

Dicht oder undicht – das ist die Frage. Frei nach Shakespeare - Dichtheitsbewertung mit Ultraschall ...

Peter HOLSTEIN¹, Manuela BARTH¹, Santer ZUR HORST-MEYER¹,
Joachim FEIERABEND²
¹ SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH, Halle (Saale)
² gfai tech GmbH, Berlin

Kurzfassung. Die Dichtheit vieler technischer Strukturen ist von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Sowohl im Betrieb als auch bei der Qualitätssicherung in der Produktion müssen gewisse Standards bezüglich der Dichtheit eingehalten werden. Ein weiterer wichtiger Einsatzfall ist die Überprüfung der Dichtheit aus energetischer Sicht. Mit Ultraschall können Dichtheitsanforderungen effizient und sicher überprüft werden. Aktive Ultraschallquellen werden dabei im zu prüfenden Volumen platziert. Außerhalb befinden sich ein oder mehrere Empfänger. In der Vergangenheit wurden diese Verfahren nur qualitativ eingesetzt. Im Beitrag werden Beispiele zu Verfahrenserweiterungen und technischen Lösungen vorgestellt, die sowohl eine Quantifizierung als auch ein automatisierbares Mapping von Undichtheiten erlauben. Die Verfahren werden mit Verfahren der akustischen Bildgebung (akustische Kamera) validiert. Damit können auch transiente Vorgänge bewertet werden.

1. Einleitung und Motivation

Im Folgenden wird eine Analyse der akustischen Effekte, die durch Strömung in Leckagen auftreten, bzw. die Beeinflussung der Ausbreitung von aktiv ausgesendetem Ultraschall durch Leckagen vorgestellt. Die Resultate zeigen die Probleme aber auch das Potential der Ultraschallmethoden auf. Die Ergebnisse demonstrieren, dass konventionelle Lecksuchtechnik, die ihre Stärken vor allem im Auffinden undichter Stellen hat, starke Limitierungen bezüglich der Quantifizierbarkeit und ihres physikalischen Aussagewertes aufweist.

2. Akustische Bewertung von Undichtigkeiten

Ein wichtiges Anwendungsgebiet von Ultraschall ist der Einsatz bei der Suche nach Undichtigkeiten (Lecks). Hierbei wird einerseits genutzt, dass beim Ausströmen aus druckbeaufschlagten Systemen (bzw. beim Einströmen in Systeme mit Unterdruck) Geräusche entstehen, die mit geeigneten Prüfgeräten eine genaue Ortung der Leckage ermöglichen [1-3]. Solche „passiven“ Verfahren werden zum Beispiel zum Auffinden von Lecks in Druckluftsystemen eingesetzt. Eine ähnliche Fragestellung und Einsatzmöglichkeit für Ultraschall kann auf die Dichtheit von Räumen, Fahrzeugkabinen,

Luken u. a. angewendet werden. Hier ist zusätzlich ein aktiver Ultraschallsender erforderlich, der in das zu untersuchende Objekt eingebracht wird. Von außen kann nun geprüft werden, ob und wo der Schall aus dem Objekt austritt, um Aussagen über dessen Dichtheit zu treffen.

Für die Lokalisierung von Lecks funktioniert einfache Verfahren hervorragend und wird technologisch sicher beherrscht. Allerdings wird in vielen Fällen die Aussagekraft der Methoden im Hinblick auf die Quantifizierung von Leckgrößen falsch eingeschätzt. Trotzdem erscheint es unter bestimmten Bedingungen möglich, Aussagen zur Quantifizierung treffen zu können, wenn man die Gesetze der Strömungsakustik entsprechend beachtet und ausnutzt. Nachfolgend werden die theoretischen Hintergründe skizziert. Auf dieser Basis wird verdeutlicht, dass eine Verbesserung der Aussagekraft durch Betrachtung der spektralen Charakteristik der empfangenen akustischen Signale erreicht werden kann.

Untersuchungen mit Ultraschall (zum Teil mit akustischem Spiegel oder Trichter) können – bis zu einem gewissen Grad – auch als „Ferndiagnose“ eingestuft werden, da kein direkter Kontakt mit dem Leck notwendig ist. Ein weiterer Vorteil der hohen Frequenzen – neben der Unanfälligkeit gegen Störungen durch Betriebsgeräusche – liegt darin begründet, dass gewisse Anisotropien der Abstrahlung ausgenutzt werden *könnten*. In der Praxis sind die Ultraschallverfahren besonders dort erfolgreich, wo Lecks schnell und effizient gefunden werden müssen.

3. Leckagen in Druckluftsystemen

3.1. Theoretische Betrachtungen

Der von Strömungen durch Leckagen verursachte Schall (Strahlärm) ist breitbandig und (prinzipiell) von stochastischer Natur. Die akustische Abstrahlung hängt dabei in starkem Maße von Leckgröße, Leckform, Oberflächenbeschaffenheit des Materials, Druckdifferenz, Ausströmgeschwindigkeit und -profil sowie der Temperatur ab. Eine wichtige Rolle spielen ebenfalls die Messentfernung und sogar der –winkel.

Die Grundlagen zur Beschreibung aeroakustischer Vorgänge wurden von *Lighthill* bereits im Jahr 1952 [5] beschrieben. Wesentliche Gesichtspunkte der *Lighthillschen*-Theorie sind eine Beschreibung der Quellen von Strahlärm als Mono-, Di- und Quadrupole mit ausgeprägter Richtcharakteristik und eine Verknüpfung der Eigenschaften der Fluidströmung (Austrittsgeschwindigkeit) mit der Schallintensität in Abhängigkeit von der Machzahl, dem Verhältnis von Strömungsgeschwindigkeit zu Schallgeschwindigkeit im Medium. [4, 5]

Eine quantitative Beschreibung von Leckagen kann mit Hilfe der Leckrate bzw. dem Volumen- oder Massenstrom erfolgen. Die Leckrate q_L kann als Druck-Volumen Durchsatz (Druck p , Volumen V , Zeit t) in Pa m³/s eines bestimmten Fluids, der ein Leck passiert, nach DIN EN 1330-08 [6] beschrieben werden. Ein Zusammenhang zwischen Leckrate und Massen- bzw. Volumenstrom (dm/dt bzw. dV/dt) lässt sich unter Verwendung der allgemeinen Gasgleichung (Dichte ρ , absolute Temperatur T , spezifische Gaskonstante R_s) bei isothermen und isochoren Bedingungen wie folgt angeben:

$$q_L = \frac{\Delta(p \cdot V)}{\Delta t} \qquad q_L = \frac{d(p \cdot V)}{dt} = p \frac{dV}{dt} = \frac{p}{\rho} \cdot \frac{dm}{dt} = R_s \cdot T \cdot \frac{dm}{dt}$$

Abhängig von den Strömungseigenschaften im Leck lässt sich der Volumenstrom auch als Produkt aus Ausströmgeschwindigkeit v und Leckquerschnittsfläche A (bzw. als integraler Wert, wenn v nicht über den gesamten Querschnitt konstant ist) darstellen:

$$\frac{dV}{dt} = \dot{V} = \int_A d\dot{V} = \int_A v(A) \cdot dA \approx \bar{v} \cdot A$$

Die Austrittsgeschwindigkeit im Düsenquerschnitt beträgt maximal c (Schallgeschwindigkeit). Aufgrund von Reibung an der Öffnung kann dieser Wert jedoch nicht erreicht werden. Ebenfalls kann nicht der gesamte Leckaustrittsquerschnitt A_{th} wirksam werden (Strahleinschnürung). Eine entsprechende Korrektur wird in Form der Ausflusszahl μ eingeführt, sodass der Volumenstrom geschrieben werden kann als:

$$\dot{V} = \mu \cdot c \cdot A_{th}$$

Die quantitative Erfassung der Leckgröße kann somit durch geeignete Wahl des Korrekturfaktors sowie durch Bestimmung der Leckgröße erfolgen.

3.2 Experimentelle Betrachtungen und quantitative Bewertung

Für eine Vielzahl unterschiedlicher Leckgeometrien (Durchmesser, Längen) und Volumenströme wurden akustische Daten aufgezeichnet und bezüglich ihrer spektralen Eigenschaften analysiert. Eine (statistisch korrekte) Mittelung über einer Vielzahl von Einzelspektren erlaubt dabei die Spezifizierung von charakteristischen Kennwerten aus Spektren, die die Ausströmung von Lecks beschreiben.

Die Eigenschaften der richtungsabhängigen Schallabstrahlung sind anhand eines Beispiels (Leckdurchmesser: 0,58 mm, Länge: 38,1 mm, Messabstand: 1 m, Systemdruck: 7 barü, resultierender Leckagevolumenstrom: 16 NI/min) in Abb. 1 dargestellt. Entsprechend der Theorie [7] erfolgt die maximale Abstrahlung unter einem Winkel von 20 bis 25° bezüglich der Strahlachse. Ursache hierfür ist zum einen die Verlagerung der Schallquellen in Strahlrichtung (Verstärkung des Schalldruckpegels in Strahlrichtung) als auch die Brechung des Schalls durch Gradienten der Strömungsgeschwindigkeit zwischen Strahlachse und umgebender Luft (lokales Minimum entlang der Strahlachse).

Ohne die Bewertung des Spektrums ist eine sinnvolle Bewertung der Leckrate nicht möglich. Als zielführend hat sich ein Frequenzbereich von ca. 20 bis 100 kHz erwiesen. Für die praktische Leckbewertung müssen entsprechende charakteristische Merkmale aus den Spektren extrahiert werden.

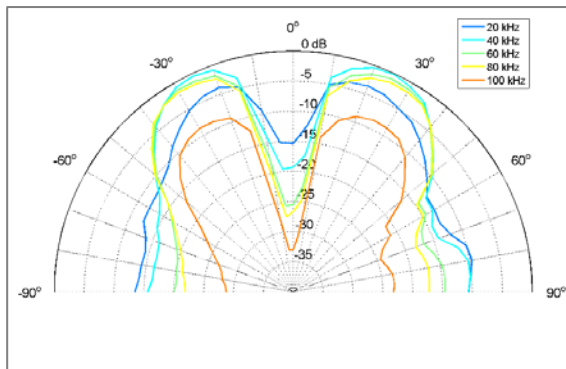


Abb. 1.

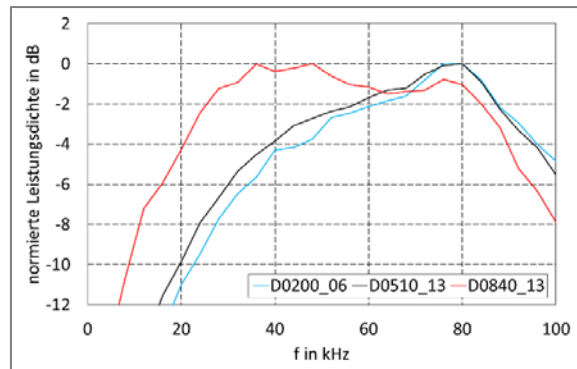


Abb. 2.

Abb. 1. Richtcharakteristik eines Lecks bei verschiedenen Frequenzen (Strahlrichtung bei 0°). Die Darstellung zeigt, dass die Abstrahlcharakteristik in einem Mess- und Auswerteverfahren berücksichtigt werden muss.

Abb. 2. Normierte Leistungsdichte (Referenzwert: maximale Leistungsdichte des Spektrums) für unterschiedliche Leckgeometrien. Die Signalaufzeichnung erfolgte in einem Abstand von 0,2 m zum Leck und unter einem Winkel von 25° bezüglich der Leckachse. Die hier dargestellten Lecks hatten einen Durchmesser von $D = 0,2$ mm und eine Länge von $L = 6$ mm (D0200_06); $D = 0,51$ mm und $L = 13$ mm (D0510_13) sowie $D = 0,84$ mm und $L = 13$ mm. Der Druck im System betrug 4,5 ... 4,8 barü und der resultierende Leckagestrom (Normvolumenstrom) 1,5 NI/min ($D = 0,2$ mm), 9 NI/min ($D = 0,51$ mm) sowie 28 NI/min ($D = 0,84$ mm).

Der spektrale Schwerpunkt wurde als charakteristischer Parameter zur Bewertung der relevanten Information aus den (diskreten) Leistungsdichtespektren $psd(f_i)$ für den ausgewählten Frequenzbereich (hier: 20...100 kHz) herangezogen.

$$f_{sc} = \frac{\sum f_i \cdot psd(f_i)}{\sum psd(f_i)}$$

Aufgrund des stochastischen Charakters der akustischen Abstrahlung müssen geeignete Mittelungsstrategien entwickelt werden. Die Verwendung komplett digitaler Prüftechnik erleichtert hier die Anpassung der Algorithmen. Neben dem Verständnis der strömungsakustischen Vorgänge ist auch eine große Zahl von Fallbeispielen notwendig. Die Abhängigkeiten zwischen den physikalischen Ursachen und den beschreibenden Parametern zeigt die nachfolgende schematische Darstellung

4. Aktive Dichtheitsprüfung

In der Praxis wird meist eine Ultraschallquelle mit ausreichender Leistung und einer Sendefrequenz in einem Bereich außerhalb der Betriebsgeräusche verwendet. Eine *möglichst isotrope* Ausstrahlung der zu untersuchenden Volumina sollte angestrebt werden, ist aber mit einfachen technischen Mitteln nur schwer erreichbar.

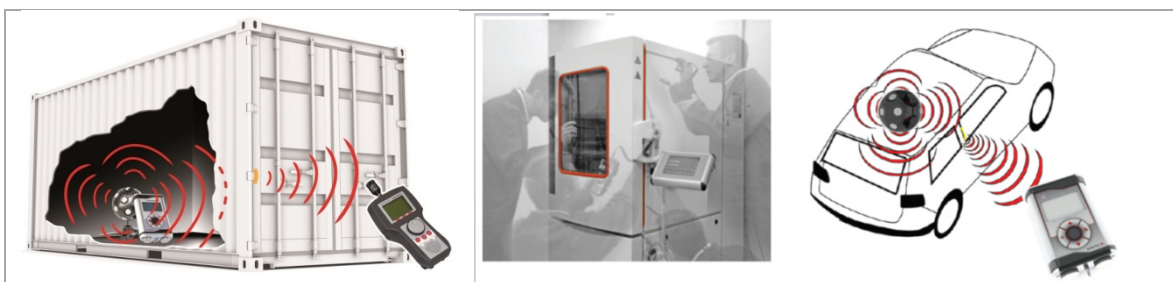


Abb. 3. Prinzipbilder der akustischen Untersuchung der Dichtheit mit Hilfe einer aktiven Ultraschallquelle.

Die Methode ist aber nur scheinbar einfach. Dies ist besonders dann zu berücksichtigen, wenn quantifizierbare Aussagen gemacht oder Anforderungen an die Qualitätssicherung (Aussagesicherheit) gestellt werden. Eine wichtige Voraussetzung für quantifizierbare Aussagen ist eine hinreichende Qualität der Schallfelder. Zur Vermessung der Inhomogenität der Schallfelder der Quellen und der Kartierung von Undichtheiten wurde eine *Akustische Kamera* eingesetzt.

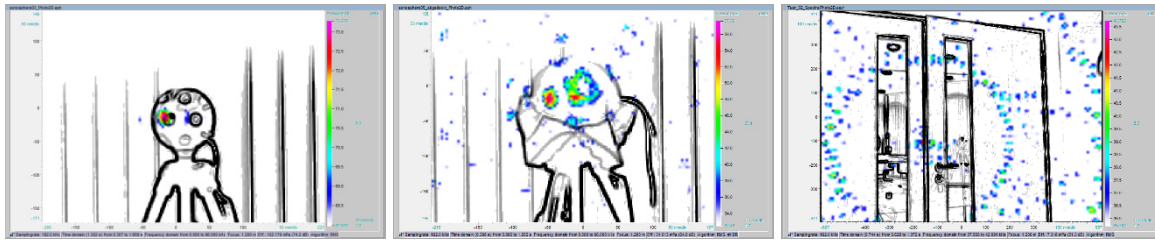


Abb. 4. Visualisierung des Ultraschallfeldes mit einer akustischen Kamera.
Links, Mitte: Abstrahlverhalten von Schallsendern, rechts: Schalldurchgang durch eine Tür mit Gummidichtung.

4.1 Theorie

Schall tritt an Leckagen nach außen (Transmission) und wird durch unterschiedliche Prozesse (Beugung [Diffraktion]/ Streuung/ Reflexion, gegebenenfalls Interferenz) beeinflusst. Transmission erfolgt direkt durch kleine Öffnungen in der Wand aber auch als Flankenübertragung (Weiterleitung über Körperschallbrücken und schließende Abstrahlung als Sekundärschall). Beugung bewirkt eine Änderung der Ausbreitungsrichtung einer Schallwelle beim Durchgang durch ein Hindernis (Loch, Spalt). Die Beugung ist umso größer, je kleiner die Öffnung im Verhältnis zur Wellenlänge des Schalls ist (ungerichtete Abstrahlung). Wird die Öffnung (unter Beibehaltung der Wellenlänge) größer, wird der Beugungseffekt geringer und die Abstrahlung erfolgt gerichteter. 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 in die Größenordnung der Wellenlänge an, so wechseln sich – aufgrund von Interferenzen mit der am Rohrende reflektierten Welle – Bereiche mit positivem und negativem Schalldämmmaß ab. Der erste Dämpfungseinbruch liegt in etwa bei der Frequenz, deren Wellenlänge gerade der doppelten Wandstärke ($k \cdot d = \pi$) 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. [10]

4.2 Simulationsrechnungen

Für die Simulationen wurde die frei verfügbare Toolbox „k-wave“ [8, 9] verwendet.

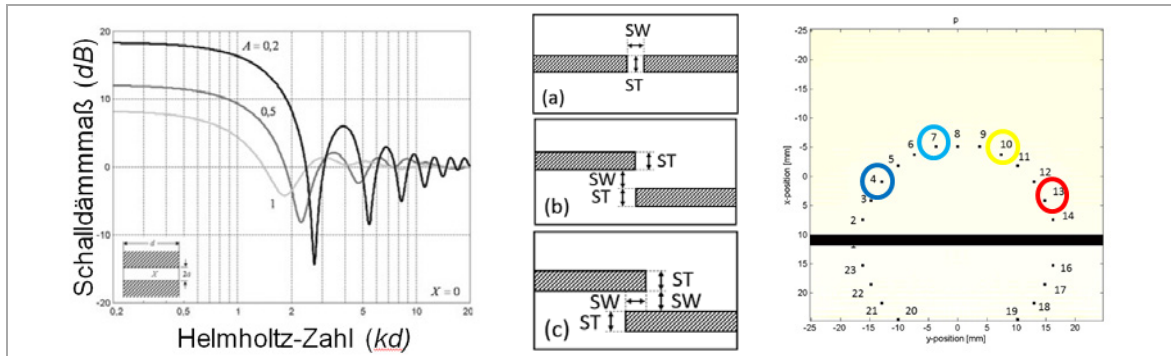
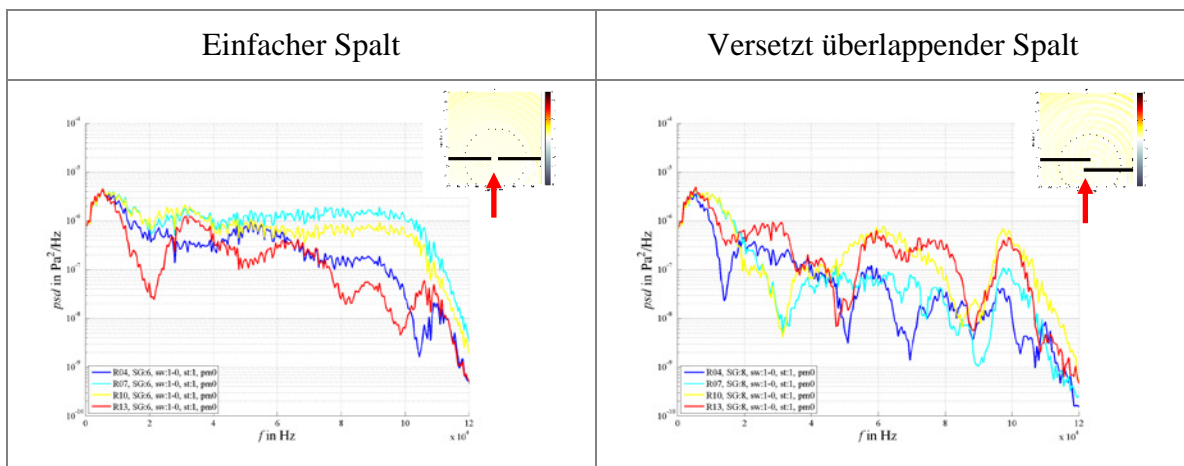


Abb. 5. *Links:* Schalldämmmaß einer kreisförmigen Leckage (normierter Öffnungsdurchmesser $A = 2a/d$, Kreiswellenzahl $k = 2\pi/\lambda$, Wellenlänge λ) [10], *Mitte:* Verschiedene simulierte Spaltgeometrien: (a) einfacher Spalt, (b) versetzter Spalt, (c) überlappend versetzter Spalt und entsprechenden Größenzuordnungen von Spaltweite (SW) und Spaltdicke (ST)., *Rechts:* Positionen der in der nächsten Abb. 7 dargestellten Leistungsdichtespektren.

Zur Anregung wurden unterschiedliche Signale verwendet: Ebene Welle aus unterschiedlichen Richtungen, Rauschsignale (interpolierte Maximallängensfolgen, Grad 11, resampled, $f_{\max} = 108$ kHz). Die „Sender“ / „Empfänger“ wurden dabei an verschiedenen Positionen platziert, um praxisnahe unvermeidliche Variationen zu berücksichtigen.

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 versetztem 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).



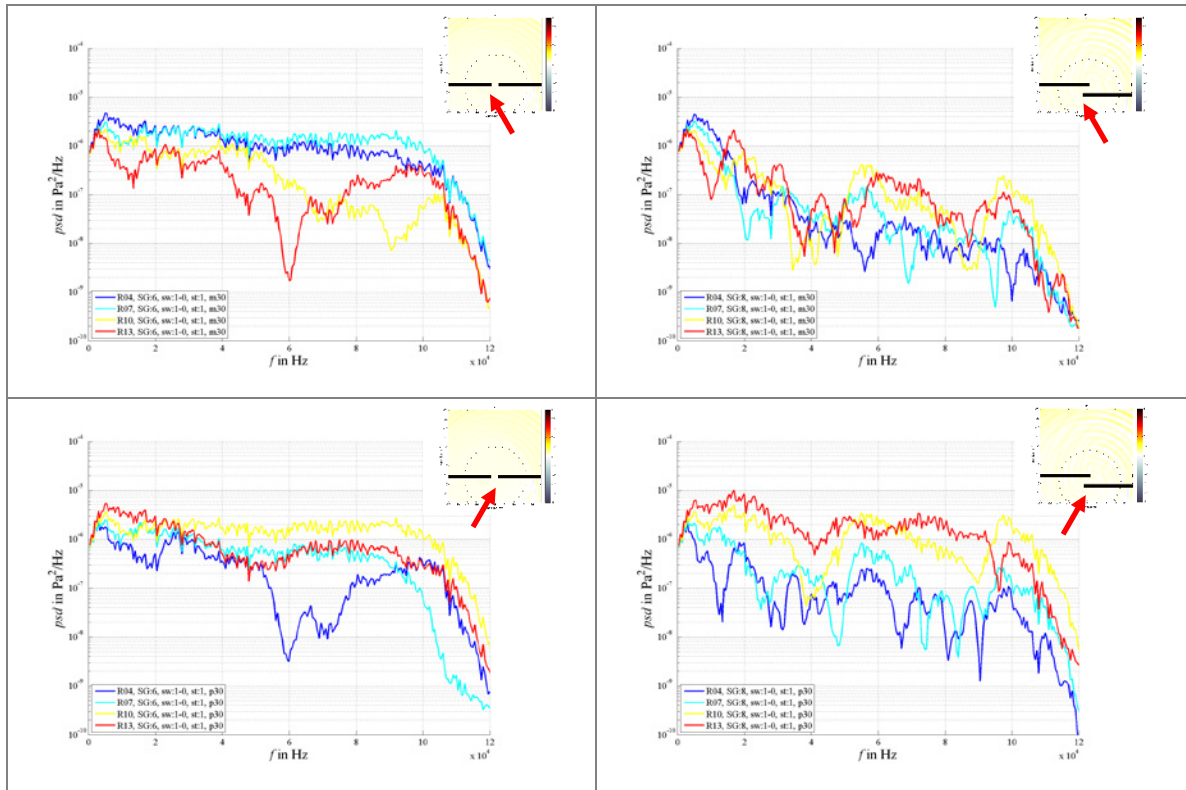


Abb. 6. Leistungsdichtespektren an verschiedenen Empfängerpositionen (Farben entsprechend Abb. 6) für eine Spaltdicke von 1,85 mm u. eine Spaltweite von 1,85 mm. Als akustisches Signal dient weißes Rauschen, das als ebene Welle aus der mit einem roten Pfeil gekennzeichneten Richtung auf den Spalt trifft.

Die Daten zeigen, dass nur komplexe Bewertungen zielführend für sichere Bewertungen sind. Dies wird in weiteren Arbeiten vorgestellt.

5. Schlussfolgerungen

Mit einem semiempirischen Verfahren und ergänzenden statistischen Methoden können plausible Werte für eine Abschätzung von abgeleitet werden. Für die Dichtheitsverfahren mit aktivem Ultraschallsender wurde eine erweiterte Verfahrensbetrachtung gemacht. Es zeigt sich, dass sich unterschiedliche Lecks in Form von abweichender Schallfeldverteilung und spektralen Effekten äußern. Für die Bestimmung eines „Dichtheitsmaßes“ sind weitere Arbeiten nötig.

Danksagung

Wir danken Frau K. Haase für die Unterstützung bei der Erstellung des Manuskripts.

Referenzen

- [1] P. Tashian: Successful Leak Detection using Ultrasonics. www.SuperiorSignal.com [08/08]
- [2] T. Klitz, L. Panzram, D. Prevet, D. Reinartz, D. Kameier:
Leckortung unter DasyLab S – Low Cost Hightech, MessComp, Wiesbaden 2003.
<http://ifs.muv.fh-duesseldorf.de> [08/08]
- [3] L. Jakevicius, J. Butkus: Application of Acoustic Methods for Determination of Coordinates of Leakage in Cavities bounded by large surface, ISSN 1392-2114 Ultragarsas, Nr. 1(38), 2001.
- [4] G.R. Sinambari, S. Sentpali: Ingenieurakustik – Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele. Springer Vieweg, 2014.
- [5] M.J. Lighthill: On sound generated aerodynamically. I. General theory. Proceedings of the Royal Society A, 211, 564-587, 1952.
- [6] DIN EN 1330-08: Zerstörungsfreie Prüfung – Terminologie – Teil 8: Begriffe der Dichtheitsprüfung.
- [7] H.S. Ribner: An extension of the Lighthill Theory of Jet Noise to Encompass Refraction and Shielding. NASA Technical Memorandum 110163, 1995.
<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19950023031.pdf> (18.03.2015)
- [8] B.E. Treeby, B.T. Cox: k-Wave: MATLAB toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave-fields. Journal of Biomedical Optics, 15 (2), 021314, 2010. k-wave Simulationen:
- [9] B.E. Treeby, J. Jaros, A.P. Rendell, B.T. Cox: Modeling nonlinear ultrasound propagation in heterogeneous media with power law absorption using a k-space pseudospectral method. Journal of the Acoustical Society of America, 131 (6), 4324-4336, 2012.
- [10] P. Zeller (Hrsg.): Handbuch Fahrzeugakustik. Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch. 2. Auflage, Vieweg + Teubner, 2012.