

Markus Krüger, Jürgen Frick, Bärbel Dieruff, Karl Fiedler,
Stefan Simon, Marisa Pamplona, Jan Willeke

**Intelligente Bauwerksüberwachung
von historischen Bauwerken**
Teilprojekt Zukunft Bau
der deutschen Partner – SMooHS

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2013

ISBN 978-3-8167-8991-8

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00
Telefax 07 11 9 70 - 25 08

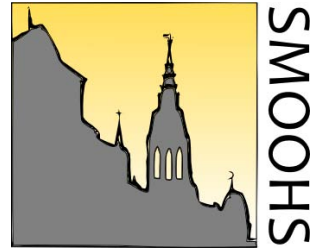
E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung



Smart Monitoring of Historic Structures



Intelligente Bauwerksüberwachung von historischen
Bauwerken (Smart monitoring of historic structures)
Teilprojekt Zukunft Bau der deutschen Partner - SMooHS

Endbericht

Project Reference:	AZ: SF – 10.08.18.7-08.35 / II 3 – F20-08-37
Project acronym:	SMooHS
Project Title:	Smart Monitoring of Historic Structures
Period covered by this report:	From 2008-11-01 to 2011-11-31
Project coordinator:	Dr. Markus Krüger
Project coordinator organisation:	MPA Universität Stuttgart, Germany
Tel:	+49 711 6856 6789
Fax:	+49 711 6856 6797
Email:	markus.krueger@mpa.uni-stuttgart.de
Project web site address:	http://www.smoohs.eu



Förderung der deutschen Projektpartner durch
Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Germany)
Project Reference: (AZ: SF – 10.08.18.7-08.35 / II 3 – F20-08-37)



Inhalt

1	Anlass/ Ausgangslage	4
2	Einführung	4
3	Gegenstand des Forschungsvorhabens.....	6
3.1	Arbeitspakete	7
4	Arbeitspaket 2: Technische Beratung und Ermittlung von Defiziten im Bereich der Denkmalpflege.....	8
4.1	Herkömmliche Überwachungsmethoden und denkmalpflegerische Arbeit	8
4.2	Bedeutung der instrumentierten Überwachung	9
4.3	Kontinuierliches Monitoring zur Erfassung und Überwachung von Einwirkungen und Schädigungsprozessen	9
5	Arbeitspaket 3: Entwicklung von intelligenten, drahtlosen Monitoringtechnologien.....	11
5.1	Anforderungen an die Messtechnik – Grundlagen	11
5.2	Drahtloses Sensornetz für die Dauerüberwachung von historischen Bauwerken....	13
5.3	Sensornetzwerklayout und –softwarekomponenten.....	16
5.4	Sensoren für die Dauerüberwachung von historischen Bauwerken.....	19
5.4.1	Lufttemperatur und -feuchte sowie weitere außen- und innenklimatische Parameter (Wind/Regen/Licht/UV/IR)	21
5.4.2	Materialfeuchte und Salze	21
5.4.3	Verformungen, Dehnungen, Verschiebungen, Risse	26
5.4.4	Erschütterung und Schwingungen	27
6	Arbeitspaket 4: Modellierung und Analyseverfahren	28
7	Arbeitspaket 5: Vergleichende Labor- und Feldversuche.....	29
8	Arbeitspaket 6: Demonstration - Untersuchungen an realen Bauwerken.....	31
8.1	Untersuchungen im Bodemuseum in Berlin	33
8.2	Untersuchungen an der Johanniskirche in Schwäbisch Gmünd	34
8.2.1	Schäden und Schadensbilder an der Johanniskirche in Schwäbisch Gmünd	34
8.2.2	Monitoring an der Johanniskirche	35
8.2.3	Messdatenanalyse und Bewertung	36
8.2.4	Fazit und Empfehlungen	38
8.3	Untersuchungen Heilig-Kreuz-Münster in Schwäbisch Gmünd.....	38
8.4	Untersuchungen am Palazzo Malvezzi, Bologna	39
8.5	Untersuchungen an der Schlosskappelle des Schlosses Schönbrunn, Wien	43
9	Verwertung der Ergebnisse	44
9.1	Webbasierte Toolbox für intelligente Monitoringtechnologien	44
9.2	Frei verfügbare „Smart Monitoring Guidelines“	45
9.3	Videodokumentation.....	45
10	Nationale und internationale Workshops	46

11 Zusammenfassung	47
12 Eckdaten.....	48
13 Referenzen	48
14 Im Rahmen des Forschungsvorhabens erschienene und öffentlich zugängliche Forschungsberichte	49
15 Im Rahmen des Forschungsvorhabens erschienene Veröffentlichungen	50

1 Anlass/ Ausgangslage

Historische Gebäude und Strukturen sollten als Kulturdenkmale in ihrer reichen Architektur und mit möglichst originalen Materialien für kommende Generationen erhalten werden. Auch für die regionale Wirtschaft haben historische Objekte oft eine erhebliche Bedeutung. Sie zu konservieren ist eine viele wissenschaftliche Gebiete umfassende Herausforderung; dies gilt insbesondere auch für den Schutz vor umweltbedingten Zerfallsprozessen. Bisher war die Überwachung meist auf die wenig effiziente visuelle Inspektion oder auf die Erfassung von Klima- und Luftverschmutzungsdaten als Basis für die Schadensvorhersage beschränkt. In dem vorliegenden Projekt, gefördert von der Europäischen Kommission im 7. Rahmenprogramm sowie durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ entwickelt die Universität Stuttgart gemeinsam mit weiteren Forschungseinrichtungen aus mehreren Ländern Europas intelligente drahtlose Systeme für die Dauerüberwachung historischer Gebäude. Damit können Eigentümer oder Restauratoren vor Gefahren gewarnt oder Empfehlungen für weitere Konservierungsmaßnahmen gegeben werden.

2 Einführung

Gebäude jeglicher Art sind essentielle Bestandteile unseres Lebens, sie sind geprägt von persönlichen Ansprüchen, kulturellen Einflüssen und den Umweltbedingungen, in denen sie erstellt wurden. Einige dieser Bauwerke werden im besonderen Maß als schützenswert angesehen, sei es aus künstlerischer, technischer, politischer, städtebaulicher oder landschaftsgestalterischer Sichtweise. Unter dem Begriff des Denkmals wird ihnen besondere Aufmerksamkeit geschenkt, um sie für zukünftige Generationen möglichst lange zu erhalten.

Historische Bauwerke gehören zum Kulturerbe und sind in der Regel im hohen Maße schützenswerte Denkmale und daher von gesellschaftlichem Interesse. Im Zusammenhang mit den wachsenden bzw. sich ändernden Schadstoff- und Umweltbelastungen erlangt das Wissen um den Erhalt historischer Bauwerke eine immer höhere Bedeutung. Die Dauerhaftigkeit einer Vielzahl von Bauwerken, die teilweise bereits Jahrhunderte meist schadlos überstanden haben, ist unter dem Aspekt der ansteigenden Umweltbelastungen heutzutage jedoch vielfach in Frage gestellt. Auf europäischer Ebene werden daher seitens der Europäischen Kommission vermehrt Anstrengungen unternommen, diesem Umstand Rechnung zu tragen. Eine Vielzahl von Forschungsaktivitäten ist dabei im 7. Rahmenprogramm unter dem Begriff „Umwelt“ („Environment“) gebündelt. Für ein Projekt im 7. Rahmenprogramm hat die Universität Stuttgart die Koordination übernommen. Das Verbundforschungsprojekt unter dem Akronym SMooHS (Smart Monitoring of Historic Structures) hat 13 weitere Projektpartner (Tab. 1) und eine Laufzeit von drei Jahren. Die Projektpartner kommen aus verschiedenen Bereichen. Vertreten sind Forschungsinstitutionen (überwiegend Universitätsinstitute) – rot markiert in Tab. 1 –, Industriefirmen und technologieorientierte Partner (blau), sowie Anwender wie Museen und Besitzer von Kulturgütern sowie Restauratoren. Fünf Partner sind jeweils aus Deutschland und Italien, die restlichen Partner kommen aus Kroatien, Polen, Österreich und den Palästinensisch Administrierten Gebieten. Das Projekt startete im Dezember 2008 und endete im November 2011.

Grundsätzlich unterliegt die Bausubstanz der Alterung, d. h. der Bauwerkszustand verschlechtert sich in der Regel kontinuierlich. Einzig die Geschwindigkeit des fortlaufenden Zerfalls hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab und es ist Aufgabe der mit dem Erhalt und der Pflege beauftragten Personen, schädigende Einflüsse zu minimieren. Die primäre Zuständigkeit für Denkmalschutz und Denkmalpflege ist in Deutschland gesetzlich verankert und liegt bei den Unteren Denkmalschutzbehörden, den

Landesämtern für Denkmalpflege sowie den Obersten Denkmalschutzbehörden der Länder. Ihnen obliegt die Entscheidungsgewalt, welche Maßnahmen an Denkmälern ergriffen werden dürfen bzw. sollten. Dabei wird der Erhalt historischer Bausubstanz vor dem Hintergrund nur begrenzt zu Verfügung stehender finanzieller Mittel und auch neuer Herausforderungen zunehmend schwieriger. Zu diesen Herausforderungen zählen beispielsweise die Anforderungen an Energieeinsparung und Nachhaltigkeit, Wohnbedürfnisse und deren individuelle Veränderung sowie die nach bisheriger Kenntnis kaum mehr abzuwendenden Einflüsse aus der Klimaveränderung. Nicht zuletzt auch aufgrund der Vielzahl von fehlgeschlagenen bzw. kontraproduktiven Sanierungs- und Konservierungsmaßnahmen an historischen Bauwerken ist eine Sensibilisierung gegenüber tiefgreifenden Maßnahmen am Objekt in den letzten Jahren zu verzeichnen.

Tab. 1: Partner des SMooHS-Projektes im 7. Rahmenprogramm der EU.

	Name	Abkürzung	Land
1	MPA Universität Stuttgart	MPA.USTUTT	Deutschland, Stuttgart
2	AuRA Restorer	AURA	Deutschland, Schwäbisch Gmünd
3	IWB Universität Stuttgart	USTUTT	Deutschland, Stuttgart
4	Accademia Europea Bolzano	EURAC	Italien, Bozen
5	Alma Mater Studiorum – Università di Bologna	UNIBO	Italien, Bologna
6	Rathgen Research Laboratory - National Museums Berlin	RRL	Deutschland, Berlin
7	Polish Academy of Sciences	PASc	Polen, Krakau
8	Technisches Büro Käferhaus	TBK	Österreich, Wien
9	TTI GmbH – TGU Smartmote	TTI	Deutschland, Stuttgart
10	Metalmobile S.R.L.	Metalmobile	Italien, Bologna
11	Artemis srl	Artemis	Italien, Ancona
12	Consorzio Cetma	CETMA	Italien, Brindisi
13	Riwaq - Centre for Architectural Conservation	RIWAQ	Palestina, Ramallah
14	University of Zagreb	UNIZAG	Kroatien, Zagreb

Als eine unverzichtbare Voraussetzung für angedachte Maßnahmen ist zunächst eine zuverlässige Kenntnis des Bestandes und dessen Zustands. Diese wird in der Bestandsdokumentation zusammengefasst, die neben der zeichnerischen Darstellung (z. B. Schnitte, Grundrisse, Ansichten, Schadenkartierungen usw.) oftmals fotografische und teils maßstabsgerechte Aufnahmen umfasst. Des Weiteren ist das Wissen um den baugeschichtlichen Hintergrund von Bedeutung und es ist eine Abschätzung vorzunehmen, welche Auswirkungen die geplanten Maßnahmen auf die Substanz haben könnten. Der letztgenannte Aspekt gestaltet sich dabei durchaus schwierig, da der Bewertungszeitraum sowohl in der Vergangenheit als auch zukünftig in der Regel sehr lang ist. Auch kleine Veränderungen, die bei kurzen Einwirkungsdauern vielleicht unkritisch sind, können über einen längeren Zeitraum signifikante Auswirkungen haben. Es besteht daher in einem hohen Umfang eine Unsicherheit in der Bewertung der tatsächlichen Einwirkungen auf das Bauwerk wie auch den Auswirkungen.

Um diesen Unsicherheiten zu begegnen, besteht Bedarf an systematischen und objektiven Untersuchungsmethoden, welche über längere Zeiträume eine Charakterisierung von Einwirkungen und Auswirkungen ermöglichen. Wir sprechen in diesem Zusammenhang von einer wiederkehrenden Prüfung bzw. dem Monitoring, wobei diese Begriffe relativ weitgefasst sind.

Ein wichtiger Schritt zum Bauwerkserhalt ist die Aufnahme des Ist-Zustandes, der wechselnden Einwirkungen und der (i.d.R. langsamen) Veränderung der Objekte. Je mehr Wissen über die verwendeten Materialien, das Tragverhalten, und die äußeren Einflüsse auf diese vorhanden ist, desto besser können geeignete Maßnahmen ergriffen werden. Minimalinvasive oder gar zerstörungsfreie Prüfmethoden sind zu bevorzugen und finden daher regelmäßig Anwendung, wobei wiederholte Untersuchungen insbesondere auch eine Charakterisierung des Schädigungsfortschritts ermöglichen. Zunehmend werden ergänzend auch fest installierte, autark arbeitende Sensorsysteme eingesetzt, welche quasi eine „Rund-um-die-Uhr“-Überwachung ermöglichen. Von Vorteil ist es, zukünftig für die Dauerüberwachung drahtlose Sensoren bzw. Sensorsysteme einzusetzen. Drahtlose Sensorsysteme sind mit geringem Aufwand zu installieren, benötigen keine zusätzliche Verkabelung und sind in der Regel kostengünstig. Aufgrund der nicht benötigten Verkabelung werden keine zusätzlichen Befestigungsmittel benötigt, was sowohl im Hinblick auf die weitere Schädigung als auch der Ästhetik Vorteile verspricht. Zudem ist so eine flexible Änderung der Sensorpositionen möglich, was den Einsatzbereich stark erweitert.

Nach einer Bestandsaufnahme können geeignete Maßnahmen zum Erhalt des Objektes eingeleitet werden. Zu derartigen Maßnahmen zählen beispielsweise der Schutz vor schädlicher Strahlung, vor Staub, Feuchtigkeit oder Temperaturwechseln und reicht hin zum Beispiel bis zu Eingriffen in die Klimaregulierung bei Objekten im Innenbereich. Daneben werden aber auch Sanierungs- und Konservierungsmaßnahmen direkt an der Struktur bzw. dem Material vorgenommen. Dies sind beispielsweise konstruktive Verstärkungen, Materialverfestigungen oder Beschichtungen. Aspekte der Erhaltung historischer Bauwerke erstrecken sich damit von der Mikrostrukturebene bis hin zum Makrobereich und zur Betrachtung ganzer Gebäudekomplexe.

3 Gegenstand des Forschungsvorhabens

Innerhalb des Forschungsprojekts sollten ein detaillierter Überblick über aktuelle Thematiken und Entwicklungen zum Begriff „Monitoring“ erarbeitet und entsprechende Technologien und Verfahren entwickelt und evaluiert werden.

Die kontinuierliche Überwachung historischer Bauwerke mit geeigneten Technologien spielt im Zusammenhang mit deren Erhalt eine zunehmende Rolle. Drahtlose Sensoren und Sensornetze können hier zukünftig wertvolle Beiträge liefern. Allerdings gibt es noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Hinblick auf geeignete Sensorik sowie einfache Handhabung und Zuverlässigkeit der drahtlosen Systeme. Zudem werden effiziente Analyse- und Bewertungsmethoden benötigt, die dem Konservator oder Eigentümer klare Aussagen möglichst durch eine automatisierte oder teilautomatisierte Prozessanalyse liefern.

Im SMooHS-Projekt steht die Entwicklung von intelligenten, drahtlosen Sensorsystemen zur Dauerüberwachung von historischen Bauwerken im Vordergrund. Messdaten sollen direkt in sogenannten Sensorknoten (also am Objekt) vorverarbeitet werden und nicht wie bei Datenloggern an den Auswerter bzw. Experten weitergeleitet werden. So wird vermieden, eine große Menge an schwer überschau- und auswertbaren Daten anzusammeln. Da außerdem die Datenübertragung bei drahtlosen Messsystemen den Verbrauch an Energie wesentlich bestimmt, kommt eine Reduzierung der übertragenen Datenmenge einer längeren (wartungsfreien) Nutzung des Sensorknotens zu Gute. Zwar lassen sich neben Batterien auch andere Stromquellen wie Solarzellen oder

Gebäudeschwingungen nutzen, jedoch ist deren Energieausbeute i.d.R. sehr gering, so dass das Energiesparen auch hier die wesentliche Möglichkeit zur Schonung der Ressourcen darstellt. Da eine Datenreduzierung im Knoten stattfinden muss, sind softwarebasierte „intelligente“ Methoden notwendig, um eine effiziente und fehlerfreie Interpretation der Daten zu ermöglichen.

Eine kontinuierliche Überwachung von Bauwerken hat weiterhin zum Ziel, daraus neue oder auch genauere Erkenntnisse bezüglich möglicher Schädigungsursachen abzuleiten. Dazu müssen geeignete Analyseverfahren und Modelle vorhanden sein, die die Einwirkungen und Auswirkungen in einen Zusammenhang stellen. Insbesondere verspricht die Kopplung verschiedener Einwirkungen, dass tatsächlich schädigende Prozesse besser charakterisiert werden können. Wie jedem Fachkundigen bekannt sein dürfte, ist beispielsweise die parallele Berücksichtigung von Temperatur und Feuchte im Hinblick auf Bauteildehnungen und resultierende Bauteilschädigungen notwendig. Allerdings fehlt es in der Praxis an anwendbaren Modellen bzw. dynamischen Modellen, die kontinuierlich erfasste Messwerte aus der Dauerüberwachung berücksichtigen. Einer der Schwerpunkte der Arbeiten innerhalb des Projekts war daher die Modellierung von Temperatur- und Feuchtetransporten in Natursteinen in Verbindung mit Salzen und mikroklimatischen Einflüssen. Auf Basis der messbaren Einwirkungen wurden auch bereits bekannte Schädigungsmodelle modifiziert und hinsichtlich des Einsatzes bei der kontinuierlichen Überwachung und der notwendigen Datenreduktion optimiert.

3.1 Arbeitspakete

Das Verbundforschungsprojekt SMooHS ist zur Erreichung dieser Ziele in insgesamt 7 Arbeitspakete unterteilt, wobei die drei folgenden Arbeitspakete (WP3, WP4 und WP5) herausragen.

- Entwicklung von intelligenten, drahtlosen Monitoringtechnologien (Arbeitspaket 3)
- Modellierung und Analyseverfahren (Arbeitspaket 4)
- Vergleichende Labor- und Feldversuche (Arbeitspaket 5)

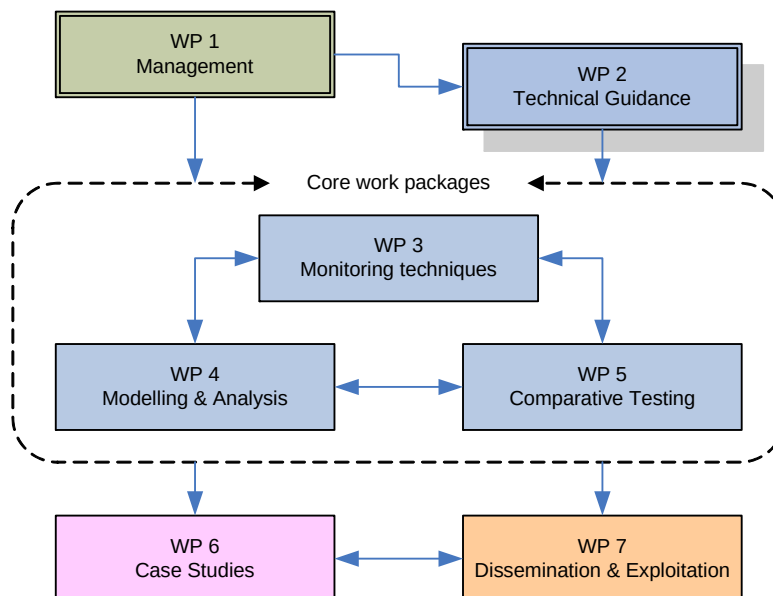


Abb. 1: Einteilung der Arbeitspakete (Workpackages).

4 Arbeitspaket 2: Technische Beratung und Ermittlung von Defiziten im Bereich der Denkmalpflege

Innerhalb dieses Arbeitspakets, welches unter der maßgeblichen Leitung der Rathgen Forschungslaboratorien stand, wurden Belange des Denkmalschutzes, des Erhalts schützenswerter Güter und die damit verbundenen Anforderungen an Technologien und Verfahren aus der Sicht der Bauwerkseigner, der Restauratoren und der Denkmalpflege betrachtet. Hierbei wurde auch die Sinnhaftigkeit und der tatsächliche Bedarf an neuen Technologien und Verfahren kritisch hinterfragt.

4.1 Herkömmliche Überwachungsmethoden und denkmalpflegerische Arbeit

Die Grundlage jeder denkmalpflegerischen Arbeit stellt die Bestandsdokumentation dar. Die Erstellung einer Bestandsdokumentation ist in weiten Teilen sogar verpflichtend und gesetzlich vorgeschrieben. Die Art und der Umfang einer Bestandsdokumentation sind allerdings für jeden Einzelfall sehr individuell. Sie kann auf bestimmte Bauteile, Materialien oder auf bestimmte Fragestellungen beschränkt sein. In jedem Fall sollte die Bestandsdokumentation auch tatsächlich durchgeführte Maßnahmen der Sanierung oder Konservierung oder gar Umbaumaßnahmen mit den wesentlichen Detailinformationen umfassen. In der Regel wird die Anfertigung einer Bestandsdokumentation und deren Umfang als Auflage von den Denkmalschutzbehörden festgelegt. Inhaltlich setzen sich Bestandsdokumentationen aus allgemeinen Angaben zum Denkmal, bereits vorhandenen Unterlagen, zeichnerischen und fotografischen Bestandserfassungen einschließlich schriftlicher Befunderfassungen und –beschreibungen wie auch einer Bewertung von durchgeführten Maßnahmen zusammen. Hierzu kommen dann eventuell im Weiteren noch einzelfallspezifische Beurteilungen beispielsweise durch Sonderfachleute, die mittels zerstörungsfreier oder zerstörender Untersuchungsmethoden wichtige zusätzliche Detailinformationen liefern können, die erst die Wahl der am besten geeignet erscheinenden Erhaltungsmaßnahme ermöglicht. Da fortlaufende Veränderungen am Bauwerk zu dokumentieren sind, stellt die Bestandsdokumentation bereits ein Monitoring dar.

Auch bei der Bestandsdokumentation ist der Trend zur vermehrten Verwendung von modernen Technologien zu verzeichnen. Dies reicht von der EDV-gestützten Schadenskartierung (vgl. Abb. 2) hin zur Erstellung von dreidimensionalen Planunterlagen und der virtuellen Visualisierung, bei denen hochgenaue 3D-Laserscannverfahren eingesetzt werden.

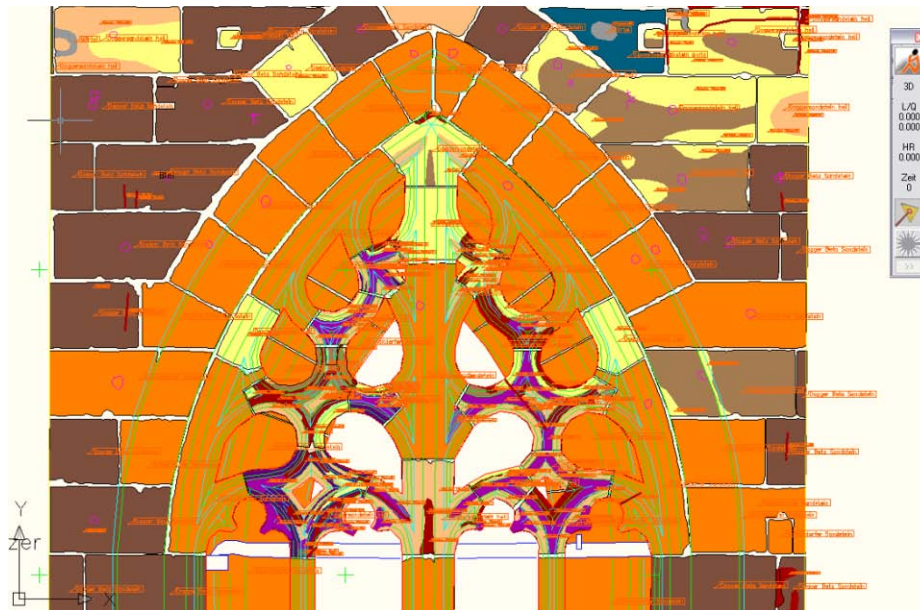


Abb. 2: EDV-gestützte Schadenskartierung an einem historischen Kirchenfenster (MonuMap).

4.2 Bedeutung der instrumentierten Überwachung

Periodische Prüfungen stellen eine Ist-Zustandsbewertung zu dem jeweiligen Zeitpunkt dar. D. h., es werden stichprobenartig Schädigungszustände charakterisiert und Veränderungen gegenüber vorhergehenden Messungen beurteilt. Dies geschieht auf Grundlage vorhandenen Fachwissens über die Schädigungs- und Veränderungsprozesse. Inwiefern hierbei allerdings alle veränderungsspezifischen Einflüsse richtig erfasst wurden, hängt bisher stark von der Erfahrung und Fachkenntnis des Beurteilenden ab. Fehlinterpretationen können nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Insbesondere können schädigungswirksame Einflüsse nur von temporärer Natur sein, so dass diese bei der periodischen Prüfung eventuell gar nicht beobachtet werden. Als Beispiel sei hier das Auftreten starker Erschütterungen oder das nur temporäre Auftreten von extremen Witterungsbedingungen genannt. Die Korrelation von Ursache und Wirkung gestaltet sich unter solchen Bedingungen als schwierig. Insbesondere bei mineralisch gebundenen Baustoffen kann oftmals eine klare Unterscheidung, ob extreme Ereignisse, schleichende Veränderungen oder aber periodisch auftretende Einwirkungsveränderungen ursächlich beispielsweise für Rissbildung sein können, nicht vorgenommen werden. Um der genauen Ursache auf den Grund zu gehen, bietet sich die instrumentierte Überwachung an, wie sie innerhalb des Forschungsprojekts erforscht und weiterentwickelt werden sollten.

4.3 Kontinuierliches Monitoring zur Erfassung und Überwachung von Einwirkungen und Schädigungsprozessen

Ein instrumentiertes Monitoring ist in der Regel mit einem nicht unerheblichen Aufwand verbunden, weswegen zunächst die Frage nach dem möglichen Nutzen einer Dauerüberwachung gestellt und beantwortet werden muss. Umfangreiche Befragungen wurden diesbezüglich innerhalb des Arbeitspaketes unter Leitung der Rathgen Forschungslaboratorien durchgeführt und ein Anforderungskatalog entwickelt, der reale Defizite an historisch wertvollen Objekten beschreibt (siehe hierzu Bericht D2.1: *Real Problems apparent at cultural heritage and monitoring demands and deficits*).

Da es zunächst Ziel einer Dauerüberwachung ist, quasi kontinuierlich mögliche Änderungen auf der Einwirkungs- bzw. Widerstandsseite zu erfassen und anschließend zu bewerten, müssen die Wirkmechanismen auf eine mögliche Schädigung in Grundzügen bekannt sein. Fundierte werkstoffwissenschaftliche Kenntnisse sind dazu unabdingbar. Danach stellt sich dann die Frage, mit welchen Monitoringtechnologien wesentliche

Kennwerte ermittelt werden können, wobei klar sein sollte, dass nicht alle möglichen Schädigungsszenarien aufgrund deren Komplexität mittels moderner Messtechnik und unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte vollständig erfasst werden können.

Zur den identifizierten Schlüsselparametern einer kontinuierlichen Überwachung von Bauwerken zählt zunächst die Erfassung von Einwirkungen aus der Umwelt, hier vor allem die Faktoren Feuchtigkeit und Temperatur. Sie haben nicht nur Einfluss auf die meisten Schädigungsprozesse selbst, sondern sind auch im Hinblick auf die verwendete Messtechnik von hoher Bedeutung. Wechselnde Temperatur- und Feuchtezustände sind bei langfristiger Betrachtung weiterhin als maßgebliche Schädigungsparameter bei jedem der Witterung ausgesetzten Bauwerk anzusehen. Welche konkreten Schädigungsprozesse tatsächlich maßgebend für die Schädigung sind, hängt dann allerdings von weiteren Faktoren ab, wie z. B. dem Material und dessen thermisch-hygrischen Verhalten oder dem Vorhandensein weiterer Einwirkungen wie beispielsweise von Salzen usw.

Vom Grundsatz her ist es möglich, jegliche Art der Einwirkung messtechnisch zu erfassen. Die Erklärung hierfür ist relativ simpel, da wir als Einwirkungen nur solche Faktoren bezeichnen, die messtechnisch quantifizierbar sind. Zu den als wesentlich erachteten Faktoren gehören physikalische und chemische Einwirkungen wie beispielsweise Temperatur, Feuchte, Wind oder solare Strahlung, wie auch Salze, Gase oder Erschütterungen. Was die Widerstandsseite angeht, so gestaltet sich dies ungleich schwieriger. Um eine Materialschädigung charakterisieren zu können, sind messtechnisch erfassbare Parameter notwendig, die eine zuverlässige Beurteilung des Materialzustands, der Materialeigenschaften und/oder des Schädigungsprozesses zulassen. Dabei ist es in der Regel einfacher, Materialveränderungen messtechnisch zu erfassen als von Messparametern auf tatsächliche Materialeigenschaften bzw. auf den tatsächlichen Grad der Schädigung zu schließen. So lässt sich beispielsweise die Rissweitenveränderung eines Risses in einem Mauerwerk leicht mittels Wegaufnehmern über einen längeren Zeitraum messen, in welcher Hinsicht allerdings die Rissbreitenveränderung eine Aussage bezüglich des Schwere der Schädigung und dem weiteren Schädigungsfortschritt zulässt, ist zunächst nicht unbedingt offensichtlich. Hier müssen geeignete Beurteilungskriterien gefunden und festgelegt werden. Das genannte Beispiel wirft zudem die Frage nach primären und sekundären Schadensmechanismen auf. So beeinflusst ein Riss primär die Strukturintegrität und damit die Stabilität eines Bauteils. Sekundäre Schäden können sich hieraus aber beispielsweise in Form von Eindringen von Feuchtigkeit in den Riss ergeben, was weitere Schädigungsprozesse auslöst. Hilfreich ist vor diesem Hintergrund, sich vorab über das Ursache-Wirkungs-Prinzip, d. h. der Kausalität, genaue Gedanken zu machen.

Insgesamt kann konstatiert werden, dass sich eine instrumentierte Dauerüberwachung von Bauwerken mit permanent tätigen Überwachungssystemen, wie sie innerhalb des Projekts entwickelt wurden, primär dafür eignet, Einwirkungen und die damit unmittelbar einhergehenden Auswirkungen auf das Bauwerk zu erfassen und zu beurteilen. Für detaillierte Schadensuntersuchungen sind in der Regel periodische Prüfungen – vorzugsweise zerstörungsfrei und gegebenenfalls unter Verwendung moderner zerstörungsfreier Prüfmethoden – eine sinnvolle Möglichkeit. Einen Überblick über sinnvoll einzusetzende Verfahren wurde unter Mitwirkung der deutschen Partner erarbeitet. Siehe hierzu die Berichte

- *D5.1 part 1: Report on test methods and former test results und*
- *D5.1 part 2: Report on test methods and former test results carried out on project's case studies.*

5 Arbeitspaket 3: Entwicklung von intelligenten, drahtlosen Monitoringtechnologien

5.1 Anforderungen an die Messtechnik – Grundlagen

Vor dem Hintergrund des Denkmalschutzes sollten alle Verfahren und Technologien eine weitgehend zerstörungsfreie Anwendung ermöglichen um den Eingriff in die historische Bausubstanz zu minimieren. Die im Bauwesen bereits erfolgreich eingesetzten und in Arbeitspaket 5 erwähnten Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung, wie beispielsweise die Verwendung von Georadar, Ultraschall oder Thermographie bieten sich für eine wiederkehrende Prüfung daher an. Anders sieht die Situation allerdings im Fall der instrumentierten Dauerüberwachung aus. Allein schon aus Gründen des Diebstahlschutzes ist es notwendig, Sensoren und Messgeräte an den zu überwachenden Bauteilen zu befestigen. Darüber hinaus ist hinsichtlich einiger der zu erfassenden Messwerte und der zu erzielenden Genauigkeit eine ordnungsgemäße und dauerhafte Befestigung am zu untersuchenden Objekt unabdingbar. Obwohl versucht wird, Eingriffe bei besonders schützenswerten Objekten so gering wie möglich zu halten, sind minimalinvasive Eingriffe oftmals nicht zu vermeiden. Sind allerdings auch diese nicht erwünscht, so bietet es sich seitens der Monitoringsysteminstallation an, diese an wenig auffälligen Stellen am Objekt zu befestigen. In der Praxis zeigt sich aber auch hier, dass dies nicht unbedingt immer die gewünschten Erkenntnisse liefert. Hier heißt es umzudenken und nach Alternativen zu suchen. Eine dieser Möglichkeiten ist die Verwendung von Ersatzmaterialien bzw. Ersatzprobekörpern, welche direkt den vorhandenen Einwirkungen am Objekt ausgesetzt werden. Bei dem in Abb. 3 dargestellten Versuchsaufbau wurde beispielsweise ein vorgeschädigter und mit konservatorischen Maßnahmen gefestigter Naturstein unter realen Witterungsbedingungen am Münster in Schwäbisch Gmünd überwacht.

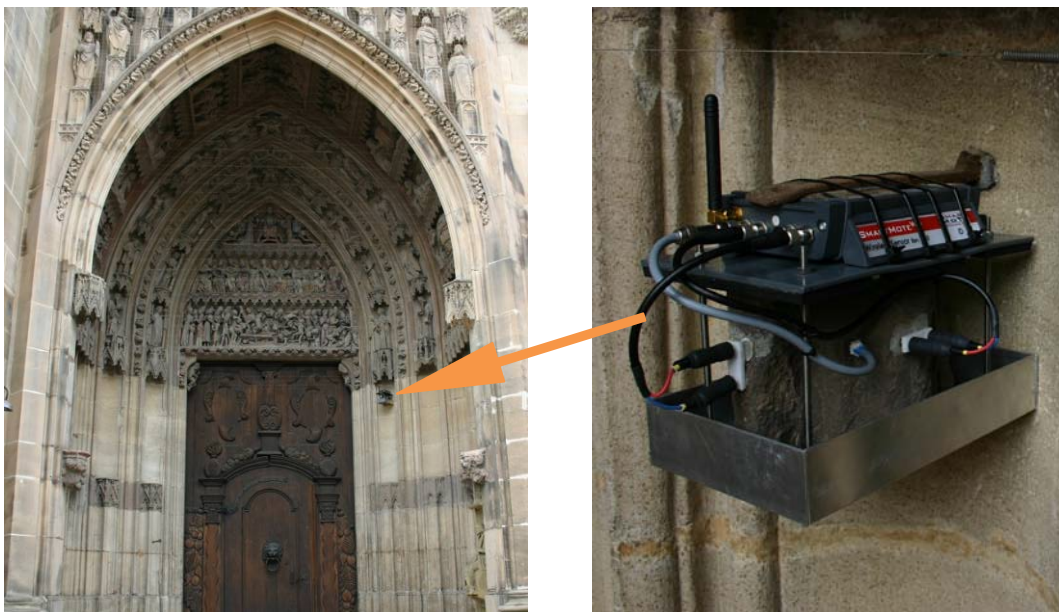


Abb. 3: Mit drahtloser Sensorik instrumentierter Ersatzprobekörper aus Naturstein für die kontinuierliche Erfassung von Feuchte- und Temperaturzuständen und deren Einfluss auf die Steinschädigung am Heilig-Kreuz-Münster in Schwäbisch Gmünd.

Aus der vorgenannten Methode ist ersichtlich, dass unter Umständen durchaus zerstörungsfrei an denkmalgeschützten Bauwerken ein kontinuierliches Monitoring durchgeführt werden kann. Für viele Messaufgaben wird es dennoch erforderlich sein, Sensoren direkt am Objekt zu befestigen. Hierfür gilt, dass die eingesetzte Sensorik generell leicht zu installieren und zudem dauerhaft sein sollte. Es können Sensoren sowohl an der Bauteiloberfläche als auch innerhalb eines Bauteils angebracht werden.

Grundsätzlich haben alle eingesetzten Sensoren gewisse Anforderungen an die Genauigkeit, Kalibrierungsfehler, Sensitivität, Hysterese, Wiederholbarkeit, Linearität, Langzeitstabilität sowie weitere Anforderungen zu erfüllen. Umfangreiche Untersuchungen hierzu wurden von den Projektpartnern TTI, USTUTT (MPA) und USTUTT (IWB) durchgeführt. Besonders hoch sind die Anforderungen insbesondere an die der Witterung ausgesetzten Sensoren, weswegen in der Praxis bei der Auswahl der Sensorik entsprechend versierte Fachleute involviert werden sollten.

In den letzten Jahren wurden verstärkt Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Hinblick auf einfach und minimalinvasiv zu installierende Messsysteme für die Dauerüberwachung unternommen. Insbesondere vor dem Hintergrund der bestehenden denkmalgeschützten Bauwerke liegt es auf der Hand, autonom arbeitende Systeme zu verwenden, welche keinen übermäßigen Verkabelungsaufwand und zudem möglichst keine externe Stromversorgung benötigen. Mittlerweile ist kommerziell bereits eine Vielzahl verschiedener, batteriebetriebener Messdatenlogger verfügbar, die es ermöglichen, in programmierbaren Zeitintervallen relevante Parameter wie z. B. Temperatur oder Feuchte zu erfassen und zu speichern. Die Datenlogger werden nach einem bestimmten Messzeitraum dann manuell ausgelesen und die Daten ausgewertet. Bedingt durch das diskontinuierliche Auslesen eignen sich Datenlogger ausschließlich für die nachträgliche Analyse, was auch oftmals ausreichend ist. Allerdings gibt es auch Anwendungsfälle, in denen Bedarf an einer quasi Echtzeitanalyse relevanter Messparameter besteht, da solche Parameter als Indikatoren für eine aktive Beeinflussung von Einwirkungen herangezogen werden. Die automatisierte Temperatur- und Feuchteregulierung innerhalb eines Gebäudes stellt dabei eine der klassischen und gleichwohl wichtigsten Anwendungen dar. Hierfür eignet sich der Einsatz der im Projekt entwickelten drahtlosen Sensornetze, bei denen einfach gesprochen batteriebetriebene Datenlogger zusätzlich mit einem Funkmodul ausgerüstet werden, über welches dann die Daten drahtlos an Zentralrechner, Steuer- und Regeleinheiten oder zum Endnutzer übertragen werden können, um so eine reaktive Aktion einzuleiten (vgl. Abb. 4 und Abb. 5).



Abb. 4: Entwickler, drahtloser Sensorknoten (Smartmote 2011).

Für das Bauwerksmonitoring geeignete Sensornetze weisen bestimmte Eigenschaften auf, die aus der Sicht der durchgeführten Forschung wie auch des zuverlässigen Praxiseinsatzes von besonderer Bedeutung sind. So besteht ein drahtloses Sensornetz aus vielen einzelnen Sensorknoten, die jeweils mit verschiedenen Sensoren bestückt sein können. Über eine drahtlose Funkverbindung muss nun erreicht werden, dass die einzelnen Sensordaten zuverlässig an den Nutzer bzw. den verantwortlichen Ingenieur übertragen werden, wobei eine statische Netzwerkstruktur vorausgesetzt wird. Vorzugsweise kommen für diesen drahtlosen Datentransfer zwei verschiedene Netzwerktopologien in Frage. Neben der einfachen sternförmigen Topologie (Star-Topologie) sind es insbesondere die Multihop-Topologien, welche für drahtlose Sensornetze im Bauwesen besonders geeignet erscheinen [4]. Der Vorteil von Multihop-Topologien sind der oftmals propagierte geringere Stromverbrauch sowie die geringeren Anforderungen an die Funktechnologie in Verbindung mit größeren Funkstrecken, da für die Datenübertragung durch das Zwischenschalten von Sensorknoten nur geringe Sendeleistungen erforderlich sind. D. h., ein Sensorknoten kommuniziert nur mit einigen wenigen Knoten, die sich in nächster Umgebung zu diesem befinden. Dadurch kann die Sendeleistung und zugleich die gegenseitige Störung bei der Funkübertragung minimiert

werden. Nachteilig ist allerdings der erhöhte Aufwand bezüglich der Programmierung und Konfiguration eines solchen Multihop-Netzwerkes. Dabei muss insbesondere eine Balance gefunden werden zwischen der Zuverlässigkeit der Datenübermittlung und dem Stromverbrauch, welcher maßgeblich durch die Funkübertragung bestimmt wird. Hier hat sich in der Vergangenheit gezeigt, dass einfache sternförmige Topologien bisher einfacher zu handhaben sind und mit deutlich geringerem Strombedarf auskommen. Dies liegt insbesondere an dem Umstand, dass keine Kommunikation zwischen einzelnen Sensorknoten stattfindet, was je nach Messumfang einen autonomen Betrieb über mehrere Jahre ermöglicht. Daher wurde auch ein solches drahtloses Sensornetzwerk von den Projektpartnern TTI, USTUTT (MPA) und USTUTT (IWB) entwickelt.

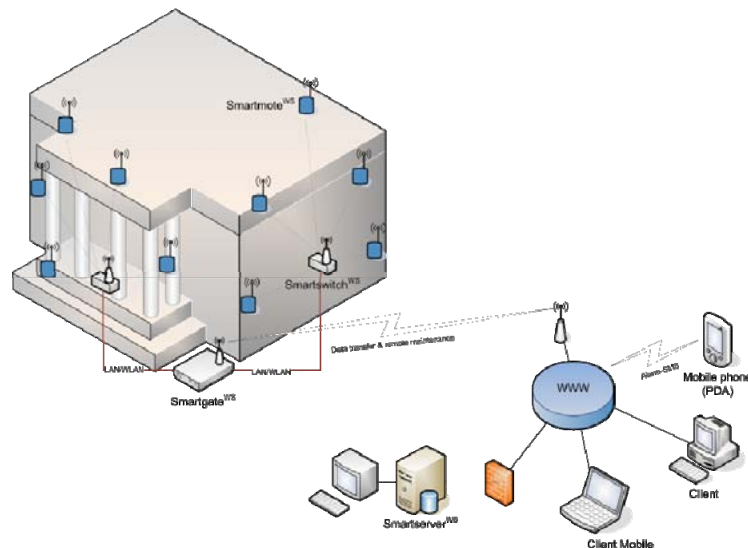


Abb. 5: Prinzipielle Funktionsweise des drahtlosen Sensornetzes (hier das Smartmote-System als ein einfaches, sternförmiges Netz) für die Bauwerksüberwachung.

5.2 Drahtloses Sensornetz für die Dauerüberwachung von historischen Bauwerken

Innerhalb von Arbeitspaket 3 wurden „intelligente“ drahtlose Sensorsysteme entwickelt, wobei zwei verschiedene Ansätze verfolgt wurden. Der erste Ansatz befasst sich mit der Entwicklung eines datenzentrischen drahtlosen Sensorsystems, der zweite mit einem drahtlosen Sensornetz als sogenanntes verteiltes System (Abb. 6). Beide Ansätze weisen ihre Vor- und Nachteile auf und sind dementsprechend für einige Anwendungen mehr, für andere hingegen weniger geeignet. Beiden Systemen ist jedoch gemein, dass sie bereits eine Datenvorverarbeitung in einem einzelnen Sensorknoten ermöglichen. Damit unterscheiden sich diese drahtlosen Systeme von rein telemetrischen Datenerfassungssystemen, die kontinuierlich alle Daten (z. B. auch Noise) aufzeichnen.

Das von dem italienischen Projektpartner Metalmobile entwickelte datenzentrische System bezeichnet ein System aus voneinander unabhängig arbeitenden drahtlosen Sensorknoten, an die je nach Bedarf verschiedene Sensoren angeschlossen werden können. Mittels eines integrierten Computers werden die Daten vorverarbeitet bzw. bereits analysiert und dann mittels standardisierter Mobilfunktechnologie an den Nutzer weitergeleitet. In der Regel werden solche Systeme nur an wenigen Stellen eines Bauwerks platziert.

Die Datenvorverarbeitung in einem Sensorknoten selbst bietet eine Reihe von Vorteilen. Die wichtigsten Vorteile sind dabei die Datenreduktion und, was hinsichtlich der Lebensdauer eines drahtlosen Sensorknotens wesentlich ist, die Reduktion des Stromverbrauchs. Durch eine intelligente Datenreduktion ist es zudem möglich, dem Nutzer nur die relevanten Informationen zur Verfügung zu stellen, die er tatsächlich benötigt. Auf Grundlage derartig extrahierter Werte oder Wertegruppen können dann

mittels geeigneter Schädigungsmodelle mögliche Auswirkungen auf die betrachteten Strukturen bzw. Materialien abgeleitet werden. Aufgrund der vielfältigen äußeren Einwirkungen ergibt sich im Hinblick auf die Beurteilung des Material- und Strukturverhaltens allerdings eine teilweise sehr hohe Komplexität. Die Forschungsaktivitäten in den nachfolgend aufgeführten Arbeitspaketen WP4 und WP5 tragen diesen Aspekten Rechnung.

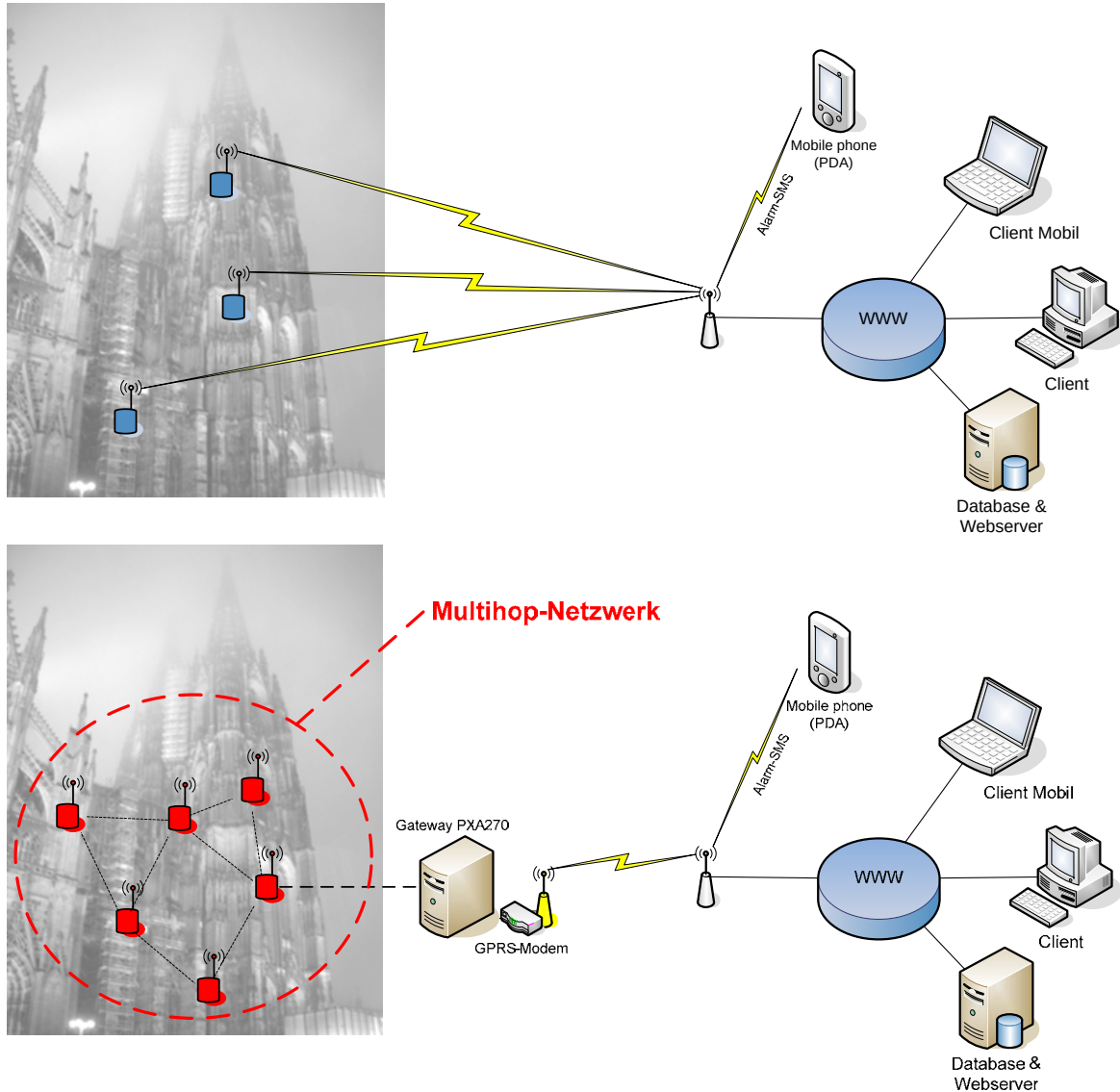


Abb. 6: Datenzentrisches Sensorsystem (oben) und drahtloses Multihop-Sensornetz als Beispiel für ein verteiltes System (unten).

Von den deutschen Projektpartnern in Stuttgart wurde der Ansatz der verteilten drahtlosen Sensornetze verfolgt, die auf Miniatorsensoren basieren und in besonderem Maße kosten- und leistungsoptimiert sind. Vorteile von Sensornetzen bestehen in der Installation einer Vielzahl von Sensoren genau an den Orten, wo sie benötigt werden, und der Möglichkeit, redundante Informationen zu erhalten. Ein derartiges Vielstellenmesssystem ermöglicht die Durchführung differenzierter Untersuchungen, wobei zudem Fehler, die bei einer nur lokal an wenigen Messstellen erfolgenden Datenerfassung und -interpretation entstehen können, vermieden werden. Die Datenreduktion und Datenanalyse findet weitgehend im Sensorknoten statt, wobei auch Informationen von einzelnen Gruppen von Sensorknoten (Sensorclustern) mit unterschiedlichen Sensoren (Temperatur, Feuchte, Dehnung, Vibration, CO₂, Ozon, Luftgeschwindigkeit, Neigung, Strahlungsdichte u.v.a.m.) ausgewertet werden können. Abb. 7 zeigt den Prototyp eines neu entwickelten Sensorknotens.



Abb. 7: Sensorknoten für den Betrieb in drahtlosen Sensornetzen (links) mit Stromversorgung und Miniatursensoren (rechts).

Abb. 8 zeigt verschiedene Systemkomponenten, aus denen Sensorknoten für gezielte Messaufgaben zusammengestellt werden können. Grundsätzlich besteht der entwickelte Sensorknoten aus dem Basisboard (Processor board), welches die benötigten Grundkomponenten beinhaltet. Hierzu gehören die Stromversorgung (Lithium-Thionylchlorid-Batterien), ein Microcontroller (MSP430), ein analoges Frontend zum direkten Anschluss von Sensoren zur Messung von Dehnungen, Temperaturen, Verschiebungen etc. sowie vier Anschlussbuchsen zum direkten Anschluss von externen Sensoren. Bereits auf dem Prozessorboard integriert sind ein dreiachsiger Beschleunigungssensor wie auch ein Sensor für die Temperatur- und Feuchtemessung im Sensorknoten. Weiterhin befinden sich auf dem Prozessorboard zwei Buchsenleisten, auf die zusätzliche Sensorboards gesteckt werden können, um so eine Vielzahl von weiteren Sensoren anschließen zu können. Eine Reihe von Sensorboards wurde zudem entwickelt, u.a.

- ein Sensorboard (Elektrometer) mit 8 hochohmigen Eingängen für die Messung von Potentialdifferenzen, welche für die Analyse von Salzbelastungen in Naturstein herangezogen wurden,
- ein Sensorboard für impedanzspektroskopische Messungen mit 6 Kanälen, welches für die kombinierte Bestimmung von Salz- und Feuchtegehalten in Naturstein konzipiert wurde,
- ein Sensorboard einschl. externen zweiachsigem Sensor für die hochgenaue Messung von Bauwerksneigungen,
- ein Sensorboard einschl. Sensor für die Luftgeschwindigkeitsmessung sowie
- ein Sensorboard für die zweikanalige Messung hochfrequenter Signale einschl. einer Ereigniserkennung.

Alle einzelnen Komponenten wurden so ausgewählt und zusammengestellt, dass sie unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen Aspekten den Anforderungen an die Dauerüberwachung von historischen Bauwerken genügen.

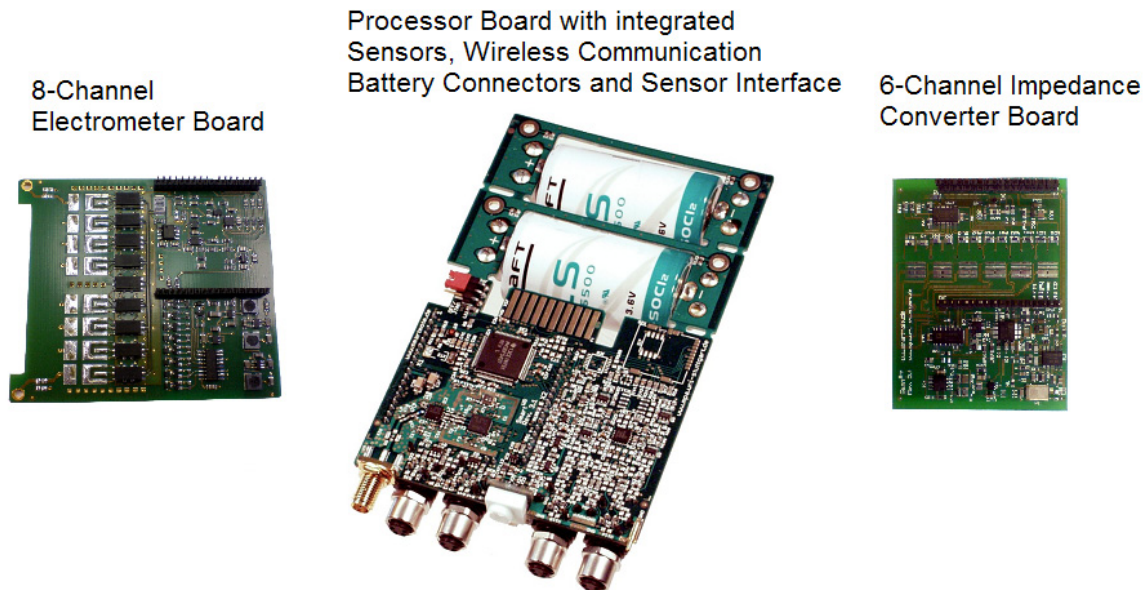


Abb. 8: Beispiele der entwickelten Systemkomponenten.

Für die Übermittlung der Daten an den Endnutzer bzw. an einen Server wurde im Weiteren eine Basisstation mit integriertem GPRS-Modem entwickelt (vgl. Abb. 9), welche sowohl als Gateway als auch als Repeater eingesetzt werden kann. Detailinformationen zu den entwickelten Systemkomponenten sind dem Bericht

- D3.2: Smart wireless sensor network platform

zu entnehmen.



Abb. 9: Basisstation (SmartGate^{WS}, Rev. 3.3).

5.3 Sensornetzwerklayout und –softwarekomponenten

Für die Dauerüberwachung mittels der entwickelten Hardware wurde im Weiteren eine Vielzahl verschiedener Softwarekomponenten entwickelt (vgl. auch Abb. 10). Für die Sensorknoten wurden zwei Softwaremodule entwickelt. Zum Einen ist dies der Bootloader „Wboot“, der als Kernkomponente auf allen Sensorknoten installiert ist. Mittels des Bootloaders ist es möglich, verschiedene Applikationssoftware („Miranda“) drahtlos auf den Sensorknoten hochzuladen. Die Applikationssoftware stellt die eigentliche Messanwendung dar und ist in weiten Teilen frei konfigurierbar und programmierbar. Hiermit ist es möglich, im hohen Grad individualisierte und für die konkrete Problemstellung optimierte Mess- und Analyseroutinen zu entwickeln. Das Protokoll, mit dem die Daten per Funk übertragen werden, ist proprietär und wurde hinsichtlich des Strombedarfs unter Berücksichtigung der Übertragungszuverlässigkeit optimiert. Im

Vergleich zum ZigBee-Standard ist das Protokoll etwa 50% kleiner, was mit einer Stromeinsparung von ebenfalls etwa 50% einhergeht.

Für die entwickelte Basisstation wurden drei verschiedene Softwarekomponenten („Uranus“ und „Jupiter“ in Verbindung mit der „Starcatcher“-Komponente) bereitgestellt. Die Funktionalität richtet sich je nachdem, in welcher Eigenschaft die Basisstation am Bauwerk eingesetzt wird. So kann die Basisstation optional auch nur in Form eines Repeaters eingesetzt werden, was es ermöglicht, auch größere Sensornetzwerke an einem Bauwerk zu realisieren. Dies ist immer dann erforderlich, wenn die Reichweite der Funkverbindung zwischen Sensorknoten und Basisstation nicht ausreichend ist. Optional kann auf einer Basisstation zudem noch eine Softwarekomponente („Callisto“) installiert werden, die für die aktive Kontrolle am Bauwerk dient. Hiermit können z. B. Warnhinweise (Alarmmeldungen) generiert werden oder aber Steuerungsmaßnahmen am Objekt (z. B. Heizungsregelung, Fensterschließung o. ä.) initiiert werden.

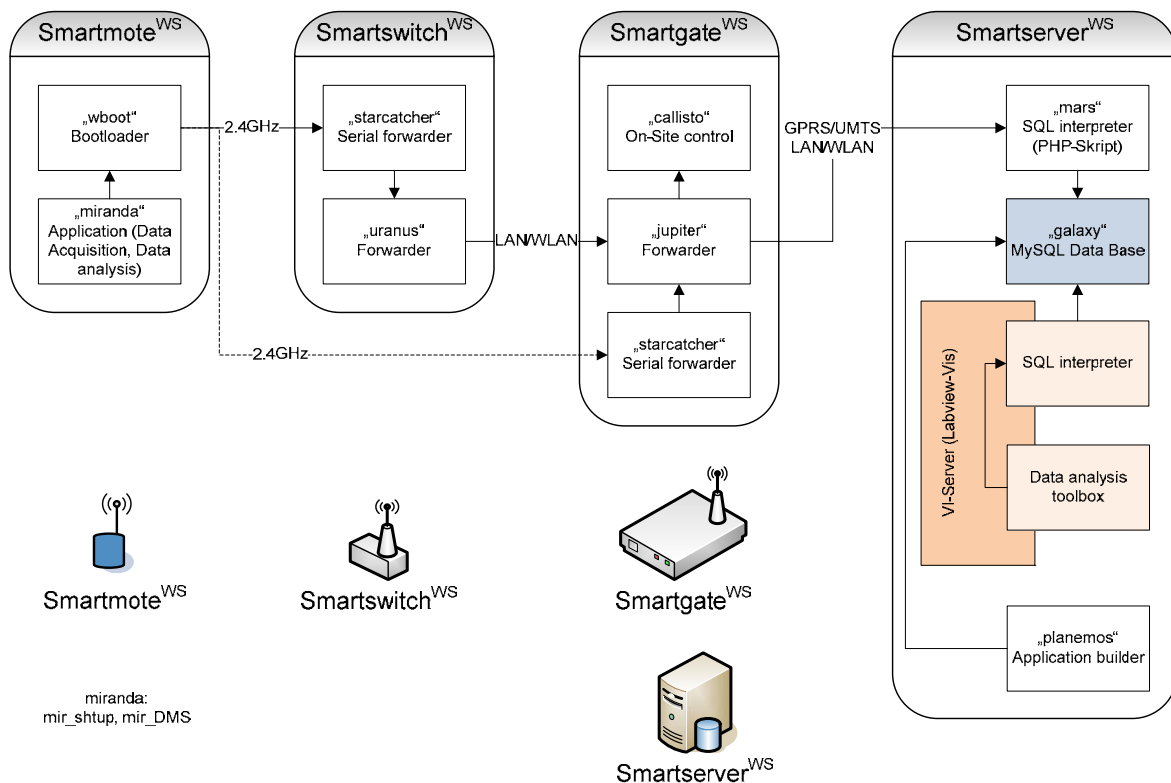


Abb. 10: Übersicht über die verschiedenen Softwarekomponenten und Namenskonventionen.

Aus Gründen der Datensicherheit werden alle Messdaten nicht jeweils am untersuchten Objekt, sondern in einer zentralen SQL-Datenbank gespeichert (vgl. hierzu Abb. 11). Alle Analysen, welche sich auf die Auswertung von Zeitreihen beziehen, werden auf Basis der in der SQL-Datenbank gespeicherten Daten vorgenommen. Hierzu bestehen verschiedene Möglichkeiten:

- Visuelle Analyse der Rohdaten in Form einfacher Tabellen und Diagrammen über das Internet und einen Webbrowser (eingeschlossen ist hier eine Exportfunktion zur weiteren Datenanalyse z. B. mit Excel etc.)
- Analyse der Rohdaten lokal über einen Labview-Server (vgl. Abb. 12); Neben der Visualisierung der Rohdaten können mittels Labview automatisierte und individualisierte Datenanalysen entwickelt, implementiert und (auch über einen Webbrowser, vgl. Abb. 13) bereitgestellt werden.

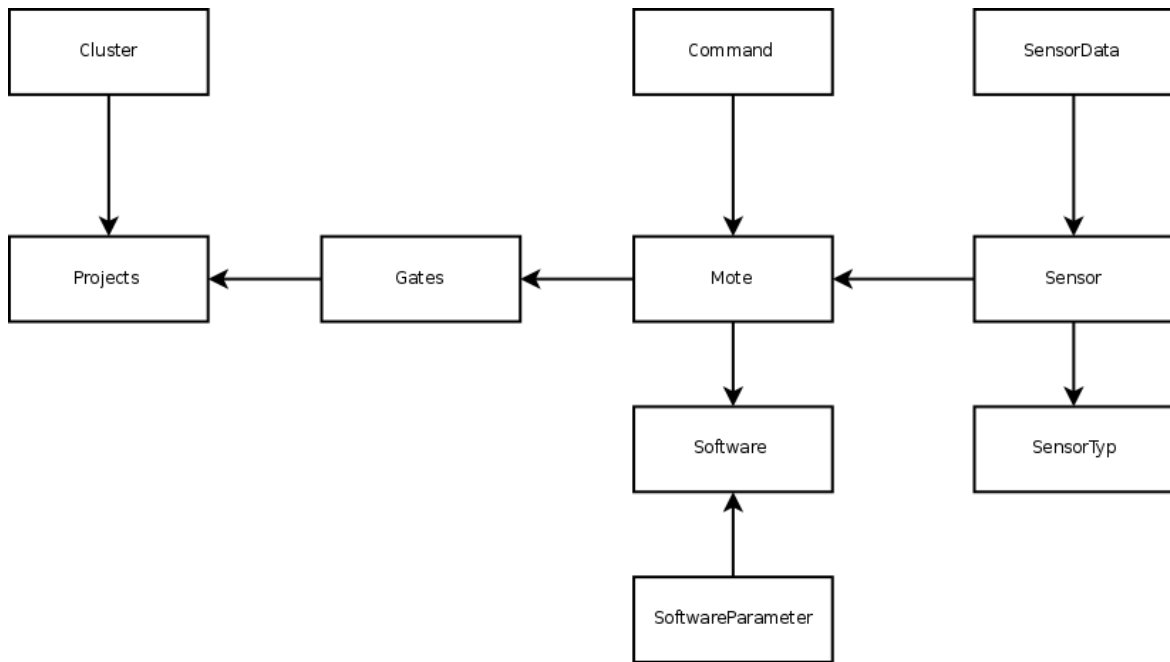


Abb. 11: Vereinfachte Datenbankstruktur.

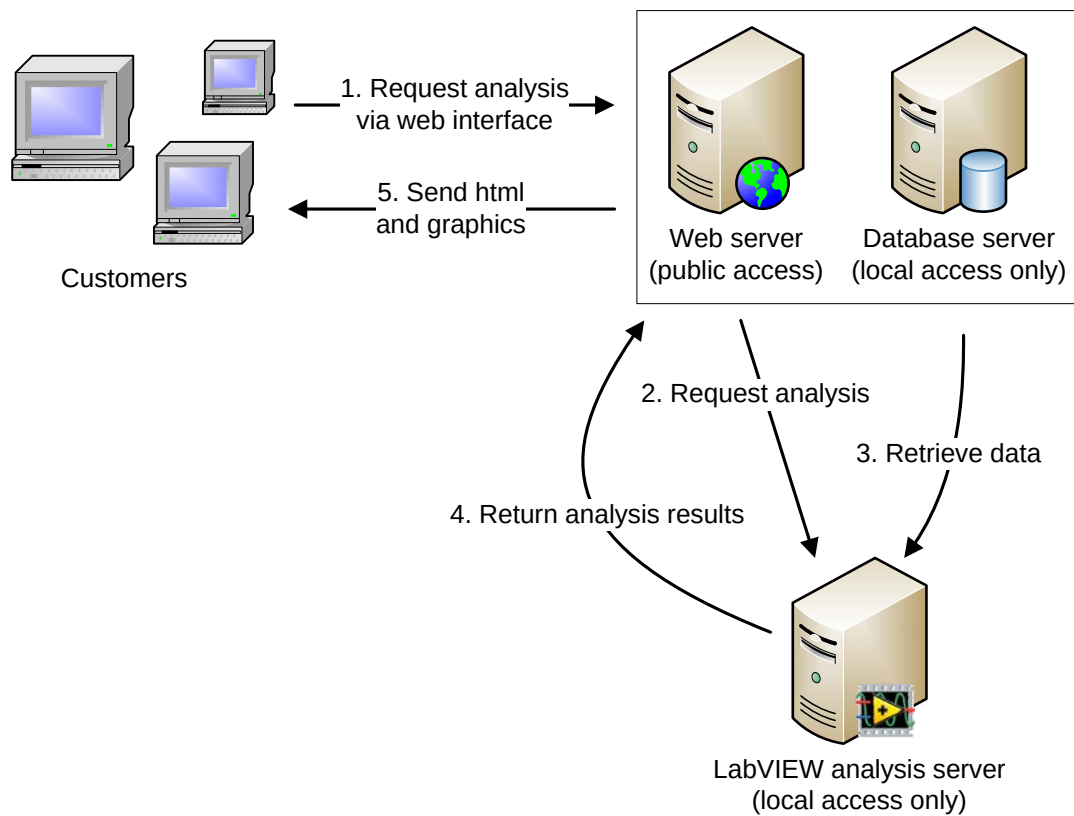


Abb. 12: Datenbankbasierte Zeitreihenanalyse mittels individuell konfigurierbarer Analyseroutinen.



Abb. 13: Datenvisualisierung von Temperatur- und Feuchtedaten innerhalb der Johanniskirche in Schwäbisch Gmünd sowie Bewertung der Kondensationsrisikos mittels implementierter Analyseroutinen.

5.4 Sensoren für die Dauerüberwachung von historischen Bauwerken

Ein entscheidender Kostenfaktor bei der Messwerterfassung ist oftmals die verwendete Sensorik bzw. die dafür benötigten elektronischen Komponenten. So können beispielsweise hochgenaue Seismometer, welche für eine Modalanalyse verwendet werden, je Stück bereits 5000 Euro und mehr kosten. Solch kostspielige Sensoren für eine Dauerüberwachung von historischen Bauwerken einzusetzen ist in der Regel zu teuer. Es sind daher Alternativen zu nutzen, die mit geringem finanziellem Aufwand eine Ermittlung von verwertbaren Messwerten ermöglichen, wobei die einzusetzende Sensorik mit den vorhandenen Energieressourcen so sparsam wie möglich umgehen sollte.

Werden die vorhandenen Restriktionen beim Strombedarf berücksichtigt, so lassen sich für drahtlose Sensornetzwerke eine Vielzahl konventioneller Sensoren einsetzen. Eine wesentliche Weiterentwicklung im Hinblick auf geeignete Sensorik stellen MEMS-Sensoren dar. MEMS sind mikroelektromechanische Systeme, bei denen elektrische und mechanische Komponenten auf kleinen Chips integriert werden [1]. Bei Massenfertigung sind solche MEMS mit Preisen von wenigen Euro sehr kostengünstig. Viele MEMS-Sensoren verfügen weiterhin über eine integrierte Temperaturkompensation sowie Kalibrierungsmechanismen, weshalb sich deren Anwendung recht einfach gestaltet. Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus der Integration der Signalkonditionierung auf dem Chip und

der Optimierung hinsichtlich des Stromverbrauchs. Dieser liegt bei einigen MEMS nur bei wenigen Mikro- bzw. Milliwatt.

Für Temperatur- und Feuchtemessungen sowie für diverse andere Einsatzmöglichkeiten ist bereits eine Vielzahl von zweckmäßigen MEMS-Sensoren verfügbar. Auch für Schwingungsmessungen im niedrigen Frequenzbereich beispielsweise für die Modalanalyse sind verschiedene MEMS-Sensoren erhältlich. Im Bereich der Schwingungsmesstechnik für mittlere bis hohe Frequenzen sind hingegen häufig nur proprietäre MEMS-Sensoren verfügbar, wie beispielsweise Schocksensoren für die Automobilindustrie. Zudem besteht hier noch die Problematik der nutzbaren Bandbreite, der Empfindlichkeit sowie des Stromverbrauchs. Die Entwicklungen im Bereich der MEMS-Sensorik schreiten jedoch rasant voran, so dass zukünftig preisgünstige MEMS-Sensorik für zahlreiche weitere Messaufgaben erhältlich sein wird.

Innerhalb des Projekts SMooHS wurde eine Vielzahl von kommerziellen Sensoren auf Ihre Eignung für die Dauerüberwachung von historischen Bauwerken mit drahtlosen Sensornetzen validiert. Geeignete Sensoren wurden anschließend in drahtlose Sensorknoten, welche als Multisensorsysteme konzipiert wurden, integriert und an mehreren Fallstudien getestet. Zu den Sensoren, die integriert wurden, zählen Sensoren für

- die Temperatur- und Feuchtebestimmung (sowohl Luft als auch Bauteil),
- die kombinierte Feuchte- und Salzgehaltsbestimmung in mineralischen Baustoffen, Naturstein oder Holz,
- Bauteildehnungen bzw. Verformungen,
- Vibrationen, Beschleunigung,
- Neigung,
- Licht und Lichtspektrum,
- Windgeschwindigkeit und
- Regendetektion.

Dabei wurde bei der Entwicklung bewusst der Fokus auf drei wesentliche Aspekte gelegt:

1. Zuverlässigkeit insbesondere im Hinblick auf Datenübertragung und Messdatenqualität,
2. extrem stromsparender Betrieb der batteriebetriebenen drahtlosen Sensorknoten, so dass möglichst eine Betriebsdauer von mehreren Jahren ohne Batteriewechsel möglich wird und
3. Einsatz möglichst kostengünstiger Einzelkomponenten, um dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit gerecht zu werden.

Innerhalb des Arbeitspakets 3 wurden zahlreiche verschiedene Sensoren in das drahtlose Sensorsystem integriert sowie teilweise auch neu entwickelt und hinsichtlich Ihrer Eignung für die Dauerüberwachung von historischen Bauwerken in den Arbeitspaketen 5 und 6 evaluiert. Details hierzu können den Berichten

- *D3.3: Sensor development and sensor adaption (Part 1),*
- *D3.3: Sensor development and sensor adaption (Part 2): Theory of data acquisition, measurement principles and practical application of vibration sensors,*
- *D5.3: Report on comparative testing,*
- *D6.1: Case Study 1: Museum Island, Berlin,*
- *D6.2: Case Study 2: Holy Cross Minster and St. Johns Church, Schwäbisch Gmünd,*
- *D6.3: Case study 3: Palazzo Malvezzi und*
- *D6.5: Case Study 5: Schönbrunn Palace*

entnommen werden.

Im Folgenden wird ein Überblick über die eingesetzten und evaluierten Sensoren gegeben.

5.4.1 Lufttemperatur und -feuchte sowie weitere außen- und innenklimatische Parameter (Wind/Regen/Licht/UV/IR)

Die Bestimmung der Temperatur der Luft bzw. eines Bauteils zählt in der Regel zu den grundlegenden Messungen, die bei einer Dauerüberwachung durchgeführt werden. Für die Temperaturmessung kommen sowohl rein analoge Sensoren wie auch Sensoren mit digitalem Ausgang in Frage. Zu den vielfach in der Praxis eingesetzten analogen Temperaturfühlern gehören Thermoelemente und Widerstandsthermometer. Weitere Temperaturfühler sind zwar auch erhältlich aber eher von untergeordneter Bedeutung für die Baupraxis.

Bei der Feuchtemessung ist es zunächst sinnvoll in Luftfeuchte und in Materialfeuchte zu unterscheiden. Der Unterschied liegt darin begründet, dass die Luftfeuchte relativ einfach mittels kommerziell erhältlicher Sensoren messbar ist, die Feuchte eines Materials hingegen von einer Vielzahl von Parametern abhängen kann und damit teilweise schwierig zu bestimmen ist.

Sensoren zur Bestimmung der Luftfeuchte werden als Hygrometer bezeichnet. Die meisten davon sind Absorptionshygrometer, bei denen sich die elektrischen Eigenschaften der Sensormaterialien durch Wasseraufnahme aus der Umgebungsluft ändern. Zur Familie der Absorptionshygrometer gehören Impedanzsensoren, bei denen sich die Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Feuchte ändert. Bei kapazitiven Sensoren hingegen ändert sich die Kapazität und bei auf Schwingquarzen basierenden Sensoren ändert sich die Resonanzfrequenz in Abhängigkeit von der Feuchte. Mittels geeigneter Messelektronik und Umrechnung können dann entsprechende Feuchten ermittelt werden. In der Regel ist im Zusammenhang mit der Feuchtemessung die Temperaturermittlung notwendig, insbesondere wenn relative Feuchten berechnet werden sollen. Die Genauigkeiten der am Markt verfügbaren Luftfeuchtesensoren werden im Allgemeinen den Anforderungen an eine Dauerüberwachung an Bauwerken gerecht, weswegen solche innerhalb des Projekts eingesetzt und evaluiert wurden. Allerdings sind drei Aspekte hervorzuheben. Dies sind die oftmals vorhandene Anforderung an eine Taupunktbeständigkeit, zweitens die Alterung des Sensors, die auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des ermittelten Messwertes einen wesentlichen Einfluss haben kann und drittens die Trägheit eines Sensors.

Die Bestimmung von Wind- und Regenmengen kann mittels verschiedener kommerzieller Sensoren zuverlässig am Untersuchungsobjekt vorgenommen werden. Jedoch ist zunächst zu überlegen, inwiefern nicht die Nutzung von Wetterdaten von Wetterstationen ausreichend ist. In der Regel findet man eine Vielzahl von für die Meteorologie verwendeten Wetterstationen verteilt über ganz Europa, deren Daten man – teils sogar kostenlos – nutzen kann. Daneben sind auch Umweltmessstationen in hoher Zahl verfügbar, die über meteorologische Daten hinaus weitere Umweltdaten liefern wie beispielsweise Luftschadstoff- oder Feinstaubgehalt. Die Verwendung solcher Daten unterliegt allerdings auch Einschränkungen. So unterscheiden sich beispielsweise die mikroklimatischen Verhältnisse an einem Objekt teilweise erheblich, weswegen pauschalisierte Annahmen oftmals keine belastungsfähige Beurteilung kritischer Bauwerksbereiche zulässt.

5.4.2 Materialfeuchte und Salze

Gegenüber der Bestimmung der Luftfeuchte gestaltet sich die Bestimmung der Feuchte eines Materials ungleich schwieriger bzw. aufwändiger, da diese meist nur mit indirekten Messmethoden bestimmt werden kann. Zu den Methoden, welche sensorgestützt für die Dauerüberwachung geeignet erscheinen, zählen die kapazitiven Verfahren, Leitfähigkeitsverfahren oder auch das Luftausgleichsfeuchteverfahren. Einen guten Überblick über gängige Verfahren zur Bestimmung der Materialfeuchte findet man in Kupfer et al. [5]. Nicht alle dieser Verfahren eignen sich in demselben Maß für die instrumentierte Dauerüberwachung, da alle Verfahren eine mehr oder minder aufwendige Kalibrierung oder Messtechnik benötigen. Zwei Verfahren, die für die instrumentierte

Dauerüberwachung hingegen geeignet erscheinen und daher innerhalb des Projekts weiterentwickelt wurden, werden nachfolgend näher erläutert. Details sind den Berichten

- *D3.2: Smart wireless sensor network platform*
- *D3.3: Sensor development and sensor adaption (Part 1)*

zu entnehmen.

Für Luftausgleichsfeuchtemessungen können in der Regel die gleichen Sensoren eingesetzt werden wie für die oben beschriebenen Luftfeuchtemessungen. Zur Ermittlung der Materialfeuchte werden diese jedoch in einen Hohlraum (meist über ein Bohrloch) innerhalb des zu untersuchenden Materials eingebettet und das Bohrloch versiegelt, so dass keine Außenluft direkt an den Sensor 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. Benötigt werden für die Umrechnung der Ausgleichsfeuchten in Materialfeuchten die materialspezifischen Sorptionsisothermen. Die eindeutige Bestimmung der Sorptionsisothermen erweist sich jedoch aus mehreren Gründen als sehr schwierig. Zunächst einmal sind das Adsorptions- und Desorptionsverhalten hygroskopischer Materialien häufig unterschiedlich. Weiterhin werden beispielsweise bei Beton die Sorptionsisothermen von der Materialzusammensetzung, dem Karbonatisierungsgrad und auch dem Salzgehalt bzw. der Salzart wesentlich beeinflusst. Von besonderer Problematik ist auch der Umstand, dass Rückschlüsse aus Ausgleichsfeuchtemessungen auf die Materialfeuchte im überhygroskopischen Feuchtebereich (ab ca. 95% r. F.) gänzlich unmöglich sind. Der überhygroskopische Bereich bezeichnet die Materialfeuchte, bei der Wasser in flüssiger Form in den Kapillarporen vorliegt, was bei der Witterung ausgesetzten Bauwerken keine Seltenheit ist. Auch Sockelbereiche weisen oftmals erhöhte Feuchtegehalte auf, sei es aufgrund von niedrigeren Bauteiltemperaturen und der dadurch bedingten erhöhten Kondensation oder durch kapillares Saugen. In der Praxis wird eine Bestimmung der Materialfeuchten über Ausgleichfeuchtemessungen daher deutlich fehlerbehaftet oder gar nicht schlüssig auswertbar sein. Dennoch können einige Hinweise aus der Bestimmung der Ausgleichsfeuchte gezogen werden. So kann über die gemessene relative Feuchte in Verbindung mit der Temperaturmessung in einem Bohrloch 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 (vgl. Abb. 14). Die Bestimmung absoluter Materialfeuchten ist vor diesem Hintergrund also nicht unbedingt erforderlich.

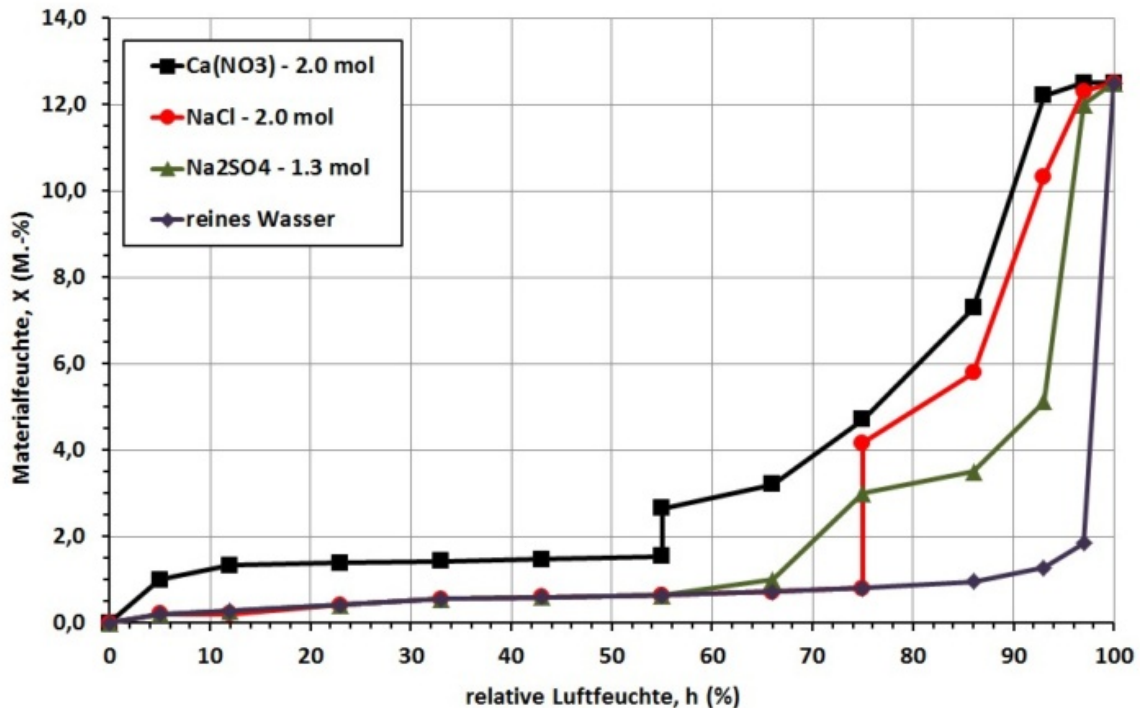


Abb. 14: Desorptionsisothermen (exemplarisch) für gelbgeaderten Sandstein aus Sinsheim, belastet mit Wasser und verschiedenen Salzlösungen [6].

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, Salzart und gegebenenfalls Carbonatisierung einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss haben können [7]. 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. Trockener, poröser Naturstein ist in der Regel ein schlechter Leiter, weswegen dessen Leitfähigkeit in der Regel unberücksichtigt bleiben kann. Ausnahmen gibt es hier nur für stark eisenhaltige Gesteine. Vernachlässigt man diese so wird die Leitfähigkeit maßgeblich durch die vorhandene Feuchte bzw. die vorhandenen Elektrolytlösungen innerhalb des Porenraums bestimmt. Die Leitfähigkeit des Elektrolyten selbst wird von der Menge der darin vorhandenen Ionen, deren Wertigkeit und Beweglichkeit bestimmt [8].

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.

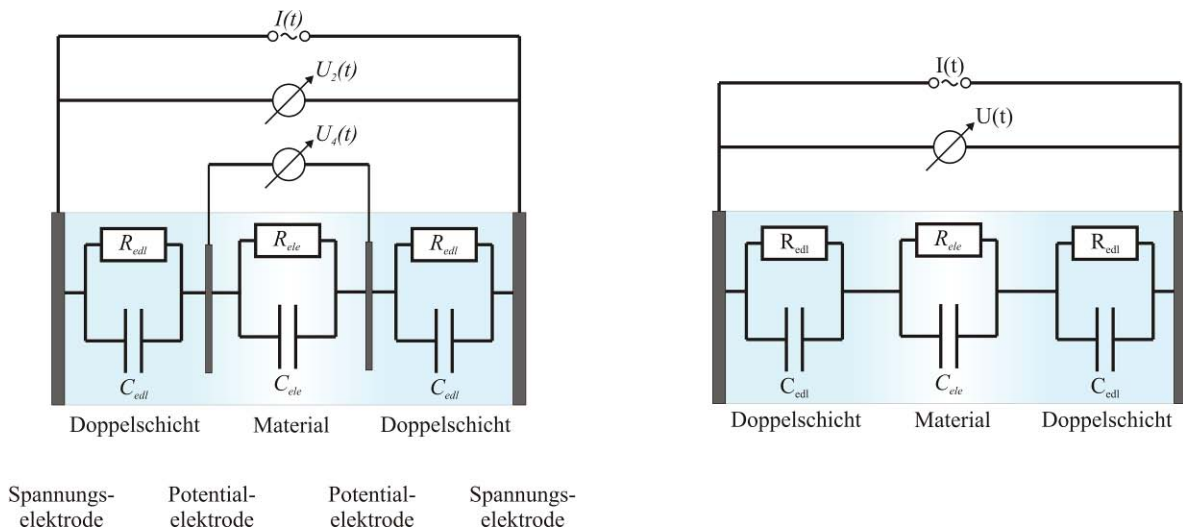


Abb. 15. Impedanzmessung nach der Zwei- und Vier-Punkt-Methode und einfaches Ersatzschaltbild für das Gesamtsystem.

In Abb. 15 (links) ist schematisch der Aufbau einer Vier-Punkt-Messung dargestellt, die häufig zur Bestimmung der Impedanz von Ionenleitern verwendet wird. An den zwei äußeren Elektroden wird ein Wechselstrom mit verschiedenen Frequenzen angelegt, und die resultierende Spannung bzw. der resultierende Strom an den zwei innenliegenden Elektroden werden gemessen. Der Vorteil bei diesem Messaufbau ist, dass sich keine elektrischen Doppelschichten an den Messelektroden ausbilden und das Messergebnis verfälschen. Das Ersatzschaltbild, welches das elektrische Verhalten des Gesamtsystems beschreiben soll, kann dabei einfach gehalten werden (vgl. hierzu [9], [10]). Es besteht aus einer Parallelschaltung eines Kondensators und eines Widerstands.

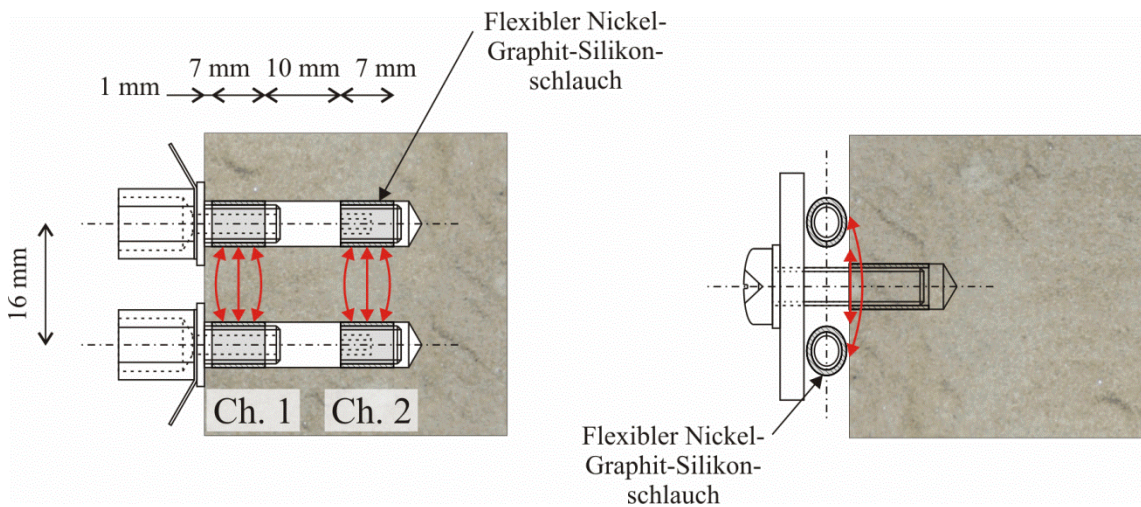


Abb. 16. Schematische Darstellung zur Impedanzmessung nach der Zwei-Punkt-Methode mit trocken angekoppelten Elektroden.

In Anbetracht des Wunsches nach minimalinvasiven Eingriffen in die denkmalgeschützten Objekte ist es allerdings wünschenswert, den Messaufbau möglichst einfach zu gestalten. Daher wurde innerhalb des Projekts die Verwendung der Zwei-Punkt-Messmethode präferiert (vgl. Abb. 16 und Abb. 17), bei denen die Sensoren in ein Bohrloch eingesetzt und trocken an die Oberfläche angekoppelt werden. Zwar kann damit die Anzahl der Elektroden auf die Hälfte reduziert werden, jedoch beinhaltet jede Messung den Abfall des Potentials an der elektrischen Doppelschicht jeder Elektrode. Mit geeigneten Mitteln kann der anteilige Einfluss jedoch reduziert werden. Für den Fall des vorgeschlagenen einfachen Ersatzschaltbilds errechnet sich die Gesamtimpedanz Z zu

$$Z = 2 \cdot Z_{edl} + Z_{ele} = 2 \cdot \left[\frac{1}{R_{edl}} + i\omega C_{edl} \right]^{-1} + \left[\frac{1}{R_{ele}} + i\omega C_{ele} \right]^{-1}$$

mit der Impedanz der Doppelschicht Z_{edl} , der Impedanz des Elektrolyten Z_{ele} , der imaginären Einheit i und der Kreisfrequenz ω der angelegten Frequenz. Eine Betrachtung des Gesamtsystems zeigt, dass eine Erhöhung der Elektrolytimpedanz den relativen Anteil der Doppelschichtimpedanz reduziert. Dies kann beispielsweise durch eine Vergrößerung des Elektrodenabstands geschehen, wobei zu beachten ist, dass dabei der Messbereich des Messgeräts nicht verlassen wird. Andererseits kann auch auf die Doppelschichtimpedanz direkt Einfluss genommen werden. Es wird aus Gleichung (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) ersichtlich, dass mit einer Erhöhung der Frequenz die Impedanz sinkt. In der Literatur wird daher häufig eine „hinreichend hohe“ Frequenz bei Messungen nach der Zwei-Punkt-Methode gefordert. Des Weiteren ergibt sich aus obiger Gleichung und unter Berücksichtigung der direkten Proportionalität der Kapazität und der inversen Proportionalität des Widerstands zur Querschnittsfläche des Leiters, dass die Doppelschichtimpedanz durch eine Vergrößerung der effektiven Elektrodenoberfläche verringert werden kann. Im Vergleich zur scheinbaren Oberfläche bezieht deren effektiver Wert auch die Oberflächenrauheit des Materials mit ein, was die Problematik der reproduzierbaren Ankopplung aufwirft. Da bei denkmalgeschützten Gebäuden der Eingriff in die Gebäudesubstanz, wie schon angesprochen, minimiert werden sollte, ist immer ein Kompromiss zwischen idealem Messaufbau und minimalinvasiver Installation zu finden. Dies hat eventuell zur Folge, dass ebenso wie bei den angesprochenen Messungen über die Ausgleichsfeuchte im Bohrloch eine Interpretation der Impedanzen in Hinblick auf absolute Feuchtegehalte und Salzkonzentrationen am Bauwerk meist nicht praktikabel ist. Allerdings gilt auch hier, dass durch die Beobachtung von Veränderungen der frequenzabhängigen Impedanz sowie der zugehörigen Phaseninformation Veränderungen im Salz- und Feuchtegehalt und deren Kinetik insbesondere im überhygroskopischen Bereich detektiert werden können.

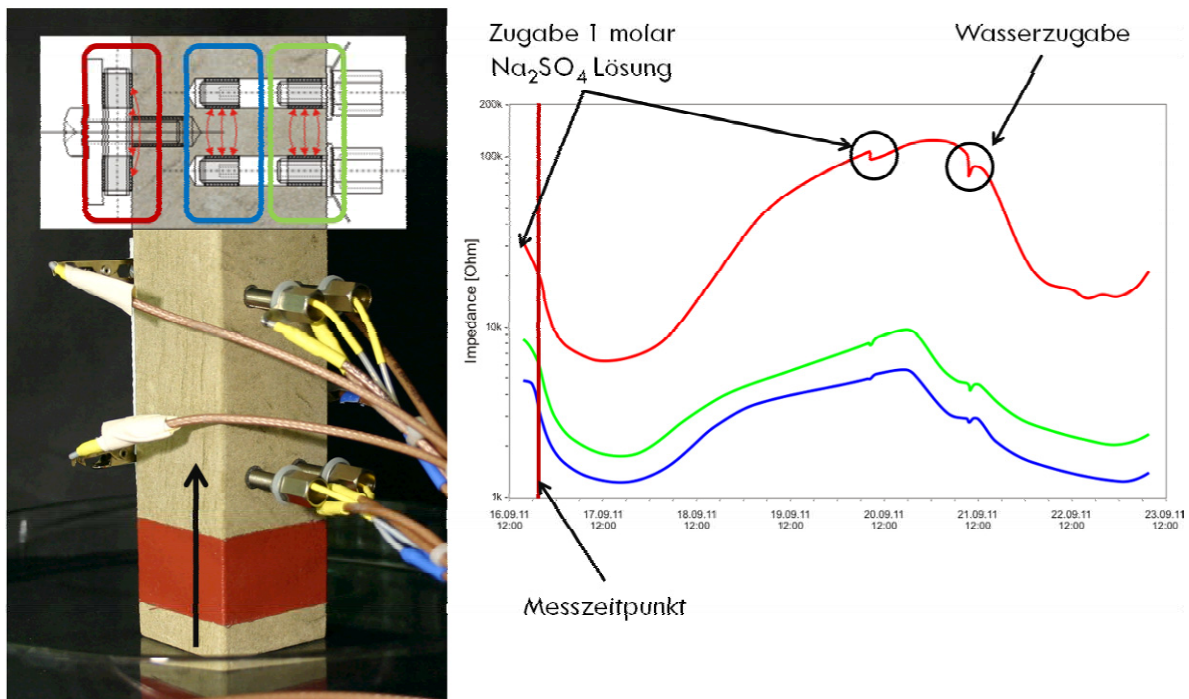


Abb. 17. Impedanzmessung während eines Saugversuches.

Mögliche weitere Ansätze für die differenzierte Analyse von Impedanzmessungen basieren z. B. auf folgenden Überlegungen:

- Die Beweglichkeit der Ionen (Leitfähigkeit) ist über die Nernst-Einstein-Beziehung mit dem Diffusionskoeffizient verknüpft.

- Die frequenzabhängige Phase steht in Korrelation mit der inneren Porenoberfläche.
- Über die Messung an mehreren Stellen bzw. Tiefen können Informationen zu örtlichen Veränderungen gewonnen werden.
- Durch die quasi kontinuierliche Messung können Veränderungen über die Zeit analysiert werden. Dies hilft z. B. qualitativ auf Salzarten zu schließen.
- Durch Kombination mit Ausgleichsfeuchtemessungen und der zeitlichen Analyse kann auf Salzarten, Salzkonzentration und Porenfüllungsgrad geschlossen werden.

Neben den Impedanz- und Bohrlochfeuchtemessungen wurden im Weiteren Potenzialdifferenzmessungen an Mauerwerk aus Naturstein durchgeführt. Ziel war hier, Informationen über mögliche Salzgehalte bzw. Salztransportprozesse zu erhalten, um so zukünftig eine Beurteilung von durch Salzkristallisation gefährdeten Bauwerken vornehmen zu können. Innerhalb des Projekts wurde für diesen Zweck ein hochohmiges Elektrometerboard (Eingangswiderstand ca. 100 GΩ) entwickelt, was auf einen drahtlosen Sensorknoten aufgesteckt werden kann. Hiermit wurden Untersuchungen mit verschiedenen salzselektiven Elektroden zweiter Art durchgeführt, wobei ein Schwerpunkt auf der Entwicklung und Verwendung von Silber-/Silberchloridelektroden lag.

Laborversuche haben gezeigt, dass eine reproduzierbare Korrelation zwischen Salzkonzentration und gemessener Potentialdifferenz, trotz leichter Abweichungen aufgrund von Effekten wie Diffusions- oder Strömungspotentialen, vorhanden ist. Untersuchungen an verschiedenen Steinvarietäten haben jedoch auch gezeigt, dass deren petrographische Eigenschaften (z. B. Calciumcarbonat als Bestandteil) einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Messergebnisse haben können. Ebenfalls besteht eine Interaktion zwischen den Kationen des jeweils vorliegenden Elektrolyten, den Bestandteilen des Steins (z. B. zwischen Calcium und Calciumcarbonat) und den fremden Anionen. Aus diesen Gründen ist eine Interpretation der Messergebnisse ohne begleitende – auch teilweise zerstörende – Untersuchungen nur sehr schwer möglich.

Mithilfe der Potentialdifferenzmessung und der Verwendung salzselektiver Elektroden wie den entwickelten Silber-/Silberchloridelektroden ist allerdings eine Möglichkeit gegeben, Feuchte- und Salztransporte im porösen Stein nachzuweisen und Aufkonzentrationen von Salzen zu lokalisieren. Die im Rahmen des Projektes entwickelten Silber-/Silberchloridelektroden sprechen auf Chloride, aber auch auf anderen Salzen an und können als ergänzendes bzw. vorbereitendes Messverfahren zur Salzanalyse an Bohrmehlproben eingesetzt werden, die nur dann durchgeführt werden muss, wenn mittels der Potenzialdifferenzmessung hohe Salzkonzentration vermutet werden.

In Kombination mit den Impedanzmessungen können Potenzialdifferenzmessungen zukünftig vermutlich auch für eingehendere Analysen verwendet werden.

5.4.3 Verformungen, Dehnungen, Verschiebungen, Risse

Für die Dehnungsmessung überwiegen am Markt Technologien, die auf Widerstandsmessungen beruhen. Dehnmessstreifen (DMS) sind Sensoren, bei denen sich der Widerstand eines Messgitters in Abhängigkeit von der Verformung ändert. Die Widerstandsänderung kann mittels einer Brückenschaltung, wie sie mittels der entwickelten drahtlosen Sensorknoten realisiert werden kann, einfach gemessen und in eine äquivalente Dehnung umgerechnet werden. Dehnmessstreifen werden in der Regel mittels geeigneten Klebstoffen auf die Oberfläche des zu untersuchenden Bauteils geklebt, wobei die Platzierung sorgsam gewählt werden sollte. Problematisch bei der Verwendung von DMS ist, dass sowohl die Klebestelle als auch die DMS selbst Alterungsprozessen unterliegen können. Besondere Sorgfalt ist daher unabdingbar. Zudem ist eine Temperaturkompensation in der Regel unerlässlich. Werden Dehnmessstreifen im linearelastischen Bereich des zu überwachenden Materials eingesetzt, so kann aus den Dehnungen auch in guter Näherung die entsprechende lokale Bauteilspannung berechnet werden.

Robuste, auf DMS basierende Sensoren sind am Markt für eine Vielzahl verschiedener Anwendungen verfügbar. Hierbei werden DMS an mechanisch verformbare Materialien appliziert, die in ein Sensorgehäuse integriert sind. Derartige Sensoren können in Bauteile integriert werden und erscheinen auch für die Dauerüberwachung historischer Bauwerke geeignet.

Gegenüber Dehnungsmessungen werden Verformungs- und Verschiebungsmessungen über längere Messstrecken zwischen zwei Fixpunkten vorgenommen. Zur Wegmessung können in der Praxis eine große Anzahl kommerziell erwerbliche potentiometrische, induktive oder auch kapazitive Wegaufnehmer wirtschaftlich eingesetzt werden. Für größere Messdistanzen eignen sich auch Laserwegsensoren, Seilwegsensoren sowie Schwingsaitenaufnehmer, wie sie beispielsweise bei Brückenbauwerken erfolgreich eingesetzt werden [11]. Laserwegsensoren und Schwingsaitenaufnehmer haben jedoch aufgrund der aktiven Anregung (Laserlicht bzw. durch Aktuatoren eingetragene Vibration) den Nachteil eines relativ hohen Strombedarfs. Auch Schlauchwaagensysteme können für die Bestimmung von Höhenänderungen gegenüber Bezugspunkten eingesetzt werden. Klassische Schlauchwaagensysteme bestehen in der Regel aus durch Rohrleitungssysteme miteinander verbundenen Messzylindern, in denen der Füllstand bei atmosphärischem Gegendruck abgelesen wird. Die Systemgenauigkeiten sind dabei je nach Schlauchwaagensystem besser als 0,3 mm, was im Bereich eines klassischen geodätischen Feinnivellements liegt [12]. Modernere Schlauchwaagen sind heutzutage als geschlossene Systeme ausgeführt [13]. Die Bestimmung einer vorliegenden Höhendifferenz erfolgt hierbei durch Messung des hydrostatischen Drucks mittels hochauflösender Druckaufnehmer, mit denen Genauigkeiten von besser als 0,1 mm zu erreichen sind. Die Vorteile dieser geschlossenen Systeme liegen in der höheren Robustheit des eigentlichen Messprinzips, der Möglichkeit, sehr verschiedene Höhen mit einem Rohrleitungssystem gleichzeitig zu überwachen wie auch der kleineren Bauform der Sensoren. In der Praxis hat sich der Einsatz solcher Systeme bereits bewährt. Allerdings sind Schlauchwaagensysteme aufgrund ihrer Trägheit nur für geringdynamische Höhenmessungen geeignet, was aber in der Regel für historische Bauwerke kein Problem darstellen sollte [13].

Die Überwachung von Rissentwicklung bzw. der Rissöffnung kann mittels spezieller Riss-DMS vorgenommen werden, die über einen vorhandenen Riss geklebt werden. Die Genauigkeit der Messung ist in der Regel sehr gut. Allerdings ist zu beachten, dass Riss-DMS bei fortlaufender Rissöffnung sukzessive zerstört werden. Die Rissöffnungsmessung ist daher eine einmalige Angelegenheit. Sollen bei Rissen die Rissöffnungsänderung kontinuierlich erfasst werden, so bietet es sich besser an, Wegsensoren über den Riss anzuordnen.

Innerhalb des Projekts wurden bei einem Belastungsversuch am Palazzo Malvezzi potentiometrische Seilwegaufnehmer wie auch Neigungssensoren an das drahtlose Sensornetzwerk angeschlossen und hiermit während eine Probelastung Messungen durchgeführt. Details hierzu sind dem Bericht

- *D6.3: Case study 3: Palazzo Malvezzi*

zu entnehmen.

5.4.4 Erschütterung und Schwingungen

Schwingungsanalysen werden an Tragwerken oftmals mit dem Ziel durchgeführt, analytische Modelle zu optimieren und zu validieren bzw. Eingangsparameter für FE-Simulationen zu bestimmen. Dabei werden strukturelle Eigenschaften des Bauwerks wie Eigenfrequenzen, Schwingungsformen und Dämpfung ermittelt. Die Ansprüche an geeignete Sensorik sind hierbei in der Regel hoch, wobei eine ordnungsgemäße Kalibrierung vorausgesetzt wird. Die DIN 45669-1 legt Anforderungen an Schwingungsmesseinrichtungen einschl. der Sensoren sowie nach Aufwand und Genauigkeit abgestufte Prüfungen fest. Mit diesen Schwingungssensoren können

mechanische Schwingungen (Erschütterungen, Vibrationen), die auf Bauwerke wirken, gemessen werden. In der Regel sind solche Sensoren auch für denkmalgeschützte Objekte geeignet und können mittels der entwickelten drahtlosen Sensorknoten auch verwendet werden. Als Grundlage zur Ermittlung von Beurteilungsgrößen werden auch Anforderungen an die Frequenz- und Zeitbewertung angegeben. Die DIN 45669-1 legt zudem fest, welche Prüfungen durch den Hersteller bzw. Anwender mindestens durchzuführen sind, um die Einhaltung der Anforderungen an die Schwingungssensorik nachzuweisen. In DIN 45669-2 sind zudem Festlegungen zum Messverfahren und zur Ankopplung von Schwingungssensoren angegeben.

In Anbetracht der oftmals massiven Strukturen historischer Bauwerke muss man sich allerdings durchaus die konkrete Frage nach der Interpretierbarkeit der Messdaten aus der Schwingungsanalyse stellen. Insbesondere bei Mauerwerksbauten erweist sich eine Schwingungsanalyse zur Beurteilung von Tragwerkszuständen bzw. von Schädigungen als ungeeignet, da die Sensitivität des dynamischen Verhaltens massiver Strukturen gegenüber Schädigungen relativ gering ist. Anders sieht dies in Bezug auf Erschütterungen aus. Nimmt man Erdbeben bei dieser Betrachtung heraus, so können sich erschütterungsspezifische Fragestellungen infolge Straßen- oder Schienenverkehr, aus Baumaßnahmen oder aus industriellem Maschineneinsatz durchaus für ein denkmalgeschütztes Bauwerk ergeben. Über das zulässige Maß an Erschütterungen lässt sich dabei trefflich streiten. Zwar bietet es sich grundsätzlich an, sich auf die Vorgaben der DIN 4150 und hier insbesondere auf Teil 3 zu beziehen, es ist jedoch auf jeden Fall zu prüfen, ob nicht andere Anforderungen für das zu überwachende Objekt hinsichtlich der kritischen Bewertung von Erschütterungen anzusetzen sind.

Eine Vielzahl von kommerziell erhältlichen Piezosensoren kann für Schwingungsmessungen sowie Erschütterungsmessungen und entsprechende Analysen eingesetzt werden. Wird entsprechend geeignete Sensorik ausgewählt, ist eine Schwingungsmessung mittels der entwickelten Sensorknoten möglich. Die fortschreitende Entwicklung im Bereich der Mikrosystemtechnik zeigt jedoch auch, dass mittlerweile kostengünstige MEMS-Sensoren mit ausreichender Genauigkeit und Auflösung zu Verfügung stehen. Ein entsprechender MEMS-Sensor wurde bereits in die drahtlosen Sensorknoten integriert und evaluiert. Zwar entsprechen die Sensorcharakteristiken nicht den Anforderungen der genannten Normen, jedoch konnte hiermit innerhalb des Projekts gezeigt werden, dass als kritisch erachtete Erschütterungen mit derartigen Sensoren durchaus detektiert und für eine Analyse verwendet werden können. Innerhalb des Arbeitspaketes 6 wurden von den deutschen Projektpartnern am Münster in Schwäbisch Gmünd mögliche Anwendungsszenarios demonstriert. Siehe hierzu die Berichte

- *D3.3: Sensor development and sensor adaption (Part 2): Theory of data acquisition, measurement principles and practical application of vibration sensors und*
- *D6.2: Case Study 2: Holy Cross Minster and St. Johns Church, Schwäbisch Gmünd.*

6 Arbeitspaket 4: Modellierung und Analyseverfahren

Eine kontinuierliche Überwachung von Bauwerken, wie sie oben beschrieben wurde, hat zum Ziel, daraus neue oder auch genauere Erkenntnisse bezüglich möglicher Schädigungsursachen abzuleiten. Dazu müssen geeignete Analyseverfahren und Modelle vorhanden sein, die die Einwirkungen und Auswirkungen in einen Zusammenhang stellen. Insbesondere verspricht die Kopplung verschiedener Einwirkungen, dass tatsächlich schädigende Prozesse besser charakterisiert werden können. Beispielsweise ist die parallele Berücksichtigung von Temperatur und Feuchte im Hinblick auf Bauteildehnungen und resultierende Bauteilschädigungen notwendig. Obwohl die wesentlichen Zusammenhänge meist bekannt sind, fehlt es in der Praxis an anwendbaren Modellen bzw. dynamischen Modellen, die kontinuierlich erfasste Messwerte aus der Dauerüberwachung berücksichtigen.

Einer der Schwerpunkte der Arbeiten innerhalb dieses Arbeitspakets war die Modellierung von Temperatur- und Feuchtetransporten in Natursteinen in Verbindung mit Salzen, der Verteilung von Luftschadstoffen sowie von mikroklimatischen Einflüssen. Auf Basis der messbaren Einwirkungen wurden auch bereits bekannte Schädigungsmodelle modifiziert und hinsichtlich des Einsatzes bei der kontinuierlichen Überwachung und der notwendigen Datenreduktion optimiert. Zudem flossen die gewonnenen Erkenntnisse in ein wissensbasiertes Expertensystem ein, welches im Projekt konzeptioniert wurde. Detailinformationen zu den einzelnen Arbeitsinhalten können den folgenden Berichten entnommen werden:

- *D4.1: Material and deterioration models (state-of-the-art and possible enhancements)*
- *D4.2: Enhancement of models and data reduction algorithms*
- *D4.3: Implementation of draft data interpretation and reduction methods and algorithms in prototypes and verification*
- *D4.4: User-friendly modular open source software for data evaluation and interpretation*

Der Beitrag der deutschen Projektpartner USTUTT (IWB) und USTUTT (MPA) zu diesem Arbeitspaket umfasste die Modellierung von Transportprozessen anhand realer Monitoringdaten sowie die Implementierung von Algorithmen zur automatisierten Datenanalyse in das drahtlose Sensornetzsystem. Exemplarisch wurde eine differenzierte Analyse an der Johanniskirche in Schwäbisch Gmünd vorgenommen. Siehe hierzu Kapitel 8.1 sowie Bericht

- *D6.2: Case Study 2: Holy Cross Minster and St. Johns Church, Schwäbisch Gmünd.*

7 Arbeitspaket 5: Vergleichende Labor- und Feldversuche

Labor- und Felduntersuchungen sind unabdingbar, will man die drahtlosen Sensorsysteme auf ihre Praxistauglichkeit hin testen und die Messergebnisse validieren. Weiterhin bilden experimentelle Untersuchungen unter definierten Rahmenbedingungen die Grundlage, auf denen Simulationen beruhen und aus denen geeignete Modelle abgeleitet und verifiziert werden können. Während Laboruntersuchungen vorwiegend lokal von den universitären Projektpartnern in Italien und Deutschland durchgeführt wurden, fanden Feldversuche an mehreren Objekten bzw. Bauwerken in Deutschland, Österreich, Italien sowie Palästina statt.

In einem ersten Schritt wurde in Arbeitspaket 5 eine umfassende Übersicht über gängige zerstörungsfreie und minimalinvasive Testmethoden angefertigt (siehe *D5.1: part 1: Report on test methods and former test results*). Ziel der umfassenden Darstellung war es, in einer übersichtlichen Darstellung mögliche Untersuchungsverfahren schnell erfassbar und bewertbar zu machen. So wurden insbesondere Vor- und Nachteile der vorgestellten Verfahren herausgearbeitet und auch weitere Hinweise für die Anwendung der Verfahren in der Praxis gegeben (vgl. auch Abb. 18).

Abb. 18: Beispiel zur Beschreibung von Testmethoden: „Determination of water absorption at atmospheric pressure“

Method description	Samples are weighted for the determination of the actual water content. Then the samples are dried for equilibrium weight (70 °C). For validation of sensors the water absorption of test specimens will be measured.
Equipment	Drying chamber (70°C), accurate electronic balance, exsiccator
Requirements	Sample size according to EN 13755 or smaller, minimum size of formatted or unformatted samples approximately 3-4 cm in length.
Characterisation	Physical principle ☐ Visual ☐ Electrical/Electromagnetic ☐ Acoustic ☐ Chemical ☒ Other NDT/ destructive ☐ Non-Destructive ☐ Minor destructive ☒ Destructive Type of test ☒ Single test ☐ Monitoring Test extent ☒ Punctual ☐ Area ☐ Construction element ☐ Structure Test depth 0 – 7 ☐ mm ☒ cm ☐ m Equipment Cost ☐ High (above 50,000 €) ☐ Medium (10,000-50,000 €) ☒ Low (0-10,000 €) Required education ☐ High ☐ Medium ☒ Low Examination level ☒ Inspector alone ☐ Inspector + specialist ☐ Specialised laboratory Time effort Testing: 4 – 8 days (water absorption)
Limitation	The accuracy depends on samples size, minimum sample size is required, less suitable for lime and gypsum mortars/plaster/renders, because of the solubility of the binder).
Test conditions	Samples from case study objects must be taken by dry – drilling and packed airtight for transport. The samples are weighted in the lab, dried at 70°C in a drying chamber, cooled in an exsiccator and weighted again. Lab samples (maximum water absorption at atmospheric pressure) are dried and impregnated with water and the weight measured before and after impregnation (in each case up to equilibrium).
Accuracy	Very good.
Advantages	Standard lab test method, gives accurate and reliable results.
Disadvantages	Destructive method, a series of samples is needed.
Comments	Also test method for investigation of masonry at the objects, if adequate samples are available.
Level of Standardisation/ guidelines / norms	Natural stone test method: DIN EN 13755: 2008 Natural stone test methods – Determination of water absorption at atmospheric pressure

In den weiteren Untersuchungen, durchgeführt sowohl im Labor als auch vor Ort direkt bei den Demonstrationsobjekten, wurden sowohl die diskontinuierlichen Untersuchungsverfahren im Zusammenhang mit den kontinuierlichen Verfahren aus dem Bauwerksmonitoring evaluiert als auch miteinander kombiniert, um so differenziertere Auswertungen zu ermöglichen. Zudem wurden einige der bekannten Untersuchungsverfahren hinsichtlich der Anwendung an historischen Bauwerken weiterentwickelt. Detailinformationen zu den umfangreichen Arbeiten innerhalb dieses Arbeitspaketes können folgenden Berichten entnommen werden:

- D5.1: part 1: Report on test methods and former test results
- D5.1: part 2: Report on test methods and former test results carried out on project's case studies
- D5.2: Laboratory and on site testing activities part 1 - Brick masonry
- D5.2: Laboratory and on-site testing activities part 2 - Stone masonry

- *D5.2: Laboratory and on-site testing activities part 3 - Historical timber elements*
- *D5.2: Laboratory and on-site testing activities part 4 - Laboratory analyses on materials from test sites*
- *D5.2: Laboratory and on-site testing activities part 5 - Laboratory ageing tests*
- *D5.2: Laboratory and on-site testing activities part 6 - On-site NDT and mechanical testing*
- *D5.2: Laboratory and on-site testing activities part 7 - Laboratory characterization of on-site collected samples*
- *D5.3: Report on comparative testing*

8 Arbeitspaket 6: Demonstration - Untersuchungen an realen Bauwerken

Innerhalb des Projekts SMooHS erfolgte eine enge Verknüpfung zwischen Forschung und Anwendung. Daher wurden die meisten Arbeiten vorwiegend objektbezogen durchgeführt. Insgesamt standen den Projektpartnern fünf Fallstudien zur Verfügung, wobei drei davon einen Schwerpunkt bildeten. Dies sind:

- Museumsinsel in Berlin (Abb. 19)
- Heilig-Kreuz-Münster sowie Johanniskirche in Schwäbisch-Gmünd (Abb. 20)
- Palazzo Malvezzi in Bologna (Abb. 19)

Der Museumskomplex der Museumsinsel in Berlin wie auch das Heilig-Kreuz-Münster und die Johanniskirche in Schwäbisch-Gmünd dienten vornehmlich der Untersuchung außen- bzw. raumklimatischer Aspekte und deren Einfluss auf die beweglichen und auch fest installierten historischen Objekte sowie die Bauwerksstruktur. Der Fokus lag auf Staub-, Feuchtigkeits- und Gasbelastungen beispielsweise aufgrund steigender Besucherzahlen, auf Strahlungsbeanspruchungen (z. B. UV-Licht) bzw. auf Betrachtungen des Feuchtigkeits- und Salztransports innerhalb von Bauteilen. Das Heilig-Kreuz-Münster in Schwäbisch-Gmünd bot den Vorteil, dass dort in der Vergangenheit bereits eine Vielzahl von Forschungsaktivitäten durchgeführt wurde, die eine gute Basis für weitere Messungen bildeten und eine vergleichende Interpretation der Daten ermöglichten. Eine Besonderheit des Palazzo Malvezzi in Bologna ist der darin enthaltene aufwändig verzierte Ratssaal mit seiner ovalen Öffnung in Raummitte sowie der vorhandenen Holz- bzw. Mischbauweise. Risse im Bodenbereich und wechselnde Feuchtigkeitszustände stellen die Dauerhaftigkeit dieser Konstruktion in Frage, weswegen es sich für die Dauerüberwachung innerhalb des Projekts SMooHS besonders eignete.

Ergänzend zu den Schwerpunktstudien wurden Fallstudien am Schloss Schönbrunn, Wien, sowie an Gebäuden der Altstadt von Hebron, Palästinensische Autonomiegebiete, vorgenommen. Damit wurden einerseits Objekte sowohl im Innen- und Außenbereich mit sehr unterschiedlichen Schädigungsbildern untersucht, wie auch Objekte aus drei verschiedenen Klimazonen.



Abb. 19: Fallstudie 1 – Museumsinsel Berlin (links); Fallstudie 3 – Palazzo Malvezzi (rechts).

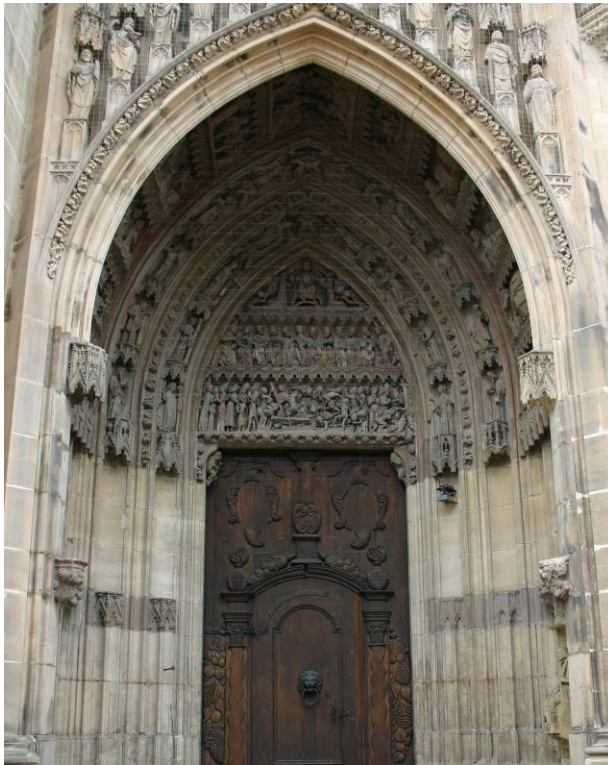


Abb. 20: Fallstudie 2 – Portale des Heilig-Kreuz-Münsters (links) und die Johanniskirche in Schwäbisch Gmünd (rechts).



Abb. 21: Fallstudie 4 – Zahdeh-Gebäude in Hebron, Palästina (links); Fallstudie 5 – Schlosskapelle des Schlosses Schönbrunn, Wien (rechts).

8.1 Untersuchungen im Bodemuseum in Berlin

Unter Leitung des Rathgen Forschungslabors wurden innerhalb der Fallstudie 1 verschiedene Untersuchungen an Objekten innerhalb des Pergamonmuseums wie auch Untersuchungen zu innenraumklimatischen Verhältnissen im Bodemuseum durchgeführt. Hierzu gehören im Einzelnen:

- Georadar- und Vibrationsmessungen am Orpheus-Mosaik zur Detektion und Beurteilung von Schädigungen durch Rissbildung und dem zugehörigen Schädigungsfortschritt;
- Schallemissionsmessungen in Verbindung mit klimatischen Beanspruchungen an glasierten Ziegelementen aus dem Ishtar-Gate zur Untersuchung des Einflusses wechselnder Feuchte- und Temperaturbeanspruchungen auf die Schädigung der Glasuren;
- Vibrationsmessungen zur Untersuchung des Einflusses aus dem Schienenverkehr und der Schifffahrt auf die kulturhistorischen Objekte innerhalb der Museen;
- Temperatur-, Feuchte- und Luftgeschwindigkeitsmessungen mittels drahtloser Sensornetze (durchgeführt von USTUTT (IWB) in Kooperation mit TTI, vgl. auch Abb. 22) sowie Staubbelastungsmessungen innerhalb des Bodemuseums einschl. CFD-Simulation zur Untersuchung des Einflusses der Nutzung durch die Besucher auf die raumklimatischen Verhältnisse und Bewertung mögliche Schädigungsszenarien und Schädigungsrisiken.

Detaillierte Informationen können dem Bericht

- *D6.1: Case Study 1: Museum Island, Berlin*

entnommen werden.

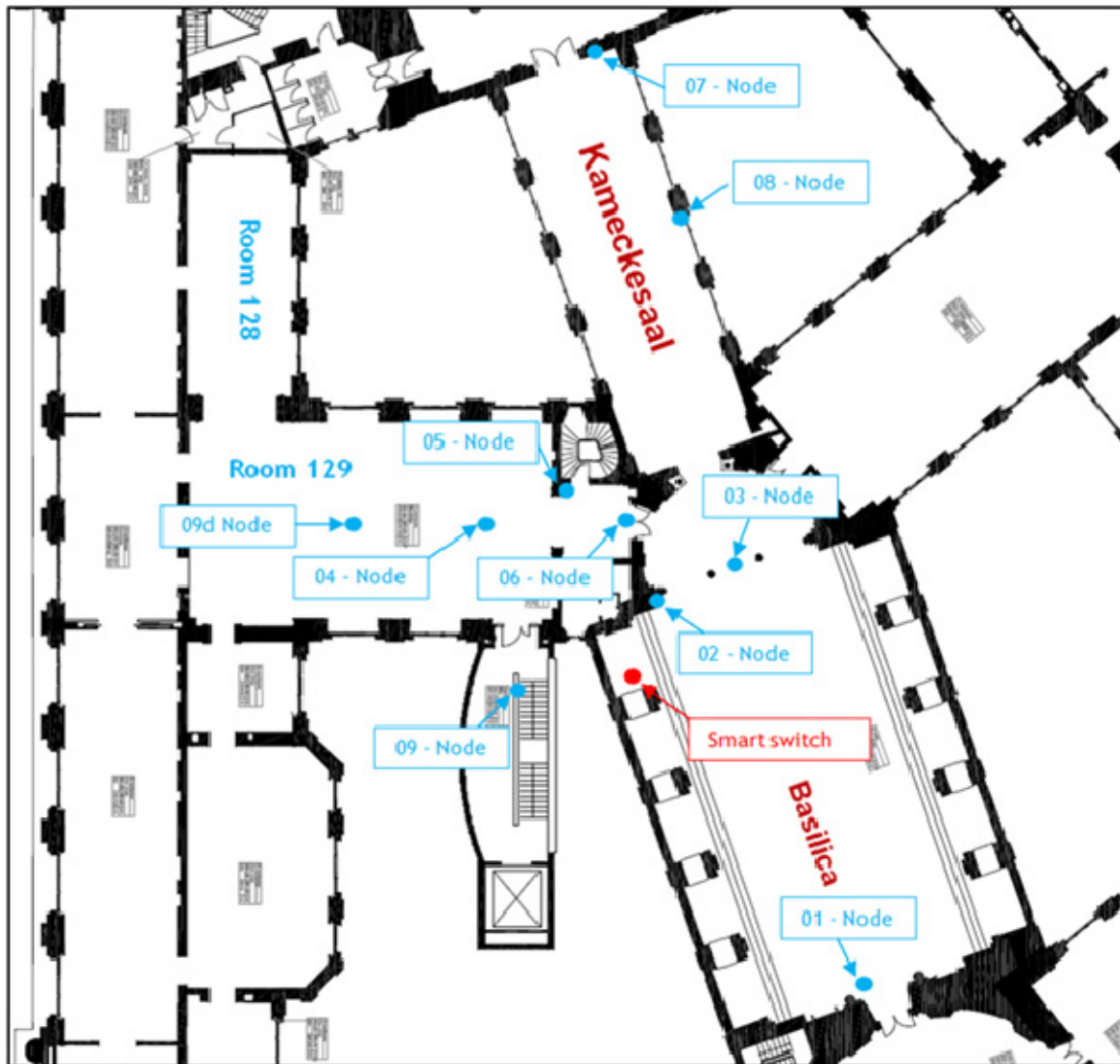


Abb. 22: Übersicht über die Monitoringsysteminstallation im Bode Museum.

8.2 Untersuchungen an der Johanniskirche in Schwäbisch Gmünd

Die Johanniskirche wurde im Zeitraum von 1220 bis etwa 1250 auf den Fundamenten einer vorher an diesem Platz stehenden Kirche erbaut. Über die Jahrhunderte hinweg wurden in der Folge fortlaufend diverse Veränderungen vorgenommen. Eine der bedeutendsten Änderungen war dabei sicherlich die durch Karl Dehner im 19ten Jahrhundert angebrachten Wandmalereien, die seitdem nahezu unverändert auf den Wänden verblieben. Da die innerhalb des Projekts durchgeführten Untersuchungen an der Johanniskirche insbesondere vor dem Hintergrund einer real bestehenden Problematik vorgenommen wurden, wird im Folgenden ein detaillierterer Überblick hierüber gegeben.

8.2.1 Schäden und Schadensbilder an der Johanniskirche in Schwäbisch Gmünd

Es ist offensichtlich, dass die Jahrhunderte nicht spurlos an der Johanniskirche vorbeigezogen sind. Im Laufe der vergangenen Jahrhunderte entstand daher eine Vielzahl von Schäden, denen jüngst mit konservatorischen Maßnahmen begegnet wurde (vgl. auch Abb. 23 und [2]). Zu den wesentlichen Schäden zählen:

- Rissbildung in den Steinfugen,
- Bindemittelabbau in den Malschichten mit der Folge von Malschichtablösungen,
- Verschmutzung durch Staub, Rußpartikel und Spinnweben,
- Schimmelbildung und Insektenbefall des Holzes der Dachkonstruktion und
- salz- und feuchtebedingte Steinschäden in Sockelbereichen.



Abb. 23: Schadensbilder in der Johanniskirche: Schäden an den Wandmalereien und Salzausblühungen im Sockelbereich.

Als Besonderheit in der unbeheizten Johanniskirche ist die extrem hohe Luftfeuchtigkeit innerhalb der Kirche hervorzuheben. Je nach Witterungsbedingungen führt dies zu teilweise massiven Kondenswasserproblemen, was manchmal in Pfützenbildung am Kirchenboden mündete oder aber dazu geführt hat, dass Kondenswasser an den Seitenwänden, und hier insbesondere unterhalb der oberen Kirchenfenster, herunterlief. Problematisch ist dies insbesondere im Hinblick auf die vorhandenen Wandmalereien, die teilweise vom Wasser quasi weggespült wurden. Im Rahmen der in jüngster Zeit durchgeführten konservatorischen Maßnahmen war daher der Frage nachzugehen, wie man mit dieser Problematik weiter umgehen soll. Dabei gestaltete sich allein die Beurteilung des Kondensationsrisikos und die Berechnung eines möglichen Tauwasseranfalls als schwierig. Zum einen ist die Kirche unbeheizt und zum anderen besteht die Frage nach der natürlichen Luftwechselrate, wobei hohe Undichtigkeiten insbesondere nach oben zum Dachraum vorliegen. Als ein möglicher Lösungsansatz zur Verminderung des Tauwasserrisikos wurde das Anbringen einer semipermeablen Folie in Verbindung mit einer Dämmung auf der Holzzwischendecke zum Dachraum diskutiert. Ob diese Maßnahme allerdings wirklich die Situation nachhaltig verbessern hilft, muss sehr kritisch hinterfragt werden, da die Kirche, wie schon angemerkt, über keine Heizung verfügt.

8.2.2 Monitoring an der Johanniskirche

Allein die vorgenannte Problematik hinsichtlich der Beurteilung der innenraumklimatischen Situation und der Wechselwirkung mit dem Außenklima bedurfte einer eingehenden Untersuchung, weswegen ein drahtloses Monitoringsystem zur kontinuierlichen Überwachung der innen- und außenklimatischen Verhältnisse installiert wurde. So wurden in einer ersten Installation an 15 verschiedenen Messstellen innerhalb und außerhalb der Kirche im 5-Minutentakt Temperatur- und Luftfeuchtwerte erfasst, über eine GSM-Verbindung an einen Server übermittelt und in einer Datenbank gespeichert (vgl. Abb. 24). Nach einer ersten Messdatenanalyse wenige Monate nach der Installation wurde dann

zunächst festgestellt, dass einige Sensoren keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich ihrer Messdaten aufwiesen und damit redundante Informationen lieferten. Drei der insgesamt 15 Sensoren konnten daher deinstalliert werden ohne den Informationsgehalt einzuschränken. Die verbliebenden Sensoren messen mittlerweile kontinuierlich über einen Zeitraum von mehr als zwei Jahren, ohne dass ein Batteriewechsel notwendig wurde. Aufgrund des geringen Stromverbrauchs konnte zudem eine Restlebensdauer von mindestens 5 weiteren Jahren prognostiziert werden.

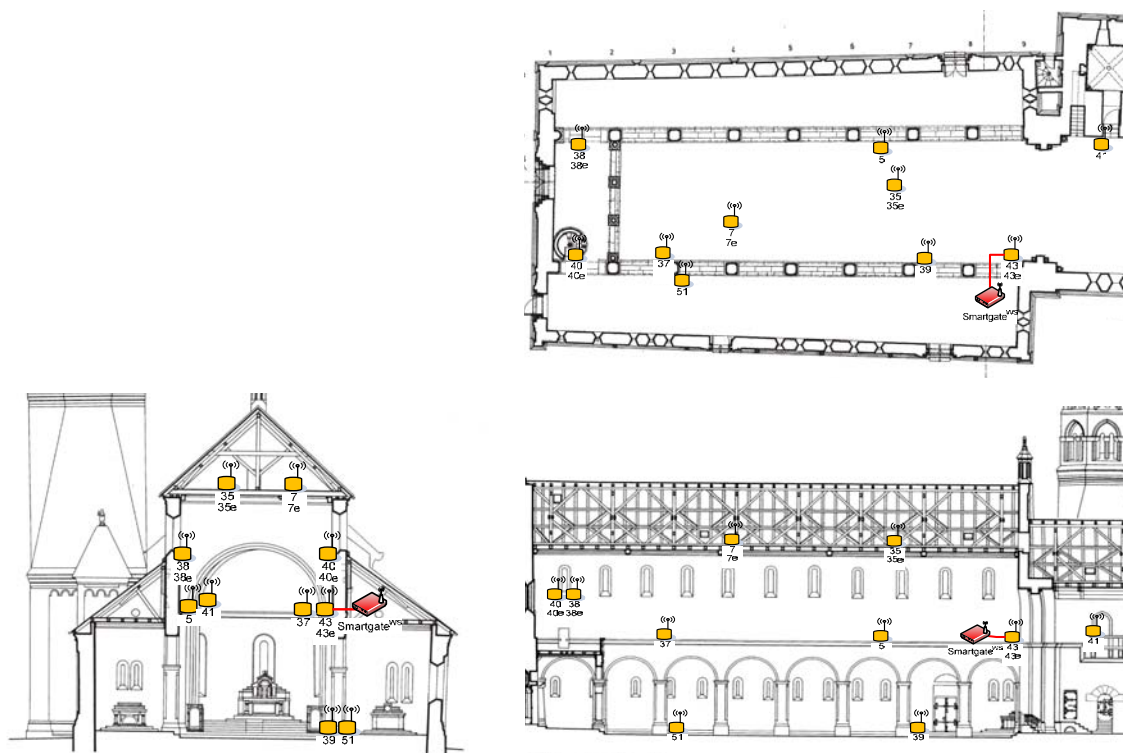


Abb. 24: Querschnitt, Grundriss und Längsschnitt mit Angabe der Positionen, an denen drahtlose Sensorknoten installiert wurden.

8.2.3 Messdatenanalyse und Bewertung

Die Messdaten der Dauerüberwachung wurden in verschiedenen Weisen weiter analysiert, wobei jeweils für unterschiedliche Teilprobleme eine Bewertung vorgenommen sowie mögliche Lösungsansätze entwickelt wurden. Eine Analyse bezog sich auf die Betrachtung des Kondensationsrisikos auf unterschiedlichen Ebenen innerhalb der Kirche. Hierzu wurde eine relativ einfache Analyse vorgenommen, nämlich der Vergleich von Taupunkttemperaturen innerhalb und außerhalb der Kirche. Diese Daten wurden zudem für eine simple Abschätzung der Tauwasser- bzw. Verdunstungswassermenge herangezogen:

$$C = d_{e,v} - d_{i,v}$$

Wobei C der abgeschätzten Tauwasser- bzw. Verdunstungswassermenge entspricht, $d_{e,v}$ der externen absoluten Luftfeuchte und $d_{i,v}$ der internen absoluten Luftfeuchte. Es ist offensichtlich, dass die abgeschätzte Tauwasser- bzw. Verdunstungswassermenge nicht der tatsächlich anfallenden Menge entspricht, da weder die tatsächliche Luftwechselrate noch unterschiedliche Oberflächentemperaturen an den Wänden berücksichtigt wurden. C ist daher vielmehr als eine Art Risikofaktor zu bewerten. Dieser erlaubt es jedoch, zumindest Empfehlungen auszusprechen, ob und wann beispielsweise Türen und Fenster der Kirche offen oder geschlossen gehalten werden sollten und an welchen Stellen zu einem jeweiligen Zeitpunkt mit einem Tauwasseranfall gerechnet werden muss. Vorteil dieser Analyse ist, dass sie quasi in Echtzeit voll automatisiert vorgenommen werden kann und somit direkt dem Nutzer zu Verfügung steht. Er braucht sich daher für die Belüftung

der Kirche nicht mehr auf sein Bauchgefühl verlassen, welches oftmals zu einem falschen Lüftungsverhalten führt und damit kontraproduktiv ist. Abb. 25 und Abb. 26 zeigen zum Beispiel das Ergebnis einer solchen Analyse über einen Zeitraum von 3 Tagen für zwei unterschiedliche Ebenen innerhalb der Kirche. Hiernach ergab sich ein hohes Kondenswasserrisiko am 26.6.2010 in Höhe der Bodenplatte. Tatsächlich wurde zu diesem Zeitpunkt auch Pfützenbildung am Boden beobachtet.

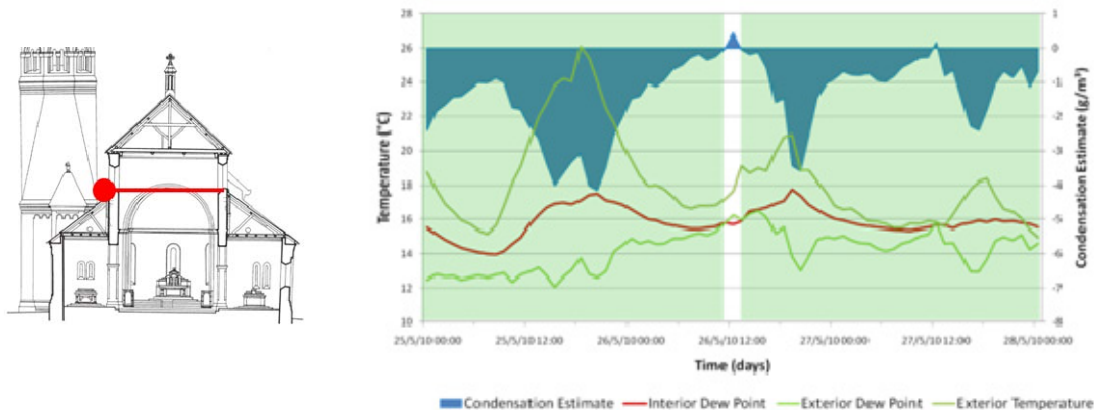


Abb. 25: Auf Messdaten basierende Berechnung von Tauwasserpunkten und prognostizierter Tauwassermenge im Wandbereich unterhalb der oberen Kirchenfenster.

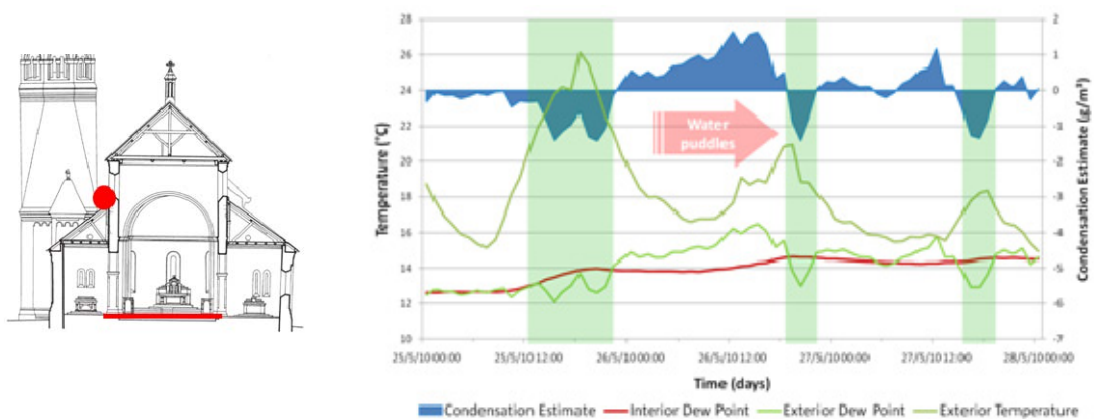


Abb. 26: Auf Messdaten basierende Berechnung von Tauwasserpunkten und prognostizierter Tauwassermenge im Fußbodenbereich.

Eine weitere Analyse, bei der die Monitoringdaten von einem ganzen Jahr berücksichtigt wurden, befasste sich mit der Simulation des thermisch-hygrischen Verhaltens der Wände unterhalb der oberen Seitenfenster (vgl. Abb. 26). Hierzu wurde eine einfache 2D-Simulation mit dem Programm WUFI (entwickelt durch das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP) durchgeführt. Dabei wurden zunächst ausschließlich die real erfassten Monitoringdaten (Temperatur und Feuchte innen und außen) als Eingabeparameter verwendet und damit die Feuchte und Temperaturverteilung über den Wandquerschnitt berechnet. Im Anschluss hieran wurden die realen Innenraumklimadaten mit verschiedenen Ansätzen verändert und diese veränderten Daten als Eingabeparameter für eine erneute Simulation verwendet. Ziel war zu untersuchen, inwiefern sich durch verschiedene Maßnahmen zur Innenraumklimabeeinflussung (aktive Belüftung, Klimatisierung, Entfeuchtung, Heizung sowie verschiedene Kombinationen hiervon) Feuchtigkeitszustände im Wandaufbau ändern und inwieweit hiermit eine Veränderung der Tauwasserproblematik an der Wandoberfläche beurteilt werden kann. Ein wichtiger Teilaspekt war in diesem Zusammenhang, dass eine Beeinflussung des Innenraumklimas nicht zu wesentlichen Änderungen des allgemeinen Feuchtezustandes in der Kirche führen sollte. Dies beruht auf dem Hintergrund, dass das Bauwerk bereits seit Jahrhunderten diesen Temperatur- und Feuchtezuständen ausgesetzt ist und eine wesentliche Veränderung der innenraumklimatischen Verhältnisse zu verheerenden,

unabsehbaren Folgeschäden führen könnte. So wurde beispielsweise die Salzproblematik im Sockelbereich ebenso in die Überlegungen mit aufgenommen wie der Umstand, den mittleren Feuchtegehalt innerhalb der Wände nicht wesentlich zu verändern. Zwar besteht in der Kirche aufgrund des hohen allgemeinen Feuchtegehalts auch das Problem der Schimmelbildung, hierzu muss allerdings angemerkt werden, dass eine starke Absenkung der Feuchtegehalte zur Vermeidung von Schimmelbildung weder im Rahmen der Energieeffizienz wirtschaftlich ist noch hinsichtlich den denkmalgerechten Überlegungen des behutsamen Eingriffs gerecht wird. Zur Verminderung der Schimmelbildung wurden daher Fungizide eingesetzt. Einzelheiten zur Simulation mit WUFI sowie den Überlegungen zur Modifikation des Innenraumklimas können Krüger et al. entnommen werden [3].

8.2.4 Fazit und Empfehlungen

Die besondere Tauwasserproblematik an der Johanniskirche sowie der Umstand, dass übliche bauphysikalische Berechnungsverfahren nicht ohne weiteres für die Beurteilung dieser Problematik verwendet werden konnten, resultieren in dem Bedarf an erweiterten Analysemethoden. Als vielversprechender Ansatz wurde daher eine kontinuierliche Überwachung mittels eines permanent tätigen drahtlosen Sensorsystems initiiert. Dieses konnte mit geringem Aufwand und relativ unauffällig installiert werden. Die mittels solcher Monitoringsysteme erfassten Messdaten können dabei quasi in Echtzeit analysiert werden, was dem Nutzer direkt hilft, sein Objekt gewissenhaft anhand objektiver Daten zu belüften. Weiterhin können Monitoringdaten auch sinnvoll für Simulationen eingesetzt werden, die helfen, den Ist-Zustand zu beurteilen. Auf der anderen Seite können auf Basis realer Messwerte aber auch Simulationen mit veränderten Eingangsparametern durchgeführt werden, die es ermöglichen, bauwerksverändernde Maßnahmen zu bewerten. So wurde beispielsweise bei den durchgeführten Simulationen festgestellt, dass eine kontrollierte Belüftung der Johanniskirche allein nicht erfolgversprechend ist und auch eine geringfügige Beheizung nicht den gewünschten Erfolg hinsichtlich der Verminderung der Tauwasserproblematik liefert. Demgegenüber erscheint auf Grundlage der Simulationen der Einsatz von Luftentfeuchtern sinnvoll (siehe hierzu im Detail [3]). Bei solchen Überlegungen ist allerdings ein wichtiger Punkt nicht unbedeutend. Dies betrifft einfache passive Maßnahmen. So konnte beispielsweise bereits durch das zusätzliche Anbringen einer zusätzlichen Schutzverglasung an den oberen Seitenfenstern der Johanniskirche der Tauwasseranfall an den Fensterscheiben minimiert werden.

8.3 Untersuchungen Heilig-Kreuz-Münster in Schwäbisch Gmünd

Das Heilig-Kreuz-Münster zählt nicht zuletzt wegen der Portale und der im Portalbereich noch in Teilen im Original erhaltenen Polychromie zu den kunsthistorisch bedeutendsten Kirchenbauwerken in Deutschland. Wenngleich durch umfangreiche Arbeiten die Portale in den vergangenen Jahrzehnten bereits gesichert wurden, wurden innerhalb des Projekts ergänzende Untersuchungen durchgeführt, um insbesondere auch den Einsatz der drahtlosen Sensornetze an bedeutsamen Konstruktionen zu demonstrieren. Dabei wurde bewusst auf jeglichen zerstörenden Eingriff verzichtet. Zu den Untersuchungen, die durchgeführt wurden, zählen:

- Ereignisbasierte Schwingungsüberwachung mittels drahtloser Sensorknoten wie auch mittels Laservibrometermessungen zur Risikobewertung der Türöffnung auf die Portale.
- Kurzzeittemperatur- und -feuchtemonitoring der mikroklimatischen Verhältnisse im Portalbereich,
- Untersuchungen zum thermisch-hygrischen Verhalten von gefestigtem Sandstein mittels drahtlosen Impedanzmessungen an Ersatzprobekörpern (vgl. Abb. 27)

- Drahtlose Potenzialdifferenzmessungen unter gleichzeitiger Verwendung von Entsalzungskompressen zur Bewertung der Salzbelastung und der Entsalzung im Bereich der Portale

Details zu den Ergebnissen sind dem Bericht

- *D6.2: Case Study 2: Holy Cross Minster and St. Johns Church, Schwäbisch Gmünd* zu entnehmen.



Abb. 27: Fallstudie 2 – Positionierung der Temperatur- und Feuchtesensorik am Portal sowie Impedanzmessung an einem Ersatzprobekörper vor Ort.

8.4 Untersuchungen am Palazzo Malvezzi, Bologna

Am Palazzo Malvezzi in Bologna wurden Untersuchungen zur Verwitterung und Salzbelastung des Sandsteines der architektonischen Gliederungselemente vorgenommen. Zum Bau des Palazzo wurde der Varignana Sandstein, ein in Bologna und Umgebung seit dem 13. Jahrhundert vielfach verwendeter Sandstein pleistozänen Alters verwendet. Der deutlich geschichtete, gelbliche Sandstein ist reich an Mikrofossilien und wird allgemein als Litharenit bis Kalkarenit bezeichnet. Der Sandstein mit Gesteinsbruchstückchen aus dem Apennin und Bioklasten (vielfach Bruchstücke von Foraminiferengehäusen) ist überwiegend karbonatisch gebunden. Exemplarisch werden im Folgenden einige der durchgeführten Untersuchungen dargestellt.



Abb. 28: Palazzo Malvezzi, bewitterte Nordwestfassade, 3. Obergeschoß, schwer geschädigte Fenstereinfassungen aus Varignana Sandstein mit Mehrfachschalenbildung, Kornbindungsverlust und Absanden.

Die Verwitterung des Sandsteines entlang der Nordwestfassade des Palazzo Malvezzi hat zu schwerwiegenden Schäden an Pilastern und weiteren architektonischen Gliederungselementen geführt (Abb. 28). Im Bereich der Sockelzone sind Schäden durch Krustenbildung und hygroskopische Fleckenbildungen infolge von Salzbelastungen vorhanden (Abb. 29).



Abb. 29: Sandsteineinfassung in der Sockelzone mit Resten von Schmutzkruste, Rückwitterung durch Absanden und hygroskopische Feuchtflecken.

Die quantitative Untersuchung der Salzbelastung (Anionen- und Kationenkonzentrationen löslicher, bauschädlicher Salze) mittels Ionenchromatografie am Eluat (Einzelheiten siehe report D 5.1) hatte hohe Gipsanreicherungen in Oberflächennähe im Sandstein (P1 bis P 4) und eine hohe Konzentrationen an Nitrat- und Chloridsalzen in der Sockelzone (P5, P6) gezeigt.

Tabelle 1: Ergebnisse der Salzbelastung, Anionenkonzentrationen, Angaben in M.-%.

Sample	Typ	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
P1	sandstone	<0,01	0,01	0,01	0,31
P2	sandstone	<0,01	0,01	0,01	0,81
P3	sandstone	<0,01	<0,01	<0,01	0,13
P4	sandstone	<0,01	0,01	0,01	2,13
P5	sandstone	<0,01	0,10	0,68	0,66
P6	sandstone	0,01	0,03	0,14	2,25

Tabelle 2: Ergebnisse der Salzbelastung, Anionenkonzentrationen, Angaben in M.-%.

Sample	Typ	Na ⁺	NH ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
P1	sandstone	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,16
P2	sandstone	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,32
P3	sandstone	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,08
P4	sandstone	0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,79
P5	sandstone	0,23	<0,01	0,13	0,03	0,31
P6	sandstone	0,06	<0,01	0,04	0,01	0,85

Die Bildung von Gips aus Karbonaten durch den Einfluss der Umweltverschmutzung (Stichwort „saurer Regen“) und des Außenklimas führt in den oberflächennahen Zonen des Sandsteines durch zyklische Lösungs- und Wiederausfällungen zur Gipskrustenbildung. Dadurch bedingte Veränderungen der petrophysikalischen Eigenschaften (Wasserdampfdiffusionsfähigkeit, kapillare Wasseraufnahme, hygische Längenänderung, etc.) beschleunigen das Alterungsverhalten und die entstehenden Schäden, wie es für den Varignana Sandstein von Bargossi [14] im Detail beschrieben ist.

Weitere Untersuchungen zur Materialzusammensetzung des Varignana Sandstein wurden mit Hilfe der Phasenanalyse mit Röntgendiffraktometrie (XRD) durchgeführt. Es können sowohl die Gesamtzusammensetzung als auch auskristallisierte Salzausblühungen (bei geeigneter Probenahme) untersucht werden (siehe Report D 5.1, XRD).

Ein typisches Beispiel einer Phasenanalyse zeigt Abb. 30, einer Probe aus Varignana Sandstein mit schwarzer Gipskruste an der Steinoberfläche. In der Sandsteinprobe sind Quarz, Kalzit, Feldspäte (hauptsächlich Albit und Mikroklin), Hellglimmerminerale und Chloritminerale identifiziert worden, der Gips hingegen stammt aus der oberflächlichen Krustenbildung.

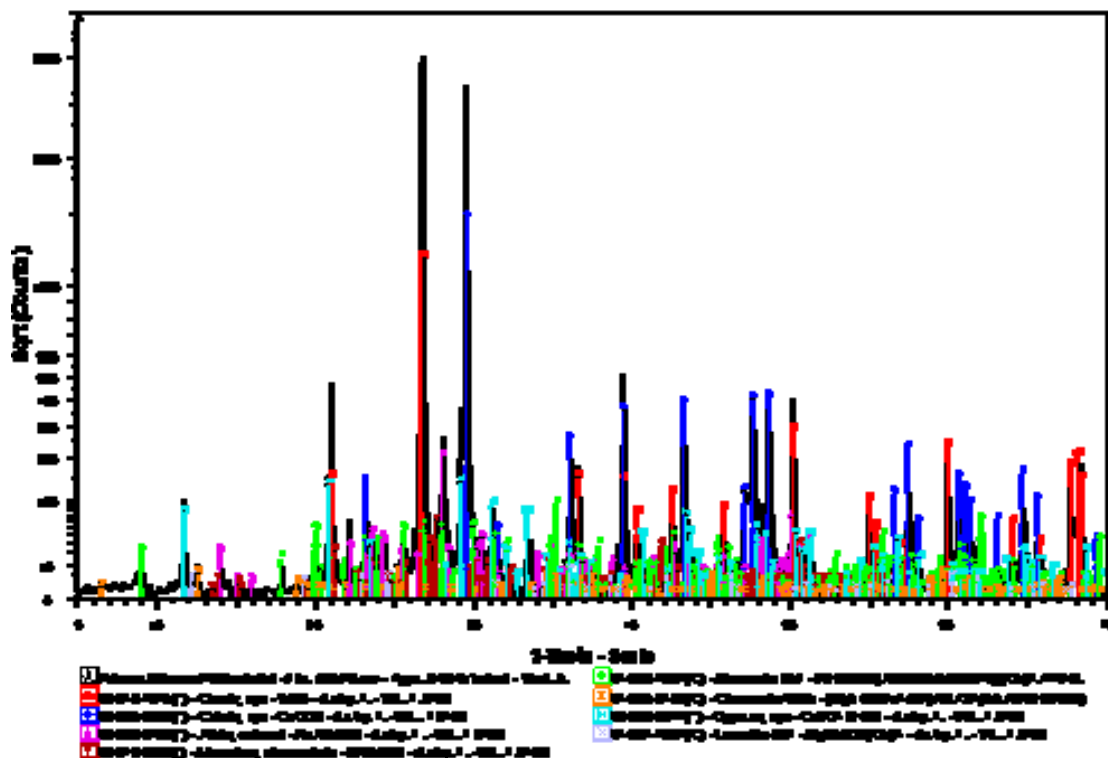


Abb. 30: Qualitative Untersuchung der mineralogischen Zusammensetzung an Probe 6 des Varignana Sandsteines mit Gipskrustenbildung.

Eine weiterführende Analyse organischer Substanzen mit Hilfe der ^1H -NMR-Spektroskopie nach Chloroform-Extraktion hatte Komponenten eines Acrylharzes ergeben. Dies hat zur Einschätzung geführt, dass während einer voran gegangenen Steinrestaurierung stark verdünntes Paraloid B 72 (ein in der Restaurierung häufiger anzutreffendes Kunstharz) zur Festigung der Steinoberfläche verwendet wurde. Aus bauphysikalischer Sicht sollte die Anwendung von filmbildenden Polymeren unter außenklimatischen Bedingungen mit der Möglichkeit der Beregnung vermieden werden, da die Trocknung durch eine starke Herabsetzung der Wasserdampfdiffusionsfähigkeit vermindert wird. Ionenwanderungen und Salzanreicherungen hinter filmbildenden Steinkonservierungsmaterialien führen deshalb langfristig zu einer Verstärkung der Schäden.

Eine detaillierte Dünnschliffuntersuchung, beispielhaft dargestellt in Abb. 31, liefert Informationen zum Mineralbestand und zur Kornbindung / Korngefügeausbildung. Veränderungen durch Verwitterungsprozesse (z. B. Lösung von Karbonaten, Krustenbildungen, Risse, etc.) können an den verschiedenen Mineralen erkannt und beschrieben werden. Rissbildungen, Schalenbildungen, Vergrößerung bzw. Veränderungen der Porosität können qualitativ und mittels Bildauswertung auch quantitativ erfasst werden.



Abb. 31: Mikroskopische Untersuchung eines Dünnschliffes aus Varignana Sandstein vom Palazzo Malvezzi mit sehr starker Auflockerung des Korngefüges durch Lösung karbonatischer Bindemittel und Rissbildung, Porenraum blau eingefärbt, planpolisiertes Licht.

Im Weiteren wurde während eines Belastungsversuchs der Deckenkonstruktion oberhalb des Ratssaales eine Evaluation der verschiedenen drahtlosen Monitoringsysteme wie auch geeigneter Sensoren für Verformungs- und Verschiebungsmessungen vorgenommen. Details hierzu sind dem Bericht

- D6.3: Case study 3: Palazzo Malvezzi

zu entnehmen.

8.5 Untersuchungen an der Schlosskapelle des Schlosses Schönbrunn, Wien

In der Schlosskapelle in Schönbrunn (siehe hierzu Abb. 32 und Abb. 33 wie auch Bericht D6.5: Case Study 5: Schönbrunn Palace) wurde der Prototyp des drahtlosen Potentialdifferenzmesssystems wie auch des Impedanzmesssystems erstmalig unter realen Bedingungen getestet. Daneben wurden zahlreiche weitere Untersuchungen zur Schadensbegutachtung durchgeführt und aktive Maßnahmen zur zukünftigen Minderung der Schädigung initiiert.



Abb. 32: Anordnung der Silber-/Silberchloridelektroden und der drahtlosen Messeinheit in der Schlosskapelle Schönbrunn.

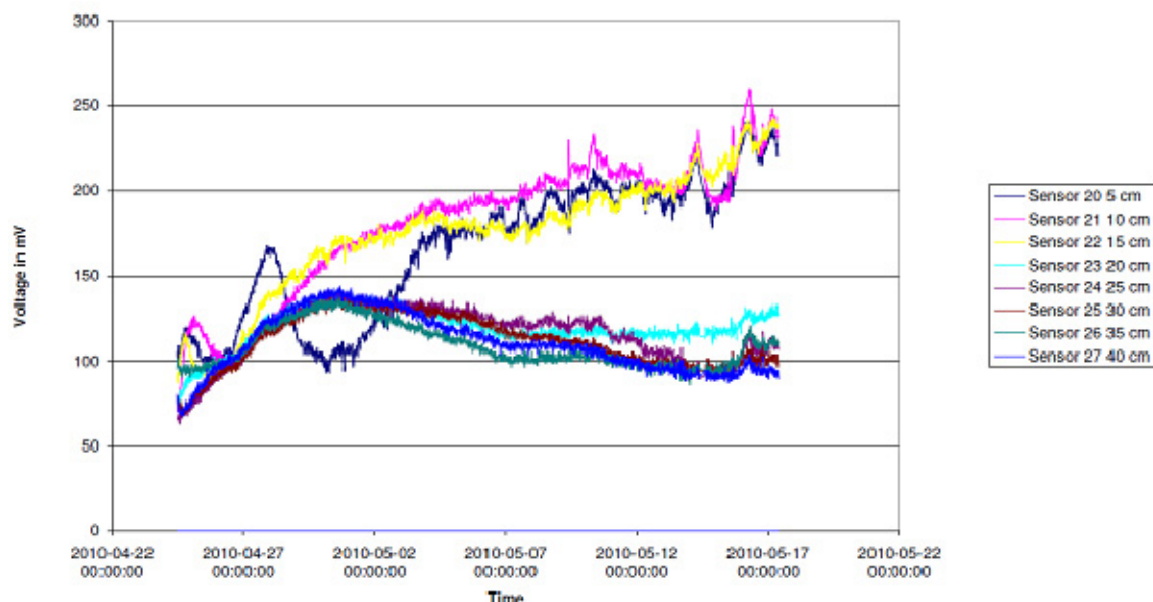


Abb. 33: Ergebnisse (Auszug) der Potentialdifferenzmessungen an der Schlosskapelle in Schönbrunn.

Phänomene wie Wiederbefeuchtung oder die Aufkonzentration von Salzen konnten mittels der Potenzialdifferenzmessung detektiert werden. Allerdings können momentan noch keine eindeutigen Aussagen über die Salzsituation in realen Bauwerken getroffen werden, da die vielfältigen Störeinflüsse noch nicht im ausreichenden Maß berücksichtigt werden können.

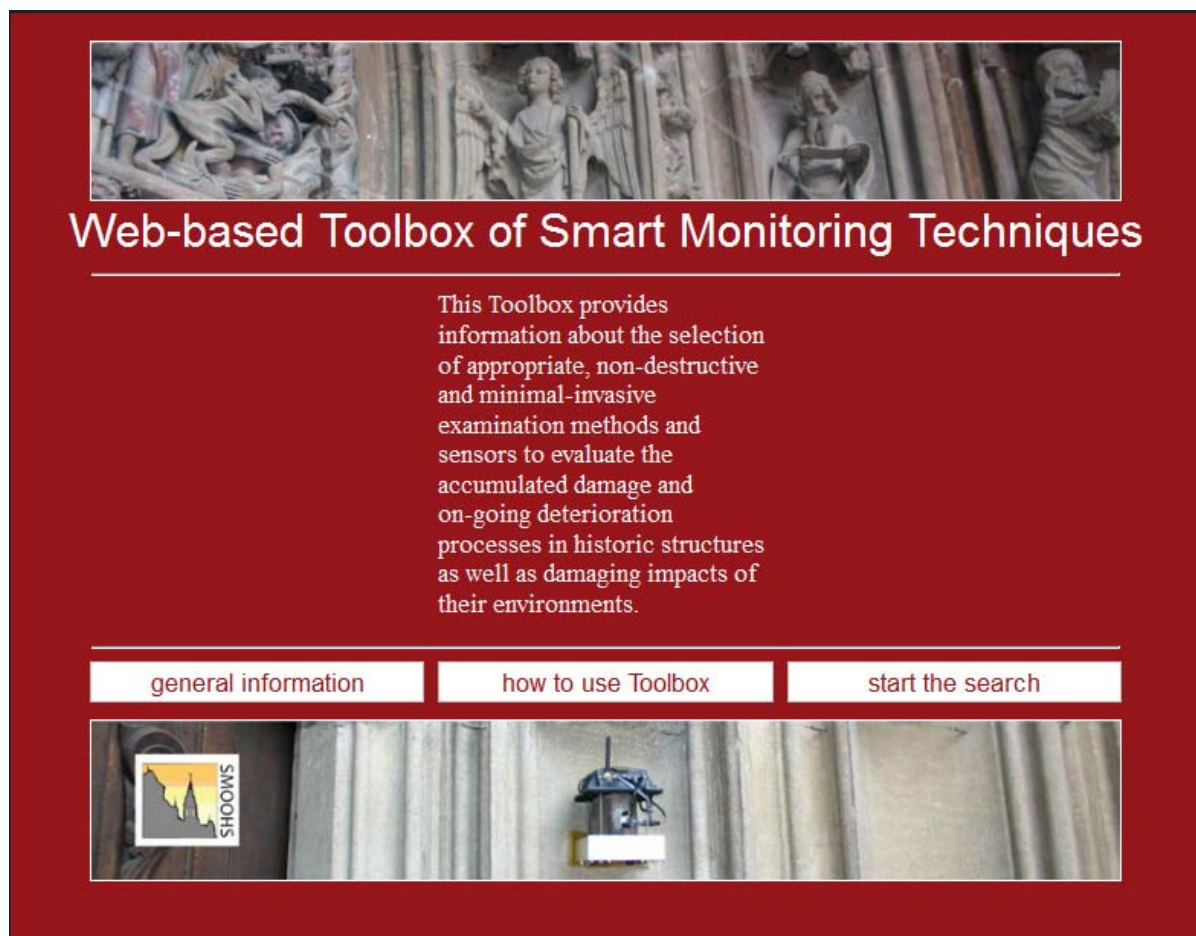
9 Verwertung der Ergebnisse

9.1 Webbasierte Toolbox für intelligente Monitoringtechnologien

Innerhalb des Projekts wurde auf Grundlage der Forschungsergebnisse eine webbasierte Toolbox entwickelt, mittels derer für konkrete Fragestellungen und Schadensbilder geeignete Monitoringtechnologien empfohlen werden. Vorzugsweise zerstörungsfreie bzw. minimalinvasive Technologien werden hier hervorgehoben, die sich bereits im Praxiseinsatz bewährt haben.

Die webbasierte Toolbox für die Anwendung von intelligenten Monitoringtechnologien kann genutzt werden unter:

<http://heritagescience.pl/smoohs>



Web-based Toolbox of Smart Monitoring Techniques

This Toolbox provides information about the selection of appropriate, non-destructive and minimal-invasive examination methods and sensors to evaluate the accumulated damage and on-going deterioration processes in historic structures as well as damaging impacts of their environments.

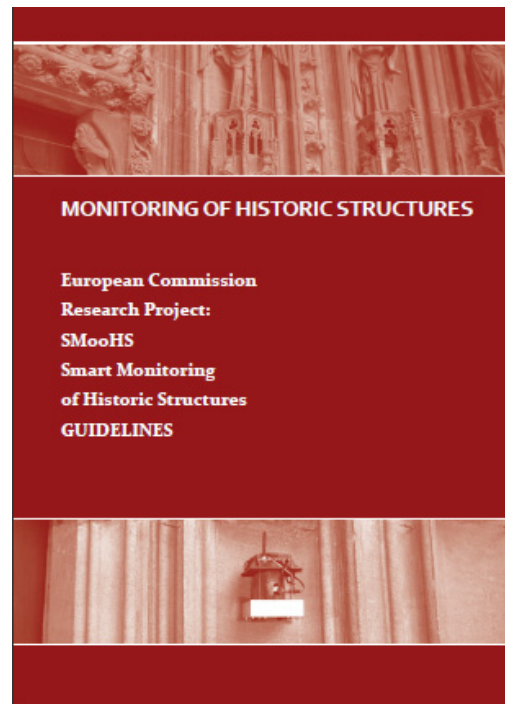
[general information](#) [how to use Toolbox](#) [start the search](#)

9.2 Frei verfügbare „Smart Monitoring Guidelines“

Neben der webbasierten Toolbox wurde im Weiteren eine frei verfügbare (PDF-Dokument) Guideline entwickelt, in der Empfehlungen insbesondere hinsichtlich der Verwendung von drahtlosen Sensornetzen für die Dauerüberwachung von historischen Bauwerken gegeben werden. Die Empfehlungen basieren auf den Erkenntnissen und Entwicklungen aus SMooHS, wobei insbesondere auch in kurzen Beschreibungen die Demonstrationsobjekte vorgestellt werden. Die Guideline richtet sich vornehmlich an Nutzer und Eigner von historischen Gebäuden, an Denkmalschutzbehörden wie auch Restauratoren und generell an mit dem Erhalt von historischen Bauwerken betraute Personen.

Die Guideline ist frei erhältlich und kann unter den folgenden Links heruntergeladen werden:

- www.smoohs.eu
- www.shm.uni-stuttgart.de
- <http://heritagescience.pl>



9.3 Videodokumentation

Innerhalb der Projektlaufzeit wurden zwei Videodokumentationen in englischer Sprache angefertigt. Eine Videodokumentation wurde maßgeblich vom Partner UNIBO (Universität Bologna) während der umfangreichen Untersuchungen am Palazzo Malvezzi angefertigt. Eine weitere Videodokumentation wurde als offizielle Projektdokumentation schließlich unter Leitung der MPA Universität Stuttgart und den Projektpartnern USTUTT (IWB), TTI und den Restauratoren Bärbel Dieruff und Karl Fiedler (AURA) angefertigt. Die Videodokumentation ist in verschiedenen Formaten erhältlich und kann auch auf Youtube angesehen werden.

10 Nationale und internationale Workshops

Während der Projektlaufzeit wurden mehrere Workshops veranstaltet. Ziel der eintägigen Workshops war, neue Verfahren und Vorgehensweisen für den Erhalt historischer Bauwerke kennen und verstehen zu lernen, um dieses Wissen danach auf konkrete Aufgabenstellungen anwenden zu können. Es wurden einige Grundprinzipien zum Einsatz drahtloser Sensoren zur Dauerüberwachung von historischen Bauwerken vorgestellt und ein Einblick in mögliche Analyse- und Auswertemethoden von Dauerüberwachungsmaßnahmen gegeben. Anhand von konkreten Fallbeispielen wurden zudem mögliche Anwendungen erörtert. Eingeschlossen in die Workshops waren jeweils Vorortbesichtigungen, bei der laufende Überwachungsmaßnahmen besichtigt und eingehendere Diskussionen geführt werden konnten.

Die Workshops richteten sich an Restauratoren, Ingenieure, Architekten, öffentliche und private Eigner von historischen Gebäuden und alle, die sich mit dem Erhalt, der Instandhaltung und der Konservierung von historischen Gebäuden und Strukturen beschäftigen.

Folgende Workshops wurden gehalten:

- Workshop mit Vorortbesichtigung, Stuttgart, Deutschland, September 29, 2010
- Workshop während der Fachmesse Restauro, Ferrara, Italien, März 30, 2011
- Workshop mit Vorortbesichtigung, Bologna, Italien, April 01, 2010
- EWCHP: European Workshop on Cultural Heritage Preservation and Training Day, Berlin, September 26-28, 2011 (Offizieller Abschlussworkshop)

Weitere Informationsveranstaltungen wurden während der Messe AR&PA 2010, Valladolid, Spanien (November 11-14, 2010) sowie der Messe MADE Expo International Architecture and Building Trade Show (Oktober 05-08, 2011) abgehalten.

Vom 26. bis 28. September 2011 fand in Berlin der erste von der MPA Universität Stuttgart und dem Rathgen-Forschungslabor in Kooperation mit allen deutschen Projektpartnern organisierte europäische Workshop zum Erhalt historischer Bausubstanz statt. An zwei Tagen wurden hier aktuelle Forschungsergebnisse aus verschiedenen europäischen und nationalen Forschungsvorhaben präsentiert und diskutiert. Darunter insbesondere auch Ergebnisse vom Forschungsprojekt „SMooHS“. In einer eigens organisierten Ausstellung wurden zudem innerhalb der Forschungsprojekte entwickelte Messsysteme und -verfahren demonstriert und erläutert. Nahezu 100 Teilnehmer aus den verschiedensten Disziplinen (Forschung, Entwicklung, Restaurierung, Denkmalpflege) trugen durch ihre intensive Diskussion und Beteiligung zu einer gelungenen Veranstaltung bei.



Abb. 34: Bilder vom Workshop (links: Dr. Lutz Töpfer von der DBU).



Abb. 35: Erläuterungen über Einsatzmöglichkeiten zerstörungsfreier Prüfmethoden für die Untersuchung und Dauerüberwachung historischer Bauwerke am Trainingday.

In einem speziell von den Partnern des Projekts SMooHS organisierten Trainingday wurde weiterhin die Anwendung der entwickelten Verfahren und Geräte zudem detailliert erläutert, wobei die Teilnehmer auch selbst die Handhabung der Messsysteme testen konnten.

Die Proceedings des Workshops wurden bei Fraunhofer IRB Verlag veröffentlicht:

<http://www.baufachinformation.de/artikel.jsp?v=236511>

“Cultural Heritage Preservation”, Proceedings of the European Workshop on Cultural Heritage Preservation EWCHP-2011, Berlin, Germany 26 – 28.09.2011, ed. M. Krüger, Fraunhofer IRB Verlag ISBN 978-3-8167-8560-6

Die Proceedings wurden unter den Workshopteilnehmern verteilt und können weiterhin erworben werden.



11 Zusammenfassung

Die Überwachung denkmalgeschützter historischer Objekte ist eine lohnende aber schwierige Aufgabe, da die Objekte sehr unterschiedlich sind und ihre Vielzahl eine eingehende vorsorgliche Betreuung erschwert. Robuste, zuverlässige und preiswerte Verfahren sind erforderlich, um die bestehenden Probleme zu analysieren und möglichst viele Skulpturen und Bauwerke zu erhalten. Allerdings sind die Ursachen der Schädigung ebenso vielfältig und oft schwer einzuschätzen, da beispielsweise unbekannt ist, wie sich verändernde Umweltbedingungen (z. B. zunehmender Verkehr oder zunehmende Menge an Schadgasen) auswirken. Deswegen erfordert eine zuverlässige Schadensanalyse die Beurteilung einer Vielzahl von Parametern. Eine Dauerüberwachung muss entsprechend auf mehreren Sensortechniken gleichzeitig basieren und komplexe flexible Schadensmodelle für die Analyse berücksichtigen.

Die meisten der genannten Anforderungen erfüllen moderne drahtlose Sensornetze, wie sie innerhalb von SMooHS entwickelt wurden. Sie können mit unterschiedlichen Miniatursensoren bestückt werden und beeinträchtigen den ästhetischen Eindruck der Objekte nicht wesentlich. Mit ihnen lassen sich über Monate und Jahre hinweg zuverlässig Daten über den Objektzustand gewinnen. Analysen und Computersimulationen, bei denen

Informationen aus der instrumentierten Dauerüberwachung als Eingangsparameter genutzt werden können, helfen Einwirkungen und Schädigungsmechanismen besser zu bewerten. Zudem können mittels Parametervariationen Studien hinsichtlich behutsamer Eingriffe durchgeführt werden, die der besseren Abschätzung des angestrebten Erfolgs von konservatorischen Maßnahmen dienen.

Die Entwicklungen im Projekt SMooHS sind nicht die Ablösung der Experten aus dem Bereich Denkmalkonservierung und Denkmalschutz, sondern ihre nachhaltige Unterstützung durch konkrete adaptierbare Datenanalysen und Warnmeldungen.

12 Eckdaten

Kurztitel:	SMooHS
Forscher / Projektleitung:	MPA Universität Stuttgart, Bärbel Dieruff & Karl Fiedler (AuRa GBR), Rathgen-Forschungslabor – Staatliche Museen zu Berlin, TTI GmbH – TGU Smartmote
Projektleiter:	MPA Universität Stuttgart, Dr. Markus Krüger
Gesamtkosten:	1.839.951,00 €
Anteil Bundeszuschuss:	179.955,00 €
Projektlaufzeit:	12.2008 bis 12.2011

13 Referenzen

- [1] Krüger, M., Große, C.U., Marrón, P.J.: Wireless Structural Health Monitoring using MEMS. Key Engineering Materials. Trans Tech Publications, Switzerland, Vols. 293-294 (2005), pp. 625-634.
- [2] Dieruff, B., Fiedler, K.: Preservation of the wall-paintings in the Johanniskirche in Schwäbisch Gmünd. In: M. Krüger (Ed.), Cultural Heritage Preservation – EWCHP 2011, Proc. of the European Workshop on Cultural Heritage Preservation, Berlin, Sept. 26-27, 2011.
- [3] Krüger, M., Samuels, J.M., Bachmaier, S.A., Lehmann, F., Willeke, J.: Condensation risk analysis and indoor climate manipulation assisted by continuous monitoring at Johanniskirche in Schwäbisch Gmünd. In: M. Krüger (Ed.), Cultural Heritage Preservation – EWCHP 2011, Proc. of the European Workshop on Cultural Heritage Preservation, Berlin, Sept. 26-27, 2011.
- [4] Culler, D., Woo, A., Tong, T. (2003): Taming the Underlying Challenges of Reliable Multihop Routing in Sensor Networks. In: Proceedings of the First International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2003.
- [5] Kupfer et al., Materialfeuchtemessung: Grundlagen – Messverfahren – Applikationen – Normen. Expert-Verlag 1997.
- [6] Garrecht, H: Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk. Dissertation, Karlsruhe, 1992.
- [7] Terheiden, K.: Feuchte- und Salztransport: Charakterisierung der Interaktion zwischen Porenfluid und porösem Bauwerkstoff. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2007. ISBN 978-3-86727-455-5.
- [8] Hamann, C.H.; Vielstich, W.: Elektrochemie. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 1998. ISBN 978-3-527-27894-7.
- [9] Barsoukov, V.S.; Macdonald, J.R.: Impedance spectroscopy: Theory, experiment, and applications. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2005. ISBN 978-0-471-64749-2.

- [10] McCarter, W.J.; Brusseau, R.: The A.C. response of hardened cement paste. Cement and Concrete Research, 60(6), 891-900, 1990. DOI 10.1016/0008-8846(90)90051-X.
- [11] Bergmeiser, K., Santa, U. (2004): Brückeninspektion und -überwachung. In: Beton-Kalender 94(2004), Teil 1. Berlin: Ernst & Sohn, 2004, S.407-481.
- [12] Dames, W. (1990): Ein hydraulisches Vielstellenmesssystem mit veränderlichem Messbereich für die kontinuierliche Überwachung von Höhenänderungen. Dissertation, RWTH Aachen, 1990.
- [13] Jakobs, M. (2004): Monitoring von dynamischen Bauwerksbewegungen und -verformungen mit Druckschlauchwaagensystem zur Steuerung von Sicherungsmaßnahmen. Fachaufsatz GT 07-14-D, 5. Geokinematischer Tag, Freiberg 2004, 9 S..
- [14] GIUSEPPE MARIA BARGOSSO, FABIO GAMBERINI, GIORGIO GASPAROTTO, GIAN CARLO GRILLINI and MARTA MAROCCHI (2004): Dimension and ornamental stones from the Tosco-Romagnolo and Bolognese Apennine. - Per. Mineral. (2004), 73, 171-195 <http://go.to/permin>, SPECIAL ISSUE 3: A showcase of the Italian research in applied petrology.

14 Im Rahmen des Forschungsvorhabens erschienene und öffentlich zugängliche Forschungsberichte

Alle nachfolgenden Projektberichte sind in englischer Sprache abgefasst und können von der Homepage www.smoohs.eu heruntergeladen werden:

- D2.1: Real Problems apparent at cultural heritage and monitoring demands and deficits
- D3.1: Smart wireless sensor platform
- D3.2: Smart wireless sensor network platform
- D3.3: Sensor development and sensor adaption (Part 1)
- D3.3: Sensor development and sensor adaption (Part 2): Theory of data acquisition, measurement principles and practical application of vibration sensors
- D3.4: Power supply technologies for WSNs
- D3.5: Conventional monitoring techniques for moisture and humidity (Microwaves, TAE, Smart Log)
- D4.1: Material and deterioration models (state-of-the-art and possible enhancements)
- D4.2: Enhancement of models and data reduction algorithms
- D4.3: Implementation of draft data interpretation and reduction methods and algorithms in prototypes and verification
- D4.4: User-friendly modular open source software for data evaluation and interpretation
- D5.1: part 1: Report on test methods and former test results
- D5.1: part 2: Report on test methods and former test results carried out on project's case studies
- D5.2: Laboratory and on site testing activities part 1 - Brick masonry
- D5.2: Laboratory and on-site testing activities part 2 - Stone masonry
- D5.2: Laboratory and on-site testing activities part 3 - Historical timber elements
- D5.2: Laboratory and on-site testing activities part 4 - Laboratory analyses on materials from test sites
- D5.2: Laboratory and on-site testing activities part 5 - Laboratory ageing tests

- D5.2: Laboratory and on-site testing activities part 6 - On-site NDT and mechanical testing
- D5.2: Laboratory and on-site testing activities part 7 - Laboratory characterization of on-site collected samples
- D5.3: Report on comparative testing
- D6.1: Case Study 1: Museum Island, Berlin
- D6.2: Case Study 2: Holy Cross Minster and St. Johns Church, Schwäbisch Gmünd
- D6.3: Case study 3: Palazzo Malvezzi
- D6.4: Case study 4: Zahdeh Building, Hebron, Palestine
- D6.5: Case Study 5: Schönbrunn Palace
- D7.2: Smart Monitoring Guidelines
- D7.6: Exploitation
- D7.4: Demonstration and training activities

15 Im Rahmen des Forschungsvorhabens erschienene Veröffentlichungen

- Largo, A.; Angiuli, R.: Thermographic Investigation of "leccese" Stone Masonry Structures, in: Proceedings of the NDTMS-2011 International Symposium on Non-destructive Testing of Material Testing, 2011, in print
- Krüger, M., Antretter, F., Leissner, J., Killian, R., Schieweck, A., Maierhofer, Ch., Meinhardt, P., Bellendorf, P., Kalisch, U.: Methoden der Dauerüberwachung von Gebäuden des kulturellen Erbes im Rahmen der Denkmalkonservierung. In: Fouad, Nabil A. (Ed.): Bauphysik-Kalender 2012.
- Lehmann, F.; Krüger, M.; Frick, J.: Impedanzmessungen zum Monitoring von Feuchte und Salz in Naturstein mit drahtlosen Sensornetzen. Messtechnik im Bauwesen, Special Issue, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2012.
- Colla, C., Benedetti, A., Ubertini, F., (2011), "Monitoraggio non distruttivo di risalita capillare in muratura con danneggiamento meccanico", Proc. of *AIMETA 2011 – XX Congresso dell'Associazione Italiana di Meccanica Teorica e Applicata*, Bologna, Italia, 12-15 settembre, pp. 10, IDN 405.
- Colla, C., Gabrielli, E., Pascale, G., (2011), "Experimental diagnosis of structural and material deterioration affecting historic structures due to environment", Proc. of *AIMETA 2011 – XX Congresso dell'Associazione Italiana di Meccanica Teorica e Applicata*, Bologna, Italia, 12-15 settembre, pp. 10, IDN 403.
- Esposito, E., del Conte, A., Colla, C., Dieruff, B., Fiedler, K., Pamplona, M., (2011), "Structural investigation of historical structures by Laser Doppler Vibrometry", Proc. of *AIMETA 2011 – XX Congresso dell'Associazione Italiana di Meccanica Teorica e Applicata*, Bologna, Italia, 12-15 settembre, pp. 10, IDN 388.
- Gabrielli, E., Colla, C., Strojceki, M., Lukomski, M., (2011), "Valutazione non distruttiva del degrado meccanico e ambientale in strutture murarie", Proc. of *AIMETA 2011 – XX Congresso dell'Associazione Italiana di Meccanica Teorica e Applicata*, Bologna, Italia, 12-15 settembre, pp. 10, IDN 393.
- Rajčić V., Colla C.: "Correlation between destructive and four NDT techniques tests on historic timber elements" in Proceedings of International conference on structural health assessment of timber structures SHATIS, 16-17 June 2011, Lisbon, Portugal.

- Castellazzi, G., de Miranda, S., Formica, G., Ubertini, F. (2010), Coupled diffusion-damage modelling of historical masonry walls, *SIMAI 2010 - Models and simulations of engineering materials*, June 21–25, 2010, Università di Cagliari.
- Castellazzi, G., de Miranda, S., Formica, G., Ubertini, F. (2010), Fully coupled diffusion-damage analysis in historical masonry walls, *GIMC 2010 - Università degli Studi di Catania*, September 22-24, 2010.
- Colla, C., Molari, L., Gabrielli, E., de Miranda, S., (2011), “Damp and salt rising in damaged masonry structures: numerical modelling and NDT monitoring”, Proc. of *NDTMS-2011 International Symposium on Non-destructive Testing of Materials and Structures*, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, May 15-18, RILEM Bookseries vol.6 (eds. Oral Buyukozturk, Mehmet Ali Tasdemir, Oguz Gunes and Yilmaz Akkaya) ISBN 978-94-007-0722-1
- Colla, C., Baldracchi, P., Troi, A., Ubertini, F., Carli, R., (2011), “Simulation and test procedures to correlate structural damage with moisture and salts migration in masonry”, Proc. of *NDTMS-2011 International Symposium on Non-destructive Testing of Materials and Structures*, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, May 15-18, RILEM Book series vol.6 (eds. Oral Buyukozturk, Mehmet Ali Tasdemir, Oguz Gunes and Yilmaz Akkaya) ISBN 978-94-007-0722-1
- Bastianini F., Sedigh S., Pascale G., Perri G.: Cost-Effective “Dynamic Structural Health Monitoring with a Compact and Autonomous Wireless Sensor System”, International Symposium on Non-destructive Testing of Materials and Structures, May 15-18, 2011, Istanbul, Turkey, RILEM Book series vol.6 (eds. Oral Buyukozturk, Mehmet Ali Tasdemir, Oguz Gunes and Yilmaz Akkaya) ISBN 978-94-007-0722-1.
- Strojecki M., Łukowski M., Colla C., Gabrielli E.: “Acoustic emission as a non-destructive method for tracing damage: from laboratory testing to monitoring historic structures” International Symposium on Non-destructive Testing of Materials and Structures, May 15-18, 2011, Istanbul, Turkey, RILEM Book series vol.6 (eds. Oral Buyukozturk, Mehmet Ali Tasdemir, Oguz Gunes and Yilmaz Akkaya) ISBN 978-94-007-0722-1.
- Bachmaier, S.A., Krüger, M.: Wireless Monitoring of Cultural Heritage – Demonstration of Usability on Selected Case Studies. International Symposium on Non-destructive Testing of Materials and Structures, May 15-18, 2011, Istanbul, Turkey, RILEM Book series vol.6 (eds. Oral Buyukozturk, Mehmet Ali Tasdemir, Oguz Gunes and Yilmaz Akkaya) ISBN 978-94-007-0722-1.
- Frick, J., Lehmann, F., Menzel, K., Pakdel, H., Krüger, M.: Monitoring of salt content in mineral materials using wireless sensor networks. International Symposium on Non-destructive Testing of Materials and Structures, May 15-18, 2011, Istanbul, Turkey, RILEM Book series vol.6 (eds. Oral Buyukozturk, Mehmet Ali Tasdemir, Oguz Gunes and Yilmaz Akkaya) ISBN 978-94-007-0722-1.
- Lehmann, F., Frick, J., Krüger, M., Menzel, K.: Monitoring of moisture content by complex impedance measurements. International Symposium on Non-destructive Testing of Materials and Structures, May 15-18, 2011, Istanbul, Turkey, RILEM Book series vol.6 (eds. Oral Buyukozturk, Mehmet Ali Tasdemir, Oguz Gunes and Yilmaz Akkaya) ISBN 978-94-007-0722-1.
- Samuels, J.M., Krüger, M., Bachmaier, S.A., Lehmann, F., Willeke, J.: Risk analysis Criteria to monitor Moisture Migration at Johanniskirche in Schwäbisch Gmünd, Germany. First Middle East conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, SMAR 2011, 8-10 February 2011, Dubai, UAE.
- Krüger, M.: Wireless monitoring of reinforced concrete structures. In: Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures, Vol. 2: Non-destructive test methods. Edited by C. Maierhofer, H. W. Reinhardt, G. Dobmann, 2010, pp. 110-126.

- Esposito E., del Conte A., Colla C., Dieruff B., Fiedler K., Pamplona M.: Structural investigation of historical structures by laser Doppler vibrometry. Proceedings of XX Conference of the Italian Association of Theoretical and Applied Mechanics - AIMETA, Bologna, 12-15 September 2011, Publi&Stampa, Conselice (RA), abstract p. 449
- Krüger, M., Grosse, C.U., Bachmaier, S.A., Willeke, J.: Wireless Monitoring of the Johanniskirche in Schwäbisch Gmünd. Proceedings of the International Workshop on Conservation of Heritage Structures Using FRM and SHM (CSHM-3), 11-13, August 2010, Ottawa-Gatineau, Canada, pp. 467-480.
- Grosse, C.U., Pascale, G., Simon, S., Krüger, M., Troi, A., Colla, C., Rajcic, V., Lukowski, M.: Smart Monitoring of Historic Structures by Wireless Sensors. Proceedings of the International Workshop on Conservation of Heritage Structures Using FRM and SHM (CSHM-3), 11-13, August 2010, Ottawa-Gatineau, Canada, pp. 281-290.
- Colla C., Fernández A.J., Garanzini S., Marelli M.: Diagnostic by imaging: 3D GPR investigation of brick masonry and post-tensioned concrete, Proc. of GPR 2010, XIII Int. Conf. on GPR, Lecce, 21-25 June 2010 (*in print*).
- Krüger M., Pascale G., Pamplona M., Simon S., Troi A., Colla C., Rajčić V. and Lukowski M.: European Union Project SMooHS: Smart Monitoring of Historical Structures, 8th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, 31st May – 2nd June, Patras, (Poster).
- Pamplona M., Aibéo C., Simon S., Krüger M., Buczynski B.: Indoor climate analysis and dust deposition in a museum,- Jardins de Pierres – Conservation de la pierre dans les parcs, jardins et cimetières, 14es journées d'étude de la SFIIC, Paris, Institut national du patrimoine, 22-24.6.2011 (Poster).
- Colla, C., (2010), "GPR of a timber structural element", Proc. of GPR 2010, XIII Int. Conf. on GPR, Lecce, Italia, 21-25 June, ISBN 978-1-4244-4605-6, pp. 418 - 422.
- Colla, C., Benedetti, A., Pascale, G., (2009), "Diagnosi di elementi strutturali lignei mediante tomografia sonica per la valutazione dello stato di conservazione", Atti di XXV Int. Congr. Scienza e Beni Culturali, Conservare e Restaurare il Legno, Conoscenze, esperienze, prospettive, Marghera-Venezia: Edizioni Arcadia Ricerche, Bressanone, 23-26 Giugno, pp. 677–688 and Color table n.26.
- Frick J.: SMooHS - Smart Monitoring of Historic Structures, European Construction Technology Platform 4th Conference, Brussels, Belgium, 24 – 25 November 2009, poster and oral presentation.
- Ubertini F., Pascale G., de Miranda S., Colla C.: Monitoraggio intelligente di strutture storiche, 13° Congresso AIPnD, Conferenza nazionale sulle prove non distruttive monitoraggio diagnostica, Roma, 15-17 ottobre 2009, IDN 83 (*in Italian language*).
- Ubertini F., Pascale G., de Miranda S., Colla C.: Smart monitoring of historic structures, Proceedings of 13th AIPnD Nat. Congress on Non-destructive testing, monitoring and diagnose", Rome, 15-1 October 2009, IDN 83.
- Krüger, M., Grosse, C.U., Bachmaier, S.A., Lehmann, F.: Development of a wireless sensor network to monitor historic structures. International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM), Stanford University, Stanford, CA, September 9-11, 2009.
- Bachmaier, S.A., Krüger, M., Grosse, C.U.: A Survey on Power Management for Long-Term Measurements using Wireless Sensor Networks. 4th International Conference on Structural Health Monitoring on Intelligent Infrastructure (SHMII-4) 2009, 22-24 July 2009, Zurich, Switzerland.
- Ispir. M., Demir C., Ilki A., Kumbasar N.: Material characterization of the historical unreinforced masonry Akaretler row houses in Istanbul, Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000071.

- Grosse, C.U., Pascale, G., Simon, S., Krüger, M., Troi, A., Colla, C., Rajcic, V., Lukomski, M.: Recent Advances in Smart Monitoring of Historic Structures, Proc. 8th European Conference on Research for Protection, Conservation and Enhancement of Cultural Heritage (CHRESP), Ljubljana, Slovenia, November 2008, extended abstract, pp 20-21.
- Krüger, M., Grosse, C.U.: Ereignisbasierte Messwerterfassung in drahtlosen Sensornetzwerken für die Strukturüberwachung, In: 5. GMM Workshop (VDI/VDE) „Energieautarke Sensorik, 12.-13.11.2008, 2008, GMM-Fachbericht 58, 7p.
- Majumder M., Gangopadhyay T.K., Chakraborty A. K., Dasgupta K., Bhattacharya D.K.: Fibre Bragg gratings in structural health monitoring—present status and applications, Journal of Sensors and Actuators A: Physical, 147 (1), 2008, pp.150-164.
- Krüger, M., Grosse, C.U., Frick, J.: Intelligente Bauwerksüberwachung von historischen Bauwerken, in: "Natursteintagung Stuttgart 2008 – Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen", Eds. Grassegger et al., Fraunhofer IRB (2008), ISBN: 978-3-8167-7553-9, pp. 145-150.
- Grosse, Ch. U., Pascale G., Simon S., Krüger M., Troi A., Colla C., Rajčić V., Lukomski M.: Smart Monitoring of Historic Structures - overview about a medium-scale research project in the EU 7th Research Framework Programme, in: In situ Monitoring of Monumental Surfaces (ed. P. Tiano and C. Pardini), ISBN 978-88-7970-390-1, Editor Publ. Florence, Proceed. of the International Workshop SMW08, Oct. 27-29 2008, Florence, Italy, p. 379-383.

Veröffentlichungen in den Proceedings zum “European Workshop on Cultural Heritage Preservation” EWCHP-2011

- Krüger M., Samuels J.M., Bachmaier S.A., Lehmann F., Willeke J.: “Condensation risk analysis and indoor climate manipulation assisted by continuous monitoring at Johanniskirche in Schwäbisch Gmünd”
- Troj A., Baldracchi P., Pamplona M., Krüger M., Aibéo C., Bachmaier S.A., Buczynski B., Simon S., Chapuis J.: “Museum Environment: monitoring fully and partially conditioned rooms within Smooths project”
- Käferhaus J.: “A damage preventive wall heating in Schönbrunn Chapel: micro climate change and impact on salt and moisture in walls”
- Bastianini F., Pascale G., Sedigh S.: “Cost effectiveness of Structural Health Monitoring in Low Sensor Count Installations using a Wireless Autonomous SHM (WASHM) Device”
- Esposito E., del conte A., Colla C., Dieruff B., Fiedler K., Pamplona M.: “Structural investigation of historical structures by scanning laser Doppler vibrometry”
- Franzen C., Baldrachi P., Colla C., Esposito E., Gaigg G., Pfluger R., Troi A.: “Assessment of historic structures by IRT”
- Colla C., Gabrielli E., Largo A., Angiuli R.: “Experimental studies by combined NDT of capillary rise monitoring in masonry specimens”
- Colla C.: “Comparative testing for improved diagnosis of historic structures”
- Rajčić V., Colla C.: “Correlation between destructive and four NDT techniques on historic timber elements”
- Strojecki M., Colla C., Łukomski M., Gabrielli E., Bratasz Ł.: “The Kaiser effect in wood—does historic wood have stress memory?”
- Colla C., Grüner, E. Gabrielli, Frick J.: “Monitoring of salt content and mobility in masonry materials”
- Krüger M., Lehmann F.: “Wireless impedance measurements to study moisture and salt migrations in natural stone”

- Castellazzi G., Colla C., de Miranda S., Gabrielli E., Formica G., Molari L., Ubertini F.:
"A simplified model for salt diffusion and crystallisation in historic masonry"
- Dieruff B., Fiedler K.: "Preservation of the wall-paintings in the Johanniskirche in
Schwäbisch Gmünd"