

Hörbarmachung von Ultraschallsignalen

Peter Holstein¹, Nicki Bader¹, Andreas. Tharandt¹, Ronald. John¹, Sebastian Uziel², David Januszko³,
Tino Hutschenreuther²

¹ SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH., 06112 Halle (Saale), E-Mail: p.holstein@sonotec.com

² IMMS, Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik Systeme, 98693 Ilmenau

³ Technische Universität Ilmenau, 98693 Ilmenau

Einleitung

Ultraschallsignale werden oft in den hörbaren Bereich transformiert. Die hörbare Information dient der akustischen Überwachung von Prüfabläufen in der Instandhaltung. Anwendungsbeispiele aus dem Maschinenbereich sind Lagerdiagnosen, die Überwachung von Schmierzuständen oder die akustische Bewertung von Leckagen. Im bioakustischen Bereich ist es von Interesse, einen hörbaren Eindruck der Akustik, die sich bei höheren Frequenzen abspielt, zu bekommen. Beispiel hier sind Fledermausdetektoren. Diese haben mit den Ultraschallprüfgeräten für technische Anwendungen gemein, dass die Ultraschallsignale nur schmalbandig um eine Trägerfrequenz registriert werden. Die Hörbarmachung erfolgt durch „Heruntermischen“ mittels Heterodynverfahren ([1,2,3], Abb. 1). Diese Methode ist verbreitet und lässt sich mit einfachen Mitteln analog realisieren. Ein Nachteil dieser Herangehensweise liegt darin, dass Ultraschallsignale, die in einem breiten Frequenzbereich vorliegen, nicht adäquat bewertet werden können, da wesentliche Frequenzinhalte verloren gehen. Ultraschallsignale, die mit entsprechenden Abstratern und breitbandigen Sensoren erfasst werden, bieten das Potenzial, den gesamten physikalisch relevanten Frequenzbereich einer Hörbarmachung zu unterziehen. Die Charakteristik des Zeitverlaufs soll dabei erhalten bleiben. Im Beitrag wird die Realisierung mittels des Vocoder- und Filterbankverfahrens mit großem Skalierungsfaktor vorgestellt. Die Unterschiede der Verfahren bezüglich des Höreffekts und des Informationsgehaltes werden an Test- und Beispielsignalen verdeutlicht.

Stand der Technik

Ultraschallprüftechnologien spielen in der technischen Diagnose eine immer größere Rolle. Gemeint sind hier Technologien, die den von Prozessen selbst erzeugten Ultraschall nutzen. Die mit „aktiv“ erzeugten Signalen arbeitenden Ultraschallverfahren der zerstörungsfreien Materialprüfung werden nicht vom Inhalt des Beitrags berührt. Der Ultraschall kann prinzipiell durch mechanische Reibung, impulsförmige Anregungen, Materialdeformationen, und Strömungsturbulenzen entstehen. Rissvorgänge und elektrische Entladungen erzeugen ebenfalls Ultraschall. Völlig analog zur Akustik im Hörbereich, kann der Ultraschall als Quelle von Information genutzt werden. Im industriellen Bereich (vor allem in der

Instandhaltung) werden traditionell einfache Ultraschallverfahren eingesetzt. Ultraschall kann auch gezielt mit geeigneten Quellen erzeugt werden. Beispielsweise kann die Dichtheit von Kabinen oder anderen Volumina mit Ultraschall überprüft werden. Eine weitere Art von Ultraschallquellen findet sich im biologischen Bereich. Fledertiere (Ordnung Chiroptera) und andere erzeugen aktiv Ultraschall um sich im Raum zu orientieren oder Objekte zu orten. Diese Art von Quellen eignet sich gut, um die Problemstellung zu verstehen und die Verfahrensentwicklung zu verifizieren. Außerdem basieren die einfachen Fledermausdetektoren und die Ultraschallprüfgeräte auf den gleichen Funktionsprinzipien. Auf die „normale“ mathematische Bewertung der nicht komprimierten Signale soll hier nicht eingegangen werden. Aufgrund der technischen Entwicklungen sind hier neue Ansätze möglich [4]. Eine Bewertung von Ultraschallsignalen durch das menschliche Gehör (das bedeutet, dass auch die Hörerfahrung und gewissen psychoakustische Aspekte eine große Rolle spielen) ist von großer technischer Bedeutung und ergänzt die Bewertung von Zahlenwerten. Teilweise ist auf diese Weise eine einfache (qualitative) Bewertung möglich und zielführend. Allerdings ist die Methode stark vereinfachend und reduzierend. Die Charakteristik der ursprünglichen Signale wird dabei u. U. stark verfälscht. Es ist demnach von großem technischen Interesse Ultraschallsignale geeignet in hörbare Frequenzen zu überführen.

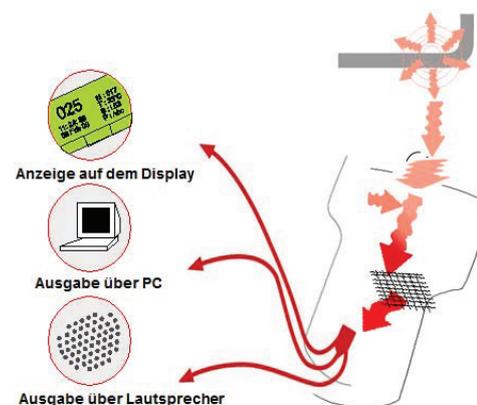


Abbildung 1: Funktionsprinzip der Ultraschallumwandlung mit dem Heterodynverfahren [1]

Das Heterodynverfahren vernachlässigt den spektralen Inhalt komplett. Lediglich die Modulation des Signals um die Trägerfrequenz bleibt erhalten. Dies wird z. T. für Spektrenberechnungen genutzt, hat aber nichts mit dem spektralen Inhalt des Signals zu tun. Besonders kritisch ist, dass nur (relativ willkürlich entsprechend der Verfügbarkeit billiger Sensoren) ein schmales Frequenzband zur Bewertung herangezogen werden kann. Das Heterodynverfahren kann aufgewertet werden, wenn mit breitbandigen Sensoren gemessen wird. Die Trägerfrequenz kann digital variiert werden (Abb. 2).

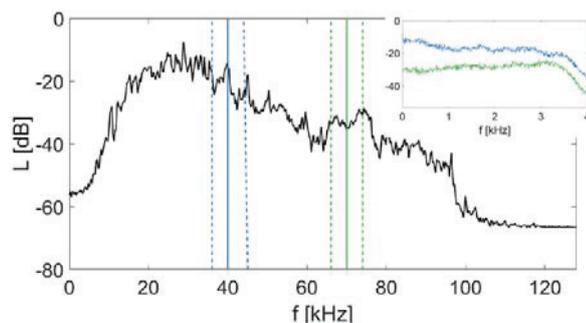


Abbildung 2: Leistungsspektrum eines technisch erzeugten Ultraschallsignals sowie Spektren der Heterodyn-Signale für zwei Mischfrequenzen (40 und 70 kHz)

Aus aufgezeichneten Signalen kann auf diese Weise auch eine Art Pseudospektrum berechnet werden. Die Hörbarmachung würde wie bisher erfolgen. Man könnte als „Vorteil“ erwähnen, dass alte Hörgewohnheiten bedient werden. Eine weitere nutzbare Eigenschaft (siehe auch die Zusammenstellung in Tab. 1) besteht darin, dass Frequenzdifferenzen erhalten bleiben. Das ist insbesondere für die aktive Anregung mit modulierten Signalen (Dichtheitsprüfung) von Bedeutung.

Hörbarmachung breitbandiger Signale

In den Abbildungen 2 bis 4 bzw. in Tab. 1 ist die Wirkung der Verfahren zur Hörbarmachung vergleichend dargestellt. Man erkennt sofort, dass das Heterodynverfahren bestenfalls qualitativen Charakter haben kann. Auf eine Kritik der Verwendbarkeit wird an dieser Stelle verzichtet. Die anderen Verfahren erhalten weitgehend die Frequenzcharakteristik. Das leistungsstärkste Verfahren ist die Vocoder-technik. Die Filterbankverfahren ermöglichen es, wichtige (breitbandige) spektrale Merkmale effektiv auf wenige Werte zu reduzieren und trotzdem noch eine vertretbare Hörqualität zu garantieren. Die Einsatzmöglichkeit wird zum Beispiel für die Langzeitüberwachung gesehen.

Die auf einem **Vocoderverfahren** beruhende Frequenzkompression ist insbesondere für den Frequenzbereich bis etwa 100 kHz effektiv [5]. Es wurde ein Kompressionsfaktor von 32 erreicht. Damit sind die Geräusche technischer Natur (Leckagen, Kugellagerfehler usw.) aber auch die Geräusche biologischer Quelle simultan für alle Ultraschallfrequenzen hörbar. Dabei entstehen neue Klangbilder. Die Hörbeispiele (Abb. 6) zu den angegebenen Grafiken belegen die Unterschiede zum Heterodynverfahren eindrucksvoll. In

Spalte 2 ist zu erkennen, dass das „klassische“ Verfahren Frequenzen außerhalb des Trägerfrequenzbereichs gar nicht erfasst. Das kann für die Erfassung technischer Prozesse extrem nachteilig sein (z.B. falsche (!) Trendaussagen). Da die meisten Ultraschallsignale stochastischen Charakter haben, spielt die Frequenzauflösung eine untergeordnete Rolle. Das bedeutet, dass die Spektrenkompression (und geeignete Mittelung) zu keinem merklichen Informationsverlust führt.

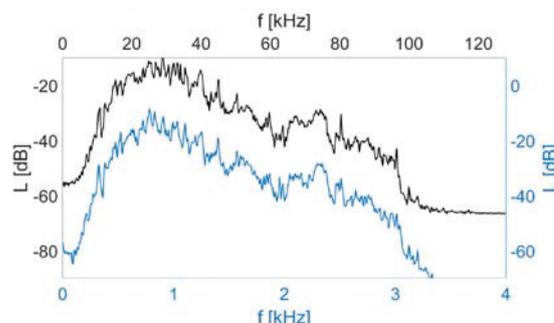


Abbildung 3: Leistungsspektrum eines realen, technisch erzeugten Ultraschallsignals und das mittels Vocoderverfahren berechnete Spektrum.

Die zeitliche Modulation eines Ultraschallsignals bleibt auch nach der Anwendung des Verfahrens erhalten. Das Signal wird aus dem Frequenzbereich in den Zeitbereich zurück transformiert. Es wird erwartet, dass insbesondere technische Prozesse viel realistischer wiedergegeben werden können. Frequenzdifferenzen bleiben im Gegensatz zum Heterodynverfahren nicht erhalten, sondern unterliegen ebenfalls der Skalierung mit dem Frequenzfaktor. Es sei darauf hingewiesen, dass alle im Text erwähnten Verfahren softwaretechnisch zur Verfügung stehen und Umschaltungen zwischen den Verfahren möglich sind. Das Verfahren zeigt seine Stärken vor allem, wenn das Ultraschallsignal über einen breiten Frequenzbereich verteilt ist und wenn spektrale Merkmale existieren. Dies ist bei fast allen Ultraschallsignalen, die technisch oder biologisch erzeugt werden der Fall. Der höhere Informationsgehalt rechtfertigt den größeren Rechenaufwand.

Eine weitere Variante der Hörbarmachung - das sogenannte **Filterbankverfahren** - nutzt die Ausgabe von frequenzgefilterten und amplitudenmodulierten Rauschsignalen [5]. Das Ultraschallsignal wird mit Filterbänken in Frequenzbänder zerlegt. Die Frequenzbänder werden dann durch einen entsprechenden rms-Wert (root mean square) repräsentiert. Dadurch werden nur wenige Zahlen zur Rekonstruktion eines (prinzipiellen) Höreindrucks benötigt. Für jedes Frequenzband wird ein skaliertes Frequenzband definiert, in das die Ultraschallinformationen skaliert werden. Die Frequenzbänder werden durch ein bandpassbegrenztes Rauschen repräsentiert. Dieses Bandrauschen wird mit aus dem zugehörigen rms-Wert aus dem höheren Frequenzband gewichtet. Die Superposition der in den Hörbereich skalierten Rauschbänder kann dann ausgegeben werden. Die simultane Ausgabe aller Schmalbandrauschsignale ergibt dann den Höreindruck des breitbandigen Ultraschallsignals. Die Ausgabequalität ist geringer als beim Vocoderverfahren (siehe Abb. 6).

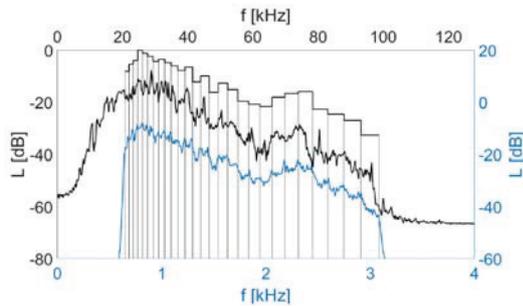


Abbildung 4: Leistungsspektrum des realen, technisch erzeugten Ultraschallsignals und die mittels Filterbank und Rauschen erzeugten rms-Werte dieser Bänder (1/6 Oktaven).

Die zeitliche Modulation des Ultraschallsignals bleibt bei diesem Verfahren ebenfalls erhalten. Ein wichtiger Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass beispielsweise eine Speicherung eines solchen Signals eine sehr kleine Speicherkapazität benötigt. Die Koeffizienten sind gleichzeitig auch für die Berechnung von Pegelverläufen in Frequenzbändern nutzbar (wichtiges Feature in der Maschinendiagnose). Für die Hörbarmachung kann die Filterbank geeignet angepasst werden (Startpunkt, Filterbreite).

Für die Entwicklung und Demonstration des Verfahrens steht eine MATLAB-GUI zur Verfügung. Die Echtzeitvarianten laufen auf einer FPGA-Lösung.

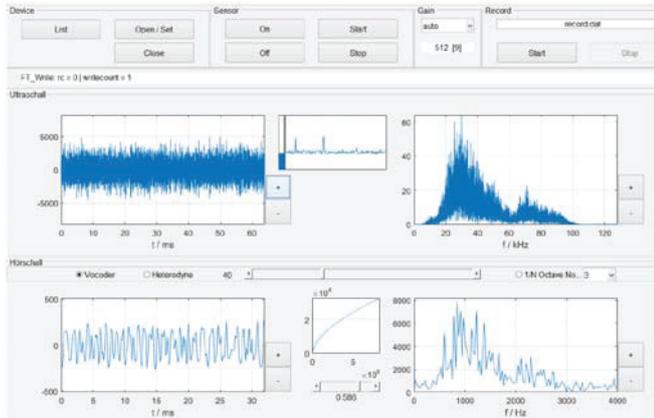


Abbildung 5: MATLAB-Entwicklungsumgebung für die Hörbarmachung

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der Verfahren

Verfahren	Nachteil	Vorteil
Heterodyn	nur kleiner Frequenzausschnitt	Einfache Umsetzung (auch analog realisierbar) Marktakzeptanz gegeben
Vocoder	noch keine Marktakzeptanz; Frequenzunterschiede werden mit skaliert	simultane Wiedergabe aller Ultraschallfrequenzen; großer Informationsgehalt
Filterbank	noch keine Marktakzeptanz;	gesamter Frequenzbereich; geringe Datenmenge auch bei längeren Aufzeichnungen
Zeitdehnung	Nur für transiente Signale sinnvoll (z. B. bei Bruch); bei Überlagerungen schwierig	Anwendung psychoakustischer Verfahren

Zusammenfassung

Die Verwendung breitbandiger Ultraschallsensoren in der Instandhaltung erlaubt neue Zugänge sowohl bei der Prüfung und Messung als auch bei der Hörbarmachung von Ultraschallfrequenzen für den Anwender. Es wurde ein System verschiedener Technologien entwickelt oder modifiziert. Die verwendeten Verfahren haben unterschiedliche Stärken und Schwächen und damit verschiedene Einsatzgebiete. Neben der Hörbarmachung können die digitalen Verfahren auch zu einer effektiven Kompression der Daten genutzt werden, ohne dass wesentliche Information verloren geht. Im Gegensatz zu den aus dem Audio-Bereich bekannten Komprimierungsverfahren spielt die Klangqualität eine untergeordnete Rolle. Stochastische Signale lassen sich auf diese Weise ausreichend gut bewerten und Rekonstruieren. Dies ist z. B. für Langzeitüberwachungen in der Instandhaltung oder Bauwerksüberwachung von Bedeutung.

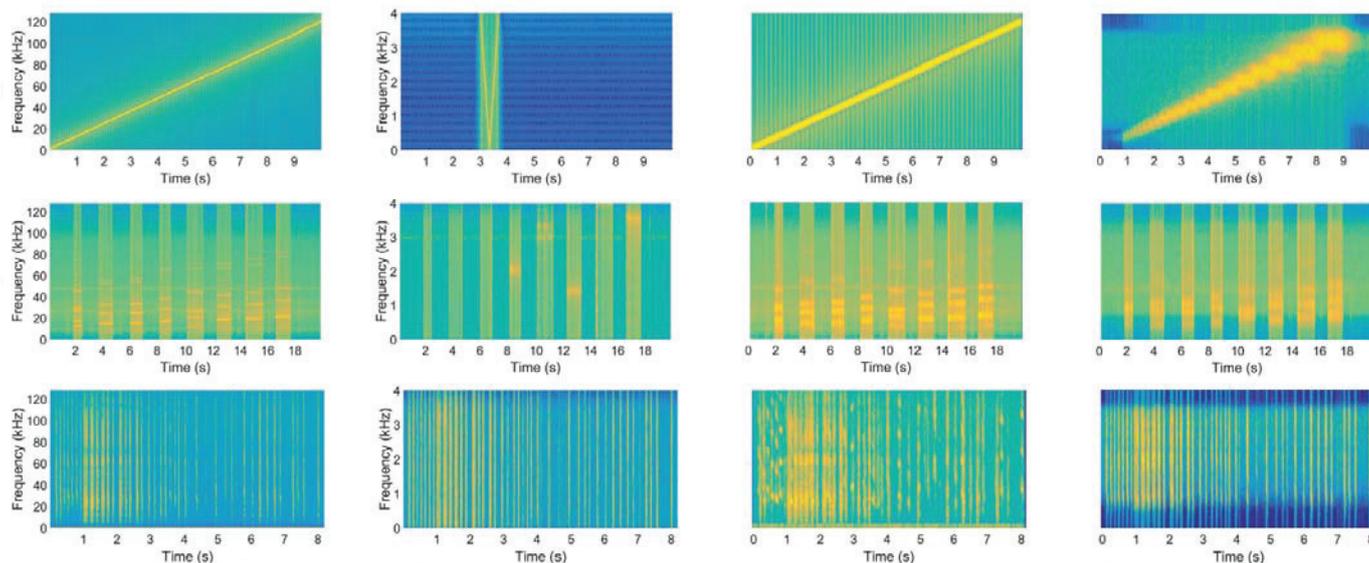


Abbildung 6: Die Spektrogramme zeigen die Wirkung der verschiedenen Verfahren der Hörbarmachung. In der linken Spalte sind die Spektrogramme der original gemessenen Daten dargestellt. In der zweiten Spalte befinden sich die mittels Heterodynverfahren berechneten Spektrogramme. Die dritte Spalte enthält die Vocoder-Spektrogramme. Die rechte Spalte ist mit dem Filterbank-Rausch-Verfahren berechnet. Die Beispiele in den Reihen 1 bis 3 sind: Chirp (synthetisch) / drehende Münzen (Aluminium 5 Mark ... 1 Pfennig, unterschiedliches Material) / Fledermaus; Quelle: (www.batcalls.com, Myotis bechsteinii) eines technisch erzeugten Ultraschallsignals sowie Spektren der Heterodyn-Signale für zwei Mischfrequenzen (40 und 70 kHz)

Danksagung

Die Arbeiten wurden teilweise im Rahmen des Projekts UMKlaD gefördert (BMBF, kMU-innovativ, Fördernummer: 01IS15051A).

Literatur

- [1] Quelle: SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH
- [2] P. Holstein, R. Müller, G. Fischer, J. Hübelt, F. Franck, Estimation of Surface Reflexion Properties by means of a new Frequency Shift Technique, Proceedings Forum Acustica, Sevilla, Spain, 2002
- [3] G. Fischer, P. Holstein, R. Müller; J. Reins, Zoom-FFT and its application, Wissenschaftliche Mitteilungen Institut f. Meteorologie, Bd. 23, Leipzig 2001, ISBN 3-9807315-2-9, 88-93
- [4] P. Holstein, C. Probst, Maschinendiagnose mit Ultraschall, 11. Tagung Technische Diagnose, 23.-24.10.2014, Merseburg
- [5] P. Holstein et al., 2016, Patentanmeldung: „Hörbarmachung breitbandiger Ultraschallsignale“