

# Messungen zur Schallerzeugung durch einen parametrischen Ultraschalllautsprecher

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

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

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

## Einleitung

In diesem Experiment wurden Luftschallmessungen an einem parametrischen Ultraschalllautsprecher in großen Entfernungen durchgeführt, so dass die Generationslänge des erzeugten Audioschalls bestimmt werden konnte. Die entfernungsabhängigen Richtcharakteristiken des parametrisch erzeugten Schalls zeigen einen Zusammenhang zwischen dem Aufbau der Richtcharakteristik mit der Entfernung und der Länge der Generationszone. Die Veränderung des Audiofrequenzgangs mit der Entfernung impliziert eine Überlagerung von mindestens zwei Effekten. Der nicht-parametrisch erzeugte Audioschallanteil wurde ebenfalls bestimmt.

## Parametrischer Ultraschalllautsprecher

Parametrische Ultraschalllautsprecher (UL) erzeugen einen stark gerichteten Audioschallstrahl bei vergleichsweise kleiner Wandlerapertur.

Hierzu wird ein mit dem Audio-Nutzsignal amplitudenmodulierter Ultraschallstrahl in Luft emittiert. Bei hohem Schalldruckpegel ( $>110$  dB) werden zunehmend nichtlineare Eigenschaften der Schallausbreitung in Luft relevant und führen zur Selbst-Demodulation des Nutzsignals. Vor dem Wandler entstehen dadurch innerhalb des Ultra-Schallstrahls virtuelle Nutzsignalquellen. Das aus ihnen gebildete Endfire-Array strahlt das Audiosignal in Ausbreitungsrichtung des Ultraschallstrahls stark gerichtet ab [1-3]. Die Generationslänge kennzeichnet in Ausbreitungsrichtung die Länge des Endfire-Arrays, innerhalb derer Beiträge zum gesamten Audioschall erzeugt werden. Die maximale Audio-Richtwirkung kann demzufolge erst in einer Entfernung auftreten, die der Generationslänge entspricht. In größerer Entfernung sinkt die Intensität des Ultraschallstrahls so weit ab, dass keine signifikante Demodulation mehr auftreten kann.

Da die verwendeten Ultraschallwandler in geringem Umfang über nichtlineare Übertragungseigenschaften verfügen, kann im Wandler selbst eine Demodulation des Nutzsignals und somit eine nicht-parametrische Schallabstrahlung stattfinden. Der Anteil dieses parasitären Schmutzeffekts an der Audioschallgenerierung ist zu untersuchen, da er in geringer Entfernung ( $<100$  cm) zum UL zu einer Erhöhung des gemessenen Audioschalldrucks führen und hier durch seine vergleichsweise schwache Richtwirkung die Gesamt-Richtcharakteristik aufweiten könnte.

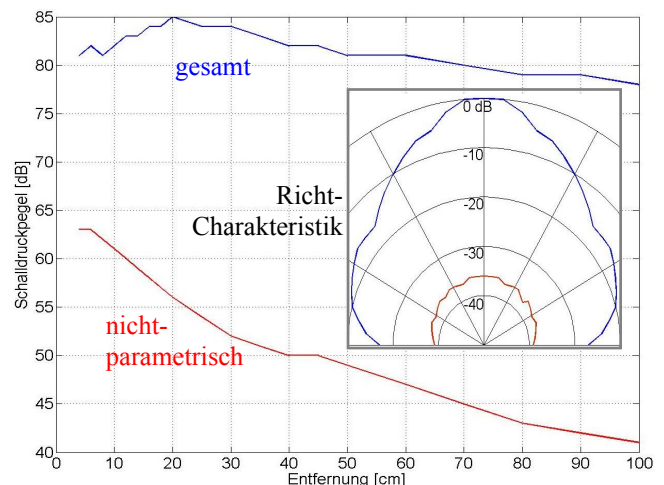
## Messungen mit einem UL

Das 40 kHz-Trägersignal des UL, welcher aus 104 Piezokristallwandlern bestand, wurde mit Sinussignalen voll durchmoduliert. Um Messfehlern durch zusätzliche

Demodulation [4] am Mikrofon vorzubeugen, wurde dieses mit einem Schaumstoffwürfel der Kantenlänge 10 cm bedeckt, wodurch der Schalldruckpegel bei 40 kHz um 31 dB gedämpft wurde. Bei der Messung zur Generationslänge wurde zudem eine Absorbermatte aus Noppenschäumstoff verwendet, die eine zusätzliche Dämpfung von 28 dB bei 40 kHz verursachte.

## Nicht-parametrisch erzeugter Audioschall

Um den Anteil des nicht-parametrisch erzeugten Schalls am Gesamt-Hörschall zu bestimmen, wurde der UL komplett mit einer Matte Schaumstoff abgedeckt. Durch die damit einhergehende starke Dämpfung des Ultraschallträgers wurde die wirksame Generationslänge auf wenige mm (Distanz Schallwandlertrichter – Matte) und somit auf Werte weit unterhalb der Audiowellenlänge (ca. 34 cm bei 1 kHz) begrenzt, wodurch eine nennenswerte parametrische Schallerzeugung ausgeschlossen werden konnte.



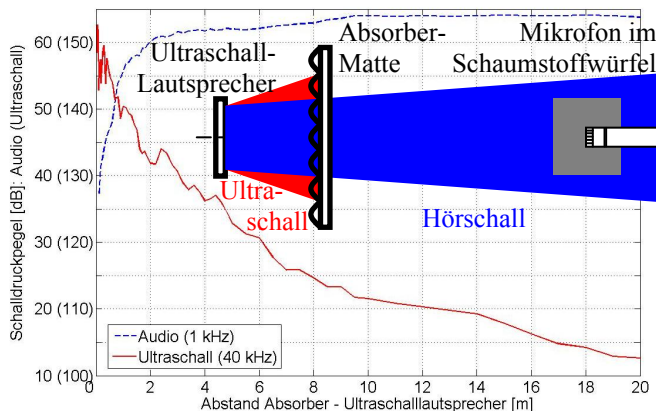
**Abbildung 1:** Verlauf von gesamtem und nicht-parametrischem Schalldruckpegel für 1 kHz über der Entfernung; kleines Bild: Gesamte und nicht-parametrische Richtcharakteristik für 1 kHz in 1 m Entfernung

Der nicht-parametrisch erzeugte Audioschallanteil besitzt eine im Vergleich zur Gesamt-Charakteristik nur schwach ausgeprägte Richtwirkung und liegt sogar in sehr geringer Entfernung ( $<10$  cm) mindestens etwa 20 dB unter dem Gesamtpegel. Er kann daher als kaum relevant eingestuft werden.

## Generationslänge

Zur Messung der Generationslänge wurde ein in [4] beschriebenes Messprinzip weitergeführt: In 20 m Entfernung vom UL wurde der Schalldruckpegel des demodulierten Audiosignals gemessen, wobei die Generationsstrecke durch eine Absorbermatte in variablem Abstand zum UL begrenzt wurde. Der Ultraschalldruckpegel

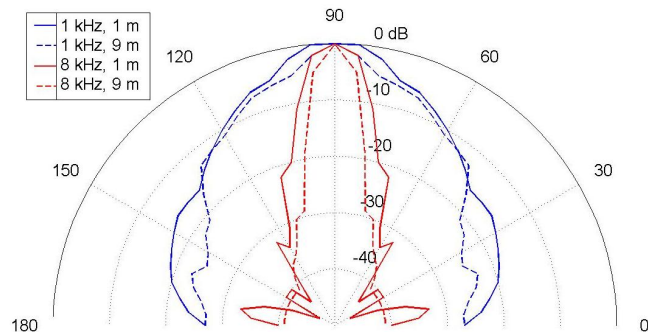
wurde jeweils am Ort des Absorbers ohne dessen Vorhandensein gemessen.



**Abbildung 2:** Audioschalldruckpegel in 20 m Entfernung über der Entfernung Absorber – UL und Ultraschalldruckpegel am Ort des Absorbers

Bis in eine Entfernung von etwa 9 m ist eine parametrische Schallerzeugung anhand des steigenden Audioschalldruckpegels zu erkennen, darüber hinaus findet kein weiterer Pegelanstieg mehr statt. Die Generationslänge lässt sich daher mit etwa 9 m angeben. Eine signifikante parametrische Audio-Schallerzeugung findet demnach bis hinab zu Ultraschalldruckpegeln von etwa 113 dB statt. Bereits nach 2,2 m liegt der erzeugte Audioschalldruck nur noch 3 dB unter seinem Endwert; der Ultraschalldruckpegel liegt hier etwa 20 dB über dem minimal nutzbaren Pegel.

### Richtcharakteristiken

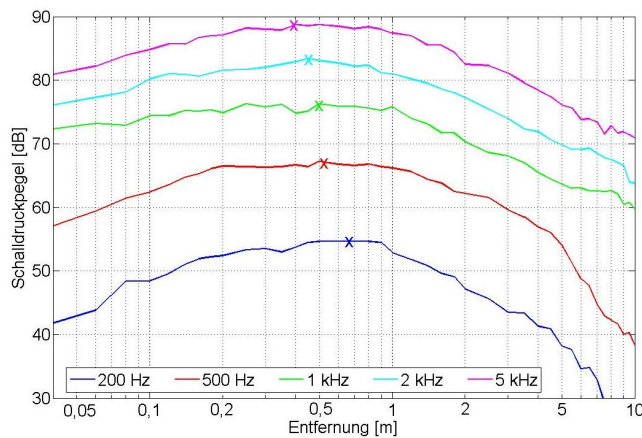


**Abbildung 3:** Richtcharakteristiken für 1 kHz und 8 kHz innerhalb (1 m) und am Ende (9 m) der Generationszone

Die ermittelten Richtcharakteristiken sind innerhalb der Generationszone schwächer ausgeprägt als an ihrem Ende. In größeren Entfernungen durchgeführte Messungen zeigten keine weitere Verschärfung der Richtwirkung. Dies stützt die These, dass der Aufbau der Richtwirkung mit der Generationslänge einhergeht.

### Frequenzgang

Aus [5] geht hervor, dass zur parametrischen Erzeugung eines bestimmten Schalldruckpegels bei tiefen Frequenzen größere Entfernungen zum UL notwendig sind als bei hohen Frequenzen. Daher ist nah am UL ein hochtonbetonter Frequenzgang zu erwarten, der mit zunehmender Entfernung mit tieferen Frequenzen angereichert wird.



**Abbildung 4:** Audioschalldruckpegel über Entfernung zum UL; Maxima sind markiert.

Tatsächlich zeigt Abb. 4, dass der maximale Pegel bei allen betrachteten Frequenzen deutlich vor Ende der Generations-Zone und bei tiefen Frequenzen in nur geringfügig größerer Entfernung als bei hohen erreicht wird. In großen Abständen (>5 m) nimmt der Pegel tiefer Frequenzen schneller ab. Ursache ist vermutlich die frequenzabhängige Richtwirkung: Die Divergenz des Schallstrahls wirkt einer weiteren Schalldruckerhöhung entgegen, besonders bei tiefen Frequenzen.

### Zusammenfassung

Der Anteil der nicht-parametrischen Schallerzeugung ist so gering, dass er selbst in geringem Abstand (<10 cm) kaum relevant ist. Die Generationslänge des hier verwendeten UL wurde mit 9 m für 1 kHz ermittelt. Offenbar ist diese Entfernung auch zur vollständigen Entwicklung der Audio-Richtwirkung notwendig. Für eine nennenswerte parametrische Audio-Schallerzeugung eines 1 kHz-Signals sind Pegel im Ultraschallträger von mindestens 113 dB notwendig. Das Erreichen der Schalldruckmaxima unterschiedlicher Frequenzen in näherungsweise gleichen Entfernungen wird offenbar durch zwei gegenläufige Effekte bestimmt.

### Anerkennung

Diese Arbeit ist Teil des EU-Förderprojekts CHIL (Computers in the Human Interaction Loop, <http://chil.server.de>).

### Literatur

[1] Westervelt, P. J.: Parametric Acoustic Array; J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 35, 1963.  
 [2] Berktaay, H. O., Leahy, D. J.: Farfield Performance of Parametric Transmitters, J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 55, 1974, S. 539-546.  
 [3] Yoneyama, M., Fujimoto, J.: The Audio Spotlight: An Application of Nonlinear Interaction of Sound Waves to a New Type of Loudspeaker Design, J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 73, 1983, S. 1532-1536.  
 [4] Gerlach, A.; Fischer, M.: Luftschallmessungen zur Schallerzeugung mit Hilfe eines parametrischen Ultraschalllautsprechers; DAGA 2005.  
 [5] Rautenberg, J., Henning, B.: Lower Frequency Bound of Parametric Arrays; IWPA 2005