



Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg – energetische Gebäudesanierung mit Faktor 10

Abschlussbericht der wissenschaftlichen Begleitforschung

Auftraggeber: WBG Nürnberg GmbH, Glogauer Straße 70, 90473 Nürnberg

Herausgeber: Dr. Burkhard Schulze Darup, Augraben 96, 90475 Nürnberg

Projektteam der wissenschaftlichen Begleitforschung:

Passivhaus Institut Darmstadt, Rheinstr. 44/46, 64283 Darmstadt,
www.passiv.de (Autoren: Dr. Wolfgang Feist, Markus John, Oliver Kah)

anbus analytik GmbH, Gesellschaft für Gebäuediagnostik, Umweltanalytik und
Umweltkommunikation, Mathildenstraße 48, 90762 Fürth, www.anbus-analytik.de (Autoren: Jörg Thumulla, Uwe Münzenberg)

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. München (FIW)
Lochhamer Schlag 4 82166 Gräfelfing, www.fiw-muenchen.de
(Autor: Dr. Martin H. Spitzner)

Dr. Burkhard Schulze Darup, Augraben 96, 90475 Nürnberg, www.schulze-darup.de

Nürnberg 2005

Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg – energetische Gebäudesanierung mit Faktor 10

Abschlussbericht (Hrsg. Dr. Burkhard Schulze Darup)

basierend auf den Gutachten im Auftrag der WBG Nürnberg:

- [PHI 2002]** Feist, Wolfgang; John, Markus; Pfluger, Rainer: Bauphysikalische Betreuung: Wärmebrückenberechnung, Diffusionsberechnung, Beratung zum Luftdichtheitskonzept und Qualitätssicherung PHPP für das Bauvorhaben Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg. - Passivhaus Institut Darmstadt 2002
- [PHI 2003]** Feist, Wolfgang; John, Markus; Kah, Oliver: Passivhaustechnik im Gebäudebestand – Qualitätssicherung für das Bauvorhaben Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg. - Passivhaus Institut Darmstadt Januar 2003
- [PHI 2003-1]** Feist, Wolfgang: Passivhaustechnik im Gebäudebestand – Thermografische Nachuntersuchung für das Bauvorhaben Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg. - Passivhaus Institut Darmstadt März 2003
- [AnBUS 2004]** Münzenberg, Thumulla: Projektbericht Jean-Paul-Platz. - AnBUS Fürth 2004
- [FIW 2005]** Spitzner: Wissenschaftliche Begleitforschung Jean-Paul-Platz 4, Nürnberg – Energetische Gebäudesanierung mit Faktor 10: Zustand nach Sanierung: Auswertung der Energieverbräuche für Heizung und Warmwasser, der Energiebeiträge der Heizanlage und der Solaranlage, sowie der Raumluftparameter Temperatur, Feuchte und CO₂-Gehalt in den Wohnungen – FIW München März 2005

Anmerkungen zum Umgang mit der Datei

Der Bericht liegt Ihnen als pdf-Datei vor, um die große Datenmenge ohne erheblichen Druckaufwand zur Verfügung stellen zu können. Darüber hinaus ist durch die Inhaltsverzeichnis- und Lesezeichenfunktionen ein einfaches Navigieren innerhalb der Kapitel und Anlagen möglich.

Durch Anklicken des Doppelstreifens am linken Bildrand der pdf-Datei öffnen Sie das Inhaltsverzeichnis, wo Sie durch Mausklick auf den Gliederungspunkt direkt zur entsprechenden Textstelle geleitet werden. Wenn sie die Kreuchen links betätigen, wird die jeweils nächste Gliederungsebene geöffnet.

Die farblich hinterlegten Quellenangaben im Text **[XYZ 2004] führen durch Anklicken mit der Maus direkt zum entsprechenden Teil des Bezugstextes in der Anlage, sodass Sie direkten Zugang zum Original-Gutachten mit vertieften Informationen haben.**

Inhaltsverzeichnis

1	GRUNDLAGEN	5
2	KONSTRUKTION	6
2.1	Wand	7
2.2	Decke über 2. Obergeschoss.....	7
2.3	Kellerdecke	7
2.4	Fenster.....	8
3	BAUPHYSIKALISCHE OPTIMIERUNG DER GEBÄUDEHÜLLE.....	9
3.1	Wärmebrücken	9
3.2	Dampfdiffusionsberechnungen.....	10
3.2.1	Außenwand vor Sanierung.....	10
3.2.2	Außenwand nach Sanierung	10
3.2.3	Oberste Geschossdecke nach Sanierung.....	10
3.3	Luftdichtheit.....	11
4	QUALITÄTSSICHERUNG MITTELS INFRAROT-THERMOGRAFIE	13
4.1	Bauphase November 2002	13
4.2	Abnahme nach Fertigstellung Dez 2002	16
4.3	Vergleich IR-Thermografie - Wärmebrückenberechnung.....	19
5	LÜFTUNGSANLAGE	20
5.1	Qualitätssicherung der Lüftungsanlage.....	21
5.1.1	Inbetriebnahme	21
5.1.2	Überprüfung durch das Passivhaus Institut (Flow Finder)	21
5.1.3	Indikatorgas-Messung.....	21
5.1.4	Luftalter.....	22
5.1.5	Stromverbrauch Vorheizregister.....	22
6	MESSUNG DER RAUMLUFTQUALITÄT.....	23
6.1	Untersuchung auf Mikroorganismen.....	23
6.2	VOC-Messung	24
6.3	CO ₂ – Verlaufsmessung.....	25

7	GEBÄUDETECHNIK	27
7.1	Heizung und Trinkwassererwärmung	27
7.2	Heizwärmebedarf.....	27
7.3	Verbrauchserfassung.....	28
7.4	Heizwärmeverbrauch	28
7.5	Heizwärmeverbrauch pro Wohnung	29
7.6	Anlagenaufwand	30
7.7	Heizleistung	30
7.8	Verbrauch für Trinkwassererwärmung	30
8	BAUKOSTEN	31
8.1	Mehrinvestitionen für Faktor 10 gegenüber EnEV-Standard	32
8.1.1	Miete	33
9	TEMPERATUR- UND FEUCHTEMESSUNGEN FIW.....	34
9.1	Sommerfall.....	35
10	NUTZERVERHALTEN	35
11	ZUSAMMENFASSUNG	36
12	QUELLEN	38

1 Grundlagen



Abb. 1: Vor der Sanierung



Abb. 2: Nach Fertigstellung

Energetische Gebäudesanierung wurde als ein wesentlicher Zielpunkt im Rahmen des EU-Ziel-2-Programms für die Nürnberger Südstadt festgelegt. Die wbg Nürnberg als Wohnungsbaugesellschaft mit hohem Innovationspotenzial konnte im Rahmen dieses Programms für eine Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten gewonnen werden. Die Wahl des Sanierungsobjekts fiel auf ein Mehrfamilienhaus am Jean-Paul-Platz 4 mit sechs Wohnungen á 149 m² Wohnfläche. Das Gebäude wurde 1930 erbaut. Die Sanierung wurde im bewohnten Zustand durchgeführt. Die Förderung erfolgte durch das bayerische Wirtschaftsministerium in Verbindung mit dem EU-Ziel-2-Programm.

Es war im Sinne des Bauherrn, dass durch den Fördergeber eine wissenschaftliche Begleitforschung gewünscht wurde. Dadurch erfolgte eine sinnvolle Ergänzung des integralen Planungsansatzes. Die Zielstellungen der jeweiligen Begleitforschung werden in den anliegenden Berichten dargestellt [PHI 2002], [PHI 2003], [AnBUS 2004], [FIW 2005]. Das Planungs- und Betreuungsteam bestand aus folgenden Partnern:

Bauherr: technische Leitung	Herr Höger (WBG)
Bauherr: Projektleitung	Frau Groß (WBG)
Architektenleistungen	Architekturbüro Schulze Darup, Nürnberg
Gebäudetechnik	Ingenieurbüro VIP, Nürnberg
Wissenschaftliche Begleitforschung	
Bauphysikalische Beratung / Qualitätssicherung	Passivhaus Institut Darmstadt (PHI)
Messprogramm Raumluftqualität	AnBUS Fürth
Messprogramm Bauphysik und Energieverbrauch	FIW München
Blower-Door-Messungen	AnBUS Fürth und PHI Darmstadt
Koordination, energetische Betreuung der Nutzer	Dr. Burkhard Schulze Darup, Nürnberg

2 Konstruktion

Das Gebäude weist folgende Konstruktionsmerkmale auf: die Außenwände bestehen aus Vollziegeln, Geschossdecken aus Holzbalkendecken mit Fehlböden und die Kellerdecke aus Betonhourdis. Der Dachboden ist nicht ausgebaut. Die Sanierung wurde umfassend ausgeführt, wobei die energetisch relevanten Bauteile besondere Beachtung erfuhren. Zugleich wurde ein möglichst sparsames Sanierungskonzept angewandt: es wurden nur geringfügige Grundrissänderungen durchgeführt in zwei Wohnungen sowie ein Kellerabgang entfernt und die Kellerorganisation geringfügig verändert. Folgende Maßnahmen wurden durchgeführt:

- Erstellen eines neuen Heizraums im Dachbodenbereich, Teilabriss von Kaminen
- Erneuern der Sockelausbildung samt Rabatten ohne Aufgraben des Kellers
- Neueindeckung des Daches und der Erneuerung aller Bleche
- Montieren von Aufschieblingen im Traufbereich zur Erzielung eines Dachüberstands
- Ausführung eines Wärmedämmverbundsystems
- Dämmung der Kellerdecke und des Kellerabgangs
- Dämmung des Dachbodens inkl. Estrich, des Kniestocks und des Treppenhaukopfes
- Vollständiger Austausch aller Fenster inkl. Kellerfenster
- Neue Hauseingangstür und Dachboden- sowie Kellertür, Abdichtung der Wohnungstüren
- Treppenhauassanierung inkl. Sprechanlage, Briefkastenanlage und Vordach
- Errichtung von überdachten Balkons für alle Wohnungen
- Erneuern der Heizungsanlage inkl. Demontage einer alten Schwerkraftanlage
- Solarthermieanlage mit Schichten-Pufferspeicher
- Zentrale Warmwasserversorgung mit neuer Anbindung aller Bäder
- Lüftungsanlagen für alle Wohnungen dezentral
- Modernisierung der Elektroanlage außerhalb der Wohnungen

Nicht ausgeführt wurden folgende Leistungen

- Baderneuerung
- Schönheitsreparaturen in den Wohnungen.

Das Kostenziel für die baulichen Maßnahmen betrug 560 €/m² Wohnfläche (Kostengruppe 300/400 nach DIN 276 inkl. MWSt. Im folgenden werden die energetisch relevanten Maßnahmen eingehender beschrieben.

2.1 Wand

Die Außenwände bestehen aus Vollziegel-Mauerwerk mit einer Gesamtdicke von 41 cm und einem U-Wert von $1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Sie wurden mit einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS) mit einer Dämmdicke von 20 cm versehen. Dabei wurde Polystyrol mit Wärmeleitfähigkeitsgruppe 035 verwendet, die bei einer sehr niedrigen Rohdichte von $15 \text{ kg}/\text{m}^3$ durch Zusatz von Graphit bei der Herstellung erreicht wird. Der resultierende U-Wert beträgt $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Die erhöhte Dammstärke war ohne Probleme durchführbar. Für das Gewerk des Wärmedämmverbundsystems lag dem Vertrag mit dem Auftragnehmer ein äußerst günstiges Kostenangebot zu Grunde. Dennoch wurde mit hoher Sorgfalt gearbeitet. Seitens des WDVS-Herstellers (Fa. Marmorit) wurde eine regelmäßige Qualitätskontrolle durchgeführt. Mehraufwand ergab sich aus dem sehr unebenen Untergrund in Form von Mehrungen beim Verbrauch des Klebers für die Dämmplatten.

2.2 Decke über 2. Obergeschoss

Bei dem Gebäude wird der Dachboden nicht genutzt, sollte aber grundsätzlich begehbar ausgebildet werden. Die Fehlbodendecke über dem 2. Obergeschoss bildet somit den thermischen Abschluss nach oben. Ausgehend von $U = 0,87 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ im unsanierten Zustand wurde folgender Aufbau durchgeführt: PE-Folie als luftdichtende Bahn, PS-Dämmung WLG 035 mit 25 cm Dicke, Ölpapier als Trennlage und Zementestrich mit 6 cm Aufbauhöhe. Es wurde also wiederum eine begehbare Lösung durchgeführt. Der resultierende U-Wert beträgt $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

2.3 Kellerdecke

Bei Erstellung des Gebäudes wurde die Kellerdecke aus Stahlbetonträgerdecken mit eingehängten Betonhourdis erstellt. Die Kellerhöhe betrug vor der Sanierung etwa 2,15 m, sodass eine maximale Dämmhöhe von 14 cm möglich war. Diese wurde in Form von PS-Dämmung WLG 035 erstellt. In den Flurbereichen wurde aus brandschutztechnischen Gründen Mineralwolle verwendet. Die Oberflächen wurden verspachtelt mit eingelegtem Glasfasergewebe. Der U-Wert vorher betrug $0,88 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, nach der Sanierung beträgt der Wert $U = 0,19 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ verbessert.



**Abb. 3: WDVS 20 cm dick –
luftdichter Anschluss an das Fenster**



**Abb. 4: Dämmung der KG-Decke und
Wärmebrückenreduktion an den Wänden**

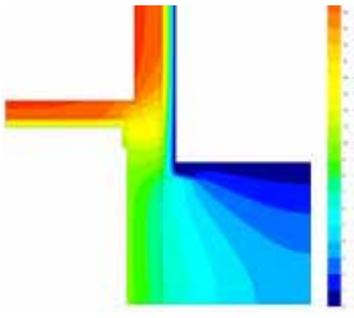
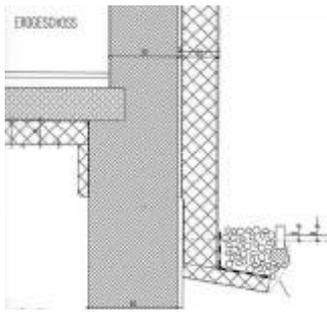
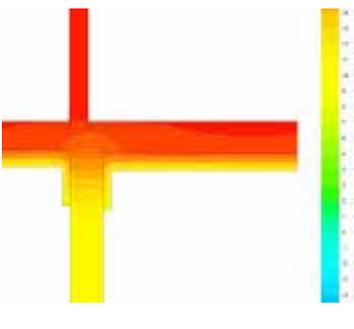
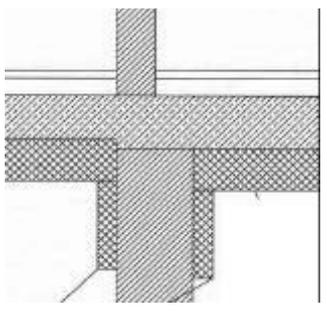
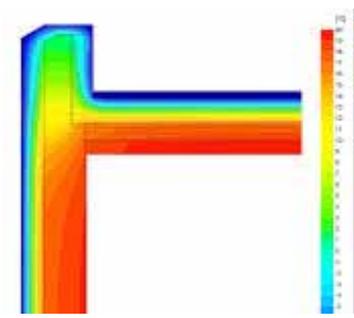
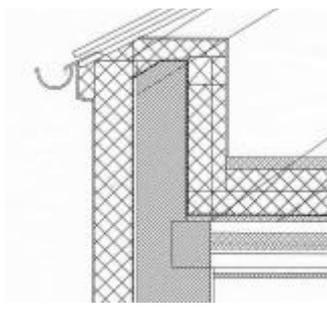
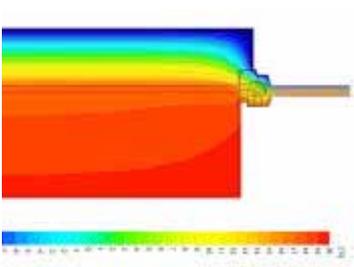
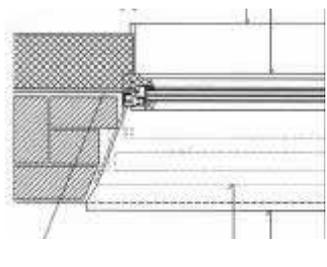
2.4 Fenster

Die Kastenfenster von 1930 waren bis vor der Sanierung im Originalzustand erhalten. Seitens der Mieter wurden extreme Klagen hinsichtlich der fehlenden Dichtheit dieser Fenster geäußert. Eine Beibehaltung oder Überarbeitung der Kastenfenster war nicht sinnvoll. Die Nebenräume und Treppenhäuser waren mit Einfachfenstern versehen. Die Montage erfolgte seinerzeit mit einem Anschlag hinter der äußeren Steinschicht, was bei einer Fenstertiefe von ca. 18 cm zu einer kleinen inneren Leibungstiefe von ca. 8 cm führte. Bei der Fensterdemontage musste der Putz auf Grund der soliden Einbauweise bis über die Innenkante hinaus entfernt werden, was zu relativ hohen Aufwendungen für die späteren Einputzarbeiten führte. Der Einbau der passivhaus-geeigneten Kunststofffenster (Fabr. Rehau Clima Design) erfolgte mit ca. 5 cm Einstand von der Außenputzkante, sodass innen eine Leibungstiefe von ca. 37 cm entstand, während außen das ursprüngliche Bild mit etwa 15 cm erhalten blieb. Die Dämmung umgreift außen das Fenster um ca. 7 cm. Der Einbau erfolgte mit Montagewinkeln. Die Einjustierung in die Dämmebene erwies sich als schwierig, weil die Außenwand erhebliche Maßtoleranzen aufwies. Geringe Abweichungen konnten dabei in Kauf genommen werden. Die Tiefe der Fensterbänke musste präzise auf die neue Putzebene abgestimmt werden. Rollläden waren vor der Sanierung vorhanden, wurden jedoch nicht erneuert bzw. neu erstellt.

3 Bauphysikalische Optimierung der Gebäudehülle

3.1 Wärmebrücken

Zu den Wärmebrücken wurde auf Grundlage der Architektendetails mit dem Passivhaus Institut (PHI) ein Abstimmungsgespräch durchgeführt und danach durch das PHI Berechnungen zur Optimierung erstellt. Die ausführliche Dokumentation befindet sich in der Anlage [PHI 2002]. Eine Auswahl der Lösungen wird tabellarisch dargestellt:

		<p>Abb. 5 Sockelbereich Keller-Außenwand: die Dämmung wird aus Kostengründen nur 25 cm tief ins Erdreich eingebunden, ergänzend wird eine nach außen verlaufenden Frostschürze verlegt; $\Psi_a = 0.134 \text{ W/(mK)}$</p>
		<p>Kellerinnenwände zu aufgehendem Mauerwerk im EG: durch die senkrechte Fortsetzung der Dämmung an den Kellerwänden nach unten (30 cm) wurde $\Psi_a = 0.30 \text{ W/(mK)}$ erreicht, bei den 38 cm dicken KG-Wänden $\Psi_a = 0.46 \text{ W/(mK)}$</p>
		<p>Kniestock: durch vollständiges Umdämmen des Kniestocks mit einer Dicke von seitlich 20 cm und oberhalb 10 cm ergibt sich: $\Psi_a = 0.056 \text{ W/(mK)}$</p>
		<p>Fenster: Wärmebrücke vergleichbar einer Neubau-Situation $\Psi_a = 0.017 \text{ W/(mK)}$ beim seitlichen Anschluss; der untere Bereich zum Fensterblech weist $\Psi_a = 0.030 \text{ W/(mK)}$ auf</p>

3.2 Dampfdiffusionsberechnungen

Bei Ausarbeitung der Details wurden Rahmenbedingungen für das Feuchteverhalten überprüft. Die wesentlichen Konstruktionen erwiesen sich als ungefährdet für Feuchteschäden. Deshalb wurde nur die Außenwand sowie der einzige wirklich zu überprüfende Bereich – die Dämmkonstruktion der obersten Geschossdecke – berechnet. Im folgenden die jeweilige Kurzzusammenfassung des PHI-Berichtes, der in der Anlage umfassend dokumentiert ist. [\[PHI 2002\]](#)

3.2.1 Außenwand vor Sanierung

Innerhalb des Ziegelmauerwerkes kommt es im äußeren Drittel regelmäßig zu Tauwasseranfall. Dieser Wasser wird kapillar gebunden und kann nach innen und nach außen wieder austrocknen. Die Materialfeuchtigkeit im Ziegel war jedoch dauerhaft relativ hoch sein.

3.2.2 Außenwand nach Sanierung

Nach Aufbringen der Dämmung gibt es in der gesamten Konstruktion keinen Tauwasseranfall mehr. Sollte Wasser aus anderen Quellen in den Aufbau gelangen, so kann es im Sommer und im Winter in ausreichendem Maß austrocknen. Die Konstruktion ist bauphysikalisch einwandfrei. Die Materialfeuchte im Mauerwerk wird gegenüber dem Zustand vor der Sanierung innerhalb von 1 bis 3 Jahren auf einen deutlich geringeren Wert absinken.

3.2.3 Oberste Geschossdecke nach Sanierung

Solange s_D der Folie unter dem Estrich kleiner bleibt als 1.3 m gibt es in der gesamten Konstruktion keinen Tauwasserausfall (Nebenwege berücksichtigt, jedoch Luftdichtheit vorausgesetzt). Entscheidend ist, dass die Luftdichtheit in der Ebene der Dampfbremssfolie auf der bestehenden Dielendecke sorgfältig hergestellt wird.

3.3 Luftdichtheit

Zu Projektbeginn lagen keine systematische Untersuchungen zur Luftdichtheit bei Bestandsgebäuden vor. Quellenangaben zu durchgeführten Messungen lagen im allgemeinen im Bereich von $n_{50} = 3 \text{ h}^{-1}$ bis $n_{50} = 15 \text{ h}^{-1}$. Dabei ließen sich keine Korrelationen auf Grund von Baujahren feststellen, allenfalls bezogen auf einzelne Konstruktionen.

Auf Grund der mithin nicht ausreichend gegebenen Erfahrungswerte war es für das Projekt Jean-Paul-Platz nicht möglich, im Planungsstadium einen fundierten n_{50} -Zielwert festzulegen.

Seitens des Passivhaus Instituts wurden in Abstimmung mit dem Architekten Planungslösungen für das Luftdichtheitskonzept erarbeitet. [PHI 2002]

Vor Baubeginn wurde ein Blower-Door-Test durch AnBUS Fürth ausgeführt, der für das Gesamtgebäude einen Wert von $n_{50} = 4,9 \text{ h}^{-1}$ nachwies. Die drei übereinanderliegenden Wohnungen auf der Ostseite wurden einzeln gemessen und erbrachten folgende Werte: Wohnung EG: $n_{50} = 4,2 \text{ h}^{-1}$; Wohnung 1. OG: $n_{50} = 6,2 \text{ h}^{-1}$; Wohnung 2. OG: $n_{50} = 9,9 \text{ h}^{-1}$. Daraus lässt sich ableiten, dass einerseits der Übergang zum Dachboden eine besondere Leckagequelle darstellt und zudem zwischen den Wohnungen relativ hohe Undichtigkeiten bestehen.

Die **Außenwand** kann nicht als luftdicht angesehen werden, weil die dichtende Innenputzschicht an zahlreichen Stellen unterbrochen wird. Das betrifft sowohl die Durchdringungen von Elektroinstallationen als auch Risse im Innenputz. Vor allem ist jedoch der gesamte Bereich des Deckenauflegers der Holzbalkendecken unverputzt, sodass in diesem obendrein geschwächten Bereich die Gefahr von Undichtheiten sehr hoch ist. Da im Innenbereich keine Maßnahmen durchgeführt werden konnten, blieb als einzige Lösung die Ausführung der luftdichtenden Ebene an der Außenseite der Wand. Dazu wurde das Wärmedämmverbundsystem vollflächig verklebt bzw. vor dem Kleben eine vollflächige Spachtelung aufgetragen.

Fensteranschlüsse konnten sehr einfach in diese Luftdichtungsebene eingearbeitet werden durch Einspachteln der Fensterverklebung, die mit vlieskaschiertem Butylklebeband auf den bestehenden Außenputz ausgeführt wurde. Unebenheiten im Mauerwerk und poröse Putzoberflächen wurden mit einem feuchte- und temperaturbeständigen Zusatzkleber ausgeglichen. Mit dem Mörtel des Wärmedämmverbundsystems wurde das Klebeband zudem eingeputzt.

Die **Fehlbodendecke über dem 2. Obergeschoss** zum Dachboden stellte die wesentliche Herausforderung hinsichtlich der Abdichtung dar. Als Abdichtungsebene wurde eine PE-Folie auf der Dielung unter der aufzubringenden Estrichdämmung gewählt. Problempunkte stellten das aufgehende Mauerwerk des Kniestocks und der Kamine sowie die zahlreichen Durchdringungen des Dachstuhls dar. Am Mauerwerk wurde die PE-Folie bis auf 30 cm hoch gezogen, zweifach mit dauerelastischem Kleber angedichtet sowie überspachtelt mit dem Mörtel des darauf angebrachten WDVS an der Innenseite des Kniestocks. An die Balkendurchdringungen wurde die Folie auf etwa 3 – 5 cm herangezogen und luftdicht eingebunden mit Gipsschlämme, die ihrerseits in die Unebenheiten und Risse des Holzes luftdicht einbindet.

Treppenabgang und Treppenhauskopf mit angrenzendem Heizraum beinhalteten zahlreiche Anschlüsse mit hohen Anforderungen an die Handwerker und mussten detailliert in den zahlreichen Anschlusspunkten luftdicht ausgeführt werden.

Der Zeitpunkt des zweiten **Blower-Door-Tests** wurde so gewählt, dass die Montage der Fenster sowie die frisch verlegte PE-Folie auf dem Dachboden überprüft und nachgearbeitet werden konnten. Während bei den Fenstern nahezu keine Undichtheit festgestellt werden konnte, war im Dachbodenbereich Nacharbeit erforderlich. Es wurde Überdruck in der jeweils darunter liegenden Wohnung mit geringen 15 Pascal erzeugt, um die Folie nicht gar zu weit abheben zu lassen. Mittels IR-Thermografie konnten dann zielgerichtet die Leckagen geortet und weitestgehend geschlossen werden. Die abschließende Messung des Gesamtgebäudes ergab einen hervorragenden n_{50} -Wert von $0,55 \text{ h}^{-1}$ und einige Hinweise zur weiteren Abdichtung der Hülle [PHI 2002]. Bei der Schlussabnahme wurde ein n_{50} -Wert von $0,35 \text{ h}^{-1}$ erzielt [AnBUS 2003].

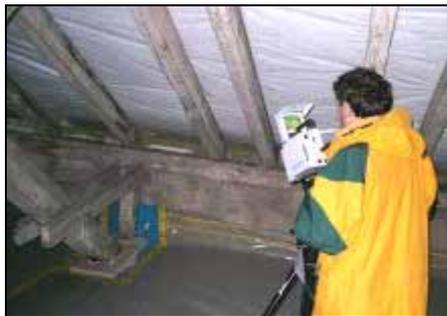


Abb. 6: Thermografie der Dachboden-Luftdichtung



Abb. 7: Luftdichtung der Fenster außenwand-bündig



Abb. 8: Blower-Door-Messung – n_{50} vorher $4,9 \text{ h}^{-1}$ nachher $0,35 \text{ h}^{-1}$

4 Qualitätssicherung mittels Infrarot-Thermografie

Infrarot-Thermografie wurde während der Sanierungsphase dreimal durch das Passivhaus Institut Darmstadt durchgeführt und jeweils in einem Bericht zusammengefasst:

- Qualitätssicherung während der Bauphase am 19.11.2002 [PHI 2002]
- Überprüfung im Umfeld der Abnahme am 17.12.2002 [PHI 2003]
- Nachkontrolle am 5.3.2003. [PHI 2003-1]

Die Visualisierung von Wärmebrücken und Luftundichtheiten war ein wesentliches Mittel der Qualitätssicherung. Seitens der Handwerker wurde angesichts der Sichtbarmachung selbst kleiner Mängel ein deutlich erhöhtes Maß an Sorgfalt an den Tag gelegt. Soweit die Akteure während der Thermografie selbst auf der Baustelle anwesend waren, stellte die Kamera für etliche Problempunkte eine wertvolle Hilfe zur Behebung von Mängeln dar.

Äußerst günstig für die Bauüberwachung war die Möglichkeit, Detailpunkte mehrfach zu thermografieren. So konnten sowohl bei der Baustellenbegehung im November Problempunkte festgestellt werden als auch das Ergebnis der weiteren Bearbeitung bei den Aufnahmen im Dezember dokumentiert werden. Gezielt wurden im März einige behobene Mängel nochmals begutachtet.

In den folgenden Abbildungen werden einige relevante Detailpunkte dargestellt. Sie illustrieren recht anschaulich die Qualität der Leistungen.

4.1 Bauphase November 2002

In den folgenden Gegenüberstellungen werden beispielhaft einige Detailpunkte herausgegriffen, die während der Bauphase thermografiert wurden. Die ausführliche Darstellung befindet sich im Bericht des Passivhaus Instituts in der Anlage. [PHI 2002]

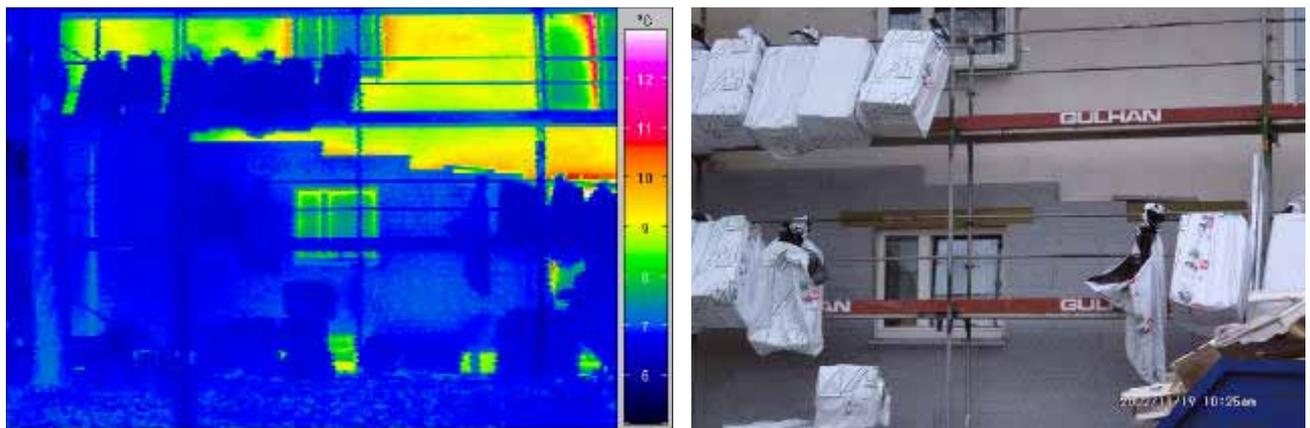


Abb. 9 Linker, unterer Bereich der Südfassade. Sehr gut ist die Grenze zwischen gedämmtem und noch nicht gedämmtem Bereich erkennbar. Die frei hängenden Säcke weisen in etwa die gleiche Oberflächentemperatur wie die bereits gedämmten Außenwandbereiche auf.

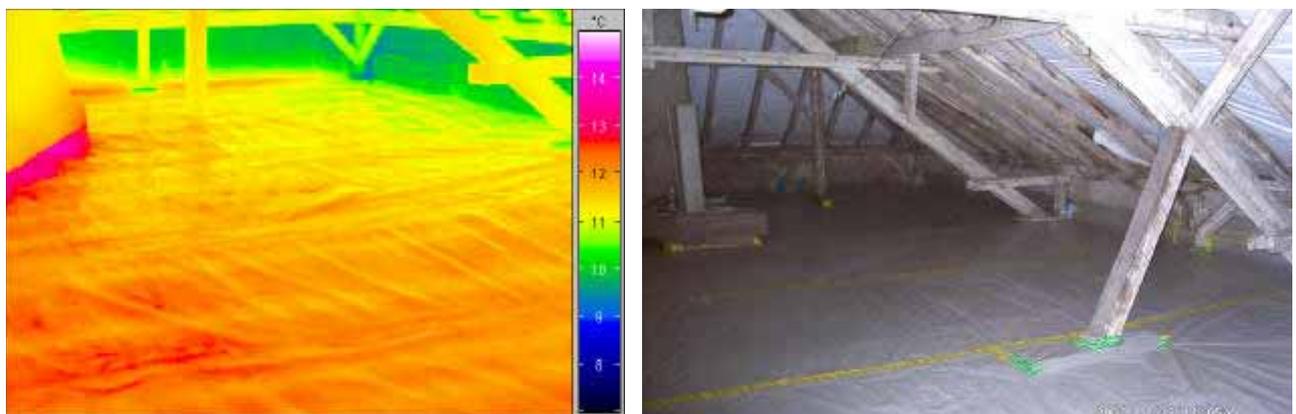


Abb. 10 Thermografieaufnahme des südöstlichen Teils des Dachbodens. Die Holzbalken der Decke sind schemenhaft erkennbar (gelbe Streifen im Bodenbereich). Am Durchstoßungspunkt des Kamins ist ein wärmerer Bereich auszumachen, in dem noch Nacharbeiten erforderlich sind. Die oberste Geschossdecke ist noch nicht gedämmt, dadurch erklären sich die relativ hohen Temperaturen der Oberflächen.

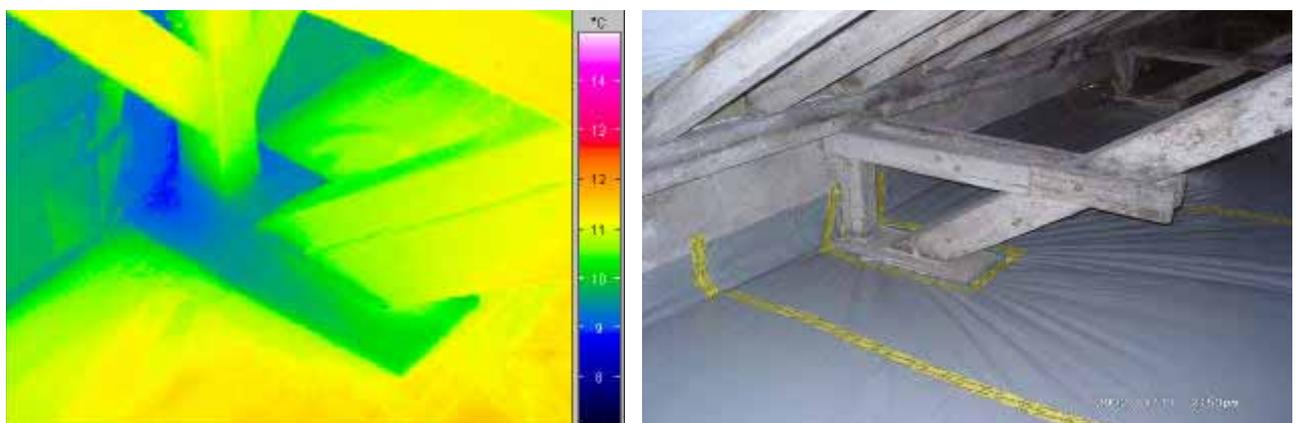


Abb. 11 Thermografie einer abgedichteten Balkendurchdringung. Mit Gipsverguß wurde Folie luftdicht an den Balken angeschlossen. Das Bild zeigt keine Auffälligkeiten: Erwartungsgemäß ist der Gips etwas kühler, da er noch trocknet.

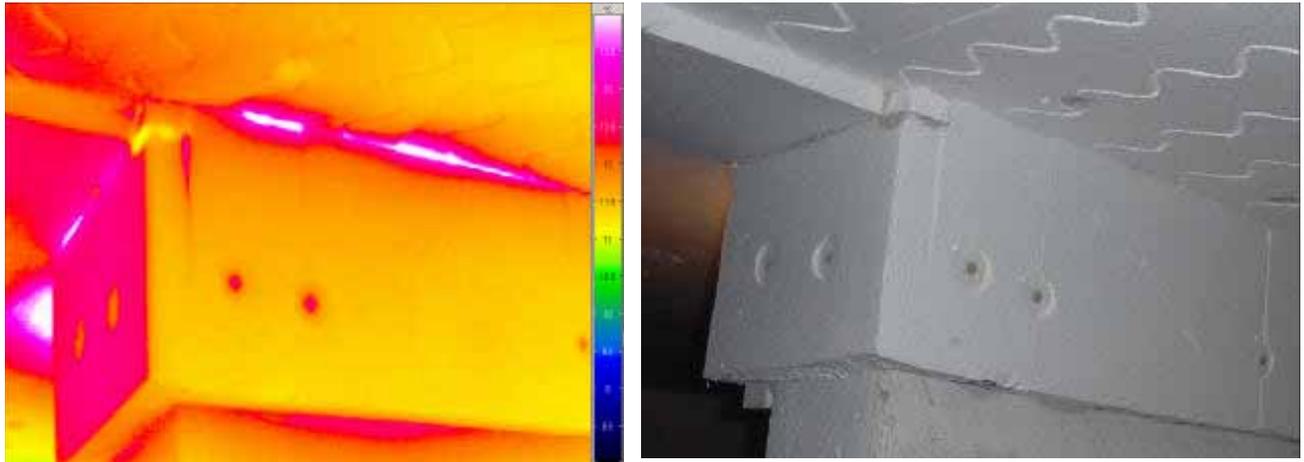


Abb. 12 Dämmstreifen am oberen Abschluss der Kellerwand zur Kellerdecke zur Wärmebrückenreduzierung. In den rot-weißen Bereichen ist konvektiver Austausch vor Verspachteln der Oberfläche erkennbar. Die Dübelköpfe zeichnen sich ab.

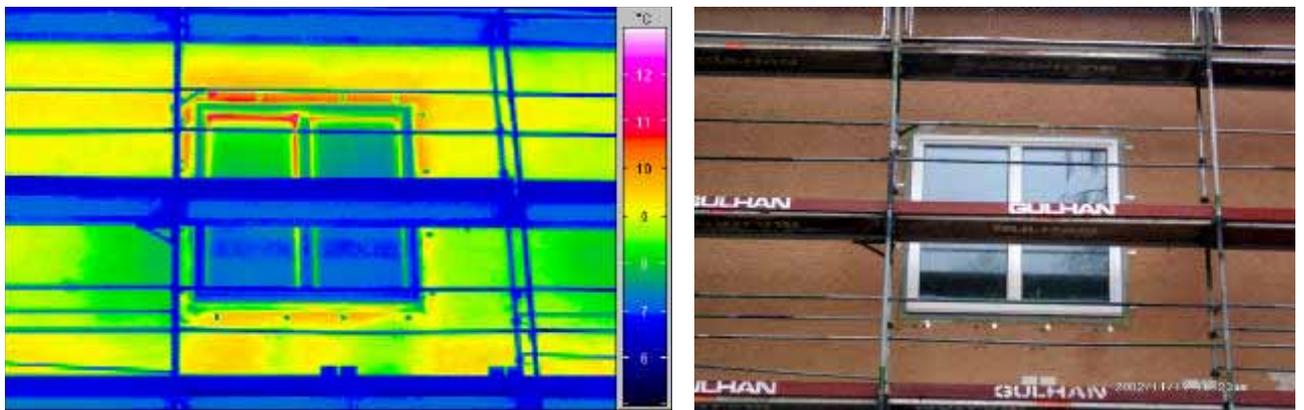


Abb. 13 Thermografiebild der raumhohen Fenstereinheit. Die Oberflächentemperaturen der Glasflächen liegen unter denen der "alten" ungedämmten Außenwand, ein Beleg für die hohe thermische Qualität der 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung. Die Einbauwärmebrücke ist ebenso erkennbar wie die Temperaturerhöhung im Bereich des Glasrandes.

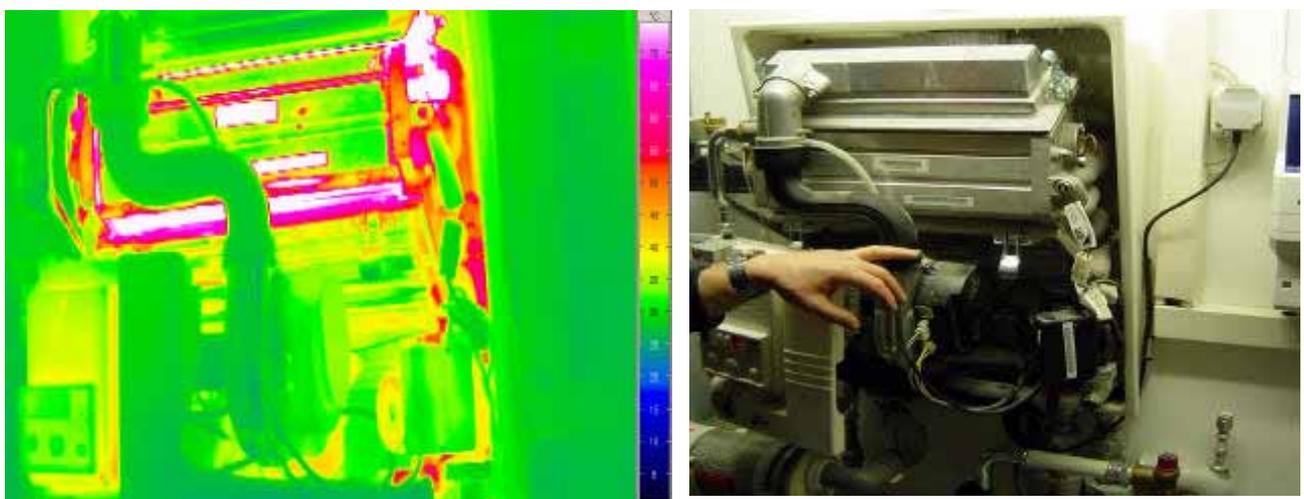


Abb. 14 Infrarot-Thermografie des Gas-Brennwertgerätes im geöffneten Zustand

4.2 Abnahme nach Fertigstellung Dez 2002

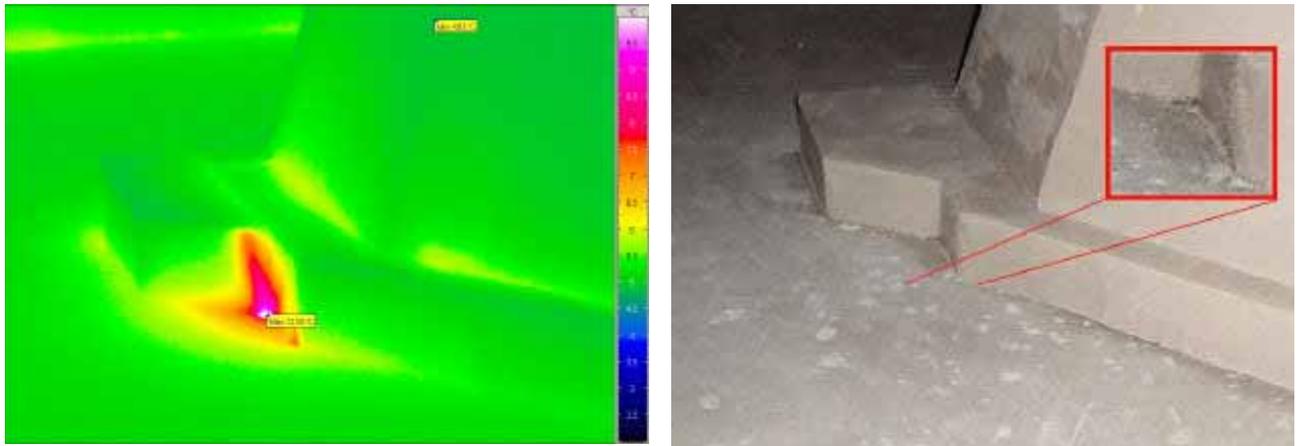


Abb. 15 Dachboden, Schornsteinverzug mit "Hotspot"- Oberflächentemperaturen über 12 °C. Nachweis eines Mangels in der Luftdichtung in Verbindung mit einem Loch in der Spachtelung, so dass Warmluft austritt.

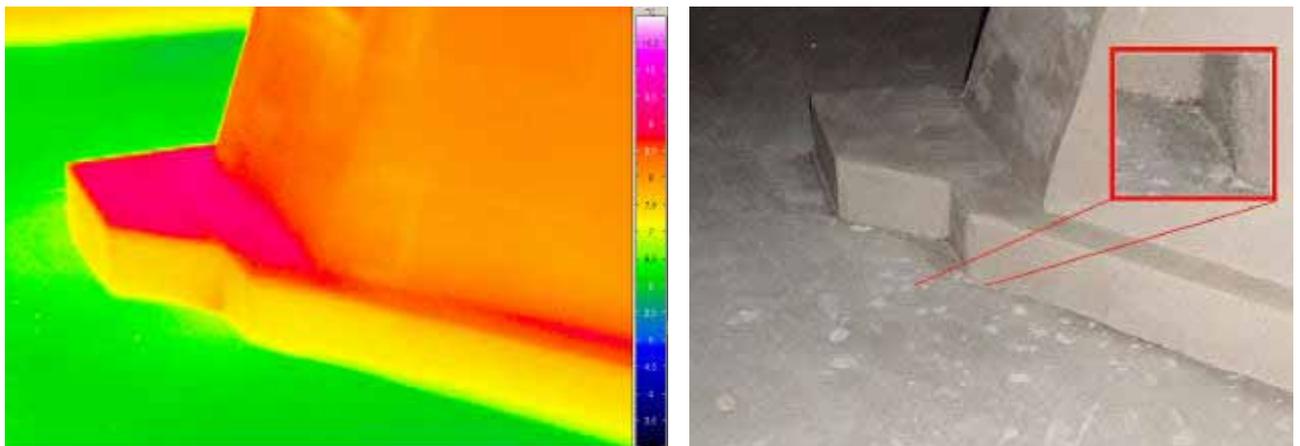


Abb. 16 Kontrolluntersuchung zum obigen Detail (März 2003): der Mangel wurde behoben, sodass keine Konvektion mit erhöhten Temperaturen mehr erkennbar ist.

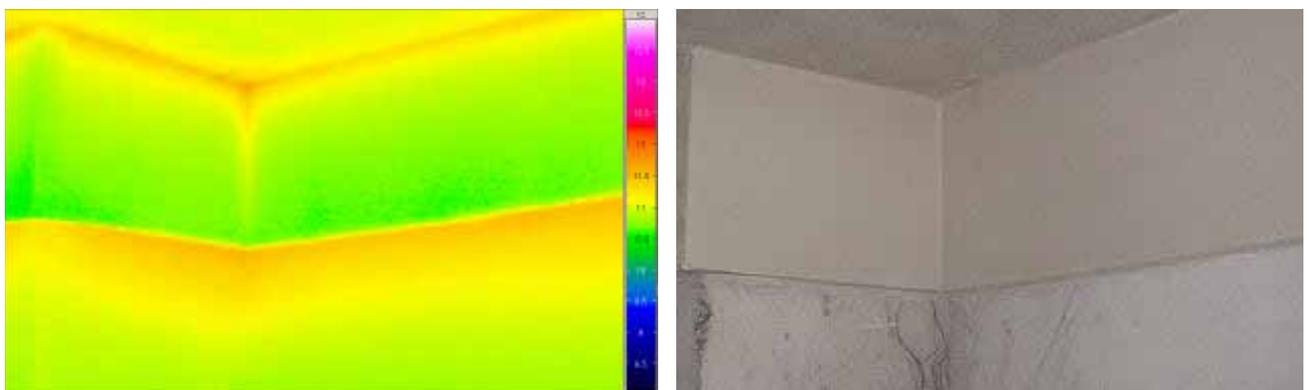


Abb. 17 Gespachtelte Kellerdeckendämmung mit Randstreifen nach der Spachtelung. Die Decke ist sehr gleichmäßig wirksam gedämmt. Die Innenwand tritt warm unter dem Dämmstreifen hervor. Das Detail ist vorbildlich gelöst und ausgeführt.

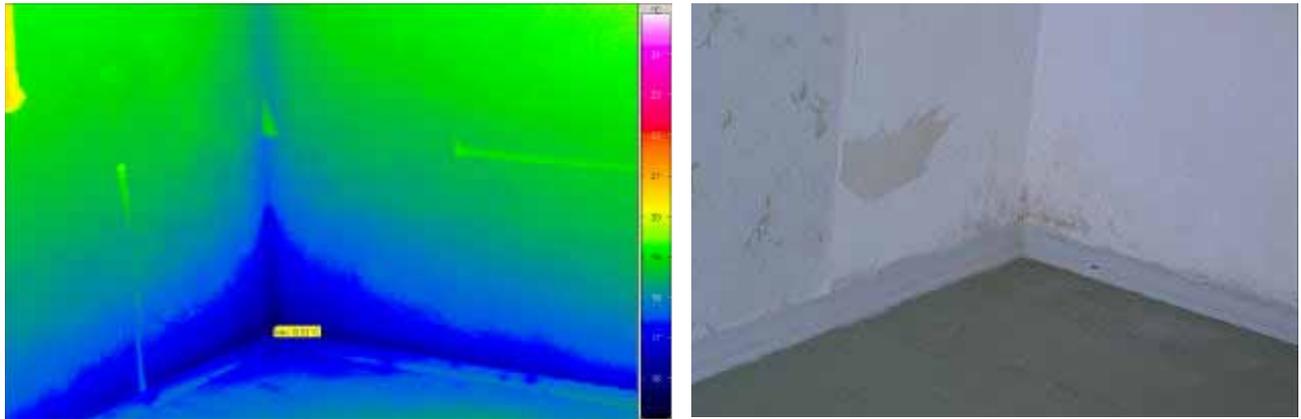


Abb. 18 Thermografie des Fußpunktbereichs in der Südostecke. Die Temperatur liegt kurz nach Baufertigstellung auf Grund der Auskühlung während der Bauphase bei $15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Als nach Tapezier- und Streicharbeiten höhere Raumluftheuchigkeiten aufgetreten waren, war es an dieser Stelle nach Bewohneraussagen zu Tauwasserniederschlag gekommen. Auch hier können bei normaler Nutzung keine Probleme auftreten. Die Temperaturen stiegen an dieser Stelle nach vollständiger Durcherwärmung des Mauerwerkes noch an. Es ist allerdings festzuhalten, dass auch bei vorheriger Wärmebrückenberechnung und optimaler Dämmung während der Bauphase auf Schwachstellen zu achten ist, an denen bauphysikalisch grenzwertige Situationen auftreten können. Dies gilt insbesondere, wenn eine erhöhte Auskühlung während der Bauphase gegeben ist oder Mauerwerk zusätzlich eine erhöhte Salzbefrachtung ausweist.



Abb. 19 Die Thermografie zeigt warme Verglasungs-, Rahmen- und Außenwandoberflächen sowie die Wärmebrücke am Glasrandverbund. Die Fußpunktwärmebrücke unten am Übergang Außenwand/Kellerdecke weist in diesem während der Bauphase warm gehaltenen Bereichs im Gegensatz zur Situation oben Temperaturen von $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ aus: auch hier besteht unter normalen Wohnraumbedingungen keine Gefahr für Schimmelwachstum (Grenze für a_w -Wert 80 %: $13\text{ }^{\circ}\text{C}$).

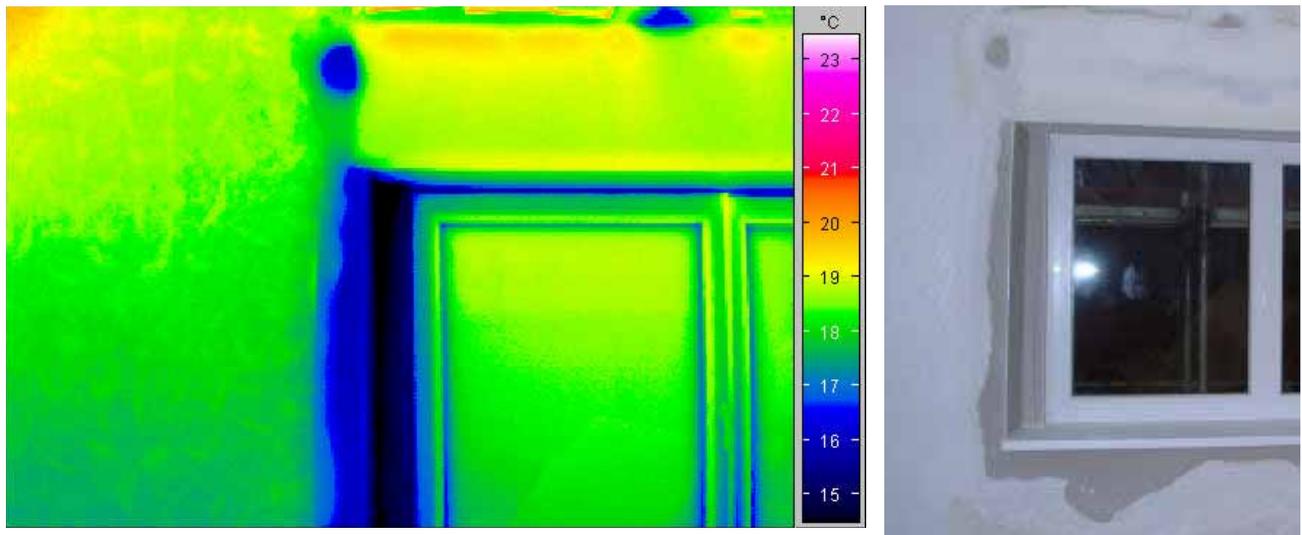


Abb. 20 Thermografie des oberen Bereichs eines frisch eingeputzten Fensters. Der Wärmeentzug durch die Trocknungsenthalpie ist deutlich erkennbar.

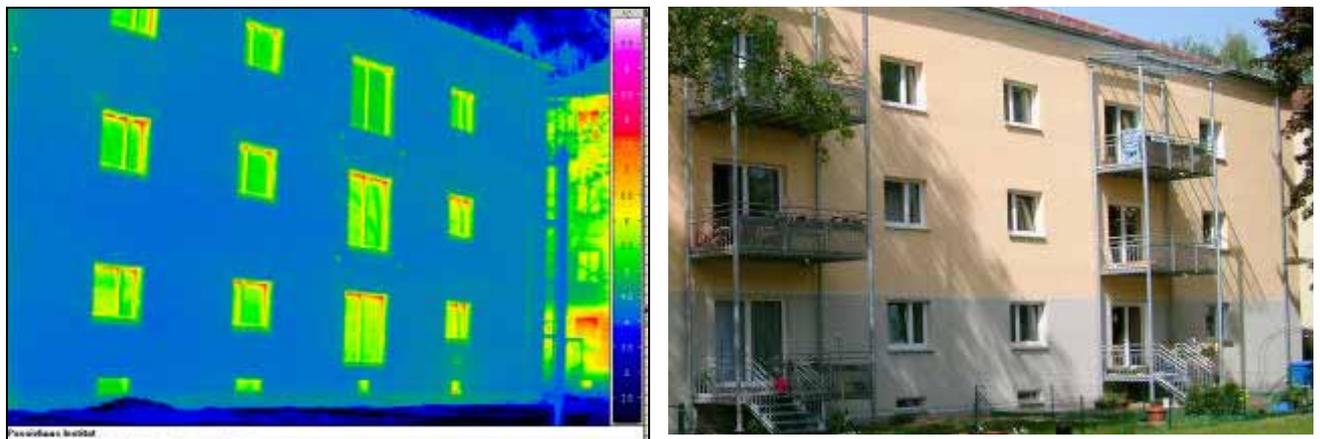
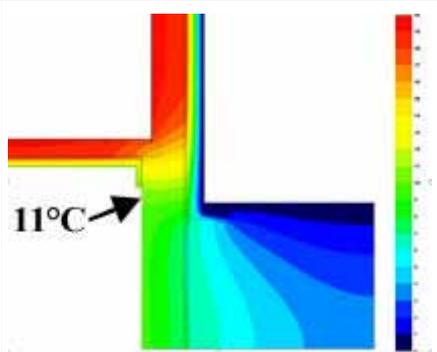
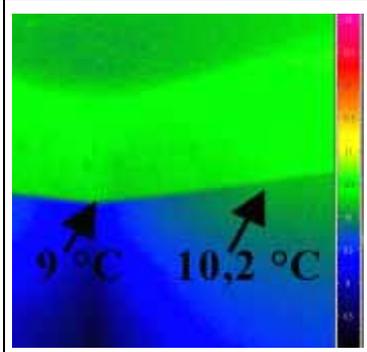
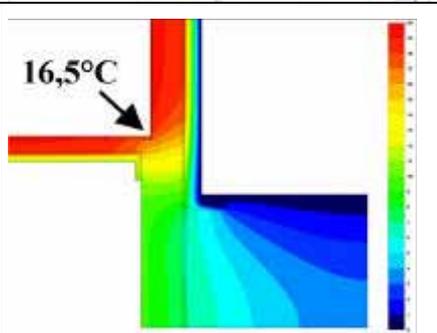
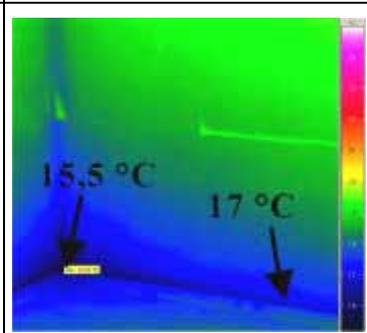


Abb. 21 Infrarot-Thermografie nach Fertigstellung des Wärmedämmverbundsystems vor Montage der Balkons: zu erkennen sind die vier Aussteifungs-Befestigungspunkte für den Balkon sowie die Spuren von der Befestigung des Temperaturfühlers unter dem EG-Fenster rechts; zum Vergleich am rechten Bildrand der Thermografie ein unsaniertes baugleiches Bestandsgebäude

4.3 Vergleich IR-Thermografie - Wärmebrückenberechnung

Besonders interessant ist der Aspekt, die Thermografie-Ergebnisse mit den Sollwerten der Wärmebrückenberechnung zu vergleichen. Wichtig ist dabei der Abgleich der jeweils vorliegenden Rahmenbedingungen. An dieser Stelle werden an zwei relevanten Punkten im Sockelbereich die Sollwerte der Wärmebrückenberechnung den gemessenen Werten bei der Thermografie gegenüber gestellt.

		<p>Abb. 22 Kelleraußenwand: an der Unterkante der Dämmschürze wird die Solltemperatur leicht unterschritten (Ursache: Auskühlung des Kellers während der Bauzeit)</p>
		<p>Abb. 23 Außenwandsockel EG: Übereinstimmung zwischen Soll und Ist; in der Raumecke liegt die Temperatur erwartungsgemäß 1,5 K niedriger</p>

5 Lüftungsanlage

Am Jean-Paul-Platz wurden passivhausgeeignete Zu- und Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung (Fabr. Maico-Aerex, Reccobox) dezentral für jede einzelne Wohnung installiert. Es wurde bewusst keine zentrale oder semidezentrale Anlage gewählt, weil der Projektierungsaufwand sehr hoch gewesen wäre und diese Technik ein hohes Maß an Erfahrung mit den Komponenten seitens Fachplaner und ausführendem Installationsbetrieb voraussetzt. Der Aufstellort für die eingebauten dezentralen Anlagen sind Abstellräume an der Außenwand, Frischluftansaugung und Fortluft erfolgen direkt nach außen. Ein Vorheizregister (Aircond Fa. Aerex) vor dem Gerät sorgt für Frostsicherheit mittels Vorheizung ab -4 °C . Die Verteilung erfolgt über den Wohnungsflur, die Einbringung der Luft in die Aufenthaltsräume wird durch Weitwurfdüsen sichergestellt. Die gesamte Luftmenge pro Wohnung beträgt 140 bis 150 m^3 (ca. 30 m^3 pro Person) bei Normalstellung. Abgesaugt wird in Bad (40 m^3), WC (20 m^3), Küche (60 m^3), Neben- und Abstellraum (20-30 m^3).

Durchführungen vom Flur zu den Wohnungen wurden mittels Kernbohrung erstellt, was mit den vorhandenen Absaug-Kernbohrgeräten prinzipiell einfach und staubfrei durchführbar war. Probleme ergaben sich aber auf Grund der sehr umfangreichen und unstrukturiert verlegten Elektroleitungen im oberen Wandbereich der Flure und Materialwechselln zwischen Holzstützen und losem Mauerwerk.

Die Inbetriebnahme der Lüftungsanlagen wurde durch die Montagefirma durchgeführt und zusätzlich im Rahmen der Begleitforschung vom Passivhaus Institut überprüft (s. u.). Die richtige Einregulierung der Anlagen ist von hoher Bedeutung für die einwandfreie Funktion und wurde im Rahmen der Qualitätssicherung gewissenhaft überprüft.



Abb. 24: Lüftungsgerät - Innenansicht



Abb. 25: Lüftungs- und Heizleitungen unter Flurdecke



Abb. 26: Kunst am Bau: Dämmung der Leitungen im Heizraum

5.1 Qualitätssicherung der Lüftungsanlage

In einem mehrstufigen Verfahren wurde die Qualitätssicherung der Lüftungsanlage durchgeführt. Inbetriebnahme inkl. Luftabgleich durch die Herstellerfirma mit anschließender mehrstufiger Qualitätskontrolle durch das Passivhaus Institut.

5.1.1 Inbetriebnahme

Die Einstellung der Balance von Zu- und Abluft mit einem Zielwert von 150 m³/h wurde durch die Installationsfirma bzw. den Gerätehersteller Maico-Aerex vorgenommen mittels Messung mit einem Flügelradanemometer am 5.12.02 durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Tabelle 1 dargestellt

5.1.2 Überprüfung durch das Passivhaus Institut (Flow Finder)

Eine Überprüfung erfolgte mit einem hochwertigen Gerät (Flow Finder) durch das PHI am 9.12.2002. In Tabelle 1 werden Messwerte der Lüftungsanlagen-Einregulierung gegenübergestellt.

[PHI 2003]

Tabelle 1 Ergebnisse der Lüftungsinbetriebnahme und der Kontrolle (Volumenströme Zu- und Abluft

Wohnung	2			5			6		
	5.12	9.12	19.12	5.12	9.12	19.12	5.12	11.12	19.12
	Anem.	FlowF	FlowF	Anem.	FlowF	FlowF	Anem.	FlowF	FlowF
Raum 1	30	25	26	24	25	22,5	25	22	25
Raum 2	35	32	32,5	32	27	29,5	37	29	35
Raum 3	16	12	14	16	24	23,5	12	13	14
Raum 4	26	24	26,5	27	15	15	22	20	21
Raum 5	29	26	27,5	30	32	28,5	27	24	26,5
Raum 6	22	22	23	20	19	18,5	20	20	21
Su. Zuluft	158	141	149,5	149	142	137,5	143	128	142,5
Raum 7 Kü.	70	85	86	50	57	68	72	85	84
Raum 7a				23	24	24			
Raum 8 Abst	13	12	12	11	10	8	10	10	10
Raum 9 Bad	46	46	46	43	42	42	45	46	47
Raum 10 WC	22	21	20	23	20	17	22	20	19
Su. Abluft	151	164	164	150	153	159	149	161	160

Messung 5.12.2002: Messung bei Inbetriebnahme mit Laufradanemometer

Messung 9.12.2002: PHI Darmstadt mit Flow-Finder

5.1.3 Indikatorgas-Messung

Mittels Indikatorgas-Messungen (SF₆) wurde der Außenluftwechsel in allen Wohnungen bestimmt. Die Ergebnisse bestätigten die Einstellungen der Lüftungsanlage. Bei einer Wohnung wurde bei gekipptem Küchenfenster gemessen, was zu einer Erhöhung des Luftwechsels um 74 m³ (Luftwechsel 0,61 h⁻¹ statt 0,42 h⁻¹) führte. [PHI 2003]

5.1.4 Luftalter

Neben dem Luftwechsel ist das Luftalter eine wichtige Größe zur Beurteilung der Luftqualität. Es beträgt i. M. der vier gemessenen Wohnungen 2,4 h mit einem Luftaustauschwirkungsgrad von 52 % und ist damit aufgrund der gerichteten Durchströmung von Zuluft- in Abluftzonen etwas besser als bei idealer Durchmischung. [PHI 2003]

5.1.5 Stromverbrauch Vorheizregister

In zwei Wohnungen wurde der Stromverbrauch für die Vorheizregister gemessen. Er lag für die Zeit von Anfang Januar 2003 bis zum Ende der Heizsaison bei ca. 24 kWh pro Gerät. In der darauf folgenden Heizsaison 2003/2004 lag der Wert pro Wohnung im Mittel bei 35 kWh. Das ergibt einen Endenergieverbrauch von 0,23 kWh/(m²a) und einem Primärenergieverbrauch von 0,62 kWh/(m²a).

6 Messung der Raumluftqualität

Raumlufthygiene ist ein wichtiges Qualitätsmerkmal bei der Planung von Gebäuden. Beim Einsatz neuer Techniken ist es besonders wichtig, durch Messungen eine hohe Qualität sicher zu stellen.

Im Rahmen des Projektes sollte überprüft werden, welche Auswirkungen die Sanierung auf die Innenraumluftqualität hat. Hierzu wurden exemplarisch in den energetisch sanierten Wohnräumen des Jean-Paul-Platz 4 Raumluftkonzentrationen an leichtflüchtigen organischen Innenraum-schadstoffen und die Konzentration an Schimmelpilzspuren in der Raumluft unter Nutzungsbedingungen erfasst. [AnBUS 2004]

Zum Vergleich wurden Untersuchungen in baugleichen Wohnungen der WBG am Jean-Paul-Platz durchgeführt, welche nicht energetisch saniert wurden.

6.1 Untersuchung auf Mikroorganismen

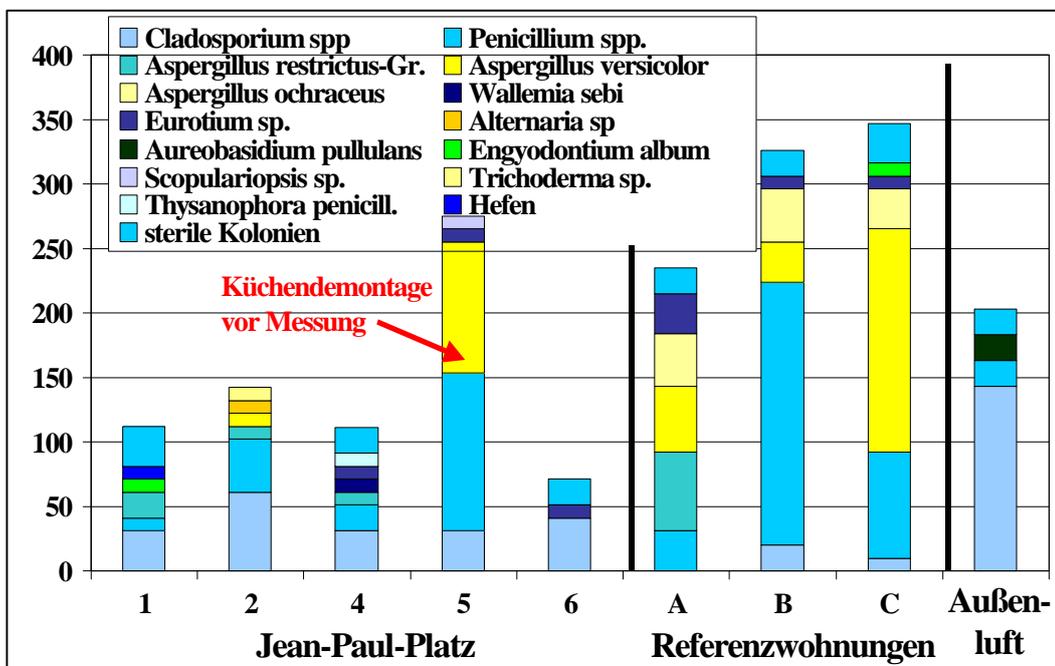


Abb. 27 Schimmelpilzuntersuchung der Raumluft in den Wohnungen am Jean-Paul-Platz im Vergleich zu drei Referenzwohnungen ohne Lüftungsanlage [AnBUS 2004]

Für Schimmelpilzuntersuchungen wurden sowohl in den Wohnungen am Jean-Paul-Platz 4 als auch in baugleichen unsanierten Nachbargebäuden Proben genommen. Die Probenahme erfolgte im Flurbereich, dem Überströmbereich der Lüftungsanlagen, wo ein Querschnitt aus den Belastungen aller Aufenthaltsräume gegeben ist. Die Auswertung erfolgte mittels Kultivierung über die Nährbodenart DG 18. Die Nährmedien wurden bei Probeneingang sowie nach 4 und 10 Tagen Inkubation bei $24 \pm 0,5^\circ\text{C}$ ausgewertet (Zählung und morphologische Differenzierung). Die Konzentration der koloniebildenden Einheiten (KBE/m³) sollte deutlich unter dem Außenluftwert liegen. Die Ergebnisse werden in Abbildung 27 dargestellt. In den Wohnungen am Jean-Paul-Platz liegen sehr günstige Werte vor mit Ausnahme einer Wohnung, in der direkt vor Probenahme eine 15 Jahre alte Küche mit stark belasteten Möbelrückseiten demontiert worden war. [AnBUS 2004]

6.2 VOC-Messung

Die Messung von leichtflüchtigen organischen Verbindungen (VOC's; Substanzen gemäß VDI 4300, Blatt 6) ermöglicht einen guten Überblick über die Raumluftqualität. Die Probenahme erfolgte wiederum im Flur der Wohnung mittels Aktivkohle bzw. Silicagel ca. 10 Monate nach Fertigstellung der Sanierungsarbeiten.

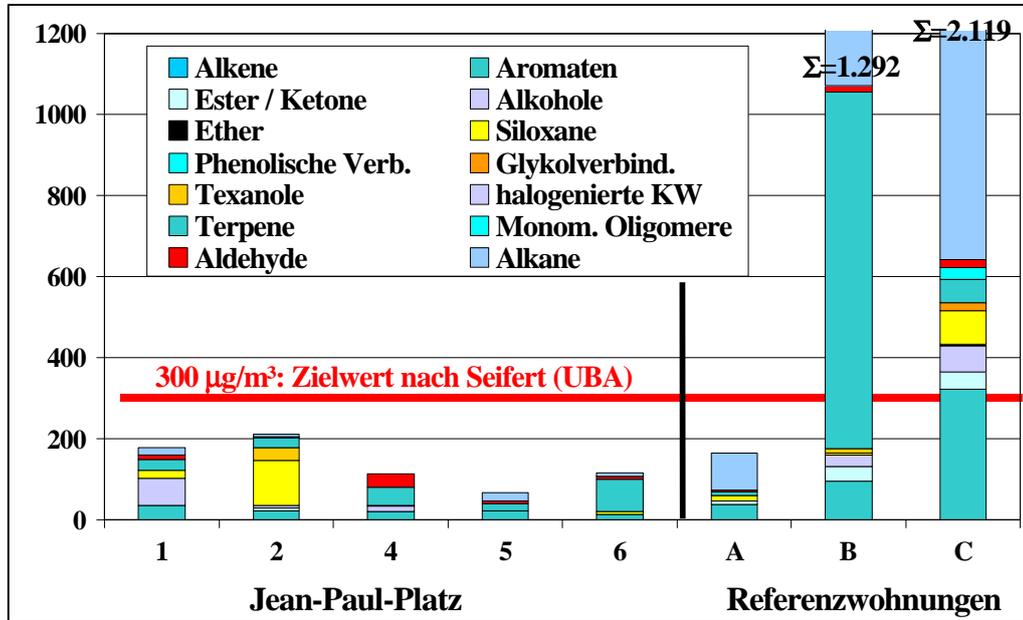


Abb. 28 Untersuchung der Raumluft auf flüchtige organische Verbindungen (VOCs) in den Wohnungen am Jean-Paul-Platz im Vergleich zu drei Referenzwohnungen ohne Lüftungsanlage [AnBUS 2004]

Das Ergebnis wird in Abbildung 28 zusammengefasst: die Raumluftqualität liegt durch den Einsatz von Zu-/Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung deutlich besser als bei gemessenen Referenzobjekten mit Fensterlüftung. Die strengen Zielwerte von Seifert (UBA) werden deutlich unterschritten. (Untersuchungsmethode: GC/MS Aktivkohle, Silicagel) [AnBUS 2004]

6.3 CO₂ – Verlaufsmessung

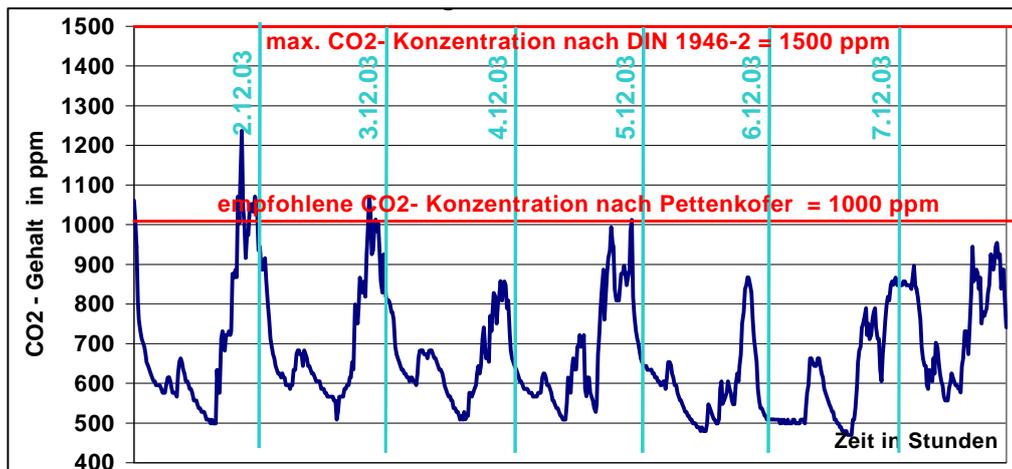


Abb. 29 Verlauf der CO₂-Konzentration über eine Woche vom 1. bis 7.12.2003 in Wohnung 1 [FIW 2005]: die Werte liegen abgesehen von einigen Besuchs-Situationen deutlich unter der empfohlenen maximalen CO₂-konzentration von 1000 ppm (Pettenkofer-Wert)

Die CO₂-Konzentration wurde mit einem Gerät über zwei Jahre in verschiedenen Räumen gemessen. In Abbildung 29 ff wird das Ergebnis jeweils über eine Woche am Beispiel der Wohnung 1 unter verschiedenen Nutzungssituationen dargestellt. Die Werte lagen in Einzelfällen (Besuch etc.) im Bereich von 1200 bis 1500 ppm, jedoch nicht darüber. Bei der üblichen Nutzung mit ca. 4 Personen lagen die Werte durchweg im Bereich unter 1000 ppm. Das Ergebnis dokumentiert den sehr guten Luftaustausch durch die Lüftungsanlage und korrespondiert mit den Ergebnissen der Qualitätssicherung der Lüftungsanlage (Kap. 5.1). [FIW 2005]

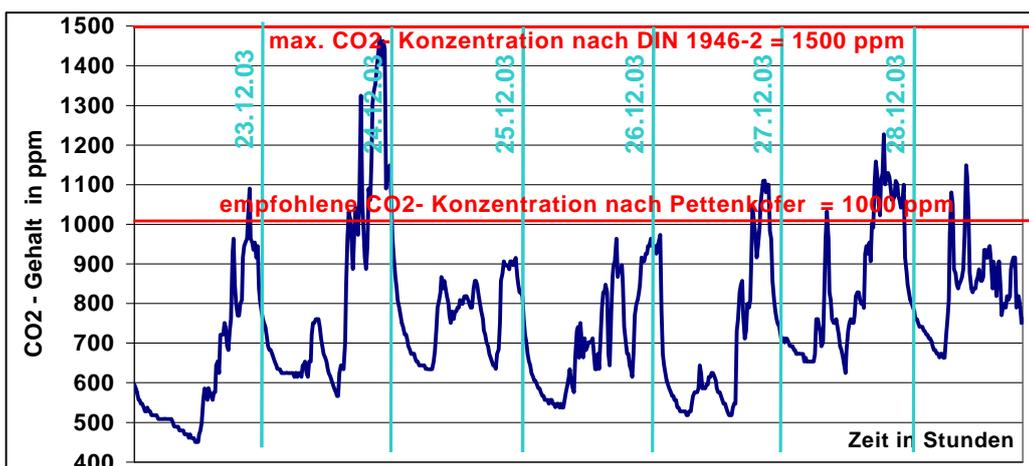


Abb. 30 Verlauf der CO₂-Konzentration über eine Woche vom 22. bis 28.12.2003 in Wohnung 1 [FIW 2005]: Weihnachtswoche mit Familientreffen – Weihnachts-Feiertage z. T. bei den Kindern

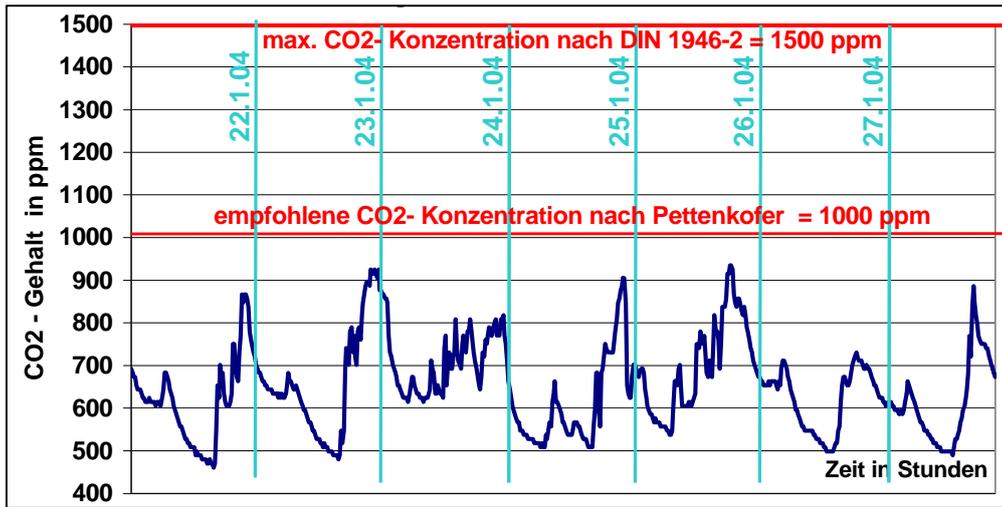


Abb. 31 Verlauf der CO₂-Konzentration über eine Woche vom 21. bis 27.1.2004 in Wohnung 1 [FIW 2005]: die Werte liegen deutlich unter der empfohlenen maximalen CO₂-konzentration von 1000 ppm (Pettenkofer-Wert)

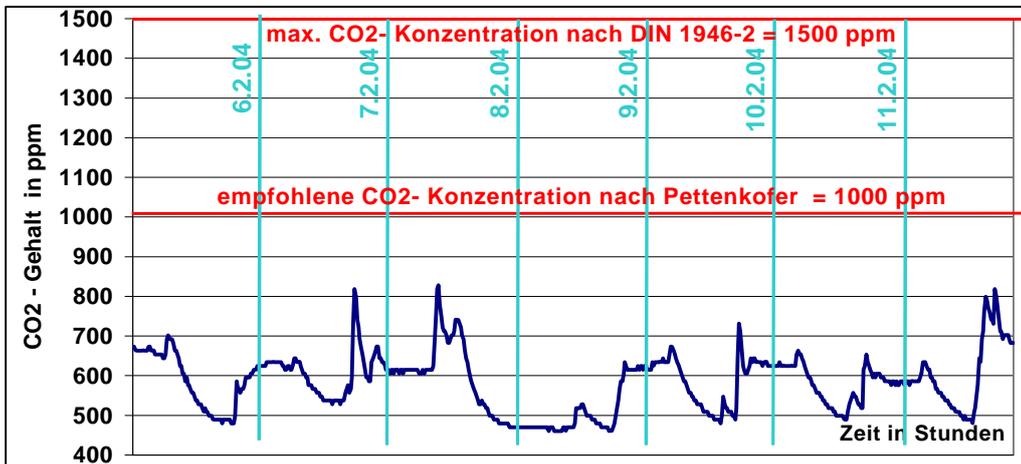


Abb. 32 CO₂-Konzentration in der Woche vom 5. bis 11.2.2004 in Wohnung 1 [FIW 2005]: Belegung mit nur zwei Personen

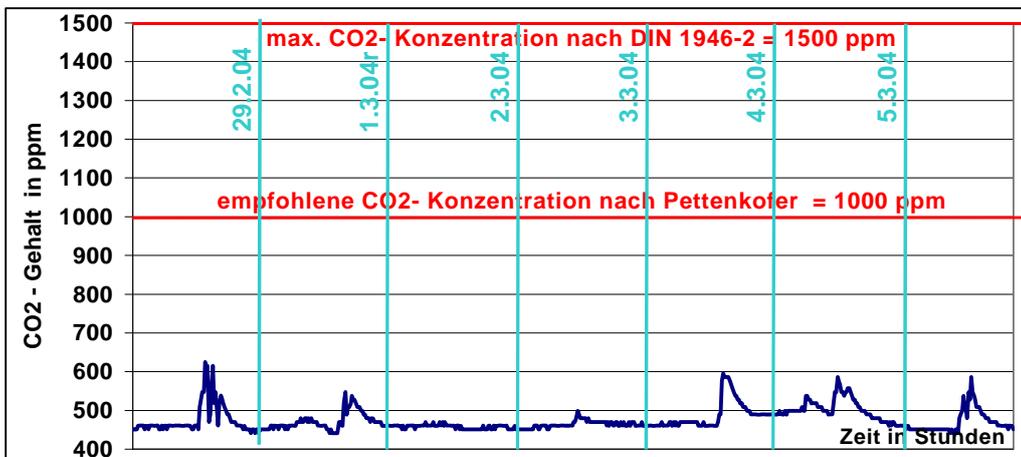


Abb. 33 Urlaub in der Woche vom 28.2. bis 5.3.2004 [FIW 2005]: die minimalen CO₂-Spitzen rühren von Kurzaufenthalten von zwei beaufsichtigenden Personen; die CO₂-Konzentrationen verhalten sich in den folgenden Wochen wieder wie in Abb. 31

7 Gebäudetechnik

7.1 Heizung und Trinkwassererwärmung

Im Ursprungszustand wurde die Heizung durch eine zentrale Schwerkraftheizung betrieben. Diese wurde in den sechziger Jahren in dezentrale Etagenheizungen geändert unter Beibehaltung der Heizkörper und der sehr voluminösen Heizleitungen.

Bei der Sanierung wurde die **Heizung** vollständig erneuert. Der Heizraum für die neue Heizzentrale mit einer minimierten Grundfläche von 6 m² befindet sich im Dachbodenbereich neben dem Treppenhaukopf. Eine Gasbrennwerttherme wurde ausgelegt nach den Anforderungen der Trinkwassererwärmung mit 30 kW Leistung. Ergänzend wurde eine solarthermische Anlage mit 17 m² Flachkollektor und 1000 Liter-Schichtenspeicher installiert, die auf den sommerlichen Wärmeertrag ausgelegt ist. Die systembedingte Heizungseinbindung wird zu keiner großen Heizungsunterstützung führen. Die Verteilung der Heizleitungen erfolgte parallel zu den Lüftungsleitungen im Deckenbereich der Flure. Die Leitungen wurden auf Putz an den Innenwänden der Räume nach unten zum Heizkörper geleitet.

Die **Bäder** befinden sich an den diametral entgegengesetzten Enden des Gebäudes. Zur Minimierung der Zirkulationsverluste wurden die Verteil- und Zirkulationsleitungen im Mittel mit 10 cm Wärmedämmung versehen und zudem vollständig im beheizten Bereich geführt. Alle Bäder wurden neu an die zentrale Warmwasserversorgung angeschlossen. Eine Badsanierung erfolgte nur im Rahmen der individuellen Mietersanierung mit gesonderter Kostenumlage.

7.2 Heizwärmebedarf

Der Heizwärmebedarf wurde von Architektenseite nach PHPP / EN 832 ermittelt und betrug vor der Sanierung 204 kWh/(m²a). Die Berechnung für die Sanierungsvariante weist einen Wert von 27 kWh/(m²a) auf. Seitens des Passivhaus Instituts wurde im Rahmen der Begleitforschung eine Qualitätssicherung hinsichtlich des Rechenverfahrens und der zu Grunde liegenden Annahmen durchgeführt.

Aus primärenergetischer Sicht und hinsichtlich der CO₂-Reduktion wird der Faktor 10 überschritten. Die Maßnahmen amortisieren sich energetisch nach weniger als zwei Jahren.

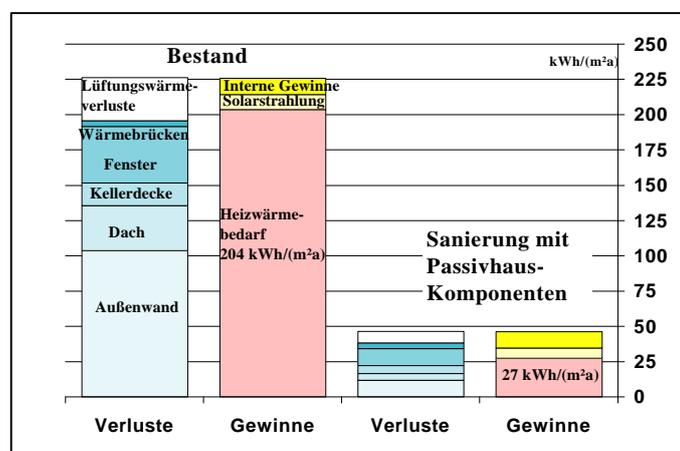


Abb. 34: Energiebilanz und Heizwärmebedarf – vor und nach der Sanierung

7.3 Verbrauchserfassung

Zur Ermittlung der Verbrauchswerte wurden in der Heizzentrale Wärmemengezähler installiert: zur Erfassung der bereitgestellten Gesamtwärmemenge hinter der 30-kW-Therme, ein weiterer Zähler im Solarkreis. Zudem wurde der Verbrauch für den Bereich Trinkwarmwasser inkl. Zirkulationsverlusten gemessen. Vor jeder Wohnung im Flur an der Übergabe wurde ein Wärmemengezähler zur Ermittlung des Heizwärmeverbrauchs pro Wohnung installiert. [FIW 2005]

7.4 Heizwärmeverbrauch

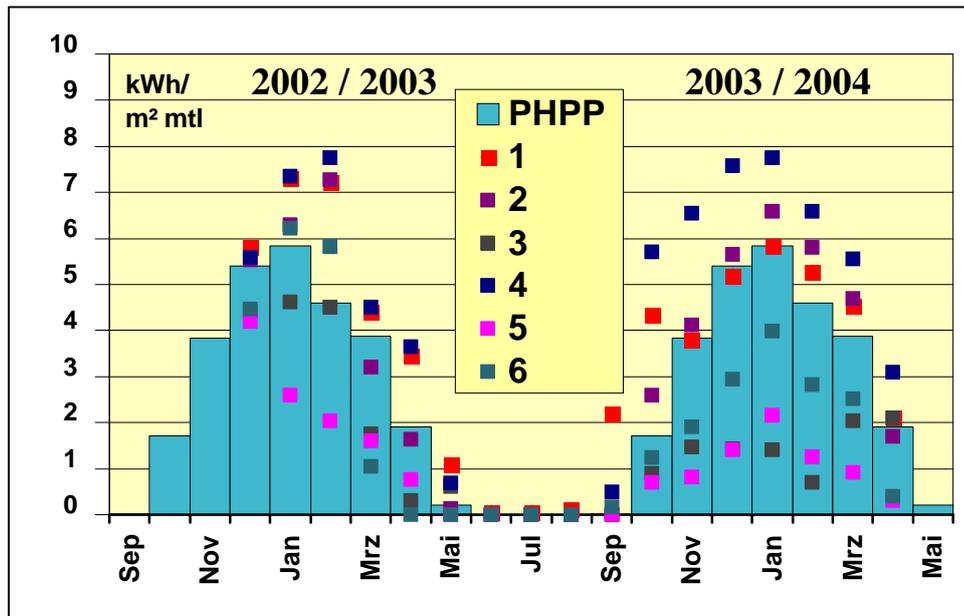


Abb. 35 Heizwärmeverbrauch der einzelnen Wohnungen: sehr inhomogenes Mieterverhalten

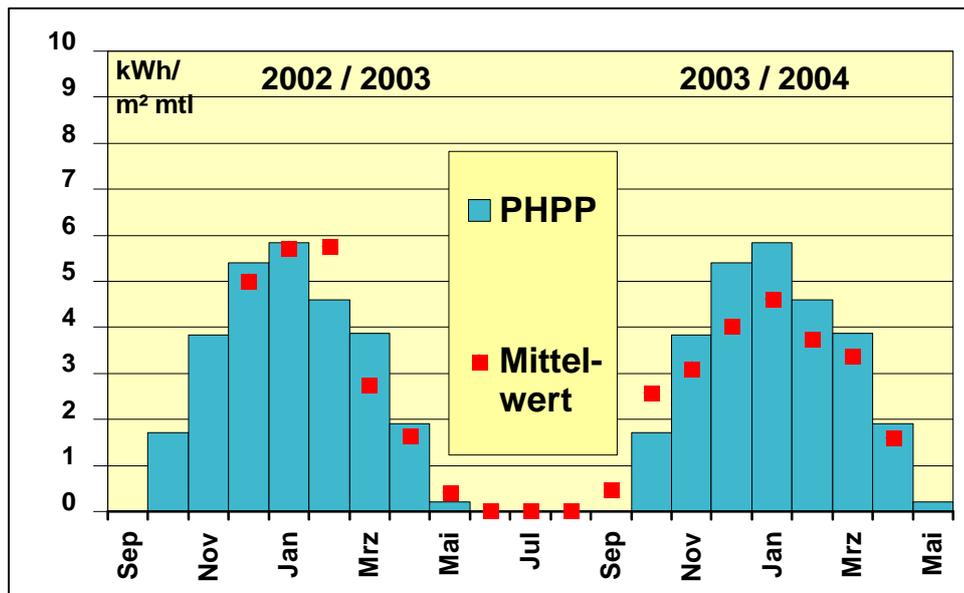


Abb. 36 Mittelwerte des Heizwärmeverbrauchs: der berechnete Wert (27,4 kWh/(m²a)) wird in der ersten Heizsaison (26,9 kWh/(m²a)) erreicht und in der zweiten Saison erwartungsgemäß unterschritten (23,7 kWh/(m²a))

Die Messung des Heizwärmeverbrauchs zeigt, dass bereits in der ersten Heizsaison die berechneten Werte eingehalten wurden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Sanierung im Herbst erfolgte und die Dämmung erst im Dezember fertig gestellt wurde. Der daraus resultierende instationäre Effekt bewirkt nach Berechnung des PHI einen Mehrverbrauch von 2 kWh/(m²a), der Effekt der Trocknungsenthalpie nochmals 2 – 4 kWh/(m²a). Darüber hinaus war das Nutzerverhalten hinsichtlich der Fensterlüftung recht inhomogen und lässt weitere Einsparungen zu.

Der Heizwärmeverbrauch betrug 26,9 kWh/(m²a) in der Heizsaison 2002/03 und 23,7 kWh/(m²a) in der folgenden Saison. Der Rechenwert nach PHPP betrug 27,4 kWh/(m²a).

7.5 Heizwärmeverbrauch pro Wohnung

Wie in den vorherigen Abbildungen ersichtlich differiert der Heizwärmeverbrauch pro Wohnung deutlich. In der Tabelle sind die jeweiligen Jahresverbrauchswerte dargestellt und in der Abbildung die Visualisierung in Diagrammform.

Tabelle 2: Verbrauch pro Saison und pro Wohnung (anonymisiert)

	1	2	3	4	5	6
2002/2003	35,1	29,7	21,8	35,1	16,8	23,2
2003/2004	33,3	31,2	10,1	43,3	7,6	16,0

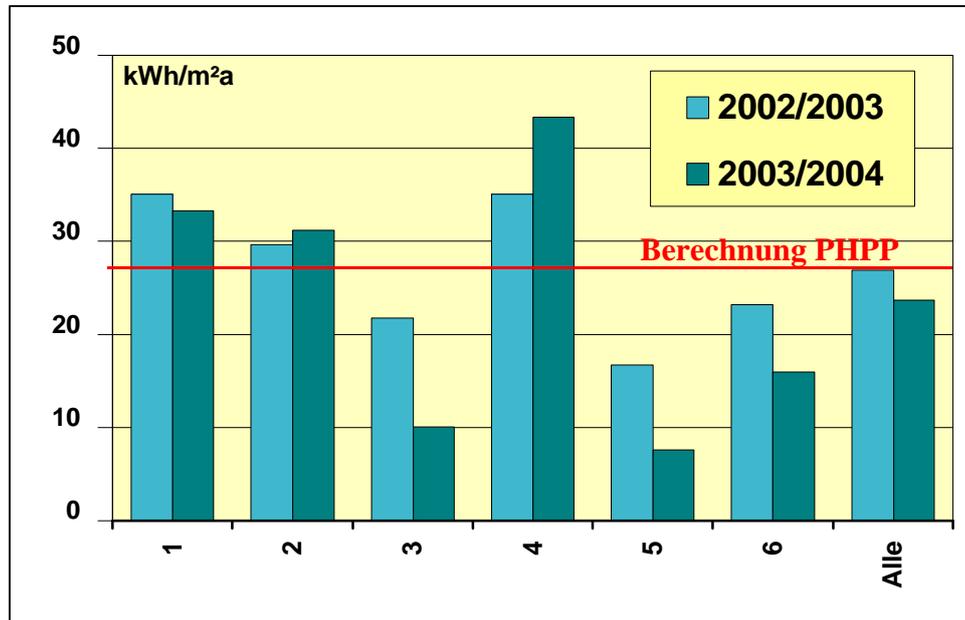


Abb. 37 Jahreswerte des Heizwärmeverbrauchs pro Wohnung: Wohnung 4 ist durch Kleinkind in Verbindung mit sehr starkem Lüften wegen eines starken Rauchers im Haushalt geprägt, Wohnung 5 durch sehr niedrige Mitteltemperatur von etwa 19,5 °C (wird durch die darunter liegende Wohnung mitgeheizt), Wohnung 6 entspricht dem akademisch geschulten Passivhaus-Wohnverhalten bei Temperaturen um 20,5 °C.

7.6 Anlagenaufwand

Der gemessene Wert für die primärenergiebezogene Anlagenaufwandszahl betrug für Heizung und Trinkwassererwärmung 1,05, bei Einbeziehen der Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung 0,80. Letzterem Wert steht ein Rechenergebnis nach EnEV von 0,84 gegenüber bei detaillierter Berechnung unter Berücksichtigung der Anlagenoptimierung. Die EnEV-Berechnung ergibt für den Jahresprimärenergieverbrauch einen Wert von 40 kWh/(m²a) nach Tabellenverfahren. Bei detaillierter Berechnung des Anlagenaufwands beträgt der Wert 34 kWh/(m²a). Der gemessene Wert ist 33,9 kWh/(m²a).

7.7 Heizleistung

Interessant ist die Betrachtung der erforderlichen Heizleistung in Hinblick auf Einsparungspotenziale bei der Heizungstechnik. In Abb. 38 werden die Ergebnisse dargestellt. Eine Reduzierung der Heizleistung im Messzeitraum auf 10 W/m² wäre möglich und sinnvoll gewesen. Die Überschreitung der Leistung in zwei Wohnungen ist auf unangepasstes Nutzerverhalten zurückzuführen, das bei einem geringeren Leistungsangebot zu einem angepassteren Verbrauch führen würde. Bei dieser Aussage handelt es sich um eine These, die bei weiteren Anlagenprojektierungen zu belegen ist.

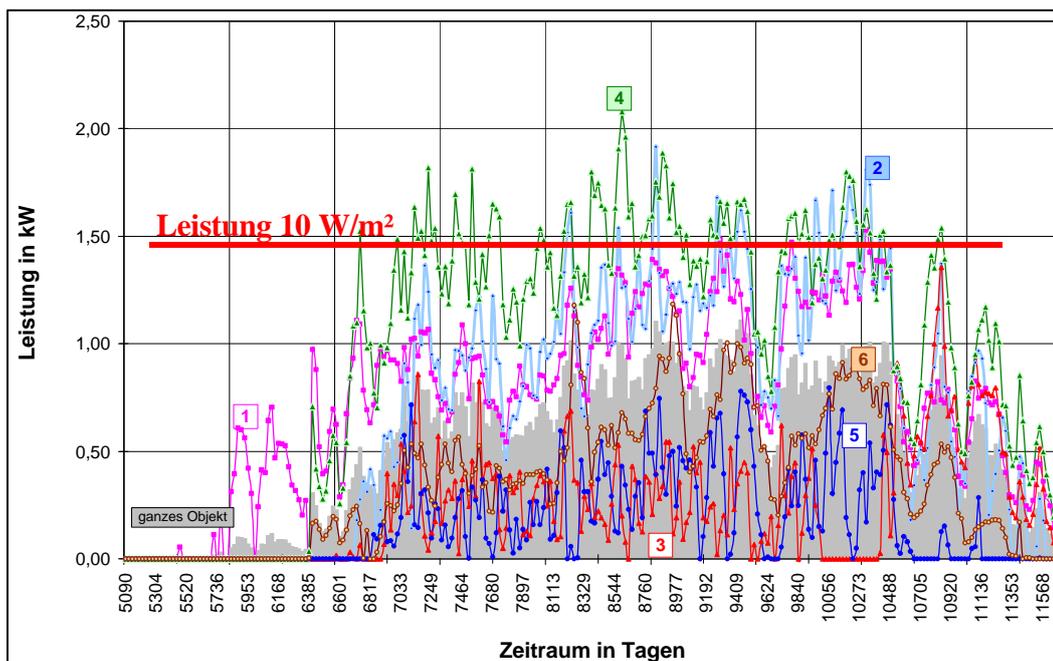


Abb. 38 Leistung über jeweils 24 Stunden von August 2003 bis April 2004 pro Wohnung und für das Gesamtgebäude (grau hinterlegt) [FIW 2005]

7.8 Verbrauch für Trinkwassererwärmung

Der Verbrauch an Heizenergie für die Trinkwassererwärmung betrug 17,8 kWh/(m²a) inkl. der Zirkulationsverluste. Der Messzeitraum reicht vom 1.4.2003 bis 1.4.2004. Bezug ist die beheizte Wohnfläche. Die Solarthermieanlage erbringt einen solaren Eintrag von 8,3 kWh/(m²a), das sind 46 % des Verbrauchs. Die Anlage ist ausgelegt auf den sommerlichen Bedarf. Im Sommer war eine zusätzliche Erwärmung des Trinkwassers durch die Heizanlage nur in Einzelfällen erforderlich. [vgl. FIW 2005]

8 Baukosten

Die Baukosten betragen 503 € pro m² Wohnfläche (nach DIN 276 Kostengruppe 300/400 inkl. MWSt.) und unterschreiten damit zahlreiche Vergleichsobjekte ohne Passivhaus-Komponenten. In Tabelle 3 werden die abgerechneten Summen der Schlussrechnungen zusammen gefasst.

Tabelle 3: Kostenberechnung nach Fertigstellung der Sanierung (abgerechnete Summen der Gewerke)

Kostengruppe 300 (Summe brutto)	
Gerüstarbeiten	7.225,46 €
Erd-, Maurer-, Beton- und Landsch.-arb.	13.898,69 €
Abbrucharbeiten	4.155,27 €
Dachdeckerarbeiten	23.606,48 €
Schlosserarbeiten	39.553,69 €
Flaschnerarbeiten	6.172,70 €
Putzarbeiten	111.901,79 €
Estricharbeiten (Dachboden)	9.968,12 €
Fliesenarbeiten	2.772,33 €
Schreinerarbeiten Fenster	60.331,44 €
Schreinerarbeiten Türen	11.881,03 €
Malerarbeiten	5.884,85 €
Gebäudereinigung	435,19 €
Kosten für Eigenleistungen Mieter	4.243,33 €
Summe Kostengruppe 300 brutto	302.030,37 €
Kostengruppe 400 (Summe brutto)	
Heizung, Sanitär, Lüftung	
Einrichten der Baustelle	423,40 €
Demontage	17.365,49 €
Kessel mit Zubehör	8.795,24 €
Solaranlage mit Zubehör	15.000,42 €
Rohrleitungen mit Zubehör	11.446,54 €
Gasversorgung	776,17 €
Heizkörper mit Zubehör	8.118,78 €
Sanitärinstallation	7.316,60 €
Wärmedämmung	5.939,52 €
Lüftung	37.980,43 €
Sonstiges	19.894,72 €
Stundenlohnarbeiten	6.400,16 €
Elektroinstallation	9.027,66 €
Summe Kostengruppe 400 brutto	148.485,13 €
Summe Kostengruppe 300 und 400 brutto	450.515,50 €
Kosten pro m² Wohnfläche	503,37 €

8.1 Mehrinvestitionen für Faktor 10 gegenüber EnEV-Standard

Um eine vergleichende Kostenberechnung für andere Standards ausführen zu können, wurden beispielhaft fünf Varianten gegenüber gestellt. Dabei handelt es sich um folgende Standards:

1. Mindestanforderungen nach Bestandsanforderungen der EnEV unter der Prämisse, möglichst geringe Eingriffe durchführen zu müssen (Bezeichnung in Tabelle 4: Bestand)
2. Anforderung nach EnEV bei grundlegenden Sanierungsmaßnahmen: EnEV-Neubaustandard zzgl. 40 %, das entspricht 140 % des Jahresprimärenergiebedarfs eines vergleichbaren Neubaus (EnEV 140)
3. Erfüllung der EnEV-Neubau-Anforderungen (EnEV-Neubau)
4. Primärenergieanforderung 60% des EnEV-Neubau-Standards (KfW 60)
5. Ausgeführter Standard Jean-Paul-Platz 4: Faktor 10

In Tabelle 4 werden die Maßnahmen und Kennwerte gegenüber gestellt:

Tabelle 4: Vergleich von energetischen Sanierungsstandards [Schulze Darup 2004]

	Bestand	EnEV 140	EnEV-Neubau	EnEV 60	3-Liter-Haus
	U-Wert	Dämmung	Dämmung	Dämmung	Dämmung
	W/(m ² K)	mm / WLG 035	mm / WLG 036	mm / WLG 037	mm / WLG 038
Wand	1,56	60	160	200	200
Dach	1,12	100	200	250	250
Grund	1,23	20	100	140	140
Fenster	2,60	1,70	1,50	0,80	0,80
Türen	2,60	1,80	1,80	1,20	1,20
Wärmebrücken		zzgl. 0,1	zzgl. 0,1	Einzelnachw.	Einzelnachw.
Luftdichtheit		keine Maßn.	keine Maßn.	Blower-Door	Blower-Door
Lüftung	manuell	manuell	manuell	manuell	AWR
Berechnung nach EnEV (kWh/m²a)					
Heizwärmebedarf	141,7	67,0	48,9	26,0	26,0
Jahresprimärenergiebedarf	231,3	119,3	86,0	50,1	40,4
wie vor, jedoch Bezug A _{EB}	332,1	171,2	123,4	71,9	58,0
Jahresprimärenergiebedarf nach PHPP inkl. Warmwasser	361,8	265,1	110,2	83,9	46,8

Auf Grundlage der ermittelten Standards mit ihren jeweiligen Maßnahmenbündeln werden nun in Abbildung 39 die Kosten für die jeweilige Variante dargestellt. Von der Methodik her wurde das Abrechnungs-LV des zugrunde liegenden Bauvorhabens Position für Position mit den Einheitspreisen des jeweiligen Standards versehen und aufsummiert. Die Kosten der EnEV-Neubau-Variante liegen ohne Berücksichtigung der Solar-Thermieanlage weniger als 100 € unterhalb des ausgeführten 3-Liter-Haus-Standards mit Passivhaus-Komponenten.

Bei der Kostenbetrachtung muss berücksichtigt werden, dass keine grundlegenden Grundrissänderungen vorgenommen worden sind und eine sehr konsequente Kostensenkungsstrategie bei der Sanierung eingehalten wurde. Zudem wurden seitens der Handwerker äußerst engagierte Preise angeboten – und während der Bauzeit gehalten!

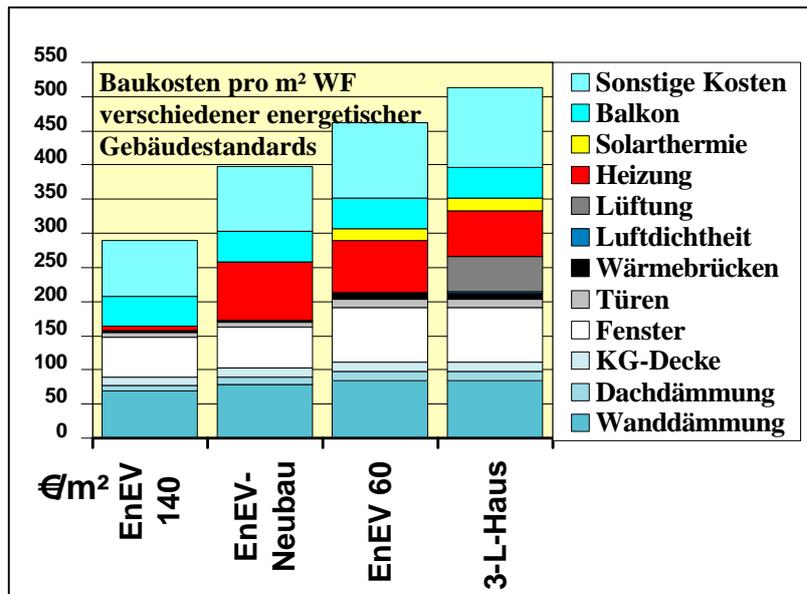


Abb. 39: Kosten verschiedener energetischer Baustandards im Vergleich nach Bauteilen; Kostengruppe 300/400 nach DIN 276 inkl. MwSt. [Schulze Darup 2004]

8.1.1 Miete

Die Kaltmiete der Bestandswohnungen am Jean-Paul-Platz lag bei ca. 2,35 € und damit deutlich unterhalb des Mietenspiegels. Ähnlich günstige Wohnungen mit fast 150 m² Wohnfläche sind in ganz Nürnberg nicht zu erhalten. Die Mieterhöhung beträgt 1,87 €/m² im Monat, wobei die umlagefähigen Kosten nicht voll ausgeschöpft wurden. Unter Einbeziehung der Betriebskosteneinsparungen ergibt sich eine resultierende Erhöhung von etwa 1,20 €/m² (vgl. Abbildung 40).

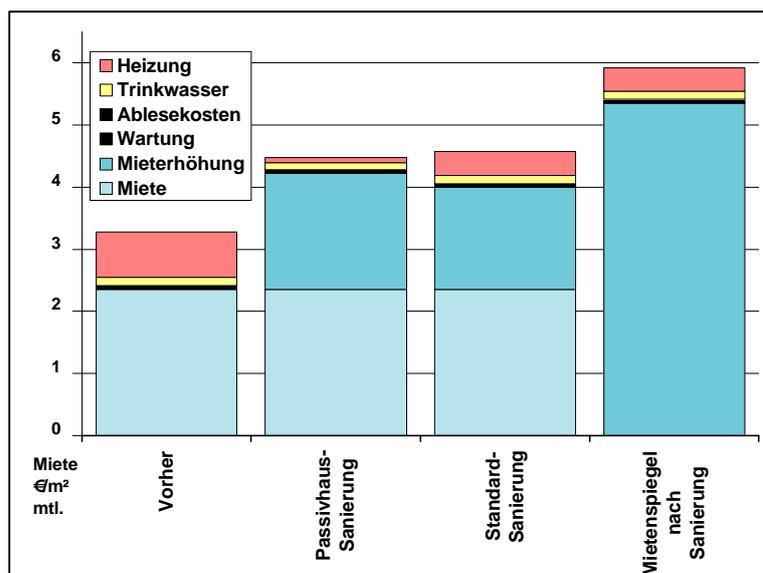


Abb. 40: Monatliche Mietkosten und Betriebskosten pro m² Wohnfläche im Vergleich; bei Mieterwechsel wird die Miethöhe nach Mietenspiegel vereinbart

9 Temperatur- und Feuchtemessungen FIW

Bauphysikalische Messungen (Raumlufthtemperatur und Raumlufftfeuchte, Oberflächenfeuchte) wurden mit einer Auflösung von 15 Minuten durch das FIW München durchgeführt. Abb. 41 zeigt hinsichtlich der Temperatur einen charakteristischen Verlauf für Wohnungen, in denen die Lüftungsanlage ohne zusätzliche Fensterlüftung kontinuierlich betrieben wurde. Bei Einsatz von Fensterlüftung lässt sich im Vergleich dazu der jeweilige Temperatur- und Feuchtesprung nach unten ablesen [FIW 2005]. Die Temperaturen in den Wohnungen lagen im Mittel um 21 °C.

Die relative Luftfeuchte liegt kontinuierlich in einem komfortablen Bereich von 35 bis 45 %. Werte um 30 % wurden erreicht in einer sehr kalten Phase ohne Absenkung des Luftwechsels bei geringer Belegung von 2 Personen in der Wohnung.

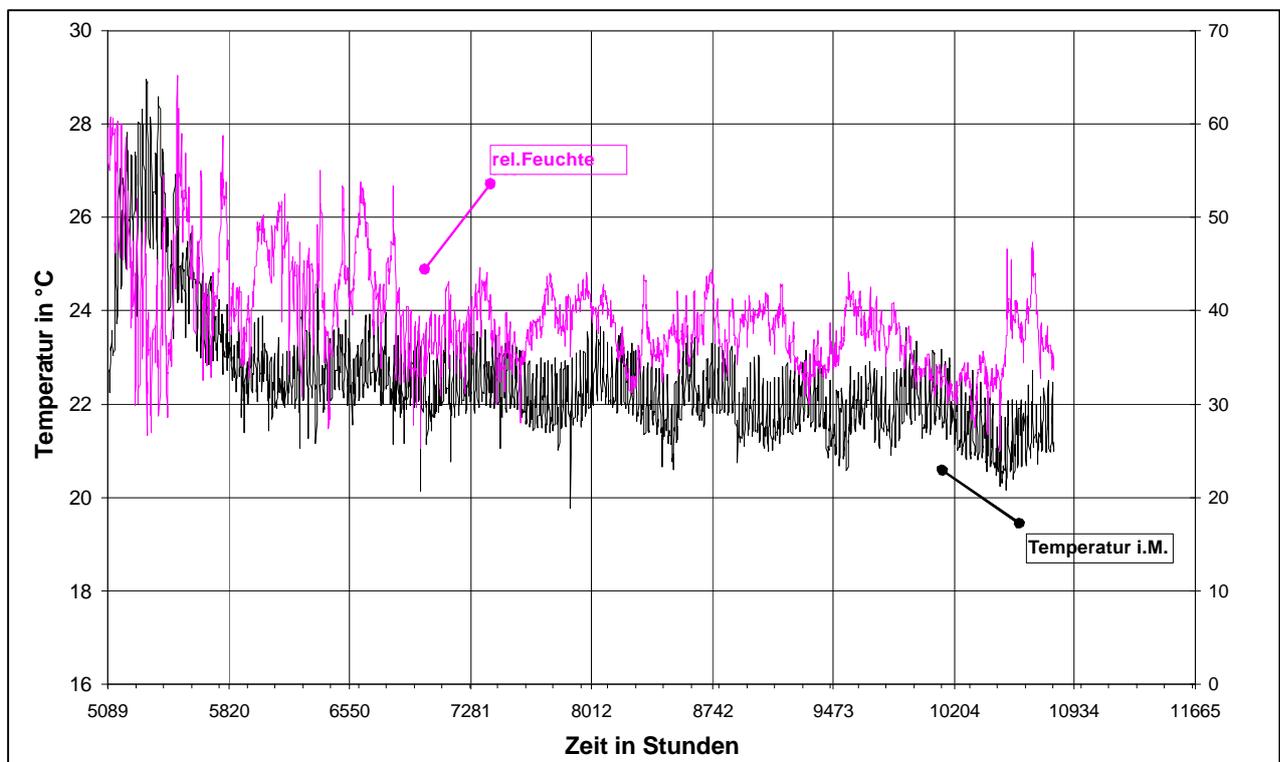


Abb. 41 Verlauf von Temperatur und relativer Feuchte von August 2003 bis März 2004 in Wohnung 1 [FIW 2005]

9.1 Sommerfall

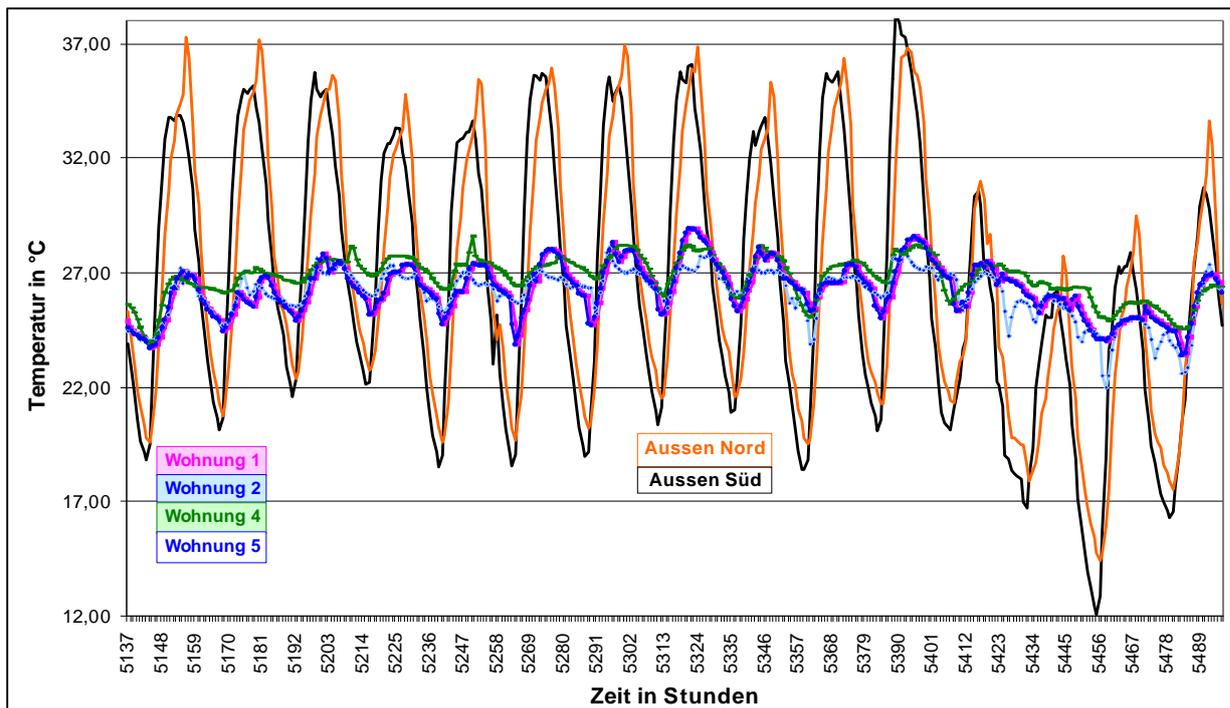


Abb. 42 Temperaturverlauf in vier Wohnungen im „Jahrhundertsommer“ 2003 [FIW 2005]

Der Ernstfall konnte im „Jahrhundertsommer“ 2003 dokumentiert werden: bei Außentemperaturen von 35 bis 39 °C wird in Abb. 3 über 11 Tage aufgezeichnet, wie sich die Temperatur in vier Wohnungen entwickelt. Ohne Außenverschattung der Fenster und bei oftmals geöffneter Balkontür während des Tages bleiben die Raumtemperaturen im Mittel 8 K unter der Außentemperatur. Eine effiziente Nachtkühlung fand in den meisten Wohnungen (z. B. aus Schallschutzgründen) nicht statt. Das subjektive Empfinden der Bewohner war positiv. Die Innentemperatur auch an den heißen Tagen wurde als angenehm empfunden.

10 Nutzerverhalten

Die sechs Mietparteien in dem Gebäude sind von der Familienstruktur und auch kulturell sehr unterschiedlich geprägt. Da im bewohnten Zustand saniert wurde, blieben zunächst bis auf eine Partei alle Mieter im Gebäude. Trotz der nicht vermeidbaren Belastung durch die Bauzeit herrschte eine positive Grundstimmung gepaart mit Skepsis hinsichtlich der energetischen Maßnahmen, insbesondere der Lüftungsanlage. Von einigen Seiten wurde sehr begrüßt, dass wie bisher die Fenster nicht zum Lüften geöffnet werden müssen – vorher waren die Fenster so undicht, dass dies nicht nötig war. Andere Parteien nutzten jedoch heftig die neu gewonnene Option der Kipplüftung. Nicht zu unterschätzen sind bei der Lüftungssituation die olfaktorischen Faktoren wie hohe Beladung der Wohnungen mit Möblierung, Interieur und Teppichböden sowie intensive Haushaltsführung.

Durch Einweisungen und ca. zwei weitere Gespräche während der Heizsaison konnte bei einem Teil der Familien ein gutes Nutzerverhalten erzielt werden. Zwei bis drei Parteien blieben im Umgang mit der Fensterlüftung relativ großzügig, hoben bei den Gesprächen jedoch zunehmend die Vorteile der Lüftungsanlage hervor.

Durch die Messung von Raumtemperatur und relativer Feuchte (s. Kap. 9) konnte das Lüftungsverhalten relativ gut verfolgt werden. Mehrfach tägliche Lüftung und z. T. kontinuierliche Kipplüftung blieben bei zwei Mietparteien erhalten. So wurde in einem Haushalt mit kleinen Kindern und einem sehr stark rauchenden Vater sehr ausgiebige Fensterlüftung betrieben mit einem daraus resultierenden hohen Heizwärmeverbrauch ca. 20 kWh/(m²a) oberhalb der sonstigen Durchschnittswerte. Die Verbrauchsdifferenz entspricht normalem Fensterlüften in Wohnungen ohne Lüftungsanlage. Vorschläge zur Änderung des Lüftungsverhaltens, wie z. B. zum Rauchen im Abluftbereich wurden nicht aufgenommen. [vgl. FIW 2005]

Die bauphysikalischen Gegebenheiten wurden von allen Mietparteien sehr positiv bewertet: die subjektiven Hinweise reichten von „kein Zug“, „endlich sind die Fenster dicht“ über „angenehm ausgeglichen warm“, „keine kalten Füße mehr“ bis hin zu den Vorzügen der ausgeglichenen Feuchte durch die Lüftungsanlage und der weniger beschlagenden Spiegel beim Duschen.

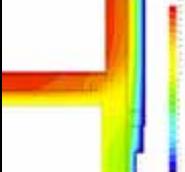
Der Heizverhalten stellt sich in den Wohnungen sehr unterschiedlich dar. Besonders in den Erdgeschoss-Wohnungen war in der ersten Heizsaison ein deutlich erhöhter Bedarf durch die erforderliche Austrocknung der Bausubstanz, insbesondere der Außenwände im Sockelbereich und der hier erhöht aufgetretenen Flächen mit neuem Putz gegeben. Eine Wohnung wurde bei ca. 19,5 °C gehalten, was zu einem extrem niedrigen Heizwärmeverbrauch führte. Die Muster-Wohnung mit dem üblichen „akademischen“ Passivhausverhalten (mustergültig: Temperatur bei 20,5 °C, kaum Fensterlüftung während der Heizsaison, Anpassung des Luftwechsels an den Bedarf mittels Drei-Stufen-Regelung) erzielte in der Heizsaison 2003/2004 einen Heizwärmeverbrauch von 16 kWh/(m²a). Ansonsten lag die Streuung zwischen 7,6 und 43,3 kWh/(m²a).

11 Zusammenfassung

Das Ergebnis der Sanierung am Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg zeigt, dass breitenwirksame Sanierung mit Passivhaus-Komponenten bis hin zur Reduktion des Heizwärmeverbrauchs um Faktor 10 eine realistische Option für die nahe Zukunft ist. Nach der Bauphase wird dies ebenfalls durch die Erfahrungen des Folgeprojektes der WBG in der Ingolstädter Straße 139/141 bestätigt.

Die Auswertung der wissenschaftlichen Begleitforschung zeigt, dass der Einsatz von Passivhaus-Komponenten wie im Neubaubereich nicht nur zur Senkung des Energieverbrauchs führt. Zudem werden äußerst gute Ergebnisse hinsichtlich Komfort, Raumluftqualität und subjektivem Wohngefühl erzielt. Die projektierten bauphysikalischen und energetischen Kennwerte wurden in der Praxis bestätigt, die Energieverbrauchswerte liegen sogar unter dem ermittelten Bedarf.

Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass sich bei Fortentwicklung der Komponenten und weiterer Marktdurchdringung hocheffiziente energetische Modernisierung bald als wirtschaftlichster Sanierungsstandard etablieren wird. Abschließend wird eine Matrix mit 10 Argumenten für Faktor 10 dargestellt, die sich aus den Erfahrungen mit dem Projekt Jean-Paul-Platz ergeben haben und durch die Ergebnisse dieses Berichtes belegt werden.

<p>1. Ressourcen & Verbrauch – angesichts des nahenden Förderzeits fossiler Energieträger bei steigender Nachfrage kann im Gebäudebestand mit hoher Energieeffizienz und bestem Kosten-Nutzen-Verhältnis Energie eingespart werden</p>	
<p>2. Behaglichkeit & Wohlfühlen – Dämmung nach Passivhaus-Standard sorgt für rundum warme Oberflächentemperaturen an der Innenseite der Hüllfläche sowie eine gleichmäßige Temperaturverteilung und mithin für besten raumklimatischen Komfort</p>	
<p>3. Bautenschutz & kein Schimmel – gute Wärmedämmung, Wärmebrückenreduktion, Luftdichtheit und mechanische Lüftung verhindern Tauwasserniederschlag und Schimmelpilzbildung; die Ursache vieler Bauschäden wird grundsätzlich beseitigt</p>	
<p>4. Raumluftqualität & Wohngesundheit – Lüftungstechnik sorgt für gesunde Raumluft durch kontinuierliche Zufuhr frischer Außenluft. Schadstoffe werden beständig abgeführt. Durch Fensterlüftung ist ein vergleichbarer Standard schwierig erzielbar</p>	
<p>5. Gebäudewert – die eingesetzten Passivhaus-Komponenten in der Gebäudehülle sind zukunftsfähig auf 40 Jahre – ein erneuter höchst unwirtschaftlicher Sanierungszyklus nach 15 – 20 Jahren entfällt</p>	
<p>6. Vermietbarkeit – durch die hohen Standards und den Wohnkomfort ist der Wohnraum langfristig attraktiv für Mieter. Leerstands- und Fluktuationsraten sind niedriger – in der betriebswirtschaftlichen Berechnung schlagen sich diese Effekte extrem stark nieder</p>	
<p>7. Energiekosten – auch bei stark steigenden Energiekosten bleiben die Nebenkosten, die „zweite Miete“ langfristig niedrig: Energieeffizienz stellt eine Versicherung gegen Energiekostensteigerungen dar</p>	
<p>8. Städtebau – zur Sanierung anstehende 30er bis 70er Jahre-Quartiere erfahren neben der technischen Ertüchtigung eine soziale, kulturelle und urbane Aufwertung</p>	
<p>9. Arbeitsplatzbeschaffung – durch gezielt eingesetzt Förderung können 400.000 Arbeitsplätze neu geschaffen bzw. erhalten werden. Der Fördermitteleinsatz ist als volkswirtschaftliches „Perpetuum Mobile“ zu betrachten, weil die resultierenden Einspareffekte höher liegen</p>	
<p>10. Klimaschutz – 90 % CO₂-Einsparung ist bei gutem Kosten-Nutzen-Verhältnis mit hoher Breitenwirkung möglich. Dämmung und Energieeffizienz müssen „sexy“ gemacht werden – denn sie stellen ein umwelt- und wirtschaftspolitisch extrem dankbares Betätigungsfeld dar.</p>	

12 Quellen

[AnBUS 2004]	Münzenberg, Thumulla: Projektbericht Jean-Paul-Platz. - AnBUS Fürth 2004
[FIW 2005]	Spitzner: Wissenschaftliche Begleitforschung Jean-Paul-Platz 4, Nürnberg – Energetische Gebäudesanierung mit Faktor 10: Zustand nach Sanierung: Auswertung der Energieverbräuche für Heizung und Warmwasser, der Energiebeiträge der Heizanlage und der Solaranlage, sowie der Raumluftparameter Temperatur, Feuchte und CO2-Gehalt in den Wohnungen – FIW München März 2005
[PHI 2002]	Feist, Wolfgang; John, Markus; Pfluger, Rainer: Bauphysikalische Betreuung: Wärmebrückenberechnung, Diffusionsberechnung, Beratung zum Luftdichtheitskonzept und Qualitätssicherung PHPP für das Bauvorhaben Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg. - Passivhaus Institut Darmstadt 2002
[PHI 2003]	Feist, Wolfgang; John, Markus; Kah, Oliver: Passivhaustechnik im Gebäudebestand – Qualitätssicherung für das Bauvorhaben Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg. - Passivhaus Institut Darmstadt Januar 2003
[PHI 2003-1]	Feist, Wolfgang: Passivhaustechnik im Gebäudebestand – Thermografische Nachuntersuchung für das Bauvorhaben Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg. - Passivhaus Institut Darmstadt März 2003
[Feist 2003]	Feist, W. (Hrsg.): Einsatz von Passivhaus-Technologien bei der Altbau-Modernisierung. - Protokollband Nr. 24, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut Darmstadt 2003
[Feist 2004]	Feist, W. (Hrsg.): Lüftung bei Bestandssanierung. - Protokollband Nr. 30, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut Darmstadt 2004
[Schulze Darup 2004]	Schulze Darup, Hrsg.: Energetische Gebäudesanierung mit Faktor 10. - Projektbericht und Broschüre zum DBU-Forschungsvorhaben 19208; Projektpartner: IEMB Berlin, Passivhaus Institut Darmstadt, ZEBAU Hamburg, Industriepartner: Aerex-Maico, Knauf-Marmorit, Rehau, Variotec; Nürnberg - Osnabrück 2004 (Bestellung der Broschüre bei der DBU (www.dbu.de))



**PASSIV
HAUS
INSTITUT**

Dr. Wolfgang Feist

**Bauphysikalische Betreuung:
Wärmebrückenberechnung,
Diffusionsberechnung, Beratung
zum Luftdichtheitskonzept und
Qualitätssicherung PHPP
für das Bauvorhaben
Jean-Paul-Platz 4
in Nürnberg**

**im Auftrag der
Wohnungsbaugesellschaft
der Stadt Nürnberg mbH**

Oktober 2002

PASSIVHAUS INSTITUT
Rheinstr. 44/46
D-64283 Darmstadt
Tel: 06151 8 26 99-0
Fax: 06151 8 26 99-11

Autoren: Dipl.-Ing. Markus John; Dr. Wolfgang Feist; Dipl.-Ing. Rainer Pfluger



Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
Wärmebrückenberechnungen	5
Detail 1 Regelschnitt KG-Decke/Außenwand.....	5
Detail 2 Schnitt Kellerfenster.....	8
Detail 3 Fenster, seitlicher Anschluss	10
Detail 5 Fenster, unterer Anschluss	12
Detail 8 Regelschnitt KG-Decke/Innenwand, breit	14
Detail 9 Regelschnitt KG-Decke/Innenwand, schmal.....	16
Detail 10 Regelschnitt Kniestock/Dachboden	18
Detail 12 Haustür, seitlicher Anschluss.....	20
Detail 14 Haustür, unterer Anschluss.....	24
Detail 16 Dachbodentür, seitlicher Anschluss	28
Detail 17 Dachbodentür, unterer Anschluss.....	30
Farblegende der verwendeten Materialien.....	33
Dampfdiffusionsberechnungen.....	34
Dampfdiffusionsberechnung für die ungedämmte Außenwand.....	34
Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser für die gedämmte Außenwand	35
Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser für die gedämmte Geschossdecke	36
Vorschläge zur Luftdichtheit der Gebäudehülle	37
Luftdichtheit der Außenwand	37
Luftdichtheit der Kellerdecke.....	37
Luftdichtheit der obersten Geschossdecke	37
Luftdichter Anschluss Außenwand/Kellerdecke	37
Luftdichter Anschluss Treppenhaukopf Wand/Decke.....	38
Luftdichter Anschluss Kniestock an Dachboden	38
Abdichtung der durchdringenden Balken des Tragwerkes auf dem Dachboden....	38
Anmerkungen zum Lüftungskonzept	41

Einleitung

Begleitend zur Ermittlung des Heizwärmebedarfs wurden vom Passivhaus Institut für das Bauvorhaben Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg für ausgewählte Details Wärmebrückenberechnungen durchgeführt. Zeichnungen der berechneten Details sind an diesen Bericht angehängt.

Zu den untersuchten Details ist jeweils ein Ausschnitt des Berechnungsmodells und des Isothermenbildes dargestellt. Die Randbedingungen und Ergebnisse der Wärmebrücken-Berechnungen sind jeweils in einer Tabelle zusammengefasst. Die gestrichelte helle Linie im Materialbild gibt jeweils die Lage der rechnerisch anzusetzenden Hüllfläche an (-----). Die Luftdichtheitsebene ist in den Schnittbildern als durchgehend rote Linie eingezeichnet.

Für die Haustür und die Dachbodentür wurde ein U-Wert für die eingebaute Tür ermittelt. In diesen U-Wert sind die Wärmebrückenverluste, die durch den Anschluss der Tür an die angrenzenden Bauteile entstehen, eingerechnet, so dass damit direkt der Heizwärmebedarf (mit der Fläche der Türrohbauöffnung) ermittelt werden kann.

Die Berechnungen der Wärmebrücken wurden mit dem Wärmestromprogramm Bisco, Version 5.1w, der Firma Physibel, Belgien, durchgeführt. Das Programm entspricht den Anforderungen von EN ISO 10211-1.

Für drei Konstruktionen wurde eine Berechnung der Wasserdampfdiffusion durchgeführt (vgl. S. 34). Darüberhinaus werden Vorschläge für die Sicherstellung der Luftdichtheit der Gebäudehülle dargestellt (S. 37).

In der folgenden Tabelle 1 sind die verwendeten Materialien und deren Wärmeleitfähigkeiten aufgeführt.

Materialien	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Vollklinker	1,00
Stahlbeton-Rippendecke	1,2
Dämmung (Wärmedämmverbundsystem)	0,035
Nadelholz	0,13
Außenputz	0,70
Innenputz bzw. Klebemörtel	0,35
Erdreich	1,4
PVC	0,17
Stahl	60
Dämmung (allgemein)	0,040
Aluminium	200
Glas	0,81
Scheibenzwischenraum ($U_g = 1,2$)	0,024
Polysulfid	0,42
Molekularsieb	0,10
Ersatzmaterial Aluminium-Abstandhalter	20



Materialien	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
EPDM	0,33
Marmor	3,5
Fensterrahmen-Dämmung	0,035
Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK)	0,19
Ersatzmaterial Abstandhalter Swisspacer	1,65
Scheibenzwischenraum ($U_g = 0,7$)	0,019
Anhydrit-Estrich	1,2
Fehlbodenschüttung	0,35
Dämmstoff (Polyurethan)	0,025
Vakuumdämmung	0,008
Polyamid	0,30
Edelstahl (Niro)	15
Purenit	0,075
EPDM 2	0,25
Beton	2,1
Granit	2,8
Polypropylen	0,22
Dämmstoff (Tür zum Dachboden bzw. Keller)	0,065
Holzwerkstoff	0,17
Holzwerkstoff, quer zur Faserrichtung	0,374
Dichtungsband (Komtriband)	0,10
Silikon	0,35

Tabelle 1: Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Materialien

Wärmebrückenberechnungen

Detail 1 Regelschnitt KG-Decke/Außenwand

Abbildung 1 zeigt den Regelschnitt KG-Decke/Außenwand. Die Kellerdecke besteht aus aneinandergereihten Stahlbeton-Trägern mit dazwischen liegenden Hohlräumen, deren Ausmaße nicht genau bekannt sind. Für die Berechnung wird vereinfachend ein homogenes Material mit einem Lambda-Wert von $1,2 \text{ W/(mK)}$ angesetzt. Die Kellerdecke wird von unten gedämmt und die Dämmung an der Innenseite der Außenwand ein Stück heruntergezogen (sog. "Dämmstreifen"), um den Wärmeübergang vom beheizten Innenraum zum unbeheizten Keller zu erschweren. Auf die Außenwand aus Vollklinkern wird ein Wärmedämmverbundsystem (WDVS) aufgebracht, das bis in das Erdreich reicht und dort nach außen abknickt. Im Isothermenbild von Abbildung 1 ist der Effekt dieser sog. "Dämmschürze" gut zu erkennen.

Detail 1: Regelschnitt KG-Decke/Außenwand

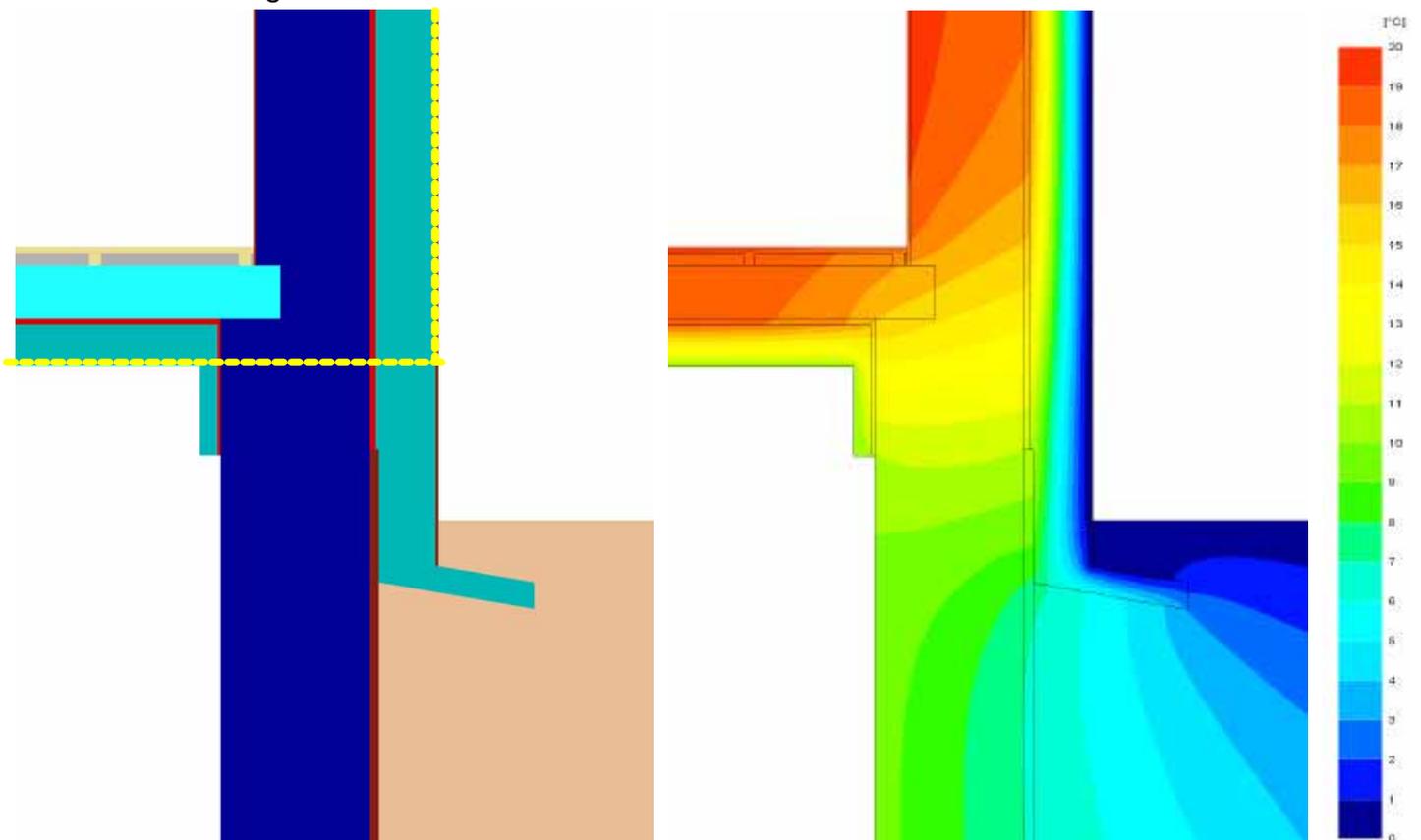


Abbildung 1: Detail 1. Regelschnitt KG-Decke/Außenwand. Rechts ist das zugehörige Isothermenbild zu sehen. Um Details besser erkennen zu können, ist nur ein Ausschnitt des Berechnungsmodells dargestellt.

Um den Effekt der an der Innenseite der Kellerwand heruntergezogenen Dämmung bewerten zu können, wurde für dieses Detail eine Variante berechnet, bei der die Dämmung wie in Abbildung 2 dargestellt ohne den inneren Dämmstreifen ausgeführt wird.

Detail 1a: Variante zu Detail 1. Die Dämmung ist hier nicht an der Innenseite der Kellerwand heruntergezogen.

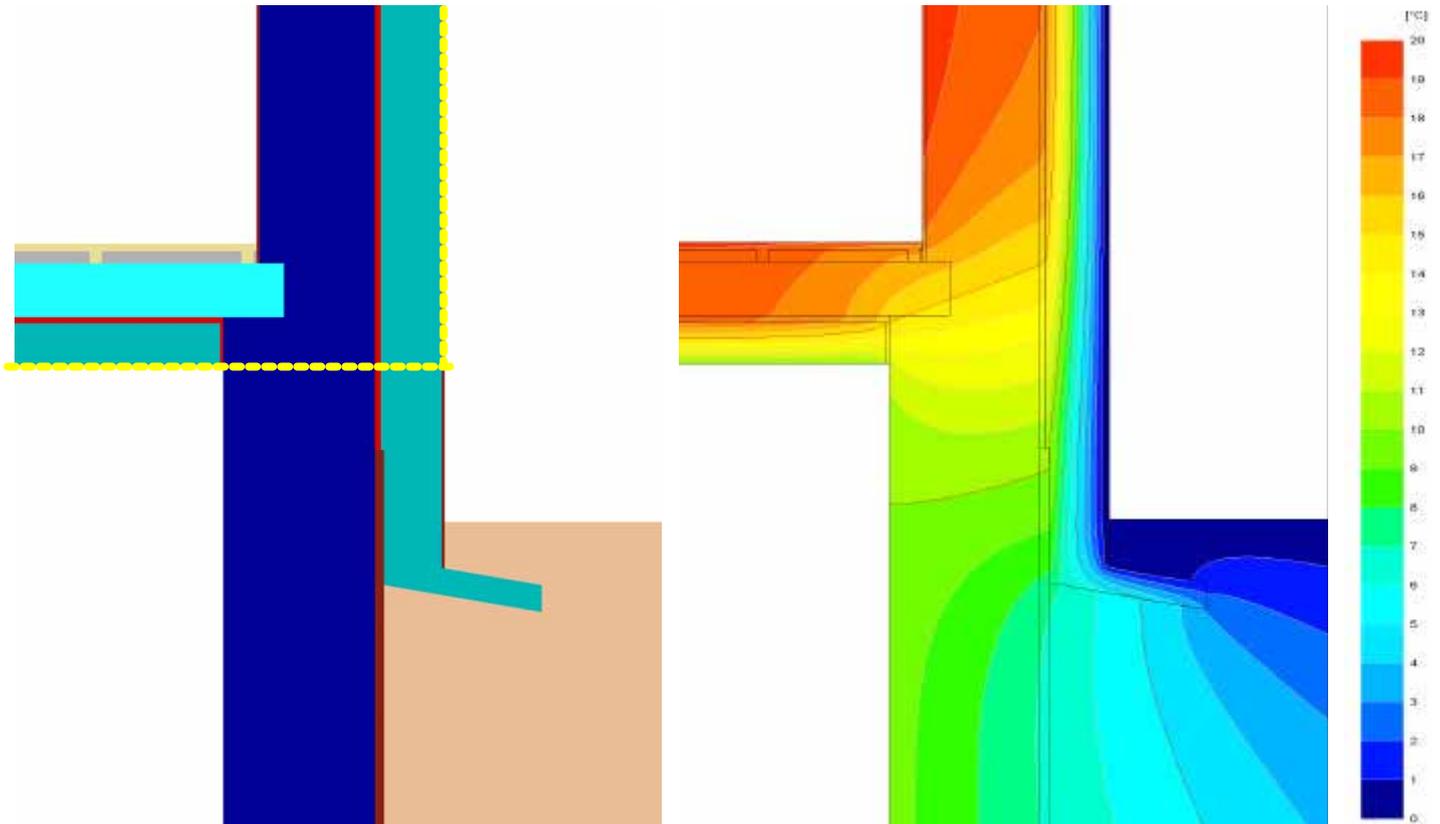


Abbildung 2: Detail 1a. Variante mit nicht an der Innenseite der Kellerwand heruntergezogener Dämmung. Rechts ist das zugehörige Isothermenbild zu sehen.

In der folgenden Tabelle 2 sind die Randbedingungen und Ergebnisse der Berechnung der Wärmebrücke zu Detail 1 angegeben.

Wärmebrücken-Auswertung

Detail:	01		
Anschluss:	KG-Decke/Außenwand		
Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Ausgangswerte			
Grenzwert Wärmebrückenfreiheit	Ψ	0.01	W/(mK)
Außentemperatur	θ_e	0	°C
Innentemperatur	θ_i	20	°C
Kellertemperatur	θ_g	10	°C
Übergangswiderstand außen	R_{se}	0.04	(m ² K)/W
Übergangswiderstand innen	R_{si}	0.17	(m ² K)/W
Übergangswiderstand Keller	R_{se}	0.17	(m ² K)/W
Wärmedurchgangskoeffizienten			
Außenwand	U_{AW}	0.157	W/(m ² K)
KG-Decke	U_{KG}	0.207	W/(m ² K)

Ergebnisse			
Bezugstemperaturdifferenz des Wärmedurchgangskoeffizienten	$\Delta\theta$	20	K
linearer Wärmedurchgangskoeffizient	Ψ_a	0.134	W/(mK)
minimale Innentemperatur bei -10°C	θ_{min}	17.5	°C
wärmebrückenfrei?	nein		

Tabelle 2: Wärmebrücken-Auswertung zu Detail 1.

Die Ausgangswerte für die Berechnung von Detail 1 und Detail 1a sind gleich.

Detail:	1a		
Anschluss:	KG-Decke/Außenwand Die Dämmung wird nicht an der Innenseite der Kellerwand heruntergezogen.		
Ergebnisse			
linearer Wärmedurchgangskoeffizient	Ψ_a	0.180	W/(mK)
minimale Innentemperatur bei -10°C	θ_{min}	16.6	°C
wärmebrückenfrei?	nein		

Tabelle 3: Wärmebrücken-Auswertung zu Detail 1a.

Detail 2 Schnitt Kellerfenster

In Abbildung 3 ist das Detail 2, der vertikale Schnitt durch die Außenwand im Bereich des Kellerfensters, dargestellt. Die Dämmung unter der Kellerdecke kann nicht in voller Stärke bis an das Kellerfenster herangezogen werden, da sich dieses noch öffnen lassen muss. Der obere Rahmen des Kellerfensters wird durch das WDVS überdämmt, wodurch die Wirkung der Wärmebrücke an dieser Stelle spürbar entschärft wird.

Detail 2: Schnitt Kellerfenster

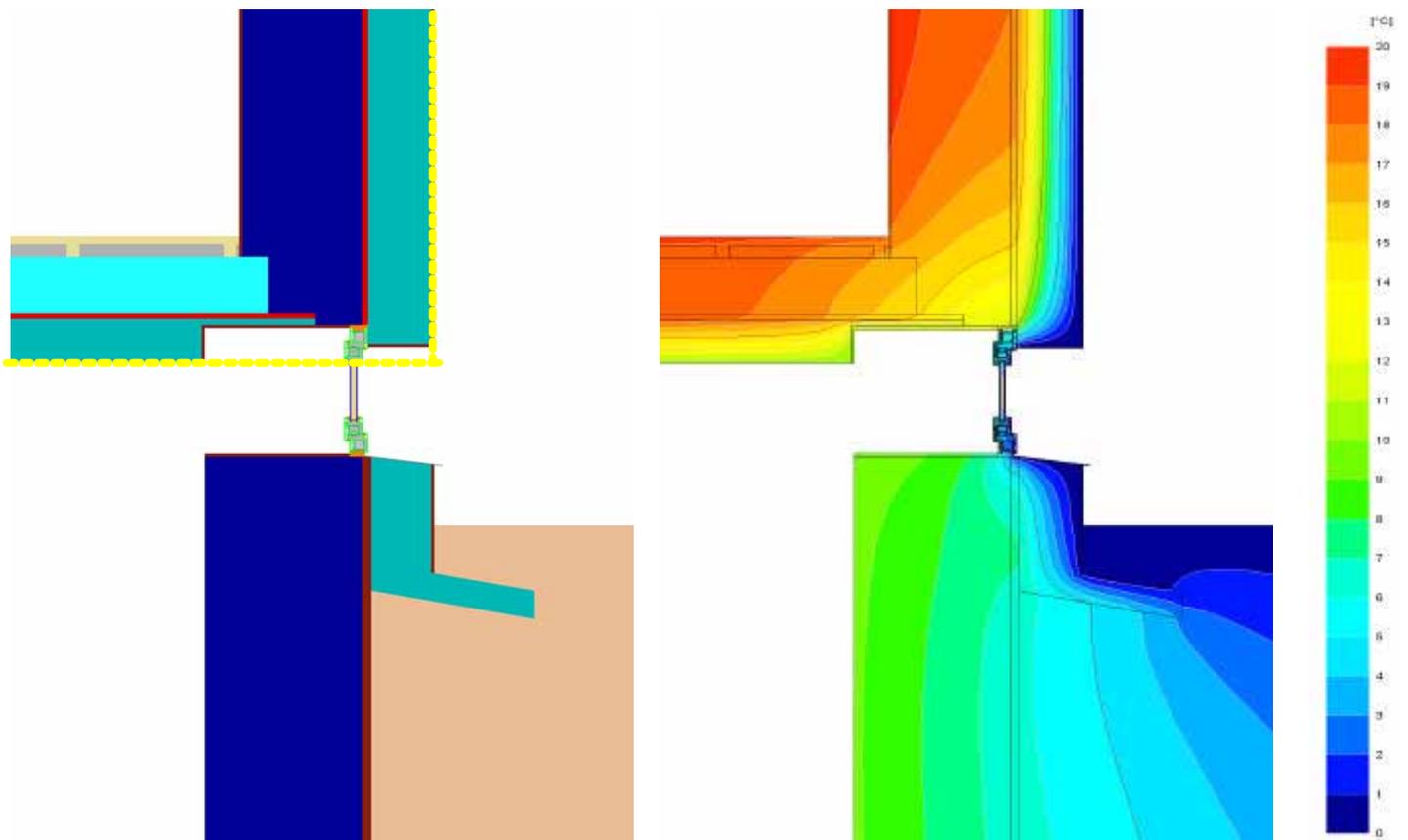


Abbildung 3: Detail 2. Schnitt Kellerfenster. Rechts ist das zugehörige Isothermenbild zu sehen. Um Details besser erkennen zu können, ist nur ein Ausschnitt des Berechnungsmodells dargestellt.

Wärmebrücken-Auswertung

Detail:	02		
Anschluss:	Kellerfenster		
Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Ausgangswerte			
Grenzwert Wärmebrückenfreiheit	Ψ	0.01	W/(mK)
Außentemperatur	θ_e	0	°C
Innentemperatur	θ_i	20	°C
Kellertemperatur	θ_g	10	°C
Übergangswiderstand außen	R_{se}	0.04	(m ² K)/W
Übergangswiderstand innen	R_{si}	0.17	(m ² K)/W
Übergangswiderstand Keller	R_{se}	0.17	(m ² K)/W
Wärmedurchgangskoeffizienten			
Außenwand	U_{AW}	0.157	W/(m ² K)
KG-Decke	U_{KG}	0.207	W/(m ² K)

Ergebnisse			
Bezugstemperaturdifferenz des Wärmedurchgangskoeffizienten	$\Delta\theta$	20	K
linearer Wärmedurchgangskoeffizient	Ψ_a	0.144	W/(mK)
minimale Innentemperatur bei -10°C	θ_{min}	16.7	°C
wärmebrückenfrei?	nein		

Tabelle 4: Wärmebrücken-Auswertung zu Detail 2.

Detail 3 Fenster, seitlicher Anschluss

Abbildung 4 zeigt den seitlichen Anschluss eines Fensters an die Außenwand. Der gedämmte Bereich des Fensterrahmens und das WDVS liegen in einer Ebene und der Rahmen wird vom WDVS 4,5 cm überdämmt.

Der Einbau- Ψ -Wert für den oberen Anschluss des Fensters kann gleich dem für den seitlichen Einbau angenommen werden. Der Rahmen wird hier an den Stahlbeton-Sturz (statt an die Vollklinkerwand) angeschlossen, der Unterschied im Ergebnis ist praktisch vernachlässigbar. Die Überdämmung ist die gleiche wie beim seitlichen Einbau.

Detail 3: Fenster; seitlicher Anschluss

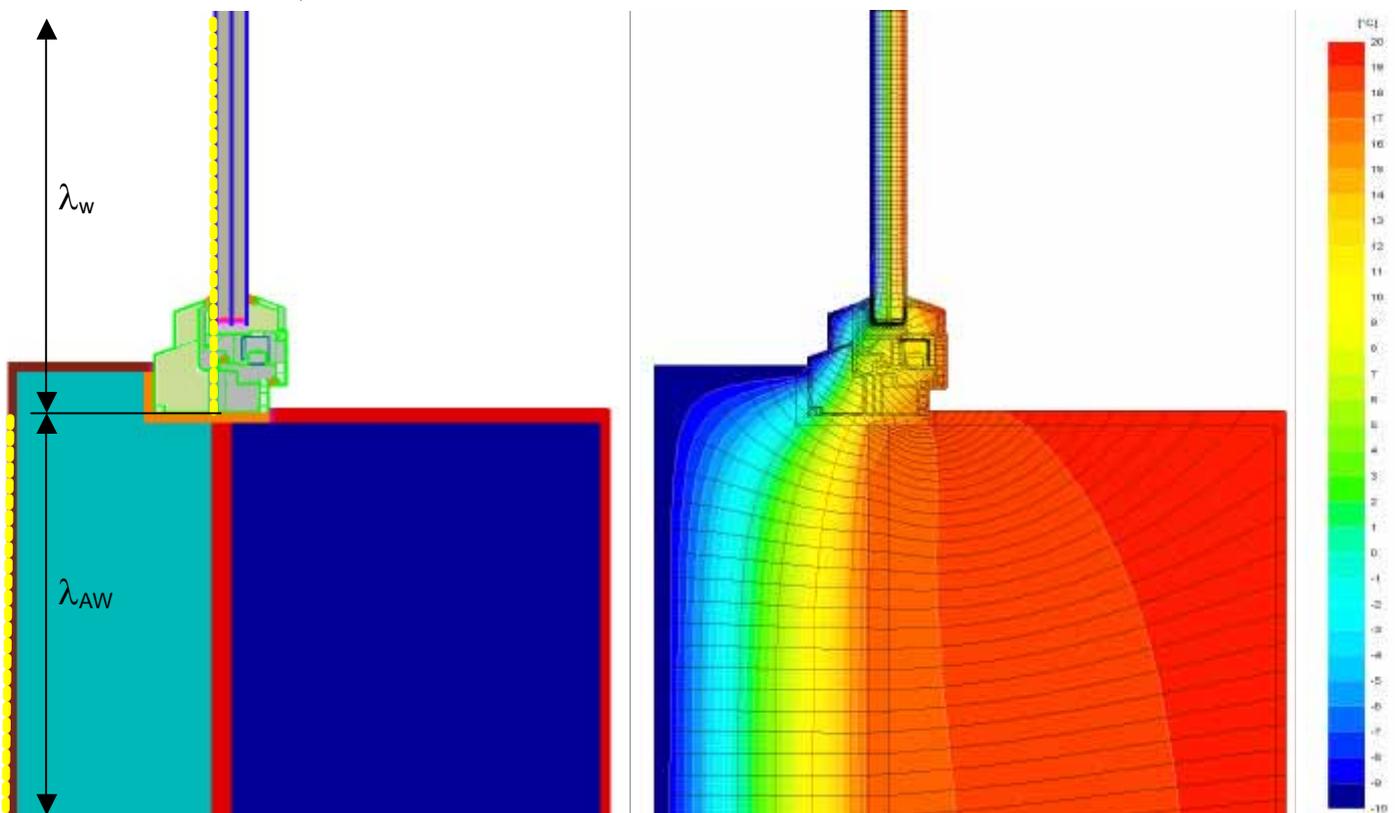


Abbildung 4: Detail 3. Seitlicher Anschluss des Fensters. Rechts ist das zugehörige Isothermenbild zu sehen. Um Details besser erkennen zu können, ist nur ein Ausschnitt des Berechnungsmodells dargestellt.

Wärmebrücken-Auswertung

Detail:	03		
Anschluss:	Fenster; seitlicher Anschluss		
Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Ausgangswerte			
Grenzwert Wärmebrückenfreiheit	Ψ	0.01	W/(mK)
Außentemperatur	θ_e	-10	°C
Innentemperatur	θ_i	20	°C
Übergangswiderstand außen	R_{se}	0.04	(m ² K)/W
Übergangswiderstand innen	R_{si}	0.13	(m ² K)/W
Übergangswiderstand innen, reduz.	$R_{si,red.}$	0.20	(m ² K)/W
Wärmedurchgangskoeffizienten			
Außenwand	U_{AW}	0.157	W/(m ² K)
Fenster	U_w	0.790	

Ergebnisse			
Bezugstemperaturdifferenz des Wärmedurchgangskoeffizienten	$\Delta\theta$	30	K
linearer Wärmedurchgangskoeffizient	Ψ_a	0.017	W/(mK)
minimale Innentemperatur bei -10°C	θ_{min}	13.8	°C
wärmebrückenfrei?	nein		

Tabelle 5: Wärmebrücken-Auswertung zu Detail 3.

Detail 5 Fenster, unterer Anschluss

In Abbildung 5 ist der untere Anschluss des Fensters zu sehen. Eine Überdämmung des Fensterrahmens ist in diesem Bereich nicht möglich, da die Entwässerung des Rahmens nach unten erfolgt. Um die Fensterbank anschließen zu können ist ein zusätzliches Profil, das von unten in den Rahmen eingeklippt wird, erforderlich.

Detail 5: Fenster; unterer Anschluss

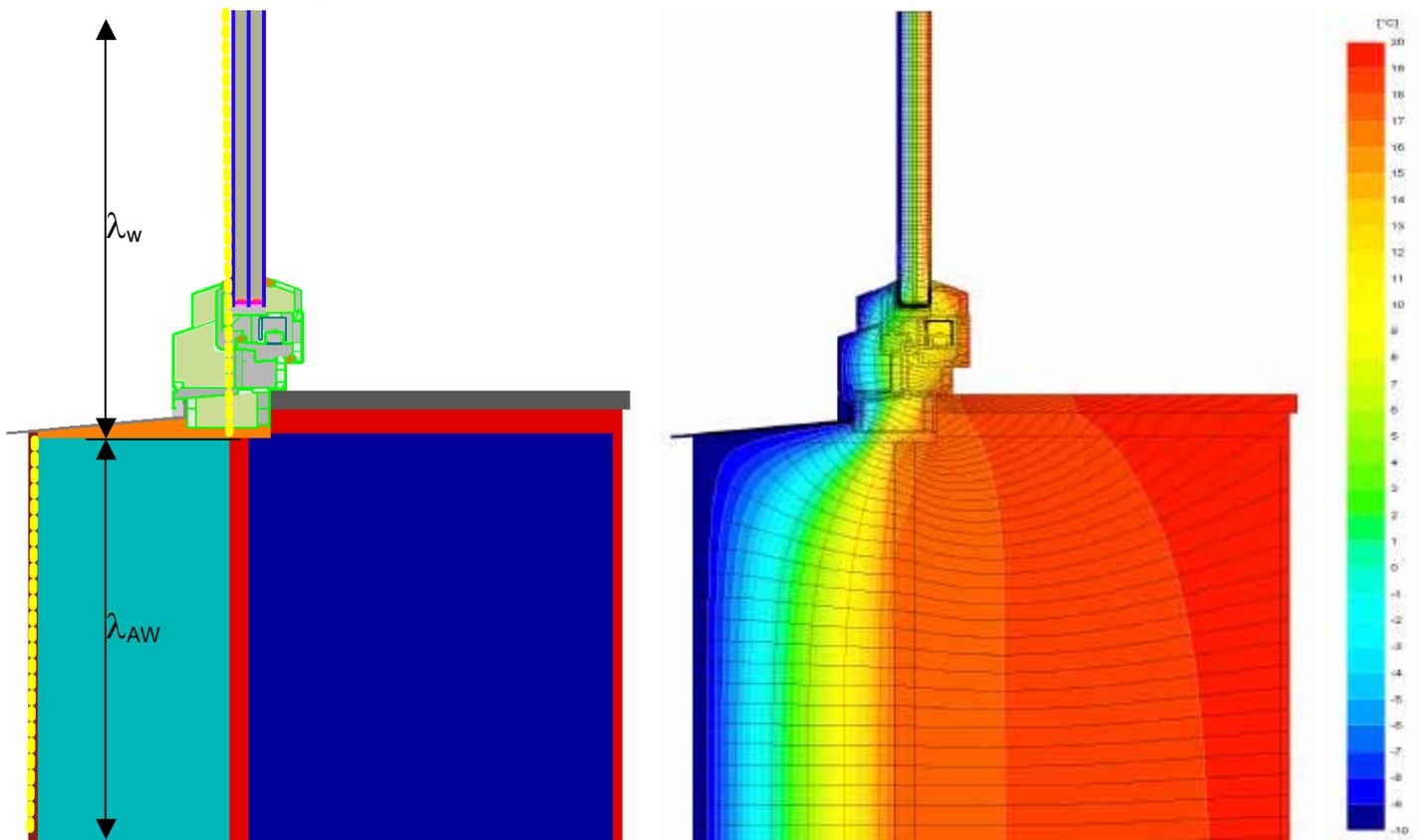


Abbildung 5: Detail 5. Unterer Anschluss des Fensters. Rechts ist das zugehörige Isothermenbild zu sehen. Um Details besser erkennen zu können, ist nur ein Ausschnitt des Berechnungsmodells dargestellt.

Wärmebrücken-Auswertung

Detail:	05		
Anschluss:	Fenster; unterer Anschluss		
Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Ausgangswerte			
Grenzwert Wärmebrückenfreiheit	Ψ	0.01	W/(mK)
Außentemperatur	θ_e	-10	°C
Innentemperatur	θ_i	20	°C
Übergangswiderstand außen	R_{se}	0.04	(m ² K)/W
Übergangswiderstand innen	R_{si}	0.13	(m ² K)/W
Übergangswiderstand innen, reduz.	$R_{si,red.}$	0.20	(m ² K)/W
Wärmedurchgangskoeffizienten			
Außenwand	U_{AW}	0.157	W/(m ² K)
Fenster	U_w	0.790	

Ergebnisse			
Bezugstemperaturdifferenz des Wärmedurchgangskoeffizienten	$\Delta\theta$	30	K
linearer Wärmedurchgangskoeffizient	Ψ_a	0.030	W/(mK)
minimale Innentemperatur bei -10°C	θ_{min}	13.6	°C
wärmebrückenfrei?	nein		

Tabelle 6: Wärmebrücken-Auswertung zu Detail 5.

Detail 8 Regelschnitt KG-Decke/Innenwand, breit

Abbildung 6 zeigt den Regelschnitt KG-Decke/Innenwand (breit). Da das Detail annähernd symmetrisch ist, wurde bei der Berechnung aus Symmetriegründen nur eine Hälfte modelliert. Die Dämmung unterhalb der Kellergeschosdecke wird an der Innenwand im Keller ein Stück heruntergezogen, um die Wärmebrückenwirkung an dieser Stelle zu mildern.

Detail 8: Regelschnitt KG-Decke/Innenwand; breit

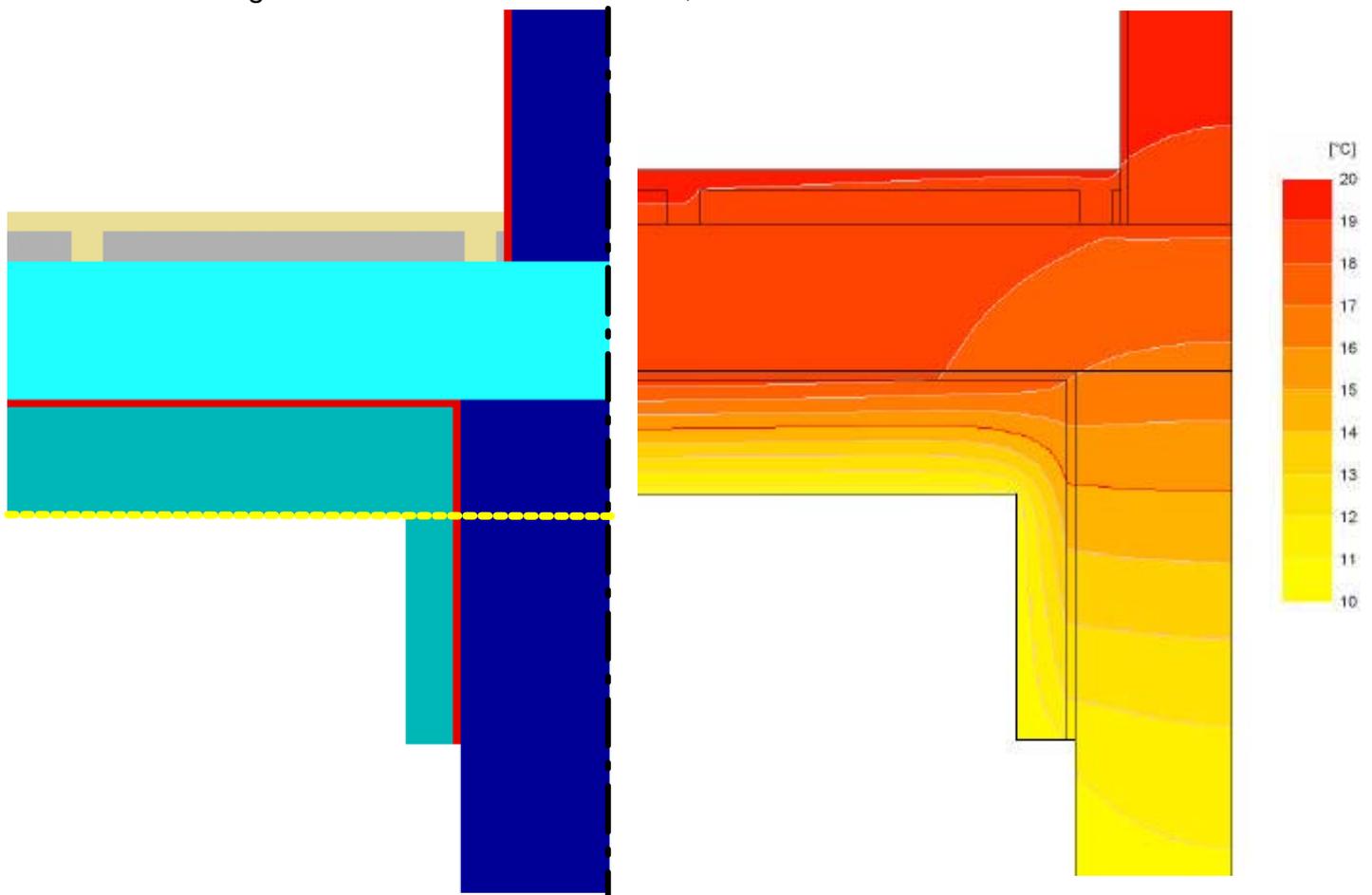


Abbildung 6: Detail 8. Regelschnitt KG-Decke/Innenwand breit. Rechts ist das zugehörige Isothermenbild zu sehen. Um Details besser erkennen zu können, ist nur ein Ausschnitt des Berechnungsmodells dargestellt.

Wärmebrücken-Auswertung

Detail:	08		
Anschluss:	KG-Decke/Innenwand breit		
Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Ausgangswerte			
Grenzwert Wärmebrückenfreiheit	Ψ	0.01	W/(mK)
Innentemperatur	θ_i	20	°C
Kellertemperatur	θ_g	10	°C
Übergangswiderstand außen (Keller)	R_{se}	0.17	(m ² K)/W
Übergangswiderstand innen, Wand	R_{si}	0.13	(m ² K)/W
Übergangswiderstand innen, Boden	R_{si}	0.17	(m ² K)/W
Wärmedurchgangskoeffizienten			
KG-Decke	U_{KG}	0.207	W/(m ² K)

Ergebnisse			
Bezugstemperaturdifferenz des Wärmedurchgangskoeffizienten	$\Delta\theta$	10	K
linearer Wärmedurchgangskoeffizient (Geamtwand)	Ψ_a	0.400	W/(mK)
minimale Innentemperatur	θ_{min}	18.4	°C
wärmebrückenfrei?	nein		

Tabelle 7: Wärmebrücken-Auswertung zu Detail 8; angegeben ist der Wert inkl. des Beitrags der gespiegelten Hälfte.

Detail 9 Regelschnitt KG-Decke/Innenwand, schmal

In Abbildung 7 ist der Regelschnitt KG-Decke/Innenwand (schmal) dargestellt. Der Einfluss der an der Kellerwand heruntergezogenen Dämmung auf den Verlauf der Isothermen ist hier gut zu erkennen.

Detail 9: Regelschnitt KG-Decke/Innenwand; schmal

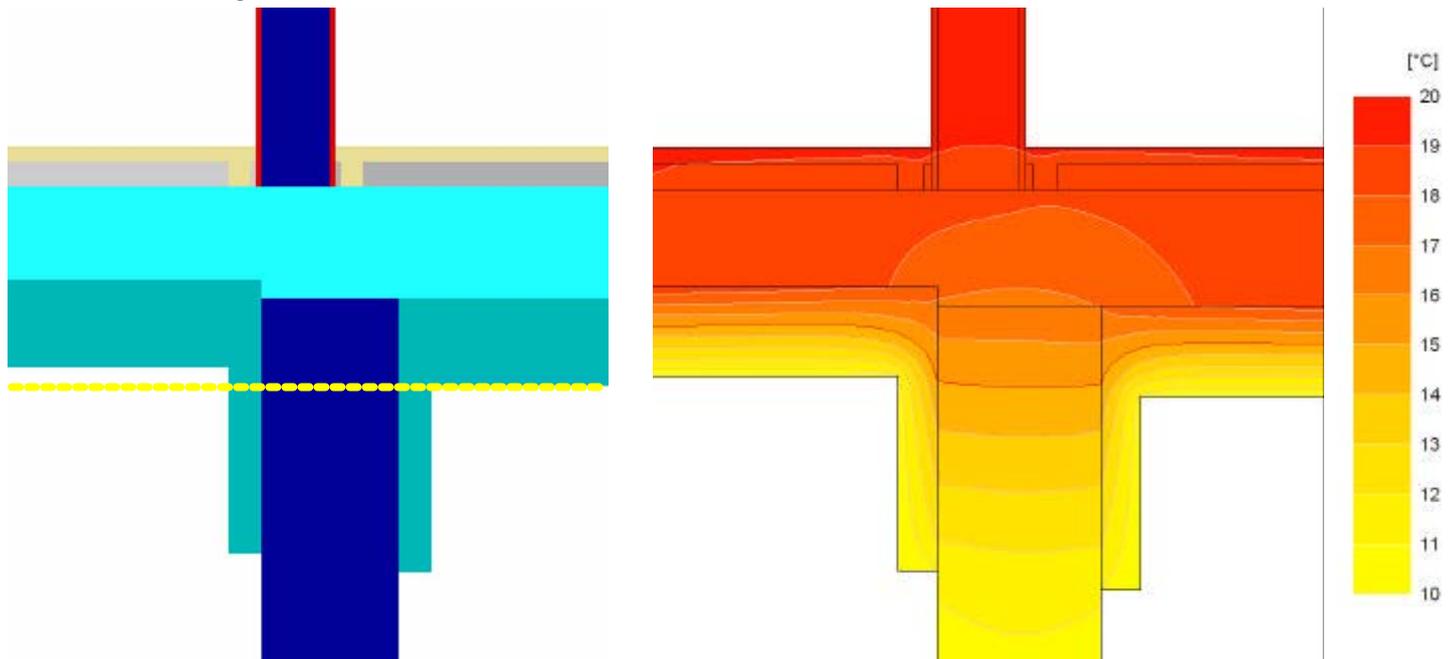


Abbildung 7: Detail 9. Regelschnitt KG-Decke/Innenwand schmal. Rechts ist das zugehörige Isothermenbild zu sehen. Um Details besser erkennen zu können, ist nur ein Ausschnitt des Berechnungsmodells dargestellt.

Um den Effekt der an der Kellerwand heruntergezogenen Dämmung bewerten zu können, wurde für dieses Detail eine Variante berechnet, bei der die Dämmung wie in Abbildung 8 dargestellt ausgeführt wird.

Detail 9a: Variante mit einer Dämmung, die nicht an der Kellerwand heruntergezogen ist.

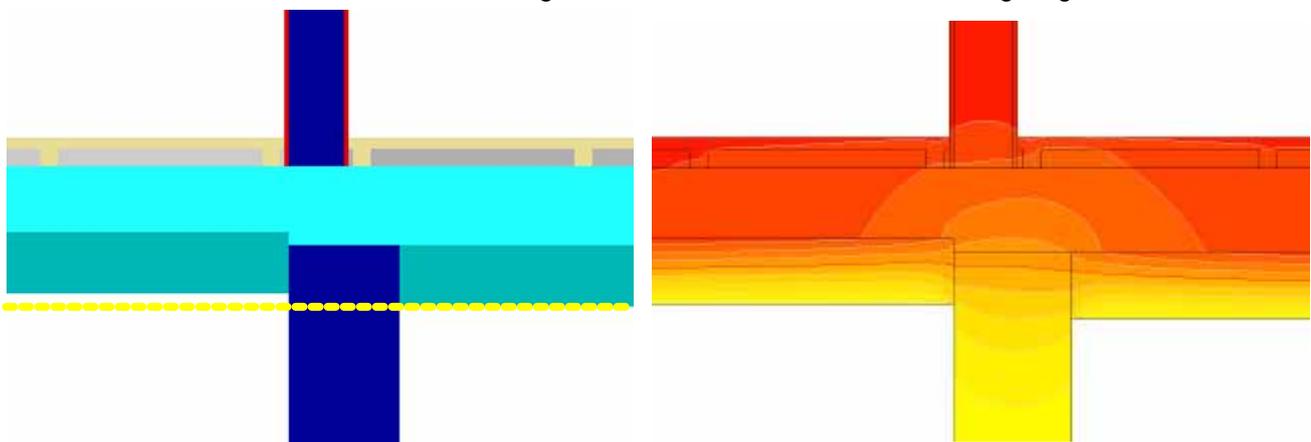


Abbildung 8: Detail 9a - Variante bei der die Dämmung mit nicht an der Kellerwand heruntergezogen wird

Wärmebrücken-Auswertung

Detail:	09		
Anschluss:	KG-Decke/Innenwand schmal		
Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Ausgangswerte			
Grenzwert Wärmebrückenfreiheit	Ψ	0.01	W/(mK)
Innentemperatur	θ_i	20	°C
Kellertemperatur	θ_g	10	°C
Übergangswiderstand außen (Keller)	R_{se}	0.17	(m ² K)/W
Übergangswiderstand innen, Wand	R_{si}	0.13	(m ² K)/W
Übergangswiderstand innen, Boden	R_{si}	0.17	(m ² K)/W
Wärmedurchgangskoeffizienten			
KG-Decke	U_{KG}	0.207	W/(m ² K)

Ergebnisse			
Bezugstemperaturdifferenz des Wärmedurchgangskoeffizienten	$\Delta\theta$	10	K
linearer Wärmedurchgangskoeffizient	Ψ_a	0.300	W/(mK)
minimale Innentemperatur	θ_{min}	19.1	°C
wärmebrückenfrei?	nein		

Tabelle 8: Wärmebrücken-Auswertung zu Detail 9.

Die Ausgangswerte für die Berechnung von Detail 9 und Detail 9a sind gleich.

Detail:	9a		
Anschluss:	KG-Decke/Innenwand schmal Variante mit nicht an der Kellerwand heruntergezogener Dämmung		
Ergebnisse			
linearer Wärmedurchgangskoeffizient	Ψ_a	0.456	W/(mK)
minimale Innentemperatur	θ_{min}	18.8	°C
wärmebrückenfrei?	nein		

Tabelle 9: Wärmebrücken-Auswertung zu Detail 9a.

Detail 10 Regelschnitt Kniestock/Dachboden

Abbildung 9 zeigt den Regelschnitt Kniestock/Dachboden. Die Dämmebene wird komplett um das Drempel-Mauerwerk herumgezogen und so ein für dieses Detail sehr guter Ψ -Wert erreicht (siehe Wärmebrücken-Auswertung, Tabelle 10). Man beachte, dass die rechnerische Außenhülle die Kniestockwand vereinfachend abschneidet (gestrichelt); dies ist im Ψ -Wert berücksichtigt.

Detail 10: Regelschnitt Kniestock/Dachboden

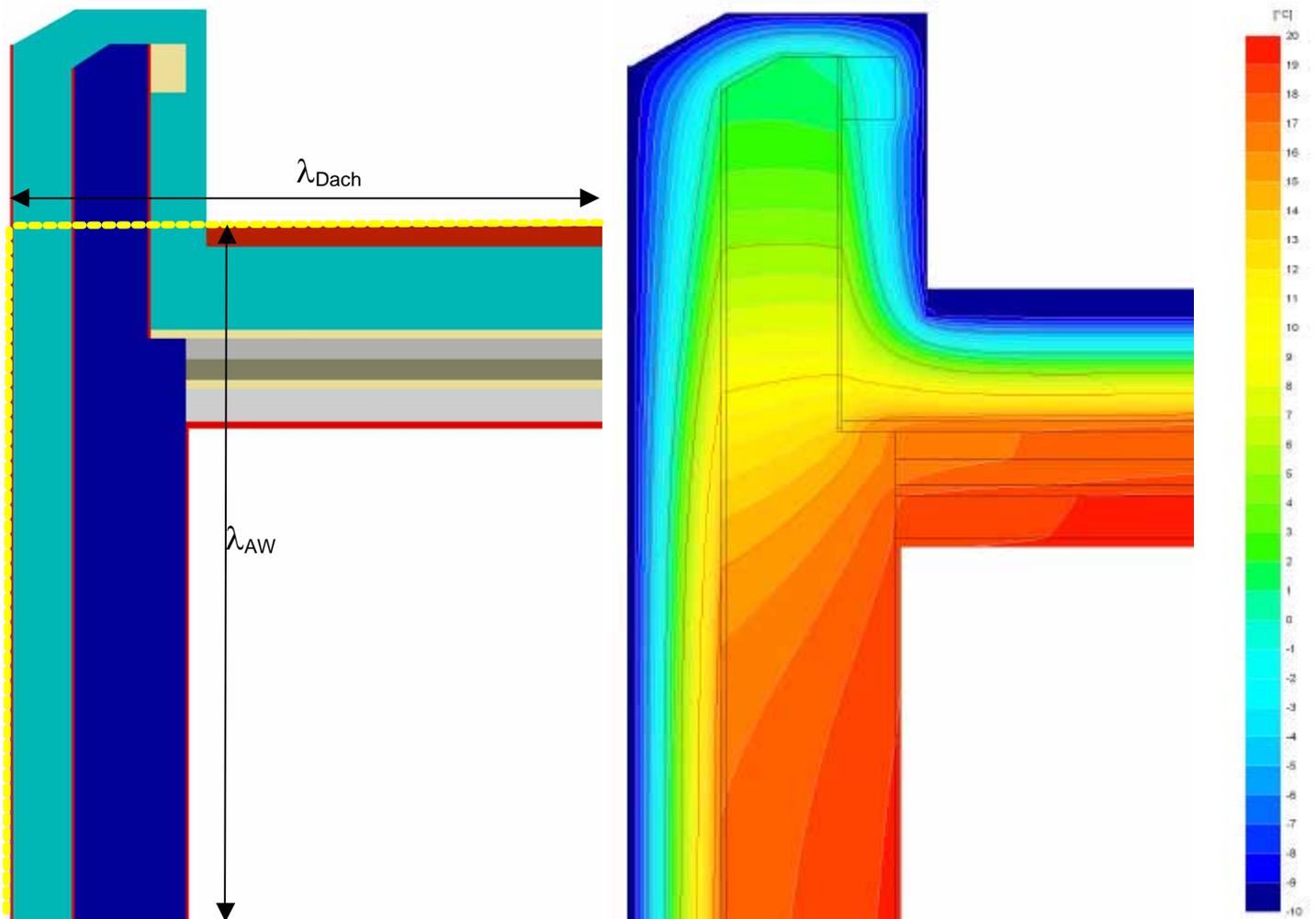


Abbildung 9: Detail 10. Regelschnitt Kniestock/Dachboden. Rechts ist das zugehörige Isothermenbild zu sehen. Um Details besser erkennen zu können, ist nur ein Ausschnitt des Berechnungsmodells dargestellt.

Wärmebrücken-Auswertung

Detail:	10		
Anschluss:	Kniestock/Dachboden		
Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Ausgangswerte			
Grenzwert Wärmebrückenfreiheit	Ψ	0.01	W/(mK)
Außentemperatur	θ_e	-10	°C
Innentemperatur	θ_i	20	°C
Übergangswiderstand außen, Außenluft	R_{se}	0.04	(m ² K)/W
Übergangswiderstand außen, Dachboden	R_{se}	0.10	(m ² K)/W
Übergangswiderstand innen, Wand	R_{si}	0.13	(m ² K)/W
Übergangswiderstand innen, Decke	R_{si}	0.10	(m ² K)/W
Wärmedurchgangskoeffizienten			
Außenwand	U_{AW}	0.157	W/(m ² K)
Decke über 2.OG	U_{Decke}	0.125	W/(m ² K)

Ergebnisse			
Bezugstemperaturdifferenz des Wärmedurchgangskoeffizienten	$\Delta\theta$	30	K
linearer Wärmedurchgangskoeffizient	Ψ_a	0.056	W/(mK)
minimale Innentemperatur bei -10°C	θ_{min}	18.4	°C
wärmebrückenfrei?	nein		

Tabelle 10: Wärmebrücken-Auswertung zu Detail 10.

Detail 12 Haustür, seitlicher Anschluss

In Abbildung 10 ist der seitliche Anschluss der Haustür an die Außenwand mit einer Vakuumdämmung im Laibungsbereich zu sehen.

Detail 12: Haustür, seitlicher Anschluss mit Vakuumdämmung im Laibungsbereich.

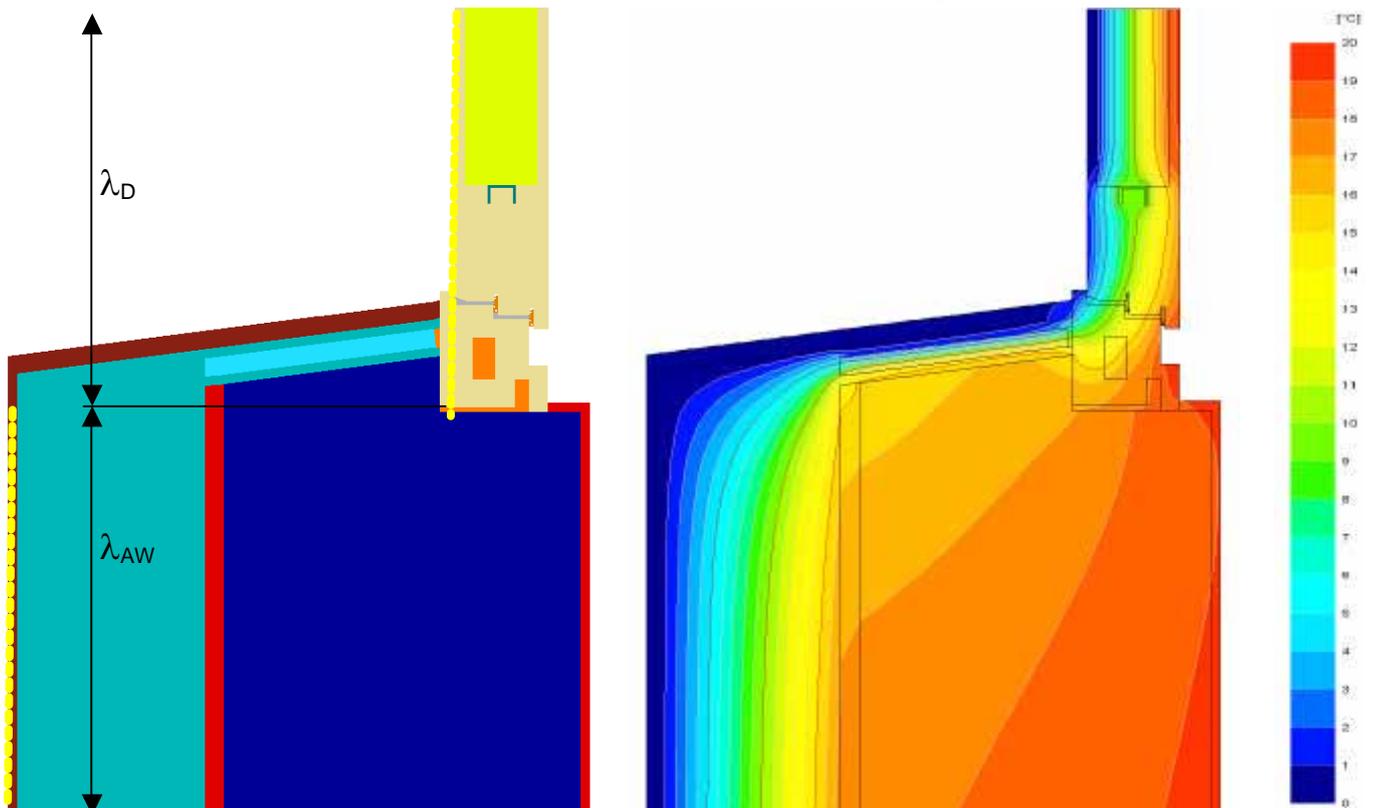


Abbildung 10: Detail 12. Seitlicher Anschluss der Haustür mit Vakuumdämmung im Laibungsbereich. Rechts ist das zugehörige Isothermenbild zu sehen. Um Details besser erkennen zu können, ist nur ein Ausschnitt des Berechnungsmodells dargestellt.

Wärmebrücken-Auswertung

Detail:	12		
Anschluss:	Haustür; seidl. Anschluss mit Vakuumdä. im Laibungsbereich		
Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Ausgangswerte			
Grenzwert Wärmebrückenfreiheit	Ψ	0.01	W/(mK)
Außentemperatur	θ_e	0	°C
Innentemperatur	θ_i	20	°C
Übergangswiderstand außen	R_{se}	0.04	(m ² K)/W
Übergangswiderstand innen	R_{si}	0.13	(m ² K)/W
Wärmedurchgangskoeffizienten			
Außenwand	U_{AW}	0.157	W/(m ² K)
Haustür-Rahmen	U_f	1.140	W/(m ² K)
Türblatt	$U_{Türblatt}$	0.294	W/(m ² K)

Ergebnisse			
Bezugstemperaturdifferenz des Wärmedurchgangskoeffizienten	$\Delta\theta$	20	K
linearer Wärmedurchgangskoeffizient	Ψ_a	0.080	W/(mK)
minimale Innentemperatur	θ_{min}	15.5	°C
wärmebrückenfrei?	nein		

Tabelle 11: Wärmebrücken-Auswertung zu Detail 12.

Abbildung 11 zeigt eine Variante des seitlichen Anschlusses der Haustür. Da das Verarbeiten der Vakuumdämmung einen gewissen Aufwand bedeutet (vor allem der Schutz vor Beschädigung), wird bei dieser Variante für die Dämmung des Laibungsbereichs das gleiche Material wie für das WDVS verwendet.

Detail 12a: Haustür, seitlicher Anschluss mit Dämmung WLG 035

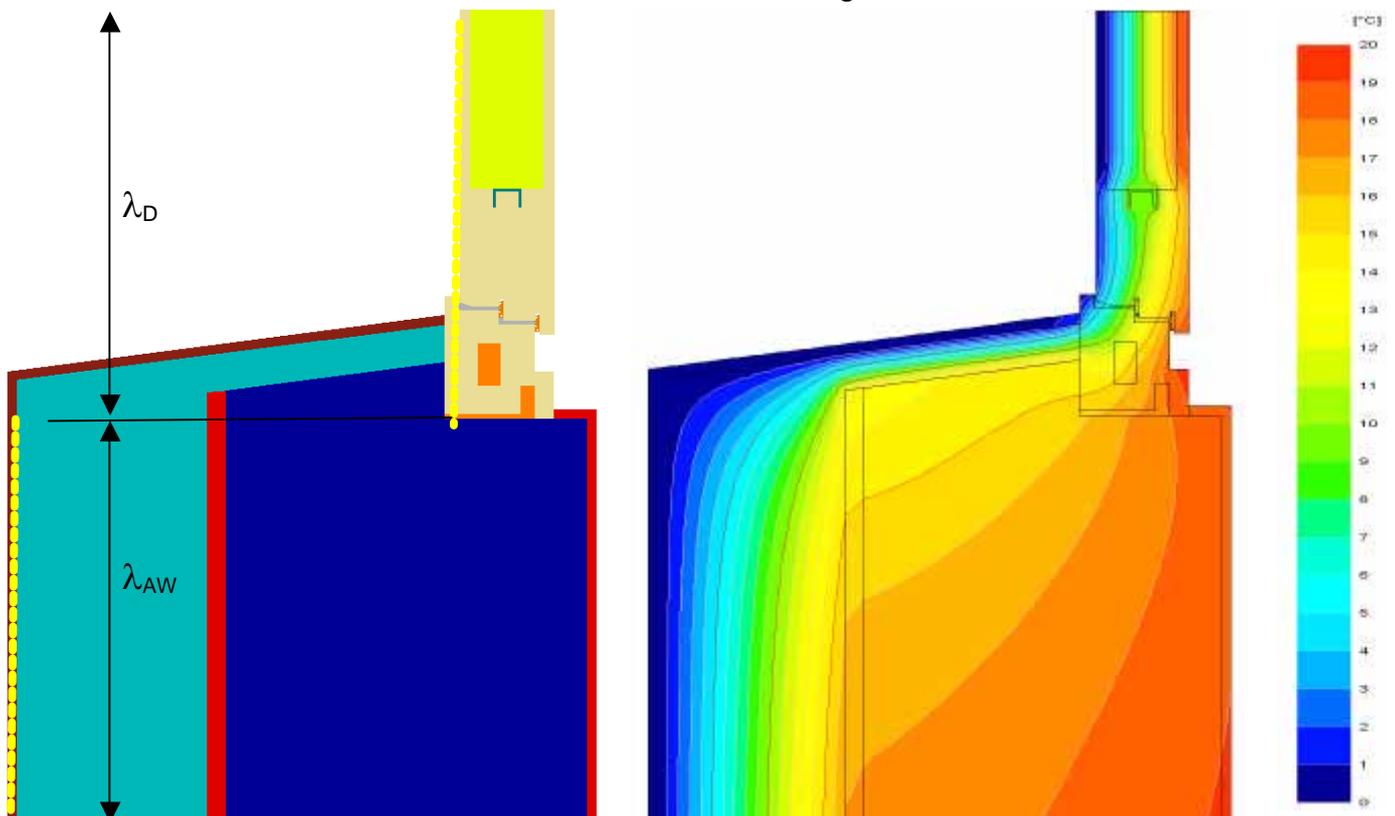


Abbildung 11: Detail 12a. Seitlicher Anschluss der Haustür. Statt der Vakuumdämmung wurde im Laibungsbereich das gleiche Material wie bei der Außenwand-Dämmung eingesetzt.

Wärmebrücken-Auswertung

Detail:	12a		
Anschluss:	Haustür; seidl. Anschluss mit Dämmung WLG 035		
Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Ausgangswerte			
Grenzwert Wärmebrückenfreiheit	Ψ	0.01	W/(mK)
Außentemperatur	θ_e	0	°C
Innentemperatur	θ_i	20	°C
Übergangswiderstand außen	R_{se}	0.04	(m ² K)/W
Übergangswiderstand innen, Wand	R_{si}	0.13	(m ² K)/W
Wärmedurchgangskoeffizienten			
Außenwand	U_{AW}	0.157	W/(m ² K)
Haustür-Rahmen	U_f	1.140	W/(m ² K)
Türblatt	$U_{Türblatt}$	0.294	W/(m ² K)

Ergebnisse			
Bezugstemperaturdifferenz des Wärmedurchgangskoeffizienten	$\Delta\theta$	20	K
linearer Wärmedurchgangskoeffizient	Ψ_a	0.151	W/(mK)
minimale Innentemperatur bei -10°C	θ_{min}	15.1	°C
wärmebrückenfrei?	nein		

Tabelle 12: Wärmebrücken-Auswertung zu Detail 12a.

Detail 14 Haustür, unterer Anschluss

Abbildung 12 zeigt den unteren Anschluss der Haustür. Die Schwelle besteht aus einem thermisch getrennten Aluminiumprofil und ist auf den Boden aufgesetzt, was für den Einbau die einfachste Möglichkeit darstellt. Die innenliegende Dichtung ist in vertikaler Richtung beweglich und wird durch das Betätigen des Türgriffs angehoben. Erst danach kann die Tür geöffnet werden. Da in diesem Bereich mit dem Ausfall von Tauwasser zu rechnen ist, muss auch für den Fall sehr niedriger Außentemperaturen ausgeschlossen werden können, dass die Dichtung festfriert und die Tür sich nicht mehr öffnen lässt. Deshalb wurde für die Wärmebrückenberechnung eine Außentemperatur von -15°C und innen eine Lufttemperatur von 10°C angesetzt.

Dem Isothermenbild in Abbildung 12 ist zu entnehmen, dass in dem Bereich, an welchem die innenliegende Dichtung auf den Boden aufsetzt, bei den gewählten Randbedingungen eine Temperatur von etwa -4°C herrscht. Die Dichtung könnte Einfrieren und die Haustür wäre dann nicht mehr leicht zu öffnen.

Um die Frostgefahr zu vermeiden, muss unterhalb der Schwelle eine thermische Trennung vorgesehen werden. In Abbildung 13 ist der Vorschlag des Passivhaus Instituts für einen unteren Anschluss der Haustür dargestellt.

Detail 14: Haustür, unterer Anschluss

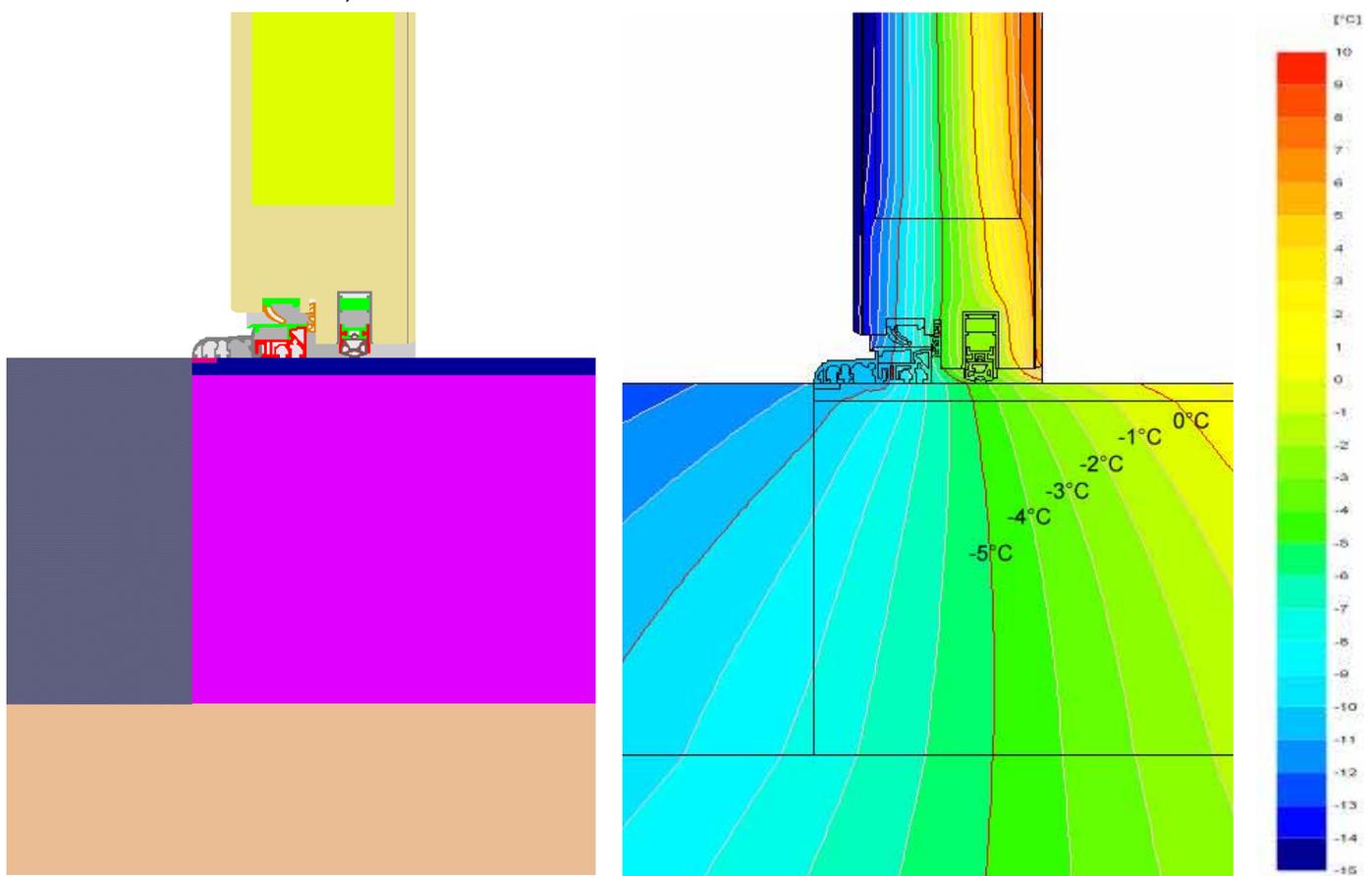


Abbildung 12: Detail 14. Unterer Anschluss der Haustür mit aufgesetzter Schwelle. Unterhalb der Schwelle wurden in dieser "Nullvariante" keine Maßnahmen zur thermischen Trennung vorgesehen. Rechts ist das zugehörige Isothermenbild zu sehen. Um Details besser erkennen zu können, ist nur ein Ausschnitt des Berechnungsmodells dargestellt.

Abbildung 13 zeigt den unteren Anschluss der Haustür nach diesem Vorschlag. Unterhalb der Schwelle ist ein Block aus Purenit (ein Polyurethan-Recycling-Dämmstoff) als thermische Trennung in den Boden eingelassen und mit einer trittfesten Kunststoffplatte abgedeckt. Unter der absenkbaren Dichtung, in die Kunststoffplatte und in den Bodenbelag eingelassen, ist eine Platte aus Edelstahl angeordnet. Diese soll einen möglichst guten Wärmetransport bis an die Dichtung ermöglichen, um so zusätzlich der Frostgefahr entgegenzuwirken. Es ist darauf zu achten, dass die Metallplatte nur bis unter die Dichtung und auf keinen Fall weiter nach außen reicht.

Detail 14a: Haustür, unterer Anschluss mit thermischer Trennung unterhalb der Schwelle.

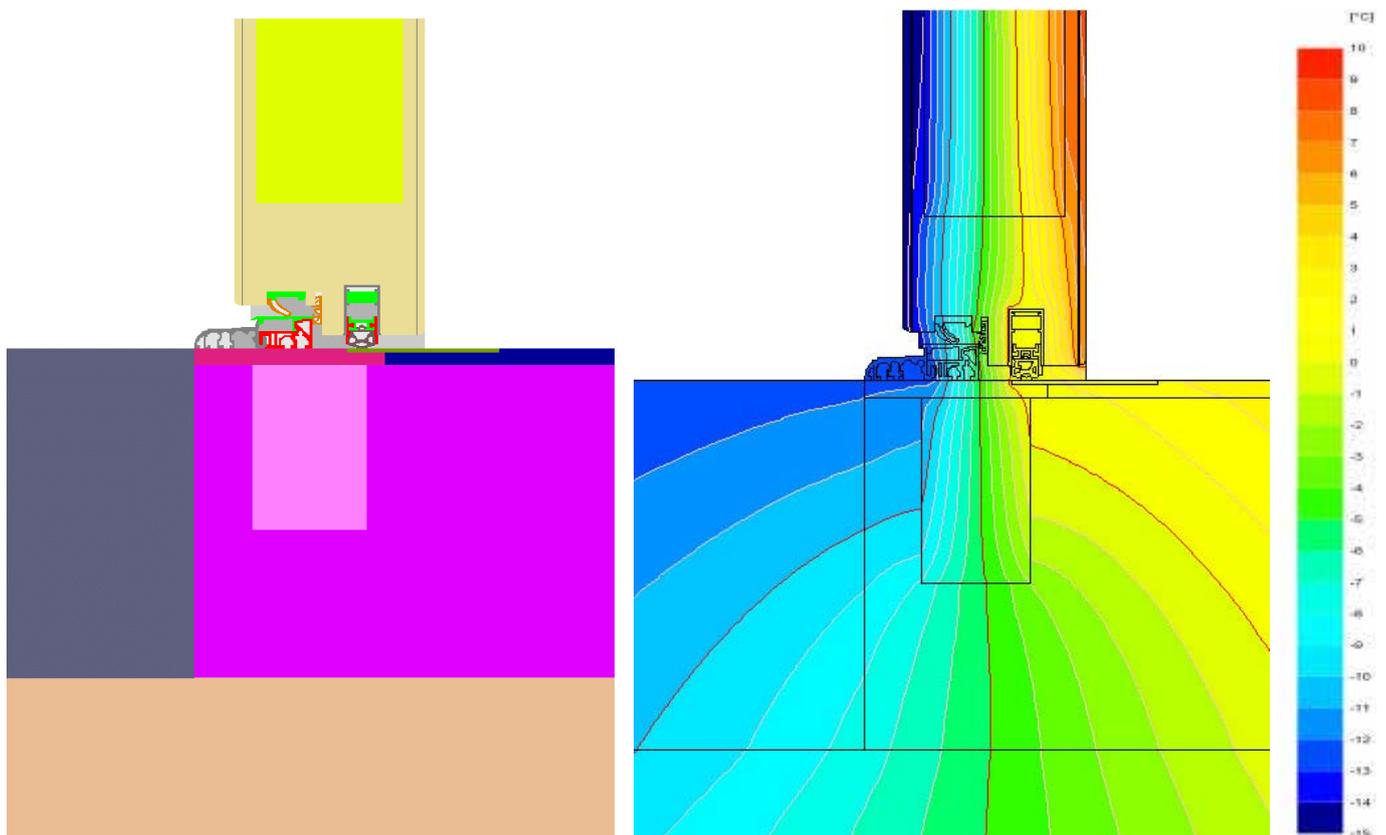


Abbildung 13: Detail 14a. Vorschlag des PHI für den unteren Anschluss der Haustür mit einer thermischen Trennung unterhalb der Schwelle. Rechts ist das zugehörige Isothermenbild zu sehen. Um Details besser erkennen zu können, ist nur ein Ausschnitt des Berechnungsmodells dargestellt.

Wärmebrücken-Auswertung

Detail:	14a		
Anschluss:	Haustür; unterer Anschluss		
	Vorschlag PHI		
Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Ausgangswerte			
Grenzwert Wärmebrückenfreiheit	Ψ	0.01	W/(mK)
Außentemperatur	θ_e	-15	°C
Innentemperatur	θ_i	10	°C
Übergangswiderstand außen	R_{se}	0.04	(m ² K)/W
Übergangswiderstand innen	R_{si}	0.13	(m ² K)/W
Übergangswiderstand innen, Boden	R_{si}	0.17	(m ² K)/W
Wärmedurchgangskoeffizienten			
Türblatt	$U_{Türblatt}$	0.294	W/(m ² K)
Rahmen	U_f	1.487	W/(m ² K)
Boden gegen Erdreich	U_{Boden}	2.071	W/(m ² K)

Ergebnisse			
Bezugstemperaturdifferenz des Wärmedurchgangskoeffizienten	$\Delta\theta$	25	K
linearer Wärmedurchgangskoeffizient	Ψ_a	0.065	W/(mK)
minimale Innentemperatur bei -15°C	θ_{min}	1.2	°C
wärmebrückenfrei?	nein		

Tabelle 13: Wärmebrücken-Auswertung zu Detail 14a.

Aus den U-Werten des Türblatts, des unteren, seitlichen und oberen Rahmens und den Einbau- Ψ -Werten ergibt sich der U-Wert für die eingebaute Tür mit der Vakuumdämmung im Laibungsbereich wie folgt:

	U-Wert	Fläche A	Ψ-Wert	Länge	spezif. Wärmeverlust H
	W/(m ² K)	m ²	W/(mK)	m	W/K
Teilflächen der Haustür					
Türblatt	0.294	1.20	-	-	0.35
Schwelle (unterer Rahmen)	1.487	0.10	-	-	0.14
seitl. und oberer Rahmen	1.14	0.96	-	-	1.10
Einbau- Ψ , unterer Anschluss	-	-	0.065	1.10	0.07
Einbau- Ψ , seitl./oberer Anschl.	-	-	0.080	5.20	0.42
Σ A:		2.26	Σ H:		2.08
$U_{\text{Haustür, eingebaut}} = \Sigma H / \Sigma A$ $= \mathbf{0.92 \text{ W/(m}^2\text{K)}, (mit Vakuumdämmung im Laibungsbereich)}$					

Tabelle 14: U-Wert-Berechnung der Haustür. Bei dem U-Wert des Haustürrahmens ist in der Regel zwischen dem schlossseitigen und dem bandseitigen (und evtl. dem oberen) Rahmen zu unterscheiden. Da diese sich nur geringfügig unterscheiden, wurde hier vereinfachend der U-Wert des schlossseitigen Rahmens angesetzt.

Für die Einbauvariante mit einer Dämmung mit WLG 035 im Laibungsbereich ergibt sich der U-Wert für die eingebaute Haustür folgendermaßen:

	U-Wert	Fläche A	Ψ-Wert	Länge	spezif. Wärmeverlust H
	W/(m ² K)	m ²	W/(mK)	m	W/K
Teilflächen der Haustür					
Türblatt	0.294	1.20	-	-	0.35
Schwelle (unterer Rahmen)	1.487	0.10	-	-	0.14
seitl. und oberer Rahmen	1.14	0.96	-	-	1.10
Einbau- Ψ , unterer Anschluss	-	-	0.065	1.10	0.07
Einbau- Ψ , seitl./oberer Anschl.	-	-	0.151	5.20	0.79
Σ A:		2.26	Σ H:		2.45
$U_{\text{Haustür, eingebaut}} = \Sigma H / \Sigma A$ $= \mathbf{1.09 \text{ W/(m}^2\text{K)}, (mit Dämm. WLG 035 im Laibungsbereich)}$					

Tabelle 15: U-Wert-Berechnung der Haustür. Bei dem U-Wert des Haustürrahmens ist in der Regel zwischen dem schlossseitigen und dem bandseitigen (und evtl. dem oberen) Rahmen zu unterscheiden. Da diese sich nur geringfügig unterscheiden, wurde hier vereinfachend der U-Wert des schlossseitigen Rahmens angesetzt.

Detail 16 Dachbodentür, seitlicher Anschluss

In Abbildung 14 ist der seitliche Anschluss der Dachbodentür im Bereich des Treppenhauuskopfes dargestellt.

Detail 16: Dachbodentür, seitlicher Anschluss

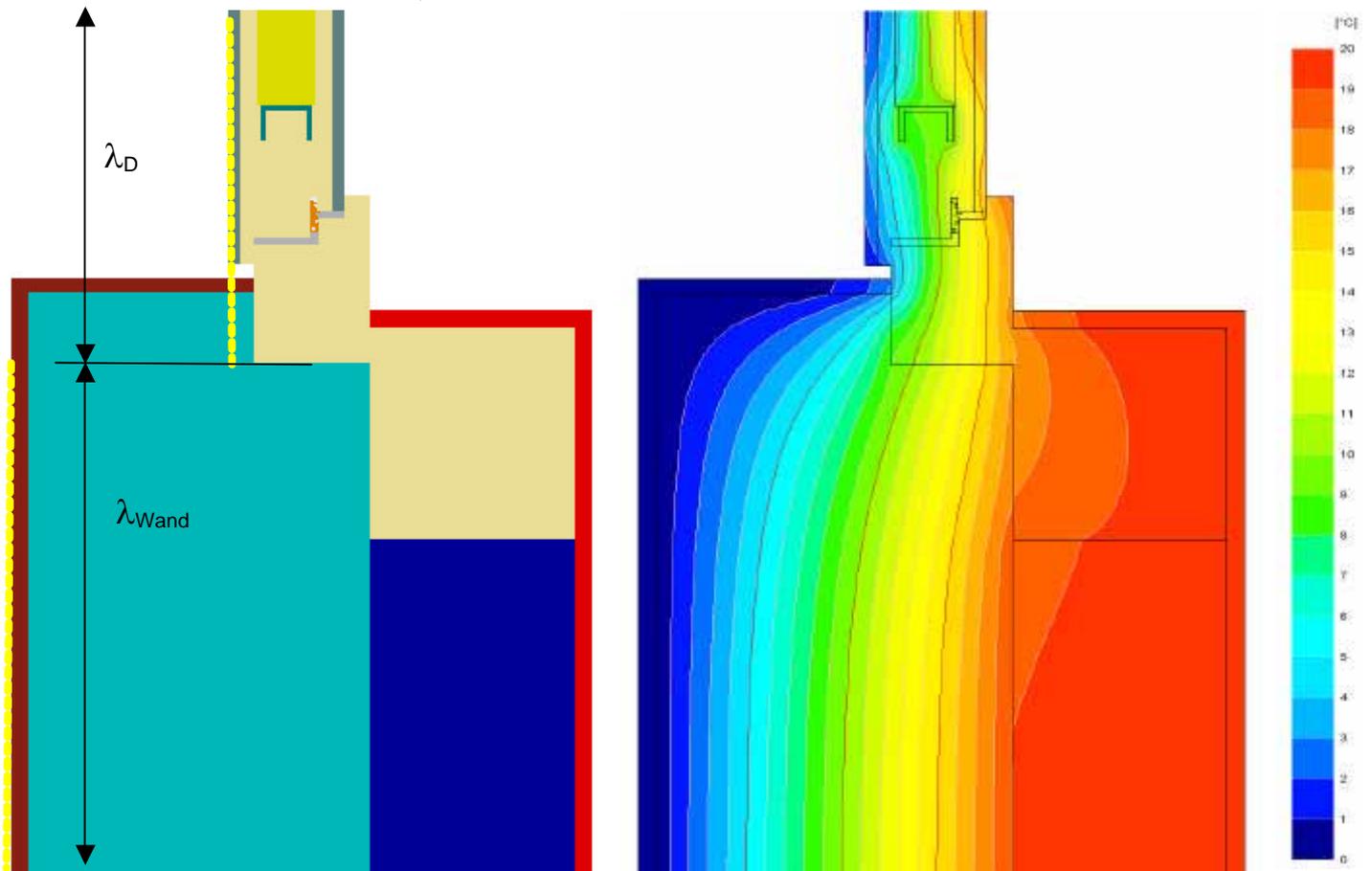


Abbildung 14: Detail 16. Dachbodentür, seitlicher Anschluss. Rechts ist das zugehörige Isothermenbild zu sehen. Um Details besser erkennen zu können, ist nur ein Ausschnitt des Berechnungsmodells dargestellt.

Wärmebrücken-Auswertung

Detail:	16		
Anschluss:	Dachbodentür, seidl. Anschluss		
Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Ausgangswerte			
Grenzwert Wärmebrückenfreiheit	Ψ	0.01	W/(mK)
Außentemperatur	θ_e	0	°C
Innentemperatur	θ_i	20	°C
Übergangswiderstand außen	R_{se}	0.13	(m ² K)/W
Übergangswiderstand innen	R_{si}	0.13	(m ² K)/W
Wärmedurchgangskoeffizienten			
Außenwand im Treppenhauskopfbereich	U_{AW}	0.161	W/(m ² K)
Türrahmen	U_f	1.66	W/(m ² K)
Türblatt	$U_{Türblatt}$	1.08	W/(m ² K)

Ergebnisse			
Bezugstemperaturdifferenz des Wärmedurchgangskoeffizienten	$\Delta\theta$	20	K
linearer Wärmedurchgangskoeffizient	Ψ_a	-0.031	W/(mK)
minimale Innentemperatur bei -10°C	θ_{min}	5,2	°C
wärmebrückenfrei?	ja		

Tabelle 16: Wärmebrücken-Auswertung zu Detail 16.

Detail 17 Dachbodentür, unterer Anschluss

Abbildung 15 zeigt den unteren Anschluss der Dachbodentür im Bereich des Treppenhauskopfes. Da es sich hier um eine Innenecke handelt, ist die Außenoberfläche kleiner als die Innenoberfläche; daher fällt der Wärmebrückenverlustkoeffizient an dieser Stelle hoch aus.

Detail 17: Dachbodentür, unterer Anschluss

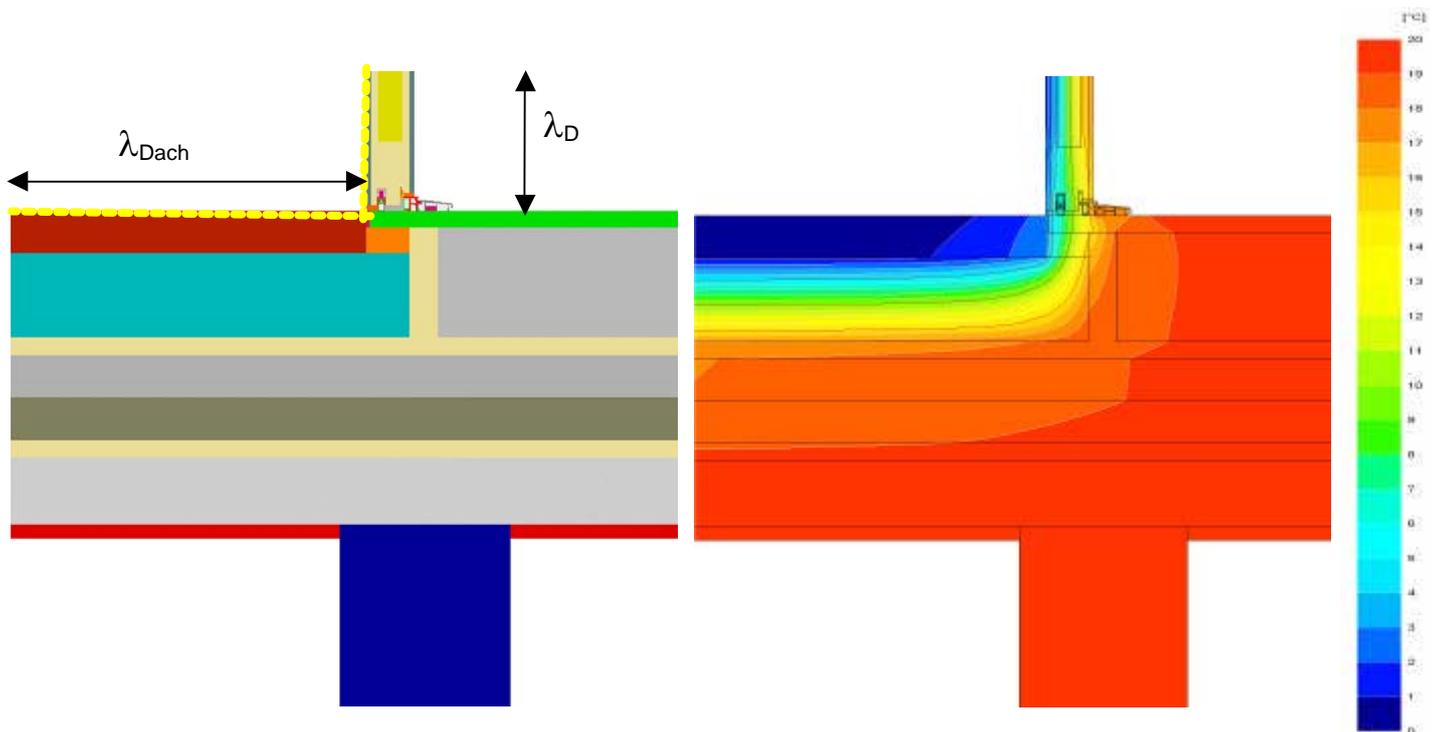


Abbildung 15: Detail 17. Dachbodentür, unterer Anschluss. Rechts ist das zugehörige Isothermenbild zu sehen. Um Details besser erkennen zu können, ist nur ein Ausschnitt des Berechnungsmodells dargestellt.

Wärmebrücken-Auswertung

Detail:	17		
Anschluss:	Dachbodentür, unterer Anschluss		
Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Ausgangswerte			
Grenzwert Wärmebrückenfreiheit	Ψ	0.01	W/(mK)
Außentemperatur	θ_e	0	°C
Innentemperatur	θ_i	20	°C
Übergangswiderstand außen	R_{se}	0.13	(m ² K)/W
Übergangswiderstand innen, Wand	R_{si}	0.13	(m ² K)/W
Übergangswiderstand innen, Decke	R_{si}	0.10	(m ² K)/W
Wärmedurchgangskoeffizienten			
Decke über 2.OG	U_{AW}	0.125	W/(m ² K)
Türrahmen	U_f	1.66	W/(m ² K)
Türblatt	$U_{Türblatt}$	1.08	W/(m ² K)

Ergebnisse			
Bezugstemperaturdifferenz des Wärmedurchgangskoeffizienten	$\Delta\theta$	20	K
linearer Wärmedurchgangskoeffizient	Ψ_a	0.186	W/(mK)
minimale Innentemperatur bei -10°C	θ_{min}	6.3	°C
wärmebrückenfrei?	nein		

Tabelle 17: Wärmebrücken-Auswertung zu Detail 17.

Aus den U-Werten des Türblatts, des unteren, seitlichen und oberen Rahmens und den Einbau- Ψ -Werten ergibt sich der U-Wert für die eingebaute Dachbodentür wie folgt:

	U-Wert	Fläche A	Ψ -Wert	Länge	spezif. Wärmeverlust H
	W/(m ² K)	m ²	W/(mK)	m	W/K
Teilfläch. der Dachbodentür					
Türblatt	1.1	1.24	-	-	1.36
Schwelle (unterer Rahmen)	1.6	0.10	-	-	0.15
seitl. und oberer Rahmen	1.7	0.71	-	-	1.21
Einbau- Ψ , unterer Anschluss	-	-	0.19	0.95	0.18
Einbau- Ψ , seitl./obere Anschl.	-	-	-0.03	5.25	-0.16
	Σ H:	2.04		Σ A:	2.74

$$\begin{aligned}
 U_{\text{Dachbodentür, eingebaut}} &= \Sigma H / \Sigma A \\
 &= \mathbf{1.3 \text{ W/(m}^2\text{K)}}
 \end{aligned}$$

Tabelle 18: U-Wert-Berechnung der Dachbodentür. Bei dem U-Wert des Türrahmens ist in der Regel zwischen dem schlossseitigen und dem bandseitigen (und evtl. dem oberen) Rahmen zu unterscheiden. Für die hier in der Berechnung eingesetzte Tür waren nicht alle Maße, die Rahmen betreffend, bekannt. Wo keine Werte vorlagen, wurden Annahmen getroffen. Auf den U-Wert der eingebauten Dachbodentür hat dies einen zu vernachlässigenden Einfluss.

Farblegende der verwendeten Materialien

In Abbildung 16 sind die Farben der Materialien dargestellt, die zur Erzeugung der Berechnungsmodelle verwendet wurden.

Materialien	[W/mK]	Hohlräume		
PUC	0.17	1		
PA	0.3	2		
Aluminium	200	3		
Niro	15	4		
Stahl	60	5		
Purenit	0.075	6		
Nadelholz	0.13	7		
Rippendecke	1.2	8		
Vollklinker	1.0	9		
Dämmstoff	0.035	10		
Dämmstoff	0.025	11		
Dämmstoff	0.04	12		
Dämmstoff	0.065	13		
Marmor	3.5	14		
Glas	0.81	15		
Fensterrahmen-Dämm.	0.035	16		
Polypropylen (PP)	0.22	17		
Granit	2.8	18		
Innenputz	0.35	19		
Normalbeton	2.1	20		
Spanplatte	0.17	21		
Außenputz	0.7	22		
Anhydritestrich	1.2			
Fehlbodenschüttung	0.35			
EPDM2	0.25			
EPDM	0.33			
Silikon	0.35			
Spanplatte x 2.2	0.374			
Erdreich	1.4			
Vakuumdämm.	0.008			
Polysulfid	0.42			
Molekularsieb	0.1			
Ersatzmaterial				
Aluminium-Abstandhalter	20			
GFK	0.19			
Swissp unten	1.65			
SZR 16 mm Ug=1.2	0.024			
SZR 12 mm Ug=0.7	0.019			

kleine Hohlräume		
	[mm ²]	[W/mK]
	<10x10	0.055
	<9x9	0.052
	<8x8	0.049
	<7x7	0.046
	<6x6	0.043
	<5x5	0.040
	<4x4	0.037
	<3x3	0.034
	<2x2	0.031
	<1x1	0.028

Abbildung 16: Farblegende der verwendeten Materialien und entsprechende Wärmeleitwerte.

Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit von Hohlräumen wurde gemäß EN 10077-2 ermittelt.

Dampfdiffusionsberechnungen

Dampfdiffusionsberechnung für die ungedämmte Außenwand

Nürnberg Jean Paul Platz 4: Ziegel_ungedämmt						-10 außen			208 außen				
Nr		Dicke d m	Rohdichte ρ kg/m³	Wärmeleit- fähigk. λ W/(mK)	μ-Wert	Durchg.- Wider- stand R m²K/W	Tempe- ratur °C	s _D -Wert m	Summe s _D	hypothetisch Wasserdampf- partialdruck Pa	Sättigungs- Dampfdruck Pa	wirklicher Wasserdampf- partialdruck Pa	
	Außenübergang					0.040	-8.264		0.000	208.000	302.876	208.000	
1	Außenputz	0.008	1800.000	0.870	40.0	0.009	-7.865	0.320	0.320	280.094	313.643	277.954	
2	Ziegel	0.150	2000.000	0.810	10.0	0.185	0.173	1.500	1.820	618.033	618.770	610.696	
3	Ziegel	0.150	2000.000	0.810	10.0	0.185	8.211	1.500	3.320	955.972	1089.492	953.127	
4	Ziegel	0.080	2000.000	0.810	10.0	0.099	12.497	0.800	4.120	1136.206	1450.450	1135.757	
5	Innenputz Gips	0.015	1400.000	0.350	10.0	0.043	14.358	0.150	4.270	1170.000	1637.122	1170.000	
6													
7													
8													
9													
10													
	Innenübergang					0.130	20.000			Diff-Strom	Diff-Menge	Eindiff.	0.219
	SUMME	0.403				0.691				kg/(m²h)	kg/(m²a)	Ausdiff.	0.210
	U-Wert W/(m²K)		1.447			Summe s_D		4.270		0.000150	0.2163	Tauwasser	0.009

Tabelle 19: Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser für die bestehende Außenwand.

Innerhalb des Ziegelmauerwerkes kommt es im äußeren Drittel regelmäßig zu Tauwasseranfall (Abbildung 17). Dieser Wasser wird kapillar gebunden und kann nach innen und nach außen wieder austrocknen. Die Materialfeuchtigkeit im Ziegel dürfte jedoch dauerhaft relativ hoch sein.

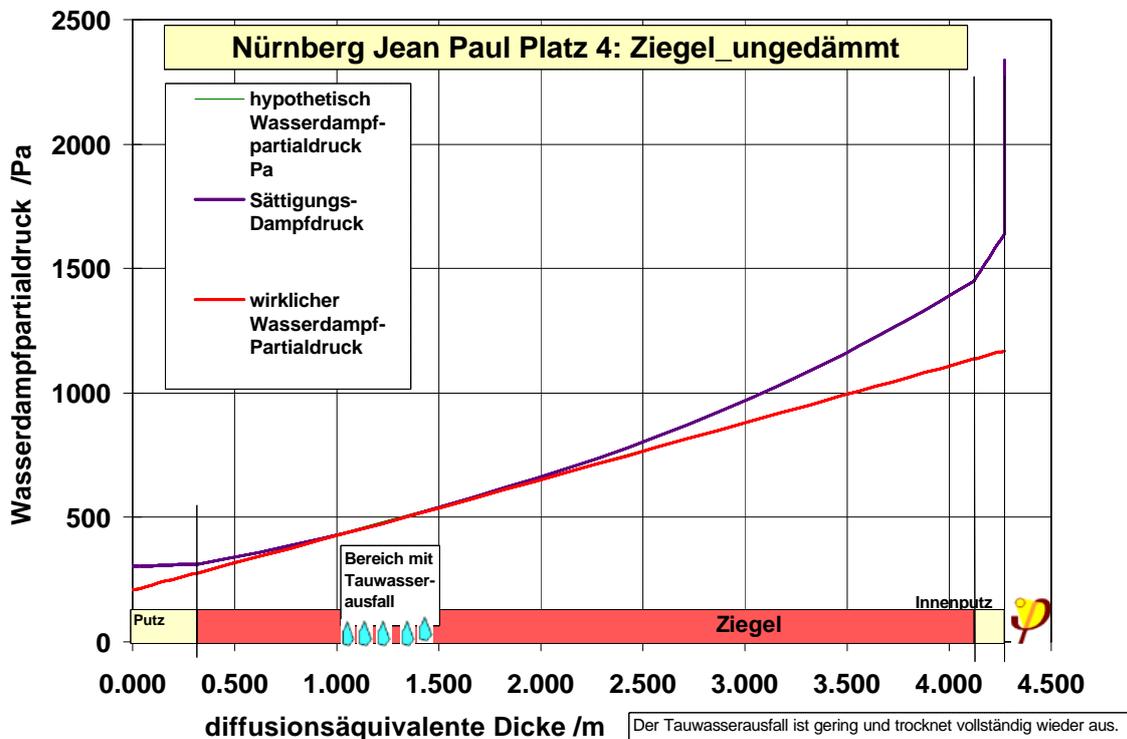


Abbildung 17: Glaserdiagramm für die bestehende Ziegelmauerwerk-Außenwand.

Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser für die gedämmte Außenwand

Nürnberg Jean Paul Platz 4: ZiegelAußendämm200					-10 außen		208 außen					
Nr	Dicke d m	Rohdichte ρ kg/m³	Wärmeleit- fähig. λ W/(mK)	μ-Wert	Durchg.- Wider- stand R m²K/W	Tempe- ratur °C	s _D -Wert m	Summe s _D	hypothetisch Wasserdampf- partialdruck Pa	Sättigungs- Dampfdruck Pa	wirklicher Wasserdampf- partialdruck Pa	
	Außenübergang				0.040	-9.813		0.000	208.000	264.215	208.000	
1	Außenputz	0.008	1800.000	0.870	0.009	-9.770	0.320	0.320	244.345	265.222	244.345	
2	Neopor	0.200	15.000	0.035	5.714	16.897	4.000	4.320	698.654	1925.726	698.654	
3	Außenputz und Kleber	0.020	1400.000	0.870	0.023	17.004	0.200	4.520	721.370	1938.842	721.370	
4	Ziegel	0.380	2000.000	0.810	0.469	19.193	3.800	8.320	1152.963	2224.159	1152.963	
5	Innenputz Gips	0.015	1400.000	0.350	0.043	19.393	0.150	8.470	1170.000	2251.967	1170.000	
6												
7												
8												
9												
10												
	Innenübergang				0.130	20.000			Diff-Strom	Diff-Menge	Eindiff.	0.000
	SUMME	0.623			6.428				kg/(m²h)	kg/(m²a)	Ausdiff.	0.000
	U-Wert W/(m²K)		0.156		Summe s _D		8.470		0.000076	0.1090	Tauwasser	0.000

Tabelle 20: Berechnungsgang Außenwand mit 200 mm Neopor-Dämmung

Nach Aufbringen der Dämmung gibt es in der gesamten Konstruktion keinen Tauwasseranfall mehr (Abbildung 18). Sollte Wasser aus anderen Quellen in den Aufbau gelangen, so kann es im Sommer und im Winter in ausreichendem Maß austrocknen. Die Konstruktion ist bauphysikalisch einwandfrei. Die Materialfeuchte im Mauerwerk wird gegenüber dem heutigen Zustand innerhalb von 1 bis 3 Jahren auf einen deutlich geringeren Wert absinken.

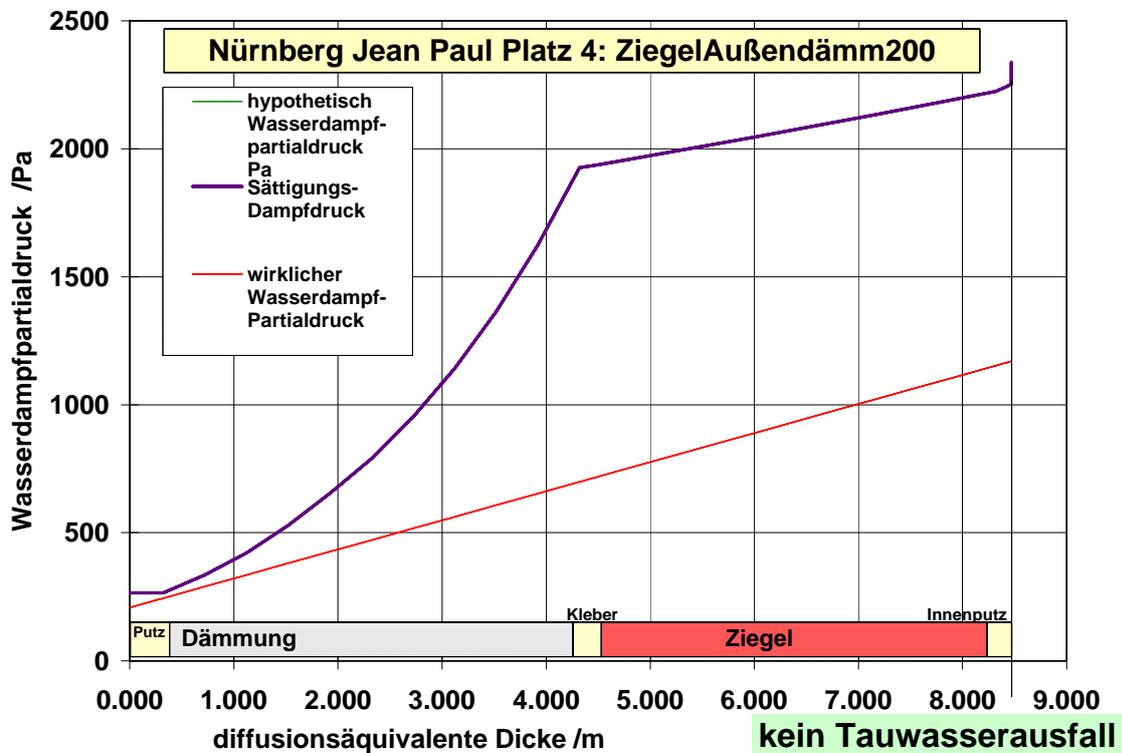


Abbildung 18: Glaserdiagramm für den Außenwandaufbau nach Aufbringung der Außendämmung

Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser für die gedämmte Geschossdecke

oberste Geschossdecke Nürnberg Jean Paul Platz 4										-10 außen	208		
Nr		Dicke d m	Rohdichte ρ kg/m ³	Wärmeleit- fähigk. λ W/(mK)	μ -Wert	Durchg.- Widerstan d R m ² K/W	Tempe- ratur	s_D -Wert m	Summe s_D	hypothetisch Wasserdampf- partialdruck	Sättigungs- Dampfdruck	wirklicher Wasserdampf- partialdruck	
	Wärmeübergang					0.080	-9.742		0.000	208.000	265.896	208.000	
1	Estrich	0.060	1400.000	1.200	20.0	0.050	-9.580	1.200	1.200	238.653	269.722	238.653	
2	Diffunorm	0.000	1200.000	0.800	5000.0	0.000	-9.580	0.500	1.700	251.425	269.732	251.425	
3	EPS-Hartschaum	0.250	15.000	0.035	20.0	7.143	13.477	5.000	6.700	379.147	1546.269	379.147	
4	Luftdichtungsfolie eff.	0.000	1200.000	0.800	150000	0.000	13.478	30.000	36.700	1145.477	1546.351	1145.477	
5	Holzdielen	0.024	800.000	0.130	20.0	0.185	14.074	0.480	37.180	1157.739	1607.328	1157.739	
6	Hohlraum	0.1400	1.200	0.206	1.000	0.680	16.267	0.140	37.320	1161.315	1850.325	1161.315	
7	Holzdielen	0.0000	800.000	0.130	20.000	0.000	16.267	0.000	37.320	1161.315	1850.325	1161.315	
8	Fehlbodenschüttung	0.1000	1.200	0.130	1.000	0.769	18.750	0.100	37.420	1163.869	2163.633	1163.869	
9	Putzträger	0.0200	500.000	0.100	2.000	0.200	19.396	0.040	37.460	1164.891	2252.329	1164.891	
10	Innenputz	0.0200	1400.000	0.350	10.000	0.057	19.580	0.200	37.660	1170.000	2278.248	1170.000	
	Innenübergang					0.130	20.000			Diff-Strom kg/(m ² h)	Diff-Menge kg/(m ² a)	Eindiff	0.000
	SUMME	0.614				9.294						Ausdiff	0.000
	U-Wert W/(m²K)		0.108					37.660		0.000017	0.0245	Tauwasser	0.000

Tabelle 21: Berechnungsgang Geschossdecke mit 200 mm Dämmung

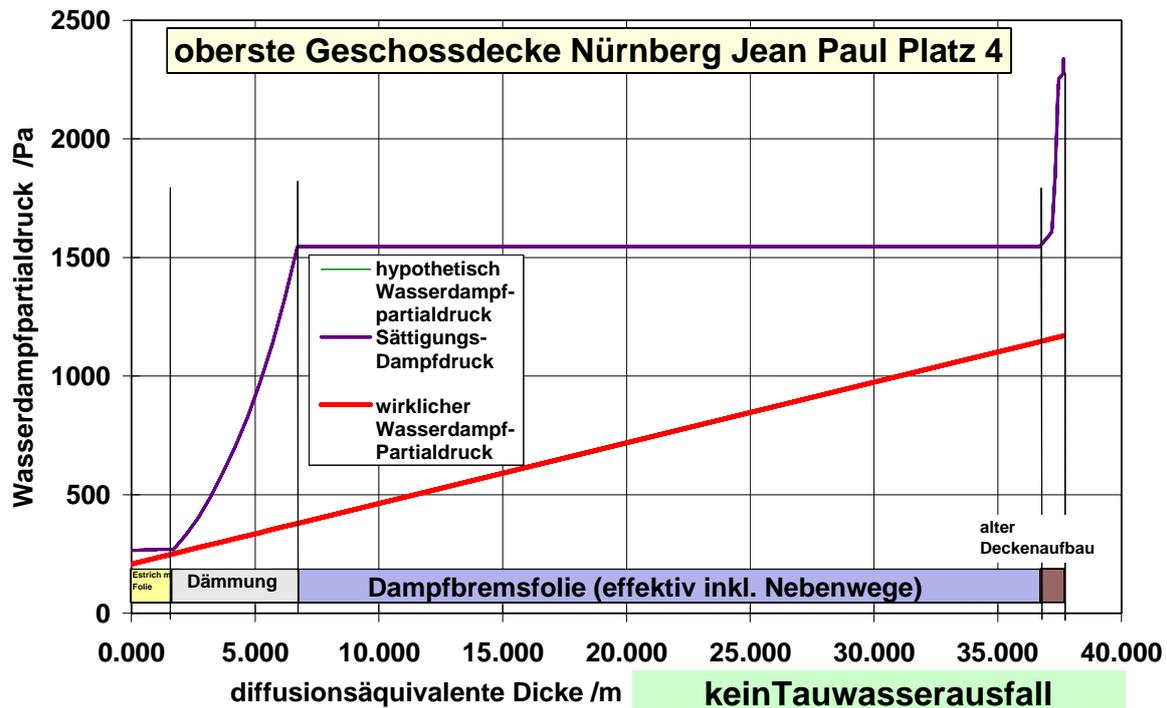


Abbildung 19: Glaserdiagramm für die Geschossdecke nach Aufbringung der Dämmung

Solange s_D der Folie unter dem Estrich kleiner bleibt als 1.3 m gibt es in der gesamten Konstruktion keinen Tauwasserausfall (Nebenwege berücksichtigt, jedoch Luftdichtheit vorausgesetzt, Abbildung 19). Entscheidend ist, dass die Luftdichtheit in der Ebene der Dampfbremssfolie auf der bestehenden Dielendecke sorgfältig hergestellt wird. Vgl. dazu unseren Vorschlag zur Vorgehensweise an den kritischen Durchdringungen (S. Abbildung 20, Abdichtung mit Anhydritschlemme).

Vorschläge zur Luftdichtheit der Gebäudehülle

Luftdichtheit der Außenwand

Die Luftdichtheit der Außenwand kann wegen der einmündenden Holzbalkendecken nicht wie im Neubau üblich durch den Innenputz hergestellt werden. In diesem Modernisierungsprojekt soll daher erstmals versucht werden, die Luftdichtheit durch eine vollflächige Verklebung des Wärmedämmverbundsystems herzustellen. Grundsätzlich ist dies möglich, es setzt aber eine gewissenhafte Verarbeitung voraus.

Luftdichtheit der Kellerdecke

Die Kellerdecke ist eine von unten verputzte Rippendecke. Auch hier soll die Luftdichtheit durch eine flächige Verklebung der von unten aufzubringenden Dämmung erreicht werden.

Luftdichtheit der obersten Geschossdecke

Die oberste Geschossdecke ist eine Holzbalkendecke. Im Ausgangszustand kann nicht von einer ausreichenden Dichtheit ausgegangen werden. Dies ist bei diesem Bauteil nicht nur mit erhöhten Wärmeverlusten, sondern auch mit einer erhöhten Gefahr von Feuchteschäden durch konvektiven Wasserdampftransport und Tauwasserbildung verbunden. Diese Gefahr ist auch nach Aufbringung der Dämmung gegeben, so dass die Erstellung einer durchgehend luftdichten Ebene hier von besonderer Wichtigkeit ist.

Die Luftdichtheit soll durch eine auf den bestehenden Dielenboden unmittelbar aufgelegte PE-Folie hergestellt werden. Diese Folie ist zugleich als Dampfbremse geeignet. Das Verfahren ist im Grundsatz richtig, jedoch muss besonders auf die Herstellung der luftdichten Anschlüsse dieser Folie an die vorhandenen Problembereiche geachtet werden (vgl. unten).

Grundsätzlich muss diese Folie auch unterhalb der Kaminaufbauten verlegt werden und sie muss an den verbleibenden Durchstosspunkten an die Kamine bzw. deren Betonaufleger angeschlossen werden.

Luftdichter Anschluss Außenwand/Kellerdecke

Die Luftdichtheithülle ist zwischen Klebeschicht außen (WDVS) und innen (Kellerdeckendämmung) streng genommen unterbrochen (auch Vollmauerwerk ist nicht luftdicht); erst der Drucktest wird eine Bewertung erlauben. Immerhin wird das WDVS und die Innendämmung jeweils ein Stück an der Wand herunter geführt, sodass die Undichtigkeit reduziert wird.

Luftdichter Anschluss Treppenhaukopf Wand/Decke

Eine Abdeckung mit diffusionsoffener Bahn ist im Prinzip in Ordnung (Tyvek), es sollte aber keine Unterspannbahn verwendet werden (Löcher). Der Anschluss dieser Bahn an die auf dem DG-Boden ausgebreitete Folie muss hergestellt werden. Als Reihenfolge des Bauablaufes schlagen wir vor

1. Treppenhaukopf oben dämmen;
2. diffusionsoffene Bahn über Treppenhaukopf anbringen
3. WDVS an den Wänden des Treppenhaukopfes anbringen; Folie vom Kopf in die Spachtelung des WDVS einbinden; unten Folie für den Anschluss an die Folie auf dem Dachboden einbinden
4. Gipsabdichtung der Abseitenwänden und der anderen Problemstellen
5. Folie auf der Dachgeschossdecke ausbreiten
6. Folienschürze Treppenhaukopf an Dachboden-Folie anschließen
7. Dämmarbeiten der Dachgeschossdecke

Luftdichter Anschluss Kniestock an Dachboden

Vorschlag des PHI zur Vorgehensweise:

A: trage so viel wie zulässig von der Kniestockwand oben ab (Dreck entfernen)

B: durchgehenden Glattstrich mit Gips auf dem Kopf des Kniestocks; auch die Lücken zum Streifbalken mit Gips volllaufen lassen.

**C: Folienstreifen für Luftdichtheitsanschluss an Dachbodenfolie
später im Bauablauf**

D: Folie auf dem Dachboden verlegen und anschließen

E: Dämmung Kniestock und Kopf (Mineralwolle) ausführen

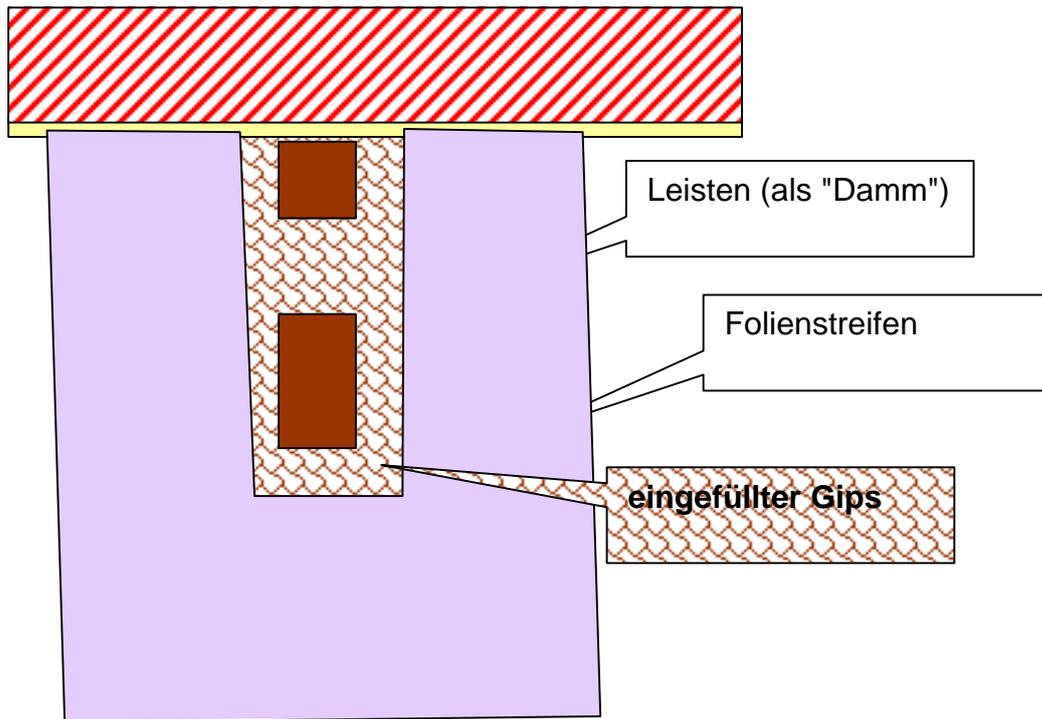
Abdichtung der durchdringenden Balken des Tragwerkes auf dem Dachboden

Die luftdichte Ebene soll im Bereich des Dachbodens durch eine Folie, die auf den zur Zeit genutzten Dielenbelag aufgelegt wird, hergestellt werden. In regelmäßigen Abständen wird diese Ebene im Bereich des Drempelmauerwerks von senkrecht stehenden Balken, auf denen die Fußfette aufgelegt ist und von schräg verlaufenden Balken des Dachtragwerks durchstoßen. Hier ist die Folie in geeigneter Weise an diese Durchdringungen anzuschließen. Die Schwierigkeit besteht darin, in Faserrichtung verlaufende Risse des Holzes möglichst gut abzudichten. Der Anschluss der Folie an die Holzbalken mit Spezial-Klebebändern, die in solchen Fällen 'üblicherweise' zur Anwendung kommen, ist aus Sicht des PHI hier nicht ausreichend. Mit einem Klebeband mit einer Breite von ca. 6 cm, das quer zu einem z. B. 20-30 cm langen (und 1 - 2 cm tiefen) Riss verläuft, ist eine luftdichte Ebene in der erforderlichen Güte nicht zu realisieren.

Der Vorschlag des PHI zur Herstellung der Luftdichtheit an diesen Stellen soll durch die folgende Abbildung 20 und die stichpunktartig beschriebenen Arbeitsschritte verdeutlicht werden:

- a) Umgebung der Durchstoßung reinigen
- b) Folienstreifen um die Durchstoßung herumlegen, stehende Breite ca. 20 cm ringsum
- c) ca. 10 mm hohe Leisten (z.B. Bilderrahmenleisten) um die Durchstoßung herumlegen und festnageln, ca. 30 bis 50 mm Folie sollte innerhalb der Leisten stehen bleiben
- d) breite Ritzen in den Dielen, in den Balken und zwischen Balken und Dielen bzw. Wand so mit Fasern (oder auch Papier) verstopfen, dass der unter e) verwendete Gips nicht einfach wegfließen kann
- e) derart vorbereitete Stelle mit flüssigem Gips, Mindesthöhe 5 mm, ausgießen. Die Ausstopfmateriale nach d) dürfen nicht aus dem Gips herausragen. Der Gips sollte ruhig in alle Ritzen des Holzbalkens etc. eindringen. Er muss den Folienstreifen mindestens 30 mm überdecken
- f) wenn die Leisten nach c) stören, können sie nach dem Aushärten des Gipses wieder entfernt werden; sie dürfen aber auch stehen bleiben;
- g) Folien der Dichtbahn, die auf der Dachgeschossdecke verlegt wird, über die Folienstreifen nach b) legen und dort verkleben
- h) EPS-Dämmung nur bis an die Leisten nach c) heranlegen; Bereich um die Balken herum mit Mineralwolle (oder Zellulosedämmstoff) ausstopfen

Skizze Draufsicht:



Skizze Schnitt:

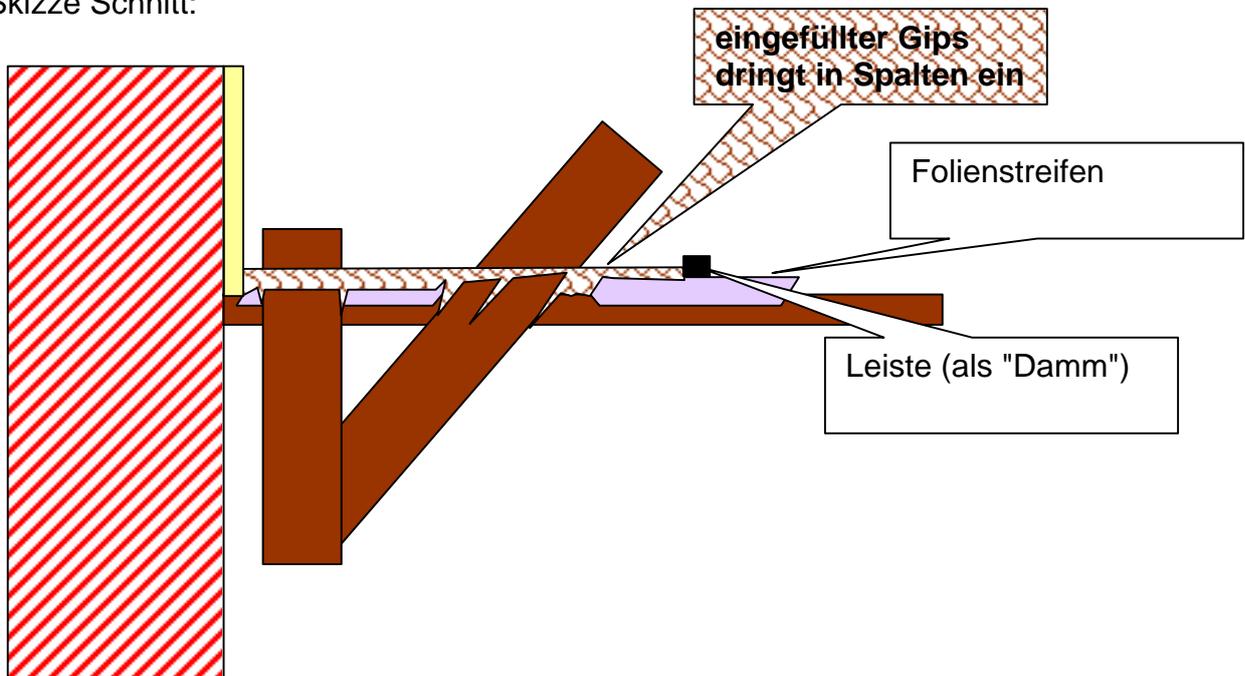


Abbildung 20: Skizze zur Herstellung der Luftdichtheit bei der durchdringenden Tragkonstruktion der obersten Geschossdecke

Anmerkungen zum Lüftungskonzept

Zuluffführung: Die Anordnung der Weitwurfdüsen über der Tür hat sich bereits bei zahlreichen Objekten als günstig herausgestellt (Über der Türe kann die Öffnung nicht durch Möbel etc. verstellt werden) und wurde hier auch weitgehend umgesetzt. Eine Ausnahme stellt hier das Zimmer 3 dar, dort wurde die Düse seitlich versetzt angeordnet. Wenn baulich möglich, sollte die Düse auch hier über die Tür gesetzt werden.

Abluffführung: Im Gegensatz zur Zuluffführung ist es bei der Abluffführung i.a. nicht möglich das Ablufttellerventil direkt über die Türe zu setzen, weil sich hier in unmittelbarer Nähe die Überströmöffnung befindet. Diese Anordnung würde zu einer Kurzschlussströmung führen, der Abluftraum würde unzureichend entlüftet. Von besonderer Bedeutung ist dies im vorliegenden Vorhaben im Küchenbereich. Das Abluftventil sollte zur raschen Abführung der Kuchendämpfe etwa im Bereich zwischen Herd und Spüle angeordnet werden. Die Dunstabzugshaube darf natürlich nicht an die Abluft angeschlossen werden (Ausführung im Umluftbetrieb).

Eine ähnliche Situation ist in den Bädern gegeben, auch hier sollte die Abluftöffnung möglichst nahe an der Feuchtequelle (Dusche, Badewanne) positioniert werden. Allerdings ist die Grundfläche der Badezimmer relativ klein, sodass die Anordnung wie eingezeichnet zwar nicht optimal, aber noch vertretbar erscheint (Wasserdampf wird an der Decke auch im Türbereich relativ rasch abgezogen).

Außen-/Fortluftführung: Zur Vermeidung von Umluft (Ansaugung von Fortluft in den Außenluftöffnung) ist auf möglichst gute Trennung der Luftströme zu achten (Geruchsbelästigung).

Anhang: Konstruktionszeichnungen der Details, für die eine Wärmebrückenberechnung durchgeführt wurde



**PASSIV
HAUS
INSTITUT**

Dr. Wolfgang Feist

Passivhaustechnik im Gebäudebestand - Qualitätssicherung für das Bauvorhaben Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg

im Auftrag der

**Wohnungsbaugesellschaft
der Stadt Nürnberg mbH
Glogauer Straße 70
90473 Nürnberg**

**Endbericht
Januar 2003**

PASSIVHAUS INSTITUT
*Rheinstr. 44/46
D-64283 Darmstadt
Tel: 06151 8 26 99-0
Fax: 06151 8 26 99-11*

*Autoren: Dr. Wolfgang Feist,
Markus John, Oliver Kah*

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	2
2	Termin zur Qualitätssicherung am 19.11.02: Thermografie der Außenfassade.....	3
2.1	Ostfassade.....	4
2.2	Nordfassade.....	6
2.3	Westfassade	9
2.4	Südfassade	10
2.5	Untersuchungen an der obersten Geschosdecke inkl. Überdruckthermografie der obersten Geschosdecke.....	19
3	Innenthermografie am 19.11.2002.....	30
4	Blower Door Messung zur Qualitätssicherung während der Bauphase.....	37
5	Bestimmung von Luftaustausch-Kennzahlen zur Überprüfung der Lüftungsanlagen.....	43
5.1	Volumenströme an Zu-und Abluftventilen	43
5.2	Messaufbau und –ablauf der Indikatorgas-Messungen	44
5.3	Luftwechsel-Messungen	45
5.4	Luftalter-Messungen und Lüftungswirksamkeit.....	46
5.5	Diagramme zu den Indikatorgas-Messungen.....	47
6	Thermografie zur Bauabnahme am 17.12.2002.....	50
7	Thermografie Dachboden	63
8	Heizraum - Zustand vom 17.12.2002.....	80
9	Thermografische Kontrolle der Dämmung der Kellerdecke.....	83
10	Innenthermografie.....	97
11	Innenthermografie mit Unterdruck.....	111

1 Einleitung

Für das Passivhaus geeignete Komponenten wurden ursprünglich vor allem im Hinblick auf einen Einsatz bei Neubauten entwickelt. Von Anfang an wurde jedoch der Altbaubestand nicht aus dem Auge gelassen: Liegen doch vor allem beim Altbau die bedeutenden Energieeinsparpotenziale. Die Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz, wie sie im Passivhaus zum Einsatz kommen, sind prinzipiell auch für die nachträgliche energetische Ertüchtigung von Altbauten geeignet. In einem ersten Demonstrationsprojekt wurde ein Geschosswohnungsbau (Jean-Paul-Platz 4) der **Wohnungsbaugesellschaft der Stadt Nürnberg mbH** durch den Architekten Burkhard Schulze Darup (Nürnberg) unter Einsatz von Passivhauskomponenten modernisiert.

Im Auftrag der Wohnungsbaugesellschaft der Stadt Nürnberg hat das Passivhaus Institut beim Bauprojekt "Modernisierung des Geschosswohnungsbaus Nürnberg, Jean-Paul-Platz 4" baubegleitend Qualitätssicherungsmaßnahmen durchgeführt.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse.

Die Berechnungen der zweidimensionalen Wärmeströme wurden mit dem Wärmebrückenprogramm Bisco (Version 5.1w) der Firma Physibel, Belgien, durchgeführt. Die thermografischen Aufnahmen wurden mit dem hochauflösenden Thermografie-system VARIOSCAN high resolution der Firma Jenoptik (Jena) aufgenommen. Zur Bearbeitung der Aufnahmen wurde das Programm IRBIS+ der Firma InfraTec GmbH (Dresden) verwendet.

2 Termin zur Qualitätssicherung am 19.11.02: Thermografie der Außenfassade

Zur Kontrolle des Einbaus der Fenster und der Dämmung des zum Teil schon angebrachten Wärmedämmverbundsystems (WDVS) wurden von allen Fassaden Thermografieaufnahmen während des Bauprozesses angefertigt.

Durch die an das Baugerüst gehängten Säcke mit Dämmung (WDVS) war es nur bei einem Teil der Fenster möglich, sie von außen mit der Thermografiekamera zu erfassen.

Um eine möglichst gute Auflösung der Thermografiebilder zu erreichen, wurden Teilflächen der Fassaden mit der Zoomfunktion des Systems aufgenommen.

Auf der Südseite des Gebäudes wurde der Einbau des ersten Fensters von links im Erdgeschoss exemplarisch genauer untersucht. Die Thermografieaufnahmen belegen, dass hier der Einbau des Fensters ordnungsgemäß durchgeführt wurde.

Eine aussagekräftige Beurteilung der Qualität der Außenhülle (korrekter Einbau der Fenster und gut ausgeführte Überdämmung der seitlichen und oberen Blendrahmen, Luftdichtheit der Hülle, Wärmebrückenfreiheit) ist erst nach Abschluss der Bauphase durch die Thermografie in Verbindung mit einem Unterdrucktest möglich; vgl. dazu Kapitel 6 dieses Berichtes.

2.1 Ostfassade



Abbildung 1: Ansicht der Ostfassade. Hier sind die Dämmplatten des WDVS bis auf eine kleine Stelle im Süden/oben bereits aufgebracht, aber noch nicht verputzt. Dagegen ist die Außenwand des Obergeschosses auf der Nordseite noch nicht gedämmt.

Die Temperatur auf der Oberfläche der bereits gedämmten Bereiche ist ziemlich einheitlich (zwischen 6,8 und 7,4 °C, vgl. Abbildung 2).

Dagegen beträgt die mittlere Temperatur auf dem noch ungedämmten Kniestock (oben links) etwa 8,7 °C.

Auffällig sind die Temperaturerhöhungen oberhalb der beiden gekippten Fenster (oben links und unten rechts).

Das Fenster oben/Mitte ist dagegen geschlossen. Die erkennbare Temperaturerhöhung ist durch die Wärmebrücke des Glasrandverbundes und die Konvektion des Füllgases im Verglasungszwischenraum bedingt.

Der Wärmebrückeneffekt der Abstandhalter ist auch bei den übrigen Verglasungen gut zu erkennen.

Eine weitere Erhöhung der Oberflächentemperatur ist im Bereich der Kellerwände zu erkennen (unterer Streifen mit Temperaturen um 8,5 °C).

Die Bilder zeigen keinen Hinweis auf Ausführungsmängel.

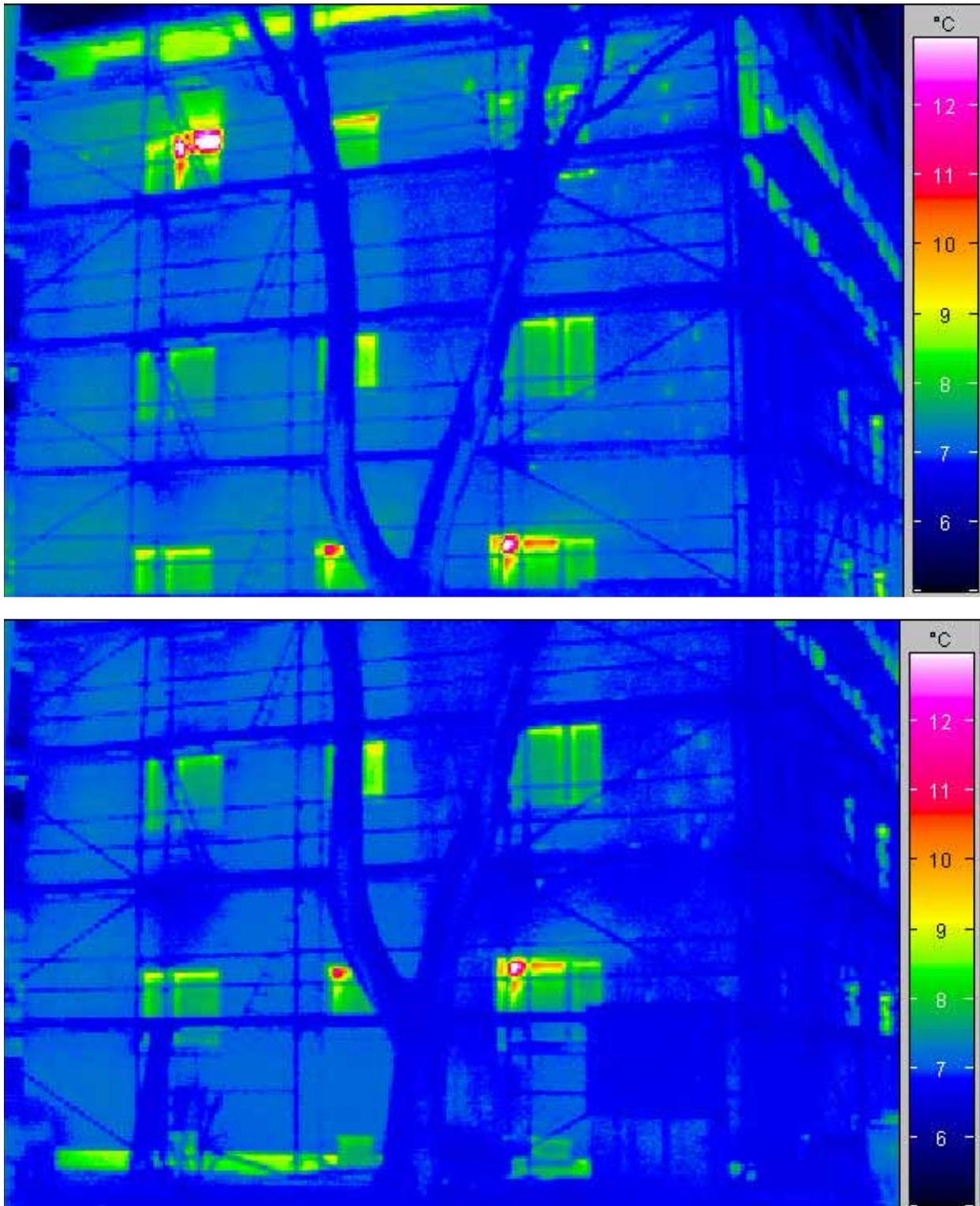
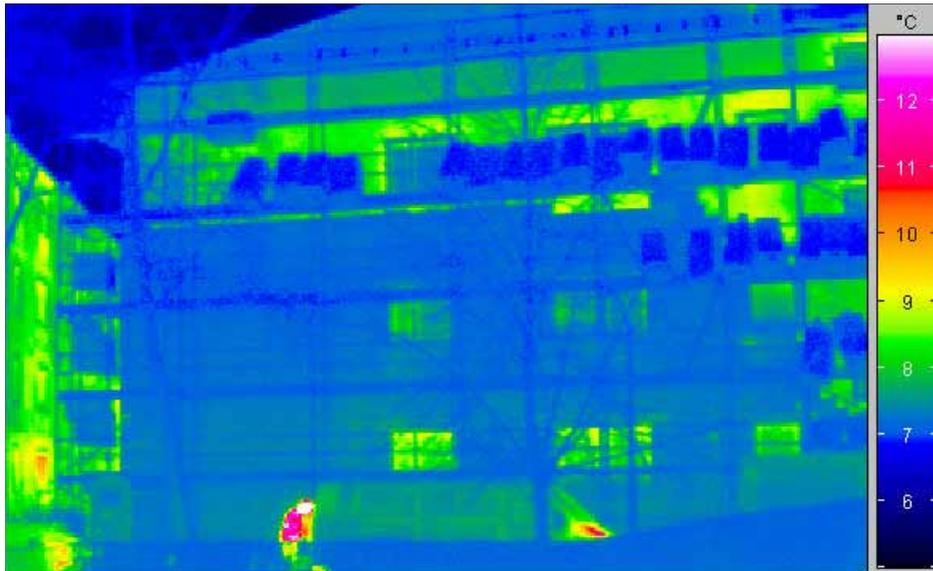


Abbildung 2: Thermografiebilder der Ostfassade, oberer und unterer Teil.

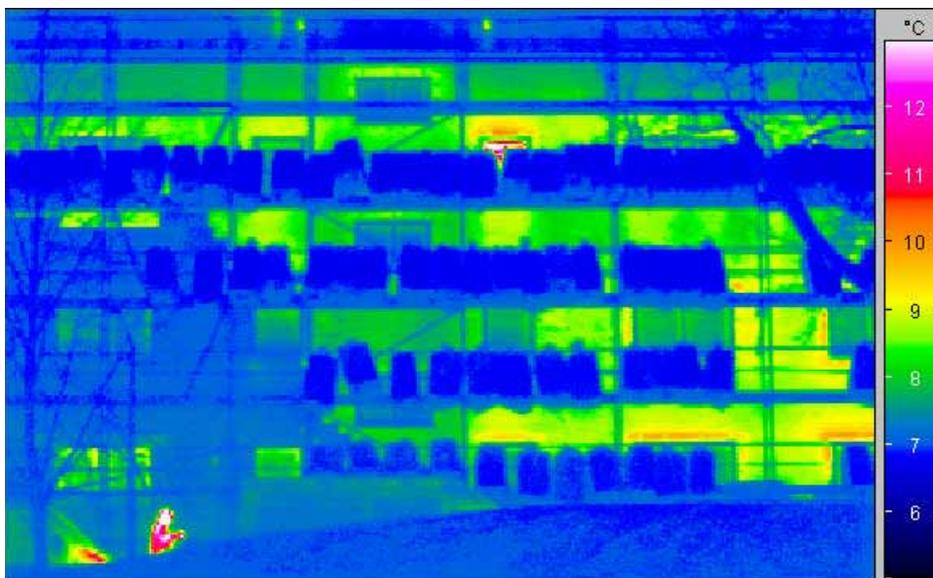
2.2 Nordfassade



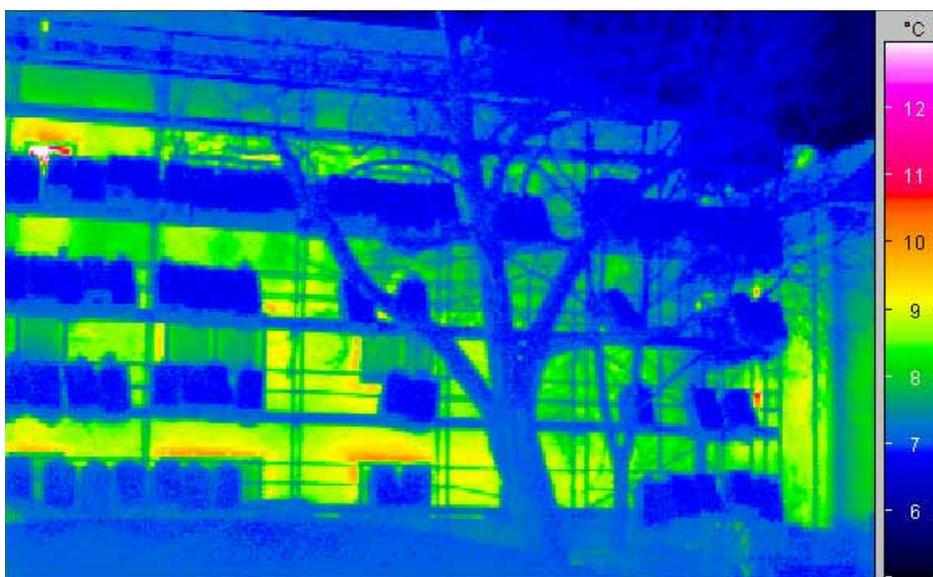
Abbildung 3: Ansichten des östlichen (oben) und des westlichen Bereichs (unten) der Nordfassade.



Die Wärmedämmung ist bisher nur bei den unteren beiden Geschossen im östlichen Teil angebracht. Hier gibt es keinen Hinweis auf Ausführungsmängel.



Die ungedämmte Fassade ist deutlich wärmer als Fensterrahmen und Verglasung der neu eingebauten Fenster. Insbesondere die Wärmebrücken im Anschlussbereich der Fenster sind gut zu erkennen. Diese werden später durch die Überdämmung eliminiert.



Der hier abgebildete Bereich der Fassade ist vollständig ungedämmt. Deutlich treten die Wärmebrücken im Anschlussbereich der Fenster, insbesondere am Sturz, hervor.

Abbildung 4: Thermografieaufnahmen des östlichen (oben), mittleren und westlichen Bereichs der Nordfassade.

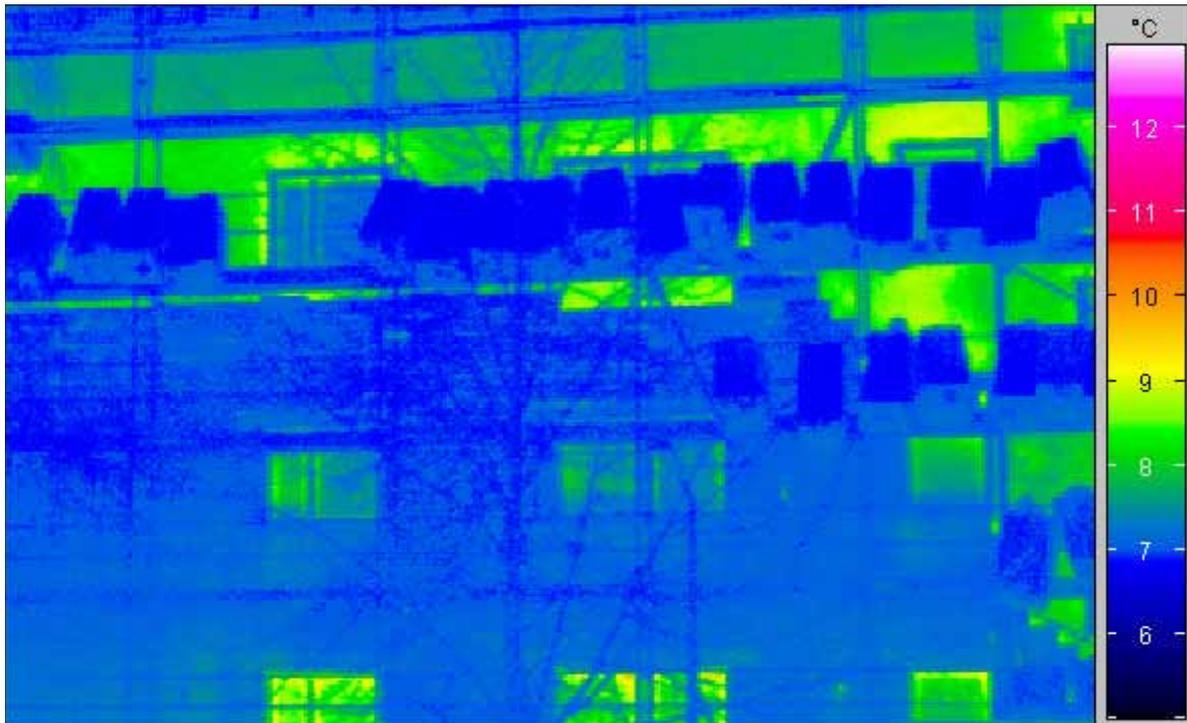


Abbildung 5: Östlicher Teil der Nordfassade. Deutlich ist der Unterschied zwischen der bereits gedämmten Wand (blauer Bereich; links und unten) und der noch ungedämmten Außenwand (grüner Bereich; oben und rechts) zu erkennen.

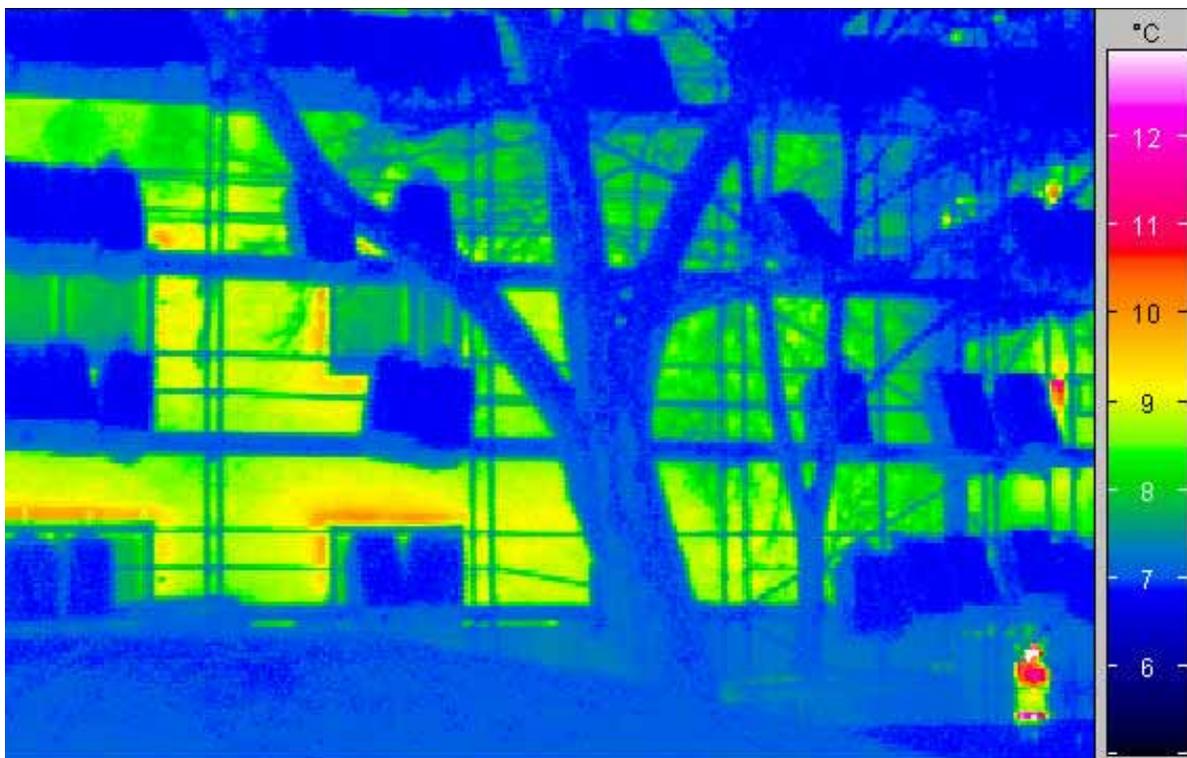


Abbildung 6: Westlicher Bereich der Nordfassade. Es ist noch keine Dämmung auf der Außenwand aufgebracht. Die Bereiche direkt um die Fenster herum weisen die höchsten Oberflächentemperaturen und somit die größten Wärmeverluste auf. Hier ist die Wärmebrückenwirkung am stärksten.

2.3 Westfassade



Abbildung 7: Ansicht der Westfassade.

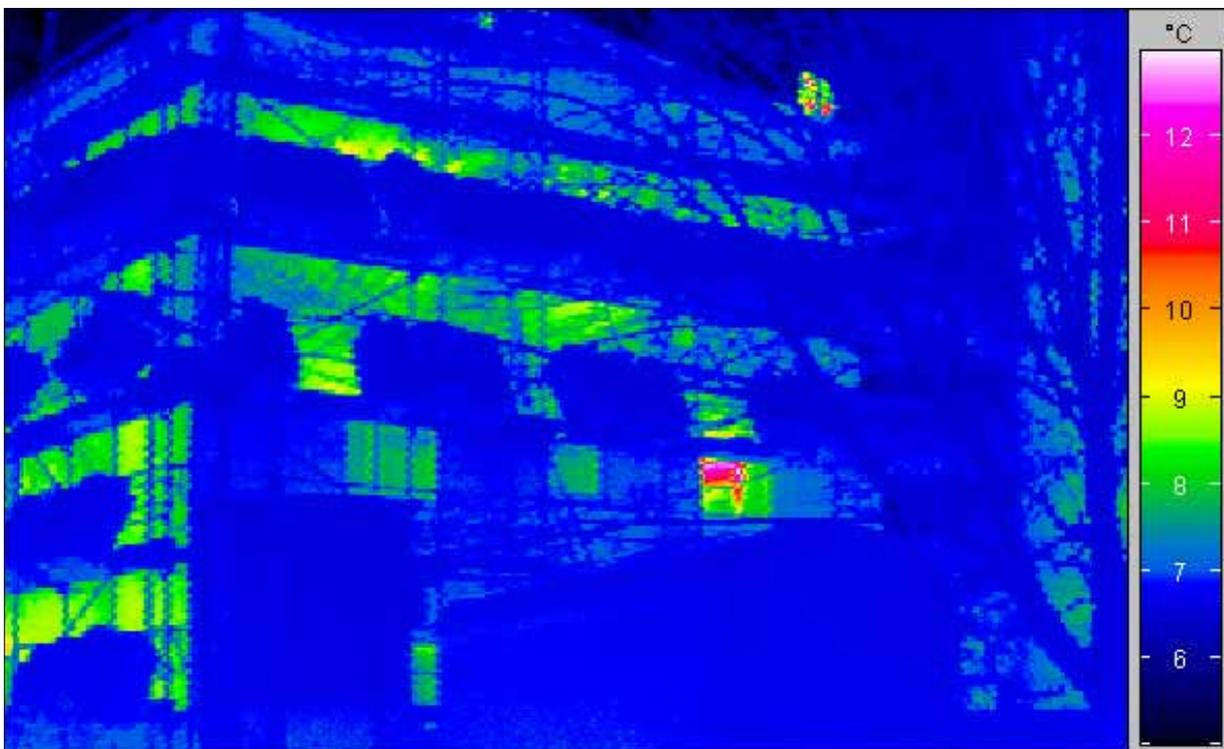


Abbildung 8: Thermografieaufnahme der Westfassade. Im oberen Bereich ist noch keine Dämmung aufgebracht. Das rechte Fenster im 1. OG ist gekippt. Ganz oben rechts auf dem Gerüst sind die Konturen einer Person erkennbar.

2.4 Südfassade



Abbildung 9: Westlicher (oben) und östlicher Teil der Südfassade.

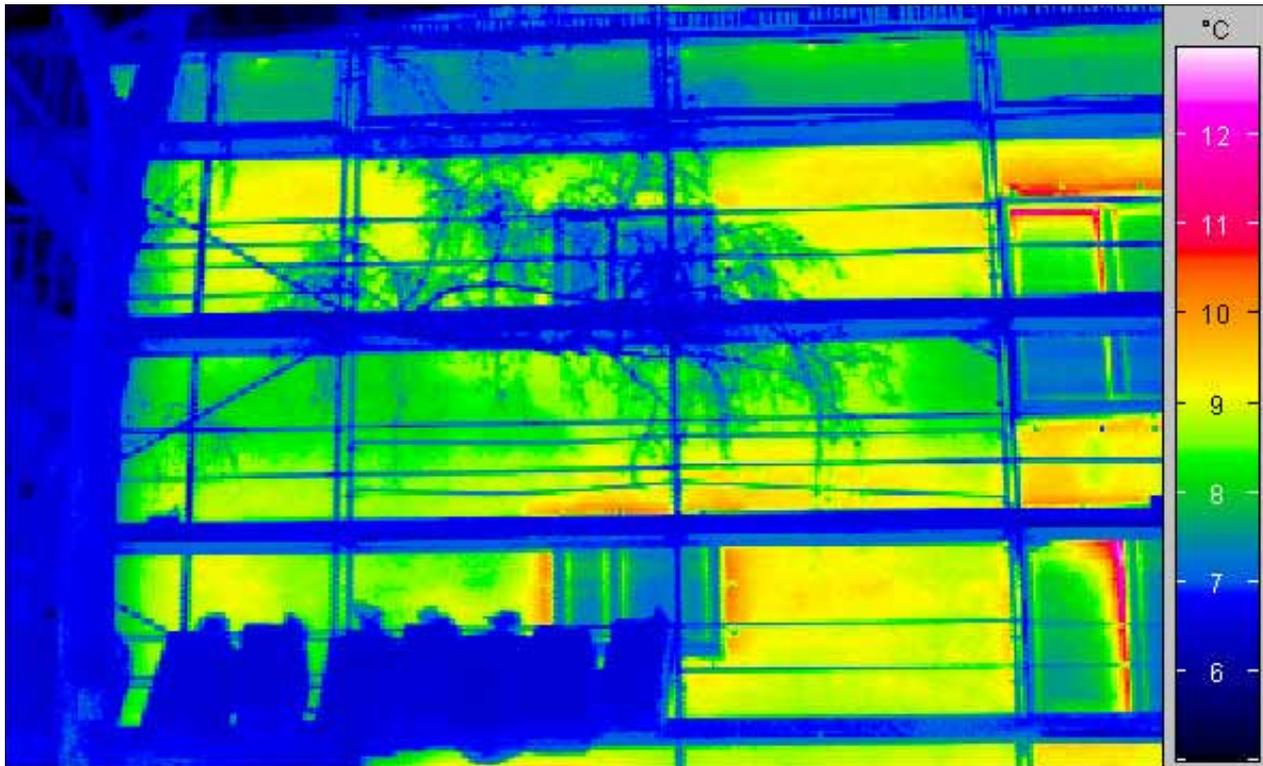


Abbildung 10: Linker, oberer Bereich der Südfassade (ungedämmt).

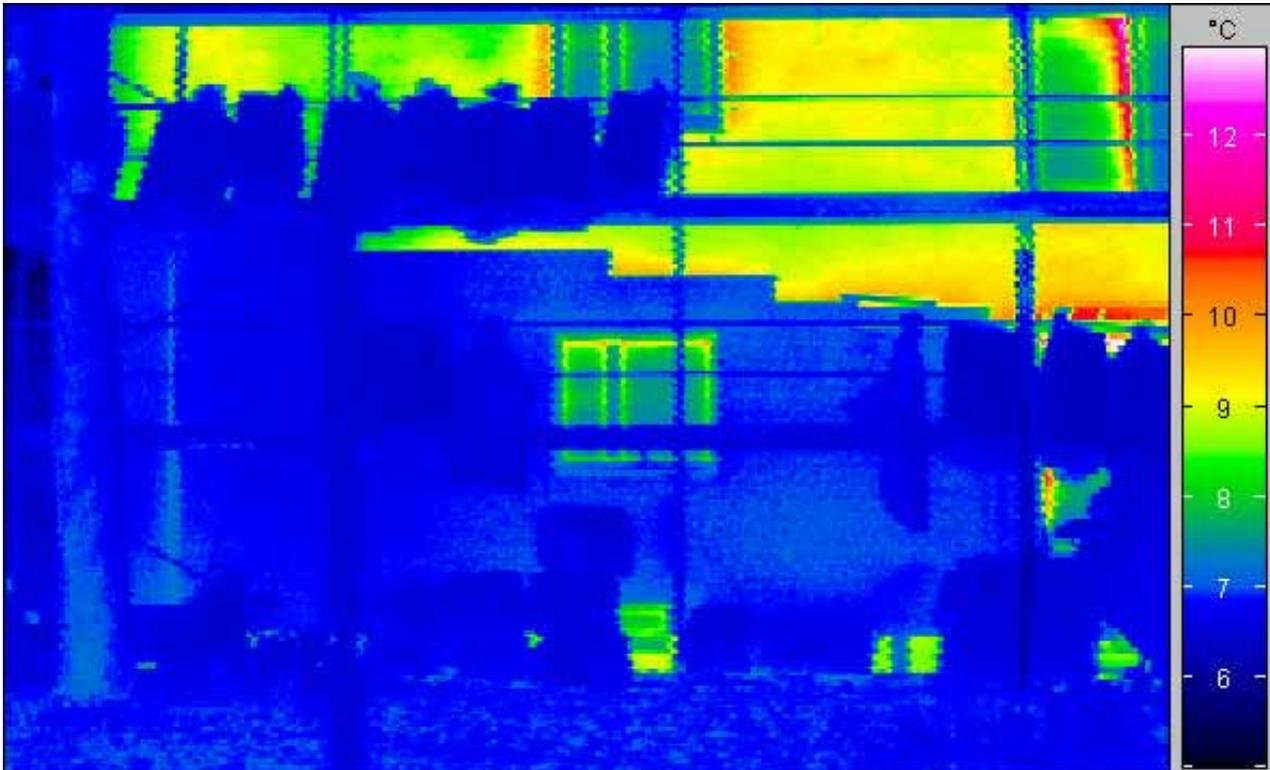


Abbildung 11: Linker, unterer Bereich der Südfassade. Sehr gut ist die Grenze zwischen gedämmt (Oberflächentemperatur um 7°C) und noch nicht gedämmt (Oberflächentemperatur um 9,2°C) erkennbar. Die frei hängenden Säcke sind mit 6,9°C Oberflächentemperatur nicht wesentlich kälter als die bereits gedämmten Außenwandbereiche.

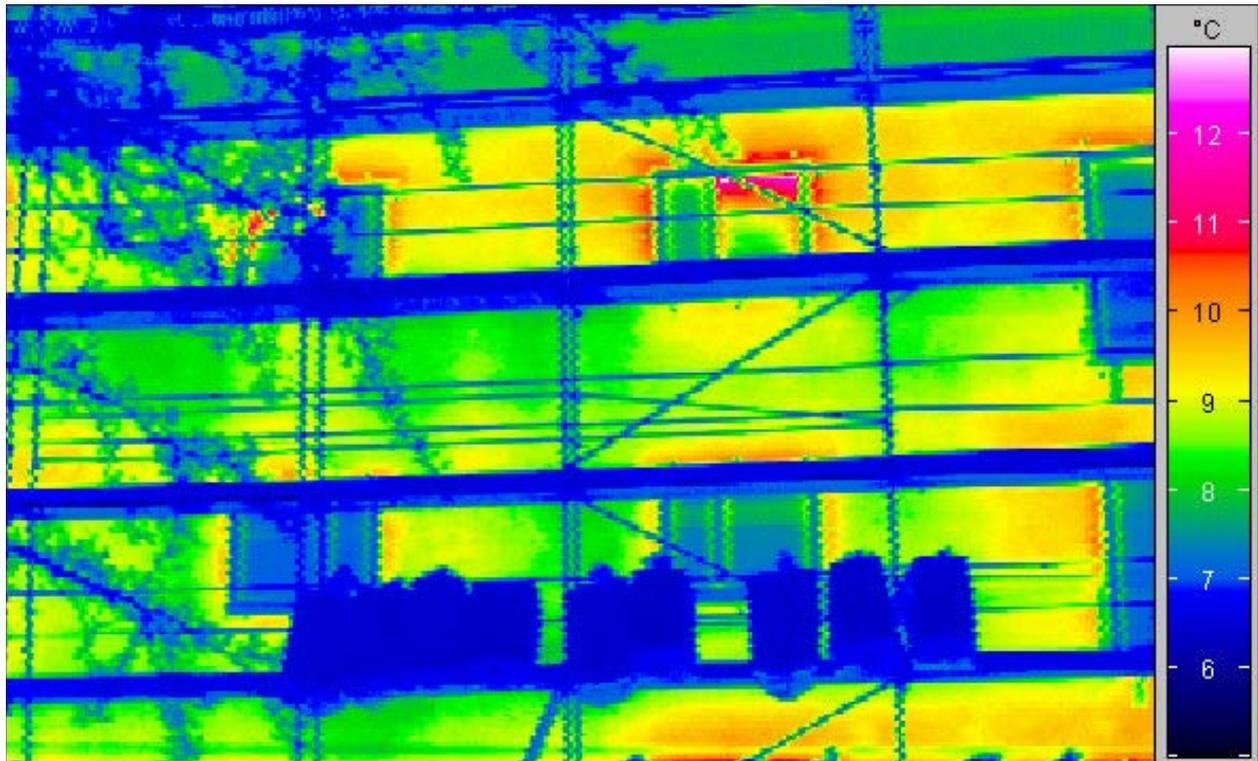


Abbildung 12: Mittlerer, oberer Bereich der Südfassade (ungedämmt; oberes Fenster Mitte gekippt).

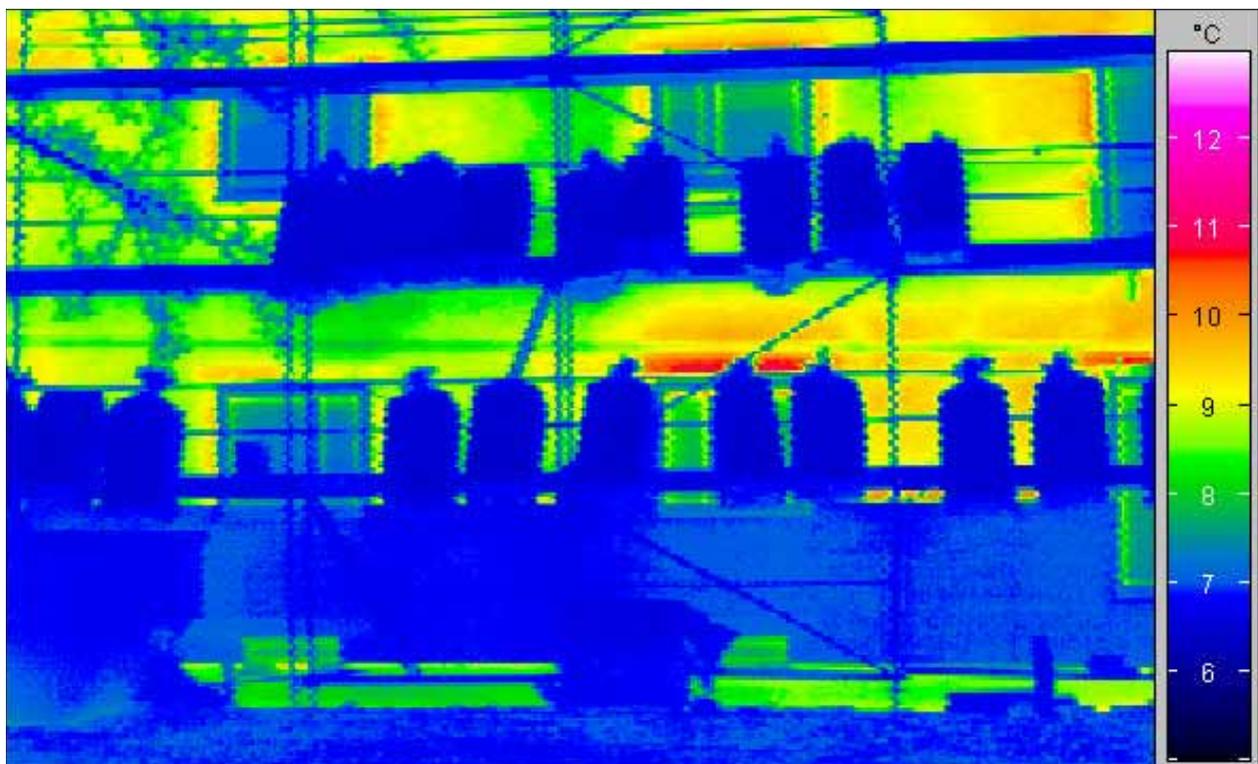


Abbildung 13: Mittlerer, unterer Bereich der Südfassade (ungedämmt)

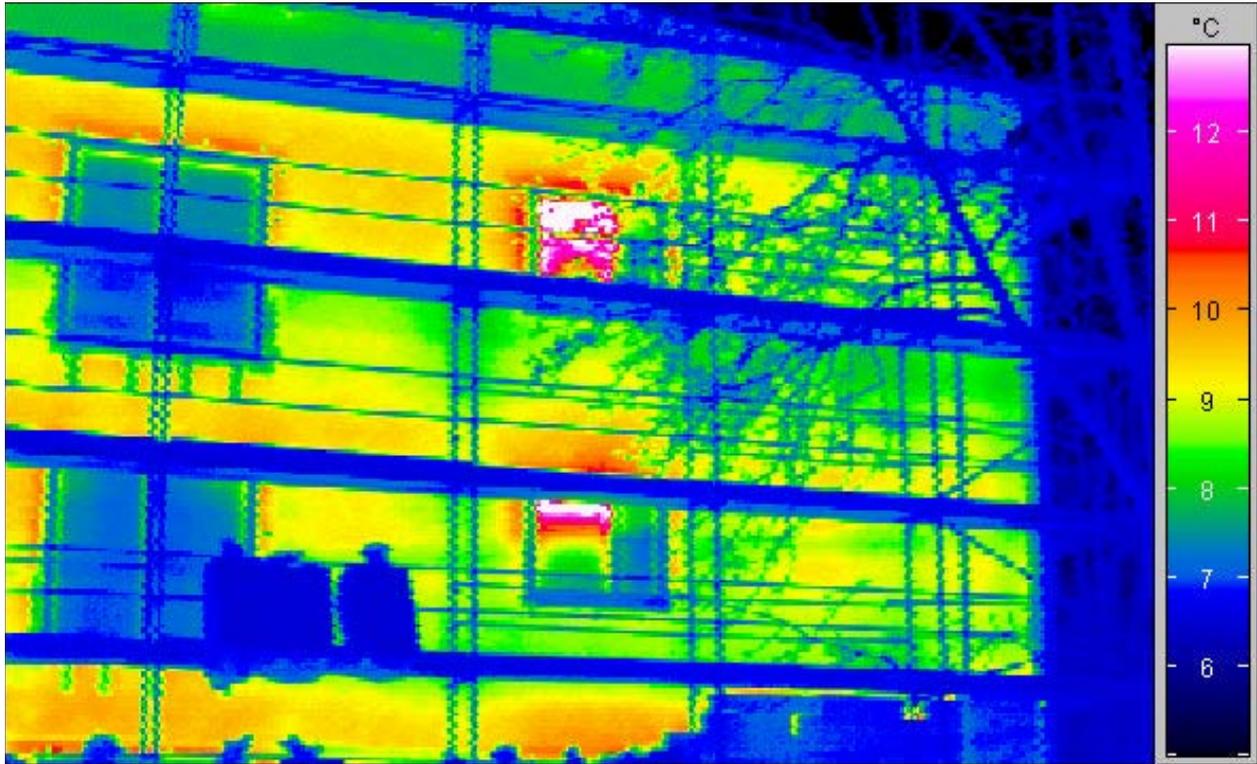


Abbildung 14: Östlicher, oberer Bereich der Südfassade (ungedämmt, zwei Fenster gekippt). Fenstereinbauwärmebrücke und die Wärmebrücke bei der Einmündung der Kellerdecke treten deutlich hervor.

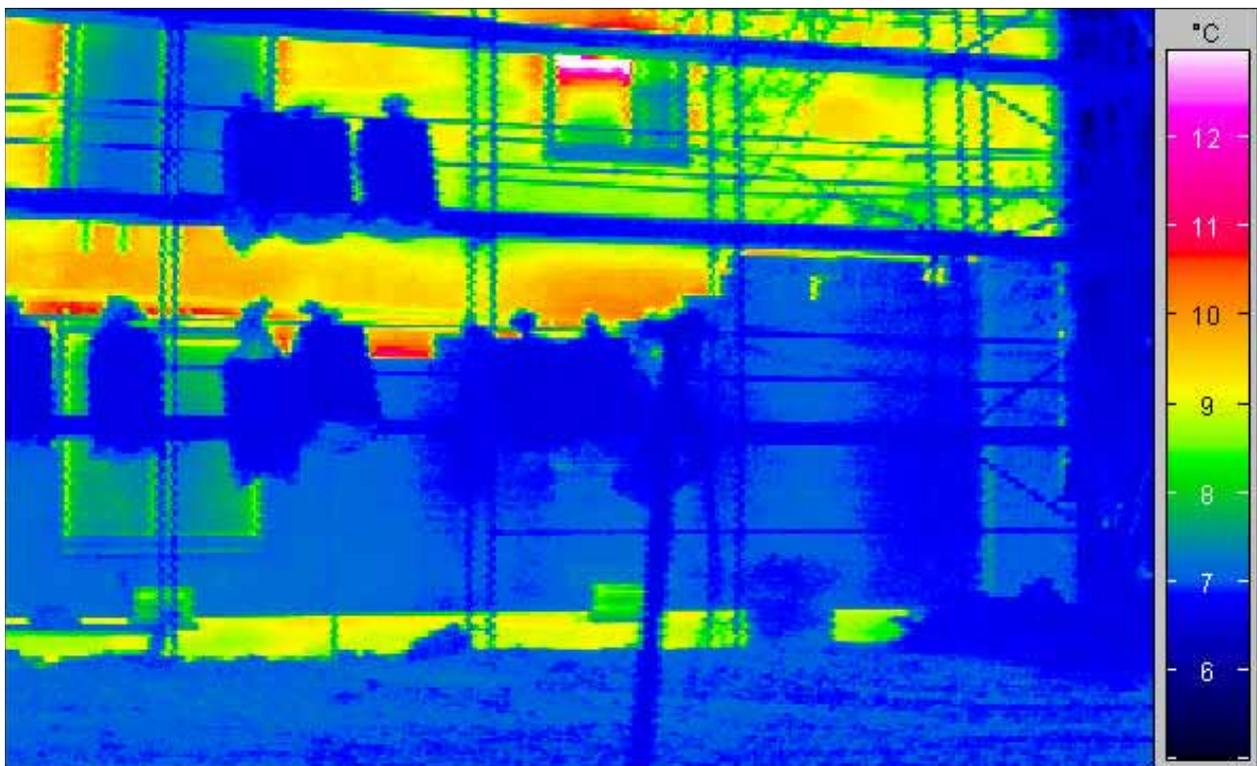


Abbildung 15: Rechter, unterer Bereich der Südfassade (die Dämmgrenze im Bereich der Fensterbrüstung des Erdgeschosses ist gut erkennbar).



Abbildung 16: Raumhohes Fenster bzw. Fenstertür der westlichen Wohnung im 2. OG

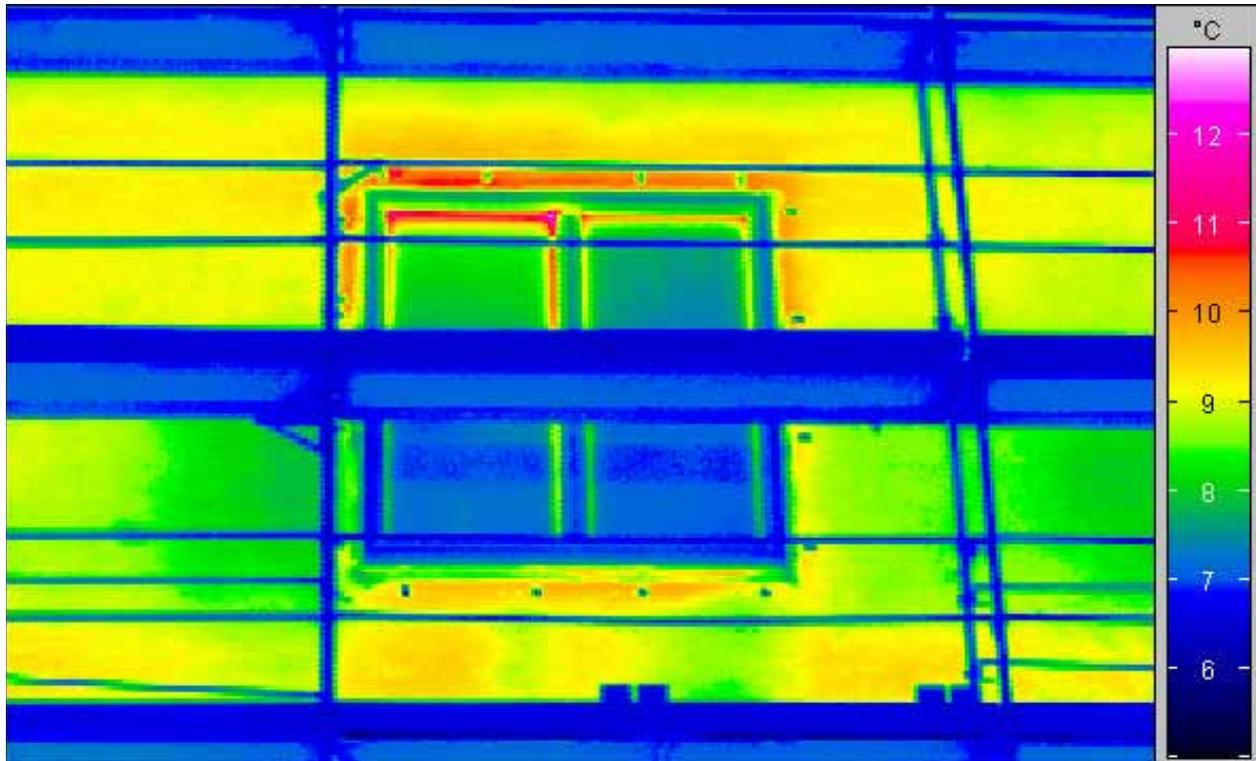


Abbildung 17: Thermografiebild der raumhohen Fenstereinheit. Die Oberflächentemperaturen der Glasflächen liegen unter denen der "alten" ungedämmten Außenwand, ein Beleg für die hohe thermische Qualität der 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung. Die Einbauwärmebrücke ist ebenso erkennbar wie die Temperaturerhöhung im Bereich des Glasrandes.



Abbildung 18: Linkes Fenster der westlichen Wohnung im EG (vgl.: Abbildung 9).

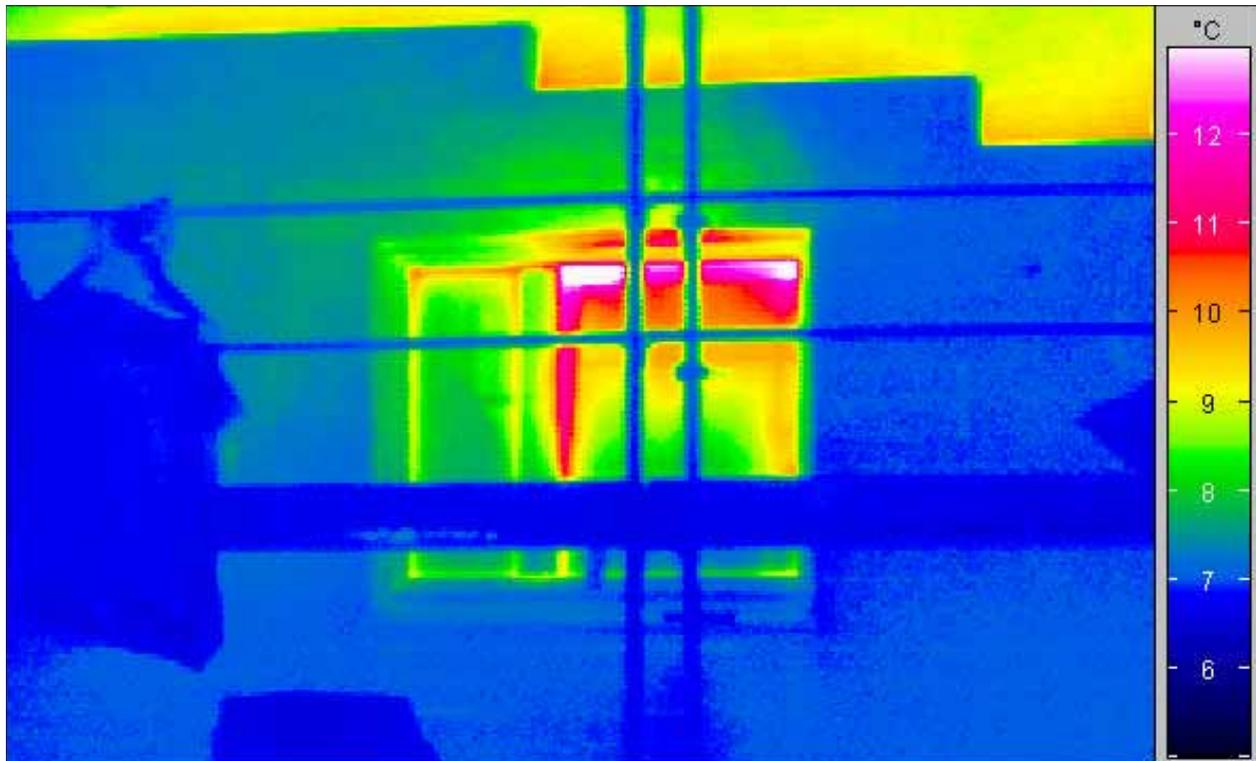


Abbildung 19: Thermografieaufnahme des bereits im gedämmten Bereich liegenden Fensters. Der rechte Fensterflügel ist gekippt, dies ist anhand der versetzten Spiegelungen des Gerüsts in den Glasflächen erkennbar. Durch die Überdämmung des Blockrahmens ist der Wärmebrückeneffekt des Fenstereinbaus verschwunden. In dieser Detailaufnahme ist der Kontrast zwischen gedämmter und ungedämmter Außenwandfläche sehr deutlich.



Abbildung 20: Nahaufnahme des in Abbildung 18 gezeigten Fensters.

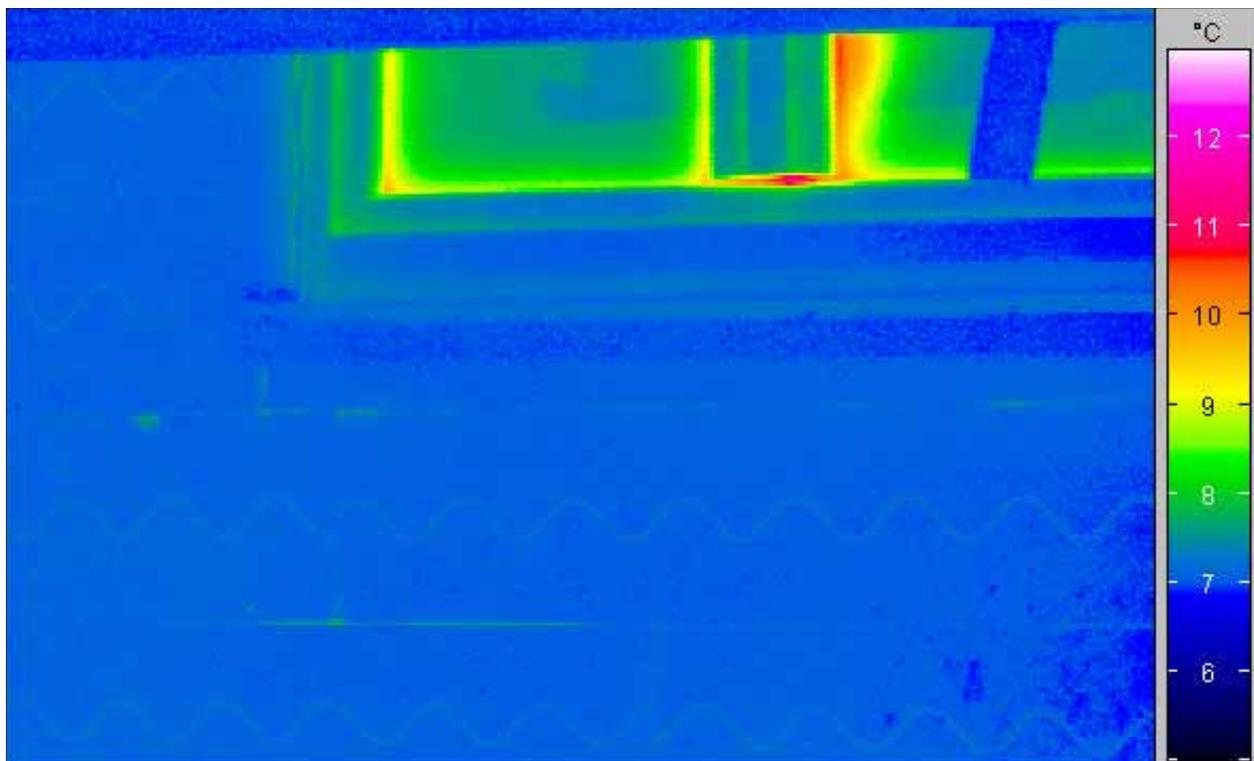


Abbildung 21: Thermografieaufnahme des unteren Fenstereinbaus. Der Einbau ist sehr sorgfältig erfolgt, die Aufnahme zeigt keinerlei Wärmebrückeneffekt. Dagegen ist die Auswirkung des gekippten Fensters sehr deutlich erkennbar. Auch kann man die Auswirkungen von Konvektion durch die offenen Spalte des noch unverputzten WDVS erkennen. Dieser Effekt wird erst mit der Anbringung des Außenputzes unterdrückt.



Abbildung 22: Oberer Bereich des Fensters. Der in Abbildung 18 noch gekippte rechte Fensterflügel wurde kurz vor der Aufnahme geschlossen (Spiegelungen der Gerüststangen).

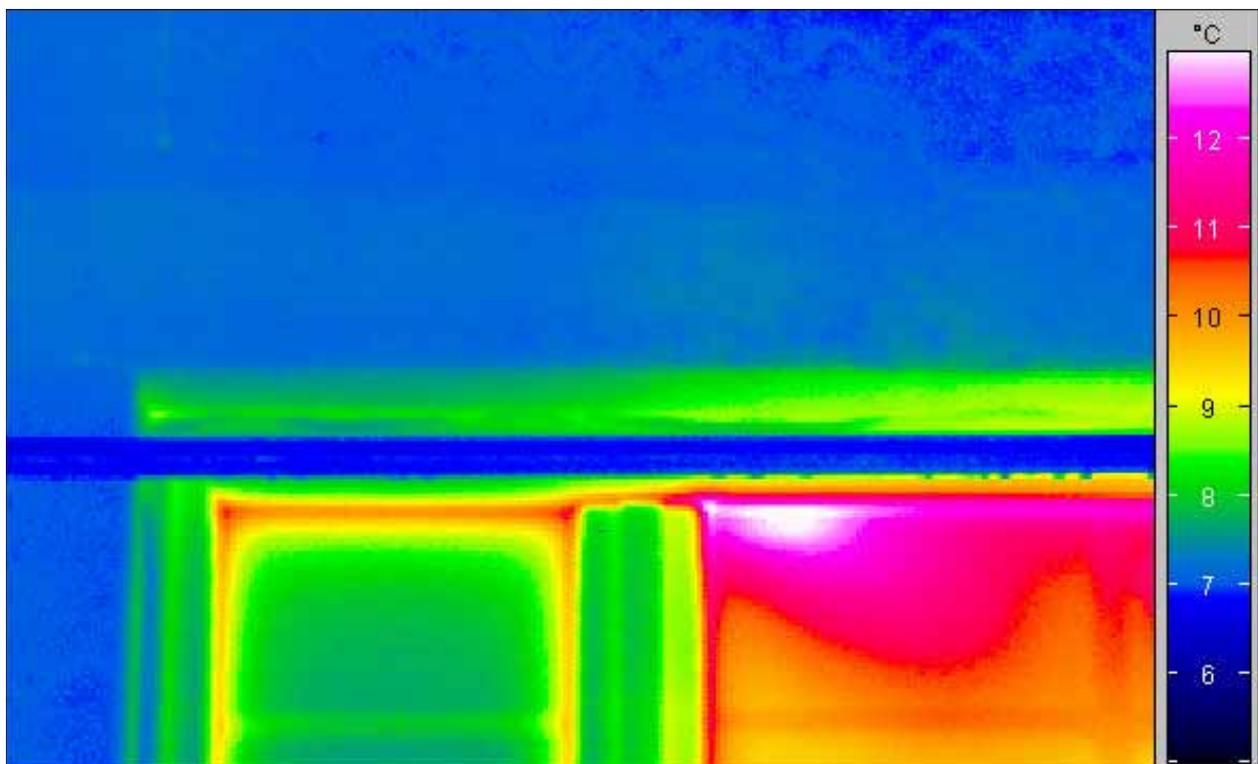


Abbildung 23: Thermografieaufnahme des oberen Fenstereinbaus. Die starke Erwärmung der Oberfläche der rechten Scheibe ist durch die Kippstellung, in der sich dieser Fensterflügel bis kurz vor der Aufnahme befand, zu erklären. Die Überdämmung der Blockrahmen ist fachgerecht ausgeführt.



Abbildung 24: Kellerfenster im Bereich der Südfassade.

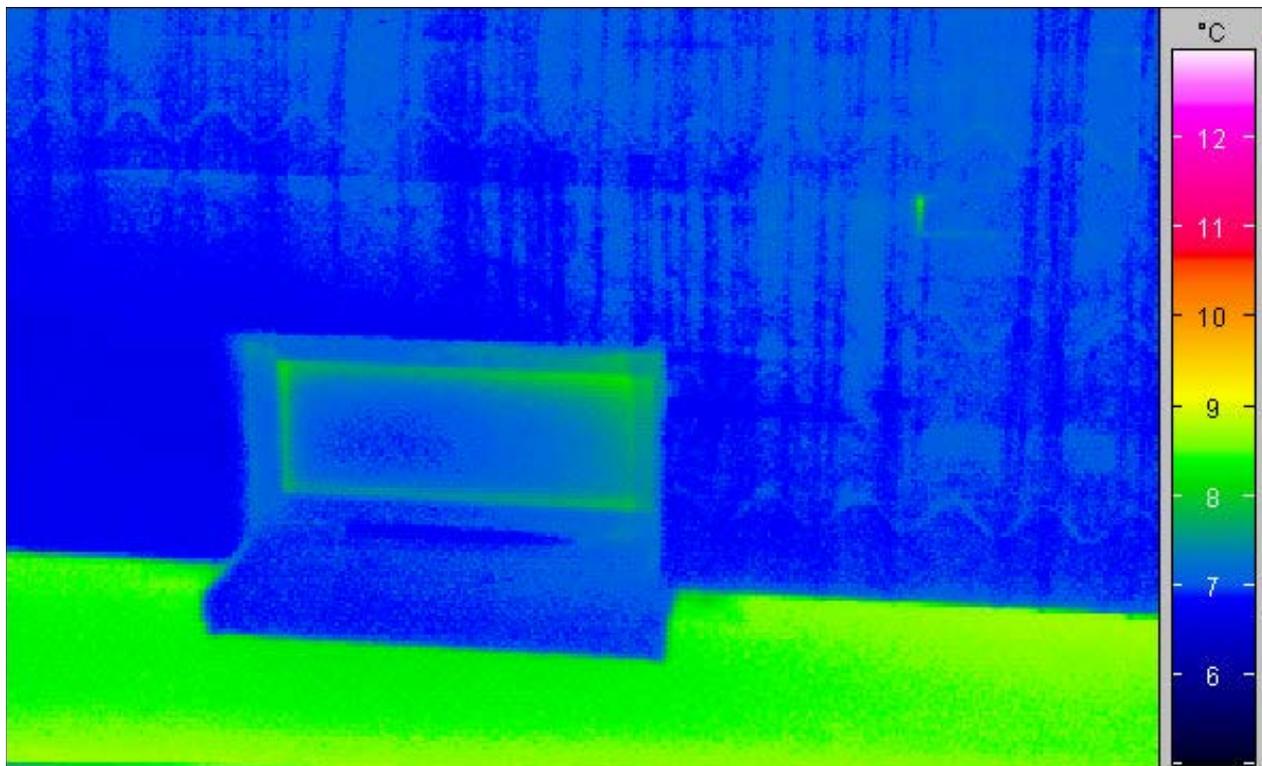


Abbildung 25: Thermografie des bereits im gedämmten Bereich (Oberflächentemperatur um 7°C) gelegenen Kellerfensters. Die Perimeterdämmung, welche die Dämmung der Außenwand nach unten hin fortsetzen wird, ist noch nicht angebracht (grüner Bereich, Oberflächentemperatur um 8,5°C).

2.5 Untersuchungen an der obersten Geschossdecke inkl. Überdruckthermografie der obersten Geschossdecke

Die Untersuchung der luftdichten Ebene im Bereich des Dachbodens bildete einen Schwerpunkt dieses Termins zur Qualitätssicherung während der Bauphase.

Die Funktion der luftdichten Schicht wird im Bereich des Dachbodens von einer Folie übernommen, die auf den vorhandenen Dielenboden aufgelegt wird. In den Randbereichen wird die Folie an der Innenseite des Kniestockmauerwerks bzw. an den Wänden des Technikraums, in dem unter anderem die neue Heizung und der Warmwasserspeicher untergebracht sind, hochgezogen und angeklebt. An den Stellen, wo die Folie von Balken des Dachtragwerks durchstoßen wird, wurde die Dichtigkeit mit Hilfe eines Gipsvergusses hergestellt, der wie eine Art Manschette um den Balken herum liegt und bis über die Folie reicht, die bis knapp an den Durchdringungspunkt herangeführt wurde.

Zur Überprüfung der luftdichten Ebene im Bereich des Dachbodens wurde wie folgt vorgegangen: Jeweils in einer der beiden Wohnungen im 2. OG wurde mit Hilfe eines Gebläses ("Blower Door") ein Überdruck erzeugt und zeitgleich vom Dachboden aus mit der Thermografiekamera und parallel durch Erfühlen mit der bloßen Hand festgestellt, ob und wo Luft aus der Geschossdecke austritt bzw. die luftdichte Ebene durchströmt.

Bevor die Wohnungen im 2. OG mit Überdruck belegt wurden, wurde die luftdichte Ebene im Bereich des Dachbodens mit Hilfe der Thermografiekamera auf der gesamten Fläche nach solchen Leckagen abgesucht, die auch ohne einen Überdruck in den darunter liegenden Wohnungen (also 'nur' auf Grund der Thermik innerhalb des Gebäudes) die Luftdichtheit beeinflussen. Auf diese Weise ließen sich keine wesentlichen Undichtheiten der luftdichten Ebene im Bereich des Dachbodens ausfindig machen.

Bei der anschließenden Untersuchung mit Überdruck in den Wohnungen des obersten Geschosses wölbte sich die Folie schon bei relativ geringem Druck sehr stark, dies ließ schon auf eine hohe Dichtigkeit schließen. Nach Absprache mit dem Architekten Hr. Schulze Darup wurde der Druck 'nur' auf etwa 12 Pa hochgefahren, um nicht die Zerstörung der luftdichten Ebene durch Abreißen von Klebungen zu riskieren. Im späteren fertiggestellten Zustand ist diese Gefahr nicht mehr gegeben, da der aufgelegte Zementestrich die Klebungen mechanisch sichert. Das Aufspüren von Undichtheiten ist auch bei diesen relativ geringen und für die Leckagesuche untypischen Druckverhältnissen (12 Pa) gut möglich, da auch sehr schwache Luftbewegungen durch Fühlen mit der bloßen Hand registrierbar sind.

Größere Leckagen wurden im gesamten Bereich des Dachbodens nicht entdeckt. Kleinere Undichtigkeiten wurden von zwei Mitarbeitern der für die Herstellung der luftdichten Ebene zuständigen Firma direkt während der Untersuchung nachgebessert.

Die gewählte Methode zur Abdichtung der Geschossdecke hat sich damit ausgezeichnet bewährt.

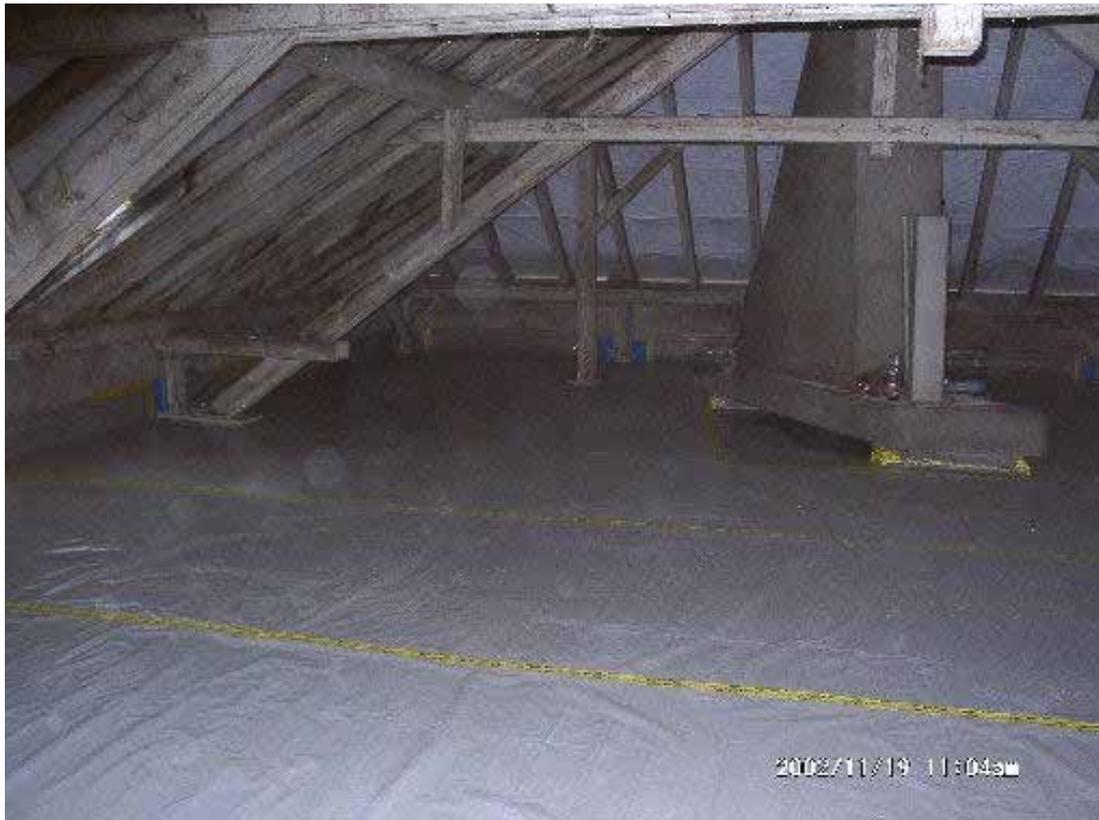


Abbildung 26: Südwestlicher Bereich des Dachbodens mit der ausgelegten und abgeklebten Luftdichtungsfolie.

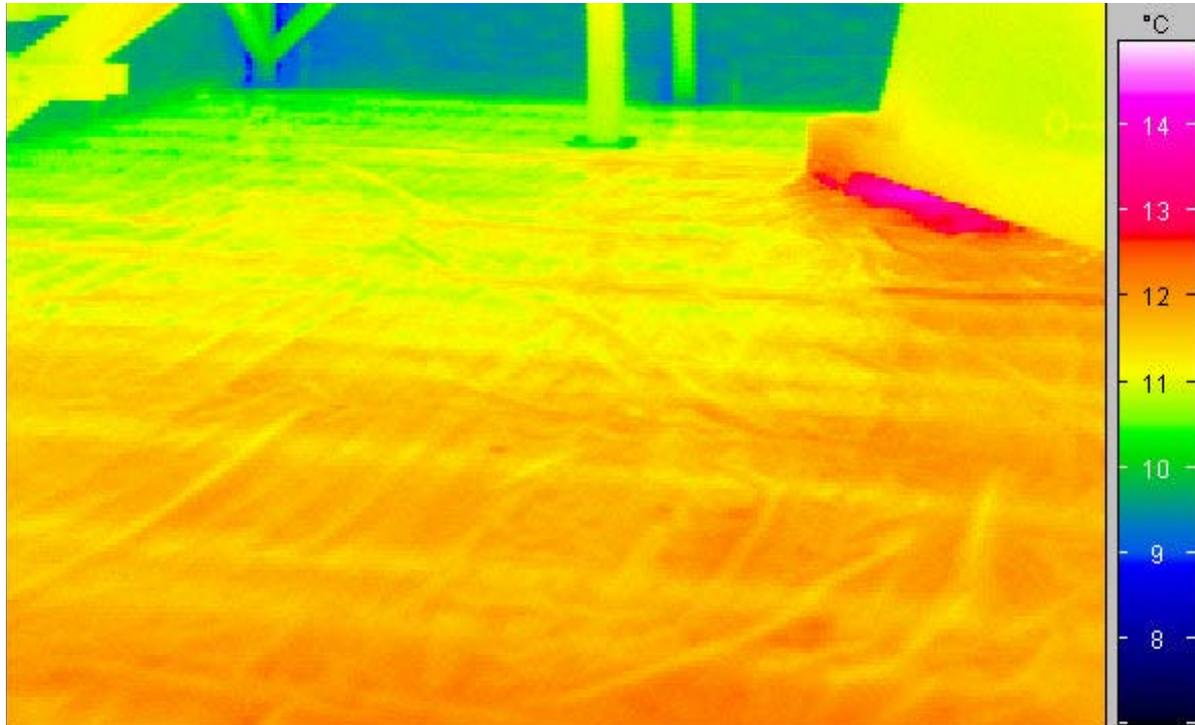


Abbildung 27: Thermografieaufnahme des südwestlichen Teils des Dachbodens. Die Holzbalken der Decke sind schemenhaft erkennbar (gelbe Streifen). Am Durchstoßungspunkt des Kamins ist ein wärmerer Bereich auszumachen (Aufnahme bei Normaldruck). Hier tritt Warmluft aus, die sich entlang der Folie ausbreitet. Die oberste Geschossdecke ist noch nicht gedämmt, dadurch erklären sich die relativ hohen Temperaturen der Oberflächen.



Abbildung 28: Nordwestlicher Bereich des Dachbodens.

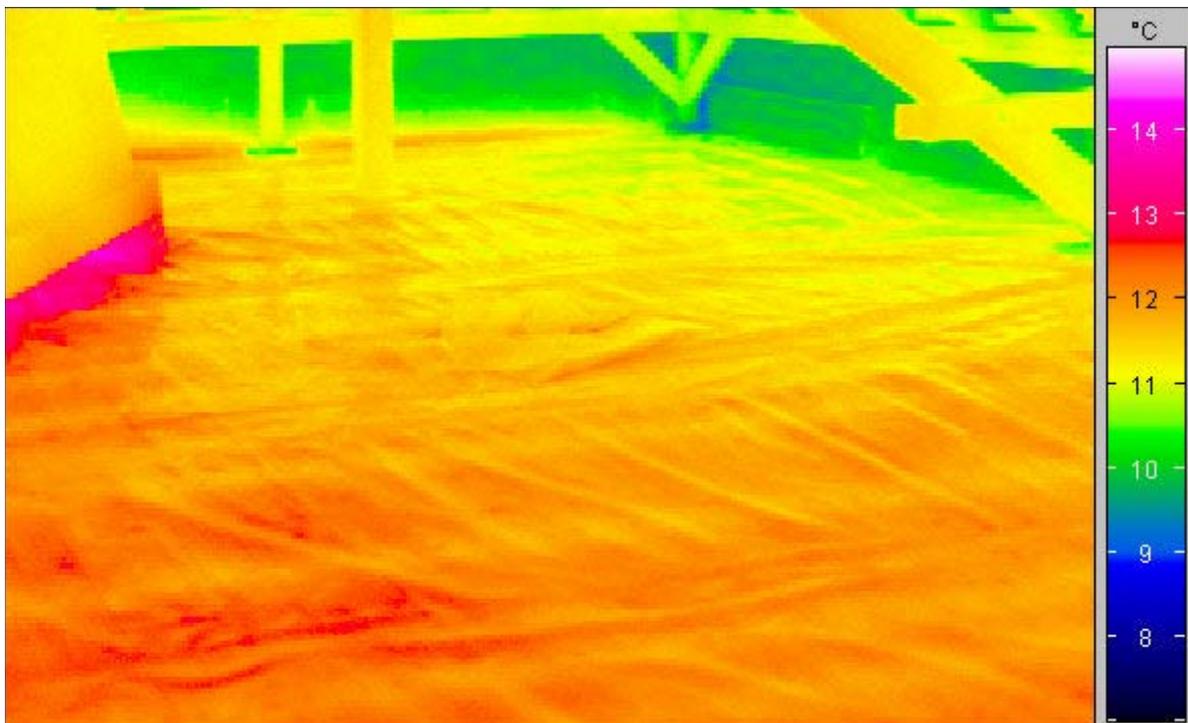


Abbildung 29: Thermografieaufnahme des nordwestlichen Teils des Dachbodens. Unterhalb des Kaminverzugs ist ein wärmerer Bereich auszumachen.



Abbildung 30: Ansicht der Heizzentrale von Osten.



Abbildung 31: Thermografie der Ostseite der Heizzentrale. Da die neue Heizung schon in Betrieb ist, herrscht in diesem Raum eine höhere Temperatur, die Thermografieaufnahme zeigt dies sehr deutlich, zumal die Flächen noch ungedämmt sind.



Abbildung 32: Detailaufnahme einer abgedichteten Balkendurchdringung.

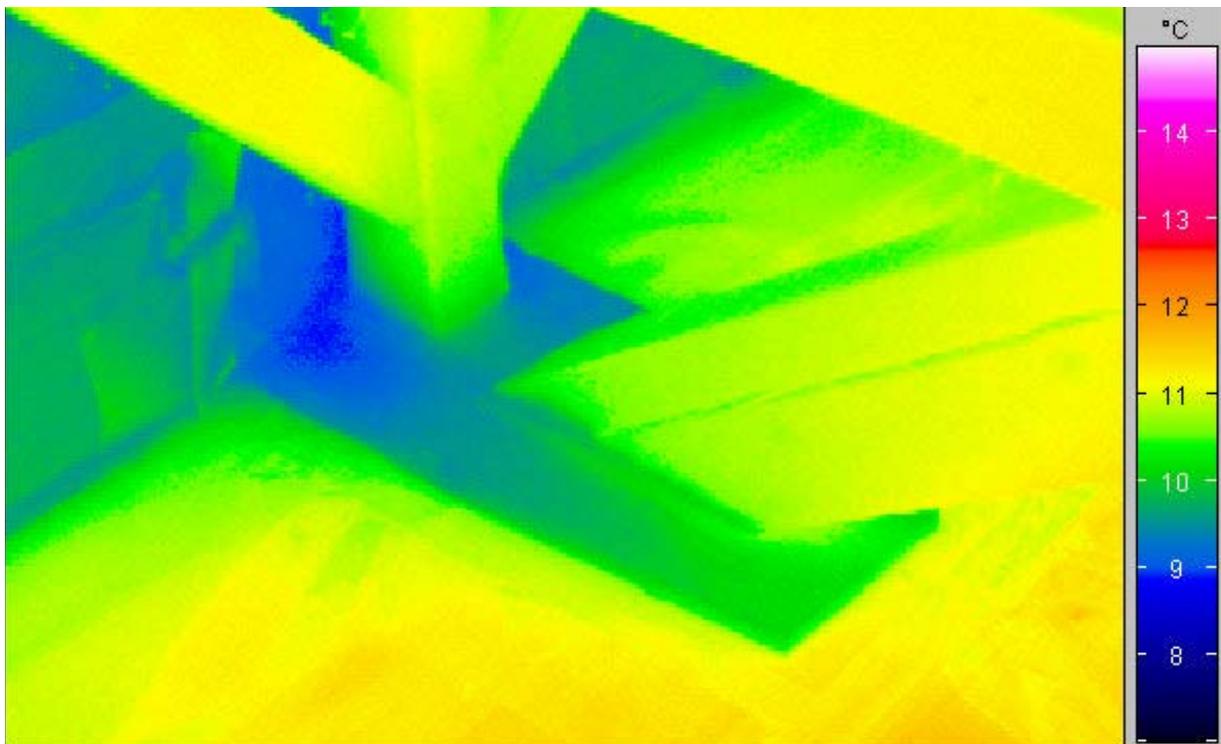


Abbildung 33: Thermografie der abgedichteten Balkendurchdringung. Das Bild zeigt keine Auffälligkeiten: Erwartungsgemäß ist der Gips etwas kühler, da er noch trocknet.



Abbildung 34: Durchdringung einer Fallrohrentlüftungsleitung durch die Decke.

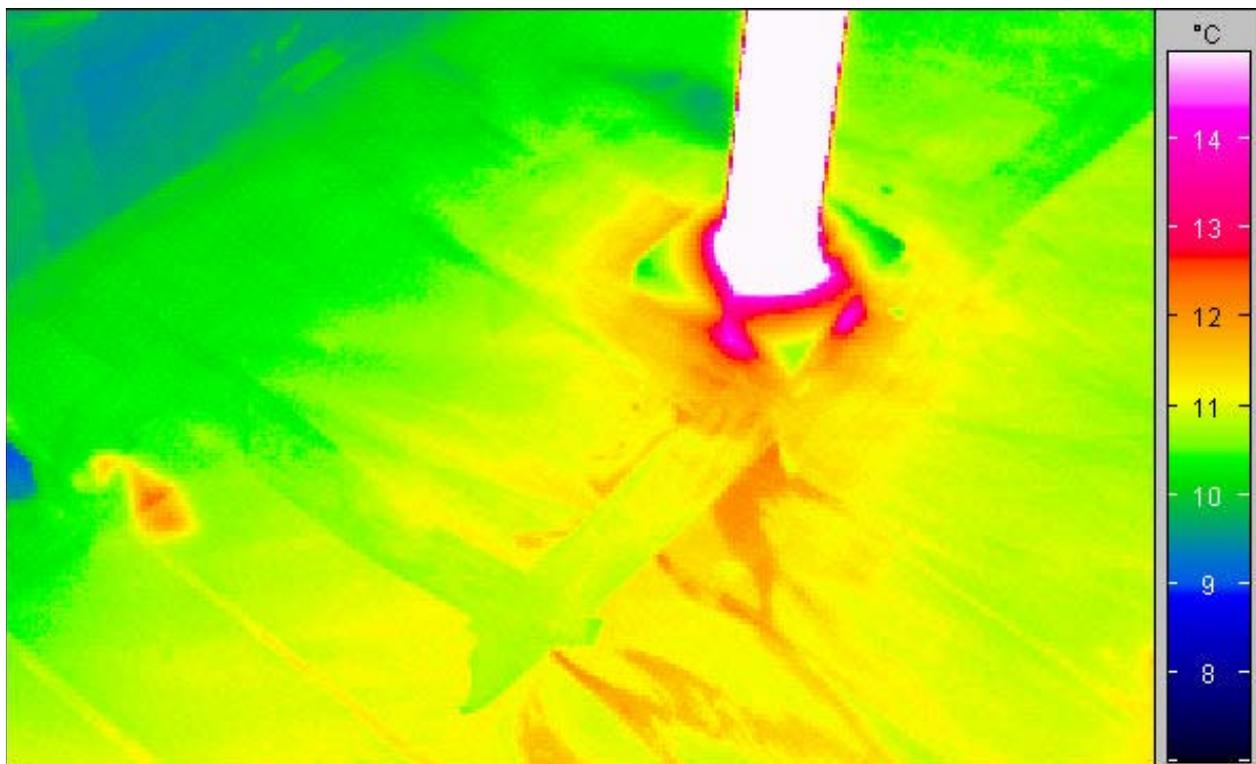


Abbildung 35: Thermografie der Fallrohrdurchdringung. Die Wärmeverluste durch die im Haus erwärmte Abwasserkanalluft sind beträchtlich: die Rohroberflächentemperatur beträgt im Mittel 21°C. Wir empfehlen das Aufsetzen eines Fallrohrbelüftungsventils.



Abbildung 36: Detailaufnahme einer abgedichteten Balkendurchdringung.

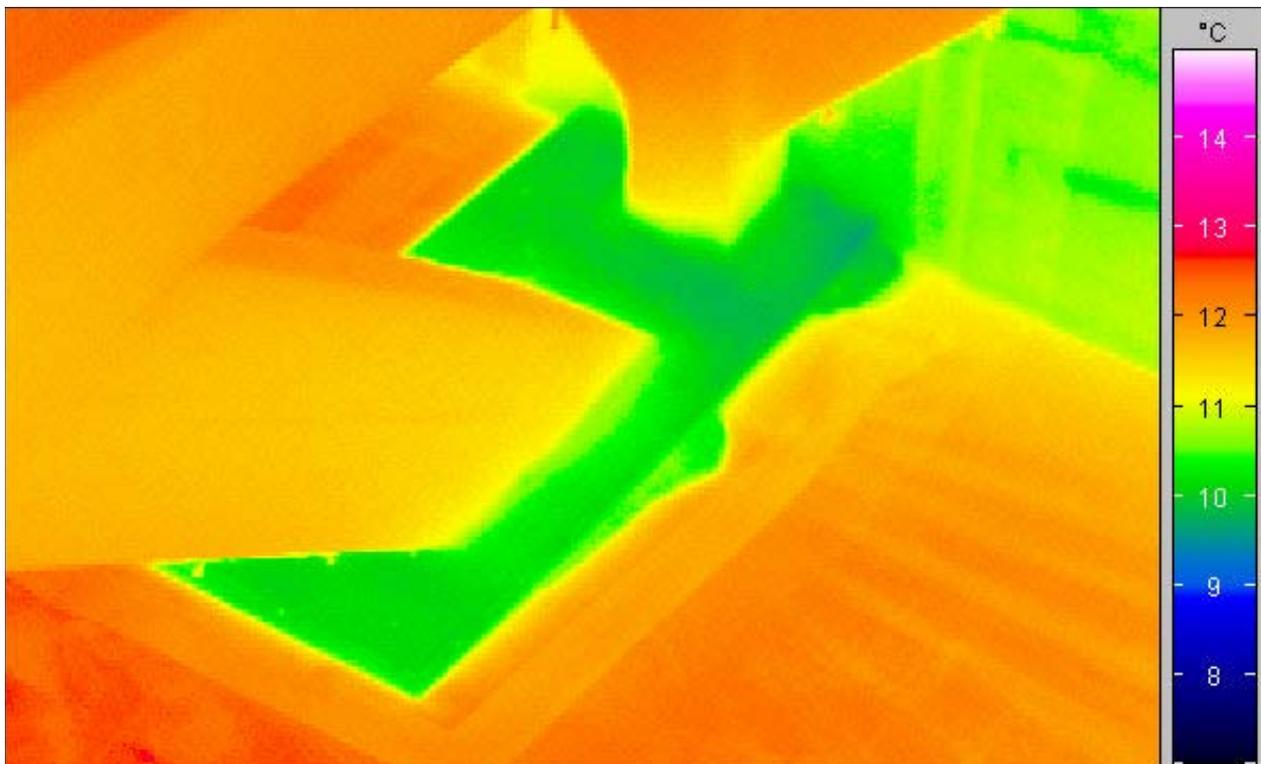


Abbildung 37: Thermografie der abgedichteten Balkendurchdringung. Der Gips erscheint wegen des Trocknungsenthalpieentzuges kälter; Undichtheiten sind nicht zu erkennen.



Abbildung 38: Detailaufnahme des Eckbereichs des Dachbodens.

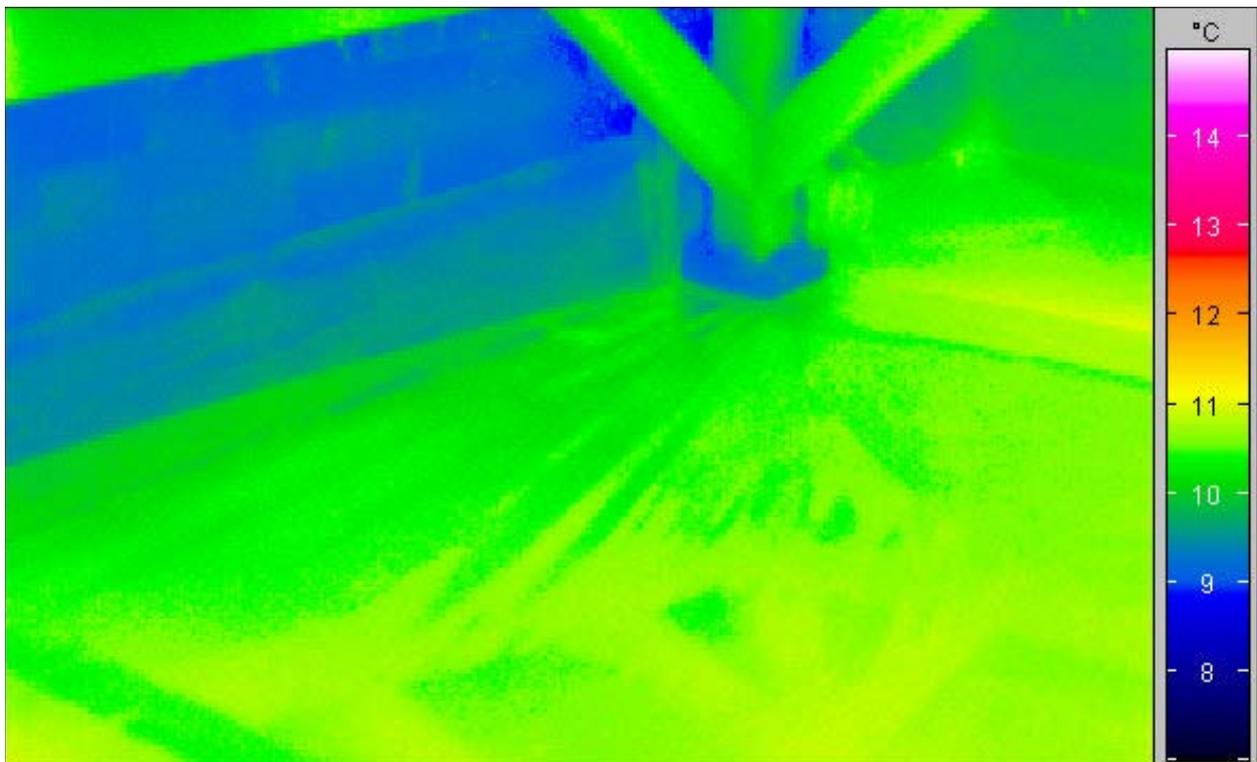


Abbildung 39: Thermografie des Eckbereichs. Undichtheiten sind nicht zu erkennen.



Abbildung 40: Detailaufnahme einer abgedichteten Balkendurchdringung. Deutlich sichtbar ist der Riss im Gips an der Vorderkante.

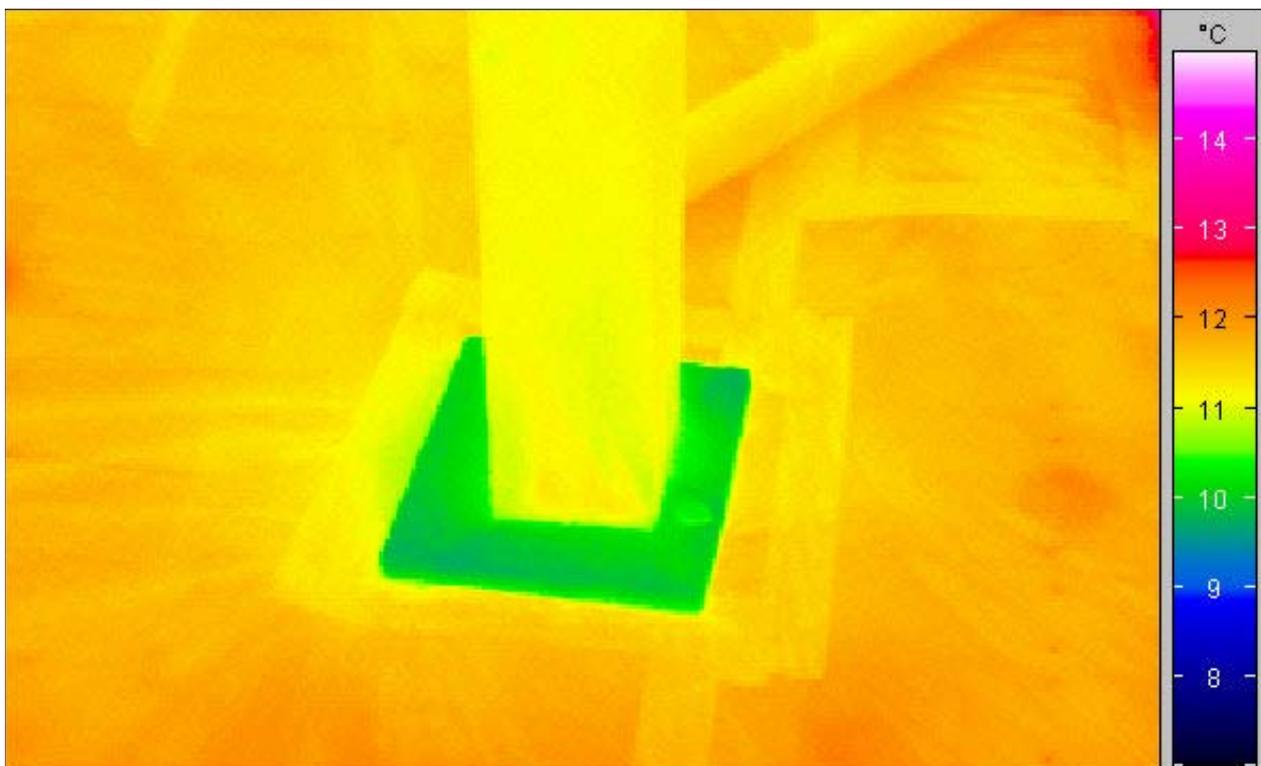


Abbildung 41: Thermografie der abgedichteten Balkendurchdringung. Auch im Bereich des oben sichtbaren Risses ist keine Undichtheit zu erkennen.



Abbildung 42: Detailaufnahme einer abgedichteten Balkendurchdringung.

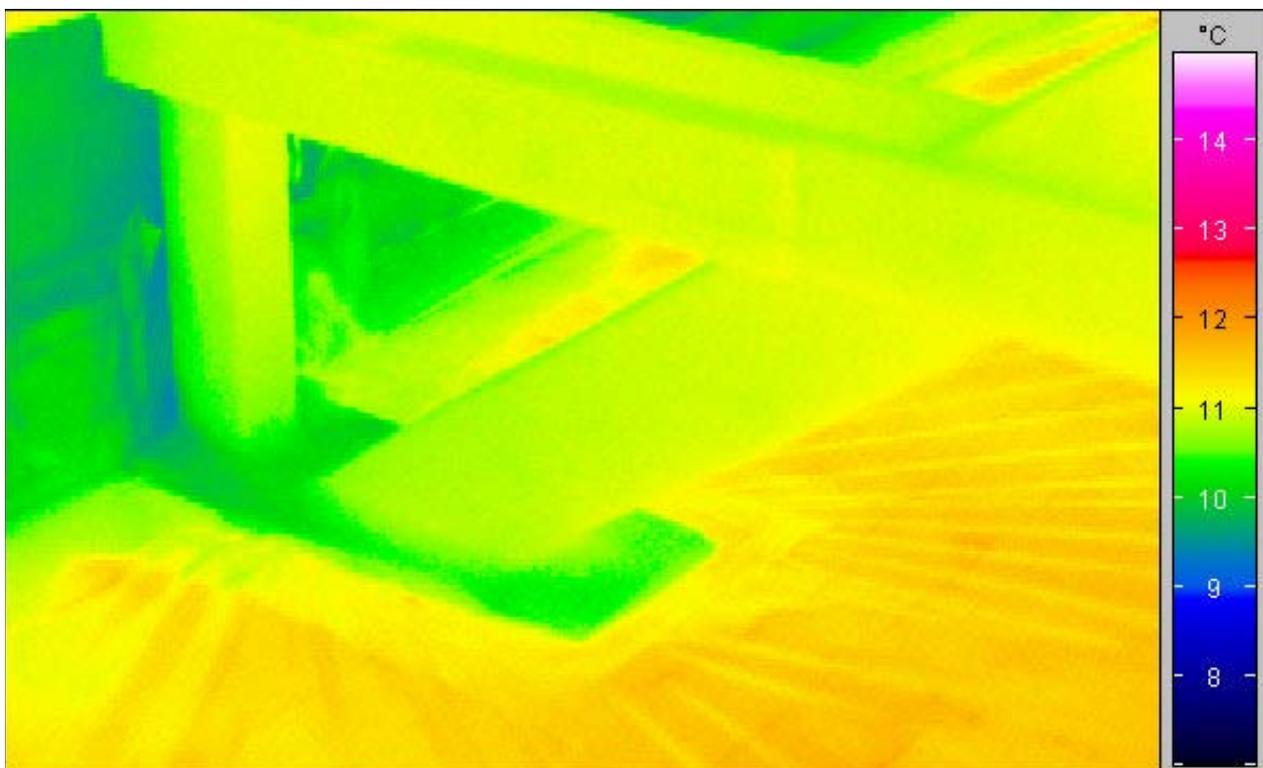


Abbildung 43: Thermografie der abgedichteten Balkendurchdringung. Es sind keine Undichtigkeiten zu erkennen.

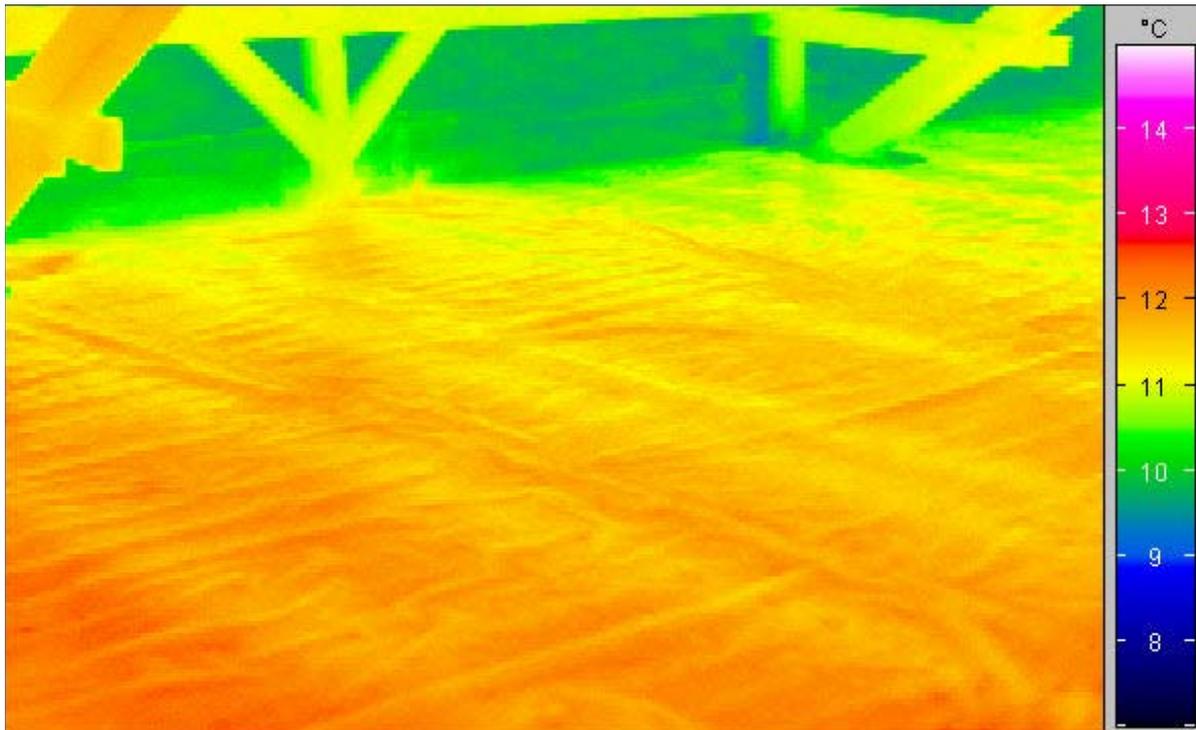


Abbildung 44: Thermografie ohne Überdruck: Die Folie liegt flach auf der Dielendecke auf.

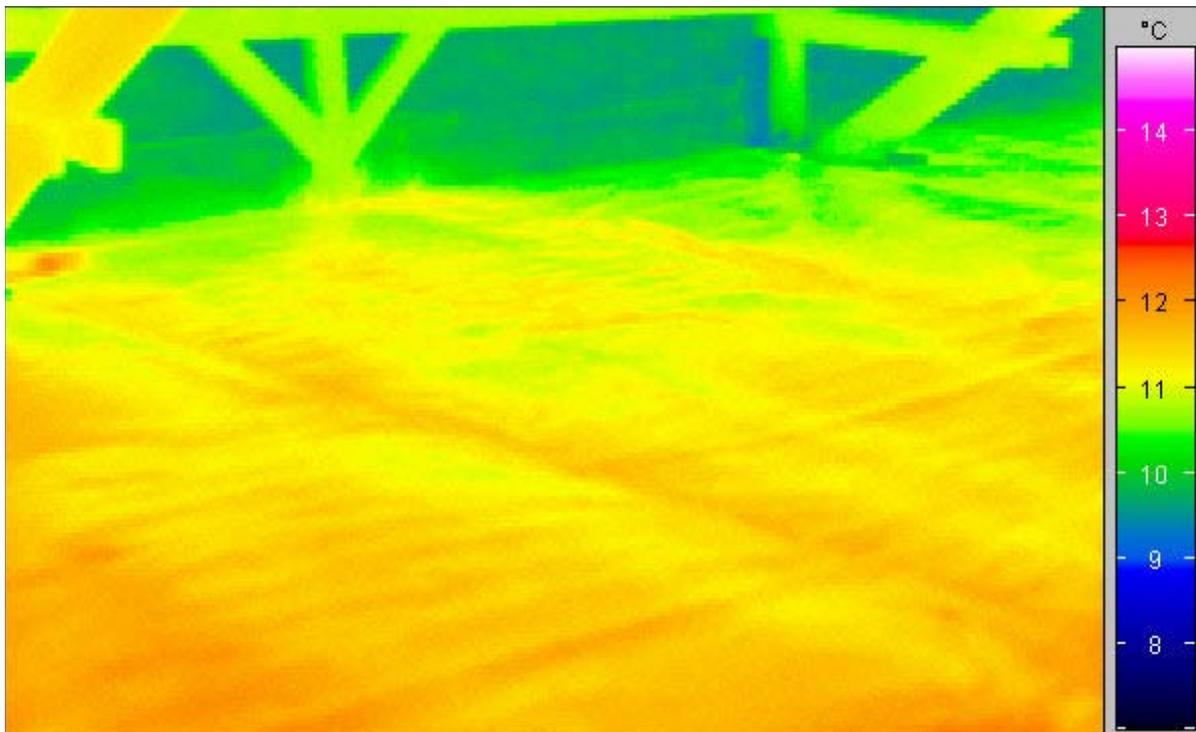


Abbildung 45: Thermografie mit 12 bar Überdruck in der darunterliegenden Wohnung: Die Folie hat sich aufgewölbt und leicht abgekühlt, weil das entstehende Luftpolster "dämmt". Verbliebene Undichtheiten müssten sich in dieser Aufnahme durch im Umfeld des Luftaustrittes erwärmte Stellen ("Warmluftfahnen") bemerkbar machen. Der Vergleich der Aufnahmen gibt keinen Hinweis auf Undichtheiten.

3 Innenthermografie am 19.11.2002

Im Bereich des Fensters aus Abb. 46 bis 48 ist die Außenwand noch nicht gedämmt. Daher liegen die inneren Oberflächentemperaturen dieser Wand nun im Bereich von 17,5 °C ähnlich niedrig wie die Oberflächentemperaturen der neuen Verglasung. Aber auch der Effekt der Einbau-Wärmebrücke ist deutlich erkennbar: Im Bereich der Laibung sinken die Temperaturen in der Nähe des Blockrahmens bis auf etwa 14,4 °C. Durch die später erfolgende Überdämmung auf der Außenseite wird diese Absenkung aufgehoben werden. Verstärkt wird der Effekt bei diesem Bild durch die Trocknung des Putzes.



Abbildung 46: Innenaufnahme eines frisch eingeputzten Fensters. Die noch nicht getrockneten (dunklen) Bereiche des Putzes sind deutlich erkennbar.



Abbildung 47: Thermografie des oberen Bereichs des frisch eingeputzten Fensters. Der Wärmeentzug durch die Trocknungsenthalpie ist deutlich erkennbar.

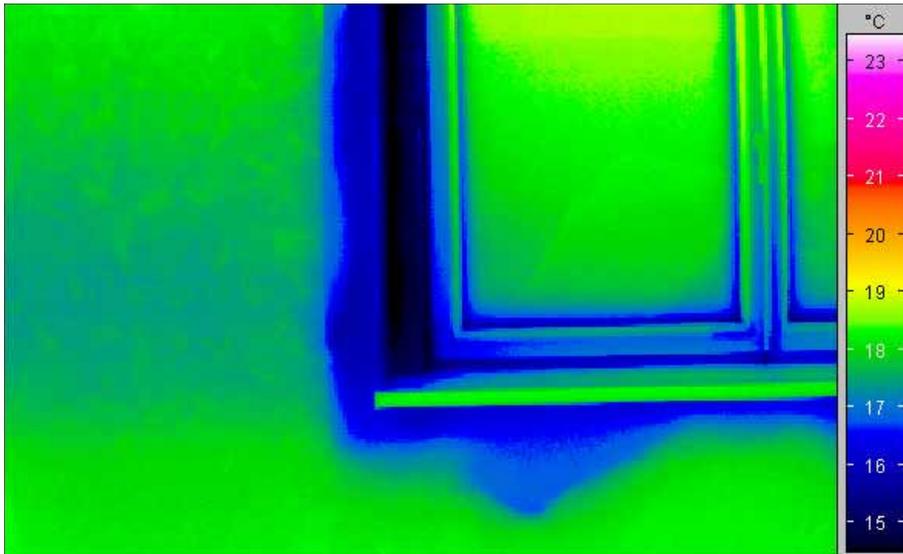


Abbildung 48: Thermografie des unteren Bereichs des frisch eingeputzten Fensters.



Abbildung 49: Innenansicht eines Badfensters. Hier ist die Außenwanddämmung bereits aufgebracht.

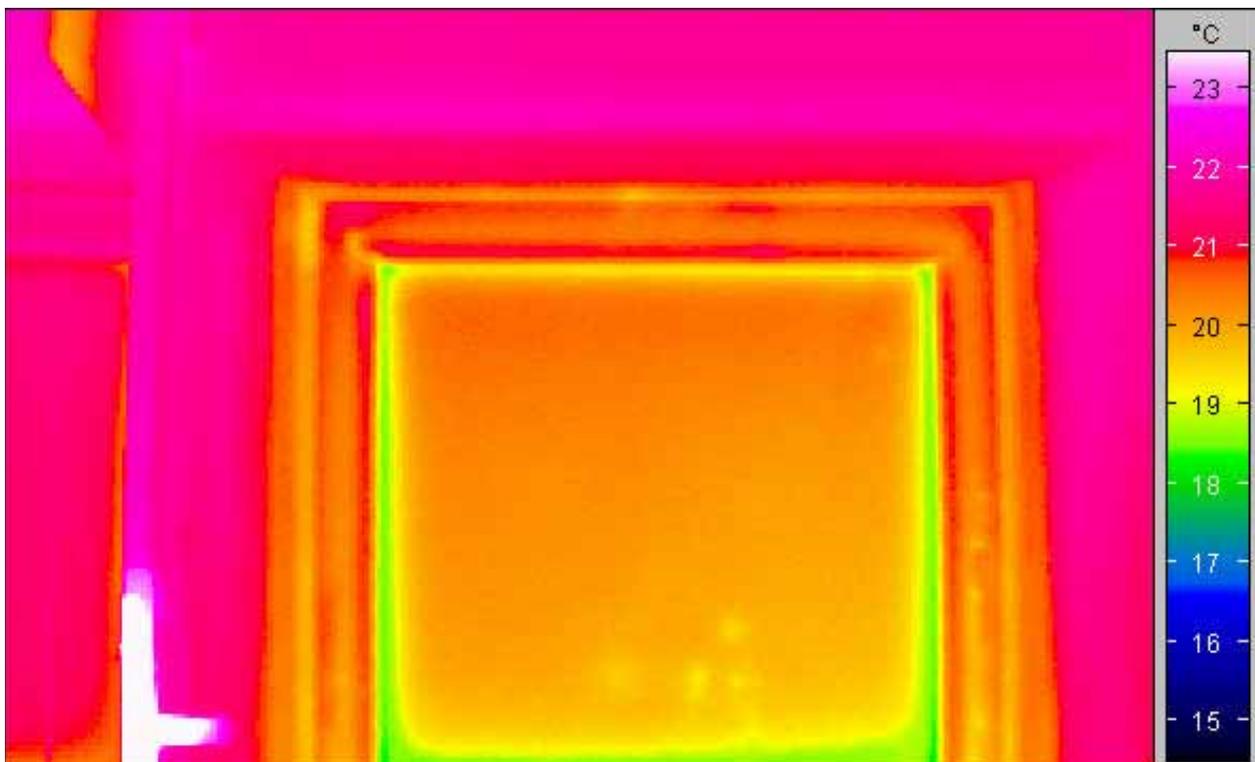


Abbildung 50: Thermografie des Badfensters. Im Laibungsbereich ist hier keine Wärmebrücke mehr erkennbar; deutlich ist jedoch die Temperaturabsenkung im Bereich des Glasrandes erkennbar. Die heiße Stelle unten links gehört zu einem Heizrohr.



Abbildung 51: Innenaufnahme eines Fensters in der Südfassade. Der Einbau des Fensters ist abgeschlossen und die Außenwand ist in diesem Bereich bereits gedämmt.



Abbildung 52: Thermografie des oberen rechten Bereichs des fertig eingebauten Fensters. Unten auf dem rechten Fensterflügel ist die Reflektion der Wärmestrahlung des Kopfes einer Person erkennbar (heller Bereich).

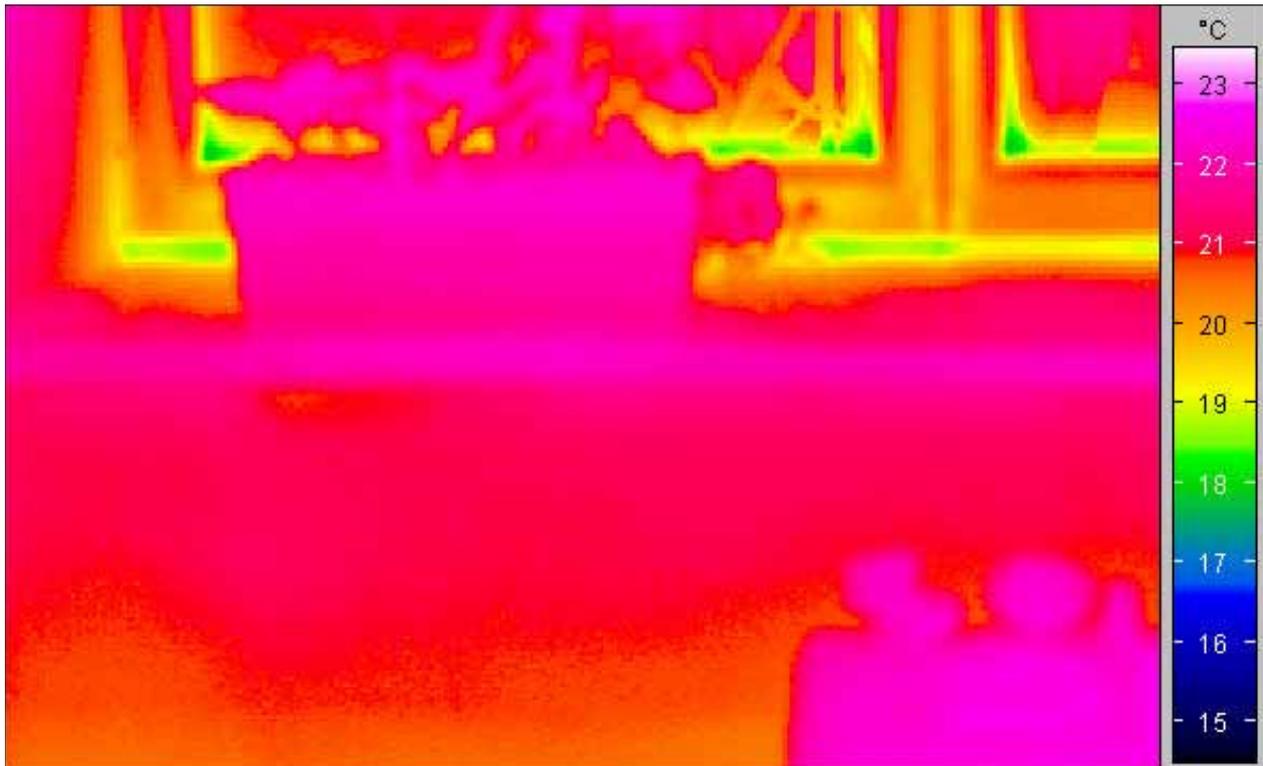


Abbildung 53: Thermografieaufnahme des unteren linken Bereichs des fertig eingebauten Fensters. Vor dem Fenster ist die bepflanzte Schale (vgl.: Abbildung 51) schemenhaft erkennbar. Die Außenwandoberfläche ist kaum kälter als diese frei stehende Schale. Der kälteste Bereich ist der untere Randstreifen der Verglasung. Hier macht sich die Wärmebrücke durch den Randverbund und die Konvektion des Füllgases im Scheibenzwischenraum bemerkbar. Diese Verluste sind nach dem Stand der Technik derzeit nicht vermeidbar und bei der Bilanzierung bereits berücksichtigt.

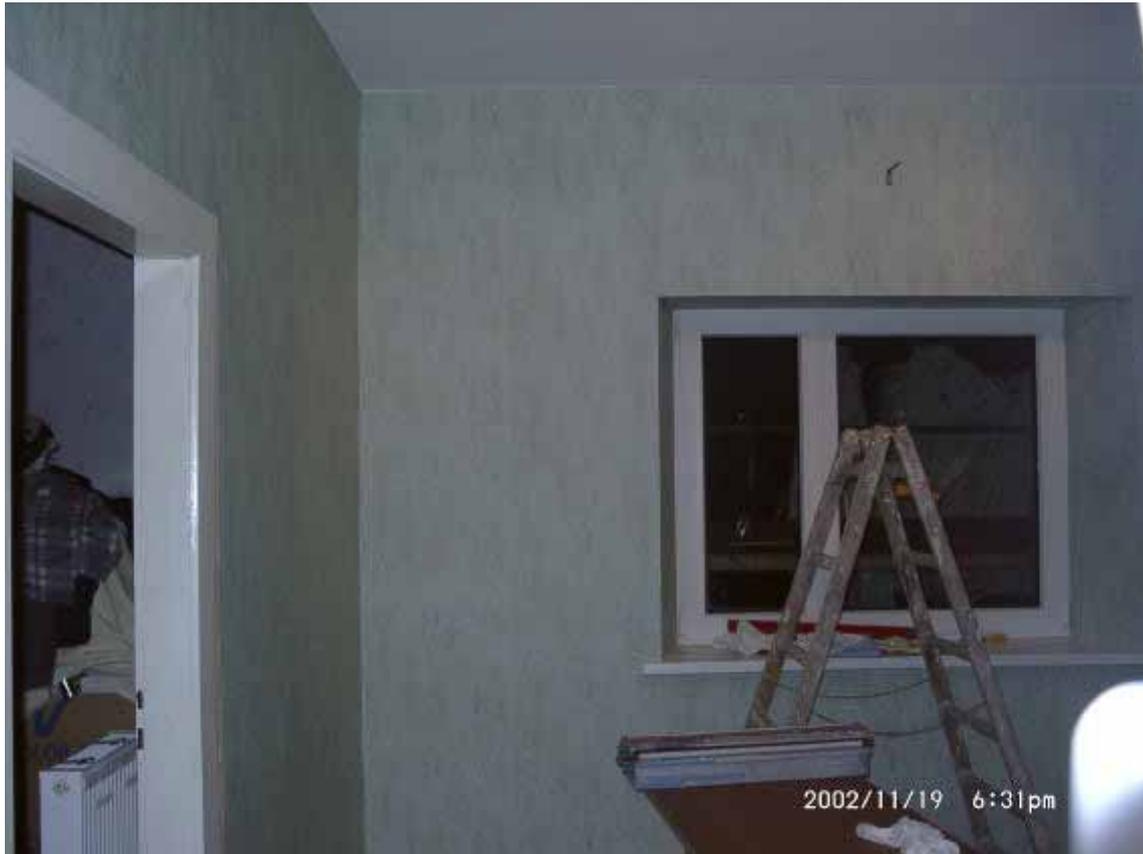


Abbildung 54: Innenaufnahme eines Fensters in der Südfassade.

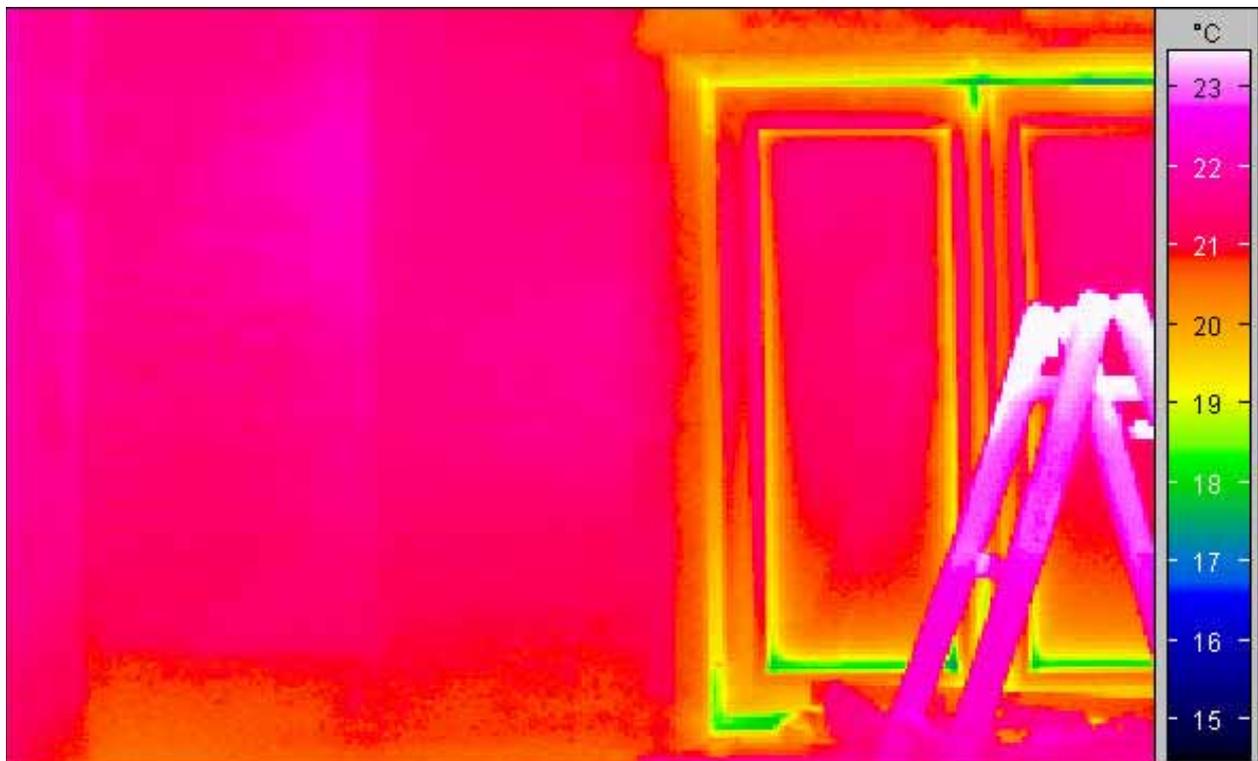


Abbildung 55: Thermografie des linken Bereichs des eingebauten Fensters. Hier sind Undichtheiten zwischen Flügel- und Blockrahmen rechts oben und links unten erkennbar.

4 Blower Door Messung zur Qualitätssicherung während der Bauphase

Um die bis zu diesem Zeitpunkt durchgeführten Arbeiten, welche die Luftdichtheit des Gebäudes betreffen (Einbau der Fenster, Ausführung der Folie als luftdichte Ebene im Bereich des Dachbodens, vgl. Kap. 1.5), bewerten zu können, wurde in Anlehnung an DIN EN 13829 die Luftdurchlässigkeit des Gebäudes mit dem Differenzdruckverfahren ermittelt. Dieser sogenannte Drucktest wurde mit einer 'Blower Door' durchgeführt.

Üblicherweise wird jeweils eine Messung bei Überdruck und eine Messung bei Unterdruck durchgeführt und daraus der Mittelwert gebildet. Wie sich aber bei diesem Termin zur Qualitätssicherung bei der Untersuchung der luftdichten Ebene im Bereich des Dachbodens gezeigt hatte, war es nicht sinnvoll einen Überdruck von mehr als etwa 12 Pa zu erzeugen. Es hätte die Gefahr bestanden, dass die Verklebungen der Folie, die sich schon beim Druck von 12 Pa stark wölbte, reißen. Bei dieser geringen, maximal möglichen Druckdifferenz ist eine Überdruck-Messung nicht durchführbar. Laut DIN EN 13829, Abs. 5.3.4 muss die größte Druckdifferenz mindestens 50 Pa betragen. Da eine Unterdruck-Messung hinsichtlich der luftdichten Schicht im Bereich des Dachbodens unkritisch war, wurde der Drucktest-Kennwert nur bei Unterdruck bestimmt (das ist ebenfalls Norm konform).

Der n_{50} -Wert von $0,55 \text{ h}^{-1}$, als Ergebnis dieser Blower Door Messung zur Qualitätssicherung während der Bauphase zeigt die gute Qualität der bis dahin durchgeführten Maßnahmen für die Luftdichtheit des Gebäudes.

Auf den folgenden Seiten sind die Auswertungsblätter für den Drucktest mit der Blower Door dokumentiert.



BlowerDoor Messprotokoll Verfahren A

Gebäude

Objekt:	Mehrfamilienhaus
Adresse:	Jean-Paul-Platz 4 Nürnberg
	Baujahr:
	Messdatum: 19.11.02

Auftraggeber

Name:	Wohnungsbaugesellschaft der Stadt Nürnberg mbH
Adresse:	Glogauer Straße 70 90473 Nürnberg
Telefon:	
Fax:	

Auftragnehmer

Name:	Passivhaus Institut	Prüfer/in:	M.John / O. Kah
		FLIB-Mitgliedsnr.:	
Adresse:	Rheinstr. 44/46 64283 Darmstadt	Telefon:	06151 82699-0
		Fax:	

Prüfverfahren

Verfahren:	A Prüfung des Gebäudes im Nutzungszustand
Norm:	In Anlehnung an EN 13829
Bemerkung:	Die natürlichen Druckdifferenzen wurden nicht ermittelt (zum Messzeitpunkt war es annähernd windstill).

Prüfobjekt

Messgegenstand:	Unterdruckmessung des Gebäudes (als Ganzes) im Bauzustand		
Innenvolumen V_i :	2741.0 m ³	Fehler: +/- 8.0 %	Die Berechnung der Bezugsgrößen liegt an.
Nettogrundfläche A_F :		Fehler: %	
Hüllfläche A_E :		Fehler: %	
Lüftungsanlage:	Zum Zeitpunkt der Messung noch nicht vorhanden		
Heizungsanlage:	zentrale Gasbrennwerttherme; Heizkörper		
Klimaanlage:	keine		
Ausführliche Angaben zum Gebäudezustand, den temporären Abdichtungen sowie dem Zustand aller Öffnungen befinden sich auf den kommenden Seiten.			

Messausrüstung

Messsystem:	BlowerDoor Modell 4, APT
	Fehler des Messsystems: 4 %
Sonstige Geräte:	Thermoanemometer



BlowerDoor Messprotokoll

Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A

Minneapolis Blower Door Modell 4 - Tectite Express 2.1.10.1

Objekt : Mehrfamilienhaus Jean-Paul-Platz 4	Prüfer/in: M.John / O. Kah Datum: 19.11.02 FLIB-Nr:
--	--

Klimadaten

Innentemperatur: 20.5 °C	Windgeschwin.: 	Referenzdruckmeßstellen: 1
Außentemperatur: 9.0 °C	Windstärke: 1	Gebäudestandort: B
Luftdruck: 1013 hPa	Zusätzliche Meßunsicherheit infolge Wind: 0 %	

Unterdruck

Natürliche Druckdiff.	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}

Überdruck

Natürliche Druckdiff.	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}

Messreihen

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom	Abwei- chung	Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom	Abwei- chung
O ABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]	O ABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]
Δp_{01}	3.9	—	—	—	Δp_{01}		—	—	—
C	-5.7	388.6	419	-2.26					
B	-14.2	82.0	734	4.28					
B	-18.6	108.9	846	1.56					
B	-23.7	140.9	961	-1.23					
B	-29.3	182.5	1093	-2.40					
B	-38.2	276.1	1342	0.20					
Δp_{02}	2.3	—	—	—	Δp_{02}		—	—	—

Korrelationskoef. r:	0.998	Vertrauensintervall	
Strömungskoeff. C_{eW} :	82.7	101.5	67.5
Leckagekoef. C_L :	83.6	102.5	68.1
Strömungsexpo. n:	0.738	0.8	0.7

Korrelationskoef. r:		Vertrauensintervall	
Strömungskoeff. C_{eW} :			
Leckagekoef. C_L :			
Strömungsexpo. n:	0.667		

Ergebnis, Kenngrößen

Innenvolumen:	Nettogrundfläche:	Hüllfläche:
2741 m³	+/- 8 %	

	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	1498	+/- 4 %	0.55	+/- 9 %				
Überdruck								
Mittelwert								

Ergebnis der Messung:

0.55	1/h	 	
-------------	-----	--	--

Anmerkung: Bei der Projektierung wurde ein n_{50} -Wert von 1.0 h⁻¹ angesetzt.



	BlowerDoor Messprotokoll	
	Verfahren A	
	Protokoll Messablauf	
	Einbauort des Messsystems	
	Türöffnung, die das Treppenhaus mit dem Dachboden verbindet	
	Wind	
	Windstärke 1 (Beaufort)	
	Gebäudezustand	
	- Einbau der neuen Fenster abgeschlossen	
	- Dämmung des WDVS nur zum Teil aufgebracht	
	- Dämmung oberhalb des Dachbodens noch nicht vorhanden	
	- Dämmung unterhalb der Kellerdecke noch nicht vorhanden	
	- neue Haustür noch nicht eingebaut	
	Temporäre Abdichtungen	
	Öffnungen für Lüftungsrohre waren noch nicht vorhanden	
	Abwasserrohre und Siphone waren verschlossen	
	Bemerkung	
	Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.	



BlowerDoor Messprotokoll

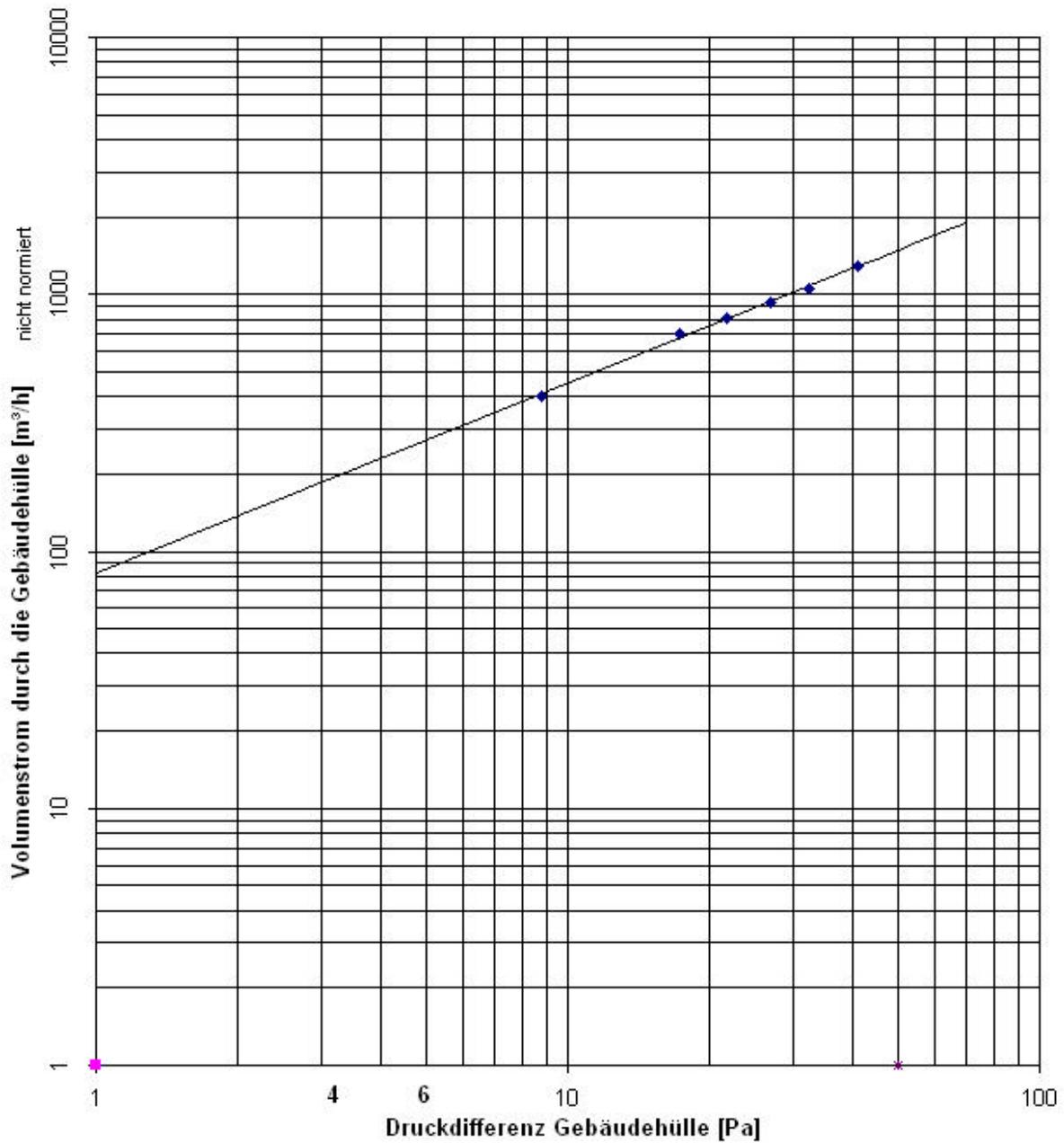
Verfahren A

Checkliste: Zustand aller Öffnungen

Bauteil / Öffnung / Einbau etc	Zustand
Außentüren (hier: Haustür; Anmerkung: die neue Haustür war noch nicht eingebaut)	geschlossen und im Bereich der Schwelle provisorisch abgedichtet
Fenster	geschlossen
Innentüren	geöffnet
Bodenluke zum unbeheizten Spitzboden	nicht vorhanden
Kellertür zum unbeheizten Keller / Kellerflur / Kellertreppenabgang	geschlossen
Offener Kamin	nicht vorhanden
Kachelofen / Einbauofen / Beistellherd o.ä.	nicht vorhanden
Raumluft abhängig betriebene (Gas-) Feuerstätten im beheizten Gebäudebereich	nicht vorhanden
Kamin, Kachelofen, Einbauofen, etc die raumluftunabhängig betrieben werden	nicht vorhanden
Raumluft unabhängig betriebene (Gas-) Feuerstätten im beheizten Gebäudebereich	der alte, nicht mehr genutzte Kamin wurde in Höhe des Dachbodens verschlossen
Klappen / Türen / Luken zu unbeheizten Gebäudebereichen	nicht vorhanden
Luken und Klappen zu Abseiten im Dachgeschoß	nicht vorhanden
Schlüssellocher	hier wurden keine Maßnahmen getroffen
Kanalentlüftungsventile im beheizten Gebäudebereich	nicht vorhanden
Dunstabzugshaube	nicht vorhanden
Erdwärmetauscher (Zuluft Lüftungsanlage)	nicht vorhanden
Spaltlüftungsbeschläge an Fenstern / Dachflächenfenster	nicht vorhanden
Zuluftelemente (mech.Abluftanlage)	nicht vorhanden
Rohrdurchdringungen (Zu- / Abluft Lüftungsanlage)	abgedichtet
Briefkastenklappen / -schlitze	nicht vorhanden
Katzenklappen	nicht vorhanden
Öffnung "Zuluft" im Heizungskeller / Öllager	nicht vorhanden
Wäschetrockner im beheizten Gebäudeteil mit Abluft nach außen	nicht vorhanden
Wäscheschacht zum unbeheizten Gebäudeteil	nicht vorhanden
Zentrale Staubsaugeranlage	nicht vorhanden
Rolladengurtdurchführungen	nicht vorhanden
Fehlende Einbauten (z.B. fehlender Fenstergriff)	Fenstergriffe nur zum Teil vorhanden
Leerrohre zu unbeheizten Gebäudebereichen	abgedichtet
Im beheizten Gebäudeteil angeordnete Hinterlüftungsöffnung von Schornsteinen	nicht vorhanden
Fenster in unbeheizten Räumen	nicht vorhanden

Grafik zur Darstellung der Messergebnisse

Objekt: Mehrfamilienhaus Jean-Paul-Platz 4



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

5 Bestimmung von Luftaustausch-Kennzahlen zur Überprüfung der Lüftungsanlagen

Eine wesentliche Komponente im Passivhaus-Konzept ist die kontrollierte Wohnungslüftung. Im Rahmen der Qualitätssicherung wurde mit Luftalter- und Luftwechsel-Messungen die Funktionsfähigkeit der Lüftungsanlagen untersucht. Im einzelnen wurden folgende Messungen durchgeführt:

- An Ab- und Zuluft-Ventilen der Lüftungsanlage wurden die geförderten Volumenströme in allen 6 Wohnungen bestimmt. Die Verteilung der Volumenströme und die Balance des Lüftungsgeräts kann hiermit geprüft werden. Das Messprinzip des eingesetzten Gerätes (Druckverlustkompensation durch eingebauten Stützventilator) ermöglicht es, den Volumenstrom direkt am Ventil ohne Beeinflussung durch zusätzlichen Druckverlust zu messen.
- Mittels Indikatorgas-Messungen wurde der Außenluftwechsel in allen Wohnungen bei geschlossenen Fenstern bestimmt. Zusätzlich ist in einer Wohnung die Luftwechsel-Messung bei geöffnetem Küchenfenster durchgeführt worden.
- Neben dem Luftwechsel ist das Luftalter eine wichtige Größe zur Beurteilung der Luftqualität. Um so höher das Alter, desto geringer kann die Luftqualität ausfallen. Mit Indikatorgas-Messungen wurde in einer Wohnung an 4 Messstellen das lokale Luftalter bestimmt. Die Lüftungswirksamkeit, die das Gesamtsystem der Wohnungslüftung kennzeichnet, wurde ebenfalls bestimmt.

5.1 Volumenströme an Zu- und Abluftventilen

Mit einem Volumenstrom-Messgerät (Flow Finder, Fa. Acin) wurden in allen Wohnungen die Luftmengen der Zu- und Abluft-Ventile gemessen. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse (die Räume in den Wohnungen sind jeweils vom Südzimmer am Wohnungseingang beginnend in Richtung Bad aufsteigend durchnummeriert).

Wegen der in Tabelle 1 erkennbaren Disbalancen wurde in Absprache mit dem Architekten eine Nachjustierung der Anlagen veranlasst.

Tabelle 1: Volumenströme Zu- und Abluft-Ventile

	EG Ost	1.OG Ost	2.OG Ost	EG West	1.OG West	2.OG West	2.OG West	2.OG West
Datum	09.12.02	09.12.02	09.12.02	09.12.02	09.12.02	09.12.02	10.12.02	09.12.02
Lüftungseinstellung	"Normal"	"Normal"	"Normal"	"Normal"	"Normal"	"Normal"	"Normal"	"Stoss"
Raum 1	24	29	25	25	22	22	22	42
Raum 2	26	31	27	32	32	29	29	52
Raum 3	15	14	24	12	10	12	13	22
Raum 4	22	26	15	24	21	20	20	30
Raum 5	23	26	32	26	29	23	24	42
Raum 6	17	22	19	22	22	20	20	34
Summe Zuluft	127	148	142	141	136	126	128	222
Raum 7 (Küche)	68	60	57	85	84	66	85	66
Raum 7a	22	25	24	0	0	0	0	0
Raum 8	12	10	10	12	10	8	10	6
Raum 9 (Bad)	38	42	42	46	48	34	46	34
Raum 10 (WC)	20	20	20	21	22	18	20	18
Summe Abluft	160	157	153	164	164	126	161	124

5.2 Messaufbau und –ablauf der Indikatorgas-Messungen

Zur Bestimmung des Luftalters als auch des Luftwechsels wurde die Konzentrationsabfall-Methode angewendet. Hierzu wird das Spurengas SF₆ in dem betrachteten Volumen ausgebracht und mit Hilfe von Ventilatoren verwirbelt. Sobald eine homogene Verteilung des Spurenstoffs in der Wohnungsraumluft erreicht ist, wird die Messung gestartet. Gemessen und ausgewertet wird der Konzentrationsverlauf des Indikatorgases.

In zwei Wohnungen wurde die zeitliche Entwicklung der Konzentration kontinuierlich von einem Gaschromatographen bestimmt. Hierzu wurden über Schläuche Luftprobenvolumina an vier Messstellen angesaugt und der Analyseeinheit zugeführt. In weiteren vier Wohnungen wurden Luftproben mit Spritzen entnommen und später am Gas-Monitor analysiert.

Die Luftwechsel-Messungen wurden unter Betrieb der Lüftungsanlage und bei geschlossenen Fenster durchgeführt. Eine Zusatz-Messung (1.OG West) untersucht den Einfluss eines geöffneten Fensters (Lüftungsanlage in Betrieb und ein Fenster gekippt).

Die Luftalter-Messung ist zeitintensiv und beschränkte sich auf eine unbewohnte Wohnung (1.OG West); aufgrund der ähnlichen Grundrisse aller Wohnungen sind keine wesentlichen Unterschiede zwischen diesen zu erwarten. Gemessen wurde bei Betrieb der Lüftungsanlage und geschlossenen Fenstern.

5.3 Luftwechsel-Messungen

Bei der Auswertung wird davon ausgegangen, dass das Indikatorgas sich vollständig mit der Raumluft vermischt und dass die Indikatorgaskonzentration in ihrer zeitlichen Entwicklung räumlich homogen bleibt. Unter diesen Annahmen folgt das Abklingen der Indikatorgaskonzentration folgender Gleichung:

$$c_{\text{Indikator}}(t) = c_{\text{Indikator}}(t=0) \cdot \exp(-n \cdot t) \quad (1)$$

$c_{\text{Indikator}}$: Indikatorgaskonzentration, t : Zeit, n : Luftwechselrate

Die Luftwechselrate n wurde jeweils durch Regressionsanalyse bestimmt. Werden die Konzentrationen logarithmisch aufgetragen, dann entspricht die negative Steigung der Ausgleichsgeraden der Luftwechselrate n . Im Abschnitt 5.5 sind die logarithmierten Konzentrationsverläufe und die Ausgleichsgeraden dargestellt.

Ergebnis der Messung ist die Außenluftwechselrate. Die Außenvolumenströme ergeben sich mit dem jeweils am Luftaustausch teilnehmenden effektiven Volumen, das zunächst nicht bekannt ist. Durch Vergleich der Luftwechselraten mit der Volumstrom-Messung (vgl. Abschnitt 5.1) kann das effektive Luftvolumen bestimmt werden; es ergeben sich hier 390 m³. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse zusammengefasst. In vier Wohnungen (den Wohnungen im Erdgeschoss und im zweiten Obergeschoss) wurden mit Spritzen Luftproben genommen. Durch die geringere Anzahl an Messpunkten ist hier der Fehler größer. Die Messungen im EG West und im 2.OG West wurden durch häufiges Öffnen der Wohnungstür gestört (die Wohnungen waren bewohnt). Die Messung im EG West kann hierdurch nicht ausreichend genau ausgewertet werden. Durch den zusätzlichen Außenluftwechsel über die Wohnungstür sind in beiden Fällen die gemessenen Luftwechsel vermutlich deutlich erhöht. Mit dem gekippten Küchenfenster im 1.OG West (Maße: Breite 104 cm, Höhe 125 cm, Öffnungsspalt oben ca. 7 cm) erhöhte sich der Außenluftvolumenstrom um 74 ∇16 m³/h. Die gemessenen Außenluftwechsel bei geschlossenen Fenstern entsprechen der Projektierung.

Tabelle 2: Ergebnisse der Luftwechsel-Messung

Wohnung	Fenster	Luftwechsel [h ⁻¹]	Außenvolumenstrom [h ⁻¹]
EG West	alle geschlossen	0.65	254
1.OG West	alle geschlossen	0.42 ∇ 0.01	164
2.OG West	alle geschlossen	0.6 ∇ 0.05	235
EG Ost	alle geschlossen	0.45 ∇ 0.07	174
1.OG Ost	alle geschlossen	0.41 ∇ 0.004	162
2.OG Ost	alle geschlossen	0.41 ∇ 0.04	160
1.OG West	Küchenfenster gekippt	0.61 ∇ 0.04	237

5.4 Luftalter-Messungen und Lüftungswirksamkeit

Neben der Luftwechselrate sind das Luftalter und daraus abgeleitet die Lüftungswirksamkeit ein weiteres Kriterium für die Luftqualität. Mit diesen Größen kann die Luftführung im Raum beurteilt werden. Das lokale und das mittlere Luftalter sagen aus, wie lange die Luft bereits im Raum ist. Der Luftaustauschwirkungsgrad kennzeichnet die Wirksamkeit des Lüftungssystems. Der Luftaustauschwirkungsgrad η_a ist das Verhältnis von geringstmöglichem mittleren Luftalter (bei gegebenem Luftwechsel) zum tatsächlich gemessenen mittleren Luftalter (vgl. Gleichung (2)). Das mittlere Luftalter bzw. das Durchschnittsalter der Luft ist minimal bei reiner Verdrängungsströmung, in diesem Fall ist der Luftaustauschgrad 1. Bei vollständiger Durchmischung ist $\eta_a = 0.5$.

$$\eta_a = \frac{\tau_v}{\tau_{\text{mittel}}} = \frac{1}{2 \cdot n \cdot \tau_{\text{mittel}}} \quad (2)$$

τ_v : geringstes Durchschnittsalter, τ_{mittel} : Durchschnittsalter der Raumluft,
 n : Luftwechselrate

Zur Bestimmung des Luftalters werden Erwartungswerte der Zeit gebildet (vgl. Gleichung (3)), wobei im Falle der angewendeten Konzentrations-Abkling-Methode die Wahrscheinlichkeitsdichte durch die Indikatorgas-Konzentration gegeben ist; der Indikator gibt als Verhältnis zur Anfangskonzentration den jeweiligen Frischluftanteil in der Raumluft wieder.

$$\tau_{\text{lokal}} = \int_0^{\infty} \frac{C_{\text{Indikator,lokal}}(t)}{C_{\text{Indikator,lokal}}(t=0)} dt$$

τ_{lokal} : lokales Luftalter, $C_{\text{Indikator,lokal}}$: Indikatorgaskonzentration an Messstelle

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Messung dargestellt. Zwischen Durchschnittsalter und lokalen Luftaltern bestehen kaum Unterschiede. Die geringen Unterschiede deuten daraufhin, dass keine Kurzschluss-Strömungen vorliegen bzw. alle untersuchten Räume gut in das Lüftungskonzept eingebunden sind.

Der Luftaustauschwirkungsgrad liegt bei 52 % und ist damit etwas besser als bei idealer Durchmischung. Dies ist aufgrund der gerichteten Durchströmung von Zuluft- in Abluftzonen zu erklären. Die Messwerte sind in Abschnitt 5.5 im Diagramm aufbereitet.

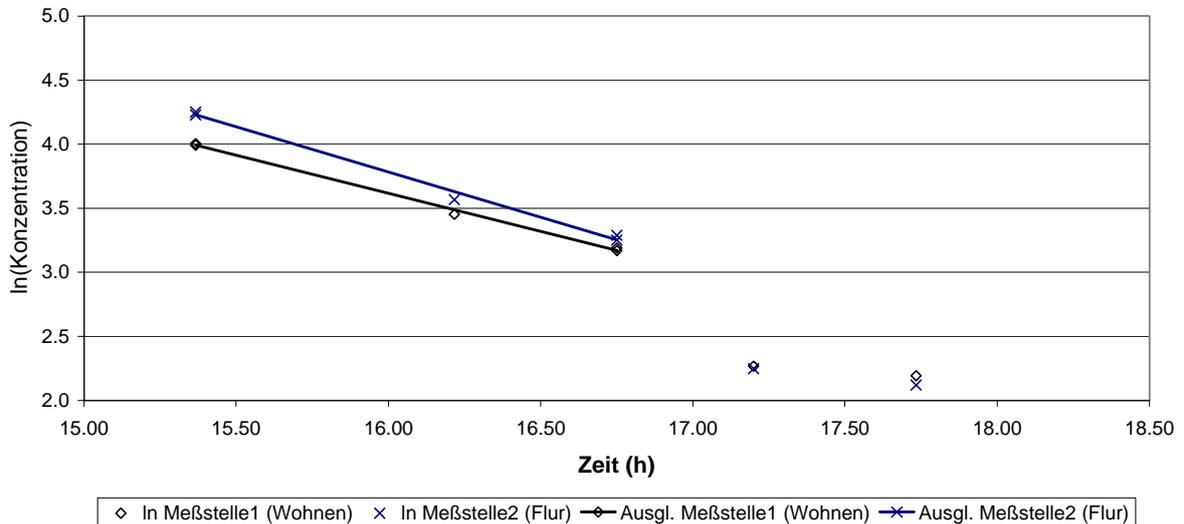
Tabelle 3: Ergebnisse Luftalter-Messung

	Wohnen	Flur	Schlafen NW-Raum	Küche
lokales Luftalter [h]	2.4 +- 0.1	2.3 +- 0.11	2.3 +- 0.1	2.3 +- 0.1
Durchschnittsalter der Luft bzw. mittleres Luftalter [h]	2.4			
mittlerer Luftwechsel [1/h]	0.41			
Luftaustauschwirkungsgrad	52% +- 5%			

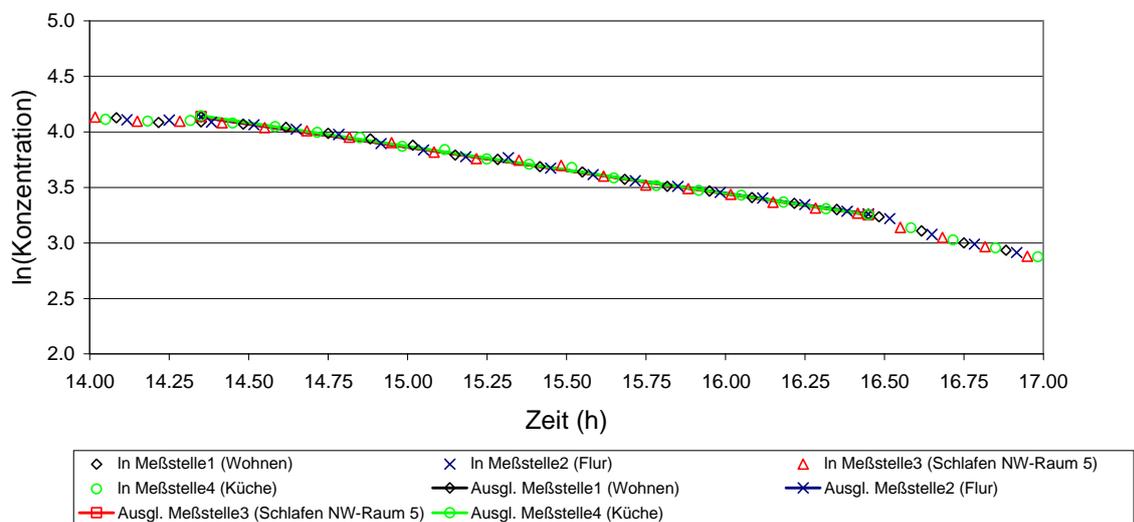
Die Wirksamkeit der Lüftungsanlagen ist damit als plangemäß anzusehen.

5.5 Diagramme zu den Indikatorgas-Messungen

Luftwechselfmessung EG West: geschlossene Fenster (logarithmiert)

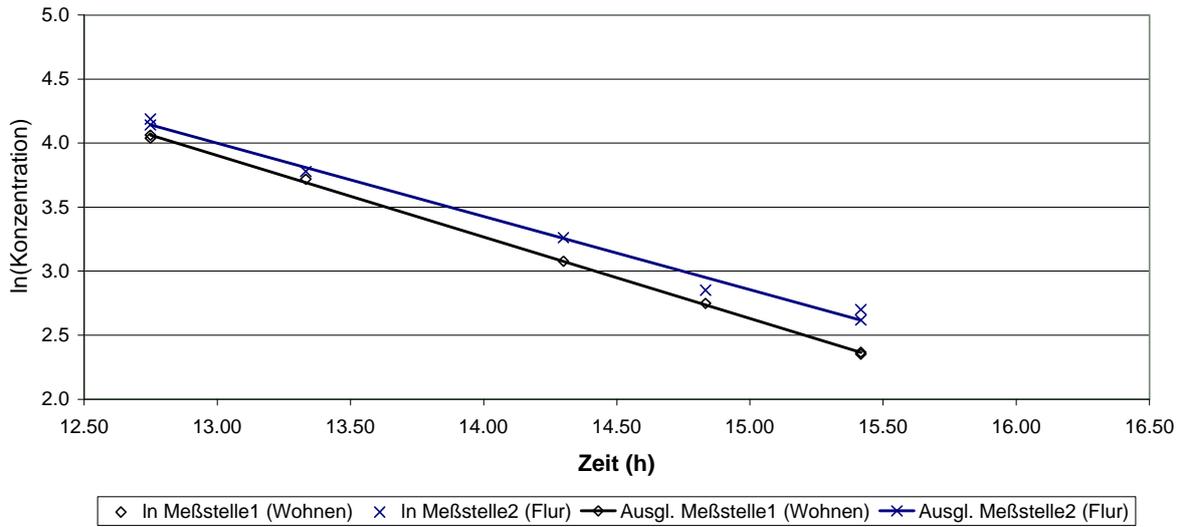


Luftwechselfmessung 1.OG West: geschlossene Fenster (logarithmiert)

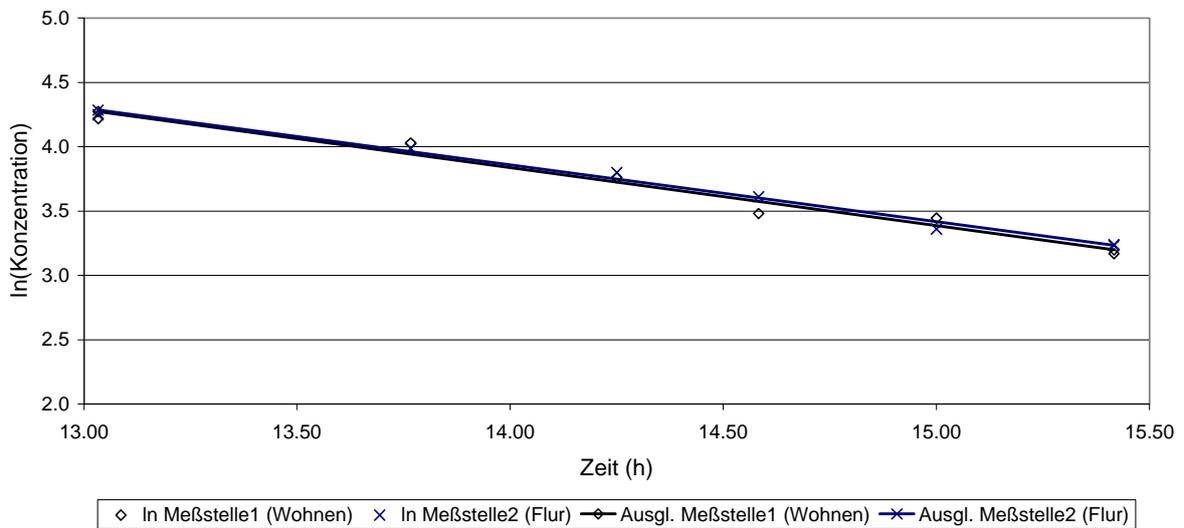




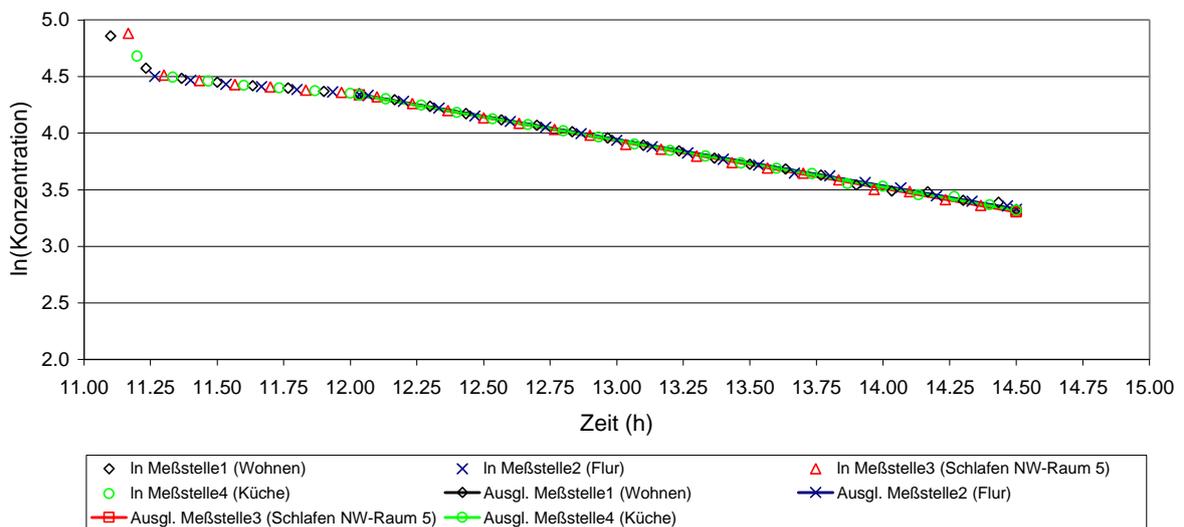
Luftwechselformung 2.OG West: geschlossene Fenster (logarithmiert)



Luftwechselformung EG Ost: geschlossene Fenster (logarithmiert)



Luftwechselformung 1.OG Ost: geschlossene Fenster (logarithmiert)



6 Thermografie zur Bauabnahme am 17.12.2002

Am 17.12.2002 fand in Nürnberg unter Beteiligung des Architekten Burkhard Schulze Darup und Dr. Wolfgang Feist (PHI) eine Abnahme der bisher ausgeführten Bauleistungen statt. Kontrolliert wurden:

- ? Die Homogenität der Außendämmung mit dem Wärmedämmverbundsystem (weitgehend fertiggestellt bis auf Teile des Außenputzes) mittels Außenthermografie,
- ? die Luftdichtheit des neuen Aufbaus auf der obersten Geschossdecke (vollständig fertiggestellt, jedoch sind einige Nachbesserungen im Bereich der Balkendurchdringungen erforderlich) mittels Thermografie im Dachraum,
- ? die Homogenität der Dämmung auf der obersten Geschossdecke und des Kniestockes (vollständig fertiggestellt) mittels Thermografie im Dachraum,
- ? die Dämmung des Heizraumes (noch unvollständig) mittels Thermografie von außen im Dachraum und von innen im Heizraum,
- ? die Dämmung der Kellerdecke (zu ca. 75 % fertiggestellt) mittels Thermografie vom Keller aus,
- ? die Qualität des Fenstereinbaus und die Wärmebrückenwirkung des Fußpunktes des Mauerwerks an der Kellerdecke durch Innenthermografie,
- ? die Luftundichtheit durch Restleckagen der Fassade und der Fenster durch Unterdruck-Innenthermografie in der Erdgeschosswohnung / Ost.



Abbildung 56: Gesamtansicht der Südfassade 17.12.2002. Zum Zeitpunkt der Thermografie waren Hebebühne, Kranwagen und Balkonbaustelle noch nicht da (Foto Schulze Darup)



Abbildung 57: Thermografie der Südfassade. Das Fenster im 2. OG/West ist gekippt. Die nicht saubere Anarbeitung des WDVS an der Traufe im Südwesten ist erkennbar (Warmluftaustritt). Die Befestigungsstäbe für den Balkon zeichnen sich (schwach) ab. Die Qualität von WDVS und Fenstereinbau ist ansonsten einwandfrei.



Abbildung 58: Westteil der Südfassade 17.12.2002. Dahinter ein Altbau zum Vergleich.

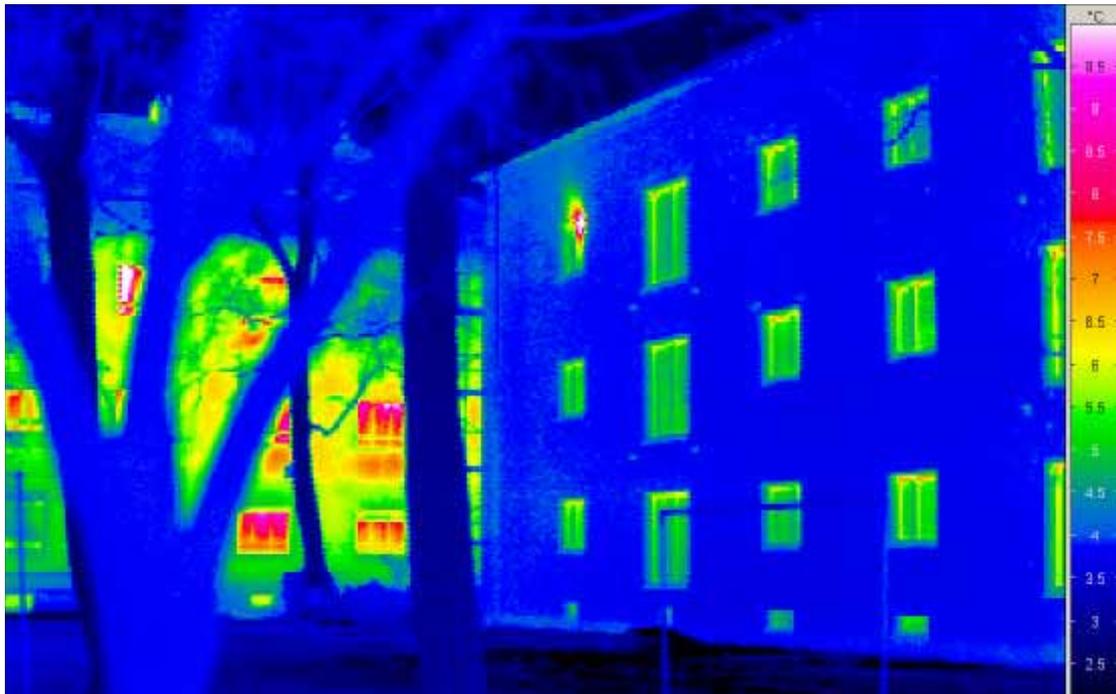


Abbildung 59: Thermografie des Westteils der Südfassade. Das Fenster im 2. OG/West ist gekippt. Zum Vergleich ist im Hintergrund ein nicht gedämmter Altbau mit konventionellen Fenstern zu sehen. Die Oberflächentemperaturen liegen auf der Fassade etwa bei den Werten der Fenster von Jean-Paul-Platz-4, auf den Fensteroberflächen beträchtlich höher. Das Bild illustriert das erreichte hervorragende Dämmniveau.



Abbildung 60: Westteil der Traufe der Südfassade 17.12.2002 / Thermografie noch ohne Balkonstütze.



Abbildung 61: Thermografie des Westteils der Traufe der Südfassade. Das Fenster im 2. OG ist gekippt. An der Traufe gibt es einige Stellen mit Warmluftaustritt (weiße Pfeile), an denen das WDVS nicht luft- und winddicht angebracht ist. Hier kann es zu Feuchteaustritt kommen. Erkennbar ist die Stahlbefestigung des später angebauten Balkons (grün-gestreifter Pfeil), diese Wärmebrückenwirkung ist unbedeutend.



Abbildung 62: Kleines Südfenster.

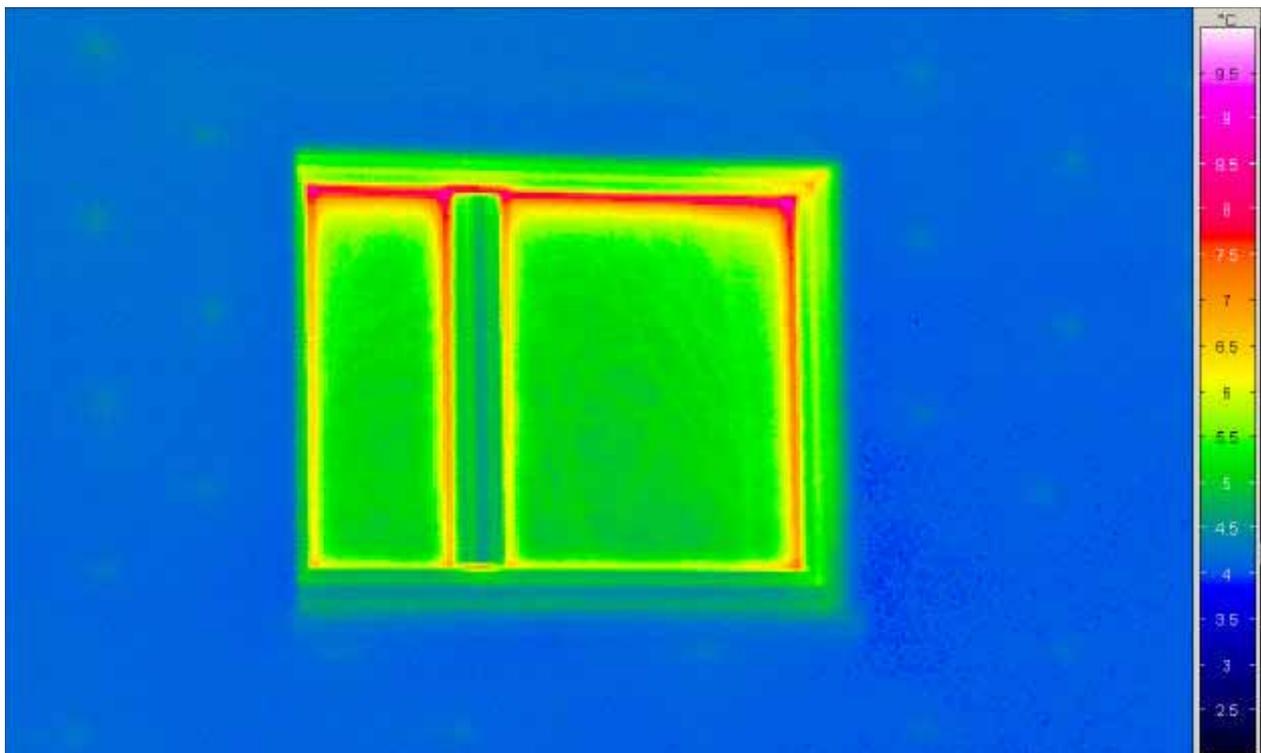


Abbildung 63: Thermografie des kleinen Südfensters. Die Einbauwärmebrücke ist durch die Überdämmung bis auf den Fensterbankbereich praktisch eliminiert. Rahmen und Verglasung dämmen etwa vergleichbar gut. Deutlich erkennbar ist aber die Wärmebrücke durch den Randverbund im Glasrandbereich und der Effekt durch die interne Konvektion des Füllgases (höhere Temperaturen am oberen Glasrand). Diese Effekte sind nach dem Stand der Technik nicht vermeidbar.



Abbildung 64: Südfenstertür (zum Zeitpunkt der Thermografie noch ohne Balkon).

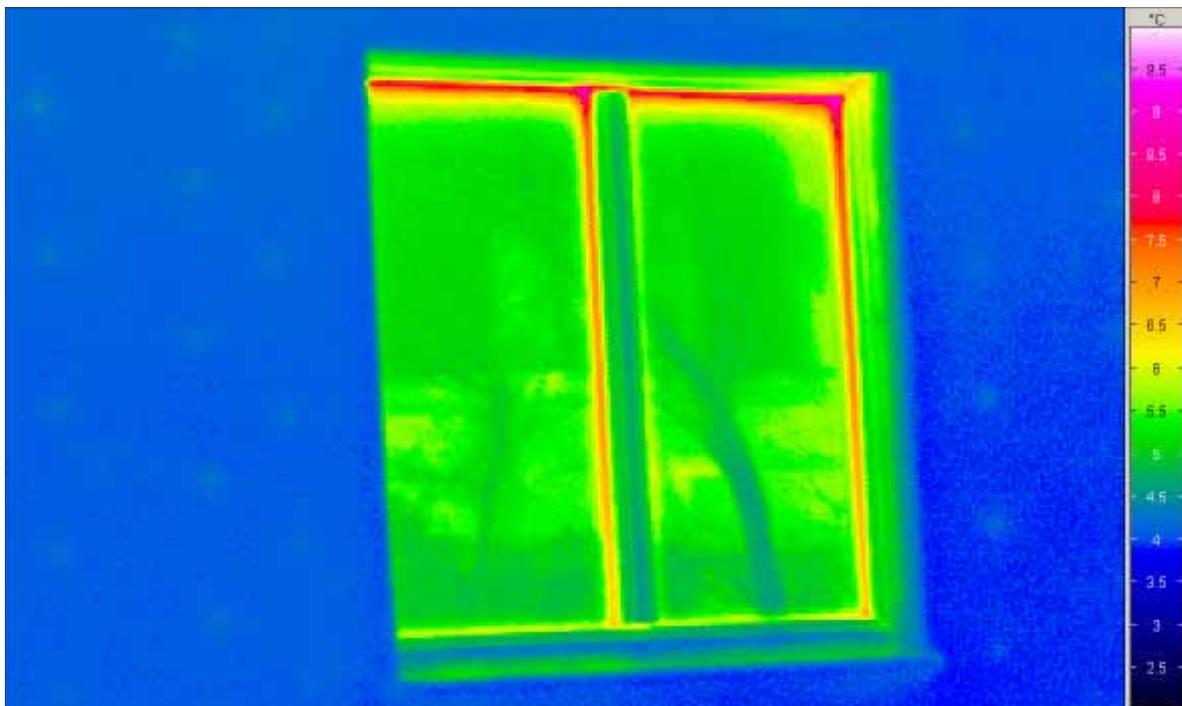


Abbildung 65: Thermografie der Südfenstertür. Die Einbauwärmebrücke ist durch die Überdämmung bis auf den Fensterbankbereich praktisch eliminiert. Auch hier sind die Wärmebrücke durch den Randverbund und der Effekt durch die interne Konvektion des Füllgases (höhere Temperaturen am oberen Glasrand) deutlich zu erkennen (der linke Glasrand ist durch die Laibung verdeckt).



Abbildung 66: Ostfassade; man beachte die Planen am Gerüst.

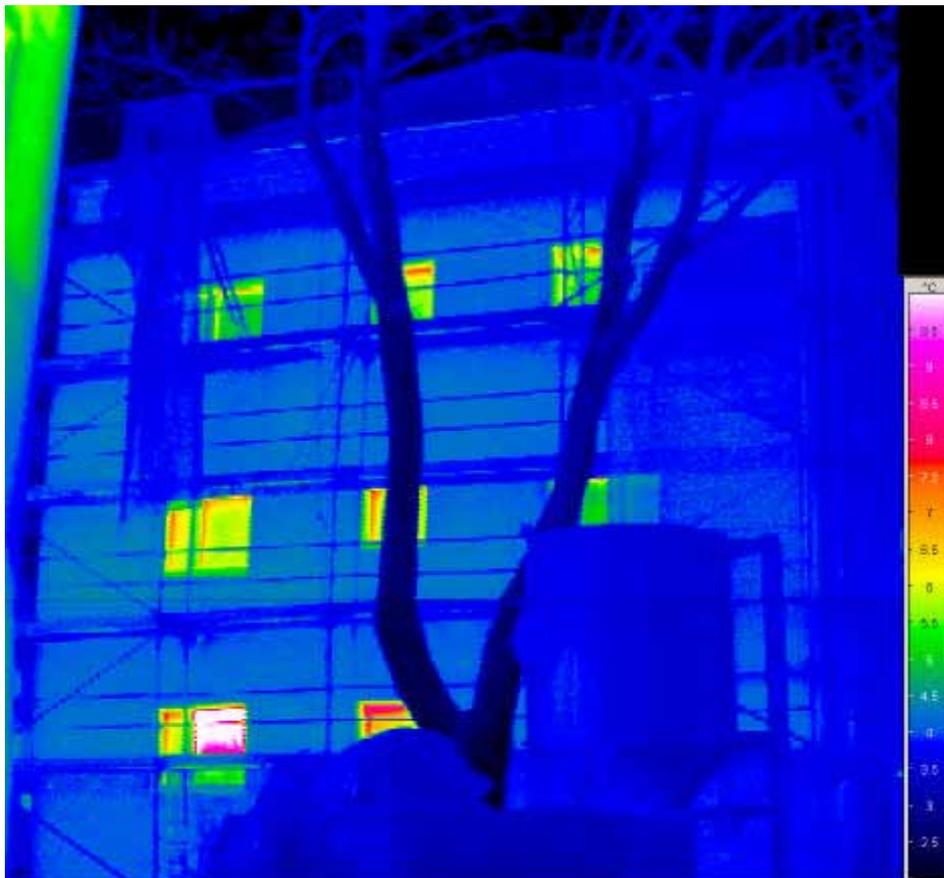


Abbildung 67: Thermografie der Ostfassade (zusammengesetztes Bild). Der rechte Fensterflügel im EG/links ist gekippt. Im Nordteil oben sieht man die Bauschildplane, nicht die Außenwand, im Vordergrund den Putzbehälter. Auch die Leitern und das Gerüst sind gut erkennbar, aber keine Auffälligkeiten in der Bauausführung.



Abbildung 68: Nordfassade; man beachte die Planen am Gerüst im Bereich der Traufe. Die Thermografieaufnahme erfolgte am Morgen.

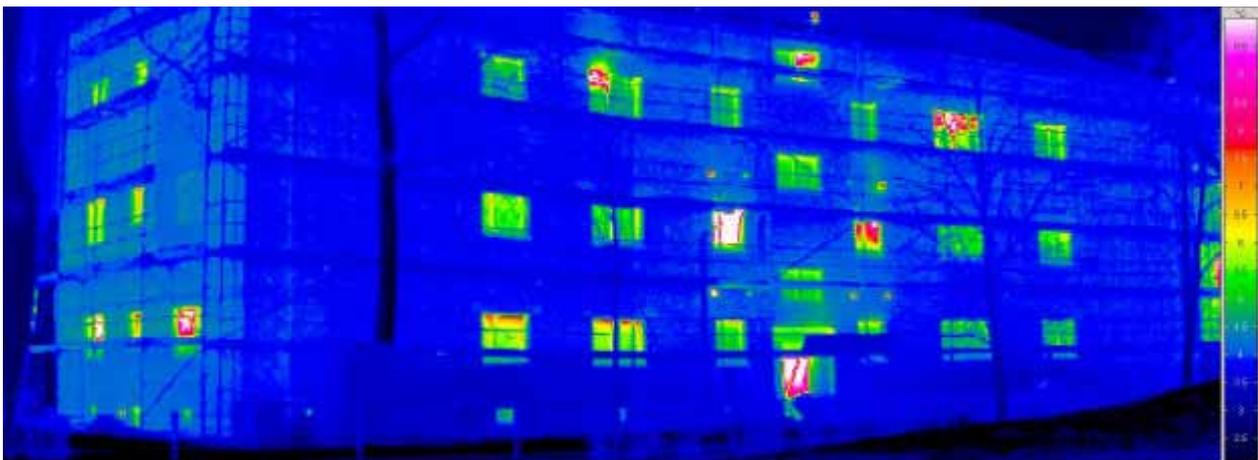


Abbildung 69: Thermografie der Nordfassade (zusammengesetztes Bild). Geöffnet sind:

- im EG: die Haustür;
- im 1.OG: der rechte Flügel des 3. Fensters von links, ganz geöffnet;
der rechte Flügel des 4. Fensters von links, gekippt;
- im 2. OG: der linke Flügel des 2. Fensters von links, gekippt;
beide Flügel des 2. Fensters von rechts, gekippt.
- im Treppenhaus: oberstes Fenster (Mitte), leicht gedreht.

Gut erkennbar sind die Fortluftauslässe der Lüftungsanlagen im EG und 1. OG; die des 2. OG befinden sich hinter dem Gerüst. Die Fortlufttemperaturen liegen laut Thermografie zwischen 9 und 12 °C. Dies würde eine nur mäßige Wärmebereitstellung des Wärmerückgewinnungsgerätes bedeuten. Nach Dämmung der kalten Leitungen sollte die Fortluft deutlich kälter werden. Das Bild zeigt keine Auffälligkeiten in der Bauausführung.



Abbildung 70: Haustür, geschlossen. Erkennbar ist das alte Türgewand aus Betonprofilen, die bisher ungedämmt sind.

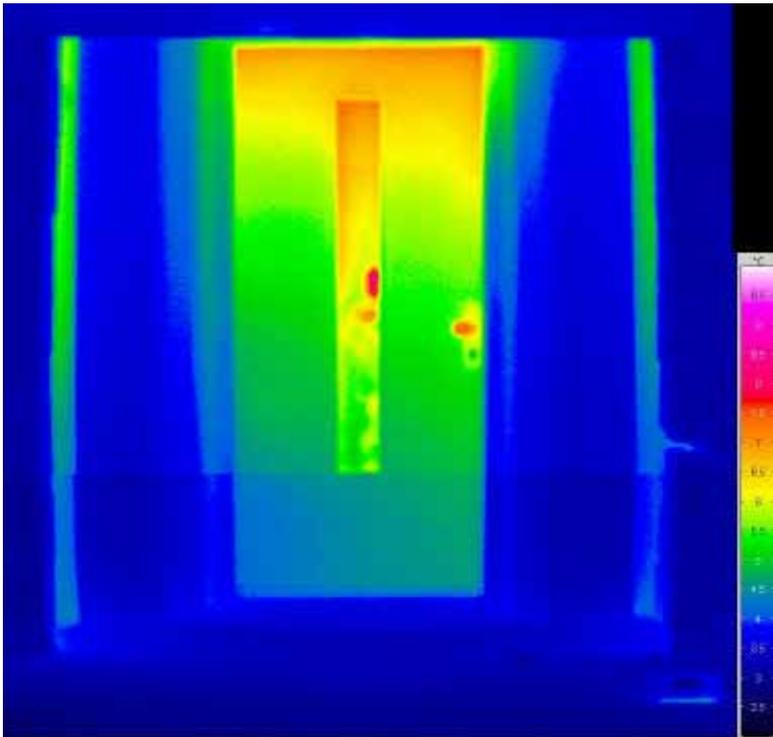


Abbildung 71: Thermografie der Haustür (zusammengesetztes Bild). Die Tür stand die meiste Zeit während des Thermografietermins offen (Handwerkerverkehr), daher sind die Oberflächentemperaturen nicht repräsentativ für normale Nutzung. Die noch ungedämmte umlaufende Nut um das Betongewand tritt erwärmt hervor.



Abbildung 72: Kellerfenster in der Nordfassade mit Schutzfolie.

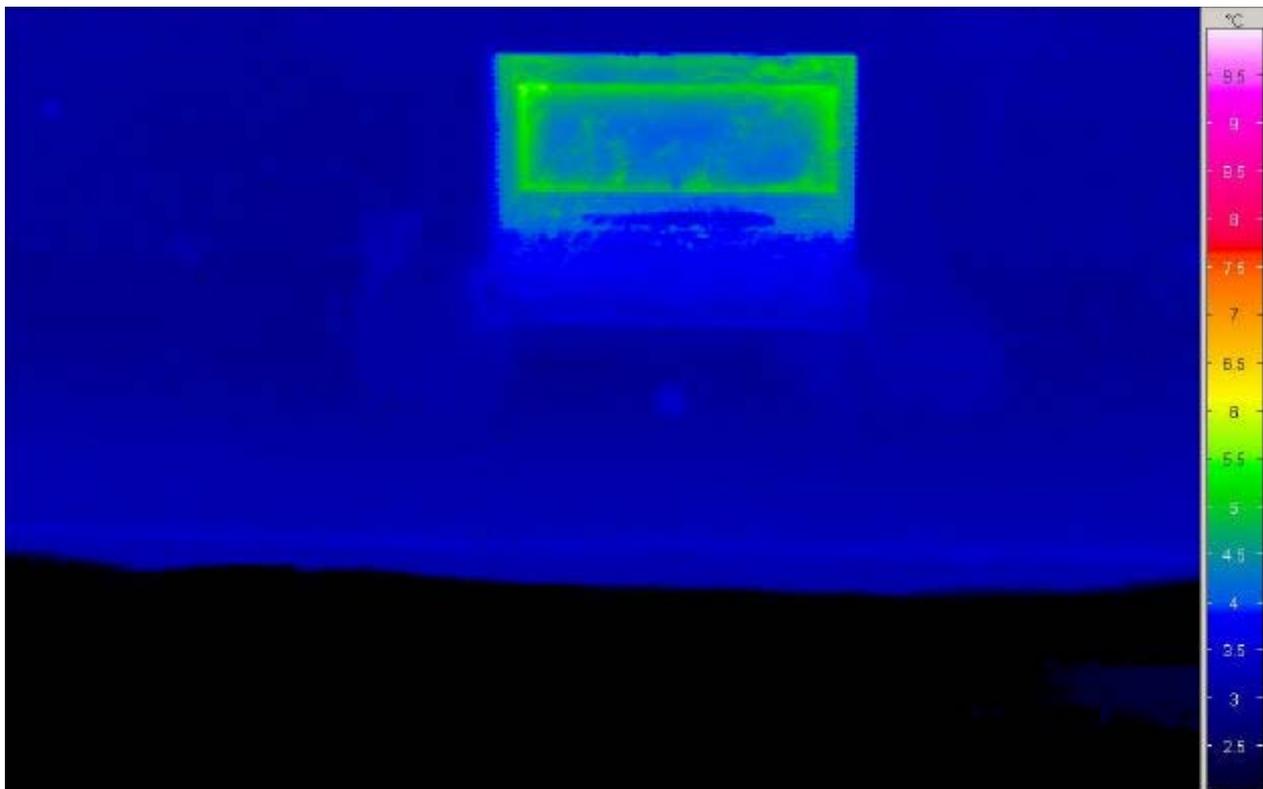


Abbildung 73: Thermografie des Kellerfensters. Trotz Folie ist der Randverbund gut zuerkennen. Die relativ frisch eingeputzte Eckverstärkung ist andeutungsweise zu sehen sowie etwas heller blau der Dübelkopf mittig unter dem Fenster. Die Wärmebrücken durch die Dübel sind offensichtlich vernachlässigbar. Das Bild zeigt keine Auffälligkeiten. Auch die Perimeter-Dämmschürze ist (wie auch umlaufend am ganzen Gebäude) ohne Wärmebrücken ausgebildet.

Der Erdboden ist sichtbar kälter als die Putzoberfläche (bedingt durch die thermische Trägheit; bis zwei Tage vor der Thermografie herrschte in Nürnberg strenger Frost).



Abbildung 74: Thermografiebild der Perimeter-Dämmschürze an der Nordfassade. Die Temperaturen sind sehr gleichmäßig, es gibt keinen Hinweis auf Ausführungsmängel.



Abbildung 75: Norddachfläche, zentraler Bereich über dem Heizraum (links) und dem Treppenhaus (rechts). Aufnahme von Nordost.

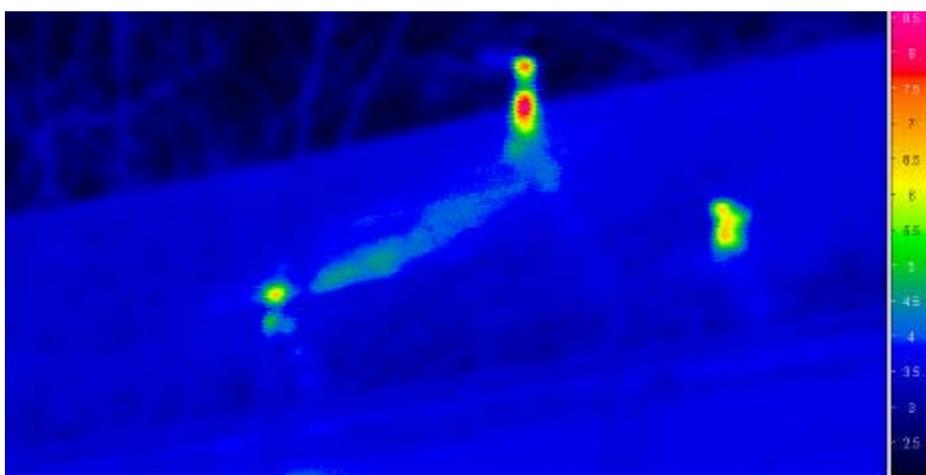


Abbildung 76: Thermografiebild der Norddachfläche, Aufnahme von Nordwest. Erkennbar: - Abgasrohr mit Deckel (ganz oben)
- zwei Fallrohrentlüftungsrohre (vgl. spätere Diskussion)
- Etwas erwärmte Dachfläche über dem Heizraum (zwischen linkem Fallrohrentlüfter und Abgasrohr; man beachte, dass im Heizraum 50°C herrschen; die Dämmung ist offenbar gut wirksam)



Abbildung 77: Westfassade, EG von Putzsilo und Bauwagen verdeckt.

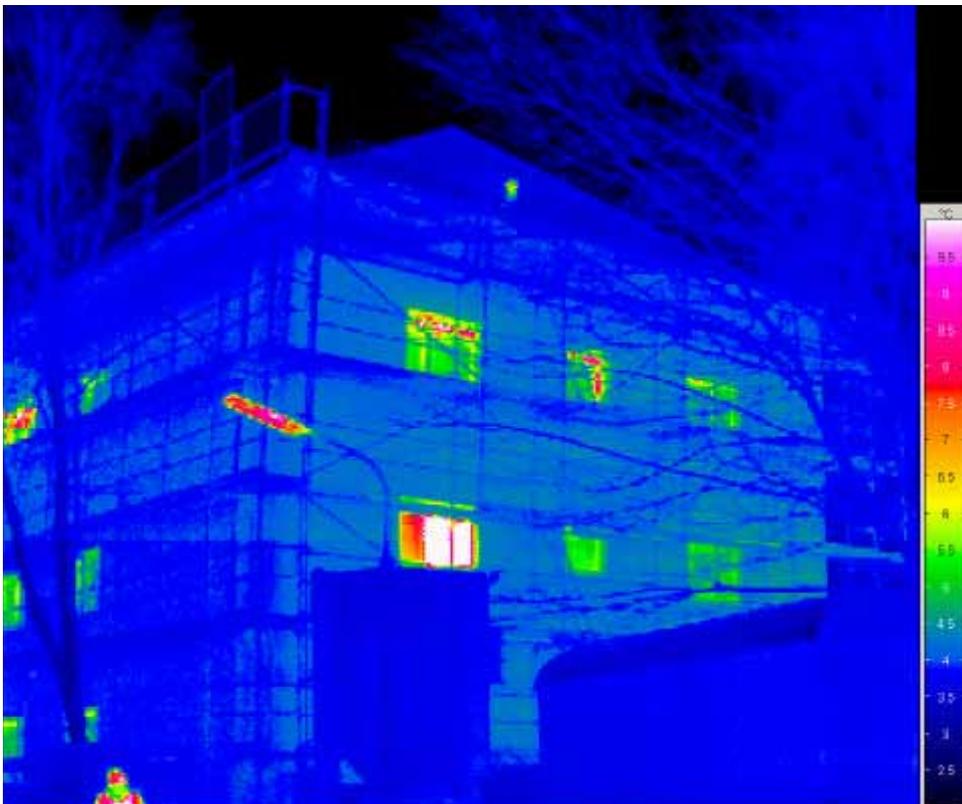


Abbildung 78: Thermografie der Westfassade (zusammengesetztes Bild). Der rechte Fensterflügel im 1. OG über dem Putzsilo steht (gedreht) offen. Gut erkennbar ist die Straßenlaterne. Im Walmdach ist ein weiterer Fallrohrentlüfter sichtbar, im Vordergrund unten links eine Person. Es gibt keine Hinweise auf Qualitätsmängel.

Abschließende Bemerkungen zur Außenthermografie

Am 17.12.2002 fanden die Qualitätssicherer die Außendämmung des Gebäudes Jean-Paul-Platz 4 nahezu vollständig fertiggestellt vor. Lediglich an einigen Stellen im Erdgeschoss fehlte noch die Armierungsschicht und der Außenputz. Dies hat jedoch auf die Wirksamkeit der Dämmung nur einen geringen Einfluss.

Die vorliegenden Kontrollaufnahmen bewerten wir zusammenfassend wie folgt:

1. Die Außendämmung mit dem Wärmedämmverbundsystem ist vollständig wie berechnet wirksam. Die Außenoberflächentemperaturen weisen im gedämmten Bereich eine sehr gute Homogenität aus.
2. Die Qualität der Dämmarbeiten ist bis auf den unter 3. genannten Punkt als sehr hochwertig anzusehen. Weder bedeutende Wärmebrücken noch Undichtheiten sind auf den Aufnahmen zu erkennen.
3. Einzig im Traufbereich "West" der Südfassade gibt es einen Warmluftaustritt, der auf nicht dichte Verklebung der obersten Dämmplatten zurückzuführen ist (Abbildung 61). Hier kann und sollte vom Dachboden aus nachgearbeitet werden (vgl. abschließende Bemerkungen zur Dämmung des Dachbodens in Kapitel 7).
4. Auch die Überdämmung der Fensterrahmen ist plangemäß ausgeführt worden und zeigt den erwünschten Erfolg.
5. Die Fenster zeigen durchweg die plangemäß guten Dämmeigenschaften; bei den zum Zeitpunkt der Aufnahmen geöffneten Fenstern war die Qualität allerdings nicht kontrollierbar.
6. Die Wärmebrückenwirkung der Dübel ist ebenso unbedeutend wie die der wenigen Befestigungspunkte der neuen Südbalkone.

7 Thermografie Dachboden



Abbildung 79: Kalibriermessung Dachbodenoberfläche: Mit dem markierten Pt-100 Oberflächenfühler wurde eine Temperatur von 5.15 °C ($\pm 0.2\text{ K}$) gemessen. Die Thermografie liefert mit 4.9 °C ($\pm 1\text{ K}$) ein im Rahmen der Messgenauigkeit übereinstimmendes Ergebnis.

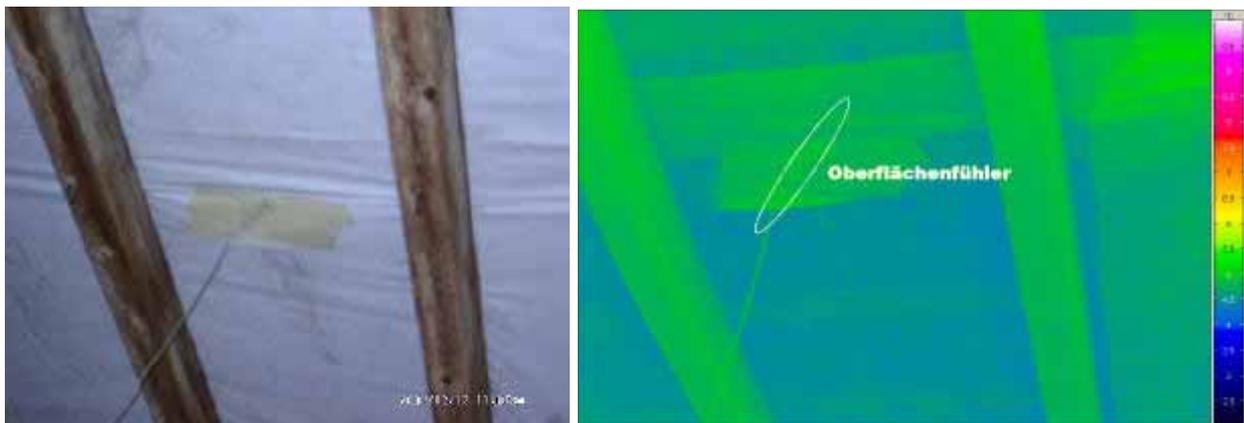


Abbildung 80: Kalibriermessung Unterspannbahn: Mit dem Pt-100 Oberflächenfühler wurde eine Temperatur von 5.43 °C ($\pm 0.2\text{ K}$) gemessen. Die Thermografie liefert mit 4.8 °C ($\pm 1\text{ K}$) ein im Rahmen der Messgenauigkeit übereinstimmendes Ergebnis.



Abbildung 81: Dachboden, Südwestecke, Übersicht

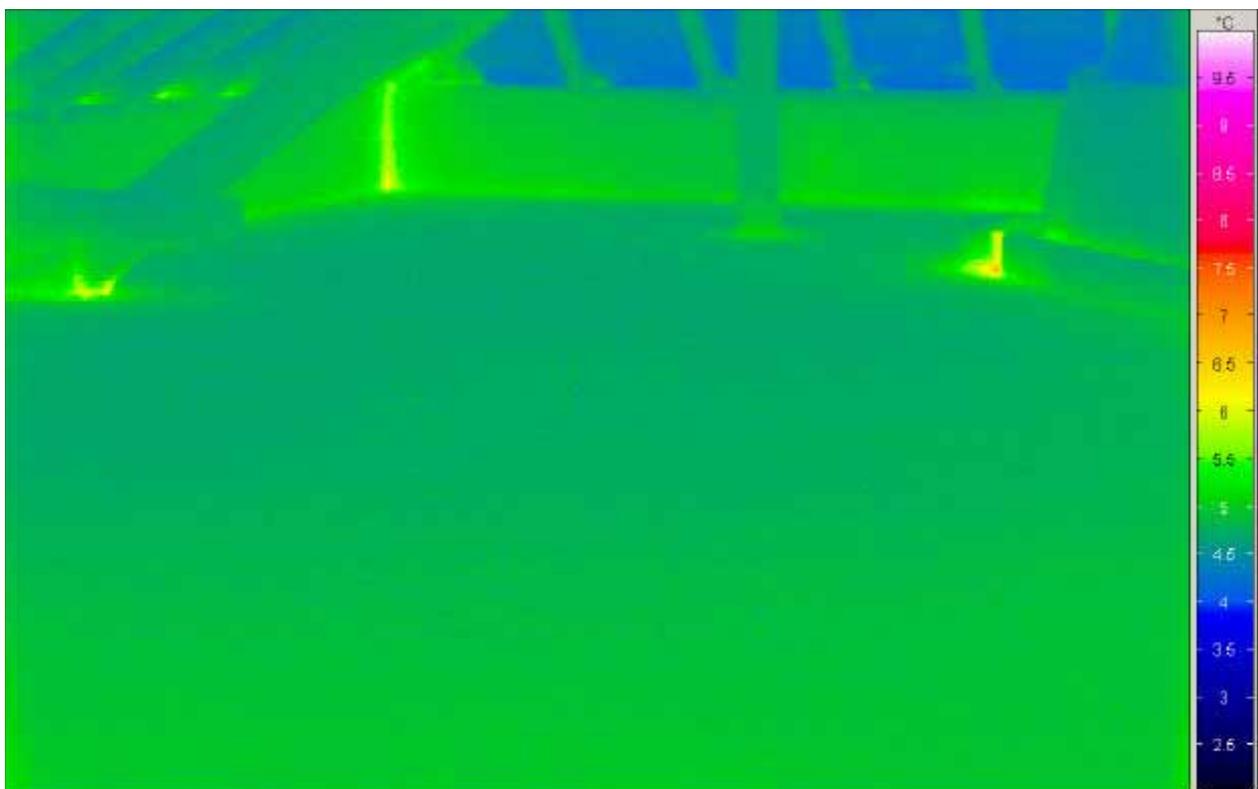


Abbildung 82: Die Temperaturen auf dieser Thermografie streuen sehr wenig. Die Unterspannbahn ist nur geringfügig kälter wie der Zementestrich. Nur an einigen wenigen Punkten gibt es "Hotspots" die im Folgenden noch genauer behandelt werden.



Abbildung 83: Dachboden, Westbereich, Übersicht

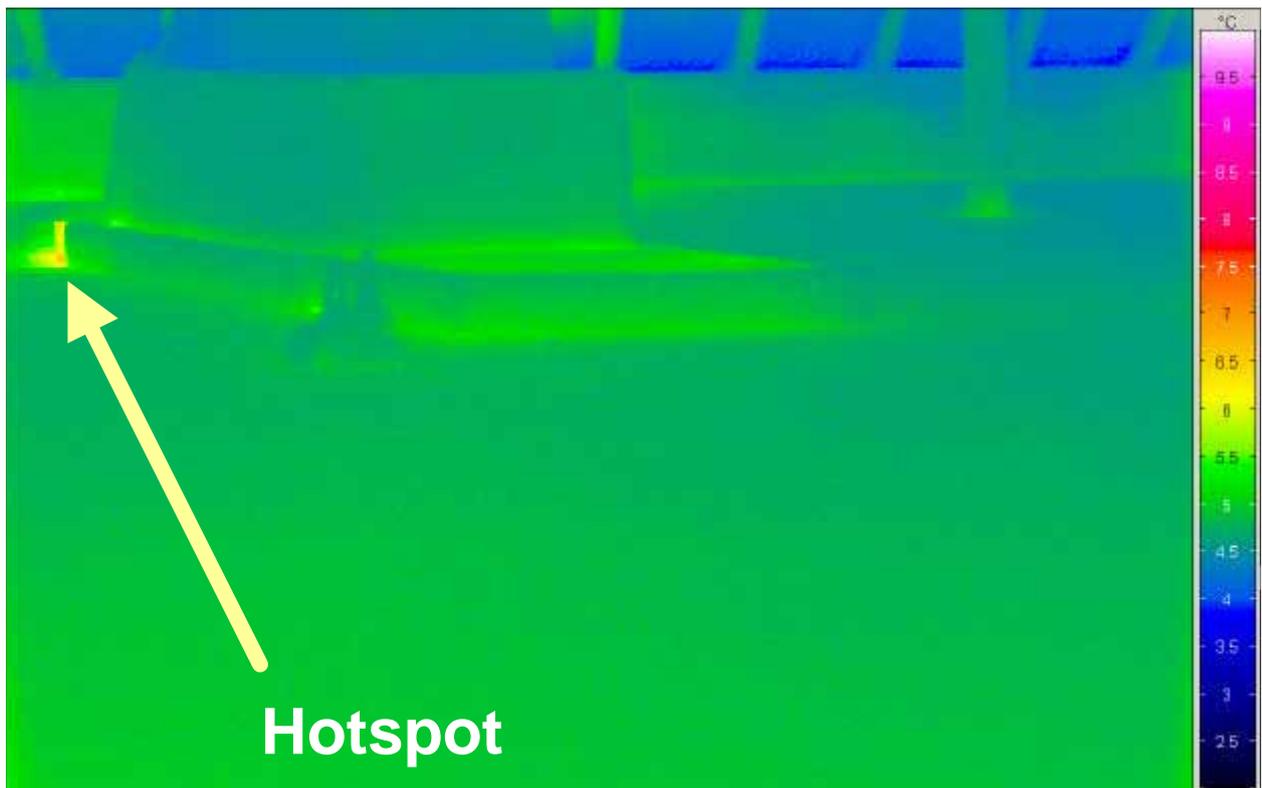


Abbildung 84: Die Temperaturen streuen extrem wenig. Nur ein Punkt mit "Hotspot" ist erkennbar (vgl. folgende Analysen).



Abbildung 85: Dachboden, Nordwestecke, Übersicht

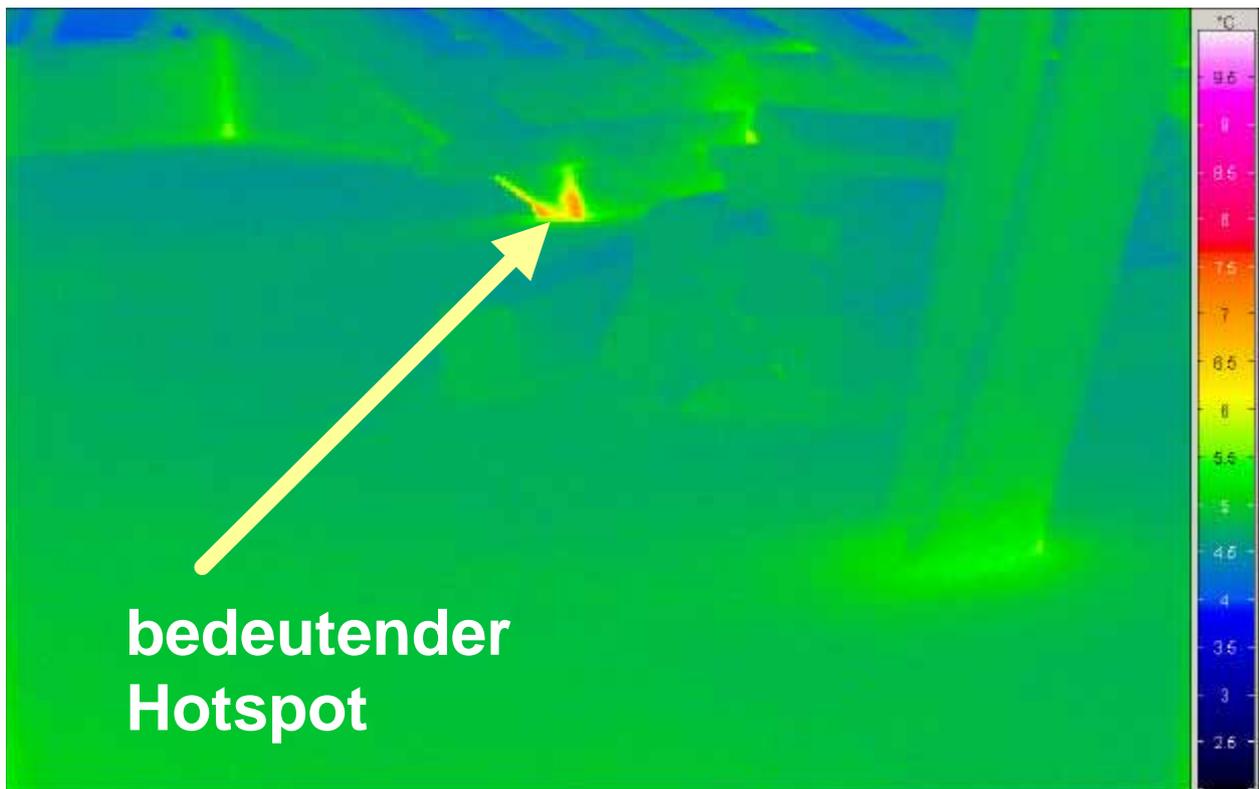


Abbildung 86: Dachboden, Nordwestecke. Die Temperaturen streuen extrem wenig. Nur ein Punkt mit "Hotspot" ist erkennbar (vgl. folgende Analysen).



Abbildung 87: Dachboden, Ostseite, Übersicht (nicht vom gleichen Standort aufgenommen wie die folgenden Thermografiebilder)

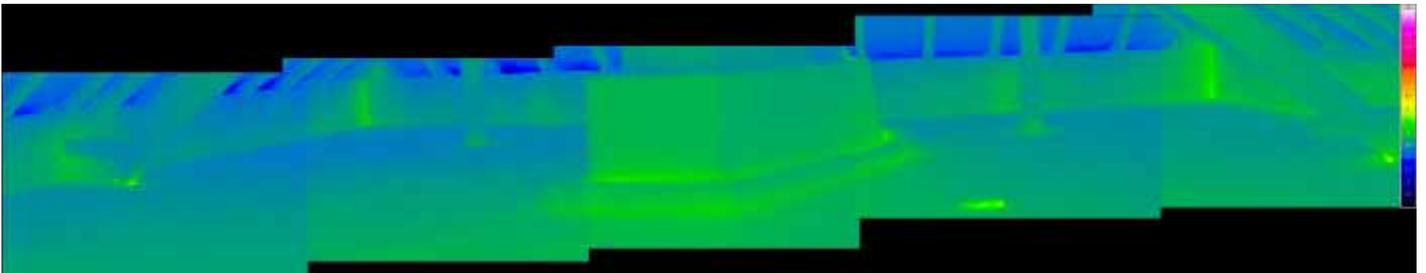


Abbildung 88: Dachboden, Ostseite, Übersicht (zusammengesetzte Thermografieaufnahmen). Die Temperaturen streuen extrem wenig. Hier sind keine bedeutenden Temperaturerhöhungen erkennbar. Im Vordergrund ist einer der alten Kaminbauten im Bild. Der helle Fleck vorn mittig in der 2. Teilaufnahme von rechts ist der Datenlogger für die Temperaturmessung (vgl. Abbildung 79).



Abbildung 89: Dachboden, Bereich im Norden hinter dem Heizraum.

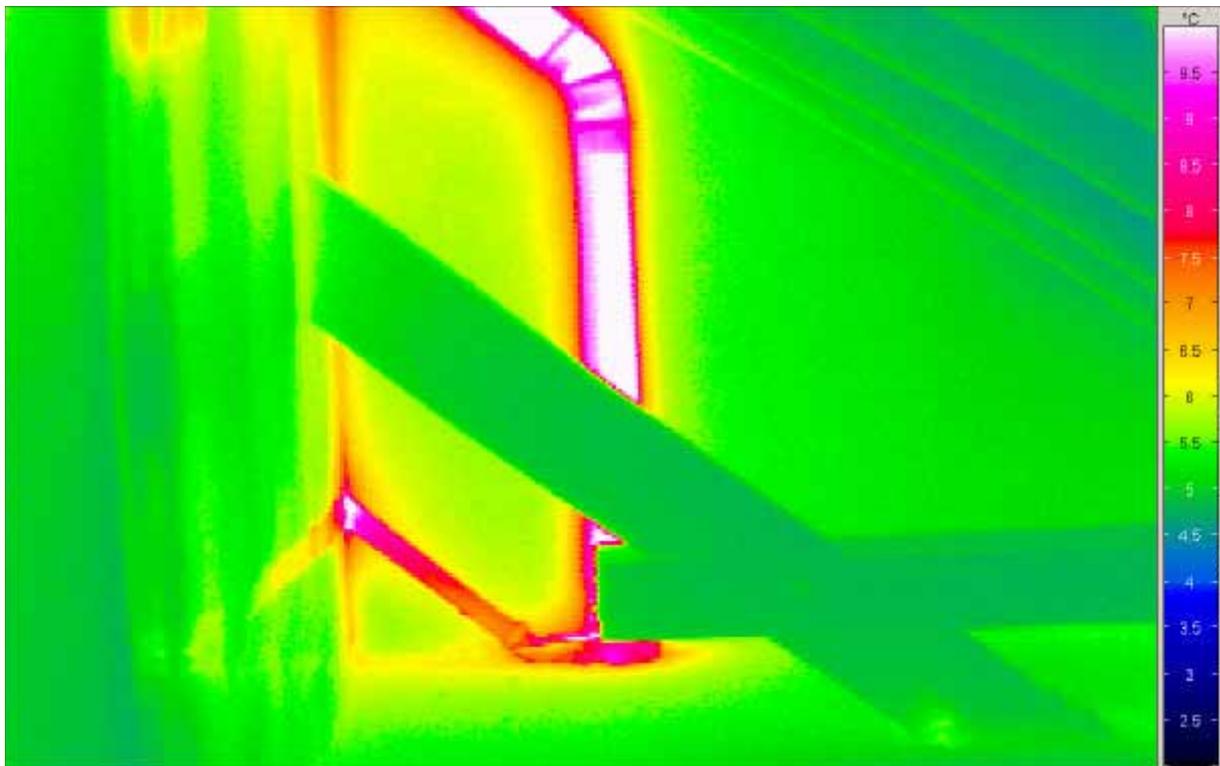


Abbildung 90: Dachboden, Bereich im Norden hinter dem Heizraum. Auffällig ist die Fallrohrentlüftung mit Oberflächentemperaturen über 10°C; auch die Kondensatableitung aus dem Heizraum ist erkennbar. Die Wand zum Heizraum weist im Bereich der Stiele etwas höhere Temperaturen auf, dies ist aber akzeptabel. Die Wärmeverluste durch die Fallrohrentlüftung sind beträchtlich.

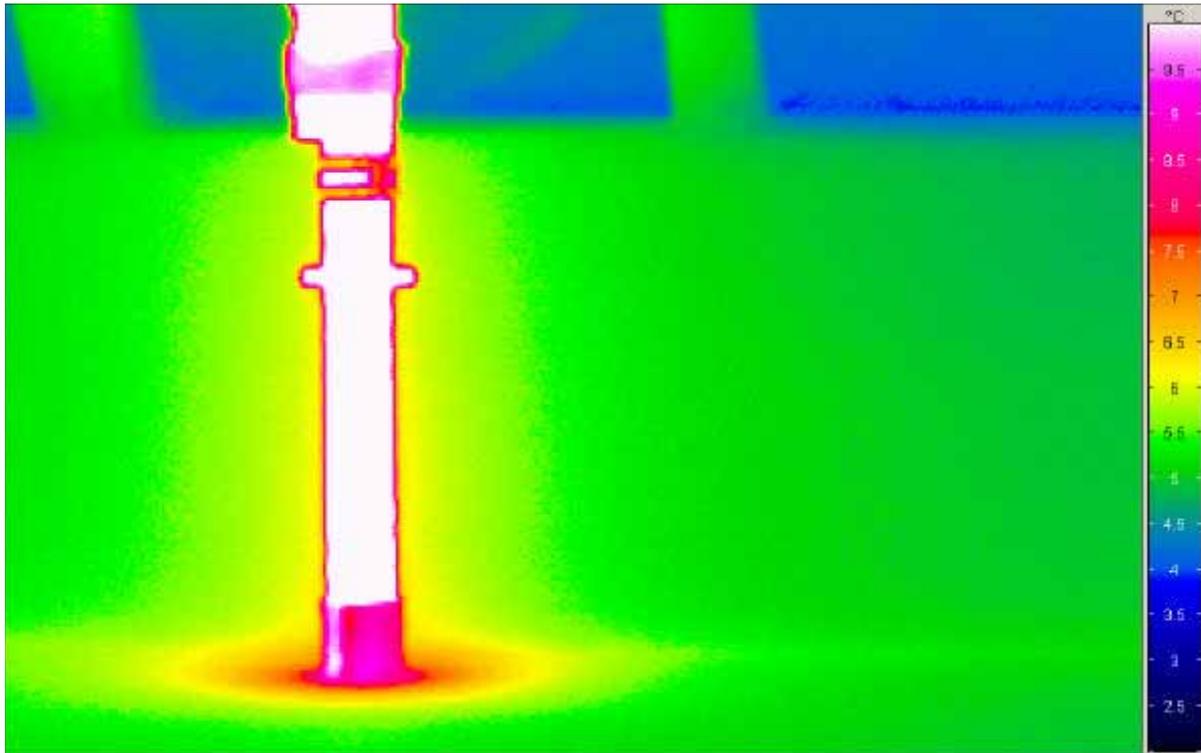


Abbildung 91: Dachboden, Fallrohrentlüftung mit Oberflächentemperaturen über 15°C (Westseite). Die Wärmeverluste durch die Fallrohrentlüftung sind beträchtlich. Das PHI empfiehlt den Einsatz von Belüftungsventilen; die Kanalbelüftung kann durch ein einziges mit Ventil abgeschlossenes Belüftungsrohr gewährleistet werden.

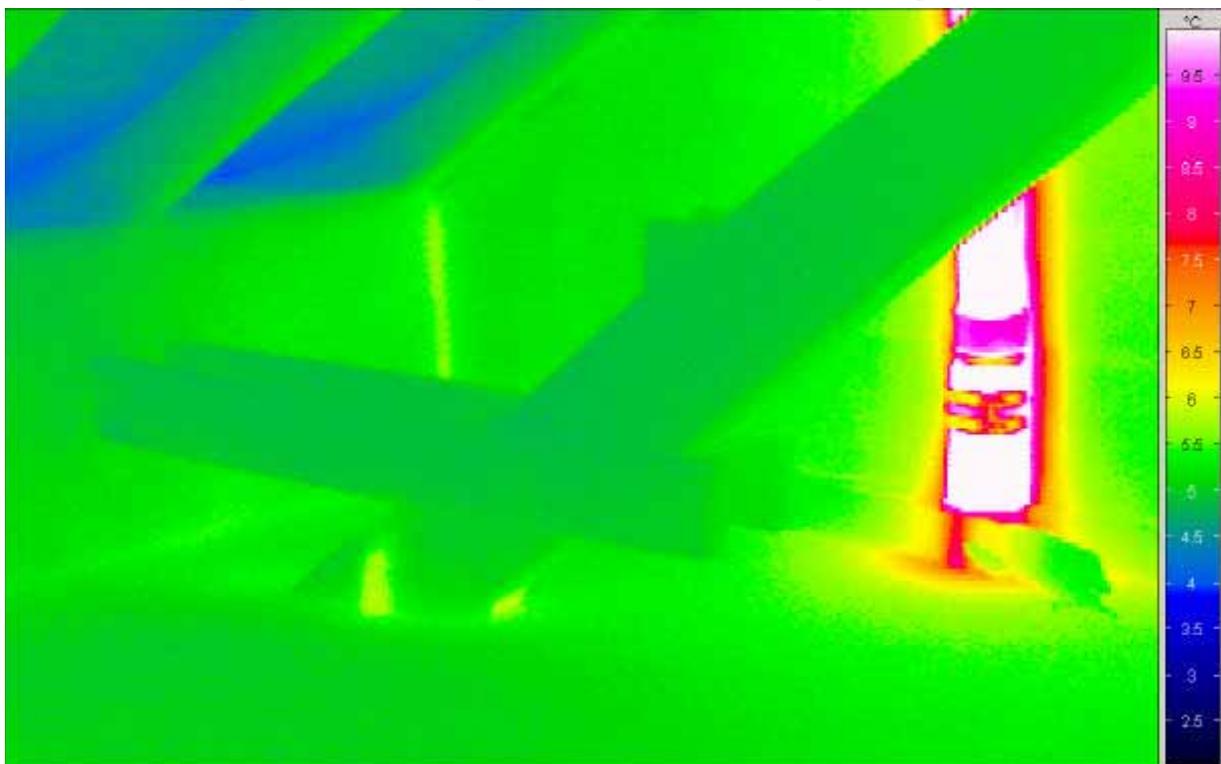


Abbildung 92: Dachboden, Fallrohrentlüftung mit Oberflächentemperaturen über 15 °C (nordwestlich des Treppenhauses). Die Wärmeverluste durch die Fallrohrentlüftung sind beträchtlich. Das PHI empfiehlt den Einsatz von Belüftungsventilen; die Kanalbelüftung kann durch ein einziges mit Ventil abgeschlossenes Belüftungsrohr gewährleistet werden.

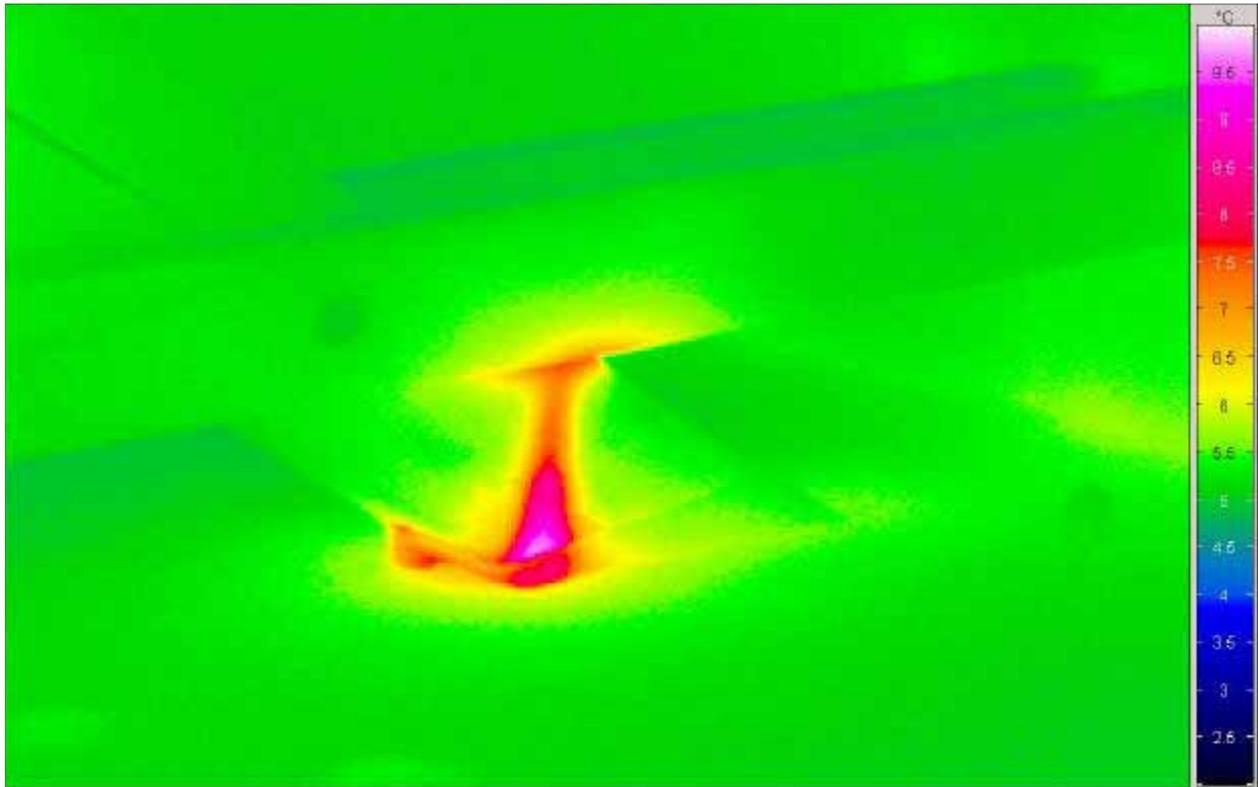


Abbildung 93: Dachboden; Dachträgerbalken an zweiter Stelle von Osten auf der Südseite mit auffälligem "Hotspot" (Oberflächentemperatur bis 10 °C). Der Farbverlauf zeigt eindeutig eine Warmluftfahne an. Die Luft tritt zwischen Balken und Randstreifen aus. Dieser Luftaustritt muss behoben werden, da die Luft auch Feuchtigkeit transportiert.

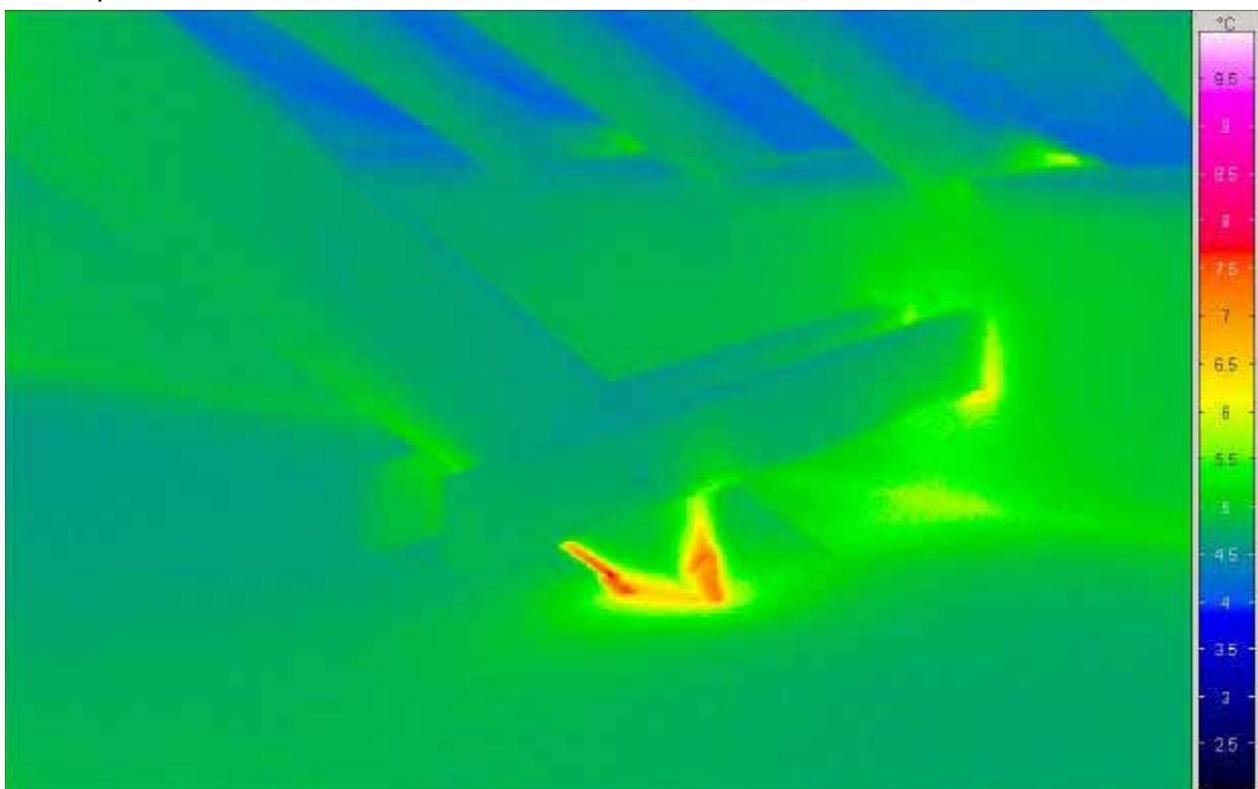


Abbildung 94: Weitere bedeutende Luftaustrittsstelle am ersten Balken von Westen auf der Nordseite. Vgl. auch Abbildung 86 zur Lage dieser Stelle.



Abbildung 95: Dachboden, Schornsteinverzug mit "Hotspot"- Oberflächentemperaturen über 12 °C (Westseite). Hier ist die Luftdichtung nicht perfekt und auch ein Loch in der Spachtelung, so dass Warmluft austritt.

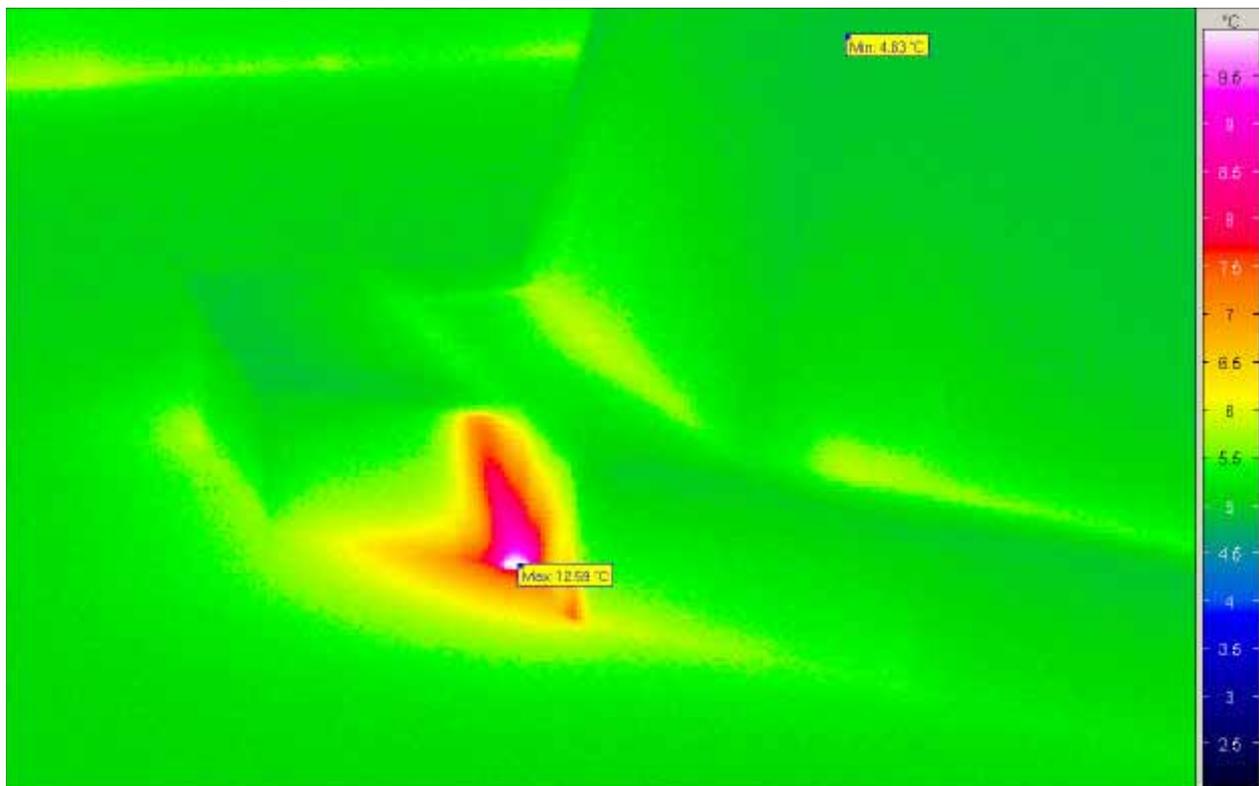


Abbildung 96: Der "Hotspot" aus dem Loch in der Spachtelung von Abbildung 95.



Abbildung 97: Dachboden, Kopfbereich der Kniestockdämmung, Südseite, zweites Feld von West. Hier wurde das WDVS nicht luftdicht verklebt, so dass warme, feuchte Luft hinter den Dämmplatten nach oben strömt, an der Lücke in der Spachtelmasse austritt und zu Tauwasserbildung unter der Unterspannbahn führt (Tropfen sind erkennbar).

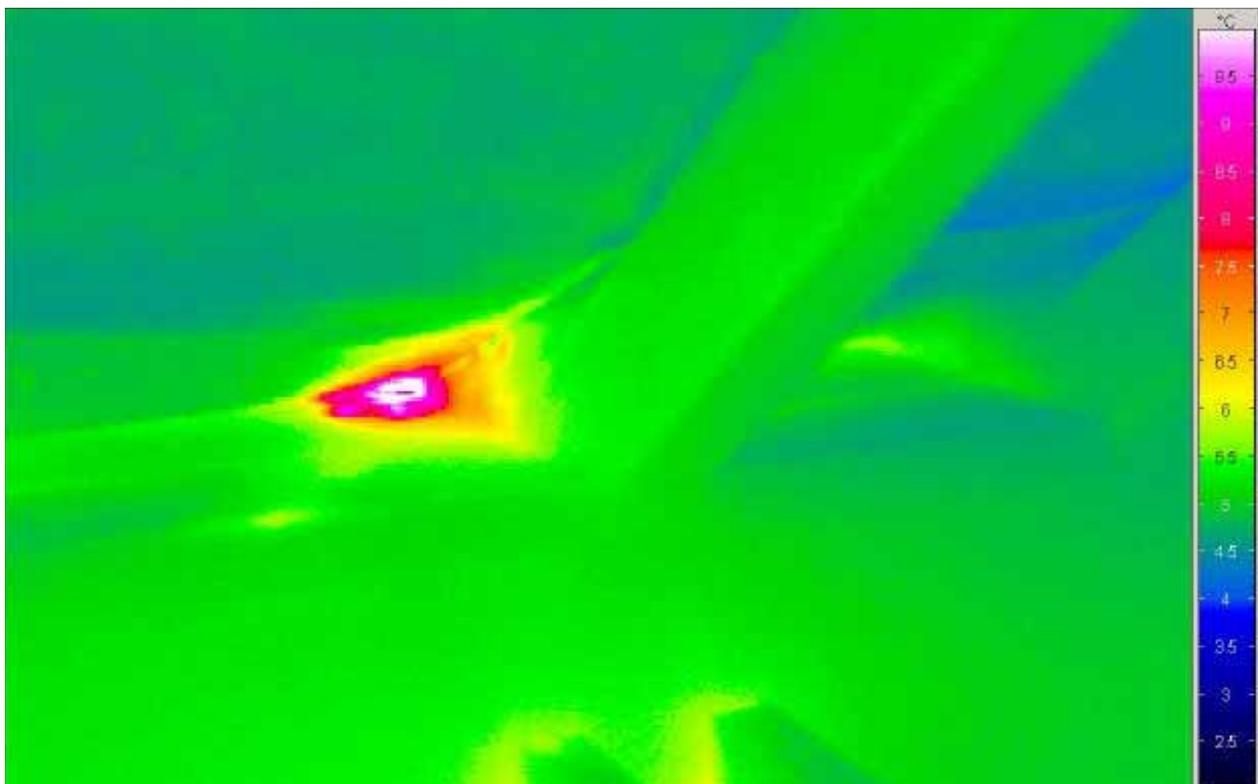


Abbildung 98: Der "Hotspot" aus dem Loch in der Spachtelung von Abbildung 97

Überwiegend gibt es im Bereich des Anschlusses des WDVS am Kopf des Kniestockes keine Undichtheiten. Allein in den ersten drei Feldern von Westen auf der Südseite sind Luftaustrittsstellen zu erkennen, von denen die in Abbildung 98 dargestellte die bedeutendste ist. Wir empfehlen hier eine Nachbesserung von der Oberseite, indem die Luftaustrittsstelle mit Spachtelmasse geschlossen wird.

Treppenhauskopf und Heizraum vom Dach aus

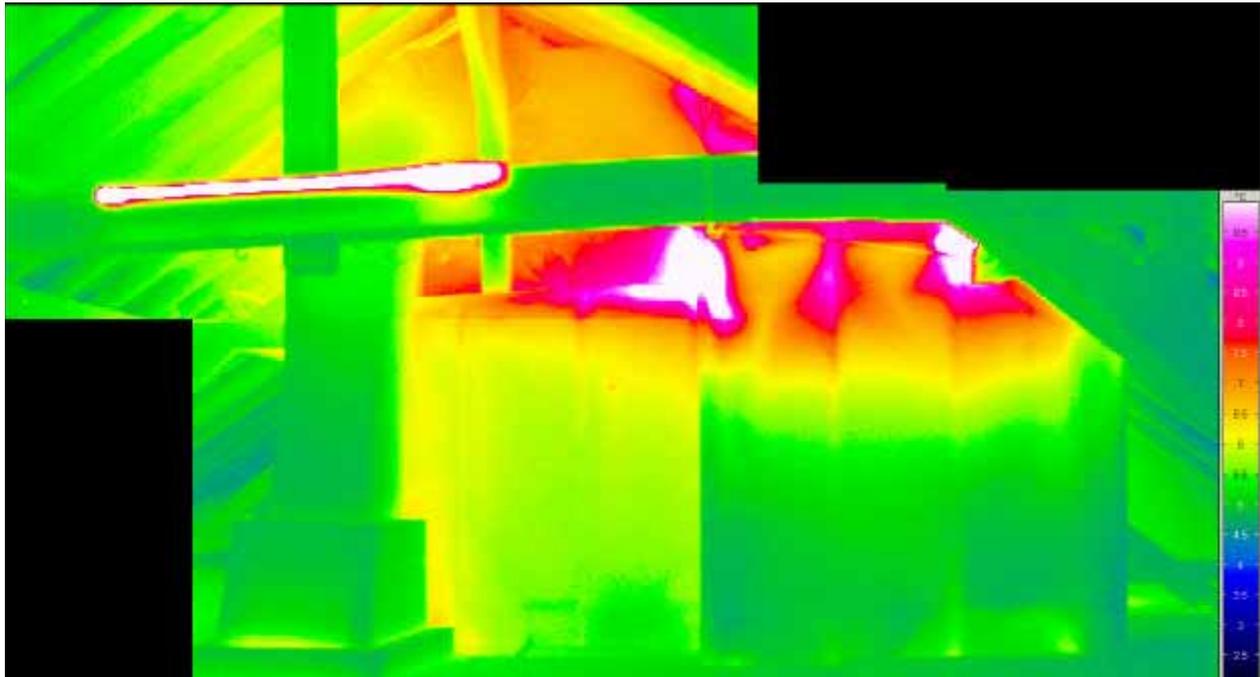


Abbildung 99: Der Heizraum von der Ostseite. Auffällig sind:

- die warme Oberfläche der Dachbodenbeleuchtung (Stab-Fluoreszenzlampe, in der Fläche um 18 °C, an den Anschlussseiten bis 46 °C)
- Warmlufthinterströmungen am Kopf der Westwand des Heizraumes (bis 14 °C)
- die Temperaturzunahme auf der Westwand nach oben zu (regulär bis 7 °C)

Abhilfe gegen unnötige Verluste aus dem Heizraum könnte eine diffusionsoffene Bahn bringen, die oberhalb des bisherigen Aufbaus aufgelegt und am Rand luftdicht angeschlossen wird. Wichtiger ist aber zunächst, dass die Überhitzung des Heizraums durch Dämmung der Armaturen reduziert wird (gemessene Innentemperatur um 50 °C am 17.12.2002).

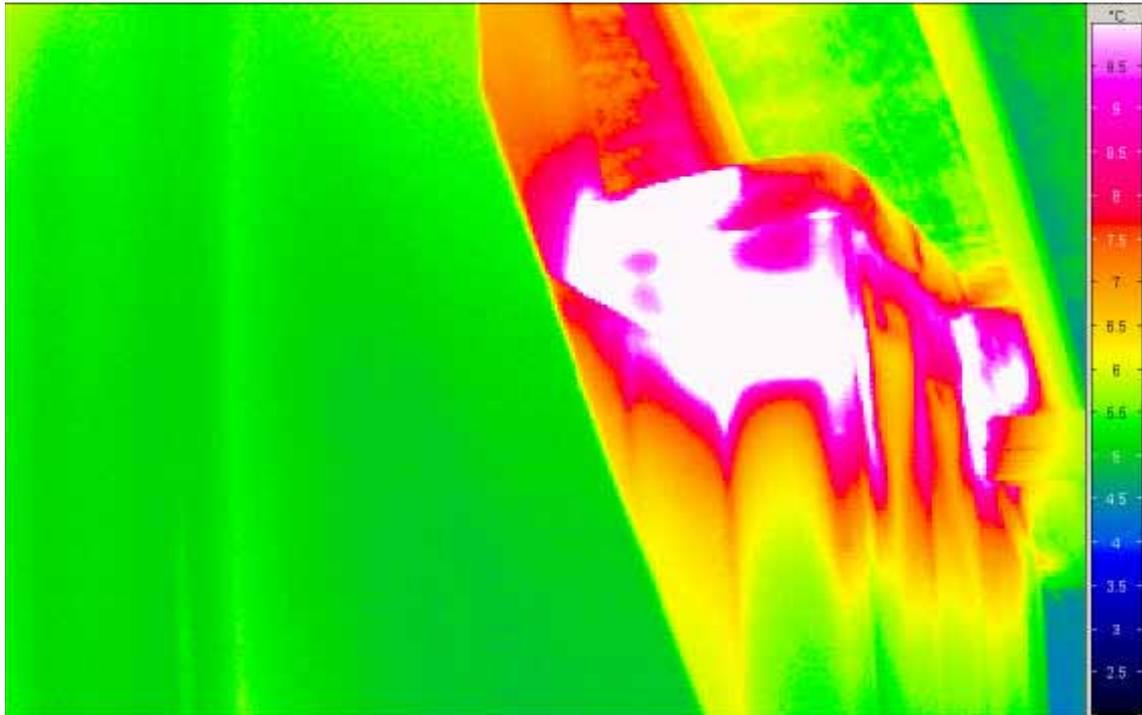


Abbildung 100: Der obere Bereich des Heizraumes (über dem Speicher) aus südöstlicher Richtung. Die Warmluftunterströmung ist deutlich erkennbar (bis 17.7 °C). Alle Temperaturen über 7 °C (also rot bis weiß in der Farbcodierung) sind unakzeptabel hoch.

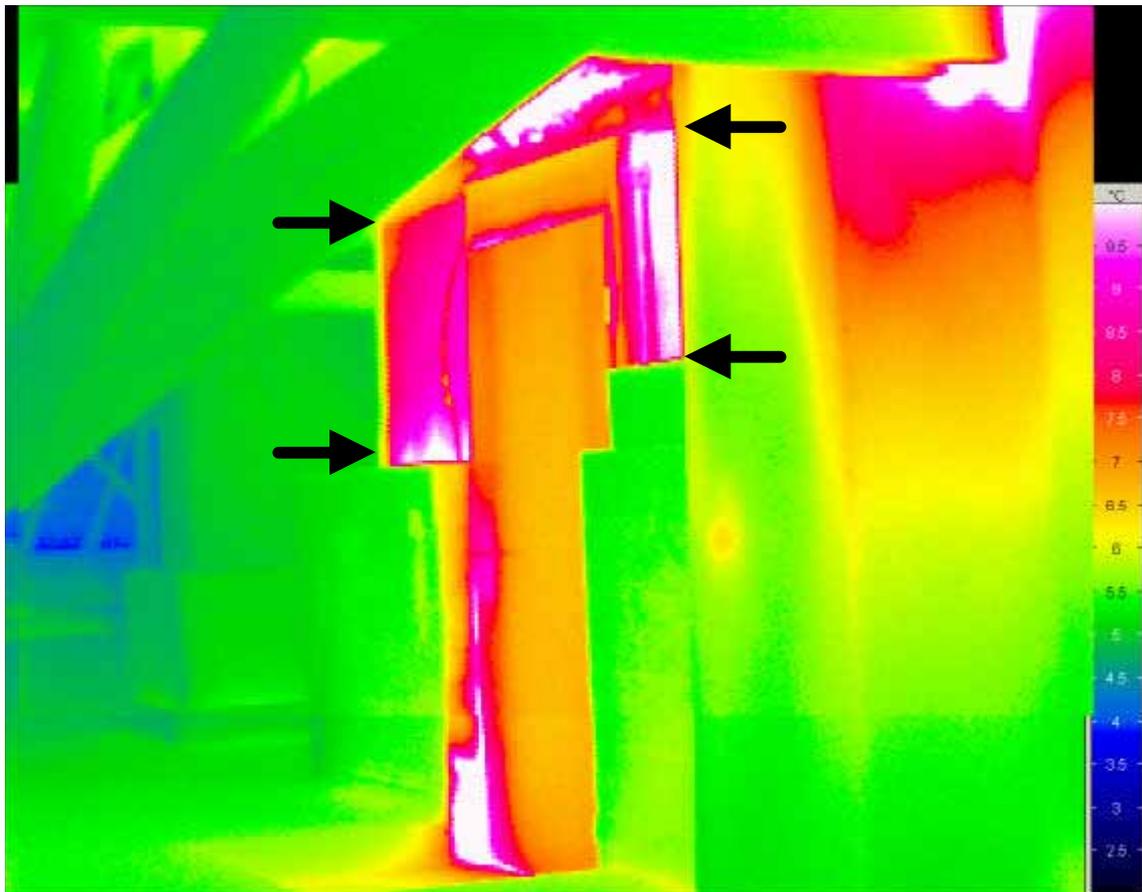


Abbildung 101: Der Treppenhauskopf mit Tür und noch ungedämmten Flächen (Pfeile, durchschnittlich 9 °C Oberflächentemperatur). Die Tür ist im unteren Bereich undicht (Luftfahne bis 16 °C). Die Türoberflächentemperatur selbst liegt bei 6.7 °C.

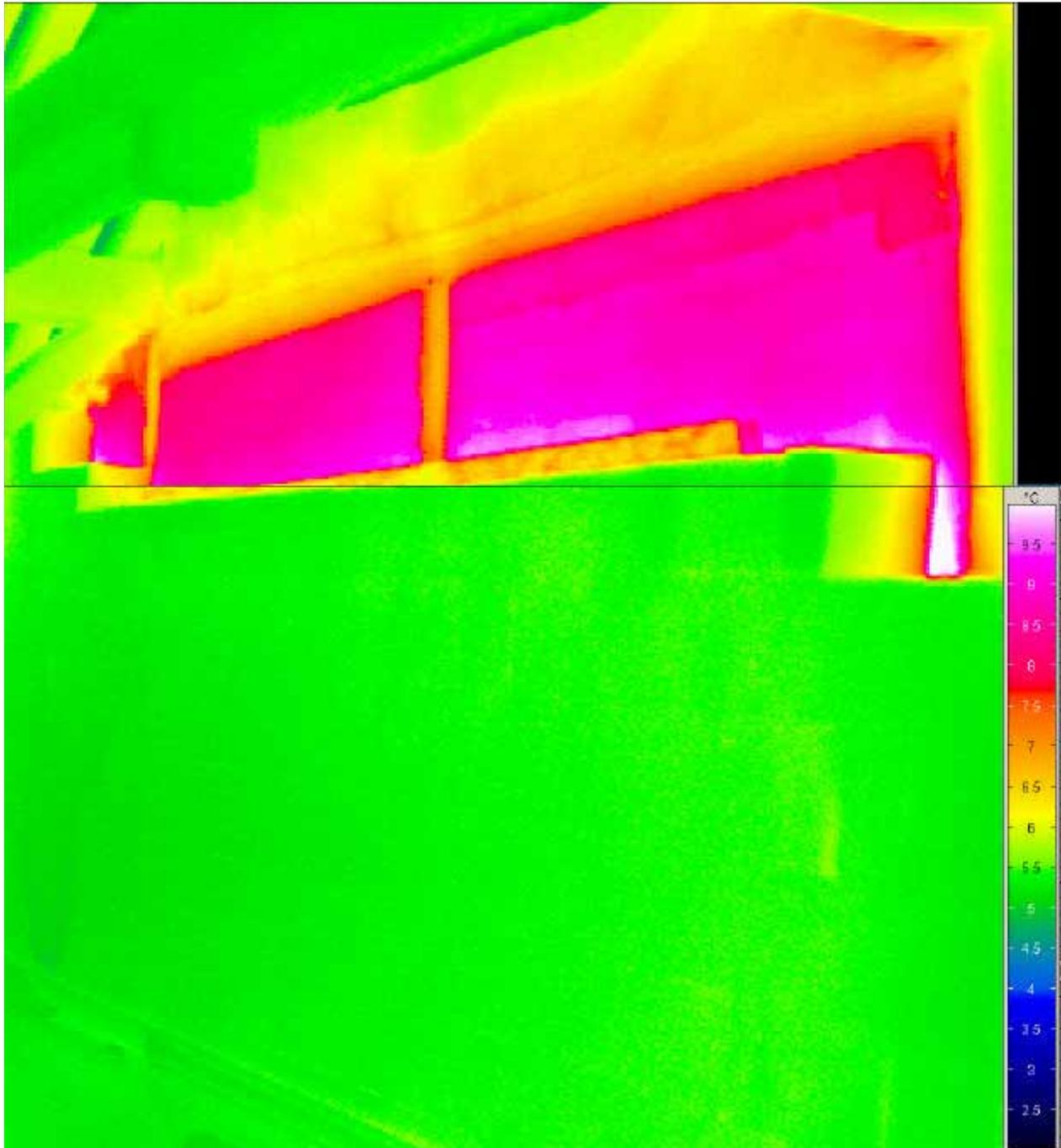


Abbildung 102: Der Treppenhauskopf von der Westseite mit noch ungedämmten Flächen (zusammengesetzte Aufnahme). Die Wirkung der Dämmung ist hier sehr gut erkennbar, auch in der "angeschnittenen" Dämmkante.



Abbildung 103: Der obere Bereich des Treppenhauskopfes ist luftdicht abgedeckt.

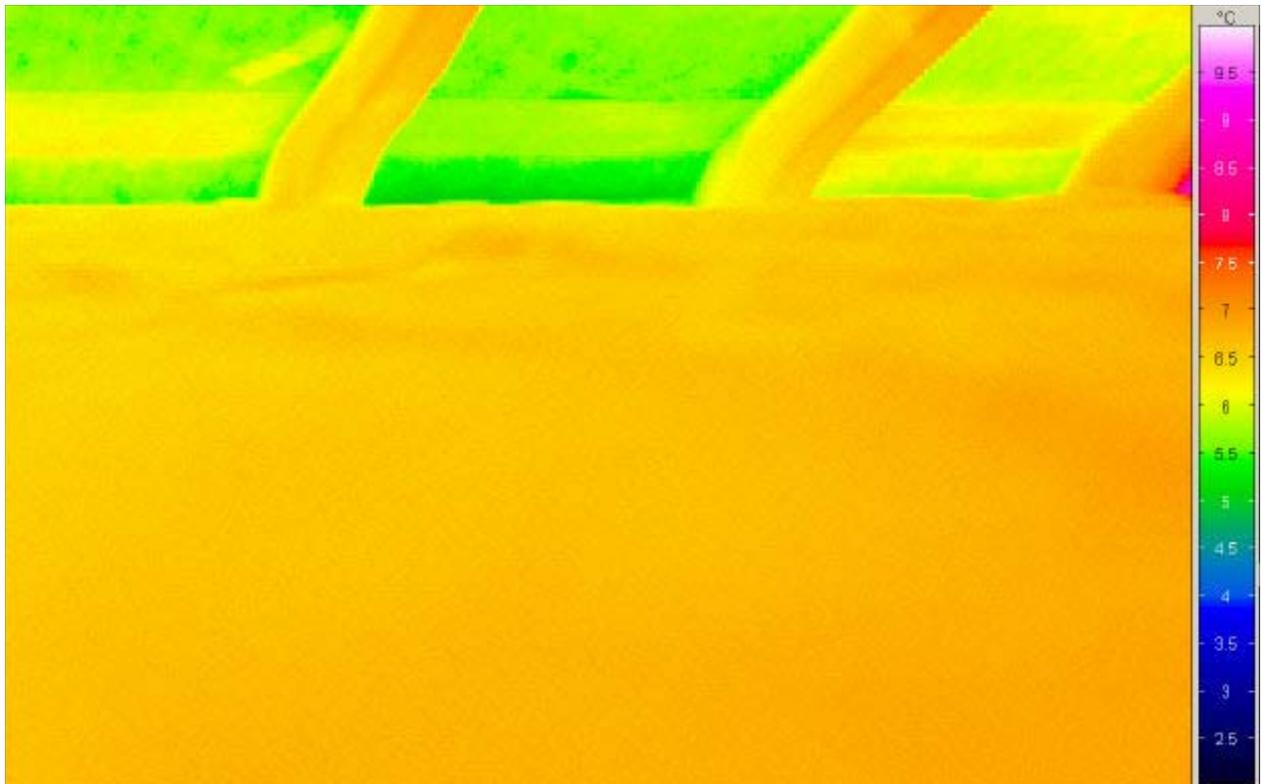


Abbildung 104: Im Deckenbereich des Treppenhauskopfes sind die Oberflächentemperaturen zwar erhöht (um 6.5 °C), aber gleichmäßig.

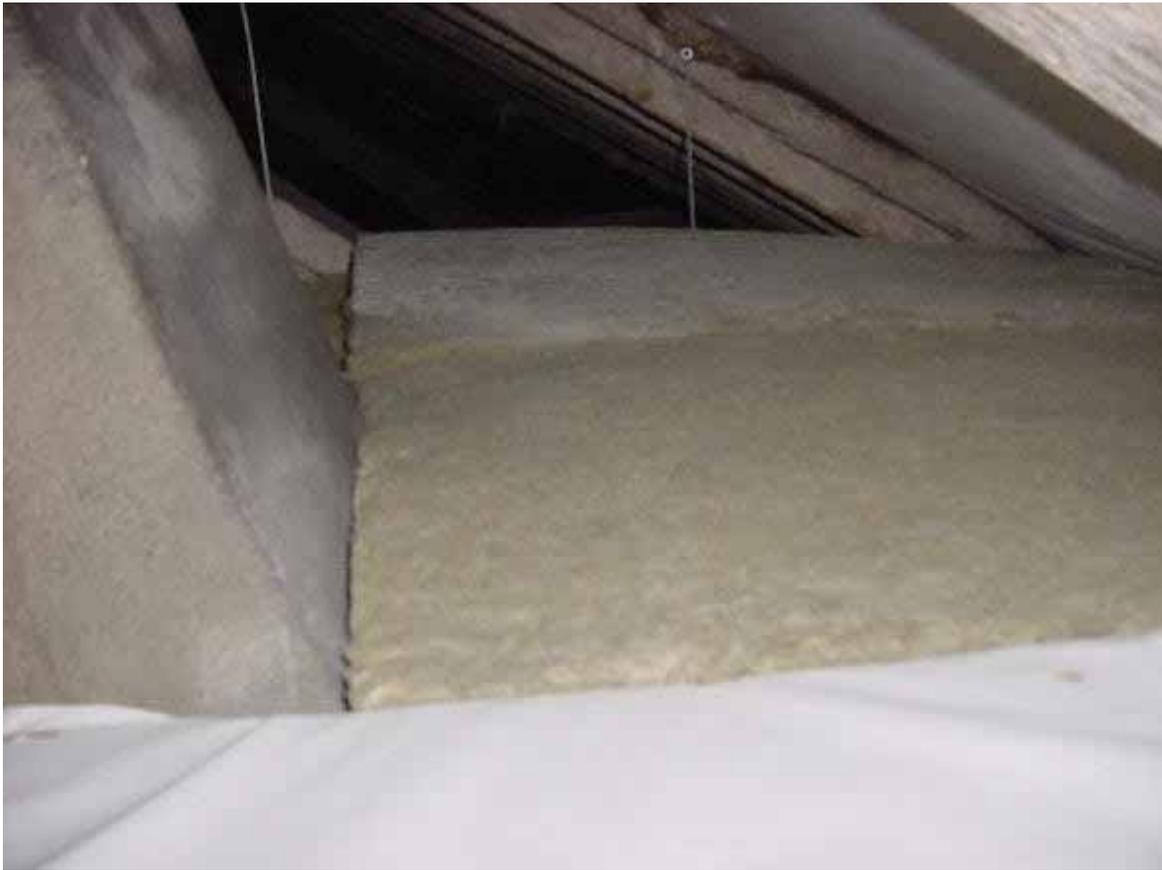


Abbildung 105: Der obere Bereich der Heizraumdecke ist teilweise nicht winddicht abgedeckt.

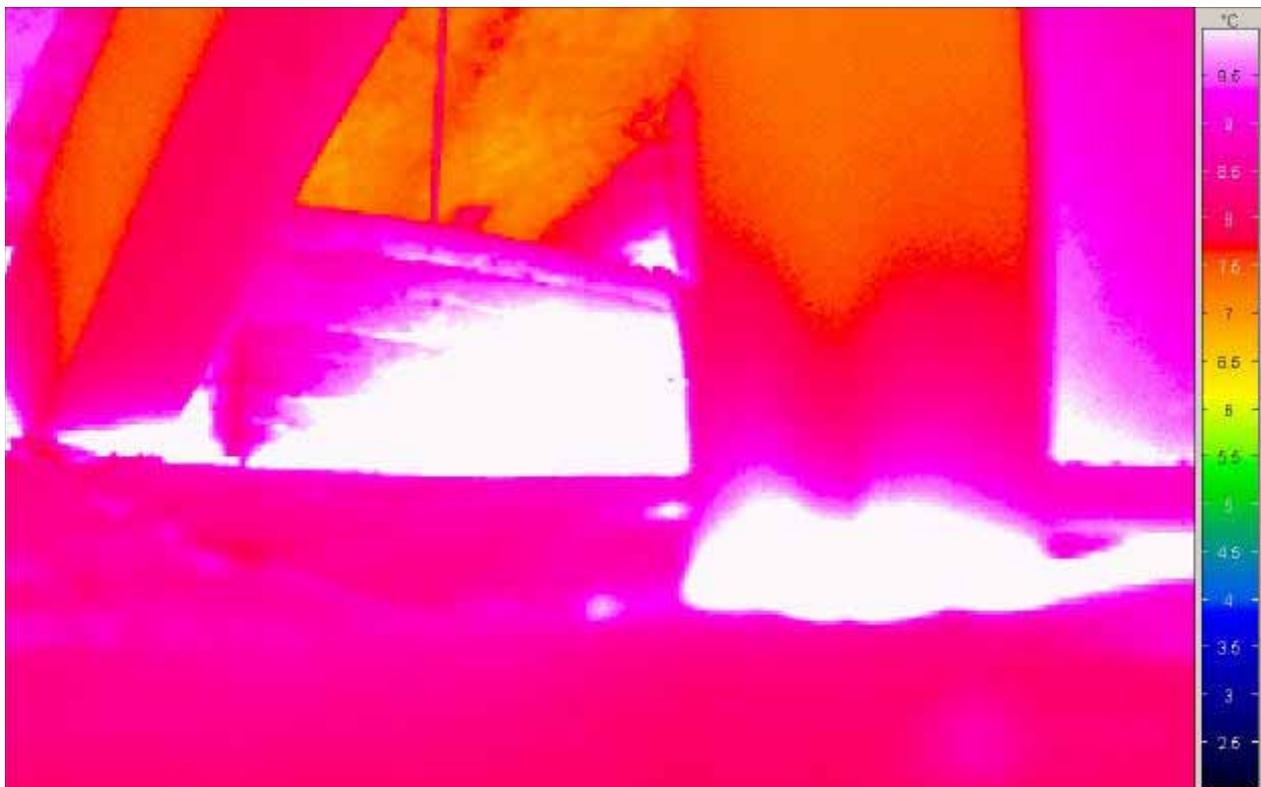


Abbildung 106: Dadurch kann es zu Warmluftzirkulation in den Dämmspalten kommen. Die gesamte Heizraumdecke ist erheblich wärmer (Regelfläche um 9.5 °C). Im Bereich der Undichtheiten herrschen Oberflächentemperaturen bis 15 °C.

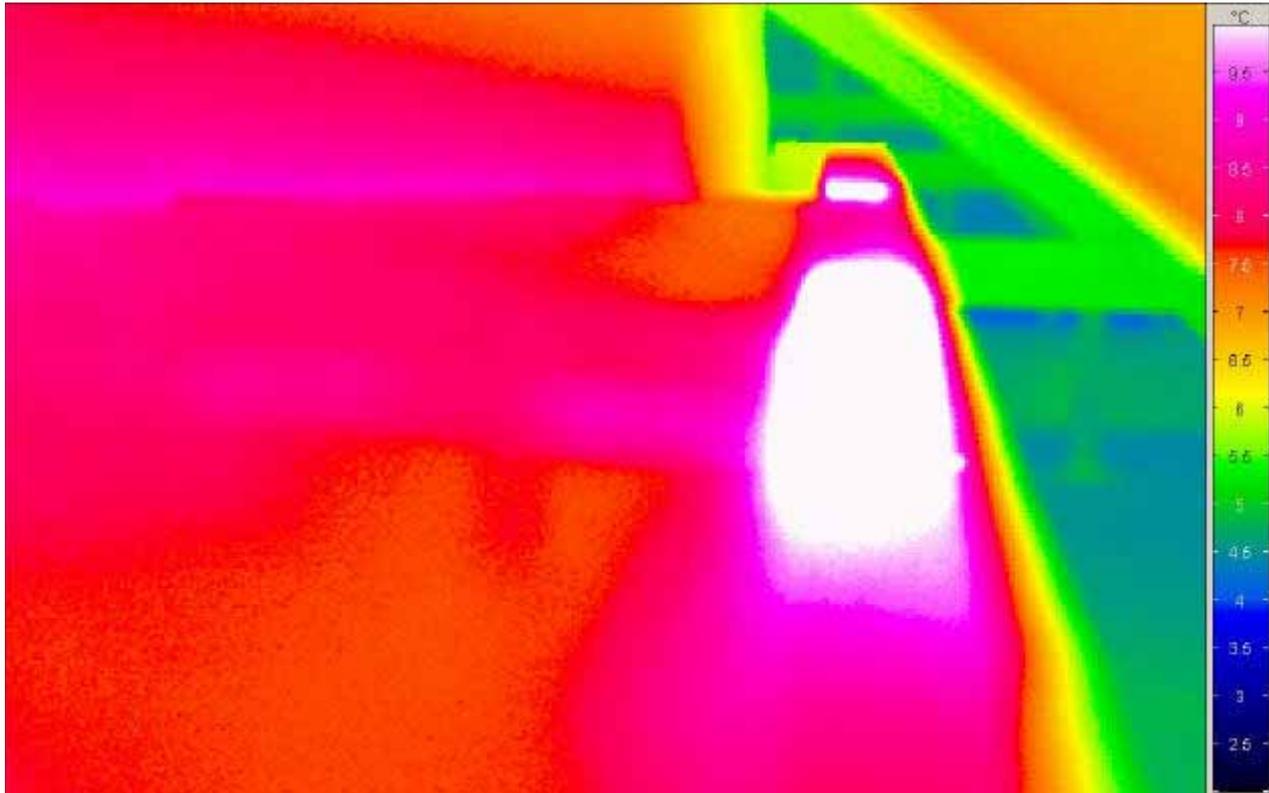


Abbildung 107: Die östliche Kante der Decke des Heizraumes. Hier liegt eine offensichtliche Zirkulation in der Dämmung vor (maximale Oberflächentemperatur 13 °C).

Abschließende Bemerkungen zur Thermografie im Dachbodenbereich

1. Die Dämmung der obersten Geschossdecke und der Kniestockwände ist ausgesprochen sorgfältig und mit gutem Erfolg ausgeführt worden. Dies zeigen die gleichmäßig niedrigen Temperaturen aller Oberflächen.
2. Einzelne verbliebende Undichtheiten ("Hotspots") insbesondere um die durchdringenden Holzbalken der Dachstuhltragkonstruktion sind aus energetischer Sicht unbedeutend. Allerdings strömt hier nicht nur warme, sondern zugleich feuchte Luft aus und als Luftfahne an den Balken entlang. An den ausgewiesenen Stellen muss diese Dampfkongvektion unterbunden werden, damit keine Bauschäden auftreten. Dazu wird der Holzbalken ringsum luftdicht eingegossen und im Abstand von ca. 25 cm vom Balken werden Dampfdruckausgleichsbohrungen in den Estrich bis durch das Ölpapier (aber nicht bis zur Dampfbremse) eingebracht. Wir empfehlen dabei eine abschließende thermografische Kontrolle.
3. Die austretende Luft hinter dem WDVS an der Traufe der Südwand / Westteil muss unterbunden werden. Eine vollständige armierte Spachtelung reicht dabei aus. Auch hier empfehlen wir eine abschließende thermografische Kontrolle.
4. Die Dämmarbeiten am Treppenhauskopf müssen vervollständigt werden. Die Dämmung muss grundsätzlich winddicht abgeschlossen werden, sonst kommt es zu Luftzirkulationen, insbesondere bei den hohen Temperaturdifferenzen zum Heizraum.



Abbildung 108: Nordkante der Decke über dem Treppenhaus. Der Dämmstoff ist hier nicht winddicht abgedeckt.



Abbildung 109: Thermografie der Nordkante der Decke über dem Treppenhaus. Hier tritt am Sparren Warmluft aus (maximale Oberflächentemperatur 17 °C). Die Luftdichtung muss hier noch ausgeführt werden.

8 Heizraum - Zustand vom 17.12.2002



Abbildung 110: Warmwasserspeicher im Heizraum (Achtung: geänderte Temperaturskala; nun von 0 °C bis 75 °C); Die Speicheroberfläche steigt allmählich von 28 °C (unten) auf 40 °C (oben) an. Satt Wärme strahlen die noch ungedämmten Rohrleitungen ab (72 °C). Die Speicherdämmung ist zwar von heute durchschnittlich üblicher Qualität, die Verluste erscheinen aber für ein Projekt mit hoher Energieeffizienz vermeidbar hoch.

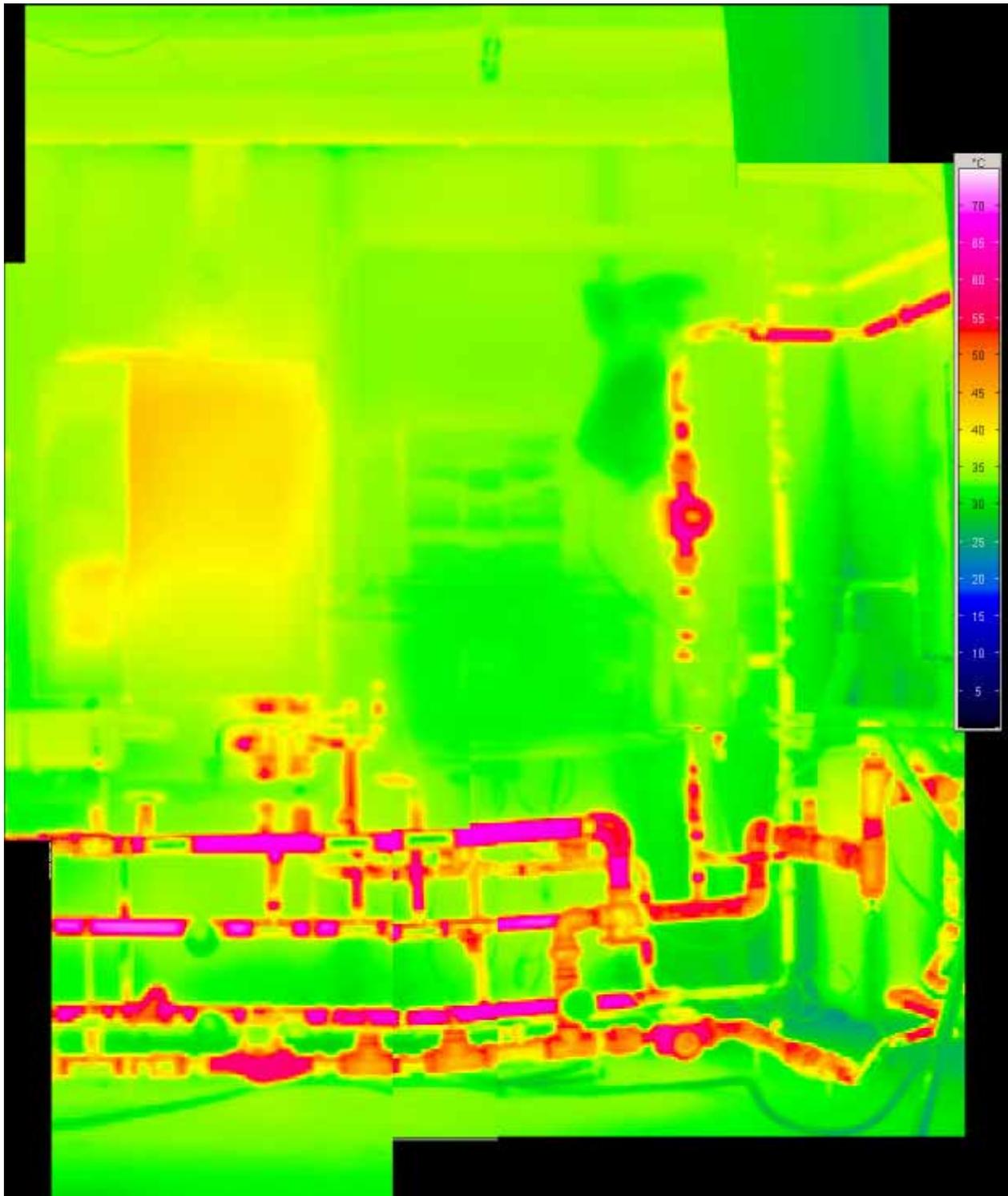


Abbildung 111: Heizraum mit Wärmeerzeuger (Achtung: Temperaturskala von 0 °C bis 75 °C; zusammengesetztes Bild). Die Oberfläche des Wärmeerzeugers steigt von 35 °C (unten) auf 43 °C (oben) an. Die noch ungedämmten Rohrleitungen strahlen sehr viel Wärme ab (72 °C).



Abbildung 112: Fotografische Dokumentation des Zustandes des Heizraumes am 17.12.2002. Die Rohrleitungen sind noch ungedämmt. Im linken Bild: Uwe Münzenberg bei der Durchführung des Drucktestes.

Abschließende Bemerkungen zur Thermografie im Heizraum

Die derzeit noch vorliegenden Wärmeverluste der Installationen im Heizraum sind erschreckend hoch. Die Raumlufttemperaturen im Raum lagen vor Öffnung der Tür zum Treppenhaus im Bauzustand am 17.12.2003 bei über 50 °C, dies ist vor allem auf die zu diesem Zeitpunkt noch ungedämmten Rohre zurückzuführen. Als bedeutende Wärmequellen konnten mit der Thermografie die noch ungedämmten Rohre, der Wärmeerzeuger und der Warmwasserspeicher ausgemacht werden.

Bei der Dämmung der Rohrleitungen muss darauf geachtet werden, dass auch alle Anschlüsse, Armaturen und Fittings mitgedämmt werden. Eine abschließende thermografische Kontrolle nach durchgeführter Dämmung ist empfehlenswert.

9 Thermografische Kontrolle der Dämmung der Kellerdecke



Abbildung 113: Dämmung der Kellerdecke mit Randdämmstreifen, noch ohne Spachtelung

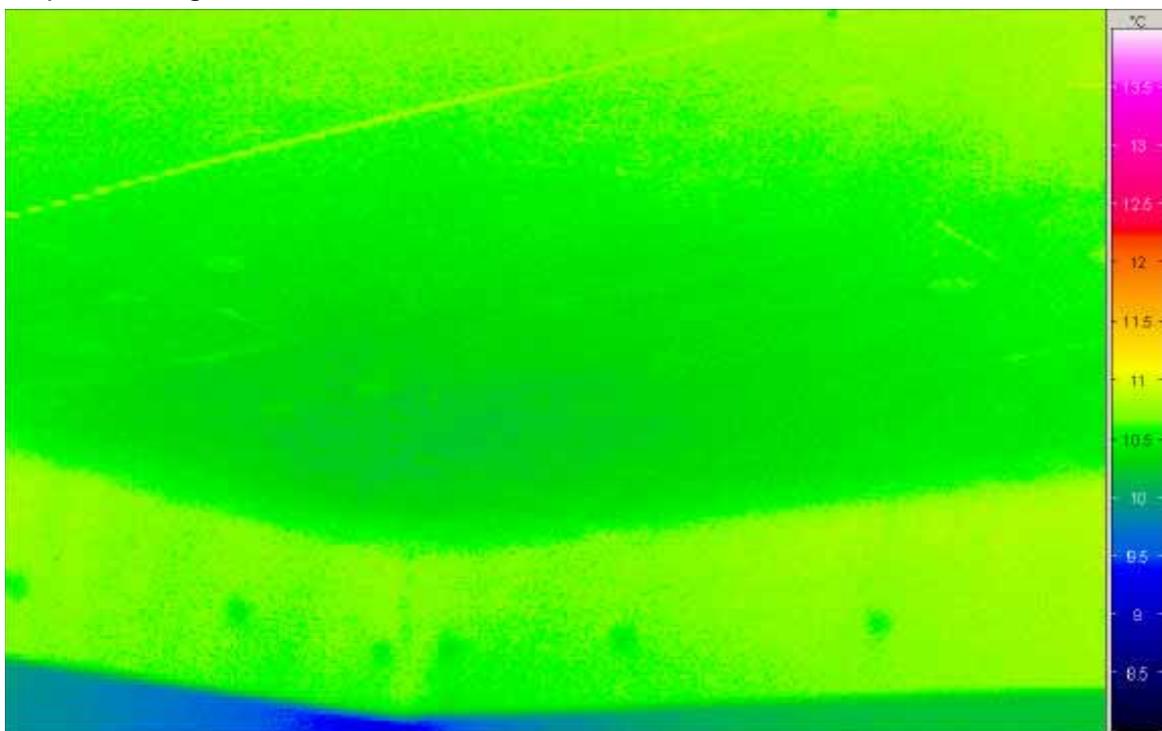


Abbildung 114: Thermografie eines Teils der Dämmung der Kellerdecke mit Randdämmstreifen. Die Dübelköpfe zeichnen sich schwach ab. Die noch offenen Spalten sind erkennbar wärmer als die Regeloberfläche. In Abbildung 116 wird dies noch deutlicher.



Abbildung 115: Dämmung der Kellerdecke im Mittelgang mit Randdämmstreifen auf der tragenden Innenwand, noch ohne Spachtelung

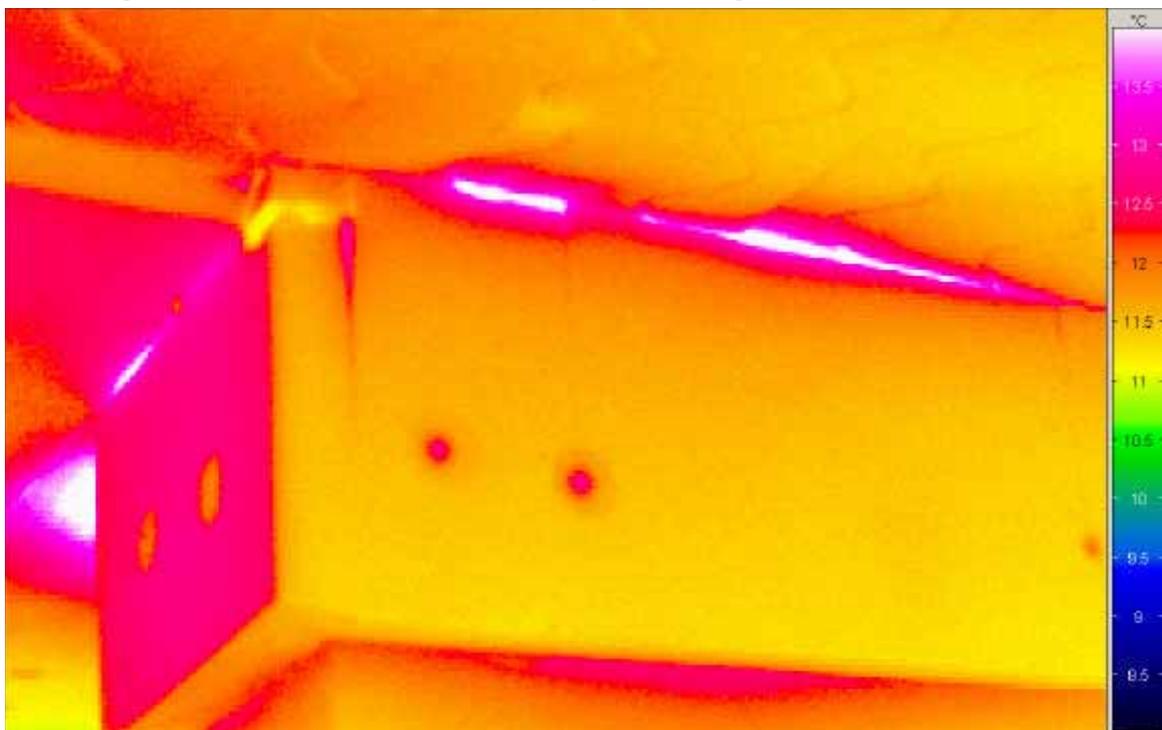


Abbildung 116: Thermografie zu Abbildung 115. Die Dübelköpfe zeichnen sich ab, stellen aber wegen der räumlichen Begrenzung kein Problem dar. Die noch offenen Spalten bilden offensichtliche Wärmebrücken. Dies macht die Notwendigkeit der Spachtelung deutlich.



Abbildung 117: Dämmung am Westende des Mittelganges, noch ohne Spachtelung. In der Mitte ein Abwasserrohr.

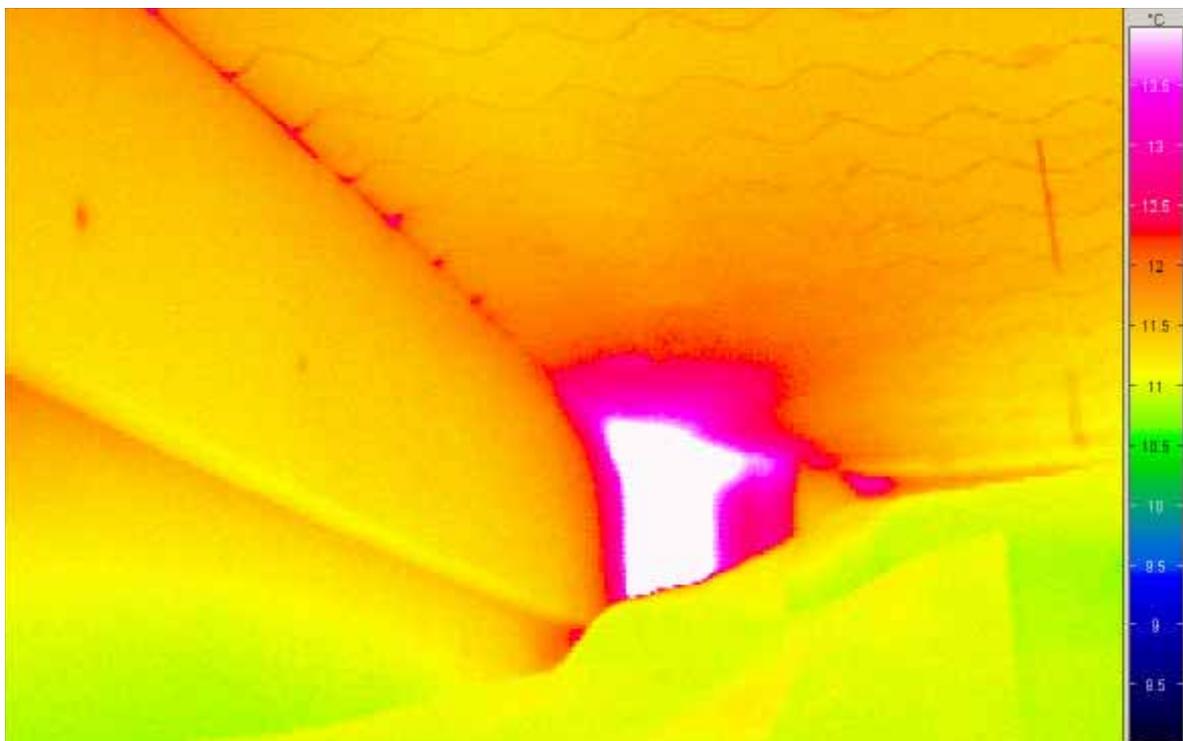


Abbildung 118: Thermografie dieses Ausschnittes. Das Abwasserrohr strahlt mit Oberflächentemperaturen um 20°C auffällig hervor, eine sehr anschauliche Illustration der Wasserablaufverluste. Auch noch offene Spalten in der Dämmung sind erkennbar: Dies macht nochmals die Notwendigkeit der Spachtelung deutlich.



Abbildung 119: Randdämmstreifen der Kellerdeckendämmung (oben), noch ohne Spachtelung an der Nordostecke des Hauses. Die optische Aufnahme lässt erkennen, dass die Außenwand hier im unteren Bereich feucht ist. Dies war zwischen Architekt und Bauherrschaft im Vorfeld der baulichen Modernisierung bereits besprochen worden; die Entscheidung der Bauherrschaft war, hier zunächst über die ohnehin geplanten Maßnahmen (wie die Perimeterdämmung) nichts Zusätzliches zu unternehmen. Das PHI schlägt vor, die Entwicklung der Feuchtigkeit an dieser und den anderen Stellen im Keller weiter zu beobachten.

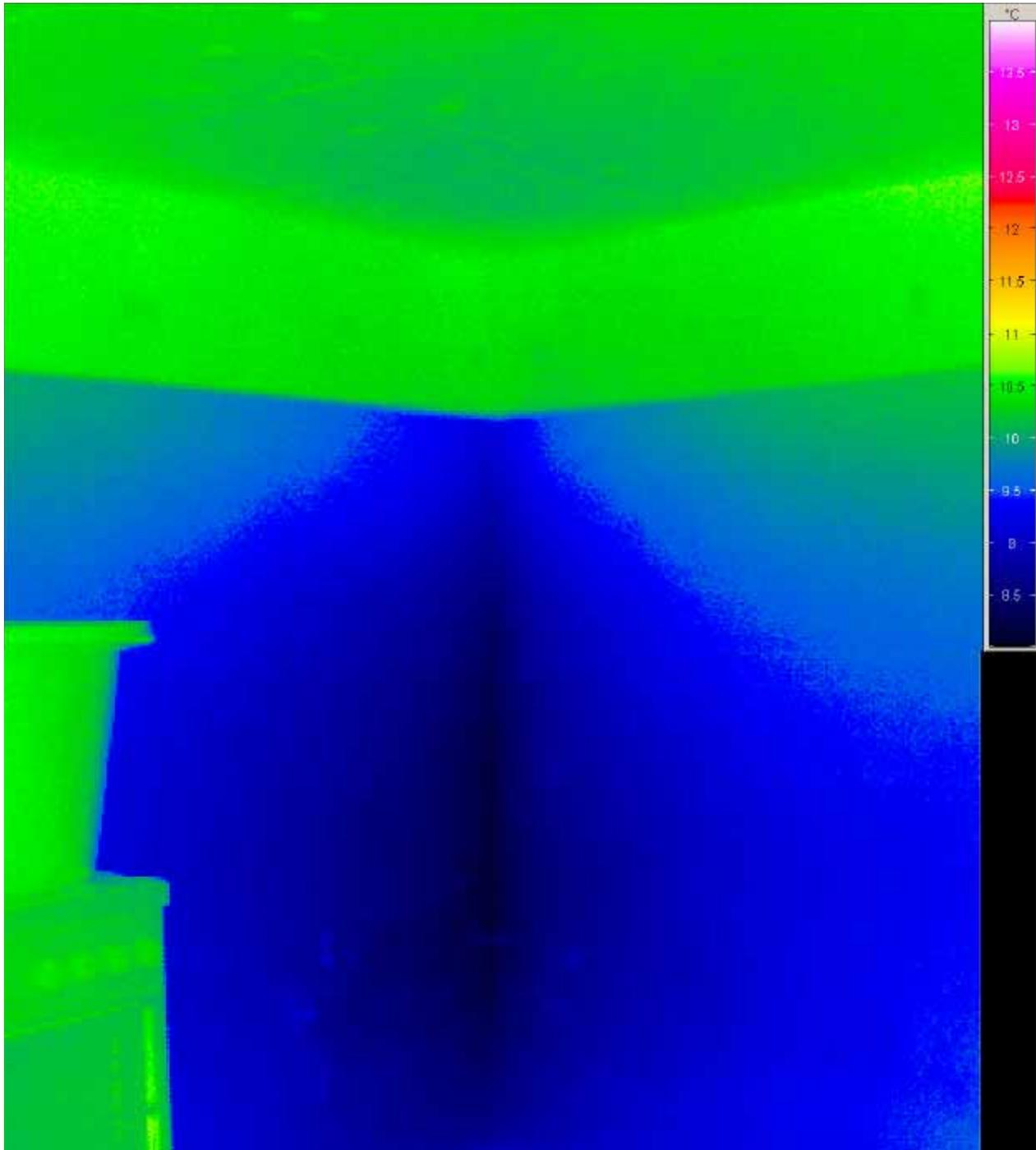


Abbildung 120: Thermografie des Eckbereichs. Die feuchten Stellen zeichnen sich wegen der dort auftretenden Verdunstung kalt ab (um 8 °C). Vom EG aus dringt Wärme über die Außenwand nach unten. Dies und die nun vorhandene Entlüftung im Keller beschleunigt die Trocknung. Da gegenwärtig nicht klar ist, ob auch die Ursachen für die Befeuchtung beseitigt sind, empfiehlt das PHI eine weitere Beobachtung.

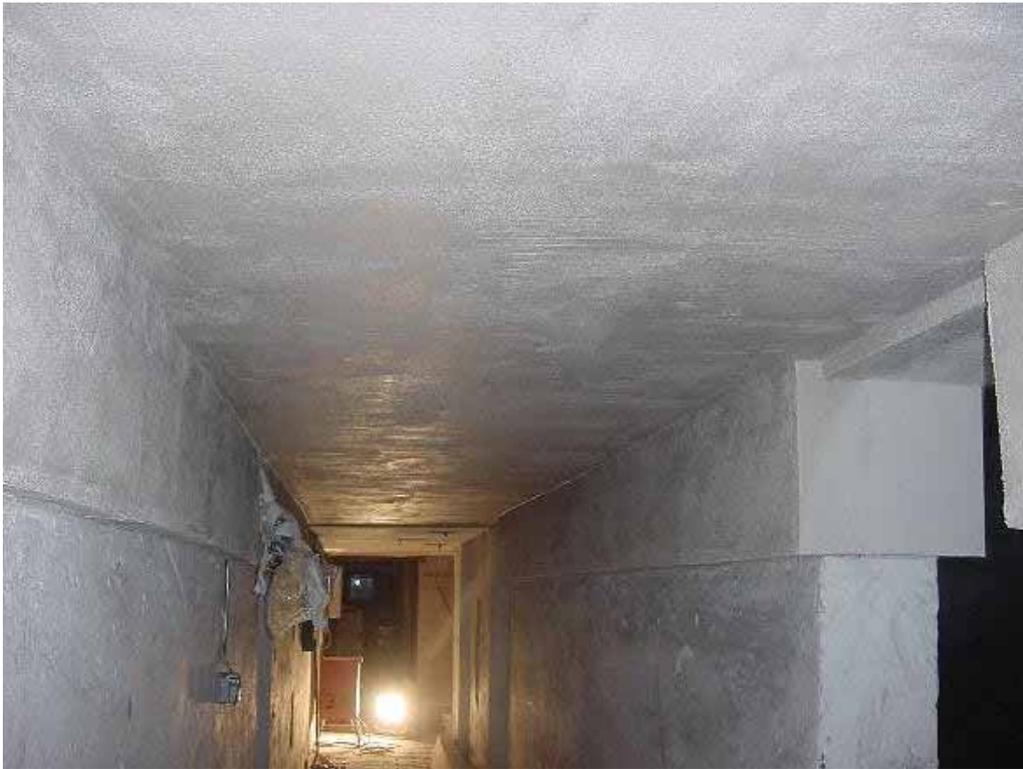


Abbildung 121: Dämmung der Kellerdecke mit Randdämmstreifen im Mittelgang (Ostseite von Ost), bereits mit Spachtelung



Abbildung 122: Thermografie dieses Teils der Dämmung der Kellerdecke. Die Wirkung des Randdämmstreifens ist erkennbar: Die Kellerwand tritt deutlich wärmer unter dem Dämmstreifen hervor. Zudem sind aufgrund der geometrischen Wärmebrücke die Kanten zwischen der Decke und dem Randstreifen erwärmt. Im Zentrum der gedämmten Decke sind wärmere Bereiche erkennbar (Pfeil). Hier dürfte die Dämmung geschwächt sein, weil sie sich unter den Elektroleitungen nur erschwert anbringen ließ. Dies stellt kein Problem dar. Im hinteren Bereich ist die Decke noch ungedämmt und daher wärmer. Sehr warm treten die Elektrozähler hervor (Verlustleistung).



Abbildung 123: Dämmung der Kellerdecke im Mittelgang im Bereich der Elektrozähler, ausgeführt mit Mineralwolle unter Gipskarton. Die Aussparungen für die Wasserabsperrentile sind erkennbar.

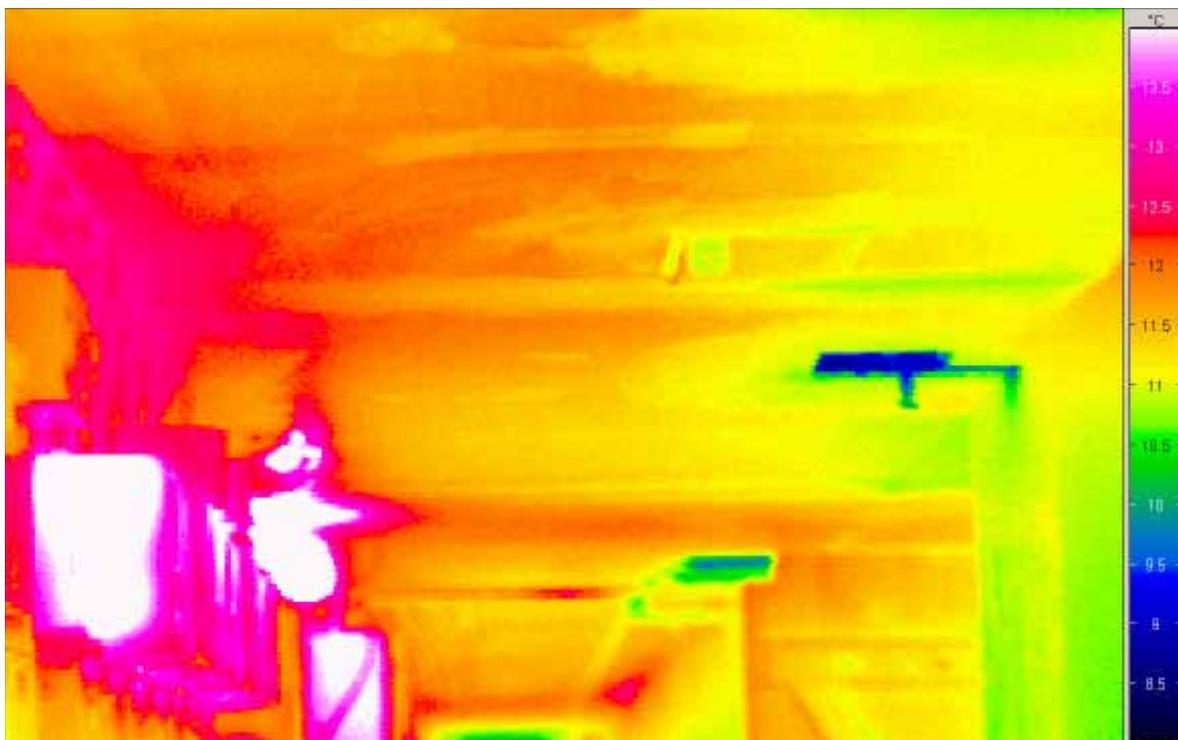


Abbildung 124: Thermografie zum Bereich aus Abbildung 123. Die Elektrozähler (bis 16 °C) und die zugehörigen Verteilleitungen (um 13 °C) geben Wärme ab, am heißesten ist die Arbeitsleuchte (bis 84 °C). Die ungleichmäßig gedämmte Decke ist unregelmäßig warm (11 bis 12.5 °C). Die Öffnungen zur Kaltwasserabspernung treten mit Temperaturen um 9 °C kalt hervor.



Abbildung 125: Dämmung der Kellerdecke, Südseite, mit neuem Kellerfenster. Die Wand unterhalb des Fensters ist neu verputzt worden.

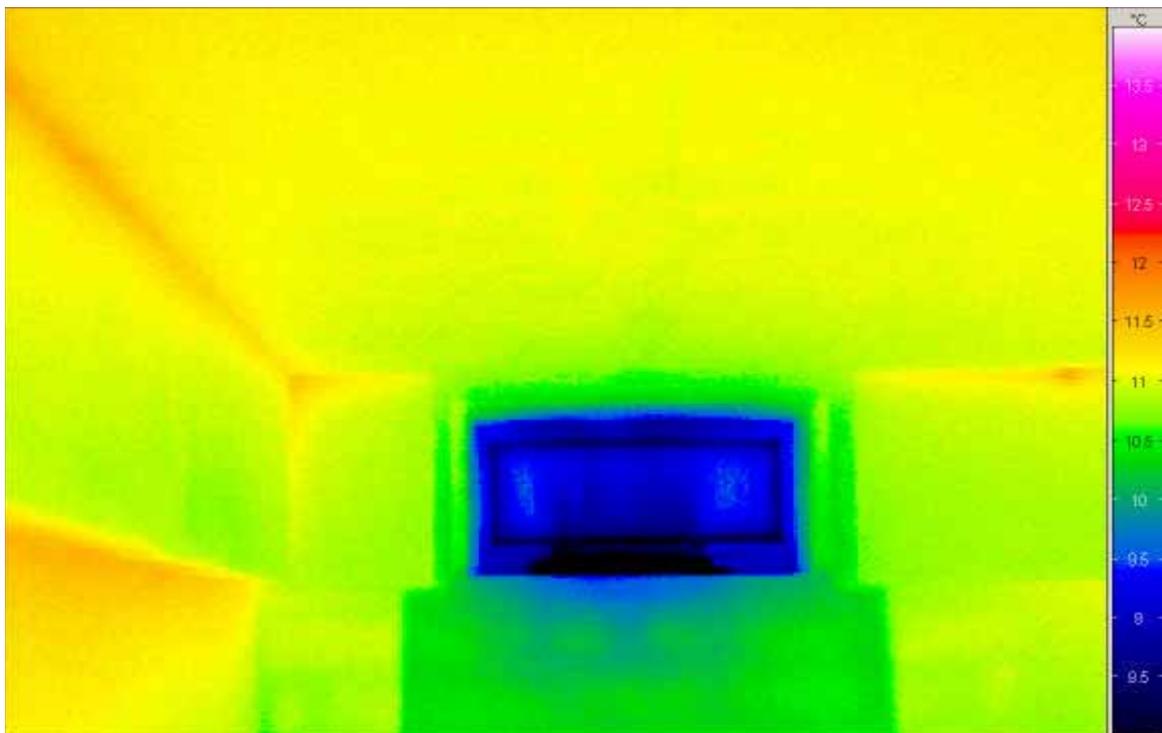


Abbildung 126: Auf der zugehörigen Thermografie sind die Steinfugen der gemauerten Wand erkennbar. Die Decke ist sehr gleichmäßig wirksam gedämmt. Die warm unter dem Randdämmstreifen hervortretende Innenwand ist links erkennbar. Auch am Kellerfenster zeichnet sich die Glasrandwärmebrücke ab, noch deutlicher allerdings der Außenlufteintritt durch den Außenluftdurchlass (vgl. auch die nächsten beiden Aufnahmen). Die Bilder zeigen den planerisch gewünschten und korrekt ausgeführten Zustand.



Abbildung 127: Neues Kellerfenster im vergrößerten Ausschnitt. Wegen der Feuchteentwicklung bei den Bauarbeiten ist das Fenster beschlagen. Dies sollte nach Abschluss der Arbeiten und Trocknung der Spachtelung nicht mehr der Fall sein. Im unteren Teil des Fensters der Außenluftdurchlass.

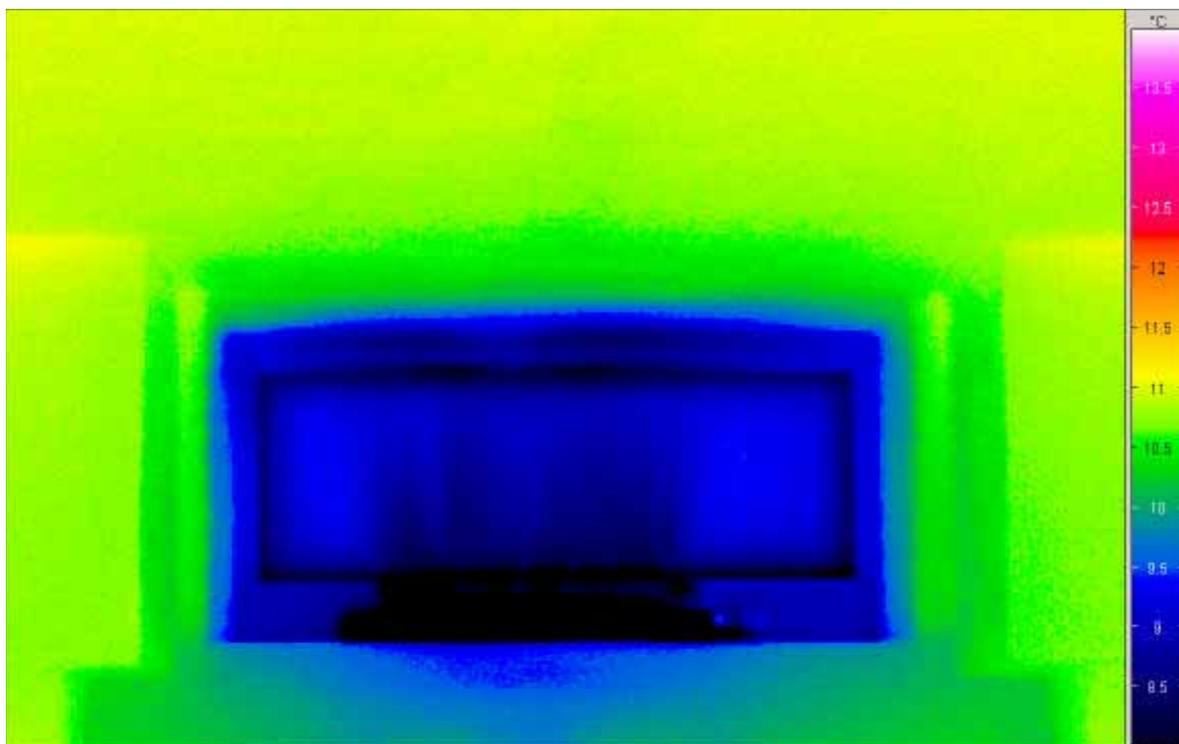


Abbildung 128: Die Thermografie des Fensters. Deutlich erkennbar sind die Glasrandwärmebrücke und der Außenlufteintritt durch den Außenluftdurchlass mit Temperaturen um 5 °C (die Außenlufttemperatur lag zwischen 3 und 4 °C).



Abbildung 129: Gespachtelte Kellerdeckendämmung mit Randstreifen; links im Bild einer der alten Schornsteine.

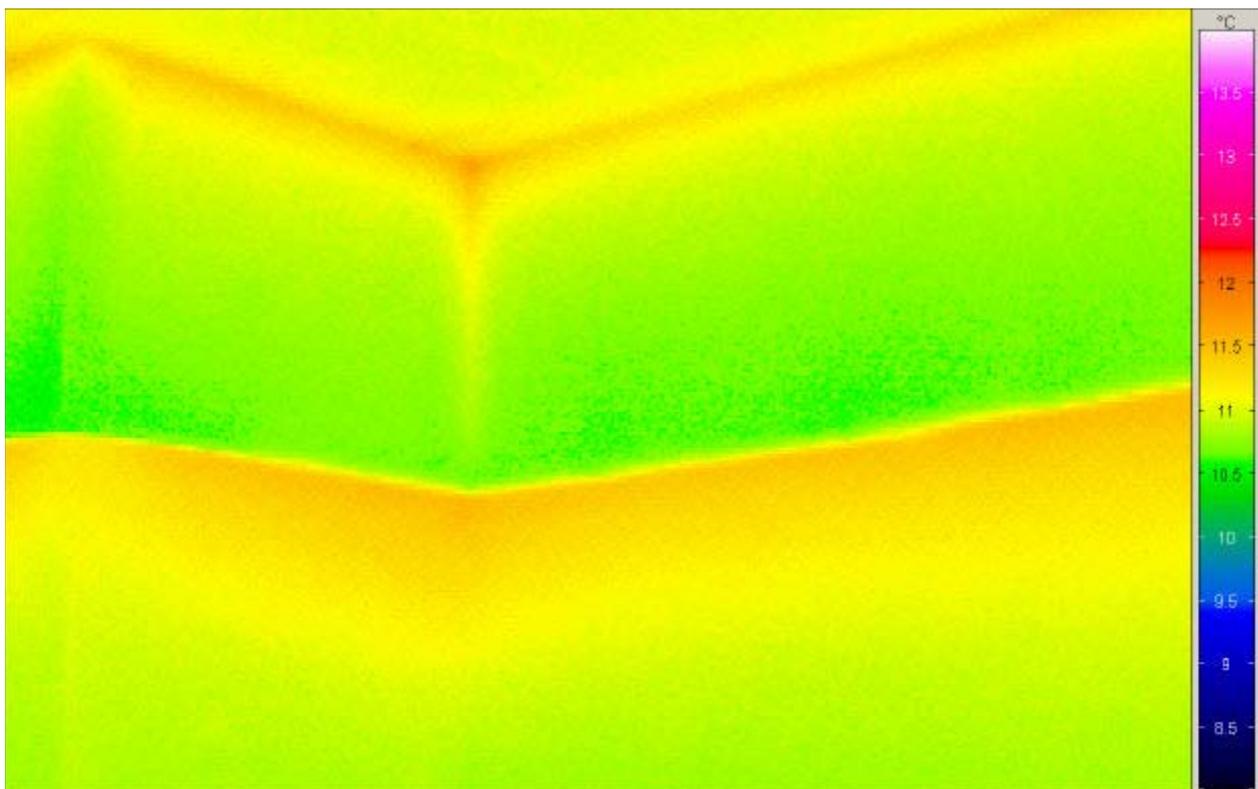


Abbildung 130: Thermografie dieser Ecke; Die Decke ist sehr gleichmäßig wirksam gedämmt. Die Innenwand tritt warm unter dem Dämmstreifen hervor. Das Detail ist vorbildlich gelöst und ausgeführt.

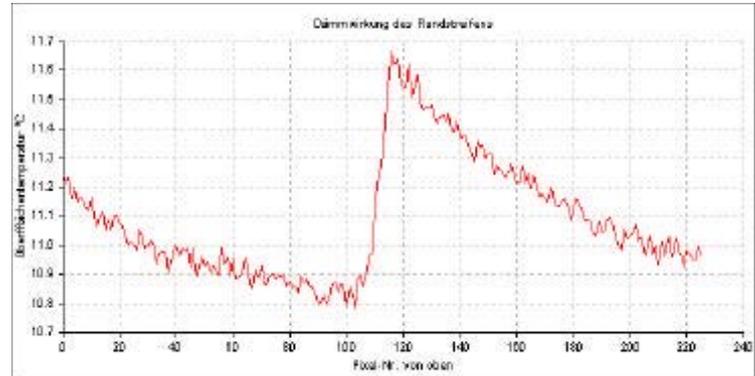


Abbildung 131: Randstreifendämmung; dazu das Temperaturprofil (rechts), dessen Lage in Abbildung 132 gekennzeichnet ist.

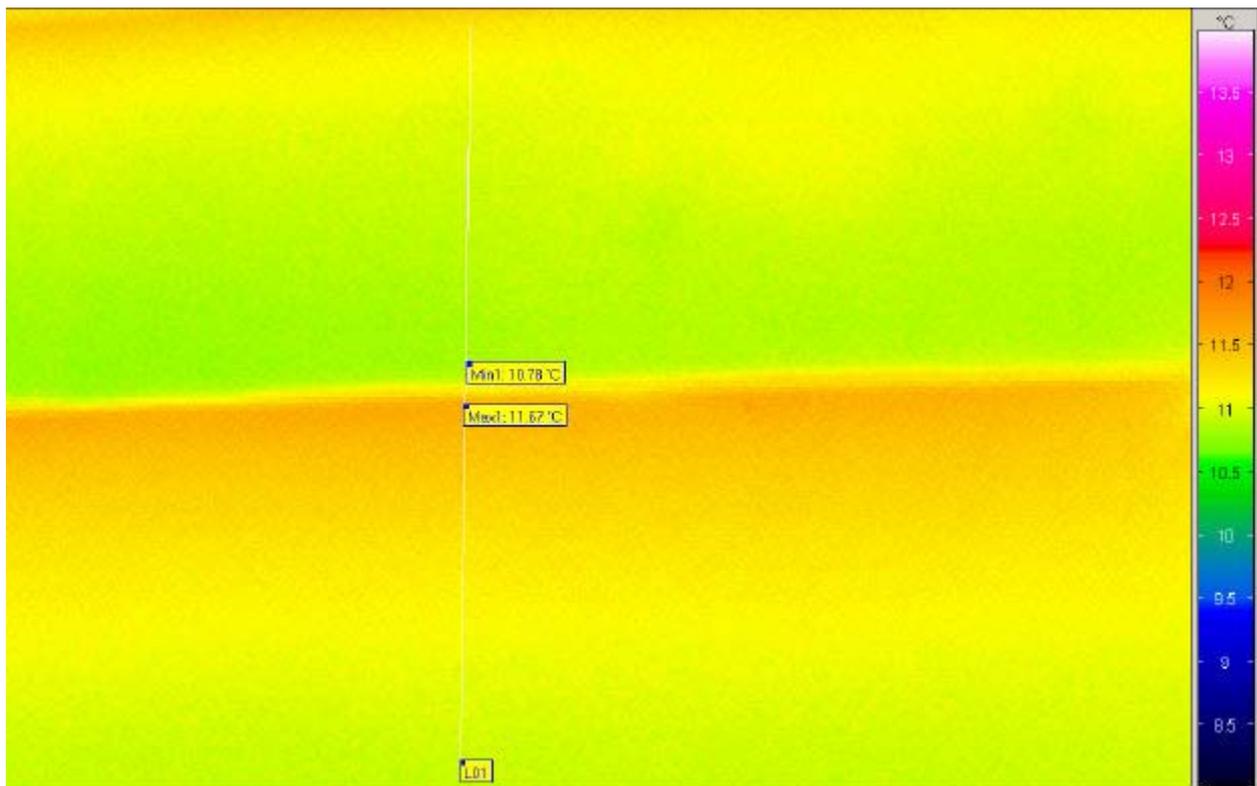


Abbildung 132: Thermografie zum Temperaturverlauf am Randdämmstreifen. Exakt gemäß der theoretischen Erwartung fällt die Temperatur der Innenwand nach dem Enden des Dämmstreifens von etwa 11.7 °C exponentiell mit Asymptote 10.8 °C ab.



Abbildung 133: Kellerdeckendämmung mit durchtretendem Abwasserrohr.

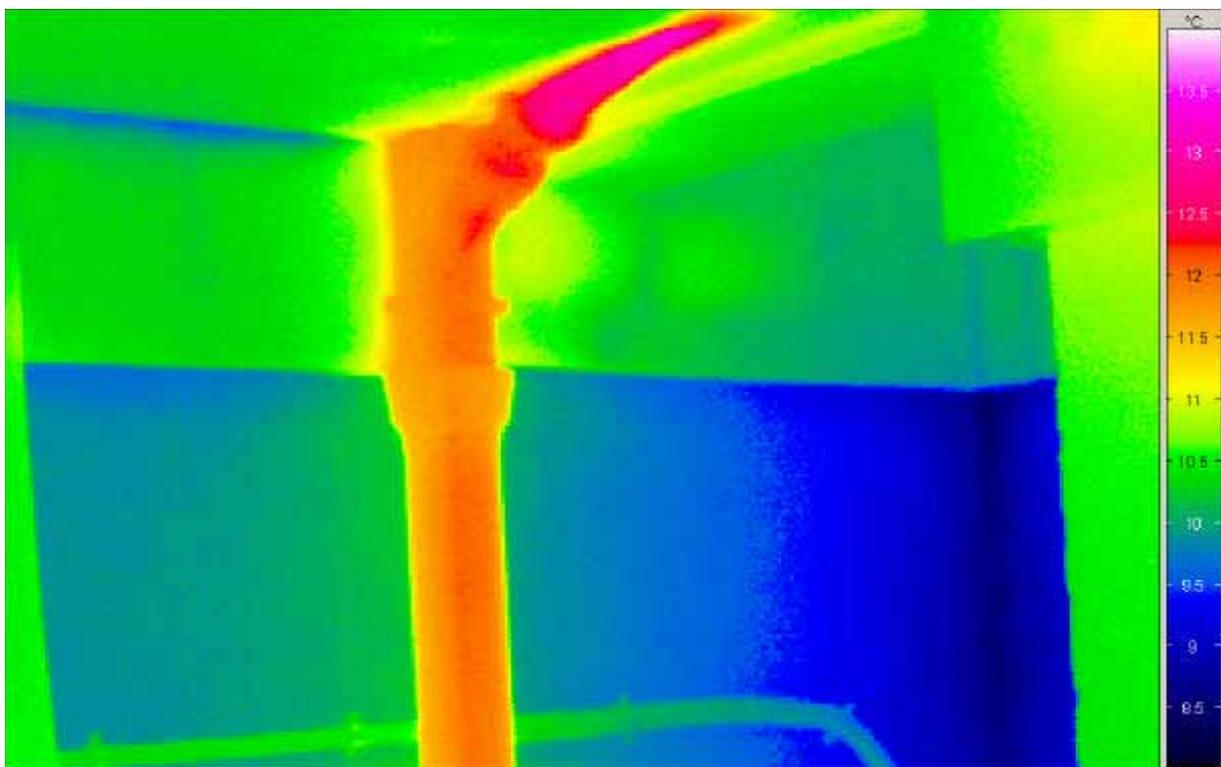


Abbildung 134: Das Abwasserrohr ist bis zu 13 °C warm. Die niedrigen Temperaturen um 8 °C in der Kante der Außenwand deuten auf Feuchtigkeit hin (wir empfehlen eine weitere Beobachtung).



Abbildung 135: Noch ungedämmte Kellerdecke im Mittelgang (Westseite). Der hintere Teil ist gerade gedämmt worden.



Abbildung 136: Thermografie des noch ungedämmten Teils der Kellerdecke:

- ganz links die Lampe mit Oberflächentemperaturen von 37 bis 55 °C,
- die Kanten zur Innenwand kommen auf ca. 13 °C (Wärmebrücken),
- die ungedämmte Decke hat durchschnittlich 12.3 °C,
- im Hintergrund sind die Kelleraußenwand und das Westkellerfenster erkennbar. Im Kellerfenster spiegelt sich die Thermografiemannschaft.



Abbildung 137: Übergang zwischen gedämmter und ungedämmter Kellerdecke im Mittelgang (Westseite).



Abbildung 138: Thermografie des Übergangs gedämmte/ungedämmte Teile der Kellerdecke im Mittelgang:

- die ungedämmte Decke hat durchschnittlich eine Temperatur von 12.5 °C,
- die Oberfläche der Dämmung liegt durchschnittlich bei 11.5 °C.

Abschließende Bemerkungen zur Dämmung der Kellerdecke:

Die Aufnahmen belegen die Wirksamkeit der angebrachten Dämmung. Sie zeigen die Notwendigkeit sowohl der zusätzlichen Dämmstreifen im oberen Bereich des Kellermauerwerkes als auch der Spachtelung der Dämmung (gegen Luftkonvektion). Die diagnostizierten Bereiche mit feuchtem Kellermauerwerk sollten im Auge behalten werden.

10 Innenthermografie

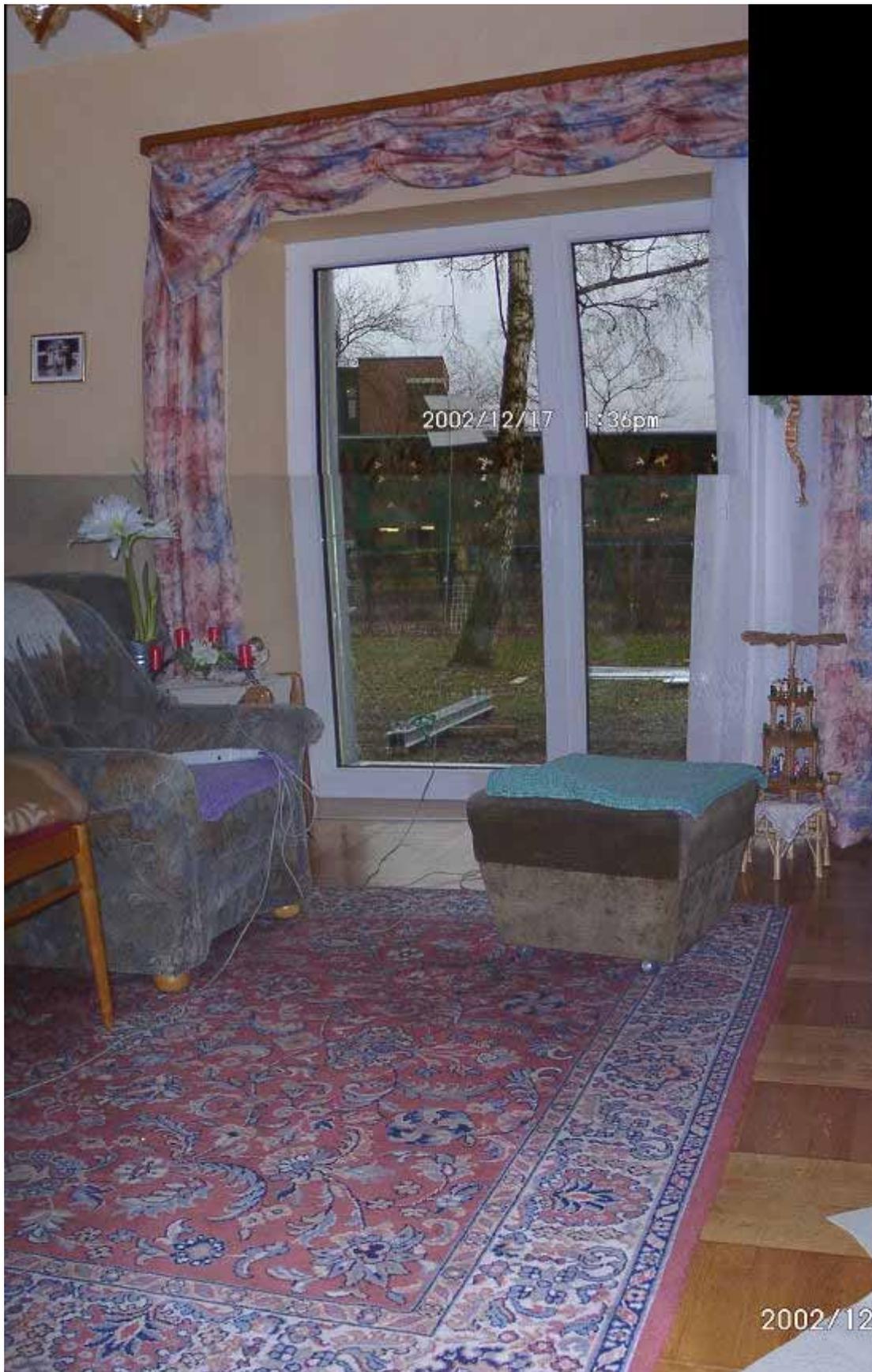


Abbildung 139: Wohnzimmerfenster der Wohnung im Erdgeschoss/Ost (zusammengesetzte Aufnahme).

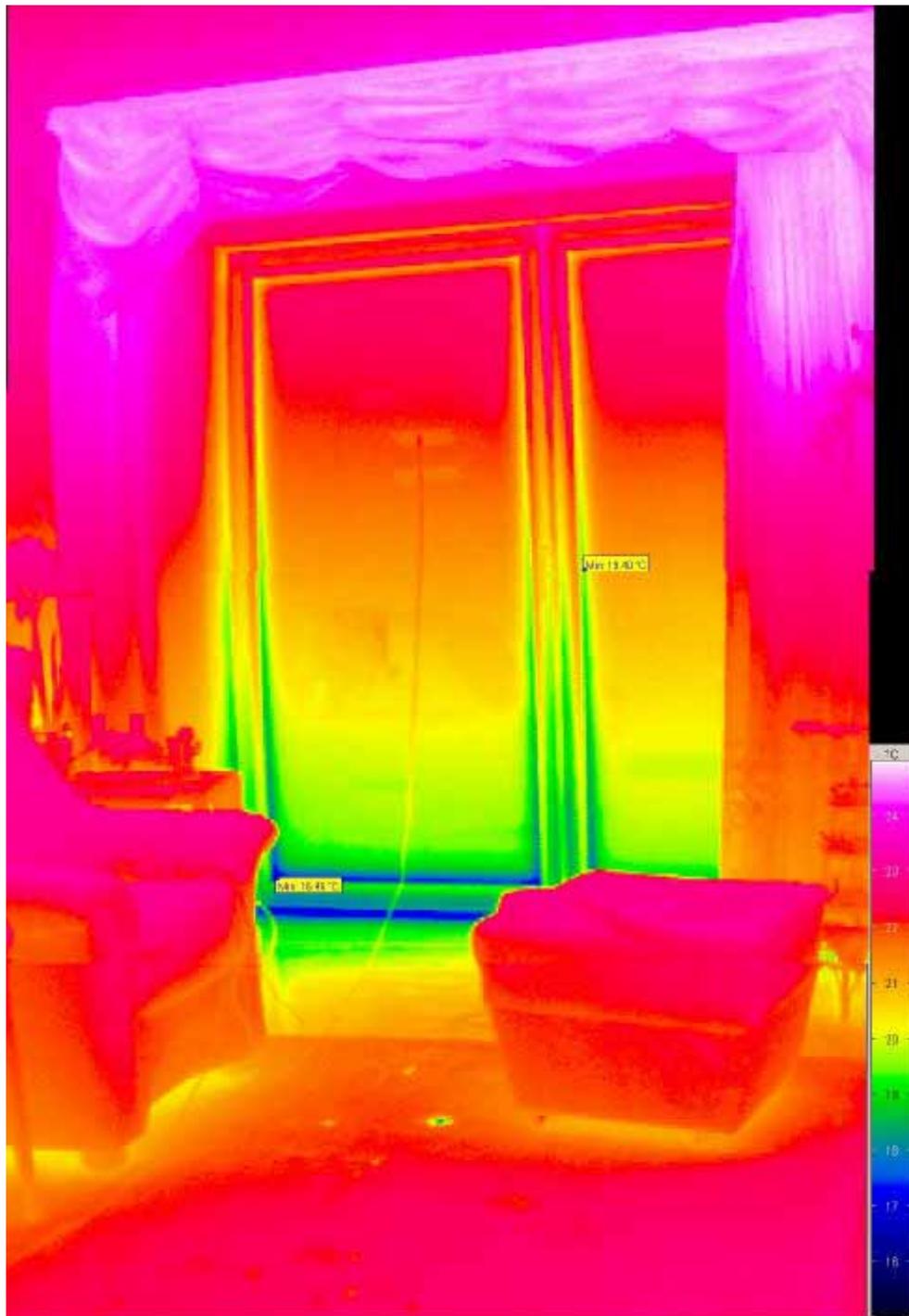


Abbildung 140: Innenthermografie des Wohnzimmerfensters (zusammengesetzte Aufnahme). Die gemessene Raumlufthtemperatur in 1.10 m Höhe lag bei 22.5 °C.

- Deutlich erkennbar ist die Temperaturschichtung im Raum (Boden: 21.7 °C; Decke: 24.5 °C). Der Gradient beträgt etwa 1 K/m und liegt damit im Komfortbereich.
- Die Oberfläche der Verglasung ist mit 20 bis 22.5 °C angenehm warm.
- Die Fensterrahmen sind zwischen 18 und 22.5 °C etwas kälter.
- Die Außenwandoberflächen haben fast Raumlufthtemperatur.
- Die Wärmebrücken durch den Glasrandverbund sind deutlich erkennbar (Temperaturen bis herunter zu 16.7 °C; diese sind aber immer noch hoch genug, um Tauwassergefahr auszuschließen).
- Klar erkennbar ist auch die verbleibende Einbauwärmebrücke am unteren Rand der Fenstertür. Auch hier liegen die Temperaturen um 17 °C (keine Tauwassergefahr).



Abbildung 141: Wohnzimmer-Außenwand.



Abbildung 142: Thermografie der Wohnzimmerraußenwand.

- Erkennbar ist wieder die Temperaturschichtung im Raum.
- Die Oberflächentemperatur des sichtbaren Teils der Außenwand liegt durchschnittlich bei 22,8 °C. Die neu angebrachte Außendämmung ist somit wie projiziert wirksam.
- Besonders warm ist die Oberfläche des beheizten Aquariums (im oberen Bereich 37,5 °C).



Abbildung 143: Außenwand mit Fenster im Raum östlich des Wohnzimmers.

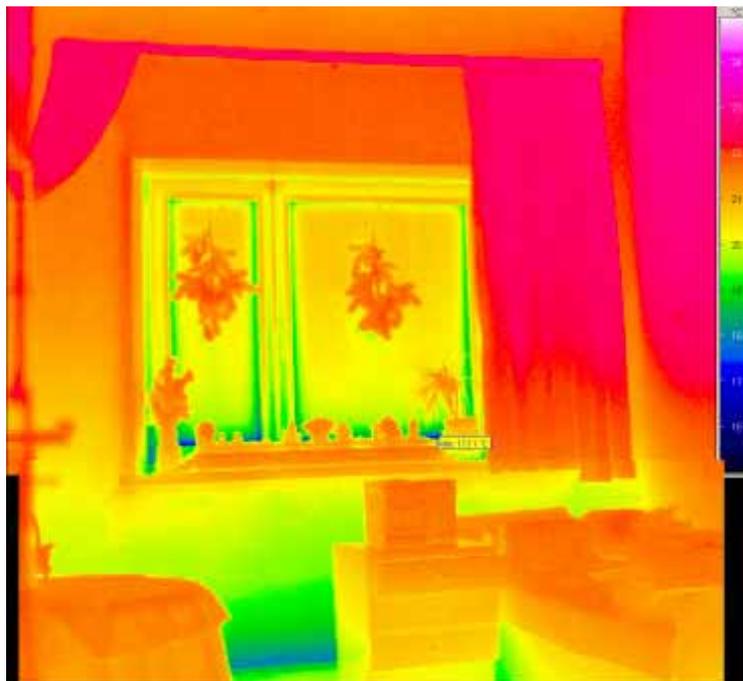


Abbildung 144: Die Thermografie (zusammengesetztes Bild) zeigt:

- warme Verglasungs-, Rahmen- und Außenwandoberflächen,
- die Wärmebrücke am Glasrandverbund,
- die Fußpunktwärmebrücke am Übergang Außenwand/Kellerdecke mit Temperaturen von um 18 °C. Hier besteht unter normalen Wohnraumbedingungen keine Gefahr für Schimmelpilzwachstum (Grenze für a_w -Wert 80 %: 13 °C).

Die Berechnungen ließen allerdings noch deutlich höhere Temperaturen in der Kante erwarten. Wir gehen davon aus, dass die Temperaturen noch ansteigen werden, wenn das gesamte Mauerwerk thermisches Gleichgewicht und eine geringere Materialfeuchte erreicht hat.



Abbildung 145: Außenwandfußpunkt im Raum östlich des Wohnzimmers.

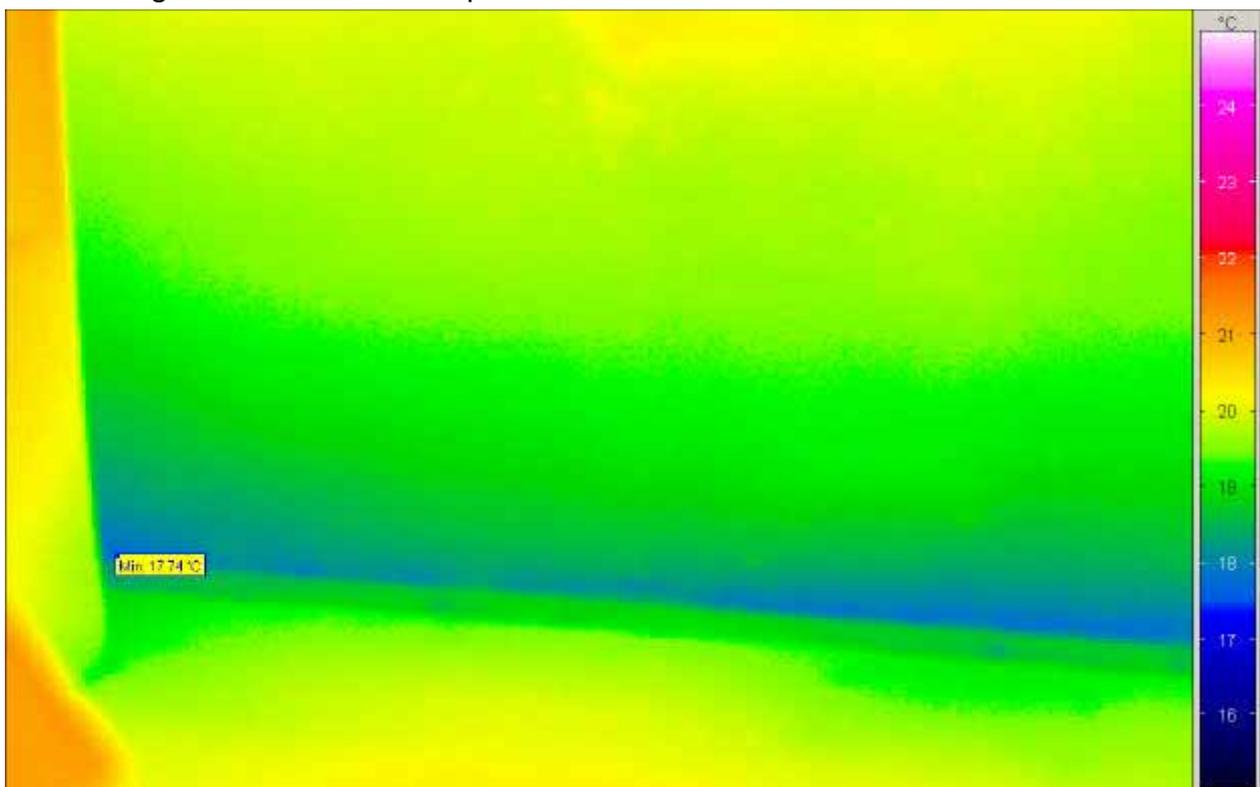


Abbildung 146: Thermografie des Fußpunktbereichs der Außenwand. Die Temperatur am Anschluss geht gleichmäßig auf etwa 18 °C zurück. Probleme bei normaler Nutzung sind auszuschließen. Die Notwendigkeit der Perimeterdämmung wird hier deutlich: sonst würden die Temperaturen am Fußpunkt weit stärker absinken.



Abbildung 147: Außenwandfußpunkt der Südostecke im EG.

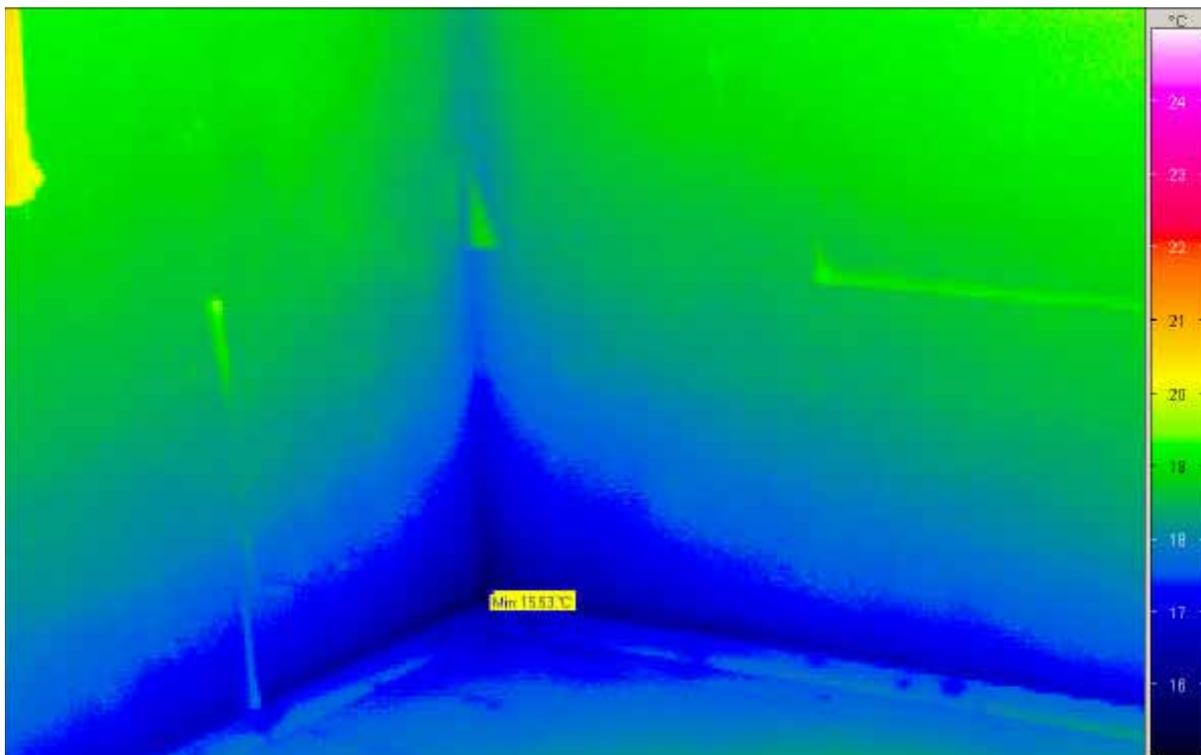


Abbildung 148: Thermografie des Fußpunktbereichs in der Südostecke. Die Temperatur geht auf 15.5 °C zurück. Als nach Tapezier- und Streicharbeiten höhere Raumluftfeuchtigkeiten aufgetreten waren, war es an dieser Stelle nach Bewohneraussagen zu Tauwasserniederschlag gekommen. Auch hier können bei normaler Nutzung keine Probleme auftreten. Die Temperaturen sollten hier nach vollständiger Durcherwärmung des Mauerwerkes noch ansteigen, wir empfehlen eine thermografische Kontrollaufnahme.



Abbildung 149: Ostfenster im Raum EG/Südost.

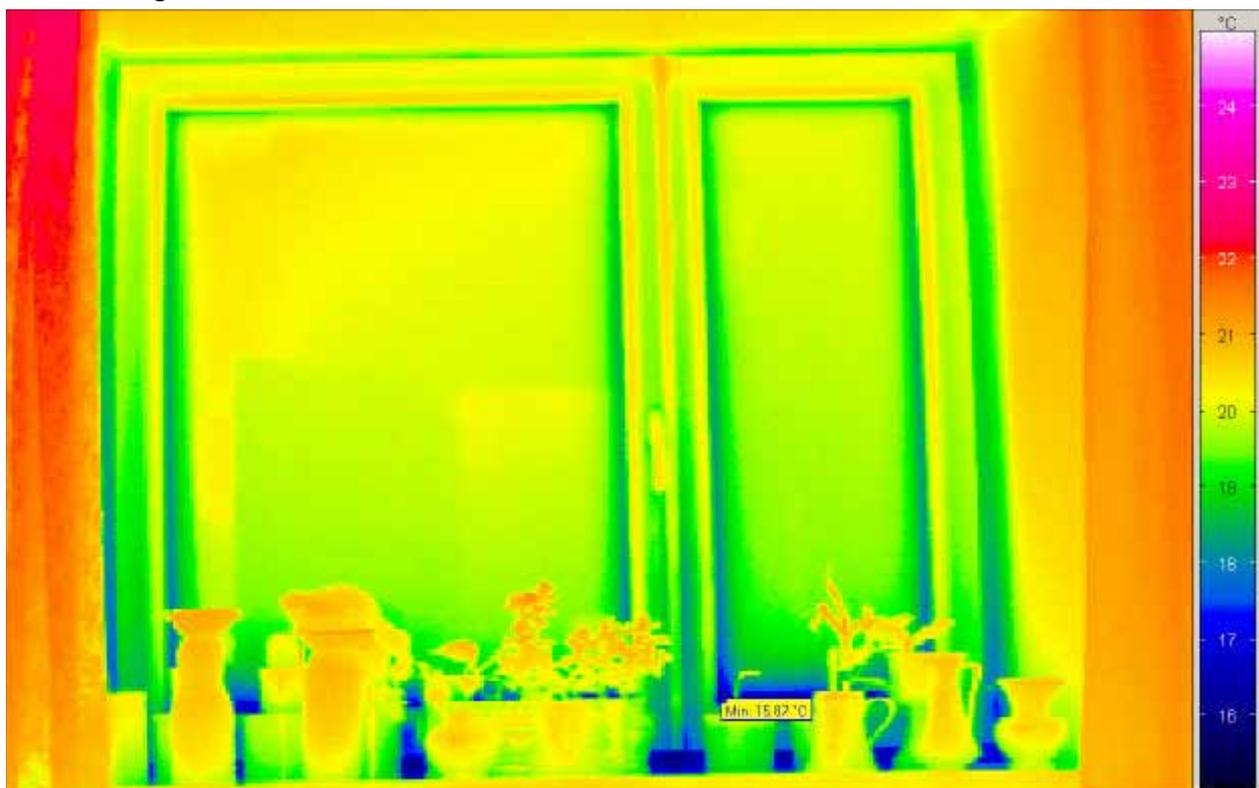


Abbildung 150: Auch bei diesem Fenster sind die Wärmebrücke am Verglasungsrand und die Einbauwärmebrücke an der Brüstung gut zu erkennen. Die Werte entsprechen der Projektierung.



Abbildung 151: Badezimmer im Osten des EG.

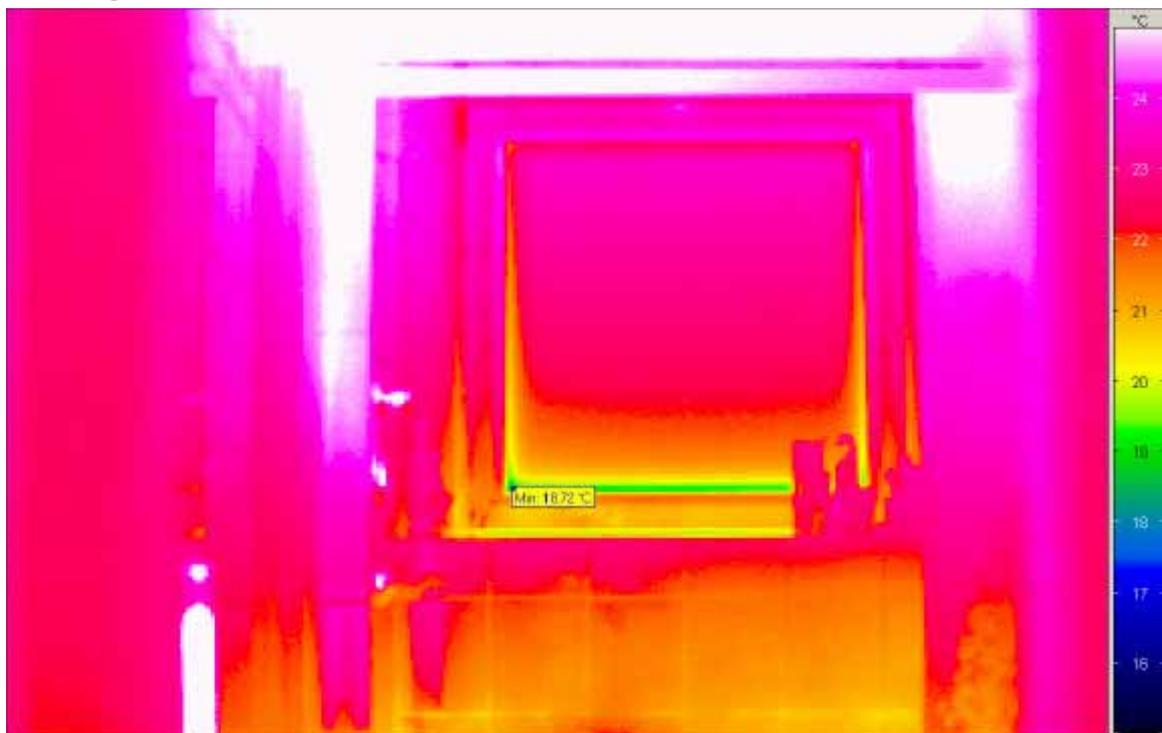


Abbildung 152: Thermografie des Fensters und des Außenwandbereichs im Badezimmer. Die Temperaturen liegen hier höher (22 bis 24 °C), trotz hoher Feuchtequellen gibt es kein Tauwasser. Die Lüftungsanlage entnimmt aus diesem Raum Abluft.



Abbildung 153: Ostwand des Raumes EG/Nordostecke.

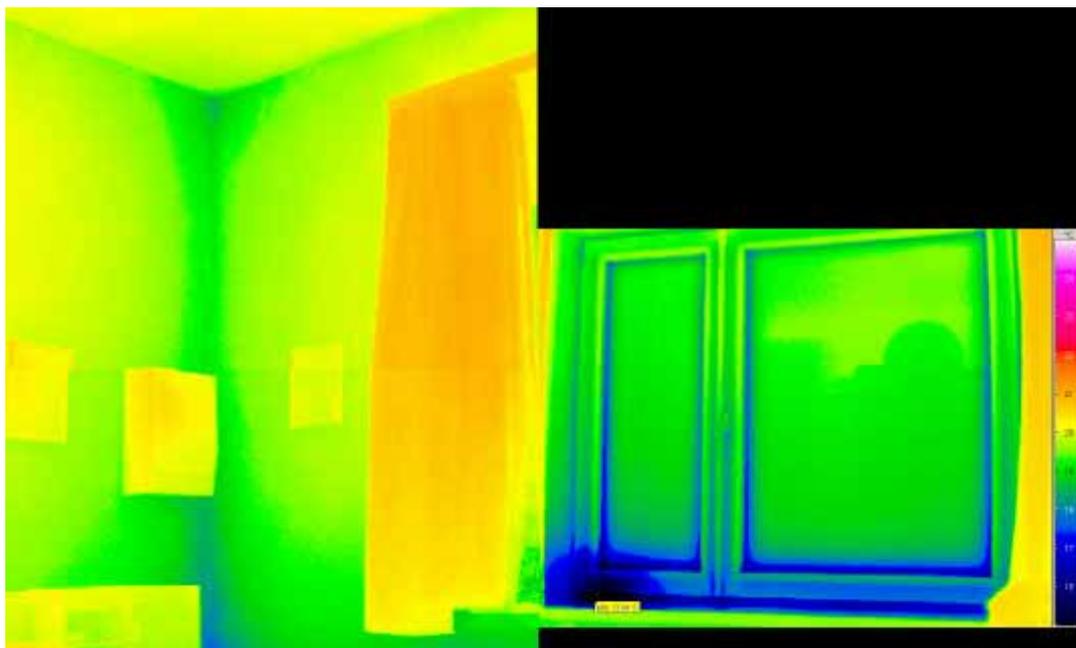


Abbildung 154: Zusammengesetzte thermografische Aufnahme: Außenwand und Fenster haben Temperaturen im erwarteten Bereich. Der linke Fensterflügel ist unten links stark ausgekühlt. Hier lag vor der Aufnahme ein Stoffpaket, das wie eine Innendämmung wirkte.

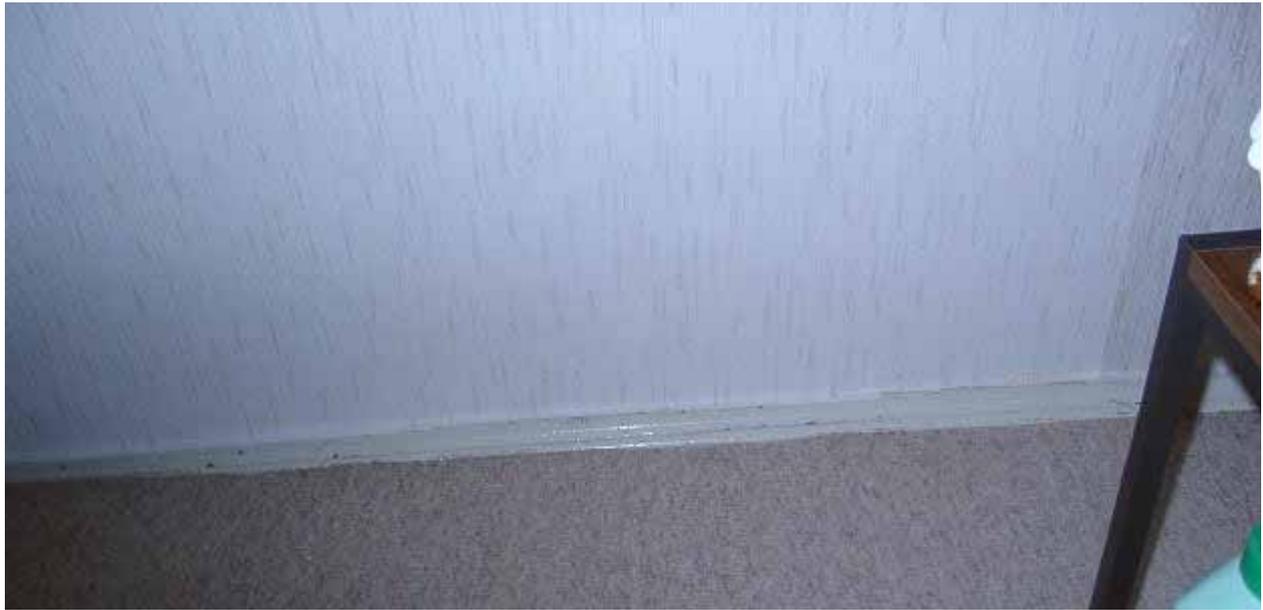


Abbildung 155: Fußpunkt der Außenwand im Raum Nordost des EG.

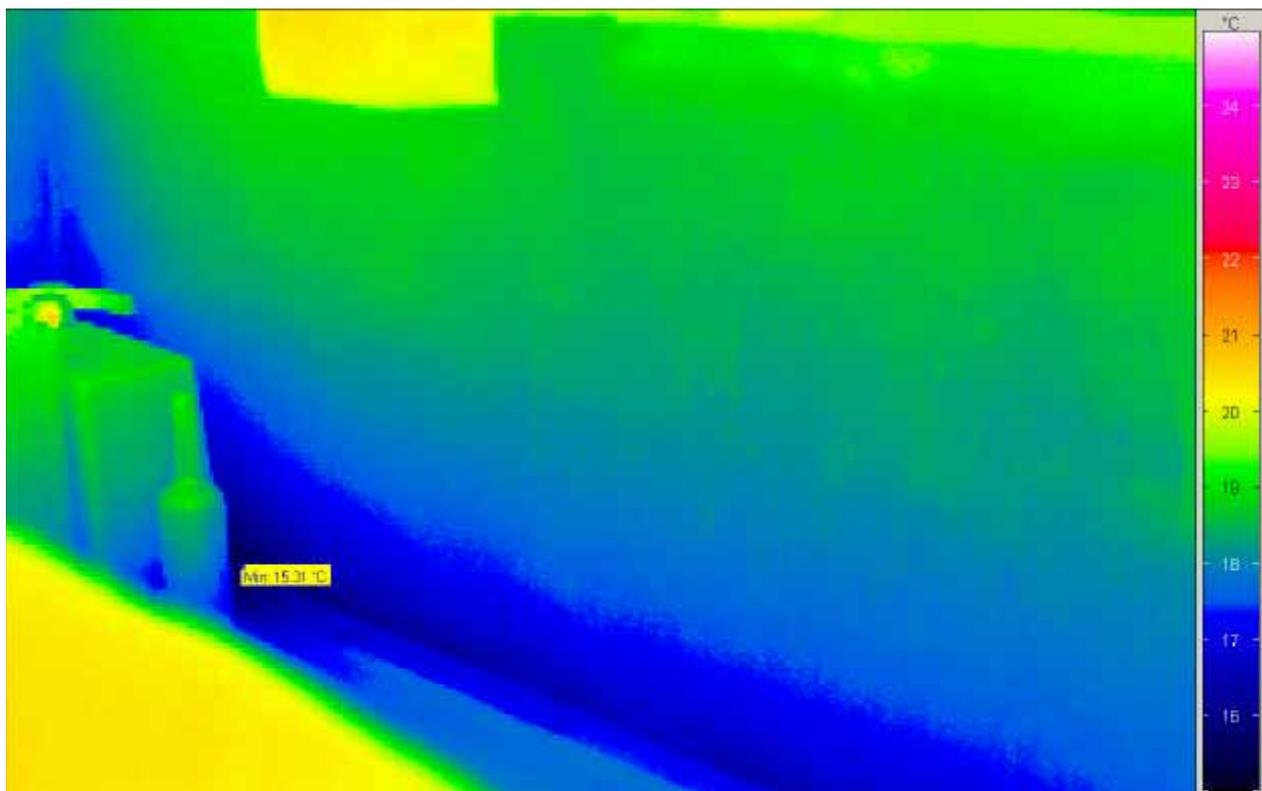


Abbildung 156: Thermografie des Außenwandfußpunktes im Nordostraum. Auch hier liegen die Temperaturen mit minimal 15 °C oberhalb des kritischen Bereichs. Sie werden mit der Zeit noch ansteigen, wenn das Mauerwerk sich vollständig durchwärmt hat und eine neue Gleichgewichtsfeuchte erreicht ist. Temperaturen über 15 °C werden hier aber nur durch die rundumlaufende Perimeterdämmung erreicht, die sich als unverzichtbar erweist.



Abbildung 157: Nordaußenwand im Nordostzimmer im EG.

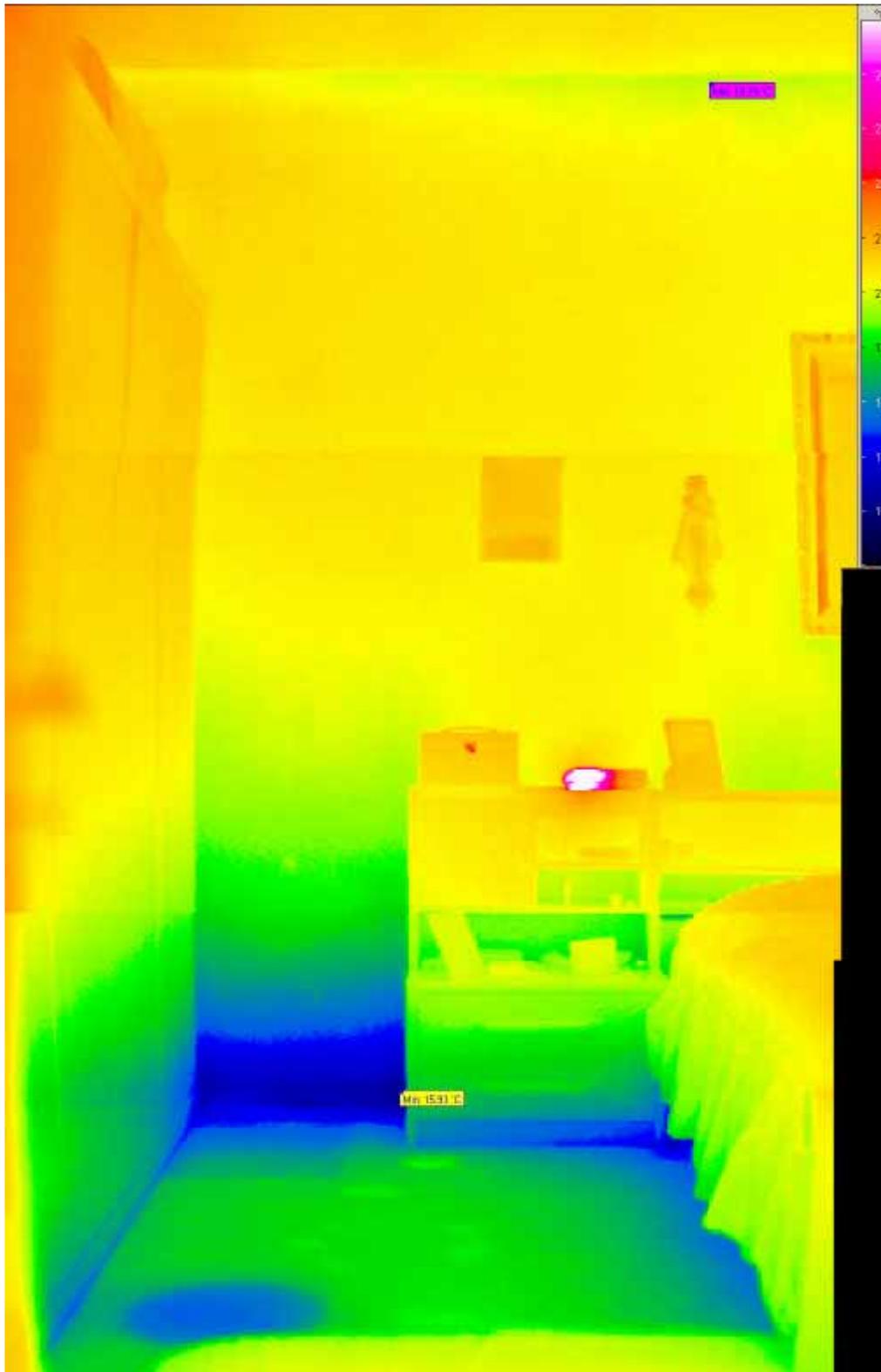


Abbildung 158: Thermografie der Nordaußenwand im Nordostzimmer des EG (zusammengesetzte Aufnahme). Wieder ist die Fußpunktwärmebrücke deutlich erkennbar, auch hier liegt die Oberflächentemperatur mit ca. 16 °C deutlich über (kritischen) 13 °C. Der "runde blaue Fleck" unten links kennzeichnet eine Stelle, auf welcher kurz vor der Aufnahme noch ein Korb stand. Durch die Kellerdeckendämmung ist auch eine solche nutzungsbedingte Innendämmung nicht mit dem Problem einer unzulässigen Temperaturabsenkung verbunden. Der "heiße Fleck" zeigt Standby-Verluste des Radioweckers.



Abbildung 159: Fenster im Nordzimmer des EG.

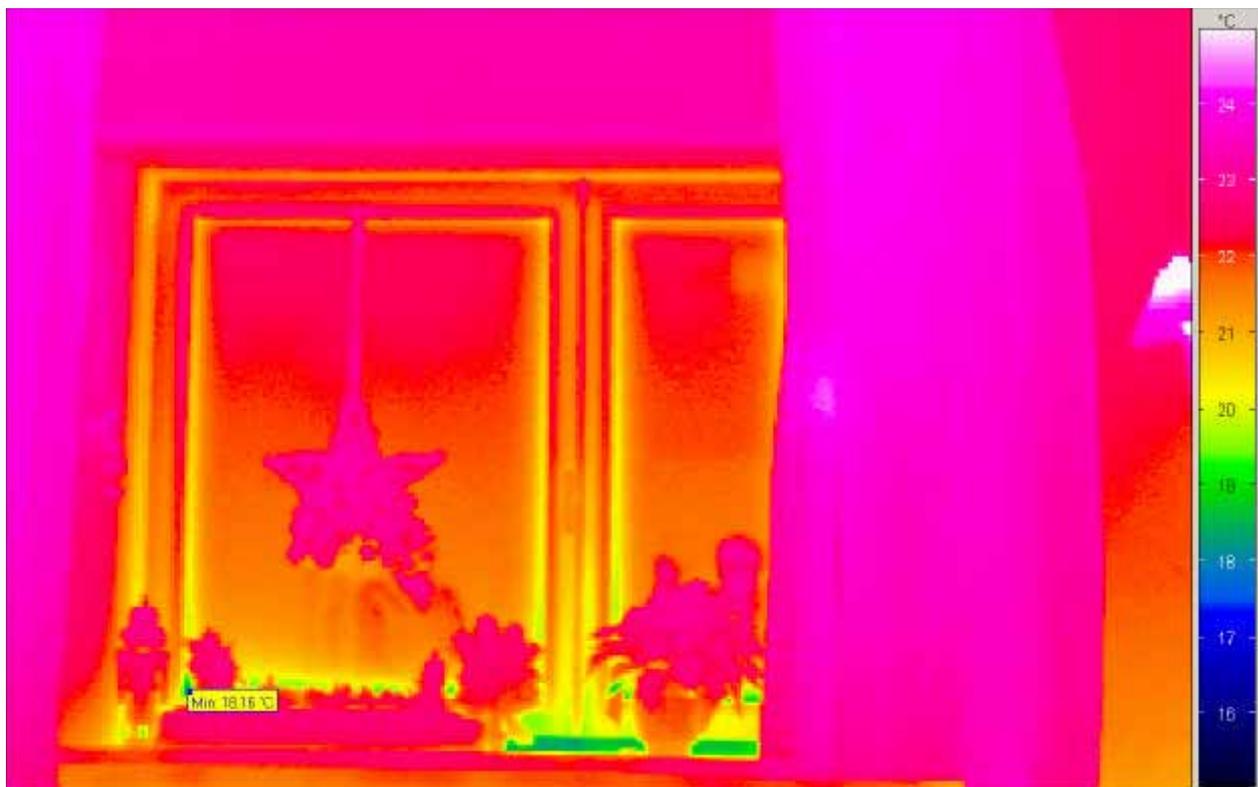


Abbildung 160: Thermografie des Fensters im Nordzimmer: Verglasungsrand und Einbauwärmebrücken sind erkennbar, kein Hinweis auf Mängel.



Abbildung 161: Fenster und Außenwand der "Kammer Nord"

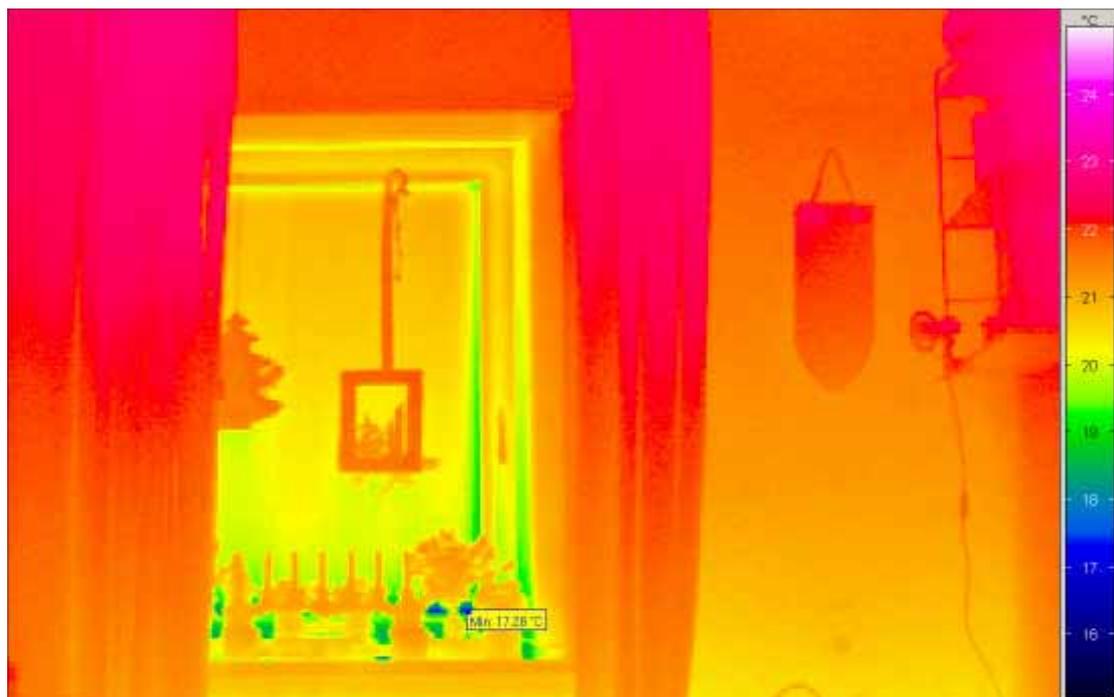


Abbildung 162: Thermografie von Fenster und Außenwand in der "Kammer Nord". Das Bild zeigt keine Hinweise auf Mängel.

Abschließende Bemerkung zur Innenthermografie unter Normaldruck:

Der Temperaturrückgang am Mauerwerksfußpunkt ist gegenwärtig stärker als nach der Berechnung. Dies könnte auf dynamische Effekte (Mauerwerk nach Anbringung der Dämmung noch nicht vollständig durcherwärmt) und auf den Feuchtegehalt zurückzuführen sein. Der dynamische Effekt sollte nach einigen Wochen, die Trocknung im zweiten Winter weitgehend abgeklungen sein. Wir empfehlen für den Fußpunkt eine thermografische Kontrollaufnahme.

Es wurden keine Mängel festgestellt.

11 Innenthermografie mit Unterdruck

Am 17.12.2002 wurde ab ca. 15:00 durch das Büro Anbus im gesamten Gebäude ein Unterdruck von 50 Pa erzeugt. Nachfolgend dokumentieren wir die Ergebnisse der Leckagesuche in der Wohnung im Erdgeschoss/Ost.

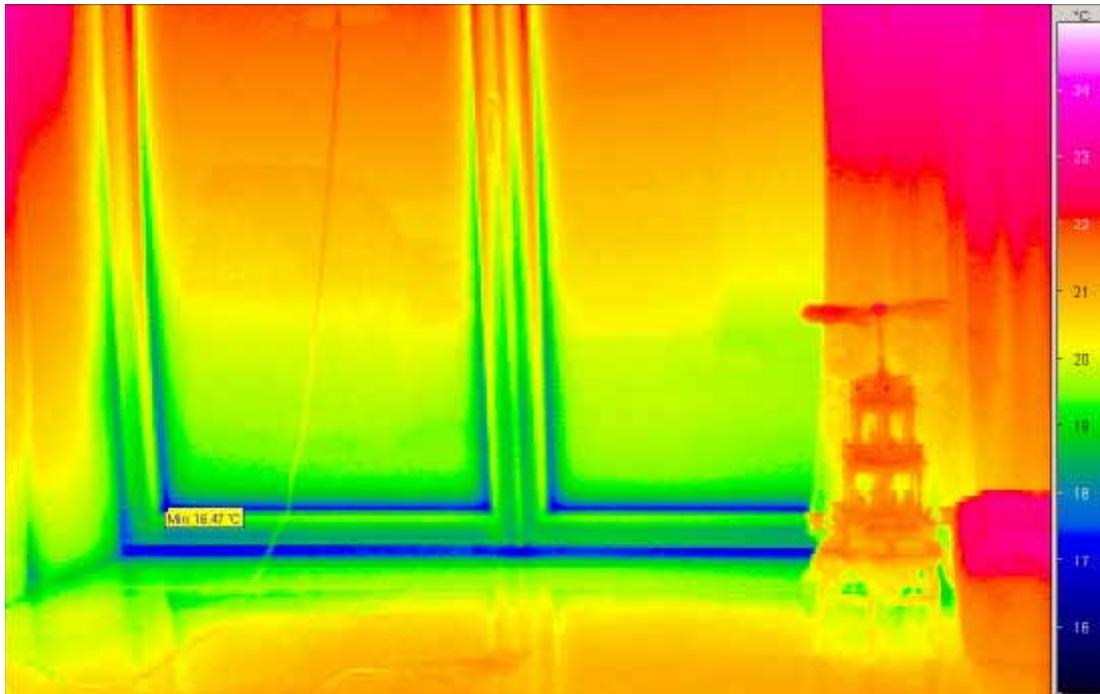


Abbildung 163: Thermografische Aufnahme des Wohnzimmerfensters, vor dem Unterdrucktest (vgl. dazu Abbildung 140). Die niedrigste Temperatur liegt am Rand der Verglasung vor (Wärmebrücke durch Randverbund-Abstandhalter).

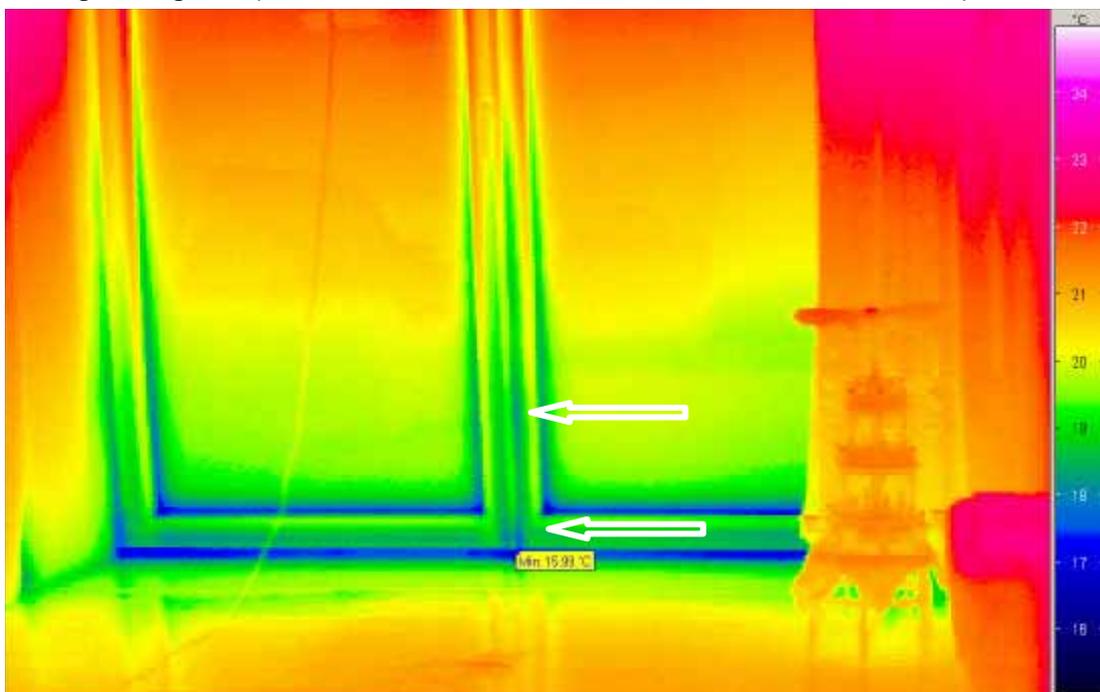


Abbildung 164: Der gleiche Ausschnitt nach ca. 15 Minuten Unterdruck von 50 Pa durch die Blowerdoor von Anbus. Die Unterschiede in den beiden Aufnahmen sind extrem gering. Durch leichte Undichtheiten an den Ecken der Flügelrahmen im Bereich des Stulp sind dort geringfügige Temperaturabsenkungen und kleine Kaltluftfahnen (Pfeile) zu erkennen. Das Fenster ist außerordentlich gut luftdicht.

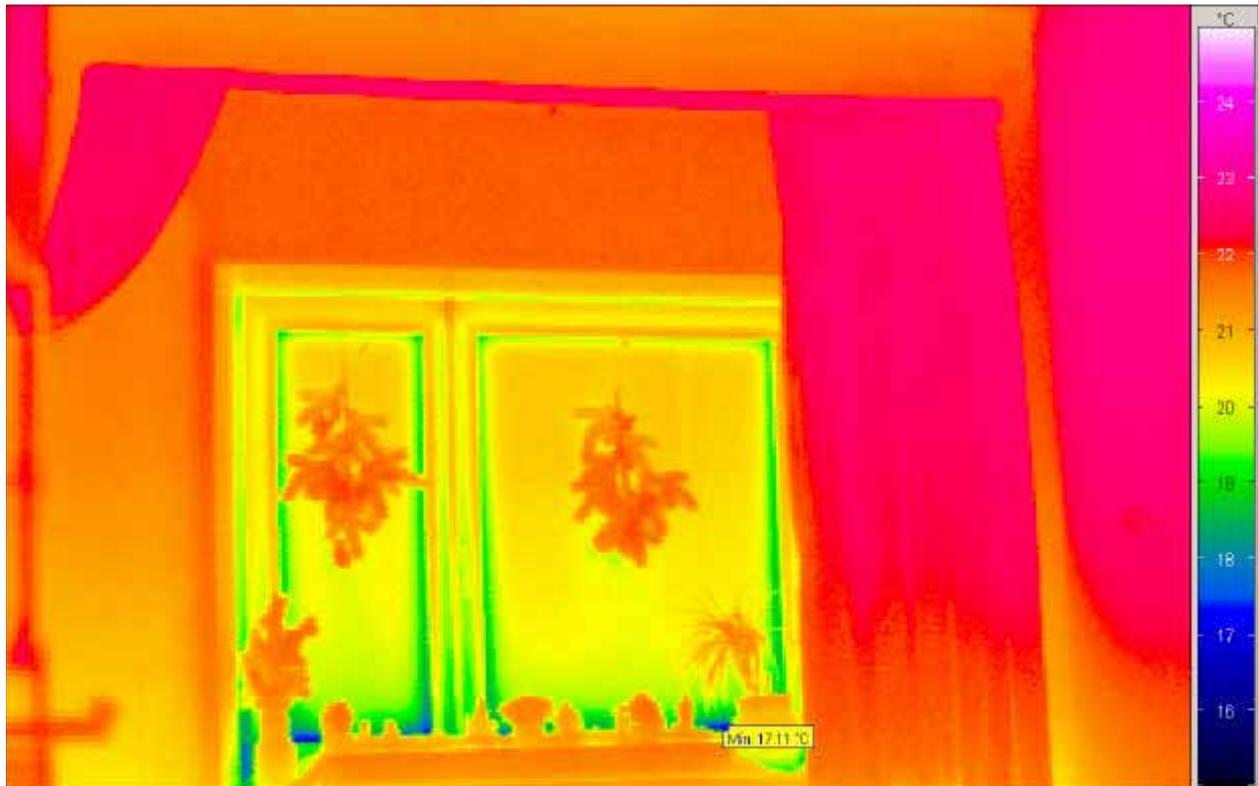


Abbildung 165: Thermografische Aufnahme des Zimmerfensters (Raum östlich des Wohnzimmers) ohne Unterdruck.

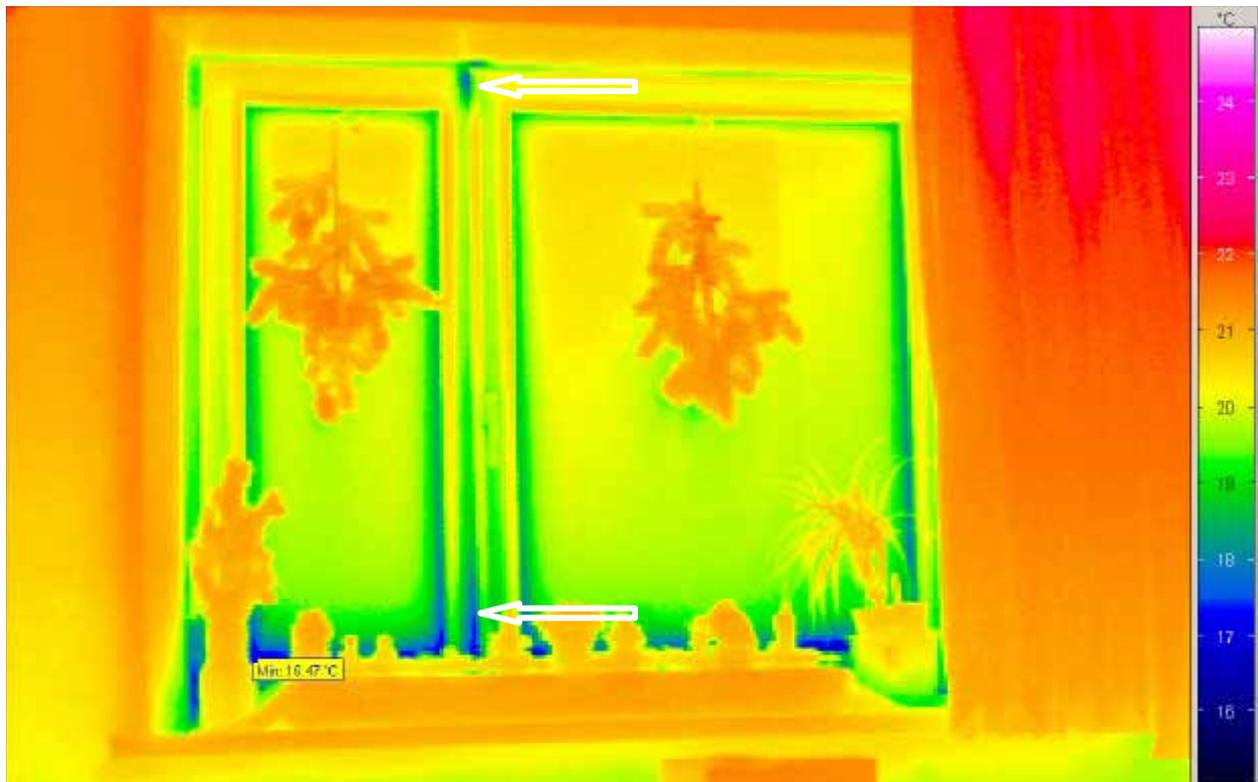


Abbildung 166: Dieses Fenster nach ca. 15 Minuten Unterdruck von 50 Pa. Durch leichte Undichtheiten an den Ecken der Flügelrahmen im Bereich des Stulp sind dort (unbedeutende) Kaltluftfahnen zu erkennen. Das Fenster ist außerordentlich gut luftdicht.

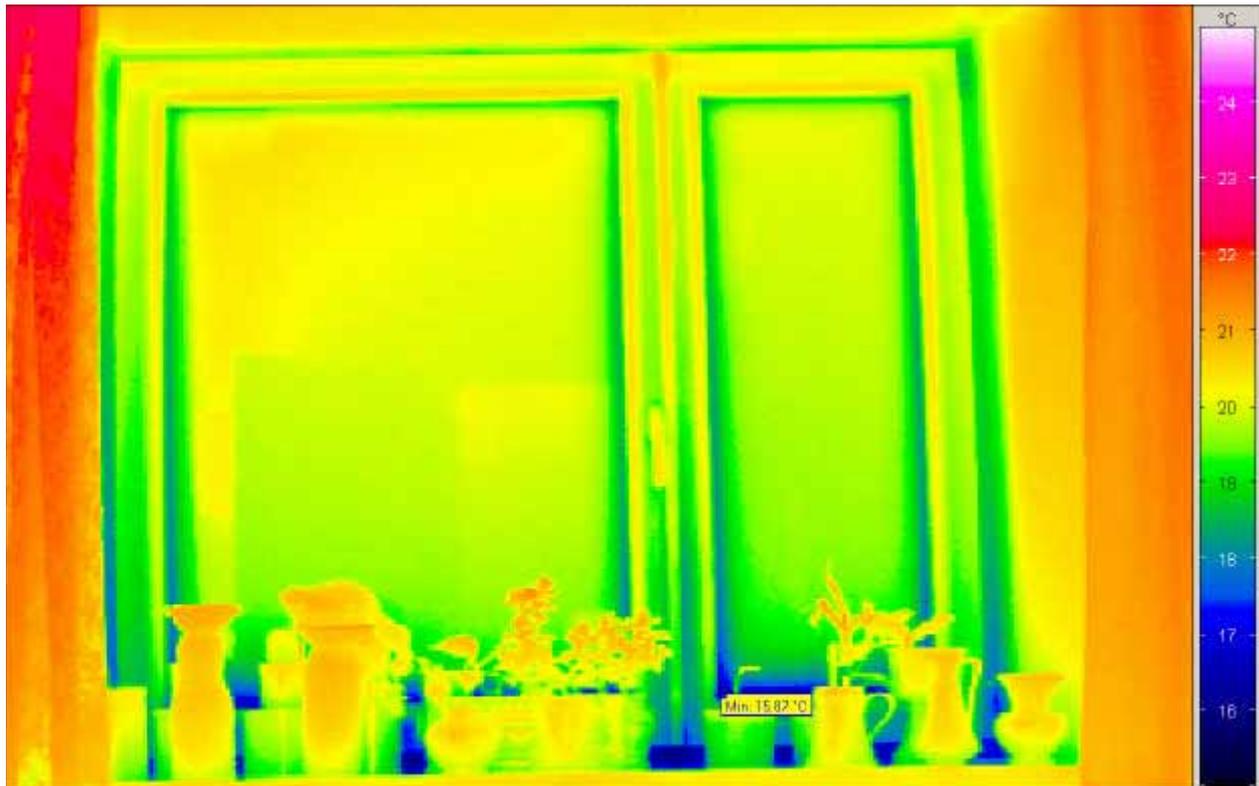


Abbildung 167: Thermografische Aufnahme des Ostzimmerfensters ohne Unterdruck (identisch mit Abbildung 149).

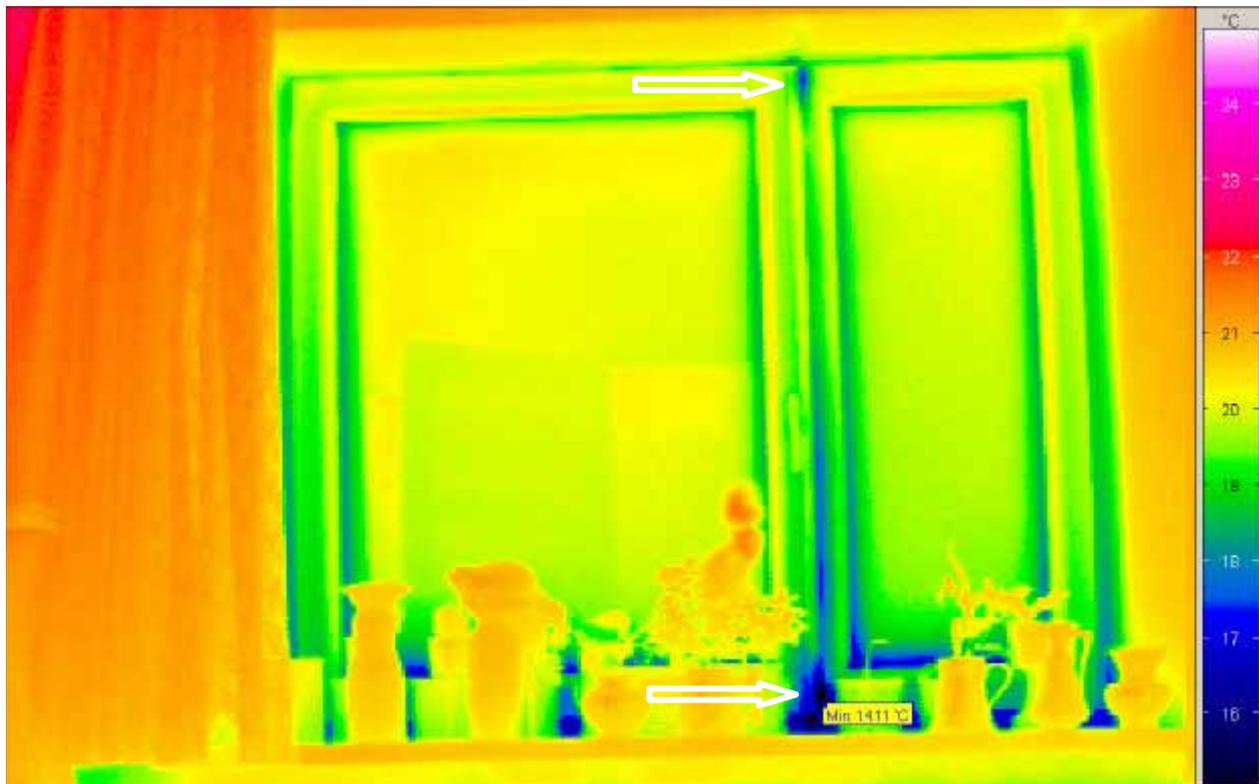


Abbildung 168: Dieses Fenster nach ca. 15 Minuten Unterdruck von 50 Pa. Durch Undichtheiten an den Ecken der Flügelrahmen im Bereich des Stulp sind dort Kaltluftfahnen zu erkennen. Die Auskühlung an der unteren Ecke ist bereits im Grenzbe-
reich (14 °C Oberflächentemperatur).

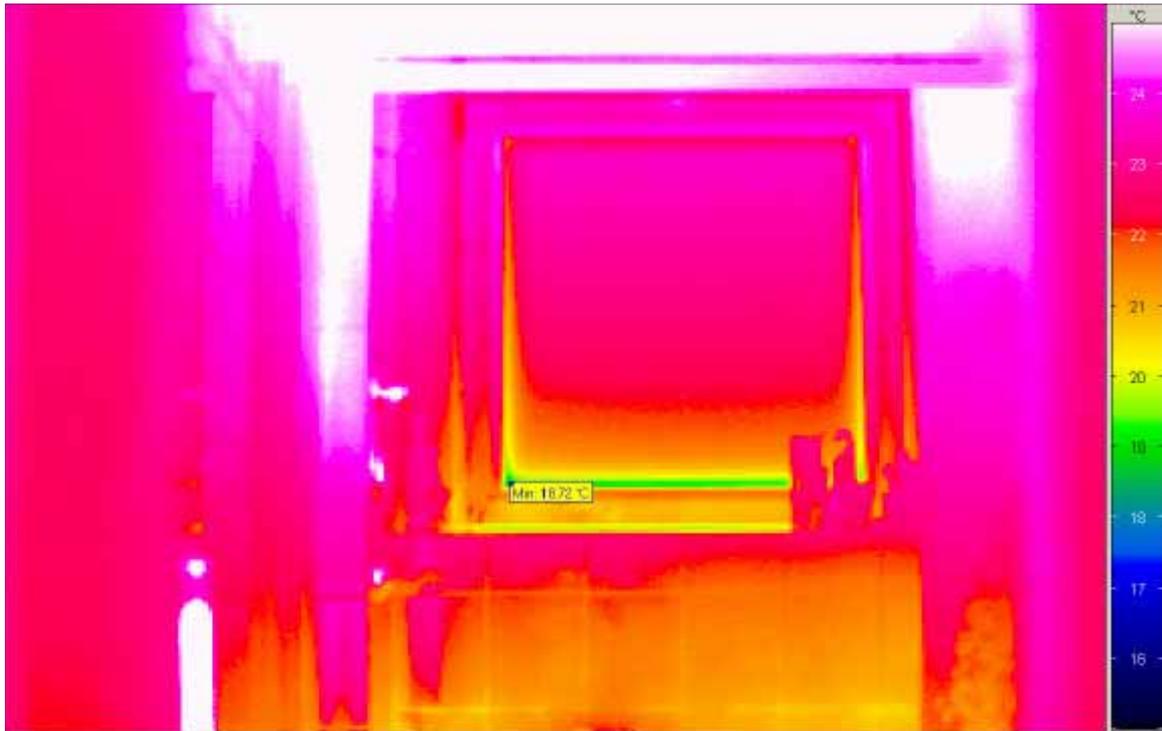


Abbildung 169: Thermografische Aufnahme des Badezimmerfensters ohne Unterdruck (identisch mit Abbildung 151).

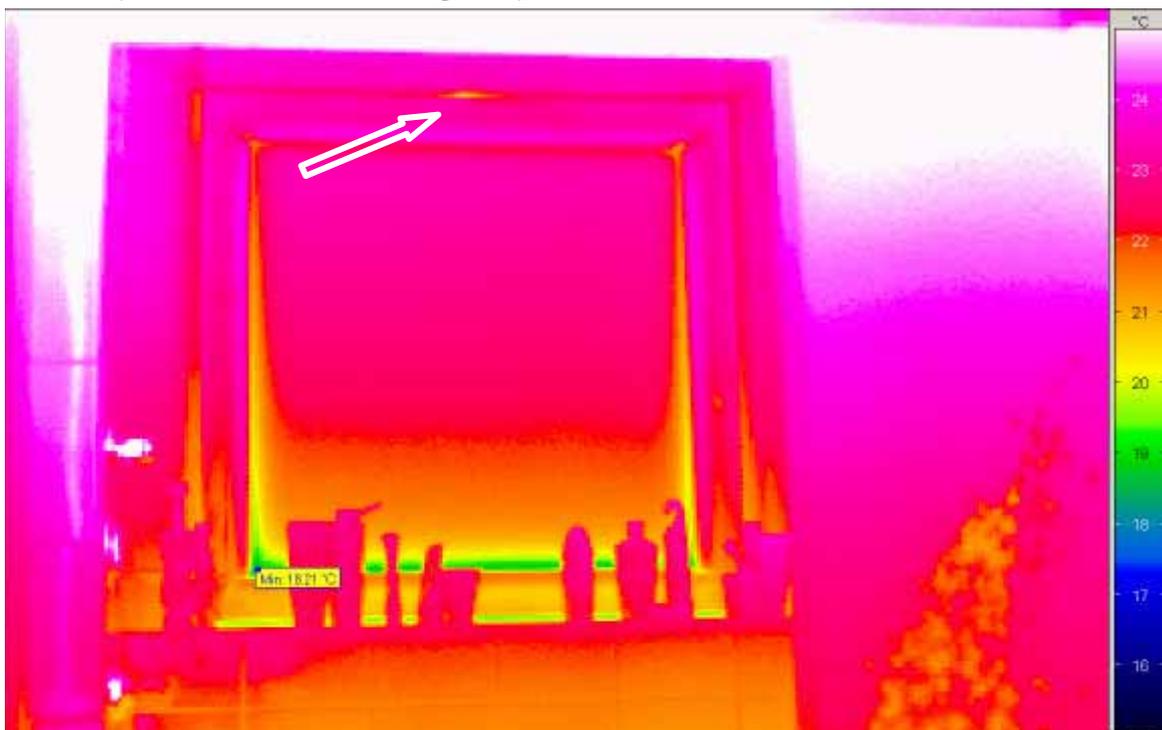


Abbildung 170: Dieses Fenster nach ca. 15 Minuten Unterdruck von 50 Pa. Hier ist nur im Bereich des oberen Anschlages eine ganz leichte Undichtheit zu erkennen. Das Fenster ist außerordentlich luftdicht.

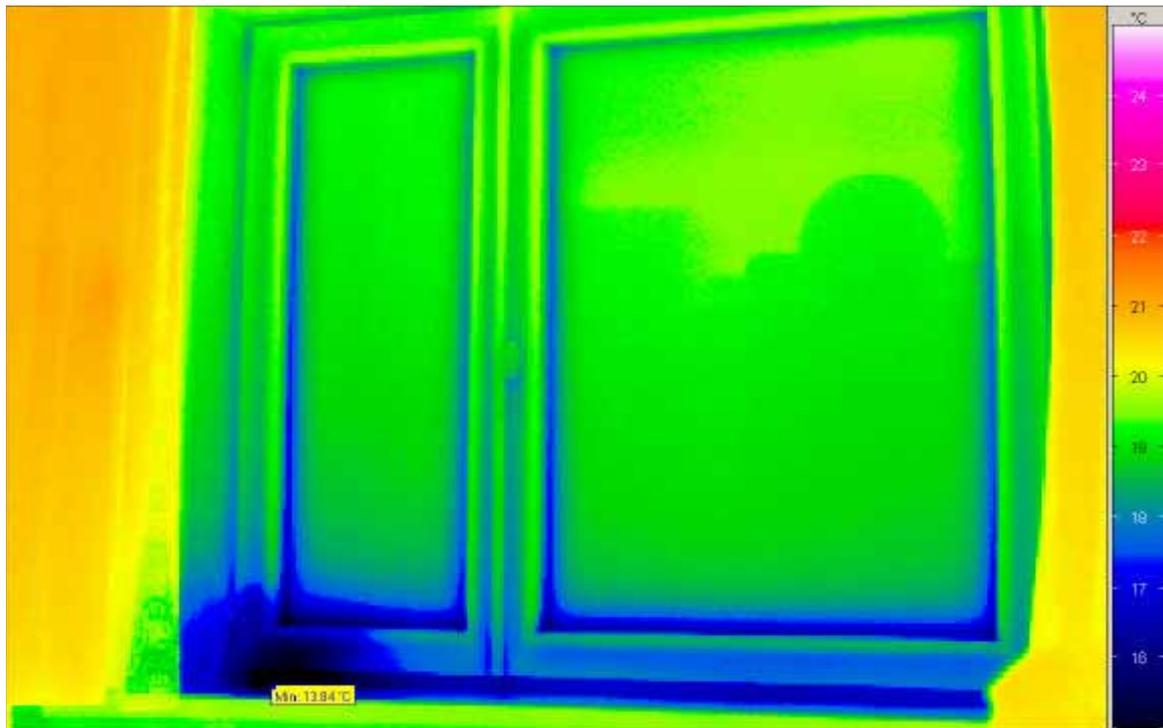


Abbildung 171: Thermografische Aufnahme des Nordostzimmerfensters ohne Unterdruck. Der linke Fensterflügel ist unten links stark ausgekühlt. Hier lag vor der Aufnahme ein Stoffpaket als temporäre Innendämmung.

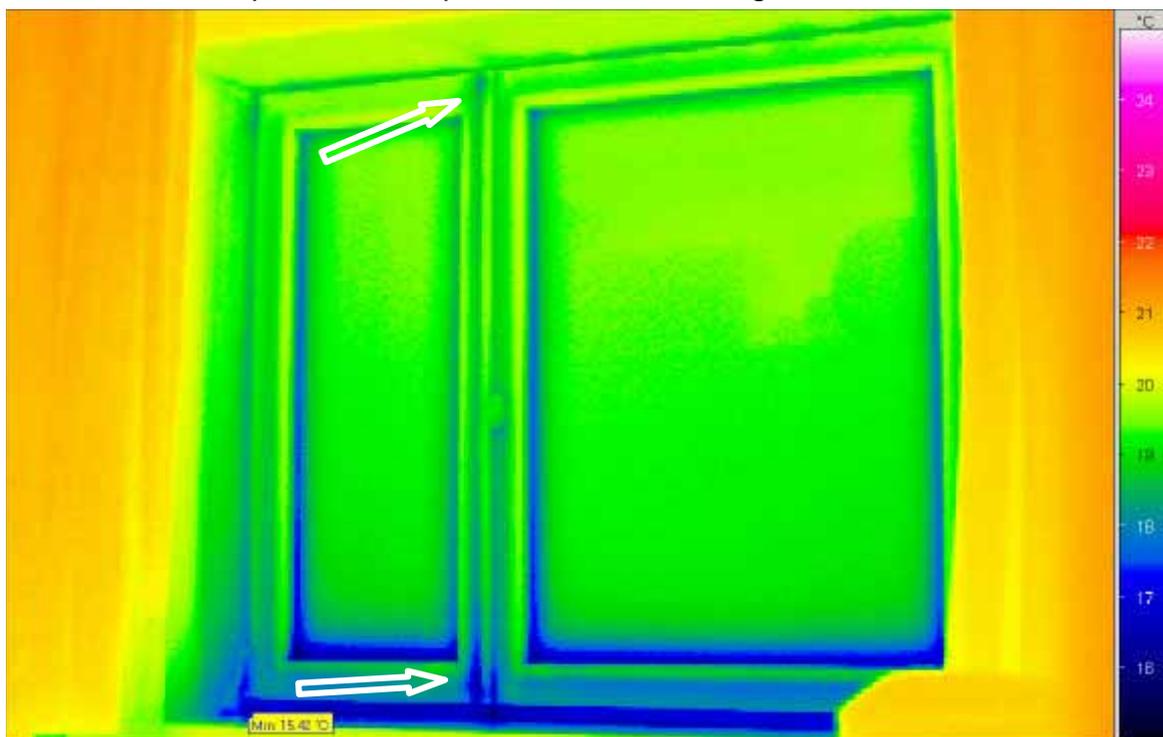


Abbildung 172: Dieses Fenster nach ca. 15 Minuten Unterdruck von 50 Pa. Hier sind im Bereich des Stulpanschlages leichte Undichtheiten zu erkennen. Die Auskühlung des zuvor "temporär innengedämmten Bereiches" ist weitgehend verschwunden. Das Fenster ist außerordentlich gut luftdicht.

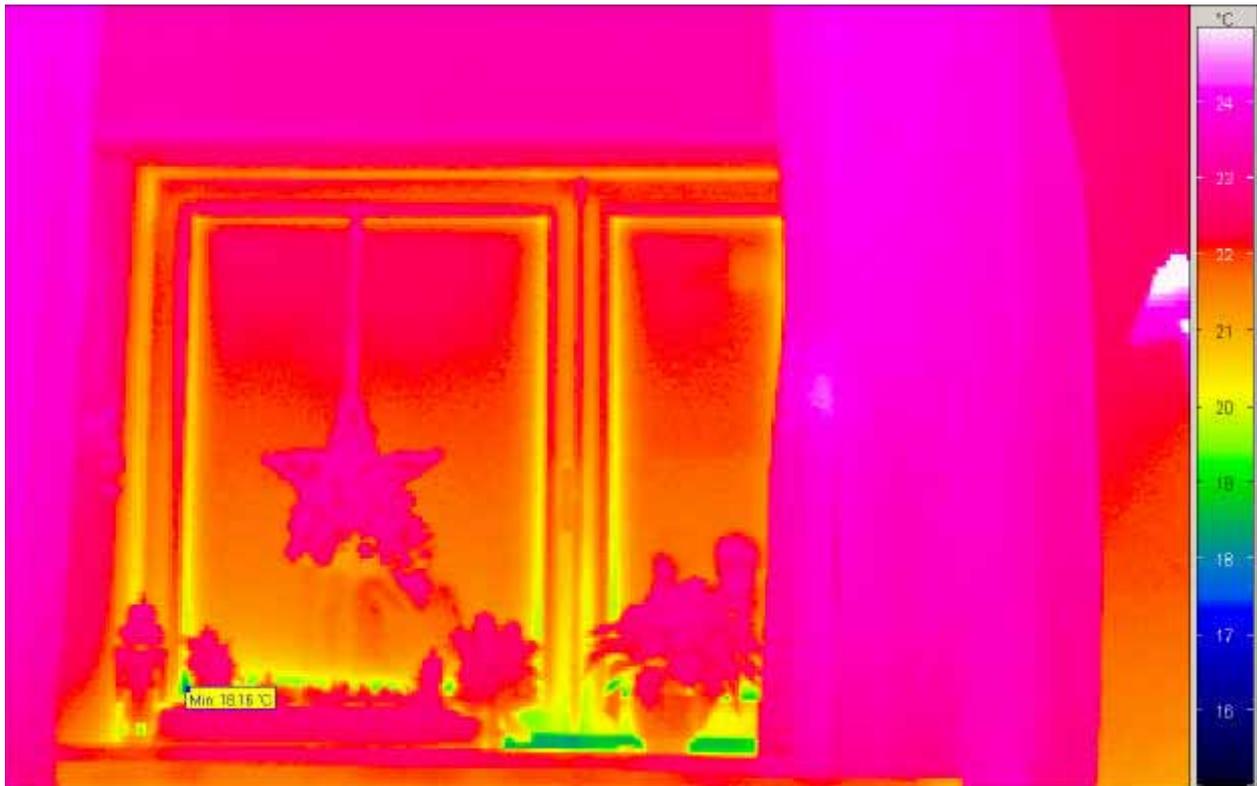


Abbildung 173: Thermografische Aufnahme des Nordzimmerfensters ohne Unterdruck (identisch mit Abbildung 160).

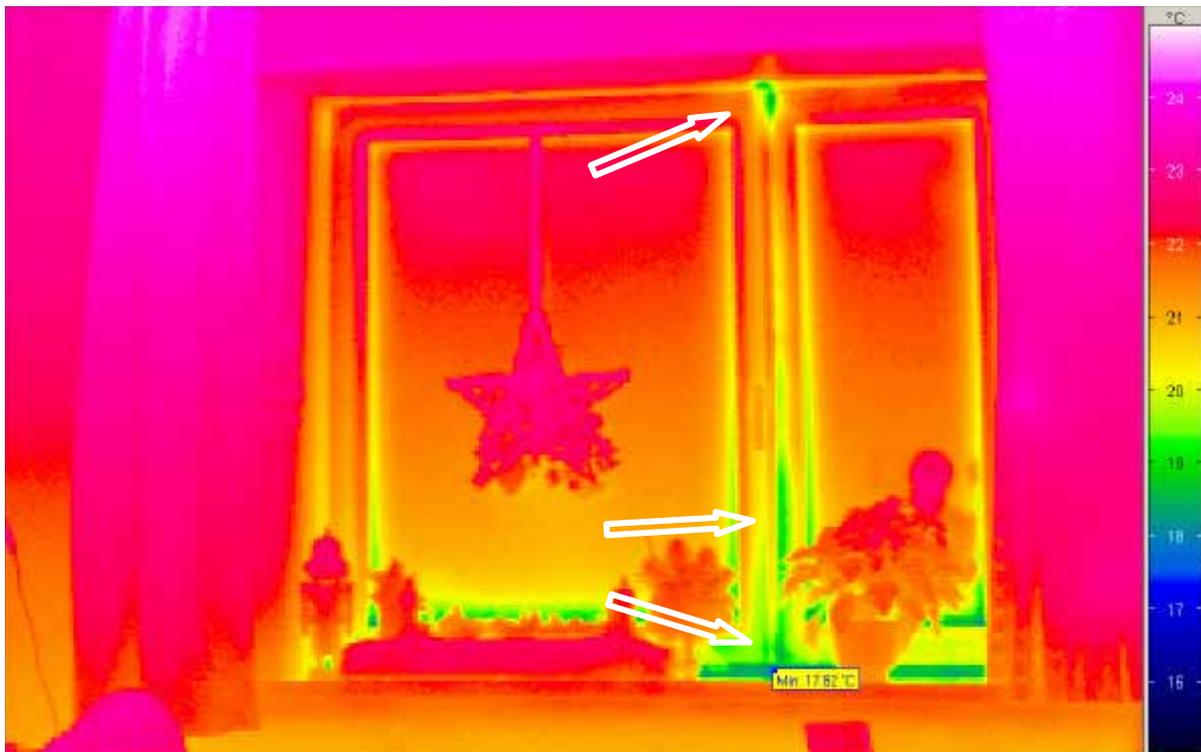


Abbildung 174: Dieses Fenster nach ca. 15 Minuten Unterdruck von 50 Pa. Wie bei den anderen Fenstern sind unbedeutende Undichtheiten im Bereich des Stulpanschlages zu erkennen. Das Fenster ist außerordentlich gut luftdicht.

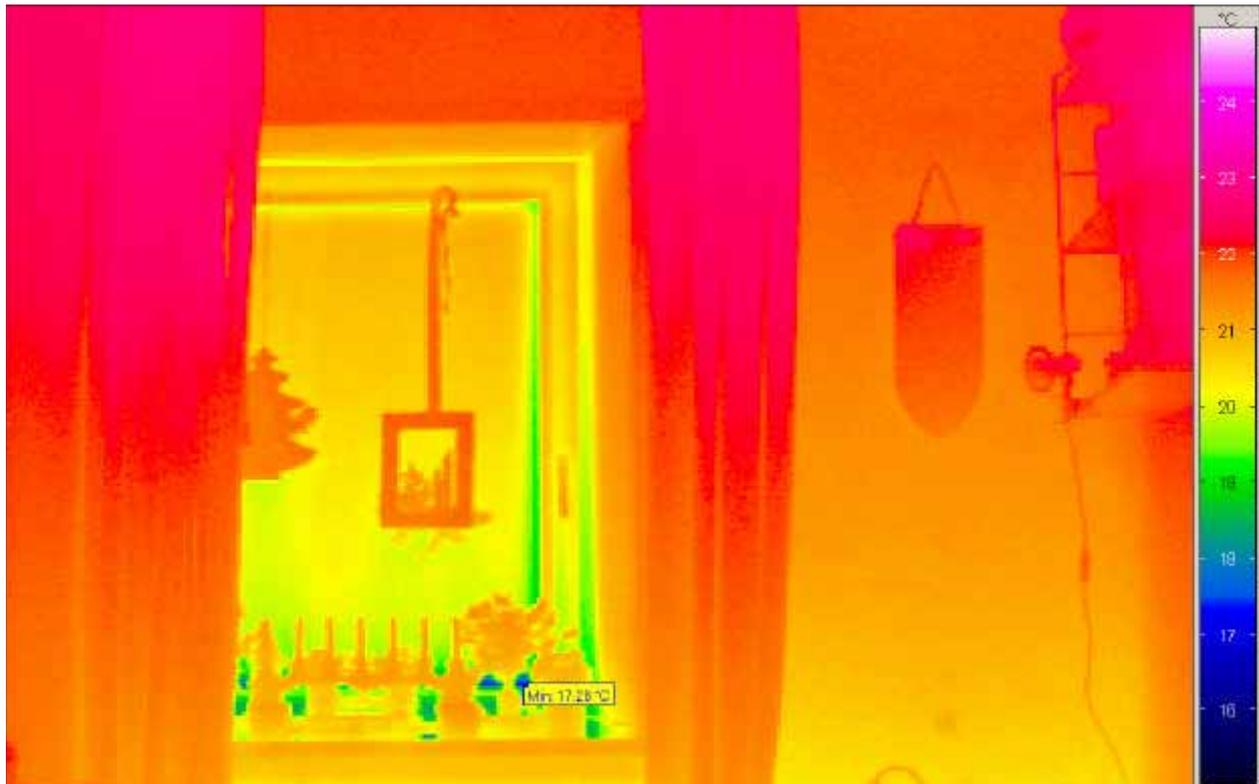


Abbildung 175: Thermografische Aufnahme des Nordkammerfensters ohne Unterdruck (identisch mit Abbildung 162).

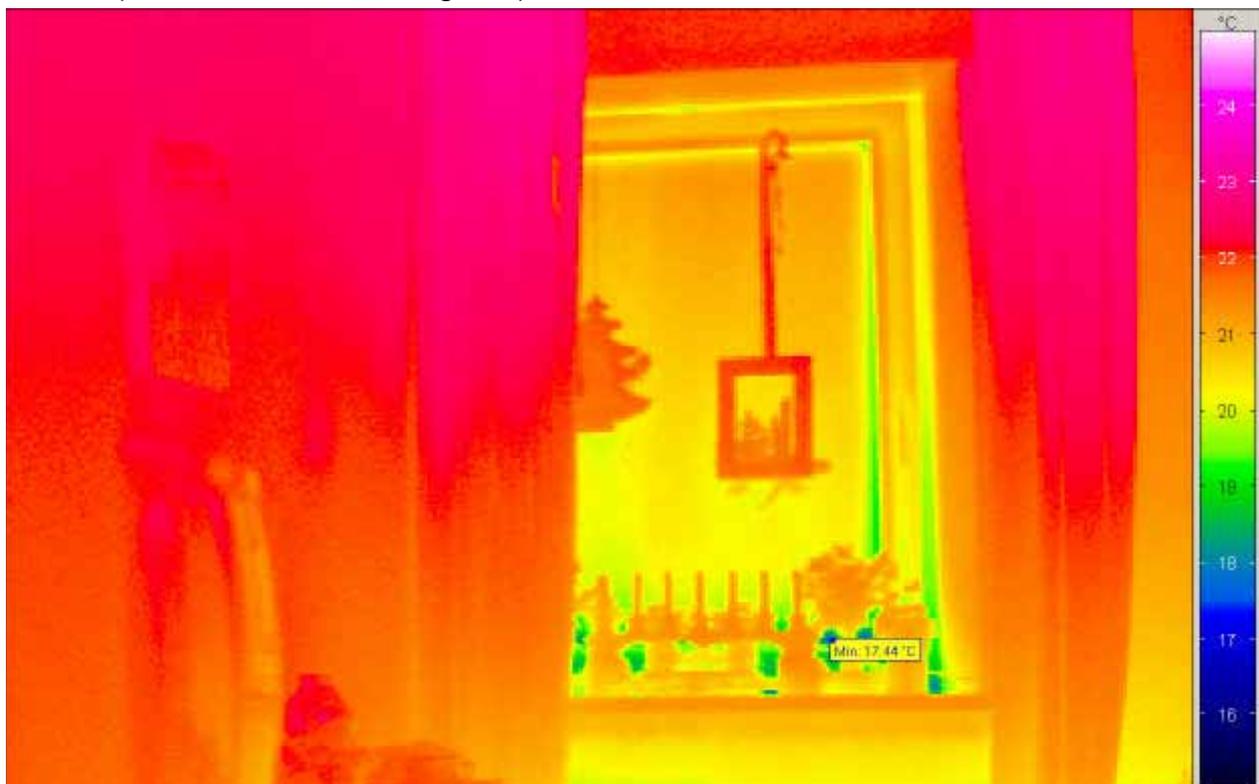


Abbildung 176: Dieses Fenster nach ca. 15 Minuten Unterdruck von 50 Pa. Es sind keine bedeutenden Veränderungen erkennbar. Das Fenster ist außerordentlich gut luftdicht.

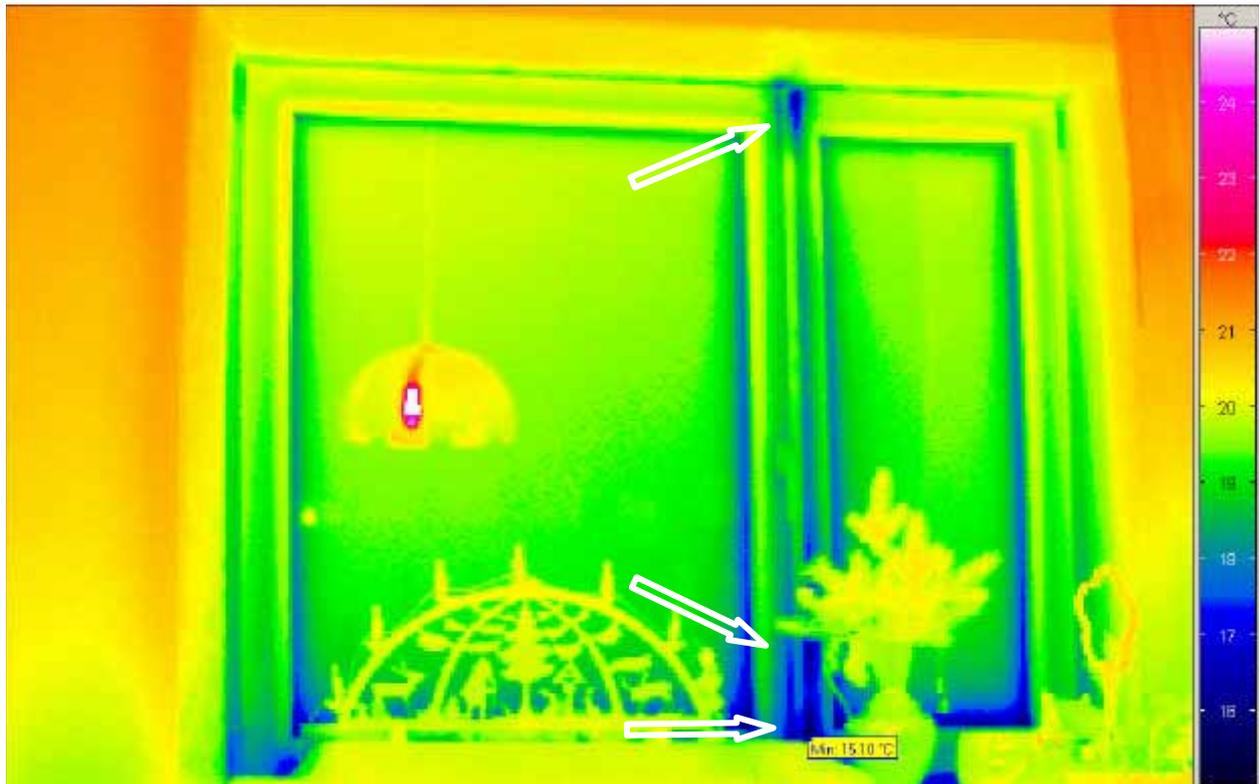


Abbildung 177: Das Küchenfenster nach ca. 15 Minuten Unterdruck von 50 Pa. Es sind die Kaltluftfahnen der von den anderen Fenstern her bereits bekannten Anschlagstellen zu erkennen. Das Fenster ist außerordentlich gut luftdicht.

Abschließende Bemerkung zur Luftleckageortung beim Unterdrucktest mit Hilfe der Thermografie

Über die hier gezeigten Aufnahmen hinaus wurde die gesamte Außenwand der Erdgeschosswohnung noch einmal unter Unterdruckbedingungen kontrolliert. Dabei ergaben sich jedoch keine weiteren erkennbaren Veränderungen über die in den Aufnahmen dokumentierten hinaus. Dieses Ergebnis ist mit der gemessenen sehr hohen Luftdichtheit des Gebäudes kompatibel.

Auch die hier dokumentierten Aufnahmen zeigen zwar Unterschiede zwischen Normal- und Unterdruck, diese sind aber außerordentlich gering. Die noch verbliebenen Restleckagen sind weder für den Energieverbrauch noch für dampfkonvektionsbedingte Bauschäden relevant. Es bedarf daher bzgl. der dokumentierten Restleckagen keiner weiteren Maßnahmen. Die Luftdichtheit der Gebäudehülle ist vorbildlich, allein die Luftströmungen entlang der Balken im Dachboden müssen noch reduziert werden.

Die Temperaturen im Bereich des Fenstereinbaus in der Brüstung lagen auch ohne Unterdruck im Bereich von ca. 17 °C. Sie haben sich bei Unterdruckbedingungen kaum verändert. Dies zeigt, dass die Temperaturabsenkungen an der unteren Einbaukante durch Wärmebrückeneffekte (nur geringe Überdämmung des Blockrahmens) und nicht durch Undichtheiten verursacht werden. Entsprechend sind die Temperaturabsenkungen im Bereich der Einbaukante bei Sturz und Laibung weniger bedeutend.



**PASSIV
HAUS
INSTITUT**

Dr. Wolfgang Feist

Gebäudemodernisierung mit Faktor 10.

Hier: Thermografische Nachuntersuchung für das Pilotprojekt Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg

gefördert durch die

Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Bericht

März 2003

PASSIVHAUS INSTITUT

Rheinstr. 44/46

D-64283 Darmstadt

Tel: 06151 8 26 99-0

Fax: 06151 8 26 99-11

Autor: Dr. Wolfgang Feist,

Die Abbildungen mit Quellangabe (z.B. "Q119") sind aus dem Qualitätssicherungsbericht zum Projekt Jean Paul Platz 4 entnommen und tragen dort die entsprechende Abbildungsnummer.



Abbildung 1: (Q119) Randdämmstreifen der Kellerdeckendämmung (oben), noch ohne Spachtelung an der Nordostecke des Hauses (Aufnahme am 17.12.2002). Die optische Aufnahme lässt erkennen, dass die Außenwand hier im unteren Bereich feucht ist. Dies war zwischen Architekt und Bauherrschaft im Vorfeld der baulichen Modernisierung bereits besprochen worden; die Entscheidung der Bauherrschaft war, hier zunächst über die ohnehin geplanten Maßnahmen (wie die Perimeterdämmung) nichts Zusätzliches zu unternehmen. Das PHI schlägt vor, die Entwicklung der Feuchtigkeit an dieser und den anderen Stellen im Keller weiter zu beobachten.



Abbildung 2: Selbe Stelle am 05.03.2003. Die optische Aufnahme lässt den feuchten Bereich immer noch erkennen. Der Eindruck vor Ort war jedoch, dass sich die Situation gebessert hat.

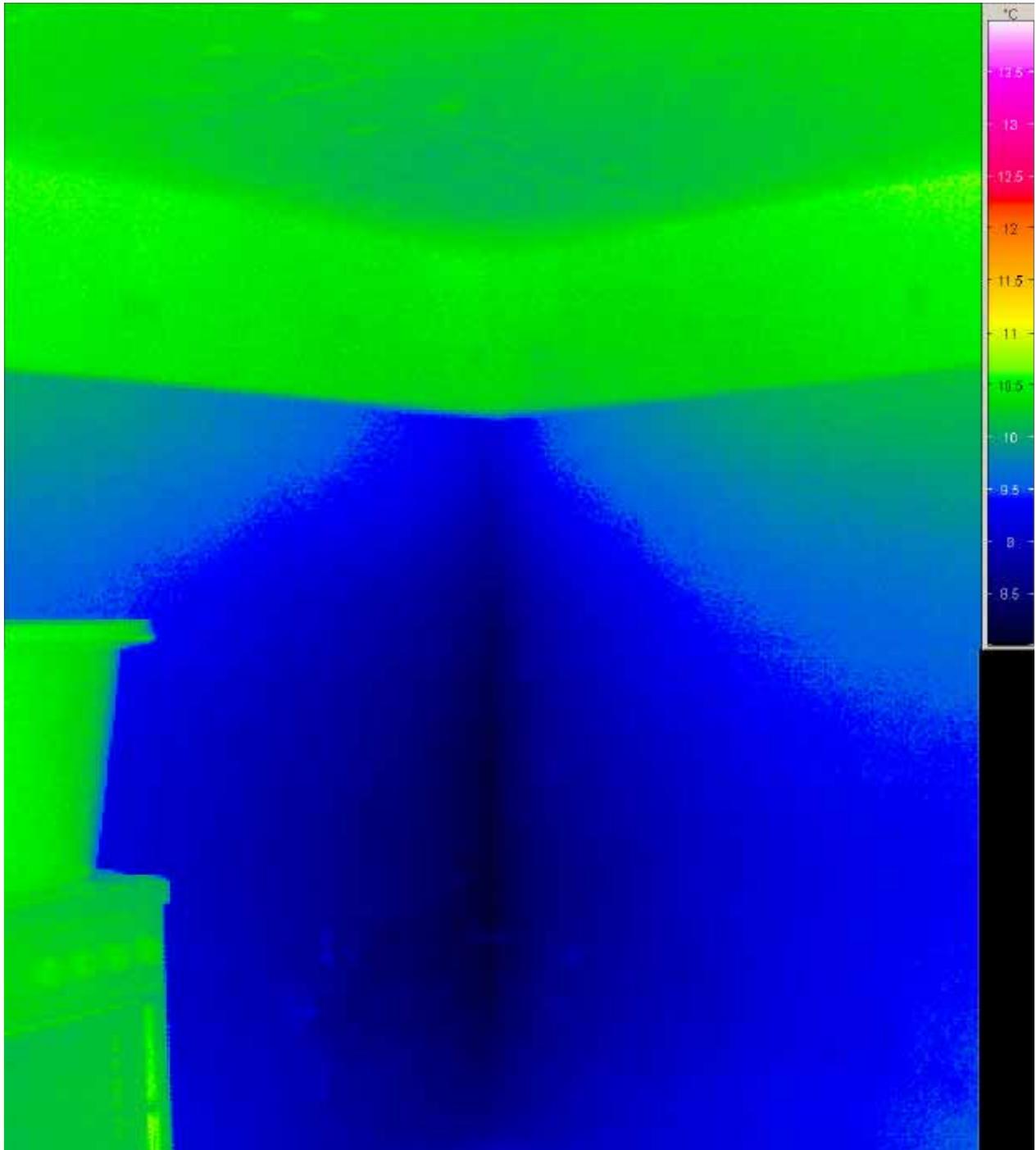


Abbildung 3: (Q120) Thermografie des Eckbereichs am 17.12.2002. Die feuchten Stellen zeichnen sich wegen der dort auftretenden Verdunstung kalt ab (um 8 °C). Vom EG aus dringt Wärme über die Außenwand nach unten. Dies und die nun vorhandene Entlüftung im Keller beschleunigt die Trocknung. Da gegenwärtig nicht klar ist, ob auch die Ursachen für die Befeuchtung beseitigt sind, empfiehlt das PHI eine weitere Beobachtung.

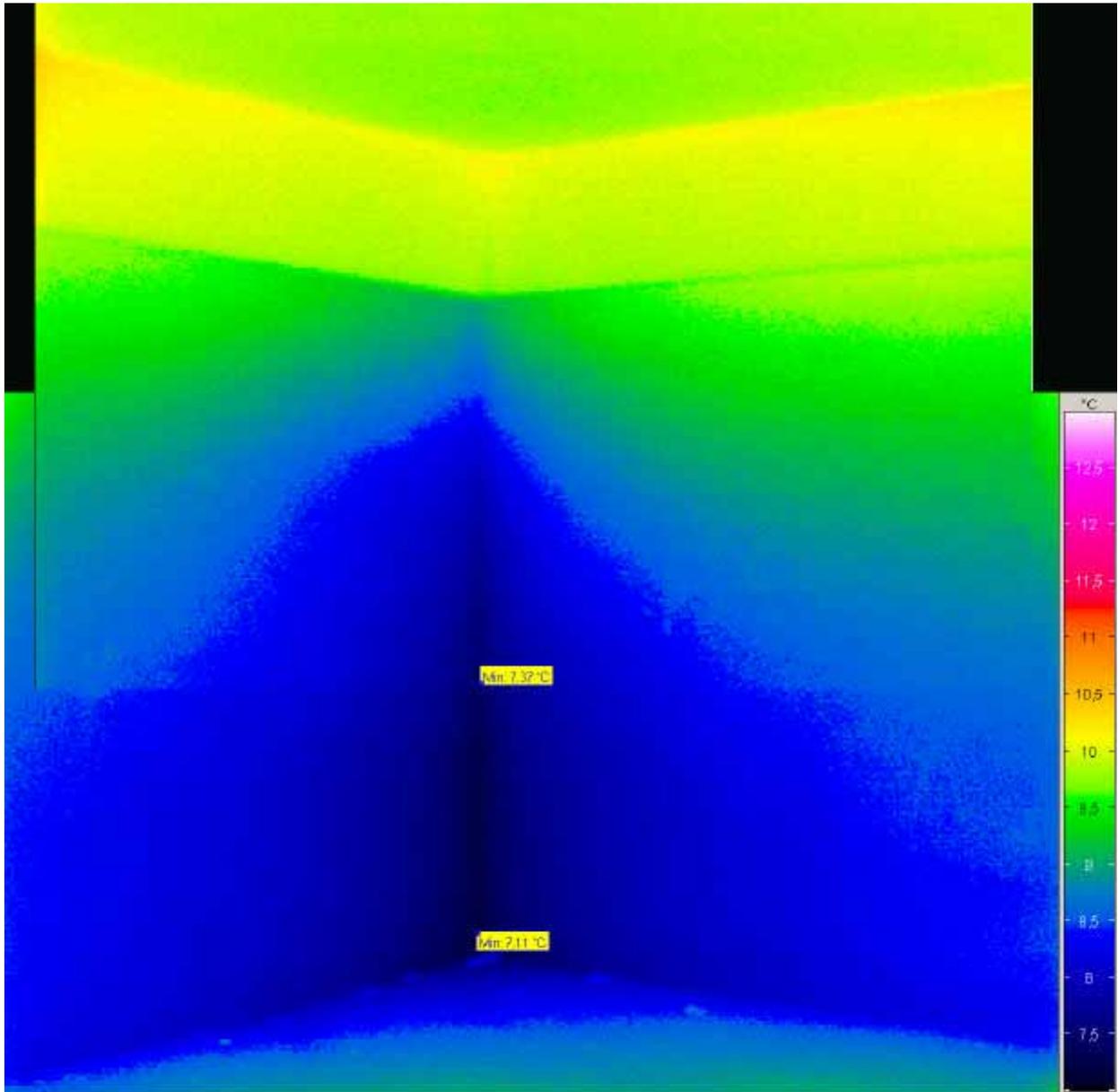


Abbildung 4: Thermografie des Eckbereichs am 05.03.2003; da es im Keller insgesamt ca. 1 K kälter geworden ist gegenüber der Aufnahme in Abbildung 3, wurde die Farbcodierung um 1 K verschoben. Die feuchten Stellen zeichnen sich immer noch deutlich ab, allerdings ist die Wand von oben her trockener geworden. Die Verdunstung wird noch einige Zeit in Anspruch nehmen, eine Kontrolle in Abständen von ca. 1/2 Jahr wird angeraten.



Abbildung 5: (Q125) Dämmung der Kellerdecke, Südseite, mit neuem Kellerfenster. Die Wand unterhalb des Fensters ist neu verputzt worden.

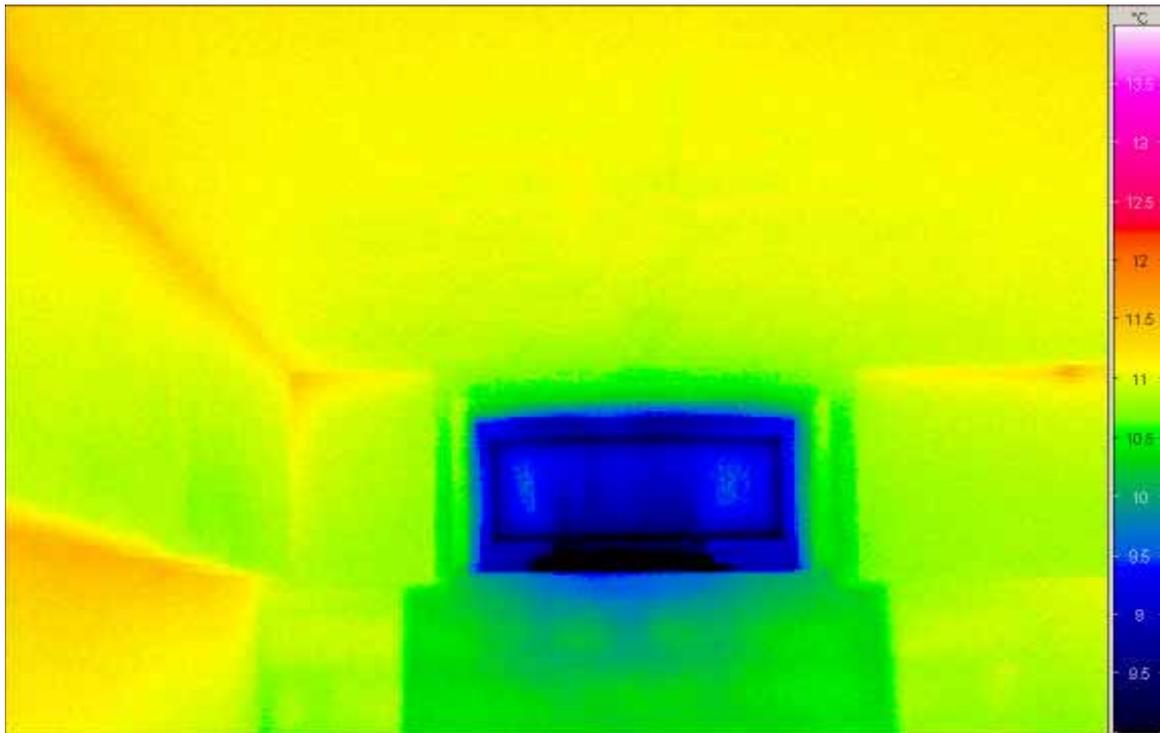


Abbildung 6: (Q126) Auf der zugehörigen Thermografie vom 17.12.2002 sind die Steinfugen der gemauerten Wand erkennbar. Die Decke ist sehr gleichmäßig wirksam gedämmt. Die warm unter dem Randdämmstreifen hervortretende Innenwand ist links erkennbar. Auch am Kellerfenster zeichnet sich die Glasrandwärmebrücke ab, noch deutlicher allerdings der Außenlufteintritt durch den Außenluftdurchlass. Die Bilder zeigen den planerisch gewünschten und korrekt ausgeführten Zustand.

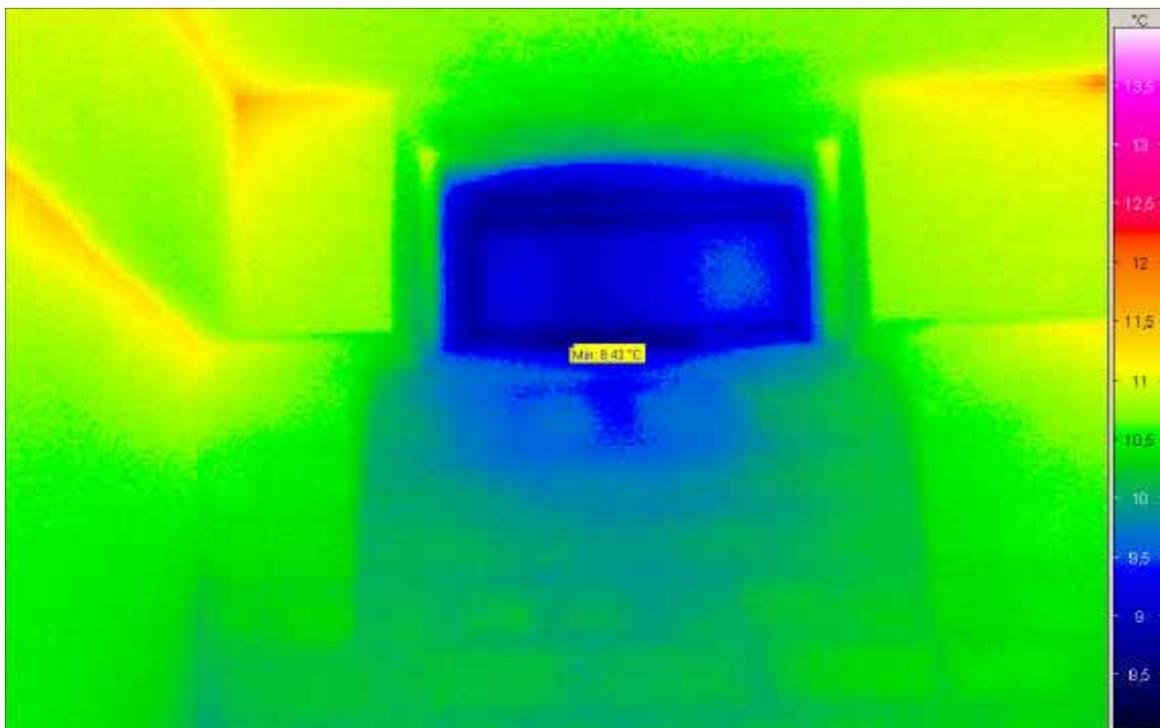


Abbildung 7: Bei Thermografie am 05.03.2003 lag die Temperatur im Keller (erwartungsgemäß) niedriger, die Außenlufttemperatur jedoch höher. Die Steinfugen sind noch deutlicher erkennbar, die eintretende Außenluft am Außenluftdurchlass ist wärmer.



Abbildung 8: Neues Kellerfenster im vergrößerten Ausschnitt (17.12.2002). Wegen der Feuchteentwicklung bei den Bauarbeiten ist das Fenster beschlagen. Dies sollte nach Abschluss der Arbeiten und Trocknung der Spachtelung nicht mehr der Fall sein. Im unteren Teil des Fensters der Außenluftdurchlass.



Abbildung 9: Selbes Kellerfenster am 05.03.2003. Tauwasser gibt es jetzt nur noch am unteren Glasrand, da hier die Wärmebrücke des Randverbundes durchschlägt. Die Trocknungsprozesse sind noch nicht abgeschlossen.

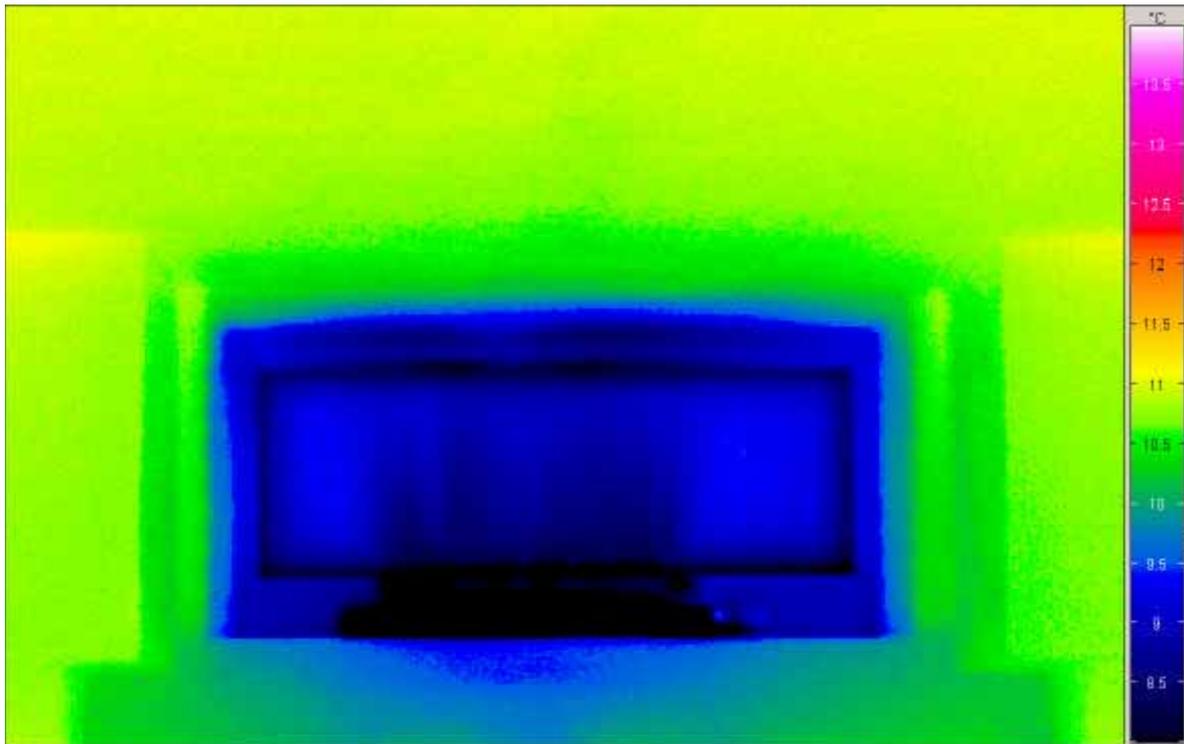


Abbildung 10: Die Thermografie des Fensters am 17.12.2002. Deutlich erkennbar sind die Glasrandwärmebrücke und der Außenlufteintritt durch den Außenluftdurchlass mit Temperaturen um 5 °C (die Außenlufttemperatur lag zwischen 3 und 4 °C).

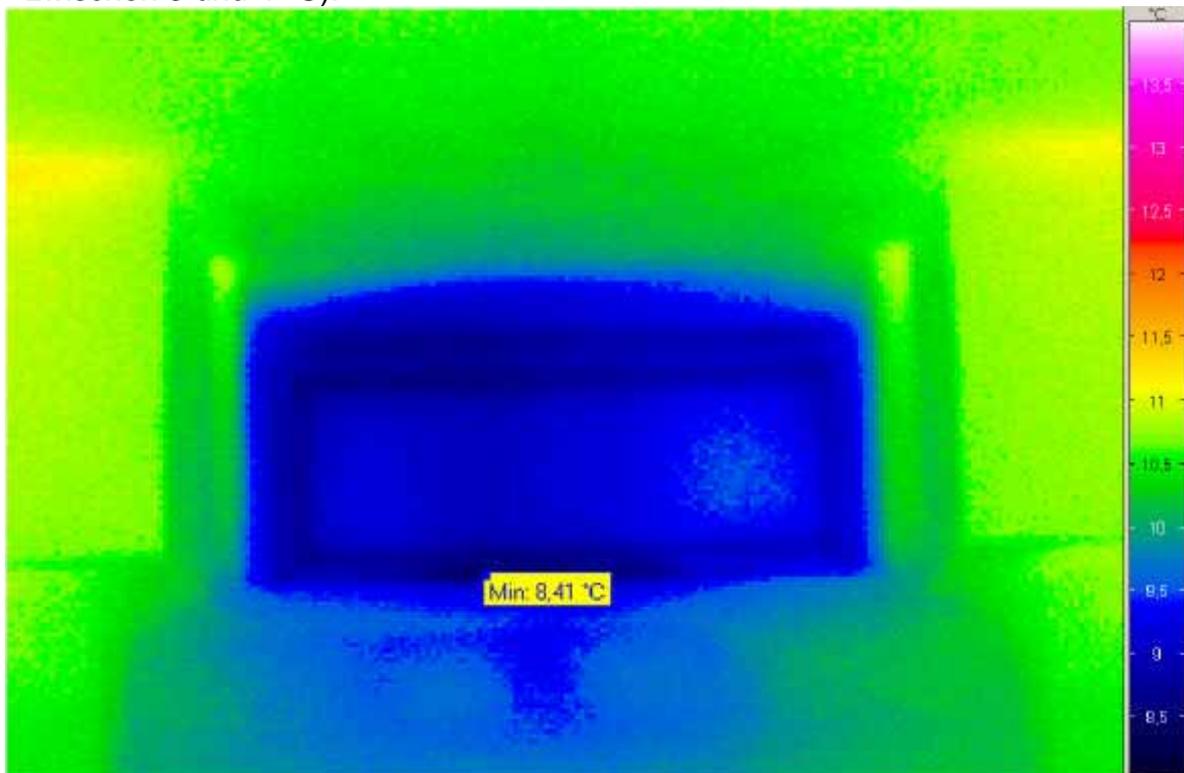


Abbildung 11: Die Thermografie des Fensters am 05.03.2003 (die Außenlufttemperatur lag zwischen 8 und 9 °C).



Abbildung 12: (Q143) Außenwand mit Fenster im Raum östlich des Wohnzimmers.

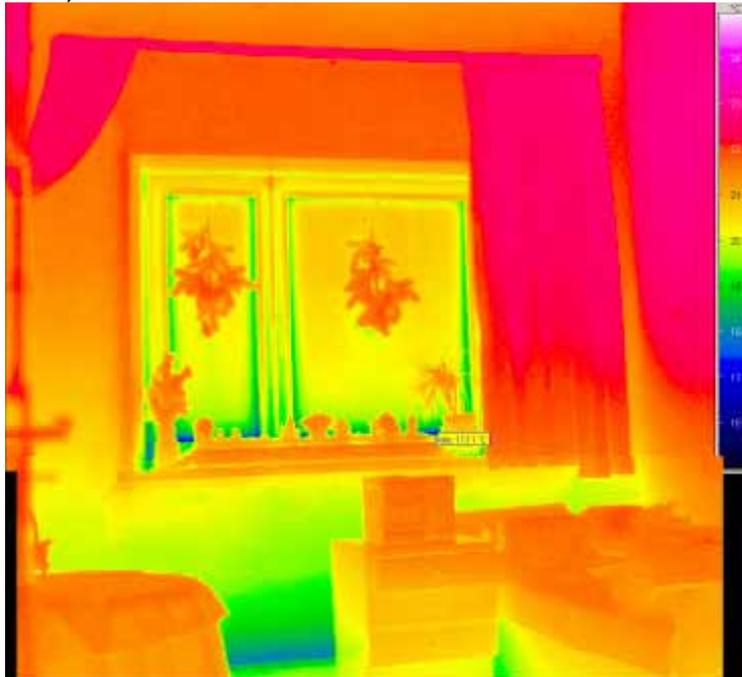


Abbildung 13: (Q144) Die Thermografie vom 17.12.2002) zeigt:

- warme Verglasungs-, Rahmen- und Außenwandoberflächen,
- die Wärmebrücke am Glasrandverbund,
- die Fußpunktwärmebrücke am Übergang Außenwand/Kellerdecke mit Temperaturen von um 18 °C. Hier besteht unter normalen Wohnraumbedingungen keine Gefahr für Schimmelwachstum (Grenze für a_w -Wert 80 %: 13 °C).

Die Berechnungen ließen allerdings noch deutlich höhere Temperaturen in der Kante erwarten. Wir gehen davon aus, dass die Temperaturen noch ansteigen werden, wenn das gesamte Mauerwerk thermisches Gleichgewicht und eine geringere Materialfeuchte erreicht hat.



Abbildung 14: (Q145) Außenwandfußpunkt im Raum östlich des Wohnzimmers.

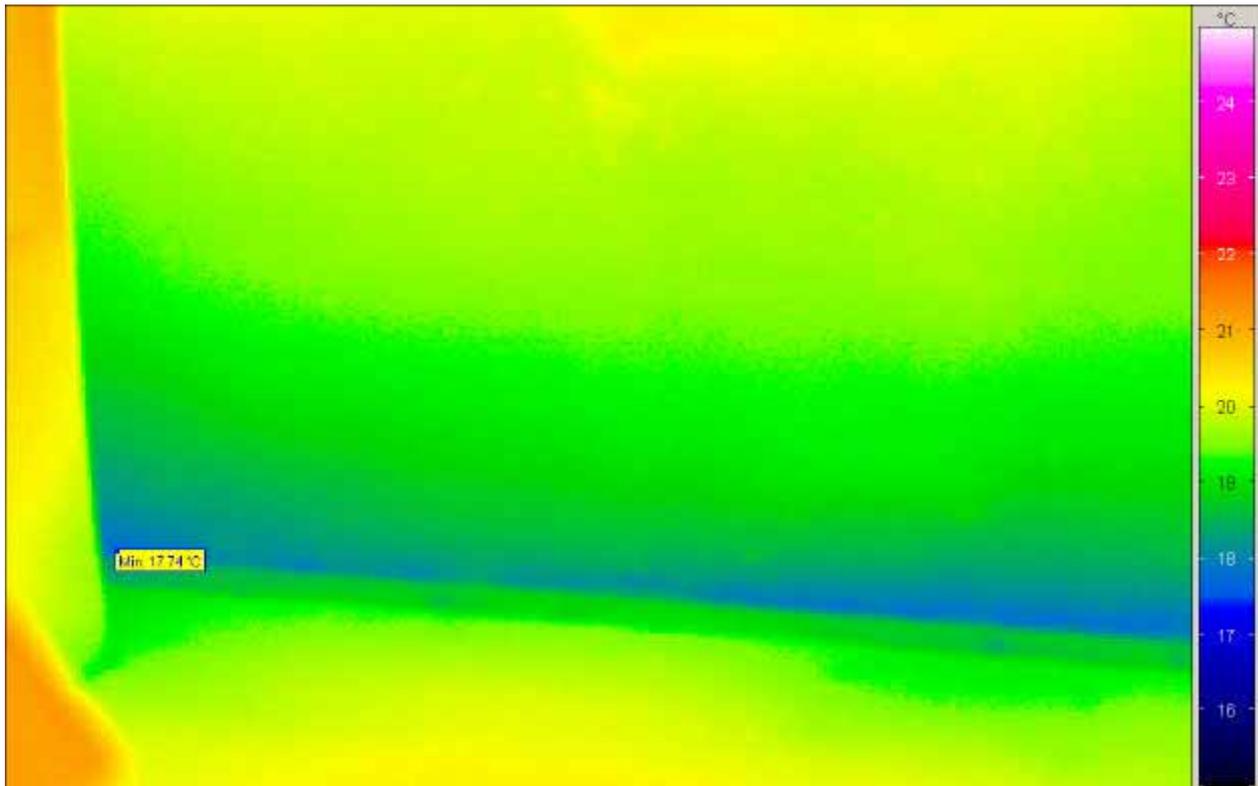


Abbildung 15: (Q146) Thermografie des Fußpunktbereichs der Außenwand am 17.12.2002. Die Temperatur am Anschluss geht gleichmäßig auf etwa 18 °C zurück. Probleme bei normaler Nutzung sind auszuschließen. Die Notwendigkeit der Perimeterdämmung wird hier deutlich: sonst würden die Temperaturen am Fußpunkt weit stärker absinken.

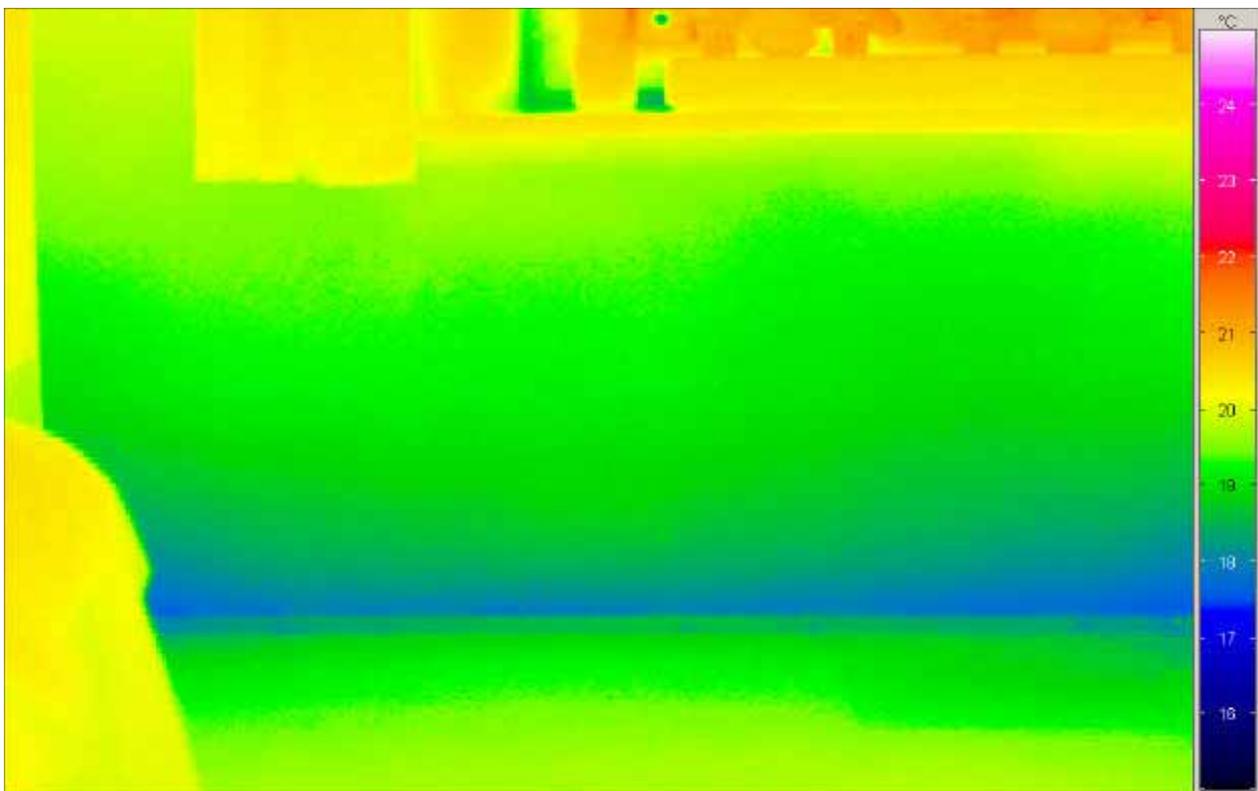


Abbildung 16: Nachthermografie des Fußpunktbereichs der Außenwand am 05.03.2003. Die Temperatur am Anschluss geht trotz erheblich höherer

Außentemperaturen (um 8°C am Tag der Aufnahme) immer noch gleichmäßig auf etwa 18 °C zurück, die Situation ist gegenüber der Aufnahme vom Dezember praktisch unverändert. Probleme bei normaler Nutzung sind jedoch auszuschließen. Nach den Berechnungen müssten allerdings nun noch deutlich höher Temperaturen in der Kante vorliegen. Da sich trotz inzwischen höherer Außentemperaturen die Temperatur in der Kante kaum verändert hat und das thermische Gleichgewicht nun in jedem Fall erreicht sein muss, muss davon ausgegangen werden, dass die gegenüber der Berechnung deutlich niedrigeren Temperaturen vor allem durch die Verdunstungsenthalpie der noch vorhandenen höheren Materialfeuchte bedingt sind. Eine genauere Aussage dazu kann aber erst durch eine erneute thermografische Kontrolle in etwa einem Jahr erfolgen.



Abbildung 17: Außenwandfußpunkt der Südostecke im EG.

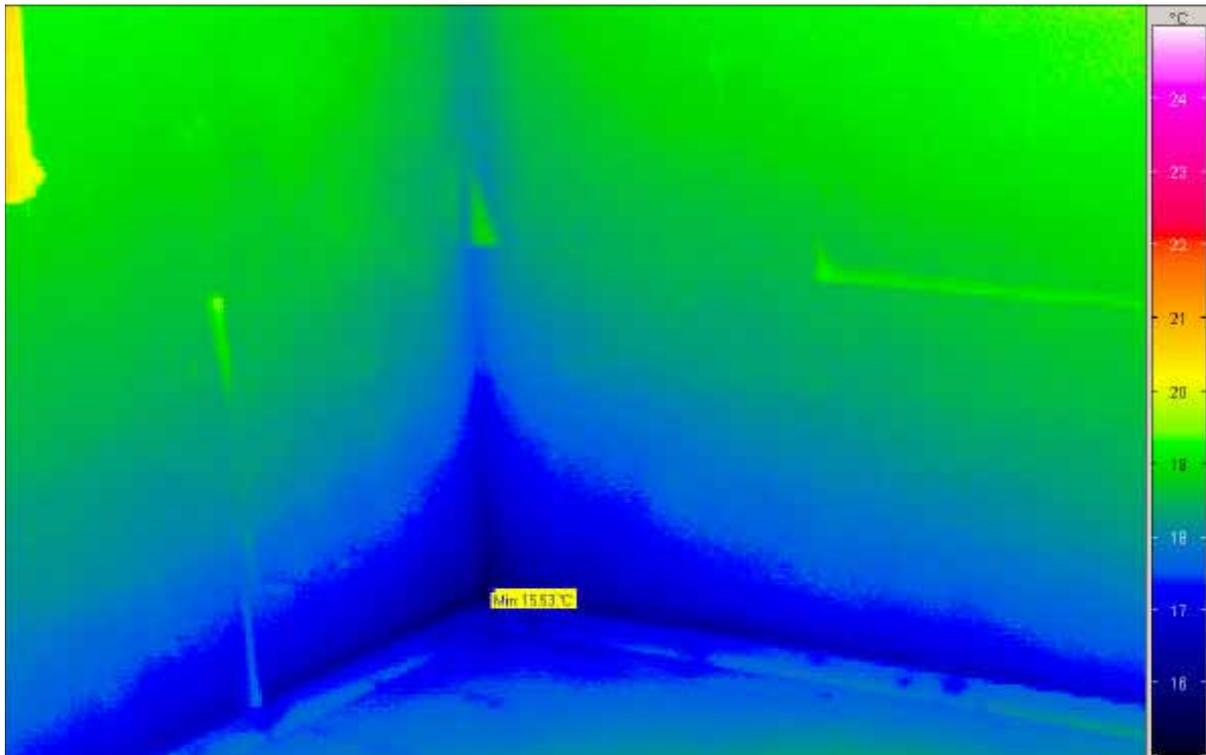


Abbildung 18: (Q148) Thermografie des Fußpunktbereichs in der Südostecke am 17.12.2002. Die Temperatur geht auf 15.5 °C zurück. Als nach Tapezier- und Streicharbeiten höhere Raumlufffeuchtigkeiten aufgetreten waren, war es an dieser Stelle nach Bewohneraussagen zu Tauwasserniederschlag gekommen. Auch hier können bei normaler Nutzung keine Probleme auftreten. Die Temperaturen sollten hier nach vollständiger Durcherwärmung des Mauerwerkes noch ansteigen, wir empfehlen eine thermografische Kontrollaufnahme.

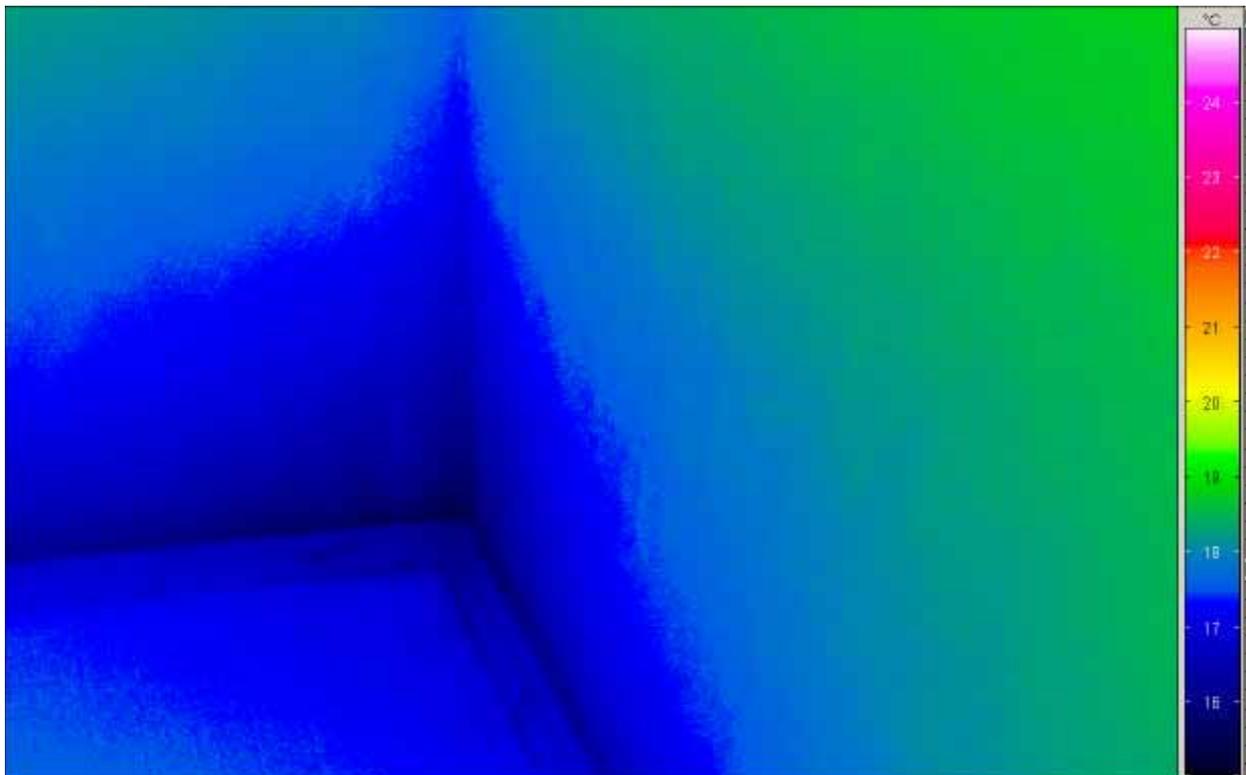


Abbildung 19: Kontroll-Thermografie des Fußpunktbereichs in der Südostecke am 05.03.2003. Die Temperatur geht trotz höherer Außentemperaturen immer noch auf

ca. 15.5 °C zurück. Damit ist geklärt, dass es sich bei der beobachteten Absenkung nicht um einen instationären thermischen Vorgang handeln kann, denn das thermische Gleichgewicht stellt sich spätestens nach einigen Tagen ein. Vielmehr liegt die Vermutung nah, dass es sich hierbei um einen Wärmeentzug zur Verdunstung von kapillar gebundener Feuchtigkeit handelt. Dieser Prozess hat eine relativ lange Zeitkonstante; wir empfehlen eine thermografische Kontrollaufnahme in etwa einem Jahr.



Abbildung 20: (Q95) Dachboden, Schornsteinverzug mit "Hotspot"-Oberflächentemperaturen über 12 °C (Westseite). Hier ist die Luftdichtung nicht perfekt und auch ein Loch in der Spachtelung, so dass Warmluft austritt.

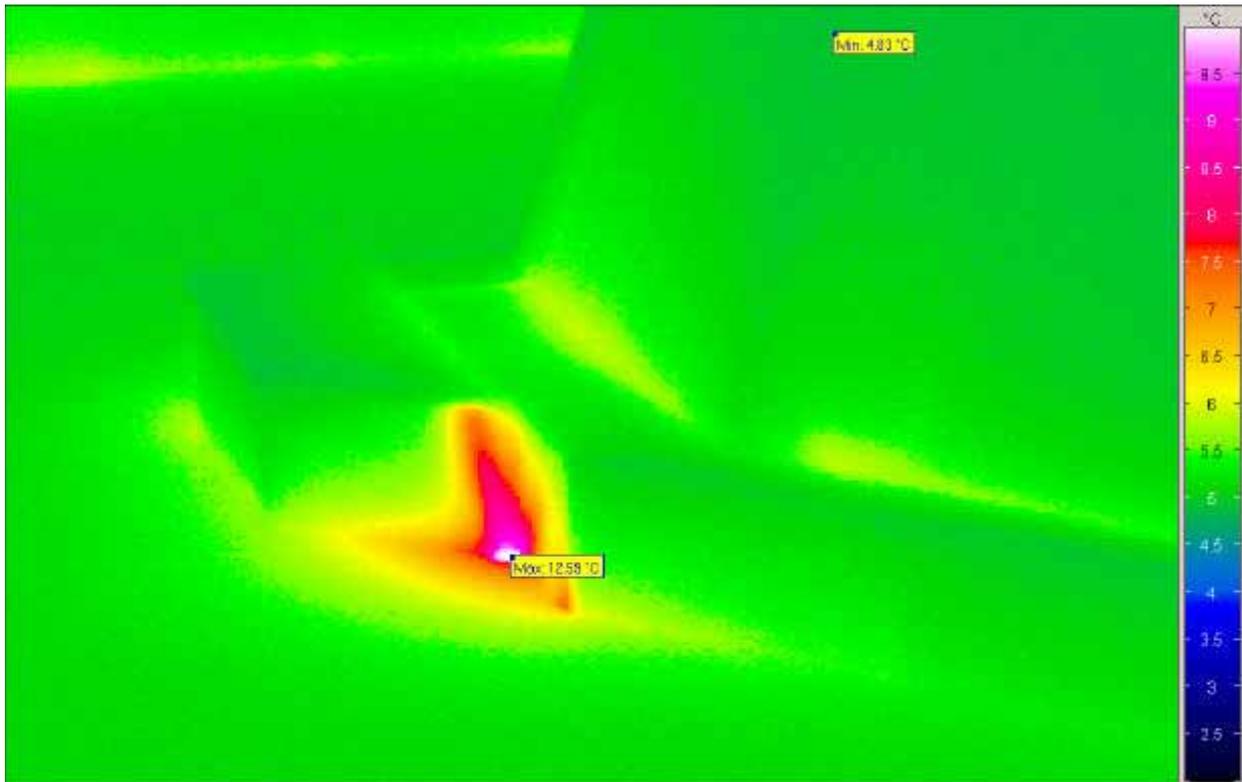


Abbildung 21: (Q96) Der "Hotspot" aus dem Loch in der Spachtelung von Abbildung 20 bei der Thermografie am 17.12.2002.

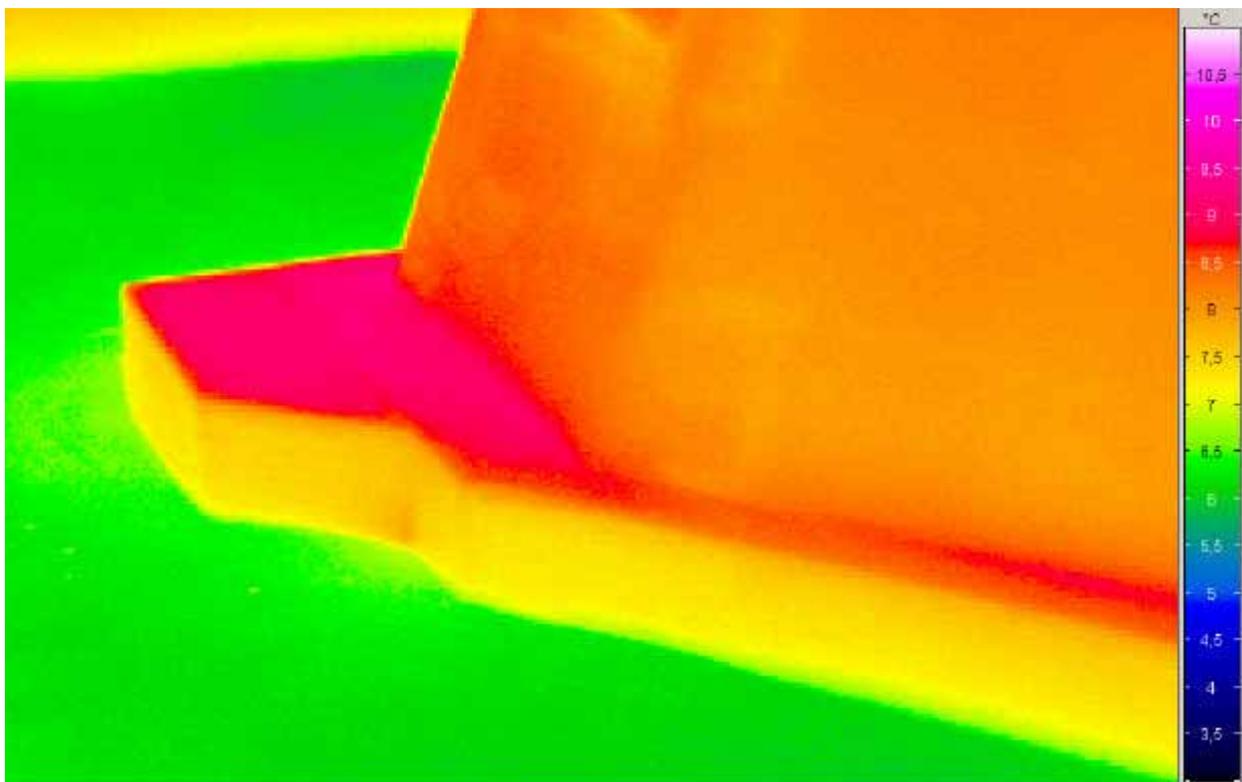


Abbildung 22: Dieselbe Stelle bei der Thermografie am 05.3.2003 (Temperaturmaßstab um 1 K nach oben verschoben). Die Spachtelung um die Dämmung des Kamines hat sich auf Grund der Wärmestrahlung vom Dach her wegen ihrer geringen Wärmespeicherfähigkeit bereits auf 8 bis 10°C erwärmt, während der massive Estrich noch bei gleichmäßig ca. 6,2 °C verweilt. Das Loch in der Spachtelung ist offensichtlich erfolgreich verschlossen worden.



Abbildung 23: (Q97) Dachboden, Kopfbereich der Kniestockdämmung, Südseite, zweites Feld von West. Hier wurde das WDVS nicht luftdicht verklebt, so dass warme, feuchte Luft hinter den Dämmplatten nach oben strömt, an der Lücke in der Spachtelmasse austritt und zu Tauwasserbildung unter der Unterspannbahn führt (Tropfen sind erkennbar).

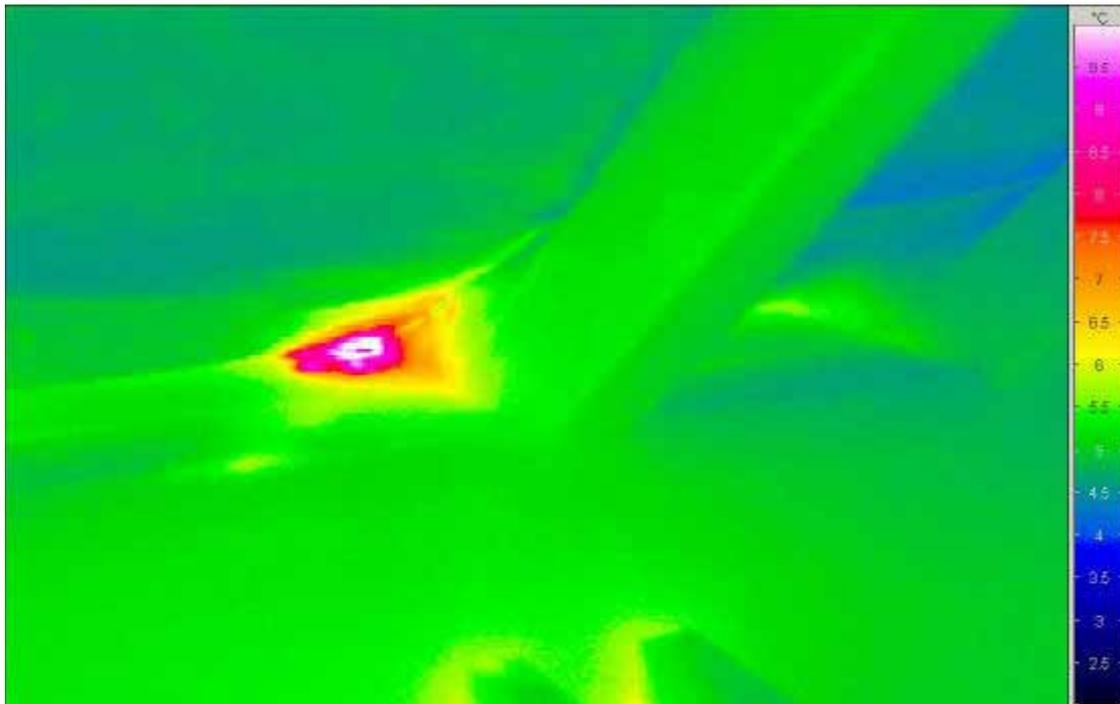


Abbildung 24: Der "Hotspot" aus dem Loch in der Spachtelung von Abbildung 23, thermografische Aufnahme vom 17.12.03.

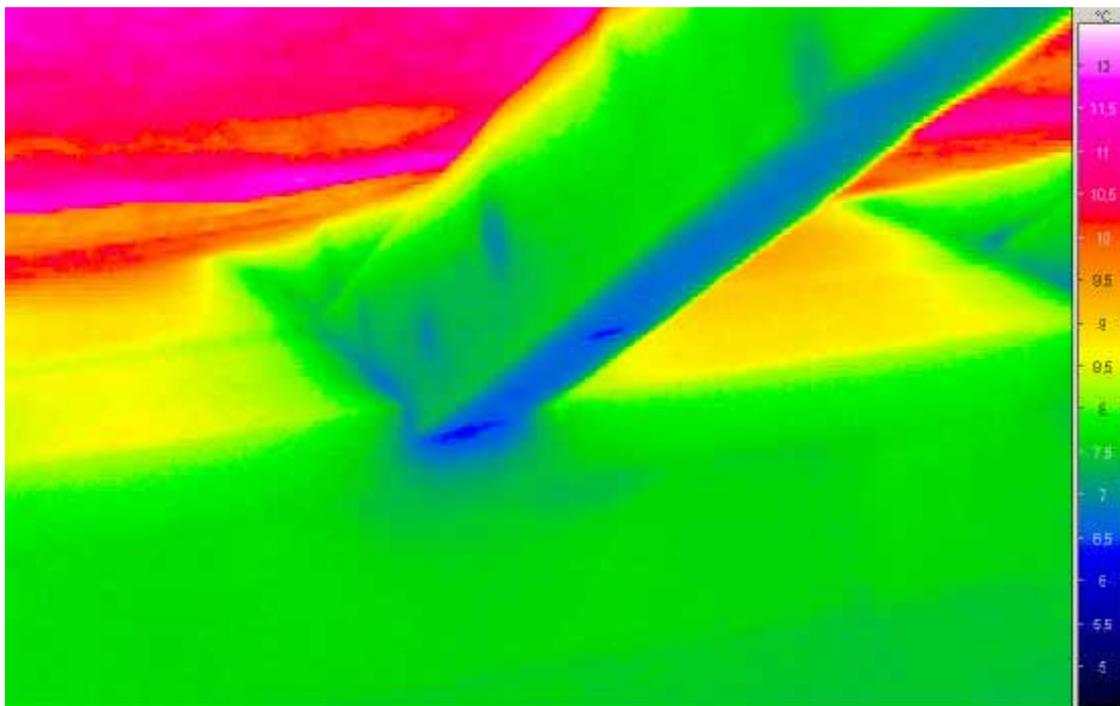


Abbildung 25: Bei der Nachthermografie am 05.03.2003 sind an den entsprechenden Stellen keine Warmluftaustritte mehr erkennbar. Die Nachbesserung der Spachtelung war offensichtlich erfolgreich. Die Farbcodierung ist gegenüber der vorausgehenden Aufnahme um 2,5 K angehoben; im Dezember war die Unterspannbahn wegen der kalten Abstrahlung in den Himmel kälter als die Kniestockflächen. Im März ist die Unterspannbahn wegen der solaren Einstrahlung auf das Dach deutlich erwärmt (ca. 11°C gegenüber Außenlufttemperatur 8°C). Durch den geometrisch günstigen Strahlungsaustausch ist dann auch die obere Oberfläche der Spachtelung auf dem Kniestock wärmer (um 9°C) als die senkrechte Oberfläche (ca. 7,5 °C).

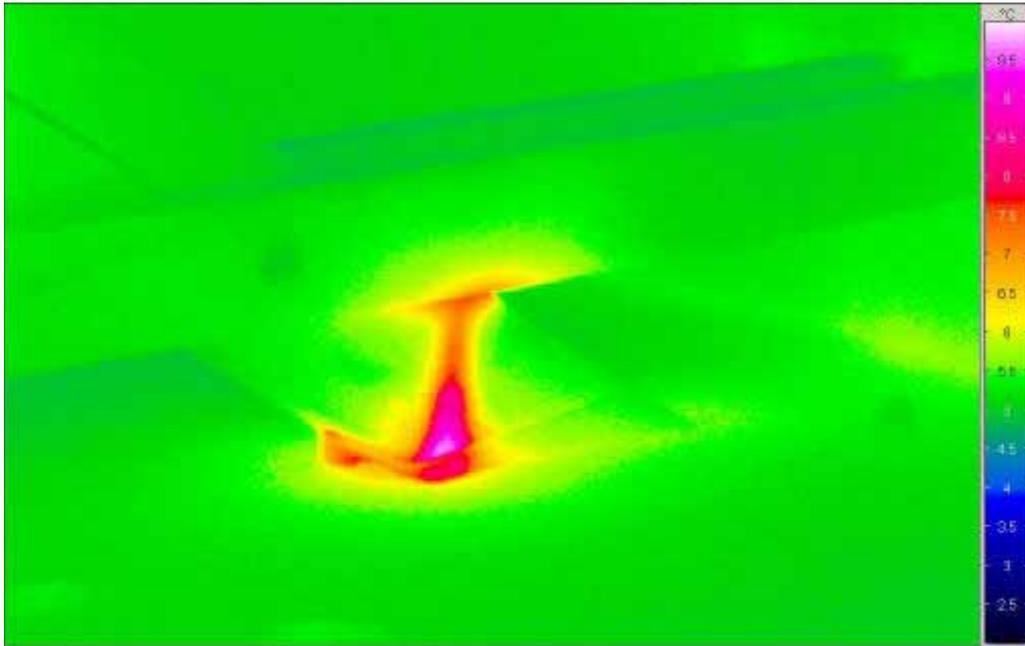


Abbildung 26: (Q95) Dachbodenthermografie vom 17.12.2003; der Dachträgerbalken an zweiter Stelle von Osten auf der Südseite zeigt einen auffälligem "Hotspot" (Oberflächentemperatur bis 10 °C). Der Farbverlauf zeigt eindeutig eine Warmluftfahne an. Die Luft tritt zwischen Balken und Randstreifen aus. Im Qualitätssicherungsbericht wurde festgehalten, dass dieser Luftaustritt behoben werden muss, da die Luft auch Feuchtigkeit transportiert. Die Nachbesserung bestand aus einer Verfugung mit PU-Dichtmasse.

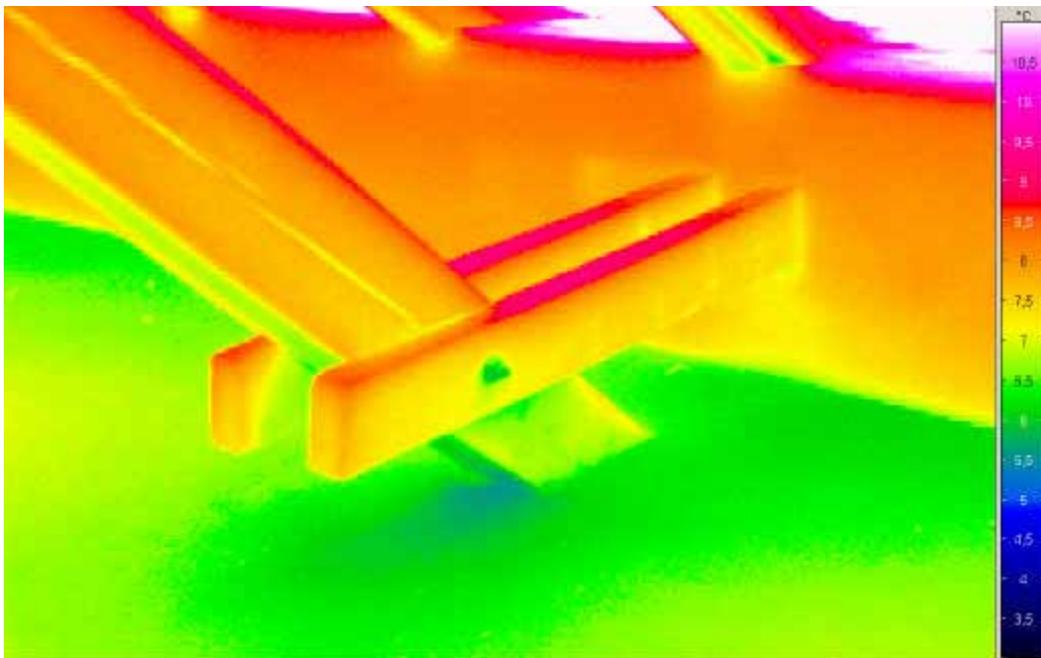


Abbildung 27: Selbe Stelle bei der Nachthermografie am 05.03.2003. Die Nachbesserung war offensichtlich erfolgreich: es ist kein Warmluftaustritt mehr erkennbar. Die deutliche Temperaturdifferenzierung ist eine Folge instationärer Erwärmungen durch die warme Zustrahlung von der Innenoberfläche der Unterspannbahn (diese ist durch Solareinstrahlung auf das Dach erwärmt):

- Waagrechte Oberfläche des Zementestrich: hohes Speichervermögen, daher noch von der Nacht her kalt; im "Schatten" des Balkens noch kälter.
- Waagrechte Oberfläche des Balkenpaares: wegen der geringeren Wärmekapazität wärmer.

- Waagrechte Oberfläche der Kniestockspachtelung: wegen noch geringerer Wärmekapazität noch wärmer.
- die senkrechte Oberflächen des schräg verlaufenden Balkens und der Kniestockwand, dort wo sie unverschattet sind, haben Strahlungsaustausch zu je etwa der Hälfte mit der Unterspannbahn und mit der Estrichoberfläche; die Temperaturen liegen daher zwischen diesen beiden. Der "verschattete" Bereich des Balkens steht jedoch allein im Strahlungsgleichgewicht mit dem Estrich und hat daher etwa dessen Temperatur.

Die hier beispielhaft gegebenen Analysen zeigen, dass die korrekte Interpretation der thermografischen Aufnahmen umfassende Sachkunde erfordert. Nicht alle erkennbaren Farbunterschiede lassen auf Wärmebrücken oder Leckagen schließen. Zudem wird deutlich, dass thermografische Aufnahmen unter Einstrahlbedingungen (z.B. tagsüber bei Sonneneinstrahlung) besonders sorgfältig analysiert werden müssen und u.U. wegen der Strahlungseffekte auf den Oberflächen für die Qualitätssicherung schlecht geeignet sind.

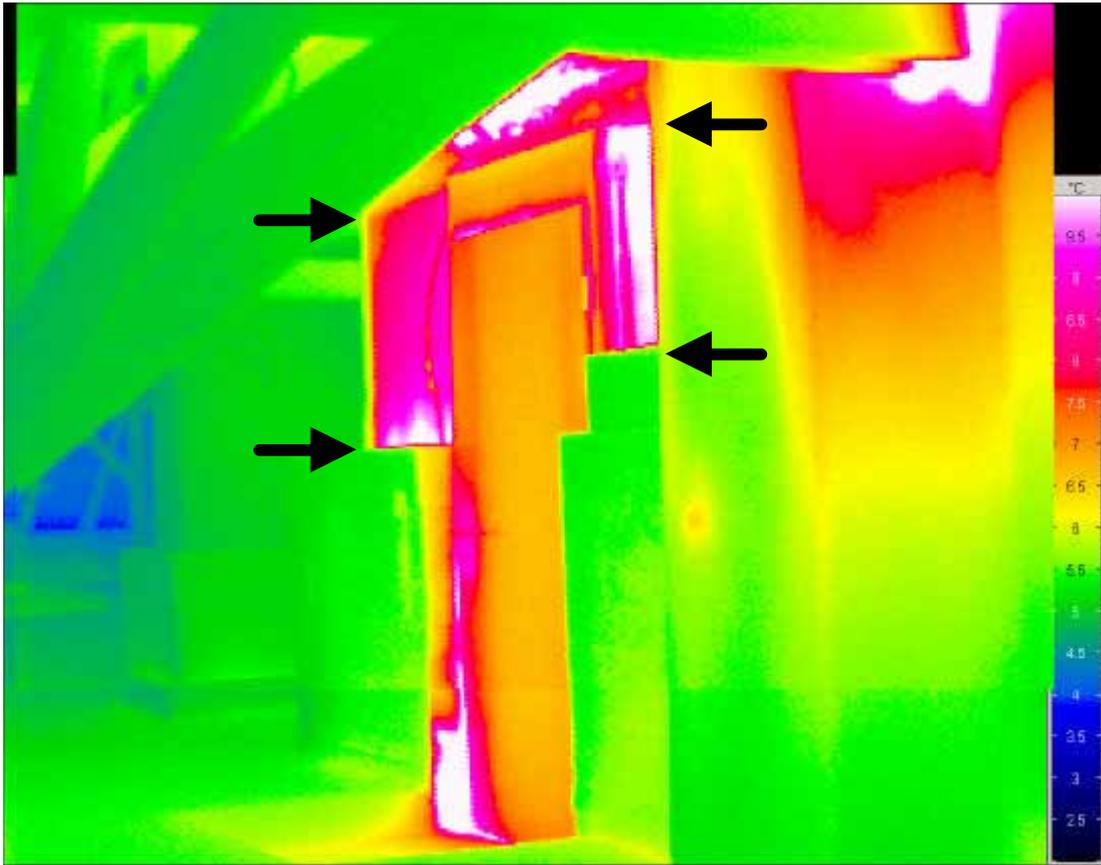


Abbildung 28: (Q101) Der Treppenhauskopf mit Tür und noch ungedämmten Flächen (Pfeile, durchschnittlich 9 °C Oberflächentemperatur) am 17.12.2002. Die Tür ist im unteren Bereich undicht (Luftfahne bis 16 °C). Die Türoberflächentemperatur selbst liegt bei 6.7 °C.

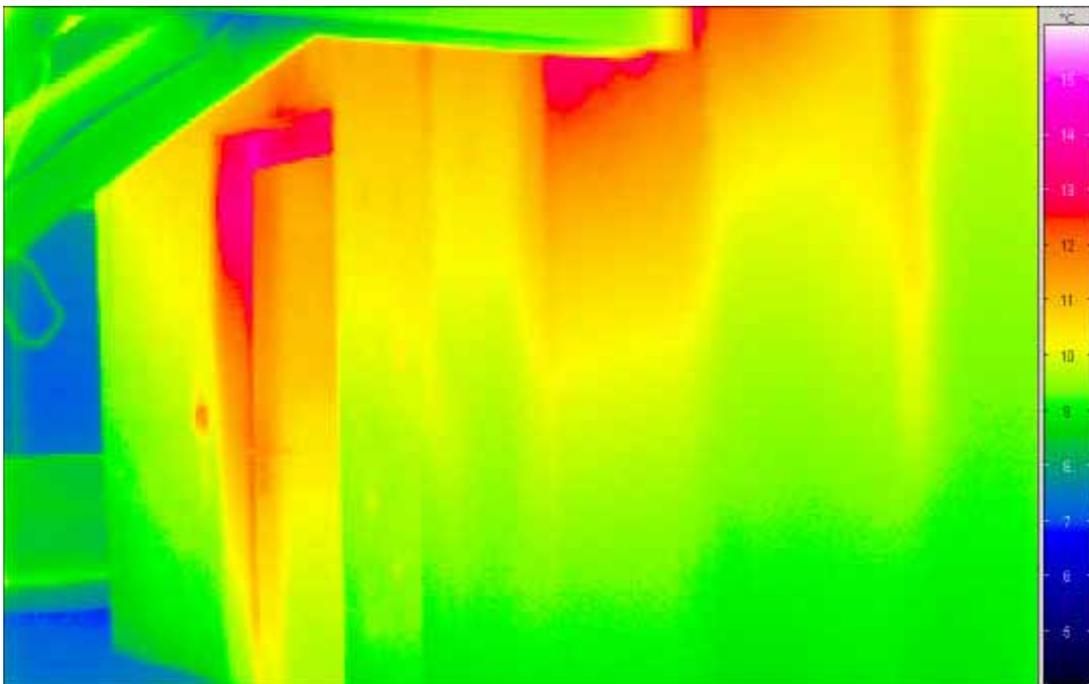


Abbildung 29: Der Treppenhauskopf nach der Vervollständigung der Dämmung, aufgenommen am 05.03.2003. Die Dämmung ist offensichtlich wirksam ausgeführt; jetzt dominiert der Warmluftaustritt im oberen Bereich der Tür mit bis zu 16°C die Thermografie. Hier könnte es im Winter zu Tauwasserbildung kommen.

Heizraum - 17.12.2002 und 05.03.2003 im Vergleich



Abbildung 30: Warmwasserspeicher im Heizraum am 17.12.2002 (Achtung: geänderte Temperaturskala; nun von 0 °C bis 75 °C); Die Speicher Oberfläche steigt allmählich von 28 °C (unten) auf 40 °C (oben) an. Satt Wärme strahlen die noch ungedämmten Rohrleitungen ab (72 °C). Die Speicherdämmung ist zwar von heute durchschnittlich üblicher Qualität, die Verluste erscheinen aber für ein Projekt mit hoher Energieeffizienz vermeidbar hoch.

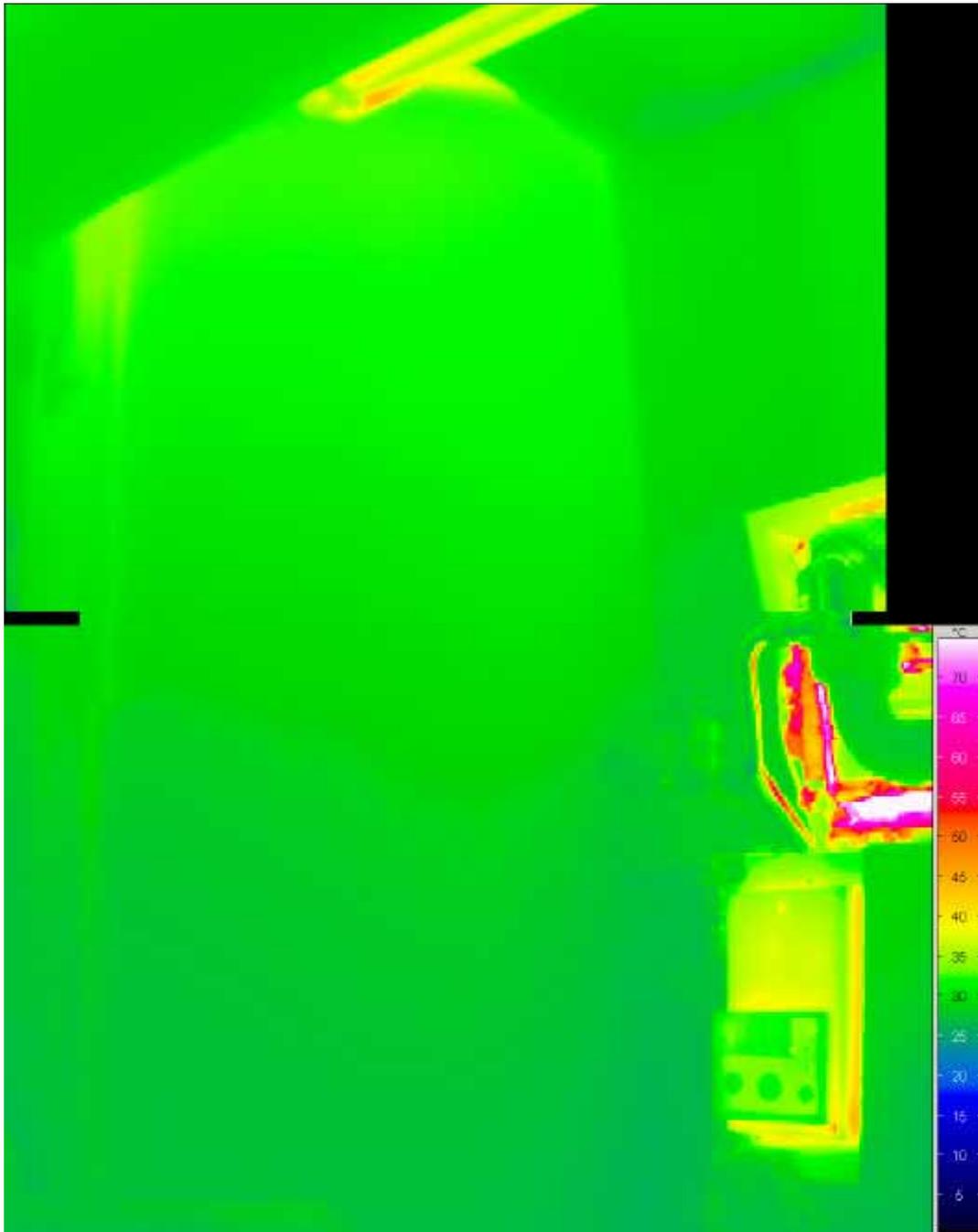


Abbildung 31: Warmwasserspeicher am 05.03.2003. Die Speicheroberfläche steigt nun von 26 °C (unten) auf 32 °C (oben) an. Die Rohrleitungen sind inzwischen wirksam gedämmt. Die heißen Oberflächen rechts im Bild sind im (geöffneten) Brennwert-Wärmeerzeuger.

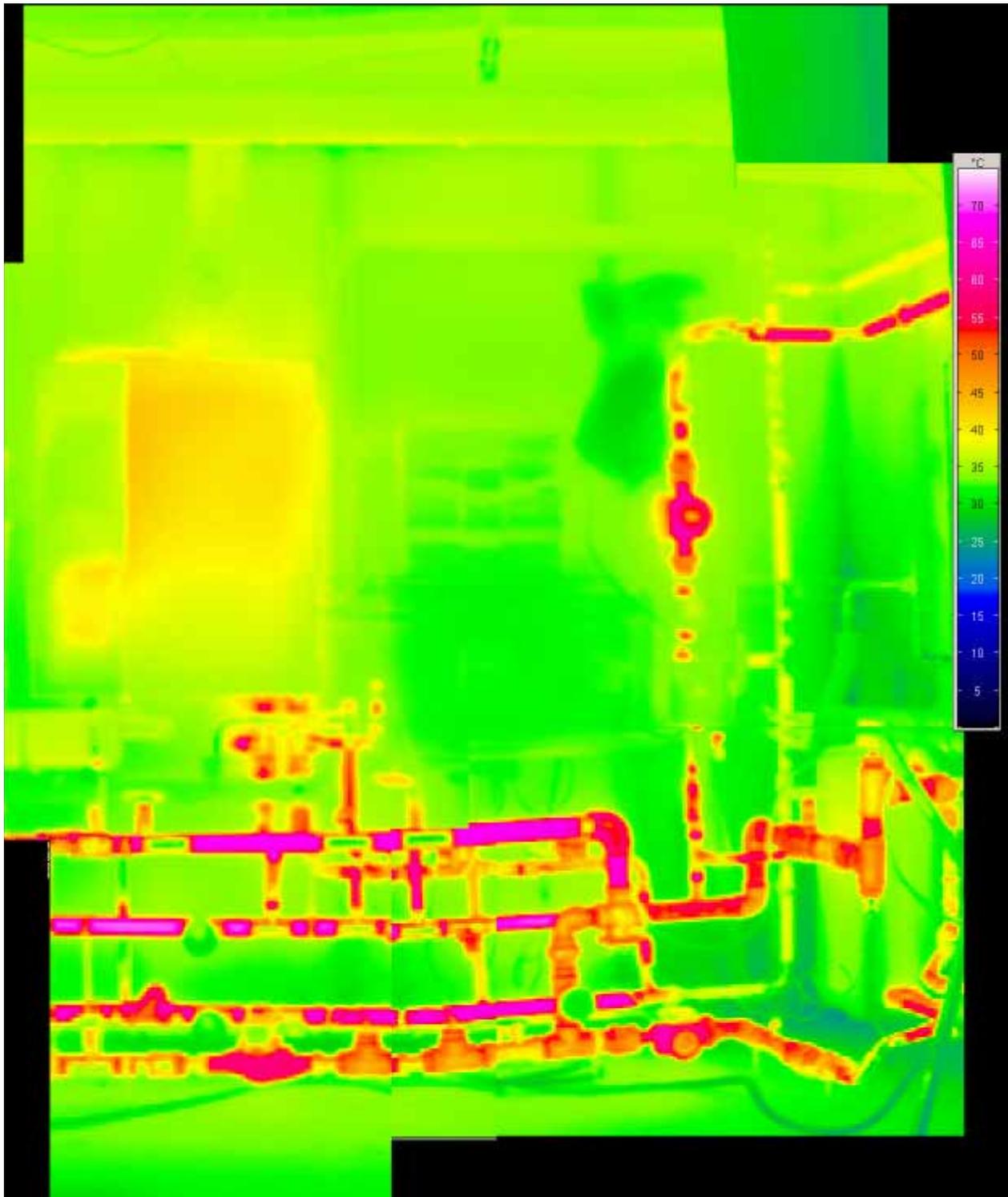


Abbildung 32: (Q111) Heizraum mit Wärmeerzeuger am 17.12.2002. Die Oberfläche des Wärmeerzeugers steigt von 35 °C (unten) auf 43 °C (oben) an. Die noch ungedämmten Rohrleitungen strahlen sehr viel Wärme ab (72 °C).

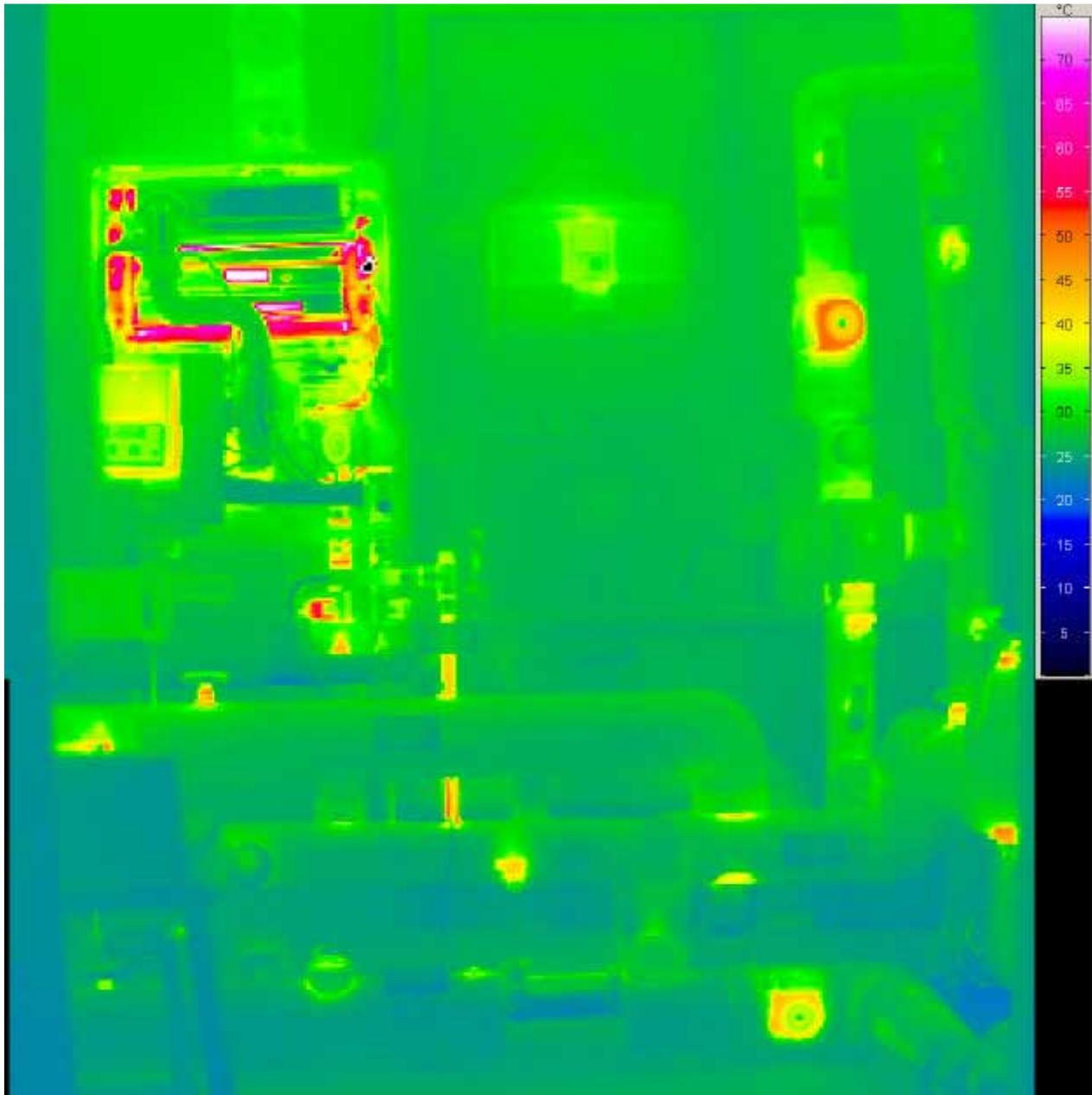


Abbildung 33: Heizraum mit geöffnetem Wärmeerzeuger am 05.03.2003. Das Temperaturniveau im Heizraum ist von ca. 33°C am 17.12.2002 auf nunmehr etwa 25°C gesunken. Die Dämmung der warmen Rohrleitungen ist offensichtlich gut wirksam. "Heiß" sind noch die Stellen ohne Dämmung: Schieber, Ventilköpfe, Pumpen etc. Durch die Entwicklung entsprechender Spezialdämmhauben bzw. durch thermische Trennung von Ventilstellglied und Ventil ließen sich für diese Punkte noch beachtliche Verbesserungen erreichen; hier gibt es ein weites Betätigungsfeld vor allem auch für kleine Unternehmen.



Abbildung 34: Detailaufnahme des geöffneten Wärmeerzeugers am 05.03.2003. Heiß ist vor allem die Oberfläche des Wasser-Verbrennungsgas-Wärmeübertragers. Da diese Oberfläche metallisch ist und ein nur geringes Emissionsvermögen hat, ist die "wahre Oberflächentemperatur" nur im Bereich der Aufkleber aus Papier erkennbar. Dort beträgt die Temperatur etwa 80 bis 88 °C.



Abbildung 35: Zugehöriges Bild im normalen sichtbaren Spektrum.

**Energetische Sanierung mit Faktor 10
Wissenschaftliche Begleitforschung
Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg**

**Auftraggeber:
Wohnungsbaugesellschaft der Stadt Nürnberg mbH**

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	2
1.1. Adressen.....	2
1.2. Ortstermin	2
2. Vorgehensweise	3
2.1. Anlass der Untersuchung Aufgabenstellung	3
2.2. Begriffe.....	3
2.3. Messplanung.....	4
2.3.1. Untersuchungen der Raumluft auf VOC	4
2.3.2. Untersuchung der Raumluft auf Schimmelpilze	4
3. Probenahmebedingungen und Laborergebnisse	5
3.1. Untersuchung der Raumluft auf leichtflüchtige organische Verbindungen (VOC) ..	5
3.1.1. Probenahme	5
3.1.2. Prüfung.....	5
3.1.3. Beschreibung der Referenzwohnungen:.....	5
3.2. VOC Ergebnisse und Probenahmedetails.....	6
3.3. Mikrobiologische Untersuchungen	10
3.3.1. Probenahme Raumluftuntersuchung auf Schimmelpilze mittels Kultivierung ...	10
3.3.2. Prüfung	10
3.3.3. Ergebnisse der Schimmelpilzuntersuchung der Raumluft	11
3.4. Untersuchung der Außenfilter auf Pilzwachstum.....	13
3.4.1. Probenahme	13
3.4.2. Prüfung	13
3.4.3. Ergebnisse.....	14
4. Bewertungsgrundlagen	15
4.1. Leichtflüchtige organische Verbindungen (VOC)	15
4.2. Schimmelpilze	15
5. Bewertung	17
5.1. Leichtflüchtige organische Verbindungen (VOC)	17
5.2. Schimmelpilzsporen in der Raumluft.....	18
5.3. Mikroskopische Untersuchung der Filter	18
6. Fazit	19

1. Einleitung

1.1. Adressen

Auftraggeber	Wohnungsbaugesellschaft der Stadt Nürnberg mbH Glogauer Straße 70 90473 Nürnberg
Auftragnehmer	AnBUS e.V. Mathildenstr. 48 90762 Fürth
Auftragsdatum	30.10.2002
Aktenzeichen	TBN/B-jg

1.2. Ortstermin

Durchgeführt von	Uwe Münzenberg
Ortstermine am	01.03.04, 06.03.2004, 10.03.04
Durchführung der Ortstermine	Uwe Münzenberg, AnBUS e.V.
Untersuchungsauftrag	Wissenschaftliche Begleitforschung: Raumluftuntersuchungen auf Schimmelpilze und leichtflüchtige Schadstoffe
Untersuchungsobjekt	Exemplarische Wohnungen im sanierten Wohnblock Jean-Paul-Platz 4, Nürnberg Vergleichswohnungen Jean-Paul-Platz 23
Verfasser des Prüfberichtes	Dipl.-Chem. Jörg Thumulla, von der IHK Mittel- franken öffentlich bestellter und vereidigter Sach- verständiger für Innenraumschadstoffe und Uwe Münzenberg, staatl. geprüfter Hochbautechniker, Sachverständiger für Baubiologie
Berichtsnummer	04851
Datum des Prüfberichtes	15.04.2004

2. Vorgehensweise

2.1. Anlass der Untersuchung und Aufgabenstellung

Das Gebäude Jean-Paul-Platz 4 wurde beispielhaft auf Passivstandard saniert. Im Rahmen dieses Projektes soll überprüft werden, welche Auswirkungen die Sanierung auf die Innenraumlufthausqualität hat. Hierzu sollen exemplarisch in den energetisch sanierten Wohnräumen des Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg Raumlufthauskonzentrationen an leichtflüchtigen organischen Innenraumschadstoffen und die Konzentration an Schimmelpilzsporen in der Raumlufthaus unter Nutzungsbedingungen erfasst werden. Weiterhin sollen im Sinne einer Qualitätskontrolle die Grob- und Feinfilter der Lüftungsanlagen auf mikrobielles Wachstum mikroskopisch untersucht werden.

Zum Vergleich wurden Untersuchungen in Wohnungen der WBG am Jean-Paul-Platz durchgeführt, welche nicht energetisch saniert wurden.

Folgende Fragestellungen sollen anhand der geplanten Untersuchungen geklärt werden:

1. Bestehen Auffälligkeiten in Konzentration und Menge der leichtflüchtigen organischen Innenraumschadstoffe in der Raumlufthaus der Wohnungen?
2. Bestehen Auffälligkeiten in Konzentration und Zusammensetzung der Schimmelpilze in der Raumlufthaus der Wohnungen?
3. Ist es möglich, dass die Filter der Lüftungsanlage mit Schimmelpilzen direkt be wachsen werden?

2.2. Begriffe

VOC

VOC steht für *Volatile Organic Compounds*. Unter dieser Bezeichnung werden eine Vielzahl chemischer Verbindungen mit einem Siedebereich zwischen 50 °C und ca. 300 °C zusammengefasst. Zu den flüchtigen organischen Verbindungen zählen unter anderem folgende Substanzklassen:

- Aldehyde und Ketone
- Ether und Ester mehrwertiger Alkohole (EEMA), "Glykolverbindungen"
- Aliphatische Kohlenwasserstoffe
- Aromatische Kohlenwasserstoffe
- Leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (LHKW)
- Terpene
- Alkohole
- Ester
- Amine

Schimmelpilze

Der Begriff "Schimmelpilze" ist eine Sammelbezeichnung für zahlreiche mikroskopisch kleine Pilze aus den systematischen Gruppen Zygomycetes, Ascomycetes und Deuteromycetes (*Fungi imperfecti*). Der wissenschaftliche Name eines Pilzes setzt sich aus einer Gattungsbezeichnung und einer Artbezeichnung zusammen (z.B. *Penicillium expansum*). Innerhalb einer Gattung wie z. B. *Penicillium* sind viele, untereinander ähnliche Schimmelpilzarten zusammengefasst, die jeweils einen eigenen Artnamen haben.

Wird ein Pilz nicht bis zu seiner Art, sondern nur bis zu seiner Gattung bestimmt, wird an den Gattungsnamen der Zusatz sp. oder spp. angefügt. Damit wird zum Ausdruck gebracht, dass es sich bei dem betreffenden Pilz um eine oder mehrere Arten der betreffenden Gattung handelt.

2.3. Messplanung

2.3.1. Untersuchungen der Raumlufte auf VOC

Für die Bestimmung der Raumluftekonzentration wurde die VDI-Richtlinie 4300 Blatt 6 *Messstrategie für flüchtige organische Verbindungen* zugrundegelegt. Das Ziel der Messstrategie wird gemäß Punkt 5.1A (*Aufklärung der Gründe von Beschwerden, evtl. verbunden mit der Überprüfung der Einhaltung von Richtwerten für die Innenraumlufte*) definiert.

Gemäß VDI 4300 wurden die Fenster vor der Messung – sofern im Untersuchungsprotokoll nicht anders erwähnt - mindestens sechs Stunden geschlossen gehalten, so dass der Luftaustausch auf die Infiltration (natürlicher Luftwechsel) beschränkt wurde und sich eine Ausgleichskonzentration einstellen konnte. Diese vorbereitenden Maßnahmen wurden durch die Wohnungsnutzer durchgeführt. Die Raumtemperaturen wurden nicht beeinflusst und lagen im Bereich der üblichen Nutzungsbedingungen.

Bei den energetisch sanierten Wohnungen, welche andauernd über eine zentrale raumluftechnische Anlage belüftet werden, wurde diese für die Probenahme nicht abgeschaltet.

Die Probenahme wurde gemäß der Richtlinie auf Aktivkohle und Silicagel durchgeführt, um gemäß der Richtlinie sowohl polare Verbindungen als auch unpolare Verbindungen erfassen zu können.

2.3.2. Untersuchung der Raumlufte auf Schimmelpilze

Für die Bestimmung der Sporenkonzentration durch Schimmelpilze in der Raumlufte wurde die vom Arbeitskreis „Qualitätssicherung – Schimmelpilze in Innenräumen“ am Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg erarbeitete Vorgehensweise angewandt (*Schimmelpilze in Innenräumen - Nachweis, Bewertung, Qualitätsmanagement, Stand 14.12.2001*).

Bei den energetisch sanierten Wohnungen, welche über eine dauernd im Betrieb befindliche zentrale raumluftechnische Anlage belüftet werden, wurde diese für die Probenahme nicht abgeschaltet.

Um Sicherheit über möglichen aktiven Befall der Filtermatten durch Schimmelpilzwachstum zu erhalten, wurden diese auf vorhandenes Mycelwachstum mykologisch untersucht.

3. Probenahmebedingungen und Laborergebnisse

3.1. Untersuchung der Raumlufte auf leichtflüchtige organische Verbindungen (VOC)

3.1.1. Probenahme

Probenehmer:	Uwe Münzenberg
Probenahmedatum:	06.03.2004 und 10.03.2004
Luftdruck:	983 und 965 hPa
Außenklima:	06.03.2004: 0°C, 85% r.F. und Schneefall 10.03.2004: 2 °C, 75% r.F. und windstill
Weitere Details:	siehe Ergebnistabelle

3.1.2. Prüfung

Probeneingang:	08.03.2004 und 11.03.2004
Prüfdatum:	15.03.2004 und 23.03.2004
Probennummer:	140308-23
zu untersuchen auf:	leichtflüchtige organische Verbindungen: Substanzen gemäß VDI 4300, Blatt 6, Screening auf unbekannte VOC
Untersuchungsmethode:	GC/MS unpolare Verbindungen von Aktivkohle, polarer Verbindungen von Silicagel
Probenvorbereitung:	<i>Aktivkohle:</i> Extraktion mit Schwefelkohlenstoff/Methanol <i>Silicagel:</i> Extraktion mit Methanol
Abweichungen:	keine Abweichungen gegenüber der Prüfspezifikation

3.1.3. Beschreibung der Referenzwohnungen:

In Bezug auf die Ausstattung und das Alter der Einrichtungen bestehen keine grundsätzlichen Unterschiede zwischen den energetisch sanierten Wohnungen und den herkömmlichen Wohnungen. Bei beiden Wohnungstypen liegen grundlegende Sanierungsarbeiten einen längeren Zeitraum zurück und dürften sich im wesentlichen auf kleinflächige Sanierungsarbeiten beschränken. Die Einrichtung und Bodenbeläge bestanden zum Großteil aus Holzwerkstoffen unterschiedlichen Alters mit verschiedenen Bodenbelägen aus Teppich, PVC oder Laminat. In Bezug auf den natürlichen Luftwechsel der Referenzwohnungen ist es wichtig anzumerken, dass diese über neue Kunststofffenster verfügen.

3.2. VOC Ergebnisse und Probenahmedetails

Probennummer		140308-23	140308-24	140308-25	140308-26	140308-27	140311-55	140311-56	140311-57
Beprobte Wohnung:		Blickle 04	Gümüs 04	Iseri 04	Klier04	Hakan 04	Schäfer 23	Fraas 23	Blickle 23
Messpunkt		Flur	Flur	Flur	Flur	Wohnzimmer	Flur	Flur	Flur
Probenahmedetails		Passivhaus	Passivhaus	Passivhaus	Passivhaus	Passivhaus	Referenz	Referenz	Referenz
Lüftungsstufe		„Sonne“	„Sonne“	„Mond“	„Sonne“	„Sonne“	Fenster - lüftung	Fenster - lüftung	Fenster - lüftung
Raumlufttemperatur		20,6°C	18,5°C	21,3°C	21,3°C	19,3°C	19,3°C	21,1°C	20,6°C
relative Luftfeuchtigkeit:		33%	36%	30%	33,5%	33,8%	41,6%	59,1%	47,9 %
Aktivkohle									
Probenahmegerät:		Buck	Eskort	Eskort	Buck	Escort	Buck	Escort	Escort
Durchflussrate [l/min]		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Volumen		69,84 l	80 l	101 l	68,22 l	70 l	65 l	68 l	80 l
Silicagel									
Probenahmegerät:		Buck	Eskort	Eskort	Buck	Eskort	Buck	Eskort	Eskort
Durchflussrate [l/min]		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Volumen		69,51 l	58 l	100 l	67,08 l	69 l	65 l	68 l	80 l
Ergebnisse									
Stoff	BG	Blickle	Gümüs	Iseri	Klier	Hakan	Schäfer	Fraas	Blickle
	[µg/m ³]								
Alkane									
n-Hexan	3	<	<	<	<	<	4	6	14
n-Heptan	2	<	3	<	5	2	7	33	38
n-Oktan	2	<	<	<	<	<	<	13	3
n-Nonan	2	<	<	<	<	<	<	13	12
n-Dekan	2	<	<	<	<	<	4	14	55
n-Undekan	2	<	<	<	<	4	9	18	160
n-Dodekan	2	<	<	<	<	2	4	8	40
n-Tridekan	2	<	<	<	<	<	<	12	<
n-Tetradekan	2	<	<	<	<	<	2	16	<
n-Pentadekan	2	<	<	<	<	<	<	6	<
n-Hexadekan	2	<	3	<	<	<	<	3	<
2-Methylpentan	10	<	<	<	<	<	15	11	22
3-Methylpentan	10	<	<	<	<	6	19	18	41
2-Methylhexan	2	<	<	<	<	2	2	7	75
3-Methylhexan	3	<	<	<	<	<	3	7	44
Methylcyclopentan	3	<	<	<	<	<	4	6	53
Cyclohexan	3	4	<	<	<	4	8	13	250
Methylcyclohexan	2	<	<	<	<	<	2	16	30
Sonstige:									
Isooctan	2								
Pentamethylheptan	2								
Heptamethylnonan	2	12			3		9		
Isomerengemisch Dekan-Dodekan	50								640
Summe		16	6	0	8	20	92	220	1.477
Alkene									
1-Okten	2	<	<	<	<	<	<	<	<
1-Deken	2	<	<	<	<	<	<	<	<
Sonstige:									
1-Dodeken	2								
1-Tetradeken	2								
1-Hexadeken	2								
Summe		0							

Messpunkt	BG [µg/m ³]	Blickle [µg/m ³]	Gümüs [µg/m ³]	Iseri [µg/m ³]	Klier [µg/m ³]	Hakan [µg/m ³]	Schäfer [µg/m ³]	Fraas [µg/m ³]	Blickle [µg/m ³]
Aromaten									
Benzol	2	3	3	3	2	5	4	4	9
Toluol	2	20	16	12	12	13	18	43	73
Ethylbenzol	2	4	<	<	<	<	6	7	100
m/p-Xylol	2	6	4	3	2	5	7	10	60
o-Xylol	2	3	<	<	<	<	<	5	22
n-Propylbenzol	2	<	<	<	<	<	<	2	4
1,2,4-Trimethylbenzol	2	<	<	<	<	<	2	8	20
1,3,5-Trimethylbenzol	2	<	<	<	<	<	<	2	7
o-Ethyltoluol	2	<	<	<	<	<	<	3	5
Naphthalin	3	<	<	<	<	<	<	<	<
Sonstige:									
iso-Propylbenzol	2								
1,2,3-Trimethylbenzol	2							2	5
m-Ethyltoluol	2							4	12
p-Ethyltoluol	2								5
Cymol	2			2				5	
Diisopropylnaphthaline	4								
Summe		36	23	20	14	23	37	95	322
Ester/ Ketone									
Ethylacetat	4	<	4	<	<	<	6	23	15
iso-Propylacetat	2	<	<	<	<	<	<	<	<
n-Butylacetat	2	<	3	<	<	<	<	5	2
MEK (Methylethylketon)	3	<	<	<	<	<	4	<	19
Methylisobutylketon	2	<	<	<	<	<	<	<	<
cyclo-Hexanon	2	<	<	<	<	<	<	6	4
Acetophenon	2	<	<	<	<	<	<	<	3
Sonstige:									
iso-Butylacetat	2							3	
Methylbutylketon	2								
Summe		0	7	0	0	0	10	37	43
Alkohole									
iso-Propanol	5	66	6	13	<	<	<	29	58
n-Butanol	4	<	<	<	<	<	<	<	<
2-Ethyl-1-hexanol	2	<	<	<	<	<	<	<	5
Benzylalkohol	5	<	<	<	<	<	<	<	<
Sonstige:									
iso-Butanol									
Octen-3-ol									
Summe		66	6	13	0	0	0	29	63
Ether									
THF (Tetrahydrofuran)	2	<	<	<	<	<	<	<	<
2-Pentylfuran	2	<	<	<	<	<	<	<	<
Sonstige:									
2-Methylfuran	2								6
tert-Butylmethylether	2								
Summe		0	0	0	0	0	0	0	6
Siloxane									
Hexamethyldisiloxan	3								
Oktamethyltrisiloxan	3								
Dekamethyltetrasiloxan	3								
Dodekamethylpentasiloxan	3								
Hexamethylcyclotrisiloxan	3								
Oktamethylcyclotetrasiloxan	3								28
Dekamethylcyclopentasiloxan	3	21	110	3	7		13	3	40
Dodekamethylcyclohexasiloxan	3								13

Messpunkt	BG [µg/m³]	Blickle [µg/m³]	Gümüs [µg/m³]	Iseri [µg/m³]	Klier [µg/m³]	Hakan [µg/m³]	Schäfer [µg/m³]	Fraas [µg/m³]	Blickle [µg/m³]
Phenolische Verbindungen									
Phenol	5								
Kresole	5								
<i>Summe</i>		0	0	0	0	0	0	0	0
Glykolverbindungen									
<i>Ethylenglykol-Derivate</i>									
2-Methoxyethanol	5	<	<	<	<	<	<	<	<
2-Ethoxyethanol	5	<	<	<	<	<	<	<	<
2-Butoxyethanol	5	<	<	<	<	<	<	<	21
2-Phenoxyethanol	5	<	<	<	<	<	<	<	<
2-Ethoxyethylacetat	5	<	<	<	<	<	<	<	<
2-Butoxyethoxyethanol	5	<	<	<	<	<	<	<	<
Butyldiglykolacetat	5								
Sonstige:									
Methoxyethylacetat	3								
2-Butoxyethylacetat	3								
Ethyldiglykolacetat	3								
<i>Summe</i>		0	0	0	0	0	0	0	21
<i>Propylenglykol-Derivate</i>									
1-Methoxy-2-propanol	5	<	<	<	<	<	<	<	<
Methoxypropylacetat	3	<	<	<	<	<	<	<	<
Sonstige:									
1-Butoxy-2-propanol	5								
<i>Summe</i>		0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Gesamtsumme.</i>		0	0	0	0	0	0	0	21
Texanole									
Texanol-1	ca. 5	<	<	<	<	<	<	<	<
Texanol-3	ca. 5	<	<	<	<	<	<	<	<
TXIB (Texanoldiisobutyrat)	2	<	31	<	<	<	<	11	<
<i>Summe</i>		0	31	0	0	0	0	11	0
halogenierte KW									
1,1,1-Trichlorethan	2	<	<	<	<	<	<	<	<
Trichlorethen	2	<	<	<	<	<	<	<	<
Tetrachlorethen	2	<	<	<	<	<	<	<	<
1,4-Dichlorbenzol	2	<	<	<	<	<	<	<	<
Sonstige:									
Dichlormethan	2								
Trichlormethan	2								
Tetrachlormethan	2								
1,1,1,2-Trichlortrifluorethan	2								
<i>Summe</i>		0	0	0	0	0	0	0	0
Terpene									
Δ ³ -Caren	2	<	<	<	3	<	<	3	<
Limonen	2	23	20	35	69	13	6	31	31
α-Pinen	2	3	5	5	7	4	4	680	23
β-Pinen	2	<	<	5	<	<	<	100	4
Sonstige:									
Longifolen	2								
Menthol	2								
β-Myrcen	2								
Champhen	2							19	
Champher	2							34	
Citronellol	2								
Eukalyptol	2							13	
β-Linalool	2								
α-Terpinen	2								
γ-Terpinen	2								
α-Terpineol	2								
Terpinolen	2								
<i>Summe</i>		26	25	45	79	17	10	880	58

Messpunkt	BG [µg/m ³]	Blickle [µg/m ³]	Gümüs [µg/m ³]	Iseri [µg/m ³]	Klier [µg/m ³]	Hakan [µg/m ³]	Schäfer [µg/m ³]	Fraas [µg/m ³]	Blickle [µg/m ³]
Monomere Oligomere									
Trimeres-Isobuten	2	<	<	<	<	<	<	<	<
4-Phenylcyclohexen	2	<	<	<	<	<	<	<	<
Styrol	2	<	<	<	<	<	<	<	4
sonstige:									
Acrylsäuremethylester	3								
Methacrylsäuremethylester	3								
Sonstige:									
<i>Summe</i>		0	0	0	0	0	0	0	29
Aldehyde									
Butanal	4	<	<	<	<	<	<	<	<
Pentanal	3	<	<	4	3	<	<	<	<
Hexanal	2	6	3	8	4	3	3	10	13
Nonanal	2	6	<	8	<	3	<	4	4
Benzaldehyd	2	<	<	<	<	<	<	<	<
Sonstige:									
Heptanal	2			3				3	2
Oktanal	2			4					
Dekanal	2			5					
Furfural	3								
5-Methylfurfural	3								
<i>Summe</i>		12	3	32	7	6	3	17	19
Aldehyde(Ergebnisse in ppb)									
Butanal	4	< ppb	< ppb	< ppb	< ppb	< ppb	< ppb	< ppb	< ppb
Pentanal	3	< ppb	< ppb	1,1 ppb	0,9 ppb	< ppb	< ppb	< ppb	< ppb
Hexanal	2	1,5 ppb	0,7 ppb	2,0 ppb	1,0 ppb	0,7 ppb	0,7 ppb	2,4 ppb	3,2 ppb
Nonanal	2	1,0 ppb	< ppb	1,4 ppb	< ppb	0,5 ppb	< ppb	0,7 ppb	0,7 ppb
Sonstige:									
Heptanal	2	< ppb	< ppb	0,6 ppb	< ppb	< ppb	< ppb	0,6 ppb	0,4 ppb
Oktanal	2	< ppb	< ppb	0,8 ppb	< ppb	< ppb	< ppb	< ppb	< ppb
Dekanal	2	< ppb	< ppb	0,8 ppb	< ppb	< ppb	< ppb	< ppb	< ppb
<i>Summe</i>		2,5 ppb	0,7 ppb	6,7 ppb	1,8 ppb	1,2 ppb	0,7 ppb	3,8 ppb	4,3 ppb
Übrige Verbindungen									
Hexansäure	5	<	<	<	<	<	<	<	<
Dimethylphthalat	2	<	<	<	<	<	<	<	<
Sonstige:									
Methylbenzoat	2								
N-Methylpyrrolidon	5								
<i>Summe</i>		0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt-Summe		177	211	113	115	66	165	1292	2119

< = kleiner Bestimmungsgrenze, BG = Bestimmungsgrenze, KW = Kohlenwasserstoffe, n.a = nicht angegeben, n.b' = nicht bestimmt

Werden bei den angegebenen Verbindungen keine Konzentrationsangaben gemacht, lag hier im Rahmen des Analysenlaufes keine Auffälligkeit vor. Die Bestimmungsgrenze gilt, sofern ein Analyseergebnis angegeben ist.

3.3. Mikrobiologische Untersuchungen

3.3.1. Probenahme Raumlufuntersuchung auf Schimmelpilze mittels Kultivierung

Probenehmer: Uwe Münzenberg
Probenahmedatum: 06.03.2004 und 10.03.2004
Luftdruck: 983 und 965 hPa
Außenklima: 06.03.2004: 0°C, 85% r.F. und Schneefall
10.03.2004: 2 °C, 75% r.F. und windstill
Weitere Details: siehe Ergebnistabelle

3.3.2. Prüfung

Probeneingang: 08.03.2004 und 11.03.2004
Prüfdatum: 15.03.2004 und 23.03.2004
Untersuchungsmethode: Die Nährmedien wurden bei Probeneingang sowie nach 4 und 10 Tagen Inkubation bei $24 \pm 0,5^\circ\text{C}$ ausgewertet (Zählung und morphologische Differenzierung).

3.3.3. Ergebnisse der Schimmelpilzuntersuchung der Raumluft

Beprobte Wohnung:		Blickle 04		Gümüs 04		Iseri 04		Klier04		Hakan 04		Außenluft	
Messpunkt		Flur		Flur		Flur		Flur		Wohn- zimmer		Straße	
Probenahmedetails		Passivhaus		Passivhaus		Passivhaus		Passivhaus		Passivhaus		-	
Lüftungsstufe		„Sonne“		„Sonne“		„Mond“		„Sonne“		„Sonne“			
Raumlufttemperatur		20,6°C		18,5°C		21,3°C		21,3°C		19,3°C		0°C	
relative Luftfeuchtigkeit:		33%		36%		30%		33,5%		33,8%		85%	
Probenahmegerät:		Gilair		Gilair		Gilair		Gilair		Gilair		Gilair	
Durchflussrate [l/min]		33		33		33		33		33		33	
Volumen		98 l		98 l		98 l		98 l		98 l		98 l	
Nährboden-Art		DG- 18	Malz	DG- 18	Malz	DG- 18	Malz	DG- 18	Malz	DG- 18	Malz	DG- 18	Malz
Ergebnisse													
Pilzart	BG [KBE/m ³]	Blickle 04 [KBE/m ³]		Gümüs 04 [KBE/m ³]		Iseri 04 [KBE/m ³]		Klier 04 [KBE/m ³]		Hakan 04 [KBE/m ³]		Außenluft [KBE/m ³]	
Cladosporium spp	10	31	20	61	51	31	20	41	10	31	10	143	194
Penicillium spp.	10	10	10	41	102	20	71			122	10	20	20
Aspergillus restrictus- Gruppe (spp.)	10	20		10		10							
Aspergillus fumigatus													10
Aspergillus versicolor	10		20	10						102	31		
Aspergillus ochraceus	10												
Wallemia sebi	10					10							
Eurotium sp. (Aspergillus glaucus-Gruppe)	10				10	10		10		10			
Alternaria sp	10			10									
Aureobasidium pullulans	10											20	10
Engyodontium album	10	10											
Spiniger sp.	10		10										
Scopulariopsis sp.	10									10			
Trichoderma sp.	10			10			10						
Thysanophora penicil- lioides	10					10							
Spiniger sp.	10												
Hefen	10	10											
sterile Kolonien	10	31	20			20		20	10		10	20	20
sonstige Kolonien	10												
Summe		112	80	142	163	111	101	71	20	275	71	203	245

Beprobte Wohnung:		Schäfer 23		Fraas 23		Blickle 23		Außenluft 23	
Messpunkt		Flur		Flur		Flur		Hinterhof	
Probenahmedetails		Referenzwohnung		Referenzwohnung		Referenzwohnung		Referenz	
Lüftungsstufe		-		-		-		-	
Raumlufttemperatur		19,3°C		21,1°C		20,6°C		2°C	
relative Luftfeuchtigkeit:		41,6%		59,1%		47,9 %		75 %	
Probenahmegerät:		Gilair		Gilair		Gilair		Gilair	
Durchflussrate [l/min]		33		33		33		33	
Volumen		98 l		98 l / 140 l		98 l		98 l	
Nährboden-Art		DG-18	Malz	DG-18	Malz	DG-18	Malz	DG-18	Malz
Ergebnisse									
Pilzart	BG [KBE/m ³]	Schäfer 23 [KBE/m ³]		Fraas 23 [KBE/m ³³]		Blickle 23 [KBE/m ³]		Außenluft 23 [KBE/m ³]	
Cladosporium spp	10		10	20		10		10	10
Penicillium spp.	10	31		204	144	82	112		10
Aspergillus restrictus-Gruppe (spp.)	10	61							
Aspergillus versicolor	10	51	10	31	43	173	31		
Aspergillus ochraceus	10	41	20	41	14	31	41		
Wallemia sebi	10								
Eurotium sp. (Aspergillus glaucus-Gruppe)	10	31		10		10			
Alternaria sp	10								
Aureobasidium pullulans	10								
Engyodontium album	10		10			10	31		
Scopulariopsis sp.	10								
Trichoderma sp.	10								
Thysanophora penicillioides	10				7				
Spiniger sp.	10								
Hefen	10								
sterile Kolonien	10	20	10	20	14	31	31	10	
sonstige Kolonien	10								
Summe		235	60	326	206	347	246	20	20

3.4. Untersuchung der Außenfilter auf Pilzwachstum

3.4.1. Probenahme

Die untersuchten Filter aus der Lüftungsanlage hatten zum Zeitpunkt der Probenahme am 01.03.04 folgende Standzeiten:

Whg. Nr.	Name	Lage	G4 Grobfilter Außenluft	F7 Feinfilter Außenluft
1	Blickle	EG links	4 Monate	1 Jahr
2	Gümüs	EG rechts	4 Monate	1 Jahr
3		1. OG links	8 Monate*	1 Jahr
4	Iseri	1. OG rechts	4 Monate	4 Monate
5	Hakan	2. OG links	8 Monate*	1 Jahr
6	Klier	2. OG rechts	4 Monate	1 Jahr

* am Ende der letzten Heizsaison ausgetauscht; am 10.11.03 überprüft - kaum belastet (gesäubert durch Absaugen)

3.4.2. Prüfung

Probeneingang: 03.03.2004 und 08.03.2004

Prüfdatum: 10.03.2004 und 22.03.2004

Untersuchungsmethode: Von den Materialproben wurden Folienkontaktproben angelegt und nach Anfärbung mit Lactophenolblaulösung lichtmikroskopisch untersucht (morphologische Differenzierung).

3.4.3. Ergebnisse

Probe	Aussehen	Pilznachweis	Sonstiges
Hakan, Grobfilter	1 Stück Filtermatte, grau verstaubt	Viele diverse Sporen ^a Kein Myzel	Extrem viele diverse Partikel
Hakan, Feinfilter	2 Stück Filtermatte, grau verstaubt	Viele diverse Sporen ^a Kein Myzel	Extrem viele diverse Partikel Viele Pollen
Iseri, Grobfilter	1 Stück Filtermatte, grau verstaubt	Viele diverse Sporen ^a Kein Myzel	Extrem viele diverse Partikel
Iseri, Feinfilter	2 Stück Filtermatte, grau verstaubt	Mäßig viele diverse Sporen ^a Kein Myzel	Extrem viele diverse Partikel
Grünüs, Grobfilter	1 Stück Filtermatte, grau verstaubt	Mäßig viele diverse Sporen ^a Kein Myzel	Extrem viele diverse Partikel
Grünüs, Feinfilter	2 Stück Filtermatte, grau verstaubt	Mäßig viele diverse Sporen ^a Kein Myzel	Viele diverse Partikel
Klier, Grobfilter	Filtermatte, grau-schwarz verstaubt	Viele diverse Sporen ^a Kein Myzel	Extrem viele diverse Partikel Viele Pollen
Klier, Feinfilter	Filtermatte, grau verstaubt	Mäßig viele diverse Sporen ^a Kein Myzel	Extrem viele diverse Partikel
Bickle, Grobfilter	2 Stück Filtermatte, grau verstaubt	Vereinzelt diverse Sporen ^a Kein Myzel	Extrem viele diverse Partikel
Bickle, Feinfilter	2 Stück Filtermatte, grau verstaubt	Mäßig viele diverse Sporen ^a In einzelnen Bereichen Myzelstücke von nicht identifizierbaren Pilzen ^b (Das Erscheinungsbild lässt vermuten, dass es zu einem kurzzeitigen Myzelwachstum gekommen ist.)	Extrem viele diverse Partikel Sehr viele Pollen

^a Die festgestellten Sporen entsprachen in ihrer Zusammensetzung den Sporen, die in der Außenluft zu erwarten sind.

^b Mangels charakteristischer morphologischer Merkmale (z.B. Sporenträger) nicht genauer bestimmbar

4. Bewertungsgrundlagen

4.1. Leichtflüchtige organische Verbindungen (VOC)

Für die Bewertung der VOC-Konzentrationen in Innenräumen gibt es keine gesetzlich verbindlichen Richtwerte. Grundsätzlich finden sich in jeder Innenraumluft eine Vielzahl flüchtiger organischer Substanzen (VOC), deren Quellen sehr unterschiedlich sein können.

Laut der Bund-Länder-Arbeitsgruppe die sich mit Innenraumhygiene beschäftigt (*Seifert*, Bundesgesundheitsblatt 3/99) sollte in Räumen, die für einen längerfristigen Aufenthalt bestimmt sind, auf Dauer ein TVOC-Wert im Bereich von 1.000 bis 3.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ nicht überschritten werden. Der Bereich bei dem direkte toxische Wirkungen zu beobachten sind, beginnt bei etwa 8.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, einer Konzentration, bei der Reizungen an Augen und Nase in Laborexperimenten beobachtet wurden.

Erfahrungsgemäß ist davon auszugehen, dass derartige TVOC-Konzentrationen durch eine beschränkte Zahl von chemischen Stoffen oder Stoffklassen bedingt sind. Daher ist das Überschreiten dieses Bereiches als Hinweis dafür aufzufassen, dass eine Einzelstoffbetrachtung durchgeführt werden sollte. Ziel sollte es sein, in Innenräumen im langzeitigen Mittel eine TVOC-Konzentration von 0,2 bis 0,3 mg/m^3 zu erreichen bzw. nach Möglichkeit sogar zu unterschreiten. Angesichts einer für VOC-Gemische nicht stringent belegbaren Beziehung zwischen Konzentration und Wirkung kann dieser Bereich als hygienischer Vorsorgebereich verstanden werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Höhe der gemessenen TVOC-Konzentration nur eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenhanges zwischen VOC-Exposition und geäußerten Beschwerden ermöglicht. Das unter Beachtung der Verhältnismäßigkeit zu fordernde Minimierungsgebot für kanzerogene Stoffe (z.B. Benzol) bleibt davon unberührt.

4.2. Schimmelpilze

Die Sporenkonzentration in der Luft kann starken Schwankungen unterliegen. Im Innenraum wird die Sporenkonzentration sehr entscheidend von den jeweiligen Probenahmebedingungen und insbesondere von den vorhandenen Aktivitäten im Raum beeinflusst. Besonders hohe Schwankungen sind bei Kurzmessungen zu erwarten, da diese Momentaufnahmen darstellen und Pilzsporen nicht gleichmäßig im Raum verteilt auftreten.

Es ist zu beachten, dass nicht alle Problemsituationen mit den vorgeschlagenen Schemata bewertet werden. So kann z.B. die Bewertung einer Luftprobe im Spätherbst schwierig sein, wenn der Sporengehalt der Außenluft in kurzer Zeit stark verringert wird (Oktober-November mit kalter und feuchter Witterung). In diesem Zeitraum können aus der Außenluft stammende Sporen, die über die Vegetationsperiode im Innenraum sedimentiert sind, das Ergebnis einer Luftprobe stärker beeinflussen (falls diese vor oder während einer Probenahme aufgewirbelt werden) und im Verhältnis zur Außenluft den Eindruck einer Belastung der Innenluft ergeben.

Ähnliches gilt bei sehr niedrigen Gesamt-KBE-Zahl in der Außenluft, wie sie z. B. im Winter bei längerer Kälteperiode auftreten. Hier ist ein Vergleich von Pilzkonzentrationen zwischen Außen- und Innenluft nicht durchführbar. Eine Bewertung unter derartigen Bedingungen erfordert Erfahrungen und Sachverstand.

Umgekehrt können auch ungewöhnlich belastete Außenluftproben eine Interpretation der

Ergebnisse erschweren.

Bei der Bewertung der Ergebnisse sollte außerdem immer berücksichtigt werden, dass meist nur Kurzzeitmessungen durchgeführt werden. Die Anwendung der Tabellen setzt daher einen hohen Sachverstand voraus.

Es werden folgende Empfehlungen zur Bewertung der kultivierbaren Luftkeime gegeben (Quelle: Umweltbundesamt, Leitfaden zur Vorbeugung, Untersuchung, Bewertung und Sanierung von Schimmelpilzwachstum in Innenräumen):

Die drei Zeilen der Tabelle sind nicht als eigenständige Kriterien gedacht, sondern sind in einer umfassenden Auswertung gemeinsam zu betrachten.

Innenluft	Innenraumquelle unwahrscheinlich	Innenraumquelle nicht auszuschließen ¹⁾	Innenraumquelle wahrscheinlich ²⁾
Cladosporium sowie andere Pilzgattungen, die in der Außenluft erhöhte Konzentrationen erreichen können (z.B. sterile Myzelien, Hefen Alternaria, Botrytis)	Wenn die KBE/m ³ einer Gattung in der Innenluft unter dem 0,7 (bis 1,0) -fachen der Außenluft liegen $I_{typ A} \leq A_{typ A} \times 0,7 (+0,3)$	Wenn die KBE/m ³ einer Gattung in der Innenluft unter dem 1,5 \pm 0,5 -fachen der Außenluft liegen $I_{typ A} \leq A_{typ A} \times 1,5 (\pm 0,5)$	Wenn die KBE/m ³ einer Gattung in der Innenluft über dem 2-fachen der Außenluft liegen $I_{typ A} > A_{typ A} \times 2$
Summe der KBE der untypischen Außenluftarten	Wenn die Differenz zwischen der KBE-Summe Innenraumluft minus Außenluft der untypischen Außenluftarten unter 150 KBE/m ³ liegt $I_{\Sigma untyp A} \leq A_{\Sigma untyp A} + 150$	Wenn die Differenz zwischen der KBE-Summe Innenraumluft minus Außenluft der untypischen Außenluftarten unter 500 KBE/m ³ liegt $I_{\Sigma untyp A} \leq A_{\Sigma untyp A} + 500$	Wenn die Differenz zwischen der KBE-Summe Innenraumluft minus Außenluft der untypischen Außenluftarten über 500 KBE/m ³ liegt $I_{\Sigma untyp A} > A_{\Sigma untyp A} + 500$
eine Art der untypischen Außenluftarten (!)	Wenn die Differenz der KBE von Außen- zu Innenluft einer untypischen Außenluft-Spezies unter 50 liegt $I_{E untyp A} \leq A_{E untyp A} + 50$	Wenn die Differenz der KBE von Außen- zu Innenluft einer untypischen Außenluft-Spezies unter 100 liegt $I_{E untyp A} \leq A_{E untyp A} + 100$	Wenn die Differenz der KBE von Außen- zu Innenluft einer untypischen Außenluft-Spezies über 100 liegt $I_{E untyp A} > A_{E untyp A} + 100$

¹⁾ Indiz für Quellensuche ²⁾ Indiz für kurzfristige intensive Quellensuche

KBE = koloniebildende Einheit

I = Konzentration in der Innenraumluft in KBE/m³

A = Konzentration in der Außenluft in KBE/m³

typ A = typische Außenluftarten bzw. -gattungen (wie z.B. Cladosporium, sterile Myzelien, ggf. Hefen, ggf. Alternaria, ggf. Botrytis)

untyp A = untypische Außenluftarten bzw. -gattungen (z. B. Pilzarten mit hoher Indikation für Feuchteschäden wie Acremonium sp., Aspergillus versicolor, A. penicillioides, A. restrictus, Chaetomium sp., Phialophora sp., Scopulariopsis brevicaulis, S. fusca, Stachybotrys chartarum, Triticium (Engyodontium) album, Trichoderma sp.)

$\Sigma untyp A$ = Summe der untypischen Außenluftarten (andere als typ A)

Euntyp A = **eine** Art, die untypisch ist in der Außenluft
!
= die angegebenen Konzentrationen gelten für Pilzarten mit gut flugfähigen Sporen. Für thermotolerante Pilzsporen sowie Pilzsporen mit geringer Flugfähigkeit gelten deutlich geringere Konzentrationen

Hinweis: Die in der Tabelle angegebenen Bewertungsgrenzen sind als vorläufige Werte zu verstehen, die ggf. den praktischen Anforderungen noch stärker angepasst werden müssen. Bei einer sehr niedrigen Gesamt-KBE-Zahl in der Außenluft, wie sie z. B. bei längerer großer Kälte auftritt, ist das Bewertungskriterium des Vergleiches der Konzentration der typischen Außenluft Spezies bzw. Gattung (wie z. B. Cladosporium, sterile Myzelien, ggf. Hefen, ggf. Alternaria, ggf. Botrytis) in der Innenraumluft mit der in der Außenluft nicht anwendbar.

Nicht alle Problemsituationen können mit den vorgeschlagenen Schemata bewertet werden. Die Beurteilung setzt daher einen hohen Sachverstand voraus.

5. Bewertung

5.1. Leichtflüchtige organische Verbindungen (VOC)

In vielen Qualitätsstandards für Innenraumqualität spielt die Konzentration flüchtiger organischer Verbindungen eine entscheidende Rolle. Mit Summenwerten von z.T. deutlich unterhalb $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ liegen die in den sanierten Häusern gemessenen Konzentration etwa ein Jahr nach der Sanierung deutlich im Komfortbereich, so dass das Vorkommen flüchtiger organischer Verbindungen als beispielhaft niedrig eingestuft werden kann. Auch die Betrachtung von Einzelsubstanzen ergibt keine prägnanten Auffälligkeiten. Die Konzentration von Benzol und den übrigen aromatischen Kohlenwasserstoffen entspricht im wesentlichen in Nürnberg üblichen Außenluftergebnissen. Die Art der Einrichtung hat keinen erkennbaren Einfluss auf die Innenraumkonzentrationen. Hingegen ist der Nutzereinfluss erkennbar. In alle Wohnungen ist der Duftstoff Limonen eine der Substanzen mit der höchsten Konzentration. Limonen wird als Duftstoff in den meisten Reinigungsmitteln eingesetzt. Hauptsubstanz in der Wohnung Blickle 04 ist das Isopropanol, ein flüchtiger Alkohol der häufig in kosmetischen und medizinischen Produkten (Parfüm, Tinkturen) eingesetzt wird. In der Wohnung Gümüs treten TXIB und Dekamethylcyclopentasiloxan hervor. Mutmaßliche Quellen sind Möbellacke oder Produkte des persönlichen Bedarf. So sind Siloxane in Deodorants enthalten.

Die VOC-Gehalte der Referenzwohnungen weisen eine sehr starke Streuung auf, was zeigt dass die Innenraumluftqualität in Wohnungen ohne automatisierte Lüftung wesentlich erheblicher von individuellen Faktoren abhängt. Während die Wohnung Schäfer ebenfalls im Komfortbereich liegt, weisen die beiden anderen Wohnungen VOC-Gehalte, die bereits als kritisch einzustufen sind, da sie in dem Schwellenbereich zwischen 1.000 und $3.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ liegen.

In der Wohnung Fraas 23 dürfte die Ursache der Einsatz von Raumluftverbesserern wie Duftlampen mit etherischen Ölen sein, weil typische Terpene wie Champhen, Champher

und Eukalyptol, nur als Duftstoffe und nicht als Lösemittel eingesetzt werden.

In der Referenzwohnung Blickle 23 sind die relativ hohen VOC-Werte durch Fliesenarbeiten im Bad, welche im Vorfeld zur Raumluftuntersuchung durchgeführt wurden, erklärbar. Hier wurde offensichtlich ein Lösemittel auf Basis aliphatischer und aromatischer Kohlenwasserstoffe (Testbenzin, Terpentinersatz) eingesetzt, das den Großteil der festgestellten VOC-Belastung ausmacht. Da die Innenluft nicht durch Lüftungsanlagen kontinuierlich ausgetauscht wird, können sich entstandene Raumluftkonzentrationen durch leichtflüchtige Schadstoffe auch nur in geringem Maße abbauen.

5.2. Schimmelpilzsporen in der Raumluft

Neben den VOC-Konzentrationen spielen die Konzentrationen von Schimmelpilzsporen bei der Bewertung der Innenraumluftqualität eine große Rolle. Bis auf die Wohnung Hakan 04 liegen alle sanierten Wohnungen deutlich unterhalb der jeweiligen Außenluftkonzentrationen, so dass festzustellen ist, dass sich die gefilterte Frischluftzuführung über Lüftungsanlage positiv auf die Raumluftqualität auswirkt.

Bei Betrachtung der Artzusammensetzung ist in der Wohnung Gümüs bei der Auswertung des Malz-Agars *Penicillium* als Hauptart. Zieht man die Differenz der Summe der untypischen Außenluftarten zur außergewöhnlich niedrigen Außenluftkonzentration als Bewertungskriterium heran, liegt diese jedoch unter 150 KBE/m^3 , so dass ein Quelle als unwahrscheinlich anzusehen ist.

Bei der Wohnung Hakan 04 ergibt sich mit einer Konzentration der untypischen Außenluftart *Aspergillus versicolor* von 102 KBE/m^3 , dass eine Schimmelpilzquelle wahrscheinlich ist. Bei der Bewertung ist jedoch zu berücksichtigen, dass vor der Probenahme in der Küche die Tapeten und der Bodenbelag entfernt wurde, so dass davon auszugehen ist, dass Schimmelpilzsporen aus Kondensatschäden aus der Zeit vor der energetischen Sanierung freigesetzt wurden. Unter der Annahme ist die festgestellte Konzentration als gering zu bewerten und weist auf den positiven Einfluss der Lüftungsanlage bei der Beseitigung von Schimmelpilzsporen hin.

In den unsanierten Wohnungen finden sich trotz deutlich geringerer Außenluftkonzentrationen höhere Innenkonzentrationen als in den Wohnungen mit Lüftungsanlagen.

In der Wohnung Blickle 23 wurden ebenfalls zeitnah vor der Probenahme Sanierungsarbeiten in Form von Fliesenarbeiten im Bad vorgenommen. Auch hier ist es nachvollziehbar, dass dabei Schimmelpilzsporen aus der früheren Nutzung freigesetzt wurden.

5.3. Mikroskopische Untersuchung der Filter

Bei der mikroskopischen Untersuchungen der Filter konnten erwartungsgemäß extrem viele diverse Partikel (Staub) sowie viele diverse Sporen nachgewiesen werden. Bei sieben der acht untersuchten Filter konnte kein Pilzmycel und damit kein Wachstum der auf dem Filter zurück gehaltenen Sporen nachgewiesen werden.

Auf einem Feinfilter konnte jedoch Mycel festgestellt werden. Das Erscheinungsbild lässt vermuten, dass es zu einem kurzzeitigen Myzelwachstum gekommen ist. Das Wachstum hat jedoch nicht ausgereicht den Filter zu durchwachsen und Sporen zu bilden. Der Fall zeigt jedoch, dass prinzipiell die Gefahr von Pilzwachstum besteht, besonders wenn die

Anlage in den Sommermonaten still steht. Daher ist eine regelmäßige Kontrolle, Reinigung und Austausch der Filter für den hygienisch einwandfreien Zustand der Innenraumluft von entscheidender Bedeutung. Um weitere Erkenntnisse über die Gefahr des Wachstum auf dem Filter zu erhalten, empfehlen wir exemplarische Langzeitaufweichungen von Luftfeuchtigkeit und Temperatur im Lüftungskanal im Bereich des Filters.

6. Fazit

Im Bauvorhaben Passivhaus, Jean-Paul-Platz 4 wurde ein Wohnblock aus den 30er Jahren zu einem Passivhaus mit hohem Dämmstandard, hoher Luftdichtigkeit und zentralen Lüftungsanlagen umgebaut. Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitforschung konnten in einer Einmalaufnahme wichtige Parameter der Innenraumluftqualität in den sanierten Wohnungen aufgenommen werden und mit unsanierten Wohnungen verglichen werden.

Als Ergebnis dieser Stichprobe kann festgestellt werden, dass die sanierten Wohnungen eine eindeutige Tendenz zu einer besseren Innenraumluftqualität aufweisen als die Wohnungen im nicht sanierten Block.

Die Summenkonzentrationen an flüchtigen organischen Verbindungen sind in den sanierten Wohnungen im Durchschnitt deutlich geringer und weisen wesentlich geringere Streuungen auf. Dies zeigt, dass nutzungsbedingte Einflüsse aufgrund der Lüftungsanlagen deutlich weniger zum Tragen kommen und schneller abgebaut werden als in den Wohnungen ohne Lüftungsanlagen.

Auch bei der mikrobiologischen Situation (Schimmelpilzsporen in der Raumluft) gibt es einen eindeutigen Trend, dass die Situation in den sanierten Häusern mit Lüftungsanlagen günstiger ist als in den unsanierten Wohnungen auch wenn es auf einem der Luftfilter, die zur Sicherheit ebenfalls untersucht wurden, einen kontrollbedürftigen Befund gibt.

Die Gesamtheit der Ergebnisse zeigen eindeutig, dass die häufig geäußerte Befürchtung, dass die Luftqualität in hochgedämmten, luftdichten Bauten schlechter sei, als in herkömmlichen Bauten, unbegründet ist - sofern über ein geregelte Lüftung ein ausreichender Luftwechsel sichergestellt wird.

Fürth den 23.04.04

AnBUS e.V.
Uwe Münzenberg
Baubiologe (VDB)

Jörg Thumulla
Diplom-Chemiker

Ende des Berichts

SCHLUSSBERICHT

im Rahmen des Forschungsvorhabens

Wissenschaftliche Begleitforschung, Jean-Paul-Platz 4, Nürnberg: Energetische Sanierung mit Faktor 10

Auftraggeber: **wbg Nürnberg GmbH,
Immobilienunternehmen der Stadt Nürnberg, Nürnberg**

Berichtsumfang: **Jean-Paul-Platz 4, Nürnberg, Zustand nach Sanierung:
Auswertung der Energieverbräuche für Heizung und Warm-
wasser, der Energiebeiträge der Heizanlage und der Solaran-
lage sowie der Raumluftparameter Temperatur, Feuchte und
CO₂-Gehalt in den Wohnungen
Sommer 2003 und Winter 2003/2004**

Vorhaben Nr.: **FO – 1/03**

Ausstellungsdatum: **17. März 2005**

Seiten: **23 Seiten**

1. Aufgabenstellung

Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitforschung zur Sanierung der Bestandsimmobilie Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg der wbg Nürnberg GmbH wurden nach der Sanierung die Energieverbräuche für Heizung und Warmwasser, die Energiebeiträge der Heizanlage und der thermischen Solaranlage sowie die Raumluftparameter Temperatur, Feuchte und CO₂-Gehalt in den Wohnungen durch das FIW München erfaßt und ausgewertet. Diese Daten werden im folgenden Bericht dargestellt, diskutiert und bewertet.

2. Meßfühler und erfaßte Größen

In den Wohnungen W1 bis W6 wurden an verschiedenen Stellen die Raumlufttemperatur und die Raumlufftfeuchte kontinuierlich aufgezeichnet. Zusätzlich wurde in 2 Wohnungen die CO₂-Konzentration der Raumluft gemessen. Die Temperatur und die relative Feuchte der Außenluft wurde an der Nord- und an der Südfassade auf der Höhe des oberen Treppenabsatzes bzw. des oberen Stockwerks erfaßt; an einer Fassade auch der Luftdruck. Zum Einsatz kamen mobile Datenlogger, die in der Regel in oder auf Regalen und Schränken in den Räumen plaziert waren. Die Daten wurden in variablen Abständen ausgelesen und die Meßfühler kontrolliert.

Bei den erfaßten Energieströmen handelt es sich generell um Nutzenergien inkl. einiger Verlustanteile, aber ohne Berücksichtigung der Umwandlungsverluste z.B. im Wärmeerzeuger. Die Angaben enthalten bei Warmwasser und Solaranlage die Leitungsverluste ab bzw. bis zum Wärmespeicher in der Heizzentrale. Bei den Heizenergieverbräuchen der Wohnungen sind die Verteilverluste innerhalb der Wohnungen in den gemessenen Verbräuchen enthalten, nicht jedoch die Leitungsverluste von der Heizzentrale bis zu den Wohnungen. Die Energieströme wurden mit insgesamt 9 Wärmemengenzählern erfaßt: WMZ 1 bis 6 entsprechen den Wohnungen W1 bis W6 (Wärmemengenzähler jeweils angebracht im Treppenhaus neben der Wohnungstür); WMZ 7 für die Solaranlage (eingesetzt in Vor/Rücklauf der Solaranlage direkt vor dem Speicher), WMZ 8 für die Energielieferung durch den Gaskessel (eingesetzt im Vor/Rücklauf des Kessels direkt vor dem Speicher), WMZ 9 für die Warmwasserentnahme durch alle Wohnungen gemeinsam (eingesetzt direkt an der Entnahmestelle aus dem Speicher; bezogen auf die Kaltwassertemperatur).

3. Vorbemerkungen zu den Grafiken

In den folgenden Grafiken wird überwiegend der Zeitraum 1. August 2003 bis 30. April 2004 dargestellt, also die erste vollständige Heizperiode nach der Sanierung. Als x-

Achsenwerte werden die Stunden des Jahres angegeben, angefangen bei der Stunde 5089 entsprechend 1. August 2003 0:00 Uhr und über den Jahreswechsel 2003/2004 weitergezählt, d.h. der 1. Januar 2004 0:00 Uhr ist die Stunde 8761 und der 30. April 2004 24:00 Uhr entspricht der Stunde 11665. Die vertikalen Abstände der Gitternetzlinien entsprechen der durchschnittlichen Dauer der Monate, d.h. der Bereich zwischen der y-Achse und der ersten vertikalen Gitternetzlinie ist etwa der Monat August usw. Die kleinen Striche an der x-Achse sind etwa die Wochenmitten der Kalenderwochen, beginnend mit KW32 des Jahres 2003 (genau genommen markieren die kleinen Striche jeweils den Freitag, 0:00 Uhr). Die Zuordnung zwischen Datum, Kalenderwochen und Jahresstunden wird noch mal aus untenstehender Tabelle deutlich.

Datum Uhrzeit	tats. Stunde des Jahres	vertikale Gitternetzlinie ist Stunde...	Wochentag, Kalenderwoche
1. August 2003, 0:00 Uhr	5089	5089	Freitag, KW 31
1. September 2003, 0:00 Uhr	5833	5820	Montag, KW 36
1. Oktober 2003, 0:00 Uhr	6553	6550	Mittwoch, KW 40
1. November 2003, 0:00 Uhr	7297	7281	Samstag, KW 44
1. Dezember 2003, 0:00 Uhr	8017	8012	Montag, KW 49
1. Januar 2004, 0:00 Uhr	8761	8742	Donnerstag, KW 1
1. Februar 2004, 0:00 Uhr	9505	9473	Sonntag, KW 5
1. März 2004, 0:00 Uhr	10201	10204	Montag, KW 10
1. April 2004, 0:00 Uhr	10945	10934	Donnerstag, KW 14
1. Mai 2004, 0:00 Uhr	11665	11665	Samstag, KW 18

Tabelle 1: Zuordnung zwischen Tag/Uhrzeit und Jahresstunden in den Grafiken.

4. Energieverbrauch, Lufttemperatur und –feuchte der Wohnungen

Der gemessene Energieverbrauch der Wohnungen (W1 bis W6) und korrespondierende Raumluftparameter werden in den nachfolgenden Diagrammen gegenübergestellt:

- Bild 1: Energieverbrauch (Monatssummen) für die einzelnen Wohnungen und als Durchschnitt aller 6 Wohnungen;
- Bild 2: Energieverbrauch (Wochensummen) für die einzelnen Wohnungen und als Durchschnitt aller 6 Wohnungen sowie Außenlufttemperatur;
- Bilder 3 bis 8: Energieverbrauch der Wohnungen W1 bis W6 als Stundenwerte (als Einzeldiagramme und nochmals zum besseren Vergleich auf einer Seite zusammengestellt);
- Bild 9: Außenlufttemperatur und Lufttemperatur in einigen Wohnungen von August 2003 bis April 2004;
- Bilder 10, 12 und 13: mittlere Raumlufthtemperatur und mittlere relative Luftfeuchte in einigen der Wohnungen. Meßorte: W1 und W2 im Wohnzimmer, W4 in der Küche;
- Bild 11: CO₂-Konzentration in Wohnung W1 (Wohnzimmer) vom November 2003 bis März 2004.

Schon aus Bild 1 sind signifikante Unterschiede im Energieverbrauch der gleich großen Wohnungen zu erkennen. Die Wohnungen W4, W2 und W1 weisen einen Verbrauch teilweise deutlich über dem Durchschnitt auf, während die Wohnungen W6 und vor allem W5 und W3 einen unterdurchschnittlichen Verbrauch haben. Dies wird in Bild 2 noch deutlicher. Hier ist auch erkenntlich, daß in W1 bereits bei Außenlufttemperaturen von über 20°C (Wochendurchschnitt) mit dem Heizen begonnen wird, während W3 und W5 erst ab durchschnittlichen Wochentemperaturen von etwa 10°C beheizt werden.

In der Wohnung W1 wird bereits Ende August an 3 Tagen geheizt; ab knapp unter 20°C Außenlufttemperatur (Wochendurchschnitt) wird kontinuierlich geheizt. In W4 und W6 wird gegen Ende September mit dem Heizen begonnen, in W2 und W3 Anfang Oktober und in W5 erst gegen Mitte Oktober. In Wohnung W5 wird auch am frühesten mit dem Heizbetrieb aufgehört; dort treten nach Mitte März 2004 nur noch 5 Heiztage auf; in den Wohnungen W2 und W6 wird mit KW18 der Heizbetrieb eingestellt, in den anderen Wohnungen später.

Wohnung W4: Schon aus Bild 1 bzw. Bild 2 wird deutlich, daß die Wohnung W4 den höchsten Energiebedarf des betrachteten Gebäudes hat. Es handelt sich um eine Wohnung in Mittellage, also ohne Decken zu einem unbeheizten Keller oder einem unbeheizten Dachboden. Aus dem Vergleich der Raumlufthtemperaturen in Bild 9 ist keine signifikant erhöhte Raumtemperatur zu belegen; in den erfaßten Heizzeiten (leider wurde aufgrund eines Sensorausfalls zwischen Mitte November und Ende Februar keine Temperaturaufzeichnung mitgeschrieben) beträgt die Raumtemperatur etwa 20°C. Auf-

stellort des dargestellten Fühlers ist das Wohnzimmer der Wohnung. Den Verlauf von Temperatur und Feuchte in der Küche der Wohnung zeigt Bild 13. Der Kurvenverlauf ist relativ uneinheitlich, wobei die Temperatur überwiegend zwischen 20 und 21°C schwankt, mit einer kühleren Phase von 18 bis 20°C im Oktober und einer wärmeren Phase von 23 bis 24°C gegen Ende November. Die Feuchte zeigt die für Küchen mitunter zu erwartenden Ausschläge nach oben. Vereinzelt treffen kurzfristige Temperatur- und Feuchteabsenkungen zusammen, was auf zusätzliche Fensterlüftung hinweist. All dies kann jedoch nicht für den gegenüber dem Durchschnitt stark erhöhten Energieverbrauch in Wohnung W4 verantwortlich sein. Wie kommt es also zu den hohen Verbrauchswerten? Auf Befragen des Mieters ergab sich folgende Konstellation: Beim Familienvater handelt es sich um einen starken Raucher, der feierabends das Wohnzimmer als „Rauchzimmer“ nutzt. Um die Geruchsbelästigung zu vermindern, macht er dies überwiegend bei dauerhaft geöffnetem Fenster, d.h. die Wärmerückgewinnung der Lüftungsanlage wird umgangen. Gleichzeitig wird aber durch Heizen versucht, die Raumtemperatur trotz geöffnetem Fenster angenehm zu halten. Dies führt in Kombination zu dem beobachteten hohen Energieverbrauch. Eventuell könnte für solche Fälle eine weniger leistungsfähige Auslegung der Heizfläche oder eine Abschaltung des Heizkörpers bei Dauer-Fensteröffnen einen gewissen erzieherischen Effekt ausüben.

Wohnung W1: Auch Wohnung W1 fällt durch einen hohen Energieverbrauch auf sowie durch den frühen Heizbeginn und das späte heizende im Jahresverlauf. Aus Bild 10 ist erkennbar, daß die Raumlufttemperatur gleichmäßig hoch im Bereich zwischen 22 und 23 °C liegt mit häufigen Tagesmaxima bei 24°C und Tagesminima bei 21°C. Temperatur und Feuchte verlaufen zumindest ab Mitte Oktober relativ gleichmäßig, was auf eine Benutzung der Lüftungsanlage (eventuell in niedriger Stellung) hinweist. Aufstellort des Fühlers ist das Wohnzimmer der Wohnung. Nur vereinzelt weisen kurzfristige Temperaturabsenkungen auf längere Fensterlüftung hin. Die Wohnung liegt im Erdgeschoß, grenzt also über den Fußboden an den unbeheizten Keller. Bild 11 zeigt die CO₂-Konzentration in der Raumluft des Wohnzimmers für den Zeitraum Mitte November bis Mitte März. Die CO₂-Konzentration bewegt sich generell zwischen 500 und bis zu 1500 ppm, wobei die Spitzenwerte der Konzentrationen im betrachteten Zeitraum zurückgehen. Die Spitzenwerte im November korrelieren mit hohen Luftfeuchten in Bild 10, d.h. zu diesem Zeitraum wurde eventuell zu wenig gelüftet (Lüftungsanlage in geringster Stellung?).

Wohnung W2: Die Wohnung W2 hat einen ähnlich hohen Verbrauch wie Wohnung W1. Die Raumlufttemperatur und -feuchte in Bild 12 verlaufen etwas ungleichmäßiger als bei W1; die relative Luftfeuchte bewegt sich unauffällig im Bereich 30 bis 45% r.F. Zahlreiche kurzfristige Temperaturabsenkungen weisen auf zusätzliche Fensterlüftung hin; evtl. wird die Lüftungsanlage auf zu geringer Stufe betrieben oder die Mieter sind Rau-

cher. Auch aus der Gegenüberstellung der Wochenmittelwerte der Raumlufthemperaturen in Bild 9 wird deutlich, daß W2 relativ warm beheizt wird. So bewegen sich die Wochenmittelwerte bis Mitte November im Bereich um 20°C, um dann auf etwa 22 bis 24°C und gegen Ende Januar sogar auf 27°C anzusteigen. Bis gegen Ende Februar geht die Lufttemperatur auf übliche Werte um 20°C zurück. Gründe für diese Phase mit erhöhter Raumtemperatur sind nicht bekannt; evtl. war ein Besuch mit erhöhten Wärmebedürfnis da, oder einer der Bewohner war länger erkrankt. Denkbar wäre auch, daß aufgrund der Geburt eines Kindes mehr geheizt wurde.

Wohnung W3: Auffällig ist die „Lücke“ im Energieverbrauch Ende Februar / Anfang März 2004 in Bild 5. Grund hierfür war ein Mieterwechsel zu diesem Zeitpunkt, wobei die Wohnung einige Zeit leer stand und nicht beheizt wurde.

Bild 1

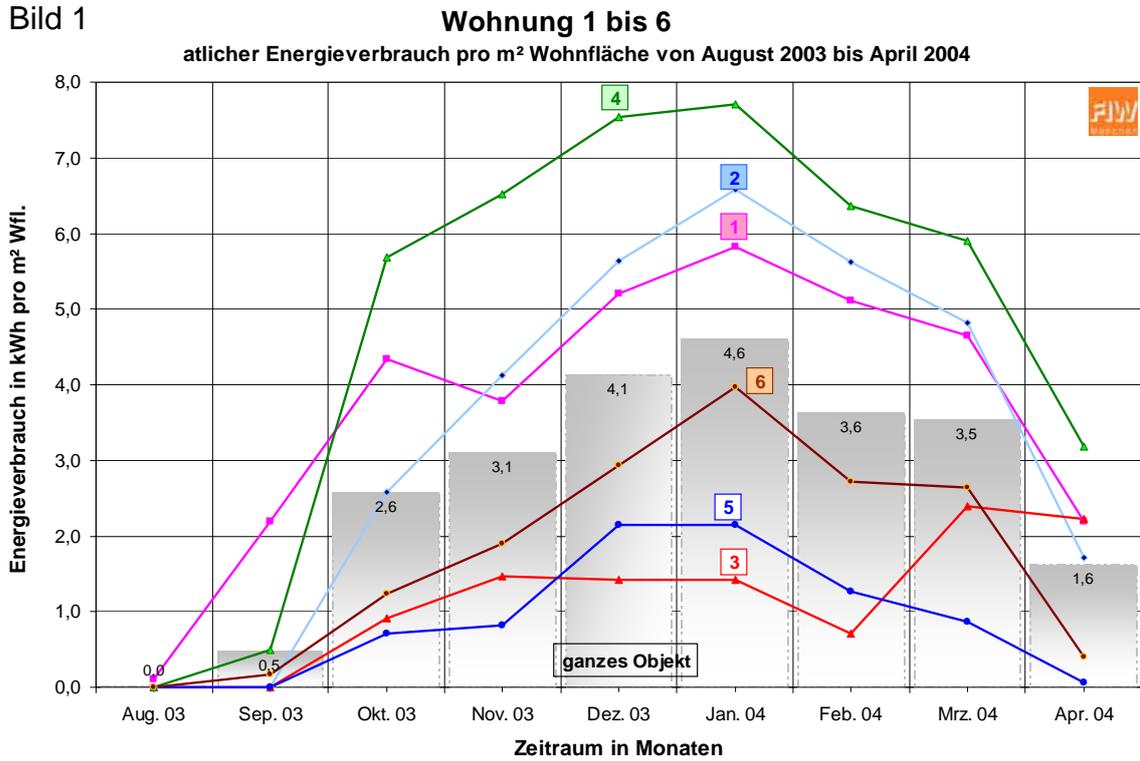


Bild 2

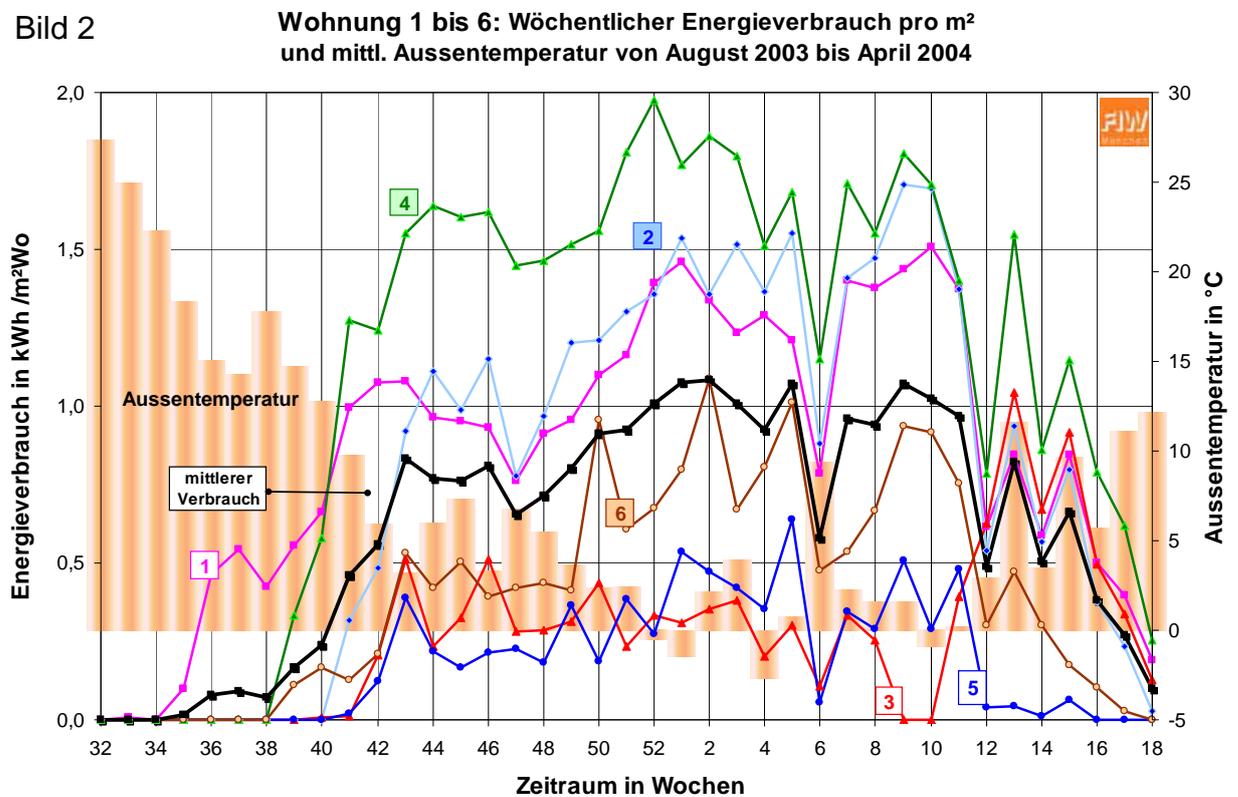


Bild 3

**Wohnung 1:
Energieverbrauch pro Std. von August 2003 bis April 2004**

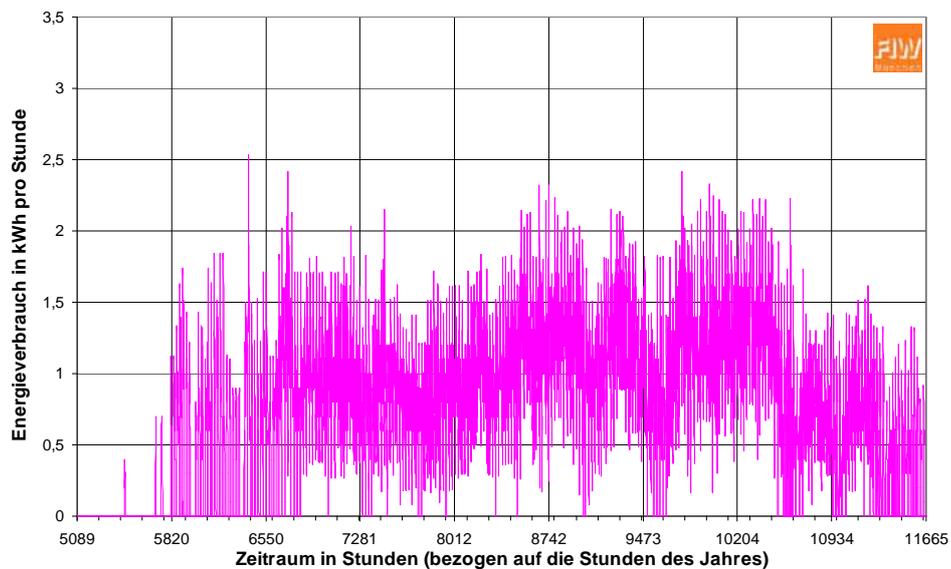


Bild 4

**Wohnung 2:
Energieverbrauch pro Std. von August 2003 bis April 2004**

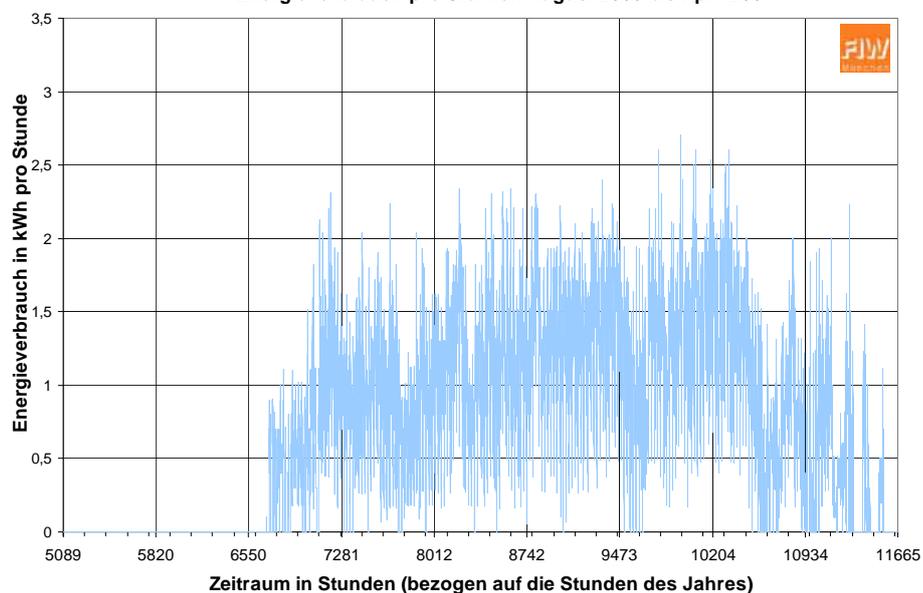
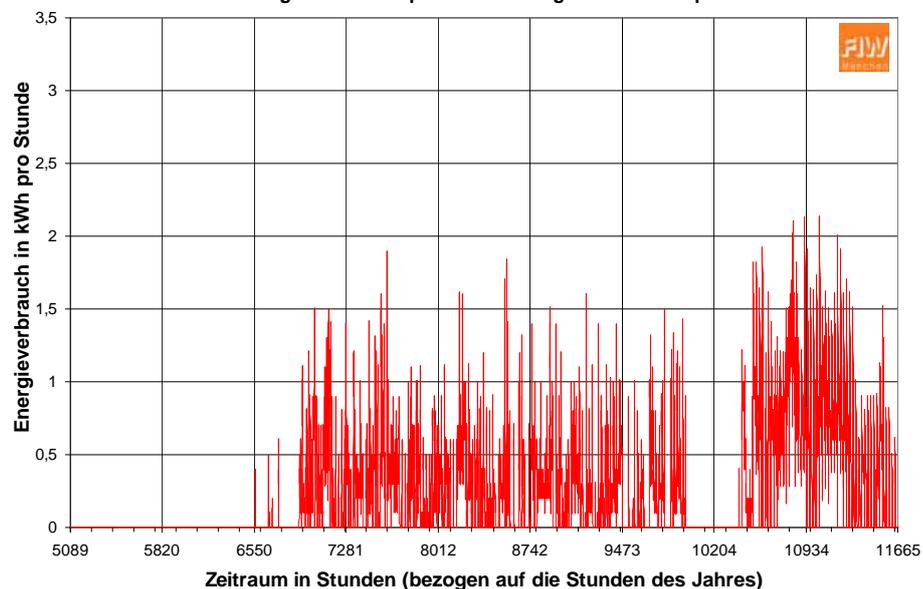


Bild 5

**Wohnung 3:
Energieverbrauch pro Std. von August 2003 bis April 2004**



Wohnung 4:
Energieverbrauch pro Std. von August 2003 bis April 2004

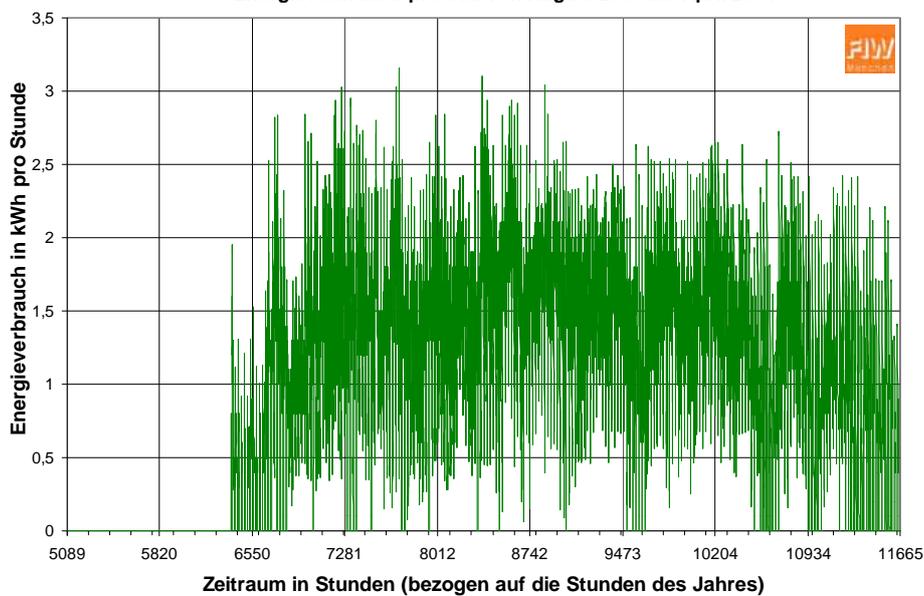


Bild 7
Wohnung 5:
Energieverbrauch pro Std. von August 2003 bis April 2004

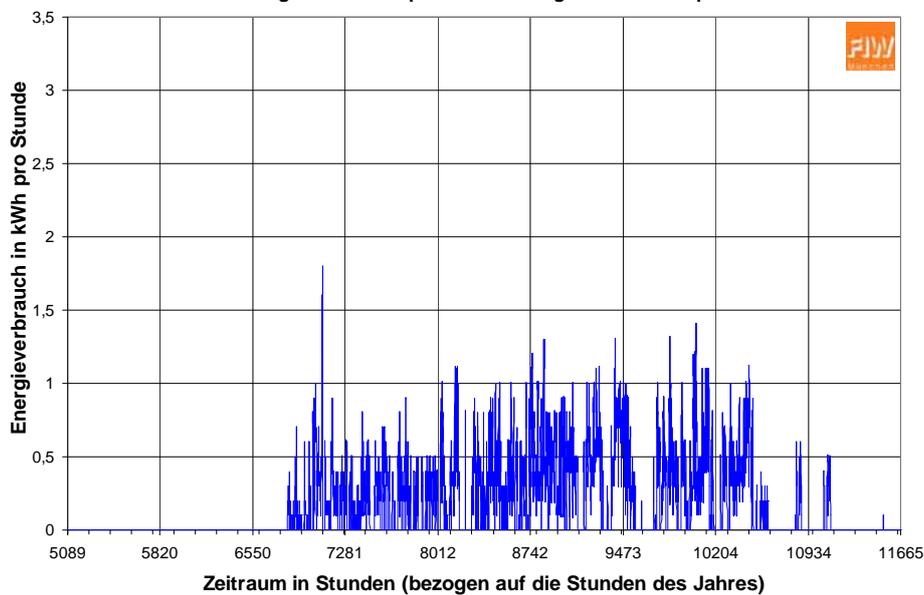
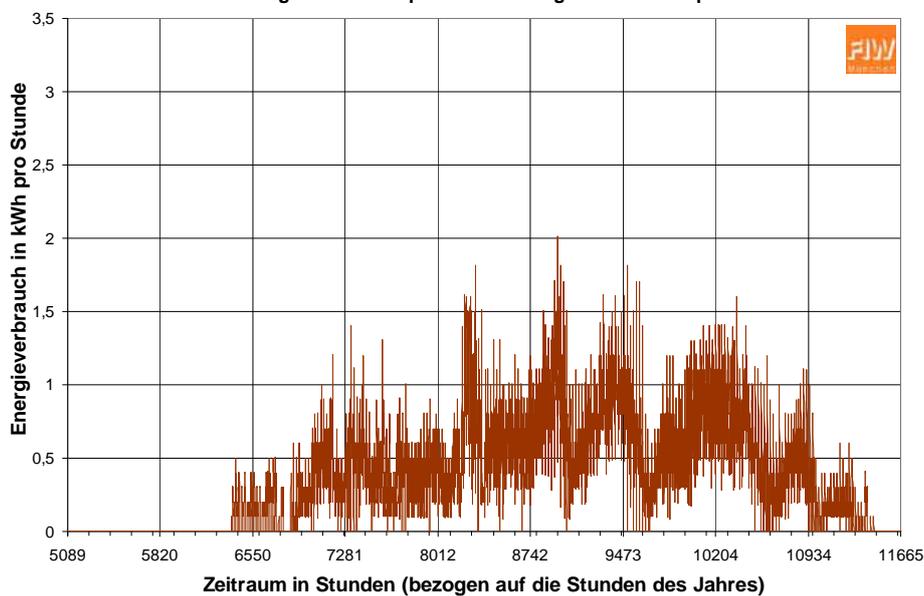


Bild 8
Wohnung 6:
Energieverbrauch pro Std. von August 2003 bis April 2004



Bilder 3 bis 5 (linke Spalte von oben nach unten) und 6 bis 8 (rechte Spalte von oben nach unten)

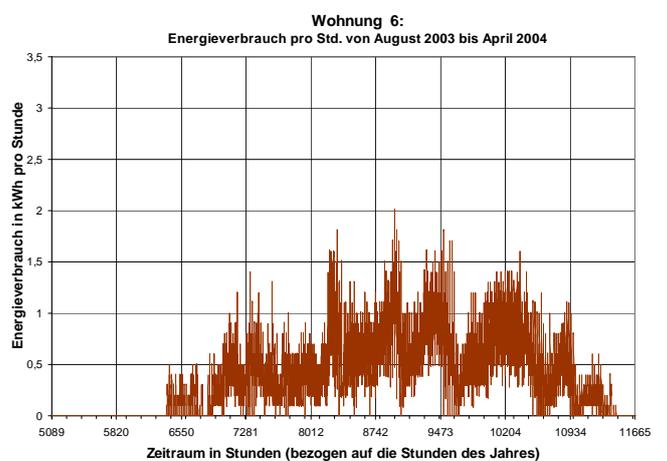
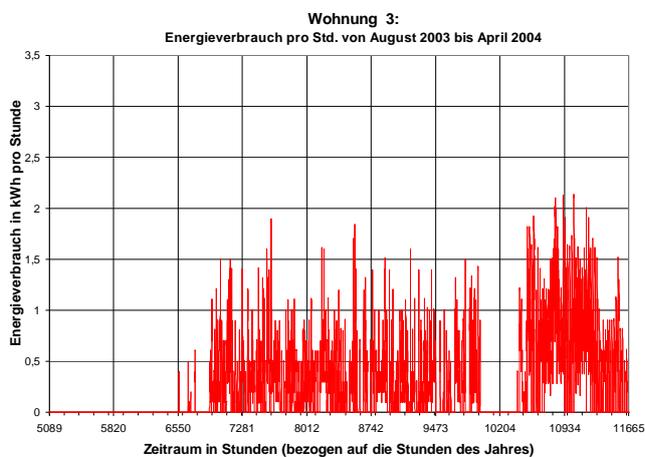
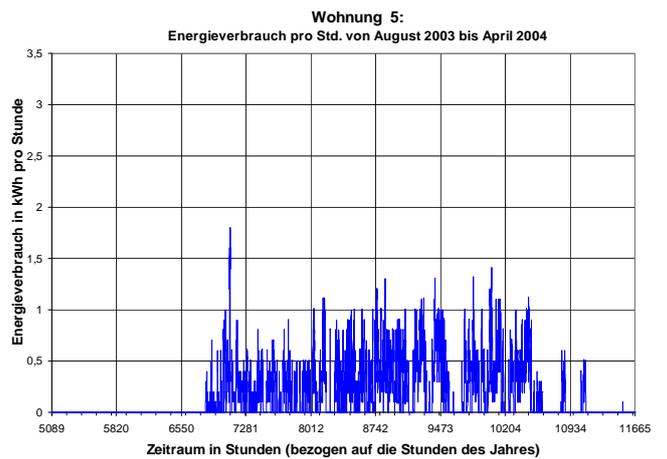
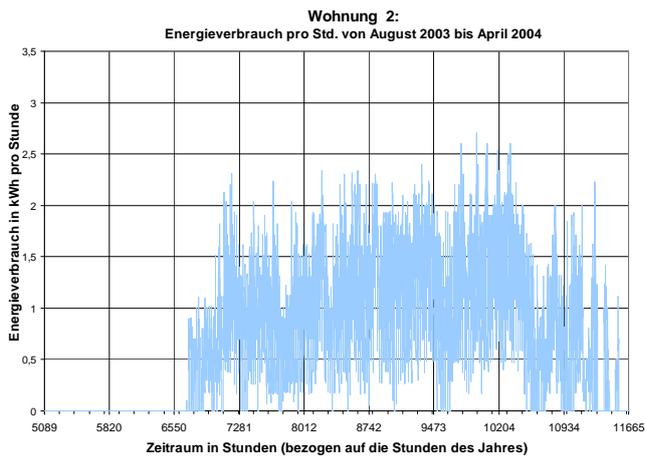
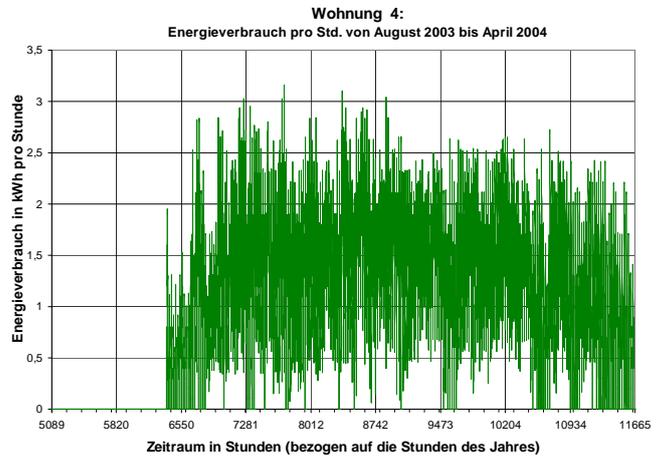
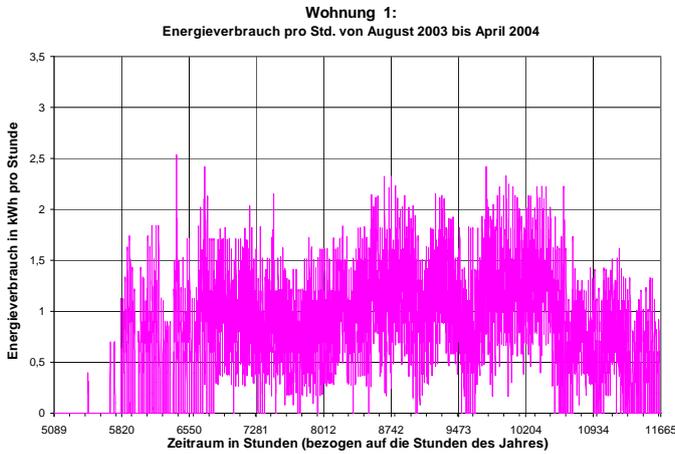


Bild 9 Temperaturen in den Wohnungen und Aussentemperatur von August 2003 bis max. April 2004

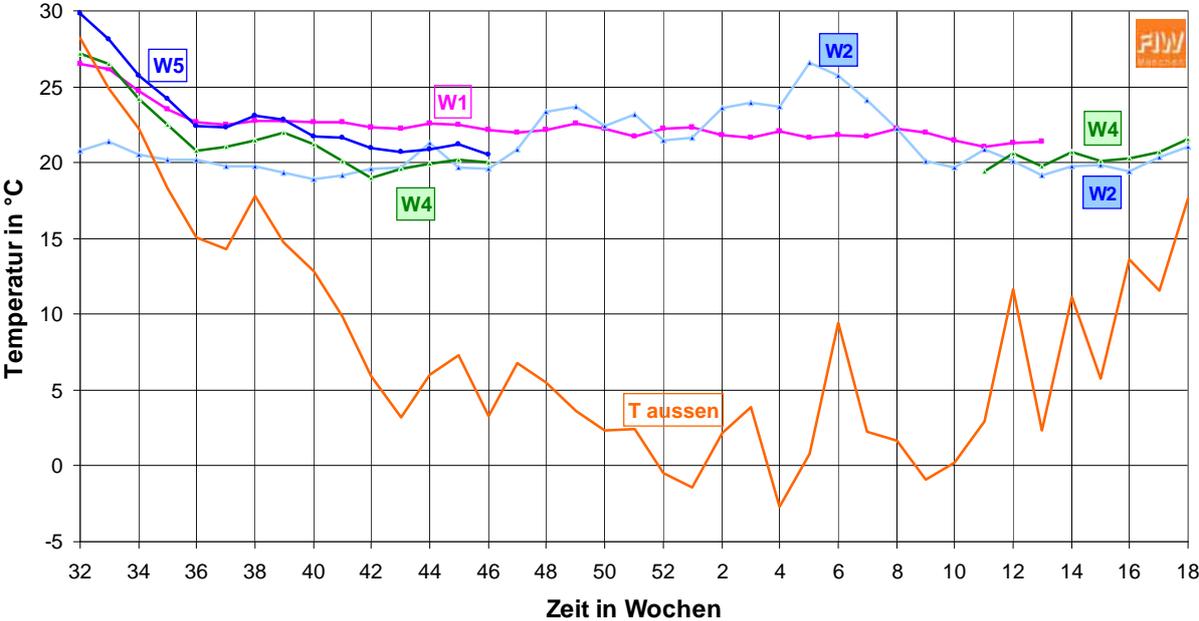


Bild 10

**Wohnung 1: Temperatur i.M. und rel. Luftfeuchte i.M.
von August 2003 bis März 2004**

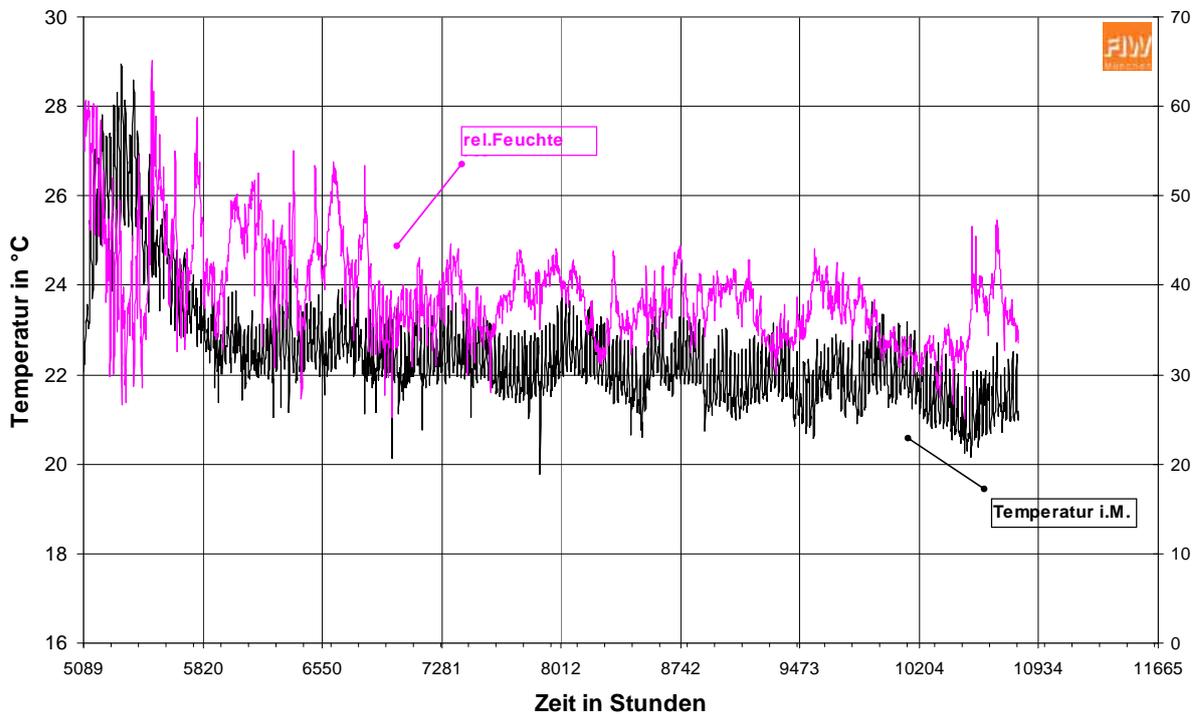


Bild 11

Wohnung 1: CO₂-Konzentration von November 2003 bis März 2004

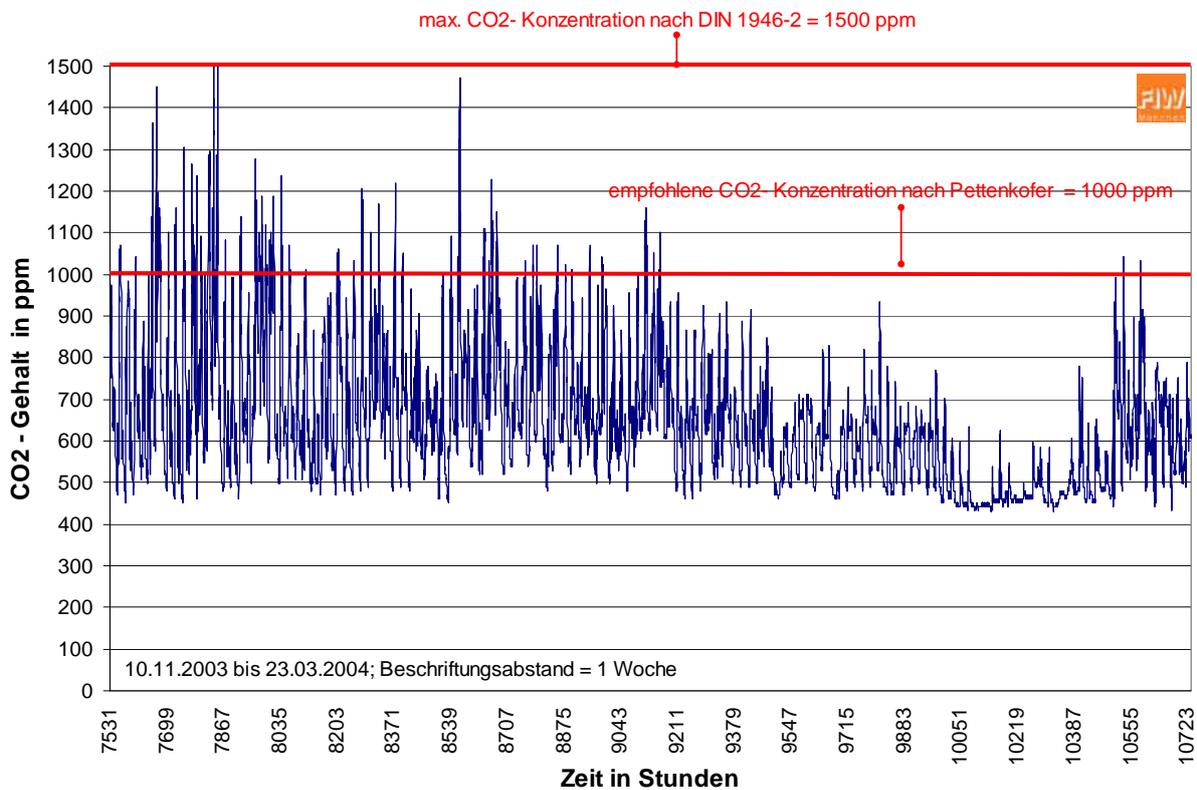


Bild 12 Wohnung 2: Temperatur i.M. und rel. Luftfeuchte i.M
von August 2003 bis April 2004

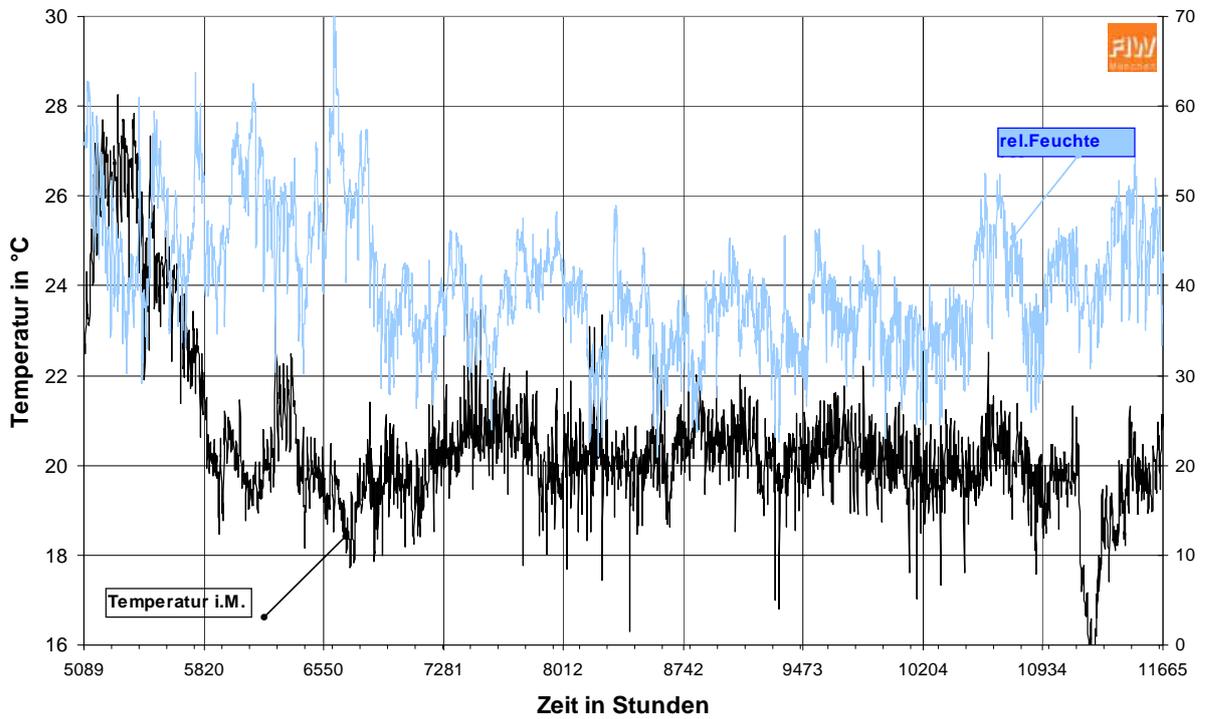
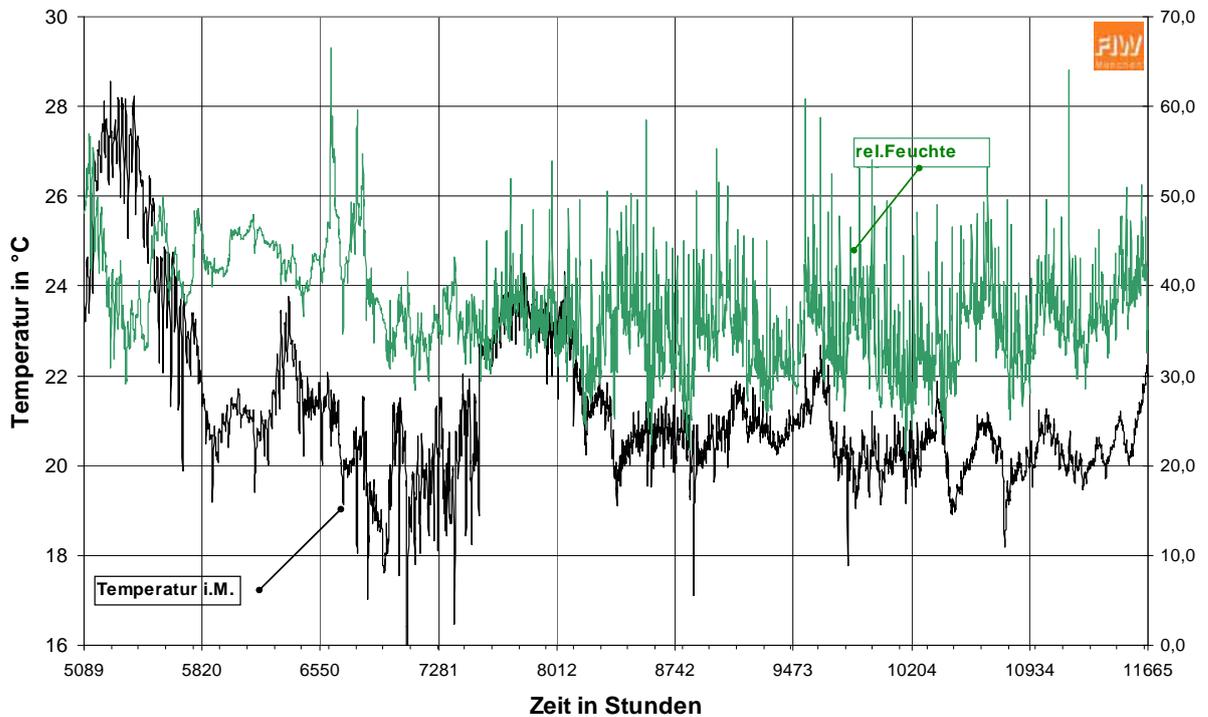


Bild 13 Wohnung 4: Temperatur i.M. und rel. Luftfeuchte i.M
von August 2003 bis April 2004



5. Sommerliches Temperaturverhalten

Die Bilder 14 und 15 behandeln den Aspekt der sommerlichen Raumtemperatur in den erfaßten Wohnungen WS1, W2, W4 und W5 (an den Meßstellen der jeweiligen Sensoren). Bild 14 gibt die stündlichen Außenlufttemperaturen an der Nord- und Südfassade über den Sommer 2003. Bild 15 enthält Stundenwerte für einen daraus herausgegriffenen Zeitraum 03. bis 17. August, bei dem es sich um die zwei heißesten Wochen des „Extremsommers“ 2003 handelt. Generell wird eine Raumtemperatur im Sommer als angenehm empfunden, wenn sie unter der Außenlufttemperatur liegt. Günstig ist es auch, wenn die Raumtemperatur sowohl zeitlich als auch betragsmäßig möglichst wenig einen Wert von etwas 26°C überschreitet, was angesichts des außergewöhnlich heißen Sommers aber bei den meisten Gebäuden nicht einzuhalten gewesen sein wird.

Tagsüber liegen die Temperaturen in den Wohnungen deutlich unter der Außenlufttemperatur, was als angenehm empfunden wird. Dafür kann die Raumtemperatur nachts nicht der absinkenden Außenlufttemperatur folgen. Dieses Verhalten ist typisch für Massivgebäude und hier deutlich ausgeprägt. Individuelle Unterschiede deuten hier auf die unterschiedliche Nutzung von Sonnenschutzmaßnahmen hin. So weist die Wohnung W2 an den meisten Tagen einen um wenige Grad geringeren Höchstwert der Raumtemperatur als die anderen Wohnungen auf. Eventuell ließe sich bei erhöhter nächtlicher Lüftung der thermische Komfort für die Nutzer weiter verbessern, ist aber so schon als sehr gut zu bezeichnen.

Bild 14

Ausstemperatur Nord und Süd von April bis September 2003

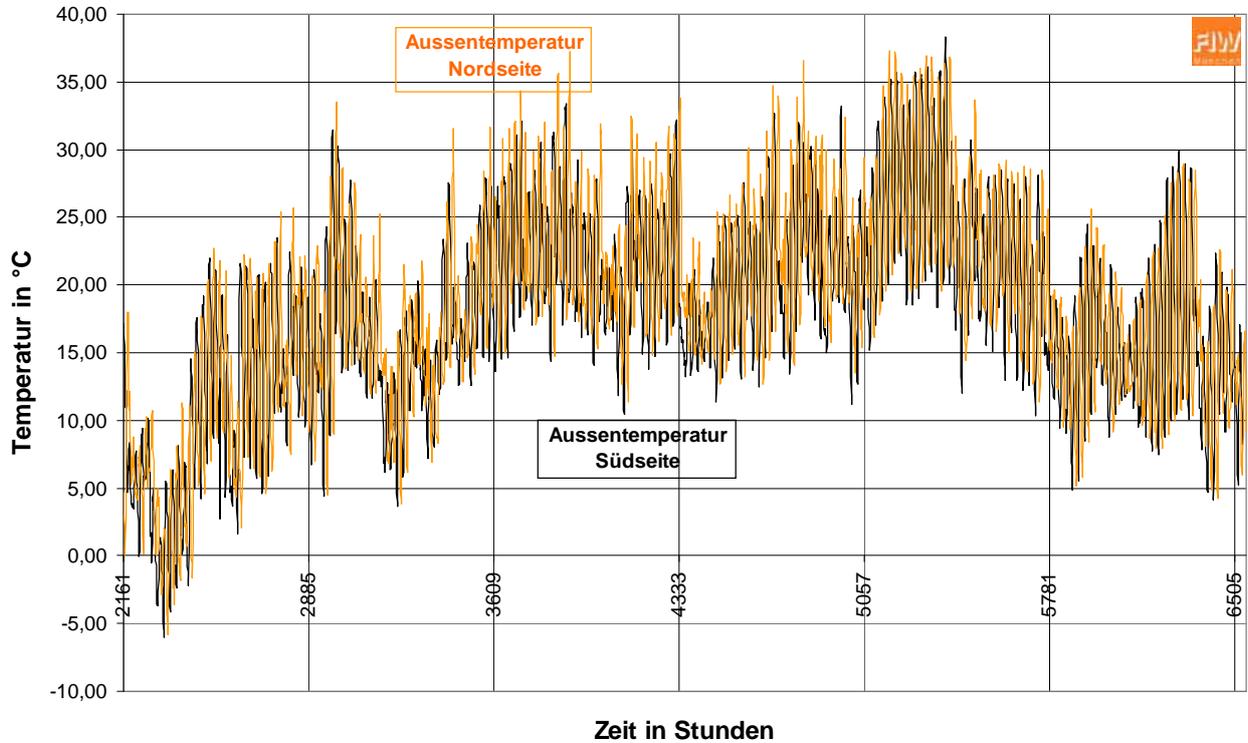
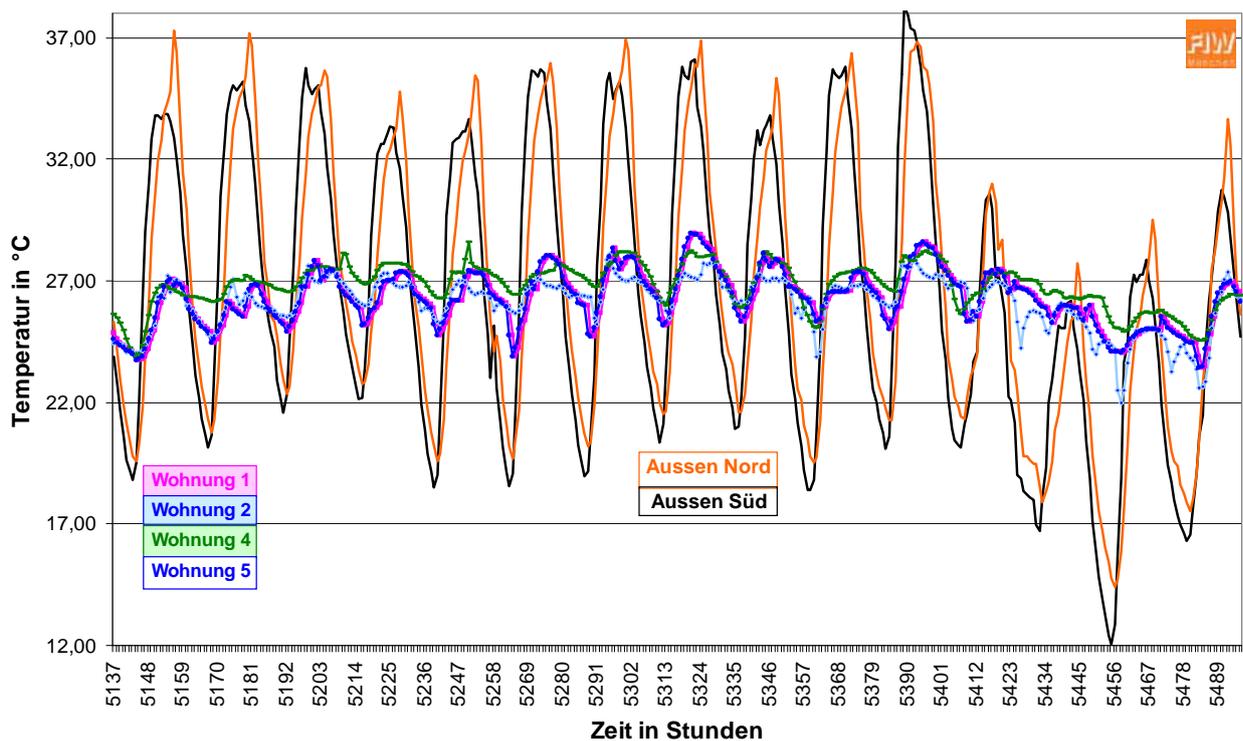


Bild 15

Wohnungs- und Ausstemperaturen von 03.08. bis 17.08.2003



6. Heizungsanlage, Warmwasserverbrauch und Solaranlage

Die Nutzenergien (teilweise inkl. einiger Verlustanteile) für Heizung und Warmwasser sowie die von der Heiz- und der Solaranlage bereitgestellten Energiemengen werden in den folgenden Diagrammen verglichen:

- Bild 16: über 24 Stunden gemittelte, von den Wohnungen W1 bis W6 abgenommene Heizleistung (entspricht dem mittleren Heizenergieverbrauch der Wohnungen pro Stunde über 24 Stunden)
- Bild 17: Gegenüberstellung des Energiebeitrags der Solaranlage und der Energieentnahme durch Warmwasser
- Bild 18: Gegenüberstellung der Energiebeiträge aus der Wärmeerzeugung (Solaranlage bzw. Gaskessel) und der Energieentnahme durch Warmwasser
- Bilder 19 bis 21: Energiebeitrag der Solaranlage pro Woche, pro Tag und pro Stunde für den Zeitraum August 2003 bis April 2004
- Bild 22: tägliche Sonnenscheindauer und erzielte Solarenergiegewinne für eine kalte, sonnenreiche Februarwoche
- Bild 23: Aufteilung der gesamten Energieverluste auf Warmwasser, Beheizung und Speicher- und Leitungsverluste;
- Bild 24: Gegenüberstellung der Gesamt-Energieerzeugung und des Gesamt-Nutzenergieverbrauchs für Beheizung und Warmwasser (d.h. ohne Speicher- und Leitungsverluste).

Bild 16 stellt die durchschnittliche, von den Wohnungen W1 bis W6 abgenommene Heizleistung dar, wobei über jeweils 24 Stunden gemittelt wurde. Die Größe entspricht dem mittleren Heizenergieverbrauch der Wohnungen pro Stunde über 24 Stunden, siehe auch Bilder 1 und 2. Für den Zeitraum Mitte Oktober 2003 bis Ende Februar 2004 wird in Wohnung W4 eine durchschnittliche Heizleistung von knapp 1,5 kW erforderlich, während in der Wohnung W3 etwa 1/5 dieser mittleren Heizleistung reicht. Beide Wohnungen befinden sich im mittleren Stockwerk des Gebäudes.

Bild 17 stellt den energetischen Beitrag der Solaranlage (d.h. den Eintrag aus der Solaranlage in den Speicher) der Energiemenge gegenüber, die insgesamt für Warmwasser aller 6 Wohnungen aus dem Speicher entnommen wurde. Deutlich erkennbar ist der im Winter geringere Beitrag der Solaranlage aufgrund der verminderten Sonnenscheindauer und der geringeren Einstrahlleistung. Dies wird auch in den Bildern 19 bis 21 deutlich. Ebenfalls eingetragen in Bild 17 ist der durchschnittliche Energieverbrauch für Warmwasser aller Wohnungen gemeinsam im betrachteten Zeitraum August 2003 bis April 2004 (274 Tage), nämlich 317 kWh/Woche entsprechend 45,2 kWh/d. Dies entspricht, auf den genannten Zeitraum und die Wohnfläche bezogen, einem Wert von 13,9 kWh/(m² Wohnfläche · 274 d). Betrachtet man nur die Heizperiode nach EnEV

bzw. DIN V 4701-10, nämlich 185 Tage von Oktober bis einschließlich März (zuzüglich 2 Tage), ergeben sich folgende Werte: Energieverbrauch für Warmwasser $9,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ Wohnfläche} \cdot 185 \text{ d})$. Dieser Wert liegt zahlenmäßig etwa $\frac{1}{4}$ unter dem Pauschalwert $12,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ Gebäudenutzfläche} \cdot 185 \text{ d})$, der für EnEV-Berechnungen angesetzt wird. Allerdings wird der Pauschalwert der EnEV für die Gebäudenutzfläche nach EnEV angesetzt, die beim untersuchten Gebäude 1283 m^2 beträgt, während die Gesamtwohnfläche nur 894 m^2 beträgt, d.h. die Diskrepanz zwischen den beiden Ansätzen wird noch größer als es die Zahlenwerte andeuten. Zu berücksichtigen ist beim Vergleich neben dem unterschiedlichen Flächenbezug auch die Größe der hier betrachteten Wohnungen relativ zur Zahl der Bewohner; in etlichen Mehrfamilienhäusern wird man eine höhere Belegungsdichte finden (was pro 1 m^2 Wohnfläche zu einem höheren Energieverbrauch für Warmwasser führen würde).

Für den dargestellten Zeitraum August 2003 bis April 2004 erbringt die Solaranlage 37,1% des Warmwasserenergieverbrauchs. Für die EnEV-Heizperiode (185 Tage; hier: 1. Oktober 2003 bis 02. April 2004) deckt die Solaranlage im Gebäude Jean-Paul-Platz 4 knapp 20% des Energieverbrauchs für Warmwasser; im Rest des erfaßten Jahres (Sommer; hier: 03. April bis 30. September 2003) fast 65 % des Energieverbrauchs für Warmwasser. Zusätzlich zur wünschenswerten, nicht-fossilen Warmwassererzeugung bedeutet dies vor allem für die Sommerzeit, daß aufgrund des Beitrags der Solaranlage der Gaskessel seltener anspringen muß, was energetisch günstig ist. Über ein ganzes Jahr gemittelt (1. Mai 2003 bis 30. April 2004), erbringt die Solaranlage mit 47,1% fast die Hälfte des Energieverbrauchs für Warmwasser. Sie substituiert dabei eine Nutzenergiemenge von 7.500 kWh , die anderweitig über fossile Brennstoffe zu erbringen gewesen wäre. Eine entsprechend größere Kollektorfläche würde erlauben, im Sommer noch einen größeren Anteil des Warmwasserenergieverbrauchs durch die Solaranlage zu erbringen.

In Bild 18 werden einige der Energiemengen nochmals abgetragen. Erkennbar ist der relativ gleichmäßige Energieverbrauch für Warmwasser (tendentiell im Sommer etwas geringer und im Winter etwas höher) und der im Winter zurückgehende Deckungsbeitrag der Solaranlage.

Die Bilder 19 bis 21 verdeutlichen den Energiebeitrag der Solaranlage für den betrachteten Zeitraum noch einmal separat. Bild 22 stellt exemplarisch für einige kalte, überwiegend sonnige Tage in der zweiten Februarhälfte 2004 die tägliche Sonnenscheindauer und die erzielten Solarenergiegewinne (Eintrag in den Speicher) dar. Der höchste tägliche Energiegewinn der Solaranlage in diesem Zeitraum beträgt 33 kWh und im Zeitraum Oktober 2003 bis März 2004 immerhin 48 kWh , siehe Bild 20.

Den Gesamtenergieverbrauch des Objekts Jean-Paul-Platz 4 für den untersuchten Zeitraum gibt Bild 23 wieder. Es handelt sich um die dem Speicher entnommenen Energien für die Beheizung der Wohnungen und für Warmwasser sowie die Verluste des Speichers und der Heizungsverteilung bis zu den Wohnungen („Speicher- und Leitungsverluste“). Würde man in diesem Diagramm die Energiegewinne der Solaranlage von den roten Balken für den Energieverbrauch für Warmwasser abziehen, würden im Jahresdurchschnitt die roten Balken etwas halb so groß sein, gemäß obiger Feststellung von knapp 50% Deckungsbeitrag der Solaranlage zu den Warmwasserenergieverbräuchen. Die Summen der Energieeinträge in den Speicher (Heizanlage; Solaranlage) und der entnommenen Energiemengen (Beheizung der Wohnungen; Warmwasser) sind in Bild 24 nebeneinander abgetragen. Die Differenz zwischen den beiden Balken stellt die Speicher- und Leitungsverluste dar.

Insgesamt ergeben sich aus den gemessenen Verbrauchs- und Erzeugungsdaten für eine Heizperiode gemäß EnEV bzw. DIN V 4701-10 (hier etwa Kalenderwoche 41/2003 bis 14/2004) folgende Anteile: Die Solaranlage liefert 5,7% der verbrauchten Nutzenergiemenge, die Heizanlage die restlichen 94,3%. Von dieser zur Verfügung stehenden Gesamtenergiemenge entfallen gut 29% auf das Warmwasser, 67% auf die Beheizung der Wohnungen und etwa 3,5 bis 4% auf die Speicher- und Leitungsverluste. Über ein ganzes Jahr gemittelt, erbringt die Solaranlage fast die Hälfte der für Warmwasser verbrauchten Nutzenergiemenge.

7. Haftung

Die dargestellten Größen gelten ausschließlich für das untersuchte Gebäude und die dort erfaßten Energieströme und Raumluftparameter. Für die durchgeführten Berechnungen ist der gegenwärtige Stand der Forschung maßgebend. Eine Haftung kann daher nur im Rahmen dieses Kenntnisstandes übernommen werden. Die Gewährleistung beschränkt sich auf die gesetzliche Haftung von 5 Jahren entsprechend den Verjährungsbestimmungen nach § 634a BGB für Bauwerke. Es gelten die allgemeinen Geschäftsbedingungen des FIW München. Eine auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichts ist nur mit schriftlicher Zustimmung des Forschungsinstituts gestattet.

Gräfelfing, im März 2005

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München

gez. Dr.-Ing. Martin H. Spitzner

gez. Dipl.-Ing. (FH) Renate Hirmer

Bild 16 Wohnung 1 bis 6
mittlere Heizleistung über jeweils 24 Stunden von August 2003 bis April 2004

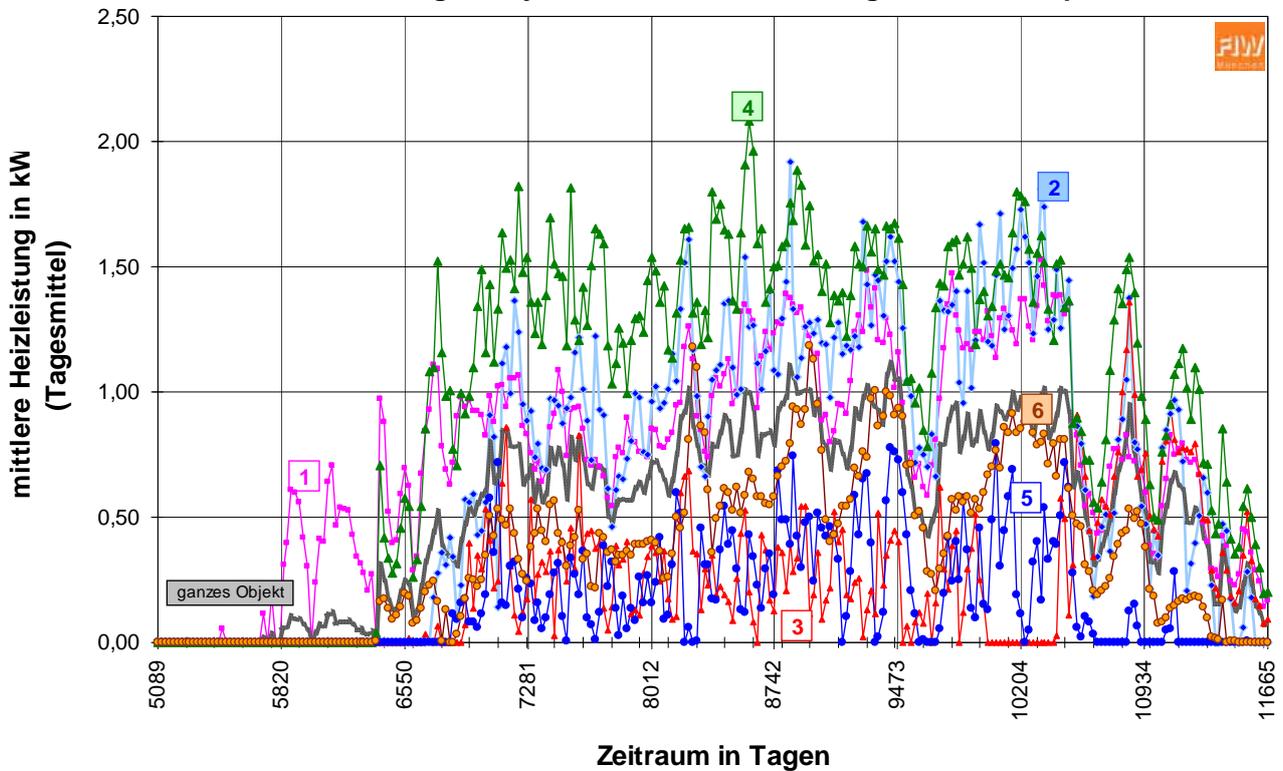


Bild 17 Energiebeitrag der Solaranlage und Energieverbrauch für Warmwasser
von August 2003 bis April 2004

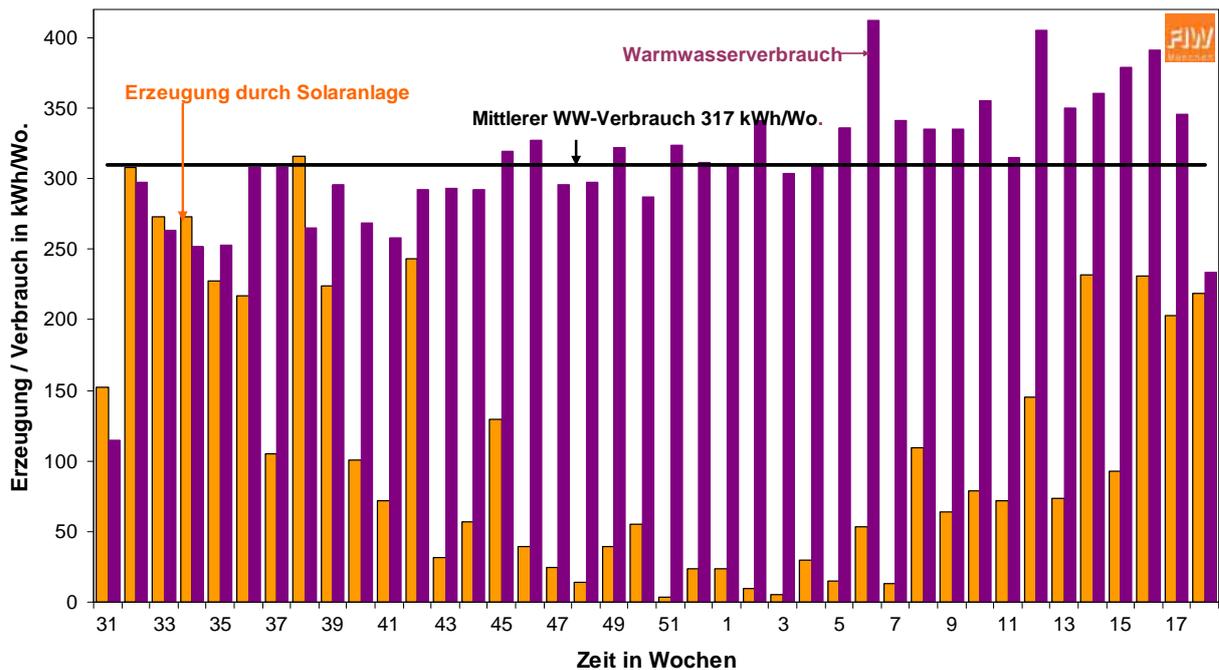


Bild 18

Solaranlage (Zähler 7), Heizung (Zähler 8) und Warmwasser (Zähler 9)
 Tagessummen von August 2003 bis April 2004

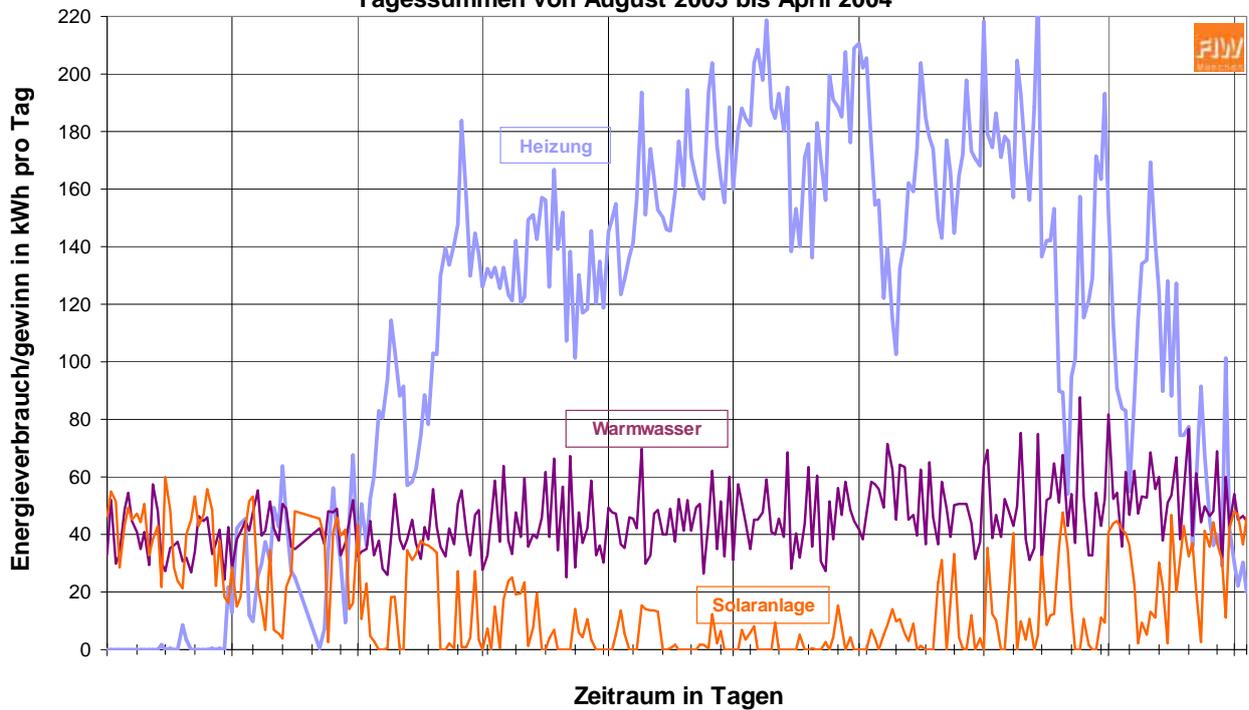


Bild 19

Solare Energie
 pro Woche von August 2003 bis April 2004

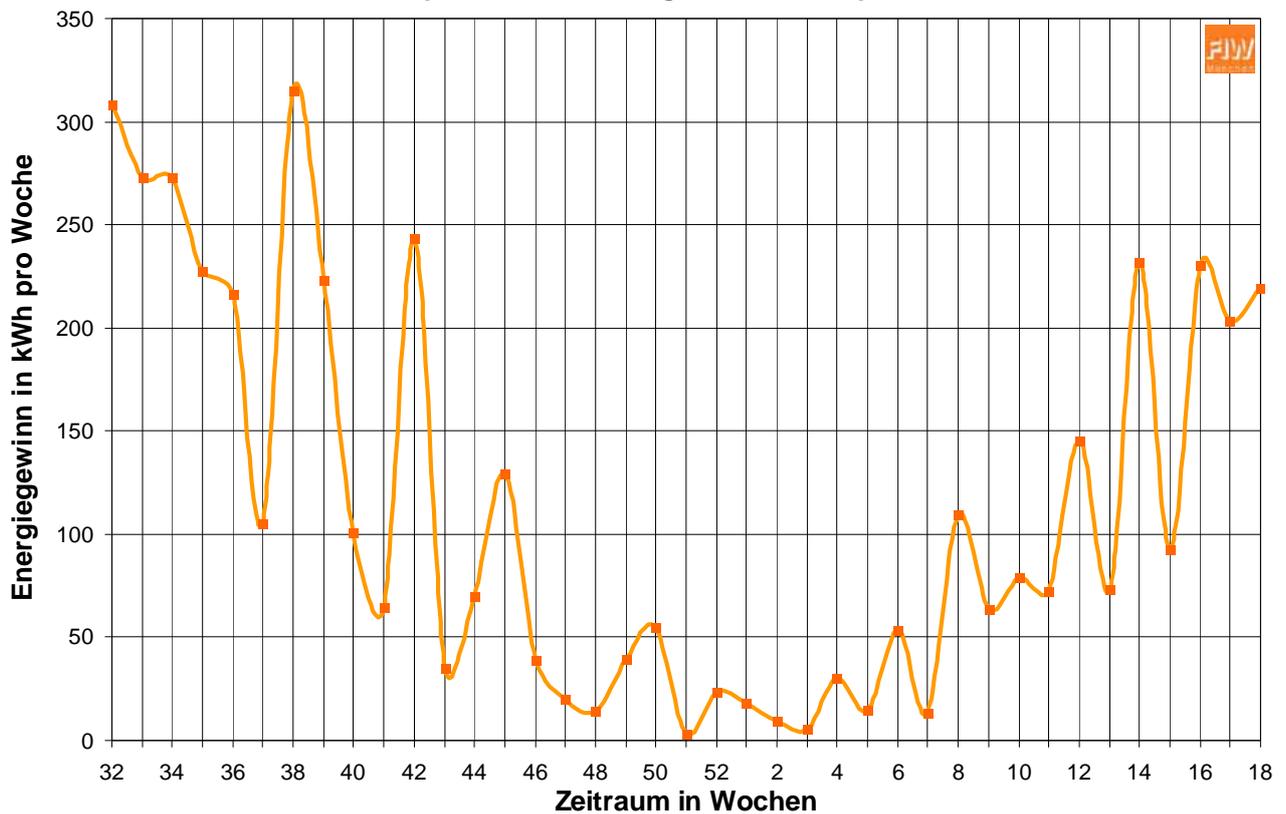


Bild 20

Beitrag der Solaranlage
Tagessummen von August 2003 bis April 2004

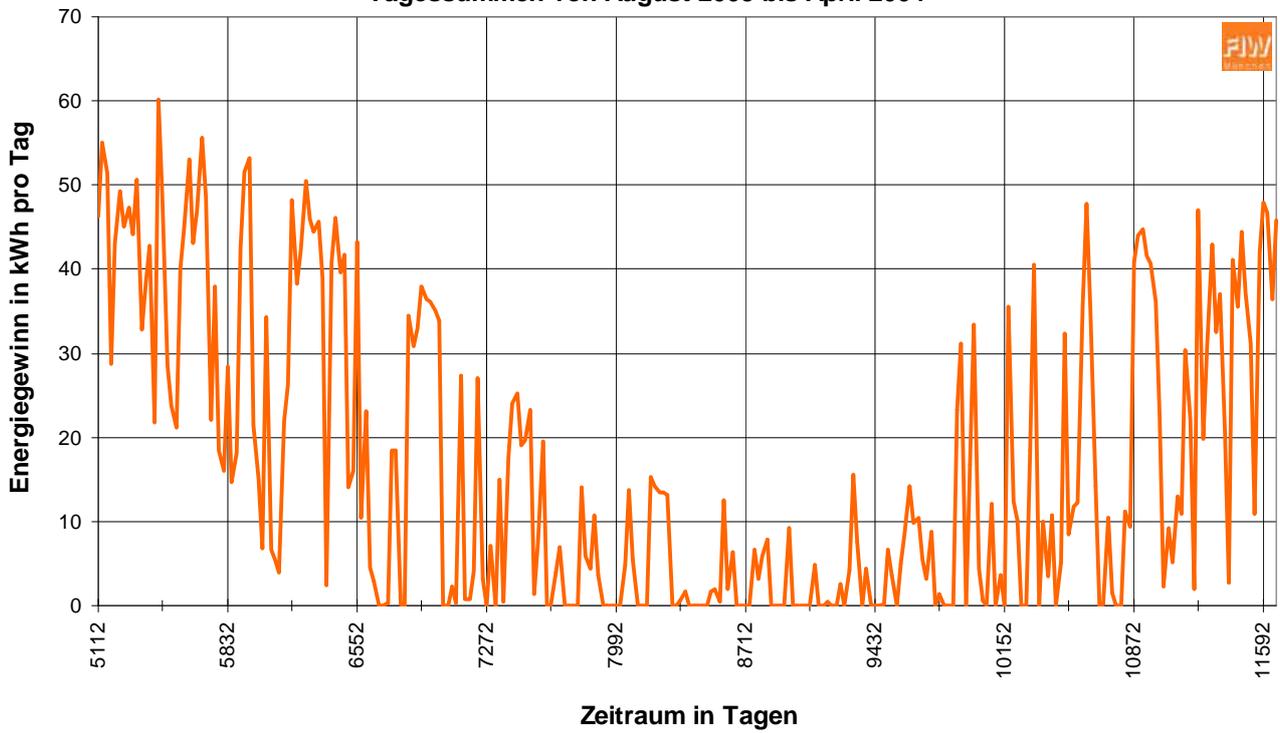


Bild 21

Beitrag der Solaranlage
pro Stunde von August 2003 bis April 2004

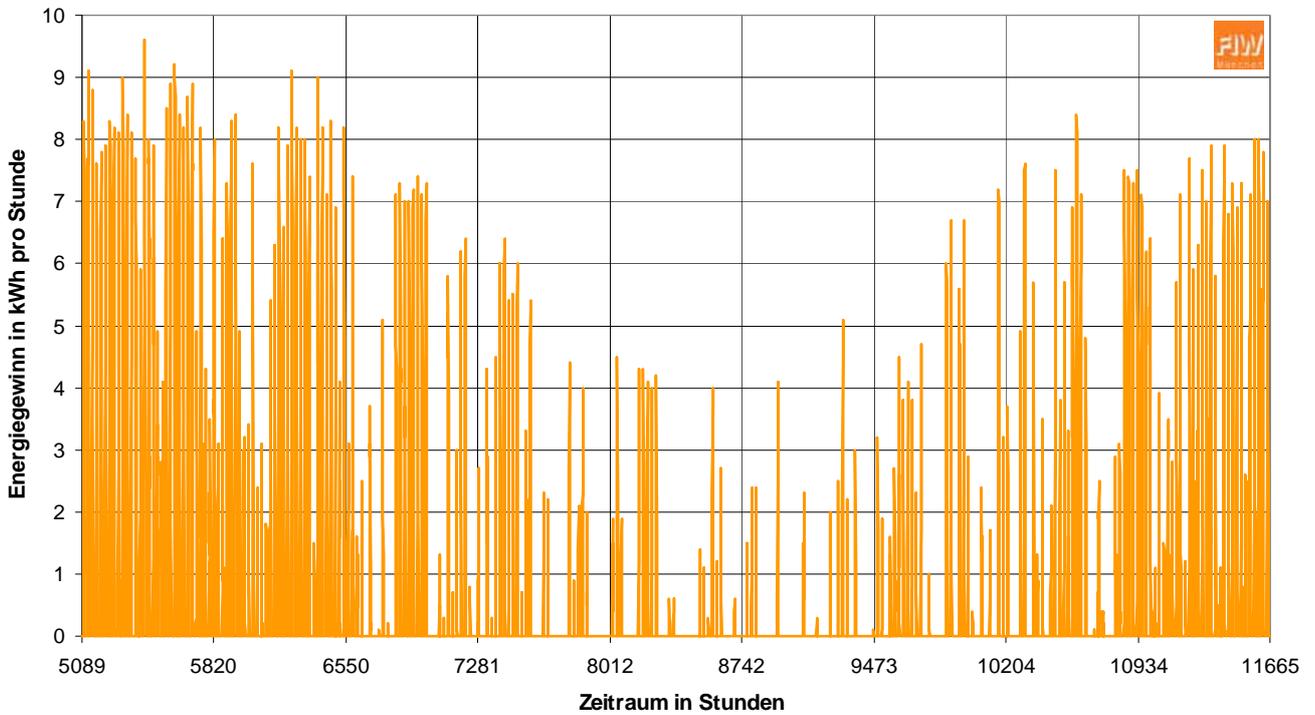


Bild 22

Solarer Energiebeitrag und Sonnenscheindauer
Woche vom 15. bis 22. Februar 2004

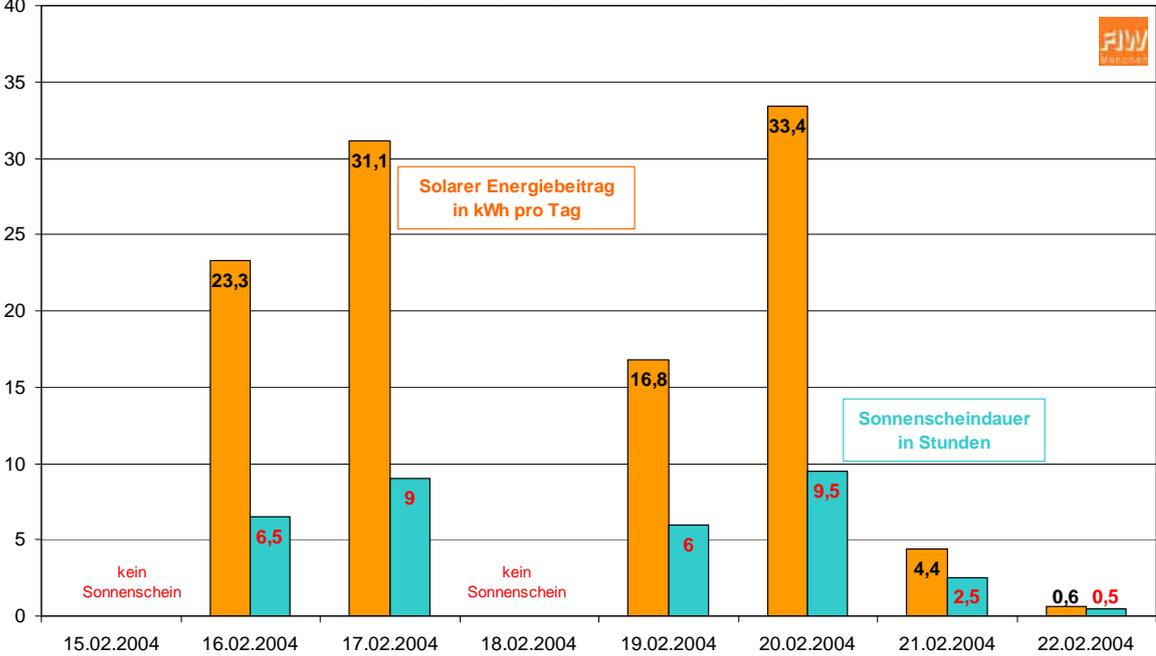


Bild 23 Energie-Gesamtverbrauch durch WW und Heizung und Speicher- + Leitungsverluste von August 2003 bis April 2004

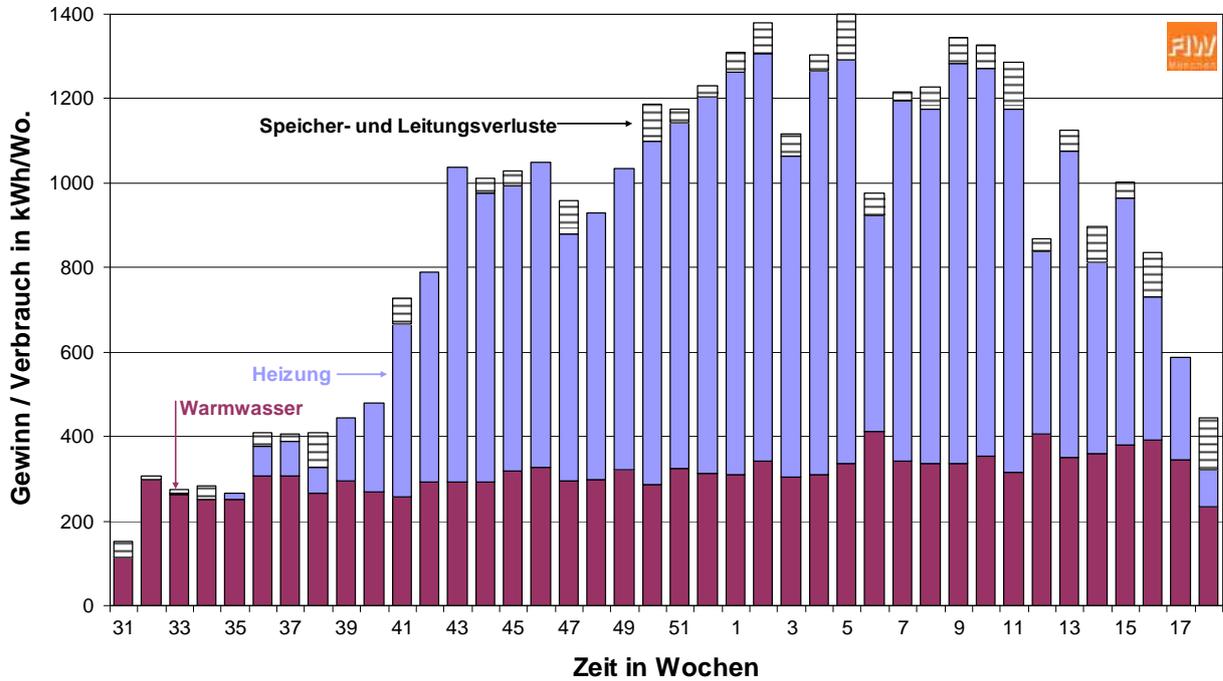


Bild 24

Energie-Erzeugung durch Solar- und Heizanlage und Energie-Verbrauch durch WW und Heizung i.d. Wohnungen von August 2003 bis April 2004

