Numerische Analyse der Schallabstrahlung eines Ultraschallwandlers für die Auswahl geeigneter Schwingungsmoden in einem Optimierungsprozess

Simone Preuss[1,2], Johannes Henneberg[1,2], André Gerlach[2] , Steffen Marburg[1]
[1] *Lehrstuhl für Akustik mobiler Systeme, TU München, 85748 Garching, Deutschland, Email: simone.preuss@tum.de*
[2] *Robert Bosch GmbH, Forschung, 71272 Renningen, Deutschland*

Einleitung

Sucht man in der Welt der Technik nach Schallwandlern mit resonantem Betriebspunkt im Ultraschallbereich, so lässt sich eine Vielzahl von Anwendungsbeispielen identifizieren. Klassische Einsatzgebiete sind die Werkstoffprüfung, Medizintechnik sowie Fahrerassistenzsysteme. Derartige Sensoren werden durch ihre Arbeitsfrequenz und die zugehörige Betriebsschwingungsform charakterisiert. Bei Betrieb des Sensors wird die gewünschte Betriebsmode angeregt und so das an den Anwendungsfall angepasste Schallfeld erzeugt [1, 2].

In der vorliegenden Arbeit wird ein numerisches Verfahren zur Untersuchung und gezielten Auswahl der Betriebsmoden eines Ultraschallsensors präsentiert. Es werden verschiedene Betriebsschwingungsformen eines vereinfachten Systemmodells hinsichtlich ihrer Abstrahlcharakteristik untersucht. Besondere Aufmerksamkeit gilt der Ausbildung von Einbrüchen, Nebenkeulen und Asymmetrien. Diese Phänomene der Schallabstrahlung wurden in den Vorgängerarbeiten von Henneberg und Preuss [3, 4] als typische Störfaktoren für ein funktionsgerechtes Schallwandlerdesign identifiziert.

Methoden

Im folgenden Abschnitt erfolgt eine Einführung in die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Modellansätze und Berechnungsvorschriften. Für die Berechnung und Interpretation der Abstrahlcharakteristik werden das Strahlungsintegral von Lord Rayleigh sowie das Kolbenstrahlermodell genutzt. Ferner wird der Einsatz des Modal Assurance Criterion zur Identifikation der gewünschten Betriebsmode thematisiert.

Rayleigh-Integral

Ein Schallwandler für die Umfeldsensierung lässt sich zumeist als ebener Plattenstrahler innerhalb einer großen, schallharten Wand approximieren [5]. Setzt man weiterhin voraus, dass die Schallabstrahlung unidirektional ohne Rückwirkung auf die Strukturschwingung erfolgt, so liefert das Rayleigh-Integral eine exakte Lösung zur Berechnung des Luftschalls [6]. Es basiert auf der gedanklichen Zerlegung der schallemittierenden Sensorbereiche in infinitesimal kleine Volumenquellen. Der Schalldruck p im Aufpunkt vor dem harmonisch angeregten Schallwandler ergibt sich durch Integration über alle diskreten Elemente der schallabstrahlenden Fläche A_Q [7] zu

$$p(r_0,\vartheta,\varphi) = \frac{\mathrm{j}\,\omega\,\varrho}{2\,\pi}\cdot\frac{e^{-\mathrm{j}\,k\,r_0}}{r_0}\cdot \int_{A_\mathrm{Q}} v\; e^{\mathrm{j}\,k\,\sin\vartheta\,(x_\mathrm{Q}\,\sin\varphi + y_\mathrm{Q}\,\cos\varphi)}\,\mathrm{d}A_\mathrm{Q}, \tag{1}$$

wobei r_0 den Quellpunkt-Aufpunkt-Abstand, (ϑ,φ) die Winkel im Polarkoordinatensystem, ω die Eigenkreisfrequenz, ρ die Fluiddichte, k die Wellenzahl und v die Schwingschnelle darstellen. Nachfolgende Abbildung 1 veranschaulicht das Funktionsprinzip des Rayleigh-Integrals unter Annahme von Fernfeldbedingungen.

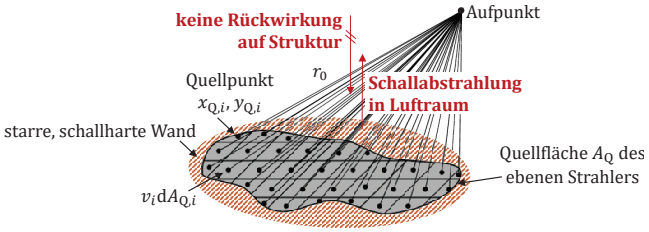

Abbildung 1: Bezugssystem und Annahmen der Fernfeldnäherung für das Rayleigh-Integral nach [8].

Das vereinfachte Modell impliziert eine deutliche Rechenzeiteinsparung gegenüber einer gekoppelten Luftschall-Körperschall-Simulation. Ferner bietet die Berechnung nach Rayleigh den Vorteil, durch einfache Variation der Bezugsgeometrie die genannten Störfaktoren der Schallabstrahlung näher untersuchen zu können.

Kolbenstrahler-Modell

Für zahlreiche technische Anwendungsfälle ist eine lückenlose Erfassung des Sensorumfelds anzustreben. Einbrüche der Richtcharakteristik sind demnach als kritisch einzustufen. Derartige Abfälle des Schalldruckpegels lassen sich, wie am Beispiel des Kolbenstrahlermodells ersichtlich, unter anderem auf die sogenannte Nebenkeulenbildung zurückführen. Ausgehend von einer homogenen und gleichphasigen Schallschnelle des ebenen Strahlers mit dem Radius R lässt sich der Schalldruck über die Besselfunktion erster Ordnung J_1 nach [5] berechnen zu

$$p(R,\vartheta) = \mathrm{j}\,\omega\,\varrho\,v\,R^2\;\cdot\;\frac{e^{-\mathrm{j}\,k\,r_0}}{r_0}\;\cdot\;\frac{J_1(k\,R\,\sin\vartheta)}{k\,R\,\sin\vartheta}. \tag{2}$$

Die Abstrahlcharakteristik, ausgewertet anhand des Abfalls um -6dB in Hauptstrahlrichtung, ist dabei stark von der Frequenz und Strahlergeometrie abhängig. Die

Kennzahl kR wird in der Literatur als Helmholtz-Zahl bezeichnet [9]. Nachfolgende Abbildung 2 zeigt die Richtwirkung eines Kolbenstrahlers für verschiedene Helmholtz-Zahlen. Für kleine Verhältnisse ($kR < 1$) weist die Richtcharakteristik ein isotropes, ungerichtetes Abstrahlverhalten auf. Demnach verhält sich die Membran wie eine ideale Punktschallquelle und strahlt gleichmäßig in alle Richtungen ab.

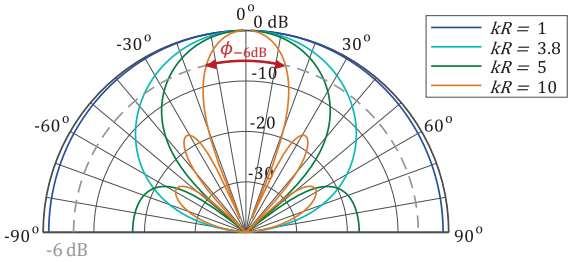

Abbildung 2: Richtcharakteristik eines Kolbenstrahlers in Abhängigkeit der Helmholtz-Zahl.

Mit zunehmender Helmholtz-Zahl kommt es zur Bündelung der Abstrahlung und Ausbildung von Nebenkeulen. Die Keule in Richtung der Schallbündelachse wird zunehmend schmaler, wohingegen die Nebenmaxima zunehmen. Die Einbrüche aufgrund der Nebenkeulenbildung sind analytisch auf Nullstellen der Besselfunktionen und physikalisch auf Superpositionseffekte durch Interaktion der Kugelwellenfronten zurückzuführen [10].

Modal Assurance Criterion (MAC)

Die realitätsnahe Berechnung der Schallabstrahlung bedarf einer korrekten Auflösung der Eigenschwingungsformen. Die numerischen Ergebnisse lassen sich mittels Messdaten über das Modal-Assurance-Criterion validieren. Dabei erfolgt nach [11] eine Korrelationsbetrachtung der Strukturschwingung bei Eigenfrequenz. Die skalare Größe MAC $\in [0,1]$ gibt Auskunft über die Gleichheit zweier Eigenschwingungsformen. Das MAC-Kriterium lässt sich nach [12] berechnen zu

$$\mathrm{MAC} = \frac{|\sum_{j=1}^{n} \{\varphi_\mathrm{A}\}_j \{\varphi_\mathrm{B}\}_j|}{(\sum_{j=1}^{n} \{\varphi_\mathrm{A}\}_j)^2 \cdot (\sum_{j=1}^{n} \{\varphi_\mathrm{B}\}_j)^2}, \qquad (3)$$

wobei $\{\varphi_\mathrm{A}\}$ und $\{\varphi_\mathrm{B}\}$ die Eigenvektorelemente der Simulation A und Messung B darstellen. Neben dem Vergleich von experimentellen und numerischen Ergebnissen lassen sich weiterführend auch zwei Simulationsdatensätze vergleichen.

Simulationsmodell

Zur Berechnung der Strukturschwingung und Akustik wird ein generisches Ersatzmodell des Ultraschallwandlers betrachtet. Dieses repräsentiert die schallabstrahlende Fläche des Sensors, in Anlehnung an die Audiotechnik auch als Membran bezeichnet, sowie die Einspannung der Membran. Analog zu derzeit auf dem Markt verfügbaren Sensoren werden die Komponenten aus Aluminium modelliert. Als Signalgeber und -empfänger wird in der Praxis eine piezoelektrische Keramik eingesetzt [1].

Diese nutzt für die Anregung den piezoelektrischen Effekt, eine lineare Wechselwirkung zwischen mechanischer Deformation in Form einer Biegeschwingung und elektrischer Polarisation. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die harmonische Anregung ersatzweise durch eine komplexe Flächenlast

$$\underline{\hat{p}} = \hat{p}\, e^{\mathrm{i}\,\varphi_0}, \qquad (4)$$

mit $\hat{p}$ als Druckamplitude und φ_0 als Phasenwinkel.

Nachfolgende Abbildung 3 zeigt das reduzierte Systemmodell eines Ultraschallsensors mit Piezoanregung sowie drei ersatzweise implementierten Belastungszustände.

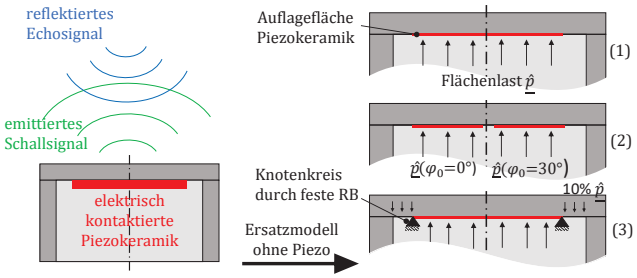

Abbildung 3: Frei gelagertes Ersatzmodell eines Sensorkopfs in drei Belastungszuständen.

Ergebnisse

Modenauswahl durch MAC

Schallwandler arbeiten klassischerweise bei einer Betriebsfrequenz, wobei eine Auslegung für mehrere Arbeitspunkte denkbar wäre (s. [4]). Eine Herausforderung der Sensorauslegung ist die Identifikation der relevanten Betriebsmoden aus der Vielzahl an Eigenschwingungsformen jedes Berechnungsmodells. Hierzu wird der MAC-Wert genutzt. Durch Einschränkung aller Freiheitsgerade (Degrees of Freedom, DOF) auf den Sensoraußenflächen mit Ausnahme der Membran wird für jedes Design eine Referenzrechnung erstellt. Durch Vergleich der nun definierten optimalen Schwingungsform lässt sich jede potenzielle Betriebsmode anhand des skalaren MAC effizient bewerten und ggf. als ungeeignet einstufen. Nachfolgende Abbildung 3 veranschaulicht beispielhaft die MAC-Wert Analyse zur Modenbewertung.

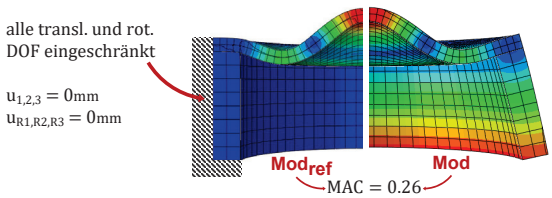

Abbildung 4: Funktionsprinzip der Modenauswahl durch MAC-Wert-Analyse: Das dargestellte Beispiel bietet mit MAC= 0.26 nur eine geringfügige Übereinstimmung mit der optimalen Schwingungsform.

Störfaktoren der Schallabstrahlung

Im Sinne einer vollumfassenden Umfeldsensierung ist eine homogene Schallabstrahlung des Sensors anzustreben,

wobei $\Phi_{-6\mathrm{dB}}$ möglichst groß sein sollte. Zusätzliche Einschränkungen des Detektionswinkels ergeben sich durch die Einbaulage. Weiterführend ist ein Fokus der Schwingung auf den Membranbereich ohne Beteiligung des Gehäuses vorteilhaft [1, 3]. Nachfolgende Abbildung 5 zeigt exemplarisch eine als geeignet einzustufende Eigenschwingungsform und zugehörige Abstrahlcharakteristik bei Anregung in Resonanz.

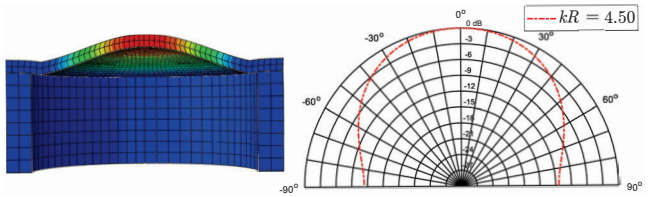

Abbildung 5: Belastungsfall 1: Beispiel einer geeigneten Richtcharakteristik und zugehörigen Schwingungsform für den Schallwandlerbetrieb.

Je nach Konstellation der Geometriegrößen relativ zur Betriebsfrequenz kommt es, wie mithilfe des Kolbenstrahlermodells bereits gezeigt, zu problematischen Abfällen des Schalldrucks. Eine derartig durch Nebenkeulenbildung dominierte Schallabstrahlung ist in Abbildung 6 dargestellt.

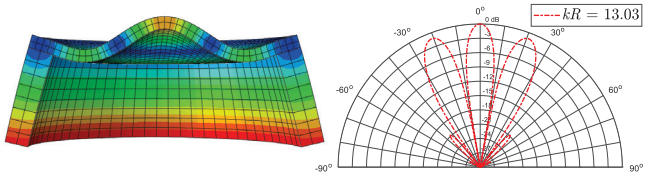

Abbildung 6: Belastungsfall 1: Gestörte Richtcharakteristik und zugehörige Schwingungsform durch Nebenkeulenbildung im hochfrequenten Bereich.

Während das Systemmodell weitestgehend symmetrisch ist, zeigen reale Sensoren oftmals geometrische Asymmetrien, die die Detektionscharakteristik verändern. Ein derartiger Effekt wird in Abbildung 7 veranschaulicht. Durch Ergänzung des vereinfachten Sensormodells um ein asymmetrisches Strukturelement lässt sich die Richtwirkung in horizontale und vertikale Abstrahlrichtung voneinander differenzieren. Dieses Phänomen wird bei Fahrerassistenzsystemen bewusst genutzt [1].

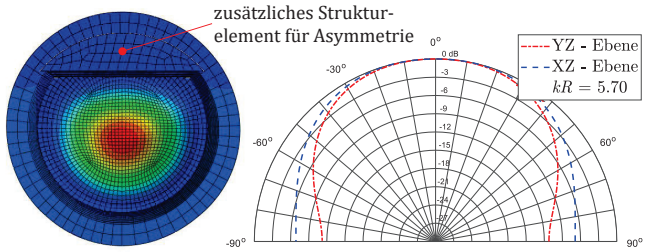

Abbildung 7: Belastungsfall 1: Zusätzliches Strukturelement führt zur elliptischen Verformung des frei schwingenden Bereichs und somit zu unterschiedlicher Richtcharakteristik in horizontale und vertikale Richtung.

Weiterführend können neben Geometrieveränderungen auch asymmetrische Belastungsfälle auftreten. Hierzu wurde beispielhaft eine zweigeteilte Flächenlastanregung mit $\varphi_0 = 30°$ Phasenversatz untersucht (s. Belastungsfall 2). Aufgrund der Anregung im Resonanzbereich bildet sich jedoch stets die Eigenschwingungsform aus, sodass die asymmetrische Anregung keine Effekte hinsichtlich der Richtcharakteristik zeigt. Auch die in Abbildung 7 sichtbare Dezentrierung des Amplitudenmaximums bewirkt aufgrund der geltenden Fernfeldbedingungen bei der Auswertung durch das Rayleigh-Integral keine wesentliche Änderung der Richtwirkung. Einzig die Amplitudenhöhe wird hierbei reduziert.

Ferner kommt es bei der Anregung aufwendiger Sensorgeometrien mit einer Vielzahl von Resonatoren zu gegenphasig schwingende Sensorbereichen. Der hierbei entstehende akustische Druckausgleich resultiert, wie in Abbildung 8 exemplarisch dargestellt, in einer lokaler Schalldruckminderung und somit in einer inhomogenen Richtwirkung.

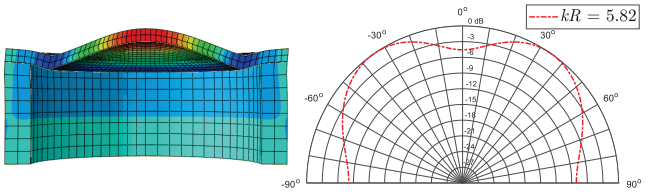

Abbildung 8: Belastungsfall 3: Gestörte Richtcharakteristik und zugehörige Schwingungsform durch mittigen Einbruch

Durch Veränderung der Bezugsgeometrie für die Rayleigh-Berechnung, lässt sich der zuvor angenommene Zusammenhang von akustischem Kurzschluss und beobachteter Druckminderung in Hauptstrahlrichtung nochmals bestätigen. Wie in Abbildung 9 erkennbar, wird hierbei das Rayleigh-Integral einzig auf den schwingenden Membranbereich innerhalb des ersten Knotenkreises angewandt (Vgl. Abbildung 8 links) und die Gegenphasigkeit somit künstlich eliminiert.

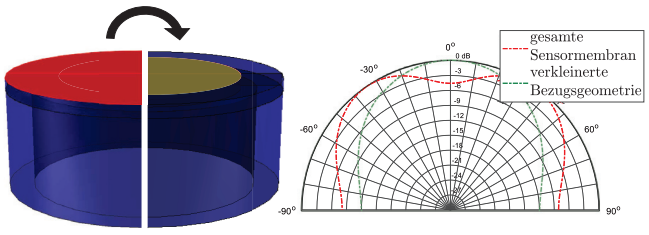

Abbildung 9: Belastungsfall 3: Nachweis akustischer Kurzschluss durch veränderte Rayleigh-Bezugsgeometrie.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Schallwandlerauslegung stellt aufgrund der erforderlichen Kopplung von strukturdynamischen und akustischen Eigenschaften eine Herausforderung dar. Erfahrungsgemäß treten bei realen Sensorgeometrien kritische Abstrahlphänomene auf, die es im Entwicklungsprozess zu berücksichtigen gilt. Diese Arbeit liefert eine Auflistung und numerische Analyse dieser Phänomene anhand eines vereinfachten Schallwandlermodells mit

Flächenlastanregung. Es wird eine geeignete Betriebsschwingungsform definiert und der Einfluss von Asymmetrien, hohen Helmholtzzahlen und Gegenphasigkeit der Membranschwingung aufgezeigt. Weiterführend wird der Nutzen des Rayleigh-Integrals und des MAC-Werts für die Sensorauslegung verdeutlicht.

Geplant ist nummehr die Automatisierung der Simulationskette für die numerische Schallwandlerauslegung unter Berücksichtigung der hier dargestellten Störfaktoren. Weiterführend soll im automatisierten Prozess die Modenidenfikation durch die MAC-Analyse realisiert werden.

Literatur

[1] Winner, H.; Hakuli, S.; Lotz, F.; Singer, C.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Springer Vieweg, ATZ/MTZ-Fachbuch, Wiesbaden, 2015

[2] Koch, C.: Ultraschall in Medizin und Technik in Taschenbuch der Technischen Akustik. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2015

[3] Henneberg, J.; Gerlach, A.; Cebulla, H.; Marburg, S.: Locally Structured Fiber Reinforcements: An Approach to Realize Anisotropic Directivity Pattern in Ultrasound Transducers. SAE Technical Paper (2018)

[4] Preuss, S.: Simulation und Optimierung der Strukturdynamik und Akustik eines Multifrequenz-Ultraschallsensors für den Einsatz in Fahrerassistenzsystemen. Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen (2018)

[5] Lerch, R.; Sessler, G.; Wolf, D.: Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009

[6] Fritze, D.; Marburg, S.; Hardtke, H.-J: Estimation of Radiated Sound Power. A Case Study on Common Approximation Methods. Acta Acustica united with Acustica 95 (2009), 833-842

[7] Möser, M.; Kropp, W.: Körperschall: Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010

[8] Hübner, G.; Gerlach., A.: Zusammenhang der DFEM-Schallleistungsbeschreibung mit der Rayleighschen Schallfelddarstellung ebener Strahler. DAGA Proceedings, Zürich (1998)

[9] Zeller, P.: Handbuch Fahrzeugakustik. Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2012

[10] Kinsley, L. E.; Frey, A. R.; Coppens, A. B.; Sanders, J. V.: Fundamentals of Acoustics. John Wiley and Sons, New York, 2000

[11] Allemang, R. J.; Brown, D. L.: A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis. Proceedings of the 1st International Modal Analysis Conference, Orlando, 1982

[12] Pastor, M., Binda, M., Harcarik, T.: Modal Assurance Criterion. Procedia Engineering 48 (2012), 543-548