

Luftschallmessungen zur Schallerzeugung mit Hilfe eines parametrischen Ultraschalllautsprechers

André Gerlach und Michael Fischer

Robert Bosch GmbH, Zentralbereich Forschung und Voraentwicklung, Abteilung Angewandte Physik, Akustik (CR/ARP3), 70839 Gerlingen, Andre.Gerlach@de.bosch.com

Einleitung

Wir untersuchen den Schalldruckabfall mit der Entfernung zu einem parametrischen Lautsprecher (PLS), der mit einer Ultraschallträgerfrequenz von ca. 40 kHz und einem 1 kHz-Signal im Hörfrequenzbereich betrieben wird. Für die Messung wurde ein 1/4-Zoll-Freifeldmikrofon Brüel & Kjær 4135 ausgewählt, da dieses bis 100 kHz durch einen glatten Frequenzgang mit Abweichungen bis zu ± 2 dB für einen Schalleinfall von vorn (0°) gekennzeichnet ist.

Parametrische Schallerzeugung

Bei einem parametrischen Ultraschalllautsprecher wird ein Audio-Nutzsignal einem Ultraschallträger aufmoduliert und abgestrahlt. In der Luft findet durch die für hohe Schalldrücke zunehmend nichtlineare Druck-Dichte-Relation eine Demodulation statt und das Nutzsignal im Hörbereich entsteht [1]-[4]. Im hier untersuchten Zusammenhang ist vom Gesamtschalldruck

$$p_{\Sigma}(t) = p(t) + k_2 p^2(t) + \dots \quad (1)$$

der quadratische Anteil relevant. Werden zwei Ultraschall-Primärfrequenzen ω_1 und ω_2 betrachtet, so ergibt sich durch die am quadratischen Glied stattfindende Demodulation

$$p^2(t) = \hat{p}^2 [\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t)]^2 = \hat{p}^2 [1 + \cos((\omega_1 - \omega_2)t) - \cos((\omega_1 + \omega_2)t) - \frac{1}{2} [\cos(2\omega_1 t) + \cos(2\omega_2 t)]] \quad (2)$$

das Nutzsignal mit der Differenzfrequenz $\omega_1 - \omega_2$.

Messung im Schallfeld des PLS

Die mit dem Mikrofon bestimmten Schalldruckpegel lagen deutlich über den theoretisch erwarteten und nach dem Höreindruck geschätzten. Wir vermuteten, dass es am Mikrofon zu einer zusätzlichen Demodulation kommt, die zu der erhöhten Anzeige der Pegel im Hörfrequenzbereich führt. Aufbauend auf einer Diskussion [5] wurden Maßnahmen festgelegt, um die Hörschalldrücke korrekt messen zu können. Das zugeordnete Messprogramm, siehe Tabelle 1 und Bild 1, beinhaltet die Messung mit und ohne Schutzgitter, 0° und 90° Schalleinfallrichtung und den Einschluss der Mikrophonkapsel in offenporigen Schaumstoff (starke Absorption Ultraschall, geringe Absorption Hörschall).

Anwendung verschiedener Messmethoden

Bild 2 zeigt die gemessenen Schalldruckpegel. Bei der üblichen Ausrichtung des Mikrofons (0° Schalleinfall) liegt der größte Schalldruck an der Membran an, wenn das Schutzgitter aufgesetzt ist, gefolgt von der Messung ohne Schutzgitter. Für 90° Schalleinfall hat das Mikrofon eine reduzierte Empfindlichkeit. Die Richtcharakteristik wurde für 40 kHz separat gemessen. Die Empfindlichkeit ist für 90° gegenüber 0° ohne Gitter um 8 dB und mit Gitter um 11 dB verringert. In der Reihenfolge der Höhe der Ultraschallpegel werden die Hörschalldrücke angezeigt. Der Schaumstoffabsorber um die Mikrophonkapsel reduziert den Ultraschallpegel um ca. 60 dB. Der Hörschall entsteht überwiegend durch Demodulation in der Luft und nicht am Mikrofon. Die Schalldämmung des Absorbers im Hörfrequenzbereich wurde gemessen und die Messwerte entsprechend kor-

rigiert. Mit dem Ultraschallabsorber wird der geringste Hörschalldruck ermittelt, diese werden als Bezugswerte für den Schalldruck im Hörbereich betrachtet.

Die Untersuchungen wurden mit einem 1/4-Zoll-Mikrofon Microtech Gefell MK 301 wiederholt. Die Mikrofone unterscheiden sich stark in der Gestaltung der Gitter, trotzdem sind die Ergebnisse nur unwesentlich verschieden.

Tabelle 1: Beschreibung der Messmethoden M1-M5

	Schutzgitter	Schalleinfall	Schaumstoff
M1	mit	0°	ohne
M2	mit	90°	ohne
M3	ohne	0°	ohne
M4	ohne	90°	ohne
M5	mit	0°	mit

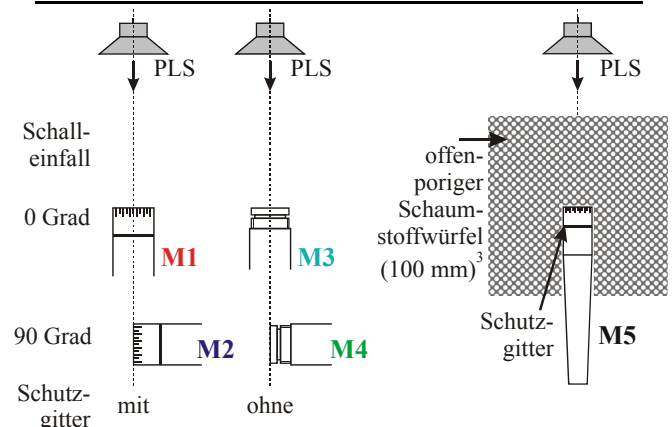


Bild 1: Veranschaulichung der Messmethoden M1-M5

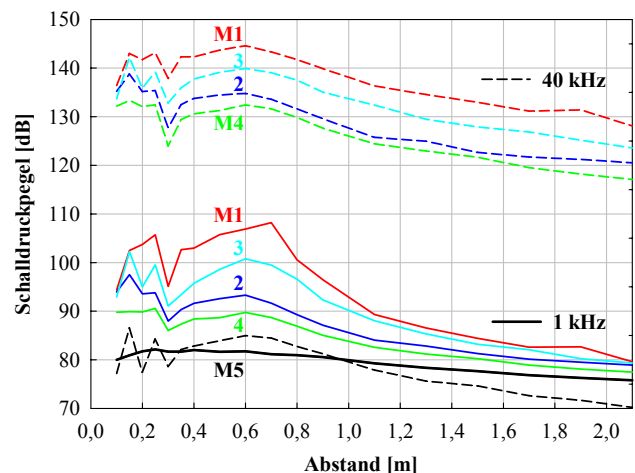


Bild 2: Schalldruckpegel über dem Abstand gemessen mit einem 1/4-Zoll-Mikrofon Brüel & Kjær 4135

Die Entwicklungslänge des Hörschalls haben wir durch Messung der Schalldruckpegel in 1,9 m Entfernung bestimmt, wenn in einem Bereich von 0,2-1,5 m eine zusätzliche Absorbermatte positioniert wird, siehe Bild 3. Die Messergebnisse zeigen, dass sich der Hörschall auf der gesamten untersuchten Länge entwickelt. Wir schlussfolgern, dass die Anwesenheit des Absorberwürfels die Entstehung des Hörschalls auf Grund der

im Vergleich zur Entwicklungslänge kleinen Würfelabmessung nur wenig beeinflusst.

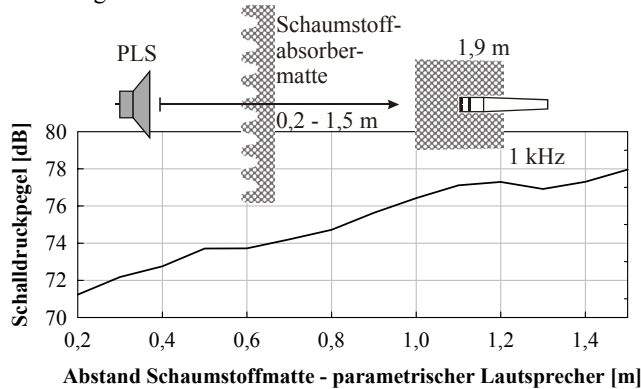


Bild 3: Schalldruckpegel in 1,9 m Entfernung über dem Abstand Absorbermatte – parametrischer Lautsprecher

Wir untersuchten außerdem den Einsatz eines 1/8-Zoll- und 1/2-Zoll-Mikrofons. Das 1/8-Zoll Brüel & Kjær 4138 (Bild 4) besitzt für die hier vorliegenden Ultraschallpegel eine so geringe Nichtlinearität, dass unabhängig von der Messmethode keine Demodulation beobachtet wurde. Beim 1/2-Zoll Brüel & Kjær 4165 (Bild 5) wirkt sich die reduzierte Empfindlichkeit im Ultraschallbereich aus. Für einen Schalleinfall unter 0° werden die größten Ultraschallpegel ermittelt, entsprechend kommt es zu einer starken Demodulation. Nur für 90° Schalleinfall und Abstände größer 1 m sind die Messfehler gering. Der Einsatz des Ultraschallabsorbers wurde nicht untersucht.

Nichtlineare Effekte am Kondensatormikrofon

Die nichtlineare Verzerrung am Kondensatormikrofon wird durch verschiedene physikalische Effekte bewirkt. In der Literatur finden sich einzelne Beschreibungen, aber keine Abschätzung der Anteile der Einzeleffekte an der Gesamtnichtlinearität [6]-[9]. Einzelne Ursachen sind:

- (1) Abweichung der Membranbewegung von der ebenen Auslenkung (keine Kolbenmembran),
- (2) Parallelkapazität zum „Membrankondensator“ (Streukapazität und Eingangskapazität Vorverstärker),
- (3) Nichtlinearität der Membransteife,
- (4) Membranvorlast durch die Polarisationsspannung,
- (5) Ladungsverschiebung bei Membranbewegung (keine gleichmäßige Ladungsverteilung),
- (6) Abhängigkeit des Strömungswiderstandes zwischen Membran und Gegenelektrode vom Abstand,
- (7) Asymmetrie des Strömungswiderstandes in Bezug auf die Bewegungsrichtung (Strömungsprofil und Wirbelbildung an Kanten und Löchern der Gegenelektrode) und
- (8) nichtlineare Kompression der Luft hinter der Membran (Einfluss der Volumensteife auf Gesamtsteife).

Im hier untersuchten Ultraschallbereich wird die Membranbewegung weniger durch die Membransteife, sondern überwiegend durch die Dämpfung und Membranmasse bestimmt. Daher tragen insbesondere der Effekt (6) sowie die Effekte (7) und (8) zur Nichtlinearität bei, quantitative Bewertungen sind in der Literatur leider nicht zu finden. Die Effekte (1) und (2) werden in [8] für quadratische Verzerrungen abgeschätzt. Für das 1/4"-Mikrofon 4135 beträgt dieser Nichtlinearitätsanteil 0,15% bei 140 dB. Die kubischen Verzerrungen sind vernachlässigbar.

Zusammenfassung

Bei der Messung im Schallfeld eines parametrischen Lautsprechers kommt es durch die Nichtlinearität des Mikrofons zu einer zusätzlichen Demodulation. Für eine korrekte Messung des Hörschalls bei Ultraschallpegeln bis 145 dB kann der Ein-

satz eines 1/8-Zoll-Mikrofons ohne Zusatzmaßnahmen, eines 1/4-Zoll-Mikrofons nur mit Ultraschallabsorber und eines 1/2-Zoll-Mikrofons nicht empfohlen werden.

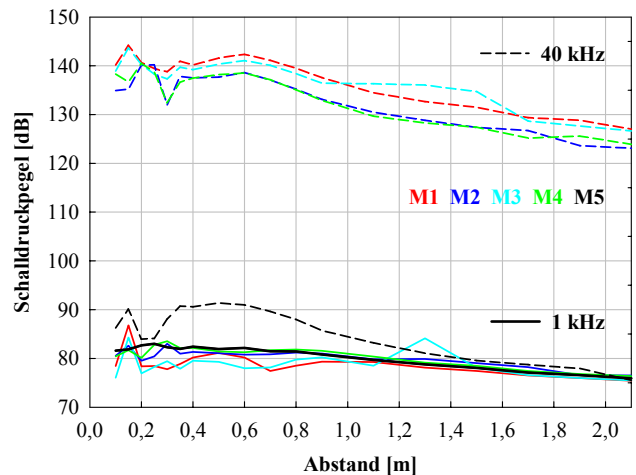


Bild 4: Schalldruckpegel über dem Abstand gemessen mit einem 1/8-Zoll-Mikrofon Brüel & Kjær 4138

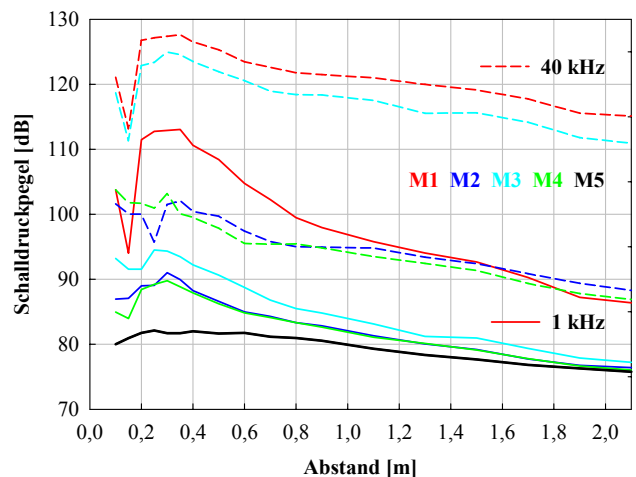


Bild 5: Schalldruckpegel über dem Abstand gemessen mit einem 1/2-Zoll-Mikrofon Brüel & Kjær 4165 (Bezugswert nach M5 ermittelt mit 1/4-Zoll-Mikrofon Brüel & Kjær 4135)

Danksagung

Herzlichen Dank an Frau Jacqueline Rausch für die Durchführung der Messungen.

Literatur

- [1] Beyer, R. T.: Nonlinear Acoustics. Woodbury: Acoustical Society of America, 1997
- [2] Westervelt, P. J.: Scattering of sound by sound. In Hamilton and Blackstock: Frontiers of Nonlinear Acoustics. 12th Int. Symp. on Nonlinear Acoustics, 1990, p. 301-305
- [3] Bakhvalov, N. S. et al.: Nonlinear Theory of Sound Beams. New York: American Institute of Physics, 1987
- [4] Mellert; Schwarz-Röhr: The origin of the audio signal in a beam of modulated ultrasound in air. In: DAGA '04, 2004 (CD-ROM)
- [5] 10. Workshop der DEGA und der DPG, Physik-Zentrum Bad Honnef, 11. 09. 2003, "Parametrische Schallerzeugung"
- [6] Brüel & Kjær: Condenser Microphones and Microphone Preamplifiers for Acoustic Measurements. 1982
- [7] Brüel & Kjær: Microphone Handbook. Volume 1 Theory. 1996
- [8] Frederiksen, E.: Reduction of non-linear distortion in condenser microphones by using negative load capacitance. Brüel & Kjær Technical Review, 1996, No. 1, p. 19-31
- [9] Fletcher, N. H. ; Thwaites, S.: Electrode surface profile and the performance of condenser microphones. J. of Acoustical Soc. America (JASA), 2002, p. 2779-2785