

- Schimmelpilzmessungen
- Raumklimaanalysen, Schadstoffmessungen
- zerstörungsfreie dreidimensionale Feuchtemessung an Gebäuden
- Messung elektromagnetischer Felder
- Sanierungskonzeptionen

Lebus, den 28.05.2007

Machbarkeitsstudie zur thermischen Konservierung der Wandmalereien im Beinhaus am Münster Doberan

Objekt : Beinhaus am Münster in Doberan, freistehend

Anschrift : Münster Bad Doberan
Beinhaus
18209 Bad Doberan

Auftraggeber : Herr Ingo Rhein
radia-therm.de

Untersuchungsauftrag : 1. Erörterung der Möglichkeiten und Grenzen zur Konservierung der historischen Bausubstanz des Beinhauses in Doberan durch den Einsatz von Sockelheizleisten.
2. Bewertung der Führungsgröße -Wandoberflächenfeuchte- zur Regelung der Sockelheizungsanlage

Der Untersuchungsbericht wurde am 28.05.2007 erstellt und umfasst 8 Seiten einschließlich dem Deckblatt.

Inhaltsübersicht:

1. Aufgabenstellung
2. Bauliche Grundlagen vor Ort
3. Messergebnisse Raumklimaanalyse / Materialfeuchteanalyse
4. Bemessung, Wirkung und Energiebedarf eines Sockelleistenheizsystems



1. Aufgabenstellung:

Aufgabe dieser Studie ist es einen Lösungsvorschlag aufzuzeigen, die zu schützende Bausubstanz und die Wandmalereien des Beinhauses vor weiteren Zerstörungen durch Feuchtigkeits- und Salzeinwirkungen weitestgehend zu schützen.

Dabei sollen die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes eines Wandtemperiersystems (Sockelheizleisten, elektrisch betrieben) dargestellt werden. Gleichzeitig soll dargelegt werden, mit welcher Führungsgröße eine solche Sockelleistenheizung objektspezifisch betrieben werden kann.

2. Bauliche Grundlagen vor Ort:

Bei dem zu konservierenden Gebäude handelt es sich um das Beinhaus des Münsters Doberan. Es wurde in Vollziegel- Wandbauweise errichtet, besitzt sieben Bleiverglaste Fenster und eine nach Westen gerichtete Außentür. Die Dacheindeckung besteht aus gefalzten Blechen die mit einem geringen Dachüberstand über eine Dachrinne mittels Speiern entwässert wird. Die Außenfassade des Beinhauses besteht aus gebrannten Klinkerziegeln unbekannter Dichte und Zusammensetzung, zum Teil glasiert. Im Innenbereich sind die Außenwände mit einem Kalkputz unbekannter Zusammensetzung verputzt. Auf diesen Putzflächen sind zu erhaltende Wandmalereien mit einer Farbschicht unbekannter Zusammensetzung aufgebracht. Die innenseitigen Putzflächen der Außenwände sind von erheblichen Ausblühungen und Absprengungen durch bauschädliche Salze betroffen.

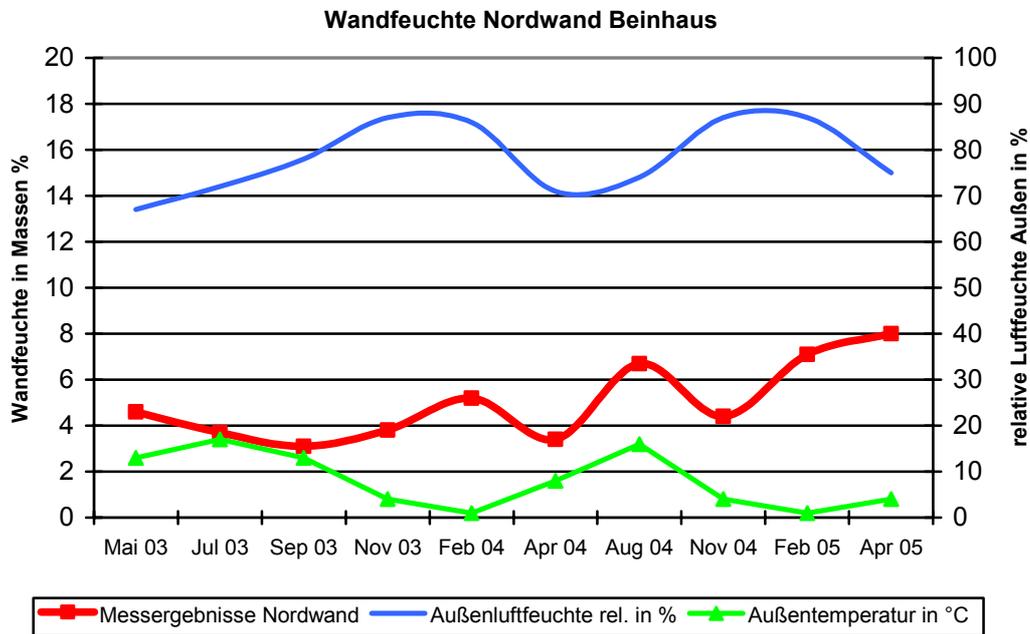
3. Untersuchungsergebnisse Raumklimaanalyse und Materialfeuchteanalyse :

Raumklima Messergebnisse:

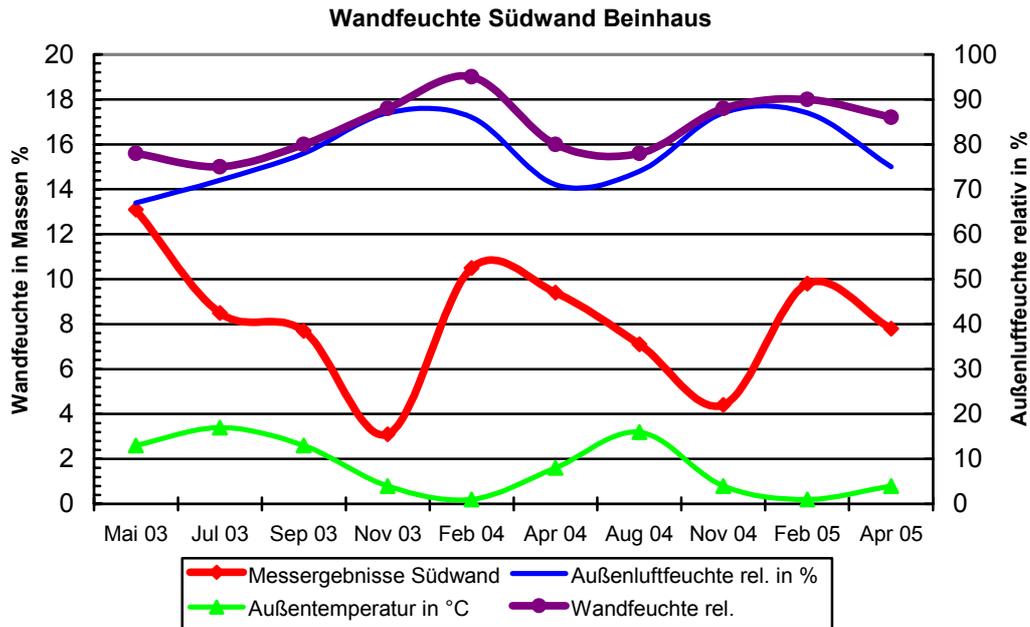
Da das Objekt nicht persönlich vom Autor untersucht wurde, werden im nachfolgenden die zur Verfügung stehenden Messergebnisse des Sachverständigen Kollegen Herrn Dipl.- Ing. (FH) Detlef Krause - Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für das Holz- und Bautenschutzgewerbe -, sowie Jahressgänge des Außenklimas verwendet.

Die Untersuchungen des Kollegen ergaben im Bereich der Süd- und Nordaußenwände in einer Höhe von 1 m über dem Fußboden im Innenbereich eine stark schwankende Materialfeuchtigkeit in den Wänden.

Aus den graphisch dargestellten Messergebnissen der Wandfeuchtemessung mittels Darr- Methode ist deutlich zu erkennen, das sich die Nord- und Südwand unterschiedlich in ihrem Feuchteverhalten zeigen.



Die Nordwand zeigt im Zeitraum vom Mai 2003 bis zum April 2005 einen Feuchteverlauf der mit der zu erwartenden Wandoberflächenfeuchte (bedingt durch Absorption aus der Raumluft) gut übereinstimmt. Die ungewöhnliche Erhöhung des Messwertes im August 2004 ist jedoch nicht sicher durch Außenklimabedingte Kondensation erklärbar. Mögliche Ursachen für diese auffällige Abweichung vom Klimabedingt zu erwartenden Verlauf sind eine evtl. Änderung der Belüftung des Hauses, der Abdichtung der Fenster oder der Eingangstür, Inhomogenitäten im Wandmaterial sowie verfahrensbedingte Ungenauigkeiten der Messung. Insgesamt lässt sich jedoch im Trend eine geringfügige Anreicherung der Wandfeuchte über den Messzeitraum von Mai 2003 bis April 2005 in der Nordwand erkennen. Dieser Trend ist abgeschwächt auch bei den Messwerten an der Südwand zu erkennen. Eine wahrscheinliche Erklärung dieses Umstandes liegt im besonderen Sommer 2003. Laut Angaben des Deutschen Wetterdienstes war der Sommer 2003 der wärmste seit Beginn der Wetterdatenaufzeichnung in Deutschland 1901. Alle 3 Sommermonate waren erheblich zu warm, die mittlere Tagestemperatur lag um 3,4 °C über dem langjährigen Mittel. Weiterhin waren die Niederschlagsmengen im Frühjahr und im Sommer 2003 überdurchschnittlich gering, sowie die Verdunstungsmenge des Oberflächenwassers überdurchschnittlich hoch.



Die Südwand zeigt im Zeitraum vom Mai 2003 bis zum April 2005 einen Feuchteverlauf der mit der relativen Wandoberflächenfeuchte (bedingt durch Absorption aus der Raumluft) sehr gut übereinstimmt. Durch das große Wärmebeharrungsvermögen der massiven Außenwände ergibt sich eine verstärkte Kondensation von Raumluftfeuchtigkeit an den noch kühlen Außenwänden im Gebäudeinneren. Dies ist an der Zeitverschiebung der Kurvenverläufe der Wandfeuchte (rote Linie) zur Außentemperatur (grüne Linie) klar zu erkennen. Die durch die Masse des Gebäudes bewirkte Nachlaufzeit der Wandfeuchte gegenüber den sich verändernden Außenklimabedingungen beträgt ca. 1-2 Monate.

Die typische Ausgleichsfeuchte historischer Ziegel liegt laut Angaben der WTA (Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.) bei ca. 2 bis 3 Massen % (bei einer rel. Luftfeuchte von 75 %)

Im Zeitraum November 2003 und November 2004 (bei einer rel. Luftfeuchte von ca. 87 %) erreicht die Südwand somit durchaus realistische Werte für eine normal trockene Ziegelwand.

Die Werte der Nordaußenwand liegen in dem genannten Zeitfenster ebenfalls noch im Bereich der anzustrebenden Ausgleichsfeuchte von historischem Ziegelmauerwerk. Die insgesamt höheren Werte an der Nordwand gegenüber der Südwand sind typischerweise durch die unterschiedlichen von der Sonne eingestrahlten Energiemengen zu erklären. Auf die Südwand werden pro Jahr ca. 270 kWh/m² solare Wärmeenergie eingestrahlt, die Nordwand eines freistehenden Gebäudes erhält jedoch nur ca. 100 kWh/m² pro Jahr Solarenergieeinstrahlung.

Weiterhin wurden vom Kollegen Krause die Salzgehalte des Mauerwerkes bestimmt.

Bei den Nitratsalzen sind die Messwerte im Innen- und Außenbereich vergleichbar, jedoch in beiden Fällen zu hoch (laut WTA Bewertungstabelle 8).

Nitratsalze können in Kalkschichten aus Stickoxiden der Außenluft (Verbrennungsgase –nitrose Gase) sowie auch z.B. durch Tierexkremte, Reinigungsmittel oder Düngemittel entstehen.

Bei den Chloriden unterscheiden sich die Messwerte im Innen- und Außenbereich nicht, liegen jedoch im Bereich einer mittleren Belastung (laut WTA Bewertungstabelle 8).

Chloridsalze entstehen z.B. durch die Reaktion von NaCl (Streusalz) mit Bestandteilen von Kalkschichten.

Bei den Sulfaten weichen die Messwerte jedoch stark im Innen- und Außenbereich voneinander ab. Die Salzbelastung durch Sulfate im Außenbereich liegt ca. doppelt so hoch wie im Innenbereich, sie sind jedoch in beiden Fällen zu hoch (laut WTA - Bewertungstabelle 8).

Sulfatsalze können im Mauerwerk und in Kalkschichten durch die für die Ziegelherstellung verwendeten Rohstoffe, sowie durch Schwefeldi- und trioxide aus der Außenluft durch Verbrennungsprozesse (vornehmlich Kohleverbrennung, Ölverbrennung) entstehen. Da die Schwefeloxide der Außenluft durch den Regen gelöst und ausgewaschen werden (saurer Regen) gelangen sie auch verstärkt über Schlagregen und Sickerwasser an die Außenhülle eines Bauwerkes.

Da bauschädliche Salze bei der Abtrocknung des Wandbaustoffes auskristallisieren, entwickeln sie eine starke Sprengwirkung durch Volumenvergrößerung die zum Zermürben und Absprengen der Wandschichten führen können.

Um diesen Prozess zu stoppen bzw. zu verringern muss der immer wiederkehrende Wechsel von Feuchtigkeitsaufnahme und Feuchtigkeitsabnahme im betroffenen Wandbauteil unterbunden werden. Eine zerstörungsfreie Entfernung der Salze aus der Wandkonstruktion ist sowohl aus konservatorischen Gründen als auch aus technischen Gründen nur schwer bis überhaupt nicht möglich. Deshalb sollte die Möglichkeit einer dem Gebäude angepassten Temperierung der Wandflächen erwogen werden, um die verstärkte Feuchtigkeitsaufnahme der Wände im Frühjahr durch Kondensation (siehe Diagramme oben) zu verhindern.

Um einen mikrobiellen Befall der Wände sicher zu verhindern, ist durchgängig eine relative Wandoberflächenfeuchte von 70 % ($a_{\text{wand}} = 0,7$) nicht zu überschreiten.

4. Bemessung, Wirkung und Energiebedarf eines Sockelleistenheizsystems

Um die oben dargestellten Forderungen nach einer ausreichenden Temperierung der Außenwände zu erfüllen, besteht die Möglichkeit z.B. elektrisch beheizte Sockelheizleisten umlaufend an den Innenseiten der Außenwände zu montieren.

Die Wirkung eines Wandtemperierheizsystems beruht unter anderem auf dem Coandaeffekt. Durch die in einer Verkleidung montierten Sockelheizleisten wird die durch die Heizleistenverkleidung angesaugte Raumluft erwärmt und bewegt sich als ca. 5 cm starker Warmluftschleier an den Außenwänden nach oben. Während dieses Strömungsvorganges gibt die aufgeheizte Luft ihre Wärme an die Wandoberfläche ab und erwärmt diese an ihrer Oberfläche. Diese Warmluftströmung reicht bis in eine Höhe von ca. 2 bis 2,5 m. In dieser Höhe haben sich Warmluft und Wandoberfläche in ihren Temperaturen angeglichen. Die Heizluft bewegt sich während des Wärmeübertragungsvorganges in einer wirbelförmigen Bahn ca. 5 bis 20 cm vor der Wandfläche auf- und danach wieder abwärts. Durch diesen begrenzten Strömungsbereich bleibt die restliche Luft des Raumes unberührt und bewegt sich nicht, so dass keine Staubaufwirbelungen aus dem Fußbodenbereich erfolgen.

Die Erwärmung der höher gelegenen Wandbauteile des Raumes erfolgt dann unmittelbar mittels Strahlungsaustausch der Hüllflächen durch Infrarotstrahlung. Die durch diese Art von Heizsystem entstehenden Temperaturgradienten (Temperaturdifferenzen) innerhalb des Raumes sind gegenüber anderen Heizsystemen (z.B. Heizkörper oder Warmluftheizungen) nur sehr gering.

Durch die Erwärmung der Außenwände sinkt gleichzeitig die relative Wandoberflächenfeuchte, welche sich durch die Wandtemperatur und die an die Wand angrenzende relative Raumluftfeuchtigkeit bestimmt. Da die Wasserdampfaufnahme eines Materials durch die Sorption

bestimmt wird, ergibt sich bei einer geringeren relativen Wandoberflächenfeuchte auch eine geringere Aufnahme von Wasserdampf aus der Raumluft.

Durch einen kontinuierlichen und angepassten Betrieb der Sockelleistenheizung an die klimatischen Randbedingungen des Gebäudes ist somit ein neuer Gleichgewichtszustand der Wandbaustoffe auf einem deutlich niedrigeren Feuchteniveau erzielbar. Dadurch wird der Vorgang der Wasseraufnahme und Wasserabgabe der in den Wänden vorhandenen bauschädlichen Salze mit ihren bekannten und zu vermeidenden Zerstörungspotentialen deutlich behindert.

Aus den dem Autor vorliegenden Datenmaterial lässt sich eine Feuchteaufnahme der Außenwände durch aufsteigende Feuchtigkeit aus dem Erdreich nicht sicher ausschließen. Dieser Feuchteaufnahmevorgang wird ebenfalls durch eine korrekt betriebene Sockelleistenheizung behindert. Auf Grund der hohen Wandstärke der Außenwände (85 cm) ist dieser Vorgang jedoch bei evtl. nicht funktionsfähiger Horizontalsperre nicht sicher im Außenbereich der Wände zu unterbinden. Die vorliegenden Messwerte deuten zumindest im Bereich der Südwand jedoch an, dass aufsteigende Feuchte nicht ursächlich für den hohen Feuchtegehalt der Wand ist.

Grundsätzliche Voraussetzung für das Funktionieren einer Wandtemperierung in dem hier dargelegten Fall ist jedoch eine möglichst geringe Luftwechselrate in dem Gebäude. Eventuell vorhandene Undichtigkeiten des Gebäudes wie z.B. defekte Fenster, Eingangstüren oder Risse an Bauteilfugen sind unbedingt zu vermeiden.

Dimensionierung und Betriebsweise der Sockelleistenheizung

Im nachfolgenden Bemessungsvorschlag wird davon ausgegangen, dass das Gebäude nicht zu musealen Zwecken mit größeren Besucherzahlen und oftmaligem Luftaustausch (Türöffnungsvorgänge) vorgesehen ist.

Um ein Absinken der Raumtemperatur auf Werte unterhalb von $+10\text{ °C}$ zu verhindern ist eine Heizlast laut DIN EN 12831 von ca. 3400 Watt zu installieren.

Als Führungsgröße zur Leistungsregelung der Anlage wird hier die relative Wandoberflächenfeuchte der Innenseite der Außenwände empfohlen. Diese ungewöhnliche Art der Leistungsregelung zielt darauf ab, die Sorptionsfähigkeit der Außenwände möglichst sicher im unkritischen Bereich zu halten. Die sich dadurch einstellende Raumtemperatur bewegt sich somit gleitend entsprechend der Bausubstanz und dem Außenklima. Das hat den Vorteil, dass die durch Temperaturdifferenzen (Wärmedehnung) verursachten Spannungen im Material gering gehalten werden und zum weiteren ist damit eine geringere Heizenergiemenge erforderlich im Vergleich zu einer Raumtemperaturgeführten Betriebsweise. Dadurch lassen sich die Betriebskosten der Anlage und somit auch die Umweltbelastung gering halten.

Zum korrekten Betrieb der Anlage sind mindestens ein kombinierter Sensor (Lufttemperatur und relative Feuchte) an der Nordwand in ca. 1,0 m Höhe zu installieren, sowie ein Sensor (relative Feuchte) hinter dem Altar in ca. 0,5 m Höhe. Diese Sensoren müssen die Raumlufttemperatur sowie die relative Feuchte an der Wandoberfläche erfassen können. Auf Grund der eventuell unterschiedlichen (unbekannten) Salzbelastungen der verschiedenen Außenwände ist jedoch der Einsatz von 2 zusätzlichen Sensoren zur Ermittlung der relativen Wandoberflächenfeuchte als spätere Option zu erwägen. Die an die Sensoren angeschlossene Regelung sollte durch einen programmierbaren Mikroprozessor realisiert werden. Das bietet die wichtige Möglichkeit die verschiedenen Sensoren gleichzeitig auszuwerten und die Anlage je nach der jeweils kritischsten Wandfläche zu steuern.

Weiterhin bietet sich dadurch die Möglichkeit, die Heizungsanlage nach Bedarf auch als Raumtemperaturgeführte Anlage zu betreiben, sollten es die Nutzungsbedingungen des Gebäudes erforderlich machen.

Der empfohlene Zeitpunkt zur erstmaligen Inbetriebnahme der Sockelleistentemperierung liegt im Monat Oktober / November. Zu diesem Zeitpunkt hat die Wandkonstruktion den geringsten Wassergehalt, bedingt durch den Verlauf des Außenklimas (siehe Graphik Südwand), schon erreicht.

Ein Betrieb der Anlage nur mit Nachtstrom (wegen des preiswerteren Stromtarifes) ist jedoch aus Gründen der nicht kontinuierlichen Betriebsweise abzulehnen.

Die Energiemengen die zur Nutzung der Anlage bestimmungsgemäß aufzubringen sind betragen je nach Nutzungsart:

- Führungsgröße Oberflächenfeuchte der Wände:

ca. 3200 – 4000 kWh pro Jahr

(entspricht nach Tarif Eon-edis 2007 ca. 600 – 750 € pro Jahr)

- Führungsgröße Raumtemperatur konstant 15 °C:

(für diese Betriebsgröße sind jedoch ca. 5300 Watt Heizleistung erforderlich!)

ca. 7000 – 7400 kWh pro Jahr

(entspricht nach Tarif Eon-edis 2007 ca. 1330 – 1400 € pro Jahr)

Die oben gemachten Angaben sind nur als Anhaltswerte zu interpretieren, da die Salz- und Feuchteverteilung in den Außenwänden (Profil) unbekannt ist. Weiterhin ist im Jahr 1 und 2 nach der Inbetriebnahme mit höheren Energiemengen zu rechnen, da das Gesamtobjekt einen neuen Gleichgewichtszustand anstreben wird.

Abschließend muss jedoch erwähnt werden, dass bei Inbetriebnahme der Heizungsanlage die Wandfeuchte weiter abnehmen wird und dadurch bis zum Einpegeln eines neuen Gleichgewichtszustandes evtl. mit weiteren Salzausblühungen zu rechnen ist. Da das Verhalten bauschädlicher Salze im Zusammenhang mit den Witterungseinflüssen an einer Außenwand (Schlagregen, aufsteigende Feuchte aus dem Erdreich) einem äußerst komplexen chemischen und physikalischen Wechselwirkungsprozeß unterliegt, sind einhundertprozentige Voraussagen in der Realität nicht möglich. Diese Randbedingungen gelten jedoch für alle zur Zeit im Bausektor bekannten und eingesetzten Verfahren zur Konservierung.

Die thermische Konservierung von historischer Bausubstanz ist ein seit mehr als 27 Jahren mittlerweile weltweit angewandtes erfolgreiches Verfahren. Dem Autor selbst sind aus seiner eigenen Berufserfahrung und aus der wissenschaftlichen Literatur keine Fälle von völligem Versagen dieser Methode bekannt.

Für weitere Rückfragen, Beratungen und Messungen stehe ich Ihnen gern zur Verfügung und verbleibe

Mit freundlichen Grüßen

Steffen Sabin