

Dr. Wolfgang Feist, Passivhaus Institut

## Qualitätssicherung am Fallbeispiel Nürnberg: Thermographie, Drucktest und Tracergasmessung

### 1 Demonstrationsprojekt "Nürnberg, Jean-Paul-Platz 4": Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse der qualitätssichernden Maßnahmen bei der Modernisierung mit Passivhauskomponenten in Nürnberg zusammengefasst. Das Projekt wurde von der wbg Nürnberg durchgeführt; Planung und Bauleitung lagen beim Architekten Burkhard Schulze-Darup – vgl. dazu auch den vorausgehenden Beitrag. Mit der Qualitätssicherung war das PHI von der Wohnungsbaugesellschaft beauftragt [Feist 2002].

Durch die in Abb. 1 genannten Maßnahmen wurde der Heizwärmebedarf bei diesem Gebäude von etwa 200 kWh/(m<sup>2</sup>a) (alter Zustand) auf unter 26 kWh/(m<sup>2</sup>a) gesenkt. Dabei wurden typische, handelübliche Passivhauskomponenten verwendet.

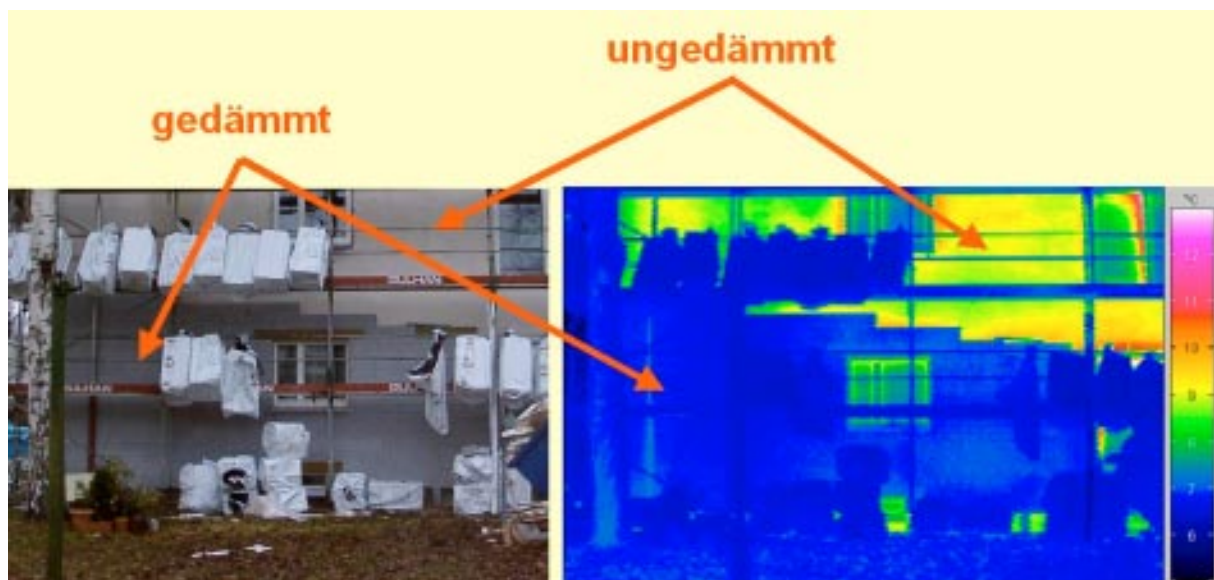


Abb. 1: Das Demonstrationsprojekt "Nürnberg, Jean-Paul-Platz 4" im Eigentum der wbg Nürnberg, Modernisierungsplanung durch Architekt Burkhard Schulze-Darup

## 2 Thermographische Kontrolle der Außenhülle

Noch während der Bausführung fand am 19.11.2002 eine erste baubegleitende thermographische Kontrolle statt. Dabei sollten die prinzipielle Eignung der ausgewählten Maßnahmen, die Qualität der Anschlussdetails und evtl. besondere Problempunkte so rechtzeitig begutachtet werden, dass eine Reaktion darauf und eine Anpassung der Maßnahmen noch möglich gewesen wäre.

Abb. 2 zeigt einen Bereich der Südwand des Gebäudes nach dem Einbau der neuen Fenster, bei bereits fertiggestellter Spachtelung auf dem alten Putz (heller Bereich, "ungedämmt") und mit teilweise bereits aufgeklebten Dämmplatten des Wärmedämmverbundsystems (dunkler Bereich, "gedämmt") – links in der optischen, rechts in der thermographischen Aufnahme. Die am Gerüst hängenden Säcke sind mit Dämmplatten gefüllt, sie gehören zur Logistik des Systemherstellers – in den Aufnahmen verwehren sie den Blick auf die Fassade, bieten jedoch zugleich eine gute Referenztemperatur von etwa 6,4 °C. Die Oberfläche der bereits gedämmten Bereiche des Gebäudes liegt mit etwa 7,0 °C nur unwesentlich darüber; auf der gedämmten Oberfläche sind keine Unregelmäßigkeiten zu erkennen. Sehr schön ist der Kontrast zur ungedämmten Wandoberfläche, die im ungestörten Bereich Oberflächentemperaturen um 9,1 °C aufweist und unregelmäßiger gefärbt ist. Gut erkennbar ist der Randeffect am Ende der gerade angebrachten Dämmung: Da sich die gemauerte Wand unter der Wärmedämmung erwärmt, wird dies durch höhere Oberflächentemperaturen am Rand der schon angebrachten Dämmung erkennbar.



**Abb. 2:** Am Thermographietermin während der Dämmarbeiten (19.11.2002) zeigt sich der Unterschied zwischen gedämmter und noch ungedämmter Außenwand

Die Wirksamkeit der Außenwanddämmung wird in der Aufnahme vom 17.12.2002 am besten dokumentiert (Abb. 3). Hier ist die Dämmung vollständig inkl. Oberputz fertiggestellt, jedoch sind die vorgestellten Balkone noch nicht montiert (im optischen Bild ist die Hebebühne zu sehen, die für die Balkonmontage verwendet wurde). Die Thermographie zeigt eine nahezu völlig ungestörte Außenoberfläche des Gebäudes mit einer durchgehend gleichmäßigen Oberflächentemperatur von 3,7 °C. Diese unterscheidet sich kaum von den Oberflächentemperaturen des Baumes bzw. des Gerüsts für die Wäscheleinen im Vordergrund. Im Kontrast dazu steht die bunte Oberfläche des ungedämmten Hauses im Hintergrund; bei diesem haben die Wandoberflächen höhere Temperaturen als die Fensteroberflächen beim Demonstrationsvorhaben (in Übereinstimmung mit der bauphysikalischen Theorie). Auffällig ist die Auswirkung des gekippten Fensters (2. OG. links). Nur bei aufmerksamer Betrachtung sind die Punktwärmebrücken der Stahlbefestigungsschrauben für den anzubringenden vorgestellten Balkon zu erkennen.

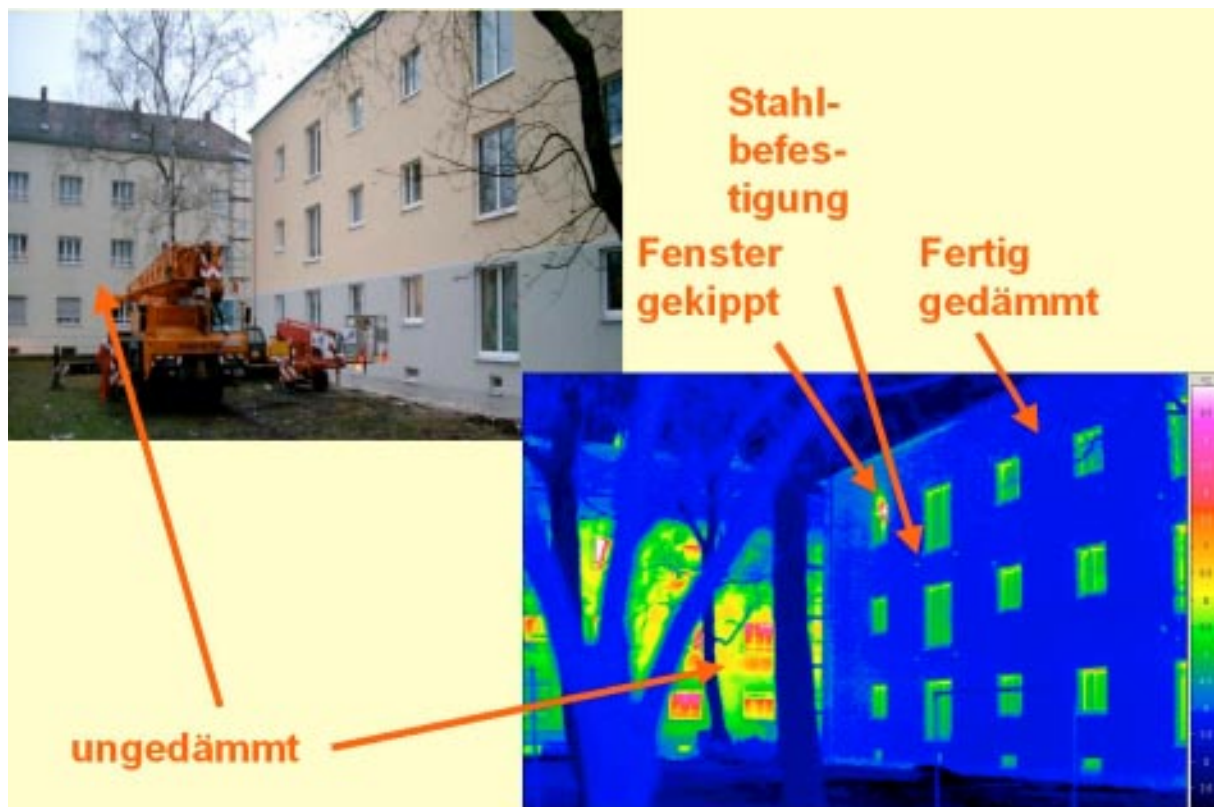
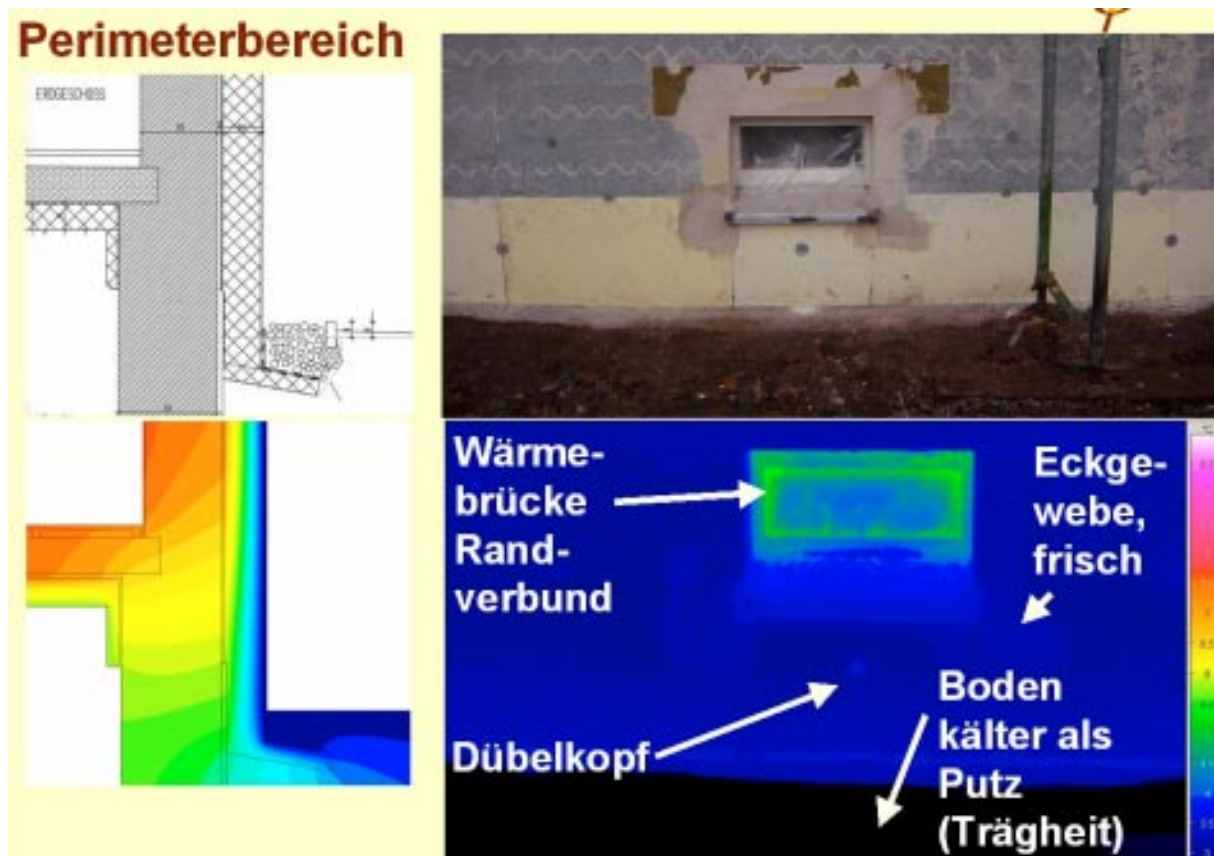


Abb. 3: Ansicht und Thermographie der Südfassade im fertig gedämmten Zustand. Im Hintergrund ein Altbau ohne Wärmedämmung.

## 2.1 Thermographie des Perimeterbereiches

Eine Detailaufnahme des Perimeterbereiches zeigt Abb. 4. Die Perimeterdämmung aus feuchtebeständigem extrudiertem Polystyrol wurde bis etwa 15 cm in das

Erdreich fortgesetzt. Dort schließt sich eine leicht nach außen geneigte Dämmschürze an; die Isothermenberechnung zeigt, dass mit dieser Maßnahme die Temperatur im Raum auch an der Fußleiste so hoch gehalten werden kann, dass Schimmelwachstum ausgeschlossen bleibt. Die Außenthermographie der noch unverputzten Oberfläche zeigt nur eine geringfügige Temperaturvariation. Unterschiede in der Emissivität der Oberflächen sind bei genauer Betrachtung erkennbar, z.B. beim bereits mit Grundputz eingelassenen Eckgewebe. Auch der Dübelkopf zeichnet sich nur sehr schwach ab. Auffällig ist dagegen die Wärmebrücke am Randverbund des Kellerfensters. Die Oberfläche des Umgebungsbodens ist deutlich kälter als die Wandoberfläche. Die Ursache hierfür ist die hohe Wärmekapazität des Bodens und die Tatsache, dass die vorausgehenden Tage deutlich kälter waren als der Tag, an dem die Thermographie stattfand.



**Abb. 4:** Bauzeichnung, Temperaturfeldberechnung, Ausführungsfoto und thermographische Aufnahme des Sockelbereiches; die Perimeterdämmung wird in das Erdreich hinein fortgesetzt und knickt in Form einer Dämmschürze ab.

Abb. 5 zeigt die zu Abb. 4 komplementäre thermographische Aufnahme von der Innenseite (ebenfalls am 17.12.2002 aufgenommen). Die Raumlufttemperatur liegt knapp über 21°C, der Isothermenschnitt links unten in der Abb. wurde mit den am Ort gemessenen Randbedingungen (stationär) berechnet. Nach der Berechnung ergibt sich in der Fußleisten-Kante eine Minimaltemperatur von 18,5°C; die Temperatur-

absenkung nach der Thermographie ist etwas höher ( $17,7^{\circ}\text{C}$ ; Nacheichung erfolgte mit einem PT100 – Temperaturfühler). Die niedrigere gemessene Temperatur kann auf zwei Ursachen zurückgeführt werden: Den instationären Effekt auf Grund der vorausgehenden kälteren Tage und den Wärmeverbrauch für die Trocknung der gemauerten Ziegelwände. Diese haben wegen der jahrelang vorliegenden niedrigeren Temperaturen (und daher höheren relativen Feuchtigkeiten) nämlich eine vergleichsweise hohe Materialfeuchte ( $u_{80}$  bis  $u_{95}$ ), kommen nach der Wärmedämmung auf deutlich höhere Temperaturen und geben daher kapillar gebundene Feuchtigkeit ab; dies verursacht einen Wärmeverbrauch, der insbesondere im ersten Winter erkennbar ist. Sowohl die berechnete als auch die gemessene Minimaltemperatur liegen weit oberhalb von  $12,6^{\circ}\text{C}$  (der für Myzelwachstum kritischen Grenze). Damit werden die Überlegen zur qualitativen Verbesserung des Wärmeschutzes durch Passivhauskomponenten auch im kritischen Sockelbereich durch die Praxis bestätigt. Eine bedeutender Spielraum für schlechtere Wärmedämmung besteht, wenn man die Abschirmung durch Möbel mit einbezieht, jedoch kaum.

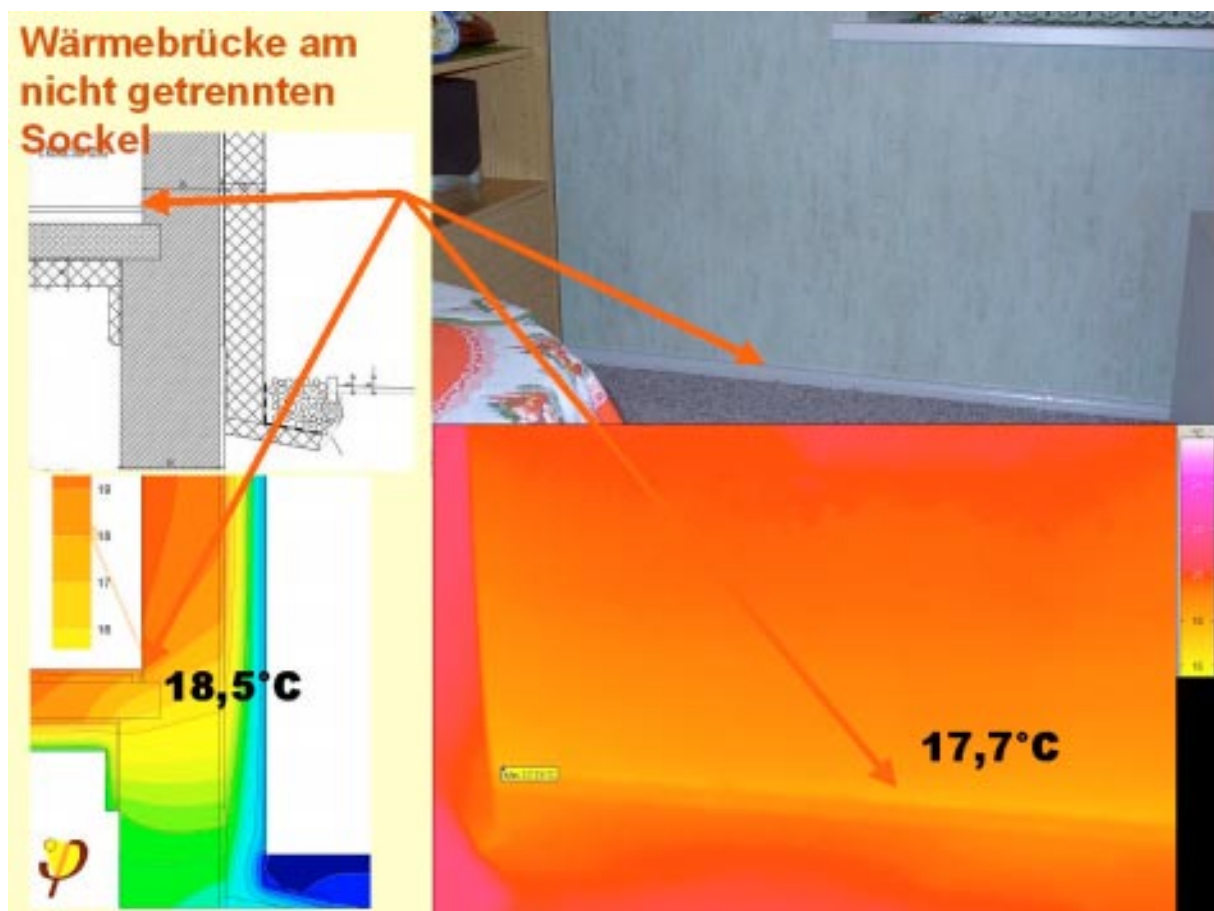


Abb. 5: Thermographische Innenaufnahme zum Sockeldetail aus Abb. 4. Die Oberflächentemperaturen sind hoch genug, um Myzelwachstum sicher auszuschließen.

## 2.2 Fenster und Fenstereinbau

Abb. 6 zeigt wieder eine thermographische Aufnahme während der Bauausführung am 19.11.2002, hier von einem frisch vor der Fassade eingebauten Fenster. In Abb. 7 ist links oben die zugehörige Planzeichnung dokumentiert. Durch den Einbau weit außen in und halb vor der alten Mauersteinwand wird ein nahezu wärmebrückenfreier Übergang zur später aufgetragenen Außendämmung ermöglicht. Noch ohne die Außendämmung zeigt Abb. 6 zunächst sehr deutlich die Einbauwärmebrücke, erkennbar durch einen warmen Streifen rings um den Blockrahmen. Die Wärmedämmung der Verglasung und die des ungestörten Rahmens sind als ganz ausgezeichnet erkennbar – die Wärmeverluste sind geringer als die der noch nicht gedämmten alten Mauersteinwand. Deutlich sichtbar sind aber auch die Auswirkungen des Glasrandverbundes durch einen umlaufenden warmen Streifen rings um die Verglasung; im oberen Bereich ist der Effekt durch die Konvektion im Scheibenzwischenraum verstärkt. Dort gelangt das an der wärmeren mittleren Scheibe aufsteigende Füllgas an die Innenoberfläche der äußeren Scheibe und erwärmt diese; Das Füllgas kühlt sich beim Absinken entlang dieser Scheibe ab und gelangt, nun kalt, am unteren Abschluss wieder zurück zur mittleren Scheibe – diese kühlt daher im **unteren** Bereich stärker aus; dies ist auf der komplementären thermographischen Innenaufnahme (Abb. 8) ebenfalls gut zu erkennen.

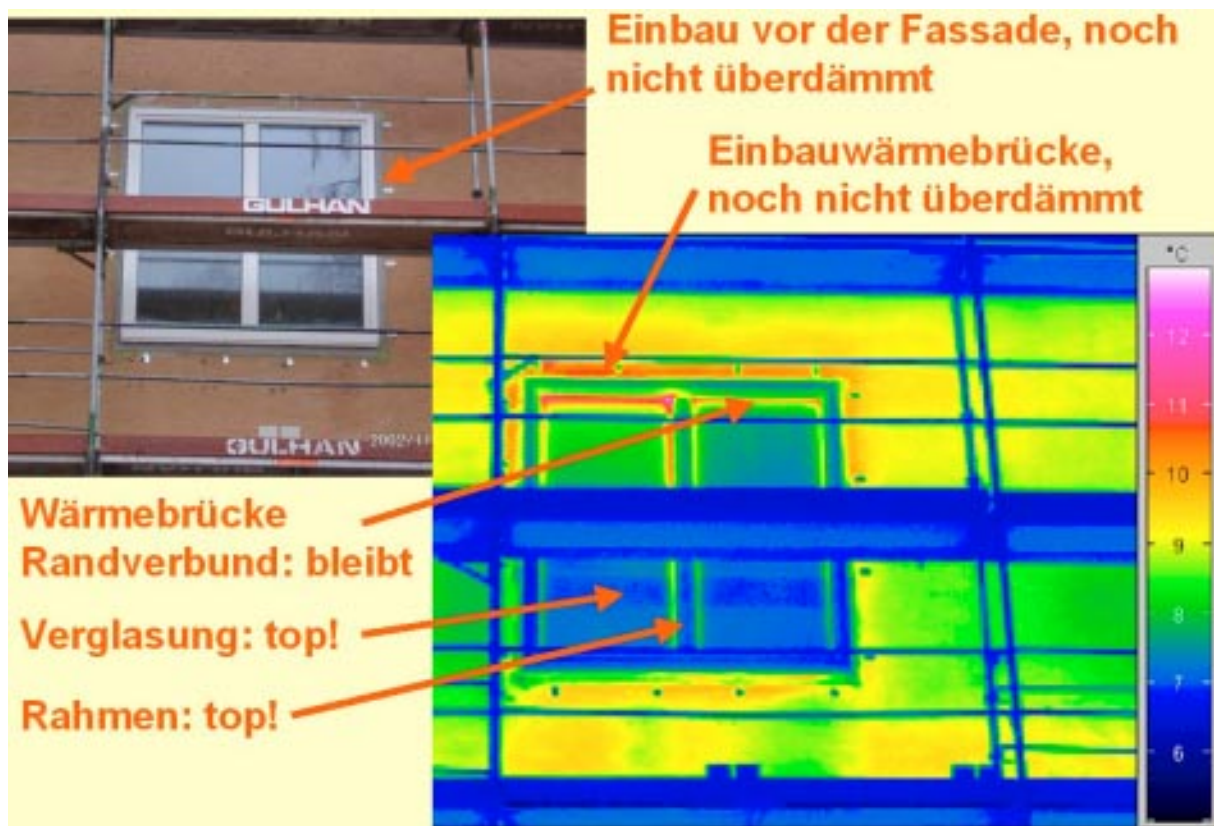
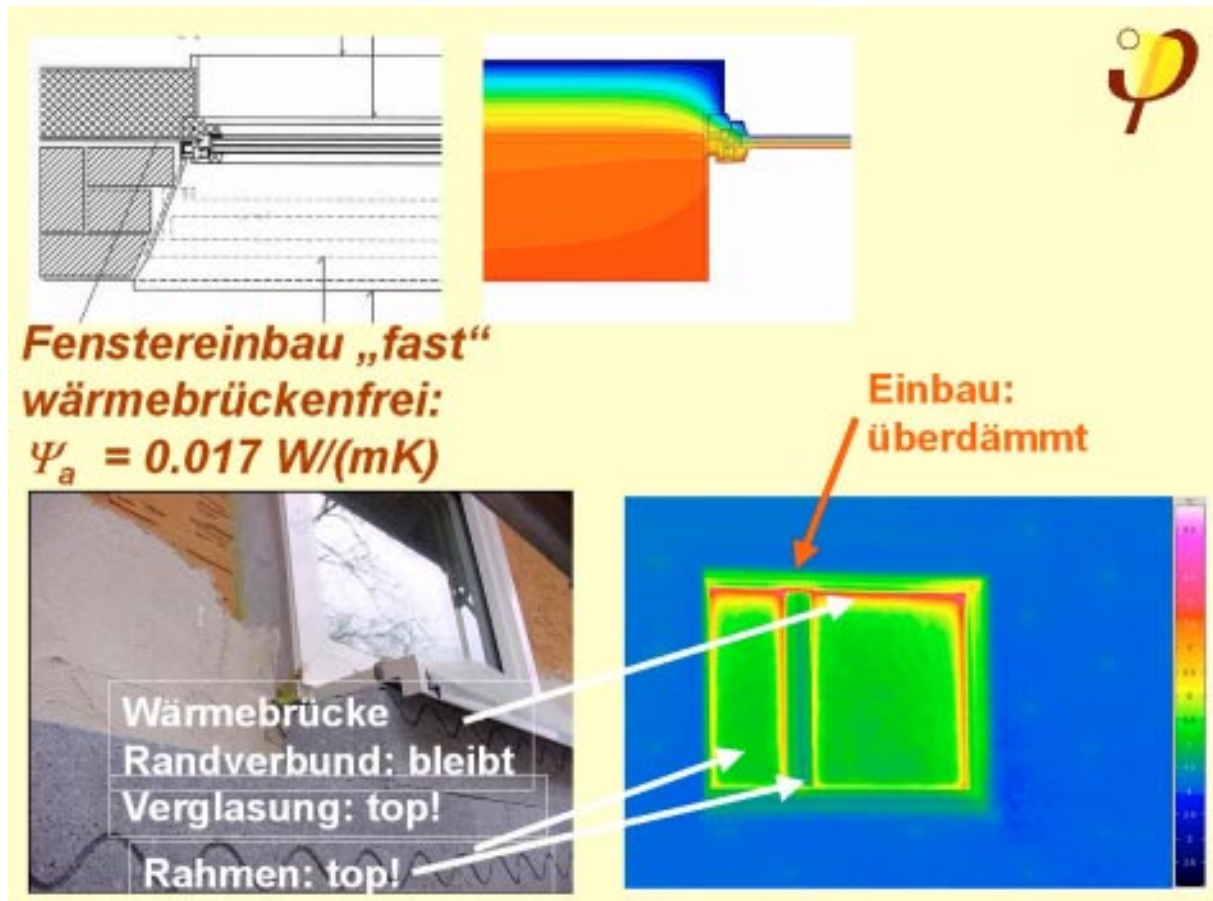


Abb. 6: Hochwärmedämmende Fenster: Ausführungsfoto und thermographische Aufnahme während der Ausführung.

Abb. 7 zeigt, dass die Einbauwärmebrücke nach der Überdämmung mit dem Wärmedämmverbundsystem praktisch verschwindet (Aufnahme vom 17.12.2002). Nun erscheint die gedämmte Wand in einem homogenen Blauton – dies zeigt die wärmebrückenfreie Konstruktion, die Qualität von Verglasung und Rahmen sind ebenso offensichtlich – wegen der höheren U-Werte liegen auf der Außenseite höhere Oberflächentemperaturen als bei der Außenwand vor. Die durch den Randverbund und die Konvektion des Füllgases bedingten Wärmbrücken treten nun deutlich hervor.



**Abb. 7: Planzeichnung, Isothermenberechnung, Ausführungsfoto und thermographische Kontrolle nach Fertigstellung für das Fenster-Anschluss-Detail.**

Eine Überprüfung der bauphysikalischen Aussagen zum Fenstereinbau ist an Hand der thermographischen Innenaufnahme der Fenstertür (Abb. 9) möglich. An der Oberfläche der frei im Raum hängenden Vorhänge kann die Schichtung der Raumlufttemperatur von 21,7 °C am Boden bis 23 °C im oberen Raumbereich abgelesen werden. Die Innenwandoberfläche liegt erwartungsgemäß nur geringfügig unter dieser Temperatur, der ungestörte Bereich des Fußbodens weist Temperaturen über 21 °C auf. Im ungestörten Zentrum der Verglasungen liegt die Oberflächentemperatur um 21,5 °C. Die Fensterrahmen sind nur wenig kälter. Deutlich erkennbar ist die Wärmebrücke durch den Glasrandverbund; die Temperatur geht hier auf um

16,5°C zurück, am unteren Glasrand liegt sie – trotz der zusätzlichen Abkühlung durch die Konvektion im Füllgas – aber immer noch über 16°C. Eine Gefahr für Schimmelwachstum besteht auch hier in Übereinstimmung mit der Berechnung nicht. Auch die Einbauwärmebrücke ist, insbesondere im unteren, nicht überdämmten Bereich, durch eine Temperaturabsenkung auf minimal 17°C erkennbar. Auch dies entspricht den bei der Berechnung erwarteten Werten und bietet ausreichend Sicherheit gegen Schimmelwachstum. Die Innenthermographie der Fenstertür bestätigt damit die Erwartungen an die bauphysikalisch hochwertige Ausführung beim Fensteranschluss.



**Abb. 8: Ausführungsfoto vom Einbau und Innenthermographie des annähernd wärmebrückenfrei eingebauten Fensters.**



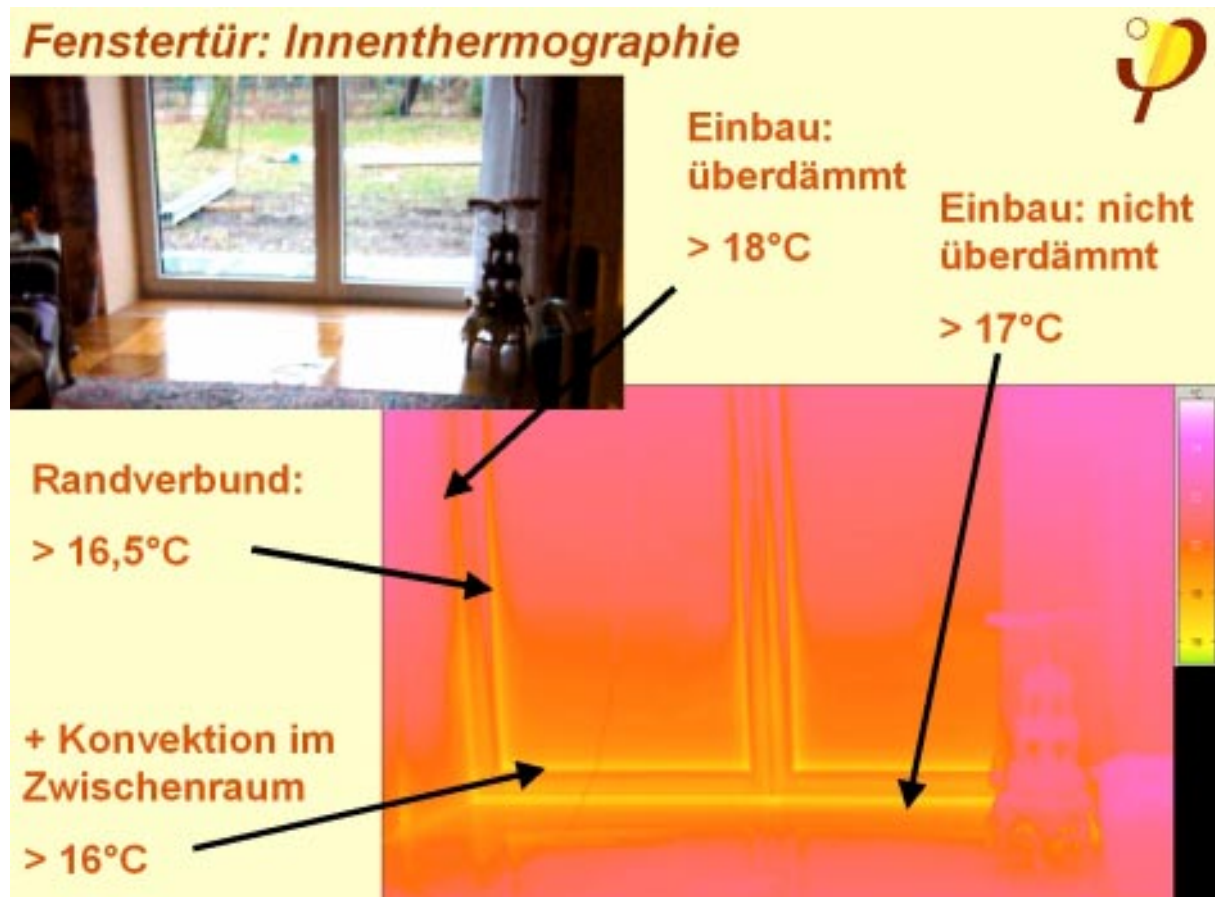


Abb. 9: Innenthermographie bei einer Fenstertür

## 2.3 Thermographie der Dachgeschossdeckendämmung

Abb. 10 zeigt die Konstruktionszeichnung (links oben) der Dämmung der Dachgeschossdecke (inkl. der Umdämmung des Kniestockes), das zugehörige berechnete Temperaturfeld, die Ausführung des Dämmarbeiten (unten links) und die thermographische Aufnahme der fertig gedämmten Decke von der kalten Seite (unten rechts). Auf dem Thermographiebild ist die außerordentlich gleichmäßige Temperaturverteilung der Estrichoberfläche erkennbar; die Temperaturdifferenzen betragen weniger als 3/10 Kelvin. Auch die Dämmung im Bereich des Kniestockes lässt keine bedeutenden Wärmebrückeneffekte erkennen. In Abb. 11 ist die Detailsausführung der Wärmedämmung des Kniestockes dokumentiert. Einzig auffällig ist die hohe Oberflächentemperatur der Fallrohrentlüftungsleitung. Die Qualitätskontrolle der gedämmten Dachgeschossdecke zeigte, dass die angestrebte hochwärmedämmende Wirkung auf der gesamten Fläche wärmebrückenfrei erreicht wurde.

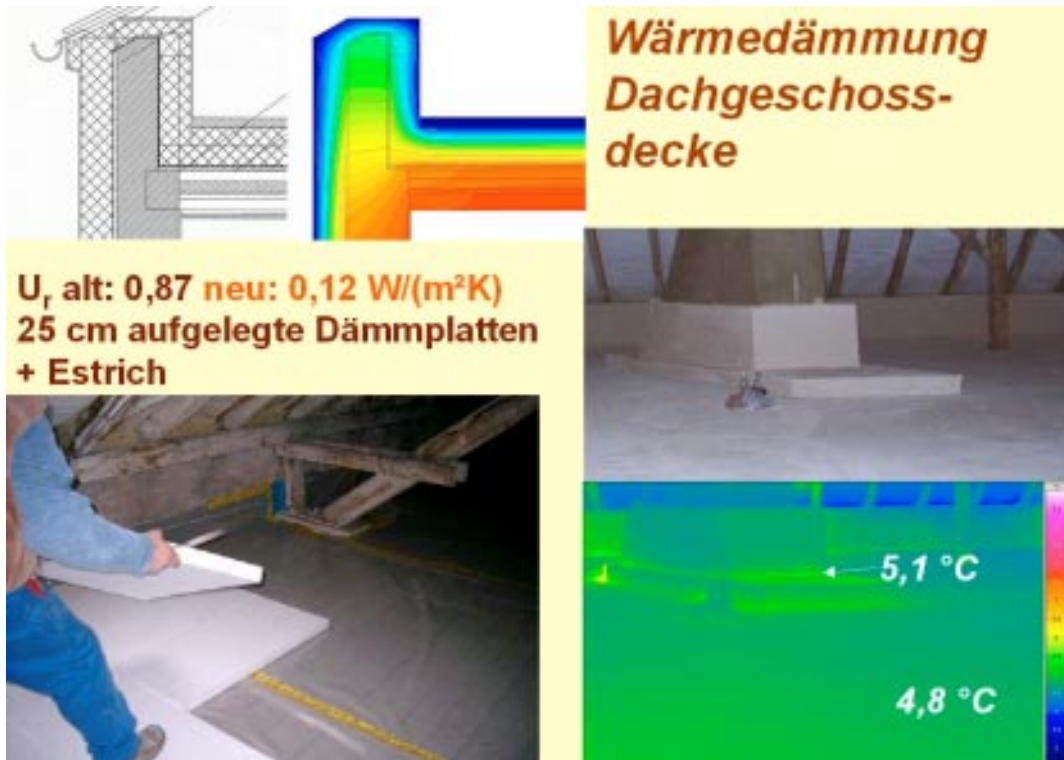


Abb. 10: Planzeichnung, Isothermenberechnung, Ausführungsfoto und thermografische Aufnahme nach Fertigstellung der Wärmedämmung der obersten Geschossdecke (inkl. Detail am Kniestock)

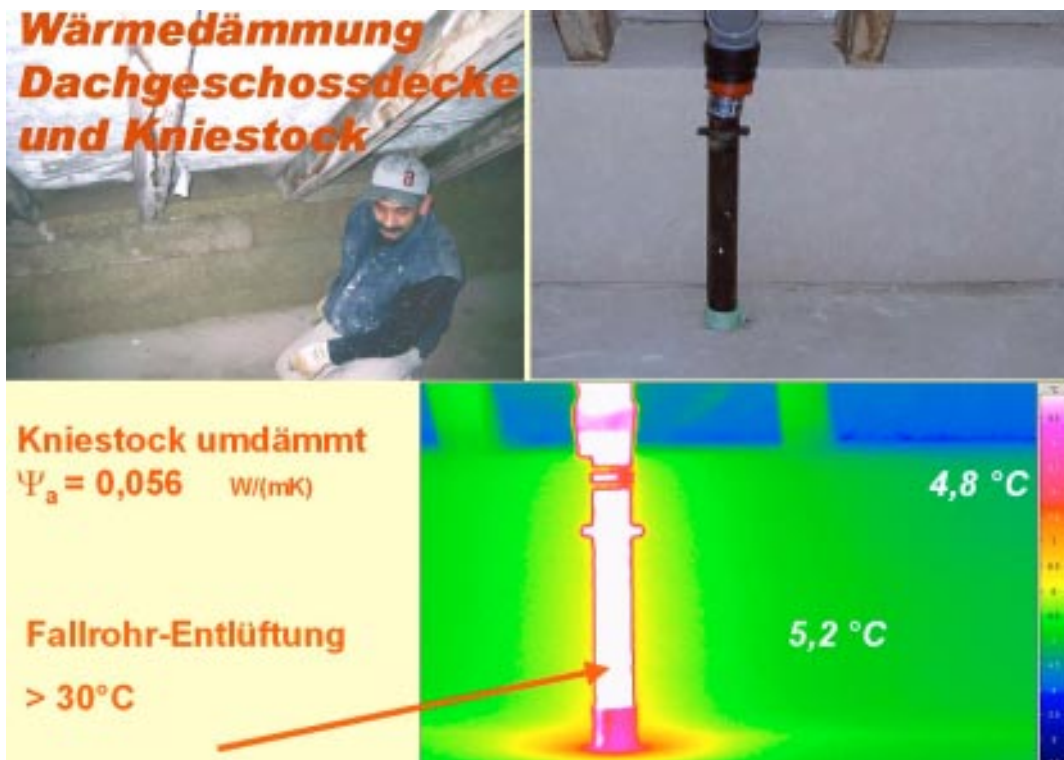


Abb. 11: Ausführung der Umdämmung des Kniestockes, thermographische Aufnahme des fertiggestellten Details; sichtbar ist außerdem eine Fallrohr-Entlüftungsleitung.

## 2.4 Kontrolle der Wärmedämmung der Kellerdecke

Die thermographische Aufnahme während der Bausausführung (Abb. 12) zeigt konvektive Wärmebrücken durch die noch nicht geschlossenen Spalte der Stöße zwischen den Dämmplatten. Auch die Dübelköpfe sind gut erkennbar. Diese Aufnahme macht deutlich, dass die nach aufzubringende Spachtelung nicht nur eine ästhetische Funktion hat, sondern vor allem dafür sorgen muss, dass die Konvektion zwischen den und um die Dämmplatten verhindert wird.

In Abb. 13 ist der Randdämmstreifen an einer anderen Stelle mit bereits fertiggestellter Spachtelung dokumentiert. Die konvektive Wärmebrücke ist jetzt beseitigt. Die beiden dargestellten Temperaturprofile zeigen jeweils exponentielle Angleichungskurven, wie es für eine aus einer isothermen Decke abzweigende Wand theoretisch zu erwarten ist. Die Kellerwand tritt immer noch etwas erwärmt aus der Randstreifendämmung hervor; das Ergebnis entspricht genau den Erwartungen. Gerade bei massivem Kellermauerwerk ist der zusätzliche Randdämmstreifen zu empfehlen, weil dadurch die Temperaturen im Sockelbereich des Erdgeschoss-Fußbodens angehoben wird.

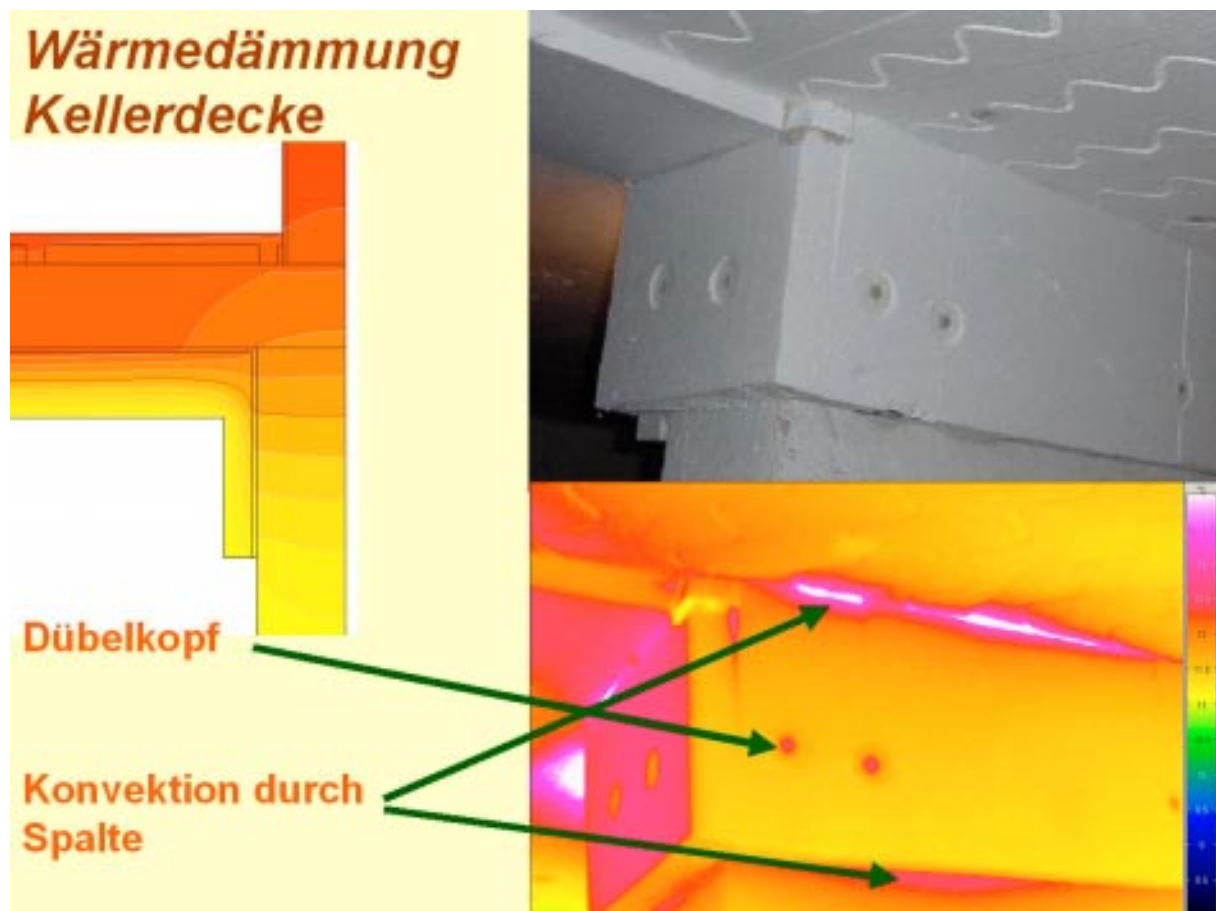
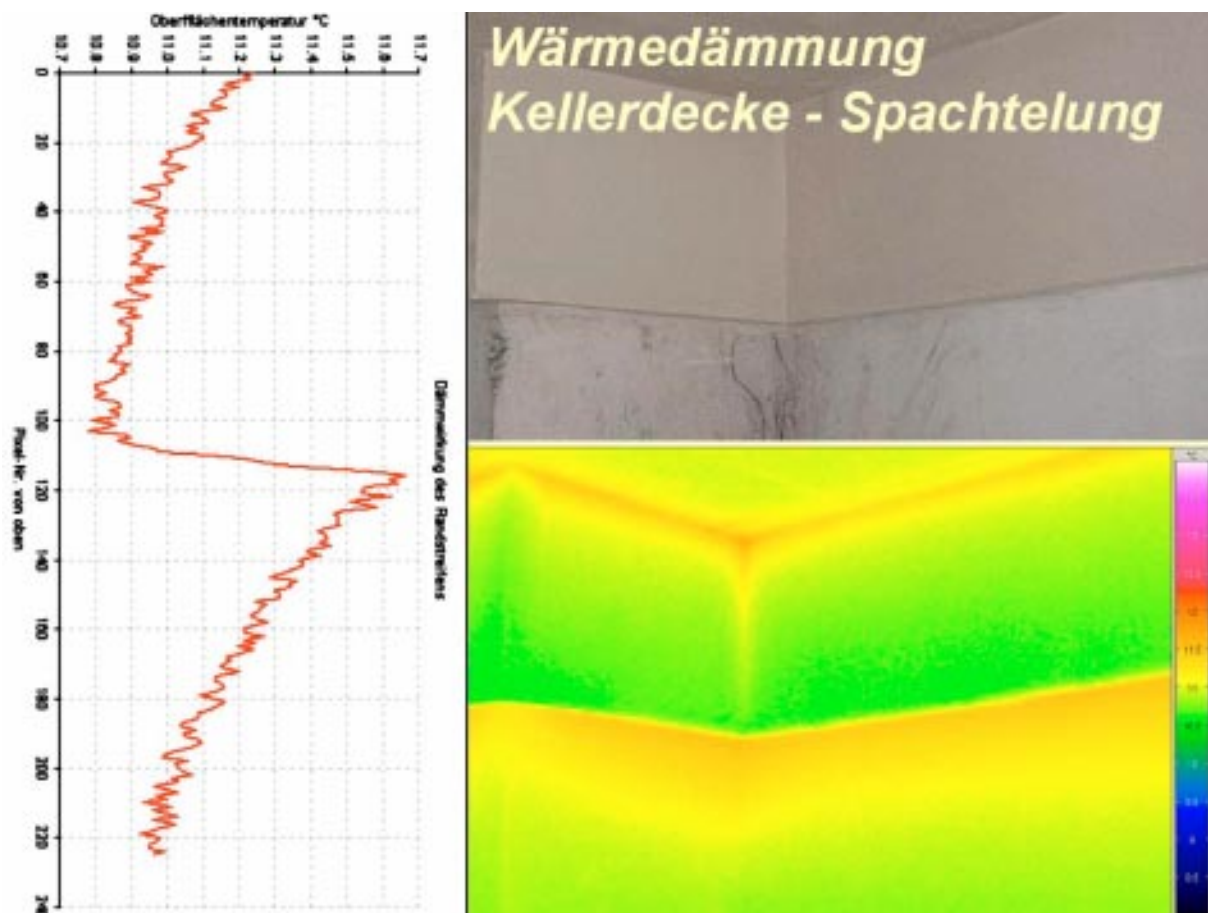


Abb. 12: Isothermenberechnung, Ausführungsfoto und thermographische Kontrollaufnahme während der Ausführung von Kellerdeckendämmung und Randdämmstreifen einer tragenden Kellerwand – noch ohne Spachtelung

Abb. 14 zeigt die Thermographieaufnahme der Kellerdecke im Mittelgang; auch diese Aufnahme wurde in der Zeit der Bausausführung gemacht. In diesem Bereich verlaufen Kaltwasser- und Stromleitungen unter der Decke; ein flächiges Verkleben von Dämmplatten war daher nicht möglich. Vielmehr wurde eine Unterkonstruktion mit Gipskartonplatten verkleidet, darunter wurde so gut wie möglich mit Mineralwolle gedämmt. Das fleckige Aussehen der Thermographieaufnahme zeigt, dass hierbei offenbar einige weniger gut gedämmte Bereiche verblieben sind (Oberflächentemperaturen bis 12,5°C). Besonders warm treten die Wechselstromzähler hervor (Verlustleistung), während sich im Hintergrund ein Kellerfenster kalt abzeichnet (bis herunter zu 8,5°C). Insgesamt kann auch der Kellerdeckendämmung ein hohes Qualitätsniveau bescheinigt werden.



**Abb. 13: Randdämmstreifen und Anschluss an die Kellerdecke nach Fertigstellung der Spachtelung; links das gemessene Oberflächentemperaturprofil mit exponentiell abnehmenden Temperaturen, wie es der Theorie entspricht.**



Abb. 14: Optisches und thermographisches Bild der Kellerdeckendämmung im Mittelgang; hier gibt es Schwachstellen wegen der dort unter der Decke verlaufenden Installationen; der "warme Fleck" ist ein Wechselstromzähler, der "kalte Fleck" im Hintergrund ein Kellerfenster.



Abb. 15: Holz-Kastenfenster, Dachgeschoss-Holzbalkendecke von oben und verputzte Keller-Rippendecke von unten im ursprünglichen Zustand vor der Modernisierung. Undicht sind vor allem die Fenster und die Holzbalkendecken.

### **3 Prüfung der Luftdichtheit**

Die im ursprünglichen Zustand des Gebäudes vorhandene Leckage wurde bei einem Drucktest vor Ausführung der Maßnahmen zu  $4,9 \text{ h}^{-1}$  bestimmt. Entscheidend für diese hohe Undichtheit sind:

- die Holzbalkendecken mit ihren als Verteilervolumen wirkenden Hohlräumen, die sich an den Balkenköpfen zur Außenwand hin öffnen,
- die Holzbalkendecke als oberste Geschossdecke, die zum Dachraum hin mit dem Holzdielenboden einen extrem hohen Fugenanteil mit bis zu zentimetergroßen Fugen aufweist (vgl. Abb. 15:),
- die alten Kastenfenster ohne Dichtlippen aus Holz, welche sowohl Fugen zwischen Flügel- und Blockrahmen als auch Einbaufugen in der Wand aufgewiesen haben.

Das Luftdichtungskonzept stützt sich bei diesem Projekt auf folgende Maßnahmen bei den Regelflächen (Abb. 15):

- neue Kunststofffenster mit Lippendichtungen,
- Dichtmanschette zum Anschluss der Fenster in die
- Dichtebene der Außenwand, die durch eine Spachtelung auf dem alten Außenputz erfolgt; diese wird schließlich durch das von außen aufgebrachte Wärmedämmverbundsystem geschützt;
- Dampfsperffolie, die auf den Holzdielenbelag der alten Dachgeschossdecke aufgelegt wurde. Diese Folie liegt nach Fertigstellung der darauf aufgelegten Dämmung auf der warmen Seite der Decke; die Dampfsperrowirkung ist beim hier gewählten Aufbau wichtig, weil durch den oberhalb der Dämmung anzubringenden Estrich ein vergleichsweise dichter Abschluss zu kalten Seite hin erfolgt. Beim Einbringen des Estrichs durfte übrigens keine PE-Folie auf der Dämmung (d.i. die kalte Seite) verwendet werden, weil diese zu dampfdicht wäre und es dadurch auf der kalten Seite zu Tauwasserbildung kommen würde.

Die Dichtheit des als Sonderlösung verwendeten Gipsvergusses bei den durch die oberste Geschossdecke durchstoßenden Aussteifungsbalken des Dachstuhles wurde durch eine Thermographie von der kalten Seite bei Überdruck auf der warmen Seite (d.i. die darunter liegende Wohnung) geprüft (Abb. 16). Undichtheiten würden sich bei dieser Prüfung durch austretende Warmluft abzeichnen (die Raumluft im 2. Obergeschoss wies eine Temperatur über  $20 \text{ °C}$  auf). Die thermographische Aufnahme zeigt keinerlei Warmluftfahne, auch nicht aus den z.T. zentimeterdicken Spalten in den alten Holzbalken. Die verwendete Technik des Gipsvergusses erwies

sich an allen Balkendurchtritten als zuverlässig luftdicht; die Aufnahmen erfolgten wenige Tage nach der Fertigstellung der Gipsvergüsse.



Abb. 15: Maßnahmen, die zur Verbesserung der Luftdichtheit ergriffen wurden: Dichtmanschette am Fenster, Spachtelung in der Ebene des alten Außenputzes und auf die alte Holzdielendecke aufgelegt Dampfsperrfolie (darauf kommt die Geschossdeckendämmung).

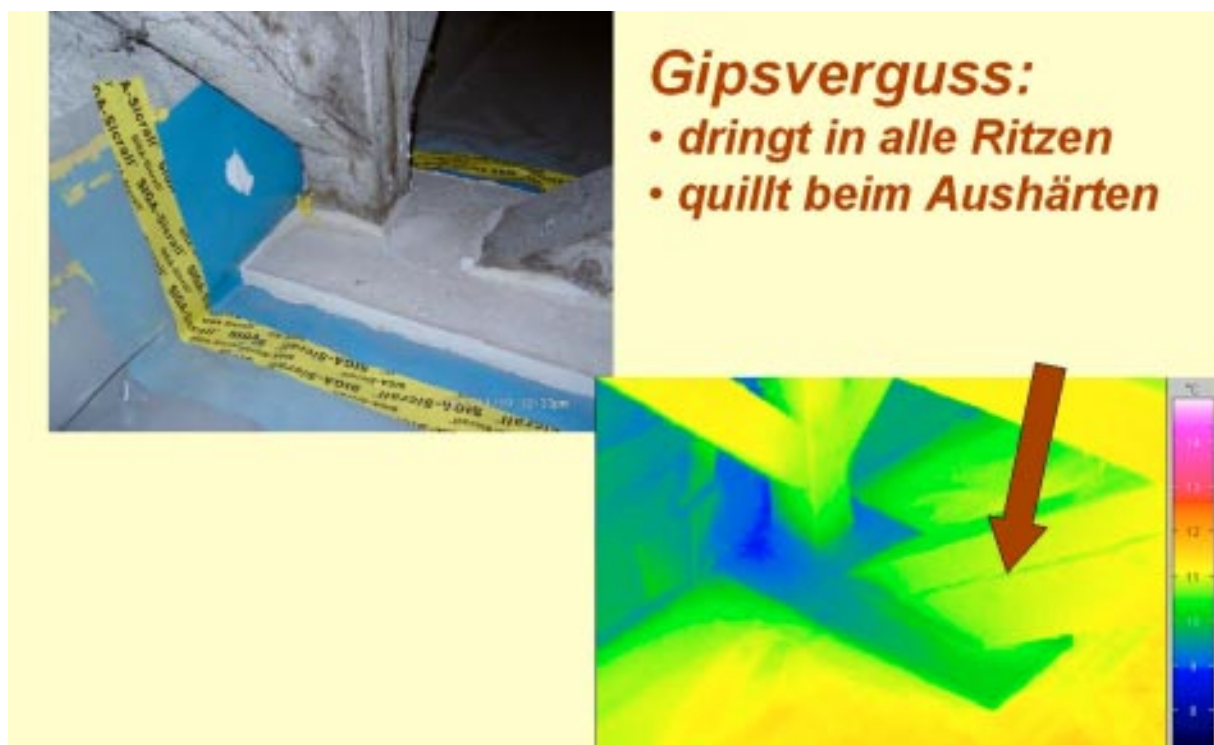
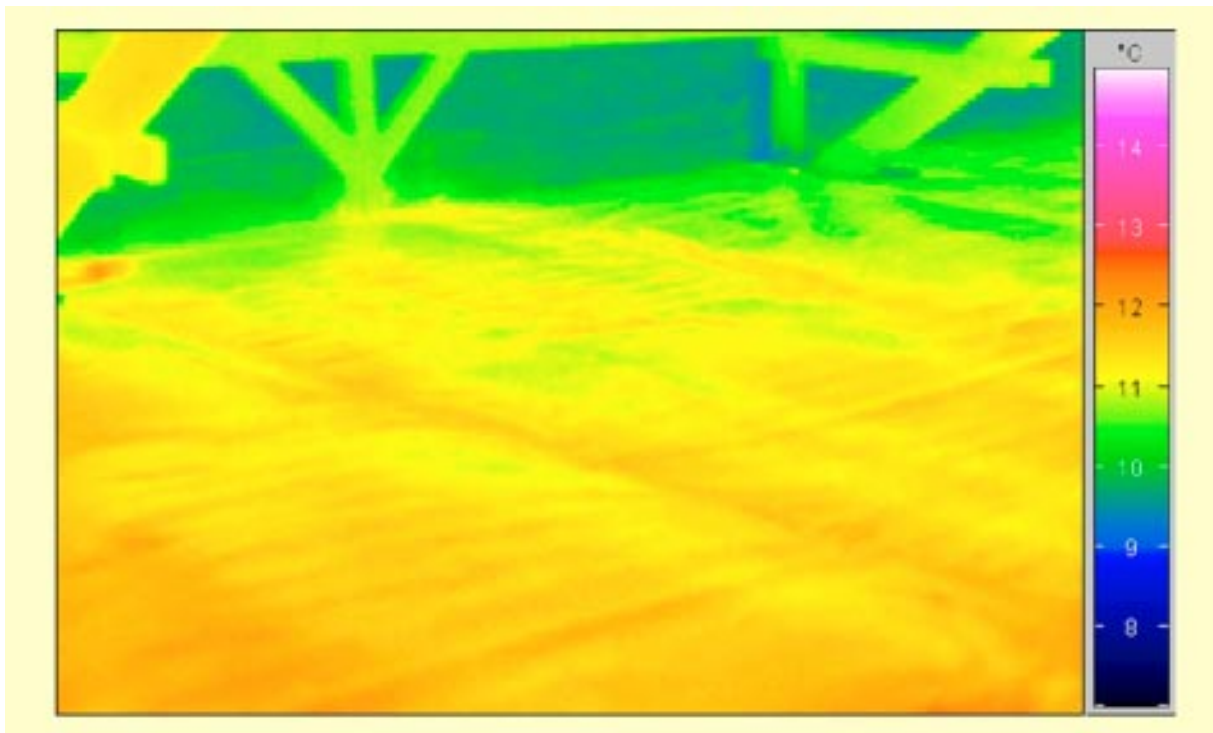


Abb. 16: Speziallösung "Gipsverguss" für die Eindichtung von Holzbalken, welche die Dichtebene der Holzbalkendecke durchstoßen. Auf der thermographischen Aufnahme ist kein Hinweis für austretende Warmluft erkennbar.

In Kombination von mit der Blowerdoor erzeugtem Überdruck in der Wohnung im 2. Obergeschoss und einer Thermographie vom kalten Dachgeschoss auf die noch nicht gedämmte Dampfsperrefolie wurde die Luftdichtheit dieser Maßnahme geprüft. Bereits bei einem Überdruck von um 15 Pa hob die verlegte Folie in der Fläche von ihrer Unterlage ab (Abb. 17). Wegen des nun vorhandenen stehenden Luftpolsters, dass als Dämmlage wirkt, verringert sich der thermische Kontakt der Folie zum Dielenboden und die Folienoberfläche kühlt dadurch ab. Undichtheiten würden durch (dann warme) Luft durchströmt und würden sich im Thermographiebild wärmer abzeichnen. Bei diesem Test ergaben sich nur vereinzelte Hinweise auf Undichtheiten in der Dampfsperrebene, die unmittelbar während der Dichtheitsprüfung ausgebessert werden konnten. Das gewählte Konzept hat sich daher bewährt.



**Abb. 17: Folie auf der obersten Geschossdecke, Draufsicht mit der Thermographiekamera während eines Überdrucktestes in der darunter liegenden Wohnung**

Die thermographische Endabnahme fand am 17.12.2002 statt; zu diesem Zeitpunkt war der Estrich bereits vollständig auf der Wärmedämmung fertiggestellt. Abb. 18 zeigt eine der wenigen Unregelmäßigkeiten, die bei der Dachgeschossdecke gefunden werden konnten: An einem Anschlusspunkt zwischen Estrich und der Spachtelung der Dämmung eines alten Kaminbauwerkes befand sich eine Lücke in der Spachtelung, durch welche warme (und feuchte) Luft austreten konnte. Der Warmluftpfad zeichnet sich an der Oberfläche der Spachtelung durch eine klar als Luftfahne erkennbare Erwärmung ab (Thermographie oben links). Die Fehlstelle wurde nachgebessert. Bei der Kontrollaufnahme am 25.03.2003 zeigte sich keine



Undichtheit mehr. Die nun insgesamt bedeutend höhere Oberflächentemperatur der Spachtelung auf der Dämmung des Kaminbauwerkes erklärt sich wie folgt:

- Die Aufnahme erfolgt an einem klaren Tag gegen 13:00 nach einer kühlen Nacht.
- Infolge der Sonneneinstrahlung hatte sich das Ziegeldeckung und die Unterspannbahn auf Temperaturen um 13°C erwärmt.
- Der thermisch träge Estrich weist nach von der Nacht her eine Temperatur um 6°C auf; auch die Zustrahlung von der wärmeren Unterspannbahn hebt die Oberflächentemperatur wegen der hohen Wärmekapazität nur wenig an.
- Die dünne Spachtelung auf der Dämmung des Kaminbauwerkes hat demgegenüber nur eine geringe Wärmekapazität. Die Oberfläche hat sich in den nahezu vertikalen Flächen durch die Zustrahlung seitens der Unterspannbahn bereits auf etwa 8°C, in der Horizontalen wegen des größeren Raumwinkels sogar auf etwa 9°C erwärmt.

Die Analyse der Temperaturunterschiede bei dieser Aufnahme zeigt, dass die korrekte Interpretation thermographischer Aufnahmen insbesondere bei starken Strahlungsungleichgewichten einer sorgfältigen Betrachtung aller physikalischen Randbedingungen bedarf. Nicht jede erwärmte Fläche ist ein Hinweis auf eine Wärmebrücke.



**Abb. 18:** Dachgeschossdecke nach Fertigstellung inkl. Estrich, Anschluss an eines der alten Kaminbauwerke. Die Thermographieaufnahme oben links zeigt eine Undichtheit, durch welche warme Luft austritt. Die Kontrollaufnahme unten links zeigt, dass nach dem Verguss keine Strömung mehr vorliegt. Weitere Erklärungen im Text.

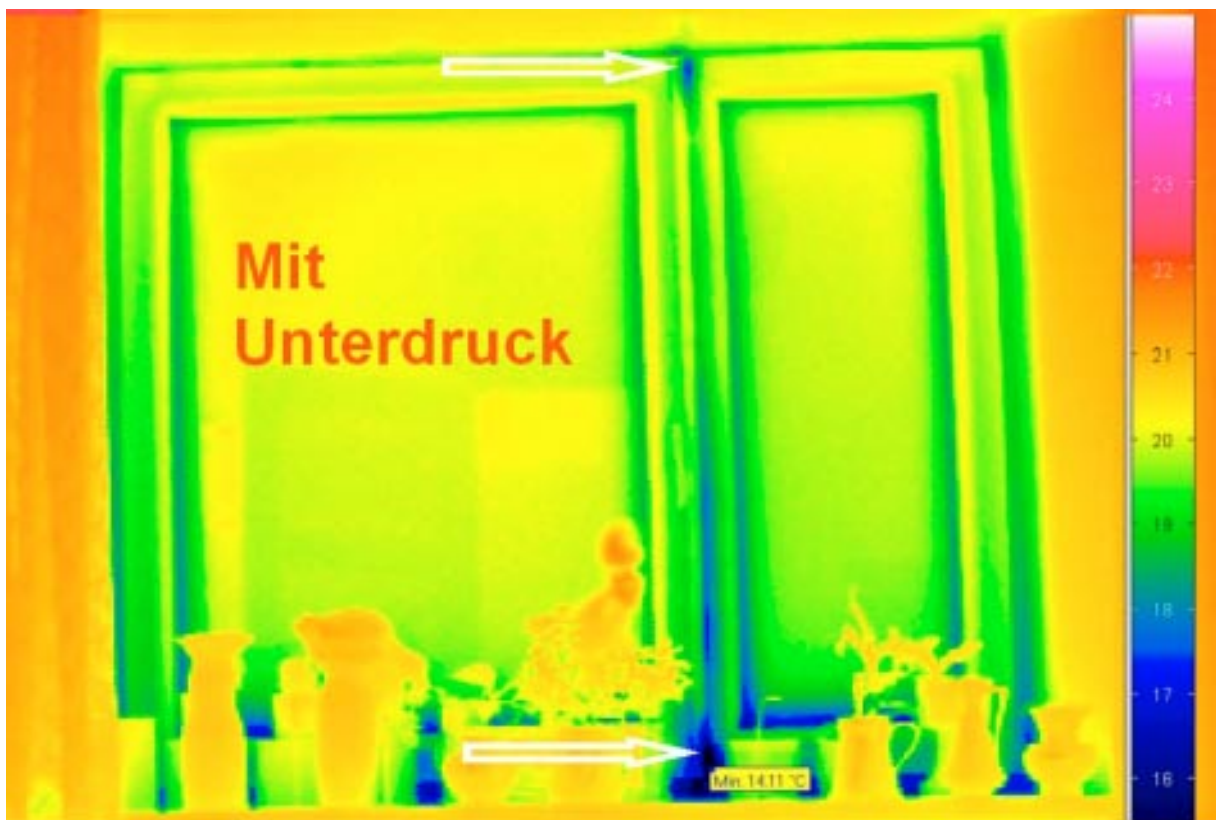
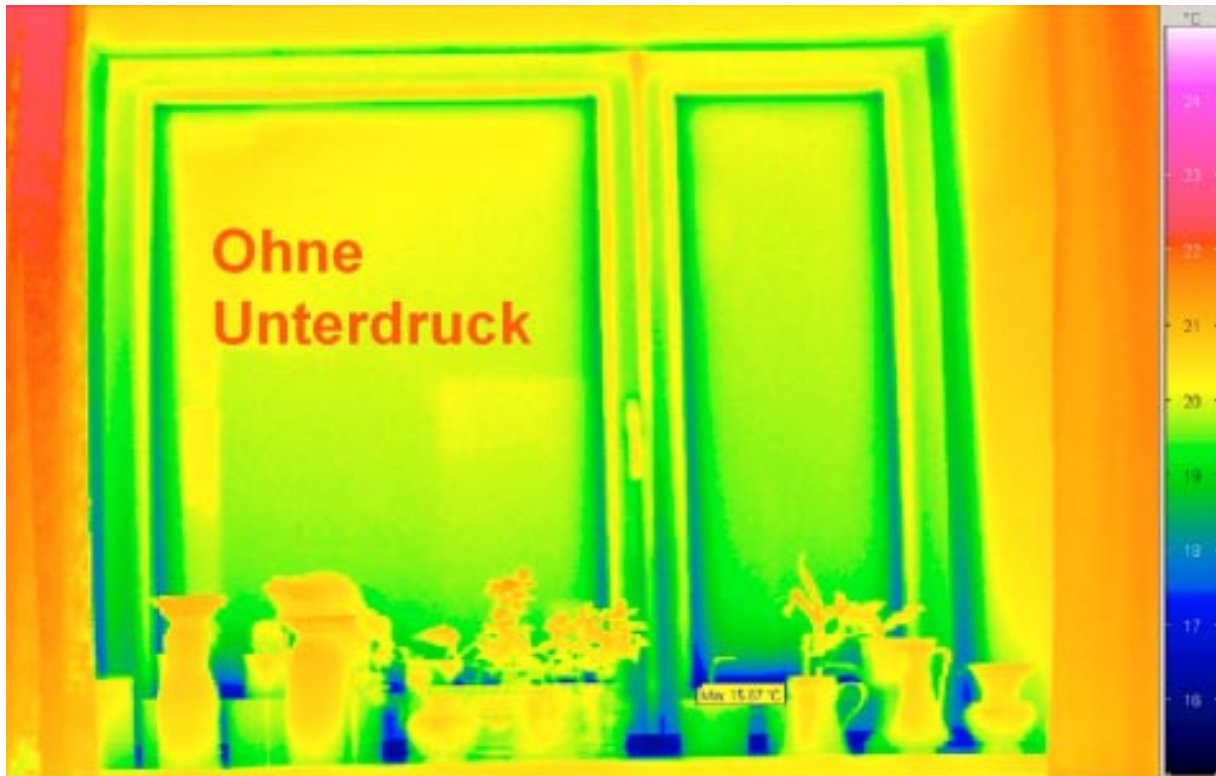


Abb. 19: Typische Thermographie bei einem Fenster: oben ohne, unten mit 50 Pa Unterdruck; die erkennbaren leichten Undichtheiten sind sehr gering und völlig unproblematisch.

Der Vergleich von druckloser und mit Unterdruck durchgeführter Thermographie eines Fensters (Abb. 19) zeigt die Kaltluftfahnen von im oberen und unteren Bereich des Stulpes eindringender Außenluft. Alle übrigen Anschlüsse und Dichtungen sind offenbar perfekt dicht. Auch die verbliebene Undichtheit des Fensters in den mit Pfeilen markierten Bereichen sind sehr gering. Die Luftdichtheit der Fenster ist als sehr gut zu beurteilen – die dokumentierte Aufnahme ist typisch für alle untersuchten Fenster beim Demonstrationsvorhaben.

Bei der Gebäudedichtheitsprüfung während der Umbauphase am 19.11.2002 waren noch nicht alle baulichen Maßnahmen vollständig fertiggestellt; die Spachtelung der Außenwand war erst zu ca. der Hälfte vollendet, damit waren auch die Anschlüsse am Kniestock und zur Kellerwand noch nicht ausgeführt. Abb. 20 zeigt das quantitative Ergebnis des Drucktests unter diesen Umständen: Zur großen Überraschung des Bauphysikteams wurde bereits in diesem halbfertigen Zustand ein  $n_{50}$ -Wert des Gesamtgebäudes von  $0,55 \text{ h}^{-1}$  erreicht. Bei der endgültigen Messung zur bauphysikalischen Abnahme am 17.12.2002 lag das Ergebnis bei  $0,35 \text{ h}^{-1}$ .

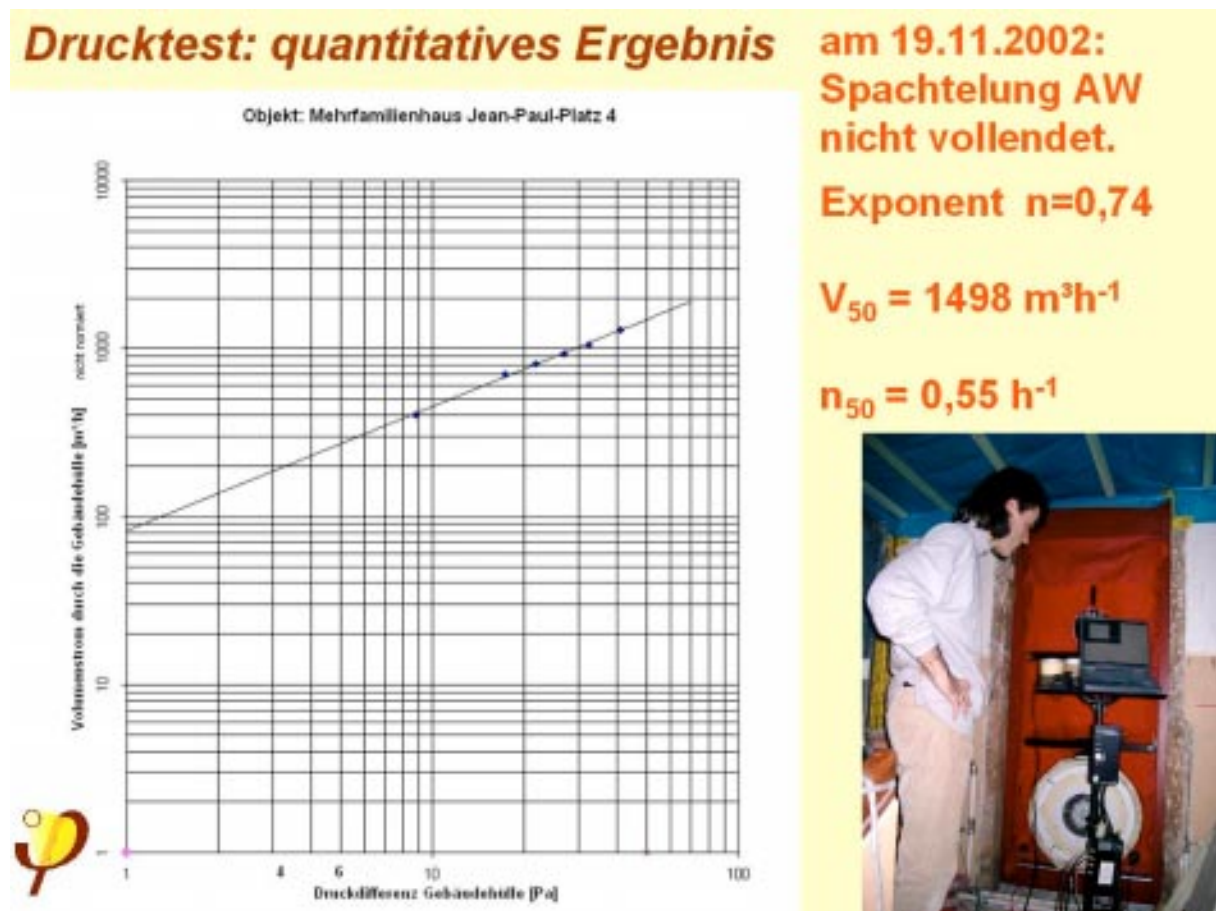


Abb. 20: Quantitatives Ergebnis der Gebäudedichtheitsprüfung vom 19.11.2002

Eine derart weitgehende Verbesserung der Luftdichtheit in einem bestehenden Gebäude mit den vorliegenden besonderen Erschwernissen durch die Holzbalkendecken als Luftverteiler war bisher generell nicht für möglich gehalten worden. Auch das PHI hatte bei der Projektierung vor zu optimistischen Annahmen bzgl. der erreichbaren Dichtheit gewarnt – den in der Berechnung der Energiebilanz eingesetzten Wert von "1,0 h<sup>-1</sup>" hatte die wissenschaftliche Begleitung als zu optimistisch angesehen (vgl. Abb. XXX im Artikel "Wärmebrücken und Luftdichtheit" in diesem Protokollband). Die Skepsis gründete sich auf die Beurteilung der "unterbrochenen luftdichten Hülle" im Bereich des Kellermauerwerkes im Übergang zur Kellerdecke. Nach gut dokumentierten Messungen von Raisch stellt sich Mauerwerk ohne luftdichtende Putzschichten als stark luftdurchlässig heraus [Raisch 1934]; schon Pettenkofer hatte diese Tatsache in seinen Vorlesungen eindrucksvoll demonstriert. Wir müssen auf Grund der vorliegenden hervorragenden Ergebnisse einräumen, dass diese Problematik überschätzt wurde. Offenbar ist die "kummulierte" Dichtwirkung insgesamt Meterdicker satt vermörtelter Vollsteinziegelwandschichten letztendlich doch ausreichend gut. Auch sorgsam analysierte Thermographieaufnahmen des Sockelbereiches im Demonstrationsgebäude gaben keinen Hinweis auf bedeutende dort bestehende Leckagepfade. Eine bauphysikalische Problemsituation würde im Übrigen durch Restundichtheiten in diesem Bereich nicht entstehen:

Mögliche Leckagen im Sockelbereich liegen am untersten Abschluss des beheizten Raumes. Aufgrund des thermischen Auftriebes ist hier ausschließlich ein einströmender Luftpfad zu erwarten. Auch eine mögliche Windanströmung wird eine Druckverteilung erzeugen, die keinesfalls zu einem Unterdruck im Keller oder umgebenden Erdreich führt. Einströmende (trockene) Kaltluft könnte allenfalls Zugscheinungen erzeugen, aber keinen konvektiven Feuchteschaden. Daher gab es keine Bedenken gegen die Ausführung der Luftdichteebenen gemäß der Planung, auch wenn mit einer nennenswerten Leckage im Sockelbereich gerechnet wurde. Dass diese offensichtlich außerordentlich gering ausfällt, ist umso erfreulicher.

Die Prüfung der Luftdichtheit bei dieser Modernisierung brachte damit folgende Ergebnisse:

- Das angewendete Konzept, die Luftdichtheit in der Ebene des früheren Außenputzes durch eine durchgehende Spachtelung herzustellen, hat sich bewährt. Selbstverständlich sollte nach etwa 2 Jahren eine Kontrollmessung erfolgen, um auch die Dauerhaftigkeit dieser Maßnahme zu prüfen.
- Auch die Luftdichtheitsebene, die durch eine auf die alte Holzdielendecke aufgelegte PE-Dampfsperre gegeben wird, hat sich bewährt. Dabei sind jedoch Maßnahmen zur Eindichtung der durch die Decke durchtretenden Balken zur Aussteifung des Dachstuhles sorgfältig durchzuführen. Eine Eindichtung durch Verguss (in diesem Fall mit Gips) und gesichertem Anschluss zur Dampfsperre

hat sich bewährt. Auch hier muss nochmals betont werden, dass an dieser Stelle eine Dampfsperre auf der warmen Seite der Dämmung unverzichtbar ist, da der obere Abschluss mit einem Zementestrich vergleichsweise dicht ist; sehr wichtig ist, dass bei der Aufbringung des Estrichs keine PE-Folie eingesetzt werden darf, da der Abschluss auf der kalten Seite keinesfalls zu dampfdicht werden darf.

- Die verbliebenen Durchdringungen der luftdichten Hülle durch Sockelmauerwerk (38 cm Vollziegelwand) erwiesen sich als überraschend wenig luftdurchlässig.
- Insgesamt ist der erreichte Wert für die Luftdurchlässigkeit mit  $0,35 \text{ h}^{-1}$  extrem gering; bisher waren derart niedrige Drucktestergebnisse bei Altbau-Modernisierungen nicht für möglich gehalten worden.

## 4 Prüfungen bzgl. Luftwechsel und Luftverteilung

Erfahrungen mit früheren Modernisierungsmaßnahmen in Altbauten, bei denen häufig nur die Fenster erneuert worden waren und dabei zwar eine höhere Luftdichtheit, aber keinesfalls ein derart gutes Ergebnis wie im hier vorliegenden Fall erzielt wurde, haben gezeigt, dass der natürliche Luftwechsel nicht mehr ausreicht, um die hygienisch erforderliche Feuchteabfuhr sicherzustellen. Ob es in der Folge dieser gravierenden Veränderung zu Feuchteschäden in den Wohnungen kommt, hängt entscheidend vom Nutzerverhalten ab:

- Der Feuchteanfall in den Wohnungen ist je nach Belegung, Koch-, Bade- und Waschgewohnheiten sowie der Ausstattung mit Zimmerpflanzen in sehr hohem Maß unterschiedlich.
- Auch das Fensterlüftungsverhalten weicht von Mietpartei zu Mietpartei sehr stark untereinander ab.

Wir haben im vorausgehenden Arbeitskreis 23 durch eingehende Untersuchungen gezeigt, dass bei durchschnittlichem Feuchteanfall ein "zwei mal tägliches Stoßlüften" keinesfalls für eine ausreichende Feuchteabfuhr aus modernisierten Wohnungen ausreicht. Vielmehr muss regelmäßig in den Wohnungen in möglichst gleichmäßigen Abständen mindestens viermal täglich ein vollständiger Luftaustausch durch Stoßlüftung erfolgen. Gerichtsurteile sehen eine solche Anforderung an den Nutzer jedoch nicht als zumutbar an.

An dieser Stelle muss nochmals darauf hingewiesen werden, dass sich das Problem nicht durch eine "Wiederherstellung" der "ursprünglich undichten Konstruktion" lösen lässt. Die für eine hygienisch ausreichende Fugenlüftung erforderliche Undichtheit ist vielmehr so hoch, dass sie modernen Komfortansprüchen an zugfreie Wohnungen nicht gerecht wird. Auch besteht eine hohe Schadensanfälligkeit bei den Gebäudefugen, die vom feuchten Luftstrom von innen nach außen durchströmt

werden. Diese Problematik verschärft sich widrigerweise dann, wenn Luftdichtungsmaßnahmen nur halbherzig und ohne Sicherstellung einer ausreichenden Lüftung mit anderen Mitteln durchgeführt werden: Die "etwas" höhere Dichtheit führt zu höheren relativen Luftfeuchtigkeiten der Raumluft; diese feuchtere Luft hat beim Durchströmen der verbliebenen Restfugen nach außen eine höhere Kondensationswahrscheinlichkeit und damit ein höheres Schadenspotential. Die Erfahrungen können in Übereinstimmung mit den Gesetzen der Physik wie folgt zusammengefasst werden:

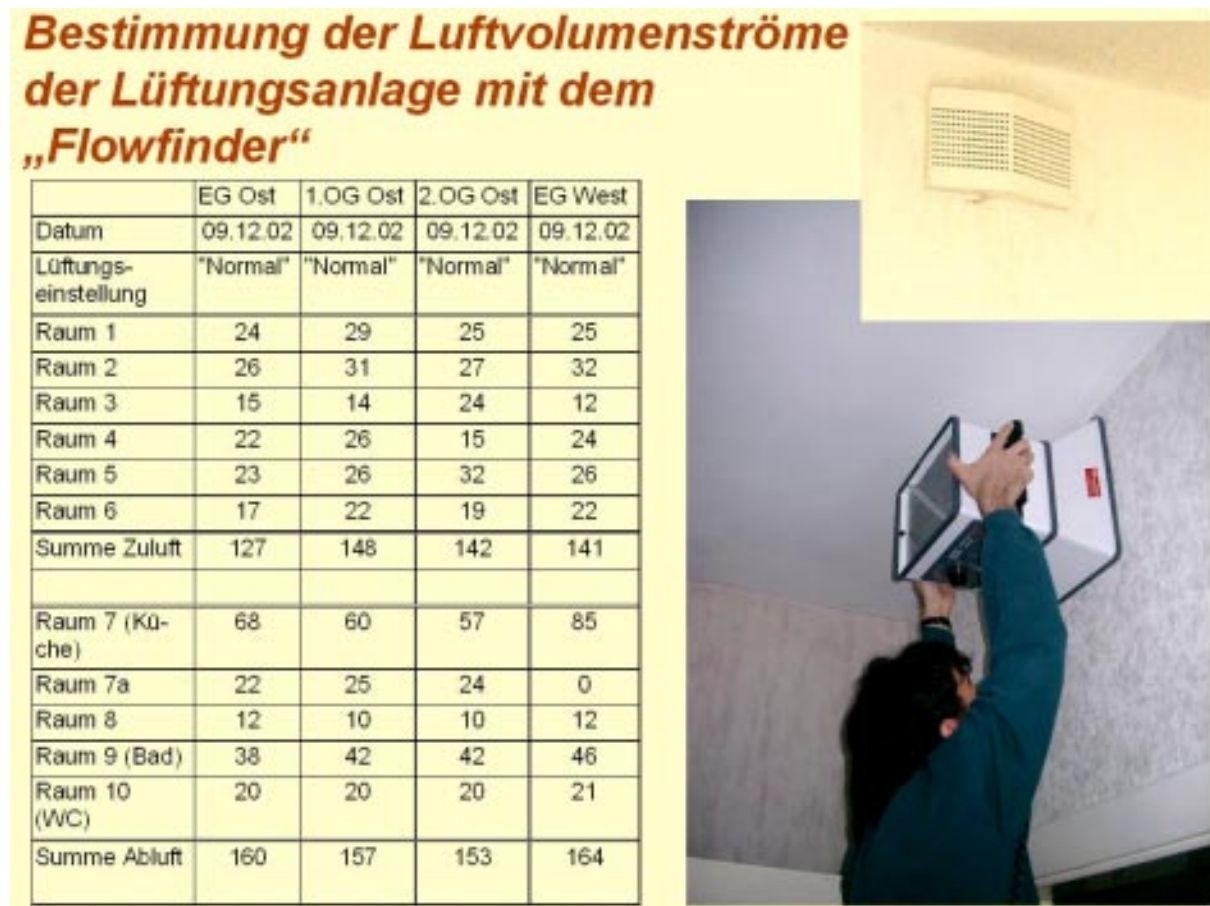
- **Ein Beibehalten der sehr hohen Undichtheit bestehender Altbauten ist wegen der geringen Akzeptanz daraus resultierender Zugerscheinungen ausgeschlossen.**
- **Halbherzige Luftdichtungsmaßnahmen verschärfen in der Regel die Feuchteprobleme, insbesondere an den dann noch bestehenden Undichtheiten.**
- **Es besteht daher keine andere Möglichkeit, als die Luftdichtheit auch in bestehenden Gebäuden so gut wie möglich und sorgfältig herzustellen und den erforderlichen Luftaustausch durch andere Maßnahmen, in der Regel eine kontrollierte Wohnungslüftung, sicherzustellen.**

Diese Konsequenzen wurden übrigens in unseren Nachbarländern (Schweden, Frankreich, Österreich) von den Wohnungsbauunternehmen bereits seit einiger Zeit gezogen. Mit der Sicherstellung einer ausreichenden Feuchtabfuhr durch eine kontrollierte Lüftung verschwinden die feuchtebedingten Bauschäden – bis auf die Fälle, deren Ursachen ganz anderer Natur sind, wie z.B. ein defektes Regenfallrohr.

Beim Demonstrationsvorhaben in Nürnberg waren die Zusammenhänge beim Planer, bei der Wohnungsbaugesellschaft und bei der wissenschaftlichen Begleitung bekannt, so dass von vorn herein eine zuverlässige und hygienisch einwandfreie Lösung durch den Einbau von Wohnungslüftungsanlagen realisiert wurde. Die Verlegung der Luftkanäle in einem abgehängten Bereich unter der Decke des Wohnungsflurs sind im Beitrag von B. Schulze Darup in Abb. XXX gezeigt.

Aufgabe der wissenschaftlichen Begleitung ist es, die von der Projektierung vorgegebenen Luftvolumenströme zu kontrollieren. Abb. 21 zeigt die Durchführung der Volumenstrommessung an den Luftauslässen mit Hilfe eines aktiven Strömungsmessgerätes: Das Gerät enthält ein eigenes Hilfsgebläse, mit welchem der Druckabfall in der Messstrecke auf Null erfolgen kann; dann lässt sich der geförderte Luftvolumenstrom an der Einstellung des Hilfsgebläses ablesen. Auf diesem Weg kann die Störung der Aus- oder Einströmbedingungen an einer Lüftungsöffnung klein gehalten werden; übliche, passive Hauben führen zu je nach Situation unterschiedlichen Beeinflussungen des Strömungsfeldes, so dass eine genaue und zuverlässige Messung auch durch Korrekturrechnung kaum möglich ist; dies gilt insbesondere für

die vergleichsweise kleinen Volumenströme, die bei Wohnungslüftungsanlagen zu bestimmen sind.



**Abb. 21: Messung eines Zuluftvolumenstroms an einer Weitwurfdüse mit dem aktiven Volumenstrommessgerät "Flowfinder"; oben rechts ein Weitwurfeinlass**

Die Messungen ergaben insbesondere bei den Zuluftmengen Abweichungen zu geringeren Werten als nach der Projektierung. Dadurch stellte sich eine Disbalance zwischen Zu- und Abluftmassenstrom in einer Größenordnung von 15% heraus. Ein solcher Wert ist nach den Erkenntnissen zur Wirksamkeit einer hocheffizienten Wärmerückgewinnung zu hoch, daher wurden in der Folge die Anlagen neu eingestellt. Der bei der ursprünglichen Einstellung vorliegende Abluftüberschuss ist im Übrigen bauphysikalisch unbedenklich, da er allein zu einströmender Außenluft Anlass bietet. Ein solcher "Schutzdruck" ist allerdings bei der vorliegenden Qualität der luftdichten Hülle nicht erforderlich.

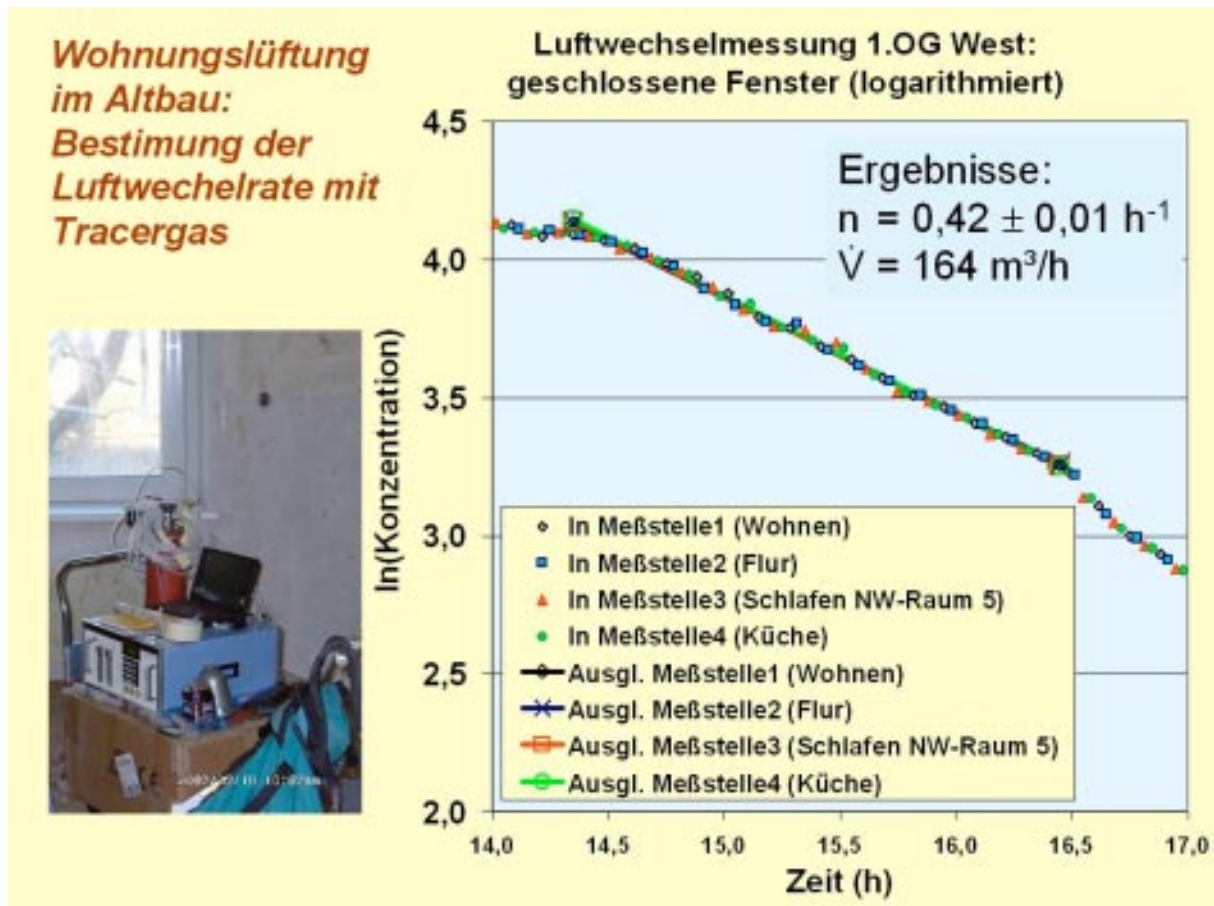


Abb. 22: Tracergasmessung des Luftwechsels in der bewohnten Wohnung

Bei den kleinen einzelnen Luftvolumenströmen an den Zuluftauslässen könnte sich trotz der sorgfältigen Messung mit dem aktiven Volumenstrommessgerät eine kumulativer Fehler in einer Höhe ergeben, welche zuverlässige Aussagen schmälert. Der Luftwechsel wurde daher noch einmal mit einer unabhängigen Methode bestimmt. Abb. 22 zeigt die Durchführung und das Ergebnis der Tracergasmessung in dieser modernisierten Altbauwohnung. Grundlagen und Auswertungsverfahren der Tracergasmessung sind bereits an andere Stelle eingehend behandelt worden [Kah 2003], so dass wir uns hier auf die Diskussion der Ergebnisse beschränken können. Der Luftwechsel wurde bei allseits offenstehenden Innentüren und unter Sicherstellung einer möglichst optimalen Durchmischung mit vier aufgezeichneten Messstellen nach der Konzentrationsabfallmethode bestimmt. Die im logarithmischen Maßstab klar erkennbare Gerade des Konzentrationsabfalls, übereinstimmend an allen vier Messstellen, zeigt, dass die Voraussetzungen für die Messung gut erfüllt waren. Es ergab sich in Übereinstimmung mit den Messungen an den Lüftungsöffnungen eine Luftwechselrate von  $0,42 \text{ h}^{-1}$ . Dieser Wert entspricht der Projektierung; er ist für die Einhaltung hygienischer Bedingungen und für eine gute Luftqualität erfahrungsgemäß ausreichend.



Die Diskussion der Lüftungseffizienz in Arbeitskreis 23 hatte gezeigt, dass die Einhaltung einer bestimmten nominalen Luftwechselrate nicht ausreichend ist, um eine wirklich zufriedenstellende Lüftung zu erhalten [Schnieders 2003]. Vielmehr muss sichergestellt werden, dass frische Außenluft auch überall dort in der Wohnung verfügbar ist, wo sie gebraucht wird. Die Qualität der Frischluftverteilung im Raum kann gut durch das lokale Luftalter charakterisiert werden. Für die Bestimmung der Lüftungseffizienz wurde daher in einer weiteren Messung das lokale Luftalter an vier Stellen in der Wohnung bestimmt. Die Messungen ergaben Werte für das Luftalter zwischen 2,3 und 2,4 Stunden. Daraus lässt sich der mittlere Luftaustauschwirkungsgrad auf 52(±3)%. Die Lüftungseffizienz ist damit nicht signifikant besser als bei einer vollständigen Durchmischung; dies ist ein zufriedenstellendes Ergebnis. Bei der Diskussion der Ergebnisse in Arbeitskreis 23 hatte sich bereits herausgestellt, dass bei den für die Wohnungslüftung vorliegenden Verhältnissen mit einem Ergebnis im Umfeld der vollständigen Durchmischung zu rechnen ist, solange eklatante Fälle von Kurzschlussströmungen vermieden werden; zugleich war deutlich geworden, dass eine wesentlich bessere Effizienz mit praktikablen Mitteln kaum erreichbar ist.

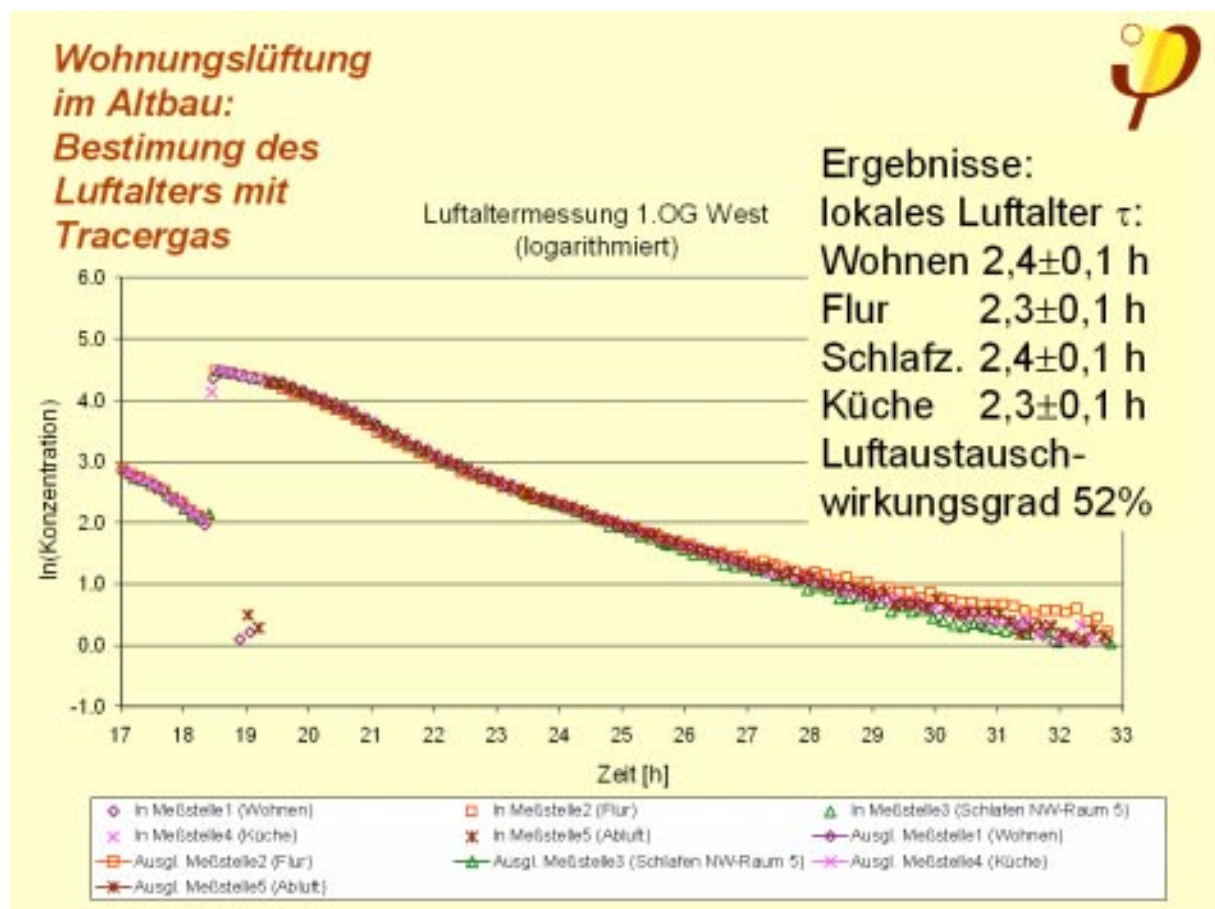


Abb. 23: Bestimmung des lokalen Luftalters an verschiedenen Messpunkten in der bewohnten Wohnung

Die Überprüfung der Lüftungseffizienz ergab somit ein zufriedenstellendes Ergebnis; die Beaufschlagung der Zulufräume ist ausreichend, die Luftführung innerhalb der Räume mit dem Weitwurfeinlass im Innenwandbereich hat sich damit bewährt. Dies ist für eine kostengünstige Verlegung von Lüftungskanälen (insbesondere im Altbau) eine wichtige Aussage.



**Abb. 24: Zuluft einlass mit thermographischer Aufnahme bei extrem hoher Temperaturlöschung; die Ausbreitung des Luftstrahls an der Decke ist zu erkennen**

Weitere Hinweise für die Wirksamkeit der Luftverteilung in den Zulufräumen und den Komfort der gewählten Lüftungsvariante erlaubt die Auswertung der Thermographieaufnahme eines Weitwurfauslasses im Betrieb (Abb. 24). Die Wiedergabe dieser Aufnahme erfolgt hier mit einer gegenüber den bisher dokumentierten Thermographien sehr hohen Temperaturlöschung (das gesamte Temperaturspektrum der Aufnahme umfasst nur 4 Kelvin). Die Zuluft weist unmittelbar am Auslass eine Temperatur von 21 °C auf ("Schwarzkörperstrahlung" aus den Öffnungen der Abdeckung). Die Strömungsfahne (um 22,5 °C Oberflächentemperatur, Orange), die sich nach dem Coanda-Effekt unter der Decke ergibt, ist in diagonalen Abgrenzung zum von einem Heizrohr erwärmten Deckenbereich (um 23,2 °C) erkennbar. Auch an der Innenwand deutet sich die nach oben gerichtete Strömung an (Pfeile).

Durch die gewählte Art und Lage des Weitwurfauslasses wird eine tiefe Beaufschlagung des Raumes mit Zuluft erreicht; dazu ist es nicht erforderlich, Zuluftkanäle bis an die Außenwände des Raumes zu führen. Für eine systematische Analyse der Lage von Zuluftöffnungen im Raum vgl. [Schnieders 2003].

## 5 Thermographische Kontrolle bzgl. der Haustechnik

Abb. 25 und Abb. 26 zeigen thermographische Aufnahmen aus dem neu eingerichteten Heizraum einmal noch vor der Dämmung der Leitungen, einmal nach fertiggestellter Wärmedämmung. Die Wärmeabgabe der ungedämmten Leitungen in Abb. 25 ist sehr hoch; dies ist bei den Kunststoffleitungen (Emissivität im Bereich von 1) unmittelbar in der Thermographie erkennbar. Leitungen mit metallischen Oberflächen, wie die Bogenstücke und Abzweigungen, haben etwa die gleichen Oberflächentemperaturen, erscheinen aber in der Thermographieaufnahme in metallisch schillernden Farben: Hier liegt eine wesentlich geringere Emissivität vor, so dass die Strahlung vor allem von der an den Oberflächen reflektierten Wärmestrahlung herrührt. Eine Aussage zu den tatsächlichen Temperaturen dieser metallischen Oberflächen ist damit allein auf Basis dieser Aufnahme nicht möglich.

Wärmeführende Leitungen verlieren nicht nur durch Abstrahlung, sondern auch durch Konvektion Energie. Es ist daher sinnvoll und notwendig, solche Leitungen mit einer Wärmedämmung auszustatten; dies gilt auch für metallische Leitungen. Die Dämmdicke muss jedoch bei metallischen Leitungen deutlich dicker als 5 mm sein (oder selbst metallisch spiegeln); sinnvoll sind nach vorausgehenden Untersuchungen Dämmstärken bei Rohrleitungen, die bei etwa dem anderthalbfachen Nenndurchmesser liegen ( $1,5 \cdot DN$ ) [Feist 1998]. Entscheidend für die Wirksamkeit einer solchen verbesserten Dämmung ist jedoch, wie die Analysen von Rainer Pflüger in diesem Tagungsband zeigen werden, die sorgfältige Dämmung auch aller Anschlussdetails und Armaturen. Abb. 26 den Heizraum nach der Wärmedämmung der Leitungen, zufälligerweise mit gerade geöffnetem Gehäuse des Brennwertgerätes. Die Wirksamkeit der Wärmedämmung der Leitungen im regulären Bereich ist offensichtlich. Besonders auffällig sind jetzt die noch ungedämmten oder unzureichend gedämmten Details: vergessene Rohrleitungsstücke, stumpf gestoßene Dämmhüllen, ungedämmte Einstell- und Absperreinrichtungen, Fühlereinsätze und Pumpen. Im Haustechnikbeitrag werden die Möglichkeiten von Verbesserungen in genau diesen Bereichen behandelt.

Einen Musterfall zur Interpretation thermographischer Aufnahmen bietet der geöffnete Wärmegerzeuger (im Bild oben links und Detailaufnahme



Abb. 27). Das Gerät war zum Zeitpunkt der Aufnahme im Betrieb. 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. Danach beträgt die Temperatur etwa 80 bis 88 °C. Auch die Pumpe, Leitungen und die Elektronik geben erkennbar Wärme ab.

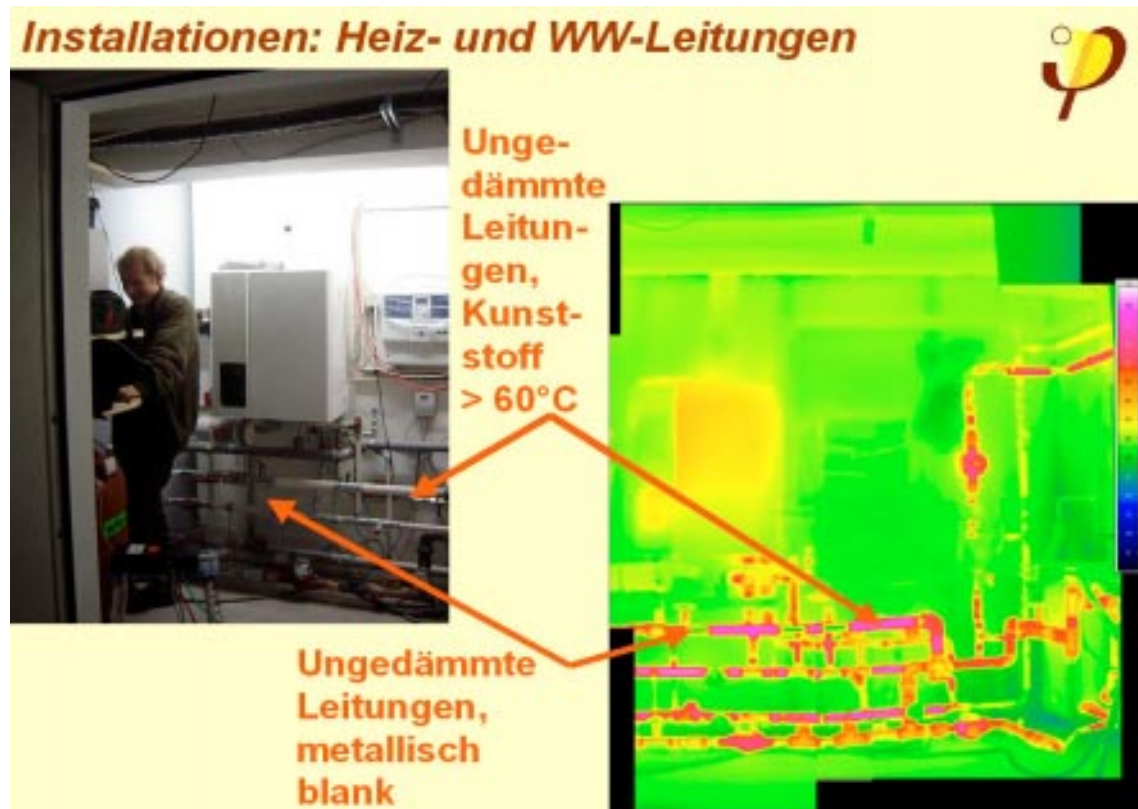


Abb. 25: Rechts: Aufnahme im Heizraum zu einem Zeitpunkt, an welchem die wärmeleitenden Leitungen noch nicht wärmeisoliert waren.

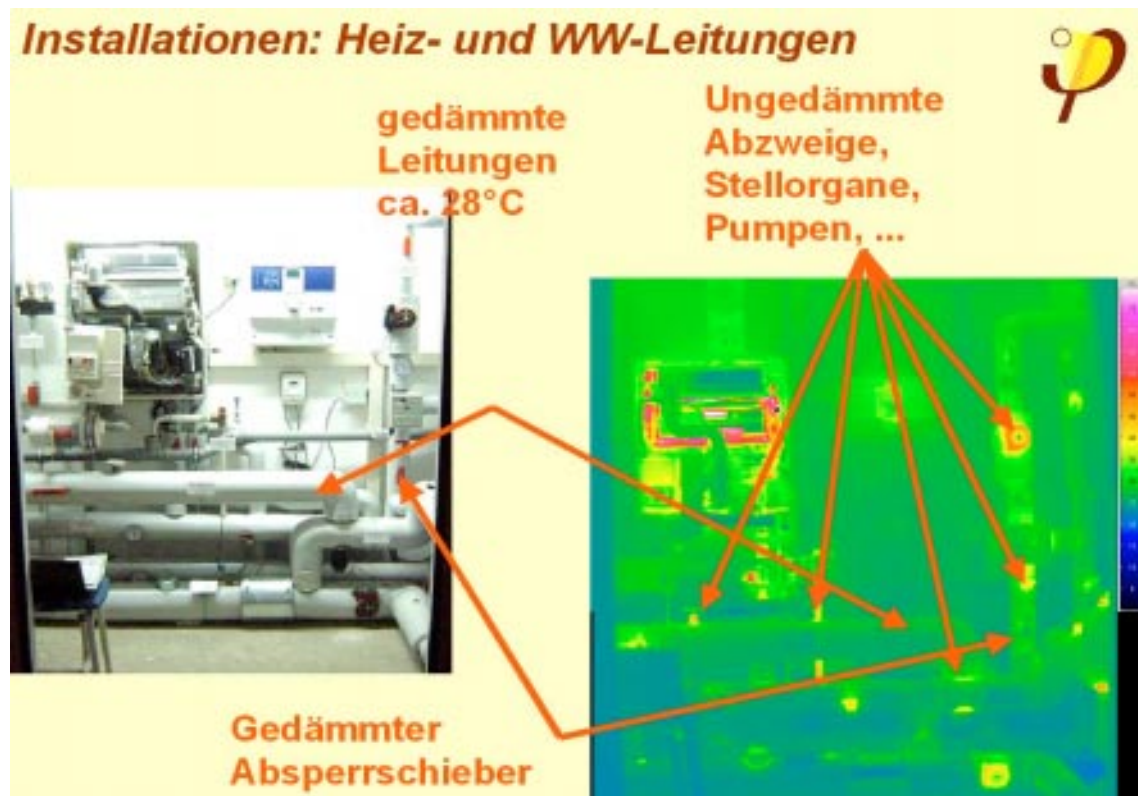
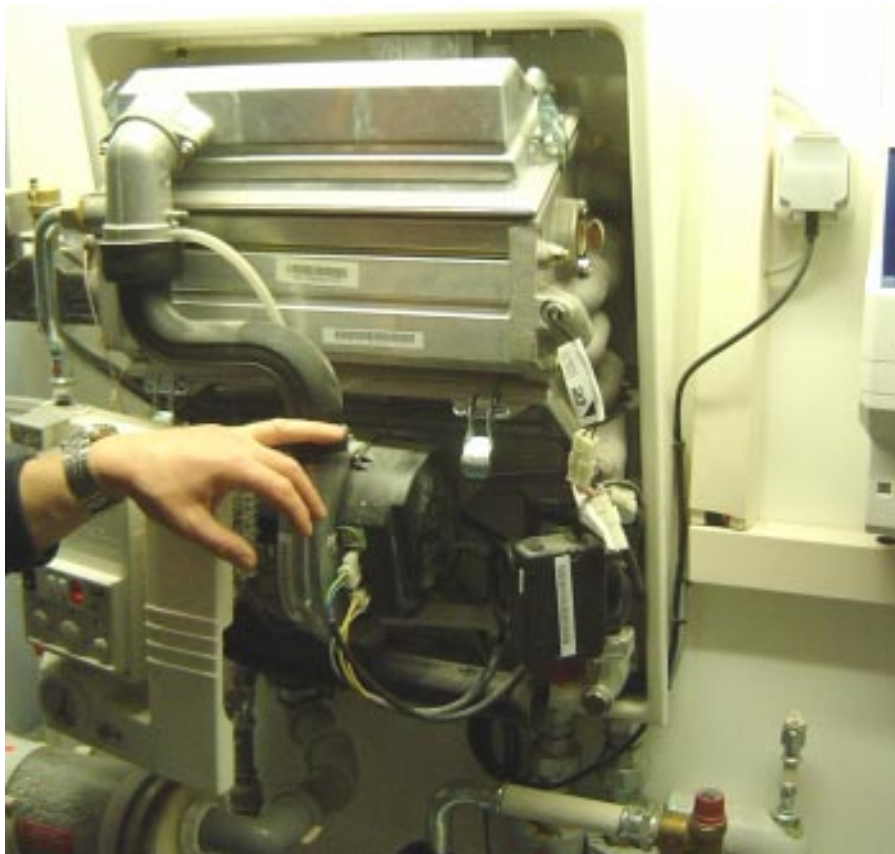


Abb. 26: Thermographische Aufnahme im Heizraum mit gedämmten Regelquerschnitten zum Zeitpunkt der thermographischen Nachuntersuchung.



**Abb. 27: Detailaufnahme des geöffneten Wärmeerzeugers am 05.03.2003.**



**Abb. 28: Zugehöriges Bild im normalen sichtbaren Spektrum.**

## 6 Erfahrungen der Qualitätssicherung beim Projekt Nürnberg, Jean-Paul-Platz 4

Die Ergebnisse lauten kurz zusammengefasst:

Beim ausgeführten Wärmeschutz in der Fläche wurden bei Dach, Außenwand und Kellerdecke regelmäßig die geplanten Qualitäten erreicht.

Die Überprüfung durch Außen- und Innenthermographie zeigt keine unkalkulierten Schwachstellen; weder solche, die aus unvollständiger Planung entstanden wären noch durch mangelhafte Ausführung bedingte.

Für den Wärmeschutz der Anschlussdetails zeigten sich sehr gute Ergebnisse. In der Überprüfung durch Außen- und Innenthermographie zeigte sich, dass

- die Innenoberflächentemperaturen überall  $> 15,5^{\circ}\text{C}$  liegen; ein Myzelwachstum ist dabei keinesfalls möglich
- die niedrigsten Temperaturen liegen dabei am Glasrandverbund sowie an der Sockelleiste in den unteren Ecken des Gebäudes. Die Temperaturen am Sockel liegen fast ein Grad niedriger als berechnet. Dies wird auf Trocknungsvorgänge der noch von den Vorjahren feuchten Außenwand zurückgeführt.

Bei den Luftdichtheitsprüfungen stellten sich überraschend gute Ergebnisse heraus. Die Überprüfung durch einen Gebäudedrucktest brachte im fertigen Zustand  $n_{50} = 0,35 \text{ h}^{-1}$ . Bei der Leckagesuche zeigten sich keine problematischen Undichtheiten. Die verwendete Sorgfalt bei Holzbalkendecken erwies sich als sehr wichtig.

Die Einstellung der Lüftungsanlage erwies sich als noch immer nicht optimal. Hier wünschen wir uns Vereinfachungen und entsprechende Hilfsmittel seitens der Hersteller.

Bei den übrigen haustechnischen Installationen sehen wir dringenden weiteren Entwicklungsbedarf bzgl. des Wärmeschutzes an Anschlussstellen, Armaturen und Stellgliedern.

## **7 Literatur**

- [Feist 1998] Feist, Wolfgang: **Wirtschaftlichkeitsuntersuchung ausgewählter Energiesparmaßnahmen im Gebäudebestand**; Passivhaus Institut, Darmstadt, 3. Auflage 2001, S 57-63.
- [Feist 2003] Feist, Wolfgang: **Passivhaustechnik im Gebäudebestand – Qualitätssicherung für das Bauvorhaben Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg**; Gutachten im Auftrag der wbg der Stadt Nürnberg, Passivhaus Institut, 2003.
- [Kah 2003] Kah, Oliver: **Messung der Raumluftrömung mit Hilfe von Indikatorgasanalyse**; In: Protokollband Nr. 23 des Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser; Passivhaus Institut Darmstadt; Darmstadt **Juli** 2003.
- [Raisch 1928] Raisch, E.: **Die Luftdurchlässigkeit von Baustoffen und Baukonstruktionen**; gi 30 (1928).
- [Schnieders 2003] Schnieders, Jürgen: **Lüftungsstrategien und Planungshinweise**; In: Protokollband Nr. 23 des Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser; Passivhaus Institut Darmstadt; Darmstadt **Juli** 2003.