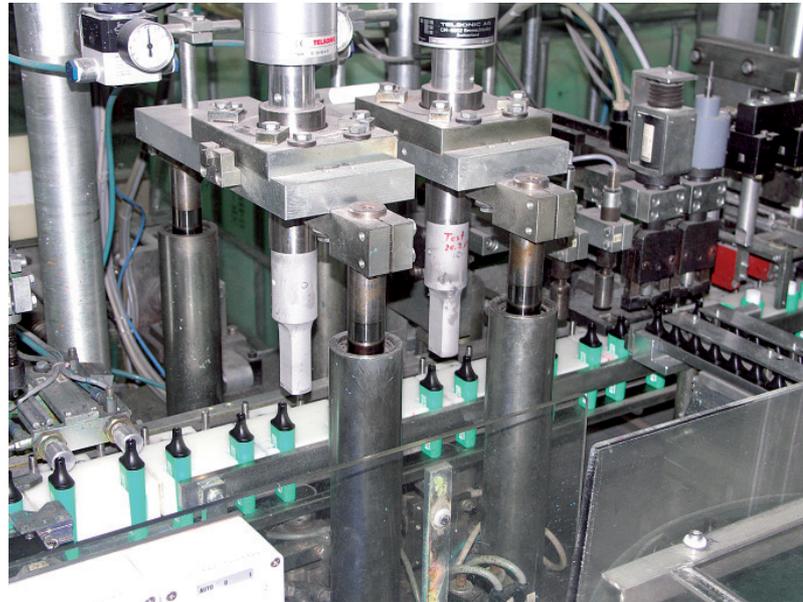


Messung und Beurteilung von Ultraschallgeräuschen am Arbeitsplatz

Jürgen H. Maue, Sankt Augustin

Ultraschall kommt heute in vielen Bereichen der industriellen Produktion zur Anwendung, z. B. zum Reinigen, Schweißen, Bohren und Schneiden. Dabei entstehen an den zugehörigen Arbeitsplätzen i. d. R. tonale Geräuschbelastungen mit mehr oder weniger bedeutenden Anteilen bei Ultraschallfrequenzen wie auch im Hörfrequenzbereich. Da handelsübliche Schallpegelmesser nur für die Erfassung von Geräuschen im Hörschallbereich ausgelegt sind, sind diese Messgeräte nicht ohne Weiteres für die entsprechenden Messungen an Ultraschallanlagen einzusetzen. Erfahrungsgemäß können sich dabei je nach Schallpegelmesser deutlich abweichende Messwerte ergeben.



Mit der Richtlinie VDI 3766 [1] wurde nun der zweite Entwurf einer Richtlinie fertiggestellt, die die Durchführung entsprechender Messungen an Arbeitsplätzen und deren Beurteilung sowie geeignete Lärminderungsmaßnahmen beschreibt. Da die Meinungen bezüglich der Beurteilung von Ultraschallgeräuschen und der dabei anzusetzenden Grenzwerte stark divergierten, hat die Erarbeitung dieser Richtlinie mehr als elf Jahre gedauert. Der neue Entwurf der Richtlinie VDI 3766 wird hier kurz vorgestellt, wobei insbesondere auf die Messgerätetechnik und die zu bestimmenden Kennwerte eingegangen wird.

Darüber hinaus werden Empfehlungen zur Beurteilung der gewonnenen Ergebnisse gegeben.

Vorkommen von Ultraschall

Um einen Überblick über die verschiedenen industriellen Einsatzbereiche von Ultraschall zu geben, werden in der Richtlinie VDI 3766 [1] entsprechende Anwendungen zusammen mit den jeweils üblichen Arbeitsfrequenzen in Form der **Tabelle 1** aufgelistet. Die relativ häufig eingesetzten Verfahren der Ultraschallreinigung und des Ultraschallschweißens werden ausführlich beschrieben. Zur Veranschaulichung der

dabei entstehenden Geräusche finden sich im Anhang der VDI-Richtlinie Beispiele mit den entsprechenden Schmalband- und Terzbandspektren.

Da beim Schweißen mit Ultraschall vielfach besonders hohe Schalldruckpegel mit bedeutenden Anteilen im Hörfrequenzbereich entstehen, sei dieses Verfahren hier kurz erläutert. Das Ultraschallschweißen ermöglicht eine Verbindung von thermoplastischen Kunststoffteilen, wobei auch Metallteile in den Kunststoff eingebettet werden können. Zum Verschweißen der Teile werden sie über die Sonotrode zu Schwingungen angeregt (siehe **Bild 1**). Durch die Grenzflächenreibung an den Fügeflächen wird die eingebrachte Ultraschallenergie absorbiert, sodass sich der Kunststoff erwärmt und die Teile miteinander verschmelzen. Der große Vorteil dieses Verfahrens liegt in der gezielten schnellen Erwärmung der zu verbindenden Kontaktstellen, ohne das übrige Material unnötig zu erwärmen und damit möglicherweise zu verformen. Aufgrund der räumlich begrenzten Erwärmung ist das Verfahren auch besonders energieeffizient.

Ultraschall-Schweißanlagen verursachen stark schwankende Geräuschbelas-

Tabelle 1 Industrielle Ultraschallanwendungen und typische Frequenzbereiche (nach VDI 3766).

Industrielle Anwendungen	Typische Frequenzbereiche
Reinigen	20 kHz bis 5 MHz
Schweißen	15 kHz bis 70 kHz
Aufbereitungs- und Verfahrenstechnik	20 kHz bis 400 kHz
Entgasung von Flüssigkeiten	20 kHz bis 100 kHz
Löten	20 kHz bis 100 kHz
Bohren und Schneiden	16 kHz bis 50 kHz
Abstandsmessungen in Luft	
Füllstandsmessung (gasförmig und flüssig)	40 kHz bis 200 kHz
Zerstörungsfreie Materialprüfung	30 kHz bis 100 kHz

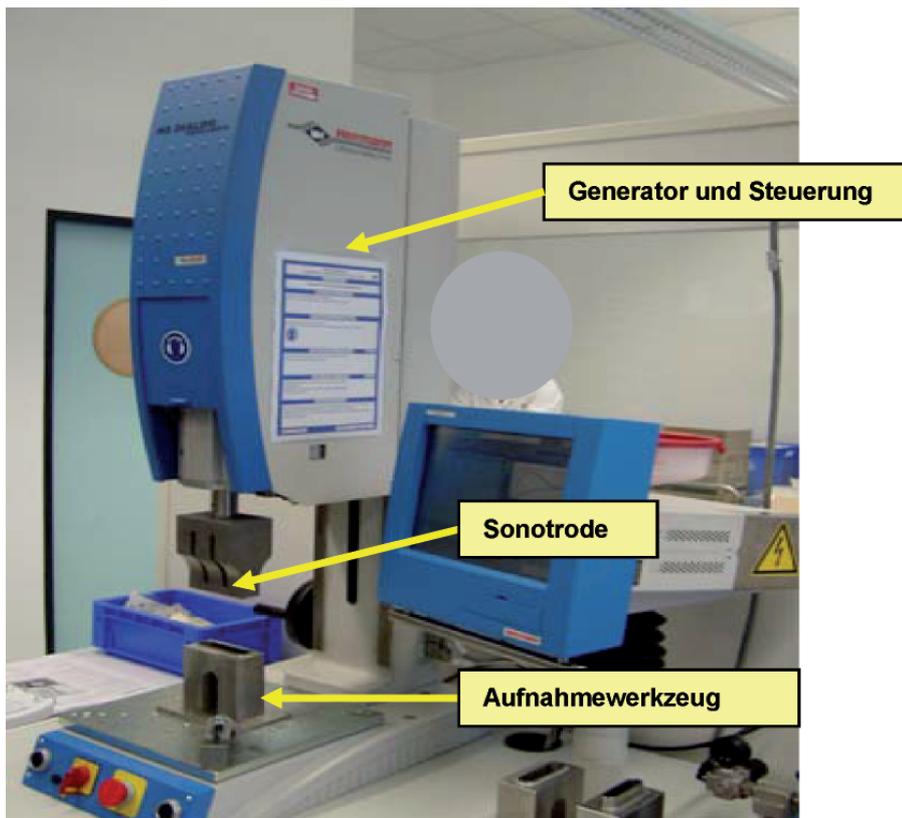


Bild 1 Ultraschall-Schweißmaschine.

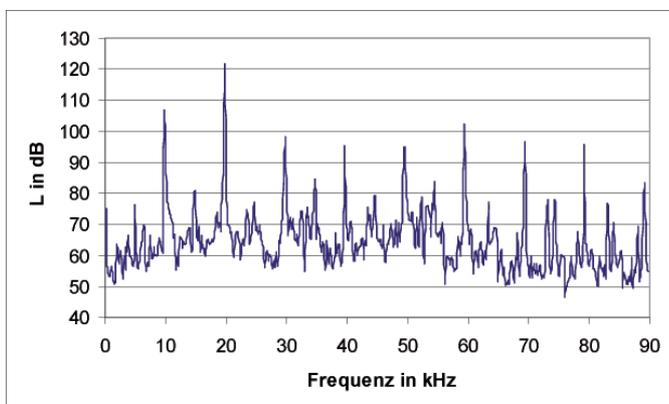


Bild 2 Schmalbandspektrum einer Ultraschall-Schweißmaschine.

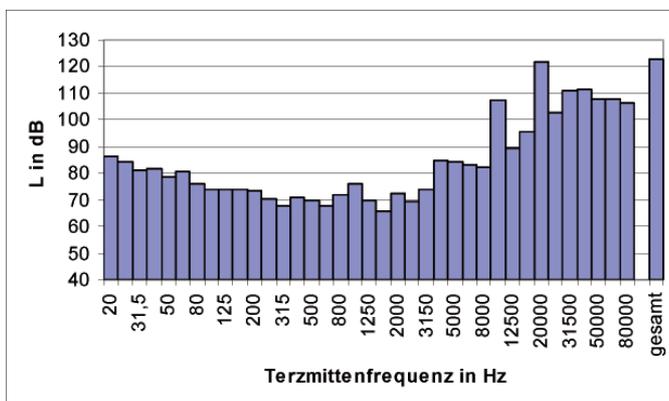


Bild 3 Terzbandspektrum einer Ultraschall-Schweißmaschine.

Bild 2 zeigt das Schmalbandspektrum einer Ultraschall-Schweißmaschine mit einer Arbeitsfrequenz von 20 kHz. Ergänzend dazu ist im Bild 3 das entsprechende Terzbandspektrum dargestellt. Es ist typisch für diese Ultraschallanlagen, dass sich der abgestrahlte Schall aus einzelnen tonalen Anteilen zusammensetzt, die die Gesamtbelastung bestimmen können. Neben der Schallabstrahlung bei der Arbeitsfrequenz ergeben sich i. d. R. auch bei der Hälfte oder einem Viertel der Arbeitsfrequenz sog. Subharmonische (Untertöne), die in den Hörfrequenzbereich fallen und den A-bewerteten Pegel bestimmen können. Oberhalb der Arbeitsfrequenz der Schweißmaschine entstehen jeweils höhere Harmonische.

Messgeräte, Messgrößen und Kennwerte

Die Eigenschaften von Schallpegelmessern sind in der Messgerätenorm DIN EN 61672-1 [2] nur für Frequenzen bis zu 20 kHz beschrieben. Bild 4 zeigt die dort festgelegten Fehlergrenzen für Schallpegelmessers der Klasse 1 (rot) und 2 (blau). Danach werden für Frequenzen oberhalb von 10 kHz relativ große Grenzabweichungen toleriert. Selbst für Schallpegelmessers der Genauigkeitsklasse 1 sind z. B. bei 16 kHz negative Abweichungen bis zu - 17,0 dB zulässig. Deshalb können sich bei der Messung von Ultraschallgeräuschquellen oder sehr hochfrequenten Geräuschen je nach Schallpegelmessers durchaus um 10 bis 20 dB abweichende Messwerte ergeben.

Die in Bild 4 grün eingetragenen Kurven zeigen die in der VDI 3766 definierten Fehlergrenzen, die somit den Einsatz des Schallpegelmessers für höhere Frequenzen erweitern. Der Schallpegelmessers soll damit eine Terzbandanalyse bis zum Terzband mit der Mittenfrequenz von 40 kHz ermöglichen, d. h. er muss den Frequenzbereich bis mindestens 50 kHz erfassen. Für die Mikrofone sind die Durchmesser von ein Viertel Zoll und ein Achtel Zoll vorgegeben, um diesen erweiterten Frequenzbereich abzudecken und den Einfluss der Richtcharakteristik des Mikrofons gering zu halten.

Das Messgerät muss neben der A-Bewertung auch über die Frequenzbewertung U nach DIN EN 61012 [3] verfügen, die die Frequenzen bis 10 kHz unverändert durchlässt, um dann zu höheren Frequenzen relativ steil abzufallen (Dämpfung ca. 25 dB bei 20 kHz, ca. 62 dB bei 40 kHz). Zur Beschreibung des Hörschalls ist der AU-bewertete Schalldruckpegel zu erfassen, der sich aus der

tungen, wobei die höchsten Pegel jeweils zu Beginn des Schweißvorgangs beim

ersten Kontakt der Sonotrode mit dem Werkstück entstehen.

Kombination der A-Bewertung mit der U-Bewertung ergibt (in Reihe geschaltet) und somit den Ultraschallanteil weitgehend unterdrückt. Bild 5 zeigt die bis 40 kHz berechnete A-Bewertung und die AU-Bewertung. Aufgrund der in der DIN EN 61672-1 [2] festgelegten relativ großen Toleranzen der A-Bewertung erfüllt die in der VDI 3766 mit geringeren Toleranzen festgelegte AU-Bewertung noch die entsprechenden Vorgaben für die A-Bewertung.

Als zusätzliche Messgröße und Kennwert ist nach VDI 3766 der Z-bewertete Spitzenschalldruckpegel L_{Zpeak} zu bestimmen.

Schließlich sollte das Messgerät auch eine Echtzeit-Terzbandanalyse ermöglichen, um damit die Belastungssituation genauer zu beschreiben. Optional kann auch eine Schmalband-Analyse durchgeführt werden, sodass sich vorhandene höhere Harmonische oder Subharmonische genau erkennen lassen.

Zur Beurteilung einer Belastungssituation definiert die VDI 3766 Kennwerte, die aus den oben genannten Messgrößen abgeleitet werden. Ein wichtiger Kennwert ist beispielsweise der AU-bewertete Lärmexpositionspegel $L_{EXAU,8h}$, der aus dem für die Arbeitsschicht ermittelten AU-bewerteten äquivalenten Dauerschallpegel L_{AUeq} unter Berücksichtigung der Dauer der Arbeitsschicht (Einwirkzeit) mit Bezug auf acht Stunden berechnet wird. Dieser Kennwert entspricht dem im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung üblicherweise ermittelten Tages-Lärmexpositionspegel $L_{EX,8h}$ nach DIN EN ISO 9612 [4] mit dem kleinen Unterschied, dass nach VDI 3766 der äquivalente Dauerschallpegel in der Frequenzbewertung „AU“ anstelle in „A“ aufzunehmen ist.

Als weiterer Kennwert wird der maximale 5-Minuten-Terzschalldruckpegel $L_{Zeq, Terz, 5min}$ definiert, der die Belastungssituation im jeweiligen Terzband für den lautesten fünfminütigen Zeitabschnitt der Arbeitsschicht beschreibt.

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht über die hier erläuterten nach VDI 3766 zu bestimmenden Messgrößen und Kennwerte.

Durchführung der Messungen

Die Schallexposition an Ultraschall-Anlagen soll vorzugsweise in Abwesenheit des Beschäftigten gemessen werden, um mögliche Schallreflexionen und Abschattungseffekte durch die Personen zu

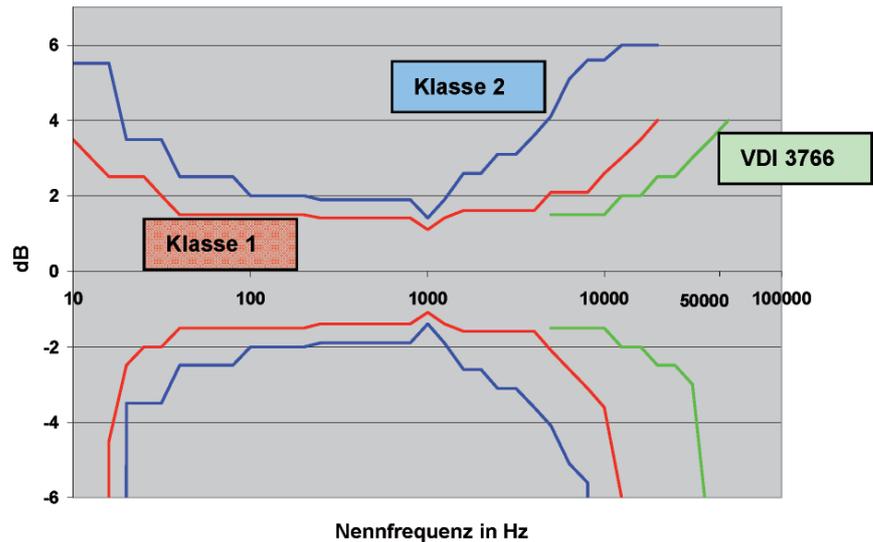


Bild 4 Fehlergrenzen für Schallpegelmesser nach DIN EN 61672-1 (Klasse 1 und 2) und VDI 3766.

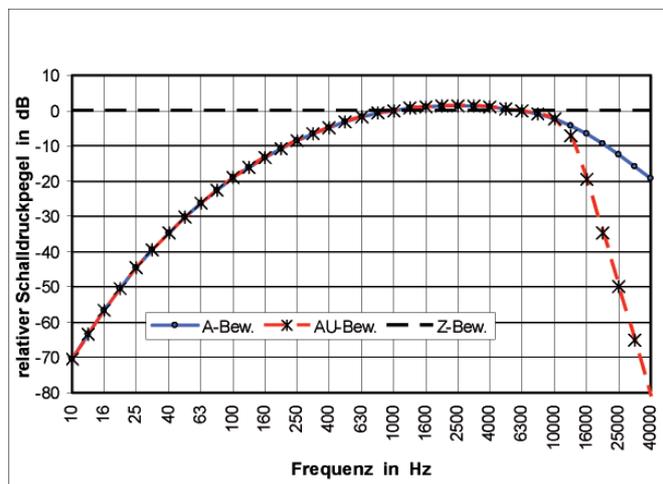


Bild 5 Frequenzbewertungskurven A, AU und Z.

vermeiden. Dabei ist auch zu prüfen, ob es größere örtliche Pegelunterschiede gibt, d. h. die Schallbelastungen sind an mehreren Messpunkten im Arbeitsbereich des Beschäftigten aufzunehmen und miteinander zu vergleichen. Als Messergebnis sind jeweils die Werte für die Position mit der höchsten Schallbelastung festzuhalten.

Alternativ zu der üblichen ortsfesten Messung mit dem Schallpegelmesser sind

auch personengebundene Messungen mit einem entsprechend den Vorgaben der DIN EN ISO 9612 [4] auf der Schulter des Beschäftigten befestigten Mikrofon möglich. Das Mikrofon ist dabei auf der Schulterseite mit der höheren Schallexposition anzubringen. Um die entsprechend höher belastete Seite zu ermitteln, verlangt die VDI 3766 Vergleichsmessungen auf beiden Seiten des Kopfes. Bei dieser personengebundenen Messung muss

Tabelle 2 Messgrößen und Kennwerte nach VDI 3766.

Messgröße/Kennwert	Formelzeichen
AU-bewerteter äquivalenter Dauerschallpegel	L_{AUeq}
AU-bewerteter Lärmexpositionspegel	$L_{EXAU,8h}$
Z-bewerteter Spitzenschalldruckpegel	L_{Zpeak}
Z-bewerteter Terzschalldruckpegel	$L_{Zeq, Terz}$
Maximaler 5-Minuten-Terzschalldruckpegel	$L_{Zeq, Terz, 5min}$
Schmalbandspektrum (optional)	–

Tabelle 3 Messgrößen und empfohlene Höchstwerte für Ultraschallquellen.

Terzbandmittenfrequenz in kHz	Maximaler 5-Minuten-Terzbandpegel $L_{Zeq, Terz, 5min}$ in dB
16	90
20	110
25	110
31,5	110
40	110

man sich aber überlegen, mit welchen Messgeräten dies in der Praxis realisiert werden kann. Handelsübliche Lärmdosimeter kommen dafür aufgrund ungeeigneter Mikrofone und großer Toleranzen bei hohen Frequenzen sicher nicht in Betracht.

Beurteilung von Ultraschallquellen

Richtwerte nach VDI 3766

Die VDI 3766 [1] enthält nur wenige Aussagen zur Wirkung von Ultraschall auf den Menschen, weil die Meinungen innerhalb des zuständigen Arbeitskreises in diesem Bereich zu sehr divergierten. Einigkeit bestand darin, dass luftgeleiteter Ultraschall (Schall mit Frequenzen oberhalb von 16 kHz) keine Hörminderungen im Sprachfrequenzbereich (Frequenzen unterhalb von 8 kHz) verursacht. Strittig war jedoch die Wirkung von Ultraschall im oberen Hörfrequenzbereich, d. h. oberhalb von 8 kHz.

Zur Beurteilung der Schallbelastung im Sprachfrequenzbereich (100 Hz bis 8 kHz) verlangt die VDI 3766 die Bestimmung des AU-bewerteten Lärmexpositionspegels $L_{EXAU, 8h}$. Als zweiter Kennwert ist der Z-bewertete Spitzenschalldruckpegel L_{Zpeak} zu bestimmen. Um Hörminderungen im Sprachfrequenzbereich zu vermeiden, empfiehlt die VDI 3766 die Einhaltung folgender Richtwerte:

- AU-bewerteter Lärmexpositionspegel $L_{EXAU, 8h}$: 85 dB
- Z-bewerteter Spitzenschalldruckpegel L_{Zpeak} : 140 dB

Höchstwerte für hochfrequenten Hör- und Ultraschall

Die VDI 3766 macht keine Vorgaben zur Vermeidung von Hörminderungen im Hörfrequenzbereich oberhalb von 8 kHz. Leider gibt es bisher auch nur relativ wenige Untersuchungen zu Hörschäden in diesem Frequenzbereich, da sich die Audiometrie i. d. R. auf die Frequenzen unterhalb von 8 kHz konzentriert. Deshalb bedarf es weiterer Untersuchungen, z. B. um Ultraschallwirkungen auf

das Gehör im oberen Hörfrequenzbereich genauer beschreiben zu können und daraus gut abgesicherte Richtwerte bzw. Höchstwerte abzuleiten.

Bei Ultraschallbelastungen kommt es für die Beschäftigten aber vielfach auch zu Beeinträchtigungen wie Kopfschmerzen, Schwindel, Übelkeit und Druckgefühl auf den Ohren. Deshalb werden außerdem entsprechende Vorgaben und Richtwerte benötigt, bei deren Einhaltung sich diese Beschwerden vermeiden lassen.

Da die Betreiber von Ultraschallanlagen im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung nach dem Arbeitsschutzgesetz [5] entscheiden müssen, ob für die Beschäftigten an diesen Arbeitsplätzen eine Gefährdung besteht und gegebenenfalls geeignete Schutzmaßnahmen notwendig sind, kann es nicht ausreichen, nur die in der VDI 3766 genannten Richtwerte zum Schutz des Sprachfrequenzbereichs (bis 8 kHz) zu prüfen und andere mögliche Ultraschallwirkungen auszuklammern. Deshalb ist eine weitergehende Analyse der Belastungssituation in Verbindung mit der Festlegung zusätzlicher Richtwerte zu fordern.

Zur genaueren Beschreibung der Belastung im hochfrequenten Bereich empfiehlt sich zunächst eine Terzbandanalyse für den Frequenzbereich bis 40 kHz. Weil Ultraschallwirkungen wie Kopfschmerzen, Schwindel, Übelkeit und Druckgefühl auf den Ohren, ggf. schon nach relativ kurzer Belastungszeit auftreten können, bietet es sich an, als Kennwert jeweils den in VDI 3766 definierten maximalen 5-Minuten-Terzbandpegel $L_{Zeq, Terz, 5min}$ heranzuziehen. In Tabelle 3 sind für diese Terzbandpegel mit den Mittenfrequenzen von 16 bis 40 kHz entsprechende Höchstwerte angegeben, die sich auf der Grundlage entsprechender Empfehlungen in der Literatur und in Richtlinien ableiten lassen.

Die Tabelle beginnt bei der Terzmittefrequenz von 16 kHz, weil für die tieferen Frequenzen durch den oben genannten AU-bewerteten Lärmexposi-

tionspegel eine sinnvolle Begrenzung gegeben ist, die sich an dem mit 85 dB(A) festgelegten oberen Auslösewert der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [6] orientiert. Die AU-Bewertung entspricht im Frequenzbereich bis 10 kHz exakt der A-Bewertung und weicht bei 12,5 kHz nur um 2,8 dB von der A-Bewertung ab (siehe Bild 5). Weil sich durch die U-Bewertung bei 16 kHz im Vergleich zur A-Bewertung jedoch eine deutlich höhere Dämpfung von 13 dB ergibt, wird hier eine gesonderte Erfassung des entsprechenden Terzbandpegels empfohlen. Der in Tabelle 3 für das 16-kHz-Terzband angegebene Höchstwert von 90 dB berücksichtigt die bei dieser Frequenz durch die A-Bewertung gegebene Dämpfung um 6,6 dB, so dass damit der durch die Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung vorgegebene obere Auslösewert von 85 dB(A) eingehalten würde. Im Vergleich zu den Forderungen der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung kann sich mit dem in der Tabelle 3 für das 16-kHz-Terzband genannten Wert nur dadurch eine Verschärfung ergeben, dass dieser Wert für die lauteste Phase gilt und keine Mittelung über die Arbeitsschicht stattfindet.

Für die Terzbänder ab 20 kHz, also für Belastungen im Ultraschall-Frequenzbereich, wird mit Blick auf entsprechende Empfehlungen in der Literatur [7 bis 9] jeweils ein Terzbandpegel von 110 dB als Höchstwert angegeben. Die Richtlinie VDI 3766 verweist in einer Anmerkung auf die VDI 2058 Blatt 2 [10], in der ebenfalls ein Höchstwert von 110 dB genannt wird (Terzband von 20 kHz). Nach der VDI 2058 Blatt 2 lassen sich Beeinträchtigungen durch luftgeleiteten Ultraschall vermeiden, wenn der Wert von 110 dB nicht überschritten wird.

Möglicherweise müssen die hier vorgeschlagenen Höchstwerte aufgrund von Erkenntnissen zukünftiger Untersuchungen nochmals geändert werden. Das gilt z. B. für das unmittelbar an den Hörfrequenzbereich angrenzende Terzband mit der Mittenfrequenz von 20 kHz. Geräusche in diesem Frequenzband werden bei höherer Intensität insbesondere von jüngeren Personen durchaus noch wahrgenommen. Aufgrund der Befürchtung, dass dadurch Hörminderungen im hochfrequenten Hörbereich verursacht werden können, gibt es auch Vorschläge für deutlich niedrigere Höchstwerte bei 20 kHz [11]. Für die Frequenzen oberhalb von 20 kHz

werden dagegen auch höhere Grenzwerte diskutiert [10].

Schlussbemerkung

Die Richtlinie VDI 3766 gibt für Geräusche mit Ultraschallanteilen geeignete Richtwerte vor, um entsprechend belastete Beschäftigte vor Hörminderungen im Sprachfrequenzbereich (bis 8 kHz) zu schützen. Da aber keine konkreten Angaben zum Schutz des Gehörs im oberen Hörfrequenzbereich und zur Vermeidung möglicher anderer gesundheitlicher Beeinträchtigungen durch Ultraschall, wie z. B. Kopfschmerzen, Schwindelgefühle und Übelkeit, gemacht werden, benötigen die Betreiber von Ultraschallanlagen wie auch die Kontrollorgane zusätzliche Richtwerte, an denen sie sich z. B. bei der

Gefährdungsbeurteilung oder bei der Abnahme einer Anlage orientieren können.

Deshalb werden hier auf der Grundlage von in der Literatur und in Richtlinien gegebenen Empfehlungen Höchstwerte für die Terzbandpegel mit den Mittelfrequenzen von 16 bis 40 kHz vorgeschlagen. Auf der Grundlage von kommenden neuen Erkenntnissen zur Wirkung von hochfrequentem Hör- und Ultraschall oder nach weiteren Fortschritten in der Lärminderungstechnik kann man die angegebenen Höchstwerte ggf. reduzieren. Im Übrigen sollten die Betriebe grundsätzlich bemüht sein, die Belastungen für die Beschäftigten zu verringern [5] und somit die hier genannten Höchstwerte möglichst deutlich zu unterschreiten. Hinweise zur Lärmmin-

derung finden sich z. B. im Abschnitt 8 der VDI 3766 wie auch in der von der Schweizerischen Unfallversicherungsanstalt herausgegebenen Broschüre „Ultraschallanlagen als Lärmquellen“ [7]. TS 232



Autor

Dr. **Jürgen H. Maue**,
Institut für Arbeitsschutz
der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung,
Sankt Augustin.

Literaturverzeichnis

- [1] VDI 3766 (Entwurf): Ultraschall – Arbeitsplatz – Messung, Bewertung, Beurteilung und Minderung. Berlin: Beuth Verlag 2011.
- [2] DIN EN 61672-1: Elektroakustik – Schallpegelmesser; Teil 1: Anforderungen. Berlin: Beuth Verlag 2003.
- [3] DIN EN 61012: Filter für die Messung von hörbaren Schall im Beisein von Ultraschall. Berlin: Beuth Verlag 1998.
- [4] DIN EN ISO 9612: Akustik – Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz; Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 (Ingenieurverfahren). Berlin: Beuth Verlag 2009.
- [5] Gesetz über die Durchführung von

- Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG) vom 7. August 1996. BGBl. I, S. 1246.
- [6] Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung – LärmVibrations-ArbSchV) vom 6. März 2007. BGBl. I, S. 261, zul. geänd. 19. Juli 2010. BGBl. I, S. 964.
- [7] Lips, W.; Hohmann, B.: Ultraschallanlagen als Lärmquellen. Schweizerische Unfallversicherungsanstalt, Luzern 1997.
- [8] Brendel, K. et al.: Leitfaden „Nicht-

- ionisierende Strahlung“ – Ultraschall. Fachverband für Strahlenschutz, FS 97-89-AKNIR, September 1997.
- [9] Veit, I.: Betrachtungen über die bisher bekannten Wirkungen von Ultraschall auf das menschliche Gehör. Z. Lärmbekämpfung 27 (1980), S. 188-192.
- [10] VDI 2058 Blatt 2: Beurteilung von Lärm hinsichtlich Gehörgefährdung. Berlin: Beuth Verlag 1988.
- [11] Schust, M.: Biologische Wirkung von luftgeleitetem Ultraschall. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Literaturdokumentation Ld 4. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW 1996.