH40	ESH60	EnEV	ESH40	ESH60	EnEV	ESH40	ESH60	ESH40	ESH40	ESH60	EnEV
absolut [kWh/a]												
2006/07	5255	3942	5161	173	641	2123 *	412	225	2611	459	361	304
2007/08	5434	5192	4262	121	669	760	342	261	2780	471	363	304
auf Wohnfläche bezogen [kWh/(m ² a)]												
2006/07	26,8	20,1	26,3	0,9	3,3	10,8	2,1	1,2	4,4	2,3	1,8	1,6
2007/08	27,7	26,5	21,8	0,6	3,4	3,9	1,7	1,3	4,7	2,4	1,9	1,6
auf A_N bezogen [kWh/(m ² A_N a)]												
2006/07	19,3	14,4	18,9	0,6	2,3	7,8	1,5	0,8	3,2	1,7	1,3	1,1
2007/08	19,9	19,0	15,6	0,4	2,4	2,8	1,3	1,0	3,4	1,7	1,3	1,1
auf Personen bezogen [kWh/(Pers*a)]												
2006/07	1313,9	985,4	1290,1	43,2	160,4	530,9	103,1	56,3	261,1	114,7	90,2	75,9
2007/08	1358,5	1297,9	1065,4	30,3	167,1	189,9	85,5	65,2	695,1	117,9	90,8	76,0

* inklusive Baustrom für Montage GEDT

Die personenbezogenen Haushaltsstromverbräuche liegen mit Werten zwischen 985 und 1358 kWh/(Pers*a) im Bereich üblicher Werte für Haushalte dieser Größe. Bei den Absolutwerten wurden aus Datenschutzgründen nur die Summenwerte für das gesamte Gebäude ausgewiesen, obwohl die Einzelverbräuche teilweise beträchtlich differieren.

Beim Allgemiestrom fällt der geringe Verbrauch im ESH 40 auf. Ein möglicher Grund hierfür besteht darin, dass eventuell bei den anderen Gebäuden, in denen teilweise noch alte Elektroinstallationen vorhanden sind, der Mieterstrom im Keller teilweise am Allgemiestromzähler angeschlossen ist. Für die Montage der GEDT-Elemente im Herbst 2006 wurde der Baustrom am Allgemiestromzähler des EnEV-Gebäudes angeschlossen, so dass der hohe Wert von 2123 kWh erklärt werden kann.

Die Lüftungsstromverbräuche liegen beim ESH 40 (Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung) zwischen 1,3 und 1,5 kWh/(m² A_N a), im ESH 60 mit der Abluftanlage zwischen 0,8 und 1,0 kWh/(m² A_N a). Für den Betrieb der Heizungsanlage, der Umwälzpumpen und der Regelung wurden ca. 4,5 kWh/(m² A_N a) Stromverbrauch erfasst. Die Pumpen und Regelungseinrichtungen im ESH 60 und im EnEV-Neubau-Gebäude wurden über ein Kabel ebenfalls über den zentralen Heizungszähler erfasst.

Verteilt man den Stromverbrauch für die Heizung gleichmäßig auf die drei versorgten Gebäude und addiert den Lüftungsstromverbrauch je Gebäude hinzu, so ergeben sich auf die Gebäudefläche A_N bezogen die in Tabelle 4.2-7 angegebenen Werte.

Tabelle 4.2-7: Hilfsstromverbräuche der unterschiedlichen Gebäudestandards, bezogen auf die Gebäudefläche A_N

	ESH40	ESH60	EnEV
	Hilfsstromverbrauch [kWh/m ² AN*a]		
2006/07	5,2	4,7	3,9
2007/08	5,1	4,9	4,1

4.2.3 Temperaturen und Raumlufffeuchten

Zur Erfassung der Raumlufftemperaturen der Gebäude wurde in jeder Wohneinheit in (fast) jedem Wohnraum (Zuluftraum) ein Raumtemperaturfühler installiert. Die gemessenen Temperaturen wurden mit der jeweiligen Wohnfläche gewichtet, um Mittelwerte für die Wohneinheit bzw. das Gebäude zu ermitteln. Bei den beiden Gebäuden mit Lüftungsanlagen wurden die Temperaturen der Abluft mit der Fläche der Ablufträume in die Mittelung einbezogen. Im Gebäude ohne Lüftungsanlage (EnEV-Neubau) war zusätzlich im Bad ein Temperaturfühler installiert. Die Temperatur des Treppenhauses wurde in jedem Gebäude mit 5 % Flächenanteil berücksichtigt.

In jeder Wohnung wurde ein Raumlufffeuchtefühler im Wohnzimmer montiert. Die Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung besaßen einen zusätzlichen Feuchtefühler in der Abluft. Hier wurde das arithmetische Mittel der Messwerte gebildet.

Tabelle 4.2-8: Mitteltemperaturen der unterschiedlichen Gebäudestandards

	ESH40	ESH60	EnEV
	Jahremitteltemperatur [°C]		
2006/07	22,2	23,4	20,7
2007/08	21,8	22,9	20,3
	Mitteltemperatur November-März [°C]		
2006/07	20,2	21,9	18,9
2007/08	20,1	21,3	18,6
	Temperatur mit Heizwärmeverbrauch gew. [°C]		
2006/07	21,1	23,1	19,6
2007/08	20,7	22,7	19,3
	Mitteltemperatur Juni - August [°C]		
2006/07	24,6	25,3	23,4
2007/08	24,5	25,0	22,6

In Tabelle 4.2-8 sind die Mitteltemperaturen aller drei Gebäude zusammengestellt. Es fällt auf, dass die Jahresmitteltemperatur im ESH 60 ca. 2,5 °C über derjenigen im EnEV-Neubau-Gebäude liegt, das ESH 40 liegt zwischen den beiden anderen Gebäuden. Betrachtet man nur die Zeit von November bis März (Kern-Heizperiode), so erreicht das ESH 40 in beiden Messjahren Temperaturen von ca. 20 °C. Im ESH 60 lagen die Temperaturen zwischen 21,3 und 21,9 °C, d. h. die Temperaturen weichen deutlich von den Standardrandbedingungen der Bilanzierung nach Energieeinspar-Verordnung (19 °C) ab. Beim EnEV-Neubau-Standard wurden Temperaturen von ca. 18,7 °C gemessen. In diesem Gebäude wurden im Mittel die Ansätze der EnEV noch leicht unterschritten, im Vergleich zu den anderen Gebäuden fielen die Temperaturen deutlich niedriger aus.

Wenn keine feste Heizperiode angesetzt wird, sondern die im Gebäude tatsächlich verbrauchte Wärmemenge für die Beheizung als Kriterium zur Festlegung der Heiztage verwendet wird, erhält man eine „verbrauchsorientierte“ Temperatur an Heiztagen. Diese lag beim ESH 40 im ersten (warmen) Winter bei 21,1 °C im etwas kühleren zweiten Winter bei 20,7 °C und somit 0,6 bis 0,9 °C über den Wintertemperaturen. Beim ESH 60 erreichte die verbrauchsorientierte Mitteltemperatur 23,1 °C bzw. 22,7 °C, das bedeutet, die tatsächliche Temperatur an Heiztagen lag nochmals ca. 1,3 °C über der Mitteltemperatur im Kernwinter. Beim EnEV-Neubau-Standard erhöhten sich die Werte nur um 0,7 °C. Die Mitteltemperaturen im Sommer (Juni - August) reichten von 22,6 °C im zweiten vermessenen Sommer im EnEV-Gebäude bis zu 25,3 °C im ersten Sommer in ESH 60. Somit kann festgehalten werden, dass die Temperaturen im ESH 60 über alle Auswertungen am höchsten lagen und im EnEV-Neubau-Gebäude am niedrigsten. Da es keine Begrenzungen bei der Heizleistung in den Wohnungen gab und die Gebäudeorientierung sowie Möglichkeiten zur Verschattung bei allen drei Gebäuden gleich waren, ist davon auszugehen, dass die gemessenen Temperaturen weitgehend den Nutzungsgewohnheiten bzw. Wünschen der Mieter entsprechen.

Abbildung 4.2-6 zeigt die Monatsmittelwerte der einzelnen Gebäude sowie die Außentemperatur. Es wird deutlich, dass beim EnEV-Neubau-Haus die Raumtemperaturen im Winter meist unter 19 °C, also vergleichsweise niedrig lagen. Im ESH 40 wurden 20 °C nur selten unterschritten und im ESH 60 lag die Temperatur meist über 21 °C. Die Spitzenwerte im Sommer traten im Juli 2006 auf und lagen zwischen 26,0 °C und 27,5 °C.

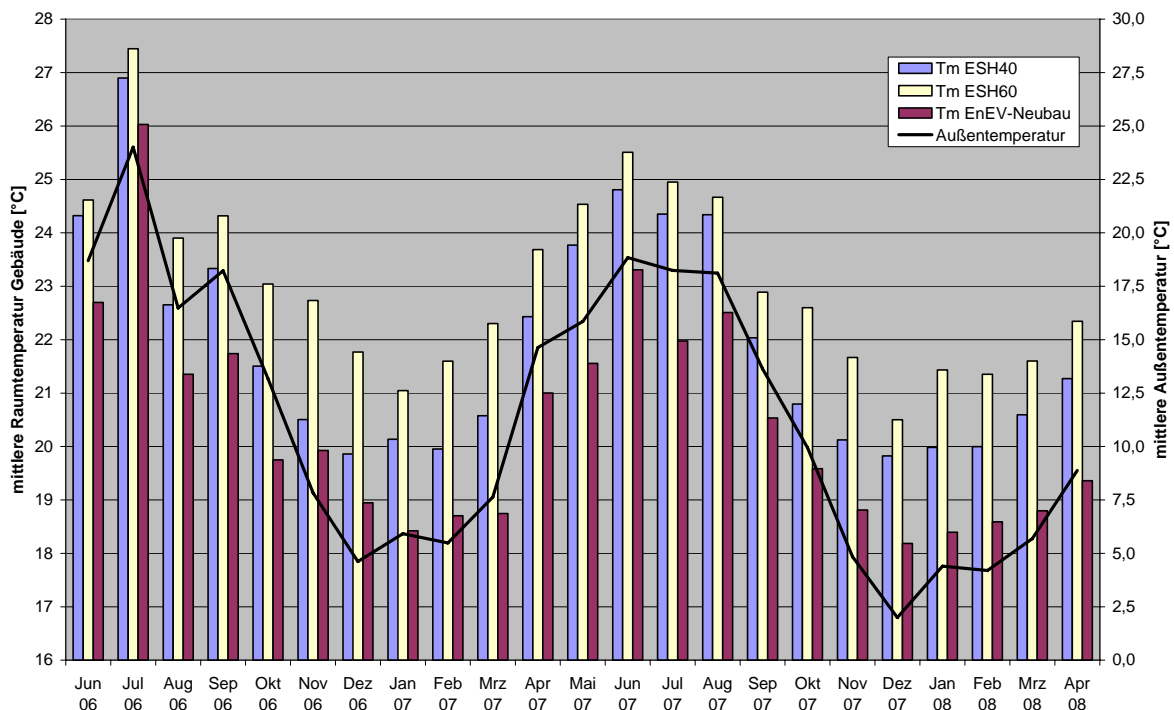


Abbildung 4.2-6: Vergleich der mittleren Gebäudetemperaturen bei den unterschiedlichen Standards

Die folgenden Abbildungen zeigen die Tagesmittelwerte der einzelnen Gebäude für die gesamte Messperiode. Bei allen drei Häusern traten im ersten Sommer Temperaturspitzen

bis ca. 30 °C an einzelnen Tagen auf. Inwieweit die Mieter dabei besonders in den südorientierten Dachgeschosswohnungen die außen liegenden Rollläden zur Verschattung genutzt haben, kann aus den Messwerten nicht entnommen werden. Im zweiten Sommer wurden nur Maximalwerte bis ca. 28 °C erreicht. Hier sind neben eventuellen Änderungen bei der Bedienung der Verschattung sicherlich die niedrigeren Temperaturen im Sommer 2007 der Grund für die geringeren Temperaturspitzen. Die Wintertemperaturen entwickelten sich bei den unterschiedlichen Gebäuden verschieden, so dass sie im Folgenden separat betrachtet werden sollen.

Im ESH 40 (Abbildung 4.2-7) liegen die Wintertemperaturen im Dachgeschoss am niedrigsten (hier liegen die Schlafräume der Maisonettwohnung des OG), im Erdgeschoss am höchsten. Die Temperaturen lagen zwischen 19 °C und 22 °C. Da alle Räume mit Heizkörpern ausgestattet sind und keine Klagen zu nicht ausreichender Heizleistung bekannt wurden, ist davon auszugehen, dass die gemessenen Temperaturen dem gewünschten Komfortniveau der Bewohner entsprechen.

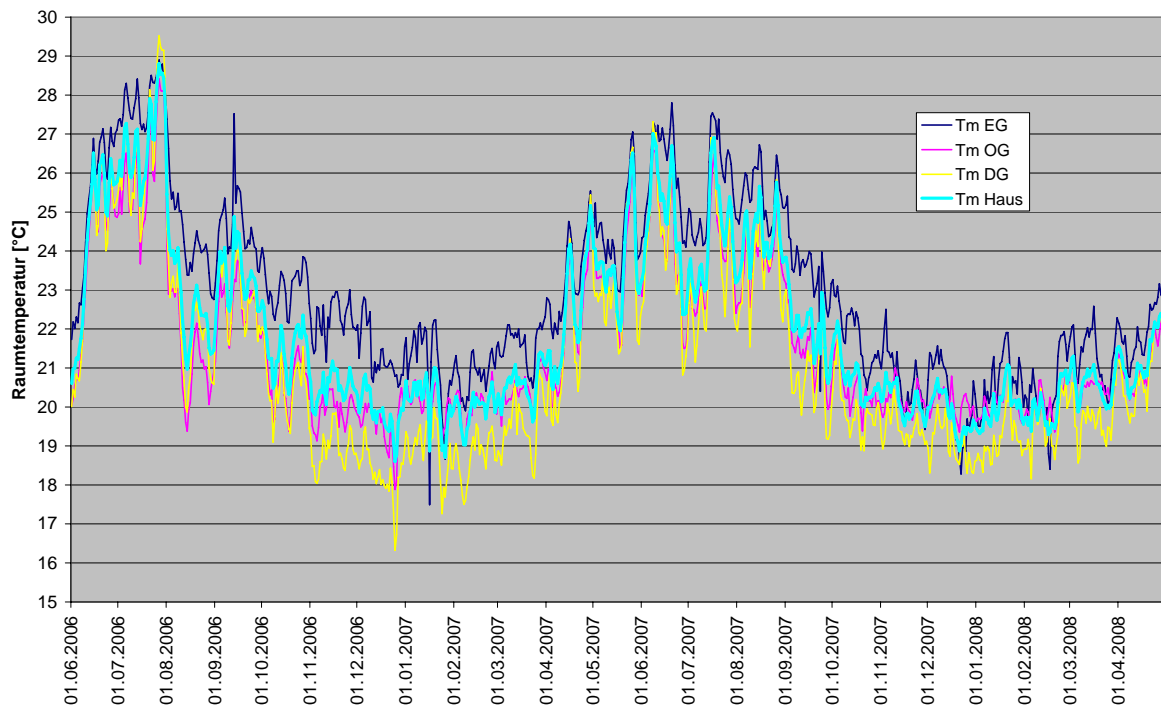


Abbildung 4.2-7: Verlauf der Raumtemperaturen im ESH 40

Im ESH 60 (Abbildung 4.2-8) ist zu berücksichtigen, dass das Dachgeschoss nicht direkt bewohnt wird und die Räume als Atelier oder als Gästezimmer verwendet werden. Im ersten Winter waren die Heizkörperthermostate im Dachgeschoss erst auf eine Temperatur von ca. 21 °C eingestellt, später sank die Temperatur auf ca. 20 °C. Im zweiten Winter waren die Thermostate offensichtlich abgedreht, da die Raumtemperatur im Dachgeschoss zum Teil sehr weit absinkt und an sonnigen Tagen starken Schwankungen unterworfen ist, die wohl auf die Solarerträge des Zimmers mit großen Südfenstern zurückzuführen sind. Im Erdgeschoss sinkt die Raumtemperatur dagegen kaum unter 22 °C im ersten Winter und unter 23 °C im zweiten Winter.

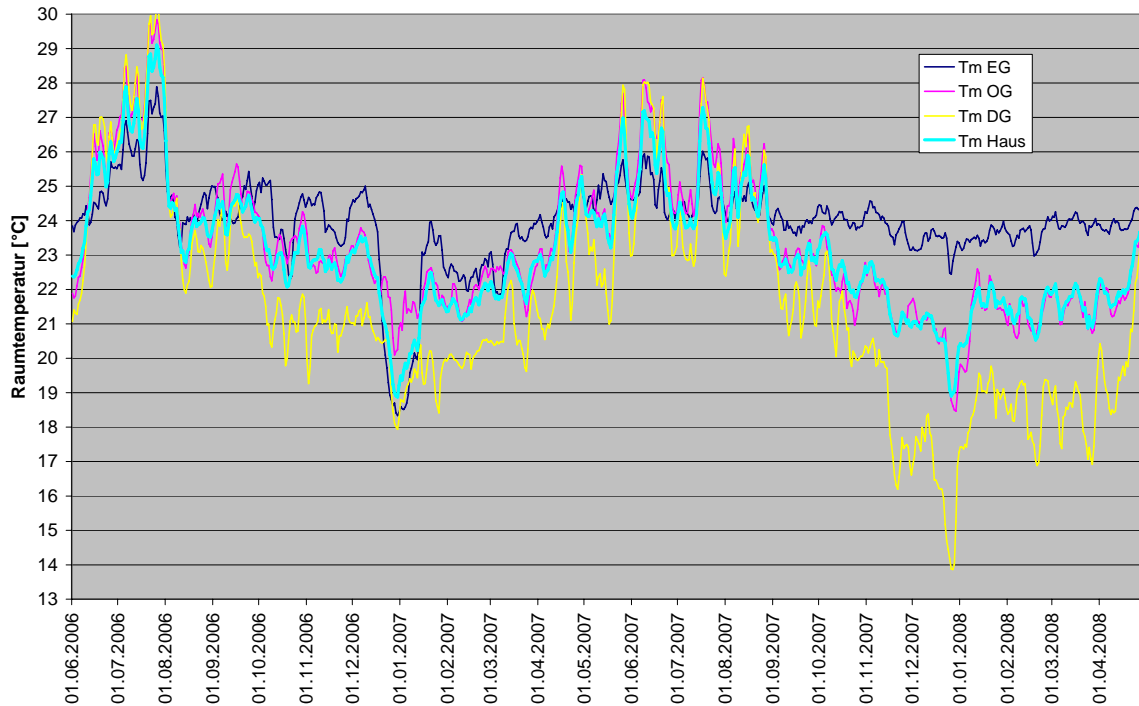


Abbildung 4.2-8: Verlauf der Raumtemperaturen im ESH 60

Die Raumlufttemperaturen sind bei den beiden Wohnungen sehr unterschiedlich. Abbildung 4.2-9 zeigt die Temperaturen der einzelnen Räume in EG und OG über einen Zeitraum von 8 Tagen. Innerhalb dieses Zeitraumes sank die Außentemperatur von ca. 12 °C auf unter -6 °C (kältester Tag des Messzeitraumes). Räume mit der gleichen Bezeichnung liegen übereinander. Man erkennt, dass die Temperaturen im Erdgeschoss immer deutlich über denen des Obergeschosses lagen.

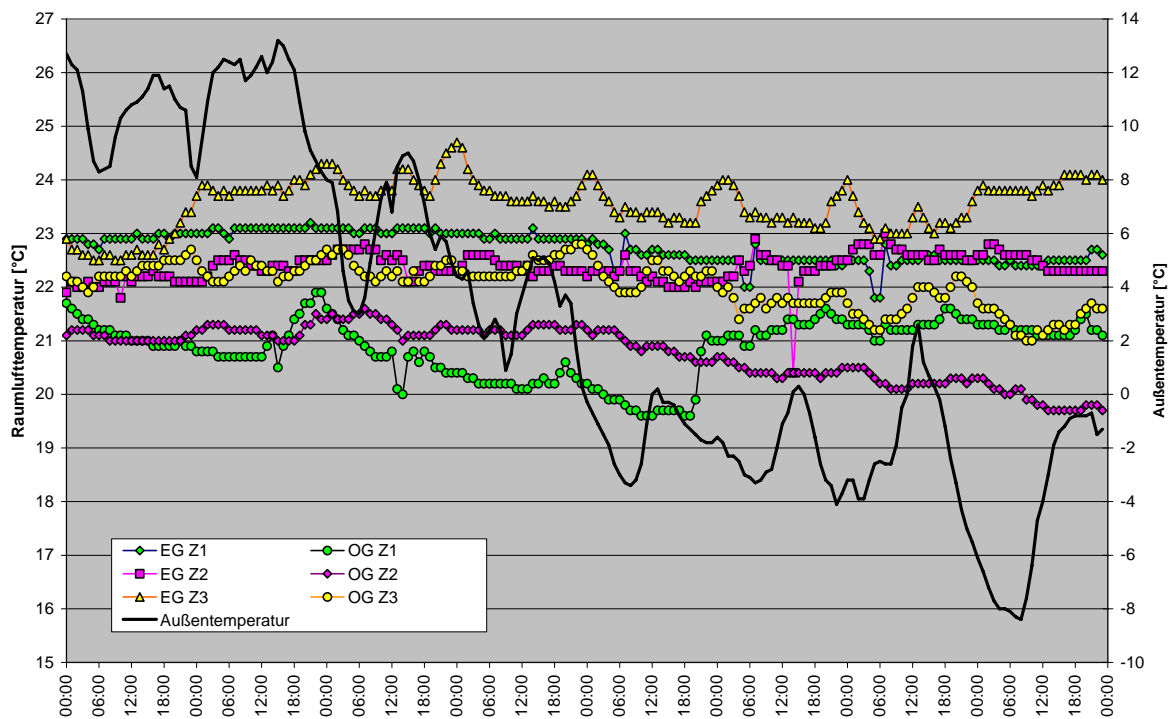


Abbildung 4.2-9: Temperaturen in EG und OG vom 19. - 26.Januar 2007 im ESH 60

Da im OG kaum Heizwärme abgenommen wird, die Wohnungen durch die Holzbalkendecke thermisch gut miteinander gekoppelt sind und die Temperaturen im EG zwischen 1 und 3 K über denen im OG liegen, stammt ein Teil der Wärme im OG aus dem EG des Gebäudes. Im EnEV-Neubau-Gebäude liegen die Temperaturen im Winter bei den einzelnen Stockwerken sehr niedrig (19 °C) und näher beieinander als bei den anderen Gebäuden. Das Dachgeschoss ist hier im Winter wie im Sommer den stärksten Schwankungen unterworfen. Im zweiten Winter wurden im Erdgeschoss regelmäßig Temperaturen zwischen 16 und 18 °C gemessen.

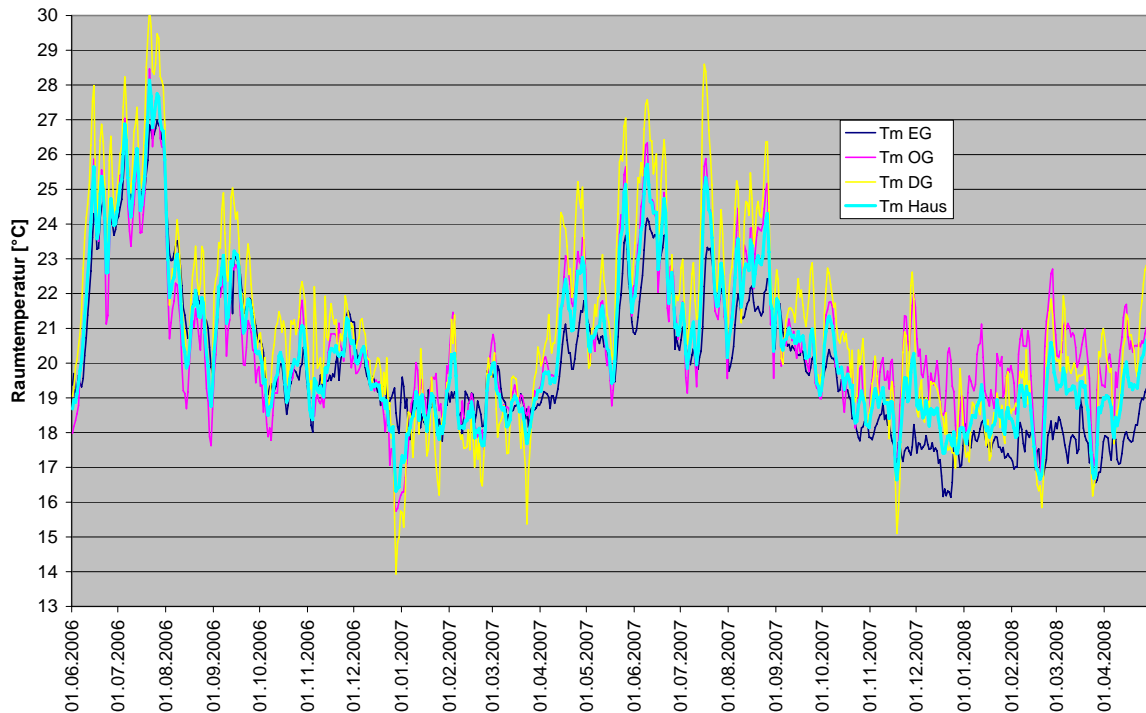


Abbildung 4.2-10: Verlauf der Raumtemperaturen im EnEV-Neubau-Gebäude

Auch bei diesem Gebäude gab es keine Klagen bezüglich der Beheizbarkeit, so dass davon auszugehen ist, dass die gemessenen Temperaturen von den Mietern so gewünscht wurden. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass im Gebäude nach EnEV-Neubau-Standard nur zwei Personen wohnen und eine Teilbeheizung einzelner Räume (z. B. Schlafzimmer, Bad) die Mitteltemperatur der Wohnung absenkt.

Kellertemperaturen

Die Temperaturen im Keller wurden im Flur in der Mitte des Gebäudes gemessen. Den Verlauf zeigt Abbildung 4.2-11 für die gesamte Messphase und alle drei Gebäude. Im ESH 40 liegen die Temperaturen am höchsten und unterschreiten auch im Winter nie 20 °C. Der Grund ist die Abwärme aus Pelletkessel und Heizraum, der auch im Winter nicht unter 28 °C abkühlt. Die Erdgeschosswohnung in diesem Gebäude wird somit teilweise über den Keller mit beheizt. In den beiden anderen Gebäuden liegen die Kellertemperaturen niedriger. Im Sommer 2006 erreicht das EnEV-Gebäude 22 °C, im Sommer 2007 ca. 20 °C. Die minimalen Werte im Winter fallen hier auf 14 °C bzw. 12 °C. Diese Temperaturen könnten besonders an den Außenwänden, wo noch niedrigere Werte zu erwarten sind, zu Feuchtproblemen führen, zumal sich eine Waschküche für die Mieter im Keller befindet.

Dieser Raum wird jedoch durch den WW-Speicher und die Nahwärmeverteilung auf höheren Temperaturen gehalten.

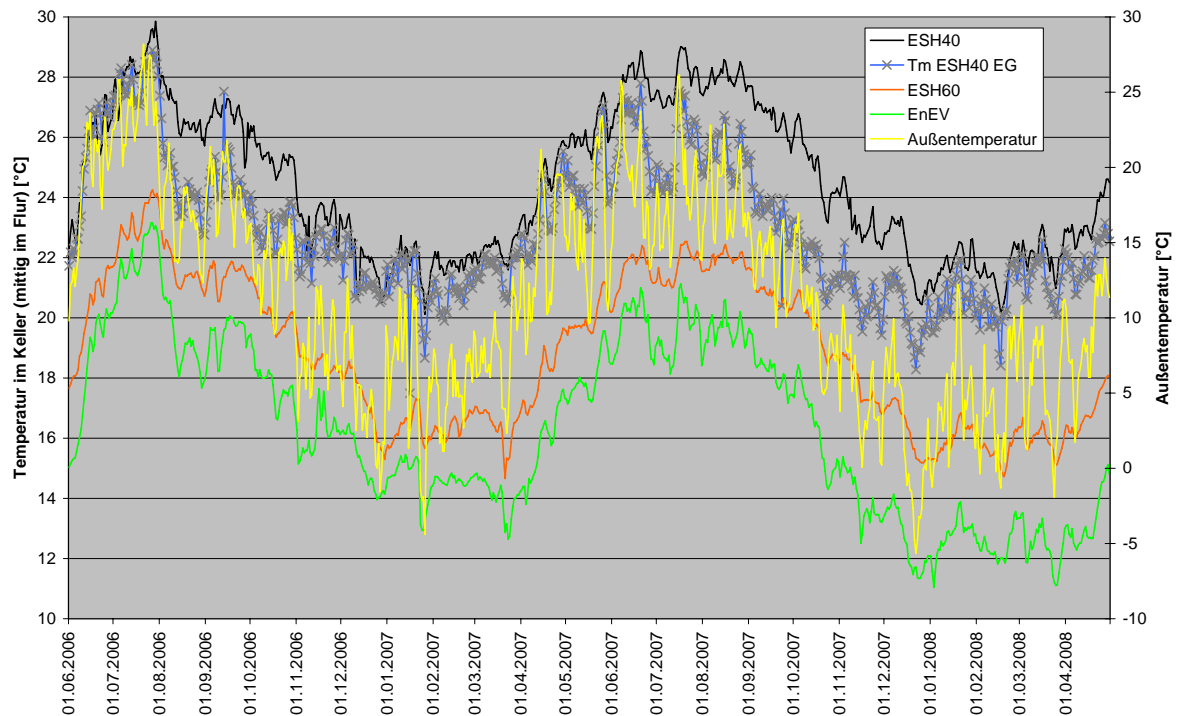


Abbildung 4.2-11: Kellertemperaturen in den drei Gebäuden und Temperatur EG im ESH 40

Im ESH 60 liegen die minimalen Temperaturen im Winter bei 15 - 16 °C. Keller und Wärmeverteilung sind hier ähnlich aufgebaut wie im Gebäude mit EnEV-Neubau-Standard, so dass ein Grund für die höheren Temperaturen im ESH 60 bei gleichem U-Wert der Kellerdecke in den um ca. 5 K höheren Temperaturen der Erdgeschosswohnung liegen könnte. Als weitere Einflussgröße könnte eventuell noch eine unterschiedliche Belüftung der Keller in Frage kommen. Die Mittelwerte der Kellertemperaturen im Winter 2007/08 liegen bei 22,1 °C im ESH 40, 16,3 °C im ESH 60 und 12,8 °C im EnEV-Gebäude.

Treppenhäuser

In Abbildung 4.2-12 sind die Temperaturen in den Treppenhäusern der drei Gebäude dokumentiert. Die Treppenhäuser besitzen keine Heizkörper und erhalten die Wärme aus den sie umgebenden Wohnungen. Auch hier liegen die Temperaturen im ESH 60 im Winter am höchsten (Mittelwert 19,7 °C im Winter 2007/08), im EnEV-Gebäude am niedrigsten (Mittelwert 15,4 °C im Winter 2007/08). Das ESH 40 erreicht eine Mitteltemperatur von 18,7 °C im Flur.

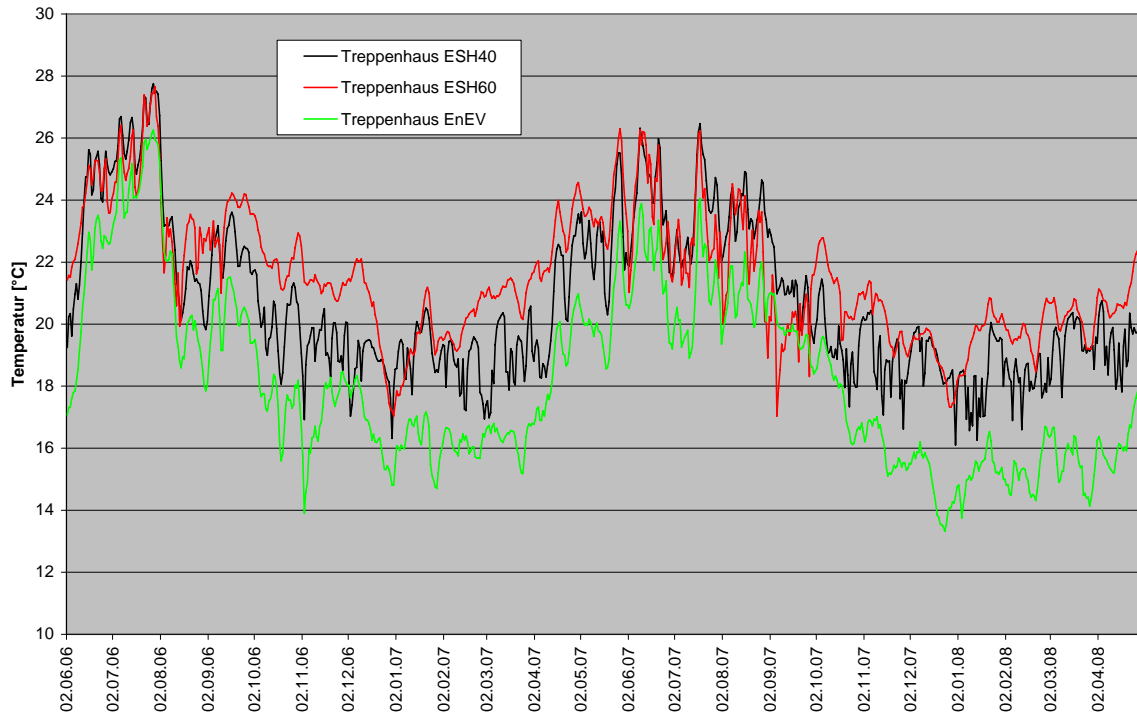


Abbildung 4.2-12: Temperaturen der Treppenhäuser in den drei Gebäuden

Temperaturen vor der Sanierung

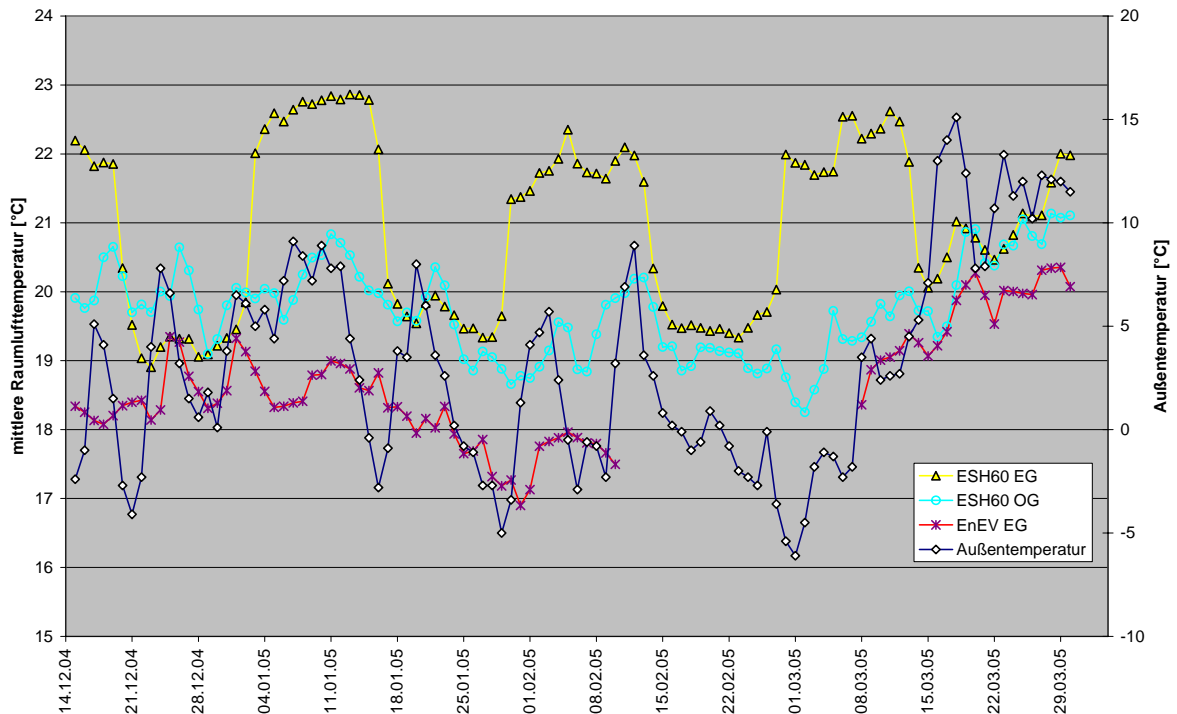


Abbildung 4.2-13: Temperaturen vor der Sanierung in den Wohneinheiten ohne Mieterwechsel

In den Gebäuden, die zum ESH 60 und auf EnEV-Neubaustandard saniert wurden fand in einigen Wohnungen kein Mieterwechsel statt. Um eventuelle Veränderungen vor und nach der Sanierung bei den Raumlufttemperaturen oder im Fensteröffnungsverhalten feststellen

zu können, wurden in diesen Wohnungen vor der energetischen Sanierung ebenfalls Messdaten erfasst. Zum Einsatz kamen dabei Datenlogger der Firma Duplex mit den zugehörigen Temperaturfühlern. Es handelt sich somit nicht um die gleiche Messtechnik wie nach der Sanierung.

Die Auswertungen der Mitteltemperaturen in den Wohnungen vor der Sanierung zeigt Abbildung 4.2-13. In der Erdgeschosswohnung des ESH 60 (Linie mit Dreiecken) tritt ein ausgeprägter Zwei-Wochen-Rhythmus bei den Mietern auf, der auf Abwesenheitszeiten zurückzuführen ist. Die Temperaturen liegen bei ca. 22 °C bei Anwesenheit der Mieter und 19,5 °C bei Abwesenheit. Dieser Rhythmus von An- und Abwesenheiten mit den dazugehörigen Temperaturen tritt nach der Sanierung im ersten Winter auch noch auf, im Verlauf des ersten Messjahres ändert sich das Verhalten jedoch und die Wohnung ist dann dauerhaft bewohnt (siehe Abbildung 4.2-8). Im Obergeschoss dieses Gebäudes (Linie mit Kreisen) liegen die Temperaturen vor der Sanierung zwischen 19 °C und 20 °C, nach der Sanierung zwischen 21 °C und 22 °C, so dass nach der Sanierung die Temperaturen – zumindest im Vergleich mit dem vorliegenden Zeitausschnitt - um ca. 2 °C angestiegen sind. Im EnEV-Neubau-Gebäude lagen die Raumtemperaturen vor der Sanierung (Linie mit dunklen Sternen) zwischen 17 °C und 19 °C, erst gegen Ende des Winters 2004/05 steigt die Raumtemperatur mit ansteigender Außentemperatur dauerhaft über 19 °C. Auch bei dieser Wohnung ist kein nennenswerter Unterschied zwischen den Temperaturen vor und nach der Sanierung festzustellen. Somit zeigt sich kein einheitliches Bild für den Vergleich vor und nach der Sanierung.

Raumluftfeuchte

Abbildung 4.2-14 zeigt die drei mittleren Gebäudetemperaturen und die zugehörigen mittleren Raumluftfeuchten in den Häusern nach der Sanierung. Es ist ein deutlicher Jahresgang der Raumtemperaturen zu erkennen, der synchron mit der Außentemperatur verläuft. Bei den Feuchtwerten (gestrichelte Linie mit Bezug auf die rechte Y-Achse) fällt auf, dass die Raumluftfeuchten im EnEV-Neubau-Gebäude, das keine mechanische Lüftungsanlage besitzt und bei dem die Lüftung vollständig über die Bewohner erfolgt, mit Abstand die höchsten Werte aufweisen. Dabei sind aber auch die niedrigen Raumlufttemperaturen in diesem Gebäude zu berücksichtigen. Im Winter liegen die Raumluftfeuchten zwischen 55 – 60 % rel. Feuchte. Dieser Wert wird nur im sehr warmen Mai 2007 nennenswert unterschritten. Die Spitzenwerte der Raumluftfeuchte liegen bei diesem Gebäude bei 71 % rel. Feuchte.

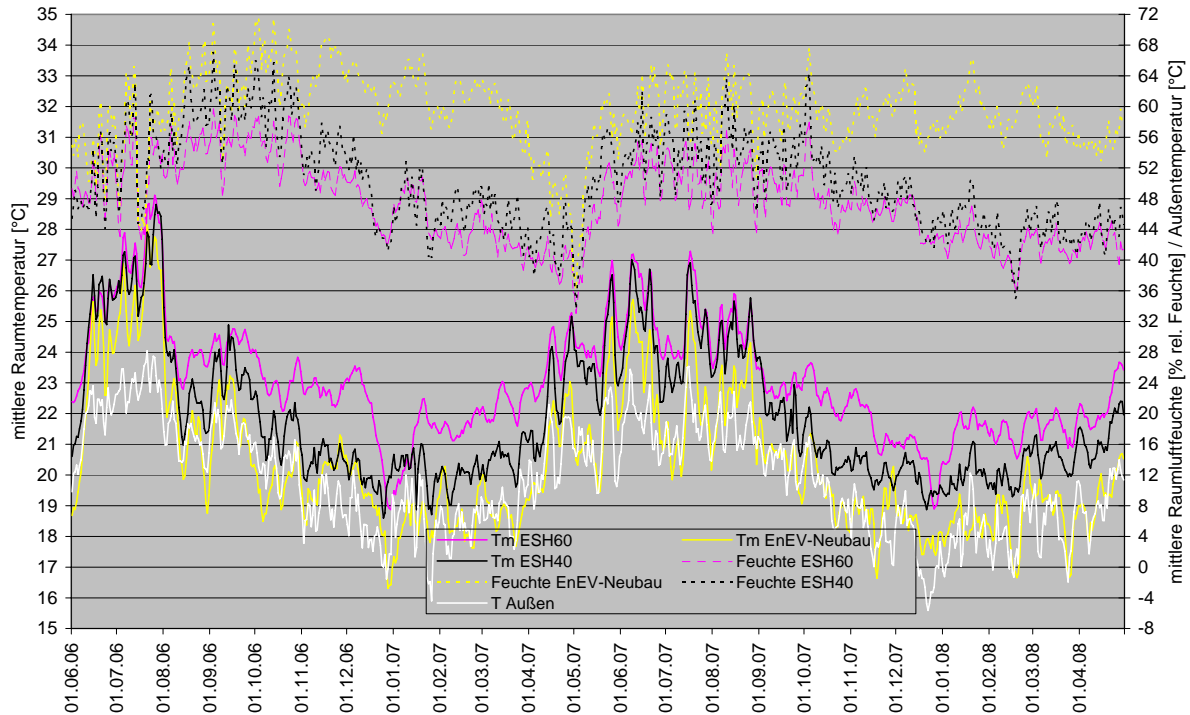


Abbildung 4.2-14: Vergleich der Raumlufthtemperaturen und der Raumlufthfeuchten als Mittelwert für das gesamte Gebäude

Beim ESH 40 und ESH 60 liegt die Raumlufthfeuchte im Winter im Bereich von 40 - 50 %, was einem guten Komfortniveau ohne zu trockene Luft entspricht. Selbst in den heißen Sommermonaten steigt die Raumlufthfeuchte kaum über 60 % an. Beim ESH 40 fließt auch ein, dass der Luftwechsel aufgrund der Mietereingriffe in die Lüftungsregelung unter dem Auslegungsluftwechsel liegt.

Bei den Monatsmittelwerten der Raumlufthfeuchte in Abbildung 4.2-15 werden die Unterschiede der verschiedenen Gebäude und somit der unterschiedlichen Lüftungskonzepte noch einmal deutlich. Im EnEV-Neubau-Gebäude liegen die mittleren Monatswerte der Raumlufthfeuchte besonders im Winter signifikant über denen der Gebäude mit mechanischer Lüftung, die sich kaum voneinander unterscheiden.

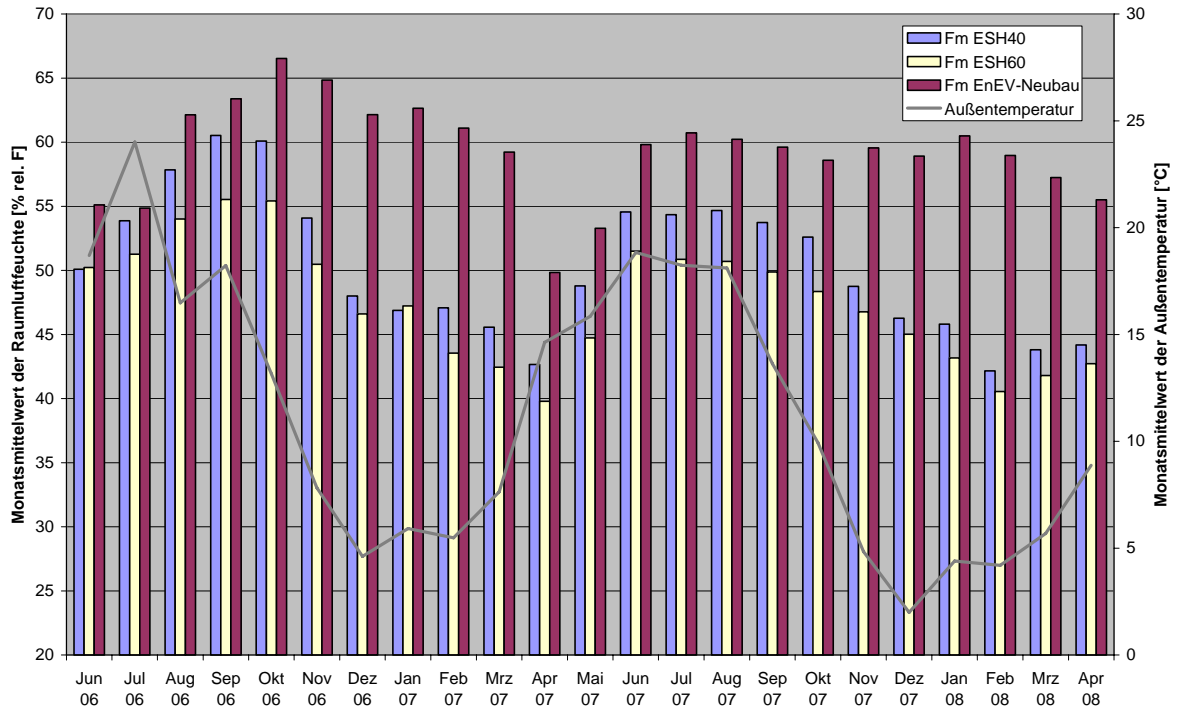


Abbildung 4.2-15: Monatsmittelwerte der Raumlufffeuchte der drei Gebäude

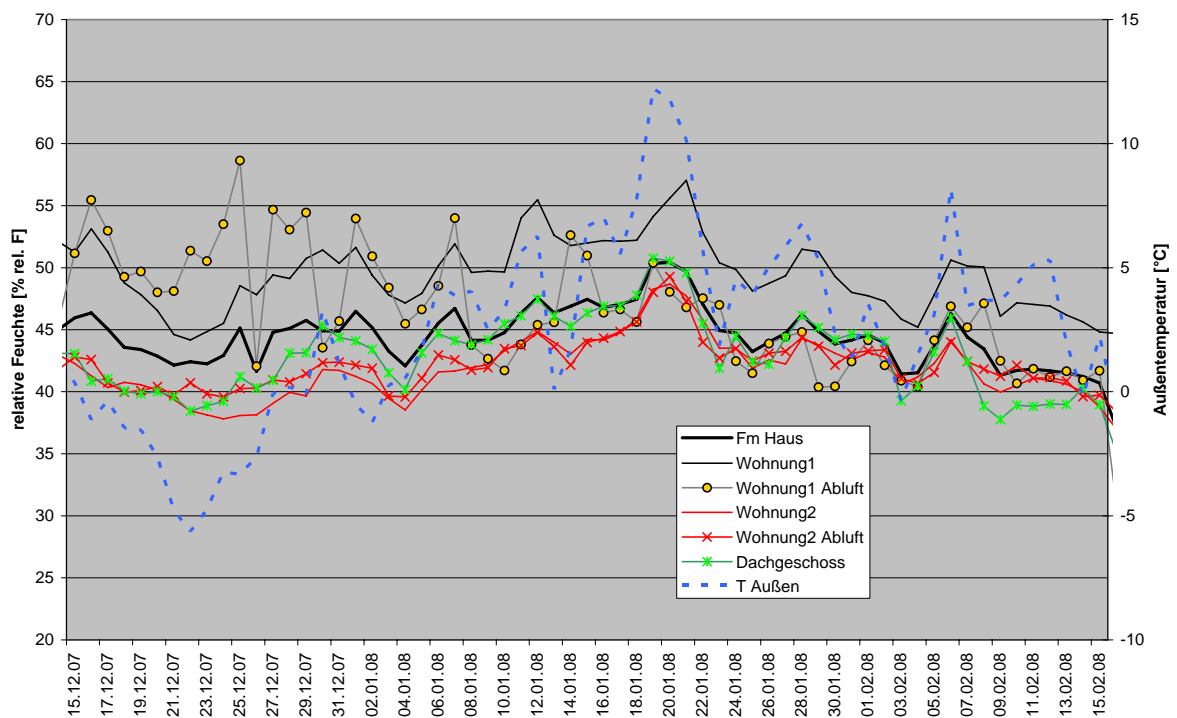


Abbildung 4.2-16: Vergleich der gemessenen Raumlufffeuchten im ESH 40 über zwei Monate im Winter

Abbildung 4.2-16 zeigt die Verteilung der relativen Raumlufffeuchten über zwei Monate im ESH 40. In Wohnung 2 (rote Linien) lag in der Vorweihnachtszeit (im Diagramm ganz links) mit niedrigen Außentemperaturen bis $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ die relative Feuchte sowohl in der Abluft als auch im Wohnzimmer bei ca. 40 %. Ähnliche Werte wurden auch im Dachgeschoss gemessen. In

Wohnung 1 (schwarze Linien) hingegen lagen die Messwerte mit minimal 45 % relativer Feuchte nennenswert höher, ohne dass kritische Bereiche erreicht wurden. Hier sind in der Abluft Spitzenwerte von 58 % im Tagesmittel gemessen worden. Die Abluftfeuchte wird durch die Feuchte in der Küche und im Bad beeinflusst. Im weiteren Verlauf des dargestellten Zeitraumes treten die Spitzen in der Abluft von Wohnung 1 nicht mehr auf, im Wohnzimmer bleibt die Feuchte aber dauerhaft über den anderen Werten. Gründe für diese Verläufe liegen wohl im Nutzerverhalten im ausgewählten Zeitraum. Grundsätzlich können die Ergebnisse zu den Feuchtwerten im ESH 40 als gut bezeichnet werden.

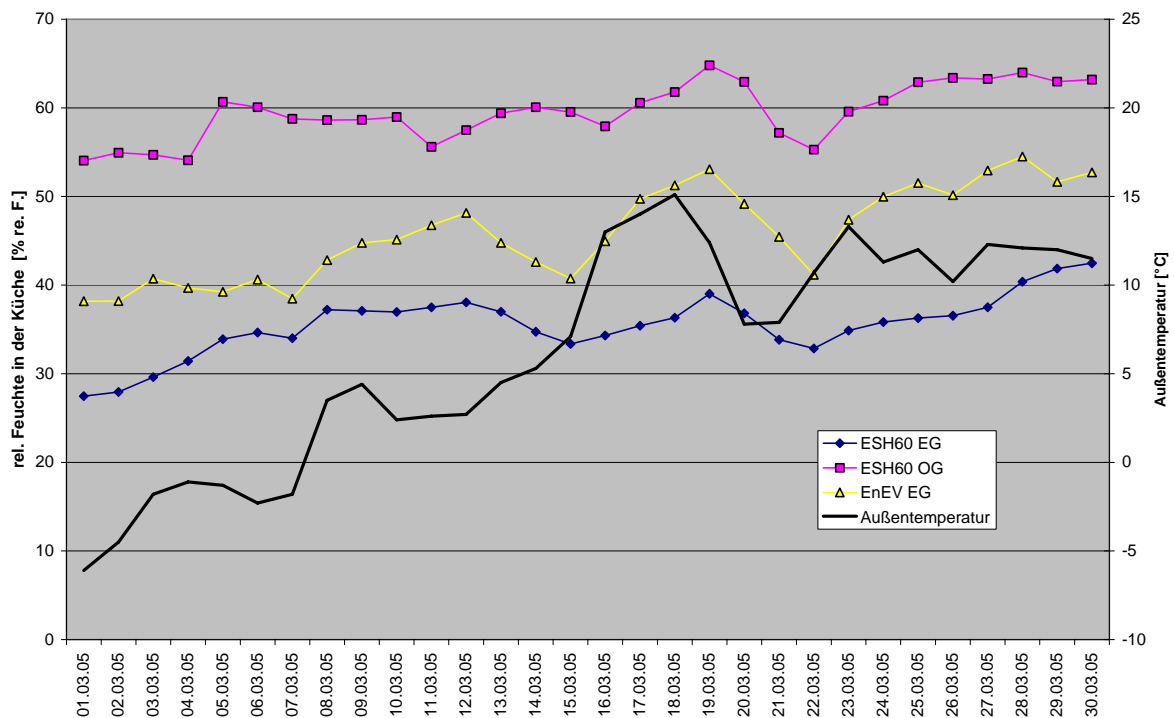


Abbildung 4.2-17: Raumlufffeuchten (in der Küche) vor der Sanierung

Für die Situation vor der Sanierung zeigt Abbildung 4.2-17 die Raumlufffeuchten in der Küche in den drei Wohneinheiten, in denen kein Mieterwechsel stattfand. In der ersten Messwoche herrschten noch sehr niedrige Außentemperaturen mit Minusgraden. Die gemessenen Feuchtwerte liegen zwischen ca. 30 % und ca. 58 %. Berücksichtigt man den unzureichenden Dämmstandard vor Sanierung und die Tatsache, dass die Raumlufffeuchte an einer Innenwand gemessen wurde, so ist der obere Feuchtwert als kritisch zu bewerten. Mit steigenden Außentemperaturen steigen überwiegend auch die Raumlufffeuchten an, so dass gegen Ende der dargestellten Periode die Feuchte zwischen 35 % und 64 % liegt. Im Vergleich zur Situation nach der Sanierung kann festgestellt werden, dass die Raumlufffeuchte sich im ESH 60 mit Abluftanlage vergleichmäßig hat (40 - 50 % rel. Feuchte im Winter), im EnEV-Neubau-Gebäude (nur Fensterlüftung durch die Mieter) die Raumlufffeuchte in der untersuchten Wohnung aber deutlich angestiegen ist (50 - 60 % Raumlufffeuchte nach der Sanierung).

4.2.4 Fensteröffnung

In jeder Wohnung wurden alle Fenster mit zwei Fensterkontakten ausgestattet, um Fenster in der Kippstellung und ganz geöffnete Fenster unterscheiden zu können. Befanden sich mehrere Fenster in einem Raum, so wurde eine Fensteröffnung aufgezeichnet, wenn mindestens ein Kontakt dies angezeigt hat. In Tabelle 4.2-9 sind die Ergebnisse für die Messjahre zusammengefasst.

Tabelle 4.2-9 Mittelwerte der Fensteröffnungsdauer bei den drei Gebäudestandards

	ESH40		ESH60		EnEV	
	gekippt	ganz offen	gekippt	ganz offen	gekippt	ganz offen
	Jahr [min/(Fen*d)]					
2006/07	379	107	236	74	405	59
2007/08	324	68	276	54	303	113
	Heizperiode Nov-Mrz [min/(Fen*d)]					
2006/07	179	8	21	4	147	9
2007/08	96	5	28	6	78	5

Im Jahresmittelwert ergeben sich für das ESH 40 in der ersten Messperiode 379 Minuten Kippstellung pro Fenster und Tag, ganz geöffnet wurden die Fenster aber nur 107 Minuten. In der zweiten Messperiode lagen die Werte etwas darunter. Betrachtet man nur den Kernwinter mit der Zeit von November bis März so wurden noch Fensteröffnungszeiten von 179 Minuten Kippstellung und nur 8 Minuten Fensteröffnung gemessen. Die Bewohner verhalten sich im Winter somit anders als im Sommer. In der zweiten Heizperiode lagen die Fensteröffnungszeiten noch deutlich niedriger. So wurden die Fenster nur noch 95 Minuten pro Tag gekippt und 5 Minuten ganz geöffnet. Da die zweite Heizperiode deutlich kühler und länger war als die erste, sind die kürzeren Fensteröffnungszeiten als eine Reaktion der Mieter auf die kühleren Außentemperaturen zu interpretieren. Beim ESH 60 lagen die Werte für Kippstellung in den beiden Heizperioden bei 21 in der zweiten bei 28 Minuten Kippstellung pro Fenster und Tag. Ganz geöffnet wurden die Fenster nur 4 bzw. 6 Minuten pro Fenster und Tag. Beim EnEV-Neubau-Gebäude wurden die Fenster 147 bzw. 78 Minuten gekippt, aber nur 9 bzw. 5 Minuten ganz geöffnet.

Es ist somit festzustellen, dass im Gebäude nach ESH 40 Standard und mit Lüftungsanlage ungefähr so viel gelüftet wurde, wie im EnEV-Neubau-Gebäude ohne Lüftungsanlage. Die geringsten Fensteröffnungszeiten wurden im ESH 60 mit Abluftanlage gemessen. Diese Fensteröffnungszeiten können aufgrund der geringen Anzahl von Gebäuden aber nicht als Aussage über einen Zusammenhang zwischen Art der Lüftung und der zusätzlichen Fensterlüftung interpretiert werden. Vielmehr müssen die Werte mit Ergebnissen aus anderen Projekten verglichen werden. In [Ebel et al. 2003] wurden in 21 Passivhäusern und 7 Niedrigenergiehäusern die Fensteröffnungszeiten gemessen (Kippstellung). Im Mittel über alle Passivhäuser (Lüftungsanlagen mit mechanischer Zu- und Abluft) und über zwei Heizperioden ergaben sich dort 72 Minuten Fensteröffnung pro Fenster und Tag im Zeitraum von November bis März. Allerdings wurden in dieser Untersuchung zwei verschiedene Nutzungstypen identifiziert, nämlich die Taglüfter mit 28 Minuten Fensteröffnung und die Nachtlüfter mit 161 Minuten Fensteröffnung. Die Nachtlüfter haben in den meisten Nächten in einem Zimmer (Schlafzimmer) ein Fenster gekippt.

Sowohl im ESH 40 als auch im EnEV-Neubau-Gebäude findet sich eine Wohnung mit einem solchen Nachtlüftungsverhalten. Die sich ergebenden Fensteröffnungszeiten für das gesamte Gebäude korrespondieren gut mit der Vergleichsuntersuchung, wenn man berücksichtigt, dass bei dem Projekt in der Wilhelmstraße teilweise weniger Fenster pro

Wohnung vorhanden sind und sich ein gekipptes Fenster damit stärker auf den Mittelwert auswirkt. Im ESH 60 ergeben sich ohne Nachtlüfter exakt die gleichen Ergebnisse bei den Fensteröffnungszeiten wie bei den Taglüftern der Vergleichsuntersuchung.

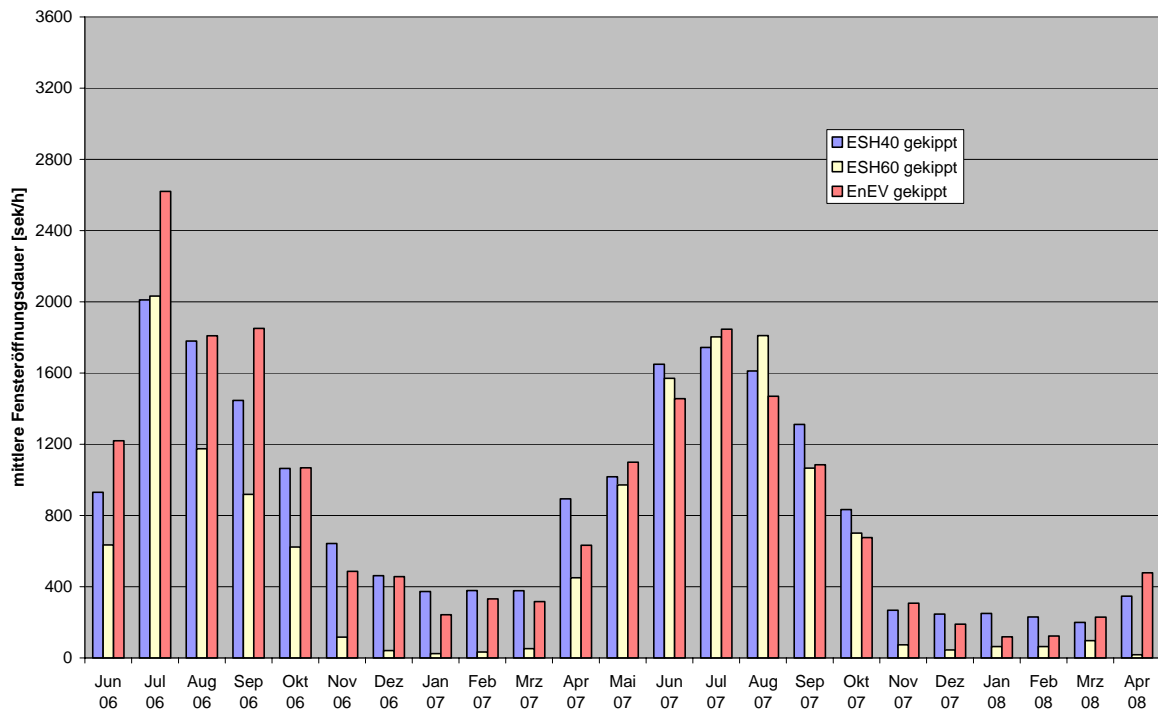


Abbildung 4.2-18: Monatswerte der Fensteröffnungsdauer (Kippstellung) der drei Standards

In Abbildung 4.2-18 sind die Monatswerte der Fensteröffnungsdauer für die Kippstellung für alle drei Gebäude dargestellt. Die Einheit ist hier die mittlere Fensteröffnungszeit in Sekunden pro Fenster und Stunde. In den Sommermonaten ist ein Großteil der Fenster bei allen Gebäuden geöffnet. Im Jahresverlauf sinken die Öffnungszeiten bei allen drei Gebäuden stark ab. Im ESH 60 wird im Winter kaum noch über die Fenster gelüftet. Bei ESH 40 und EnEV-Gebäude fallen die Fensteröffnungszeiten sehr ähnlich aus.

Abbildung 4.2-19 zeigt dagegen die Zeiten, in denen Fenster ganz geöffnet waren. Auch im Sommer wurden nur niedrige Werte bis zu 400 Sekunden pro Stunde (entspricht ca. 6 Minuten), im Winter wurde kaum noch das Fenster ganz geöffnet. Dies trifft auch für das EnEV-Gebäude zu, in dem, da keine Lüftungsanlage vorliegt, ein regelmäßiges Stoßlüften zu empfehlen wäre.

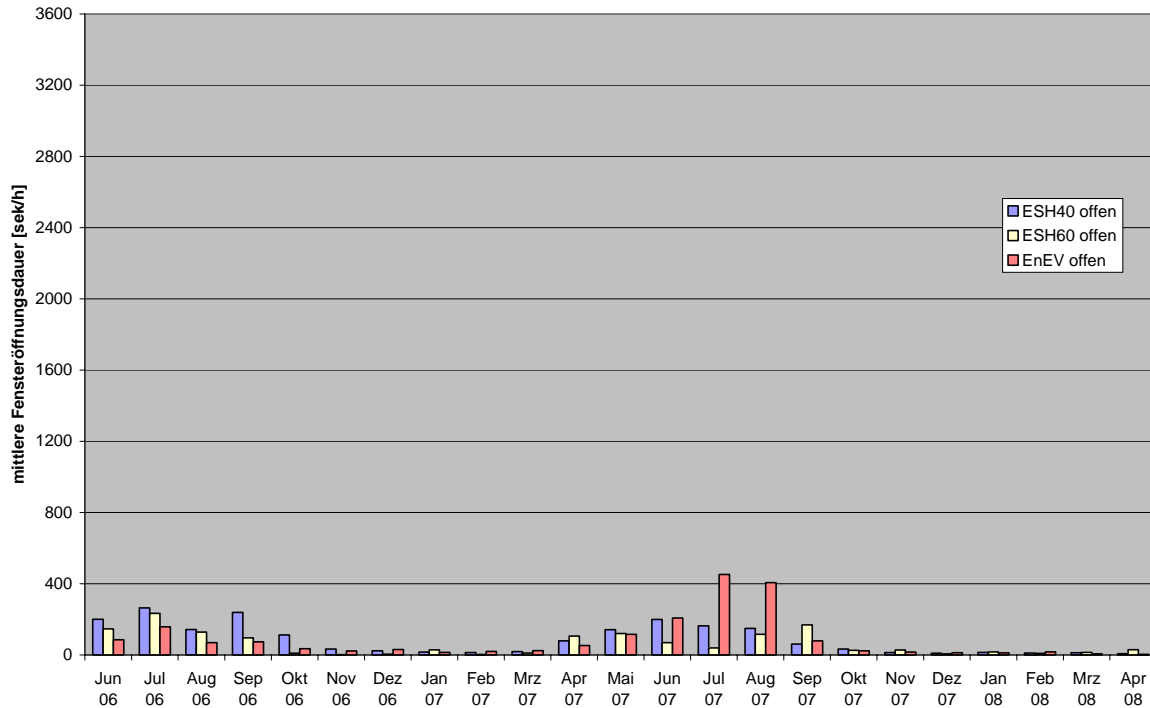


Abbildung 4.2-19: Monatswerte der Fensteröffnungsdauer (Fenster ganz geöffnet) der drei Standards

Den Zusammenhang zwischen der Fensteröffnungszeit und der Außentemperatur ist in Abbildung 4.2-20 dargestellt. Die X-Achse zeigt die Außentemperatur und die Y-Achse die mittlere Fensteröffnungsdauer. Für alle drei Gebäudestandards ist festzustellen, dass die Fensteröffnungsdauer bei niedrigen Außentemperaturen zwischen 0 und 400 Sekunden liegt. Erst ab etwa 12 °C steigt die Fensteröffnungsdauer steil an. Dieser Wert stimmt recht gut mit der angenommenen Heizgrenztemperatur der Gebäude überein.

In Abbildung 4.2-21 ist die Außentemperatur über die Zeit ganz geöffneter Fenster dargestellt. Auch hier treten unterhalb von ca. 12 °C kaum nennenswerte Fensteröffnungszeiten auf, d. h. auch hier verhalten sich die Nutzer „richtig“, indem Sie ihr Fensteröffnungsverhalten der Außentemperatur anpassen.

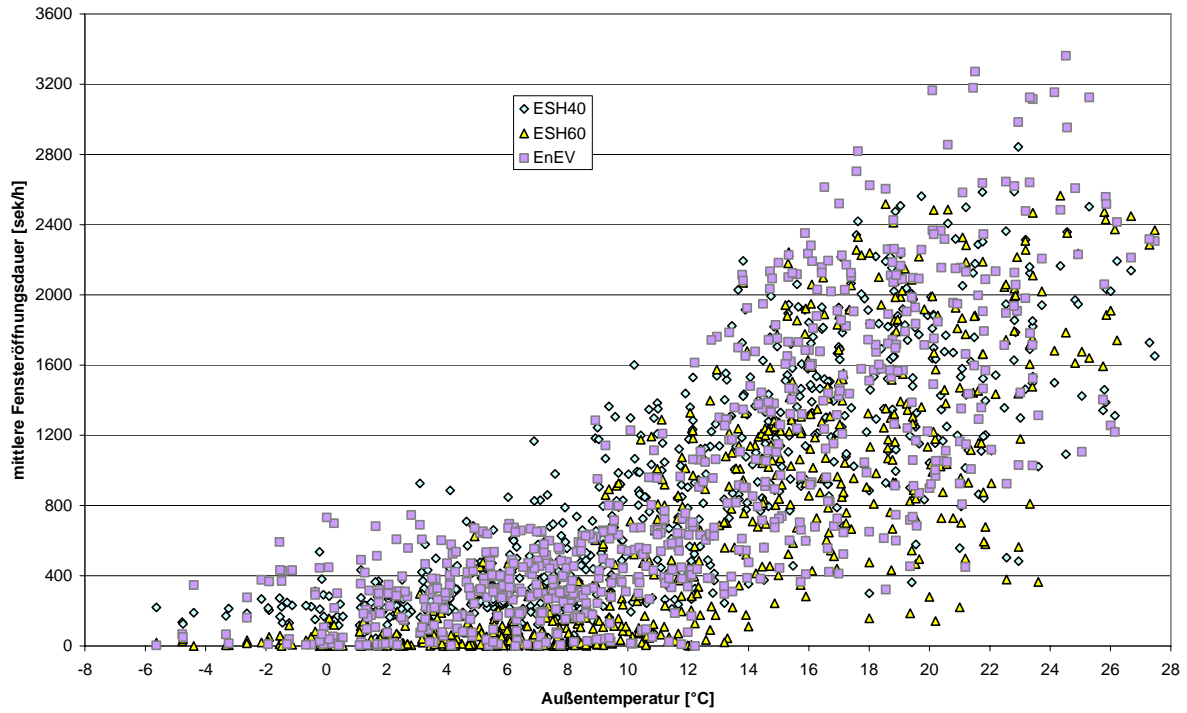


Abbildung 4.2-20: Zusammenhang von Außentemperatur und Fensteröffnungsdauer (Kippstellung) der drei Standards

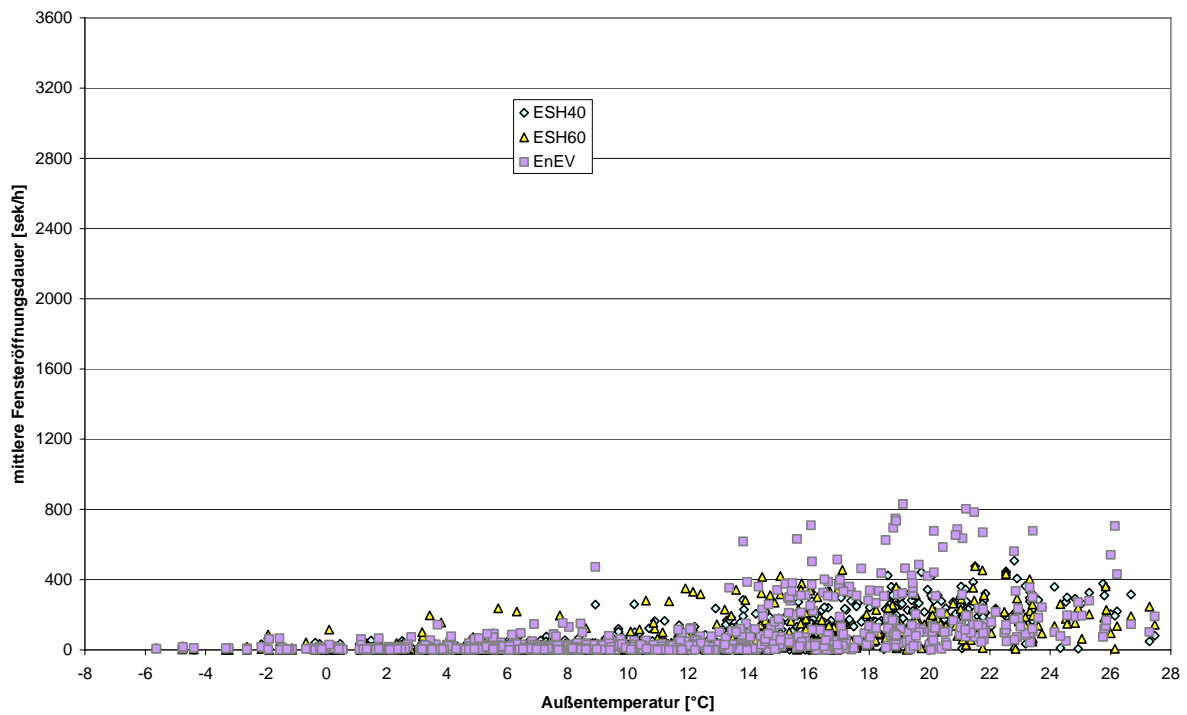


Abbildung 4.2-21: Zusammenhang von Außentemperatur und Fensteröffnungsdauer (Fenster ganz geöffnet) der drei Standards

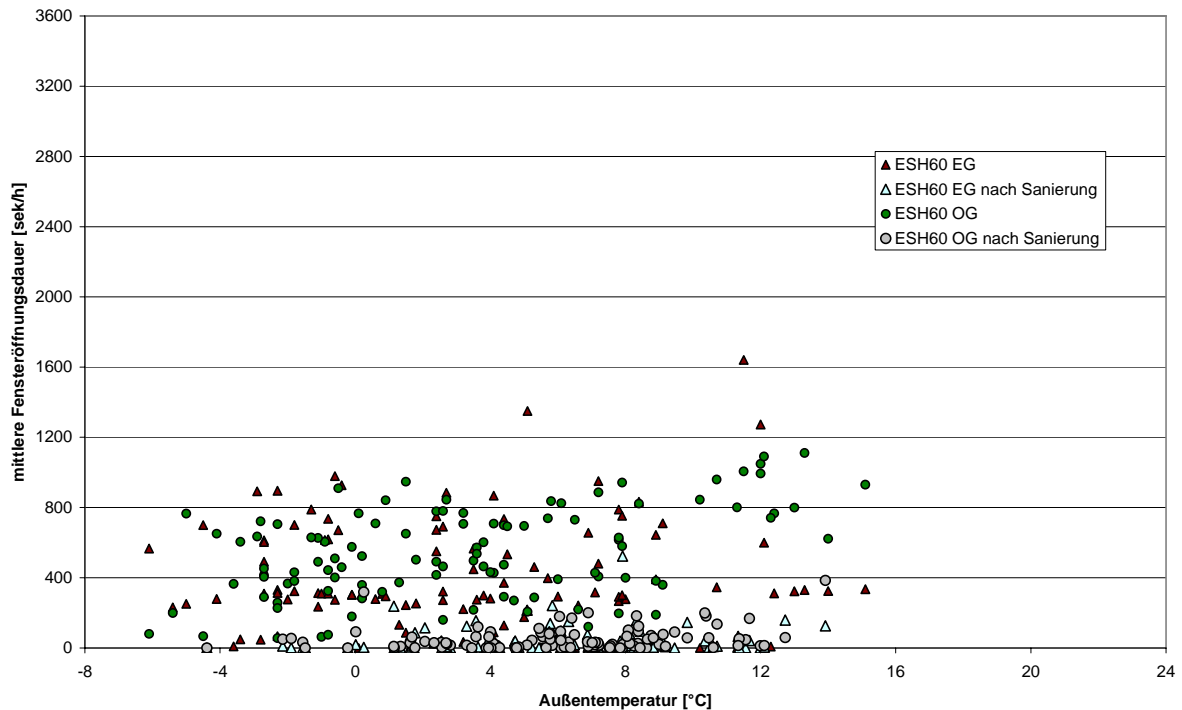


Abbildung 4.2-22: Zusammenhang von Außentemperatur und Fensteröffnungsdauer (Kippstellung) vor und nach der Sanierung im ESH 60 (jeweils vom 15.12.-30.03)

Auch vor der Sanierung wurden in den drei Wohnungen ohne Mieterwechsel Fensteröffnungszeiten (Kippstellung) aufgezeichnet. Abbildung 4.2-22 zeigt für die Wohnungen des ESH 60 die mittlere Dauer der Kippstellung pro Fenster über einen Zeitraum von drei Monaten im Winter 2004/05 über die Außentemperatur sowie für den gleichen Monat nach der Sanierung. Vor der Sanierung lagen die Werte beider Wohnungen über denen nach der energetischen Sanierung. Man kann daraus schließen, dass die Bewohner durch die mechanische Lüftung weniger das Bedürfnis hatten, über die Fenster zusätzlich zu lüften. Vor der Sanierung lag die Heizgrenztemperatur der Gebäude höher, so dass der steile Anstieg der Werte ab 12 °C nicht feststellbar ist. Im späteren EnEV-Gebäude lagen die Fensteröffnungszeiten auf einem vergleichbaren Niveau wie nach der Sanierung. Dies ist auch plausibel, da sich durch die Sanierung keine Änderungen am Lüftungskonzept in diesem Gebäude ergeben haben.

Die Ergebnisse der drei Gebäude zeigen, dass nur in geringem Umfang die Fenster komplett geöffnet werden, nur Kippstellung tritt nennenswert auf. Aussagen über die energetischen Auswirkungen der Kippstellung sind aber schwer zu treffen, da der Luftwechsel über ein Fenster von Randbedingungen wie Öffnungsfläche, Querlüftung, Temperaturdifferenz oder Gebäudedichtheit abhängt. Der Luftaustausch über ein einzelnes gekipptes Fenster kann gering sein, wie Abbildung 4.2-23 zeigt. Im Rahmen einer Studie [Loga et al. 2003] wurde die Auswirkung von Fensteröffnungszeiten auf den Gebäudeluftwechsel in der Heizzeit abgeschätzt.

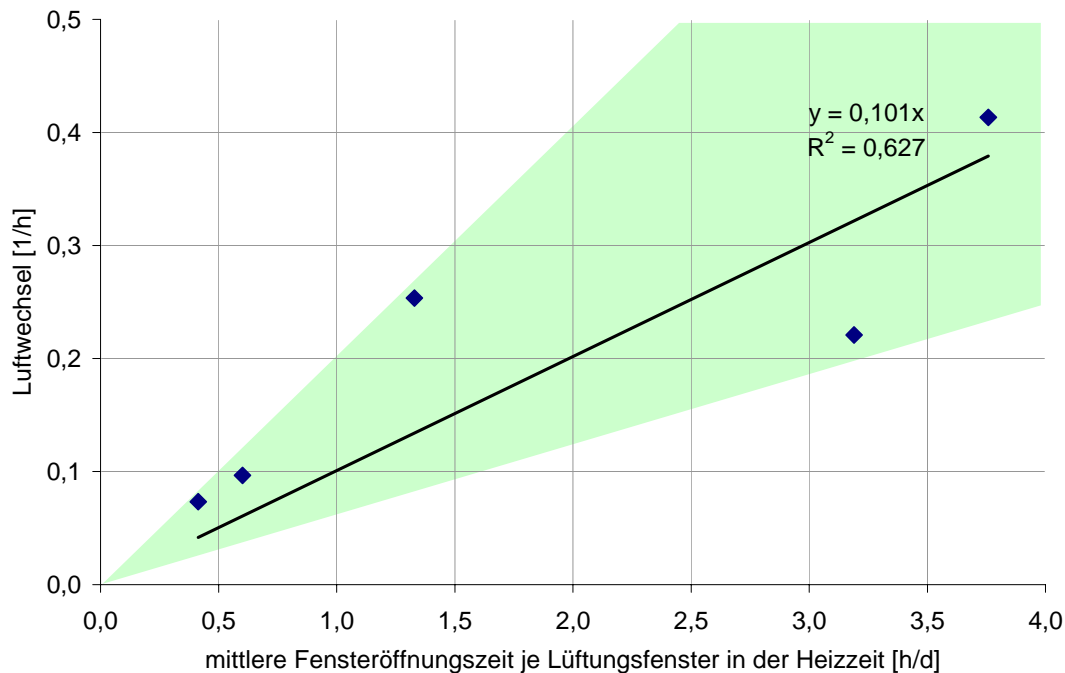


Abbildung 4.2-23: Zusammenhang zwischen Fensteröffnungszeit und Luftwechsel in der Heizzeit [Loga et al. 2003], grünes Feld: plausibler Bereich für den Luftwechsel in Abhängigkeit von der Öffnungszeit

Setzt man die gemessenen Fensteröffnungszeiten in die in der Abbildung angegebene Geradengleichung ein, so ergibt sich für das ESH 40 ein Fensterluftwechsel von 0,16 1/h, beim ESH 60 0,05 1/h und beim EnEV-Neubau-Gebäude ein Wert von 0,13 1/h. Da beim EnEV-Neubau-Gebäude kein zusätzlicher Anlagenluftwechsel hinzuzurechnen ist und nur der Infiltrationsluftwechsel noch addiert werden muss, ist bei diesem Gebäude von einer deutlichen Abweichung von den Randbedingungen der rechnerischen Bilanzierung auszugehen (siehe auch Kapitel 6.1.2, dort wurden $0,6 \text{ h}^{-1}$ angesetzt).

4.2.5 Bilanzierung Heiz- und Anlagentechnik

Im diesem Kapitel wird die Anlagentechnik der Wärmeversorgung für die drei Gebäude dargestellt und analysiert.

Endenergieverbrauch Pellets und Nutzungsgrad Pelletkessel

Die drei Gebäude werden über einen Pelletkessel und eine Nahwärmeverteilung zwischen den Häusern mit Wärme versorgt. Zur Bilanzierung der verbrauchten Pelletmenge wurde ein Betriebsstundenzähler an die Förderschnecke am Pelletlager installiert. Die Betriebszeiten der Förderschnecke sollten Auskunft über die zugeführte Endenergie liefern. Bei der Auswertung der Laufzeiten der Förderschnecke ergab sich jedoch das Problem, dass diese offensichtlich nicht proportional zur Pelletförderung ist. Mögliche Ursachen können im unterschiedlichen Nachrutschen der Pellets in den Schneckenschacht bei nur noch teilweise gefülltem Pelletvorrat liegen, so dass die Schnecke pro Laufzeit nicht immer mit der gleichen Menge an Pellets gefüllt ist.

Aus diesem Grund wurde die Gesamtbilanzierung auf Basis der abgerechneten Pelletlieferungen vorgenommen. Hierfür müssen jedoch zwei gleiche Füllzustände im

Pelletlager bekannt sein. Da nicht sicher ist, ob das Lager nach einem Nachtanken komplett gefüllt ist, konnte nur der Zustand „Lager leer“ herangezogen werden. Dieser bestand bei Inbetriebnahme der Heizungsanlage sowie nahezu vollständig am 11.02.2008. Aufgrund dieser Zeitspanne kann zusammen mit dem Wärmemengenzähler der Nahwärmeeinspeisung ein Gesamtnutzungsgrad des Pelletkessels zusammen mit den Pufferspeichern ermittelt werden. Der Zeitraum weicht jedoch vom in den übrigen Auswertungen definierten Messzeitraum 01.06.2006 - 30.04.2008 ab. In der Anfangsphase waren Teile der Anlagentechnik (z. B. Isolierungen) noch nicht fertig gestellt und nicht alle Gebäude fertig gedämmt (z. B. GEDT), so dass der im Folgenden berechnete Endenergieverbrauch nicht identisch mit dem bei fertig gestellten Gebäuden sein muss. Da der Auswertungszeitraum zum großen Teil den definierten Messzeitraum abdeckt, sollte das Ergebnis dennoch sehr nahe am tatsächlichen Verbrauch liegen.

Tabelle 4.2-10: Pelletlieferungen seit Inbetriebnahme

Datum	Pelletmenge [kg]	Energieinhalt [kWh]	Anmerkung
25.10.05	1.500	7.350	Lager leer
16.11.05	6.600	32.340	
31.01.06	4.000	19.600	
09.02.06	4.500	22.050	
21.03.06	2.500	12.250	
25.07.06	3.000	14.700	
25.10.06	2.720	13.328	
14.12.06	2.250	11.025	
19.02.07	3.020	14.798	
27.04.07	3.760	18.424	
02.08.07	2.640	12.936	
30.10.07	2.340	11.466	
11.02.08	2.600	12.740	Lager leer
Gesamt	38.830	190.267	
Wärmemenge WMZ		104.145	16.11.05-11.2.08

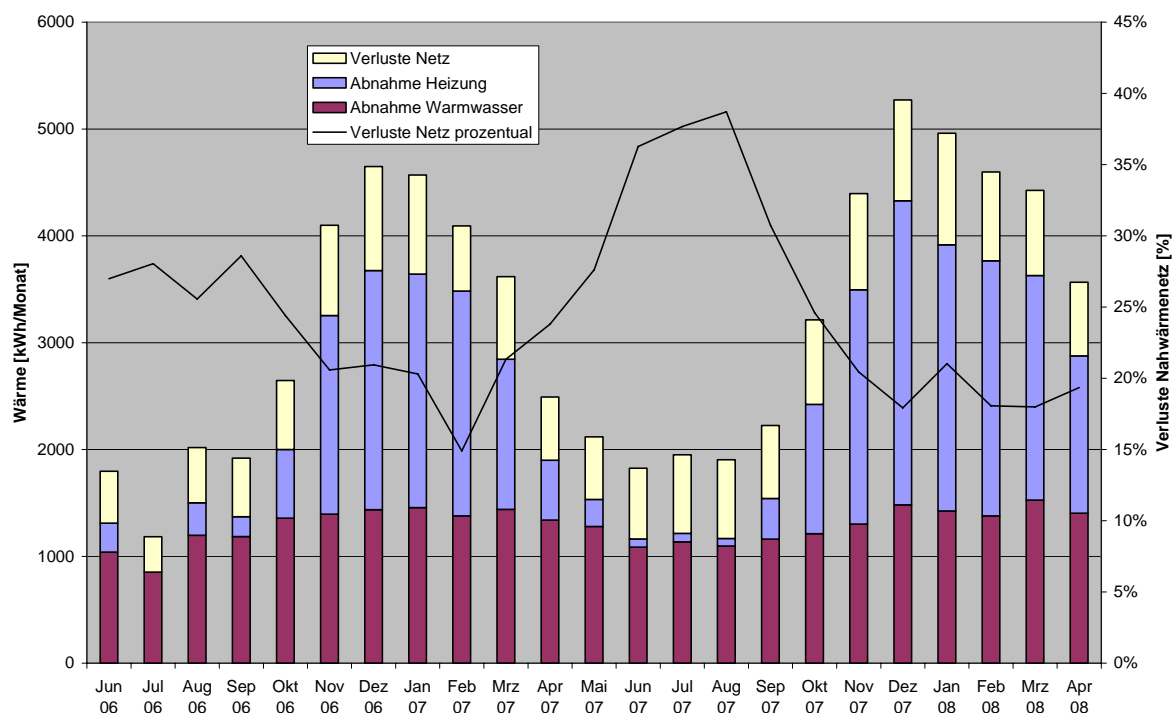
Aus Tabelle 4.2-10 ist zu entnehmen, dass über den Gesamtzeitraum Pellets mit einem Energieinhalt von 190 MWh verbraucht wurden. Der Wärmemengenzähler der Nahwärmeeinspeisung, der am 16.11.2005 eingebaut wurde, erfasst bis 11.02.08 104 MWh, so dass sich ein Gesamtnutzungsgrad von 55 % ergibt. Verteilt man die verbrauchte Pelletmenge gleichmäßig über den gesamten Zeitraum so ergibt sich ein Endenergieverbrauch für Heizung und Warmwasser (inklusive Verteil- und Speicherverluste) von 140,8 kWh/(m²WF*a) bzw. 102,7 kWh/(m²A_N*a) im Mittel über alle Gebäude. Wie bereits erwähnt, umfasst dieser Wert auch Zeiten, in denen die Gebäude nicht vollständig gedämmt waren. Berechnet man unter Verwendung des Jahresnutzungsgrades von 55 % für die Pelletheizung den Endenergieverbrauch für die Messphase aus der Einspeisung in das Nahwärmenetz, so ergeben sich die in Tabelle 4.2-11 angegebenen Werte.

Tabelle 4.2-11: Endenergieverbrauch (Holzpellets, unterer Heizwert) über alle Gebäude für Heizung, Warmwasser und Verluste

	absolut	WF bezogen	A _N bezogen
	kWh/a	kWh/m ² WF*a	kWh/m ² AN*a
2006/07	64.007	109	79
2007/08	73.555	125	91

Einspeisung Nahwärmenetz und Verteilverluste

Abbildung 4.2-24 zeigt die gesamte eingespeiste Wärmemenge sowie die Abnahme für Heizung und Warmwasserbereitung in den Gebäuden. Die Gesamthöhe der Stapelbalken entspricht der monatlich eingespeisten Wärmemenge. Zur Bilanzierung Wärmeverluste der Verteilung sind sowohl die Wärmeabnahme durch die Brauchwasserspeicher als auch die Abnahme der einzelnen Wohneinheiten für die Beheizung dargestellt. Zusätzlich sind die Verluste prozentual aufgetragen.

**Abbildung 4.2-24: Abnahme aus dem Nahwärmenetz für Heizung und Warmwasserbereitung sowie die Verluste des Nahwärmenetzes**

Es zeigt sich ein Jahrgang der Wärmeeinspeisung. Im Sommer wurde weniger als die Hälfte der Wärme eingespeist, die im Winter erforderlich war. Dabei war die Wärmeabnahme für die Warmwasserbereitung im Jahresverlauf annähernd konstant mit 1286 kWh/Monat im Mittel. Für die Beheizung kamen im Mittel 1188 kWh/Monat hinzu, wobei der größte Teil in den Wintermonaten abgenommen wurde. Aber auch im Sommer wurde vereinzelt Wärme für die Beheizung abgenommen. Schließlich sind noch die Verluste der Wärmeverteilung bezogen auf die eingespeiste Gesamtmenge dargestellt. Auch hier ergeben sich jahreszeitliche Schwankungen. Während die Verluste im Winter im Bereich von 20 % liegen,

steigen sie im Sommer 2007 auf 38 %. Im ersten Sommer lagen die Verluste unter 30 %. Die Ursachen dieser Verluste werden im Kapitel 4.2.7 weiter untersucht.

Tabelle 4.2-12 zeigt die Jahresbilanzen für Einspeisung, Heizung, Warmwasserbereitung und Verluste. Im warmen Winter 2006/07 lag der Aufwand für die Warmwasserbereitung über dem für die Beheizung, im zweiten Messjahr wurde etwa gleich viel Wärme für Heizung und Warmwasserbereitung benötigt. Die Verluste sind 2007/08 deutlich gegenüber der ersten Messperiode angestiegen und erreichen ca. 10 MWh.

Tabelle 4.2-12: Wärmeeinspeisung in das Nahwärmenetz und Wärmeabnahme für Heizung, Warmwasser sowie Verluste

	Einspeisung Nahwärme	Abnahme Heizung	Abnahme Warmw- wasser	Verluste
	[kWh/a]			
2006/07	35.204	12.009	15.361	7.834
2007/08	41.534	15.563	15.494	10.477

Die Wärmeabnahme der verschiedenen energetischen Standards wurde bereits in Kapitel 4.2.2 dargestellt.

Eine detaillierte Betrachtung der Betriebsweise der Anlagentechnik folgt in Kapitel 4.2.7.

4.2.6 Lüftungsanlagen

Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung im ESH 40

Im ESH 40 wurde in jeder Wohneinheit eine Lüftungsanlage mit mechanischer Zu- und Abluft und Wärmerückgewinnung vom Typ Vallox KWL90SE installiert. Die Lüftungskanäle verlaufen in der abgehängten Decke im Flur, Außen- und Fortluftleitungen sind direkt über dem Lüftungsgerät nach draußen geführt.

Abbildung 4.2-25 zeigt die Volumenströme der Wohnung 1 für jeweils 4 Tage zu zwei Zeitpunkten. Im Januar 2007 liegt der Volumenstrom von Zu- und Abluft bei 90 m³/h bzw. 85 m³/h, d. h. die Anlage ist relativ gut ausbalanciert, der Volumenstrom liegt jedoch um 20 % über dem Auslegungsvolumenstrom von 75 m³/h. Nachts wird der Volumenstrom der Anlage vom Nutzer in die kleinste Stufe gestellt, die Volumenstrombalance geht dabei aber offensichtlich verloren, da für die Zuluft 48 m³/h gemessen werden, für die Abluft aber nur 14 m³/h. Bei der Interpretation muss berücksichtigt werden, dass die Volumenstrommessblenden für solch geringe Volumenströme nicht ausgelegt sind und der Messfehler in diesem Bereich beträchtlich ist. Die gemessene Druckdifferenz an der Blende beträgt bei 48 m³/h nur 1,6 Pa, so dass der Messwert auch von thermischen Auftriebseffekten oder möglicherweise, wegen der Holzbalkendecken von der zweiten Wohnung abhängt. Durch die Volumenstromreduktion vermindert sich auch die elektrische Stromaufnahme der Lüftung von 31 W auf 11 W. Die Kennzahl für den Stromverbrauch für die Luftförderung liegt im Normalbetrieb bei 0,35 Wh/m³, d. h. unter dem für Passivhäuser geforderten Wert von 0,45 Wh/m³ [PHPP] und wird auch beim reduzierten Betrieb erreicht.

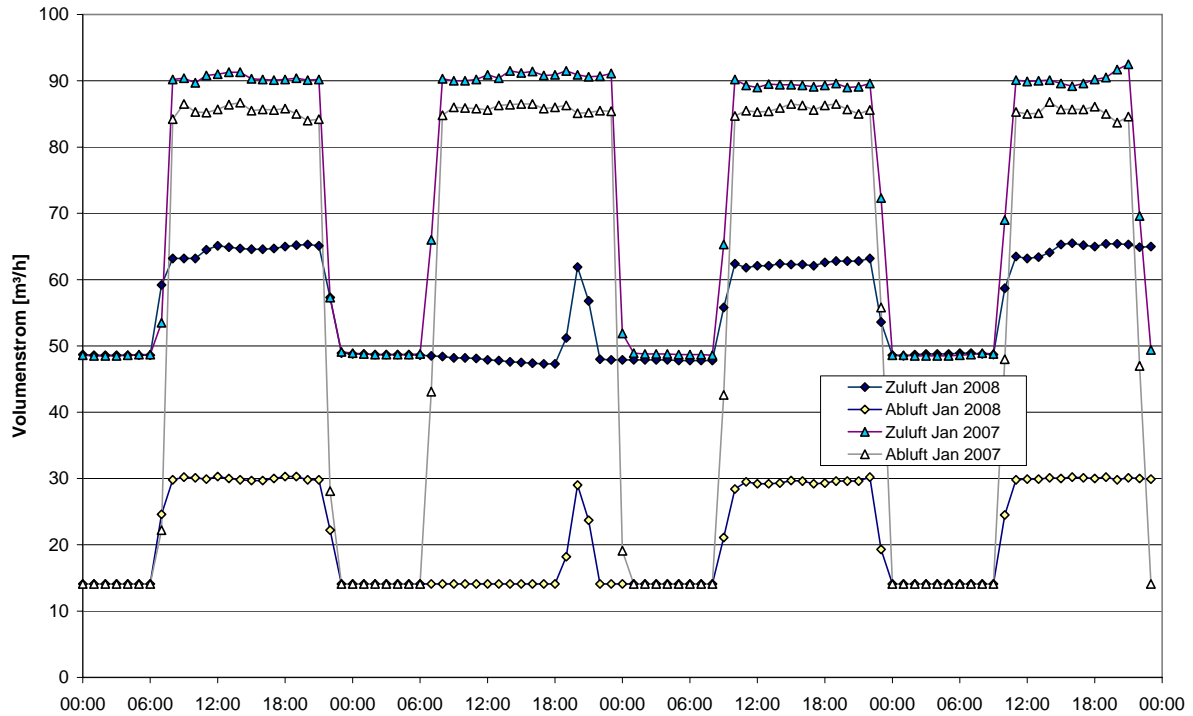


Abbildung 4.2-25: Zu- und Abluftvolumenströme in Wohnung 1 für je vier Tage im Januar 2007 und 2008 (ESH 40)

Im Januar 2008 haben sich die Werte deutlich verändert. Die Zuluft erreicht bei Normalbetrieb nur noch ca. 65 m³/h, nachts stellt sich der gleiche Wert wie im Jahr zuvor ein. Die Zuluft ist im Normalbetrieb auf 30 m³/h gesunken. Der Stromverbrauch für die Luftförderung stieg auf 0,46 m³/h im Normalbetrieb. Ursache für diese Reduktion des Volumenstroms sind einerseits Verschmutzungen der Filter. Nach dem Filterwechsel stieg der Volumenstrom auf der Zuluftseite um ca. 20 m³/h an, auf der Abluftseite um 10 m³/h. Der zweite Grund für die Disbalance der Lüftungsanlage liegt nach eigenen Aussagen in einem Eingriff des Mieters in das Lüftungsgerät. Obwohl bereits ein G7-Feinfilter in der Zuluft vorhanden war, wurden zusätzliche Filtermatten vom Mieter in die Zuluft eingebaut, um den Polleneintrag zu reduzieren. Somit ist die Veränderung bei den Luftvolumenströmen erklärbar.

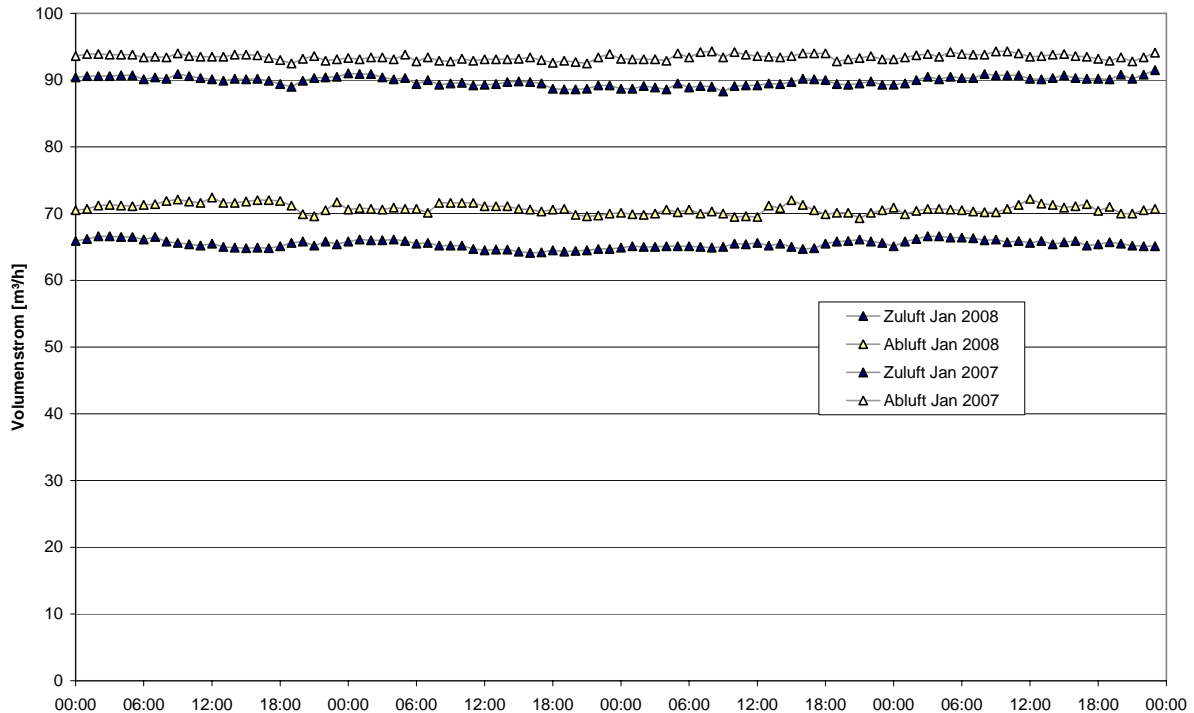


Abbildung 4.2-26: Zu- und Abluftvolumenströme in Wohnung 2 für je vier Tage im Januar 2007 und 2008 (ESH 40)

Im Vergleich zeigt Abbildung 4.2-26 Volumenströme für die gleichen Zeiträume in der zweiten Wohnung. Im ersten Winter liegen die Volumenströme konstant bei ca. $92 \text{ m}^3/\text{h}$, ein Nutzereingriff ist nicht erkennbar. Im Folgejahr ist der Volumenstrom auf ca. $68 \text{ m}^3/\text{h}$ gesunken, aber weiterhin ausbalanciert. Der Grund liegt in einer veränderten Einstellung der Mieter, da die Veränderung plötzlich geschah. Der Stromverbrauch für die Luftförderung liegt in der ersten Messphase bei $0,33 \text{ Wh}/\text{m}^3$, in der zweiten bei $0,28 \text{ Wh}/\text{m}^3$. Eine nennenswerte Verschmutzung der Filter konnte nicht festgestellt werden.

In Abbildung 4.2-27 sind für Wohnung 1 für den gesamten Messzeitraum der sich aus den gemessenen Volumenströmen berechnete mittlere Luftwechsel sowie der gemessene Stromverbrauch für die Lüftung dargestellt. Durch die täglichen Nutzereingriffe in die Lüftungsregelung schwankt der Luftwechsel zwischen ca. $0,45 \text{ 1/h}$ in der Vorweihnachtszeit 2006 und $0,15 \text{ 1/h}$ im Sommer 2006, in dem die Mieter längere Zeit nicht anwesend waren. Der Auslegungsluftwechsel der Wohnung liegt bei $0,4 \text{ 1/h}$. Er wurde meist deutlich unterschritten. Auffällig ist, dass es keinen erkennbaren Jahresrhythmus beim Luftwechsel gibt, d. h. die Lüftungsanlage wird im Sommer ähnlich wie im Winter betrieben, was den Stromverbrauch der Wohneinheit erhöht und die Effizienz der Lüftungswärmerückgewinnung verschlechtert. Durch die häufigen Wechsel der Betriebszustände der Lüftungsanlage sind keine Aussagen über den Einfluss der Filterverschmutzung möglich.

Messwerte für den Luftstrom liegen erst ab 01.11.2006 vor. Danach folgen die Stromverbräuche weitgehend dem Luftwechsel. Ausnahme ist ein Zeitraum im Januar/Februar 2008, in dem der Luftwechsel bei gleichem Stromverbrauch höher liegt. Eine Mögliche Ursache dafür könnte sein, dass der bereits angesprochene Zusatzfilter in der Zuluft im Rahmen eines Filterwechsel zeitweise nicht eingebaut war. Für das Frostschutz-Vorheizregister wurde im gesamten Messzeitraum kein Stromverbrauch für die

Zuluftvorheizung gemessen. Da die Anlage nachts meist in die kleinste Lüftungsstufe gestellt wurde, ist dies plausibel.

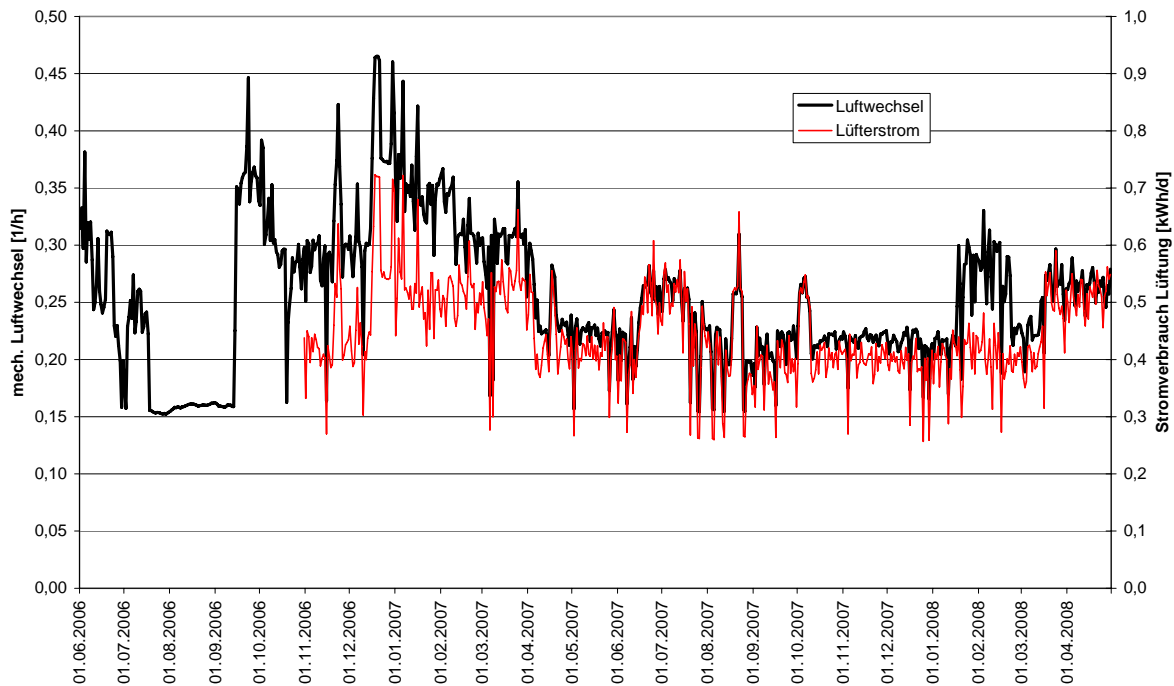


Abbildung 4.2-27: Mittlerer täglicher Luftwechsel und Stromverbrauch Lüftung in Wohnung 1 (ESH 40)

Abbildung 4.2-28 zeigt analog den Luftwechsel und den Stromverbrauch für die zweite Wohnung. Hier ergibt sich ein völlig anderes Bild, da die Anlage kontinuierlich betrieben wurde. Der Auslegungsluftwechsel liegt hier bei 0,36 1/h, der im ersten Drittel des Diagramms mit ca. 0,32 1/h nur knapp unterschritten wurde. Es zeigt sich bei konstantem Stromverbrauch ein leichter Abfall des Luftwechsels, was auf die fortschreitende Filterverschmutzung zurückzuführen ist. Im Februar 2007 wird die Lüfterstufe von den Mietern vermindert und ein halbes Jahr fast konstant in der gleichen Stufe weiter betrieben. Danach folgten weitere sechs Monate in einer höheren Stufe, um schließlich wieder auf die kleine Stufe konstant zu wechseln. Der Stromverbrauch folgt während des gesamten Messzeitraumes gut dem Luftwechsel. Der Peak am 26.01.2007 stellt den einzigen Tag der gesamten Messperiode dar, an dem ein Stromverbrauch für die Zusatzheizung (900 W) gemessen wurde. An diesem kältesten Tag der Heizperiode 2006/07 wurde über 6 Stunden (5:00 – 10:00 Uhr) eine mittlere Nachheizleistung von 35 W gemessen, die Spitze lag bei 55 W als Stundenmittel. Die Außentemperaturen lagen in dieser Zeit zwischen -6,4 und -8,3 °C. Abbildung 4.2-29 zeigt die Temperaturen der Lüftungsanlage, die Außentemperatur sowie die Stromverbräuche für die gesamte Lüftungsanlage bzw. das Frostschutzregister. Die Fortlufttemperatur sinkt in dieser Zeit auf ca. 4,6 °C ab, d. h. diese Temperatur entspricht ungefähr dem eingestellten Einschaltpunkt der Frostfreihaltung.

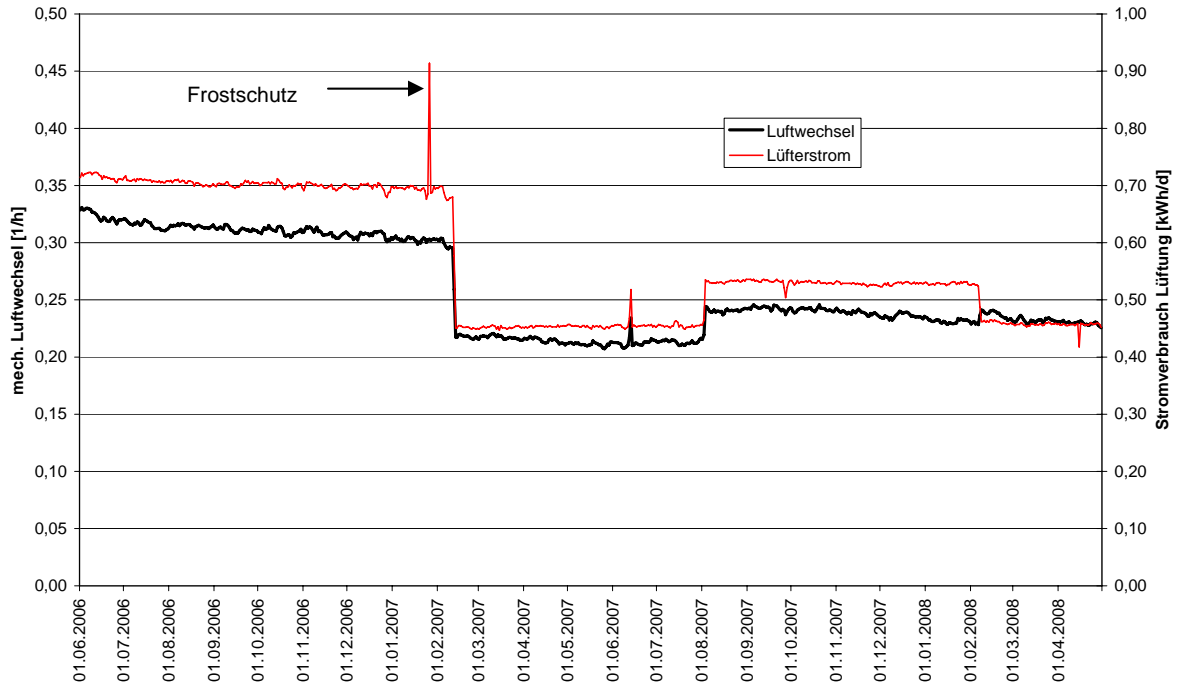


Abbildung 4.2-28: Mittlerer täglicher Luftwechsel und Stromverbrauch Lüftung in Wohnung 2 (ESH 40)

Die Differenzen zwischen der Außentemperatur und der Außenlufttemperatur der Lüftungsanlage erklären sich durch die unterschiedlichen Messpunkte. Die Außentemperatur wird auf dem Dach des ESH 60 gemessen, die Außenlufttemperatur der Lüftungsanlage bereits im Gebäude im Außenluftkanal, der unter dem Dachüberstand von außen ansaugt und somit besser geschützt gegen Abstrahlungsverluste angebracht ist.

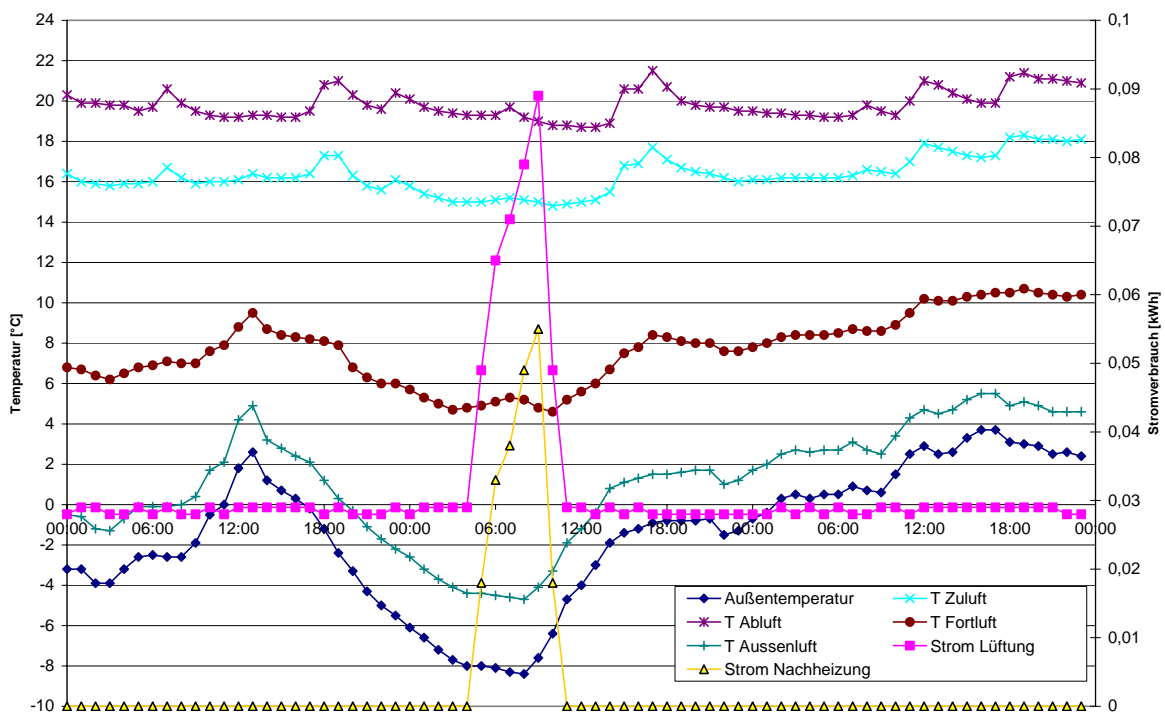


Abbildung 4.2-29: Temperaturen und Stromverbräuche der Lüftungsanlage in Wohnung 2 am Tag mit Frostschutzheizung (ESH 40)

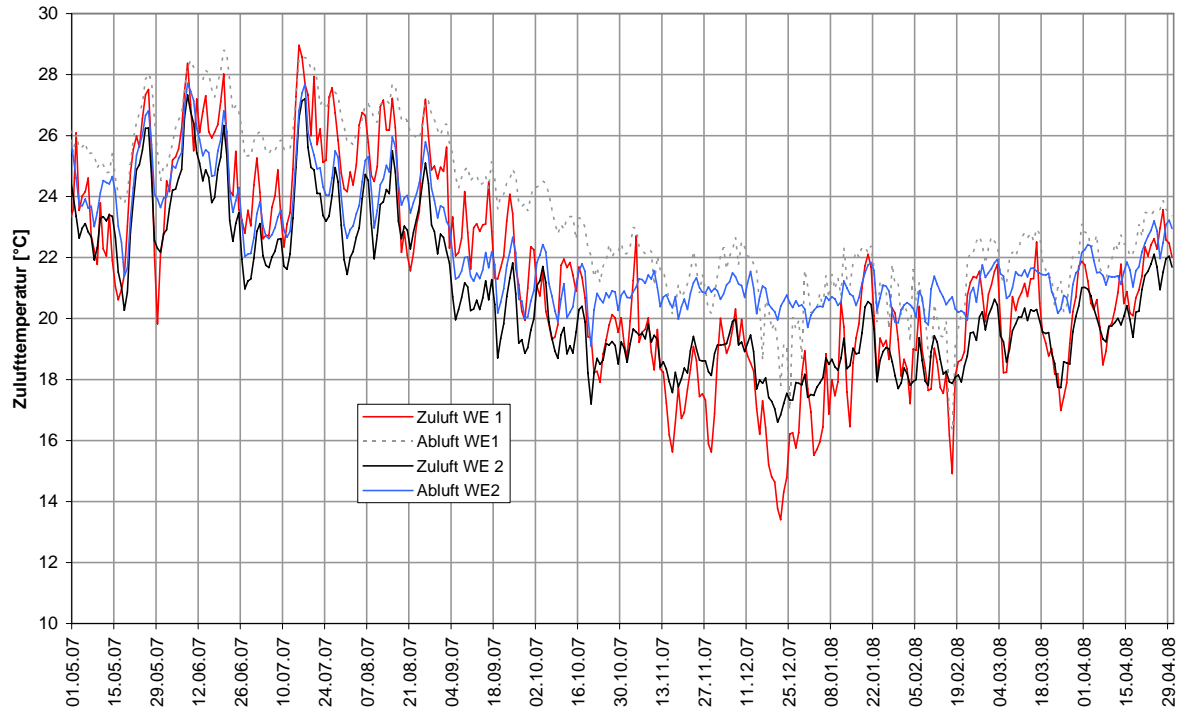


Abbildung 4.2-30: Zu- und Ablufttemperaturen der beiden Wohneinheiten in der zweiten Messperiode (ESH 40)

Abbildung 4.2-30 zeigt für die zweite Heizperiode die Zu- und Ablufttemperaturen in beiden Wohnungen. Im Sommer fällt auf, dass die Zuluft immer der Abluft folgt, was ein Indiz dafür ist, dass die Wärmerückgewinnung ganzjährig in Betrieb ist und somit im Sommer keine kühlere Luft über die Anlage zugeführt werden kann. Im Winter wird in Wohnung 2 nur selten eine Zulufttemperatur von 18 °C unterschritten, d. h. es ist nicht mit Komfortbeeinträchtigungen durch kalte Zuluft zu rechnen. In Wohnung 1 sinkt die Zulufttemperatur teilweise sogar deutlich unter diesen Wert ab, der Minimalwert liegt bei 13,4 °C. Grund sind die bereits erwähnten Nutzereingriffe in die Lüftungsregelung. Analog zum Zuluftüberschuss bei niedrigen Volumenströmen fällt die Zulufttemperatur ab, da zu wenig Wärme in der Abluft zur Vorerwärmung zu Verfügung stehen.

Tabelle 4.2-13: Monatliche Kenndaten der Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung im ESH 40

	ESH40											
	Wohnung 1						Wohnung 2					
	Lüfterstrom [kWh/Monat]	mittl. Volumenstrom (Zu/Abluft) [m³/h]	Rückwärm- zahl	q Lüftung (Rückgewinnung in WRG) [kWh/d]	q Lüftung an Heiztagen	Luftwechsel 1/h	Lüfterstrom [kWh/Monat]	mittl. Volumenstrom (Zu/Abluft) [m³/h]	Rückwärm- zahl	q Lüftung (Rückgewinnung in WRG) [kWh/d]	Luftwechsel 1/h	q Lüftung an Heiztagen
Jun. 06		51,5	0,62	34,8	15,6	0,27	21,5	95,4	0,76	96,1	0,32	34,0
Jul. 06		37,4	0,35	4,6	0,0	0,20	22,0	93,1	0,79	58,2	0,32	0,0
Aug. 06		30,3	0,26	1,2	0,5	0,16	21,8	92,8	0,83	103,8	0,31	37,7
Sep. 06		51,3	0,35	23,4	3,7	0,27	21,1	91,9	0,84	84,5	0,31	8,1
Okt. 06		56,1	0,64	56,9	50,2	0,30	21,8	91,5	0,85	139,5	0,31	122,9
Nov. 06	13,0	57,0	0,63	81,8	81,8	0,30	21,0	91,1	0,85	210,0	0,31	210,0
Dez. 06	16,3	67,2	0,68	161,1	161,1	0,35	21,6	90,4	0,87	269,5	0,31	269,5
Jan. 07	16,2	66,5	0,67	114,3	114,3	0,35	21,7	89,3	0,87	251,5	0,30	251,5
Feb. 07	14,4	60,9	0,59	77,9	77,9	0,32	15,3	74,0	0,92	204,0	0,25	204,0
Mrz. 07	15,8	56,0	0,54	61,8	61,8	0,29	14,0	64,1	0,95	176,7	0,22	176,7
Apr. 07	13,2	46,2	0,42	21,5	16,5	0,24	13,6	63,3	0,93	100,3	0,21	67,0
Mai. 07	12,7	41,8	0,33	12,9	8,3	0,22	14,1	62,3	0,91	101,9	0,21	65,2
Jun. 07	13,5	44,4	0,36	12,2	2,4	0,23	13,7	62,8	0,91	72,2	0,21	12,7
Jul. 07	14,5	46,1	-0,02	12,1	4,5	0,24	14,1	62,9	0,89	71,7	0,21	23,3
Aug. 07	12,5	40,4	0,31	8,9	0,4	0,21	16,3	70,6	0,89	84,7	0,24	3,5
Sep. 07	11,4	39,6	0,30	10,6	8,3	0,21	16,0	71,6	0,89	105,8	0,24	79,7
Okt. 07	13,3	43,2	0,32	19,6	17,9	0,23	16,4	71,3	0,90	153,7	0,24	145,9
Nov. 07	12,0	41,4	0,30	20,3	20,3	0,22	15,8	70,5	0,91	217,6	0,24	217,6
Dez. 07	11,9	40,2	0,30	21,2	21,2	0,21	16,4	69,6	0,91	260,8	0,24	260,8
Jan. 08	12,5	45,7	0,42	42,0	42,0	0,24	16,4	68,3	0,93	226,7	0,23	226,7
Feb. 08	11,6	50,5	0,54	60,7	60,7	0,27	13,8	69,5	0,95	225,5	0,24	225,5
Mrz. 08	13,9	46,5	0,43	38,7	38,7	0,24	14,2	68,4	0,97	230,1	0,23	230,1
Apr. 08	15,4	50,3	0,47	37,9	37,9	0,26	13,7	67,7	0,98	187,0	0,23	187,0

Tabelle 4.2-13 zeigt die monatlichen Kenndaten der Lüftungsanlagen der beiden Wohneinheiten, Tabelle 4.2-14 die Jahreswerte. Der Stromverbrauch für die Luftförderung liegt für Wohnung 1 zwischen 0,38 (2006/07) und 0,40 Wh/m³ (2007/08), bei Wohnung 2 für beide Heizperioden bei ca. 0,31 Wh/m³. Aufgrund der kurzen Leitungsführung in den Wohnungen und dem vergleichsweise niedrigen Luftwechsel konnten diese günstigen Werte erreicht werden, die die Anforderungen an Passivhäuser (0,45 Wh/m³) erfüllen.

Tabelle 4.2-14: Jahreswerte der Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung im ESH 40

	Stromverbrauch [kWh]		Kennz. Luftförderung [Wh/m³]		mittl. Luftwechsel [1/h]		rückgew. Wärme [kWh/m²AN]	
	WE 1	WE 2	WE 1	WE 2	WE 1	WE 2	WE 1	WE 2
01.06.06-01.06.07	170,4	229,5	0,38	0,31	0,27	0,28	7,9	13,8
01.05.07-30.04.08	155,3	180,8	0,40	0,30	0,23	0,23	3,5	16,0

Die rückgewonnene Wärme an Heiztagen, die hier mit einer Temperatur von 15 °C im Tagesmittel definiert wurden – nicht zu verwechseln mit der resultierenden Heizgrenztemperatur der Gebäude, bei der die Wärmerückgewinnung bereits eingeflossen ist – schwankt bei den Wohneinheiten und in den Messjahren deutlich. Wurden in der Heizperiode 2007/08 in Wohnung 1 nur 3,5 kWh/m²_{AN} über die Wärmerückgewinnung in das Gebäude zurück geführt, so liegt dieser Betrag bei Wohnung 2 bei 16 kWh/m²_{AN}. Hier wirken sich die niedrigen Luftvolumenströme und die Disbalancen in Wohnung 1 stark aus. Als Mittelwert für das gesamte Gebäude ergeben sich 10,8 bzw. 9,7 kWh/m²_{AN}. Die Rückwärmzahl erreicht in Wohnung 2 Werte von 0,87 in der ersten Messperiode und 0,92 in der zweiten. Diese Werte beinhalten auch die Rückgewinnung von Kondensationswärme aus der Abluft und liegen aus diesem Grund höher als die trockenen Rückwärmzahl nach DBiT, die der Hersteller mit 0,74 – 0,80 angibt. Die Werte aus Wohnung 1 sind aufgrund der gemessenen Disbalancen und den häufigen Volumenstromwechseln nicht belastbar und nur der Vollständigkeit halber aufgeführt.

Abluftanlage im ESH 60

Im ESH 60 wurde eine zentrale Abluftanlage installiert, die aus den Küchen und den Bädern kontinuierlich Luft absaugt. Die Frischluft strömt über Fensterbanklüfter nach. Für die Abluftventile in den Bädern war eine mechanische, feuchteabhängige Volumenstrom-

regelung eingeplant, die jedoch nur in einer Wohnung umgesetzt wurde. Abbildung 4.2-31 zeigt den aus dem gemessenen Gesamtvolumenstrom berechneten Luftwechsel für das gesamte Gebäude. Er sinkt im Laufe der Messphase von 0,39 1/h im Sommer 2006 auf 0,33 1/h im Januar 2008. Nennenswerte Schwankungen in Zusammenhang mit der Feuchte (Jahresgang der Luftfeuchte) sind nicht zu erkennen. Am 07.02.2008 wird der Filter vor dem Abluftventilator gewechselt, danach liegt der Luftwechsel wieder auf 0,37 1/h. Planwert über das gesamte Gebäude war ein Luftwechsel von 0,41 1/h, der somit im ersten Messjahr (0,36 1/h) um 12 % unterschritten wurde, im zweiten Messjahr um 15 %.

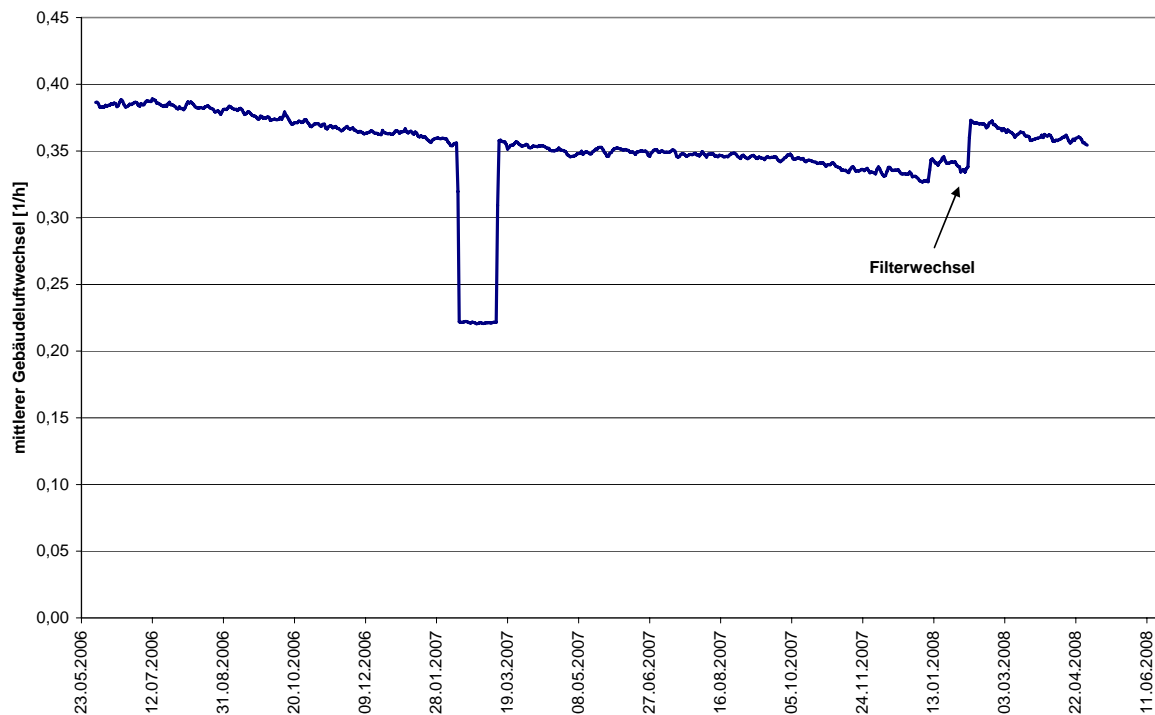


Abbildung 4.2-31: Mittlerer Luftwechsel im ESH 60 während der Messphase

Der Einbruch beim Luftwechsel im Februar 2007 ist auf einen Defekt der Energieversorgung des Abluftventilators zurückzuführen. Auch hier gilt, ähnlich wie beim ESH 40, dass die eingesetzte Volumenstrommessblende, zusammen mit dem Druckdifferenzfühler nicht für solch geringe Volumenströme dimensioniert waren und der Fehler der Messwerte bei kleinen Volumenströmen beträchtlich ist. Es ist anzunehmen, dass der tatsächliche Anlagenluftwechsel in dieser Phase noch niedriger lag.

Der mittlere Stromverbrauch je q_m geförderter Luft lag in beiden Messjahren bei $0,17 \text{ Wh/m}^3$, der Stromverbrauch betrug absolut 225 bzw. 261 kWh/a.

4.2.7 Betriebsweise der Anlagentechnik und Optimierungsvorschläge

Im diesem Kapitel werden die Betriebsweise der Anlagentechnik vorgestellt und Vorschläge zur Optimierung der Betriebsweise diskutiert.

Pelletkessel

Abbildung 4.2-32 zeigt die Vor- und Rücklauftemperaturen der Nahwärme über den gesamten Messzeitraum. Die Vorlauftemperatur wird im ersten Sommer abhängig von der Außentemperatur zwischen 55 und 70 °C variiert, die Rücklauftemperatur liegt ca. 4 K darunter. Bei ca. 13 °C Außentemperatur wird eine Vorlauftemperatur von 70 °C erreicht. Danach steigt die Vorlauftemperatur kaum noch an. Die außentemperaturabhängige Vorlaufregelung ist bis zum 12.06.2007 in Betrieb, danach wird konstant eine Vorlauftemperatur von 71 °C gehalten. Zu diesem Zeitpunkt wurde entweder der entsprechende Einstellparameter der Regelung verändert oder es ist ein Defekt der Regelung aufgetreten.

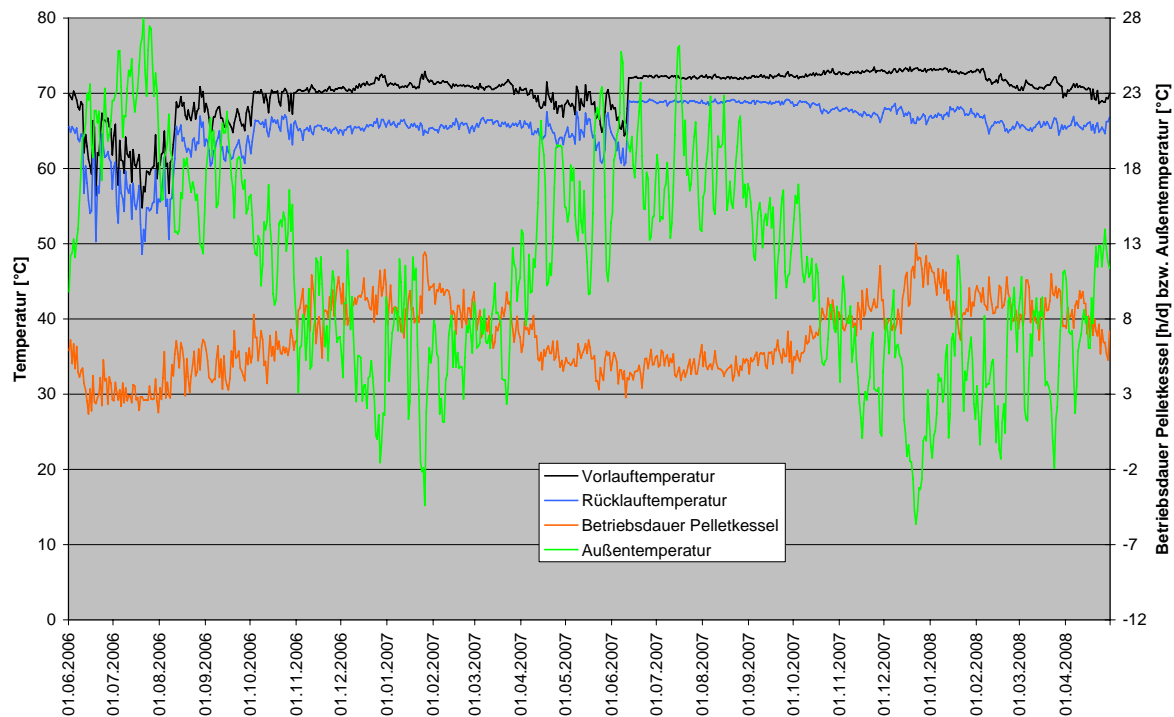


Abbildung 4.2-32: Vor- und Rücklauftemperaturen Nahwärme sowie Betriebszeiten Brenner und Außentemperatur während der Messphase

Die Betriebsdauer des Brenners im Pelletkessel wurde über einen Betriebsstundenzähler erfasst und ist ebenfalls im Diagramm dargestellt. Es zeigt sich der zu erwartende Verlauf der antizyklisch zur Außentemperatur verläuft.

In Abbildung 4.2-33 ist die Spreizung zwischen Vor- und Rücklauftemperatur als monatlicher Minimal- Mittel- und Maximalwert dargestellt. In diese Abbildung wurden zusätzlich auch Messwerte aus der Zeit von Februar bis Mai 2006 dargestellt. Die mittlere Temperaturspreizung im Nahwärmenetz sinkt von anfangs 8 K im Februar/März 2006 auf 6 K in den folgenden Wintern. Die minimale Temperaturspreizung liegt im Winter bei 2 K, im Sommer bei 0 K.

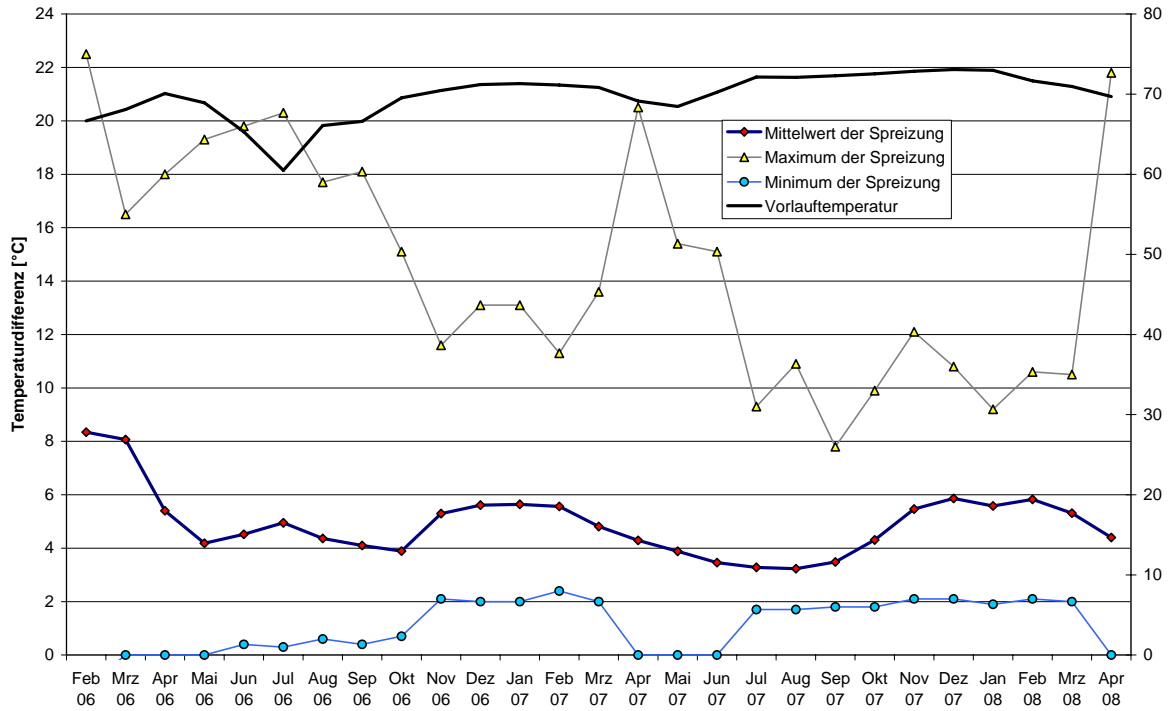


Abbildung 4.2-33: Spreizung von Vor- und Rücklauftemperatur (Minimum, Mittelwert, Maximum) sowie Vorlauftemperatur während der gesamten Messphase

Die folgenden beiden Abbildung 4.2-34 und Abbildung 4.2-35 zeigen auf Basis von Stundenwerten die Vor- und Rücklauftemperaturen der Nahwärme – für eine Woche im Januar und eine Woche im Juli.

Verlauf der Vor- und Rücklauftemperatur im Januar 2007 (1 Woche, Stundendaten)

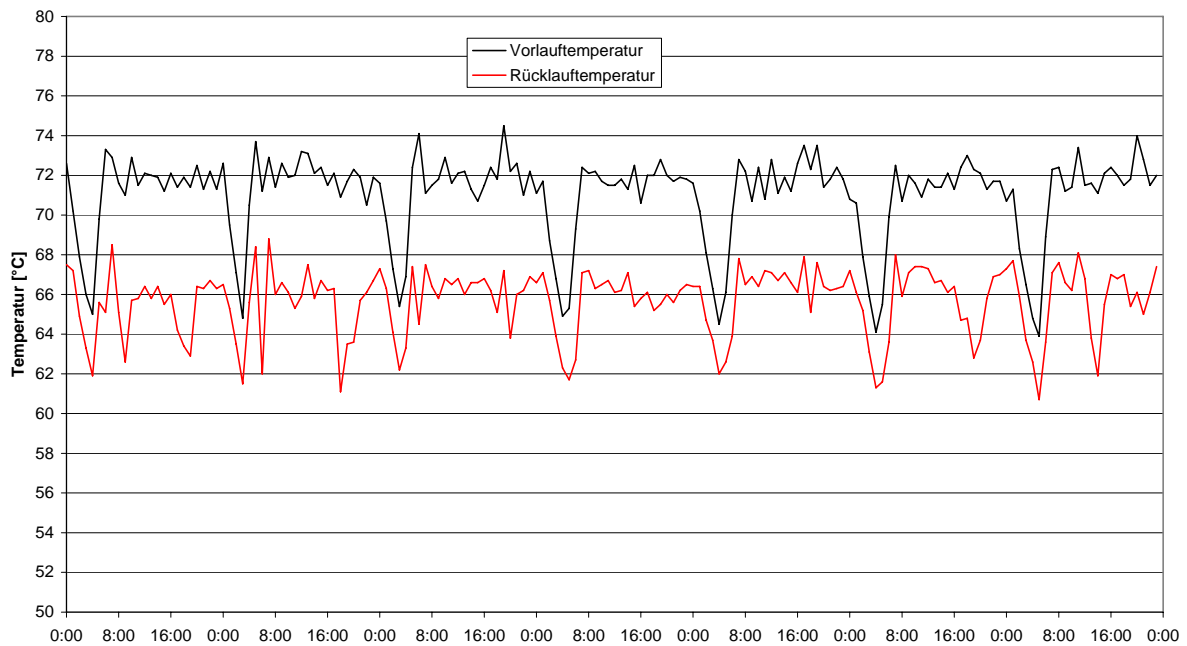


Abbildung 4.2-34: Vor- und Rücklauftemperatur für eine Woche im Januar 2007

In der Januarwoche liegt die Vorlauftemperatur fast konstant bei 72 °C, in der Nacht gibt es zwischen 2:00 und 4:00 Uhr je ca. 2 Stunden einen Einbruch der Temperatur auf ca. 66 °C,

der auf eine (falsch eingestellte) Nachtabsenkung hindeutet. Die Rücklauftemperatur folgt dem Vorlauf, wobei einzelne Ereignisse mit geringerer Rücklauftemperatur (durch Wärmeabnahmen) zu erkennen sind.

Verlauf der Vor- und Rücklauftemperatur im Juli 2007 (1 Woche, Stundendaten)

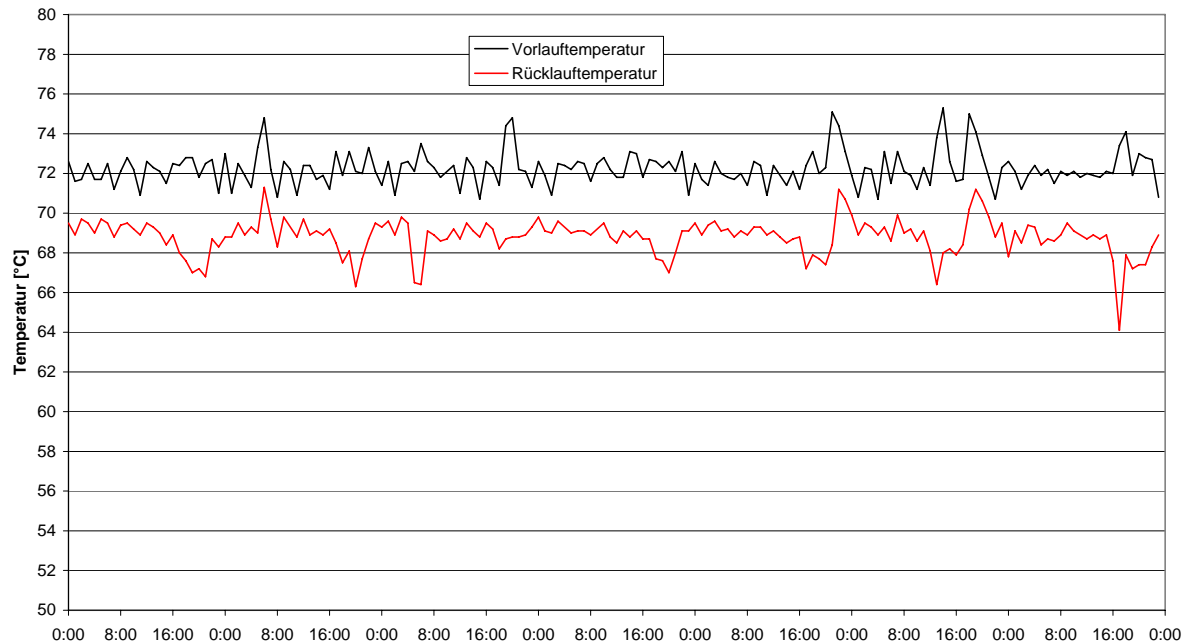


Abbildung 4.2-35: Vor- und Rücklauftemperatur für eine Woche im Juli 2007

Im Sommer wird die Vorlauftemperatur konstant auf 72 °C gehalten, Absenkezeiten oder Einbrüche sind nicht zu erkennen. Die Rücklauftemperatur liegt von einzelnen Ausreißern abgesehen bei ca. 69 °C. Somit ist nur eine sehr geringe Temperaturspreizung vorhanden. Im Rahmen einer Ortsbegehung wurden die Reglereinstellungen kontrolliert und Verbesserungsvorschläge formuliert, die aber innerhalb der Messphase nicht mehr umgesetzt wurden. Zur Anhebung der Temperaturspreizung sollte überprüft werden, ob der hydraulische Abgleich im Netz richtig eingestellt wurde und ob der Volumenstrom der Umwälzpumpe nicht weiter reduziert werden kann (womit sowohl die Netzverluste als auch der Stromverbrauch sinken würden).

Pumpen

Abbildung 4.2-36 zeigt die Laufzeiten des Brenners im Pelletkessel, die Laufzeiten der Ladepumpe und die Wärmeabnahme des Nahwärmenetzes für eine kalte Woche im Januar. Dargestellt ist die Betriebszeit der Komponente (Spannung liegt an) je Stunde (Einheit Stunden je Stunde) sowie die Wärmeabnahme am Heizungsverteiler des Nahwärmenetzes (in Kilowattstunden).

Der Brenner läuft nie dauerhaft (mit voller Leistung), obwohl im dargestellten Abschnitt die kältesten Tage der Heizperiode 2006/07 liegen. In der Nacht ist der Brenner teilweise sogar stundenweise abgeschaltet. Die Ladepumpe des Kessels läuft dagegen ununterbrochen, was zu einer kontinuierlichen Auskühlung des Pufferspeichers über den Kessel führt. Im Sommer 2008 konnte die Regelung der Ladepumpe korrigiert werden, so dass sie nur noch läuft, wenn Wärme vom Kessel zum Pufferspeicher transportiert werden soll.

Verlauf der Betriebszeiten Brenner und Ladepumpe im Januar 2007 (22.-28.01.07, Stundendaten)

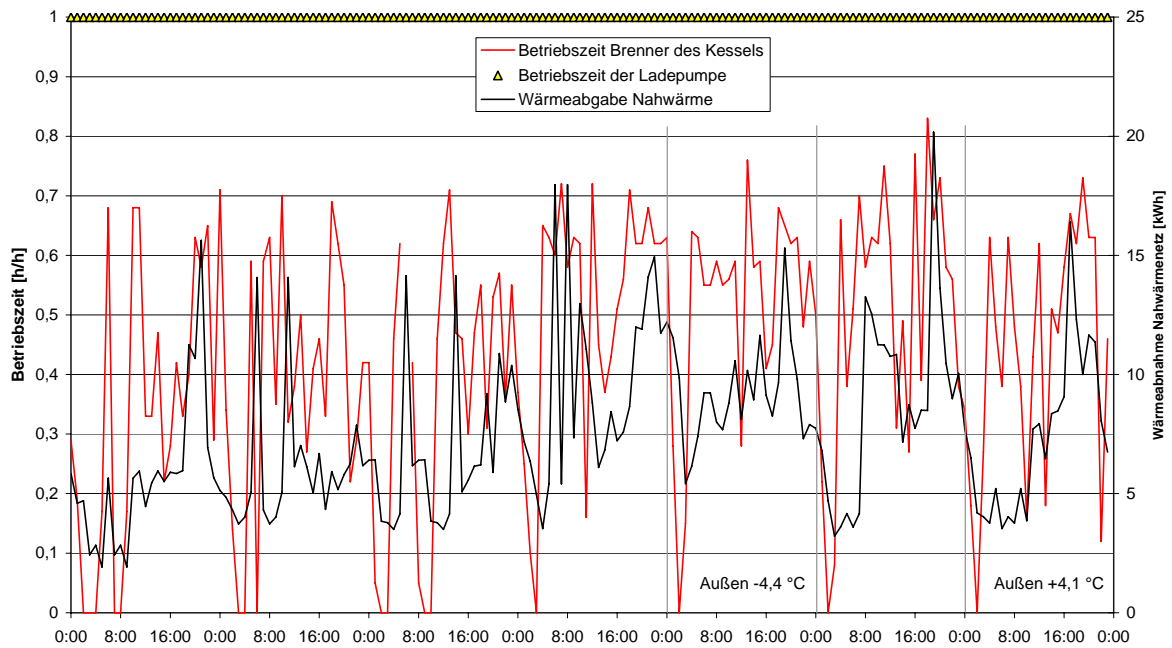


Abbildung 4.2-36: Verlauf der Betriebszeiten Brenner und Ladepumpe für eine Woche im Januar 2007

Verlauf der Betriebszeiten Brenner und Ladepumpe im Juli 2007 (11.-17.07.07, Stundendaten)

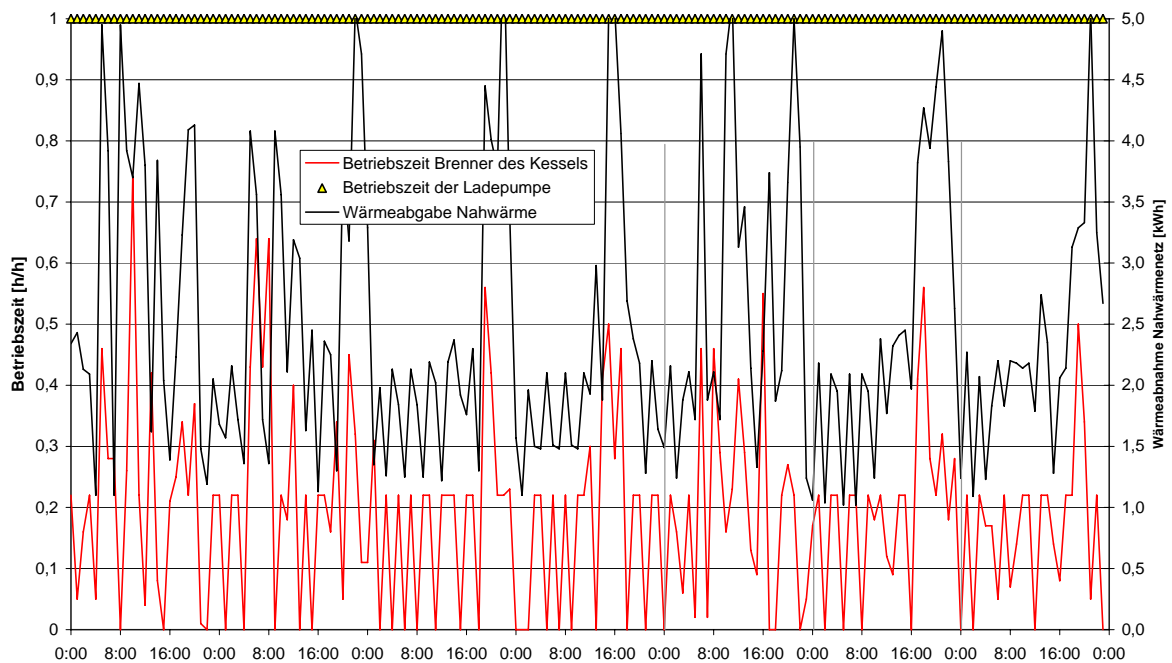


Abbildung 4.2-37: Verlauf der Betriebszeiten Brenner und Ladepumpe für eine Woche im Juli 2007

Abbildung 4.2-37 zeigt die gleichen Parameter im Juli 2007. Die Außentemperaturen lagen im Tagesmittel zwischen 13,4 °C und 26,1 °C. Die Laufzeiten des Brenners fallen deutlich geringer aus, aber dennoch ist der Kessel fast in jeder Stunde – wenn auch nur kurz - in Betrieb. Die minimale Laufzeit des Brenners liegt bei ca. 12 Minuten (Ausschalthysterese).

Wenn es hier gelänge, die vorgeschalteten Pufferspeicher besser auszunutzen und/oder die Nachladezeiten für Warmwasser zu begrenzen (siehe Warmwasserbereitung weiter unten), könnte die Laufzeit des Kessels wahrscheinlich deutlich verringert werden.

Es stehen zwei Pufferspeicher mit je 600 Litern zur Verfügung. Bei der im Sommer gemessenen geringen Temperaturdifferenz von 3 K zwischen Vorlauftemperatur (72 °C) und Rücklauftemperatur (69 °C) im Nahwärmenetz kann hier eine Wärmemenge von 4,2 kWh gespeichert werden. Bei niedrigen Abnahmeleistungen des Nahwärmenetzes im Sommer von ca. 2,5 kW hält dies für knapp zwei Stunden vor, so dass der Kessel immer wieder in Betrieb geht. Könnte die Temperaturspreizung durch einen geringeren Massenstrom und niedrigere Temperaturen in den Brauchwasserspeichern der drei Gebäude auf z. B. 9 K erhöht werden (63 °C Rücklauftemperatur), so würde die eingespeicherte Wärmemenge auf ca. 12,5 kWh vergrößert, und der Kessel müsste sich nur ungefähr alle 5 Stunden einschalten.

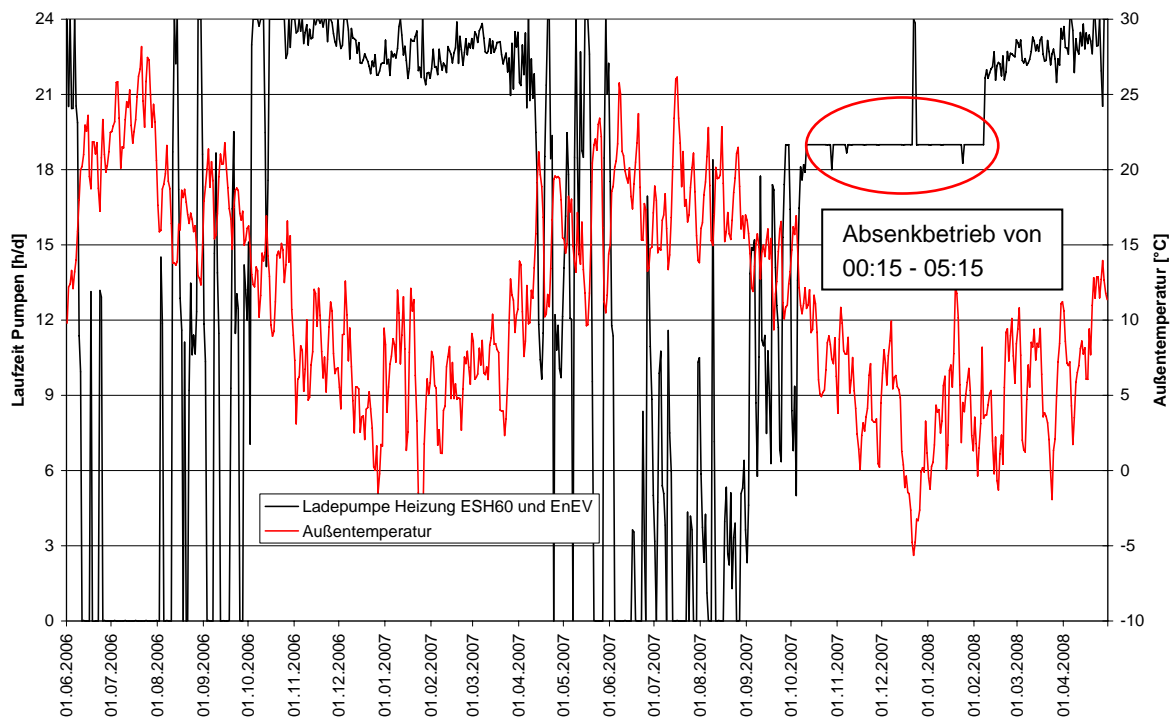


Abbildung 4.2-38: Mittlere tägliche Betriebszeit der Heizungspumpe für ESH 60 und EnEV-Gebäude während der gesamten Messphase

Im EnEV-Gebäude sitzt eine zusätzliche Heizungs-ladepumpe für das EnEV- und das ESH 60-Gebäude. Wie aus Abbildung 4.2-38 ersichtlich, wird die Laufzeit dieser Pumpe mit der Außentemperatur variiert. Allerdings ist auch festzustellen, dass die Einstellungen mehrfach über die Messperiode geändert wurden. Anfangs wurden die Absenkezeiten weitgehend an den Verlauf der Außentemperatur angepasst. Im Januar und Februar 2008 tritt eine Zeit mit festen Absenkezeiten zwischen ca. 0:15 und 5:15 Uhr auf, eine Anpassung an die Außentemperatur fand nicht statt. Am 08.02.08 wurde das feste Zeitprogramm auf Absenkezeiten von 2:15 bis 5:00 Uhr verkürzt, gegen Ende der Messphase wurde nur noch von 3:00 bis 4:00 Uhr abgesenkt. Am 07.02.08 fanden Wartungsarbeiten an der Heizungsanlage statt, so dass davon auszugehen ist, dass die Änderungen bewusst vorgenommen wurden. Die Tatsache, dass bei steigenden Außentemperaturen die

Absenkezeiten nicht angepasst werden, führt jedoch zu zusätzlichen Wärmeverlusten und Stromverbräuchen.

Warmwasserbereitung

Abbildung 4.2-39 zeigt vier aufeinander folgende Tage im Januar und im Juli und die zugehörigen Temperaturen am Ausgang des WW-Speichers im EnEV-Neubau-Haus. Die Speichertemperatur liegt bei ca. 69 °C. Im Januar ist in der Nacht ein Absinken der Temperatur am Speicherausgang zu erkennen, was mit der Zeitschaltuhr der WW-Zirkulation zusammenhängt, die von 22:00 bis 5:00 Uhr die Zirkulationspumpe abschaltet. Dadurch sinkt die gemessene Temperatur ab und sie steigt nur bei einzelnen Zapfungen wieder kurz an. Im Juli sinkt die Temperatur am Speicherausgang nie ab, woraus der Schluss gezogen werden kann, dass die Zirkulationspumpe in diesem Haus ständig läuft. Dies ist seit dem 22.01.07 zu beobachten, hier ist die Zeitsteuerung defekt.

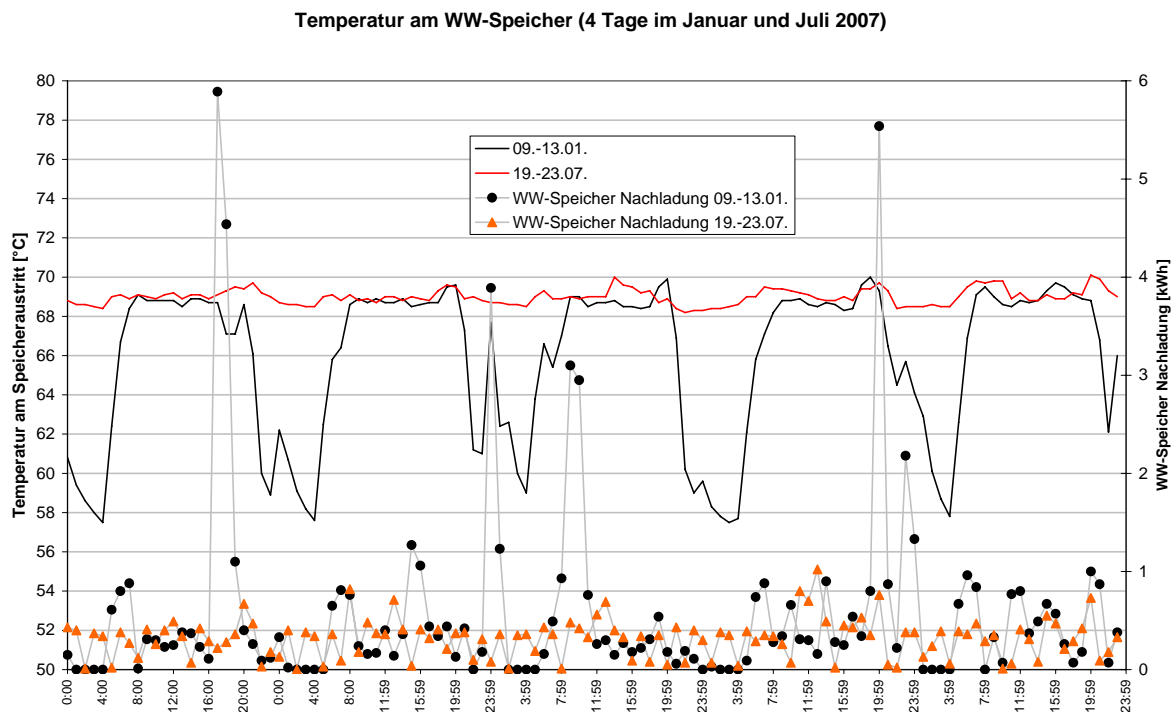


Abbildung 4.2-39: Temperatur Warmwasserspeicher und Nachladeleistung für je eine Woche im Januar 2007 und Juli 2007

Die Solltemperatur des Warmwasserspeichers liegt bei 60 °C, gemessen wurden aber bis zu 70 °C. Abbildung 4.2-40 zeigt für fünf Tage im April 2008 den Verlauf aller drei Speichertemperaturen, die Vorlauftemperatur der Nahwärme und die Wärmeabnahme der Speicher. Die Temperatur aller Speicher folgt direkt der Vorlauftemperatur im Nahwärmenetz, eine Temperaturregelung der Speicher ist nicht zu erkennen. Im ESH 40 liegt die Speichertemperatur ca. 2 K niedriger als in den anderen Gebäuden. Ein Einfluss der Zirkulationssteuerung ist nicht zu erkennen. Normalerweise wird die Speichernachladung über die Nachladepumpe freigegeben. Im vorliegenden Fall wird jedoch kontinuierlich in die Speicher geladen. Die Ursache für das gezeigte Verhalten könnte in einer zu hoch eingestellten Förderhöhe der Nahwärmepumpe liegen, die die Nahwärme über die abgeschaltete Ladepumpe in den Speicher drückt. Mit der bereits angesprochenen

Reduktion der Förderleistung zur Erhöhung der Spreizung im Nahwärmenetz könnte somit gleichzeitig auch die hohe Speichertemperatur und die kontinuierliche Nachladung behoben werden.

Durch die hohe Vorlauftemperatur im Nahwärmenetz, die „Zwangsladung“ der Speicher und eine ggf. falsch eingestellte Nachheizregelung werden die Speicher aller Gebäude dauerhaft zu warm, was zu erhöhten Verlusten bei der Warmwasserbereitung führt. Das ausführende Heizungsunternehmen wurde mit einer Überprüfung der Einstellungen beauftragt, die jedoch nicht mehr vollständig innerhalb der Projektlaufzeit durchgeführt wurde.

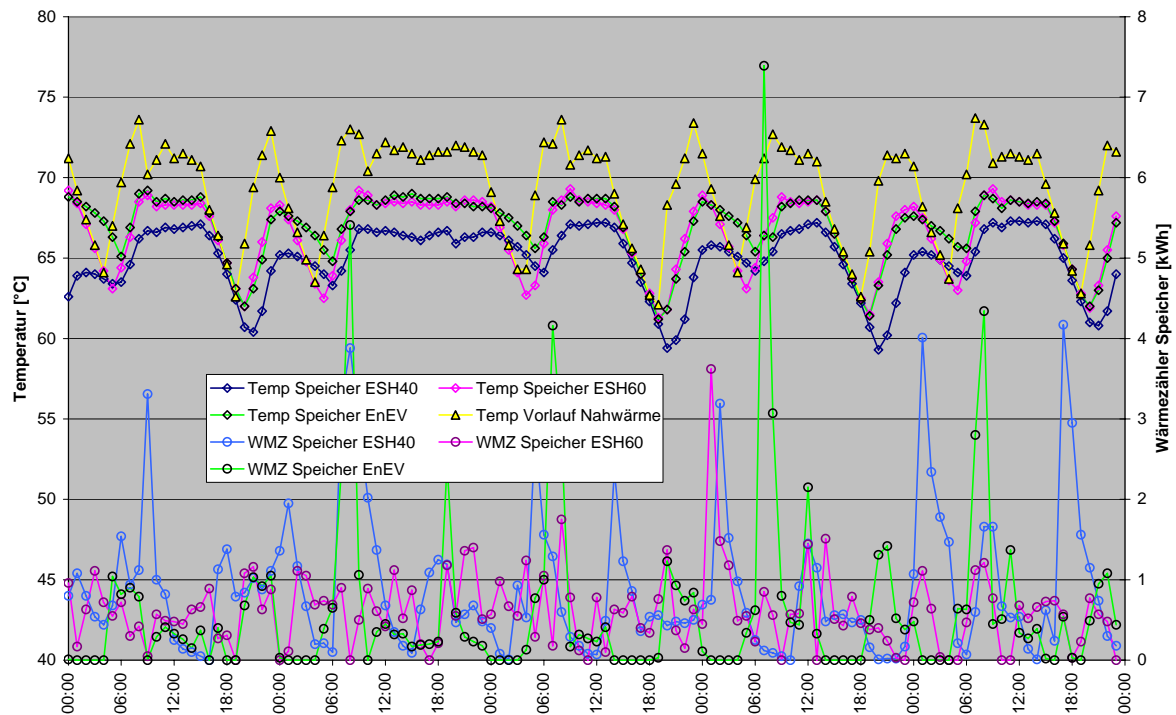


Abbildung 4.2-40: Temperaturen aller Warmwasserspeicher, Vorlauftemperatur und Nachladeleistung für fünf Tage im April 2008

Optimierungen

Im Sommer 2008 konnten noch einige Änderungen an der Betriebsweise der Heizungsanlage und des Nahwärmenetzes umgesetzt werden. Abbildung 4.2-41 zeigt den Verlauf der Vor- und Rücklauftemperaturen im September 2008 in einer Phase mit sinkenden Außentemperaturen. Im linken Teil der Abbildung, zu Zeiten von Außentemperaturen von ca. 17 °C, sind Absenkezeiten im Nahwärmenetz von 0:00 bis 5:00 Uhr zu erkennen, in denen Kessel und Ladepumpe ausgeschaltet sind und die Netztemperaturen bis auf 40 °C absinken. Aber auch tagsüber sind Phasen zu erkennen, in denen Kessel und Ladepumpe über einige Stunden nicht in Betrieb sind. Im rechten Teil der Abbildung sinken die Außentemperaturen auf ca. 11 °C ab. Damit verbunden sind längere Laufzeiten des Kessels. Außerdem wird die Ladepumpe seltener abgeschaltet und nachts sinkt die Vorlauftemperatur weit weniger stark ab. Die Spreizung zwischen Vor- und Rücklauftemperatur steigt bei größeren Wärmeabnahmen zwar an, liegt aber immer noch in einem Bereich von 3 - 5 K und somit sehr niedrig.

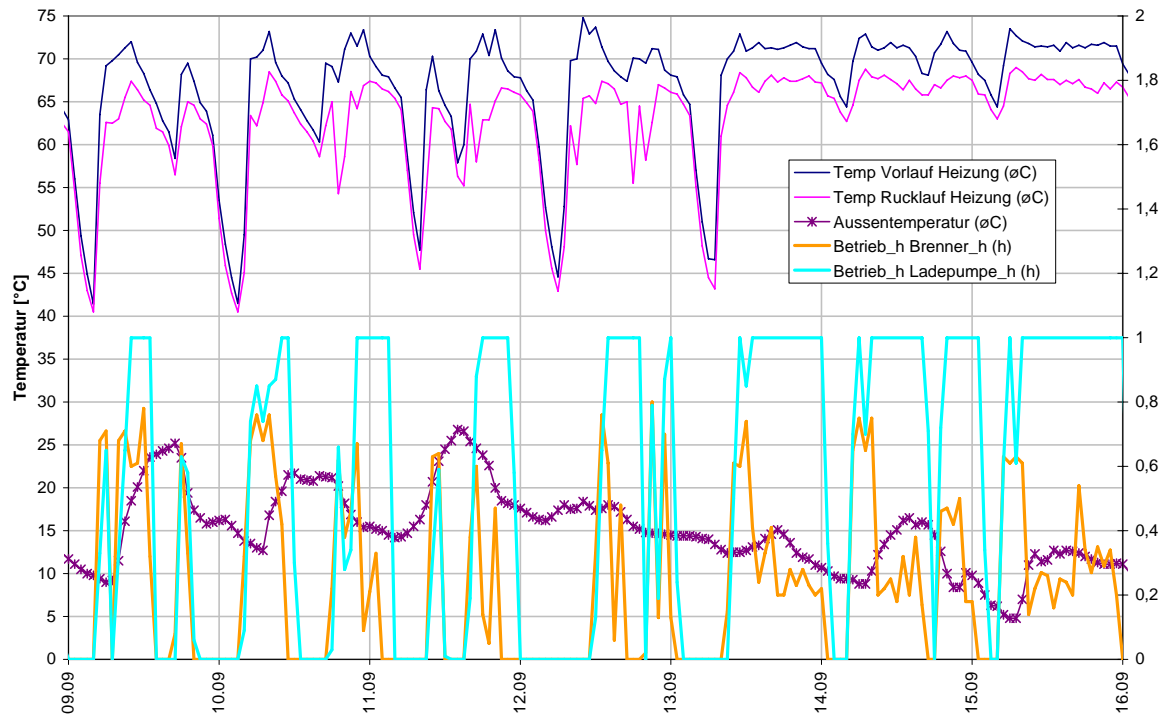


Abbildung 4.2-41: Vor- und Rücklauftemperaturen im Nahwärmenetz, Laufzeiten von Ladepumpe und Brenner sowie die Außentemperatur im September 2008 nach Veränderung der Einstellungen

Auch die Laufzeiten der Heizungspumpe für ESH 60 und EnEV-Gebäude sind nach den Änderungen an die Außentemperatur gekoppelt. Die Warmwasserladepumpe der beiden Häuser läuft jedoch immer noch im Dauerbetrieb, obwohl analog zu den Absenkezeiten im Netz auch hier kürzere Laufzeiten möglich wären. Die Speichertemperaturen schwanken jetzt stärker, liegen im Mittel aber immer noch deutlich über 60 °C.

Fazit

Bei der Analyse der Anlagentechnik wurde in einigen Punkten eine Betriebsweise festgestellt, die einer effizienten Energienutzung entgegenstehen. Hier sind besonders die Betriebszeiten der Speicherladepumpe, Absenkezeiten des Netzes, die geringe Temperaturspreizung im Netz und das Nachladeverhalten der Brauchwasserspeicher zu nennen. Nachdem diese Punkte erkannt wurden, konnten einige Parameter so verändert werden, dass ein effizienterer Anlagenbetrieb möglich ist und weniger Holzpellets und elektrischer Strom zur Wärmeversorgung erforderlich sind. Es besteht aber weiterhin noch Optimierungspotenzial.

4.2.8 GEDT-Elemente und Vakuumdämmung

Die GEDT-Elemente wurden mit zwei unterschiedlichen Messverfahren vermessen. Einerseits wurden in einem Element im ESH 40 an sechs ausgewählten Stellen Temperatur- und Feuchtefühler für die kontinuierliche Überwachung der Temperaturen und Feuchten an charakteristischen Punkten der Konstruktion eingebaut und ausgewertet. Zusätzlich wurde mit Temperaturfühlern, die hinter jedem Vakuumdämmpaneel eingebaut sind, die Funktionsfähigkeit der Paneele zu einzelnen Zeitpunkten im Winter überprüft. Die hier dargestellten Ergebnisse sind eine Aktualisierung der Messdatenauswertung bezüglich der GEDT-Elemente, die in [Mayr et al. 2007] dokumentiert ist. Dort kann der Messaufbau detailliert nachgelesen werden.

Kontinuierliche Messung von Temperatur und Feuchte an sechs ausgewählten Stellen

Abbildung 4.2-42 zeigt den Temperaturverlauf in den GEDT-Elementen über die gesamte Messphase. Die einzelnen Messpunkte (MP) wurden an folgenden Stellen angeordnet:

- 1 Unter Fenster in Fuge Fenster-Kerto-Platte (Einbauwärmebrücke Fenster)
- 2 Mitte VIP (ungestörter Bereich)
- 3 PW-Punkt (innen, ca. 3 cm von PW-Anker entfernt)
- 4 VIP-VIP-Stoß (auf der Innenseite Kertoplatte gemessen)
- 5 Vertikalfuge (zu GEDT 39/1 etwa mittlere Höhe)
- 6 Horizontalfuge (zu GEDT 39/4, ca. 1 m neben Gebäudemitte)



Die einzelnen Messpunkte folgen dem Verlauf der Außentemperatur, wobei zu erkennen ist, dass die Werte der unterschiedlichen Messpunkte aufgrund der Wärmebrücken, in deren Umgebung sie angeordnet sind, sich voneinander deutlich unterscheiden. Für den Monat Dezember 2007 ist der Temperaturverlauf in Abbildung 4.2-43 nochmals detailliert dargestellt. Die Messpunkte 2, 3 und 4 verlaufen nahezu deckungsgleich übereinander. Diese Punkte sind das ungestörte VIP (MP2) in der Nähe eines durchgehenden Halteankers (MP3) und hinter einem VIP-VIP-Stoß auf der warmen Seite der Kerto-Platte (MP4). Dieses Ergebnis zeigt, dass die VIP-VIP-Stöße und der Halteanker auf der warmen Seite der Kerto-Platte nur eine vergleichsweise geringe Wärmebrückenwirkung ausüben, da kaum Unterschiede zum ungestörten VIP zu erkennen sind. Die Einbaufuge am Fenster (MP1) und die Vertikalfuge des GEDT (MP5) liegen zwischen 0,5 K und 1 K unter dem ungestörten VIP. Hier zeigt sich, dass durch die eingesetzten Kompribänder, die eine deutlich geringere Dämmwirkung aufweisen, in den Fugen deutlich mehr Wärme abfließt.

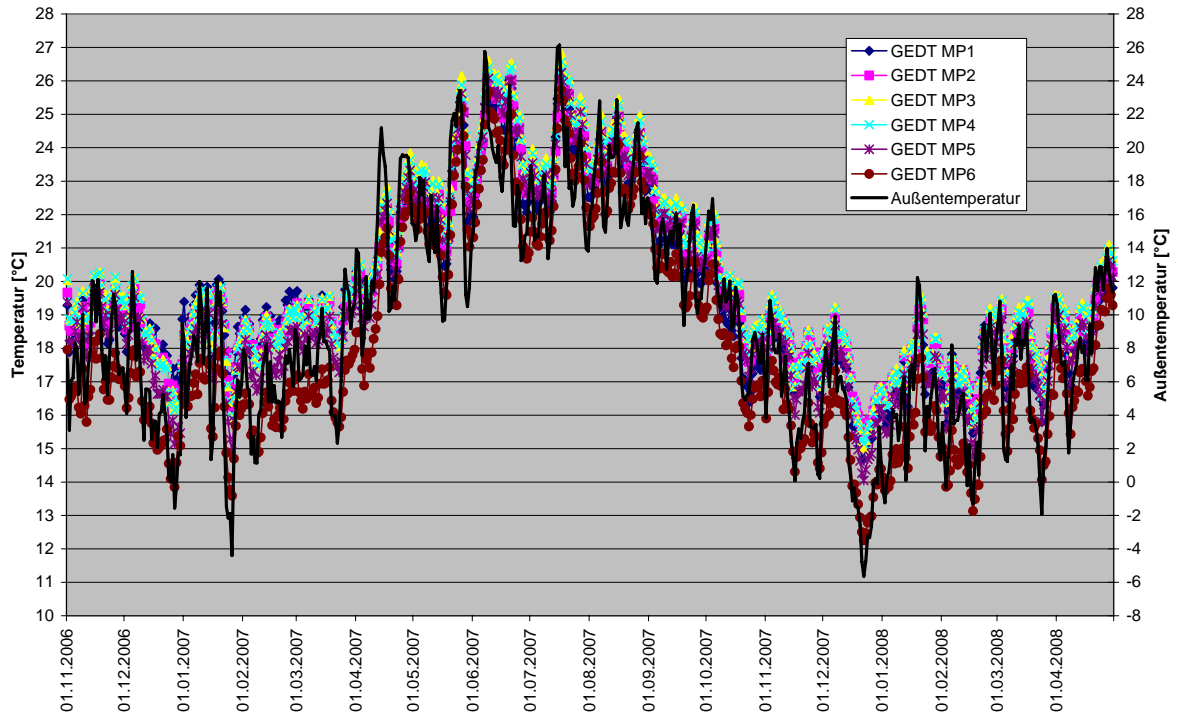


Abbildung 4.2-42: Temperaturen am GEDT über die gesamte Messphase

Die Temperatur der Horizontalfuge (MP6) liegt je nach Außentemperatur zwischen 2 und 3 K unter der des ungestörten VIP. An dieser Stelle wurde die Fuge offensichtlich nicht korrekt ausgeführt, denn es wären rechnerisch die gleichen Temperaturen wie in der Vertikalfuge zu erwarten gewesen.

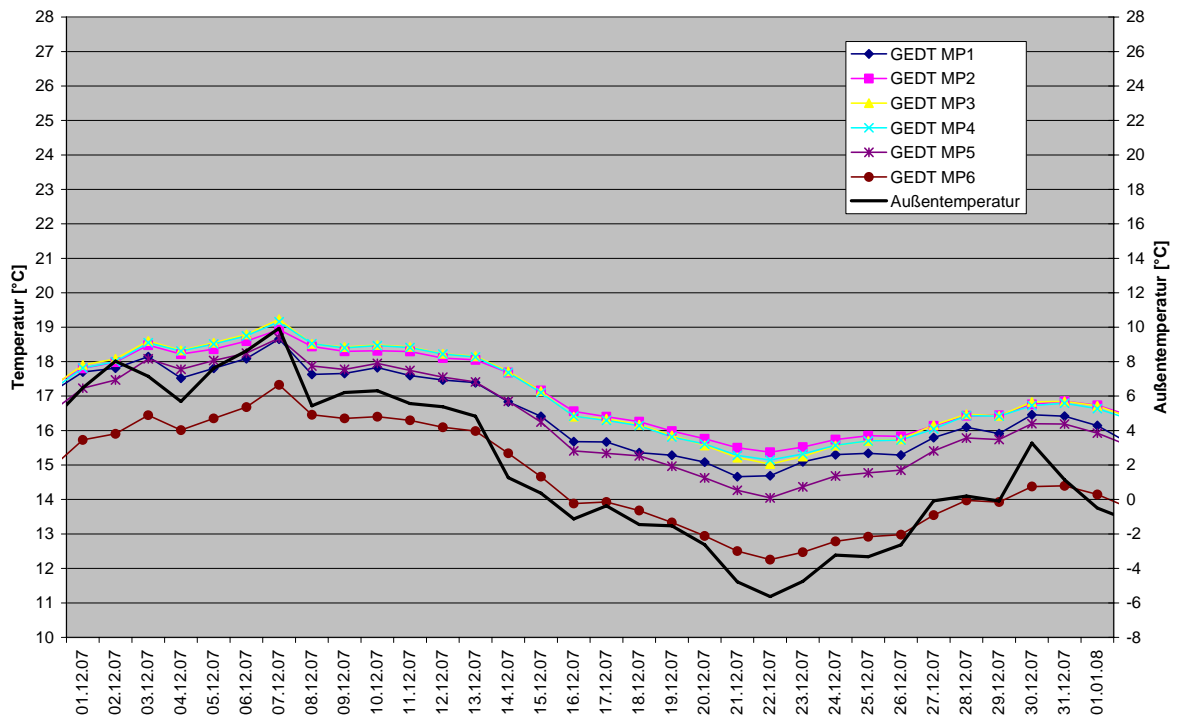


Abbildung 4.2-43: Temperaturen am GEDT im Dezember 2007

Für die Feuchtemesswerte ist der Verlauf in Abbildung 4.2-44 über den gesamten Messzeitraum dargestellt. Die Feuchte sank im ersten Winter bei allen Fühlern kontinuierlich ab, stieg im folgenden Sommer wieder leicht an, ohne die Werte beim Einbau zu erreichen um im darauf folgenden Winter 2007/08 wieder leicht zurückzugehen. Es ist über den gesamten Zeitraum keine Auffeuchtung einzelner Messstellen festzustellen. Die Reihenfolge der Messpunkte ist hier grundsätzlich umgekehrt, da eine niedrigere Temperatur zu höheren Feuchten führt. Auffällig sind die Messpunkte MP1 und MP5. Die Fugen zwischen GEDT und Fenster (MP1) zeigten deutliche Abweichungen gegenüber den anderen Messstellen in Richtung auf niedrigere Feuchten im Winter. Dies ist vermutlich auf den direkteren Einfluss der Raumlufttemperatur auf die Fensterfuge zurückzuführen. Die Vertikalfuge (MP5) folgt bei den Feuchtwerten direkt dem Verlauf der Außentemperatur. Dies deutet auf eine direkte Ankopplung des Fühlers in dieser Fuge an die Außenluft hin, die bei den Temperaturmessungen aber nicht festgestellt werden konnte. Die einzelnen Einbrüche bei den Feuchtemessungen entstehen durch kurze Datenausfälle an den Feuchtefühlern.

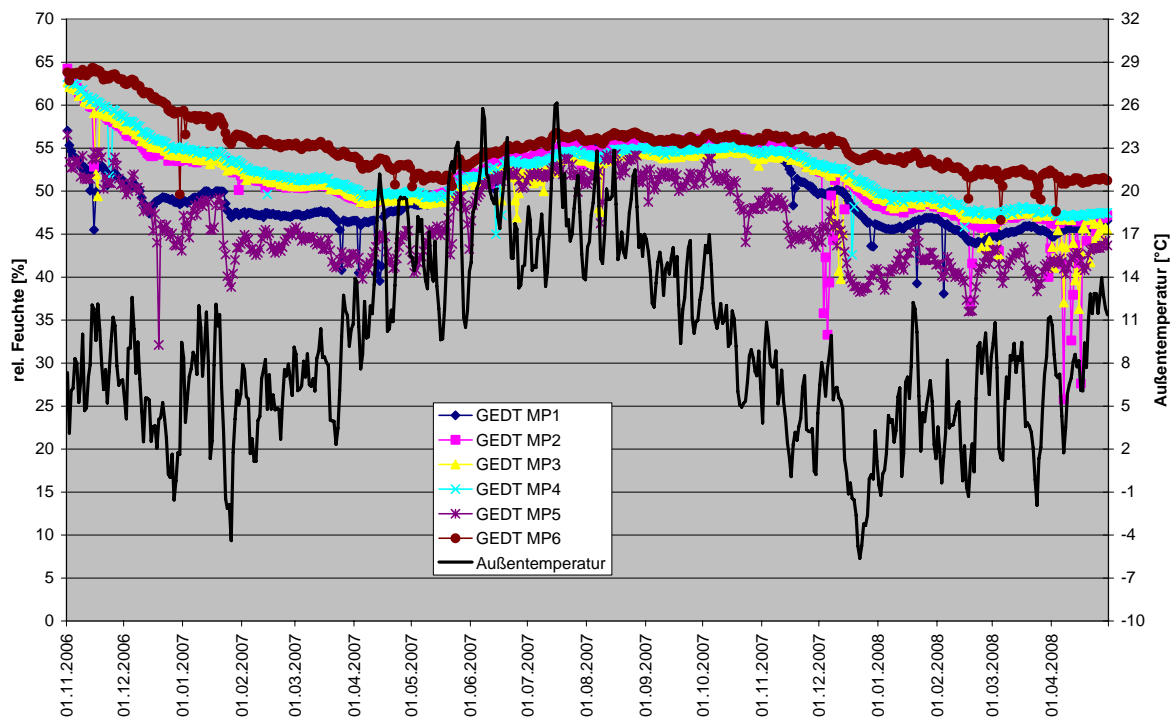


Abbildung 4.2-44: Mittlerer Ausgleichsfeuchten am GEDT über die gesamte Messphase

Messung der Funktionsfähigkeit der Vakuumpaneele

Da eine thermografische Kontrolle der Funktionsfähigkeit der Vakuumdämmpaneele wegen der Hinterlüftung der Fassade nicht möglich ist, wurde in die GEDT-Elemente hinter jedes VIP ein Temperaturfühler (PT100) montiert. Im Keller jedes Hauses kann mit einem entsprechenden Temperaturmessgerät die Temperatur in der Kerto-Platte mittig hinter dem VIP gemessen werden. Zusammen mit den Raumtemperaturen und der Außentemperatur ist es damit möglich, die gemessene Temperatur mit den Solltemperaturen bei funktionsfähigem VIP zu vergleichen. Dabei werden eine Reihe von Korrekturen angewandt, die in [Mayr et al. 2007] beschrieben sind. Auf eine Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der VIPs wurde aufgrund der Unsicherheiten bei diesem Messaufbau bewusst verzichtet.

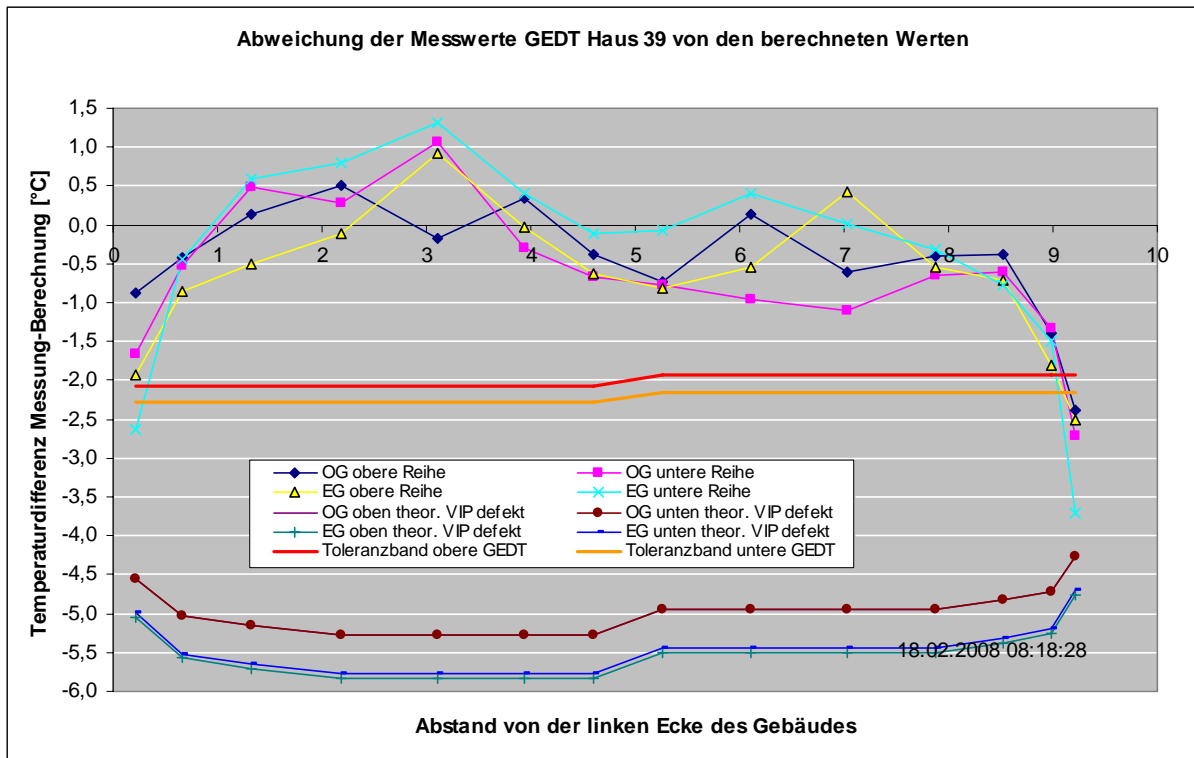


Abbildung 4.2-45: Bestimmung der Funktionsfähigkeit der VIPs im ESH 40

Abbildung 4.2-45 zeigt die korrigierten Messpunkte der Temperaturfühler an den VIPs sowie die zu erwartenden Temperaturen bei defekten VIP für die Messung vom 18.02.2008. Die einzelnen Punkte stellen von der linken Ecke aus (von außen betrachtet) die Messpunkte dar, wobei jedes GEDT zwei Reihen mit VIP aufweist. Die Temperaturen liegen fast alle im Bereich der zu erwartenden Temperaturen, d. h. die Differenz zwischen Berechnung und Messung liegt nahe Null. Da es aber Einflüsse auf den Messwert gibt, die im Nachhinein nicht mehr quantifiziert werden können (z. B. Dicke der Ausgleichsdämmung am Messpunkt), ist auch ein Toleranzband angegeben, innerhalb dessen von einem funktionsfähigen VIP ausgegangen werden kann. In der Abbildung liegen alle Messpunkte innerhalb dieses Toleranzbandes, außer bei einigen Randelementen. Die Abweichungen treten aber systematisch bei allen Gebäuden auf, so dass davon auszugehen ist, dass die Temperaturkorrektur an den Randelementen nicht vollständig alle Effekte abdeckt. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass im ESH 40 alle VIP voll funktionsfähig sind.

Anders ist die Situation im ESH 60-Gebäude. Abbildung 4.2-46 zeigt den zugehörigen Kurvenverlauf für die Messung am 18.02.2008. Hier sind einige Ausreißer zu erkennen, die exakt die Temperaturdifferenz erreichen, die sich für defekte VIPs rechnerisch ergibt. Allerdings treten evtl. zusätzliche Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Funktionsfähigkeit auf. Wenn die Temperaturen zwischen den Geschossen oder zwischen den Zimmern um einige Grad auseinander liegen, können in der Außenwand in der 6 cm breiten Luftschicht u. U. Konvektionsströmungen in diesem Zwischenraum auftreten, die die tatsächlich an der Messstelle vorhandenen Temperaturen verändern. Dieser Effekt trat bei vorherigen Messungen auf [siehe [Mayr et al. 2007], zeigt sich in der hier dargestellten Auswertung vom 18.02.2008 aber nicht.

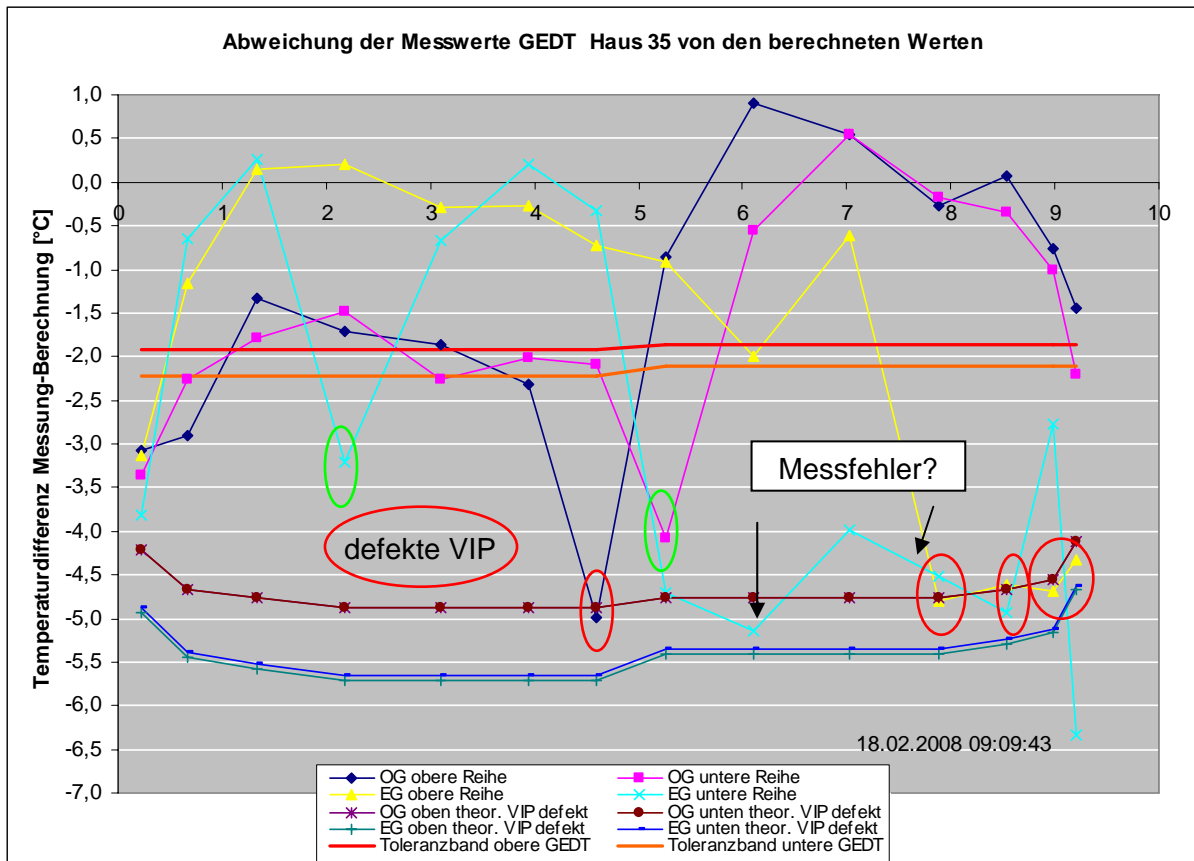


Abbildung 4.2-46: Bestimmung der Funktionsfähigkeit der VIPs im ESH 60

Die mit roten Kreisen gekennzeichneten VIPs sind wahrscheinlich defekt, bei einigen weiteren könnte ein Defekt vorliegen, dies ist aber nicht eindeutig (grüne Kreise). Schließlich gibt es noch die VIPs der unteren Reihe EG rechts, bei denen der Verdacht besteht, dass die Messleitungen bei der Montage beschädigt wurden und aus diesem Grund falsche Temperaturen gemessen werden. Wären alle unteren VIPs am rechten GEDT defekt, so wäre zu erwarten, dass sich dies bei den Thermografieaufnahmen im Bereich des Überganges zur Perimeterdämmung zeigt, was die Messungen mit der Thermografiekamera aber nicht gezeigt haben. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass am ESH 60 fünf VIPs defekt sind, zwei weitere evtl. defekt sein könnten und 7 VIPs nicht auswertbar sind.

Die Situation am EnEV-Neubau-Gebäude zeigt sich in Abbildung 4.2-47. Auch hier gibt es VIPs, die exakt die Temperatur defekter Paneele erreichen. Die vier mit rot eingekreisten VIPs sind bei diesem Gebäude wohl defekt. Zusätzlich gibt es noch vier weitere Messpunkte (grüne Kreise), die auf defekte VIPs hindeuten könnten. Die gemessenen Temperaturen, besonders in der Mitte des Diagramms, könnten aber auch durch Verarbeitungsfehler in der GEDT-Fuge verursacht werden, so dass es sich bei diesen Punkten nicht sicher um defekte VIPs handelt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass 9 von 154 VIPs nach 2 Jahren defekt sind (6%). Wann diese Defekte auftraten, kann nicht bestimmt werden. Bei einigen weiteren kann nicht sicher entschieden werden, ob es sich um defekte VIPs handelt, oder ob in diesem Bereich Montagefehler vorliegen. Auffallend ist jedoch, dass die GEDTs, die zuerst montiert wurden, die meisten Fehler aufweisen. Zusätzlich wurde am EnEV-Gebäude ein Prototyp montiert, bei dem umfangreiche Nacharbeiten wie Schweißen und Schleifen erforderlich waren. Im letzten fertig gestellten Gebäude sind keine defekten VIPs vorhanden.

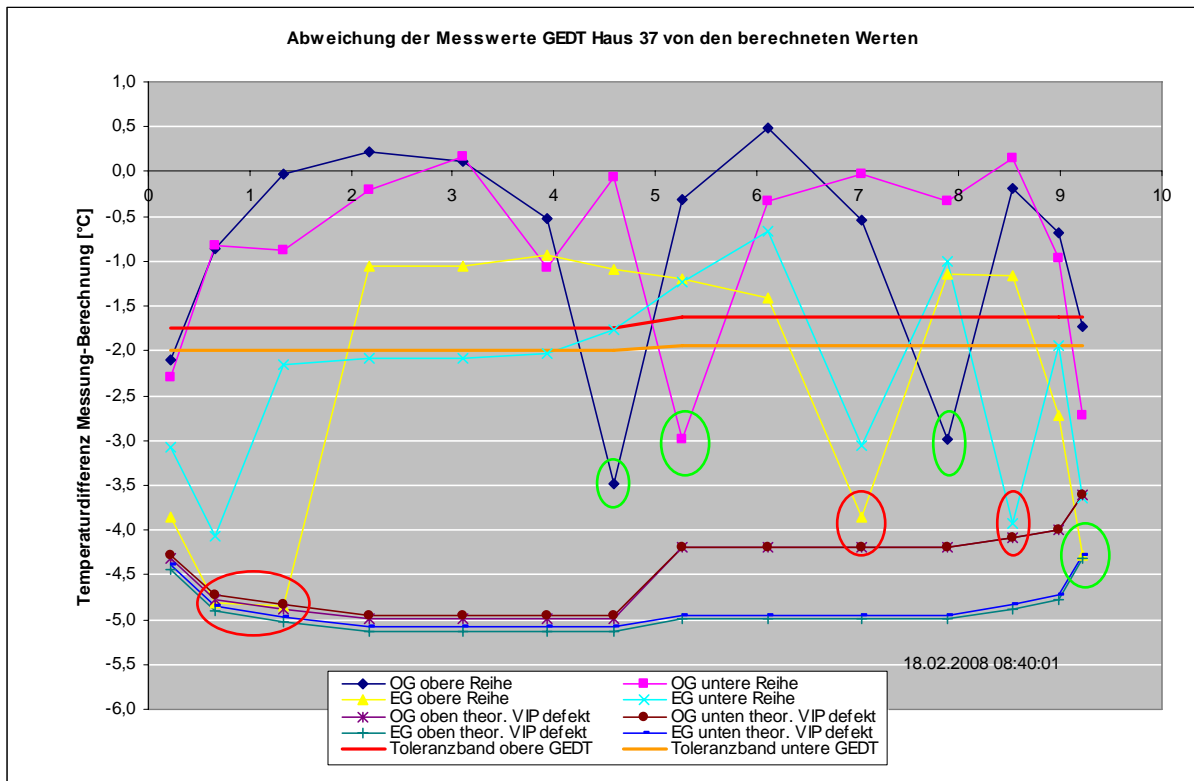


Abbildung 4.2-47: Bestimmung der Funktionsfähigkeit der VIPs im EnEV-Neubau-Gebäude

5 Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Begleituntersuchung

5.1 Methodisches Vorgehen

Drei der sechs Wohnungen in der Wilhelmstraße 35, 37 und 39 der Hofheimer Wohnungsbau GmbH (HWB) waren während der Sanierungstätigkeit bewohnt; die übrigen drei Wohnungen wurden erst mit Abschluss der Bautätigkeit im Zeitraum von Dezember 2005 bis April 2006 neu vermietet. Daraus ergab sich für die Befragungen folgendes Untersuchungsdesign: Vier Befragungen wurden mit den Altmietern und zwar vor, während und nach der Sanierungsmaßnahme und eine Befragung mit den Neumieter nach Abschluss der Sanierungsmaßnahme durchgeführt. Die einzelnen Befragungen hatten dabei unterschiedliche Zielsetzungen:

- Die Befragung vor Beginn der Bautätigkeit diente der Erfassung der Bewertungen unterschiedlicher Wohnungsmerkmale der unsanierten Wohnung - im Sinne einer Baseline (nachfolgend mit Vorherbefragung bezeichnet).
- Eine zweite Befragung zur Zeit der höchsten Bautätigkeit sollte das Ausmaß der Beeinträchtigungen durch die Sanierungsmaßnahme feststellen (nachfolgend Zwischenbefragung benannt).
- Die dritte Befragung der Altmietern hatte das Ziel, den Umgang mit der neuen Haustechnik und das Raumklima im Winter zu erfragen. Diese Befragung fand nach Abschluss der Sanierungsarbeiten und mit dem Ende der ersten Heizperiode statt (nachfolgend als Nachherbefragung umschrieben).
- In der letzten Befragung wurden Alt- und Neumieter zeitgleich interviewt. Die letzte Befragung fand nach der Montage der Großdämmelemente statt. Die Altmietern wurden gebeten die verschiedenen Merkmale einer energetisch sanierten Wohnung (Heizen, Lüften, Umgang mit der Haustechnik usw.) nach längerer Wohndauer zu beurteilen. Die Neumieter wurden gebeten, die unterschiedlichen Merkmale einer energetisch sanierten Wohnung zu bewerten (Befragung der Neumieter). Beide Mietergruppen sollten darüber hinaus das erstmals eingesetzte Verfahren der Großelement-Dämmtechnik mit Vakuumdämmung bewerten – vor allem auch im Hinblick auf konventionelle Dämmverfahren, soweit hierzu von Seiten der Mieterschaft entsprechende Erfahrungen vorlagen⁷.

Die Untersuchung in Hofheim war im Wesentlichen als Längsschnittuntersuchung angelegt, um die durch die Sanierungsmaßnahme verursachten Veränderungen z. B. der Wohnzufriedenheit messen zu können. Dazu wird in einer ersten Befragung die Wohnzufriedenheit vor der Maßnahme erhoben (Baseline) und mit der Bewertung späterer Befragungen während oder nach Abschluss der Sanierung in Relation gesetzt. Da im Fall des Sanierungsobjekts Hofheim unterschiedliche Sanierungstechniken (konventionelle

⁷ Die Ergebnisse sind in dem separaten Teilbericht über die Großelement-Dämmtechnik dokumentiert [Mayr et al. 2007].

Dämmverfahren vs. Großdämmelemente mit Vakuumdämmung) zum Einsatz kamen, ist es möglich, diese beiden unterschiedlichen Techniken zu vergleichen.

Die statistischen Verfahren, die bei der sozialwissenschaftlichen Begleituntersuchung der Sanierungsmaßnahme in Hofheim eingesetzt wurden, sind – auf Grund des geringen Stichprobenumfangs - ausschließlich beschreibender (deskriptiver) Art. Auch auf eine differenzierte Teilgruppenbetrachtung (Geschlecht, Altersgruppen) wurde verzichtet, damit die Ergebnisse nicht auf die einzelnen Haushalte rückführbar sind. Die Ergebnisse sind – ebenfalls im Hinblick auf die geringe Fallzahl – als Tendenzen zu verstehen.

Um die durch die geringe Fallzahl eingeschränkte Aussagekraft zu erhöhen, wurde vergleichend auf weitere Untersuchungen zurückgegriffen, um zu stabilen Ergebnissen zu gelangen. Dazu zählt einerseits die zeitgleich vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) in Auftrag gegebene sozialwissenschaftliche Begleitforschung verschiedener Sanierungsvorhaben, die am Modellprojekt „Niedrigenergiehaus im Bestand“ der Deutschen Energieagentur (dena) teilgenommen haben. Im Rahmen dieses Projekts untersuchte das IWU Sanierungsprojekte in Ansbach und Bremen (Längsschnittuntersuchung) sowie Freiburg, Leipzig und Schwerin (Retrospektivuntersuchung)⁸. Ebenfalls einfließen konnten Ergebnisse einer Untersuchung, die das Institut Wohnen und Umwelt im Sommer 2000 bis Sommer 2002 in einer Niedrigenergie- und Passivhaussiedlung in Wiesbaden Dotzheim durchführte⁹. Hier stand vor allem die Zufriedenheit mit dem Wohnkomfort und der Haustechnik nach längerer Wohndauer im Blickpunkt des Interesses.

Abbildung 5.1-1 gibt einen Überblick über die einzelnen Erhebungszeiträume in Hofheim; die zeitlichen Abstände zwischen den Befragungen lagen zwischen fünf Monaten und einem Jahr; die Befragungstermine wurden dem jeweiligen Stand des baulichen Sanierungsfortschritts angepasst und mit der Wohnungsbaugesellschaft HWB abgestimmt.

Abbildung 5.1-1 Übersicht über die einzelnen Erhebungszeiträume

Monat	2005								2006							2007			
	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Feb.	März	Apr.	Mai	Juni	(...)	Dez.	Jan.	(...)	Apr.
Befragung	1					2						3							4

Altm Mieter

Die drei Haushalte, die während der Sanierung in ihren Wohnungen verblieben, konnten für alle vier Befragungen gewonnen werden. Bei den befragten Altmietern handelt es sich um zwei Ein-Personen-Haushalte im Rentenalter und einen Drei-Personen-Haushalt. Alle drei Haushalte wohnen schon sehr lange in diesen Wohnungen. Ein Haushalt wohnt bereits seit mehr als 40 Jahren in der Wohnung, die beiden übrigen Haushalte bewohnen ihre Wohnung seit etwa 25 Jahren.

⁸ Vgl. hierzu den wissenschaftlichen Abschlussbericht des IWU [Hacke, U. & G. Lohmann 2006]

⁹ Vgl. hierzu die wissenschaftlichen Endberichte des IWU ([Flade et. al 2003a] und [Flade et. al. 2003b])

Neumieter

Drei Haushalte sind erst nach Abschluss der Sanierungsmaßnahmen (jedoch vor Anbringung der Großdämmelemente mit Vakuumdämmung) in die Gebäude gezogen. Der Bezug der Wohnungen lag im Zeitraum von Dezember 2006 bis April 2007. Unter den drei Haushalten sind ein Ein-Personen-Haushalt und zwei Zwei-Personen-Haushalte; in keinem Haushalt leben Kinder unter 18 Jahren, das Durchschnittsalter liegt bei 48 Jahren.

5.2 Ergebnisse der Untersuchungen

Erwartungen und Bedenken hinsichtlich der Maßnahme

Die Haltung der Bewohnerschaft zur energetischen Sanierung wurden mit zwei Schwerpunktsetzungen erhoben: Zum einen interessierte die Beurteilung des *Sanierungsergebnisses*. Dazu zählen die Erwartungen und abschließenden Bewertungen hinsichtlich der Wohnungssanierung sowie die grundsätzliche Identifikation mit den Zielen einer energetischen Sanierung. Dies ist eng verwoben mit der Wohnzufriedenheit insgesamt und der Zufriedenheit mit den technischen Besonderheiten eines Niedrigenergiehauses. Zum zweiten wurden Fragen zur Bewertung des baulich-organisatorischen Ablaufs der Sanierungsmaßnahmen (*Sanierungsprozess*) formuliert. Hierzu zählen insbesondere die Erfassung der wahrgenommenen Beeinträchtigungen durch die Begleitumstände der Sanierungsmaßnahmen sowie die Bewältigungsstrategien (Coping) der Mieterhaushalte im Umgang damit.

Zu Beginn standen die Mieterinnen und Mieter der Sanierungsmaßnahme indifferent gegenüber; sie sahen sowohl positive als auch negative Aspekte in der anstehenden Maßnahme. Anders als hypothetisch angenommen, wird die Einstellung gegenüber der Maßnahme – trotz Baulärm und Baudreck, denen die Mieterinnen und Mieter ausgesetzt sind – im Laufe der Sanierungsmaßnahme jedoch nicht negativer, sondern eher positiver, wie Abbildung 5.2-1 zeigt.

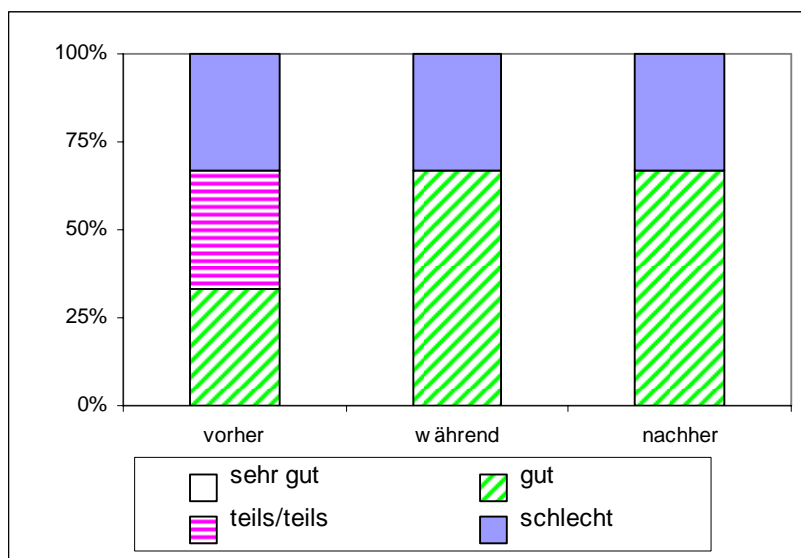


Abbildung 5.2-1 Bewertung der Sanierungsmaßnahme im Laufe der Zeit¹⁰

¹⁰ Einmal alles in allem gesehen, was halten Sie von der geplanten Sanierungsmaßnahme? Die Sanierungsmaßnahme finde ich ... 1 = sehr gut, 2 = gut, 3 = teils/teils, 4 = schlecht oder 5 = sehr schlecht.

Entsprechend waren die Erwartungen, die die Mieterinnen und Mieter an die bevorstehenden Sanierungsmaßnahmen stellten - insgesamt gesehen - auch nur in einem Haushalt hoch. Dieser versprach sich von der Sanierung eine Modernisierung des Badezimmers, die beiden übrigen Haushalte sahen keine konkreten Verbesserungen im Zusammenhang mit der Sanierungsmaßnahme. Auf die Bedenken hinsichtlich der Sanierungsmaßnahme angesprochen äußerten die Befragten die Befürchtungen, dass mit Dreck und Stress zu rechnen sei, dass es keine Rückzugsmöglichkeiten gäbe und dass die Sanierung nur mit Nachteilen verbunden sei.

Obwohl die generelle Einstellung der Bewohnerinnen und Bewohner zur Sanierungsmaßnahme eher nüchtern war, sahen die Befragten die mit einer Sanierung verbundenen Ziele insgesamt als sehr wichtig oder wichtig an. Insbesondere die Senkung der Heizkosten, die Einsparung von CO₂ sowie die Einsparung von Energie waren Ziele, die von den Befragten als sehr wichtig eingestuft wurden (vgl. Abbildung 5.2-2). Am wenigsten wichtig scheint den Befragten eine Verbesserung des Wohnraumklimas zu sein. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der BBR-Längsschnittuntersuchung. Auch hier gaben die Mieterinnen und Mieter an, vorrangig an einer Senkung der Heizkosten, an einer Energieeinsparung und an einer Minderung der CO₂-Emissionen interessiert zu sein.

Abbildung 5.2-2 Bewertung der Ziele der energetischen Sanierung¹¹

Ziele der energetischen Sanierung	Mittelwert
Aufwertung der Wohngebäude	2,00
CO ₂ -Einsparung	1,67
Erhöhung des Wohnkomforts	2,33
Einsparung von Energie	1,67
Verbesserung des Wohnraumklimas	2,67
Senkung der Heizkosten	1,50

Informiertheit

Als Voraussetzung für eine für die Mieterinnen und Mieter so belastungsarm wie möglich durchgeführte Sanierungsmaßnahme kann die umfängliche Information der Bewohnerschaft gewertet werden. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, dass die Qualität der Information und Kommunikation zwischen Wohnungsbaugesellschaft und Mieter wesentliche Einflussfaktoren auf die positive Unterstützung der Bewohnerinnen und Bewohner darstellen. Daher interessierte in der Vorherbefragung des Längsschnitts vor Beginn der Sanierungsmaßnahmen, wie sich die Mieterinnen und Mieter über die anstehenden Sanierungsmaßnahmen informiert haben, wie sie die Qualität der erhaltenen Informationen beurteilen und was ggf. besser hätte gemacht werden können.

Die Bewohnerinnen und Bewohner der Wilhelmstraße wurden auf einer Informationsveranstaltung des Wohnungsunternehmens HWB über die geplante Sanierung informiert. Dabei wurden Themen wie

- Art der Maßnahme (was soll gemacht werden)
- Beginn und Dauer der Maßnahme

¹¹ Für wie wichtig halten Sie die mit der Sanierung verbundenen Ziele? 1 = sehr wichtig, 2 = wichtig, 3 = teils/teils, 4 = weniger wichtig, 5 = unwichtig.

- Belastungen durch Lärm und Dreck
- Wohnqualität
- Mietpreise und Höhe der Heizkosten nach der Maßnahme

angesprochen. Es zeigte sich, dass sich die Mieterinnen und Mieter zu allen Aspekten überwiegend gut informiert fühlten, mit Ausnahme der Hinweise zu den „Heizkosten nach der Sanierung“. Zu diesem Punkt gab niemand an, gut informiert zu sein. Am besten informiert fühlten sich die Befragten bei den Themen „Wohnqualität“, „Ausmaß der Belastungen durch Lärm und Dreck“ und dem „Mietpreis“.

Zum energiesparenden Wohnen gehören nicht nur eine zeitgemäße Technik und hochwertige Gebäudedämmungen, sondern ebenso wichtig ist das richtige Nutzerverhalten. Die Bewohnerinnen und Bewohner von Passiv- oder Niedrigenergiehäusern sollten daher eine Einweisung in die Bedienung und Wartung der neuen Haustechnik erhalten und über das richtige Heizen und Lüften in Energiesparhäusern informiert werden. Zwei der drei Altmietter-Haushalte, aber nur einer der drei Neumietter-Haushalte, gaben an, eine entsprechende Einweisung in das richtige Nutzerverhalten erhalten zu haben.

Zum Umfang der Einweisung gehörten die Aspekte

- Nutzerverhalten
- Handhabung der Heizung
- Bedienung der Lüftungsanlage
- Wartung der Lüftungsanlage (z. B. Filterwechsel)
- Fensteröffnungsverhalten
- Heizverhalten

Belastungen und Beeinträchtigungen

In Anbetracht dessen, dass die Befragten zum Zeitpunkt der Sanierungs- und Modernisierungsarbeiten in ihren Wohnungen verblieben, war von hohen Beeinträchtigungen und Belastungen während der akuten Bauphase auszugehen. Um das Ausmaß der Beeinträchtigungen möglichst genau zu erfassen, wurden die Bewohnerinnen und Bewohner zum Zeitpunkt der höchsten Bauaktivität zu diesen Aspekten befragt. Darüber hinaus wurde auch das Ausmaß der Exponiertheit der Mieterinnen und Mieter thematisiert. Hier wurde die Hypothese zu Grunde gelegt, dass z. B. berufstätige Personen, die sich tagsüber nicht in der Wohnung aufhalten, den Beeinträchtigungen weniger ausgesetzt sind und diese somit weniger negativ wahrnehmen.

Die Befragten gaben an, dass Baumaßnahmen während der zweiten Befragung in allen drei Wohnungen stattfanden, d. h. dass die Mieterinnen und Mieter den negativen Begleiterscheinungen der Sanierungsmaßnahme wie Dreck und Baulärm zum Zeitpunkt der Befragung in unmittelbarer Nähe ausgesetzt waren. Eine befragte Person ist tagsüber normalerweise zu Hause, die beiden anderen befragten Personen sind tagsüber normalerweise nicht in ihren Wohnungen. Zwei Haushalte stufen die Beeinträchtigungen als sehr hoch ein, ein Haushalt machte dazu keine Angaben.

Der Dreck und die eingeschränkte Nutzbarkeit der Räume stellen für die Befragten die größte Beeinträchtigung dar, der Baulärm und die Unordnung der Wohnung wird als mittlere Belästigung und die Anwesenheit der Handwerker in der Wohnung als die geringste

Beeinträchtigung wahrgenommen. Die Bewohnerinnen und Bewohner wurden weiterhin gefragt, ob die Begleitumstände der Sanierung den normalen Wohnalltag beeinträchtigen, und wenn ja, in welcher Form. Alle Befragte gaben an, sich in ihrem normalen Wohnalltag sehr gestört zu fühlen. Vor allem das temporäre Fehlen der Sanitäreinrichtung (Dusche, Waschgelegenheit und WC), aber auch der herumliegende Bauschutt und die fehlenden Möglichkeiten sich hinzusetzen, beeinträchtigten den Wohnalltag der Mieterinnen und Mieter erheblich. Abbildung 5.2-3 zeigt das Ausmaß der Beeinträchtigung bei den Aspekten Baulärm, Dreck, Handwerker in der Wohnung, Unordnung und eingeschränkte Nutzbarkeit der Wohnung.

Abbildung 5.2-3 Ausmaß der Beeinträchtigungen durch verschiedene Begleitumstände der Sanierungsmaßnahme, Mittelwerte¹²

Ausmaß der Beeinträchtigungen	Mittelwerte
Baulärm	2,67
Dreck, Baustaub	1,00
Handwerker in der Wohnung	4,00
Unordnung	2,67
Eingeschränkte Nutzbarkeit der Wohnung	1,33

Der Dreck und die eingeschränkte Nutzbarkeit der Wohnung stellen für die Befragten die größten Beeinträchtigungen dar. Die Belastungen durch Lärm und die Unordnung in der Wohnung sind von mittlerer Bedeutung und die Anwesenheit von Handwerkern in der Wohnung ist für die Bewohnerschaft eher unproblematisch. Auch in der BBR-Untersuchung stuften die Befragten die negativen Begleiterscheinungen der Sanierung als hoch belastend ein. Dabei wurde der Dreck und die eingeschränkte Nutzbarkeit der Wohnung – wie in Hofheim – als größte Beeinträchtigung wahrgenommen.

Individuelle Bewältigungsstrategien (Coping)

Bisher wurde aufgezeigt, welchen Belastungen sich die Mieterinnen und Mieter während der Baumaßnahmen gegenüber sahen und wie sie diese zum Zeitpunkt ihres Auftretens bewerteten. Von Interesse war darüber hinaus, wie die Mieterinnen und Mieter mit diesen als beeinträchtigend anzusehenden Begleitumständen einer Sanierung fertig wurden (Coping).

¹² Wie stark fühlen Sie sich derzeit durch folgende Aspekte beeinträchtigt? Sehr stark (1), stark (2), mittel (3), kaum (4) oder gar nicht (5).

Abbildung 5.2-4 Bewältigungsstrategien (Coping) während der Sanierungsarbeiten, Mittelwerte¹³

Coping-Strategien	Mittelwerte
Ich ertrage die Sanierungsmaßnahmen mit Geduld, weil sie zeitlich begrenzt sind	2,67
Ich ertrage die Sanierungsmaßnahmen mit Geduld, weil ich das Ziel gut heiÙe	3,00
Ich bin viel zu Hause und habe ein Auge auf die Handwerker	3,33
Ich versuche momentan so wenig wie möglich zu Hause zu sein	3,00
Ich flüchte in eine ruhige Ecke meiner Wohnung	2,67
Ich mache meinem Ärger Luft, indem ich mich z. B. beschwere	3,67

Die häufigste Strategie ist das Üben in Geduld, da die Mieterinnen und Mieter wissen, dass die Baumaßnahmen zeitlich begrenzt sind. Die Flucht in eine ruhige Ecke der Wohnung wird als Bewältigungsstrategie eher gewählt als die offensive Variante der Beschwerde beim Wohnungsunternehmen. Ein Misstrauen gegenüber den Handwerkern war - insgesamt gesehen – eher nicht zu beobachten.

Wohnzufriedenheit

Bereits aufgrund der Tatsache, dass sich die meisten befragten Mieterinnen und Mieter dazu entschlossen hatten, während der Sanierungsmaßnahmen in ihren Wohnungen zu verbleiben, stand zu vermuten, dass sie sich in ihrer Wohnung und in ihrem Wohnumfeld grundsätzlich wohl fühlten. Ausgegangen wurde im Rahmen der energetischen Sanierung von einer Erhöhung der Wohnzufriedenheit. Wohnzufriedenheit ist ein Komplex, der sich aus verschiedenen Bereichen zusammensetzt. Es gehören hierzu Aspekte ...

- der Wohnung und des Wohnumfelds: die Wohnung, der Grundriss, der Wohnkomfort, das Aussehen des Gebäudes, die Nachbarn im Haus, die Wohnlage, die Wohnungsumgebung, die Bewohner im Viertel usw.
- des Raumklimas und der Haustechnik: die Raumtemperatur, die Frische der Luft, das Lüften, die Heiz- und Lüftungsanlage usw.
- der Kosten: die Kaltmiete, die Heizkosten, die Nebenkosten, die Betriebskosten usw.

Die Zufriedenheit mit der Wohnung insgesamt kann als Gesamtzufriedenheit verstanden werden.

¹³ Frage: Wenn Sie an die Baumaßnahme denken: Wie treffen die folgenden Aussagen auf Sie zu? Trifft sehr zu (1), trifft ziemlich zu (2), trifft mittelmäßig zu (3), trifft wenig zu (4) und trifft nicht zu (5).

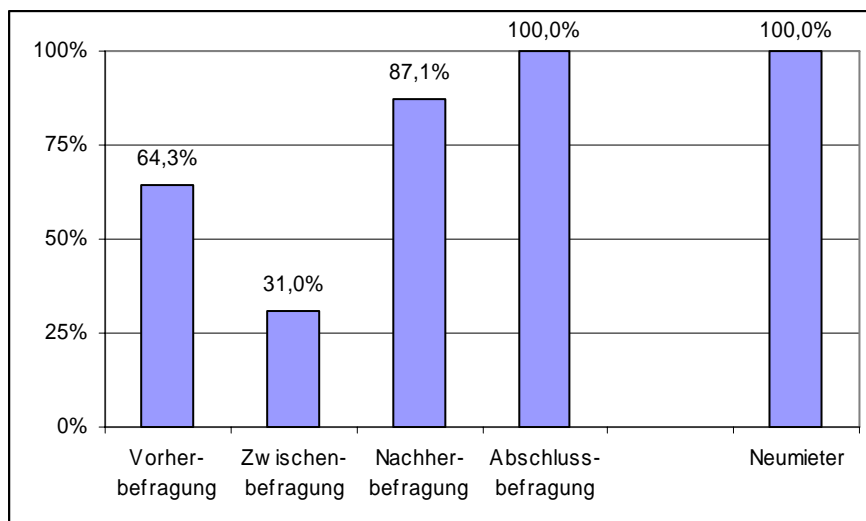


Abbildung 5.2-5 Zufriedenheit mit der Wohnung insgesamt im Zeitverlauf, kumulierte Prozente von „sehr zufrieden“ und „zufrieden“. Neumieter: „deutlich zufriedener“ und „zufriedener“¹⁴

In der Zwischenbefragung - zur Zeit der höchsten Bautätigkeit - nahm die Zufriedenheit mit der Wohnung insgesamt erwartungsgemäß etwas ab. Die Zufriedenheit stieg jedoch wieder gegen Ende der Sanierungsmaßnahme. Mit Abschluss der Baumaßnahmen waren alle Altmietlerhaushalte sehr zufrieden oder zufrieden mit ihrer Wohnung. Die Neumieter wurden gebeten ihre Zufriedenheit mit der Wohnung insgesamt mit ihrer alten Wohnung zu vergleichen. Alle Neumieterhaushalte waren mit ihrer neuen Wohnung (deutlich) zufriedener als mit ihrer alten Wohnung. Der gleiche Verlauf der Zufriedenheit mit der Wohnung insgesamt war auch in der Längsschnittuntersuchung des BBR zu beobachten.

Zufriedenheit mit verschiedenen Aspekten der Wohnung und des Wohnumfelds

Bezogen auf die Wohnlage, die Wohnungsumgebung und die Nachbarschaft blieben die Einschätzungen im Zeitverlauf auf einem konstant positiven Niveau.

Einige Aspekte haben sich baulich marginal verändert, wie z. B. der Grundriss und das Aussehen des Gebäudes (GEDT-Fassade), was sich aber nicht in einer veränderten Bewertung seitens der Bewohnerschaft niederschlägt; der Wohnkomfort hat sich hingegen aus Sicht der Mieterinnen und Mieter deutlich verbessert.

¹⁴ Altmietler: Wie zufrieden sind Sie mit der Wohnung insgesamt? Sehr zufrieden (1), zufrieden (2), mittelmäßig zufrieden (3), unzufrieden (4) und sehr unzufrieden (5). Neumieter: Im Vergleich zur vorherigen Wohnung bin ich mit der neuen Wohnung insgesamt ... deutlich zufriedener (1), zufriedener (2), etwa gleich zufrieden (3), unzufriedener (4) und deutlich unzufriedener (5).

Abbildung 5.2-6 Veränderungen der Zufriedenheit mit verschiedenen Aspekten der Wohnung, Mittelwerte¹⁵

Aspekte der Wohnzufriedenheit:	Vorher- befragung	Nachher- befragung	Abschluss- befragung	Neumieter
Wohnung, Nachbarn, Wohnumfeld				
Wohnung insgesamt	2,00	2,00	1,67	1,33
Wohnlage	1,00	1,67	1,00	1,67
Wohnungsumgebung	1,00	1,33	1,00	2,33
Aussehen des Gebäudes	2,00	2,00	2,33	2,33
Wohnungsgrundriss	2,00	1,67	2,00	1,67
Wohnkomfort	2,50	1,33	1,33	2,00
Nachbarn im Viertel	1,00	1,67	1,00	2,33
Nachbarn im Haus	1,50	1,67	1,33	2,67

Zufriedenheit mit verschiedenen Aspekten des Raumklimas

In Energiesparhäusern sorgt die Lüftungsanlage für den Luftaustausch und für frische Luft. Zwar ist das Lüften auch durch Öffnung der Fenster möglich, im Winter ist dabei jedoch mit erheblichen Wärmeverlusten zu rechnen. Da Energiesparhäuser nicht über die Heizleistung konventioneller Gebäude verfügen müssen, kann es recht lange dauern, bis der durch die Fensteröffnung verursachte Wärmeverlust wieder ausgeglichen ist. In der Untersuchung in Wiesbaden Dotzheim hat sich gezeigt, dass das Lüften per Lüftungsanlage erst nach einer längeren Gewöhnungsphase als ausreichend und als Komfortgewinn verstanden wird [Flade et. al. 2003b]. Dies scheint offensichtlich auch für die Bewohnerinnen und Bewohner in Hofheim zu gelten. Rund ein Jahr nach Abschluss der Baumaßnahmen stellte sich für die Altmieten (immer noch) ein Frischluftgefühl eher durch das Öffnen der Fenster ein. Dieser Zusammenhang war auch in der BBR-Untersuchung zu beobachten. Zwar wurden die unterschiedlichen Aspekte einer Lüftungsanlage, wie der störungsfreie und geräuscharme Betrieb, die gute Handhabbarkeit etc. positiv bis sehr positiv bewertet, dennoch waren die Mieterinnen und Mieter überwiegend nicht der Ansicht, dass die Lüftungsanlage für ein ausreichendes Frischluftgefühl sorgt und damit das Fensteröffnen überflüssig macht. Die Neumieter waren da erkennbar besser auf die neue Haustechnik eingestellt. Auch sahen sie in der Lüftungsanlage eher einen Komfortgewinn. Hier ist zu berücksichtigen, dass im ESH 40 mit einer mechanischen Zu- und Abluftanlage und Wärmerückgewinnung nur Neumieter befragt wurden.

¹⁵ Skala siehe Fußnote 9

Abbildung 5.2-7 Bewertung der Lüftungsanlage, Mittelwerte¹⁶

Effizienz und Handhabung der Lüftungsanlage	Nachher- befragung	Abschluss- befragung Altm Mieter	Abschluss- befragung Neum Mieter
Die Lüftungsanlage funktioniert störungsfrei	1,00	1,00	1,00
Die Lüftungsanlage ist gut handhabbar	1,00	2,00	1,00
Die Lüftungsanlage entwickelt störende Geräusche	4,50	4,00	2,67
Ich habe das Gefühl, dass es in der Wohnung zieht	4,00	5,00	4,00
Ich empfinde es als angenehm, dass ich im Winter die Fenster eigentlich nicht mehr öffnen muss	3,50	3,50	1,67
Ein Frischluftgefühl stellt sich bei mir nur durch das Öffnen der Fenster ein	2,50	2,00	5,00

Während die Zufriedenheit mit dem Raumklima und der Luftqualität nahezu unverändert blieb, waren Zufriedenheitsgewinne bei den Aspekten „Raumtemperatur“ und „Handhabung der Heizung“ zu beobachten. Die Neumieter schienen sich in allen aufgeführten Bereichen im Vergleich zu ihrer vorherigen Wohnung verbessert zu haben; hier sind insbesondere die „Handhabung der Heizung“ sowie das „Raumklima“ und die „Luftqualität“ zu nennen.

Abbildung 5.2-8 Veränderungen der Zufriedenheit mit verschiedenen Aspekten des Heizens und Lüftens, Mittelwerte¹⁷

Aspekte der Wohnzufriedenheit: Raumklima, Luftqualität, Raumtemperatur usw.	Vorher- befragung	Nachher- befragung	Abschluss- befragung Altm Mieter	Abschluss- befragung Neum Mieter
Raumklima	1,50	1,50	1,67	1,33
Luftqualität	2,00	1,50	1,67	1,33
Raumtemperatur	3,00	2,00	1,67	1,50
Frische der Luft	2,50	1,50	2,00	2,00
Beseitigung störender Gerüche	2,50	2,67	2,00	1,50
Handhabung der Heizung	2,00	1,33	1,50	1,00

Zufriedenheit mit verschiedenen Aspekten der Wohnkosten

Bezüglich der Wohnkostenentwicklung im Zuge der energetischen Sanierung standen die tatsächlichen Preise für die Kaltmiete, die Heizkosten sowie für die Nebenkosten zunächst noch nicht fest. Zwar hat die HWB – soweit dies in ihrem Kenntnisstand lag – die Mieterinnen und Mieter auf der Mieterversammlung über die zu erwartenden Kosten informiert, jedoch sind – insbesondere die Heiz- und Nebenkosten – über einen längeren Zeitraum betrachtet mehr oder weniger großen Preisschwankungen unterworfen, so dass den Bewohnerinnen und Bewohnern zu einigen Befragungszeitpunkten noch keine detaillierten Kosten bekannt waren. Darüber hinaus lagen der HWB auch keine Erfahrungswerte vor, mit welchen Heizkosten mit der gegebenen Heizanlage und dem gegebenen Dämmstandard zu rechnen war. Hinzu kommt, dass die Höhe der Heizenergieverbräuche individuell sehr unterschiedlich

¹⁶ Frage: Wie bewerten Sie die Lüftungsanlage? ... trifft die Aussage sehr zu (1), ziemlich zu (2), mittelmäßig zu (3), wenig zu (4) oder nicht zu (5).

¹⁷ Skala siehe Fußnote 7

ausfallen kann. Im Hinblick auf die Neumieter ist jedoch festzuhalten, dass bezüglich der Heizkosten eine sehr hohe Zufriedenheit und bezüglich der Nettokaltmiete eine mittlere Zufriedenheit im Vergleich zur vorherigen Wohnung vorlag.

Abbildung 5.2-9 Veränderungen der Zufriedenheit mit verschiedenen Aspekten der Wohnkosten, Mittelwerte¹⁸

Aspekte der Wohnkosten: Kaltmiete, Heizkosten, Nebenkosten	Vorher- befragung	Nachher- befragung	Abschluss- befragung Altm Mieter	Abschluss- befragung Neumieter
Heizkosten	2,00	-	-	1,00
Mietpreis	2,00	-	2,00	3,00
Nebenkosten	2,00	-	3,00	2,00

Bleibeabsichten und Ortsbindung

Sowohl die Absicht in einer Wohnung wohnen zu bleiben als auch Umzugswünsche können komplexe und mehrstufige Ursachen aufweisen. Der Zusammenhang Bleibeabsicht gleich hohe Wohnzufriedenheit und umgekehrt Umzugswünsche gleich geringe Wohnzufriedenheit ist nicht ohne weiteres herzustellen. Ein weiteres Kriterium für den Verbleib oder den Ortswechsel ist die Ortsbindung, also die Verbundenheit mit dem physischen und sozialen Wohnumfeld (Lage, Umgebung und Nachbarschaft). Die befragten Mieterinnen und Mieter in Hofheim weisen – vermutlich auch auf Grund der langen Wohndauer von im Schnitt rund 30 Jahren – eine starke Ortsverbundenheit auf. Keiner der drei Altm Mieter-Haushalte spielt mit dem Gedanken die Wohnung in der Wilhelmstraße aufzugeben; ganz im Gegenteil haben die Haushalte die Absicht, noch recht lange dort wohnen zu bleiben. Ganz offen nach den Gründen gefragt, was die Bewohnerinnen und Bewohner dazu bewogen hat, während der Sanierungsmaßnahme in ihren Wohnungen zu verbleiben, antworteten zwei der drei Haushalte mit dem hohen Aufwand bei Umzügen; ein Haushalt weist explizit auf das Wohnumfeld hin, das ihn vom Wegzug abgehalten habe.

¹⁸ Skala: Siehe Fußnote 7

Abbildung 5.2-10 Ortsbindung, Umzugs- und Bleibeabsichten

Ortsbindung, Umzugs- und Bleibeabsichten	Vorherbefragung	Nachherbefragung
Verbundenheit mit der Wohngegend ¹⁹ (Mittelwert)	1,00	1,00
Umzugsabsicht im Zusammenhang mit der Sanierung ²⁰	-	-
Absicht, noch sehr lange in der Wohnung zu leben (% an Zustimmung) ²¹	nicht gefragt	100

Rückblickende Bewertung der Maßnahme

Wie weiter oben gezeigt hat sich die Zufriedenheit mit dem Wohnkomfort und der Raumtemperatur zum Teil deutlich verbessert. Dass die Bewohnerinnen und Bewohner der energetischen Sanierung ihrer Wohngebäude etwas Positives abgewinnen können, zeigt sich unter anderem auch daran, dass sich die Befragten bei einem anstehenden Wohnungswechsel gut vorstellen könnten wieder in eine energetisch sanierte Wohnung zu ziehen. Auch Freunden auf Wohnungssuche würden die Mieterinnen und Mieter eine energetisch sanierte Wohnung empfehlen; ebenso würden sie anderen Wohnungsunternehmen eine energetische Sanierung ihres Bestandes nahe legen. Zwei der drei Haushalte sind darüber hinaus der Ansicht, dass die Sanierung der Gebäude ein Imagegewinn für das ganze Wohnviertel bedeutet.

Abbildung 5.2-11 Weiterempfehlung energetisch sanierter Wohnungen, kumulierte Prozente (Skalenwerte 1 und 2)²²

	Altm Mieter	Neum Mieter
Ich würde eine energetisch sanierte Wohnung weiterempfehlen (bspw. einem Freund, der gerade auf Wohnungssuche ist) (% an Zustimmung)	100	100
Wenn ich umziehen müsste, würde ich wieder in eine energetisch sanierte Wohnung einziehen wollen (% an Zustimmung)	100	66,6
Ich würde auch anderen Wohnungsunternehmen eine energetische Sanierung ihrer Gebäude nahe legen (% an Zustimmung)	100	100

Auch die Neumieter stehen der energetischen Gebäudesanierung weit überwiegend positiv gegenüber und würden Freunden auf Wohnungssuche eine energetisch sanierte Wohnung uneingeschränkt weiterempfehlen. Ein Neumieter-Haushalt würde nicht unbedingt wieder in eine energetisch sanierte Wohnung einziehen, was aber nicht an einer Unzufriedenheit mit der Wohnung liegt, sondern daran, dass schon der Einzugsgrund nicht ausdrücklich der Wunsch war, in einer energetisch sanierten Wohnung wohnen zu wollen. Eine Sanierung des Wohnungsbestandes würde aber auch dieser Haushalt anderen Wohnungsunternehmen empfehlen.

¹⁹ Frage: Bitte sagen Sie uns, wie sehr Sie sich mit Ihrer Wohngegend verbunden fühlen? Sehr verbunden (1), etwas verbunden (2), mittelmäßig verbunden (3), wenig verbunden (4) und gar nicht verbunden (5).

²⁰ Frage: Haben Sie vor in der nächsten Zeit (innerhalb des nächsten Jahres) von hier wegzuziehen? ... Wenn ja: Steht der Wegzugsgedanke im Zusammenhang mit der Sanierungsmaßnahme/mit Ihrer Wohnung?

²¹ Zu kommentierende Aussage: Ich kann mir vorstellen, noch sehr lange in dieser Wohnung zu leben.; Skala: 1 = stimme sehr zu bis 5 = stimme nicht zu

Rückblickend betrachtet wurden die Erwartungen aller Altmieten, die sie an die energetische Sanierungsmaßnahme stellten, erfüllt. Das Ergebnis der Sanierung wird von keinem Haushalt negativ bewertet, im Gegenteil heben Sie als Verbesserung vor allem die neuen Fenster, das bessere Bad und den größeren Balkon hervor. Auf die Nachteile der sanierten Wohnung angesprochen erwähnten die Bewohnerinnen und Bewohner Probleme mit der Lüftungsanlage sowie dass die Wohnung fußkalt sei. Zwei der drei Haushalte ziehen eine energetisch sanierte Wohnung einer energetisch nicht sanierten Wohnung vor und empfinden diese als Erweiterung ihres Wohnkomforts.

Etwa zwei Monate nach Abschluss der Baumaßnahmen konnten die Bewohnerinnen und Bewohner rückblickend noch einmal verschiedene Aspekte der Sanierungsmaßnahme bewerten.

Abbildung 5.2-12 Retrospektive Zufriedenheit mit verschiedenen Aspekten der Sanierungsmaßnahme, Mittelwerte²³

Wie zufrieden sind Sie heute mit ...	Nachherbefragung
... der Information über die Sanierungsmaßnahme	3,33
... dem organisatorischen Ablauf der Sanierungsmaßnahme	3,33
... der Dauer der Sanierungsmaßnahme	4,33
... der Unterstützung durch Wohnbaugesellschaft bei Fragen und Problemen	2,33
... der handwerklichen Umsetzung	3,00

Dabei zeigte sich, dass die Bewohnerinnen und Bewohner mit der Dauer der Sanierungsmaßnahme am wenigsten zufrieden waren; am zufriedensten waren sie mit der Unterstützung durch das Wohnungsunternehmen. Alle anderen bewerteten Aspekte – wie die Informationsvergabe, der organisatorische Ablauf und die handwerkliche Realisierung - liegen im mittleren Bewertungsbereich.

Die Beeinträchtigungen im Zuge der Sanierungsmaßnahme werden auch nach Abschluss der Bautätigkeit rückblickend immer noch von allen Altmietern als sehr hoch beschrieben.

5.3 Zusammenfassung

Die Vorteile der energetischen Gebäudesanierung sind auch aus Sicht der Mieter offensichtlich. Die Energiebilanz des Gebäudes wird optimiert und die Ausstattung und der Wohnkomfort verbessert, was die Chancen einer zukünftigen dauerhaften Vermietung erhöht. Auf Seiten der Mieterschaft sind die Vorteile vor allem in der moderneren Haustechnik, im angenehmeren Raumklima und in den geringeren Heizkosten zu sehen. Energetische Bestandssanierungen sind jedoch nicht unproblematisch, vor allem dann nicht, wenn die Sanierung im bewohnten Zustand erfolgen soll, d. h. ein temporärer Wohnungswechsel für die Dauer der Sanierung von Seiten der Mieterschaft nicht in Anspruch genommen wird oder von den Wohnungsunternehmen nicht angeboten werden kann. Sowohl die Untersuchung in Hofheim, als auch vergleichbare Studien (vgl. [Hacke, Lohmann 2006]) zeigen, dass die Beeinträchtigungen in Folge der Sanierung erheblich sind und die Mieterinnen und Mieter auf eine Geduldprobe stellen. Vor allem der Dreck, der

²² Ich stimme ... sehr zu (1), ziemlich zu (2), mittelmäßig zu (3), weniger zu (4) und nicht zu (5).

²³ Skala: Sehr zufrieden (1), zufrieden (2), teils/teils (3), weniger zufrieden (4) und unzufrieden (5).

Lärm und die eingeschränkte Nutzbarkeit der Räume, insbesondere die der Sanitärräume werden von den Bewohnerinnen und Bewohnern als belastend empfunden. Viele Möglichkeiten, sich den unerwünschten Folgen der Sanierung zu entziehen, haben die Mieterinnen und Mieter nicht, so dass das „Üben in Geduld“ die überwiegend häufigste Bewältigungsstrategie darstellt. Um den Bewohnerinnen und Bewohnern ein zusätzliches Maß an Situationskontrolle zukommen zu lassen, ist es auf Seiten der Wohnungsunternehmen erforderlich den Sanierungsfortschritt, aber auch Probleme und Bauverzögerungen unverzüglich und umfassend zu kommunizieren. Mit dem Ende der Sanierung sollten die Bewohnerinnen und Bewohner eine detaillierte Einweisung in die neue Haustechnik erhalten, in der der Umgang mit der neuen Technik und die Wartung genauso thematisiert werden sollten wie das richtige Heizen und Lüften. Zwar trägt eine hohe Gebäudeenergieeffizienz erheblich zum Einsparen von Heizenergie bei, komplettiert wird der Effekt jedoch erst durch das richtige Nutzerverhalten²⁴. Das Lüften in Energiesparhäusern übernimmt i. d. R. die Lüftungsanlage, d. h. ein Fensteröffnen aus Frischluftgründen ist eigentlich nicht mehr nötig, dennoch dauert es im Allgemeinen sehr lange (etwa eineinhalb Jahre)²⁵ bis dies die Mieterinnen und Mieter als Komfortgewinn verstehen.

Obwohl die Befragten sich anfänglich eher skeptisch bezüglich der Sanierung äußerten, waren sie doch von der Wichtigkeit der Ziele wie der Senkung der Heizkosten und der Einsparung von Energie und CO₂ überzeugt und auch das Ergebnis der Sanierung wird sehr gut bewertet. So sind alle Altm Mieter am Ende der Sanierung sehr zufrieden oder zufrieden mit ihrer Wohnung. Verbesserungen sind vor allem bei der Zufriedenheit mit der Raumtemperatur und bei der Zufriedenheit mit dem Wohnkomfort zu beobachten. Hinsichtlich der neuen Haustechnik ist festzuhalten, dass vorläufig nur die Neumieter die Lüftungsanlage und das Lüften in Niedrigenergiehäusern als Komfortgewinn verstehen. Kein Haushalt beabsichtigt einen Wohnungswechsel; alle Befragten haben den Wunsch, noch sehr lange in der Wilhelmstraße wohnen bleiben zu wollen.

Zwar ist die vorliegende Stichprobe so gering, dass die Ergebnisse eher als Tendenzen zu verstehen sind; alle Ergebnisse decken sich jedoch mit der vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung beauftragten Untersuchung, wodurch die Befragungsergebnisse in Hofheim zusätzlich an Stabilität und Plausibilität gewinnen.

²⁴ Die Heizenergieverbräuche können bei gleicher Haushaltstruktur und identischer Gebäudesituation um den Faktor vier variieren, vgl. [Ebel, W. et al. 2003].

²⁵ Die Gewöhnungsdauer ist kürzer, wenn sich die Mieterinnen und Mieter explizit für ein Energiesparhaus entschieden haben.

6 Vergleich der drei Energiesparstandards

Eine wesentliche Aufgabe des Forschungsprojekts bestand im Vergleich der drei unterschiedlichen energetischen Qualitätsniveaus, die bei den Gebäuden erreicht wurden: EnEV-Neubau-Standard sowie Energiesparhaus 60- und Energiesparhaus 40-Standard (s. auch Kapitel 2.2.2).

6.1 Energiebilanz

6.1.1 Berechnung der Energiebilanz

Die Berechnung des Heizwärmebedarfs erfolgte mit Hilfe des am IWU entwickelten EXCEL-Programms EnEV-XL. Dieses Programm erlaubt die Verwendung unterschiedlicher Randbedingungen für die Berechnung. Im vorliegenden Fall wurden die Berechnungsansätze nach Energieeinsparverordnung gewählt, da diese für den Nachweis der drei Energiesparstandards maßgeblich sind. Es wurde das Monatsbilanzverfahren nach DIN V 4108-6 angewendet.

Die Wärmeversorgungs- und Lüftungstechnik wurden nach dem detaillierten Verfahren gemäß DIN V 4701-10 berechnet, d. h. die gegebenen Voraussetzungen (Länge, Querschnitt und Dämmung von Verteilleitungen, Herstellerangaben zu anlagentechnischen Komponenten) wurden, soweit die entsprechenden Daten vorlagen, individuell berücksichtigt. Die Verteilverluste und der Hilfsstrombedarf des Nahwärmesystems wurden auf Grundlage der Verlegungslängen, der verwendeten Rohrquerschnitte und -dämmstoffstärken sowie Auslegungs-Systemtemperaturen abgeschätzt.

Die Abbildungen auf den folgenden Seiten zeigen die Berechnungsergebnisse für die drei Gebäude in schematischer Form (in Anlehnung an [Diefenbach et al. 2005], hier noch etwas verfeinert). Der gestrichelte Pfeil deutet an, dass ein Teil der Verteilverluste des Brauchwarmwassers (1,6 von 6,9 kWh/m²a in Abbildung 6.1-1), die im beheizten Bereich auftreten, als Gutschrift bei der Beheizung verbucht werden. Unten in der Abbildung sind zwei Aufwandszahlen angegeben: Die Primärenergie-Aufwandszahl des Gesamtsystems e_P entspricht der Definition in DIN V 4701-10 / EnEV, gibt also den Primärenergiebedarf pro Nutzwärme an. Die Primärenergie-Aufwandszahl der Wärmeerzeugung $e_{P,g}$ bezieht die Verteilverluste im Gebäudeinneren und den Hilfsstrombedarf nicht mit ein. Sie charakterisiert also den eigentlichen Kernbereich der Wärmeerzeugung, indem sie den Primärenergiebedarf der direkt für die Wärmeproduktion verwendeten Energieträger pro unmittelbar (noch ohne Verteilverluste) im Gebäude erzeugter oder an das Gebäude gelieferter Wärmemenge angibt.

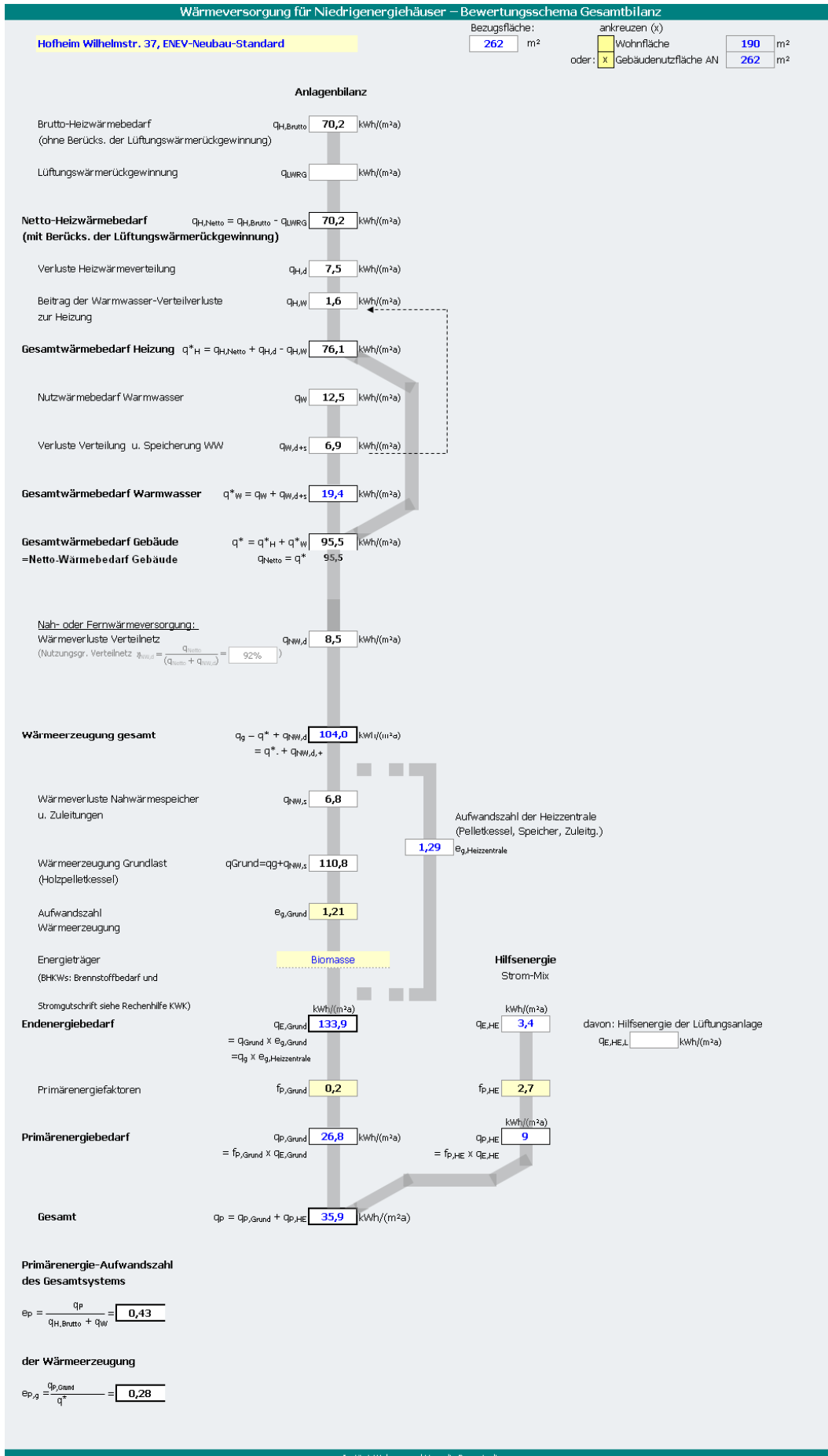


Abbildung 6.1-1 Berechnete Energiebilanz Wilhelmstraße 37: ENEC-Neubau-Standard

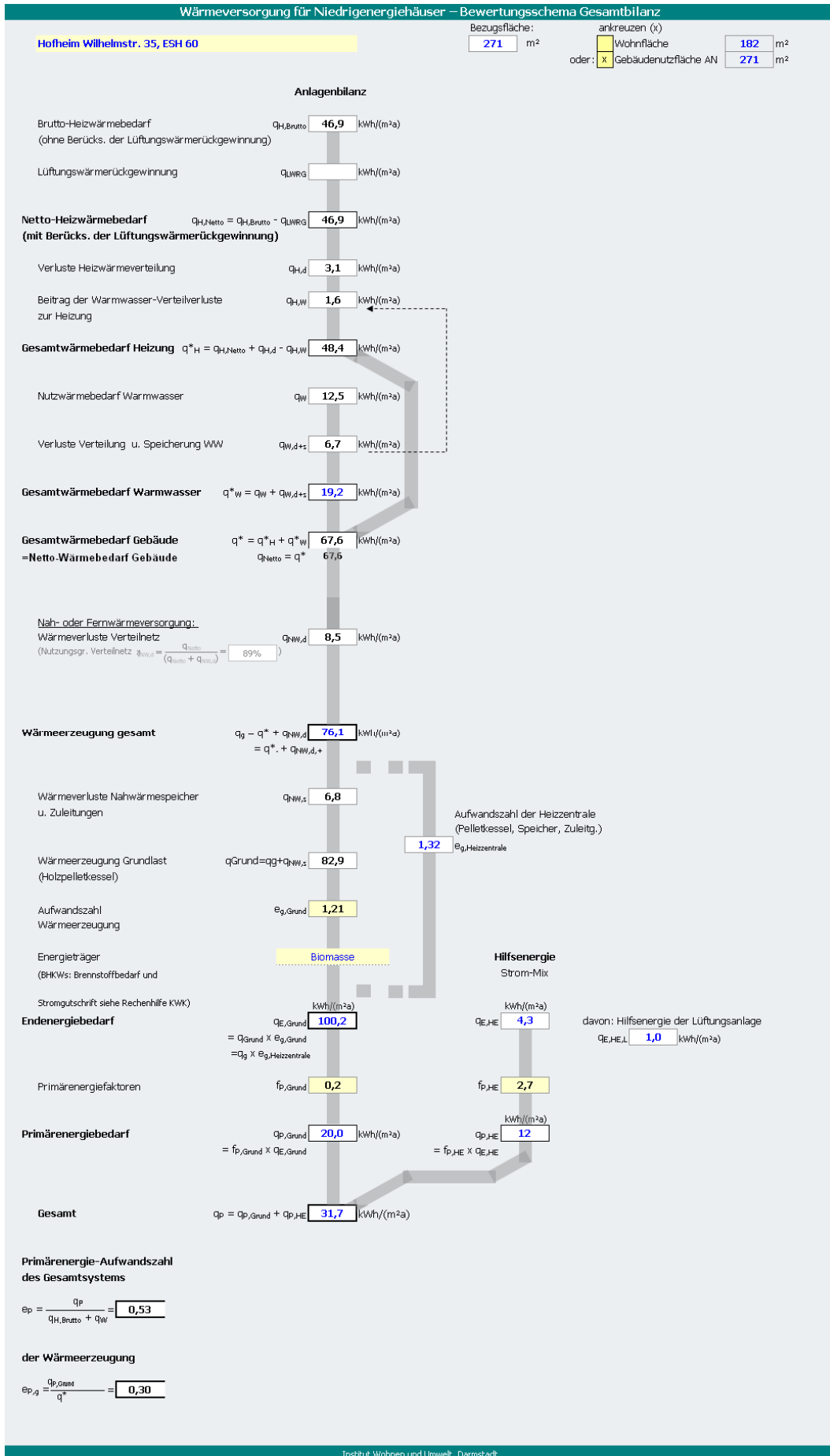


Abbildung 6.1-2 Berechnete Energiebilanz Wilhelmstraße 35: Energiesparhaus 60

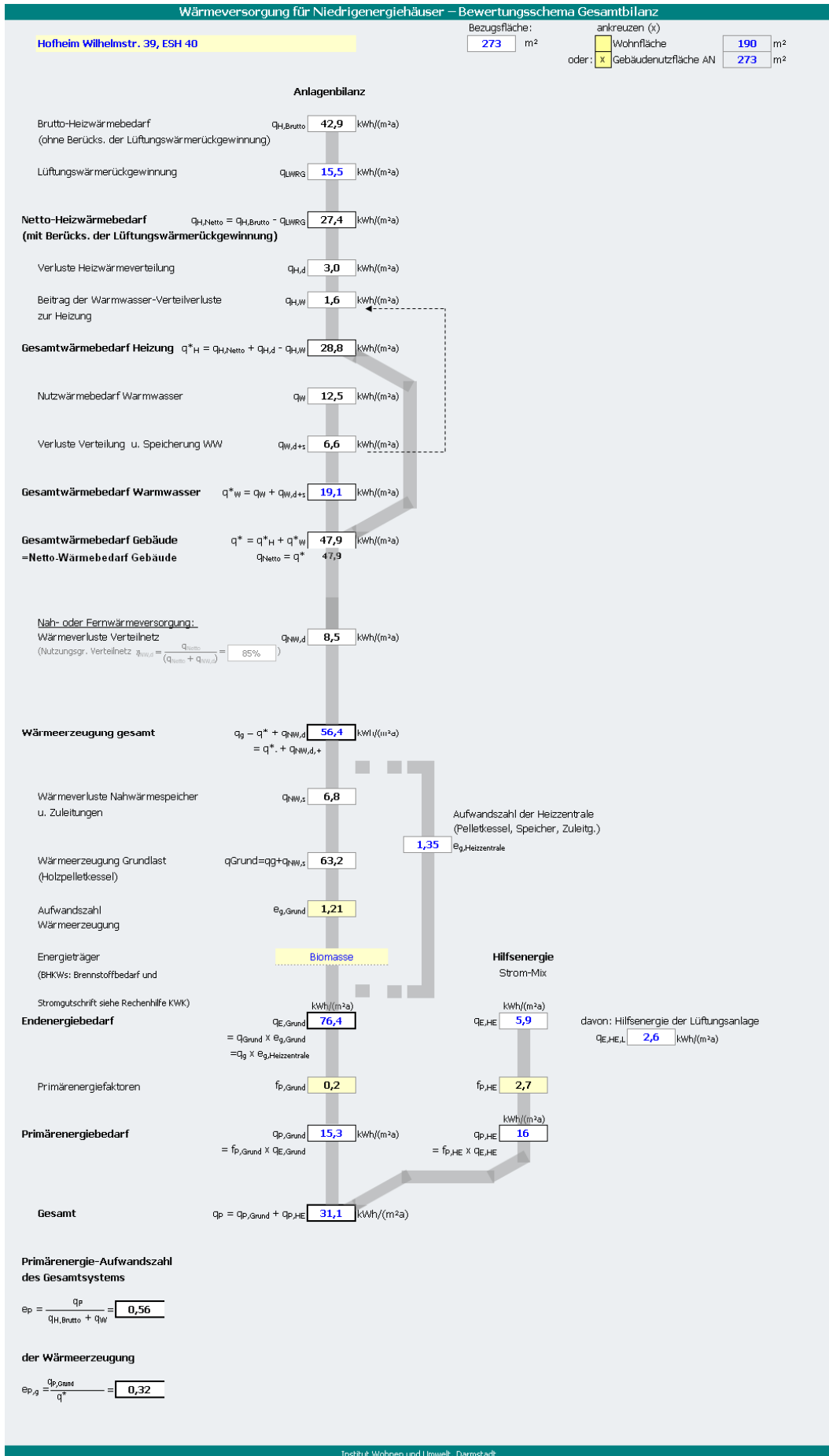


Abbildung 6.1-3 Berechnete Energiebilanz Wilhelmstraße 39: Energiesparhaus 40

Abbildung 6.1-4 zeigt eine genauere Aufteilung des Hilfsstrombedarfs:

	Hilfsstrom in kWh/m ² a (A _N)		
	EnEV-Neubau	ESH 60	ESH 40
Erzeugung (Pelletkessel)	1,7	1,7	1,7
Verteilung Nahwärme	0,7	0,7	0,7
Verteilung Heizung	0,4	0,4	0,3
Verteilung Warmwasser	0,5	0,4	0,4
Speicherung Warmwasser	0,1	0,1	0,1
Lüftung	0,0	1,0	2,6
Summe Hilfsstrom	3,4	4,3	5,9

Abbildung 6.1-4 Berechneter Hilfsstrombedarf (bezogen auf die Gebäudenutzfläche A_N)

Entscheidend für die Einhaltung der Anforderungen der unterschiedlichen Gebäudestandards sind der Primärenergiebedarf q_p und der spezifische Transmissionswärmeverlust H_T' (siehe auch Kapitel 2.2.2). Die Ergebnisse sind in den folgenden Diagrammen dargestellt.

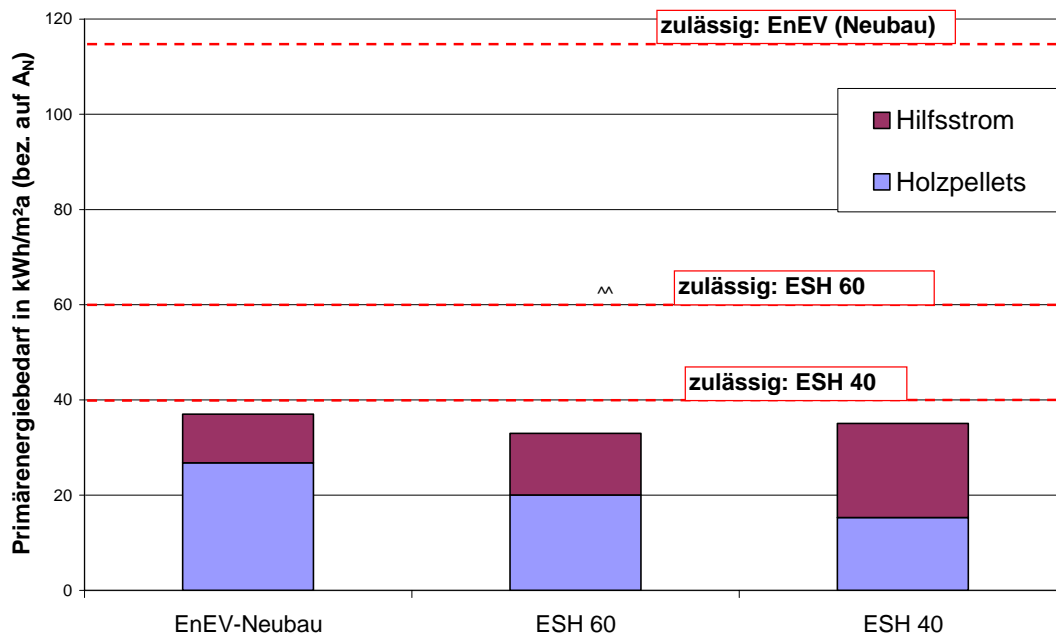


Abbildung 6.1-5 Vergleich der berechneten Werte für den Primärenergiebedarf

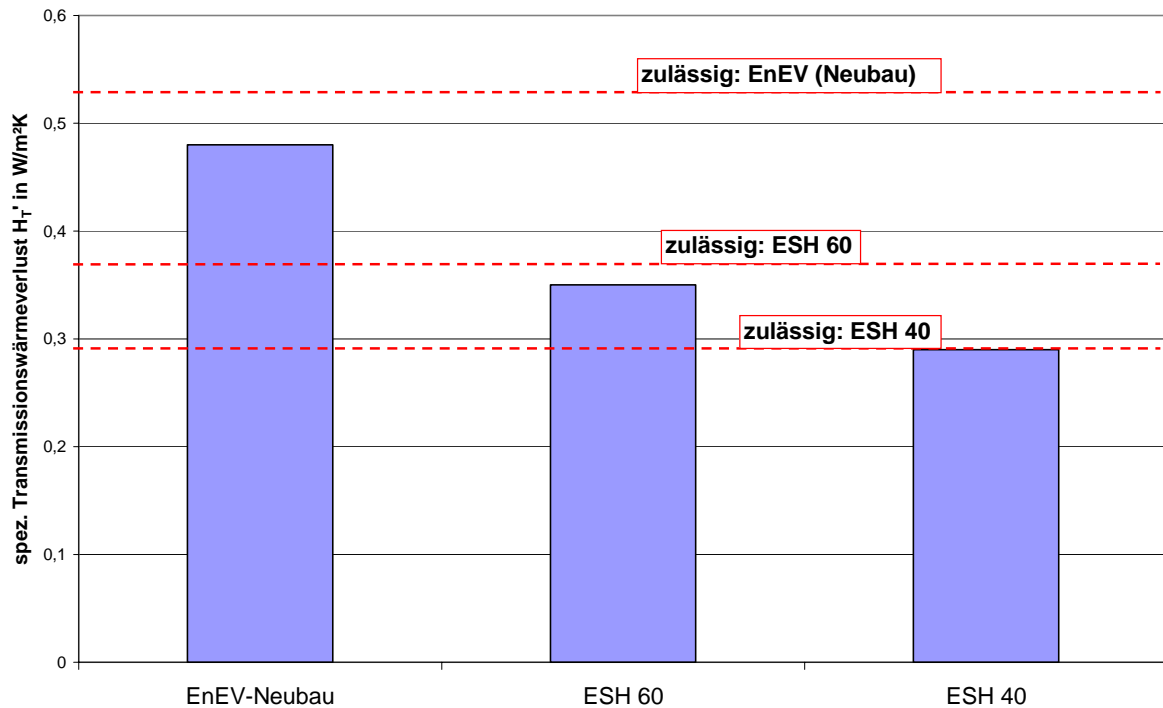


Abbildung 6.1-6 Vergleich der berechneten Werte für den spezifischen Transmissionswärmeverlust

Die Schaubilder machen deutlich, dass die Anforderungen an den Primärenergiebedarf in allen Fällen eingehalten und sogar deutlich unterschritten werden: Selbst das Gebäude nach EnEV-Neubau-Standard liegt unterhalb $40 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, hält also die Hauptanforderung an das Energiesparhaus 40 ebenfalls ein. Ursache für diese Situation ist die Verwendung von Holzpellets: Biomasse aus nachhaltigem Anbau ist eine erneuerbare Energiequelle, ihr Energieinhalt wird nicht in den Primärenergiebedarf eingerechnet. Zu dem daher äußerst niedrigen Primärenergiefaktor der Holzpellets von nur $0,2 \text{ (kWh Primärenergie pro kWh Heizwert der Pellets)}$ trägt daher nur der vorgelagerte, teils auf nicht-erneuerbaren Energiequellen beruhende Energieeinsatz für die Herstellung und den Transport der Pellets bei.

Im Fall der zweiten einzuhaltenden Bedingung an den Gebäudewärmeschutz (beschrieben durch den spezifischen Transmissionswärmeverlust) liegen die Gebäude deutlich weiter auseinander. Während bei EnEV-Neubau und ESH 60 (H_T' 30 % unter EnEV-Neubau) die jeweiligen Anforderungen noch merklich unterschritten werden konnten, wurde beim ESH 40 der Wärmeschutz genau so ausgelegt, dass die Bedingung an diesen Standard (H_T' 45 % unter EnEV-Neubau) genau eingehalten wurde (vgl. Kap. 2.2.2).

Die Ergebnisse werfen die Frage auf, ob sich der erhöhte Aufwand für das Energiesparhaus 60 und 40 angesichts der eng beieinander liegenden Werte für den Primärenergiebedarf überhaupt lohnen kann. Schließlich ist der Primärenergiebedarf ja eine sehr sinnvolle Bewertungsgröße für die Relevanz des Energieeinsatzes sowohl im Hinblick auf den Verbrauch nicht-erneuerbarer Energieressourcen als auch die Umweltauswirkungen.

Dabei ist aber zu beachten, dass auch Biomasse, obwohl es sich um eine erneuerbare Energiequelle handelt, nicht in beliebigem Maße zur Verfügung steht. Genaue Aussagen über die langfristig zur Verfügung stehenden Mengen sind schwer möglich. Es ist jedenfalls klar, dass die Potenziale zu klein sind, als dass die Herausforderungen des Klimaschutzes und der Abnahme der fossilen Energieressourcen allein oder auch nur hauptsächlich durch

Biomasseeinsatz gelöst werden können. Dies gilt nicht zuletzt vor dem Hintergrund konkurrierender Nutzungen (natürlich Biomasse als Nahrungsmittel, aber auch als Kraftstoff, zur Stromerzeugung bzw. als Baustoff) und selbst unter Berücksichtigung von Energiepflanzenanbau. In [Diefenbach 2002] wird eine einfache Abschätzung der Größenordnung der Potenziale durchgeführt und – angesichts der Notwendigkeit eines sparsamen Umgangs mit Biomasse - eine Alternative für die primärenergetische Bewertung vorgeschlagen. Im Hinblick auf die im vorliegenden Projekt verwendete primärenergetische Bewertung nach EnEV/DIN V 4701-10 muss die Schlussfolgerung lauten, dass die Nebenanforderung an den Gebäudewärmeschutz (H_T') sowohl beim EnEV-Standard als auch bei den Energiesparhäusern ein notwendiges und sinnvolles Korrektiv darstellt, mit dem sichergestellt wird, dass die auf diese Weise bewerteten Gebäude ein sinnvolles Niveau der Energieeffizienz erreichen.

In Abbildung 6.1-7 ist der Endenergiebedarf der drei Gebäude dargestellt, die Holzpellets sind dabei mit ihrem Energieinhalt (unterer Heizwert) bewertet. Es wird deutlich, dass bei verbessertem Wärmeschutz-Niveau deutliche Energieeinsparungen auch bei der Biomasse erreicht werden. Der leichte Anstieg beim Hilfsstrombedarf ist auf die Lüftungsanlagen zurückzuführen.

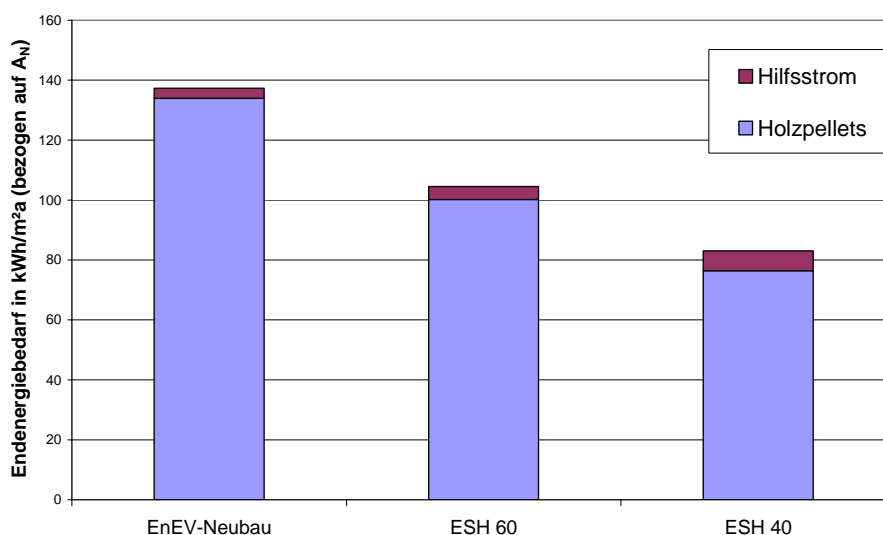


Abbildung 6.1-7 Vergleich der berechneten Werte für den Endenergiebedarf

6.1.2 Vergleich mit den Messwerten

Anpassung der berechneten Energiebilanz

Um den Vergleich zwischen Messung und Berechnung zu erleichtern, wurden zunächst die Berechnungsergebnisse in eine etwas abgewandelte Struktur gebracht, die genau den gemessenen Bilanzen entspricht. In Abbildung 6.1-8 ist dies für den Fall des Energiesparhauses 40 dargestellt. Die Bilanz links zeigt genau die Berechnungsergebnisse, wie sie auch bereits Abbildung 6.1-1 dargestellt wurden. Rechts daneben ist die Umrechnung auf die Bilanzpunkte gegeben, die von den eingebauten Messzählern erfasst werden (s. auch Anlagenschemata mit Messgeräten in Kapitel 2.5).

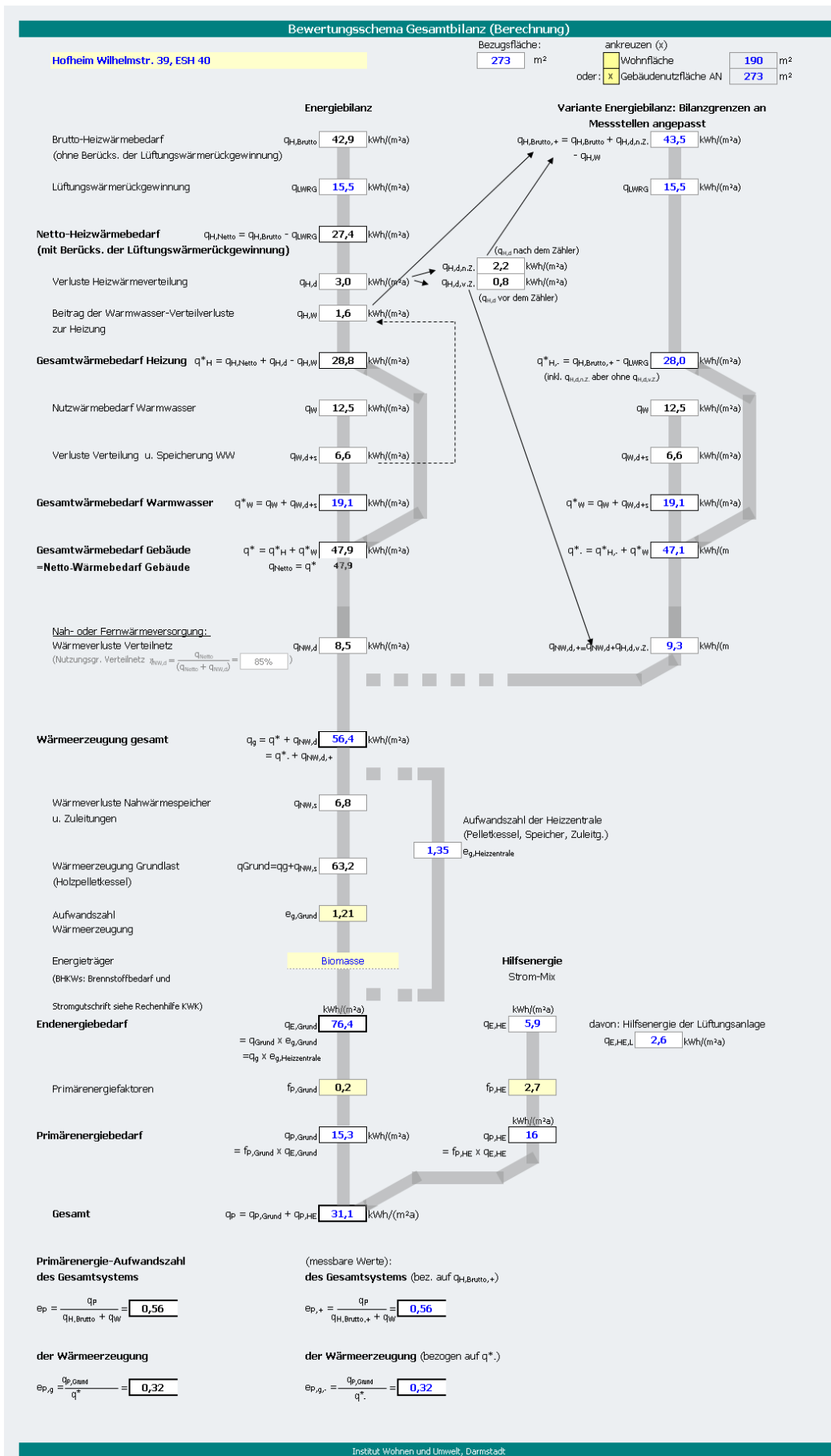


Abbildung 6.1-8 Umrechnung der berechneten Energiebilanz in eine Struktur, die der Messwerterfassung entspricht (hier: ESH 40)

Die Wärmemengenzähler der Gebäudeheizung registrieren nicht nur den eigentlichen Netto-Heizwärmebedarf (dazu müsste die Wärmeabgabe jedes Heizkörpers einzeln gemessen werden), sondern auch einen Teil der im Gebäude anfallenden Wärmeverteilungsverluste der Heizung. Eine genauere Analyse des Rohrnetzes ergab, dass hier der Großteil der berechneten Gesamtverteilungsverluste (im vorliegenden Fall des Energiesparhauses 40 2,2 kWh/m²a von insgesamt 3,0 kWh/m²a) betroffen sind. Außerdem wird der Effekt, dass die Warmwasserverteilung ebenfalls zur Gebäudeheizung beiträgt (rechnerisch mit $q_{H,W}=1,6$ kWh/m²a) mit erfasst.

Da also die Wärmemengenzähler für die Heizung Rohrleitungseffekte mit beinhalten, kann man sagen, dass hier ungefähr der Gesamtwärmebedarf der Heizung q^*_H erfasst wird, allerdings vermindert um den Anteil der Verteilverluste zwischen Nahwärmesystem (im Keller) und den Wärmemengenzählern in den Wohnungen, im vorliegenden Fall also vermindert um ca. 0,8 kWh/m²a. Dementsprechend wird statt der Größe q^*_H der neue Kennwert $q^*_{H,-}$ angegeben, wobei die Bezeichnung darauf hindeutet, dass der Wert etwas kleiner ist als die ursprüngliche Kenngröße (Minuszeichen), ihr aber immer noch ungefähr entspricht (Verwendung derselben Formelbuchstaben).

Der Betrag der Lüftungswärmerückgewinnung q_{LWRG} wird bei der Messung aus dem Volumenstrom und den Temperaturdifferenzen am Lüftungsgerät ermittelt, kann also direkt gemessen werden. Die Differenz zwischen $q^*_{H,-}$ und q_{LWRG} wird hier als $q_{H,Brutto,+}$ bezeichnet: Gegenüber der ursprünglichen Kenngröße ist der Wert um den bei der Messung mit erfassten Teil der Heizwärme-Verteilverluste (theoretisch: 2,2 kWh/m²a) erhöht, gleichzeitig aber um den ebenfalls mit gemessenen Beitrag der Warmwasser-Verteilverluste zur Heizung (1,6 kWh/m²a) vermindert. Die Differenz zum eigentlichen Brutto-Heizwärmebedarf $q_{H,Brutto}$ beträgt also rechnerisch nur 0,6 kWh/m²a²⁶.

Im Fall des Warmwasserbedarfs ist eine Umrechnung nicht notwendig: Die Wärmemengenzähler sind hier im Keller installiert – sozusagen am Übergang vom Nahwärme- zum Hausnetz – und erfassen somit den gesamten Wärmebedarf q^*_W des Gebäudes inklusive aller Verteilverluste und der Verluste des Wärmespeichers.

Der Nutzwärmebedarf Warmwasser q_W wird zwar nicht durch Wärmemengenzähler erfasst, kann aber aus dem gemessenen Warmwasservolumen und den Messwerten für die Temperaturdifferenz zwischen der Zapftemperatur (hier vereinfacht die Temperatur am Ausgang des Wärmespeichers angesetzt) und der Kaltwassertemperatur relativ gut abgeschätzt werden.

Die Addition der Größen q^*_W und $q^*_{H,-}$ ergibt den Gesamtwärmebedarf q^* - des Gebäudes, der gegenüber dem Ursprungswert q^* leicht vermindert ist, da ja ein Teil der Heizwärme-Verteilverluste (hier: 0,8 kWh/m²a) fehlt. Diese Wärmemenge wird erst im Wärmemengenzähler der Heizzentrale erfasst, mit dem der Gesamtwärmebedarf aller Gebäude und die Gesamtwärmeverluste des Nahwärmesystems, d. h. also die Kenngröße q_g ermittelt wird. Diese ist im linken (originalen) und rechten (an die Messpunkte) angepassten Schema identisch. Unterschiede ergeben sich dagegen bei den Nahwärme-

²⁶ Genauso beträgt auch die Differenz von $q^*_{H,-}$ zum Netto-Heizwärmebedarf nur 0,6 kWh/m²a. Man kann also sagen, dass hier mit der Größe $q^*_{H,-}$ ungefähr auch der Netto-Heizwärmebedarf gemessen wird, könnte also statt $q^*_{H,-}$ auch $q_{H,netto,+}$ schreiben. Allerdings ist zu beachten, dass dies nur so lange gilt, wie die Verteilverluste (nach dem Zähler) und der Heizungsbeitrag der Warmwasserbereitung $q_{H,W}$ sich auch in der Realität (und nicht nur in der Berechnung) ungefähr gegenseitig aufheben. Diese Einschränkung gilt natürlich entsprechend auch für den Brutto-Heizwärmebedarf.

Verteilverlusten $q_{NW,d}$: Im Fall der Messung werden diese aus der Differenz der Wärmemengenmessung in der Heizzentrale und in den Gebäuden ermittelt. Sie enthalten damit den genannten Anteil von 0,8 kWh/m²a, der ursprünglich (also links) den Verteilverlusten im Gebäude zugeordnet wurde und werden daher auf rechten Seite mit $q_{NW,d,+}$ bezeichnet.

Innerhalb der Heizzentrale werden die Wärmeverluste der beiden dort installierten großen Pufferspeicher, die direkt vom Pelletkessel gespeist werden, nicht separat gemessen. Aus diesem Grund wird auf der rechten Seite der Energiebilanz diese Größe nicht erfasst und es wird statt der Erzeugeraufwandszahl des Wärmeerzeugers (also des Kessels) die Aufwandszahl für die gesamte Heizzentrale (Kessel + Pufferspeicher) angegeben.

Die Definitionsgleichungen für die ganz unten angegebenen Primärenergieaufwandszahlen sind entsprechend an die neuen Kenngrößen angepasst. Gerundet ergeben sich die gleichen Zahlenwerte wie vorher. Insgesamt sind also im vorliegenden Fall (übrigens auch bei den beiden anderen Gebäuden in der Wilhelmstraße) die Differenzen zwischen den ursprünglichen und den an die Bilanzpunkt der Messung angepassten Kenngrößen relativ gering. Man kann also durchaus davon sprechen, dass die eigentlich interessierenden (da „allgemein geläufigen“) Kenngrößen $q_{H,Brutto}$, q^*_H , q^* , e_P usw. durch die Messung relativ gut erfasst werden können.

Messergebnisse für das erste Jahr

Die folgenden Abbildungen zeigen den Vergleich zwischen den tatsächlichen Messwerten (rechte Hälfte des Energiebilanz-Diagramms) und den an die Messpunkte angepassten rechnerischen Bilanzen (im vorangegangenen Abschnitt rechts, hier aber jeweils links in der Abbildung). Dargestellt ist zunächst die erste Jahresperiode vom 1. Juni 2006²⁷ bis zum 31. Mai 2007.

²⁷ Die Wohnungen waren zu diesem Zeitpunkt fertig modernisiert, alle Mieter eingezogen, die Messtechnik vollständig installiert und mit nur wenigen Störungen in Betrieb.

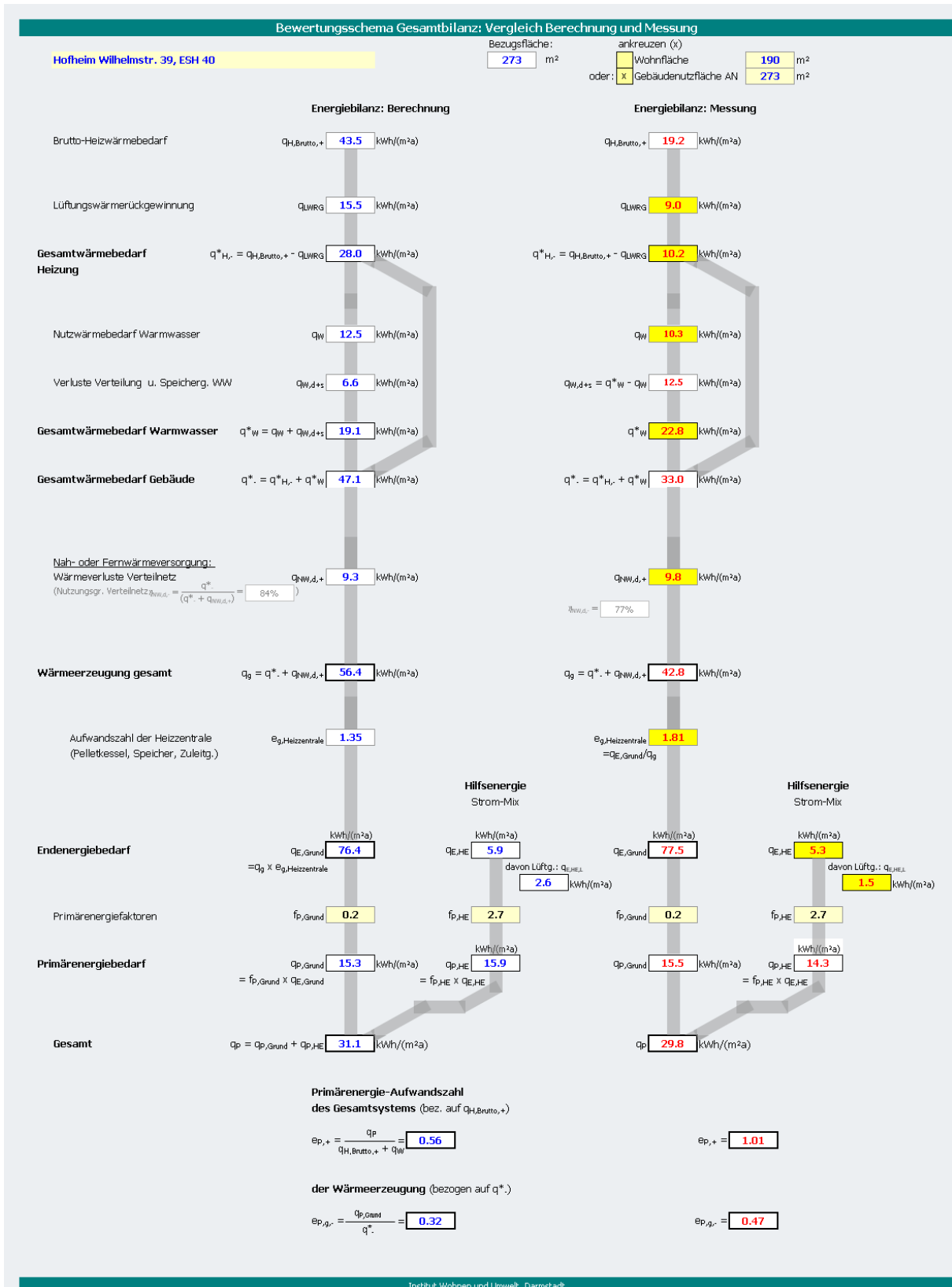


Abbildung 6.1-9 Messergebnisse ESH 40, erste Messperiode 2006/2007

links: berechnete Energiebilanz

rechts: gemessene Energiebilanz (direkt gemessene Kenngrößen: gelb hinterlegt)

Abbildung 6.1-9 zeigt die Ergebnisse für das Energiesparhaus 40. Es fällt zunächst auf, dass der tatsächliche Heizwärmeverbrauch mit 10,2 kWh/m²a deutlich niedriger ausfällt als

berechnet (28 kWh/m²a). Hier ist zu beachten, dass der Winter 2006/2007 weit überdurchschnittlich mild war. Entsprechende Klimakorrekturen werden weiter unten im Abschnitt „Gesamtübersicht“ noch betrachtet werden. Darüber hinaus liegt im ESH 40 die Besonderheit vor, dass im Keller die Heizzentrale für alle drei Gebäude installiert ist. Durch die Verluste des Pelletkessels wird im Keller sehr viel Wärme freigesetzt und die Transmissionswärmeverluste über die Kellerdecke vermindern sich dementsprechend.

Die Lüftungswärmerückgewinnung ist mit 9 kWh/m²a niedriger als berechnet (15,5 kWh/m²a). Hier liegt die Ursache wohl in erster Linie darin, dass die Anlage von den Bewohnern häufig auf einer niedrigen Stufe betrieben wurde.

Der Energieverbrauch der Warmwasserbereitung liegt insgesamt etwas höher als berechnet. Dies wird durch die größeren Verteilungs- und Speicherverluste verursacht, während der Nutzwärmeverbrauch etwas unter dem Standardwert der Berechnung liegt.

Der Gesamtwärmeverbrauch des Gebäudes (Summe und Heizung und Warmwasser) ist wegen der niedrigen Werte bei der Heizwärme mit 33,0 kWh/m²a immer noch deutlich niedriger als der Rechenwert von 47,1 kWh/m²a. Die Verteilungsverluste des Nahwärmesystems liegen mit 9,8 kWh/m²a in der Nähe des berechneten Werts von 9,3 kWh/m²a. Dabei ist zu beachten, dass im ESH 40 zwar eigentlich keine Nahwärmeverteilungsverluste auftreten, da die Heizzentrale sich im Keller dieses Gebäudes befindet. Im Sinne einer einheitlichen Bewertung wurden hier aber – sowohl bei der Berechnung als auch bei der Auswertung der Messwerte - die Gesamt-Verteilungsverluste des Nahwärmesystems zu gleichen Teilen auf die drei Gebäude umgelegt²⁸.

Die gemessene Aufwandszahl der Wärmezeugung in der Heizzentrale (Pelletkessel und Speicher) beträgt ca. 1,81 und liegt damit sehr deutlich über dem theoretischen Wert von 1,35. Der Kehrwert ergibt den Jahresnutzungsgrad, hier liegen die Zahlen bei 55 % (gemessen) statt 74 % (berechnet). Die Energieverluste in der Heizzentrale belaufen sich also auf 45 % statt 26 %. Dies ist teilweise sicherlich durch die niedrigere Wärmeabnahme der Gebäude bedingt: Gleich hohe Energieverluste in der Heizzentrale (z. B. sind jährlich vergleichbar hohe Verluste der Wärmespeicher anzunehmen) machen sich bei niedrigerer Netzeinspeisung prozentual stärker bemerkbar. Andererseits wurden durch das Messprogramm auch anlagen- und regelungstechnische Defizite in der Heizzentrale festgestellt (siehe Kapitel 4.2.7).

Die genannten Kennwerte der Heizzentrale wurden nicht spezifisch für diese Messperiode ermittelt, sondern es wurde ein Mittelwert über den viel längeren Zeitraum vom 25.10.2005 bis 11.02.2008 angesetzt, der auch in der zweiten Jahresbilanz verwendet wurde (siehe Tabelle 4.2-10). Der Grund hierfür ist, dass eine genaue Zuordnung des Holzpellet-Verbrauchs zu der jeweiligen Jahres-Messperiode aufgrund der unregelmäßigen und ungleichmäßigen Füllungen des Pellet-Vorratsbehälters zu stark fehlerbehaftet wäre²⁹. Am 11.2.2008 wurde aber beobachtet, dass vor der Füllung der Tank fast völlig leer war (wie vor der ersten Tankfüllung überhaupt am 25.10.2005), so dass hier die Gesamtverbrauch in diesem Zeitraum sehr genau bestimmt werden konnte³⁰.

²⁸ Die gleichmäßige Aufteilung des Absolutwerts der Verteilungsverluste (in kWh/m²a) auf die drei Gebäude bringt es mit sich, dass jedem Gebäude im Gegenzug unterschiedliche Nutzungsgrade der Nahwärmeverteilung zugeordnet werden.

²⁹ Der Versuch, eine Zuordnung des Pelletverbrauchs zur jeweiligen Messperiode auf Basis der gemessenen Betriebsstunden der Förderschnecke in der Holzpellet-Zufuhr vorzunehmen, stellte sich leider ebenfalls als zu unsicher heraus (vgl. auch Kap. 4.2.5)

³⁰ Es ist noch darauf hinzuweisen, dass der genannte Mittelwert der Aufwandszahl sich auf eine Messperiode von ca. 2,5 Jahren bezieht und dabei etwa drei Winter- und zwei Sommerhalbjahre umfasst. Da die Effizienz

Der Primärenergieverbrauch liegt mit insgesamt 29,8 kWh/m²a ungefähr in der Größenordnung des berechneten Werts (31,1 kWh/m²a). Der niedrigere Gebäude-Wärmeverbrauch und die hohen Verluste in der Heizzentrale heben sich hier offenbar ungefähr auf. Zu bemerken ist, dass der Hilfsstrom sowohl in der Messung (5,3 kWh/m²a elektrische Energie entsprechen 18,1 kWh/m²a Primärenergie) als auch in der Berechnung ungefähr zur Hälfte zum Primärenergieverbrauch beiträgt. Die Lüftungsanlage hat dabei mit einem gemessenen Stromverbrauch von 1,5 kWh/m²a einen merklichen, aber keinen dominierenden Anteil (wobei der Sommerbetrieb hier mit erfasst wurde, gleichzeitig aber – auch im Vergleich mit dem höheren berechneten Wert - zu beachten ist, dass die Anlagen in beiden Wohnungen meist auf relativ kleiner Stufe betrieben wurden). Die restlichen 3,8 kWh/m²a wurden in der Heizzentrale gemessen³¹ und auf alle drei Gebäude entsprechend ihrer Gesamt-Gebäudenutzfläche A_N gleichmäßig umgelegt.

Die Ergebnisse für das Energiesparhaus 60 sind in Abbildung 6.1-10 dargestellt. Auch hier ist der Wärmebedarf bei der Gebäudeheizung deutlich niedriger als berechnet, aber gleichzeitig höher als beim Energiesparhaus 40. Der Nutzwärmebedarf für die Warmwasserbereitung ist auffallend niedrig, die Verteilverluste beim Warmwasser sind dagegen wie beim ESH 40 ungewöhnlich hoch.

Der Gesamt-Wärmebedarf des Gebäudes und damit letztlich auch der Endenergieverbrauch (Holzpellets) sind höher als beim ESH 40. Der Primärenergieverbrauch ist dennoch etwas niedriger, da der gemessene (wie auch der berechnete) Hilfsstromverbrauch der Abluftanlage nur ca. 1 kWh/m²a beträgt und damit deutlich unter dem Messwert der kontrollierten Lüftung mit Wärmerückgewinnung im ESH 40 liegt.

von Heizkesseln und Speichern im Sommer wegen des geringeren Wärmebedarfs in der Regel geringer ist als im Winter, ist der hier angegebene bereits sehr hohe Messwert der Aufwandszahl möglicherweise sogar noch günstiger als ein entsprechender Jahresmittelwert. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass im ersten Winter die Anlagentechnik noch nicht komplett fertig gestellt war und auch einige Wohnungen noch nicht bezogen waren.

³¹ Der gesamte Stromverbrauch der Heizungsregelung, des Pelletkessel inklusive Pelletförderung und aller Umwälzpumpen (inklusive der Heizungspumpen und Warmwasserzirkulationspumpen in den Einzelgebäuden) wurde über diesen Zähler erfasst.

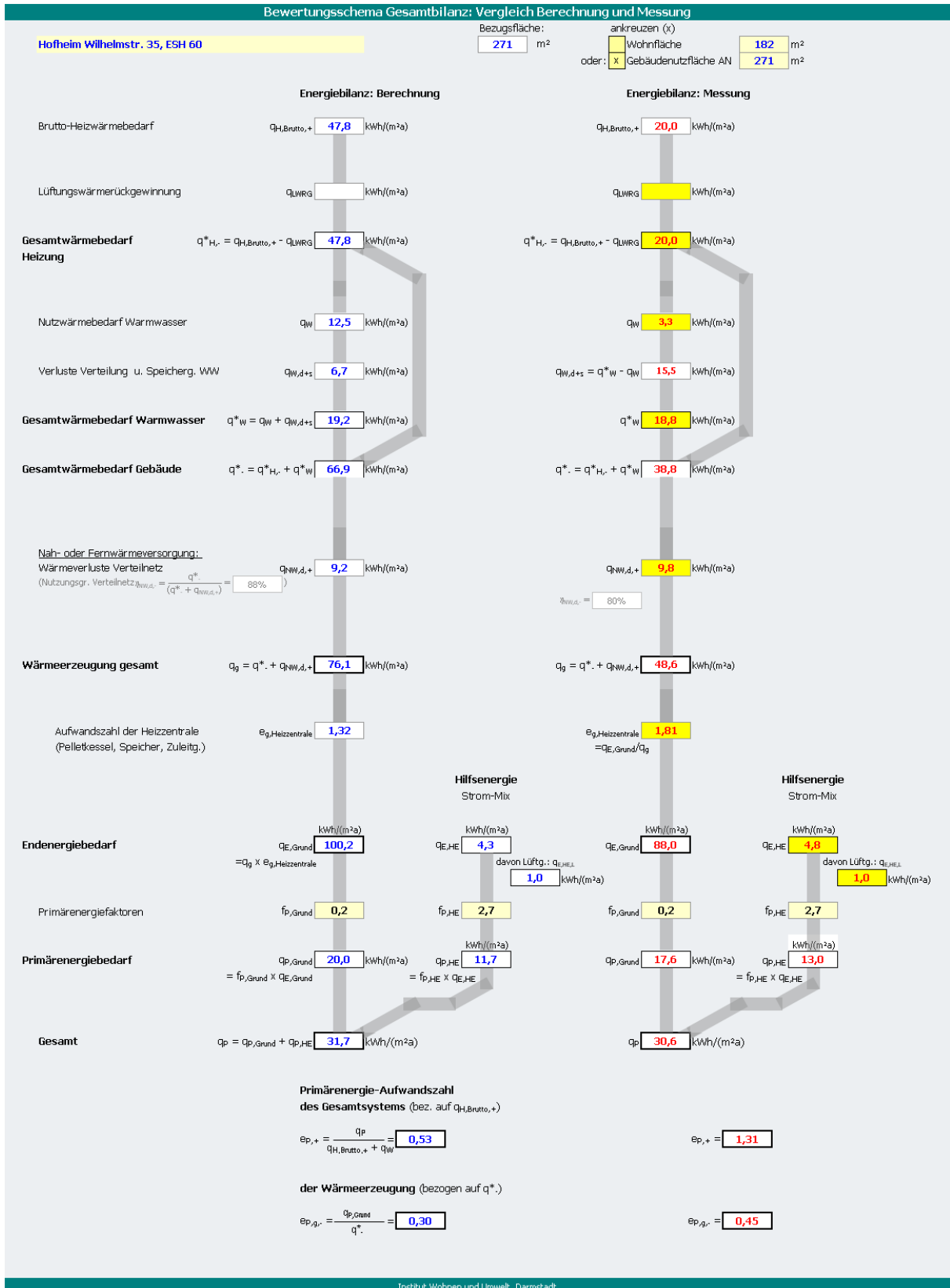


Abbildung 6.1-10 Messergebnisse ESH 60, erste Messperiode 2006/2007 (links: Berechnung, rechts: Messung)

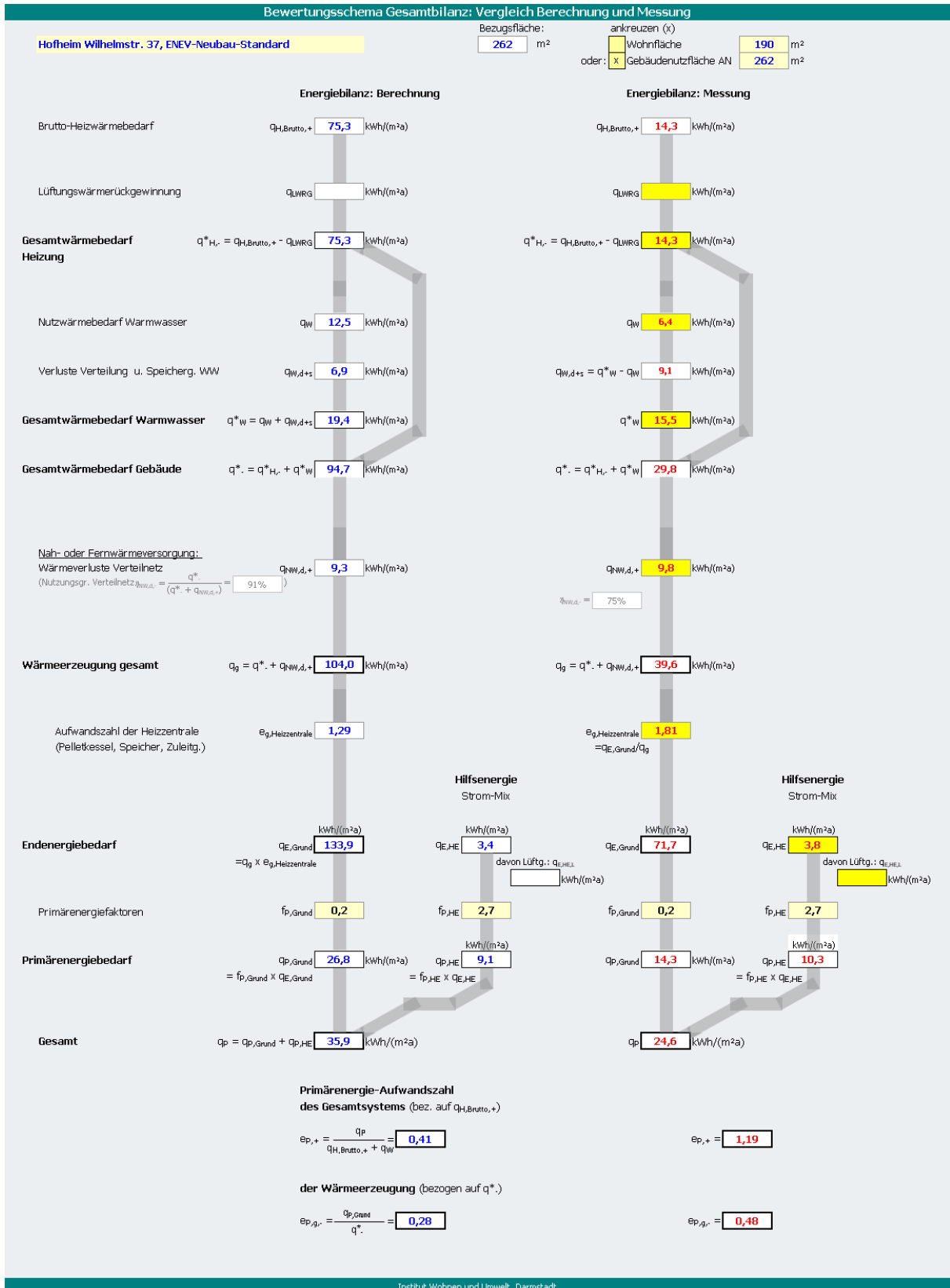


Abbildung 6.1-11 Messergebnisse EnEV-Neubau-Standard, erste Messperiode 2006/2007 (links: Berechnung, rechts: Messung)

In Abbildung 6.1-11 sind die gemessenen Werte für das Gebäude im EnEV-Neubau-Standard dargestellt. Der Gesamtwärmeverbrauch der Heizung liegt hier extrem unter dem Berechnungsergebnis, im Vergleich mit den beiden anderen Gebäuden zwar noch etwas

oberhalb des Wertes für das ESH 40, aber noch unterhalb des Messergebnisses im ESH 60. Ein Grund hierfür ist sicherlich in den niedrigen mittleren Raumtemperaturen in diesem Gebäude zu suchen (entsprechend korrigierte Werte: s. u. im Gesamtüberblick)

Der Warmwasser-Nutzwärmeverbrauch ist mit 6,4 kWh/m²a immer noch sehr gering, aber etwas höher als im ESH 60, die Verteilungs- und Speicherverluste der Warmwasserbereitung liegen deutlich unterhalb der Zahlen in den beiden anderen Gebäuden, dementsprechend auch der Gesamtwärmeverbrauch der Warmwasserbereitung (15,5 kWh/m²a) und – gemeinsam mit dem niedrigen Heizwärmeverbrauch – auch der Gesamtwärmeverbrauch des Gebäudes (29,8 kWh/m²a).

Als Folge davon tritt hier die ungewöhnliche Situation auf, dass das Gebäude mit der schlechtesten rechnerischen Energiebilanz den niedrigsten gemessenen Endenergieverbrauch (71,7 kWh/m²a Holzpellets) und natürlich auch – da keine Lüftungsanlage zum Hilfsstromverbrauch beiträgt – mit 24,6 kWh/m²a den niedrigsten gemessenen Primärenergieverbrauch in der ersten Bilanzperiode aufweist.

Messergebnisse für das zweite Jahr

Als zweite Messperiode wurde der Zeitraum vom 1.5.2007 bis zum 30.4.2008 betrachtet³². Die Messwerte für die drei Gebäude sind in Abbildung 6.1-12 bis Abbildung 6.1-14 dargestellt. Der Winter 2007/2008 war deutlich kälter als im Vorjahr und entsprach im Hinblick auf die Heizgradtage ungefähr dem langjährigen Durchschnitt. Dementsprechend liegen die Heizwärmeverbräuche deutlich höher als im Vorjahr, sie erreichen aber immer noch bei weitem nicht die berechneten Bedarfswerte. Im Großen und Ganzen ergeben sich ähnliche Ergebnisse wie für die erste Messperiode. Die Verteilungsverluste des Nahwärmesystems liegen etwas höher als im Vorjahr, was sich durch den längeren Winter und den fehlerhaften Betrieb bei der Vorlauftemperaturregelung erklären lässt. Die Lüftungsanlagen im Energiesparhaus 40 weisen einen niedrigeren Stromverbrauch und einen geringeren Wert der zurückgewonnenen Wärme auf, da sie von den Bewohnern auf niedrigerer Stufe betrieben wurden. Die Aufwandszahl der Wärmeerzeugung in der Heizzentrale ($e_{g,Heizzentrale} = 1,81$) wurde, wie bereits oben erläutert, pauschal als Mittelwert eines fast 2½-jährigen Messzeitraums angesetzt und entspricht daher genau dem Wert der Vorjahresperiode.

³² Der Endpunkt (30.4.2008) entspricht dem Projektende, daraus ergibt sich eine einmonatige Überschneidung (Mai 2007) mit der ersten Messperiode.

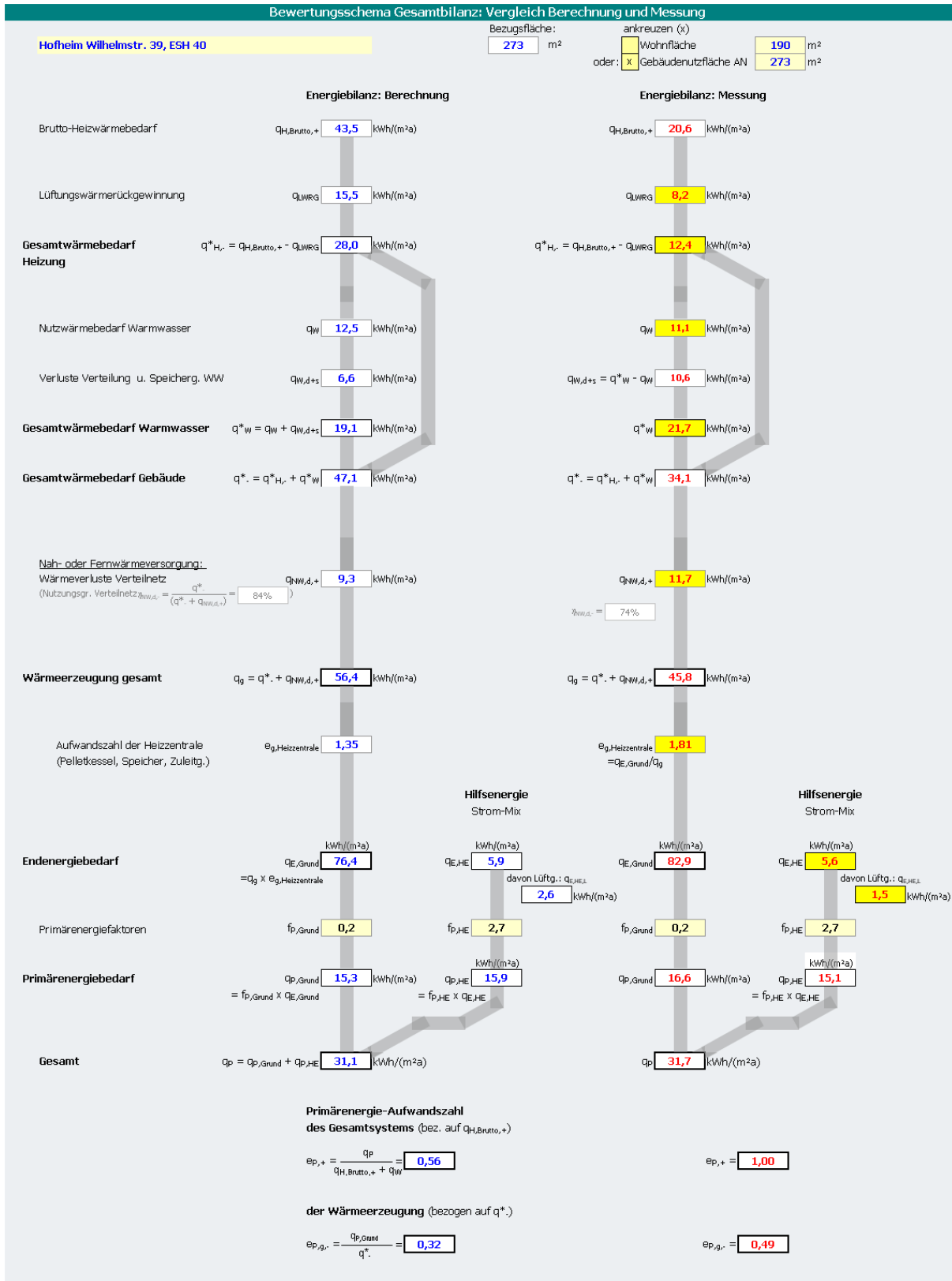


Abbildung 6.1-12 Messergebnisse ESH 40, zweite Messperiode (links: Berechnung, rechts: Messung)

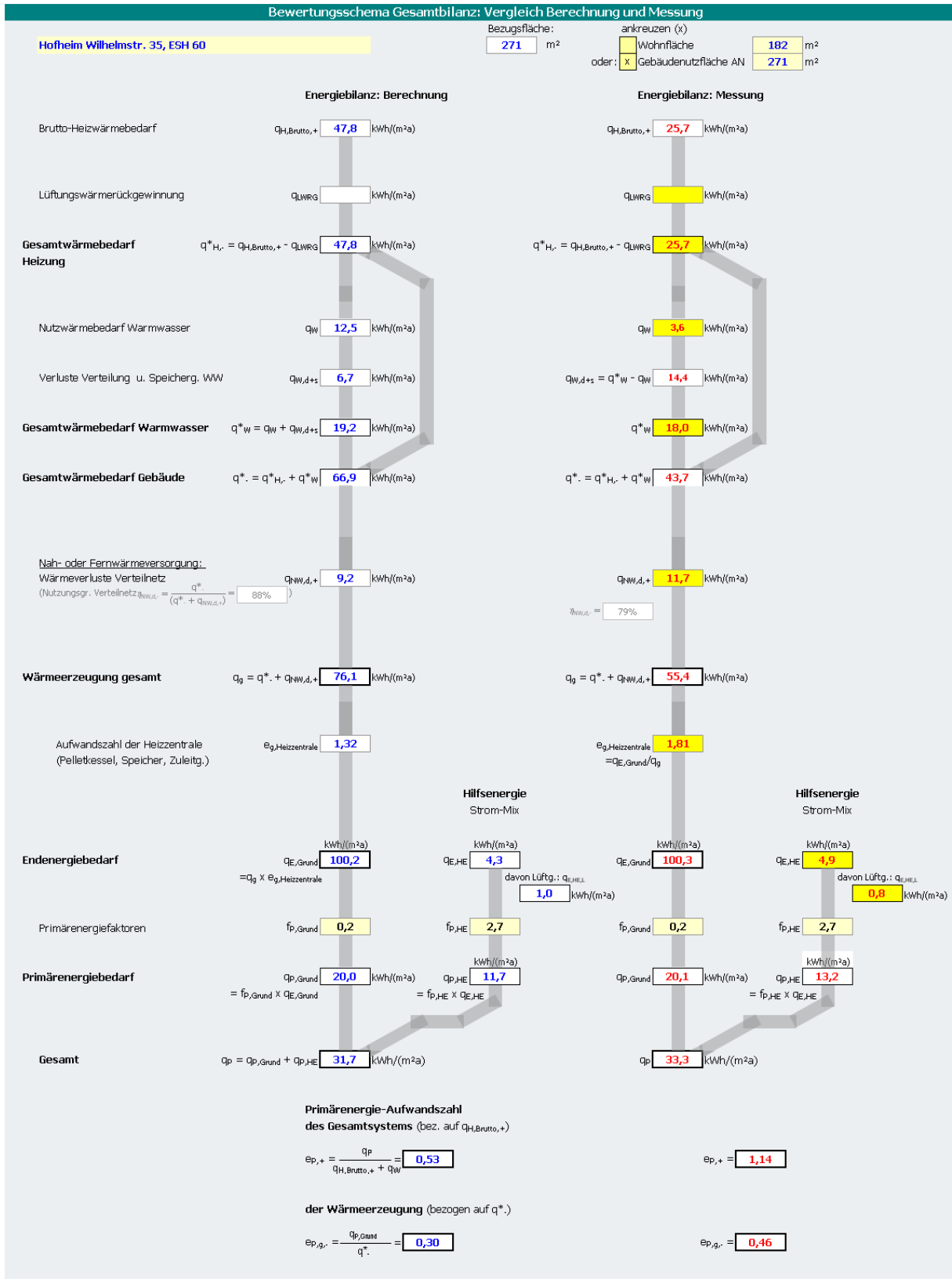


Abbildung 6.1-13 Messergebnisse ESH 60, zweite Messperiode (links: Berechnung, rechts: Messung)

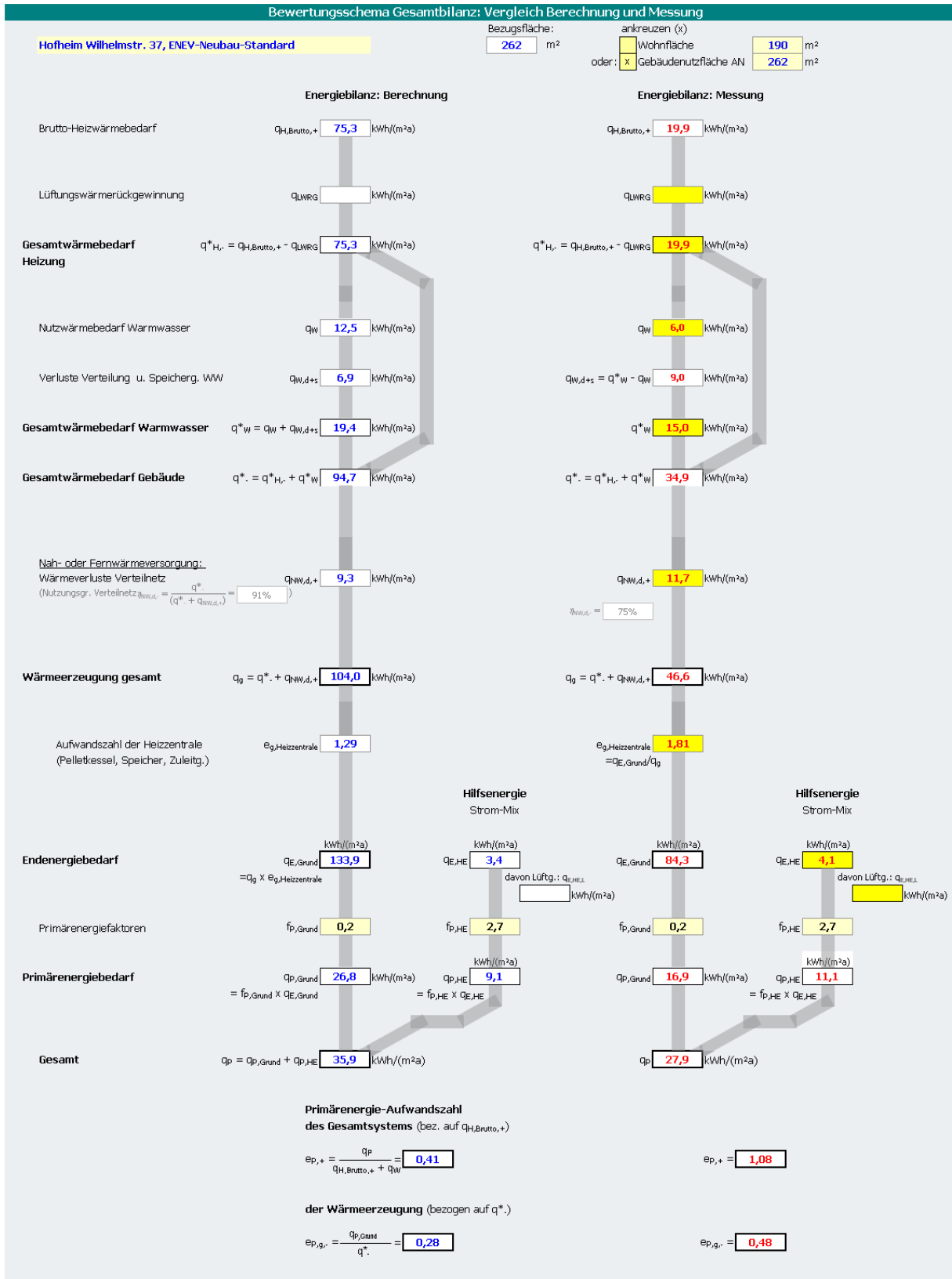


Abbildung 6.1-14 Messergebnisse EnEV-Neubau-Standard, zweite Messperiode (links: Berechnung, rechts: Messung)

Gesamtübersicht

In Tabelle 6.1-2 sind links noch einmal die wichtigsten Messergebnisse aus den beiden Bilanzperioden dargestellt. Rechts daneben sind die jeweiligen Werte nach Durchführung einer Klima- und Nutzungskorrektur dargestellt. Dabei wurden folgende Einflussfaktoren berücksichtigt (s. auch Zahlenwerte in Tabelle 6.1-1):

- Der Gesamtwärmebedarf $q_{H,-}^*$ wurde hinsichtlich Klima und Nutzung korrigiert: Die Klimakorrektur erfolgte durch Umrechnung der von der Außentemperatur abhängigen Heizgradtage der jeweiligen Heizperiode auf einen langjährigen Mittelwert. Gleichzeitig wurde auch eine Nutzungskorrektur durchgeführt, indem in der Gradtagzahl der Heizperiode auch die tatsächlich gemessene mittlere Innentemperatur T_i (Mittelwert November-März) berücksichtigt wurde, während der klimakorrigierte Wert auf die üblichen 20 °C Raumtemperatur umgerechnet wurde³³.
- Als Warmwasser-Nutzwärmebedarf q_w wurde generell mit 12,5 kWh/m²a der auch für die EnEV verwendete Wert aus der DIN V 4701-10 angesetzt.
- Die weiteren Größen (Verteilungsverluste, Aufwandszahl der Heizzentrale, gemessener Hilfsstrombedarf) wurden nicht korrigiert.

Nach Durchführung der Klima- und Nutzungskorrektur entspricht die Reihenfolge der Heizwärmeverbrauchswerte zwar der tatsächlichen Qualität der Gebäude (niedrigster Wert für das ESH 40, höchster Wert für EnEV-Neubau-Standard). Die Abweichungen zu den deutlich höheren, berechneten Werten insbesondere für den Heizwärmebedarf sind aber weiterhin sehr groß.

Tabelle 6.1-1 Daten der Klima- und Nutzungskorrektur

	Standard-Ansatz	Heizperiode 2006/2007	Heizperiode 2007/208
HGT 20/12	1467	904	1343
Heiztage	205	172	204
T_i , ESH 40	20	20,2	20,1
T_i , ESH 60	20	21,9	21,3
T_i , EnEV	20	18,9	18,6

³³ Bei der Klimakorrektur wurde als Grundlage der langjährige Mittelwert der Heizgradtage der nahe gelegenen Messstation Frankfurt Flughafen verwendet. Als Basisfall wurden 20 °C Innentemperatur und eine Heizgrenztemperatur von 12 °C angesetzt. Die Heizgrenztemperatur in der jeweiligen Messperiode wurde – ausgehend von 12 °C – entsprechend der Differenz der gemessenen Innentemperaturen zu 20 °C korrigiert und auf dieser Grundlage die Anzahl der Heiztage und der Heizgradtage der jeweiligen Messperiode mit Hilfe der im Projekt in Hofheim gemessenen Außentemperaturen ermittelt.

Tabelle 6.1-2 Übersicht über die Messergebnisse vor und nach Durchführung der Klima- und Nutzungskorrektur

Energiesparhaus 40					
	Berechnung	Messung, unkorrigiert		Messung, korrigiert	
		1. Jahr	2. Jahr	1. Jahr	2. Jahr
	kWh/m ² a	kWh/m ² a	kWh/m ² a	kWh/m ² a	kWh/m ² a
Gesamtwärmebedarf Heizung $q_{H,-}^*$	28,0	10,2	12,4	15,9	13,0
Nutzwärmebedarf Warmwasser q_W	12,5	10,3	11,1	12,5	12,5
Gesamtwärmebedarf Warmwasser q_W^*	19,1	22,8	21,7	25,0	23,1
Gesamtwärmebedarf Gebäude q^*	47,1	33,0	34,1	40,9	36,1
Verteilverluste Nahwärme $q_{NW,d,+}$	9,3	9,8	11,7	9,8	11,7
Endenergiebedarf Pellets $q_{E,Grund}$	76,4	77,5	82,9	91,8	86,5
Primärenergiebedarf Pellets $q_{P,Grund}$	15,3	15,5	16,6	18,4	17,3
Primärenergiebedarf Hilfsstrom $q_{P,HE}$	15,9	14,3	15,1	14,3	15,1
Primärenergiebedarf gesamt q_P	31,1	29,8	31,7	32,7	32,4
Energiesparhaus 60					
	Berechnung	Messung, unkorrigiert		Messung, korrigiert	
		1. Jahr	2. Jahr	1. Jahr	2. Jahr
	kWh/m ² a	kWh/m ² a	kWh/m ² a	kWh/m ² a	kWh/m ² a
Gesamtwärmebedarf Heizung $q_{H,-}^*$	47,8	20,0	25,7	23,4	22,6
Nutzwärmebedarf Warmwasser q_W	12,5	3,3	3,6	12,5	12,5
Gesamtwärmebedarf Warmwasser q_W^*	19,2	18,8	18,0	28,0	26,9
Gesamtwärmebedarf Gebäude q^*	66,9	38,8	43,7	51,4	49,5
Verteilverluste Nahwärme $q_{NW,d,+}$	9,2	9,8	11,7	9,8	11,7
Endenergiebedarf Pellets $q_{E,Grund}$	100,2	88,0	100,3	110,7	110,8
Primärenergiebedarf Pellets $q_{P,Grund}$	20,0	17,6	20,1	22,1	22,2
Primärenergiebedarf Hilfsstrom $q_{P,HE}$	11,7	13,0	13,2	13,0	13,2
Primärenergiebedarf gesamt q_P	31,7	30,6	33,3	35,1	35,4
EnEV-Neubau-Standard					
	Berechnung	Messung, unkorrigiert		Messung, korrigiert	
		1. Jahr	2. Jahr	1. Jahr	2. Jahr
	kWh/m ² a	kWh/m ² a	kWh/m ² a	kWh/m ² a	kWh/m ² a
Gesamtwärmebedarf Heizung $q_{H,-}^*$	75,3	14,3	19,9	28,9	26,5
Nutzwärmebedarf Warmwasser q_W	12,5	6,4	6,0	12,5	12,5
Gesamtwärmebedarf Warmwasser q_W^*	19,4	15,5	15,0	21,6	21,5
Gesamtwärmebedarf Gebäude q^*	94,7	29,8	34,9	50,5	48,0
Verteilverluste Nahwärme $q_{NW,d,+}$	9,3	9,8	11,7	9,8	11,7
Endenergiebedarf Pellets $q_{E,Grund}$	133,9	71,7	84,3	109,1	108,1
Primärenergiebedarf Pellets $q_{P,Grund}$	26,8	14,3	16,9	21,8	21,6
Primärenergiebedarf Hilfsstrom $q_{P,HE}$	9,1	10,3	11,1	10,3	11,1
Primärenergiebedarf gesamt q_P	35,9	24,6	27,9	32,1	32,7

Offensichtlich kann die Klima- und Nutzungskorrektur in dieser pauschalen Form noch nicht alle relevanten Einflussgrößen - insbesondere auf den Heizwärmebedarf - erfassen. Weitere Faktoren – über die zum Teil erst das ausführliche Messprogramm Erkenntnisse erbringen konnte - sind daher zu berücksichtigen, z. B.:

- Geringerer Luftwechsel, besonders beim EnEV-Neubau-Gebäude ohne Lüftungsanlage
- Hohe Kellertemperaturen von ca. 15 °C und mehr durch Abwärme aus dem Nahwärmenetz, den Warmwasserspeichern und durch die starke Perimeterdämmung im Verhältnis zur Kellerdeckendämmung
- Leicht erhöhtes Solarstrahlungsangebot aus Südrichtung

- Die GEDT-Fassade ist zurzeit noch besser als in der Bilanzierung angesetzt (noch keine Alterung der Vakuum-Dämmelemente)
- Im Gebäude nach EnEV-Neubau-Standard war bei der Berechnung nicht der tatsächliche Wärmebrückenzuschlag, sondern - auf der sicheren Seite liegend – ein höherer Wert von $0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$ angesetzt worden.

Vor diesem Hintergrund wurde noch eine weitere Herangehensweise gewählt, um die Differenzen zwischen Messung und Berechnung klären zu können: Die Berechnungsergebnisse wurden sukzessive an die tatsächlichen Bedingungen angenähert. In Abbildung 6.1-16 sind für das Energiesparhaus 40 und das EnEV-Neubau-Gebäude der Heizwärmebedarf bei entsprechend abweichenden Randbedingungen von den Vorgaben des EnEV-Monatsbilanzverfahrens dargestellt. Beim Energiesparhaus 40 ergibt sich bei Standardrandbedingungen ein Heizwärmebedarf von ca. $42 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{AN}} \cdot \text{a})$. Werden die Istwerte des GEDT-U-Werts und der Wärmebrücken eingesetzt, reduziert sich der Heizwärmebedarf auf $39 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{AN}} \cdot \text{a})$. Wird zusätzlich das lokale Klima in der Messperiode 2007/08 berücksichtigt, ergeben sich $31 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{AN}} \cdot \text{a})$. Die realen Raumtemperaturen lagen jedoch im Energiesparhaus über den Annahmen der EnEV, so dass unter Berücksichtigung dieser Messwerte der Heizwärmebedarf auf $36 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{AN}} \cdot \text{a})$ ansteigt. Berücksichtigt man die besondere Situation im Keller mit den hohen Temperaturen aus dem Heizraum und unterstellt, dass keine Verluste mehr gegen Keller auftreten (Wärmegewinne werden nicht berücksichtigt), ergibt sich ein Wert von $29 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{AN}} \cdot \text{a})$. Die letzten vier Säulen stellen den Heizwärmebedarf bei Anlagenluftwechseln von 0,35 bis 0,15 1/h dar. Gemessen wurde ein Wert von 0,23 1/h in jeder Wohneinheit. Bei einem 0,2-fachen Luftwechsel, einem Wert, der den tatsächlichen Bedingungen also hier wahrscheinlich am nächsten liegt, ergäbe sich nur noch ein Heizwärmebedarf von $18,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{AN}} \cdot \text{a})$. Der in Abbildung 6.1-12 dargestellte Messwert von $12,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{AN}} \cdot \text{a})$ wird somit immer noch nicht erreicht.

Für das EnEV-Neubau-Gebäude sind die Auswirkungen der Anpassungen an die gemessenen Randbedingungen ebenfalls in der Abbildung dargestellt. Durch die Ist-Werte bei GEDT und Wärmebrücken, das lokale Klima und die Raumtemperaturen reduziert sich der Heizwärmebedarf von 69 auf $54 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{AN}} \cdot \text{a})$. Aufgrund der Fensteröffnungszeiten wurde in diesem Gebäude ein Luftwechsel von 0,13 1/h abgeschätzt (Kapitel 4.2.4), für einen Gesamtluftwechsel von 0,2 1/h ergibt die Bilanzberechnung $33,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{AN}} \cdot \text{a})$, die noch deutlich über dem gemessenen Wert von $19,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{AN}} \cdot \text{a})$ liegen.

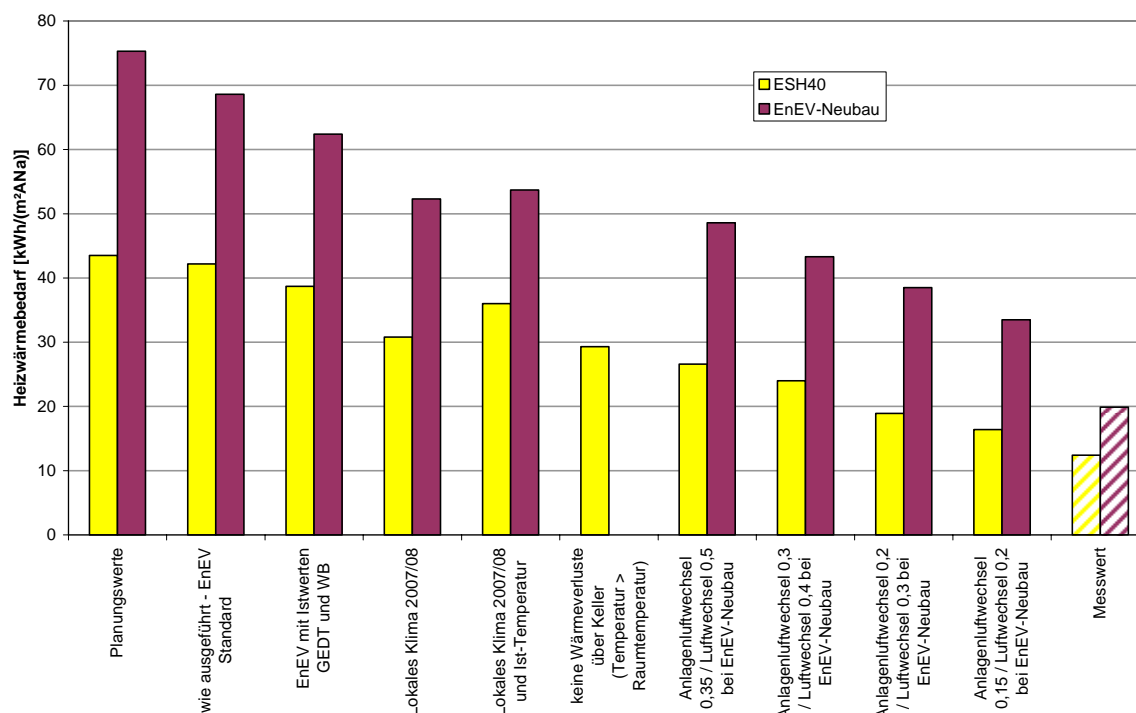


Abbildung 6.1-15 Berechnungsergebnisse für das Energiesparhaus 40 und den EnEV-Neubau-Standard bei Variation der Randbedingungen

Insgesamt gesehen lassen sich die berechneten Werte durch diese Analysen deutlich an die gemessenen annähern. Es verbleibt allerdings immer noch eine Differenz, die sich hier nicht erklären lässt. Insofern ist darauf hinzuweisen, dass sicherlich noch weitere Einflussfaktoren bestehen können, die hier nicht alle berücksichtigt werden konnten und dass natürlich auch mit Messfehlern zu rechnen ist. Beispielsweise ist Folgendes zu beachten:

- Die höheren Verteilverluste bei der Warmwasserbereitung können einen höheren Beitrag zur Heizenergie liefern
- Der Fehler bei einer Messung, bei der Differenzen kleiner Zahlen gebildet werden, ist höher als im Auslegungsmessbereich. Durch die kleinen Verbräuche kann er bei den hier untersuchten Gebäuden erhöht sein. Hinzu kommt die zeitweise geringe Spreizung im Nahwärmenetz, die ebenfalls zu einem erhöhten Messfehler führt.

Schließlich ist darauf hinzuweisen, dass die verbleibenden Abweichungen zwischen Messung und Berechnung zwar (gemessen am Verbrauchsniveau der Gebäude) als relativ hoch erscheinen, aber letztlich nur in einer Größenordnung von 10 kWh/(m²ANa) liegen und damit absolut gesehen nicht sehr groß sind: Bei ungedämmten Altbauten mit Heizwärmeverbräuchen von z. B. 150 kWh/(m²ANa) würden solche Differenzen kaum ins Gewicht fallen.

6.1.3 Vergleich mit dem Zustand vor der Modernisierung

Der Energiebedarf der nicht modernisierten Gebäude wurde ebenfalls mit dem Programm EnEV-XL berechnet (Randbedingungen nach EnEV-Verfahren). Es ergaben sich folgende Kennwerte (Wärme-/Energiebedarf jeweils bezogen auf eine Gebäudenutzfläche nach EnEV von $A_N = 172,8 \text{ m}^2$):

- Spezifischer Transmissionswärmeverlust (bezogen auf die thermische Hüllfläche): 1,06 W/m²K
- Heizwärmebedarf: 194 kWh/m²a
- Endenergiebedarf (Erdgas): 276 kWh/m²a
Endenergiebedarf (Hilfsstrom): 3,1 kWh/m²a
- Primärenergiebedarf: 313 kWh/m²a

Rechnerisch wurde also durch die Gebäudemodernisierung der Transmissionswärmeverlust im Durchschnitt über die Gebäude um fast zwei Drittel reduziert (von 1,06 W/m²K auf 0,37 W/m²K). Im Fall des Primärenergiebedarfs beträgt die Einsparung beim Vergleich der berechneten Werte ca. 89 % (313 kWh/m²a vorher gegenüber 35 kWh/m²a nachher).

Für die Zeit vor der Modernisierung liegen Messwerte über den Erdgasverbrauch vor, und zwar über die Jahre 2001 bis 2004 (s. Abbildung 6.1-16).

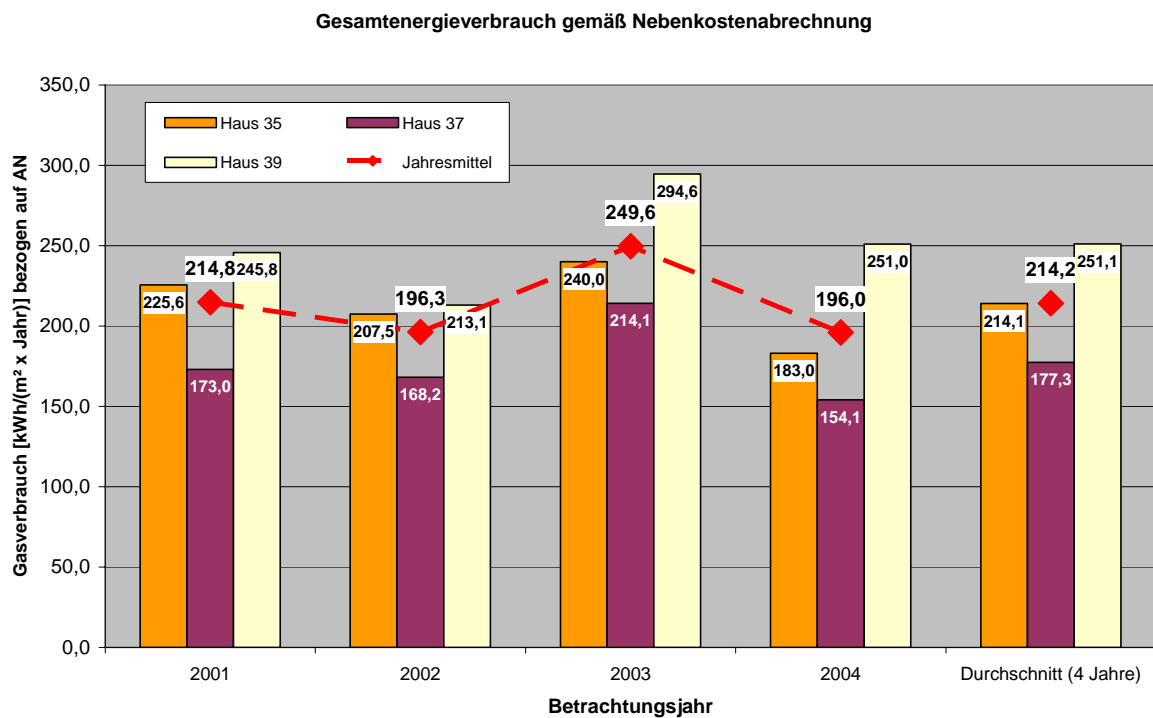


Abbildung 6.1-16 Erdgasverbrauch der Gebäude vor der Modernisierung

Der Mittelwert über alle Gebäude und alle vier Jahre liegt bei einem Erdgasverbrauch von 214 kWh/m²a (bezogen auf A_N). Unter Ansatz einer Klimabereinigung³⁴ ergeben sich ca. 234 kWh/m²a. Durch das Berechnungsergebnis (276 kWh/m²a) wird der tatsächliche Verbrauch also – bezogen auf den klimabereinigten Wert – um ca. 18 % überschätzt.

Betrachtet man die erreichten Energieeinsparungen (Mittelwerte über alle drei Gebäude) so ergeben sich folgende Zahlen:

³⁴ Auf Basis der Heizgradtage für den langjährigen Durchschnitt am Standort Frankfurt (Flughafen). Der (konstant) angesetzte Anteil der Warmwasserbereitung betrug laut Heizkostenabrechnung ca. 11 % (bezogen auf die tatsächlich gemessenen Werte).

- Endenergieeinsparung (Brennstoff für Heizung und Warmwasser):
Rechnerisch ergibt sich hier eine Reduzierung um 62 % von 276 kWh/m²a (Erdgas) auf 104 kWh/m²a (Holzpellets). Ohne Klimabereinigung gemessen wurde eine Einsparung von 214 kWh/m²a (2001 – 2004 ohne Klimabereinigung) auf 89 kWh/m²a (Messung 2. Jahr 2007/2008), d. h. von 58 %
- Primärenergieeinsparung (Brennstoff für Heizung und Warmwasser, ohne Hilfsstrom)
Bewertet man die genannten Brennstoffeinsparungen primärenergetisch (Primärenergiefaktoren 1,1 für Erdgas und 0,2 für Holzpellets) so sinkt der Wert rechnerisch von 304 kWh/m²a auf 21 kWh/m²a, d. h. um 93 %. Beim Vergleich der entsprechenden Messwerte ergeben sich vorher 235 kWh/m²a und nachher 18 kWh/m²a, die Einsparung beträgt prozentual 92 %.
- Primärenergieeinsparung insgesamt (inklusive Hilfsstrom)
Die gesamte Primärenergieeinsparung bei der Beheizung und Warmwasserbereitung sinkt rechnerisch von 313 kWh/m²a auf 33 kWh/m²a, also um 89 %. Der „Messwert“ für den Primärenergieverbrauch in der zweiten Messperiode nach der Modernisierung beträgt mit Hilfsstrom 31 kWh/m²a, der Wert vor der Modernisierung kann nicht angegeben werden, da keine Messwerte über den Hilfsstromverbrauch vor der Sanierung vorliegen.
- Einsparung beim Kohlendioxidäquivalent
Mit der Verbrennung von Erdgas oder Holz-Pellets sind CO₂-Emissionen verbunden. Ausgedrückt in CO₂-Äquivalenten, d. h. unter Berücksichtigung der Vorketten und der anderen zugehörigen klimaschädlichen Emissionen sinkt für die Gebäude der spezifische CO₂-Ausstoß auf Basis der berechneten Werte von 68,7 kg/(m²_{AN}*a) auf 4,4 kg/(m²_{AN}*a), das entspricht einer CO₂-Reduktion von 94 %. Mit den gemessenen Endenergieverbräuchen ergibt sich eine CO₂-Reduktion von 53,3 auf 3,7 kg/(m²_{AN}*a), was einer CO₂-Reduktion um 93 % entspricht.

6.2 Kosten

6.2.1 Gesamtkosten

Tabelle 6.2-1 zeigt die Gesamtkosten des Modernisierungsvorhaben entsprechend den Kostengruppen nach DIN 276 (alle Kostenangaben in diesem Kapitel enthalten die Mehrwertsteuer). Für die weiteren Auswertungen wurde eine andere Aufteilung vorgenommen und zwar nach Instandhaltungsmaßnahmen, Wohnraumerweiterung, Energieeinsparung und Planung. Diese ist in Tabelle 6.2-2 und Abbildung 6.2-1 dargestellt.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass die Kostenermittlung und -aufteilung an die Auswertungen dieser Studie angepasst wurden, die das Ziel verfolgten, allgemein vergleichbare Werte zu liefern. Sie sind daher an einigen Stellen nicht mit den tatsächlichen Baukosten identisch: Beispielsweise wurde hier die auf den Straßenfassaden eingesetzte Großelement-Dämmtechnik nicht mitberücksichtigt. Stattdessen wurden die Kosten der jeweils auf drei Fassaden erfolgten „konventionellen“ Außenwanddämmung mit Wärmedämmverbundsystem auf alle vier Fassaden hochgerechnet.

Tabelle 6.2-1 Aufteilung der Modernisierungskosten nach Kostengruppen (DIN 276)

	EnEV-Neubau-Standard	ESH 60	ESH 40
KG 300: Bauwerk (Baukonstr.)	197.226 €	187.789 €	210.048 €
KG 400: Bauwerk (techn. Anl.)	39.351 €	46.589 €	52.926 €
KG 500: Außenanlagen	4.923 €	4.000 €	3.894 €
KG 700: Baunebenkosten	17.102 €	17.325 €	16.867 €
GESAMT:	258.602 €	255.702 €	283.736 €

Tabelle 6.2-2 Aufteilung der Modernisierungskosten nach Instandhaltung, Wohnraumerweiterung, Energieeinsparung und Planung

	EnEV-Neubau-Standard	ESH 60	ESH 40
Instandhaltungsmaßnahmen	55.439 €	51.379 €	84.015 €
Wohnflächenerweiterung	110.535 €	98.483 €	79.600 €
Energiesparmaßnahmen	75.526 €	88.737 €	103.018 €
Planung	17.102 €	17.102 €	17.102 €
GESAMT:	258.602 €	255.702 €	283.736 €

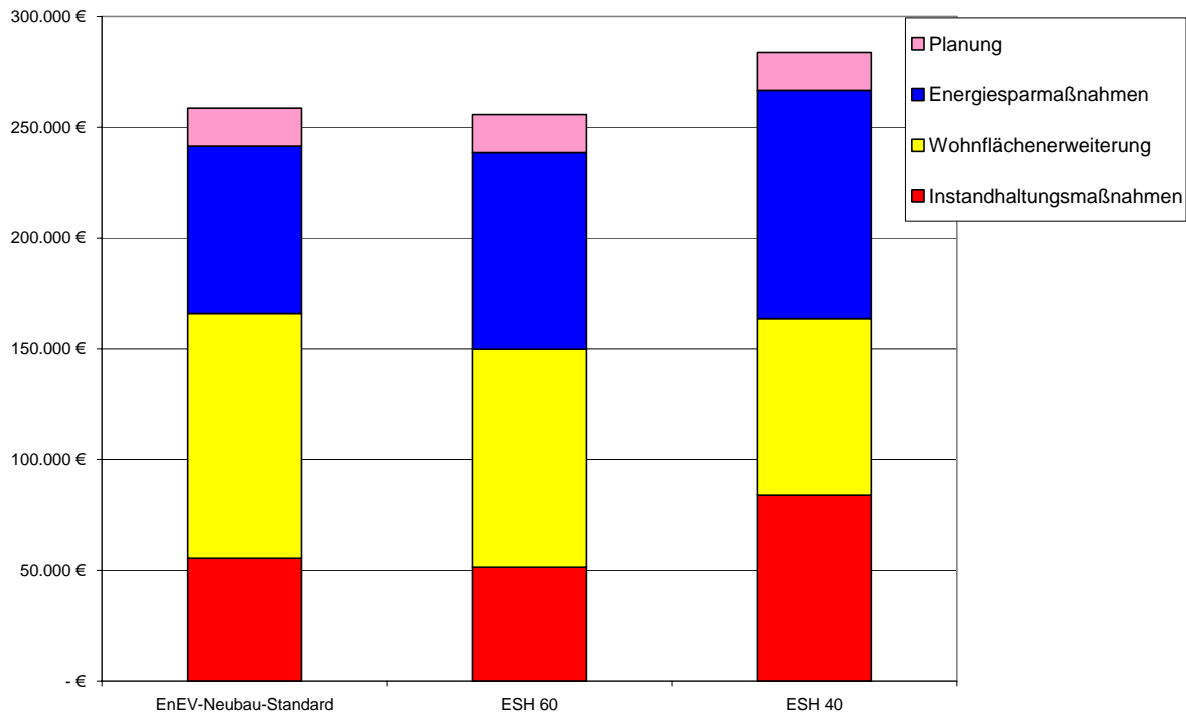


Abbildung 6.2-1 Aufteilung der Modernisierungskosten

Die Kosten für Wohnflächenerweiterung und Instandhaltung liegen in den drei Gebäuden zwar in der gleichen Größenordnung, weichen aber dennoch signifikant voneinander ab. Für den Vergleich der drei Energiesparstandards, auf den es hier ja eigentlich ankommt, werden daher nicht die Gesamtkosten, sondern die Kosten der Energiesparmaßnahmen herangezogen. Dabei wurde die folgende Zuordnung getroffen:

- In den Energiesparkosten sind die vollständigen Kosten der Wanddämmung mit Wärmedämmverbundsystem, des Fensteraustausches, der Erneuerung der Heizung (Nahwärme-System sowie Erneuerung von Heizkörpern und Leitungen in den Gebäuden), der Kellerdeckendämmung, der Aufsparrendämmung der Dächer sowie der Lüftungsanlagen enthalten.

- Weitere besondere Kosten, die in einem indirekten Zusammenhang mit der Energieeinsparung stehen, wurden zum Teil ebenfalls berücksichtigt (z. B. Konsole für wärmebrückenminimierten Balkonanschluss)
- Die Kosten des Nahwärmesystems (Pelletkessel und zugehörige Geräte, Nahwärmeleitungen) wurden gleichmäßig auf alle drei Gebäude umgelegt.
- Die bei allen drei Gebäuden identisch durchgeführte Zwischensparrendämmung ist hier in den Erweiterungskosten (neuer Dachstuhl) enthalten.
- Die Kosten der an den Straßenfassaden aufgetragenen Großdämmelemente wurden - wie bereits erwähnt - nicht berücksichtigt. Diese Maßnahme mit dem Charakter eines Forschungsvorhabens ist für die heutige Baupraxis untypisch. Die Kosten sind in Abschnitt 7.7 separat dokumentiert. Stattdessen wurden hier die Kosten des jeweiligen Wärmedämmverbundsystems für die gesamte Straßenfassade angesetzt³⁵.

Die Höhe der so definierten Energiesparkosten ist in Tabelle 6.2-2 und Abbildung 6.2-1 abzulesen. Sie betragen für den EnEV-Neubau-Standard etwa 75.000 €, für das Energiesparhaus 60 ca. 89.000 € und für das Energiesparhaus 40 ca. 103.000 €³⁶.

Im Hinblick auf die Interpretation dieser Zahlen ist zu beachten, dass die Einordnung in die verschiedenen Kategorien häufig nicht eindeutig vorgenommen werden konnte und dass auch die bei den Energieeinsparmaßnahmen zusammengefassten Punkte häufig nicht nur der Energieeinsparung dienen:

- Auch in den Kosten der Energiesparmaßnahmen sind erhebliche Instandhaltungsanteile enthalten: Beispielsweise wird durch die Dämmung der Außenwand eine Putzerneuerung überflüssig gemacht, die alte Heizung bzw. die Fenster hätten (nach 25 Jahren Nutzungszeit) auch irgendwann ausgetauscht werden müssen.
- Die Lüftungsanlagen dienen ebenfalls nicht allein dem Zweck der Energieeinsparung. Hier geht es nicht zuletzt auch um die Verbesserung der Luftqualität sowie des Wohnkomforts und um eine erhöhte Sicherheit bei der Vermeidung von Bauschäden. Dies gilt insbesondere für die Abluftanlage ohne Wärmerückgewinnung.

Es ist also wichtig sich klarzumachen, dass auch die genannten Energiesparkosten nur erste Anhaltswerte liefern und nicht als die reinen durch die Energieeinsparung bedingten Mehrkosten zu interpretieren sind. Es sollte also weniger deren absolute Höhe als vielmehr die Kostenunterschiede der betrachteten Gebäude von Interesse sein.

Im Rahmen der genaueren Wirtschaftlichkeitsberechnungen in den Abschnitten 6.3 und 6.4 werden aus diesen Gründen jeweils zum Vergleich noch entsprechende Referenzfälle für eine „Standard-Sanierung“ ohne besondere Energiesparanstrengungen betrachtet.

³⁵ Die Konsequenzen für die Energiebilanz werden noch berücksichtigt (s. u.).

³⁶ In diesem Zusammenhang ist noch einmal darauf hinzuweisen, dass es sich hier um die jeweiligen Standards handelt, wie sie im Modellprojekt erreicht wurden, d. h. mit deutlicher Unterschreitung der jeweiligen Vorgaben für den Primärenergiebedarf (auf Grund des gemeinsamen Biomasse-Heizsystems) und ebenfalls mit merklicher Unterschreitung der Grenzwerte für den Transmissionswärmeverlust beim Gebäude nach EnEV-Neubau-Standard und ESH 60.

6.2.2 Einzelmaßnahmen

In diesem Abschnitt werden die Kosten der Einzelmaßnahmen dargestellt, so dass sie als Vergleichswerte für andere Projekte dienen bzw. auch mit allgemeinen Kostendaten in Beziehung gesetzt werden können. Dabei ist natürlich zu beachten, dass von den Kosten eines einzelnen Projekts, das ja von vielen individuellen Besonderheiten abhängig ist, keine direkten Rückschlüsse auf das generelle Kostenniveau der jeweiligen Energiesparmaßnahme bzw. Energiespartechnologie gezogen werden können³⁷.

Tabelle 6.2-3 gibt die Kosten der Wärmeschutzmaßnahmen an. Sie sind auf die Fläche der jeweiligen Bauteile bezogen. Wegen der unterschiedlichen verwendeten Materialien wird außer der tatsächlichen Dämmstoffdicke auch noch die Dicke angegeben, die bei Verwendung eines Dämmstoffs der Wärmeleitfähigkeit 0,04 W/mK denselben Effekt haben würde.

Tabelle 6.2-3 Kosten der Wärmeschutzmaßnahmen

Wärmeschutz	EnEV-Neubau-Standard			ESH 60			ESH 40		
	Dämmstoffstärke in cm	Dämmstoffstärke WLG 040 in cm	Kosten/Bauteilfläche in €/m ²	Dämmstoffstärke in cm	Dämmstoffstärke WLG 040 in cm	Kosten/Bauteilfläche in €/m ²	Dämmstoffstärke in cm	Dämmstoffstärke WLG 040 in cm	Kosten/Bauteilfläche in €/m ²
Außenwand*	4	4	94,23 €	16	18,3	103,48 €	20	22,9	117,13 €
Zwischensparrendämmung**	16	17,8	41,72 €	16	17,8	41,72 €	16	17,8	41,72 €
Aufsparrendämmung	2,5	1,8	11,84 €	8	6,4	20,18 €	14	11,2	43,15 €
Kellerdecke	4	4	28,53 €	6	6,9	32,01 €	6	6,9	32,01 €
Fenster***	-	-	325,05 €	-	-	329,14 €	-	-	369,48 €

* inkl. 2/3 der Gerüstkosten

** inklusive Dampfbremse

*** inkl. Bearbeiten, EnEV/ESH 60: $U_f = \text{ca. } 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$, ESH 40: $U_f = \text{ca. } 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$

Die Kosten der Lüftungsanlagen in Tabelle 6.2-4 sind in der unteren Zeile auf die Wohnfläche bezogen. Dies ist bei Kostendaten gebräuchlicher als der Bezug auf die „Gebäudenutzfläche A_N “, nach EnEV, der hier wegen der Definition der Energiespargebäude bei allen energetischen Kenngrößen (in kWh/m²a) verwendet wird. Bei den Kosten wurden auch die notwendigen baulichen Maßnahmen (Mehrkosten der Trockenbauarbeiten) grob überschlägig mit einbezogen.

Tabelle 6.2-4 Kosten der Lüftungsanlagen

Lüftungsanlage	EnEV	ESH 60	ESH 40
Kosten in €	-	8.983,04 €	12.749,81 €
Kosten/Wohnfläche in €/m ²	-	49,36 €	67,10 €

Tabelle 6.2-5 gibt die Kosten des Wärmeversorgungssystems an, d. h. sowohl des neu installierten Nahwärmesystems mit Pelletkessel (oberer Teil der Tabelle) als auch der Maßnahmen zur Erneuerung der Verteilleitungen, Heizkörper und Warmwasserspeicher in den einzelnen Gebäuden (unterer Teil)

³⁷ Darüber hinaus gilt auch hier, dass die Zuordnung der Einzelposten nicht immer eindeutig möglich ist. So wurden die Kosten des Gerüsts, das sowohl für die Außenwanddämmung als auch für die Dacherneuerung notwendig war, je zur Hälfte diesen beiden Aufgaben zugeordnet.

Tabelle 6.2-5 Kosten des Wärmeversorgungssystems

Kosten der Wärmeversorgung	Kosten in €	Kosten / Wohnfl. in €/m ²
<i>Heizzentrale und Nahwärme</i>		
Pelletkessel inkl. Pelletförderung	17.562	31,25
Pufferspeicher / Leitungen / Regelung	10.329	18,38
bauliche Maßnahmen Heizzentrale	14.121	25,13
Nahwärmeleitungen inkl. Graben	4.635	8,25
<i>Zwischensumme Nahwärmesystem</i>	<i>46.648</i>	<i>83,00</i>
<i>Maßnahmen in den Gebäuden</i>		
Warmwasserspeicher (3 Stck.)	2.781	4,95
Hausanschluss Sanitär	4.392	7,81
Erneuerung Leitungen (Warmwasser)	16.910	30,09
Erneuerung Leitungen (Heizung)	16.039	28,54
Erneuerung Heizkörper	6.695	11,91
<i>Zwischens. dezent. Maßnahmen</i>	<i>46.816</i>	<i>83,30</i>
Gesamtsumme	93.463	166,31

6.3 Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen

Während im vorangegangenen Kapitel die Investitionskosten des Modernisierungsvorhabens dokumentiert wurden, wird hier nun eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt, d. h. die Mehrkosten der Energiesparmaßnahmen einerseits werden mit den dadurch erreichten Kosteneinsparungen bzw. Mehreinnahmen andererseits verglichen.

Die eigentliche Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen wird untersucht, indem die Mehrinvestitionen mit den eingesparten Energiekosten in Beziehung gesetzt werden (s. Kap. 6.3.3). Im nächsten Schritt wird die besondere Perspektive eines Wohnungsunternehmens eingenommen (Kap. 6.3.4): Es handelt sich ja hier um vermieteten Wohnraum und für den Vermieter, der die Investitionsentscheidung fällen muss, sind – jedenfalls auf den ersten Blick – weniger die eingesparten Energiekosten (die der Mieter trägt) sondern vielmehr die erreichbaren Miet-Mehreinnahmen von Interesse.

Zunächst muss aber, wie im vorherigen Kapitel dargelegt, eine Referenzbetrachtung durchgeführt werden, gegenüber der die Mehrkosten der Energieeinsparung definiert werden (Kap. 6.3.1), und es wird noch kurz auf die Methodik der Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen eingegangen (Kap. 6.3.2).

6.3.1 Referenzuntersuchungen

Im Referenzfall wird neben der Wohnflächenerweiterung (Dachgeschossausbau) sowie der Erneuerung der Wohnungen und des Außenbereichs (wie in Hofheim durchgeführt) eine Durchführung reiner Instandhaltungsmaßnahmen ohne weitergehende Energiesparmaßnahmen angenommen. Allerdings sind auch hier sowohl beim Dachstuhl als auch bei der Instandhaltung zum Teil energiesparende Maßnahmen quasi „automatisch“ mitbetroffen, was sich sowohl in den Kosten als auch in der Energiebilanz des Referenzfalls widerspiegelt. Insbesondere sind dies:

- Einbau neuer Fenster
- Einbau neuer Niedertemperatur-Gaskessel in den drei Gebäuden
- Einbau Warmwasserspeicher, Erneuerung Heizkörper und Leitungen wie in Hofheim durchgeführt
- Neuer Dachstuhl (nur Zwischensparrendämmung im Referenzfall)

Die „energiebedingten Mehrkosten“ der Hofheimer Gebäude werden nun als die Differenzkosten zum Referenzfall definiert. Dabei wird zwischen zwei Fällen unterschieden:

1. „wie gebaut“

Die Gebäude werden so betrachtet, wie sie in Hofheim errichtet wurden³⁸. Im Hinblick auf die Lüftung heißt dies: EnEV-Neubau-Standard ohne Lüftungsanlage, Energiesparhaus 60 mit Abluftanlage und Energiesparhaus 40 mit kontrollierter Lüftung inklusive Wärmerückgewinnung. Der Referenzfall wird ohne Lüftungsanlage angesetzt.

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung heißt dies, dass die Mehrkosten der Lüftungsanlagen voll den energiebedingten Mehrkosten zugeschlagen werden. Dies ist allerdings nicht unbedingt gerechtfertigt, da Lüftungsanlagen – insbesondere Abluftanlagen – häufig nicht wegen der Energieeinsparung, sondern vor allem zur Verbesserung der Luftqualität, des Wohnkomforts und zur Vorbeugung von Bauschäden eingesetzt werden. Vor diesem Hintergrund wird noch eine zweite Variante „mit Lüftungsanlage“ betrachtet.

2. „mit Lüftungsanlage“

Hier wird angenommen, dass in allen Gebäuden (inkl. Referenzfall) eine mechanische Lüftung installiert wird, und zwar im Referenzfall, im EnEV-Neubau-Standard (der hier also neu definiert wird) und im Energiesparhaus 60 (wie in Hofheim gebaut) eine Abluftanlage und im Energiesparhaus 40 (ebenfalls wie in Hofheim) eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Hier werden hinsichtlich der Lüftung also nur die Mehrkosten der Wärmerückgewinnung im Energiesparhaus 40 als energiebedingte Mehrkosten verbucht.

Tabelle 6.3-1 zeigt die Ergebnisse für die wichtigsten Energiebilanzgrößen und die energiebedingten Mehrinvestitionskosten. Dabei werden kurzlebige Maßnahmen (wirtschaftliche Nutzungsdauer: 20 Jahre) und langlebige Maßnahmen (40 Jahre) unterschieden. Zu den ersteren werden hier die meisten anlagentechnischen Maßnahmen (Heizung, Lüftungsanlage) und die Fenster gezählt, bei den letzteren handelt es sich um die baulichen Maßnahmen.

³⁸ Natürlich gilt auch hier die Einschränkung, dass die Großdämmelemente auf der Straßenseite sowohl bei der Kostenermittlung als auch bei der Energiebilanz durch das entsprechende Wärmedämmverbundsystem der anderen Fassaden ersetzt wurden.

Tabelle 6.3-1 Energiebilanzen und „energiebedingte“ Mehrinvestition der Vergleichsfälle „wie gebaut“ (oben) bzw. „mit Lüftungsanlage“ (unten)

		Referenzfall	EnEV-Neubau-St.	ESH 60	ESH 40
		ohne mech. Lüftg.	ohne mech. Lüftg.	Abluftanlage	LWRG
Endenergiebedarf: Erdgas	kWh _{HU} /m ² a	168,7			
Endenergiebedarf: Holzpellets	kWh _{HU} /m ² a		138,0	99,8	75,6
Endenergiebedarf: Strom	kWh/m ² a	2,3	3,4	4,3	5,9
Primärenergiebedarf	kWh/m ² a	191,8	36,7	31,7	31,0
Mehrkosten gegenüber Referenzfall			41.783 €	54.309 €	66.343 €
davon: "langlebig" (40 Jahre)			33.064 €	37.682 €	47.686 €
davon: "kurzlebig" (20 Jahre)			8.719 €	16.627 €	18.657 €

		Referenzfall	EnEV-Neubau-St.	ESH 60	ESH 40
		mit Lüftungsanlage			
		Abluftanlage	Abluftanlage	Abluftanlage	LWRG
Art der Lüftungsanlage					
Endenergiebedarf: Erdgas	kWh _{HU} /m ² a	160,4			
Endenergiebedarf: Holzpellets	kWh _{HU} /m ² a		134,5	99,8	75,6
Endenergiebedarf: Strom	kWh/m ² a	3,3	4,4	4,3	5,9
Primärenergiebedarf	kWh/m ² a	185,4	38,7	31,7	31,0
Mehrkosten gegenüber Referenzfall			41.783 €	45.326 €	57.360 €
davon: "langlebig" (40 Jahre)			33.064 €	37.682 €	47.686 €
davon: "kurzlebig" (20 Jahre)			8.719 €	7.644 €	9.673 €

Natürlich muss beachtet werden, dass die Höhe der energiebedingten Mehrkosten und damit auch die Ergebnisse der folgenden Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen sehr stark von den hier nur theoretisch ermittelten Kosten des Referenzfalls abhängig sind. Ein besonderes Augenmerk sollte daher immer auf den Vergleich der drei Gebäudestandards untereinander gerichtet werden: Hier sind für die Differenzkosten nur die tatsächlich bei dem Bauvorhaben aufgetretenen Werte angesetzt worden.

6.3.2 Methodik der Wirtschaftlichkeitsberechnung

Energetechnische Gestaltungsmaßnahmen im Gebäudebereich sind in der Regel mit Kosten verbunden und zielen auf die Reduzierung zukünftig notwendiger finanzieller Aufwendungen. Unter wirtschaftlichen Aspekten betrachtet können sie daher als Investitionen bezeichnet werden. Dabei steht naturgemäß die Wirtschaftlichkeit alternativer möglicher Investitionen im Mittelpunkt. Zur Entscheidungsfindung stellt die betriebswirtschaftliche Investitionstheorie eine Reihe von Verfahren zur Verfügung. Grundsätzlich lassen diese sich in statische und dynamische Verfahren unterteilen.

Statische Verfahren

Bekannte statische Verfahren der Investitionstheorie sind die Gewinnvergleichs- bzw. Kostenvergleichsrechnung, die Rentabilitätsvergleichsrechnung und die statische Amortisationsrechnung. Vorteile der statischen Verfahren sind in der einfachen Handhabung und im relativ geringen Informationsbedarf zu sehen.

Allerdings bieten diese Verfahren keine ausreichende Basis zur Beurteilung von Investitionsentscheidungen, weil es sich bei Energiesparinvestitionen immer um mehrperiodige Entscheidungsprobleme handelt. Bei deren Beurteilung müssen die zeitliche Struktur der Ein- und Auszahlungsreihen und entsprechende Zinseffekte berücksichtigt werden.

Dynamische Verfahren

Das wesentliche Merkmal von dynamischen Verfahren ist es, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallenden Zahlungen mit Hilfe der Zinseszinsrechnung auf einen gemeinsamen Vergleichszeitpunkt ab- oder aufzudiskontieren. Somit haben Einnahmen und Ausgaben nicht nur über ihren Betrag, sondern auch über den Zeitpunkt des Cashflows einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis. Dies ist der entscheidende Vorteil gegenüber den statischen Verfahren.

Zu den dynamischen Verfahren zählen u. a. die Kapitalwertmethode und die Annuitätenmethode. Im Folgenden soll kurz auf diese beiden Verfahren eingegangen werden:

Der Kapitalwert KW einer Investition ist die Summe aller mit dem Kalkulationszinssatz i auf den Zeitpunkt $t = 0$ diskontierten Investitionszahlungen (Jahresüberschüsse) \ddot{u}_t :

$$KW = \sum_{t=0}^n \ddot{u}_t \cdot (1+i)^{-t}$$

Die Kapitalwertmethode setzt voraus, dass der Investor weiß, welchen "Zinsgewinn" er aus einer Investition mindestens erwirtschaften will. Diese – vom Marktzins und Risikogesichtspunkten abhängige – Mindestverzinsung nennt man Kalkulationszinssatz.

Bei der Wahl des Kalkulationszinssatzes ist zu differenzieren zwischen:

- Vollständiger Eigenfinanzierung der Investition. Der Kalkulationszinssatz sollte den Verzicht auf eine entgangene Alternativanlage widerspiegeln. Er ist definiert als Zinssatz einer risikofreien Kapitalanlage.
- Vollständiger Fremdfinanzierung der Investition. Der Kalkulationszinssatz sollte die durch die Kreditaufnahme entstandene Zinsbelastung abbilden. Er ist definiert als Zinssatz des aufgenommenen Kredits.
- Mischfinanzierung der Investition. Der Kalkulationszinssatz muss die von den Eigenkapitalgebern geforderte Verzinsung und die durch die anteilige Fremdfinanzierung verursachte Zinsbelastung widerspiegeln. Als Definition bietet sich das gewogene arithmetische Mittel aus Eigen- und Fremdkapitalzinssatz an.

Die Kapitalwertmethode prüft, ob in einer Investition zumindest der gewählte Kalkulationszinssatz steckt und die Investition somit vorteilhaft ist ($KW > 0$ bei der Beurteilung einer Einzelinvestition). Aus einer Menge von Investitionsalternativen ist diejenige Alternative optimal, die den größten Kapitalwert aufweist.

Die Annuitätenmethode berücksichtigt als Entscheidungskriterium nicht die Höhe des Kapitalwertes, sondern die Höhe der sich daraus ergebenden Annuität. Inhaltlich ist die Annuität als der unter Berücksichtigung einer Verzinsung zum Kalkulationszinssatz durchschnittlich je Periode erzielbare Einzahlungsüberschuss interpretierbar. Die Annuität A kann ermittelt werden, in dem der Kapitalwert der Investition mit dem sog. Annuitätenfaktor $a_{i,n}$ multipliziert und so auf die Nutzungsperioden der Investition verteilt wird:

$$A = KW * a_{i,n}$$

Der Annuitätenfaktor $a_{i,n}$ lautet für einen gegebenen Kalkulationszinssatz i und eine gegebene Nutzungsdauer n :

$$a_{i,n} = \frac{i * (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Bei gleichem Kalkulationszinssatz und gleicher Nutzungsdauer ist die Annuitätenmethode mit der Kapitalwertmethode vollkommen äquivalent. Insoweit ist die Annuität nichts anderes als eine Umformung des Kapitalwertes. Im Folgenden wird ein auf der Annuitätenmethode basierendes Verfahren zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit einer Energiesparinvestition beschrieben.

Der annuitätische Gewinn als Beurteilungskriterium der Wirtschaftlichkeit

Ein annuitätischer Gewinn kann grundsätzlich als Differenz zwischen annuitätischen Erlösen und annuitätischen Kosten definiert werden. Zur Ermittlung der annuitätischen Kosten werden die aus einer energiesparenden Maßnahme entstehenden zusätzlichen Investitionskosten (d. h. lediglich die Mehrkosten gegenüber der ohnehin anstehenden baulichen oder anlagentechnischen Instandsetzung - Kopplungsprinzip) sowie die Kosten zur Beheizung des Gebäudes und eventuell anfallende Zusatzkosten (z. B. Wartung oder Hilfsenergie) auf konstante annuitätische Kosten umgerechnet.

Die annuitätischen Kosten der Energiesparmaßnahme belaufen sich damit auf:

$$K = a * I + Z$$

- K = annuitätische Kosten nach der energiesparenden Maßnahme
- a = Annuitätenfaktor
- I = Mehrkosten für die energiesparende Maßnahme
- Z = eventuell anfallende jährliche Zusatzkosten für z. B. Wartung oder Hilfsenergie

Im nächsten Schritt folgt die Ermittlung der annuitätischen Erlöse, in diesem Fall der annuitätischen Energiekosteneinsparung. Um die annuitätischen Erlöse zu ermitteln, werden die jährlichen Energiekosten nach Durchführung der Maßnahme von den jährlichen Energiekosten ohne die Maßnahme abgezogen.

$$E = p_1 * E_0 - p_2 * E_S$$

- E = annuitätische Erlöse (Energiekosteneinsparungen durch die Maßnahme)
- $p_{1,2}$ = mittlerer zukünftiger Preis der Energieeinheit vor bzw. nach Durchführung der Modernisierung (unterschiedlich bei Energieträgerwechsel wie in Hofheim)
- E_S = jährlicher Energieverbrauch nach Durchführung der Maßnahme
- E_0 = jährlicher Energieverbrauch ohne Maßnahme

Eine Energiesparmaßnahme ist dann als wirtschaftlich anzusehen, wenn die annuitätischen Energiekosteneinsparungen größer sind als die annuitätischen Kosten. Der so ermittelte annuitätische Gewinn G muss dann größer als 0 sein:

$$G = E - K = p_1 * E_0 - p_2 * E_S - (a * I_e + Z)$$

Aus einer Menge von Investitionsalternativen ist diejenige Alternative optimal, die den größten annuitätischen Gewinn aufweist.

Die folgende Betrachtung wird inflationsbereinigt durchgeführt, d. h. es wird mit realen Preisen und Zinsen gearbeitet. Dies ist oft zweckmäßig, um von unsicheren Schwankungen der allgemeinen Inflation abzusehen.

Bei einem Realansatz muss man eine allgemeine Inflationsrate j (z. B. $j = 2\%$) festlegen und den Realzins i_{real} verwenden. Wenn Inflationsrate und Zinsen gering sind, ist der Realzins in erster Näherung die Differenz zwischen nominalem Zinssatz und der Inflationsrate, d. h. er entspricht im Falle der Fremdfinanzierung der Investition dem effektiven Jahreszins des aufzunehmenden Kredits abzüglich der Inflationsrate (z. B. $5\% - 2\% = 3\%$). Exakt lässt sich der Realzins über folgende Formel berechnen:

$$i_{\text{real}} = \frac{1 + i_{\text{nom}}}{1 + j} - 1$$

Alternativ kann man auch mit nominalen Preisen und Zinsen, d. h. mit einem Nominalzinssatz und Teuerungsraten für Energie und Zusatzkosten arbeiten. Für die vergleichende Beurteilung von Energiesparinvestitionen ist es jedoch unerheblich, ob mit nominalen oder mit realen Kosten gearbeitet wird. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass der Ansatz für alle Maßnahmenvarianten derselbe ist. Der Vergleich der Nominalkosten liefert höhere Beträge, dies führt zum subjektiven Eindruck einer künftigen Verteuerung der Dienstleistung, während ein Vergleich der realen Kosten (inflationsbereinigt) sogar zu fallenden Ausgaben führen kann. Der Alternativenvergleich führt aber zum selben Ergebnis wie der Realansatz.

6.3.3 Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen

Die Berechnungen werden für folgende Varianten durchgeführt „EnEV Neubau“, „ESH 60“ und „ESH 40“. (s. o.):

Die Basisdaten der Berechnung werden wie folgt gewählt:

Tabelle 6.3-1 Grunddaten der Wirtschaftlichkeitsberechnung

Betrachtungszeitraum	a	40
Lebensdauer langlebiger Maßnahmen	a	40
Lebensdauer kurzlebiger Maßnahmen	a	20
Kalkulationszins (nominal)	%	5,0
Energiepreis Erdgas	Ct/kWh	6,5
Energiepreis Holzpellets	Ct/kWh	4,0
Strompreis	Ct/kWh	19,0
Teuerungsrate allgemein (nominal)	%/a	2,0
Teuerungsrate Energie (nominal)	%/a	5,0
Teuerungsrate Energie real	%/a	3,0

Bei einem Betrachtungszeitraum von 40 Jahren (= Lebensdauer der meisten baulichen Maßnahmen sowie der Verteilleitungen und Heizkörper) wird ein Ersatz der kürzerlebigen Anlagentechnik sowie der Fenster nach dem Ende von deren rechnerischer Lebensdauer von 20 Jahren berücksichtigt. Die energiebedingten Mehrkosten der verschiedenen Varianten sowie die relevanten Energiekennwerte zur Berechnung der jährlichen Energieeinsparung werden aus Tabelle 6.3-1 entnommen. Es wird unterstellt, dass die Energiepreise stärker ansteigen als die allgemeine Inflation. Es kommt also zu realen Verteuerungen von Energie (3 %/a). Die energiebedingten Mehrkosten werden vollständig fremdfinanziert (Kalkulationszinssatz 5 %). Jährlich anfallende Zusatzkosten für Wartung werden nicht berücksichtigt. Aufgrund der Umstellung auf ein Nahwärmesystem mit Pelletkessel und der Verwendung einer Abluftanlage bzw. einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung treten bei den untersuchten Varianten im Vergleich zum Referenzfall zusätzliche jährliche Kosten für Hilfsenergie (Stromkosten) auf.

In Tabelle 6.3-2 sind die Berechnungsergebnisse unter den gemachten Annahmen für das Szenario „wie gebaut“ (s. o.) zusammenfassend dargestellt:

- Für die Variante „EnEV Neubau“ ergibt sich ein annuitätischer Gewinn von 278 €/a
- Für die Variante „ESH 60“ ergibt sich ein annuitätischer Gewinn von 1 €/a
- Für die Variante „ESH 40“ ergibt sich ein annuitätischer Verlust von -290 €/a

Die Varianten „EnEV Neubau“ und „ESH 60“ sind also ohne Berücksichtigung von Förderung wirtschaftlich. Bei Berücksichtigung von Förderung z. B. im Rahmen des CO₂-Gebäudesanierungsprogramms der KfW verbessert sich die Wirtschaftlichkeit dieser Varianten zusätzlich.

Das ESH 40 weist ohne Förderung einen annuitätischen Verlust auf. Es werden jedoch nur ca. 7.000 € an (barwertiger) Förderung benötigt, damit auch diese Variante wirtschaftlich realisiert werden kann. Unterstellt man, dass die gesamten energiebedingten Mehrkosten über einen KfW-Kredit zu den aktuellen Konditionen finanziert werden, beträgt allein der gewährte Tilgungszuschuss von 12,5 % beim ESH 40 ca. 8.300 €. Hinzu kommt noch der Vorteil der Zinsverbilligung. Unter Berücksichtigung von Förderung ist damit auch das ESH 40 wirtschaftlich.

Tabelle 6.3-2 Berechnungsergebnisse „wie gebaut“ (ohne Förderung)

Berechnung Maßnahmenpaket			EnEV- Neubau	ESH 60	ESH 40
Bezeichnung Maßnahme					
Energieeinsparung					
jährl. Energiebedarf Referenzfall	kWh/a		44.199	44.199	44.199
jährl. Energiebedarf mit Maßnahme	kWh/a		36.156	27.046	20.639
jährl. Energieeinsparung	kWh/a		8.043	17.154	23.561
jährl. Energiekosten Referenzfall	€/a		4.983	4.983	4.983
jährl. Energiekosten mit Maßnahme	€/a		2.508	1.876	1.432
jährl. Energiekosteneinsparung	€/a		2.474	3.106	3.551
jährl. Strombedarf Referenzfall	kWh/a		603	603	603
jährl. Strombedarf mit Maßnahme	kWh/a		891	1.165	1.611
jährl. Stromeinsparung	kWh/a		-288	-563	-1.008
jährl. Stromkosten Referenzfall	€/a		199	199	199
jährl. Stromkosten mit Maßnahme	€/a		294	384	531
jährl. Stromkosteneinsparung	€/a		-95	-185	-332
Wirtschaftlichkeit					
Investition	€		41.783	54.309	66.343
Annuitätsfaktor (real)			0,043	0,043	0,043
Ersatzinvestitionsfaktor			1,174	1,255	1,234
jährliche Kapitalkosten	€/a		2.101	2.920	3.508
Energiekosteneinsparung annuitätisch	€/a		2.379	2.921	3.219
Zusatzkosten annuitätisch	€/a		0	0	0
Förderung annuitätisch			0	0	0
Berechnungsergebnisse					
Annuitätischer Gewinn (real)	€/a		278	1	-290
Mittlerer zukünftiger Energiepreis (berechnet)					
Mittlerer Energiepreis Erdgas	Ct/kWh		11,3	11,3	11,3
Mittlerer Energiepreis Holzpellets	Ct/kWh		6,9	6,9	6,9
Mittlerer Strompreis	Ct/kWh		33,0	33,0	33,0

In Tabelle 6.3-3 sind die Berechnungsergebnisse unter den getroffenen Annahmen für das Szenario „mit Lüftungsanlage“ (so.) zusammenfassend dargestellt. Die Unterschiede zum Szenario „wie gebaut“ ergeben sich aus den unterschiedlichen energiebedingten Mehrkosten sowie den unterschiedlichen Energiekennwerten (so.):

- Für die Variante „EnEV Neubau“ ergibt sich ein annuitätischer Gewinn von 96 €/a
- Für die Variante „ESH 60“ ergibt sich ein annuitätischer Gewinn von 547 €/a
- Für die Variante „ESH 40“ ergibt sich ein annuitätischer Gewinn von 257 €/a

Die Varianten „EnEV Neubau“, „ESH 60“ und „ESH 40“ sind alle auch ohne Förderung wirtschaftlich. Bei Berücksichtigung von Förderung z. B. im Rahmen des CO₂-Gebäudesanierungsprogramms der KfW verbessert sich die Wirtschaftlichkeit dieser Varianten zusätzlich.

Tabelle 6.3-3 Berechnungsergebnisse „mit Lüftungsanlage“ (ohne Förderung)

Berechnung Maßnahmenpaket		EnEV-Neubau	ESH 60	ESH 40
Bezeichnung Maßnahme				
Energieeinsparung				
jährl. Energiebedarf Referenzfall	kWh/a	42.025	42.025	42.025
jährl. Energiebedarf mit Maßnahme	kWh/a	35.239	27.046	20.639
jährl. Energieeinsparung	kWh/a	6.786	14.979	21.386
jährl. Energiekosten Referenzfall	€/a	4.737	4.737	4.737
jährl. Energiekosten mit Maßnahme	€/a	2.445	1.876	1.432
jährl. Energiekosteneinsparung	€/a	2.293	2.861	3.306
jährl. Strombedarf Referenzfall	kWh/a	865	865	865
jährl. Strombedarf mit Maßnahme	kWh/a	1.153	1.165	1.611
jährl. Stromeinsparung	kWh/a	-288	-301	-746
jährl. Stromkosten Referenzfall	€/a	285	285	285
jährl. Stromkosten mit Maßnahme	€/a	380	384	531
jährl. Stromkosteneinsparung	€/a	-95	-99	-246
Wirtschaftlichkeit				
Investition	€	41.783	45.326	57.360
Annuitätsfaktor (real)		0,043	0,043	0,043
Ersatzinvestitionsfaktor		1,174	1,140	1,140
jährliche Kapitalkosten	€/a	2.101	2.215	2.803
Energiekosteneinsparung annuitätisch	€/a	2.198	2.762	3.060
Zusatzkosten annuitätisch	€/a	0	0	0
Förderung annuitätisch		0	0	0
Berechnungsergebnisse				
Annuitätischer Gewinn (real)	€/a	96	547	257
Mittlerer zukünftiger Energiepreis (berechnet)				
Mittlerer Energiepreis vorher	Ct/kWh	11,3	11,3	11,3
Mittlerer Energiepreis nachher	Ct/kWh	6,9	6,9	6,9
Mittlerer Strompreis	Ct/kWh	33,0	33,0	33,0

6.3.4 Wirtschaftlichkeit aus Sicht des Investors

Energiesparende Maßnahmen im Mietwohnungsbestand sind durch das so genannte „Investor-Nutzer-Dilemma“ gekennzeichnet. Der Nutzen energiesparender Maßnahmen in Form einer Reduktion der Heizkosten kommt primär dem Mieter und nicht dem investierenden Vermieter zugute. Der Vermieter kann in der Regel nur indirekt über zusätzliche Mieteinnahmen von seinen Investitionen profitieren.

Die Rentabilität von Investitionen im vermieteten Bereich wird im Folgenden auf der Basis so genannter „Vollständiger Finanzpläne“ für unterschiedliche Gebäudemodelle untersucht.

Das Konzept Vollständiger Finanzpläne bildet alle mit der Investition verbundenen Zahlungen explizit ab. Auf diese Weise werden eine vergleichsweise exakte und transparente Erfassung sämtlicher Zahlungsreihen und der sich ergebenden finanzwirtschaftlichen Alternativen ermöglicht. Anders als bei den barwertig orientierten Verfahren werden alle Zahlungen statt auf den Investitionszeitpunkt auf den Planungshorizont bezogen. Der Zeitpräferenz des Entscheiders wird dementsprechend über die Dauer der möglichen Wiederanlage bzw. der notwendigen Zwischenfinanzierung explizit Rechnung getragen. Die Zinssätze zu dem diese Wiederanlagen oder Zwischenfinanzierungen erfolgen, können frei und an der tatsächlichen Situation orientiert gewählt werden.

Wesentlicher Bestandteil vollständiger Finanzpläne ist die periodenbezogene Erfassung aller im Zusammenhang mit der Investition stehenden Zahlungsströme und zwar sowohl der

originären als auch der derivativen. Unter den originären Zahlungsströmen sind alle Ein- und Auszahlungen zu verstehen die direkt mit der Investition in Zusammenhang stehen. Als derivative Zahlungsströme werden alle Ein- und Auszahlungen bezeichnet, die sich als Konsequenz aus der Investition ergeben. Hierunter werden vornehmlich die steuerlichen Auswirkungen sowie der gesamte Finanzierungsbereich mit dem gewichtigen Aspekt der Reinvestition zusammengefasst. Gerade im Bereich der derivativen Zahlungsströme sind Parameter zu definieren, mittels derer die periodengerechte Abbildung innerhalb der vollständigen Finanzpläne gewährleistet werden kann. Zu diesen Parametern gehören unter anderem die Zinssätze für Kapitalaufnahme und Kapitalanlage, Abschreibungssätze sowie Annahmen bezüglich der Ertragsentwicklung für den betrachteten Zeitraum. Als Entscheidungskriterien werden der Vermögensendwert und die VOFI-Rendite verwendet. Der Vermögensendwert (liquide Mittel am Ende des Betrachtungszeitraums) eignet sich nur für den Vergleich von Alternativen, da er für die Beurteilung von Einzelentscheidungen keinen Maßstab bereitstellt. Die VOFI-Rentabilität ist als durchschnittliche Rendite des eingesetzten Eigenkapitals zu verstehen. Sie kann mit einer geforderten Mindestrendite verglichen werden und erlaubt so auch eine Bewertung von Einzelentscheidungen.

Berechnungsmodell

Bei den folgenden Berechnungen wird der Vermögensendwert als Entscheidungskriterium verwendet. Es werden folgende Annahmen zu den Eingangsparametern getroffen³⁹:

Gebäudevarianten:

Es handelt sich um ein Mietwohngebäude mit einer gesamten Wohnfläche von 160 m² und 2 Wohneinheiten. Das Gebäude ist altschuldenfrei. Nach der Modernisierung beträgt die Wohnfläche durch den Dachausbau 190 m² bei weiterhin 2 Wohneinheiten. Untersucht werden die Modernisierungsvarianten „Referenz“, „EnEV-Neubau“, „ESH 60“ und „ESH 40“ (siehe oben). Es wird angenommen, dass das Gebäude nach der Modernisierung neu vermietet wird. Neben den Modernisierungsvarianten wird zusätzlich eine Ist-Variante untersucht, bei der eine Weiterführung der Situation ohne Modernisierung unterstellt wird.

Betrachtungszeitraum:

Der Betrachtungszeitraum des Investors wird auf 20 Jahre festgelegt. Es wird angenommen, dass das Gebäude am Ende des Betrachtungszeitraums verkauft wird.

Investitionskosten:

Die Investitionsvollkosten des Investors betragen für die Variante „Referenz“ 1.120 €/m², für die Variante „EnEV-Neubau“ 1.340 €/m², für die Variante „ESH 60“ 1.406 €/m² und für die Variante „ESH 40“ 1.470 €/m². Die zusätzlichen Investitionskosten der energiesparenden Varianten im Vergleich zur Variante „Referenz“ entsprechen den energiebedingten Mehrkosten im Szenario „wie gebaut“ (s. o.). Bei der Ist-Variante fallen keine Investitionskosten an.

³⁹ Dabei handelt es sich um typische Werte, die aber (außer bei den Investitionskosten) nicht unbedingt der Vor-Ort-Situation in Hofheim entsprechen.

Finanzierung:

Das zur Verfügung stehende Eigenkapital beträgt 84.986 €. Der zu den Investitionsvollkosten fehlende Betrag wird bei Variante „Referenz“ über ein Hypothekendarlehen aufgenommen (annuitätischer Kredit mit einem Zinssatz von 5 %). Bei den Varianten „EnEV-Neubau“, „ESH 60“ und „ESH 40“ kommt ergänzend zu einem Hypothekendarlehen ein für die Laufzeit der ersten 10 Jahre zinsverbilligtes Förderdarlehen hinzu (max. Kreditsumme 50.000 € pro Wohnung entsprechend dem „CO₂-Gebäudesanierungsprogramm“ der KfW) mit einem Zinssatz von 3,35 % für die ersten 10 Jahre und einem Zinssatz von 5 % für die Jahre 11 – 20 (bei drei tilgungsfreien Anlaufjahren und einem Tilgungszuschuss von 5 % für die Variante „EnEV-Neubau“ bzw. 12,5 % für die Varianten „ESH 60“ und „ESH 40“).

Der Sollzins für notwendige Zwischenfinanzierungen beträgt 6 %, der Habenzins für mögliche Kapitalanlagen beträgt 4 %.

Bei der Ist-Variante wird der zur Verfügung stehende Eigenkapitalbetrag nicht für Investitionen verwendet, sondern alternativ am Kapitalmarkt zu 4 % angelegt.

Laufende Ausgaben:

Die laufenden Instandhaltungskosten betragen für die Modernisierungsvarianten 8 €/m²a (beginnend in Periode 5 nach Ablauf der Gewährleistungspflicht). Aufgrund des höheren Instandhaltungsbedarfs ohne Modernisierung betragen die laufenden Instandhaltungskosten für die Ist-Variante 16 €/m²a (beginnend in Periode 1).

Laufende Verwaltungskosten werden pauschal für alle Varianten mit 330 €/Wohnung angesetzt.

Die Steigerungsrate der Instandhaltungs- und Verwaltungskosten beträgt einheitlich 2 %/a.

Laufende Einnahmen:

Für die Ist-Variante wird eine Kaltmiete von 3,5 €/m²Monat angesetzt (bestehende Mietverträge). Die zu erzielende Kaltmiete für die Modernisierungsvarianten beträgt zunächst einheitlich 8,0 €/m²Monat nach Neuvermietung. Es wird angenommen, dass die Kaltmieten mit 1,5 %/a steigen.

Alternativ wird im Rahmen einer Risikobetrachtung angenommen, dass die zukünftig zu erzielenden Mieterträge der Modernisierungsvarianten von den Energiekosten abhängen. Für die Variante „Referenz“ beträgt die Kaltmiete weiterhin 8,0 €/m²Monat. Für die anderen Varianten wird ein Zuschlag in Höhe der Energiekostensparnis im Jahr der Modernisierung im Vergleich zur Variante „Referenz“ angenommen. Die Kaltmieten betragen damit für Variante „EnEV-Neubau“ 8,60 €/m²Monat, für die Variante „ESH 60“ 8,74 €/m²Monat und für die Variante „ESH 40“ 8,81 €/m²Monat. Für die Mieter sind diese höheren Mieten im Vergleich zur „Variante „Referenz“ damit warmmietenneutral im Jahr der Maßnahme.

Leerstand

Der erwartete Leerstand beträgt zunächst für die Ist-Variante und alle Modernisierungsvarianten einheitlich 2 % (Vollvermietung) über den Betrachtungszeitraum. Es wird anschließend im Rahmen der Risikobetrachtung angenommen, dass ohne Modernisierung ab Periode 10 Leerstände auftreten (20 % Leerstand ab Periode 11 für die Ist-Variante).

Durch die Modernisierung können diese zukünftigen Leerstände nachhaltig reduziert werden. Das Ausmaß der Leerstandsreduzierung an Periode 11 setzt sich zusammen aus einer allgemeinen Reduktion aufgrund der nicht-energetischen Modernisierung (10 % Leerstandsreduktion) und einer Leerstandsreduktion aufgrund der Energieeinsparung der einzelnen Varianten im Vergleich zur Ist-Situation (3 % für „Referenz“, 5 % für „ESH 60“ und 8 % für „ESH 40“). Für das ESH 40 mit sehr geringen Energiekosten wird damit auch ab Periode 11 Vollvermietung (Leerstand 2 %) angenommen.

Restwert

Am Ende des Betrachtungszeitraums wird der Restwert der Gebäude (erwarteter Verkaufserlös nach 20 Jahren) über den Ansatz eines Vervielfältigers und der Jahresrohmiere abgeschätzt⁴⁰. Von der erwarteten Jahresrohmiere in Periode 20 werden die erwarteten Mietausfälle aufgrund von Leerstand in Periode 20 abgezogen. Wird die Leerstandsquote an das energetische Niveau angepasst (s. o.) bestimmt die energetische Qualität des Gebäudes im Rahmen der Risikobetrachtung somit auch den Gebäuderestwert.

Steuern:

Es wird angenommen, dass es sich um ein steuerbefreites Wohnungsunternehmen handelt. Steuerliche Gesichtspunkte sind daher hier nicht relevant.

Berechnungsergebnisse

Ohne Risikobetrachtung / ohne Einfluss auf Miethöhe:

Ohne die Berücksichtigung des möglichen Einflusses der Energiekosten auf die zukünftigen Mieterträge, den zukünftigen Leerstand und den Gebäuderestwert erzielt die Variante „Referenz“ erwartungsgemäß (geringste Investitionskosten der Modernisierungsvarianten bei sonst gleichen laufenden Auszahlungen und Einzahlungen) den höchsten Vermögensendwert und wäre unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten die optimale Variante. Alle energiesparenden Varianten weisen geringere Vermögensendwerte als die Variante „Referenz“ auf, erzielen jedoch immer noch einen höheren Vermögensendwert als die Ist-Variante (Bewirtschaftung im Ist-Zustand einschließlich einer Anlage des Eigenkapitals).

Diese Betrachtung hat hier nur eine theoretische Bedeutung und stellt sozusagen einen „Worst-Case“ für die Energiesparmaßnahmen dar, da für den Vermieter keinerlei Vorteil (über höhere Mieten) aufgrund der Energiesparmaßnahmen angesetzt wurde.

⁴⁰ Diese Vorgehensweise entspricht der bekannten Maklerformel zur Ermittlung von Immobilienpreisen, die von dem x-fachen der Jahresrohmiere ausgeht. Als Vervielfältiger wurde für alle Varianten der Faktor 13 gewählt.

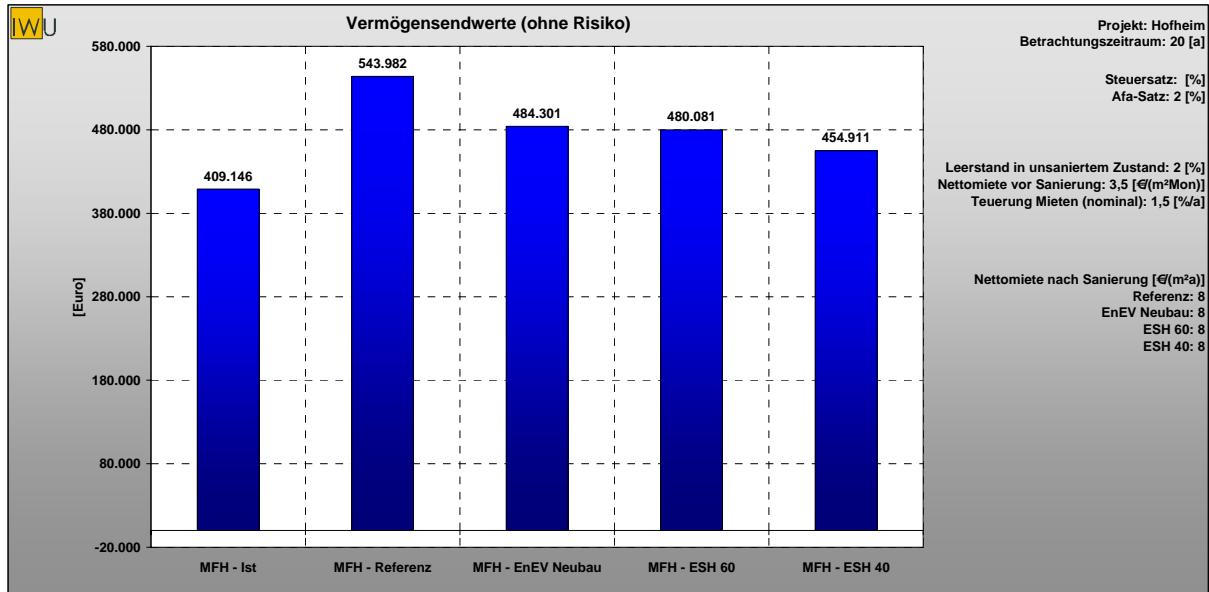


Abbildung 6.3-2: Vermögensendwerte ohne Risikobetrachtung

Mit Risikobetrachtung:

Mit Berücksichtigung des möglichen Einflusses der Energiekosten auf die zukünftigen Mieterträge, den zukünftigen Leerstand und den Gebäuderestwert erzielt die Variante „ESH 60“ den höchsten Vermögensendwert und wäre unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten die optimale Variante. Auch die Varianten „EnEV-Neubau“ und „ESH 40“ weisen höhere Vermögensendwerte als die Variante „Referenz“ auf, die Variante „ESH 40“ wäre dabei noch der Variante „EnEV Neubau“ vorzuziehen. Die Ist-Variante erzielt weiterhin den geringsten Kapitalwert.

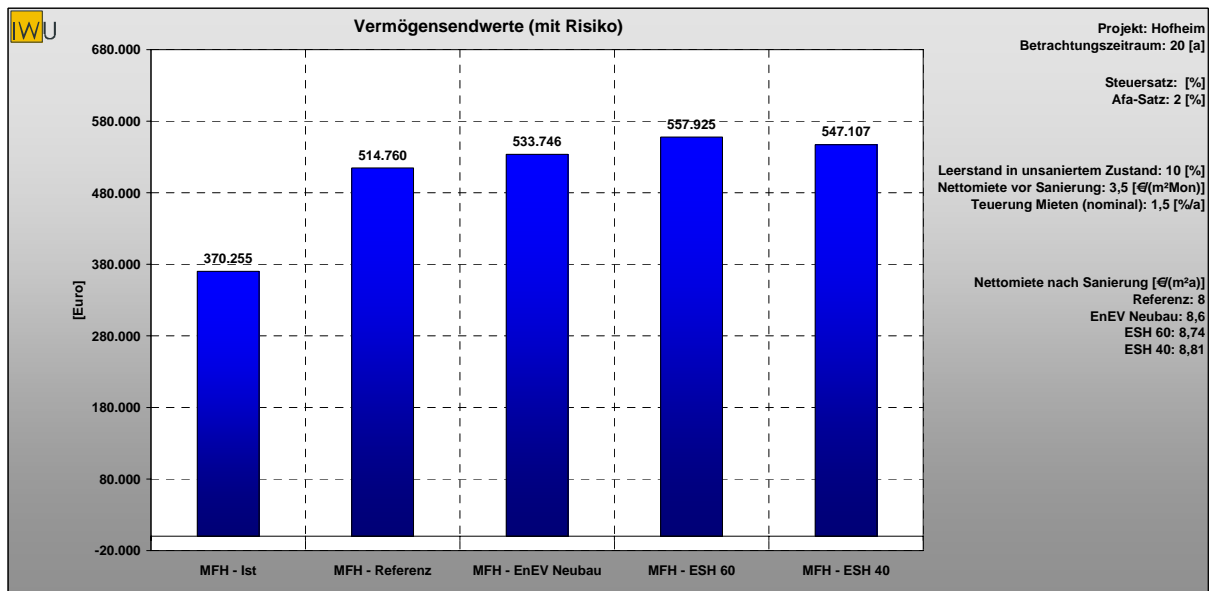


Abbildung 6.3-3: Vermögensendwerte mit Risikobetrachtung

Nun ist es möglich das Ausmaß der warmmietenneutralen Zuschläge zu berechnen, damit bei sonst gleichen Annahmen die Vermögensendwerte der energiesparenden Varianten dem Vermögensendwert der Variante „Referenz“ gerade entsprechen. Die Kaltmieten betragen in

diesem Fall für die Variante „EnEV-Neubau“ 8,42 €/m²Monat, für die Variante „ESH 60“ 8,36 €/m²Monat und für die Variante „ESH 40“ 8,52 €/m²Monat.

Ein Energiesparhaus 40 könnte bei Annahme einer um 5 % höheren Leerstandsreduktion als die Variante „Referenz“ und mit nur 52 Cent mehr Kaltmiete im Vergleich zur Variante „Referenz“ mit dem gleichen ökonomischen Ergebnis modernisiert werden.

6.4 Untersuchung weiterer Maßnahmenpakete

Die hohe Primärenergieeinsparung und die Einhaltung der entsprechenden Anforderungen an die drei energetischen Ziel-Standards wurden in dem vorliegenden Projekt vor allem durch die Verwendung von Holzpellets erreicht. Wie bereits dargelegt, lässt sich diese Lösung angesichts der begrenzten Biomasse-Potenziale aber nicht beliebig verallgemeinern. Es stellt sich daher die Frage, mit welchen Maßnahmen und zu welchen Kosten die energetischen Zielwerte auf andere Weise hätten erreicht werden können.

Diese Thematik wurde im Rahmen einer Diplomarbeit untersucht, die an der Hochschule Darmstadt⁴¹ durchgeführt und vom Institut Wohnen und Umwelt betreut wurde [Xu 2007]. Das vorliegende Kapitel gibt die Ergebnisse der Arbeit wieder.

Am Beispiel eines der baugleichen Hofheimer Gebäude wurden folgende Maßnahmenkombinationen untersucht:

- Unterschiedliche Maßnahmenpakete bei der Wärmedämmung⁴²
- Fenster: 2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung bzw. Passivhausfenster (3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung mit gedämmtem Rahmen)
- Lüftung: freie Lüftung, Abluftanlage, kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung (LWRG)
- Haupt-Wärmeerzeuger: Erdgas-Brennwertkessel bzw. elektrische Erdreich-Wärmepumpe (jeweils Einzelhausheizung im Gebäude, keine Nahwärme)
- optional: Solaranlage zur Warmwasserbereitung mit/ohne Heizungsunterstützung

Die Energiebilanzberechnungen wurden mit der IWU-Software EnEV-XL durchgeführt. Da die in Abschnitt 6.2 genannten Kostenauswertungen während der Bearbeitung der Diplomarbeit noch nicht vorlagen, wurden Kostenansätze auf Basis von Literaturrecherchen abgeleitet.

⁴¹ Fachbereich Wirtschaft, Studiengang Energiewirtschaft. Referent: Prof. Dr. Martin Meyer-Renschhausen

⁴² Abstufungen von der „untersten“ Variante mit Dämmstoffdicken von 8 / 12 / 4 cm für Außenwand/Dach/Kellerdecke bis hin zu Dämmstoffdicken von 30 / 32 / 10 cm (Wärmeleitfähigkeit 0,04 W/mK)

⁴⁴ Der Heizwärmebedarf ist auf die Gebäudenutzfläche A_N bezogen. Die Wärmegewinne der Lüftungswärmerückgewinnung wurden dabei mit berücksichtigt.

Abbildung 6.4-1 zeigt die Investitionskosten in Abhängigkeit vom erreichten Heizwärmebedarf⁴⁴ für die verschiedenen Wärmeschutz-Varianten.

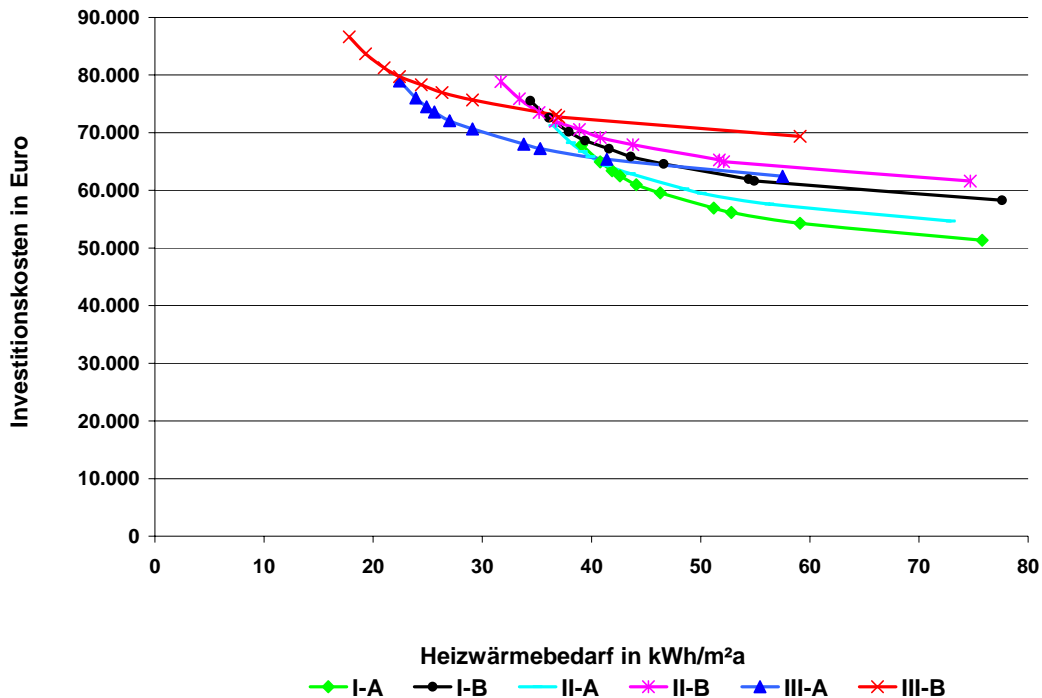


Abbildung 6.4-1 Investitionskosten für ein Gebäude in Abhängigkeit vom Heizwärmebedarf [Xu 2007]

*I: freie Lüftung, II: Abluftanlage, III: Kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung
A: 2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung, B: Passivhausfenster*

Zur weiteren Untersuchung wurde eine Kostenoptimumkurve gebildet, d. h. es wurden nur noch diejenigen Maßnahmenpakete berücksichtigt, die das Erreichen des jeweiligen Heizwärmebedarfs zu minimalen Kosten erlauben: Dieses Kostenoptimum folgt im Wesentlichen dem Verlauf der Kurven I A (freie Lüftung, 2-Scheiben-Wärmeschutzvergl.), III A (Lüftungs-Wärmerückgewinnung und Wärmeschutzvergl.) und – im Bereich des minimalen Heizwärmebedarfs bei ca. 20 kWh/m²a der Kurve III B (LWRG und Passivhausfenster).

In Abbildung 6.4-2 sind die angenommenen Investitionskosten für die Wärmeversorgung dargestellt. Der beim Brennwertkessel und der Wärmepumpe angesetzte Warmwasserspeicher entfällt in dem Fall, dass gleichzeitig eine Solaranlage eingesetzt wird.

Diese Angaben können mit den Kosten des in Hofheim eingesetzten Systems (s. Tabelle 6.2-5 in Kapitel 6.2.2) verglichen werden. Dort betragen die Investitionskosten der Nahwärmeversorgung für alle drei Gebäude zusammen ca. 46.000 €, für ein Gebäude also etwas mehr als 15.000 €.

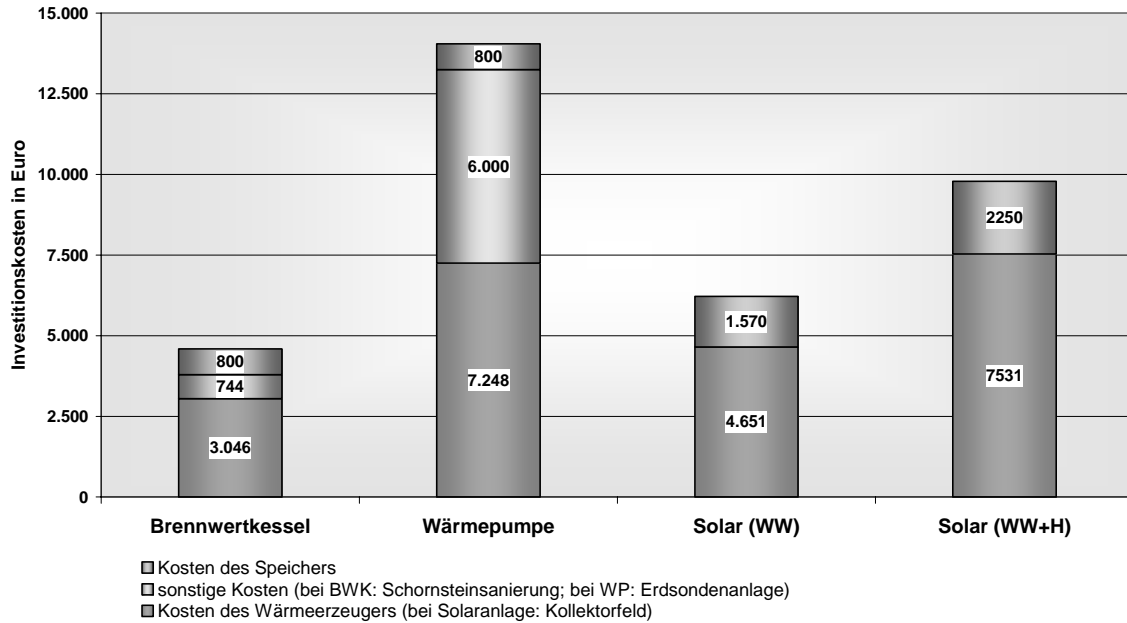


Abbildung 6.4-2 Investitionskosten der Wärmeversorgungsanlagen (für ein Gebäude) [Xu 2007]

Die Ergebnisse für die gemeinsame Betrachtung von Wärmeschutz (Kostenoptimum) und Wärmeversorgung sind in Abbildung 6.4-3 zu sehen. Es werden die Gesamt-Investitionskosten in Abhängigkeit von dem erreichten Primärenergiebedarf dargestellt. Die Maßnahmenpakete unterscheiden sich sowohl im Hinblick auf den Wärmeschutzstandard als auch die durchgeführten Wärmeversorgungsmaßnahmen. Die Aufschlüsselung erfolgte hier auf Basis des Wärmeversorgungssystems.

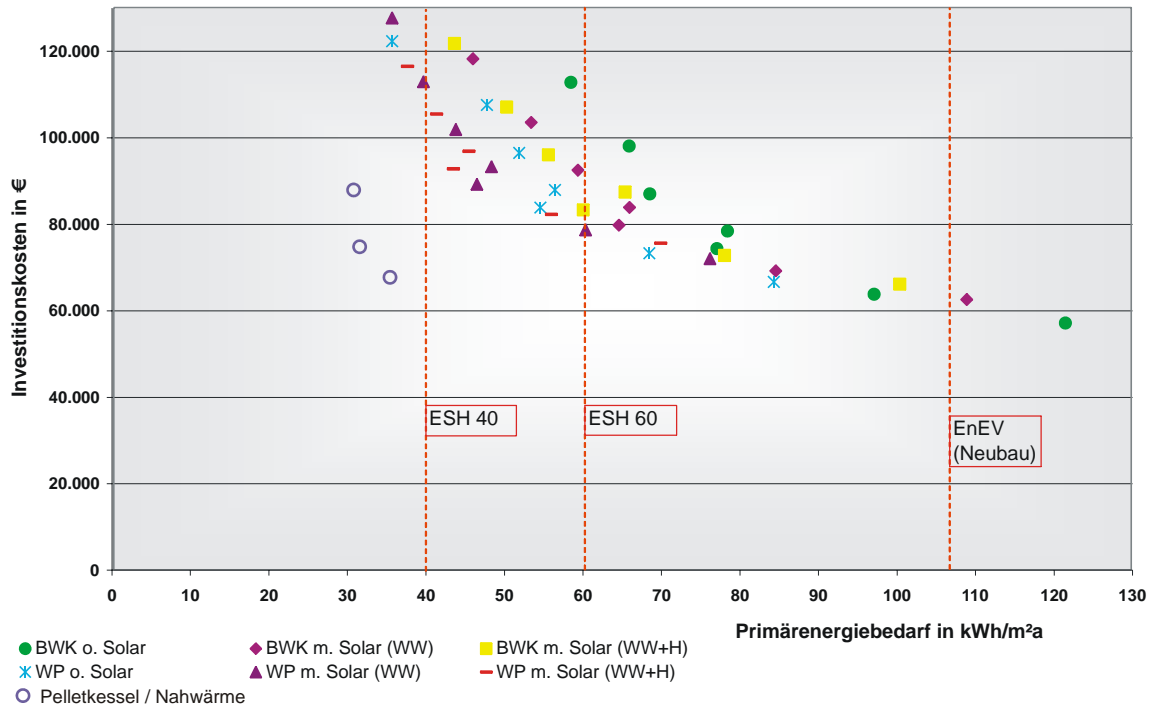


Abbildung 6.4-3 Investitionskosten für Maßnahmenpakete aus Wärmeschutz und Wärmeversorgung an einem Gebäude in Abhängigkeit vom Primärenergiebedarf (bezogen auf A_N), nach [Xu 2007]

Die Punkte sind hier nach dem jeweiligen Wärmeversorgungssystem aufgeschlüsselt.

Die Punkte Pelletkessel/Nahwärme wurden in Anlehnung an Kosten des Nahwärmesystems in Hofheim nachträglich eingefügt.

Auf Basis der oben genannten Investitionskosten für das Nahwärmesystem mit Holzpelletkessel in Hofheim wurde dieses System nachträglich in die Untersuchung mit eingeführt und – auf Basis der drei in Hofheim realisierten Ergebnisse für den Heizwärmebedarf – in die Abbildung eingetragen. Um eine Vergleichbarkeit mit den anderen Systemen zu gewährleisten, wurden dabei die Kosten des Wärmeschutzes weiterhin entsprechend den Ansätzen von [Xu 2007] gewählt. Die Untersuchung spiegelt hier also nicht direkt die Vor-Ort-Situation in Hofheim wider, sondern sie dient vielmehr der Verallgemeinerung der Ergebnisse im Bezug auf einen breiteren Vergleich verschiedener Modernisierungsvarianten.

Die Abbildung zeigt, dass durch die Holzpellet-Heizung – fast unabhängig vom Wärmeschutz-Niveau und den damit zusammenhängenden Kosten – sehr niedrige Primärenergiekennwerte von ca. 30 – 35 kWh/m²a erreicht werden, und zwar zu deutlich günstigeren Investitionskosten als mit den anderen, auf den konventionellen Energieträgern Erdgas bzw. Strom basierenden Systemen. Die in Hofheim eingesetzte Lösung schneidet hier also – unter der Voraussetzung, dass sehr niedrige Primärenergiekennwerte unter 40 kWh/m²a erreicht werden sollen – im Vergleich der untersuchten Systeme deutlich am besten ab. Bereits oben und in Kapitel 6.1.1 wurde aber dargelegt, dass dieses Ergebnis richtig interpretiert werden muss: Angesichts der begrenzten Biomasse-Potenziale handelt es sich eben nicht um eine beliebig verallgemeinerbare Lösung. Eine Minimierung des Energiebedarfs durch sehr guten Wärmeschutz und der Einsatz anderer, unter Umständen

auch teurerer Systeme zur effizienten Energienutzung und zum Solarenergieeinsatz sind weiterhin eine Notwendigkeit.

Auf Grundlage der Investitionskostenanalyse wurde in [Xu 2007] auch eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt. Die Investitionskosten wurden in Annuitäten umgerechnet, die Energie- und Wartungskosten der eingesetzten Systeme wurden berücksichtigt⁴⁵. Auf dieser Basis wurde der ökonomische Gewinn (negativer Wert: Verlust) gegenüber einem Referenzfall⁴⁶ ermittelt. Abbildung 6.4-4 zeigt die Ergebnisse.

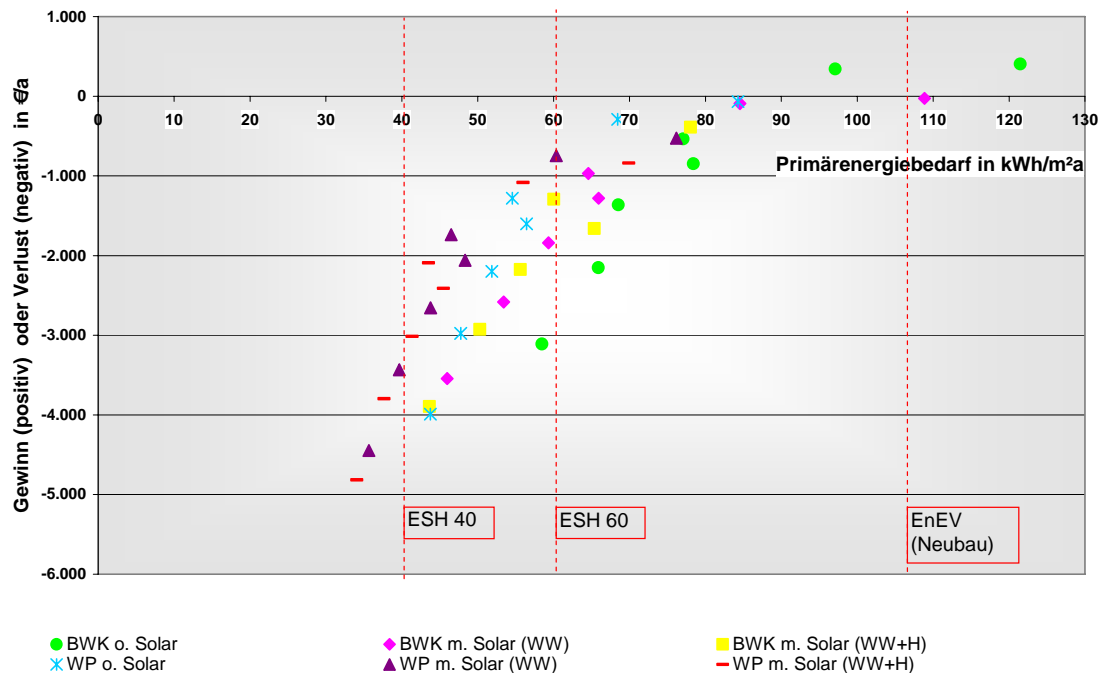


Abbildung 6.4-4 Annuisierter Gewinn (negativ: Verlust) gegenüber einem Referenzfall (Instandhaltung) in Abhängigkeit vom erreichten Primärenergiebedarf, nach [Xu 2007]⁴⁷

In der Abbildung ist zu erkennen, dass sich bei den betrachteten Gebäuden und Randbedingungen durch Einsatz eines Brennwertkessels wirtschaftliche Lösungen (Punkte oberhalb der x-Achse) für das Modernisierungsvorhaben erzielen lassen. Dabei werden je nach Wärmeschutz Primärenergiekennwerte bis etwa 80 kWh/m²a erreicht. Bei niedrigeren Werten sind aus wirtschaftlicher Sicht eine Kombination des Kessels mit einer Solaranlage

⁴⁵ Kalkulationszinssatz 5 %, Energiepreise 0,055 €/kWh (Erdgas), 0,125 €/kWh (Strom für Wärmepumpe), 0,17 €/kWh (Haushaltsstrom), jährl. Wartungskosten z. B. 1 % (Kessel) bzw. 3 % (Wärmepumpe) der Anschaffungskosten, wirtschaftliche Nutzungsdauer: 30 Jahre (Dämmung), 20 Jahre (Fenster) bzw. 15 Jahre (sonst. Systeme).

⁴⁶ Reine Instandhaltung ohne weitergehende energetische Modernisierung: Putzerneuerung ohne Wärmeschutz (hier nicht nur Ausbesserung sondern komplette Erneuerung des alten Putzes), neue Dacheindeckung ohne verbesserten Wärmeschutz, Einsatz von Fenstern mit 2-Scheiben Wärmeschutzverglasung, neuer Gas-Niedertemperaturkessel. Dieser Referenzansatz unterscheidet sich also von dem in Abschnitt 6.3 definierten, da andere Kostensätze (nur Literaturdaten) verwendet wurden sowie eine komplette Putzerneuerung und kein neuer Dachstuhl sondern eine Erneuerung des bestehenden Dachs angenommen wurde.

⁴⁷ Aufgrund abweichender Ansätze (z. B. anderer Referenzfall, kein Energiepreisanstieg) ist diese Kurve nicht direkt mit den Ergebnissen aus Abschnitt 6.3.3 vergleichbar. Daher wurde hier darauf verzichtet, die dortigen Ergebnisse nachträglich zu übertragen. Überschlägige Abschätzungen zeigen aber, dass sich der in

bzw. der Übergang zur Erdreich-Wärmepumpe sinnvoll. Die Kostenpunkte liegen nun unterhalb der x-Achse, gegenüber dem Referenzfall ergibt sich also ein Kostennachteil. Bis zu einem Primärenergiebedarf von 70 kWh/m²a ist dieser aber gering. Der Kostenaufwand für das Erreichen noch niedrigerer Primärenergiekennwerte steigt dann immer weiter an. Werte unter 40 kWh/m²a können nur mit erheblichem Kostenaufwand durch Kombinationen aus Erdreich-Wärmepumpe, Solaranlage mit Heizungsunterstützung sowie (in der Abbildung nicht direkt ablesbar) gleichzeitig sehr guten Wärmeschutz und Lüftung mit Wärmerückgewinnung erreicht werden.

7 Großelement-Dämmtechnik mit Vakuumdämmung

Ein wesentlicher Teil des Forschungsprojekts bestand in der Entwicklung und Anwendung einer neuen Wärmeschutztechnologie für die Modernisierung von Altbauten. Diese „Großelement-Dämmtechnik (GEDT) mit Vakuumdämmung“ wird in einem separaten Bericht ausführlich beschrieben, an dem alle am GEDT-Teilvorhaben beteiligten Projektpartner mitgewirkt haben [Mayr et al. 2007]. Im vorliegenden Kapitel werden Auszüge aus diesem Bericht wiedergegeben und die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst. Ergänzende neuere Messergebnisse sind in Kapitel 4.2.8 zu finden.

7.1 Aufgabenstellung

Die Straßenfassaden der drei Gebäude boten durch die Grenzbebauung zum Gehsteig wenig Raum für eine Wärmedämmung. Durch den Einsatz von Vakuumdämmelementen verbunden mit der Großelement-Dämmtechnik sollten die angestrebten energetischen Kennwerte bei möglichst kleiner Dämmstoffdicke erreicht werden. Gleichzeitig war es das Ziel, durch Vorfertigung kurze Montagezeiten mit wenigen Nacharbeiten auf der Baustelle zu realisieren. Bei der Entwicklung und Planung der GEDT-Elemente konnte teilweise auf Erfahrungen aus einem abgeschlossenen Forschungsprojekt zurückgegriffen werden, allerdings mit herkömmlichen Dämmstoffen bei statisch ansetzbarem Sandwich-Tragverhalten der GEDT-Elemente insgesamt. Themen, die sich für das Modernisierungsprojekt in Hofheim – u. a. aufgrund des Einsatzes von Vakuumdämmplatten (Vakuum-Isolations-Paneelen, kurz: VIP) - neu stellten, waren:

- Integration der Vakuumdämmplatten in die GEDT-Elemente.
- Integration von Fenstern in die GEDT-Elemente bereits in der Vorfertigung. Um dies zu erreichen, mussten Fragen der Statik, Bauphysik und Montage sowie zur späteren Wartung beantwortet werden.
- Erarbeitung verallgemeinerbarer Lösungen für GEDT-Elemente und für Anschlussdetails an die konventionelle Wärmedämmung der übrigen Außenwände, an Sockel und Traufe bzw. Übergang zur Dachdämmung.
- Statische Neukonzipierung des GEDT-Tragkonzepts – unter Berücksichtigung der im Vergleich zu herkömmlichen Dämmstoffen (z. B. Mineralwolle, EPS) ungünstigeren mechanischen Eigenschaften der VIPs - mit daraus folglich notwendiger Neuentwicklung von metallenen Befestigungselementen zur Applikation der Fassadenelemente selbst sowie zur Verbindung der erforderlichen Einzelschichten der Fassadenelemente, da eine hinreichend dauerhafte statische Tragfähigkeit der VIP bislang nicht ansetzbar ist.

Die Vakuumdämmung der GEDTs unterscheidet sich wesentlich von herkömmlichen Dämmstoffen. Sie ist nicht nur ein Hochleistungsdämmstoff mit einem gegenüber herkömmlichen Dämmstoffen vielfach besseren Dämmwert, sie besitzt auch Eigengesetzmäßigkeiten, die die Verarbeitung deutlich erschweren. Hieraus erklären sich grundsätzliche Vorgehensweisen und Ausführungen bei diesem Forschungsprojekt:

- Die VIP-Hüllfläche, eine aluminiumbedampfte Kunststoffolie, ist extrem empfindlich. Die Vorfertigung der Elemente im Werk verringert die Beschädigungsgefahr gegenüber der Baustelle erheblich, da die Verarbeitung kontrolliert erfolgt und baustellentypische Störfaktoren ausgeschlossen werden können.
- Wärmebrücken machen sich durch die nur geringe notwendige Gesamtstärke der Vakuumdämmung, in Hofheim nur 40 mm, deutlicher als bei herkömmlichen Dämmstoffen bemerkbar. Konstruktiv notwendige Fugen und Verbindungen mussten so weit wie möglich reduziert werden.

7.2 Aufbau der Elemente

Der Querschnittsaufbau der Großelemente ist in Abbildung 7.2-1 dargestellt. Bei der Ausgleichsdämmung handelt es sich um leicht zusammendrückbare Mineralwolle, die sich den leichten Oberflächen-Unebenheiten der Althauswand anpasst und damit die Entstehung unerwünschter Luftspalte zwischen Althauswand und GEDT-Element verhindert.

Die VIP-Schicht liegt zwischen der inneren Beplankung (27 mm KERTO-Platte als hintere Tragplatte) und der äußeren Beplankung (18 mm BFU-Platte).

Sowohl zwischen der inneren Beplankung (KERTO) und dem VIP als auch zwischen der äußeren Beplankung (BFU) und dem VIP befindet sich jeweils eine Schutzschicht aus je 2 mm Sperrholz, um eine Verletzung der empfindlichen VIP-Dämmplatten zu verhindern.

Die hinterlüftete Bekleidung (Wetterschutzschale aus Harzkompositplatten) wurde auf vertikalen Alu-Hohlprofilen (ihrerseits auf der äußeren Beplankung appliziert) mittels zugelassenem Klebsystem (SIKA) befestigt.

Durch die Anordnung dieser hinterlüfteten Wetterschutzschale mit ihrer eigenen Geometrie erfolgte eine interessante optische Entkopplung der Fassade von der Geometrie der Großelemente selbst.

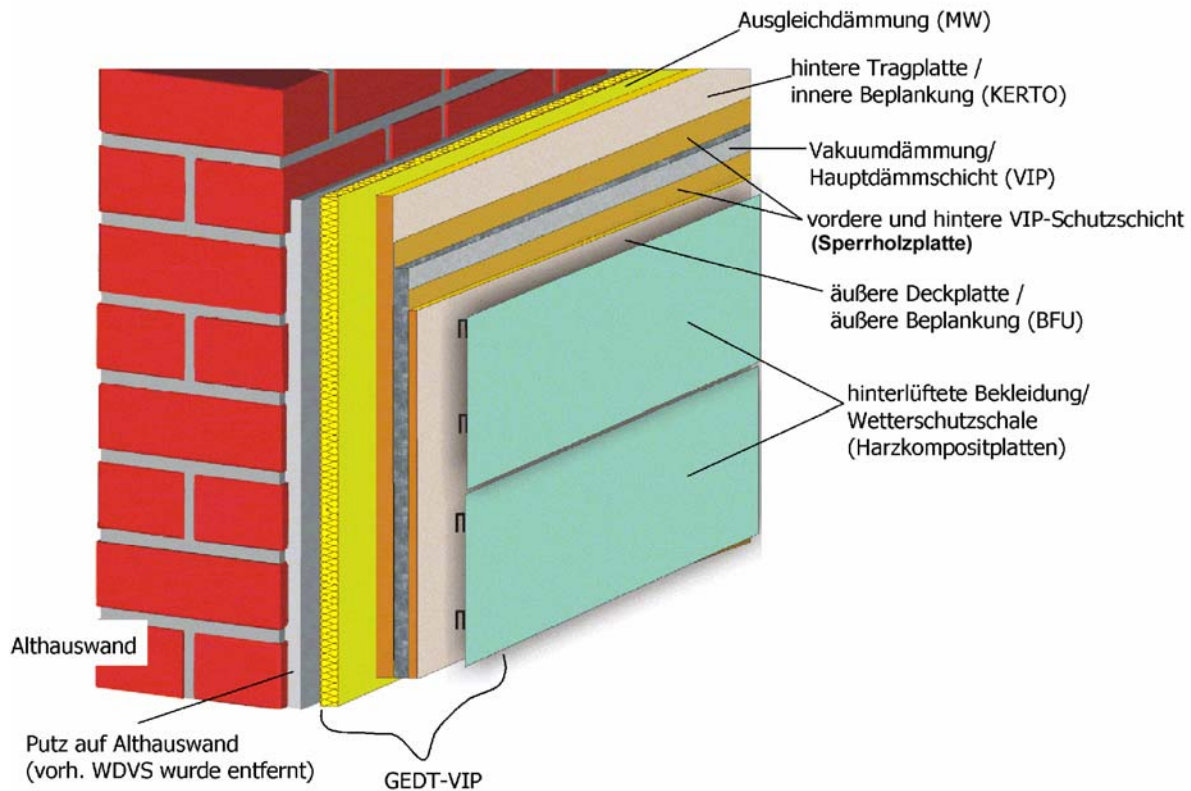


Abbildung 7.2-1 Querschnittsaufbau der Großelemente mit Vakuum-Dämmschicht (VIP)

Die Einteilung der Großelemente an den straßenseitigen Fassaden der drei baugleichen Gebäude in Hofheim ist detailliert in Abbildung 7.2-2, ausschließlich an einer linken Haushälfte dargestellt, da die Gebäude in ihrer Längsrichtung symmetrisch sind. Des Weiteren zeigt Abbildung 7.2-2 die Abmessungen und Lage der Großelemente GEDT 1 und GEDT 2 sowie der Füllelemente (FÜLL-GEDT A und FÜLL-GEDT B) und die Anordnung der Befestigungspunkte zwischen der inneren Tragschicht (aus 27 mm KERTO-Platte) und der Bestandswand. Die Abmessungen der Großelemente betragen:

Höhe: 2,5 m - 3,20 m

Breite: 5,05 m - 5,20 m

Wie bereits zuvor angemerkt, sind die Abmessungen der GEDT selbst nach Applikation der Wetterschale dem Betrachter nicht mehr sichtbar.

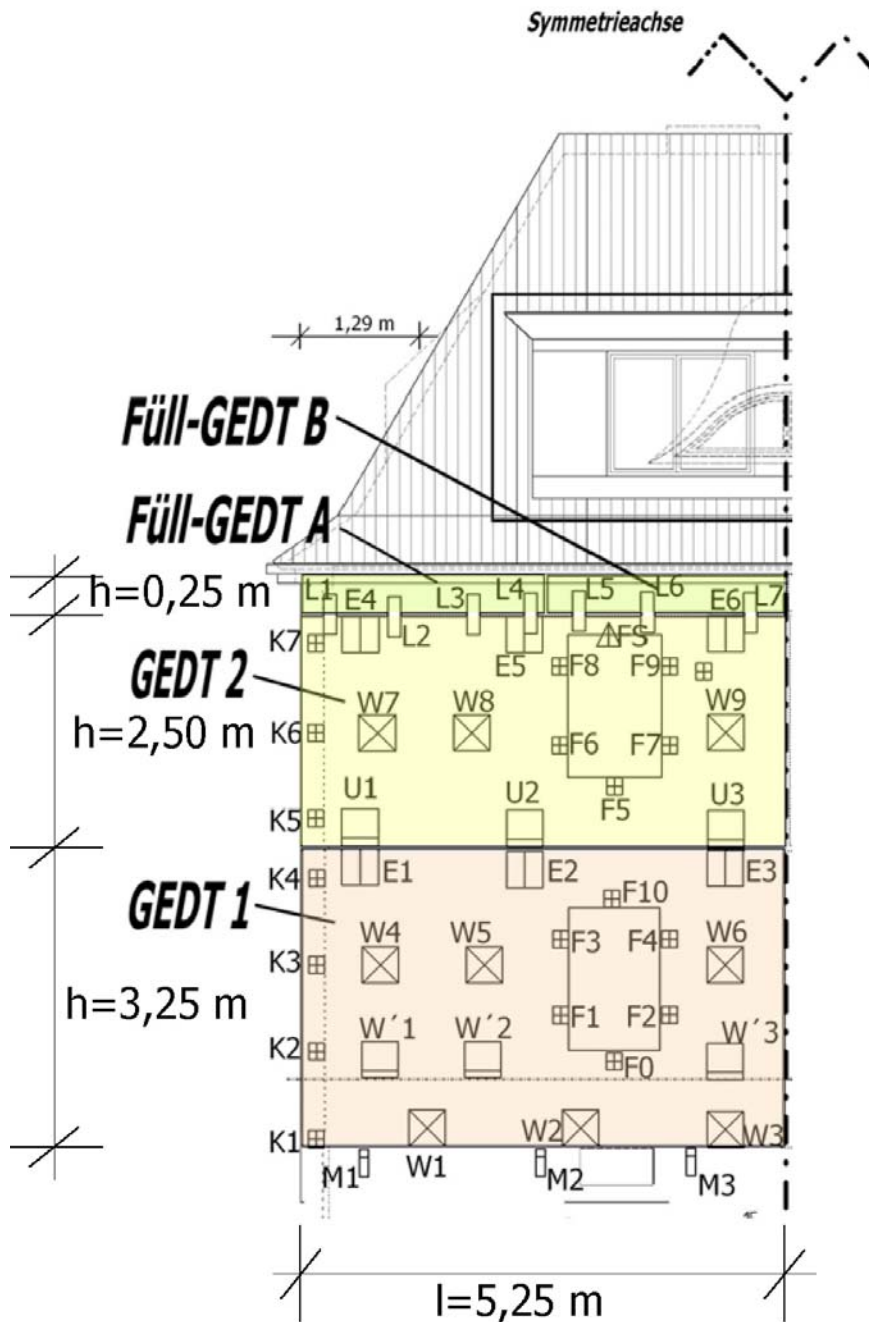


Abbildung 7.2-2 Belegung einer Gebäudehälfte mit zwei Großdämmelementen und zwei Füllelementen (Abbildung: IGRT)

Da bei den GEDT mit Vakuumdämmung im Gegensatz zu den GEDT mit herkömmlicher Dämmung die Hauptdämmschicht keine tragende Funktion (außer Druck senkrecht zur Fassadenebene) zugewiesen werden kann, müssen die Lasten der verschiedenen Befestigungsebenen (innerhalb des Elements, aber auch Element-Wand) weitgehend durch metallische Verbinder weitergeleitet werden (Ausnahme: Verklebung der Fassadenplatten an der auf der BFU-Platte befestigten Aluminium-Unterkonstruktion). Eine Vielzahl von Befestigungspunkten musste daher neu entwickelt und hergestellt werden (die teilweise in Abbildung 7.2-2 mit eingezeichnet wurden). Exemplarisch ist in Abbildung 7.2-3 eine vereinfachte Prinzipdarstellung der Befestigungsebene Wand – Großelement mit drei Arten von Befestigungspunkten angegeben.

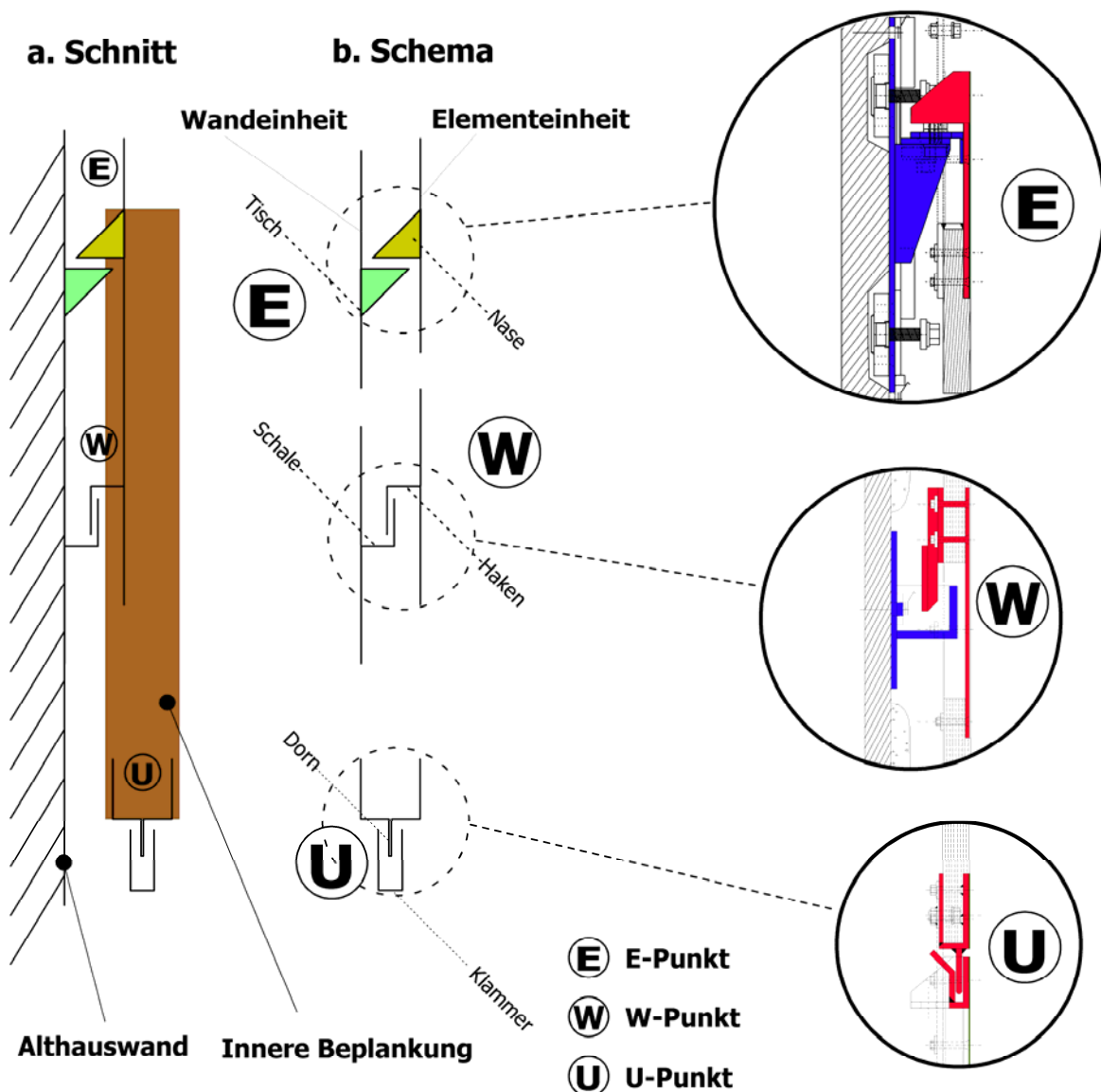
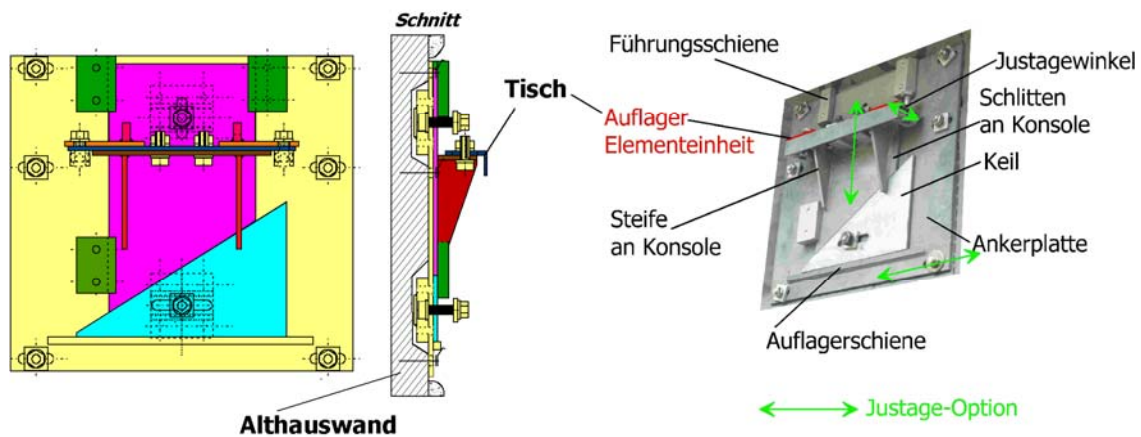


Abbildung 7.2-3 Prinzipdarstellung der konstruktiven Ausführung der Befestigungspunkte der Befestigungsebene 1 (E, W und U) an dem Vertikalschnitt eines Großelementes mit Vakuumdämmung (Abbildung: IGRT)

Die E-Befestiger dienen der Abtragung von Eigengewicht, Wind und Erdbebenlasten. Sie sind in allen drei Raumrichtungen justierbar und stellen den kompliziertesten Befestigungspunkt dar (s. Abbildung 7.2-4).

Die U- und W-Punkte wurden für Wind- und Erdbebenlasten konzipiert. Weitere Befestigungspunkte waren am Rand der Elemente und natürlich auch in den weiteren hier nicht dargestellten Befestigungsebenen innerhalb des Großelementes erforderlich.

Wandeinheit



Elementeinheit

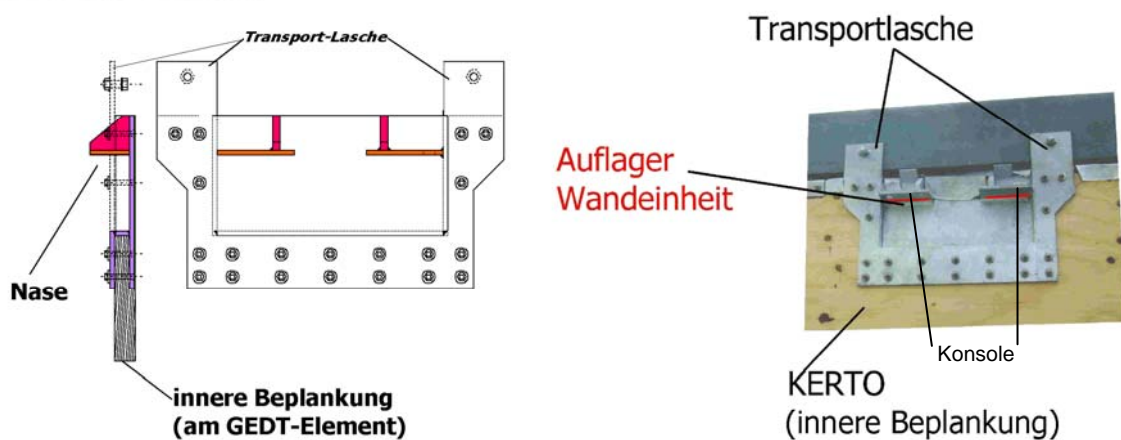


Abbildung 7.2-4 Wand- und Elementeinheit eines E-Befestigers mit Bezeichnung wichtiger Einzelbestandteile unter Aufzeigung der Justage-Optionen in Plan und Fotografie (Abbildung: IGRT)

7.3 Herstellung

Im Folgenden wird der Herstellungsprozess in seinen wichtigsten Schritten dokumentiert. Die einzelnen Abläufe bei Herstellung und Montage der Elemente wurden auch in einem Film festgehalten, der unter www.iwu.de zum Download zur Verfügung steht.

Die Firma Variotec produziert unter anderem auch Vakuum-Isolationspaneele (unter der Bezeichnung Qasa) und konnte daher die im Projekt eingesetzte Vakuumdämmung selbst herstellen (Abbildung 7.3-1).



Abbildung 7.3-1 Zwei kleine Vakuum-Isolationspaneele (übereinander liegend), darauf das Kernmaterial aus pyrogener Kieselsäure

Zum Schutz der Elemente während des Produktionsprozesses wurden auf beiden Seiten dünne Schutzschichten aufgebracht. Der Rand der Paneele wurde durch ein vorkomprimiertes Dichtband („Kompriband“) geschützt (Abbildung 7.3-2).



Abbildung 7.3-2 Aufkleben des Kompribandes vor dem Verkleben der „eingehausten“ VIPs



Abbildung 7.3-3: Aussparungen an den VIP-Rändern für die spätere Durchführung von Befestigungsankern

Bereits bei der Produktion der Paneele wurden Aussparungen an den Stellen, an denen Metallanker die Vakuumdämmung durchstoßen, eingearbeitet (**Abbildung 7.3-3**).

Die folgenden Abbildungen zeigen Ausfräsungen in der BFU- und Kerto-Platte zur Aufnahme von Metallteilen (Abbildung 7.3-4).

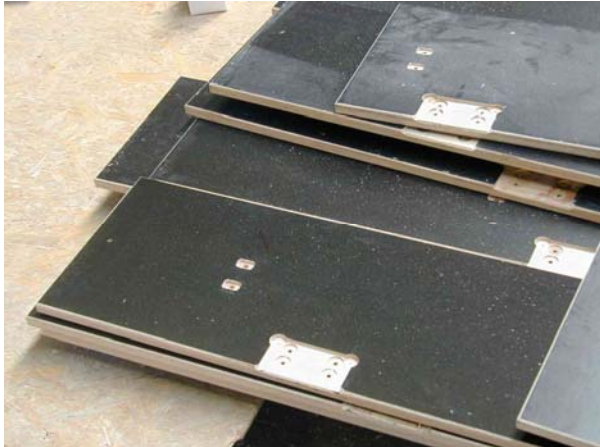


Abbildung 7.3-4 Ausfräsungen für Metallbeschläge an BFU- (links) und Kerto-Platten (rechts)

Auf dem folgenden Foto wird eine Kerto-Platte zum Einbau der Metallteile platziert. Man erkennt die Ausfräsungen für verschiedene Metallpunkte und für das Fenster.



Abbildung 7.3-5 Transport der Kerto-Platte



Abbildung 7.3-6: Einbau der Metallbeschläge in die Kerto-Platte

Der Einbau der Stahlteile erforderte eine sorgfältige Koordination mit der Metallbaufirma. In Abstimmung mit dem Fertigungsprozess wurden zuerst die für die Produktion der Elemente, anschließend die für den Einbau an der Fassade in Hofheim benötigten Teile hergestellt.

Ein relativ komplexes Element ist der E-Punkt (Abbildung 7.3-7), der zur Aufhängung dient und eine Justage in allen drei Raumrichtungen ermöglicht. Ein Teilstück wurde in Hofheim an der Fassade montiert, während der Einbau des anderen Teilstücks in die Kerto-Platte hier zu sehen ist.



Abbildung 7.3-7 Montage des E-Punktes in die Kerto-Platte

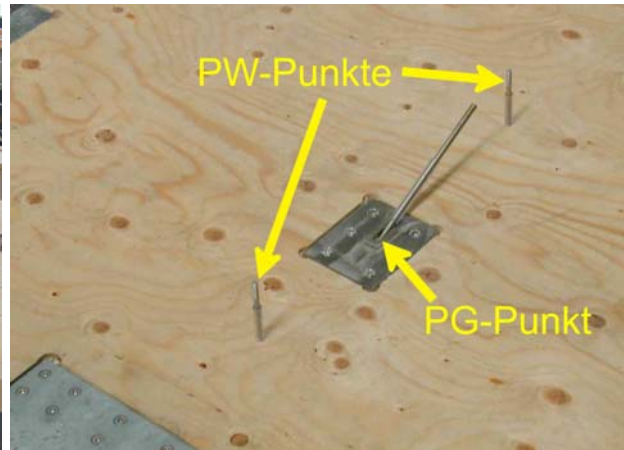


Abbildung 7.3-8 Lage der PW- und PG-Punkte in der Kerto-Platte

Von besonderer Bedeutung für die Wärmebrückeneffekte waren die durch die Dämmebene durchstoßenden Punkte. In Abbildung 7.3-8 sind die in das Kerto eingelassenen PG- und PW-Punkte zu sehen.

Nach Einbau aller Metallpunkte erfolgte der schrittweise Einbau der weiteren Schichten des Elements. Aufgrund der angewendeten Verklebungstechnik musste gleichzeitig schnell und genau gearbeitet werden. Zunächst wurden die Vakuum-Isolationspaneele aufgebracht (Abbildung 7.3-9).

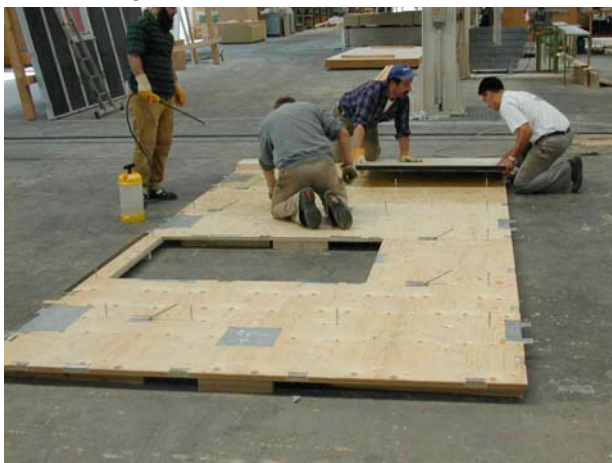


Abbildung 7.3-9 Aufkleben der VIPs auf die Kerto-Platte



Abbildung 7.3-10 Auftragen des PU-Klebers auf die Kerto-Platte

Im Vordergrund des folgenden Bildes wird der Klebstoff aufgebracht (Abbildung 7.3-10).

Der äußere Rand der Elemente schließt mit einer schmalen PU-Dämmplatte und einem Kantholz ab (Abbildung 7.3-11). An dieser Stelle wird das Großelement später die Gebäudefassade überragen, von hinten schließt sich dann das konventionelle Wärmedämmverbundsystem an, das auf den anderen Außenwänden der Häuser in Hofheim verwendet wurde.

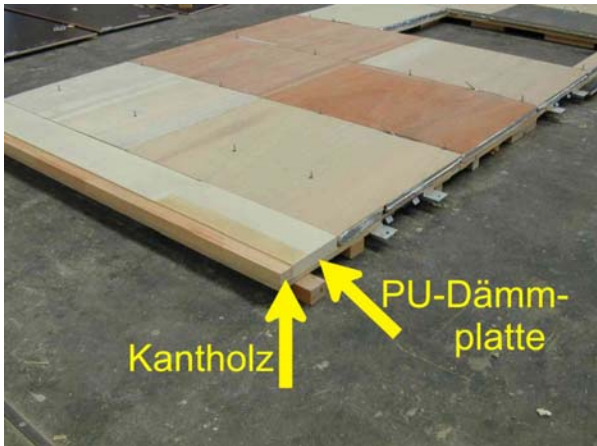


Abbildung 7.3-11 Lage von Kantholz am GEDT-Rand und PU-Dämmplatte



Abbildung 7.3-12 Verkleben der BFU-Platten auf die VIPs

Nach der Vakuumdämmung wurde die vordere BFU-Deckplatte segmentweise aufgebracht (Abbildung 7.3-12).

Die ausgesparten Fugen an den durchstoßenden Metallankern wurden zum Verschließen der Hohlräume, insbesondere auch zur Reduzierung der Wärmebrückenwirkung, mit PU-Ortschaum gefüllt (Abbildung 7.3-13).



Abbildung 7.3-13 Ausschäumen von Fugen und Hohlräumen mit PU-Ortschaum



Abbildung 7.3-14 Montage der äußeren Teile der Befestigungsanker

Anschließend wurden die Metallanker an der BFU-Deckplatte festgeschraubt (Abbildung 7.3-14). Während des Aushärtens der Verklebungen wurden die Elemente mit Gewichten beschwert.

Der Rand der Elemente wurde mit Butylvlies-Dichtbändern abgeklebt (Abbildung 7.3-15). Danach wurden die Stahl-Randpunkte montiert, die die Dämmebene in der GEDT-GEDT-Fuge durchstoßen. (Die auf dem rechten Bild ebenfalls sichtbare waagerechte Abklebung schützt eine Messleitung, siehe Kapitel 4.2.8).



Abbildung 7.3-15 Kantenschutz der GEDT-Elemente

Auch die Fenster wurden bereits im Werk in die Elemente eingebaut. Auf dem rechten Bild ist zu sehen, dass zuvor noch die BFU-BFU-Stöße ebenfalls mit Butylband abgeklebt worden sind (Abbildung 7.3-16).



Abbildung 7.3-16 Montage des Fensters in ein GEDT

Es mussten Verbindungen zwischen Fensterrahmen, Kerto-Tragplatte und – beim Einbau in den Gebäuden – zur Fensterleibung vorgesehen werden. Die Anschlüsse wurden so konstruiert, dass ein späterer Ersatz der Fenster ohne Schäden für das GEDT-Element möglich ist. Auch der Fensterflügel wurde im Werk montiert.



Abbildung 7.3-17: Einbau des Fenster in ein GEDT – Details Abdichtung

Auf der BFU-Deckplatte wurde die Aluminium-Unterkonstruktion festgeschraubt (Abbildung 7.3-18). Die dafür erforderlichen Gewindestangen waren bereits vorher in das BFU eingelassen worden. Ein Teil der Alu-Profile überlappte vom oberen zum unteren Element und wurde daher erst auf der Baustelle in Hofheim eingebaut.

Die auf der BFU-Platte sichtbaren Metallpunkte wurden mit einer dünnen Schaumstoffschicht überdämmt, um die Wärmebrückenwirkung zu reduzieren. Auf dem ersten Foto ist dies zunächst nur auf der rechten Seite des Elements ausgeführt.

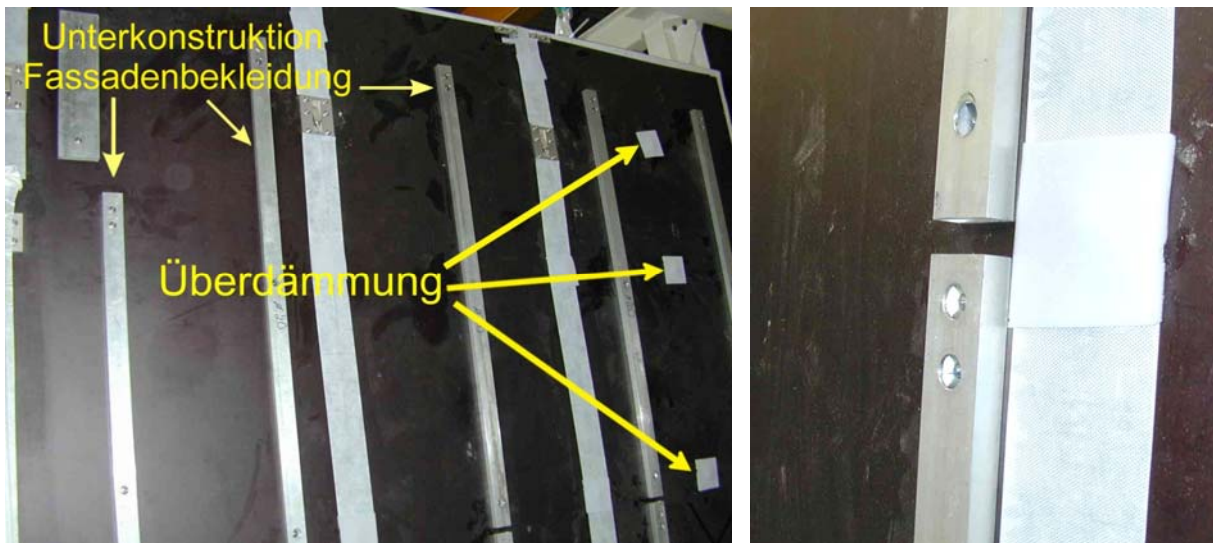


Abbildung 7.3-18: Montage der Aluminiumprofile der Unterkonstruktion

Das folgende Foto zeigt zwei fast fertige Elemente. Auf der Kerto-Seite des vorderen Elements sind die durch Abklebungen geschützten Messleitungen zu sehen, mit denen im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitforschung die Funktionsfähigkeit der Vakuumdämmelemente vermessen wird. Die Messleitungen wurden in der Kabelrolle am linken Rand zusammengeführt. Die Ausgleichsdämmung (Mineralwolle) war hier noch nicht aufgebracht.



Abbildung 7.3-19 Ansicht eines fertigen GEDT-Elements (Wandseite) und der Messtechnik



Abbildung 7.3-20 Ansicht der Füll-GEDT

Neben den Großelementen wurden - für den Einbau zwischen der Oberkante des oberen Großelements und dem Dachüberstand der Gebäude – auch noch kleinere Füllelemente produziert (Abbildung 7.3-20). Als Wärmedämmschicht wurde auch hier jeweils ein Vakuum-Isolationspaneel eingebaut.

7.4 Montage

Parallel zur Endphase der Elementfertigung wurden in Hofheim die Stahlteile an den Gebäudefassaden montiert. Dabei musste zunächst die genaue Lage der Punkte durch ein Vermessungsteam bestimmt und eingezeichnet werden. Das alte 5 cm dicke Wärmedämmverbundsystem aus den 80er Jahren war zu diesem Zeitpunkt schon entfernt worden. Da dies bereits im Jahr zuvor geschehen war, war das Gebäude mit Energiesparhaus-40-Standard und kontrollierter Lüftungsanlage mit einem neuen luftdichten Putz versehen worden (Abbildung 7.4-1, rechtes Foto). Bei den anderen Gebäuden wurde der Altputz ausgebessert, indem Dübellöcher des alten Wärmedämmverbundsystems geschlossen wurden.



Abbildung 7.4-1: Ansicht der Gebäude vor Montage der Befestigungspunkte; links EnEV-Neubau, rechts ESH 40; die Markierungen zeigen die spätere Lage der Befestigungspunkte

Der Einbau der Metallteile wurde vorbereitet, indem der Altputz entfernt wurde, so dass die Ziegel der äußeren Wandschale freigelegt wurden (Abbildung 7.4-2) und die Befestigungselemente Lasten direkt in die Wandschale einleiten können.

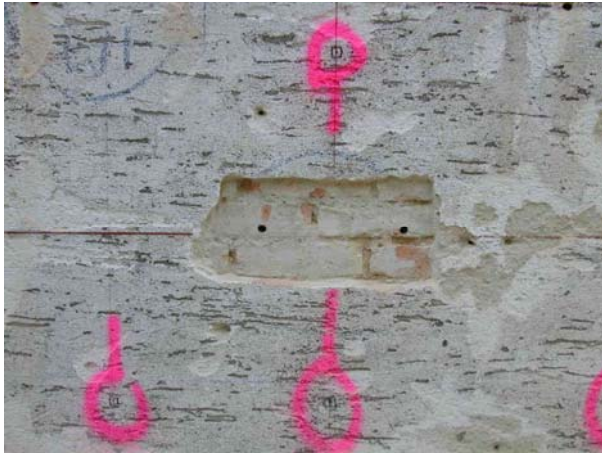


Abbildung 7.4-2 Entfernen des Altputzes an Stellen, an denen die Wandbefestiger montiert werden



Abbildung 7.4-3 Abmessen der Spezialdübel für die Wandbefestiger

Zur Befestigung der Gewindestangen für die Aufnahme der Metallpunkte wurden spezielle Dübel (Abbildung 7.4-3) verwendet, die vorher vor Ort in Auszugsversuchen getestet worden waren. Dübel und Gewindestangen wurden in die Wand einbetoniert (Abbildung 7.4-4). Vor Installation der Stahlteile wurde zur Verbesserung der Luftdichtheit eine Folie eingeklebt (Abbildung 7.4-5).

Der Einbau der Stahlpunkte erfolgte durch Verschraubung mit den Gewindestangen. Die Abbildung 7.4-6 zeigt einen eingebauten W-Punkt (links) und einen E-Punkt (rechts).

Auf Abbildung 7.4-7 ist sind die Gesamtfassaden mit W- und E-Punkten zu sehen



Abbildung 7.4-4 Montage der Spezialdübel



Abbildung 7.4-5 Abdichten des Wandbefestigers (W-Punkt) zur Verbesserung der Luftdichtheit



Abbildung 7.4-6 Ansicht montierter Befestigungspunkte: links W-Punkt, rechts E-Punkt



Abbildung 7.4-7 Ansicht der Fassade mit montierten Wandbefestigern; links EnEV-Neubau, rechts ESH 40

Nach Abschluss dieser Vorarbeiten wurden die vorgefertigten Großelemente mit einem Innenlader zum Transport von Fertigteilen angeliefert (Abbildung 7.4-8).



Abbildung 7.4-8 Ansicht des Transportgestells der GEDT mit sechs Elementen

Zur Elementmontage wurden ein Teleskopstapler und die speziell für das Projekt entwickelte Montage-Traverse eingesetzt (Abbildung 7.4-9).



Abbildung 7.4-9 Anheben und Transport eines GEDT-Elements mit dem Teleskopstapler

Es wurde jeweils zuerst auf einer Gebäudeseite das untere Element eingesetzt. Das Einrichten der in alle drei Raumrichtungen verstellbaren E-Punkte erforderte immer eine besondere Aufmerksamkeit. Anschließend wurde das darüber liegende Element eingehängt.

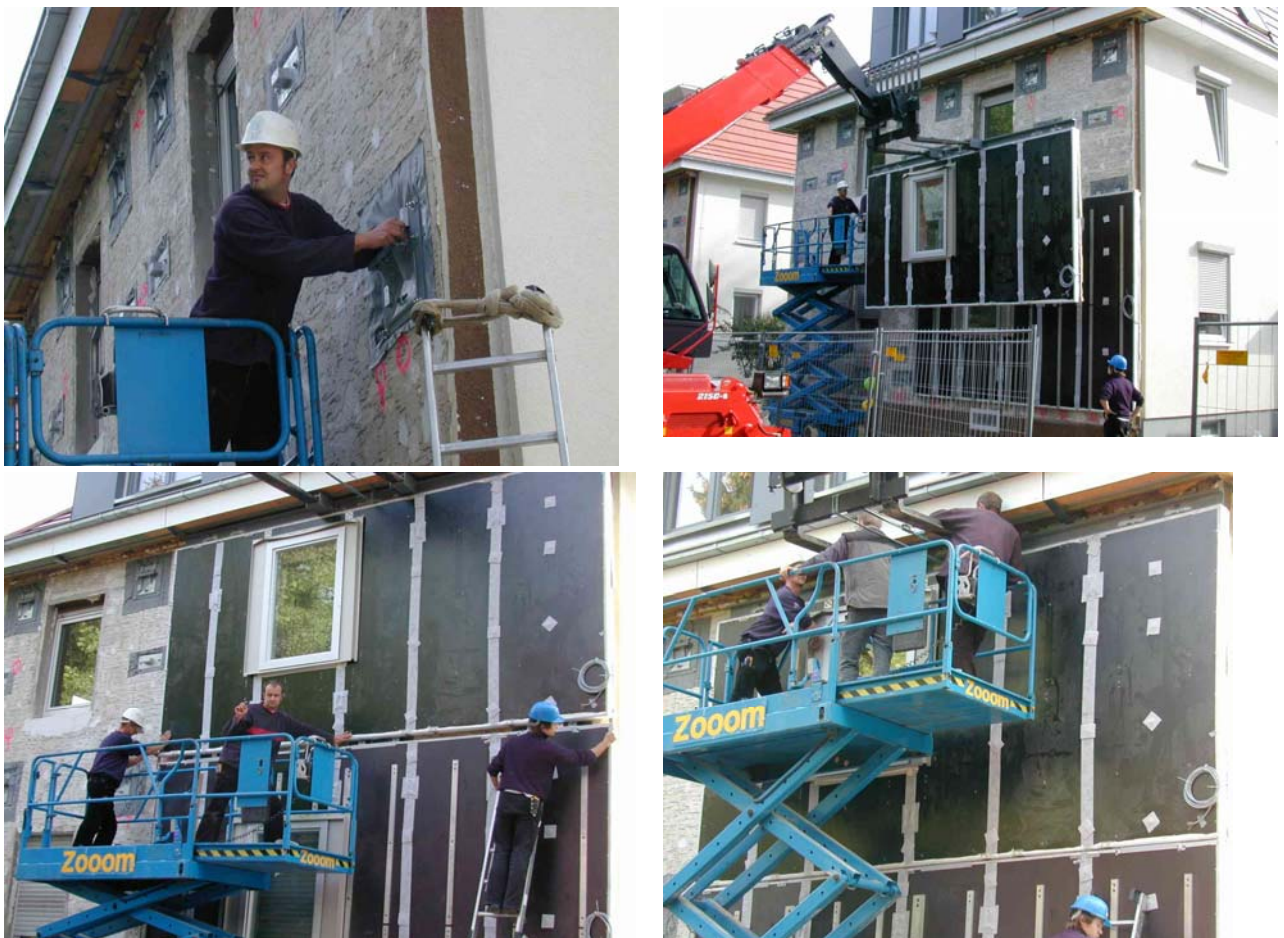


Abbildung 7.4-10 Montage des ersten und zweiten GEDT-Elements

Dabei wurde zunächst ein Probedurchgang durchgeführt, um zu gewährleisten, dass die korrekte Position der Elemente eingehalten werden konnte. Die Elemente wurden dann noch einmal abgenommen, in die W-Punkte wurde Vergussmörtel eingegossen (Aushärtezeit ca. 1 Stunde), und die Elemente wurden schließlich endgültig montiert. Die folgende Abbildung 7.4-11 zeigt einen mit (Test-)Mörtel gefüllten W-Punkt an der Fassade sowie einen W-Punkt auf der Rückseite eines Großelements, der bei der Montage in den Fassadenpunkt eingreift sowie die Montage des letzten Elements (inklusive Verfüllen des Mörtels)



Abbildung 7.4-11 W-Punkt (Wandseite) mit Testfüllung aus Vergussmörtel (links oben) und GEDT-seitigem Gegenstück (rechts oben) sowie Füllen des W-Punkts (links unten) und Montage des letzten GEDT-Elements

Die Abbildung 7.4-12 zeigt eine komplette Fassade nach Montage aller Elemente, bevor die Unterkonstruktion für die Fassadenbekleidung montiert wurde.



Abbildung 7.4-12: Straßenfassade nach Montage der GEDT-Elemente, vor der Befestigung der Unterkonstruktion für die Fassadenbekleidung

Auf den folgenden Fotos der Abbildung 7.4-13 sind einige Anschlussdetails zu sehen. An den Elementrändern wurden die M-Punkte (unten) und K-Punkte (seitlich) eingebaut. An der Stelle, wo später der K-Punkt montiert wird, ist hier nur die Aussparung zwischen dem GEDT-Element und dem Wärmedämmverbundsystem der Nachbarfassade abgebildet. An der Rückseite des Elements sind in der Aussparung zwei bereits werkseitig eingebaute Gewindestangen zur Aufnahme des K-Punkts zu erkennen.



Abbildung 7.4-13: Detailansicht von M-Punkt (links) und K-Punkt (rechts)

Die Fugen zwischen den Großelementen wurden mit vorkomprimiertem Dichtband ausgefüllt, das jeweils vor dem Einhängen des zweiten Elements auf dem ersten aufgebracht wurde. Anschließend wurden die Fugen außen mit Butylkautschuk-Klebeband verschlossen.



Abbildung 7.4-14: Detail einer GE-GE-Fuge (links, Blick auf Kompriband) und abgedichtete Elementfuge (rechts)

Auch die Füllelemente wurden jetzt eingebaut, um die für den Montageablauf notwendige Lücke zwischen den oberen GEDT-Elementen und dem Dachüberstand zu schließen (Abbildung 7.4-15).



Abbildung 7.4-15: Ansicht des Füll-GEDT am Dachüberstand

Im Anschluss wurde die Außenbekleidung aus Harzkompositplatten angebracht. Die Aluminium-Unterkonstruktion war auf den unteren Elementen bereits werkseitig montiert worden, die oberen Teile, die die beiden Großelemente sowie die Füll-Elemente überlappten, wurden vor Ort in Hofheim installiert. Zur Abdeckung der horizontalen Fugen wurden Aluminiumprofile angebracht (Abbildung 7.4-16).



Abbildung 7.4-16: Fugenprofil der Unterkonstruktion



Abbildung 7.4-17: Primern der Harzkomposit-Platten an den Klebestellen

Die Fassadenplatten wurden auf der Aluminiumkonstruktion aufgeklebt. Dazu war eine Vorbehandlung mit einem „Primer“ notwendig (Abbildung 7.4-17). Um die Elemente während der Aushärtung des Klebers zu fixieren, wurde doppelseitiges Klebeband eingesetzt.

Der eigentliche, dauerhafte Kleber wurde parallel zum Klebeband auf den vertikalen Aluminiumprofilen aufgebracht. Die folgende Abbildung 7.4-18 gibt einige Eindrücke vom Fortschritt der Arbeiten wieder.





Abbildung 7.4-18 Montageablauf der Harzkomposit-Platten

Parallel zu den Arbeiten an der Außenfassade wurden in den Wohnungen die alten Fenster demontiert (Abbildung 7.4-19).



Abbildung 7.4-19: Demontage der alten Fenster

Die neuen Fenster, die bereits in den Großelementen integriert waren, wurden in der Fensterleibung angeschlossen und die Folienlappen zur Luftdichtung. Abschließend wurden die Leibungen mit Gipskartonplatten verkleidet, tapeziert und überstrichen (Abbildung 7.4-20, links) und die Verdunklung in den Fensterflügel eingesetzt (Abbildung 7.4-20, rechts).



Abbildung 7.4-20 Fensterleibung mit Verkleidung aus Gipskarton (links) und fertiges Fenster mit Verdunklung (rechts)

Außen wurden noch die Randanschlüsse durchgeführt. Eine Luftdichtungsfolie wurde zwischen den Elementrändern und der Außenwand bzw. dem Sockel hergestellt (Abbildung 7.4-21). Der Seitenrand der Großelemente wurde durch ein Aluprofil überdeckt.



Abbildung 7.4-21 Abdichtung der GEDT-Elemente an den Sockelbereich (links) sowie Schließen der Arbeitsfuge zum WDVS (Mitte) und Anschluss der Perimeterdämmung (rechts)

Am Ende wurden die Anschlüsse an das Wärmedämmverbundsystem der Nachbarfassaden und an die Perimeterdämmung hergestellt. Die folgende Abbildung 7.4-22 zeigt die fertigen Fassaden in Hofheim



Abbildung 7.4-22: Ansicht der fertigen Straßenfassaden mit GEDT-Elementen

7.5 Wärmetechnische Eigenschaften

7.5.1 Planwerte

Die vorgefertigten Dämmelemente mit Vakuumdämmung erreichen ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken und mit fabrikneuen, 4 cm starken VIPs einen U-Wert von $0,115 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, unter Berücksichtigung der Altbauwand und 3 cm Ausgleichsdämmschicht $0,102 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Durch die Wärmebrücken (wie geplant) an den VIP-Rändern und -Stößen, den GEDT-Stößen und den Ankern erhöht sich der Gesamt-U-Wert jedoch auf $0,145 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für ein großes GEDT ($15,5 \text{ m}^2$) bzw. $0,155 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für ein kleines GEDT ($11,10 \text{ m}^2$) (siehe folgende Abbildung 7.5-1). Die Wärmebrücken durch Anker, VIP/VIP- und GEDT/GEDT-Stöße belaufen sich auf ca. 30 % bzw. 34 % vom Gesamt-U-Wert (21 % punktförmige Wärmebrücken (Anker), 12 % linienförmige Wärmebrücken (Stöße)). Trotz metallischer Anker durch die Dämmebene kann mit der Großelement-Dämmtechnik ein sehr guter U-Wert bei der energetischen Altbausanierung erreicht werden. Der Mittelwert für eine gesamte Fassade inklusive der Füll-GEDT liegt bei $0,150 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, Fenster und Anschlüsse sind dabei in der Gebäudebilanz und nicht beim GEDT berücksichtigt.

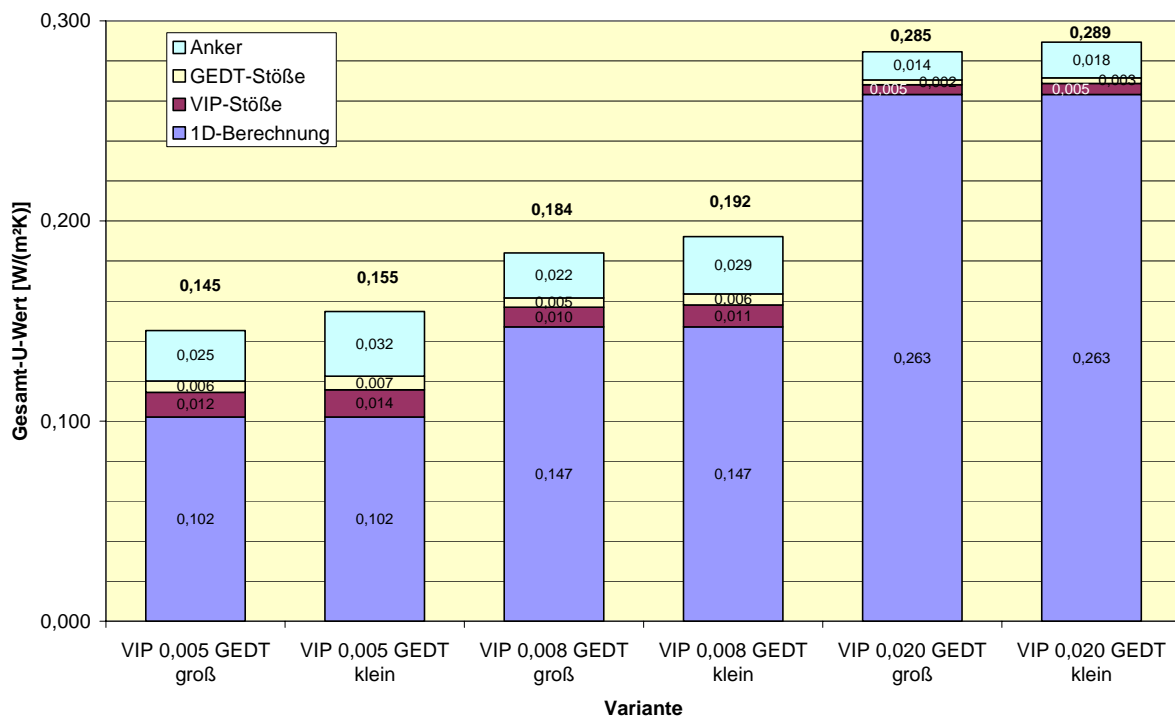


Abbildung 7.5-1: Vergleich der Gesamt-U-Werte des GEDT-Elements für unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit der Vakuumdämmung

Durch Alterung wird die Wärmeleitfähigkeit der VIPs ansteigen. Gleichzeitig sinkt der Einfluss der Wärmebrücken geringfügig, so dass sich bei einer Wärmeleitfähigkeit von 0,008 W/(mK) ein Gesamt-U-Wert von 0,188 W/(m²K) für die Gesamtfassade ergibt (inklusive Füll-GEDT). Innerhalb welcher Zeit mit dieser Verschlechterung zu rechnen ist, kann bisher nur schwer abgeschätzt werden, es handelt sich aber bei normaler Qualität der VIPs voraussichtlich um mehrere Jahrzehnte. Die Berechnungsergebnisse für eine Wärmeleitfähigkeit von 0,008 W/(mK) stellen somit nicht den langjährigen Mittelwert über die Lebensdauer dar, sondern einen Endwert bei einer definierten „technischen“ Lebensdauer, der aber mit dem Bemessungswert, der in Bilanzberechnungen eingesetzt werden muss, nahezu identisch ist. Die VIPs bieten über viele Jahre und Jahrzehnte deutlich bessere Werte. Insoweit sind die Ergebnisse für den Gesamt-U-Wert, die im Folgenden meist für die Wärmeleitfähigkeit von 0,008 W/(mK) angegeben werden, konservative Abschätzungen, die jedoch z. B. bei der Planung der Anlagentechnik einfließen müssen, damit die Gebäude auch nach Jahrzehnten noch ausreichend beheizt werden können.

Da Vakuumdämmplatten sehr empfindlich gegen mechanische Beschädigungen sind und auch durch Alterung ein Versagen der Hüllfolie möglich ist, sei hier noch der unwahrscheinliche Fall einer vollständigen Belüftung aller Vakuumpaneele (62 Stück) in allen GEDTs einer Fassade aufgelistet. Durch einen solchen „Totalausfall“ würde sich der Gesamt-U-Wert auf ca. 0,287 W/(m²K) erhöhen. Die aktuellen Anforderungen der Energieeinsparverordnung für die Dämmung von Altwänden ($U = 0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$) würden damit zwar immer noch eingehalten, der angestrebte Energieverbrauch des Hauses würde sich jedoch deutlich erhöhen.

7.5.2 Tatsächliche Werte unter Berücksichtigung der Bauausführung

Einfluss der Fugenbreite

Die Ausführungsqualität bei Herstellung und Montage der GEDT-Elemente beeinflusst auch den Gesamt-U-Wert. Eine Berechnung mit Fugenbreiten beim VIP-VIP-Stoß von 4 mm und beim GEDT-GEDT-Stoß von 15 mm (Ausführung wie geplant) ergibt für ein kleines Element den U-Wert von $0,192 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (bei $\lambda=0,008 \text{ W}/(\text{mK})$). Wäre es im Mittel aller Fugen gelungen, deren Breite bei VIP-VIP-Stößen auf 1 mm und bei GEDT-GEDT-Stößen auf 10 mm zu begrenzen („optimale Ausführung“), wäre der sich ergebende U-Wert leicht auf $0,185 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ gesunken. Entstehen dagegen größere Fugenbreiten (VIP-VIP 6 mm und GEDT-GEDT 20 mm), so steigt der U-Wert auf $0,199 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ an („ungünstige Ausführung“). Die Ausführungsqualität beeinflusst somit auch die zu erreichende energetische Effizienz.

Die Ausführung, wie sie tatsächlich in Hofheim umgesetzt wurde, lässt sich folgendermaßen beschreiben: Die mittlere VIP-VIP-Fugenbreite liegt bei 8 mm, die GEDT-GEDT-Fugenbreite bei 10 mm. Damit ergibt sich ein Gesamt-U-Wert des kleinen Elementes von $0,198 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Für die gesamte Fassade ergibt sich ein U-Wert von $0,192 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, d. h. eine Verschlechterung von 2 %.

Einfluss zusätzlicher Anker

Bei der Montage mussten, anders als geplant, an mehreren Stellen zusätzliche Anker gesetzt werden. Diese ähneln im Prinzip dem PW-Punkt und wurden nach einem vergleichbaren Verfahren modelliert. Allerdings reichen sie von der BFU-Platte durch die Ausgleichsdämmung hindurch bis in die Bestandswand, die Situation ist also wärmetechnisch ungünstiger. Der Wärmebrückenaufschlag für jeden zusätzlichen Anker liegt bei $0,005 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (bei $\lambda=0,008 \text{ W}/(\text{mK})$). Dabei wurde berücksichtigt, dass die Wärmebrückenwirkung durch Aufbringen einer 1 cm dicken PE-Schaum-Abdeckung (quadratisch 10 cm x 10 cm) abgemindert werden konnte.

Einfluss der Füllelemente

Zusätzlich zu den großflächigen GEDT-Fassadenelementen werden nun auch die Füll-GEDT-Elemente berücksichtigt, die den oberen Abschluss zwischen GEDT-Fassade und Traufe bilden. Diese waren erforderlich, um einen Arbeitsraum für die GEDT-Montage zu erhalten. Bedingt durch die geringe Höhe von ca. 25 cm und die dadurch erforderliche Unterteilung auf 6 Füllelemente auf eine Fassade entstehen vergleichsweise lange GEDT-GEDT-Fugen, die den U-Wert merklich vergrößern. Ein Füll-GEDT erreicht bei einer Wärmeleitfähigkeit der Vakuumdämmung von $0,008 \text{ W}/(\text{mK})$ einen U-Wert von $0,204 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Rechnet man die Planwerte der GEDT-Elemente einer Fassade zusammen (2 große, 2 kleine, 6 Füll-Elemente) ergibt sich ein mittlerer U-Wert von $0,188 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. In fabrikneuem Zustand liegt der mittlere U-Wert bei $0,150 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

7.5.3 Überblick: Gesamt-U-Werte

Die folgende Abbildung 7.5-2 gibt einen Überblick über die Planwerte und die tatsächlich erreichten U-Werte der GEDT-Fassaden. Letztere berücksichtigen die nach der Montage gemessenen Fugenbreiten, die zusätzlichen Anker in den Elementfugen und die Füllelemente. Die Fenster der Großelemente sind in den angegebenen U-Werten nicht

berücksichtigt, d. h. die U-Werte beziehen sich auf die Fassadenfläche ohne Fenster (im Fall der Planwerte auch ohne Fläche der Füll-GEDT).

Es werden wiederum getrennte Werte für die Wärmeleitfähigkeiten 0,005 W/mK (fabrikneu), 0,008 W/mK (nach Alterung) und 0,02 W/mK (Vakuum zerstört) angegeben.

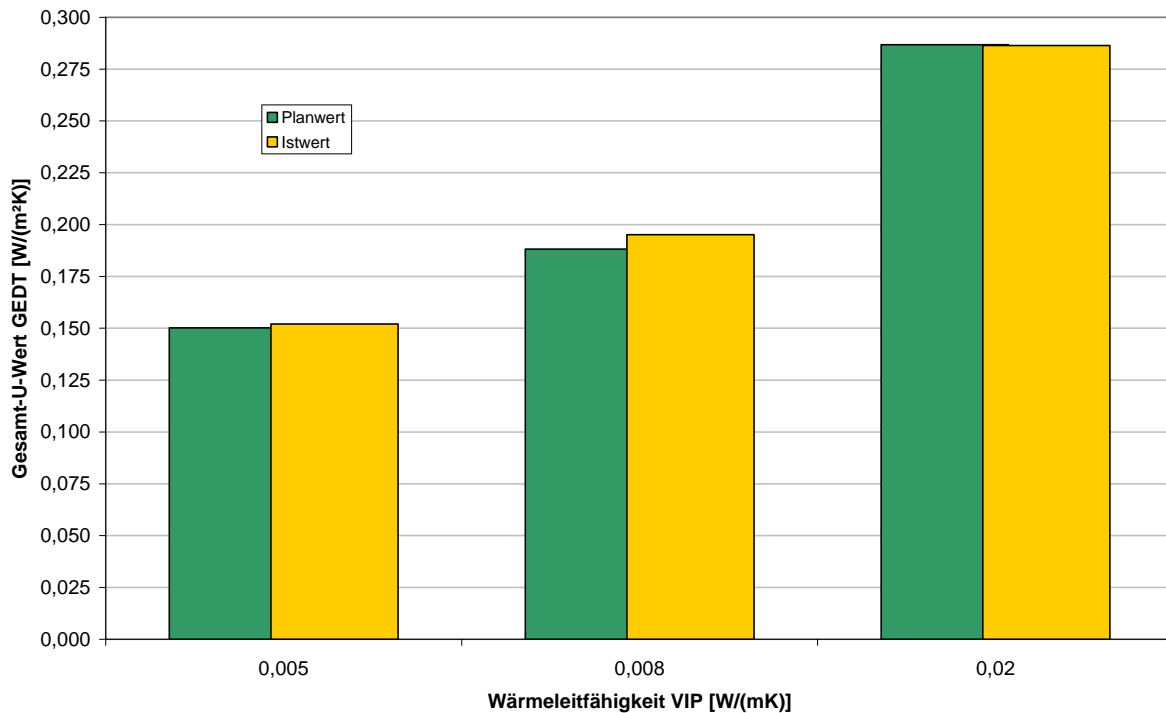


Abbildung 7.5-2 Vergleich von Plan- und Istwerten des Gesamt-U-Wertes der GEDT

7.6 Ergebnisse des Messprogramms

In Kapitel 4.2.8 wurden die aktualisierten Messergebnisse bereits dokumentiert. Es zeigte sich, dass an den sechs kontinuierlich überwachten Punkten die Temperatur- und Feuchtwerte nicht in kritische Bereiche gelangten. Allerdings konnten auch Schwächen in der Verarbeitung der GEDT-Fugen festgestellt werden.

Bei den Messungen zur Funktionsfähigkeit der VIPs zeigte sich, dass die Ergebnisse nicht direkt ausgewertet werden können, sondern mit Korrekturfaktoren aus Wärmebrückenberechnungen angepasst werden müssen. Diese angepassten Messergebnisse ergaben, dass im ESH 40 keine defekten VIPs vorhanden sind. Im EnEV-Neubau-Gebäude, an dem als erstes die GEDT montiert wurden und auch ein Prototyp eingesetzt wurde, an dem einige nachträgliche Änderungen erforderlich wurden, sind fünf VIPs defekt. Im ESH 60 konnten ebenfalls 4 defekte VIPs gefunden werden. Zusätzlich gibt es in EnEV-Gebäude und ESH 60 einige VIPs, bei denen nicht genau festgestellt werden kann, ob VIPs defekt sind, Messfehler vorliegen oder eine andere Ursache (z. B. fehlende Ausgleichsdämmung) zu den niedrigeren Temperaturen an den Messpunkten führten. Nach fast zwei Jahren sind 6 % der VIPs defekt.

7.7 Kosten

Da es sich bei den Großelementen mit Vakuumdämmung und eine komplette Neuentwicklung handelt, sind zum jetzigen Zeitpunkt kaum verbindliche Kostenaussagen im Bezug auf höhere Stückzahlen bzw. eine mögliche Markteinführung zu treffen. Insbesondere die Weiterentwicklungsmöglichkeiten werden eine entscheidende Rolle spielen, so dass auch in dieser Hinsicht Kostenaussagen nur schwer durchzuführen sind.

Trotz dieser Einschränkungen wurden die Kosten detailliert untersucht, um durch Beschreibung des Status Quo eine Ausgangsbasis für Optimierungen des GEDT-Konzepts zu schaffen. Abbildung 7.7-1 zeigt das Ergebnis.

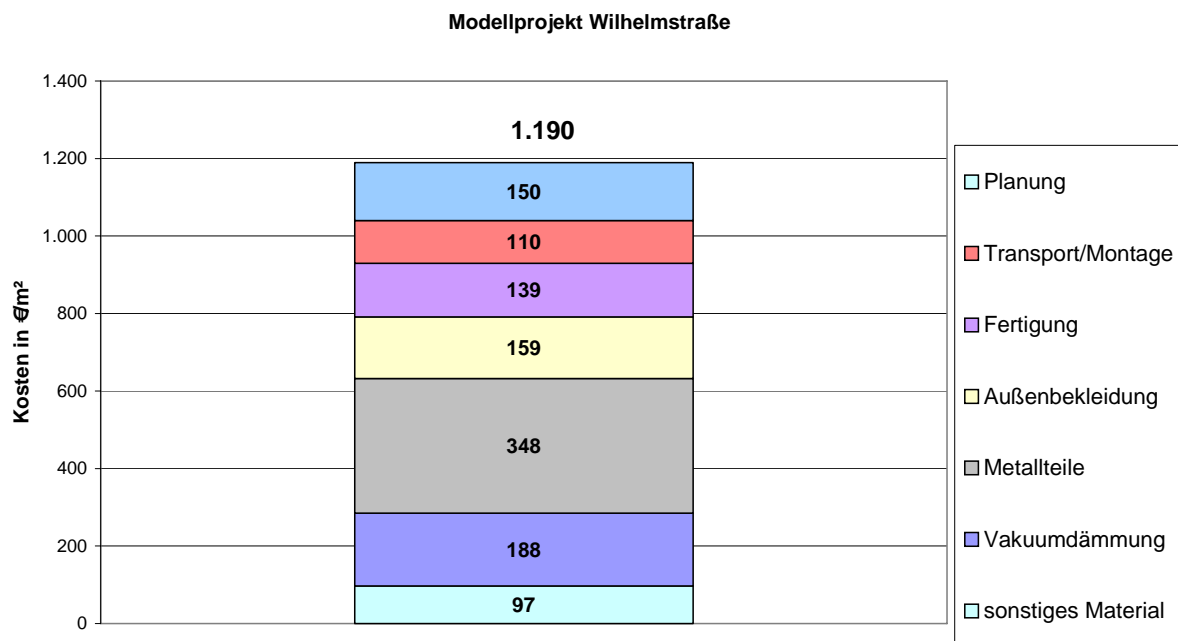


Abbildung 7.7-1: Kosten der GEDT-Fassadenelemente im Modellprojekt

Insgesamt gesehen erscheinen Kosten von fast 1200 €/m² (ohne Mehrwertsteuer) natürlich deutlich zu hoch für eine breite Markteinführung, wenn man sie mit den Kosten üblicher Wärmeschutzmaßnahmen, z. B. einem Wärmedämmverbundsystem vergleicht, die in der Größenordnung von etwa 100 €/m² liegen⁴⁸. Der Übergang zu einer Kleinserienfertigung (ohne weitergehende Optimierungen des Konzepts) könnte immerhin zu einer Kostensenkung auf ca. 900 €/m² führen.

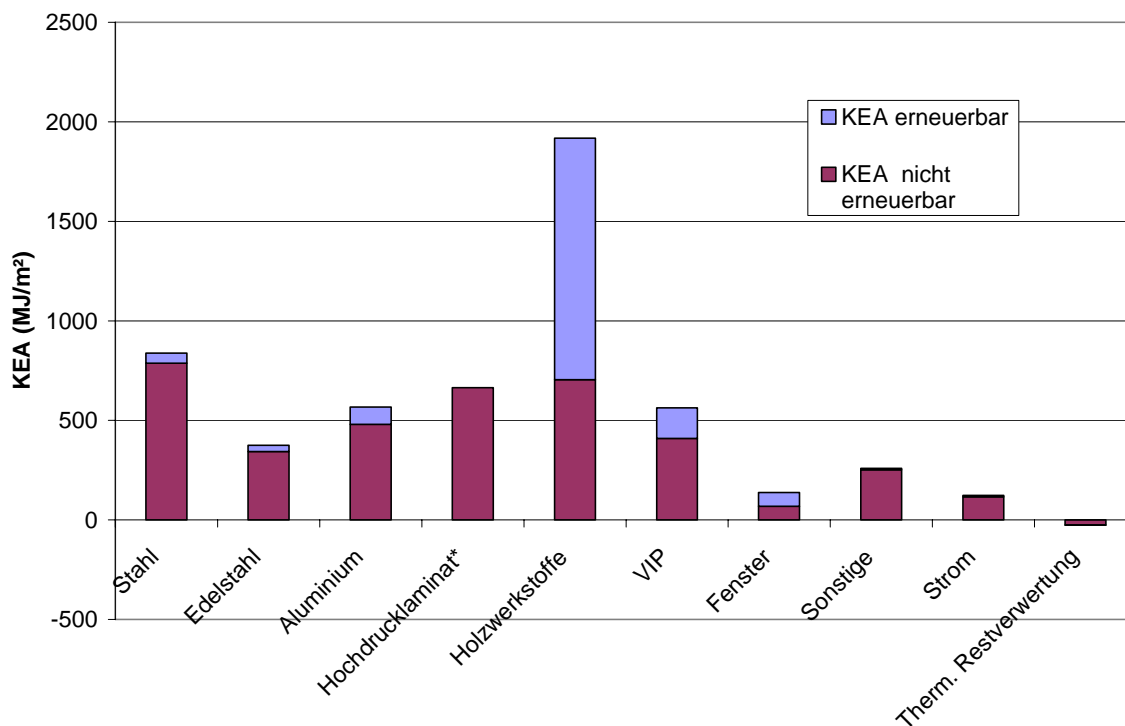
Aus diesem Vergleich dürfen aber noch keine zu weit gehenden Schlussfolgerungen gezogen werden: Schließlich handelt es sich hier um eine Neuentwicklung, die erstmals erprobt wurde. Entscheidend sind die Kostensenkungen, die beim Übergang zu einer größeren Serienfertigung und bei einer Weiterentwicklung des Konzepts zu erwarten wären. Auch wenn dabei die Kosten konventioneller Wärmedämmsysteme nicht erreicht würden, könnten gegebenenfalls dennoch Marktchancen in bestimmten „Nischenanwendungen“ bestehen, insbesondere dann, wenn eine Reduzierung der Dicke der Wärmedämmung erforderlich ist.

⁴⁸ Würde man die vollständige Fassade aus WDVS und Passivhausfenster betrachten, ergäben sich Vergleichskosten von 150-200 €/m²

7.8 Lebenszyklusanalyse

Im Rahmen einer durch die Technische Universität Darmstadt⁴⁹ und das IWU betreuten Diplomarbeit wurde eine Lebenszyklusanalyse der in Hofheim eingesetzten Großelemente mit Vakuumdämmung durchgeführt [Gropp 2007]. Es wurde insbesondere der kumulierte Energieaufwand (KEA) nach VDI-Richtlinie 4600 untersucht. Dabei handelt es sich um den Gesamtaufwand aller bei der Herstellung, Nutzung und Entsorgung anfallenden Primärenergieträger inklusive der Vorketten, hier angegeben in MJ pro m² Elementfläche. Die Analyse wurde mit Hilfe der Software Umberto [IFU 2001] und der Datenbank Ecoinvent⁵⁰ durchgeführt. Die Arbeit wurde dabei auch durch das Forschungszentrum Karlsruhe, Zentralabteilung Technikbedingte Stoffströme, unterstützt. Im vorliegenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Diplomarbeit bzw. von darauf aufbauenden Berechnungen des IWU dargestellt.

Die folgende Abbildung 7.8-1 zeigt die Energiebilanz der Herstellung des Großdämmelements. Der kumulierte Energieaufwand ist getrennt nach den Anteilen erneuerbarer und nicht-erneuerbarer Energieträger dargestellt. Entscheidend für Ressourcenverbrauch und Umweltauswirkungen ist – wenn auch nicht ausschließlich, so doch vorwiegend – der nicht-erneuerbare Anteil, auf den daher bei den folgenden Bewertungen das Hauptaugenmerk gerichtet wird.



*Schätzwert für Hochdrucklaminat

Abbildung 7.8-1 Kumulierter Energieaufwand für die Herstellung eines Großelements mit Vakuumdämmung nach Stoffgruppen (bezogen auf 1 m² Elementfläche)

⁴⁹ Institut WAR, Fachgebiet Industrielle Stoffkreisläufe, Prof. Dr. Liselotte Schebek

⁵⁰ Siehe www.ecoinvent.org, Swiss Centre for Life Cycle Inventories

Die Einzelbeiträge der verschiedenen Materialien summieren sich zu einem nicht-erneuerbaren KEA-Gesamtwert von 3798 MJ/m² für die Herstellung des Elements. Dazu kommen 1616 MJ/m² erneuerbarer Anteil, insgesamt ergeben sich also 5414 MJ/m².

Die Ergebnisse für den Lebensweg des Elements sind in Abbildung 7.8-2 dargestellt. Insgesamt ergibt sich ein nicht-regenerativer KEA von 2949 MJ/m². Der Gesamtwert inklusive erneuerbaren Energieträgern beträgt 4338 MJ/m².

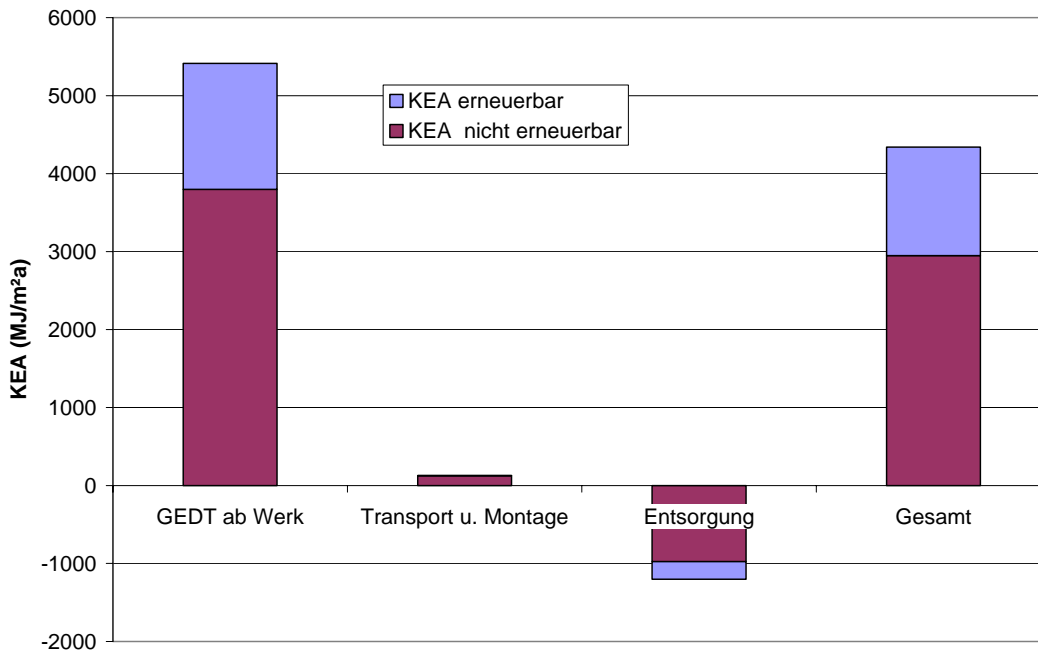


Abbildung 7.8-2: Bilanz des GEDT-Lebenswegs (mit Recycling der pyrogenen Kieselsäure).

Der kumulierte Energieaufwand des Großdämmelements kann mit der Primärenergieeinsparung durch den reduzierten Heizwärmebedarf verglichen werden. Zum Vergleich wird ein herkömmliches Wärmedämmverbundsystem (WDVS) mit Polystyrol-Hartschaumdämmung (EPS) betrachtet. Der kumulierte Energieaufwand wurde in [Gropp 2007] ebenfalls ermittelt: Es ergeben sich über den gesamten Lebensweg (Herstellung und Entsorgung) 592 MJ (erneuerbarer und nicht erneuerbarer Anteil).

Berechnet wird der Erntefaktor EF, indem der während der Nutzungsphase durch die Wärmedämmung eingesparte KEA durch den KEA des Dämmelements (für Herstellung und Entsorgung) dividiert wird. Für den GEDT-Lebensweg wird hier von Fall 1 (ohne Recycling der pyrogenen Kieselsäure) ausgegangen. Berücksichtigt wird nur der nicht-erneuerbare Anteil des KEA des Großdämmelements und der Erdgas-Einsparung⁵¹. In Abbildung 7.8-3 sind die Ergebnisse in Abhängigkeit von der Lebensdauer des Dämmelements aufgetragen.

⁵¹ Im Fall des Wärmedämmverbundsystems ist der nicht-regenerative Anteil in der Gesamtbilanz nicht gesondert ausgewiesen. Vereinfachend wird hier der Gesamt-KEA von 592 MJ/m² in Ansatz gebracht. Darin sind Gutschriften für Herstellung und Entsorgung verrechnet. Ohne Anrechnung dieser Gutschriften kann die Aufspaltung des KEA angegeben werden: Er beträgt ca. 695 MJ/m², davon 617 MJ/m² nicht-erneuerbarer und 78 MJ/m² erneuerbarer Anteil.

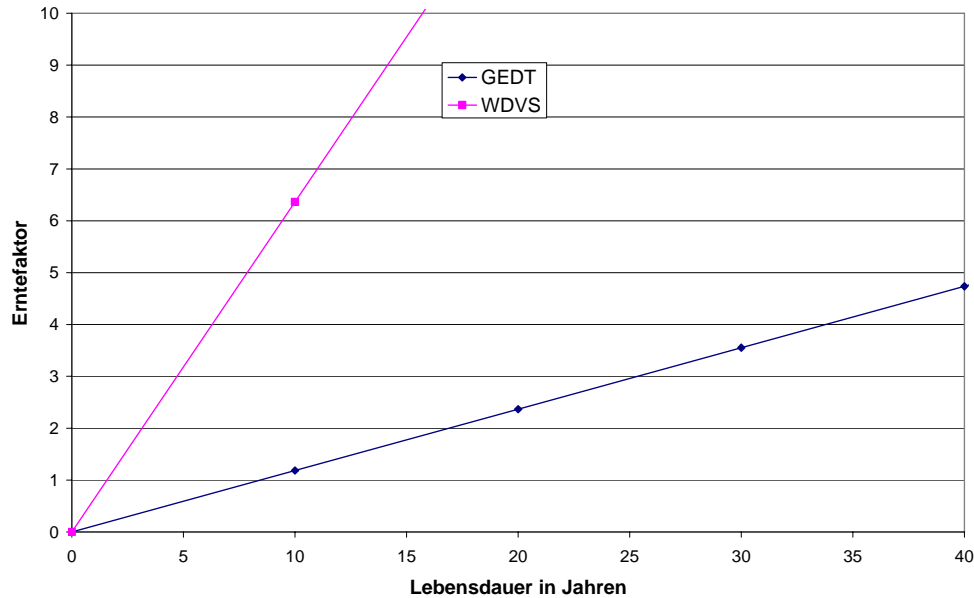


Abbildung 7.8-3 Erntefaktoren des GEDT-Elements (Fall 1) mit Vakuumdämmung und eines EPS-Wärmedämmverbundsystems (WDVS) in Abhängigkeit von der Lebensdauer (Bewertungsbasis: Kumulierter Energieaufwand)

Unter Annahme einer Lebensdauer von 30 Jahren betrüge der Erntefaktor des Großdämmelements ungefähr 3,5, d. h. das Element hätte dann das 3,5-fache seiner Herstellungsenergie (inklusive Entsorgung) eingespart. Betrüge die Lebensdauer nur 8,5 Jahre, so ergäbe sich ein Erntefaktor von 1, d. h. der KEA des Elements und die bei der Beheizung eingesparte Primärenergie glichen sich dann gerade aus.

Das Wärmedämmverbundsystem liegt aufgrund seiner viel niedrigeren Herstellungsenergie deutlich günstiger: Bei 30 Jahren Lebensdauer würde hier ein Erntefaktor von 19 erreicht (in der Abbildung 7.8-3 nicht mehr dargestellt). Bereits bei einer Lebensdauer von etwa 1,5 Jahren betrüge der Erntefaktor 1.

Diese Betrachtungen zeigen, dass die Lebenszyklus-Bilanz des Großdämmelements zwar bei normaler Lebensdauer baulicher Maßnahmen von mehreren Jahrzehnten ein positives Gesamtergebnis erbringt, insgesamt aber nicht zufrieden stellen kann. Eine „Verschlankung“ der Konstruktion, also ein geringerer Materialeinsatz pro Elementfläche, wäre daher als ein wichtiges Ziel der Weiterentwicklung anzusehen.

8 Zusammenfassung

In den Jahren 2005 und 2006 führte die Hofheimer Wohnungsbau GmbH eine umfassende Modernisierung von drei kleinen Mehrfamilienhäusern mit je zwei Wohnungen durch. Das Vorhaben wurde durch ein breit angelegtes Forschungsprojekt unterstützt und begleitet. Zwei Aspekte standen dabei im Mittelpunkt:

- An den Gebäuden wurden unterschiedlich weitgehende Energiesparmaßnahmen realisiert. Dabei handelt es sich um den EnEV-Neubaustandard sowie das Energiesparhaus 60 (ESH 60) und Energiesparhaus 40 (ESH 40) gemäß der KfW-Definition bei der Neubauförderung. Da es sich um drei fast baugleiche Gebäude handelt, ließ sich ein direkter Vergleich dieser drei Energiesparstandards durchführen.
- Es wurde ein neues Konzept mit großformatigen, vorgefertigten Dämmelementen (Großelement-Dämmtechnik - GEDT) in Verbindung mit Vakuumisulationspaneelen entwickelt. Diese Elemente – mit bereits integrierten Fenstern – wurden an den Straßenfassaden aller drei Gebäude installiert.

Daneben fanden eine ausführliche Dokumentation des Bauablaufs, ein umfangreiches Messprogramm sowie eine Mieterbefragung statt.

Die drei Häuser wurden sowohl im Innen- wie im Außenbereich einer umfassenden Modernisierung unterzogen. Es wurden neue Dachstühle errichtet und dadurch weiterer Wohnraum in den Dachgeschossen geschaffen. Aus Sicht von Wärmeschutz und Wärmeversorgung waren vor allem folgende Maßnahmen relevant:

- unterschiedlich weitgehende Wärmeschutzmaßnahmen je nach angestrebtem Energiespar-Standard (Ausnahme: gleichartige GEDT-Elemente an den Straßenfassaden)
- unterschiedliche Lüftungskonzepte (Fensterlüftung beim EnEV-Neubau-Standard, Abluftanlage im ESH 60, Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung im ESH 40)
- gemeinsame Nahwärmeversorgung der drei Gebäude über einen Holzpelletkessel (installiert im Keller des ESH 40)

Bereits in der Planungsphase und auch im weiteren Verlauf des Projektes wurde deutlich, dass bei einer ehrgeizigen energetischen Altbaumodernisierung viele Einzelaspekte und Details zu beachten sind, nicht zuletzt im Hinblick auf die Vermeidung von Wärmebrücken und die Luftdichtheit. Dabei war man auch vor Überraschungen nicht gefeit: Erst während der Bauarbeiten stellte sich heraus, dass das Bestandsmauerwerk nicht wie vermutet einschalig war, sondern aus zwei Ziegelmauern mit dazwischen liegender Luftschicht bestand. Hier mussten während des Bauablaufs notwendige Korrekturen vorgenommen werden. Am Ende wurden eine befriedigende Luftdichtheit und ein sehr niedriger Kennwert für den Wärmeverlust über Wärmebrücken erreicht.

Im Rahmen des über ca. zwei Jahre durchgeführten Messprogramm wurden Klimadaten, die wichtigsten Energieströme der Gebäude und der Heizzentrale (inklusive Hilfsstrom und

Haushaltsstrom) sowie wesentliche Kenngrößen des Wohnkomforts und des Nutzerverhaltens (Raumtemperaturen, Luftfeuchtigkeit, Fensteröffnung) stündlich erfasst.

Bei der Heizwärme wurden in der Realität deutlich niedrigere Verbrauchswerte erreicht, als vorher in der Berechnung (angelehnt an das EnEV-Verfahren) ermittelt worden waren. Diese Unterschiede konnten zu einem großen Teil – allerdings nicht vollständig – anhand der Messwerte über die tatsächlichen Randbedingungen (Klimadaten, Innentemperaturen, Luftwechsel) erklärt werden.

In der Heizzentrale zeigen die Messwerte eine niedrigere Effizienz an, als ursprünglich erwartet worden war. Eine Ursache kann dabei in dem geringeren Wärmebezug der Gebäude gesehen werden, allerdings wurden durch das Messprogramm auch Fehlfunktionen der Regelung und nicht optimale Betriebszustände einzelner Komponenten (z. B. zu hohe Massenströme, unnötiger Dauerbetrieb von Umwälzpumpen) identifiziert. Die Fehler konnten teilweise verbessert werden, allerdings besteht weiterhin Optimierungsbedarf. Es zeigt sich hier, dass gerade bei komplexeren Wärmeversorgungssystemen eine sorgfältige Planung allein nicht ausreicht, sondern auch eine richtige Einstellung der Komponenten sowie eine laufende Nachkontrolle des Anlagenbetriebs wichtig sind.

Insgesamt konnten die im Mittel über die drei Gebäude rechnerisch ermittelten Brennstoffeinsparungen von 62 % (bezogen auf den unteren Heizwert, vorher Erdgas, nachher Holzpellets) durch die Messungen bestätigt werden (Ergebnis: 58 %, nicht klimabereinigt), wobei das Verbrauchsniveau sowohl vorher als auch nachher etwas niedriger liegt als berechnet. Die mit der Reduzierung des Brennstoffverbrauchs verbundene Primärenergieeinsparung liegt wegen der unterschiedlichen Primärenergiefaktoren von Erdgas und Pellets mit ungefähr 90 % noch deutlich höher. Ebenfalls liegt die Reduktion bei den CO₂-Emissionen über 90 %.

Die Lüftungsanlagen erfüllen in den beiden betroffenen Gebäuden ihre Funktion und garantieren insbesondere eine niedrigere Luftfeuchtigkeit in der Heizperiode als in dem Gebäude mit Fensterlüftung. Die Wärmerückgewinnung im ESH 40 entspricht den Erwartungen (Rückwärmezahl > 0,85), der Hilfsstromverbrauch schwankt abhängig vom Nutzerverhalten deutlich (teils niedriger als berechnet wegen Betrieb auf sehr niedriger Stufe, teils höher wegen Anlagenbetrieb auch im Sommer).

Durch die Bewohnerbefragung wurden verschiedene Aspekte des Modernisierungsvorhabens aus Mietersicht beleuchtet. Insgesamt zeigte sich, dass die Bewohner nach der Modernisierung mit den durchgeführten Maßnahmen sehr zufrieden waren. Dabei ist zu beachten, dass es sich bei drei Mietparteien um „Altmieten“ handelt, die während der Bauarbeiten in ihren Wohnungen verblieben und zwischenzeitlich hohen Belastungen durch Lärm und Schmutz ausgesetzt waren. Aufgrund der geringen Fallzahl und der Besonderheiten des Hofheimer Projekts lassen sich die Ergebnisse natürlich nicht beliebig verallgemeinern, es ist aber auffällig, dass sich ähnliche Tendenzen auch bei einem anderen, breiter angelegten Befragungsprojekt des IWU ergaben (Erfassung von Modernisierungsvorhaben in fünf Städten, Befragung von ca. 100 Mieterhaushalten).

Die geforderten Energiesparstandards EnEV-Neubau-Niveau, Energiesparhaus 60 und Energiesparhaus 40 wurden in allen drei Fällen eingehalten. Dabei erwies sich die Vorgabe für die Primärenergie als am wenigsten problematisch: Der Grenzwert für das ESH 40 (40 kWh/m²a bezogen auf die Gebäudenutzfläche A_N) konnte hier sogar durch das „EnEV-Gebäude“ eingehalten werden. Dies lag an der Verwendung von Holzpellets als Energieträger, also einer erneuerbaren Energiequelle. Da es sich hier allerdings um eine knappe Ressource handelt, ist eine solche Lösung natürlich nicht nachhaltig. Daher ist es wichtig, dass auch mit diesem Energieträger äußerst sparsam umgegangen wird, die erhöhten Anforderungen an den Wärmeschutz im Fall des ESH 60 und ESH 40 haben also auch im vorliegenden Fall eine wesentliche Bedeutung und Berechtigung. Die Vorgaben für den spezifischen Transmissionswärmeverlust H_T' wurden beim ESH 60 (ebenso wie beim EnEV-Neubau-Standard) noch merklich unterschritten (diese beiden Häuser sind hier also sowohl bei Primärenergie als auch beim Wärmeschutz noch besser als gefordert), während sie beim ESH 40 genau eingehalten wurden.

Vor dem Hintergrund einer begrenzten Verfügbarkeit von Biomasse wurden – unabhängig von der konkreten Realisierung in Hofheim - Vergleichsrechnungen mit anderen Heizsystemen (Brennwertkessel, elektrische Erdreich-Wärmepumpe, ergänzende Solaranlage) durchgeführt. Es zeigte sich, dass insbesondere die Einhaltung des ESH 40-Standards erhebliche Anstrengungen, d. h. einen sehr hohen Wärmeschutz und die Kombination verschiedener anlagentechnischer Maßnahmen - erfordert.

Die Investitionskosten der drei Hofheimer Gebäude wurden ermittelt und es wurden Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen durchgeführt. Dabei zeigte es sich, dass gegenüber einer Referenzmodernisierung, die nur die notwendigsten Energiesparmaßnahmen vorsieht (diejenigen, die sich durch Fensteraustausch, neuen Dachstuhl und Heizkesselerneuerung ohnehin ergeben) sowohl der EnEV-Neubau-Standard als auch knapp das ESH 60 im Bereich der Wirtschaftlichkeit liegen. Das heißt, hier liegen die eingesparten Energiekosten höher als die annuisierten Mehrinvestitionen. Das ESH 40 erreicht die Wirtschaftlichkeit ebenfalls, wenn gleichzeitig auch die KfW-Förderung (CO₂-Gebäudemodernisierungsprogramm) berücksichtigt wird. Dabei ist zu beachten, dass die speziellen GEDT-Straßenfassaden mit Vakuumdämmung in den Berechnungen nicht berücksichtigt wurden, sondern sowohl bei der Kosten- als auch bei der Energiebilanzrechnung durch die herkömmlichen Wärmedämmverbundsysteme der anderen Fassaden ersetzt wurden. Die Kosten der Lüftungsanlagen wurden voll der Energieeinsparung zugerechnet. Nimmt man dagegen an, dass auch im Referenzfall eine Lüftungsanlage (Abluftanlage) zur Verbesserung des Wohnkomforts und Versicherung gegen Bauschäden eingebaut wird, so ergeben sich nun auch ohne Förderung für das ESH 40 wirtschaftliche Vorteile gegenüber dem Referenzfall.

Die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen wurden um spezielle Analysen aus Sicht des Vermieters, der direkt von erhöhten Mieteinnahmen und nicht von eingesparten Energiekosten profitiert, ergänzt. Unter der Annahme, dass sich durch den verbesserten energetischen Standard jeweils das Leerstandsrisiko reduzieren und die Mieteinnahmen erhöhen lassen, ergeben sich auch Vermietersicht wirtschaftliche Vorteile durch die in Hofheim realisierten verbesserten Energiesparstandards gegenüber der Referenzsanierung – und erst recht gegenüber dem nicht modernisierten Ausgangszustand.

Einen besonderen Schwerpunkt in dem Forschungsprojekt bildete die Entwicklung und Erstanwendung der GroÙelement-Dämmtechnik (GEDT) mit Vakuumdämmung. Die besonderen Charakteristika dieses Ansatzes sind:

- Einsatz vorgefertigter geschosshoher GroÙelemente bei der Altbausanierung
- Einsatz von Vakuum-Isolationspaneelen (VIP) als Dämmkern
- Integration der Fenster in die GroÙelemente.

Das angestrebte Ziel wurde in dem Forschungsvorhaben erreicht. Die Entwicklung und Erstanwendung der neuen Dämmtechnologie konnte erfolgreich abgeschlossen werden.

Dabei hatte sich das Vorhaben als schwieriger herausgestellt, als im Vorfeld erwartet worden war. Eine besondere Herausforderung bestand darin, die Entwicklung parallel zu dem Modernisierungsvorhaben durchzuführen, bei dem sie direkt angewendet werden sollte. Ein solcher Ansatz erschien zunächst als gerechtfertigt, da bei der GroÙelement-Dämmtechnik auf Testanwendungen mit konventioneller Dämmung zurückgegriffen werden konnte. Es zeigte sich aber im Laufe des Projekts sehr schnell, dass hier eine weitgehende Neuentwicklung notwendig war. Der Grund lag vor allem in der mangelnden statischen Belastbarkeit der Vakuumisolationspaneele für den aus Sicherheitsgründen unterstellten pessimistischen Fall, dass sie defekt, also belüftet sind. Als Folge davon konnte das „Sandwichprinzip“, das sonst bei schichtweise aufgebauten Elementen eine Lastübertragung von einer Ebene in die nächste erlaubt, im Bereich der Vakuum-Dämmpaneele nicht genutzt werden. Stattdessen mussten die statischen Aufgaben durch neu zu entwickelnden Stahl-Bauteile übernommen werden. Stahlanker durchdrangen zum Teil die von den VIPs gebildete Dämmebene und führten dadurch auch zu verstärkten Wärmebrückeneffekten. Diese konnten aber angesichts eines Beitrags von ca. 15 % zum Wärmedurchgangskoeffizienten der Gesamtkonstruktion ($U = 0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$) letztlich in vernünftigen Grenzen gehalten werden.

Trotz aller Schwierigkeiten konnte am Ende demonstriert werden, dass die neue Technologie in der Baupraxis realisierbar ist. Ein entscheidender Punkt im Projektverlauf war das Aufhängen der 12 Elemente vor Ort in Hofheim: Auch dieses erfolgte in dieser Erstanwendung nicht so reibungslos, wie man das für die Zukunft erwarten würde, denn ein Motiv für die Anwendung von GroÙelementen besteht ja gerade darin, Arbeitsleistungen und Arbeitszeit von der Vor-Ort-Montage auf der Baustelle zur Vorfertigung im Werk zu verschieben. Letztlich ist aber festzustellen, dass die Koordination der verschiedenen Beteiligten vom Entwickler über den Planer bis zum Arbeiter im Werk und Monteur vor Ort erfolgreich war und gezeigt werden konnte, dass die engen Vorgaben, die an die Maßhaltigkeit einer solchen Konstruktion zu stellen sind, auch in einem realen Bauprozess eingehalten werden können.

Auch die Messungen (Funktionskontrolle der Vakuum-Isolationspaneele, Verlauf von Temperatur und Feuchte an verschiedenen Stellen des Elements sowie Schalldämmung) zeigen sehr befriedigende Ergebnisse. Angesichts eines Anteils von nur ca. 6 % defekter Vakuum-Isolationspaneele kann man davon ausgehen, dass das Ziel, durch die Vorfertigung im Werk einen guten Schutz der empfindlichen Paneele zu realisieren, erreicht wurde.

Auch wenn das neue Dämmkonzept also erfolgreich umgesetzt wurde, war gleichzeitig sicherlich nicht zu erwarten, dass in einem solchen Projekt - sozusagen aus dem Stand heraus - direkt ein marktfähiges Produkt entwickelt werden könnte. Die Kosten der GEDT-Elemente lagen im Modellprojekt bei ca. 1200 € pro Quadratmeter Elementfläche und könnten nach ersten Schätzungen durch eine Kleinserienfertigung auf ca. 900 €/m² gesenkt werden. Diese Werte liegen erheblich über den Kosten üblicher Außenwanddämmsysteme. Ein solches Ergebnis kann bei der Erstentwicklung und Erstanwendung eines komplexen neuen Systems letztlich nicht überraschen und erlaubt noch kein Urteil über die zukünftigen Anwendungsmöglichkeiten. Auch besteht nicht unbedingt eine direkte Konkurrenz zu Standard-Wärmeschutzmaßnahmen: Die Anwendung der Vakuumdämmung ist ja zunächst einmal für besondere Situationen von Interesse, in denen die erwünschten Wärmeschutzeigenschaften bei gleichzeitig begrenzter Schichtdicke mit herkömmlichen Dämmstoffen nicht mehr erreicht werden können. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass es insbesondere im Nichtwohnungsbau einen Markt auch für hochpreisige Fassadensysteme (mit Kosten bis über 1000 €/m² gibt). Davon abgesehen sind die hohen Kostenwerte aber natürlich ein Hinweis darauf, dass für eine breitere Anwendung dieses Systems die Möglichkeiten einer Weiterentwicklung ausgeschöpft und Optimierungen durchgeführt werden sollten.

Diese Schlussfolgerung wird auch durch die energetische Lebenszyklusanalyse nahe gelegt: Grundsätzlich ist das Ergebnis positiv: Durch den verbesserten Wärmeschutz spart das System ein Mehrfaches (nämlich das 3,5-fache) der für die Herstellung aufgewendeten Energie ein. Aber auch hier fällt der Vergleich mit einer herkömmlichen Außenwanddämmung ungünstig aus: Bei einem Wärmedämmverbundsystem mit gleicher Dämmwirkung liegt die Herstellungenergie fast um einen Faktor 20 niedriger als die erreichte Energieeinsparung.

Insgesamt gesehen konnte die GEDT-Neuentwicklung also erfolgreich abgeschlossen und die Realisierbarkeit des neuen Dämmsystems demonstriert werden. Auch das Messprogramm zeigt positive Ergebnisse für die Funktionalität und nur eine geringe Ausfallquote der Vakuumpaneele. Im Laufe von Entwicklung und Umsetzung wurden jedoch auch zahlreiche Erkenntnisse erzielt, die in die Weiterentwicklung hin zu einem marktfähigen Produkt einfließen sollten. Ergebnis dieser Entwicklungen müssten neben Optimierungen bei Elementaufbau und -abmessung vor allem eine Reduktion der Kosten und des Herstellungsenergieaufwandes sein.

Die Herstellung und Anwendung einer Gebäudedämmtechnik mit vorgefertigten Elementen unter Verwendung von Vakuumpaneelen wird auch mittelfristig noch ein hohes technisches Know-how und innovative Entwicklungen erfordern. Nicht zuletzt angesichts der Herausforderungen des Klimaschutzes ist es aber notwendig, auch in der Gebäude-Energiespartechnik weiterhin neue und auch unkonventionelle Wege zu erproben.

Literatur

- [Diefenbach 2002] Diefenbach, N.: Bewertung der Wärmeerzeugung in KWK-Anlagen und Biomasse-Heizsystemen, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, November 2002, Bestellnr. 08/02
- [Diefenbach et al. 2005] Diefenbach, N.; Loga, T.; Born, R.: Wärmeversorgung für Niedrigenergiehäuser - Erfahrungen und Perspektiven, Untersuchung im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, 101 S., IWU, 2005, Darmstadt, Bestellnr. 10/05
- [Diefenbach et al. 2006] Diefenbach, N.; Enseling, A; Loga, T. (IWU); Hertle, H.; Jahn, D.; Duscha, M. (ifeu); Beiträge der EnEV und des KfW-CO₂-Gebäudesanierungsprogramms zum Nationalen Klimaschutzprogramm, Endbericht (Juli 2005), Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 10. Mai 2006, ISBN 3-932074-86-8
- [DIN V 4108-6] DIN V 4108-6:2003-06: Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden, Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs, Beuth Verlag, 2003
- [Ebel et al. 2003] Ebel, W., Großklos, M., Knissel, J., Loga, T. und K. Müller (2003): Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2003
- [Flade et al. 2003a] Flade, A., Hallmann, S. Lohmann, G. & B. Mack (2003a): Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern aus sozialwissenschaftlicher Sicht. Abschlussbericht, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2003
- [Flade et al. 2003b] Flade, A., Hallmann, S. Lohmann, G. & B. Mack (2003b): Wohnkomfort im Passivhaus. Ergebnisse einer sozialwissenschaftlichen Untersuchung, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2003
- [Gropp 2007] Gropp, M.: Lebenszyklusanalyse der Großelement-Dämmtechnik mit Vakuumpaneel, Diplomarbeit an der TH Darmstadt, Institut WAR, Juni 2007
- [Hacke, Lohmann 2006] Akzeptanz energetischer Maßnahmen im Rahmen der nachhaltigen Modernisierung des Wohnungsbestandes. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2006
- [Loga et al. 2003] Loga, Großklos, Knissel: Der Einfluss des Gebäudestandards und des Nutzerverhaltens auf die Heizkosten – Konsequenzen für die verbrauchsabhängige Abrechnung, Studie im Auftrag der Viterra Energy Services AG, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2003
- [LEG] Hessisches Umweltministerium [Hrsg.]: Heizenergie im Hochbau – Leitfaden für energiebewusste Gebäudeplanung, 6. Auflage, Wiesbaden, 1999
- [Mayr et al. 2007] Mayr, J. (HWB); Leuschner, I.(ift) ; Reyer, E.; Kröger, R.; Bamberger, C. (IGRT); Großklos, M.; Diefenbach, N.; Lohmann, G. (IWU); Reuther, S.; Weber, C. (PDREI); Stölzel, C., Thoms, H.(Variotec): Sanierung von drei kleinen Wohngebäuden in Hofheim – Teilprojekt Großelement-Dämmtechnik mit Vakuumdämmung, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, November 2007, ISBN 9-783932-074950
- [PHPP] Passivhaus Projektierungs-Paket 2007, Passivhaus-Institut, Darmstadt, 2007
- [Xu 2007] Xu, Yang: Niedrigenergiehäuser im Wohngebäudebestand, Diplomarbeit an der Hochschule Darmstadt (Fachbereich Wirtschaft), 24.7.2007

Anhang I: Wärmebrückenberechnungen