



## Raumklimatische Untersuchungen und bauphysikalische Konzepte.

Forschungsergebnisse zur Klimaproblematik im Kloster Maulbronn und im Dom zu Speyer

### 1. Einleitung

Ziel einer jeden Konservierung und Instandsetzung im Denkmalsbereich ist es, nur solche Maßnahmen zur Ausführung kommen zu lassen, die bei möglichst geringem Eingriff in die historische Bausubstanz der Schadensursache sicher und dauerhaft entgegnetreten und mit denen die geschädigten Bauwerksbereiche wieder in einen für die Erhaltung, Unterhaltung und Nutzung geeigneten Zustand geführt werden können.

Bei Kulturdenkmälern wie Kirchen, Klöstern, Schlössern und Museen sind es häufig gerade die klimatischen Randbedingungen, die für die Erhaltung der Substanz und der Ausstattung von besonderer Bedeutung sind. Neben grundsätzlichen Fragen zu den Auswirkungen des Raumklimas müssen oftmals auch die haustechnischen Installationen hinsichtlich ihrer Eignung im historischen Bestand bewertet werden, um geeignete Verbesserungen zu erarbeiten.

So fordert die Nutzung von Baudenkmalern häufig deren Beheizung bzw. Temperierung. Eine sichere Planung und Bewertung haustechnischer Anlagen erfordert aber ein sicheres Verständnis für die raumklimatischen Verhältnisse in den zumeist sehr großvolumigen Räumen. Aussagekräftige Kenndaten, mit denen die Raumcharakteristika beschrieben werden kann, und Programme, mit denen sich denkmalgerechte Konzepte erarbeiten lassen, sind kaum verfügbar und vielfach wenig erprobt. Auch für unbeheizte Objekte sind nur wenige Erfahrungsberichte publiziert. Gefährdungspotenziale, wie sie durch eine unterlassene, fehlerhafte oder unkontrollierte Belüftung gegeben sind, lassen sich daher ebenfalls nur schwer bewerten.

Am Beispiel zweier langjähriger Untersuchungsobjekte, dem Dormentbau der Klosteranlage Maulbronn (Abb. 1–3) und dem Kaiser- und Mariendom zu Speyer (Abb. 8), werden heutige technische Möglichkeiten aufgezeigt, mit denen die raumklimatischen Verhältnisse sicher erfasst und bewertet werden können. Mit Kenntnis der Raumklimasituation können die Beanspruchung der Bausubstanz, die Gefährdung der wertvollen Ausstattung und nicht zuletzt auch die Folgen einer Nutzung sicher beurteilt werden. Schließlich können auf dieser Grundlage aufbauend denkmalgerechte Maßnahmen herausgearbeitet werden, mit denen der weiteren Schadensentwicklung wirksam entgegengetreten werden kann.

An beiden Objekten wurden Regelungen für den natürlichen bzw. erzwungenen Betrieb von Systemen zur Be- bzw. Entlüf-

tung in Abhängigkeit von Raumklimakennwerten und äußeren Witterungseinflüssen unter restauratorischer Begleitung entwickelt, so dass durch den kontrollierten Betrieb von Lüftern bzw. durch das gezielte Öffnen und Schließen von Fenstern einer fortschreitenden Schädigung der historischen Substanz entgegengewirkt wird.

In beiden Objekten kam ein neues und innovatives kabel- und funkbasiertes Klimamesskonzept zum Einsatz, das vielfältige weitere Einsatzmöglichkeiten bietet. So werden auch an einigen anderen, bereits realisierten bzw. noch laufenden Projekten verschiedenste Fragestellungen analysiert, die trotz der Unterschiedlichkeit in den restauratorischen, nutzungsspezifischen und wissenschaftlichen Details allesamt belegen, dass mit Klimamessungen und den zugehörigen materialkundlichen Untersuchungen ein wesentlicher Beitrag zur Substanzsicherung von historischer Bausubstanz geleistet werden kann. Nicht zuletzt zeigen diese praktischen Beispiele auch, dass sich die nicht selten folgenschwere Auswirkung einer Nutzung messtechnisch sicher bewerten lässt und im Bedarfsfall dann mittels einer kontrollierten Einflussnahme das Raumklima in denkmalgerechter und kostengünstiger Weise in einem günstigen Bereich halten lässt. Auch lässt sich mit einer kontrollierten Betriebsweise von Beheizung bzw. Temperierung mit Hilfe der Mess- und Regeltechnik im Sinne der Substanzsicherung das Raumtemperaturniveau in historischen Räumen deutlich absenken und vergleichmäßigen, ohne dass das Behaglichkeitsempfinden der Nutzer eingeschränkt wird. Nicht zuletzt kann so auch der Energiebedarf für die Beheizung bzw. Temperierung der zumeist großen historischen Räume erheblich reduziert werden.

### 2. Raumklimaproblematik in historischen Bauwerken

Schäden an Raumschale und Ausstattung historischer Bauwerke können oftmals auf ungünstige Raumklimaverhältnisse zurückgeführt werden.<sup>1</sup> So stellen sich gerade in gering oder nicht beheizten Räumen während feuchtwarmer Winter-, Frühlings- und Frühsommertage erhebliche Tauwasserbildungen auf den kalten Oberflächen der massiven Wände, Böden und Gewölbe ein, sobald feuchtwarme Außenluftmassen Zugang in das noch ausgekühlte Gebäude finden. Demgegenüber ist die Tauwassergefahr in temperierten oder gar beheizten Gebäuden infolge der wärmeren Bauteiloberflächen meist geringer. Zur Minimierung der Energiekosten werden historische Bauwerke in der Regel nur bei Bedarf beheizt oder temperiert. Entsprechend hohen Klimaschwankungen ist die Raumschale wie auch die Ausstattung der historischen Räume unterworfen, die aber aus konservatorischer Sicht meist eine gleichförmige Klimasicht erfordern.

Auch die Besucher großvolumiger Räume, so etwa großer Kirchen, klagen oftmals über erhebliche Beeinträchtigungen durch starke Luftbewegungen. Diese entstehen nicht zuletzt durch eine starke und ungleichförmige Beheizung von histori-

<sup>1</sup> Claus ARENDT, Heizung – Problemfall historische Räume, Folge 4 Schadensbilder, Beispiele, Empfehlungen, in: Bausubstanz Nr. 3, 1992, S. 50–52; Helmut KÜNZEL, Bauphysik-Geschichte(n) Nr. 14 – Lüften in Kirchen und Kellern, in: ARCONIS, 7, 2002, Nr. 1, S. 40–43.



Abb. 2. Maulbronn, Kloster, Dormentbau, Laienrefektorium, Südwand: Trennwand zur sog. Geißelkammer (1995).

schen Räumen während der kalten Wintertage. Gerade in den kalten Witterungsperioden werden z.B. die Kirchenräume vor Feiertagen oftmals kurzzeitig gut geheizt, um den Besuchern in der Kirche einen möglichst angenehmen Aufenthalt zu sichern. Je kälter es ist, umso mehr Wärme muss von der Heizung erzeugt und in den Raum geführt werden. Die Wärme wird zumeist entweder konvektiv z.B. mittels Warmluftheizung oder mittels Strahlung in Form einer Fußbodenheizung an die Raumluft abgegeben. Daneben findet sich in Kirchen auch häufig eine Kirchenbankheizung.

Die vom Heizsystem erwärmten Luftmassen steigen infolge der unterschiedlichen Dichte von warmer und kalter Luft in höhere Raumbereiche auf. An den kalten Wandoberflächen bzw. den zumeist einfachverglasten kalten Fenstern kühlt sich

die warme Luft wieder ab und fällt nach unten wieder in den Raum zurück. Besucher, die sich hier aufhalten, verspüren dies meist als sehr unangenehmen Luftzug, der oft auch als Fallwind empfunden wird.

Um das Behaglichkeitsempfinden der Besucher zu verbessern, wird oft versucht, die Raumtemperatur mehr oder weniger stark anzuheben, so dass das Heizsystem noch mehr Wärme an den Raum abgeben muss. Anstatt einer Verbesserung bewirkt diese Form des Heizbetriebs aber zumeist eine Verschlechterung, da die Abgabe einer stärker erwärmten Luftmasse auch eine höhere Raumluftströmung zur Folge hat.

Eine starke Luftbewegung hat aber nicht nur Folgen für das Behaglichkeitsempfinden der Besucher. Große Luftströmungen führen auch zu einem Transport von feinsten Schmutz- und



Abb. 3. Maulbronn, Kloster, Dormentbau, Laienrefektorium, Ostwand, nördliches Joch (1995).

Staubpartikeln, die mit der Warmluft an die kalten Wand- und Deckenoberflächen geführt werden. An den rauen Oberflächen von Putzen, Mauerwerk und Ausstattung bleiben die Schmutzpartikel haften und führen allmählich zu einer optisch deutlich sichtbaren Verschmutzung, die nach einer gewissen Zeit zumindest eine Reinigung erfordert.

Als wesentlich problematischer erweist sich die Ablagerung von Schmutzpartikeln, wenn nicht nur Schmutz- und Staubpartikel, sondern auch wasserdampfreichere Luftmassen zu den kalten Bauteiloberflächen geführt werden. Sobald bei der Abkühlung der feuchtwarmen Luft an der Wandoberfläche die Taupunkttemperatur der Luft unterschritten wird und sich Kondensat auf der Wandoberfläche niederschlägt, bleiben die mit der Warmluft geführten Partikel auf der feuchten Oberfläche

haften. Eine rasche Verschmutzung ist die Folge, die zudem in Verbindung mit der auskondensierten Feuchte chemisch-mineralogische Umbildungen, Quell- und Schwindvorgänge an den Fassungen bewirken kann und so zu einer allmählichen Schädigung der wertvollen Oberflächen führt.

Stete Raumklimaschwankungen wirken sich aber auch auf die Raumausrüstung schädigend aus. Nicht selten erfordern raumklimatisch bedingte Schäden an hölzernen Einbauten wie wertvollen Altären, an historischen Textilien wie auch an materialreichen Malereien und Fassungen eine aufwendige restauratorische Bearbeitung. Nicht zu vergessen die Problematik des Heizbetriebs in Kirchenbauwerken, in denen die Orgel besonders hohe Anforderungen an das Raumklima stellt.

### 3. Klimaproblematik im Erdgeschoss des Dormentbaus der Klosteranlage Maulbronn

Als Beispiel einer raumklimatisch besonders problematischen Beanspruchung soll nachfolgend die Raumklimasituation der Frateria im Erdgeschoss des Dormentbaus der Klosteranlage Maulbronn erörtert werden (Abb. 1–3).

Hier ist es vor allem die Tauwasserproblematik, die in dem unbeheizten Raum über die Jahrhunderte zu einer immer deutlicheren Schädigung der noch erhaltenen originalen Fassungen aus dem 15. Jahrhundert führten. Bereits im Zuge von Restaurierungsarbeiten Mitte des 20. Jahrhunderts wurde die besondere Problematik der Raumbelüftung erkannt und am Mauerfuß der östlichen Außenwand zum Garten hin an drei Stellen eine Öffnung mit einem Durchmesser von 80 mm gebohrt, um einen steten Luftwechsel zu sichern und so Feuchte aus dem Raum abzuführen. Dennoch konnte der Substanzverlust auch in den darauf folgenden Jahrzehnten nicht gestoppt werden, da sich der gewünschte Luftwechsel über die Öffnungen alleine nicht einstellte.

Im Zuge umfassender restauratorischer Arbeiten seitens des Sonderforschungsbereiches (SFB) 315 der Universität Karlsruhe „Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke“ wurden in interdisziplinärer Zusammenarbeit das Ausmaß der Schäden und deren Ursachen erarbeitet, um Konzepte zur Sicherung und Erhaltung der historischen Substanz und der besonders wertvollen Fassungen zu entwickeln.<sup>2</sup>

In nicht oder nur gering beheizten Räumen kommt während der Winter-, Frühlings- und Frühlingsperioden der Belüftung eine große Bedeutung zu. Ein rascher Luftwechsel über Fenster und Türen wirkt sich dabei in kleineren unbeheizten Räumen hinsichtlich des Tauwasserausfalls stärker aus als in großen. Ob kleiner oder großer Raum, häufige Praxis von Kirchengemeinden ist es z.B., die in der kalten Winterperiode ausgekühlten Kirchenräume während der wärmeren Frühlingstage intensiv durch das Öffnen von Türen und Fenstern zu belüften, um so die Raumtemperatur durch die eintretenden warmen Außenluftmassen anzuheben. Dabei verursachen die eintretenden feuchtwarmen Luftmassen auf den noch kalten Bauteiloberflächen zwangsläufig große Tauwasserausfälle, die als Folge der Feuchtelast die verschiedenartigsten Schäden an Putzen und Fassungen bewirken können.<sup>3</sup>

Demgegenüber konnte sich über die drei Öffnungen an der Ostwand der Klosteranlage Maulbronn wie auch über die offe-



ne Rosette an der gegenüberliegenden Westwand zum Kreuzgang hin kein ausreichender Luftwechsel einstellen. Jedem, der den Raum von außen betreten hat, wurde der äußerst hohe Feuchtegehalt bereits durch die muffige Luft offenkundig.

Um dem fortschreitenden Verlust originaler Putz- und Fassungsbestände zu begegnen, wurden von 1987 an neben den naturwissenschaftlichen, restauratorischen, baugeschichtlichen und kunstgeschichtlichen Untersuchungen auch eingehende Untersuchungen zum Raumklima und dessen Folgen auf die Bausubstanz vorgenommen.

Im Jahrbuch 1997/98 des SFB wurde bereits ein umfassender Überblick über die damaligen Arbeiten gegeben, die vor allem die Probleme der aufsteigenden Feuchte und der Bewertung des jahreszeitlichen Gangs des Raumklimas untersuchten.<sup>4</sup>

Als Ergebnis der mehrjährigen umfassenden Untersuchungen, die neben der Raumklimamessung auch vielfältige experimentelle und theoretische Arbeiten beinhalteten, konnte der besondere Einfluss der aufsteigenden Feuchte auf die Schäden des Sockelmauerwerks bewertet werden. Da bautenschutztechnische Eingriffe am Weltkulturerbe nicht vorgenommen werden konnten und sollten, wurden geeignete, die Substanz konservierende Maßnahmen erarbeitet. So wurde im Sockelmauerwerk ein Opferputz aufgetragen, um einen weiteren Verlust von originaler Substanz des Mauerwerks zu vermeiden. Außerdem war das Raumklima zu optimieren, um eine gleichförmige Feuchteabgabe zum Raum in Form der Trocknung zu ermöglichen. Entsprechend sollten die oberflächennahen Bauteilbereiche über weite Strecken eines Jahres hinweg einen nahezu trockenen Zustand einnehmen, sobald die Trocknungsrate im Sockelbereich und an der Bodenoberfläche größer als die aus dem Baugrund aufsteigende Feuchte ist.

Auch in den höher gelegenen Wandabschnitten und an den Gewölben konnte das ungünstige Raumklima für die starken Schäden an den Fassungen verantwortlich gemacht werden. Auch hier wurde als eine zwingend notwendige Maßnahme die Optimierung des Raumklimas erachtet.

Entsprechend wurde die bereits seit langem betriebene Messeinrichtung im Jahr 1998 komplett umgerüstet und in ein rechnergestütztes Mess- und Regelsystem umgewandelt. Hiermit sollte eine gezielte Einflussnahme auf das Raumklima erzielt werden, um mit einer mikroklimatischen Bewertung der wertvollen Fassungen zutreffende Aussagen etwa zur Feuchtelast durch Tauwasser zu erhalten.

Wesentlicher Bestandteil der Einrichtung ist neben der zentralen Rechereinheit zur Messwerterfassung auch ein Regelkreis, der abhängig von außen- und raumklimatischen Verhältnissen drei Lüfter ansteuert. Sobald günstige Außen-

<sup>2</sup> Harald GARRECHT, Reduzierung der raumklimatischen Beanspruchung der Raumschalen im Dormentbau des Klosters Maulbronn, in: Jahrbuch des Sonderforschungsbereiches (SFB) 315 – Universität Karlsruhe 1997/1998, Karlsruhe 2000, S. 223–235.

<sup>3</sup> ARENDT, Heizung (Anm. 1), S. 50–52; KÜNZEL, Bauphysik (Anm. 1), S. 40–43.

<sup>4</sup> GARRECHT, Reduzierung (Anm. 2), S. 223–235.

<sup>5</sup> Harald GARRECHT – Jochen HUBER, Untersuchungen zum Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch energetisch sanierter Wohngebäude, in: 11. Bauklimatisches Symposium, TU Dresden, Dresden 2002, S. 54–63.

Abb. 4. Maulbronn: Prototyp einer Lüftereinrichtung für den Einsatz im Dormentbau des Klosters.



Abb. 5. Maulbronn, Kloster, Dormentbau, Laienrefektorium: Lüftergehäuse für den Dauerbetrieb mit Integration funkbasierter Messbaugruppen.

klimaverhältnisse vorherrschen, wird der Raum durch die Inbetriebnahme der Lüfter intensiv belüftet. Auf diese Weise kann die Abtrocknung des durch aufsteigende Feuchte belasteten Sockelmauerwerks sichergestellt werden. Bei ungünstiger Witterung hingegen, sobald die Gefahr einer Tauwasserbildung gegeben ist, werden die Lüfter abgeschaltet.

In einer ersten Versuchsphase wurden sogar die Zuluftöffnungen mechanisch geschlossen. Bereits wenige Wochen nach der Inbetriebnahme der Mess- und Regeleinrichtung konnten deutlich verbesserte Raumklimaverhältnisse im Nahfeld der Wandfassungen beobachtet werden. Im Sockelbereich wie auch auf dem Boden zeichnen sich seither die in der Vergangenheit im Winter und Frühling stets feuchten Mauerwerksoberflächen und Sandsteinplatten mit Ausnahme einiger weniger, besonders kritischer Tage immer als trocken ab. Die begleitenden restauratorischen Untersuchungen belegen seither auch, dass ein weiterer Substanzverlust durch ein vergleichsweise stabiles Raumklima um 80 bis 85 % relativer Feuchte vermieden werden konnte.

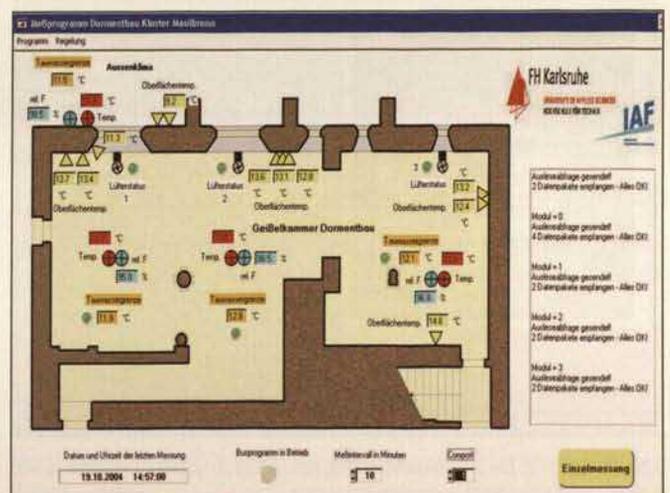
In Abbildung 4 ist ein Prototyp der Lüftungseinrichtung dargestellt. Zwei in einem Gehäuse angeordnete Lüfter konnten abhängig von den Raum- und Außenklimaverhältnissen Luft in

Abb. 6. Maulbronn, Kloster, Dormentbau: Benutzeroberfläche des laufenden Mess- und Regelsystems.

den Raum einziehen oder ausblasen oder den Lüftungsbetrieb gänzlich einstellen. Die drei Anlagen wurden mit Alu-Flexrohren über die bereits bestehenden Öffnungen nach außen verbunden. Alle drei Lüfter konnten einzeln angesteuert werden. Außerdem wurde zur Optimierung der Raumluftströmungsverhältnisse während der Versuchsphase die Einblasrichtung und der eingeblasene Luftvolumenstrom optimiert. So wurden maximal 500 Liter Luft pro Stunde in den ca. 400 m<sup>3</sup> großen Raum geführt.

Als Folge der positiven Ergebnisse der Versuchsphase wurde die Anlage im Jahr 2002 in ein für den Dauerbetrieb geeignetes neueres System umgebaut. Hier kam ein im Rahmen eines Forschungsvorhabens von der Fachhochschule Karlsruhe mit einem Industriepartner gemeinsam entwickeltes, neues funkbasiertes Mess-System zum Einsatz, mit dem auf eine störende Kabelführung in der Frateria verzichtet werden konnte.<sup>5</sup> Zentrales Herz der Messeinrichtung ist der Leitreechner der im Technikraum des Klosters untergebracht wurde. Von hier wurde eine Busdatenleitung bis in den der Frateria und Geißelkammer benachbarten Keller geführt, wo dann eine Funk-Sende-Empfangsbaugruppe angeschlossen wurde, die mit allen Messbaugruppen per Funk kommuniziert. Die Messbaugruppen, die für die Aufnahme der Raumluftsensoren und der Oberflächentemperatursensoren erforderlich sind, wurden in den neuen Lüfterboxen integriert, die vom Staatlichen Vermögens- und Hochbauamt Pforzheim in Anlehnung an die sonstigen im Kloster aufgestellten Schautafeln, Beleuchtungseinrichtungen etc. entwickelt wurden (Abb. 5).

Jede Messbaugruppe weist 8 digitale und 8 analoge Kanäle auf, mit denen die im Nahfeld der jeweiligen Lüftereinheiten positionierten Oberflächentemperaturfühler und Raumluftfeuchte- sowie Raumlufttemperatursensoren ausgelesen werden. Die Signale aller Messfühler werden minütlich vom Leitreechner abgefragt. Von den in den Lüfterboxen eingebauten Funkmessmodulen werden über kurze Kabel die diversen, zur Bewertung der mikroklimatischen Beanspruchungen erforderlichen Sensoren erschlossen. Insgesamt sind im Raumbereich von Frateria und Geißelkammer mehr als 50 Sensoren installiert, mit denen die raumklimatischen Verhältnisse erfasst und bewertet werden können. Abhängig vom Bewertungsergebnis prüft der Rechner dann, ob durch den Betrieb eines oder mehrerer Lüfter eine Verbesserung der Raumluftverhältnisse möglich ist.



Neben den gemessenen Raumklimadaten sind für die Entscheidungsfindung vom Rechner weitere Kriterien zu bewerten. So soll die Raumluftfeuchte im Jahresgang möglichst gleichförmig zwischen 80 und 85 % relativer Feuchte liegen. Auch sind große Feuchteänderungen insbesondere im Bereich der besonders wertvollen Fassungen zu vermeiden (hier wurden von den Restauratoren Oberflächentempersensoren auf den Fassungen sorgfältig befestigt). Grund hierfür sind die mit einer starken Klimaveränderung verbundenen Formänderungen durch Schwind- und Quellprozesse oder sonstige Mineralumbildungen, die sich gerade im oberflächennahen Bereich einstellen.

Die kontrollierte Belüftung stellt seither über weite Bereiche des Jahres hinweg günstige Raumluftbedingungen sicher. Insbesondere während der Winter-, Frühlings- und Wintertage garantiert die rechnergestützte Mess- und Regeleinrichtung, dass bei ungünstigen Witterungsverhältnissen durch das sofortige Abschalten der drei Lüftereinrichtungen keine feuchtwarmen Außenluftmassen dem Raum zugeführt werden, die an den ausgekühlten Wandoberflächen des unbeheizten Raumbereiches zwangsläufig zur Tauwasserbildung führen würden.

Die im Sommer 2002 in Betrieb genommene für den Dauerbetrieb ausgelegte Mess- und Regeleinrichtung läuft abgesehen von einzelnen Anfangsschwierigkeiten (Kabelbruch durch Baumaßnahmen und Stromabschaltungen) ohne Unterbrechung. Über einen ISDN-Zugang ist jederzeit ein Zugriff auf das Mess- und Regelsystem möglich, um Softwareoptimierungen und Systemprüfungen vornehmen zu können. Die dialoggeführte Nutzeroberfläche ist in Abbildung 6 wiedergegeben. Begleitende restauratorische Untersuchungen bestätigten nach der Anlagenumrüstung, dass auch mit den neuen, dauerhaft betriebenen Lüftern günstigere Raumluftverhältnisse durch die gezielte Eingriffnahme erreicht werden konnten. Die Feuchtebelastung im aufgehenden Mauerwerk und im Sandsteinboden konnte auch weiterhin deutlich reduziert werden. Auch an den originalen Fassungen in den höher gelegenen Wandbereichen und Gewölben konnte der Schadensbildungsprozess gestoppt werden. Das vergleichsweise gleichförmige Raumklima um 80 bis 85 % relativer Feuchte stellt zudem sicher, dass die früher zu verzeichnenden, hygrisch bedingten Formänderungen unterbleiben und sich Salzumbildungen nur selten einstellen können.

#### 4. Raumklimatische Beanspruchungen der Gewölbeputze im Kaiserdom zu Speyer

Bereits in verschiedenen Publikationen wurden die umfassenden Untersuchungen zur raumklimatischen Beanspruchung der Gewölbeputze im Speyerer Dom erörtert, die wie auch der oftmals unzureichende Verbund zwischen Gewölbemauerwerk und Gewölbeputz eine umfassende Restaurierung der Gewölbeputze erforderten.<sup>6</sup> Die Baumaßnahmen begannen zunächst im nördlichen Querhaus. Um die Ursachen der Schadensbildung zu analysieren, wurde begonnen, das Raumklima aufzuzeichnen. Bereits nach kurzer Messdauer konnte nachgewiesen werden, dass an den Gewölbeputzen während der Übergangsmomente bei hohen Raumluftfeuchten Tauwasser ausfällt.

Insbesondere die komplexe Materialzusammensetzung des Vierungsturmes, der neben den ursprünglich verbauten Materialien im Zuge der Sanierungsarbeiten um 1960 auch mit Zementmörteln und Betonen versehen wurde, erforderte eine besonders sorgfältige Bewertung der raumklimatischen Beanspruchung. Entsprechend der im nördlichen Querhaus gewonnenen Erkenntnisse wurde folglich entschieden, vier der acht im Vierungsturm befindlichen Fenster mit elektrischen Motoren zu bestücken, um bei Bedarf die Fenster zur Entspannung der Raumluftsituation öffnen oder schließen zu können.

Um eine geeignete Ansteuerung der Fenster vornehmen zu können, wurde auch im Dom zu Speyer ein rechnergestütztes Messkonzept realisiert, ähnlich wie es oben am Beispiel der Klosteranlage Maulbronn aufgezeigt wurde. So wurde ein umfassendes Messnetz von mehr als 40 Sensoren zur Erfassung der Raumklimaverhältnisse und der Oberflächentemperaturen auf den Gewölbeputzen des Vierungsturmes vom Restaurator installiert.

Erste Messergebnisse zeigten, dass auch im Vierungsturm (Abb. 8) die raumklimatische Belastung besonders ausgeprägt war. Durch das Öffnen und Schließen der Fenster sollten im Bedarfsfall nun feuchtwarme Luftmassen nach außen abgeführt werden können, die dann durch frische und trockenere Außenluft ersetzt würde. Erste Abschätzungen zeigten, dass das Aufstellen der vier Galeriefenster des Vierungsturmes einen guten Luftaustausch ermöglichen sollte und somit zur Entlastung des Raumklimas nachhaltig beitragen kann. Um ein vom Raumklima abhängiges Öffnen und Schließen der Fenster vorzunehmen, wurde die ursprüngliche Messeinrichtung 1998 um entsprechende Regelkreise erweitert.

Die seither im Dachraum des Domes installierte Rechneinheit ruft in sehr kurzen Messzyklen von ca. einer Minute alle Messdaten ab, bewertet diese und visualisiert sie auf einem LCD Monitor. Stellt der Rechner die Gefahr einer Tauwasserbildung fest, prüft er sogleich, ob er durch eine geeignete Ansteuerung der Fenster der Tauwassergefahr entgegen kann.

Die Messanordnung im Vierungsbereich ist in Abbildung 7 dargestellt. Neben den Raumklimaverhältnissen, die in 4 Höhenlagen des Turmes erfasst werden, gehen auch die Werte von mehr als 12 Oberflächentemperaturen der Gewölbeputze in die Bewertung der raumklimatischen Beanspruchung des Vierungs-

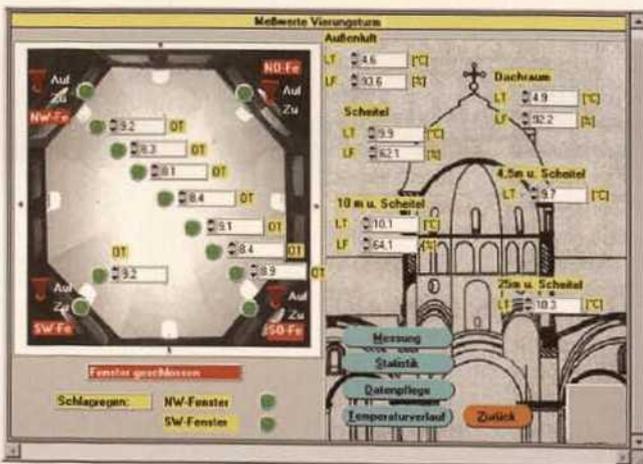


Abb. 7. Speyer, Dom: Visualisierung der im Vierungsturm gemessenen Klima- und Oberflächentemperaturdaten.

<sup>6</sup> Harald GARRECHT – Harald S. MÜLLER, Raumklimatische Beanspruchung von Raumschalen historischer Bauwerke – Maßnahmen am Beispiel des Speyerer Doms, in: 10. Bauklimatisches Symposium, Technische Universität Dresden, 27./29.9.1999, hg. von Peter HÄUPL und Jürgen ROLOFF, Dresden 2000, S. 833–845.



Abb. 8. Speyer, Dom: Blick in die Vierungskuppel (1999).

turmes ein. Ferner werden die Klimaverhältnisse im Dach des Turmes und im Freien erfasst. Auf den Wetterseiten mussten zudem Regensensoren neben den zu öffnenden Fenstern installiert werden, um im Falle eines Schlagregenereignisses die Fenster unverzüglich schließen zu können. Ansonsten könnte Schlagregen ggf. über die offenen Fenster in den Vierungsturm gelangen und auf den frisch restaurierten Putzflächen abfließen.

Die grafische Benutzeroberfläche erlaubt, die einzelnen Anlagenteile zu konfigurieren, eine Bewertung der Daten vorzunehmen und diese zu visualisieren. Tauwasserausfälle werden durch rote LEDs am jeweiligen Ort kenntlich gemacht. Zudem teilt die Oberfläche mit, ob unter Berücksichtigung verschiedenster Kriterien ein Öffnen der Fenster die Raumklimasituation verbessern kann. Insgesamt sind acht Kriterien zu erfüllen, bevor die Fenster im Turm geöffnet werden. So wird die Kirche mit einer elektrischen Fußbodenheizung, die vorzugsweise nachts in Betrieb genommen wird, beheizt. Um die teure Wärmeenergie nicht unnötigerweise nach Außen durch das Öffnen der Fenster abzuführen, werden nur bei Bedarf die Fenster kurzzeitig, so lange wie nötig, geöffnet. Ferner müssen hohe Raumluftfeuchten und günstigere Außenluftbedingungen vorherrschen, um überhaupt eine Verbesserung des Raumklimas bewirken zu können. Jederzeit können neue Vorgaben im Programm eingebunden werden, um die raumklimatischen Verhältnisse unter Berücksichtigung aller Besonderheiten verbessern zu können.

Im Zuge der fortlaufenden Arbeiten zur Gewölbeputzsanierung wurde die Mess- und Regeleinrichtung stetig weiter ausgebaut. Mittlerweile umfasst die Messeinrichtung die raumklimatische Erfassung des nördlichen Querhauses, des Vierungsturmes sowie des Langhauses in Joch 2 und Joch 5.

Der Betrieb der Fenster läuft seit vielen Jahren weitestgehend störungsfrei und stellt sicher, dass vor allem in den Wintermonaten die Raumluftfeuchte im Bereich der Vierung in einer für

die Bausubstanz unkritischen Größenordnung liegt. Allerdings greift die Einflussnahme auf das Raumklima lediglich im Bereich der Vierung. Eine Entlastung der Raumklimaverhältnisse im Langhaus kann mit den Fenstern der Vierung alleine kaum gelöst werden.

Insbesondere während der heißen Schönwetterperioden in den Sommermonaten erwärmt sich der Dom allmählich. Wie eine Batterie nimmt er die von außen zugeführte Energie langsam auf. Wird das Raumklima zunächst als sehr angenehm im Dom empfunden, nimmt mit stetig ansteigender Außentemperatur und Dauer der Schönwetterperiode, die Raumtemperatur im Dom stetig zu und kann nach einigen Tagen Werte über 30°C erreichen. In Verbindung mit den schwülwarmen Luftmassen der Rheinebene nimmt die Raumluft zeitweise ein sehr unbehagliches Klima an, das mit einer geschickten Belüftung der Kirche erheblich verbessert werden könnte. So werden derzeit in den Sommermonaten die Fenster der Galerie soweit als möglich geöffnet, um eine Querbelüftung im Langhaus sicherzustellen, die eine leichte Verbesserung bewirkt.

Da die Querlüftung während der heißen und schwülen Sommertage im Laufe des Tages aber auch zu einer Tauwasserbildung auf den im Vergleich zur Außentemperatur kälteren raumseitigen Wandoberfläche führen kann und zudem am Tage warme Luftmassen in die Kirche eintreten, die eine stete Zunahme der Raumtemperatur bedingen, soll das bereits vorhandene Rechnersystem zukünftig auch genutzt werden, die Fenster des Langhauses durch einen optimierten Betrieb zur nachhaltigen Verbesserung der Raumluftverhältnisse einzusetzen. So blieben die Fenster an heißen Tagen weitestgehend verschlossen, um die feuchtheißen Außenluftmassen nicht in den Raum eintreten zu lassen. Erst in den Nachtstunden würde der Rechner die Fenster zur Querlüftung der Kirche öffnen, um das im Tagesverlauf thermisch aufgeladene Mauerwerk wieder energetisch zu entladen. Der Kirchenraum ließe sich so in einem behaglichen Temperaturbereich halten und Tauwasserbildungen auf den Gewölbeputzen würden vermieden.

In Kürze sollen zwei gegenüberliegende Galeriefenster mit entsprechenden Fenstermotoren ausgerüstet werden, um die Wirkungsweise der Querlüftung eingehender analysieren zu können. Eine Umsetzung des kontrollierten und den baulichen Besonderheiten angepassten Belüftungssystems wird mit der Verfügbarkeit der hierfür notwendigen Mittel für die Baumaßnahmen beginnen.

In der Winterperiode kommt dem Heizbetrieb eine besondere Bedeutung zu. So ist die Kirche 1970 über weite Bereiche des Bodens mit einer elektrischen Fußbodenheizung ausgestattet worden. Die Heizung wird auf einem vergleichsweise geringen Temperaturniveau von 12 bis 16°C abhängig von den kirchlichen Veranstaltungen betrieben.

Die Ergebnisse der Klimamessungen zeigten aber auf, dass die Raumluft in der Domkirche in den verschiedenen Raumbereichen sehr unterschiedliche Temperaturen und Raumluftfeuchten annimmt. Außerdem klagen sehr viele Kirchenbesucher, dass ein Aufenthalt in der Kirche gerade während sehr kalter Wintertage äußerst unangenehm sei. Eine der wesentlichen Ursachen hierfür ist sicherlich eine bereits in Abschnitt 2 angeführte intensive Betriebsweise der Heizung z.B. während der Weihnachtsfeiertage. Dann können die warmen Luftmassen aufsteigen. Streichen diese an kalten Tagen an den kalten Wandoberflächen vorbei, kühlen sie sich ab und fallen wieder in den Raum zurück.

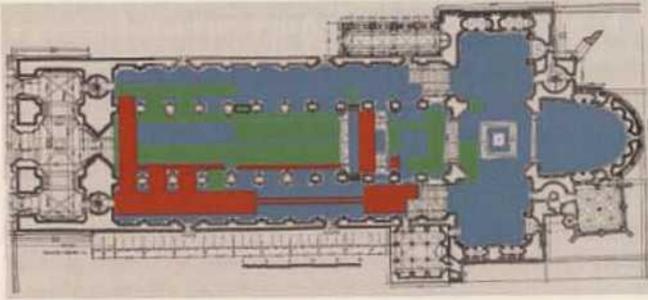


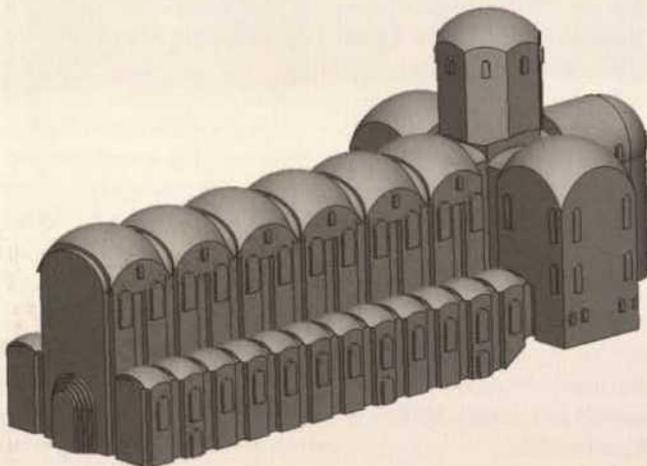
Abb. 9. Speyer, Dom, Oberflächentemperaturen des Fußbodens, gemessen mittels IR-Thermographiesystem: voll leistungsfähige Heizung (rot), geringere Wärmeabgabeleistung (grün), Ausfall der Fußbodenheizung in weiten Bereichen.

Durch die mit dem intensiven Heizbetrieb einhergehende starke Luftströmung ist aber sicherlich auch die Gefahr einer erneuten Verschmutzung der Gewölbeputzoberflächen gegeben, die im Hinblick auf die erst vor wenigen Jahren abgeschlossene Restaurierung möglichst vermieden werden sollte.

Entsprechend der ungleichförmigen gemessenen Raumluftverhältnisse in der Domkirche wurde Anfang 2002 mit Hilfe der IR-Thermografie die Funktionsfähigkeit der Fußbodenheizung im Dom analysiert.

Einen Eindruck einer einzelnen IR-Wärmebildaufnahme vom Fußboden zeigt Abbildung 11. Insgesamt wurden 154 IR-Wärmebilder vom Boden des Kaiser- und Mariendomes aufgenommen, um die Funktionsfähigkeit des gesamten Heizsystems bewerten zu können.

Die im Vollastbetrieb der Fußbodenheizung durchgeführten Wärmebildaufnahmen ergaben, dass in weiten Bereichen der Kirche die Fußbodenheizung nicht mehr funktionstüchtig ist (Abb. 9). Ein Vergleich mit Ergebnissen zur Raumklimasituation in der Kirche aus dem Jahr 1991 zeigte darüber hinaus, dass innerhalb der vergangenen zehn Jahre die Heizbereiche im nördlichen Querhaus ihre Funktionsfähigkeit verloren haben müssen. Auch ist im mittleren Bereich des südlichen Seitenschiffes die Heizung ausgefallen, die aber bereits 1991 nicht mehr zu funktionieren schien. Erstaunlicherweise sind im westlichen Bereich der Kirche die Heizkreise der Fußbodenheizung noch größtenteils intakt.



Mit Hilfe der Wärmebildmessungen konnten die enormen Luftströmungen im Kaiserdom erklärt werden. So ist davon auszugehen, dass sich die Raumluftmassen während des Heizbetriebs in den westlichen Kirchenbereichen erwärmen und entsprechend der Dichteunterschiede von warmer und kalter Luft nach oben bewegen. Entsprechend der großen Temperaturdifferenz der westlichen und östlichen Kirchenabschnitte, kommt es aber auch zu enormen Luftbewegungen, die sich in Richtung der östlichen Kirche einstellen. Die zu beobachtenden hohen Luftgeschwindigkeiten sind die wesentlichen Ursachen, die zum Unwohlbefinden der Kirchenbesucher beitragen. Zudem können die starken Luftbewegungen, die auch Staubpartikel mitführen, zur raschen Verschmutzung der Raumschalen beitragen.

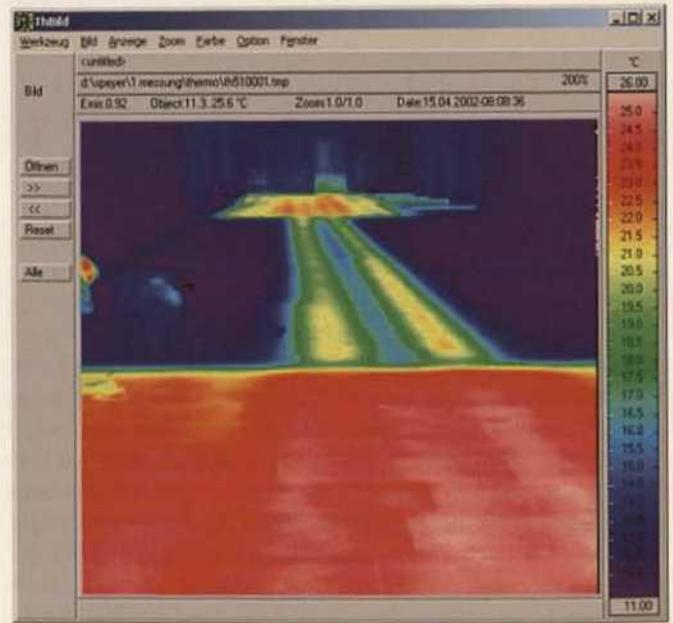


Abb. 11. Speyer, Dom: Beispiel einer IR-Wärmebildaufnahme im südlichen Seitenschiff.

Der Raumluftströmung kommt somit eine zentrale Bedeutung zu, wenn es um Fragen der Konservierung der mit der Restaurierung der Gewölbeputze erzielten Oberfläche geht. Die Raumluftströmung hängt aber ihrerseits in besonderem Maße von der Funktionsfähigkeit und der Betriebsweise des Heiz- bzw. des Temperiersystems ab. Entsprechend haben derzeitige Untersuchungen zum Gegenstand, die Raumluftverhältnisse unter Berücksichtigung des derzeitigen, nicht mehr voll funktionsfähigen Heizsystems zu analysieren. Als Simulationsprogramm wird das CFD-Programmpaket der CD-Adapco Group CD-Star verwendet, mit dem sich Raumluftströmungsvorgänge abbilden lassen.

<sup>7</sup> Christian BODMER, Simulation der Raumluftströmung im Kaiserdom zu Speyer, Diplomarbeit an der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft.

Abb. 10. Speyer, Dom: CAD-Aufbereitung der Raumschalenumschließungsflächen für die Volumennetzgenerierung.

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde zunächst das innere Raumvolumen des Domes mit einem Volumenelementnetz aus mehr als 1,2 Mio. Elementen abgebildet.<sup>7</sup> Seit Anfang 2004 werden hieran Parameterstudien vorgenommen, um das derzeitige Raumluftverhalten des Doms unter Berücksichtigung der gemessenen Klimarandbedingungen nachzuzeichnen. Mit Abschluss der Validierung der Eingabeparameter sollen die Auswirkungen verschiedener Heiz- und Temperiersystem rechnerisch analysiert und einander gegenüber gestellt werden, um das im Hinblick auf den Erhalt der Bausubstanz wie auch hinsichtlich des Behaglichkeitsempfindens der Kirchenbesucher am besten geeignete Konzept herauszuarbeiten.

Einen Eindruck zum Stand der Arbeiten vermittelt die CAD-Aufbereitung der Raumumschließungsfläche der Domkirche in Abbildung 10, die im weiteren Bearbeitungsschritt in finite Volumenelemente zu diskretisieren ist.

Ein beispielhaftes Ergebnis der Raumluftströmungsberechnung vermittelt Abbildung 12, die die Temperaturverteilung in der Kirche für einen etwas kälteren Wintertag aufzeigt. Die Ergebnisse der unter Ansatz des gemessenen Außenklimas berechneten Temperaturverteilung stimmen in hervorragender Weise mit den innerhalb der Kirche in den verschiedenen Raumbereichen gemessenen Temperaturen überein. Folglich kann die Wärmeabgabe der Fußbodenheizung mit dem gewählten Modellansatz der CFD-Studie sehr gut abgebildet werden.

Neben der Ermittlung der Temperaturverteilung im Raum erlaubt die CFD-Simulation auch die Betrachtung der Raumluftströmungsverhältnisse, wie sie in Abbildung 13 für einen Schnitt durch das Haupt- und die beiden Seitenschiffe gegeben ist. Für jeden Knotenpunkt des Raumnetzes werden die berechneten Raumluftgeschwindigkeiten durch einen Vektor grafisch visualisiert. Die Größenordnung der Geschwindigkeit wird durch den Farbwert des Pfeiles angeführt. Die Richtung der Luftströmung wird durch die Orientierung der Pfeile aufgezeigt.

Noch 2005 sollen die möglichen Heizkonzepte einander gegenübergestellt und deren Auswirkungen auf das Raumklima wie deren Folgen für die Konservierung der Bausubstanz und die Behaglichkeit der Nutzung – auch hinsichtlich der jeweiligen Bau- und Betriebskosten – diskutiert werden, bevor dann die Entscheidung für ein geeignetes Konzept getroffen werden kann. Die gewählte Methodik erscheint durchaus geeignet, eine erneute Schädigung der erst vor wenigen Jahren restaurierten Gewölbeputze zu vermeiden.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Ausarbeitung von Steuerungen für den Betrieb von Heiz- und Temperiersystemen wie auch die Regelung von natürlichen bzw. erzwungenen Be- und Entlüftungen in Abhängigkeit von Raumklimakennwerten und äußeren Witterungseinflüssen konnten am Beispiel zweier Welterbeobjekte unter den Aspekten

Abb. 13. Speyer, Dom: Raumluftströmungsverhältnisse im Hauptschiff und in den Seitenschiffen (Ist-Zustand).

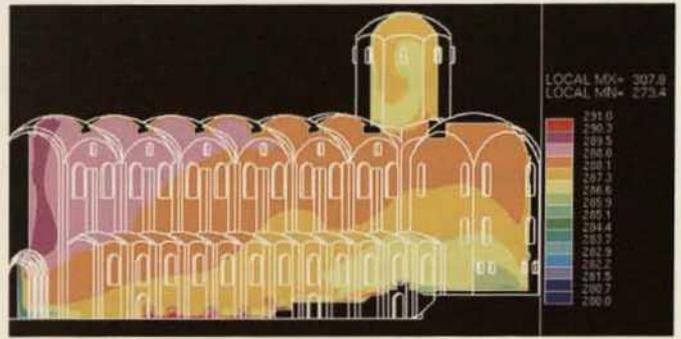
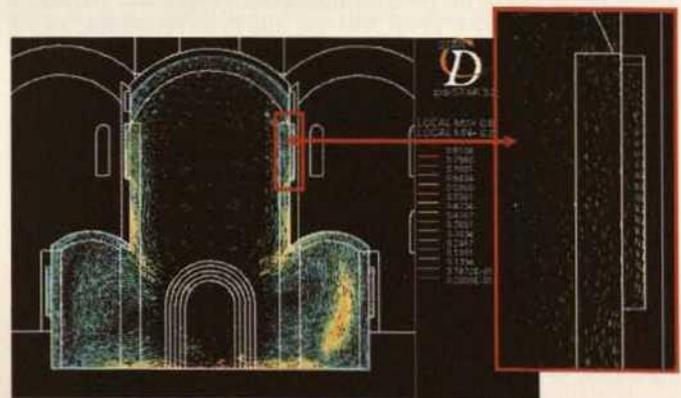


Abb. 12. Speyer, Dom: Visualisierung der Temperaturverteilung im Raum (Ist-Zustand).

eines optimierten und zuverlässigen Betriebs zur Vermeidung einer fortschreitenden Schädigung der historischen Substanz und seiner Ausstattung entwickelt und unter restauratorischer Begleitung erprobt werden.

Das in beiden Fällen zum Einsatz gekommene neue und innovative kabel- und funkbasierte Klimamesskonzept bietet vielfältige weitere Einsatzmöglichkeiten.

So werden auch an einigen anderen bereits realisierten bzw. noch laufenden Projekten verschiedenste Fragestellungen analysiert, die trotz der Unterschiedlichkeit in den restauratorischen, nutzungsspezifischen und wissenschaftlichen Details allesamt belegen, dass mit Klimamessungen und den zugehörigen materialkundlichen Untersuchungen ein wesentlicher Beitrag zur Substanzsicherung von historischer Bausubstanz geleistet werden kann. Nicht zuletzt zeigen diese praktischen Beispiele auch, dass sich die nicht selten folgenschwere Auswirkung einer Nutzung messtechnisch sicher bewerten lässt und im Bedarfsfall dann mittels einer kontrollierten Einflussnahme das Raumklima in denkmalgerechter und kostengünstiger Weise in einem günstigen Bereich gehalten werden kann. Auch lässt sich bei einer kontrollierten Betriebsweise von Beheizung bzw. Temperierung mit Hilfe der Mess- und Regeltechnik das Raumtemperaturniveau in historischen Räumen im Sinne der Substanzsicherung deutlich absenken und vergleichmäßigen, ohne dass das Behaglichkeitsempfinden der Nutzer eingeschränkt würde. Nicht zuletzt kann so auch der Energiebedarf für die Beheizung bzw. Temperierung der zumeist großen Räume erheblich reduziert werden.



## Summary

### Indoor Climate and Building Physics: Investigations and Plans.

#### Research Results Regarding Climatic Problems in the Maulbronn Monastery and the Speyer Cathedral

The goal of all conservation and repair work in the field of preservation is to ensure that only those measures are carried out which use the most minimal intervention possible to safely and permanently remove the cause of damage and which return the damaged area to a state that allows appropriate preservation, maintenance and use.

In the case of cultural monuments such as churches, monasteries, palaces and museums climatic conditions are often of particular importance for the preservation of historic building fabric and artistic fittings. In addition to considering basic questions concerning the effects of the indoor climate it is often also necessary to evaluate the appropriateness of the technical building services in historic monuments so that suitable improvements can be developed.

The use of historic buildings often necessitates their heating or temperature control. But a reliable plan for and assessment of technical building services requires sufficient understanding of the special characteristics of the indoor climate in such large volume interior spaces. Meaningful data characterizing inside air conditions is difficult to obtain and thus is rarely available. Regarding unheated buildings in particular there are only a few publications in the specialized literature which treat the issues of indoor climatic effects on historic building fabric. Thus it is also difficult to assess potential dangers such as those caused by lack of ventilation or by incorrect or uncontrolled ventilation.

On the basis of long-term studies of two buildings, the dormitory in the Maulbronn monastery complex and the imperial cathed-

ral of St. Mary's in Speyer, current technical possibilities for accurately recording indoor climatic conditions are discussed, as are techniques for accurate assessment of climatic strain on the building fabric, dangers to valuable artistic fittings, and the effects of a building's use. By building on this data it is possible to draw up monument-compatible measures which effectively counteract development of further damages.

Feedback control systems were developed and tested on both buildings in order to optimize the indoor air conditions with controlled air intake and extraction. Operation of the ventilators and the windows (which open and close electronically) is correlated with the indoor climatic conditions, the use of the buildings, etc. Restoration studies carried out at the same time prove that further development of damages to the original surface treatments can be effectively resisted with these simple measures which are in harmony with the historic building fabric.

The diversity of the restoration, use-specific and scientific problems makes it necessary not only to record and evaluate the indoor climatic conditions but also to take theoretical considerations into account regarding air movement in large-volume spaces. In view of the special problems of heating and temperature control in the Speyer cathedral, which has an interior volume of c. 50,000 m<sup>3</sup>, numerical calculations were carried out with the help of a high-performance simulation program; they are presented here along with the other studies.

## Literaturverzeichnis

Hermann RECKNAGEL, Eberhard SPRENGER, Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, 69. Auflage, München 1995.

Claus ARENDT, Heizung – Problemfall historische Räume, Folge 4: Schadensbilder, Beispiele, Empfehlungen, in: Bausubstanz Nr. 3, 1992, S. 50–52.

Harald GARRECHT, Harald MÜLLER, Raumklimatische Beanspruchung von Raumschalen historischer Bauwerke – Maßnahmen am Beispiel des Speyerer Doms, in: 10. Bauklimatisches Symposium, Technische Universität Dresden, 27./29.9.1999, hg. von Peter HÄUPL und Jürgen ROLOFF, Dresden 2000, S. 833–845.

HARALD GARRECHT, Reduzierung der raumklimatischen Beanspruchung der Raumschalen im Dormentbau des Klosters Maulbronn, in: Jahrbuch 1997/1998 des SFB 315 – Universität Karlsruhe, Karlsruhe 2000, S. 223–235.

Harald GARRECHT, Jochen HUBER, Untersuchungen zum Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch energetisch sanierter Wohngebäude, in: 11. Bauklimatisches Symposium, TU Dresden, Dresden 2002, S. 54–63.

Harald GARRECHT, Klaus WOLFRUM, Ralf SCHMIDER, Online-Infrarotthermografie-Messsystem, in: Internat. Kolloquium Erhalten, Umnutzen, Ertüchtigen, WTA-Tage 2002, Freiburg, 2002.

Helmut KÜNZEL, Bauphysik-Geschichte(n) Nr. 14 – Lüften in Kirchen und Kellern, in: ARCONIS, 7, 2002, Nr. 1, S. 40–43.

Christian BODMER, Simulation der Raumluftströmung im Kaiserdom zu Speyer, Diplomarbeit an der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft.

## Abbildungsnachweis

Abb. 1: Prof. Dr. Uta Hassler, Karlsruhe (Foto: Dirk Altenkirch, Karlsruhe); Abb. 2–3: Wilhelm Glaser, Horb; Abb. 4–7, 9–13: Prof. Dr. Harald Garrecht, Karlsruhe; Abb. 8: Renate J. Deckers-Matzko, Heidelberg.