

Raumklimatisches Gutachten zur Kondensationsgefährdung in der Wieskirche

Allgemeines

Kondensation an Bauteiloberflächen tritt dann auf, wenn deren Oberflächentemperatur zu niedrig, die Raumluftfeuchte hingegen zu hoch ist. «Zu niedrig» und «zu hoch» sind relative Begriffe und hängen voneinander ab.

In unbeheizten Räumen ist es vornehmlich das Außenklima, das diese Werte bestimmt: Außenluftfeuchte und Außenlufttemperatur sind deshalb zu erfassen. Im Inneren wirken jedoch noch andere Faktoren; diese sind vor allem Nutzung, Sonneneinwirkung, aber auch bauliche Einflüsse aus Stärke und Art der Raumschale: Raumluftfeuchte und Raumlufttemperatur müssen deshalb ebenfalls gemessen werden. Während die Luftfeuchte, absolut gesehen, auch in einem großen Raum kaum schwanken wird und ihr relativer Wert aus den Raumtemperaturen zu errechnen ist, finden sich bei diesen, lagebedingt, oft größere Unterschiede – dies vor allem in vertikaler Schichtung, so daß die Raumlufttemperatur an mehreren Stellen gemessen werden muß.

Da der Feuchteniederschlag aus der Luft an die Oberfläche der Raumschale aber von deren Temperaturen abhängt und diese lage-, aber auch material- und konstruktionsbedingt unterschiedlich sind, läßt es sich auch bei kostenbewußter Untersuchung nicht vermeiden, diese Werte an vergleichsweise vielen Stellen und gestaffelt zu erfassen.

Zweck des Gutachtens

Mit Schreiben vom 12.10.1989 (II-Wx Kap./Tit. 05 53/712 01-6) wurde das IGS vom Landbauamt Weilheim beauftragt, längerfristige Messungen über die raumklimatischen Bedingungen in der Wieskirche bei Steingaden mit den entsprechenden Auswertungen durchzuführen. Unter Berücksichtigung der Temperatur- und Feuchtwerte der Luft außen, im Dachraum, in der Kirche sowie von Oberflächentemperaturen ist ein Gutachten zu erstellen, das die raumklimatischen Eigenschaften des Kirchenbaus, besonders aber die Gefährdung durch Bildung von Oberflächenkondensat mit nachfolgendem Wachstum von Schimmelpilzen klären und zur weiteren Entscheidungsfindung über die Notwendigkeit baulicher Maßnahmen zur Unterbindung von Kondensation beitragen soll.

Die Meßinstallation wurde im November 1989 eingebaut und war bis Oktober 1990 in Betrieb. Die Datenerfassung von insgesamt 50 Meßstellen erfolgte durch selbständig aufzeichnende, im Dachraum aufgestellte Hybridschreiber.

Eine derartige Installation verlangt bereits vor dem Einbau eine mehrtägige Vorbereitung (Abb. 1–2). Die Installation in der Kirche war extrem zeitaufwendig wegen der Rücksichtnahme auf Ausstattung und Raumschale, teilweise auch wegen des Unverständnisses einiger Restauratoren, konnte aber nach 17 Manntagen und der Verlegung von fast 2,5 km Kabeln Mitte November abgeschlossen werden (Abb. 3–8). In zeitlichen Abständen von etwa einem Monat wurde die Anlage gewartet; ein umfangreicheres Nachinstallieren wurde notwendig, als beide Hybridschreiber durch Blitzschlag über das Lichtnetz der Kirche zerstört wurden.

Parallel zum etappenweisen Abbau der Innengerüste wurde auch die Meßinstallation zurückgebaut.

Bauliche Einflußgrößen

Konstruktiv ist die Kirche ein Mauerwerksbau (Ziegel und Kalktuff) von knapp 60 m Länge und 30 m Breite. Der eigentliche Kirchenraum (ohne Vorhalle, Sakristei und Turm) gliedert sich in das Runderdache des Schiffes und das anschließende Längssohl des Chorraums. Diese Raumzonen grenzen sich durch den Chorbogen deutlich voneinander ab.

Sämtliche Konstruktionsteile über den Säulenkapitellen sind als Leichtbaukonstruktion ausgeführt. Die Kuppeln über Schiff und Chor bestehen aus Holz und Putz; es handelt sich im wesentlichen um Trapezlatten, die unter- und oberseitig mit Haarkalkmörtel verputzt und über hölzerne Spanten am Dachstuhl verankert sind. Das Muldengewölbe ist gegen den Dachraum nicht gedämmt. Am Fuß der Kuppel befinden sich in regelmäßigen Abständen Lüftungsöffnungen mit einem Querschnitt von etwa 30/20 cm, die einen Luftaustausch zwischen Dachraum und Kirchenschiff ermöglichen.

Im Vergleich zu anderen Kirchen bietet die Wies – vor allem in den höheren Raumzonen – eine im Verhältnis zum Raumvolumen relativ geringe umhüllende Masse.

Nach einer überschlägigen Berechnung gemäß DIN 4108 bieten die Hüllkonstruktionen folgende bauphysikalische Eckdaten zum Dampf- und Wärmedurchgang:

Bauteil	s_d [m]	k-Wert [W/m ² ·K]
Außenwände	5,6	0,6
Gewölbe	1,7	2,0
Dachhaut	20,8	3,0

Anmerkung: Der luftschichtäquivalente Dampfdurchgangswiderstand « s_d » wurde nach der Angabe des Auftraggebers errechnet, nach der die Holzschalung mit einer Dachbahn überdeckt ist. Der entsprechende – sehr hohe Wert – verliert im Gesamtzusammenhang aber an Bedeutung, da sich die Dachhaut im Lauf der Messungen zwar als weitgehend winddicht, aber nicht dampfdicht erwies.

Über den gesamten Zeitraum der Messungen waren – bis auf besonders kalte Tage – Arbeiten zur Restaurierung der Raumschale im Gange, daneben wurden auch kirchliche Feiern abgehalten und die Kirche von Touristen, wenn auch in stark eingeschränktem Maß, besucht.

Aufbau und Systematik der Meßinstallation

Ziel der Messungen war, die Zusammenhänge aus den Klimabedingungen von Außenluft, Dachraum und Kirchenraum zu erfassen. Hierzu benötigt man nicht nur die Kenntnis der Außenluft- und Raumluftzustände, sondern vor allem die Oberflächentemperaturen der Raumschale – und dies vornehmlich dort, wo Schäden auftreten.

Weiterhin wurden Messungen zu den Luftströmungen im Raum durchgeführt, da auch hierdurch Feuchtebe- und -entlastung mitbestimmt werden, und zudem der Wärmedurchgang meßtechnisch ermittelt, da der genormte Rechengang bei normfremden Materialien zu große Abweichungen bringen kann.

Im einzelnen wurden folgende Meßstellen angelegt, deren Auswertung die beschriebenen Abhängigkeiten aufzeigt:

— Außen, Dachraum und Kirchenraum: jeweils Lufttemperatur und relative Luftfeuchte. Durch diese Daten ist eine Bilanzierung der Luftzustände in den drei Bereichen möglich.

Es können hierdurch Abhängigkeiten der Klimata von Dach- und Kirchenraum zum äußeren Leitklima gefunden werden. Zum Bilanzieren der Feuchtezustände in der Kirche wurde die Temperatur- und Luftfeuchtemeßstelle in etwa halber Höhe des Kirchenschiffs verwendet.

— Vertikalprofil der Lufttemperatur etwa in Raummitte Kirchenschiff in Verbindung mit Lufttemperatur außen und Dach.

Hieraus ist die Temperaturschichtung im Kirchenschiff sowie zwischen Schiff und Dachraum ablesbar.

- Vertikalprofil der Lufttemperatur im Altarbereich zum Vergleich zur vorher genannten Raumzone.
- Unter Chorbogen: Lufttemperatur, gemeinsam mit den Vertikalprofilen als Horizontalprofil in Längsrichtung der Kirche auswertbar.
- Raumschale: Oberflächentemperaturen, überwiegend an der Gewölbeshale (ZR), der nördlichen Seitenkapelle (KK-5) und der südöstlichen Seitenkapelle (KK-10), meist mit zusätzlichen oberflächennahen Lufttemperaturen.

Diese Daten dienen dem Abklären einer Kondensationsneigung an unterschiedlich massereichen beziehungsweise unterschiedlich situierten Bauteilen.

Soweit die Gefahr einer Meßwertverfälschung durch Bestrahlung (Scheinwerfer oder Sonne) absehbar war, wurden die Meßfühler durch reflektierende Hüllen abgeschirmt.

Sämtliche Meßfühler wurden vom Hybridschreiber im Abstand von zwei Minuten abgetastet und ihre Werte aufgezeichnet, einschließlich der automatischen Nennung von Maximal-, Minimal- und Mittelwerten.

Aus Kostengründen wurden an klimabedingten Größen nicht direkt erfaßt:

- Sonnenscheindauer,
- Windanfall und -geschwindigkeit,
- Regenmenge und -dauer,
- Gesamtluftwechsel der Kirche,
- Gesamtströmungsverhältnisse.

Aus den vorhandenen Meßergebnissen konnten jedoch zum Teil indirekte Schlüsse hierzu gezogen werden.

Während der Installation des Meßsystems wurden von den Restauratoren die bis dahin noch nicht behobenen, eventuell thermisch bedingten Schäden an der Raumschale angegeben. Im wesentlichen handelte es sich dabei um Verschmutzungen (Staubablagerungen) an horizontalen und schwach geneigten Flächen entlang der Nordseite sowie Schimmelbefall an der Deckenuntersicht hauptsächlich im Bereich des Chorbogens.

Die weitere Verarbeitung der Einzel- und Mittelwerte wurde mittels EDV-gestützter Tabellenkalkulationen durchgeführt, die gesondert auf die vorhandene Meßinstallation zugeschnitten waren.

In das Gutachten sind jeweils erläuternde Diagramme eingefügt oder den einzelnen Absätzen Tabellenbögen mit den zugehörigen Daten zugeordnet. Diese Zusammenfassung enthält beispielhaft einige dieser Abbildungen.

In den nachfolgenden Texten, Diagrammen und Tabellen werden folgende Kurzzeichen verwendet:

T = Temperatur [°C].

T_l = Lufttemperatur (direkte Beziehung zum Sättigungsdampfdruck und der darin enthaltenen maximalen Menge an Wasserdampf).

T_s = Taupunkttemperatur oder Sättigungstemperatur: bei einer bestimmten Dampfmenge kann Luft bis zu dieser Temperatur abkühlen, bevor der Dampf als Nebel oder Oberflächenkondensat ausfällt (direkte Beziehung zum Partialdampfdruck und der tatsächlichen Menge an Wasserdampf).

T_o = Oberflächentemperatur an der Raumschale; liegt diese unter der Taupunkttemperatur T_s, so fällt der Wasserdampf als Kondensat an der Oberfläche aus.

Als Taupunktstand wird die Differenz zwischen Oberflächen- und Taupunkttemperatur bezeichnet. Dieser Wert erlaubt eine sehr rasche und einfache Orientierung über die Kondensationsneigung eines Bauteils. Je größer er ist, desto mehr Wasser kann von den Oberflächen abdiffundieren; negative Werte (Taupunktunterschreitungen) besagen, daß eine Kondensation stattfindet, die sich an Oberflächen – je nach deren Temperatur – als Feuchtfilm (Tauwasser) oder Reif niederschlagen kann. Taupunktunterschreitungen von Luft führen zu Nebelbildung.

K = Temperaturdifferenz: 1 K (Kelvin) entspricht einer Änderung um 1 °C.

P = Druck [Pa oder N/m²], hier stets als Dampfdruck von gasförmigem Wasser.

P_s = Sättigungsdampfdruck, als maximal möglicher Wasserdampfdruck in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_l.

P_p = Partialdampfdruck, als tatsächlich herrschender Dampfdruck.

rF = relative Luftfeuchte [%], als Verhältniszahl von Sättigungs- und Partialdruck. Je näher diese Zahl beim Wert «100» liegt,

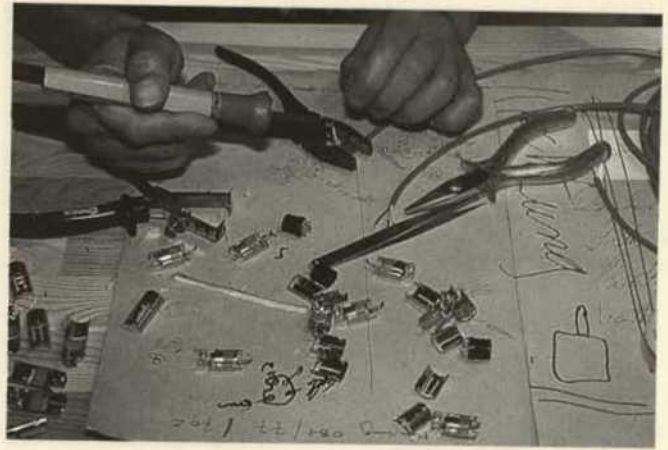


Abb. 1. Montage der Temperaturfühler an die Anschlußkabel

Fig. 1. Placement of the temperature sensors on the connection cables

desto stärker ist die temperaturabhängige Wasseraufnahmefähigkeit der Luft ausgeschöpft.

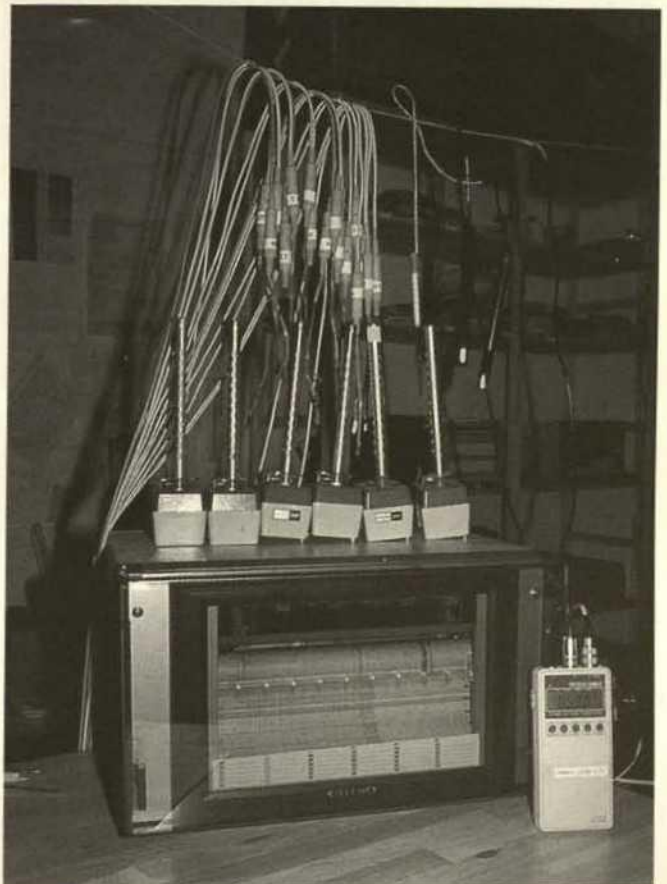
X_v = Wasserdampfanteil in Luftvolumen [g/m³].

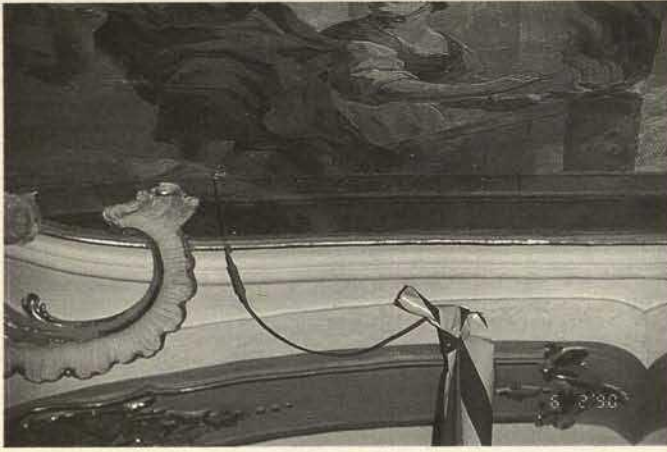
X_{vs} = maximal möglicher Wasserdampfanteil, entspricht im Verhältnis dem Sättigungsdampfdruck und einer relativen Luftfeuchte von 100%.

X_{vp} = tatsächlicher Wasserdampfanteil, entspricht im Verhältnis dem Partialdampfdruck zur Sättigungs- oder Taupunkttemperatur, beziehungsweise der relativen Luftfeuchte.

Abb. 2. Probelauf eines Teils der Meßanlage im Institut; zu sehen sind der Hybridschreiber sowie Luftfeuchtefühler

Fig. 2. Trial run with part of the measuring apparatus in the laboratory; the hybrid recorder and the humidity sensors are visible





3



4



5 Δ

▽ 6



Da aus den Meßergebnissen keine negativen Auswirkungen durch Besucher und die Arbeiten an der Raumschale (zum Beispiel als Strahlungswärme von Scheinwerfern oder Heizgeräten) ablesbar waren, wurde, um dennoch über die Gefährdungsgrenze Angaben zu erhalten, eine Modellrechnung unter Zugrundelegung besonders ungünstiger Umstände durchgeführt.

Meßergebnisse

Abhängigkeiten von Außen- und Innenklima

Als Referenztemperatur im Kirchenraum wurde die Meßstelle in etwa 7,5 m Höhe gewählt. Höherliegende Meßstellen sind regelmäßig wärmer, tiefere dagegen kälter. Die angegebenen Daten sind grundsätzlich als Tagesmittelwerte zu verstehen.

Beispielhaft zeigt die Interpretation der Daten für August 1990, wie sehr sich selbst bei schwankendem Außenklima ein regelmäßiges Innenklima einstellt:

Das Außenklima war in diesem Monat vor allem durch starke Wetterumschwünge und schroffe Temperaturstürze bestimmt. Dabei wurden Temperaturdifferenzen von 10,6 K auf 4,6 K (Dachraum) beziehungsweise 1,5 K (Kirchenschiff) abgefangen. Von den Schwankungen vom 13. bis 16.8. wurde die Abkühlung im Dach weitgehend, im Schiff vollständig «geschluckt». Dafür waren die Temperatureinbrüche am 17. und 21.8 im Dach und Kirchenraum gut zu verfolgen. Die Räume reagierten nur in einem Fall mit einem Tag Nachlauf. Zwischen 24. und 30.8. war eine zwischenzeitlich leichte Temperatursenkung im Dach wieder schwach, in der Kirche gar nicht wahrnehmbar.

Die Taupunkttemperaturen im Inneren änderten sich etwa analog zur betreffenden Lufttemperatur.

Gesamtbewertung: Unter sommerlichen Bedingungen wird der in den Vormonaten bestimmte thermische Mechanismus ganz erheblich durch weitere Einflüsse überlagert. Da diese Vorgänge nicht nur im Kirchenschiff, sondern auch in dem nicht zugänglichen Dachraum zu beobachten sind, kann die Anzahl von Besuchern oder direkte Verbindungen zwischen Außenluft und Kirchenschiff (offene Türen) nicht als ursächlich betrachtet werden.

Qualitativ entsprechen sich Sommer- und Winterprofil des Raumklimas, der Unterschied liegt im wesentlichen nur in der unterschiedlich großen Temperaturspanne zwischen unten und oben. Die hauptsächlichsten Temperaturunterschiede finden sich zwischen Bodennähe und etwa 5 m Höhe. Von bis 5 bis 10 m ist nur ein leichter Anstieg zu bemerken; die Lufttemperaturen steigen von 10 auf 12,5 m Höhe wieder deutlich an und stagnieren auf diesem Niveau bis knapp unter die Kuppelschale. Die Unterkante des Muldengewölbes ist wieder wesentlich wärmer als die darunter befindliche Luft. Innerhalb der Putz- und Lattenkonstruktion findet sich wieder ein Temperaturabfall.

Im Dachraum ist wieder ein Temperaturanstieg vom 1. zum 2. Dachgeschoß ablesbar, dann erfolgt der Sprung zur Außentemperatur.

Vertikales Temperaturprofil

Im Kirchenschiff wurde ein Kabelbaum mit Meßstellen für die Lufttemperatur in senkrechten Abständen von etwa 2,5 m installiert. Die Meßstelle in 7,5 m Höhe war gleichzeitig Referenzstelle für raumklimatische Abhängigkeiten von Feuchte und Temperatur.

Folgende Aussagen können aus dem Diagramm «Monatsauswertung» abgeleitet werden:

Abb. 3. Anschluß eines Temperaturfühlers

Abb. 4, 6. Ankleben der Fühler für Oberflächentemperaturen

Abb. 5. Verzug der Meßinstallation durch Gewölbeöffnungen

Fig. 3. Connection of a temperature sensor

Fig. 4, 6. Application of the surface temperature sensors

Fig. 5. Insertion of the measuring apparatus through openings in the vault

- Die Gewölbeschale ist einer der wärmsten Bestandteile im thermischen Raumsystem,
- die Umgebungstemperaturen bei Unter- und Oberkante Muldengewölbe liegen sehr eng beieinander, es kann folglich auch kein nennenswerter Wärmedurchgang durch diesen Bauteil erfolgen. Im Monatsmittel lag die Temperaturdifferenz in der Gewölbeschale bei maximal $-1,48\text{ K}$.

Gesamtbewertung: Im vertikalen Temperaturprofil zeigten sich in den Tagesmittelwerten überraschend einfache Zusammenhänge, die ohne Bruch über das ganze Jahr hinweg verfolgt werden konnten:

- Es besteht eine abgestufte Temperaturschichtung mit deutlichen Temperaturerhöhungen zwischen Fußboden und $2,5\text{ m}$, zwischen 10 und $12,5\text{ m}$ und der Luft unter der Kuppel gegenüber der Oberfläche des Muldengewölbes. An den dazwischen liegenden Meßstellen gab es kaum eine Temperaturerhöhung oder es war sogar ein leichter Rückgang zu verzeichnen.
- Diese Temperaturschichtung war ganzjährig zu beobachten, im Sommer allerdings stärker ausgeprägt als im Winter.
- Abweichungen von der «Normalschichtung» waren fast ausschließlich bei besonders schroffen äußeren Temperaturen meßbar.
- Die stabilsten Temperaturzustände herrschten an der Meßstelle in $12,5\text{ m}$ Höhe; dort sind die Temperaturamplituden am geringsten. Auch nach Abbau der Gerüstebene unter dem Muldengewölbe blieb diese Eigenart erhalten.
- Zwischen Ober- und Unterkante Muldengewölbe besteht kein nennenswertes Temperaturgefälle, das dort den Einbau einer Dämmung begründen könnte.

Ebenso wie bei den Untersuchungen über die Klimabeziehungen von Außenluft, Dachraum und Kirchenschiff zeigt sich, daß der Kirchenraum – auch noch während Kälteperioden – vom Dach aus temperiert wird.

Horizontales Temperaturprofil

In der Auswertung zeigt sich, daß die Luft im Altarraum sehr regelmäßig um etwa $0,5\text{ K}$ wärmer ist als in gleicher Höhe im Kirchenschiff und unter dem Chorbogen nochmals bis um etwa $0,7\text{ K}$ ansteigt. Nur bei sehr stark steigenden Temperaturen reagierte der Altarbereich schneller: die Lufttemperaturen stiegen dann gelegentlich über diejenige unter dem Chorbogen. Es zeigte sich als Tendenz, daß die Luft im Kirchenschiff geringfügig rascher abkühlte als an den anderen Meßstellen, unter dem Chorbogen aber die Erwärmungen deutlicher wiedergegeben wurden.

Auch im Altarbereich besteht ein ausgeprägtes vertikales Temperaturprofil, da die Meßstelle in $0,5\text{ m}$ Höhe stets deutlich niedrigere Temperaturen als in größerer Höhe ergab.

Gesamtbewertung: Bei dem, über eine einheitliche Höhe von etwa sieben Meter ermittelten horizontalen Temperaturprofil erwies sich die Luft direkt unter dem Chorbogen durchgängig wärmer als in Kirchenschiff und Altarraum.

Raumschale, Gewölbe über Kirchenschiff

In der graphischen Darstellung sind die vom Außenklima abhängigen Schwankungen der Tagesmittelwerte sehr gut ablesbar; die Linien der einzelnen Temperaturen an der Gewölbeunterseite liegen aber so eng, daß sie teilweise fast nicht mehr zu unterscheiden sind. Meist lagen die Temperaturen an den Fußpunkten der Hohlkehle etwas tiefer als in Gewölbemitte; die Lufttemperatur unter Mitte Gewölbe entspricht weitgehend den Oberflächentemperaturen an Unterkante Hohlkehle.

Als Tendenz ist ablesbar, daß eine Temperaturspreizung überwiegend während sommerlicher Bedingungen und bei ruhigen Klimlagen mit geringen Änderungen stattfindet.

Eine Kondensatbildung in der Gewölbeschale konnte in keinem Fall ermittelt werden. Als Minimum der Tagesmittel ergab sich eine Taupunktnäherung bis auf $4,1\text{ K}$ ($14.2.90$ am nördlichen und südlichen Kuppelfuß). Der größte Taupunkt-Abstand von $11,0\text{ K}$ zeigte sich am $30.05.90$ in Gewölbemitte.

Wegen der sehr leichten und massearmen Konstruktion haben Erwärmungsphasen einen nur sehr geringen Einfluß auf die Taupunkt-



Abb. 7. Verkabelung und Anschluß im Dachraum
Fig. 7. Cables and connections in the roof

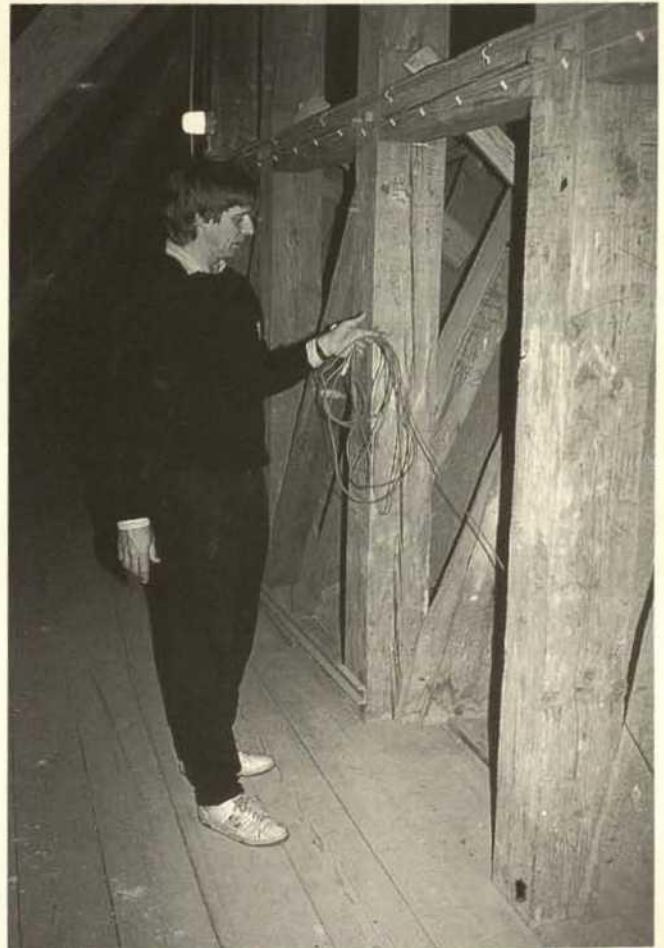
näherungen, da die Oberflächen mit der gleichen oder fast gleichen Geschwindigkeit «nachwärmen» wie die umgebende Luft.

Wesentlich kritischer sind Außenluftzustände mit einer relativen Luftfeuchte ab etwa 90% , da bereits in der Umgebungsluft sehr knappe Abstände von der Luft- zur Taupunkttemperatur vorhanden sind.

Raumschale, Unterseite Chorbogen

Die Oberflächentemperatur des Chorbogens wurde im Umfeld eines größeren Schimmelrasens erfaßt. Grundsätzlich lag sie tiefer als die Lufttemperatur in enger Nähe und auch tiefer als die Oberflächentem-

Abb. 8. Wie Abb. 7 / Fig. 8. Same as fig. 7



Monat	Oberflächentemperatur			Taupunktstand		
	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.	Min.
Nov.	2.8	5.5	0.9	7.5	9.1	5.8
Dez.	2.8	7.3	-0.6	6.7	8.6	4.8
Jan.	2.3	4.2	1.0	6.7	8.6	5.0
Feb.	4.5	6.8	2.9	5.7	7.4	3.0
März	7.4	10.1	2.0	6.3	8.2	4.8
April	6.1	8.0	4.1	5.0	7.3	4.2
Mai	12.5	14.9	8.5	5.6	8.7	4.4
Juni	13.6	17.3	10.4	4.7	8.2	3.7
Juli	14.7	16.7	12.7	5.1	7.0	3.0

peraturen der Hauptkuppel. Nachfolgend werden die wesentlichen Daten aus dieser Meßstelle mit den entsprechenden Taupunktständen tabellarisch wiedergegeben. – Anschließend Abbau von Gerüst und Meßstelle.

Es zeigt sich, daß die Taupunktstände – trotz Erwärmung der Oberfläche – unter sommerlichen Bedingungen enger werden; sie sind allgemein geringer als an der Hauptkuppel. Sogar bei Taupunktständen von stellenweise nur 3,0 K im Tagesmittel kann allerdings selbst eine kurzfristige Kondensatbildung während des Tages ausgeschlossen werden.

Die Taupunktannäherungen erfolgten stets während oder unmittelbar nach starken Temperaturerhöhungen der Außenluft, die von hohen relativen Luftfeuchten begleitet waren.

Gesamtbewertung: Die im Vergleich zur Hauptkuppel etwas massereichere und damit besser gedämmte Konstruktion des Chorbogens besitzt eine geringfügig stärkere Neigung zur Bildung von Oberflächenkondensat. Dabei sind winterliche Klimabedingungen deutlich harmloser als sommerliche Erwärmungsphasen mit gleichzeitig hoher relativer Luftfeuchte.

Raumschale, Seitenkapelle Südost (KK 10)

Die vier installierten Meßstellen (Luft, Decke, Außenwand und innere Trennwand zur benachbarten Seitenkapelle) zeigten sehr weitgehend parallel verlaufende Temperaturen. Davon waren die der (leichten) Deckenkonstruktion und der (schweren) Innenwand über weite Strecken sogar deckungsgleich.

Die grundsätzlichen Abhängigkeiten zeigt beispielhaft wieder ein Monat, Mai 1990 (Graph S. 555 oben). Der geringste Taupunktstand (5,0 K) ergab sich während harmloser äußerer Klimabedingungen (minimaler Temperaturanstieg bei gleichbleibender relativer Luftfeuchte). Ursache war ein «Nachlaufen» der vorherigen äußeren Erwärmung um ein bis zwei Tage im Kirchenraum. Dieser Mechanismus ist charakteristisch für schwere, damit thermisch träge Bauteile.

Gesamtbewertung: Die kleine südöstliche Kapelle besitzt ein ausgeglichenes und «warmes» Klima. Die Temperaturen von Luft, Außen- und Innenwand wie auch Decke liegen in einem sehr engen Bereich mit meist weniger als 0,5 K Differenz. Taupunktnäherungen erfolgen dann, wenn die Außenluft weitgehend mit Wasserdampf gesättigt ist und gleichzeitig Erwärmungen stattfinden. In einem Fall wurde der engste Taupunktstand im Rahmen einer verzögerten Erwärmung gegenüber der Außenluft nachgewiesen. Taupunktunterschreitungen sind in dieser Kapelle allenfalls bei «klimatischen Jahrhundertereignissen» möglich.

Raumschale, Seitenkapelle Nord

Untersucht wurden die Temperaturen von Decke, Fensterpfeiler aus Naturstein, Außenwand im vertikalen Profil und der Figur des Abraham als Teil der Ausstattung im Seitenaltar. Im Gegensatz zu den vorher untersuchten Raumzonen ergaben sich hier auch inhomogene Temperaturverläufe. Bestimmende Faktoren waren unter anderem die allgemeine jahreszeitliche Temperaturdisposition, Tagesschwankungen sowie die Masse und thermische Trägheit der jeweiligen Bauteile. Allgemein ist ein stärkeres Nachlaufen gegenüber den Außentemperaturen erkennbar.

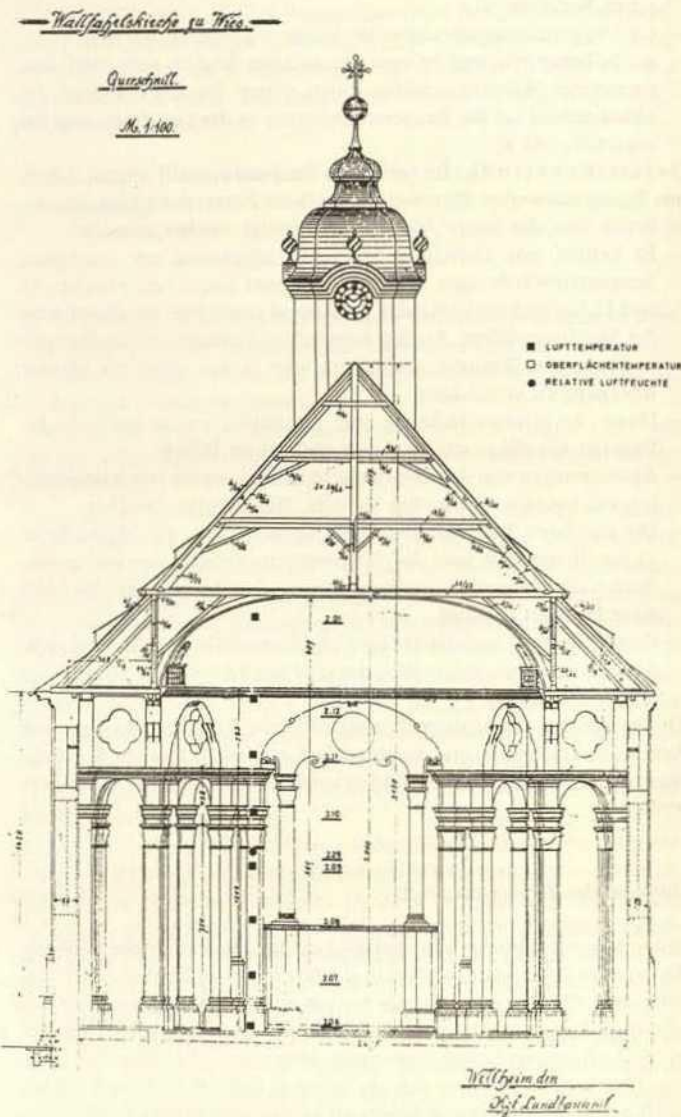
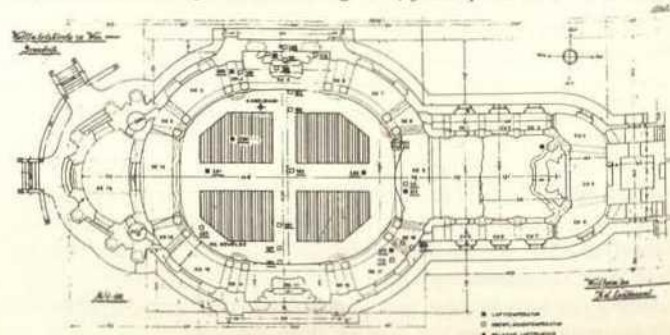


Abb. 9a. Lageplan der Meßstellen, Querschnitt ohne Maßstab
Fig. 9a. Location of the measuring sites, section without scale

Zur besseren Übersicht wurden nur die «kritischen» Meßstellen in die Diagramme übernommen; Raumluft und innere Wandscheibe verhielten sich im Temperaturablauf etwa wie die dargestellte Decke.

Zur Verdeutlichung der Problematik dieser Zone werden zwei Monate herausgegriffen: Dezember 1989 und Februar 1990.

Abb. 9b. Lageplan der Meßstellen, Grundriß ohne Maßstab
Fig. 9b. Location of the measuring sites, floor plan without scale



Dezember 1989 (Graph S. 555 Mitte): Die starke Erwärmung der Außenluft zeichnet sich auch in der Kapelle ab, die anschließende Abkühlung erfolgte aber wesentlich weicher. Gegenüber dem Vormonat hatte sich die Temperaturreihe nicht verschoben, mit Ausnahme der Decke sogar leicht erwärmt. Die Spannen zwischen Maximal- und Minimaltemperatur waren meist größer als im Vormonat, sie standen in einem besseren Zusammenhang zu Lage und Masse des Bauteils. Die noch unkritischen Taupunktstände lagen bis zu knapp 2 K unter denen der Kuppel.

Meßstelle	To, Mittel (Max./Min) °C	Spreizung Max./Min K
Decke	3.2 (-0.1/7.8)	7.9
Luft	3.2 (-0.1/8.1)	8.2
Innenwand, 13 m	3.1 (-0.1/7.3)	7.4
Außenwand, 12 m	2.9 (-0.3/6.9)	7.2
Fensterpfeiler	2.5 (-0.9/7.8)	8.7
Abraham	2.5 (-1.0/6.9)	7.9
Außenwand, 7 m	1.7 (-1.5/5.5)	7.0
Außenwand, 4 m	1.6 (-1.5/5.3)	6.8

«Abraham» ist stärkeren Temperaturschwankungen unterworfen als die Außenwände.

Februar 1990: Während der Erwärmungsphasen stieg die Temperatur an der Decke drastisch stärker als an den anderen Meßstellen. «Abraham» zeigte mit den massereichen Meßstellen eine verzögerte Erwärmung, reagierte aber vergleichsweise rasch auf Abkühlungen.

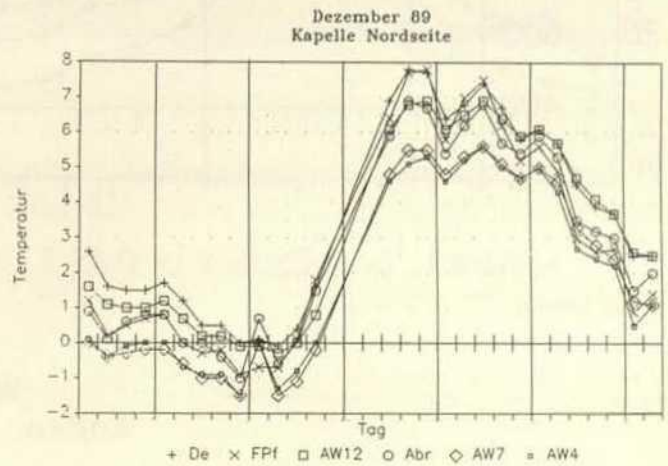
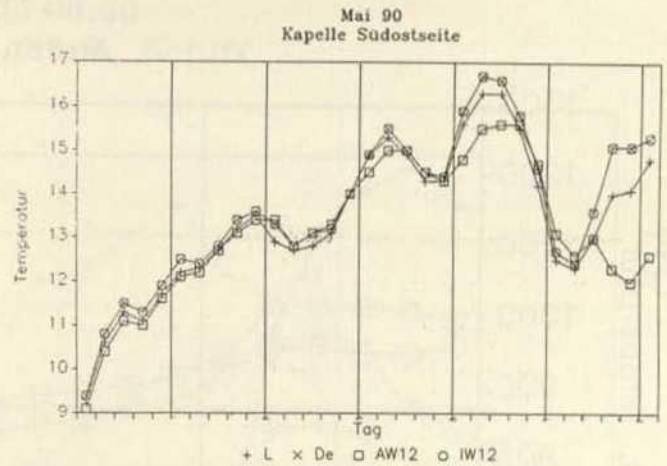
Meßstelle	To, Mittel (Max./Min) °C	Differenz Max./Min K
Decke	6.2 (9.9/3.5)	6.4
Innenwand, 13 m	5.5 (8.3/3.7)	4.6
Luft	5.4 (8.1/3.6)	4.5
Fensterpfeiler	5.0 (8.1/3.0)	5.1
Außenwand, 12 m	4.9 (7.2/3.4)	3.8
Abraham	4.5 (6.8/2.8)	4.0
Außenwand, 4 m	3.6 (5.5/2.2)	3.3
Außenwand, 7 m	3.5 (5.5/2.2)	3.3

Die Temperaturreihe hatte sich nach den Kriterien «Masse» und «Nähe zur Außenluft» verschoben, wobei die Figur trotz geringer Eigenmasse und Abschirmung durch den Altaraufbau in der Gruppe «Außenwand» blieb. Die Decke zeigte größere Schwankungen und ein insgesamt etwas höheres Temperaturniveau als das Muldengewölbe. Bei hoher relativer Außenluftfeuchte und während Temperaturerhöhungen waren an der kältesten Meßstelle Taupunktdifferenzen bis hinab zu 2,3 K nachweisbar.

Gesamtbewertung: Im Bereich der nördlichen Seitenkapelle findet sich die übliche thermische Problematik von schweren, massereichen und speicherfähigen Bauteilen bei sommerlichen Klimabedingungen, verbunden mit dem Kälteeinfluß durch eine ungedämmte und nicht besonnte Fensterkonstruktion. An keiner anderen Meßstelle wurden ähnlich enge Taupunktänerungen nachgewiesen, was auch die Schäden an Holzteilen dieses Seitenaltars erklärt.

Charakteristisch ist das raumklimatische Zusammenspiel an folgenden Meßstellen:

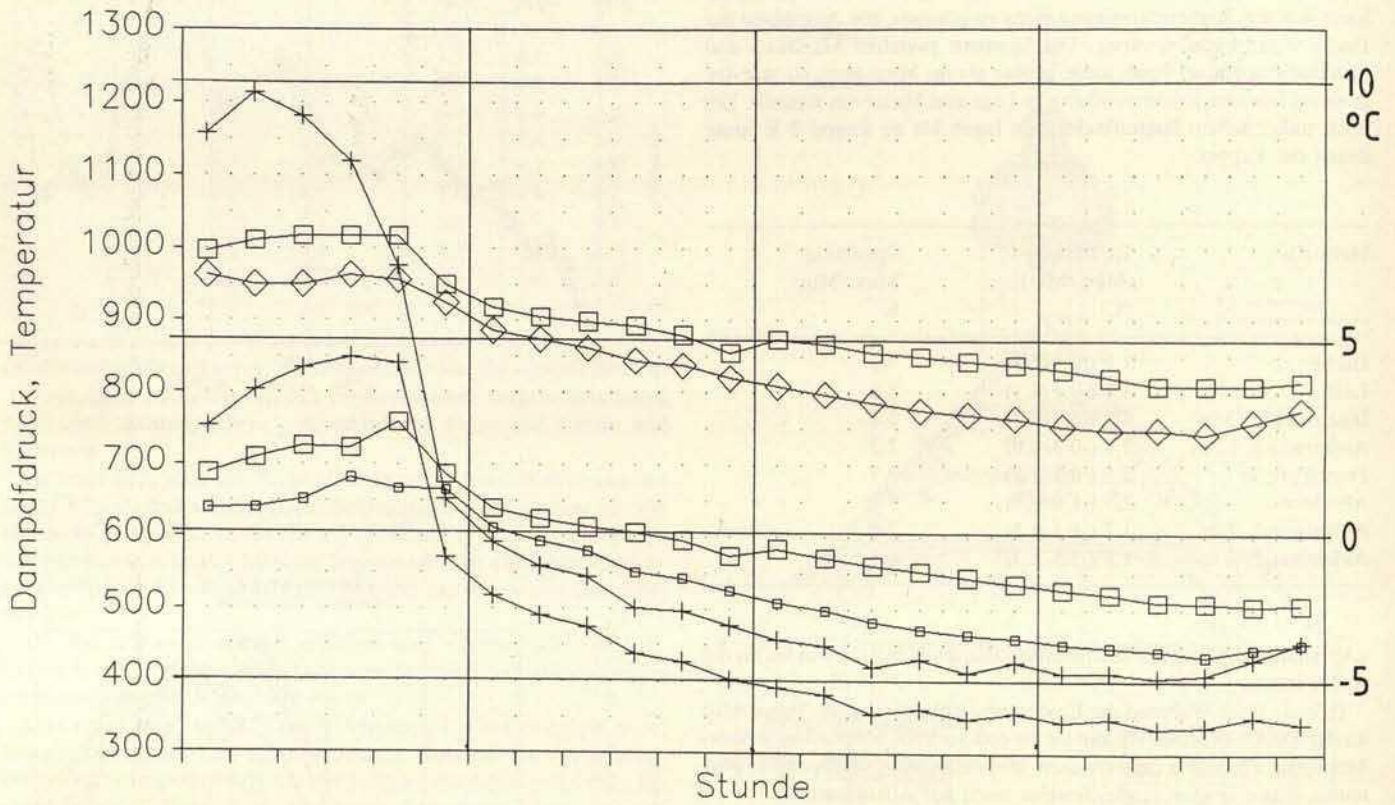
- Fensterpfeiler aus Naturstein an der oberen Fensterkante, mit geringer Eigendämmung und zusätzlichen thermischen Flankenwegen durch die Glasfassungen aus Blei und Eisen,
- Figur des Abraham: unter dem Fenster, von vergleichsweise großen Bauteilmassen umgeben und darüber liegenden Altaraufbauten abgeschirmt.



Während sich das Temperaturniveau des Fensterpfeilers im Mittelfeld aller Meßstellen in der Kapelle bewegte, war die geschützte Figur nicht wesentlich wärmer als die Außenwand in gleicher Höhe, dabei deutlich kühler als der Pfeiler. Das thermisch sehr unterschiedliche Verhalten dieser Meßstellen kann durch folgende «Mechanik» erklärt werden:

- Die geringe Masse des Fensterpfeilers kühlt zwar rasch und stark ab, sie erwärmt sich bei günstigen Außenluftbedingungen aber mit der annähernd gleichen Geschwindigkeit und Amplitude.
 - Die Meßstelle liegt an Oberkante des Fensters; damit über dem Horizont einer Einwirkung der dünnen, besonders kalten Glas- und Metallfläche (einschließlich eventueller Undichtigkeiten).
 - Die Meßstelle «Abraham» liegt sowohl unter dem großen Okulus als auch zwischen den beiden hohen Fenstern in der Seitenkapelle. Diese drei «Kühlflächen» beeinflussen durch absinkende Kaltluft vor allem dann die tiefer liegende Umgebung, wenn die Außenluft kühler als die Raumluft ist. Dann entstehen Fallströmungen von Kaltluft, deren Geschwindigkeit noch nicht zwingend als Zugluft empfunden werden muß, die aber wenigstens den Bereich unter den Fenstern mit einem «Kälteteppich» belegen.
- Bei starker äußerer Erwärmung mit Wärmegegewinnen, durch die Fensterflächen sinkt die Umgebungsluft nicht mehr ab, sondern steigt nach thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten nach oben. Die Bereiche unter den Nordfenstern laufen zwar sehr gut mit den äußeren Kühl- und Abkühlphasen mit, doch wird die im Gegensatz zu den Südfenstern ohne wesentlich schwächere Erwärmung abgeschwächt.

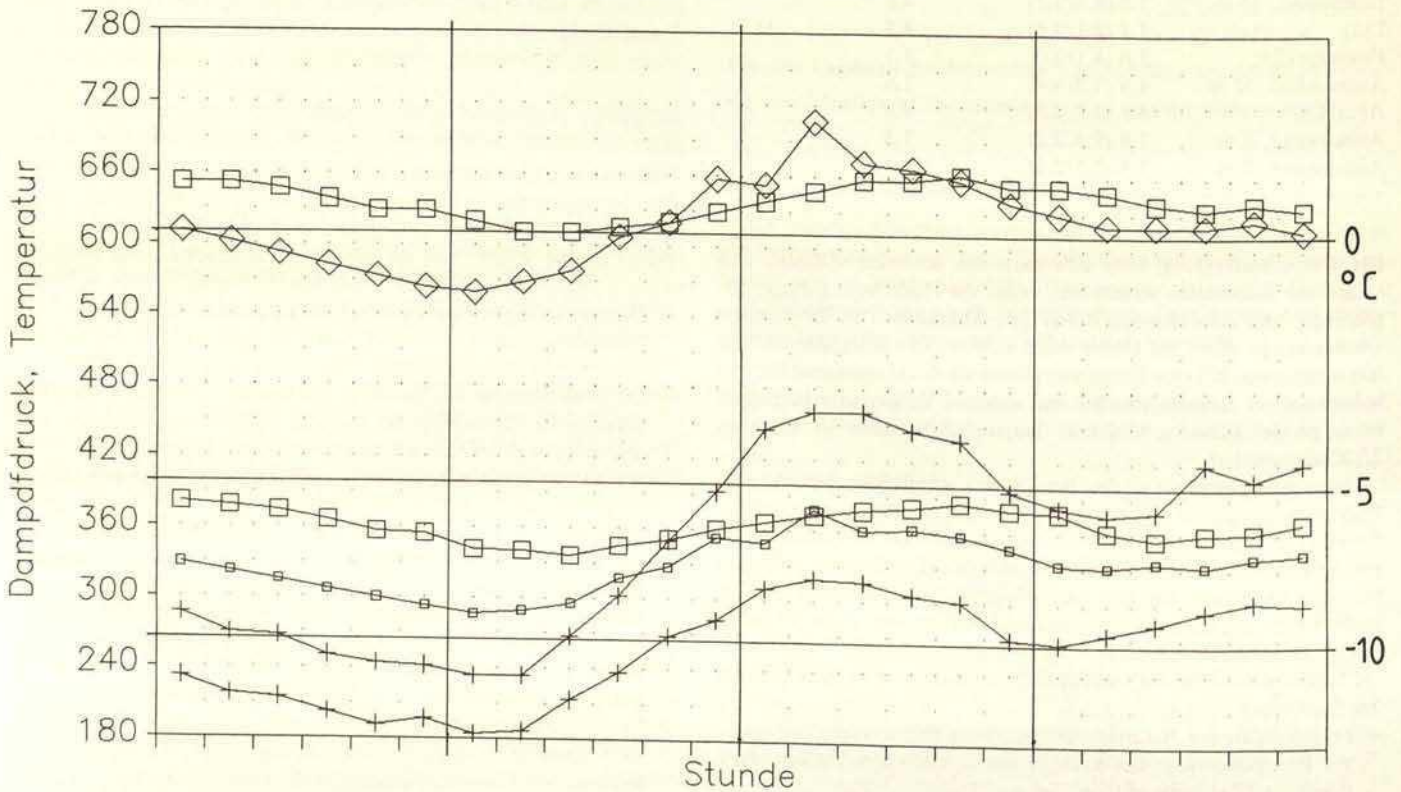
22.11.89
Außen, Dach, Schiff



+ A:Ps,T + A:Pp,Ts □ D:Ps,T □ D:Pp,Ts ◇ S:Ps,T ◻ S:Pp,Ts

stärkste Abkühlung

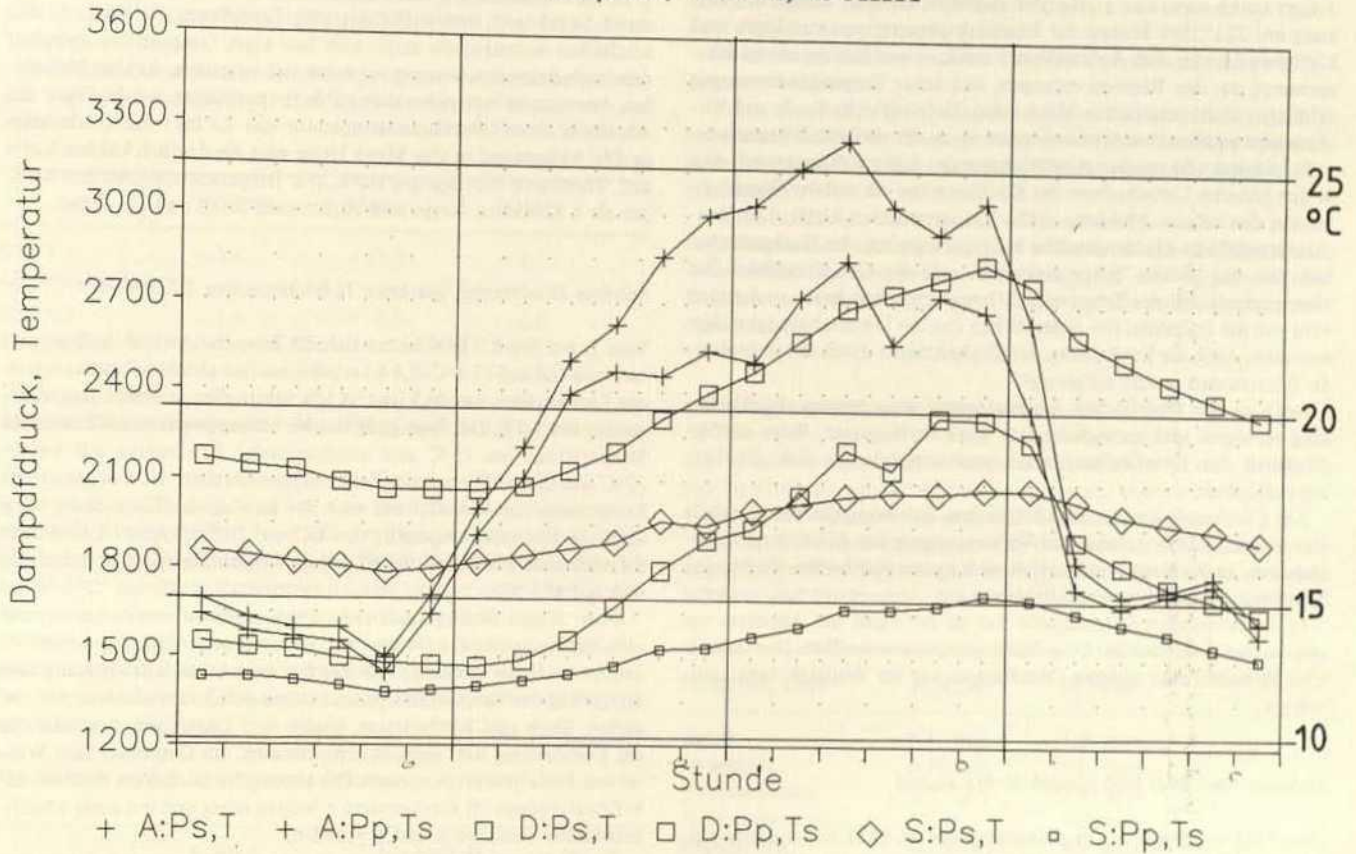
26.11.89
Außen, Dach, Schiff



+ A:Ps,T + A:Pp,Ts □ D:Ps,T □ D:Pp,Ts ◇ S:Ps,T ◻ S:Pp,Ts

kältester Tag

30.06.90
Außen, Dach, Schiff



Höchster Partialdruck außen

— Die vergleichsweise große Bauteilmasse der Außenwand reagiert thermisch träger, so daß zwar die aus der Lage bedingte starke Abkühlung gedämpft wird, im gleichen Maß aber auch die ohnehin abgeschwächte Erwärmung.

Auswertung von Extrembedingungen

Nachfolgend werden die raumklimatischen Zustände bei besonders ausgeprägten Bedingungen der Außenluft untersucht, um das Kurzzeitverhalten von Raumschale und Raumluft zu ermitteln. Die Auswertung erfolgt stundenweise nach Tagen, die sich im Rahmen der vorherigen Untersuchungen als besonders auffällig gezeigt hatten.

Stärkste Abkühlung: 22.11.1989 (Graph S. 556 oben)

Rahmenbedingung war eine Abkühlung der Tagesmittelwerte um 8,8 K, von +4,4 auf -4,4 °C zwischen 22.11. und 23.11.89. Die gesamte Abkühlung reichte von den Extremwerten +9,8 °C (22.11. 13 Uhr) bis -4,9 °C (23.11. 8 Uhr), also über 14,7 K. Dabei erfolgte der wesentliche Teil des Temperatursturzes innerhalb von 2 Stunden, von 8,6 über 6,6 auf 0,9 °C; die Temperatursprünge betragen in dieser Zeit 2,0 und 5,7 K im Stundenintervall.

Während dieses Vorgangs trat ein kurzfristiger Bruch in der Taupunktlinie ein, die relative Luftfeuchte pendelte sich aber anschließend rasch auf ein Niveau um 80% ein. Die Taupunkttemperatur senkte sich nicht im gleichen Umfang ab wie die der Außenluft. Die gesamte Spanne lag zwischen 4,6 und -6,9 °C (11,5 K), wobei das größte Stundenintervall 5,4 K betrug.

Weder im Dachraum noch im Kirchenschiff war ein Temperatursturz von nur annähernd gleichem Ausmaß wie außen feststellbar. Im Dach fielen die vorher etwas kühleren Temperaturen insgesamt um 3,3 K, von +7,2 auf +3,9 °C, wobei der größte Stundensprung exakt 1,0 K betrug und zeitgleich mit der Außenluft erfolgte. Die anschließende weitere Abkühlung lag bei einem Mittelwert um 0,3 K pro Stunde; der Dachraum blieb dauerhaft wärmer als die Außenluft.

Im Kirchenschiff erfolgte die Abkühlung insgesamt von +6,4 auf +2,7 °C (3,7 K) sogar weniger gedämpft als im Dachraum, es zeigten sich aber sehr weiche Stundenintervalle von maximal 0,6 K. Das Kirchenschiff blieb stets kälter als der Dachraum; interessant ist der Umstand einer leichten anschließenden Erwärmung in der Kirche, die fast parallel zur Außenluft erfolgte, von dem etwas wärmer gebliebenen Dachraum aber nicht mitgetragen wurde. Ursache ist die Sonneneinstrahlung über die nach Süden orientierten Fenster (jahreszeitlich tiefer Sonnenstand), aber auch ein Wärmeentzug aus dem Dachraum durch das Kirchenschiff.

Der Taupunktverlauf in Dach und Schiff war besser an den äußeren Klimawechsel angeglichen als die Lufttemperaturen. Im Dachraum sank die Taupunkttemperatur um 5,6 K, von +3,0 auf -2,6 °C, in der Kirche von +1,5 auf -4,3 °C, um 5,8 K. Daraus ist abzuleiten, daß der «überschüssige» Wasserdampf sehr rasch durch einen Ausgleich mit außen abgebaut wurde, da der Kirchenraum weniger dampfdicht ist als die Dachhaut. Als wichtige und schadensmindernde Konsequenz verringert das Ablüften von Raumluftfeuchte die Neigung zur Kondensatbildung, da mit den Lufttemperaturen auch die Taupunkttemperaturen sanken, auch die vorher bestehenden Taupunktstände weiter gespreizt wurden.

Während sich die Taupunktstände im Lauf der Abkühlung an den meisten Oberflächen etwa verdoppelten, stiegen sie beim «Abraham»

vergleichsweise gering, von 4,3 auf 7,0 K, was nochmals – zumindest theoretisch – auf eine erhöhte Gefährdung hinweist.

Gesamtbewertung: Bei der extremen äußeren Temperatursenkung am 22.11.1989 blieben die Raumlufttemperaturen von Dach und Kirche weit hinter dem Außenklima zurück, es wurde aber so viel Wasserdampf aus den Räumen entzogen, daß keine Taupunktnäherungen erfolgten. Die klimatischen Hoch- und Tiefpunkte in Dach und Kirchenraum wurden zwei Stunden später als in der Außenluft gemessen.

Bei starken und raschen Abkühlungen der Außenluft entwickelt sich in den höheren Luftschichten des Kirchenraums ein stabiles Warmluftpolster, das bis zum Muldengewölbe fast unverändert bleibt. Das Temperaturgefälle im Muldengewölbe bleibt sehr gering, der Dachraum behält fast das gleiche Temperaturniveau wie die Gewölbeschale. Der überwiegende Teil der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen wird von der Dachhaut (im wesentlichen von der Unterschalung) aufgenommen. Auch die Erwärmung des Kirchenraums durch die tiefstehende Wintersonne wurde aufgezeigt.

Auch an den Oberflächen des Muldengewölbes begann die Abkühlung verzögert und entwickelte sich stark verlangsamt. Beim sanften Abgleiten der Oberflächentemperaturen vergrößerten sich die Taupunktabstände.

Am Chorbogen und in der südöstlichen Seitenkapelle war ebenfalls eine deutliche Verzögerung und Verlangsamung der Abkühlung zu beobachten. In der Kapelle stellte sich nach kurzer Zeit bereits wieder eine Erwärmung durch Sonneneinstrahlung ein.

In der nördlichen Seitenkapelle war an der Figur des Abraham ein sehr rasches Absinken der Oberflächentemperatur meßbar. Das thermische Verhalten aller anderen Oberflächen war im Vergleich dazu «gut-mütig».

Kältester Tag: 26.11.1989 (Graph S. 556 unten)

Dieser Tag war Tiefpunkt und Abschluß der am 22.11. begonnenen Kälteperiode. Das Tagesmittel der Außentemperatur lag bei $-7,1^{\circ}\text{C}$, die Extremwerte bei $-11,2$ und $-3,4^{\circ}\text{C}$ (Unterschied 7,8 K). Im Zusammenhang mit dem großen Tagesgang und der zwischen 81,3 und 68,3 % wechselnden relativen Luftfeuchte ist von einem Schönwettertag mit Sonneneinstrahlung auszugehen. Die äußeren Taupunkttemperaturen bewegten sich synchron mit der Lufttemperatur zwischen $-13,8$ und $-7,7^{\circ}\text{C}$.

Seit Beginn der vier Tage früher einsetzenden Abkühlung hatten sich die Lufttemperaturen von Dach und Schiff nur auf einen Bereich um 0°C abgesenkt, die Temperaturdifferenz zur Außenluft lag im Tagesmittel bei 7,2 (Schiff), beziehungsweise 7,7 K (Dachraum). Diese Differenz kann nicht mehr durch die Dämmung und Speicherwirkung des Bauwerks, sondern nur aus zwischenzeitlichen Wärmegewinnen durch Sonneneinstrahlung interpretiert werden.

Die Wasserdampfanteile der Raumluft (Schiff und Dach) hatten sich besser an die Außenluft angeglichen.

Der Tagesgang der Außentemperaturen war auch innen abgeschwächt meßbar. Bei der Erwärmung konnte im Kirchenschiff ein Nachlauf von etwa einer Stunde nachgewiesen werden; im Dachraum erfolgte sie zeitgleich mit außen. Die Abkühlung des Dachraums begann mit drei Stunden Verzögerung, ihr Beginn im Kirchenschiff ist wegen eines «ausgerissenen» Meßwerts (eventuell kurzfristig besonders starke Erwärmung durch Sonneneinstrahlung) nicht belegbar; die Abkühlung geschah dann aber langsamer als im Dach.

Gesamtbewertung: Die seit 22.11. erfolgte Abkühlung der Außenluft war im Kirchenschiff – aber auch im Dachraum – so weit abgeschwächt, daß die vergleichsweise statischen Temperaturzustände nicht mehr aus der Wärmespeicherung und Dämmung, sondern nur aus zwischenzeitlichen Wärmegewinnen erklärbar sind. Die äußere Erwärmung im Tageslauf war auch in Kirche und Dachraum meßbar, obwohl deren Temperaturen bereits vorher erheblich über der Außentemperatur lagen.

Im Gegensatz zur Lufttemperatur hatte sich innen die Taupunkttemperatur gut an die äußeren Bedingungen angepaßt.

Im Längsprofil entwickelt sich eine deutliche Erwärmung des gesamten Kirchenraums, die «massenahe» Luft unter dem Chorbogen reagiert am trägsten, blieb aber insgesamt wärmer als die anderen Raumteile.

In der Kuppelschale hatten sich die Taupunktabstände nochmals vergrößert. Die vergleichsweise starke tageszeitliche Erwärmung am südli-

chen Fuß des Muldengewölbes wird wieder auf solare Wärmegewinne zurückgeführt.

In der südöstlichen Seitenkapelle erfolgte kurz vor Mittag (Sonnenstand Südsüdost) eine auffällig starke Erwärmung der Luft. In der nördlichen Seitenkapelle zeigte sich eine klare Gruppierung zwischen den hoch liegenden, warmen und den tief liegenden, kühlen Meßstellen. Ausnahmen waren der stets kühle Fensterpfeiler und die Figur des Abraham, deren Oberflächentemperatur von $-1,4$ bis $+1,2^{\circ}\text{C}$ schwankte. Die Außenwand in vier Meter Höhe wies die deutlich kühlest Stelle auf. Thermisch durchgängig stabil, mit Temperaturspannen von weniger als 1 K blieben Decke und Außenwand in 12 und 7 m Höhe.

Stärkste Erwärmung, stärkster Taupunktanstieg 8.7.1990

Vom 7. auf den 8.7.1990 hatten sich die Temperaturmittel im Tagesverlauf von $11,9$ auf $17,3^{\circ}\text{C}$ (5,4 K) erhöht, bei fast gleichbleibenden relativen Luftfeuchten von 96,3 und 94,1 % führte dies zu einem Taupunktanstieg um 5,0 K. Der Tagesgang war bis Mittag durch relativ konstante Temperaturen um 15°C und anschließender Erwärmung auf knapp 22°C bestimmt. Die relative Luftfeuchte reduzierte sich während der Erwärmung nur von 97,7 auf 89,4 %. Im Zug der Erwärmung stieg auch die Taupunkttemperatur von $13,5$ auf $20,3^{\circ}\text{C}$. Ab 17 Uhr kühlte die Außenluft wieder auf $18,3^{\circ}\text{C}$ ab, die Taupunkttemperatur reduzierte sich auf $17,4^{\circ}\text{C}$.

Unter diesen Bedingungen einer Erwärmung ist bereits bei normal schwerer Bauweise die Gefahr von Sommerkondensation gegeben.

Gesamtbewertung: Am Tag mit der stärksten Erwärmung und Steigerung der Taupunkttemperatur zeigte sich im Zusammenspiel von außen, Dach und Kirchenraum wieder eine Dämpfung, besonders in der Entwicklung der Taupunkttemperaturen. Im Gegensatz zum Winter war keine überproportionale Erwärmung im Dachraum meßbar. Alle Erwärmungen im Kirchenraum erfolgten stetig und mit einer «Nachheizdauer» zwischen 2 und 6 Stunden.

Da die Wasserdampfanteile in der Raumluft wesentlich langsamer anstiegen als außen, führten auch verzögerte und abgeschwächte Temperaturanstiege der Raumschale in keinem Fall zu Taupunktunterschreitungen.

Wärmster Tag: 5.8.1990

An diesem Tag herrschten die hochsommerlichen, warm-trockenen Außenluftbedingungen einer Hochdrucklage, mit einer durchschnittlichen Temperatur von $22,4^{\circ}\text{C}$ und einer mittleren relativen Luftfeuchte von 52,3 %. Auch die Tage zuvor hatten ähnliche, wenn auch weniger stark ausgeprägte Wetterlagen bestanden.

Im Lauf des Tages stieg die Außentemperatur von $19,9$ auf $28,4^{\circ}\text{C}$ und sank wieder auf $16,1^{\circ}\text{C}$ ab. Die relative Luftfeuchte schwankte zwischen den Extremwerten von 36,4 bis 77,8 %, die Taupunkttemperaturen von $8,8$ bis $14,3^{\circ}\text{C}$. Wegen dieser geringen Luftfeuchteanteile ergibt sich für den gesamten Kirchenraum die günstige Prognose, daß keine engen Taupunktnäherungen erfolgen.

Gesamtbewertung: Am wärmsten Tag der gesamten Messungen zeigten sich die Luft- und Taupunkttemperaturen im Tagesgang merklich abgedämpft, ohne daß in den Mittelwerten ein gravierendes Temperaturgefälle zwischen außen, Dach und Schiff bestand. Trotz intensiver Sonneneinstrahlung (Hochsommer) war weder im Kirchen- noch im Dachraum eine entsprechende Aufheizung meßbar. Ein erheblicher Teil der Differenzen zwischen innen und außen wurde im Dachraum abgefangen.

An der Kuppel über Kirchenschiff und unter dem Chorbogen konnte wegen des Gerüstabbaus nicht mehr gemessen werden.

In der nördlichen Seitenkapelle zeigten sich trotz einer teilweise stark abgeschwächten Erwärmung immer noch große Taupunktabstände.

Größter Tagesgang der Außentemperatur: 13.4.1990

Bei Durchschnittswerten der Tagestemperatur von $4,1^{\circ}\text{C}$ und relativer Luftfeuchte von 85 % reichte die gesamte Spanne von $-2,6$, über $+11,3$ bis $+2,2^{\circ}\text{C}$. Diese Bedingungen entstehen nur bei Hochdrucklagen

oder Föhn. Die relativen Luftfeuchten bewegten sich von 92,3 (kurz nach Beginn der Erwärmung) bis 72,2% (an Temperaturhochpunkt). Die Taupunkttemperaturen schwankten von -3,6 (kühlster Meßwert) über +6,8 (eine Stunde nach Hochpunkt) bis -0,8 K (zwei Stunden vor Tiefpunkt am Ende).

Tabellarisch sind diese großen Schwankungen besser lesbar (es werden Extremwerte angegeben, auch wenn sie teilweise zeitlich versetzt sind):

	Morgens	Mittags	Nachts
Tl (°C)	-2.6	+11.3	+2.2
Unterschied (K)	+13.9	-9.1	
Ts (°C)	-3.6	+6.8	-0.8
Unterschied (K)	+10.4	-7.6	

Höchste Taupunkttemperatur: 30.6.1990 (Graph S. 557)

Dieser Tag war Teil einer schwül-warmen Wetterserie mit relativen Luftfeuchten über 90%, dazu noch von einer deutlichen Erwärmung gegenüber dem Vortag begleitet. Innerhalb des Tages herrschten Lufttemperaturen zwischen 13,0 und 25,5°C, bei Taupunkttemperaturen von 12,5 bis 23,3°C. Bei diesen Bedingungen bildet sich an allen Oberflächen Tauwasser, wenn sie auch nur minimal kühler als die Luft sind. Die Extremwerte von Luft- und Taupunkttemperaturen lagen zeitgleich. Die relativen Luftfeuchtwerte lagen bei mindestens 84,7%, in einem Fall bei 99,1%. Luft- und Taupunkttemperatur unterschieden sich hier nur um 0,1 K.

Tabellarisch ergeben sich folgende Eckwerte:

	Morgen	Nachmittag
Tl (°C)	13.0	25.5
Unterschied (K)	+12.3	
Ts (°C)	12.5	23.3
Unterschied (K)	+10.8	

Der kräftige Anstieg der Lufttemperatur fand sich fast unvermindert ebenso bei der Taupunkttemperatur.

Die Erwärmung der Außenluft wurde vom Dachraum gedämpft mitgetragen, der Hochpunkt um drei Stunden später erreicht. Im Kirchenraum stellt sich der Temperaturverlauf nur als flache Wölbung dar; die Höchsttemperatur betrug 18,1°C.

Die Taupunkttemperaturen stiegen im Dachraum noch deutlich, aber gegenüber der Außenluft bereits merklich abgeschwächt; in der Kirche war wieder nur ein sehr flacher Anstieg nachweisbar.

Dachraum	Morgen	Nachmittag
Tl (°C)	18.0	23.2
Unterschied (K)	+5.2	
Ts (°C)	12.7	19.9
Unterschied (K)	+7.2	

Kirchenschiff	Morgen	Nachmittag
Tl (°C)	15.7	18.1
Unterschied (K)	+2.4	
Ts (°C)	11.7	15.1
Unterschied (K)	+3.4	

Das «Zusammenspiel» von Dach und Kirchenschiff und außen gleicht auch unter schwül-warmen sommerlichen Bedingungen nicht nur die Luft-, sondern auch die Taupunkttemperaturen aus.

An schwülen Sommertagen werden Temperatur- und Taupunktspitzen in einer abgestuften Reihenfolge durch Dach- und Kirchenraum gedämpft; äußere Taupunktmaxima werden nur mit etwa einem Drittel ihrer Amplitude nach innen geleitet.

Im vertikalen und horizontalen Temperaturprofil waren keine Auffälligkeiten erkennbar.

Wegen der starken Dämpfung des äußeren Taupunktanstiegs im Kirchenraum blieben die Taupunktstände an der Gewölbeshale stets hoch, gleiches gilt für die südöstliche Seitenkapelle und (noch) für den Chorbogen.

In der nördlichen Seitenkapelle wurde allerdings wieder eine bereits enge Taupunktnäherung bis auf 1,2 K ermittelt. Dieser Vorgang ist charakteristisch für massereiche, thermisch träge und «sommerkühle» Bauteile und Gebäude und weist wieder auf die dort vorgefundenen Schäden hin.

Strömungsverhältnisse im Kirchenraum

Die Strömungsmessungen führten im wesentlichen zu dem Ergebnis, daß im Kirchenraum nur sehr schwache, an der unteren Meßgrenze liegende Luftbewegungen von maximal 0,1 m/s stattfinden.

An den Lüftungsöffnungen am Fuß des Muldengewölbes zeigten sich dagegen deutliche Strömungen in wechselnden Richtungen zwischen Kirchen- und Dachraum:

Meßstelle, Lage	28.02.90	05.10.90
Süden	0.4 m/s	1.20 m/s
Südwesten	0.75 m/s	0.8 m/s
West-südwesten	0.7 m/s	0.8 m/s
West-nordwesten	0.7 m/s	1.0 m/s
Nordwesten	0.7 m/s	0.9 m/s
Norden	0.7 m/s	0.8 m/s

Es findet offensichtlich ein Luftaustausch zwischen Dachraum und Kirchenschiff statt, der letztlich mit zum Ausgleich der Temperaturen und Wasserdampfgehalte in beiden Gebäudeteilen führt. Das Kirchenschiff «atmet» durch diese Lüftungsöffnungen.

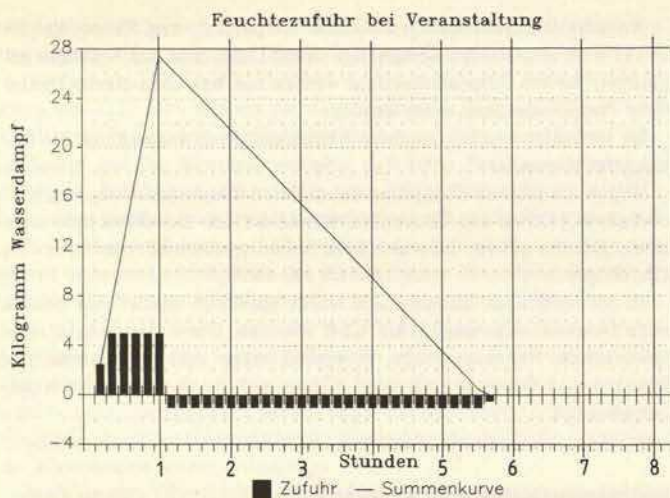
Mögliche Kondensatbildung durch Besucher (Hochrechnung)

Als Grundlage wurden vom Bearbeiter, Herrn Dipl.-Ing. Demberger, die besonders ungünstigen Raumklima- und Temperaturwerte vom 30.6.90 und die Oberflächentemperaturen an der unteren Außenwand der nördlichen Seitenkapelle verwendet; die Berechnungsannahmen sind in ihrem Ansatz so gewählt, daß für die Praxis noch eine Sicherheit verbleibt; dieses unübliche Vorgehen wird deshalb notwendig, weil für den korrekten Ansatz einer instationären Betrachtung der Untersuchungsaufwand vervielfacht hätte werden müssen.

Im einzelnen gilt: genau während des Taupunktmaximums von 15,1°C und einer (entgegen den Meßwerten) gleichzeitig geringsten Oberflächentemperatur von 16,3°C findet ein Gottesdienst oder Konzert mit einer Stunde Dauer und 900 Besuchern statt; die äußere Taupunkttemperatur liegt gemäß Auswertung bei 22,2°C, so daß ein Ablüften des zugeführten Wasserdampfs nicht möglich ist. Zwar wurde die Feuchteabgabe der Besucher berücksichtigt, nicht jedoch deren Wärmeabgabe. Die Verringerung der Luftfeuchte durch Sorptionsvorgänge und andere Mechanismen wurde ohne belegte Messung mit einem Anteil von 6 kg/h Wasserdampf angesetzt und der Innenraum als hygrisch geschlossenes System betrachtet; auch die Diffusionsvorgänge sind vereinfacht in Rechnung gesetzt. Überschlägig wurde für den gesamten Kirchenraum ein Luftvolumen von 10200 Kubikmeter ermittelt.

Die Balken im Diagramm (Graph S. 560 oben links) geben die Menge von zu- beziehungsweise abgeführtem Wasserdampf wieder; die auf- und absteigende Gerade entspricht der Summe dieser Balken.

Genau am Ende der Veranstaltung (nach einer Stunde) hat sich die größte Dampfmenge in der Raumluft angesammelt; diese entspricht nicht der vollen Feuchtezufuhr, sondern wird durch An- und Einlage-



rungen von Wasser in der Raumschale verringert. Bis zur völligen Abfuhr der angesammelten Luftfeuchte vergehen weitere 4,5 Stunden. Analog zur Dampfzufuhr in die Raumluft steigt auch deren Taupunkttemperatur von 15,1 auf knapp über 18 °C an, um bis zum «Abbau» der eingeschleppten Feuchte wieder zu sinken.

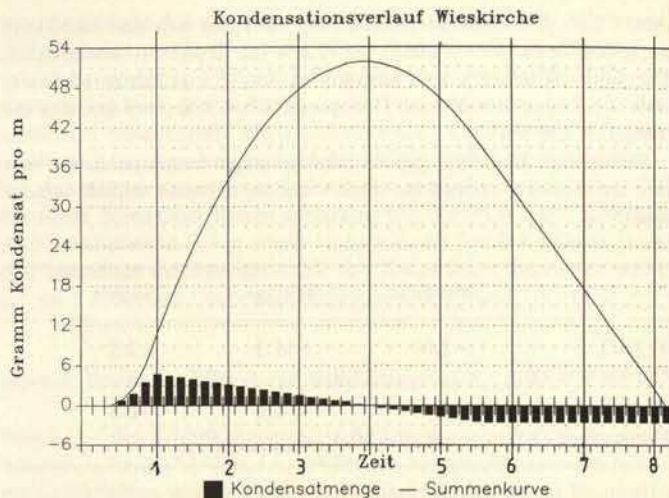
Nach etwa einer halben Stunde übersteigt der Taupunkt die Oberflächentemperatur: ab hier beginnt Kondensat auszufallen. Da sich die Taupunkttemperatur nur langsam abbaut, sinkt sie erst drei Stunden nach Ende der Veranstaltung wieder unter den Wert der Oberflächentemperatur. Dann beginnt das angefallene Tauwasser wieder von der betroffenen Oberfläche zu verdunsten. Aus einer Stunde «Wasserzufuhr» entwickelt sich somit eine Kondensationsdauer von 3,5 Stunden.

Nach Erreichen der höchsten Feuchtigkeitswerte zu Ende von Messe oder Konzert fällt also weiterhin Tauwasser an, da sich die Taupunkttemperatur im Raum ebenfalls nur langsam wieder der Oberflächentemperatur annähert. Bis die gesamte Schwitzwassermenge verdunstet ist, vergehen wieder mehr als vier Stunden. Der einstündige Eingriff in das Raumklima verlangt also eine mehr als siebenstündige «Erholungszeit» für diesen Teil der Raumschale (Graph S. 560 oben rechts).

Zur besseren Verdeutlichung der anfallenden Wassermenge: sie entspricht in etwa der bei sehr feuchtem Aufwischen (ein halber Liter Wasser auf zehn Quadratmeter). Trockene und kapillar leitfähige Materialien wie die der Raumschale in der Wies nehmen solche Mengen auch bei schlagartiger Zufuhr rasch auf, ohne daß daraus unmittelbar die Gefahr einer Schadensbildung (zum Beispiel Schimmelbefall) entsteht. Auch wenn die Summenkurve auf den ersten Blick erschreckend wirken mag, darf sie nicht allzu hoch bewertet werden – dies besonders im Hinblick auf die ausgesucht ungünstigen Randbedingungen und die immer wieder vorgefundene «Selbstheilung» des Raumklimas in der Wieskirche.

Kritisch und nicht quantifizierbar bleibt vorwiegend für gering oder nicht kapillar leitfähiges Material (Vergoldungen, polierter und überfaßter Stuckgips) der Umstand, daß die Feuchtigkeit an Oberflächen durch geringe Adhäsionskräfte den anfallenden Staub an sich bindet. Kühle Teile der Raumschale, auch mit nur gelegentlicher Kondensatbildung neigen daher sehr viel stärker zu Verschmutzungen. Hier schließt sich wieder der Kreis zwischen den von Restauratoren gezeigten Verschmutzungen entlang der Nordseite über die hier stets als kühler ermittelten Temperaturen bis zur Modellrechnung.

Im Objekt (und nur dort) kann das Eintreten einer Kondensatbildung auf sehr einfache Weise qualitativ ermittelt werden: die Meßstelle «Luft 10cm über Boden» war regelmäßig noch kühler als die Nordwand, zum Zeitpunkt der Modellrechnung nur um 0,4 K wärmer als die Taupunkttemperatur. Der Bodenbelag wird zwangsläufig noch ein Quentchen kühler sein, so daß eine Tauwasserbildung dort immer zuerst einsetzen muß. Die Natursteinplatten sind kapillar weitgehend «dicht», so daß dort der entstehende Feuchtfilm auch als erstes sichtbar werden wird. Falls dies schon vor Konzerten geschieht, ist eine Absage – auch kurzfristig – in Erwägung zu ziehen. Wenn erst die entspre-



chende Dampfmenge freigesetzt ist, könnte nur noch durch sehr leistungsfähige Lufttrockner (etwa 30 l pro Stunde) der Anfall von Tauwasser abgeschwächt und damit die Neigung der Wand zur Kondensatbildung verringert werden – ein in der Praxis aus formalen, räumlichen und akustischen Gründen kaum zu realisierender Vorschlag.

Zur Kondensatgefährdung an der Unterseite des Muldengewölbes: bei den Bedingungen zum Zeitpunkt der Modellrechnung herrschte das übliche vertikale Temperaturprofil mit schichtweise nach oben steigender Lufttemperatur. Bei einer beliebig lang und auch starken Feuchtezufuhr verhält sich der Raum folgendermaßen:

Zuerst beginnt die Tauwasserbildung am Fußboden; anschließend setzt in der bodennahen Luftschicht eine Taupunktunterschreitung, des weiteren in den entsprechenden Luftschichten ein, noch bevor an der – etwas wärmeren – nördlichen Außenwand Tauwasser ausfällt. Mit weiterer Feuchtezufuhr steigt dieser Effekt analog den Temperaturschichten in der Raumluft und der steigenden Taupunkttemperatur (es fällt jeweils in jener Luftschicht Kondensat aus, deren Temperatur der ansteigenden Taupunkttemperatur entspricht). Eine Taupunktunterschreitung an der Gewölbeschale tritt erst dann ein, wenn der gesamte Kirchenraum bis oben hin diesen Zustand angenommen hat; an allen kühlen Teilen der Raumschale gäbe es bis dahin bereits nasse Oberflächen.

Rückschluß auf die baulichen Bedingungen

Bis zum Beginn der nun abgeschlossenen Innenrestaurierung stand das Bauwerk mehr als 230 Jahre, ohne daß zuvor eine Restaurierung der gesamten Raumschale erfolgte. Die eingetretenen Schäden werden vor allem auch im Hinblick auf diesen großen Zeitraum als gering bewertet; andere Kirchen gleichen Alters wurden meist entweder bereits mehrfach innen restauriert oder zeigen vergleichsweise wesentlich stärkere Schäden.

Gerade diese geringe Schadensintensität zeigt – besser als durch Messungen und sorgfältigste Auswertung belegbar –, daß die Klimabedingungen im Innenraum weitgehend «stimmen». Die teilweise fast zeltartige Leichtigkeit der Konstruktion vermindert die Gefahr von Sommerkondensation fast vollständig. Unter winterlichen Bedingungen bewirkt bereits eine geringe Sonneneinstrahlung eine ausreichende Erwärmung. Der Dachraum ist einem Federbett vergleichbar, das mit minimaler Eigenmasse bereits als Puffer für Erwärmungen, Abkühlungen wie auch der Feuchtezu- und -abfuhr dient.

Insgesamt herrscht in der Wieskirche ein sehr exakt abgestimmtes Feinklima, dessen Zusammenhänge und Abhängigkeiten sich im positiven Sinn auswirken. Das Bauwerk ist die richtige Mischung von «Zelt» und Massivbau, um weder im Sommer noch im Winter zu stark auszukühlen.

Die im Vergleich zum übrigen Kirchenraum relativ starken Verschmutzungen an der Nordseite sind durch die – wenn auch schwachen – Kaltluftzufälle über die ungedämmten Nordfenster erklärbar.

Die Schimmelbildung am Muldengewölbe ist dagegen weder nach den Meßwerten, noch ihrer Situierung nach *ursächlich* auf Kondensation zurückzuführen. Es kann davon ausgegangen werden, daß vor Einbringung der Dachschalung immer wieder Flugschnee, aber auch in begrenzten Bereichen Regen in den Dachraum eindrang und deshalb der organische Befall, partiell begrenzt, erfolgte. Es entzieht sich unserer Kenntnis, ob die zu Beginn der Restaurierung noch sichtbaren Schimmelrasen noch aktiv waren, oder sich seit langer Zeit in einer «Trockenstarre» befanden. Auch aus dem überlassenen Gutachten über diesen organischen Befall ist nicht entnehmbar, ab welchen Luftfeuchtwerten oder aber auch Materialfeuchtwerten ein solcher Befall wieder aktiv werden kann. Es ist allerdings unzweifelhaft, daß bereits befallene Flächen in ihrem Wachstum durch hohe Feuchtigkeitswerte unterstützt werden.

Nicht bis ins Letzte können jene Ursachen belegt werden, weshalb der fast ungedämmte Dachraum eine so starke Pufferwirkung gegenüber dem Außenklima aufweist. Sicher ist dieser Umstand aber auch auf die Verbesserung des Dachaufbaus durch Aufbringen einer Vollschalung und Bitumenpappe zurückzuführen. Das Dach ist zwar winddicht, trotz der erheblich bremsenden Wirkung der Bitumenpappe aber nicht dampfdicht, da es noch genügend viele Fugen gibt, die einen ausreichenden Dampfdruckausgleich gewährleisten. Die geringe zusätzliche Dämmwirkung der Holzschalung mindert schroffe Temperaturänderungen weiter ab.

Die Lüftungsöffnungen am Gewölbefuß sind ebenfalls an dieser ausgleichenden Pufferwirkung beteiligt: verschiedene Messungen belegten eine Luftströmung bis zu 1,2 m/sec in Richtung Dachraum, doch wurden auch gegenläufige Strömungen festgestellt. Eine quantitative Aussage setzte hier weitere Messungen voraus, die jedoch für unnötig erachtet werden, da die raumklimatischen Daten die positive Wirkung dieses Luftverbunds belegen.

Möglichkeiten einer Verbesserung des Raumklimas

Der wichtigste Teil einer «klimatischen Sanierung» ist offenbar bereits durch den verbesserten Dachaufbau erfolgt. Als weitere sinnvolle Möglichkeit bliebe nur noch der Einbau einer Verglasung mit verringertem Wärmedurchgang, zumindest an den Fenstern der Nordseite, um dort den Kaltluftfall abzumindern. An den Fenstern der Südseite ist diese Maßnahme zumindest nicht schädlich; dort verringerte sie nachts und an sonnenlosen Tagen ebenfalls das Absinken von Kaltluft. Ein Verzicht auf diese Maßnahme führt allerdings nicht unmittelbar zu Schäden, es bleibt nur die stärkere Neigung zu Schmutzablagerungen an diesem Teil der Raumschale.

Ausschließlich nach restauratorischen Gesichtspunkten muß beurteilt werden, ob an den südlichen Fenstern ein Sonnenschutz sinnvoll ist, der eine direkte Bestrahlung wichtiger Ausstattungsteile verhindert, die zum besonders raschen Erwärmen und wieder Abkühlen der Oberflächen – und damit zu deren thermischer Belastung führt. Der Sonnenschutz sollte dann aber raumseitig angeordnet werden, um die Wärmegewinne aus der Strahlung nicht aus dem Raum, sondern nur von den Oberflächen abzuleiten.

Eine Dämmung der Gewölbeschale ist im besten Fall nutzlos, da nur geringe Temperatur- und Dampfdruckdifferenzen zwischen Dach- und Kirchenraum vorhanden sind. Technisch sinnvoll wäre deshalb allenfalls eine Dämmung der Dachhaut, doch wird in Hinblick auf die komplizierten Abhängigkeiten im gesamten System und den mit dieser Maßnahme verbundenen Verlust der Solargewinne auch hiervon abgeraten – selbst ohne Berücksichtigung der hierfür anfallenden Kosten.

In Übereinstimmung mit der aus restauratorischen Gründen gefundenen Vorentscheidung, wird auch aus raumklimatischen Gründen vom Einbau einer Heizung dringendst abgeraten, für die es in dieser Kirche selbst unter Hintanstellung denkmalpflegerischer Rücksichtnahmen keine zwingende Notwendigkeit gibt.

Fazit

- Eine Gefahr überhöhter Feuchte an der Raumschale besteht im Sommer, nicht im Winter.
- Diese sommerliche Gefahr setzt extrem hohe Außenluftfeuchten voraus, ebenso aber sehr hohe Außenlufttemperaturen; in der Praxis: hohe Luftfeuchte bei gleichzeitiger Erwärmung.
- Unter Voraussetzung dieser außenklimatischen Gegebenheiten steigt diese Gefährdung im Tagesverlauf.
- Als «Indikator» dieser Gefährdung ist der Fußboden zu betrachten; dort setzte eine Kondensation als erstes ein.
- Treffen diese Vorgaben zu, sollte die Besucherzahl verringert werden, obwohl aus den Meßwerten keine Kondensationsgefährdung durch Besucher abgeleitet werden kann. (Restaurierungszeit mit eingeschränkter Kirchennutzung). Da diese Verringerung bei Gottesdiensten sicherlich nicht durchführbar ist, ergibt sich eine solche Regulierungsmöglichkeit nur bei den Sommerkonzerten. In der Praxis kann dies nur durch grundsätzliche Einschränkung der Besucherzahl geschehen, oder durch Trennung im Kartenverkauf in Kontingente für Vorbestellung und Kasse. Derzeit läuft ein zweiter Meßzyklus, der den Einfluß der Besucherströme ungestört erfassen kann.
- Eine Dämmung der Gewölbeschale wird wegen des «Atmens» von Schiff und Dach weitgehend unsinnig, da über die Lüftungsströmungen eine vergleichsweise rasche Temperaturanpassung geschieht.
- Da das Abzeichnen der Lattenkonstruktion des Gewölbes auch durch Sorptionsvorgänge bestimmt wird, wäre zur Verringerung dieser ungleichen Verschmutzung ein haustechnischer Eingriff in das Raumklima notwendig, was aus unterschiedlichen Gründen abzulehnen ist.
- Der Schimmelbefall ist nicht auf das Raumklima, sondern auf frühere Feuchtbelastungen vor der Dachsanierung zurückzuführen; das Schimmelwachstum kann durch das Raumklima begünstigt werden – konkrete Angaben hierüber können von uns nicht gegeben werden; sie sind auch im Gutachten über diesen organischen Befall nicht enthalten.

Die Wieskirche zeigt ein so «stimmiges» Raumklima, daß von allen Eingriffen bautechnischer oder auch haustechnischer Art abgeraten wird.

Summary

Consultant Report on the Indoor Climate in Die Wies with Emphasis on the Danger of Condensation

The nature of the indoor climate in Die Wies was to be surveyed, giving particular attention to the dangers presented by surface condensation with subsequent growth of mold fungus. The investigations were to result in decisions regarding the need for construction measures to prevent condensation. Measuring apparatus was installed in November 1989 and functioned until October 1990. Data from a total of 50 measuring stations was gathered by independently operating hybrid recorders set up in the attic. Goal of the measurements was to survey the climatic relationships between the external air, the attic and

the church interior. For this purpose surface temperatures on the space-enclosing surfaces were especially important, particularly where damages had developed. Measurements of the air currents in the interior were carried out because they also determine the rise and fall of humidity. In addition heat conductivity was established using technical measurements, because the standardized method of calculation can lead to significant discrepancies when non-standardized materials are involved.

The following measuring stations were laid out, and analysis of the data revealed the dependencies described:

- exterior, attic and church interior: air temperature and relative humidity. Using this data a review of the atmospheric conditions in the three areas can be drawn up. Dependencies of the climate in the attic and the church interior on the external climate can be established. To prepare a review of the humidity conditions in the church measurements of temperature and humidity were taken at approximately half of the height of the nave.
- vertical profile of the air temperature in the approximate center of the nave in connection with the external air temperature and the temperature in the attic. From this the layering of temperatures in the nave as well as between the nave and the attic are readable.
- vertical profile of the air temperature around the altar, for comparison with the above-mentioned spatial zone.
- beneath the choir arch: air temperature, analyzed together with the vertical profiles to give a horizontal profile in a longitudinal sense.
- on the space-enclosing surfaces: surface temperatures, mainly on the vault, the northern side chapel and the southeast side chapel, mostly with additional near-surface air temperatures. All the measurement sensors were scanned by the hybrid recorder in intervals of two minutes and values were recorded, including the automatic naming of maximum, minimum and mean values.

For financial reasons climatically-contingent factors were not directly measured:

- duration of sunshine
- amount and speed of wind
- amount and duration of rain
- overall air exchange in the church
- overall relation of currents

However, indirect conclusions concerning these points could be drawn in part from the results of the other measurements.

Further processing of individual and mean values was carried out by computer-supported tabulatory calculations, tailored especially to the measuring installations.

In addition an extreme load caused by visitors was projected as a model case, using the most adverse measured values (even though these were not all recorded at the same point in time).

The findings showed that a very finely adjusted mini-climate exists in Die Wies and that its correlations and dependencies work out in a positive way. The building is the proper mixture of «tent» and massive

construction so that it does not cool down too severely in either summer or winter.

The soiling on the north side, relatively severe in comparison to the rest of the interior, can be explained by (weak) cold air penetration through the uninsulated north window.

In contrast, neither the measurements nor its location suggest that the mold on the shallow vault can be traced back to condensation. It can be assumed that before placement of the roof sheathing drifting snow and possibly rain as well repeatedly penetrated limited areas of the attic, therefore causing a likewise limited organic attack.

The practically uninsulated attic space nevertheless exhibits such a strong buffer effect against the external climate that further abrupt temperature changes are reduced. This effect is aided by ventilation openings at the foot of the vault: different measurements documented an air current of up to 1.2 m./sec. in the direction of the attic.

Conclusion: there is danger of excessive moisture on the interior surfaces in summer but not in winter.

A prerequisite for this danger during the summer is extremely high exterior humidity in conjunction with very high external temperatures; in other words high humidity with simultaneous warming. When these external climatic conditions prevail, the danger of condensation increases during the course of the day. The floor can be taken as the «indicator» since condensation begins there first.

Insulation of the vault surface would be useless, since only minor differences in temperature and steam pressure exist between the attic and the church interior. Therefore at best insulation of the roofing skin would be reasonable from a technical standpoint, but in view of the complicated dependencies within the overall system and the loss of solar heat gain in winter, this is not advisable – even without considering the costs. Such insulation would also not bring the desired «rehabilitation» in the appearance of the vault, where the lath construction has become visible from the church interior, because this condition is also caused by absorption processes. To reduce this unequal soiling an intervention in the interior climate involving technical installations would be necessary; for various reasons this is to be avoided.

In agreement with a preliminary decision based on restoration concerns, it is strongly advised for climatic reasons as well that no heating system be installed. Even disregarding conservation concerns there is no compelling necessity for such an installation in this church.

Die Wies exhibits such a balanced climate that no interventions of a structural or technical nature are advisable.