

# Virtuelle Mikrofone: Anwendung von Ultraschall zum Erfassen von Audioschall

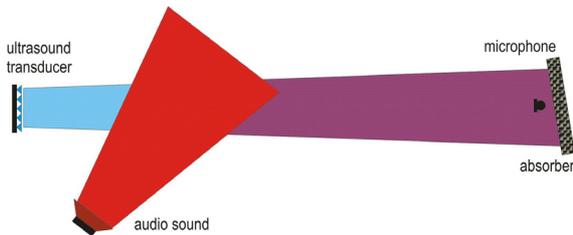
Tobias Merkel<sup>1</sup>, Hans-Gerd Lühmann<sup>2</sup>, Tom Ritter<sup>1</sup>, Jan Lühmann<sup>2</sup>

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

2011/03/23

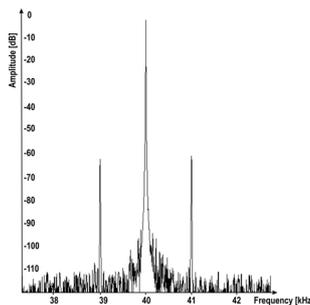
## Einleitung

Gerichteter Ultraschall mit konstanter Frequenz und Amplitude wird durch den Raum gesendet und nach einem Ausbreitungsweg von mehreren Metern 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]. Dieses ist in der spektralen Auswertung des aufgenommenen



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

menen Ultraschallstrahls zu sehen (Abb. 2): Beidseitig vom Trägersignal mit einer Frequenz von 40 kHz sind Seitenbänder im Abstand von 1 kHz zu erkennen, der Frequenz des verwendeten Audiosignals. Der Modulation



**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.

onsgrad des Ultraschalls ist unabhängig vom absoluten Pegel des Ultraschalls und proportional vom Pegel des Audioschalls.

## Physikalische Hintergründe

Zwei unterschiedliche physikalische Prinzipien führen zu der Modulation des Ultraschalls [2]:

1. Partikelbewegung. Da beide überlagerten Schallwellen von denselben Gasmolekülen transportiert werden, führt der Audioschall zu einer Modulation der Phasenlage  $\Delta\phi$  des Ultraschalls, welche auch als Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $\Delta c_m$  ausgedrückt werden kann:

$$\Delta c_m = v_a \cos \alpha = \frac{\cos \alpha}{\rho_0 c_0} \cdot p_a \quad (1)$$

(mit  $v_a$  ... Schallschnelle und  $p_a$  ... Schalldruck der Audiowelle,  $\alpha$  ... Winkel, in dem sich Ultra- und Audioschall kreuzen)

2. Gaszustand. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Ultraschalls ist weiterhin vom herrschenden Gaszustand, also auch vom momentanen Audioschalldruck, abhängig:

$$c(p_a) = c_0 + \frac{(\gamma - 1)}{2\rho_0 c_0} \cdot p_a \quad (2)$$

Beide Effekte wirken simultan und führen zu einem Ausdruck für die Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $\Delta c$  des Ultraschalls in Abhängigkeit des herrschenden Schalldruckes  $p_a$ :

$$\Delta c(p_a) = \Delta c_m + \Delta c_p = \frac{2 \cos(\alpha) + \gamma - 1}{2\rho_0 c_0} \cdot p_a \quad (3)$$

(gültig für quasistationären Zustand bezüglich des Audiodrucks, d.h. innerhalb kleiner Volumina mit homogenem  $p_a$ )

Entlang des Ausbreitungsweg  $L$  von der Ultraschallquelle bis zum Ultraschallmikrofon ist der Winkel  $\alpha$  zwischen den Ausbreitungsrichtungen beider Schallfelder variabel, außerdem ist der Audioschalldruck  $p_a$  sowohl orts- als auch zeitabhängig:

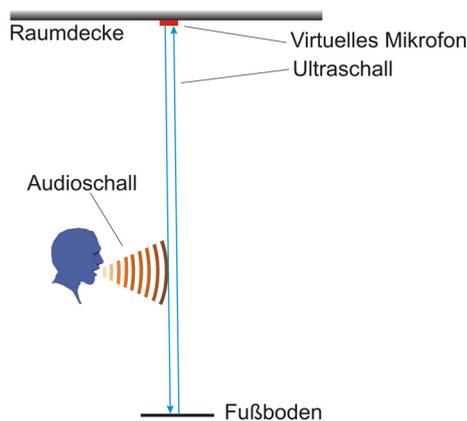
$$\Delta c(x, t) = \frac{2 \cos(\alpha(x)) + \gamma - 1}{2\rho_0 c_0} \cdot p_a(x, t) \quad (4)$$

Um einen Ausdruck für die resultierende Phasenverschiebung  $\Delta\phi(t)$  am Mikrofon zu erhalten, muss (4) über den Ausbreitungsweg  $0 \dots L$  des Ultraschalls integriert werden [3]:

$$\Delta\phi(t) = \int_0^L \frac{1}{c_0 + \Delta c(x, t + \frac{x}{c_0})} dx - \frac{L}{c_0} \quad (5)$$

## Praktische Anwendung

Die Schallerfassung mittels Ultraschall bietet den Vorteil, dass am Ort der Schallaufnahme selbst keine technologischen Einrichtungen, wie Membrane o.Ä. vorhanden sind. Eine mögliche praktische Anwendung beschreibt Abbildung 3. Da die Reflektion des Ultraschalls auf dem Fußboden ausgenutzt wird, können der Ultraschallsender und das Ultraschallmikrofon gemeinsam unter der Raumdecke montiert werden.

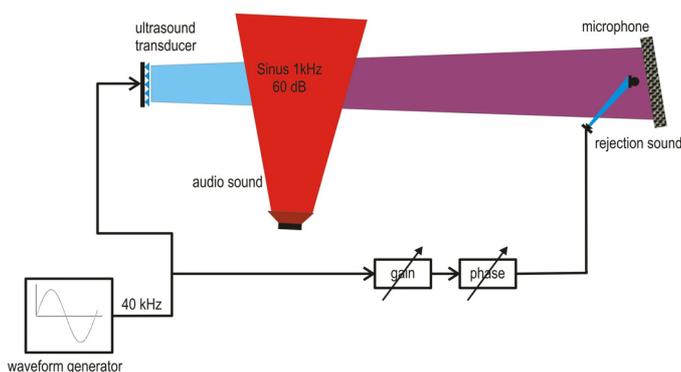


**Abbildung 3:** Mögliche praktische Anwendung des Virtuellen Mikrofons: Der Ultraschall wird von der Raumdecke abgestrahlt, auf dem Fußboden reflektiert und wieder aufgenommen.

### Technische Herausforderung

Die beschriebenen Modulationseffekte sind sehr klein. Um auch Audiowellen geringer Amplitude zu erfassen, muss der Ultraschall mit einem sehr hohen Dynamikbereich erfasst werden (vergleiche dazu Abb. 2). Insbesondere kostengünstige Ultraschallmikrofone können dieser Anforderung nicht gerecht werden und bilden somit einen Flaschenhals im Schallerfassungssystem.

Die auszuwertende Information über den Audioschall ist ausschließlich in den Seitenbändern des US-Trägers enthalten. Damit kann der Ultraschallträger vor Passieren des US-Mikrofons unterdrückt werden, ohne dass Informationen verloren gehen. Die Abbildung 4 demonstriert das prinzipielle Vorgehen: Ein zusätzlicher Ultraschallwandler sendet unmit-

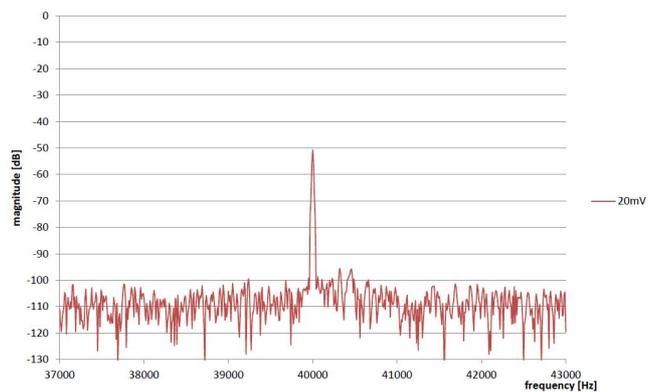


**Abbildung 4:** Kompensation des Trägersignals unmittelbar vor der Erfassung durch das US-Mikrofon.

telbar vor dem empfangenden US-Mikrofon ein Signal aus, das die gleiche Frequenz wie der US-Träger hat, jedoch in der Phasenlage und Amplitude so ausgeregelt ist, dass der US-Träger vor dem Mikrofon akustisch unterdrückt wird.

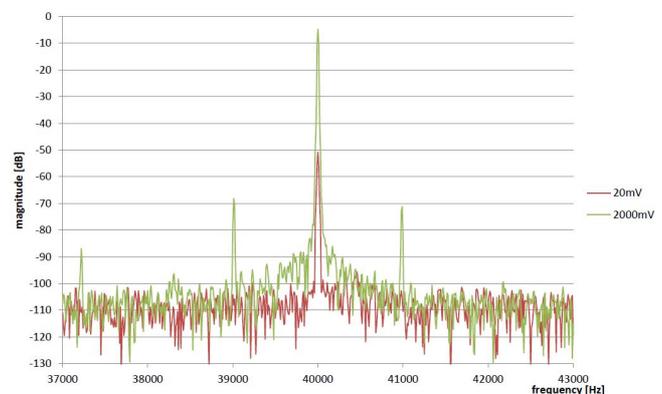
Die Abbildung 5 zeigt das Amplitudenspektrum des empfangenen Ultraschalls. Der US-Träger wird um fast 50 dB unterdrückt. Die Modulation durch den Audioschalls ist so gering, dass die Seitenbänder im Rauschen nicht zu erkennen sind.

Durch Anheben des Pegels sowohl des ursprünglichen Ultraschallsenders als auch des Kompensationsstrahlers um 40 dB



**Abbildung 5:** Amplitudenspektrum des empfangenen Ultraschalls mit Kompensation des Trägers.

entsteht das Spektrum nach Abbildung 6. Die Amplitude des



**Abbildung 6:** Amplitudenspektrum des empfangenen Ultraschalls: Die Trägerkompensation erlaubt ein Anheben des US-Pegels, so dass auch eine geringe Modulation erfassbar wird.

(um 50 dB kompensierten) Trägers steigt entsprechend an, jetzt sind außerdem die Seitenbänder im Spektrum erschienen, die durch die Modulation durch das Audiosignal entstanden sind. Dieses Vorgehen erlaubt auch das Erfassen von schwachen Audioschallpegeln bei einem eingeschränkten Dynamikbereich der Empfangseinheit.

Schon sehr kleine Temperaturschwankungen entlang des Ausbreitungsweges des Ultraschallträgers verursachen eine quasistatische Phasenverschiebung am Ultraschallmikrofon. Ein Regelkreis ist notwendig, der die Phase des Kompensationsstrahls entsprechend mitführt und so eine kontinuierliche Trägerkompensation ermöglicht.

### 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. Virtuelle Mikrofone – Erfassung von Audioschall mittels Ultraschall, DAGA2010, Berlin 2010
- [4] Y. Tsuchiya, T. Watanabe. Parametric receiving array as a practical sound receiver. Jap. J. of Applied Physics, 25:79-81, 1986.