

Monitoring des St. Salvators mit drahtlosen Sensornetzen

Erkenntnisse aus dem Einsatz drahtloser Sensornetze für die Dauerüberwachung historischer Bauwerke

Markus Krüger, Eric Price

Abstract: Im Rahmen des DBU-Projekts "Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator (Schwäbisch Gmünd)" in Verbindung mit der Ermittlung eines neuen Steinkonservierungsmittels zur Anwendung in nassem Umfeld wurden am St. Salvator umfangreiche Dauerüberwachungsmaßnahmen vorgenommen. Unter anderem wurden mittels eines drahtlosen Monitoringsystems während der Projektlaufzeit umfangreiche Messungen insbesondere zu den klimatischen Verhältnissen in den Kapellen des St. Salvators durchgeführt. Im vorliegenden Artikel werden die Grundlagen zur instrumentierten Dauerüberwachung mittels drahtloser Sensornetze am St. Salvator vorgestellt und die Besonderheiten diskutiert, die auch bei der Weiterentwicklung des Monitoringsystems berücksichtigt wurden. Zudem werden einige der Ergebnisse der instrumentierten Dauerüberwachung vorgestellt und diskutiert.

Keywords: Klimamonitoring, instrumentierte Dauerüberwachung, drahtlose Sensoren

1 Einleitung

Die rasant fortschreitende Entwicklung von kostengünstigen Sensortechnologien ermöglicht zunehmend eine instrumentierte Dauerüberwachung einer Vielzahl von Bauwerken. Ziel ist es hierbei, sowohl Einwirkungen aus der Umwelt, als auch direkt deren Auswirkung auf die Materialien oder die Bauwerksstrukturen zu erfassen. Ein Bauwerksmonitoring ist für verschiedene Fragestellungen interessant. Beispielsweise kann eine Beobachtung fortlaufender Bauwerksschädigungen vorgenommen werden. Es lassen sich aber auch das Tragwerkverhalten oder aber die Energieeffizienz im Hinblick auf raumklimaregulierende Maßnahmen und die Komfortbedingungen für den Nutzer bewerten. Für solche Fragestellungen ist es in der Regel erforderlich, an mehreren Messorten diverse Messparameter nicht nur zu erfassen, sondern auch zu überwachen und weiter zu analysieren. Ziel der instrumentierten Dauerüberwachung sollte es schließlich sein, eine möglichst objektive Bewertung

anhand von konkreten Messergebnissen vorzunehmen und nicht nur Messdaten in ihrer Rohform zu liefern. Im vorliegenden Beitrag wird ein Überblick über den Einsatz von Sensorsystemen und geeigneten Sensortechnologien insbesondere für den Bereich historischer Bauwerke gegeben, wobei explizit die Anwendung eines solchen Systems am Beispiel des St. Salvators diskutiert wird. Zudem wird in Grundzügen erläutert, welche Analysemöglichkeiten für die Datenauswertung im Rahmen eines Bauwerksmonitorings bestehen.

2 Instrumentierte, drahtlose Dauerüberwachung

Im Rahmen des DBU-Projekts "Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator" und den Ende des Jahres 2014 durchgeführten konservatorischen Maßnahmen war der Frage nachzugehen, wie man die vorliegende Feuchteproblematik bewerten und mit dieser zukünftig im Rahmen der präventiven Konservierung weiter umgehen soll.

Daher wurde in den Kapellenräumen ein drahtloses Monitoringsystem zur kontinuierlichen Erfassung der innen- und außenklimatischen Verhältnisse und weiterer für die Bewertung notwendigen Kenndaten installiert. Dazu gehören ein Sensor zur Erfassung der Türöffnung am Eingang der oberen Kapelle sowie weitere Sensoren zur Erfassung der Materialfeuchte im Bereich der Nische des Beichtstuhls. Zu Letzteren gehören sowohl Messungen zur relativen Luftfeuchte im Bohrloch als auch direkt in den Sandstein eingebrachte Sensoren zur Bewertung der Feuchtesituation mittels der elektrischen Impedanzspektroskopie [Lehmann 2011; Lehmann 2013].

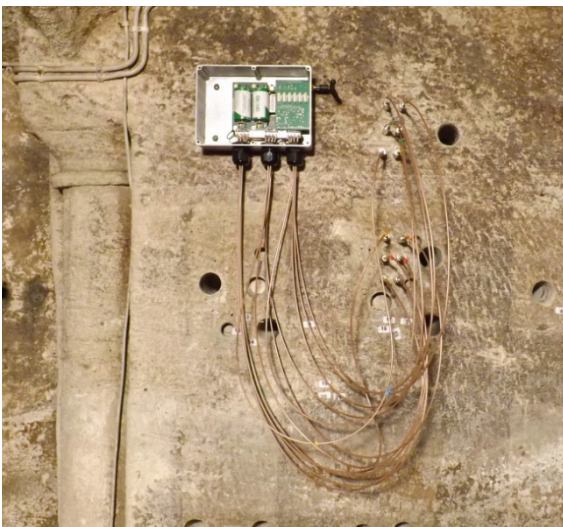


Bild 1 Drahtloser Sensorknoten zur Materialfeuchtebestimmung mittels elektr. Impedanzspektroskopie

Für Luftausgleichsfeuchtemessungen wurden die gleichen Sensoren eingesetzt wie für die beschriebenen Luftfeuchtemessungen. Zur Ermittlung der Materialfeuchte wurden diese jedoch in bereits vorhandene Bohrlöcher eingebettet und die Bohrlöcher versiegelt, so dass keine Außenluft direkt an die Sensoren gelangen kann. Innerhalb des vorhandenen Hohlraumes stellt sich nun in Abhängigkeit von der vorliegenden Bauteilfeuchte eine Ausgleichsfeuchte im Hohlraum ein, die in der Theorie mit der tatsächlichen Materialfeuchte korreliert. In der vorliegenden Anwendung im St. Salvator wird eine konkrete Bestimmung der Materialfeuchte über Ausgleichfeuchtemessungen aufgrund der vielfältigen Störeinflüsse allerdings nicht vorgenommen. Dennoch können einige Hinweise aus der Bestimmung der Ausgleichsfeuchte gezogen werden. So kann über die gemessene relative Feuchte

in Verbindung mit der Temperaturmessung in den Bohrlöchern eine Aussage bezüglich möglicher Feuchtetransportprozesse getroffen werden. Zudem können auch anhand der Kinetik der Feuchteänderungen Hinweise auf das Vorhandensein von Salzen gefunden werden, da diese den zeitlichen Verlauf der Sorption maßgeblich beeinflussen können. Die Bestimmung absoluter Materialfeuchten ist vor diesem Hintergrund also nicht unbedingt erforderlich.

Leitfähigkeitsmessungen sind hingegen auch im überhygroskopischen Bereich der Materialfeuchte anwendbar. Bei Leitfähigkeitsmessungen wird bei einfachen Verfahren zwischen zwei eingebrachten Elektroden der elektrische Widerstand gemessen. Mit zunehmender Materialfeuchte sinkt in der Regel der Widerstand, wobei allerdings auch hier Temperatur, Salzgehalt und Salzart einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss haben können [Terheijden 2007]. Während Leitfähigkeitsmessungen mit Gleichstrom zur Bestimmung des Feuchtegehalts bei vernachlässigbar geringem Salzgehalt brauchbare Ergebnisse liefern können, besteht bei Elektrolyten wie Salzlösungen die Problematik der Polarisierbarkeit und der Ionenwanderung bei Anlegen eines elektrischen Stroms. Eine Messung mit Gleichstrom ist bei salzbelasteten Materialien daher in der Regel nicht zielführend, vielmehr bietet sich hier die Messung mit Wechselstrom an. Den frequenzabhängigen Wechselstromwiderstand eines Materials bezeichnet man dabei als elektrische Impedanz. Die Leitfähigkeit des Elektrolyten selbst wird von der Menge der darin vorhandenen Ionen, deren Wertigkeit und Beweglichkeit bestimmt [Hamann 1998].

Die Impedanz eines Natursteins ist damit im Wesentlichen abhängig von der Materialfeuchte, dem Salzgehalt, der Salzart, der Temperatur, der Porengeometrie und der Porengrößenverteilung. Obwohl die genannten Parameter jeder für sich gesehen die Impedanz in hohem Maße beeinflussen können, können über eine Betrachtung der Impedanzänderung bei gleichzeitiger Überwachung der Umgebungsbedingungen Rückschlüsse auf die Einflussfaktoren und mögliche Veränderungen gezogen werden. Es ist allerdings auch hier anzumerken, dass eine direkte Korrelation von Impedanzmessungen mit absoluten Materialfeuchten und Salzgehalten nicht zu empfehlen ist, da eine klare Trennung der sich fortlaufend ändernden Einflüsse auf die gemessenen Impedanzen – zumindest nach dem jetzigen Stand der Forschung – nicht eindeutig vorgenommen werden kann.

In der Regel wurden im 5-Minutentakt Messwerte zu den Klimadatenpaaren aus Temperatur und relativer Feuchte der Luft erfasst und über eine sternförmige Netzwerktechnologie von den batteriebetriebenen Sensoren an eine im Bereich des Altars installierte Basisstation drahtlos übertragen. Von hier aus wurden über eine GSM-Verbindung die Daten auf einen Server übermittelt und in einer Datenbank gespeichert.

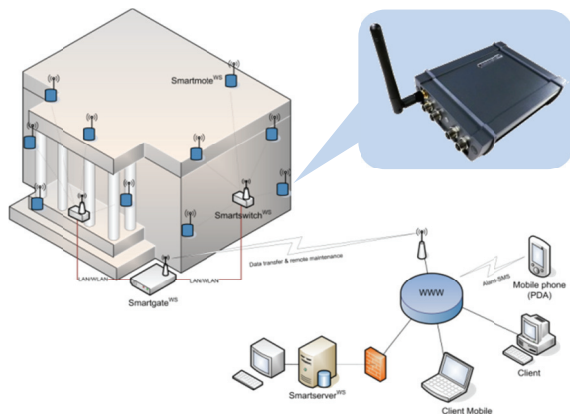


Bild 2 Prinzipielle Funktionsweise eines drahtlosen Sensornetzes (hier ein einfaches, sternförmiges Netz) für die Bauwerksüberwachung und drahtloser Sensorknoten.

Im Laufe der Untersuchungen wurden fortlaufend weitere Veränderungen am Messsystem vorgenommen, auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird. Erwähnenswert ist jedoch der Umstand, dass die drahtlose Datenübertragung innerhalb der Kapelle nicht unproblematisch ist. Dies liegt an den hohen Feuchtezuständen des Sandsteins wie auch der generell hohen Luftfeuchte innerhalb der Kapelle, was eine drahtlose Datenübertragung massiv negativ beeinflusst und die Grenzen der drahtlosen Datenübertragung im Frequenzbereich von 2,4GHz aufzeigt. Zudem ist bei der Analyse insbesondere der Feuchtemessdaten über 90% RF der erzielbaren Messgenauigkeit besondere Aufmerksamkeit zu schenken, da mit messprinzipbedingten Fehlern der verwendeten Sensorik von bis zu 5% RF gerechnet werden muss. Hier zeigt sich, dass in der Messpraxis immer auch ein Kompromiss zwischen Kosten und Nutzen gefunden werden muss. Dies betrifft insbesondere die eingesetzte Sensorik, die Kriterien wie Langzeitstabilität aufweisen muss.

Mit den installierten Temperatur- und Feuchte-sensoren wird mittlerweile kontinuierlich und ohne

Batteriewechsel über einen Zeitraum von mehr als drei Jahren gemessen. Aufgrund des geringen Stromverbrauchs konnte zudem eine Restlebensdauer der Batterien eines jeden Sensorknotens von mindestens 3 weiteren Jahren prognostiziert werden. Ausnahme hiervon bilden die Sensorknoten zur Impedanzspektroskopie, bei denen die Batterielebensdauer aufgrund des erhöhten Strombedarfs für die Messdatenerfassung und Datenübertragung bei etwa einem Jahr liegt.

3 Datenvisualisierung und -analyse

Der Datenvisualisierung und der -analyse kommt im Hinblick auf den Nutzen der kontinuierlichen instrumentieren Überwachung eine besondere Bedeutung zu. Die zwei folgenden Anwendungsszenarien sind dabei zu unterscheiden:

- Echtzeitanalyse aktueller Messdaten (gegebenenfalls mit direkter Reaktion, z.B. aktive Klimaregulierung)
 - Postprocessing aufgezeichneter Messdaten über längere Beobachtungszeiträume und Bewertung
- Beide Szenarien stellen besondere Anforderungen an die einzusetzende Soft- und Hardware, da bei Langzeitüberwachungen erfahrungsgemäß immer auch fehlerhafte Messungen auftreten als auch Messdaten komplett fehlen können. Eine weitere Komplexität ergibt sich aus den in der Regel nicht zeitsynchron erfassten Datensätzen, der zeitlich unterschiedlichen Diskreditierung und der hohen Anzahl der Messdaten selbst. So ergibt beispielsweise eine Erfassung der relativen Feuchte und der Temperatur alle 5 Minuten einschließlich der notwendigen Metainformationen in einer SQL-Datenbank einen Datensatz von etwa 23 Mbyte pro Jahr und Sensor, wobei allein für die Temperatur über 100.000 Messwerte pro Jahr vorliegen. Es ist offensichtlich, dass eine rein manuelle Datenauswertung hier nicht mehr möglich ist und auch die verwendeten Softwaretools in der Lage sein müssen, mit entsprechend großen Datensätzen umzugehen.

Neben der Darstellung von Istzuständen und deren Bewertung ist ein wichtiger Aspekt des kontinuierlichen Monitorings die Identifikation und Quantifizierung von Zusammenhängen bzw. Abhängigkeiten, z.B. hinsichtlich eines Schädigungsrisikos o.ä. (siehe auch Bild 4 bzw. [Krüger 2015]).

Im Rahmen der fortlaufenden Weiterentwicklung des Monitoringsystems wurden dementsprechend Fähigkeiten zur Analyse und Datenauswertung in die Serverbasierte Applikation integriert. War es bereits vorher möglich, die abgespeicherten Rohdaten für beliebig gewählte Zeiträume abzufragen und zu visualisieren, so erlauben es die Weiterentwicklungen, diese Daten nach Bedarf und in Echtzeit zu filtern oder abgeleitete Werte zu berechnen und darzustellen.

Ein einfaches Beispiel für diese Filterung wäre etwa ein Tiefpass, um stark verrauschte Sensordaten in der Darstellung nach Bedarf zu glätten.

Die Fähigkeiten dieser Erweiterungen gehen aber weit über das Anwenden einzelner einfacher Filter hinaus. Verschiedene Algorithmen lassen sich kombinieren etwa um Fehler der Sensoren in den Rohdaten zu korrigieren, Mittelwerte aus verschiedenen Sensorquellen zu bilden und diese dann mit gesetzten Grenzwerten zu vergleichen um Sollwertüberschreitungen automatisch festzustellen.

Das Ergebnis einer solchen vollautomatischen Analyse kann sowohl dargestellt oder zur weiteren Verarbeitung heruntergeladen werden, als auch automatisiert in Intervallen auf die jeweils aktuellsten Messwerte angewandt werden, um etwa automatische Alarmmeldungen zu generieren und bei Bedarf per Email zu versenden.

Auch abgeleitete Werte sind so darstellbar. Mit den Erweiterungen ist es zum Beispiel möglich, die Messwerte für Temperatur und relative Feuchte naheliegender Sensoren zu kombinieren und daraus den absoluten Feuchtegehalt zu berechnen und darzustellen.

Eine andere Anwendung dieser Erweiterungen erlaubt eine Visualisierungsdarstellung verschiedener Sensoren gegeneinander um eventuelle Korrelationen sichtbar zu machen. Dabei werden die Daten automatisch und für den Nutzer unsichtbar abgeglichen und bei Bedarf interpoliert, so dass dies selbst dann funktioniert, wenn die Sensoren zu unterschiedlichen Zeitpunkten und mit unterschiedlichen Messintervallen aufgezeichnet haben.

Die genannten Beispiele stellen nur einen kleinen Auszug der möglichen Analysen und Darstellungsformen dar. Weitere Analysen der aufgezeichneten Daten können jederzeit über einen Webbrowser vorgenommen werden. Der Zugriff erfolgt passwortgeschützt unter folgendem Link (Zugangsdaten für Projektbeteiligte können in Absprache mit dem Eigentümer unter info@smartmote.de angefragt werden):

- <http://www.smartmote.net/neptun>

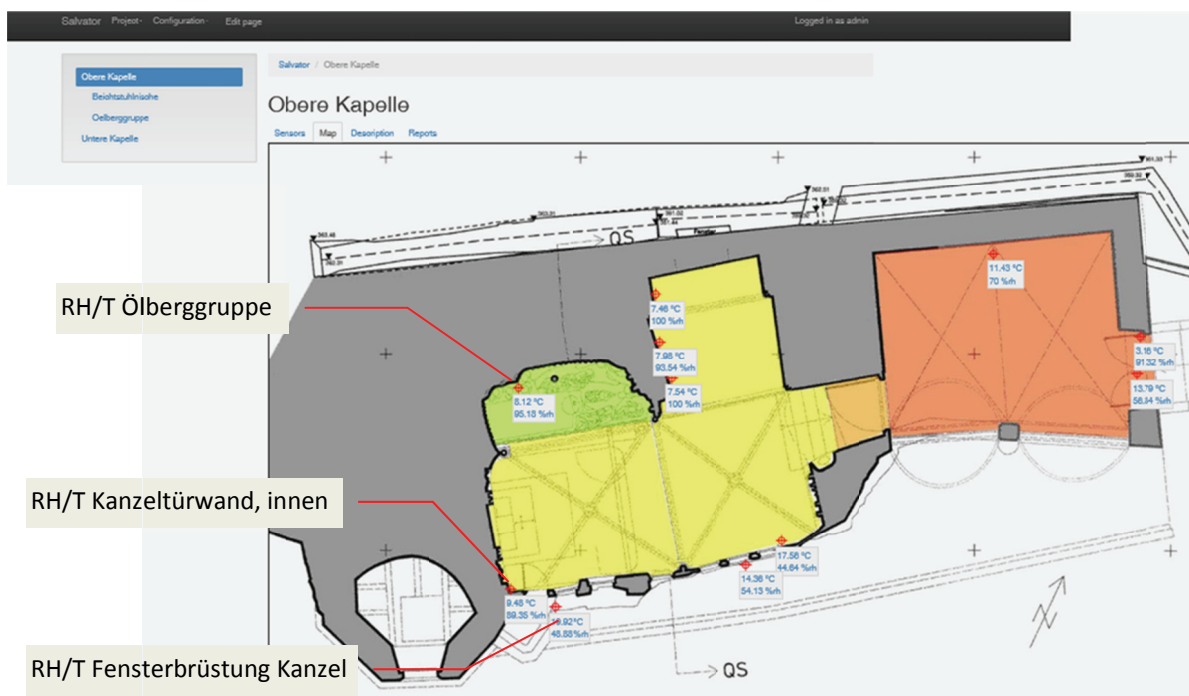


Bild 3 Darstellung der Sensorpositionen zur Messung der Klimadaten im Bereich der oberen Kapelle (Auszug der webbasierten Online-Visualisierung mit Sensorpositionen und aktuellen Messwerten am Objekt).

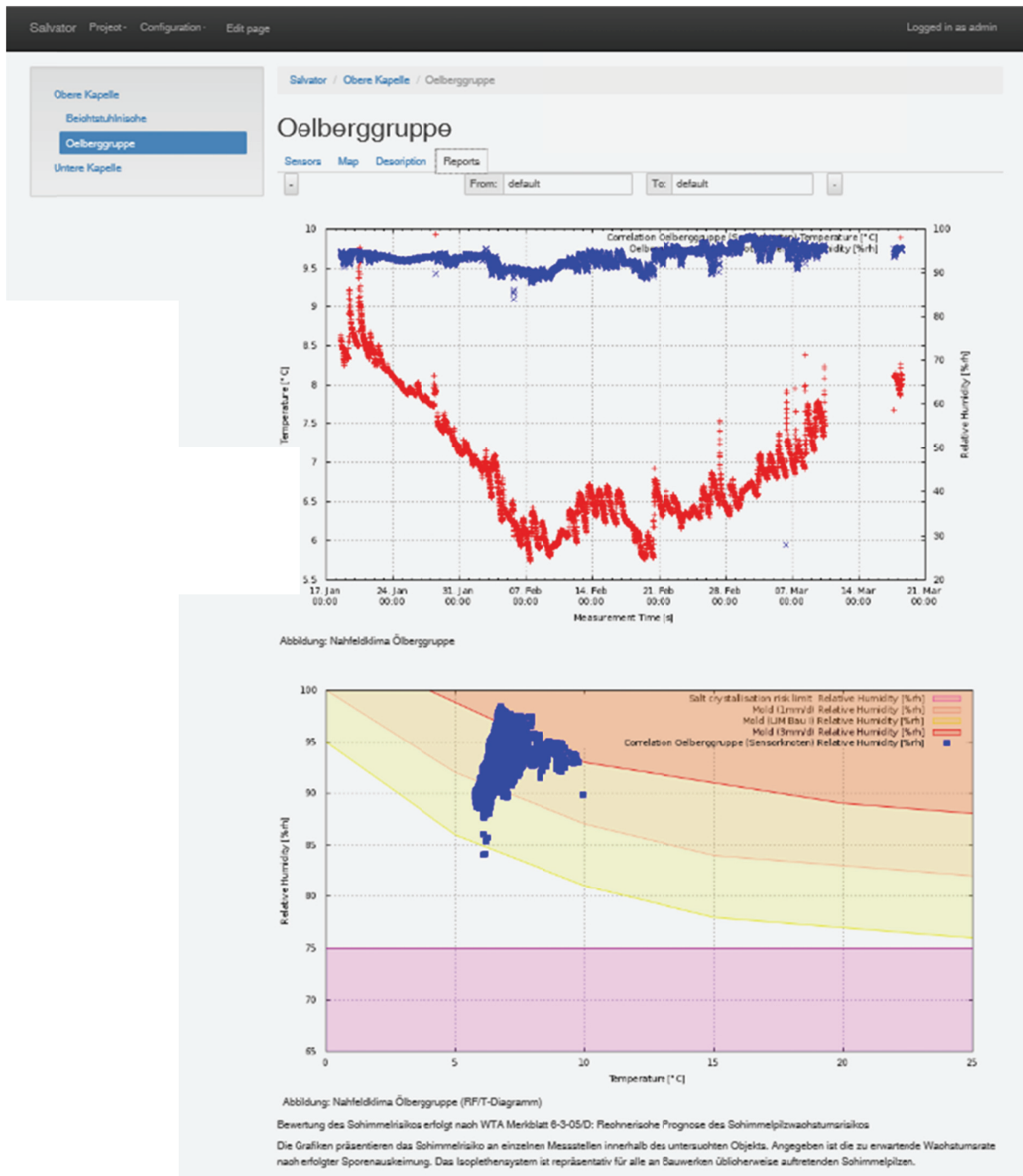


Bild 4 Screenshot einer Online-Visualisierung (Automatisiert generierter Report mit Risikobewertung hinsichtlich der innenraumklimatischen Verhältnisse im Bereich der Ölberggruppe)

4 Klimasituation am St. Salvator von 2012 bis 2014

Bild 5 zeigt die Temperaturverläufe im Außenbereich (Fensterbrüstung Kanzel, vgl. Bild 3) als 30-Tage-Mittelwert wie auch die Temperaturen im

Nahfeldbereich an Kanzeltürwand innen sowie direkt an der Ölberggruppe für den Zeitraum 2012 bis 2014. Tageszeitbedingt ergeben sich im Außenbereich erwartungsgemäß höhere Temperaturschwankungen, die durch die Mittelung über 30 Tage nicht mehr im Diagramm erkennbar sind. Gut zu erkennen ist jedoch, dass sich die Temperaturen im Innenraum stark an der mittleren Außentemperatur orientieren.

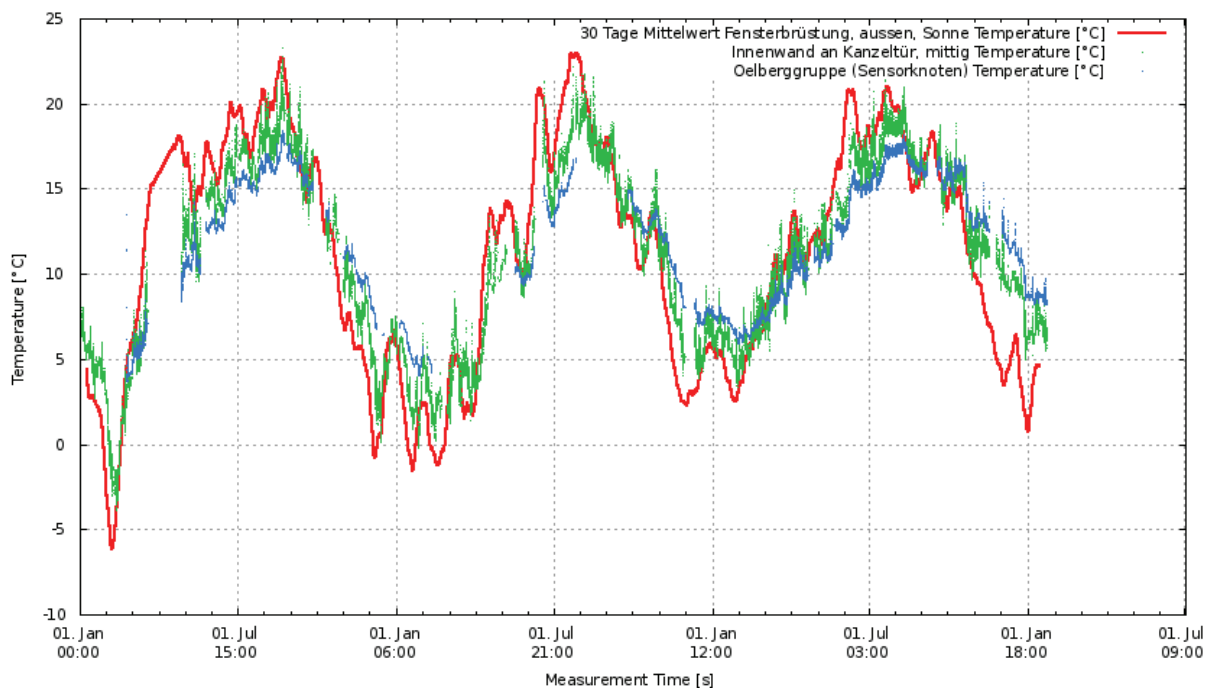


Bild 5 Temperaturverlauf innen im Bereich der Kanzeltür und an der Ölberggruppe sowie das 30-Tage-Mittel im Außenbereich zwischen Januar 2012 und Dezember 2014.

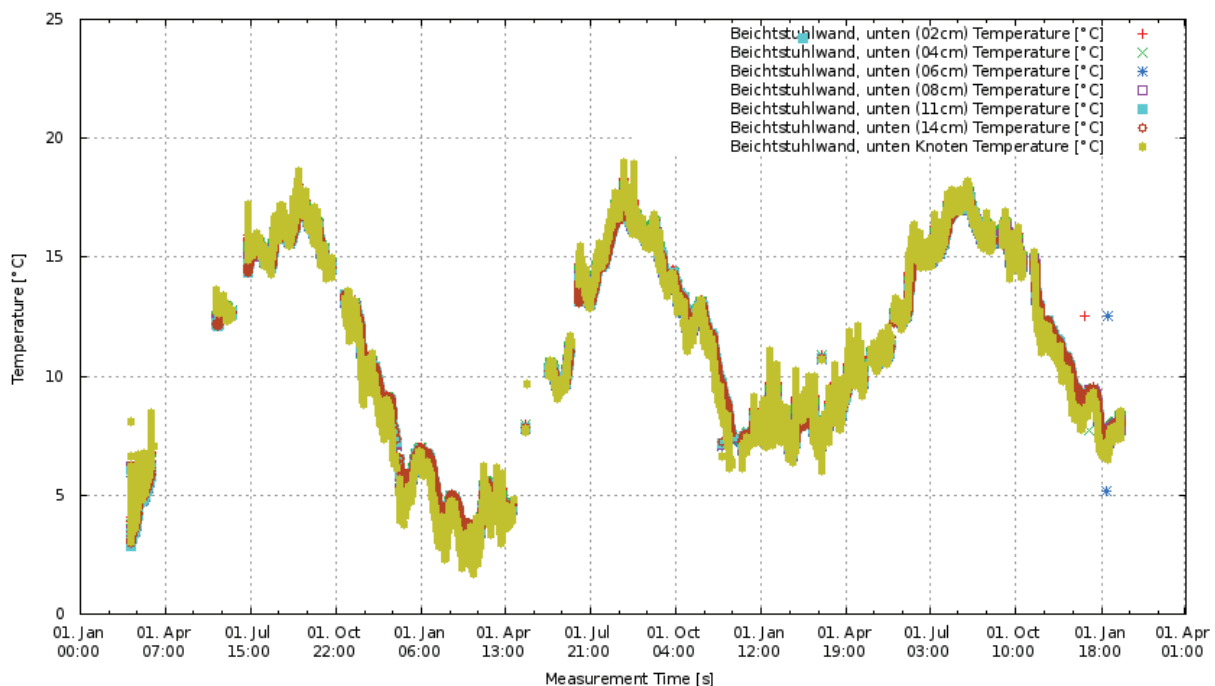


Bild 6 Tiefengestaffelte Temperaturmessungen im unteren Bohrloch in der Beichtstuhlwand (Zeitraum 2012 bis 2014)

Betrachtet man im Detail die Temperaturen innen im Bereich der Kanzeltürwand und an der Ölberggruppe, so fällt auf, dass aufgrund der Orientierung der Ölberggruppe zum Fels hin die Temperaturschwankungen dort gegenüber dem Bereich der Außenfassade erwartungsgemäß geringer sind.

Die in den Bohrlöchern im Bereich der Beichtstuhlnische durchgeführten Temperaturmessungen zeigen, dass über die Tiefe eine relativ homogene Temperaturverteilung vorliegt (vgl. Bild 6). Dabei unterliegen die Temperaturen der Wand wiederum vorwiegend jahreszeitlichen Schwankungen und

werden nur wenig vom Tagesgang beeinflusst. Sowohl im Bereich der Beichtstuhlnische als auch im Bereich der Ölberggruppe sind die Temperaturen relativ gleich.

Auffällig sind die erhöhten Tiefsttemperaturen in dem milden Winter 2013/2014. Dabei sind die leicht höheren Temperaturen in der oberen Kapelle offensichtlich nicht auf die Vorgabe zur permanenten

Türschließung zurückzuführen, sondern rein auf die Änderung der Außentemperaturen (vgl. auch hier Bild 5). Die gegenüber dem Außenklima erhöhten Innenraumtemperaturen im November und Dezember 2014 sind auf die maschinelle Klimatisierung des Bereiches der Ölberggruppe zurückzuführen, die im Rahmen der Festigungsmaßnahme vorgenommen wurde.

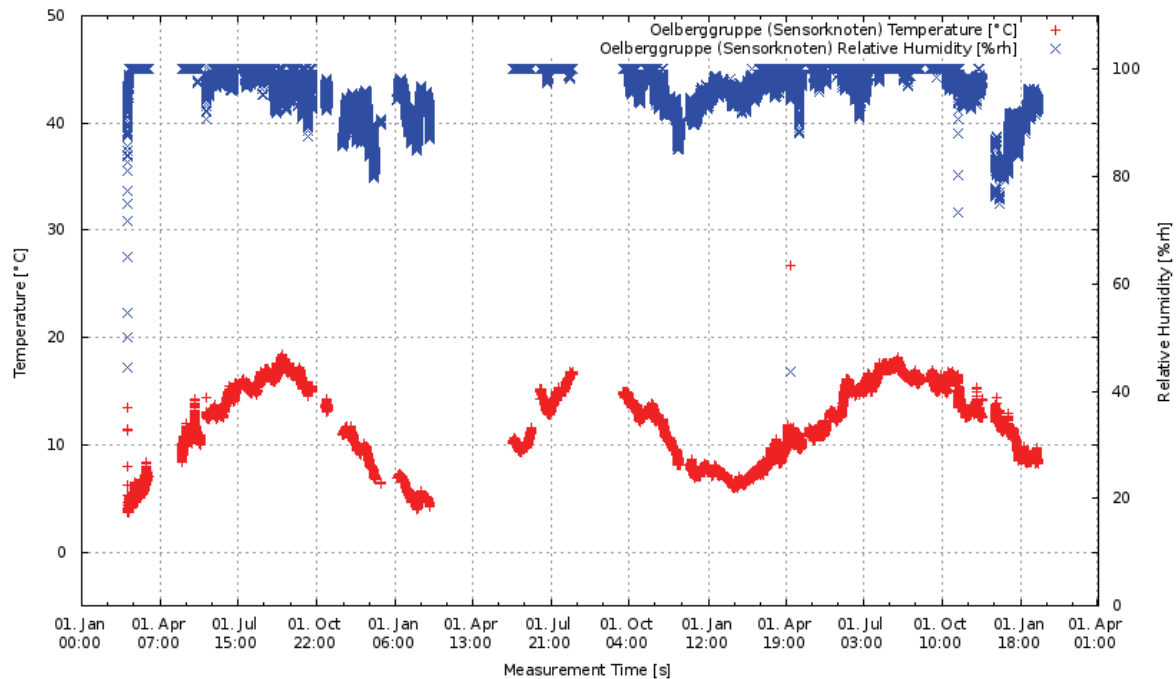


Bild 7 Temperatur und Feuchtigkeitsverlauf direkt am Ölberg zwischen Januar 2012 und Dezember 2014

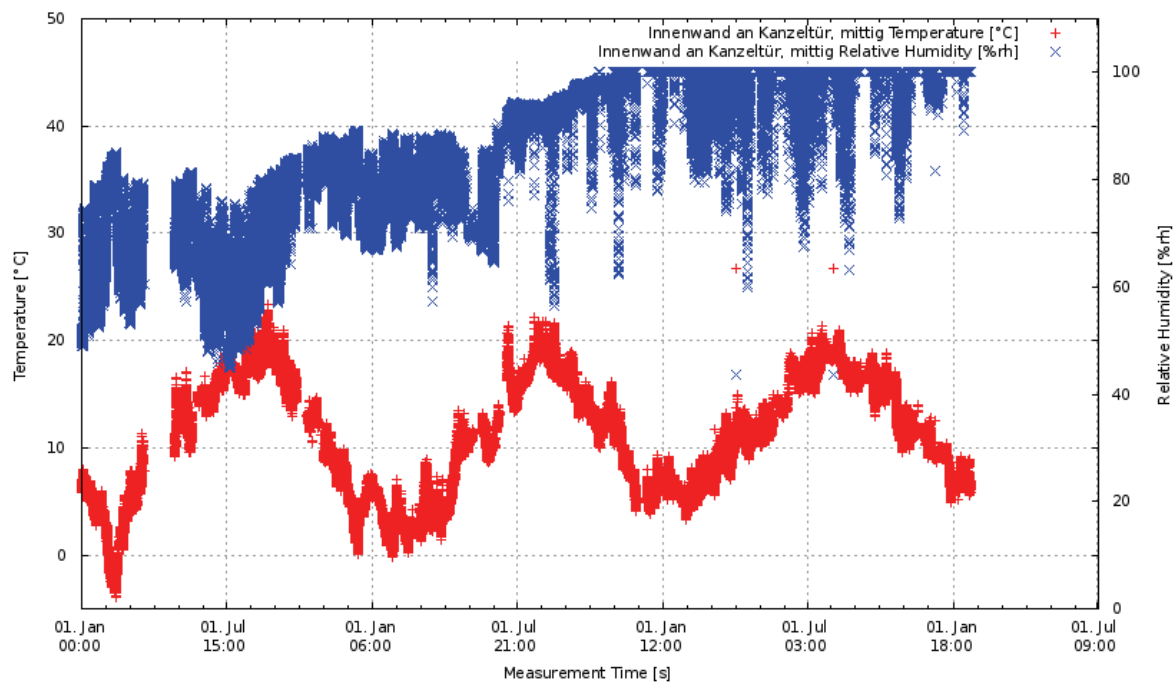


Bild 8 Temperatur- und Feuchtigkeitsverlauf innen im Bereich der Kanzeltür zwischen Januar 2012 und Dezember 2014.

Besonderheiten ergeben sich nachfolgend allerdings bei der Betrachtung der Feuchtwerte über den Zeitraum von 2012 bis 2014 (siehe hierzu Bild 7 und Bild 8). Wie in Bild 7 zu erkennen ist, liegt im Nahfeld der Ölberggruppe die relative Feuchte über die Jahre hinweg gesehen über 80% RF, wobei insbesondere auch die Feuchteminderung durch die im November und Dezember 2014 durchgeführte maschinelle Klimatisierung erkennbar ist.

Demgegenüber stellt sich die Situation im Bereich der Innenwand an der Kanzeltür anders dar. Während im Jahr 2012 die Feuchte noch in einem Bereich zwischen etwa 50% bis hin zu etwa 90% lag, hat sich dies im Laufe des Jahres 2013 und insbesondere 2014 zu höheren Feuchtegehalten hin verlagert, wobei einzelne, kurzzeitige signifikante Feuchtereduktionen durch eine vermehrte Öffnung der Eingangstür zu verzeichnen sind.

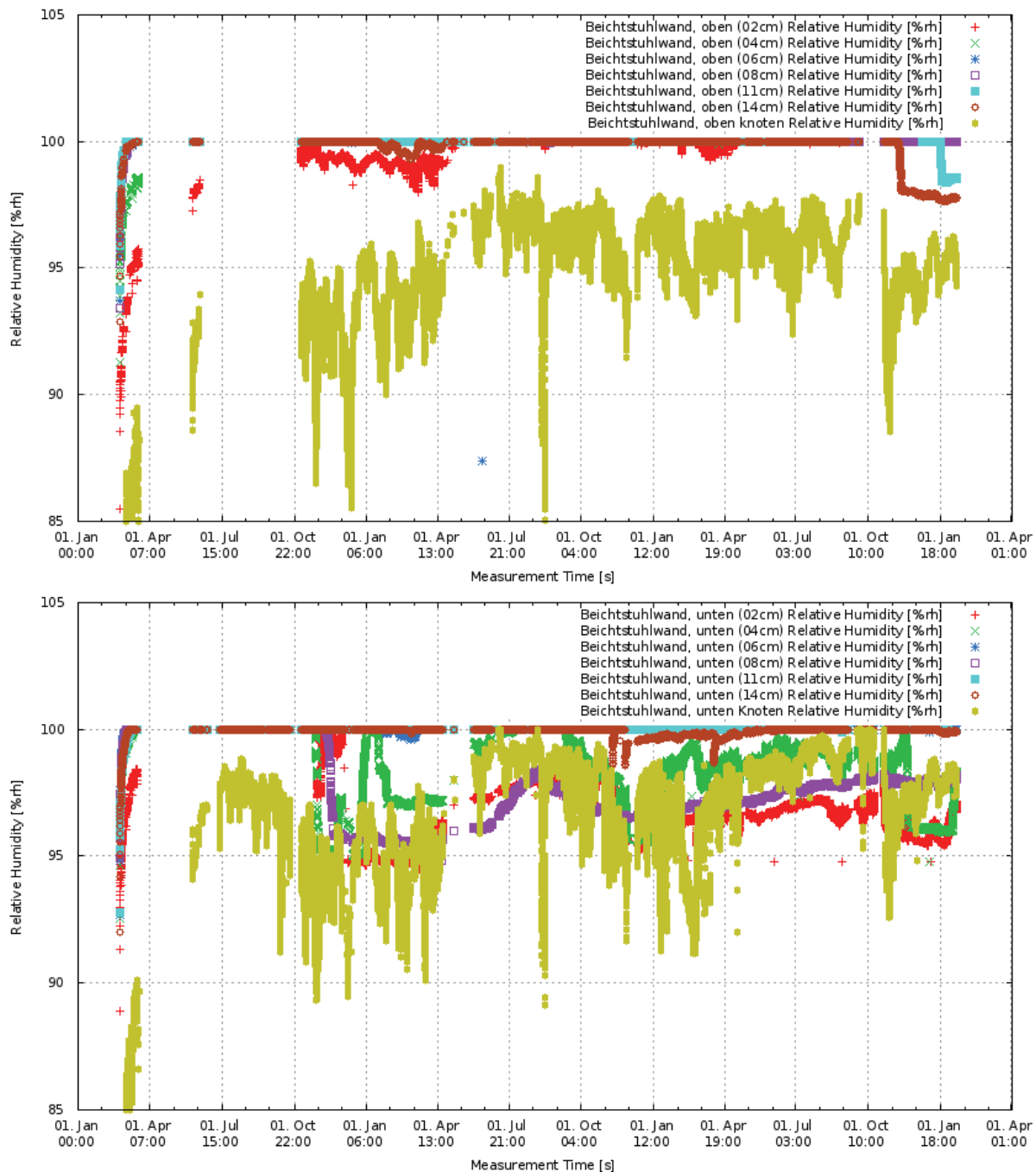


Bild 9 Tiefengestaffelte Feuchtemessungen im oberen und unteren Bohrloch in der Beichtstuhlwand (Zeitraum 2012 bis 2014)

Bild 9 zeigt die Ergebnisse der tiefengestaffelten Feuchtemessungen in den vorhandenen Bohrlöchern an der Seitenwand der Beichtstuhlnische. Nach einer anfänglichen Akklimatisierung ist festzustellen, dass die Bohrlochfeuchte in den verschiedenen Tiefen in beiden Bohrlöchern zwischen etwa 95% und 100% schwankt. Es ist daher, wie zunächst erwartet, in der Regel von einem überhygroskopischen Feuchtezustand im Stein auszugehen, in dem nicht nur der Feuchtetransport maßgeblich durch Kapillartransport stattfindet sondern auch der Salztransport, wobei die meisten der vorhandenen Salze durchgehend in gelöster Form vorliegen dürften (ausgenommen hiervon ist Gips). Auffällig ist jedoch auch, dass im oberen Bohrloch häufiger Feuchtegehalte von 100% RF gemessen wurden als im unteren Bohrloch. Dieser Umstand könnte darauf zurückzuführen sein, dass sich in der Wand unten Salze in höherer Konzentration (bzw. auch eine Variation des Salzsystems) in der Porenlösung befinden als oben und durch (den sich einstellenden unterschiedlichen Dampfdruck) niedrigere Ausgleichsfeuchten im Stein vorliegen. Eine eindeutige Interpretation ist hier aufgrund der eingeschränkten Messgenauigkeit der eingesetzten Sensorik und der Unklarheit über die tatsächlich vorliegenden Salzkonzentrationen allerdings nicht möglich. Auffällig ist bei den Messungen im oberen Bohrloch aber auch, dass im Zuge der maschinellen Klimatisierung (ab November 2014) die Feuchte im Bohrloch in einer Tiefe von zunächst 14 cm und anschließend in einer Tiefe von 11 cm absinkt. Die primär auf die Ölberggruppe gerichtete Entfeuchtung wirkt sich demnach bereits relativ schnell auch auf die Feuchte tiefer im Stein aus.

5 Zusammenfassung

Funkbasierte Messsysteme ermöglichen es, physikalische, mechanische und witterungs- bzw. raumklimabedingte Einwirkungen an Bauwerken zu erfassen. Werden die Messdaten genutzt um eine Zustandsbewertung der aktuellen Bauwerksverhältnisse vorzunehmen, lassen sich kritische Bauwerkszustände, die zu einer Schädigung der Bausubstanz führen können, identifizieren und quantifizieren.

Kann mittels Monitoring ein kritischer Grenzzustand festgestellt werden, bietet es sich an, den Nutzer, Betreiber und/oder Eigentümer auf die besonderen Verhältnisse mittels echtzeitnaher Visualisierung, SMS, Mail o. ä. hinzuweisen. Vorteilhaft ist es dabei, wenn die Informationen des Sensornetzes zur Er-

kundung der Bauwerksverhältnisse unmittelbar genutzt würden, um zeitnah auch solche Aktivitäten anzustoßen, mit denen der eigentlichen Ursache der Beanspruchung wirksam entgegnet werden kann. Mit einer rechnergestützten Analyse der Messwerte und einer Bewertung der Auswirkungen können dann auch geeignete Aktionen initiiert werden. Dies könnten z.B. Regelstrategien zur Klimastabilisierung sein, anhand derer die Raumluftverhältnisse in einer denkmalverträglichen und kontrollierten Weise optimiert werden können.

6 Literaturreferenzen

- [Hamann, 1998] Hamann, C.H.; Vielstich, W.: Elektrochemie. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 1998. ISBN 978-3-527-27894-7.
- [Krüger 2015] Krüger, M.: Klimakonzeption zur präventiven Konservierung des St. Salvators. In: J. Frick, J. Zöldföldi (Hrsg.) DBU-Projekt: „Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator in Schwäbisch Gmünd. Fraunhofer IRB Verlag, 2015, S. 133-143
- [Lehmann 2011] Lehmann, F., Krüger, M.: Wireless impedance measurements to monitor moisture and salt migration in natural stone. In: M. Krüger (ed.), Cultural Heritage Preservation, European Workshop on Cultural Heritage Preservation, Berlin. Fraunhofer IRB Verlag, pp. 224-231.
- [Lehmann 2013] Lehmann, F., Martínez Garrido, M.I., Krüger, M.: On the advance of impedance measurements for monitoring moisture in sandstone. In: A. Troi, E. Lucchi (ed.), Cultural Heritage Preservation, 3rd European Workshop on Cultural Heritage Preservation, Bozen. Felix Verlag editrice, pp. 259-264.
- [Terheiden 2007] Terheiden, K.: Feuchte- und Salztransport: Charakterisierung der Interaktion zwischen Porenfluid und porösem Bauwerkstoff. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2007. ISBN 978-3-86727-455-5.
- [Zöldföldi, 2015] Zöldföldi, J. et al.: St. Salvator - Materialtechnische Analysen am Stübensandstein der Ölberggruppe. In: J. Frick, J. Zöldföldi, J. (Hrsg.) DBU-Projekt: „Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator in Schwäbisch Gmünd. Fraunhofer IRB Verlag, 2015, 93-103

Autoren

- Krüger, Markus
TTI GmbH - TGU Smartmote
Pfaffenwaldring 2b
70569 Stuttgart
krueger@smartmote.de
- Price, Eric
TTI GmbH - TGU Smartmote
Pfaffenwaldring 2b
70569 Stuttgart
price@smartmote.de