

Akustische Verfahren zur Ermittlung der Dichtheit an Gebäuden

Nicki Bader¹, Peter Holstein¹, Hans-Joachim Münch¹, Steffen Moeck¹, Dirk Döbler², Alexander Jahnke²

¹ SONOTEC GmbH, 06112 Halle, E-Mail: n.bader@sonotec.de

²GFaI e.V., Volmerstr. 3, 12489 Berlin, E-Mail: doebler@gfai.de

Einleitung

Akustische Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass sie für vielfältige Einsatzgebiete modifiziert werden können. Luft und andere Materialien kommen dabei sowohl als mögliche Übertragungswege aber auch als relevante Untersuchungsziele infrage. Das Spektrum der Methoden reicht dabei vom hörbaren bis in den Ultraschallbereich. Es wurde bereits in zwei Vorgängerbeiträgen auf die Möglichkeiten eingegangen, Ultraschallverfahren auch mit energetischen Fragestellungen in Zusammenhang zu bringen. In diesem Beitrag wird dies am Beispiel historischer Bausubstanz vertieft, wobei die Dichtheit von Fenstern und Türen und innenklimatische Fragestellungen behandelt werden. Im Beitrag wird dabei auf Vor- und Nachteile der akustischen Methoden eingegangen und es wird gezeigt, dass die Ultraschalltechnologie andere bauphysikalische Verfahren ergänzen oder ersetzen kann. Um die akustischen Methoden zielführend einsetzen zu können, ist spezialisierte Prüftechnik erforderlich. Vorgestellt werden Verfahren und Anwendungen zur Bewertung der akustischen Dichtheit im Kontext der Vermeidung von Wärmeverlusten mittels breitbandiger Ultraschallprüftechnik und akustischer Bildgebung.

Ein Vorteil akustischer Methoden besteht in ihrer Skalierbarkeit. Die Wellenlängenvariation erlaubt eine Anpassung an Objektausdehnung, Fehler oder Durchbrüche. Transmission, Reflexion, Beugung und Streuung müssen geeignet in Beziehung gesetzt werden, um das Potenzial der Methoden zu erschließen. Neben robusten Anwendungen für den Bereich der funktionellen Dichtheit rücken energetische Fragestellungen immer stärker in den Fokus. In den Beiträgen [1, 2] wurde die Übertragbarkeit der Ultraschalldichtheitsprüfung auf den Bau- und Denkmalbereich diskutiert. Traditionell werden im Baubereich Thermografie und das Blower-Door-Verfahren [3] eingesetzt, die physikalischen Gradienten bedingen. Für die akustischen Verfahren ist es dagegen nicht notwendig geschlossene Räume zu haben. Ein weiterer Vorteil der akustischen Methoden ist ihre Reziprozität.

Das Untersuchungsobjekt

Für die methodisch orientierten Arbeiten wurde das bereits durch vorherige Untersuchungen bekannte Rittergutsschloss Taucha als Untersuchungsobjekt ausgewählt. Einige Fakten, Daten und Bilder wurden bereits in Buchbeiträgen der „Denkmal und Energie“-Reihe 2018 [1, 2, 4] zusammengestellt. Einige Fotos sollen einen „Rundumindruck“ des Innenhofareals geben.

Unsere Aktivitäten fallen günstiger Weise mit dem 800jährigen Jubiläum zusammen [5,6].

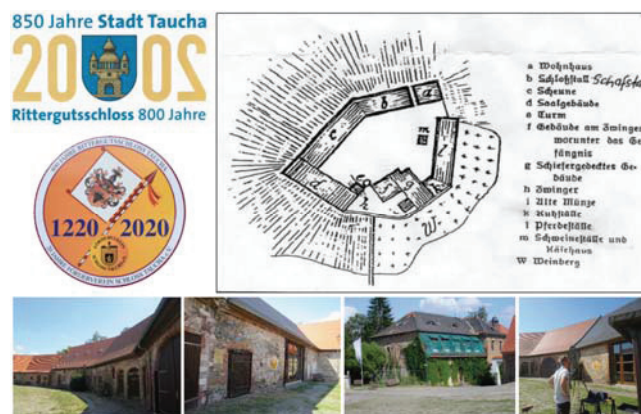


Abbildung 1 Ausschnitt aus einem Rundumblick auf den Hof des Rittergutsschlusses.

Messmethoden

Der Durchgang akustischer Wellen durch Wände und Öffnungen muss wellentheoretisch beschrieben werden. „Ungünstige“ geometrische Verhältnisse können die Messergebnisse und sogar die Verwertbarkeit der Daten beeinflussen. Ausführlicher wird dies von Holstein [7] behandelt. In der Praxis wird bisher nur von einfachen geometrischen Überlegungen ausgegangen. Eine Aufwertung der Methoden scheint hier möglich. Die für die Arbeit verwendete Technik nutzt – im Gegensatz zu traditionellen Verfahren mit Festfrequenzquellen – einen breiten Frequenzbereich. Den Vorteil dieses Zugangs kann die folgende Abbildung nur andeuten.

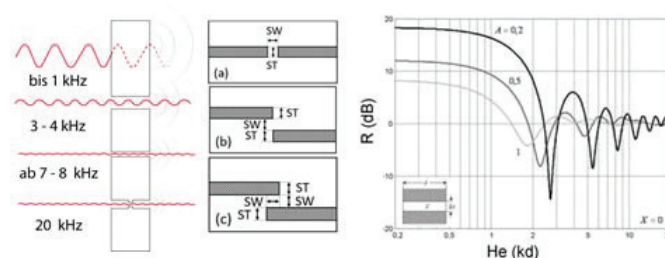


Abbildung 2: Links ist die Wirkung der Wellenlänge bezüglich des Durchgangs durch Öffnungen und Hindernisse angedeutet. In der Praxis können jedoch wesentlich kompliziertere Situationen auftreten. Dies verdeutlichen die rechten Skizzen (aus [7]). Der Transmissionsverlust hängt dabei stark von Wellenlänge und Geometrie (hier im Modell berücksichtigt durch die Helmholtz-Zahl) ab.

Ultraschalltechnologie

Akustische Messungen haben oft den Nachteil, dass es ungewünschte Quellen im Hörschallbereich gibt, welche die Messungen verfälschen können. Die Ultraschallprüfungen können dagegen in der Regel auch in hörakustisch belasteter Umgebung stattfinden, da im Umgebungslärm kaum Ultraschallquellen zu finden sind. Die mobile Prüftechnik wird dabei mit der Hand geführt. Bei ungünstiger Erreichbarkeit steht Sensorik mit erhöhter Reichweite zur Verfügung. Der Prototyp eines Koordinaten erfassenden Systems [2] war ebenso verfügbar. Alle Messungen wurden von außen u. innen durchgeführt. Die Ergebnisse waren im Rahmen der experimentellen Genauigkeit identisch. Die gezeigte prinzipielle Vorgehensweise zeigt, dass die „Sicherheit“ bei der Bewertung durch die hier wiederholte und gespiegelte Datenerfassung hoch ist. In einen Spektrogramm (kombinierte Zeit-Frequenz-Darstellung) werden die komplex berechneten Daten verständlich visualisiert. Damit wird eine ablesbare Art Mittelwertbildung erzeugt, die für den Nutzer leicht zu interpretieren ist und unvermeidbare Fluktuationen ausgleicht.



Abbildung 3: Suche nach energetisch wirksamen Fehlern entlang der Türdichtungen der historischen Kulturscheune mit mobiler Ultraschallprüftechnik. Da das Ultraschall-Sende-Empfangsverfahren manuell scannend erfolgt, wird entsprechend der konstruktiv bedingten Erwartung abgetastet.



Abbildung 4: Wiederholtes „Überstreichen“ einer undichten Stelle (links) und das Vorgehen an einer ausgedehnteren undichten Stelle (rechts). Die Prüfung erfolgte hier mit der breitbandigen Rauschquelle. Die Ergebnisdarstellung zeigt den mittleren Schallpegel (20-100 kHz, grüner oberer Schrieb) und das zeitsynchron berechnete Spektrogramm (Zeit-Spektrum).

Akustische Kamera

Für die Untersuchungen wurden zwei Kameravarianten der GFaI tech GmbH [8] ausgewählt. Für die Messungen wurden ein großes Fibonacci 120 AC Pro Array und das mobile MIKADO-System verwendet (Datenrekorder: 192 kHz bei 24 Bit). Die akustische Quelle war breitbandig (bis in den Ultraschallbereich (B&K Reference Sound Source - Typ 4204). Aufgrund des breiten Frequenzbereichs konnten Fragestellungen zur akustischen und energetischen Dichtheit

simultan bewertet werden. Die untersuchte Kulturscheune hat keine Zwischendecke. Deshalb wurden neben Lecks im Bereich der Türen auch schalldurchlässige Stellen im Bereich des Dachkastens gefunden. Die akustische Kamera findet nicht nur die direkt durchlässigen („offenen“) Stellen sondern auch Bereiche, die für niederfrequente und im Alltag oft laute Schallquellen nicht dämmend wirken. Besonders interessant ist, dass bei (schon Ultraschall-) Frequenzen um 16 bis 20 kHz noch eine gute Quellensuche möglich ist. Ab 40 kHz lieferte der Algorithmus keine eindeutigen Resultate mehr (mit MIKADO).



Abbildung 5: Akustische Kamera der GFaI im Einsatz (hier Array mit 72 Mikrophonen, Unten rechts ist eine kleineres System (mit weniger Mikrophonen abgebildet). Rechts befinden sich der Datenrekorder (bis zu 168 Kanäle, 192 kHz bei 24 Bit) und die akustische Quelle für die Experimente (B&K Reference Sound Source - Typ 4204).

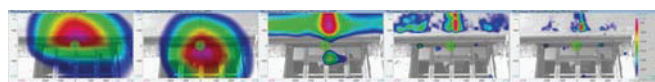


Abbildung 6: Messungen mit der akustischen Kamera im Bereich des Dachkastens. Die Frequenzen erhöhen sich von links nach rechts (0.4, 0.5, 4, 16, 20 kHz). In der niedrigsten Terz ist deutlich zu erkennen, wo Lärm austritt. Bei höherfrequenten Terzen („niedrige“) Ultraschallfrequenzen) sind echte Öffnungen für den Schalldurchgang zuständig - mit energietechnischen Konsequenzen. Rechts sind Lecks in Türdichtung und Ziegeln zu sehen. Im vorher akustisch durchlässigen Frequenzbereich tritt kein HF-Schall hindurch. Die Position der Rauschquelle und der Kamera wurden getauscht, um die Reziprozität auch experimentell zu belegen. Dies ist in Abbildung 7 illustriert.

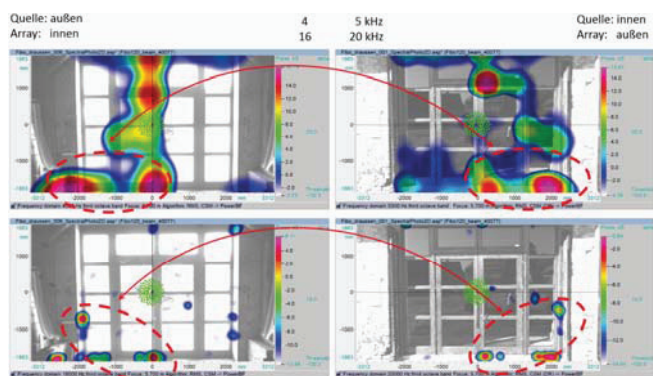


Abbildung 7: Ein wichtiger Vorteil der Akustik besteht darin, dass Sender und Empfänger vertauschbar sind, weil der Transferweg gleich ist. In der Abbildung ist dies durch Hervorhebung der Symmetrie gekennzeichnet (rote Markierungen). Für jeweils zwei (vergleichbare) Terzen wird die Reziprozität demonstriert. Es werden die gleichen Fehlerstellen gefunden. Auf diese Weise wäre auch eine Synthese von Fehlerbildern bei schwierigen Zugangsbedingungen möglich.

Vergleich der Methoden

Interessant ist auch ein direkter Vergleich der beiden akustischen Verfahren. Im kombinierten Mapping der beiden Verfahren zeigt sich, dass sich diese in sehr guter Genauigkeit aufeinander abbilden lassen. Im Beispiel (Abb. 8) ist ein Bild der akustischen Kamera (5 kHz-Terz) mit einem (simultan gemessenen) Ultraschallbild verglichen worden.

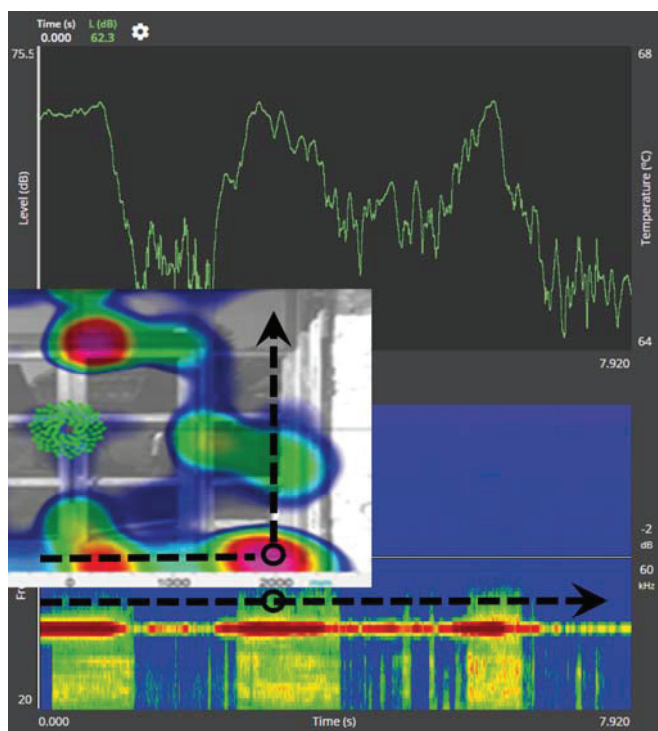


Abbildung 8: Vergleich von Ultraschallmethode und akustischer Kamera (5 kHz) – Beide Verfahren haben ihre prinzipiellen Vorteile und ergänzen sich. Die gestrichelten Linien stehen für gleiche Messpositionen. Sowohl die scannende Methode (Ultraschall) als auch die direkte Bildgebung liefern bezüglich der Fragestellung vergleichbare Ergebnisse.

Die Verwendung der etwas niedrigeren Frequenz für das Bild der akustischen Kamera im Vergleich zum Ultraschallscan soll auch verdeutlichen, dass in der Frequenzskalierung noch weitere Informationen stecken. Letzteres ist insbesondere für quantifizierende Aspekte von Bedeutung. Dies ist Ausgangspunkt weiterführender Arbeiten.

Für die vergleichende Darstellung arbeiten sowohl Rausch- und Ultraschallquelle simultan. Dies belegt, dass das Ultraschallverfahren auch noch unter sehr lauten Baustellenbedingungen funktionsfähig bleiben würde.

Beide Methoden haben ihre spezifischen Vorteile und Limitierungen. Mit der akustischen Kamera kann natürlich eine große Fläche simultan bewertet werden. Mit dem scannenden Ultraschallverfahren wird allerdings eine höhere Signaldynamik erreicht. Der Aufwand beider Methoden bezüglich des Aufwandes bei der Messung ist vergleichbar.

Zusammenfassung

Die Flexibilität der akustischen Methoden, dies betrifft sowohl den hörbaren Bereich als auch den Ultraschall, ermöglicht die Anpassung und Skalierung an spezifische bauphysikalische und energetische Fragestellung. Obwohl denkmalgeschützte Gebäude sicher ein ideales und dankbares Feld für solche methodischen Arbeiten sind, ist der Bereich des Bauens und Sanierens letztlich die anwendungstechnische Hauptrichtung, um den zunehmend bedeutsamer werdenden energetischen Anforderungen gerecht zu werden. Gegebenenfalls sind die akustischen Methoden geeignete Ergänzungen zu den etablierten aber aufwendigeren Dichtheitsprüfungen mittels des Blower-Door-Tests. Beide Methoden haben jeweils ihre spezifischen Vor- und Nachteile.

Danksagung

Der Artikel lehnt sich an einen im Februar 2020 in Osnabrück ausführlicher vorgestellten Beitrag, auf der Tagung „Denkmal und Energie 2020“ an. Die Langfassung ist im Buch zur Tagung veröffentlicht [4].

Herr Studienrat Jürgen Ullrich hat uns als Vorsitzender des Förderverein „Schloss Taucha bei der Vorbereitung und Durchführung unserer Messungen großzügig unterstützt. Von Herrn Ullrich stammen auch alle Informationen rund um das Schloss. Der Artikel ist auch ein Beitrag zur Vorbereitung der 800-Jahr-Feier des Rittergutsschlusses in diesem Jahr.

Literatur

- [1] Holstein, P.; Raabe, A.; Bader, N.; Tharandt, A.; Barth, M.; Münch, H.-J.: Energetische Probleme und akustische Verfahren. Denkmal und Energie 2017. Wiesbaden, Springer, 2016.
- [2] Bader, N., Holstein, P., Eckert, K.; Münch, H.-J.; Holtkamp, L.; d'Achard van Eschut, T.: Akustisches Verfahren zur Dichtheitsprüfung. Denkmal und Energie 2018. Wiesbaden, Springer, 2017.

- [3] Weidner, T.: BlowerDoor Luftdichtheitsprüfung. <https://www.bauthermografie-luftdichtheit.de/38303.html>, abgerufen am 17.09.2019.
- [4] Bader, N., Holstein, P., Münch, H.-J., Döbler, D., Jahnke, A., Akustische Verfahren zur Ermittlung der Luftdichtheit von Bestandsgebäuden, „Denkmal und Energie 2020“, Hrsg. B. Weller, L. Scheuring, ISBN978-658-28752-8, Springer, Vieweg, Wiesbaden 2020
- [5] Stadtarchiv Leipzig: Historische Skizze der Schlossanlage Taucha, Logos für Jubiläen
- [6] Rittergutsschloss Taucha. <https://rittergutsschloss-taucha.de/>, abgerufen am 17.09.2019.
- [7] Holstein, P., Barth, M., Probst C., Acoustic methods for leak detection and tightness testing, Proceedings, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016; 13 - 17 June 2016 in Munich, Germany
- [8] <https://www.acoustic-camera.com>