

Untersuchungen von Bimsziegelstein mit Ultraschallecho: Ausbreitungsverhalten von Transversalwellen

Andreas HASENSTAB*, Katja FRÜHWALD**, Georg HILBERT***

*Ingenieurbüro Dr. Hasenstab GmbH, Carron-du-Val-Str. 17, 86161 Augsburg,
zfp@hasenstab.de

**Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Fachbereich Produktion und Wirtschaft, Liebigstr. 87,
32657 Lemgo, katja.fruehwald@hs-owl.de

***Remmers Fachplanung, Lönigen

Kurzfassung. Die Anwendung von Ultraschall zur Prüfung von Bimsziegelsteinen ist nicht Stand des Wissens in Forschung und Praxis. In einem Gewölbe aus Bimsziegelstein einer neugotischen Kirche fielen große Risse, die teilweise noch aus dem Zweiten Weltkrieg herrührten, sowie weitere strukturelle Schäden auf. Da das Ausmaß der Schäden nicht einzuschätzen war, musste das Gewölbe untersucht werden, was üblicherweise mittels visueller, handnaher Prüfung in Kombination mit punktueller Bohrkernentnahme an einigen Messpunkten gelöst wird. Dieser Untersuchungsansatz bedeutet, dass nur die Oberfläche und die Struktur nur an wenigen Stellen untersucht wird. Mit Ultraschallecho ist es möglich, an vielen Punkten die innere Struktur des Gewölbes zerstörungsfrei, d. h. substanzschonend, zu untersuchen.

Alle Gewölbe des Hauptschiffs und der beiden Seitenschiffe wurde mittels Ultraschallecho untersucht und ergaben beispielsweise, dass sich der strukturelle Aufbau auch innerhalb eines Schiffes unterscheidet. Weiter zeigten die Ergebnisse der Ultraschallechomessungen, dass eine Qualitätssicherung der verschiedenen Restaurierungen wichtig ist, da einige Restaurierungen nur „kosmetischer“ Natur waren. Mit den Ergebnissen konnte ein detailliertes Restaurierungskonzept mit einer Prioritätenliste aufgestellt werden, um z. B. Bereiche, in denen eine chemische Verfestigung der Bimsziegelsteine (z. B. mit Kieselsäureester oder Romanzement) erforderlich ist, festzulegen. Durch die genaue Untersuchung war es aber auch möglich, die intakten Bereiche eindeutig zu definieren, was erhebliche Material- und Kosteneinsparungen hinsichtlich des Einsatzes von chemischen Verfestigungsmitteln zur Folge hatte.

Zusätzlich zum Gewölbe wurde die Holzkonstruktion des Dachstuhls untersucht: Dies geschah visuell, handnah, mittels Ultraschallecho, Bohrwiderstandsmessung und Bohrkernentnahme. Bereiche mit starkem Braunfäulebefall sowie Insektenbefall wurden identifiziert.

1. Einführung

Während der visuellen und handnahen Prüfung einer historischen Konstruktion stellt sich häufig die Frage nach visuell nicht sichtbaren Schäden der Konstruktion. Im folgenden Beitrag werden Möglichkeiten zur Untersuchung der inneren Struktur am Beispiel des

Bimsziegelstein-Gewölbes der Pfarrkirche St. Cornelius in St. Tönis (vgl. Abbildungen 1 und 2) vorgestellt.

Baugeschichtlich reichen Teile der Kirche bis etwa 1380 zurück, große Teile der derzeitigen Kirche wurden im neugotischen Stil von 1885-1904 erbaut und einige Bereiche nach dem Zweiten Weltkrieg 1947 im gleichen Stil wieder aufgebaut. In den im Krieg nicht eingestürzten Gewölben befanden sich teilweise große, nur zum Teil visuell erkennbare Risse, weitere strukturelle Schäden wurden in allen Teilen der Gewölbe vermutet. Darüber hinaus war zu Untersuchungsbeginn nicht bekannt, ob in den einzelnen Kirchenschiffen gleiche Material verwendet wurde. Im Verlauf der Untersuchungen wurden Materialunterschiede z. B. hinsichtlich der Putzhärte, Putzoberfläche, Putzstärke und des Materials (Zement / Kalkmörtel) festgestellt.



Abbildung 1. Kirche St. Cornelius in St. Tönis

Üblicherweise würde die Untersuchung eines derartigen Gewölbes mittels visueller Sicht- und handnaher Prüfung in Verbindung mit Bohrkernentnahmen an einigen Messpunkten gelöst werden. Mit diesem Ansatz kann jedoch nur die Oberfläche und an einigen ausgewählten Messpunkten die Struktur des Gewölbes untersucht werden.

Mit den Untersuchungen sollte geklärt werden, ob zerstörte Bereiche aufgrund von nicht sichtbaren Rissen oder anderen, überlagerten Schäden mittels Kombination von visueller Sichtprüfung, mechanischem Abklopfen und Ultraschallecho erkannt werden können. Wenn diese Erkennung möglich ist sollte weiter geklärt werden, ob das Ausmaß der Schäden im Bereich um die Risse bestimmt werden kann.

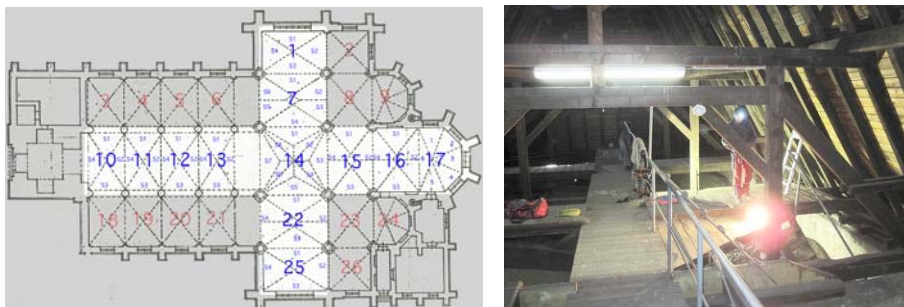


Abbildung 2. Links: Plan der Kirche, untersuchte Bereiche sind hell hervorgehoben;
Rechts: Blick in den Kirchendachstuhl

2. Untersuchungsmethoden

2.1 Visuelle Sichtprüfung und mechanisches Abklopfen

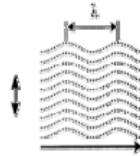
Bei der visuellen Inaugenscheinnahme wird die Oberfläche der zu untersuchenden Struktur betrachtet und beschrieben. Hierbei werden Auffälligkeiten und Schäden dokumentiert. Ergänzt wird diese visuelle Sichtprüfung durch Abklopfen der Gewölbeoberfläche mit einem Hammer, was eine übliche Untersuchungsmethode bei der Prüfung von Brücken nach DIN 1076 ist. In St. Cornelius wurde das Abklopfen der Gewölbeoberfläche ergänzend zu den Ultraschallechomessungen durchgeführt, um auf diese Weise ausgedehnte oberflächennahe Hohlstellen zu lokalisieren.

2.2 Ultraschallechomethode

Mit Ultraschallecho ist es möglich, zerstörungsfrei und damit substanzschonend an vielen Punkten die innere Struktur des Gewölbes zu untersuchen – nicht nur an einigen Stellen mit entnommenen Materialproben. Das Ultraschallechoverfahren beruht auf der Reflexion von Schallwellen an Werkstoffinhomogenitäten wie der Bauteilrückwand oder an anderen Grenzflächen. Aus den empfangenen Signalen kann indirekt eine Aussage über den Bauteilzustand oder innere Schäden getroffen werden. Aus vielen Untersuchungen ist bekannt, dass z. B. bei Holz davon ausgegangen werden kann, dass die untersuchte Struktur frei von Innenfäule, ausgeprägtem Insektenbefall oder ausgeprägten Rissen ist. Diese Aussage gründet physikalisch darauf, dass das ausgesendete Schallsignal eine ungestörte Struktur für die Schallleitung benötigt und für ein Echosignal von der Bauteilrückseite der Schall das Bauteil zweimal ungehindert durchlaufen muss. Ist dies möglich, d. h. wird ein Echosignal empfangen, ist die innere Struktur ungeschädigt. Wird dagegen bei sonst gleichbleibenden Randbedingungen kein Echosignal von der Bauteilrückseite empfangen, besteht ein Verdacht auf eine innere Schädigung. Details zur Ultraschallechomethode, speziell an Holz, können [1-4] entnommen werden.

Die Anwendung des Ultraschallechoverfahrens zur Untersuchung von Bimsziegeln ist keine anerkannte Regel der Technik und ist auch nicht Stand des Wissens in Forschung und Praxis. Die Auswertung der Messungen basiert auf Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und eigenen Vorversuche der Autoren an Probekörpern aus Leichtbeton, Porenbeton und Bimsziegelsteinen. Der hohe Luftgehalt der Struktur der Bimsziegelsteine verursacht eine hohe Dämpfung der Ultraschallsignale. Dieser, für Longitudinalwellen bekannte Effekt, kann nicht direkt auf Transversalwellen übertragen werden. Mit einem für Beton (Dichte 2,0...2,6 g/cm³) optimierten Ultraschallechoequipment wurden Versuche an mineralischen Probekörpern mit einer Dichte von ca. 1,0 g/cm³ durchgeführt. Die vielversprechenden Ergebnisse an Leichtbeton (Dichte 1,0...2,0 g/cm³) und Porenbeton (z. B. Ytong, Dichte 0,3...0,8 g/cm³) führen zur der Annahme, dass die Transversalwellen (vgl. Abbildung 3) über Schub in der feinen, zusammenhängenden Struktur übertragen werden. Deshalb wurden Transversalwellen für die Messungen an Bimsziegelsteinen verwendet (vgl. Abbildung 4). Zum Anregen der Transversalwellen wird eine Sende-Empfangseinheit, bestehend aus 12 Punktkontakt-Prüfköpfen als Sender und 12 Prüfköpfen als Empfänger verwendet. Dieser Prüfkopf hat den Vorteil, dass kein Koppelmittel erforderlich ist und somit eine schnellere Messung ohne Verunreinigung der Messfläche möglich ist. Die Kernfrequenz ist optimiert bei 55 kHz [5].

transverse waves (also shear waves) spread perpendicularly to the direction of motion.



$$v_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \mu)}}$$

E Youngmodul
 μ poisson ratio
 ρ density

Abbildung 3. Transversalwellen [6]

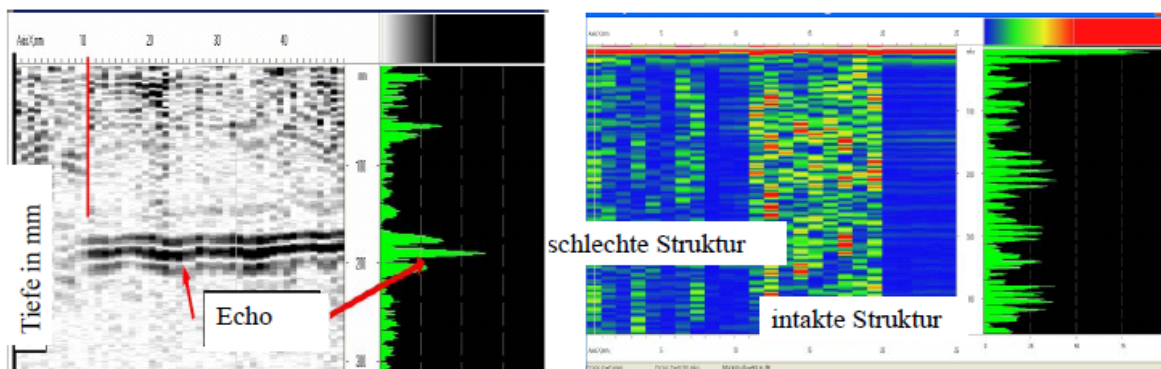
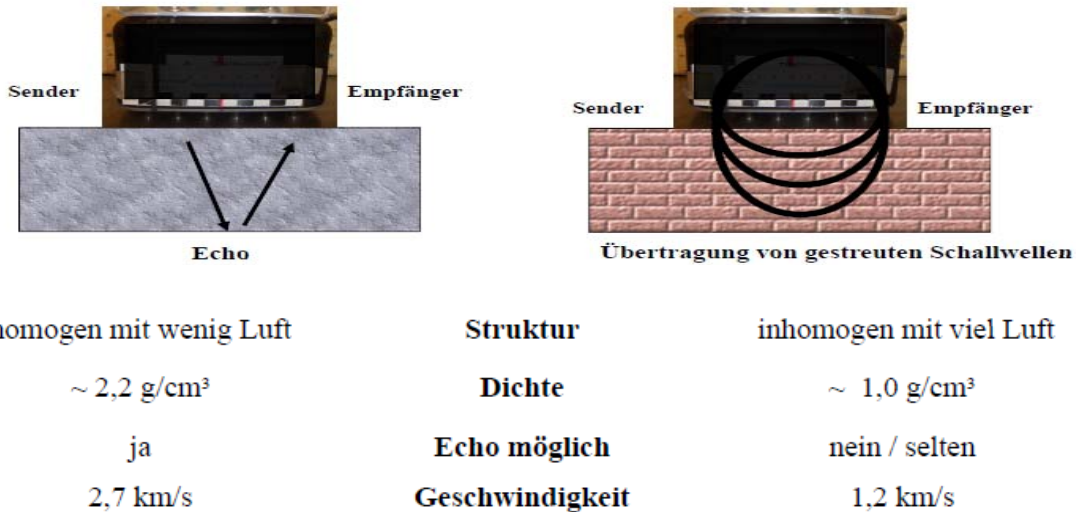


Abbildung 4. Vergleich Ultraschallecho an Beton (links) und Bimsziegelstein (rechts)

Üblicherweise werden bei Ultraschallmessungen Reflexe von der Bauteilrückseite empfangen, was bedeuten, dass der eingebrachte Schall das ungeschädigte Bauteil durchläuft, an der Bauteilrückseite oder an einem Reflektor reflektiert wird und das Bauteil erneut durchläuft. Im vorliegenden Fall waren solche Echos von der Bauteilrückseite nicht so einfach möglich, da das Gewölbes aus unterschiedlichen Schichten und Materialien bestand. Deshalb wurde im vorliegenden Fall das Ultraschallbündel ausgewertet, d. h. es wurde gemessen, wie viel Schall, d. h. Energie, vom Sendekopf zum Empfangskopf durch das Bauteil gelangt. Wird kein Schall beim Empfangskopf gemessen, d. h. ist keine Schallleitung möglich, deutet dies darauf hin, dass die innere Struktur sehr brüchig oder bröselig ist was bedeutet, dass diese Struktur statisch nicht mehr angesetzt werden kann (vgl. Abbildung 4). Eine genaue Auswertung ist dabei nur möglich, wenn die einzelnen Laufzeit-Intensitäts-Signale (d. h. das A-Diagramm) analysiert werden, da die Darstellung als B-Bild teilweise einen Informationsverlust darstellt.

3. Ergebnisse der Untersuchungen

Das Abklopfen und die Ultraschallechomessungen müssen direkt am Bauwerk, d. h. unmittelbar auf den zu untersuchenden Gewölben, durchgeführt werden, wobei der Zustand der Messoberfläche für die Ultraschallechomessungen von sehr großer Bedeutung ist.

Zunächst wurde die zu untersuchende Fläche mit dem Hammer abgeklopft. Mittels Abklopfen kann schnell die Lage von ausgedehnten, oberflächennahen Hohlstellen bestimmt werden. Werden Schäden mittels Abklopfen erkannt, waren keine weiteren Messungen mittels Ultraschallecho notwendig. Liegt die Hohllage zu tief, d. h. ist die darüber liegende Kalkschicht mehrere Zentimeter stark, lässt sich eine Hohllage mittels Abklopfen nicht lokalisieren.



Abbildung 5. Links: Ultraschallechomessungen von der Gewölbeunterseite von einem Gerüst aus; Rechts: Ultraschallechomessungen von der Gewölbeoberseite mittels Seilsicherung, Glaswolle wurde vor den Messungen entfernt

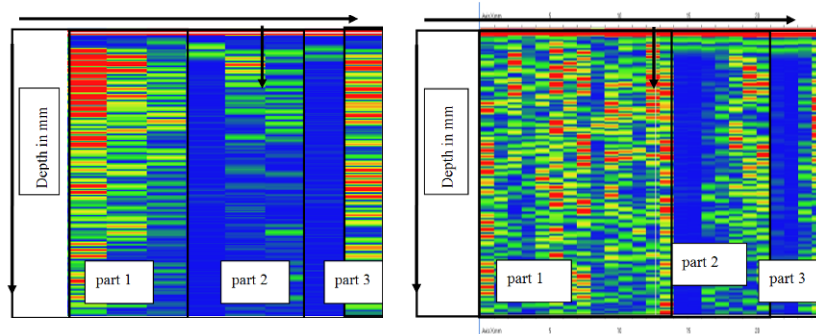


Abbildung 6. Ergebnisse der Ultraschallechomessungen

Links: Messungen von der Gewölbeunterseite, Messbereiche 1 und 3: keine Schäden (hohe Signalenergie), Messbereich 2: geschädigt (keine Signale aufgrund eines Risses); Rechts: Messungen von der Gewölbeoberseite, Messbereich 1: keine Schäden, Messbereich 2: geschädigt (keine Signale aufgrund eines Risses), Messbereich 3: geschädigt (keine Signale um den Riss herum, d. h. der Bereich um den Riss herum ist auch geschädigt)

Um zu entscheiden, ob Messungen an der Ober- und Unterseite des Gewölbes zu besseren bzw. vergleichbaren Ergebnissen führen, wurden einige Messungen von beiden Seiten durchgeführt (vgl. Abbildungen 5 und 6). Wegen der Einrichtung (Altar, Orgel, Heiligenfiguren etc.) sowie einer Fußbodenheizung, die den Einsatz eines Hubsteigers unmöglich macht, sind ausgedehnte flächige Messungen von der Unterseite in weiten Bereichen nicht möglich. Bei den Messungen von oben musste vor den Messungen die aufliegende Glaswolle sowie sehr viel Dreck entfernt werden. Ebenso erhöhten bauliche Probleme den Schwierigkeitsgrad der Messungen. Da der Zustand der Gewölbesegel unbekannt war und durch die Vielzahl von Rissen in den Gewölben die real tragende

Materialdicke teilweise stark reduziert war, war der prüfende Ingenieur (in Schutzausrüstung) immer mit einer Seilsicherung durch einen Industriekletterern zu sichern (vgl. Abbildung 5 rechts).

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse der Ultraschallechomessungen von der Gewölbeunterseite (links) und der Gewölbeoberseite (rechts). In Abbildung 6 links sind drei verschiedene Messbereiche (“parts”) von der Gewölbeunterseite dargestellt: Die Messbereiche 1 und 3 zeigen gute Ergebnisse, die aufgenommene Signalenergie ist hoch, d. h. es sind keine Schäden in diesem Bereich zu erwarten. Die Struktur im Messbereich 2 ist dagegen gestört: aufgrund eines (oberflächlich nicht sichtbaren) Risses können keine Signale empfangen werden. Die Erkennung der Risse ist damit indirekt. Abbildung 6 rechts zeigt Ähnliches von der Gewölbeoberseite. Messbereich 1 mit einer intakten Struktur (hoher aufgenommenen Signalenergie). Im Messbereich 2 können aufgrund eines Risses keine Signale empfangen werden. Im Messbereich 3 werden zudem keine Signale um den Riss herum empfangen, d. h. der visuell scheinbar intakte Bereich um den Riss herum ist hier auch geschädigt. Dies bedeutet, dass mit Ultraschallecho nicht nur die Risse, sondern auch das Ausmaß der Schäden um die Risse herum ermittelt werden kann.

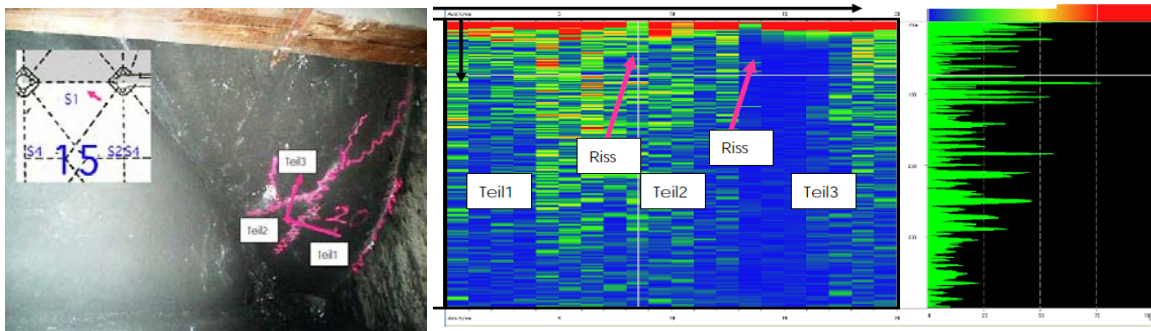


Abbildung 7. Ergebnisse der Ultraschallechomessungen am Gewölbe:
 Teil 1+2: gute Signale → keine Strukturstörungen;
 Teil 3: schlechte Signale wg. gestörter Struktur im Nahbereich der Risse

Letztendlich konnte mit Ultraschallecho zwischen kriegsbedingten Rissen (aus dem 2. Weltkrieg) und Rissen aus der Nachkriegszeit durch Erdbebenbelastungen unterschieden werden. Es wurden kriegsbedingte Risse mit erheblichem Ausmaß festgestellt, aufgrund der schlechten Struktur musste der nördliche Seitenflügel gesperrt werden. Bei den kriegsbedingten Rissen ist die Struktur im Bereich der Risse oft etwa 15-20 cm neben dem Riss geschädigt (aufgrund von Wasserdampfdiffusion und -kondensation über einen längeren Zeitraum). Sowohl in den älteren als auch den 1947 wiederaufgebauten Gewölben sind erdbebenbedingte Risse zu beobachten, die meist im 45°-Winkel verlaufen, bei denen die Struktur neben den Rissen jedoch intakt ist.

4. Schlussfolgerungen

Im Rahmen der Untersuchungen an der Kirche St. Cornelius in St. Tönis konnte gezeigt werden, dass die Ultraschallechomessungen sowohl von der Unter- als auch von der Oberseite des Gewölbes erfolgen können. Mittels Ultraschallecho konnten die 1947 erbauten Gewölbe (Bimsstein mit Zement als Bindemittel) von älteren Gewölben (Bimsstein mit Kalk als Bindemittel) unterschieden werden.

Mittels Ultraschallecho waren visuell nicht sichtbare Risse erkennbar. Die Risse konnten unterschieden werden in Risse aus dem 2. Weltkrieg (mit Strukturstörungen bis 40 cm um die Risse herum) und Risse aufgrund von Erdbeben in den 1990ern (ohne

Strukturstörungen um die Risse). Unabhängig von den Schädigungen durch Risse wurden großflächig zerstörte Bereiche lokalisiert, die auf dauerhaften Feuchteintrag infolge eines undichten Daches zurückzuführen sind. Dies bedeutet, dass über diesen großflächig zerstörten Bereichen des Gewölbes auch die Holzkonstruktion stark beschädigt ist (hohe Holzfeuchte, Pilzbefall, Insektenbefall). Die Holzkonstruktion wurde ebenfalls mittels visueller Sichtprüfung, Abklopfen, Ultraschallecho und Bohrwiderstandsmessungen untersucht, Details hierzu können [7] und [8] entnommen werden. In den 1970ern wurden viele Risse im Gewölbe saniert (und sind daher oberflächlich visuell nicht mehr erkennbar). Hierfür wurde Kalkmörtel oder Zementmörtel verwendet. Bei den Ultraschallechountersuchungen zeigte sich, dass oft kein Verbund zwischen dem Zement (mit einem sehr hohen E-Modul) und dem Bimsstein (mit einem geringen E-Modul) vorhanden ist. Zudem fiel auf, dass unter sanierten Rissen die Struktur oft aufgelöst ist und sich der Zement nur auf „Bröseln“ befindet. Dies bedeutet, dass der Erfolg einer Sanierung gut mit Ultraschallecho überprüft werden kann

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden in den Plan der Kirche eingetragen und für die Erarbeitung eines Maßnahmenplans verwendet, woraus wiederum eine Dringlichkeitsliste erstellt wurde (Johannig und Petermann Architekten GmbH, Lauterberg im Harz). Durch die genaue Untersuchung konnten ungeschädigte Bereiche eindeutig markiert werden, in denen keine weiteren Maßnahmen erforderlich sind. So können die vorhandenen Mittel effektiv eingesetzt und damit eine Kostenersparnis erzielt werden.

In der vorliegenden Kirche werden die Gewölbebereiche mit einer erheblichen strukturellen Schädigung vorrangig repariert. Dabei wird in Bereichen, in denen die Materialdicke des Gewölbes durch die völlige strukturelle Auflösung reduziert ist, mit einem Putz wieder aufgebaut. Weiter ist es unbedingt erforderlich, die breiten, tiefen Risse zu schließen. Hierbei muss das Reparaturmedium, ein Injektionsmörtelsystem (bestehend aus Injektionsmörtel i. e. S. und Verdämmmörtel), folgendes Anforderungsprofil erfüllen:

- E-Modul Injektionsmörtelsystem < E-Modul Substrat
- Feuchtetransporteigenschaften in gleicher Größenordnung wie Substrat
- Hohe Frühfestigkeit (aus anwendungstechnischen Gründen).

Bei Erfüllung dieses Anforderungsprofils werden Spannungen und damit Rissbildungen zwischen Gewölbe und Reparaturmörtelsystem vermieden. Weiter sollte das Reparaturmedium flüssig genug sein, um in die Struktur einzudringen und damit eine gute Rissverzahnung zu ermöglichen. Um den E-Modul des Reparaturmediums anpassen zu können muss der E-Modul der vorhandenen Struktur untersucht werden. Ein Bindemittelsystem, in dem sich das definierte Anforderungsprofil (niedrige Festigkeiten, hohe Frühfestigkeit, hohe Kapillarität) gut realisieren lässt, ist der seit ca. 150 Jahren in der praktischen Anwendung befindliche Romanzement.

Durch die detaillierte Untersuchung und gezielte Maßnahmen konnte im vorliegenden Fall der Kirche St. Tönis in Tönisvorst auf eine großflächige Behandlung mit chemischen, verfestigenden Substanzen verzichtet werden, was zu einer sehr großen finanziellen Einsparung führt.

Referenzen

[1] Hasenstab, A., Krause, M., Rieck, C. and Hillemeier, B. (2003): Use of low Frequency Ultrasound Echo Technique to Determine Cavities in wooden Construction Composites, In: Proceedings of the International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), DGZfP (Ed.), BB 85-CD, P51, 16.-19.09.2003, Berlin

[2] Hasenstab, A. (2005): Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren. Dissertation an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und der Technischen Universität Berlin, Fakultät VI, Prof. Dr. Hillemeier (TU Berlin), Prof. Scheer (TU Berlin), Dr. Krause (BAM)

- [3] Hasenstab, A., Krause, M., Rieck, C., Hillemeier, B. (2006): Ultraschall-Echo-Messungen an Holz. Holz als Roh- und Werkstoff, 64(6), S. 475-481, Springer-Verlag, Deutschland
- [4] Frühwald, K. and Hasenstab, A. (2009): Strength grading of hardwood with longitudinal ultrasonic waves and longitudinal vibration and locating defects in softwood and hardwood with low frequency ultrasonic echo technique, In: Economic and Technical aspects on quality control for wood and wood products, Proceedings of the Conference Cost Action E53, October 22-23, 2009, Lisbon
- [5] Shevaldykin, V., Samokrutov, A. and Kozlov, V. (2003). Ultrasonic Low-Frequency Short-Pulse Transducers with Dry Point Contact. Development and Application, In: Proceedings of the International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), DGZfP (Ed.), BB 85-CD, V66, 16.-19.09.2003, Berlin
- [6] Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP) (1999). Merkblatt für Ultraschall-Verfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile (B4), Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V., Berlin
- [7] Frühwald, K., Hasenstab, A., Osterloh, K. (2011). Detection of incipient decay of wood with non- and minor-destructive testing methods. Proceedings of the NDTMS-2011 International Symposium on Nondestructive Testing of Materials and Structures, May 15-18, 2011, Istanbul Technical University, Istanbul / Turkey
- [8] Frühwald, K., Hasenstab, A. (2011). Detection of fungal damage of wood in early stages using drilling cores and drilling resistance compared to non-destructive testing methods. Proceedings of the International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures, SHATIS'11, June 16-17, 2011, Lisbon / Portugal