

## Bemessung und Bewertung 'nicht-hörbaren' Lärms

Christoph Kling<sup>1</sup>, Robert Kühler<sup>2</sup>

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig,

E-Mail: <sup>1</sup>christoph.kling@ptb.de, <sup>2</sup> robert.kuehler.ptb.de

### Einleitung

Lärm birgt große gesundheitliche Risiken für den Menschen. Diese Aussage ist vielfach nachgewiesene Tatsache für den klassischen Hörbereich von ca. 20 Hz bis 16 kHz. Untersuchungen mehren sich, die auch eine schädliche Wirkung von ‚nicht-hörbarem‘ Lärm nachweisen, also übermäßigem Schall im Infraschall- und Ultraschallfrequenzbereich. Die Lärmbelastung hat in den letzten Jahrzehnten durch die wachsende Technisierung stetig zugenommen. Dies gilt für den privaten Bereich (z.B. Marderscheuchen), den professionellen Bereich (z.B. Ultraschallschweißanlagen, Infraschall durch Klimaanlage) wie den öffentlichen Bereich (Infraschall durch z.B. Windkraftanlagen oder große Maschinen in der Nachbarschaft, Ultraschall durch Ortungs- und Steuerungssysteme). Während der Infraschalllärm zunehmend in Öffentlichkeit und Fachwelt wahrgenommen und diskutiert wird, ist der Ultraschalllärm und seine Wirkung auf den Menschen noch weitgehend unerforscht.

Das im Rahmen des European Metrology Research Programme (EMRP) des EURAMET geförderte EARS-Projekt [1] befasst sich mit dieser Problematik. Grundlegende Fragestellungen um die Wahrnehmung und die Wirkung von ‚nicht-hörbarem‘ Schall auf den Menschen werden untersucht, um Risiken qualitativ zu erfassen, zu verstehen und zu quantisieren.

### Der Untersuchungsansatz

Der Ansatz des EARS-Projekts besteht in der qualitativen und quantitativen Untersuchung des ‚Wahrnehmungsmechanismus‘ mit objektiven Messmethoden. Dazu werden Hirnaktivitäten von Probanden während der gezielten Exposition von Infraschall- bzw. Ultraschallsignalen untersucht. Möglich wird dies durch die Methoden der Magnetenzephalographie (MEG) und der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT, engl. fMRI). Einfach ausgedrückt ist das MEG ein sehr sensibler Magnetfeldsensor, der die durch Hirnströme verursachten Magnetfelder um den Kopf eines Probanden vermisst. Im fMRT wird letztlich durch Anlegen eines starken Magnetfeldes die Sauerstoffsättigung in bestimmten Hirnarealen bestimmt. Beide Methoden erlauben Hirnaktivitätsmessungen, wobei MEG die bessere Zeitauflösung, fMRT die bessere Ortsauflösung bietet. Sie gestatten die objektive Erfassung von Hirnaktivitäten auf einen auditiven Stimulus, unabhängig von der subjektiven Wahrnehmung des Probanden. Ziel ist es, für verschiedene Schallsignale die Hirnaktivierung mit den Schalldruckpegeln zu korrelieren und daraus Schlussfolgerungen über die Eignung von Beurteilungsgrößen und über mögliche Grenzwerte zu ziehen.

Die Studie ist zurzeit noch im Gange, daher können hier nur vorläufige Ergebnisse berichtet werden. In den Untersuchungen zum Infraschall gelang es, Hörschwellen und Kurven gleicher Lautstärkepegel (engl. Equal Loudness Contours, ELCs) für eine Gruppe von Probanden zu bestimmen. Über Resultate und Schlussfolgerungen dazu wurde schon an anderer Stelle berichtet [2, 3, 13]. Dieser Beitrag beschränkt sich daher im Folgenden auf den Ultraschallbereich.

### Wahrnehmung von Luftultraschall

Die Durchführung der Untersuchungen im Ultraschall-Frequenzbereich erwies sich als messtechnisch schwierig. Grund hierfür ist, dass eine Ultraschallquelle für ausreichende und reproduzierbare Pegel am Ohr des Probanden in Ohrnähe positioniert werden muss. Dadurch stören die durch Ströme und bewegte Bauelemente verursachten Magnetfelder der Quelle das MEG bzw. fMRT. Mit einer speziell konzipierten Quelle (Abbildung 1) konnten ausreichend störungsfrei Schalldruckpegel von bis zu 120 dB (re 20  $\mu$ Pa) am Ohreingang erzeugt werden.

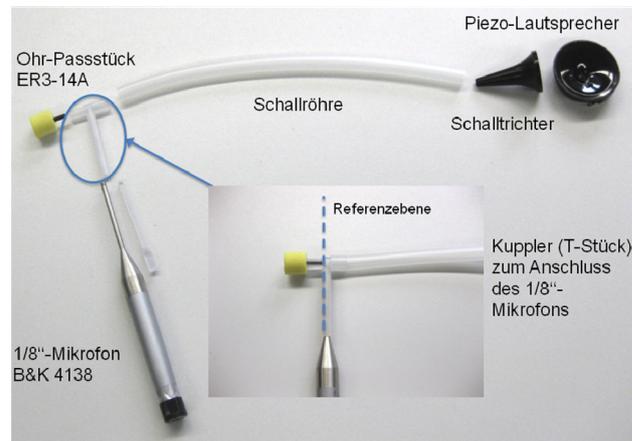
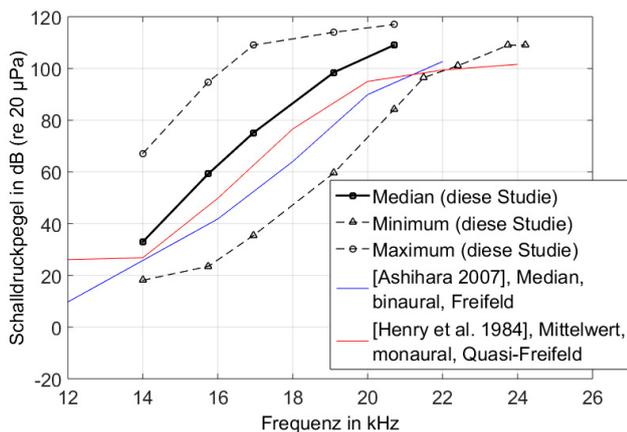


Abbildung 1: MEG- und fMRT-geeignete Luftultraschall-Quelle.

In Voruntersuchungen wurden nach klassischem Verfahren mit Probandenbefragung individuelle Hörschwellen bis ca. 21 kHz, in einzelnen Fällen bis ca. 24 kHz bestimmt. Stimuli waren monofrequente Ton-Burst-Signale. Es nahmen 26 otologisch normale männliche und weibliche Probanden im Alter zwischen 19 und 33 Jahren teil. Abbildung 2 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse als frequenzabhängige maximale und minimale gemessene Hörschwellen und den Median über alle verfügbaren Messwerte. Die gefundenen Schwellen liegen im Bereich verfügbarer Literaturwerte. Unterschiede können auch auf verschiedene Messmethoden und Schalldruckpegel-Kalibrierungen und unterschiedliche

Probandenkonstellationen zurückgeführt werden. Oberhalb von 21 kHz lag für etwa zwei Drittel der Probanden die Hörschwelle über dem größten herstellbaren Schalldruckpegel, bei 24 kHz konnte nur noch für 3 der Probanden eine Schwelle gefunden werden. Die Auswertungen sind in den folgenden Graphiken daher teilweise auf den Bereich beschränkt, in dem die Mehrzahl (21 von 26) der Probanden vermessen werden konnten. Weitere für die folgenden Überlegungen weniger relevante Detailangaben zu den hier durchgeführten Messungen können in [4] gefunden werden.



**Abbildung 2:** Zusammengefasste individuelle Hörschwellen aus dieser Studie im Vergleich mit Literaturwerten.

Auffällig ist die große Streubreite der Hörschwellen. So bestehen Unterschiede zwischen einzelnen Probanden von 70 dB und mehr bei einzelnen Frequenzen. Auch die Steilheit der Hörschwellen variiert individuell. Die Probanden wurden nach der Durchführung zum Hörversuch befragt. Interessant ist die Beobachtung, dass die Tonhöhenwahrnehmung zu hohen Frequenzen hin abnimmt, die Wahrnehmung einer unangenehmen Störung an sich jedoch nicht.

Die Untersuchungen im MEG und fMRT sind zum Zeitpunkt der Manuskripterstellung noch im Gange. Es gelang, Hirnaktivitäten bis zu ca. 24 kHz nachzuweisen. Höhere Frequenzen wurden aufgrund des begrenzten herstellbaren Schalldruckpegels nicht untersucht.

## Mögliche Lärmmaße für Luftultraschall

Eine quantitative Bewertung von möglichen Bemaßungsgrößen für Luftultraschall ist mit den vorliegenden Daten noch nicht möglich. Daher sollen im Folgenden mögliche Lärmmaße qualitativ diskutiert werden.

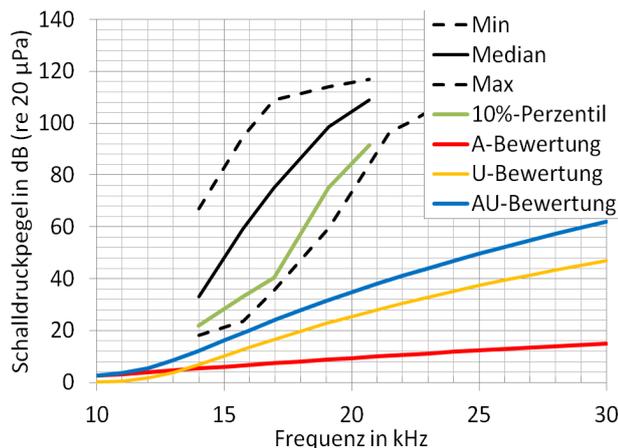
Naheliegender ist zunächst die Suche nach einer der menschlichen Wahrnehmung kongruenten Frequenzbewertung ähnlich zur A-Bewertung, die in DIN EN 61672-1 [5] über den (erweiterten) Hörschallbereich von 10 Hz bis 20 kHz definiert ist. In DIN EN 61012 [6] wurde die U-Bewertung derart definiert, dass Sie in der Pegelsumme von A und U als AU-Bewertung bis zu 40 kHz eine Erweiterung der A-Frequenzbewertung darstellt. Die

Definition ist allerdings rein technisch ohne direkten Bezug zu einer nachgewiesenen menschlichen Wahrnehmung. Sie ist mit dem Ziel ausgewiesen, Ultraschallkomponenten aus einem Schallereignis auszublenden, um den Hörschallanteil ungestört nach klassischen Verfahren bewerten zu können. Mit dieser Zielsetzung ist die Anwendung der U-Frequenzbewertung in einem Ultraschalllärmmass zunächst fragwürdig.

Nichtsdestotrotz wird sie in VDI 3766 [7] aufgrund mangelnder Alternativen als Frequenzbewertung in einem Lärmmaß genutzt. Die Richtlinie fasst den aktuellen Wissensstand um Ultraschalllärm zusammen und definiert zwei Bemaßungsgrößen: den unbewerteten Spitzenschalldruckpegel  $L_{Zpeak}$  und den AU-bewerteten Lärmexpositionspegel über 8 Stunden  $L_{AUE8h}$ . Weiterhin werden für die Anwendung im Arbeitsschutz Grenzwerte genannt: 140 dB (re 20 µPa) für  $L_{Zpeak}$  und 85 dB (re 20 µPa) für  $L_{AUE8h}$ . Bei Einhaltung dieser Grenzwerte soll auf Grundlage der verfügbaren Literatur eine Hörverminderung im Sprachfrequenzbereich verursacht durch Geräusche mit Ultraschallanteil ausgeschlossen werden können. Weiterhin wird auf einen in VDI 2058 [8] definierten Grenzwert von 110 dB (re 20 µPa) des unbewerteten Schalldruckpegels der 20 kHz-Terz verwiesen. Bei Betrachtung typischer Emissionsspektren von Luftultraschallquellen (siehe z.B. [9]) zeigt sich jedoch, dass die Lärmbelastung nicht auf dieses Frequenzband beschränkt ist. Sowohl oberhalb, aber gerade auch unterhalb wird Schallenergie emittiert, letztere durch für viele Ultraschallquellen typische Subharmonische der Betriebsfrequenz. Richtlinien aus anderen Ländern halten Grenzwerte für eine ganze Reihe von Terzbändern vor [10].

Zur Findung von Schutzgrößen und Schutzziele ist zunächst folgende Frage zu beantworten: *Wer ist wogegen zu schützen?* Aus der Probandenbefragung ergab sich eine weitgehend übereinstimmende subjektive Feststellung: Sobald der Luftultraschall wahrgenommen wird, wird er auch als Störung empfunden. Geht man von der sehr konservativen Hypothese aus, dass jede Störung irgendeine Art von gesundheitlichem Risiko birgt, so leitet sich als primäres Schutzziel ab, dass jede Wahrnehmung von Luftultraschall zu vermeiden ist. Die obigen Hörschwellenmessungen zeigen, dass die Wahrnehmung individuell sehr verschieden ist. Es war im Rahmen dieser Studie nicht möglich zu beurteilen, ob die Unterschiede auf angeborenen Eigenschaften oder einer womöglichen Vorschädigung beruhen. Man kann hier von dem Ansatz ausgehen, dass es ausreicht 90% der Betroffenen wirksam zu schützen, und somit das 10%-Perzentil aus Hörschwellenmessungen als allgemeine Wahrnehmungsschwelle zu definieren. Abbildung 3 zeigt das 10%-Perzentil aus den Messwerten der hier durchgeführten Messungen im Vergleich zu den verschiedenen bekannten Frequenzbewertungen. Der direkte Vergleich zeigt, dass die AU-Bewertung die hier definierte Wahrnehmungsschwelle größtenteils unterschätzt. Auch richtet sich die A- und damit die AU-Bewertung streng genommen an der 40 phon-Kurve aus, während eine Hörschwelle bei einem Lautstärkepegel von ca. 3 phon

anzusiedeln ist. Damit kann ein Vergleich nur bedingt gezogen werden.



**Abbildung 3:** Vergleich des 10%-Perzentils aus den Daten dieser Studie mit verschiedenen Frequenzbewertungen.

Ein mögliches Schutzziel wäre demnach die Überschreitung dieser definierten Wahrnehmungsschwelle zu verhindern. Weiterhin wird ein Maß benötigt um eine Über- oder Unterschreitung des Schutzziels zu quantisieren. Ein solches Maß kann zum Beispiel als der Überschreitungswert des Terzbandes mit der maximalen Überschreitung oder als der Summenwert der Überschreitungen aller betroffenen Terzbänder definiert werden. Diese beiden Vorschläge sind angelehnt an den aktuellen Entwurf zur DIN 45680 [11] zur Beurteilung tieffrequenter Geräuschmissionen im Bereich zwischen 8 Hz und 125 Hz. Dort werden zusätzlich psychoakustische Lautheitsaspekte berücksichtigt, die durch Maskierungseffekte zu einer Verschärfung der Beurteilung führen. Es gibt Hinweise, dass auch im Ultraschallbereich ähnliche Effekte auftreten können [12].

### Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein umfangreiches Forschungsprogramm aufgesetzt, um mit objektiven Messverfahren die menschliche Wahrnehmung von Schall außerhalb des klassischen Hörbereichs zu untersuchen. Speziell im Bereich des Luftultraschalls gelang es bisher, an einer Probandengruppe individuelle Hörschwellen bis ca. 24 kHz zu bestimmen. Diese Untersuchungen dienen der Kalibrierung der Signalpegel in Hirnaktivitätsmessungen in MEG und fMRT. Es konnten messbare Hirnaktivitäten bei der Exposition mit Luftultraschall nachgewiesen werden. Bestimmungen von Hirnaktivitäten auf verschiedenen ELCs sollen folgen. Mit diesen Daten kann die Korrelation verschiedener Einzahlwerte zur Bemaßung von Ultraschalllärm mit der Aktivierung des menschlichen Hörapparates quantitativ untersucht werden.

Die hier vorgestellten Untersuchungen sind auf die Wahrnehmung von nicht-hörbarem Schall ausgelegt und damit auf den Schutz vor einer gesundheitsschädlichen Störung. Die bisherige Literatur verfolgt überwiegend nur die Vermeidung einer irreversiblen Schädigung des Hörapparates als Schutzziel. Dieser deutlich rigorosere Ansatz geht zurück auf die grundlegenden Untersuchungen

aus den 1970er- und 1980er-Jahren zum Ultraschallhören, auf denen letztlich weltweit alle derzeit gültigen Richtlinien und Empfehlungen basieren. Die dort festgehaltenen Grenzwerte sind demnach mit dem hier höher gesteckten Schutzziel, bereits eine Störung zu vermeiden, bevor es überhaupt zu einer Schädigung kommen kann, neu zu bewerten. Untersuchungen zur Schädigung des menschlichen Gehörs, wie zum Beispiel 1966 von Parrack durchgeführt (siehe [10]), sind heute schon aus ethischen Gründen schwierig. Bis weitere Untersuchungsergebnisse vorliegen, sollten daher die geltenden Grenzwerte, wie zum Beispiel in VDI 3766, mit Vorsicht und genügend Sicherheitsspielraum eingesetzt werden.

### Literatur

- [1] Projektwebsite, URL: [www.ears-project.eu](http://www.ears-project.eu) oder <http://www.ptb.de/emrp/ears-project.html>
- [2] Robert Kühler, Johannes Hensel, Christian Koch, Martin Bauer, Tillmann Sander-Thömmes: Auditory cortex activation by infrasonic and low-frequency sound of equalized individual loudness. Proceedings Euro-Noise 2015 (in press).
- [3] Christian Koch, Martin Bauer, Simone Kühn, Robert Kühler, Tillmann Sander-Thömmes, Albrecht Ihlenfeld: Hört man bei 8 Hz? Nachweis einer Erregung des primären auditiven Cortexes durch Infraschall mit Hilfe von fMRT und Magnetoencephalographie. 41. Deutsche Jahrestagung für Akustik, Nürnberg, 16-19. März, 2015, Deutschland.
- [4] Robert Kühler: Airborne ultrasound hearing threshold. Ears Project News, Jan 2015. URL: Siehe [1].
- [5] DIN EN 61672-1:2014-07: Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 1: Anforderungen.
- [6] DIN EN 61012:1998-09: Filter für die Messung von hörbarem Schall im Beisein von Ultraschall.
- [7] VDI 3766:2012-09: Ultraschall - Arbeitsplatz - Messung, Bewertung, Beurteilung und Minderung.
- [8] VDI 2058 Blatt 2:1988-06: Beurteilung von Lärm hinsichtlich Gehörgefährdung.
- [9] Christoph Kling, Tobias Michaelis, Sonja Walther: Pegel und Richtcharakteristik von Luftultraschallquellen. Fortschritte der Akustik, DAGA 2014.
- [10] B.W. Lawton: Exposure limits for airborne sound of very high frequency and ultrasonic frequency. Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, ISVR Technical Report No: 334, April 2013.
- [11] DIN 45680:2013-09: Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräuschmissionen (Norm-Entwurf).
- [12] Tadashi Nishimura, Tadao Okayasu, Yuka Uratani, Fumi Fukuda, Osamu Saito, Hiroshi Hosoi: Peripheral perception mechanism of ultrasonic hearing. Hearing Research 277 (2011), 176-183.

- [13] Kühler, Robert; Fedtke, Thomas; Hensel, Johannes; Infrasonic and low-frequency insert earphone hearing threshold. *Journal of the Acoustical Society of America* 137, EL347 (2015); <http://dx.doi.org/10.1121/1.4916795>