

## Virtuelle Mikrofone an einer reflektierenden Wand

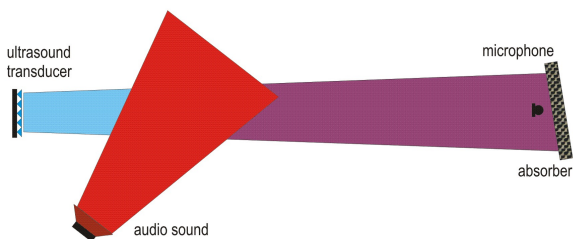
Tobias Merkel<sup>1</sup>, Hans-Gerd Lühmann<sup>2</sup>, Tom Ritter<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Beuth Hochschule für Technik Berlin, <sup>2</sup>Lütronic GmbH Berlin

2012/03/20

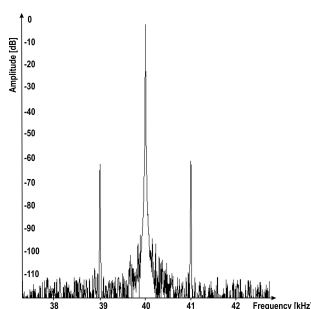
### Einleitung

Mit einem Aarray von Ultraschallsendern wird ein gerichteter Ultraschallstrahl mit konstanter Frequenz und Amplitude durch den Raum gesendet. Nach einem Ausbreitungsweg von mehreren Metern wird er wieder mit einem Ultraschallmikrofon aufgenommen (Abb. 1). Wenn sich dem Ultraschallfeld das Schallfeld einer Audioschallquelle überlagert, kommt es zu einer Modulation der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $\Delta c$  der Ultraschallwelle [1]. In



**Abbildung 1:** Überlagerung von Audioschall und Ultraschall: der Audioschall bewirkt eine Modulation des Ultraschallstrahls.

der spektralen Auswertung des aufgenommenen Ultraschallstrahls sind beidseitig vom Trägersignal mit einer Frequenz von 40 kHz Seitenbänder im Abstand von 1 kHz zu erkennen, der Frequenz des verwendeten Audiosignals (Abb. 2). Der Modulationsgrad des Ultraschalls ist un-



**Abbildung 2:** Amplitudenspektrum des aufgenommenen Signals: Im Abstand von 1 kHz – der Frequenz des Audiosignals – sind Seitenbänder zum Ultraschallsignal zu erkennen. Pegel des Audiosignals 86 dB.

abhängig vom absoluten Pegel des Ultraschalls und proportional vom Pegel des Audioschalls.

### Physikalische Hintergründe

Die Modulation des Ultraschallstrahls basiert darauf, dass der überlagerte Audioschall Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Ultraschalls ausübt: es er-

gibt sich für ein kleines Volumen entlang des Ultraschallpfades folgende Beziehung [2]:

$$\Delta c(x, t) = \frac{2 \cos(\alpha(x)) + \gamma - 1}{2\rho_0 c_0} \cdot p_a(x, t) \quad (1)$$

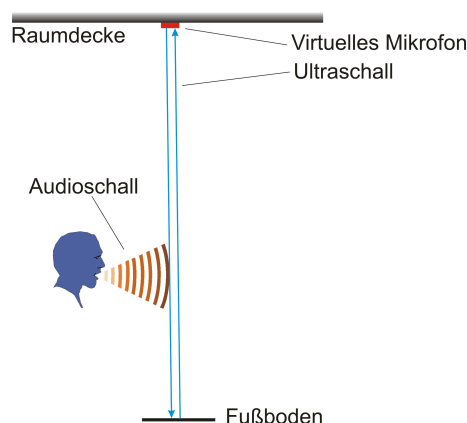
Darin enthalten ist der Winkel  $\alpha(x)$ , der den jeweils herrschenden Winkel zwischen den Ausbreitungsrichtungen zwischen Audio- und Ultraschall in Abhängigkeit von der lokalen Position  $x$  beschreibt.

Um einen Ausdruck für die resultierende Phasenverschiebung  $\Delta\phi(t)$  am Mikrofon zu erhalten, muss (1) über den Ausbreitungsweg  $0 \dots L$  des Ultraschalls integriert werden [3]:

$$\Delta\phi(t) = \int_0^L \frac{1}{c_0 + \Delta c(x, t + \frac{x}{c_0})} dx - \frac{L}{c_0} \quad (2)$$

### Reflektierende Wand

Die Schallerfassung mittels Ultraschall bietet den Vorteil, dass am Ort der Schallaufnahme selbst keine technologischen Einrichtungen, wie Membrane o.Ä. vorhanden sind. Einerseits besteht die Möglichkeit, in Analogie zum Versuchsaufbau nach Abbildung 1 den Ultraschall als schallerfassende physikalische Größe entlang einer Gerade durch den Raum zu senden. Eine andere besonders praktische Anordnung wird in Abbildung 3 beschrieben.

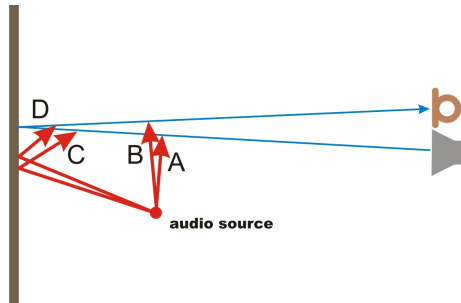


**Abbildung 3:** Mögliche praktische Anwendung des Virtuellen Mikrofons: Der Ultraschall wird von der Raumdecke abgestrahlt, auf dem Fußboden reflektiert und wieder aufgenommen.

Da die Reflektion des Ultraschalls auf einer reflektierenden Ebene ausgenutzt wird, können der Ultraschallsender und das Ultraschallmikrofon in einem gemeinsamen

technischen Gerät unter der Raumdecke montiert werden. Als reflektierende Ebene können dabei der Fußboden, eine Arbeitsplatte oder die Oberfläche eines Rednerpultes dienen.

In dieser Anordnung kommt es zu einer mehrfachen Beeinflussung des Ultraschallstrahls durch den Audioschall (Abb. 4). Einerseits überlagert er sich auf direk-



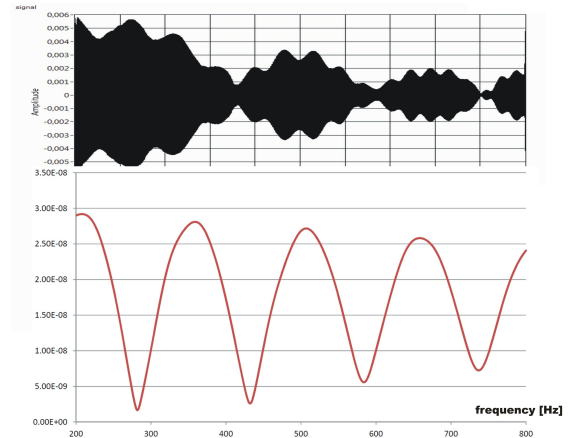
**Abbildung 4:** An einer reflektierenden Ebene wirkt der Audioschall vier Mal auf den Ultraschallstrahl ein.

tem Ausbreitungsweg sowohl dem hin- als auch dem zurücklaufendem Ultraschall (A und B). Aber auch der Audioschall selbst wird an der Ebene reflektiert, so dass auch der reflektierte Audioschall auf den hin- und zurücklaufenden Ultraschall Einfluss nimmt (C und D). Jede dieser vier Überlagerungen hat andere zeitliche und örtliche Charakteristik, die von der räumlichen Position der Audioschallquelle in Bezug auf den Ultraschallstrahl und die reflektierende Ebene abhängt. Je nach geometrischer Anordnung und Frequenz kann es zu einer Verstärkung oder auch zu einer Abschwächung der Modulation des Ultraschalleffektes kommen.

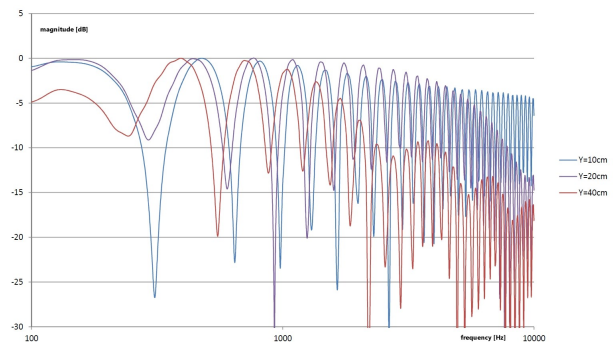
## Messungen

Für eine experimentelle Untersuchung wurde der Ultraschall über eine Entfernung von  $3,8\text{ m}$  auf eine reflektierende Ebene mit den Maßen  $1\text{ m} \times 0,5\text{ m}$  gesendet und in der Nähe des Transmitters wieder erfasst. Ein Dodekaeder wurde  $0,8\text{ m}$  vor der Ebene in einer Entfernung von  $0,5\text{ m}$  vom Ultraschallstrahl platziert und mit einem Audiosweep von  $200\text{ Hz}$  bis  $800\text{ Hz}$  angesteuert. In Abbildung 5 ist das durch das Virtuelle Mikrofon erfasste Sweep-Signal oben dargestellt. Deutlich sind für bestimmte Frequenzen Auslöschungen zu erkennen. Darunter ist der berechnete Effektivwert der Modulation für diese geometrische Anordnung dargestellt. Für die drei rechts liegenden Auslöschungen (es sind eigentlich nur Abschwächungen) ist eine gute Übereinstimmung mit der Messung zu erkennen. Das die berechnete Abschwächung bei  $280\text{ Hz}$  nicht gemessen werden konnte, ist darauf zurück zu führen, dass die Dimensionen der reflektierenden Ebene bei dieser Frequenz kleiner als die Audiowellenlänge ist.

Für verschiedene Abstände  $Y$  der Audioquelle vom Ultraschallstrahl ist in Abbildung 6 der Frequenzgang der Modulation des Ultraschallstrahls dargestellt. Die bevorstehenden praktischen Untersuchungen werden zeigen, inwiefern sich der zu erkennende Kammfiltereffekt auf die



**Abbildung 5:** Durch das Virtuelle Mikrofon aufgenommene Sweepsignal (oben) und der berechnete Effektivwert über der Frequenz (unten).



**Abbildung 6:** Frequenzcharakteristik des Virtuellen Mikrofons an einer reflektierenden Ebene für verschiedene Quellabstände  $Y$  (hier bei einem Abstand von  $1,50\text{ m}$  beispielsweise zu einem reflektierenden Fußboden).

Sprachqualität und Verständlichkeit eines Sprechers auswirkt.

## Literatur

- [1] T. Merkel. How to Receive Sound through Ultrasound: The Interaction between Ultrasonic and Audio Waves in the Air. ICSV 16, Krakow, 2009
- [2] L. Naugolnykh, K. A. Ostrovsky. Nonlinear Wave Processes in Acoustics. Cambridge University Press, 1998.
- [3] T. Merkel, H.-G. Lühmann, T. Ritter und J. Lühmann. Virtuelle Mikrofone: Anwendung von Ultraschall zum Erfassen von Audioschall. DAGA2011, Düsseldorf 2011.
- [4] T. Merkel, H.-G. Lühmann, T. Ritter und J. Lühmann. Using Ultrasonic Waves to Receive Audio Sound. ICU2011 Gdansk, Poland.