

Entwicklung eines Ultraschall-Pegelmesssystems für den Arbeitsschutz

Moritz Wächtler, Christoph Kling, Andrea Wolff, Braunschweig, St. Augustin

Zusammenfassung Die Verbreitung von Ultraschalltechnologien und die damit verbundene Luftultraschall-Exposition an Arbeitsplätzen nehmen ständig zu. Der Mangel an geeigneten Messgeräten für eine Ermittlung von Schallfeldgrößen erschwert eine Erfassung und Bewertung dieser Exposition im Rahmen des Arbeitsschutzes. Aus diesem Grund wird aktuell an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) ein mobiles System für die Messung von Luftultraschallfeldgrößen entwickelt. Die Entwicklung umfasst neben dem Entwurf und der Implementierung einer Analyse-Software die Auswahl und Prüfung von geeigneten Hardware-Komponenten in Hinblick auf die speziellen Anforderungen des Arbeitsschutzes. Um eine regelmäßige Überprüfung des Messsystems zu ermöglichen, wird zudem ein Verfahren zur akustischen Kalibrierung entwickelt.

Development of an ultrasound level meter for use in occupational safety and health

Summary Ultrasonic technologies are widely used and the exposure to airborne ultrasound at the workplace is constantly increasing. The lack of suitable measuring instruments for the determination of sound field parameters makes the investigation and assessment of this exposure even more difficult within the scope of occupational safety and health measures. A mobile system for the measurement of airborne ultrasound field parameters is therefore under development at PTB. Besides the design and implementation of analysis software, this development encompasses the testing of suitable hardware components with regard to the special requirements inherent to occupational safety and health. For the purpose of periodically checking the ultrasound level meter, an acoustical calibration procedure is going to be developed.

Ultraschall findet heutzutage in einer Vielzahl von Technologien Anwendung. Als Beispiele sind hier etwa das Ultraschallschweißen, -schneiden oder -reinigen zu nennen. Die Verwendung dieser Technologien geht oftmals mit der Emission von luftgeleitetem Ultraschall einher, welcher auf umstehende Personen einwirken kann.

In Deutschland sind Arbeitgeber durch die Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV) [1] verpflichtet, alle existierenden und potenziellen Risiken durch Schall an Arbeitsplätzen zu ermitteln und zu bewerten. Da die zugehörige Technische Regel [2] nur die Anwendung auf Hörschall präzisiert, kann derzeit als einziges Dokument die VDI-Richtlinie 3766 [3] bezüglich Handlungsanweisungen zur Messung von Lärm an Ultraschallarbeitsplätzen herangezogen werden. Problematisch ist unter anderem, dass derzeit keine Schallpegelmesser existieren, welche einen Pegel von Ultraschall verlässlich und mit bekannter Unsicherheit messen können. Daraus resultiert etwa, dass Berufsgenossenschaften ihrer Aufgabe zur Risikobewertung an Arbeitsplätzen nicht in vollem Umfang nachkommen können. Dieser Umstand motivierte ein Projekt an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) zur Prototypen-Entwicklung eines Ultraschallpegel-Messsystems (USPM)

für den praktischen Einsatz im Arbeitsschutz. Das Projekt findet im Rahmen eines Technologie-Transferprogramms in Zusammenarbeit mit dem Institut für Arbeitsschutz (IFA) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung statt.

Messung von luftgeleitetem Ultraschall

Die Technik und Methodik zur Messung von Hörschall (Frequenzbereich von ca. 16 Hz bis 16 kHz) kann nicht ohne Weiteres auf Ultraschall (Frequenzbereich über 16 kHz) übertragen werden. Viele Geräte und Bauteile sind für die Verarbeitung oder Wandlung von Signalen im Hörfrequenzbereich optimiert und eignen sich daher für den Ultraschallfrequenzbereich nur sehr eingeschränkt. Als Beispiel seien hier Analog-Digital-Wandler angeführt, welche im Ultraschallfrequenzbereich oftmals ein deutlich erhöhtes Grundrauschen zeigen. Zudem ist dieser Frequenzbereich mitunter durch elektromagnetische Einstrahlungen gestört. Exemplarisch hierfür ist in **Bild 1** das Spektrum des Grundrauschens eines handelsüblichen Audiointerfaces dargestellt. Es sind ein deutlicher Anstieg der Rauschenergie zu hohen Frequenzen sowie mehrere schmalbandige Störkomponenten oberhalb des Hörschallfrequenzbereichs zu erkennen. Letztere können z. B. durch die Spannungsversorgung des Geräts verursacht sein.

Eine Eigenschaft von Ultraschall, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Messtechnik und Durchführung von Messungen hat, ist seine kurze Wellenlänge. Aufgrund dieser wird Ultraschall schon durch kleine Hindernisse stark in seiner Ausbreitung beeinträchtigt. So hat in höheren Frequenzbereichen bereits das Schutzgitter einer Mikrofonskapsel einen

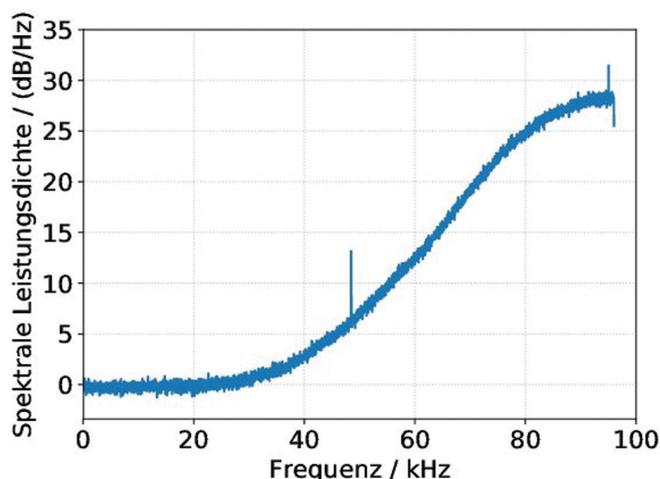


Bild 1 Leistungsdichtespektrum des Grundrauschens am Ausgang des Analog-Digital-Wandlers eines handelsüblichen Audiointerfaces bei kurzgeschlossenem Eingang. Erkennbar sind ein deutlicher Anstieg der Leistungsdichte zu hohen Frequenzen sowie schmalbandige Störkomponenten im Ultraschallfrequenzbereich.

deutlichen Einfluss auf dessen Sensitivität (**Bild 2**). Auch das Schallpegelmessgerät selbst oder die messende Person können die Ausbreitung des Ultraschalls deutlich stärker beeinflussen, als es im Hörschallfrequenzbereich der Fall ist. Die bloße Vermessung eines Feldes kann also schon zu einer Verfälschung desselben führen. Eine weitere Folge der kurzen Wellenlänge ist eine starke Ortsabhängigkeit des Schalldruckpegels in Ultraschallfeldern. Änderungen des Schalldrucks um 10 dB oder mehr treten in der Regel bereits innerhalb von Ortsdifferenzen von wenigen Zentimetern auf [4]. Hierdurch wird eine große Anzahl an Messpunkten benötigt, um ein Ultraschallfeld zu charakterisieren, was einen erheblichen Messaufwand bedeutet.

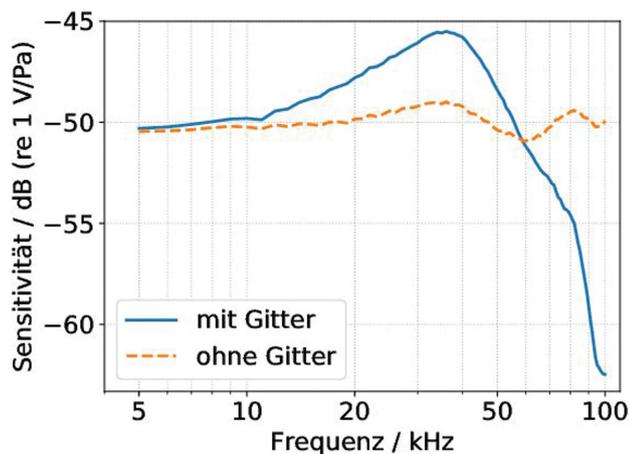


Bild 2 Sensitivität einer Viertel-Zoll-Mikrofonkapsel in Abhängigkeit von der Frequenz, gemessen mit und ohne Schutzgitter.

Anforderungen an das Messsystem

Aus den genannten Eigenschaften des Ultraschalls ergeben sich bereits einige zwingende Anforderungen an das zu entwerfende Messsystem. Daher wurde zu Beginn der Entwicklung eine Anforderungsliste formuliert. Diese Anforderungen ergeben sich zum einen aus dem vorgesehenen Einsatzbereich und basieren zum anderen auf den technischen Anforderungen an Schallpegelmessgeräte [5] (mit Anpassungen bezüglich des Frequenzbereichs) sowie der VDI-Richtlinie 3766 [3]. Die folgende Liste zeigt eine Auswahl der wichtigsten Anforderungen:

- **Mobiler Betrieb:** Da ein Anschluss an das Stromnetz nicht immer gegeben ist, sollte zumindest temporär ein Betrieb über Akkus möglich sein.
- **Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV):** Eine Beeinflussung der Messergebnisse durch elektrische oder elektromagnetische Felder, wie sie mitunter an Industriearbeitsplätzen vorzufinden sind, muss ausgeschlossen werden.
- **Abgesetztes Mikrofon:** Damit das Gehäuse des Messsystems das zu messende Schallfeld so wenig wie möglich beeinflusst, sollte das Mikrofon vom restlichen Teil des Systems abgesetzt betrieben werden können.
- **Linearität in hohen Pegelbereichen (70 bis 150 dB SPL):** An Ultraschallarbeitsplätzen sind zum Teil sehr hohe Schalldruckpegel vorzufinden [6]. Zudem sind im Kontext des Arbeitsschutzes vor allem hohe Pegel von Interesse. Daher kann und muss der Messbereich so gewählt werden können, dass insbesondere diese hohen Pegel korrekt erfasst werden können.

- **Ultraschall-Frequenzbewertungen:** Neben den für Hörschall-Messungen etablierten Frequenzbewertungen A und C, sollte das System auch spezielle Ultraschall-Bewertungen unterstützen:

- **U-Bewertung:** Ein Tiefpass-Filter, welches für die Unterdrückung von Ultraschall-Komponenten während der Messung von Hörschall ausgelegt ist [7]
- **AU-Bewertung:** Eine Kombination von A- und U-Bewertung [7]

Die Verwendung der U- als auch der AU-Bewertung im Kontext dieses Projekts scheint zunächst widersprüchlich, da es eine Messung und keine Unterdrückung von Ultraschall zum Ziel hat. Jedoch handelt es sich beim AU-bewerteten Pegel um eine etablierte Größe zur Bewertung der Schallexposition am Arbeitsplatz [3], weshalb eine Integration in das Messsystem sinnvoll ist.

- **Echtzeitanzeige und Aufzeichnung des Frequenzspektrums:** Eine Echtzeitanzeige des Frequenzspektrums kann sich als nützlich erweisen, um nicht hörbare Spektralkomponenten auszumachen. Eine Aufzeichnung des Terzspektrums ist nötig, um die Anforderungen der VDI 2058-2 [8] zu erfüllen.

Hardware

Der erste Prototyp des Ultraschall-Pegelmesssystems (**Bild 3**) besteht im Wesentlichen aus kommerziell erhältlichen Einzelkomponenten, welche für den mobilen Einsatz in einem Koffer montiert sind. Das System ist als Komplettsystem konzipiert. Der Koffer beherbergt daher neben dem eigentlichen Messgerät sämtliches notwendiges sowie optionales Zubehör, wie etwa einen Kalibrator und ein Mikrofonverlängerungskabel. Zudem liegt dem System eine Mikrofonangel bei, durch dessen Benutzung der Einfluss der messenden Person auf das Schallfeld verringert werden kann. Um temporär einen Betrieb unabhängig vom Stromnetz zu ermöglichen, kann die Energieversorgung über Akkus erfolgen. Als Forschungs- und Entwicklungssystem ist das USPM offen und modular aufgebaut, d.h. die meisten Hardware-Komponenten können mit geringem Aufwand ausgetauscht werden. Dies ermöglicht ein einfaches Auf- oder Umrüsten des Systems, etwa wenn sich zu bereits verbauten Komponenten im Laufe der Entwicklung eine bessere Alternative findet.

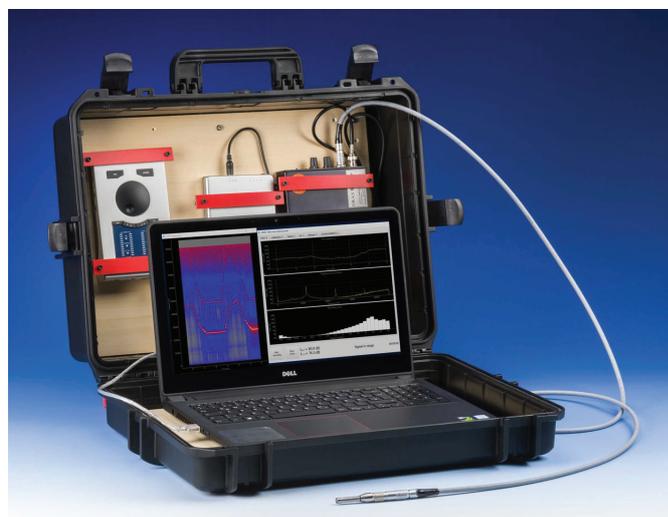


Bild 3 Erster Prototyp des Ultraschallpegel-Messsystems (USPM).

Software

Zur Berechnung, Anzeige und Speicherung der Messergebnisse wurde eine über eine grafische Benutzeroberfläche (**Bild 4**) bedienbare Software in der Programmiersprache Python implementiert. Die Software unterstützt diverse Arten der Signalvisualisierung in Echtzeit, wie etwa einen Pegel-Zeit-Verlauf, ein Spektrogramm und die Anzeige eines instantanen Schmalbandspektrums sowie eines instantanen Terzspektrums. Die Rohdaten sowie die berechneten Pegelwerte können zur nachträglichen Bearbeitung und Auswertung am Computer gespeichert werden. Es wurde besonderer Wert auf die Bedienfreundlichkeit der Oberfläche gelegt, so dass ein effizienter Einsatz des Geräts auch bei einer Messung vor Ort am Arbeitsplatz möglich ist. Beispielsweise können die wichtigsten Pegelgrößen in der Liveansicht in einer sehr großen Schriftgröße angezeigt werden, was ein leichtes

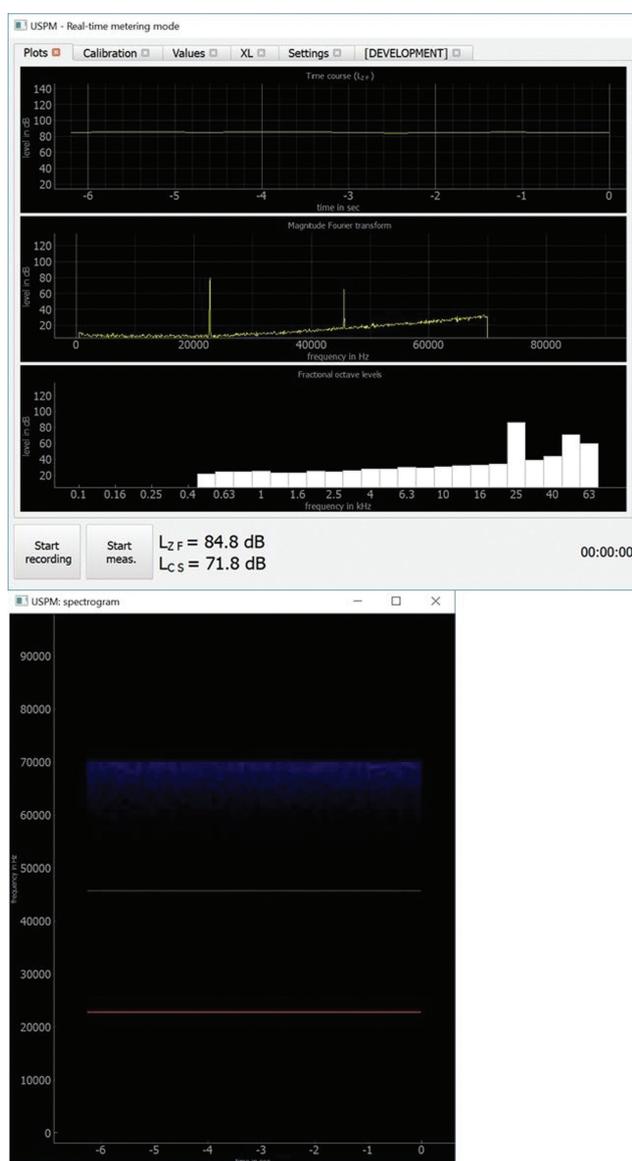


Bild 4 Grafische Benutzeroberfläche der entwickelten USPM-Software. Die drei Diagramme im oberen Fenster zeigen (von oben nach unten) den Pegel-Zeit-Verlauf, das Schmalbandspektrum (Fouriertransformation) und das Terzspektrum des Signals. Im unteren Fenster wird ein Spektrogramm (der zeitliche Verlauf des Frequenzspektrums) angezeigt.

Ablesen während der Messung auch bei größerer Entfernung zum Gerät ermöglicht. So können kleine Bereiche besonders hoher Ultraschallexposition leichter identifiziert werden.

Da es sich beim USPM um ein Forschungs- und Entwicklungssystem handelt, wurde bei der Software großer Wert auf Modifizierbarkeit und Erweiterbarkeit gelegt. Dadurch wird eine direkte Umsetzung neuer Erkenntnisse zur Messung und Bewertung von Ultraschall am Arbeitsplatz, etwa in Form neuer Pegelgrößen, ermöglicht.

Prüfungen

Ergänzend zur Entwicklung erfolgt im Rahmen dieses Projekts eine ausführliche Prüfung des USPM sowie seiner Einzelkomponenten auf korrekte Funktionsweise und auf Erfüllung der zuvor genannten Anforderungen. Zu diesem Zweck werden zum Teil die für Baumusterprüfungen von Schallpegelmessern verwendeten Prüfplätze der PTB genutzt. Darüber hinaus kommen auch eigens für das USPM entworfene Prüfplätze zum Einsatz. Die Prüfverfahren und -parameter orientieren sich bei der Prüfung des USPM an den technischen Anforderungen an Schallpegelmesser [5], wobei analog zu den Anforderungen auch hier Anpassungen vorgenommen wurden, um den Ultraschallfrequenzbereich einzubeziehen. An dieser Stelle ist es wichtig zu erwähnen, dass es sich bei der Prüfung des USPM nicht um eine Baumusterprüfung nach dem Mess- und Eichgesetz handelt, welche die Eichfähigkeit demonstriert, auch wenn die Anforderungen zum Teil daran angelehnt sind.

Geprüft wird beispielsweise der Frequenzgang des Systems und damit zusammenhängend die korrekte Funktionsweise der Frequenzbewertungen. Darüber hinaus werden Tests durchgeführt, um den linearen Arbeitsbereich des Systems zu bestimmen, also den Abstand zwischen dem niedrigsten und dem höchsten durch das System verzerrungsfrei messbaren Pegel. Die elektromagnetische Verträglichkeit wird, um kontrollierte Bedingungen zu schaffen, in einem speziellen Messraum für elektrische und elektromagnetische Felder geprüft. Durch die hier stattfindende gezielte Exposition des Messsystems mit elektrischen Feldern darf der gemessene Pegel nicht signifikant beeinflusst werden. In einer Klimaprüfung wird getestet, ob die Messergebnisse durch die Änderung der Werte für Lufttemperatur und -feuchte verfälscht werden.

Bild 5 zeigt ein Beispiel für einen Prüfplatz zur Einzelkomponentenprüfung. Zu prüfende Mikrofone können in eine Vorrichtung eingespannt und dann aus verschiedenen Richtungen beschallt werden. Damit lässt sich die sogenannte Richtcharakteristik eines Mikrofons, d.h. seine Sensitivität in Abhängigkeit vom Einfallswinkel des Schalls, bestimmen. Eine solche Richtcharakteristik ist in **Bild 6** für ein Viertel-Zoll-Kondensator-Mikrofon dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Abhängigkeit des gemessenen Pegels vom Einfallswinkel mit steigender Frequenz zunimmt. Die Ausprägung dieses Effekts ist von der Größe des Mikrofons abhängig, lässt sich aber prinzipiell bei Mikrofontypen unterschiedlichster Bauformen beobachten. Das Beispiel zeigt insbesondere, dass die Messtechnik nicht ohne Weiteres aus dem Hörschall übernehmbar ist, sondern an die spezifischen Eigenschaften des Ultraschalls angepasst werden muss.

Kalibrierverfahren

Ein USPM ist zurzeit nicht eichfähig und kann daher nicht wie ein klassisches Schallpegelmessgerät alle zwei Jahre beim Eichamt eingereicht werden. Es muss jedoch, zum Beispiel aus Gründen des Qualitätsmanagements und um eine Vergleichbarkeit

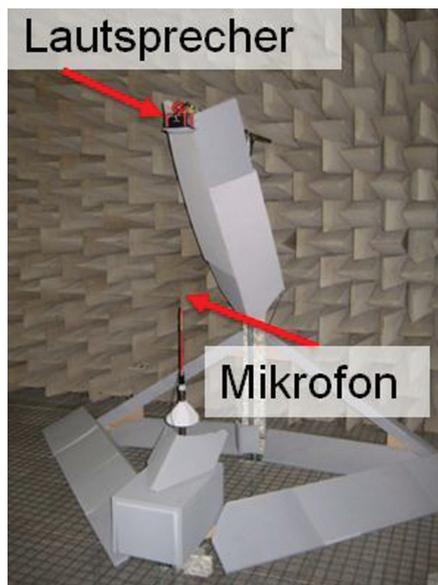


Bild 5 Messplatz zur Bestimmung der Richtcharakteristik von Mikrofonen. Der Lautsprecher kann um das Mikrofon rotiert werden, während das Mikrofon um seine eigene Längsachse gedreht werden kann. Um störende Reflexionen an der Vorrichtung zu verhindern, ist diese zu großen Teilen mit Absorbermaterial bedeckt.

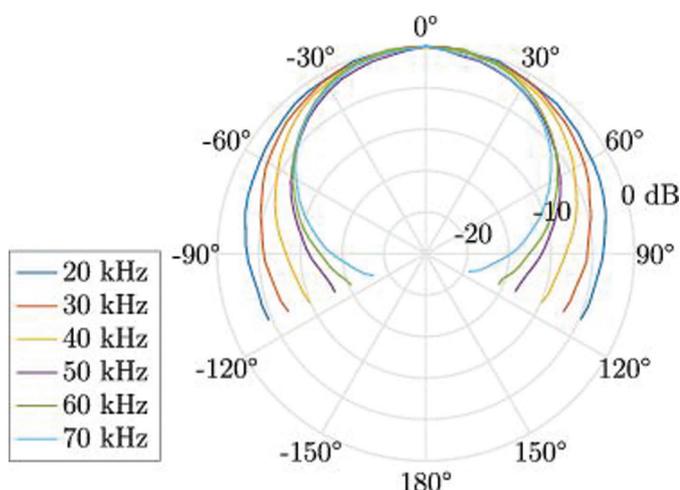


Bild 6 Richtcharakteristiken einer Viertel-Zoll-Mikrofonkapsel ohne Schutzgitter bei verschiedenen Frequenzen. Ein Einfallswinkel von 0° bedeutet einen senkrechten Schalleinfall auf die Membran. Jede Kurve wurde auf ihren jeweiligen Pegel bei 0° normiert. Entnommen aus [9].

mit sonstigen Lärmmessungen für den Arbeitsschutz zu gewährleisten, auch nach der Entwicklung regelmäßig einer Funktionsprüfung unterzogen werden. Hierfür wird in diesem Projekt ein periodisches Kalibrierverfahren entwickelt. Dieses beschränkt sich im Gegensatz zu den ausführlicheren Baumusterprüfungen vor allem auf akustische Eigenschaften. Als Beispiel ist hier die Mikrofonkapsel zu nennen, welche etwa durch Perforation der Membran ihren Frequenzgang ändern kann. Ein Messplatz zur Umsetzung des Verfahrens soll in den Laboren der PTB und des IFA aufgebaut werden, um Vergleichsmessungen zum Zwecke der Qualitätssicherung durchzuführen, wie sie für die heutigen Prüf- und Kalibrierverfahren üblich sind.

Zusammenfassung und Ausblick

Ein Messsystem für luftgeleiteten Ultraschall wurde an der PTB entwickelt und wird derzeit auf Erfüllung der gestellten Anforderungen geprüft. Testmessungen des Gesamtsystems sowie der Einzelkomponenten zeigen die Herausforderungen bei der Messung von Ultraschall, die sich aus den Eigenschaften des Ultraschalls (z.B. starke Beeinflussung durch kleine Hindernisse) und der Hardware-Komponenten (z.B. hoher Pegel des Grundrauschens im Ultraschallfrequenzbereich) ergeben. Die Entwicklung des USPM kommt dem Bedarf nach einem Messgerät für luftgeleiteten Ultraschall nach und schafft damit eine Voraussetzung für die Messung und Bewertung der Ultraschall-Exposition an Arbeitsplätzen durch die Berufsgenossenschaften. Die während der Entwicklung des Systems gewonnenen Erkenntnisse könnten zudem in Zukunft von Herstellern genutzt werden, um kommerzielle Messgeräte für luftgeleiteten Ultraschall zu entwickeln.

Danksagung

Die Autoren danken **Marvin Rust**, **Robert Schönweiß** und **Christian Ullisch-Nelken** für das Testen des USPM und für hilfreiche Verbesserungsvorschläge bezüglich Soft- und Hardware. Das Projekt wurde im Rahmen eines Programms der PTB zum Transfer metrologischer Technologie (TransMeT) gefördert.

Moritz Wächtler, Christoph Kling

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig

Andrea Wolff

Institut für Arbeitsschutz (IFA) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, St. Augustin

Literatur

- [1] Verordnung zum Schutz der Beschäftigten durch Lärm und Vibrationen (Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung – Lärm-VibrationsArbSchV): Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung vom 6. März 2007 (BGBl. I S. 261), die durch Artikel 5 Absatz 5 der Verordnung vom 18. Oktober 2017 (BGBl. I S. 3584) geändert worden ist.
- [2] Technische Regel zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung – TRLV Lärm. GMBI 2017, S. 590 [Nr. 34/35] (vom 05.09.2017). Ausgabe: August 2017.
- [3] VDI 3766:2012–09: Ultraschall – Arbeitsplatz Messung, Bewertung, Beurteilung und Minderung. Berlin: Beuth Verlag 2012.
- [4] *Walther, S.; Kling, C.*: 3-D-Vermessung von Luftschallfeldern. DAGA 2015, Nürnberg, 41. Jahrestagung für Akustik „Fortschritte der Akustik“, S. 239–242. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Akustik (DEGA) 2015.
- [5] DIN EN 61672: Elektroakustik – Schallpegelmesser – Teile 1 bis 3. Berlin: Beuth Verlag 2014.
- [6] *Kusserow, H.*: Kritische Betrachtung der deutschen Beurteilungskriterien für berufliche Ultraschalleinwirkungen auf das Gehör im Rahmen eines internationalen Vergleichs und am Beispiel von Ultraschall-Schweißmaschinen (IFA-Report 4/2016). Berlin: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV) 2016.
- [7] DIN EN 61012:1998–09: Filter für die Messung von hörbarem Schall im Beisein von Ultraschall. Berlin: Beuth Verlag 1998.
- [8] VDI 2058 Blatt 2:2017–02 – Entwurf: Beurteilung von Lärm hinsichtlich Gehörgefährdung. Berlin: Beuth Verlag 2017.
- [9] *Rust, M.*: Untersuchungen zur Richtcharakteristik von MEMS- und Messmikrofonen. Bachelorarbeit. TU Braunschweig 2017.