

Dauerüberwachung von Bauwerken des Kulturerbes

Christian GROSSE, Markus KRÜGER, MPA Universität Stuttgart

Kurzfassung. 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 einem Projekt gefördert von der Europäischen Kommission im 7. Rahmenprogramm 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.

Einführung

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 Restaurierer. 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.

Tabelle 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	Italy, Bolzano
5	Alma Mater Studiorum – Universität di Bologna	UNIBO	Italy, Bologna
6	Rathgen Research Laboratory - National Museums Berlin	RRL	Deutschland, Berlin
7	Polish Academy of Sciences	PASc	Poland, Krakow
8	Technisches Büro Käferhaus	TBK	Austria, Schönbrunn
9	TTI GmbH – TGU Smartmote	TTI	Deutschland
10	Metalmobile S.R.L.	Metalmobile	Italy, Bologna
11	Artemis srl	Artemis	Italy, Ancona
12	Consorzio Cetma	CETMA	Italy, Brindisi
13	Riwaq - Centre for Architectural Conservation	RIWAQ	Palestinian-administered areas, Ramallah
14	University of Zagreb	UNIZAG	Croatia, Zagreb

2. Konzepte für Monitoringverfahren zum Erhalt historischer Objekte

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. Minimal-invasive oder gar zerstörungsfreie Prüfmethode 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 (Abbildung 1).



Abbildung 1: Verwitterte Steinskulptur am Heilig-Kreuz-Münster in Schwäbisch Gmünd (links) und Fassade des Palazzo Malvezzi in Bologna (rechts).

3. Ziele des EU-Projekts SMooHS

Im SMooHS-Projekt steht die Entwicklung von intelligenten drahtlosen Sensorsystemen zur Dauerüberwachung von historischen Bauwerken im Vordergrund [1]. 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.

Deswegen ist das SMooHS-Projekt in drei Arbeitspakete (workpackages) unterteilt:

- Entwicklung von intelligenten, drahtlosen Monitoringtechnologien (Arbeitspaket 1)
- Modellierung und Analyseverfahren (Arbeitspaket 2)
- Vergleichende Labor- und Feldversuche (Arbeitspaket 3)

3.1 Entwicklung von drahtlosen Monitoringsystemen

Innerhalb von Arbeitspaket 1 werden „intelligente“ drahtlose Sensorsysteme entwickelt, wobei zwei verschiedene Ansätze verfolgt werden. Der erste Ansatz befasst sich mit der Entwicklung eines datenzentrischen drahtlosen Sensorsystems, der zweite mit einem drahtlosen Sensornetz als sogenanntes verteiltes System (**Abbildung 2**). 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.

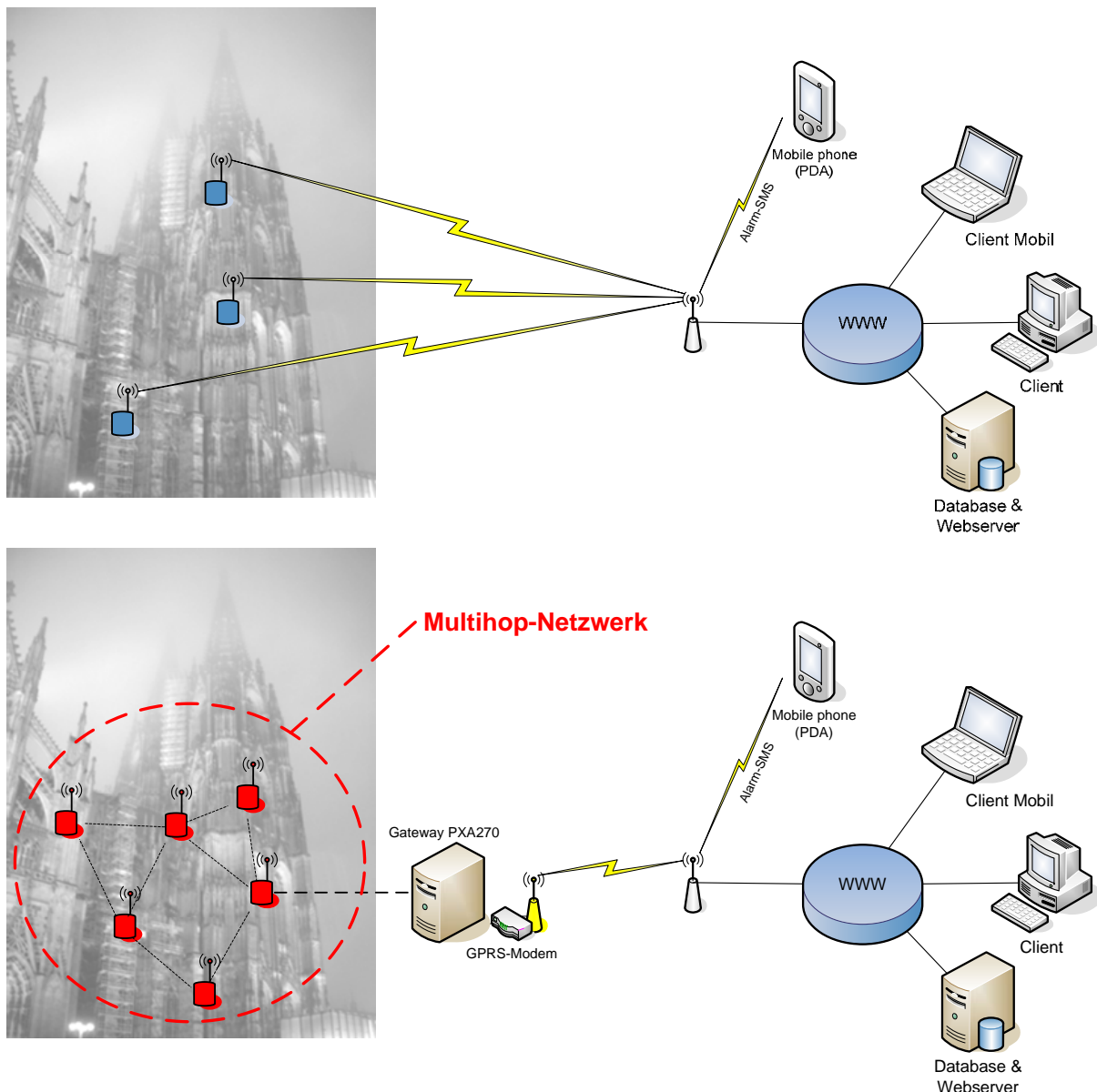


Abbildung 2: Datenzentrisches Sensorsystem (oben) und drahtloses Multihop-Sensornetz als Beispiel für ein verteiltes System (unten).

In Stuttgart wird der Ansatz der verteilten drahtlosen Sensornetze verfolgt, die auf Miniatursensoren 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. Abbildung 3 zeigt den Prototyp eines neu entwickelten Sensorknotens.



Abbildung 3: Sensorknoten für den Betrieb in drahtlosen Sensornetzen (links) mit Stromversorgung und Miniatursensoren (rechts).

3.2 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 Bauteil deformierungen 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 ist 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 werden auch bereits bekannte Schädigungsmodelle modifiziert und hinsichtlich des Einsatzes bei der kontinuierlichen Überwachung und der notwendigen Datenreduktion optimiert. Zudem werden die gewonnenen Erkenntnisse in ein wissensbasiertes Expertensystem einfließen, welches im Projekt konzeptioniert wird.

3.3 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 [2, 3, 4] und Deutschland durchgeführt werden, finden Feldversuche an mehreren Objekten bzw. Bauwerken in Deutschland, Österreich, Italien sowie Palästina statt.

4. Fallstudien

Innerhalb des Projekts SMooHS erfolgt eine enge Verknüpfung zwischen Forschung und Anwendung. Daher werden die meisten Arbeiten vorwiegend objektbezogen durchgeführt. Insgesamt stehen den Projektpartnern fünf Fallstudien zur Verfügung, wobei drei davon einen Schwerpunkt bilden; dies sind:

- Museumsinsel in Berlin (Abbildung 4)
- Heilig-Kreuz-Münster in Schwäbisch-Gmünd (Abbildung 4) [5]
- Palazzo Malvezzi in Bologna (Abbildung 1)

Der Museumskomplex der Museumsinsel in Berlin wie auch das Heilig-Kreuz-Münster in Schwäbisch-Gmünd dienen vornehmlich der Untersuchung außen- bzw. raumklimatischer Aspekte und deren Einfluss auf die beweglichen und auch fest installierten historischen Objekte sowie der Bauwerksstruktur. Der Fokus liegt 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 bietet den Vorteil, dass dort in der Vergangenheit bereits eine Vielzahl von Forschungsaktivitäten durchgeführt wurde, die eine gute Basis für weitere Messungen bildet und eine vergleichende Interpretation der Daten ermöglicht. 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 eignet.

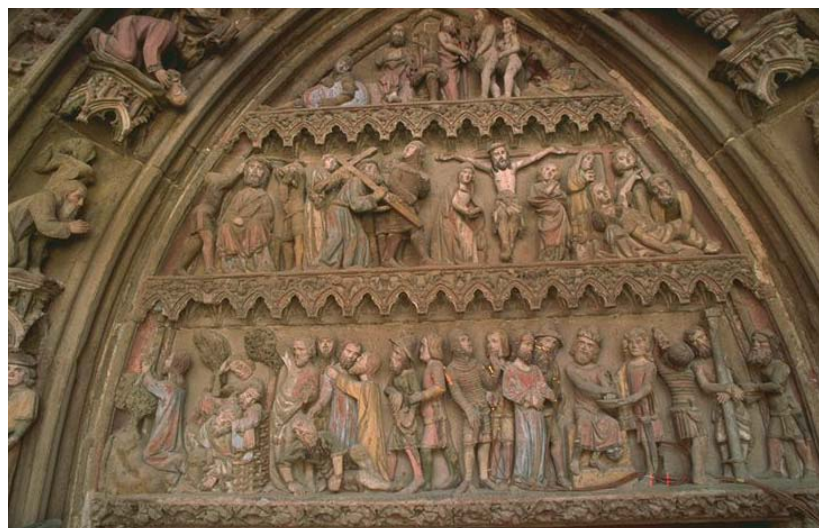


Abbildung 4: Fallstudie 1 – Museumsinsel Berlin (links); Fallstudie 2 – Portale des Heilig-Kreuz-Münsters in Schwäbisch Gmünd (rechts).

Ergänzend zu den Schwerpunktstudien werden Fallstudien am Schloss Schönbrunn, Wien, sowie an Gebäuden der Altstadt von Hebron, Palästinensische Autonomiegebiete, vorgenommen. Damit werden einerseits Objekte sowohl im Innen- und Außenbereich mit sehr

unterschiedlichen Schädigungsbildern untersucht, wie auch Objekte aus drei verschiedenen Klimazonen.

5. 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 Umweltsbedingungen (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, die mit unterschiedlichen Miniatorsensoren bestückt werden können und den ästhetischen Eindruck der Objekte nicht wesentlich beeinträchtigen. Mit ihnen lassen sich über Monate und Jahre hinweg zuverlässig Daten über den Objektzustand gewinnen, wobei eine Vorverarbeitung in den Sensorknoten selbst stattfindet, so dass sich die Anwender – die häufig wenige Kenntnisse über Datenanalyseverfahren haben – auf wesentliche (robuste) Aussagen konzentrieren können. Das Ziel der Entwicklungen im vorgestellten Projekt SMooHS [6] ist dementsprechend auch nicht die Ablösung der Experten aus dem Bereich Denkmalkonservierung und Denkmalschutz, sondern ihre nachhaltige Unterstützung durch konkrete adaptierbare Datenanalysen und Warnmeldungen.

Referenzen

- [1] Grosse, C., Pascale, G., Simon, S., Krüger, M., Troi, A., Colla, C., Rajcic, V., Lukomski, M.: Smart Monitoring of Historic Structures - overview about a medium-scale research project in the EU 7th Research Framework Programme, Proc. Workshop "In situ Monitoring of Monumental Surfaces" (SMW08), Eds. P. Tiano, C. Pardini, ISBN 978-88-7970-390-1, Edifir Publ. Florence, Italy, 27-28 Oct. 2008, 6 S.
- [2] Colla, C.: Non-destructive evaluation of brick masonry via scanning impact-echo testing. Proc. 9th North American Masonry Conference, Clemson, South Carolina, USA, June 1-4, 2003, The Masonry Society, book of abstracts and CD-Rom, paper 6A.1, pp. 954-965.
- [3] Pascale, G., Colla, C., Carli, R., Bonfiglioli, B.: Wave propagation based methods for investigation of concrete and masonry architectural members. 8th International Conference on Non-Destructive Testing and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of the Cultural and Environmental Heritage, Lecce (Italy), 15-19 May 2005, CD, Contribution N° 170.
- [4] Colla, C., Pascale, G.: Non-Destructive Defect Location and Sizing in Concrete Columns and Masonry Pillars from Impact-Echo Testing. Structural Faults + Repair-2006, 13th - 15th June 2006, Edinburgh, Scotland, UK.
- [5] Frick, J., Grassegger, G., Reinhardt, H.-W.: Entwicklung und Erprobung eines Qualitätssicherungs- und Überwachungskonzeptes mit zerstörungsfreien Methoden für die konservierten Portale des Heilig-Kreuz-Münsters in Schwäbisch Gmünd. Proc. 4th International Conference on Non-Destructive Testing of Works of Art – 4. Internationale Konferenz Zerstörungsfreie Untersuchungen an Kunst- und Kulturgütern DGZfP, Vol. 45, part 1 (1994), 606-618.
- [6] www.smoohs.eu.