

# Stark gerichtete Audio-Beschallung mittels modulierten Ultraschall-Strahlungsdrucks

Dirk Olszewski<sup>1</sup>, Klaus Linhard<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DaimlerChrysler AG, 89013 Ulm, Deutschland, Email: dirk.olszewski@daimlerchrysler.com

<sup>2</sup> DaimlerChrysler AG, 89013 Ulm, Deutschland, Email: klaus.linhard@daimlerchrysler.com

## Einleitung

Messungen an Ultraschalllautsprechern zur gerichteten Beschallung ergeben oftmals Audio-Schalldrücke, die deutlich über den theoretisch zu erwartenden Werten liegen. Diese Abweichung ist umso größer, je näher sich das Mikrofon an der Schallquelle befindet. In vorangegangenen Untersuchungen wurde dieser Effekt meist als Messfehler eingestuft, der mit einer zusätzlichen Demodulation im Mikrofon erklärt wurde. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen zeigen jedoch, dass die durch nichtlineare Mikrofon-Eigenschaften herbeigeführte Demodulation nicht ausreicht, um die Abweichung zu erklären. Stattdessen wird hier der akustische Strahlungsdruck betrachtet, der offenbar einen zusätzlichen Beitrag zum parametrisch erzeugten Audio-Schalldruck generiert. Dieser Beitrag nimmt mit zunehmender Entfernung von der Schallquelle ab, während der parametrisch erzeugte Anteil zunächst ein Maximum erreicht und dann erst abfällt. Folglich wird die Möglichkeit beschrieben, den akustischen Strahlungsdruck gezielt für eine stark gerichtete Audio-Beschallung zu nutzen. Der schwierigen technischen Realisierbarkeit stehen die Vorteile im Vergleich zum parametrischen Ultraschalllautsprecher gegenüber, welche aus einer noch stärkeren Richtwirkung und einer fehlenden Frequenzabhängigkeit des erzeugten Audio-Schalldrucks bestehen.

## Grundlagen

Parametrische Ultraschalllautsprecher erzeugen einen stark gerichteten Audio-Schallstrahl unter Verwendung kleiner Wandleraperturen, verglichen mit der Audiowellenlänge. Hierzu wird ein mit dem Audiosignal amplitudenmodulierter Ultraschallträger in Luft emittiert. Bei hohem Ultraschallpegel führen nichtlineare Eigenschaften der Druck-Dichte-Relation der Luft zur Selbst-Demodulation des Audiosignals. Vor der Schallquelle baut sich dadurch ein Endfire-Array virtueller Quellen auf, welches das Audiosignal stark gerichtet abstrahlt.

Eine ebene Schallwelle, die im Winkel  $\varepsilon$  auf eine Grenzfläche trifft, erzeugt einen akustischen Strahlungsdruck, welcher der mittleren Energiedichte der Welle entspricht [1, 2]:

$$\Pi_\varepsilon = \langle e_\varepsilon \rangle = \rho_0 \langle (v \cdot \cos \varepsilon)^2 \rangle \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

Dabei bezeichnet  $\rho_0$  die Ruhedichte der Luft und  $v$  die Schallschnelle am Ort der Grenzfläche. Ist nun die Schallwelle wie im Falle des Ultraschalllautsprechers mit

einem Audiosignal  $s(t) = \hat{s} \sin(\omega_s t)$  moduliert, lässt sich für den Strahlungsdruck folgende Form angeben:

$$p_{Str}(t) = \Pi_\varepsilon \left( 1 + \frac{m}{2} + 2m \sin(\omega_s t) - \frac{m^2}{2} \cos(2\omega_s t) \right) \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

Da  $p_{Str}$  nun ebenfalls moduliert ist, schwankt er um einen konstanten Gleichdruck  $p_{Str,0}$  und es gilt:

$$p_{Str,1} = \Pi_\varepsilon \frac{2m}{\sqrt{2}}, \quad p_{Str,2} = \Pi_\varepsilon \frac{m^2}{2\sqrt{2}} \quad [\text{Pa}] \quad (3)$$

Der Wechselanteil von  $p_{Str}$  enthält also einen Anteil  $p_{Str,1}$  bei der modulierenden Signalfrequenz  $\omega_s$  und einen Anteil  $p_{Str,2}$  bei deren ersten Oberschwingung, wobei der Pegel von  $p_{Str,1}$  linear und der von  $p_{Str,2}$  quadratisch von der Modulationstiefe  $m$  abhängt.

Im Gegensatz zur Schallerzeugung durch das parametrische Array ist der Audiopegel hier unabhängig von der Frequenz. Die Richtwirkung ist im Vergleich meist stärker ausgeprägt, da zusätzlich zur Richtcharakteristik des Ultraschallstrahls der Einfallswinkel  $\varepsilon$  ausschlaggebend ist. Somit wäre sogar bei Kugelcharakteristik des Ultraschallträgers eine stark gerichtete Audiobeschallung denkbar, da nur bei entsprechend günstigem Winkel  $\varepsilon$  signifikante Audio-Schallpegel demoduliert würden. Abb. 1 zeigt qualitativ die Schalldruckverläufe der Effekte, die einen Beitrag zur Schallerzeugung bei Verwendung eines Ultraschalllautsprechers liefern. Der nicht-parametrisch erzeugte Anteil resultiert aus einer Demodulation durch Nicht-Linearitäten der Übertragungsfunktion der Schallquelle [3].

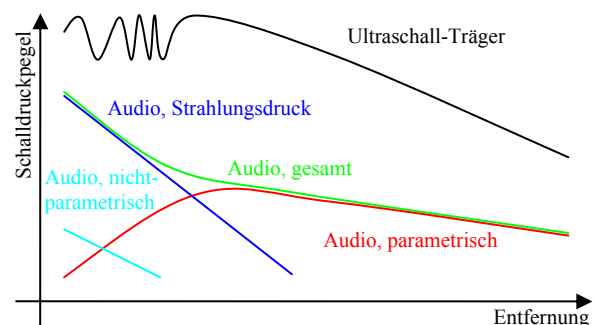
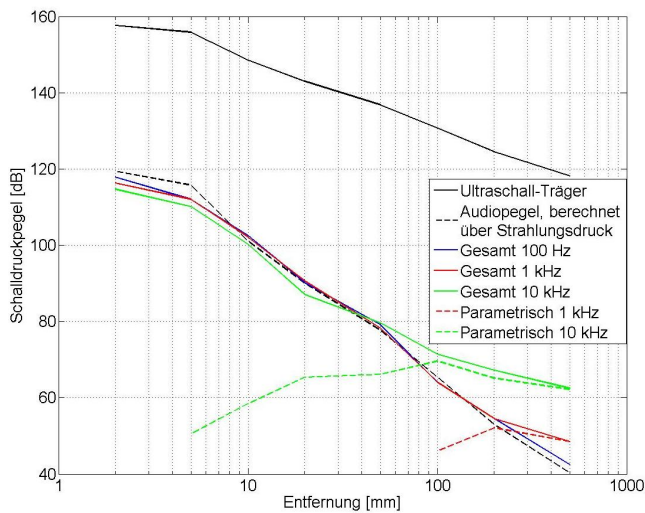


Abbildung 1: Qualitative Schalldruckverläufe der an der Audioschallerzeugung beteiligten Effekte.

## Messungen

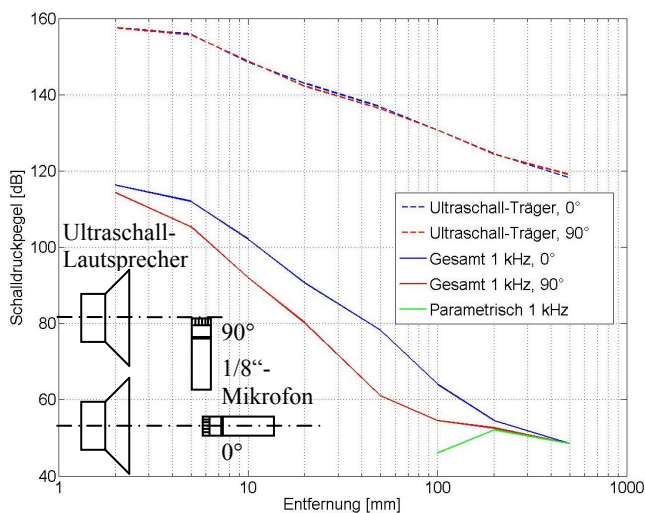
In einem Experiment (Abb. 2) wurde zunächst der Ultraschallpegel über der Entfernung  $x$  von der Schallquelle gemessen und daraus nach Gleichung (3) der zu erwartende,

durch den Strahlungsdruck am Mikrofon erzeugte Audio-Schallpegel  $p_{Str,1}$  berechnet. Zudem wurden der insgesamt erzeugte ( $p_{ges}$ ) und der parametrisch generierte Audio-Schallpegel  $p_{param}$  gemessen, letzterer durch Abdecken des Mikrofons mit einem Ultraschallabsorber, so dass kein Audioschall durch Strahlungsdruck erzeugt werden konnte. Der Schalleinfall erfolgte jeweils von vorn ( $0^\circ$ ), der nicht-parametrisch erzeugte Audioschallpegel war vernachlässigbar klein. Die berechneten Werte für  $p_{Str,1}$  stimmen zunächst recht gut überein mit  $p_{ges}$ . Sobald  $p_{param}$  mit  $x$  größer wird als  $p_{Str,1}$ , weicht  $p_{ges}$  vom berechneten  $p_{Str,1}$  erwartungsgemäß ab.



**Abbildung 2:** Ultraschallpegel (gemessen), Audiopegel durch Strahlungsdruck (aus Ultraschall-Pegel berechnet), Gesamt-Audiopegel und parametrisch erzeugter Audiopegel (jeweils gemessen).

Um bei der Messung von  $p_{Str,1}$  einen Messfehler durch Demodulation aufgrund von Nichtlinearitäten in der Messkette ausschließen zu können, wurde ein zweiter Versuch durchgeführt, indem die gemessenen Gesamt-Audiopegel bei Einfall von  $0^\circ$  und von  $90^\circ$  verglichen wurden (Abb. 3):



**Abbildung 3:** Gemessene Ultraschall- und Audiopegel bei  $0^\circ$  und  $90^\circ$  Einfallswinkel.

Da bei  $90^\circ$  gemäß Gleichung (2) kein Audioschall durch Strahlungsdruck erzeugt wird und in geringen Entfernungen  $p_{param}$  noch vernachlässigt werden kann, ist der hier gemessene Audioschallpegel als Resultat der Demodulation

aufgrund von Nichtlinearitäten in der Messkette einzustufen. Dieser Pegel liegt meist deutlich unterhalb desjenigen für  $0^\circ$  Schalleinfall, so dass der dort gemessene Audiopegel  $p_{ges}$  verlässlich als Summe aus  $p_{param}$  und  $p_{Str,1}$  betrachtet werden kann. In sehr kleinen Abständen ( $<5$  mm) wird die Verlässlichkeit geringer; in größeren Abständen ( $>100$  mm) jedoch ist die geringer werdende Pegeldifferenz dem nun stärker angewachsenen parametrisch erzeugten Audio-Schallpegel zuzuschreiben, da dieser aufgrund der Omnidirektionalität des Mikrofons in beiden Fällen gleiche Werte liefern muss. Wird nun z. B. ein divergentes Ultraschallfeld moduliert, so dass aufgrund der Divergenz nur eine kaum wahrnehmbare parametrische Audioschallerzeugung stattfindet, könnte ein Benutzer, dessen Trommelfell in einem günstigen Winkel  $\varepsilon$  getroffen wird, eine stark gerichtete bzw. individuelle Beschallung erfahren. Durch die geringe parametrische Schallerzeugung würden benachbarte Personen kaum belästigt und störende Reflexionen vermieden; durch die fehlende Frequenzabhängigkeit wäre ein gegenüber der parametrischen Schallerzeugung verbesserter Frequenzgang zu erwarten, allerdings müsste die aus Gleichung (3) resultierende Verzerrungskomponente durch geeignete Entzerrungsmaßnahmen kompensiert werden. Eine technische Realisierung wird allerdings durch die Krümmung des Gehörgangs und durch die schräge Insertion des Trommelfells [4] erschwert. Ein Schalleinfall im Winkel von etwa  $45^\circ$ , verbunden mit einem Ultraschallpegel von 140 dB und einer Modulationstiefe von  $m=1$  ließe dennoch einen Audioschallpegel von etwa 70 dB erwarten, ein vollständiges Mitschwingen des Trommelfells vorausgesetzt. Ein solches System wäre allerdings empfindlich gegenüber Positionsänderungen des Nutzers. Zudem müsste es bzgl. der hohen Ultraschallpegel medizinisch abgesichert werden.

### Zusammenfassung

Die Erzeugung von Audioschall durch Ultraschall-Strahlungsdruck wurde theoretisch beschrieben und durch Messungen belegt. Gleichzeitig wurden die Ergebnisse gegenüber systematischen Messfehlern durch Demodulation aufgrund von Nichtlinearitäten in der Messkette abgesichert. Sie zeigen, dass die in der Literatur hinreichend beschriebene parametrische Schallerzeugung erst in größerem Abstand überwiegt, während im Nahbereich der Schallquelle die Schallerzeugung durch Strahlungsdruck dominiert.

### Literatur

- [1] C. P. Lee und T. G. Wang, „Acoustic Radiation Pressure“, J. Acoust. Soc. Amer. 94, 1993
- [2] Vladimir A. Sutilov, Physik des Ultraschalls, Springer-Verlag, 1984
- [3] Dirk Olszewski und Klaus Linhard, Optimum array configuration for parametric ultrasound loudspeakers using standard emitters, IEEE International Ultrasonics Symposium 2006
- [4] Rauber / Kopsch, Anatomie des Menschen, Lehrbuch und Atlas, Band 3, Nervensystem Sinnesorgane, Thieme-Verlag 1987, ISBN 3-13-503501-8