

Potenzial akustischer Methoden zum Einsparen von Energie

P. Holstein¹, A. Raabe², M. Barth¹, N. Bader¹, S. zur Horst-Meyer¹

¹ SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH, Nauendorfer Str. 2, 06112 Halle (Saale), peter.holstein@sonotec.de

² Institut für Meteorologie, Universität Leipzig, Stephanstr. 3, 04103 Leipzig, raabe@uni-leipzig.de

Einleitung

Heute hängen sowohl der wirtschaftliche Erfolg als auch das ökologische Abschneiden moderner Industriefelder stark von der Effizienz des technischen Equipments und ihrer Einsatzmethodik ab. Beeinflusst wird dies durch die zunehmende Komplexität der Maschinen und Anlagen besonders in den Bereichen Produktion, Engineering, Automation, Automotive und Energietechnik. Die Entwicklung zeigt, dass Unternehmen steigenden Wert auf die Verhinderung von Energieverlusten legen, um wachsende Produktionskosten zu mindern. Im Zeitraum von 2008 bis 2012 stiegen die Elektrizitätspreise jährlich um durchschnittlich ca. 3,5 Prozent in jedem EU-Mitgliedsstaat [1]. Unternehmen haben erkannt, dass der Einsatz der Methoden der industriellen Instandhaltung für die Vermeidung von Energieverlusten und die Verbesserung der Energieeffizienz entscheidend ist, um in der Folge höhere Gewinne erzielen und die eigene Wettbewerbsfähigkeit verbessern zu können.

An zwei aus unterschiedlichen Teilgebieten der Akustik stammenden Verfahren wird hier die Bandbreite gezeigt, in der diese einen Beitrag zum effizienten Umgang mit Energie ermöglichen können. Diese reicht von robusten qualitativen Prüfverfahren auf der Basis von Ultraschall bis hin zu mehrkanaligen akustischen bildgebenden Verfahren wie der akustischen Laufzeitotomographie.

Ultraschallbewertungen werden in einigen Bereichen erfolgreich eingesetzt. Manchmal genügen einfache Diagnoseverfahren mit preiswerter Sensorik und Prüftechnik, um Fehlerzustände und Trends zu bewerten. Beispiele sind:

- Reibung (Lagerfehler, Trockenlauf, ...)
- Leckagen
- Dichtheit
- Kavitation

Weitere ließen sich anführen.

Ähnlich wie in der klassischen Technischen Akustik gibt es Effekte in den verschiedensten Frequenzbereichen. Für die höheren akustischen und Vibrationsfrequenzen steht jedoch keine dem niederen Frequenzbereich vergleichbare Sensorik und Messtechnik zur Verfügung. (Auf die sehr kostenintensiven Verfahren, wie sie beispielsweise aus der Schallemission der zerstörungsfreien Prüfverfahren bekannt sind, soll hier nicht eingegangen werden.) Deshalb hat dieses Gebiet der industriellen Prüfung einen etwas anderen Weg

genommen als die Messung (z.B.) von Pegeln usw. Es gibt einige Anbieter auf dem Markt, die entsprechende Prüftechnik anbieten. Etabliert haben sich Geräte, die Ultraschallfrequenzen schmalbandig erfassen können. Ein wichtiges Feature ist dabei auch die Hörbarmachung: Durch Heruntermischen haben Prüfer die Möglichkeit, Strömungsgeräusche und Körperschallphänomene aus dem Ultraschallbereich sozusagen hörbar zu machen.

Den direktesten Bezug zur Energieoptimierung haben die etablierten Verfahren der Lecksuche mit Ultraschall und die Überprüfung der Dichtheit mit Ultraschallverfahren. Ein großer Teil der industriell bereitgestellten Druckluft (bis zu 30%) geht verloren. Austretende Druckluft kann auch als Schallquelle betrachtet werden. Das dabei auftretende Spektrum ist breitbandig. Die akustischen Merkmale können dabei für die Bewertung des Druckluftverlustes herangezogen werden [2]. Ein weiterer wichtiger Einsatzfall aus energetischer Sicht ist die Überprüfung der Dichtheit, beispielsweise bei Fenstern, Türen, Containern, Dichtungen in Fahrzeugen oder auch Reinräumen. Mit Ultraschall können Dichtheitsanforderungen effizient und sicher überprüft werden, was u.a. direkt zum effizienten Umgang mit Energie beiträgt.

Mit Hilfe tomografischer Algorithmen ist es möglich aus Schallgeschwindigkeitsmessungen entlang verschiedener Wege durch ein Gebiet eine flächenhafte/ räumliche Verteilung der Lufttemperatur- bzw. der Strömungsverhältnisse zu ermitteln. In Räumen zeigen die Aufzeichnungen die zeitlich-räumliche Variabilität der Raumklimaparameter Temperatur und Strömung. Diese Angaben sind dazu geeignet, bestimmte Steuerungsmaßnahmen für die Raumbelüftung zu effektivieren, bzw. eine homogene Raumtemperatur zu erreichen. Letztlich ermöglichen diese Informationen Eingriffe in die Raumklimatisierung, was auch für einen effizienten Energieeinsatz sorgen kann. Die Methoden sind skalierbar bezüglich der Schallfrequenz, der –leistung, der Anzahl und Entfernungen der Sender und Empfänger sowie der Anregungsmuster. Damit sind solche akustische Methoden an viele Fragestellungen anpassbar.

Grundlagen der Verfahren

Lecks

Unter bestimmten Bedingungen erscheint es möglich, Aussagen zur Quantifizierung von Lecks machen zu können, wenn man die Gesetze der Strömungsakustik entsprechend beachtet und ausnutzt. Der von Lecks verursachte Schall ist

breitbandig und (prinzipiell) von stochastischer Natur. Deshalb wurde ein Konzept erarbeitet, das die akustischen Signale in einem weiten Frequenzbereich erfasst und bewertet. Ein neuer Ansatz zur Leckbewertung [2] stützt sich im Wesentlichen auf drei unterschiedliche Größen. Die Art der Strömung (laminar, abgelöst oder turbulent) kann akustisch bestimmt werden (kein Geräusch (laminare Strömungsanteile), tonale Komponenten, stochastisches Rauschen). Die Größenordnung der *Reynoldszahl* muss bekannt sein. Die Dichte und die dynamische Viskosität des Fluids sind bekannt. Die zweite notwendige Größe zur Bestimmung der Leckrate bezieht sich auf die tonalen Komponenten nach *Strouhal*. Zur Verbesserung der Messunsicherheit kann die Schalleistung nach *Lighthill* als weitere Größe zur Auswertung herangezogen werden. Diese Größe wird zur Validierung genutzt, da sie sowohl von der Austrittsgeschwindigkeit, und damit von den tonalen Anteilen, als auch vom „*Mach*exponenten“ und damit von der Größenordnung der *Reynoldszahl* abhängt.

Die Wirbelentstehung hängt von der *Reynoldszahl* ab:

- bis ca. $Re = 40 \rightarrow$ laminare Strömung
- von ca. $Re = 40$ bis ca. $Re = 400 \rightarrow$ abgelöste Strömung
- ab ca. $Re = 400 \rightarrow$ turbulente Strömung.

Wesentliche Gesichtspunkte für die Bewertung der Schalleistung nach *Lighthill* sind:

- Quellen sind Mono-, Di- und Quadrupole
- ausgeprägte Richtcharakteristik

Ihr Beitrag zur Schalleistung ist abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit:

- $Ma < 0,3 \rightarrow$ Monopolquellen dominieren
- $0,3 < Ma < 0,7 \rightarrow$ Dipolquellen dominieren
- $0,7 < Ma \rightarrow$ Quadrupolquellen dominieren

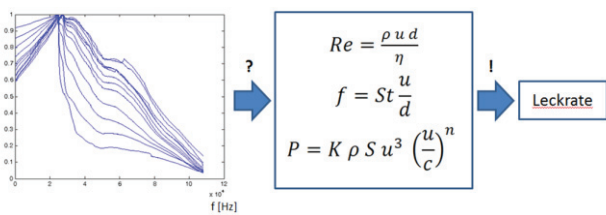


Abbildung 1: Prinzipielle Vorgehensweise zur Abschätzung der Leckrate.

Somit kann aus den akustischen Parametern (in gewissem Umfang) eine Größenklassifikation von Lecks abgeleitet werden.

Dichtheit

Das Verfahren zur Bewertung der Dichtheit hat Ähnlichkeit mit dem zur Leckbewertung. Auch hierbei kann Ultraschall zum Lokalisieren von Lecks (Undichtheiten) verwendet werden. Allerdings dient hier als Ultraschallquelle ein aktiver Sender (bewährt haben sich Frequenzen um 40 kHz). Der Ultraschallsender wird im auf Dichtheit zu untersuchenden Volumen platziert. Der akustische Nachweis erfolgt außerhalb dieses Volumens. Dabei wird der

Ultraschallpegel ortsabhängig erfasst. Die Verwendung variabler Frequenzen erhöht den Aussagewert der Methode, wenn quantitative Aspekte einbezogen werden sollen.

Tabelle 1: Klassifikation von Dichtheit (Druckluft bezogen)

	[ml/min]	[mbar l/s]
Wasserdicht	$6 \cdot 10^{-1}$	10^{-2}
Dampfdicht	$6 \cdot 10^{-2}$	10^{-3}
Bakteriendicht	$6 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}
Benzin- und Öldicht	$6 \cdot 10^{-4}$	10^{-5}
Virendicht	$6 \cdot 10^{-5}$	10^{-6}
Gasdicht	$6 \cdot 10^{-6}$	10^{-7}
Technische Dichtheit	$6 \cdot 10^{-9}$	10^{-10}



Abbildung 2: Festlegung der optimalen Positionierung der Sensoren für Tests bei einem konventionellen Betriebsmodus; (i) x-Ebene, (ii) y-Ebene; (iii) z-Ebene, (iv) optimale Position

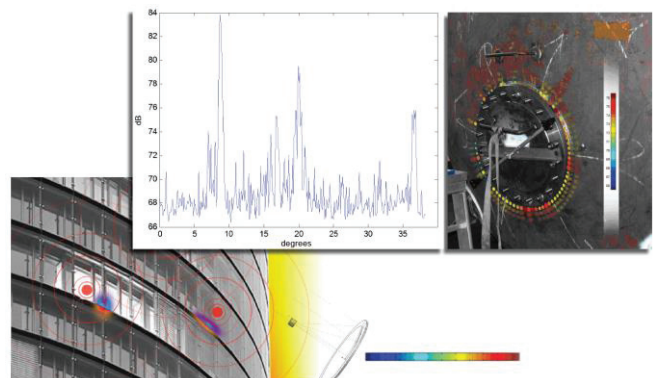


Abbildung 3: Beispiel für den Einsatz der Dichtheitsprüfung an einem Tankdeckel (die Pegeldarstellung wurde in ein geeignetes Mapping „übersetzt“). Der untere Teil der Abbildung verdeutlicht die Vision der Prüfung der energetischen Dichtheit an Gebäuden. Die Reichweite der Methode kann mit geeigneter Technik [3] deutlich erhöht werden.

Tomografische Verfahren

Für eine energieeffiziente Raumklimasteuerung ist die Kenntnis der Lufttemperaturverteilung und der Strömungsverhältnissen in Innenräumen hilfreich. Unter Zuhilfenahme tomografischer Verfahren können aus Schallgeschwindigkeitsmessungen solche Temperatur- bzw. Strömungsverhältnisse visualisiert werden.

Da das Messverfahren auf mehreren regelmäßig angeordneten Schallsender/Empfänger-Kombinationen beruht, ist der Aufwand nicht unerheblich, ermöglicht jedoch

eine Raumklimasteuerung, die nicht mehr nur auf einige wenige Messpunkte angewiesen ist.

In der Meteorologie [4] werden Schallgeschwindigkeitsmessverfahren genutzt, um die Lufttemperatur bzw. die Windgeschwindigkeit zu beobachten. Das Leipziger Institut für Meteorologie verwendet eine Kombination von mehreren Schallgeschwindigkeitsmessstrecken, die flächenhaft oder räumlich angeordnet werden, um auf diese Weise die sich über die Zeit hinweg ändernden Schallgeschwindigkeitsfelder aufzuzeichnen und hieraus Informationen über Temperatur- und Strömungsverhältnisse abzuleiten. Mit Hilfe tomografischer Algorithmen kann aus den sich überschneidend angeordneten Messstrecken eine flächenhafte/ räumliche Verteilungen der Lufttemperatur- bzw. der Strömungsverhältnisse berechnet werden. Das Verfahren kann über ganzen Landschaftsausschnitten oder auch innerhalb von Räumen eingesetzt werden.

Im Allgemeinen werden an den Rändern einer zu untersuchenden Fläche Kombinationen aus einem Schallsender und einem Schallempfänger positioniert. Verwendet man N solche Sende-/Empfangspunkte, dann erhält man $N \times (N-1)$ verschiedene Messstrecken, die die zu untersuchende Fläche möglichst optimal abdecken. Die Entfernungen (d) zwischen allen Messstellen sind bekannt. Die Elektronik sendet zu einer definierten Zeit ein Schallsignal aus, das an allen anderen Messstellen nach einer gewissen Zeit aufgezeichnet wird. So erhält man die Laufzeiten der Schallsignale τ , die den entsprechenden Strecken zugeordnet werden.

Da sich die Sender-Empfänger-Kombinationen gegenüberstehen können die Schalllaufzeiten auf der jeweiligen Strecke hin (τ_{hin}) und zurück ($\tau_{rück}$) gemessen werden.

Aus dem Mittelwert der Schallgeschwindigkeit auf der jeweiligen Messstrecke

$$c_L = \frac{c_{hin} + c_{rück}}{2} = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{\tau_{hin}} + \frac{1}{\tau_{rück}} \right) \quad (1)$$

erhält man die *Laplacesche* Schallgeschwindigkeit c_L , die ein Maß für die virtuelle akustische Temperatur T_{av} darstellt, welche wiederum näherungsweise mit der Lufttemperatur gleichgesetzt werden kann

$$c_L = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_{av}} \quad T_{av} = c_L^2 \cdot (\gamma \cdot R)^{-1} \quad (2)$$

$(\gamma = 1.4, \quad R = 287,05 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1})$

Aus der Differenz der Schalllaufzeiten auf jeder Strecke erhält man die dem im Raum möglicherweise existierenden Strömungsfeld zuzuordnende Strömungsgeschwindigkeit entlang dieser Strecken

$$v = \frac{c_{hin} - c_{rück}}{2} = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{\tau_{hin}} - \frac{1}{\tau_{rück}} \right) \quad (3)$$

Über ein tomografisches Verfahren wird aus den einzelnen sich überschneidenden Schallpfadmessungen eine flächenhafte oder räumliche Verteilung der Raumklima-parameter Temperatur und Strömung abgeleitet.

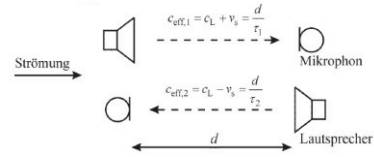


Abbildung 4: Ausnutzung reziproker Schallwege zur Trennung von vektoriellem Strömungs- und skalarem Temperatureinfluss auf die effektive Schallgeschwindigkeit.

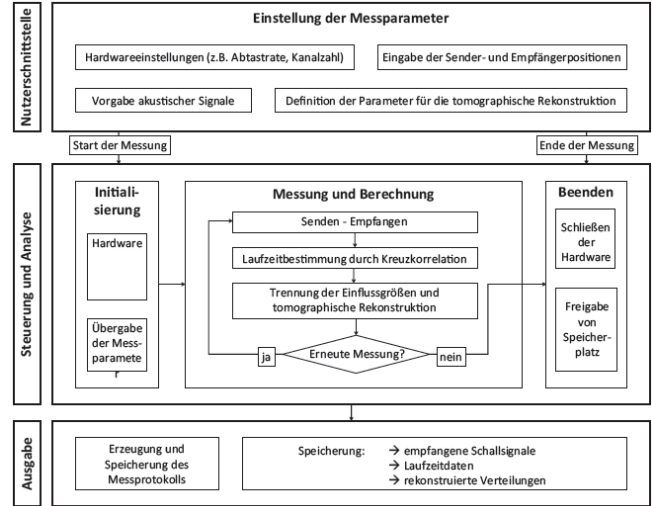


Abbildung 5: Prinzipieller Ablauf der tomografischen Erfassung der Raumparameter

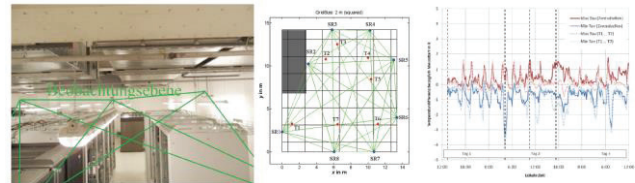


Abbildung 6: Installation des Messsystems (8 verteilte Schallsender/-empfänger SR1-SR8) in einem Serverraum (links, Mitte). Erfasst wurden Temperaturunterschiede und Strömung in der Beobachtungsebene (Messfläche) oberhalb der Serverschränke, welche den Messwerten konventioneller Sensoren (T1-T7) gegenübergestellt wurden (rechts).

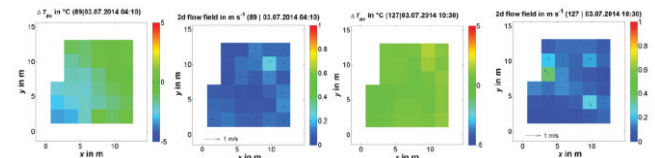


Abbildung 7: Räumliche Verteilung von Temperaturunterschieden ΔT_{av} und Strömung in der Messebene zu zwei unterschiedlichen Zeiten.

Als Beispiel gezeigt werden hier die Temperatur- und Strömungsunterschiede im Raum zu verschiedenen Zeiten als Abweichung von einem mittleren Wert der Lufttemperatur (Abb. 7). Erkennbar werden weniger gut klimatisierte Bereiche und eine mögliche Inhomogenität des Temperaturfeldes. Diese Informationen können in die Steuerung des Raumklimas einbezogen werden was zu einem optimierten Energieeinsatz beitragen kann.

Zusammenfassung

Potenzial akustischer Verfahren zum Einsparen von Energie
Ultraschallverfahren sind geeignet, konstruktive Undichtheiten, die sich energetisch auswirken, aufzuspüren. Bereits einfache Verfahren sind in vielen Fällen qualitativ zielführend. Das Potenzial kann jedoch erheblich gesteigert werden, wenn physikalische Effekte wie spektrale Eigenschaften, Beugung und Schallfeldcharakteristika berücksichtigt und in die Auswerteverfahren integriert werden. In der Laufzeit akustischer Signale auf bekannten Strecken spiegelt sich die räumliche Struktur des Temperatur- und Strömungsfeldes in der Umgebung der Schallquelle wider. Aus mehreren im Raum oder in einer Fläche angeordneten Schallstrecken lassen sich die Lufttemperatur- und Strömungsverhältnisse lückenlos abbilden, um diese im Zeitverlauf zu kontrollieren und für eine Raumklimaregelung zu verwenden. Die Verfahren können so eine Bewertung von Energieverlusten ermöglichen bzw. zu einer energieeffizienten Regelung von Heizungs- und Kühlungssystemen beitragen.

Literatur

- [1] EUROPEAN COMMISSION: Energy prices and costs report, 2014,
http://ec.europa.eu/energy/doc/2030/20140122_swd_prices.pdf
- [2] Holstein, P., Klepel, A., Gillner, K., Münch, A., 2014: Einsatzmöglichkeit von Ultraschall bei der Einsparung von Energie, Journal Scientific Reports, Journal of the University of Applied Sciences Mittweida, Nr. 5, 2014, 38-41
- [3] <http://www.sonotec.de/produkte/vorbeugende-instandhaltung/lecksuche/sonospot/>
- [4] Barth, M.; Raabe, A.; 2011: Acoustic tomographic imaging of temperature and flow fields in air, Meas. Sci. Technol. 22, 1-13 (doi: 10.1088/0957-0233/22/3/035102)
- [5] Raabe, A., Barth, M., Holstein, P., 2014: Akustische Tomografie und Raumklimatisierung, Journal Scientific Reports, Journal of the University of Applied Sciences Mittweida, Nr. 5, 2014, 42-43