

## Virtuelle Mikrofone:

### Präzise Demodulation von Audioschall aus phasenmoduliertem Ultraschall

T. Ritter<sup>1</sup>, T. Merkel<sup>1</sup>, H.-G. Lühmann<sup>2</sup> und J. Lühmann<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Beuth Hochschule für Technik Berlin, 13353 Berlin, E-Mail: ritter@beuth-hochschule.de

<sup>2</sup> Lütronic Elektroakustik GmbH, 13403 Berlin, E-Mail: info@luetronic.de

#### Einleitung

Im Forschungsprojekt "Virtuelle Mikrofone" an der Beuth-Hochschule für Technik Berlin sollen Audiomikrofone durch ein System bestehend aus Ultraschallsendern und -empfängern ersetzt werden. Dabei wird das Prinzip genutzt, dass Ultraschallwellen bei Überlagerung mit Audioschall phasenmoduliert werden. Aufgrund der physikalischen Zusammenhänge treten nur geringe Veränderungen der Phasenwinkel auf. Im Mittelpunkt der Untersuchung steht neben der Erzeugung einer stabilen Trägerfrequenz zur Ultraschallerzeugung und der Bündelung der Schallwellen am Empfänger die präzise Demodulation des phasenmodulierten Signals. Dazu wurden verschiedene Methoden zur Demodulation phasenmodulierter Signale verglichen. Im Vordergrund steht dabei die maximal erreichbare Genauigkeit, die unter den gegebenen Bedingungen einer geringen Veränderung des Phasenwinkels und relativ schwachem additiven Rauschen erzielt werden kann. Durch den geplanten Einsatz von digitalen Signalprozessoren zur Demodulation am Ultraschallempfänger bildet die benötigte Rechenleistung der Verfahren nur ein untergeordnetes Kriterium zu Bewertung der Demodulationsalgorithmen.

#### Physikalisches Prinzip

Wird Ultraschall in der Luft von anderen Schallquellen überlagert führt dies zu einer Modulation des Ultraschalls [1 bis 6]. Die Modulation wird durch zwei unterschiedliche Vorgänge hervorgerufen.

Da der Ultraschall und der Audioschall von denselben Partikeln in der Luft transportiert wird, verändert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Ultraschalls in Abhängigkeit des Audioschalls. Dadurch wird der Ultraschall phasenmoduliert. Dabei ist der Modulationsgrad abhängig von dem Winkel, mit dem die beiden Wellen aufeinandertreffen.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen in der Luft ist abhängig von der Luftdichte. Da der Audioschall die Luftdichte periodisch ändert, verändert sich auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Ultraschalls. Damit wird der Ultraschall ebenfalls phasenmoduliert, dabei ist hier die Ausbreitungsrichtung nicht relevant. Der Modulationsgrad ist durch die relative geringe Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Luftdichte ebenfalls nur minimal.

#### Aufbau

Die geplante Anwendung eines Systems mit „virtuellen Mikrofonen“ ist in Abbildung 1 skizziert. Sowohl die Ultraschallsender als auch der Empfänger sind an der Raumdecke angebracht. Die gesendeten Ultraschallwellen werden von einer Fläche reflektiert, entweder am Fussboden oder an einer Tischplatte. In den bisherigen Messungen und Simulation wurde der Rückweg nicht berücksichtigt.

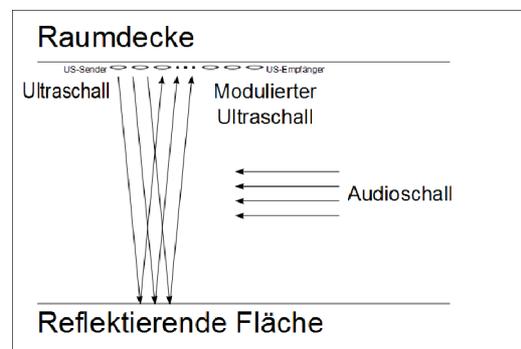


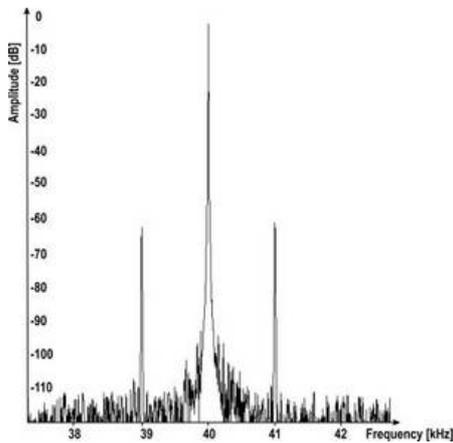
Abbildung 1: Skizze der geplanten Implementierung eines „Virtuellen Mikrofonen“ mittels Ultraschall

#### Voraussetzungen

Die Übertragungstrecke des Ultraschalls wird mit 40 kHz betrieben. Aus Messungen ergibt sich ein Modulationsgrad für die Simulationen mit 0.001. Durch die kurze Übertragungstrecke wird ein Rauschen von weniger als 80 dB dem gesendeten Signal hinzugefügt. Die Bandbreite der zu demodulierenden Sprachsignale soll 10 kHz betragen.

Wie in Abbildung [2] gezeigt weist der modulierte Ultraschall eine sehr hohe Dynamik auf, die am Empfänger verarbeitet werden muss. Um die relative schwachen Veränderungen des Ultraschalls durch den Audioschall auswerten zu können muss der Ultraschall mit möglichst hoher Amplitude gesendet werden. Bei einem Modulationsgrad in der Größenordnung von  $10^{-3}$  liegt die maximale Amplitude des Audioschalls bereits 60 dB unter der des Ultraschalls.

Um den Audioschall über dem Niveau des Rauschens zu halten, muss die Stärke des Ultraschalls 60 dB plus der gewünschten Signalqualität der demodulierten Sprache betragen. Bei den Messungen wurde mit maximalen 120 dB Ultraschallsignalpegel am Empfänger gearbeitet. Bei 80 dB Rauschen und 60 dB Modulationsgrad sind liegt das Nutzsignal 20 dB über dem Rauschen. Der Pegel des Audiosignals betrug 80 dB.



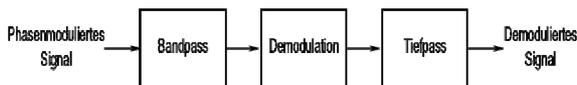
**Abbildung 2:** Gemessenes Spektrum des empfangenen, mit 1 kHz Sinus-modulierten 40 kHz Ultraschalls (Quelle: [7])

## Simulation

Die verschiedenen im nächsten Abschnitt aufgeführten Demodulationstechniken wurden in Matlab simuliert. Dazu wurde eine Abtastrate von 1 MSPS angenommen. Als Testvektoren wurden sinusförmige Eingangssignale mit Frequenzen zwischen 1 und 10 kHz verwendet.

## Demodulation

Abbildung [3] zeigt das Blockschaltbild eines allgemeinen Demodulators von phasenmodulierten Signalen.



**Abbildung 3:** Blockschaltbild eines allgemeinen Demodulators

Der Durchlassbereich des Bandpasses muss der Carson-Regel folgend mindestens das Doppelte der Quellenbandbreite betragen. Da der Tiefpass im Basisband mit dem demodulierten Signal arbeitet muss die Breite des Durchlassbereichs mindestens der Bandbreite des Quellensignals entsprechen.

Die Demodulation von phasenmodulierten Signalen kann direkt im Zeitbereich oder in der Frequenzebene durchgeführt werden.

Im Zeitbereich arbeiten zum Beispiel die kontinuierlichen Verfahren, die entweder den Betrag der Differenz oder das Produkt des modulierten Empfangssignals mit dem Trägersignal unter Verwendung eines Tiefpasses auswerten. Der Rechenaufwand beider Varianten ist verhältnismäßig gering.

Im Frequenzbereich arbeitet die Hilberttransformation, die aus dem Empfangssignal und einer verzögerten Version des Empfangssignals das so genannte analytische Signal bildet, welches wiederum zur Bestimmung des momentanen Phasenwinkel genutzt werden kann. Dabei muss wegen der Transformation in den Frequenzbereich und zurück das Signal periodisch sein. Die erzielten Ergebnisse lagen über der erreichbaren Qualität der kontinuierlichen Methoden. Unter den gegebenen Bedingung konnte durch die Verwendung von Fenstern auf das Eingangssignal Blöcke, das bedeutet zeitbegrenzte Signale, gebildet werden, deren

Hilberttransformation vergleichbare Ergebnisse nach der Demodulation bieten konnte. Die erzielten Signal-Rauschabstände des demodulierten Signals wurden durch die Fensterung nur geringfügig beeinträchtigt.

Die Hilberttransformation kann durch unterschiedliche Näherungsmethoden im Zeitbereich direkt bestimmt werden. Dabei kann mit geeigneten Methoden im Zeitbereich der Hilberttransformation im Frequenzbereich vergleichbar gute Ergebnisse erreicht werden, ohne die Signale in den Frequenz- und zurück in den Zeitbereich transformieren zu müssen.

Weitere Demodulationsvarianten im Zeitbereich beruhen auf Polynomnäherungen oder minimierten die Summe der quadratischen Fehler. Bei zum Teil erheblich höherem Rechenaufwand konnte aber keine weitere Qualitätsverbesserung des demodulierten Signals beobachtet werden.

## Auswertung

In der Untersuchung wurde bestätigt, dass ein in der Luft durch Audioschall moduliertes Ultraschallsignal mit einem System bestehend aus einem Analog/Digital-Konverter und einem DSP in Echtzeit demoduliert werden kann. Die Auswahl des Demodulationsverfahrens für das phasenmodulierte Signal hat Einfluss auf die Qualität des demodulierten Signals, verschiedene Verfahren können gleich gute Ergebnisse unter unterschiedlichen Ressourcenaufwand erreichen. Die Nachbildung einer Hilberttransformation mit Hilfe eines Hilbert-Bandpasses als FIR Filter in Zeitbereich liefert von den untersuchten Verfahren die besten Ergebnisse bei vertretbarem Aufwand.

Diese Projekt wird gefördert durch das BMBF in Rahmen des „Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)“.

## Literatur

- [1] T. Merkel. Receiving Sound through Ultrasound - Ways to a New Kind of Microphones. *Internoise 2010*, Lisbon 2010, Portugal
- [2] T. Merkel. Virtuelle Mikrofone - Erfassung von Audioschall mittels Ultraschall. *DAGA 2010*, Berlin 2010, ISBN 978-3-9808659-8-2
- [3] T. Merkel. Überlagerung von Ultraschall und Audioschall: Neue Wege zur Schallerfassung in Forschungsbericht, Beuth Hochschule für Technik Berlin, Berlin 2009, ISBN 978-3-938576-20-5
- [4] T. Merkel. How to Receive Sound through Ultrasound: The Interaction between Ultrasonic and Audio Waves in the Air. *ICSV 16*, Krakow, 2009.
- [5] T. Merkel. The Interaction between Ultrasonic and Audio Waves in Air. *DAGA 2009*, Rotterdam, 2009.
- [6] T. Merkel. Die Umkehrung parametrischer Schallabstrahlung. *DAGA 2008*, Dresden, 2008.
- [7] T. Merkel. Virtuelle Mikrofone, URL: <http://prof.beuth-hochschule.de/merkel/forschung/>