



**PASSIV  
HAUS  
INSTITUT**

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

# Sanierung mit Passivhauskomponenten



## Planungsbegleitende Beratung und Qualitätssicherung Tevesstraße Frankfurt a.M.



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

Bauherr: ABG Frankfurt Holding GmbH

Darmstadt; Februar 2009

<p><b>Autoren:</b> Dr. Berthold Kaufmann Dipl.Ing. Søren Peper Dr. Rainer Pfluger Prof. Dr. Wolfgang Feist</p> <p><b>Unter Mitarbeit von:</b> Dipl.Ing Wolfgang Hasper</p> <p><b>Herausgeber:</b> PASSIVHAUS INSTITUT Dr. Wolfgang Feist Rheinstr. 44/46 D-64283 Darmstadt</p> <p>Tel: 06151 / 82699-0 Fax: 06151 / 82699-11 E-Mail: mail@passiv.de www.passiv.de</p> <p><b>Darmstadt, Februar 2009</b></p>	<p><b>Dieser Bericht entstand im Auftrag Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Wiesbaden</b></p> <p><b>Titel des Forschungsauftrages:</b> Wissenschaftliche Begleitung und messtechnische Untersuchung zur Demonstration von Passivhaus Gebäudetechnik in der Altbaumodernisierung am Beispiel Tevesstraße 36-54, Friedrich Ebert-Siedlung, Frankfurt/M.</p> <p><b>Sanierung Tevesstraße. Planungsbegleitende Beratung und Qualitätssicherung.</b></p> <p>Wir danken dem Bauherren, der ABG Frankfurt Holding, insbesondere Herrn Frank Junker und Herrn Braun für die wohlwollende Unterstützung des Projektes. Wir danken den Vertretern der ABG im Bauteam, Herrn Wagner und Herrn Theobald für die konstruktive Zusammenarbeit im Laufe des Projektes.</p> <p>Wir danken den Architekten, Büro faktor 10, Herrn Folkmer Rasch und Frau Petra Grenz und dem Haustechnikplaner, Ing. Büro Baumgartner, Herr Hans Baumgartner und Herrn Petrusch für die stete Diskussionsbereitschaft während der Planungs- und Ausführungsphase.</p>
<p><b>Haftungsausschluss:</b> Die Informationen in dieser Schrift wurden nach bestem Wissen zusammengestellt. Eine Haftung für den Inhalt kann jedoch trotz sorgfältiger Bearbeitung und Korrektur nicht übernommen werden. Dies gilt insbesondere für Detailzeichnungen, die in jedem Fall als Prinzipskizzen zu verstehen sind, in denen nicht immer alle baulich relevanten Komponenten enthalten sein müssen.</p>	

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG UND EINORDNUNG.....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>VORHABENSBESCHREIBUNG .....</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>GEBÄUDEHÜLLE.....</b>	<b>21</b>
	<b>Luftdichtheit der Gebäudehülle.....</b>	<b>23</b>
	Luftdichtheitstest zur Prüfung der Tauglichkeit erster Maßnahmen .....	23
	Luftdichte Ertüchtigung der alten Kellerdecken.....	26
	Luftdichter Fenstereinbau: Bemerkungen zur Realisierung im Detail .....	28
	Luftdichtheit im Haustür bzw. Kellertürbereich, Abgang zum Keller.....	31
	Luftdichter Anschluss von Rohrdurchführungen durch die Außenwand.....	32
	Luftdichtheit im DG Neubau (vorgefertigte Holz-Bauelemente) .....	35
	<b>Untersuchung der Luftdichtheit nach der Sanierung.....</b>	<b>40</b>
	Untersuchung Haus 36 bis 46 (6er Block).....	41
	Untersuchung Haus 48 bis 54 (4er Block).....	47
	Ergebnisse Luftdichtheitsuntersuchung .....	51
	Messprotokolle zur Untersuchung der Luftdichtheit nach der Sanierung .....	55
	<b>Wärmedämmung und Wärmebrückenreduktion.....</b>	<b>65</b>
	Wärmedämmung und WB im DG Neubau (Holz-Leichtbau) .....	65
	Wärmebrückenreduktion .....	68
	Wärmedämmung unter der Kellerdecke .....	68
	Anschluss Kellerdecke an Außenwand.....	73
	Sturz Kellertür zum Garten (ursprüngliche Planung).....	83
	Sturz Kellertür zum Garten.....	85
	Anschluss Kellerdecke an Innenwand (Varianten während der Planung).....	87
	Anschluss Kellerdecke an Innenwand (realisierte Details).....	91
	Wärmebrückenwirkung von Installationen in der Außenwanddämmung.....	94
	Balkone im Nachbarhaus .....	97
	Haustür 99	
	Wärmebrücken beim Fenstereinbau – Diskussion von Varianten während der Planung 103	
	Fenstereinbau – realisierte Details.....	109
	Anker für Gerüst und vorgestellte Balkone.....	127
	Verankerung vorgestellter Balkone .....	128
	Qualitätssicherung: Dämmücken .....	132
	<b>Infrarotthermografie .....</b>	<b>133</b>
	Außenthermographie .....	134
	Innenthermographie.....	144
	Haustechnische Installationen .....	154
	Anhang IR-Thermografie: Einige weitere Außenaufnahmen.....	156

---

<b>4</b>	<b>HAUSTECHNIK .....</b>	<b>159</b>
	<b>Beratungsleistung des Passivhaus Instituts während der Planungsphase: Grundsätze zur Vermeidung von Verteilverlusten bei zentraler Wärmeversorgung .....</b>	<b>159</b>
	<b>Haustechnik .....</b>	<b>162</b>
	<b>Varianten für Heizwärmeversorgung und Warmwasserbereitung .....</b>	<b>162</b>
	Zentrale Wärmeversorgung .....	163
	Dezentrale Versorgung mit Wärmepumpen-Kompaktgeräten.....	165
	Solaranlage zur Warmwasserbereitung .....	171
	<b>Grundrissgestaltung und Systemanordnung .....</b>	<b>172</b>
	<b>Kanalnetz der Lüftungsanlage .....</b>	<b>177</b>
	Außen-/Fortluftkanalführung .....	177
	Zuluft- /Abluftkanalnetz .....	180
	Kanalführung.....	181
	Schalldämpfer .....	181
	Deckenabhängung.....	183
	<b>Balanceabgleich Lüftungsgeräte: Stichprobenartige Überprüfung .....</b>	<b>184</b>
<b>5</b>	<b>PLANUNGSVARIANTEN UND ENERGIEBILANZ (PHPP) .....</b>	<b>188</b>
	Auswirkung der Wärmebrücken auf die Energiebilanz.....	188
	Auswirkung von Wärmebereitstellungsgrad und Luftdichtheit.....	189
	Heizlastberechnung für einzelne Wohneinheiten .....	191
<b>6</b>	<b>LITERATUR .....</b>	<b>195</b>

## 1 Einleitung und Einordnung

Die Aufgabe der Gebäudeheizung nimmt in Deutschland etwa ein Drittel des gesamten Endenergieverbrauchs in Anspruch. Dies ist damit der bedeutendste Einzelposten in der Energiebilanz.

Die Aufgabe der „Heizung“ besteht im Bereithalten und Garantieren von komfortablen Innenraumbedingungen: Der Sicherstellung der thermischen Behaglichkeit. Dank jahrzehntelanger systematischer Arbeiten auf diesem Gebiet, die vor allem dem dänischen Forscher Ole Fanger (gest. 2006) zu verdanken ist, wissen wir heute über die Bedingungen für thermische Behaglichkeit sehr gut Bescheid. Die wesentlichen Kriterien sind in der internationalen Norm ISO 7730 niedergelegt. Damit müssen im Innenraum stabile thermische Verhältnisse in einer höchstens etwa 1 Kelvin breiten Umgebung des Punktes der optimalen operativen Temperatur eingehalten werden. Dazu kommen Nebenbedingungen an die Luftfeuchtigkeit, die Zugfreiheit nicht zu hohe Strahlungstemperaturdifferenzen und nicht zu geringe Temperaturen am Fußboden.

Das Aufrechterhalten dieser stabilen thermischen Bedingungen ist nach den Gesetzen der Thermodynamik nicht an eine Energiezufuhr gebunden. Vielmehr würde ein System schon von selbst in diesen einmal erreichten Bedingungen verharren, wenn keine Wärmeverluste auftreten würden. Heizwärme wird überhaupt nur dann benötigt, wenn die Wärmeverluste die passiv vorhandenen Wärmegewinne übersteigen.

Nun sind gewisse Wärmeverluste in winterkalten Klimaten kaum vollständig zu vermeiden: Da die erforderlichen Innentemperaturen über den mittleren Außentemperaturen von ca. Mitte Oktober bis Mitte März liegen, ist die Richtung des Wärmeverluststromes von innen nach außen bereits thermodynamisch vorgegeben. Wie hoch die Wärmeverluste tatsächlich werden, hängt wesentlich von zwei Einflüssen ab: von der Höhe der Temperaturdifferenz nach außen (welche eine Kennzeichnung des Klimas ist) und von der thermischen Qualität der Gebäudehülle, d.h. vor allem deren Wärmedämmeigenschaft. Letztere können wir heute in hohem Maß beeinflussen, inzwischen so stark, dass der noch verbleibende Verlust auch in Mitteleuropa so gering wird, dass die Heizung nur noch vernachlässigbar wenig Energie verbraucht.

Schon in den achtziger Jahren haben grundsätzliche Untersuchungen gezeigt, dass durch Verbesserungen der Gebäudehülle und der Haustechnik bedeutende Einsparungen im Energieverbrauch möglich sein sollten: Eine Effizienzverbesserung um einen Faktor 10 war theoretisch als möglich erkannt worden. Es dauerte allerdings bis 1991, dass diese Möglichkeiten in einem konkreten und normal bewohnten Neubauprojekt auch wirklich umgesetzt und wissenschaftlich validiert wurden: Mit dem Passivhaus Darmstadt Kranichstein, einer von vier Familien bewohnten Reihenhaus-

zeile, wurde der Beweis für den Neubau angetreten. Dieses, ebenfalls von der Hessischen Landesregierung geförderte Projekt, zeigte einen Heizenergieverbrauch von im Durchschnitt 9,2 kWh/(m<sup>2</sup>a) – und dies stabil über die vergangenen 17 Jahre. Der tatsächliche Heizenergieverbrauch liegt damit um mehr als 95% unter dem typischen Verbrauch von Altbauten (der im Bereich von um 180 kWh/(m<sup>2</sup>a) liegt).

Die praktisch erreichte enorme Einsparung beruht auf Komponenten und Verfahren, wie sie in Europa heute, ein gutes Jahrzehnt später, am Markt verfügbar sind – die Verfügbarkeit ist in vielen Fällen gerade auf die guten Erfahrungen mit dem ersten Passivhaus und auf die Weiterentwicklung und Weiterverbreitung dieses Konzeptes zurück zu führen. Die entscheidenden Komponenten sind:

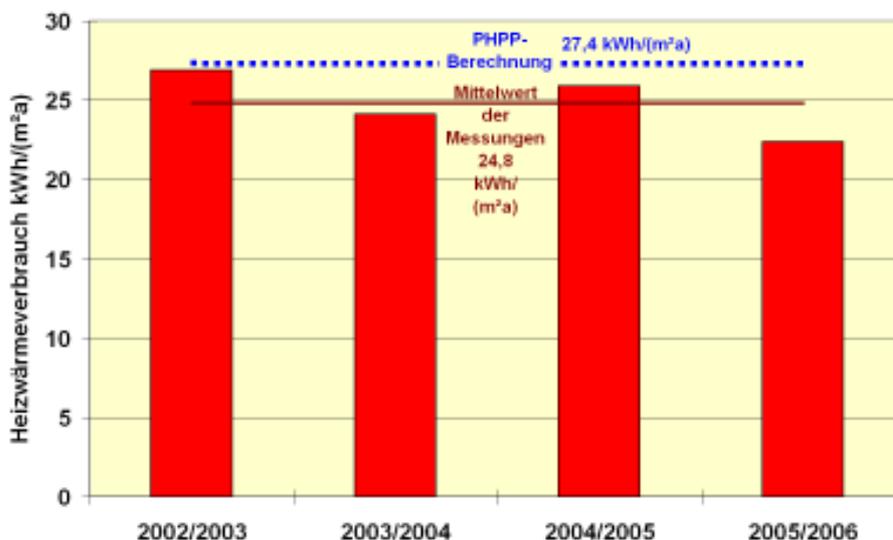
- Eine sehr gute **Wärmedämmung** der opaken Bauteile (Außenwände, Dächer, Kellerdecken) im Bereich von 20 bis 40 cm Dämmstoffdicke
- Eine hohe Qualität der Fenster, die **Dreischeiben-Wärmeschutzverglasungen**, einen **wärmegeämmten Fensterrahmen** und einen **thermisch getrennten Randverbund** aufweisen müssen
- Eine sorgfältige Reduzierung, am besten Vermeidung, von **Wärmebrücken**
- Eine **luftdichte** Konstruktion
- Eine **Wärmerückgewinnung** aus der verbrauchten Abluft

Es ist geradezu ein Glücksfall, dass diese wichtigsten Einflussgrößen auf den Energieverbrauch gerade die beim Neubau und der Sanierung regelmäßig ohnehin benötigten oder zu modernisierenden Komponenten der Gebäude betreffen: Wände, Dächer, Fenster und auch die Lüftung werden bei jedem Gebäude, das für den dauerhaften Aufenthalt von Menschen geschaffen wird, immer ohnehin gebraucht. Diese Bauteile (oder zumindest die energietechnisch entscheidenden Teile davon) müssen ohnehin in regelmäßigen Zyklen erneuert werden (z.B. Neuverputz einer Fassade). Es bietet sich daher im Zuge eines Neubaus oder im Zuge einer Ohnehin-Erneuerung die Chance, die Qualitäten dieser relevanten Bauteile nachhaltig zu verbessern und dadurch die Energiebilanz des Gebäudes maßgeblich zu beeinflussen.

Schon schnell nach dem erkennbaren Erfolg der Passivhaustechnik bei Neubauten wurde die Frage aufgeworfen, inwieweit sich diese Technik auch für die Modernisierung der Bestandsgebäude eignet. Diese Frage konnte klar mit ja beantwortet werden: Denn auch bei Gebäuden im Bestand ist bei der weit überwiegenden Zahl eine nachträgliche Wärmedämmung im Zuge einer Fassadenerneuerung möglich; Fenster werden im Lebenszyklus mehrfach ausgewechselt und können durch thermisch hochwertige Komponenten mit Dreischeibenverglasungen ersetzt werden – und auch

der Einbau einer effizienten Wohnungslüftung erweist sich bei Altbauten als in allen Fällen realisierbar [AKKP 30].

Allerdings: Einige grundsätzliche Unterschiede zum Neubau bleiben: Die Lage, Grundrisse und tragenden Konstruktionen sind weitgehend vorgegeben bzw. nur mit vergleichsweise hohem Aufwand zu ändern; bei größeren Veränderungen in diesem Bereich wird die Kostengrenze zur Alternative „Abriss und Neubau“ ziemlich schnell erreicht. Beim hier behandelten Sanierungsprojekt bewegen sich die Maßnahmen bereits im Grenzbereich dieser Kostensituation. In aller Regel wird in Altbauten die Wärmebrückensituation am Fußpunkt der Gebäude nur suboptimal zu lösen sein: Bautechnisch wäre zwar eine Auftrennung des tragenden Mauerwerks und die Einfügung einer thermischen Trennung durchaus durchführbar; eine solche Maßnahme verbietet sich aber auf Grund der damit verbundenen sehr hohen Investitionskosten. Dies ist einer der wichtigsten Gründe, weshalb es bei Altbaumodernisierungen *meist nicht möglich ist, mit dem sanierten Gebäude tatsächlich den Passivhausstandard zu erreichen*, auch dann nicht, wenn überall die derzeit marktverfügbar besten Komponenten eingesetzt werden.



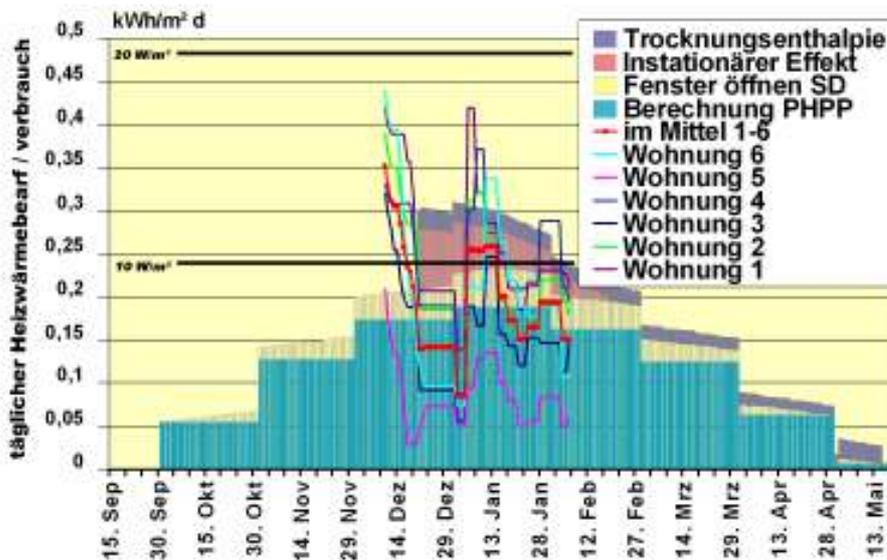
**Abbildung 1: Messer-  
gebnisse aus dem Vor-  
läuferprojekt „Sanierung  
Jean-Paul-Platz“ in  
Nürnberg zum Heizwär-  
meverbrauch im Ver-  
gleich mit den a priori  
Berechnungen. Die ge-  
messenen Verbrauchs-  
werte liegen etwa 88%  
unter dem Verbrauch des  
ursprünglichen Altbaus  
(205 kWh/(m²a)).**

(Quelle: Ablesedaten von  
Dr. Burkhard Schulze  
Darup)

So wurde bei den ersten Modernisierungsprojekten mit Passivhauskomponenten auch zunächst der Passivhausstandard bei den sanierten Gebäuden gar nicht angestrebt: Sowohl bei dem vom PHI maßgeblich im technischen Niveau bestimmten Projekt der LUWOG/Ludwigshafen "3-Liter-Haus" [AKKP24], [Schnieders2000 und 2001] als auch beim Projekt "Modernisierung mit Faktor 10, Jean-Paul-Platz Nürnberg" [Feist 2002], [Schulze-Darup 2003] wurden vielmehr die ökonomisch tragfähigen Passivhauskomponenten so weit wie möglich und sinnvoll eingesetzt, aber bewusst auf das Erreichen des Passivhausstandards (15 kWh/(m²a)) verzichtet: Für beide Objekte hat das PHI die Energiebilanz berechnet – mit Ergebnissen zwischen 26 und 30 kWh/(m²a) Heizwärmebedarf.

Beide Projekte wurden wie geplant ausgeführt und im Anschluss von jeweils anderen Wissenschaftlern messtechnisch begleitet. Projekt 3-Liter-Sanierung Ludwigshafen: [Schnieders 2000 und 2001], [Weyand 2005 und 2007], [Dahlem 2003], [Heinrich 2007], Projekt Nürnberg Jean-Paul-Platz: [Feist 2002 und 2003], [Schulze Darup 2003 und 2005]. In diesen beiden Projekten ergaben sich jeweils bei der Luftdichtheit niedrigere gemessene Restleckagen als ursprünglich planerisch für möglich gehalten. Und in beiden Projekten waren die letztendlich gemessenen Heizenergieverbräuche im Durchschnitt geringer als die rechnerisch zuvor ermittelten Werte. Damit haben das Konzept eine hohe Zuverlässigkeit und die Komponenten eine reproduzierbar hohe Qualität bewiesen.

Noch bedeutender war die Erkenntnis aus dem Projekt „Modernisierung mit Faktor 10 Jean-Paul-Platz“, dass die gemessenen Heizlasten in allen Wohnungen des Mehrfamilienhauses sich deutlich niedriger als erwartet einstellten (vgl. Abbildung 2). Die gemessenen Heizlastdaten sind auch deswegen so gering, weil sich im Mehrfamilienhaus auf Grund der höheren Belegungsdichte dauerhaft zuverlässige innere Lasten einstellen und weil die alten massiven Gebäude nach der außen angebrachten Wärmedämmung eine sehr viel höhere Zeitkonstante aufweisen.



**Abbildung 2: Messergebnisse zur Heizlast aus dem Vorläuferprojekt „Sanierung Jean-Paul-Platz“ in Nürnberg. Bis auf die Anheizspitzen liegen die gemessenen Heizlastverläufe bei sehr geringen Werten. Dieses Objekt wird mit Heizkörpern beheizt – die verfügbare Heizleistung ist sehr viel höher als die in Anspruch genommene.**

(Quelle: Ablesedaten von Dr. Burkhard Schulze Darup)

Auch in einigen weiteren Folgeprojekten (Hohelooogstraße [Peper 2008]) mit vergleichbarem Ansatz erwiesen sich die Ergebnisse als in voller Übereinstimmung mit den Erwartungen. Auch die Kostendaten für die Ausführung der Sanierungen wurden einerseits plangemäß eingehalten und sie erwiesen sich als ökonomisch bereits unter den gegenwärtigen Randbedingungen unter Inanspruchnahme der KfW-Finanzierung tragfähig.

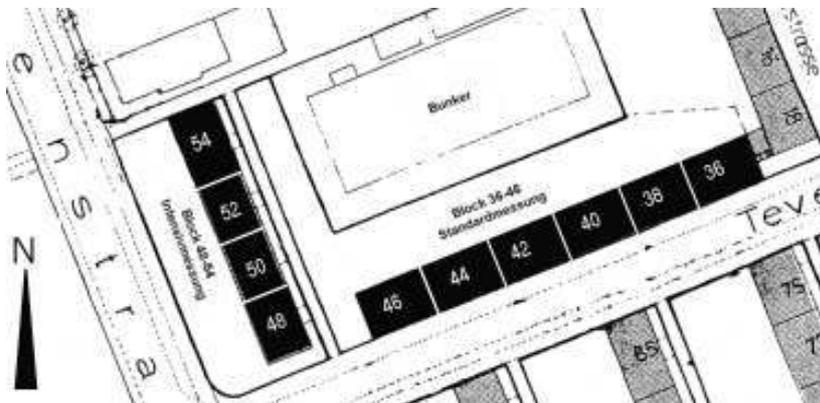
Diese Ergebnisse führten zu der konsequenten Überlegung, inwieweit die Vorteile der Passivhauskonzeption für den Neubau nicht doch, trotz der weniger günstigen Bedingungen in Altbauten, auf den Altbau übernommen werden können. Im Neubau

muss dazu die kritische Heizleistungsgrenze von  $10 \text{ W/m}^2$  unterschritten werden. Ab diesem Punkt ist es möglich, die Wärme nahezu vollständig über die Zuluft zuzuführen, wodurch sich das Konzept der Wärmeverteilung spürbar in Aufwand und Kosten reduziert. Erforderlich sind in der Regel nur noch Heizkörper in den Bädern (z.B. als beheizte Handtuchhalter). In sanierten Altbauwohnungen ist die  $10 \text{ W/m}^2$ -Grenze nicht immer zuverlässig einhaltbar. Andererseits ist es kein großes Problem, neben dem Badheizkörper wenige weitere Heizflächen zur Unterstützung dort vorzusehen, wo sie erforderlich sind – da es in jedem Fall ausreicht, die Heizflächen in der Nähe der inneren Erschließung zu platzieren, wodurch der Installationsaufwand sehr gering wird.

Gelingt es, dieses Konzept in einem sanierten Altbau erfolgreich zu erproben, so ergeben sich sehr weit gehenden Möglichkeiten der Kosteneinsparung sowohl bei den Modernisierungen als auch bei den späteren Betriebskosten. Die praktischen Potentiale für die Anwendung der Passivhaus-Heiztechnik auch im sanierten Bestand zu erproben, das war das Hauptziel des hier durchgeführten Forschungsprojektes.

## 2 Vorhabensbeschreibung

### Lage – Gebäudebeschreibung – Bauliche Maßnahmen



**Abbildung 3: Lageplan der Bestandsgebäude.**

Die Achsrichtungen der Bestandsgebäude sind um  $23^\circ$  im Uhrzeigersinn gegen die Haupthimmelsrichtungen verdreht.

**Tevesstraße 36-46: Südseite ist Eingangs- und Straßenseite, Nordseite ist Hofseite**

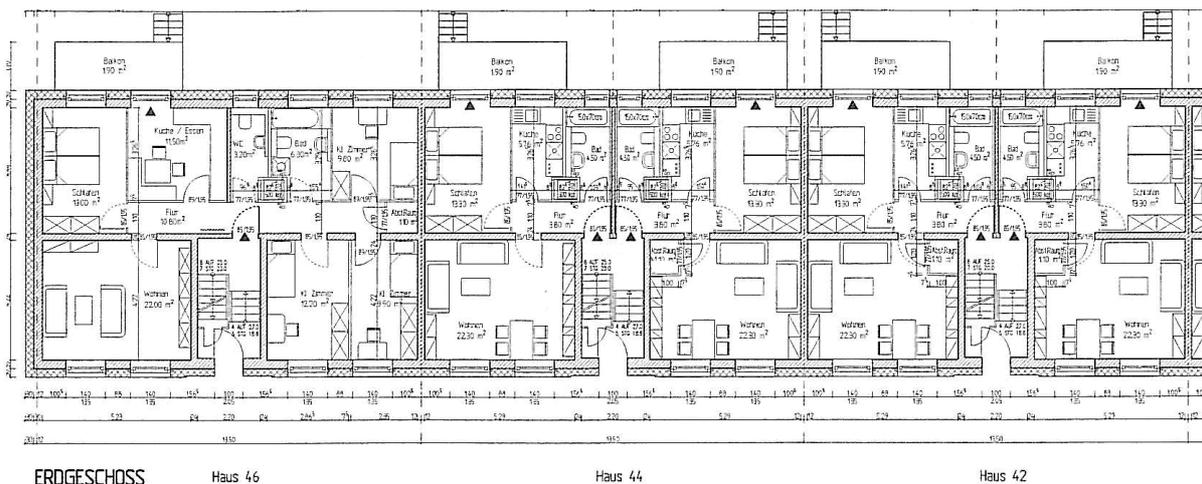
**Tevesstraße 48-54: Ostseite ist Hofseite und Eingangsseite; Westseite ist unverbaute Wohnseite**

Die sanierten Gebäude befinden sich in Frankfurt a. M. ca. 4 km westlich des Hauptbahnhofes in der Friedrich Ebert Siedlung Ecke Tevesstraße / Sondershausenstraße

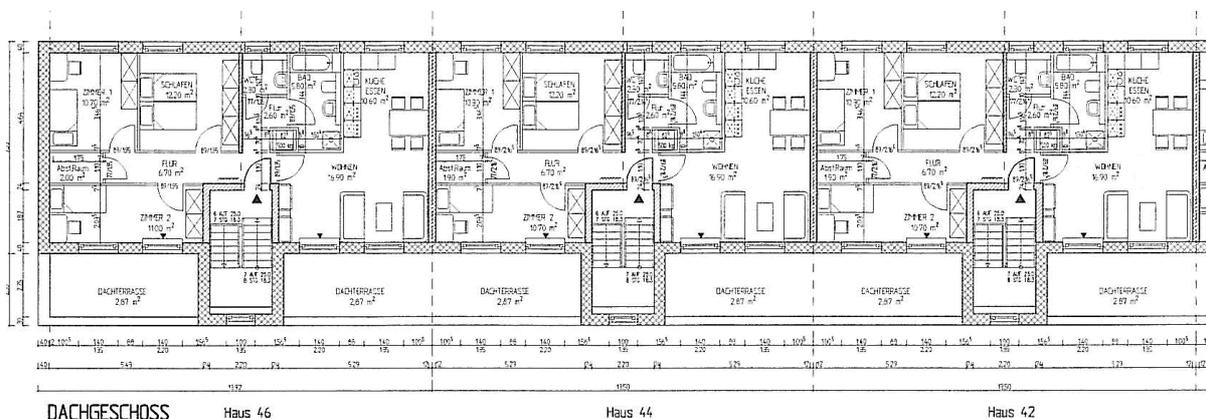
Es handelte sich ursprünglich um zwei Wohnblöcke aus den 50er Jahren mit ehemals insgesamt 60 Wohneinheiten, die als Zweispännerkonstruktion jeweils sechs Wohnungen über einen Hauseingang bzw. Treppenaufgang erschlossen. Der Block in der Tevesstraße weist dabei 6 Hauseingänge (Tevesstraße 36 bis 46, im Folgenden 6er-Block genannt) mit insgesamt ursprünglich 36 Wohneinheiten (WE) auf, der

in der Sondershausenstraße (Tevesstraße 48 bis 54, 4er Block) hat 4 Hauseingänge mit ursprünglich 24 WE, siehe Abbildung 3.

Die Eigentümerin, die ABG Frankfurt Holding, hatte sich entschlossen, die beiden Gebäude, welche einen erheblichen Modernisierungstau aufwiesen, grundlegend zu erneuern. Daher wurden beide Gebäude bis zum Frühjahr 2005 leergezogen, nachdem allen Bewohnern ein Ausweichquartier angeboten worden war. Alle Bewohner erhielten eine Option nach der Sanierung wieder zurückzukehren.



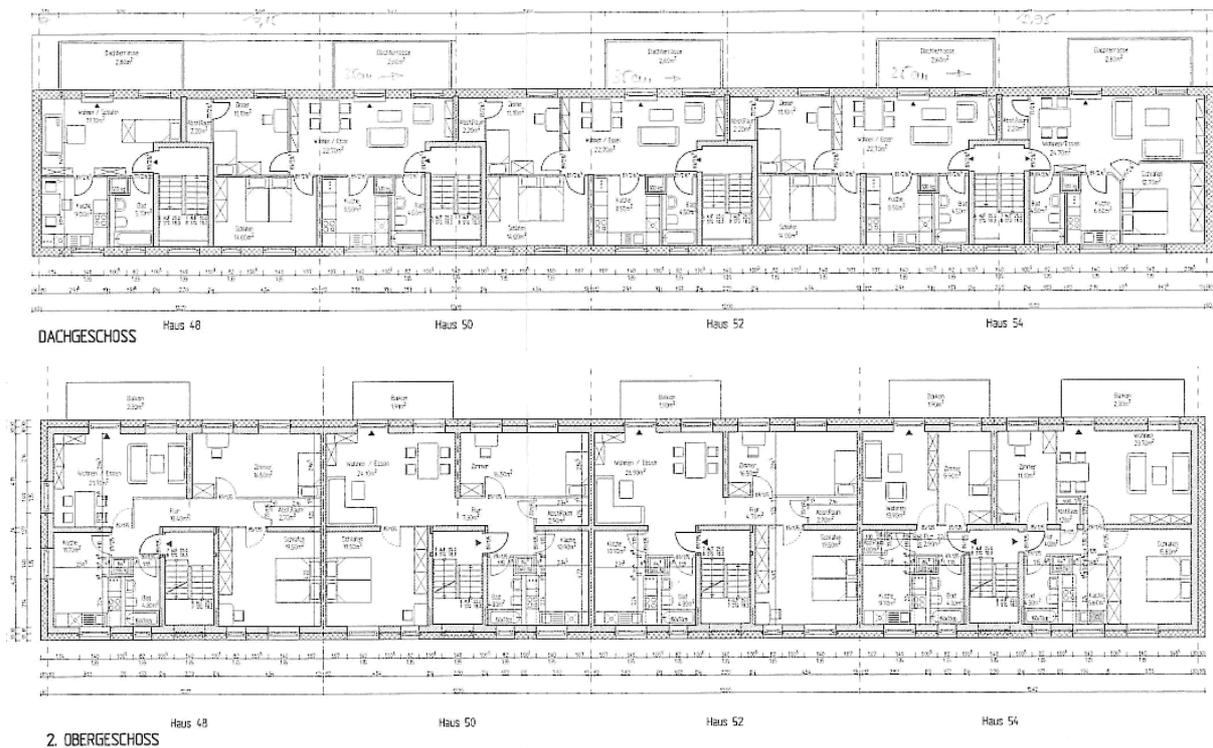
**Abbildung 4: Ausschnitt 6er-Block: Tevesstraße 46 bis 42 Erdgeschoss (aus Bauantrag 2004). Haus 46 eine Wohnung pro Treppenhaus, Haus 44 und 42 zwei Wohnungen pro Treppenhaus.**



**Abbildung 5: Ausschnitt 6er-Block: Tevesstraße 46 bis 42 Dachgeschoss (aus Bauantrag 2004). Eine Wohnung pro Treppenaufgang.**

Der Wohnungszuschnitt der Bestandsgebäude war durchweg Kleinwohnungen mit drei Zimmern, Küche, Bad mit im Mittel ca. 50 m<sup>2</sup> Wohnfläche. Die größten Wohnungen hatten 64 m<sup>2</sup>. Da diese Wohnungszuschnitte in den letzten Jahren zunehmend schwerer zu vermieten gewesen waren, lag die Entscheidung nahe, neben der baulichen Substanz auch die Grundrisse bzw. Wohnungszuschnitte grundlegend zu verändern.

Die Grundrissänderungen bezogen sich im Wesentlichen auf die Zusammenlegung zweier Wohnungen zu einer, um auch für Familien zeitgemäßen Wohnraum zu schaffen. So entstanden bis zu 80 m<sup>2</sup> große Wohnungen. Das alte Dachgeschoss wurde komplett abgetragen. Dort wurde ein neues Staffelgeschoss mit etwa 2/3 der Grundrissfläche des Gebäudes geschaffen. Die Grundrisse aus Abbildung 4 stammen aus den Bauantragsplänen von 2004. Der Zuschnitt einiger Wohnungen wurde später noch leicht verändert, weil noch weitere größere Wohnungen gewünscht wurden.



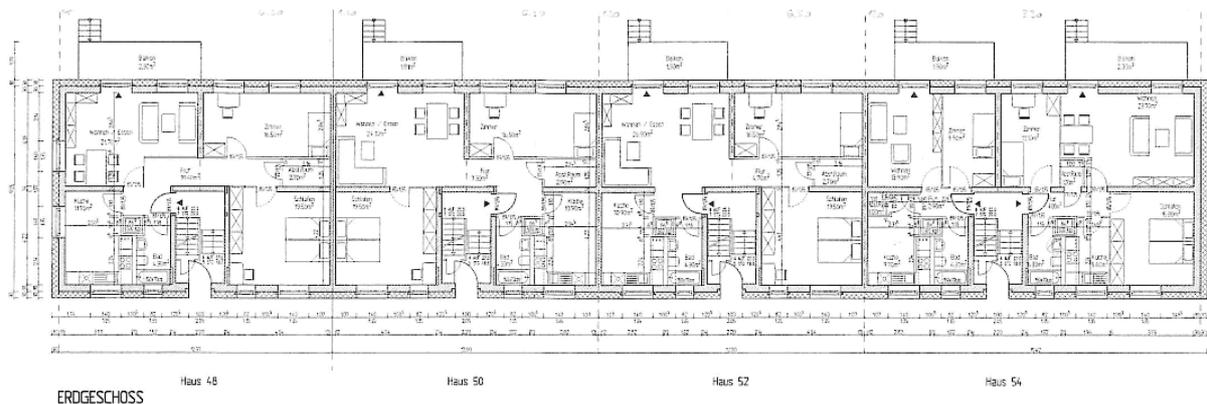
**Abbildung 6: 4er-Block: Tevesstraße 48 bis 54. 2. Obergeschoss und Dachgeschoss (aus Bauantrag 2004). Je eine bzw. zwei Wohnungen pro Treppenhauseingang.**

Die Grundrisse der neuen (kleinen) Wohnungen sind den alten sehr ähnlich: Bad/WC und Küche grenzen direkt aneinander und weisen ebenso wie das benachbarte Zimmer jeweils ein Fenster zur Eingangsseite (Tevesstr. 48-54) bzw. zur gegenüberliegenden Seite (Tevesstr. 36-46) hin auf. Die Grundrisse der kleinen Wohnungen sind daher nach wie vor zum Treppenhaus hin spiegelsymmetrisch. Ein Querschnitt durch die Gebäude findet sich in Abbildung 15.

Die gesamte Wohnfläche im 6er Block Tevesstraße 36-46 beträgt nach der Sanierung und Aufstockung etwa 2244 m<sup>2</sup> (Energiebezugsfläche nach PHPP). Der 4er-Block Tevesstraße 48-54 weist eine Gesamtwohnfläche von 1350 m<sup>2</sup> auf (Energiebezugsfläche nach PHPP).

Alle Wohnungen wurden gleichermaßen mit neuen Bädern ausgestattet. Alle Bodenbeläge wurden entfernt und durch neue ersetzt. Das war insbesondere im Erdgeschoss wichtig, weil dort ein Teil der Dämmung über der Kellerdecke angeordnet werden musste und außerdem die Luftdichtheit der alten Kellerdecke verbessert werden musste, vgl. Abbildung 24. Der alte Innenputz wurde teilweise entfernt, in jedem Fall aber komplett ausgebessert um als luftdichte Schicht dienen zu können. Das neue Staffelgeschoss wurde in Holz-Leichtbauweise mit vorgefertigten Elementen errichtet.

Die neuen Fenster sind nicht nur in Passivhausqualität ausgeführt, sondern die zwei-flügelige Teilung wurde in den Wohnungen komplett aufgegeben. Da außerdem die Fenster in die neue Dämmebene nach außen rücken, entsteht raumseitig eine zusätzliche Fensterbankfläche, die den 'neuen' Räumen einen sehr großzügigen Eindruck verleiht, vgl. Abbildung 128.



**Abbildung 7: 4er-Block: Tevesstraße 48 bis 54 Erdgeschoss (aus Bauantrag 2004). Eine bzw. zwei Wohnungen pro Treppenaufgang. Die Grundrisse wurden später noch teilweise modifiziert.**



**Abbildung 8: Tevesstraße 36 bis 46 während der Bauzeit.**

**Das Nachbargebäude Herzheimer Straße grenzt direkt an. Siehe auch die Betrachtungen zu Wärmebrücken aufgrund der Betonplatten der Balkonnischen im Gebäude Herzheimer Straße.**

## Sanierung mit Passivhauskomponenten

Die beiden Geschosswohnungsbauten werden durch bauliche Wärmeschutz-Maßnahmen nachträglich bis nahe an den Passivhaus-Standard herangeführt. Da es sich generell um im Vergleich zu Neubauten kleine Wohnungen handelt, ist der Einsatz von Passivhaus-Gebäudetechnik bei dieser Sanierung auch dann möglich, wenn nicht  $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  Heizwärmebedarf, sondern ein höherer Wert erreicht werden – dies zeigt die Untersuchung zur Gebäudetechnik, vgl. Abschnitt 4. Kriterium ist dabei die Möglichkeit einer Beheizung weitgehend durch die Zuluft der verwendeten Frischluftanlage. Bis auf wenige Wohnungen konnte dies erreicht werden. Aufgrund von höheren Heizlasten wegen verbleibender Wärmebrücken zum Keller wurden die Wohnungen im EG mit zusätzlichen kleinen Heizkörpern ausgestattet, siehe Abbildung 226 in Abschnitt 5.

Für die Sanierung der Gebäudehülle wurden grundsätzlich die im Neubau bereits bewährten für das Passivhaus geeignete Komponenten verwendet:

- Dämmung der Kellerdecke auf U-Werte unter  $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Im Projekt wurde aus Platzgründen sowohl eine Dämmlage (80 mm PU) von der Unterseite der Kellerdecke als auch auf der Oberseite der Kellerdecke (40 mm PU) verwendet ( $U_{\text{Kellerdecke}} = 0.17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ). Alle U-Werte gelten für die Regelbauteile ohne Berücksichtigung von Wärmebrücken z.B. durch aufsteigende Kellerwände.
- Dämmung der Außenwände auf U-Werte unter  $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Verwendet wurden zwei verschiedene Systeme: Auf den massiven Bestandswänden ein Wärmedämmverbundsystem mit 200 bzw. 260 mm Dämmdicke aus Polystyrol ( $U_{\text{wand}} = 0.12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ). Im neu aufgesetzten DG wurde ein gedämmtes Holz-Leichtbau-System mit Vollsparrendämmung und einem zusätzlichen außenliegenden Wärmedämmverbundsystem aus Polystyrol oder Mineralwolle realisiert ( $U_{\text{wand}} = 0.093 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ )
- Dämmung des Daches: Holz-Leichtbau-Konstruktion mit Vollsparrendämmung ( $U_{\text{Dach}} = 0.11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ).
- Passivhaus geeignete Fenster mit einem über aller Fenster gemittelten  $U_w$ -Wert von  $0.87 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Dieser Wert beinhaltet bereits alle Einbauwärmebrücken.
- Ertüchtigung der Luftdichtheitsebene (EG-Fußboden, Innenputz, dichte Fensteranschlüsse, dichter Anschluss des Neubau-Daches). Die schlussendlich erzielte Luftdichtheit des Gebäudes ist mit  $n_{50} \leq 0.5 \text{ } \frac{1}{\text{h}}$  sehr gut gelungen, vgl. Abschnitt Drucktest.

- Wärmebrückenminimierung. Die Wärmebrücken an den Kellerinnen- und Kelleraußenwänden konnte nicht vollständig beseitigt werden, wie das bei einem Passivhausneubau möglich wäre. Verschiedene andere Wärmebrücken, wie Balkonanker, nicht ganz optimaler Fenstereinbau, z.B. wegen Rollläden waren aus konstruktiven bzw. architektonischen Gründen nicht zu vermeiden. Die Auswirkung aller nicht ganz optimal ausgeführter Wärmebrücken auf den Heizwärmebedarf beträgt etwa +2 kWh/(m<sup>2</sup>a), vgl. Tabelle 23 ff. Weil die Gebäude sehr großvolumig sind ist dieser Beitrag relativ gering. Bei kleineren Gebäuden wären die Auswirkungen gravierender.

Objekt:	Altbausanierung Tevesstraße		
Variante:	gesamtes Gebäude		
Wohneinheit:	ganzer 4erBlock (48-54)		
Standort und Klima:	Frankfurt	Frankfurt (Region 12)	
Straße:	Tevesstraße 36 bis 46 und 48 bis 54		
PLZ/Ort:	60326 Frankfurt		
Land:	Deutschland / Hessen		
Objekt-Typ:	Wohngebäude (Geschosswohnungsbau)		
Bauherr(en):	ABG Frankfurt Holding GmbH		
Straße:	Elbestraße 48		
PLZ/Ort:	60329 Frankfurt/Main		
Architekt:	Folkmer Rasch, Petra Grenz, faktor10 Ges. für Siedlungs- und Hochbaupl		
Straße:	Herta Mansbacher Straße 124		
PLZ/Ort:	64289 Darmstadt		
Haustechnik:	Dipl. Ingenieur Hans Baumgartner		
Straße:	Groß-Breitenbach 25		
PLZ/Ort:	69509 Mörlenbach		
Baujahr:	1951	Sanierung:	2005
Zahl WE:	20		
Umbautes Volumen:	5588.7		m <sup>3</sup>
Personenzahl:	38.6	dies entspricht einer mittleren Personenbelegung von 35 m <sup>2</sup> /Pers	

Kennwerte mit Bezug auf Energiebezugsfläche			
Energiebezugsfläche:	1350.0	m <sup>2</sup>	
<b>Verwendet:</b>	<b>Monatsverfahren</b>		
<b>Energiekennwert Heizwärme:</b>	16.9	kWh/(m <sup>2</sup> a)	<b>PH-Zertifikat:</b> 15 kWh/(m <sup>2</sup> a) <b>Erfüllt?</b> -
<b>Drucktest-Ergebnis:</b>	0.49	h <sup>-1</sup>	0.6 h <sup>-1</sup> ✓
<b>Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Haushalts-Strom):</b>	122	kWh/(m <sup>2</sup> a)	120 kWh/(m <sup>2</sup> a) -
<b>Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Lüftung):</b>	49	kWh/(m <sup>2</sup> a)	
<b>Heizlast:</b>	11.8	W/m <sup>2</sup>	Erläuterungen hierzu siehe Blatt Heizlast
<b>Übertemperaturhäufigkeit:</b>	0%	über	25 °C

Kennwert mit Bezug auf Nutzfläche nach EnEV			
Nutzfläche nach EnEV:	1788.4	m <sup>2</sup>	
<b>Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Lüftung):</b>	37.3	kWh/(m <sup>2</sup> a)	<b>Anforderung:</b> 40 kWh/(m <sup>2</sup> a) <b>Erfüllt?</b> ✓

**Abbildung 9: PE- und HWB-Kennwerte Gebäude Tevesstraße 48 bis 54 (4erBlock). Berechnet mit Standard-Wetterdaten Frankfurt/Main.**

### PASSIVHAUS-PROJEKTIERUNG ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME MONATSVERFAHREN

(auf dieser Seite dargestellt werden die Ganzjahressummen des Monatsverfahrens)

Klima: <u>Frankfurt (Region 12)</u> Objekt: <u>Altbauanierung Tevesstraße</u> Standort: <u>Frankfurt</u> Variante: <u>ganzer 4erBlock (48-54) gesamtes Gebäude</u>	Innentemperatur: <u>20</u> °C Gebäudetyp/Nutzung: <u>Wohngebäude (Geschossewohnungsbau)</u> Energiebezugsfläche A <sub>EG</sub> : <u>1350.0</u> m <sup>2</sup>
spez. Kapazität: <u>132</u> Wh/(m <sup>2</sup> K) (Eingabe in "Sommer")	Standard-Personenbelegung: <u>39</u> Pers pro m <sup>2</sup> Energiebezugsfläche

Bauteile	Temperaturzone	Fläche m <sup>2</sup>	U-Wert W/(m <sup>2</sup> K)	Red. Fak. Mon.	G <sub>1</sub> kWh/a	G <sub>2</sub> kWh/a	pro m <sup>2</sup> Energiebezugsfläche	
1. Außenwand (massiv) EG bis 2.OG	A	570.2	0.122	1.00	90	6255		
2. Außenwand (Holz-Leichtbau DG)	A	368.5	0.093	1.00	90	3081		
3. Kellerdecke	B	467.5	0.174	1.00	59	4794		
4. Dach	A	385.9	0.106	1.00	90	3703		
5. Wand um den Kellerzugang	A	98.6	0.430	1.00	90	3820		
6. Haustürpodest und Kellertreppe	B	43.2	0.576	1.00	59	1468		
7. Giebelwände gedämmt	B	168.9	0.122	1.00	59	1212		
8. Dachterasse	A	124.8	0.127	1.00	90	1433		
9. Giebelwände nicht gedämmt	A	0.0	1.317	1.00	90	0		
10. Fenster	A	324.3	0.848	1.00	90	24777		
11. Wbrücken außen (Lösge/n)	A	384.5	0.010	1.00	90	355		
12. Wbrücken Boden (Lösge/n)	B	126.1	0.149	1.00	59	1109		
<b>Summe</b>							<b>52005</b>	<b>38.5</b>

**Transmissionswärmeverluste Q<sub>T</sub>** Summe: 52005 kWh/a, 38.5 kWh/m<sup>2</sup>a

Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmelieferanten	Wass	<u>78%</u>	wirksames Luftvolumen V <sub>L</sub>	A <sub>EG</sub> m <sup>2</sup>	lichte Raumhöhe m	m <sup>3</sup>
Wärmebereitstellungsgrad des Erdreichwärmelieferanten	Wass	<u>0%</u>		<u>1350</u>	<u>2.50</u>	<u>3375</u>
energetisch wirksamer Luftwechsel n <sub>L</sub>	n <sub>L, Anlage</sub> 1/h	<u>0.343</u>	Φ <sub>W, WP</sub>	<u>78%</u>	n <sub>L, lichte</sub> 1/h	<u>0.114</u>

**Lüftungswärmeverluste Q<sub>L</sub>** 3375 \* 0.114 \* 0.33 \* 90 = 11413 kWh/a, 8.5 kWh/m<sup>2</sup>a

**Summe Wärmeverluste Q<sub>V</sub>** (52005 + 11413) \* 1.0 = 63418 kWh/a, 47.0 kWh/m<sup>2</sup>a

Ausrichtung der Fläche	Reduktionsfaktor vgl. Blatt Fenster	g-Wert (senk. Eintr.)	Fläche m <sup>2</sup>	Globalstr. Heizeit kWh/(m <sup>2</sup> a)	WWh/a
1. Ost	0.37	0.49	132.1	564	13632
2. Süd	0.47	0.50	12.2	791	2287
3. West	0.45	0.48	180.0	722	28342
4. Nord	0.40	0.00	0.0	412	0
5. Horizontal	0.40	0.00	0.0	1046	0
<b>Summe</b>					<b>44261</b>

**Wärmeangebot Solarstrahlung Q<sub>S</sub>** Summe: 44261 kWh/a, 32.8 kWh/m<sup>2</sup>a

**Innere Wärmequellen Q<sub>I</sub>** 0.024 \* 385 \* 2.1 \* 1350.0 = 24835 kWh/a, 18.4 kWh/m<sup>2</sup>a

Freie Wärme Q<sub>F</sub> Q<sub>S</sub> + Q<sub>I</sub> = 69096 kWh/a, 51.2 kWh/m<sup>2</sup>a

Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten Q<sub>F</sub> / Q<sub>V</sub> = 1.09

Nutzungsgrad Wärmegewinne η<sub>G</sub> = 59%

**Wärmegewinne Q<sub>G</sub>** η<sub>G</sub> \* Q<sub>F</sub> = 40628 kWh/a, 30.1 kWh/m<sup>2</sup>a

**Heizwärmebedarf Q<sub>H</sub>** Q<sub>V</sub> - Q<sub>G</sub> = 22791 kWh/a, **16.9** kWh/m<sup>2</sup>a

Abbildung 10: Heizwärmebedarf des Gebäudes Tevesstraße 48 bis 54 (4erBlock). Berechnet mit Standard-Wetterdaten Frankfurt/Main.

Objekt:	Altbausanierung Tevesstraße		
Variante:	gesamtes Gebäude		
Wohneinheit:	ganzer 6erBlock (36-46)		
Standort und Klima:	Frankfurt	Frankfurt (Region 12)	
Straße:	Tevesstraße 36 bis 46 und 48 bis 54		
PLZ/Ort:	60326 Frankfurt		
Land:	Deutschland / Hessen		
Objekt-Typ:	Wohngebäude (Geschosswohnungsbau)		
Bauherr(en):	ABG Frankfurt Holding GmbH		
Straße:	Elbestraße 48		
PLZ/Ort:	60329 Frankfurt/Main		
Architekt:	Folkner Rasch, Petra Grenz, faktor10 Ges. für Siedlungs- und Hochbaupl		
Straße:	Herta Mansbacher Straße 124		
PLZ/Ort:	64289 Darmstadt		
Haustechnik:	Dipl. Ingenieur Hans Baumgartner		
Straße:	Groß-Breitenbach 25		
PLZ/Ort:	69509 Mörlenbach		
Baujahr:	1951	Sanierung:	2005
Zahl WE:	33		
Umbautes Volumen:	8958.5		m <sup>3</sup>
Personenzahl:	64.1	dies entspricht einer mittleren Personenbelegung von 35 m <sup>2</sup> /Pers	

Kennwerte mit Bezug auf Energiebezugsfläche				
Energiebezugsfläche:	2244.0	m <sup>2</sup>		
	<i>Verwendet:</i>	<i>Monatsverfahren</i>	<i>PH-Zertifikat:</i>	<i>Erfüllt?</i>
<b>Energiekennwert Heizwärme:</b>	<b>16.8</b>	<b>kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>	<b>15 kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>	<b>–</b>
<b>Drucktest-Ergebnis:</b>	<b>0.46</b>	<b>h<sup>-1</sup></b>	0.6 h <sup>-1</sup>	✓
<b>Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Haushalts-Strom):</b>	<b>120</b>	<b>kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>	120 kWh/(m <sup>2</sup> a)	✓
<b>Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Lüftung):</b>	<b>48</b>	<b>kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>		
<b>Heizlast:</b>	<b>11.9</b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>	Erläuterungen hierzu siehe Blatt Heizlast	
<b>Übertemperaturhäufigkeit:</b>	<b>0%</b>	über	<b>25</b>	°C

Kennwert mit Bezug auf Nutzfläche nach EnEV				
Nutzfläche nach EnEV:	2866.7	m <sup>2</sup>		
			<i>Anforderung:</i>	<i>Erfüllt?</i>
<b>Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Lüftung):</b>	<b>37.4</b>	<b>kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>	<b>40 kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>	<b>✓</b>

**Abbildung 11: PE- und HWB-Kennwerte Gebäude Tevesstraße 36 bis 46 (4erBlock). Berechnet mit Standard-Wetterdaten Frankfurt/Main.**

Die erwähnten Maßnahmen werden im Folgenden detailliert beschrieben. Als wesentlicher verbleibender Unterschied zu einem Passivhaus-Neubau stellt sich die nicht so gute Dämmung des EG-Fußbodens zum Keller hin heraus, insbesondere die dort verbleibenden Wärmebrücken durch die bestehenden Kellerwände, die thermisch nicht mit vertretbarem Aufwand von der Kellerdecke nachträglich abgetrennt werden können. Da auch die Höhe der Räume im Keller gering ist, kann zudem auch die Dicke der Kellerdeckendämmung nicht so hoch gewählt werden, wie es für Passivhäuser wünschenswert wäre.

### PASSIVHAUS-PROJEKTIERUNG ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME MONATSVERRFAHREN

(auf dieser Seite dargestellt werden die Ganzjahressummen des Monatsverfahrens)

Klima: <u>Frankfurt (Region 12)</u>	Innentemperatur: <u>20</u> °C
Objekt: <u>Altbauanierung Tevesstraße</u>	Gebäudetyp/Nutzung: <u>Wohngebäude (Geschosswohnungsbau)</u>
Standort: <u>Frankfurt</u>	Energiebezugsfläche A <sub>EG</sub> : <u>2244.0</u> m <sup>2</sup>
Variante: <u>ganzer 6erBlock (36-46)</u>	
spez. Kapazität: <u>132</u> kWh/m <sup>2</sup> (Eingabe in "Sommer")	Standard-Personenbelegung: <u>64</u> Pers pro m <sup>2</sup> Energiebezugsfläche

Bauteile	Temperaturzone	Fläche m <sup>2</sup>	U-Wert W/(m <sup>2</sup> K)	Red. Fak. Mon.	C <sub>g</sub> kWh/a	W/a	W/a (m <sup>2</sup> )
1. Außenwand (massiv) EG bis 2.OG	A	913.7	0.122	1.00	90	10022	
2. Außenwand (Holz-Leichtbau DG)	A	629.5	0.093	1.00	90	5263	
3. Kellerdecke	B	753.2	0.174	1.00	58	7611	
4. Dach	A	671.7	0.106	1.00	90	6445	
5. Wand um den Kellerzugang	A	147.8	0.430	1.00	90	5730	
6. Haustürpodest und Kellertreppe	B	64.8	0.576	1.00	58	2169	
7. Giebelwände gedämmt	B	116.3	0.154	1.00	58	1039	
8. Dachterasse	A	197.6	0.127	1.00	90	2268	
8. Giebelwände nicht gedämmt	A	12.9	1.317	1.00	90	1534	
9. Fenster	A	502.3	0.899	1.00	90	40709	
10. Wbrücken außen (Länge/n)	A	647.7	0.017	1.00	90	990	
11. Wbrücken Boden (Länge/n)	B	156.2	0.137	1.00	58	1241	
<b>Summe</b>						<b>85021</b>	<b>37.9</b>

**Transmissionswärmeverluste Q<sub>T</sub>**

Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmeliefertragers	φ <sub>WRG</sub>	<u>78%</u>	wirksames Luftvolumen V <sub>L</sub> m <sup>3</sup>	A <sub>EG</sub> m <sup>2</sup>	lichte Raumhöhe m	W/a	W/a (m <sup>2</sup> )
Wärmebereitstellungsgrad des Erdreichwärmesuchers	φ <sub>WRD</sub>	<u>0%</u>		<u>2244</u>	<u>2.50</u>	<u>5610</u>	
energetisch wirksamer Luftwechsel n <sub>L</sub>			n <sub>L,lagg</sub> 1/h	φ <sub>WRG</sub>	n <sub>L,letr.</sub> 1/h		
			<u>0.343</u>	<u>78%</u>	<u>0.035</u>	<u>0.111</u>	

**Lüftungswärmeverluste Q<sub>L</sub>**

V <sub>L</sub> m <sup>3</sup>	n <sub>L</sub> 1/h	C <sub>Luft</sub> W/(m <sup>3</sup> K)	C <sub>g</sub> kWh/a	W/a	W/a (m <sup>2</sup> )
<u>5610</u>	<u>0.111</u>	<u>0.33</u>	<u>90</u>	<u>18581</u>	<u>8.3</u>

**Summe Wärmeverluste Q<sub>V</sub>**

Q <sub>T</sub> W/a	Q <sub>L</sub> W/a	Reduktionsfaktor Nacht-/Wochenendauslenkung	W/a	W/a (m <sup>2</sup> )
<u>85021</u>	<u>18581</u>	<u>1.0</u>	<u>103602</u>	<u>46.2</u>

**Ausrichtung der Fläche**

Reduktionsfaktor vgl. Blatt Fenster	g-Wert (senk. Eintr.)	Fläche m <sup>2</sup>	Globalstr. Heizzeit W/a (m <sup>2</sup> )	W/a	W/a (m <sup>2</sup> )
1. Ost	0.40	0.00	0.0	652	0
2. Süd	0.44	0.49	231.5	791	39920
3. West	0.40	0.00	0.0	649	0
4. Nord	0.41	0.48	259.0	436	22355
5. Horizontal	0.20	0.00	11.8	1046	0
<b>Summe</b>				<b>62275</b>	<b>27.8</b>

**Wärmeangebot Solarstrahlung Q<sub>S</sub>**

innere Wärmequellen Q <sub>I</sub>	Länge Heizzeit d <sub>h</sub>	spezif. Leistung q <sub>h</sub> W/m <sup>2</sup>	AEB m <sup>2</sup>	W/a	W/a (m <sup>2</sup> )
<u>0.024</u>	<u>365</u>	<u>2.1</u>	<u>2244.0</u>	<u>41281</u>	<u>18.4</u>

Freie Wärme Q <sub>F</sub>	Q <sub>S</sub> + Q <sub>I</sub>	W/a	W/a (m <sup>2</sup> )
	<u>103556</u>	<u>46.1</u>	

Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten	Q <sub>F</sub> / Q <sub>V</sub>	<u>1.00</u>
-------------------------------------	---------------------------------	-------------

Nutzungsgrad Wärmegewinne η<sub>0</sub>

η <sub>0</sub>	<u>64%</u>
----------------	------------

**Wärmegewinne Q<sub>G</sub>**

η <sub>0</sub> * Q <sub>F</sub>	W/a	W/a (m <sup>2</sup> )
	<u>66011</u>	<u>29.4</u>

**Heizwärmebedarf Q<sub>H</sub>**

Q <sub>V</sub> - Q <sub>G</sub>	W/a	W/a (m <sup>2</sup> )
	<u>37592</u>	<u>16.8</u>

**Abbildung 12: Heizwärmebedarf des Gebäudes Tevesstraße 36 bis 46 (6erBlock). Berechnet mit Standard-Wetterdaten Frankfurt/Main.**

Dennoch stellt sich heraus, dass die verbleibenden Wärmebrücken so weit reduziert werden können, dass keine bauphysikalischen Probleme (Feuchte, Schimmelbildung) wegen zu niedriger Innenoberflächentemperaturen an den Außenbauteilen

auftreten. Die Auswirkung des gegenüber Passivhaus-Neubau schlechteren Wärmeschutzes bleibt daher auf etwas größere Heizlasten und Jahresheizwärmeverbrauchswerte in den Erdgeschosswohnungen beschränkt. Hier müssen dann in gewissem Umfang zusätzliche Heizflächen vorgesehen werden. Dies ist aber mit vertretbarem Aufwand möglich.

Für alle entscheidenden Anschlussdetails wurden die Wärmebrücken berechnet und verschiedene Varianten betrachtet, dabei wurde vor allem auf eine möglichst wirtschaftliche Ausführbarkeit geachtet. Der Planungsprozess wurde mit laufend aktualisierten Berechnungen mit dem Passivhaus Projektierungs Paket (PHPP) begleitet.

### **Zum Vergleich: konventionelle Sanierung nach EnEV**

Eine konventionelle Sanierung nach der zum Zeitpunkt der Bauantragsstellung gültigen EnEV (2002) hätte die folgenden Bauteilkennwerte gehabt:

- Dämmung der opaken Bauteile mit Dämmstärken von 12 cm,  
 $U_{\text{wand}} = 0.3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- Konventionelle Fenster mit  $U_w = 1.7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  incl. Einbauwärmebrücke
- Luftdichtheit mit  $n_{50} = 1.5 \text{ }^1/\text{h}$  für Abluftanlage ohne Wärmerückgewinnung bzw. Luftdichtheit mit  $n_{50} = 3.0 \text{ }^1/\text{h}$  für Fensterlüftung
- Typische nicht optimierte Wärmebrücken, vgl. z.B. Abbildung 79

Mit diesen Bauteilkennwerten hätte sich ein Heizwärmebedarf von  $69 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  berechnet gemäß PHPP und bezogen auf die Energiebezugsfläche nach PHPP (6er-Block,  $A_{\text{EBF}} = 2244 \text{ m}^2$ ) ergeben, d.h. der Wert eines typischen Niedrigenergiehauses, vgl. Abbildung 14. Der für den Nachweis nach EnEV relevante Primärenergiebedarf ergibt sich dabei zu  $81 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  bezogen auf  $A_N = 2867 \text{ m}^2$ .

Ein erhöhter Luftdichtheits-Kennwert von  $n_{50} = 3.0 \text{ }^1/\text{h}$  wie er für Gebäude mit Fensterlüftung zulässig wäre und oft auch erreicht wird hätte einen um etwa  $3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  höheren Heizwärmebedarf zur Folge, d.h.  $72 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$

Parallel zum PHPP wurde für jeden Block jeweils ein EnEV-Nachweis gemäß dem Rechenverfahren der EnEV (2002) mit den Bauteilkennwerten der Passivhauskomponenten erstellt. Der darin ausgewiesene maximal zulässige Primärenergiebedarf ergibt sich zu  $85 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  (6er-Block, bezogen auf  $A_N = 2867 \text{ m}^2$ ) was im Rahmen der Rechengenauigkeit dem oben genannten Wert entspricht. Zu beachten ist, dass die Nutzfläche  $A_N$  gemäß EnEV etwa 30 % größer ist als die Energiebezugsfläche  $A_{\text{EBF}}$  nach PHPP [Feist2001], daher weichen die entsprechenden spezifischen Werte in Abbildung 9 ff voneinander ab.

In Absprache mit der deutschen Energieagentur (dena), die eine vergleichende Studie mehrer Sanierungsprojekte durchführte, wurde vereinbart, dass der Nachweis des Heizwärme- bzw. des Primärenergiebedarfs im Sanierungsprojekt Tevesstraße mit dem Rechenverfahren nach PHPP geführt wird [dena].

### Passivhaus Nachweis

Foto oder Zeichnung			
Objekt:	Altbausanierung Tevesstraße		
Variante:	Komponenten gemäß EnEV		
Wohneinheit:	ganzer 6erBlock (36-46)		
Standort und Klima:	Frankfurt <span style="float: right;">Frankfurt (Region 12)</span>		
Straße:	Tevesstraße 36 bis 46 und 48 bis 54		
PLZ/Ort:	60326 Frankfurt		
Land:	Deutschland / Hessen		
Objekt-Typ:	Wohngebäude (Geschosswohnungsbau)		
Bauherr(en):	ABG Frankfurt Holding GmbH		
Straße:	Elbestraße 48		
PLZ/Ort:	60329 Frankfurt/Main		
Architekt:	Folkmer Rasch, Petra Grenz, faktor10 Ges. für Siedlungs- und Hochbaupla.		
Straße:	Herta Mansbacher Straße 124		
PLZ/Ort:	64289 Darmstadt		
Haustechnik:	Dipl. Ingenieur Hans Baumgartner		
Straße:	Groß-Breitenbach 25		
PLZ/Ort:	69509 Morlenbach		
Baujahr:	1951	Sanierung:	2005
Zahl WE:	33		
Umbautes Volumen:	8958,5	m <sup>3</sup>	
Personenzahl:	64,1	dies entspricht einer mittleren Personenbelegung von 35 m <sup>2</sup> /Pers	

Kennwerte mit Bezug auf Energiebezugsfläche			
Energiebezugsfläche:	2244,0	m <sup>2</sup>	
<b>Energiekennwert Heizwärme:</b>	<b>68,8</b>	<b>kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>	<b>PH-Zertifikat: 15 kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>
<b>Drucktest-Ergebnis:</b>	<b>1,50</b>	<b>h<sup>-1</sup></b>	<b>0,6 h<sup>-1</sup></b>
<b>Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Haushalts-Strom):</b>	<b>176</b>	<b>kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>	<b>120 kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>
<b>Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Lüftung):</b>	<b>103</b>	<b>kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>	
<b>Heizlast:</b>	<b>28,5</b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>	Erläuterungen hierzu siehe Blatt Heizlast
<b>Übertemperaturhäufigkeit:</b>	<b>0%</b>	über	25 °C

Kennwert mit Bezug auf Nutzfläche nach EnEV			
Nutzfläche nach EnEV:	2866,7	m <sup>2</sup>	
<b>Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Lüftung):</b>	<b>80,6</b>	<b>kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>	<b>Anforderung: 40 kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>

**Abbildung 13: Heizwärmebedarf und Primärenergiebedarf des Gebäudes Tevesstraße 36 bis 46 (6erBlock) für den Fall, dass die Gebäudehülle gemäß EnEV ausgeführt worden wäre. Berechnet gemäß PHPP mit Standard-Wetterdaten Frankfurt/Main.**

**PASSIVHAUS-PROJEKTIERUNG  
ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME  
MONATSVERFAHREN**

(auf dieser Seite dargestellt werden die Ganzjahressummen des Monatsverfahrens)

Klima:	Frankfurt (Region 12)	Innentemperatur:	20 °C
Objekt:	Altbausanierung Tevesstraße	Gebäudetyp/Nutzung:	Wohngebäude (Geschosswohnungsbau)
Standort:	Frankfurt	Energiebezugsfläche A <sub>EB</sub> :	2244.0 m <sup>2</sup>
Variante:	ganzer 6erBlock (36-46) Komponenten gemäß EnEV	Standard-Personenbelegung:	64 Pers pro m <sup>2</sup> Energiebezugsfläche
spez. Kapazität:	132 kWh/(m <sup>2</sup> K) (Eingabe in "Sommer")		

Bauteile	Temperaturzone	Fläche m <sup>2</sup>	U-Wert W/(m <sup>2</sup> K)	Red. Fak. Mon.	G <sub>i</sub> kWh/a	kWh/a	pro m <sup>2</sup> Energiebezugsfläche
1. Außenwand (massiv) EG bis 2.OG	A	913.7	0.237	1.00	90	19530	
2. Außenwand (Holz-Leichtbau DG)	A	629.5	0.298	1.00	90	16905	
3. Kellerdecke	B	753.2	0.313	1.00	51	11982	
4. Dach	A	671.7	0.311	1.00	90	18838	
5. Wand um den Kellerzugang	A	147.8	1.093	1.00	90	14561	
6. Haustürpodest und Kellertreppe	B	64.8	3.077	1.00	51	10144	
7. Giebelwände gedämmt	B	116.3	0.237	1.00	51	1404	
8. Dachterasse	A	197.6	0.603	1.00	90	10731	
8. Giebelwände nicht gedämmt	A	12.9	0.237	1.00	90	276	
9. Fenster	A	502.3	1.743	1.00	90	78925	
10. Wbrücken außen (Länge/m)	A	647.7	0.089	1.00	90	5214	
11. Wbrücken Boden (Länge/m)	B	156.2	0.187	1.00	51	1483	
						Summe	189993 kWh/a
							84.7 kWh/(m <sup>2</sup> a)

Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmeübertragers	ϕ <sub>WRG</sub>	0%	wirksames Luftvolumen V <sub>L</sub>	A <sub>EB</sub> m <sup>2</sup>	lichte Raumhöhe m	m <sup>3</sup>
				2244	2.50	5610
Wärmebereitstellungsgrad des Erreichwärmetauschers	ϕ <sub>BWT</sub>	0%	energetisch wirksamer Luftwechsel n <sub>L</sub>	ϕ <sub>WRG</sub>	n <sub>L,Infr.</sub> 1/h	1/h
			0.343	0%	0.009	0.352
			V <sub>L</sub> m <sup>3</sup>	n <sub>L</sub> 1/h	C <sub>Luft</sub> kWh/(m <sup>3</sup> K)	G <sub>i</sub> kWh/a
			5610	0.352	0.33	58756 kWh/a
				Q <sub>T</sub> kWh/a	Q <sub>L</sub> kWh/a	Reduktionsfaktor Nacht-/Wochenend-absenkung
				189993	58756	1.0
						248749 kWh/a
						110.8 kWh/(m <sup>2</sup> a)

Ausrichtung der Fläche	Reduktionsfaktor vgl. Blatt Fenster	g-Wert (senkr. Einstr.)	Fläche m <sup>2</sup>	Globalstr. Heizzeit kWh/(m <sup>2</sup> a)	kWh/a
1. Ost	0.40	0.00	0.0	652	0
2. Süd	0.44	0.64	231.5	791	51802
3. West	0.40	0.00	0.0	649	0
4. Nord	0.41	0.62	259.0	436	28875
5. Horizontal	0.20	0.00	11.8	1046	0
				Summe	80677 kWh/a
					36.0 kWh/(m <sup>2</sup> a)

Innere Wärmequellen Q <sub>I</sub>	Länge Heizzeit kh/d	spezif. Leistung q <sub>I</sub> W/m <sup>2</sup>	AEB m <sup>2</sup>	kWh/a	kWh/(m <sup>2</sup> a)
	0.024	365	2244.0	41281	18.4
				Freie Wärme Q <sub>F</sub>	Q <sub>S</sub> + Q <sub>I</sub>
					121958 kWh/a
				Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten	Q <sub>F</sub> / Q <sub>V</sub>
					0.49
Nutzungsgrad Wärmegewinne η <sub>G</sub>					77%
Wärmegewinne Q <sub>G</sub>				η <sub>G</sub> * Q <sub>F</sub>	94447 kWh/a
					42.1 kWh/(m <sup>2</sup> a)
Heizwärmebedarf Q <sub>H</sub>				Q <sub>V</sub> - Q <sub>G</sub>	154302 kWh/a
					68.8 kWh/(m <sup>2</sup> a)

**Abbildung 14: Heizwärmebedarf des Gebäudes Tevesstraße 36 bis 46 (6erBlock) für den Fall, dass die Gebäudehülle gemäß EnEV ausgeführt worden wäre. Berechnet gemäß PHPP mit Standard-Wetterdaten Frankfurt/Main.**

### 3 Gebäudehülle

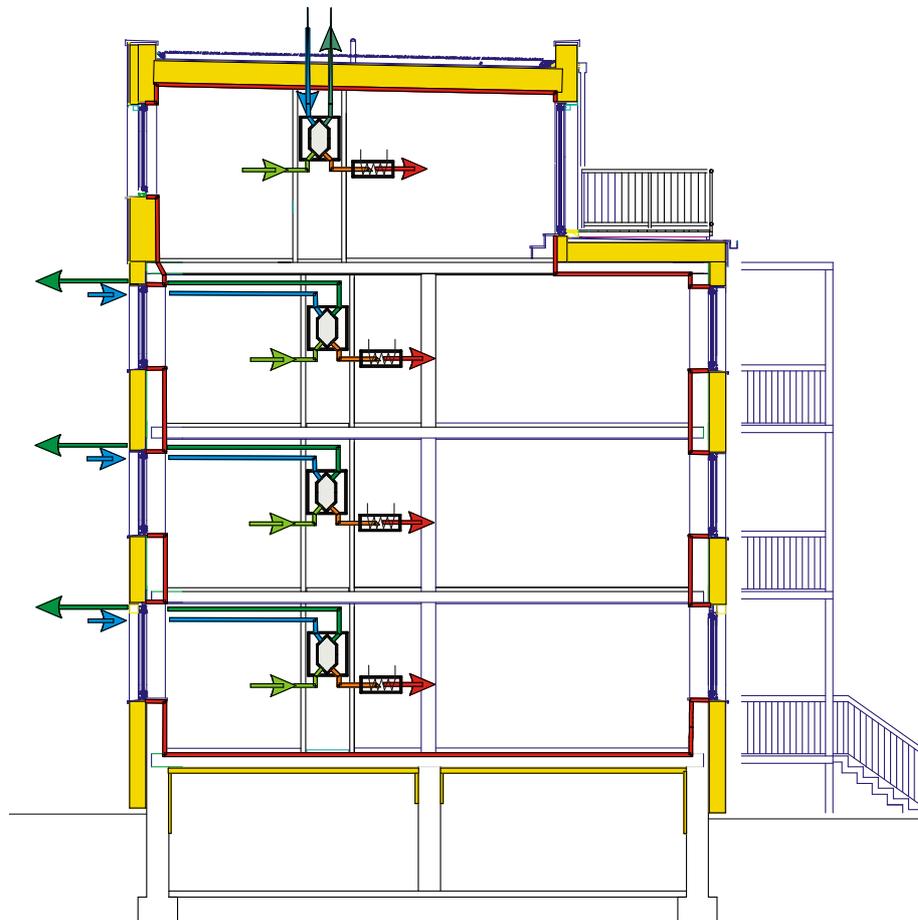


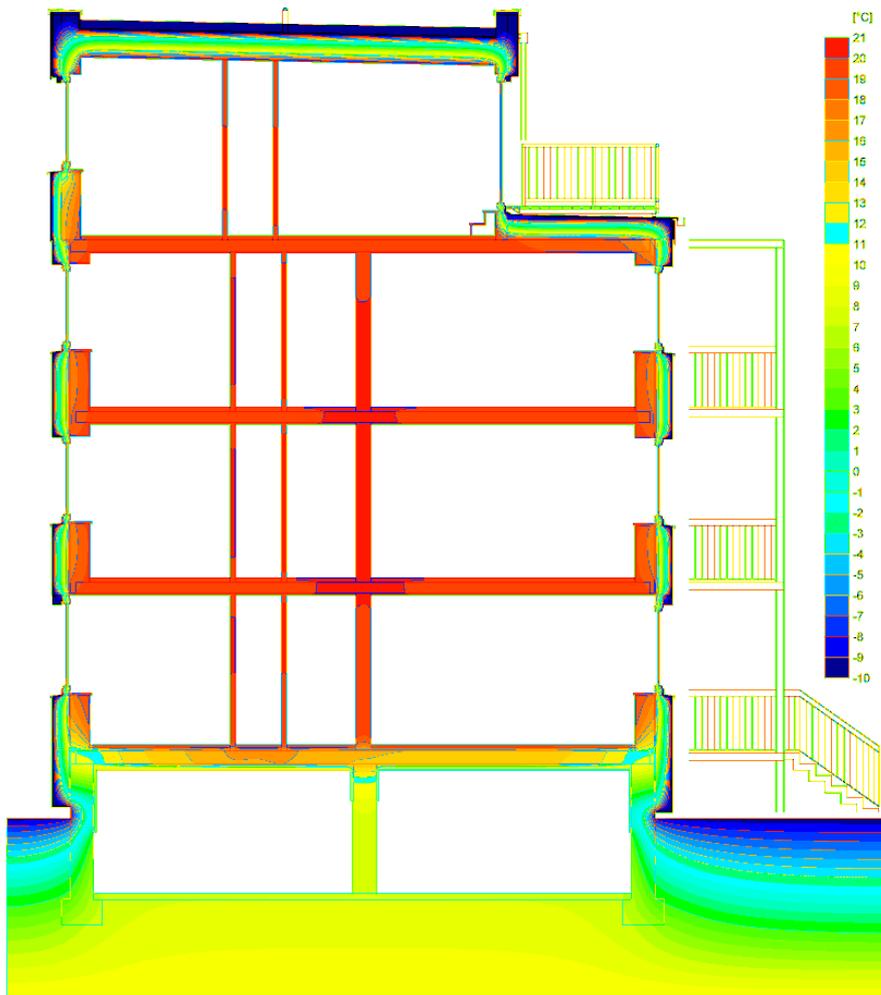
Abbildung 15:

Tevesstraße 48-54  
Schnitt durch das Ge-  
bäude nach der Sanie-  
rung.

Hervorgehoben sind die  
vollständig umlaufende  
Wärmedämmung (gelb)  
und die luftdichte Ebene  
(rot).

Im Schnitt (Abbildung 15) sind die für eine energieeffiziente Modernisierung entscheidenden Maßnahmen erkennbar:

- Eine sehr gut wärmedämmende Hülle ist rings um den alten Gebäudekern sowie das neue Staffelgeschoss gelegt.
- Passivhausfenster sind in fast allen Rohbauöffnungen in der Dämmebene eingebaut, siehe Abschnitt Fenstereinbau und Wärmebrücken.
- Die Dämmhülle wurde bis auf die nicht mit vertretbarem Aufwand zu beseitigenden Durchstoßpunkte der Kellerdeckendämmung wärmebrückenfrei geplant und ausgeführt.
- Die Luftdichtheitsebene ist bei dieser Sanierung auf der Innenseite der Außenbauteile realisiert worden.
- In jede Wohnung wurde eine wohnungszentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung eingebaut.



**Abbildung 16:**

In dieser Grafik wurde mit dem Querschnitt aus Abbildung 15 eine Wärmestromberechnung durchgeführt, um die gut gedämmte Gebäudehülle im Temperaturbild zu visualisieren.

Im Folgenden sind diese Konstruktionen und Wärmestromberechnungen für die wichtigen Bauteilanschlüsse im Detail dokumentiert.

## Luftdichtheit der Gebäudehülle

### Luftdichtheitstest zur Prüfung der Tauglichkeit erster Maßnahmen

Die Planung sah vor, dass in den bestehenden Geschossen mit massivem Mauerwerk der Innenputz die luftdichte Ebene bildet. Der Boden im EG mit der sog. Stahlsteindecke bzw. 'Frankfurter Kappendecke' kann ebenfalls als luftdichte Schicht fungieren. Die Oberfläche beider Bauteile, sowohl der Innenputz als auch die Oberfläche der Kellerdecke bzw. des Bodens im EG mussten jedoch für diesen Zweck ertüchtigt werden.



**Abbildung 17:** Die alten undichten Fenster, Rollladenkasten etc. wurden abgeklebt, weil deren Einfluss auf die Luftdichtheit der Gebäudehülle schon bekannt war.



**Abbildung 18:** Schadhafte Verputz im Sockelbereich nach der Entfernung des Holzfußbodens

Um den Aufwand für diese Ertüchtigung zu erkunden, wurde ein Drucktest zur Bestimmung der Luftdichtheit in einer Wohnung (Tevesstraße 42 EG links) durchgeführt. Die Wohnung wurde dazu entsprechend präpariert, d.h. die bestehenden sehr undichten Fenster und alle anderen bekannten Öffnungen, wie Abgasrohre zum Kamin etc. (siehe den Bericht zu den Bestandsgebäuden) wurden bestmöglich abgeklebt, siehe Abbildung 17.

Der bestehende Holzfußboden über der Rohbetondecke wurde vollständig abgetragen und die darunter befindliche Schüttung aus Sand wurde entfernt. Das Herausreißen des Holzfußbodens hinterließ wie zu erwarten Schäden am Innenputz im Sockelbereich. Da der Boden in allen anderen Wohnungen ebenfalls entfernt werden wird, müssen diese Schäden als typisch angesehen werden, Abbildung 18.



**Abbildung 19: Auch an den bestehenden Steckdosen, wo der Außenputz unterbrochen ist, treten beim Drucktest hohe Luftströmungen auf.**



**Abbildung 20: Risse in der bestehenden Rohbetondecke...**



**Abbildung 21: ... hier treten beim Drucktest (50 Pa Unterdruck) erhebliche Luftströmungen auf**

Auch an den bestehenden Steckdosen ergaben sich beim Drucktest wie zu erwarten bedeutende Luftströmungen, weil an diesen Stellen der Putz in Bestandsgebäuden in aller Regel unterbrochen ist, Abbildung 19. Wegen der Schäden beim Entfernen des Holzfußbodens und der Undichtheit im Bereich der Steckdosen musste der Innenputz in allen Wohnungen ausgebessert werden, um die Funktion der luftdichten Schicht erfüllen zu können.

Die Rohbetondecke (Kellerdecke) wies einige sehr lange (3...4 m) Risse mit einer Breite von etwa 1 mm auf, vgl. Abbildung 20 und Abbildung 21. Diese Leckage musste im Zuge der Sanierung ebenfalls beseitigt werden. Das Planungsteam [faktor10] hat dafür einen dünnen Fließspachtel direkt auf der Rohbetondecke vorgesehen, vgl. die Erläuterungen zu Abbildung 24.

Der luftdichte Anschluss der Fenster an das Mauerwerk sollte nach der ursprünglichen Planung durch eine Klebung mit Spezialklebeband erfolgen. Dabei wird auf die vorgeputzte Laibung der Rohbauöffnung geklebt. Die selbstklebende Folie mit Vlieskaschierung kann dafür schon ab Werk an die Fensterrahmenprofile appliziert werden. Entsprechende Produktsysteme sind am Markt erhältlich. Dies hat den Vorteil, dass bauseits die Montagezeit erheblich verkürzt wird und vor allem die Anfälligkeit für Montagefehler sinkt. Typische Leckagen treten dabei vor allem in den Ecken in Sturz und Brüstung auf, weil dort das Klebeband bei bauseitiger Montage meist abgeschnitten und neu angesetzt wird. Diese Unterbrechung ist anschließend nur mit großer Mühe ausreichend luftdicht zu machen, siehe Abbildung 22.



**Abbildung 22: Leckage der luftdichten Ebene Am Fenster aufgrund von fehlerhafter Montage. Die Unterbrechung des Spezialklebebands in der Ecke lässt sich nachträglich nur aufwendig wieder beseitigen.**

Unter den beschriebenen Bedingungen wurde eine Unterdruckmessung durchgeführt, die einen Messwert  $n_{50} = 2,3 \text{ }^1/\text{h}$  ergab. Dieser Wert liegt deutlich unter den Messwerten in den anderen Bestandswohnungen ( $n_{50} = 4 \text{ }^1/\text{h}$ ) bei denen alle Leckagen eingingen. Es konnte festgestellt werden, dass die Beseitigung der genannten Leckagen in der Betondecke und im Innenputz ausreichen würde, alle Bauteile so zu ertüchtigen, dass insgesamt eine ausreichende Luftdichtheit der Gebäudehülle erreichbar sein müsste. Diese Einschätzung wurde durch die Messung der Luftdichtheit nach der Sanierungsmaßnahme, die weiter unten dargestellt wird, bestätigt.

**BlowerDoor-Prüfprotokoll**  
**Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren B**  
 Minneapolis BlowerDoor Modell 4 - Tectite Express 3.0.0.10

Objekt: Sanierungsvorhaben Tevesstraße Frankfurt / Main	Prüfer/in: B. Kaufmann Datum: 8.10.04 FLIB-Nr.:
--	--

<b>Klimadaten</b>			
Innentemperatur: 18 °C	Referenzdruckmessstellen: 1		
Außentemperatur: 15 °C	Windstärke: 0	Gebäudestandort: A	
Luftdruck (Standard): 101325 Pa	Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: 0 %		

Unterdruck				Überdruck			
Natürliche Druckdiff.	DP <sub>21+</sub>	DP <sub>21-</sub>	DP <sub>22-</sub>	Natürliche Druckdiff.	DP <sub>21+</sub>	DP <sub>21-</sub>	DP <sub>22-</sub>
-	-2.7 Pa	-	-2.2 Pa	***	***	***	***

Messreihen					Messreihen				
Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom V <sub>1</sub>	Abwei- chung	Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom V <sub>1</sub>	Abwei- chung
oABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]	oABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]
DP <sub>21</sub>	-0.7				DP <sub>21</sub>	***			
C	-51	67	290	0.97					
C	-46	57	269	0.34					
C	-41	49	249	0.08					
C	-34	36	213	-2.61					
C	-30	31	196	-3.17					
C	-25	23	169	-4.66					
C	-21	17	146	-5.77					
C	-24	32	201	16.42					
DP <sub>22</sub>	-1.2				DP <sub>22</sub>	***			

Korrelationskoeff. r:	0.958	Vertrauensintervall		Korrelationskoeff. r:		Vertrauensintervall	
C <sub>90%</sub> [m³/h Pa²]	21	max. 42	min. 10	C <sub>90%</sub> [m³/h Pa²]			
C <sub>1</sub> [m³/h Pa²]	21	max. 42	min. 11	C <sub>1</sub> [m³/h Pa²]			
n	6	max. 0.87	min. 0.47	n	6		

<b>Ergebnis, Kenngrößen</b>		V =	125 m³	A <sub>E</sub> =	50 m²	A <sub>E</sub> =	
	V <sub>50</sub>	Unsicher- heit	n <sub>50</sub>	Unsicher- heit	W <sub>50</sub>	Unsicher- heit	Q <sub>50</sub>
	m³/h	%	h <sup>-1</sup>	%	m³/m²h	%	m³/m²h
Unterdruck	285	+/- 10 %	2,3	+/- 14 %	5,7	+/- 14 %	
Überdruck							
Mittelwert							

Anforderungen nach: PHI 0,6 1/n \*\*\* \*\*\*

**Die Anforderungen der Vorschrift werden nicht erfüllt.**

Bemerkung: Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.

Auftragnehmer: B. Kaufmann  
 Passivhaus Institut  
 64283 Darmstadt

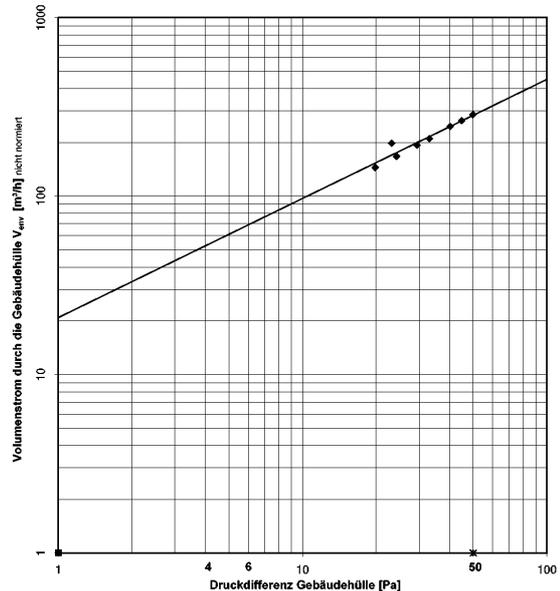
Datum, Unterschrift  
 Auswertung\_BO\_Tevesstr42\_EGlinks\_041008\_3.xls BD-0903

Stempel  
 Seite 2

Auswertung\_BO\_Tevesstr42\_EGlinks\_041008\_3.xls BD-0903

Anlage A

**BlowerDoor-Leckagekurve**  
 Objekt: Sanierungsvorhaben Tevesstraße



- ◆ Volumenstrom Unterdruck [m³/h]
- Volumenstrom Überdruck [m³/h]
- Regressionsgerade Unterdruck [m³/h]
- - - Regressionsgerade Überdruck [m³/h]
- x Volumenstrom (gemittelt) bei 50 Pa [m³/h]

**Abbildung 23: Protokoll der Messwerte und grafische Darstellung der Unterdruckmessung in der Wohnung Tevesstraße 42 EG links vor den eigentlichen Baumaßnahmen, Ergebnis: n<sub>50</sub> = 2,3 1/n, siehe Text.**

## Luftdichte Ertüchtigung der alten Kellerdecken

Wie im vorigen Abschnitt erwähnt waren die alten Hohlsteindecken zum Keller hin an vielen Stellen gerissen. Die Risse gingen durch die ganze Konstruktion hindurch und hätten somit große Auswirkungen auf die Luftdichtheit an dieser Stelle.

Der Boden wurde in einem ersten Arbeitsgang mit dünnflüssigem Haftgrund versehen. Darauf wurde Anhydritspachtel aufgebracht und geglättet. Der glatte Untergrund war auch für die im EG verwendeten sehr harten PU-Wärmedämmplatten wichtig. Später wurde der Anhydritspachtel luftdicht mit dem Gipsputz an der Wand verbunden, Abbildung 24.



Abbildung 24: Aufbringen des dünnflüssigen Haftgrundes (links oben). Darüber (rechts) Anhydritpachtel, der sorgfältig geglättet wurde.

Links unten: Verbinden des Anhydritpachtels mit dem Gipsputz an der Wand.

Fotos: [faktor10]

## **Luftdichter Fenstereinbau: Bemerkungen zur Realisierung im Detail**

Der luftdichte Anschluss der Fenster an das Mauerwerk war in der ursprünglichen Planung mit einer Verklebung mittels Spezialklebeband auf der vorgeputzten Laibung und nachträgliches Verputzen der Laibungen vorgesehen. Im Laufe der Baumaßnahmen wurde dieses Vorgehen leicht abgewandelt, d.h. die Laibungen wurden nicht mehr verputzt, da der Stuckateur die Arbeit mit vorgefertigten Laibungsplatten bevorzugte.



**Abbildung 25: Links: Fensterlaibung zum Teil vorgeputzt. Die Klebebänder wurden später luftdicht eingeputzt.**

Trotzdem wurden alle Fenster ohne Ausnahme mit Spezialklebeband an die Laibungen angedichtet. Die Laibungsplatten sind zwar laut Hersteller luftdicht, wurden aber, auf Wunsch der ausführenden Firma nur eingesetzt, um in den Laibungen kostengünstiger als durch Verputzen eine Sichtoberfläche herzustellen.

Wie in Abbildung 25 und Abbildung 26 dargestellt, wurden anfangs einige Fenster zum Teil vor dem Herstellen der Laibung eingebaut. Dies war durch Schwierigkeiten im Bauablauf begründet und wurde später nicht mehr praktiziert. Wie man in den Abbildungen sieht bedeutet der zu frühzeitige Fenstereinbau einen erheblichen Mehraufwand, als wenn die Laibung vor dem Fenstereinbau schon fertiggestellt und sogar vorgeputzt ist. Die am Fenster angebrachten Klebebänder wurden alle eingeputzt. Dies stellt die eigentliche luftdichte Schicht dar.

Planer und Handwerker bevorzugten jedoch aus baupraktischen Überlegungen die Verwendung von Laibungsplatten um in den Laibungen eine Sichtoberfläche herzustellen, dies ist aus den baupraktischen Überlegungen heraus sicher sinnvoll. Diese Laibungsplatten sind zwar zusätzlich luftdicht mit dem Fenster und über Eckwinkelschienen auch luftdicht mit dem Wandputz verbunden sind. Diese 'zweite' luftdichte Schicht ist jedoch fraglich: Eine zweifache Ausführung der luftdichten Schicht ist nicht 'doppelt sicher' in Bezug auf die Luftdichtheit der gesamten Gebäudehülle, denn zwei

unzureichend luftdichte Schichten wären im Ergebnis ebenfalls nicht ausreichend luftdicht. Es muss zwingen EINE garantiert luftdichte Ebene hergestellt werden.



**Abbildung 26: Fenstereinbau vor Fertigstellung der Laibung.** Einige Fenster im 6er Block, Tevesstraße 36-46 wurden eingebaut, bevor die Laibungen fertiggestellt waren. Die Laibung mag später realisiert werden können, dies stellt jedoch hohe Anforderungen, damit der luftdichte Anschluss später einwandfrei hergestellt werden kann. Für den luftdichten Anschluss der Fenster sollte die Laibung vor dem Einbau der Fenster einigermaßen flächige vorbereitet sein (z.B. Spachtelung vorab), damit später das Klebeband mit dem Putz eine dauerhaft dichte Verbindung bilden kann.



**Abbildung 27: Vor dem Einbau der Fensterbank muss unbedingt eine luftdichte Spachtelung aufgebracht werden oder das am Fenster angebrachte Klebeband muss eingeputzt werden.** Wird hier lediglich die Fensterbank montiert, ohne dass die Putzfläche geschlossen wird, können sich hier Strömungspfade ergeben, welche die Luftdichtheit der Konstruktion beeinträchtigen.

Eine doppelte Ausführung scheint deshalb eher aufwendig und unnötig teuer in der Herstellung. Wenn nicht beide Schichten vollständig luftdicht sind ergibt sich keine erhöhte Sicherheit in Bezug auf evtl. Beschädigungen. Beschädigungen treten in aller Regel schon während der Bauzeit auf und sind meist eine Folge von unzureichend instruiertem Personal. Beschädigungen seitens der Bewohner sind andererseits auch durch eine doppelte Ausführung nicht effektiv vorzubeugen, auch da hilft eher eine adäquate Aufklärung der Bewohner über die Qualitäten der Gebäudehülle und ihrer Besonderheiten.

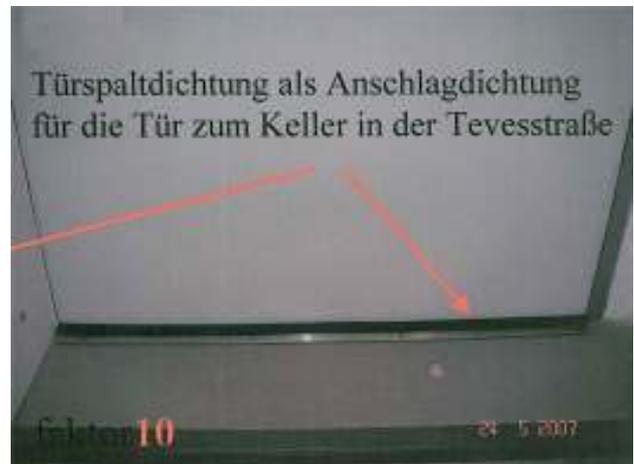


**Abbildung 28:** Die dargestellte Gipskartonplatte wurde von der ausführenden Firma präferiert, weil damit die Laibung rationeller herzustellen war als durch Verputzen. Die Platte wurde folgendermaßen luftdicht am Fenster angeschlossen: Ein Kunststoff-U-Profil wurde mit schon daran befestigtem elastischen Klebestreifen auf den Fensterrahmen geklebt. Anschließend wurden Gipskartonplatten in das Profil geschoben. Die Fensterbank wurde mit Silikonfuge an Fensterrahmen angeichtet und von unten angeputzt. Laibungsseitig wurden Eckwinkelschienen mit dem Wandputz verbunden. Der luftdichte Anschluss im Fensterbankbereich bleibt jedoch fraglich.

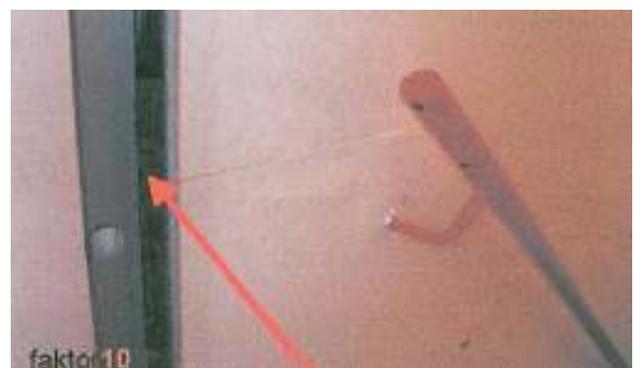
Außerdem ist folgendes anzumerken: die bauliche Qualitätskontrolle bei dem beschriebenen Vorgehen ist wegen der zeitlichen Verschiebungen nur sehr schwer zu gewährleisten. Sowohl im Interesse der Qualität und auch des Aufwandes bei der Herstellung der luftdichten Schicht und der verschiedenen Anschlüsse empfiehlt das Passivhaus Institut ein anderes Vorgehen: Entweder wird vollflächig verputzt, wie ursprünglich vorgesehen oder plattenförmige Laibungselemente werden mit ausreichendem Fugenhub und luftdicht an den Wandputz angeschlossen montiert. Hier gibt es Entwicklungspotentiale für innovative Produkte.

## Luftdichtheit im Haustür bzw. Kellertürbereich, Abgang zum Keller

Das Treppenhaus liegt im warmen Bereich des Gebäudes. Daher muss nicht nur die Haustür, sondern auch die Tür zum Kellerabgang dauerhaft luftdicht ausgeführt werden. Die Tür wurde mit einer im Rahmen umlaufenden Dichtung ausgeführt. An der Schwelle wurde eine Schlauchdichtung mittels Klemmleiste auf dem Fußboden montiert. Die Tür schlägt gegen die Schlauchdichtung (Abbildung 29 Mitte) genau wie an die Anschlagdichtung in Laibung und Sturz (Abbildung 29 rechts unten).



**Abbildung 29: Tür zum Kellerabgang neben der Haustür. Der Türschlitz unter dieser Tür wurde mit einem Gummischlauchprofil, das mittels Klemmleiste auf dem Boden verschraubt ist, abgedichtet. Die Tür schlägt gegen die Schlauchdichtung (Mitte) genau wie an die Anschlagdichtung in Laibung und Sturz (rechts unten). Fotos vom Architekturbüro [faktor10]**



## **Luftdichter Anschluss von Rohrdurchführungen durch die Außenwand**

Die Lüftungskanäle werden in runden Öffnungen von speziell gefertigten Stahl-Träger-Formteilen durch die Außenwand geführt, siehe Abbildung 30. Dies war notwendig, weil die Wände an der Stelle, wo die Rohrdurchführungen platziert werden mussten, aus statischen Gründen nicht einfach durchbohrt werden durften. Die runden Öffnungen der Stahl-Elemente (Pfeil) sind geringfügig größer als der Durchmesser der Lüftungskanäle (DN100). Wärmebrücken an der Kanaldurchführung müssen unbedingt vermieden werden. Dazu wurden die Kanäle mit mindestens einer Lage Armaflex umwickelt bzw. verklebt, bevor sie durch die Öffnungen geführt wurden. Würden sie den Stahl des Trägers berühren, entstünde an dieser Stelle eine massive Wärmebrücke, die abgesehen von hohen Wärmeverlusten im schlimmsten Fall zu Tauwasser führen könnte. Die gezeigte Ausschäumung zwischen Träger und Kanal kann diese Trennlage unterstützen, nicht aber ersetzen.



**Abbildung 30: Eine Berührung von Stahlträger und Kanalrohren würde zu einer massiven Wärmebrücke führen, so dass Gefahr für Tauwasserbildung bestünde. Deshalb wurde zwischen Rohr und Stahlträger eine Trennlage aus Armaflex eingelegt. der übrige Hohlraum wurde an den schwer zugänglichen Stellen mit Ortschaum gedämmt. Das Ausschäumen von Fugen ist richtig und wichtig für die einwandfreie Funktion der Wärmedämmung. Es ist jedoch nicht ausreichend als luftdichter Anschluss der Rohre. Die im Bild gezeigte Ausschäumung zwischen Träger und Kanal stellt also keine gesicherte luftdichte Verbindung dar. Fotos PHI und [faktor10]**

Der luftdichte Anschluss der Kanäle an die Außenwanddurchführung kann nicht dauerhaft durch die im Bild gezeigte Ausschäumung zwischen Träger und Kanal hergestellt werden, diese stellt keine gesicherte luftdichte Verbindung dar, siehe Abbildung 30. Nach Aussage der Architekten [faktor10] wurden die mit dampfdichtem geschlossenzelligem Kautschuk (Armaflex) gedämmten Rohre vor dem dargestellten Ausschäumen mit einem geeigneten Material luftdicht an die Außenwanddurchführung angeschlossen. Da die Dämmlage (Armaflex) auf den Lüftungsrohren verklebt ist, könnte der luftdichte Anschluss an die Durchführungen z.B. mit Spezialklebeband erfolgen.

Abwasserleitungen, die das Mauerwerk waagrecht durchdringen, wurden für eine luftdichte Verbindung eingemörtelt. Die Isolierung des Abwasserrohres wurde zusätzlich mit einer Klemmmanschette dicht an das Rohr gepresst. Da das Rohr dort schlecht zugänglich ist und sehr viel Klebeband verwendet wurde ist diese Situation fehlerträchtig.



Abbildung 31: links: luftdicht eingemörteltes Abwasserrohr mit zusätzlicher Klemmmanschette. Rechts: Da die Abwasserleitungen aus konstruktiven Gründen in der Dämmebene der Fassade verlaufen, entsteht in jeder Wohnung eine Durchdringung der Dämmebene und der luftdichten Schicht. Dort wurde das Rohr mit Hilfe einer vorgefertigten Manschette (im Bild weiß) und Spezialklebeband an die Luftdichtheitsebene angeschlossen.

Alle Öffnungen für Leitungen und Rohre aus dem Keller wurden mit Quellschmörtel luftdicht abgedichtet, ein Verfahren, das sich im Neubau bereits gut bewährt hat. Alle durch das Dach geführten Luftleitungen wurden mit der auf der Dachdecke liegenden Dachdichtungsbahn fest verschweißt. Raumseitig wurden die Rohre mit der Dampfsperre bzw. luftdichten Folie verklebt.



**Abbildung 32: Alle Durchdringungen der Kellerdecke durch Heizungsleitungen o.ä. wurden mit Hilfe von Quellmörtel luftdicht abgedichtet.**



**Abbildung 33: Fortluftauslass und Außenluftansaugung einer Dachgeschosswohnung. Fotos: [faktor10]**

Die Schornsteine wurden ähnlich wie die durch das Dach geführten Lüftungsleitungen außenseitig an die Dachdichtungsbahn und Raumseitig an die luftdichte Folie angeschlossen.



**Abbildung 34: die Schornsteine wurden außen an die Dachdichtungsbahn und raumseitig an die luftdichte Folie im Dachaufbau angeschlossen. Fotos: [faktor10]**



## Luftdichtheit im DG Neubau (vorgefertigte Holz-Bauelemente)

Bei der Montage der in Holztafelbauweise vorgefertigten Wandelemente des Dachgeschosses wurden an den Bauteilstößen, die später nicht mehr zugänglich waren, Folienstreifen angebracht. Später wurden die in der Fläche verlegten Luftdichtheitsfolien aus Wand und Dach an diese Streifen angeschlossen, siehe Abbildung 35.



Abbildung 35: Holz-Leichtbau im DG. Folienstreifen zwischen einem Außenwandelement (rechts) und einer Innenwand. Der Folienstreifen wird später an die flächig aufgebrachte Folie angeklebt. Foto: [faktor10]

Generell wurde im Dachgeschoss von innen auf die OSB-Platten eine PE-Folie verlegt. Diese Folie stellt neben der luftdichten Ebene vor allem eine Dampfsperre dar, die ausgeführt wurde, weil direkt über dem gedämmten Dachaufbau die wasserführende und deshalb ebenfalls dampfdichte Schicht des begrünten Daches liegt, Abbildung 36.



**Folienstreifen über den senkrechten Wandelementen zur späteren Befestigung mit einer flächig unter den Deckenelementen verlegten Folie (Dampfsperre).**

Nach Fertigstellung des Rohbaus wurde zunächst die Luftdichtheit an der Dachuntersicht mit Hilfe der an den OSB-Platten angetackerten Dampfbremse hergestellt.

Die Tackerlöcher wurden sodann, wie in Abbildung 37 links erkennbar, mit Klebeband überdeckt. Besonderen Wert wurde auf die spannungsfreie Verlegung der Folie in den Raumecken gelegt. Ebenfalls im Bild ersichtlich ist, dass der Anschluss der Dampfbremse an die im Bereich der Bauteilstöße vorher verlegten Folienstreifen meist nur durch Überlappung erfolgte.



**Abbildung 36: Holz-Leichtbau im DG: Die Dampfbremse und luftdichte Ebene im neuen Dachgeschoss. Im Dachgeschoss wurde von innen auf die OSB-Platten eine PE-Folie verlegt. Diese Folie stellt neben der luftdichten Ebene vor allem eine Dampfsperre dar, die ausgeführt werden musste, weil direkt über dem gedämmten Dachaufbau die wasserführende und dampfdichte Schicht des begrüntes Daches liegt.**



**Abbildung 37: Holz-Leichtbau im DG. Luftdichte Folie (und Dampfsperre) auf der OSB-Platte, an den Stößen verklebt, bevor die Gipskartonplatte aufgebracht wurde. Fotos: [faktor10]**

Im weiteren Verlauf wurde die Dachunterseite mit Gipskartonplatten verkleidet sowie die Dampfbremse auf der Innenseite der Außenwand angebracht. Auch diese wurde später mit Gipskartonplatten verkleidet, siehe Abbildung 37 rechts. In Abbildung 38 ist die luftdichte Verklebung einer Durchführung für die Lüftungsleitungen aus den DG-Wohnungen durch das Dach dargestellt. Solche Verklebungen sind aufwendig und daher Fehlerträchtig. Inzwischen sind für solche Situationen vorgefertigte Manschetten verfügbar.



**Abbildung 38:** Luftdichter Anschluss einer Rohrdurchführung für die Außenluft- bzw. Fortluftleitung im DG.

Wichtig ist zu bemerken, dass der Dachaufbau raumseitig mit einer Dampfsperre sehr gut dampfdicht ausgeführt sein muss. Das kommt daher, dass auf der Oberseite der Dämmschicht des Daches direkt die wasserführende Schicht liegt, vgl. Abbildung 34. Die Folie der wasserführenden Schicht unter dem Substrat des Gründaches hat in jedem Fall einen sehr hohen  $s_d$ -Wert. Daher muss auch die raumseitige Oberfläche des Dachaufbaus unterhalb der Dämmlage als Dampfsperre ausgeführt werden. Die dampfbremsende Wirkung einer OSB-Platte reicht dafür nicht aus.



**Abbildung 39:** Fensteranschluss Holzleichtbau im DG: Folie mit Fenster verklebt.  
Foto: [faktor10]

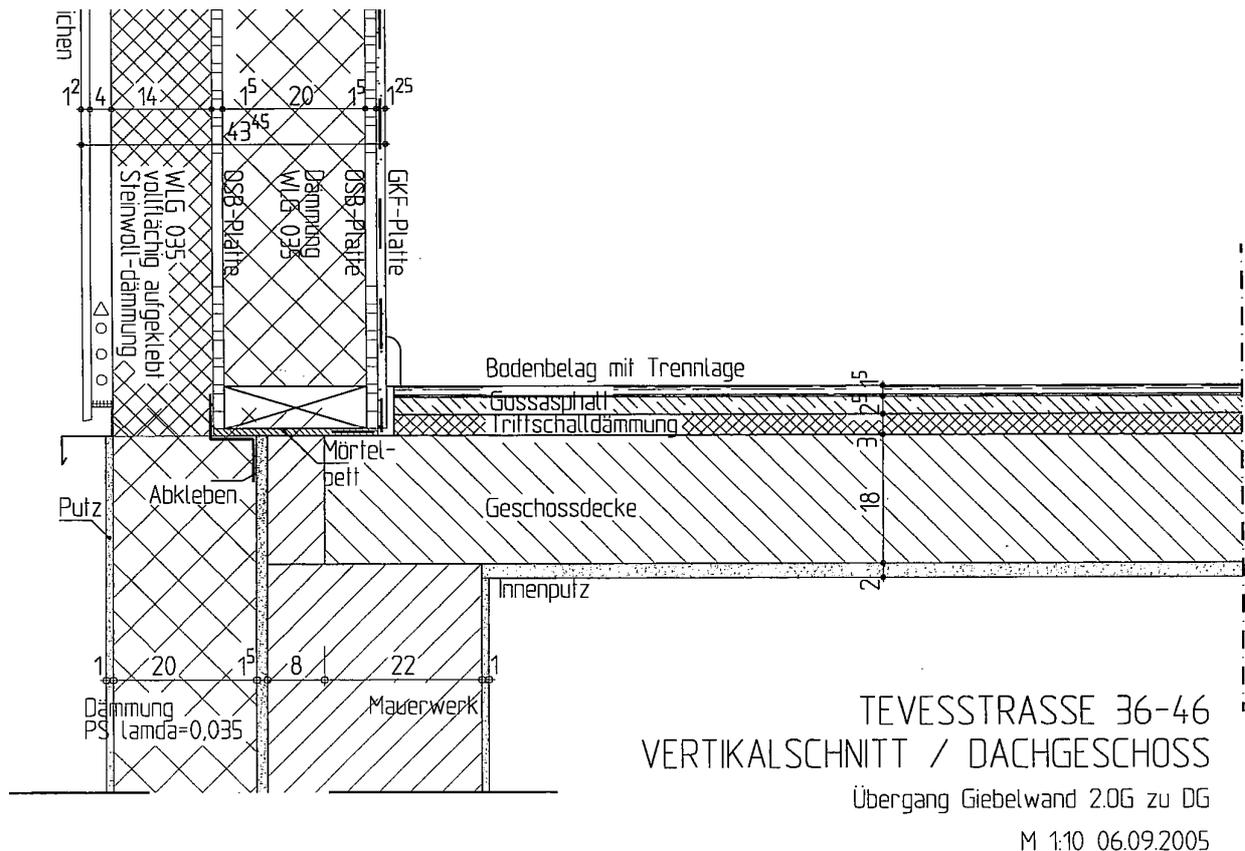


**Abbildung 40:** Holzleichtbau im DG: Überstehende Folie wurde am Fußboden in Mörtelbett gedrückt um eine luftdichte Verbindung zur darunter liegenden Betondecke herzustellen.  
Foto: [faktor10]

Die Fenster wurden zuerst mit Dichtungsband (in Abbildung 39 blassgelb) und elastischer Klebemasse an die Holzbalken der Fensterlaibung angeschlossen. In einem weiteren Schritt wurde die flächig auf der Wand verlegte Folie an diese Dichtungs-  
bänder mit Klebeband angedichtet.



**Abbildung 41: Anschluss der luftdichten Folie der Holz-Leichtbau-Wände im DG an die Rohbetondecke des 2. OG. Die mechanische Fixierung der Folie durch Mineralwollestreifen – hier vor Montage der Gipskartonverkleidung auf der Wand – konnte im Bereich der Windanker nicht vollständig verwirklicht werden. Foto: [faktor10]**



**Abbildung 42: Anschluss der Außenwand im neuen DG (Holz-Leichtbau) an die Betondecke des Bestandsgebäudes. Die luftdichte Folie zwischen Gipskartonplatte und OSB-Platte an der Wand wurde am Fußpunkt in ein Mörtelbett gedrückt um dort den luftdichten Anschluss herzustellen. Detail: [faktor10]**

Am Übergang zwischen Wand und DG-Fußboden wurde die aus der Wand kommende Folie mit elastischer Klebmasse an den Fußboden angeschlossen. Der Fußboden, bzw. die darauf ausgebrachte Teerbahn bildeten im Dachterrassenbereich die luftdichte Ebene, siehe Abbildung 40.

Die Wandelemente der Holz-Leichtbau-Konstruktion des DG durften nur im Bereich der tragenden Außenwände direkt auf dem Bestandsgebäude aufsetzen, siehe Abbildung 42. Alle anderen Zwischenwände im DG mussten an den Außenwänden bzw. am Dach aufgehängt werden, weil die Betondecken und Zwischenwände des Bestandsgebäudes statisch nicht weiter belastet werden durften.

Um die Dampfsperrfolie auch von den nichttragenden Wänden mechanisch am Fußboden zu fixieren, wurde die aus diesen statisch-konstruktiven Gründen nötige Fuge zwischen den Wandelementen und dem Fußboden mit Mineralwollestreifen ausgefüllt. Die Mineralwollestreifen dienen als weiches Polster zwischen den GK-Platten der Wandverkleidung und dem Fußboden. Die GK-Platten drücken die Folie über die Vermittlung der Mineralwollestreifen in die elastische Klebmasse auf dem Fußboden. Diese mechanische Fixierung der Folie durch Mineralwollestreifen auf der Wand, konnte im Bereich der Windanker nicht vollständig verwirklicht werden, in Abbildung 41 ist dies vor der Montage der Gipskartonverkleidung dargestellt. Abbildung 42 zeigt einen Schnitt durch den Anschluss einer tragenden Außenwand zum Bestandsgebäude.

Auf der Außenseite wurden die Holz-Wandelemente zusätzlich mit überstehenden Folienstreifen vor dem Aufbringen der Dämmplatten am Mauerwerk verklebt, Abbildung 43.



**Abbildung 43: luftdichter Anschluss der Holz-Leichtbau Konstruktion im DG an das Mauerwerk des Bestandsgebäudes.**

## Untersuchung der Luftdichtheit nach der Sanierung

Die Luftdichtheit der sanierten Gebäude wurden am 12. Mai, 30. Juni sowie am 28. Juli 2006 mittels Blower Door Messungen untersucht. Die Luftdichtheit wurde jeweils pro Hauseingang bzw. Treppenhaus nach DIN EN 13829 jeweils im noch unbewohnten Zustand untersucht. Die Luftfördereinrichtung (Minneapolis Blower Door Model 4 mit Druckmessdose Tectite) wurde jeweils in die Hauseingangstür eingebaut. Alle Wohnungs- und Innentüren wurden geöffnet um einen Luftverbund zwischen den Wohnungen und dem Treppenhaus herzustellen. So war es ausreichend, je Hauseingang eine Messung durchzuführen – und es war nicht notwendig, jede Wohnung einzeln zu messen.

Zur Präparation der Gebäude wurden alle Lüftungsgeräte einzeln mit Luftblasen im Gerät oder wenn möglich außen an der Fassade (EG Wohnungen) verschlossen. Alle offenen Abwasserrohre und Abläufe wurden verschlossen bzw. Abwasser-Syphone mit Wasser aufgefüllt. Voraussetzung für die Messung war das Verschließen aller Fenster und Fenstertüren in allen Wohnungen je Eingang. Da sich die Keller nicht innerhalb der thermischen Hülle befinden, wurden diese bei der Luftdichtheitsuntersuchung nicht berücksichtigt. Die Kellertüren wurden geschlossen und ggf. abgeklebt wenn sie noch nicht vollständig eingedichtet waren (Anputzung und Schwelle fehlten zu diesem Zeitpunkt überwiegend).



**Abbildung 44: Abdichtung der Fort- und Außenluftöffnungen an der Fassade bei einer der EG Wohnungen und geöffnetes Lüftungsgerät mit eingesetzten Luftblasen.**

Die Luftströmungen an den Leckagen wurden mit einem Thermoanemometer gemessen (Fa. Airflow, Typ TA5). Zum Teil sind die gemessenen Luftgeschwindigkeiten in m/s im Text angegeben (Messung immer bei 50 Pa Gebäudedruckdifferenz). Eine Abschätzung der Volumenströme ist nur bei gleichzeitiger Bestimmung der Leckagefläche möglich. Diese Angaben sind daher nur qualitativ zu verstehen.

**Leckagen** Zur Leckagesuche wurden alle Wohnungen und das jeweilige Treppenhaus eines jeden Hauseingangs bei 50 Pa Unterdruck auf Leckagen abgegangen und untersucht. Dabei waren insbesondere Rohr- und Kabeldurchgänge, Fenster und Fenstertüren sowie Anschlüsse bzw. Anschlussfugen von Interesse.



**Abbildung 45: Eingebaute Blower Door in einer Hauseingangstür und für die Messung temporär abgedichtete Kellertür.**

### **Untersuchung Haus 36 bis 46 (6er Block).**

Bei den Untersuchungen im Haus 42 bis 46 zeigten sich in allen drei Eingängen Leckagen bei fast allen Revisionsklappen in den WCs (Lüftungsschlitze um 0,2 m/s). Diese Strömungen deuten auf eine Undichtheit an den Rohrdurchführungen hin wie sie in Abbildung 30 beschrieben wurden.

Regelmäßige, jedoch kleinere Leckagen an den Verbindungen der Laibungsplatten mit den Fenster-Blendrahmen (meist die Ecken) sind hier nicht im Einzelnen aufgeführt.

Ebenso wurden in beinahe allen Wohnungen in dem Spalt hinter den Lüftungsgeräten (ca. 1cm breit, im Anschluss an Abkofferung auf gesamter Gerätebreite) Leckagen lokalisiert. Diese Strömungen kommen vermutlich aus den Bohrungen für die Befestigung der Geräte in der Leichtbauwand. In diesem Hohlraum (Leichtbauwand) befinden sich an der Außenwand auch die beiden - von innen unzugänglich - Rohrdurchführungen der Außen- und Fortluftleitungen. Es ist zu vermuten, dass diese nicht perfekt abgedichtet sind und Restleckagen verblieben sind.

Bei den drei Hauseingängen waren zum Zeitpunkt der Messungen alle Kellertüren nicht fertig verputzt und wurden komplett mit Folie abgeklebt. Die wichtigsten gefundenen Leckagen und Besonderheiten werden hier Hausweise dokumentiert:

Haus 42: Zum Zeitpunkt der Messung waren in den Wohnungen noch keine Fußleisten montiert.

Ort	Leckage
Treppenhaus	Die RWA-Öffnung im Treppenhauskopf wurde ohne Antrieb und Verriegelung vorgefunden und temporär abgeklebt. Haus-Eingangsbereich: unverputzter Bereich neben der Tür/Wand zur Wohnung/Keller und über der Tür, unverputzte Stellen am Treppenpodest zum Keller. 1. OG: Fensterbank zur Laibung (0,5 m/s). DG: Fuge Altbau/Neubau im Bereich des Fensters mehrer Bereiche (um 0,3 m/s), die Klebebänder sind unsauber verarbeitet (insbes. am Absatz rechts des Fensters); am Austritt der Treppe (0,70 m/s), geringe Restleckage an RWA, offener Kabelauslass Wand mit RWA-Kabeln (0,8 m/s), Treppenpodest/Altbauwand unter RWA (0,8 m/s)
2. OG	Whg. links: Abstellraum Fußboden zum Schacht (0,1 m/s, 1 lfm), Zimmer zur Straße an Kante zu Haus 44 zwei Löcher auf Kopfhöhe Whg. rechts: Balkontür unten stark undicht (2,5 m/s, 1 lfm)
DG	Flur Wandkante gegenüber Eingangstür 0,7 m/s; Küche: Fuge am Fußboden um Schornstein massive Leckage 3,7 m/s 1,5 lfm; hier wurde für die Messung so gut als möglich abgeklebt! Aus bauphysikalischer Sicht war hier unbedingt eine Nachbesserung notwendig. Diese wurde später bauseits ausgeführt.

Haus 44:

Ort	Leckage
Treppenhaus	EG/Haus-Eingangsbereich Leckagen an der Holztreppe zum Kellerabgang, Treppenstufen/Treppenwange Fenster (EG/OG): oben Mitte, Laibung links unten Fenster (OG/2. OG): links oben (2 m/s) 2.OG/DG: Fuge alt/neu Außenwand Ritzen im Putz, Treppenaustritt Fuge (0,35 m/s), unter RWA-Klappe weißes Kabel
EG	Whg. links: An der Schwelle der Wohnungstür, Unterverteilung umlaufend (0,1 m/s) Deckenauslässe 1,2 m/s, Balkontür unten, Bad Wandauslass 0,3 m/s Whg. rechts: Bad Wandauslass, Balkontür rechts oben, links unten, Deckenauslässe, Jalousietaster straßenseitig
1. OG	Whg. links: Bad Wandauslass Kabel, Balkontür unten und Band rechts oben, Deckenauslässe, Zimmer Straßenseite Kabel am Sockel neben Tür (Loch im Putz)
2. OG	Whg. rechts: Bad Wandauslass, Küche Fenster rechts oben, Balkontür fehlender Beschlag, Zimmer Straßenseite Sockelkanal-Ecken Whg. links: Bad WC-Taster, Wandauslass, Balkontür schließt schlecht rechts unten (3,8 m/s), Zimmer Straßenseite linkes Fenster rechts oben
DG	Deckenauslass Flur vor WC, Wohnzimmer Treppe Terrasse (0,2 m/s)

Haus 46:

Ort	Leckage
Treppenhaus	Fenster EG/OG: links unten (Anschluss an Laibung) Treppenabsatz DG: Fuge Altbau/Neubau Löcher im Putz, Riss Dachschräge/Wand, RWA Klappe an Spindel
EG	Küche Balkontür links unten, Abflussrohr umlaufend, WC Fenster rechts oben
1. OG	Küche: Balkontür links oben, Loch Außenwand (Kabel, 3 x 3cm), Zimmer Straßenseite: Ost-Fenster rechts unten

Im Folgenden sind Fotos verschiedener Leckagen im Treppenhaus und in den Wohnungen des 6er Blocks dargestellt.

**Typische Leckagen im Treppenhaus:**

Abbildung 46: Links: Noch unfertiger unverputzter Bereich über der Haustür (Blower Door ist in der Haustür eingebaut). Rechts: Leckage Treppenpodest EG, Anschluss der Freiwange der Treppe zum Keller.



Abbildung 47: Links: Leckagen Treppenstufe zur Freiwange sowie zwischen Tritt- und Setzstufen. Rechts: Im Treppenhaus DG Verbindungsfuge Altbau zum aufgesetzten Neubau.



**Abbildung 48: Links: Unfertig verkleidetes Mauerstück im Treppenhaus rechts und links neben dem Fenster im 2. OG/DG, Rechts: Detail von dem Mauerstück mit Leckagen in der Abklebung zur Treppenhausinnen- und Außenwand.**



**Abbildung 49: Links: Unfertiger Kabelauslass im Treppenhauskopf unterhalb der RWA-Klappe. Rechts: Kante im Anschluss zwischen Treppenhauswand und Dach.**

## Typische Leckagen in den Wohnungen



Abbildung 50: Links: Lüftungsschlitze in der Revisionsklappe im Badezimmer. Rechts: Fenster Bandseite oben.



Abbildung 51: Links: Leckage an einer Fenstertür unten. Rechts: Luftströmung über der Fußleiste in einem Zimmer.



Abbildung 52: Links: Massive Leckage am Schornsteinschacht in der DG Whg. Haus 42. Rechts: Detail Fußboden/Schornsteinschacht mit sehr hoher Strömungsgeschwindigkeit (5,5 m/s) im gesamten Anschlussbereich Schachtverkleidung zum Fußboden.



Abbildung 53: Links: Leckage hinter dem Schornstein zum Dach bzw. zur Haustrennwand (nach dem Entfernen der Gipsplattenverkleidung. Rechts: Gleicher Bereich nach dem Verkleben der Folien (Fotos: Faktor 10).

Die Leckagen im Haus 36 bis 40 sind vergleichbar mit den hier aufgeführten für die Eingänge Nr. 42 bis 46. Daher werden diese hier nicht im Detail aufgeführt.

### Untersuchung Haus 48 bis 54 (4er Block)

Im 4er Block (Haus 48 bis 54) zeigten so gut wie alle Kabelauslässe in den Decken (für Deckenlampen) kleinere Leckagen. Ebenfalls an den Verbindungen der Sockelleisten konnten durchgängig geringe Luftströmungen festgestellt werden. Diese sind hier nicht im Einzelnen aufgeführt. Die wichtigsten gefundenen Leckagen werden hier Hausweise dokumentiert.

#### Haus 48

Ort	Leckage
Treppenhaus	Absatz zum DG: Fuge Altbau/Neubau Im DG: Loch vom fehlenden Schalter Rauchabzug (RWA Kabel) starke Leckage (Wand ist hinterströmt)
EG	Leckagen im Elektroverteiler zeigt an, dass vermutlich der Verguss zum Keller nicht optimal ausgeführt ist Küche: Schalter Jalousie und Abflussrohr im Sockel (Leckage umlaufend) Wohnzimmer: Schalter Jalousie
DG	Küche: Abflussrohr im Sockel. Leckage umlaufend Wohnraum: Abkofferrung Zuluftkanal am Kabelauslass und Balkontür Band oben

#### Haus 50:

Ort	Leckage
Treppenhaus	Absatz zum DG: Fuge Altbau/Neubau
EG	Schalter Jalousie Zimmer Ost Durchführung Heizungsrohr unter Lüftungsgerät (wie in Haus 52, 2. OG aber deutlich schwächer) Küche: Abflussrohr im Sockel (Leckage umlaufend)
1. OG	Küche: Abflussrohr im Sockel (Leckage umlaufend) Balkontür: Band oben Zimmer West: Fenster Band oben

#### Haus 52:

Ort	Leckage
Treppenhaus	Fenster EG/1.OG: Ecke oben links (Horizontal + Vertikal je 20 cm) Nachstellen
2. OG	Balkontür: rechter und linker Anschluss (Einbau) und Tür Band unten und oben Küche: Abflussrohr im Sockel. Massive Leckage umlaufend Leichtbauwand zwischen Küche/Bad: An den Öffnungen (WW-+ Heizungsrohre unter dem Lüftungsgerät sowie z.B. Spültaster WC) starker Luftstrom. Deutet auf Leckage in der Hohlwand hin, ggf. an den Durchführungen Lüftungsrohre oder Abwasserrohre
DG	Wohnungstür rechts unten/Fußboden: Loch im Fußboden wie auch an der Fußleiste an der Wand im TH deutliche Leckage (Hohldecke). Küche: Abwasserrohr (massive Leckage umlaufend)

Haus 54: Bei allen Wohnungen der rechten Seite deuten die Luftströmungen in den Elektroverteilerkästen auf nicht optimalen Verguss zum Keller hin.

Ort	Leckage
Treppenhaus	Absatz zum DG: Fuge Altbau/Neubau
EG	Whg. rechts: Wohnzimmer: Balkontür rechts unten (Einbauanschluss) und Schalter Jalousie. Bad: Auslass Kabel Spiegel. Küche: Abflussrohr (Leckage umlaufend) Whg. links: Küche: Wand hinter Kompaktgerät zum Boden auf 1 m Breite Leckage Zimmer West (südlich): Schalter Jalousie und Balkontür Schlossseite oben
1. OG	Whg. rechts / Wohnzimmer: Balkontür unten links und rechts (zusätzlich auch eine Leckage an der Eckverbindung der Glasleiste unten rechts) Whg. links / Küche: Fensterlaibung links. unten deutliche Leckage Whg. links / Zimmer West: Balkontür unten (Einbauanschluss) beidseitig und oben rechts
2. OG	Whg. links / Küche: Steckdose Nordwand Whg. links / Zimmer West südlich: Steckdose + Lichtschalter
DG	Whg. rechts / Abstellraum: Außenwand Sockel links und Fuge Parkett / Außenwandsockel (sehr stark) Whg. rechts / Wohnzimmer: Feuchte-Messbohrungen müssen verschlossen werden Whg. links / Küche: Abwasserrohr (umlaufende Leckage)

Beispielhafte Fotos der Leckagen im 4er Block werden im Folgenden dargestellt:



Abbildung 54: Links: Fehlstelle auf dem Treppenabsatz (Podest EG). Rechts: Leckage im Bereich der noch fehlenden Türschwelle (EG Whg.).



Abbildung 55: Links: Fenstertür Bandseite oben. Rechts: Laibung/Fußboden vor der Fenstertür (vermutlich aufgrund inkonsequenter Eindichtung der Fenstertür).



Abbildung 56: Links: Abflussrohr Küche (umlaufende Leckage). Rechts: WC Spültaster



Abbildung 57: Links: Rohrdurchführung unter dem Lüftungsgerät zur Hohlwand. Rechts: Fußbodenleiste zur Wand (am Eckwinkel).



Abbildung 58: Links: Kabelauslass in der Decke. Rechts: Schalter eines Außenrollos.



**Abbildung 59: Treppenhaus DG Links: Noch offener Bereich Fußboden zur Wand. Rechts: Fußboden zur Wand (unter der neu montierten Fußleiste).**



**Abbildung 60: Links: Noch offener Kabelauslass für RWA Taster (Treppenhaus DG). Rechts: Fuge in einer DG Whg. am Anschluss zwischen Massivbau und Leichtbauelementen im DG.**



Abbildung 61: Links: Innen-Außenwand Kante in einer EG Wohnung.

### Leckagenbeurteilung

Die lokalisierten Restleckagen zeigen u.a. die besondere Anforderung bei der Abdichtung eines Altbaus mit Hohlsteindecken. Das Hohlstein-Wand-Decken System bieten in einigen Bereichen trotz der Abdichtungsmaßnahmen die Möglichkeit der Durchströmung bis weit in das Gebäude hinein. Die luftdichte Ebene konnte nicht überall ganz perfekt im Bereich der Außenwände (Hülle) durchgehend realisiert werden, so dass ungewünscht stellenweise auch Innenbauteile als Bestandteil der luftdichten Ebene fungieren. Wenn dann in diesen nicht auf Luftdichtheit ausgelegten Bereich Fehlstellen auftreten oder Bohrungen für z.B. Schalter oder Steckdosen gesetzt werden, treten Leckageströmungen auf.

### Ergebnisse der Luftdichtheitsuntersuchung

Die Drucktestmessungen (Unter- und Überdruckmessreihen) wurden für jeden der zehn Eingänge einzeln ausgewertet. Es ergaben sich Messwerte zwischen  $n_{50} = 0,35$  und  $0,71 \text{ h}^{-1}$ . Dabei liegt der Mittelwert von Haus 36 bis 46 (6er Block) mit  $n_{50} = 0,45 \text{ h}^{-1}$  unerheblich besser als Haus 48 bis 54 (4er Block) mit  $n_{50} = 0,49 \text{ h}^{-1}$ . Der gesamte volumengewichtete Mittelwert für beide Wohnblöcke ergab  $n_{50} = 0,46 \text{ h}^{-1}$ . Trotz der gefundenen und dokumentierten Restleckagen sind insgesamt diese sehr guten Luftdichtheitswerte realisiert worden.

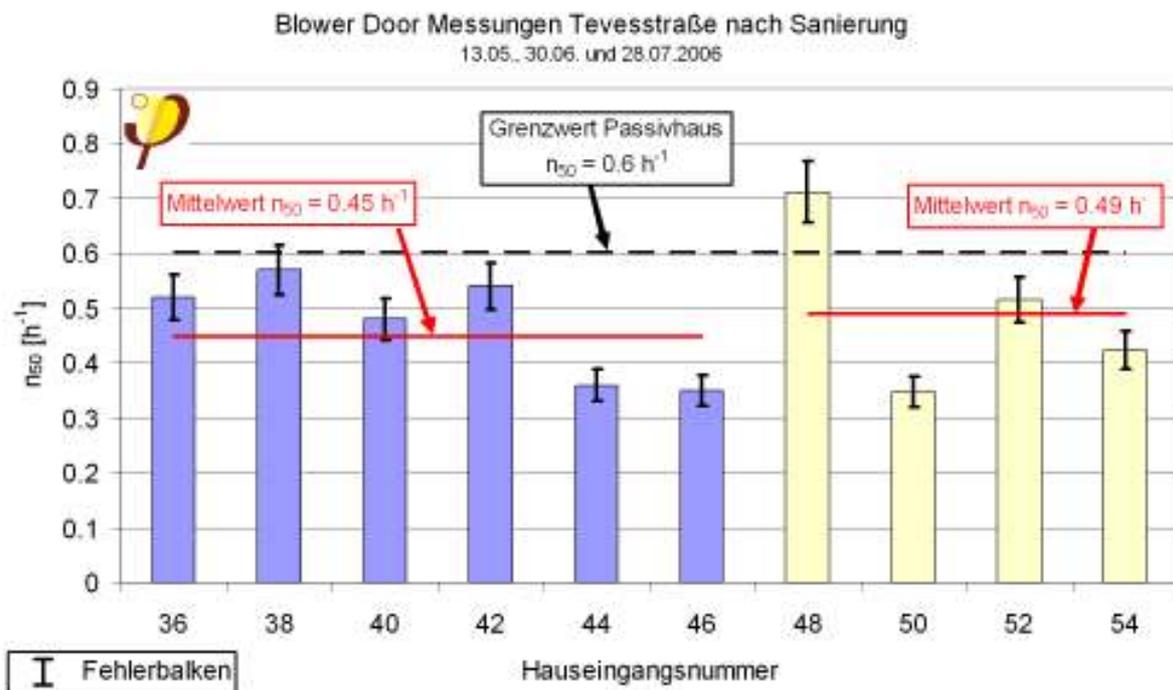
Die Leckagen intern zwischen verschiedenen Wohnungen wurden nicht gemessen. Dazu hätte eine aufwendigere Messmethode (sog. „Schutzdruckverfahren“ [Hall 2000, Peper 1999]) eingesetzt werden müssen. Dies ließ keine entscheidenden zu-

sätzlichen Erkenntnisse erwarten. Bei der hier vorliegenden Bauweise sind keine internen Luftvolumenströme in nennenswerter Größe zu erwarten.

	Hauseingangsnummer									
	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54
$n_{50}$ -Wert [1/h]	0,52	0,57	0,48	0,54	0,36	0,35	0,71	0,35	0,52	0,42
Mittelwert	Block 36 - 46 = <b>0,45 1/h</b>						Block 48 - 54 = <b>0,49 1/h</b>			
	<b>Gesamtmittelwert 0,46 1/h</b>									

**Tabelle 1: Messergebnisse der Drucktestmessungen der zehn Hauseingänge**

Die Messwerte liegen deutlich unterhalb der in der gültigen Bauvorschrift (EnEV) zulässigen Werte von  $n_{50} = 1,5 \text{ h}^{-1}$  für Gebäude mit Lüftungsanlagen. Auch die deutlich strengere Anforderung an Passivhäuser  $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$  wird im Mittel unterschritten. Nur ein Gebäudeteil liegt etwas über der Anforderung. Die graphische Darstellung der Messwerte in Abbildung 62 zeigt den Erfolg des realisierten Luftdichtheitskonzeptes trotz der schwierigen Voraussetzungen des Altbaus.



**Abbildung 62: Ergebnisse der 10 Luftdichtheitsmessungen vom 13.5., 30.06. sowie 28.07.2006 der beiden sanierten Altbaublöcke in der Tevesstraße. Die Mittelwerte sind je jeweils pro Wohnblock dargestellt.**

Die hier wiederholt erreichten guten Ergebnisse zur Luftdichtheit bestätigen, dass entgegen der ursprünglichen Erwartung auch bei Altbaumodernisierungen zuverlässig und reproduzierbar eine Luftdichtheit gemäß den Anforderungen des Passivhaus Standards erreicht werden kann.

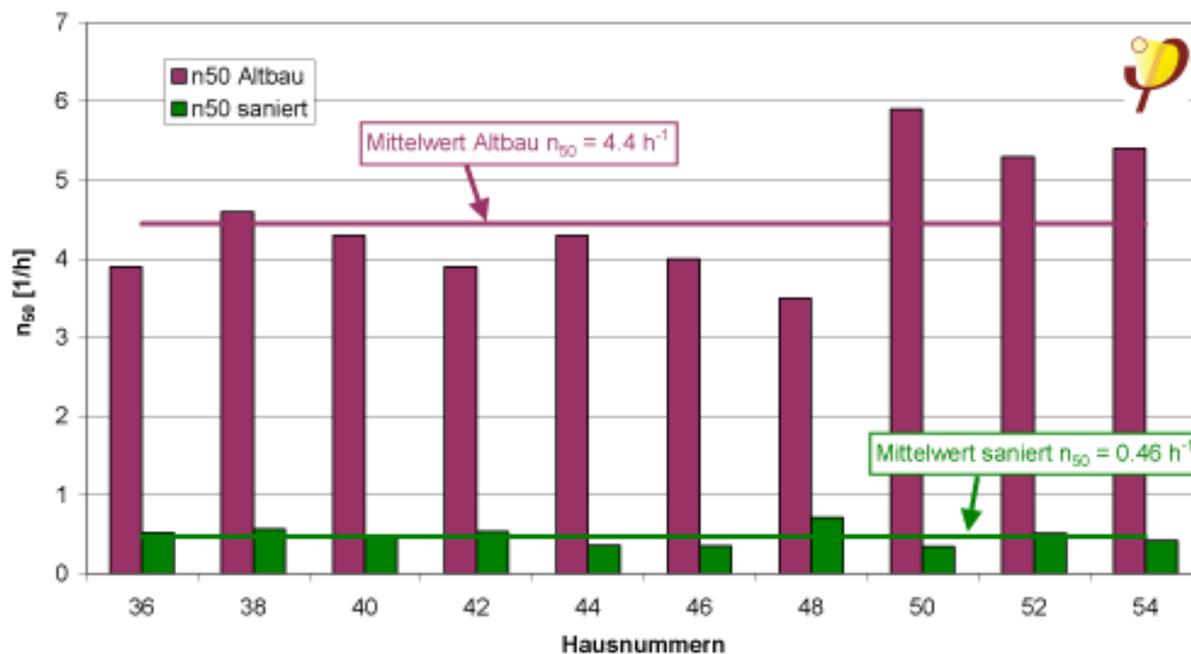


Abbildung 63: Vergleich der Luftdichtheitsmesswerte der 10 Hausaufgänge vor und nach der Sanierung.

Beim Vergleich der Luftdichtheitswerte vor und nach der Sanierung zeigt Abbildung 63 eine Verbesserung um etwa einen Faktor 10: Von im Mittel  $n_{50} = 4,4 \text{ h}^{-1}$  ist der Wert auf  $0,46 \text{ h}^{-1}$  reduziert worden. Dies verdeutlicht den gewaltigen Sprung im Bereich der luftdichten Gebäudehülle, die eine zentrale Voraussetzung für ein energieeffizientes Gebäude darstellt. Neben den systematischen Verbesserung der Gebäudehülle ist ein Teil auch den weggefallenen Lüftungsschlitzen in den Küchen zuzurechnen. Die dienten im Altbau der Luftzuführung der Verbrennungsstellen (Kohleöfen).

Die einzelnen Drucktestmessprotokolle der zehn Messungen sind im Anhang dokumentiert.

Die umfassende Verbesserung der Luftdichtheit ist ein großer Erfolg bei diesem Projekt. Auf zwei Konsequenzen sei aber ausdrücklich hingewiesen:

1. Auch bei einer weniger ambitionierten "Standardausführung" sind Ergebnisse für  $n_{50, \text{neu}}$  von weniger als  $1,5 \text{ h}^{-1}$  üblich. Diese Luftdichtheit ist zwar nicht als sehr gut zu bezeichnen – aber eine derartige, wenn auch nur mittelmäßig gut luftdichte Gebäudehülle führt bereits zu einer sehr starken Verringerung des Infiltrationsluftwechsels. Bei  $n_{50} = 1,5 \text{ h}^{-1}$  liegt dieser durchschnittlich nur bei  $n_{\text{inf}} = 0,06 \text{ h}^{-1}$ . Dieser Luftaustausch ist aus hygienischen Gründen ganz sicher unzureichend. Es muss daher bei auch bei konventionellen Modernisierungen, immer dann wenn Maßnahmen zur Verbesserung der Luftdichtheit

durchgeführt werden, darauf geachtet werden, dass der hygienisch erforderliche Luftwechsel auf anderem Weg sichergestellt wird.

2. Eine zuverlässige und zugleich energieeffiziente Lüfterneuerung, welche den hygienischen Anforderungen entspricht, kann nach den vorliegenden Erkenntnissen nur durch eine Komfortlüftung sichergestellt werden. Die Erfahrung aus zahlreichen Projekten zeigt: Luftdichtheit und Komfortlüftung gehören daher bei Modernisierungen untrennbar zusammen.

**Messprotokolle zur Untersuchung der Luftdichtheit nach der Sanierung**

Blower Door Untersuchung: Messprotokolle Tevesstraße 36 - 54 (10 Eingänge).

BlowerDoor-Prüfprotokoll											
Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A											
Minneapolis BlowerDoor Modell 4 - Tectite Express 3.0.0.10											
Objekt : Hauseingang 36 Tevesstr 36 60326 Frankfurt					Prüfer/in: Kaufmann / John						
					Datum: 28.7.06 FLIB-Nr:						
<b>Klimadaten</b>											
Innentemperatur: 26 °C		Außentemperatur: 27 °C		Windstärke: 1		Referenzdruckmessstellen: 1		Gebäudestandort: B			
Luftdruck (Standard): 101325 Pa		Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: 0 %									
<b>Unterdruck</b>					<b>Überdruck</b>						
Natürl. Druckdiff.		$\Delta p_{01+}$	$\Delta p_{01-}$	$\Delta p_{02+}$	$\Delta p_{02-}$	Natürl. Druckdiff.		$\Delta p_{01+}$	$\Delta p_{01-}$	$\Delta p_{02+}$	$\Delta p_{02-}$
		0.2 Pa	-0.3 Pa	0.2 Pa	-0.1 Pa			-	-1.6 Pa	0.1 Pa	-0.1 Pa
<b>Messreihen</b>											
Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebälse- druck	Volumen- strom $V_r$	Abwei- chung	Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebälse- druck	Volumen- strom $V_r$	Abwei- chung		
$\Delta p_{01}$	-0.3	—	—	—	$\Delta p_{01}$	-1.6	—	—	—		
B	-54	44	537	-1.60	B	54	47	560	-0.73		
B	-51	40	517	-0.55	B	47	38	501	0.80		
B	-44	33	470	2.04	B	42	32	457	2.13		
B	-39	28	433	3.44	C	36	326	383	-2.38		
C	-36	323	381	-2.69	C	32	285	357	-0.93		
C	-26	199	298	-0.50	C	27	220	313	1.17		
$\Delta p_{02}$	0.2	—	—	—	$\Delta p_{02}$	0.0	—	—	—		
Korrelationskoef. r: 0.995					Korrelationskoef. r: 0.997						
Vertrauensintervall					Vertrauensintervall						
$C_{env}$ [ $m^3/(h Pa^n)$ ]	22	max. 34	min. 14		$C_{env}$ [ $m^3/(h Pa^n)$ ]	17	max. 23	min. 12			
$C_L$ [ $m^3/(h Pa^n)$ ]	22	max. 34	min. 14		$C_L$ [ $m^3/(h Pa^n)$ ]	17	max. 23	min. 12			
n [-]	0.81	max. 0.93	min. 0.69		n [-]	0.88	max. 0.97	min. 0.79			
<b>Ergebnis, Kenngrößen</b>				V =	1008 m <sup>3</sup>	A <sub>F</sub> =	399 m <sup>2</sup>	A <sub>E</sub> =			
	<b>V<sub>50</sub></b>	Unsicher- heit	<b>n<sub>50</sub></b>	Unsicher- heit	<b>w<sub>50</sub></b>	Unsicher- heit	<b>q<sub>50</sub></b>	Unsicher- heit			
	m <sup>3</sup> /h	%	h <sup>-1</sup>	%	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h	%	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h	%			
Unterdruck	<b>520</b>	+/- 7 %	<b>0.52</b>	+/- 8 %	<b>1.3</b>	+/- 8 %					
Überdruck	<b>519</b>	+/- 7 %	<b>0.51</b>	+/- 8 %	<b>1.3</b>	+/- 8 %					
Mittelwert	<b>520</b>	+/- 7 %	<b>0.52</b>	+/- 8 %	<b>1.3</b>	+/- 8 %					
Anforderungen nach:	Passivhaus-Kriterium	<b>0.6</b>	1/h	***		***					
<b>Die Anforderung an die Luftdichtheit wird erfüllt.</b>											
Bemerkung: Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.											

## BlowerDoor-Prüfprotokoll

### Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A

Minneapolis BlowerDoor Modell 4 - Tectite Express 3.0.0.10

Objekt : <u>Hauseingang 38</u> Tevesstr 38 60326 Frankfurt	Prüfer/in: <u>Kaufmann / John</u> Datum: <u>28.7.06</u> FLIB-Nr.:
---	--

**Klimadaten**

Innentemperatur: <u>26 °C</u>	Referenzdruckmessstellen: <u>1</u>
Außentemperatur: <u>27 °C</u>	Gebäudestandort: <u>B</u>
Luftdruck (Standard): <u>101325 Pa</u>	Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: <u>0 %</u>
Windstärke: <u>1</u>	

**Unterdruck**

Natürl. Druckdiff.	$\Delta p_{01+}$	$\Delta p_{01-}$	$\Delta p_{02+}$	$\Delta p_{02-}$
	0.1 Pa	-0.5 Pa	-	-0.3 Pa

**Überdruck**

Natürl. Druckdiff.	$\Delta p_{01+}$	$\Delta p_{01-}$	$\Delta p_{02+}$	$\Delta p_{02-}$
	0.3 Pa	-0.0 Pa	-	-0.3 Pa

**Messreihen**

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom $V_r$	Abwei- chung	Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom $V_r$	Abwei- chung
$\Delta p_{01}$	-0.5	—	—	—	$\Delta p_{01}$	0.2	—	—	—
B	-61	66	660	-0.71	B	53	50	574	-0.17
B	-53	53	593	-0.81	B	49	46	549	0.78
B	-46	44	536	-0.85	B	44	38	504	-1.13
B	-41	40	515	2.55	B	40	34	478	0.61
B	-34	32	458	3.69	B	35	28	433	-0.08
C	-30	328	384	-3.70					
$\Delta p_{02}$	-0.3	—	—	—	$\Delta p_{02}$	0.6	—	—	—

Korrelationskoef. r:	0.990	Vertrauensintervall		Korrelationskoef. r:	0.998	Vertrauensintervall	
$C_{env}$ [ $m^3/(h Pa^n)$ ]	37	max. 63	min. 22	$C_{env}$ [ $m^3/(h Pa^n)$ ]	42	max. 58	min. 31
$C_L$ [ $m^3/(h Pa^n)$ ]	37	max. 62	min. 22	$C_L$ [ $m^3/(h Pa^n)$ ]	42	max. 57	min. 31
n	0.70	max. 0.84	min. 0.57	n	0.66	max. 0.74	min. 0.58

**Ergebnis, Kenngrößen**

V =	1006 m <sup>3</sup>	A <sub>F</sub> =	399 m <sup>2</sup>	A <sub>E</sub> =	
-----	---------------------	------------------	--------------------	------------------	--

	$V_{50}$	Unsicher- heit	$n_{50}$	Unsicher- heit	$W_{50}$	Unsicher- heit	$Q_{50}$	Unsicher- heit
	m <sup>3</sup> /h	%	h <sup>-1</sup>	%	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h	%	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h	%
Unterdruck	<b>583</b>	+/- 7 %	0.58	+/- 8 %	1.5	+/- 8 %		
Überdruck	<b>558</b>	+/- 7 %	0.55	+/- 8 %	1.4	+/- 8 %		
Mittelwert	<b>570</b>	+/- 7 %	<b>0.57</b>	+/- 8 %	<b>1.4</b>	+/- 8 %		

Anforderungen nach:	Passivhaus-Kriterium	<b>0.6</b>	1/h	***		***	
---------------------	----------------------	------------	-----	-----	--	-----	--

**Die Anforderung an die Luftdichtheit wird erfüllt.**

**Bemerkung:** Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.

## BlowerDoor-Prüfprotokoll

### Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A

Minneapolis BlowerDoor Modell 4 - Tectite Express 3.0.0.10

Objekt : <u>Hauseingang 40</u> <u>Tevesstr 40 60326 Frankfurt</u>	Prüfer/in: <u>Kaufmann / John</u>
	Datum: <u>28.7.06</u> FLIB-Nr: <u></u>

#### Klimadaten

Innentemperatur: <u>26 °C</u>	Referenzdruckmessstellen: <u>1</u>
Außentemperatur: <u>25 °C</u>	Gebäudestandort: <u>B</u>
Windstärke: <u>1</u>	Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: <u>0 %</u>
Luftdruck (Standard): <u>101325 Pa</u>	

#### Unterdruck

Natürl. Druckdiff.	$\Delta p_{01+}$	$\Delta p_{01-}$	$\Delta p_{02+}$	$\Delta p_{02-}$
	-	-0.5 Pa	-	-0.4 Pa

#### Überdruck

Natürl. Druckdiff.	$\Delta p_{01+}$	$\Delta p_{01-}$	$\Delta p_{02+}$	$\Delta p_{02-}$
	1.5 Pa	-0.2 Pa	0.0 Pa	-0.0 Pa

#### Messreihen

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom $V_r$	Abwei- chung	Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom $V_r$	Abwei- chung
$\Delta p_{01}$	-0.5	—	—	—	$\Delta p_{01}$	-0.2	—	—	—
B	-53	39	506	-1.05	B	54	39	509	-0.75
B	-50	36	490	1.18	B	49	34	477	0.97
B	-45	31	456	2.85	B	45	31	450	3.56
C	-39	321	380	-2.73	C	40	320	379	-3.56
C	-36	287	359	-1.49	C	34	242	329	-1.78
C	-27	185	287	1.35	C	27	175	279	1.73
$\Delta p_{02}$	-0.4	—	—	—	$\Delta p_{02}$	0.0	—	—	—

Korrelationskoef. r:	0.995	Vertrauensintervall		Korrelationskoef. r:	0.994	Vertrauensintervall	
$C_{env}$ [m³/(h Paⁿ)]	17	max. 26	min. 11	$C_{env}$ [m³/(h Paⁿ)]	15	max. 25	min. 9
$C_L$ [m³/(h Paⁿ)]	17	max. 26	min. 11	$C_L$ [m³/(h Paⁿ)]	15	max. 24	min. 9
n [-]	0.86	max. 0.97	min. 0.74	n [-]	0.89	max. 1.03	min. 0.75

#### Ergebnis, Kenngrößen

V =	1019 m³	A <sub>F</sub> =	399 m²	A <sub>E</sub> =	
-----	---------	------------------	--------	------------------	--

	<b>V<sub>50</sub></b> m³/h	Unsicher- heit %	<b>n<sub>50</sub></b> h <sup>-1</sup>	Unsicher- heit %	<b>W<sub>50</sub></b> m³/m²h	Unsicher- heit %	<b>q<sub>50</sub></b> m³/m²h	Unsicher- heit %
Unterdruck	<b>489</b>	+/- 7 %	<b>0.48</b>	+/- 8 %	<b>1.2</b>	+/- 8 %		
Überdruck	<b>480</b>	+/- 7 %	<b>0.47</b>	+/- 8 %	<b>1.2</b>	+/- 8 %		
Mittelwert	<b>485</b>	+/- 7 %	<b>0.48</b>	+/- 8 %	<b>1.2</b>	+/- 8 %		

Anforderungen nach:	Passivhaus-Kriterium	<b>0.6</b>	1/h	***	***
---------------------	----------------------	------------	-----	-----	-----

**Die Anforderung an die Luftdichtheit wird erfüllt.**

**Bemerkung:** Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.

## BlowerDoor-Prüfprotokoll

### Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A

Minneapolis BlowerDoor Modell 4 - Tectite Express 3.0.0.10

Objekt : Altbausanierung Tevesstr. 42 60326 Frankfurt	Prüfer/in: Peper / Hasper Datum: 30.6.2006 FLIB-Nr: 24400
--	--

**Klimadaten**

Innentemperatur: 23 °C	Luftgeschw in. Anemom.: 0.2 m/s	Referenzdruckmessstellen: 1
Außentemperatur: 27 °C	Windstärke: 1	Gebäudestandort: B
Luftdruck (Standard): 101325 Pa	Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: 0 %	

**Unterdruck**

Natürl. Druckdiff.	$\Delta P_{01+}$	$\Delta P_{01-}$	$\Delta P_{02+}$	$\Delta P_{02-}$
	0.1 Pa	-0.1 Pa	0.5 Pa	-0.4 Pa

**Überdruck**

Natürl. Druckdiff.	$\Delta P_{01+}$	$\Delta P_{01-}$	$\Delta P_{02+}$	$\Delta P_{02-}$
	0.2 Pa	-0.2 Pa	1.1 Pa	-

**Messreihen**

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom $V_f$	Abwei- chung	Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom $V_f$	Abwei- chung
<small>a b c d e</small>	<small>(Pa)</small>	<small>(Pa)</small>	<small>(m³/h)</small>	<small>(%)</small>	<small>a b c d e</small>	<small>(Pa)</small>	<small>(Pa)</small>	<small>(m³/h)</small>	<small>(%)</small>
$\Delta P_{01}$	0.0	—	—	—	$\Delta P_{01}$	0.1	—	—	—
B	-54	52	585	-0.67	B	56	46	551	-0.73
B	-50	48	561	-0.22	B	49	38	502	-0.36
B	-45	41	520	0.90	B	44	33	471	1.37
B	-39	33	470	-0.06	C	35	330	385	-0.43
B	-34	28	431	1.76	C	35	331	386	1.08
C	-31	337	389	-1.67	C	30	250	335	-0.91
$\Delta P_{02}$	0.1	—	—	—	$\Delta P_{02}$	1.1	—	—	—

Korrelationskoef. r:	0.997	Vertrauensintervall		Korrelationskoef. r:	0.999	Vertrauensintervall	
$C_{env}$ [m³/(h Paⁿ)]	33	max. 44	min. 25	$C_{env}$ [m³/(h Paⁿ)]	23	max. 29	min. 19
$C_L$ [m³/(h Paⁿ)]	33	max. 44	min. 25	$C_L$ [m³/(h Paⁿ)]	23	max. 29	min. 19
n [-]	0.73	max. 0.80	min. 0.65	n [-]	0.79	max. 0.85	min. 0.74

**Ergebnis, Kenngrößen**

V =	1004 m³	A <sub>F</sub> =		A <sub>E</sub> =	
-----	---------	------------------	--	------------------	--

	$V_{50}$	Unsicher- heit	$n_{50}$	Unsicher- heit	$w_{50}$	Unsicher- heit	$q_{50}$	Unsicher- heit
	m³/h	%	h⁻¹	%	m³/m²h	%	m³/m²h	%
Unterdruck	<b>564</b>	+/- 7 %	0.56	+/- 8 %				
Überdruck	<b>514</b>	+/- 7 %	0.51	+/- 8 %				
Mittelwert	<b>539</b>	+/- 7 %	<b>0.54</b>	+/- 8 %				

Anforderungen nach:	<b>PHI</b>	<b>0.6</b>	1/h	***	***
---------------------	------------	------------	-----	-----	-----

**Die Anforderungen der Vorschrift werden erfüllt.**

**Bemerkung:** Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.

## BlowerDoor-Prüfprotokoll

### Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A

Minneapolis BlowerDoor Modell 4 - Tectite Express 3.0.0.10

Objekt : Altbausanierung Tevesstr. 44 60326 Frankfurt	Prüfer/in: Peper / Hasper Datum: 30.6.2006 FLIB-Nr: 24400
---	--

#### Klimadaten

Innentemperatur: 25 °C	Luftgeschw. in. Anemom.: 0.2 m/s	Referenzdruckmessstellen: 1
Außentemperatur: 27 °C	Windstärke: 1	Gebäudestandort: B
Luftdruck (Standard): 101325 Pa	Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: 0 %	

#### Unterdruck

Natürl. Druckdiff.	$\Delta P_{01+}$	$\Delta P_{01-}$	$\Delta P_{02+}$	$\Delta P_{02-}$
	0.5 Pa	-0.0 Pa	0.5 Pa	-

#### Überdruck

Natürl. Druckdiff.	$\Delta P_{01+}$	$\Delta P_{01-}$	$\Delta P_{02+}$	$\Delta P_{02-}$
	0.7 Pa	-	1.0 Pa	-

#### Messreihen

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom $V_f$	Abwei- chung	Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom $V_f$	Abwei- chung
A B C D E	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]	A B C D E	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]
$\Delta P_{01}$	0.5	—	—	—	$\Delta P_{01}$	0.7	—	—	—
C	-54	320	379	1.29	C	54	315	377	-1.21
C	-55	318	378	-0.20	B	56	24	401	2.00
C	-46	245	331	-0.89	C	53	315	376	0.30
C	-45	242	329	1.01	C	51	293	363	-1.17
C	-34	154	261	-2.21	C	42	223	316	1.50
C	-33	149	257	-0.37	C	33	140	250	-2.40
C	-27	110	221	-0.35	C	30	123	234	-0.38
C	-24	102	212	1.79	C	24	90	199	1.44
$\Delta P_{02}$	0.5	—	—	—	$\Delta P_{02}$	1.0	—	—	—

Korrelationskoef. r:	0.998	Vertrauensintervall		Korrelationskoef. r:	0.998	Vertrauensintervall	
$C_{env}$ [m³/(h Paⁿ)]	19	max. 22	min. 16	$C_{env}$ [m³/(h Paⁿ)]	16	max. 19	min. 13
$C_L$ [m³/(h Paⁿ)]	19	max. 22	min. 16	$C_L$ [m³/(h Paⁿ)]	16	max. 19	min. 13
n [-]	0.75	max. 0.80	min. 0.71	n [-]	0.80	max. 0.85	min. 0.75

#### Ergebnis, Kenngrößen

V =	1008 m³	$A_F =$		$A_E =$	
-----	---------	---------	--	---------	--

	$V_{50}$ m³/h	Unsicher- heit %	$n_{50}$ h⁻¹	Unsicher- heit %	$W_{50}$ m³/m²h	Unsicher- heit %	$Q_{50}$ m³/m²h	Unsicher- heit %
Unterdruck	<b>355</b>	+/- 7 %	0.35	+/- 8 %				
Überdruck	<b>365</b>	+/- 7 %	0.36	+/- 8 %				
Mittelwert	<b>360</b>	+/- 7 %	<b>0.36</b>	+/- 8 %				

Anforderungen nach:	<b>PHI</b>	<b>0.6</b>	1/h	<b>***</b>	<b>***</b>
---------------------	------------	------------	-----	------------	------------

**Die Anforderungen der Vorschrift werden erfüllt.**

**Bemerkung:** Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.

## BlowerDoor-Prüfprotokoll

### Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A

Minneapolis BlowerDoor Modell 4 - Tectite Express 3.0.0.10

Objekt : Altbausanierung Tevesstr. 46 60326 Frankfurt	Prüfer/in: Peper / Hasper Datum: 30.6.2006 FLIB-Nr.: 24400
--	---

**Klimadaten**

Innentemperatur: 24 °C	Luftgeschw.in. Anemom.: 0.2 m/s	Referenzdruckmessstellen: 1
Außentemperatur: 24 °C	Windstärke: 1	Gebäudestandort: B
Luftdruck (Standard): 101325 Pa	Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: 0 %	

**Unterdruck**

Natürl. Druckdiff.	$\Delta P_{01+}$	$\Delta P_{01-}$	$\Delta P_{02+}$	$\Delta P_{02-}$
	0.3 Pa	-0.0 Pa	0.4 Pa	-0.0 Pa

**Überdruck**

Natürl. Druckdiff.	$\Delta P_{01+}$	$\Delta P_{01-}$	$\Delta P_{02+}$	$\Delta P_{02-}$
	0.2 Pa	-	1.1 Pa	-

**Messreihen**

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom $V_f$	Abwei- chung	Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom $V_f$	Abwei- chung
<small>a b c d e</small>	<small>(Pa)</small>	<small>(Pa)</small>	<small>(m³/h)</small>	<small>(%)</small>	<small>a b c d e</small>	<small>(Pa)</small>	<small>(Pa)</small>	<small>(m³/h)</small>	<small>(%)</small>
$\Delta P_{01}$	0.3	—	—	—	$\Delta P_{01}$	0.2	—	—	—
C	-54	320	380	0.96	C	56	313	375	-0.45
C	-54	320	379	1.52	C	54	286	358	-2.53
C	-48	248	333	-2.06	C	50	281	355	2.77
C	-37	156	263	-5.50	C	42	187	289	-2.11
C	-45	248	333	2.23	C	41	203	301	2.40
C	-27	120	230	2.66	C	36	159	266	1.17
C	-27	113	224	0.43	C	27	96	206	-1.10
$\Delta P_{02}$	0.4	—	—	—	$\Delta P_{02}$	1.1	—	—	—

Korrelationskoef. r:	0.992	Vertrauensintervall		Korrelationskoef. r:	0.995	Vertrauensintervall	
$C_{env}$ [m³/(h Paⁿ)]	18	max. 27	min. 12	$C_{env}$ [m³/(h Paⁿ)]	14	max. 21	min. 10
$C_L$ [m³/(h Paⁿ)]	18	max. 27	min. 12	$C_L$ [m³/(h Paⁿ)]	14	max. 21	min. 10
n [-]	0.76	max. 0.88	min. 0.65	n [-]	0.81	max. 0.91	min. 0.72

**Ergebnis, Kenngrößen**

V =	1012 m³	A <sub>F</sub> =		A <sub>E</sub> =	
-----	---------	------------------	--	------------------	--

	$V_{50}$	Unsicher- heit	$n_{50}$	Unsicher- heit	$w_{50}$	Unsicher- heit	$q_{50}$	Unsicher- heit
	m³/h	%	h⁻¹	%	m³/m²h	%	m³/m²h	%
Unterdruck	<b>351</b>	+/- 7 %	0.35	+/- 8 %				
Überdruck	<b>349</b>	+/- 7 %	0.35	+/- 8 %				
Mittelwert	<b>350</b>	+/- 7 %	<b>0.35</b>	+/- 8 %				

Anforderungen nach: <b>PHI</b>	<b>0.6</b>	1/h	***	***
--------------------------------	------------	-----	-----	-----

**Die Anforderungen der Vorschrift werden erfüllt.**

**Bemerkung:** Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.

## BlowerDoor-Prüfprotokoll

### Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A

Minneapolis BlowerDoor Modell 4 - Tectite Express 3.0.0.10

Objekt : Altbausanierung Tevesstr. 48 60326 Frankfurt	Prüfer/in: Peper Datum: 12.05.2006 FLIB-Nr: 24400
---	--

#### Klimadaten

Innentemperatur: 23 °C	Luftgeschw.in. Anemom.: 1.5 m/s	Referenzdruckmessstellen: 1
Außentemperatur: 25 °C	Windstärke: 2	Gebäudestandort: B
Luftdruck (Standard): 101325 Pa	Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: 2 %	

#### Unterdruck

Natürl. Druckdiff.	$\Delta P_{01+}$	$\Delta P_{01-}$	$\Delta P_{02+}$	$\Delta P_{02-}$
	0.8 Pa	-0.7 Pa	0.3 Pa	-0.1 Pa

#### Überdruck

Natürl. Druckdiff.	$\Delta P_{01+}$	$\Delta P_{01-}$	$\Delta P_{02+}$	$\Delta P_{02-}$
	0.4 Pa	-	0.2 Pa	-

#### Messreihen

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom $V_f$	Abwei- chung	Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom $V_f$	Abwei- chung
A B C D E	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]	A B C D E	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]
$\Delta P_{01}$	0.3	—	—	—	$\Delta P_{01}$	0.4	—	—	—
B	-77	95	791	-0.03	B	78	80	726	0.19
B	-69	83	738	-0.33	B	71	70	677	-0.09
B	-60	70	678	0.26	B	61	58	617	-0.02
B	-53	61	633	1.25	B	56	52	584	-0.59
B	-50	54	594	-0.27	B	51	46	552	0.45
B	-44	46	550	-0.32	B	46	40	513	0.21
B	-40	39	510	-1.13	B	40	34	472	-0.15
B	-29	27	426	0.59					
$\Delta P_{02}$	0.2	—	—	—	$\Delta P_{02}$	0.2	—	—	—

Korrelationskoef. r:	0.999	Vertrauensintervall		Korrelationskoef. r:	1.000	Vertrauensintervall	
$C_{env}$ [m³/(h Paⁿ)]	47	max. 52	min. 43	$C_{env}$ [m³/(h Paⁿ)]	45	max. 48	min. 42
$C_L$ [m³/(h Paⁿ)]	47	max. 51	min. 43	$C_L$ [m³/(h Paⁿ)]	45	max. 48	min. 42
n [-]	0.65	max. 0.67	min. 0.63	n [-]	0.64	max. 0.66	min. 0.62

#### Ergebnis, Kenngrößen

V =	803 m³	$A_F =$		$A_E =$	
-----	--------	---------	--	---------	--

	$V_{50}$ m³/h	Unsicher- heit %	$n_{50}$ h⁻¹	Unsicher- heit %	$W_{50}$ m³/m²h	Unsicher- heit %	$Q_{50}$ m³/m²h	Unsicher- heit %
Unterdruck	<b>599</b>	+/- 7 %	0.75	+/- 8 %				
Überdruck	<b>545</b>	+/- 7 %	0.68	+/- 8 %				
Mittelwert	<b>572</b>	+/- 7 %	<b>0.71</b>	+/- 8 %				

Anforderungen nach:	<b>PHI</b>	<b>0.6</b>	1/h	<b>***</b>	<b>***</b>
---------------------	------------	------------	-----	------------	------------

**Die Anforderungen der Vorschrift werden nicht erfüllt.**

**Bemerkung:** Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.

## BlowerDoor-Prüfprotokoll

### Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A

Minneapolis BlowerDoor Modell 4 - Tectite Express 3.0.0.10

Objekt : Altbausanierung Tevesstr. 50 60326 Frankfurt	Prüfer/in: Peper Datum: 12.05.2006 FLIB-Nr.: 24400
--	---

**Klimadaten**

Innentemperatur: 25 °C	Luftgeschw. in. Anemom.: 0.8 m/s	Referenzdruckmessstellen: 1
Außentemperatur: 25 °C	Windstärke: 2	Gebäudestandort: B
Luftdruck (Standard): 101325 Pa	Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: 2 %	

**Unterdruck**

Natürl. Druckdiff.	$\Delta P_{01+}$	$\Delta P_{01-}$	$\Delta P_{02+}$	$\Delta P_{02-}$
	0.6 Pa	-0.2 Pa	0.8 Pa	-

**Überdruck**

Natürl. Druckdiff.	$\Delta P_{01+}$	$\Delta P_{01-}$	$\Delta P_{02+}$	$\Delta P_{02-}$
	0.2 Pa	-0.1 Pa	1.1 Pa	-

**Messreihen**

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom $V_f$	Abwei- chung	Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom $V_f$	Abwei- chung
<small>0 A B C D E</small>	<small>(Pa)</small>	<small>(Pa)</small>	<small>(m³/h)</small>	<small>(%)</small>	<small>0 A B C D E</small>	<small>(Pa)</small>	<small>(Pa)</small>	<small>(m³/h)</small>	<small>(%)</small>
$\Delta P_{01}$	0.4	—	—	—	$\Delta P_{01}$	0.2	—	—	—
B	-78	30	445	0.59	C	65	300	367	1.62
C	-61	310	373	3.23	C	66	298	366	-0.20
C	-58	266	346	-1.65	C	66	287	359	-2.06
C	-49	196	296	-3.31	C	64	283	356	-0.43
C	-48	202	300	-0.49	C	60	245	331	-1.53
C	-43	172	276	0.31	C	48	195	295	3.95
C	-37	139	248	0.66	C	36	115	225	0.55
C	-28	90	199	0.80	C	30	81	189	-1.76
$\Delta P_{02}$	0.8	—	—	—	$\Delta P_{02}$	1.1	—	—	—

Korrelationskoef. r:	0.997	Vertrauensintervall		Korrelationskoef. r:	0.997	Vertrauensintervall	
$C_{env}$ [m³/(h Paⁿ)]	13	max. 17	min. 10	$C_{env}$ [m³/(h Paⁿ)]	13	max. 17	min. 10
$C_L$ [m³/(h Paⁿ)]	13	max. 17	min. 10	$C_L$ [m³/(h Paⁿ)]	13	max. 17	min. 10
n [-]	0.80	max. 0.87	min. 0.74	n [-]	0.80	max. 0.86	min. 0.73

**Ergebnis, Kenngrößen**

V =	871 m³	A <sub>F</sub> =		A <sub>E</sub> =	
-----	--------	------------------	--	------------------	--

	$V_{50}$	Unsicher- heit	$n_{50}$	Unsicher- heit	$w_{50}$	Unsicher- heit	$q_{50}$	Unsicher- heit
	m³/h	%	h⁻¹	%	m³/m²h	%	m³/m²h	%
Unterdruck	<b>309</b>	+/- 7 %	0.35	+/- 8 %				
Überdruck	<b>296</b>	+/- 7 %	0.34	+/- 8 %				
Mittelwert	<b>302</b>	+/- 7 %	<b>0.35</b>	+/- 8 %				

Anforderungen nach: <b>PHI</b>	<b>0.6</b>	1/h	***	***
--------------------------------	------------	-----	-----	-----

**Die Anforderungen der Vorschrift werden erfüllt.**

**Bemerkung:** Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.

## BlowerDoor-Prüfprotokoll

### Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A

Minneapolis BlowerDoor Modell 4 - Tectite Express 3.0.0.10

Objekt : Altbausanierung Tevesstr. 52 60326 Frankfurt	Prüfer/in: Peper Datum: 12.05.2006 FLIB-Nr: 24400
---	--

#### Klimadaten

Innentemperatur: 23 °C	Luftgeschw.in. Anemom.: 0.8 m/s	Referenzdruckmessstellen: 1
Außentemperatur: 17 °C	Windstärke: 2	Gebäudestandort: B
Luftdruck (Standard): 101325 Pa	Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: 2 %	

#### Unterdruck

Natürl. Druckdiff.	$\Delta P_{01+}$	$\Delta P_{01-}$	$\Delta P_{02+}$	$\Delta P_{02-}$
	2.1 Pa	-	1.1 Pa	-

#### Überdruck

Natürl. Druckdiff.	$\Delta P_{01+}$	$\Delta P_{01-}$	$\Delta P_{02+}$	$\Delta P_{02-}$
	2.0 Pa	-	1.1 Pa	-

#### Messreihen

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom $V_f$	Abwei- chung	Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom $V_f$	Abwei- chung
<small>0 1 2 3 4 5 6</small>	<small>(Pa)</small>	<small>(Pa)</small>	<small>(m³/h)</small>	<small>(%)</small>	<small>0 1 2 3 4 5 6</small>	<small>(Pa)</small>	<small>(Pa)</small>	<small>(m³/h)</small>	<small>(%)</small>
$\Delta P_{01}$	2.1	—	—	—	$\Delta P_{01}$	2.0	—	—	—
B	-60	44	539	-1.03	B	61	38	503	-0.29
B	-55	39	507	-0.39	B	58	35	480	-0.25
B	-49	34	471	1.69	B	52	31	453	1.62
B	-43	28	430	2.16	C	44	332	386	-0.70
C	-39	334	388	-1.13	C	43	321	380	0.51
C	-31	232	322	-2.99	C	38	257	340	-1.57
C	-24	159	266	-2.10	C	31	192	293	0.27
C	-25	194	294	3.99	C	26	146	254	0.44
$\Delta P_{02}$	1.1	—	—	—	$\Delta P_{02}$	1.1	—	—	—

Korrelationskoef. r:	0.996	Vertrauensintervall		Korrelationskoef. r:	0.999	Vertrauensintervall	
$C_{env}$ [m³/(h Paⁿ)]	22	max. 29	min. 17	$C_{env}$ [m³/(h Paⁿ)]	21	max. 24	min. 19
$C_L$ [m³/(h Paⁿ)]	22	max. 29	min. 17	$C_L$ [m³/(h Paⁿ)]	21	max. 24	min. 19
n [-]	0.77	max. 0.84	min. 0.70	n [-]	0.78	max. 0.81	min. 0.75

#### Ergebnis, Kenngrößen

V =	875 m³	$A_F =$		$A_E =$	
-----	--------	---------	--	---------	--

	$V_{50}$ m³/h	Unsicher- heit %	$n_{50}$ h⁻¹	Unsicher- heit %	$W_{50}$ m³/m²h	Unsicher- heit %	$Q_{50}$ m³/m²h	Unsicher- heit %
Unterdruck	<b>456</b>	+/- 7 %	0.52	+/- 8 %				
Überdruck	<b>446</b>	+/- 7 %	0.51	+/- 8 %				
Mittelwert	<b>451</b>	+/- 7 %	<b>0.52</b>	+/- 8 %				

Anforderungen nach:	<b>PHI</b>	<b>0.6</b>	1/h	<b>***</b>	<b>***</b>
---------------------	------------	------------	-----	------------	------------

**Die Anforderungen der Vorschrift werden erfüllt.**

**Bemerkung:** Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.

## BlowerDoor-Prüfprotokoll

### Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A

Minneapolis BlowerDoor Modell 4 - Tectite Express 3.0.0.10

Objekt : Altbausanierung Tevesstr. 54 60326 Frankfurt	Prüfer/in: Peper Datum: 12.05.2006 FLIB-Nr.: 24400
---	---

#### Klimadaten

Innentemperatur: 22 °C	Luftgeschw.in. Anemom.: 1.2 m/s	Referenzdruckmessstellen: 1
Außentemperatur: 22 °C	Windstärke: 2	Gebäudestandort: B
Luftdruck (Standard): 101325 Pa	Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: 2 %	

#### Unterdruck

Natürl. Druckdiff.	$\Delta P_{01+}$	$\Delta P_{01-}$	$\Delta P_{02+}$	$\Delta P_{02-}$
	0.5 Pa	-	0.3 Pa	-

#### Überdruck

Natürl. Druckdiff.	$\Delta P_{01+}$	$\Delta P_{01-}$	$\Delta P_{02+}$	$\Delta P_{02-}$
	0.3 Pa	-	0.6 Pa	-

#### Messreihen

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom $V_f$	Abwei- chung	Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom $V_f$	Abwei- chung
<small>0 A B C D E</small>	<small>(Pa)</small>	<small>(Pa)</small>	<small>(m³/h)</small>	<small>(%)</small>	<small>0 A B C D E</small>	<small>(Pa)</small>	<small>(Pa)</small>	<small>(m³/h)</small>	<small>(%)</small>
$\Delta P_{01}$	0.5	—	—	—	$\Delta P_{01}$	0.3	—	—	—
B	-85	85	749	1.03	B	84	74	697	0.21
B	-65	54	599	-1.46	B	72	58	620	-0.07
B	-56	44	539	-0.83	B	62	46	553	-0.40
B	-53	42	525	0.34	B	54	39	510	0.75
B	-49	37	496	0.39	B	50	33	468	-1.17
B	-43	31	453	0.56	B	45	30	445	0.70
$\Delta P_{02}$	0.3	—	—	—	$\Delta P_{02}$	0.6	—	—	—

Korrelationskoef. r:	0.999	Vertrauensintervall		Korrelationskoef. r:	0.999	Vertrauensintervall	
$C_{env}$ [m³/(h Paⁿ)]	27	max. 34	min. 22	$C_{env}$ [m³/(h Paⁿ)]	28	max. 33	min. 23
$C_L$ [m³/(h Paⁿ)]	27	max. 34	min. 22	$C_L$ [m³/(h Paⁿ)]	28	max. 33	min. 23
n [-]	0.74	max. 0.80	min. 0.69	n [-]	0.73	max. 0.77	min. 0.69

#### Ergebnis, Kenngrößen

V =	1155 m³	A <sub>F</sub> =		A <sub>E</sub> =	
-----	---------	------------------	--	------------------	--

	$V_{50}$	Unsicher- heit	$n_{50}$	Unsicher- heit	$w_{50}$	Unsicher- heit	$q_{50}$	Unsicher- heit
	m³/h	%	h⁻¹	%	m³/m²h	%	m³/m²h	%
Unterdruck	<b>497</b>	+/- 7 %	0.43	+/- 8 %				
Überdruck	<b>480</b>	+/- 7 %	0.42	+/- 8 %				
Mittelwert	<b>488</b>	+/- 7 %	<b>0.42</b>	+/- 8 %				

Anforderungen nach: <b>PHI</b>	<b>0.6</b>	1/h	***	***
--------------------------------	------------	-----	-----	-----

**Die Anforderungen der Vorschrift werden erfüllt.**

**Bemerkung:** Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.

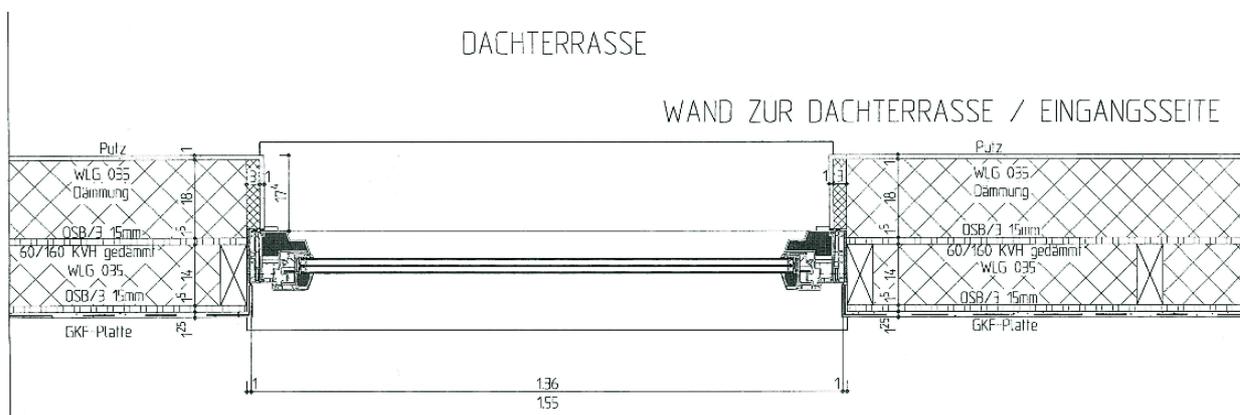
## Wärmedämmung und Wärmebrückenreduktion

### Wärmedämmung und WB im DG Neubau (Holz-Leichtbau)

Das neu aufgebaute Dachgeschoss wurde mit einer Holzleichtbau-Konstruktion mit additivem WDVS realisiert. Am Giebel Tevesstr 36 wurde aus Brandschutzgründen mit Mineralwolle und einer hinterlüfteten Fassade gearbeitet, vgl. Abbildung 64. Alle anderen Flächen wurden über der tragenden Holzständerwand mit WDVS aus EPS Hartschaumplatten und Putz versehen. In Abbildung 65 ist der prinzipielle Wandaufbau dargestellt.

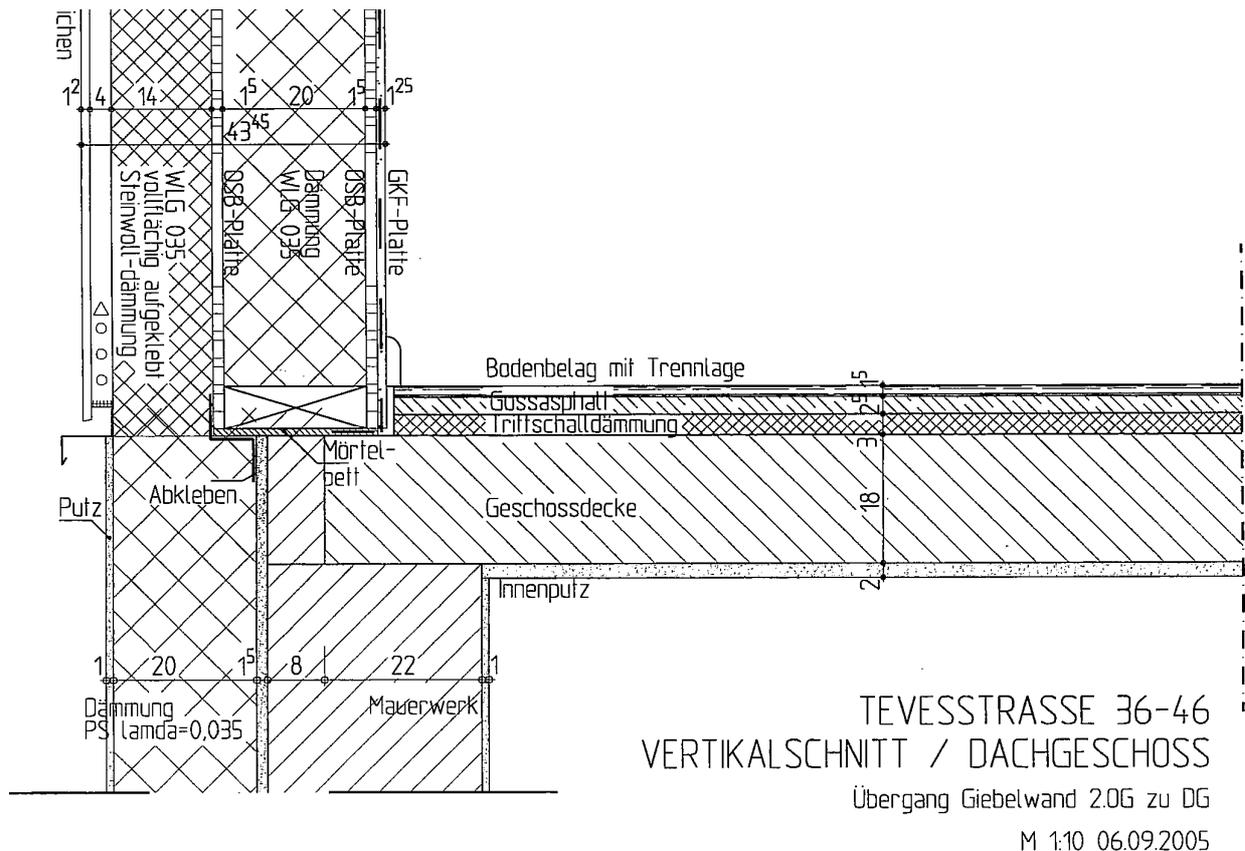


**Abbildung 64:** Die Dämmung an der Giebelwand und des Staffelgeschosses sind vor der Holzständerkonstruktion mit 14 cm Mineralwolle gedämmt. Davor eine hinterlüftete Fassadenplatte aus Holzwerkstoff.



**Abbildung 65:** Prinzipieller Wandaufbau im DG. Holzständerkonstruktion 14 cm, zusätzlich gedämmt mit 18 cm WDVS (EPS) Detail: [faktor10]

In Abbildung 66 ist der Anschluss zwischen Bestandsgebäude mit Mauerwerk und WDVS und dem neuen Dachgeschoss dargestellt. Die Dämmstärken unterscheiden sich, die Außenoberflächen sind jedoch außenbündig durchlaufend.



**Abbildung 66: Wiederholung von Abbildung 42 Anschluss der Außenwand (Giebelwände) im neuen DG (Holz-Leichtbau) an die Betondecke des Bestandsgebäudes. Detail: [faktor10]**

Die Außenwände des Bestandsgebäudes wurden mit einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS) gedämmt. Das WDVS besteht aus EPS Hartschaumblöcken mit einer Stärke an fast allen Wänden von 260 mm, was zu U-Werten von  $U_{\text{wand}} = 0.122 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  führt. An den Giebelwänden wurde die Dämmstärke auf 200 mm reduziert, vgl. Abbildung 66. Über den Dämmblöcken wurde ein handelsübliches Putzsystem aus Grundputz und darin eingearbeitetes Netz gegen Rissbildung und Oberputz aufgebracht.

### Brandschutzmaßnahmen

Im Bereich des DG wurde die Wärmedämmung vor der Holzständerwand aus Brandschutzgründen an den Giebelwänden und an den 'Rückwänden', d.h. den Seiten gegenüber den Dachterrassen, aus Mineralwolleblöcken mit einer hinterlüfteten Fassade gefertigt, siehe Abbildung 66 und Abbildung 67 rechts im oberen Bereich. Ein Wärmedämmverbundsystem mit Putz wurde im DG nur zur Terrassenseite hin realisiert.

Bei Gebäuden mit größerer Höhe wie es die Gebäude Tevesstraße darstellen, muss aus Brandschutzgründen auch jede Fensteröffnung in einer Wand mit WDVS aus

EPS in Laibung und Sturz mit einem Streifen Mineralwolle versehen werden, vgl. Abbildung 67. Denn Polystyrol tropft im Brandfall ab und würde daher die Flucht von Personen über eine Rettungsleiter und den Angriffsweg der Feuerwehr versperren (2. Rettungsweg). Der Streifen Mineralwolle um jedes Fenster soll im Brandfall dieses Abtropfen verhindern und damit die Zugänglichkeit über den zweiten Rettungsweg sicherstellen.

Die Ausführung eines derartigen Streifen aus Mineralwolle um jedes Fenster stellt einen nicht zu vernachlässigenden Kostenaufwand dar. Daher sind inzwischen auch andere Konzepte entwickelt worden, z.B. ein nicht brennbares Netz, das im Sturzbereich in den Putz eingearbeitet wird und ein Abtropfen im Brandfall verhindern soll.

Wichtig ist, dass diese Maßnahmen zum Brandschutz vom Hersteller bzw. von unabhängiger Seite geprüft und zugelassen sein müssen. Außerdem müssen in jedem Fall die in der Landesbauordnung geforderten Maßnahmen realisiert werden. Dazu ist am besten eine Abstimmung mit der örtlichen Brandschutzbehörde bzw. der Feuerwehr zu suchen.



**Abbildung 67: Dämmstreifen aus Mineralwolle rund um die Fenster als Maßnahme zum Brandschutz. Dies ist vorgeschrieben, weil Polystyrol im Brandfall abtropfen kann und dann die Fluchtwege bzw. Angriffswege der Feuerwehr (2. Rettungsweg) gefährden könnte.**

## Wärmebrückenreduktion

Die im Folgenden dargestellten Details wurden auf ihre Auswirkungen auf die Energiebilanz und bezüglich der resultierenden Oberflächentemperaturen an den Innenoberflächen geprüft: Die Ergebnisse der Wärmebrückenberechnung sind in den jeweiligen Tabellen zusammengefasst.

- Anschluss Kellerdecke an Außenwand (Abbildung 80 ff und Tabelle 2),
- Kellerinnenwand an Kellerdecke und Kellertür zum Garten (Abbildung 100 ff und Tabelle 5)
- Fenstereinbau in der Außenwand (Abbildung 135 ff und Tabelle 7)
- Regenrinne, Abwasserleitung (Fallrohr) und Solarleitungen in der Dämmebene.
- Balkone am angrenzenden Nachbarhaus
- Durchdringungen: Balkonanker, Gerüstanker aus Metall
- Qualitätssicherung: Verarbeitung ohne Dämmücken im WDVS

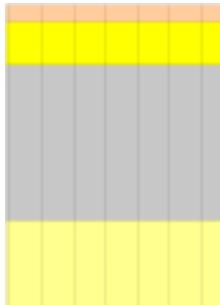
Insgesamt lässt sich feststellen, dass alle ausgeführten Varianten der verschiedenen Anschlüsse von der Oberflächentemperatur her gesehen unkritisch sind. Auch eine verringerte Dämmstärke von 20 cm an der Außenwand im Sockelbereich ist nicht kritisch. Im Folgenden werden die verschiedenen Wärmebrückeneffekte im Einzelnen dargestellt.

## Wärmedämmung unter der Kellerdecke

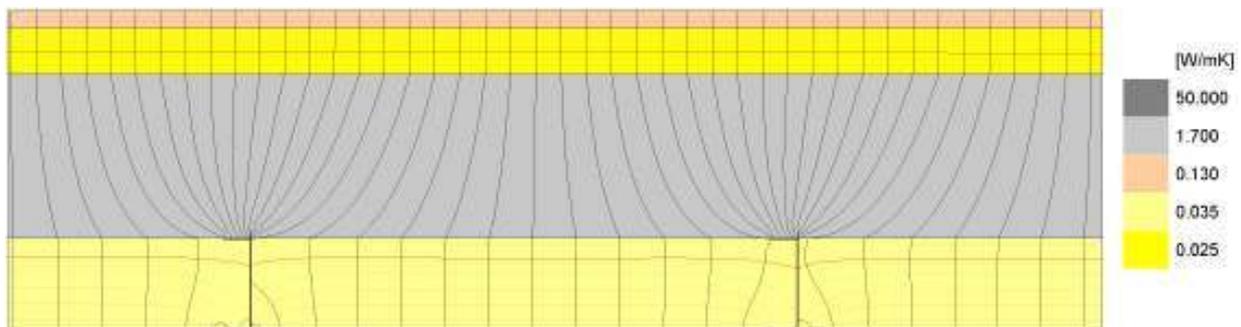
Die lichte Höhe in den Kellern der Gebäude Tevesstraße 36-54 ist mit etwa 210 cm sehr gering. Eine Dämmschicht unter der Kellerdecke durfte deshalb nur 10 cm auftragen, um die Begehbarkeit der Keller nicht unnötig einzuschränken.

Der ursprünglich vom Architekten vorgeschlagene Aufbau der Dämmung unter der Kellerdecke ist in Abbildung 69 dargestellt: C-Profile aus Stahl werden mit einem Abstand von 60 cm freitragend unter der Decke gespannt. Eine Verschraubung an der Decke war bei diesem Gebäude aus statischen Gründen nicht möglich. Der Zwischenraum wird anschließend mit Dämm-Material (Mineralwolle) ausgefüllt. Die Bilder in Abbildung 69 ff zeigen das Ergebnis einer Wärmebrückenberechnung, welche die Auswirkung von Durchdringungen der Dämmschicht mit Stahlprofilen dokumentiert. Die Verminderung der wärmedämmenden Wirkung entspricht einer effektiven Verringerung der Dämmstärke um etwa 50 mm, in diesem Beispiel bedeutet dies eine Verringerung der Dämmstärke um die Hälfte. Auch Lösungen mit 'Thermostopps' als Unterlage zwischen Stahlprofil und der Decke bringen keine wesentliche Verbesserung, siehe Abbildung 70 und Abbildung 71. Selbst eine Unterlage von 30 mm, so dass die Stahlprofile nur noch 2/3 der Dämmschicht durchdringen, bewirkt immer

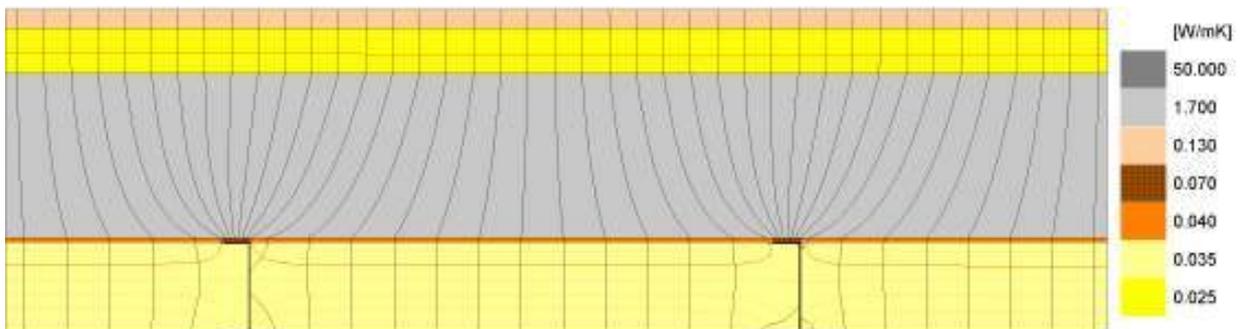
noch  $\Delta U = 0,02 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  was einer effektiven Verminderung der Dämmschicht von 20 mm gleichkommt. Auf einen entsprechenden Hinweis des Passivhaus Instituts wurde diese Lösung daher verworfen.



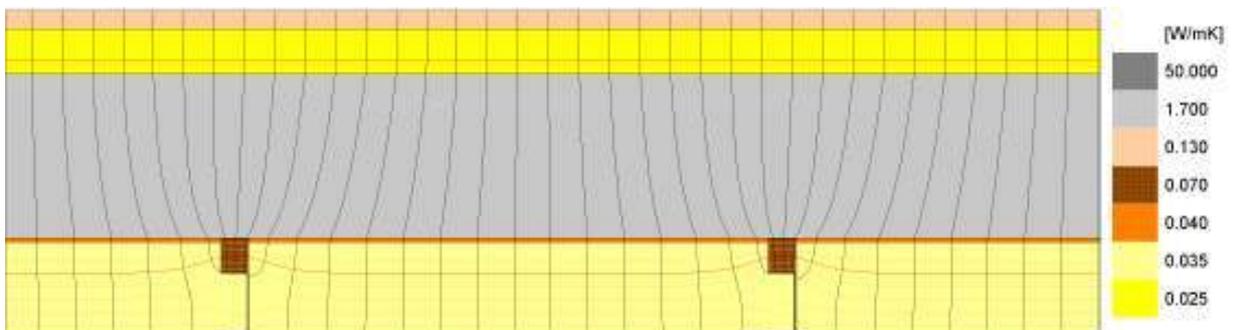
**Abbildung 68: Ungestörte Decke:**  
50 mm PU ( $\lambda = 0,025 \text{ W}/(\text{mK})$ ) über der Decke  
100 mm PS ( $\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{mK})$ ) unterhalb der Decke  
 $U_{\text{Decke}} = 0,183 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



**Abbildung 69: Stahlschienen durchdringen die untere Dämmschicht, Abstand 60 cm.**  
 $U_{\text{Decke}} = 0,242 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$   $\Delta U = 0,06 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  entsprechend  $-50 \text{ mm}$  Dämmstärke



**Abbildung 70: Stahlschienen durchdringen die untere Dämmschicht, Unterlage Thermostopp 5 mm, Abstand 60 cm.**  $U_{\text{Decke}} = 0,226 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$   $\Delta U = 0,04 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  entsprechend  $-40 \text{ mm}$  Dämmstärke



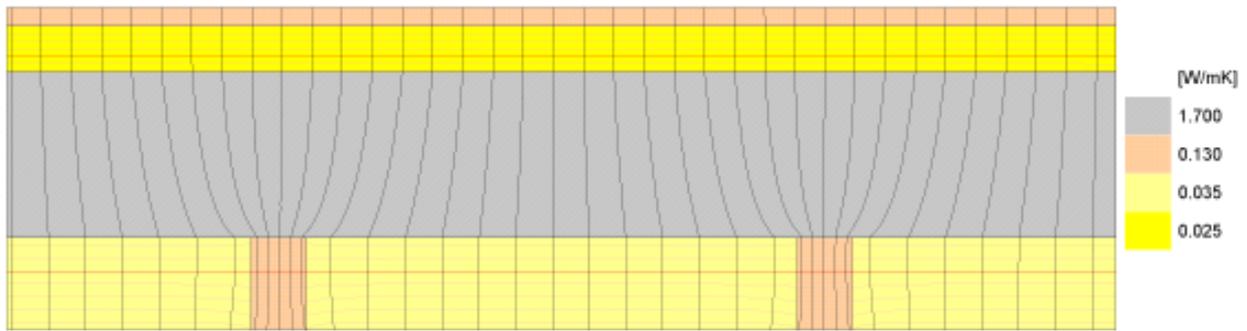
**Abbildung 71: Stahlschienen durchdringen nur 2/3 der unteren Dämmschicht, Abstand 60 cm.**  
 $U_{\text{Decke}} = 0,200 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$   $\Delta U = 0,02 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  entsprechend  $-20 \text{ mm}$  Dämmstärke

Problematisch ist bei diesen Gebäuden die Tragfähigkeit der Decken. Es durften keinerlei zusätzliche Tragprofile wie z.B. Holzbalken an die Decke geschraubt werden. Diese mussten stattdessen seitlich an den Wänden befestigt und dann frei tragend unter der Kellerdecke entlang gezogen werden. Als Oberfläche zum Kellerraum hin wurde eine 12 mm starke Gipskartonplatte verwendet. Eine solche Konstruktion aus Traghölzern 6 cm x 10 cm und dazwischen eingelegter Mineralwolle wurde im Gebäude Tevesstraße 54 links (unter der Musterwohnung) zu Testzwecken realisiert, siehe Abbildung 72 und Abbildung 76. Der resultierende U-Wert der Konstruktion ergibt sich bei 100 mm WLG 035 zwischen den Kanthölzern zu  $U_{\text{Decke}} = 0,204 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  statt  $0,183 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , d.h.  $\Delta U_{\text{WB}} = 0,02 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  gegenüber der ungestörten Dämmlage ohne Hölzer. Das entspricht einer effektiven Reduzierung der Dämmschicht um etwa 20 mm. Diese Konstruktion ist vom Materialeinsatz her kostengünstig, bedeutet aber einen sehr hohen Arbeitszeitaufwand. Deshalb wurde diese Konstruktion nur unter der Musterwohnung realisiert, aber nicht weiter verfolgt.

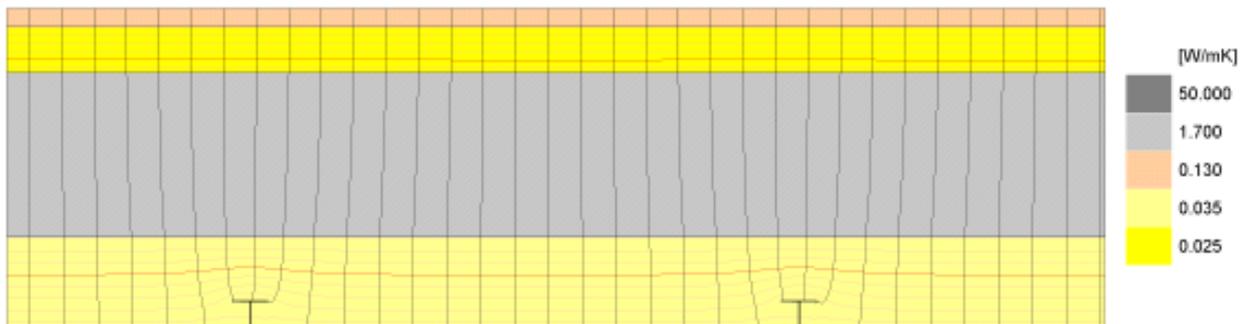
Eine Nachfrage beim Statiker ergab, dass die kritische Last dieser Konstruktion hauptsächlich vom Gewicht der Gipskarton-Platte unter der Dämmung herrührt. Die Last der Dämmung selbst ( $\leq 4 \text{ kg}/\text{m}^2$ ) könnte von der Decke durchaus noch getragen werden. Eine Anfrage bei einem PU-Dämmstoff-Hersteller ergab, dass es eine Lösung mit PU-Platten mit Verbindungsprofilen aus Metall oder Kunststoff gibt, die allerdings nicht durch die gesamte Dämmschicht dringen. Die Platten sind kaschiert mit Alufolie und haben als raumseitige Oberfläche eine dünne Holzwerkstoffplatte, die weiß beschichtet ist. Das PU-Material tropft im Brandfall nicht. Eine Verklebung der Platten auf dem unebenen Untergrund wird nicht empfohlen. Die Befestigung an der Decke wird mit einer Spezial Dübel-Schraub-Lösung realisiert.

Der resultierende U-Wert des PU-Platten Systems ergibt sich bei 100 mm WLG 035 zu  $U_{\text{Decke}} = 0,188 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , vgl. Abbildung 73 statt  $0,183 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  ohne Metallschienen. Das entspricht einer Reduzierung der Dämmschicht um etwa 5 mm, die wegen der speziellen Situation akzeptabel ist. Wird tatsächlich PU-Material mit  $\lambda = 0,030 \text{ W}/(\text{mK})$  verwendet, so ergibt sich sogar  $U_{\text{Decke}} = 0,173 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

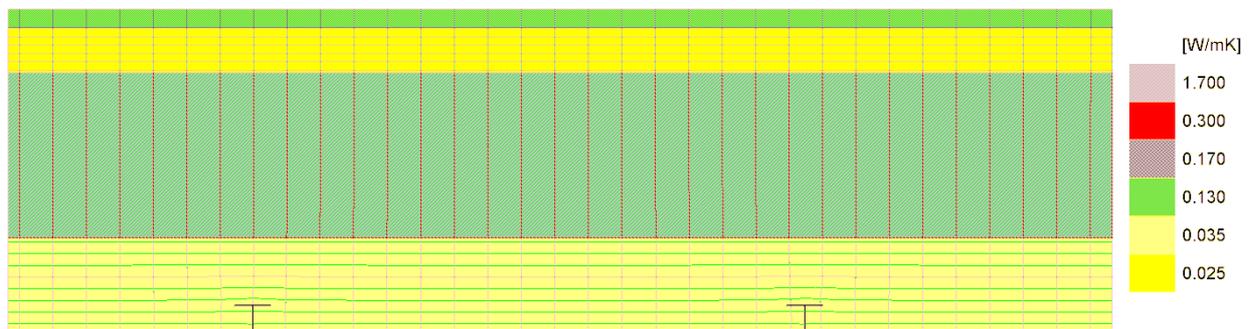
Beim Bauvorhaben wurde schließlich PU-Material mit  $\lambda = 0,025 \text{ W}/(\text{mK})$  eingesetzt und statt 100 mm nur 80 mm Stärke realisiert, um zusätzliche lichte Höhe im Keller zu gewinnen. Statt der Schienen aus Metall wurden solche aus Kunststoff mit  $\lambda = 0,3 \text{ W}/(\text{mK})$  verwendet. Der resultierende U-Wert ist  $0,172 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , vgl. Abbildung 75. Dies entspricht dem U-Wert, wie er sich bei Verwendung der 80 mm PU-Platte ergibt, d.h. die Wärmebrückenreduktion aufgrund der Kunststoff-H-Profile ist verschwindend klein, siehe auch Abbildung 77.



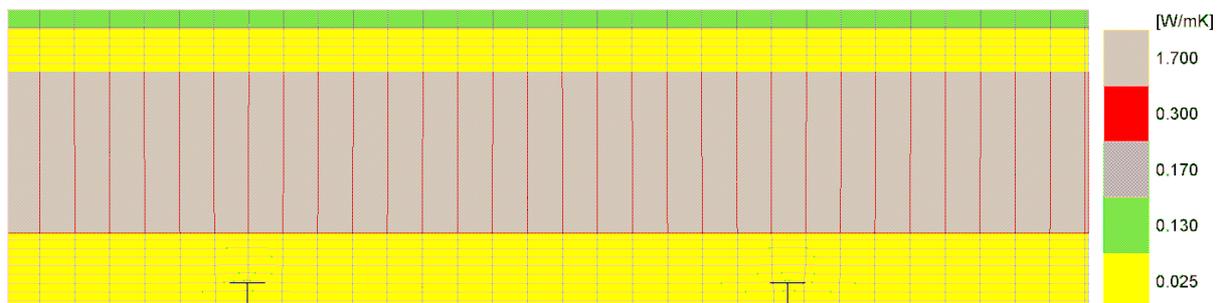
**Abbildung 72:** Konstruktion mit Kanthölzern 60 x 100 mm statt Stahlschienen, Abstand 60 cm.  
 $U_{\text{Decke}} = 0,204 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$   $\Delta U = 0,02 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  entsprechend  $-20 \text{ mm}$  Dämmstärke



**Abbildung 73, Favorisierte Lösung:** Metallschienen liegen außen in der Dämmung und durchdringen nur 1/3 der unteren Dämmschicht, Abstand 60 cm. Aufhängung der Schienen nur an einzelnen Metallwinkeln  $U_{\text{Decke}} = 0,188 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$   $\Delta U = 0,005 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  entsprechend  $-5 \text{ mm}$  Dämmstärke.



**Abbildung 74, Weitere Verbesserung:** Kunststoffschienen statt Metallschienen.  
 $U_{\text{Decke}} = 0,183 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  Praktisch keine Wärmebrückenwirkung mehr  $\Delta U = 0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .



**Abbildung 75, Schlussendlich realisierte Lösung:** Verbund-Dämmplatten aus PU-Schaum mit 80 mm Dämmstärke unter der Kellerdecke ( $\lambda = 0,025 \text{ W}/(\text{mK})$ ) raumseitig kaschiert mit 5 mm Holzwerkstoffplatte. Befestigung mit Spezial-Dübel-Schrauben-System an der Decke. Platten stumpf gestoßen mit Nut, in welche Kunststoff-H-Profile ( $\lambda = 0,3 \text{ W}/(\text{mK})$ ) als Verbindung eingelegt werden.  $U_{\text{Decke}} = 0,177 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



**Abbildung 76: Dämmung aus Mineralwolle mit Kantholzträger und Gipskartonplatte als raumseitige Oberfläche. Nur realisiert an der Kellerdecke der Musterwohnung Tevesstraße 54 links.**

$$U_{\text{Decke}} = 0,204 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$



**Abbildung 77: Querschnitt der Dämmplatten unter der Kellerdecke. Die Platten sind seitlich genutet, dort greift ein H-Profil aus Kunststoff ein, welches die Verbindung zwischen den Plattenstößen bildet. Die Oberfläche besteht aus einer weiß beschichteten Holzwerkstoffplatte.**

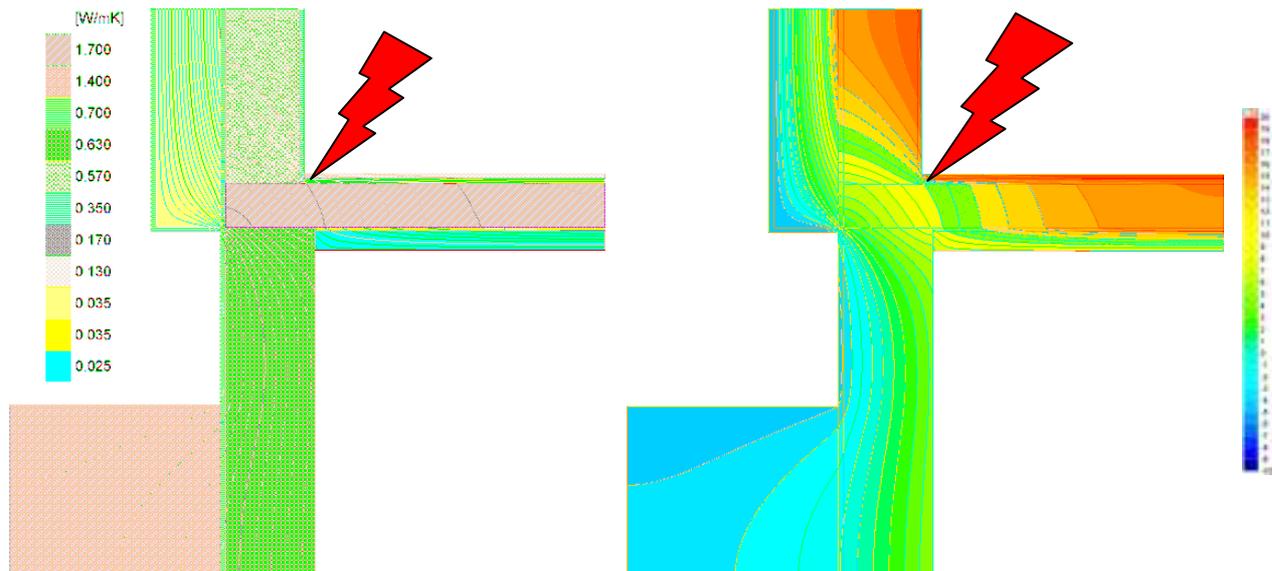
$$U_{\text{Decke}} = 0,177 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

## Anschluss Kellerdecke an Außenwand

Üblicherweise wird bei Sanierungen die Wärmedämmung an der Außenwand nur bis knapp über den Kellersockel gezogen, wie dies in Abbildung 78 dargestellt ist. Eine solche Anordnung wirft in zweierlei Hinsicht Probleme auf. Zum einen sind die Wärmebrückenverluste der aufgehenden Kellerwand am Sockelanschluss sehr hoch, d.h. die zugehörigen  $\Psi$ -Werte sind sehr groß,  $\Psi_a$  (AWKD) = 0,324 W/(mK). Zum anderen können im Winter die Oberflächentemperaturen an der Innenkante des EG zum Keller hin so weit abfallen, dass dort mit Schimmelbefall oder gar Tauwasserbildung gerechnet werden muss. Im Beispiel Abbildung 79 sind die Kellerdecke und die Außenwand zwar hochwertig gedämmt ( $U_{AW} = 0,122$  W/(m<sup>2</sup>K) bzw.  $U_{KD} = 0,214$  W/(m<sup>2</sup>K)). Am Sockelanschluss ist jedoch die Dämmung innen nur gegen die Außenwand gestoßen, außenseitig ist sie über dem Kellerniveau abgeschnitten. Im Effekt muss mit Innenoberflächentemperaturen in der Kante von weniger als 10°C gerechnet werden. Dies ist bauphysikalisch schadensträchtig, weil es schon bei normaler Wohnnutzung zu erheblichen Bauschäden durch Schimmel führen würde.



**Abbildung 78: So nicht: Kellersockel ohne Dämmung bei einer konventionellen Sanierung mit WDVS. Auf eine Dämmung im Sockelbereich wird leider meist verzichtet, vgl. Abbildung 79. Dadurch entstehen erhebliche Wärmebrückenwirkungen und nicht akzeptable niedrige Temperaturen im Bereich der Fußleiste der EG-Wohnungen**

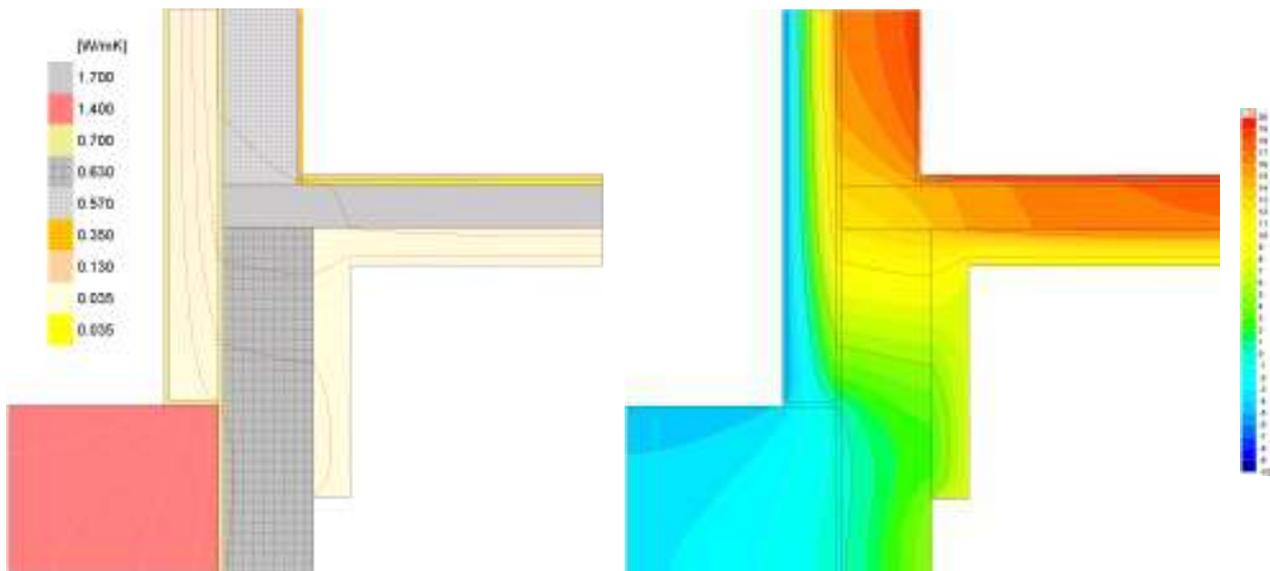


**Abbildung 79: Außen und innen ohne Sockeldämmung entlang der Kellerwand. Diese Anordnung wäre bauphysikalisch absolut untauglich und unzulässig. Der extrem hohe Wärmebrücken-Effekt am Sockel würde zu Kondensatbildung in der Wandkante zum Erdgeschossboden führen.**  
 $U_{KD} = 0,214 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .  $U_{AW} = 0,122 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  {AWD260 KDD80 PU v23}  
 Resultierende Wärmebrückenverluste:  $\Psi_a$  (AWKD) =  $0,324 \text{ W}/(\text{mK})$ .  
 $\vartheta_{\min} = 9,9 \text{ }^\circ\text{C}$ . Siehe auch die Übersicht in Tabelle 4.

Aus diesem Grund war allen Projektbeteiligten klar, dass am Anschluss der Kellerdecke zur Außenwand und an den aufgehenden inneren Kellerwänden die Wärmebrücken mit zusätzlicher Begleitdämmung so weit entschärft werden müssen, dass mindestens die Temperaturen an den Innenoberflächen der entsprechenden Bauteile in einem bauphysikalisch unkritischen Bereich liegen. Dies wurde auch schon bei vorausgegangenen Projekten erfolgreich praktiziert [AKKP 24].

Die Wärmebrückenberechnungen im Folgenden wurden mit Standardbedingungen durchgeführt: Außentemperatur  $T_a = -10^\circ\text{C}$ , Innentemperatur  $T_i = +20^\circ\text{C}$ . Wärmeübergang außen  $1/\alpha_a = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  innen  $1/\alpha_i = 8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . An der Kellerdecke oben und unterseitig  $1/\alpha_i = 1/\alpha_a = 6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , Temperatur im Keller  $5^\circ\text{C}$ .

Zur Bestimmung der kritischen Innenoberflächentemperaturen wurde mit  $T_a = -5^\circ\text{C}$  und  $1/\alpha_a = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  und innen mit  $T_i = 20^\circ\text{C}$  aber nur mit einem auf die Hälfte reduzierten Wärmeübergang von  $1/\alpha_i = 4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  gerechnet, wie er gemäß [DIN EN ISO 13788] zu erwarten ist, sobald Vorhänge oder Möbelstücke raumseitig an der Außenwand platziert werden [AKKP24].



**Abbildung 80: Anschluss Kellerdecke an Außenwand, Kellerdecke von unten und von innen mit 150 mm (WLG 035) gedämmt  $U_{KD} = 0,183 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Dämmung außen auf Außenwand 200 mm (WLG 035)  $U_{AW} = 0,154 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  {AWD200 KDD150 v1 lang}. Dämmung an Innenwand Keller um 110 cm nach unten gezogen (v1 lang). Resultierende Wärmebrückenverluste:  $\Psi_a$  (AWKD) =  $0,074 \text{ W}/(\text{mK})$ . Minimale Oberflächentemperatur unterhalb der Trittschalldämmung in der Ecke:  $\vartheta_{\min} = 14,52 \text{ }^\circ\text{C}$ . Siehe auch Tabelle 2**

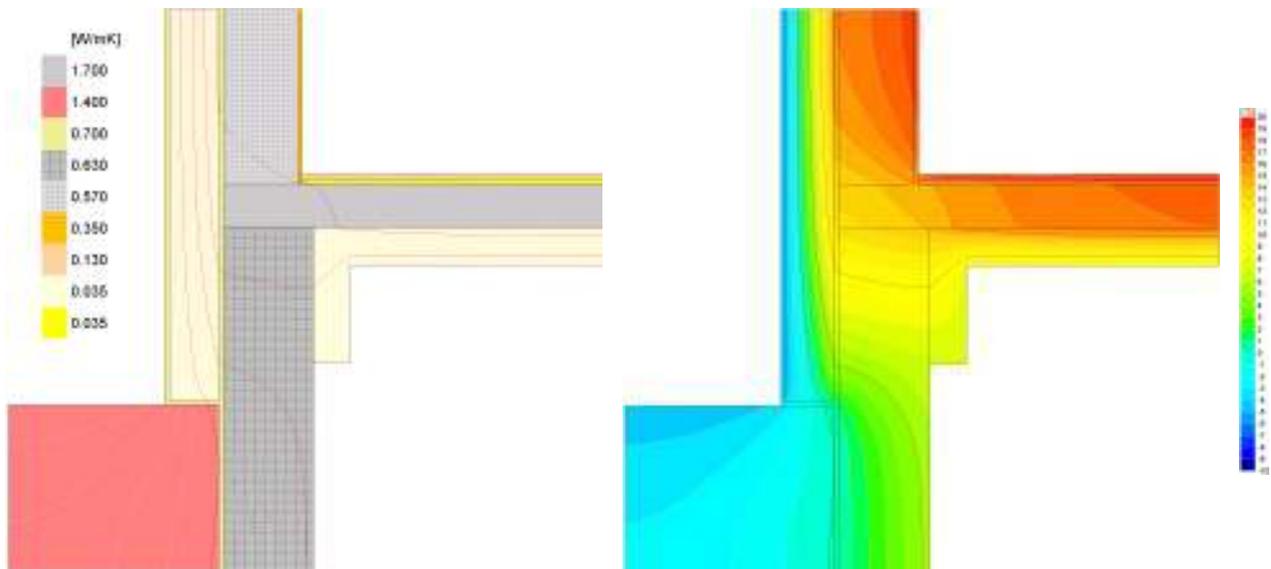
Abbildung 80 zeigt die ursprünglich vorgesehene Variante der Sockeldämmung: Außenseitig wird die Dämmung (Stärke 200 mm) bis zum Trottoir bzw. Erdreich heruntergezogen, so dass sie den gesamten Sockel abdeckt. Innenseitig wird die Dämmung in voller Stärke von 150 mm insgesamt 100 cm an der Wand heruntergezogen.

Eine detaillierte Untersuchung verschiedener Varianten zeigte, dass diese aufwendige Lösung nicht unbedingt notwendig ist. Es genügt, wie in Abbildung 81 gezeigt, die Dämmung nur etwa 55 cm an der Innenseite herunterzuführen. Die Innenoberflächentemperaturen liegen in beiden Fällen mit  $14^\circ\text{C}$  über dem kritischen Wert.

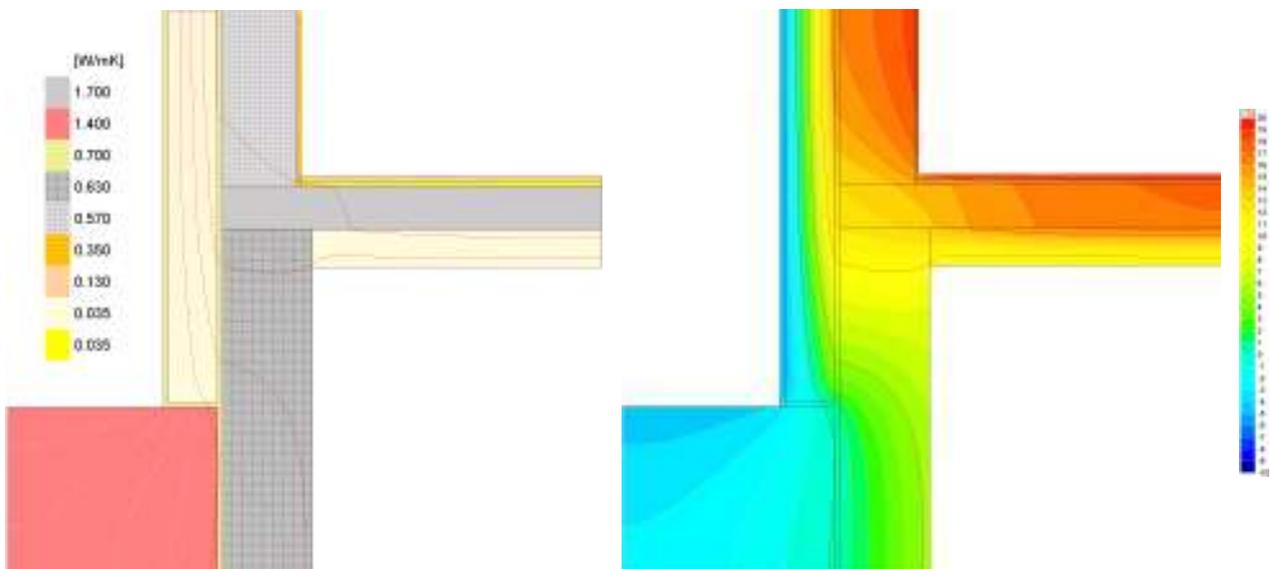
Neben der Dämmung von 150 mm unterhalb der Kellerdecke wurde auch geprüft, wie sich eine Reduzierung der Dämmschicht auf 100 mm Stärke unter der Kellerdecke auswirkt. Auch hier zeigt sich, dass die Temperaturen über der Betondecke, bzw. unter dem Estrich immer noch akzeptabel sind, denn sie sind durchweg höher als  $13^\circ\text{C}$ . Energetisch wirkt sich die dünnere Dämmung auf das gesamte Gebäude (4er Block Tevesstraße 48...54) in einem Mehrverbrauch von nur etwa  $0,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  aus.

Bei allen hier gezeigten Anschlussdetails außer Abbildung 83 wurde mit einer Außenwanddämmung von 200 mm gerechnet. Dies war notwendig, weil anfangs davon ausgegangen werden musste, dass die Dämmung im Sockelbereich zur Straße hin nur so dünn ausgeführt werden kann. Die Berechnungen zeigen, dass die Tempera-

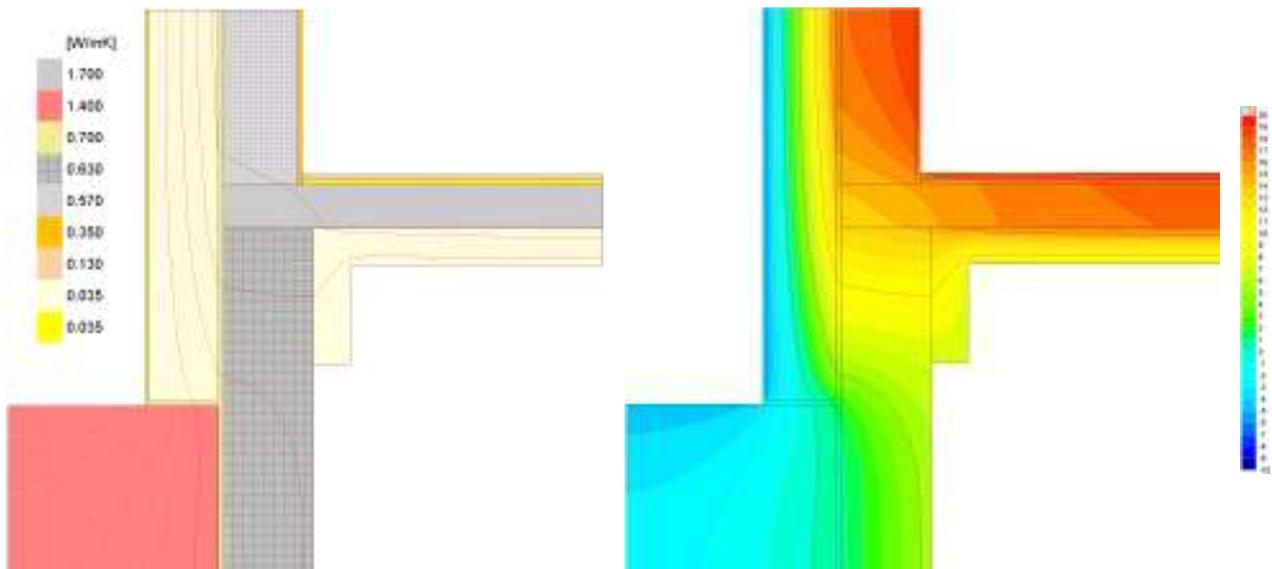
turen an den Innenoberflächen der Außenwände in jedem Fall auch bei 200 mm Sockeldämmstärke ausreichend hoch liegen, um Schimmelbildung zu vermeiden.



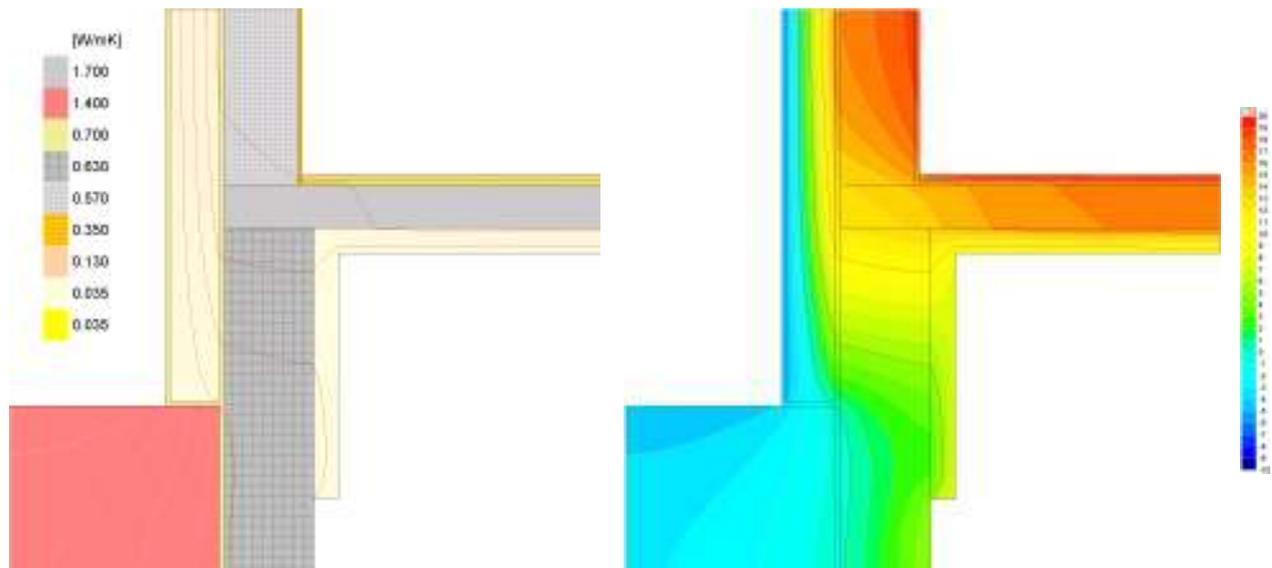
**Abbildung 81:**  $U_{KD} = 0,183 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .  $U_{AW} = 0,154 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Dämmung an Innenwand Keller nur um 55 cm nach unten gezogen (v2 kurz) {AWD200 KDD150 v2 kurz.}. Resultierende Wärmebrückenverluste:  $\Psi_a$  (AWKD) =  $0,058 \text{ W}/(\text{mK})$ .  $\vartheta_{\min} = 14,82 \text{ }^\circ\text{C}$ . Siehe auch Tabelle 2



**Abbildung 82:**  $U_{KD} = 0,183 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .  $U_{AW} = 0,154 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Dämmung an Innenwand Keller nicht nach unten gezogen (v3 ohne) {AWD200 KDD150 v3 ohne}. Resultierende Wärmebrückenverluste:  $\Psi_a$  (AWKD) =  $0,087 \text{ W}/(\text{mK})$ .  $\vartheta_{\min} = 14,45 \text{ }^\circ\text{C}$ . Siehe auch Tabelle 2



**Abbildung 83:**  $U_{KD} = 0,183 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .  $U_{AW} = 0,107 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Dämmung an Innenwand Keller nur 55 cm nach unten gezogen (v2 kurz) {AWD300 KDD150 v2 kurz}. Resultierende Wärmebrückenverluste:  $\Psi_a$  (AWKD) =  $0,071 \text{ W}/(\text{mK})$ .  $\vartheta_{\min} = 15,23 \text{ }^\circ\text{C}$ . Siehe auch Tabelle 2

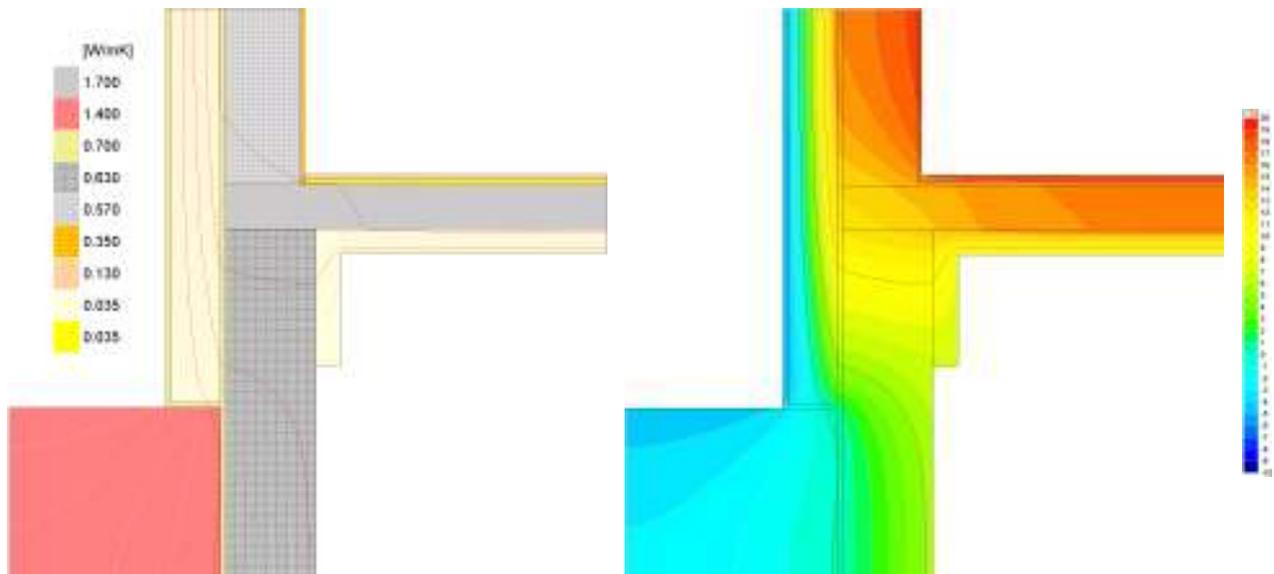


**Abbildung 84:**  $U_{KD} = 0,249 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .  $U_{AW} = 0,154 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Dämmung an Innenwand Keller 110 cm nach unten gezogen (v1 lang) {AWD200 KDD100 v1 lang}. Resultierende Wärmebrückenverluste:  $\Psi_a$  (AWKD) =  $0,049 \text{ W}/(\text{mK})$ .  $\vartheta_{\min} = 14,27 \text{ }^\circ\text{C}$ . Siehe auch Tabelle 2

Letztendlich wurden nur die Giebelwände mit 200 mm gedämmt. Alle anderen massiven Außenwände vom EG bis zum 2. OG, d.h. in den Bestandsetagen konnten mit 260 mm EPS Hartschaumplatten ( $\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{mK})$ ) gedämmt werden. Der Sockel mit Begleitdämmung innen und außen wurde wie in Abbildung 88 dargestellt ausgeführt.

Außen wurde die Sockeldämmung aus Kostengründen und baupraktischen Erwägungen nur bis kurz über das Erdreich heruntergezogen, der entstehende Spalt führt

zu einer merklichen aber akzeptablen Absenkung der Innenoberflächentemperaturen im Sockelbereich der EG-Wohnungen, siehe Abbildung 88 und Abbildung 89.



**Abbildung 85:**  $U_{KD} = 0,249 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ;  $U_{AW} = 0,154 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Dämmung an Innenwand Keller nur um 55 cm nach unten gezogen (v2 kurz) { AWD200 KDD100 v2 kurz.}. Resultierende Wärmebrückenverluste:  $\Psi_a$  (AWKD) =  $0,035 \text{ W}/(\text{mK})$ .  $\vartheta_{\min} = 14,53 \text{ }^\circ\text{C}$ . Siehe auch Tabelle 2

Detail (Dateiname)	AWD200KDD 150 v1 lang	AWD200KDD 150 v2 kurz	AWD200KDD 150 v3 ohne	AWD300KDD 150 v2 kurz	AWD200KDD 100 v1 lang	AWD200KDD 100 v2 kurz	AWD200KDD 100 v3 ohne
Beschreibung	AW 200 KD unten 150 oben 20	AW 200 KD unten 150 oben 20	AW 200 KD unten 150 oben 20	AW 300 KD unten 150 oben 20	AW 200 KD unten 100 oben 20	AW 200 KD unten 100 oben 20	AW200 KD unten 100 oben 20
Außenwand U (W/m <sup>2</sup> K)	0,154	0,154	0,154	0,107	0,154	0,154	0,154
Kellerdecke U (W/m <sup>2</sup> K)	0,183	0,183	0,183	0,183	0,249	0,249	0,249
$\Psi$ -Wert (W/(mK))	<b>0,074</b>	<b>0,058</b>	<b>0,087</b>	<b>0,071</b>	<b>0,049</b>	<b>0,035</b>	<b>0,069</b>

Minimale Oberflächentemp. bei -5°C Außentemperatur	<b>14,52°C</b>	<b>14,82°C</b>	<b>14,45°C</b>	<b>15,23°C</b>	<b>14,27°C</b>	<b>14,53°C</b>	<b>14,08°C</b>
---	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

	Abbildung 80	Abbildung 81	Abbildung 82	Abbildung 83	Abbildung 84	Abbildung 85	Abbildung 86
--	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

**Tabelle 2: Varianten der Gestaltung des Anschlusses Außenwand zu Kellerdecke. 100 mm Dämmung unter der Decke und ein kurzer Verzug an der Kellerinnenwand reichen aus.**

Die Begleitdämmung auf der Innenseite der Kelleraußenwand wurde aus Platzgründen mit 40 mm PU-Schaumplatten hergestellt, welche wie die Dämmung an der Kellerdecke raumseitig mit einer dünnen Holzwerkstoffplatte kaschiert sind.

Die Ergebnisse der Berechnungen zum Anschluss Kellersockel an der Außenwand sind als Übersicht in Tabelle 2 und Tabelle 4 zusammenfassend dargestellt. Neben einer kurzen Beschreibung der Variante sind dort die U-Werte der anstoßenden Bauteile, die  $\Psi_a$ - Wert und die jeweilige niedrigste Temperatur an der Innenoberfläche der Bauteile angegeben.

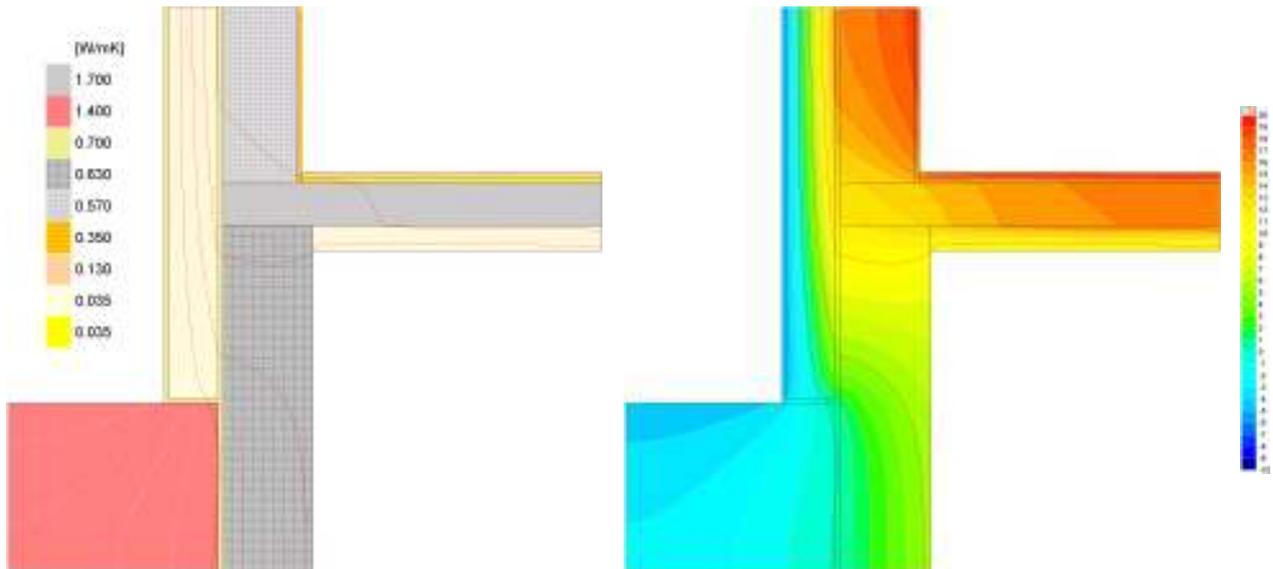


Abbildung 86:  $U_{KD} = 0,249 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .  $U_{AW} = 0,154 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Dämmung an Innenwand Keller nicht nach unten gezogen { AWD200 KDD100 v3 ohne}. Resultierende Wärmebrückenverluste:  $\Psi_a$  (AWKD) =  $0,069 \text{ W}/(\text{mK})$ .  $\vartheta_{\min} = 14,08 \text{ }^\circ\text{C}$ . Siehe auch Tabelle 2

Detail (Dateiname)	AWD260 KDD80 PU v24kurz	AWD260 KDD80 PU v241kurz	AWD260 KDD80 PU v241 Türsturz	AWD260 KDD80 PU v241 Türsturz	AWD260 KDD80 PU v241 Türsturz	AWD260 KDD80 PU v23
Beschreibung	AWD 260 KDD unten 80mm PU oben 40mm PU + 10 mm TS	AWD 260 KDD unten 80mm PU oben 40mm PU +10 mm TS <b>Lücke zwi- schen AWD und Erdreich</b>	AWD 260 KDD unten 80mm PU oben 40mm PU +10 mm TS <b>Gartentür Sturz ohne Dämmung</b>	AWD 260 KDD unten 80mm PU oben 40mm PU +10 mm TS <b>Gartentür Sturz 20mm Dämmung</b>	AWD 260 KDD unten 80mm PU oben 40mm PU +10 mm TS <b>Gartentür Sturz 20mm Dämmung</b>	AWD 260 KDD unten 80mm PU oben 20mmTS <b>keinerlei Sockeldäm- mung</b>
Außenwand U (W/m <sup>2</sup> K)	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122
Kellerdecke U (W/m <sup>2</sup> K)	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,214
$\Psi$ -Wert (W/(mK))	<b>0,046</b>	<b>0,062</b>	<b>0,468</b>	<b>0,206</b>	<b>0,163</b>	<b>0,318</b>

Minimale Oberflächentemp bei -5°C Außentemperatur	<b>13,4</b>	<b>13,0</b>	<b>2,7</b>	<b>9,2</b>	<b>10,3</b>	<b>9,9°C</b>
---	-------------	-------------	------------	------------	-------------	--------------

	Abbildung 87	Abbildung 88	Abbildung 96	Abbildung 97	Abbildung 98	Abbildung 79
--	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

**Tabelle 3: Letztendlich wurde die Kellerdecke unten mit 80 mm Dämmung PU-Schaum-Verbund-Paneele n gedämmt, um zusätzliche Raumhöhe im Keller zu erreichen. Der Verzug der Dämmung an der Kellerinnenwand wurde aus 40 mm PU-Platten gefertigt. Die Lücke der AW-Dämmung zum Erdreich ist merklich aber noch akzeptabel. Zur Erläuterung der Tabelle siehe Text.**

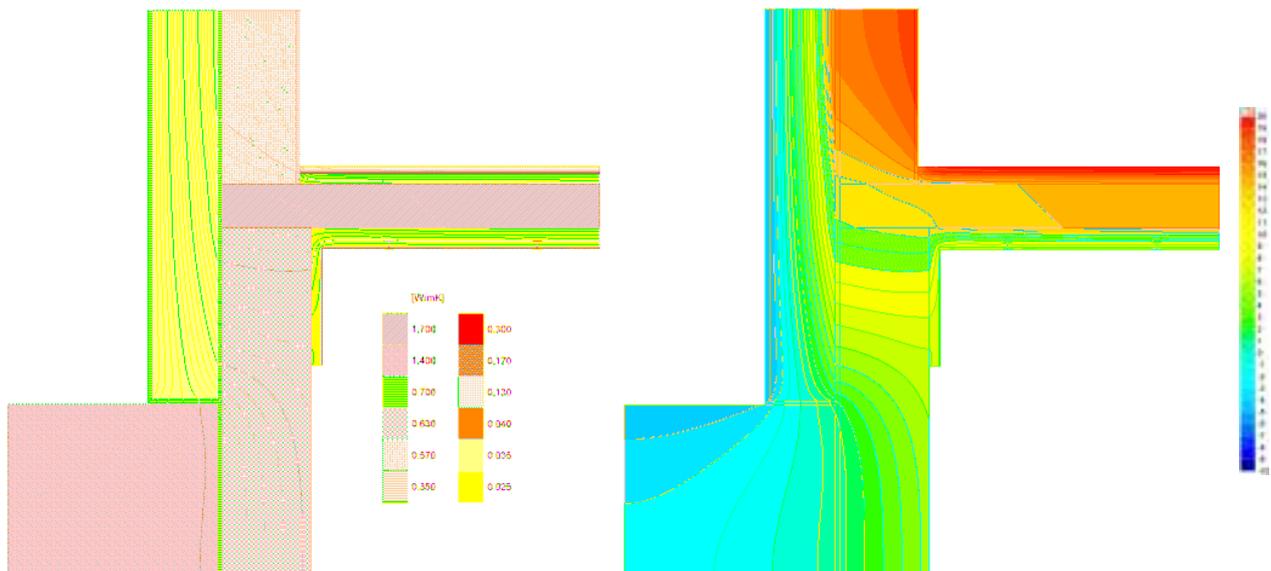


Abbildung 87:  $U_{KD} = 0,177 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .  $U_{AW} = 0,122 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Realisierte Lösung: Kellerdecke unterseitig mit 80 mm Dämmung PU-Schaum Verbundpaneelen gedämmt { AWD260 KDD80 PU BD40+10 v24 kurz}. Dämmung oberhalb der Kellerdecke 40 mm PU plus 10 mm Trittschalldämmung  
Resultierende Wärmebrückenverluste:  
 $\Psi_a \text{ (AWKD)} = 0,046 \text{ W}/(\text{mK})$ .  $\vartheta_{\min} = 13,4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Siehe auch Tabelle 4

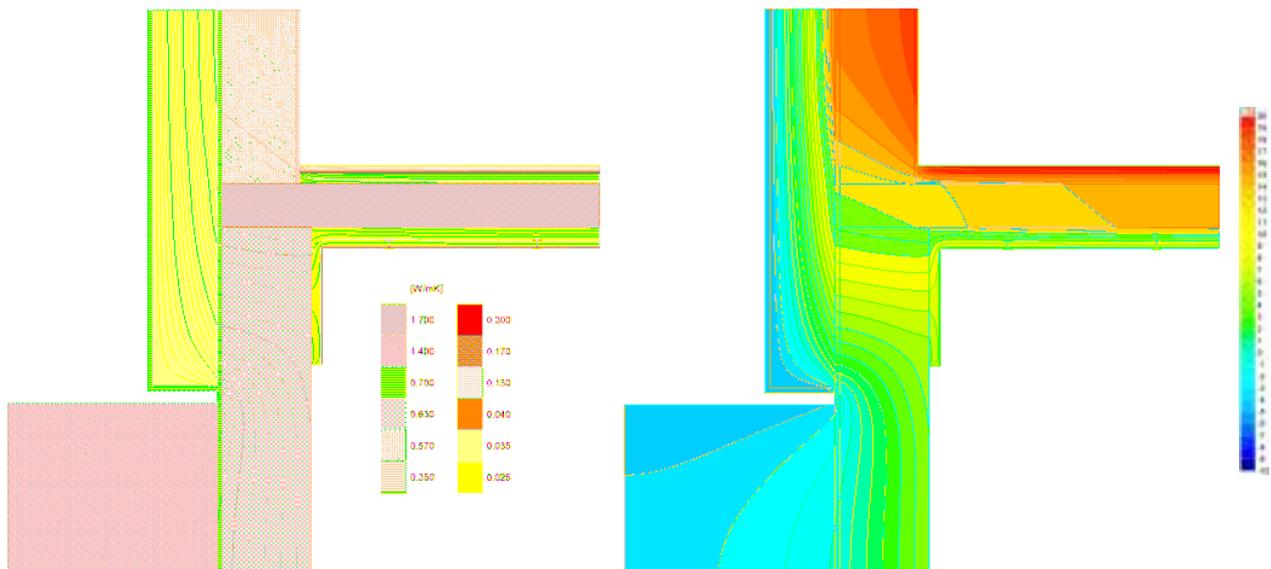


Abbildung 88:  $U_{KD} = 0,177 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .  $U_{AW} = 0,122 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . wie Abbildung 88 mit Dämm-lücke zwischen Dämmung an AW und Erdrreich { AWD260 KDD80 PU BD40+10 v24 kurz}. Resultierende Wärmebrückenverluste:  $\Psi_a \text{ (AWKD)} = 0,062 \text{ W}/(\text{mK})$ .  $\vartheta_{\min} = 13,0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Siehe auch Tabelle 4 und Abbildung 171 bzw. Abbildung 89 f.



**Abbildung 89:** Dämmung im Sockelbereich der Außenwand. Nur an der Nordwand von Tevesstraße 54 wurde der Luftspalt zwischen Dämmung und Gehweg nachträglich mit wasserdichtem Material verschlossen, weil an dieser Stelle vermutlich Regenwasser in den Keller eingedrungen war und die Kellerwand durchfeuchtet hatte.



**Abbildung 90:** Die bisherigen Kellerfenster wurden mit Dämmblöcken verschlossen. Die Belüftung der Keller erfolgt durch einfache über Zeitschaltuhr gesteuerte Abluftventilatoren, um nachts eine Lärmbelästigung durch die relativ lauten Lüfter auszuschließen.

Alle alten Kellerfenster wurden mit Dämmblöcken verschlossen, damit die Dämmung des Sockelbereichs ununterbrochen um das ganze Gebäude gewährleistet ist, Abbildung 90. Die Belüftung der Keller erfolgt nun über Abluftventilatoren, die über eine einfache Zeitschaltuhr gesteuert werden, um eine Lärmbelästigung der Bewohner in den Nachtstunden zu vermeiden. Ursprünglich waren über Feuchte gesteuerte Abluftventilatoren vorgeschlagen worden, damit nicht bei bestimmten Feuchtschwülen Wetterlagen wie z.B. im Frühjahr feuchtwarme Luft in die kühlen Kellerräume geblasen wird und es dort zu Kondensation und evtl. Schimmelbildung kommt.



**Abbildung 91: Sockelabschluss zum Gehweg.** Im Sockelbereich wurde steiferes Material verwendet. Der alte Anschluss für das Regenfallrohr ist erkennbar. Das neue Regenfallrohr wird an dieser Stelle in einer Aussparung der Dämmung geführt, vgl. auch Abbildung 115

Der Sockelabschluss des WDVS wurde rund um das Gebäude mit steiferem Material ausgeführt, als die Dämmung in der Wand, damit dort später nicht so leicht Beschädigungen der Oberflächen auftreten, weiße Blöcke in Abbildung 90 und Abbildung 91. Die Hersteller der WDVS bieten inzwischen für fast jede Beanspruchungssituation Putzsysteme an, so dass die Widerstandsfähigkeit einer Putzoberfläche auf WDVS derjenigen auf einem Mauerwerk praktisch nicht mehr nachsteht.

Wichtig ist, dass die Dämmung auch am Sockel durchgezogen wurde und kein Absatz eingefügt wurde, der ein Sockelabschlussprofil benötigt hätte. Die optische Abstimmung des Sockels gegenüber der Wand wurde später alleine über die farbliche Gestaltung erreicht, Abbildung 89.

In Abbildung 91 erkennt man neben dem Sockel auch einen Rücksprung in der Dämmstärke zur späteren Aufnahme des Fallrohrs der Regenrinne. Dies war an dieser Stelle (Tevesstraße 36 bis 46 zum Gehweg hin) notwendig, weil dort die gesamte Dämmstärke auf öffentlichem Raum, d.h. über der Grundstücksgrenze auf dem Gehweg, angeordnet ist. Diese 'Vergrößerung' des Gebäudes ist von der Stadt Frankfurt genehmigt worden, weil sie dem Zweck Wärmeschutz dient und weil der Gehweg an diese Stelle eine ausreichende Breite hat. Eine derartige Genehmigungspraxis ist inzwischen bei den meisten Kommunen üblich. Andererseits ist leicht einsichtig, dass, wenn schon die Dämmung in den öffentlichen Raum hineinragt, nicht auch noch das Fallrohr der Regenrinne davor platziert werden konnte. Daher der Rücksprung, der eine merkliche aber akzeptable Schwächung der Dämmung zur Folge hat. Der Effekt wurde als Wärmebrücke berechnet und ist in Abbildung 115 dokumentiert.

### Sturz Kellertür zum Garten (ursprüngliche Planung)

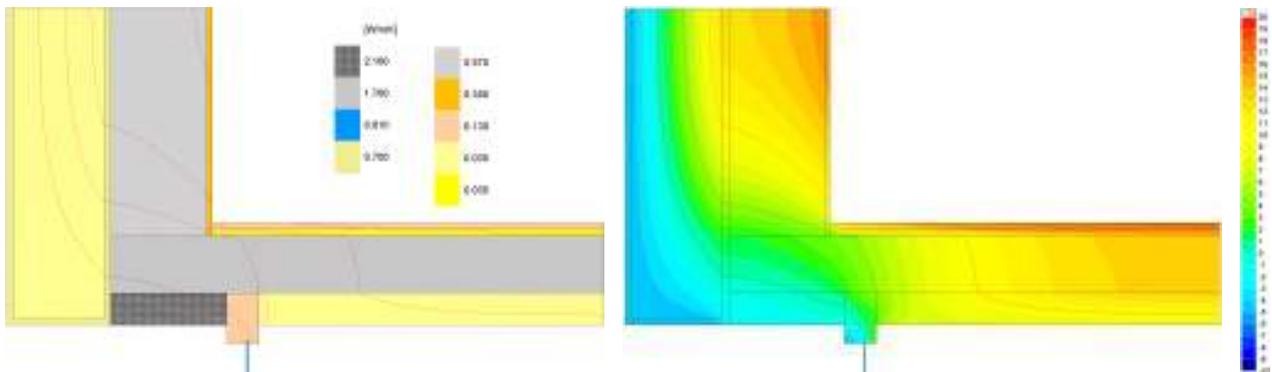


Abbildung 92: Sturz Kellertür zum Garten. SO NICHT!

$U_{KD} = 0,249 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .  $U_{AW} = 0,107 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Keine Dämmschicht über dem Sturz der Kellertür.  
{ AWD300 KDD100 TS 20 mm } Resultierende Wärmebrückenverluste:

$\Psi_a \text{ (AWKD)} = 0,467 \text{ W}/(\text{mK})$ .  $\vartheta_{\min} = 4,0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Siehe auch Tabelle 4

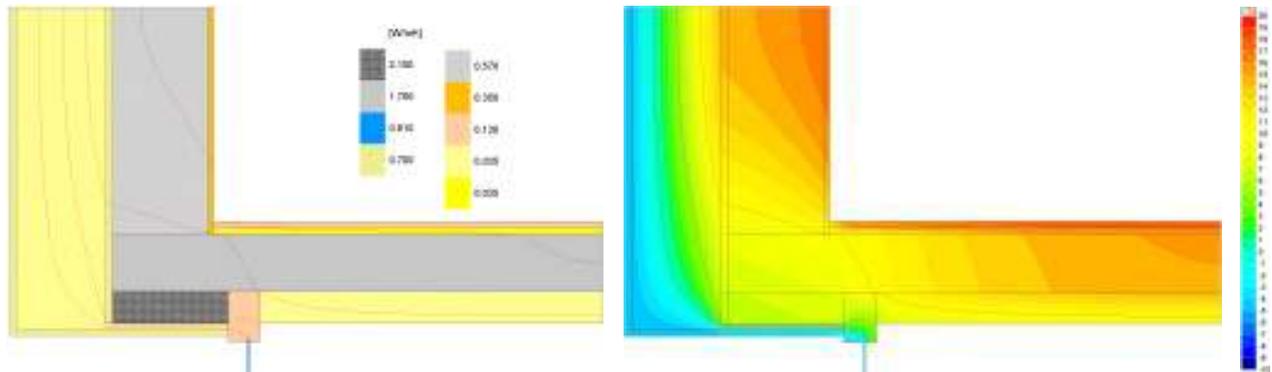


Abbildung 93: Sturz Kellertür zum Garten.

$U_{KD} = 0,249 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .  $U_{AW} = 0,107 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . 20 mm Dämmschicht über dem Sturz der Kellertür.  
{ AWD300 KDD100 TS 20 mm } Resultierende Wärmebrückenverluste:

$\Psi_a \text{ (AWKD)} = 0,194 \text{ W}/(\text{mK})$ .  $\vartheta_{\min} = 9,9 \text{ }^\circ\text{C}$ . Siehe auch Tabelle 4

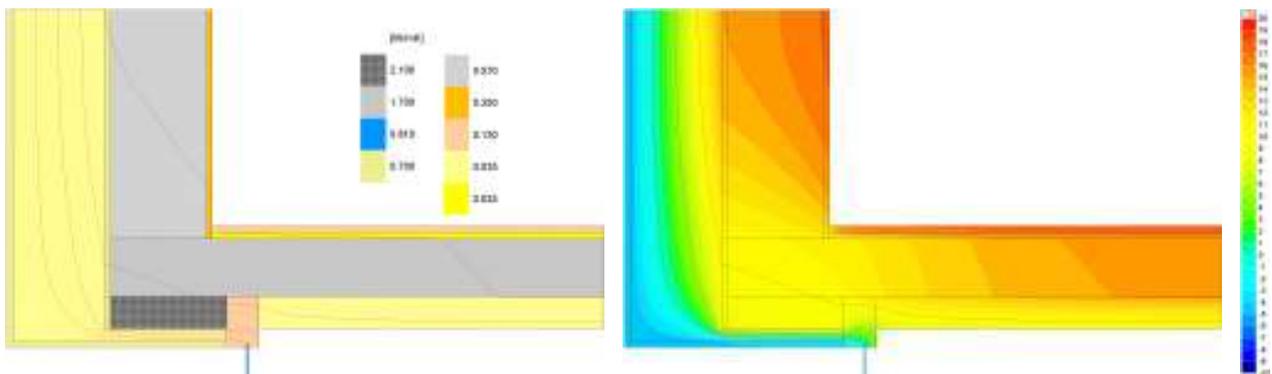


Abbildung 94: Sturz Kellertür zum Garten.

$U_{KD} = 0,249 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .  $U_{AW} = 0,107 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . 30 mm Dämmschicht über dem Sturz der Kellertür.  
{ AWD300 KDD100 TS 20 mm } Resultierende Wärmebrückenverluste:

$\Psi_a \text{ (AWKD)} = 0,199 \text{ W}/(\text{mK})$ .  $\vartheta_{\min} = 11,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Siehe auch Tabelle 4



**Alte Tür sitzt innen am Anschlag**

**Abbildung 95: Sturz der Kellertür zum Garten**



**Neue Tür mit Zarge aus Stahlwinkel sitzt außen vor dem alten Sturz. Der Sturz ist innenseitig überall mit mindestens 20 mm Wärmedämmung überdeckt. Siehe auch Abbildung 98.**



**Auch die Laibung der Tür ist innenseitig so weit wie möglich gedämmt**



**Dämmung der Kellerdecke innenseitig auch unter dem Sturz bis zur Tür durchgezogen.**



**Dämmung außenseitig dicht an den Türrahmen angeschlossen.**

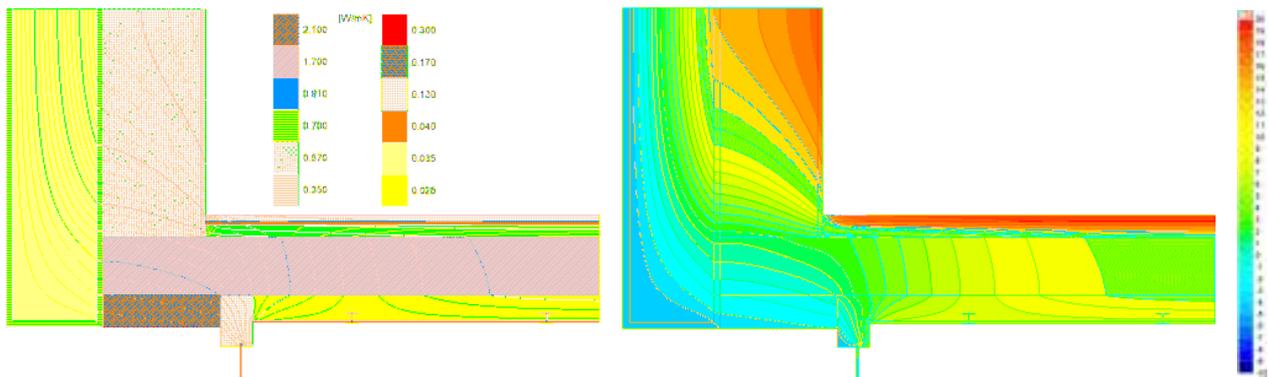
**Sturz Kellertür zum Garten**


Abbildung 96: Sturz Kellertür zum Garten. {AWD260 KDD80 PU BD40+10 v24}  
 $U_{KD} = 0,177 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .  $U_{AW} = 0,122 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .  
 Keine Dämmschicht über dem Sturz der Kellertür. Resultierende Wärmebrückenverluste:  
 $\Psi_a \text{ (AWKD)} = 0,468 \text{ W}/(\text{mK})$ .  $\vartheta_{\min} = 2,7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Siehe auch Tabelle 4

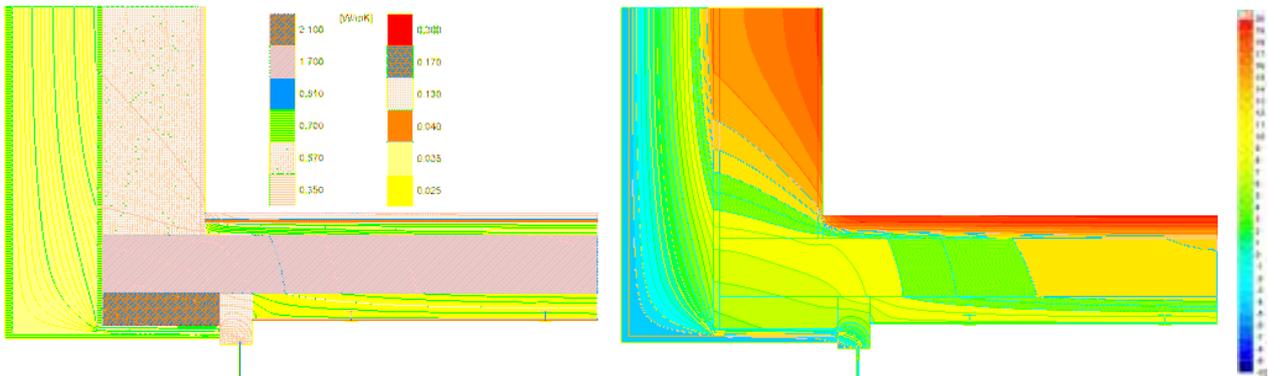


Abbildung 97: Sturz Kellertür zum Garten, Verbesserungsvorschlag.  
 $U_{KD} = 0,177 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .  $U_{AW} = 0,122 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . {AWD260 KDD80 PU BD40+10 v24}  
 20 mm Dämmschicht über dem Sturz der Kellertür. Resultierende Wärmebrückenverluste:  
 $\Psi_a \text{ (AWKD)} = 0,206 \text{ W}/(\text{mK})$ .  $\vartheta_{\min} = 9,2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Siehe auch Tabelle 4

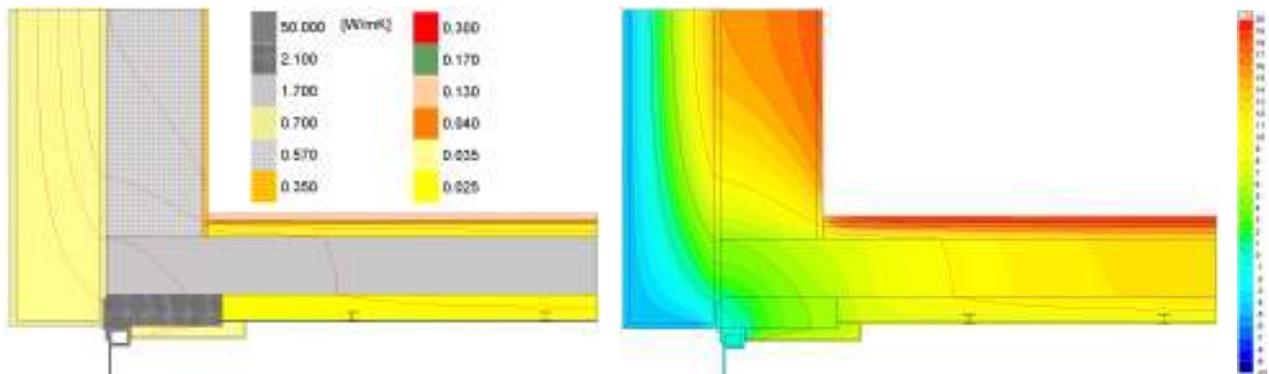
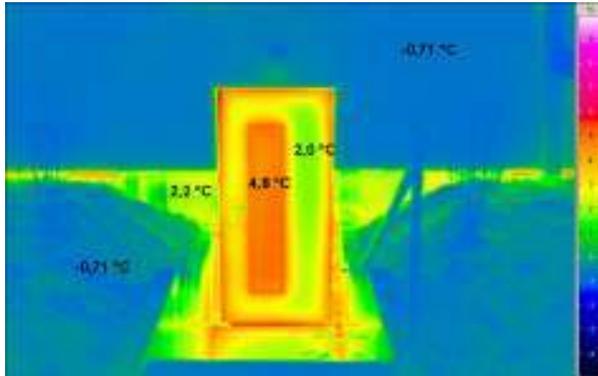


Abbildung 98: Sturz Kellertür zum Garten, realisierte Situation mit Stahlwinkelzarge welche die Dämmschicht an der Außenkante des Sturzes unterbricht. 30 mm Dämmschicht über dem Sturz der Kellertür.  $U_{KD} = 0,177 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .  $U_{AW} = 0,122 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . {AWD260 KDD80 PU BD40+10 v241}  
 Resultierende Wärmebrückenverluste:  $\Psi_a \text{ (AWKD)} = 0,287 \text{ W}/(\text{mK})$ .  $\vartheta_{\min} = 7,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Siehe Tabelle 4



**Abbildung 99: Thermografieaufnahme der Kellertür von außen.**

Detail (Dateiname)	AWD260 KDD80 PU v241 Türsturz	AWD260 KDD80 PU v241 Türsturz	AWD260 KDD80 PU v241 Türsturz			
Beschreibung	AWD 260 KDD unten 80mm PU oben 40mm PU +10 mm TS <b>Gartentür Sturz ohne Dämmung</b>	AWD 260 KDD unten 80mm PU oben 40mm PU +10 mm TS <b>Gartentür Sturz mit 20mm Dämmung</b>	AWD 260 KDD unten 80mm PU oben 40mm PU +10 mm TS <b>Gartentür Sturz mit 30mm Dämmung</b>			
Außenwand U (W/m²K)	0,122	0,122	0,122			
Kellerdecke U (W/m²K)	0,177	0,177	0,177			
ψ-Wert (W/(mK))	<b>0,468</b>	<b>0,206</b>	<b>0,287</b>			

Minimale Oberflächentemp bei -5°C Außentemperatur	<b>2,7</b>	<b>9,2</b>	<b>7,5</b>			
---	------------	------------	------------	--	--	--

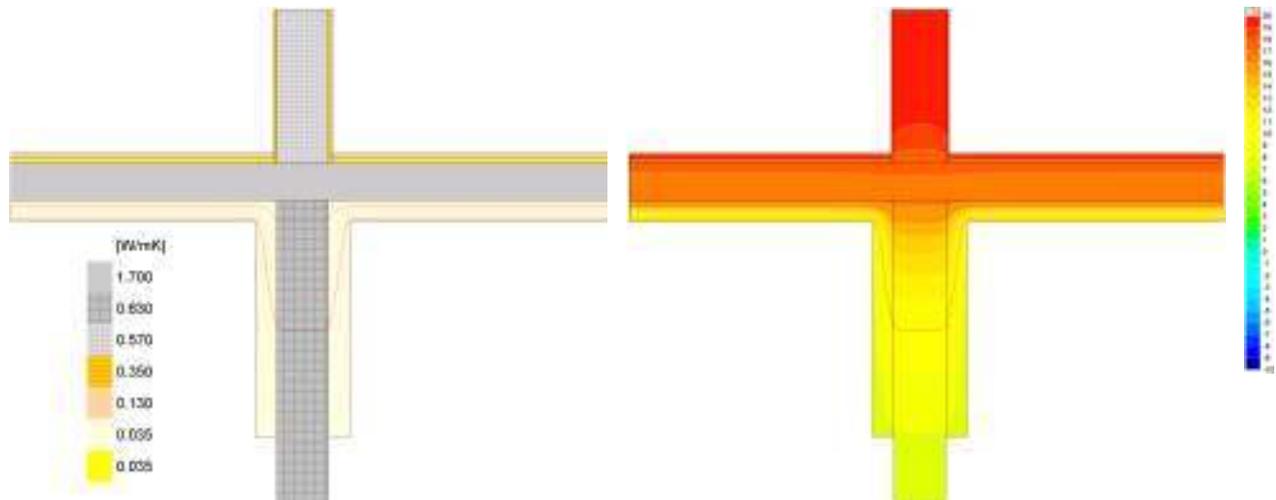
	Abbildung 96	Abbildung 97	Abbildung 98			
--	--------------	--------------	--------------	--	--	--

**Tabelle 4: Der Sturz der nach außen führenden Kellertüren stellt eine kritische Stelle dar, weil dort nur wenig Platz für eine Dämmschicht zur Verfügung steht.**

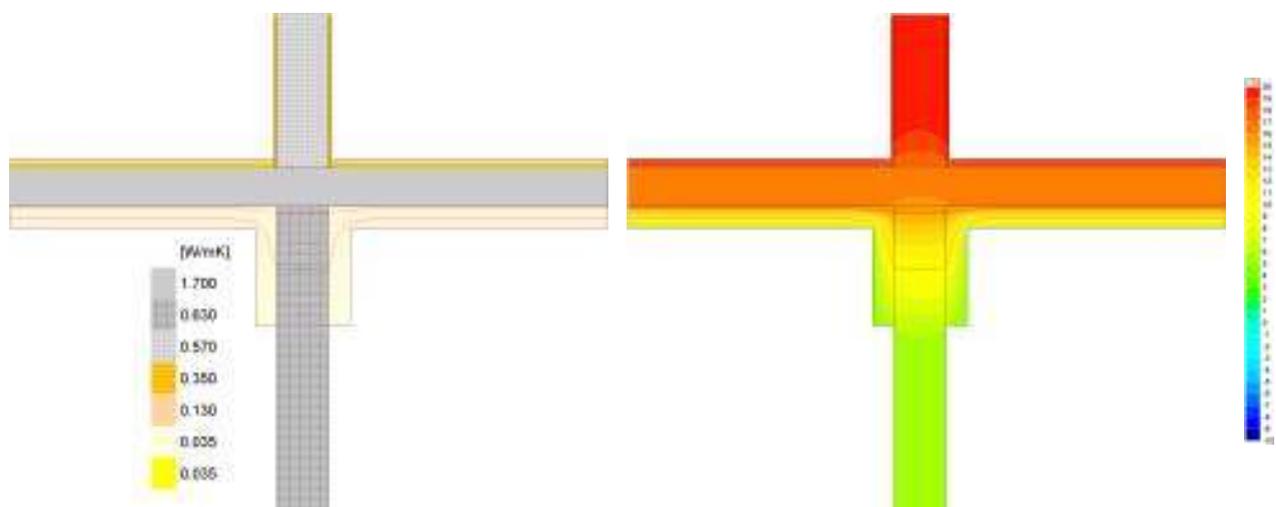
Die dargestellten zweidimensionalen Wärmebrückenberechnungen für den Sturzbereich der Kellertüren stellen eine 'worst case' Annahme dar. Die angegebenen minimalen Oberflächentemperaturen gelten für die Kante des Mauerwerks zur Kellerdecke unter dem Estrich und unter der Trittschalldämmung, weil dorthin theoretisch feuchtwarme Raumluft gelangen kann. Die Realität dürfte aus folgendem Grund weit weniger kritisch sein: Der Sturz ist nur etwa 1 m lang, d.h. in den Randbereichen bestehen Querwärmeströme zur gedämmten warmen Außenwand und Decke, welche den Sturz, die Decke und die angrenzenden Innenoberflächen auf höheren Temperaturen als die dargestellten halten dürften. Eine genaue Analyse könnte durch eine dreidimensionale Wärmestromberechnung erbracht werden. Wichtiger ist für dieses Detail allerdings die konsequente Weiterentwicklung der Lösung, für die sich vorgefertigte Komponenten empfehlen.

Aufgrund der in allen Wohnungen vorhandenen kontrollierten Lüftung liegen die Raumlufffeuchten außerdem in der Regel unter 45 % r.F.. Somit ist die Gefahr von Schimmelbildung gegenüber den Standardannahmen (50 % r.F.) reduziert.

### Anschluss Kellerdecke an Innenwand (Varianten während der Planung)



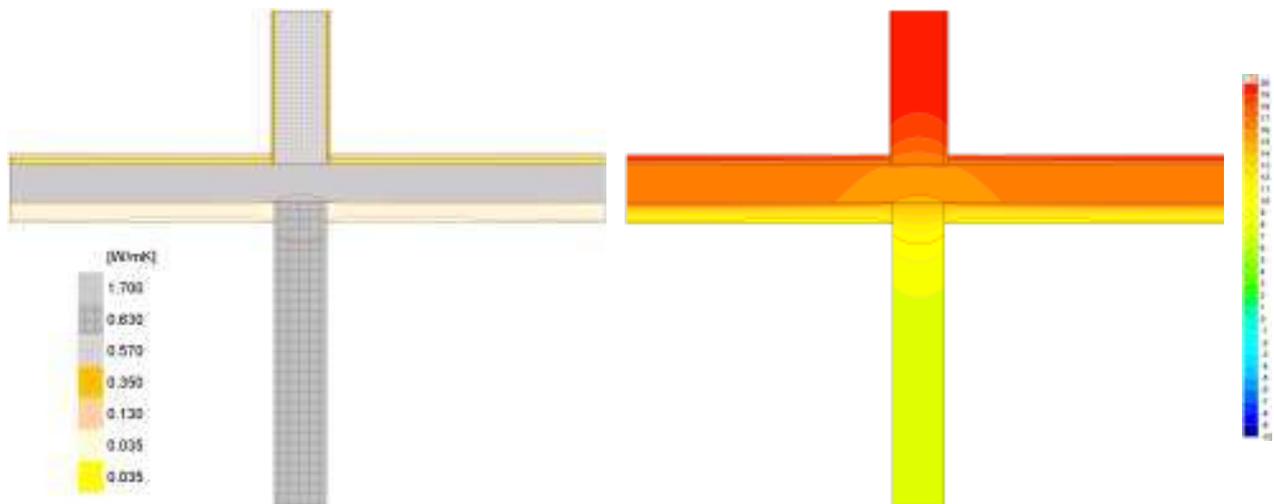
**Abbildung 100:  $U_{KD} = 0,249 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Dämmung an Innenwand Keller 110 cm nach unten gezogen (v1 lang). {IW KDD100 v1 lang} Resultierende Wärmebrückenverluste:  
 $\Psi_a$  (IWKD) = 0,113 W/(mK).  $\vartheta_{\min} = 17,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Siehe auch Tabelle 5**



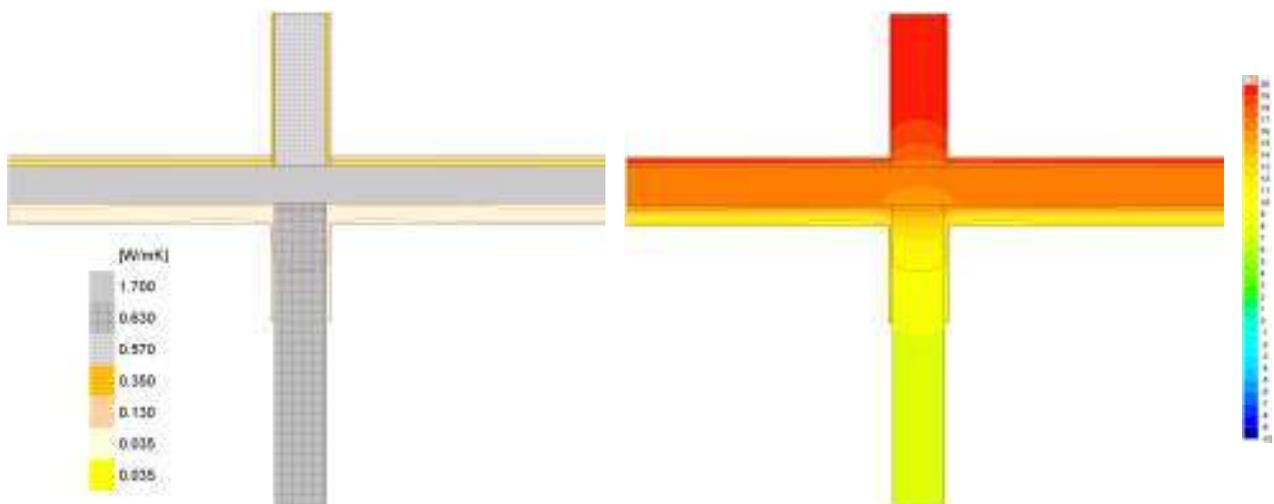
**Abbildung 101:  $U_{KD} = 0,249 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Dämmung an Innenwand Keller nur 55 cm nach unten gezogen (v2 kurz). {IW KDD100 v2 kurz} Resultierende Wärmebrückenverluste:  
 $\Psi_a$  (IWKD) = 0,249 W/(mK).  $\vartheta_{\min} = 16,62 \text{ }^\circ\text{C}$ . Siehe auch Tabelle 5**

Beim Anschluss der tragenden Innenwände an die Kellerdecke wäre ein möglichst weit nach unten reichender Verzug der Dämmung am besten um die Wärmeverluste an dieser Stelle gering zu halten. Um die aus bauphysikalischen Gründen geforderten Innenoberflächentemperaturen von mehr als  $13^\circ\text{C}$  zu gewährleisten, genügt es

jedoch, die Dämmung nur 55 cm nach unten zu verziehen, wie dies auch an der Außenwand praktiziert wurde.



**Abbildung 102:  $U_{KD} = 0,249 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Ohne Dämmung an den Kellerwänden {IW KDD100 v3 ohne}. Hohe resultierende Wärmebrückenverluste:  
 $\Psi_a$  (IWKD) =  $0,322 \text{ W}/(\text{mK})$ .  $\vartheta_{\min} = 16,05 \text{ }^\circ\text{C}$ . Siehe auch Tabelle 5**

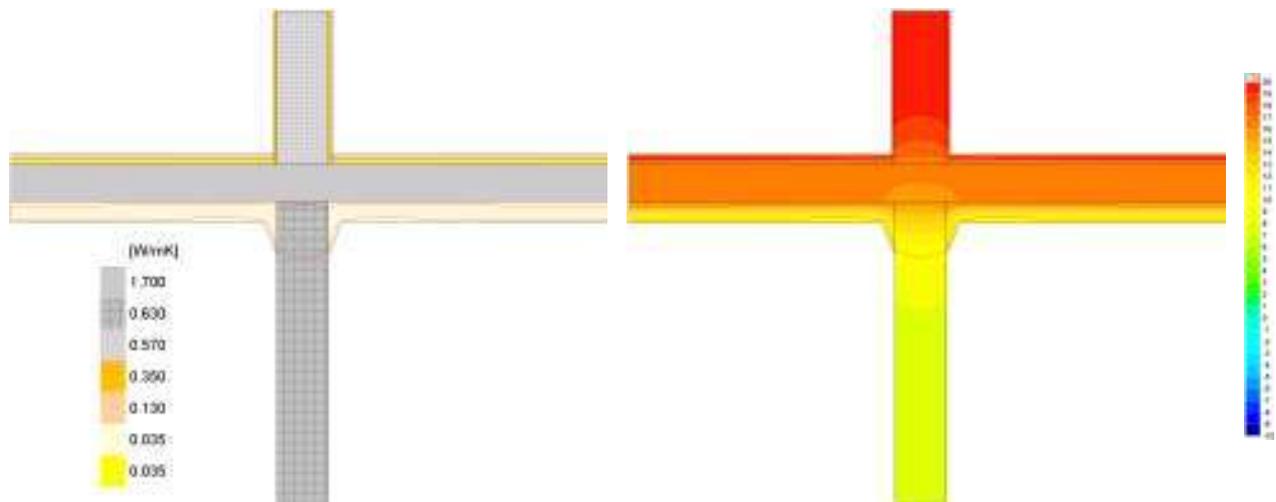


**Abbildung 103:  $U_{KD} = 0,249 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Dämmung an Innenwand Keller nur als 20 mm dicke Platte nach unten gezogen {IW KDD100 v4 min20mm} Resultierende Wärmebrückenverluste:  
 $\Psi_a$  (IWKD) =  $0,224 \text{ W}/(\text{mK})$ .  $\vartheta_{\min} = 16,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Siehe auch Tabelle 5**

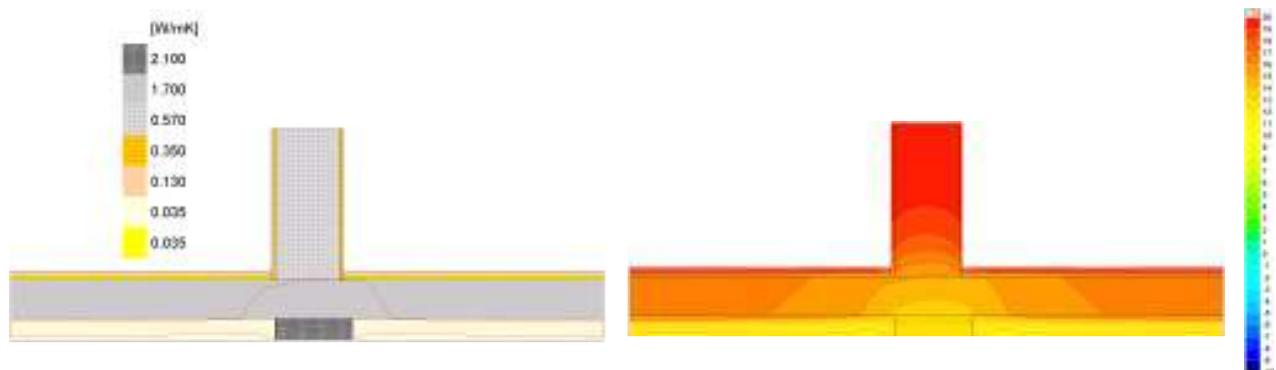
100 mm PS-Dämmung unter der Decke und ein kurzer Verzug von 50 cm an der Kellerinnenwand reichen aus um die Wärmebrücke sicher zu entschärfen. Wichtig ist, dass die Dämmung überall ohne Lücken und Spalte verlegt wird, so dass erhöhte Wärmeverluste aufgrund von Hinterströmung vermieden werden.

Die nach unten gezogene Dämmschicht braucht an einzelnen besonders engen Durchgängen im Kellerbereich nicht unbedingt 50 mm stark zu sein. Dort genügen auch 20 mm. Mit diesen Varianten v3, v4 oder v5, siehe Abbildung 102 ff sind die erforderlichen Mindesttemperaturen an den Innenoberflächen immer noch einzuhalten. Allerdings erhöhen sich dadurch die Wärmebrückenverluste an diesen Stellen

erheblich. Der Verzug der Dämmung im Wandbereich sollte also wo immer möglich nach der Variante v2 oder ähnlich ausgeführt werden.



**Abbildung 104:**  $U_{KD} = 0,249 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Dämmung an Innenwand Keller als minimaler Keil nach unten gezogen {IW KDD100 v5 minKeil250} Resultierende Wärmebrückenverluste:  
 $\Psi_a$  (IWKD) =  $0,231 \text{ W}/(\text{mK})$ .  $\vartheta_{\min} = 16,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Siehe auch Tabelle 5



**Abbildung 105:**  $U_{KD} = 0,249 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Am Türsturz lässt sich wegen der begrenzten Durchgangshöhe keine Dämmung anbringen {IW KDD100 Sturz}. Resultierende Wärmebrückenverluste:  
 $\Psi_a$  (IWKD) =  $0,590 \text{ W}/(\text{mK})$ .  $\vartheta_{\min} = 14,9^\circ\text{C}$ . Siehe auch Tabelle 5

Im Bereich der Stürze der Innentüren und Durchgänge im Keller war die lichte Höhe so gering, dass dort keine Dämmung angebracht werden konnte. Eine Überprüfung zeigte, dass an diesen wenigen Stellen auf eine Dämmung ganz verzichtet werden konnte, ohne die Innenoberflächentemperaturen in den Wohnungen im EG zu stark abzusenken.



**Abbildung 106: PU-Platten 40 mm als Begleitdämmung der aufgehenden Kellerwand. Situation unter dem Hauseingangspodest des Treppenhauses und am Abgang von der Haustür zum Keller.**

Detail (Dateiname)	IW KDD100 v1 lang	IW KDD100 v2 kurz	IW KDD100 v3 ohne	IW KDD100 v4 min20mm	IW KDD100 v5 min Keil250 mm	IW KDD100 Sturz	
Beschreibung	KD unten 100 oben 20	KD unten 150 oben 20	KD unten 150 oben 20	KD unten 150 oben 20	KD unten 150 oben 20	KD unten 150 oben 20	
Außenwand U (W/m²K)							
Kellerdecke U (W/m²K)	0,249	0,249	0,249	0,249	0,249	0,249	
ψ-Wert (W/(mK))	<b>0,113</b>	<b>0,135</b>	<b>0,322</b>	<b>0,224</b>	<b>0,231</b>	<b>0,590</b>	

Minimale Oberflächentemp bei -5°C Außentemperatur	<b>17,1°C</b>	<b>16,99°C</b>	<b>16,05°C</b>	<b>16,50°C</b>	<b>16,49°C</b>	<b>14,9°C</b>	
---	---------------	----------------	----------------	----------------	----------------	---------------	--

	Abbildung 100	Abbildung 101	Abbildung 102	Abbildung 103	Abbildung 104	Abbildung 105	
--	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	--

**Tabelle 5: Varianten der Gestaltung des Anschlusses Innenwand zur Kellerdecke mit Kellerwand.**

### Anschluss Kellerdecke an Innenwand (realisierte Details)

Die schlussendlich realisierte Lösung für die Kellerdecke und die verschiedenen Anschlüsse an den aufgehenden Innenwänden und den Stürzen sind in Abbildung 107 bis Abbildung 112 dargestellt. An einer Innenwand ist dabei ein Kabelkanal angeordnet, in dessen Bereich die Dämmstärke auf 20 mm begrenzt ist. Eine Überprüfung ergab, dass dies akzeptiert werden kann. Die über der Kellerdecke liegende Dämmschicht von 40 mm PU plus 20 mm Trittschalldämmung kompensiert die Wärmebrückenwirkung des Kabelkanals und des Türsturzes weitgehend.

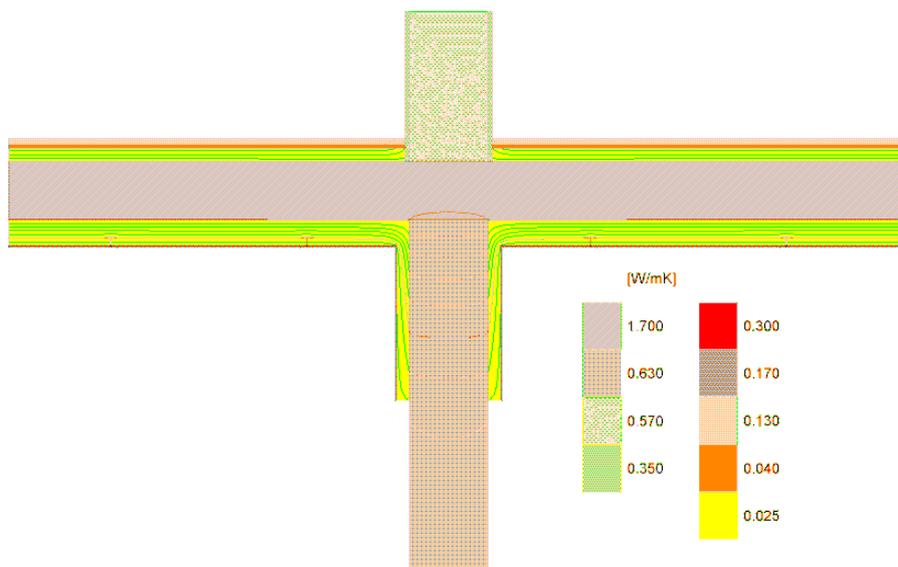
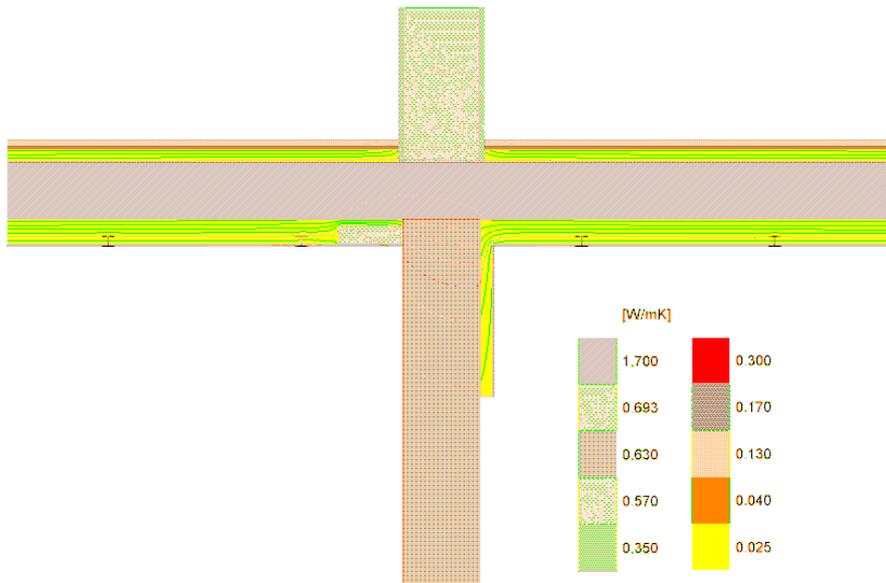


Abbildung 107:

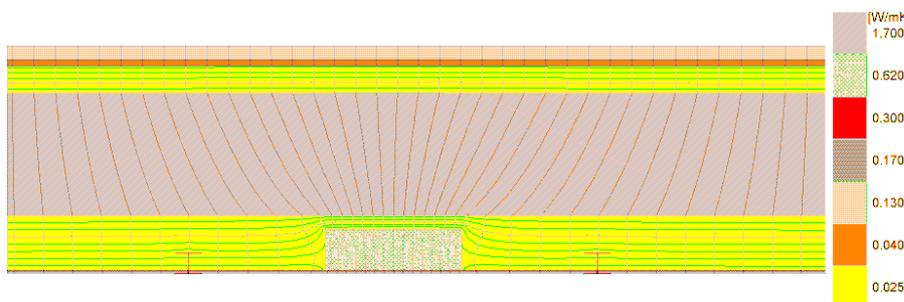
$U_{KD} = 0,177 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .  
 Innenwand Keller mit Begleitdämmung;  
 {IW KDD080 v24}  
 Ergebnisse  
 $\Psi_a \text{ (IWKD)} = 0,185 \text{ W}/(\text{mK})$ .  
 $\vartheta_{\min} = 15,7^\circ\text{C}$ .  
 Siehe auch Tabelle 6



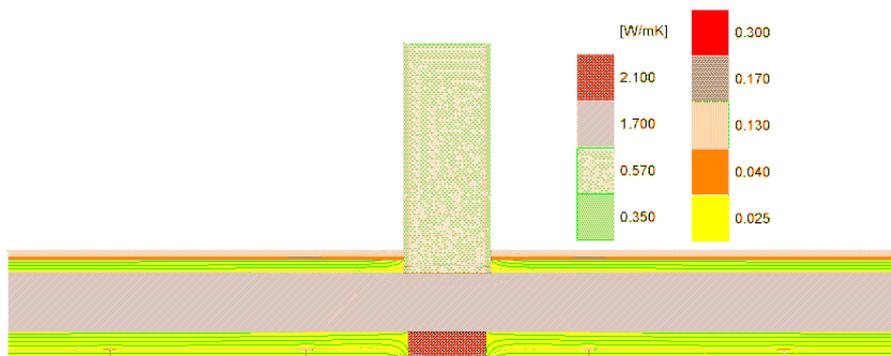
Abbildung 108: PU-Platten 40 mm als Begleitdämmung der aufgehenden Kellerwand.



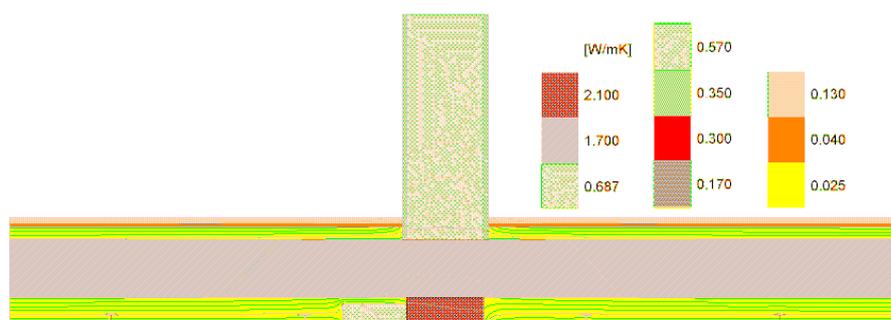
**Abbildung 109:**  
IW KDD080 v24.  
 $U_{KD} = 0,177 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Ka-  
belkanal neben aufgehen-  
der Innenwand:  
 $\Psi_a \text{ (IWKD)} = 0,323 \text{ W}/(\text{mK})$ .  
 $\vartheta_{\min} = 14,6^\circ\text{C}$ .  
Siehe auch Tabelle 6



**Abbildung 110:**  
KDD080 mit Kabelkanal in  
der Dämmebene.  
 $U_{KD} = 0,177 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .:  
 $\Psi_a \text{ (IWKD)} = 0,021 \text{ W}/(\text{mK})$ .  
 $\vartheta_{\min} = 18,4^\circ\text{C}$ .  
Siehe auch Tabelle 6



**Abbildung 111:**  
IW KDD080 Sturz v24.  
 $U_{KD} = 0,177 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .  
Am Türsturz lässt sich  
wegen der begrenzten  
Durchgangshöhe keine  
Dämmung anbringen. Re-  
sultierende Wärmebrü-  
ckenverluste:  
 $\Psi_a \text{ (IWKD)} = 0,406 \text{ W}/(\text{mK})$ .  
 $\vartheta_{\min} = 12,8^\circ\text{C}$ .  
Siehe auch Tabelle 6



**Abbildung 112:**  
IW KDD080 Sturz v24.  
 $U_{KD} = 0,177 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .  
Sturz mit daneben verlau-  
fendem Kabelkanal:  
 $\Psi_a \text{ (IWKD)} = 0,449 \text{ W}/(\text{mK})$ .  
 $\vartheta_{\min} = 13,8^\circ\text{C}$ .  
Siehe auch Tabelle 6



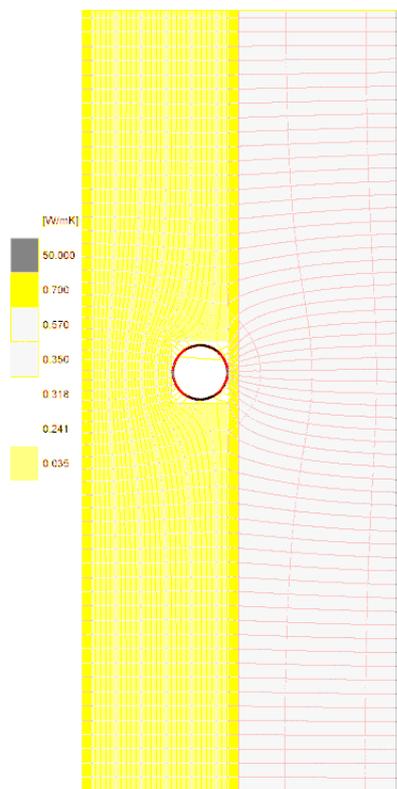
Abbildung 113: Kabelkanal in Kellerdecke vor und nach der Anbringung der Deckendämmung. Links unten: Situation am Sturz einer Kellerinnentür. Entlang des ungedämmten Türsturzes verläuft der Kabelkanal.

Detail (Dateiname)	IW KDD080 v24	IW KDD080 v24	KDD080	IW KDD080 v24	IW KDD080 v24	AW 260	AW 260	AW 260
Beschreibung	Dämmung unten 80 mm PU oben 40 mm +20 mm TS	Wand +Kabelkanal	Kabelkanal	Sturz	Sturz + Kabelkanal	Abwasser Fallrohr in Dämmebene	Regenrinne	Solarleitungen in der Dämmebene
Kellerdecke U (W/m²K)	0,117	0,117	0,117	0,117	0,117	0,122	0,122	0,122
ψ-Wert (W/(mK))	<b>0,185</b>	<b>0,323</b>	<b>0,021</b>	<b>0,406</b>	<b>0,449</b>	<b>0,016</b>	<b>0,025</b>	<b>0,004</b>
Minimale Oberflächen-temperatur bei -5°C Außentemperatur	<b>15,7°C</b>	<b>14,6°C</b>	<b>18,4°C</b>	<b>12,8°C</b>	<b>13,8°C</b>	<b>16,4°C</b>	<b>16,7°C</b>	<b>14,3°C</b>
	Abbildung 107	Abbildung 109	Abbildung 110	Abbildung 111	Abbildung 112	Abbildung 114	Abbildung 115	Abbildung 116

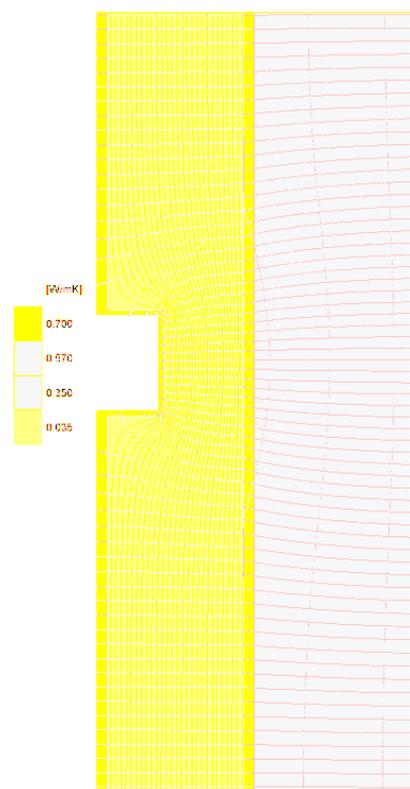
Tabelle 6: Realisierte Details der Gestaltung des Anschlusses Innenwand zur Kellerdecke mit Kellerwand, zum Teil mit einem Kabelkanal entlang einer Innenwand.

## Wärmebrückenwirkung von Installationen in der Außenwanddämmung

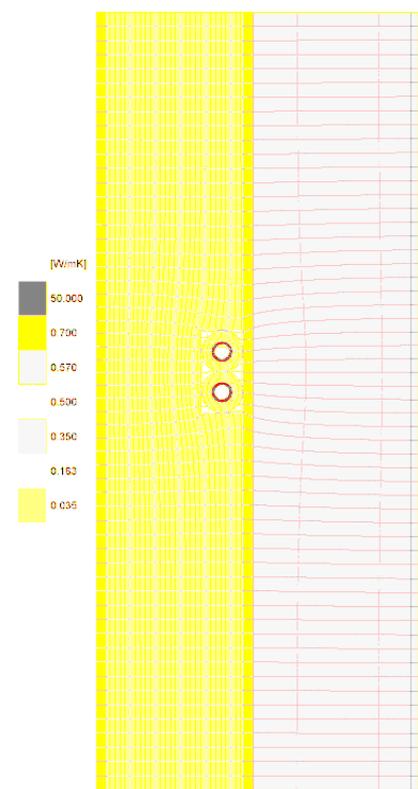
Verschiedene Leitungsführungen waren wegen der knappen Platzverhältnisse und der begrenzten statischen Tragfähigkeit der Konstruktion nur schwer innerhalb der Außenmauern der Gebäude unterzubringen. Es wurde daher auch aus Kostengründen entschieden, das Fallrohr der Abwasserleitung und die Zirkulationsleitungen der Solaranlagen an der Außenmauer entlang zu verlegen, weil dafür genügend Platz in der Dämmschicht vorhanden war. Dies verringert jedoch die Dämmschicht entlang der Leitungen entsprechend der Leitungsdurchmesser. Dasselbe gilt für die Verlegung der Dachrinne in einer Nische, die in Tevesstraße 36-46 straßenseitig notwendig wurde, weil dort das Gebäude direkt an den Gehweg grenzt.



**Abbildung 114: AW 260**  
 $U_{AW} = 0,122 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .  
 Abwasserleitung in Dämmebene verlegt:  
 $\Psi_a \text{ (IWKD)} = 0,016 \text{ W}/(\text{mK})$ .  
 $\vartheta_{\min} = 16,35^\circ\text{C}$ .



**Abbildung 115: AW 260**  
 $U_{AW} = 0,122 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .  
 Rücksprung für Regenrinne:  
 $\Psi_a \text{ (IWKD)} = 0,025 \text{ W}/(\text{mK})$ .  
 $\vartheta_{\min} = 16,7^\circ\text{C}$ .



**Abbildung 116: AW 260**  
 $U_{AW} = 0,122 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .  
 Solarleitungen in der Dämmebene verlegt:  
 $\Psi_a \text{ (IWKD)} = 0,004 \text{ W}/(\text{mK})$ .  
 $\vartheta_{\min} = 19,2^\circ\text{C}$

Siehe auch Abbildung 117 f und Tabelle 6

Um die daraus resultierenden zusätzlichen Wärmeverluste abzuschätzen und um die an diesen Stellen auftretenden Innenoberflächentemperaturen zu bestimmen, wurden zweidimensionale Wärmestromberechnungen durchgeführt, die in Abbildung 114 ff. und in Tabelle 6 dokumentiert sind. Die Nische für das Fallrohr der Regenrinne, Abbildung 117, verursacht den größten aber immer noch einen akzeptablen Wärmebrückeneffekt. Bei allen drei Details sind die Oberflächentemperaturen an den jeweiligen Innenoberflächen jedoch unkritisch.



**Abbildung 117:** Fallrohr der Abwasserleitungen wurden außen in der Dämmebene verlegt, vgl. auch Abbildung 114.



**Abbildung 118:** rechts oben: Verjüngung der Dämmschicht zur Verlegung des Regenfallrohrs zur Straßenseite Tevesstr 36-46, vgl. Abbildung 115.

Für die Nische in der Dämmschicht zur Aufnahme von Briefkästen in Abbildung 119 gilt dies ebenfalls: solange solche Flächen relativ klein bleiben und die verbleibende Dämmschichtstärke nicht weniger als 10 cm beträgt sind sie bauphysikalisch unkritisch und in der Energiebilanz verkraftbar, bzw. wie bei diesen großen Gebäuden kaum bemerkbar. Hinweis: das gilt allerdings nur, solange die Regeldämmstärke mehr als 200 mm beträgt, wie das im vorliegenden Projekt der Fall war.

Haustechnische Leitungen wurden im Projekt Tevesstraße ebenfalls zum Teil in der Dämmebene verlegt. Das sind zum einen die Vor- und Rücklaufleitungen zu den Solarkollektoren und die Fallrohre der Abwasserleitungen.



**Abbildung 119: Verjüngung der Dämmschicht wegen Aussparung zur Aufnahme von Briefkästen. Solange eine minimale Dämmschicht von etwa 100 mm stehen bleibt und die Regeldämmstärke größer als 200 mm ist sind solche kleinen Flächen mit geringerer Dämmstärke unproblematisch.**



**Abbildung 120: Sie Vor- und Rücklaufleitungen zu den Solar-kollektoren wurden außen in der Dämmebene verlegt, die Hohlräume wurden später noch ausgeschäumt, vgl. Abbildung 116 .**



**Abbildung 121: Solarleitungen am Übergang vom DG (Holz-Leichtbau-Elemente) zum Bestandsgebäude. Die Leitungen verschwanden später vollständig hinter der Wärmedämmung.**

## Balkone im Nachbarhaus

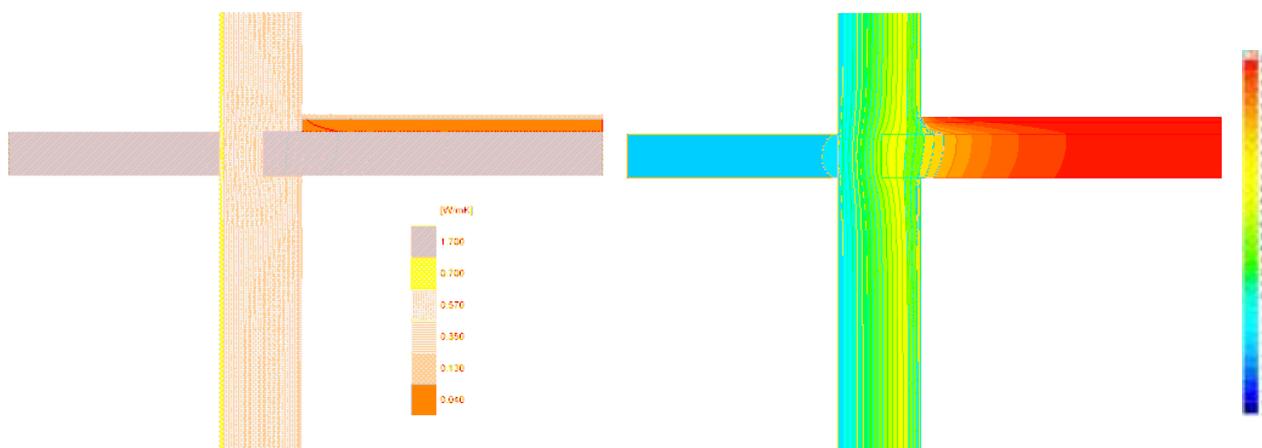


Abbildung 122: AWD260  $U_{AW} = 1,31 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Zwischendecke eingebunden in Außenwand. Balkonplatte jedoch stumpf auf Außenwand gestoßen.

Nicht gedämmte Außenwand verursacht niedrige Innenoberflächentemperaturen und insgesamt hohe Wärmeverluste. Dämmung von mindestens 5...10 cm Stärke ist unbedingt empfehlenswert. Resultierende Wärmebrückenverluste:  $\Psi_a = 0,076 \text{ W}/(\text{mK})$ .  $\vartheta_{\min} = 10,3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

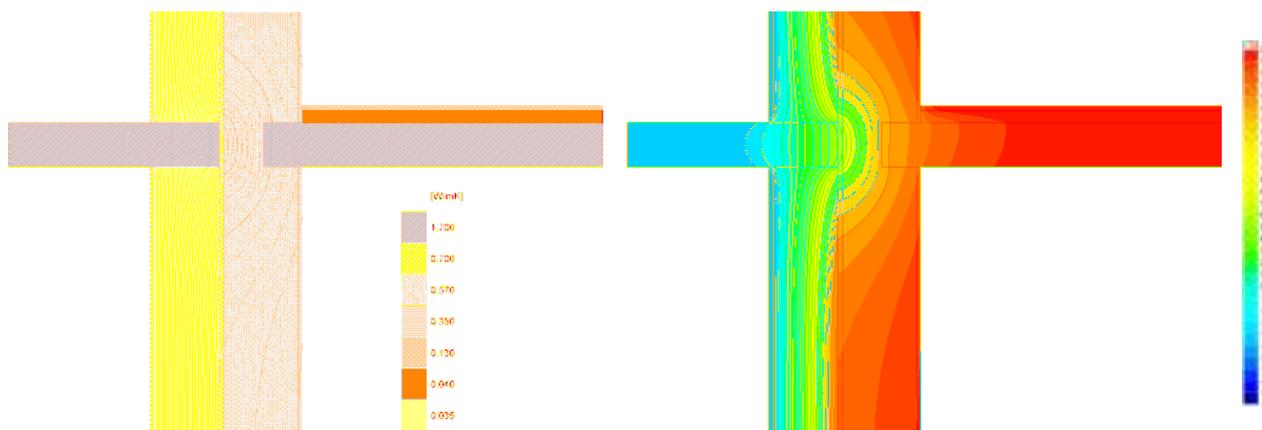


Abbildung 123: AWD260  $U_{AW} = 0,122 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Zwischendecke eingebunden in Außenwand. Balkonplatte jedoch stumpf auf Außenwand gestoßen.

Innenoberflächentemperaturen sind dann unkritisch, weil die Dämmung die WB wirkungsvoll entschärft. Resultierende Wärmebrückenverluste:  $\Psi_a = 0,36 \text{ W}/(\text{mK})$ .  $\vartheta_{\min} = 16,4 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Die Berechnungen wurden unter der Annahme durchgeführt, dass die Balkonplatte vom Nachbarhaus (Herzheimerstraße) nicht in die Wand Tevesstraße einbindet. Dies scheint plausibel, da es sich um zwei getrennte Gebäude handelt. Die so berechneten Innenoberflächentemperaturen sind jetzt nach der Sanierung, d.h. nach der Ausführung der Außendämmung überall akzeptabel.

Die Innenthermografie (Abbildung 126) bestätigt diese Annahme: an dieser Stelle sind die Oberflächentemperaturen zwar geringer aber trotzdem überall akzeptabel, d.h. es muss an keiner Stelle mit Schimmelgefahr gerechnet werden.

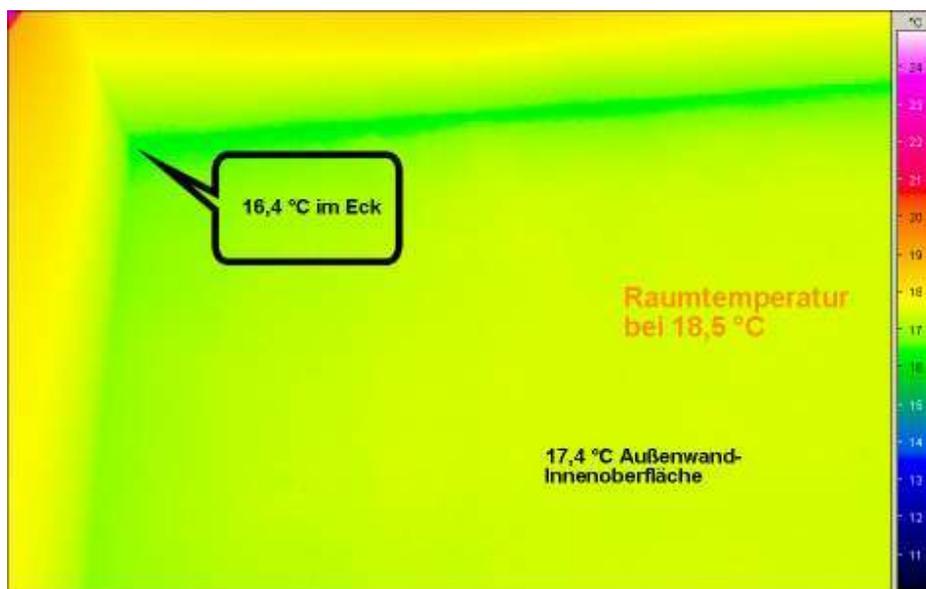
Die zusätzliche Dämmung im Balkonbereich fehlt auf den Bildern Abbildung 124 noch, wurde aber später nachgerüstet.



**Abbildung 124:** Anschluss Tevesstraße 36 zum Nachbargebäude Herxheimerstraße während der Bauzeit. Die Trennwand ist auch im Nischenbereich der Balkone zweischalig aufgebaut mit einer hohlen Trennfuge von 20...50 mm.



**Abbildung 125:** links im Bild die Dämmung am Gebäude Tevesstraße 36. Im Bereich der Balkone

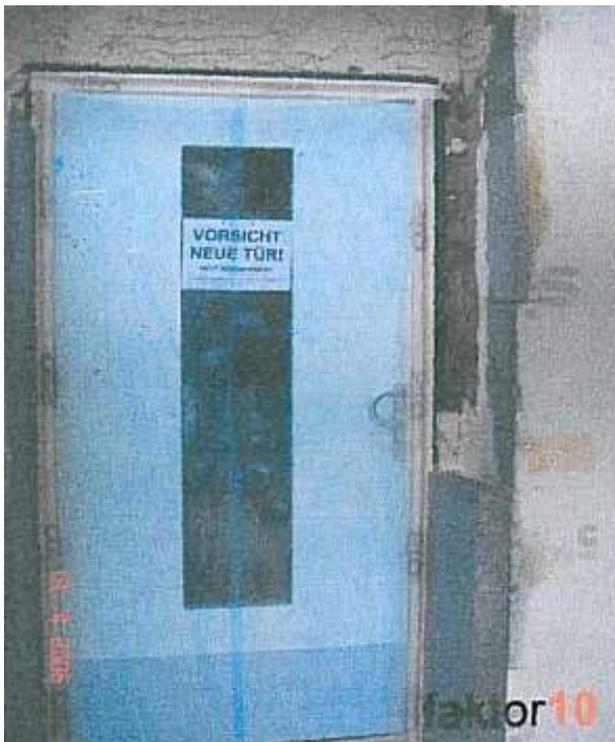


**Abbildung 126:** Innenthermografie im EG Tevesstraße 36 zum Nachbarhaus im Bereich der angrenzenden Balkone. Die Oberflächentemperaturen in der Kante sind signifikant niedriger als in anderen Kanten, aber immer noch unkritisch.

Außentemperatur zur Zeit der Messung etwa 0°C. Wohnung mäßig temperiert (18.5°C) da unbewohnt, .vgl. auch Abbildung 169 und Abbildung 183

## Haustür

Die Hauseingangstüre wurde als passivhaustaugliches Element ausgeführt. Die Tür sitzt auf einer Schwelle aus PU-Recyclingmaterial und wie alle Fenster vor dem alten Mauerwerk in der Dämmebene. Die Einbauwärmebrücke konnte somit auf ein Mindestmaß reduziert werden. Die Tür hat umlaufende Dichtungen und an der Schwelle eine elektromechanische Absenkdichtung und ist somit gut luftdicht. Der elektromechanische Schließmechanismus war in der Anfangszeit etwas fehleranfällig.



**Abbildung 127: Luftdichter und Wärmebrückenfreier Einbau der Hauseingangstür.**



Der Anschlag der alten Haustür wurde fast vollständig entfernt. Der luftdichte Einbau der neuen Tür wurde mit eingeputzten Dichtbändern in Kombination mit Kompribändern und einer Dichtlippe mit einputzbarem Gewebe realisiert.



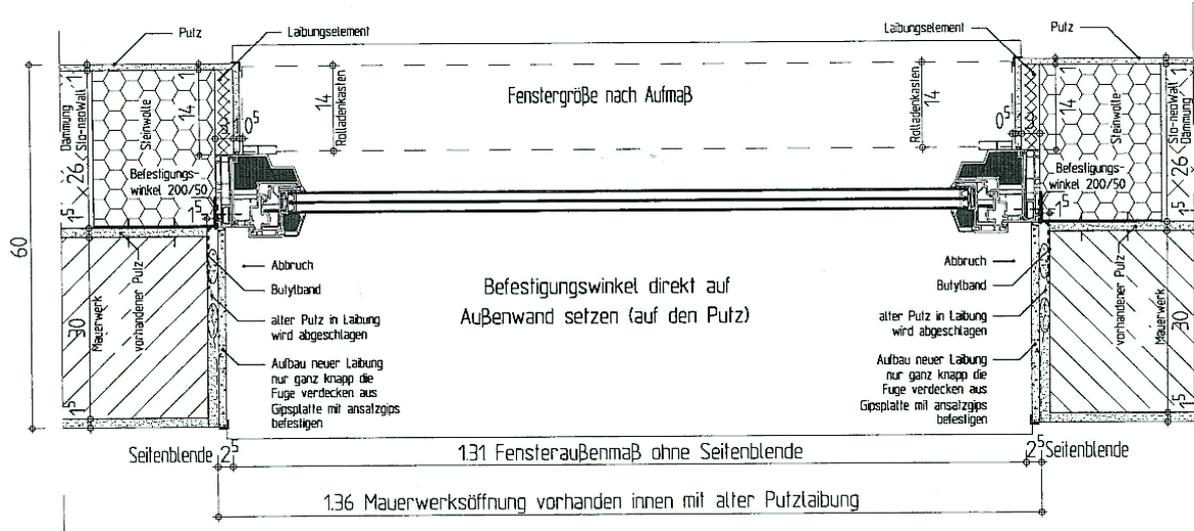


Abbildung 130: Horizontalschnitt Fenstereinbau, Detail [faktor10]

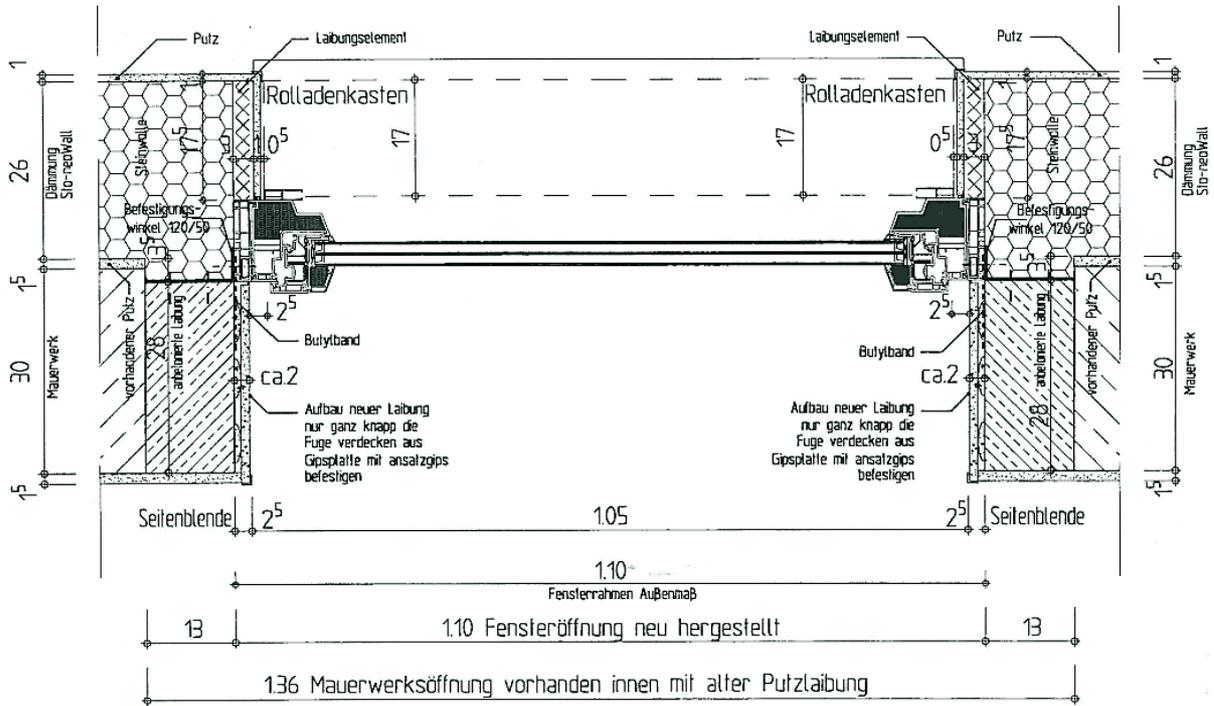


Abbildung 131: Horizontalschnitt Fenstereinbau, Detail [faktor10]



**Abbildung 132: Mauerwerksöffnung nach dem Abbau des alten Anschlags, vorbereitet zum Einbau des neuen Fensters.**



**Abbildung 133: Fenstereinbau in der Dämmebene mit teilweise schon angesetztem Wärmedämmverbundsystem**



**Abbildung 134: Standard Fenster Einbausituation mit Kantholz als Auflager und Einbauhilfe sowie Stahlwinkeln zur seitlichen Befestigung.**

## Wärmebrücken beim Fenstereinbau – Diskussion von Varianten während der Planung

Der Einbau der Fenster und die damit verbundenen Wärmebrückeneffekte wirken sich stärker auf den Heizwärmebedarf aus als diejenigen am Kellersockelanschluss des Gebäudes, weil die relevanten Längen, d.h. die Umfänge aller Fenster zusammengekommen, bedeutend größer sind. Der Einbau des Fensters in der Dämmebene stellt sich energetisch gesehen erwartungsgemäß als die beste Lösung heraus (Tabelle 7, Tabelle 8 und Tabelle 9). Die  $\Psi$ -Werte erhöhen sich stark, wenn das Fenster nach innen auf das Mauerwerk gerückt wird. Die Anordnung 'Rahmen Außenbündig im Mauerwerk' hat mit  $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,07 \text{ W/(mK)}$  einen fast um das vierfache höheren  $\Psi$ -Wert im Vergleich zur optimalen Lösung mit  $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,017 \text{ W/(mK)}$ . Die U-Werte des eingebauten Fensters verschlechtern sich dementsprechend auf Werte von  $U_{W,\text{eingebaut}} = 1,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  gegenüber  $U_{W,\text{eingebaut}} = 0,84 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ . Der Unterschied der beiden Varianten (alle Fenster optimal bzw. nicht optimal platziert) in der Gesamtenergiebilanz würde etwa  $1 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$  betragen, vgl. Tabelle 23 und Tabelle 24 in Abschnitt 5. Wir empfehlen deshalb die Fenster nach außen in die Dämmebene zu rücken, wie dies bei Passivhäusern auch sonst üblich ist.

Bei der letztendlich realisierten Ausführung wurde etwa ein Drittel der Fenster aus baupraktischen Gründen teilweise nach innen ins Mauerwerk gerückt. Die Auswirkung in Summe auf die Gesamtenergiebilanz ist zwar gering, der Einfluss auf die Innenoberflächentemperaturen ist bei einzelnen Details jedoch kritisch, bzw. nur gerade noch akzeptabel. Hier bestätigt sich die Erfahrung aus dem Neubau, dass bekanntermaßen kritische Details nur nach eingehender Untersuchung der Auswirkung auf die relevanten Oberflächentemperaturen realisiert werden sollten.

Im Folgenden sind die wichtigsten Anschlussdetails dargestellt. Eine Grafik zeigt jeweils die Materialzusammenstellung mit den einzelnen Wärmeleitfähigkeiten im Querschnitt und Isothermenlinien im Abstand von 1 Kelvin Temperaturdifferenz. Eine zweite Grafik zeigt die Isothermen als Farbkodierung zwischen rot ( $20^\circ\text{C}$ ) und blau ( $-10^\circ\text{C}$ ). Die Farbkodierung ist überall gleich. Die Aufstellung von Abbildungen und Tabellen kann als Wärmebrückenkatalog für Sanierungsprojekte herangezogen werden, es besteht jedoch kein Anspruch auf Vollständigkeit.

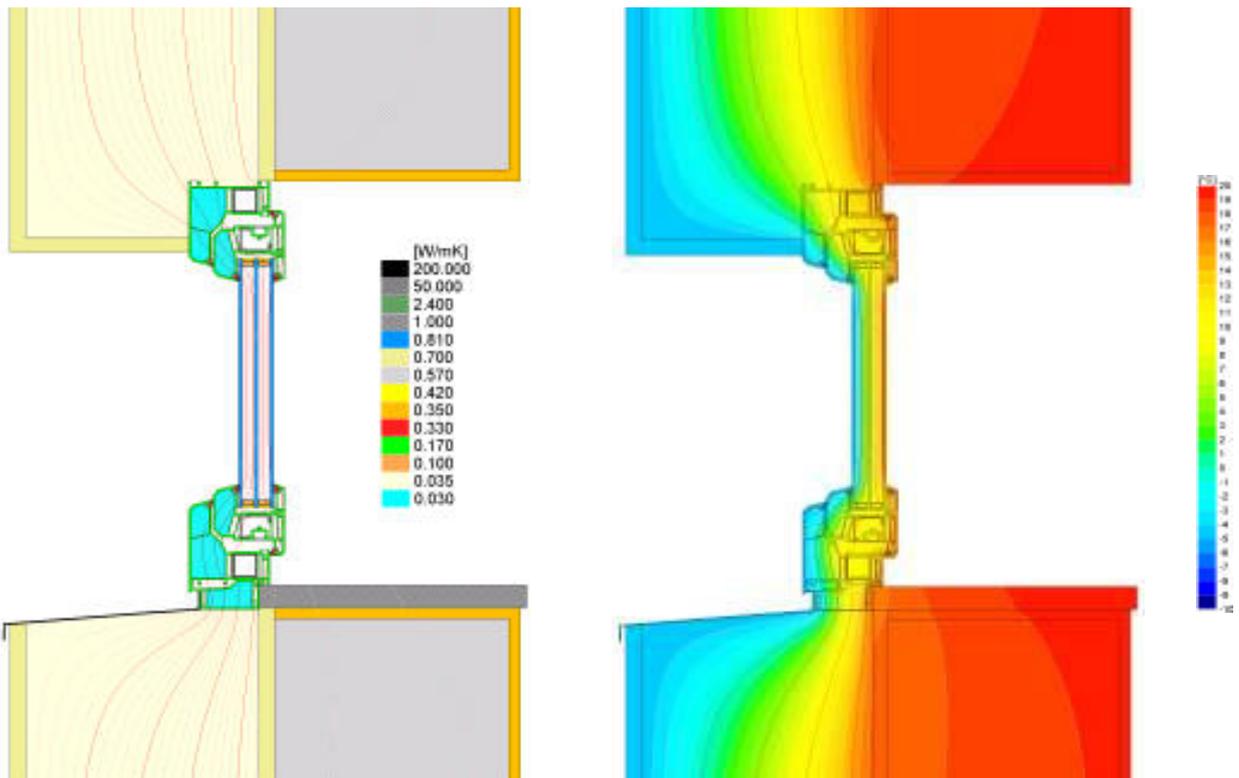


Abbildung 135: vEinbau0. Fenster ganz nach außen in die Dämmebene gerückt.

$\Psi_{\text{Einbau (oben/seitlich)}} = 0,010 \text{ W/(mK)}$   $\Psi_{\text{Einbau (unten)}} = 0,058 \text{ W/(mK)}$

Mittelwert:  $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,021 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  Fenster-U-Wert  $U_{\text{W}} = 0,86 \text{ W/(m}^2\text{K)}$   $\vartheta_{\text{min}} = 14,1 \text{ }^\circ\text{C}$

$U_{\text{Wand}} = 0,107 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  300 mm WDVS.

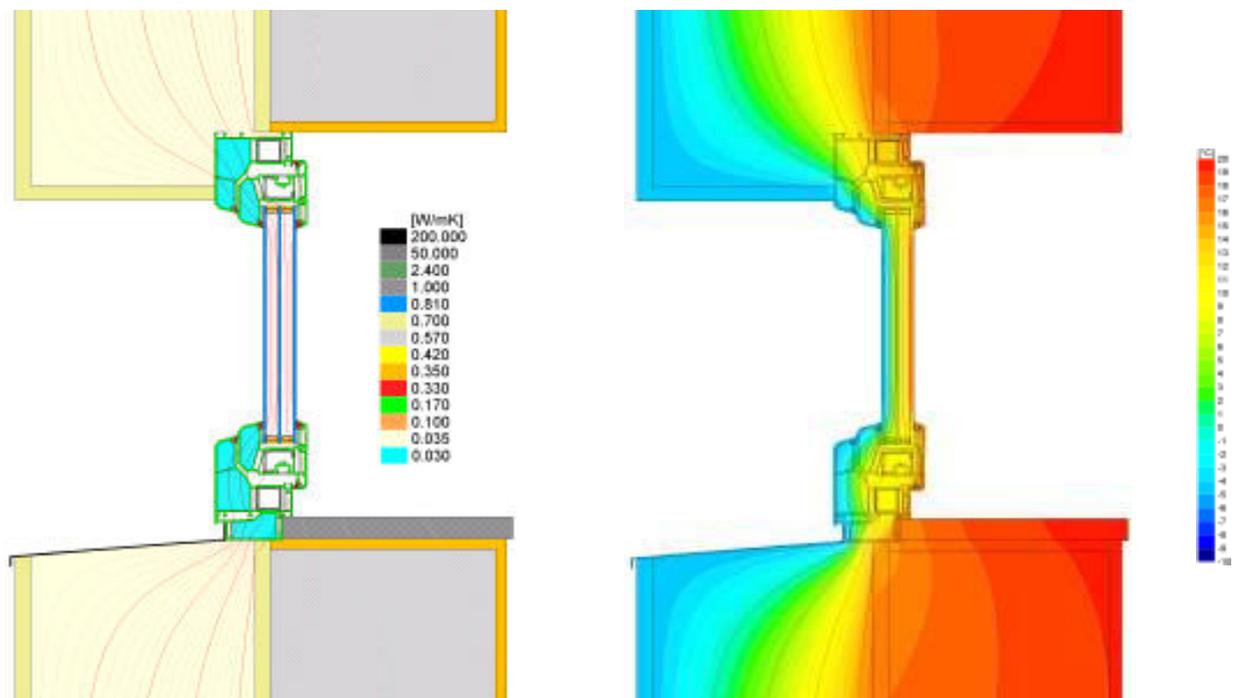
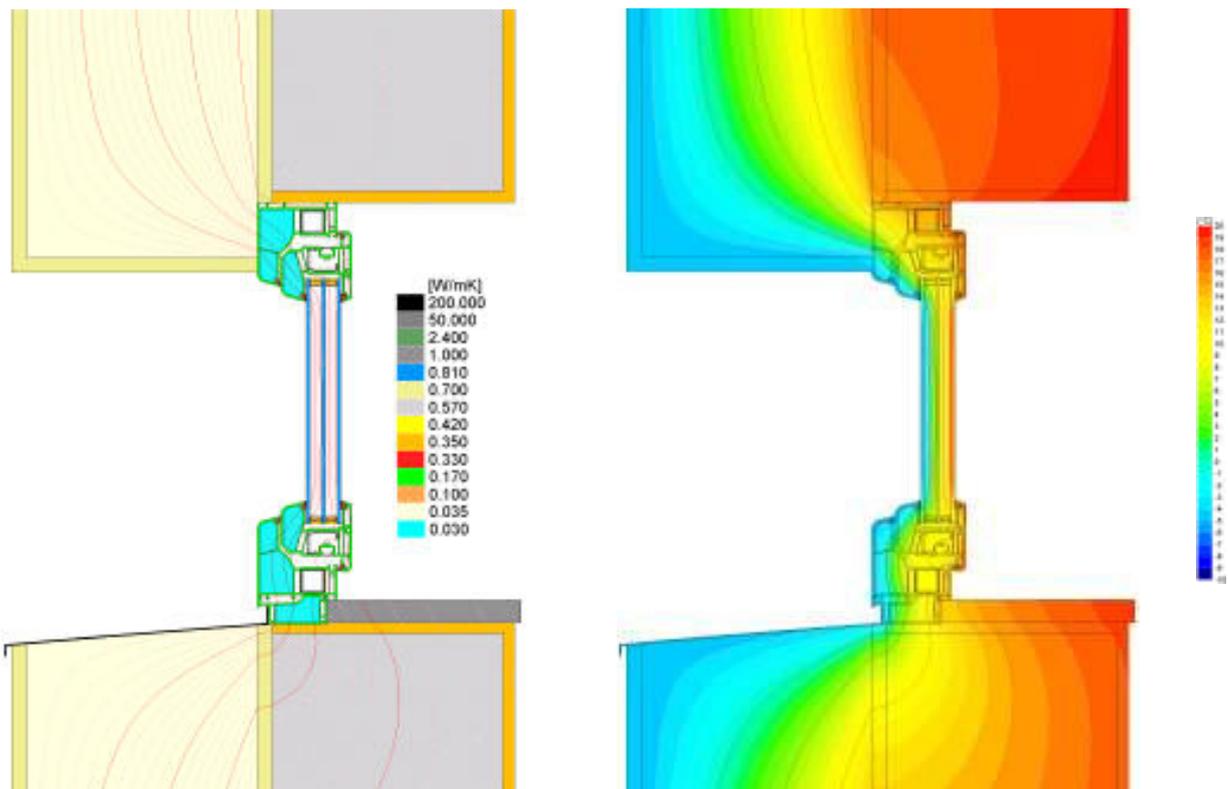


Abbildung 136: vEinbau1. Fenster halb nach innen gerückt.

$\Psi_{\text{Einbau (oben/seitlich)}} = 0,006 \text{ W/(mK)}$   $\Psi_{\text{Einbau (unten)}} = 0,076 \text{ W/(mK)}$

Mittelwert:  $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,022 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  Fenster-U-Wert  $U_{\text{W}} = 0,87 \text{ W/(m}^2\text{K)}$   $\vartheta_{\text{min}} = 14,2 \text{ }^\circ\text{C}$

$U_{\text{Wand}} = 0,107 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  300 mm WDVS.



**Abbildung 137: vEinbau2. Fenster außenbündig auf das Mauerwerk gesetzt.**

$\Psi_{\text{Einbau (oben/seitlich)}} = 0,020 \text{ W/(mK)}$      $\Psi_{\text{Einbau (unten)}} = 0,261 \text{ W/(mK)}$

**Mittelwert:  $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,075 \text{ W/(m}^2\text{K)}$**

**Fenster-U-Wert  $U_w = 1,03 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ,  $\vartheta_{\text{min}} = 13,7 \text{ }^\circ\text{C}$**

**$U_{\text{Wand}} = 0,107 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  300 mm WDVS.**

Eine erste Frage ist immer die nach der optimalen bzw. kostengünstigsten Einbau-  
position des Fensters. Auch im Projekt Tevesstraße wurde dies diskutiert. Daher  
wurden in Abbildung 135 ff die drei gängigsten Positionen exemplarisch dargestellt  
und durchgerechnet:

Einbau0: optimal in der Dämmebene

Einbau1: leicht eingerückt um leichter befestigen zu können

Einbau2: außenbündig auf Mauerwerk, um ohne Ausklinken überdämmen zu können

Es ist bekannt, dass 'Einbau1' von den Kennwerten her noch akzeptabel ist, 'Einbau2'  
aber in keinem Fall empfohlen werden kann. Siehe dazu auch die Modifikationen in  
Abbildung 153 ff.

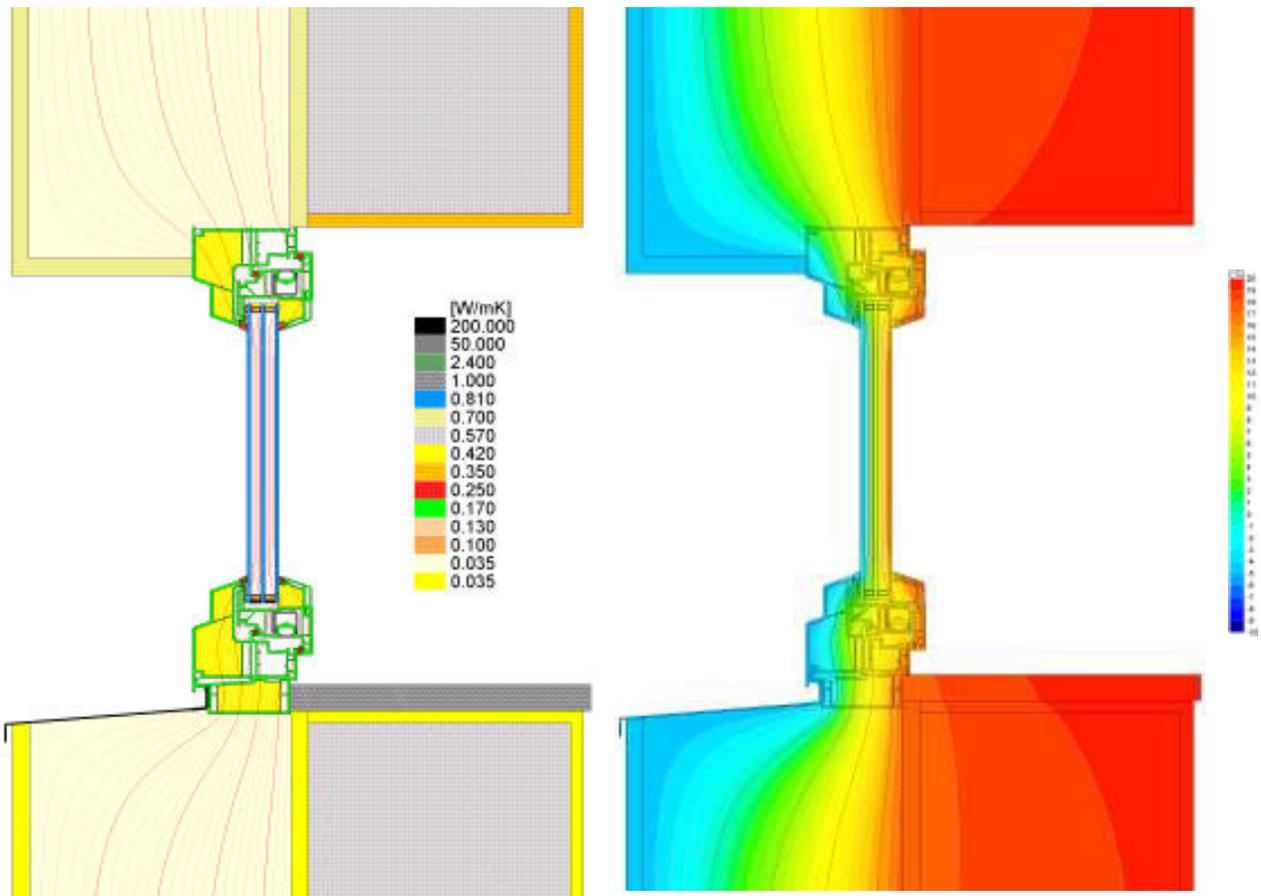


Abbildung 138: rEinbau0. Fenster ganz außen in Dämmebene gesetzt, Rahmen in Laibung und Sturz überdämmt.  $\Psi_{\text{Einbau}}$  (oben/seitlich) = 0,009 W/(mK)

$\Psi_{\text{Einbau}}$  (unten) = 0,042 W/(mK)

Mittelwert:  $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,017 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ,

Fenster-U-Wert  $U_{\text{W}} = 0,84 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

$\vartheta_{\text{min}} = 15,1 \text{ }^\circ\text{C}$  am Brüstungsanschluss,

$\vartheta_{\text{min}}$  (innen) = 15,5 °C an Sturz/Laibung

$U_{\text{Wand}} = 0,107 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  300 mm WDVS.

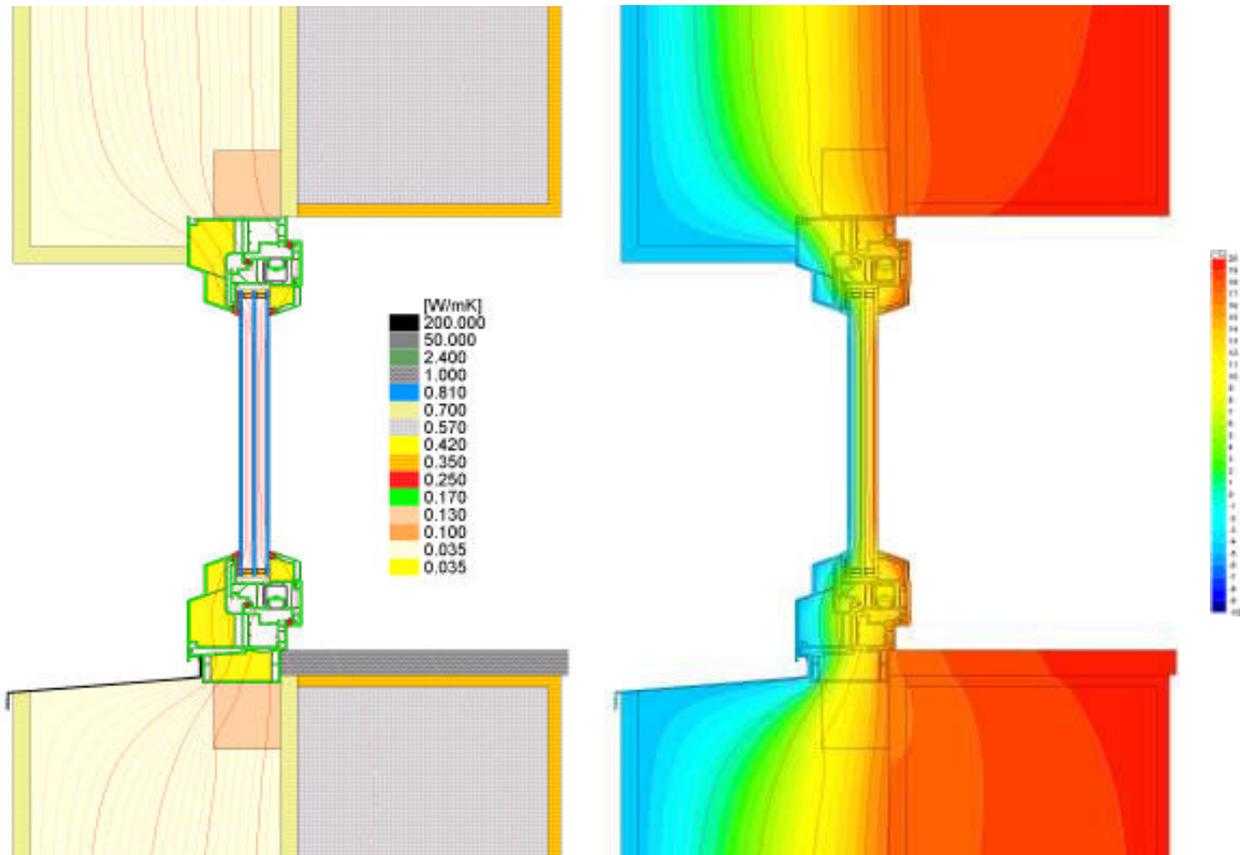


Abbildung 139 oben: rEinbau01, WDVS 300 mm. Fenster ganz außen in der Dämmebene, Kantholz 10 cm x 10 cm als Blindstock rund um das Fenster,

Rahmen in Laibung und Sturz überdämmt.

$\Psi_{\text{Einbau (oben/seitlich)}} = 0,020 \text{ W/(mK)}$

$\Psi_{\text{Einbau (unten)}} = 0,062 \text{ W/(mK)}$

Mittelwert:  $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,030 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Fenster-U-Wert  $U_{\text{W}} = 0,88 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

$\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,1 \text{ }^\circ\text{C}$  am Brüstungsanschluss,

$\vartheta_{\text{min (Holz)}} = 3,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

$\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,8 \text{ }^\circ\text{C}$  an Sturz/Laibung,

$\vartheta_{\text{min (Holz)}} = 9,3 \text{ }^\circ\text{C}$

$U_{\text{Wand}} = 0,107 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  300 mm WDVS.

Unten links: prototypischer Fenstereinbau bei der Musterwohnung Tevesstraße 54 EG links. Blindstock rund um das Fenster aus Holz. Überdämmung in Laibung. Gedämmte Rahmenaufdopplung im Sturz zur späteren Platzierung eines Rollladens.

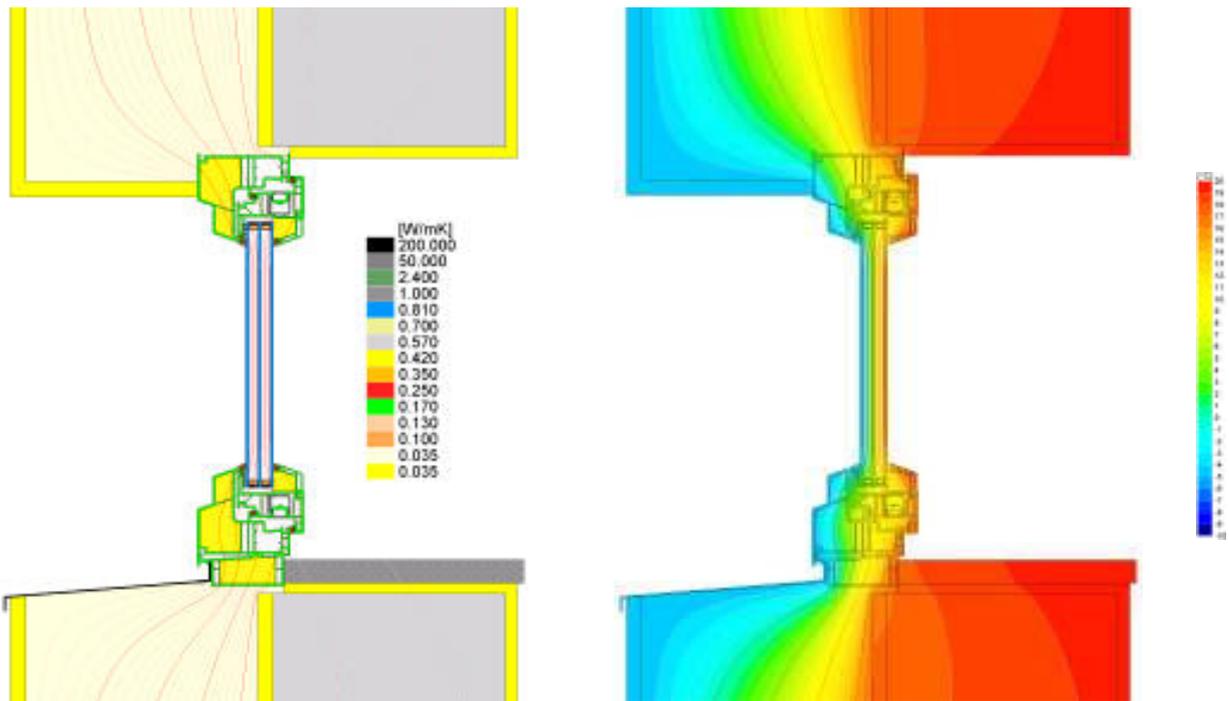


Abbildung 140: rEinbau1. Fenster teilweise auf Mauerwerk aufgesetzt.

$\Psi_{\text{Einbau (oben/seitlich)}} = 0,015 \text{ W/(mK)}$

Mittelwert:  $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,024 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

$\vartheta_{\text{min}} = 15,1 \text{ }^\circ\text{C}$  am Brüstungsanschluss

$U_{\text{Wand}} = 0,107 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  300 mm WDVS.

$\Psi_{\text{Einbau (unten)}} = 0,053 \text{ W/(mK)}$

Fenster-U-Wert  $U_{\text{W}} = 0,86 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

$\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,7 \text{ }^\circ\text{C}$  an Sturz/Laibung

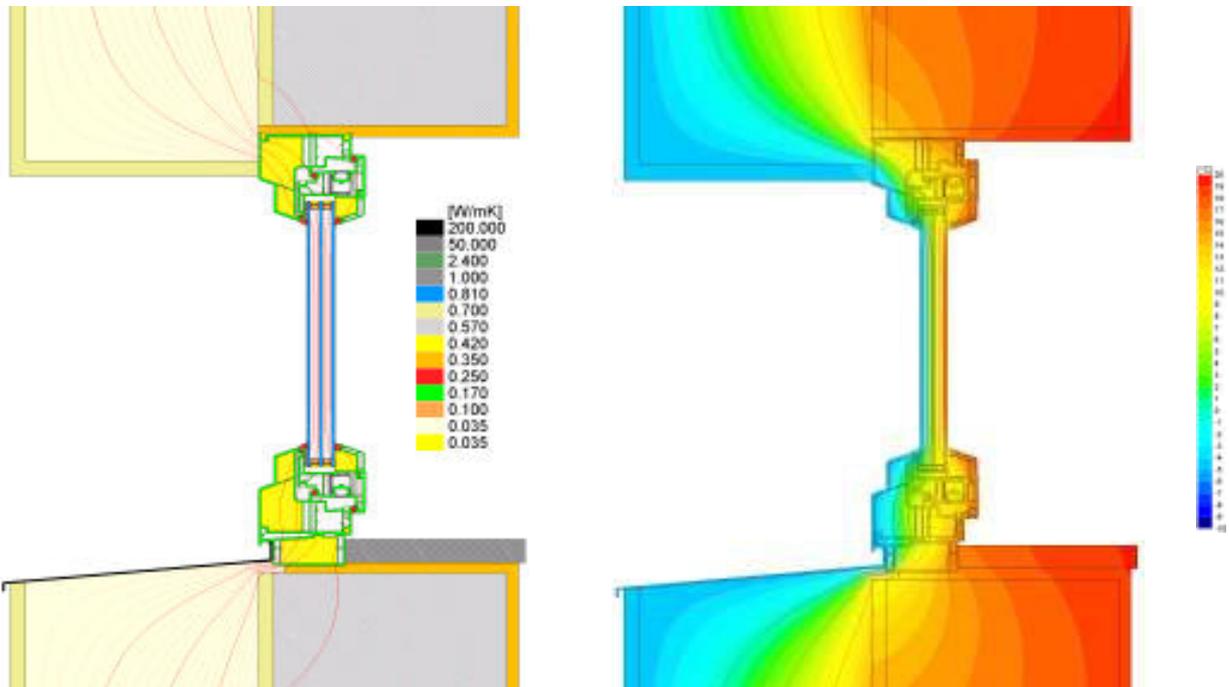


Abbildung 141: rEinbau2. Fenster eingerückt auf Mauerwerk.

$\Psi_{\text{Einbau (oben/seitlich)}} = 0,050 \text{ W/(mK)}$

Mittelwert:  $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,068 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

$\vartheta_{\text{min}} = 15,1 \text{ }^\circ\text{C}$  am Brüstungsanschluss

$U_{\text{Wand}} = 0,107 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  300 mm WDVS.

$\Psi_{\text{Einbau (unten)}} = 0,129 \text{ W/(mK)}$

Fenster-U-Wert  $U_{\text{W}} = 0,99 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

$\vartheta_{\text{min (innen)}} = 16,02 \text{ }^\circ\text{C}$  an Sturz/Laibung

Detail (Dateiname)	vEinbau0	vEinbau1	vEinbau2	rEinbau0	rEinbau01	rEinbau1	rEinbau2
Bemerkung	AW 300	AW 300	AW 300	AW 300	AW 300 Holzklotz	AW 300	AW 300
Außenwand U (W/m²K)	0,107	0,107	0,107	0,107	0,107	0,107	0,107
Rahmen-U-Wert U <sub>r</sub> (W/m²K)	0,734	0,734	0,734	0,703	0,703	0,703	0,703
Ψ <sub>g</sub> (W/(mK))	0,037	0,037	0,037	0,035	0,035	0,035	0,035
Ψ <sub>Einbau</sub> seitl/oben (W/(mK))	0,010	0,006	0,020	0,009	0,020	0,015	0,050
Ψ <sub>Einbau</sub> unten (W/(mK))	0,058	0,076	0,261	0,042	0,062	0,053	0,129
Mittelwert Ψ <sub>Einbau</sub> (W/(mK))	<b>0,021</b>	<b>0,022</b>	<b>0,075</b>	<b>0,017</b>	<b>0,030</b>	<b>0,024</b>	<b>0,068</b>
Fenster U-Wert U <sub>w, eingebaut</sub> (1,23 m x 1,48 m)	<b>0,86</b>	<b>0,87</b>	<b>1,03</b>	<b>0,84</b>	<b>0,88</b>	<b>0,86</b>	<b>0,99</b>

Minimale Oberflächentemp bei -5°C Außentemperatur	<b>14,1°C</b>	<b>14,2°C</b>	<b>13,7°C</b>	<b>15,1°C</b>	<b>innen 15,1°C Holz 3°C</b>	<b>15,1°C</b>	<b>15,1°C</b>
--	---------------	---------------	---------------	---------------	----------------------------------	---------------	---------------

	Abbildung 135	Abbildung 136	Abbildung 137	Abbildung 138	Abbildung 139	Abbildung 140	Abbildung 141
--	---------------	---------------	------------------	------------------	------------------	---------------	------------------

**Tabelle 7: Varianten Fenstereinbau bei zwei verschiedenen Fensterfabrikaten, die in der engeren Auswahl des Architekten waren. Wandaufbau: 300 mm Wärmedämmverbundsystem auf bestehendem Mauerwerk.**

Kurzbezeichnung der dargestellten Varianten, soweit nicht explizit im Text oder in der Beschreibung der jeweiligen Abbildung genannt:

Einbau0: Fenster sitzt ganz außen in der Dämmebene.

Einbau01: Fenster sitzt ganz außen in der Dämmebene,  
Kantholz 80 mm x 80 mm als Auflager

Einbau1: Fenster halb nach innen gerückt.

Einbau2: Fensterrahmen ganz nach innen,  
d.h. außenbündig auf Mauerwerk gesetzt.

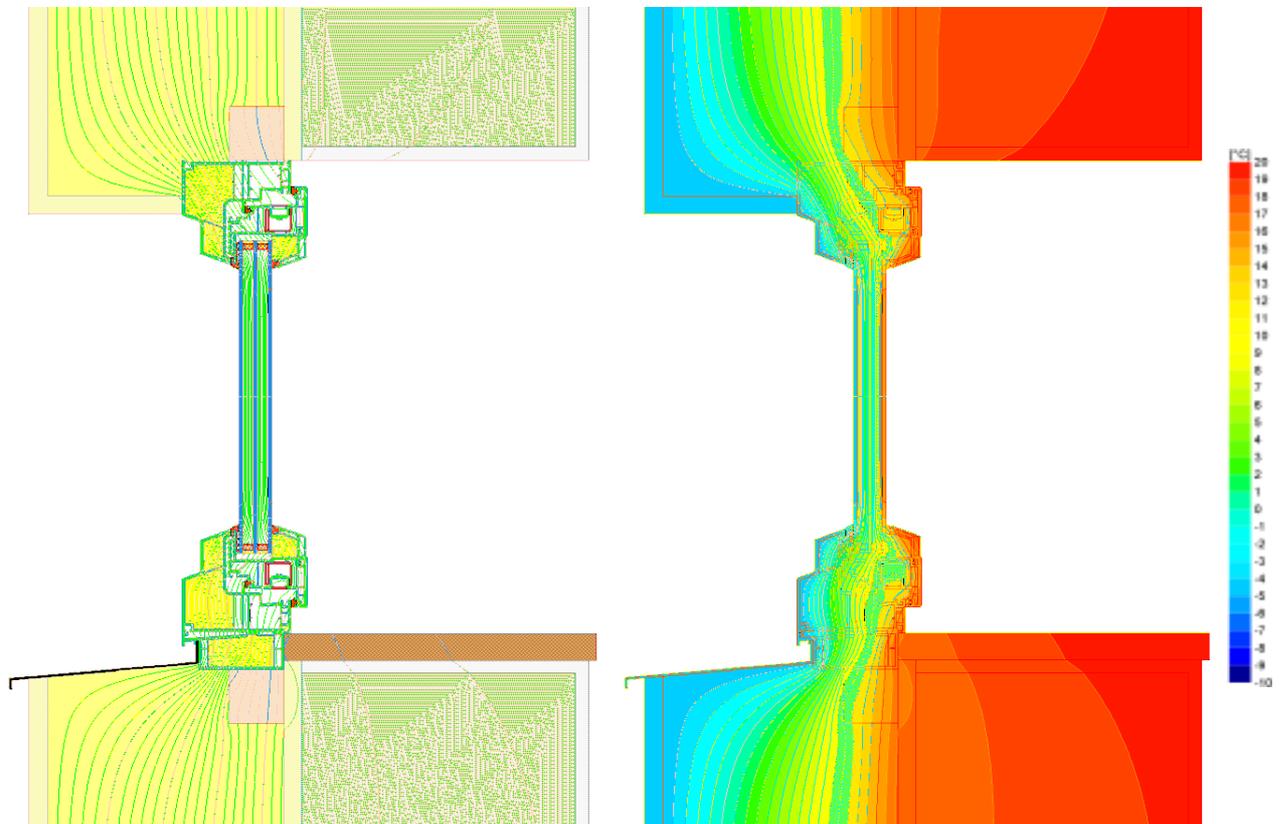
### Fenstereinbau – realisierte Details

Der Fenstereinbau wurde im Zuge der Realisierung der Musterwohnung ebenfalls untersucht. Der ursprüngliche Vorschlag war, das Fenster zusammen mit einem Einbaurahmen aus Holz komplett zu montieren wie in Abbildung 139 dargestellt und in Abbildung 142 berechnet. Dieser Ansatz wurde verworfen, weil das Gewicht dieser Elemente viel zu groß gewesen wäre und der Platz hinter dem Gerüst nicht ausgereicht hätte, um mit den Elementen zu hantieren.

Schließlich wurde der Einbau wie in Abbildung 146 realisiert. Der Rahmen ist seitlich und oben leicht überdämmt. Es wird nur eine Holzbohle unter dem Brüstungsprofil realisiert. Diese Bohle kann sehr einfach nivelliert und befestigt werden. Anschließend kann das ganze Fensterelement dort einfach aufgesetzt und seitlich mit Stahlwinkeln zusätzlich verschraubt werden.

Die Holzbohle ist in der Regel vor Feuchtigkeit geschützt, weil sie unter der Fensterbank montiert ist. Daher dürfte es unkritisch sein, wenn die bestimmte minimale Temperatur an dieser Stelle unter 10 °C liegt. Überall dort, wo Feuchtigkeit zu be-

fürchten ist, z.B. an Austritten von Balkontüren wurden Bohlen aus PU-Recyclingmaterial verwendet, das gegen Feuchte unempfindlich ist, vgl. Abbildung 157.



**Abbildung 142: rEinbau02, 260 mm WDVS. Fenster in der Dämmebene, Kanthölzer 6 cm x 6 cm umlaufend als Blindstock, Rahmen in Laibung und Sturz voll überdämmt.**

$\Psi_{\text{Einbau (oben/seitlich)}} = 0,014 \text{ W/(mK)}$

**Mittelwert:  $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,022 \text{ W/(m}^2\text{K)}$**

$\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,1 \text{ }^\circ\text{C}$  am Brüstungsanschluss,

$\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,8 \text{ }^\circ\text{C}$  an Sturz/Laibung,

$U_{\text{Wand}} = 0,122 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  260 mm WDVS.

$\Psi_{\text{Einbau (unten)}} = 0,050 \text{ W/(mK)}$

**Fenster-U-Wert  $U_{\text{W}} = 0,85 \text{ W/(m}^2\text{K)}$**

$\vartheta_{\text{min (Holz)}} = 6,3 \text{ }^\circ\text{C}$

$\vartheta_{\text{min (Holz)}} = 11,3 \text{ }^\circ\text{C}$

Die Überdämmung der Fensterrahmen in der Laibung wurde mit vorgefertigten verputzten Laibungsdämmplatten realisiert, vgl. Abbildung 143. Dies erspart ein Ausklinken der Dämmplatten, was baupraktisch bei den Mineralwollestreifen rund um die Fenster nur sehr schwierig realisierbar gewesen wäre. Außerdem können mit diesen Platten die Oberflächen in den Laibungen rationell hergestellt werden. In Abbildung 144 rechts sind Endschienen auf dem Rahmen dargestellt, welche die Platten aufnehmen, daneben erkennt man wie die Laibungsplatte gesetzt wurde.

Alle weiteren Varianten beziehen sich auf Rahmenaufdopplungen, zusätzliche Rollladenkasten und eine starke Einrückung des Rahmens auf das Mauerwerk. Die einzelnen Varianten sind jeweils bei den Grafiken erläutert.



**Abbildung 143:** Rechts: gedämmte Laibungsplatten zur rationellen Herstellung der Oberflächen in der Fensterlaibung. Gleichzeitig dient die 3 cm starke Dämmung der Überdämmung des Fensterrahmens, vgl. Abbildung 142. Oben: Detailaufnahme.



**Abbildung 144:** links: Montage der gedämmten Laibungsplatten mittels PU-Kleber. Rechts: Putzendschienen zur Aufnahme der Laibungsplatten. Fotos[faktor10]

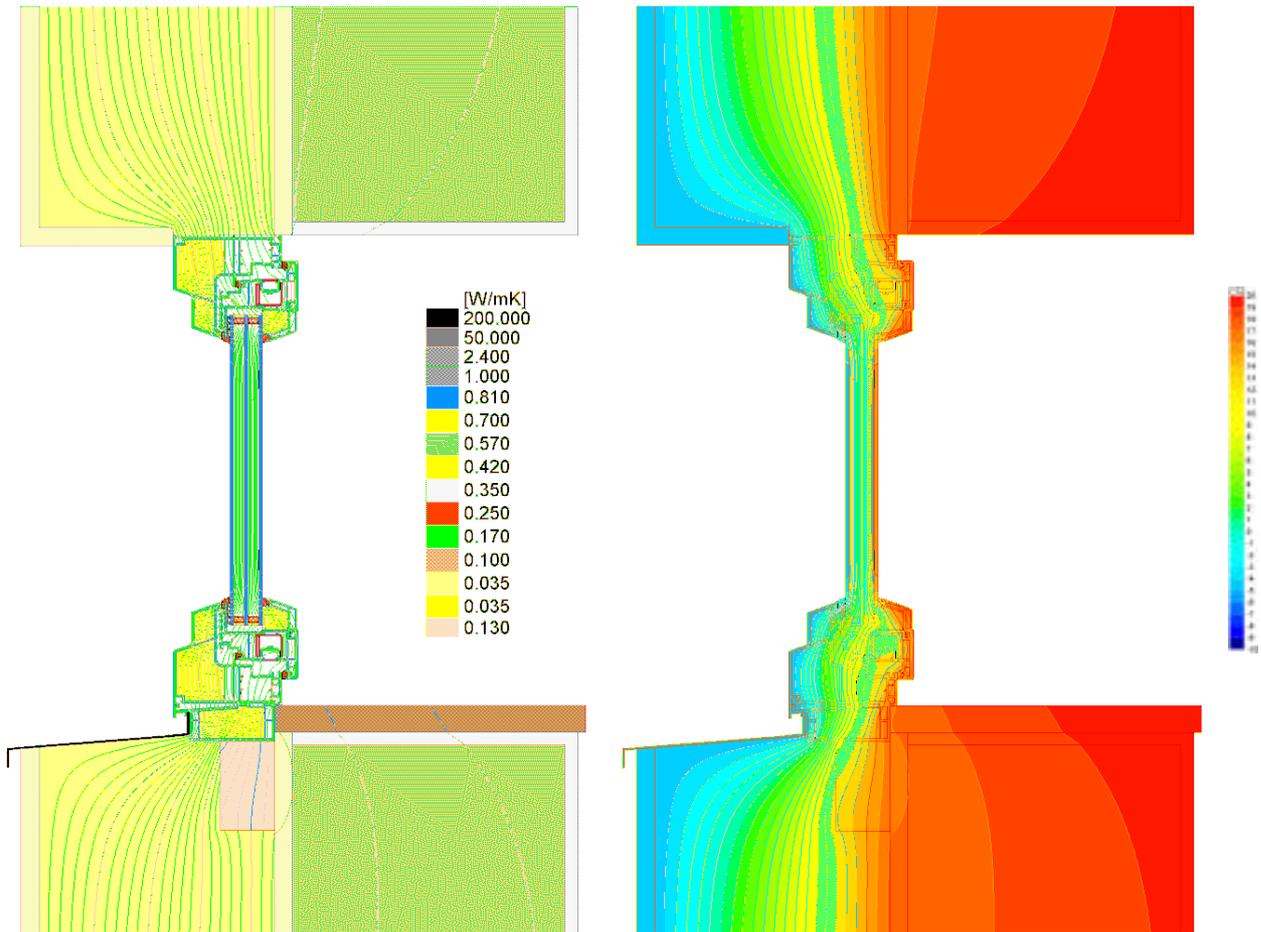


Abbildung 145: rEinbau03 WDVS 260 mm. Fenster in der Dämmebene angeordnet, unter dem Brüstungsprofil ein Kantholz 6 cm x 10 cm als Auflager, Rahmen in Laibung und Sturz nicht überdämmt.  
 $\Psi_{\text{Einbau (oben/seitlich)}} = 0,016 \text{ W/(mK)}$   
 $\Psi_{\text{Einbau (unten)}} = 0,053 \text{ W/(mK)}$   
 Mittelwert:  $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,024 \text{ W/(m}^2\text{K)}$   
 Fenster-U-Wert  $U_{\text{W}} = 0,86 \text{ W/(m}^2\text{K)}$   
 $\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,1 \text{ }^\circ\text{C}$  am Brüstungsanschluss,  
 $\vartheta_{\text{min (Holz)}} = 3,4 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,4 \text{ }^\circ\text{C}$  an Sturz/Laibung  
 $U_{\text{Wand}} = 0,122 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ .

Unten links: Kantholz als Auflager für die Fenster. Diese Lösung ist auch baupraktisch optimal, da so das Auflager einfach nivelliert und das Fenster anschließend zur Montage darauf abgestellt werden kann. Die Befestigung mit Winkeln geschieht additiv.

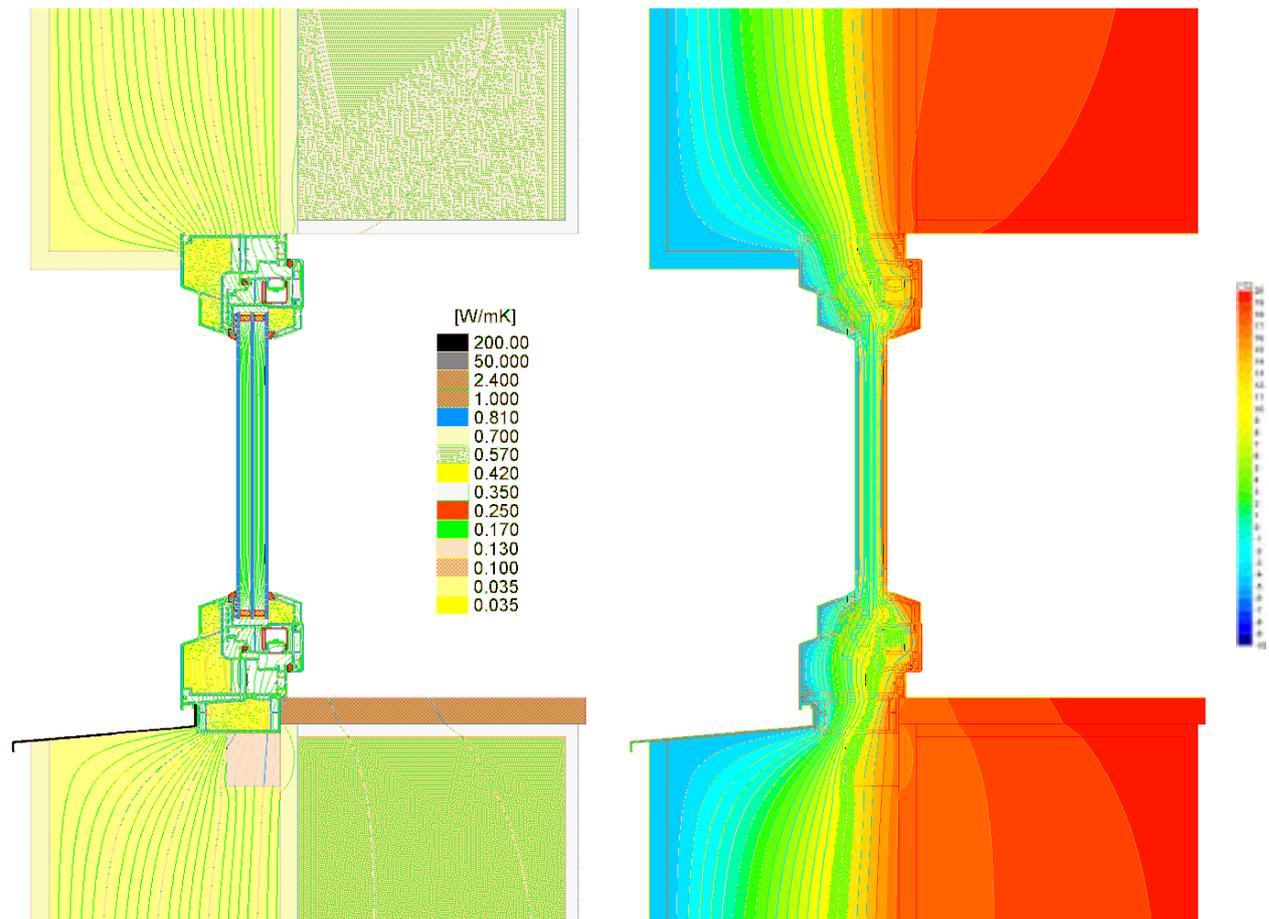


Abbildung 146: rEinbau031(oben) Einbau02(unten) WDVS 260 mm. Fenster in der Dämmebene, unter dem Brüstungsprofil ein Kantholz 6 cm x 6 cm als Auflager, Rahmen in Laibung und Sturz etwa 3 cm überdämmt.

$\Psi_{\text{Einbau (oben/seitlich)}} = 0,011 \text{ W/(mK)}$

$\Psi_{\text{Einbau (unten)}} = 0,050 \text{ W/(mK)}$

Mittelwert:  $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,020 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Fenster-U-Wert  $U_{\text{W}} = 0,85 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

$\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,1 \text{ }^\circ\text{C}$  am Brüstungsanschluss,

$\vartheta_{\text{min (Holz)}} = 3,4 \text{ }^\circ\text{C}$

$\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,5 \text{ }^\circ\text{C}$  an Sturz/Laibung

$U_{\text{Wand}} = 0,122 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ .

Unten links: Ansicht eines eingebauten Fensterrahmens. Die Wanddämmung fehlt noch teilweise.

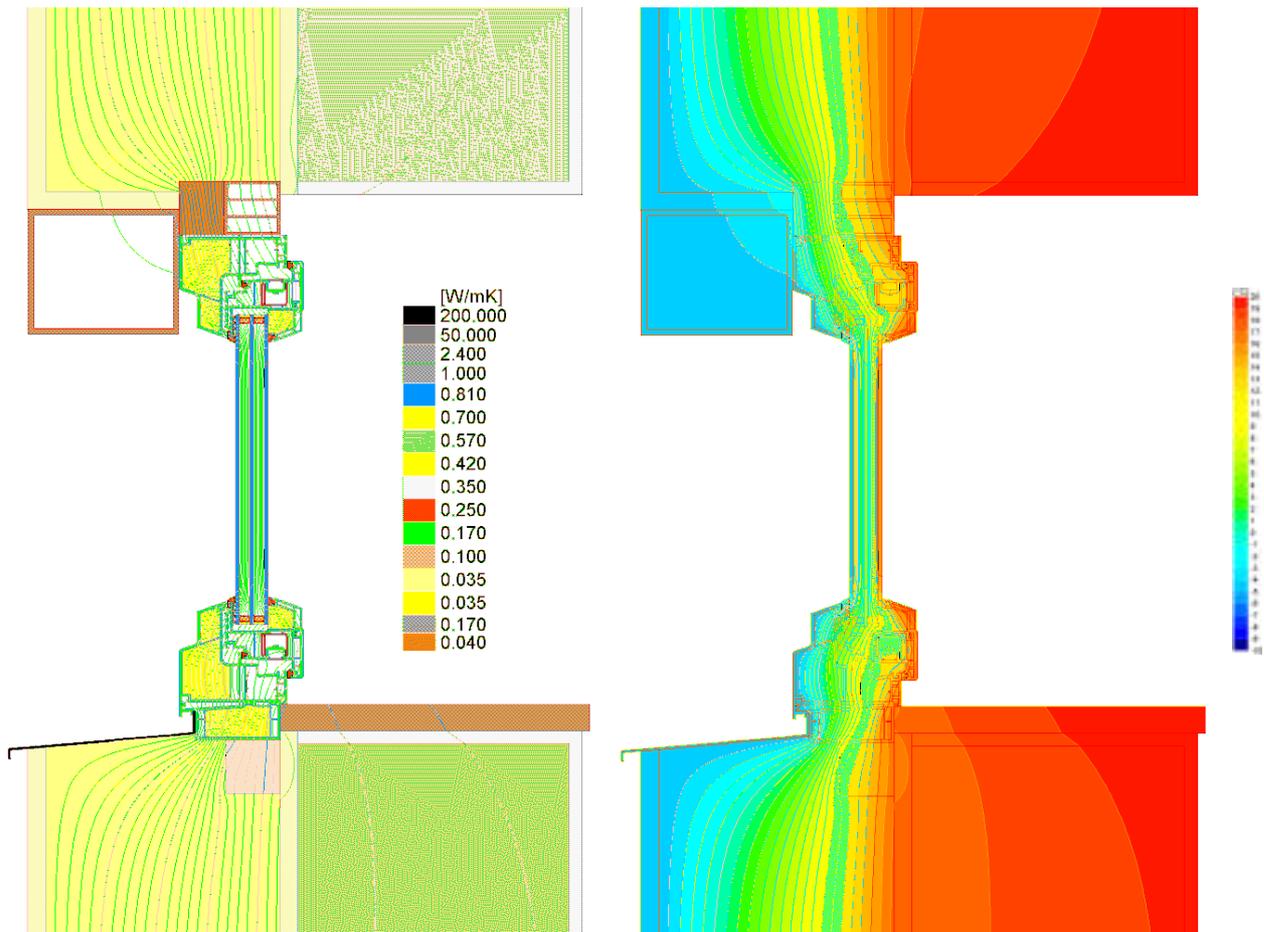


Abbildung 147: rEinbau04. Rollläden, Fenster in der Dämmebene platziert, unter dem Brüstungsprofil ein Kantholz 6 cm x 6 cm als Auflager.

$\Psi_{\text{Einbau (oben)}} = 0,040 \text{ W/(mK)}$

$\Psi_{\text{Einbau (seitlich)}} = 0,016 \text{ W/(mK)}$

wie Einbau03 seitlich

$\Psi_{\text{Einbau (unten)}} = 0,050 \text{ W/(mK)}$

Mittelwert:  $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,043 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Fenster-U-Wert  $U_W = 0,91 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

$\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,1 \text{ }^\circ\text{C}$  am Brüstungsanschluss,

$\vartheta_{\text{min (Holz)}} = 6,3 \text{ }^\circ\text{C}$

$\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,9 \text{ }^\circ\text{C}$  am Sturz

$U_{\text{Wand}} = 0,122 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ .

Unten links: Eingebautes Fenster nach dem Anbringen der Dämmung. Neben dem Fenster in Laibung und Sturz sind aus Brandschutzgründen Mineralwollestreifen angebracht. Die Rahmen wurde in Laibung und Sturz mit fertig verputzten Laibungsdämmplatten mit 3cm Stärke überdämmt, vgl.

Abbildung 143

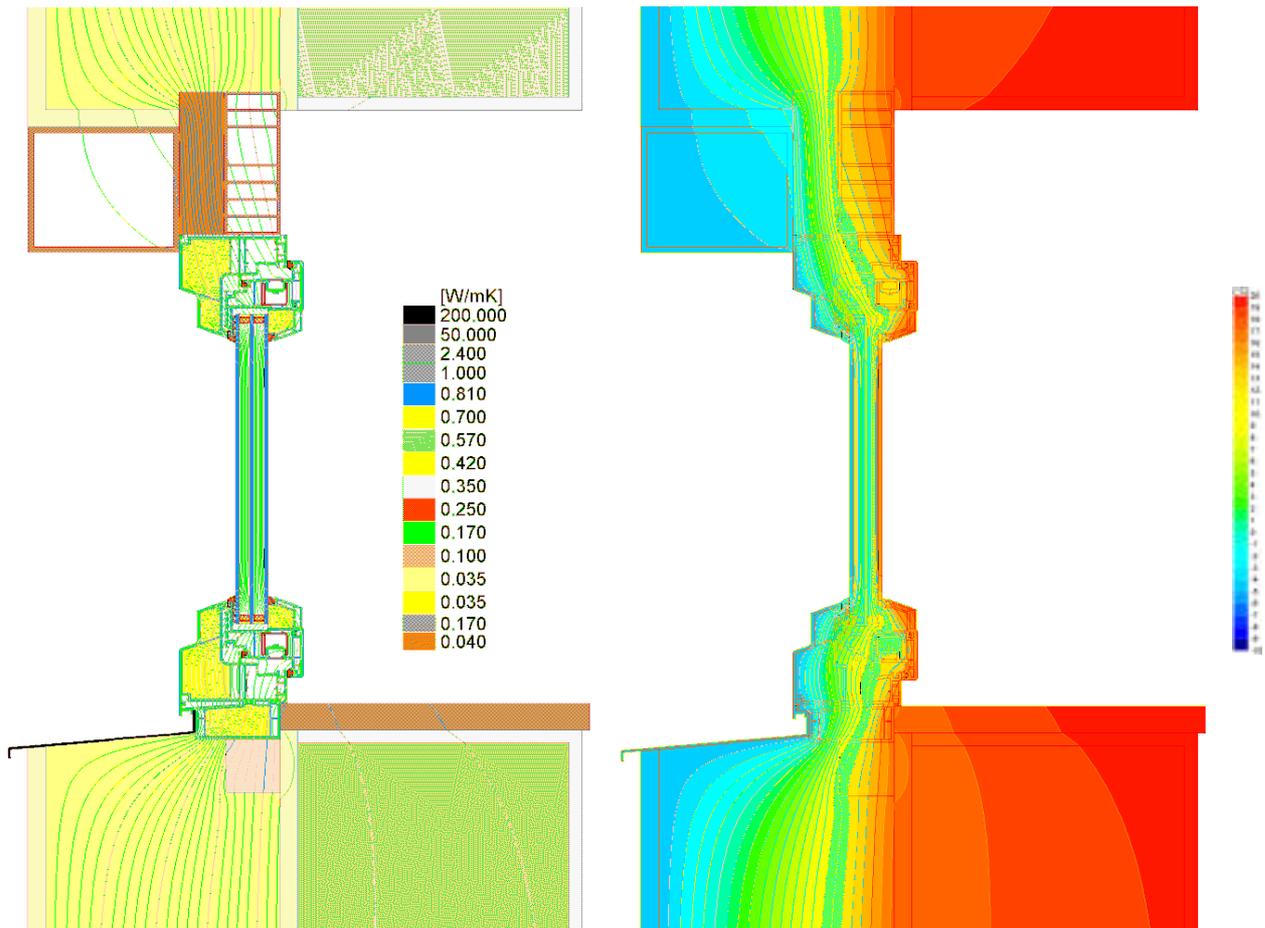


Abbildung 148: rEinbau05. Rollladen Sturzprofil mit Aufdopplung zusätzlich mit PU-Platte gedämmt. Fenster in der Dämmebene, unter dem Rahmen ein Kantholz 60 cm x 6 cm als Auflager.

$\Psi_{\text{Einbau (oben)}} = 0,080 \text{ W/(mK)}$

$\Psi_{\text{Einbau (seitlich)}} = 0,016 \text{ W/(mK)}$

(wie Einbau03 seitlich)

$\Psi_{\text{Einbau (unten)}} = 0,050 \text{ W/(mK)}$

Mittelwert:  $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,073 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Fenster-U-Wert  $U_W = 1,01 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

$\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,1 \text{ am Brüstungsanschluss, } ^\circ\text{C}$

$\vartheta_{\text{min (Holz)}} = 6,3 \text{ } ^\circ\text{C}$

$\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,5 \text{ } ^\circ\text{C am Sturz}$

$U_{\text{Wand}} = 0,122 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ .

Unten links: Eingebautes Fenster nach dem Anbringen der Dämmung

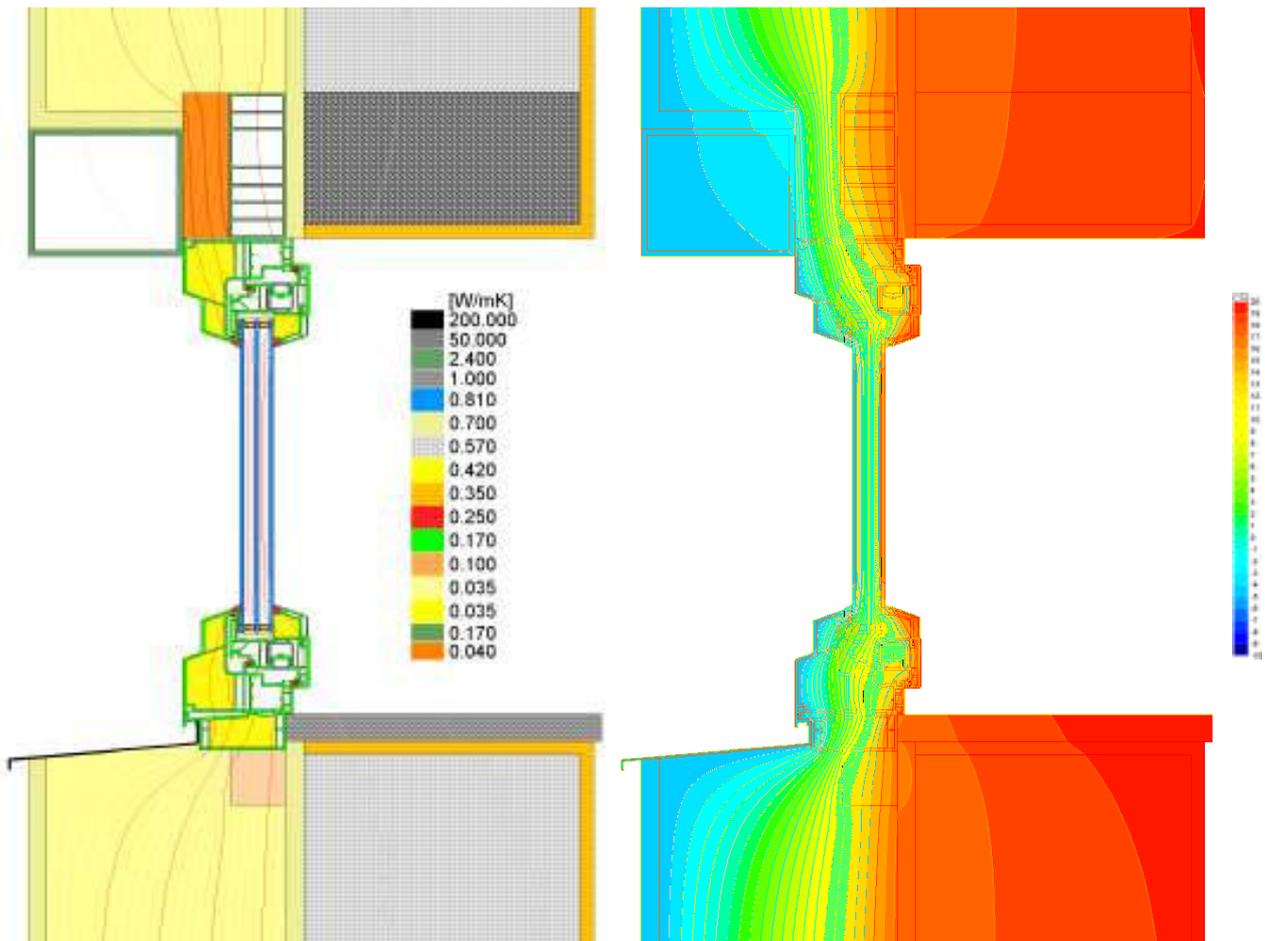


Abbildung 149: rEinbau06. Rollladen, Sturzprofil mit Aufdopplung zusätzlich mit PU-Platte gedämmt. Fenster in der Dämmebene, unter dem Rahmen ein Kantholz als Auflager.

$\Psi_{\text{Einbau (oben)}} = 0,077 \text{ W/(mK)}$

$\Psi_{\text{Einbau (seitlich)}} = 0,016 \text{ W/(mK)}$  (Einbau03 seitlich)

$\Psi_{\text{Einbau (unten)}} = 0,050 \text{ W/(mK)}$ ,

Mittelwert:  $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,071 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Fenster-U-Wert  $U_W = 1,00 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

$\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,1 \text{ }^\circ\text{C}$  am Brüstungsanschluss,

$\vartheta_{\text{min (Holz)}} = 6,3 \text{ }^\circ\text{C}$

$\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,6 \text{ }^\circ\text{C}$  am Sturz

$U_{\text{Wand}} = 0,122 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ .

Unten links: Rahmenaufdopplung mit Hohlkammerprofil, das außenseitig mit PU-Schaum-Platten gedämmt wurde, bevor der Rollladenkasten montiert wird. Hinter dem Fenster ist der neu eingebaute Betonsturz zu erkennen.

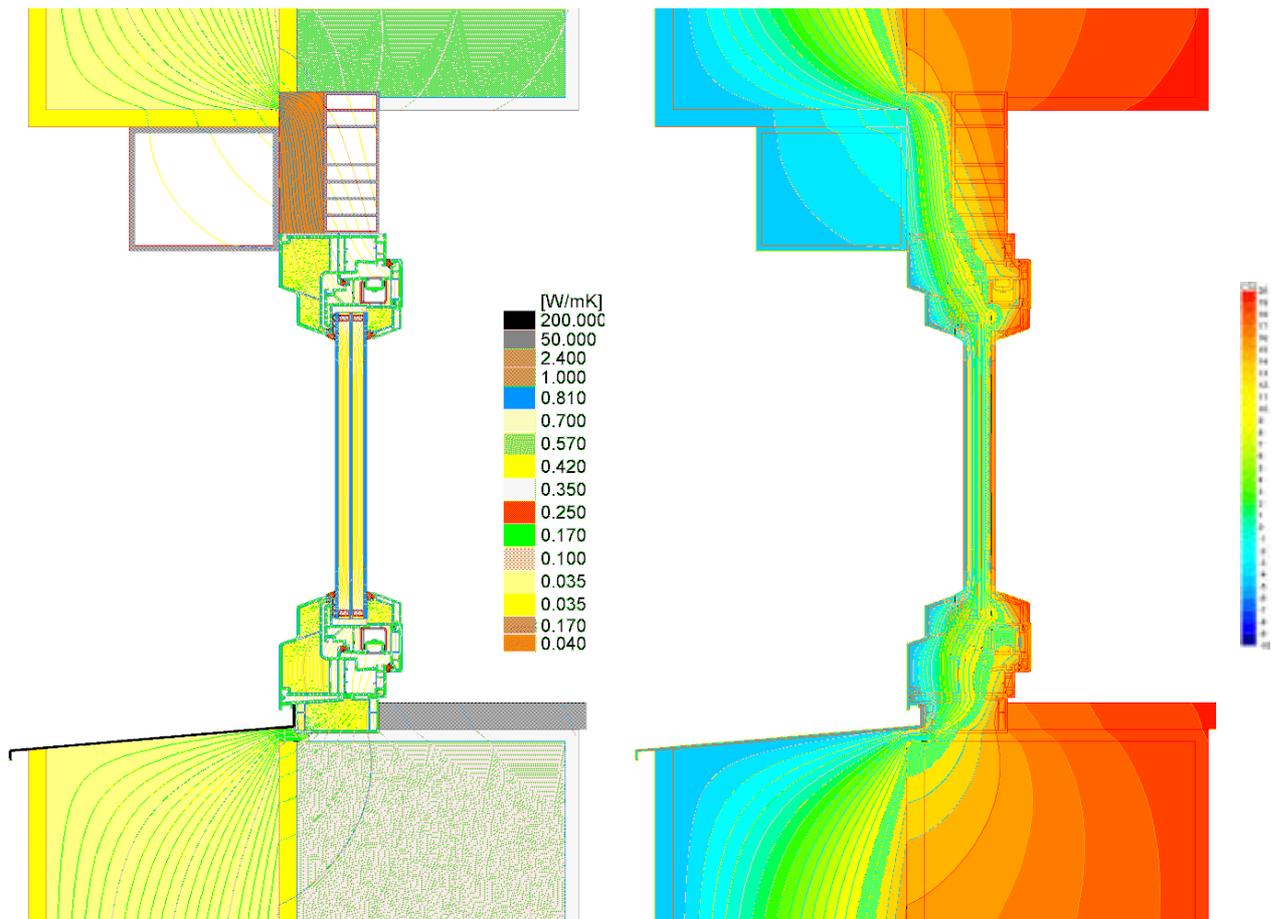


Abbildung 150: rEinbau051. Rollläden, Fenster voll eingerückt in das Mauerwerk. In Laibung nicht überdämmt. Extreme Wärmebrücke am Fensterbankanschluss.

$\Psi_{\text{Einbau (oben)}} = 0,111 \text{ W/(mK)}$

$\Psi_{\text{Einbau (seitlich)}} = 0,111 \text{ W/(mK)}$  (wie Einbau21 seitlich)

$\Psi_{\text{Einbau (unten)}} = 0,125 \text{ W/(mK)}$ ,

Mittelwert:  $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,114 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Fenster-U-Wert  $U_{\text{W}} = 1,13 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

$\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,1 \text{ }^\circ\text{C}$  am Brüstungsanschluss,

$\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,6 \text{ }^\circ\text{C}$  am Sturz

$U_{\text{Wand}} = 0,122 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ .

Detail (Dateiname)	rEinbau 02	rEinbau 03	rEinbau 031	rEinbau 04	rEinbau 05	rEinbau 06	rEinbau 051
Bemerkung	AW 260 Einbaurahmen (Blindstock) umlaufend	AW 260 oben/seitl. nicht überdämmt	AW 260 Rahmen oben/seitl. etwa 3 cm überdämmt	AW 260 schmale Aufdopplung oben Rollladen tief gehängt	AW 260 breite Aufdopplung oben für Rollladen	AW 260 breite Aufdopplung oben für Rollladen vor Betonsturz	AW 260 Rollladen wie Einbau05 Fenster eingerückt wie Einbau21
Einbaulage	in Dämmebene	in Dämmebene	in Dämmebene	in Dämmebene	in Dämmebene	in Dämmebene	eingerückt auf Mauerwerk
Außenwand $U_w$ (W/m <sup>2</sup> K)	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122
Rahmen-U-Wert (W/m <sup>2</sup> K)	0,703	0,703	0,703	0,703	0,703	0,703	0,703
$\Psi_g$ (W/(mK))	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
$\Psi_{\text{Einbau}} \text{ seitl/oben}$ (W/(mK))	0,020	0,014	0,011	0,040	0,080	0,077	0,111
$\Psi_{\text{Einbau}} \text{ unten}$ (W/(mK))	0,062	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,125
Mittelwert $\Psi_{\text{Einbau}}$ (W/(mK))	<b>0,030</b>	<b>0,022</b>	<b>0,020</b>	<b>0,043</b>	<b>0,073</b>	<b>0,071</b>	<b>0,115</b>
Fenster U-Wert $U_{w, \text{eingebaut}}$ (1,23 m x 1,48 m)	<b>0,88</b>	<b>0,085</b>	<b>0,85</b>	<b>0,91</b>	<b>1,01</b>	<b>1,00</b>	<b>1,13</b>

Minimale Oberflächentemp bei -5°C Außentemperatur	<b>15,8°C</b>	<b>15,4°C</b>	<b>15,5°C</b>	<b>15,9°C</b>	<b>15,5°C</b>	<b>15,6°C</b>	<b>15,6°C</b>
---	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

	Abbildung 142	Abbildung 145	Abbildung 146	Abbildung 147	Abbildung 148	Abbildung 149	Abbildung 150
--	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

**Tabelle 8: Varianten Fenstereinbau für die spätere Realisierung. Wandaufbau: 260 mm Wärmedämmverbundsystem auf bestehendem Mauerwerk.**

Detail (Dateiname)	rEinbau 21	rEinbau 211	rEinbau 052	rEinbau 22	rEinbau 221	rEinbau BT03	rEinbau BT031
Bemerkung	Fenster eingerückt, nicht überdämmt	eingerückt, oben teilweise überdämmt	eingerückt mit Rollladen	Dämmklotz im Brüstungsbereich	Dämmklotz im Brüstungsbereich oben teilweise überdämmt	Balkontür in Dämmebene	Balkontür eingerückt mit Rollladen
Einbaulage	eingerückt auf Mauerwerk	eingerückt auf Mauerwerk	eingerückt auf Mauerwerk	eingerückt auf Mauerwerk	eingerückt auf Mauerwerk	in Dämmebene	eingerückt auf Mauerwerk
Außenwand $U$ (W/m <sup>2</sup> K)	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122
Rahmen-U-Wert $U_f$ (W/m <sup>2</sup> K)	0,703	0,703	0,703	0,703	0,703	0,703	0,703
$\Psi_g$ (W/(mK))	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
$\Psi_{\text{Einbau}} \text{ seitl/oben}$ (W/(mK))	0,111	<b>0,060</b>	<b>0,111</b>	<b>0,111</b>	<b>0,063</b>	<b>0,077</b>	<b>0,085</b>
$\Psi_{\text{Einbau}} \text{ unten}$ (W/(mK))	0,125	<b>0,125</b>	<b>0,069</b>	<b>0,069</b>	<b>0,069</b>	<b>0,105</b>	<b>0,119</b>
Mittelwert $\Psi_{\text{Einbau}}$ (W/(mK))	<b>0,115</b>	<b>0,077</b>	<b>0,101</b>	<b>0,102</b>	<b>0,064</b>	<b>0,083</b>	<b>0,092</b>
Fenster U-Wert $U_{w, \text{eingebaut}}$ (1,23 m x 1,48 m)	<b>1,13</b>	<b>1,02</b>	<b>1,09</b>	<b>1,09</b>	<b>0,98</b>	<b>1,12</b>	<b>1,15</b>

Minimale Oberflächentemp bei -5°C Außentemperatur	<b>15,5°C</b>	<b>15, °C 9</b>	<b>15,6°C</b>	<b>15,5°C</b>	<b>15,9°C</b>	<b>15,9°C</b>	<b>15,9°C</b>
---	---------------	-----------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

	Abbildung 151	Abbildung 152	Abbildung 153	Abbildung 154	Abbildung 155	Abbildung 157	Abbildung 159
--	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

**Tabelle 9: Spezielle Fenstereinbausituationen mit erhöhten Wärmebrückeneffekten.**

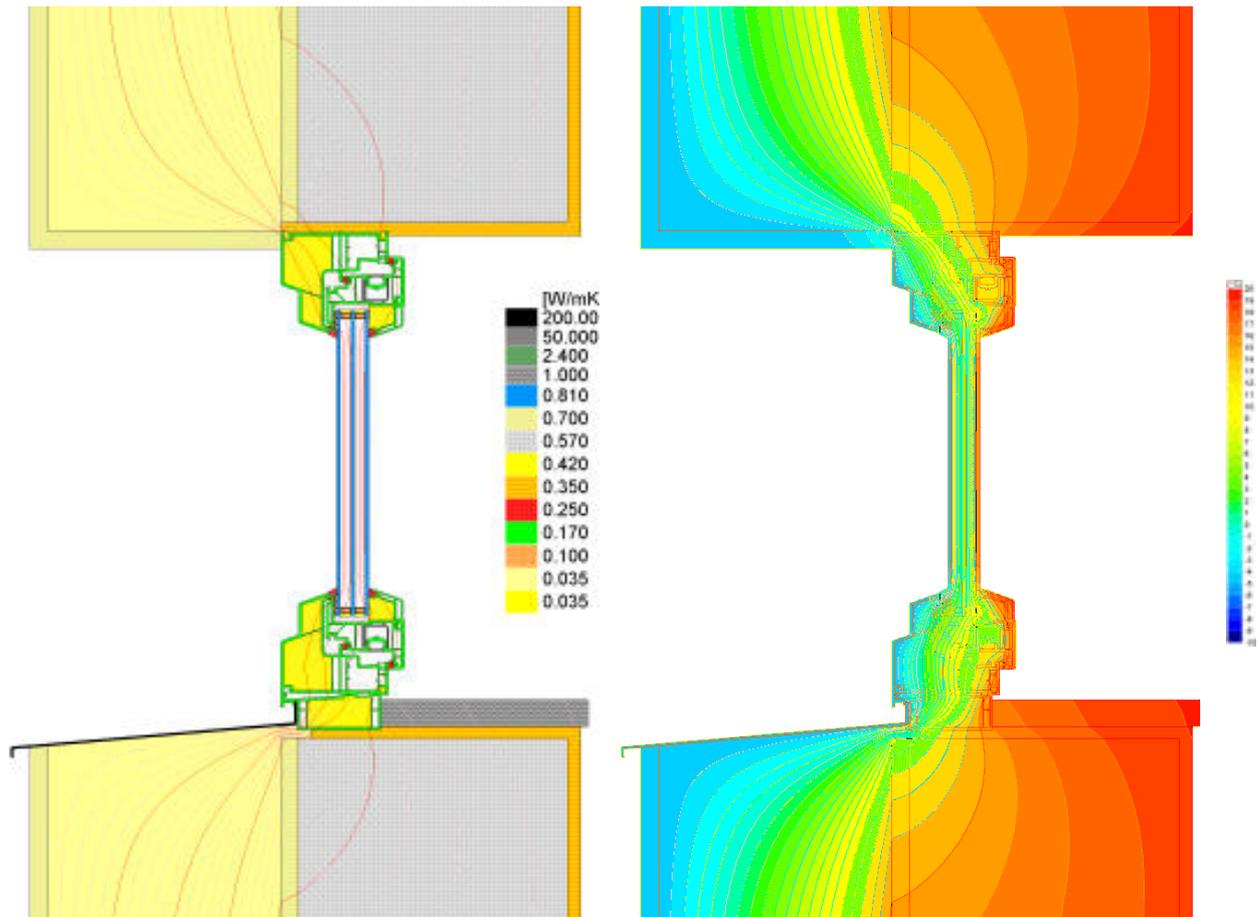


Abbildung 151: rEinbau21. Fenster eingerückt auf Mauerwerk. In Laibung nicht überdämmt. Extreme Wärmebrücke am Fensterbankanschluss.

$\Psi_{\text{Einbau (oben/seitlich)}} = 0,111 \text{ W/(mK)}$

$\Psi_{\text{Einbau (unten)}} = 0,125 \text{ W/(mK)}$ ,

Mittelwert:  $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,115 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Fenster-U-Wert  $U_{\text{W}} = 1,13 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

$\vartheta_{\text{min}} = 15,1 \text{ }^\circ\text{C}$  am Brüstungsanschluss

$\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,5 \text{ }^\circ\text{C}$  an Sturz/Laibung

$U_{\text{Wand}} = 0,122 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ .

Unten links: Fenster eingerückt in das Mauerwerk. Die WB-Berechnung zeigt, dass diese Anordnung nicht empfehlenswert ist.

Später wurde hier die Betonkonsole wieder ausgestemmt und an deren Stelle Dämmstoff eingebracht, siehe Abbildung 153 f

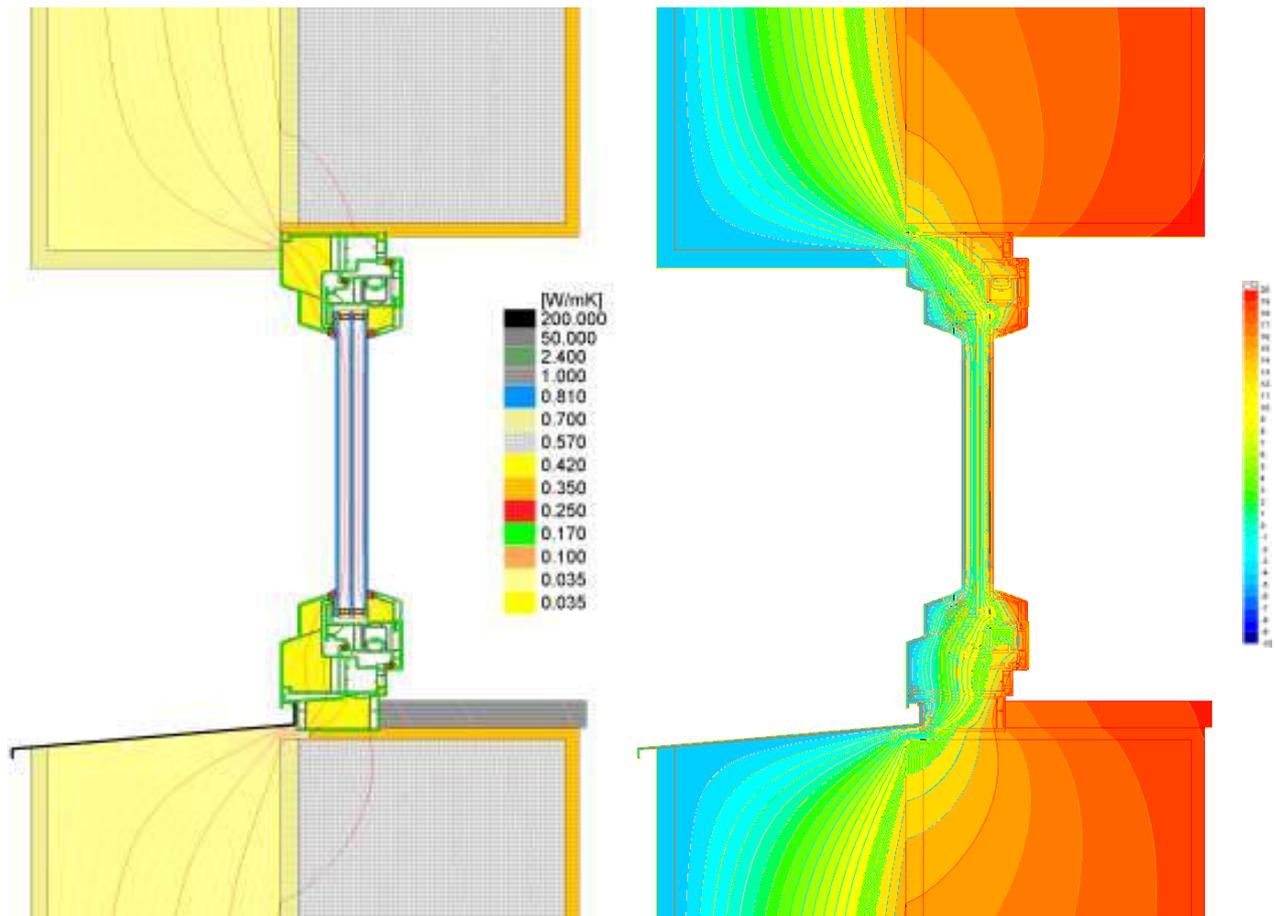


Abbildung 152: rEinbau211. Fenster eingerückt in das Mauerwerk. In Laibung etwa 3 cm überdämmt. Die Wärmebrückenwirkung in Laibung und Sturz kann damit merklich vermindert werden. Die Einrückung des Fensters ins Mauerwerk bewirkt jedoch eine starke Verschlechterung gegenüber der optimalen Anordnung des Fensters in der Dämmebene, Abbildung 138. Siehe auch Abbildung 141. Extreme Wärmebrücke am Fensterbankanschluss.

$\Psi_{\text{Einbau (oben/seitlich)}} = 0,063 \text{ W/(mK)}$

$\Psi_{\text{Einbau (unten)}} = 0,125 \text{ W/(mK)},$

Mittelwert:  $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,077 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

$\vartheta_{\text{min}} = 15,1 \text{ °C}$  am Brüstungsanschluss

$\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,9 \text{ °C}$  an Sturz/Laibung

$U_{\text{Wand}} = 0,122 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ .

resultierender Fenster-U-Wert  $U_{\text{W}} = 1,02 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

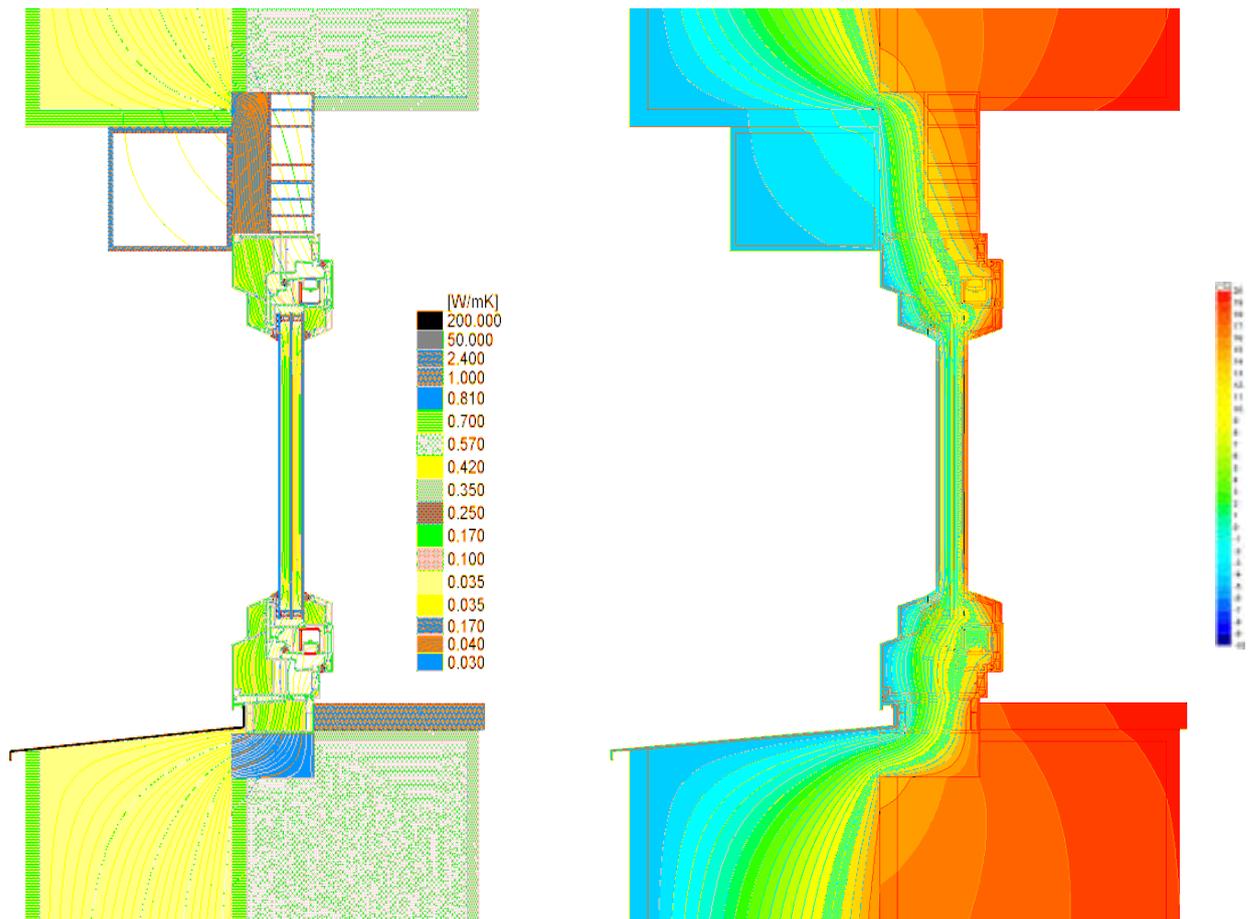


Abbildung 153: rEinbau052. Rollläden, Fenster eingerückt auf Mauerwerk. In Laibung nicht überdämmt. PU-Block unter Brüstungsprofil zur Entschärfung der Wärmebrücke am Fensterbankanschluss.

$\Psi_{\text{Einbau (oben)}} = 0,111 \text{ W/(mK)}$

$\Psi_{\text{Einbau (seitlich)}} = 0,111 \text{ W/(mK)}$  (wie Einbau21 seitlich)

$\Psi_{\text{Einbau (unten)}} = 0,069 \text{ W/(mK)}$ ,

Mittelwert:  $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,101 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

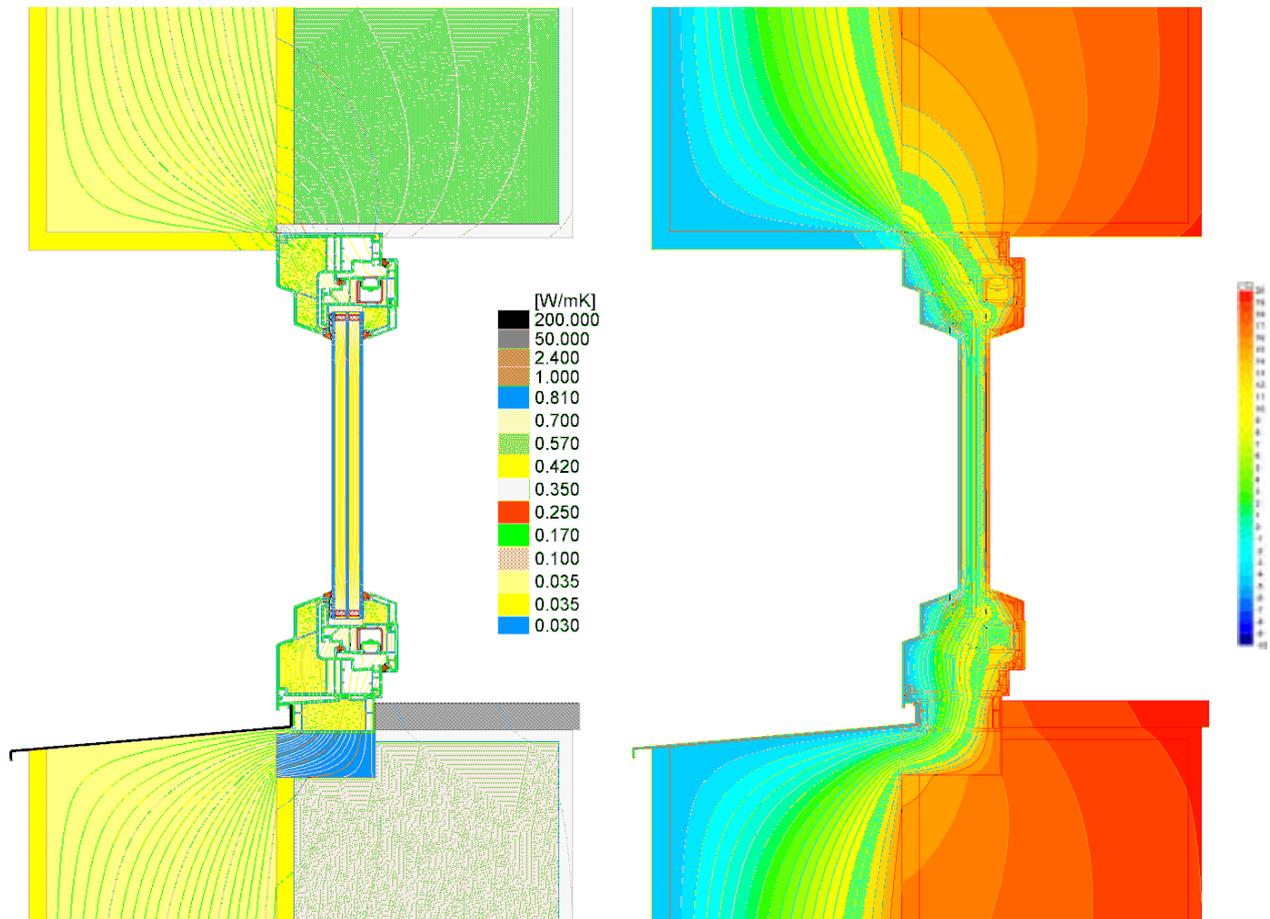
resultierender Fenster-U-Wert  $U_{\text{W}} = 1,09 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

$\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,1 \text{ }^\circ\text{C}$  am Brüstungsanschluss,

$\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,6 \text{ }^\circ\text{C}$  am Sturz

$U_{\text{Wand}} = 0,122 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ .





**Abbildung 154: rEinbau22. Fenster eingerückt auf Mauerwerk. In Laibung nicht überdämmt. PU-Block unter Brüstungsprofil zur Entschärfung der Wärmebrücke am Fensterbankanschluss.**  
 $\Psi_{\text{Einbau}} (\text{oben/seitlich}) = 0,111 \text{ W/(mK)}$  (wie Einbau21)  $\Psi_{\text{Einbau}} (\text{unten}) = 0,069 \text{ W/(mK)}$ ,  
**Mittelwert:  $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,102 \text{ W/(m}^2\text{K)}$**   
 $\vartheta_{\text{min}} = 15,1 \text{ }^\circ\text{C}$  am Brüstungsanschluss  $\vartheta_{\text{min n}} (\text{innen}) = 15,5 \text{ }^\circ\text{C}$  an Sturz/Laibung  
 $U_{\text{Wand}} = 0,122 \text{ W/(m}^2\text{K)}$   $U_{\text{W}} = 1,09 \text{ W/(m}^2\text{K)}$



Um die PU-Dämmung einzufügen, musste das Mauerwerk nachträglich teilweise ausgestemmt werden.

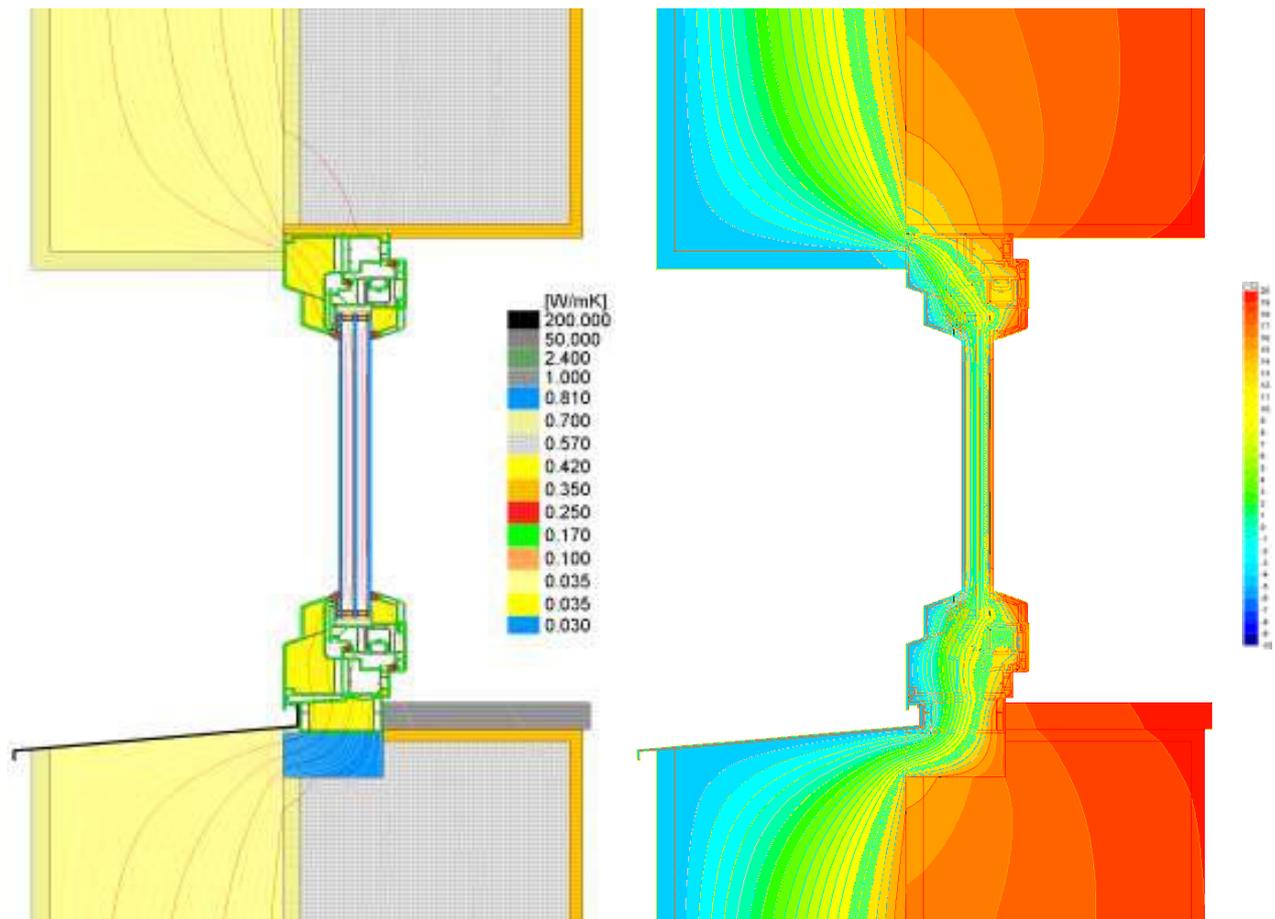


Abbildung 155: rEinbau221. Fenster eingerückt auf Mauerwerk. In Laibung etwa 3 cm überdämmt. PU-Block unter Brüstungsprofil zur Entschärfung der Wärmebrücke am Fensterbankanschluss. Beide Maßnahmen zusammen verbessern den U-Wert des Fensters auf ein in Ausnahmefällen gerade noch hinnehmbares Maß.

$\Psi_{\text{Einbau (oben/seitlich)}} = 0,063 \text{ W/(mK)}$  (Einbau211)

$\Psi_{\text{Einbau (unten)}} = 0,069 \text{ W/(mK)}$ ,

Mittelwert:  $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,064 \text{ W/(mK)}$

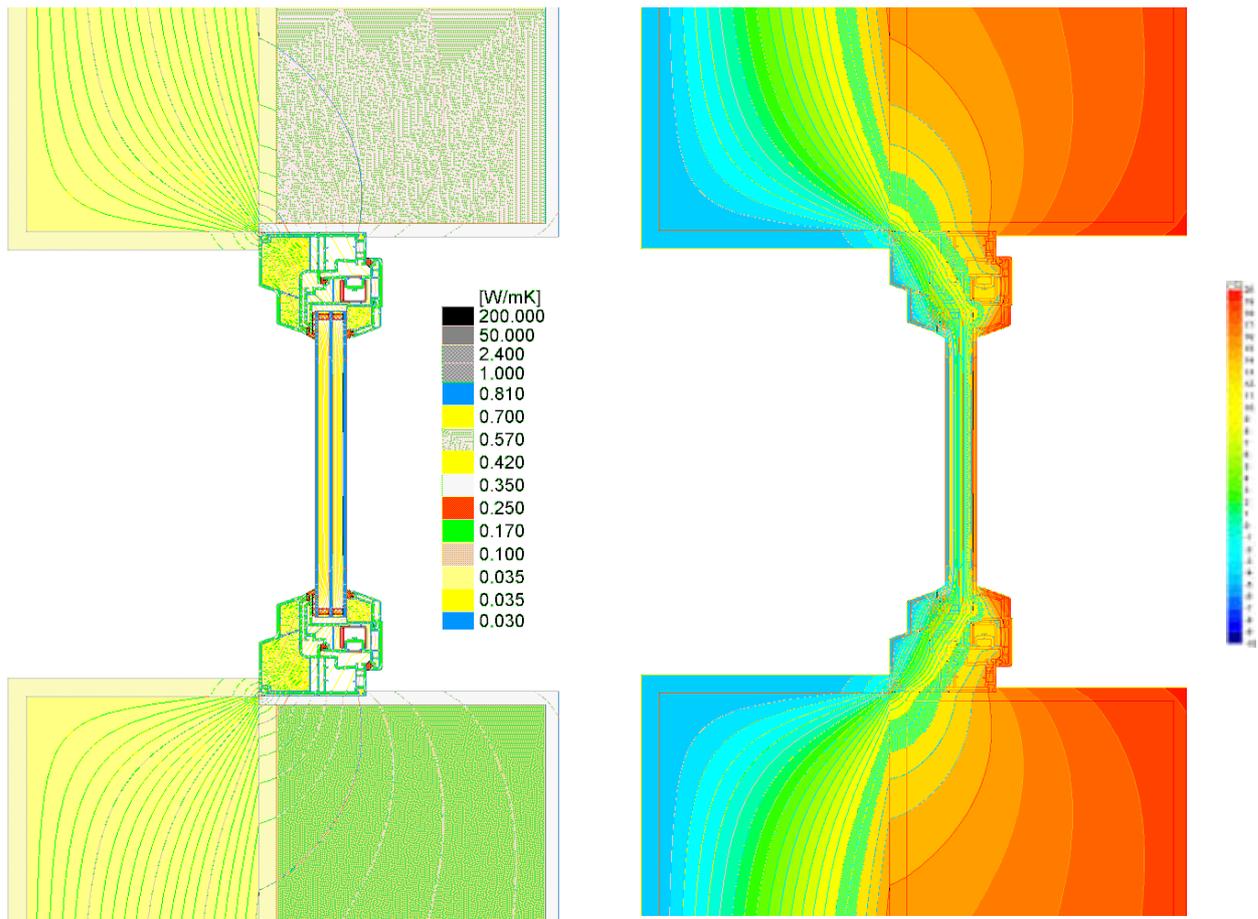
Fenster-U-Wert  $U_{\text{W}} = 0,98 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

$\vartheta_{\text{min}} = 15,1 \text{ }^\circ\text{C}$  am Brüstungsanschluss

$\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,9 \text{ }^\circ\text{C}$  an Sturz/Laibung

$U_{\text{Wand}} = 0,122 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ .

Bei einigen Fenstern in Bädern und in einigen Treppenhäusern (Abbildung 156), war es aus architektonischen Gründen notwendig, den Rahmen sehr stark auf das Mauerwerk einzurücken. Dies ist aus der Sicht des Wärmeschutzes prinzipiell sehr schlecht. Durch das Einsetzen eines Dämmblockes aus PU-Schaum war es jedoch möglich die jeweiligen Einbau- $\psi$ -Werte zu vermindern. Aus rein geometrischen Gründen bleibt der Effekt einer solchen Maßnahme jedoch begrenzt, d.h. der Einbau- $\psi$ -Wert bleibt mit etwa  $0,07 \text{ W/(mK)}$  immer noch sehr hoch, Abbildung 153.



**Abbildung 156: rEinbau Treppenhaus. Fenster wegen Mauerwerksrücksprung seitlich eingerückt ins Mauerwerk. In Laibung deshalb nicht überdämmt. Oben und unten wie Abbildung 145**  
 $\Psi_{\text{Einbau (oben)}} = 0,011 \text{ W/(mK)}$  (Einbau 031)  
 $\Psi_{\text{Einbau (seitlich)}} = 0,111 \text{ W/(mK)}$  (Einbau22)  
 $\Psi_{\text{Einbau (unten)}} = 0,050 \text{ W/(mK)}$ , (Einbau 02)  
**Mittelwert:  $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,070 \text{ W/(m}^2\text{K)}$**   
**Fenster-U-Wert  $U_w = 0,90 \text{ W/(m}^2\text{K)}$**   
 $\vartheta_{\text{min}} = 15,1 \text{ }^\circ\text{C}$  am Brüstungsanschluss  
 $\vartheta_{\text{min (innen)}} = 15,5 \text{ }^\circ\text{C}$  an Sturz/Laibung  
 $U_{\text{Wand}} = 0,122 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ .



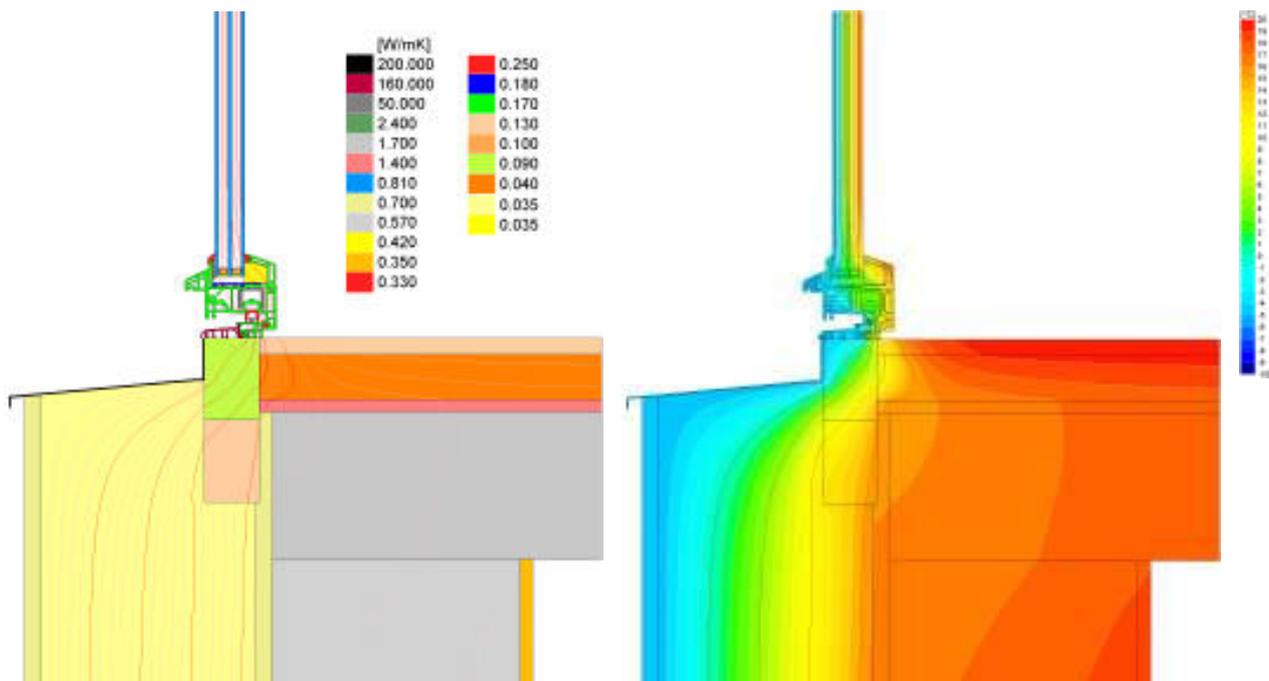


Abbildung 157: rBalkontür Einbau03(Schwelle) Einbau06 Fenster in Dämmebene. In Laibung etwa 3 cm überdämmt. An der Schwelle Blendrahmenprofil ersetzt durch Türschwelle, deshalb praktisch keine Dämmwirkung im Rahmen. An der Schwelle außerdem systembedingt (Wasserführung) keine Überdämmung des Rahmens nur PU-Recycling-Block als Auflager. Unten links: Eingebaute Balkontür mit PUR-Block unter dem Schwellprofil.

$U_f$  (seitlich/oben) = 0,70 W/(m<sup>2</sup>K)

$\Psi_g$  (seitlich/oben) = 0,035 W/(mK)

$\Psi_{\text{Einbau}}$  (oben) = 0,077 W/(mK) (Einbau06)

$\Psi_{\text{Einbau}}$  (seitlich) = 0,02 W/(mK) (Einbau03 oben)

$U_f$  (Schwelle) = 1,86 W/(m<sup>2</sup>K)

$\Psi_g$  (Schwelle) = 0,040 W/(mK)

$\Psi_{\text{Einbau}}$  (Schwelle) = 0,105 W/(mK),

Mittelwert:  $\Psi_{\text{Einbau}}$  = 0,083 W/(m<sup>2</sup>K)

Fenster-U-Wert  $U_w$  = 1,12 W/(m<sup>2</sup>K)

$\vartheta_{\text{min}}$  = 8,7 °C an der Türschwelle und am Glasrand, damit besteht dort Tauwassergefahr

$\vartheta_{\text{min}}$  (innen) = 15,9 °C an Sturz/Laibung

$U_{\text{Wand}}$  = 0,122 W/(m<sup>2</sup>K).

Zur Bauzeit standen vom Hersteller der Fensterprofile leider keine adäquaten gedämmten Schwellprofile für Balkontüren mit einem niedrigen (barrierefreien) Austritt zur Verfügung. Daher wurden ungedämmte Profile verwendet, bei denen allerdings bei niedrigen Außentemperaturen Tauwasser an den Innenoberflächen entstehen kann. Der Einfluss auf die Energiebilanz bleibt bei diesen sehr großen Gebäuden gering, weil pro Wohnung nur höchstens eine Balkontür vorkommt. In den Dachgeschossen wurden die regulären Fensterprofile als Balkontüren eingesetzt.

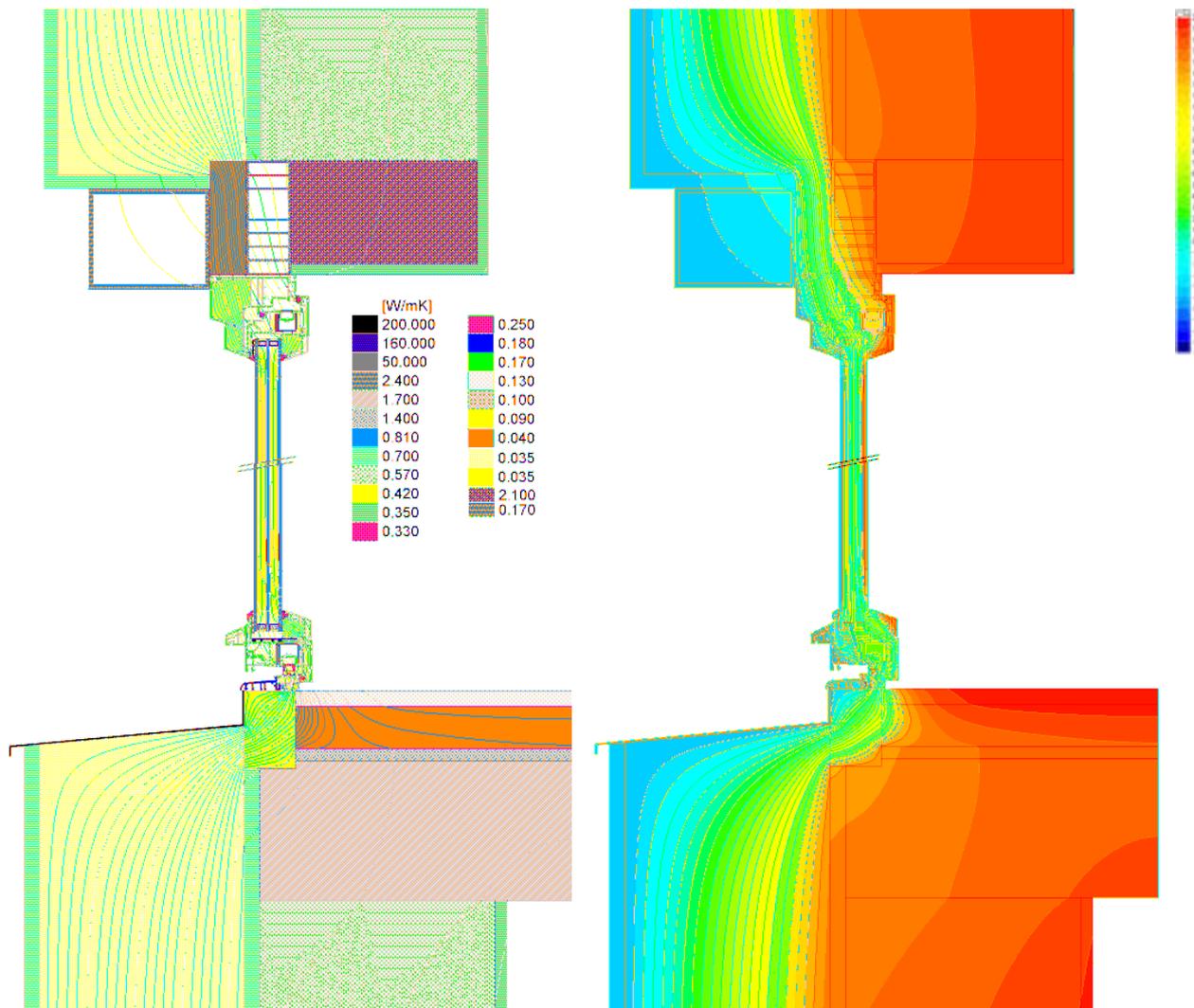


Abbildung 158: Austritt nach der Fertigstellung: Abdeckblech direkt an Schwellprofil angeschlossen

Abbildung 159: rBalkontür Einbau031(Schwelle) Einbau061(oben). Fenster teilweise in Mauerwerk eingerückt. In Laibung etwa 3 cm überdämmt. An der Schwelle Blendrahmenprofil ersetzt durch Türschwelle, deshalb praktisch keine Dämmwirkung im Rahmen. An der Schwelle außerdem systembedingt (Wasserführung) keine Überdämmung des Rahmens nur PU-Recycling-Block als Auflager für Schwellprofil.

$U_f$  (seitlich/oben) = 0,70 W/(m²K)  
 $\Psi_g$  (seitlich/oben) = 0,035 W/(mK)  
 $\Psi_{\text{Einbau}}$  (oben) = 0,085 W/(mK)  
 $\Psi_{\text{Einbau}}$  (seitlich) = 0,02 W/(mK) (Einbau03)  
 $U_f$  (Schwelle) = 1,86 W/(m²K)  
 $\Psi_g$  (Schwelle) = 0,040 W/(mK)  
 $\Psi_{\text{Einbau}}$  (Schwelle) = 0,119 W/(mK),  
 Mittelwert:  $\Psi_{\text{Einbau}}$  = 0,092 W/(m²K)  
 Fenster-U-Wert  $U_w$  = 1,15 W/(m²K)  
 $\vartheta_{\text{min}}$  = 8,7 °C an der Türschwelle und am Glasrand,  
 damit besteht dort Tauwassergefahr  
 $\vartheta_{\text{min}}$  (innen) = 15,9 °C an Sturz/Laibung  
 $U_{\text{Wand}}$  = 0,122 W/(m²K).

## Anker für Gerüst und vorgestellte Balkone

Befestigungsanker aus Edelstahl durchdringen die Dämmschicht und verursachen dort eine nicht zu vernachlässigende punktförmige Wärmebrücke. Solche Anker sind jedoch zur späteren Befestigung von Gerüsten unbedingt erforderlich, um zu vermeiden, dass später unkontrolliert durch die Dämmung gebohrt wird. Prinzipiell hätte man die Anker aber auch etwas höher an den Holz-Leichtbau-Elementen der Dachgeschosse befestigen können. Dort wären die Anker etwas kürzer geworden. Dies wurde aus statischen Gründen jedoch verworfen.



**Abbildung 160:** Leichte Befestigungsanker aus Edelstahl durchdringen die Dämmschicht. Um deren Wärmebrückenwirkung zu vermindern und die Öffnung vor Witterungseinflüssen zu schützen, wurden nach Fertigstellung des Putzes eine gedämmte Abdeckkappe über die hervorstehenden Ringösen gestülpt.

Um die Wärmebrückenwirkung der Anker zu vermindern und die Öffnung vor Witterungseinflüssen zu schützen wurde nach Fertigstellung des Putzes eine gedämmte Abdeckkappe über die hervorstehenden Ringösen gestülpt., siehe Abbildung 160.

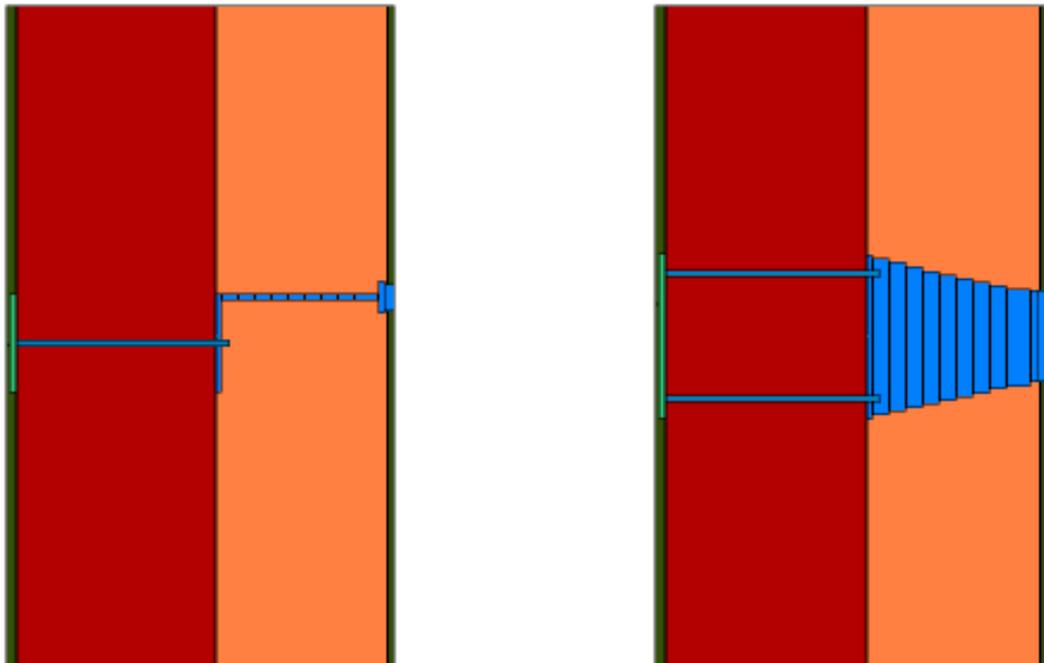
## Verankerung vorgestellter Balkone



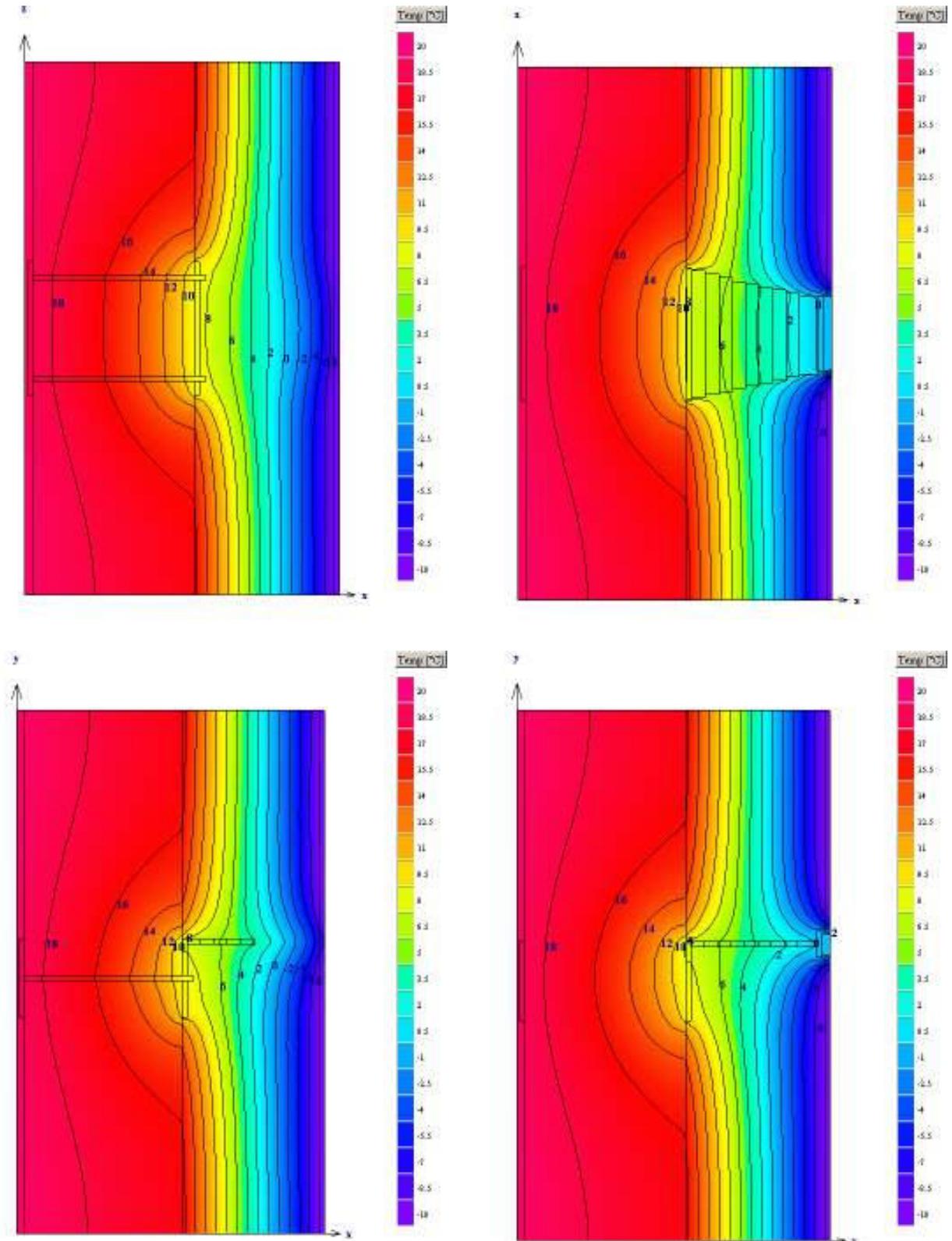
**Abbildung 161:** Edelstahlwinkel mit Halben-Schiene zur späteren Befestigung der vorgestellten Balkone an der Hauswand. Auch diese Befestigungselemente durchdringen die Dämmschicht und verursachen eine nicht zu vernachlässigende Wärmebrücke. Außerdem kann die auf der Außenwand anliegende Platte (Bild oben links) wegen der hohen statischen Lasten nicht einfach im Mauerwerk verschraubt werden, sondern muss zusätzlich mit einer Konterplatte auf der Innenoberfläche der Außenwand gekontert werden.

Zur Befestigung der vorgestellten Balkone wurden 10 mm starke Edelstahlwinkel mit Halben-Schiene an der Hauswand angebracht, siehe Abbildung 161. Auch diese Befestigungselemente durchdringen die Dämmschicht und verursachen eine nicht zu vernachlässigende Wärmebrücke. Außerdem kann hier die an der Außenwand anliegende Platte wegen der hohen statischen Lasten nicht einfach im Mauerwerk verschraubt werden, sondern muss zusätzlich mit einer Konterplatte aus Stahl auf der Innenoberfläche der Außenwand gekontert werden. Die Verbindung zwischen beiden Platten geschieht über zwei Edelstahlschrauben. Der Hohlraum, der nach Anbringen des WDVS um den Anker herum entsteht, wurde jeweils ausgeschäumt, um Konvektionsströmungen zu vermeiden.

Um den Wärmebrückeneffekt der Durchdringungen und die resultierenden Oberflächentemperaturen an den Konterplatten an den Innenoberflächen berechnen zu können, wurde ein numerisches Modell nach den Plänen der Architekten aufgestellt, welches die Materialeigenschaften an der Stelle der Durchdringungen dreidimensional abbildet, siehe Abbildung 162. Die dreidimensionale Wärmestromberechnungen wurde mit dem Programm HEAT3 durchgeführt. Die Ergebnisse bezüglich Oberflächentemperaturen sind für verschiedenen Schnittebenen in den Isothermenbildern in Abbildung 163 dargestellt. Die Innenoberflächentemperaturen im Bereich der Konterplatten sind mit über  $18^{\circ}\text{C}$  überall als unkritisch anzusehen. In Abbildung 164 ist die Wärmestromdichte in den verschiedenen Schnittebenen dargestellt. Gemäß der Farbkodierung sind in gelben bis roten Bereichen die Wärmeströme wie erwartet besonders hoch.



**Abbildung 162: Modell zur dreidimensionalen Berechnung der Wärmebrückenwirkung der Balkonbefestigungen. Schnitt vertikal (links) und horizontal (rechts) durch das dreidimensionale Modell. Material der Durchdringung: Edelstahl, Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 17 \text{ W}/(\text{mK})$ . Resultierender Wärmebrückenverlustkoeffizient der quasi punktförmigen Durchdringung  $\chi = 0,09 \text{ W}/\text{K}$ .**



**Abbildung 163: Isothermenbilder in verschiedenen Schnittebenen der Balkonanker. Die minimalen Temperaturen an den Innenoberflächen im Bereich der Konterplatten liegen über 18°C und sind somit akzeptabel.**

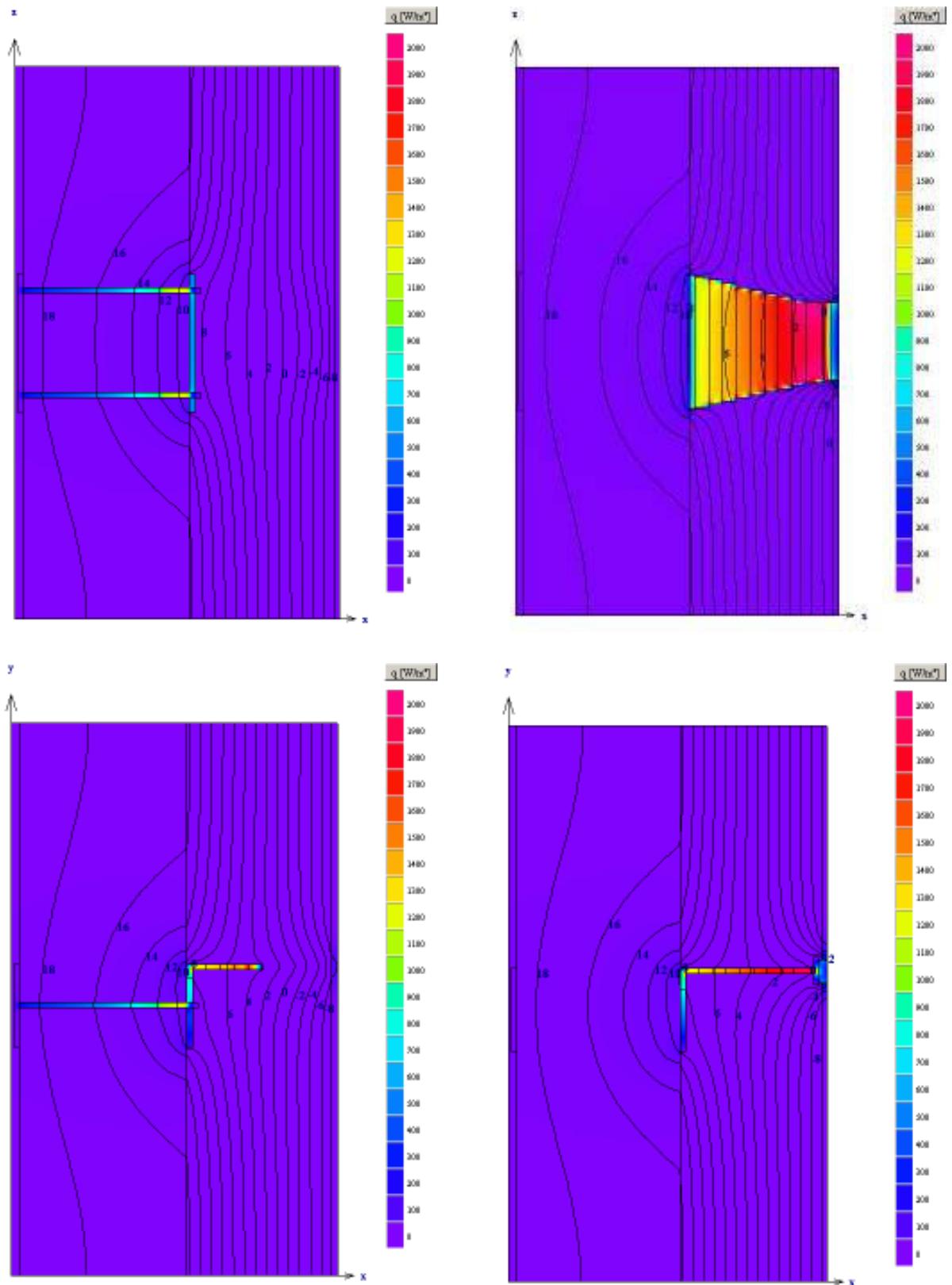


Abbildung 164: Farbfelddarstellung der Wärmestromdichten in den verschiedenen Schnittebenen der Balkonanker. Gemäß der Farbkodierung sind in gelben bis roten Bereichen die Wärmeströme wie erwartet besonders hoch. Schwarze Isothermenlinien wie in Abbildung 163.

## Qualitätssicherung: Dämmücken

Die Außenwand des Bestandsgebäudes war, wie bei Altbauten üblich, nicht sehr eben. Ursprünglich war vorgesehen gewesen, dies auszugleichen, indem die Dämmblöcke des WDVS mit mehr oder weniger Klebermaterial auf der Oberfläche fluchtend geklebt worden wären. Nachdem sich herausgestellt hatte, dass dadurch zum Teil mehr als 5 cm Kleberschicht hätte verarbeitet werden müssen, wurde die verworfen.

Die Dämmblöcke sind daher an den meisten Außenwänden direkt auf die Mauer geklebt und die neue Oberfläche folgt der darunter liegenden alten Oberfläche. Aus diesem Grund kann es allerdings zu Dämmücken kommen, wenn einzelne Dämmblöcke gegeneinander verkanten. Die Stuckateure wurden darauf verpflichtet diese Dämmücken mit Ortschaum zu verfüllen, siehe Abbildung 165. Dies wurde von der Bauleitung auch kontrolliert.

Es ist aus der PH-Entwicklung bekannt, dass solche Dämmücken mit einer Spaltweite von mehr als 4 mm erhebliche WB-Effekte verursachen würden. Daher ist es unbedingt notwendig dies zu vermeiden [AKKP14 Wbfrei].



**Abbildung 165: Spalt zwischen zwei Dämmplatten, der später mit Ortschaum ausgefüllt wurde, wie im unteren Bildteil zu erkennen.**



**Abbildung 166: Dämmücke über Solarleitung, die in der Dämmebene verlegt wurde.**

## Infrarotthermografie

Die thermographische Untersuchung der beiden Gebäude von außen wurde am 27. Dezember 2006 in den frühen Morgenstunden zwischen 5:30 und 8:00 Uhr durchgeführt. Danach wurden zwei Wohnungen im EG sowie die Treppenhäuser, einige Kellerräume und ein Haustechnikraum mit der IR-Kamera untersucht (8:15 bis 12:30 Uhr).

Der Untersuchungstag war mit einer mittleren Außentemperatur von  $-0.16^{\circ}\text{C}$  ein mäßig kalter Wintertag. Im Untersuchungszeitraum der IR-Außenaufnahmen blieb die Außentemperatur weitgehend konstant. Auch am Tag zuvor herrschten ähnliche Wetterbedingungen. Während der Erstellung der Außenthermographien gab es keine Niederschläge. Damit waren für die Aufnahme der IR-Bilder sehr günstige Witterungsbedingungen gegeben.

**Tabelle 10: Randbedingungen der thermographischen Untersuchung**

Außentemperatur Vortag 26.12.2006 (Mittelwert)	- 0.20°C
Außentemperatur 27.12.2006 Mittelwert 5:30 bis 8:00 Uhr	- 0.16°C
Windbedingungen	schwacher Wind
Niederschlag	kein Niederschlag
rel. Luftfeuchte (Mittelwert 5:30 bis 8:00 Uhr)	98%
<b>Gebäude</b>	teilweise bewohnt aber vollständig beheizt
Emissionsgrad der opaken Wandflächen	0,93

Die thermographischen Aufnahmen wurden mit dem hochauflösenden Thermographiesystem „VARIOSCAN high resolution“ der Firma Jenoptik (Jena) erstellt. Zur Bearbeitung der Aufnahmen wurde das Programm IRBIS+ V2.2 der Firma InfraTec GmbH (Dresden) verwendet.

**Tabelle 11: Geräteparameter des verwendeten Thermographie-Systems**

Geräteparameter des Thermographie-Systems	
Messgerät	VARIOSCAN 3021 ST, Fa. Jenoptik
Spektralbereich ( $\mu\text{m}$ )	8 bis 12
Aufnahmesystem	Scansystem
Detektormaterial	HgCdTe
Temperaturauflösung bei 30°C (K)	$\pm 0,03$
Bildformat (Pixel)	360 x 240

## Außenthermographie

Die Temperaturskala der dargestellten Bilder ist für jeweils zusammengehörige Aufnahmen immer gleich skaliert um eine direkte Vergleichbarkeit herzustellen. Jedem Bild ist jedoch trotzdem eine Farb-Temperaturskala als Legende beigelegt. Zum Teil werden mehrere IR-Bilder zu einem Bild zusammengefügt. Nach Möglichkeit wird dem Thermogramm das entsprechende Tageslicht-Foto aus ähnlicher Perspektive beigelegt. Diese Fotos wurden erst gegen Mittag, nach Abschluss der Innenuntersuchungen aufgenommen. Veränderungen zwischen dem Thermogramm und dem Foto in Bezug auf z.B. Fensterstellungen oder Rollladenstellungen sind durch diese zeitliche Differenz begründet. Aus der Vielzahl von aufgenommenen Außenthermogrammen wird hier nur eine Auswahl dargestellt.



**Abbildung 167: Tevesstraße 36 bis 46 (6er Block) mit IR-Thermografie vor und nach der Sanierung**

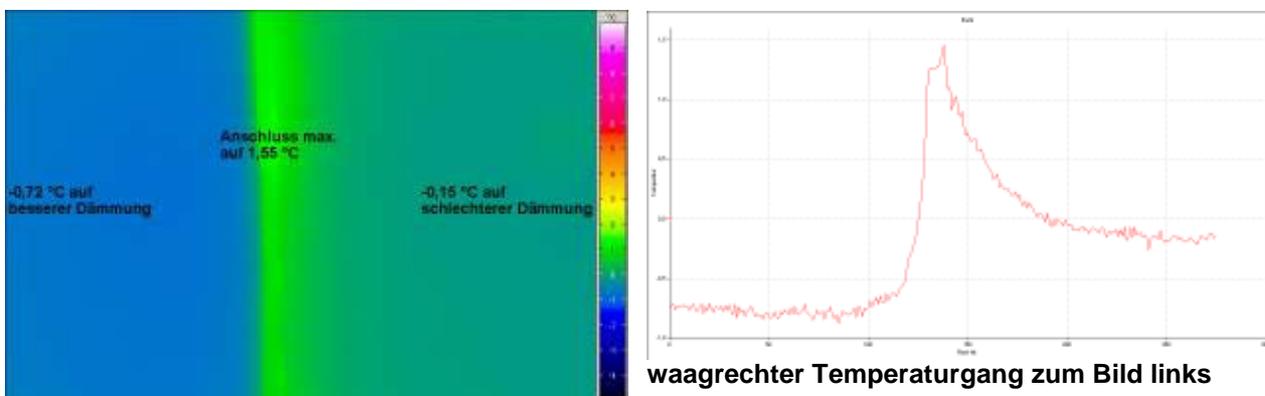
Die Übersichtsdarstellung in Abbildung 167 zeigt sehr eindrücklich die hohe Qualität der Gebäudehülle nach der Sanierungsmaßnahme. Während vorher viele Wärmebrücken und sogar der Beheizungsstatus jeder Wohnung deutlich erkennbar war ist heute die Außenoberfläche gleichmäßig 'kalt', d.h. die Oberflächentemperaturen sind wie erwartet gleichmäßig niedrig. Lediglich die Fenster mit ihren höheren U-Werten sind wärmer. Im Folgenden werden IR-Aufnahmen von außen, darunter einige 'hot-spots' z.B. von Wärmebrücken gezeigt. Es muss jedoch betont werden, dass die Gebäudehülle insgesamt eine sehr hohe Qualität aufweist, wie es bereits das rechte Bild in Abbildung 167 belegt.

## Anschluss Tevesstraße 36 zum Nachbargebäude Herxheimerstraße

An einer Stelle besteht eine direkte Verbindung zum Nachbargebäude: Das Gebäude Tevesstraße 36 ist direkt an das Gebäude Herxheimerstraße angebaut. Das Nachbargebäude wurde vor mehreren Jahren mit nur 100 mm starkem WDVS gedämmt. Außerdem befinden sich zur Straßenseite zusätzlich direkt an der Gebäudegrenze Balkone in einer Nische. Die Balkone sind mit einer auskragenden Betonplatte realisiert, Abbildung 169.

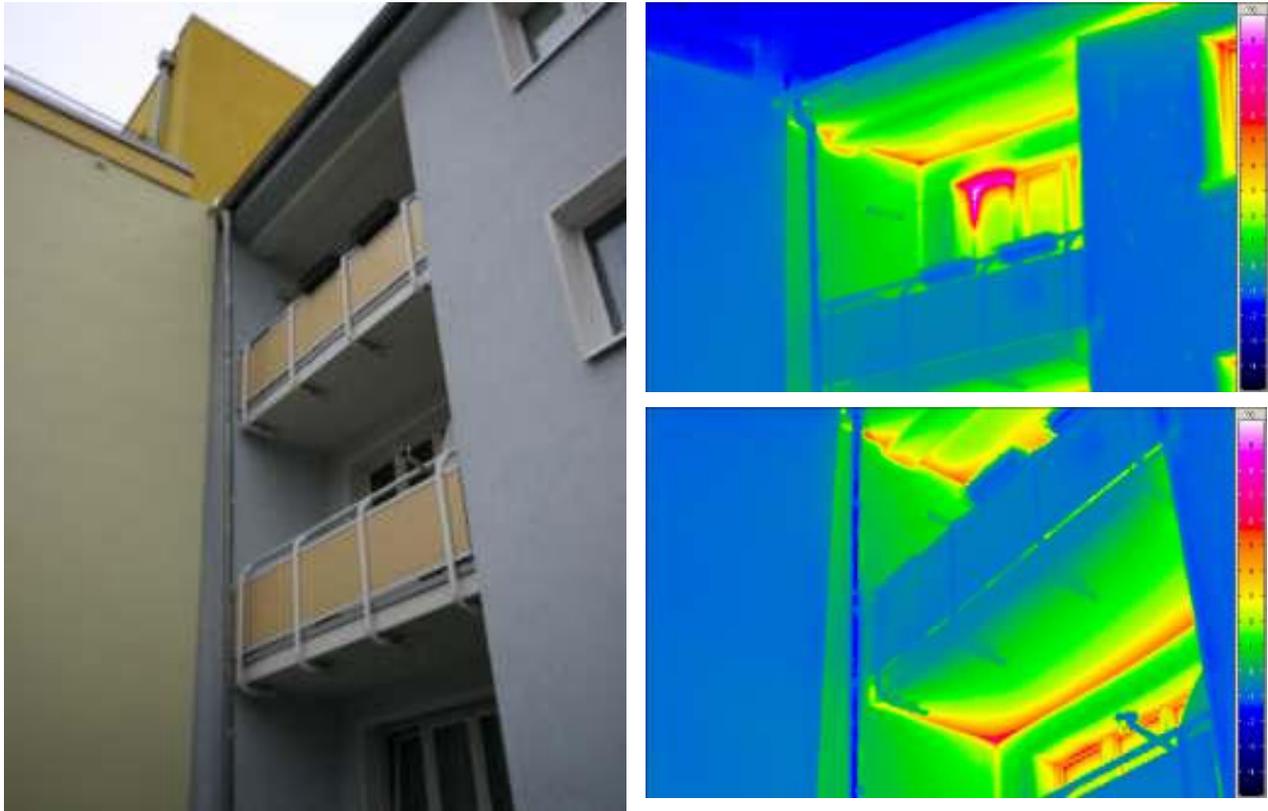
Die auskragende Betonplatte stellt außerdem nicht nur zum Gebäude Herxheimerstraße, sondern auch zur Tevesstraße 36 hin eine erhebliche Wärmebrücke dar. Die am Rand erwärmte Betonplatte ist in den IR-Bildern rechts oben deutlich zu erkennen. Der Wärmebrückeneffekt dieser Balkonplatte in Bezug auf das Gebäude Tevesstraße 36 wird in Zusammenhang mit Abbildung 123 ff im Detail berechnet diskutiert.

Die Wandfläche in der Balkonnische zum Gebäude Tevesstraße 36 hin war zum Zeitpunkt der Aufnahmen nur mit etwa 10 cm gedämmt. Dieser Sprung in der Dämmstärke lässt sich in den IR-Bildern deutlich erkennen. Die schlechter gedämmten Flächen erscheinen daher hellgrün, weil dort die Außenoberfläche wärmer ist, Abbildung 168.



**Abbildung 168:** Die Wandfläche in der Balkonnische zum Gebäude Tevesstraße 36 hin war zum Zeitpunkt der Aufnahmen nur etwa 10 cm stark gedämmt. Die Außenoberfläche ist daher dort deutlich wärmer. Rechts ist der Temperaturgang in einer waagrechten Linie über die Grenzlinie von stärkerer (links) zu schwächerer Dämmung (rechts) dargestellt.

Später wurde auf die Wandfläche in der Balkonnische noch eine zusätzliche Dämmschicht aufgebracht. Dies war notwendig, um diese Außenwandfläche auf dasselbe Dämmniveau zu bringen, wie beim restlichen Gebäude Tevesstraße. Insbesondere aber, um die Heizlast in den angrenzenden Wohnräumen im Gebäude Tevesstraße 36 auf das in der Planung angestrebte Maß zu begrenzen. Ohne diese Zusatzdämmung, d.h. mit einer schlecht gedämmten Außenwandfläche von mehreren Quadratmetern pro angrenzendem Wohnraum wäre in diesen Räumen ein zusätzlicher Heizkörper notwendig geworden.



**Abbildung 169: Anschluss zum Nachbargebäude Herxheimer Straße. Die Wärmebrücke der auskragenden Balkonplatte im Nachbargebäude Herxheimerstraße ist deutlich erkennbar. Links: Der Balkon mit konventionell auskragender Betonplatte gehört zum Nachbarhaus Herxheimerstraße. Sie stößt jedoch an die Mauerwerkswand des Gebäudes Tevesstraße 36 und verursacht auch dort eine Wärmebrücke.**

Zur Gartenseite stoßen die starke Dämmung des Gebäudes Tevesstraße an die dünnere Dämmung des Gebäudes Herxheimerstraße. Man erkennt in Abbildung 170 ganz links den Anschluss der beiden Gebäude. Auch hier ist die Oberflächentemperatur am Nachbargebäude (links) erhöht gegenüber den besser gedämmten Oberflächen im Gebäude Tevesstraße 36. Für das Gebäude Tevesstraße 36 ergibt sich daraus eine geringfügige zusätzliche Wärmebrücke. Für das schon früher sanierte Gebäude Herxheimerstraße verbessern sich die Verhältnisse mit der Sanierung Tevesstraße, weil dort nun besser gedämmt ist.

Der Übergang zwischen Dachgeschoss und 2. OG auf der Gartenseite ist wegen des Materialwechsels erkennbar. Die "dunklen Streifen" bis zum 2. OG sind Reflexe auf der Stahlkonstruktion der vorgestellten Balkone.

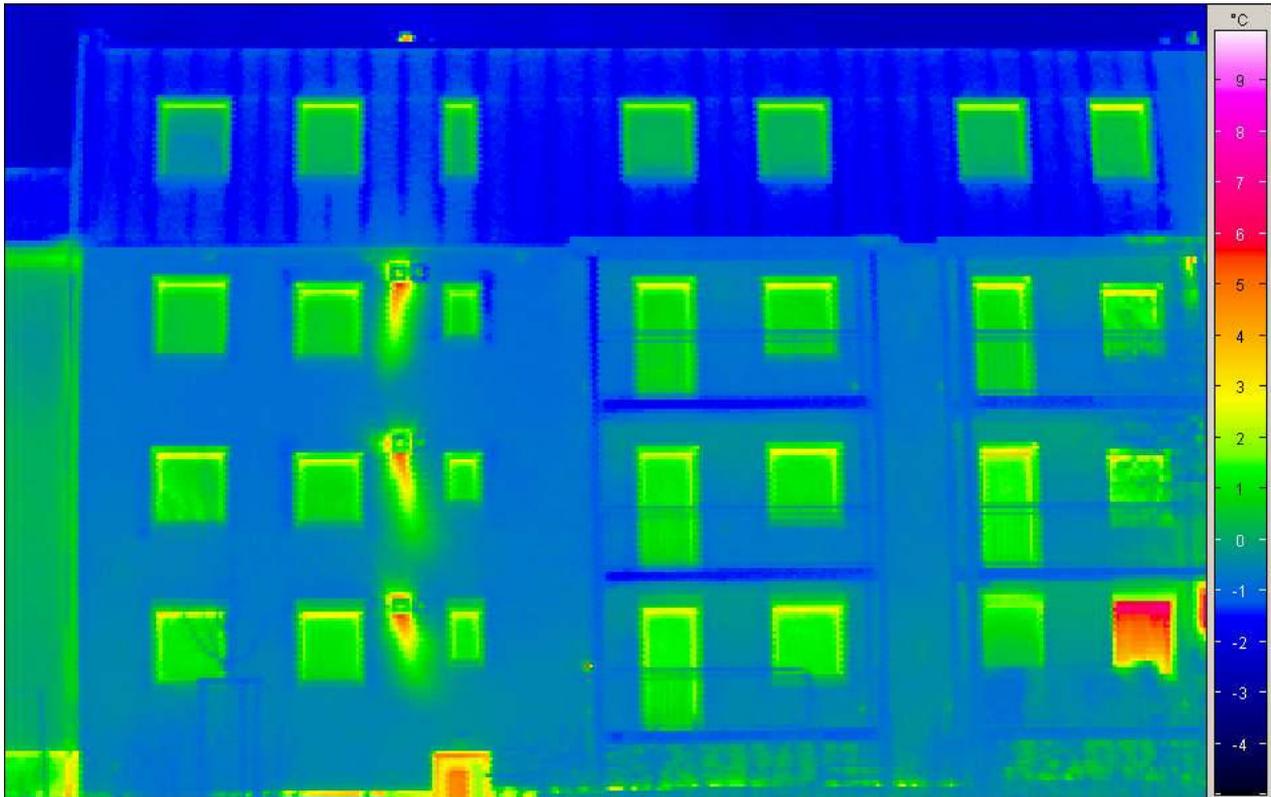
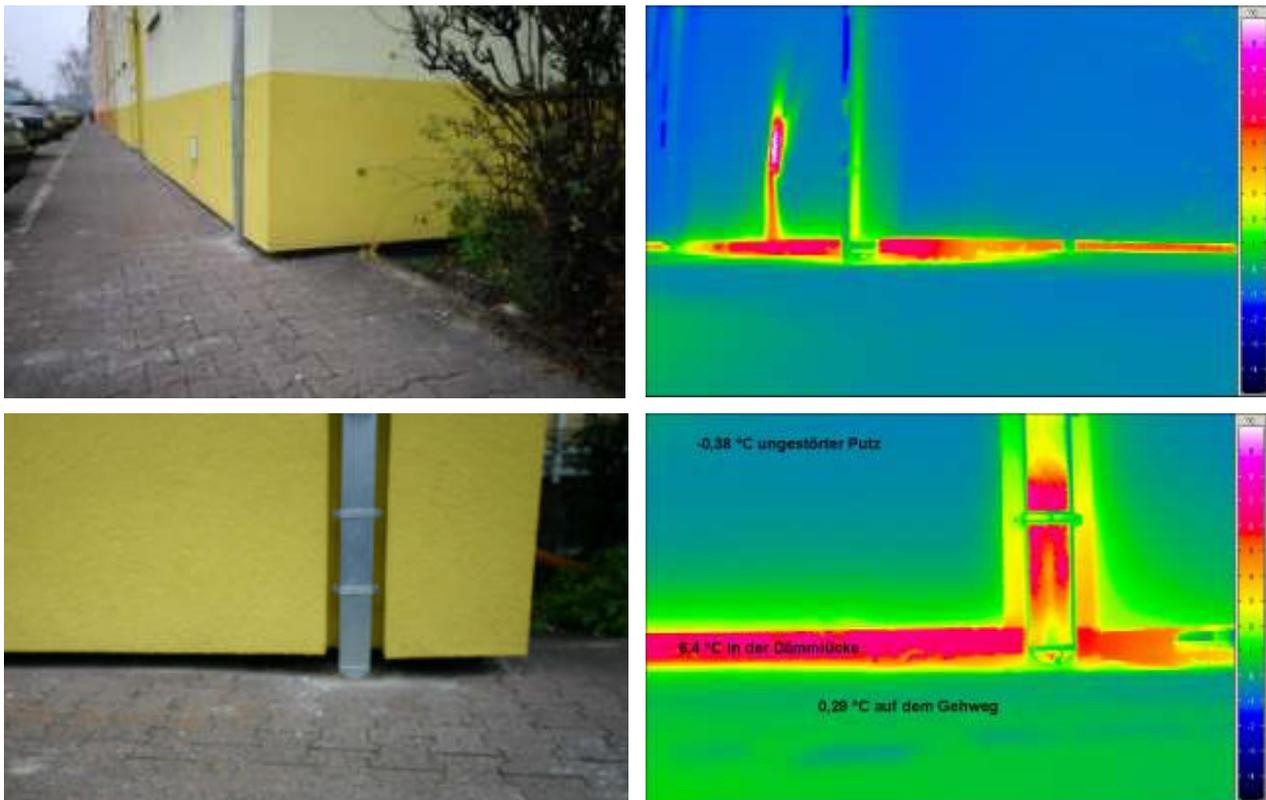


Abbildung 170: Tevesstraße 36 und 38. Ganz links Anschluss zum Gebäude Herxheimerstraße. Beide Gebäude von der Gartenseite {61227163.png}

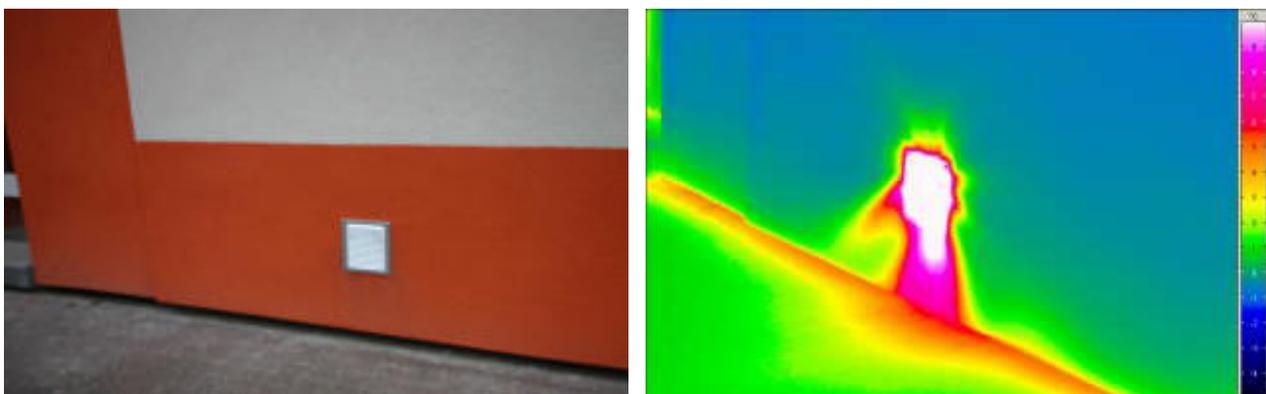
### Gebäudesockel, Dachrinne, Kellerabluft und Haustür (Briefkästen) von außen

Der Sockelabschluss zum Gelände ist fast überall mit einer Lücke von 5 bis 10 cm zur Geländeoberkante ausgeführt, d.h. die Dämmung endet über dem Erdreich. Dies ist in diesem Fall ausreichend, weil das Erdgeschoss des Gebäudes relativ weit über der Geländeoberkante liegt. Die Wärmebrückeneffekte verschiedener Planungsvarianten am Kellersockel werden im Zusammenhang mit Abbildung 80 ff ab Seite 75 im Detail diskutiert.

Die Temperatur in der Lücke zwischen Dämmung und Erdreich erscheint hoch, weil die Innentemperatur im Keller relativ hoch ist. Aus dem selben Grund ist die Ausblasöffnung für die Kellerabluft in Abbildung 172 und die Dachrinne in Abbildung 171 wegen aufsteigender Warmluft aus dem Abwasserkanal entsprechend warm.



**Abbildung 171: Sockelabschluss zum Gehsteig mit einer Lücke von etwa 5...10 cm. Diese Lücke erscheint warm, weil die Keller-Innentemperatur relativ hoch ist, vgl. auch Abbildung 88. Unten: zusätzlich Regenfallrohr.**



**Abbildung 172: Tevesstraße 38. Abluftauslass Kellerabluft und Sockelabschluss.**

Auch die Kellertüren von außen zum Keller erscheinen warm, Abbildung 173. Es sind Metallkonstruktionen mit Einfachverglasung ( $U_g = 5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ), die also einen sehr hohen U-Wert haben. Die Wärmebrückeneffekte an diesen Stellen, werden ebenfalls schon ab Seite 75 genauer diskutiert, die Thermografie bestätigt die Berechnungen.

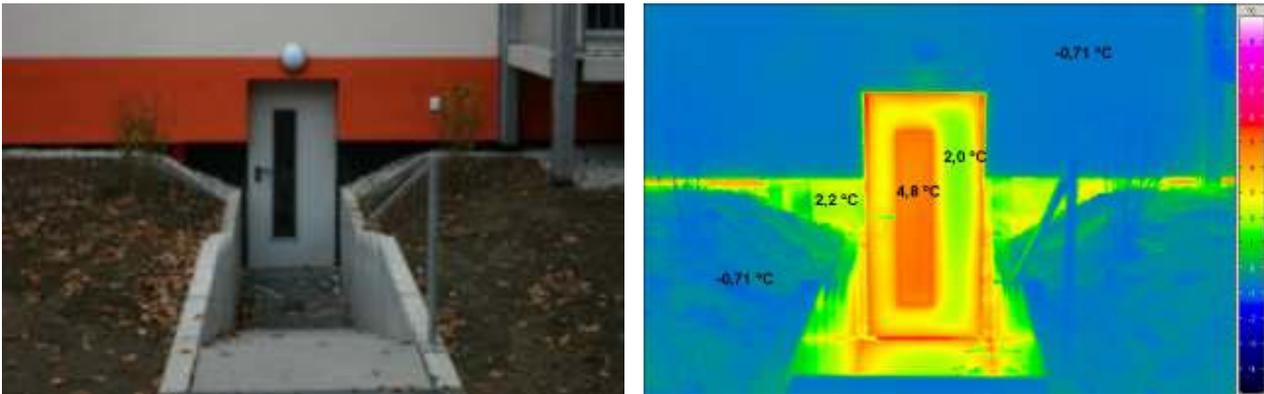


Abbildung 173: Tevesstraße 36, Kellerzugang von außen zum kalten Keller

Die Briefkästen der Gebäude Tevesstraße 36 bis 46 mussten außenbündig in die Dämmung eingelassen werden, Abbildung 174. Trotzdem ist dahinter überall eine Dämmschicht von etwa 10 cm Stärke geblieben, Abbildung 117. Damit ist sichergestellt, dass der Wärmeverlust an diesen Stellen nicht zu groß wird bzw. die resultierenden Oberflächentemperaturen auf den dahinter liegenden Innenoberflächen nicht auf kritische Werte absinken. Dasselbe gilt für die Nische des Regenfallrohrs in Abbildung 171, vgl. auch Abbildung 115. Die Thermografie bestätigt dies, sie zeigt außerdem, dass eine saubere Ausführung der Dämmung hinter dem Briefkasten vorliegt.

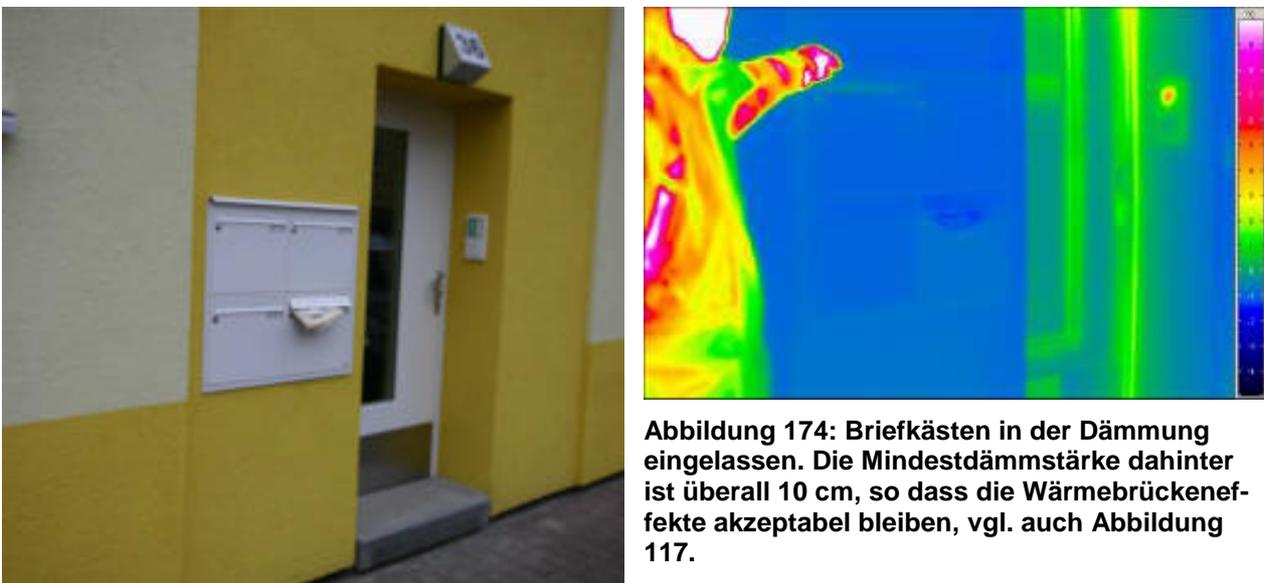
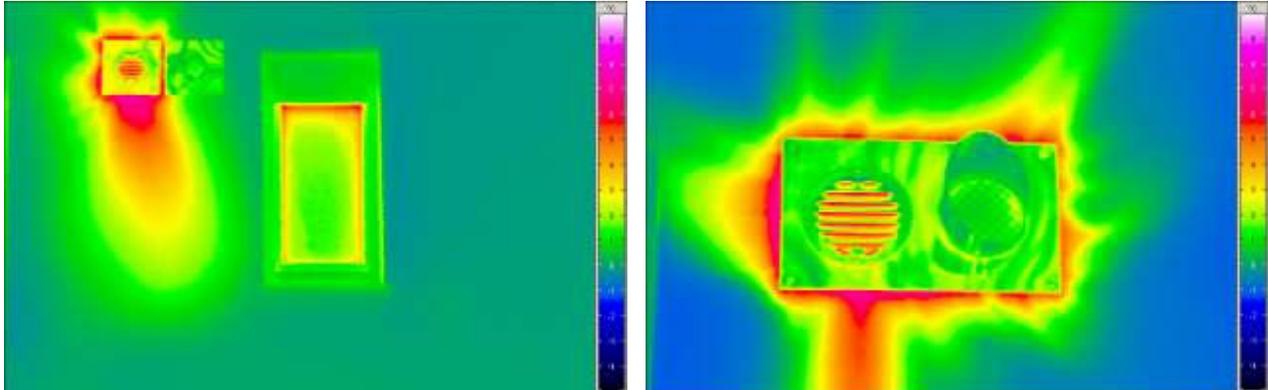


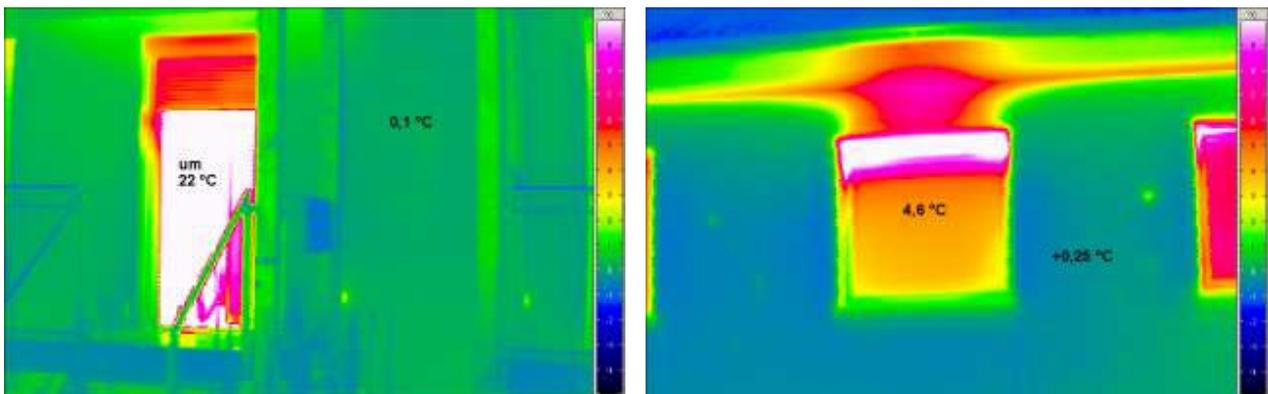
Abbildung 174: Briefkästen in der Dämmung eingelassen. Die Mindestdämmstärke dahinter ist überall 10 cm, so dass die Wärmebrückeneffekte akzeptabel bleiben, vgl. auch Abbildung 117.

Die Außenluftdurchlässe sind deutlich wärmer als die umgebenden Wandoberflächen, denn die ausströmende Luft hat auch nach dem Wärmetauscher noch etwa 6°C. Sie erwärmt die metallische Konstruktion und die den Auslass direkt umgebenden Wandbereiche. In Abbildung 175. ist das Richtungsprofil der ausströmenden Luftströmung klar erkennbar. Deutlich höhere Temperaturen, nämlich direkt die

Temperatur der ausströmenden Raumluft, ergeben sich, wenn ein Fenster geöffnet wird, siehe Abbildung 176 und Abbildung 177.



**Abbildung 175: Fenster und Außenluftdurchlass Tevesstraße 40 (links) und Tevesstraße 54 (rechts) im Detail. Die ausströmende Luft (6°C) erwärmt die metallische Konstruktion und die umgebenden Wandbereiche.**



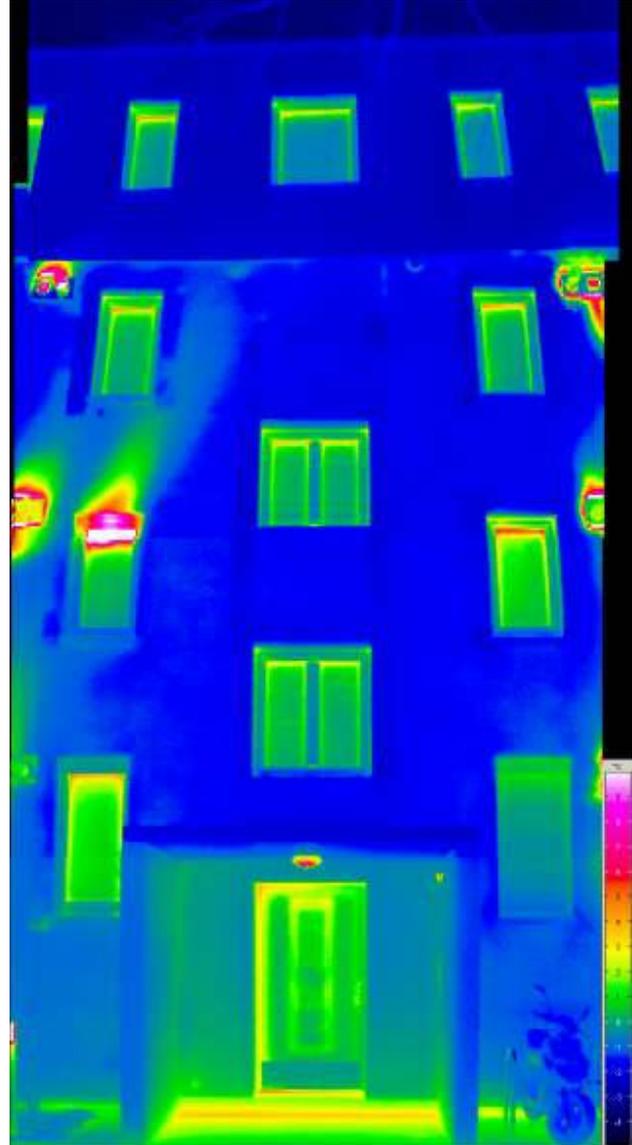
**Abbildung 176: offene Balkontür. Der teilweise herabgelassene Rollläden wird durch die ausströmende Raumluft stark erwärmt.**

**Abbildung 177: gekipptes Fenster in einem Nachbarhaus: deutlich höhere Fortluft = Ablufttemperatur.**

Abbildung 178 zeigt einige weitere erklärungsbedürftige Effekte. Am auffallendsten ist die Erwärmung der Außenwand aufgrund der Warmluftfahne, welche aus dem geöffneten Fenster im Bad des 1. OG links nach oben ausströmt. Das Fenster war allerdings nicht lange gekippt, wie das später aufgenommene optische Bild zeigt.

Die Spuren der Luftströmungen aus den Fortluftauslässen sind weniger warm aber trotzdem deutlicher erkennbar. Denn die Fortluft aus den Lüftungsanlagen ist in der Wärmerückgewinnung gegenüber der Raumlufttemperatur deutlich abgekühlt worden, diese Strömungen sind aber dauerhaft vorhanden. Die Spuren an der Fassade sind daher stärker.

Auffällig ist weiterhin, dass die Fassade unter dem Vordach deutlich wärmer ist als an den sonstigen Flächen. Dies ist auf die abschirmende Wirkung des Vordaches gegenüber der langwelligen Abstrahlung in den Nachthimmel zurückzuführen.

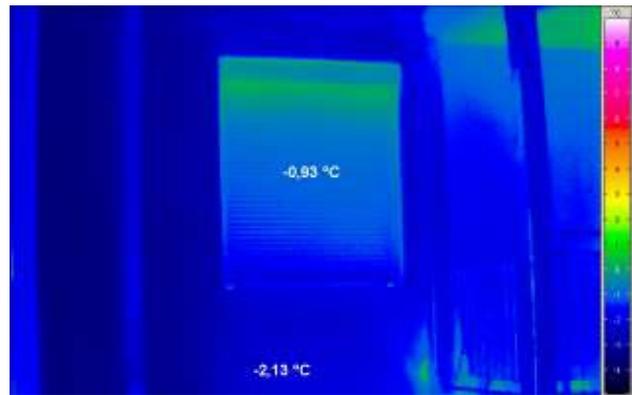


**Abbildung 178: Tevesstraße 54 Eingangsseite. Deutlich erkennbar kurzzeitige Warmluftströmung aus einem Fenster und dauerhafte aber kühlere Fortluftströmung aus der Lüftungsanlage.**  
{61227062u63u64}

Die nicht perfekte Luftdichtheit der Eingangstür ist in Abbildung 178 auch erkennbar, so zeigt sich ein Streifen mit höherer Temperatur im oberen Bereich der Haustür. Man beachte dass dieser Streifen an der Tür stärker ist als an den Fenstern, bei denen nur ein schmaler Streifen auf eine Restwärmebrücke hinweist.



**Abbildung 179: Tevesstraße 54 Einzelfenster ohne Rollläden. {61227041.png}**



**Abbildung 180: Tevesstraße 54 Einzelfenster mit geschlossenem Rollladen {27042.png}**

Man erkennt in Abbildung 179 oben am Fensterrand einen warmen Streifen, der sich bei allen Fenstern zeigt. Dies rührt zum einen ebenfalls von der Abschirmung des oberen Fensterrahmens gegen den kalten Nachthimmel durch den Sturz her. Andererseits sind die Wärmeverluste am Fenster aufgrund von konvektiven Strömungen im Scheibenzwischenraum am oberen Glasrand immer am größten, was sich an diesem wärmeren Streifen zeigt.

Abbildung 180 zeigt die IR-Aufnahme eines Fensters mit geschlossenem Rollladen. Auch hier ist die Oberflächentemperatur im oberen Bereich höher wegen der Konvektion der Luft hinter dem Rollladen. Insgesamt ist die Oberflächentemperatur allerdings deutlich geringer. Das bedeutet jedoch leider keinen besonders verbesserten Wärmedämmeffekt aufgrund des Rollladens, sondern ist wie die Wirkung einer vorgehängten, d.h. hinterlüfteten Fassade zu interpretieren. Die Hinterlüftung, d.h. Hinterströmung des Rollladens mit Außenluft bewirkt eine Abkühlung der Lamellen des Rollladens. Nur wenn der Rollladen allseitig, insbesondere auch an der unteren Kante zur Fensterbank luftdicht schließen würde, könnte damit eine gegenüber dem gut gedämmten Fenster mit Dreifachverglasung eine wesentliche Verbesserung erreicht werden. Bei konventionellen Rollläden beschränkt sich die Wirkung auf die oben beschriebene Abschirmung gegen den kalten Nachthimmel.

In Abbildung 181 ist eine Trennfuge im WDVS dargestellt. Diese Trennfuge ist als Dehnfuge bei größeren Flächen aus technischen Gründen notwendig. Es wäre aber möglich, die Fuge in der Tiefe z.B. mit Mineralwolle auszustopfen. Damit könnte die Konvektion in diesem recht breiten Spalt wirksam unterbunden werden. Die Abbildung veranschaulicht daher sehr gut die problematische Wirkung von Dämm-lücken, die es möglichst zu vermeiden gilt.

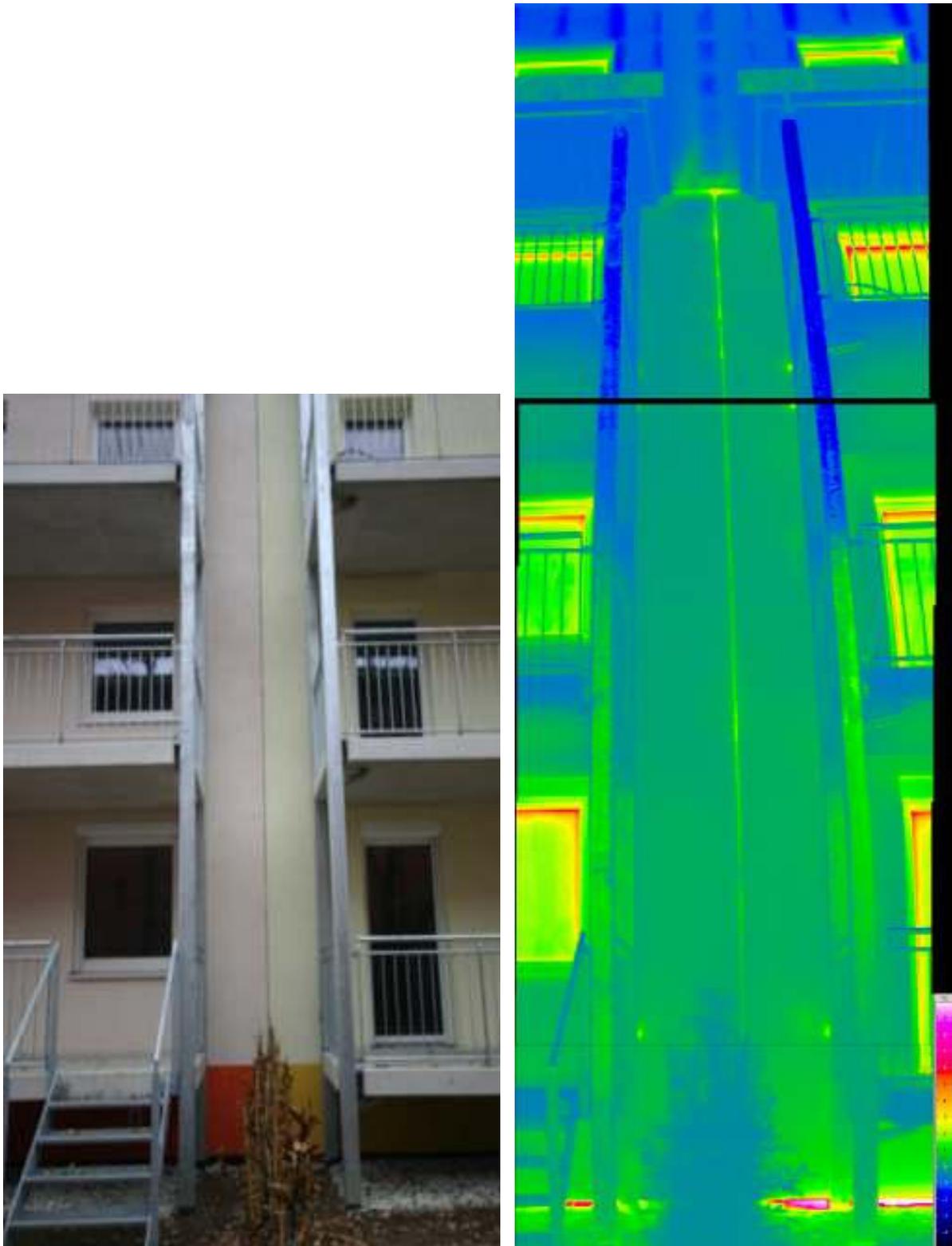
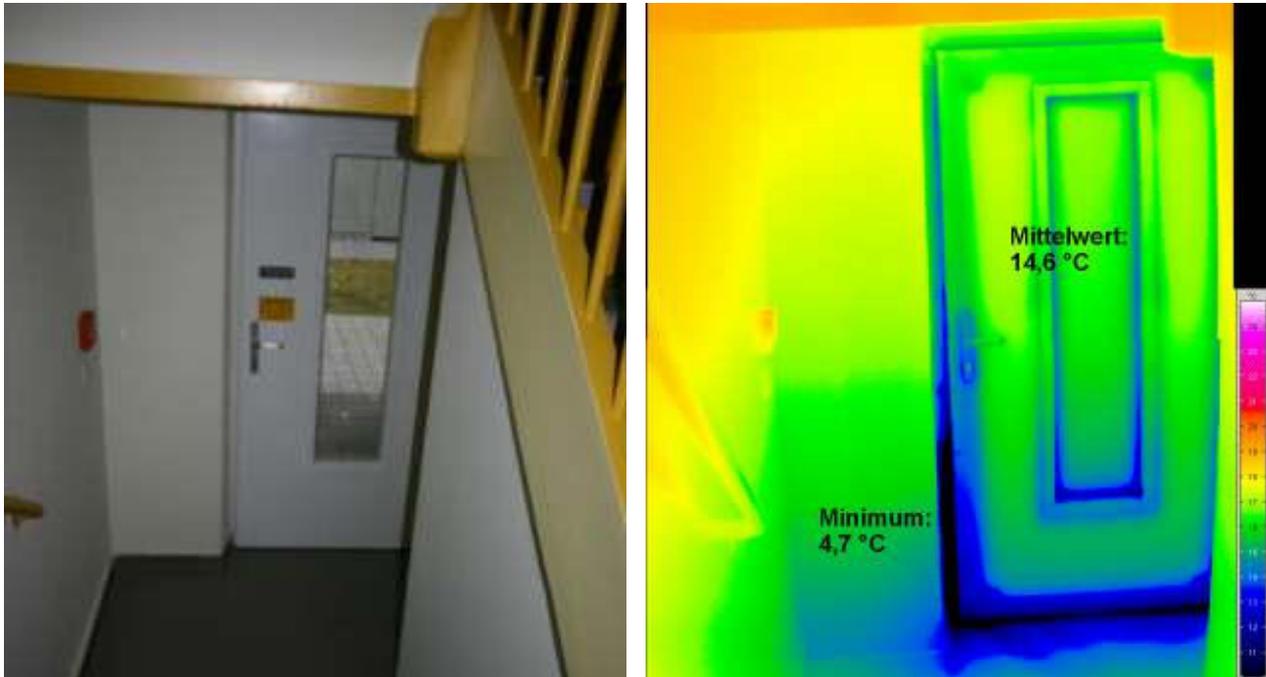


Abbildung 181: Trennfuge im WDVS {61227195u196u197u198u199u200.png}

## Innenthermographie

### Haustür: Luftdichtheit, Formstabilität



**Abbildung 182: Haustür Tevesstraße 48 von innen. Deutlich erkennbar ist, dass die Tür im unteren Bereich nicht luftdicht ist. Dies ist im Wesentlichen auf Anfangsprobleme mit dem Schließmechanismus zurückzuführen.**

Trotz Auswahl eines gegenüber Standardkomponenten deutlich verbesserten Produktes ist diese Eingangstür offensichtlich im unteren Bereich nicht luftdicht. Dies lag vor allem daran, dass es sehr schwere Türen waren, die zuerst nicht exakt waagrecht ausgerichtet waren und deshalb nicht dicht schließen konnten. Das ist darauf zurückzuführen, dass die recht aufwendig konstruierten elektromechanischen Schließmechanismen dieser Türen in der Anfangszeit nicht einwandfrei funktionierten bzw. insbesondere die hohe Öffnungsfrequenz in den Mehrfamilienhäusern nicht verkraftet haben. Der Schließmechanismus war in der Anfangsphase öfters defekt, weil das Stromversorgungskabel sehr störanfällig war und öfters abgerissen ist.

Im Gegensatz zu Fenstern hat eine Haustür in der Regel im unteren und oberen Bereich keine Schließbacken, die einen ausreichenden Anpressdruck garantieren würden. Daher müssen Haustüren besonders formstabil auch bei sich ändernden Wetterlagen sein. Um dies sicherzustellen ist eine Prüfung in der Klimakammer anzuraten.

Eine weitere Verbesserung der marktgängigen Lösungen wäre aber insofern möglich als man Ansätze von Konstruktionen aus dem Kühlraumsektor adaptieren könnte. Ein vergrößerter Funktionshub der Dichtbänder ist eine Möglichkeit. Manche Hersteller bieten neben der einen Schließe / Falle bei der Türklinke zwei weitere an, die un-

ten und oben angeordnet sind und das Türblatt auch dort gegen den Rahmen pressen, wenn die Tür nicht abgeschlossen ist.

### Anschluss Tevesstraße 36 zum Nachbargebäude Herxheimerstraße

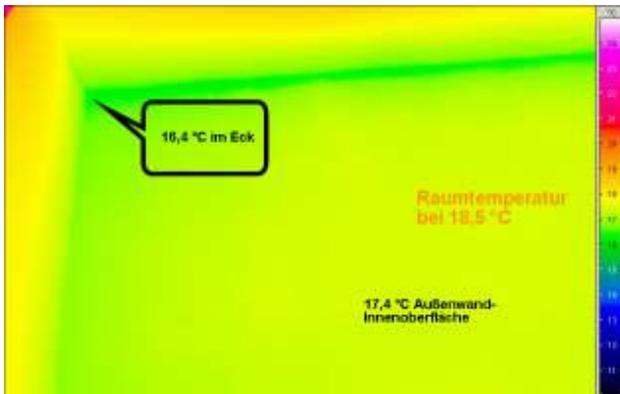


**Abbildung 183: Kante zu Nachbarhaus Herxheimer**

Das Gebäude Tevesstraße 36 grenzt direkt an das Nachbargebäude Herxheimerstraße. Das Nachbargebäude wurde vor mehreren Jahren mit 100 mm WDVS gedämmt. Zur Gartenseite stoßen somit die starke Dämmung des Gebäudes Tevesstraße an die dünnere Dämmung des Gebäudes Herxheimerstraße aneinander. Für das Gebäude Tevesstraße 36 ergibt sich damit eine kleine zusätzliche Wärmebrücke, die man in der Außenthermografie gut erkennen kann, siehe die Ausführungen zu Abbildung 170. Aber auch in der Thermografieaufnahme von innen, Abbildung 183, erkennt man leicht abgesenkte Temperaturen. Dies entspricht in etwa den Verhältnissen am Fußpunkt zum Keller wie man in Abbildung 186 erkennt.

Direkt an der Grenze zur Straßenseite befinden sich im Gebäude Herxheimerstraße Balkone in einer zurückspringenden Gebäudenische. Die Wand dieser Nische zur Tevesstraße 36 war zum Zeitpunkt der Aufnahmen der IR-Thermografie nur mit 100 mm WDVS wärmegeklämt. Außerdem schwächen bzw. unterbrechen die Balkonplatten das WDVS. Beide Effekte sieht man auf den Thermografieaufnahmen von außen, siehe die Diskussion zu Abbildung 169. Aber auch die Thermografien von

innen in Abbildung 184 zeigen gewisse Temperaturabsenkungen an den entsprechenden Wänden zum Nachbargebäude.

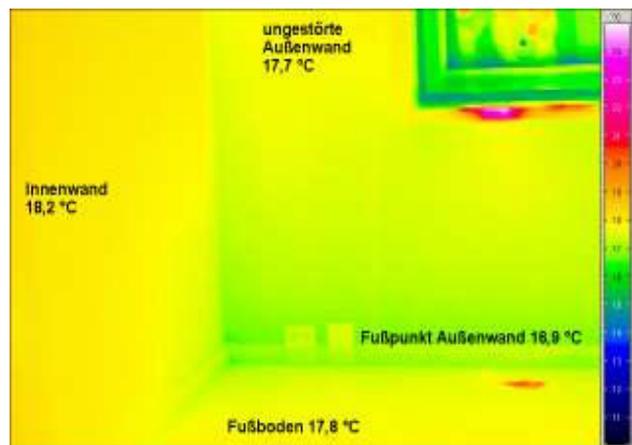
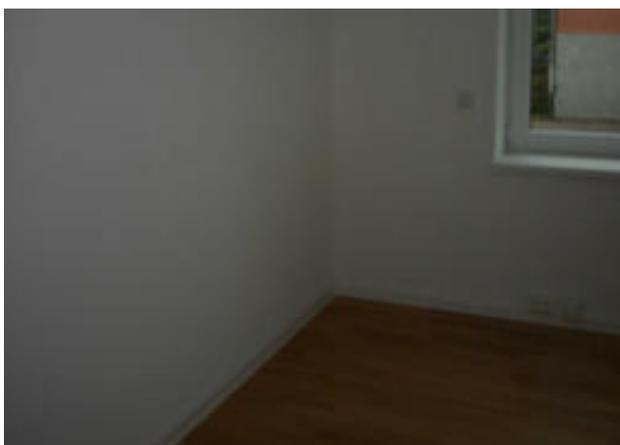


**Abbildung 184:** Tevesstraße 36 EG. Innenwand zum Nachbarhaus Herxheimerstraße an der Stelle der Balkonnische. Zum Zeitpunkt der Aufnahme war dort nur 100 mm WDVS auf der Außenwand vorhanden, wurde aber später nachgerüstet.



**Abbildung 185:** Tevesstraße 40. Es handelt sich um ein 'Mittelhaus', daher grenzt die Wand rechts an das ebenfalls warme Nachbargebäude; Wärmebrücken sind nicht erkennbar.

Die Innenthermografie in Räumen im EG zeigt die geringfügig abgesenkten Temperaturen am Fußpunkt zum Keller. Obwohl der Raum zum Zeitpunkt der Aufnahme, Abbildung 186, weil unbewohnt nur 'grundgeheizt' war, d.h. Raumlufttemperatur nur etwa 19°C, vgl. auch Abbildung 191, so liegen die niedrigsten Temperaturen am Fußpunkt zur Außenwand bei knapp unter 17°C. Dies zeigt einmal mehr die hohe Qualität der Außendämmung und bestätigt das Konzept zur Eindämmung der Wärmebrücke am Fußpunkt bzw. Kellersockel der Gebäude.



**Abbildung 186:** Fußbodenkante innen EG zum Keller.

## Badezimmer

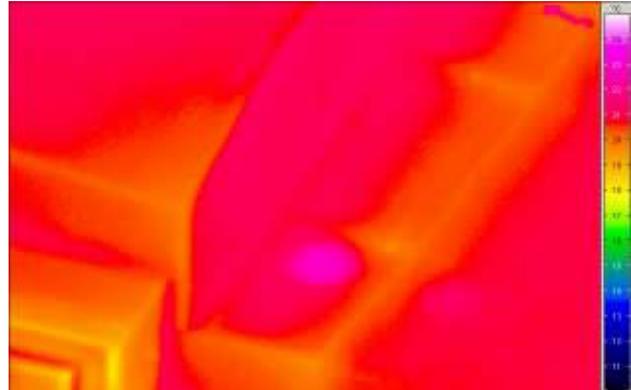
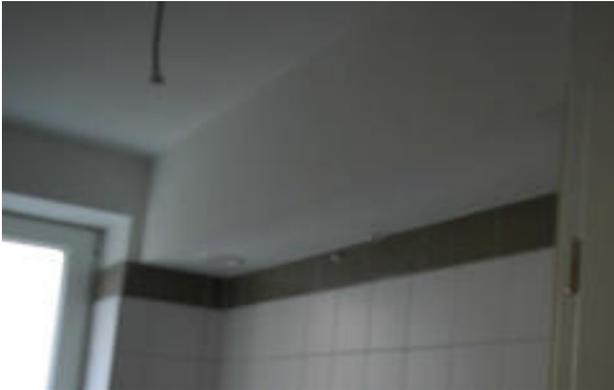


Abbildung 187: Abluftventil im Bad. In der Abkofferung verlaufen neben dem (warmen) Abluftkanal auch die (kalten) Frisch- und Fortluftkanäle.

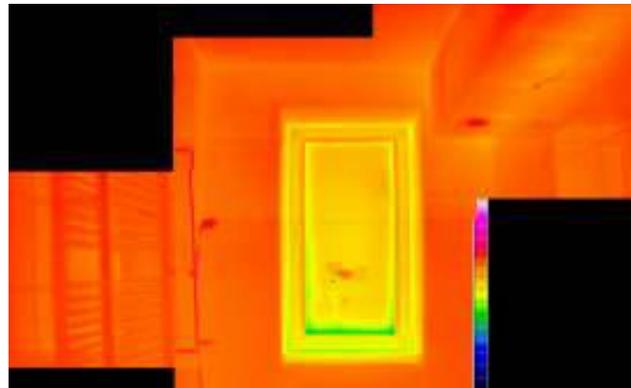
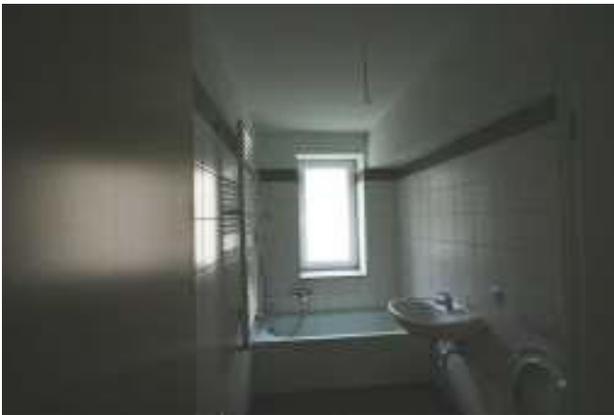


Abbildung 188: Bad innen. Die niedrigsten Oberflächentemperaturen finden sich mit etwa 16°C am Fenster.

In den Badezimmern erkennt man in der Innenthermografie im Wesentlichen die weitgehend homogenen Oberflächentemperaturen. Rechts oben verlaufen in der Abkofferung die kalten Frisch- und Fortluftkanäle. Diese Kanäle wurden neben einer Dämmung der Rohre aus diffusionsdichtem Kautschuk (Abbildung 30) noch zusätzlich mit Zelloosedämmung ausgeblasen, vgl. Abbildung 218. Die beiden Maßnahmen führen zu einer sehr guten Dämmung der kalten Kanäle, so dass man in der Thermografie an der Abkofferung keine gegenüber den anderen Oberflächen im Bad abgesenkten Temperaturen erkennen kann.

## Fenster

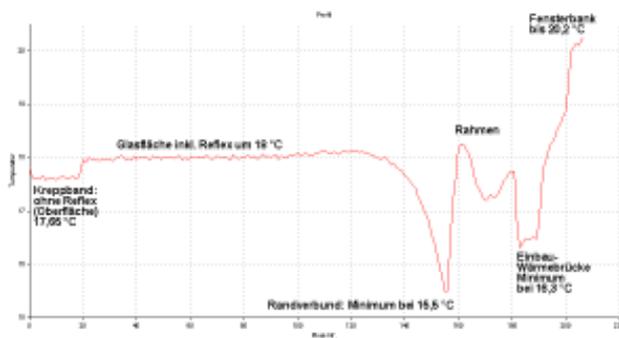
Die Oberflächentemperaturen an den Fenstern sind sehr interessant, weil sich daraus etwaige Wärmebrückeneffekte sehr leicht erkennen lassen. Die Wärmeverluste durch Verglasung und Fensterrahmen lassen sich auf diese Weise einerseits übersichtlich darstellen, andererseits an jedem Punkt im Detail analysieren. Lediglich bei spiegelnden Glasoberflächen ist Vorsicht geboten: In Spiegelnden Oberflächen werden statt der Oberflächentemperatur des Glases die Temperaturen der gespiegelten Objekte oder Personen aufgenommen. Um die tatsächliche Oberflächentemperatur einer Glasscheibe zu erhalten, muss deshalb z.B. ein Klebestreifen aus Kreppband aufgebracht werden, siehe Abbildung 189. Glas ist im Messbereich der Kamera (fernes Infrarot) nicht durchsichtig, sondern absorbiert (etwa 84%) und spiegelt die Strahlung zu ca. 16%.



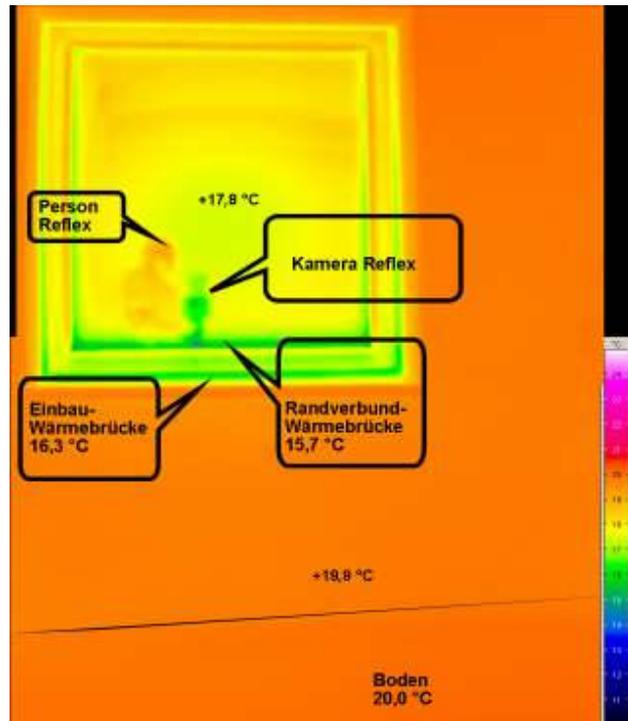
**Abbildung 189 links: Fenster mit Klebestreifen zur Bestimmung der tatsächlichen Oberflächentemperatur mit der IR-Kamera.**

**Rechts: In Spiegelnden Oberflächen werden statt der Oberflächentemperatur des Glases die Temperaturen der gespiegelten Objekte aufgenommen.**

In Abbildung 190 ist die IR-Thermografie eines typischen Fensters im Projekt Tevesstraße dargestellt. Daneben ist ein Linienscan senkrecht aus der Scheibenmitte nach unten dargestellt. Deutlich erkennt man die erhöhten Wärmeströme am Glasrandverbund und den Effekt der Einbauwärmebrücke. Die hohen Temperaturen im Bereich des Rahmens resultieren aus dessen guter Dämmung. Auf der ungestörten Wandfläche liegt die Temperatur knapp unter 20°C. Da die Fensterbank in den Raum hineinragt liegen dort die Temperaturen gegenüber der Wandoberfläche noch leicht höher.



**Abbildung 190: IR-Thermografie eines Fensters von innen. Oben das zugehörige Temperaturprofil, d.h. ein Linienscan durch die IR-Aufnahme.**



Die hier gezeigten IR-Aufnahmen und deren Analyse zeigen exakt das erwartete Bild für eine hochwertige moderne Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung, einen thermisch getrennten Randverbund und einen Passivhaus geeigneten, gut wärmegeprägten Fensterrahmen bei Einbau außen auf die Mauerwerkswand, d.h. vollständig in der Dämmebene. Doch auch dann sind noch Effekte von zusätzlichen Randverlusten erkennbar, insbesondere am Randverbund.

Das zeigt vor allem, dass trotz der bereits erreichten Verbesserungen gegenüber Standardfenstern noch ein großes Potential für weitere technologische Entwicklungen zur Verbesserung der Energieeffizienz an dieser Stelle besteht.

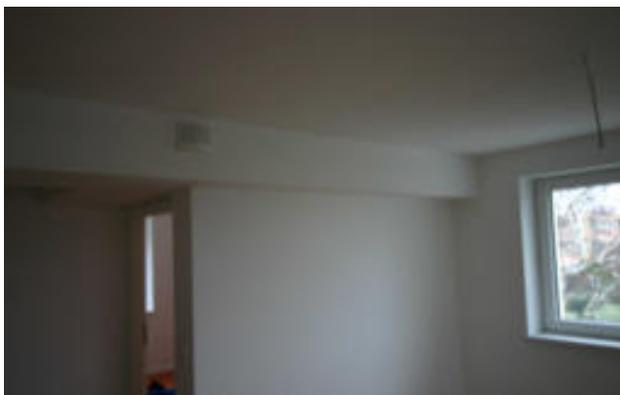
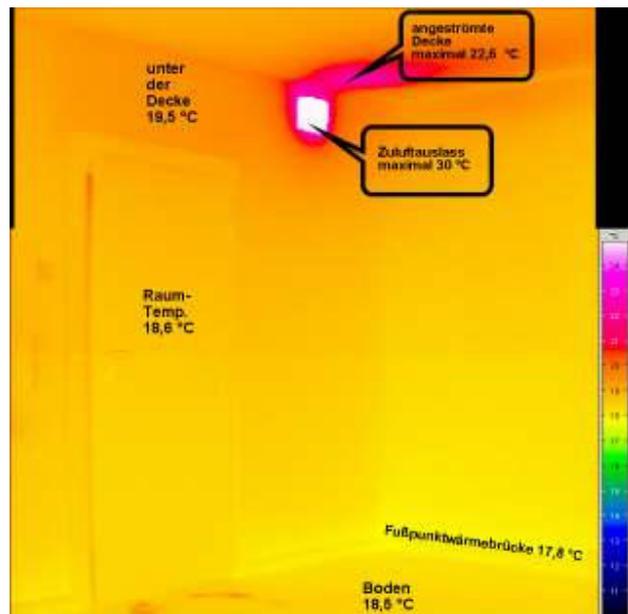
Solche Entwicklungen können die Wirtschaftlichkeit von Effizienzmaßnahmen noch weiter verbessern, weil sie es erlauben werden, eine noch höhere Steigerung von Einsparung und gleichzeitig eine wesentlich verbesserte Behaglichkeit in einem Schritt zu realisieren.

## Zuluftheizung

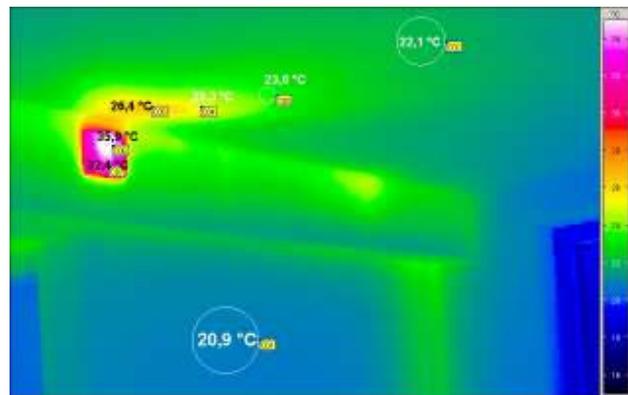
Die Wirkungsweise der Zulufnacherwärmung ist in Abbildung 191 und Abbildung 192 gut erkennbar. Der ausströmende warme Luftstrom legt sich an der Decke an und erwärmt diese mit. Daher ergibt sich neben der 'Luftheizung' auch ein Strahlungsanteil von der erwärmten Decke.



**Abbildung 191: Tevesstraße 36 EG. Zuluftelement über einer Zimmertür. Unbewohnte Wohnung, daher nur Grundheizung mit etwa 19°C.**



**Abbildung 192: andere Skala als in Abbildung 191: Luftauslass Tevesstraße 48 Wohnzimmer.**

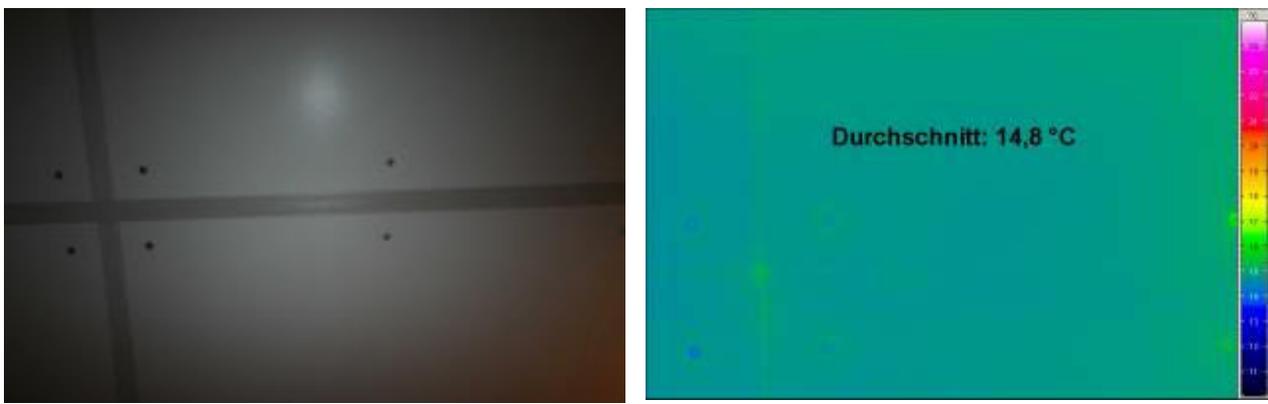


Alle Oberflächentemperaturen liegen sehr nahe bei der Raum(luft)temperatur. Die Deckentemperatur in Abbildung 192 ist sogar höher. In der Abkofferung verläuft der warme Luftkanal, der dessen Oberflächen erwärmt. Der Raum in Abbildung 191 war nur auf etwa 19°C beheizt, weil diese Wohnung zum Zeitpunkt der Aufnahme nicht bewohnt war.

Man beachte, dass eine Beheizung über die Zuluft nicht möglich wäre, wenn das Gebäude nicht in dieser hohen Qualität wärmedämmend wäre. Insbesondere die Fensterqualität spielt dabei eine entscheidende Rolle [Feist 2007] weil niedrigere Scheibenoberflächentemperaturen sonst zu einer Strahlungstemperatursymmetrie führen würden, die mit einer Beheizung über die Zuluft nicht kompensiert werden könnten.

## Keller von Innen

Die Kellerdecke ist von unten mit 80 mm PU-Schaum-Platten gedämmt, die unterseitig mit aufkaschierten Holzwerkstoffplatten versehen sind. Somit konnte in einem Arbeitsgang, ohne Verputzen oder Streichen eine fertige Oberfläche hergestellt werden. Die einzelnen Platten sind mit einem H-förmigen Profil untereinander verbunden, um Lücken in der Dämmschicht weitgehend auszuschließen und um einen guten optischen Eindruck der Oberfläche sicherzustellen, Abbildung 193. Wärmebrückeneffekte oder Dämm-lücken konnten dank der hochwertigen Ausführung praktisch nicht festgestellt werden.



**Abbildung 193: Kellerdecke mit PU-Platten gedämmt. Plattenstöße mit Spezialprofilen. Wärmebrücken oder Dämm-lücken konnten praktisch nicht festgestellt werden.**

Die aufgehenden Kellerwände bekamen ebenfalls eine Begleitdämmung aus demselben Material. Siehe dazu auch die Diskussion der Wärmebrückeneffekte verschiedener Planungsvarianten am Kellersockel in Abbildung 80 ff ab Seite 75. Auch die Ausführung dieser Begleitdämmung ist von guter Qualität, vgl. Abbildung 194.



**Abbildung 194: Begleitdämmung Kelleraußenwände von innen.**



**Abbildung 195: Kellertreppe. Die Begleitdämmung wurde aufgrund der beengten Platzverhältnisse nur mit einer Mindestdämmstärke von 50 mm ausgeführt.**

Die Begleitdämmung musste auch seitlich an den Wänden der Treppenhäuser am Abgang zum Keller angebracht werden. An dieser Stelle entsteht eine komplexe geometrische Situation weil das Treppenhaus im oberen Bereich innerhalb der Wärmedämmten Hülle liegt, unterhalb der Kellerdecke gehört es jedoch zum kalten Kel-

ler. Am Kellerabgang wurde daher die Dämmung seitlich zu den EG-Wohnungen hin und oben an der darüber liegenden Treppe angebracht, siehe das Übersichtsbild in Abbildung 195 links oben.

Aufgrund der beengten Platzverhältnisse, sowohl in der Breite als auch in der Lichten Höhe des Durchgangs, wurde hier dasselbe Material wie unter der Kellerdecke verwendet: PU-Schaum mit aufkaschierter weißer Holzwerkstoffplatte, es wurde aber in einer geringeren Stärke verarbeitet. Wichtig ist, dass an jeder Stelle eine Mindestdämmstärke von etwa 4 cm eingehalten wird, um ausreichend hohe Oberflächentemperaturen an den entsprechenden Innenoberflächen der Wohnräume sicherzustellen. Die hier eingegangenen Kompromisse am Treppenabgang sind also richtig, weniger wäre aber nicht mehr ausreichend gewesen.

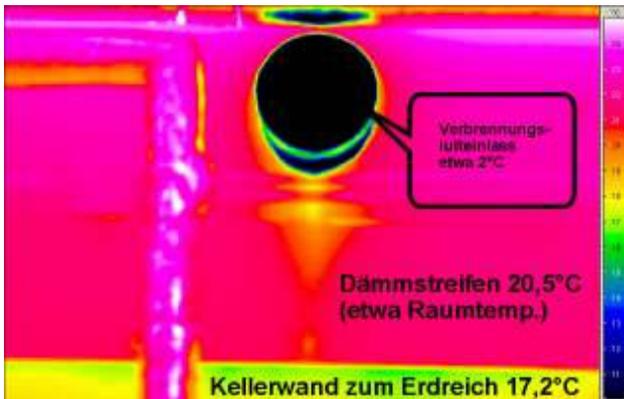
In den IR-Thermografien in Abbildung 195 sieht man eindeutig, dass die Oberflächentemperaturen zum kalten Keller hin wie erwartet über der Dämmung immer niedriger sind. Jeweils an den Endkanten der Dämmplatten steigen die Oberflächentemperaturen jedoch sprunghaft an, d.h. dort sind wie erwartet die Wärmeverluste dann höher.

Im Keller musste ein größerer Kabelkanal quer durch das ganze Gebäude verzogen werden. Dies geschah in der Mitte des Gebäudes. Da die Dämmschicht mit 80 mm sehr dünn ist, durchdringt der Kabelkanal sie vollständig. Die Wärmebrückenwirkung an dieser Stelle ist in Abbildung 109 im Detail diskutiert. Abbildung 196 zeigt einen Abschnitt des Kabelkanals mit einer Dämmplatte als Abdeckung. In der IR-Aufnahme sieht man praktisch keine auffälligen 'hot-spots'.



**Abbildung 196: Kabelkanal an der Kellerdecke zusätzlich von Dämmlage abgedeckt. Blickrichtung in beiden Bildern um 90° verdreht.**

**Haustechnische Installationen**



**Abbildung 197: Verbrennungslufteinlass Gas-Brennwerttherme 61227121.png**

**Abbildung 198: Versorgungsschacht Tevesstraße 48 61227011.png**

Die Analyse der IR-Aufnahmen der Haustechnischen Installationen zeigt im Wesentlichen, dass die Wärmedämmung aller wärmeleitenden Leitungen und WW-Speicher in hoher Qualität ausgeführt wurde. Trotzdem blieben manche Armaturen ungedämmt, weil die heute am Markt verfügbaren Dämmschalen nicht eingesetzt wurden. Die wärmeleitenden Leitungen wurden alle gemäß geltender Vorschriften gedämmt (100% DN, d.h. Dämmstärke gleich Nenndurchmesser der Leitungen). In den IR-Aufnahmen ist erkennbar, dass hier noch Optimierungspotenziale bestehen. Studien von Feist und Kah haben ergeben, dass das ökonomische Optimum heute eher bei 150 bis 200 % DN liegt, je nach Leitungstyp [Kah 2008]. Die Auswertung der Messtechnischen Untersuchungen zum Projekt Tevesstraße von Søren Peper zeigen dies ebenfalls sehr deutlich [Peper 2009]. Siehe dazu auch die Vorbemerkung zum Abschnitt 4 'Haustechnik' in diesem Bericht.

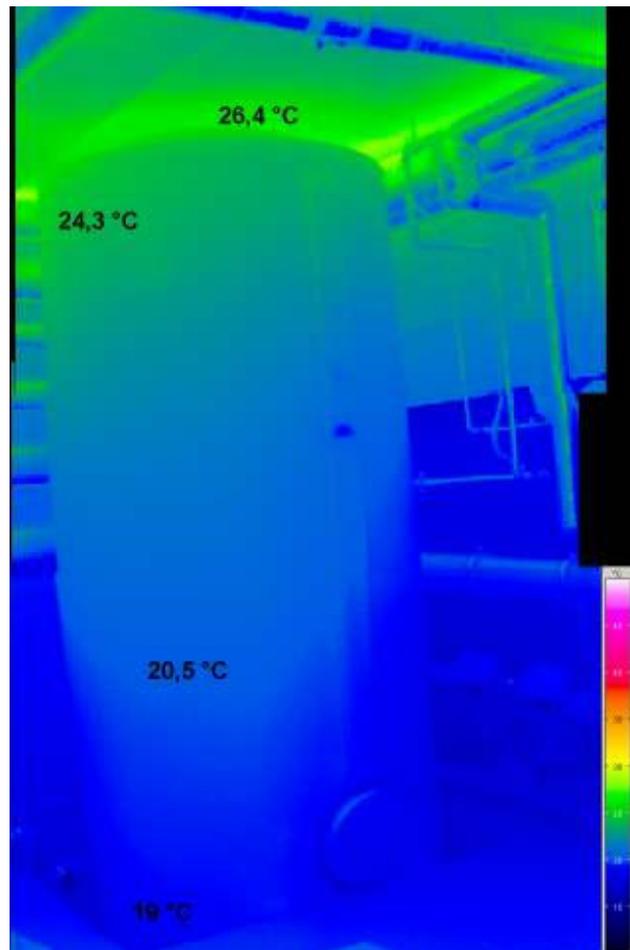


Abbildung 199: Warmwasserspeicher. Trotz Wärmedämmung ist die Außenoberfläche des Speichers deutlich wärmer als die Umgebung. {61227118}

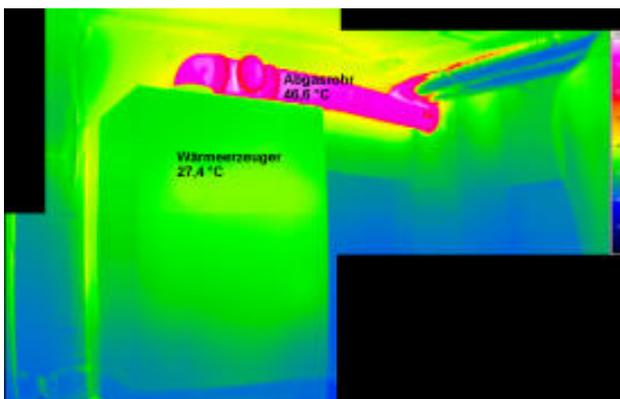


Abbildung 200: Wärmeerzeuger und Abgasrohr im Heizungskeller. {61227113}



Abbildung 201: ungedämmte Installationen im Heizungskeller {61227109}

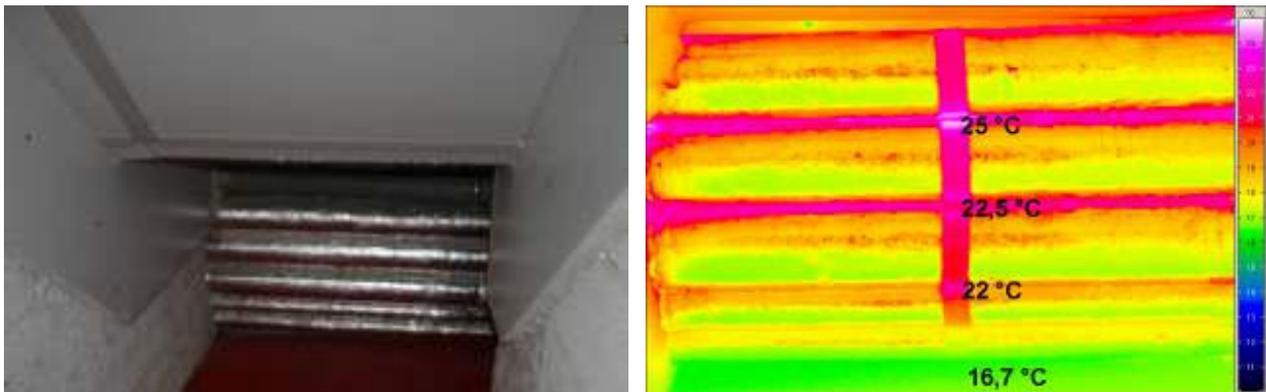


Abbildung 202: Verteilleitungen im Keller Tevesstraße 48 {61227095}

### Anhang IR-Thermografie: Einige weitere Außenaufnahmen

Kommentare zu den Folgenden Bildern finden sich, soweit notwendig in den Bildunterschriften. Auffällig sind vor allem die Fortluftauslässe und die zugehörigen Fortluftfahnen.

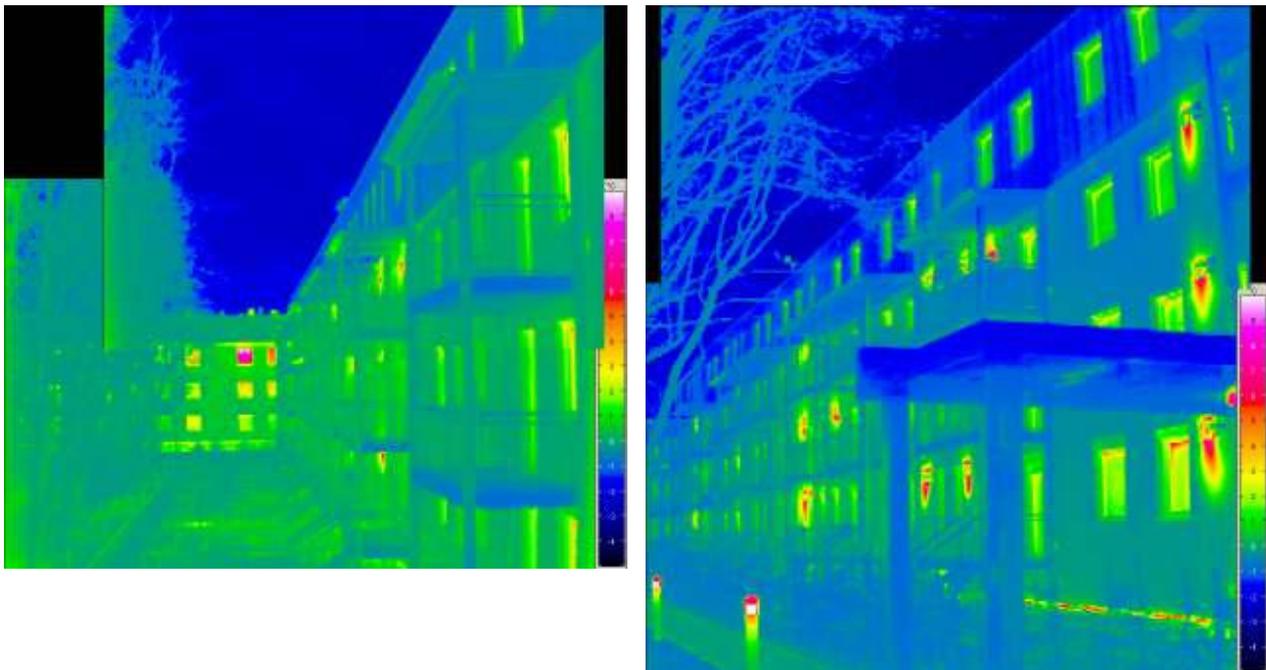


Abbildung 203: Tevesstraße 36 bis 46 Gartenseite 61227161u162

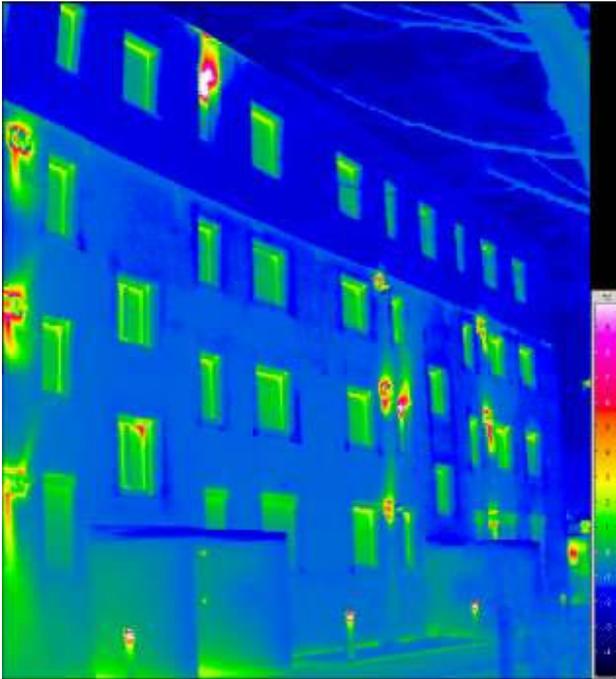


Abbildung 204: Tevesstraße 48 bis 54  
Eingangsseite {61227090u91}

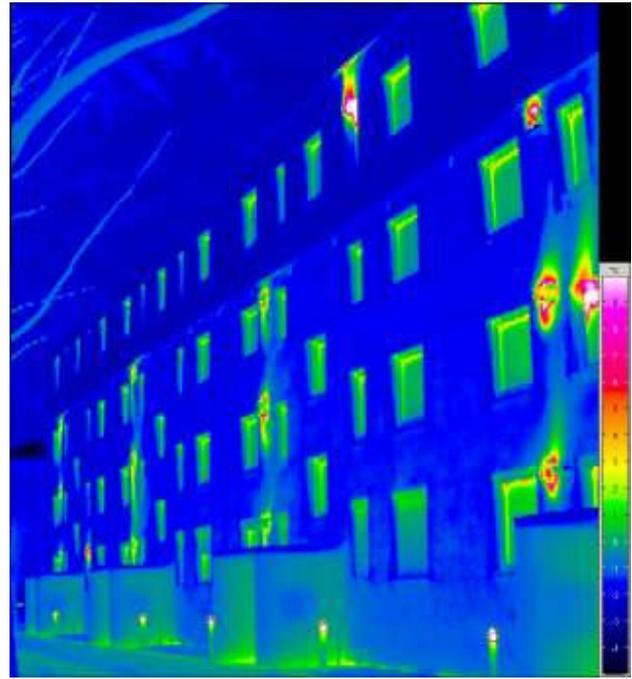


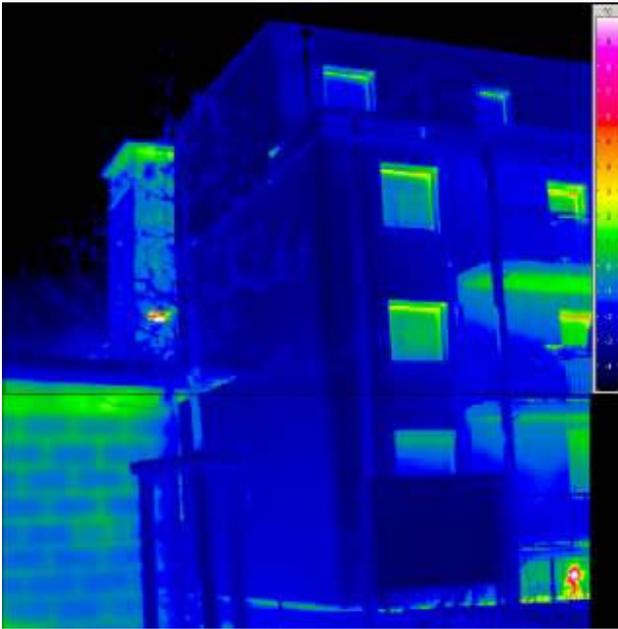
Abbildung 205: Tevesstraße 48 bis 54  
Eingangsseite {61227054u56}



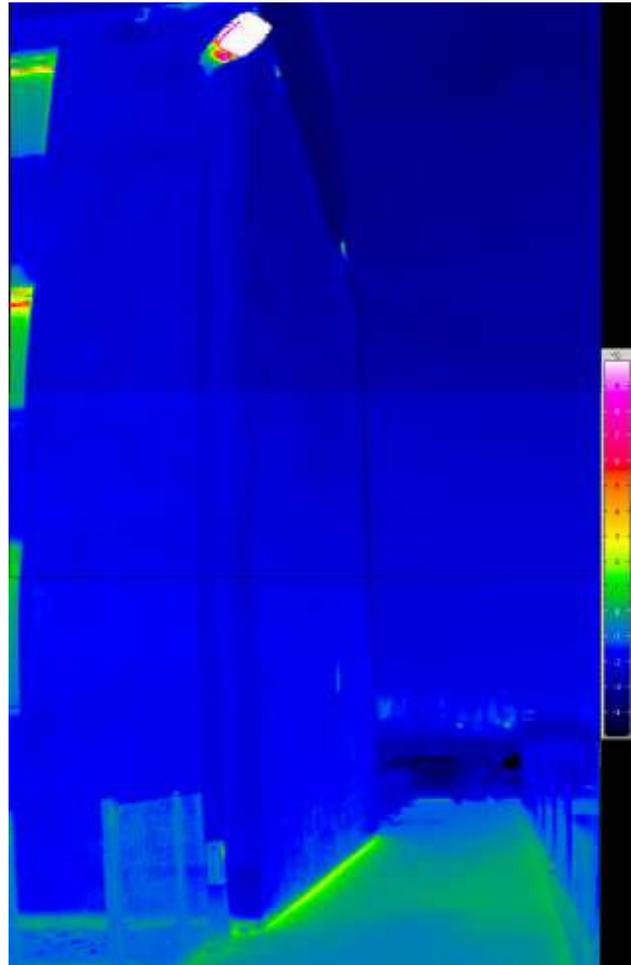
Abbildung 206: Tevesstraße 48 Giebel  
{61227102u103}



Abbildung 207: Tevesstraße 48 Straßenseite  
{61227010u11}



**Abbildung 208: Tevesstraße 54 Giebelwand von  
der Straßenseite aus gesehen {61227025u27}**



**Abbildung 209: Tevesstraße 54 Giebelwand von  
der Gartenseite aus gesehen {61227044u45u47}**

## 4 Haustechnik

### **Beratungsleistung des Passivhaus Instituts während der Planungsphase: Grundsätze zur Vermeidung von Verteilverlusten bei zentraler Wärmeversorgung**

#### **Kerngrundsätze**

Warme Leitungen müssen grundsätzlich innerhalb der thermischen Hülle verlegt werden; nur in Ausnahmefällen, über sehr kurze Wege und dann mit einer extrem guten Dämmung (mindestens  $2 \cdot DN$ ) ist auch eine Verlegung z.B. im Keller möglich. Es sollen so wenig wärmeführende Komponenten wie möglich eingesetzt werden, auch innerhalb der Hülle soll die Leitungsführung so kurz wie möglich und sollen die Leitungsquerschnitte so klein wie möglich sein. Alle warmen Teile müssen durchgehend hochwertig gedämmt werden.

#### **Grundsätze zur Leitungsdämmung**

**Kleinstmögliche Querschnitte der Leitungen wählen.** Dazu ist eine Berechnung der maximalen Last und eine Berechnung der Druckverluste erforderlich. Die Querschnitte müssen andererseits ausreichen, um Fließgeräusche sicher zu vermeiden. Das Passivhaus kommt der Erfüllung aller Anforderungen stark entgegen, weil nur kleine maximale Lasten zu erwarten sind: für die Heizwärmeleitung maximal  $20 \text{ W/m}^2$  auch bei Sanierungsprojekten, nur geringe Zirkulations-Rücklauf-Wassermengen weil das gesamte WW-Netz hochwertig gedämmt wird (s.u.).

**Alle wärmeführenden Leitungen müssen durchgehend gedämmt werden.** Der Nachdruck liegt auf **durchgehender** Dämmung. Die Grundsätze hierfür sind vergleichbar denen der Dämmung der Gebäudehülle: unterbrechungsfrei, ohne Spalte, auch an Bögen und Abzweigungen, etc.

**Die Dämmung muss am wasserführenden Rohr eng anliegen, es darf keine Lufträume zwischen der Dämmung und dem Rohr geben.** Einer der häufigsten Fehler in der Praxis ist die Verwendung von Rohrdämmschalen mit zu großem Innendurchmesser; das Rohr ist dann unmittelbar von einem Lufthohlraum umgeben, diese Luft heizt sich stark auf, wodurch große Auftriebskräfte entstehen; diese treiben die Luft auch durch schmalste Spalte, wodurch sich ein hoher zusätzlicher konvektiver Wärmeverlust ergibt. Spalte dürfen am Abschluss der Dämmschalen nicht verbleiben; daher ist der Verschluss (Verklebung) nach Vorn zu drehen, so dass eine visuelle Kontrolle möglich ist. Das PHI wird Stichproben thermographisch kontrollieren.

**Auch Abzweige, Verschraubungen und Armaturen müssen gedämmt werden.** Die Dämmdicke soll überall mindesten  $1 \cdot DN$  betragen, auch in Steigschächten, die hinterher mit Ausblasdämmstoff verfüllt werden (Konvektionsbremse, höherwertiger Dämmstoff).

**Es sollte ein hochwertiger Dämmstoff,  $\lambda < 0,035 \text{ W/(mK)}$ , verwendet werden.** Gerade bei der Leitungsdämmung ist ein hochwertiger Dämmstoff mit niedriger Wärmeleitfähigkeit unmittelbar am Rohr sehr wichtig, da die Dämmwirkung nur logarithmisch mit dem Abstand zum Rohr zunimmt. Die ersten Zentimeter müssen daher so hochwertig wie vertretbar ausgeführt werden.

**Keine Endmuffen (Wärmebrücken).** Endmuffen aus Metall sehen möglicherweise "sauber" aus, erhöhen aber den Wärmeverlust; grundsätzlich ist die Dämmung unterbrechungsfrei auszuführen - es gibt dann keine Endmuffen, sondern nur Anschlüsse z.B. an Speicher oder Pumpengehäuse. Diese sind lückenlos bis an die jeweilige Armatur heranzuführen. Wo immer zulässig, sind auch die wärmeführenden Armaturen zu dämmen.

**Echte gedämmte Abzweigdämmungen.** Hier kann (vgl. [Pfluger\_1 2004]) mit Geh-rungsschnitten gearbeitet werden.

**Rohrschellen über die Dämmung.** Grundsätzlich sind wärmeführende Rohrstücke zuerst zu dämmen und erst dann außerhalb der Dämmung mit einer Rohrschelle zu befestigen. Dies ist auch schallschutztechnisch besser. Die Methode hat sich bereits im Passivhaus Kranichstein seit 14 Jahren bewährt.

### **Grundsätze Dämmung Kellerleitungen**

Es gelten alle Punkte wie oben sowie darüber hinaus:

- Gedämmte Leitungen gerade und parallel unter der Rohdecke montieren, vgl. Abbildung 210 und Abbildung 211.
- Gesamtbreite des "Leitungskanals" maximal 50 cm
- Dieser "gedachte Kanal" wird an der Decke zeichnerisch markiert. Das Ge-werk, das die Kellerdeckendämmung durchführt (später) kann störungsfrei bis an diese Grenze herandämmen.

Ablauf:

- gedämmte Leitungen montieren;
- Nachdämmen, Abkleben;
- Dämmung der Kellerdecke (anderes Gewerk) mit sauberem Abschluss neben Rohrleitungen, 50 cm Kanal frei halten
- Kanal ausstopfen ( $\lambda < 0,035 \text{ W/(mK)}$ )
- Deckplatte  $\geq 30 \text{ mm}$  mit  $\lambda < 0,025 \text{ W/(mK)}$ , 50 cm breit, als Deckel mit Halte-leisten verlegen

## Grundsätze Dämmung Steigleitungen

Es gelten alle Punkte wie dargestellt sowie darüber hinaus: Warme Leitungen sollten möglichst zentral im Schacht angeordnet werden.

Ablauf der Installation:

- gedämmte Leitungen montieren;
- Nachdämmen, Abkleben;
- Ausblasen des Steigschachtes mit Einblasdämmstoff

## Grundsätze zur Dämmung des Wärmespeichers

- Alle wärmeleitenden Teile müssen durchgehend gedämmt werden. Auch Abzweige, Verschraubungen, Flansche, Armaturen sind zu dämmen!
- Die Dämmung muss eng anliegen, keine Spalte, keine Lufträume, kein offener Deckel; Eine visuelle Kontrolle ist unerlässlich; das PHI wird auch thermographisch kontrollieren.
- Die Dämmdicke muss überall mindesten 120 mm betragen.
- Es wird ein hochwertiger Dämmstoff,  $\lambda < 0,035 \text{ W/(mK)}$ , verwendet
- keine Endmuffen verwenden (Wärmebrücken)

## Grundsätze für Zirkulationsleitungen

Es sind kleinste Durchmesser zu wählen (10 mm reichen immer). Die Dämmung ist mit hochwertigem Dämmstoff, enganliegend und ohne Spalte auszuführen.

Die Zirkulationspumpe soll maximal 10 Watt elektrische Aufnahmeleistung aufweisen, sie muss über eine Zeitschaltuhr gesteuert werden. In der Regel reicht eine Freigabe von 5:00 bis 23:30.

## **Haustechnik**

Neben der wissenschaftlichen und bauphysikalischen Beratung zur Modernisierung der Gebäudehülle wurden in der Planungsphase sowohl die Fachplaner als auch die Architekten zur energetischen, technischen und ökonomischen Optimierung der Haustechnik beraten. Hierbei wurden insbesondere hocheffiziente Technologien aus dem Passivhaus-Neubaubereich auf deren Anwendbarkeit bei der Bestandssanierung untersucht. In den nachfolgenden Abschnitten werden sowohl die zentrale als auch die dezentrale Variante vorgestellt. Der Schwerpunkt der Untersuchung lag zu diesem Zeitpunkt auf der dezentralen Variante, weil die zentrale Variante kaum Unterschiede zur Implementierung im Neubau aufweist.

Unabhängig von der Art der Heizwärmebereitstellung und Verteilung werden die Gebäude mit Komfortlüftung (Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung) ausgestattet. Eine im Winterhalbjahr 2000/2001 durchgeführte repräsentative Untersuchung [Heinz 2004] in 5530 Wohnungen zeigte, dass es im Bestand insgesamt 21,9 % Wohnungen mit sichtbaren Feuchteschäden gab, davon waren 14,2 % lüftungsrelevant, d.h. nicht durch Leitungs- bzw. Regenwasser oder aufsteigende Feuchte verursacht. Vor diesem Hintergrund sollte die kontrollierte Wohnungslüftung zum selbstverständlichen Bestandteil der Bestandssanierung werden.

Wie in [Pfluger\_1 2004] ausgeführt, kann mit marktverfügbaren Komponenten bereits heute fast jedes Bestandsgebäude selbst bei beengten Platzverhältnissen mit einer kontrollierten Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung ausgestattet werden, nur in Ausnahmefällen muss auf Abluftanlagen oder dezentrale Geräte zurückgegriffen werden. Das Projekt „Tevesstraße“ mit den geringen Raumhöhen von 2,4 m und den kleinen Wohnungsgrundrissen stellt dafür ein gutes Beispiel dar. Die Luftführung und Geräteaufstellung wird in späteren Abschnitten erläutert. Die Grundsätze hierfür sind unabhängig von der gewählten Systemvariante der Wärmeversorgung, welche in den nachfolgenden Abschnitten untersucht werden.

## **Varianten für Heizwärmeversorgung und Warmwasserbereitung**

Die Bestandsgebäude waren mit Gasversorgung erschlossen und wurden größtenteils über Gasetagenheizungen beheizt. Darüber hinaus wurde das Gas in den meisten Fällen auch zum Kochen genutzt. Da die Wohnungen aber vorher nie generalsaniert worden waren, war der Standard der Haustechnik jeder Wohnung individuell unterschiedlich, bis hin zum Kohleofen für die Warmwasserbereitung im Badezimmer (siehe Bestandsdokumentation [Pfluger\_3 2004]). Das Leitungsnetz für Wasser und Strom musste aus Altersgründen ohnehin bei einer Generalsanierung erneuert werden.

Vom Bauherrn werden Lösungen bevorzugt, welche keine oder nur geringe Abrechnungskosten zur Folge haben. Daneben sind natürlich Investitionskosten und Wartung wichtige Entscheidungskriterien. Unter Beachtung dieser ökonomischen Randbedingung wurden primärenergetisch günstige Lösungen gesucht und optimiert.

### Zentrale Wärmeversorgung

Die Wohnungen der Tevesstraße 36-46 sollen wohnungsweise mit Wohnungslüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnung ausgestattet werden. Die Wärmeversorgung soll jedoch zentral im Keller von Haus 42 mittels Gasbrennwertgerät und Pufferspeicher realisiert werden. Das Heizmedium wird über Zirkulationsleitung in die einzelnen Wohnungen geführt. Dort wird über Wärmeübertrager das Trinkwarmwasser erzeugt. Alternativ hierzu könnte auch ein konventionelles Vierleitersystem mit getrennter Heiz- und Trinkwasserzirkulation ausgeführt werden.



Abbildung 210: Gedämmte Rohrleitungen der zentralen Wärmeversorgung die in der Dämmebene verlegt sind.



**Abbildung 211: Gedämmte Rohrleitungen die in der Dämmebene verlegt sind.**



Erfahrungen über zentrale Wärmeversorgung mittels Zweileitersystem liegen bereits aus mehreren Passivhaus-Neubauprojekten (z. B. Wiesbaden Dotzheim, Hannover Kronsberg und Frankfurt Bockenheim) vor. Diese lassen sich prinzipiell auch in Bestandsgebäude übertragen. Der Platzbedarf in den Wohneinheiten für Plattenwärmeübertrager ist vernachlässigbar gering. Für die Abrechnung wird neben dem Kaltwasserzähler pro Wohneinheit nur ein Wärmemengenzähler für die Gesamtwärmeabnahme (Warmwasser und Heizung) benötigt. Auf die baulichen Gegebenheiten des Bestandsgebäudes muss bei diesem Konzept lediglich bei der horizontalen Lei-

tungsführung und den Steigsträngen geachtet werden. Da die Kellerdecke gedämmt werden soll, bietet es sich an, die Leitungen in dieser Dämmung als vorgedämmte Leitungen einzubetten (Befestigung mittels Schellen die um die Wärmedämmung gelegt werden).

### **Dezentrale Versorgung mit Wärmepumpen-Kompaktgeräten**

Aufgrund der geplanten hohen Qualität der Gebäudehülle nach der Bestandsmodernisierung mit Passivhaus-Komponenten besteht die Möglichkeit, die erforderliche Heizleistung über die Zuluft und einen Badheizkörper einzubringen. Die reine Frischluftheizung, welche sich bei Passivhaus-Neubauten bereits hervorragend bewährt hat, ermöglicht die Einsparung von vielen statischen Heizflächen und deren Verteilungen. Sie bietet sich bei diesem Modernisierungsvorhaben an, weil ohnehin eine Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung integriert werden soll. Passivhaus-Kompaktgeräte mit Kleinstwärmepumpen (Leistung ca. 1,5 kW thermisch) haben sich im Einfamilien- und Reihenhausneubau bereits gut bewährt, erst seit kurzer Zeit sind sie auch für Mehrfamilien- und Geschosswohnungsbauten auf dem Markt (siehe hierzu auch [AK 26]). Durch zusätzliche Außenluftansaugung wird die Anströmung des Verdampfers erhöht und die Bereifung reduziert. Damit können die Geräte auch ohne Außenluftvorerwärmung durch einen Erdwärmetauscher eingesetzt werden. Letzterer ist im Geschosswohnungsbau problematisch, weil lange kalte Kanalstücke durch das Gebäude (mit hohem Kosten und Platzaufwand für dessen Dämmung) geführt werden bzw. mit solegeführten Erdleitungen gearbeitet werden müsste. Aus- und Erdarbeiten im städtischen Bestandsumfeld sind generell problematisch.

In diesem Projekt sollten u.a. die Vorteile der Kompaktgeräte (monovalentes dezentrales System, keine zusätzlichen Abrechnungskosten, platzsparende kompakte Bauweise, keine externen statischen Heizflächen und entsprechende Verteilsysteme notwendig, hohe Effizienz) im Einsatz bei der Bestandsmodernisierung erprobt werden. Am Beispiel der Gebäude in der Tevesstraße zeigt sich, dass die Randbedingungen für die Haustechnik im energetisch sanierten Bestandsgebäude insbesondere im Geschosswohnungsbau eine große Bandbreite aufweisen. Mit Hilfe der nachfolgenden Parameteruntersuchung wird gezeigt, welche Geräteauslegung benötigt, und welcher Primärenergieeinsatz jeweils zu erwarten ist.

### **Heizlastberechnung, Dimensionierung und Parameteruntersuchung**

In den nachfolgenden Untersuchungen werden beide Gebäudeblöcke Tevesstr. 48-54 und 36-46 einbezogen. Es wurde letztlich nur ein Kompaktgerät in der ursprünglichen Musterwohnung in Haus 54 EG links installiert, der Vollständigkeit halber wurden die Berechnungen aber für beide Gebäude durchgeführt. Die Wohnflächen der einzelnen Wohneinheiten nach der Modernisierung sind jeweils in Tabelle 12 und

Tabelle 13 nach Hausaufgängen bzw. in Tabelle 14 nach Wohnungsgröße geordnet aufgetragen.

Wohnfl. [m <sup>2</sup> ]	Haus 48		Haus 50		Haus 52		Haus 54	
	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts
<b>DG</b>	33,2	63,0		63,0		63,0		50,7
<b>OG 2</b>	86,8		85,5		85,5		41,7	65,7
<b>OG 1</b>	86,8		85,5		85,5		41,7	65,7
<b>EG</b>	86,8		85,5		85,5		41,7	65,7

**Tabelle 12: Wohnflächen im Gebäude Tevesstr. 48-54 (20 WE, Wohnfläche ges. 2299,5 m<sup>2</sup>)**

Wohnfl. [m <sup>2</sup> ]	Haus 46		Haus 44		Haus 42		Haus 40		Haus 38		Haus 36	
	links	rechts										
<b>DG</b>	81,5		80,0		80,0		80,0		80,0		81,0	
<b>OG 2</b>	99,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	99,8	99,8
<b>OG 1</b>	99,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	99,8	99,8
<b>EG</b>	99,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	99,8	99,8

**Tabelle 13: Wohnflächen im Gebäude Tevesstr. 36-46 (36 WE, Wohnfläche ges. 1356,5)**

Die Palette der Wohnungsgrößen reicht damit von der Kleinstwohnung mit 33 m<sup>2</sup> bis zur knapp 100 m<sup>2</sup>-Wohnung. Im Mittel liegt die Wohnfläche pro Wohneinheit bei 65,3 m<sup>2</sup>, dies entspricht etwa dem Bundesdurchschnitt der Wohneinheiten im Geschosswohnungsbau. Für die Dimensionierung der Kompaktgeräte von Bedeutung ist sowohl die maximale insgesamt erforderliche Wärmelieferung für Warmwasser und Heizung, als auch das Verhältnis von Warmwasser zu Heizung.

Aus diesem Grund wurde die minimale und maximale Personenbelegung für alle Wohnungstypen ermittelt und daraus der mögliche Wertebereich für die spezifische Wohnfläche bestimmt. Diese reicht von 13,3 m<sup>2</sup>/Person (80 m<sup>2</sup> - Wohnung bei Belegung mit 6 Personen) bis 65,7 m<sup>2</sup>/Person (65,7m<sup>2</sup> - Wohnung von nur einer Person bewohnt).

Wohnfläche [m <sup>2</sup> ]	Anzahl der WE	Pers. min	Pers. max.	Personen Standard (bei 25 m <sup>2</sup> /P)	max. spez. Wohnfläche (m <sup>2</sup> /Person)	min. spez. Wohnfläche (m <sup>2</sup> /Person)
33,2	1	1	2	1,3	33,2	16,6
41,7	3	1	3	1,7	41,7	13,9
50,7	1	1	3	2,0	50,7	16,9
50,8	24	1	3	2,0	50,8	16,9
63,0	3	1	4	2,5	63,0	15,8
65,7	3	1	4	2,6	65,7	16,4
80,0	4	2	6	3,2	40,0	13,3
81,0	1	2	6	3,2	40,5	13,5
81,5	1	2	6	3,3	40,8	13,6
85,5	6	2	6	3,4	42,8	14,3
86,8	3	2	6	3,5	43,4	14,5
99,8	6	2	6	4,0	49,9	16,6

**Tabelle 14: Wohnflächen nach Größe sortiert; Bereiche der spezifischen Wohnflächen**

Für die Standard-Personenbelegung wurde mit einer spezifischen Wohnfläche von 25 m<sup>2</sup>/Person gerechnet, diese Werte sind mit einer Dezimalstelle zur Orientierung ebenfalls in der Tabelle 14 eingetragen. Zunächst wurde als spezifische Heizlast der nach dem PHPP-Heizlastverfahren berechnete Wert für das Gesamtgebäude für alle Wohnungsgrößen herangezogen.

Wohnfläche [m <sup>2</sup> ]	Pers. min.	Pers. max.	Personen Standard	maximale Gesamtwärmeleistung [kW] min	maximale Gesamtwärmeleistung [kW] max.	maximale Gesamtwärmeleistung [kW] Standard
33,2	1	2	1,3	0,5	0,5	0,5
41,7	1	3	1,7	0,6	0,7	0,6
50,7	1	3	2,0	0,7	0,8	0,8
50,8	1	3	2,0	0,7	0,8	0,8
63,0	1	4	2,5	0,8	1,1	0,9
65,7	1	4	2,6	0,9	1,1	1,0
80,0	2	6	3,2	1,1	1,4	1,2
81,0	2	6	3,2	1,1	1,4	1,2
81,5	2	6	3,3	1,1	1,4	1,2
85,5	2	6	3,4	1,2	1,5	1,3
86,8	2	6	3,5	1,2	1,5	1,3
99,8	2	6	4,0	1,4	1,6	1,5

**Tabelle 15: Jeweils erforderliche Gesamtwärmeleistung (Tagesmittelwert) unter der Annahme einer Heizlast von 12,3 W/m<sup>2</sup> für alle Wohneinheiten;**

Berechnet man für diese Wertebereiche die jeweils erforderliche Gesamtwärmeleistung im Heizlastfall, so zeigt sich, dass eine Dimensionierung mit einer Leistung von 1,5 kW thermisch für alle Wohneinheiten und Belegungsfälle ausreicht. Für diese Berechnungen wurde eine Heizlast von 12,3 W/m<sup>2</sup> und einem Heizwärmebedarf von 19,6 kWh/(m<sup>2</sup>a), also den Werten für die Gesamtgebäude (Berechnung nach PHPP-Heizlastverfahren), für alle Wohneinheiten herangezogen. Unter diesen Annahmen können alle Wohneinheiten weitgehend unabhängig von Ihrer Belegungsdichte ihren Wärmebedarf mit Hilfe von Fortluft-Wärmepumpen decken, zusätzliche Wärme müsste nur für besonders hohen Komfort bei der Warmwasserzapfung bereitgestellt werden.

Bei der hier geplanten Bestandsmodernisierung mit Passivhauskomponenten werden im Erdgeschoss, trotz Dämmung der Kellerdecken und teilweiser Dämmung der Kel-

lerwände, noch deutliche Wärmebrücken und damit Wärmeverluste zum Kellergeschoss verbleiben. Tabelle 16 zeigt die Berechnungsergebnisse nach PHPP für die Modernisierung sowohl für das EG als auch für das Dachgeschoss. Zum Vergleich wurde auch das 1. Obergeschoss ausgewertet. Bei der Heizlastberechnung wurden die Nachbarwohnungen im gleichen Geschoss jeweils mit einer um 3 K niedrigeren Raumlufttemperatur angenommen. Die Wohneinheiten über- bzw. unter der jeweiligen Wohneinheit wurden mit gleichem Temperaturniveau angenommen. Dies stellt zwar keine worst-case-Betrachtung dar, bildet aber in etwa den in der Praxis zu erwartenden Fall ab (Gleichzeitigkeitsannahme).

Das Dachgeschoss, welches als Staffelgeschoss quasi als Neubau auf die oberste Geschosdecke des Bestandsgebäudes aufgesetzt wird, weist die geringste Heizlast auf. Erwartungsgemäß fallen die Heizlasten im EG am höchsten aus. Zunächst würde man erwarten dass die maximalen Werte in den EG-Wohnungen mit Giebelwand auftreten. Die Heizlast in Wohnung Haus 54 links übersteigt aber mit 20,4 W/m<sup>2</sup> noch den Wert der Nachbarwohnung (Haus 54 rechts) mit der zusätzlichen Außenwand. Der Grund liegt in den Wärmeströmen zu den Nachbarwohnungen durch die Wohnungstrennwände. Diese wirken sich spezifisch bei der kleinen Wohnung (41,7 m<sup>2</sup>) relativ stark aus.

spezifische Heizlast [W/m <sup>2</sup> ]	Haus 48		Haus 50		Haus 52		Haus 54	
	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts
DG	12,8	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,5	10,5
OG 1	13,0	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	14,3	13,1
EG	18,1	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	20,4	18,9

**Tabelle 16: Heizlast [W/m<sup>2</sup>], berechnet nach PHPP für Haus 48-54**

spezifische Heizlast [W/m <sup>2</sup> ]	Haus 46		Haus 44		Haus 42		Haus 40		Haus 38		Haus 36	
	links	rechts										
DG	10,0	10,0	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,0	10,0
OG 1	11,8	11,8	15,0	15,0	14,5	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	11,8	11,8
EG	16,7	16,7	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	16,6	16,6

**Tabelle 17: Heizlast [W/m<sup>2</sup>], berechnet nach PHPP für Haus 36-46**

Für die Geräteauswahl und Auslegung der Kompaktgeräte von Bedeutung ist nun die maximal benötigte Gesamtwärmeleistung (Warmwasser + Heizung) in den EG-Wohnungen. Um den gesamten Wertebereich aufzuzeigen wurde in den nachfolgenden Tabellen die minimale, maximale und die Standard-Personenbelegung (aus

Tabelle 14) zugrundegelegt und für die EG-Wohnungen ausgewertet. Unter der Annahme einer Geräteauslegung mit 1,5 kW Wärmepumpenleistung (thermisch) für alle Wohneinheiten ergeben sich die in Klammern (gerundet ohne Nachkommastellen in %) angegebenen direktelektrischen Anteile der vom Kompaktgerät jeweils bereitgestellten Wärme. In den meisten Fällen liegt die angeforderte Leistung unter der thermische Leistung der Wärmepumpe, ein direktelektrischer Anteil würde also nur für Komfortverbesserung zur schnelleren Wiederaufheizung nach Speicherentladungen benötigt. In Einzelfällen (Haus 48, 46 und 36) können bei extrem hoher Personenbelegung (6 Personen pro WE) nennenswerte direktelektrische Anteile (bis zu 15 %) anfallen.

maximale Gesamt-wärme-leistung [kW]	Haus 48	Haus 50 EG	Haus 52 EG	Haus 54	
	EG	EG	EG	EG links	EG rechts
Belegung min.	1,7 kW (1 %)	1,6 kW (0 %)	1,6 kW (0 %)	<b>0,9 kW (0 %)</b>	1,3 kW (0 %)
Belegung Standard	1,8 kW (4 %)	1,7 kW (3 %)	1,7 kW (3 %)	1,0 kW (0 %)	1,4 kW (0 %)
Belegung max.	<b>2,1 kW (13 %)</b>	2,0 kW (11 %)	2,0 kW (11 %)	1,1 kW (0 %)	1,6 kW (0 %)

**Tabelle 18: Maximale Gesamtwärmeleistung [kW] bzw. direktelektrisch gelieferter Anteil (Werte in %) für Haus 48-54, Wohnungen im EG**

maximale Gesamt-wärme-leistung [kW]	Haus 46 EG	Haus 44 EG		Haus 42 EG		Haus 40 EG		Haus 38 EG		Haus 36 EG
		links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts	
Belegung min.	1,7 kW (2 %)	1,1 kW (0 %)	1,1 kW (0 %)	1,1 kW (0 %)	1,1 kW (0 %)	1,1 kW (0 %)	1,1 kW (0 %)	1,1 kW (0 %)	1,1 kW (0 %)	1,7 kW (2 %)
Belegung Standard	1,8 kW (3 %)	1,2 kW (0 %)	1,2 kW (0 %)	1,2 kW (0 %)	1,2 kW (0 %)	1,2 kW (0 %)	1,2 kW (0 %)	1,2 kW (0 %)	1,2 kW (0 %)	1,9 kW (7 %)
Belegung max.	<b>2,2 kW (15 %)</b>	1,2 kW (0 %)	<b>2,2 kW (15 %)</b>							

**Tabelle 19: Maximale Gesamtwärmeleistung [kW] bzw. direktelektrisch gelieferter Anteil (Werte in %) für Haus 36-46, Wohnungen im EG**

Aus Gründen der Einheitlichkeit und der Marktverfügbarkeit der Kompaktgerätevarianten und damit indirekt auch der Wirtschaftlichkeit, ist es vorteilhaft alle Wohneinheiten mit dem gleichen Gerätetyp auszustatten. Die hier gewählte Geräteleistung (1,5 kW thermisch) stellt damit einen guten Kompromiss für alle hier auftretenden Anforderungsvarianten dar. Greift man sich die Extremwerte der „ungünstigsten“ Wohneinheiten (EG, Haus 48, 46 und 36) heraus, so werden auch dort noch durchaus akzeptable Jahresarbeitszahlen erreicht (siehe Tabelle 20).

Wohneinheit	Personenbelegung	Aufwandszahl	Jahresarbeitszahl	Primärenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> a]
Haus 48 EG	Standard	0,38	2,6	35
Haus 48 EG	max.	0,41	2,5	51
Haus 46 EG	Standard	0,39	2,6	39
Haus 46 EG	max.	0,41	2,4	52

**Tabelle 20: Aufwandszahlen (bzw. Jahresarbeitszahlen) der „ungünstigsten“ Wohneinheiten (EG, Haus 48, 46) unter der Annahme einer maximalen Wärmepumpenleistung von 1,5 kW thermisch**

Da die Beheizung über die Zuluft erfolgen soll, stellt sich die Frage, in wie weit dies ohne Heizkörper, evtl. mit dem zusätzlichen Badheizkörper erfolgen kann. In Tabelle sind nochmals die berechneten Heizlasten der Wohneinheiten bei Standardbelegung eingetragen. Darüber hinaus wurde die über die Zuluft transportierbare Wärme berechnet. Fällt diese geringer aus, muss diese z.B. über den Badheizkörper eingebracht werden (siehe Tabelle 21, Zusatzleistung).

	Haus 48	Haus 50 EG	Haus 52 EG	Haus 54	
	EG	EG	EG	EG links	EG rechts
Heizlast	18,1 W/m <sup>2</sup>	17,5 W/m <sup>2</sup>	17,5	20,4 W/m <sup>2</sup>	18,9 W/m <sup>2</sup>
über Zuluft transportierbar	13,6 W/m <sup>2</sup>	13,6 W/m <sup>2</sup>	13,6 W/m <sup>2</sup>	14,1 W/m <sup>2</sup>	13,8 W/m <sup>2</sup>
Zusatzleistung	391 W	333 W	333 W	263 W	335 W

**Tabelle 21: Heizlast und über die Zuluft transportierbare Wärmeleistung [W/m<sup>2</sup>] unter Standardbelegung sowie erforderliche Ergänzungsleistung (z.B. Badheizkörper) für Haus 48-54, Wohnungen im EG**

	Haus 46 EG	Haus 44 EG		Haus 42 EG		Haus 40 EG		Haus 38 EG		Haus 36 EG
		links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts	
Heizlast	16,7 W/m <sup>2</sup>	20,4 W/m <sup>2</sup>	16,6 W/m <sup>2</sup>							
über Zu- luft trans- portierbar	13,6 W/m <sup>2</sup>	13,9 W/m <sup>2</sup>	13,6 W/m <sup>2</sup>							
Zusatz- leistung	309 W	330 W	299 W							

**Tabelle 22: Heizlast und über die Zuluft transportierbare Wärmeleistung [W/m<sup>2</sup>] unter Standardbelegung sowie erforderliche Ergänzungsleistung (z.B. Badheizkörper) für Haus 36-46, Wohnungen im EG**

Die maximal erforderliche Zusatzleistung tritt im Haus 48 (EG) mit knapp 400 W auf. Damit ist davon auszugehen, dass die Heizwärme auch im Heizlastfall rein über die Zuluft und einen Badheizkörper zugeführt werden kann.

### Fazit

Insgesamt kann man aus diesen Untersuchungen ableiten, dass die gewählte Geräteleistung einer Wärmepumpe von 1,5 kW thermisch zwar für einen Großteil der Wohneinheiten etwas überdimensioniert ist, in den EG-Wohnungen bei hoher Personenbelegung und großen Wohneinheiten sowie den Wärmeverlusten zum Keller aber durchaus ausgelastet sind. Eine eigene Geräteklasse mit z.B. nur 1 kW thermisch ist nur in extremen Ausnahmefällen bei sehr kleinen Wohneinheiten mit geringer Belegungsdichte (Single-Wohnungen, Wohnheime etc.) sinnvoll.

In diesem Modernisierungsvorhaben mit Passivhauskomponenten und einem kompakten Baukörper sowie relativ günstiger Situation im EG (Hochparterre) kann die Heizwärme über die Zuluft sowie einen Badheizkörper zugeführt werden. Damit können Zusatzinvestitionen für statische Heizflächen und Wärmeverteilsysteme entfallen.

### Solaranlage zur Warmwasserbereitung

Die Entwurfsplanung sah auf den abgeschrägten Treppenhausaufgängen zum Staffelgeschoss Kollektorfelder mit einer Aperturfläche von ca. 12 m<sup>2</sup> für die solare Warmwasserbereitung vor. Die Abschrägungen der Aufgänge sind aus baurechtlichen Gründen ohnehin notwendig (Staffelgeschoss) und bieten eine gute Möglichkeit zur baulichen Integration der Kollektorfelder ohne zusätzlichen Aufständeraufwand.



**Abbildung 212: Kollektorfelder (jeweils 7.5 m<sup>2</sup>) auf den sechs abgeschrägten Treppenhäusern.  
Foto: Fotostudio Michels, Darmstadt**

Auch wenn anstelle der zentralen Wärmeversorgung Kompaktgeräte eingesetzt würden, könnte die Solaranlage eingebunden werden, weil diese bereits über relativ große Speicher und die entsprechende Regelung verfügen. Die dezentralen Geräte könnte dabei über eine (je Hausaufgang) gemeinsame Solaranlage versorgt werden. Die Anbindung sollte dabei über parallelgeschaltete Plattenwärmeübertrager erfolgen. Im Falle der zentralen Wärmeversorgung erfolgt die Anbindung an den Pufferspeicher im Keller (Haus 42).

## **Grundrissgestaltung und Systemanordnung**

Die Wohnungsgrundrisse der Bestandsgebäude weisen eine sehr geringe Wohnfläche von im Mittel ca. 50 m<sup>2</sup> auf, die größten Wohnungen haben 64 m<sup>2</sup>. Die typischen Grundrisse der kleinen Wohnungen (3 Zimmer, Küche, Bad) sind in Abbildung 213 dargestellt. Jede der Bestandswohnungen verfügt über zwei je zweizügige Kamine (in der Küche und dem kleinen Zimmer), welche aus Platzgründen abgebrochen werden. Eine Verwendung als Schacht wurde angedacht, da aber keine zentrale Lüftungslösung geplant ist, werden sie für die Kanalführung nicht benötigt. Vor den Kaminen in der Küche befindet sich jeweils eine kleine Abstellnische (zum Flur hin geöffnet). Sowohl die Küchen als auch die Badezimmer sind in den Bestandsgrundrissen sehr klein (Küche: 6,4 bzw. 11,3 m<sup>2</sup>; Bad: 4,4 bzw. 4,7 m<sup>2</sup>).

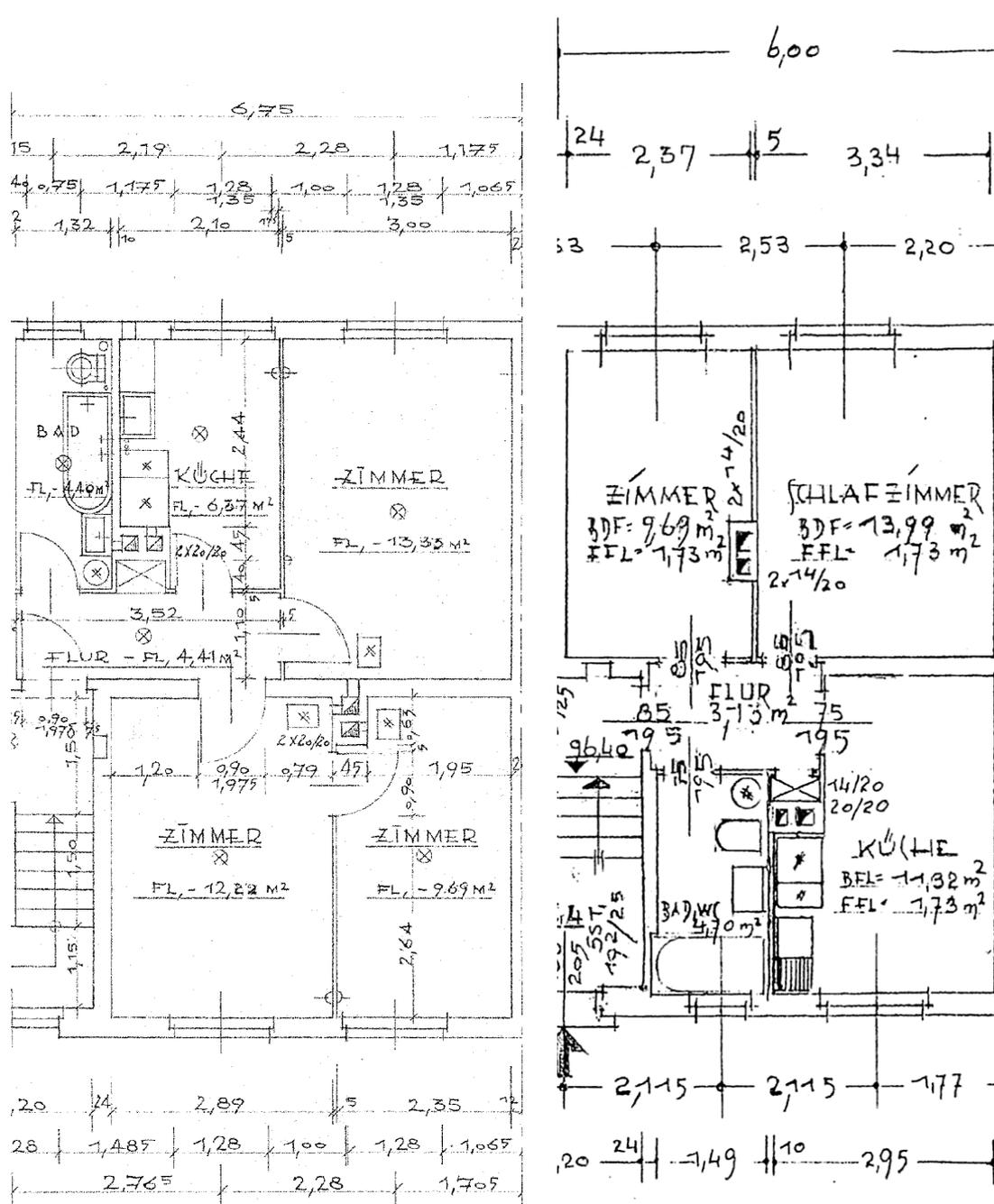
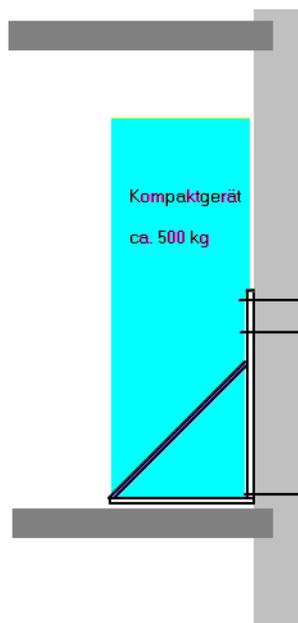


Abbildung 213: Wohnungsgrundriss im Bestandsgebäude Tevesstraße 36-46 / 48-54

Prinzipiell ist die Anordnung der Kompaktgeräte bzw. Lüftungsgeräte möglichst nahe an der wärmedämmten Gebäudehülle aus folgenden Gründen vorzusehen:

- möglichst kurze Außen-/Fortluftleitungen
- geringe Wärmeverluste
- geringe Kosten für Kanäle, Dämmung, Montage
- Platzbedarf

Im Rahmen der Planungsbegleitung wurde daher nach Lösungen gesucht, das Gerät möglichst nahe an der Außenwand aufstellen zu können. Auch im Bezug auf die Statik hätte diese Anordnung Vorteile: Die Bestandsdecken dürfen neben den üblichen Verkehrslasten keine zusätzlichen Lasten übernehmen. Statisch könnte die Last der Kompaktgeräte über statisch tragende Wände mittels spezieller Aufhängungen abgetragen werden (siehe Abbildung 214). Die Vertikalkräfte können dabei vom Mauerwerk, die Horizontalkräfte von der Decke aufgenommen werden (ggf. zusätzliche Deckenverankerung).

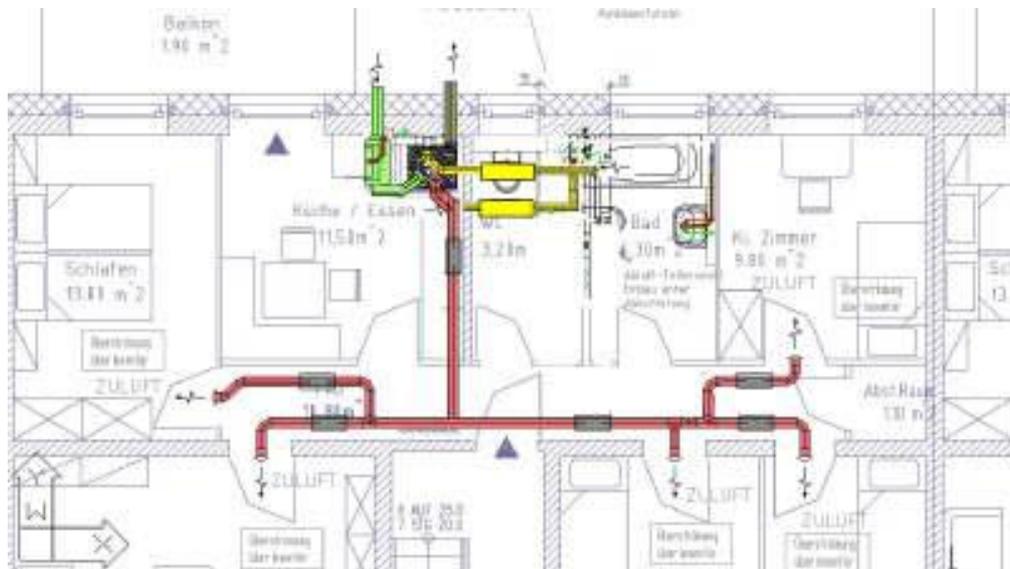


**Abbildung 214: Aufhängung und Lastabtragung für die Befestigung der Kompaktgeräte an der Außenwand**

Im Badezimmer ist die Aufstellung an der Außenwand aber aus Platzgründen nicht möglich, weil die Badewanne parallel zur Außenwand gestellt werden soll. Eine Längsaufstellung der Badewanne ist aus Gründen der zu geringen Abstandsflächen ausgeschlossen. Als verbleibende eventuelle Geräteposition für die Aufstellung an der Außenwand kommt daher nur die Küche in Frage. Die Stellfläche neben dem Fenster ist aber auch hier sehr begrenzt. Da das Gerät für Wartungszwecke vor dem Aufstellort nochmals etwa die gleiche Fläche benötigt, würde in diesem Fall die Stellfläche für Küchenmöblierung unakzeptabel reduziert. Diese Variante wäre allerdings in den Grundrissen mit vergrößerter Wohn-/Essküche denkbar (siehe Vorschlag in Abbildung 215). Allerdings wären auch dann noch gewisse Grundrissanpassungen notwendig.

Als eine weitere Modernisierungsvariante wurde untersucht, die Badezimmer nach außen zu erweitern und damit eine Aufstellfläche für die Kompaktgeräte zu schaffen. Diese Variante hätte den Vorteil, dass die Geräte tatsächlich nahe der wärmegeämmten Hülle platziert werden könnten, und darüber hinaus noch eine geringfügige Badezimmervergrößerung möglich wäre. Diese Option wurde insbesondere für die Modernisierung im bewohnten Zustand entwickelt, weil alle Arbeiten in den vorgela-

gerten Erweiterungen noch vor dem Durchbruch der Außenwand des Bestandsgebäudes vorgenommen werden könnten.



**Abbildung 215: Geräteaufstellung in der Küche an der Außenwand**

Aus Kostengründen wurde letztere Variante allerdings nicht weiter verfolgt. Aufgrund der beengten Verhältnisse wurde die Aufstellung zwischen Bad und Küche in Betracht gezogen. Diese Variante hat den Vorteil, dass sie in fast identischer Ausführung in allen Wohneinheiten realisierbar ist.

Aus schalltechnischen Gründen können die heute auf dem Markt befindlichen Kompaktgeräte noch nicht ohne Einhausung innerhalb der Wohnung aufgestellt werden [AKKP 34]. Für die Planung dieser Einhausung ist die genaue Kenntnis der Geräteschallabgabe über den gesamten Spektralbereich (insbesondere auch im niederfrequenten Bereich um 50 Hz) notwendig. Prinzipiell sollte die Geräteschallabgabe aber bereits so gering wie möglich sein, Verbesserungen z.B. durch Schwerbitumenauskleidungen und Schwingungsdämpfungen sind möglich. Darüber hinaus sollte aber auch die Körperschallentkopplung des Aufstellortes z. B. durch einen eigenen schwimmenden Estrich mit Randdämmstreifen verbessert werden. Speziell auf die Gerätefrequenzen abgestimmte Feder-/Dämpfersysteme als Aufstellunterlage kann der Schallschutz weiter optimiert werden. Im Bestandsgebäude sind diesen Maßnahmen allerdings aufgrund der geringen lichten Raumhöhe Grenzen gesetzt. In [AKKP 34] sind Maßnahmen zum Schallschutz von Wärmepumpenkompaktgeräten ausführlich diskutiert.

Die Geräteeinhausung soll nicht nur zur schalltechnischen Verbesserung eingesetzt werden, sondern auch vor unbefugten Manipulationen am Gerät schützen. Die Geräteeinhausung soll mit abschließbarer Türe versehen werden. Die Bewohner bedienen das Gerät nur über eine Fernbedienung (Einstellung der Lüfterstufe und der Soll-

temperatur), lediglich das autorisierte Wartungspersonal hat direkten Zugang zum Gerät.

In der ursprünglichen Planung sollte die Einhausung des Kompaktgerätes so gestaltet werden, dass die Türe zum Flur hin öffnet. Diese Version wurde aber aus schalltechnischen Gründen wieder verworfen. Die Schallabgabe in der Küche bzw. dem Badezimmer wird jeweils durch eine Zimmertüre zum Flur hin nochmals um ca. 25 dB(A) gedämpft, die Öffnung der Einhausungstüre zu diesen Räumen ist daher zu bevorzugen.

Die Entfernung des Aufstellortes von der Außenwand (ca. 3 m) wirkt sich allerdings in einem relativ aufwändigen Außen-/Fortluftkanalnetz mit entsprechendem baulichen Aufwand und signifikanten Wärmeverlusten aus, siehe die Ausführungen im nächsten Abschnitt. Darüber hinaus wird eine relativ aufwändige statische Ertüchtigung des Aufstellortes für das Kompaktgerät aufgrund seines Gewichts von ca. 500 kg (incl. Speicherwasser) notwendig. Hierfür bestehen prinzipiell zwei Möglichkeiten: entweder der nachträgliche Einzug von deckengleichen Unterzügen oder mittels Stahlträgergerüst welches seine Last bis in den Keller abträgt.

Die Einbringung der Kompaktgeräte über die Treppen ist prinzipiell möglich (Leergewicht etwa 250 kg), zur Verbesserung der Effizienz beim Bauablauf wird das Einbringen über die Balkontüren (per Kran auf die Balkonplattformen) bevorzugt.

Die Gerätedimensionierung hängt von den Anforderungen für Heizung und Warmwasser sowie den gewünschten Komfortbedingungen ab. Die Leistung der Kleinstwärmepumpe im Kompaktgerät ist aufgrund der Leistungsbegrenzung der Wärmequelle Fortluft (evtl. mit Außenluftbeimischung) begrenzt, im Kernwinter auftretende Leistungsspitzen werden durch direktelektrische Nachheizung ausgeglichen. Die Wahl der Nachheizleistung bestimmt die nominelle Anschlussleistung der Geräte und kann zu einem erhöhten Baukostenzuschuss für die Elektroanschlusskosten führen. Insbesondere bei kleinen Wohneinheiten ist daher die Höhe dieser Nachheizleistung entsprechend der Anforderungen anzupassen. In diesem Projekt wurde daher geplant, die Nachheizleistung von 6 kW generell auf 4 kW zu reduzieren und bei kleinen Wohneinheiten auf 2 kW einzuschränken.

Bei kleinen Wohneinheiten, welche z.B. von nur ein bzw. zwei Personen belegt werden, liegen die Luftvolumenströme bei ca. 50 m<sup>3</sup>/h. Derzeit marktgängige volumestromgeregelte Ventilatoren können zwar auch in diesem geringen Volumenstrombereich betrieben werden, arbeiten hier aber häufig nicht mehr mit der geforderten Genauigkeit der Balance unter 10 %. Hier sollte daher generell eine manuelle Einstellung vor Ort vorgenommen werden (Messung der Außen-/Fortluftvolumenströme und Nachjustierung der Ventilatoransteuerung).

## Kanalnetz der Lüftungsanlage

### Außen-/Fortluftkanalführung

#### Außenluftansaugung und Fortluftauslass

Um kalte Kanalabschnitte innerhalb des beheizten Bereiches so kurz wie möglich zu halten, sollen die Außen- und Fortluftleitungen möglichst direkt durch die Außenwand geführt werden. Zu bedenken ist dabei allerdings die Vermeidung von Kurzschlussströmungen zwischen Abluftauslass und Fortluftansaugung. Aus den Modernisierungsobjekten der SWB Göttingen liegen hierzu gute Erfahrungen mit folgender Anordnung vor: Außenluftansaugung bündig mit der Fassadenoberfläche und Fortluftauslass über einen ca. 15 cm langen Rohrstützen (siehe hierzu auch [Schleevoigt 2004]).

#### Schalldämpfer

Abhängig von der Art des Baugebiets sind die zulässigen Schallimmissionen im Außenraum nach TA-Lärm begrenzt. Für Wohnungslüftung maßgebend sind die schärferen Anforderungen nachts; in einem reinen Wohngebiet ist der maximale Schalldruckpegel auf 35 dB(A) in 0,5 m Abstand vor den Fenstern eines Nachbargebäudes begrenzt, in Mischgebieten sind bis zu 45 dB(A) zulässig. In diesem Objekt bestehen in dieser Hinsicht eigentlich keine Anforderungen, weil die gegenüberliegende Bebauung aus einem Bunkergebäude ohne Fenster besteht. Allerdings werden dennoch Rohrschalldämpfer für Außen-/Fortluft empfohlen, wenn die Außenwanddurchlässe in geringer Entfernung zu den Balkonen platziert werden. Insbesondere bei Kompaktgeräten können erhöhte Schallpegel im Außenbereich auftreten, wenn der Kompressor der Wärmepumpe die Vibrationen direkt an den Luftstrom abgeben kann.

#### Wärmedämmung und Verkleidung

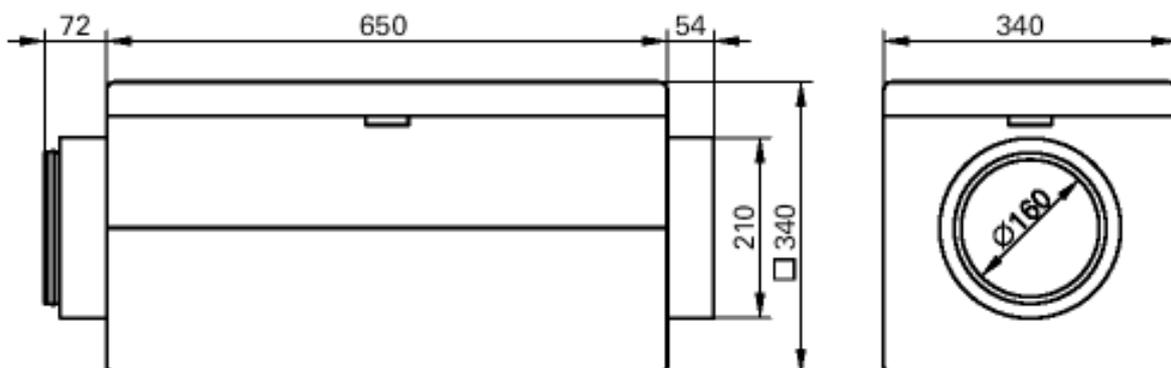
Die Außen- und Fortluftleitung führen kalte Luft, im Falle der Fortluftleitung sogar mehrere Kelvin unter Außenlufttemperatur, wenn die Wärmepumpe in Betrieb ist und der Verdampfer der Fortluft zusätzlich Wärme entzieht. Die Leitungen müssen demnach diffusionsdicht gedämmt werden, um Kondensatbildung zu vermeiden. Darüber hinaus treten über diese Leitungsabschnitte erhebliche Wärmeverluste auf. Trotz Wärmedämmung von mindestens 10 bis 15 cm erhöhen die Wärmeverluste den spezifischen Jahresheizwärmebedarf um 1,5 bis 2 kWh/m<sup>2</sup>a. Darüber hinaus führen diese Leitungen bei Außenluftbeimischung bis zu 300 m<sup>3</sup>/h zusätzliche Luft, entsprechend groß müssen die Leitungsquerschnitte gewählt werden, um zu hohen Druckabfall und Strömungsgeräusche zu vermeiden. Insbesondere die Aufbringung der

diffusionsdichten Dämmung, welche normalerweise bauseits vorgenommen wird, führt zu relativ hohen Kosten (ca. 50 bis 75 €/m). Da die Geräteaufstellung in diesem Projekt für alle Wohneinheiten vereinheitlicht werden kann, soll der Abschnitt aus Außen-/ und Fortluftleitung sowie Teile des Abluftkanalnetzes in einer vorgefertigten Einheit auf die Baustelle gebracht werden. Dabei kann weitgehend auf industriell vorgedämmte Rohre zurückgegriffen werden, welche bereits mit einer diffusionsdichten Dämmung versehen sind. Von verschiedenen Herstellern werden hier bereits Kanalsysteme mit Doppelrohr mit eingeschlossener Dämmlage angeboten (siehe Abbildung 216). In der Kältetechnik sind solch Kanäle bereits Standardprodukte, für die Lüftungstechnik allerdings relativ teuer. Darüber hinaus sind die Dämmstärken üblicherweise auf ca. 2 bis 3 cm beschränkt. Dies reicht zwar für die Kondensatvermeidung aus, nicht jedoch dafür, die Wärmeverluste hinreichend gering zu halten. Daher muss auch bei diesen Rohrsystemen zusätzlich nachgedämmt werden.



**Abbildung 216: Diffusionsdicht vorgedämmte Kanäle (Quelle: Lindab (links); Rehau (rechts))**

Im Außenluftkanal ist ein Feinfilter (Filterklasse F7) vorzusehen. Der Filterkasten muss ebenso wie das gesamte Kanalstück wärme- und „schwitzwassergedämmt“ werden. Auch hier bieten sich wieder vorgedämmte Lösungen an, z.B. ein vollständig aus EPP gefertigte Filterkasten mit dicht schließendem Revisionsdeckel (siehe Abbildung 217).



**Abbildung 217: Außenluft-Filterkasten aus EPP für Einschub-Taschenfilter F7 (Quelle: Fa. Viessmann)**

Für den Filterwechsel muss in der Verkleidung ein entsprechender Revisionsdeckel eingebracht werden. Auf entsprechende Zugänglichkeit für Wartungsarbeiten ist zu achten. Die Anordnung des Filterkastens direkt über der Badewanne ist in dieser Hinsicht ungünstig.

Alle kalten Abschnitte der Lüftungskanäle zwischen Außenwand und Lüftungsgerät wurden raumseitig neben der Dämmung mit geschlossenzelligem diffusionsdichten Butylkautschuk ('Armaflex') zusätzlich mit Zellulosedämmung ausgeblasen. Dazu wurde die Abkofferung in der die Rohre verlaufen mit Zellulose ausgeflockt. Damit diese Dämmschicht nicht von warmer feuchter Raumluft durchspült wird, wurde die Abkofferung raumseitig durch eine luftdichte und dampfbremsende Folie abgedichtet, vgl. Abbildung 218.

Die Zellulose wurde zur Verfüllung der Hohlräume anstatt der ursprünglich dafür vorgesehenen Mineralwolle gewählt, da die Zellulosefaser eine deutlich bessere Pufferwirkung für Feuchtigkeit hat als alle anderen handelsüblichen Dämmmaterialien. Außerdem hat Zellulose kapillaraktive Eigenschaften, d.h. einmal eingedrungene Feuchtigkeit wird von der Faser zu einer 'trockenen' Oberfläche transportiert. Diese Eigenschaft ist bei innen liegender Dämmung, wie sie hier vorliegt, wichtig [AKKP32]. Aus diesem Grund ist die vorgenannte Dampfbremssolie insofern ungünstig, als sie ein Austrocknen zum Wohnraum hin verhindert, falls doch aus irgendwelchen Gründen Feuchtigkeit in die Abkofferung hinter die Folie gelangen sollte.



**Abbildung 218:** Die Deckenabkofferungen für die kalten Außenluft- und Fortluftleitungen wurden mit Zellulosedämmung ausgeflockt. Da sich so der Taupunkt aus der relativ dampfdichten Kanaldämmung heraus in die Zellulosedämmung verschob, musste die Abkofferung möglichst luftdicht ausgeführt werden. Fotos: [faktor10]

## Zuluft- /Abluftkanalnetz

Die günstige Anordnung der Funktionsräume (direkt benachbarte Küchen und Bäder) ermöglichen eine kurze und effiziente Kanalführung, Kanalkreuzungen zwischen Zu- und Abluftleitungen sind im Flurbereich nicht notwendig, ein Vorteil insbesondere bei der geringen Deckenhöhe des Bestandsgebäudes. Das Prinzip der Zuluft einbringung über Weitwurfdüsen, welche die Decke quasi als halbseitigen Kanal nutzen, hat sich im Neubaubereich bereits bestens bewährt und ist inzwischen auch im Sanierungsbereich weitgehend zum Standard geworden. Kernlochbohrungen über der Türe können mit Diamantschneidesystemen mit Staubabsaugung auch im Altbau vibrations- und staubarm durchgeführt werden. An dieser Stelle besteht auch für die spätere Nutzung kein Problem, weil der Türbereich nicht mit Möbeln verstellt wird. Darüber hinaus beschränkt sich die Leitungsführung auf den Flur- bzw. Bad- und Küchenbereich, die Deckenhöhe in den Zulufräumen selbst werden nicht durch Abhängungen oder Abkofferungen eingeschränkt.



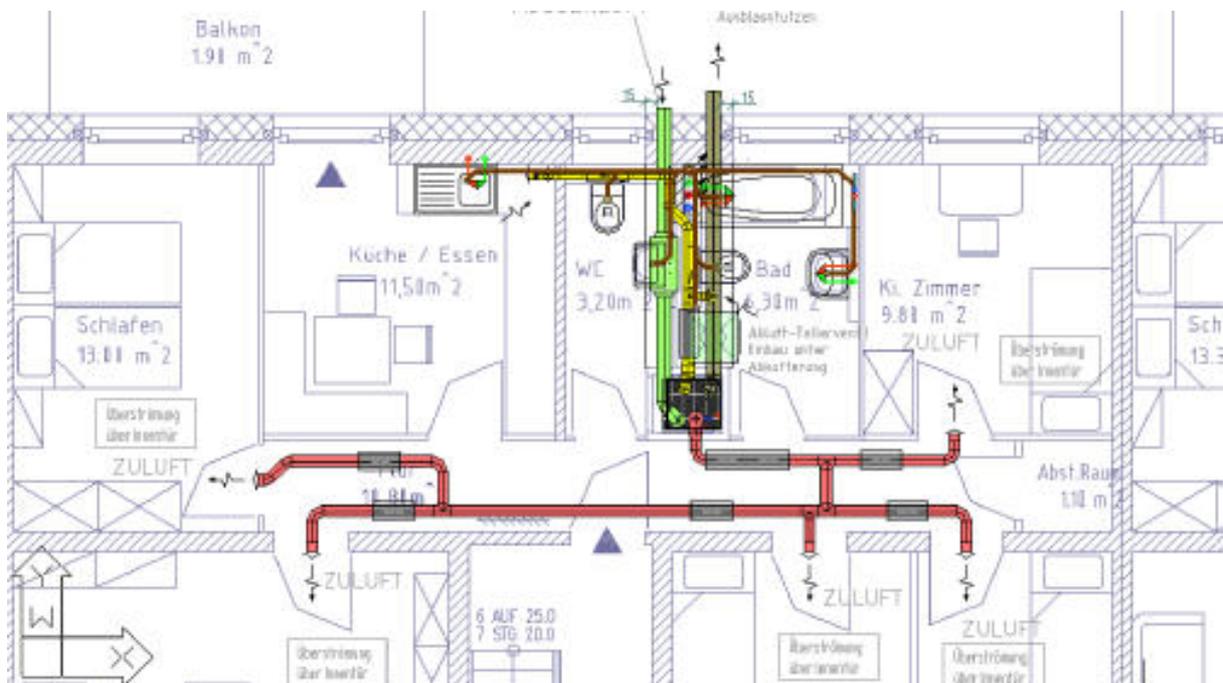
**Abbildung 219: Kernlochbohrung zur Kanaldurchführung der Zuluft vom Flur in das Wohnzimmer (Modernisierungsvorhaben der SWB, Göttingen; Foto: PHI)**

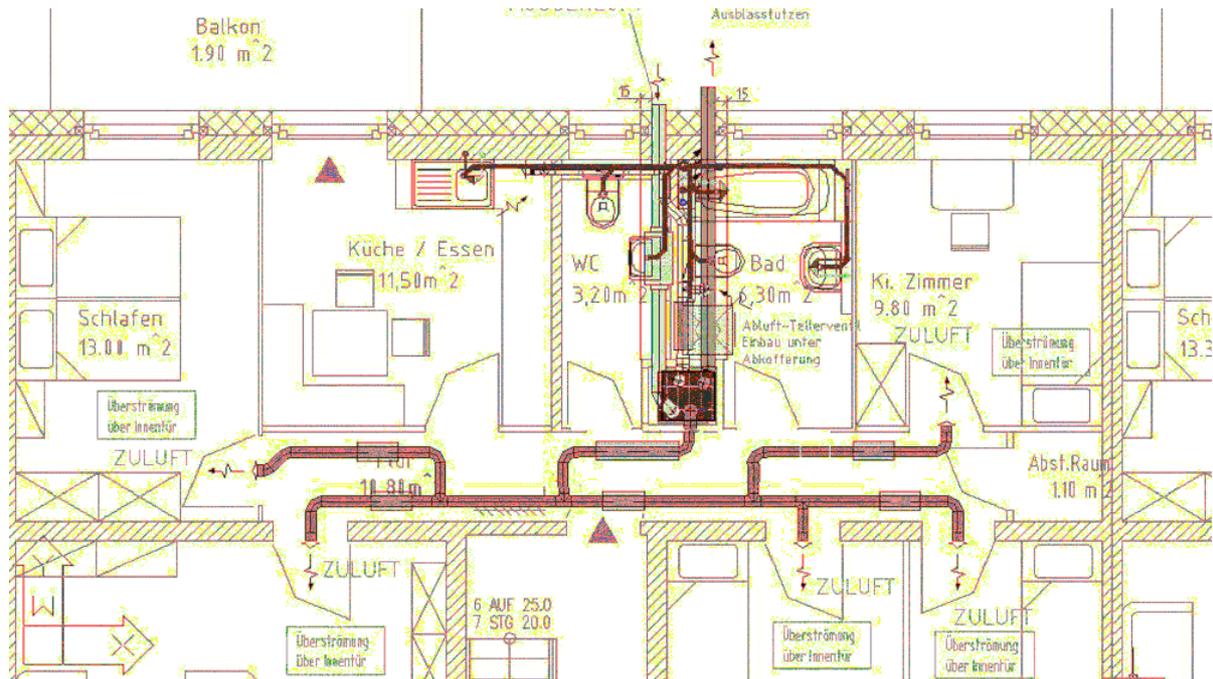
## Kanalführung

Die Zuluftkanalführung erfolgt im Flur mit entsprechender Verzweigung zu allen Zuluftträumen. In Abbildung 219 ist die Kanalführung am Beispiel der großen Wohneinheiten dargestellt. Prinzipiell sollte zwischen jedem Zulufttraum mindestens ein Telefonschalldämpfer positioniert werden, um die Schallübertragung zwischen zwei Räumen zu dämpfen. Darüber hinaus sollte das Kanalnetz in Form einer Baumstruktur so verzweigen, dass alle Kanalstrecken vom Zentralgerät bis zum Zuluftventil möglichst etwa gleichen Druckabfall aufweisen, damit nicht einzelne Ventile bei Kanalstrecken mit besonders geringem Druckabfall übermäßig abgedrosselt werden müssen (Strömungsgeräusche, Einstellbarkeit, Effizienz). Mit dieser Zielsetzung wurde die ursprüngliche Entwurfsplanung der Kanalführung verbessert (siehe Abbildung 220 unten).

## Schalldämpfer

Bestimmend für das Maß der Deckenabhängung ist nicht der Kanaldurchmesser selbst, sondern der Außendurchmesser der Schalldämpfer. In diesem Sanierungsvorhaben ist die Deckenhöhe sehr gering bemessen, Standard-Rundschalldämpfer können daher nur bedingt eingesetzt werden. Hier bieten sich Rechthckschalldämpfer bzw. Flachschalldämpfer an, welche mit deutlich geringeren Maßen für die Deckenabhängung auskommen.





**Abbildung 220: Zuluftkanalnetz; oben: ursprüngliche Planung, unten: optimierte Baumstruktur.**

## Deckenabhängung

Nicht nur die Konstruktion des zu verkleidenden Lüftungskanalnetzes selbst, sondern auch die Bauweise der Deckenabhängung selbst spielen eine nicht zu vernachlässigende Rolle, wenn im Bestandsgebäude geringe Deckenhöhen (ca. 2,5 m) vorliegen. Insbesondere im EG kommt es in diesem Modernisierungsvorhaben auf jeden Zentimeter an (lichte Raumhöhe 2,42 m). Vorschläge für die Optimierung wurden bereits in [Pfluger\_2 2004] aufgezeigt. Die ursprünglich als Lichtdecke (Spanndecke mit indirekter Beleuchtung) angedachte Flurabhängung wird vermutlich aus Kostengründen doch in Gipskarton ausgeführt. Die Beleuchtung wird dabei deckenintegriert ausgeführt, hier stehen hocheffiziente Einbau-Leuchtensysteme (Energiesparlampen mit Einbaureflektor und horizontalem Vorschaltgerät) zur Verfügung. Die in diesem Bereich häufig eingesetzten Halogenstrahler sind aus Effizienzgründen zu vermeiden. Bei der Planung des Zuluftkanalsystems sind sowohl die Montage der Deckenabhängung als auch die Position der Einbauleuchten zu beachten. Üblicherweise werden die Leuchten exakt in Flurmitte angeordnet, an dieser Stelle dürfen dann keine Kanäle oder Schalldämpfer angeordnet werden (siehe z.B. Abbildung 221).

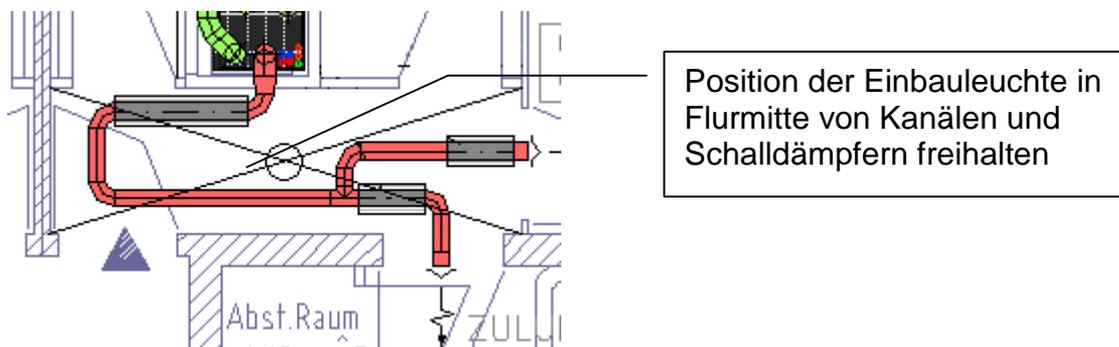


Abbildung 221: Zuluftkanalnetz und Position der Einbauleuchte

## **Balanceabgleich Lüftungsgeräte: Stichprobenartige Überprüfung**

Um die Balance von Zu- und Abluftvolumenströmen der installierten Lüftungsanlagen bewerten zu können, wurden im Sommer 2005 die von der Installationsfirma vorgenommenen Einstellungen stichprobenartig überprüft. Es wurden in einigen Wohnungen alle Zuluft- und Abluftvolumenströme mit dem 'Flowfinder' gemessen. Die Ergebnisse und die Summen für die einzelnen Wohnungen sind im Folgenden dokumentiert. Die Disbalance war in einigen Wohnungen über der Toleranzgrenze, in den meisten Fällen aber kleiner als 10% Abweichung zwischen der Summe der Zu- und Abluftvolumenströmen.



**Abbildung 222: stichprobenartige Überprüfung der Luftvolumenströme.**

Die Protokolle in Abbildung 223 ff wurden der Installationsfirma zur Verfügung gestellt, die anschließend alle Wohnungen noch einmal überprüft hat. Es hat sich gezeigt, dass die Verwendung eines hochwertigen Messgerätes ('Flowfinder') für die exakte Bestimmung des Volumenstroms sehr hilfreich ist. Die üblicherweise verwendeten Anemometer messen nur die Strömungsgeschwindigkeit an einer bestimmten Stelle des Zu- oder Abluftventils. Druckdifferenzmessgeräte messen den Druck an einer ganz bestimmten Position, die mit der aus dem Datenblatt übereinstimmen muss. Außerdem ist zur Auswertung, d.h. Bestimmung des Zahlenwertes immer das Datenblatt des Herstellers notwendig. Da dies aber auf der Baustelle oft verloren geht, kann der Balanceabgleich von angelerntem Personal nur

unvollständig oder gar fehlerhaft vorgenommen werden.

Der 'Flowfinder' misst demgegenüber prinzipiell den gesamten Luftvolumenstrom der durch eine Öffnung strömt. Da dies drucklos mit Hilfe eines Stützventilators geschieht, kann das Messgerät auch von angelerntem Personal mit etwas Geschick erfolgreich benutzt werden.



	Zuluft/Abluft innen	Sollwert	Messwert	Messwert		
	Raum	IBB m³/h	A&W m³/h	BK PHI m³/h		
<b>Wohnung 52 DG (3/1)</b>	Wohnen	30	27.72	35		
	Zimmer(Schlafen)	??	??	-	beim zweiten Ventil keine Messung möglich	
Stufe 4	Zimmer(Kind)	33	33.66	24		
	Zimmer	18	17.82	22		
	Abstellraum	2.5	2.24	2	<b>Mittelwert aus Zuluft und Abluft</b>	
	Summe	83.5	81.44	<b>83</b>	<b>80.5 m³/h</b>	
					<b>Differenz zw. Zuluft und Abluft (absolut)</b>	
					<b>5 m³/h</b>	
	Küche	46	45.54	43	<b>Differenz zw. Zuluft und Abluft (relativ)</b>	
	Bad	36	37.62	35	<b>-6.2%</b>	
					<b>Differenz sollte kleiner als 10% sein</b>	
	Summe	82	83.16	<b>78</b>		
	<b>Außenluft/Fortluft</b>				<b>Differenz zu Summe innen</b>	
				Stufe 4	Diff (abs)	Diff (rel)
	Außenluft			-		
	Fortluft			-		
	Zuluft/Abluft innen	Sollwert	Messwert	Messwert		
	Raum	IBB m³/h	A&W m³/h	BK PHI m³/h		
<b>Wohnung 52 1. OG (1/1)</b>	Wohnen	42	39.6	36		
	Zimmer(Schlafen)	36	35.64	25		
Stufe 4	Zimmer(Kind)	22	21.78	34		
	Zimmer					
	Abstellraum	2.5	3.62	2	<b>Mittelwert aus Zuluft und Abluft</b>	
	Summe	102.5	100.64	<b>97</b>	<b>108 m³/h</b>	
					<b>Differenz zw. Zuluft und Abluft (absolut)</b>	
					<b>22 m³/h</b>	
	Küche	55	55.44	43	<b>Differenz zw. Zuluft und Abluft (relativ)</b>	
	Bad	47	47.52	76	<b>20.4%</b>	
					<b>Differenz sollte kleiner als 10% sein</b>	
	Summe	102	102.96	<b>119</b>		
	<b>Außenluft/Fortluft</b>				<b>Differenz zu Summe innen</b>	
				Stufe 4	Diff (abs)	Diff (rel)
	Außenluft			-		
	Fortluft			-		
	Zuluft/Abluft innen	Sollwert	Messwert	Messwert		
	Raum	IBB m³/h	A&W m³/h	BK PHI m³/h		
<b>Wohnung 52 EG (E/1)</b>	Wohnen	42	43.56	36		
	Zimmer(Schlafen)	36	35.64	30		
Stufe 4	Zimmer(Kind)	22	21.78	32		
	Zimmer					
	Abstellraum	2.5	3.42	2	<b>Mittelwert aus Zuluft und Abluft</b>	
	Summe	102.5	104.4	<b>100</b>	<b>90 m³/h</b>	
					<b>Differenz zw. Zuluft und Abluft (absolut)</b>	
					<b>-20 m³/h</b>	
	Küche	55	55.44	49	<b>Differenz zw. Zuluft und Abluft (relativ)</b>	
	Bad	47	47.52	31	<b>-22.2%</b>	
					<b>Differenz sollte kleiner als 10% sein</b>	
	Summe	102	102.96	<b>80</b>		
	<b>Außenluft/Fortluft</b>				<b>Differenz zu Summe innen</b>	
				Stufe 4	Diff (abs)	Diff (rel)
	Außenluft			108	8.0	7%
	Fortluft			92	12.0	13%

**Abbildung 224: Balanceabgleich Wohnungs Lüftungsanlagen Tevesstraße 52**



## 5 Planungsvarianten und Energiebilanz (PHPP)

### Auswirkung der Wärmebrücken auf die Energiebilanz

Die Beschaffenheit der im vorigen Abschnitt genauer beschriebenen Wärmebrücken wirkt sich merklich auf die Heizwärmebilanz des Gebäudes aus. In den Spalten 1 bis 3 der Tabelle 23 und Tabelle 24 ist die Differenz des letztlich realisierten Zustands 1 gegenüber einer fiktiven optimierten Variante 2 und einer fiktiven fehloptimierten Variante 3 aufgelistet. Insgesamt ist die Differenz zwischen der Variante 2 und 3 etwa 3,3 kWh/(m<sup>2</sup>a) beim 6er Block und 2,8 kWh/(m<sup>2</sup>a) beim 4er Block. Die Qualität jeder einzelnen Wärmebrücke wirkt sich im nur sehr wenig auf den Heizwärmebedarf, d.h. auf die gesamte Energiebilanz des sehr großen Gebäudes aus.

	1	2	3	4	5	6	7
ganzer 6er Block (36-46) Beschreibung der Variante	Wärmebrücken IST	WB alles OPT	WB alles ganz schlecht	WB Fenster OPT sonst alles IST	WB Fenster IST Anker OPT Dachrinne opt	WB Fenster IST Anker IST Keller OPT	WB Fenster IST Anker IST Keller OPT Balkone OPT
HWB [kWh/m <sup>2</sup> a]	16.56	14.33	17.60	15.53	16.31	16.10	15.54
Differenz zur Spalte 1		-2.22	1.05	-1.03	-0.24	-0.45	-1.01

**Tabelle 23: mittlerer Heizwärmebedarf (HWB) im 6er Block in Abhängigkeit von der Beschaffenheit der verschiedenen Wärmebrücken. In der letzten Zeile ist jeweils die Differenz zum IST-Zustand in Spalte 1 angegeben. Aus PHPP Stand 17.12.2008**

	1	2	3	4	5	6	7
ganzer 4er Block (48-54) Beschreibung der Variante	WB IST	WB alles OPT	WB alles ganz schlecht	WB Fenster OPT sonst alles IST	WB Fenster IST Anker OPT	WB Fenster IST Anker IST Keller OPT	WB Fenster IST Anker IST Keller OPT Balkone OPT
HWB [kWh/m <sup>2</sup> a]	16.72	15.32	18.01	16.07	16.52	16.14	16.14
Differenz zur Spalte 1		-1.40	1.30	-0.64	-0.19	-0.57	-0.57

**Tabelle 24: mittlerer HWB im 4er Block in Abhängigkeit von der Beschaffenheit der verschiedenen Wärmebrücken. Hier ist das A/V Verhältnis und das Verhältnis der Länge der Wärmebrücken zum umbauten Volumen höher, so dass der spezifische HWB jeweils höher ausfällt als beim 6er Block.**

Hier ist jedoch zwischen der Auswirkung einer Wärmebrücke im Detail auf den 'globalen' Heizwärmebedarf zu unterscheiden von der bauphysikalisch relevanten Auswirkung der Wärmebrücke auf die Oberflächentemperaturen und mithin auf die Heizlast in einzelnen besonders betroffenen Wohnungen und Räumen. Aus diesem Grund wurden neben dem Heizwärmebedarf des gesamten Gebäudes auch die Heizlast für einzelne besonders exponierte Wohnungen berechnet und in Tabelle 27 ff aufgelistet.

## Auswirkung von Wärmebereitstellungsgrad und Luftdichtheit

Die gesamte **Effizienz der Wärmerückgewinnung** der Lüftungsanlagen hat ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf die Energiebilanz des Gebäudes. Der Wärmebereitstellungsgrad der Geräte wurde gemäß den Herstellerangaben mit  $\eta_{WRG} = 0.85$  angenommen. Die Lüftungsgeräte sind dezentral in allen Wohnungen aufgestellt, sie stehen also in innerhalb der gedämmten Gebäudehülle. Daher gibt es nicht zu vernachlässigende Wärmeströme von den Wohnräumen Bad bzw. Küche zu den kalten Außenluft- und Fortluftleitungen. Diese kalten Luftleitungen müssen daher gut und vor allem kondenswasserdicht gedämmt werden, siehe dazu Abbildung 218. Weil die Dämmung dieser Leitungen aus geometrischen Gründen in der Regel nicht stärker als 50 mm ausgeführt werden kann, bleiben die Wärmeströme relativ hoch. In der Energiebilanz nach PHPP werden diese Wärmeströme mit einer effektiven Wärmerückzahl der Lüftungsanlage gekennzeichnet.

	1	2	3	4	5	6	
ganzer 6er Block (36-46) Beschreibung der Variante	Haustechnik Luftdichtheit (IST) 3m lange Zuluftkanäle $n_{50} \leq 0.5$ 1/h	Haustechnik 5m lange Zuluftkanäle $n_{50} \leq 0.5$ 1/h	Haustechnik 1.5m lange Zuluftkanäle $n_{50} \leq 0.5$ 1/h	Luftdichtheit $n_{50} = 0.3$ 1/h	Luftdichtheit $n_{50} = 0.6$ 1/h	Luftdichtheit $n_{50} = 1.5$ 1/h	
effektives $\eta_{WRG}$ der Lüftungsanlage	0.78	0.73	0.81				
HWB [kWh/m <sup>2</sup> a]	16.56	17.52	15.84	15.84	17.15	21.23	
Differenz zur Spalte 1		0.97	-0.71	-0.72	0.59	4.67	

**Tabelle 25: mittlerer Heizwärmebedarf (HWB) im 6er Block in Abhängigkeit der Länge der (kalten) Lüftungsleitungen zwischen Gerät und Außenwanddurchlass (Spalte 1 bis 3) und abhängig von der Luftdichtheit der Gebäudehülle (Spalte 3 bis 6). In der letzten Zeile ist jeweils die Differenz zum IST-Zustand in Spalte 1 angegeben. (Aus PHPP Stand 17.12.2008)**

	1	2	3	4	5	6	7
ganzer 4er Block (48-54) Beschreibung der Variante	Haustechnik Luftdichtheit (IST) 3m lange Zuluftkanäle $n_{50} \leq 0.5$ 1/h	Haustechnik 5m lange Zuluftkanäle $n_{50} \leq 0.5$ 1/h	Haustechnik 1.5m lange Zuluftkanäle $n_{50} \leq 0.5$ 1/h	Luftdichtheit $n_{50} = 0.3$ 1/h	Luftdichtheit $n_{50} = 0.6$ 1/h	Luftdichtheit $n_{50} = 1.5$ 1/h	
effektives $\eta_{WRG}$ der Lüftungsanlage	0.78	0.73	0.81				
HWB [kWh/m <sup>2</sup> a]	16.72	17.66	16.02	15.92	17.21	21.22	
Differenz zur Spalte 1		0.94	-0.70	-0.80	0.50	4.50	

**Tabelle 26: mittlerer Heizwärmebedarf (HWB) im 6er Block in Abhängigkeit der Länge der (kalten) Lüftungsleitungen zwischen Gerät und Außenwanddurchlass (Spalte 1 bis 3) und abhängig von der Luftdichtheit der Gebäudehülle (Spalte 3 bis 6). Hier ist das A/V Verhältnis höher, so dass der spezifische HWB jeweils höher ausfällt als beim 6er Block.**

Die Dämmstärke der Kanäle im Projekt Tevesstraße wurde mit 50 mm Butylkautschuk um die runden Rohre und zusätzlich noch etwa 50 mm Zellulose-Einblasdämmung in der rechteckigen Abkofferung ausgeführt, vgl. Abbildung 218, und ist

damit effektiv etwa 100 mm stark. Dies wurde im PHPP angesetzt, so dass sich ein Wärmeverlustkoeffizient von  $\psi = 0.26 \text{ W}/(\text{mK})$  für die Lüftungsleitungen ergibt.

Werden die Längen der kalten Lüftungsleitungen mit 3 m (realisierte Variante) oder 5 m oder 1.5 m angenommen so ergeben sich die in Tabelle 25 bzw. Tabelle 26 genannten Werte für den Heizwärmebedarf (HWB) des gesamten Gebäudes. Die überlangen Leitungen würden den Heizwärmebedarf um fast eine  $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  vergrößern. Die auf 1.5 m Länge optimierten Leitungen hätten gegenüber der realisierten Variante nochmals  $0.71 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  eingespart.

Die kurzen Leitungen waren leider aus Gründen der Grundrissoptimierung nicht möglich. An dieser Stelle soll deshalb aber für zukünftige Projekte deutlich gemacht werden, dass eine Optimierung an dieser Stelle ohne Mehrkosten möglich wäre. Zum Vergleich: Eine zusätzliche Einsparung von  $1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  (von etwa  $17 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  auf  $16 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ) hätte bei dem Gebäude Tevesstraße 36-46 (6er Block) eine zusätzliche Dämmstärke von 35 mm bei allen opaken Bauteilen erfordert. Bei Kosten für den additiv notwendigen Dämmstoff (nur Materialkosten) von etwa  $1 \text{ EUR}/\text{cm}/\text{m}^2$  (Bauteilfläche) und einer Gesamtfläche der opaken Bauteile von  $3500 \text{ m}^2$  wären das Mehrkosten gewesen von 12250 EUR oder  $5.50 \text{ EUR}/\text{m}^2$  Energiebezugsfläche (6er Block:  $2244 \text{ m}^2 \text{ EBF}$ ).

Die **Optimierung der Luftdichtheit der Gebäudehülle** ist ebenfalls eine lohnende, weil sehr kostengünstige Maßnahme. Im Abschnitt 3 wurde die Notwendigkeit einer ausreichend luftdichten Gebäudehülle erläutert. Wird unterstellt, dass aus bauphysikalischen Gründen sowieso eine gute Luftdichtheit erforderlich ist, dann können die Mehrkosten dafür als nahe Null angenommen werden.

Im Projekt konnte eine Luftdichtheit im Mittel von  $n_{50} = 0.49 \text{ } \frac{1}{\text{h}}$  beim 6er Block bzw.  $n_{50} = 0.46 \text{ } \frac{1}{\text{h}}$  beim 4er Block realisiert werden. Wäre demgegenüber eine Luftdichtheit von  $n_{50} = 0.3 \text{ } \frac{1}{\text{h}}$  erreicht worden hätte das eine zusätzliche Einsparung von bis zu  $0.8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  bedeutet, siehe Spalte 4 bis 6 in Tabelle 25 bzw. Tabelle 26. Wäre andererseits nur ein Wert von  $n_{50} = 0.6 \text{ } \frac{1}{\text{h}}$  erreicht worden so hätte das einen um bis zu  $0.6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  höheren Heizwärmebedarf zu Folge gehabt. Ein  $n_{50}$ -Wert von  $1.5 \text{ } \frac{1}{\text{h}}$  wie er nach EnEV noch zulässig gewesen wäre, hätte gar einen zusätzliche Heizwärmebedarf von  $4.5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  verursacht, der mit keiner anderen Maßnahme zu vernünftigen Kosten hätte kompensiert werden können.

## Heizlastberechnung für einzelne Wohneinheiten

Die Beheizbarkeit der Wohnungen über die Zuluft ist auch für Altbausanierungen mit Passivhauskomponenten prinzipiell gegeben. Da jedoch insbesondere Wärmebrücken zum Keller hin nicht ganz vermieden werden können, kann es sein, dass einzelne Wohnungen oder Räume eine erhöhte Heizlast aufweisen.

Im Projekt Tevesstraße waren es vor allem die in Abschnitt 3 beschriebenen Wärmebrücken, z.B. die Balkonanker, und die exponierte Lage einiger Wohnungen im EG und DG, die dort zu erhöhten Heizlasten führten.



**Abbildung 226: kleiner zusätzlicher Heizkörper im Flur einer Wohnung im EG. Dort reicht die Zuluftnacherwärmung nicht aus, um die Heizlast zu decken.**

In Tabelle 28 sind die im PHPP angesetzten Luftvolumenströme mit nominell 30 m<sup>3</sup>/h/Person und einer Personenbelegung der Wohnungen von 25 m<sup>2</sup>/Person für jede einzelne Wohnung eingetragen. In den Tabellen sind die Heizlasten aller Wohnungen einzeln aufgelistet. Sie können jeweils mit der über die Zuluft transportierbaren Wärmeleistung verglichen werden. Es ist ersichtlich, dass die Deckung der Heizlast allein über die Zuluftnacherwärmung nicht in allen Wohnungen gegeben ist, insbesondere im EG aber auch im DG. Dort muss die fehlende Heizleistung deshalb über zusätzliche statische Heizflächen abgedeckt werden, Abbildung 226.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang noch zu betonen, dass die im PHPP ausgewiesenen Heizlasten in der Regel in den realisierten Gebäuden auch wirklich erreicht werden. Das ist aus den Ergebnissen verschiedener Messprojekte bekannt. Die angegebene Heizlast hat daher keine Reserven und muss tatsächlich zur Verfügung stehen. Die Tabellen wurden mit den für die Haustechnikplanung Verantwortlichen diskutiert. In den kritischen Wohnungen wurden dann zusätzliche kleine Heizkörper

installiert, welche im selben hydraulischen Kreis angeordnet sind wie die Heizregister. Erkennt die Steuerung einen Wärmebedarf, so werden beide Wärmequellen aktiviert.

**Tabelle 27: Heizlastdaten zum 4er Block, Tevesstraße 48 – 54 aus PHPP Stand 11.01.2006**

Nr.	Variante / Wohnung		Haus 48 Eck- wohnung (neu) DG	Haus 50 Mit- telwohnung (neu) DG	Haus 52 Mit- telwohnung (neu) DG	Haus 54 links Mittelwohnung (neu) DG	Haus 54 rechts Eckwohnung (neu) DG
1	spezifische Heizlast	W/m <sup>2</sup>	17,6	15,4	15,4	15,4	14,3
2	über Zuluft transportierbar	W/m <sup>2</sup>	15,2	15,0	15,0	15,0	15,0
3	Wohnfläche (PHPP)	m <sup>2</sup>	33,2	63,0	63,0	63,0	50,7
4	Heizlast gesamt pro WE	W	583	969	969	969	727
5	Heizlast pro WE ohne Bad	W 1)	493	899	899	899	662
6	mögl. Heizleistg. über Zuluft	W	505	943	943	943	761
7	mittlerer Volumenstrom	m <sup>3</sup> /h	40,0	75,6	75,6	75,6	60,8
8	Vorh. Heizreg. P <sub>nom</sub> (55/45°)	W 2)	400	600	600	600	500
9	Vorh. Heizreg. P <sub>nom</sub> (70/55°)	W 3)	500	720	720	720	600

Nr.	Variante / Wohnung		Haus 48 Eck- wohnung 2.OG	Haus 50 Mit- telwohnung 2.OG	Haus 52 Mit- telwohnung 2.OG	Haus 54 links Mittelwohnung 2.OG	Haus 54 rechts Eckwohnung 2.OG
1	spezifische Heizlast	W/m <sup>2</sup>	14,7	15,0	15,0	17,0	14,6
2	über Zuluft transportierbar	W/m <sup>2</sup>	15,4	15,4	15,4	16,1	15,6
3	Wohnfläche (PHPP)	m <sup>2</sup>	86,8	85,5	85,5	41,7	65,7
4	Heizlast gesamt pro WE	W	1275	1282	1282	709	962
5	Heizlast pro WE ohne Bad	W 1)	1212	1217	1217	636	899
6	mögl. Heizleistg. über Zuluft	W	1340	1321	1321	671	1028
7	mittlerer Volumenstrom	m <sup>3</sup> /h	104,2	102,6	102,6	50,0	78,8
8	Vorh. Heizreg. P <sub>nom</sub> (55/45°)	W 2)	700	700	700	500	500
9	Vorh. Heizreg. P <sub>nom</sub> (70/55°)	W 3)	850	850	850	600	600

Nr.	Variante / Wohnung		Haus 48 Eck- wohnung EG	Haus 50 Mit- telwohnung EG	Haus 52 Mit- telwohnung EG	Haus 54 links Mittelwohnung EG Muster- wohnung mit WP Kompakt- gerät	Haus 54 rechts Eckwohnung EG
1	Spezifische Heizlast	W/m <sup>2</sup>	18,4	18,5	18,5	22,7	19,2
2	über Zuluft transportierbar	W/m <sup>2</sup>	15,4	15,4	15,4	16,1	15,6
3	Wohnfläche (PHPP)	m <sup>2</sup>	86,8	85,5	85,5	41,7	65,7
4	Heizlast gesamt pro WE	W	1601	1582	1582	948	1259
5	Heizlast pro WE ohne Bad	W 1)	1522	1503	1503	851	1177
6	mögl. Heizleistg. über Zuluft	W	1340 (!)	1321 (!)	1321 (!)	671	1028 (!)
7	mittlerer Volumenstrom	m <sup>3</sup> /h	104,2	102,6	102,6	50,0	78,8
8	Vorh. Heizreg. P <sub>nom</sub> (55/45°)	W 2)	700	700	700	500	600
9	Vorh. Heizreg. P <sub>nom</sub> (70/55°)	W 3)	850	850	850	600	720

1) 2) und 3) siehe Fußnoten bei Tabelle 28.

**Tabelle 28: Heizlastdaten zum 6er Block, Tevesstraße 36 – 46**
**Stand: 11.01.2006**

Nr.	Variante / Wohnung	Haus 46 Eckwohnung (neu) DG	Haus 44 Mittelwohnung (neu) DG	Haus 42 Mittelwohnung (neu) DG	Haus 40 Mittelwohnung (neu) DG	Haus 38 Mittelwohnung (neu) DG	Haus 36 Eckwhg (neu) DG
1	spezifische Heizlast W/m <sup>2</sup>	13,4	13,8	13,8	13,8	13,8	13,5
2	über Zuluft transportierbar W/m <sup>2</sup>	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9
3	Wohnfläche (PHPP) m <sup>2</sup>	81,5	80,0	80,0	80,0	80,0	81,0
4	Heizlast gesamt pro WE W	1092	1105	1105	1105	1105	1091
5	Heizlast pro WE ohne Bad W 1)	1015	1025	1025	1025	1025	1013
6	mögl. Heizleistg. über Zuluft W	1216	1194	1194	1194	1194	1208
7	mittlerer Volumenstrom m <sup>3</sup> /h	97,8	96,0	96,0	96,0	96,0	97,2
8	Vorh. Heizreg. P <sub>nom</sub> (55°/45°) W 2)	700	700	700	700	700	700
9	Vorh. Heizreg. P <sub>nom</sub> (70°/55°) W 3)	850	850	850	850	820	850

Nr.	Variante / Wohnung	Haus 46 Eckwohnung 2.OG	Haus 44 links 2.OG	Haus 44 rechts 2.OG	Haus 42 links 2.OG	Haus 42 rechts 2.OG	Haus 40 links 2.OG	Haus 40 rechts 2.OG	Haus 38 links 2.OG	Haus 38 rechts 2.OG	Haus 36 Eckwhg 2.OG
1	spezifische Heizlast W/m <sup>2</sup>	13,2	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	13,1
2	über Zuluft transportierbar W/m <sup>2</sup>	15,4	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,4
3	Wohnfläche (PHPP) m <sup>2</sup>	99,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	99,8
4	Heizlast gesamt pro WE W	1317	862	862	862	862	862	862	862	862	1307
5	Heizlast pro WE ohne Bad W 1)	1234	786	786	786	786	786	786	786	786	1224
6	mögl. Heizleistg. über Zuluft W	1532	806	806	806	806	806	806	806	806	1532
7	mittlerer Volumenstrom m <sup>3</sup> /h	119,8	60,9	60,9	60,9	60,9	60,9	60,9	60,9	60,9	119,8
8	Vorh. Heizreg. P <sub>nom</sub> (55°/45°) W 2)	700	500	500	500	500	500	500	500	500	700
9	Vorh. Heizreg. P <sub>nom</sub> (70°/55°) W 3)	850	600	600	600	600	600	600	600	600	850

Nr.	Variante / Wohnung	Haus 46 Eckwohnung EG	Haus 44 links EG	Haus 44 rechts EG	Haus 42 links EG	Haus 42 rechts EG	Haus 40 links EG	Haus 40 rechts EG	Haus 38 links EG	Haus 38 rechts EG	Haus 36 Eckwhg EG
1	spezifische Heizlast W/m <sup>2</sup>	16,7	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	16,6
2	über Zuluft transportierbar W/m <sup>2</sup>	15,4	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,4
3	Wohnfläche (PHPP) m <sup>2</sup>	99,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	99,8
4	Heizlast gesamt pro WE W	1669	1114	1114	1114	1114	1114	1114	1114	1114	1655
5	Heizlast pro WE ohne Bad W 1)	1563	1015	1015	1015	1015	1015	1015	1015	1015	1550
6	mögl. Heizleistg. über Zuluft W	1532	806 (!)	806 (!)	806 (!)	806 (!)	806 (!)	806 (!)	806 (!)	806 (!)	1532
7	mittlerer Volumenstrom m <sup>3</sup> /h	119,8	60,9	60,9	60,9	60,9	60,9	60,9	60,9	60,9	119,8
8	Vorh. Heizreg. P <sub>nom</sub> (55°/45°) W 2)	700	500	500	500	500	500	500	500	500	700
9	Vorh. Heizreg. P <sub>nom</sub> (70°/55°) W 3)	850	600	600	600	600	600	600	600	600	850

1) Heizleistung, die den Wohnräumen alleine zugeführt werden muss,  $(W_{fl.ges} - W_{fl.Bad}) \cdot \text{spez. Heizlast}$ . **Übersteigt dieser Wert die maximal über die Luft zuführbare Heizleistung (Zeile 6), so ist entweder ein zusätzlicher Heizkörper notwendig oder es muss evtl. zusätzlich mit einer höheren Vorlauftemperatur, bzw. höheren Zulufttemperatur gearbeitet werden, siehe Text.** Die Heizleistung des Badheizkörpers darf hier nicht mehr hinzuaddiert werden, weil sie im Wohnraum nicht zur Verfügung steht.

2) und 3) Nominelle Heizleistung des alten bisher vorgesehenen Heizregisters beim angegebenen Luftvolumenstrom (Zeile 7) für jede Wohnung. Diese Heizleistung muss mindestens den Wert 1) (Zeile 5), d.h. die Heizlast der Wohnräume alleine ohne Badezimmer, erreichen. **Alle Wohnungen sind diesbezüglich kritisch. Im EG muss ein zusätzlicher HK vorgesehen werden.**



**Abbildung 227: Links Wasser-Luft-Heizregister mit geringer Wärmeleistung, da die Wärmetauscherfläche sehr gering ist. Rechts Heizregister mit hoher Wärmeleistungsübertragung.**

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die konkrete Dimensionierung der Zuluft-Nachheizregister. Diese muss sorgfältig vorgenommen werden, denn die gängigen Leistungs-Typ-Bezeichnungen der Heizregister beziehen sich normalerweise auf wesentlich höhere Luftvolumenströme als sie in Passivhäusern und insbesondere in den kleinen Wohnungen zur Auslegung kommen. Die tatsächlich zur Verfügung stehenden Heizleistungen müssen deshalb sorgfältig geprüft werden. Es kann sonst passieren, dass die notwendige bzw. die prinzipiell über die Zuluft transportierbare Heizleistung nicht in der geplanten Menge an die Zuluft übertragen werden kann und daher die Wohnungen nicht ausreichend beheizt werden können. Eine Überprüfung ergab, dass einige der Heizregister gegenüber der ursprünglichen Planung geändert werden mussten, siehe Abbildung 227.

## 6 Literatur

- [AKKP24] Feist, W. (Hrsg.), Einsatz von Passivhauskomponenten für die Altbausanierung, Passivhaus Institut, Darmstadt, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 24, 1. Auflage 2004
- [AKKP 26] Feist, W. (Hrsg.), Neue Passivhaus-Gebäudetechnik mit Wärmepumpen, Protokollband Nr. 26, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Phase III, Darmstadt, Juni 2004
- [AKKP 30] Feist, W. (Hrsg.), Lüftung bei der Bestandssanierung: Lösungsvarianten, Protokollband Nr. 30, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Phase III, Darmstadt, 1. Auflage 2004
- [AKKP 32] Feist, W. (Hrsg.), Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten: Passivhauskomponenten und Innendämmung, , Protokollband Nr. 32, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Phase III, Darmstadt, 1. Auflage 2005.
- [AKKP 34] Feist, W. (Hrsg.), Schallschutz beim Einsatz von Wärmepumpen und Wärmepumpen-Kompaktgeräten im Passivhaus, Protokollband Nr. 34, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Phase III, Darmstadt, 1. Auflage 2007.
- [Dahlem 2003] Dahlem K.H., Heinrich, H., Weyand, N., Ergebnisse 3-I-Haus-Modernisierung Ludwigshafen, Beitrag in [AKKP24]
- [dena] Deutsches Energieagentur, dena, Das Projekt 'Sanierung Tevesstraße' war ein Bauprojekt im Projekt 'Niedrigenergiehaus im Bestand'. Dabei wurde Beispielhafte Sanierungsprojekte in einer vergleichenden Auswertung übersichtlich dokumentiert.
- [DIN EN ISO 13788] Raumseitige Oberflächentemperatur zu Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren, Berechnungsverfahren, Deutsche Fassung DIN EN ISO 13788:2001
- [faktor10] Rasch, F., Grenz, P., faktor 10 Gesellschaft für Siedlungs- und Hochbauplanung mbH, Darmstadt, [www.faktor10.com](http://www.faktor10.com). Das Büro faktor10 war federführend und verantwortlich für die Planung und Bauleitung beim Projekt Sanierung Tevesstraße.
- [Feist 2001] Feist, W., Stellungnahme zur Vornorm DIN V 4108 Teil 6:2001 aus Sicht der Passivhausentwicklung, CEPHEUS Projektinformation Nr. 39, Passivhausinstitut, Darmstadt, 2001
- [Feist 2002] Feist, W. John, M., Pfluger, R., Bauphysikalische Betreuung: Wärmebrückenberechnung, Diffusionsberechnung, Beratung zum Luftdichtheitskonzept, Qualitätssicherung und Energiebilanzberechnung (PHPP) für das Bauvorhaben Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg im Auftrag der Wohnungsbaugesellschaft der Stadt Nürnberg mbH, Endbericht, Passivhaus Institut, Darmstadt, Oktober 2002
- [Feist 2003] Feist, W. John, M., Kah, O., Passivhaustechnik im Gebäudebestand – Qualitätssicherung für das Bauvorhaben Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg im Auftrag der Wohnungsbaugesellschaft der Stadt Nürnberg mbH, Endbericht, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2003
- [Feist 2003] Gebäudemodernisierung mit Faktor 10. Hier: Thermografische Nachuntersuchung für das Pilotprojekt Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg. Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Endbericht, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2003
- [Feist 2007] Feist, W., Passivhäuser in der Praxis, in: Bauphysikkalender 2007, Schwerpunkt: Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, Hrsg Nabil A. Fouad, ISBN-10:3-433-01868-5, Verlag Enst & Sohn 2007
- [Hall 2000] Hall, Monika: Anwendung der erweiterten Blower Door-Meßmethoden. Bauphysik 22 (2000), Heft 6, S. 402 – 404
- [Heinrich 2007] H. Heinrich / K.-H. Dahlem /N. Weyand: "3-Liter-Haus" im Bestand – Messkonzept und Messergebnisse von 3 Heizperioden Tagungsband zum 12. Bauklimatisches Symposium, Dresden, März 2007
- [Heinz 2004] Heinz, E.; Brasche, S.; Hartmann, T.; Richter, W. und Bischof, W.: Feuchtigkeitschäden einschließlich Schimmelpilz-Wachstum in deutschen Wohnungen, AIRTec 02 (2004) 1

[Kah 2008] Kah, O. Feist, W., Pfluger, R., Schnieders, J., Kaufmann, B., Bewertung energetischer Anforderungen im Lichte steigender Energiepreise für die EnEV und die KfW-Förderung, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Passivhaus Institut, 2008.

[Pfluger\_1 2004] Pfluger, R.: "Integration von Lüftungsanlagen im Bestand – Planungsempfehlungen für Geräte, Anlagen und Systeme", in Protokollband Nr. 30, Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser, Darmstadt, Dezember 2004

[Pfluger\_2 2004] Pfluger, R.: "Lösungen für die Kanalführung in der Bestandssanierung", in Protokollband Nr. 30, Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser, Darmstadt, Dezember 2004

[Pfluger\_3 2004] Pfluger, R., Kaufmann, B., Peper, S. Feist, W.: Wissenschaftliche Begleitung des Sanierungsprojektes der ABG Frankfurt Holding GmbH, Untersuchungen zu den Bestandsgebäuden, i. A. des HMWVL, Darmstadt, 2004

[Peper2009] Peper, S, Baumgärtner, C., Grove-Smith, J., Feist, W., Sanierung mit Passivhauskomponenten: Messtechnische Untersuchungen und Auswertung zum Sanierungsprojekt Tevesstraße, PHI, Darmstadt, 2009.

[Peper 1999] Peper, S. Untersuchung der Luftdichtheit in der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg, PHI 1999/4

[Schnieders 2000] Schnieders, J., Sanierung eines Wohnblocks zum "Passivhaus im Bestand", Beitrag im Tagungsband zur 4. Passivhaustagung 2000, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2000.

[Schnieders 2001] Schnieders, J., Qualitätssicherung beim Sanierungsprojekt Brunckviertel: 3-Literhaus-Sanierung. Unveröffentlichter Projektbericht im Auftrag der LUWOG, Ludwigshafener Wohnungsbaugesellschaft, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2001

[Schulze Darup 2003] Schulze Darup, B.: Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten. – Tagungsband der 7. Passivhaus-Tagung in Hamburg, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2003

[Schulze Darup 2005] Schulze Darup, Hrsg.: Projektbericht Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg. Zusammenstellung der Ergebnisse der Wissenschaftlichen Begleitforschung durch das Passivhaus Institut Darmstadt, FIW München, AnBUS Fürth und Architekturbüro Schulze Darup, Nürnberg 2005

[Weyand 2005] Weyand, N., Heinrich, H., Dahlem, K.-H., Modernisierung Brunckviertel – Ergebnisse zum "3-Liter-Haus" Beitrag im Tagungsband der 9. Passivhaustagung 2005, Ludwigshafen, April 2005

[Weyand 2007] N. Weyand, H. Heinrich, K.-H. Dahlem, 3-Liter-Haus im Bestand – Messkonzept und Messergebnisse von 3 Heizperioden, in: Bauphysik (2007) Heft 3, S. 213-220, Juni 2007