

Ears II: Entwicklung eines metrologischen Konzepts zur Charakterisierung von luftgeleiteten Ultraschallfeldern am Arbeitsplatz

Robert Schöneweiß¹, Christian Koch¹, Christoph Kling¹, Johannes Hensel¹, Christian Ullisch-Nelken²

¹ *Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, E-Mail: robert.schoeneweiss@ptb.de*

² *Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung e.V., 53757 Sankt Augustin, E-Mail: christian.ullisch-nelken@dguv.de*

Einleitung

Die Präsenz von ultraschallemittierenden Technologien an Arbeitsplätzen sowie in öffentlichen und privaten Umgebungen nimmt stets zu. Damit einhergehend gewinnt auch die Betrachtung der Lärmbelastung durch Schall außerhalb des Hörfrequenzbereiches an Bedeutung.

Zur Abschätzung der sich aus dieser Lärmbelastung ergebenden potenziellen Gesundheitsschädlichkeit ist, neben dem Verständnis der menschlichen Wahrnehmungsmechanismen von luftgeleitetem Ultraschall, ein spezifisches metrologisches Konzept notwendig. Dieses umfasst auf die Erfordernisse des Ultraschalls angepasste Messinstrumente und die zugehörige Messmethodik zur validen Charakterisierung von Schallfeldern.

Vor dem Hintergrund bisher unzureichender Kenntnis über die Vorgehensweise bei der Risikoabschätzung der Lärmbelastung soll im Rahmen des EU-Projektes Ears II [1] unter anderem durch neurologische Untersuchungen das Verständnis über die Wahrnehmung von luftgeleitetem Ultraschall erweitert werden. Darüber hinaus soll ein praktikables Messverfahren entwickelt werden, welches unter Berücksichtigung der Kalibrier- und Rückführbarkeit Aufschluss über Schallfeldparameter an Ultraschallarbeitsplätzen liefert.

Status Quo

Während im öffentlichen Raum Tiervergrämungsanlagen und Kontrollmechanismen für Lautsprecher Systeme Einzug gehalten haben, werden in der Industrie zahlreiche unterschiedliche ultraschallbasierte Verfahren zur Produktion und Weiterverarbeitung eingesetzt. Mögliche Anwendungen sind das Ultraschallschweißen, -reinigen, -schneiden und -bohren sowie Verfahren zum Prüfen und Vermessen. An diesen Arbeitsplätzen entsteht als Nebeneffekt oftmals auch luftgeleiteter Ultraschall, welcher in Abhängigkeit vom individuellen Hörbereich jedoch nicht bewusst wahrgenommen werden kann. Zum Schutz der Beschäftigten vor tatsächlichen oder möglichen Gefährdungen ihrer Gesundheit und Sicherheit hat der Arbeitgeber die auftretenden Lärmexpositionen am Arbeitsplatz zu ermitteln und zu bewerten [2][3]. Es existieren jedoch für die Messung und Beurteilung von Ultraschall keine entsprechenden Normen. Vorhandene Normen und Regelwerke beschränken sich auf eine Bewertung von Hörschall im Beisein von Ultraschall [4], liefern keine Angaben zur Messmethode [5] oder schließen die Behandlung von Ultraschall explizit aus [6][7].

Bei Messungen des Schalldruckpegels zur Ermittlung der Lärmbelastung im Hörschallbereich wird der Ultraschallanteil durch geeignete Filter ausgeschlossen. Darüber hinaus mangelt es an praxistauglichen Messinstrumenten, die für die notwendigen Messungen im Ultraschallbereich geeignet sind. Das hat zur Folge, dass die Ultraschallfelder um Maschinen zum größten Teil unbekannt sind.

Neben diesen normativen, technischen und methodischen Problemen liegen derzeit nur unzureichende Kenntnisse über die menschlichen Wahrnehmungsmechanismen von luftgeleitetem Ultraschall vor. Infolgedessen ist eine wissenschaftlich fundierte Abschätzung der sich aus der Lärmbelastung durch Ultraschall ergebenden potenziellen Gesundheitsschädlichkeit bislang nicht möglich. Für eine Beurteilung der auftretenden Ultraschallpegel fehlen daher Grenz- oder Richtwerte, die sich an den Wirkungs- und Wahrnehmungsmechanismen orientieren sollten.

Ears II

Das durch die EURAMET-Initiative EMPIR (European Metrology Programme for Innovation and Research) für 3 Jahre geförderte Projekt Ears II widmet sich mit seinen 12 teilnehmenden Institutionen aus sechs europäischen Ländern unter anderem diesen Herausforderungen. Im Rahmen des Projektes sollen durch einen multidisziplinären Ansatz die menschlichen Wahrnehmungs- und Wirkungsmechanismen von luftgeleitetem Ultraschall untersucht werden, um eine Abschätzung der potenziellen Gesundheitsschädlichkeit durch die Einwirkung von Ultraschall zu ermöglichen. Parallel dazu soll ein metrologisches Konzept zur Charakterisierung luftgeleiteter Ultraschallfelder am Arbeitsplatz entwickelt werden.

Untersuchung der menschlichen Wahrnehmungs- und Wirkungsmechanismen

Die Untersuchungen der menschlichen Wahrnehmungs- und Wirkungsmechanismen von luftgeleitetem Ultraschall werden mit neurologischen Verfahren wie der Magnetoenzephalographie (MEG) und der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) in Probandenstudien durchgeführt. Zur Bereitstellung der Stimuli bedarf es einer leistungsstarken Luftultraschallquelle, die mit den vorgenannten Untersuchungsmodalitäten kompatibel ist.

Luftultraschallquelle

Bei der entwickelten Luftultraschallquelle handelt es sich um einen aus Kunststoff gefertigten Würfel mit einer Kantenlänge von 8 cm (siehe Abbildung 1).

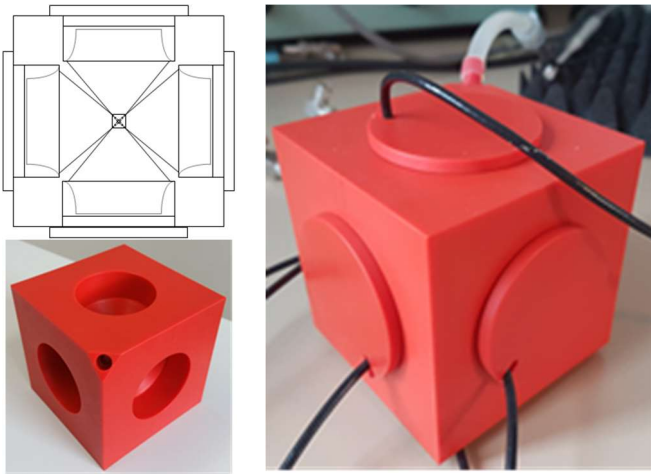


Abbildung 1: Würfelförmige Luftultraschallquelle für Stimuli im Rahmen neurologischer Untersuchungen; links oben: Skizze der Quelle im Querschnitt; unten links: leeres Gehäuse; rechts: mit Piezowandlern bestückte und mit Deckeln verkapselte Quelle

In jede der sechs Seitenflächen sind Trichter eingefräst, welche sich in einem zentralen Volumen in der Würfelmitte treffen. Dieses zentrale Volumen ist über eine Bohrung entlang der Raumdiagonalen mit einem Schlauchstutzen verbunden. In jeden Trichter ist ein piezoelektrischer Hochtonlautsprecher eingeklebt und mit einem Deckel rückseitig gekapselt. Über einen Funktionsgenerator wird eine sinusförmige Wechselspannung erzeugt, mithilfe eines ultraschallfähigen Verstärkers verstärkt und an die parallelgeschalteten Piezo-Wandler übertragen. Der dort erzeugte Ultraschall gelangt über die Trichter in die Würfelmitte, entlang der Bohrung in einen angeschlossenen Schlauch und durch eine aus Schaumstoff gefertigte Gehörgangsankopplung zum Ohr des Probanden. In dieser Ankopplung befindet sich, neben dem schallführenden Schlauch der Ultraschallquelle, ein weiteres Röhrchen, welches über einen Schlauch mit einem optischen Mikrofon verbunden ist. Mithilfe dieses Mikrofons vom Typ Sennheiser MO 2000 ist es möglich, den Schalldruckpegel im Gehörgang des Probanden zu messen.

Mit diesem Versuchsaufbau können monofrequente Stimuli im Bereich von 20 kHz bis 40 kHz mit einem Schalldruckpegel bis zu 130 dB im Ohr der Probanden dargeboten werden. Das entwickelte Setup ist hinsichtlich der MR-Kompatibilität erfolgreich getestet worden. Da es sich bei den MEG-Sensoren zur Detektion der biomagnetischen Signale um optisch gepumpte Magnetometer handelt, treten keine hinderlichen Wechselwirkungen mit der Luftultraschallquelle und ihren elektromagnetischen Wechselfeldern auf [8].

Neurologische Untersuchungen

Magnetoenzephalographie

Nach der Bestimmung der individuellen Hörschwelle der Probanden im Ultraschallbereich mithilfe der entworfenen Ultraschallquelle werden mit den normalhörenden Probanden MEG-Messungen durchgeführt. Hierzu werden den Probanden Stimuli mit einem Schalldruckpegel entsprechend ihrer Hörschwelle dargeboten und die magnetische Aktivität des Gehirns bestimmt. Verglichen werden diese Daten mit Messreihen, bei denen eine Stimulierung mit Ultraschallpegeln 25 dB oberhalb der Hörschwelle erfolgt.

Funktionelle Magnetresonanztomographie

Die funktionelle Magnetresonanztomographie wird für Untersuchungen der Lästigkeit und Kognitionsbeeinflussung durch Ultraschall verwendet.

Probanden, die an den Untersuchungen zur Lästigkeit von Ultraschall teilnehmen, erhalten zunächst eine audiometrische Untersuchung und werden mithilfe eines Fragebogens bezüglich ihrer Lärmempfindlichkeit befragt. Anschließend findet eine individuelle kategoriale Lautheitsskalierung und die Bestimmung der Lästigkeitsschwelle statt. Die Probanden erhalten daraufhin eine funktionelle Magnetresonanztomographie zur Untersuchung ihrer audiolologischen Funktionen in Abhängigkeit von der dargebotenen Ultraschallfrequenz, des Schalldruckpegels des Stimulus und der damit verbundenen individuellen Lautheit und Lästigkeit des Signals, welches mit der zuvor beschriebenen Luftultraschallquelle erzeugt wird.

Bei den Untersuchungen zum Einfluss von Ultraschall auf die kognitiven Fähigkeiten werden Probanden zunächst bezüglich ihrer Hörschwelle im Ultraschallbereich charakterisiert. Anschließend werden mit ihnen während einer fMRT-Bildgebung kognitive Tests durchgeführt, bei denen sie Ultraschall unterhalb ihrer Hörschwelle ausgesetzt sind. Auch hier erfolgt die Darbietung der Stimuli mithilfe der entwickelten Luftultraschallquelle. Als Referenz werden diese Tests auch ohne Ultraschallstimulus durchgeführt.

Erarbeitung des metrologischen Konzeptes

Bei der Erarbeitung des metrologischen Konzeptes muss den Ausbreitungscharakteristika von Ultraschall Rechnung getragen werden. Ultraschall weist kurze Wellenlängen von rund 20 mm bis in den Submillimeterbereich auf. Infolgedessen besitzt Ultraschall eine starke Richtwirkung. Durch Reflexion und Streuung der Ultraschallwellen können Interferenzerscheinungen im Schallfeld auftreten. Daher muss auch Wechselwirkungen mit der Umgebung einer Ultraschallquelle und etwaigen Hindernissen im Ausbreitungsbereich Beachtung zukommen. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass die emittierende Quelle in Relation zur Wellenlänge häufig sehr viel größer ist und sich durch Interferenz ein als Nahfeld bezeichneter Bereich ausbildet, der durch eine sehr heterogene räumliche Verteilung der Schalldruckpegel gekennzeichnet ist.

Um die vorgenannten Punkte zu berücksichtigen, ist daher die detaillierte Untersuchung eines Ultraschallfeldes um eine typische Ultraschallquelle, wie sie in der Industrie häufig Anwendung findet, an einem Referenzarbeitsplatz geplant. Um einschätzen zu können, welche Ultraschallanwendungen und Arbeitsfrequenzen häufig auftreten sowie welche Messverfahren aktuell existieren und inwiefern diese für die zu entwickelnde Methodik geeignet erscheinen, wurde eine retrospektive Studie von Literatur und vorhandenen Messdaten durch das Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung e.V. (IFA) durchgeführt. Im Ergebnis zeigt sich die häufige Verwendung von Ultraschallschweißmaschinen mit einer Arbeitsfrequenz von 20 kHz. Einschränkend sei erwähnt, dass bei der Datenerhebung ausschließlich Arbeitsplätze erfasst wurden, an denen Beschwerden, beispielsweise über hörbare Subharmonische, seitens der Arbeitnehmer auftraten. Aufgrund dieser Häufung wurde eine solche Maschine im Rahmen einer Kooperation mit einem Industriepartner als Ultraschallquelle für den aufzubauenden Referenzarbeitsplatz ausgewählt. Erste Messungen zur Auswahl geeigneter Sonotroden und Arbeitsmodi der Maschine wurden bereits durchgeführt.



Abbildung 2: Portalscanner in der PTB; Untersuchungsumgebung zur räumlich hochaufgelösten Charakterisierung von Ultraschallfeldern an einem Referenzarbeitsplatz

Als Untersuchungsumgebung für den Referenzarbeitsplatz stehen je ein Aufbau am IFA und in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) zu Verfügung. In der PTB handelt es sich dabei um einen dreiaxigen Portalscanner mit einer Kantenlänge von 2 m (siehe Abbildung 2). Mit diesem kann das Schallfeld um die darin zu platzierende Maschine in hoher räumlicher Auflösung vermessen werden. Zusätzlich können ein Kunstkopf zur Simulation eines Arbeiters sowie unterschiedliche reflektierende Oberflächen in den Scanner eingebracht werden. So ist es möglich, den Einfluss auf das Ultraschallfeld durch Personen, Oberflächen und die Maschine selbst zu untersuchen. Im Rahmen der Charakterisierung des Schallfeldes sollen weitere

Erkenntnisse über die Anforderungen an ultraschallfähige Messinstrumente gewonnen und eine Messmethodik zur validen Vermessung des Ultraschallfeldes abgeleitet werden. Anschließend erfolgt, basierend auf den bis dahin gewonnenen Ergebnissen, die Erprobung einer gezielten Messpunktreduzierung und die Überführung in ein praxistaugliches Messverfahren am Messplatz des IFA. Die so erarbeitete Messmethode wird abschließend in einer Feld-Messkampagne erprobt und gegebenenfalls angepasst. Das so gewonnene Konzept soll in die Normung eingebracht werden.

Danksagung

This project has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.



The EMPIR initiative is co-funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and the EMPIR Participating States

Literatur

- [1] EMPIR 15HLT03 Ears II – Metrology for modern hearing assessment and protecting public health from emerging noise sources, URL: <http://www.ears-project.eu/>
- [2] Arbeitsschutzgesetz vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), das zuletzt durch Artikel 427 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist
- [3] Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung vom 6. März 2007 (BGBl. I S. 261), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 15. November 2016 (BGBl. I S. 2531) geändert worden ist
- [4] VDI 3766:2012-09: Ultraschall – Arbeitsplatz – Messung, Bewertung, Beurteilung und Minderung
- [5] DIN EN 61010-1 (VDE 0411-1):2011-07: Sicherheitsbestimmungen für elektrische Mess-, Steuer-, Regel- und Laborgeräte – Teil 1: Allgemeine Anforderungen (IEC 61010-1:2010 + Cor.:2011); Deutsche Fassung EN 61010-1:2010
- [6] Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (TRLV Lärm), Bundesministerium für Arbeit und Soziales, Bonn, 2010
- [7] DIN EN ISO 9612:2009-09: Akustik – Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz – Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 (Ingenieurverfahren) (ISO 9612:2009); Deutsche Fassung EN ISO 9612:2009
- [8] MEG mit optisch gepumpten Magnetometern im Fachbereich 8.2 der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, URL: <https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt8/ag-821/bmsr-821.html>