Möglichkeiten zur räumlichen und zeitlichen Charakterisierung von Ultraschallfeldern in Luft mit scannender Laser-Doppler-Vibrometrie

Klaus-V. Jenderka[1], Ralf Steinhausen[2], Andreas Kopp[1], Christoph Pientschke[2], Mario Kiel[2]

[1] *Hochschule Merseburg, FB INW, 06217 Merseburg, E-Mail: klaus.jenderka@hs-merseburg.de*

[2] *Forschungszentrum Ultraschall gGmbH, 06118 Halle(Saale), E-Mail: ralf.steinhausen@fz-u.de*

Einleitung

Die zuverlässige Charakterisierung von Luftultraschallfeldern im Frequenzbereich über 150 kHz stellt nach wie vor eine messtechnische Herausforderung dar. Der Einsatz zeitlich hoch auflösender scannender Laser-Doppler-Vibrometer (sLDV) eröffnet eine Möglichkeit zur Erfassung der akustischen Feldparameter von Luftultraschallwandlern im Impulsbetrieb.

Durch orts- und zeitaufgelöste Erfassung der Geschwindigkeiten und Auslenkungen auf der Wandleroberfläche können im ersten Schritt Datensätze für eine wandlerspezifische Simulation des Schallfeldes gewonnen werden. Im zweiten Schritt kann nach dem Prinzip der Refrakto-Vibrometrie [1]-[5] die Ausbreitung des Luftultraschallimpulses erfasst und visualisiert werden.

Am Beispiel von einem Luftultraschallwandler mit variablem Fokus werden die auf Basis konventioneller Simulationen und Messungen ermittelten akustischen Feldparameter mit den Ergebnissen der sLDV-Messungen verglichen.

Methoden

In der Standardanwendung kann mit der sLDV ortsaufgelöst der zeitliche Verlauf der Geschwindigkeit einer schwingenden Oberfläche in wenigen Minuten detektiert und visualisiert werden (Abb. 1.a). An Luftultraschallwandlern kann diese Messung bei cw-, Burst- oder Impulsanregung ohne großen Aufwand durchgeführt werden. Die erfassten Transienten der Geschwindigkeit dienen dann als Ausgangsgrößen für eine individuelle, wandlerspezifische Schallfeldsimulation.

In einer abgewandelten Messkonfiguration (Abb. 1.b) wird dem Prinzip der Refrakto-Vibrometrie [4] das Schallfeld von dem Laserstrahl des Vibrometers durchdrungen und von einer feststehenden Fläche zurück gestreut. Die zeitliche Änderung des Brechungsindex $\Delta n(t)$ infolge der mit der Ultraschallwelle verbundenen Druckänderungen $\Delta p(t)$ resultiert in einer zeitlichen Änderung der optischen Weglänge $\Delta[n(t)\cdot a_0]$, wobei a_0 der Abstand zur Reflektorfläche ist. Vom sLDV wird dieses als Abstandsänderung $n\cdot\Delta a(t)$ der eigentlich feststehenden Reflektorfläche wahrgenommen.

Diese Änderung des Brechungsindex wird durch den piezooptischen Koeffizienten β beschrieben. Unter Normalbedingungen erhält man für Luft einen Wert von [6][7]

$$\beta = \left(\frac{\partial n}{\partial p}\right)_{\Delta Q=0} = 2{,}68\cdot 10^{-9} \qquad [\mathrm{Pa}^{-1}]. \qquad (1)$$

Unter der Annahme, dass während der Schallausbreitung keine Wärmeaustausch mit der Umgebung erfolgt (adiabatischer Prozess, ΔQ=0) und der Äquivalenz der optischen Weglängen $n\cdot\Delta a(t) = \Delta n(t)\cdot a_0$, folgt für den Schalldruck

$$\Delta p(t) = \frac{\Delta a(t)}{2a_0\beta} \ . \qquad (2)$$

Die Strecke $2a_0$ steht für den doppelten Abstand zwischen Vibrometer und feststehender Fläche (Abb. 2), entsprechend dem Hin- und Rückweg des Laserstrahls.

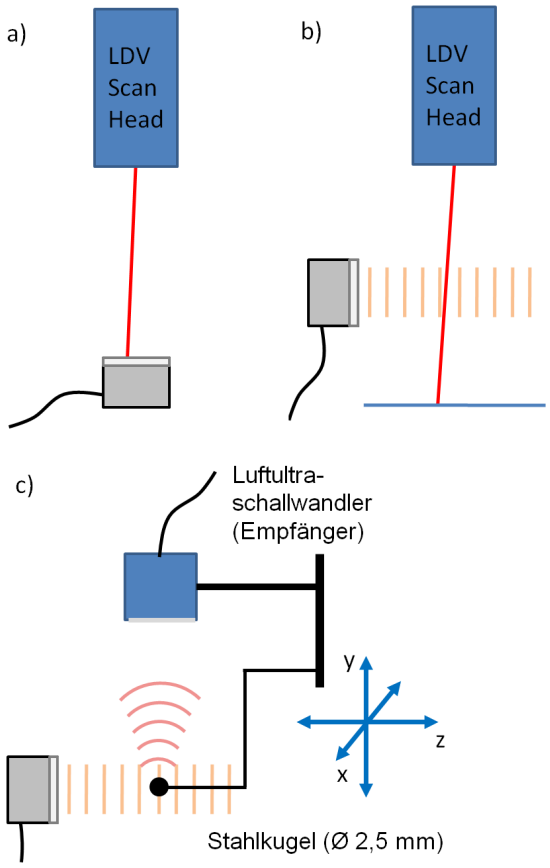

Abbildung 1: Konfigurationen zur Bestimmung der Schalldruckverteilung: a) Messung der Geschwindigkeitsverteilung an der Wandleroberfläche, b) Refrakto-Vibrometrie und c) Feldabtastung mit Punktreflektor.

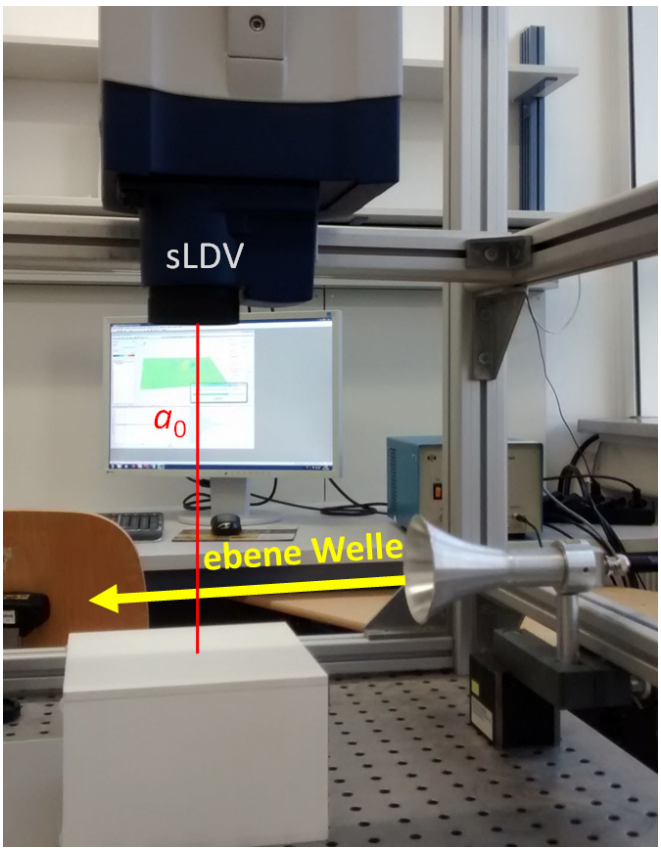

Abbildung 2: Messaufbau zur Refrakto-Vibrometrie. Das scannende Laser-Doppler-Vibrometer (PSV-500-V, Fa. Polytec GmbH, Waldbronn) erfasst die Ausbreitung eins 40 kHz-Burst in Luft.

Die Wegänderung, und damit auch der Schalldruck, werden bei diesem Verfahren integral über den optischen Weg erfasst:

$$\Delta a(t) = 2\int_0^{a_0} \beta\, p(x,t)\, dx\,. \tag{3}$$

Das Ergebnis ist eine Projektion der Schalldruckverteilung, die eine qualitative Beurteilung des Schallfeldes im Zeitverlauf gestattet.

Zur Bestimmung des absoluten Schalldruckes $p(x,y,z,t)$ ist entsprechend dem Tomographieverfahren die Aufnahme von Projektionen aus verschiedenen Richtungen erforderlich. Für die direkt mit dem Vibrometer gemessenen Transienten der Geschwindigkeit gilt

$$v(t) = \frac{d}{dt}\left(2\int_0^{a_0} \beta\, p(x,t)\, dx\right), \tag{4}$$

wobei das Integral als die Radontransformierte des Schalldruckes angesehen werden kann [8].

Als Referenzverfahren zur qualitativen Beurteilung der Schalldruckverteilung wurden die seitlichen Streuechos einer Stahlkugel (Abb. 1.c) mit einem zweiten Luft-ultraschallwandler aufgenommen. Die Stahlkugel wurde mit Hilfe eines 3-Achsen-Scanners durch das Schallfeld bewegt, wobei die relative Position von Stahlkugel und Empfangswandler unverändert blieb.

Luftultraschallquelle

Ein elektronisch fokussierbarer Luftschallwandler der Mittenfrequenz 400 kHz wurde entwickelt (Abb. 3) und als Ultraschallquelle eingesetzt. Die Ultraschallwelle wird im Wandler über einen Piezokomposit erzeugt und die Schallwelle durch eine Anpassschicht in die Luft eingekoppelt. Ausstrahlungsseitig ist die Piezoscheibe mit einer durchgehenden Elektrode versehen. Zum Dämpfungskörper hin wurde die Elektrode strukturiert gestaltet. Drei flächengleiche konzentrische Elektrodenringe können hier separat angesteuert werden. Die Ansteuerung mit verschiedenen Pulssequenzen erfolgt über einen mehrkanaligen Digitalverstärker. Der Piezokomposit ist lateral ausreichend mechanisch entkoppelt, dass die Auslenkung der Kompositoberfläche hinreichend beeinflusst werden kann.

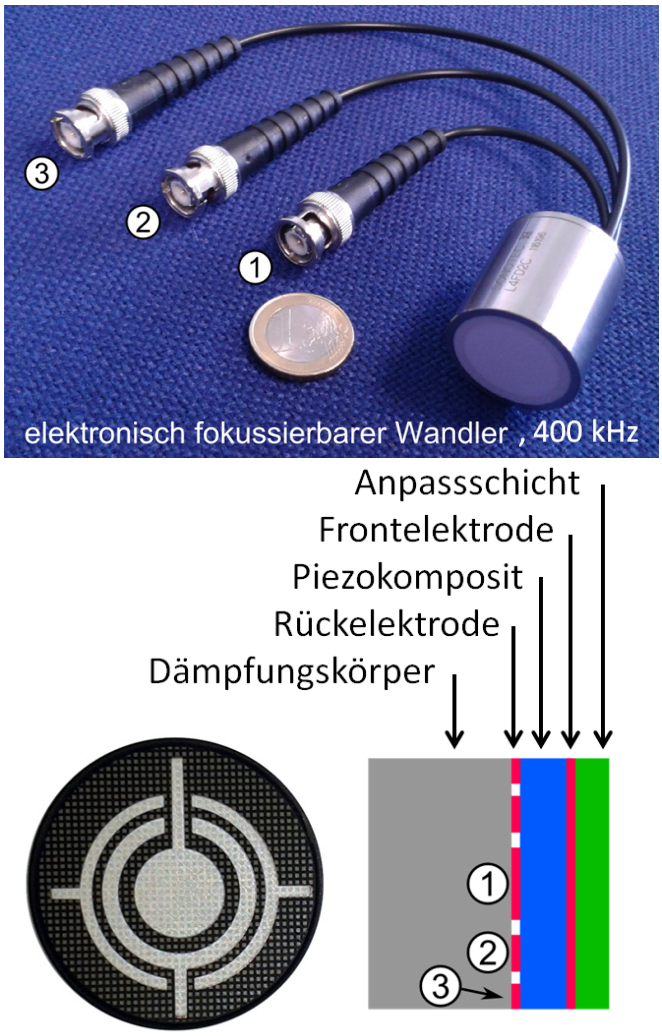

Abbildung 3: Luftultraschallwandler mit elektronisch variierbarem Fokus. Einsatzbereiter Wandler (oben), konstruktiver Aufbau (unten rechts) und Elektrodenstruktur aus konzentrischen Ringen (unten links).

Für die Messungen wurde der Wandler mit zwei unterschiedlichen Pulssequenzen angesteuert. Die gleich-phasige Ansteuerung der Ringelemente steht dabei für ein unfokussiertes und die phasenversetzte Ansteuerung für ein fokussiertes Schallfeld (Abb. 4).

Ergebnisse

Die mit dem Referenzverfahren gemessenen Schalldruckverteilungen zeigen einen deutlichen Unterschied für beide Anregungsformen (Abb. 4). Das unfokussierte Schallfeld weist dabei alle Merkmale des Schallfeldes eines Kolbenschwingers, einschließlich der Nebenmaxima, auf. Das fokussierte Schallfeld ist stärker gebündelt und das Druckmaximum liegt im Bereich des Nahfeldes.

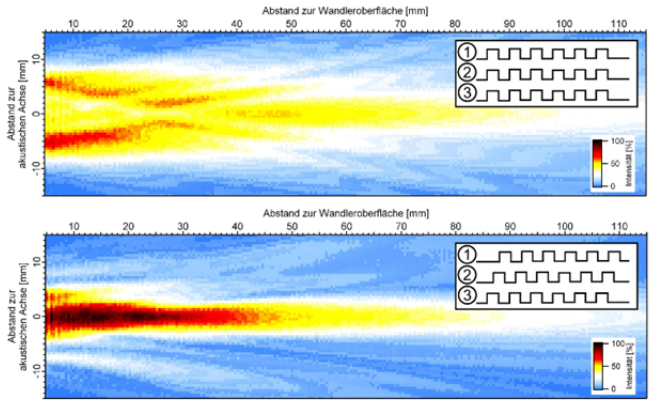

Abbildung 4: Ergebnis der Abtastung des Schallfeldes mit dem Punktreflektor (Stahlkugel) bei (oben) gleichphasiger Anregung (unfokussiert) und (unten) phasenversetzter Anregung (fokussiert).

Die mit dem sLDV erfasste transiente Geschwindigkeitsverteilung auf der Wandleroberfläche stellt sich im Fall der gleichphasigen Anregung als typische Bewegungsform eines Kolbenschwingers dar (Abb. 5). Für den Fall der phasenversetzten Anregung sind im zeitlichen Verlauf die konzentrischen Auslenkungen erkennbar, die von außen nach innen wandern. In beiden Fällen lassen sich in den animierten zeitlichen Abläufen Bereich mit verminderter Geschwindigkeitsamplitude erkennen, die durch die Geometrie der Elektrodenstruktur hervorgerufen werden.

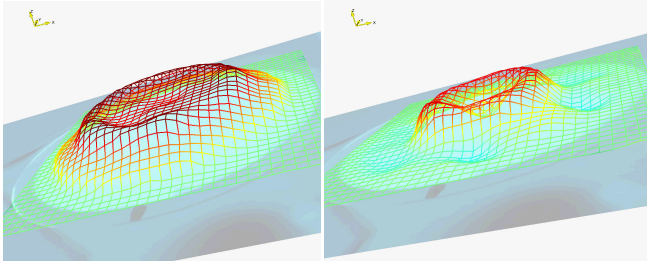

Abbildung 5: Momentaufnahme der Geschwindigkeitsverteilung auf der Wandleroberfläche für das unfokussierte (links) und fokussierte (rechts) Schallfeld. Die maximalen Geschwindigkeiten liegen im Bereich von ± 1m/s.

Davon ausgehend wurden mit der Finite-Element-Methode (COMSOL 4.3, Comsol Multiphysics GmbH, Göttingen) die Schallfelder transient und unter Ausnutzung der radialen Symmetrie modelliert (Abb. 6). Auch hier zeigt der qualitative Vergleich deutliche Unterschiede für beide Anregungsformen. Trotz der vereinfachenden Symmetrieannahmen betrug auf Grund der ca. 460000 Freiheitsgrade bei der transienten Berechnung die Rechenzeit etwa 10 h (Prozessor Intel® Core ™ i7-4770, Grundtaktfrequenz: 3,40 GHz, 16 GB RAM).

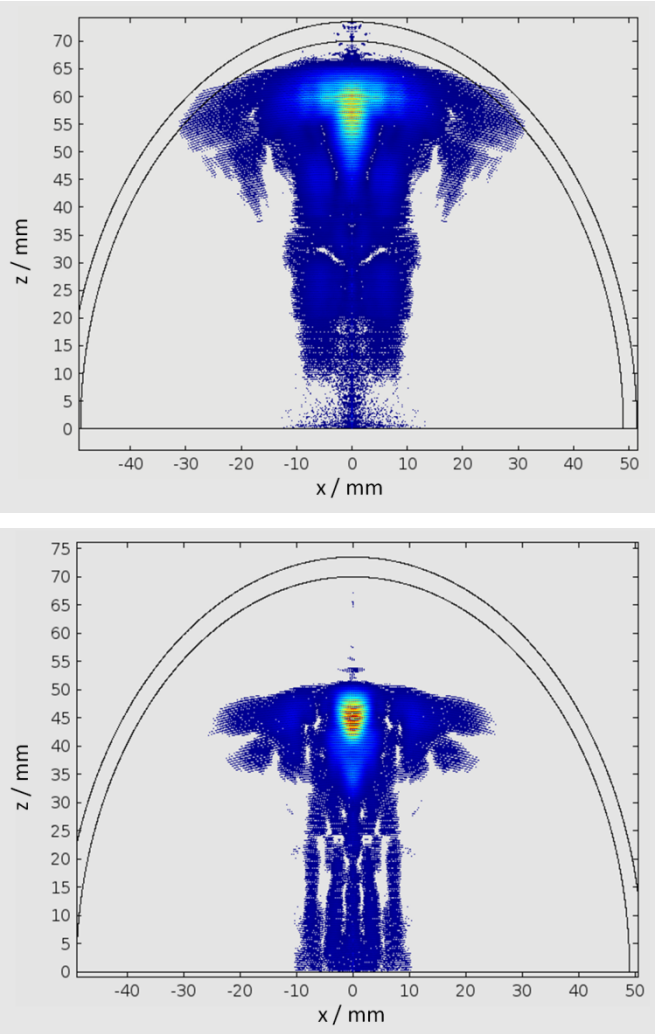

Abbildung 6: Ergebnisse der transienten, radialsymmetrischen Berechnung der Schallfelder aus den gemessenen Geschwindigkeiten der Wandleroberfläche - unfokussiert (oben) und fokussiert (unten).

Diskussion und Zusammenfassung

Die drei eingesetzten Verfahren lieferten qualitativ übereinstimmende Ergebnisse und ermöglichen die Charakterisierung der räumlichen und zeitlichen Schalldruckverteilung. Ebenso kann die Impulsform und des Nachschwingverhalten der Wandler beurteilt werden. Diese Informationen sind wertvoll für eine weitere Optimierung der Wandlerkonstruktion und der Anregung.

Ein entscheidender Vorteil ist die relativ unkomplizierte Durchführung und die vergleichsweise kurze Messzeit mit dem sLDV. Je nach gewählter örtlicher Auflösung sind Scans der Wandleroberfläche bereits in einigen Minuten abgeschlossen. Die Aufzeichnung einer großflächigen Projektion mit der Refrakto-Vibrometrie benötigt ca. 30 min (z. B. 5885 Messpunkte mit je 16 Mittelungen, siehe Abb. 7).

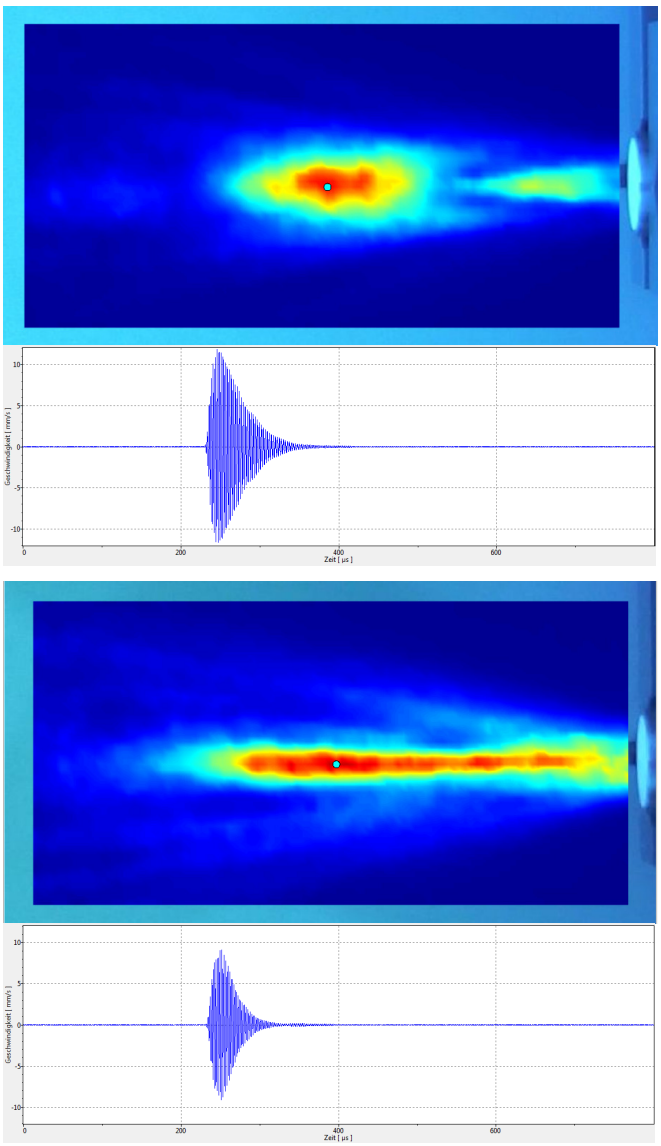

Abbildung 7: Transiente Erfassung des unfokussierten (oben) und fokussierten Schallfeldes mit der Refrakto-Vibrometrie in Projektion. Die dargestellten Transienten der Geschwindigkeit am Messpunkt (siehe Markierung) sind proportional zur Druckänderung integral über die Messstrecke.

Im nächsten Schritt soll der Messaufbau um eine Vorrichtung zur Rotation des Schallwandlers erweitert werden. Durch Einsatz tomographischer Verfahren [8] oder alternativer Ansätze zur Bestimmung des Bündel-durchmessers [9] werden dann quantitative Aussagen zur Schalldruckverteilung möglich. In jedem Fall ist der Einfluss der fächerförmigen Strahlgeometrie zu minimieren bzw. entsprechende Korrekturen vorzusehen.

Literatur

[1] Matar, O. B., Pizarro, L., Certon, D., Remenieras, J. P., Patat, F.: Characterization of airborne transducers by optical tomography. Ultrasonics 38 (2000), 787-793

[2] Harvey, G., Gachagan, A., McNab, A.: Ultrasonic field measurement in test cells combining the acousto-optic effect, laser interferometry & tomography. Proc. IEEE Ultrason. Symp., 2004, 1038–1041

[3] Zipser, L., Wächter, F., Franke, H.: Refracto-Vibrometry for Visualizing Sound Radiation from Vibrating Objects. Proceedings ISMA, 2006, 3193 – 3200

[4] Zipser, L., Franke, H: Refracto-Vibrometry for Visualizing Ultrasound in Gases, Fluids and Condensed Matter. 2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 2007, 395–398.

[5] Dittmar, A., Behrendt, R.: Measuring the 3D propagation of sound waves using scanning laser vibrometry, Proceedings of the Berlin Beamforming Conference, Berlin, 2008

[6] Stone, J.A., Zimmerman, J.H.: Index of Refraction of Air. URL: `http://emtoolbox.nist.gov`

[7] Edlén, B.: The refractive index of air, Metrologia 2 (1966), 71–80.

[8] Bahr, L., Lerch, R.: Beam Profile Measurements Using Light Refractive Tomography. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics an Frequency Control 55 (2008), 405-414

[9] Malkin, R., Todd, T., Robert, D.: A simple method for quantitative imaging of 2D acoustic fields using refracto-vibrometry. Journal of Sound and Vibration 333 (2014), 4473–4482