

AKUSTISCHE VERFAHREN ZUR DICHTHEITSPRÜFUNG

Nicki Bader¹, Peter Holstein¹, Armin Raabe²,
Andreas Tharandt¹, Manuela Starke^{1,3}, Hans-Joachim Münch¹

¹ SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH, 06112 Halle E-Mail: peter.holstein@sonotec.de

² Universität Leipzig, Institut für Meteorologie, 04103 Leipzig

³ Technische Universität Dresden, Fakultät für Umweltwissenschaften, 01062 Dresden

Motiv

Die Dichtheit von Konstruktionen, Bauteilen oder Räumen kann akustisch bewertet werden. Im Mittelpunkt des Beitrags stehen Verfahren, die für Anwendungen im baulichen Bereich geeignet sind - typischerweise betrifft das Dimensionen mit Ausmaßen wie bei Fenstern, Türen oder Kanälen. Oft sind diese Undichtheiten mit energetischen Problemen verbunden. Akustische Verfahren bieten dabei eine Reihe von Anwendungsvorteilen und könnten künftig sog. Blower-Door-Tests ergänzen oder teilweise ersetzen. Sie sind in weiten Grenzen an die jeweilige Aufgabenstellung anpassbar und skalierbar. Die Verfahren sind so ausgelegt, dass sie oberhalb des hörbaren Frequenzbereiches (ca. 20 bis 100 kHz) arbeiten. Dies ist sowohl für die physikalische Auflösung als auch für die Akzeptanz bei Nutzern bedeutsam. Neben den Anwendungen im Baubereich sind die Verfahren überall dort interessant, wo die Dichtheit im Rahmen von Produktionsprozessen eine Rolle spielt.

Anwendungen und Prüftechnik

Überall dort, wo kein Druckgradient anliegt, gibt es an Undichtheiten keine Strömungsgeräusche, die eine Detektion mittels Ultraschall ermöglichen. Es gibt aber Problemstellungen, wo das Auffinden dieser Stellen trotzdem sehr wichtig ist. Beispiele sind Luken und Deckel im Transportwesen, Abdichtungen von Reinräumen oder von Gehäusen im industriellen Bereich, wie Fahrzeugkabinen. Die Dichtheit von Gebäuden und Gebäudeelementen wird energetisch oft auch mittels IR-Thermo-Kameratechnik mit zugehöriger Bildverarbeitung bewertet. Dieses Verfahren hat den Nachteil, dass ein Temperaturgradient benötigt wird. Es existieren aber Situationen, in denen keine energierelevanten Temperaturunterschiede vorhanden sind, die eine entsprechende Untersuchung verhindern. Als weiteres Verfahren zur Bewertung der Luftdichtheit ist ein auf Druckdifferenzen beruhendes Messverfahren im Einsatz (Blower-Door (ISO 9972:1996 / EN 13829) [1,4,5]). Im betreffenden Volumen wird mittels Unterdruck eine Strömung erzeugt, die sich mit diversen Mitteln nachweisen lässt. Der Raum oder das Gebäude muss dabei abgedichtet sein. Der damit verbundene relativ große Aufwand dient dazu, etwa 50 Pa Unterdruck zu erzeugen. Das Verfahren hat einige prinzipielle Nachteile. Es ist oft schwierig, eine perfekte Abdichtung zu erreichen und bei großen Volumina den notwendigen Unterdruck zu erzeugen. Zudem können lediglich geschlossene Räume untersucht werden.



Abbildung 1: Prinzipdarstellung möglicher Anwendungen der aktiven Ultraschallmethode in der Industrie, Schallsender und Empfänger befinden sich hinter oder vor der zu untersuchenden Dichtung.

Ultraschallverfahren sind hingegen nicht an geschlossene Volumina gebunden und auch unabhängig von einem Temperaturgradienten. Mit einem aktiven Ultraschallsender können auch vorgefertigte Elemente wie Türen, Fenster, die in Wandelemente eingebaut sind, im Freifeld geprüft werden. Ziel ist es, die Verfahren im Handling so zu vereinfachen, dass diese auch von Nichtfachleuten schnell und sicher durchgeführt und ausgewertet werden können. Basis dafür ist eine entsprechend flexibel ausgelegte Messplattform, die gegenüber der konventionellen Gerätelösung f. d. klassische Lecksuche funktional erweiterbar und anpassbar konzipiert ist.



Abbildung 2: klassische Prüftechnik zur Lecksuche und Dichtheitsbewertung. Links: klassische analoge Prüftechnik mit Schmalbandverfahren und Zubehör. Mitte u. Rechts: Digitales Prüfgerät mit ausgewähltem Zubehör für Dichtheitsanwendungen. Die Softwarearchitektur erlaubt die Integration spezialisierter Programme und Abläufe für die Dichtheitsprüfung. Ein wichtiges Feature für den Einsatz ist eine geeignete Transformation in den hörbaren Frequenzbereich.

Simulationen zur Verfahrensentwicklung

In der Praxis wird meist eine Ultraschallquelle mit ausreichender Leistung und einer Sendefrequenz - meist um 40 kHz - in einem Bereich außerhalb der Betriebsgeräusche verwendet. Die Methode ist vermeintlich einfach. Allerdings muss bei tiefergehender Ermittlung quantifizierbare Aussagen berücksichtigt werden, dass eine hinreichende Qualität und Leistung der Schallfelder sowie das Verständnis der physikalischen Phänomene (Holstein und Barth [3]) benötigt werden. Schall tritt an Leckagen nach außen (Transmission) und wird durch unterschiedliche physikalische Prozesse beeinflusst.

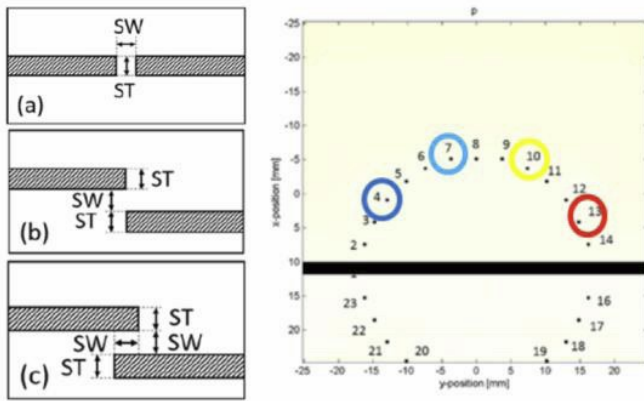


Abbildung 3: Links: Simulierte Spaltgeometrien: (a) einfacher Spalt, (b) versetzter Spalt, (c) überlappend versetzter Spalt und entsprechenden Größenordnungen von Spaltweite (SW) und Spaltdicke (ST). Der Fall (c) dürfte typisch für Türen und Fenster sein. Rechts: Positionen der rechts dargestellten Leistungsdichtespektren (Holstein [2]).

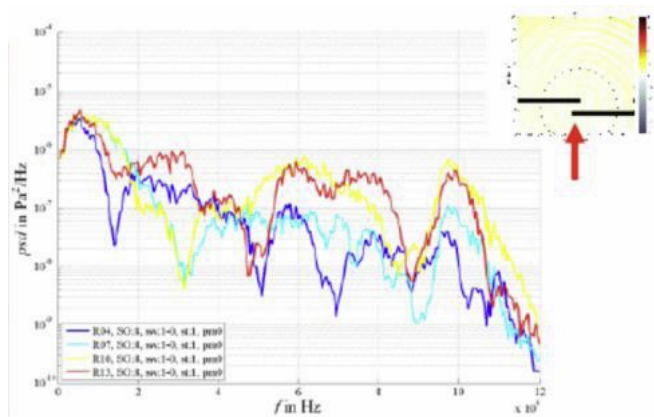


Abbildung 4: In den Experimenten wurde ein Sender mit 40 kHz verwendet. Die Simulationen (dargestellt ist Fall (c)) zeigen die Sensivität des Verhältnisses von Wellenlänge und undichten Spalten. Leistungsdichtespektren an verschiedenen Empfängerpositionen (Farben entsprechend Markierung in Abb. 3-Rechts) für eine Spaltdicke von 1,85 mm und eine Spaltweite von 1,85 mm. Als akustisches Signal dient weißes Rauschen, das als ebene Welle aus der mit einem roten Pfeil gekennzeichneten Richtung auf den Spalt trifft. Verwendet wurde die MATLAB-Toolbox- k-Wave [6].

Transmission erfolgt direkt durch kleine Öffnungen in der Wand aber auch als Flankenübertragung im Sinne einer Weiterleitung über Körperschallbrücken und schließende Abstrahlung als Sekundärschall. Beugung bewirkt eine Änderung der Ausbreitungsrichtung einer Schallwelle beim Durchgang durch Hindernisse wie Löcher oder Spalten. Die Beugung ist umso größer, je kleiner die Öffnung im Verhältnis zur Wellenlänge des Schalls ist (ungerichtete Abstrahlung). Bei größeren Öffnungen und unter Beibehaltung der Wellenlänge verringern sich diese Beugungseffekt und die Abstrahlung erfolgt gerichtet. Ist die Öffnung deutlich kleiner als die Wellenlänge, entstehen dahinter Kugelwellen (kreisförmige Öffnung) bzw. Zylinderwellen (schlitzförmige Öffnung). Eine Überlagerung der Elementarwellen kann zu gegenseitiger

Verstärkung (konstruktive Interferenz) oder gegenseitiger Abschwächung (destruktive Interferenz) oder sogar zur Auslöschung führen. Nähert sich die Längenausdehnung der Öffnung der Größenordnung der Wellenlänge an, so wechseln sich – aufgrund von Interferenzen mit im Dichtungshohlraum reflektierten Wellen – Bereiche mit positivem und negativem Schalldämmmaß ab. Der erste Dämpfungseinbruch liegt in etwa bei der Frequenz, deren Wellenlänge gerade der doppelten Wandstärke entspricht. Weitere Einbrüche folgen bei ganzzahligen Vielfachen dieser Frequenz. Je größer die Wandstärke im Vergleich zum Lochdurchmesser wird, umso ausgeprägter treten die Resonanzen auf. Dabei können auch negative Werte des Schalldämmmaßes erreicht werden. Dies bedeutet, dass durch die Öffnung in diesem Frequenzbereich mehr Schallenergie „gepumpt“ wird, als auf diesem Flächenanteil zu erwarten wäre. Ohne Hindernis entsteht ein konstanter spektraler Verlauf. Die Wand ist nicht vollständig schallhart. Tiefe Frequenzen transmittieren, höhere Frequenzen werden effektiv reflektiert. Bei einem einfachen Spalt sind im Fernfeld keine Interferenzerscheinungen zu beobachten. In Wandnähe gibt es Überlagerung von transmittiertem und gebeugtem Signal. Bei einem versetzten bzw. überlappend versetzten Spalt wird die Feldverteilung komplizierter. Es entsteht eine Überlagerung von transmittierten, gebeugten und reflektierten Signalen. Dies wirkt sich als Überlagerung im gesamten Spektralbereich aus. Es gibt dabei Abhängigkeiten vom Einfallswinkel des Schalls, vom Abstand des Sensors zum Spalt sowie der Spaltgeometrie (Spaltweite, Dicke und Form). Die Daten zeigen, dass nur komplexe Bewertungen zielführend für sichere Bewertungen sind. Die folgenden Abbildungen verdeutlichen die prinzipiellen Zusammenhänge zwischen Wellenlänge, Spaltgeometrie und Positionierung der Messgeräte.

Anwendungsbeispiel am denkmalgeschützten Gebäude

Am Beispiel der Dichtheit von Fenstern und Türen des denkmalgeschützten Gebäudes der ehemaligen Sternwarte in Leipzig wird das Verfahren beispielhaft demonstriert (Abbildung 5 und 6). Bei der Dichtheitsprüfung sind hier Sender und Empfänger jeweils geeignet vor und hinter dem Untersuchungsobjekt platziert.

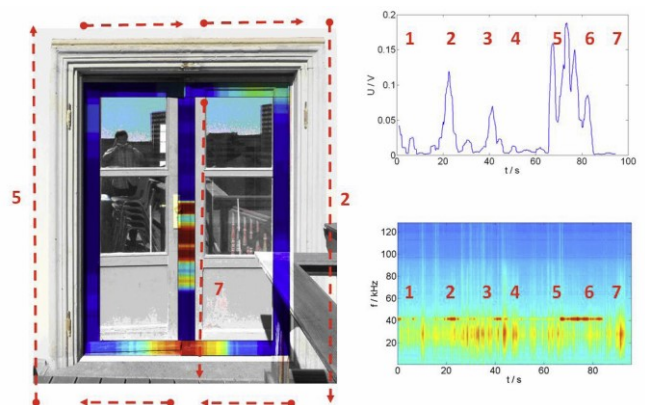


Abbildung 5: Dichtheitsprüfung einer Tür im Turm der alten Sternwarte. Die Prüfreihefolge ist mit den Zahlen angedeutet.

Gesendet wurde mit 40 kHz. Die Arbeitsfrequenz kann den Erfordernissen angepasst werden. Die Zeit-Frequenz-Darstellungen (Spektrogramme) illustrieren die Rohdatenaufnahme und gleichzeitig die Leistungsfähigkeit des Verfahrens. Akustische Störungen könn(t)en durchaus relevanten Einfluss haben. Mit dem neuen breitbandigen Verfahren können diese jedoch geeignet gefiltert werden.

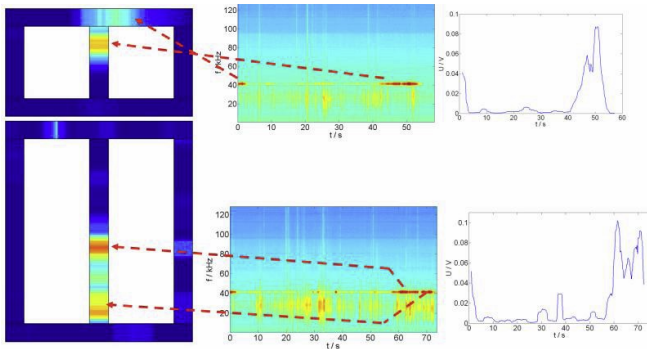


Abbildung 6: „undichtiges“ Fenster – Mitte oben: obere Flügel (Fenster), Mitte unten: Fenster unterer Flügel Akustische Rohdaten (in Zeit-Frequenz-Darstellung). Die Koordinatenzuordnung erfolgt (gegenwärtig) über eine gleichförmige Zeit-Distanz-Transformation. Das Messsignal muss man sich als „abgerollten“ Messpfad vorstellen. Die Daten zeigen, dass Störfrequenzen durchaus vorkommen. Dies kann aber mit dem neuentwickelten breitbandigen Messverfahren berücksichtigt korrigiert werden. Nach entsprechenden Filterungen im Zeit- und Frequenzbereich erhält man den Intensitätsverlauf (rechts), der ein Maß für die Dichtheit darstellt.

Es sei darauf hingewiesen, dass mit einer weiteren akustischen Methode räumliche verteilte energetische Probleme untersucht wurden. Dabei wurde ein Verfahren der akusischen Laufzeit-Tomografie modifiziert.

Die Einzelheiten sind im Beitrag von Raabe [7] in diesem Tagungsband beschrieben.

Zusammenfassung

Akustische Methoden sind für wichtige energiebezogene praktische Fragestellungen einsetzbar, die eine Reduzierung des Energieaufwandes im Blick haben müssen. Die Verfahren sind an viele Fragestellungen anpassbar. Für die Dichtheitsprüfung wurde erstmalig neue digitale Prüftechnik eingesetzt. Messung und Datenaufbereitung ermöglichen ein effektives Mapping von Ursachen für Energieverluste relevanter Bereiche. Eine Reduktion des experimentellen und personellen Aufwandes, wie am Beispiel der Tomografie dargestellt, macht die Methoden praxistauglich. Beispielsweise konnte die Zahl der üblicherweise eingesetzten Sender- und Empfänger-Paare auf ein Paar reduziert werden, was den Aufwand für eine Installation im Raum und die Kosten erheblich reduziert. Es konnte auch gezeigt werden, dass das Hinterfragen der physikalischen Grundlagen die Möglichkeiten der Verfahren erweitert. Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Anwendung ist die Übersetzung der Verfahren in moderne Gerätetechnik, die auch in die Auswerteverfahren integrieren kann.

Danksagung

Die Arbeiten wurden teilweise im Rahmen des Projekts UMKlaD gefördert (BMBF, KMU-innovativ, Fördernummer: 01IS15051A).

Literatur

- [1] Weidner, L. T., BlowerDoor Luftdichtheitsprüfung <http://www.bauthermografie-luftdichtheit.de/38303.html>, web-download 07/2016
- [2] Holstein, P., Klepel, A., Gillner, K., Münch, H.-J., Einsatzmöglichkeiten von Ultraschall bei der Einsparung von Energie, Proceedings DACH-Tagung, Salzburg, 2015
- [3] Holstein, P., Barth, M., Probst, C., Acoustic methods for leak detection and tightness testing, Proceedings 19. World Conference of Nondestructive Testing, 13.17.06.2016, München
- [4] <http://www.energiwelt.de/web/cms/de/1543382/energieberatung/bauen-und-sanieren/blowerdoor-test/>, web-download 07/2016
- [5] <https://de.wikipedia.org/wiki/Differenzdruck-Messverfahren>, web-download 07/2016
- [6] Treeby, B.E., Cox, B.T.: k-Wave: MATLAB toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave-fields. Journal of Biomedical Optics, 15 (2), 021314, 2010.
- [7] A. Raabe, P. Holstein, M. Bleisteiner, Tomografische Rekonstruktion der Raumtemperaturverteilung aus einer Raumimpulsantwort, DAGA 2017, 6.-9.3.2017, Kiel