

# Virtuelle Mikrofone: Echtzeit-Demodulation von Audioschall aus phasenmoduliertem Ultraschall

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

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

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

## Einleitung

Das Forschungsprojekt "Virtuelle Mikrofone" an der Beuth-Hochschule Berlin hat sich zum Ziel gesetzt, Audiomikrofone durch ein System bestehend aus Ultraschallsendern und Ultraschallempfängern zu ersetzen. Die vom Sender ausgesendeten Ultraschallwellen werden bei Überlagerung mit Audioschall phasenmoduliert, gegebenenfalls reflektiert, und danach von einem Ultraschallempfänger aufgenommen. Dadurch erübrigt sich die Notwendigkeit, in der unmittelbaren Umgebung der Schallquelle ein Mikrofon zu platzieren. Aufgrund der physikalischen Zusammenhänge sind die dabei auftretenden Veränderungen der Phasenwinkel nur gering. Um eine Demodulation des phasenmodulierten Signals gewährleisten zu können muss eine stabile Trägerfrequenz mit geringem Phasenrauschen zur Verfügung stehen.

Der Fokus der hier vorgestellten Untersuchungen liegt in der präzisen Demodulation des phasenmodulierten Ultraschallsignals und der sich anschließenden Signalverarbeitung zur Verbesserung der Qualität des demodulierten Signals.

Hierfür soll das verwendete Echtzeitsystem skizziert und die Schritte erläutert werden, die zur Verarbeitung des empfangenen Ultraschallsignals notwendig sind. Weiterhin sollen die Fragen, die durch die optimierte Hardware aufgeworfen werden, aufgezeigt und Lösungsansätze vorgestellt werden.

## Physikalisches Prinzip

Eine Überlagerung von Ultraschall in der Luft mit anderen Schallwellen verursacht eine Modulation des Ultraschalls [1 bis 5]. Diese Modulation wird durch zwei unterschiedliche physikalische Prinzipien hervorgerufen.

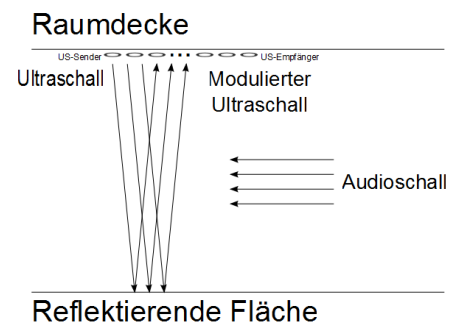
Der erste Effekt wird durch die Überlagerung der Schallwellen verursacht. Der Ultraschall und der Audioschall werden von denselben Partikeln in der Luft transportiert und damit verändert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Ultraschalls in Abhängigkeit des Audioschalls. Durch die Veränderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit wird der Ultraschall phasenmoduliert. Der Modulationsgrad ist hier abhängig von dem Winkel, mit dem die beiden Wellen aufeinandertreffen.

Der zweite Modulationsmechanismus beruht auf der Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Ultraschalls infolge der Beeinflussung der Luftdichte durch den Audioschall. 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 die -empfänger sollen an der Raumdecke angebracht werden. Die gesendeten Ultraschallwellen werden von einer Fläche reflektiert, entweder am Fussboden oder an einer Tischplatte. In den bisherigen Messungen und Simulationen wurde der Rückweg und somit eine eventuell weitere Modulation nicht berücksichtigt.



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

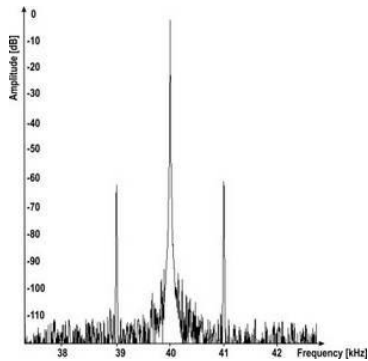
## Voraussetzungen

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

In Abbildung 2 sind ist das gemessene Empfangsspektrum für ein 40 kHz Ultraschallsignal mit einem 1 kHz Sinussignal als modulierendes Audiosignal dargestellt. Um die relativ 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. Diese hohe Dynamik muss dann am Empfänger auch verarbeitet werden können. Bei den Messungen wurde mit maximalen 120 dB Ultraschallpegel am Empfänger gearbeitet. Bei 80 dB Signal-Rausch-Abstand 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: [2])

## Demodulation

Die Demodulationstechniken aus [3] wurden in Matlab simuliert. Dazu wurde eine Abtastrate von 1 MSPS angenommen. Als Testvektoren wurden sinusförmige Eingangssignale mit einer Frequenz zwischen 1 und 10 kHz verwendet. Mit einem geeigneten Eingangsbandpass und Ausgangstiefpass konnten so je nach Demodulationsverfahren zwischen 30 und 33 dB Signal-Rauschabstand erreicht werden. Als Referenz verwendet wurde das kontinuierliche Verfahren, bei dem Betrag der Differenz des modulierten Empfangssignals mit dem Trägersignal unter Verwendung eines Tiefpasses ausgewertet.

Leicht bessere Ergebnisse können durch eine Methode zur Demodulation erzielt werden, die eine Hilberttransformation im Zeitbereich mit Hilfe eines Filters nachbildet.

Wird als Audiosignal Sprache an Stelle eines Sinussignals verwendet, verringert sich die erreichbare Audiosignalqualität der Demodulation. Infolge unterschiedlicher Amplitudendichteverteilung bei konstantem Rauschanteil wird dieser relativ stärker. Bei einem Sprachsignal aus einer Testsuite [6] betrug das Signal-Rausch-Verhältnis 21.5 dB.

## Rauschbefreiung

Infolge der vergleichsweise geringen erzielbaren Audiosignalqualität nach der Demodulation mussten weitere Maßnahmen zur Verbesserung der erwogen werden. Innerhalb des Projektes wurden Wiener Filter, Spektrale Subtraktion und Wavelet Denoising untersucht. In Bezug auf das Signal-Rauschverhältnis konnte mit Spektraler Subtraktion das beste Ergebnis mit 8.9 dB Gewinn von 21.5 auf 30.4 dB bei Sprache erzielt werden. Wavelet Denoising konnte nur einen relativ geringen Gewinn von 1.8 dB in Bezug auf das SNR erbringen. Dabei stellte sich die Beschreibung der Audiosignalqualität durch die das Signal-Rauschverhältnis als unzureichend heraus. Mittels eines Programmes zur objektiven Bewertung subjektiver Audiosignalqualität (PEMO-Q[6]) konnte eine Vergleichbarkeit der Methoden zur Rauschbefreiung

gewährleistet werden. Dabei wurde die Audiosignalqualität eines mittels Wavelet Denoising verarbeiteten Signals vergleichbar bewertet wie ein Signal, dessen SNR 36 dB beträgt.

## Implementierung

Die Echtzeitdemodulation wurde auf einem 16 Bit Festkomma-DSP implementiert, dessen Taktfrequenz 600 MHz beträgt. Damit können zurzeit im Speicher abgelegte 16 Bit breite Testsignale in Echtzeit mit geringerer Signalqualität demoduliert werden. Als ein nächster Schritt soll ein 18 Bit ADC mit 1 MSPS eingebunden werden und die Demodulation auf 18 Bit erweitert 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 erzielbare Audiosignalqualität kann durch geeignete Maßnahmen verbessert werden, verbleibt insgesamt aber trotz Verbesserungen auf vergleichsweise niedrigem Niveau.

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

## Literatur

- [1] T. Merkel, H.-G. Lühmann, T. Ritter und J. Lühmann, Using Ultrasonic Waves to Receive Audio Sound, International Congress on Ultrasonics, Gdansk 2011, Poland
- [2] T. Merkel, H.-G. Lühmann, T. Ritter und J. Lühmann, Virtuelle Mikrofone: Anwendung von Ultraschall zum Erfassen von Audioschall, DAGA 2011, Düsseldorf, 2011, ISBN: 978-3-939296-02-7
- [3] T. Ritter, T. Merkel, H.-G. Lühmann und J. Lühmann, Virtuelle Mikrofone: Präzise Demodulation von Audioschall aus phasenmoduliertem Ultraschall, DAGA 2011, Düsseldorf, 2011, ISBN: 978-3-939296-02-7
- [4] T. Merkel, Receiving Sound through Ultrasound - Ways to a New Kind of Microphones. Internoise 2010, Lisbon 2010, Portugal
- [5] T. Merkel, Virtuelle Mikrofone - Erfassung von Audioschall mittels Ultraschall. DAGA 2010, Berlin 2010, ISBN 978-3-9808659-8-2
- [6] Peter Kabal, TSP Speech Database, McGill University, Database Version: 1.0 (2002-09-02), Document Version: 2002-09-04
- [6] Huber, R. and Kollmeier, B. (2006). "PEMO-Q—A new Method for Objective Audio Quality Assessment using a Model of Auditory Perception." IEEE Transactions on Audio, Speech and Language processing, Vol. 14, no. 6, pp. 1902 - 1911.