Klimasimulationsrechnungen-
Eine Möglichkeit zur Vermeidung von Bauschäden?[1]

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer
Dipl.-Ing Frank Eßmann

1 Einleitung

Historische Gebäude waren von jeher nur für eine bedingte Beheizung ausgelegt. Hieraus folgt, das das Innenklima bestrebt ist sich mit dem, sich im Jahreszyklus wechselnden, Außenklima auszugleichen. Unter diesen Voraussetzungen sind nicht nur die Bausubstanz sondern auch die Einrichtungsgegenstände nahezu unversehrt erhalten geblieben.

Steigende Komfortansprüche der Besucher und der Anspruch des Menschen auf eine hohe Behaglichkeit in Räumen, führten zum Einsatz von Heizungssystemen in historischen Gebäuden, die nun wieder die Gebäude, aber auch in erheblichen Maße die räumliche Ausstattung belasten und zu Schäden führen können, siehe auch/[2]/.

Eine Vorausschau auf zu erwartende Schäden war bislang nur bedingt möglich. Nun sind in letzter Zeit neben den Simulationsrechnungen für Bauteile, wie Wärmebrücken, Feuchteverteilungen im Bauteil infolge Kapillarleitung, Kondensationsberechnungen, die Möglichkeiten von Klimasimulationsrechnungen der Gesamtgebäude weiter entwickelt worden. Hierbei wird es möglich die raumklimatischen Zustände in Hinblick auf mögliche Schäden der Raumschale gerade im Vorfeld einer geplanten Umnutzung zu bewerten.

Mit diesem Verfahren wurde das von der Stiftung Deutscher Denkmalschutz finanzierte Projekt der Umwandlung der St.-Blasii-Kirche (Bild [1]) in Quedlinburg zu einer Konzert- und Versammlungsstätte untersucht, um in Hinblick auf die künftige Nutzung sowie Art und Regelung von unter- schiedlichsten Heizungssystem Aussagen über Wirkweisen und Auswirkungen auf das Gesamtgebäude treffen zu können.

Die erste Erwähnung der St.-Blasii-Kirche findet sich in einer Urkunde des Jahres 1223, ihre heutige Form geht auf das Jahr 1715 zurück. Die barocke, einschiffige Kirche hat einen länglichen, achteckigen Grundriss mit einem schmalen gotischen Altarraum. Auf der Westseite befindet sich ein romanischer Turm, dessen Anlage möglicherweise bis ins 10. Jahrhundert zurückreicht. Emporen laufen um die Nord-, Süd- und Westseite. Sie ruhen auf vier achteckigen Stützen mit reich geschnitzten Kapitellen sowie auf Wandkonsolen. Der farbenprächtige Hochaltar mit Kanzel wurde im 18. Jahrhundert ausgeführt.

---

[1] Leimer, Hans-Peter; Eßmann, Frank
Rechnerische Untersuchung des Innenklimas der Kirche St.-Blasii; Erstveröffentlichung Bauphysik 4/94

[2] BBS INGENIEURBÜRO Berichte
Nr. 6-Beurteilung des energetischen Verhaltens von Fachwerkgebäuden, Bausubstanz 6/93
Nr. 7-Wärmetechnische Sanierung von Fachwerkgebäuden mit raumseitigen Wärmedämmputzen, Bautenschutz und Bausanierung 3/94
Nr. 8-Wärmetechnische Untersuchungen an Block und Plattenbauten

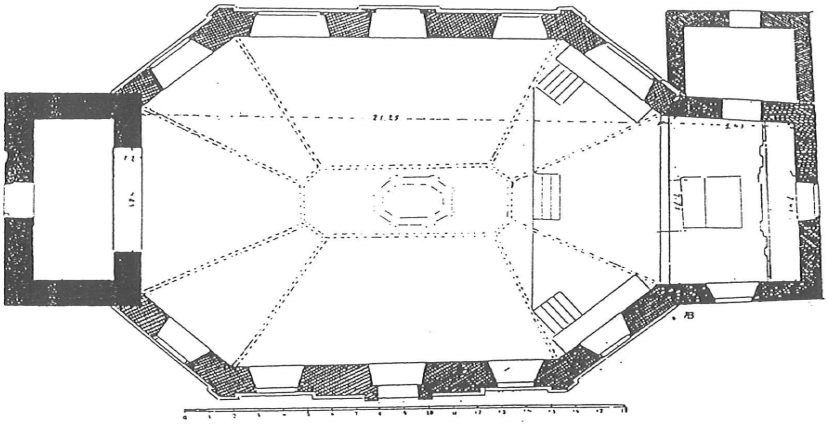

Bild 1 Grundriss der St.-Blasii-Kirche

2 Einflüsse auf das Raumklima in Kirchen

Über Jahrhunderte hinweg sind Kirchen ohne jegliche Heizungssysteme ausgekommen und die in ihnen befindlichen Kunstwerke und Einrichtungsgegenstände sind erhalten geblieben. Das Bauwerk war lediglich den jahreszeitlichen Klimaschwankungen unterworfen, die durch die Wärme- und Feuchtespeicherfähigkeit der Baustoffe sehr verlangsamt ausgeglichen wurden.

Da sich jedoch die Komfortansprüche der Kirchenbesucher, in Bezug auf Behaglichkeit, im Laufe der Zeit in großem Maß verändert haben, mussten die historischen Gebäude mit Heizungssystemen versehen werden. Dies führte in den Kirchen und ihren Raumausstattungen zu neuen untypischen Klimabedingungen, die vordringlich durch eine beschleunigte Veränderung des Raumklimas erhebliche Schäden verursachen können.

Das Raumklima wird im Wesentlichen von den vier Komponenten Raumlufttemperatur, relative Luftfeuchte, Raumluftgeschwindigkeit und Raumumschließungsflächentemperatur bestimmt. Den Einfluss auf das Raumklima und die Wechselwirkung mit Größen wie Heizung, Kirchenbesucher, Fugendurchlässigkeit und Bauwerksfeuchte zeigt Bild [2] nach /[3]/.

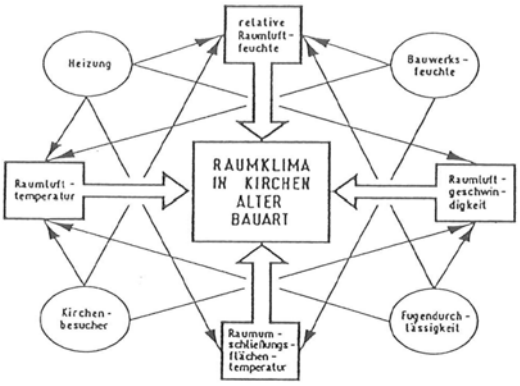

Bild 2 Klimatologische Zusammenhänge in Kirchen alter Bauart /2/

[3] Pfeil, A.
Kirchenheizung und Denkmalschutz - Wärmebedarf, Feuchtehaushalt, Heizungssysteme
Bauverlag, Wiesbaden und Berlin 1975

2.1 Raumlufttemperatur

Durchgeführte Messungen zeigen, dass die Raumlufttemperaturen in unbeheizten Kirchen während der Winterperiode im Mittel zwischen 1,5°C und 6°C, in beheizten Kirchen im Tagesmittel bei 13 °C liegen/[4]/. Durch eine Beheizung werden die Raumluft- und Raumumschließungsflächentemperatur erhöht. Dabei sind, vor allem bei historischen Kirchenräumen stationäre und instationäre Verhältnisse von Bedeutung. Die stationären Verhältnisse, die sich bei zeitlich konstanten Temperaturverhältnissen einstellen, werden in beheizten Kirchen selten erreicht. Hier wechseln vielmehr die Phasen des Aufheizens und Abkühlens ständig ab.

Die Außenbauteile von historischen Gebäuden, die aufgrund ihrer Masse über ein großes Wärmespeichervermögen verfügen, nehmen einen großen Anteil der Heizenergie auf und geben diese in Form von Wärme nur langsam an die Innenluft wieder ab. Die Räume lassen sich nur langsam erwärmen, dies ist gerade bei einer nur kurzzeitigen Nutzung, von Nachteil.

2.2 Raumluftfeuchte

Der Mensch gibt in Ruhe etwa 25 bis 30g Wasser in der Stunde ab, was die relative Luftfeuchte in einem Raum erhöht. Auf der anderen Seite können die Baustoffe und Einrichtungsgegenstände in einem Raum über Sorption, in Abhängigkeit von der sie umgebenden Luft, Feuchte abgeben oder aufnehmen. Darüber hinaus sind die hygroskopischen Eigenschaften eines Materials, in Abhängigkeit von seinem Salzgehalt, zu berücksichtigen.

Eine entscheidende Größe zur Beeinflussung der relativen Luftfeuchte ist, gerade in historischen Kirchen, der Luftwechsel. Durch den Luftaustausch wird das Raumklima durch das Außenklima beeinflusst. Im Winter strömt trockenere Luft von außen nach, die die Luftfeuchte im Inneren herabsetzt. Während der Luftwechsel bei Undichtigkeiten von Fenstern und Türen, verursacht durch den Windanfall, im Normalfall zwischen 0,5 und 1,0 liegt, wird bei historischen Kirchenräumen von einem Wert zwischen 1,0 und 2,0 ausgegangen /[2]/,/[4]/.

2.3 Raumausstattung und Raumschale

Eine Veränderung der Raumluftfeuchten, sei es durch schädigendes Heizverhalten oder natürliche Einflüsse, führt zu Reaktionen der Raumausstattung und Raumschale. Holzbauteile, wie Gestühl, Kanzel, Tafelbilder und Orgeln sind dabei ständigen Schwind- und Quellvorgängen unterworfen. Es treten vor allem im Winter, durch zu niedrige Luftfeuchten, Schwindrisse in der hölzernen Ausstattung auf. Trocknungsrisse in Stuckdecken und Abbröckeln von Freskomalereien sind ebenso auf zu geringe Luftfeuchten zurückzuführen.

Eine gegenteilige Gefahr birgt der Tauwasser-Ausfall auf der kalten raumseitigen Bauteiloberfläche. Der durch die Heizungsluft aufgewirbelte Staub findet in den Kondensationsbereichen einen idealen Nährboden für Schimmelpilzwachstum.

In den Sommermonaten sind die Lufttemperaturen im Mittel 10-15 K höher als im Winter. Die absolute Luftfeuchtigkeit wird erhöht. Dieser hohe Feuchtehaushalt kann somit zu Schäden an historischen Gebäuden führen.

[4] Holz, D.; Künzel, H.
Richtiges Heizen zur Erhaltung alter Gebäude und Inneneinrichtung,

Die in den Baustoffen befindlichen Salze binden sorptiv das Wasser aus der Luft, das zum Quellen z.B. des Holzes führt. Eine länger anhaltende erhöhte Feuchte, bei entsprechenden Temperaturen ist ein geeigneter Lebensraum für tierische und pflanzliche Holzschädlinge. So besetzen z.B. Algen und Schimmelpilze Oberflächen, die organische Bestandteile beinhalten.
Die Hauptursache für Schäden in großen Kirchenräumen während der Sommerperiode ist die frühsommerliche Kondensation. Das massige Mauerwerk historischer Räume reagiert sehr träge auf Temperaturschwankungen. Eine plötzliche Temperaturerhöhung bewirkt einen Anstieg der Taupunkttemperatur, der schneller ist als die Zunahme der Oberflächentemperatur. Es kommt zum Tauwasserausfall an der Bauteiloberfläche. Fördernd trägt in den Sommermonaten ein verstärkter Luftwechsel, durch Öffnen der Türen des Besucherverkehrs, zur Kondensation bei, da hierbei dem Raum ständig Luft mit erhöhter Feuchte zugeführt wird.
Ein Absenken der Raumluftfeuchten könnte ein sommerlicher Einsatz der Heizung bringen. Hier handelt es sich sicherlich nicht um starkes Heizen, sondern lediglich um eine Temperierung des Gebäudes.

2.4 Arten von Heizungssysteme

Das Heizen in Kirchen ist grundsätzlich nicht schädigend, es kann sich vielmehr ausgleichend auf das Raumklima auswirken. Die eigentlich schädigenden Faktoren sind in dem Heizsystem selbst und in der Heizweise (Intensität/Geschwindigkeit) zu finden. Aus diesem Grunde wurden in Zusammenarbeit mit den Herstellern in der Praxis eingesetzte Heizsysteme in Hinblick auf ihre Wirkweisen näher untersucht.

3 Grundlagen für Klimasimulationsrechnungen zur Bestimmung des thermischen und hygrischen Verhaltens von Gebäuden

3.1 Das Programmsystem TRNSYS

TRNSYS (= Transient System Simulation Program /[5]/) ist ein Programm, zur Simulation von thermischen Systemen unter instationären Bedingungen. Das Rechenprogramm berücksichtigt dynamische Effekte, die nach aktuellen Angaben zugrunde gelegt werden können.

Die Variation der nachstehenden Randbedingungen die ein Bauwerk belasten, ermöglicht es einerseits die energetische Beurteilung von Planungsmaßnahmen als auch die Auswirkungen auf das Raumklimat durchzuführen.

3.2 Grundlagen der Berechnung

Bei den Berechnungen wurde das Gebäude in Hinblick auf seinen Standort, seiner Geometrie, Neigung und Azimut, der Bauteile und Baustoffe, der Nutzung und des Außenklimas als Modell für eine rechentechnische Klimasimulation abgebildet.
Für die rechentechnische Betrachtung wurde das Testreferenzjahr Zone 2, entsprechend dem nord- und westdeutschen Tiefland, für die Vorgabe des Außenklimas zugrunde gelegt.

Internationaler Kongress zur Bauwerkserhaltung, Berlin 1992
[5] TRNSYS Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Wisconsin 1992

Auf der Grundlage der Bestandsunterlagen, ergänzt durch ein verformungsgerechtes Aufmaß mit seinen Detailangaben konnte das Gebäude, für die rechentechnische Betrachtung, sinnfällig in einzelnen Raumzonen gegliedert, dargestellt werden. [3]

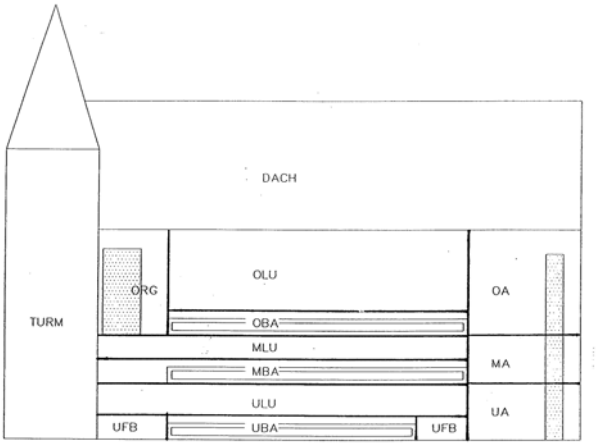

Bild 3 Gebäudemodell der Blasii Kirche mit Zoneneinteilung

3.2.1 Baustoffe und Bauteile

Die Bauteile mit ihren baustoffspezifischen wärme- und feuchtetechnischen Kennwerten der historischen Bausubstanz wurden auf der Grundlage der Untersuchungen nach /[6]/ und /[7]/ angesetzt.

Die Bestimmung der wärme- und feuchtetechnischen Abhängigkeiten der Baustoffe erfolgte auf der Grundlage nach /[8]/.

Bei den Berechnungen werden die Baustoffe hinsichtlich

- ihrer Absorption (bei außen liegenden Bauteilen)
- ihrer Speicherfähigkeit
- ihrer Absorption, Reflexion und Durchlasswiderstandes bei Verglasungen

berücksichtigt.

Um das energetische Verhalten, aber auch die schallschutztechnischen Belange des Gebäudes zu verbessern, wurden folgende Sanierungsmaßnahmen zu Grunde gelegt:

- Einbau eines zweiten Fensters vor die vorhandene Verglasung,
- Aufbringen von 14 cm mineralisch gebundenen Faserdämmstoff auf die Gewölbekappen zum Dachraum,
- Einbau einer 14 cm dicken Wärmedämmschicht unterhalb des Gehbelages / Fußbodenheizung.

[6] Ingenieurbüro BAUDIAG
Gutachten zum Durchfeuchtungs- und Versalzungszustand im Mauerwerk, Wismar 1993
[7] Architekturbüro Sturmat, Bauaufnahme, Quedlinburg 1993
[8] BBS INGENIEURBÜRO Berichte
Nr. 4-Bauphysikalische Untersuchungen zur Entwicklung eines Sanierungskonzeptes, Bausubstanz 4+5/94

3.2.2 Gebäudenutzung

Die Klimabeeinflussung durch die Wärme- und Feuchteabgabe der Besucher sowie der erhöhte Luftwechsel durch Öffnen und Schließen der Türen wurde bei der Generierung des historischen Gebäudes berücksichtigt.

- **Kirchenraum ohne Belastung, -Basis-**
  Luftwechsel 1,0-fach
- **Öffnungszeit des Gebäudes**
  Täglich 15^{00} - 18^{00} Uhr mit einem Besucherstrom von ~50 Personen in den Zonen UBA und UFB.
  Luftwechsel erhöht 1,5-fach
- **Konzerte / Versammlungen**
  Freitag Abend von 19^{00} - 23^{00} Uhr, Sonntag Morgen von 10^{00} - 14^{00} Uhr
  Während der Veranstaltungen mit ca.260 Personen sind die Zonen UBA und UA im Erdgeschoss sowie die Zone MBA und OBA auf den beiden Emporen belegt.
  Luftwechsel erhöht 1,5-fach,
  angestrebte Lufttemperatur 18°C

3.2.3 Grenzwerte der Innenklimate

In Abstimmung mit den Beteiligten, insbesondere den Restauratoren und Denkmalpflegern konnten folgende Grenzwerte eines zulässigen Innenraumklimas für das Gebäude mit seiner Ausstattung festgelegt werden:

- Orgel $\Delta\vartheta$ ± 1 K/h; φ = 30 - 70/80 %
- Instrumente $\Delta\vartheta$ ± 1 K/h; φ = 30 - 70/80 %
- Holzbauteile, Bilder, Altar ϑ = 0 - 20 °C; φ = 50 - 80 %

4 Klimasimulation und Vergleich mit einer zweiwöchigen Klimamessung vor Ort

Für die Vergleichsrechnung wurden die aus einer zweiwöchigen Messreihe in der Periode vom 05.11.-19.11.1992 vor Ort gemessenen Klimadaten, hier Raumlufttemperatur und -feuchte, auf das Bauwerk als äußere Belastung aufgeben und die Wirkweisen im Inneren der Kirche berechnet. Die erforderlichen, nicht gemessenen Strahlungsdaten wurden /[9]/, entsprechend der Region Braunschweig, entnommen.
Mit Hilfe des Programmsystems kann über eine quantitative Steuerung der Feuchtespeicherung der Bauteile in Verhältnis zu der der Luft beschrieben werden.

Für Gebäude/Räume ist man, wie die Vergleichsrechnungen der Rechnung/Messung zeigen, in der Lage den Einfluss der unterschiedlichen Feuchtespeicherfähigkeiten der Baustoffe und Bauteile hinreichend genau abzuschätzen, wenn die Randbedingungen anhand von Parameterstudien aufeinander abgestimmt worden sind.

[9] Leimer, H.-P.
Beitrag zur wärme- und feuchtetechnischen Bestimmung von Bauteilen bei der Sanierung von historischen Fachwerkgebäuden, Dissertation Weimar 1991

Die daraufhin erhaltenen Berechnungen zeigen gute Übereinstimmungen der gemessenen mit den berechneten Werten. [4]

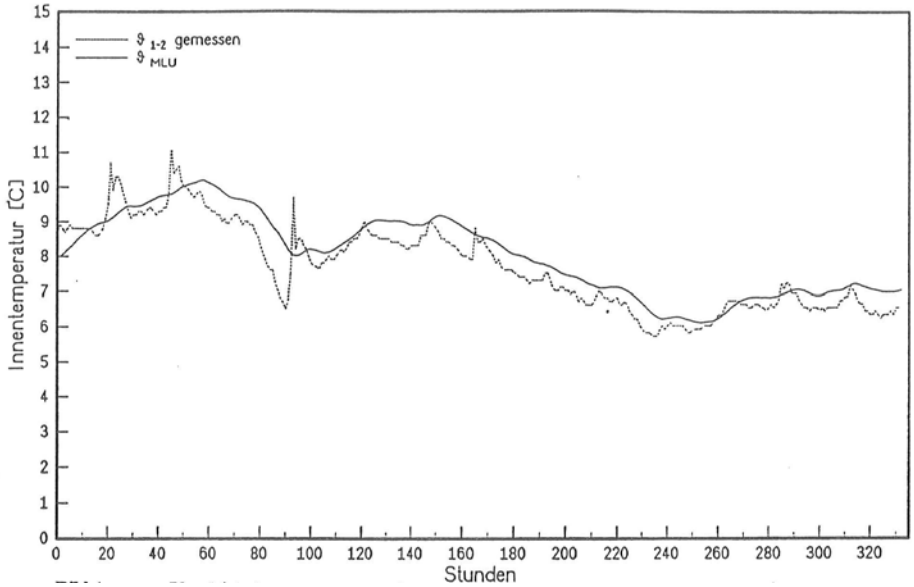

Bild 4 Vergleich der gemessenen zu den berechneten Temperatur- Werten

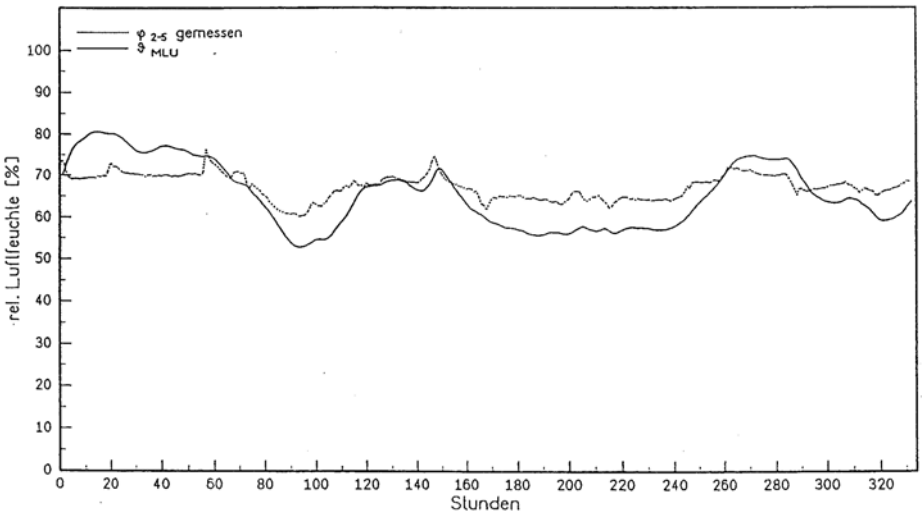

Bild 5 Vergleich der gemessenen zu den berechneten Feuchte-Werten

5 Simulationsrechnungen für den Sommerfall

Um Aussagen über die Einflüsse einer Nutzung des Gebäudes zu gewinnen, wurde zunächst der Sommerfall / unbeheizt betrachtet.

Dargestellt ist in Bild [6] der Feuchteverlauf für die als kritisch anzusehenden Bauteile **ORG** Orgel, **MBA** Gestühl und Einbauten/Bilder Mitte, **UA** Altar.

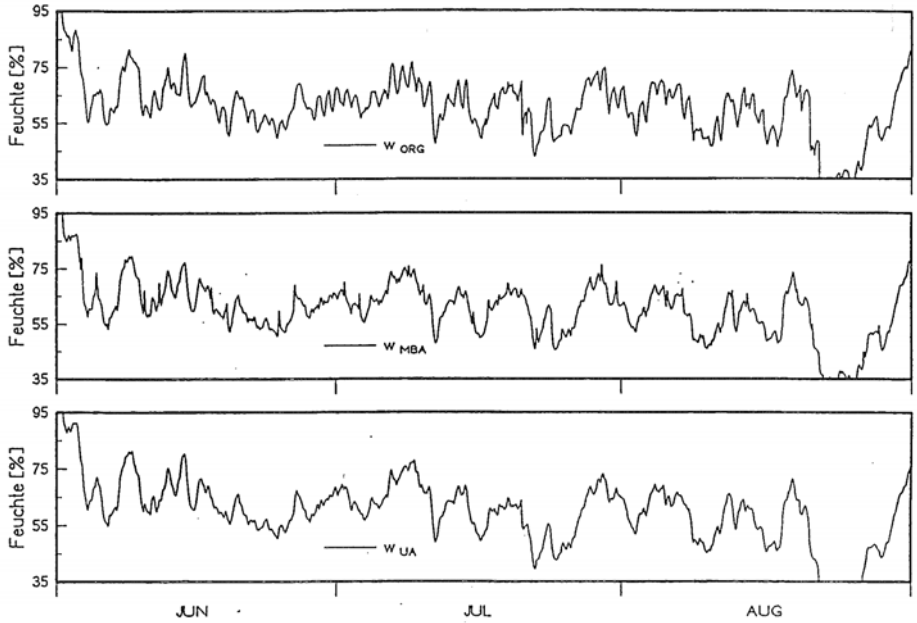

Bild 6 Feuchteverlauf für den Sommerfall

Es zeigt sich, dass die Feuchten während der Sommermonate i. A. innerhalb der zulässigen Grenzen liegen.

Die grundlegenden Abhängigkeiten für den Sommerfall stellen sich wie folgt dar:

Die Raumlufttemperaturen im Erdgeschoss Uxx folgen dem Verlauf der Außenlufttemperaturen. Ihre Amplituden sind jedoch geringer, da das massige Bauwerk mit seinem großen Wärmespeichervermögen träge auf Temperaturschwankungen reagiert. Weiterhin stellt sich eine Phasenverschiebung von ca. 4 h dar. Die Raumlufttemperatur beträgt im Sommer im Mittel ca. 21 °C.

Deutlich berechnet sich eine Temperaturschichtung im Kirchenschiff. Die Temperaturen steigen zwischen der Erdgeschossebene und der ersten Empore um 6K und zwischen der ersten und zweiten Empore um 3K an.

Die relativen Luftfeuchten liegen in den Sommermonaten im Mittel bei ca. 70%. Die Raumluftfeuchte im Erdgeschoss sinkt Anfang und Ende Juli unter die Außenluftfeuchte ab, da die Raumlufttemperatur höher ist als die Außenlufttemperatur. Eine Phasenverschiebung der Luftfeuchten zwischen innen und außen ist in Teilbereichen ersichtlich.

Die Schichtung der relativen Luftfeuchten verhält sich über die Höhe entsprechend der Temperatur. Im Erdgeschoss sind die Raumluftfeuchten am höchsten und nehmen bis zur zweiten Empore hin ab.

5.1 Kondensationsgefahr im Sommer

Auf die Gefahr der frühsommerlichen Kondensation wird vielfach hingewiesen /[4]/. Dabei wird die Grundvoraussetzung, dass zu feuchte Luft auf eine zu kalte Oberfläche trifft und somit eine Taupunktunterschreitung zur Folge hat, vor allem in großen historischen Bauwerken mit mächtigem Mauerwerk vorgefunden. Die Gefahr der Kondensation wird weniger durch die Feuchteabgabe der

Besucher als vielmehr durch den erhöhten Luftwechsel bei frühsommerlichem Besucherverkehr gefördert.

Eine Abschätzung der Gefahr des Tauwasserausfalls an der Bauteiloberfläche kann anschaulich in Bild [7] bei der Betrachtung der Temperaturverläufe der

- Oberflächentemperatur
- Taupunkttemperatur

durchgeführt werden.

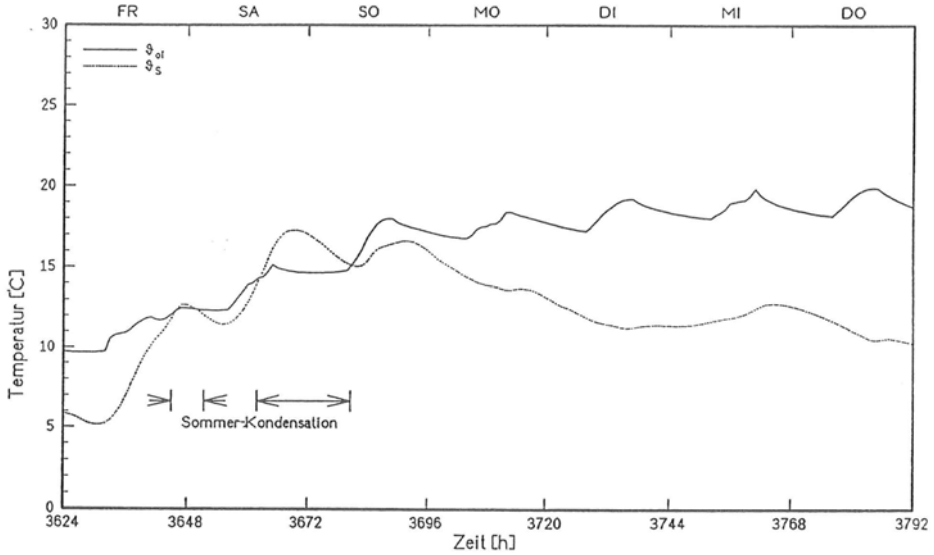

Bild 7 Luft- und Taupunkttemperaturverlauf, Kondensationsgefahr Woche Juni

Zu Beginn der Simulation kommt es hier im Juni zu einer Kondensation, da die Oberflächentemperatur der Wand unter die Taupunkttemperatur der Raumluft absinkt. Gefährdete Bereiche liegen auch jeweils Mitte Juni, Juli und August vor.

6 Simulationsrechnungen für den Winterfall

Für eine Beurteilung des Winterfalls mit Beheizung wurden 3 Außenklima-Zustände berücksichtigt:

- KALT - kalter Wintertag ($\vartheta \approx$ - 4 °C)
- NORMAL - Wintertag mittlerer Temperatur ($\vartheta \approx$ + 2 °C)
- WARM - warmer Wintertag ($\vartheta \approx$ + 6 °C)

Es wurde nicht versucht in jedem Fall (also auch bei extrem niedrigen Außentemperaturen) eine ausreichende Beheizung in allen Zonen zu garantieren.

Als Maßgabe wurde daher der Klimazustand NORMAL zugrunde gelegt.
Die Basis der Untersuchungen bildet hierbei das Gebäude mit der angesetzten Nutzung, jedoch ohne Einflussnahme (Heizung) auf das Raumklima (Bilder [8] und [9]).

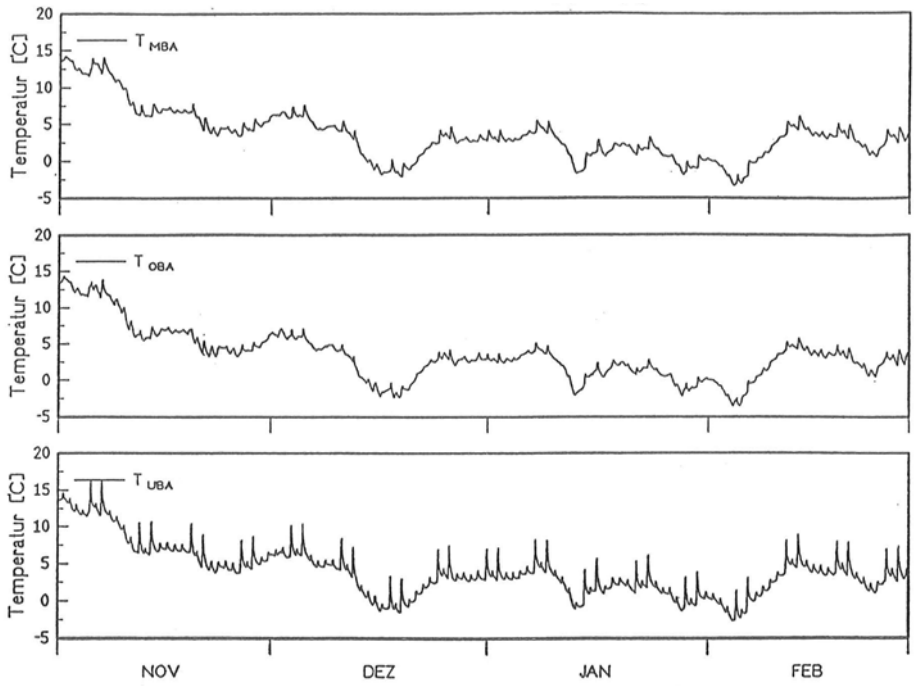

Bild 8 Temperaturverlauf in den Besucherzonen

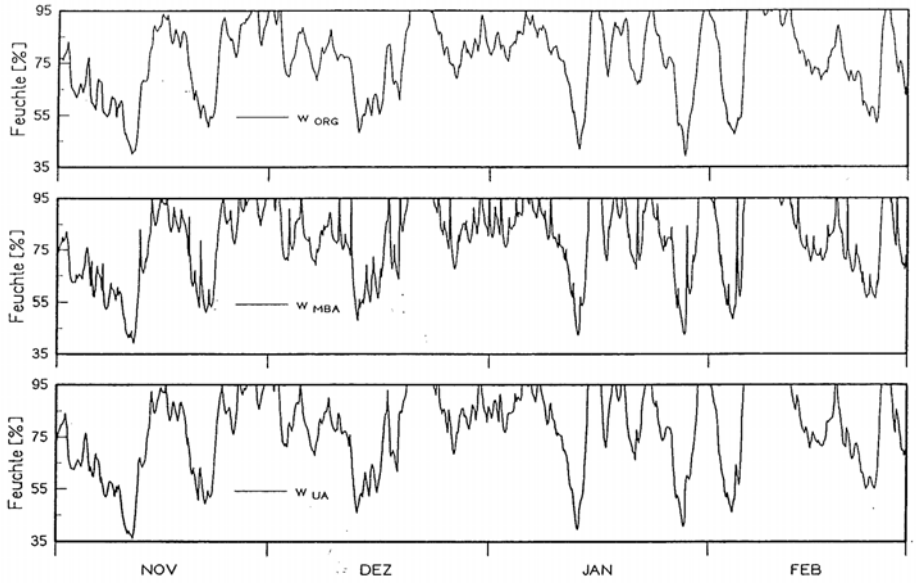

Bild 9 Feuchteverlauf im Bereich der feuchtegefährdeten Bauteile

Allgemein können die Ergebnisse wie folgt beschrieben werden:

Die Raumlufttemperaturen im Erdgeschoss Uxx folgen in ihrer Schwingung dem Verlauf der Außenlufttemperaturen. Deutlich ist eine Phasenverschiebung und Amplitudendämpfung, bedingt durch die Wärmespeicherfähigkeit der Baustoffe des massigen Baukörpers zu erkennen.

Die Berechnungen zeigen, dass die Temperaturänderungen sowie die rel. Luftfeuchten erheblich von den zulässigen Grenzwerten abweichen. Schäden der Einbauten sowie des Baukörpers sind hierbei nicht auszuschließen.

6.1 Betrachtungen von unterschiedlichen Heizsystemen

Hierbei sollte die Frage beantwortet werden, inwieweit die Wahl des Heizungssystems und die thermische und hygrische Regelung der Systeme das Raumklima in großen Räumen beeinflussen kann, um den Vorgaben gerecht zu werden.

Bei den Untersuchungen wurden die für Kirchenräume gängigsten Heizungssysteme untersucht. Hierbei wurden in Absprache mit den Beteiligten folgende Systeme betrachtet:

Bankheizung

Bei der Simulation einer Bankheizung wurden die Zonen UBA, MBA und OBA beheizt. Hierbei wurde eine maximale Heizleistung von 350 W/lfdm Bankreihe angesetzt.

Fußbodenheizung

Die Fußbodenheizung wurde in den Zonen UBA, UFB und (zur Hälfte) in UA berücksichtigt. Als Heizleistung wurden 100 W/m² zugrunde gelegt.

Plattenheizkörper

In den Zonen MBA und OBA (Emporen) wurden einzelne Plattenheizkörper angesetzt. Als Heizleistung wurden 4 kW/m² angesetzt.

Warmluftheizung

Bei diesem Heizungssystem wurden im Kirchenraum (UFB) vier Ausblasöffnungen mit je 16570 W und im Altarbereich (UA) eine mit 8344 W angeordnet. Hier ist besonders zu berücksichtigen, dass sich aufgrund der Ausblasgeschwindigkeit der Luftaustausch zwischen den einzelnen Zonen erhöht.

6.1.1 Kombination der Heizungssysteme

Es wurden die Kombinationen der Heizungssysteme, wie in Tabelle I dargestellt, berücksichtigt. Im Folgenden werden beispielhaft die Heizsysteme 'Bankheizung' und 'Konvektor-HZ & Bankheizung' näher dargestellt.

	Fußboden-HZ & Plattenheizkörper	Bankheizung	Konvektor-HZ & Bankheizung	Fußboden-HZ & Bankheizung
	F	B	----	F
UFB	F	----	K	F
UA	F	----	K	F
MBA	P	B	B	B
OBA	P	B	B	B

Tabelle I Kombination der Heizungssysteme

6.1.2 Bankheizung

Dieses Heizungssystem sieht in jeder Ebene eine Bankheizung in allen Sitzreihen vor.

Um den Anforderungen an die Bauteile sowie an die Ausstattung gerecht zu werden, ist eine thermische und hygrische Regelung der Heizungsanlagen bei den Berechnungen angesetzt worden. Eine rein thermische Regelung ist nicht ausreichend!

In Bild 10 ist der Temperaturverlauf in den Bankreihen bei einem Außenklima-Zustand 'Normal' aufgetragen. Bei dieser Kombination beträgt die Aufheizphase 5 Std. Es ist damit zu rechnen, dass an kalten Tagen die angestrebten Temperaturen nicht ganz erreicht werden!

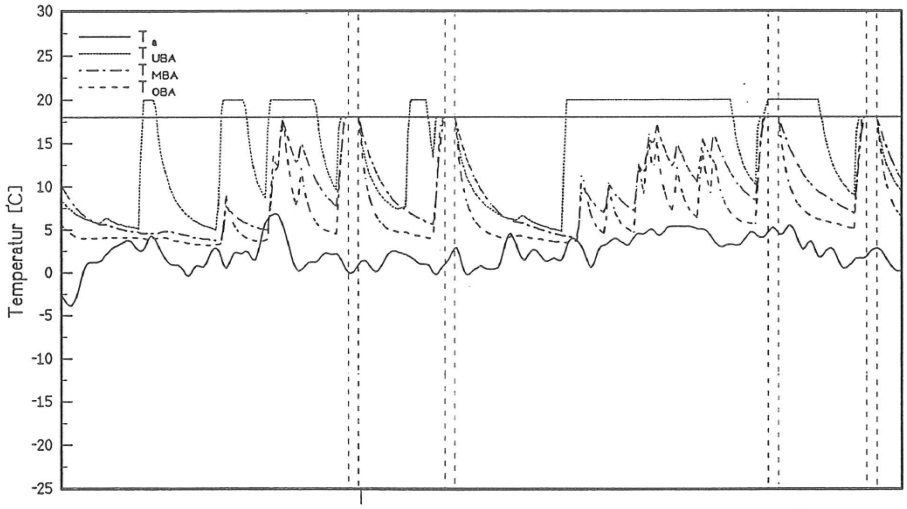

Bild 10 Zweiwöchiger Temperaturverlauf in den Besucherzonen

Die Ergebnisse zeigen, dass die Vorgaben bzgl. der Einrichtungsgegenstände im Wesentlichen eingehalten werden können.
Beispielhaft ist in Bild [11] der Bereich MA des klimaempfindlichen Holzaltares dargestellt. Hier wird deutlich, dass eine Regelung ausschließlich über die Bankheizung nicht sinnfällig ist.

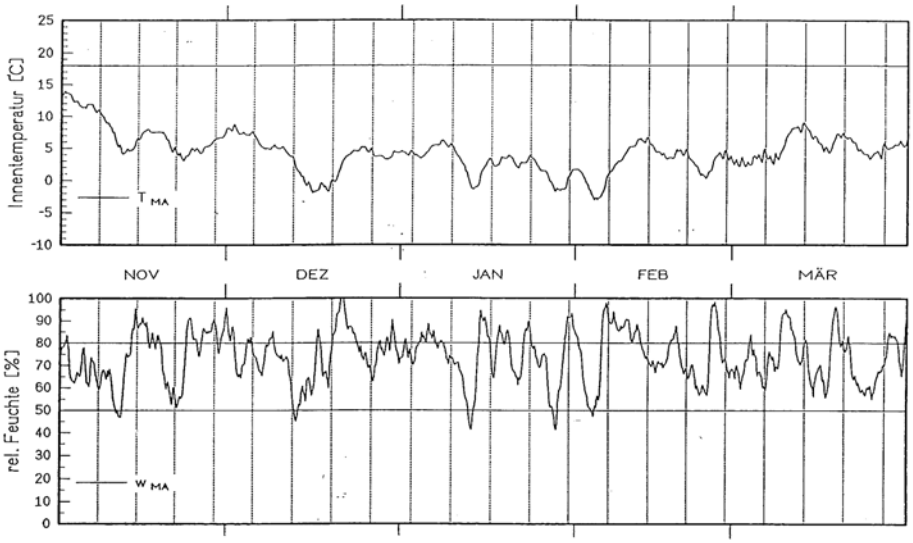

Bild 11 Temperatur- und Feuchteverlauf Mitte Altar (MA)

6.1.3 Konvektorheizung & Bankheizung

Diese Kombination berücksichtigt unten eine Konvektor- und in den Emporen eine Bankheizung.

Bei dieser Kombination beginnt die Aufheizphase ca. 6 Std. vor Konzertbeginn. In diesem Fall ist am wenigsten damit zu rechnen, dass an kalten Tagen die angestrebten Temperaturen nicht erreicht werden (vgl. Bild 12).

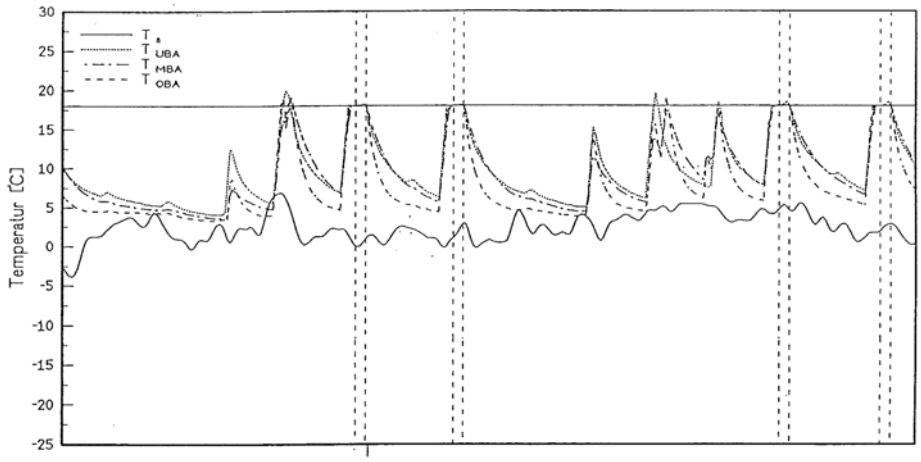

Bild 12 Zweiwöchiger Temperaturverlauf in den Besucherzonen

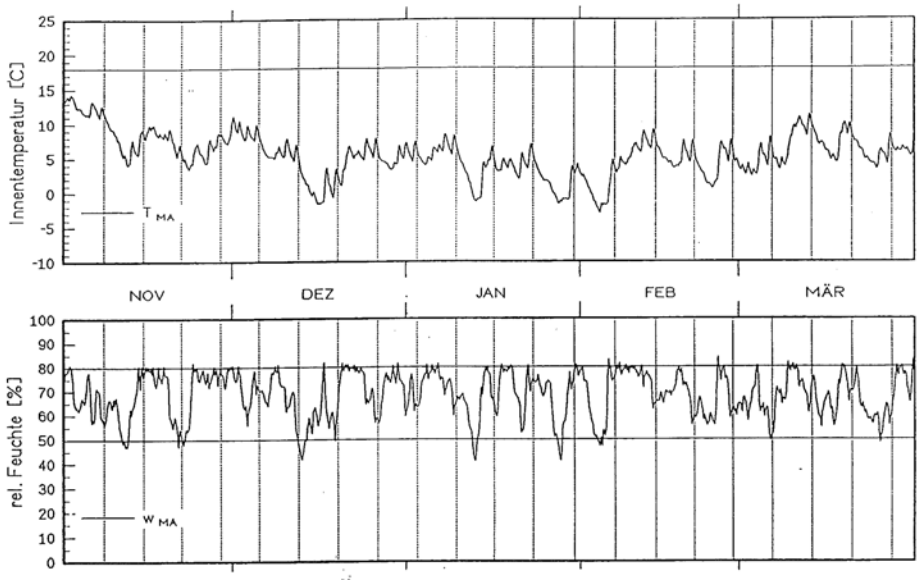

Bild 13 Temperatur- und Feuchteverlauf Mitte Altar (MA)

Die Ergebnisse zeigen, dass die Vorgaben, bedingt durch die thermische und hygrische Steuerung weitestgehend eingehalten werden können. Die in Bild 13 dargestellte Zone MA zeigt im Vergleich mit Bild 11 einen deutlich günstigeren Verlauf, der einzig in der Art des Heizungssystems zu sehen ist.

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, im Unterschied zum unbeheizten Fall, dass die Temperaturänderungen (ϑ ±1 K/h) sowie die abs. Temperaturen (max + 20°C) den Vorgaben entsprechen.

Die Vorgaben an die Regelung der Heizungsanlagen zeigen, dass es möglich wird die rel. Feuchten so zu regeln, dass sie in den unkritischen Bereichen (30/50 < φ < 80 %) verbleiben.

6.1.4 Bewertung der anderen Heizsysteme

Fußbodenheizung & Plattenheizkörper

Die Berechnungen zeigen, dass 6 Std. vor Konzertbeginn mit Beginn der Aufheizphase am Freitagabend die angestrebten Raumlufttemperaturen in den Besucherzonen erreicht werden können.
An kalten Tagen ist damit zu rechnen, dass die angestrebten Temperaturen nicht ganz erreicht werden können.

Fußbodenheizung & Bankheizung

Bei dieser Kombination beträgt die Aufheizphase ca. 6 Stunden. Auch in diesem Fall muss davon ausgegangen werden, dass an kalten Tagen die angestrebten Temperaturen nicht ganz erreicht werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Vorgaben, bedingt durch die thermische und hygrische Steuerung i. A. eingehalten werden können.

6.1.5 Bestimmung des Heizwärmebedarfs

Bei einer Betrachtung über den Jahreszyklus zeigt sich, dass auch in den Übergangszeiten, Frühjahr und Herbst, Heizenergien erforderlich werden, um zum einen die Behaglichkeitskriterien und zum anderen die Anforderungen an die Sicherheit der Bauteile zu gewährleisten.

In Tabelle II ist der Gesamtenergiebedarf der unterschiedlichen Kombinationen dargestellt.

	Fußboden-HZ & Plattenheizkörper	Bankheizung	Konvektor-HZ & Bankheizung	Fußboden-HZ & Bankheizung
UBA	7.462	15.879	----	7.501
UFB	12.008	----	17.575	12.049
UA	2.661	----	4.454	2.664
MBA	9.444	10.043	10.329	9.516
OBA	7.980	8.101	7.305	7.759
	39.555	18.144	39.663	39.489

Tabelle II Gesamtenergiebedarf für die untersuchten Kombinationen

Der Energiebedarf der Fußbodenheizung mit Plattenheizkörper, der Konvektor-/ Bankheizung und der Fußboden-/ Bankheizung zeigen keine Unterschiede. Der geringste Energiebedarf wird beim Einsatz einer reinen Bankheizung erreicht; wobei hier, wie oben gezeigt, die geforderten Grenzwerte nicht eingehalten werden können.

6.1.6 Kondensationsgefahr im Winter

In Bild [14] ist einerseits die Taupunkttemperatur der Luft, andererseits die Oberflächentemperatur der Bauteile im ebenen Bereich aufgetragen.
Es zeigt sich bei den Berechnungen, dass die Oberflächentemperaturen im Bereich der Wärmebrücken der Blasii Kirche, wie z.B. Außenkante, Sockel, Anschluss an Dach/Gewölbe, Fensterlaibung i. A.

5 - 7.5 K

unterhalb der Oberflächentemperatur des Bauteiles im ebenen Bereich liegen.
Der gefährdete Bereich einer Taupunktunterschreitung des Bauteiles im Bereich von Wärmebrücken (WB) ist ergänzend in Bild [14] dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass in einigen Perioden auch im ebenen Bereich annähernd eine Kondensationsgefahr besteht. In Bereichen der Wärmebrücken ist mit einer erhöhten Gefahr zu rechnen.

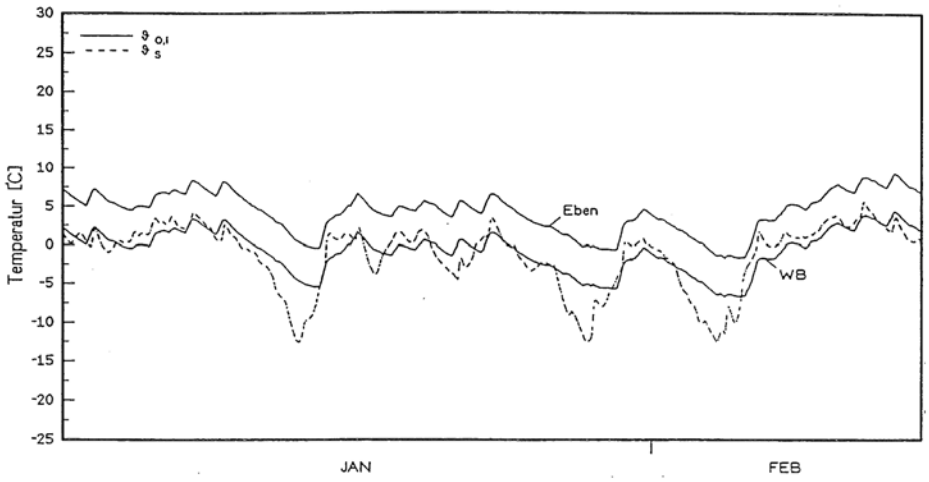

Bild 14 Kondensationsgefahr im Winter

7 Zusammenfassung

Historische Gebäude waren von jeher nur für eine bedingte Beheizung ausgelegt.
Unter einem, sich im Jahreszyklus wechselnden Außenklimates war das Innenklima bestrebt sich mit dem Außenklima auszugleichen. Unter diesen Voraussetzungen sind nicht nur die Bausubstanz sondern auch die Einrichtungsgegenstände nahezu unversehrt erhalten geblieben. Steigende Komfortansprüche der Besucher und der Anspruch des Menschen auf eine hohe Behaglichkeit in Räumen, führten zum Einsatz von Heizungssystemen in historischen Gebäuden, die nun wieder die Gebäude, aber auch in erheblichen Maße die räumliche Ausstattung belasten und zu Schäden führen können.

Eine Vorausschau auf zu erwartende Schäden war bislang nur bedingt möglich. Mit Hilfe der Simulationsrechnungen kann eine Bewertung der künftigen Situation bzgl. der Gefahr möglicher Schäden an der Raumschale vorgenommen werden. Mit diesem Verfahren wurde das von der Stiftung Deutscher Denkmalschutz finanzierte Projekt der Umwandlung der St. Blasii Kirche in Quedlinburg zu einer Konzert- und Versammlungsstätte untersucht, um in Hinblick auf Art und Regelung von

unterschiedlichsten Heizungssystem Aussagen über Wirkweisen und Auswirkungen schon im Vorfeld der Maßnahme treffen zu können. Hierbei wurden die Eingabedaten aufgrund einer zweiwöchigen Vergleichsmessung geeicht. Die Ergebnisse zeigen gute Übereinstimmungen.

Sommerfall:

Zu Beginn der Simulation kommt es u. a. im Juni zu einer Kondensation, da die Oberflächentemperatur der Wand unter die Taupunkttemperatur der Raumluft absinkt. Gefährdete Bereiche liegen auch jeweils Mitte Juni, Juli und August vor.

Winterfall:

Hierbei sollte die Frage beantwortet werden, inwieweit die Wahl des Heizungssystems und die thermische und hygrische Regelung der Systeme das Raumklima in großen Räumen beeinflussen kann, um den Vorgaben gerecht zu werden.
Bei den Untersuchungen wurden die für Kirchenräume gängigsten Heizungssysteme untersucht. Hierbei wurden in Absprache mit den Beteiligten folgende Systeme betrachtet:

- Bankheizung
- Fußbodenheizung
- Plattenheizkörper
- Warmluft-Konvektorheizung

Die Ergebnisse zeigen, dass die Vorgaben, nur mit einer thermischen und hygrischen Steuerung eingehalten werden können.
Der Energiebedarf der Fußbodenheizung mit Plattenheizkörper sowie der Konvektor-/ Bankheizung und der Fußboden-/ Bankheizung zeigen keine Unterschiede. Der geringste Energiebedarf wird beim Einsatz einer reinen Bankheizung erreicht, hierbei ist jedoch zu beachten, dass eine ausreichende Regelung der thermischen und hygrischen Anforderungen nicht erreicht werden kann.

In Hinblick auf die Einhaltung der geforderten Grenzwerte zeigt sich das reine Bankheizungssystem als nicht ausreichend. Alle anderen Systeme sind annähernd gleichwertig zu betrachten.
Als erster Vorschlag sollte somit im unteren Bereich entweder eine Fußboden- oder eine Konvektorheizung eingebaut werden. Der Vorteil dieser Systeme ist zum einen die größere Flexibilität der Bestuhlung, zum anderen eine ausreichende Regelung der Luftfeuchten in den gefährdeten Bereichen.
Für die Emporen empfiehlt sich das Bankheizungssystem.
Es ist erforderlich die Heizintervalle in Abhängigkeit der Außen-/Innentemperatur sowie der rel. Feuchte in ausgewählten, besonderen Zonen des Kirchenschiffes im gesamten Jahresverlauf zu regeln.

Berechnungen zeigen, dass die Oberflächentemperaturen im Bereich der Wärmebrücken der St.-Blasii-Kirche, wie z.B. Außenkante, Sockel, Anschluss an Dach/Gewölbe, Fensterlaibung i. A. 5 - 7.5 K unterhalb der Oberflächentemperatur des Bauteiles im ebenen Bereich liegen. Dieses kann besonders in Wärmebrückenbereichen zu Unterschreitungen der Taupunkttemperatur führen.