

## Ears II: Entwicklung eines praxistauglichen Messverfahrens für luftgeleiteten Ultraschall

Christian Ullisch-Nelken<sup>1</sup>, Robert Schöneweiß<sup>2</sup>, Andrea Wolff<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institut für Arbeitsschutz der DGUV, 53757 Sankt Augustin, Deutschland, E-mail: christian.ullisch-nelken@dguv.de*

<sup>2</sup> *Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, Deutschland, E-mail: robert.schoeneweiss@ptb.de*

### Einleitung

In den letzten Jahrzehnten haben sich verschiedene ultraschallbasierte Arbeitsverfahren in industriellen Produktions- und Fertigungsprozessen etabliert. Da über die menschliche Wahrnehmung von luftgeleitetem Ultraschall und seine Wirkungen bisher nur wenig belastbares Material vorliegt [5], ergibt sich aus der industriellen Anwendung von Ultraschall möglicherweise ein Gefährdungspotential für Arbeitnehmer und Bevölkerung. In diesem Zusammenhang wurde das EU-Projekt „Ears II“ [6] ins Leben gerufen, um verschiedene Aspekte der Wahrnehmung und Wirkung von Schall außerhalb des als „Hörfrequenzbereich“ definierten Bereiches von 16 Hz – 16 kHz zu untersuchen. Die Entwicklung einer Messmethode für luftgeleiteten Ultraschall erfolgt in Kooperation zwischen dem Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung e.V. (IFA) und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB).

### Ausgangslage

Die sich im Zusammenhang mit dem industriellen Einsatz von Ultraschall ergebenden Probleme lassen sich im Wesentlichen in vier Kategorien einteilen.

### Quellen

Die in der Industrie eingesetzten Ultraschallmaschinen weisen eine große Variabilität auf. Als Beispiele seien Schweißmaschinen für unterschiedliche Anwendungen, Reinigungsbecken und Schneidemaschinen genannt. Diese unterscheiden sich unter anderem in der eingesetzten Arbeitsfrequenz (s. Tabelle 1). Industrielle Ultraschallmaschinen arbeiten mit einer hohen Leistung. Allerdings wird auch bei anderen Prozessen, wie z.B. der Reinigung mittels Druckluft und bei klassischen Schweißverfahren, z.T. Ultraschall in die Luft emittiert.

**Tabelle 1:** Maschinentypen und deren typische Arbeitsfrequenzen (nach VDI 3766, Tabelle 1 [8])

Anwendung	Typische Frequenzbereiche von	bis
Reinigen	20 kHz	5 MHz
Schweißen	15 kHz	70 kHz
Bohren / Schneiden	16 kHz	50 kHz
Materialprüfung	30 kHz	100 MHz

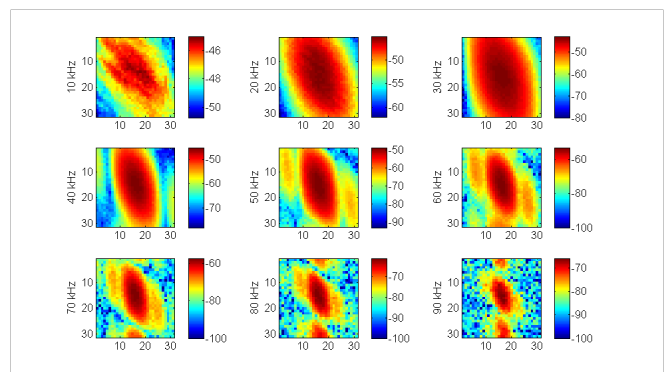
### Ultraschallfelder

Die von Maschinen emittierten Ultraschallfelder sind bisher unbekannt. Es existieren jedoch Laborverfahren zur Charakterisierung von Ultraschallfeldern im Allgemeinen (vgl. [9]). Aufgrund der wesentlich kürzeren Wellenlänge von Ultraschall im Vergleich zu Schall im Hörfrequenzbereich (vgl. Tabelle 2) ergibt sich eine größere räumliche Komplexität des Schallfeldes im Ultraschallbereich.

**Tabelle 2:** Typische Frequenzen mit zugehöriger Wellenlänge in Luft. Eine Frequenz von 1 kHz ist typisch für Kalibratoren, die zur Vor-Ort-Überprüfung der Kalibration von Schallpegelmessern eingesetzt werden. 16 kHz stellt die obere Grenze des „Hörschallbereichs“ dar und bei 20 kHz handelt es sich um eine typische Arbeitsfrequenz von Ultraschall-Schweißmaschinen. Die übrigen Frequenzen stellen Sub-Harmonische (10 kHz) und Harmonische (40 kHz) dieser Arbeitsfrequenz dar.

Frequenz [kHz]	Wellenlänge [mm]
1	343
10	34,3
16	21,44
20	17,15
40	8,58

In einem Versuch von Kling und Walther [9] konnte das durch einen Bändchen-Hochtöner erzeugte Schallfeld räumlich hochauflösend abgetastet werden (Abb. 1). Hierbei wurde eine deutliche Variation des Pegels auf einer Fläche von nur 900 cm<sup>2</sup> beobachtet. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Frequenz.



**Abbildung 1:** Ultraschallfeld eines Bändchen-Hochtöners. Abstand 0,5 m. x und y in cm (vgl. [9], Abb. 7)

## Normen

Bei den im Arbeitsschutz angewandten Verfahren zur „Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz“ [3] bleibt der Einfluss von luftgeleitetem Ultraschall bisher unberücksichtigt, oder dessen Anteil am Gesamtschalldruckpegel wird durch entsprechende Frequenzbewertungen (U und AU) gezielt unterdrückt, um die Lärmexposition im Hörschallbereich korrekt ermitteln zu können [8]. Die Verfahren sollten auf ihre Eignung zur Messung des Ultraschallanteils am Gesamtschalldruckpegel überprüft werden. Dabei muss der Komplexität von Schallfeldern im Ultraschallbereich besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

## Grenzwerte

In Deutschland findet sich für die Bewertung von luftgeleitetem Ultraschall ein Grenzwert von 110 dB für die Terz mit der Mittenfrequenz 20 kHz ( $L_{Z, \text{Terz}, 20 \text{ kHz}}$ ) [7]. Darüber hinaus nennt die VDI 3766 Richtwerte von 85 dB für den AU-bewerteten Lärmexpositionspegel ( $L_{\text{EXAU}, \text{sh}}$ ) und von 140 dB für den ungewichteten Spitzenschalldruckpegel ( $L_{Z, \text{peak}}$ ). International existieren weitere Grenz- und Richtwerte [5], die sich in einer ähnlichen Größenordnung bewegen.

## Entwicklung eines Messverfahrens

Eine für die Beurteilung der Ultraschallbelastung an Arbeitsplätzen geeignete Messstrategie muss daher iterativ durch Auswertung bereits existierender Daten, Evaluation bestehender Verfahren und Praxistests entwickelt werden. Hierzu ist die Durchführung folgender Schritte in der hier genannten Reihenfolge geplant:

1. Untersuchung existierender Messverfahren auf ihre Anwendbarkeit im Ultraschallbereich und Überblick über Arbeitsplätze
2. Auswertung von durch das IFA und die Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG ETEM) erhobenen Messdaten [4] hinsichtlich verschiedener Parameter
3. Aufbau eines Referenzmessplatzes im Portalscanner der PTB (s. Abb. 2) und am IFA (s. Abb. 3)
4. Durchführung praktisch orientierter systematischer Untersuchungen am Referenzmessplatz
5. Anwendung der erarbeiteten Methode in der Praxis und ggf. Anpassung an praktische Bedürfnisse

Die Schritte 1 und 2 bestehen im Wesentlichen aus Literaturrecherche und der statistischen Auswertung vorhandener Messdaten von bereits durchgeführten Betriebsmessungen. Zu diesem Zweck wurden zunächst einige relevante Normen und Richtlinien untersucht, die sich mit Messvorschriften und Messgeräteeigenschaften beschäftigen. Unter anderem wurden DIN EN ISO 9612 [3] und VDI 3766 [8] sowie DIN EN 61672-1 [1] und DIN EN 61012 [2] eingehend studiert. Die Auswertung etablierter Messvorschriften hinsichtlich deren Anwend-



**Abbildung 2:** 3-Achsen-Portalscanner zur räumlich hochauflösenden Abtastung von Schallfeldern (vgl. [9], Abb. 2).

barkeit zur Beurteilung von Ultraschall lieferte einen Startpunkt für die Entwicklung einer Messstrategie.

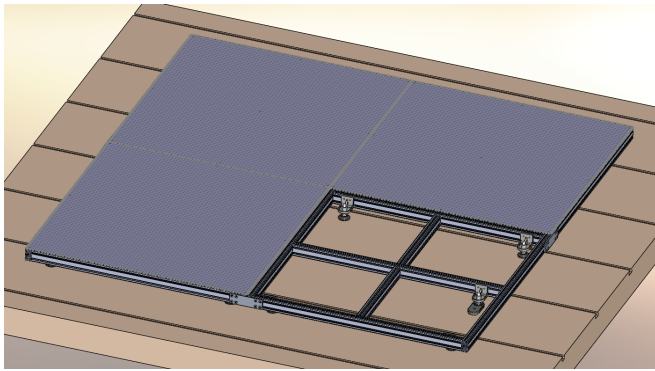
Zur Gestaltung eines Referenzarbeitsplatzes, insbesondere für die Auswahl einer geeigneten Referenzschallquelle, sind Kenntnisse über die Häufigkeit der eingesetzten Maschinen unerlässlich. Als Referenzschallquelle sollte eine Maschine gewählt werden, die eine häufig vorkommende Kombination von Maschinenkategorie und Arbeitsfrequenz repräsentiert.

Nachdem der Referenzmessplatz mit Hilfe der Ergebnisse aus den Schritten 1 und 2 definiert wurde, wird er in Schritt 3 am IFA und an der PTB aufgebaut. Während am IFA in Schritt 4 ein an der Praxis orientiertes Konzept verfolgt werden soll, d.h. die Lärmbelastung durch möglichst wenige repräsentative Punkte ermittelt werden soll, wird die Schallquelle an der PTB räumlich hoch auflösend abgetastet. Aus der Kenntnis des Schallfeldes ergeben sich möglicherweise besonders zu berücksichtigende Bereiche an einer Maschine, die in die Entwicklung einer Messstrategie eingearbeitet werden müssen.

In Schritt 5 wird die entwickelte Methode in der Praxis erprobt und entsprechend adaptiert. Sollte sich z.B. die Anzahl der vorgesehenen Messpunkte als unzureichend oder unpraktikabel herausstellen, wird die Methode dahingehend überarbeitet.

## Ergebnisse

Die im vorigen Abschnitt vorgestellten Schritte 1 und 2 sind bereits abgeschlossen. In den beiden Normen DIN EN ISO 9612 und DIN EN 61672-1 wird im Abschnitt „Anwendungsbereich“ explizit darauf hingewiesen, dass diese für Messungen im Hörschallbereich vorgesehen sind. Entsprechend beschränkt sich die DIN EN 61672-1 auf Messgeräteeigenschaften bis 20 kHz. DIN EN 61012 spezifiziert erweiterte Anfor-



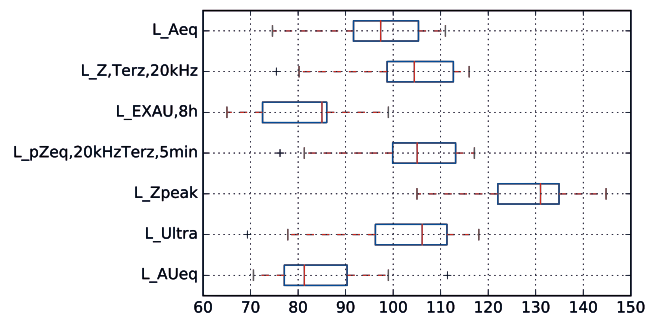
**Abbildung 3:** 3-D-Darstellung des im IFA geplanten Versuchsaufbaus. Dieser dient dem reproduzierbaren Aufbau des Referenzarbeitsplatzes und der Einführung eines Koordinatensystems zum Datenaustausch mit der PTB. Vier lasergraavierte Platten werden auf einem Grundgerüst nivelliert und so ausgerichtet, dass das gravierte Raster aneinander anschließt. Der gesamte Aufbau wird in Schienen mit dem Boden verankert.

derungen an Messgeräte und führt außerdem die U- und AU-Bewertungen zur Unterdrückung des Ultraschallanteils am Gesamtschalldruckpegel ein. Die Richtlinie VDI 3766 dient der Bestimmung der Lärmexposition im Hörschallbereich bei Anwesenheit von Ultraschall. Dementsprechend ist dort die Unterdrückung des Ultraschallanteils vorgesehen; die zur Beurteilung der Lärmbelastung vorgesehenen Größen sind ein AU-bewerteter Lärmexpositionspegel und der Z-bewertete Spitzenschalldruckpegel. Diese Richtlinie erweitert außerdem die Anforderungen an Schallpegelmessgeräte, z.B. hinsichtlich der höchsten zu messenden Frequenz. Diese soll mindestens 40 kHz betragen bzw. die Nennarbeitsfrequenz der am untersuchten Arbeitsplatz eingesetzten Maschine einschließen. Außerdem werden erhöhte Anforderungen an Grenzabweichungen der Z-Bewertung gestellt, diese soll erst ab 50 kHz um  $-\infty$  dB abweichen dürfen.

Eine nicht repräsentative Auswertung von Messungen an Arbeitsplätzen mit Ultraschallbelastung zeigt, dass am häufigsten Schweißmaschinen, Reinigungsbecken und Schneidemaschinen mit Arbeitsfrequenzen zwischen 20 kHz und 40 kHz zum Einsatz kommen. Die Kapselung der Maschinen variierte stark. So wurden Maschinen ohne Kapselung sowie voll gekapselte Maschinen beobachtet, aber auch Maschinen, deren Kapselung z.B. zur Produktivitätssteigerung entfernt wurde.

Die durch das IFA und die BG ETEM erhobenen Daten wurden hinsichtlich der bestehenden Richt- und Grenzwerte ausgewertet. Dafür wurden die Daten nach Arbeitsfrequenz und Maschinenkategorie gruppiert. Eine statistische Auswertung wurde nur für Schweißmaschinen mit einer Arbeitsfrequenz von 20 kHz durchgeführt, da nur in dieser Kategorie ausreichend Messwerte vorhanden waren (Abb. 4).

Der für die Beurteilung der Lärmexposition im Hörschallbereich eingesetzte  $L_{Aeq}$  wird an nahezu allen gemessenen Arbeitsplätzen überschritten. Die für die Be-



**Abbildung 4:** Auswertung der Messungen an Ultraschall-Schweißmaschinen mit einer Arbeitsfrequenz von 20kHz; Skalierung in dB.  $N_{L_{Z,peak}}$ : 53;  $N_{L_{AUeq}}$ : 63;  $N_{L_{Z, Terz, 20kHz}}$ : 36;  $N_{L_{EXAU, 8h}}$ : 23;  $N_{L_{Aeq}}$ : 36.

urteilung der Lärmexposition im Hörschallbereich unter Anwesenheit von Ultraschall existierenden Grenz- und Richtwerten werden hingegen nur an einigen Arbeitsplätzen überschritten. Der Grenzwert für den  $L_{Z, Terz, 20kHz}$  wird an deutlich über 50 % der Arbeitsplätze eingehalten. Der Richtwert für den  $L_{EXAU, 8h}$  wird nur an 50 % der Arbeitsplätze eingehalten. Die Überschreitungen sind jedoch, von einigen Ausreißern abgesehen, im Bereich von wenigen dB. Der Richtwert für den  $L_{Z, peak}$  wird nur an wenigen Arbeitsplätzen überschritten.

## Diskussion

Die beiden wichtigsten Normen im Zusammenhang mit der Bestimmung der Lärmexposition (DIN EN 61672-1 und DIN EN ISO 9612, [1, 3]) enthalten Einschränkungen bzgl. der Anwendbarkeit im Ultraschallbereich. Neben der Tatsache, dass die Anwendbarkeit dieser beiden Normen für Messungen von luftgeleitetem Ultraschall bereits im Vorwort ausgeschlossen wird, sind sie aufgrund weiterer praktischer Einschränkungen nicht für die Entwicklung einer neuen Messmethode geeignet. Die Akzeptanzgrenzen der Frequenzbewertungen, wie sie in der DIN EN 61672-1 gefordert sind, sind für Messungen im Ultraschallbereich unzureichend, da gerade bei hohen Frequenzen eine zu hohe Abweichung toleriert wird. Die DIN EN ISO 9612 lässt die Komplexität des Schallfeldes unberücksichtigt.

Obwohl die VDI 3766 nicht zur Bestimmung des Ultraschallanteils am Gesamtschalldruckpegel vorgesehen ist, werden die Schwächen der zuvor genannten Normen thematisiert und zum Teil ausgeglichen. Dabei wird für die grundlegende Methode auf die Ausführungen der DIN EN ISO 9612 zurückgegriffen. Die VDI 3766 weist jedoch z.B. explizit auf die Komplexität des Schallfeldes hin und greift die Problematik durch zu hohe tolerierte Abweichungen der Frequenzbewertungen auf und weist erhöhte Anforderungen an Schallpegelmessgeräten aus. Außer-

dem wird die Verwendung des in der DIN EN 61012 definierten U- bzw. AU-Filters gefordert. Die VDI 3766 bietet also bereits eine gute Grundlage für die Entwicklung einer neuen Methode.

Bei der Analyse von Arbeitsplätzen wurde der Fokus bewusst auf Arbeitsplätze an Ultraschallmaschinen gelegt, andere mögliche Quellen blieben zunächst unberücksichtigt, da die beobachtete Problematik hinsichtlich Beschwerden von Arbeitnehmern häufig mit Ultraschallmaschinen in Zusammenhang stehen. Die Analyse der Arbeitsplätze und die statistische Untersuchung der vorhandenen Messdaten legen eine größere Verbreitung von Schweißmaschinen mit einer Arbeitsfrequenz von 20 kHz nahe. Allerdings ist dabei zu beachten, dass durch das IFA und die BG ETEM nur Messungen an Arbeitsplätzen durchgeführt wurden, an denen es z.B. aufgrund des Auftretens von deutlich hörbaren Subharmonischen der Arbeitsfrequenz zu Beschwerden seitens der Mitarbeiter kam. Da keine repräsentative Untersuchung zur Häufigkeitsverteilung von Ultraschallmaschinen durchgeführt wurde, bilden die hier vorgestellten Ergebnisse wahrscheinlich ein verzerrtes Bild der Realität ab.

Durch Betrachtung des LULTRA (eine durch das Brüel & Kjær Filterset 1627 eingeführte Frequenzbewertung zur Ausblendung des Hörschallanteils bei ansonsten neutraler Gewichtung) wird der hohe Anteil an luftgeleitetem Ultraschall an den aufgesuchten Arbeitsplätzen deutlich. Während für die Beurteilung der Lärmexposition im Hörschallbereich bei Anwesenheit von Ultraschall mit den vorhandenen Grenz- und Richtwerten bereits geeignete Messgrößen existieren, ist dies für den Ultraschallanteil der Lärmbelastung noch nicht der Fall.

## Zusammenfassung und Ausblick

Für den Arbeitsschutz ergibt sich die Notwendigkeit zur Entwicklung einer Methode zur Messung von luftgeleitetem Ultraschall an Arbeitsplätzen. Diese soll Defizite in existierenden Methoden ausgleichen, wobei insbesondere hohe Ansprüche bezüglich der Verlässlichkeit und praktischen Anwendbarkeit bestehen. Aus diesem Grund wurden zunächst etablierte Methoden auf ihre Anwendbarkeit und Erweiterbarkeit hin untersucht. Zur weiteren Entwicklung der Methode werden Messungen an einem Referenzarbeitsplatz durchgeführt, um die besonderen Anforderungen z.B. durch die Komplexität des Schallfeldes abbilden zu können.

Nach der Fertigstellung des Referenzarbeitsplatzes werden praktisch orientierte systematische Untersuchungen am IFA und Messungen im Portalscanner der PTB durchgeführt. Eine aus diesen Untersuchungen resultierende Messmethode wird im Anschluss in einer Feld-Messkampagne überprüft und ggf. so angepasst, dass die praktische Anwendbarkeit und die korrekte Erfassung der Ultraschallbelastung gewährleistet ist. Das resultierende Verfahren soll in die Normung einfließen.

## 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] DIN EN 61672-1:2014-07 Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 1: Anforderungen (IEC 61672-1:2013); Deutsche Fassung EN 61672-1:2013
- [2] DIN EN 61012:1998-09 Filter für die Messung von hörbarem Schall im Beisein von Ultraschall (IEC 61012:1990); Deutsche Fassung EN 61012:1998
- [3] 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
- [4] H. Kusserow. *Kritische Betrachtung der deutschen Beurteilungskriterien für berufliche Ultraschalleinwirkungen auf das Gehör im Rahmen eines internationalen Vergleichs und am Beispiel von Ultraschall-Schweißmaschinen*. Masterarbeit, Dresden International University, Dresden 2015.
- [5] B.W. Lawton. *Damage to human hearing by airborne sound of very high frequency or ultrasonic frequency*. Prepared by the Institute of Sound and Vibration Research for the Health and Safety Executive. Sudbury: HSE Books, 2001.
- [6] Metrology for modern hearing assessment and protecting public health from emerging noise sources, URL: <http://www.ears-project.eu/>
- [7] VDI 2058 Blatt 2:1988-06 Beurteilung von Lärm hinsichtlich Gehörgefährdung
- [8] VDI 3766:2012-09 Ultraschall - Arbeitsplatz - Messung, Bewertung, Beurteilung und Minderung
- [9] Sonja Walther und Christoph Kling. „3-D-Vermessung von Luftschallfeldern“. In: DAGA 2015. 41. Jahrestagung für Akustik „Fortschritte der Akustik“. 16.-19. März 2015, Nürnberg. S. 239 - 242. Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Berlin 2015.