



CEPHEUS - gefördertes Projekt:
EUROPÄISCHE KOMMISSION
THERMIE
Projekt-Nummer: BU/0127/97

**Passiv
Haus
Institut**
Dr. Wolfgang Feist

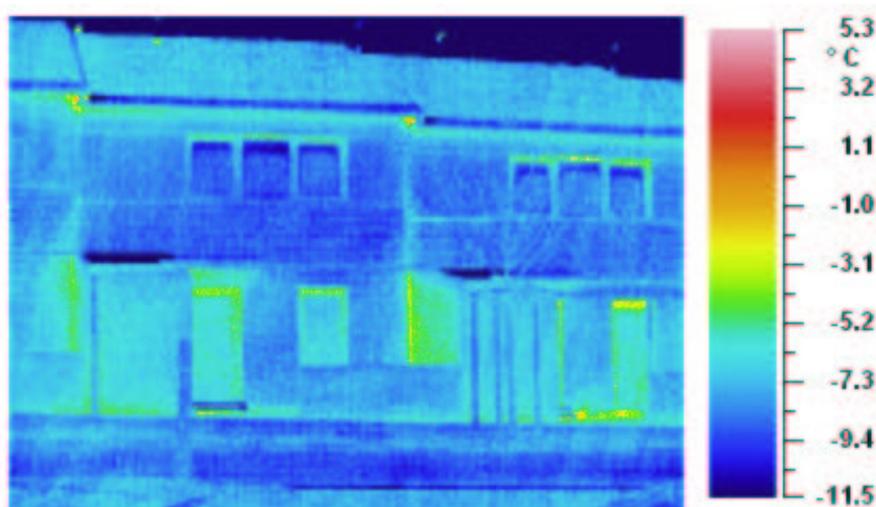


CEPHEUS-Projektinformation Nr. 20



Thermographische Untersuchung der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg

Wissenschaftliche Auswertung



enercity[®]
positive energie

Im Auftrag der Stadtwerke Hannover AG



CEPHEUS - gefördertes Projekt:
EUROPÄISCHE KOMMISSION
DIRECTORATE-GENERAL XVII, ENERGY
THERMIE
Projekt-Nummer: **BU/0127/97**

**Passiv
Haus
Institut**
Dr. Wolfgang Feist



CEPHEUS-Projektinformation Nr. 20



Thermographische Untersuchung der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg

Wissenschaftliche Auswertung

Autoren:

Søren Peper
Dr. Wolfgang Feist
unter Mithilfe von: Wiebke Wenzel

**Thermographische Aufnahmen und
Fotos:** Prof. W. Zapke und A. Bethe (FH
Hannover / FB Bauingenieurwesen)

Auftragnehmer:

PASSIVHAUS INSTITUT
Dr. Wolfgang Feist
Rheinstraße 44/46
64283 Darmstadt
E-Mail: Passivhaus@t-online.de
www.passiv.de

Hannover 2001

**Dieser Bericht entstand im Auftrag der
Stadtwerke Hannover AG. Dieser
Auftrag war Teil des im Thermie
Programm geförderten europäischen
Forschungsprojekts CEPHEUS - Cost
Efficient Passive Houses as European
Standards.**

Bezug:

Stadtwerke Hannover AG
Herr von Oesen
Glockseestraße 33
30169 Hannover
Fax: +49 (0)5 11 43 09 41 33 20
E-Mail: matthias.vonoesen@enercity.de

Inhaltsverzeichnis

1	Thermographische Untersuchung	3
	1.2 Meßgeräte	4
2	Infrarotthermographie.....	4
3	Auswertung	5
	3.1 Außenthmographie	6
	3.1.1 Regelfall	7
	3.1.2 Festgestellte Schwachstellen.....	14
	3.1.3 Geöffnete Fenster.....	18
	3.2 Innenthmographie.....	18
	3.2.1 Innenthmographie ohne Blower Door.....	19
	3.2.2 Innenthmographie mit Blower Door.....	29
4	Zusammenfassung.....	32
5	Literaturverzeichnis	34
6	Anhang: Thermographie-Bilder.....	35

1 Thermographische Untersuchung

Die Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg (Sticksfeld 30 bis 124) mit insgesamt 32 Reihenhäusern in vier Hauszeilen je 8 Häuser wurde mit Hilfe der Infrarotthermographie im Auftrag der Stadtwerke Hannover AG untersucht. Die Siedlung ist vom Bauträger Rasch & Partner (Architektin P. Grenz) 1998/1999 errichtet worden und seit Ende 1998/Mitte 1999 bewohnt.

Die Untersuchung zur Schwachstellenanalyse und wissenschaftlichen Analyse der Bauteileigenschaften wurde am 15. Februar 2001 in Zusammenarbeit zwischen der Fachhochschule Hannover / FB Bauingenieurwesen und dem Passivhaus Institut (PHI) durchgeführt. Die Aufnahmen wurden von Prof. W. Zapke und Dipl.-Ing. Bethe (beide Fachhochschule Hannover) durchgeführt. Die Gebäudevorbereitung, Ablaufkoordination, Bestimmung der zu untersuchenden Details und die Messung der Referenztemperaturen wurden vom PHI durchgeführt.



Abb. 1: Südfassade einer Hauszeile (Ausschnitt) der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg.

Zur Vermeidung von Einflüssen durch Solarstrahlung wurden die IR-Außenaufnahmen vor Sonnenaufgang (Meßbeginn ca. 5:00 Uhr) durchgeführt. Zuerst wurde die gesamte Siedlung von außen untersucht und danach exemplarisch ein Haus von innen. Die gesamte Untersuchung vor Ort dauerte ca. bis 11:30 Uhr. Da die Siedlung durch das PHI auch für mindestens zwei Heizperioden meßtechnisch begleitet wird, konnten die für jedes Haus vorliegenden Meßdaten der Innentemperaturen sowie der Außentemperatur verwendet werden.

1.2 Meßgeräte

Für die Untersuchung wurden die folgenden Meßgeräte eingesetzt:

Infrarotkamera:	Kameratyp:	TVS 600 Neo Thermo,
	Temperaturbereich:	-20 °C bis 300 °C
	Thermische Auflösung:	< 0,1 °C
	spektrale Empfindlichkeit Langwelle:	8 µm bis 14 µm

Digitalkamera zur Aufzeichnung der Realbilder

Temperaturmeßgerät zur Messung der Referenzoberflächentemperaturen
ALMEMO 2290-8 mit Pt100-Folienfühler Typ P 685.

2 Infrarotthermographie

Zur allgemeinen Erläuterung der Funktion und Möglichkeit einer Infrarotuntersuchung wird der folgende Abschnitt erklärend vorangestellt. (Überarbeitung aus [Schnieders 1998]).

Damit der Wärmestrom, der aus dem Innern eines Gebäudes durch ein Bauteil nach außen fließt, den Wärmeübergangswiderstand auf der Außenseite des Bauteils überwinden kann, ist eine Temperaturdifferenz zwischen Bauteiloberfläche und Außenluft erforderlich. Daher unterscheidet sich die Oberflächentemperatur des Bauteils von der Temperatur der Außenluft. Ist an verschiedenen Stellen auf der Außenhülle eines Gebäudes der Wärmeübergangswiderstand gleich groß, so ist die Oberflächentemperatur ein Maß für den am jeweiligen Ort aus der Gebäudehülle austretenden Wärmestrom. Entsprechendes gilt selbstverständlich mit umgekehrtem Vorzeichen für die Oberflächentemperaturen auf der Innenseite der Gebäudehülle.

Auch etwa vorhandene Leckagen in der Gebäudehülle wirken sich in ihrer Umgebung auf die Oberflächentemperaturen aus. Wo warme Raumluft aus dem Gebäude austritt, werden die umgebenden Flächen erwärmt. Hohe Oberflächentemperaturen auf der Außenseite des Gebäudes deuten daher auf Leckagen hin und zwar insbesondere im oberen Bereich eines Gebäudes, wo durch thermischen Antrieb die warme Raumluft entweicht. Entsprechend zeigen sehr niedrige Oberflächentemperaturen im Gebäudeinnern eindringende Außenluft an.

Thermographie ist ein Verfahren, mit dem auf einfache Weise die Oberflächentemperaturen von Gegenständen visualisiert werden können¹. Dazu wird ausgenutzt, daß Oberflächen Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung) emittieren, wobei die Intensität und Wellenlänge dieser Strahlung sich mit der Temperatur der Oberfläche ändert. Die Strahlung wird mit Hilfe spezieller Kameras ähnlich wie bei Videoaufnahmen aufgezeichnet. Durch Auswertung der aus einer bestimmten Richtung in die Kamera einfallenden Infrarotstrahlung kann damit näherungsweise die Temperatur der in dieser Richtung gelegenen Oberfläche ermittelt werden. Anschließend werden ver-

¹ Genaugenommen wird die langwellige thermische Strahlung gemessen, die von der Oberfläche ausgeht. Ein Maß für die Oberflächentemperaturen ist dies dann, wenn keine bedeutende Reflexion vorliegt und wenn der Emissionsgrad der Bauteiloberflächen gleich ist.

schiedene Strahlungsintensitäten in verschiedene Farben umgesetzt. Mit der resultierenden thermographischen Aufnahme, auch Thermobild genannt, erhält man eine gute Übersicht über die Temperaturverteilung auf der Oberfläche des aufgenommenen Objekts.

Bei der Interpretation von Thermobildern sind jedoch prinzipbedingt einige Punkte zu beachten:

- Die von einer Oberfläche emittierte Wärmestrahlung hängt im allgemeinen außer von der Temperatur noch von dem Emissionsgrad ε ab. Verschiedene Oberflächen gleicher Temperatur erscheinen daher im Thermobild unter Umständen unterschiedlich warm. Für die meisten bauüblichen Materialien ist glücklicherweise $\varepsilon \approx 0,93$, so daß ihre Farben im Thermobild unmittelbar vergleichbar sind. Für gewöhnliches Floatglas hingegen liegt ε zwischen 0,8 und 0,9, infrarotreflektierend beschichtete Scheiben erreichen $\varepsilon \approx 0,1$. Ein Emissionsgrad in dieser Größenordnung tritt auch bei blanken Metalloberflächen auf.
- Der Emissionsgrad ist selbst eine temperaturabhängige Größe, bei Thermographieaufnahmen im betrachteten Temperaturbereich ist diese Abhängigkeit jedoch vernachlässigbar.
- Ähnlich wie sichtbares Licht wird Infrarotstrahlung von Oberflächen mit niedrigem Emissionsgrad reflektiert. Spiegelt sich etwa die Sonne oder der kalte Himmel in einer Glasscheibe, kann dies zu Fehlinterpretationen verleiten.
- Wenn Oberflächen unter flachen Winkeln aufgenommen werden (Winkel gegen die Flächennormale über 60°), kann es zu Fehldarstellungen kommen, da die emittierte Infrarotstrahlung sich winkelabhängig verändert.
- Der Wärmeübergangswiderstand auf der Oberfläche eines Bauteils wird größer, wenn die Luftgeschwindigkeit an der Oberfläche sinkt, z.B. in einer Kante. Daraus resultieren dann größere Temperaturdifferenzen zwischen der Oberfläche und der umgebenden Luft, die aber nicht unbedingt auf erhöhte Wärmeverluste in diesem Bereich schließen lassen.
- Die in den Aufnahmen sichtbaren Farben ergeben sich aus der Umsetzung der gemessenen Infrarotstrahlung in den sichtbaren Bereich. Je nach gewähltem Meßbereich entspricht eine bestimmte Farbe unterschiedlichen Temperaturen; ein Vergleich von Thermobildern ist daher nur dann unmittelbar möglich, wenn die Meßbereiche übereinstimmen.

3 Auswertung

Die mit der IR-Kamera aufgenommenen Bilder sind für den Abdruck in diesem Bericht mit einer speziell für diesen Zweck im PHI erstellten Software in Schwarz-Weiß-Bilder umgewandelt worden. Der Skala ist zu entnehmen, daß für die **Außen**thermographie **dunkle Töne** den **höheren** Temperaturen entsprechen. Bei den **Innen**thermographien ist es genau umgekehrt: die **helleren Töne** entsprechen den **höheren** Temperaturen.

Die Auswertung gliedert sich in die Bereiche der Außen- und der Innenthermographie.

3.1 Außenthermographie

Die Außenlufttemperaturen im Zeitraum der Außenthermographie (ca. 5:00 bis 8:00 Uhr) lagen bei $-1,5$ bis $-3,7$ °C, also ausreichend gute Voraussetzungen für kontrastreiche IR-Außenaufnahmen. Die gemessene relative Luftfeuchte lag im Untersuchungszeitraum bei 97,5 %. Die Oberflächentemperaturen wurden auf der Außenfassade und auf der Fensterscheibe mit Hilfe von in Folie eingebetteten PT100-Meßwiderständen gemessen. Für die thermische Ankopplung dieser Sensoren an die Außenfassade (Holz) wurden diese vorher mit Wärmeleitpaste bestrichen. Zum Angleichen des Emissionskoeffizienten der Oberflächen wurden die Sensoren nach dem Aufbringen mit Kreppband überklebt. Mit Hilfe der auf diese Weise gemessenen Oberflächentemperaturen und dem Signal der IR-Kamera für die entsprechenden Bildbereiche konnten die Emissionskoeffizienten der jeweiligen Gebäudeoberflächen bestimmt werden. Damit war ein sehr genauer Abgleich der Temperaturskala der IR-Aufnahmen möglich.

Es ist insbesondere zu beachten, daß es sich bei allen Fassadenflächen (mit Ausnahme der Giebelwände und des EG Bereichs auf der Südseite) um hinterlüftete Fassaden handelt (vergl. Abb. 2). Die äußeren Oberflächentemperaturen lassen also **keine direkten Aussagen** auf dahinterliegende Wärmebrücken oder Leckagen zu.

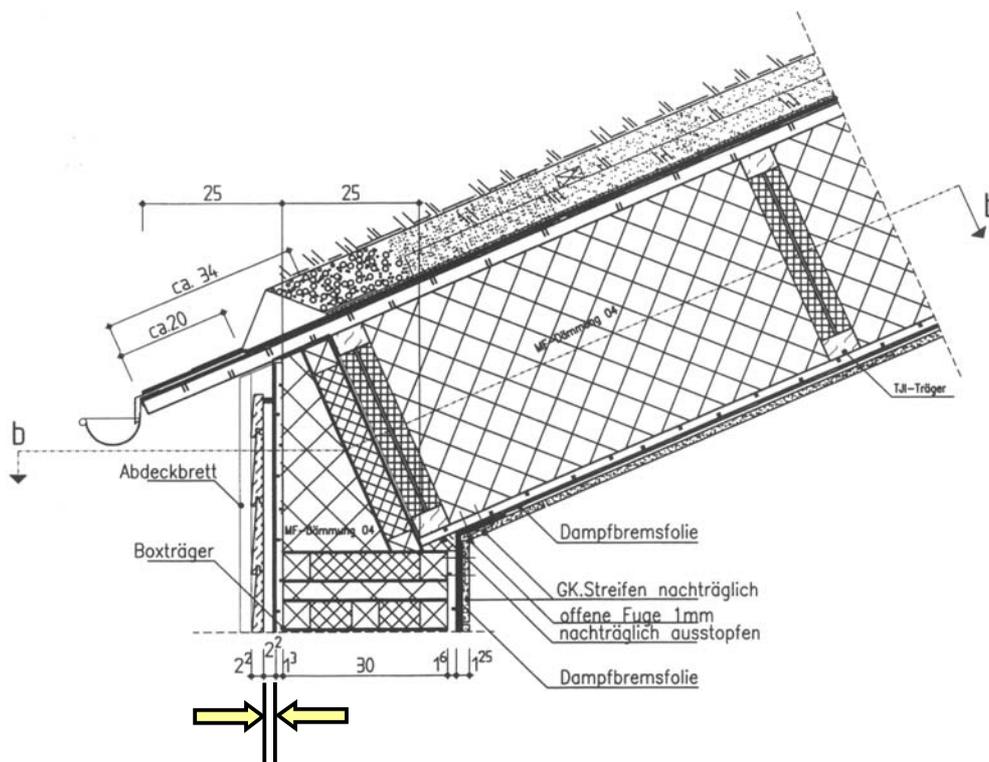


Abb. 2: Hinterlüftete Außenfassaden der Häuser (Die Pfeile deuten die Spaltbreite an) (Quelle: Rasch und Partner)

Außenthermographische Aufnahmen wurden von der gesamten Siedlung, also von allen Fassadenflächen der 4 Zeilen sowie von den zwei Heizzentralen angefertigt. Die Südfassade von Reihe 14 konnte allerdings nur eingeschränkt untersucht werden, da aufkommender Nebel die Untersuchungsergebnisse verfälschte. Es sind insgesamt 94 IR-Außenaufnahmen abgespeichert worden, die für die Auswertung zur Verfügung standen.

3.1.1 Regelfall

Bei der Untersuchung der Außenflächen wurden im Regelfall keine größeren Schwachstellen festgestellt. Insbesondere die Bereiche mit Wärmedämmverbundsystem (Giebelwände, Südseite EG und die Sockelbereiche), bei denen sich direkte Aussagen zur Wärmebrückenfreiheit machen lassen, zeigen so gut wie keine Auffälligkeiten. Abb. 3 zeigt die Bereiche, von denen für den Regelfall IR-Bilder im Anhang abgebildet sind.

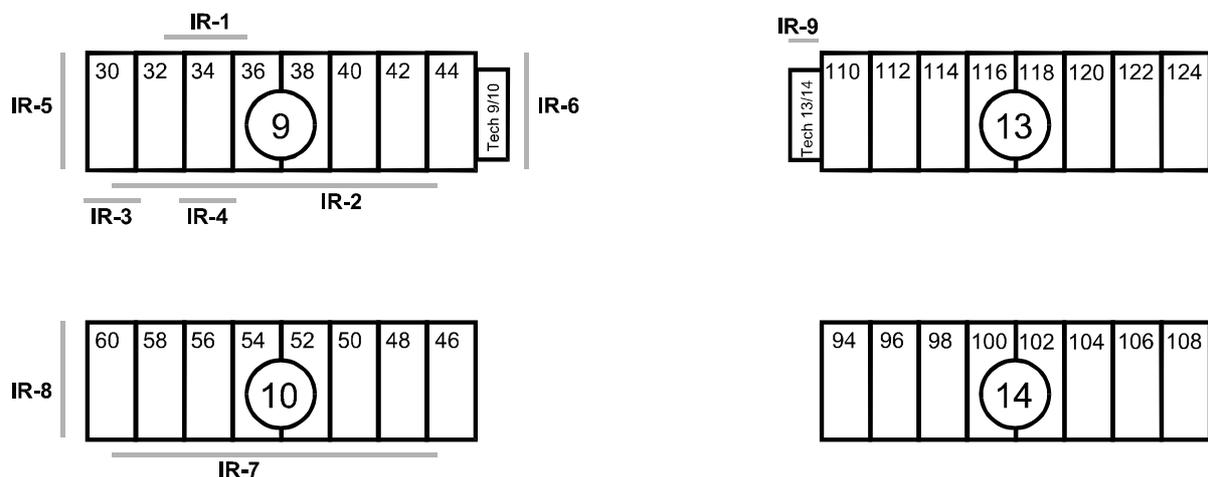


Abb. 3: Bereich/Lage der im Anhang dargestellten IR-Bilder (jeweilige Nummer ist angegeben) zur Außenthermographie ohne nennenswerte Schwachstellen (Regelfall).

IR-Bild 1 (Reihe 9: Haus 32 - 36)

Insgesamt zeigt das Bild gleichmäßige Oberflächentemperaturen um $-4,5\text{ °C}$ der Fassade. Auf dem Bild ist im Bereich der Haustür ein wärmerer Bereich zu erkennen. Dieser hat seine Ursache im Glasvordach, welches sich über der Eingangstür befindet und den Bereich gegenüber Abstrahlung in den nächtlich kalten Himmel „abschattet“. Dadurch kühlt sich die Fassade dort nicht so stark ab wie im rechten Bereich um das Fenster. Unterhalb der Traufe ist die Fassade auch ein Stück weit gegenüber dem Himmel verschattet und zusätzlich tritt dort die hinter der Fassade leicht erwärmte Luft aus der Hinterlüftung aus. Daher ergeben sich dort ebenfalls leicht höhere Temperaturen (dunkler).

Die leicht erhöhten Temperaturen im Bereich der beiden Haustrennfugen (ca. -2 °C) und die kleinen punktförmigen Bereiche am oberen Ende der Fugen (ca. $+3\text{ °C}$) deuten auf die geringen - zuvor auch berechneten - Wärmebrücken im Anschlußbereich hin. Für die Haustrennfugen sind zu berücksichtigende Wärmebrücken-

koeffizienten von $\psi = 0,016 \text{ W}/(\text{mK})$ errechnet worden [Baffia 1999]. Die punktförmigen $+3 \text{ }^\circ\text{C}$ Bereiche haben ihre Ursache vermutlich in aufsteigenden Warmluftströmen in den Haustrennfugen, die oben austreten.

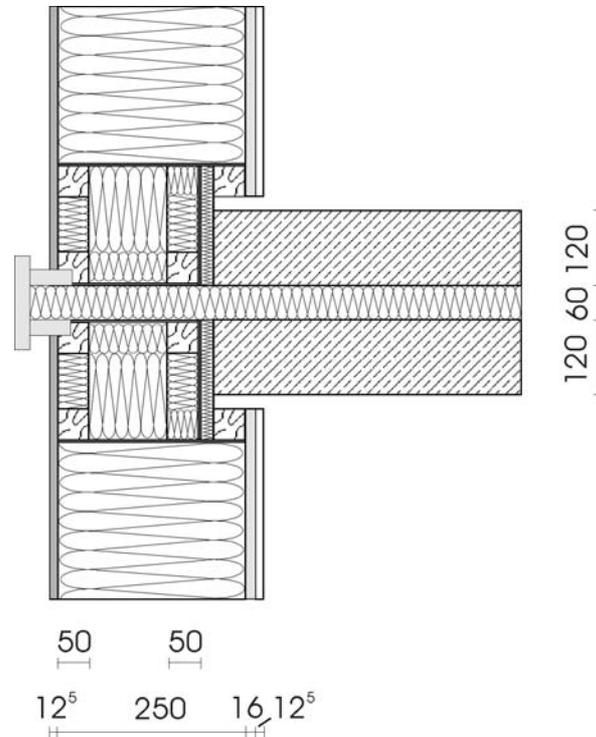


Abb. 4: Bereich der Haustrennfuge im Schnitt (Quelle [Baffia 99]).

Der Dachbereich (begrünt), der Betonvorbau (Abstellhaus) mit Abdichtung zur Fassade, die Regenrinne und die Verglasungsflächen lassen sich **nicht** direkt mit der angegebenen Temperaturskala **vergleichen**, da es sich um Materialien mit gegenüber der Fassade differierenden Emissionsfaktoren handelt.

IR-Bild 2 (Reihe 9 Gartenseite)

Der Überblick über die Südseite von Reihe 9 zeigt keine Auffälligkeiten. Deutlich zu erkennen sind der vorgestellte Balkon von Haus 36 sowie die metallischen Dachablaufrohre (senkrecht) an Haus 30 und 36. Auf den Fensterrahmen liegt erwartungsgemäß im oberen Bereich eine leicht erhöhte Temperatur vor.

IR-Bild 3 und 4 (Reihe 9 Südseiten, Haus 30 und Haus 34)

Die IR-Aufnahme des Hauses ist aus zwei Aufnahmen zusammengesetzt. Deutlich zu erkennen sind die Geländer vor den OG-Fenstern sowie die Dachrinne und das Dachablaufrohr (Metalloberflächen). Die Holzterrasse verschattet das darunterliegende Erdreich, wodurch die stellenweise erhöhte Erdreichtemperatur bedingt ist. Die Fassadefläche hat im EG und im OG Bereich etwa die gleiche Temperatur ($-3,5 \text{ }^\circ\text{C}$). Daran zeigt sich die gute Qualität des Wärmedämmverbundsystems (nicht hinterlüftet!) im EG-Bereich. Die beiden waagerechten und der eine senkrechte Balken sind die Bereiche, an denen Oberflächentemperaturprofile bestimmt wurden. Diese sind weiter unten abgebildet und ausgewertet worden.

Auffällig sind die Unterschiede in der Fensteroberflächentemperatur: Insbesondere erscheinen die OG- und die EG-Fenster völlig anders im Bild. Die Ursache für diesen Effekt ist in der Reflexion von kalter Gegenstrahlung an den Scheiben zu finden. Da dieser Effekt interessant für die Interpretation von IR-Aufnahmen ist, werden die zugrundeliegenden Prinzipien genauer erklärt:

Die äußeren Oberflächentemperaturen der Verglasungen sind im Kernbereich ("Center of glass") niedriger als am Rand: Dies hat seine Ursache in der Wärmebrücke, die durch den Randverbund gebildet wird - auch wenn, wie in diesem Fall, ein Kunststoff-Randverbund verwendet wurde. Am höchsten ist die Oberflächentemperatur am oberen Rand der Verglasung, weil hier auch noch der Wärmetransport durch die Konvektionswalze im Scheibenzwischenraum dazu kommt. Die Temperaturzunahme zum Rand hin ist auch bei den Fenstern im EG gut erkennbar (vgl. das Temperaturprofil in Abb. 5). Die Folge der niedrigen Oberflächentemperaturen im Zentralbereich der Verglasung ist, daß bei den hier gegebenen Wetterbedingungen die Verglasungen in diesem Bereich auf der Außenoberfläche betauen. Allein der Randstreifen entlang der Grenze zum Rahmen ist wegen der dort höheren Temperatur nicht betaut.

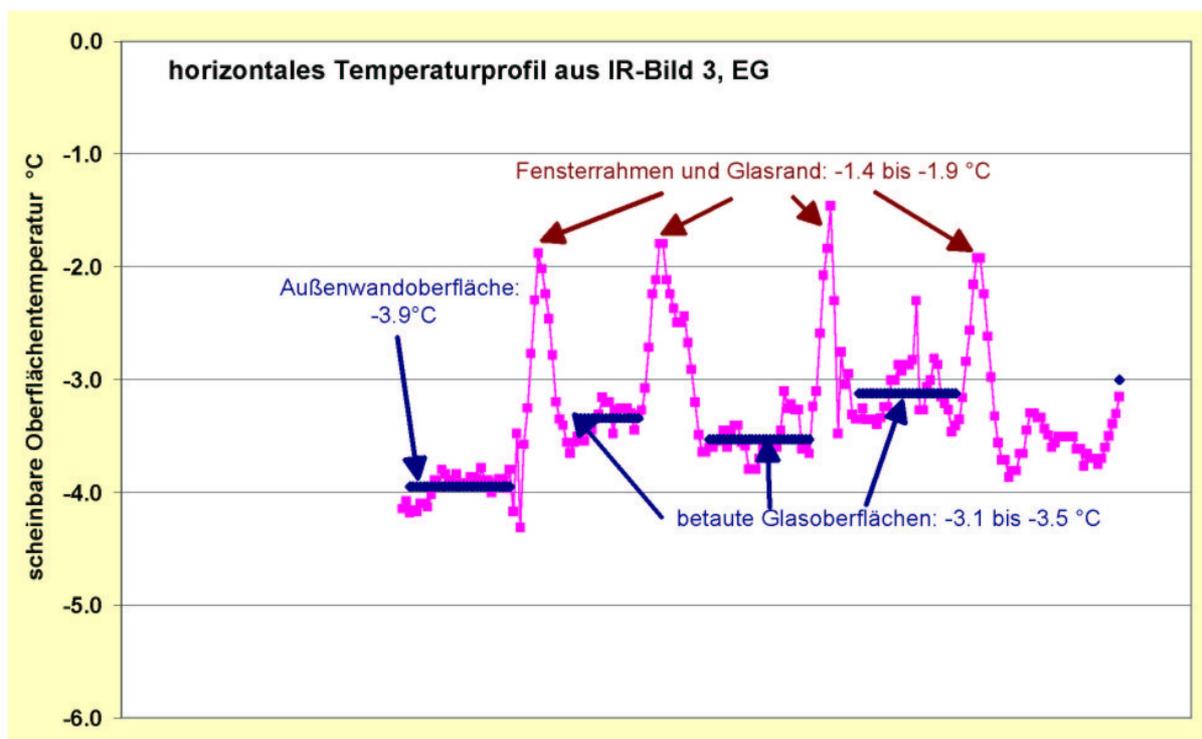


Abb. 5: Temperaturprofil horizontal im Erdgeschoß von IR-Bild 3, 40 cm unterhalb der Oberkante der Fenster.

Vom physikalischen Temperaturverlauf der Oberflächentemperatur her ist dies bei den Fenstern im Obergeschoß genauso: Auch diese sind objektiv im Zentralbereich kälter und hier betaut, im Randbereich und insbesondere im oberen Randbereich wärmer und dort tauwasserfrei. In der unteren Hälfte der OG-Fenster in IR-Bild 4 ist dieser Temperaturverlauf auch so erkennbar. Im oberen unbetauten Bereich er-

scheint die Verglasung nun aber entgegen der objektiven Verhältnisse in der Thermographie heller und somit kälter; wie erklärt sich das?

Steht der Betrachter ebenerdig und blickt auf die **OG-Verglasung**, so spiegelt sich ab einem bestimmten Blickwinkel der Himmel im nicht mehr betauten oberen Bereich. Dieser erscheint dadurch heller, weil die atmosphärische Gegenstrahlung zu einer sehr niedrigen Strahlungstemperatur gehört (siehe Abb. 6). Da der nicht betaute Bereich die Form eines umgedrehten "U" hat, wird dieses jetzt sehr auffällig sichtbar. Die Untergrenze der gerichteten Himmels-Reflexstrahlung markiert das Spiegelbild des Dachfirstes der hinter dem Betrachter stehenden Bebauung.

Im betautem Bereich im OG-Fenster ist die Spiegelung der Gegenstrahlung diffus und der Reflexionsgrad geringer; dieser Bereich erscheint damit dunkler. Bei den EG-Fenstern ist der Randbereich ebenfalls nicht betaut, aber aufgrund des Blickwinkels spiegelt sich nicht der Himmel, sondern die gegenüberliegende Hauszeile.

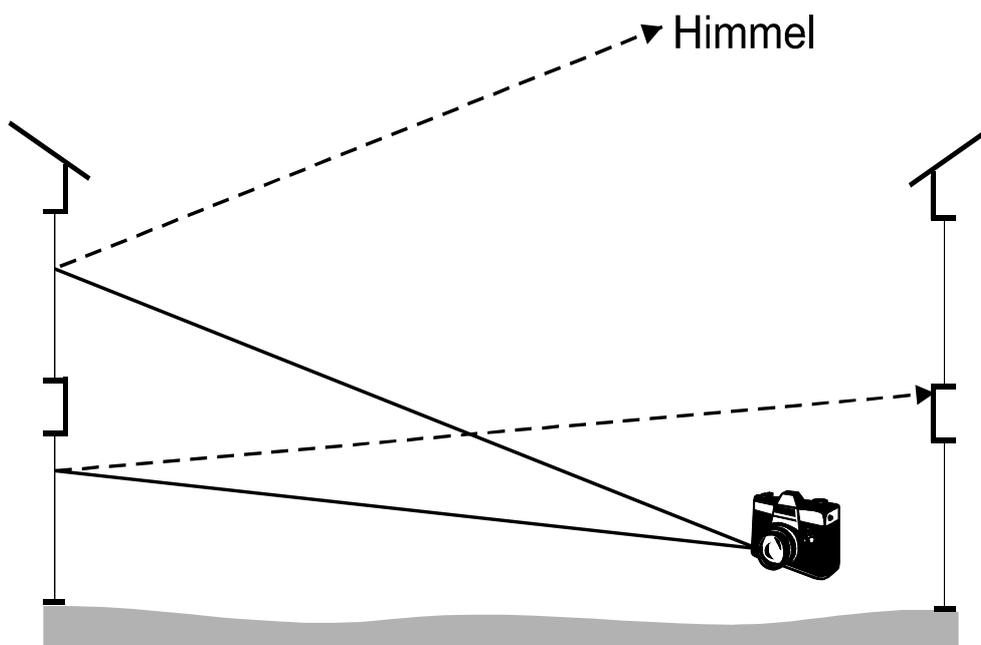


Abb. 6: Reflexionen auf den EG- und OG-Scheiben. Je nach Blickwinkel spiegelt sich der Himmel oder die gegenüberliegende Hauszeile (bzw. andere Verschattungsobjekte wie Bäume).

Aus der Energiebilanz an einer freistehenden vertikalen Oberfläche lässt sich als einzig unbekanntes Temperatur die äquivalente Himmelstemperatur ϑ_{Himm} , die zur gerade vorliegenden atmosphärischen Gegenstrahlung gehört, bestimmen. Dazu haben wir ein vertikales Temperaturprofil im Bereich der frei vor dem Gebäude (Endhaus) stehenden Terrassentrennwand aufgenommen und analysiert (Abb. 7).

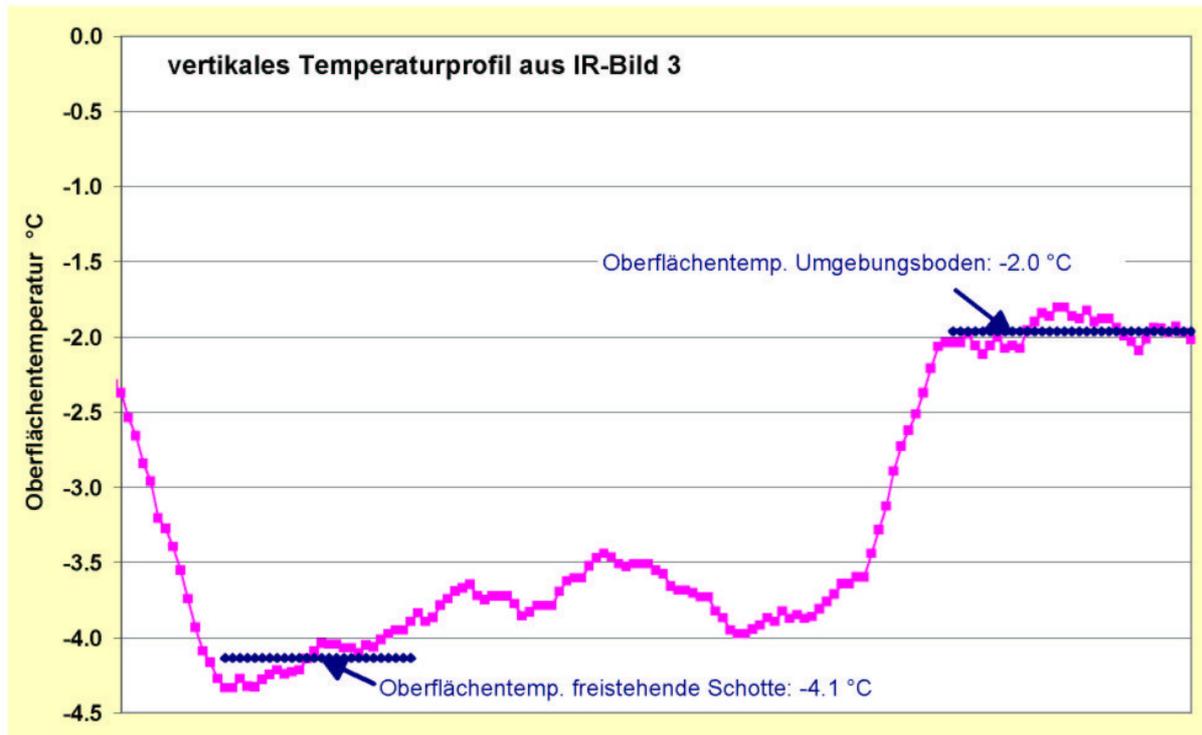


Abb. 7: Vertikales Temperaturprofil aus IR-Bild 3 von der freistehenden Schottenwand (Terrassentrennwand) bis auf den Umgebungsboden. Die mittleren Oberflächentemperaturen dieser Flächen wurden zu -4.1 °C resp. -2.0 °C bestimmt.

Die Oberflächentemperatur $\vartheta_{\text{Trennw.}}$ dieser Trennwand bestimmt sich nach der Gleichung

$$\vartheta_{\text{Trennw.}} = (\alpha_{\text{konv.,a}} \vartheta_{\text{Luft,a}} + \alpha_{\text{Str.,a}} (\Phi_{\text{Bod}} \vartheta_{\text{Bod}} + \Phi_{\text{Himm}} \vartheta_{\text{Himm}})) / (\alpha_{\text{konv.,a}} + \alpha_{\text{Str.,a}}), \quad (1)$$

wo $\alpha_{\text{konv.,a}}$ den konvektiven und $\alpha_{\text{Str.,a}}$ den radiativen äußeren Wärmeübergangskoeffizienten sowie Φ die Sichtfaktoren von Boden (Index "Bod") und Himmel (Index "Himm") von der Trennwand aus bezeichnen; die Sichtfaktoren sind in guter Näherung jeweils $\Phi_{\text{Bod}} = \Phi_{\text{Himm}} = 0,5$, der konvektive Wärmeübergang kann mit $6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ abgeschätzt werden, der Strahlungswärmeübergang bestimmt sich bei den vorliegenden Verhältnissen zu $3,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Damit kann aus der Gleichung die fehlende Größe ϑ_{Himm} zu etwa $-13,5 \text{ °C}$ bestimmt werden. Mit diesem Wert liegen wir in einer vernünftigen Relation zu gängigen Abschätzungen, nach welchen die äquivalente Himmelstemperatur durchschnittlich etwa 10 K unter der Außenlufttemperatur liegt.

Mit bekannter Himmelstemperatur lassen sich jetzt die Oberflächentemperaturen der Außenbauteile (Index "Bau") analog zu Gleichung [1], jedoch mit dem zusätzlichen Term des Wärmeverlustes durch das Bauteil mit U-Wert U_{Bau} und Innentemperatur ϑ_i , bestimmen:

$$\vartheta_{\text{Bau,a}} = (\alpha_{\text{konv.,a}} \vartheta_{\text{Luft,a}} + \alpha_{\text{Str.,a}} (\Phi_{\text{Bod}} \vartheta_{\text{Bod}} + \Phi_{\text{Himm}} \vartheta_{\text{Himm}}) + U_{\text{Bau}} \vartheta_i) / (\alpha_{\text{konv.,a}} + \alpha_{\text{Str.,a}} + U_{\text{Bau}}). \quad (2)$$

Diese Werte führen auf theoretische Oberflächentemperaturen der Außenwand von $-3,8\text{ °C}$ (gemessen: zwischen $-3,6$ und $-4,0\text{ °C}$), der betauten Verglasungen im Zentrum von $-3,3\text{ °C}$ (gemessen: zwischen $-3,1$ und $-3,8\text{ °C}$) und der Fensterrahmen von $-1,7\text{ °C}$ (gemessen von $-1,4$ bis $-2,3\text{ °C}$). Soweit stimmen die Ergebnisse der Thermographie auch quantitativ mit den Erwartungen gut überein. Es ist erkennbar, daß bis auf die Randbereiche der Verglasungen und den Fensterrahmen alle äußeren Bauteiloberflächentemperaturen unter der Außenlufttemperatur liegen. Dies steht in Übereinstimmung mit der bei guter Dämmung zu erwartenden Auskühlung der Oberflächen wegen der thermischen Abstrahlung. Die Thermographie bestätigt damit qualitativ und quantitativ die Wirksamkeit der durchgeführten Wärmeschutzmaßnahmen.

Selbst die höchsten im Bild auftretenden Temperaturen an den Fensterrahmen liegen mit um $-1,4\text{ °C}$ sehr niedrig; sie dokumentieren den hohen Standard der wärmegeämmten Rahmen.

In Abb. 8 ist das horizontale Temperaturprofil im Schnitt durch die OG-Fenster (40 cm unterhalb der Oberkante) aus IR-Bild 3 dokumentiert. Hier sind deutlich die Reflexstrahlungsanteile der Gegenstrahlung im unbetauten Randbereich der OG-Fenster erkennbar. Bei einem Reflexionskoeffizient von 0,2 war hier mit der oben ermittelten äquivalenten Himmelsstrahlung von $-13,5\text{ °C}$ eine scheinbare Oberflächentemperatur von $-5,8\text{ °C}$ zu erwarten. Die dem Thermogramm entnommenen Werte liegen noch geringfügig darunter ($-6,5\text{ °C}$).

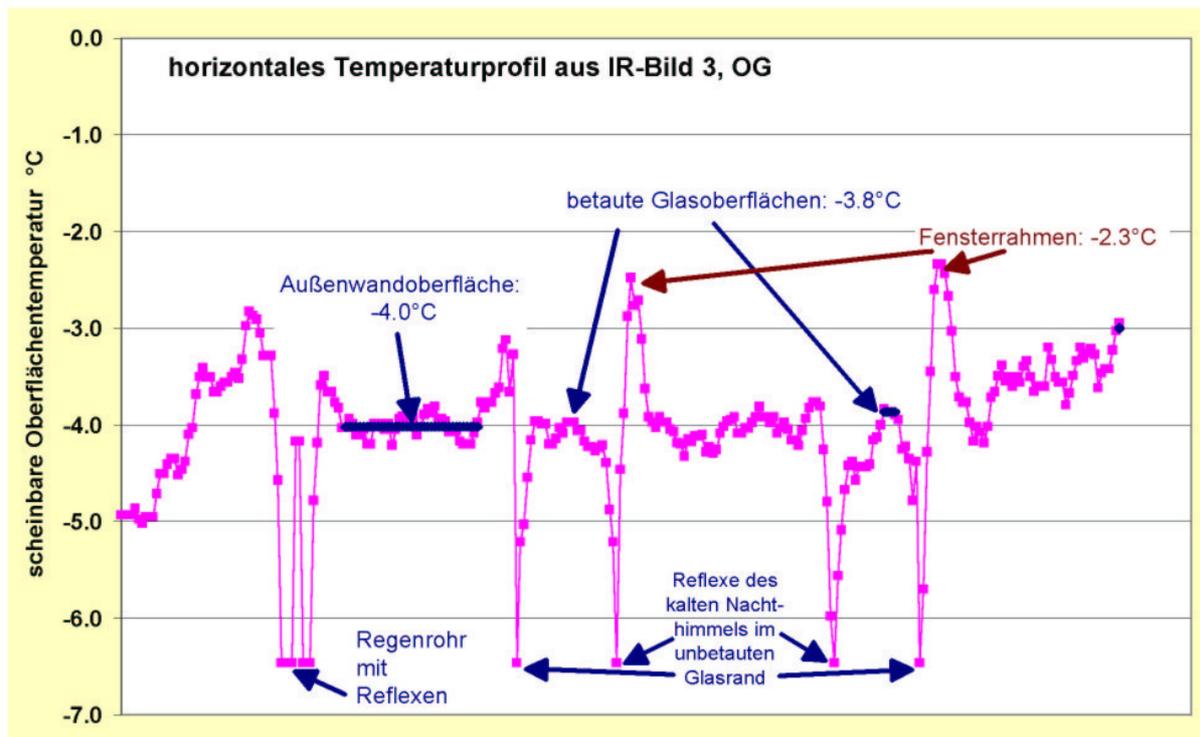


Abb. 8: Das horizontale Temperaturprofil 40 cm unter der Oberkante der OG-Fenster in IR-Bild 3 zeigt deutlich die gerichtete Reflexion der kalten Gegenstrahlung vom Himmel im Regenerrohr (metallisch, links) und in den unbetauten Randstreifen der OG-Fenster. Die jeweiligen Oberflächen sind objektiv wärmer als der im Thermogramm aufgenommene scheinbare Wert, da dieser den Reflexionsanteil des Himmels mit enthält.

IR-Bild 5 und 6 (Reihe 9, Giebelwand West und Ost)

Die Giebelwände zeigen einheitliche Temperaturen über die ganze Fläche (ca. -6 °C). Die Aufnahmen des hochgedämmten Wärmedämmverbundsystem (400 mm Polystyrol) weist keine Bereiche mit erhöhter Temperatur auf, die auf Fehlstellen hinweisen würden. Nur im Ortgangbereich ist eine leicht höhere Temperatur von etwa -4 °C zu erkennen.

Bei der östlichen Giebelwand befindet sich im unteren Bereich der Fassade das vorgestellte Technikhaus über fast die gesamte Breite des Hauses. Die Oberfläche der Wand zeigt eine etwa ein Kelvin höhere Temperatur (um -5 °C). Insbesondere im Sockelbereich zeigt sich die geringere thermische Qualität des Technikhauses mit Temperaturen um -1,5°C.

IR-Bild 7 (Reihe 10, Übersicht Südfassade)

Die Übersicht über die Fassaden (Südseite) von Reihe 10 (im IR-Bild Haus 52 bis 60) zeigt die gleiche Qualität wie in Reihe 9. Die Fassadenoberflächentemperaturen liegen bei etwa -4 °C. Einzig bei Haus 58 zeigt das rechte Fenster im OG, daß es nicht optimal dicht schließt. Dazu findet sich eine genauere Beschreibung im Abschnitt 3.1.2.

IR-Bild 8 (Reihe 10, Giebelwand West)

Die westliche Giebelwand von Reihen 10 zeigt, analog zum entsprechenden IR-Bild 5 von Reihe 9, keine Fehlstellen.

IR-Bild 9 (Reihe 13, Nordseite Technikhaus Reihe 13/14)

Die Technikhäuser sind nicht in der hohen Dämm- und Anschlußqualität des Passivhausstandards erstellt worden. Das IR-Bild vom Technikhaus der Reihe 13/14 zeigt daher wie erwartet eine etwas erhöhte Wandtemperatur (- 3 °C). Besonders am Rand der Stahltür mit Temperaturen um + 11°C und am Wandanschluß an das Wärmedämmverbundsystem von Haus 110 mit Temperaturen von + 5 °C zeigt sich der Qualitätssprung zu den Wohnhäusern in Passivhausqualität.

Alle weiteren Übersichtsbilder und Giebelwände der Reihen werden hier nicht dokumentiert, da sich keine relevanten Abweichungen zu den dargestellten Bildern ergeben haben. Im Anschluß werden alle nennenswerten mit der Außenthermographie aufgefundenen Schwachstellen dargestellt.

3.1.2 Festgestellte Schwachstellen

Die Außenthermographie der 32 Passivhäuser hat insgesamt 10 nennenswerte Schwachstellen sichtbar gemacht. Diese werden in diesem Abschnitt dokumentiert.

Die räumliche Zuordnung der unten beschriebenen und im Anhang abgedruckten Fehlstellen kann der folgenden Abbildung entnommen werden:

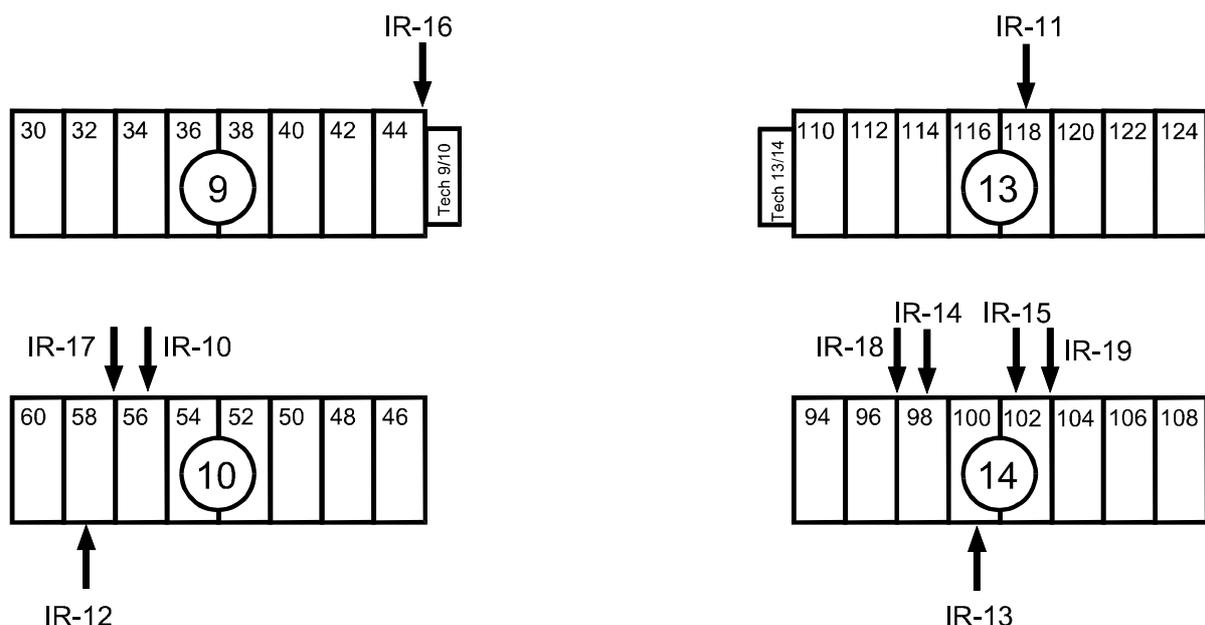


Abb. 9: Bereich/Lage der im Anhang dargestellten IR-Bilder (jeweilige Nummer ist angegeben) zu Schwachstellen.

3.1.2.1 Schwachstellen bei Haustüren und Fenstern

IR-Bild 10 und 11 (Haustür Nr. 56 und 118)

Bei der Untersuchung waren zwei Haustüren besonders auffällig. Die Tür von Haus 56 zeigt Temperaturen im Rahmenbereich bis +10 °C, die von Haus 118 in der gleichen Größenordnung. Der Balken im IR-Bild 10 zeigt den Bereich an, in dem ein Temperaturprofil erstellt wurde. Das Profil ist in Abb. 10 dargestellt.

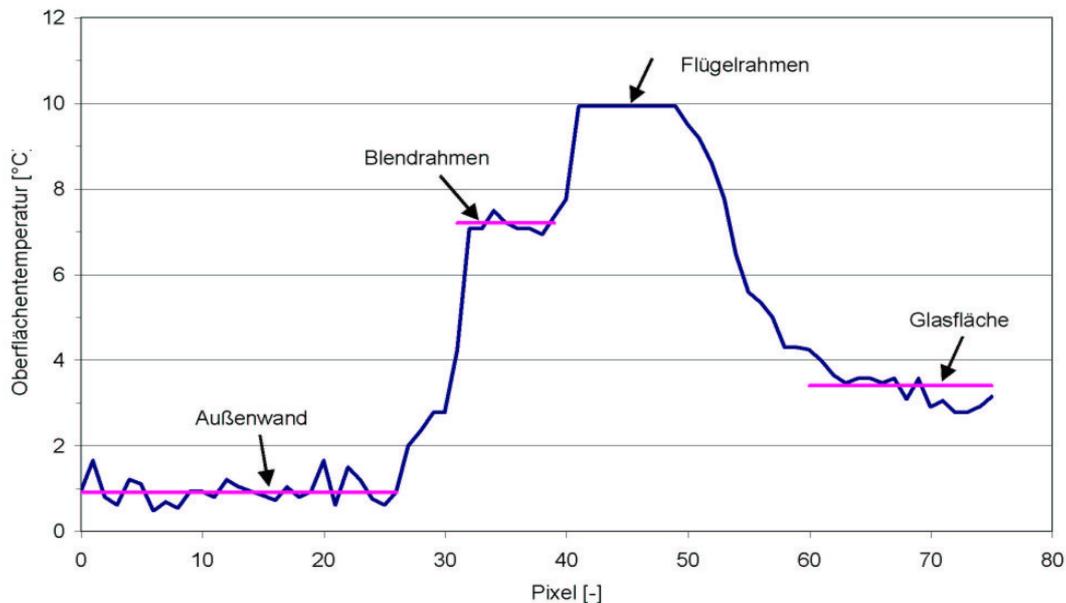


Abb. 10: Oberflächentemperaturprofil der Haustür aus IR-Bild 10 (im Anhang).

Es zeigt Wandoberflächentemperaturen um + 1 °C (unter dem Vordach) und maximale Temperaturen auf der Blendrahmenoberfläche der Tür von + 7 °C, bzw. auf dem Flügelrahmen von + 10 °C. Da die Qualität in den anderen Häusern ausreichend war, deuten die hier dokumentierten Schwachstellen eindeutig auf eine mangelhafte Luftdichtheit hin. Dabei ist zu bemerken, daß nach der Untersuchung im März 2001 der Türenhersteller alle Haustüren nachgearbeitet (Verstärkung im Bandbereich) und neu eingestellt hat. Es ist daher von einer Verbesserung auszugehen. Bei IR-Bild 11 ist die gesamte Terrasse mit einem Dach gegenüber Abstrahlung in den Himmel verschattet. Dies erklärt die höheren Wandtemperaturen im EG Bereich.

IR-Bild 12 und 13 (Fenster Südseite OG/re, Haus 58 und 100)

Bei zwei Fenstern konnten durch die „Wärmebilder“ nicht dicht schließende Fenster jeweils im OG/rechts festgestellt werden. Im Bereich der Verriegelung zeigen die Temperaturen für beide Fenster erhöhte Wärmeverluste durch Undichtheit an. Entweder sind die Fenster nicht richtig eingestellt oder sie wurden nicht richtig geschlossen. Eine kleinere Undichtheit wurde bei Haus 46 (Reihe 10) im OG Fenster links festgestellt (dazu kein gesondertes Bild im Anhang).

3.1.2.2 Schwachstellen im Sockelbereich

IR-Bild 14 und 15 (Nordseite Haus 98 und 102)

Unterhalb der hochwärmegedämmten Fassaden wurden auf Höhe der Bodenplatten auf der gesamten Hausbreite Dämmplatten aus Polystyrol-Hartschaum befestigt. Diese bestehen aus Einzelstücken, die an Holzkonsolen aneinandertreffen. Bei der thermographischen Untersuchung zeigten sich hier bei zwei Häusern Schwachstellen vermutlich im Bereich der Stöße. Es wurden normalerweise Temperaturen auf dem Sockel um 0 °C gemessen, im Bereich der Stöße aber um + 2 bis + 3 °C. Bei beiden Häusern zeigen sich punktuell Bereiche von + 6 bis + 7 °C. In Abb. 11 ist das Temperaturprofil im Sockelbereich dargestellt (siehe Schnittprofil in IR-Bild 14 im Anhang). Es verdeutlicht nicht nur das Temperaturmaximum sondern zeigt auch die unterschiedliche effektive Dämmqualität entlang des Sockelbereichs.

Neben der Möglichkeit, daß Wärmebrücken durch schlecht eingebaute Dämmplatten die Ursache sind, ist es auch möglich, daß an diesen Stellen wärmere Luft aus dem Hohlraum unter den Häusern austritt.

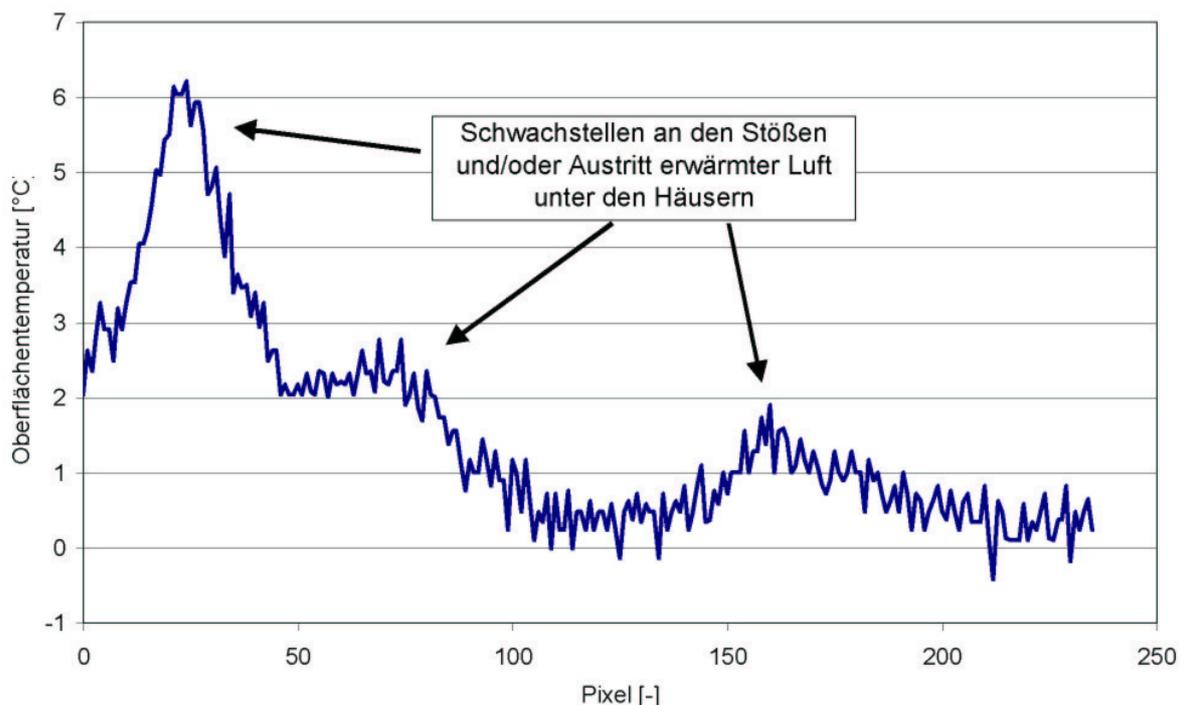


Abb. 11: Oberflächentemperaturprofil im Sockelbereich aus IR-Bild 14 (im Anhang).

3.1.2.3 Schwachstellen hinter der hinterlüfteten Fassade/Haustrennfugen

Bei der außenthermographischen Untersuchung sind - wie oben beschrieben - nur indirekt Schwachstellen an den hinterlüfteten Fassaden feststellbar. Die Oberflächentemperaturen der Holzfassaden lassen keine Aussage über die Qualität der Wand zu. Die Hinterlüftung der Fassade endet oben unter dem Dachüberstand (vergl. Abb. 2). Hier kann die Luft austreten. Da auch eine hochgedämmte Außenwand bei kühlen Außentemperaturen immer einen gewissen Wärmestrom nach außen abgibt,

erwärmt sich die Luft im Luftspalt und tritt am oberen Ende wärmer aus als die Umgebungsluft. Wenn hinter der Fassade Schwachstellen am Dämmstandard vorhanden sind, können diese ggf. durch stärker erwärmte Luft sichtbar werden. Damit ist allerdings keine Zuordnung zur Lage der Wärmebrücke oder Undichtheit möglich.

Im Bereich der Haustrennfuge sind berechnete Wärmebrücken vorhanden. Aus diesem Grund ist zu erwarten, daß die in der Nähe der Haustrennfugen oben aus der Hinterlüftung austretende Luft etwas mehr erwärmt ist, als auf der restlichen Hausbreite. Dies gilt auch schon für den Normalfall.

IR-Bild 16 (Anschluß Fassade/Giebelwand Reihe 9 / Haus 44)

Der oben beschriebene erwärmte Luftstrom, der hinter der Fassade austritt, bildet sich in diesem Bild recht deutlich ab. Es sind Temperaturen von bis + 2,5 °C gemessen worden. Durch die Abschattung der kalten Himmelsstrahlung ist der Bereich unter dem Dachüberstand mit - 2 °C insgesamt etwas wärmer als die restliche Fassade (- 5 °C). Das IR-Bild 16 zeigt nun insbesondere den Anschluß der Fassade an die Giebelwand. Dieser Anschlußbereich ist in [Baffia 1999] als „wärmebrückenfrei“ berechnet worden ($\psi = - 0,054 \text{ W}/(\text{mK})$). Bei Haus 44 zeigt sich hier punktuell unter dem Dachüberstand ein Temperaturwert von + 6 °C. Dies deutet auf Ausführungsschwachstellen hin. An der Verbindungsleiste sind auf der restlichen Länge etwa Oberflächentemperaturen von - 2,5 °C festzustellen.

IR-Bild 17 (Hinterlüftung der Fassade Reihe 10 / Haus 56/58)

Die oben beschriebene austretende stärker erwärmte Luft im Bereich der Haustrennfugen ist bei dieser Fuge besonders deutlich sichtbar. Hier treten Temperaturen von bis + 10 °C auf. Es ist zu vermuten, daß bei diesem Anschluß bei der Montage/Ausführung erhöhte Wärmebrücken entstanden sind. Diese können zum einen durch die beschriebenen Bereiche in der Wand (Nähe der Trennfuge) oder auch beim Anschluß Dach an Wand entstanden sein. Der Anschluß Dach-Wand ist bei planmäßiger Ausführung auch als „wärmebrückenfrei“ berechnet worden ($\psi = - 0,055 \text{ W}/(\text{mK})$ in [Baffia 1999]). Es handelt sich bei der dokumentierten Stelle allerdings um keine besonders relevante Störung der Dämmqualität, da sie sich auf punktuelle Bereiche beschränkt. Beim Fenster sind im oberen Rahmenbereich Temperaturen bis zu + 2 °C festzustellen.

IR-Bild 18 + 19 (Hinterlüftung der Fassade Reihe 14 / Haus 96/98 und 102/104)

Auch bei diesen beiden Haustrennfugen ist der oben beschriebene Effekt deutlich zu erkennen. Hier stellen sich ebenfalls punktuell Temperaturen von + 8 °C ein.

Im Unterschied zu Reihe 9 und 10 sind in diesen beiden Reihen die Dächer aufgedoppelt worden, um eine notwendige Hinterlüftung des Dachbereichs wg. eines Regenwasserschadens während der Bauzeit sicherzustellen. Dadurch gibt es zwei Bereiche, in denen erwärmte Luft aus den Hinterlüftungen austreten kann. Die zusätzliche Dachhinterlüftung ist auf dem Realbild (Ausschnittsverrößerung) deutlich am Metallgitter zu erkennen. Die IR-Bilder zeigen diese Zweiteilung deutlich: Es gibt bei beiden IR-Bildern zwei dicht beieinander liegende Bereiche, die die Erwärmung durch austretende Warmluft mit etwa + 8 °C zeigen. Hier sind ebenfalls kleinere Leckagen zu vermuten. Die betreffenden Wärmeverluste sind durch die angesetzten Infiltrationswärmeströme in der Energiebilanz der Häuser bereits berücksichtigt.

3.1.3 Geöffnete Fenster

Während der Untersuchung wurden 5 geöffnete Fenster vorgefunden, welche erwartungsgemäß durch eine hohe Temperaturdifferenz sehr deutlich erkennbar sind. Es waren also im Verhältnis zur Gesamtanzahl aller Fenster nur wenige geöffnet. Die Bilder sind im Anhang als IR-Bild 20 bis 25 dargestellt. Bis auf Bild 22 handelt es sich bei allen vorgefundenen geöffneten Fenstern um Schlafzimmerfenster auf der Nordseite im OG.

Die Bilder lassen auch die Lüftungsdauer bis zur IR-Aufnahme erkennen (vorausgesetzt es herrschen annähernd gleiche Innentemperaturen). Bei „längerer“ Lüftung ist bereits der Bereich über dem Fenster bis hin zur Dachrinne stark erwärmt. Bild 22 zeigt kaum eine Erwärmung der Fassade über dem geöffneten Fenster. Bei IR-Bild 20 handelt es sich vermutlich um ein nicht richtig geschlossenes Fenster. Das ist an der nur über die Hälfte der Flügelbreite (rechter Teil) austretende Warmluft zu erkennen.

Auch der Unterschied der Kipplüftungen zur Öffnung des gesamten Fensterflügels (nur IR-Bild 21) ist trotz des kleinen Aufnahmewinkels zur Fassade deutlich zu erkennen.

3.2 Innenthermographie

Für die Innenthermographien wurde exemplarisch das unbewohnte Reihenmittelhaus Nr. 34 in Reihe 9 ausgewählt. Das unbewohnte Haus bietet sich hier an, weil wegen nicht vorhandener Möblierung die Hüllflächen an allen Stellen gut zugänglich sind und keine Zufälligkeiten von nutzungsbedingten inneren Wärmequellen vorliegen. Die Innenlufttemperaturen im Zeitraum der Untersuchung (ca. 8:00 bis 11:30 Uhr) lagen im Erdgeschoß bei 18,6 bis 19,0 °C und im Obergeschoß bei 19,2 bis 19,6 °C (aufgenommen mit der kontinuierlichen Meßdatenerfassung).

Ab ca 10:00 Uhr wurde mittels einer Blower Door (Einbau in die Terrassentür) ein konstanter Unterdruck von 50 Pa im Haus erzeugt. Bei diesen Unterdruckbedingungen wurden bei einem neuen Rundgang durch das Haus weitere thermographische Aufnahmen aufgenommen, um den Einfluß von Restleckagen feststellen zu können. Das Gebäude hatte zur Zeit der Luftdichtheitsmessungen (11. Februar 1999) einen n_{50} -Wert von $0,36 \text{ h}^{-1}$ (inkl. der Leckagen zu den beiden Nachbarhäusern, bei der Schutzdruckmessung von $n_{50} = 0,31 \text{ h}^{-1}$ ohne die Leckagen zu den Nachbarhäusern).

Als Referenztemperaturen wurden die Oberflächentemperaturen an der Innenwand und der Verglasung wieder mit Hilfe von in Folie eingebetteten PT100 – Meßwiderständen gemessen. Zum Angleichen des Emissionskoeffizienten der Oberflächen wurden die Sensoren nach dem Aufbringen mit Kreppband überklebt. Mit Hilfe der auf dieser Weise gemessenen Oberflächentemperaturen und dem Signal der IR-Kamera für die entsprechenden Bildbereiche konnten wieder die Emissionskoeffizienten der jeweiligen Innenoberflächen bestimmt werden und damit eine Kalibrierung der Kamera für die folgenden quantitativen Untersuchungen erfolgen (siehe IR-REF-Bild im Anhang).

3.2.1 Innenthermographie ohne Blower Door

Bei der Untersuchung wurden alle Räume des Hauses mit der IR-Kamera begutachtet. Bei der Thermographie insbesondere der Außen- und Haustrennwände sind insgesamt 38 IR-Bilder festgehalten worden. Ein repräsentativer Teil davon wird bei dieser Auswertung dargestellt und diskutiert. Die Lage der hier beschriebenen IR-Bilder sind in Abb. 12 in den Grundriß eingezeichnet.

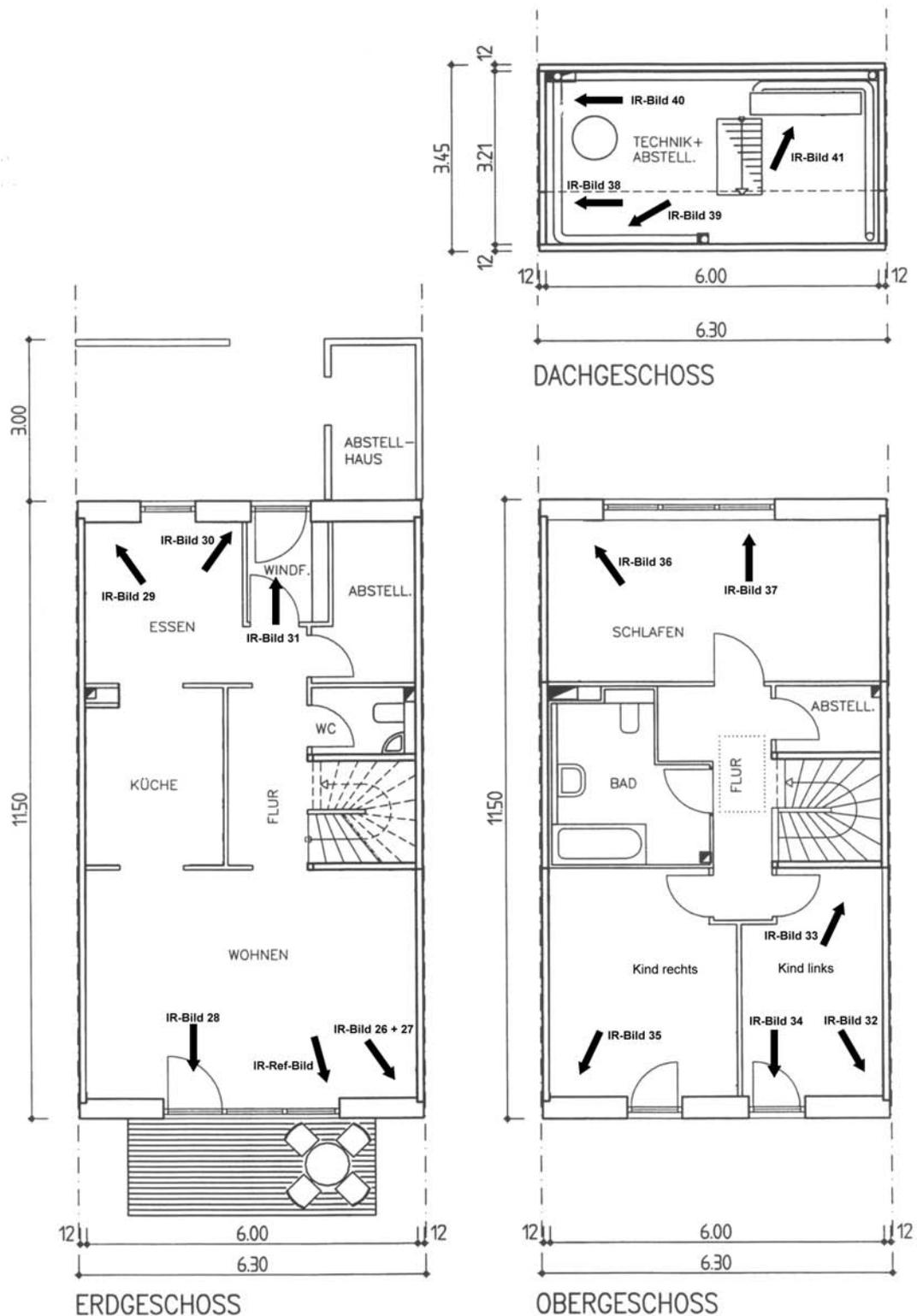


Abb. 12: Bereich/Lage der im Anhang dargestellten IR-Bilder (jeweilige Nummer ist angegeben) zur Innenthermographie bei Normaldruck ohne Blower Door (Pläne: Rasch & Partner).

IR-Ref-Bild (Wohnzimmer Südwand links mit Fenster)

Das Referenzbild zum Abgleich der Temperaturmessung der Infrarot-Kamera und der Oberflächentemperaturmessung zeigt die Lage des Pt-100 Oberflächenfühlers

an der Scheibe (sichtbar insbesondere das vertikale Kabel zum Sensor). Der zweite Sensor auf der Wand ist auf diesem Bild nicht erkennbar. In der Abbildung wurde durch einen horizontalen Balken der Bereich für das Oberflächentemperaturprofil in Abb. 13 markiert.

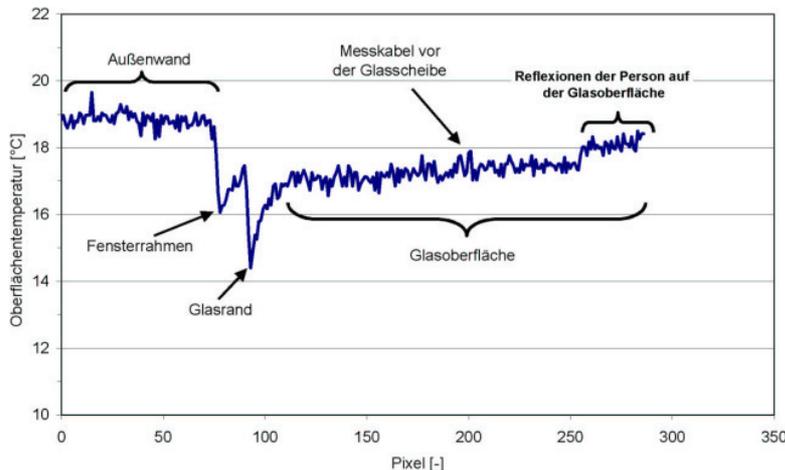


Abb. 13: Oberflächentemperaturprofil der Außenwand und des Fensters (Festverglasung) ca. 80 cm über Fußbodenniveau im Wohnzimmer (Bereichsmarkierung siehe IR-REF Bild im Anhang).

Hier sind die Bereiche der gemessenen Oberflächentemperaturen deutlich zu erkennen: Die Außenwandoberfläche mit 18,9 °C, der Fensterrahmen mit minimal 16,1 °C und der Glasrand mit minimal 14,4 °C. Auf der Basis der zweidimensionalen Temperaturfeldberechnung erwarten wir am Glasrand unter den hier gegebenen Randbedingungen eine Temperatur von 14,5 °C [Schnieders 1999]. Dagegen sollte der Fensterrahmen im Mittel 17,5 °C aufweisen. In der Thermographie erscheint er etwas kälter; allerdings muß dies nicht unbedingt durch eine schlechtere Dämmwirkung verursacht sein. Es ist wahrscheinlicher, daß die Konvektion an der Grenze zwischen Laibung und Fenster stärker behindert ist als nach den theoretischen Annahmen. Die Glasoberfläche wird im Bereich der Reflexionen auf der Scheibe durch die im Raum stehende Person deutlich verfälscht.

Mit den gemessenen Raumlufttemperaturen im Erdgeschoß zwischen 18,6 und 19,0 °C liegt die Außenwandoberflächentemperatur etwa im Bereich der Raumlufttemperatur. Bei einem U-Wert von 0,126 W/(m²K) wäre theoretisch eine Temperatur der inneren Oberfläche der Außenwand von 18,5 bis 18,7 °C zu erwarten. Sogar die gemessene Glasoberflächentemperatur (ca. 17,3 °C) liegt nur wenig unterhalb der Raumlufttemperatur. Bei einem Glas-U-Wert von 0,75 W/(m²K) erwarten wir theoretisch 16,9 bis 17,3 °C. Hier zeigt sich deutlich die ausgezeichnete Qualität der hohen Dämmstoffstärken und der „Superfenster“. Spürbarer Kaltluftabfall in Fensternähe ist damit ausgeschlossen. Die in der Thermographie bestimmten Oberflächentemperaturen entsprechen den theoretischen Erwartungen.

IR-Bild 26 und 27 (EG Wohnzimmer Süd / links)

Ein Temperaturunterschied zwischen Außenwand und Gebäudetrennwand, Fußboden und Geschoßdecke ist so gut wie nicht zu erkennen. Zur genaueren Untersuchung werden in Abb. 14 die Oberflächentemperaturen des horizontalen Profils etwa 30 cm unterhalb der Fensteroberkante abgebildet.

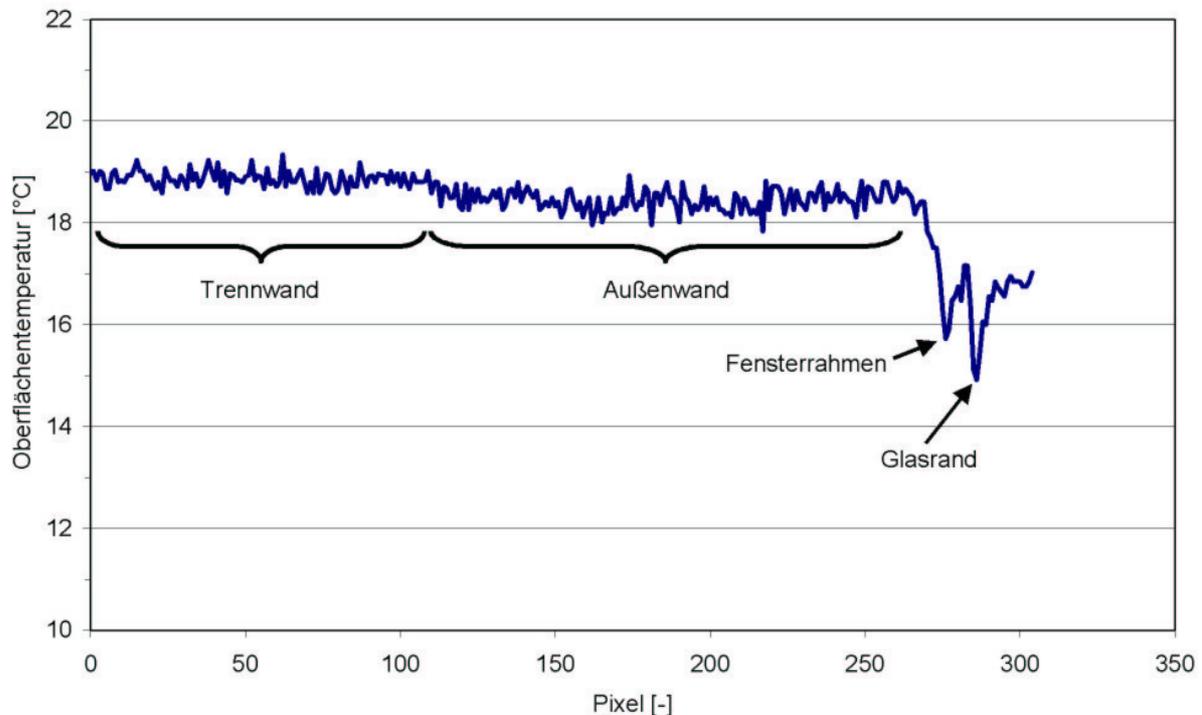


Abb. 14: Oberflächentemperaturprofil der Trennwand zum Nachbarhaus, der Außenwand und des Fensters (Festverglasung) etwa 30 cm unterhalb der Fensteroberkante im Wohnzimmer (Bereichsmarkierung siehe IR-Bild 26 im Anhang).

Die Außenwand hat in der Fläche eine Oberflächentemperatur von 18,5 °C, die Trennwand zum Nachbarhaus ist im Mittel etwa 0,5 °C wärmer. Im Vergleich zu den Werten auf der gleichen Außenwand etwas tiefer (siehe Abb. 13) beträgt der Temperaturunterschied 0,5 °C. Die minimale Oberflächentemperatur wird erwartungsgemäß wieder am Glasrand gemessen (15 °C). Die Oberflächentemperaturen liegen auf hohem Niveau, der Unterschied zwischen den Wandflächen ist minimal. Hier kann von einer optimalen Ausführung ausgegangen werden.

Die Geschoßdecke liegt im gleichen Temperaturbereich wie die Außenwandfläche. Die minimale Temperatur wurde erwartungsgemäß direkt in der unteren Ecke (Wand / Trennwand / Bodenplatte) mit 16,6 °C gemessen. Bei der Frage der Tauwasserfreiheit liegt die kritische Grenze bei Oberflächentemperaturen kleiner 12 °C (Bedingungen: 60 % relative Luftfeuchte und 20 °C Raumlufttemperatur). Selbst bei noch niedrigeren Außenlufttemperaturen sind bei der hier vorliegenden Dämmqualität mit Sicherheit keine Tauwasserprobleme zu befürchten.

IR-Bild 28 (Terrassentür)

Das Real-Foto zeigt deutlich, daß die Scheibe von außen großflächig betaut ist, dies macht die hohe Qualität der Verglasung deutlich.

Am Rahmen finden sich Temperaturen von 16,5 bis 18 °C, welche nur etwa 1 bis 2,5 K unter der Raumlufthtemperatur liegen. Die schwächsten Bereiche finden sich wieder am Glasrand und am unteren und rechten Einbauanschluß der Fenstertür. Hier liegen die niedrigsten Temperaturen punktuell bei 12,9 °C (Ecke Scheibe) und 13,4 °C (Blendrahmen rechts). Dies ist noch immer als ausreichend für den Tauwasserschutz zu bewerten. Durch eine äußere Überdämmung des Rahmens könnte hier eine weitere Verbesserung erzielt werden. Eine solche Überdämmung wäre allerdings mit relativ großem Aufwand verbunden und erbringt eine nur geringe Heizenergieeinsparung. Aus diesen Gründen ist bei der Bebauung in Hannover darauf verzichtet worden [Baffia 1999].

IR-Bild 29 (EG Eßzimmer Nord / Ecke rechts mit Fenstertür Eßzimmer)

Das zusammengesetzte Thermographiebild zeigt fast keine Temperaturunterschiede auf den Wandflächen an. Die Wandoberflächentemperaturen der Eßzimmerecke unten (Nordseite) sind mit minimal um 17 °C (Eckpunkt) noch etwas höher als im Wohnzimmer. Die Wandoberflächentemperaturen betragen im unteren Bereich der Außenwand 17,5 bis 18,0 °C und im oberen Bereich etwa 19,0 °C. Im oberen Bereich sind sie damit kaum von der Temperatur der Betongeschoßdecke (19,5 °C) zu unterscheiden. An der Unterkante des Fensters werden hier wieder die geringsten Temperaturen in einem schmalen Streifen mit minimal 13 °C festgestellt. Hier sind ebenfalls keine Tauwasserprobleme zu erwarten.

IR-Bild 30 (EG Eßzimmer Nord / Ecke links mit Trennwand zum Windfang)

Die Oberflächentemperaturen der Außenwand, der Trennwand zum Windfang und des Fußbodes zeigen wieder keine Temperaturabweichungen (gleichmäßig 17,5 bis 18,0 °C). Abgesehen vom Fenster - welches im vorherigen Bild schon dokumentiert wurde - ist der kälteste Punkt wieder die untere Ecke mit einer unproblematischen Minimaltemperatur von 16,0 °C.

IR-Bild 31 (Haustür)

Die Haustür gleicht im Aufbau einem Fenster, hat jedoch eine Milchglas-Verglasung. Neben dem Glasrand fällt bei dem IR-Bild besonders der umlaufende kühlere Blendrahmen ins Auge. Hier werden im unteren Bereich minimale Temperaturen von 12,5, im oberen Bereich von 14,0 °C festgestellt. Der Türflügel mit 14,5 bis 16,5 °C zeigt wieder erwartungsgemäß höhere Temperaturen. Die umliegende Wand (16,5 bis 17,5 °C) und Bodenflächen (16,4 °C) sind nicht durch den kühleren Blendrahmen betroffen. Zum Teil haben die kühleren Temperaturen im unteren Bereich des Bildes ihre Ursache in der Temperaturschichtung im Raum. Zusätzlich ist die Haustür im unteren Bereich auch nicht luftdicht, was zur konvektiven Auskühlung führt. Auch hier sind trotz der kleineren Schwachstellen keine Tauwasserprobleme zu erwarten. Der Wärmeverlust der Haustür dürfte jedoch höher anzusetzen sein, als in der ursprünglichen Projektierung.

IR-Bild 32 und 33 (OG Kinderzi. links: Ecke Süd links und Nord-Wand zum Technikraum)

Im Obergeschoß zeigen sich im Kinderzimmer etwa die gleichen Temperaturen der Wandoberflächen wie im EG. Die Betontrennwand zum Technikraum ist mit 21,5 bis 22 °C, wie aufgrund der höheren Raumlufthtemperatur im Technikraum erwartet, erhöht (IR-Bild 33).

Der kälteste Punkt mit 18,3 °C findet sich in der oberen Zimmerecke, welche von Trenn-, Außenwand und Dach gebildet wird. Hier liegt eine konstruktive Wärmebrücke vor. In der Veröffentlichung [Baffia 99] wurde der Anschluß der Leichtbauwände an die Gebäudetrennwand mit $\psi = 0,016 \text{ W}/(\text{mK})$ (siehe auch Abb. 4) bestimmt, womit (wie oben bereits geschildert) das Kriterium der Wärmebrückenfreiheit nicht ganz erfüllt wurde. Für die entsprechende Verbindung zwischen Außen- und Trennwand ergibt sich das folgende Temperaturprofil (Abb. 15):

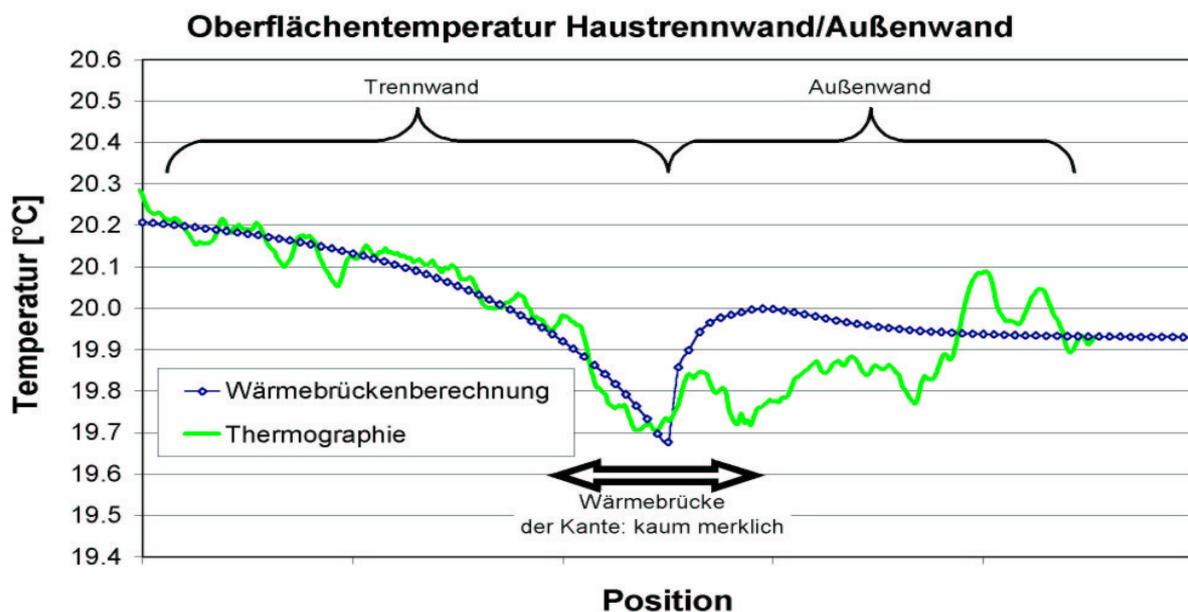


Abb. 15: Oberflächentemperaturprofil der Trennwand zum Nachbarhaus und der Außenwand im Kinderzimmer links/OG (untere Bereichsmarkierung siehe IR-Bild 32 im Anhang). Zu dem gemessenen Oberflächentemperaturprofil wurde der Temperaturverlauf der berechneten Wärmebrücke in der Kante dargestellt.

Die Trennwand hat eine ungestörte Temperatur von etwa 20,2 °C, die Außenwand von etwa 19,8 °C. Die Temperaturdifferenz der Wandoberfläche zur Raumlufttemperatur (max. im OG 19,6 °C) ist vernachlässigbar. Daß die Raumlufttemperatur unter der Wandtemperatur liegt, hat seine Ursache in der langwelligen Zustrahlung von der gegenüberliegenden wärmeren Technikraumwand. Diese führt zu einer höheren Wandoberflächentemperatur der anderen Raumumfassungsflächen, die mit ihr im Strahlungsaustausch stehen („sich sehen können“). In der Verbindungskante beider Wände fällt die Oberflächentemperatur auf minimal 19,7 °C ab. Ein Wärmebrückeneinfluß ist daher kaum merklich. Zum Vergleich wurden zusätzlich zum gemessenen Oberflächentemperaturprofil die Oberflächentemperaturen aus der Wärmebrückenberechnung (nach den Berechnungsgrundlagen von [Baffia 1999]) abgebildet. Hier zeigt sich eine recht gute Übereinstimmung zwischen der IR-Messung und der theoretischen Berechnung im Rahmen der hier erzielbaren Meßgenauigkeiten.

In der oberen Zimmerecke kommen für die Wärmebrückenwirkung noch die Effekte des Dachanschlusses dazu. Für den ungestörten Anschluß zwischen Dach- und

Wandelement (siehe Abb. 16) wurde ein Wärmebrückenverlustkoeffizient von $\psi = -0,052 \text{ W/(mK)}$ - also Wärmebrückenfreiheit - berechnet [Baffia 99].

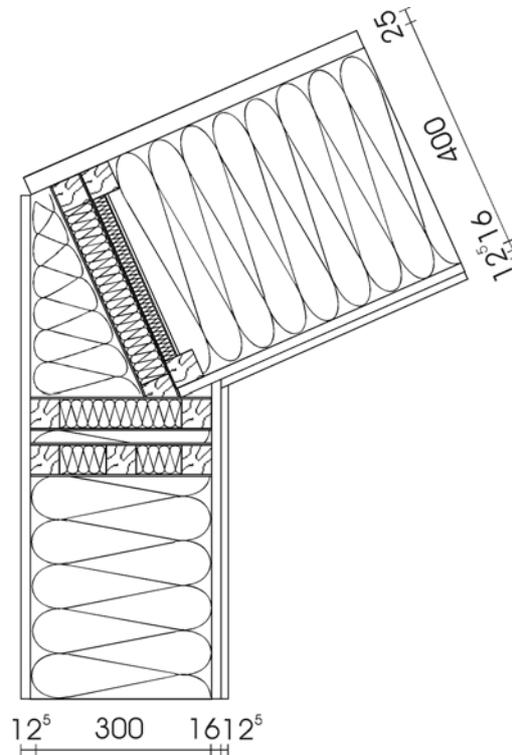


Abb. 16: Anschluß der Leichtbauwand an das Dachelement (aus [Baffia 99])

Bei der Thermographie ergab sich in der Ecke eine Minimaltemperatur von $18,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Das Profil (Abb. 17) zeigt im Bereich der Ecke deutlich das Absinken der Temperatur an (obere Bereichsmarkierung in IR-Bild 32 zeigt die Lage des Profils). Damit liegt hier die tiefste Temperatur um $1,1 \text{ K}$ tiefer als in der ungestörten Kante. Die Störungen können ihre Ursache in erhöhten Holzanteilen im Randbereich der hochwärmegeämmten Fassaden- und Dachelemente und auch im Einbau von Befestigungselementen (Winkel etc.) haben. Denkbar ist auch eine Dämmstofflücke in der Fassade, in der zusätzliche konvektive Wärmeverluste auftreten. Den Unterschied zur berechneten Wärmebrücke macht der in Abb. 17 eingetragene Temperaturverlauf der berechneten Werte deutlich (nach [Baffia 1999]). Der Pfeil deutet auf eine Differenz zwischen Rechnung und Messung hin, die bereits in einer nicht mehr zu vernachlässigenden Größenordnung von $1,1 \text{ K}$ liegt.

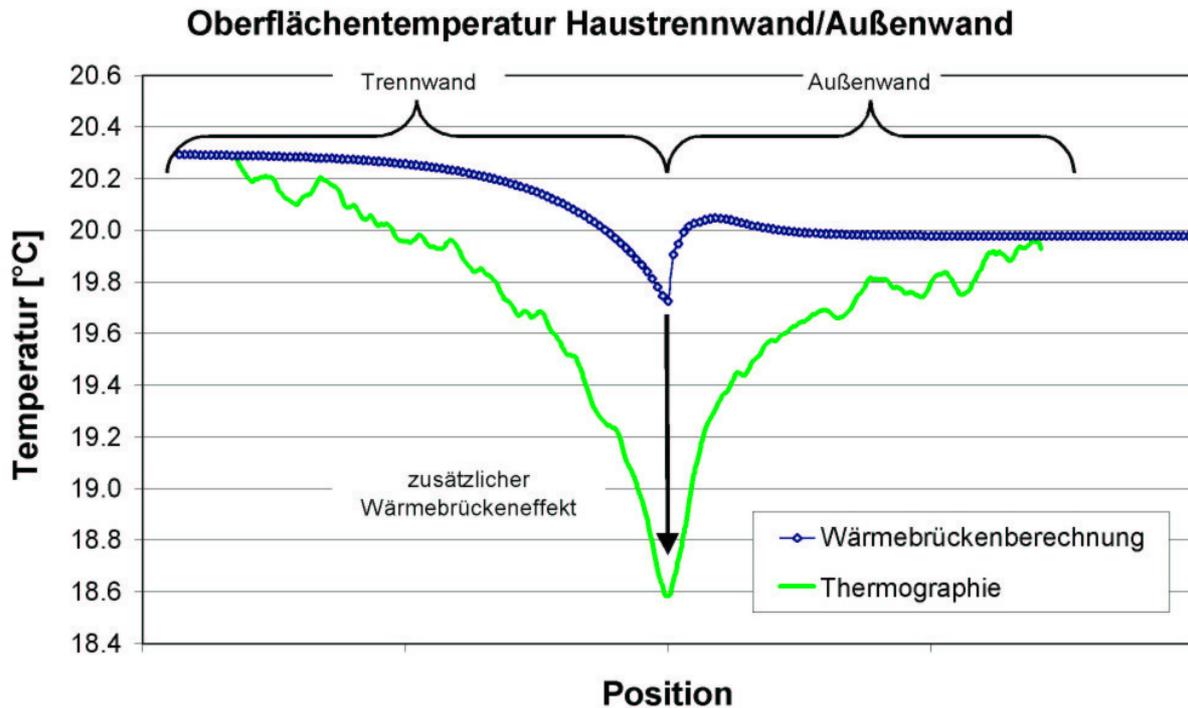


Abb. 17: Oberflächentemperaturprofil in der Ecke Trennwand zum Nachbarhaus und der Außenwand im Kinderzimmer li /OG (obere Bereichsmarkierung siehe IR-Bild 32 im Anhang). Zu dem gemessenen Oberflächentemperaturprofil wurde der Temperaturverlauf der berechneten Wärmebrücke dargestellt. Der vertikale Pfeil deutet die Größe des Unterschieds zwischen Rechnung und Messung an.

Bei einer Abschätzung des zusätzlichen Energiebedarfs des Hauses durch diese nicht projektierten Schwachstellen wird wie folgt vorgegangen: Die mittlere Temperaturdifferenz entlang des Profils zwischen den Wandoberflächentemperaturen nach der Wärmebrückenberechnung und den gemessenen Oberflächentemperaturen in der Kante bzw. Ecke beträgt 0,38 K. Die Länge des Profils in Abb. 17 gibt die Ausdehnung der Störung wieder (1,55 m in der Abwicklung). Die Höhe des Bereichs mit niedrigerer Temperatur ist dem Thermographiebild (IR-Bild 32) mit ca. 30 cm zu entnehmen. Es ergibt sich damit eine beeinträchtigte Fläche von 0,46 m². Bei der vereinfachten Annahme eines Wärmeübergangskoeffizienten an der Wand und in der Zimmerecke von $1/\alpha_i = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ ergibt sich aufgrund der niedrigeren Wandoberflächentemperatur bei 84 kWh/a ein zusätzlicher jährlicher Wärmeverlust von **4,69 kWh/a**.

Wird als „worst case“-Betrachtung die Schwachstelle in dieser Größenordnung für alle 4 Ecken im Obergeschoß angenommen, obwohl nur in zwei Ecken diesbezügliche Schwachpunkte gefunden wurden (siehe auch Beschreibung zu IR-Bild 34 und 35 weiter unten), ergibt sich der zusätzliche Wärmebedarf zu

$$4 \times 4,69 \text{ kWh/a} = 18,76 \text{ kWh/a.}$$

Das entspricht bei der Energiebezugsfläche von 119,5 m² des Hauses einem Betrag von **0,16 kWh/(m²a)**. Diese Berechnung zeigt, daß die hier erkannten zusätzlichen

Dämmklotz auf dem Dach von Haus Nr. 32 allerdings nicht optimal montiert wurde, können sich hier zusätzliche Wärmeverluste einstellen.

IR-Bild 36 und 37 (OG Schlafzimmer: Ecke oben rechts und Fenster)

Bei der Untersuchung des OG Nordzimmers (Standardnutzung: Schlafzimmer) zeigen sich keine Abweichungen von der bisher beschriebenen hohen Qualität. Die obere Zimmerecke hat eine minimale Temperatur von 18,0 °C, obwohl es sich auch um die Ecke an der Trennwand zum tiefergelegenen Haus 32 handelt. Dies deutet nochmals auf eine Ausführungsschwachstelle bei der Wärmebrücke der oberen Ecke im Kinderzimmer rechts hin (IR-Bild 35).

Die Temperatur der Fensterbank des Schlafzimmerfensters zeigt deutlich, daß Kaltluft vor der Verglasung abfällt und hier auftritt. Ein Anteil der Abkühlung kann auch auf Infiltrationseffekte zurückgehen. Hier sind Oberflächentemperaturen von 14 (Kante zum Blendrahmen) bis knapp 19 °C (Kante Fensterbank zum Raum) zu finden. Der Blendrahmen hat Oberflächentemperaturen zwischen 12,9 und 17 °C.

IR-Bild 38 bis 41 (Detailansichten Technikgeschoß)

Im Technikgeschoß herrschen höhere Raumlufttemperaturen als in EG und OG. Daher sind die Temperaturskalen der Aufnahmen verschoben. Bei der Kontrolle der Dachbauteile und des Firstanschlusses wurden keine Schwachpunkte festgestellt.

Zur Dokumentation der Wärmedämmung der technischen Einbauten sind im Anhang vier IR-Bilder abgebildet. Bei der Installationswand (IR-Bild 38) sind die nach den Verbesserungsarbeiten an der Dämmung verbliebenen Schwachstellen als helle Flecken deutlich zu erkennen (Armaturen, VL-Anschluß an den Brauchwasserspeicher). Bis auf diese wenigen Ausnahmen ist insgesamt allerdings ein sehr guter Dämmstandard zu erkennen. In IR-Bild 39 ist durch die Temperatur zu erkennen, daß es sich bei den drei gedämmten Rohrleitungen (unterhalb der Kabelpritsche) an der Wand um die Vor- und die Rücklauf- sowie die Kaltwasserleitung (von oben nach unten), handelt. Dieses Bild macht sehr gut deutlich, daß eine generelle Verbesserung des Dämmniveaus der wärmeleitenden Leitungen wünschenswert wäre. Die Wand zwischen den Rohren hat eine Oberflächentemperatur zwischen 23 und 27 °C. Die Temperatur des Lüftungsrohrs (Zuluft, unten rechts im IR-Bild 39) ist nicht direkt anzugeben, da die Metalloberfläche einen anderen Emissionsgrad besitzt.

Das nachträglich wärmegegedämmte Nachheizregister (IR-Bild 40) zeigt ebenfalls fast durchgehend hohe Oberflächentemperaturen. Am ungedämmten Entlüfter (Messing) in der Vorlaufleitung, oben über dem Heizregister, zeigt sich die hohe anliegende Vorlauftemperatur. Der Erfolg der nachträglichen Wärmedämmung wird dadurch besonders deutlich.

Beim Lüftungsgerät mit Wärmeübertrager der Firma Paul zeigt sich in IR-Bild 41 die hohe Qualität der Gerätewärmedämmung. Nur im Bereich der Rohranschlüsse zeigen sich kleinere Undichtheiten als dunkle Kreisabschnitte. An diesen Stellen wäre eine bessere Verbindung wünschenswert. Die Lage der Steuerungseinheit des Gerätes (in der Mitte) ist durch seine Abwärme ebenfalls deutlich zu erkennen. Hier ist eine stromsparendere Technik für die Steuerung zu empfehlen.

3.2.2 Innenthermographie mit Blower Door

Nach der thermographischen Untersuchung bei Umgebungsdruck wurde eine Blower Door in die Terrassentür eingebaut. Es wurde ein konstanter Unterdruck von 50 Pa erzeugt und der Rundgang mit der IR-Kamera nochmals wiederholt. Dabei wurden insgesamt 23 IR-Bilder aufgenommen. In 5 Fällen sind nennenswerte Unterschiede zu den Vergleichsbildern bei Umgebungsdruck festzustellen. Diese Bilder werden hier ausgewertet und diskutiert. Die Lage der beschriebenen IR-Bilder bei Unterdruck sind in Abb. 19 in den Grundriß eingezeichnet.

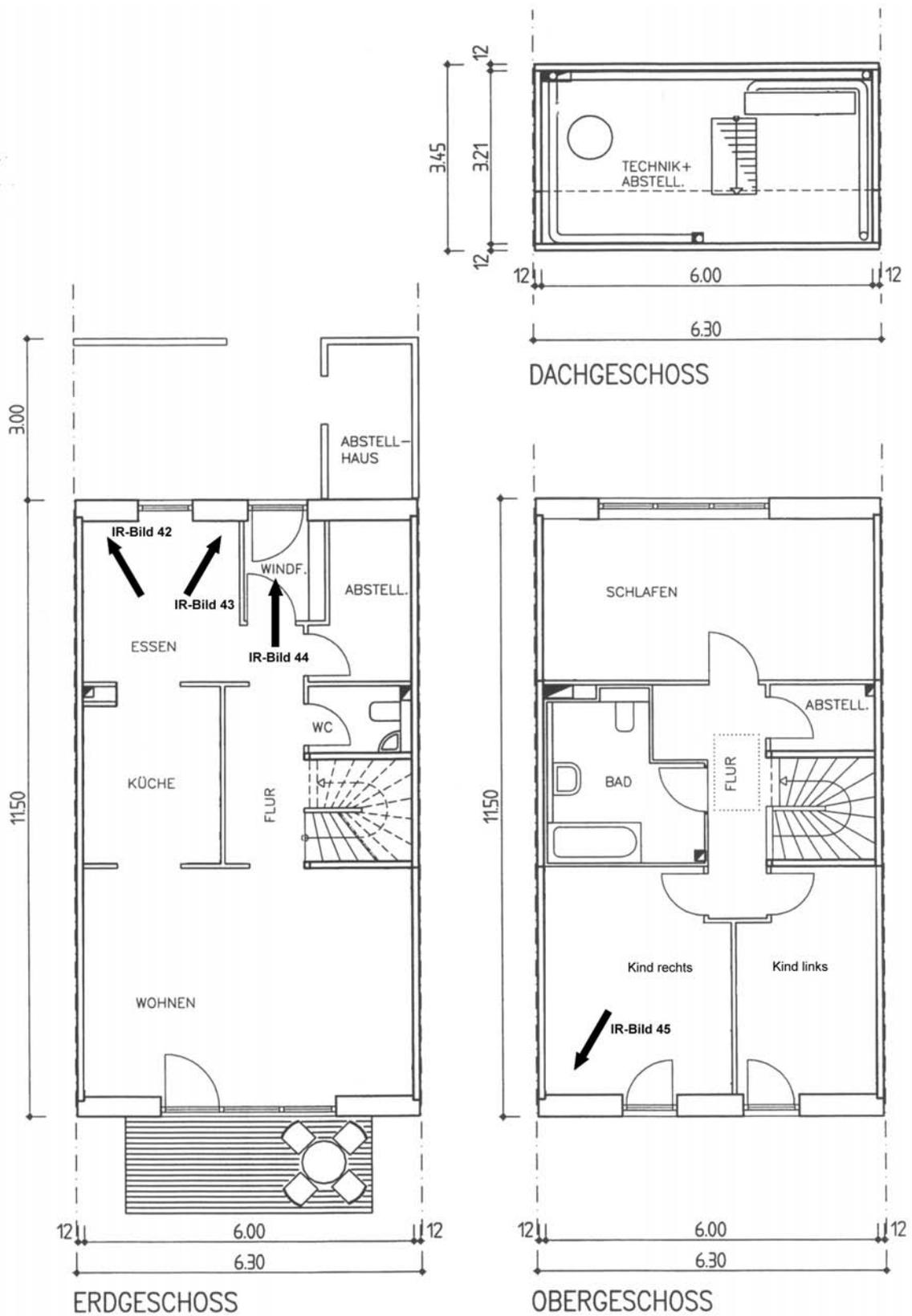


Abb. 19: Bereich/Lage der im Anhang dargestellten IR-Bilder (jeweilige Nummer ist angegeben) zur Innenthermographie mit Blower Door bei 50 Pa Unterdruck (Pläne: Rasch & Partner).

IR-Bild 42 (EG Eßzimmer Nord / Ecke rechts unten mit Blower Door)

Bei Unterdruck wirken sich die Restleckagen an dieser Raumecke aus. Die Minimaltemperatur in der Ecke sinkt auf 15,5 °C und liegt damit noch 1,5 K unter der Temperatur bei Umgebungsdruck (Vergleichs-IR-Bild 29 als Ausschnitt unter dem IR-Bild 42). Die umliegenden Wandflächen kühlen sich durch den Einfluß der durch die Restleckagen einströmenden kalten Außenluft ebenfalls ab. Die genaue Lage der Leckagen kann in diesem Ausbaurzustand (Gipsplatte auf der Innenseite vor der PE-Folie als luftdichte Ebene) nicht mehr bestimmt werden.

IR-Bild 43 (EG Eßzimmer Nord / Ecke links unten mit Blower Door)

Die Außenfassade zeigt bei Unterdruck im Eßzimmer auch an der Trennwand zum Windfang (untere Ecke) Restleckagen. In der Ecke stellt sich eine um 0,5 K niedrigere Minimaltemperatur von 15,5 °C ein. Auch hier kühlen sich die umliegenden Wandflächen um bis zu 1 K ab (Minimum an der Außenwand bei 16,6 °C).

IR-Bild 44 (Haustür)

Bei der Haustür macht sich die Undichtheit ganz besonders bemerkbar. Der Blendrahmen kühlt sich jetzt auch im oberen Bereich stellenweise auf Werte unter 12,2 °C ab (untere Meßbereichsgrenze der Kameraeinstellung). Insbesondere im unteren Bereich wird die „Kaltluftfahne“ auf dem IR-Bild sichtbar. Der Fußboden im Windfangbereich vor der Tür kühlt sich dadurch auf Werte um 15 °C ab. Hier zeigt sich die relativ hohe Undichtheit der Tür. Etwa einen Monat nach der thermographischen Untersuchung wurden alle Haustüren der Siedlung vom Hersteller in der Befestigung am Fassadenelement überarbeitet und verbessert. Es ist zu erwarten, daß bei der Nachstellung der Türen die Luftdichtheit maßgeblich und dauerhaft verbessert wurde. Die mit IR-Bild 44 dokumentierte Leckage ist im gemessenen n_{50} -Wert enthalten, die entstehenden Wärmeverluste sind also bei der Projektierung bereits berücksichtigt worden.

IR-Bild 45 (OG Kinderzimmer rechts / Süd Ecke rechts oben mit Blower Door)

Auch im Kinderzimmer rechts stellt sich eine weitere Verschlechterung der Oberflächentemperatur in der oberen Ecke zwischen Dach, Außen- und Trennwand ein. Hier fällt die Temperatur auf minimal 16,0 °C ab, damit liegt sie ebenfalls etwa 1 K tiefer als bei der Untersuchung bei Umgebungsdruck. Bei den angrenzenden Flächen macht sich dies nur geringfügig bemerkbar (ca. $\Delta t = 0,5$ K).

Insgesamt ist anzumerken, daß sich während der Untersuchung bei Unterdruckbedingungen keine besonderen Auffälligkeiten ergeben haben. Das Haus ist als gut luftdicht zu bezeichnen ($n_{50} = 0,31 \text{ h}^{-1}$, siehe oben). Die Oberflächentemperaturen verringern sich zwar meßbar bei Unterdruck, fallen aber selbst bei diesem „künstlichen“ Gebäudezustand (im Zeitraum der Messung) nicht auf bedenkliche Werte ab. Es wurden auch nur an den vier hier dargestellten Bereichen überhaupt erkennbare Einflüsse von Luftundichtheit festgestellt.

4 Zusammenfassung

Bei der thermographischen Untersuchung der Passivhaussiedlung Hannover Kronsberg am 15.02.2001 sind als wichtigste Ergebnisse festzuhalten:

- Durch zeitgleiche Messung repräsentativer Oberflächentemperaturen gelang sowohl für die Außen- als auch für die Innenseite eine quantitative Auswertung.
- Der überwiegende Teil der Regelflächen (Fenster, Außenwände, Dächer) zeigt in der Thermographie qualitativ und quantitativ etwa die aus der Theorie erwarteten Oberflächentemperaturen. Damit bestätigt die Thermographie die außerordentlich hohe Qualität der Wärmedämmung der Außenbauteile bei der Passivhaus-siedlung.
- Die Außenoberflächentemperaturen lagen bis auf Teile der Haustür- und Fensterrahmen und den Randbereichen der Scheiben (sowie vereinzelte konvek-tive Wärmebrücken) unter der Außenlufttemperatur. Damit bestätigt sich noch einmal der große Einfluß der langwelligen Abstrahlung in den kalten Nachthimmel (dessen Äquivalenttemperatur während der Aufnahmen zu $-13,5\text{ °C}$ bestimmt wurde; zum Vergleich: die Außenlufttemperatur lag bei $-1,5$ bis $-3,7\text{ °C}$).
- Besondere Vorsicht ist bei der Interpretation von Thermographiebildern von direkt reflektierenden Oberflächen geboten: Bei den hier untersuchten Gebäuden sind dies z.B. die metallischen Regenfallleitungen sowie Verglasungsoberflächen. Durch einen bedeutenden Teil von Reflexionsstrahlung darf das Thermographie-bild hier nicht als Oberflächentemperatur des betreffenden Bauteils interpretiert werden. Ein besonders schönes Beispiel bieten die IR-Außenaufnahmen der Fenster im Obergeschoß der Zeile 9. Die Verglasung ist hier im Zentralbereich betaut ($\epsilon \approx 0,95$, kaum Reflexion und diese auch nur diffus: daher gibt das Thermographiebild hier tatsächlich etwa die Oberflächentemperatur wieder). Zum Rand hin steigen die Oberflächentemperaturen wegen der Wärmebrücken im Randverbund an - daher ist die Verglasung dort nicht betaut. Wegen der direkten Reflexion des kalten Nachthimmels erscheint dieser Bereich im Thermographie-bild jedoch in Form eines hellen „umgedrehten U“.
- Auch die Häuser der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg sind nicht frei von in der Thermographie erkennbaren Schwachstellen. Soweit derzeit beurteilbar, sind die gefundenen Bereiche (vor allem mit konvektiven Wärmebrücken) aber weder kritisch für die Substanz noch von entscheidendem Einfluß auf die Heizwärmebilanz.
- Geringfügige Schwachstellen sind indirekt durch die oberhalb der hinterlüfteten Fassaden austretenden Warmluftströme zu vermuten. Andererseits wird die hohe Qualität der Außenfassaden durch die Oberflächentemperatur im Bereich des Wärmedämmverbundsystems (Südseite EG) und der hinterlüfteten Fassade (Südseite OG) deutlich: Bei diesen beiden Flächen ist kein Temperaturunter-schied meßbar!
- Die Innenthermographie eines der unbewohnten aber beheizten Häuser ergab durchgehend hohe Oberflächentemperaturen aller Wandflächen. Die hohen Oberflächentemperaturen demonstrieren den Erfolg der hohen Dämmqualität und zeigen, daß im ganzen Gebäude keine Tauwasserprobleme zu erwarten sind. Vereinzelt lagen die Oberflächentemperaturen an Bereichen von konstruktiven

Wärmebrücken (zwei Zimmerecken im OG) unter den erwarteten Werten. Auch an diesen Stellen ist keine Tauwassergefahr vorhanden. Diese Bereiche führen jedoch zu einer minimalen Erhöhung der Heizenergieverbräuche. Von Mängeln kann hier bei minimalen Oberflächentemperaturen von 16,9 °C jedoch in keinem Fall gesprochen werden.

- Bei den Haustüren waren bereits während der Messung ohne Unterdruck im Haus (Blower Door Einsatz) auffällige Undichtheiten im unteren Bereich erkennbar. Auch bei der Außenthermographie zeigten sich bereits an zwei anderen Haustüren diesbezügliche Schwachstellen. Diese führen zu höheren Energieverlusten als vorab projiziert. Alle Haustüren wurden im März 2001 (nach der IR-Untersuchung) in den Bandbereichen verstärkt und neu eingestellt. Dadurch ist anzunehmen, daß sich diese Schwachstellen verbessert haben.
- Bei der Untersuchung des Gebäudes bei Unterdruckbedingungen (Blower Door Einsatz in der Terrassentür) wurde nur in 5 Fällen eine nennenswerte Abweichung von den Vergleichsbildern ohne Unterdruck festgestellt. Aufgrund der hohen Luftdichtheit des Hauses waren diese Bereiche selbst bei diesem „künstlichen“ Gebäudezustand völlig unkritisch.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse der thermographischen Untersuchung der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg durchgehend die hohe Qualität der Dämmung der gesamten Gebäudehülle.

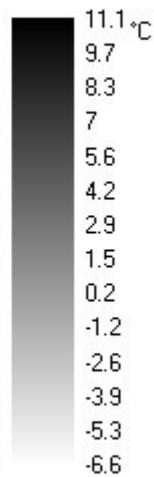
5 Literaturverzeichnis

- [Baffia 1999] Baffia, Enikö: Wärmebrückenfreie Reihenhäuser der Passivhaus-Siedlung Hannover Kronsberg in Mischbauweise. In: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 16, Wärmebrückenfreies Konstruieren, Darmstadt, Passivhaus Institut, Juni 1999
- [Schnieders 1998] Schnieders, Jürgen; Such, Martin: Untersuchung der Luftdichtheit in der Niedrigenergie- und Passivhaussiedlung Lummerlund in Wiesbaden-Dotzheim, Fachinformation PHI-1998/9 Darmstadt, Passivhaus Institut, 1998
- [Schnieders 1999] Schnieders, Jürgen; Feist, Wolfgang: Für das Passivhaus geeignete Fenster, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 9, Fachinformation PHI-1999/9, Darmstadt, Passivhaus Institut, April 1999

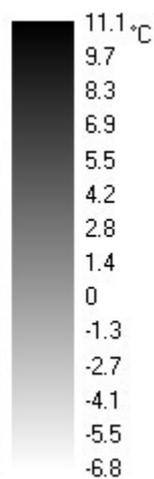
6 Anhang: Thermographie-Bilder

Im Anhang werden alle im Text ausgewerteten thermografischen Aufnahmen mit den dazugehörigen Realbildern wiedergegeben. Die Realbilder sind zum größten Teil zu einem späteren Zeitpunkt am gleichen Tag aufgenommen worden.

Reihe 9: Nordseite Haus 32 - 36, Gartenseite Übersicht

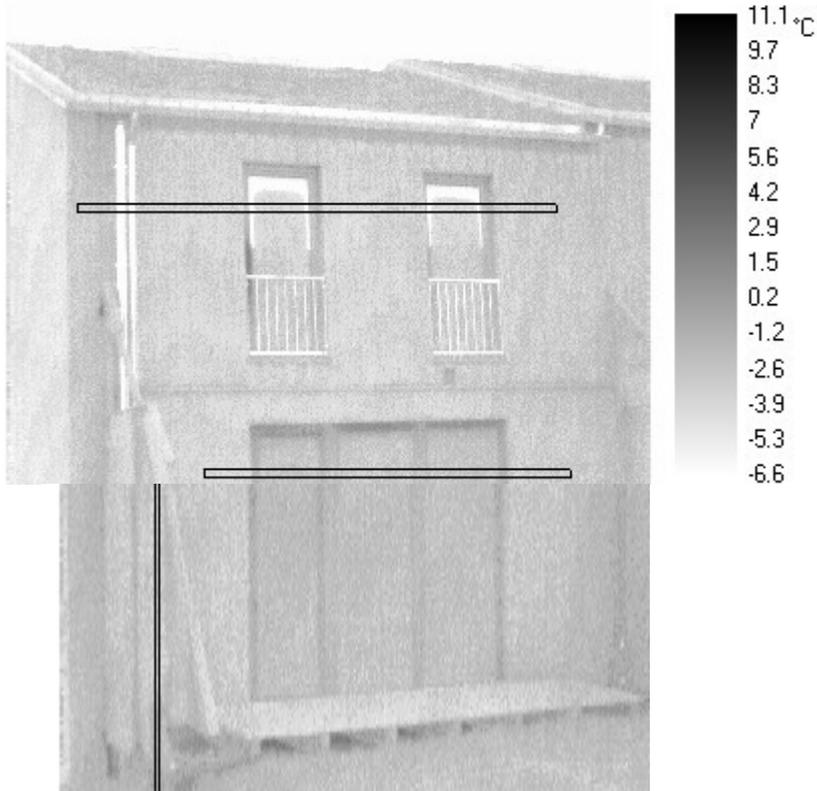


IR-Bild 1

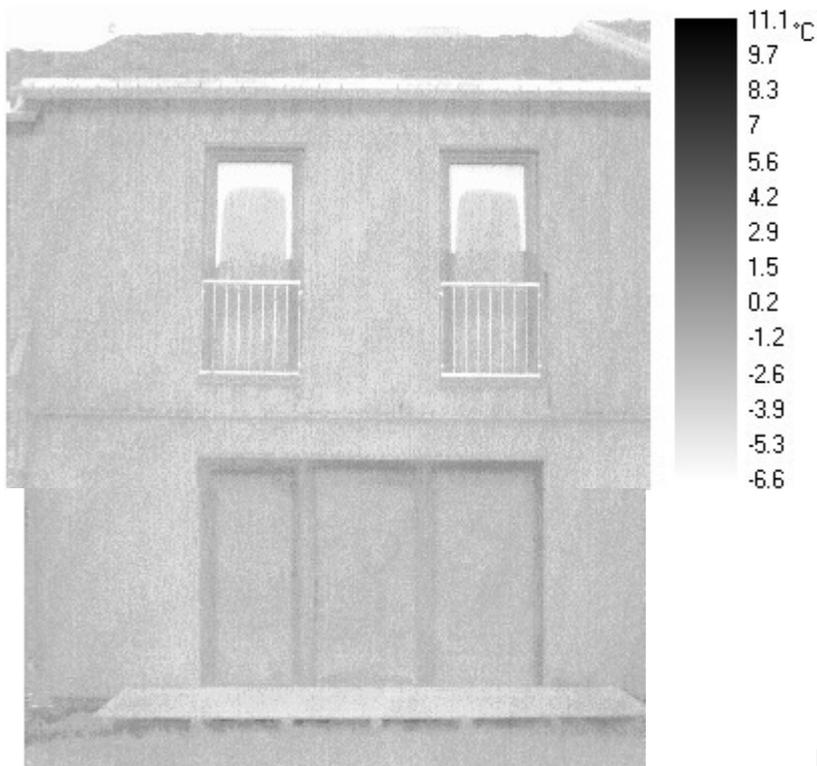


IR-Bild 2

Reihe 9: Haus 30 Gartenseite, Haus 34 Gartenseite

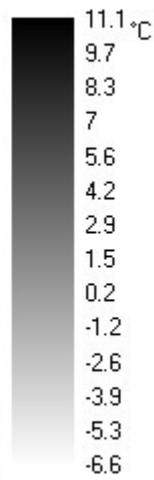
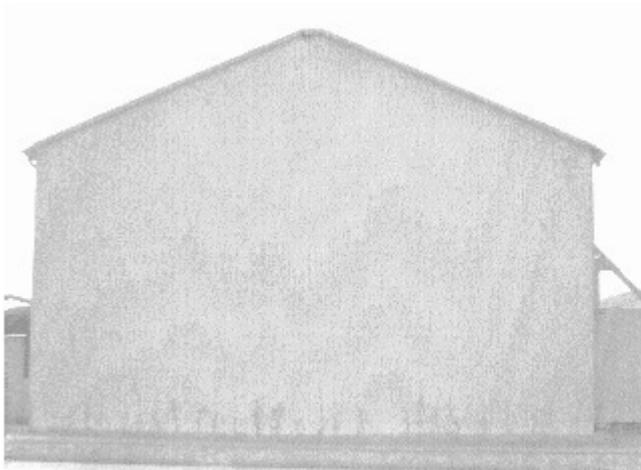


IR-Bild 3

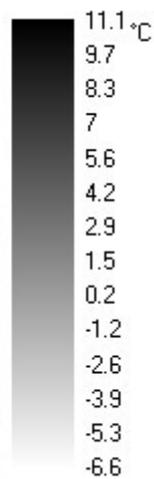
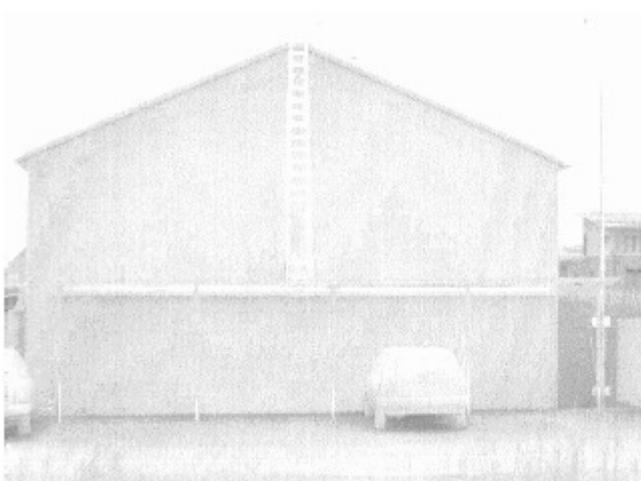


IR-Bild 4

Reihe 9: Giebelwand West und Ost

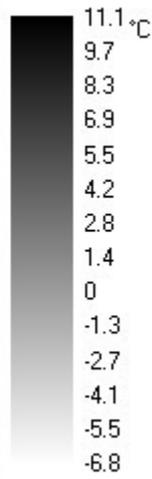


IR-Bild 5

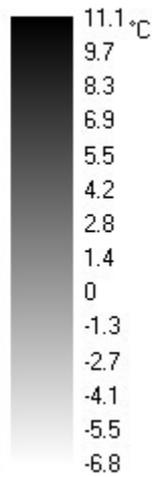


IR-Bild 6

Reihe 10: Gartenseite Übersicht, Giebelwand West

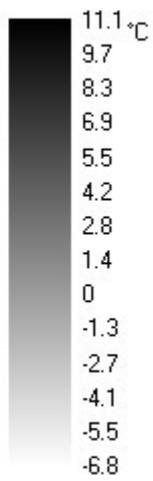


IR-Bild 7



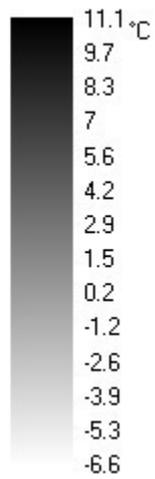
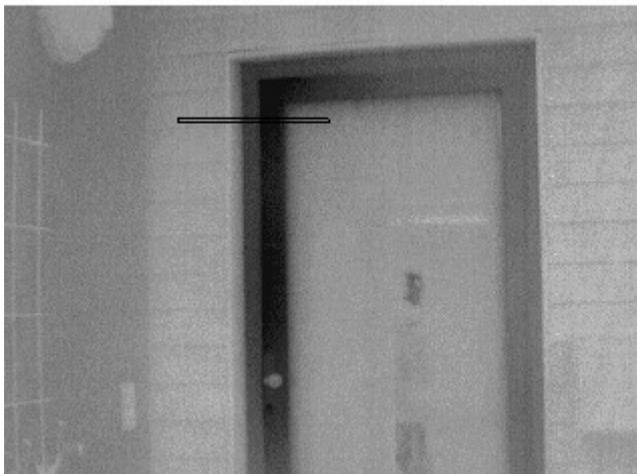
IR-Bild 8

Nordfassade Technikhaus Reihe 13/14

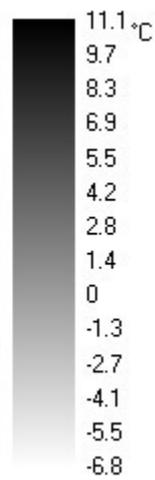
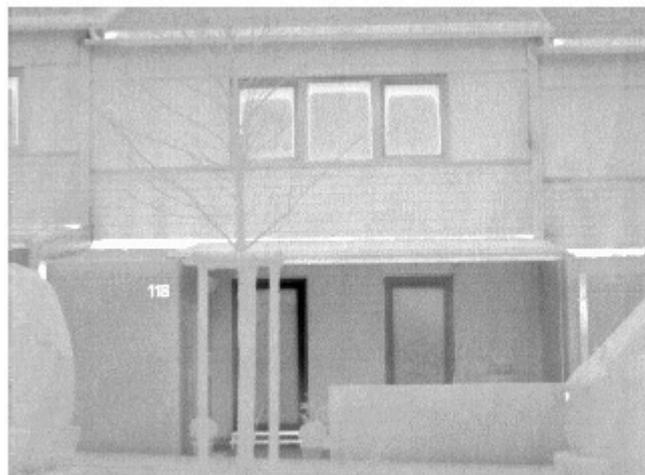


IR-Bild 9

Schwachstellen Haustüren: Haus 56 (Reihe 10) und 118 (Reihe 13)

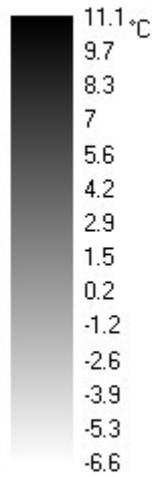


IR-Bild 10

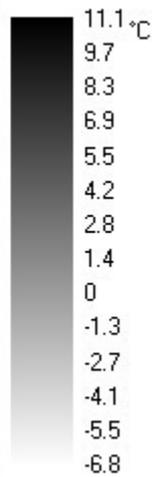


IR-Bild 11

Schwachstellen Fenster: Haus 58 (OG, rechts) und Haus 100 (OG, rechts)

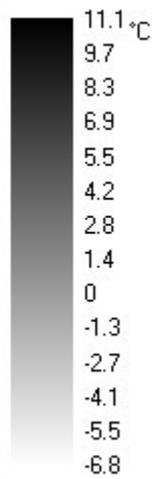
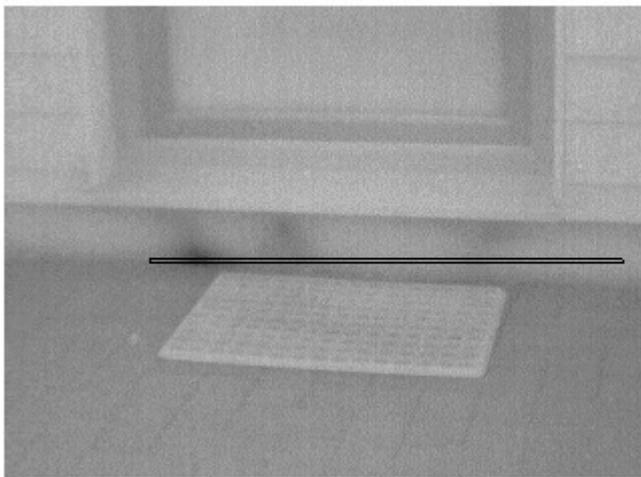


IR-Bild 12

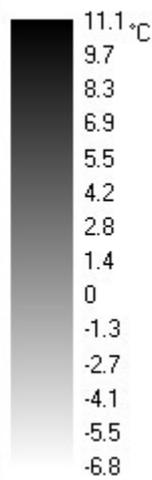


IR-Bild 13

Schwachstelle Sockelbereich Nord: Haus 98 und Haus 102

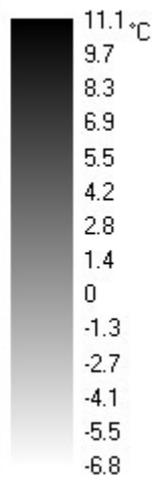
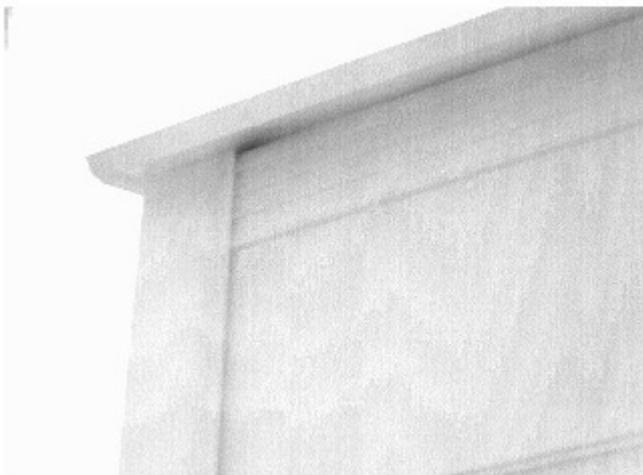


IR-Bild 14

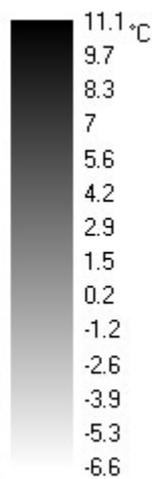
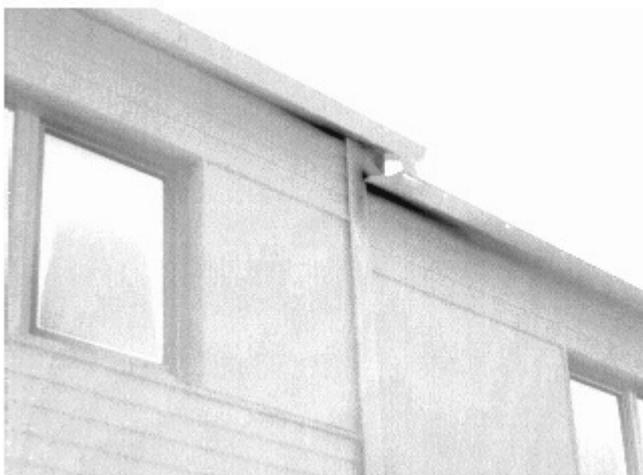


IR-Bild 15

Hinterlüftung der Fassade (Reihe 9/10): Haus 44 und 56/58

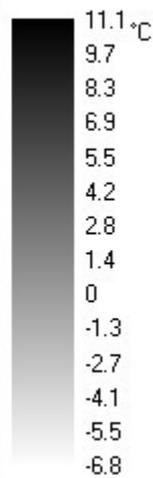
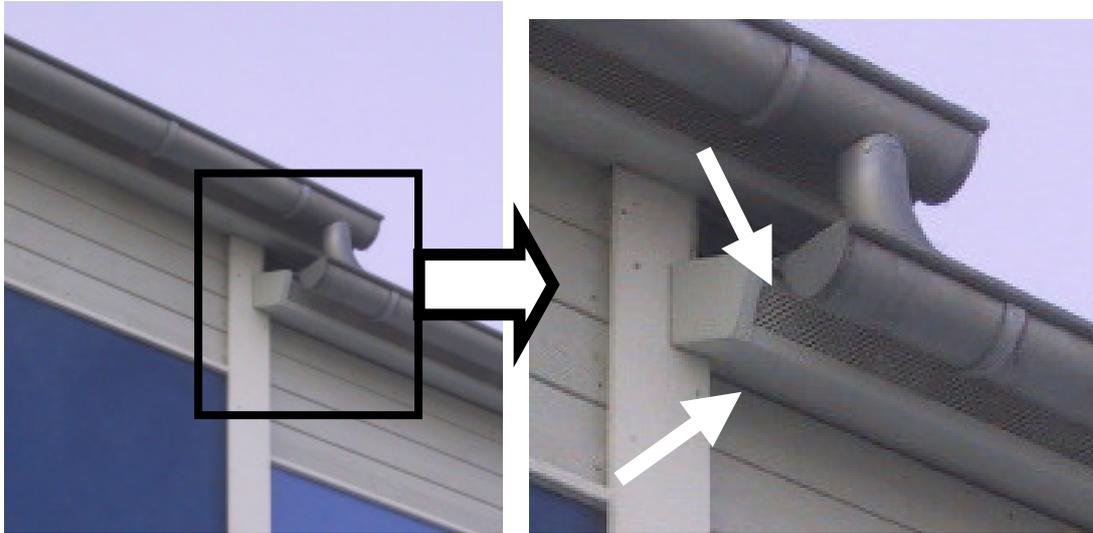


IR-Bild 16

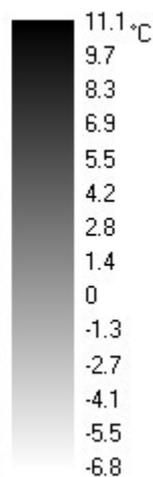
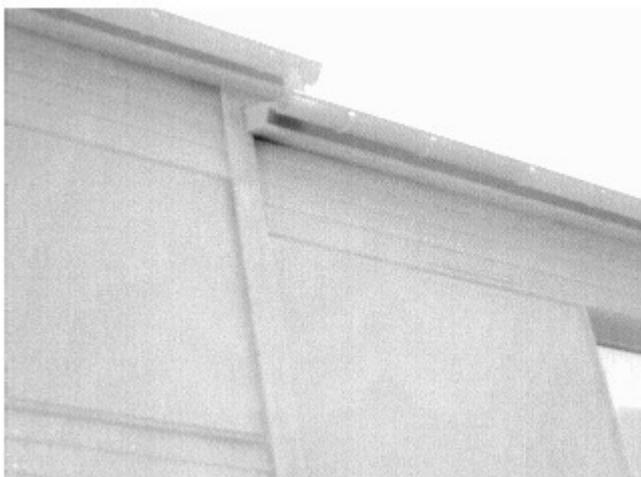


IR-Bild 17

Hinterlüftete Fassade (Reihe 14): Haus 96/98 und Haus 102/104

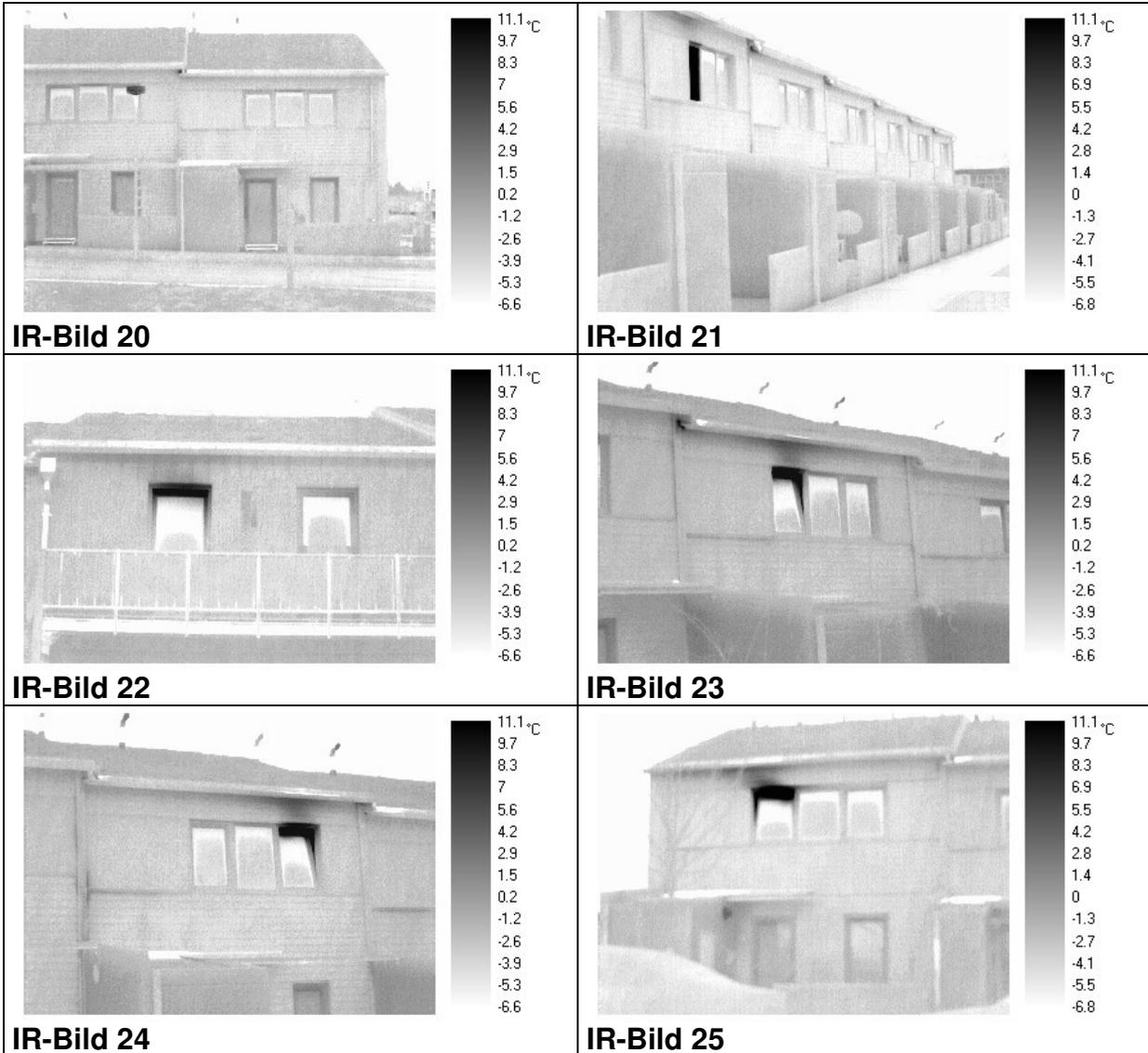


IR-Bild 18

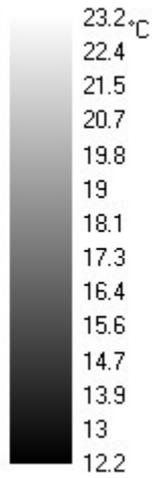
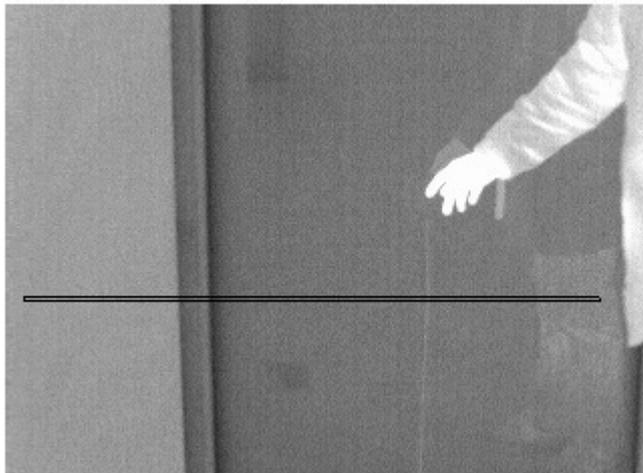


IR-Bild 19

Geöffnete Fenster

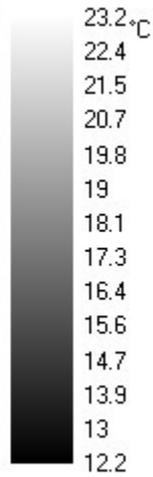
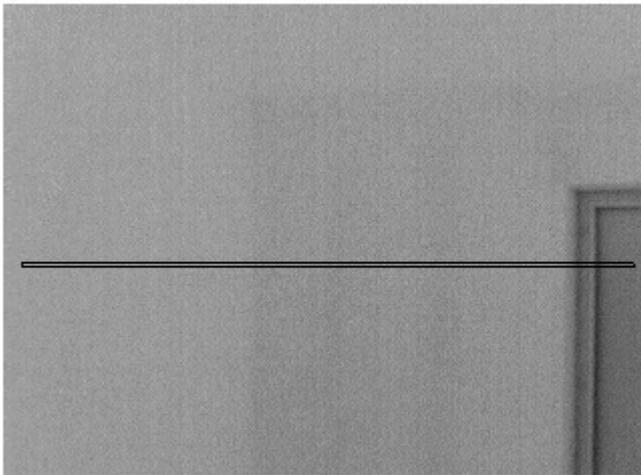


Innenthermographie Referenz-IR-Bild

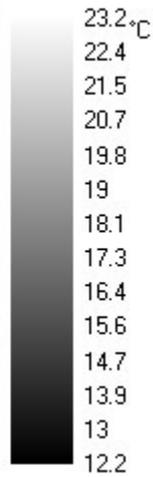
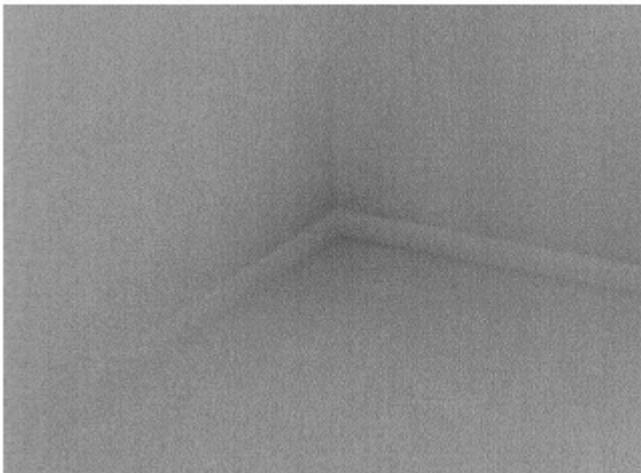


IR-REF-Bild

Innenthermographie: EG Wohnzimmer Süd / links

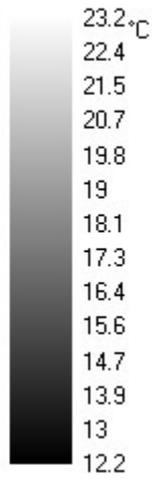
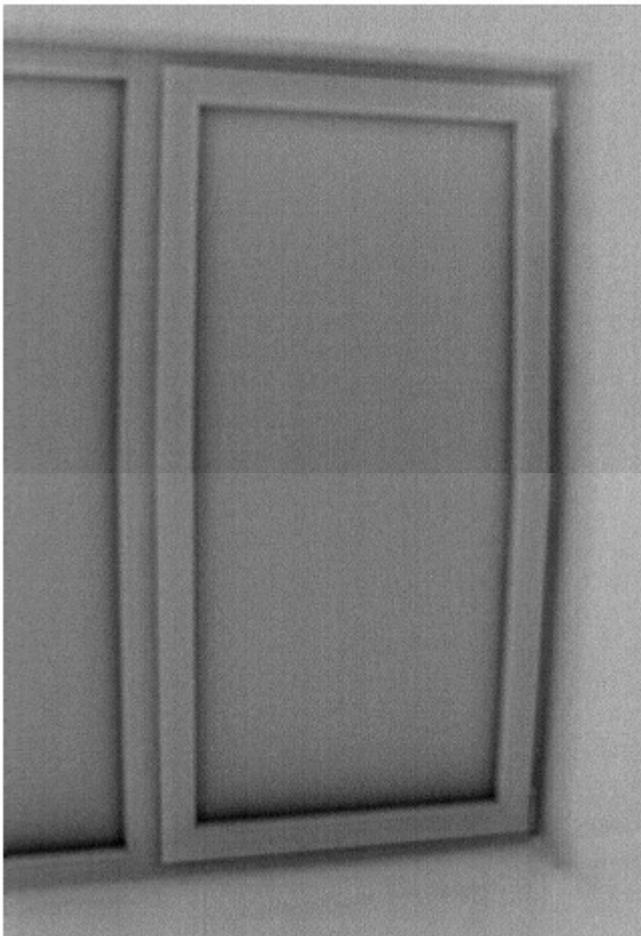


IR-Bild 26



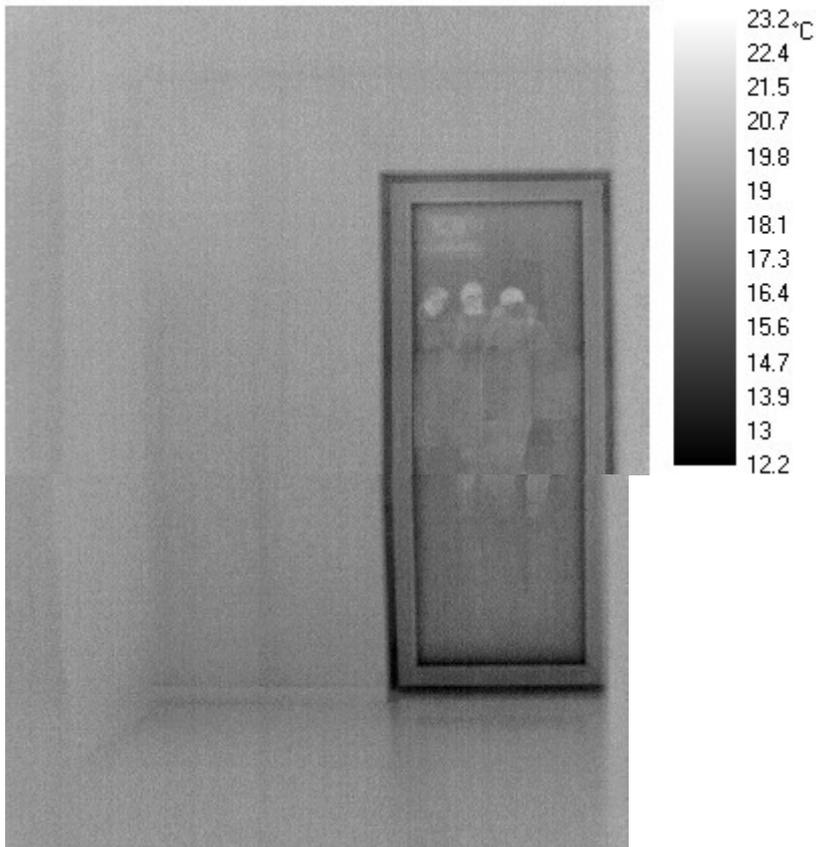
IR-Bild 27

Innenthermographie: EG Wohnzimmer Süd / Fenstertür



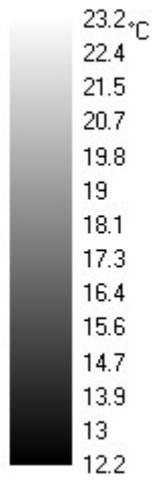
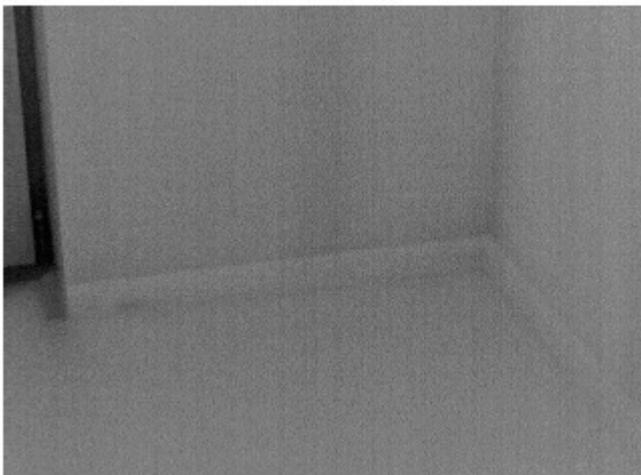
IR-Bild 28

Innenthermographie: EG Eßzimmer Nord / Ecke rechts



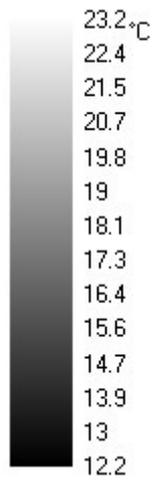
IR-Bild 29

Innenthermographie: EG Eßzimmer Nord / Wand zum Windfang



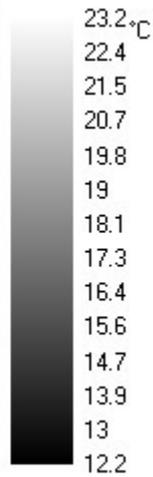
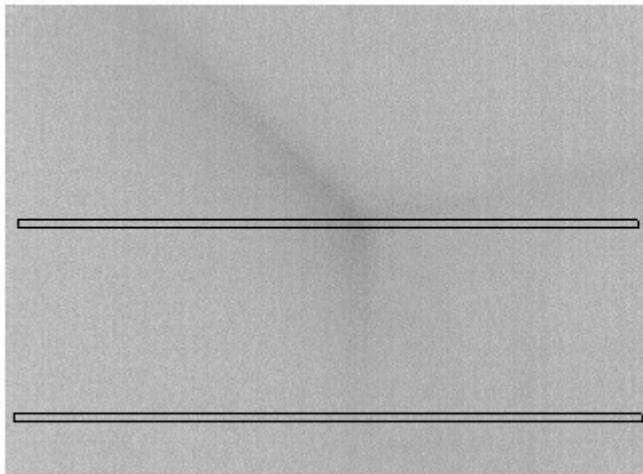
IR-Bild 30

Innenthermographie: EG Haustür

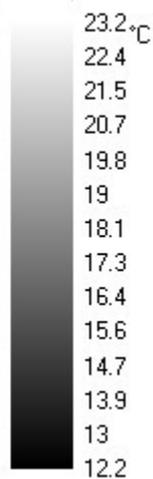
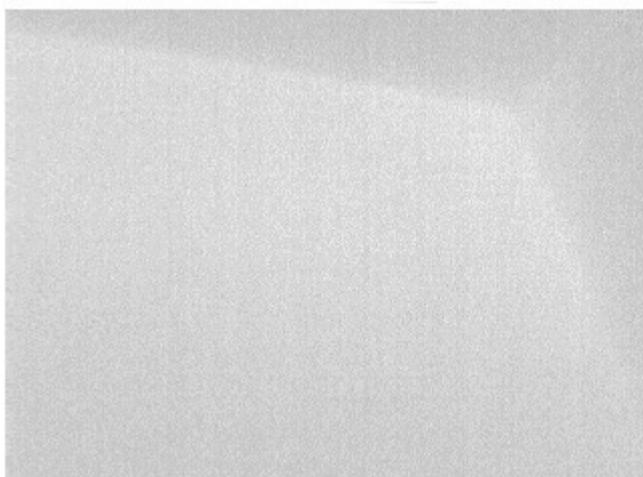


IR-Bild 31

**Innenthermographie: OG Kinderzimmer links
Ecke Süd links und Nordwand zum Technikraum/Treppenhaus**

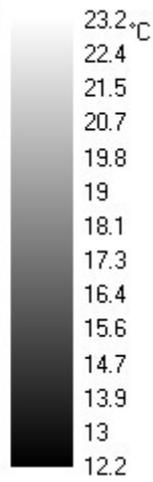
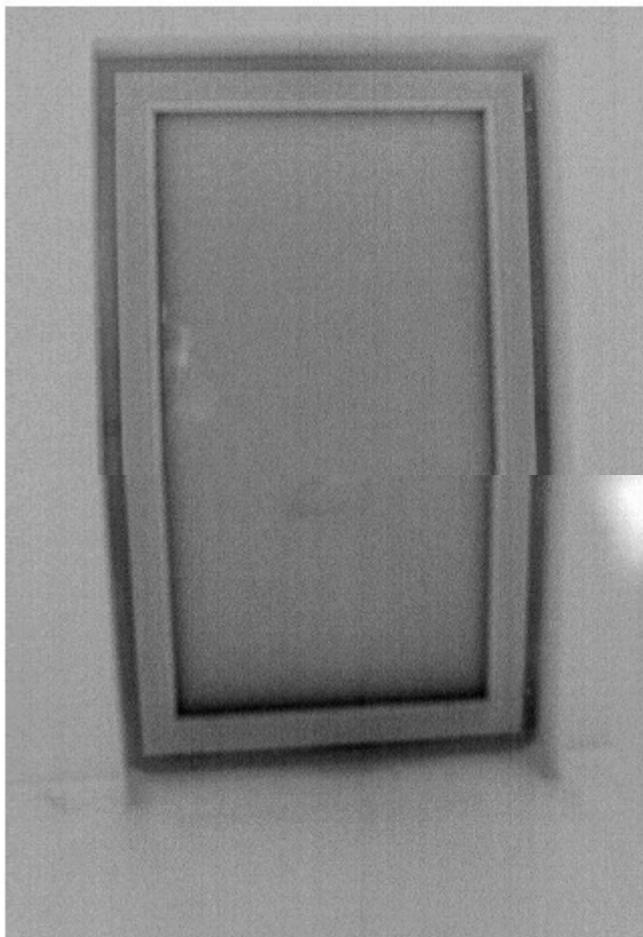


IR-Bild 32



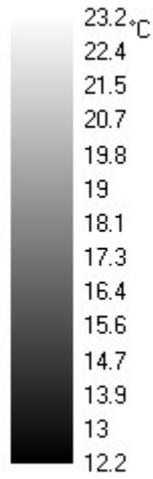
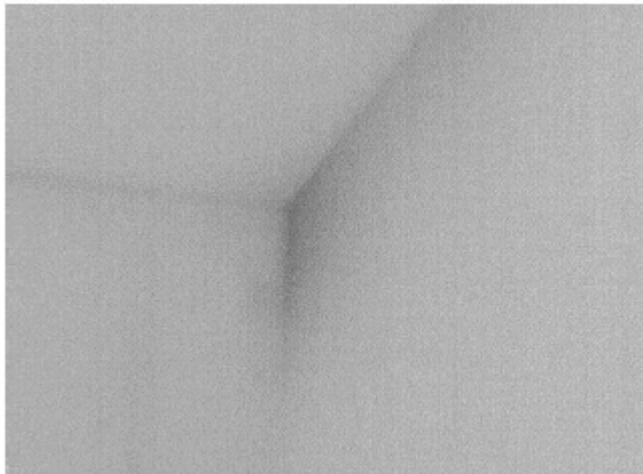
IR-Bild 33

Innenthermographie: OG Kinderzimmer links / Fenstertür



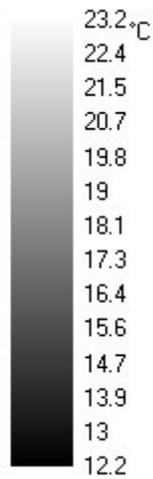
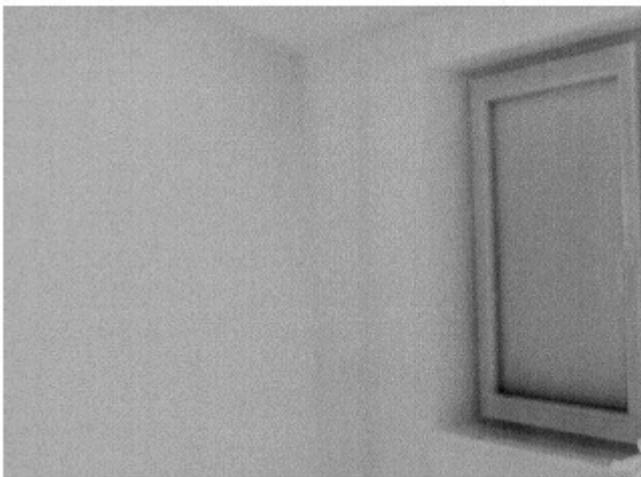
IR-Bild 34

Innenthermographie: OG Kinderzimmer rechts / Süd Ecke rechts

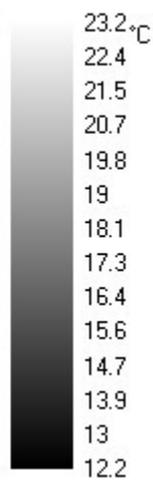


IR-Bild 35

Innenthermographie: OG Schlafzi. / Nord Ecke re und Fenster

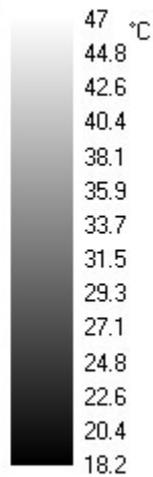
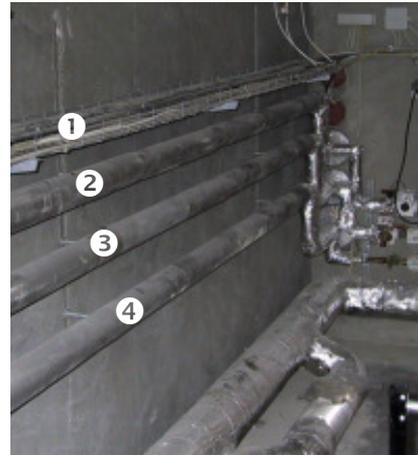


IR-Bild 36

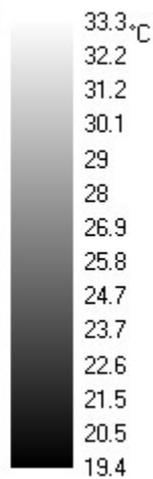
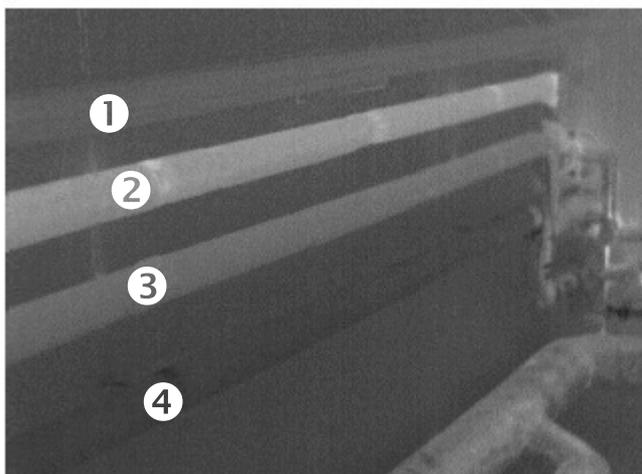


IR-Bild 37

Innenthermographie: Technikgeschoß / Installationswand und Südwand rechts



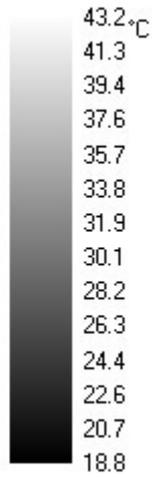
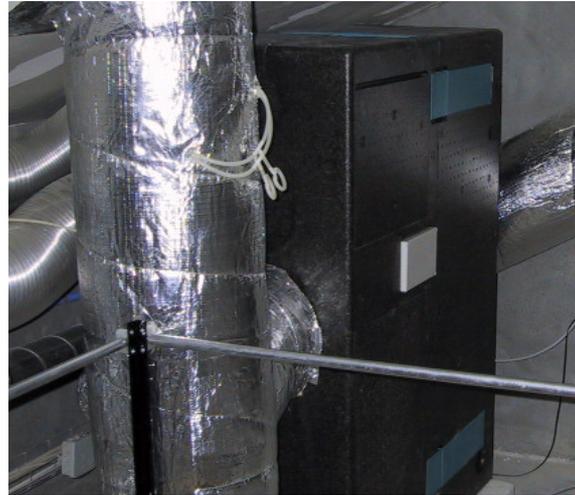
IR-Bild 38



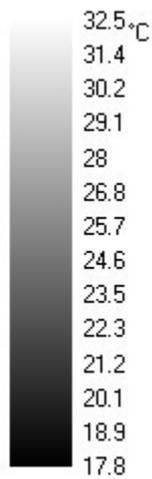
- ❶ Kabelpritsche
- ❷ VL-Heizung
- ❸ RL- Heizung
- ❹ Kaltwasserleitung

IR-Bild 39

Innenthermographie: Technikgeschoß / Heizregister und Lüftungsgerät

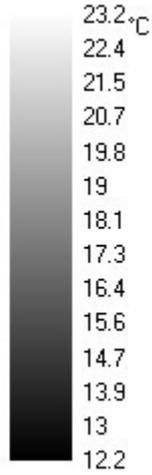
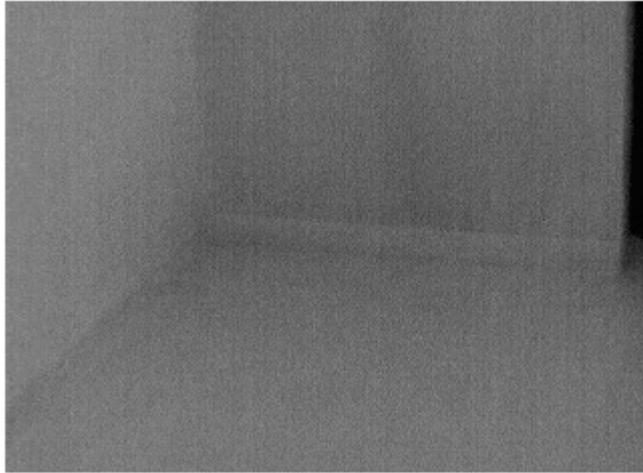


IR-Bild 40

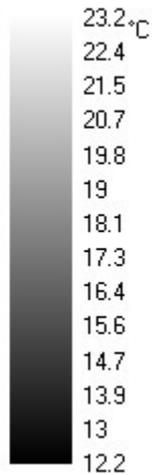
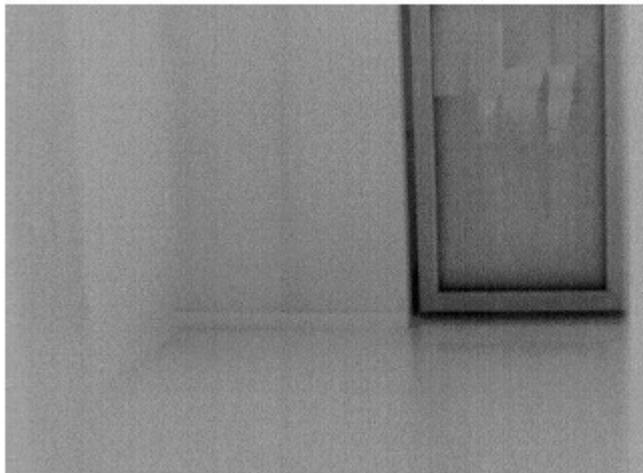


IR-Bild 41

**Innenthermographie Vergleich: Mit und ohne Unterdruck
EG Eßzimmer / Nord rechts unten**

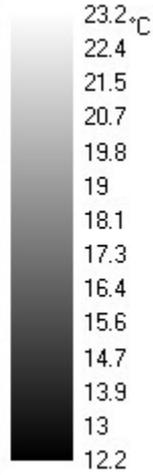
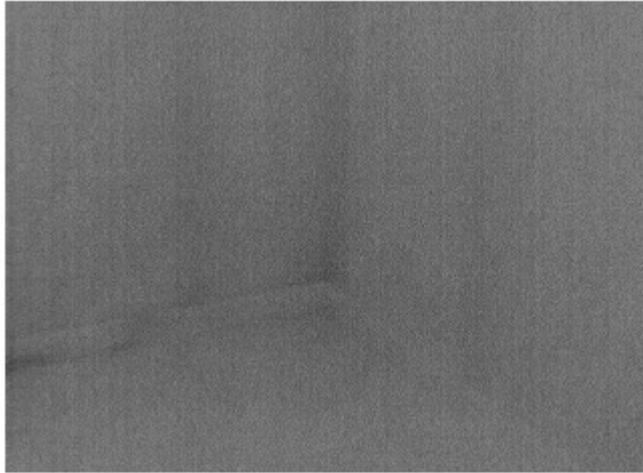


**Unterdruck
IR-Bild 42**

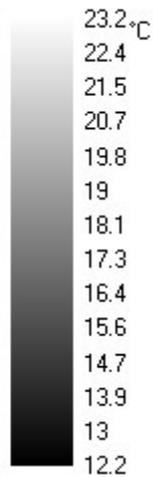
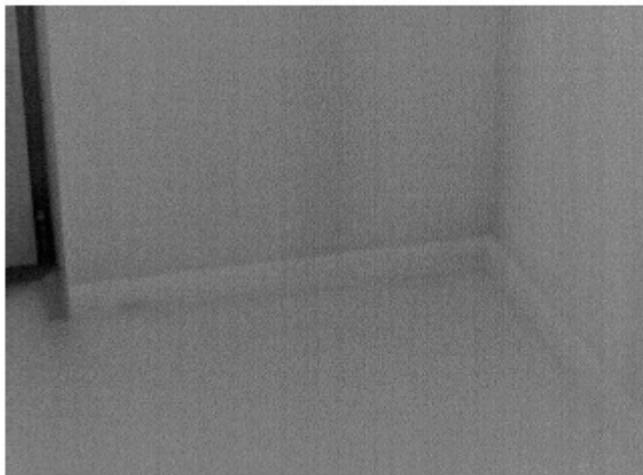


zum Vergleich:
Ausschnitt von IR-Bild 29

**Innenthermographie Vergleich: Mit und ohne Unterdruck
EG EBzimmer / Nord links unten**

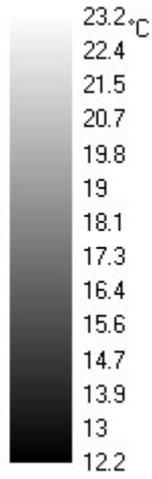
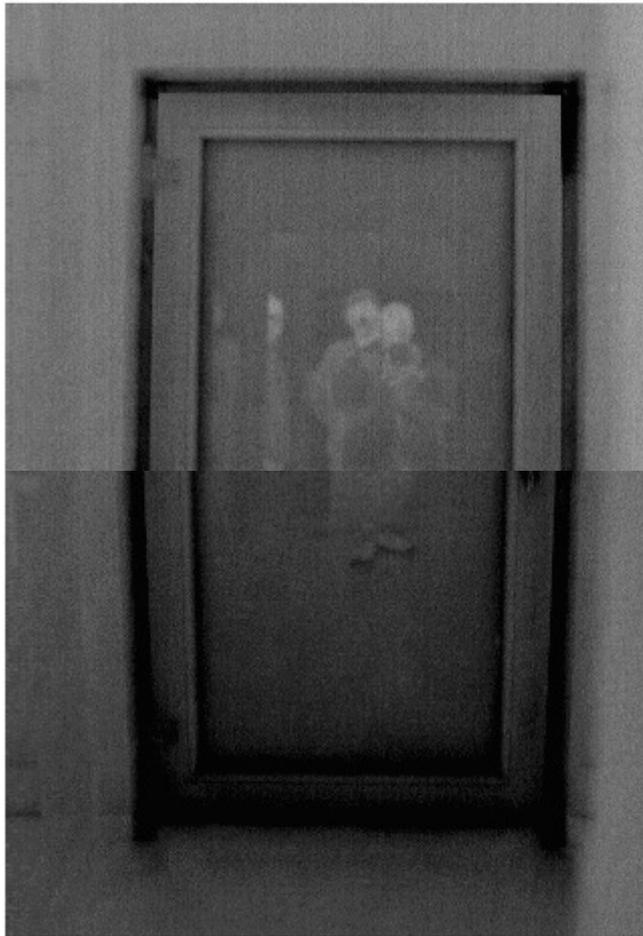


**Unterdruck
IR-Bild 43**

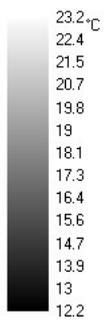


**zum Vergleich:
IR-Bild 30**

**Innenthermographie Vergleich: Mit und ohne Unterdruck
Haustür**

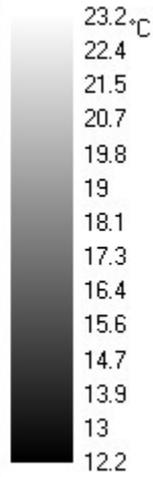
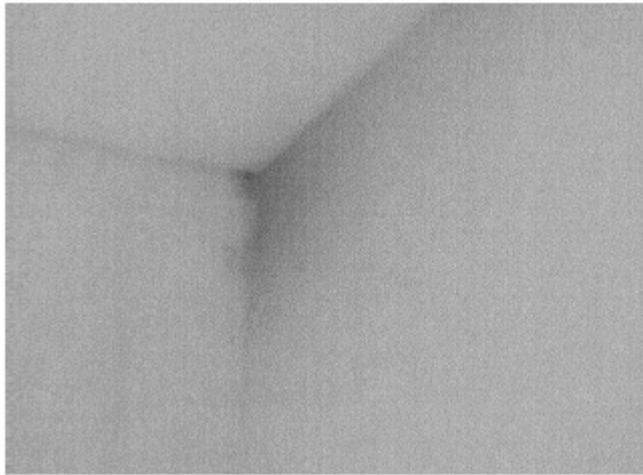


**Unterdruck
IR-Bild 44**

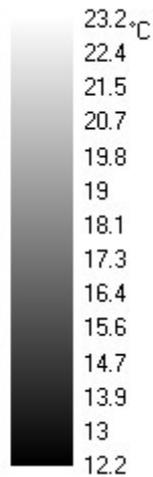
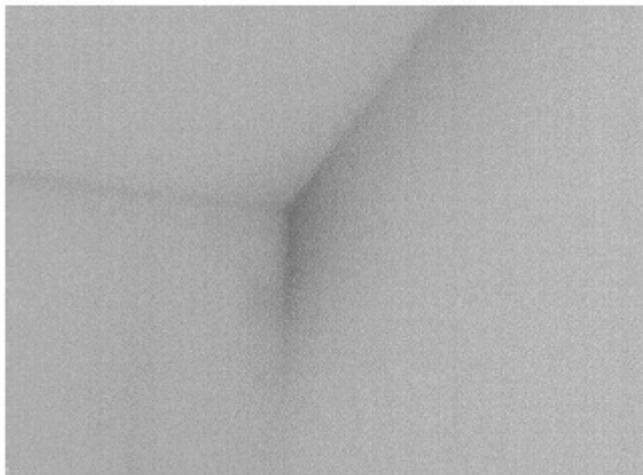


zum Vergleich:
**IR-Bild 31
(Verkleinert)**

**Innenthermographie Vergleich: Mit und ohne Unterdruck
Kinderzimmer rechts / Süd Ecke rechtes oben**



**Unterdruck
IR-Bild 45**



**zum Vergleich:
IR-Bild 35**