
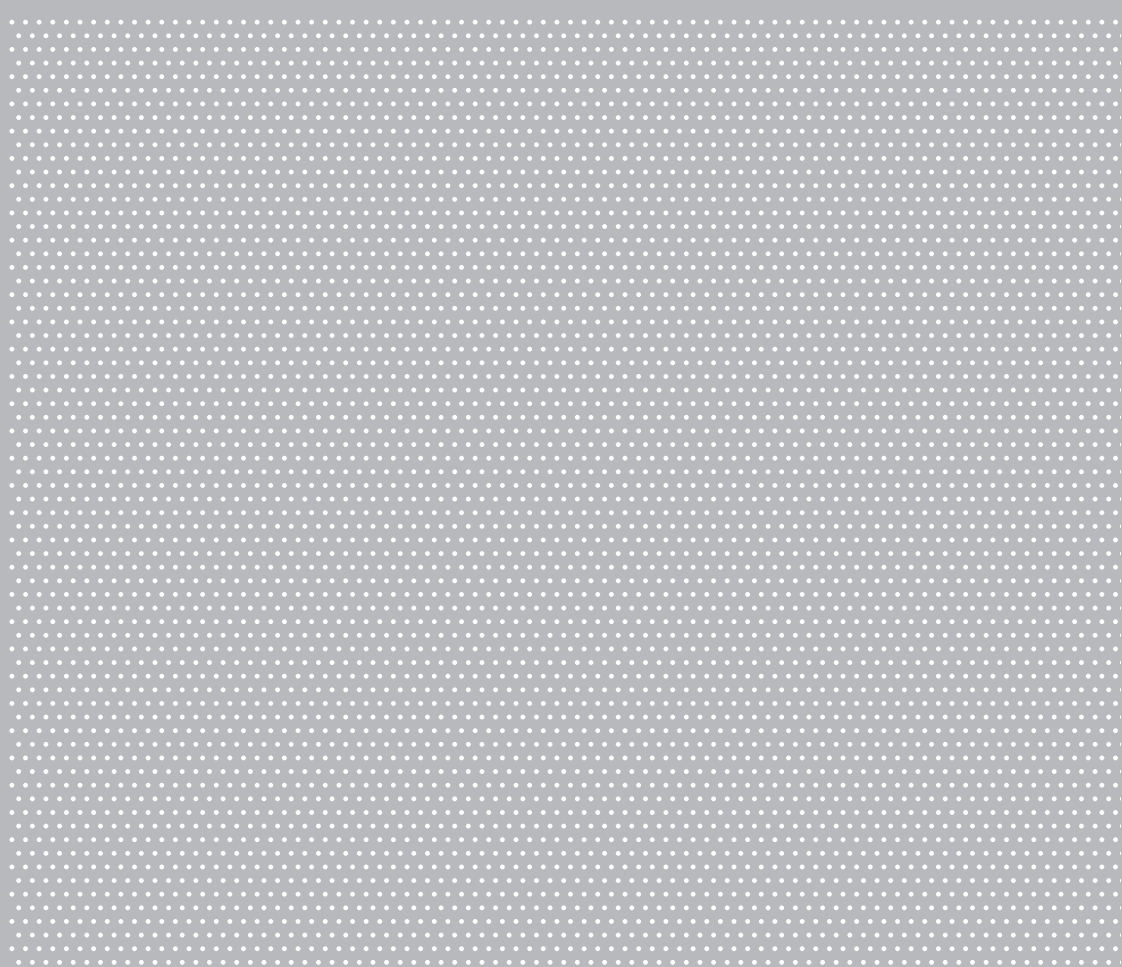


4/2016

IFA Report



Kritische Betrachtung der deutschen Beurteilungskriterien für berufliche Ultraschalleinwirkungen auf das Gehör im Rahmen eines internationalen Vergleichs und am Beispiel von Ultraschall-Schweißmaschinen



Verfasser: Heiko Kusserow
Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse, Köln

Herausgeber: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV)
Glinkastr. 40
10117 Berlin
Telefon: 030 288763800
Fax: 030 288763808
Internet: www.dguv.de
E-Mail: info@dguv.de

– Mai 2016 –

Publikationsdatenbank: www.dguv.de/publikationen

ISBN: 978-3-86423-176-4
ISSN: 2190-7994

Kurzfassung

Kritische Betrachtung der deutschen Beurteilungskriterien für berufliche Ultraschalleinwirkungen auf das Gehör im Rahmen eines internationalen Vergleichs und am Beispiel von Ultraschall-Schweißmaschinen

Damit Arbeitgeber ihrer Pflicht zur Gefährdungsbeurteilung an allen Arbeitsplätzen nachkommen können, bedarf es hinsichtlich aller vorliegenden Einwirkungsarten einer entsprechenden Kenntnis zum Schädigungspotenzial, den Erhebungsmöglichkeiten, Beurteilungskriterien und Schutzmaßnahmen. Bezüglich der Einwirkung von Ultraschall am Arbeitsplatz ist dieses Wissen nicht in vollem Umfang verfügbar. Dieser Report stellt anhand einer Literaturrecherche den aktuellen Kenntnisstand zu den auralen Wirkungen von Ultraschall dar und vergleicht die

deutschen Beurteilungskriterien mit anderen nationalen Standards. Dabei wird deutlich, dass in Deutschland der vorhandene wissenschaftliche Kenntnisstand nicht vollumfänglich in die Gefährdungsbeurteilung einfließt. Mit den Ergebnissen einer an Bediener-Arbeitsplätzen von Ultraschall-Schweißmaschinen durchgeführten Messserie zeigt diese Arbeit einen konkreten Handlungsbedarf für alle am Arbeitsschutz beteiligten Akteure auf.

Abstract

Critical analysis of the German criteria for assessing the impact of occupational ultrasound upon the hearing within an international comparison and with reference to the example of ultrasonic welding machines

Employers have the duty to provide a complete risk assessment for all workplaces within their enterprise. To fulfil this obligation, information about damage potential, evaluation methods, assessment criteria and protective measures for all types of hazards at the workplace is needed. Regarding airborne ultrasound this knowledge is very limited. Based on a literature review this report reflects the current state of knowledge on aural effects caused by ultrasound. German assessment

criteria are presented and compared to national standards worldwide. It is then shown, that the existing scientific knowledge on ultrasound is not completely taken into account in German regulations on risk assessment regarding airborne ultrasound. Using a measurement series performed at workplaces of ultrasonic welding machines as an example, the need for action of all parties involved in occupational safety and health is demonstrated.

Résumé

Examen critique des critères allemands d'évaluation des risques professionnels des ultrasons pour l'audition, mené dans le cadre d'une étude comparative internationale et à l'exemple de soudeuses à ultrasons

Pour que les employeurs puissent, comme ils en ont l'obligation, évaluer les risques émanant des ultrasons à tous les postes de travail, quelle que soit la manière dont agissent ces ultrasons, ils ont besoin de posséder les connaissances adéquates quant à leur potentiel nocif, aux possibilités de les identifier, aux critères d'évaluation et aux mesures de protection. Or, pour ce qui est de l'effet des ultrasons sur le lieu de travail, ces connaissances ne sont pas totalement disponibles. Basée sur une recherche bibliographique, le présente rapport fait le point sur les

connaissances actuelles concernant les effets des ultrasons sur l'audition, et compare les critères allemands d'évaluation avec d'autres standards nationaux. Il en ressort que, en Allemagne, le niveau actuel des connaissances scientifiques n'est pas pleinement mis à profit pour l'évaluation des risques. S'appuyant sur les résultats d'une série de mesures effectuées sur les postes de travail d'opérateurs de soudeuses à ultrasons, la présente étude met en évidence un besoin d'action concret pour tous les acteurs impliqués dans la sécurité et la santé au travail.

Resumen

Análisis crítico de los criterios de evaluación alemanes respecto a los efectos de los ultrasonidos para el oído en el marco de una comparación internacional y basado en el ejemplo de las máquinas soldadoras por ultrasonidos

Para que los empleadores puedan cumplir con su obligación respecto a la evaluación de riesgos en todos los puestos de trabajo, es necesario que dispongan de los conocimientos correspondientes sobre el potencial de causar daños, las posibilidades de recopilar datos, los criterios de evaluación y las medidas de protección respecto a todos los efectos existentes. Respecto a los efectos de los ultrasonidos en el puesto de trabajo no se dispone de todas las informaciones necesarias. Este informe presenta los conocimientos disponibles en la actualidad sobre los efectos aurales de los ultrasonidos sirviéndose de

un estudio bibliográfico y compara los criterios de evaluación alemanes con otros estándares nacionales. En él queda claro que en Alemania los conocimientos científicos existentes no se reflejan en toda su magnitud en la evaluación de riesgos. Con los resultados de una serie de mediciones realizada en los puestos de trabajo de operarios de máquinas soldadoras por ultrasonidos, este trabajo muestra un ámbito concreto en el que es necesario que actúen todos los actores implicados en temas de seguridad en el puesto de trabajo.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
2	Grundlagen zu Schall und Lärm in Bezug zur Arbeitswelt	11
2.1	Allgemeines zu luftgeleitetem Schall im hörbaren Frequenzbereich	11
2.2	Infraschall – Hörschall – Ultraschall	11
2.3	Schalldruckpegelgrößen	12
2.3.1	Schalldruckpegel	12
2.3.2	Maximaler Schalldruckpegel und Spitzenschalldruckpegel	12
2.3.3	Äquivalenter Dauerschalldruckpegel	12
2.3.4	Tages-Lärmexpositionspegel	12
2.4	Lärm am Arbeitsplatz	12
2.5	Ultraschallanwendungen in der Arbeitswelt	13
2.5.1	Ultraschallschweißen	14
3	Wirkungen von Schall auf das menschliche Gehör	15
3.1	Aufbau und Funktion des menschlichen Gehörs	15
3.2	Die Tonaudiometrie	16
3.3	Chronische Gehörschäden mit Blick auf das einwirkende Frequenzspektrum	16
3.3.1	Gehörschäden durch Lärm mit dominantem Spektrum im Sprachfrequenzbereich (bis 8 kHz)	17
3.3.2	Gehörschäden durch Lärm mit dominantem Spektrum oberhalb des Sprachfrequenzbereichs und/oder unterem Ultraschallbereich (8 bis 20 kHz)	19
3.3.3	Gehörschäden durch Ultraschall und seine Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich (ab 8 kHz)	21
3.3.4	Fazit zur Literaturrecherche hinsichtlich lärmbedingter bzw. ultraschallbedingter, chronischer Gehörschäden	25
3.4	Berufskrankheit Nr. 2301: Lärmschwerhörigkeit	26
4	Messung von Schall	29
4.1	Messvorschriften	29
4.1.1	Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung	29
4.1.2	Technische Regeln zur Lärm- und Vibrationsschutzverordnung	29
4.1.3	DIN EN ISO 9612	29
4.1.4	Richtlinie VDI 3766	30
4.2	Zeitbewertung	30
4.3	Frequenzanalyse	31
4.4	Frequenzbewertungsfilter	32
4.4.1	Z-Bewertung	32
4.4.2	A-Bewertung	32
4.4.3	U-Bewertung	34
4.4.4	AU-Bewertung	34
4.4.5	Ultra-Bewertung	34
4.4.6	C-Bewertung	35
4.5	Schallpegelmesser	35
4.5.1	Personenschallexposimeter	35
4.5.2	Handschallpegelmessgeräte	35
4.5.3	Messsysteme für Ultraschall	37
4.6	Problematik der Abgrenzung von Hör- und Ultraschall	38
5	Beurteilung von Schall	41
5.1	Beurteilungskriterien für gehörgefährdenden Lärm in Deutschland	41
5.1.1	Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung	41
5.1.2	Richtlinie VDI 3766	42
5.1.3	Richtlinie VDI 2058 Blatt 2	42
5.2	Deutsche Ultraschall-Beurteilungskriterien im internationalen Vergleich	43
5.3	Vorschläge zur Beurteilung von luftgeleitetem Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich	45
5.3.1	Empfohlene Höchstwerte nach <i>Maue</i>	45
5.3.2	Beurteilungsansatz mit einem einzelnen zulässigen Höchstwert	46
6	Messung und Beurteilung der Schalleinwirkung an Ultraschall-Schweißmaschinen	47
6.1	Das Ultraschall-Messsystem	48
6.1.1	Filterfehler im Ultraschall-Messsystem	49

6.2	Beschreibung der Messorte	51
6.3	Messergebnisse	51
6.3.1	Ultraschall-Schweißmaschinen mit einer Arbeitsfrequenz von 20 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung	52
6.3.2	Ultraschall-Schweißmaschine mit einer Arbeitsfrequenz von 30 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung	56
6.3.3	Ultraschall-Schweißmaschinen mit einer Arbeitsfrequenz von 35 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung	57
6.3.4	Ultraschall-Schweißmaschinen mit Arbeitsfrequenzen von 20, 30 und 35 kHz, mit Schallschutzeinrichtung.....	58
6.4	Diskussion zur Beurteilung von luftgeleitetem Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich am Beispiel dieser Messserie.....	61
7	Schutzmaßnahmen an Ultraschall-Schweißmaschinen	63
7.1	Sekundäre Schallschutzmaßnahmen (Technische Schutzmaßnahmen).....	63
7.2	Organisatorische Schutzmaßnahmen	65
7.3	Gehörschutz (Persönliche Schutzmaßnahmen).....	65
8	Zusammenfassung	67
	Literatur	69
	Abkürzungsverzeichnis.....	75
	Formelzeichen	77
	Anhang A: Unterscheidungsmerkmale akuter Gehörschäden	79
	Anhang B: Excel-Tool „Ultraschall_LpA_{Ueq}_Rechner.xlsm“	81
	Anhang C: Frequenzbewertungsfilter	85
	Anhang D: Messergebnisse Ultraschall-Schweißmaschinen	91

1 Einleitung

In der industriellen Produktion werden heute in vielen Bereichen Ultraschalltechnologien eingesetzt. Typische Anwendungsbeispiele hierfür sind das Reinigen, Schweißen, Bohren und Schneiden. Aufgrund der energieeffizienten und damit preiswerten Arbeitsweise ist eine weiterhin ansteigende Zahl der eingesetzten Ultraschallgeräte, -maschinen und -anlagen zu verzeichnen. An Arbeitsplätzen, die in direkter Verbindung zu derartigen Ultraschallquellen stehen, sind Beschäftigte neben Geräuschen im Hörfrequenzbereich (16 Hz bis 16 kHz) auch Schallimmissionen im Ultraschallbereich (> 16 kHz) ausgesetzt [1; 2].

Mit der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV) und den zugehörigen Technischen Regeln liegen den Arbeitgebern in Deutschland Vorschriften zur Messung, Bewertung, Beurteilung und Minderung von Lärm am Arbeitsplatz vor. Per Definition beschränken sich diese Dokumente dabei auf Schalleinwirkungen im Hörfrequenzbereich [3; 4]. Ein entsprechendes staatliches Vorschriften- und Regelwerk zu Einwirkungen im Ultraschallbereich existiert nicht.

Mit der im September 2012 veröffentlichten Richtlinie VDI 3766 „Ultraschall – Arbeitsplatz – Messung, Bewertung, Beurteilung und Minderung“ gibt es erstmals eine Richtlinie, die laut Titel Empfehlungen zu mess- und beurteilungstechnischen Fragen hinsichtlich Ultraschall am Arbeitsplatz abgibt. Bei genauem inhaltlichen Betrachten der Richtlinie VDI 3766 ist festzustellen, dass deren Fokus auf der Vermeidung von Gehörschäden im Sprachfrequenzbereich liegt. Dafür wird mittels einer Frequenzbewertung der vorliegende Ultraschall ausgeblendet und letztendlich nur die verbleibende Hörschallexposition beurteilt. Ergänzend dazu steht für die Gefährdungsbeurteilung eine auf die 20-kHz-Terzmittenfrequenz beschränkte Grenzwertempfehlung zur Vermeidung von Gehörschäden durch Ultraschall in der fast 30 Jahre alten Richtlinie VDI 2058 Blatt 2 „Beurteilung von Lärm hinsichtlich Gehörgefährdung“ zur Verfügung [5; 6].

Aufgrund erster eigener Erfahrungen in der Anwendung der beiden VDI-Richtlinien bestehen beim Verfasser dieses Reports mehrere offene Fragen und Unsicherheiten im Umgang mit Ultraschall am Arbeitsplatz. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit eine Literaturrecherche zum Schädigungspotenzial von hohen Frequenzen auf das menschliche Gehör durchgeführt und die bestehenden deutschen Beurteilungskriterien mit anderen nationalen Standards verglichen. Anhand einer Messserie an Ultraschall-Schweißmaschinen werden Messwerte aus der industriellen Praxis vorgestellt und anhand der vorhandenen Beurteilungskriterien sowie von zwei alternativen Beurteilungsansätzen kritisch diskutiert. Zur Abrundung des Themengebietes beschäftigt sich diese Arbeit mit der Betrachtung von möglichen Schutzmaßnahmen an Bediener-Arbeitsplätzen von Ultraschall-Schweißmaschinen.

Erstellt wurde diese Arbeit im Rahmen des Masterprogramms MSGA – Management Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit, das die Dresden International University (DIU) in Kooperation mit der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) anbietet (www.di-uni.de; www.dguv.de, Webcode d13132).

2 Grundlagen zu Schall und Lärm in Bezug zur Arbeitswelt

Wellenförmige Fortpflanzungen von Druck- oder Dichteschwankungen in elastischen Medien wie Gasen, Flüssigkeiten oder Festkörpern werden als Schallwellen bezeichnet [7]. Allgemeiner ausgedrückt steht der Begriff Schall für Schwingungen in einem elastischen Medium [8]. Schwerpunkt dieser Arbeit ist die gefährdende Einwirkung von luftgeleitetem Schall, weshalb sich die folgenden Erläuterungen lediglich auf den Luftschall konzentrieren.

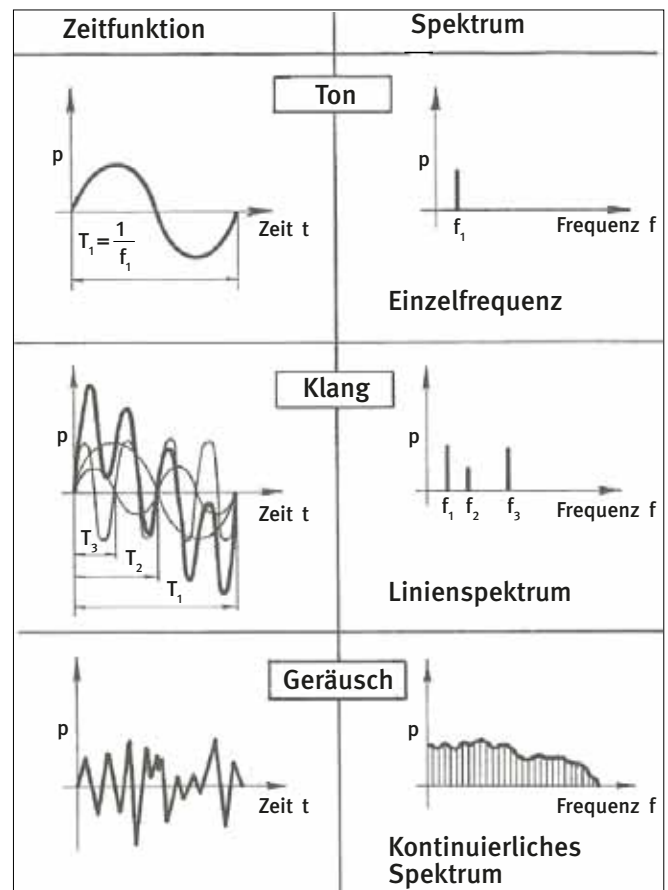
2.1 Allgemeines zu luftgeleitetem Schall im hörbaren Frequenzbereich

In Luft breiten sich die Schallwellen als Longitudinalwellen aus, d. h. die Materieteilchen schwingen in Schallausbreitungsrichtung. Die Geschwindigkeit der Ausbreitung wird als Schallgeschwindigkeit bezeichnet und beträgt für Luft bei 20 °C ca. 344 m/s. Aus der Betrachtung einer sinusförmigen Schallwelle (Schalldruckänderung über die Zeit) lässt sich über die Amplitude der Druckschwankung die Lautstärke ableiten und z. B. in Pa oder mbar angeben (1 Pa = 1 N/m² = 0,01 mbar). Mit der Periodendauer der Schwingung (Zeit für eine vollständige Sinusschwingung) lässt sich die Frequenz als Zahl der vollständigen Schwingungen pro Sekunde in Hz ermitteln. Die Frequenz bestimmt die Tonhöhe des Schallsignals. Die Schallwellen überlagern sich mit dem atmosphärischen Luftdruck und werden vom Ohr als Schallsignal wahrgenommen. Dabei ist das gesunde menschliche Ohr in der Lage, sehr kleine Luftdruckschwankungen von ca. 2 · 10⁻⁵ Pa zu hören (der normale Luftdruck beträgt 10⁵ Pa = 1 bar) und Frequenzen von ca. 16 Hz bis 16 kHz wahrzunehmen. Die Länge einer Schallwelle ist umso kleiner je höher die Frequenz ist. Allein im Bereich der hörbaren Frequenzen ergeben sich Wellenlängen zwischen wenigen Zentimetern (z. B. bei 10 kHz ca. 3,4 cm) und mehreren Metern (z. B. bei 20 Hz ca. 17,2 m). Für eine detaillierte Beschreibung der vorstehend in aller Kürze gemachten Ausführungen wird auf *Maue* [8] verwiesen.

Schall kann in unterschiedlicher Art und Weise bildlich dargestellt werden. Zwei gängige Varianten sind die Zeitfunktion und das Frequenzspektrum. In der Zeitfunktion wird der Verlauf des Schalldruckes über die Zeit dargestellt. Beim Frequenzspektrum werden die Schallschwingungen eines Signals mit ihrer entsprechenden Amplitude über den zugehörigen Frequenzen abgebildet. Eine Schallwelle mit sinusförmiger Zeitfunktion wird als Ton bezeichnet. In einem Frequenzspektrum zeigt sich ein Ton als eine einzelne Linie. Die Frequenz des Tones ergibt sich dabei aus der Lage der Linie auf der Frequenzachse und die Amplitude des Signals wird durch die Höhe der Linie beschrieben. Der Klang ist die nächste zu betrachtende Signalform. Er besteht aus mehreren Einzeltönen, deren Frequenzen in einem ganzzahligen Verhältnis zu einer Grundfrequenz stehen. Als

typische Schallquellen für den Klang sind Musikinstrumente zu nennen. Die reine Form von Ton und Klang sind in der Arbeitswelt eher selten zu finden. Üblicherweise ergibt sich bei technischen Schallquellen die Signalform des Geräusches. Dabei entspricht das Geräusch einem keiner Regel folgenden, schwankenden Schalldrucksignal, das sich nahezu lückenlos über das Frequenzspektrum erstreckt [8]. Die Norm DIN 1320 „Akustik – Begriffe“ definiert den Begriff Geräusch als Schall, der nicht vorwiegend zur Übertragung von Information dient [9]. In Abbildung 1 sind die Signalformen Ton, Klang und Geräusch in der Zeitfunktion und als Frequenzspektrum dargestellt.

Abbildung 1: Darstellung von Ton, Klang und Geräusch in der Zeitfunktion und als Frequenzspektrum [8]



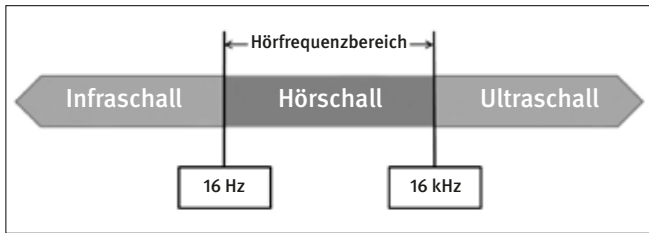
2.2 Infraschall – Hörschall – Ultraschall

Beim Menschen liegt der Bereich des ausgeprägten Hörvermögens zwischen etwa 16 Hz und 16 kHz und wird als Hörfrequenzbereich bezeichnet. Der Schall innerhalb des Hörfrequenzbereiches heißt Hörschall. Unterhalb und oberhalb dieses Bereiches wird der Schall als Infraschall bzw. Ultraschall

bezeichnet [9]. Die vorgenannten Zusammenhänge sind in Abbildung 2 dargestellt.

Hohe Infraschallimmissionen treten in der Arbeitswelt im industriellen Bereich z. B. an Hochöfen und Kompressoren auf. Eine weitere Quelle für extrem tieffrequenten Schall sind Verkehrsmittel, wie z. B. Schiffe und Fahrzeuge [10]. Zum Auftreten von Ultraschallimmissionen in der Arbeitswelt wird auf Abschnitt 2.5 verwiesen.

Abbildung 2:
Veranschaulichung der Zusammenhänge zwischen Infraschall, Hörschall und Ultraschall, nach [8]



2.3 Schalldruckpegelgrößen

Der vom Menschen wahrnehmbare Schalldruck erstreckt sich von der Hörschwelle ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa) bis zur Schmerzgrenze (ca. 20 Pa) (siehe Abschnitt 4.4.2). Dies entspricht einem Wertebereich von mehr als sechs Zehnerpotenzen. Aufgrund dieser großen Wertedynamik wäre es nicht praktikabel gewesen, Schallereignisse unmittelbar durch den Wert des Schalldruckes p zu beschreiben. Stattdessen wurde ein Pegelmaß mit einer logarithmischen Skala definiert, das den großen Wertebereich des Schalldruckes auf einen kleinen Wertebereich des Schalldruckpegels abbildet. Nachfolgend werden die wichtigsten Schalldruckpegelgrößen kurz beschrieben. Dabei handelt es sich um dimensionslose Größen, die in Dezibel (dB) angegeben werden [11].

2.3.1 Schalldruckpegel

Der Schalldruckpegel L_p ergibt sich aus Gl. (1) durch Bezug des Effektivwerts des Schalldruckes p auf den Referenzschalldruck p_0 , der per Definition dem Schalldruck an der Hörschwelle bei 1 kHz ($p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa = 20 μ Pa) entspricht [12].

$$L_p = 10 \lg \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \text{ dB} \quad (1)$$

2.3.2 Maximaler Schalldruckpegel und Spitzenschalldruckpegel

Bei der Beurteilung von Schalldruckpegeln ist oftmals die Kenntnis des maximalen Schalldruckpegels bzw. des Spitzenschalldruckpegels erforderlich. Die Berechnung dieser Pegel erfolgt analog zur Gl. (1), wobei der Effektivwert des Schalldruckes für die Berechnung des maximalen Schalldruckpegels durch den maximalen Effektivwert des Schalldruckes und für die Berechnung des Spitzenschalldruckpegels durch die absolute Schalldruckspitze ersetzt wird. Der maximale Schalldruckpegel wird als $L_{p_{\text{max}}}$ und der Spitzenschalldruckpegel als $L_{p_{\text{peak}}}$ bezeichnet [9; 13].

2.3.3 Äquivalenter Dauerschalldruckpegel

Normalerweise verlaufen die in der Arbeitswelt vorkommenden Geräusche über einen längeren Zeitraum betrachtet nie so gleichmäßig, dass sie allein durch die Angabe eines Schalldruckpegels ausreichend beschrieben werden könnten. Um derartige, zeitlich veränderliche Schalldruckpegel mit einem repräsentativen Einzahlwert beschreiben zu können, wurde der „Mittelungspegel für einen zeitlich veränderlichen Schalldruckpegel“, auch als „Äquivalenter Dauerschalldruckpegel“ bezeichnet, definiert. Der äquivalente Dauerschalldruckpegel L_{peq} aus einem zeitlich veränderlichen Schalldruckpegel $L(t)$ über die Mittelungsdauer T wird durch Integration nach Gl. (2) berechnet [14].

$$L_{\text{peq}} = 10 \lg \left[\frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,1 \cdot L(t)} dt \right] \text{ dB} \quad (2)$$

2.3.4 Tages-Lärmexpositionspegel

Der Tages-Lärmexpositionspegel ist in ISO 1999 „Acoustics – Estimation of noise-induced hearing loss“ und DIN EN ISO 9612 „Akustik – Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz – Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 (Ingenieurverfahren)“ definiert [15; 16]. Er beschreibt die über einen repräsentativen Arbeitstag gemittelte Geräuschimmission bezogen auf einen achtstündigen Arbeitstag. Der Tages-Lärmexpositionspegel wird als A-bewerteter (siehe Abschnitt 4.4.2) äquivalenter Dauerschalldruckpegel nach Gl. (3) bestimmt und dient als Maß zur Beurteilung der Gehörgefährdung eines Geräusches [13].

$$L_{\text{EX,Sh}} = L_{p_{\text{Aeq}T_e}} + 10 \lg \left[\frac{T_e}{T_0} \right] \text{ dB} \quad (3)$$

mit

$L_{p_{\text{Aeq}T_e}}$ = A-bewerteter Dauerschalldruckpegel über die Zeit T_e

T_e = tatsächliche Zeitdauer des Arbeitstages in Stunden

T_0 = Bezugszeitdauer von 8 Stunden

2.4 Lärm am Arbeitsplatz

Lärm am Arbeitsplatz ist ein uraltes Thema. So durfte z. B. in der süditalienischen Stadt Sybares (gegründet im Jahr 600 v. Chr.) kein Handwerk innerhalb der Stadtmauern ausgeübt werden, bei dem gehämmert wurde. Ein weiteres Beispiel findet sich in der von *Bernardo Ramazzini* verfassten Abhandlung „Die Krankheiten der Handwerker“, die im Jahr 1700 erschien. In dieser Schrift berichtet er von ohrenbetäubendem Lärm bei Kupferschmieden und den dabei typischen Folgen wie Schwerhörigkeit und Taubheit [17]. Mit dem Beginn der Industrialisierung dehnte sich der Lärm, dessen Vorkommen sich bis dahin auf bestimmte Handwerksberufe begrenzte, auf immer mehr Arbeitsplätze in nahezu allen Branchen aus. In diesem Zusammenhang wurden damals Fabriken als „Orte von Lärm und Gestank“ bezeichnet [18].

Generell ist unter Lärm ein unerwünschter Hörschall zu verstehen, der den Menschen stört, belästigt, beeinträchtigt oder gesundheitlich schädigt [9]. Da bereits ein lauter PC-Lüfter von einem konzentriert arbeitenden Menschen in einem Büro als lästig und störend empfunden werden kann, macht diese Definition deutlich, dass eine Arbeitswelt ohne Lärm schwer vorstellbar ist.

In Deutschland geben 27,3 % der Vollzeitbeschäftigten an, häufig unter Lärm zu arbeiten. Jeder zweite Vollzeitbeschäftigte (49,4 %) fühlt sich durch Lärm am Arbeitsplatz belastet. Bezogen auf das Anforderungsniveau liegt die Zahl der Vollzeitbeschäftigten, die häufig unter Lärm arbeiten, mit 40,9 und 35 % in den Gruppen „Helfer- und Anlern Tätigkeiten“ sowie „Fachlich ausgerichtete Tätigkeiten“ am höchsten. Bei den „Komplexen Spezialist Tätigkeiten“ und den „Hochkomplexen Tätigkeiten“ beträgt diese Zahl 15,2 bzw. 13,4 %. Wiederum auf das Anforderungsniveau bezogen fühlen sich 64,2 % der Vollzeitbeschäftigten in der Gruppe der „Hochkomplexen Tätigkeiten“ durch Lärm am Arbeitsplatz belastet, während im Vergleich dazu die Zahlen in den anderen drei Gruppen zwischen 41,5 und 48,5 % liegen. Bezogen auf die beiden Geschlechter ist bei den Vollzeitbeschäftigten zu erkennen, dass Männer (31,3 %) häufiger unter Lärm arbeiten als Frauen (19,3 %). Bei der empfundenen Belastung durch Lärm dreht sich dieses Verhältnis. Hier geben 65,3 % der Frauen und 44,6 % der Männer an, sich durch Lärm am Arbeitsplatz belastet zu fühlen [19].

Durch einen erhöhten Lärmpegel kann eine deutliche Beeinträchtigung der sprachlichen Verständigung auftreten. Am Arbeitsplatz kann dies zu erhöhten Unfallgefahren führen, weil z. B. Anweisungen oder Warnrufe nicht richtig verstanden, aber auch gefahrkündigende Geräusche sowie akustische Warnsignale nicht wahrgenommen werden. Als erste Folge von belastend empfundenem Lärm sind Stressreaktionen zu verzeichnen, die sowohl psychisch – z. B. als Verärgerung, Anspannung und Nervosität – als auch physisch – z. B. durch veränderte Atemrate und erhöhtem Blutdruck – feststellbar sind. Derartige Stressreaktionen wirken sich negativ auf das Konzentrationsvermögen und die Leistungsfähigkeit aus, was wiederum zu erhöhten Fehlerraten, verringerter Produktivität und erhöhter Unfallgefahr führen kann [8]. Für ausführlichere Informationen hinsichtlich extra-auraler Lärmwirkungen wird auf die DGUV Information „Lärm-Stress am Arbeitsplatz“ verwiesen [20].

Neben den extra-auralen Wirkungen, die auch schon bei relativ niedrigen Schalldruckpegeln auftreten können, gibt es die gehörgefähdenden bzw. auralen Wirkungen, die erst bei hohen Lärmexpositionen entstehen. Die auralen Wirkungen des Lärms werden ausführlich in Kapitel 3 behandelt.

2.5 Ultraschallanwendungen in der Arbeitswelt

Die ersten Forschungen zu technischen Anwendungen des Ultraschalls begannen gegen Ende des 19. Jahrhunderts. Als erste und lange Zeit auch einzige Anwendung ist die Unterwasserschalltechnik zu nennen. Die gezielten Entwicklungen der Unterwasserschalltechnik hatten als ersten Anlass den

tragischen Untergang der Titanic im Jahr 1912. Vor dem und während des Ersten Weltkriegs wurde die Unterwasserschalltechnik zur Signalübertragung zwischen Schiffen, zur Ortung von Eisbergen sowie zur Echolotung zwecks Abstandsmessung zwischen Schiff und Meeresboden genutzt. Zwischen den beiden Weltkriegen führte die Weiterentwicklung der Elektro- und Hochfrequenztechnik zu verstärkten Grundlagenforschungen im Ultraschallbereich. Zur Zeit des Zweiten Weltkrieges entstanden die ersten Anwendungen von Ultraschall in der Werkstoffprüfung. Die rasante Entwicklung aller anderen, heute bekannten Anwendungsbereiche des Ultraschalls begann erst nach dem Zweiten Weltkrieg [21].

Viele Anwendungen des Ultraschalls benötigen hohe Energiedichten bzw. Leistungen, die jedoch durch die Eigenschaften der schallführenden Materialien begrenzt sind. Diese Grenzen ergeben sich bei festen Körpern aus der mechanischen Wechselfestigkeit, bei Flüssigkeiten aus der Kavitationsfestigkeit und bei Gasen aus dem statischen Druck. Typische Anwendungen von Ultraschall mit hohen Energiedichten sind z. B. das Schweißen, Bohren, Reinigen und Dispergieren. Die Möglichkeit, Ultraschallsignale mehr oder weniger gerichtet auszusenden und z. B. für Abstandsmessungen, Ortungen oder Zwecke der Materialprüfung einzusetzen, ist die Grundlage anderer technischer Anwendungen des Ultraschalls [6].

Neben dem bereits erwähnten Anwendungsfeld der Unterwasserschalltechnik finden sich heutzutage Ultraschallanwendungen hauptsächlich im medizinischen und industriellen Bereich. Aus der Industrie sind typische Ultraschallanwendungen mit den entsprechend verwendeten Frequenzbereichen in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Typische Frequenzbereiche für industrielle Ultraschallanwendungen [6]

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

An dieser Stelle ist auch die Gruppe der aerodynamischen Schallquellen anzuführen, die eigentlich keine typischen Ultraschallanwendungen enthält. Bei diesen Schallquellen entstehen aufgrund hoher Strömungsgeschwindigkeiten von Luft oder Gasgemischen Geräusche, die oberhalb des Hörfrequenzbereichs auch Ultraschallanteile enthalten. Das gilt z. B. für die folgenden Schallquellen [6]:

- Ansaug- und Ausblasöffnungen von Lüftern und Kompressoren,

2 Grundlagen zu Schall und Lärm in Bezug zur Arbeitswelt

- Dampfzustandswandler und Sicherheitsventile,
- Druckluftschalter und Druckluftpistolen,
- Strahltriebwerke und Raketen,
- Brennern zum Stahlschmelzen oder zur Herstellung von Glas- und Mineralwolle.

Für eine ausführliche Beschreibung der verschiedensten Ultraschallanwendungen sowie eine Auflistung weiterer, z. T. recht exotischer Einsatzgebiete des Ultraschalls wird auf den Artikel „Ultrasonic noise sources in a work environment“ von *Smagowska* [22], die Richtlinie VDI 3766 [6], die Broschüre „Ultraschallanlagen als Lärmquellen“ [23] sowie die Bücher „Niederfrequenter Ultraschall“ [24] und „Faszination Ultraschall“ [21] verwiesen.

2.5.1 Ultraschallschweißen

Da im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Lärmexposition an Ultraschall-Schweißmaschinen untersucht wird (siehe Kapitel 6), erfolgt nachstehend eine kurze Beschreibung dieser Anwendung.

Beim Ultraschallschweißen handelt es sich neben dem Ultraschallreinigen um eine der häufigsten industriellen Anwendung von Ultraschall. Mit dem Verfahren, das mittlerweile in vielen verschiedenen Branchen zum Einsatz kommt, lassen sich feste Körper, z. B. Halbleiterchips, Metalle und Kunststoffe (Thermoplaste), miteinander verbinden. Für den Schweißvorgang sind hohe Energiedichten erforderlich. Diese Ultraschallschwingungen werden durch Hochleistungsschwingsysteme erzeugt und über ein Transformationsstück und eine Sonotrode auf das Schweißobjekt übertragen. Das Ultraschallschweißen ist ein thermischer Prozess, bei dem die erforderliche Wärme direkt an der Schweißstelle durch die Absorption des Ultraschalls entsteht. Die zu verbindenden Kontaktstellen können so gezielt und schnell erwärmt werden, ohne dass das übrige Material des Schweißobjekts durch die Wärmezufuhr möglicherweise verformt wird. Eine bedeutsame Geräuschentwicklung entsteht jeweils zu Beginn des Schweißvorgangs. Generell gilt das Ultraschallschweißen als ein energieeffizientes und umweltfreundliches Verfahren [6; 23]. Abbildung 3 zeigt beispielhaft eine Ultraschall-Schweißmaschine.

Abbildung 3:
Beispiel einer Ultraschall-Schweißmaschine ohne Schallschutzeinrichtung



3 Wirkungen von Schall auf das menschliche Gehör

Die ersten Hinweise zu Lärm und seinen Wirkungen finden sich bereits im Alten Testament. Dort wird geschildert, wie es den Israeliten gelang, mit einem siebentägigen Lärmmarsch die Stadt Jericho zu erobern. Dieser Angriff mit Posaunen und Kriegsgeschrei kann als Symbol für die zerstörerischen Kräfte des Lärms gelten [17]. Mit dem Zeitalter der Industrialisierung wurden der Lärm und damit auch seine Wirkungen zu einem Massenphänomen [18]. Der deutsche Medizin-Nobelpreisträger von 1905, Robert Koch (1843 bis 1910) äußerte hierzu: „Eines Tages wird der Mensch den Lärm ebenso unerbittlich bekämpfen müssen, wie die Cholera und die Pest“ [25].

Grundsätzlich werden die Wirkungen des Lärms in aurale und extra-aurale Wirkungen unterschieden [26]. Da sich diese Arbeit schwerpunktmäßig mit der Einwirkung von Schall auf das menschliche Gehör beschäftigt, werden die extra-auralen Wirkungen des Lärms nicht näher betrachtet. Ausführlichere Informationen hinsichtlich extra-auraler Lärmwirkungen sind in der DGUV Information „Lärm-Stress am Arbeitsplatz“ zu finden [20]. Unter dem Oberbegriff der auralen Wirkungen sind alle auf das Gehör bezogenen Lärmwirkungen zusammengefasst. Diese können in akute, vorübergehende und chronische Gehörschäden unterteilt werden. Akute Gehörschäden treten bei einmaliger oder mehrmaliger Einwirkung extrem hoher, kurzzeitiger Schalldruckpegel bzw. auch bei sehr hohen Schalldruckpegeln mit einer Einwirkungszeit von einigen Minuten bis hin zu mehreren Stunden auf. Bekannte Formen akuter Gehörschäden sind das Knalltrauma, Explosionstrauma, akute Lärmtrauma und der akustische Unfall. In Anhang A sind diese vier akuten Gehörschäden mit ihren Unterscheidungsmerkmalen dargestellt (Tabelle A.1). Ein vorübergehender Gehörschaden kann z. B. nach einem Disco- oder Konzertbesuch in Form einer spürbaren Vertäubung, evtl. begleitet von einem Ohrgeräusch, auftreten. Es wird hier von einer vorübergehenden Hörschwellenverschiebung (Temporary Threshold Shift, TTS) gesprochen, von der sich das Gehör in Ruhe wieder vollständig erholt. Wird das vorstehende Beispiel auf die Arbeit unter Lärmeinwirkung projiziert, kann unmittelbar nach der Arbeitsschicht ebenfalls eine TTS vorhanden sein. Wiederholt sich dies arbeitstäglich, entwickelt sich aus der vorübergehenden Hörschwellenverschiebung in einem schleichenden Prozess über mehrere Jahre eine dauernde Hörschwellenverschiebung (Permanent Threshold Shift, PTS), die dann als chronischer Gehörschaden oder Lärmschwerhörigkeit (Noise-Induced Hearing Loss, NIHL) bezeichnet wird. Betroffene Personen empfinden in den ersten Tagen der Lärmeinwirkung besonders nach Arbeitssende eine Vertäubung, an die sie sich aber gewöhnen und dann den schleichenden Eintritt der Lärmschwerhörigkeit kaum spüren. Meistens werden sie oder ihre Familienangehörigen erst in einem fortgeschrittenen Stadium auf die Erkrankung aufmerksam [17; 27].

In der Erwerbstätigenbefragung 2012, die zusammen vom Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB) und der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) durchgeführt wurde, gaben 14,8 % der Vollzeitwerbstätigen gesundheitliche Beschwerden bei der Arbeit in den letzten 12 Monaten in Form

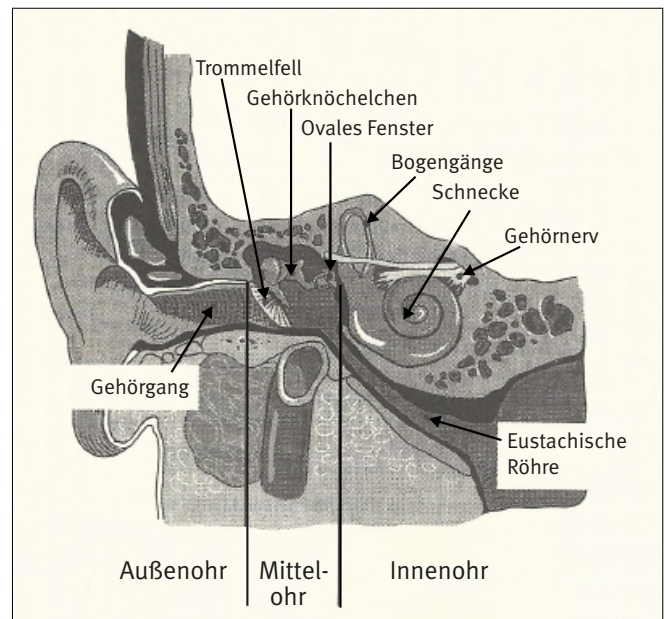
einer Hörverschlechterung und Ohrgeräusche an. Von diesen 14,8 % begaben sich 35,8 % deswegen in ärztliche Behandlung. Die Stichprobengröße der Befragung betrug 15 239 Personen [19].

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden der Aufbau und die Funktion des menschlichen Gehörs erklärt, die Diagnosemöglichkeiten mittels Tonaudiogramm kritisch betrachtet, chronische Gehörschäden hinsichtlich des einwirkenden Frequenzspektrums beschrieben sowie die Berufskrankheit „Lärmschwerhörigkeit“ kurz vorgestellt.

3.1 Aufbau und Funktion des menschlichen Gehörs

Der Aufbau des menschlichen Gehörs sowie seine anatomische Unterteilung in das Außen-, Mittel- und Innenohr ist in Abbildung 4 dargestellt.

Abbildung 4: Querschnitt durch das Ohr (nicht maßstäblich) [8]



Der Schall wird über das trichterförmige Außenohr zum Trommelfell geleitet. Dort reagiert das Trommelfell wie eine Mikrofonmembran auf die eingeleiteten Druckschwankungen und überträgt seine Bewegungen über die drei Gehörknöchelchen des Mittelohres (Hammer, Amboss, Steigbügel) auf das ovale Fenster. Im Innenohr befindet sich die für die Hörwahrnehmung verantwortliche Schnecke. Sie ist etwa erbsengroß und besteht aus einem aufgewickelten, flüssigkeitsgefüllten Röhrchen, das in Längsrichtung durch die Basilarmembran unterteilt ist. Die Schwingungen des ovalen Fensters erzeugen in der Flüssigkeit der Schnecke wellenförmige Bewegungen, die die Basilarmembran je nach Frequenz an bestimmten Stellen auslenken. Dabei

liegen die hohen Frequenzen nahe am ovalen Fenster und die tiefen Frequenzen am Ende der Schnecke. Auf der Basilarmembran befinden sich etwa 3 500 innere sowie etwa 1 500 äußere Haarzellen. Die inneren Haarzellen nehmen die Bewegungen der Basilarmembran auf und wandeln sie in bioelektrische Signale um, während die äußeren Haarzellen wie kleine Muskeln als Verstärker und Regler arbeiten und somit eine besondere Bedeutung für das hervorragende Auflösungsvermögen des Gehörs im Frequenz- und Zeitbereich haben. Über den Hörnerv werden die von den Haarzellen erzeugten Signale an das Gehirn weitergeleitet und dort an entsprechender Stelle weiterverarbeitet. Das Außen- und Mittelohr hat für die Schallübertragung zum Innenohr jeweils eine gewisse Frequenzcharakteristik, die insgesamt eine Schallverstärkung für die Frequenzen zwischen 1 und 6 kHz bewirkt, während die tiefen und sehr hohen Frequenzen einer Abschwächung unterliegen. Somit hat das menschliche Gehör im Frequenzbereich zwischen 1 und 6 kHz die größte Empfindlichkeit [8].

3.2 Die Tonaudiometrie

Die Tonaudiometrie ist ein Verfahren zur Prüfung der Gehörfunktion. Mit einem Audiometer werden der Versuchsperson für jedes Ohr separat Einzelfrequenzen von definierter Lautstärke über Kopfhörer oder Knochenleitungshörer dargeboten und die Lautstärken in dB bestimmt, die bei der Versuchsperson gerade eine Hörempfindung hervorrufen. Dabei werden diese Lautstärken für die Luft- und Knochenleitung getrennt ermittelt. Zur Prüfung der Luftleitung, die für die Schallübertragung durch das Außen- und Mittelohr zum Innenohr steht, werden die Töne mittels Kopfhörer auf das Gehör übertragen. Über die Knochenleitung erfolgt die Prüfung der Schallübertragung zum Innenohr. Dafür wird mit einem Knochenleitungshörer der Schädelknochen mit mechanischen Schwingungen angeregt, die sich auf das Innenohr übertragen und dort eine Hörempfindung auslösen. Die ermittelten Hörschwellen für die Luft- und Knochenleitung werden für jede Frequenz in ein Audiogramm übertragen und dort mit einer Nulllinie, die für eine normale Hörschwelle steht, verglichen. Höhere Schwellenwerte werden im Audiogramm von der Nulllinie aus nach unten abgetragen. Eine Hörschwelle von X dB über dem Normalwert bedeutet für die betrachtete Frequenz einen Hörverlust von X dB. Das Audiogramm ist ein wichtiges Untersuchungsergebnis, das vor allem zur differenzialdiagnostischen Beurteilung der Schwerhörigkeit bzw. zum Ausschluss einer andersartigen Schwerhörigkeit oder Schwerhörigkeitskomponente dient. Die Tonaudiometrie im Sprachfrequenzbereich bis 8 kHz gilt als ein Standard-Untersuchungsverfahren in der medizinischen Diagnostik und Vorsorge [27; 28].

Die technischen Anforderungen an ein konventionelles Audiometer für den Sprachfrequenzbereich von 125 Hz bis 8 kHz sind in DIN EN 60645-1 „Akustik – Audiometer – Teil 1: Reinton-Audiometer“ festgelegt [29]. Das Verfahren zur Durchführung der audiometrischen Untersuchung ist in DIN EN ISO 8253-1 „Akustik – Audiometrische Prüfverfahren – Teil 1: Grundlegende Verfahren der Luft- und Knochenleitungs-Schwelenaudiometrie mit reinen Tönen“ beschrieben [30]. Für die Feststellung von Hörverlusten im erweiterten Hochtonbereich von 8 bis 16 kHz werden Hochtonaudiometer eingesetzt, deren technischen Anforderungen in DIN EN 60645-4 „Akustik – Audiometer – Teil 4: Geräte für

die Audiometrie in einem erweiterten Hochtonbereich“ normiert sind. Die Frequenz 8 kHz wird somit gleichzeitig als die höchste Frequenz bei den konventionellen Audiometern und als die niedrigste Frequenz bei den Hochtonaudiometern angesehen [31].

Die Aussagekraft der Hochtonaudiometrie wird bereits seit vielen Jahren diskutiert. Dabei geht es vor allem um die Hypothese, dass die Fähigkeit, sehr hohe Töne hören zu können, besonders empfindlich gegenüber toxischen oder physikalischen Einflüssen ist [32]. Vielfach wurde untersucht, ob Lärm eine Auswirkung auf das Hörvermögen in den sehr hohen Frequenzen hat (siehe Abschnitt 3.3.1). Zu dieser Frage lassen sich mehrere Studien finden, die dies nicht nur bejahen, sondern aus ihren Ergebnissen heraus auch noch ableiten, dass die Hochtonaudiometrie ein zuverlässiges Instrument zur Früherkennung von lärmbedingten Gehörschäden sei [33 bis 38]. Eine deutsche Studie konnte dies nicht bestätigen, machte jedoch selbst die Einschränkung, dass keine hinreichende Datengrundlage gegeben war, um die Eignung des Hochtonaudiogramms für diese spezifische Fragestellung definitiv beurteilen zu können. Weiterhin wurde angeführt, dass die Hochtonaudiometrie eine schwierige, fehleranfällige und zeitaufwendige Methode ist, deren Anwendung sowohl von Audiometristen als auch von Versuchspersonen eine große Sorgfalt und Übung erfordert. Im Gegensatz zur konventionellen Tonaudiometrie im Sprachfrequenzbereich ist die Streuung der gemessenen Schwellenwerte in der Hochtonaudiometrie weitaus größer [32; 39]. Eine britische Studie kam nach einer Literatursichtung zu der Aussage, dass die Hochtonaudiometrie zwar mittlerweile in einem technisch normierten Standard verfügbar ist, es jedoch bezüglich der Zuverlässigkeit dieser Systeme abzuwarten bleibt, wie die interindividuelle Streuung der Schwellenwerte in großen homogenen Gruppen ausfällt und welche Aussage zur Wiederholbarkeit von Messungen aufgrund der intraindividuellen Streuung der Messwerte getroffen werden kann [40].

Schwarze et al. [32] regen in den Schlussfolgerungen ihrer Untersuchung an, in zukünftigen Studien zu prüfen, inwieweit gerade bei der Beurteilung früher Schäden des Gehörs der Einsatz modernerer, aber wesentlich objektiverer Methoden, wie z. B. die Messung otoakustischer Emissionen oder der Distorsionsprodukte otoakustischer Emissionen, vorteilhafter wäre.

Dieser kurze Überblick über die in der Literatur kontrovers geführte Diskussion zur Zuverlässigkeit der Hochtonaudiometrie soll insbesondere in Hinblick auf den nächsten Abschnitt sensibilisieren, da die dort enthaltenen Aussagen zu Gehörschäden oberhalb des Sprachfrequenzbereichs ausschließlich auf Hochtonaudiometrie-Untersuchungen basieren.

3.3 Chronische Gehörschäden mit Blick auf das einwirkende Frequenzspektrum

Die lärmbedingte, permanente Hörschwellenverschiebung ist für den Sprachfrequenzbereich definiert (siehe Abschnitt 3.3.1) und wird mittels eines konventionellen Audiometers, das ebenfalls nur den Sprachfrequenzbereich untersucht, diagnostiziert

(siehe Abschnitt 3.2). Da die pegeldominierenden Beiträge der meisten am Arbeitsplatz vorkommenden Schallquellen im Sprachfrequenzbereich liegen, reicht diese bereits seit vielen Jahrzehnten praktizierte Betrachtungsweise der Lärmwirkungen auf das Gehör in den meisten Fällen aus. Anders sieht es bei der Einwirkung von Hörschall mit dominanten Spektren oberhalb des Sprachfrequenzbereichs und/oder bei Ultraschall aus. Da derartige Einwirkungen nicht mit dem „normalen“ Lärm im

Sprachfrequenzbereich vergleichbar sind, muss untersucht werden, ob hier evtl. andere Schädigungsmechanismen am Gehör auftreten. In den folgenden Abschnitten wird der aktuelle Kenntnisstand zu lärmbedingten bzw. ultraschallbedingten, chronischen Gehörschäden beschrieben. In Anlehnung an *Lawton* [40] und *Sliwinski* [41] wird dabei nach der Einwirkungsart und dem durch Hörschwellenverschiebungen betroffenen Frequenzbereich im Gehör strukturiert (Abbildung 5).

Abbildung 5: Matrix zu möglichen Schädigungsmechanismen durch Hörschall und Ultraschall, in Anlehnung an *Lawton* [40] und *Sliwinski* [41]; für die grau hinterlegten Felder existiert derzeit zu den Schädigungsmechanismen kein einheitlicher, gesicherter Wissensstand

	Lärm mit dominantem Spektrum im Sprachfrequenzbereich (bis 8 kHz)	Lärm mit dominantem Spektrum oberhalb des Sprachfrequenzbereichs und/oder unterem Ultraschallbereich (8 bis 20 kHz*)	Ultraschall und seine Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich (ab 8 kHz)
	* Hochfrequenzbereich		
Hörschwellenverschiebungen im Sprachfrequenzbereich	Schädigungsmechanismen bekannt		
Hörschwellenverschiebungen oberhalb des Sprachfrequenzbereichs			

Bei den in Abbildung 5 angegebenen Frequenzbereichen bezüglich des einwirkenden Schalls handelt es sich um keine wissenschaftlich fundierte Klassifikation, sondern um einen Vorschlag des Verfassers dieses Reports, der sich an *Sliwinski* [41] anlehnt. Die angegebenen Frequenzen sind jeweils als Terzmittenfrequenzen zu verstehen.

Ein einheitlicher, gesicherter Wissensstand hinsichtlich der Schädigungsmechanismen besteht lediglich für das weiß hinterlegte Feld in Abbildung 5. Zu den grau hinterlegten Feldern wird der aktuelle Kenntnisstand nachfolgend anhand einer Literaturrecherche vorgestellt.

Da sowohl der Lärm mit dominantem Spektrum oberhalb des Sprachfrequenzbereichs und/oder unteren Ultraschallbereichs als auch der Ultraschall und seine Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich bei 8 kHz beginnen und über weite Teile den gleichen Frequenzbereich abdecken, macht es an dieser Stelle aus Sicht des Verfassers dieses Reports Sinn, die Betrachtung der auralen Wirkungen schwerpunktmäßig auf beide Einwirkungsarten auszuweiten, obwohl der eigentliche Fokus dieser Arbeit auf die berufliche Einwirkung von Ultraschall gerichtet ist.

Der Vollständigkeit halber ist zu erwähnen, dass es neben den oben beschriebenen Schalleinwirkungsarten auch noch den Infraschall und den tieffrequenten Lärm gibt, die aber beide nicht Gegenstand dieses Reports sind.

3.3.1 Gehörschäden durch Lärm mit dominantem Spektrum im Sprachfrequenzbereich (bis 8 kHz)

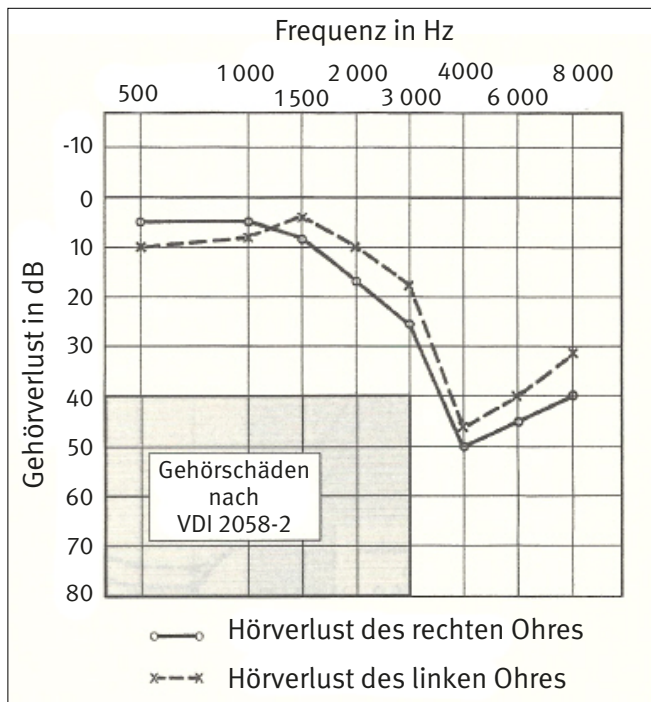
Mit dem in der Überschrift beschriebenen „Lärm mit dominantem Spektrum im Sprachfrequenzbereich“ meint der Verfasser dieses Reports den Großteil aller vorkommenden Arbeitslärm-spektren, deren dominante Anteile im Sprachfrequenzbereich bis 8 kHz liegen. Nachfolgend wird hierfür die Kurzform „Lärm im Sprachfrequenzbereich“ benutzt.

Bei einer arbeitstäglich und über mehrere Jahre hinweg einwirkenden Lärmexposition mit Tages-Lärmexpositionspegeln ab 85 dB(A) besteht die Gefahr des Entstehens von Gehörschäden [5]. Dabei entsprechen diese Gehörschäden den bereits einleitend in Kapitel 3 beschriebenen chronischen Gehörschäden, die sich im Verlauf zunächst über eine TTS hin zu einer PTS entwickeln.

Ein lärmbedingter Gehörschaden entsteht im Innenohr. Über eine längere Zeit gesehen bleiben dem Gehör durch die arbeitstägliche Lärmexposition keine ausreichenden Ruhezeiten mehr, um sich von der TTS vollständig zu erholen. Im Innenohr zeigt sich dies durch eine Überforderung des Stoffwechsels, was im weiteren Verlauf zum Absterben der Haarzellen in der Schnecke führt. Dabei werden zuerst die äußeren Haarzellen geschädigt, deren Aufgabe in der Verstärkung und Regelung der Hörwahrnehmung liegt (siehe Abschnitt 3.1). Abbildung 6 zeigt ein Audiogramm von einer beginnenden Lärmschwerhörigkeit [8].

3 Wirkungen von Schall auf das menschliche Gehör

Abbildung 6:
Beispiel eines Reintonaudiogramms bei beginnender
Lärmschwerhörigkeit [8]

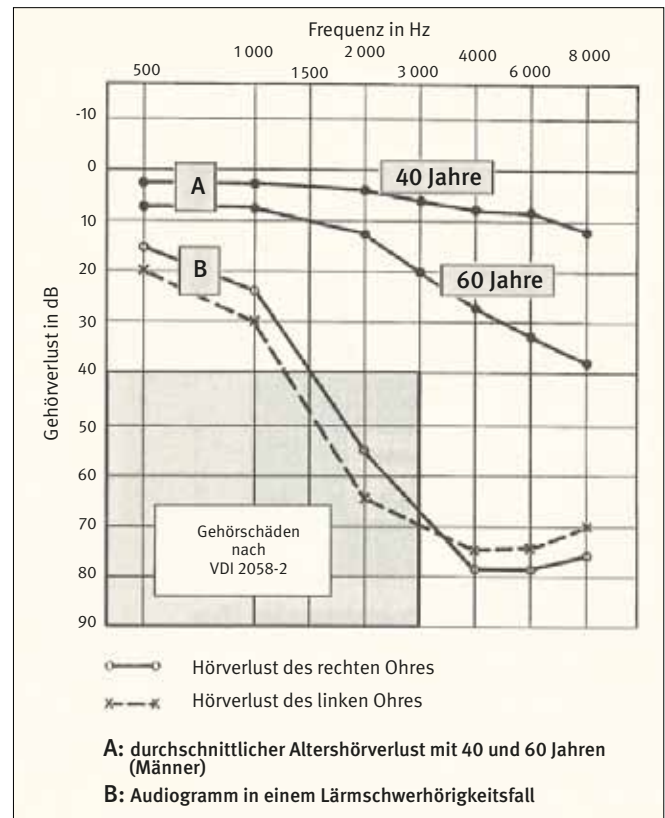


Die lärmbedingten Hörminderungen beginnen bei 4 kHz und breiten sich dann nach und nach über den gesamten Bereich der größten Empfindlichkeit des Gehörs aus. Es entsteht dabei im Audiogramm das für eine Lärmschwerhörigkeit typische Bild mit einem Schrägabfall ab 1 kHz sowie einer Senke bei 4 kHz. Des Weiteren gibt es neben dem lärmbedingten Gehörschaden auch altersbegleitende Hörverluste, die sich mit zunehmendem Alter insbesondere bei hohen Frequenzen zeigen (Abbildung 7). Sowohl die altersbegleitenden als auch die lärmbedingten Hörverluste betreffen den Frequenzbereich der menschlichen Sprache. Eine beginnende Lärmschwerhörigkeit wird von den Betroffenen meist nicht bemerkt. Erst wenn sich die lärmbedingten Hörverluste über den gesamten Sprachfrequenzbereich ausdehnen, ergeben sich für die Betroffenen erhebliche Kommunikationsprobleme, die sich durch die altersbegleitende Abnahme der Hörempfindlichkeit weiter verschlimmern [8].

Die Richtlinie VDI 2058 Blatt 2 definiert Gehörschäden als Hörminderungen mit audiometrisch nachweisbaren Merkmalen eines Haarzellschadens, die bei 3 kHz 40 dB überschreiten [5].

Eine Lärmschwerhörigkeit betrifft immer beide Ohren und führt nie zu einer vollständigen Taubheit. Nach Ende der Lärmexposition kann sich eine Lärmschwerhörigkeit nicht weiter verschlimmern. Bei einem begründeten Verdacht auf eine berufliche Lärmschwerhörigkeit sind behandelnde Ärzte und Unternehmer gleichermaßen verpflichtet, den Verdacht auf eine Berufskrankheit „Lärmschwerhörigkeit“ bei dem zuständigen Unfallversicherungsträger anzuzeigen (siehe Abschnitt 3.4) [17].

Abbildung 7:
Durchschnittliche altersbegleitende Hörverluste für ohrgesunde
Männer im Alter von 40 und 60 Jahren nach ISO 1999 (Linien A)
sowie beispielhaftes Audiogramm einer Person mit fortgeschrittener
Lärmschwerhörigkeit (Linien B für rechtes und linkes Ohr getrennt) [8]



Wie bereits in Abschnitt 3.2 erwähnt, gibt es eine Reihe von Studien, in denen untersucht wurde, ob die hier betrachtete Lärmeinwirkung Auswirkungen auf das Hörvermögen oberhalb des Sprachfrequenzbereichs hat. Dabei wurden die Versuchspersonen jeweils mit einem konventionellen Audiometer und mit einem Hochtonaudiometer untersucht.

Ahmed et al. [33] untersuchten 187 lärmexponierte und 52 nicht lärmexponierte Personen. Dabei wurden oberhalb des Sprachfrequenzbereichs für alle getesteten Frequenzen signifikant höhere Hörschwellen bei den lärmexponierten Personen gefunden, wobei der größte Unterschied bei 14 kHz lag. Anhand einer Literaturrecherche kam Lawton [40] zu dem Ergebnis, dass das Gehör durch Lärm in zwei verschiedenen Frequenzbereichen geschädigt werden kann: einmal in dem bereits bekannten, lärmempfindlichen Bereich von 3 bis 6 kHz und weiterhin in einer lärmempfindlichen Region oberhalb von 12 kHz. In einer weiteren Studie mit 20 lärmexponierten und 50 nicht lärmexponierten Personen dokumentierten Singh et al. [34], dass bei 62 % der lärmexponierten Personen Hörverluste oberhalb des Sprachfrequenzbereichs festgestellt wurden. Die am meisten betroffenen Frequenzen lagen dabei im Bereich von 16 bis 20 kHz. Mehrparvar et al. [36] untersuchten die Hörschwellen von 120 lärmexponierten und 120 nicht lärmexponierten Textilarbeitern. Die höchsten Hörschwellen wurden in der Fallgruppe für das rechte Ohr bei 4 kHz und für das linke Ohr bei 6 kHz sowie für beide Ohren bei 16 kHz gefunden. Dabei war die Hörschwelle bei 16 kHz für beide Ohren signifikant höher als bei den Frequenzen 3, 4 und 6 kHz. Maccá et al. [38] stellten bei

einem Vergleich von 113 lärmexponierten zu 148 nicht lärmexponierten Personen fest, dass die Lärmgruppe signifikant höhere Hörschwellen bei 4, 6 und 14 kHz hat. Lopes et al. [35] haben bei der Analyse von 30 Audiogrammen eine positive, signifikante Korrelation zwischen der Zeitdauer der Lärmbelastung und den Hörschwellen bei 9 kHz für das rechte Ohr und 14 kHz für das linke Ohr bestätigt.

Ahmed et al. [33] und Maccá et al. [38] führten im Rahmen ihrer Studien multivariate Datenanalysen durch und kamen zu dem Ergebnis, das für die Hörschwellen oberhalb des Sprachfrequenzbereichs das Alter der erste Prädiktor und der Lärm der zweite Prädiktor ist. Im Sprachfrequenzbereich zwischen 2 und 6 kHz dreht sich das Bild. Dort ist Lärm der erste Prädiktor vor dem Alter.

Schwarze et al. [32] untersuchten audiometrisch jeweils ein ausgewähltes Ohr von 482 Versuchspersonen. Die Ergebnisse zeigten, dass sich mit zunehmendem Alter im Bereich von 9 bis 12,5 kHz eine immer steiler abfallende Kurve entwickelt, die dann in eine Senke bis 14 kHz übergeht und deren tiefster Punkt bei 12,5 kHz liegt. In den anschließend durchgeführten Datenanalysen konnte hierfür jedoch kein Gruppenunterschied zwischen hoher und niedriger Lärmexposition gefunden werden. Ein Effekt der Lärmexposition ließ sich nur im Sprachfrequenzbereich zwischen 3 und 8 kHz nachweisen. Als wichtige Charakteristika der untersuchten Stichprobe wird von den Autoren selbstkritisch angeführt, dass der Großteil der Versuchspersonen männlich war ($n = 390$), ein relativ hohes Alter hatte (Mittelwert: 56,5 Jahre, etwa 80 % der Versuchspersonen waren über 50 Jahre alt) und nur ein kleiner Teil der Stichprobe in den letzten zehn Jahren einem Lärm am Arbeitsplatz in gehörgefährdender Größenordnung ausgesetzt war (bei 85 Versuchspersonen überschritt der Mittelungspegel 85 dB).

Mehrere der vorstehend aufgeführten Studien enthalten einleitend Ergebnisse von Literaturrecherchen der Autoren. Dabei bestätigen weitere Studien für Lärmexponierte deutlich höhere Hörschwellen im Frequenzbereich ab 12 oder 14 kHz. Zwei Studien aus den Jahren 1979 und 1985 werden zitiert, die keinen Unterschied zwischen lärmexponierten und nicht lärmexponierten Personen feststellen konnten [32; 33; 36; 38; 40].

3.3.2 Gehörschäden durch Lärm mit dominantem Spektrum oberhalb des Sprachfrequenzbereichs und/oder unterem Ultraschallbereich (8 bis 20 kHz)

Für den in der Überschrift als „Lärm mit dominantem Spektrum oberhalb des Sprachfrequenzbereichs und/oder unterem Ultraschallbereich“ bezeichneten Schall wird nachfolgend die Kurzform „Lärm im Hochfrequenzbereich“ bzw. „hochfrequenter Lärm“ benutzt.

Als ein typisches Beispiel für diese Lärmeinwirkung kann die bereits in Abschnitt 2.5 aufgeführte Gruppe der aerodynamischen Schallquellen genannt werden. Dabei handelt es sich nicht um typische Ultraschallquellen, sondern um Schallquellen, bei denen aufgrund hoher Strömungsgeschwindigkeiten

von Luft oder Gasgemischen Geräusche entstehen, deren Energiegehalt sich dominant im Spektrum oberhalb vom Sprachfrequenzbereich bis in den unteren Ultraschallbereich verteilt. Eine Literaturrecherche zu Wirkungen des Lärms von aerodynamischen Schallquellen auf das Gehör wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

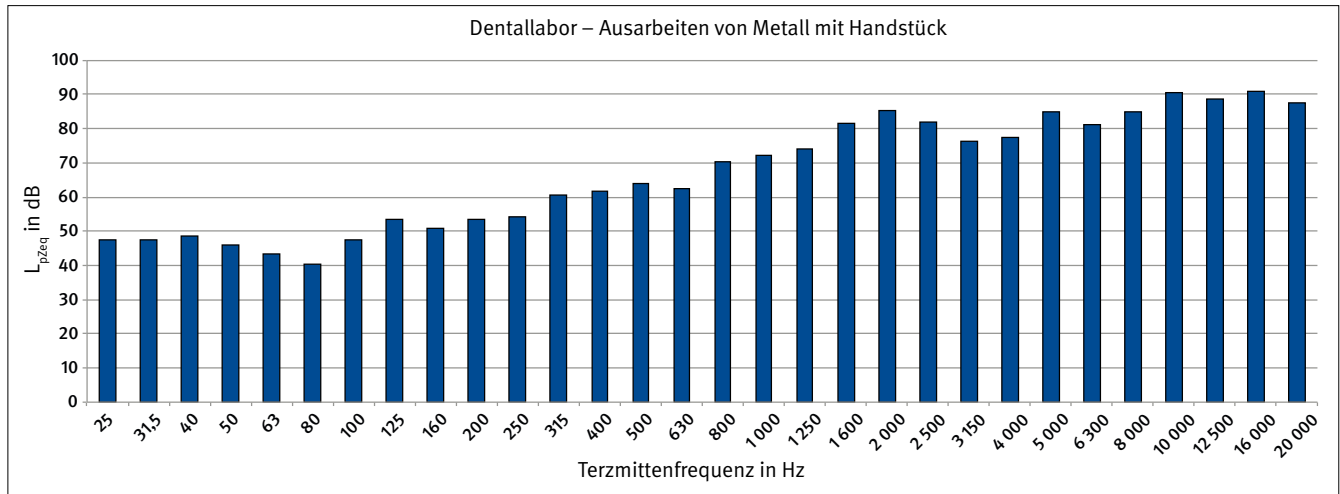
Ein weiteres, typisches Beispiel für diese Einwirkungsart betrifft Beschäftigte in Zahnarztpraxen und Dentallaboren. Eine entsprechende Literaturrecherche führt zu einer Vielzahl von Studien, die sich mit Lärm und seinen Wirkungen auf das Gehör von Beschäftigten in Zahnarztpraxen und Dentallaboren beschäftigt haben. In beiden Branchen wird mit hochtourigen Antriebseinheiten gearbeitet, deren hochfrequentes Geräuschspektrum in Bezug auf Schädigungen des Gehörs schon seit den 1960er-Jahren Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen ist [42].

Weiterhin kommen in Zahnarztpraxen Ultraschallwerkzeuge, Druckluft sowie Absaugeinrichtungen als hochfrequente Geräuschquellen zum Einsatz [43]. In Dentallaboren sind neben der Antriebseinheit (branchenübliche Bezeichnung: Handstück) noch die Druckluft und der Dampfstrahlreiniger als dominant hochfrequente Geräuschquellen zu nennen. Dem Verfasser dieses Reports ist die Lärmeinwirkung in der Dentaltechnikbranche aufgrund umfangreicher eigener messtechnischer Erfahrung bestens bekannt. Aus einer Auswertung vorliegender Messergebnisse aus verschiedenen Dentallaboren konnte ein repräsentativer Tages-Lärmexpositionspegel in Höhe von 80 dB(A) ermittelt werden (energetischer Mittelwert aus 24 Tages-Lärmexpositionspegeln mit einer Spanne von 73 bis 83 dB(A)). Bei den hochfrequenten Tätigkeiten treten äquivalente Dauerschalldruckpegel zwischen 75 und 87 dB(A) bei der Arbeit mit dem Handstück sowie zwischen 88 und 101 dB(A) beim Abblasen des Werkstückes mit Druckluft oder bei der Reinigung mit dem Dampfstrahlgerät auf. Abbildung 8 zeigt beispielhaft ein Frequenzspektrum, das im Dentallabor beim Ausarbeiten von Metall mit dem Handstück gemessen wurde [44].

Aufgrund des vorstehend aufgeführten, repräsentativen Tages-Lärmexpositionspegels dürfte bei den Dentaltechnikern keine Gefahr für das Entstehen eines Gehörschadens bestehen, da dies nach VDI 2058 Blatt 2 erst bei einer arbeitstäglich und über mehrere Jahre hinweg einwirkenden Lärmexposition mit Tages-Lärmexpositionspegeln ab 85 dB(A) der Fall ist [5].

Brusis et al. [45] haben sowohl für Zahnärzte und Zahnmedizinische Fachangestellte als auch für Dentaltechniker Tages-Lärmexpositionspegel mittels Langzeitmessungen mit Lärmdosimetern ermittelt. In drei Zahnarztpraxen wurden Tages-Lärmexpositionspegel für drei Zahnärzte von 70 bis 77 dB(A) und vier Zahnmedizinische Fachangestellte von 69 bis 77 dB(A) festgestellt. Die Tages-Lärmexpositionspegel aus sieben Dentallaboren lagen zwischen 74,7 und 80,1 dB(A). Eine Gefährdung für das Entstehen einer beruflichen Lärmschwerhörigkeit wird für alle drei Berufsgruppen ausgeschlossen. Bezogen auf die hochfrequenten Geräusche der Zahnarztsturbinen wird angeführt, dass isolierte Hochtonverluste auftreten können, die aber das Sprachverständnis nicht beeinträchtigen [17; 45].

Abbildung 8:
Frequenzspektrum, gemessen im Dentallabor beim Ausarbeiten von Metall mit dem Handstück [44]



Grundsätzlich finden sich die vorstehenden Messwerte und Tages-Lärmexpositionspegel in der Literatur bestätigt [46 bis 58]. Mehrere Studien führen in der Zusammenfassung an, dass die Tages-Lärmexpositionspegel sehr nah an der Grenze zur Gehörgefährdung liegen [51; 53; 58]. Durchaus selbstkritisch in Bezug auf die eigenen Messwerte als auch kritisch gegenüber einigen anderen Untersuchungen ist vom Verfasser dieses Reports anzuführen, dass nicht unbedingt zu erkennen ist, mit welcher Messtechnik, mit welcher Messstrategie und mit welchen Unsicherheiten die Werte erhoben wurden. Da ein nicht unerheblicher Anteil der Lärmeinwirkungen im Hochfrequenzbereich liegt, sind Lärmdosimeter und Handschallpegelmessgeräte der Genauigkeitsklasse 2 für Schalldruckpegelmessungen in diesen beiden Branchen nicht geeignet (siehe Abschnitte 4.5.1 und 4.5.2). Bei einer tätigkeitsbezogenen Messstrategie ist eine sehr aufwendige Zeitanalyse hinsichtlich der durchzuführenden Tätigkeiten erforderlich. Bei einer reinen Befragung der Versuchspersonen kommt es aus der Erfahrung des Verfassers dieses Reports zu einer deutlichen Überschätzung der Zeitanteile, was insbesondere bei Schalldruckpegeln von bis zu 101 dB(A) bei der Verwendung von Druckluft und Dampfstrahlgeräten schnell zu einem überhöhten Tages-Lärmexpositionspegel führt. Aus Sicht des Verfassers dieses Reports bedarf es hier einer sehr umfangreichen Untersuchung der Lärmeinwirkung mit Schallpegelmessgeräten der Genauigkeitsklasse 1 und der Messstrategie Ganztagsmessungen, um eine valide Aussage zur repräsentativen Lärmbelastung treffen zu können (siehe Abschnitt 4.1.3). Ein derartiges Untersuchungsdesign unterstreicht die Forderung von *Maue* nach einem Lärmdosimeter der Genauigkeitsklasse 1 [59]. Da hier durchaus auch ein repräsentativer Tages-Lärmexpositionspegel im Bereich der Gehörgefährdung das Ergebnis sein könnte, ist die Betrachtung von Messunsicherheiten im Rahmen dieser Untersuchung unerlässlich.

Zu den Wirkungen auf das Gehör wird die Diskussion in der Literatur kontrovers geführt. Anhand einer Literaturrecherche kommt *Szymanska* [49] zu dem Ergebnis, dass der arbeitsbedingte Lärm keinen signifikanten Einfluss auf das Gehör von Zahnärzten hat. *Johnson et al.* [57] konnte in einer audiometrischen Untersuchungsreihe an 22 Zahnärzten keine signifikanten Hörschwellenveränderungen nach einem Arbeitstag dokumentieren. Da jedoch in einigen individuellen Daten besondere

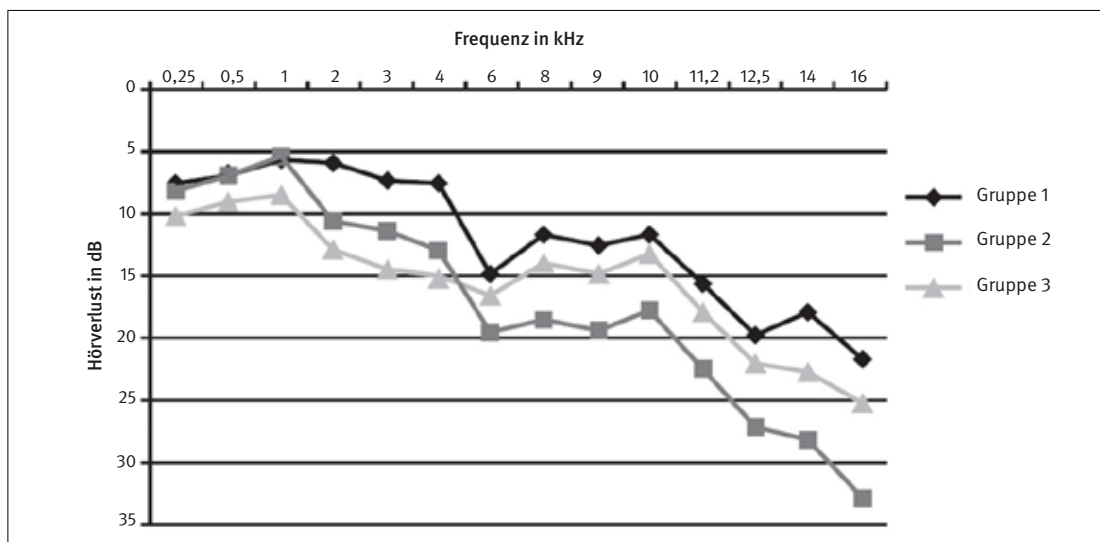
Empfindlichkeiten gegenüber Lärm festgestellt wurden, kommt es in der Zusammenfassung zu der Empfehlung, Zahnärzte generell zum Tragen von Gehörschutz zu ermutigen. *Veit* [60] fand in seiner Literaturrecherche sowohl Studien, die keine Gehörschädigungen bei Zahnärzten nachweisen konnten, als auch Studien, die signifikante Hörverluste im Hörschallbereich dokumentierten. *Akbarkhanzadeh* [46] wies im Rahmen einer audiometrischen Untersuchung an zwölf Zahnärzten am Ende einer Arbeitswoche eine statistisch signifikante TTS bei 4 kHz am linken Ohr und bei 3 kHz am rechten Ohr nach. In einer Fall-Kontroll-Studie mit 137 Zahnärzten und 80 nicht lärmbelasteten Medizinern konnten *Zubick et al.* [42] bei den Zahnärzten statistisch signifikante Hörverluste insbesondere bei 4 kHz feststellen. *Willershausen et al.* [61] dokumentierten in einem Vergleich von 53 Zahnärzten mit 55 nicht lärmbelasteten Akademikern statistisch signifikante Unterschiede bei 3 und 4 kHz. Zum gleichen Ergebnis kamen auch *Nazia Aziz et al.* [56] bei einer audiometrischen Untersuchung von 20 Zahnärzten und 20 nicht lärmbelasteten Medizinern. *Nassiri et al.* [62] führten an 250 Zahnärzten audiometrische Untersuchungen durch und fanden dabei in allen Altersgruppen und Praxiszeiträumen einen Hörverlust bei 6 kHz, was wiederum positiv mit dem Schalldruckpegel der Antriebseinheit bei dieser Frequenz korrelierte. Der Hörverlust bei 6 kHz liegt am oberen Rand des Sprachfrequenzbereichs und bleibt aus diesem Grund erst einmal unerkannt. Bei fortlaufender Lärmbelastung kommt es zu einer allmählichen Ausbreitung in die darunterliegenden Sprachfrequenzen. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen *Letho et al.* [63] mit einer Follow-Up-Studie, an der sich 64 Zahnärzte beteiligten, die mindestens zehn Jahre im Beruf arbeiteten. Die erste audiometrische Untersuchung fand 1973 statt und wurde nach 15 Jahren 1988 wiederholt. In beiden Untersuchungsreihen zeigte die Hörschwelle bei 6 kHz einen hoch signifikanten Unterschied zur Referenzgruppe. Die Zahnärzte hatten insgesamt höhere Hörschwellen bei den Frequenzen 4, 6 und 8 kHz, wobei die Hörschwelle bei 6 kHz hervorstach. Die Autoren sahen hier einen Unterschied zu den Gehörschäden, die durch typischen industriellen Lärm hervorgerufen werden. Aufgrund der höherfrequent liegenden Hörverluste sowie der Tendenz, sich nicht kontinuierlich auf die tieferen Frequenzen auszubreiten, bleibt den Zahnärzten in ihrem Berufsleben das soziale Gehör erhalten. *Dogan et al.* [52] fanden bei einer audiometrischen Untersuchung von

36 Dentaltechnikern und 36 nicht lärmexponierten Personen in jeder Frequenz bedeutend höhere Hörschwellen bei den Dentaltechnikern. Aus ihrer Sicht gehören die Dentaltechniker einer Risikogruppe für das Entstehen von beruflichen Hörverlusten an.

In allen vorstehend aufgeführten Studien wurden lediglich audiometrische Untersuchungen im Sprachfrequenzbereich durchgeführt. Teilweise kamen dabei auch Audiometer zum Einsatz, mit denen die Hörschwellen nur bis 6 kHz untersucht werden konnten. Es wurden drei Studien gefunden, in denen sich die audiometrischen Untersuchungen auch in den Bereich oberhalb des Sprachfrequenzbereichs erstreckten. *Rahko et al.* [47] untersuchten 234 Zahnärzte und zahnärztliches Assistenzpersonal mit einem konventionellen und einem Hochtonaudiometer. Über alle Frequenzen hinweg konnten keine signifikanten Unterschiede zur Kontrollgruppe gefunden werden. Die Autoren sahen hier keine schädliche Exposition gegenüber modernen zahnärztlichen Werkzeugen und betrachteten audiometrische Vorsorgeuntersuchungen in dieser Branche als nicht erforderlich. In einer

Studie von *Ünlü et al.* [64] konnten bei audiometrischen Untersuchungen (bis 18 kHz) an 25 Dentaltechnikern statistisch signifikante Unterschiede zur Kontrollgruppe im Frequenzbereich von 125 Hz bis 8 kHz festgestellt werden. Der Hörverlust stieg bei den höheren Frequenzen deutlich an. Ab 10 kHz konnten keine nennenswerten Unterschiede dokumentiert werden. *Lopes et al.* [37] untersuchten 108 Personen – 44 Zahnärzte (Gruppe 1), 36 Personen aus dem zahnärztlichen Assistenzpersonal (Gruppe 2), 28 Prothesenspezialisten (Gruppe 3) – hinsichtlich ihrer Hörschwellen bis 16 kHz. In der Auswertung wurden die Hörschwellen der drei Gruppen untereinander verglichen, wobei bei einigen Frequenzen signifikante Unterschiede festgestellt werden konnten. Ein Vergleich mit einer nicht exponierten Kontrollgruppe wurde in dieser Studie nicht durchgeführt. Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der audiometrischen Untersuchungen für das rechte Ohr der drei Personengruppen. Die Autoren kommen in der Zusammenfassung zu der Aussage, dass in den drei betrachteten Gruppen die konventionelle Audiometrie die Hörverluste nicht identifizieren würde.

Abbildung 9:
Hörschwellen vom rechten Ohr aller getesteten Personengruppen [37]



Auf eine ebenfalls in der Literatur kontrovers geführte Diskussion zu auftretenden Seitendifferenzen bei Zahnärzten wird im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen [37; 42].

Die vorstehend zitierten Studien zu Zahnärzten und Dentaltechnikern beschreiben keinen eindeutigen Schädigungsmechanismus für hochfrequenten Lärm auf den Sprachfrequenzbereich. Aus Sicht des Verfassers dieses Reports lässt sich hier aber insbesondere unter Berücksichtigung der in den Studien abgebildeten Audiogrammverläufe die Hypothese aufstellen, dass in den beiden Branchen hochfrequenter Lärm im Sprachfrequenzbereich zu einer Senke bei 6 kHz führt, die mit einem Schrägabfall bei 3 bis 4 kHz beginnt. Für eine Aussage zum Hörschwellenverlauf oberhalb des Sprachfrequenzbereichs liegen zu wenige Studien vor.

3.3.3 Gehörschäden durch Ultraschall und seine Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich (ab 8 kHz)

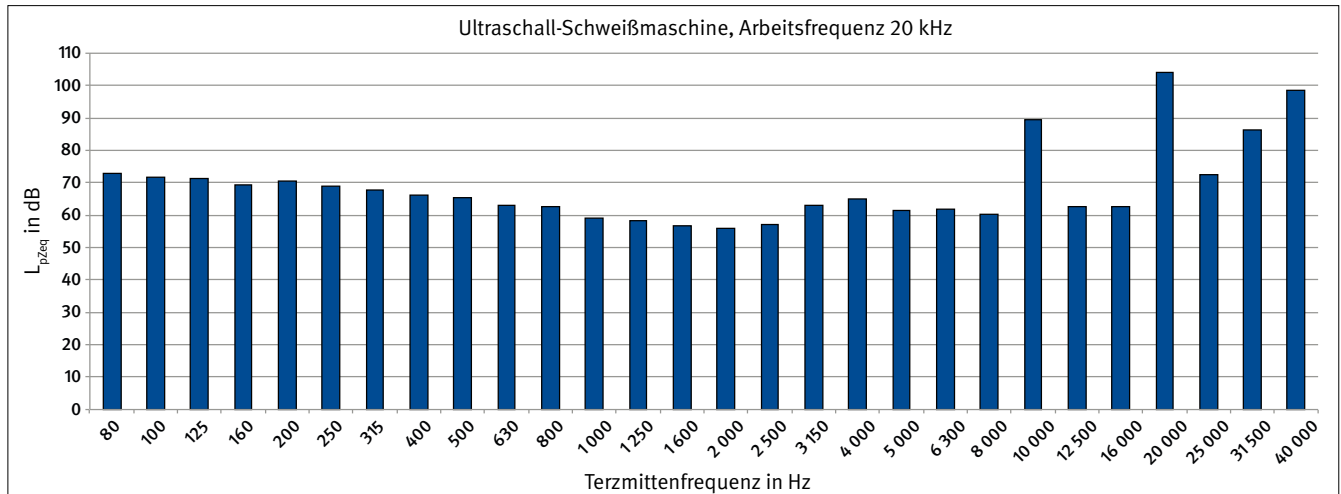
In diesem Abschnitt werden die auralen Wirkungen von luftgeleitetem Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich betrachtet. Wirkungen von knochengeleitetem Ultraschall auf das Gehör sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Industrielle Ultraschallquellen arbeiten mit einer festen Arbeitsfrequenz. Bei der halben bzw. doppelten Arbeitsfrequenz kommt es sehr häufig zu sogenannten subharmonischen bzw. harmonischen Schwingungen, die zusammen mit der Arbeitsfrequenz im Frequenzspektrum zu erkennen sind. Abbildung 10 zeigt hierzu beispielhaft das Terzspektrum einer Ultraschall-Schweißmaschine mit der Arbeitsfrequenz von 20 kHz, bei der sowohl eine Subharmonische bei 10 kHz als auch eine Harmonische bei 40 kHz erkennbar sind. Die Einwirkungsart ist in der Überschrift mit einem Beginn bei 8 kHz beschrieben, da Ultraschall per Definition ab 16 kHz beginnt und somit eine Subharmonische bereits bei 8 kHz auftreten kann.

3 Wirkungen von Schall auf das menschliche Gehör

Abbildung 10:

Beispielhaftes Terzspektrum am Bedienerplatz einer Ultraschall-Schweißmaschine mit der Arbeitsfrequenz 20 kHz



Im Vergleich zu den im vorherigen Abschnitt beschriebenen Lärmeinwirkungen auf Beschäftigte in Zahnarztpraxen und Dentallaboren liegt hierbei eine andersartige Schalleinwirkung vor. Die einwirkende Energie verteilt sich nicht über das gesamte Spektrum, sondern ist in der Regel tonal auf eine bzw. im Fall von Subharmonischen und/oder Harmonischen auf zwei oder drei Terzen begrenzt.

Die Forschungen zu dieser Art der Einwirkung begannen bereits Mitte des letzten Jahrhunderts. So beschrieb *Dickson* [65] 1952 neben seiner mit britischem Humor bestückten Definition von Lärm als *“Noise may be defined as unwanted sound or, as the old gentleman said, ‘It is anything I don’t want to hear.’”* ([65], S. 139), den Ultraschall ab 20 kHz in der Form, dass er nicht auf das Ohr wirkt, um dort die Empfindung von Tönen bzw. Klängen hervorzurufen. Er kam nach seinen Untersuchungen zu dem Schluss, dass es keine Anzeichen für eine Gefährdung des Gehörs durch luftgeleiteten Ultraschall gibt.

Acton und *Carson* [66] untersuchten 16 Personen, die an diversen Ultraschallmaschinen mit Arbeitsfrequenzen von 16 und 20 kHz arbeiteten, audiometrisch (2 bis 12 kHz) vor und nach ihrer Arbeitsschicht. Sie konnten keine signifikanten TTS bis 12 kHz feststellen und sahen dies als eine Bestätigung, dass sich in der Folge daraus auch keine PTS entwickeln kann. Allerdings beobachteten sie subjektive Effekte, wie z. B. Kopfschmerzen, Übelkeit, Tinnitus, Druckgefühl auf den Ohren und Ermüdung, deren Entstehung sie den hörbaren Subharmonischen oder den Ultraschallmaschinen mit der Arbeitsfrequenz von 16 kHz zuordneten. Die Autoren begründeten dies damit, dass bei den Personen, die an Ultraschallmaschinen mit einer Arbeitsfrequenz von 20 kHz arbeiteten, keine subjektiven Effekte auftraten. Das Entstehen der subjektiven Effekte wurde bei Schalldruckpegeln ab 78 dB bei 16 kHz beobachtet. Ob es sich bei den subjektiven Effekten um extra-aurale Wirkungen handelt, ist aus der Literatur nicht eindeutig ersichtlich. Aus diesem Grund erfolgt im weiteren Verlauf dieser Arbeit eine strikte Trennung der beiden Begrifflichkeiten.

In einer weiteren Veröffentlichung von *Acton* [67] wiederholte er seine früheren Studienergebnisse, fügte jedoch als Ergebnis eines Reviews an, dass in einigen laborexperimentellen

Untersuchungen TTS aufgrund von Ultraschallexpositionen beobachtet wurden. Damit waren hauptsächlich die Untersuchungen von *Parrack* aus dem Jahr 1966 gemeint, die später auch in einem großen Review (110 Literaturquellen) zu Wirkungen von Ultraschall auf das Gehör von *Veit* [60] beschrieben wurden. Demnach stellte *Parrack* bei der Beschallung mit diskreten Ultraschallsignalen mehrerer Frequenzen zwischen 21 und 37 kHz bei Pegeln von ca. 150 dB vorübergehende Hörschwellenverschiebungen an den Stellen der ersten Subharmonischen fest, die sich jedoch sehr schnell und vollständig rückbildeten. Insgesamt nannte *Veit* in seinem Review mehrere Studien, die entweder die Untersuchungsergebnisse von *Parrack* oder aber die von *Acton* und *Carson* bestätigten. Als bedeutsam sind an dieser Stelle auch die Untersuchungsergebnisse von *Grigor’eva* aus dem Jahr 1966 bzw. *Milkow et al.* aus dem Jahr 1968 anzuführen, die eine Gefährdung für das Gehör der an industriellen Ultraschallanlagen beschäftigten Personen durch luftgeleiteten Ultraschall ausschließen, solange die Schalldruckpegel kleiner als 120 dB sind. Im weiteren Verlauf beschreibt *Veit* noch eine Studie von 1974 aus der Schweiz, nach der durch luftgeleiteten Ultraschall mit einer PTS beim 1,5-fachen Wert der jeweiligen Beschallungsfrequenz zu rechnen ist.

Veit [60] führt Studien aus den 1950er- und 1960er-Jahren an, aus denen bekannt ist, dass das Trommelfell oberhalb von ca. 2,5 kHz bei hinreichend hohen Schalldruckpegeln zu subharmonischen Schwingungen mit der halben Erregerfrequenz angeregt werden kann. Dabei werden diese Subharmonischen vom Trommelfell als Schall abgestrahlt und – sofern sie im Hörfrequenzbereich liegen – von demselben Hörorgan wieder wahrgenommen. Dieser Mechanismus wird auch in weiteren Schriften zu Ultraschallwirkungen auf das Gehör erwähnt bzw. als mögliches Erklärungsmodell für Hörschwellenverschiebungen im Bereich der Subharmonischen angeführt [2; 67 bis 73]. Bezüglich der hinreichend hohen Schalldruckpegel zu diesem Effekt sind in der Literatur unterschiedliche Angaben zu finden. Während *Veit* [60] hierzu Pegel oberhalb von 140 dB nennt, beschreiben *Howard et al.* [70] eine Pegelspanne von 110 bis 130 dB.

Abschließend kam *Veit* [60] in seinem Review zu dem Ergebnis, dass der von ihm beschriebene Wissensstand keine abgesicherte Aussage zur Gehörgefährdung durch Ultraschall zulässt,

und es deshalb verfrüht wäre, konkrete Vorschläge für eine Richtlinie oder Vorschrift zum Umgang mit ultraschallabstrahlenden Maschinen, Geräten oder Anlagen zu unterbreiten. Weiterhin führte er an, dass der von *Acton* und *Grigor'eva* vorgeschlagene Terzbandschalldruckpegel von 110 dB für Frequenzen oberhalb von 20 kHz als vorläufiger Grenzwert für die Gehörbelastung mit Ultraschall angesehen werden sollte, solange noch Unklarheit über die Wirkung von luftgeleitetem Ultraschall auf das Gehör besteht.

Grzesik und *Pluta* [74] untersuchten in einer Querschnittsstudie 55 Bediener von Ultraschall-Schweißmaschinen (Arbeitsfrequenz: 21 kHz) und Ultraschall-Reinigungsanlagen (Arbeitsfrequenz: 25 und 28 kHz) sowie 189 nicht lärmbelastete Personen als Kontrollgruppe audiometrisch im Bereich von 500 Hz bis 20 kHz. Dabei konnten keine signifikanten Unterschiede im Sprachfrequenzbereich festgestellt werden. Im Gegenteil dazu wurden oberhalb des Sprachfrequenzbereichs bei den 55 Fällen teilweise signifikante PTS gefunden sowie ein erhöhter prozentualer Anteil derer festgestellt, die in der audiometrischen Untersuchung die höchsten Testfrequenzen nicht mehr wahrnehmen konnten. Im direkten Vergleich der Bediener von Ultraschall-Reinigungsanlagen und Ultraschall-Schweißmaschinen zeigten sich unterschiedliche Hörschwellen. Die Hörverluste befanden sich bei den Bedienern der Ultraschall-Reinigungsanlagen im Bereich zwischen 10 und 13 kHz während sich bei den Bedienern der Ultraschall-Schweißmaschinen die Hörverluste im Bereich ab 16 kHz zeigten. Da in diesen beiden Frequenzbereichen sowohl an den Ultraschall-Schweißmaschinen als auch an den Ultraschall-Reinigungsanlagen jeweils Schalldruckpegel oberhalb von kritischen Werten gemessen wurden, erklärten sich damit die jeweiligen Hörverluste für die Autoren. Des Weiteren beschrieben die Autoren hinsichtlich der beobachteten PTS eine Abhängigkeit von der Expositionsdauer in Jahren und von der täglichen Einwirkzeit. Nach drei Jahren wiederholten *Grzesik* und *Pluta* [75] die Untersuchung an 26 verbliebenen Personen der ursprünglichen Population. Die dabei festgestellten Veränderungen an den Hörschwellen konnten in den Frequenzbereichen bis 8 kHz und zwischen 10 und 13 kHz als altersbedingt angesehen werden. Für den Bereich von 14 bis 17 kHz wurden neben dem altersbedingten Hörverlust ein expositionsbedingter Hörverlust zwischen 2 und 5 dB festgestellt. Unter der Bedingung einer durchgängigen Exposition beschrieben die Autoren die Dynamik des expositionsbedingten Hörverlustes mit ca. 1 dB pro Jahr.

In einer weiteren Studie von *Grzesik* und *Pluta* [76] wurden 106 Arbeiter an Ultraschallmaschinen untersucht. Dabei stellten sie fest, dass Schalldruckpegel oberhalb von 80 dB oder äquivalent ein arbeitstäglicher, achtstündiger Schalldruckpegel von 80 dB über 15 Jahre in den Terzmittenfrequenzen 10, 12,5 und 16 kHz zu Hörverlusten im Bereich von 10 bis 16 kHz führen kann. Schalldruckpegel unterhalb von 80 dB können laut den Autoren nur für Personen, die jünger als 40 Jahre sind, als sicher angesehen werden. Bei älteren Personen besteht das Risiko, dass sich die Hörschwellen stärker verschlechtern als dies entsprechend der Altersschwerhörigkeit zu erwarten wäre. Der Effekt einer Exposition bei 20 kHz auf das Gehör konnte im Rahmen dieser Studie nicht analysiert werden, weil es nur eine geringe Anzahl von Personen gab, die in der audiometrischen Untersuchung die Frequenzen 18, 19 und 20 kHz wahrnehmen konnten. Da der mittlere Schalldruckpegel bei 20 kHz 92 dB

betrug, schlossen die Autoren daraus, dass ein 20-kHz-Grenzwert zur Vermeidung von Hörverlusten evtl. unterhalb von 92 dB liegen müsste.

In einem Review zu Wirkungen von Ultraschall auf das Gehör innerhalb einer kanadischen Richtlinie zum sicheren Umgang mit Ultraschall werden ergänzend zu den bereits vorstehend aufgeführten Studien Forschungsergebnisse von *Dobroserdov* aus dem Jahr 1967 beschrieben. Dabei wurden Hörschwellenverschiebungen bei 4, 10, 14 und 15 kHz nach einer einstündigen Exposition mit einem Schalldruckpegel von 120 dB bei 20 kHz festgestellt. Keine signifikanten Effekte waren bei einem Schalldruckpegel von 100 dB zu beobachten [68]. Da diese Studie jedoch in vier anderen Reviews [40; 60; 67; 69] unterschiedlich beschrieben wird und die originale Literaturquelle nicht zugänglich ist [40], müssen die Ergebnisse als unsicher eingestuft werden.

Schust [69] kam in ihrem Review von 135 Studien zur biologischen Wirkung von luftgeleitetem Ultraschall zu dem Ergebnis, dass das menschliche Gehör Höreindrücke bis mindestens 40 kHz wahrnehmen kann. Das Auftreten einer TTS durch Einwirkung von Ultraschall konnte wiederholt in Laborexperimenten dokumentiert werden. Dabei lagen die Höreinbußen bei der Frequenz des einwirkenden Luftschalls und/oder deren Subharmonischen bzw. in einem Fall beim 1,5-Fachen der Expositionsfrequenz. Aufgrund der Ergebnisse einzelner epidemiologischer Studien lässt sich eine Beeinträchtigung des Gehörs oberhalb des Sprachfrequenzbereichs bei langfristiger Exposition nicht ausschließen. Kritisch führt sie in ihrer Diskussion an, dass der in Deutschland gültige Richtwert von 110 dB nur auf die 20-kHz-Terz beschränkt ist und dass es zur weiteren Klärung der auralen Wirkungen von luftgeleitetem Ultraschall vor allem an qualitativ guten epidemiologischen Studien fehlt.

Das Review von *Lawton* [40] brachte hinsichtlich der Wirkungen von luftgeleitetem Ultraschall auf das Gehör keine neuen Erkenntnisse. Nach der Berücksichtigung der relevanten Literatur zu subjektiven und auralen Wirkungen von luftgeleitetem Ultraschall äußerte er zusammenfassend den Eindruck, dass es hierzu scheinbar seit den ersten Veröffentlichungen in den 1960er-Jahren keinen signifikanten Fortschritt in der Forschung gibt. Die Studien von *Parrack* sowie *Grzesik* und *Pluta* kritisiert *Lawton* an mehreren Stellen sehr deutlich. Aus seiner Sicht können durch luftgeleiteten Ultraschall lediglich Hörverluste oberhalb des Sprachfrequenzbereichs entstehen.

Wilson et al. [77] untersuchten mit einem konventionellen Audiometer 40 Zahnärzte, wovon 20 Zahnärzte eine Gruppe mit hoher zeitlicher Nutzung von Ultraschallwerkzeugen (25 bis 42 kHz) bildete, während die anderen 20 Zahnärzte Ultraschallwerkzeuge nur seltener einsetzten. Sie fanden beim Vergleich der beiden Gruppen lediglich einen statistisch signifikanten Unterschied bei den 3-kHz-Hörschwellen, den sie in der Schlussfolgerung ursächlich den Ultraschallwerkzeugen zuordneten. Aus Sicht des Verfassers dieses Reports ist die Schlussfolgerung von *Wilson* et al. kritisch zu hinterfragen, da die zu dieser Berufsgruppe durchgeführte Literaturrecherche in mehreren Studien bereits ohne direkten Bezug zu Ultraschallwerkzeugen signifikante Hörschwellen bei 3 bzw. 4 kHz zeigte (siehe Abschnitt 3.3.2).

Howard et al. [70; 78] fassten in ihren kurzen Reviews ebenfalls nur altbekannte Forschungsergebnisse zusammen. Solange keine zuverlässigeren Daten verfügbar sind, empfehlen sie, in Bezug auf Grenzwerte einen konservativen Ansatz zu verfolgen. Dieser sieht vor, dass Schalldruckpegel ab 25 kHz unterhalb von 110 dB liegen sollten, während bei den Terzmittenfrequenzen 16 und 20 kHz deutlich niedrigere Schalldruckpegel anzusetzen sind. Alle Grenzwerte sollten unabhängig von der Expositionszeit sein, um unerwünschte subjektive Effekte durch luftgeleiteten Ultraschall zu vermeiden.

Ashihara et al. [71] untersuchten die Hörschwellen von 15 Personen (Alter: 18 bis 33 Jahre) im Bereich von 2 bis 28 kHz. Bei allen Personen konnten Hörschwellen bis 18 kHz gemessen werden, während ab 26 kHz keine Hörschwellen mehr beobachtet wurden. Dazwischen hörten elf Personen den Ton von 20 kHz, sechs Personen den Ton von 22 kHz und vier Personen den Ton von 24 kHz. Die Hörschwellen stiegen ab 14 kHz stark an und verlangsamten ihr Wachstum ab 20 kHz. Bei 24 kHz betragen die Hörschwellen über 88 dB. Die Autoren konnten in einem zweiten Experiment durch den Einsatz eines 20-kHz-Tiefpassfilters ausschließen, dass die Hörempfindung oberhalb von 20 kHz durch subharmonische Komponenten im Hörfrequenzbereich beeinflusst wurde. Mit ihrem Ergebnis, dass einige Menschen durchaus Frequenzen bis 24 kHz wahrnehmen können, falls die Schalldruckpegel ca. 90 dB übersteigen, sehen sie einen brauchbaren Ansatz zur Entwicklung von Kriterien für die industrielle und kommerzielle Nutzung von Ultraschall.

Pawlaczyk-Luszczynska et al. [79] untersuchten 25 Personen, die einer mehrjährigen Exposition von Ultraschall-Schweißmaschinen (Arbeitsfrequenz: 20 und 31,5 kHz) ausgesetzt waren, mit einem konventionellen Audiometer. Parallel dazu wurden die 25 Arbeitsplätze schallmesstechnisch untersucht. Obwohl die polnischen Ultraschall-Grenzwerte in Bezug auf einen Acht-Stunden-Tag sowie hinsichtlich des maximalen Schalldruckpegels an 60 bzw. 48 % der Arbeitsplätze überschritten wurden, konnten in einem Vergleich der gemessenen Hörschwellen mit den Werten der ISO 1999 keine signifikanten Hörschäden im Bereich von 2 bis 6 kHz festgestellt werden.

Lenhardt [72] beschreibt in seinem Review neben bereits vorstehend aufgeführten Studien weitere Forschungsansätze. So sieht er unter anderem die Möglichkeit einer Hörschwellenverschiebung oberhalb des Sprachfrequenzbereichs durch luftgeleiteten Ultraschall zwischen 25 und 60 kHz, der über die Augen in der Schnecke eine Hörempfindung auslöst. *Lenhardt* [80] hat auch gezeigt, dass es möglich ist, mittels hochfrequentem Schall und niederfrequentem Ultraschall einen Tinnitus effektiv zu maskieren. Er verfolgt hier mehrere Ansätze, in denen durch knochengeleiteten Ultraschall über das Gehirn eine Beeinflussung des Hörorgans erfolgt. Weiterhin kommt er zu der Aussage, dass eine gleichzeitige Exposition von hochfrequentem Schall und Ultraschall am Arbeitsplatz das Risiko eines Gehörschadens erhöhen kann, weil es im Innenohr durch beide Signale zu einer Reizüberlappung kommt. *Lenhardt* [72] und *Morgan* [81] sehen die Ursache von Gehörschäden nicht in den eigentlichen Ultraschallfrequenzen, sondern vielmehr in den hörbaren Subharmonischen, die als Begleiterscheinung des Ultraschalls auftreten.

Auch in dem jüngsten gefundenen Review zu Wirkungen von Ultraschall auf das Gehör beginnen die Autoren mit Studien aus den 1960er-Jahren. Sie führen aber auch die neueren Studien von *Wilson*, *Ashihara* und *Lenhardt* an, die vorstehend bereits beschrieben wurden. In ihrer Zusammenfassung ist zu lesen, dass im Zusammenhang mit Wirkungen von Ultraschall auf das Gehör auch chemische Faktoren in der Arbeitsumgebung einen Einfluss haben könnten [82].

Maccá et al. [38] untersuchten den Effekt von Alter, Ultraschall und Hörschall auf die Hörschwellen oberhalb des Sprachfrequenzbereichs. Das Probandenkollektiv bestand aus 24 industriell ultraschallexponierten Personen, 113 industriell lärmexponierten Personen und 148 Personen ohne berufliche Schallexposition. Jede Versuchsperson wurde sowohl mit einem konventionellen als auch mit einem Hochtonaudiometer (9 bis 18 kHz) untersucht. Als Ergebnis wurde festgehalten, dass sich die Hörschwellen oberhalb des Sprachfrequenzbereichs mit dem Alter, insbesondere bei Personen, die älter als 30 Jahre sind, verschlechtert. Die ultraschallexponierte Gruppe hatte im Vergleich zu der Gruppe ohne berufliche Schallexposition signifikant höhere Hörschwellen oberhalb des Sprachfrequenzbereichs. Die Unterschiede waren im Bereich von 10 bis 14 kHz am größten. Der Hörverlust war bei Personen mit einer mehr als fünfjährigen Ultraschallexposition deutlich ersichtlich und erhöhte sich mit weiteren Expositionsjahren und fortschreitendem Alter. Bei der lärmexponierten Gruppe waren die Hörschwellen im Vergleich zur nicht exponierten Gruppe bei 4, 6 und 14 kHz signifikant höher. Multivariate Datenanalysen ergaben, dass für die Hörschwellen oberhalb des Sprachfrequenzbereichs das Alter der erste Prädiktor und Hör- bzw. Ultraschall der zweite Prädiktor ist. Im Sprachfrequenzbereich sieht dies anders aus. Dort wurde der Hörschall für den Bereich von 2 bis 6 kHz vor dem Alter als erster Prädiktor ermittelt. Die Ergebnisse der multivariaten Datenanalysen sind in Abbildung 11 dargestellt.

Die Studie von *Maccá et al.* konnte zeigen, dass ab einem Alter von 30 Jahren Hörverluste ab 15 kHz auftreten, die mit steigendem Alter oberhalb des Sprachfrequenzbereichs sowie zwischen 6 und 8 kHz immer signifikanter werden. Aus dem Vergleich der lärmexponierten Probanden zu den Kontrollen zeigten sich signifikante Unterschiede bei den unter 30-Jährigen zwischen 9 und 10 kHz bzw. zwischen 14 und 15 kHz. Im Sprachfrequenzbereich traten signifikante Hörverluste ab einem Alter von 40 Jahren auf. Des Weiteren konnten signifikante Unterschiede bezogen auf die Jahre der Exposition oberhalb des Sprachfrequenzbereichs ab zehn Jahren und im Sprachfrequenzbereich ab 20 Jahren festgestellt werden. Mit diesen Ergebnissen sahen die Autoren es als bestätigt an, dass die Hochtonaudiometrie für lärmexponierte Personen unter einem Alter von 30 Jahren ein brauchbares Instrument in der Früherkennung von Lärmschwerhörigkeiten sein kann (siehe Abschnitt 3.2).

In der Studie von *Maccá et al.* arbeiteten die ultraschallexponierten Probanden an Ultraschall-Schweißmaschinen (Arbeitsfrequenz: 25 und 30 kHz), Ultraschall-Schneidemaschinen (Arbeitsfrequenz: 20, 31,5 und 40 kHz) sowie Ultraschall-Reinigungsanlagen (Arbeitsfrequenz: 20 und 25 kHz). Laut den Autoren waren an allen Ultraschallquellen im Hochfrequenzbereich Subharmonische als Begleiterscheinung des Ultraschalls festzustellen. Zusammenfassend kommen sie zu der Aussage, dass

Ultraschall Hörschäden oberhalb des Sprachfrequenzbereichs verursacht. Der Studie ist keine Aussage darüber zu entnehmen, ob für die Hörverluste oberhalb des Sprachfrequenzbereichs der

Ultraschall oder die Subharmonischen im Hochfrequenzbereich verantwortlich sind.

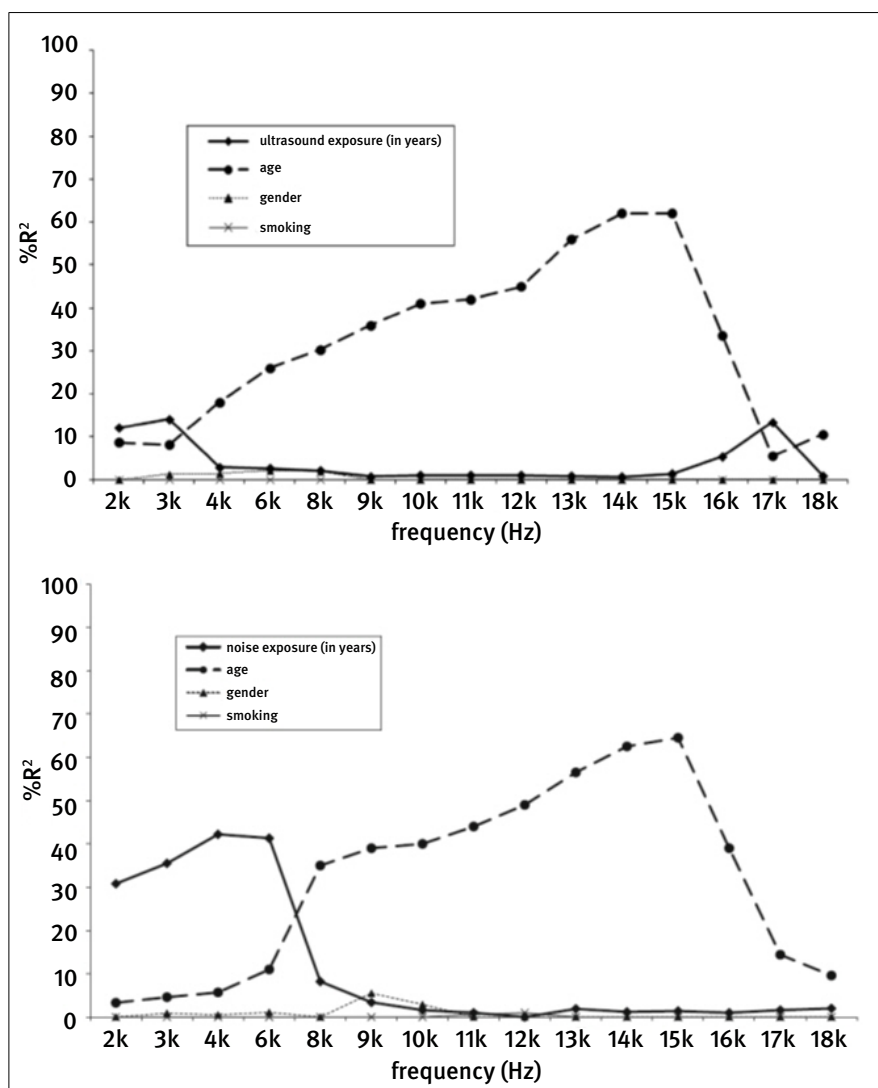


Abbildung 11: Ergebnisse der multivariaten Datenanalysen von Hörschwellen der ultraschall-exponierten Probanden und der Kontrollgruppe (oben) sowie der lärm-exponierten Probanden und der Kontrollgruppe (unten) – Verlauf der Bestimmtheitsmaße verschiedener Prädiktoren als Funktion der (Schall)frequenz [38]

3.3.4 Fazit zur Literaturrecherche hinsichtlich lärmbedingter bzw. ultraschallbedingter, chronischer Gehörschäden

Mit der durchgeführten Literaturrecherche sollte der Stand der Wissenschaft zu den grau hinterlegten Feldern in Abbildung 5 dargelegt werden (siehe Abschnitt 3.3). Dies war jedoch nur in geringem Umfang erfolgreich.

In einer sehr groben Zusammenfassung kann festgehalten werden, dass Lärm im Sprachfrequenzbereich zu Hörverlusten im und oberhalb des Sprachfrequenzbereichs führt. Zur Einwirkung von hochfrequentem Lärm wurde am Beispiel der Berufsgruppen der Zahnärzte und Dentaltechniker gezeigt, dass es einen Verdacht hinsichtlich der Verursachung von Hörverlusten im oberen Sprachfrequenzbereich gibt, während zu der Wirkung oberhalb des Sprachfrequenzbereichs keine Aussage getroffen werden konnte. Aufgrund einer Einwirkung von Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich scheint es unstrittig zu sein, dass es durch hohe Schalldruckpegel im Hochfrequenzbereich zu subjektiven Effekten, wie z. B. Kopfschmerzen, Übelkeit, Tinnitus, Druckgefühl auf den Ohren und Ermüdung, kommen kann. Hinsichtlich Gehörschäden besteht

hierbei die einhellige Meinung, dass keine Hörverluste im Sprachfrequenzbereich verursacht werden, aber ein Schädigungspotenzial oberhalb des Sprachfrequenzbereichs besteht. Ungeklärt bleibt hierbei jedoch die viel diskutierte Frage, ob die Hörverluste oberhalb des Sprachfrequenzbereichs durch den Ultraschall oder aber die Subharmonischen im Hochfrequenzbereich verursacht werden. Ein Ansatz für eine Dosis-Wirkungs-Beziehung für Einwirkungen von luftgeleitetem Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich konnte in der Literatur nicht gefunden werden. Was ebenfalls in der recherchierten Literatur nicht betrachtet wurde, ist die Frage nach der Wirkung einer kombinierten Belastung durch Ultraschall und Lärm im Hörfrequenzbereich, obwohl dies in industriellen Arbeitsbereichen sicherlich häufiger vorkommen dürfte als eine reine Ultraschalleinwirkung. Abschließend ist als eine wichtige Erkenntnis aus der Literaturrecherche anzuführen, dass für die Hörverluste oberhalb des Sprachfrequenzbereichs als erster und dominanter Prädiktor das Alter und erst danach der Lärm oder der Ultraschall verantwortlich ist.

Da jedoch insgesamt sehr viele Fragen ungeklärt bleiben, stimmt der Verfasser dieses Reports vielen Autoren der zitierten

Literaturquellen zu, die hinsichtlich der auralen Wirkungen von luftgeleitetem Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich weiteren Forschungsbedarf sehen [1; 2; 40; 60; 69; 73; 78; 79].

Einen weiteren Forschungsbedarf sieht der Verfasser dieses Reports auch für die Wirkungen des Lärms im Hochfrequenzbereich. Am Beispiel der Zahnärzte und Dentaltechniker konnte aufgezeigt werden, dass in der Zukunft hinsichtlich Arbeitsbereichen mit hochfrequenter Lärmeinwirkung sensibler mit der Auswahl geeigneter Messtechnik und/oder einer geeigneten Messstrategie umgegangen werden muss. Hierzu sind Kriterien zu definieren, mit denen Lärm im Sprachfrequenzbereich, Lärm im Hochfrequenzbereich und der Ultraschall mit seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich eindeutig voneinander abgrenzbar sind, damit z. B. weitere Arbeitsbereiche mit hochfrequentem Lärm identifiziert werden können. Beispielhaft kann hierzu die Untersuchung von *Smagowska* [83] angeführt werden. Auch die mittlerweile große Vielfalt bei den Einsatzbereichen von Ultraschallanwendungen (siehe Abschnitt 2.5) erfordert eine umfangreiche messtechnische Aufarbeitung, wie das beispielhaft *Mikulski* und *Smagowska* [84] für Ultraschall-Bohrmaschinen dokumentiert haben.

3.4 Berufskrankheit Nr. 2301: Lärmschwerhörigkeit

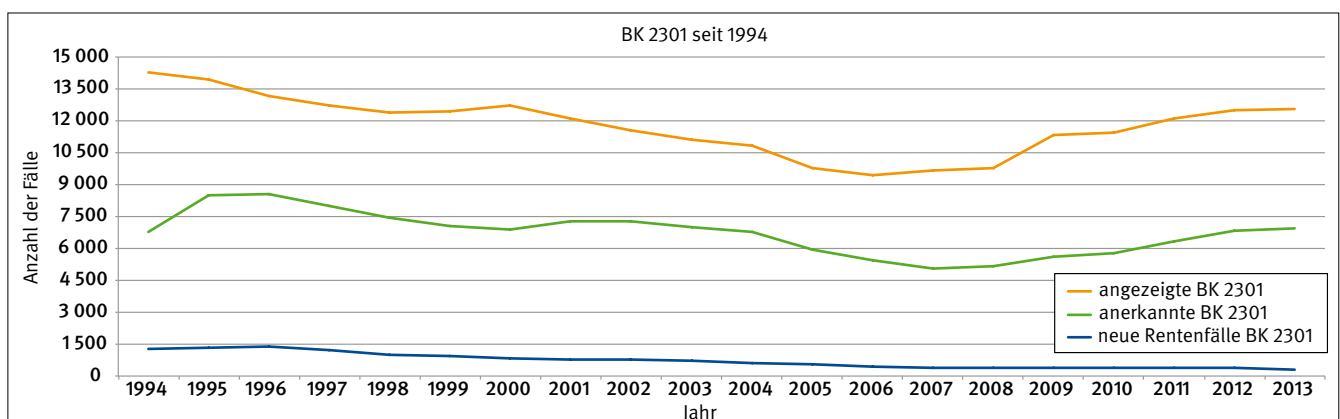
Eine Rechtsgrundlage für eine Anerkennung und Entschädigung von speziellen arbeitsbedingten Gesundheitsschäden als Berufskrankheit (BK) existiert in Deutschland seit 1929. Als Nummer 18 wurde in der Anlage der damaligen Verordnung die Berufskrankheit mit der Bezeichnung „Durch Lärm verursachte Taubheit oder an Taubheit grenzende Schwerhörigkeit“ gelistet. Diese Berufskrankheit galt jedoch nicht für alle Unternehmensarten. Es bestand eine Beschränkung auf Tätigkeiten in Betrieben der Metallverarbeitung und Metallbearbeitung. Eine derartige Beschränkung der Lärmschwerhörigkeit als Berufskrankheit auf bestimmte Unternehmensarten gab es in der Bundesrepublik Deutschland bis 1961 und in der ehemaligen DDR bis 1957 [85].

In der heutigen Berufskrankheiten-Verordnung (BKV) ist die Lärmschwerhörigkeit als Berufskrankheit Nr. 2301 (BK 2301) gelistet [86]. Bei einem begründeten Verdacht auf das Vorliegen einer Berufskrankheit sind Ärzte und Unternehmer nach dem Siebten Buch des Sozialgesetzbuches (SGB VII) verpflichtet, eine BK-Verdachtsanzeige bei dem Unfallversicherungsträger zu erstatten [87]. Entsprechendes Hintergrundwissen zur BK 2301 hat der Ärztliche Sachverständigenbeirat „Berufskrankheiten“ beim Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) in Form eines Merkblattes veröffentlicht [88]. Der zuständige Unfallversicherungsträger ermittelt und entscheidet nach Eingang der BK-Verdachtsanzeige, ob die Voraussetzungen einer Berufskrankheit erfüllt sind und auf welche Leistungen der Versicherte einen Anspruch hat. Zur Begutachtung der Lärmschwerhörigkeit haben die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) und der Spitzenverband der landwirtschaftlichen Sozialversicherung (LSV-SpV) entsprechende Kriterien festgelegt und als „Königsteiner Empfehlung“ veröffentlicht [89].

Abbildung 12 zeigt den zahlenmäßigen Verlauf der BK 2301 hinsichtlich angezeigter und anerkannter Fälle sowie neuer Rentenfälle von 1994 bis 2013.

Bei den angezeigten Fällen ist deutlich zu erkennen, dass sich die Zahlen im Zeitraum von 1994 bis 2006 von 14 281 auf 9 413 BK-Verdachtsanzeigen reduzierten und seitdem wieder bis auf 12 534 Fälle in 2013 anstiegen. Der Anteil der davon anerkannten BK-2301-Fälle schwankte im betrachteten Zeitraum zwischen 47,6 und 64,9 %. Im Jahr 2013 wurden von den 12 534 angezeigten Fällen insgesamt 6 935 Fälle (55,3 %) anerkannt. Als Gesamtzeitraum betrachtet wurden von 1994 bis 2013 im Mittel jährlich 11 787 BK-2301-Verdachtsanzeigen gestellt und davon mehr als jeder zweite Fall anerkannt (6 723 Fälle, entspricht 57 %). In der Gesamtstatistik der Berufskrankheiten liegt die BK 2301 bezüglich der angezeigten Fälle auf Platz 2 hinter den Hauterkrankungen (BK 5101), von denen in 2013 insgesamt 24 440 Fälle angezeigt wurden. Anders sieht es bei den anerkannten Berufskrankheiten aus. Hier führt die BK 2301 seit vielen Jahren die Statistik der am häufigsten anerkannten Berufskrankheiten an. Im Jahr 2013 war die zweithäufigste anerkannte Berufskrankheit die Asbestose (BK 4103) mit 1 926 Fällen [19].

Abbildung 12: Verlauf der BK 2301 hinsichtlich angezeigter und anerkannter Fälle sowie neuer Rentenfälle von 1994 bis 2013 [19]



In der gesetzlichen Unfallversicherung ist der Bewertungsmaßstab für den Gesundheitsschaden die Minderung der Erwerbsfähigkeit (MdE). Ein Anspruch auf eine Entschädigung in Form einer Rentenzahlung besteht in der Regel erst ab einer MdE von 20 %. Auf das Gehör bezogen gelten hierbei als Eckpfeiler die einseitige Taubheit mit einer MdE von 20 % sowie die beidseitige Taubheit mit einer MdE von 80 %. Für die Lärmschwerhörigkeit wurde bei symmetrischen Hörschäden eine gering- bis mittelgradige Schwerhörigkeit mit einem Hörverlust von 40 % als 20%ige MdE festgelegt [27; 89].

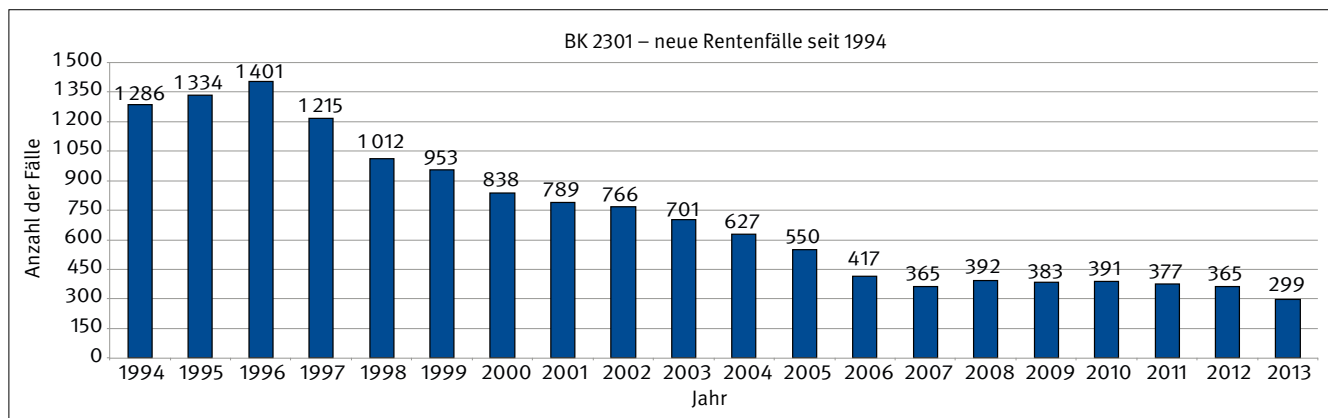
Der in Abbildung 12 gezeigte Verlauf der neuen Rentenfälle bei der BK 2301 im Zeitraum von 1994 bis 2013 ist in Abbildung 13 noch einmal detaillierter aufgeführt. Es wird deutlich, dass die

Anzahl der höhergradigen Lärmschwerhörigkeiten seit 1996 von 1 401 Fällen bis auf 299 Fälle in 2013 zurückgegangen ist. Prozentual gesehen wurden 1996 von allen angezeigten Fällen 10,6 % mit einer Rente entschädigt, während dies im Jahr 2013 nur noch bei 2,4 % der Fall war [19].

Der große Erfolg bei der Reduzierung der höhergradigen Lärmschwerhörigkeiten zeugt nach Meinung des Verfassers dieses Reports von einer langjährig gelebten, effektiven Präventionsarbeit aller im Arbeitsschutz beteiligten Stellen.

Für weitere Informationen zur BK Lärmschwerhörigkeit wird auf [17; 19; 27; 85; 90; 91] verwiesen.

Abbildung 13:
Neue Rentenfälle der BK 2301 im Zeitraum von 1994 bis 2013 [19]



4 Messung von Schall

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Frage „Wie und womit wird Schall gemessen?“. Bezogen auf die Aufgabenstellung dieser Arbeit wird ein kurzer Überblick über Messvorschriften, Zeitbewertung, Frequenzanalyse, Frequenzbewertungsfilter und Schallpegelmessung gegeben. Abschließend wird anhand eines Beispiels aus der Praxis die Problematik der Abgrenzung von Hör- und Ultraschall bei Messungen von Hörschall im Beisein von Ultraschall erläutert.

4.1 Messvorschriften

In Abhängigkeit von der zu klärenden Aufgabenstellung gibt es unterschiedliche Kennwerte, die bei Schallmessungen zu erfassen sind. Beispielhafte Aufgabenstellungen sind die Erhebung raumakustischer Parameter zur Beurteilung der Raumakustik (z. B. Schallabsorptionsgrad, Pegelabnahme bei Abstandsverdopplung und Sprachverständlichkeit) oder die Ermittlung der Lärmexposition am Arbeitsplatz zur Beurteilung hinsichtlich extra-auraler Wirkungen (z. B. Störwirkung und Lästigkeit) bzw. hinsichtlich auraler Wirkungen (gehörgefährdende Einwirkungen). Letzteres kann weiter unterteilt werden in die Ermittlung der Lärmexposition im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung nach LärmVibrationsArbSchV, zur Feststellung von Lärmbereichen sowie zur Beurteilung von Arbeitsunfällen oder Lärmschwerhörigkeiten. Hinzuzufügen sind spezielle Aufgaben, wie beispielsweise die Ermittlung der Lärmexposition unter Kopfhörern, bei besonders gefährdeten Personengruppen oder auch im Beisein von Ultraschall.

Für alle Aufgaben ist es erforderlich, dass die relevanten Kennwerte nach festen Messvorschriften erhoben werden müssen, damit die Ergebnisse aussagekräftig, vergleichbar und reproduzierbar sind. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick zu den relevanten Messvorschriften für Messungen von Hörschall im Beisein von Ultraschall gegeben.

4.1.1 Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung

Die LärmVibrationsArbSchV gilt zum Schutz der Beschäftigten vor tatsächlichen oder möglichen Gefährdungen ihrer Gesundheit und Sicherheit durch Lärm oder Vibrationen bei der Arbeit (§ 1 Anwendungsbereich). Mit Lärm ist dabei jeder Schall gemeint, der zu einer Beeinträchtigung des Hörvermögens oder zu einer sonstigen mittelbaren oder unmittelbaren Gefährdung von Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten führen kann (§ 2 Begriffsbestimmungen). Mit dieser Definition wird Ultraschall nicht grundsätzlich ausgeschlossen. Die Verordnung schreibt vor, dass Messungen nach dem Stand der Technik durchgeführt werden müssen. Messverfahren und -geräte müssen den vorhandenen Arbeitsplatz- und Expositionsbedingungen angepasst sein. Damit sind insbesondere die Eigenschaften des zu messenden Lärms, die Dauer der Einwirkung und die Umgebungsbedingungen gemeint. Weiterhin müssen die Messverfahren und -geräte geeignet sein, die jeweiligen physikalischen Größen zu bestimmen. Grundsätzlich erlaubt

die Verordnung auch Messungen in Form einer Stichprobenerhebung, wenn sie für die Exposition eines Beschäftigten repräsentativ ist (§ 4 Messungen). Hinsichtlich der erforderlichen Fachkunde darf der Arbeitgeber mit der Durchführung von Messungen nur Personen beauftragen, die über die dafür notwendige Fachkunde und die erforderlichen Einrichtungen verfügen (§ 5 Fachkunde) [3].

Der Stand der Technik hinsichtlich Lärmmessungen im Sinne der Verordnung wird durch die Norm DIN EN ISO 9612 beschrieben [92].

4.1.2 Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung

Die Technischen Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (TRLV Lärm) geben den Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Arbeitshygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm wieder. Im Anwendungsbereich ist festgelegt, dass die TRLV Lärm für Lärm im Frequenzbereich zwischen 16 Hz und 16 kHz (Hörschall) gelten. Weiterhin beschränken sich die TRLV Lärm auf tatsächliche oder mögliche Gefährdungen von Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten durch Lärmeinwirkungen einschließlich extra-auraler Wirkungen im Bereich ab einem äquivalenten Dauerschalldruckpegel von 80 dB(A). Extra-aurale Wirkungen von Lärm im Bereich unterhalb eines äquivalenten Dauerschalldruckpegels von 80 dB(A) sowie die Wirkungen von Infraschall (unter 16 Hz) und Ultraschall (über 16 kHz) sind nicht Gegenstand der TRLV Lärm. Bei den Begriffsbestimmungen weichen die TRLV Lärm für den Begriff „Lärm“ von der Definition in § 2 der LärmVibrationsArbSchV ab, in dem mit Lärm nicht mehr grundsätzlich jeder Schall gemeint ist (siehe Abschnitt 4.1.1), sondern Lärm im Sinne der LärmVibrationsArbSchV jeder Schall im Frequenzbereich zwischen 16 Hz und 16 kHz (Hörschall) ist [4].

In Teil 2 der TRLV Lärm werden die Anforderungen der LärmVibrationsArbSchV an die erforderliche Fachkunde und die Messungen konkretisiert. Im Grunde sind die hier gemachten Ausführungen zu Lärmmessungen an den Inhalt der DIN EN ISO 9612 angelehnt. Dies wird durch die Bemerkung „Die Ermittlung der Lärmeinwirkung ist ausführlich in der Norm DIN EN ISO 9612 erläutert.“ zu Beginn des Kapitels 5 „Erfassen der Lärmeinwirkung“ bestätigt. Von DIN EN ISO 9612 abweichende Ausführungen gibt es in den TRLV Lärm zur Beschreibung einer ortsbezogenen Messung und Beurteilung zur Festlegung von Lärmbereichen sowie zur Einführung eines vereinfachten Verfahrens für die Zuordnung der Genauigkeitsklasse [93].

4.1.3 DIN EN ISO 9612

DIN EN ISO 9612 beschreibt ein Verfahren, mit dem die Lärmbelastung von Beschäftigten am Arbeitsplatz erfasst und der Lärmexpositionspegel berechnet werden kann. Explizit nicht vorgesehen ist die Norm unter anderem zur Beurteilung von Infra- und

Ultraschall. Für Messungen nach dieser Norm können Personenschallexposimeter und Schallpegelmesser der Klasse 1 und 2 eingesetzt werden (siehe Abschnitte 4.5.1 und 4.5.2). Bei Lärm mit dominierenden hohen Frequenzen wird auf einen bevorzugten Einsatz von Schallpegelmessern der Klasse 1 verwiesen. Als Methodik sind in der Norm fünf chronologische Schritte sowie drei verschiedene Messstrategien beschrieben:

- Schritt 1: Arbeitsanalyse
- Schritt 2: Auswahl der Messstrategie
 - Messstrategie 1: Tätigkeitsbezogene Messung
 - Messstrategie 2: Berufsbildbezogene Messung
 - Messstrategie 3: Ganztagsmessung
- Schritt 3: Messungen
- Schritt 4: Fehlerbetrachtung und Unsicherheiten
- Schritt 5: Berechnung und Darstellung der Ergebnisse und der Unsicherheit

Für eine detaillierte Beschreibung der Methodik und der Messstrategien wird an dieser Stelle auf DIN EN ISO 9612 verwiesen [16].

4.1.4 Richtlinie VDI 3766

Für die Messung von Ultraschallexpositionen am Arbeitsplatz legt die Richtlinie VDI 3766 die Anforderungen an die geeignete Messtechnik (siehe Abschnitt 4.5.3) sowie die entsprechenden Messvorschriften fest. Die Messungen von Lärm im Beisein von Ultraschall sind grundsätzlich in Anlehnung an DIN EN ISO 9612 durchzuführen. Aus den Eigenschaften des Ultraschalls resultieren jedoch einige Besonderheiten, die bei der Messung zu beachten sind. So ist z. B. für die Wahl des Messortes bei einer ortsfesten Messung an der Kopfposition des Beschäftigten zu beachten, dass hochfrequente Quellen starke Nahfeldeffekte aufweisen können und deshalb mit inhomogenen Schallfeldern zu rechnen ist. Mittels Messungen an mehreren Positionen bzw. mittels einer abstreifenden Abtastung ist die Mikrofonposition mit der maximalen Schallexposition im Kopfbereich des Beschäftigten zu wählen. Bei personengebundenen Messungen ist z. B. zu beachten, dass im Beisein von Ultraschall mit Abschattungs- und Abschirmeffekten oder Reflexionen am Körper oder am Kopf des Beschäftigten zu rechnen ist. Aus diesem Grund ist für die Befestigung des Mikrofons die Körper- oder Kopfseite mit der höheren Schallexposition auszuwählen. Im Rahmen einer tätigkeitsbezogenen Messung müssen an allen Messorten mindestens drei unabhängige Messungen vorgenommen werden, deren Messdauer ausreichend lang ist, um einen stabilen äquivalenten Dauerschalldruckpegel für die betrachtete Tätigkeit zu erfassen. Sollten die drei Messergebnisse um mehr als 5 dB voneinander abweichen, sind drei weitere Messungen vorzunehmen. Bleibt es bei Differenzen von mehr als 5 dB, ist die Tätigkeitsanalyse hinsichtlich der Wahl der Messdauer zu überprüfen. Vor und nach den Messungen ist das Messgerät zu kalibrieren. Sollte dabei eine Abweichung von mehr als 0,5 dB auftreten, dürfen die Messwerte nicht verwendet werden [6].

4.2 Zeitbewertung

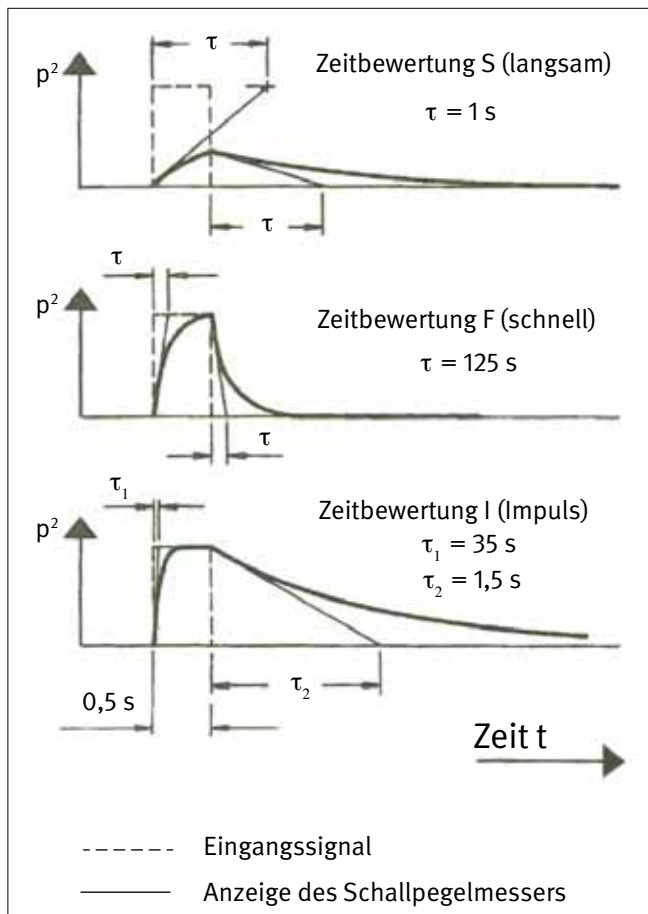
Im Schallpegelmesser wird zur Bildung des Schalldruckpegels der Effektivwert des Schalldruckes benötigt (siehe Abschnitt 2.3.1). Für die Effektivwertbildung stehen die drei international normierten Zeitbewertungen „F“ (Fast), „S“ (Slow) und „I“ (Impulse) zur Verfügung. Hintergrund für die verschiedenen Zeitbewertungen ist die Einstellung einer geeigneten Anzeigetragheit bezogen auf die vorliegende Geräuschcharakteristik. Die Problematik der geeigneten Anzeigetragheit stammt noch aus der Zeit der analog anzeigenden Messgeräte. Da Schalldruckpegel in der Zeitachse gesehen von völlig konstant bis hin zu schnell aufeinanderfolgenden, großen Schwankungen jede denkbare Verlaufsform annehmen können, muss ein analog anzeigendes Messgerät eine zum vorliegenden Schallsignal passende Anzeigetragheit haben, damit erstens die Messwerte von der Anzeige möglichst sicher abzulesen sind, aber auch zweitens schnell aufeinander folgende Schallereignisse unterscheidbar bleiben. Bei der Zeitbewertung „S“ (Zeitkonstante $\tau = 1$ s) liegt aufgrund der relativ großen Zeitkonstanten eine stark gedämpfte Anzeige vor, die sich sicher ablesen lässt. Sinnvoll ist die Zeitbewertung „S“ nur für relativ gleichmäßig verlaufende Schallereignisse ohne Impulshaltigkeit. Bei schwankenden Schallverläufen ergibt sich durch die Zeitbewertung „F“ (Zeitkonstante $\tau = 0,125$ s) eine deutlich unruhigere Anzeige, mit der jedoch die Schwankungen und einzelne Spitzen besser erkennbar sind. Für impulshaltige Geräusche wurde die Zeitbewertung „I“ mit zwei verschiedenen Zeitkonstanten definiert. Es erfolgt ein sehr schneller Pegelanstieg (Zeitkonstante $\tau = 35$ ms) zu Beginn des Schallsignals und ein verzögerter Pegelabfall (Zeitkonstante $\tau = 1,5$ s) nach dem Schallereignis. Das unterschiedliche Anzeigeverhalten der drei Zeitbewertungen ist in Abbildung 14 veranschaulicht [8; 94].

Bei den Zeitbewertungen „S“ und „F“ wird durch die Pegelintegration der Energieinhalt des Schallsignals erfasst. Hierbei entsprechen die Flächen zwischen Anzeige und Nulllinie exakt der Fläche des Schallsignals (Abbildung 14). Bei der Zeitbewertung „I“ ergibt sich durch die sogenannte „Impulsschleppe“, die durch den verzögerten Pegelabfall entsteht, ein deutlich höherer Wert, was in Abbildung 14 leicht durch einen Vergleich der entsprechenden Flächen erkennbar ist. Handelt es sich bei dem zu messenden Schallereignis um ein nicht schwankendes Dauersignal (z. B. konstanter Sinuston), wird in allen drei Zeitbewertungen jeweils dasselbe Messergebnis angezeigt [8].

Weiterhin ist die Zeitbewertung „Peak“ anzuführen. Mit dieser sehr schnellen, nicht normierten Zeitbewertung wird der Spitzenschalldruckpegel ermittelt [94].

Die verwendete Zeitbewertung kann bei der Dokumentation des Messergebnisses durch Hinzufügen des entsprechenden Index beim Schalldruckpegel angegeben werden (z. B. L_{pS} , L_{pF} , L_{pI} , $L_{p\text{peak}}$). Bei frequenzbewerteten Schalldruckpegeln wird der Zeitbewertungsindex hinter dem Frequenzbewertungsindex angegeben (z. B. L_{pAF} , L_{pAI} , $L_{pC\text{peak}}$) [8].

Abbildung 14:
Anzeigeverhalten eines Schallpegelmessers bei einem Schallsignal von 0,5 s Dauer in den Zeitbewertungen „S“, „F“ und „I“ [8]



4.3 Frequenzanalyse

Mithilfe einer Frequenzanalyse werden aus einem Schallsignal nähere Informationen über dessen Frequenzzusammensetzung erzielt. Diese Informationen werden z. B. für fast alle

Tabelle 2:
Bandmittenfrequenzen von Oktavfiltern und Terzfiltern im Hörfrequenzbereich, nach [95]

Nennwert der Bandmittenfrequenz in Hz															
Oktavfilter	31,5			63			125			250			500		
Terzfilter	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630
Oktavfilter	1000			2000			4000			8000			16000		
Terzfilter	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000	20000

Die grobe Oktavbandanalyse eignet sich insbesondere für die Auswahl von Schallabsorptionsmaterial und Gehörschutz, da hier herstellereitig die Materialdaten ebenfalls nur in Oktavbandbreite erhältlich sind. Für die Erkennung einzelner herausragender Frequenzen muss mindestens auf die etwas feinere Auflösung der Terzbandanalyse zurückgegriffen werden. Aufgrund der bandweisen Betrachtung ergibt sich aber auch hier eine geringere Auflösung bei steigenden Frequenzen. Dies führt dazu, dass herausragende hochfrequente Signalbestandteile zwar mittels einer herausragenden Terz im Frequenzspektrum

Schallschutzmaßnahmen benötigt, da entsprechende Schutzmittel frequenzabhängig wirken und somit für eine optimale Schallschutzmaßnahme aufeinander abgestimmt sein müssen (z. B. Auswahl von schallabsorbierenden Materialien für raumakustische Schutzmaßnahmen oder Auswahl eines geeigneten Gehörschützers). Des Weiteren ist die Frequenzzusammensetzung eines Geräusches eine wichtige Information bei der Analyse von Geräuschursachen an Maschinen als Basis für Lärm-minderungsberatungen [8].

Das Ergebnis einer Frequenzanalyse wird grafisch in Form eines Frequenzspektrums ausgegeben und zeigt die in einem Signal enthaltenen Schallenergieanteile in Abhängigkeit von der Frequenz (siehe Abschnitt 2.1). Es gibt drei verschiedene Frequenzanalysen, die sich hinsichtlich ihrer Auflösung unterscheiden. Die größte Variante ist die Oktavbandanalyse, die den Hörfrequenzbereich in zehn Oktaven unterteilt. Dabei entspricht jeder Oktavschritt einer Frequenzverdoppelung. Somit gilt für jede Oktavfilterbandbreite das Verhältnis von unterer (f_u) zu oberer (f_o) Durchlassfrequenz in Form von $f_o = 2 \cdot f_u$. Gekennzeichnet wird jede Oktave durch ihre Mittenfrequenz (f_m), die den Oktavschritt geometrisch in zwei gleiche Teile teilt ($f_m/f_u = f_o/f_m$). Eine etwas feinere Aufteilung der Frequenzachse bietet die Terzbandanalyse, die jede Oktave logarithmisch in drei gleiche Teile unterteilt. Die genaue Definition der Oktaven und Terzen ist DIN EN 61260-1 „Elektroakustik – Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven – Teil 1: Anforderungen“ zu entnehmen. In Tabelle 2 sind die Bandmittenfrequenzen der Oktav- und Terzfilter für den Hörfrequenzbereich aufgeführt [8; 12; 95].

Bei der Oktav- und Terzbandanalyse ist zu erkennen, dass sich die Filterbandbreite mit zunehmender Frequenz vergrößert. Dies korreliert relativ gut mit der Hörempfindung des Menschen, der hohe Frequenzen nicht mehr so fein differenzieren kann [8].

gut erkannt werden, aber aufgrund der relativ großen Terzbandbreite keine genaue Frequenzerkennung möglich ist. Als ein weiterer Nachteil der Terzbandanalyse ist anzuführen, dass zur deutlichen Erkennung einer einzelnen herausragenden Frequenz diese möglichst komplett innerhalb einer Terzbandbreite liegen muss. Je mehr eine zu erkennende Frequenz im Randbereich einer Terz liegt, desto weniger heben sich die beiden entsprechend benachbarten Terzen voneinander ab und erschweren somit eine deutliche Erkennung. Letztendlich wird für eine sichere Erkennung einzelner herausragender Frequenzen eine

deutlich höhere Frequenzauflösung benötigt. Hierfür gibt es die Schmalbandanalyse, die den gesamten Frequenzbereich mit Filtern konstanter Breite von z. B. 1 bis 10 Hz analysiert. Mit der Schmalbandanalyse können im Rahmen von Lärminderungsuntersuchungen einzelne herausragende Frequenzen ihren entsprechenden Ursachen zugeordnet werden. Über die genaue Kenntnis von Geräuschursachen wird eine gezielte Entwicklung von geeigneten Lärminderungsmaßnahmen direkt an der Stelle der Schallentstehung ermöglicht [8]. Abbildung 15 zeigt die verschiedenen Frequenzanalysen in einer schematischen Darstellung.

Abbildung 15: Schematische Darstellung verschiedener Frequenzanalysen eines tonhaltigen Geräusches bei der Frequenz f_i [12]

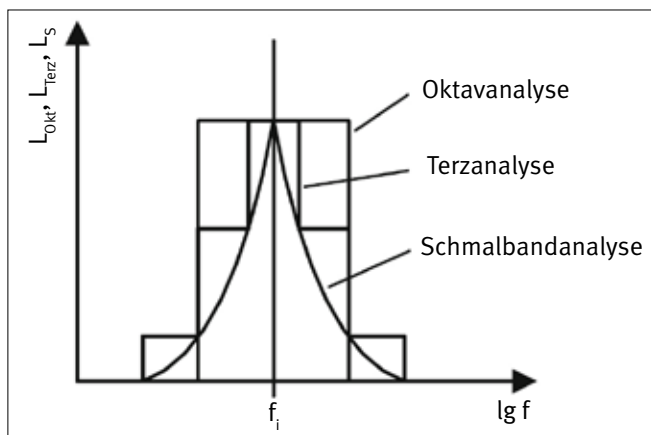
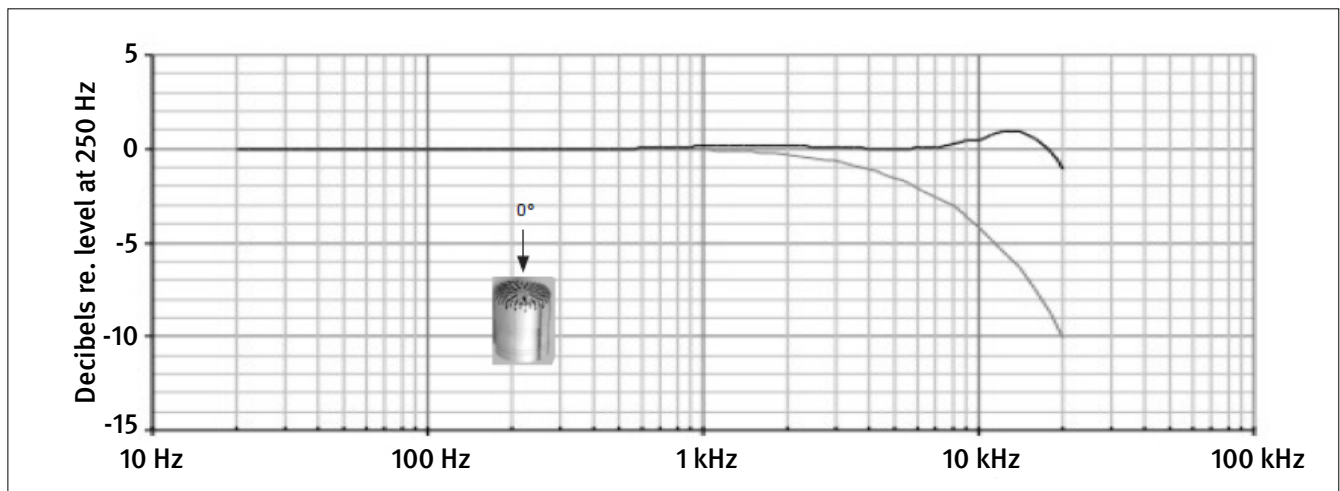


Abbildung 16: Typischer Frequenzgang (obere Kurve) des 1/2"-Mikrofons G.R.A.S. Type 40AE [96]



4.4.1 Z-Bewertung

Bei der Z-Bewertung steht das „Z“ für „Zero“ [94]. Im eigentlichen Sinne erfolgt hier keine Frequenzbewertung, da der Frequenzgang des Z Filters im gesamten Frequenzbereich die Schallsignale ohne Verstärkung oder Absenkung überträgt. Aus diesem Grund wird im Zusammenhang mit einem Z-bewerteten Schalldruckpegel auch oft von einem unbewerteten Schalldruckpegel gesprochen [8]. Definiert ist das Z-Filter in der Norm DIN EN 61672 1 „Elektroakustik – Schallpegelmesser – Teil 1: Anforderungen“ für die Terzmittenfrequenzen von 10 Hz bis 20 kHz. Die Richtlinie VDI 3766 erweitert den Frequenzgang des

4.4 Frequenzbewertungsfilter

Schallpegelmessgeräte messen den Schalldruck entsprechend dem Frequenzgang des zugehörigen Mikrofons. Innerhalb des erfassbaren Frequenzbereiches verläuft der Frequenzgang des Mikrofons idealerweise linear [92]. In Abbildung 16 ist hierzu beispielhaft der Frequenzgang eines hochwertigen Messmikrofons dargestellt.

Je nach Aufgabenstellung der Messung durchläuft das Eingangssignal vor der Bildung des Schalldruckpegels einen bestimmten Frequenzbewertungsfilter. Eine Frequenzbewertung ist eine frequenzabhängige Verstärkung oder Absenkung des Eingangssignals. Die Pegeldifferenz zwischen dem vom Schallpegelmesser angezeigten Pegel und dem entsprechenden Pegel des Eingangssignals wird in dB angegeben. Frequenzbewertungsfilter sind in Normen definiert und werden mit einem Buchstabenkürzel bezeichnet. Die verwendete Frequenzbewertung ist als Index des Schalldruckpegels L_p anzugeben, z. B. führt die Verwendung der A-Bewertung zu einem Schalldruckpegel L_{pA} [6].

Nachfolgend werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Frequenzbewertungsfilter kurz beschrieben. Die Frequenzgänge der Filter sind im Anhang C detailliert dargestellt.

Filters bis zur Terzmittenfrequenz von 50 kHz. Im Anhang C ist der Frequenzgang der Z-Bewertung in Tabelle C.1 und Abbildung C.1 dargestellt [6; 97].

4.4.2 A-Bewertung

Das menschliche Ohr kann Frequenzen zwischen 16 Hz und 16 kHz wahrnehmen. Dieser Frequenzbereich wird als Hörfrequenzbereich oder auch Hörschallbereich bezeichnet. An den Hörschallbereich grenzt unterhalb der 16 Hz der Infraschallbereich und oberhalb der 16 kHz der Ultraschallbereich. Innerhalb des Hörschallbereiches nimmt das Ohr jedoch nicht alle

Frequenzen gleich gut wahr. Die größte Empfindlichkeit besitzt das Ohr bei einer Frequenz von ca. 4 000 Hz. Zu niedrigeren und höheren Frequenzen hin nimmt die Empfindlichkeit ab. Als Hörschwelle wird die frequenzabhängige Sammlung von Schalldrücken bzw. Schalldruckpegeln bezeichnet, bei denen das menschliche Ohr gerade eben eine Hörempfindung hat. Neben der Hörschwelle gibt es noch die sogenannte Schmerzgrenze, ab der das Hören für den Menschen unerträglich wird. Die Schmerzgrenze ist anders als die Hörschwelle nur im geringen Maß von der Frequenz abhängig. Werden die soeben beschriebenen Grenzen der Schalldruckpegel und der Frequenzen in einem Pegel-Frequenz-Diagramm aufgetragen, ergibt sich die sogenannte Hörfläche (Abbildung 17), innerhalb der sich der gesamte Hörvorgang vollzieht [12].

Von der Hörschwelle ausgehend verändert sich die frequenzabhängige Hörempfindung bei steigenden Schalldruckpegeln. Abbildung 18 zeigt die Kurven gleicher Lautstärke-Wahrnehmung. Auf einer Kurve gleicher Lautstärke liegen die Schalldrücke aller Sinustöne verschiedener Frequenzen, die subjektiv gleich laut wahrgenommen werden. Die Lautstärke L_N wird in Phon gemessen. Dabei entspricht der Wert der Lautstärke per Definition dem absoluten Schalldruckpegel bei 1 kHz. Es ist deutlich erkennbar, dass die Kurven bei hohen Lautstärken einen deutlich flacheren Verlauf haben als die Kurven mit den niedrigeren Lautstärken [11].

Um die frequenzabhängige Hörempfindung des Menschen zu berücksichtigen, wurden die Frequenzbewertungsfiler A, B und C definiert. Die drei Kurven in Abbildung 19 nähern sich an die Kurven gleicher Lautstärkepegel für unterschiedliche Pegelbereiche an. Dabei entspricht das A-Filter den weniger lauten und das B- und C-Filter den lauten und sehr lauten Kurven. Auf internationaler Ebene wurde zugunsten einer einfachen Handhabung verabredet, dass zur objektiven Feststellung der Lautstärke nur noch der A-bewertete Schallpegel gemessen wird. Dabei wird in Kauf genommen, dass bei größeren Lautstärken die subjektive Lautstärkewahrnehmung etwas unterbewertet wird [12].

Die Kennwerte der A-Bewertung sind in DIN EN 61672-1 für die Terzmittenfrequenzen von 10 Hz bis 20 kHz definiert. In DIN EN 61012 „Filter für die Messung von hörbarem Schall im Beisein von Ultraschall“ und der Richtlinie VDI 3766 wird die A-Bewertung um drei weitere Werte für die Terzmittenfrequenzen bis 40 kHz erweitert. Im Anhang C ist der Frequenzgang der

A-Bewertung in Tabelle C.1, Abbildung C.2 und Abbildung C.7 dargestellt [6; 97; 99].

Abbildung 17:
Hörfläche des menschlichen Ohres [12]

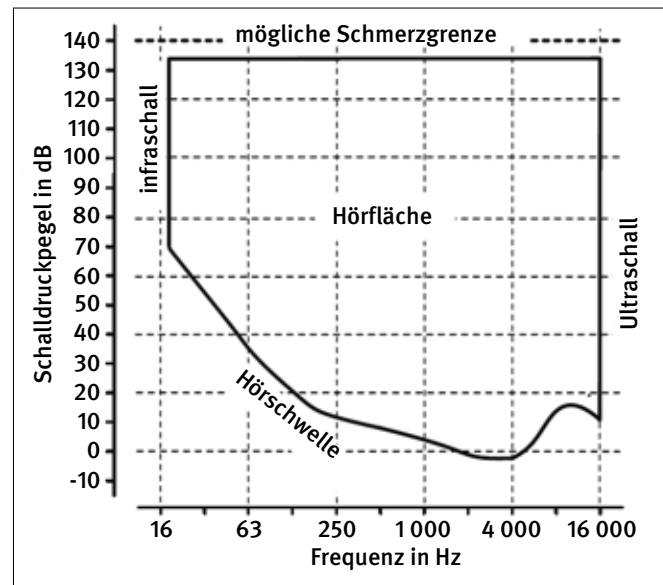


Abbildung 18:
Kurven gleicher Lautstärke-Wahrnehmung [98]

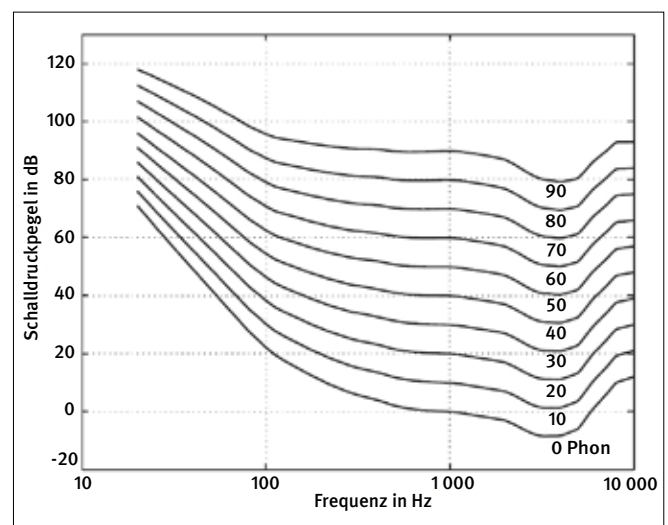
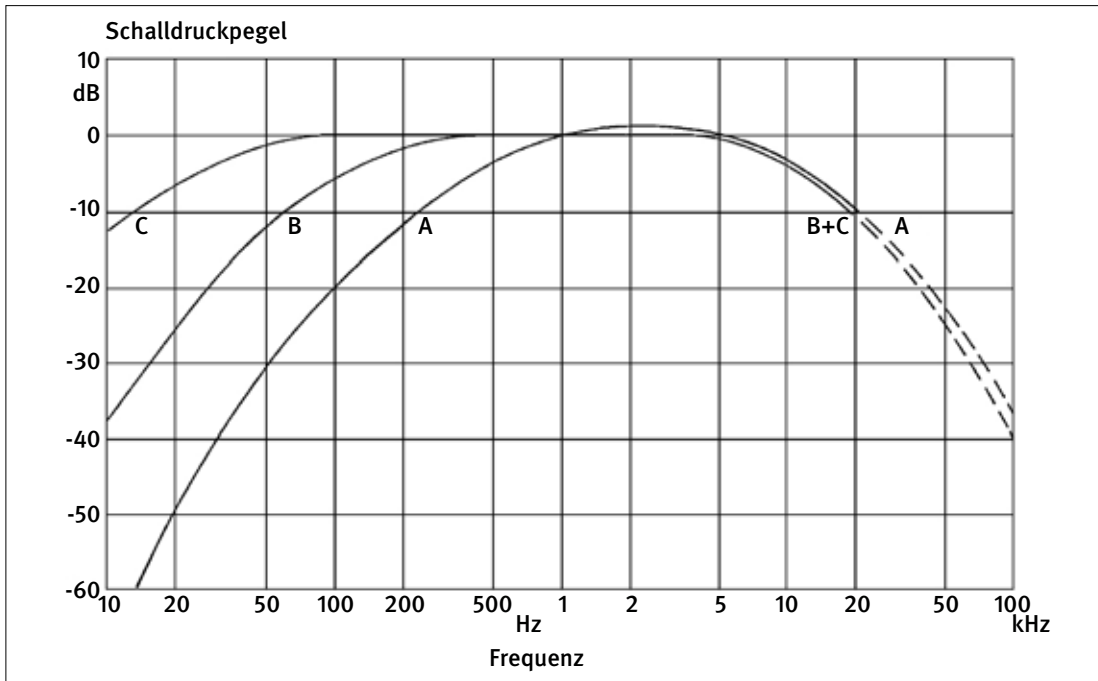


Abbildung 19:
Frequenzgänge des A-, B- und C-Bewertungsfilters zur gehörrichtigen Bewertung des Schalldruckpegels [11]



4.4.3 U-Bewertung

Für die Messung von Hörschallexpositionen in Anwesenheit von Ultraschall sind Schallpegelmesser, die Frequenzen bis in den Ultraschallbereich hinein erfassen können, nur dann geeignet, wenn sie neben der A-Bewertung auch die U-Bewertung verwenden (siehe Abschnitt 4.5.2). Ohne die U-Bewertung kommt es durch den Ultraschall zu überhöhten Messwerten im Hörschallbereich (siehe Abschnitt 4.6). Die U-Bewertung ist ein Tiefpassfilter, das einen steilen Abfall am Anfang des Ultraschallbereiches aufweist und damit die Beeinflussung der Messwerte im Hörschallbereich durch den Ultraschall verhindert. Die Kennwerte der U-Bewertung sind in DIN EN 61012 für die Terzmittenfrequenzen von 10 Hz bis 40 kHz definiert. Der Frequenzgang der U-Bewertung ist im Anhang C in Tabelle C.1, Abbildung C.3 und Abbildung C.7 dargestellt [99].

4.4.4 AU-Bewertung

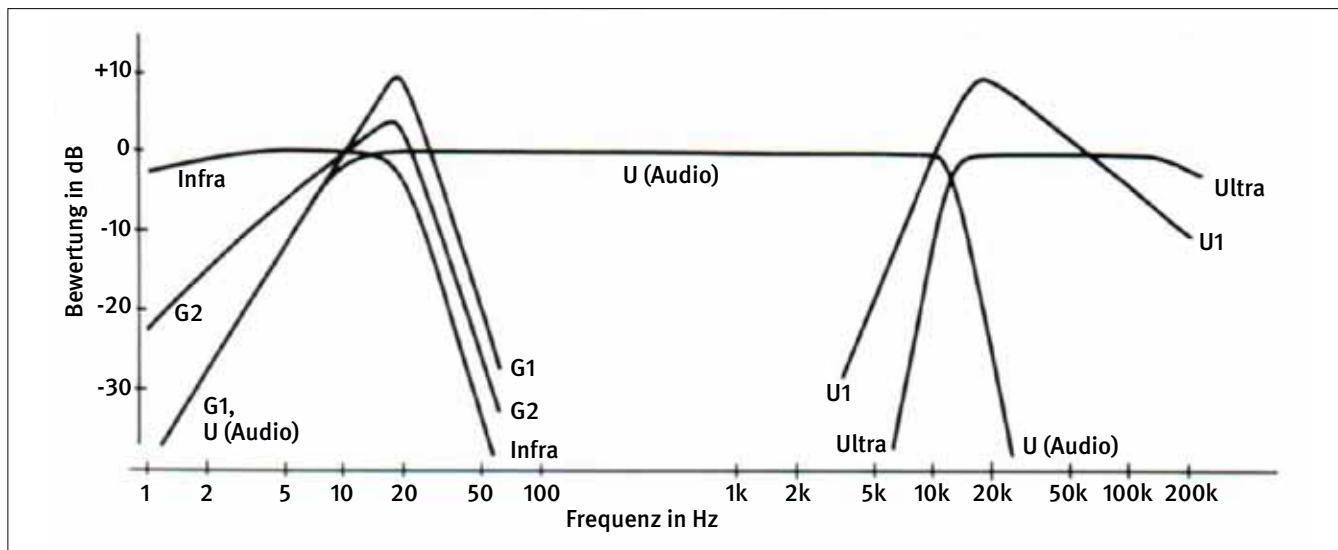
Die Bewertung von Hörschallexpositionen in Anwesenheit von Ultraschall erfolgt unter Verwendung der AU-Bewertung. Diese besteht aus einer Kombination der A- und der U-Bewertung. Der Gesamtfrequenzgang der AU-Bewertung ist die Summe der in dB angegebenen A- und U-Frequenzgänge. Da der Frequenzgang der A-Bewertung in DIN EN 61672-1 nur für die Terzmittenfrequenzen von 10 Hz bis 20 kHz definiert ist, ergänzen die DIN EN 61012 und die Richtlinie VDI 3766 die AU-Bewertung für die Terzmittenfrequenzen 25, 31,5 und 40 kHz um die Werte -50,0, -65,4 und -81,1 dB. Im Anhang C ist der Frequenzgang der AU-Bewertung in Tabelle C.1, Abbildung C.4 und Abbildung C.7 dargestellt [6; 97; 99].

4.4.5 Ultra-Bewertung

In den 1980-er Jahren vertrieb der Schallpegelmesser-Hersteller Brüel & Kjaer für den Modul-Schallpegelmesser 2231 ein Erweiterungsmodul in Form eines Infra-/Ultraschallfilters Typ 1627, das mit verschiedenen Bewertungsfiltern aus dem Infra- und Ultraschallbereich die Einsatzmöglichkeiten des Modul-Schallpegelmessers 2231 erweiterte [100]. Die entsprechenden Filtercharakteristiken dieses Infra-/Ultraschallfilters Typ 1627 sind in Abbildung 20 dargestellt. Unter anderem enthielt das Filtermodul ein Hochpassfilter mit der Bezeichnung „Ultra“. Dieses Filter blendet den Hörschallbereich aus und lässt nur Frequenzen aus dem Ultraschallbereich durch. Bei der Ultra-Bewertung handelte es sich nicht um ein normiertes Filter. In den nachfolgenden Messgerätegenerationen, bis hin zur heutigen Zeit, hat die Ultra-Bewertung keine Verwendung mehr gefunden.

Im Rahmen dieses Reports wird der Gedanke an ein Hochpassfilter mit der Bezeichnung „Ultra“ aufgegriffen und als ein mögliches Instrument für die Beurteilung von Ultraschalleinwirkungen am Arbeitsplatz vorgeschlagen und diskutiert (siehe Abschnitte 5.3.2 und 6.4). Der Frequenzgang der vorgeschlagenen Ultra-Bewertung wurde in Anlehnung an die Kennwerte des damaligen Brüel & Kjaer-Filters festgelegt. Der Hochpass schließt den Hörschall unterhalb von 12,5 kHz aus und übernimmt den Ultraschall im Bereich der Terzmittenfrequenzen von 16 bis 40 kHz unbewertet. Die Definitionsgrenze bei der Terzmittenfrequenz 40 kHz basiert auf den Vorgaben der Richtlinie VDI 3766 für den Frequenzbereich einzusetzender Schallpegelmesser, der mindestens die Terzmittenfrequenz 40 kHz umfassen muss [6]. Im Anhang C ist der vorgeschlagene Frequenzgang der Ultra-Bewertung in Tabelle C.1, Abbildung C.5 und Abbildung C.7 dargestellt.

Abbildung 20:
Filtercharakteristiken des Infra-/Ultraschallfilters Brüel & Kjaer Typ 1627 [100]



4.4.6 C-Bewertung

Die C-Bewertung dient der gehörrichtigen Bewertung des Schalldruckpegels in sehr lauten Pegelbereichen. Je höher die Lautstärke desto flacher bzw. frequenzunabhängiger verlaufen die Kurven gleicher Lautstärke-Wahrnehmung (siehe Abschnitt 4.4.2). Der Frequenzgang der C-Bewertung verläuft in Annäherung an die Kurven gleicher Lautstärke-Wahrnehmung für sehr laute Pegel im Bereich zwischen 100 und 5 000 Hz weitgehend linear. Mit diesem Filter werden im Hörfrequenzbereich gemessene Spitzenschalldruckpegel L_{ppeak} bewertet und als L_{pCpeak} ausgegeben. Die Kennwerte der C-Bewertung sind in DIN EN 61672-1 für die Terzmittenfrequenzen von 10 Hz bis 20 kHz definiert. Der Frequenzgang der C-Bewertung ist im Anhang C in Tabelle C.1 und Abbildung C.6 dargestellt [97].

4.5 Schallpegelmessler

In diesem Abschnitt kann aufgrund des begrenzten Umfangs nicht auf alle Arten und Details von Schallpegelmessern eingegangen werden. Er beschränkt sich auf die beiden gängigsten Schallpegelmessarten sowie den Messsystemen für Ultraschall. Der Fokus wird dabei auf eine allgemeine Beschreibung der Schallpegelmessler sowie technische Details hinsichtlich der Aufgabenstellung in dieser Arbeit gerichtet.

4.5.1 Personenschallexposimeter

Personenschallexposimeter werden auch als Lärmdosimeter bezeichnet. Es handelt sich um kleine Messgeräte, die zur personengebundenen Messung, also am Körper der Versuchsperson befestigt, eingesetzt werden. Das Mikrofon wird dabei in der Nähe des Ohres auf der Schulter oder an einer Kopfbedeckung befestigt. Mit diesen Messgeräten kann Lärm über längere Zeiten hinweg gemessen werden. Bei einer personengebundenen Lärmdosimetermessung muss mit größeren Messfehlern gerechnet werden, die durch den Einfluss des Körpers (Person, die das Dosimeter trägt) auf das Messergebnis entstehen können (z. B. Abschattung des Mikrofons, Reflexionen am Körper). Ein

typischer Anwendungsfall für den Einsatz von Lärmdosimetern sind Langzeitmessungen an mobilen Arbeitsplätzen, die sich mit einem Handschallpegelmessgerät nicht ohne Weiteres durchführen lassen [13].

Für Personenschallexposimeter sind die technischen Mindestanforderungen in DIN EN 61252 „Elektroakustik – Anforderungen an Personenschallexposimeter“ definiert. Die Norm schreibt einen A-bewerteten Pegelbereich von 80 bis 130 dB sowie einen Nennfrequenzbereich von 63 Hz bis 8 kHz vor [101]. Da für Lärmdosimeter keine Genauigkeitsklassen festgelegt wurden, aber die in DIN EN 61252 festgelegten Fehlertoleranzen näherungsweise denen eines Schallpegelmessers der Klasse 2 entsprechen, werden die Lärmdosimeter in den Messnormen mit der Genauigkeitsklasse 2 gleichgesetzt [13].

Aufgrund des begrenzten Nennfrequenzbereiches sind Lärmdosimeter lediglich für Messungen im Sprachfrequenzbereich geeignet. Dabei handelt es sich per Definition um den Frequenzbereich, der das menschliche Sprechen und Hören umfasst und zwischen etwa 100 Hz und 8 kHz liegt [6]. Für Schallpegelmessungen von sehr hochfrequentem Hörschall, Hörschall im Beisein von Ultraschall und Ultraschall sind Personenschallexposimeter nicht geeignet [16].

4.5.2 Handschallpegelmessgeräte

Im Arbeits- und Gesundheitsschutz erfolgen die meisten Lärmmessungen mit Handschallpegelmessgeräten. Dies ist der besonderen Situation geschuldet, dass die Messungen in der Regel als Feldmessungen in Unternehmen an realen Arbeitsplätzen durchgeführt werden und dafür die Handschallpegelmessgeräte gegenüber aufwendigen Laborsystemen die notwendige Handlichkeit und Flexibilität besitzen.

Die technischen Mindestanforderungen für Schallpegelmessler sind in DIN EN 61672-1 festgeschrieben. Im Anwendungsbereich der Norm ist definiert, dass Schallpegelmessler nach dieser Norm dazu bestimmt sind, Schall zu messen, der im Allgemeinen im Bereich des menschlichen Hörvermögens liegt [97]. Der

4 Messung von Schall

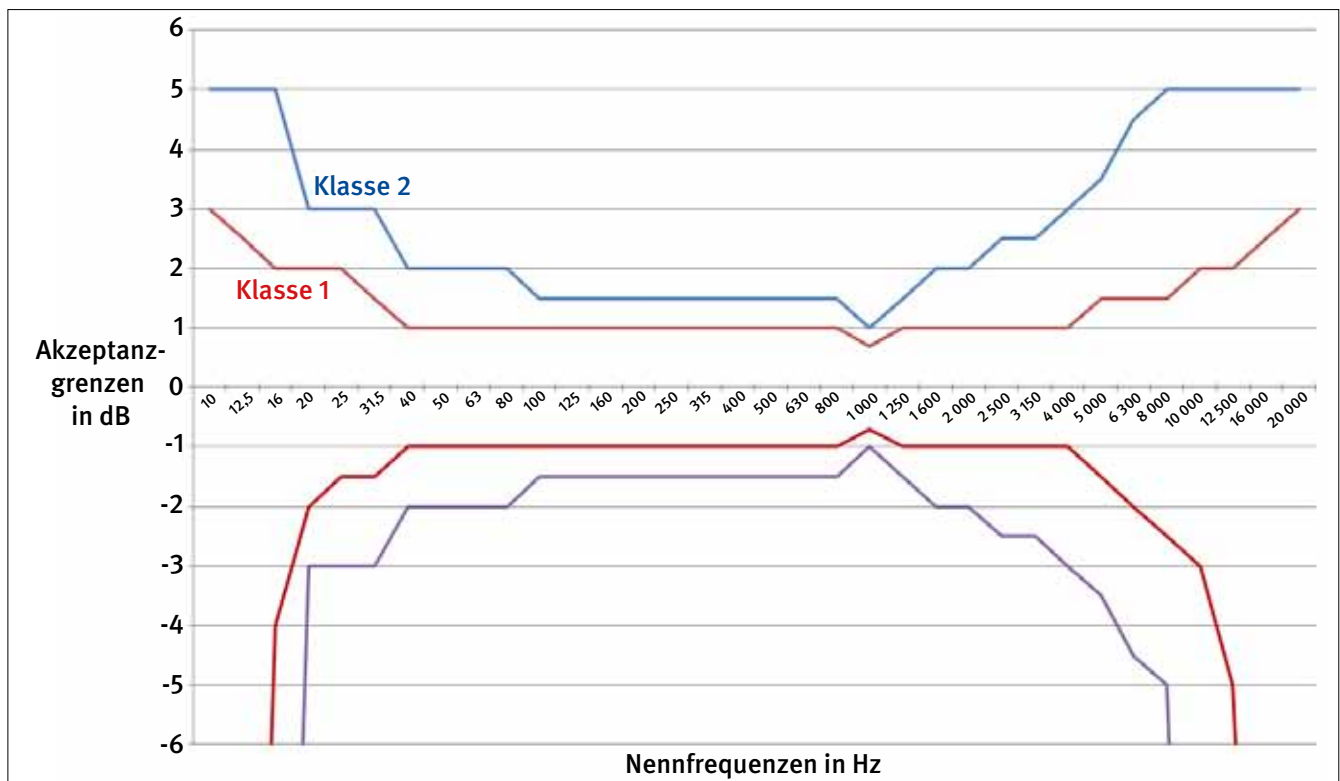
Bereich des ausgeprägten Hörvermögens liegt beim Menschen zwischen etwa 16 Hz und 16 kHz und wird per Definition in der Richtlinie VDI 3766 als Hörfrequenzbereich bezeichnet (siehe Abschnitt 2.2) [6].

Moderne Handschallpegelmessgeräte erfassen den Schall bis einschließlich der Terzmittenfrequenz 20 kHz. An dieser Stelle kann es bei Lärmessungen im Beisein von Ultraschall zu Abgrenzungsproblemen zwischen Hör- und Ultraschall kommen, die zu einer Beeinflussung der Messergebnisse führt. Die angeführte Problematik der Abgrenzung von Hör- und Ultraschall wird in Abschnitt 4.6 detailliert beschrieben. Da es sich um eine bekannte Problematik handelt, ist im Anwendungsbereich der

DIN EN 61672-1 die Anmerkung eingefügt, dass bei der Messung von A-bewerteten Hörschallpegeln bei gleichzeitiger Einwirkung einer Schallquelle mit Spektralanteilen über 20 kHz die AU-Bewertung verwendet werden kann [97]. Auf dem Schallpegelmessermarkt sind derzeit keine Handschallpegelmessgeräte erhältlich, in denen die U- bzw. AU-Bewertung als Frequenzbewertungsfilter enthalten sind.

DIN EN 61672-1 legt für Schallpegelmesser zwei Genauigkeitsklassen fest: Klasse 1 und Klasse 2. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Klassen liegt in den Akzeptanzgrenzen der Frequenzbewertungsfilter A, C und Z, die in Abbildung 21 dargestellt sind [97].

Abbildung 21:
Akzeptanzgrenzen der Frequenzbewertung für Schallpegelmesser der Klassen 1 und 2 nach DIN EN 61672-1



Die Akzeptanzgrenzen legen tolerierbare Abweichungen von den idealen Frequenzbewertungsfiltern fest. Generell ist festzustellen, dass die Akzeptanzgrenzen für Klasse-2-Geräte größer ausfallen als die für Klasse-1-Geräte. Bei der Betrachtung der Akzeptanzgrenzen der Klasse 1 sind für den Sprachfrequenzbereich (100 Hz bis 8 kHz) sehr eng gehaltene Grenzen erkennbar, die ihr Maximum bei der Frequenz 8 kHz mit den Werten +1,5 dB und -2,5 dB haben. Für tiefere und höhere Frequenzen wird der Akzeptanzkorridor deutlich breiter. Für ein Messgerät der Klasse 1 sind bei der Frequenz von 20 kHz Abweichungen von der idealen Frequenzbewertungskurve in Höhe von +3 dB und -∞ dB erlaubt. Aufgrund der Aktualität der DIN EN 61672-1, die im Juli 2014 als Ersatz für die Vorgängerversion mit Stand Oktober 2003 erschienen ist, wird angemerkt, dass bei der Überarbeitung der Norm die Akzeptanzgrenzen im Vergleich zu den Werten aus der Vorgängernorm etwas enger formuliert wurden [97; 102].

Die Akzeptanzgrenzen für die Frequenzen oberhalb von 10 kHz können bei Messungen von sehr hochfrequenten Hörschallspektren oder Ultraschallgeräuschen mit verschiedenen Schallpegelmessern zu deutlich voneinander abweichenden Messwerten führen [1].

Zusammenfassend ist anzuführen, dass Handschallpegelmessgeräte nach DIN EN 61672-1 für die Messung von Hörschallspektren geeignet sind. Für die Messung von hochfrequenten Hörschallspektren sollten aufgrund der Akzeptanzgrenzen nur Schallpegelmesser der Klasse 1 eingesetzt werden [16]. Bei sehr hochfrequenten Hörschallspektren können aufgrund der Akzeptanzgrenzen auch bei Schallpegelmessern der Klasse 1 Abweichungen bei den Messwerten verschiedener Schallpegelmesser entstehen. Für die Messung von Hörschall im Beisein von Ultraschall sind Handschallpegelmessgeräte nur unter Verwendung der AU-Bewertung geeignet. Da es auf dem Markt keine Handschallpegelmessgeräte mit AU-Bewertung gibt, kann unter Verwendung eines im Rahmen dieser Arbeit erstellten

Excel-Tools aus dem mit einem Schallpegelmessgerät der Klasse 1 gemessenen, Z-bewerteten Spektrum der AU-bewertete Schalldruckpegel L_{pAUeq} berechnet werden. Das Excel-Tool „Ultraschall_LpAUeq_Rechner.xlsm“ ist im Anhang B detailliert beschrieben und online verfügbar (www.dguv.de/ifa, Webcode: d10635). Für Messungen von Ultraschall sind Handschallpegelmessgeräte nicht geeignet.

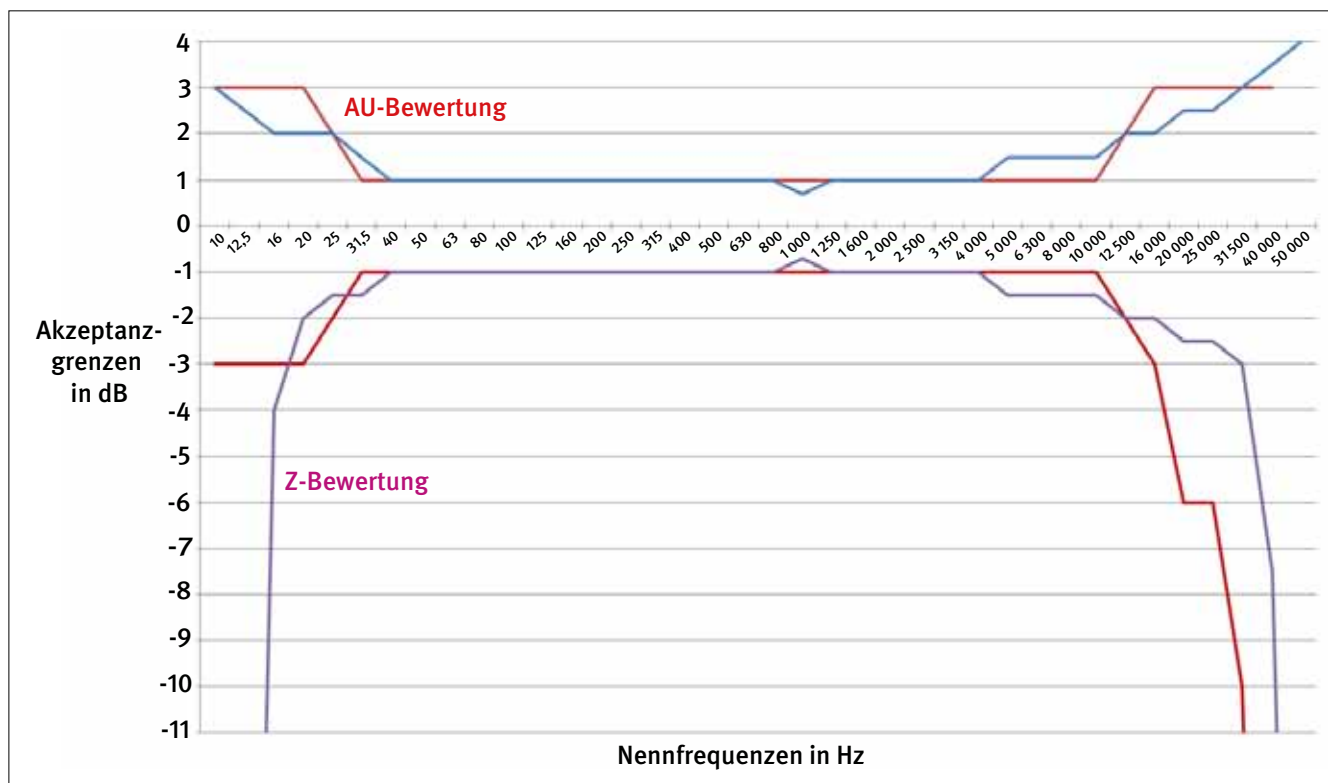
4.5.3 Messsysteme für Ultraschall

Zur Erfassung von Ultraschallexpositionen an Arbeitsplätzen ist eine geeignete Messtechnik erforderlich. Die technischen Mindestanforderungen für derartige Messsysteme sind in der Richtlinie VDI 3766 aufgeführt. Demnach sind für Schallpegelmessungen an Ultraschallanlagen Schallpegelmessgerät und Mikrofone zu benutzen, die die Anforderungen der Genauigkeitsklasse 1 nach DIN EN 61672-1 und DIN EN 61012 erfüllen. Der Frequenzbereich des Schallpegelmessers sollte die Arbeitsfrequenz der Ultraschallanlage einschließen und mindestens bis zur Terzmittenfrequenz von 40 kHz reichen. Zur Quantifizierung der Ultraschallanteile sowie zur Erkennung von Harmonischen und Subharmonischen sollte das Messsystem vorzugsweise über

eine Echtzeit-Terzbandanalyse oder auch optional über eine Schmalbandanalyse verfügen. Für die Weiterverarbeitung der Eingangsdaten müssen die Frequenzbewertungsfilter Z, A und U verfügbar sein. Da das Z- und A-Filter in DIN EN 61672-1 nur bis zur Terzmittenfrequenz von 20 kHz definiert ist, legt VDI 3766 für beide Filter entsprechende Nennwerte für die Ultraschallterzen des Frequenzbereiches fest. Als Akzeptanzgrenzen für die AU-Bewertung gelten die in DIN EN 61012 festgelegten Fehlergrenzen für die U-Bewertung. Für die Z-Bewertung werden aus DIN EN 61672-1 aufgrund der großen Toleranzen im oberen Frequenzbereich (siehe Abschnitt 4.5.2) nur die festgelegten Akzeptanzgrenzen für die Frequenzen bis 5 kHz übernommen. Ergänzend dazu sind in der Richtlinie VDI 3766 die Grenzabweichungen für den Frequenzbereich von 5 bis 50 kHz definiert. Die Akzeptanzgrenzen der AU- und Z-Bewertung sind in Abbildung 22 dargestellt. Als Aufnehmer sind für den geforderten Frequenzbereich geeignete 1/4"- oder 1/8"-Freifeldmikrofone zu verwenden [6].

Abgesehen von Labormesssystemen gab es auf dem Markt bis zum Beginn dieser Arbeit kein für Feldmessungen geeignetes Messsystem, das die Anforderungen der Richtlinie VDI 3766 umsetzt.

Abbildung 22: Akzeptanzgrenzen der Frequenzbewertung AU und Z nach VDI 3766



4.6 Problematik der Abgrenzung von Hör- und Ultraschall

In diesem Abschnitt wird anhand eines Praxisbeispiels verdeutlicht, warum es bei der Messung von Hörschall im Beisein von Ultraschall mit Handschallpegelmessgeräten der Klasse 1 zu überhöhten Anzeigewerten kommt.

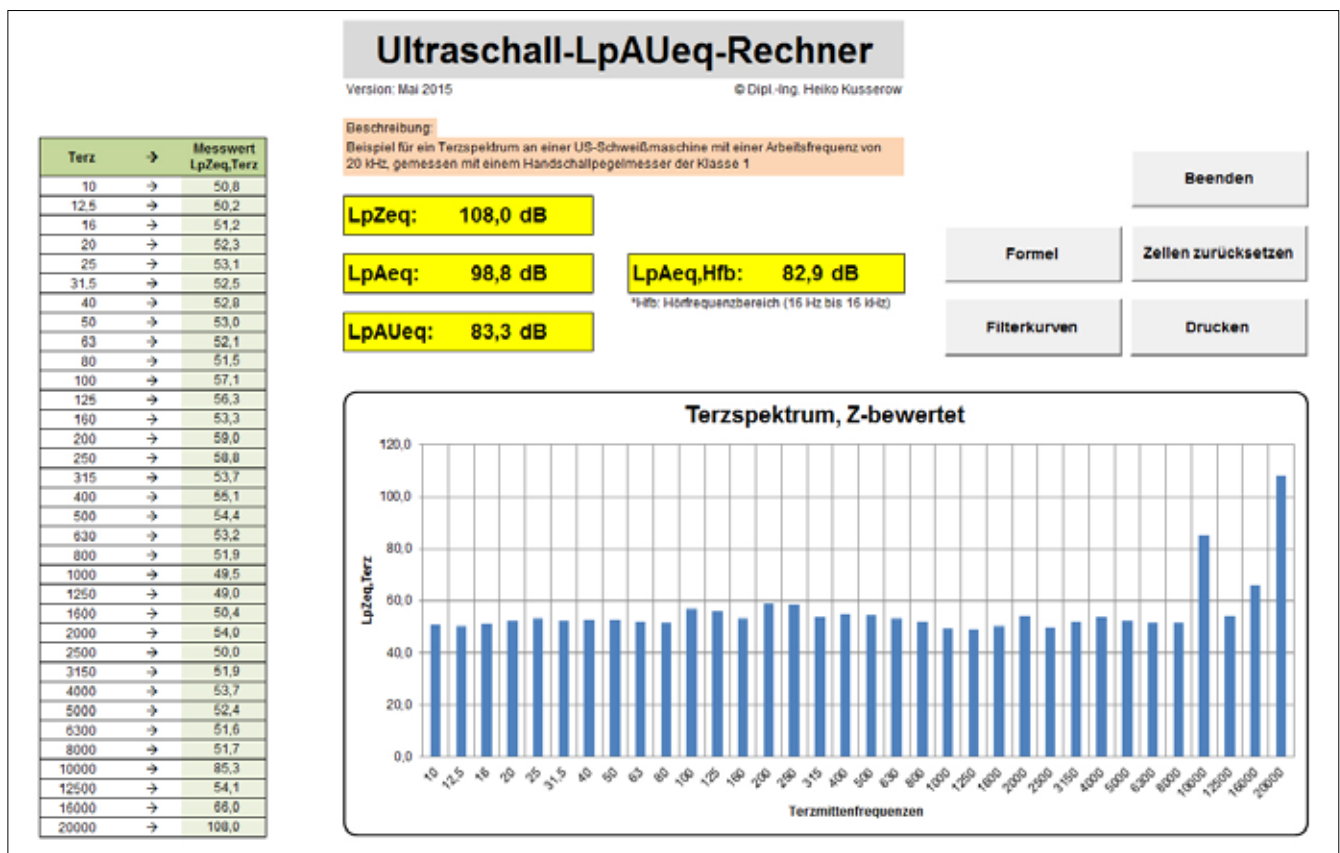
Schallpegelmesser nach DIN EN 61672-1 sind für die Messung von Hörschall (16 Hz bis 16 kHz) bestimmt [97]. Vom Frequenzbereich her erfassen die Messgeräte jedoch Schall bis einschließlich der Terzmittenfrequenz 20 kHz (siehe Abschnitt 4.5.2). Das A-Filter ist in DIN EN 61672-1 ebenfalls bis 20 kHz definiert. Für die Terzmittenfrequenz von 20 kHz ist bei der A-Bewertung eine

Dämpfung von 9,3 dB vorgesehen (siehe Tabelle C.1 im Anhang C).

In Abbildung 23 ist ein Screenshot des im Rahmen dieser Arbeit erstellten Excel-Tools „Ultraschall-LpAUEq_Rechner.xlsm“ dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung des Tools ist im Anhang B zu finden. Der Screenshot zeigt ein Z-bewertetes Terzspektrum, dass an einer Ultraschall-Schweißmaschine (Arbeitsfrequenz: 20 kHz) mit einem Handschallpegelmessgerät der Klasse 1 erfasst wurde. Das Messgerät gibt bei dieser Messung einen äquivalenten Dauerschalldruckpegel L_{pAeq} von 98,8 dB aus, obwohl im gesamten Hörfrequenzbereich lediglich bei der 10-kHz-Terz ein nennenswerter Pegel von 85,3 dB zu erkennen ist.

Abbildung 23:

Screenshot des Ultraschall-LpAUEq-Rechners mit dem Terzspektrum einer Ultraschall-Schweißmaschine (Arbeitsfrequenz: 20 kHz), gemessen mit einem Handschallpegelmessgerät der Klasse 1



Entscheidend hierfür ist die fehlende Abgrenzung von Hör- und Ultraschall. Gemessen wurde an einer Ultraschall-Schweißmaschine mit einer Arbeitsfrequenz von 20 kHz. Dabei wurde bei der 20-kHz-Terz ein Z-bewerteter Schalldruckpegel von 108 dB festgestellt. Durch die A-Bewertung wird dieser Pegel um 9,3 dB gedämpft und geht somit mit einem Wert von 98,7 dB in die Berechnung des L_{pAeq} ein. Das Beispiel zeigt sehr deutlich, dass der vom Messgerät angezeigte L_{pAeq} in Höhe von 98,8 dB nahezu ausschließlich durch den bei 20 kHz gemessenen Wert bestimmt wird.

Soll im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung die Lärmexposition im Hörschallbereich bestimmt werden, ist der vom Messgerät angezeigte L_{pAeq} in Höhe von 98,8 dB nicht zu verwenden, da

er seinen Ursprung in dem hohen Messwert bei der 20-kHz-Terz hat und es sich dabei um eine Ultraschall-Terz handelt.

Wird bei dem gezeigten Beispiel die U-Bewertung zuhulfe genommen, werden Verfälschungen der Hörschallexposition durch gleichzeitige Ultraschallsignale vermieden. Durch Addition der A- und U-Bewertung wird die 20-kHz-Terz mit 34,6 dB gedämpft (ergibt im gezeigten Beispiel einen AU-bewerteten 20-kHz-Wert von 73,4 dB) und spielt damit keine nennenswerte Rolle mehr bei der Berechnung des L_{pAUEq} . Im gezeigten Beispiel beträgt der AU-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel 83,3 dB. Dieser Wert ergibt sich wiederum nahezu ausschließlich aus dem Z-bewerteten Messwert bei der 10-kHz-Terz in Höhe von 85,3 dB, der für die Berechnung des L_{pAUEq} noch durch die

AU-Bewertung mit 2,5 dB gedämpft wird (siehe Tabelle C.1 im Anhang C).

Parallel dazu berechnet das Excel-Tool zur Information den im Rahmen dieser Arbeit definierten, A-bewerteten äquivalenten Dauerschalldruckpegel für den Hörfrequenzbereich von 16 Hz bis 16 kHz ($L_{pAeq,HR}$). Auch mit diesem Schalldruckpegel in Höhe von 82,9 dB(A) wird in dem hier betrachteten Beispiel die Beeinflussung des eigentlichen L_{pAeq} durch die Ultraschallterz bei 20 kHz deutlich.

Die meisten industriellen Ultraschallverfahren haben Arbeitsfrequenzen ab 20 kHz aufwärts und liegen damit in einem Frequenzbereich, den der Mensch nicht hören kann. Bei diesen Verfahren treten jedoch sehr oft als Begleiterscheinung kräftige subharmonische Töne auf, die bei der halben Arbeitsfrequenz liegen [23]. Um eine solche subharmonische Schwingung handelt es sich im gezeigten Beispiel bei der 10-kHz-Terz. Sie hat ihren Ursprung bei der Ultraschall-Schweißmaschine und liegt bei der halben Arbeitsfrequenz im Hörfrequenzbereich.

Es ist wichtig, an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass es sich bei der hier beschriebenen Problematik der Abgrenzung von Hör- und Ultraschall nicht um eine Fehlfunktion der Schallpegelmessung nach DIN EN 61672-1 handelt. Im Anwendungsbereich der DIN EN 61672-1 ist definiert, dass die Schallpegelmessung nach dieser Norm dazu bestimmt sind, Schall im Hörfrequenzbereich zu messen [97]. Ein Einsatz eines derartigen Schallpegelmessers an einer Ultraschallanlage ohne Verwendung der AU-Bewertung liegt damit außerhalb des definierten Anwendungsbereichs. Der Anwender steht somit in der Verantwortung, seine Messtechnik hinsichtlich Anwendungsbereich, Frequenzbereich und Frequenzbewertungsfilter genau zu kennen. Weiterhin hat er vor der Messung an Ultraschallanlagen abzuklären, wo laut Herstellerangaben die Arbeitsfrequenzen der Anlagen liegen und bei welchen Frequenzen mit Subharmonischen zu rechnen ist [23].

5 Beurteilung von Schall

Im Arbeitsschutz spielt die Gefährdungsbeurteilung eine bedeutende Rolle. Sie ist eine Kernforderung des Arbeitsschutzgesetzes (ArbSchG) sowie aller nachfolgenden Verordnungen. Der Begriff beschreibt die systematische Ermittlung, Bewertung und Beurteilung relevanter Gefährdungen der Beschäftigten bei der Arbeit. Ziel der Gefährdungsbeurteilung ist es, erforderliche Schutzmaßnahmen festzulegen, damit eine Gefährdung für das Leben sowie die physische und psychische Gesundheit möglichst vermieden und die verbleibende Gefährdung möglichst gering gehalten wird. Das ArbSchG führt unter § 5 „Beurteilung der Arbeitsbedingungen“ beispielhafte Gefährdungsfaktoren auf. Darin enthalten sind die physikalischen Einwirkungen, zu denen unter anderem auch der luftgeleitete Schall zählt [103].

Bezüglich einer Schalleinwirkung im Hörfrequenzbereich ist das ArbSchG durch die LärmVibrationsArbSchV detaillierter ausgearbeitet worden. Anforderungen der LärmVibrationsArbSchV werden wiederum durch die TRLV Lärm weiter konkretisiert. Einwirkungen von Infra- und Ultraschall sind per Definition in der TRLV Lärm kein Gegenstand der LärmVibrationsArbSchV (siehe Abschnitte 4.1.1 und 4.1.2). Im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung sind im ersten Schritt die Art und Höhe der Schallexposition zu ermitteln. Anhand vorhandener Kriterien, die dem Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Arbeitshygiene sowie sonstiger gesicherter arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse zum Schutz der Beschäftigten entsprechen, erfolgt im zweiten Schritt eine Bewertung der vorhandenen Exposition hinsichtlich des möglichen Gefährdungspotenzials. In Abhängigkeit vom Beurteilungsergebnis sind dann geeignete Schutzmaßnahmen nach dem Stand der Technik festzulegen und deren Wirksamkeit zu überprüfen [104].

Das Ausklammern von Infra- und Ultraschall per Definition im vorhandenen staatlichen Vorschriftenwerk sowie das Fehlen von anderen staatlichen Vorschriften zu diesen Einwirkungen darf nach Meinung des Verfassers dieses Reports nicht zu der Annahme führen, dass eine Gefährdungsbeurteilung hinsichtlich derartiger Einwirkungen nicht erforderlich ist. Da bei der Einwirkung von luftgeleitetem Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich u. a. ein Gefährdungspotenzial für das Gehör besteht (siehe Abschnitt 3.3.3), ist eine diesbezügliche Gefährdungsbeurteilung an entsprechenden Arbeitsplätzen unerlässlich.

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels erfolgt die Vorstellung der Beurteilungskriterien für gehörgeschädigenden Lärm in Deutschland. Für den Bereich des luftgeleiteten Ultraschalls und seine Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich werden die derzeitigen Beurteilungskriterien einem internationalen Vergleich unterzogen und danach zwei Vorschläge mit ergänzenden bzw. veränderten Beurteilungskriterien unterbreitet. Beide Vorschläge kommen im weiteren Verlauf dieses Reports im Rahmen einer Messserie an Ultraschall-Schweißmaschinen zur Anwendung und Diskussion (siehe Kapitel 6).

5.1 Beurteilungskriterien für gehörgeschädigenden Lärm in Deutschland

Bei der nachfolgenden Auflistung von Beurteilungskriterien für gehörgeschädigenden Lärm in Deutschland liegt das Hauptaugenmerk auf den Kriterien, die zur Beurteilung von beruflichen Lärmeinwirkungen herangezogen werden. Dabei erfolgt eine Beschränkung auf Beurteilungskriterien, die in deutschen Rechtsvorschriften und Normen aufgeführt sind, wobei an mehreren Stellen auch ein thematisch passender Bezug auf andere deutsche Literaturquellen genommen wird.

5.1.1 Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung

Die LärmVibrationsArbSchV präzisiert das ArbSchG und gilt zum Schutz der Beschäftigten vor tatsächlichen oder möglichen Gefährdungen ihrer Gesundheit und Sicherheit durch Lärm oder Vibrationen bei der Arbeit. Per Definition in der TRLV Lärm handelt es sich beim Lärm im Sinne der LärmVibrationsArbSchV um jeden Schall im Hörfrequenzbereich, der zu einer Beeinträchtigung des Hörvermögens oder zu einer sonstigen mittelbaren oder unmittelbaren Gefährdung von Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten führen kann [4].

In der präventiv ausgerichteten Verordnung sind in Bezug auf Lärm untere und obere Auslösewerte definiert (Tabelle 3) (§ 6 „Auslösewerte bei Lärm“), ab deren Erreichen bzw. Überschreiten bestimmte Schutzmaßnahmen umzusetzen sind. Die Auslösewerte beziehen sich auf die Schalldruckpegelgrößen Tages-Lärmexpositionspegel $L_{EX,8h}$ und Spitzenschalldruckpegel L_{pCpeak} (siehe Abschnitt 2.3). Die dämmende Schutzwirkung eines persönlichen Gehörschutzes ist bei der Anwendung der Auslösewerte nicht zu berücksichtigen [3].

Tabelle 3:
Auslösewerte der LärmVibrationsArbSchV

Schalldruckpegelgröße	Untere Auslösewerte	Obere Auslösewerte
$L_{EX,8h}$ in dB(A)	80	85
L_{pCpeak} in dB(C)	135	137

Bezogen auf ein Ampel-Gefährdungsmodell beginnt ab den oberen Auslösewerten der „rote“ Gefährdungsbereich. Der präventive „gelbe“ Gefährdungsbereich liegt zwischen den unteren und oberen Auslösewerten. Von keiner Gefährdung („grüner“ Bereich) ist unterhalb der unteren Auslösewerte auszugehen.

Die oberen Auslösewerte entsprechen den Angaben im Merkblatt zur Berufskrankheit Nr. 2301 „Lärmschwerhörigkeit“, in dem ein Überschreiten dieser Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Häufigkeit bzw. Dauer der Überschreitung mit einem Schädigungspotenzial für das Gehör verbunden ist (siehe

Abschnitt 3.4) [88]. Der obere Auslösewert $L_{EX,8h} = 85$ dB(A) entspricht weiterhin dem Wert in VDI 2058 Blatt 2, ab dem eine Gefahr für das Entstehen von Gehörschäden besteht (siehe Abschnitt 5.1.3) [5].

Bei dem Spitzenschalldruckpegel $L_{pCpeak} = 137$ dB bezieht sich das Schädigungspotenzial auf die sich wiederholende Einwirkung derartiger Spitzenschalldruckpegel. Anders sieht dies bei einmaligen Schallereignissen aus. Hierzu stellt *Liedtke* [105] nach einer Literaturrecherche klar, dass erst bei einem Spitzenschalldruckpegel oberhalb von 150 bis 160 dB (L_{pCpeak}) mit einem akuten Gehörschaden (siehe Anhang A) durch ein einmaliges Schallereignis gerechnet werden muss.

5.1.2 Richtlinie VDI 3766

Der Anwendungsbereich der Richtlinie VDI 3766 liegt in der Erfassung, Bewertung und Beurteilung von luftgeleitetem Ultraschall an Arbeitsplätzen. Es sind Richtwerte definiert (Tabelle 4), deren Einhaltung zur Vermeidung von Hörminderungen im Sprachfrequenzbereich (100 Hz bis 8 kHz) durch Geräusche mit Ultraschallanteilen empfohlen wird [6].

Tabelle 4:
Richtwerte der VDI 3766

Schalldruckpegelgröße	Richtwert
$L_{EXAU,8h}$ in dB(AU)	85
L_{pZpeak} in dB(Z)	140

Der erste Richtwert bezieht sich auf die Schalldruckpegelgröße des AU-bewerteten Tages-Lärmexpositionspegels, mit dem die Ultraschallanteile des Geräusches durch die AU-Bewertung unberücksichtigt bleiben (siehe Abschnitt 4.4.4). Anders verhält es sich beim zweiten Richtwert, der sich auf die Schalldruckpegelgröße des Z-bewerteten Spitzenschalldruckpegels stützt. Da die Z-Bewertung bis zur Terzmittenfrequenz von 50 kHz definiert ist, werden hier alle Spitzenschalldruckpegel innerhalb des festgelegten Frequenzbereiches einbezogen (siehe Abschnitt 4.4.1). Im Hinblick auf weitere Beurteilungskriterien für Einwirkungen im Ultraschallbereich verweist die Richtlinie VDI 3766 in einer Anmerkung auf Abschnitt 3.7 in VDI 2058 Blatt 2, in dem zur Vermeidung von bleibenden Gehörschäden für die Terzmittenfrequenz von 20 kHz ein Terzschalldruckpegel $L_{pZeq, Terz 20kHz}$ von 110 dB als Grenzwert definiert ist (siehe Abschnitt 5.1.3) [6].

Der Richtwert $L_{EXAU,8h} = 85$ dB nach VDI 3766 entspricht dem Grenzwert aus dem Leitfaden „Nichtionisierende Strahlung – Ultraschall“, den der Fachverband für Strahlenschutz e.V. 2005 herausgegeben hat. Als zusätzlicher Grenzwert ist im Leitfaden abweichend von VDI 3766 der Z-bewertete Maximalpegel L_{pZmax} in Höhe von 140 dB aufgeführt [106].

5.1.3 Richtlinie VDI 2058 Blatt 2

An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass die aktuelle Version der VDI 2058 Blatt 2 den Stand Juni 1988 hat und sich derzeit in Überarbeitung befindet. In der Richtlinie wird für die auf einen achtstündigen Arbeitstag bezogene, gemittelte Geräuschmission der Begriff „Beurteilungspegel“ verwendet.

Dieser Begriff, der seine Historie in den Unfallverhütungsvorschriften der Gesetzlichen Unfallversicherungsträger hat, wurde 2007 mit Inkrafttreten der LärmVibrationsArbSchV zum Tages-Lärmexpositionspegel. Zur Einhaltung einer einheitlichen Begrifflichkeit wird im Rahmen dieser Arbeit nur der Begriff des Tages-Lärmexpositionspegels verwendet.

Die Richtlinie VDI 2058 Blatt 2 ist zur Beurteilung aller Arbeitsplätze anzuwenden, an denen die Gefahr einer Gehörschädigung anzunehmen ist. Dabei definiert sie als Gehörschäden Hörminderungen mit audiometrisch nachweisbaren Merkmalen eines Haarzellschadens, die bei 3 kHz 40 dB überschreiten. Grundsätzlich zu unterscheiden sind akute und chronische Gehörschäden [5].

Ein akuter Gehörschaden (siehe Anhang A) kann laut dieser Richtlinie bei hohen AI-bewerteten Schalldruckpegeln oberhalb von 120 dB bereits nach einer Einwirkung von einigen Minuten auftreten. Auch Einzelschallereignisse mit extrem hohen Schalldruckpegeln von mehr als $L_{pAlmax} = 135$ dB (z. B. Knalle, Explosionen) können akute Gehörschäden verursachen [5]. Der Schalldruckpegel $L_{pAlmax} = 135$ dB entspricht in etwa einem Wertebereich von $L_{pCpeak} = 150$ bis 160 dB [105].

Chronische Gehörschäden können erst bei einer langfristigen Lärmeinwirkung entstehen. Entscheidende äußere Einflussgrößen für die Gehörgefährdung sind dabei der Tages-Lärmexpositionspegel sowie die mehrjährige Dauer der Lärmbelastung. Grundsätzlich sieht die Richtlinie VDI 2058 Blatt 2 ab einer Lärmeinwirkung von $L_{EX,8h} = 85$ dB(A) eine Gefahr für die Entstehung von Gehörschäden. Diese nimmt mit steigendem Tages-Lärmexpositionspegel deutlich zu. Bezogen auf die Dauer der Lärmeinwirkung ist die Entwicklung eines Gehörschadens bei ohrgesunden Personen unwahrscheinlich, wenn die Lärmeinwirkung bei einem Tages-Lärmexpositionspegel von 90 dB weniger als sechs Jahre, bei 87 dB weniger als zehn Jahre und bei 85 dB weniger als 15 Jahre bestand [5].

Hinsichtlich dieser zeitlichen Betrachtung der schädigenden Lärmeinwirkung wurde vor einigen Jahren das Modell der „Effektiven Lärmdosis“ (ELD) entwickelt. Mit dem Verfahren wird basierend auf dem Lärmdosis-Wirkungsmodell nach ISO 1999 aus einer Belastungsbiografie mit unterschiedlichen Belastungsdauern und wechselnden Tages-Lärmexpositionspegeln eine ELD berechnet, die als Ergebnis eine Belastungszeit in Lärmjahren mit einem Bezugsexpositionspegel von 90 dB(A) angibt. Eine Aussage zu einer zeitlichen Belastungsschwelle, ab deren Überschreitung mit einem Gehörschaden zu rechnen ist, enthält das Modell nicht [107; 108]. Die ELD ist mittlerweile ein fester Bestandteil bei der Begutachtung der Berufskrankheit „Lärmschwerhörigkeit“ [89].

Bei Einwirkungen von luftgeleitetem Ultraschall hält die Richtlinie VDI 2058 Blatt 2 bleibende Gehörschäden für unwahrscheinlich, wenn der als Grenzwert bezeichnete, Z-bewertete Terzschalldruckpegel für die Mittenfrequenz von 20 kHz ($L_{pZeq, Terz 20kHz}$) den Wert von 110 dB nicht übersteigt. Für höhere Frequenzen führt die Richtlinie an, dass auch höhere Grenzwerte in der Diskussion stehen. Als Anmerkung weist die Richtlinie darauf hin, für die Ermittlung des Tages-Lärmexpositionspegels die AU-Bewertung zu verwenden [5].

Bei den Infraschalleinwirkungen im Frequenzbereich von 1 bis 20 Hz sieht VDI 2058 Blatt 2 derzeit keine gesicherten Erkenntnisse für Grenzwerte vorliegen. Jedoch wird angeführt, dass in der Literatur Hinweise auf Beeinträchtigungen durch Infraschall zu finden sind, wenn der unbewertete Schalldruckpegel bei 20 Hz 120 dB und bei 1 Hz 132 dB überschreitet [5].

5.2 Deutsche Ultraschall-Beurteilungskriterien im internationalen Vergleich

Zusammenfassend gibt es in Deutschland derzeit drei Kriterien, anhand derer eine Gefährdungsbeurteilung hinsichtlich Einwirkungen von luftgeleitetem Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich durchgeführt werden kann. Da ist zum einen der Grenzwert $L_{pZeq, Terz 20kHz} = 110$ dB aus VDI 2058 Blatt 2, unterhalb dessen die Entstehung von bleibenden Gehörschäden als unwahrscheinlich angesehen wird, und zum anderen die Richtwerte $L_{EXAU, 8h} = 85$ dB und $L_{pZpeak} = 140$ dB aus VDI 3766, deren Einhaltung zur Vermeidung von Hörminderungen im Sprachfrequenzbereich durch Geräusche mit Ultraschallanteilen empfohlen wird [5; 6]. Einen direkten Bezug zu luftgeleitetem Ultraschall haben dabei nur die beiden Werte $L_{pZeq, Terz 20kHz}$ und L_{pZpeak} . Mit dem ersten Wert wird der Z-bewertete, äquivalente Dauerschalldruckpegel beschränkt auf die 20-kHz-Terzmittenfrequenz betrachtet, während der zweite Wert den Z-bewerteten Spitzenschalldruckpegel über das gesamte Frequenzspektrum bis zur 50-kHz-Terzmittenfrequenz beschreibt. Der Wert $L_{EXAU, 8h}$ dient nicht zur Beurteilung von Ultraschallexpositionen, sondern schließt den einwirkenden Ultraschall zur Beurteilung des Lärms im Hörfrequenzbereich aus.

Aus dem Review zu Wirkungen von luftgeleitetem Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich bleibt die Frage nach einer entsprechenden Dosis-Wirkungs-Beziehung offen. Unstrittig ist derzeit lediglich, dass luftgeleiteter Ultraschall und seine Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich das Gehör im Sprachfrequenzbereich nicht schädigen, aber oberhalb des Sprachfrequenzbereichs zu Hörverlusten führen können. Weiterhin wird nicht angezweifelt, dass subjektive Effekte, wie z. B. Kopfschmerzen, Übelkeit, Tinnitus, Druckgefühl auf den Ohren und Ermüdung, durch tonal begrenzte Einwirkungen im Hochfrequenzbereich entstehen können, die durch Ultraschall oder entsprechende Subharmonische verursacht werden (siehe Abschnitt 3.3).

Da dieser Wissensstand bereits mehrere Jahrzehnte besteht, äußerte Schust [69] vor fast zwanzig Jahren bereits Kritik an dem in Deutschland gültigen Richtwert, der sich nur auf die 20-kHz-Terzmittenfrequenz beschränkt.

Im Vergleich zu den bestehenden deutschen Beurteilungskriterien gab es vor der deutschen Wiedervereinigung in

der damaligen DDR bereits den Fachbereichsstandard TGL 32 630/06 „Arbeitshygiene – Ultraschall am Arbeitsplatz – Grenzwerte, Messung und Bewertung“, der sowohl für luftübertragenen Ultraschall im Frequenzbereich der Terzbandmittenfrequenzen von 20 bis 100 kHz als auch für Luftschall der Terzbandmittenfrequenzen 10, 12,5 und 16 kHz, wenn dieser im Zusammenhang mit luftübertragenem Ultraschall an Arbeitsplätzen auftritt, galt. Dort waren Grenzwerte für alle Terzmittenfrequenzen von 10 bis 100 kHz definiert, die sich auf eine Arbeitsschicht von acht Stunden bezogen (Tabelle 5). Die Grenzwerte galten als eingehalten, wenn in den Terzbändern der maximale Schalldruckpegel unter den üblichen Betriebsbedingungen mehr als 10 dB unter dem Grenzwert lag. War dies nicht der Fall, mussten die Schalldruckpegel nach einer aufwendigeren Messvorschrift, unter Berücksichtigung der Messunsicherheit, erneut erhoben werden. Der Fachbereichsstandard wurde im Juni 1986 veröffentlicht und war ab dem 1. März 1987 verbindlich zur Anwendung empfohlen [109].

Tabelle 5:

Grenzwerte der früheren DDR für luftübertragenen Ultraschall bzw. für Luftschall zwischen 10 und 16 kHz, wenn dieser im Zusammenhang mit luftübertragenem Ultraschall auftritt [109]

Terzbandmittenfrequenz in kHz	Energieäquivalenter Terz-Dauerschalldruckpegel in dB
10/12,5/16	80
20	95
25	105
31,5/40/50/63/80/100	110

Auch wenn die Wissenslücken zu den Wirkungen von luftgeleitetem Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich groß sind, sollen im Folgenden die deutschen Beurteilungskriterien für luftgeleiteten Ultraschall mit anderen nationalen Standards verglichen werden. Ein entsprechendes Review zu internationalen Ultraschall-Beurteilungskriterien wurde von Lawton [110] veröffentlicht und dient als Basis für die nachfolgenden Ausführungen.

Das Review beginnt mit einer Zusammenstellung von zulässigen Höchstwerten, die aufgrund von Untersuchungsergebnissen aus den 1960er-Jahren von Wissenschaftlern empfohlen wurden (Tabelle 6). Hintergrund dieser empfohlenen Richtwerte ist die Vermeidung aller subjektiven und auralen Wirkungen auf alle entsprechend exponierten Menschen. Somit ist aus Sicht der Autoren dieser Studien jeder Schall, der einen oder mehrere dieser Richtwerte übersteigt, mit einer gewissen Gefährdung für den Menschen verbunden.

Die Veröffentlichung von Lawton enthält eine kurze Darstellung zum Hintergrund dieser wissenschaftlichen Empfehlungen. Bei den aufgeführten Studien handelt es sich teilweise um dieselben wie die in Abschnitt 3.3.3 beschriebenen.

5 Beurteilung von Schall

Tabelle 6:
Wissenschaftliche Empfehlungen in Bezug auf zulässige Höchstwerte für hochfrequenten Lärm und luftgeleitetem Ultraschall nach [110]

Source	one-third-octave band centre frequency in kHz									wide-band ≥ 20 kHz
	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	
<i>Grigor'eva</i> (1966)	80	85	90	90	–	–	–	–	–	120
<i>Acton</i> (1968)	75	75	75	75	110	110	110	–	–	
<i>Parrack</i> , 1969 cited in WHO (1982) and <i>Acton</i> (1983)	–	80	80	80	105	110	115	115	115	
<i>Acton</i> (1975, 1976)	75	75	75	75	75	110	110	110	–	

Bereits in einem früheren Review äußerte *Lawton* deutliche Kritik an den Studien, die zu diesen Empfehlungen führten [40]. Dies findet sich auch in dem hier betrachteten Review wieder [110]. So schreibt er z. B., dass seit der Veröffentlichung dieser Richtwerte keine weiteren Studien einen systematischen Trend zu Hörverlusten in Verbindung mit Ultraschall bzw. seinen Subharmonischen im Hochfrequenzbereich aufgezeigt haben. Weiterhin, so *Lawton*, seien die Richtwerte über mehrere Jahrzehnte hinweg mit genügend Regelmäßigkeit in wissenschaftlichen Arbeiten wiederholt worden, sodass sie einen gewissen Grad an

Autorität und Dauerhaftigkeit erlangt haben, die ihnen in diesem Maß vielleicht gar nicht zustehen.

Ungeachtet der Kritik von *Lawton* wurden auf der Basis dieser wissenschaftlichen Empfehlungen entsprechende Beurteilungskriterien auf internationaler Ebene abgeleitet. Tabelle 7 zeigt die entsprechenden Datensätze, die von *Lawton* in einer umfassenden Recherche innerhalb der englischsprachigen Literatur gefunden wurden [110].

Tabelle 7:
Zulässige Höchstwerte für hochfrequenten Lärm und luftgeleitetem Ultraschall, veröffentlicht von Organisationen oder Regierungen nach [110]

Source	one-third-octave band centre frequency in kHz								
	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50
International Labour Office (1977) cited in <i>Lee</i> (1980)	–	–	75	85	110	110	110	110	110
ACGIH, 1979		80	80	80	105	110	115	115	115
WHO (1982)									
Japan, 1971	90	90	90	90	110	110	110	110	110
USSR, 1975	–	–	75	85	110	110	110	110	110
US Air Force, 1976	–	–	85	85	85	85	85	85	–
Sweden, 1978	–	–	–	–	105	110	115	115	115
Canada, 1980	80	80	80	80	80	110	110	110	110
INRC IRPA (1984)									
occupational exposure	–	–	–	–	75	110	110	110	110
general public	–	–	–	–	70	100	100	100	100
cited in <i>Damongeot, André</i> (1985)									
Norway, 1978	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Australia, 1981	–	75	75	75	75	110	110	110	110
cited in <i>Tanttari</i> (1986)									
USSR, 1983	–	–	80	90	100	105	120 (octave)	110	110
Halth Canada (1991)	–	–	–	75	75	110	110	110	110
ACGIH (2004)									
8 hour average ceiling values	–	88	89	92	94	–	–	–	–
	–	105	105	105	105	140	145	145	145
cited in <i>Pawlaczyk-Luszczynska et al.</i> (2007) Poland, 2002									
L _{eq8h}	–	80	80	80	90	105	110	110	–
L _{max}	–	100	100	100	110	125	130	130	–
US Department of Defence (2010)	–	80	80	80	105	110	115	115	115

Die Beurteilungskriterien der American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) wurden 2004 gegenüber den zuerst veröffentlichten Werten aus dem Jahr 1979 deutlich angehoben. Auch im Vergleich mit den anderen Datensätzen fallen diese Grenzwerte erheblich höher aus. Diese laut *Lawton*

sehr großzügige Auslegung von Grenzwerten erfolgte unter der Festlegung der ACGIH, dass unterhalb dieser Werte keine Gefährdung für das Hören und Verstehen der menschlichen Sprache im Bereich von 500 Hz bis 4 kHz besteht. Zur Vermeidung von möglichen subjektiven Effekten sind diese Grenzwerte der ACGIH

nicht festgelegt worden. Den Ursprung der Grenzwerte in Höhe von 140 bzw. 145 dB für die Terzmittenfrequenzen ab 25 kHz sieht *Lawton* in den Untersuchungen von *Parrack* begründet, der erst bei Pegeln um 150 dB vorübergehende Hörschwellenverschiebungen an den Stellen der ersten Subharmonischen feststellen konnte. Damit hat die ACGIH die Grenzwerte sehr nah an die Grenze einer potenziellen Schädigungsgefahr gesetzt, da luftgeleiteter Ultraschall bereits ab ca. 155 dB von der Haut absorbiert wird und die anschließende Erhitzung des Gewebes zu akuten Schäden führen kann [110].

Das International Labour Office (ILO) sowie das International Non-Ionizing Radiation Committee (INRC) veröffentlichten ihre Richtwerte mit der Möglichkeit, diese um definierte Werte zu erhöhen, wenn die tägliche Expositionszeit vier bzw. acht Stunden unterschreitet. Begründet wurde diese Festlegung jeweils mit dem Energie-Äquivalenz-Prinzip. Zu den Richtwerten des ILO, die bereits ab der 12,5-kHz-Terzmittenfrequenz festgeschrieben sind, fügt *Lawton* kritisch an, dass die subjektiven Effekte in den zugrunde liegenden Studien bei empfindlichen Menschen schon nach wenigen Minuten Expositionszeit beobachtet wurden und somit das Energie-Äquivalenz-Prinzip hier eine falsche Sicherheit erzeugen würde. Die Richtwerte des INRC beginnen erst bei der 20-kHz-Terzmittenfrequenz mit einem sehr präventiv ausgerichteten Wert. Da die subjektiven Effekte in den Studien nur unterhalb von 20 kHz zu beobachten waren, wertet *Lawton* die Möglichkeit der Pegelerhöhung bei reduzierter Expositionszeit an dieser Stelle nicht ganz so kritisch [110; 111].

Aus diesem internationalen Vergleich ist zu entnehmen, dass mit Ausnahme der Datensätze der US Air Force von 1976 (sehr niedrig angesetzte Richtwerte für die Terzmittenfrequenzen ab 25 kHz), des INRC von 1984 (definiert für den öffentlichen Bereich), der ACGIH von 2004 (sehr hoch angesetzte Grenzwerte) und der polnischen Richtwerte für L_{pmax} (abweichende Definition als L_{pmax} nicht mit den anderen Datensätzen vergleichbar), die verbleibenden Richtwerte in den folgenden Schalldruckpegelbereichen liegen:

- In den Terzmittenfrequenzen von 8 bis 16 kHz liegen die Richtwerte zwischen 75 und 90 dB, zwecks Vermeidung von subjektiven und auralen Wirkungen.
- In den 20-kHz-Terzmittenfrequenzen liegen die Richtwerte zwischen 75 und 110 dB, zwecks Vermeidung von subjektiven und auralen Wirkungen. An der großen Pegelspanne ist zu erkennen, dass es an dieser Stelle keine einhellige Meinung gibt. Die gleiche Pegelspanne existiert auch bei den wissenschaftlichen Empfehlungen, nachdem *Acton* seine anfängliche Empfehlung von 110 auf 75 dB senkte. Dies begründete er damit, dass die Bandbreite der 20-kHz-Terzmittenfrequenz von 17,6 bis 22,5 kHz reicht und somit das untere Ende der 20-kHz-Terzmittenfrequenz für einen signifikanten Teil der Menschheit, insbesondere junge Frauen, im hörbaren Bereich liegt. Des Weiteren sieht er bei Pegeln von 110 dB in dieser Terz auch die Möglichkeit des Auftretens von subjektiven Effekten [110]. *Howard et al.* und *Maue* diskutieren an dieser Stelle ebenfalls eine Reduzierung des Richtwertes von 110 dB [1; 70; 78; 112].

- In den Terzmittenfrequenzen von 25 bis 50 kHz liegen die Richtwerte zwischen 105 und 120 dB, zwecks Vermeidung von auralen Wirkungen.

Damit befinden sich alle vorliegenden Richtwerte – sowohl die internationalen als auch die aus der früheren DDR – innerhalb des wissenschaftlich empfohlenen Wertebereichs. Weiterhin ist in Tabelle 7 zu erkennen, dass sich die Datensätze dahingehend unterscheiden, für welche Terzmittenfrequenz der jeweils erste Richtwert festgelegt wurde. Bezogen auf das obere Ende des Definitionsbereichs sind in allen Datensätzen Richtwerte bis mindestens zur 40-kHz-Terzmittenfrequenz abzulesen. Zu den Fragen, warum sich die jeweiligen Staaten bzw. Organisationen mehr an der einen oder der anderen wissenschaftlichen Empfehlung ausgerichtet haben und warum der jeweils erste Richtwert bei unterschiedlichen Terzmittenfrequenzen festgelegt wurde, liegen dem Verfasser dieses Reports keine näheren Informationen vor.

Als Fazit ist aus diesem Abschnitt festzuhalten, dass sich alle vorliegenden Staaten bzw. Organisationen bei der Definition von Richtwerten zur Beurteilung von luftgeleitetem Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich an den wissenschaftlichen Empfehlungen orientiert haben und sich dabei außer Deutschland kein anderer Staat bzw. keine andere Organisation nur auf einen Richtwert für eine Terzmittenfrequenz beschränkt hat.

5.3 Vorschläge zur Beurteilung von luftgeleitetem Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich

Nachfolgend werden zwei von den derzeitigen deutschen Beurteilungskriterien abweichende Ansätze zur Beurteilung von luftgeleitetem Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich vorgestellt und am Beispiel einer Messserie an Bediener-Arbeitsplätzen von Ultraschall-Schweißmaschinen diskutiert (siehe Abschnitte 6.3 und 6.4).

Die Beurteilungskriterien in den Vorschlägen berücksichtigen sowohl die wissenschaftlichen Erkenntnisse zu Wirkungen von luftgeleitetem Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich als auch die Ergebnisse aus dem Vergleich international vorhandener Richtwerte.

5.3.1 Empfohlene Höchstwerte nach *Maue*

Der erste Vorschlag wurde von *Maue* [1] veröffentlicht, nachdem sich der Arbeitskreis zur Erstellung der Richtlinie VDI 3766 nicht auf eine Festlegung entsprechender Richtwerte einigen konnte (siehe Kapitel 6). Da die Richtwerte der VDI 3766 lediglich zur Vermeidung von Hörminderungen im Sprachfrequenzbereich definiert wurden, fehlen in Deutschland geeignete Kriterien, mit denen man im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung das Entstehungsrisiko von subjektiven Beeinträchtigungen und Hörverlusten oberhalb des Sprachfrequenzbereichs betrachten kann. Aufgrund nicht vorhandener Erkenntnisse zu einer Dosis-Wirkungs-Beziehung im Zusammenhang mit Einwirkungen von

Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich sowie der Tatsache, dass die subjektiven Wirkungen bereits nach kurzer Expositionszeit entstehen können, hat sich *Maue* bei der Wahl einer geeigneten Schalldruckpegelgröße auf den in VDI 3766 definierten Z-bewerteten maximalen 5-Minuten-Terzschalldruckpegel $L_{pZeq, Terz, 5min}$ festgelegt. Diese Schalldruckpegelgröße beschreibt den Z-bewerteten äquivalenten Dauerschalldruckpegel in Terzen ($L_{pZeq, Terz}$), der während der Arbeitszeit über den lautesten zusammenhängenden Zeitabschnitt von fünf Minuten gemittelt wird und zu dem höchsten Z-bewerteten Tages-Lärmexpositions-Schalldruckpegel $L_{EXZ, Terz, 8h}$ führen würde [6].

Auf die Praxis übertragen besteht aufgrund der Messvorschrift in VDI 3766 die Verpflichtung, an jedem Messort drei unabhängige und ausreichend lange Messungen durchzuführen (siehe Abschnitt 4.1.4). Wird die Zeitdauer der drei Messungen mit jeweils fünf Minuten veranschlagt, ergeben sich für jeden Messort drei unabhängige Frequenzspektren, aus denen dann der jeweils höchste Messwert einer Terzmittenfrequenz den $L_{pZeq, Terz, 5min}$ beschreibt.

Die von *Maue* [1] empfohlenen Höchstwerte für Ultraschallquellen sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8:
Empfohlene Höchstwerte für Ultraschallquellen [1]

Terzmittenfrequenz in kHz	Z-bewerteter maximaler 5-Minuten-Terzschalldruckpegel $L_{pZeq, Terz, 5min}$ in dB
16	90
20	110
25	110
31,5	110
40	110

Für den Frequenzbereich unterhalb der 16-kHz-Terzmittenfrequenz ist mit dem bestehenden Richtwert $L_{EXAU, 8h} = 85$ dB aus VDI 3766 laut *Maue* ein sinnvolles Beurteilungskriterium vorhanden, das sich an den Vorgaben der LärmVibrationsArbSchV orientiert. Der Richtwert der VDI 3766 kann jedoch für die 16-kHz-Terzmittenfrequenz nicht mehr zur Beurteilung herangezogen werden, da an dieser Stelle der vorliegende Schalldruckpegel durch die AU-Bewertung bereits mit 19,6 dB gedämpft wird. *Maue* empfiehlt für die 16-kHz-Terzmittenfrequenz die Einhaltung des zulässigen Höchstwertes $L_{pZeq, Terz, 5min} = 90$ dB. Unter Berücksichtigung der A-Bewertung bei dieser Frequenz (-6,6 dB) besteht somit eine sinnvolle Beziehung zum oberen Auslösewert $L_{EX, 8h} = 85$ dB(A) der LärmVibrationsArbSchV. Als zulässige Höchstwerte $L_{pZeq, Terz, 5min}$ für die Terzmittenfrequenzen ab 20 kHz empfiehlt *Maue* jeweils einen Wert von 110 dB. Damit wird für die 20-kHz-Terzmittenfrequenz der bestehende Grenzwert nach VDI 2058 Blatt 2 übernommen und darüber hinaus der Empfehlung von *Veit* [60] gefolgt [1]. Unterstützung findet der Vorschlag von *Maue* in der Veröffentlichung von *Wolff* [2].

5.3.2 Beurteilungsansatz mit einem einzelnen zulässigen Höchstwert

Im Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) sowie bei anderen thematisch betroffenen berufsgenossenschaftlichen Lärmmessdiensten wird seit einigen Jahren mittels Verwendung der Ultra-Bewertung die gesamte einwirkende Ultraschallenergie zu Informationszwecken mit der Schalldruckpegelgröße des ultrabewerteten äquivalenten Dauerschalldruckpegel $L_{pULTRAeq}$ beschrieben. Das nicht normierte Ultra-Filter besteht aus einem Hochpass, der den Hörschall unterhalb von 12,5 kHz ausschließt und den Ultraschall im Bereich der Terzmittenfrequenzen von 16 bis 40 kHz unbewertet übernimmt (siehe Abschnitt 4.4.5 sowie Tabelle C.1, Abbildungen C.5 und C.7 in Anhang C).

Diese bisher nur zu Informationszwecken genutzte Schalldruckpegelgröße $L_{pULTRAeq}$ könnte nach Meinung des Verfassers dieses Reports durch die Festlegung eines zulässigen Höchstwertes als Beurteilungskriterium für den gesamten Ultraschallbereich bis zur 40-kHz-Terzmittenfrequenz gelten. In Anlehnung an den vorhandenen 20-kHz-Grenzwert aus VDI 2058 Blatt 2 sowie der Empfehlung von *Veit* [60] wird an dieser Stelle als zulässiger Höchstwert für den gesamten Ultraschallbereich der $L_{pULTRAeq} = 110$ dB vorgeschlagen. Unterhalb der 16-kHz-Terzmittenfrequenz dient als Beurteilungskriterium der bereits vorhandene Richtwert $L_{EXAU, 8h} = 85$ dB aus VDI 3766.

Der hier vorgestellte Vorschlag für einen Beurteilungsansatz mit einem einzelnen zulässigen Höchstwert wurde bisher in der Praxis nicht erprobt, diskutiert und publiziert.

Für die praktische Anwendung im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung ist es von Vorteil, pro (physikalische) Einwirkung nur eines statt mehrerer Beurteilungskriterien berücksichtigen zu müssen. Ob dies jedoch bei der hier betrachteten Einwirkung von luftgeleitetem Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich überhaupt möglich ist, bedarf einer praktischen Erprobung und Diskussion dieses Beurteilungsvorschlages anhand der später in dieser Arbeit beschriebenen Messserie an Bediener-Arbeitsplätzen von Ultraschall-Schweißmaschinen (siehe Abschnitte 6.3 und 6.4).

6 Messung und Beurteilung der Schalleinwirkung an Ultraschall-Schweißmaschinen

Mit der im Herbst 2012 veröffentlichten Richtlinie VDI 3766 wurden erstmals technische Anforderungen an Ultraschall-Messsysteme, eine entsprechende Messvorschrift sowie ergänzende Beurteilungskriterien zu dem bereits existierenden Ultraschall-Grenzwert in VDI 2058 Blatt 2 ($L_{pZeq, Terz 20kHz} = 110$ dB) normiert [6]. Zwecks Anwendung der Richtlinie in der Praxis galt es, ein entsprechendes Ultraschall-Messsystem zu kaufen und im Rahmen einer Messserie erste Erfahrungen bezüglich Messvorschrift, Bewertung und Beurteilung zu sammeln. Hinsichtlich der Messorte, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden sollten, fiel die Entscheidung auf Bediener-Arbeitsplätze an Ultraschall-Schweißmaschinen, da diese Maschinen mittlerweile in vielen produzierenden Unternehmen der verschiedensten Branchen zu finden sind und zusätzlich mit einer bedeutenden Geräuschentwicklung in Verbindung gebracht werden [6; 23].

Auf die Frage „Ist Ultraschall gesundheitsschädlich?“ antwortet ein Hersteller von Ultraschall-Schweißmaschinen auf seinen Internetseiten unter der Rubrik „Frequently Asked Questions“ (FAQs): „Nein, die Ultraschallfrequenzen zwischen 20 und 35 kHz sind für den Menschen nicht schädlich. Manchmal entstehen Nebengeräusche, die unangenehm pfeifen. Maschinen im niedrigen Frequenzbereich haben daher oft einen Schallschutz.“ [113]. Weitere herstellerseitige Aussagen zu dieser Frage konnten im Internet nicht gefunden werden.

In der Wissensdatenbank KomNet des Landesinstituts für Arbeitsgestaltung des Landes Nordrhein-Westfalen ist unter der Dialognummer 22084 folgende Frage zu finden: „Inwiefern besteht für den Bediener an einer Ultraschall-Schweißmaschine ein Risiko durch über Luft übertragene Schalleistung? Geht von Luftschallübertragung ein Risiko für den Bediener aus, und sollte ein höherer Schallpegel am Arbeitsplatz entstehen, sind dann fallweise geeignete Maßnahmen (Gehörschutz) ausreichend?“. Die Expertenantwort auf diese Frage lautet: „Generell gilt, dass die Einkopplung von Schall beim Übergang Luft-Festkörper bzw. Luft-Flüssigkeit umso besser ist, je niedriger die Schallfrequenz ist. Im Bereich des Ultraschalls (über 20 kHz) ist der Impedanzwiderstand zwischen Luft und Körper sehr hoch, so dass praktisch keine Einkopplung des Ultraschalls in das Gewebe stattfindet. Daher ist eine Gefährdung durch berührungslose Ultraschallübertragung im üblichen Intensitätsbereich auszuschließen. Gehörschutz erübrigt sich.“ [114].

Das IFA kam in einer Untersuchung an Ultraschall-Schweißmaschinen zu dem Ergebnis, dass der in VDI 3766 vorgegebene Höchstwert von $L_{EXAU, 8h} = 85$ dB an vielen dieser Arbeitsplätzen überschritten wird und entsprechende Schutzmaßnahmen erforderlich sind. Im Ultraschallbereich konnte keine Überschreitung des Grenzwerts aus VDI 2058 Blatt 2 ($L_{pZeq, Terz 20kHz} = 110$ dB) festgestellt werden. Hier wurden bei der Terzmittenfrequenz von 20 kHz mittlere Schalldruckpegel von bis zu 105 dB gemessen.

Die Anzahl der untersuchten Ultraschall-Schweißmaschinen ist in der Publikation nicht angegeben [115].

Eine in Polen durchgeführte Untersuchung an 25 Ultraschall-Schweißmaschinen ergab in 60 % der Fälle eine Überschreitung polnischer Terzgrenzwerte für die Schalldruckpegelgröße $L_{pF_{eq, 8h, Terz}}$ sowie in 48 % der Fälle eine Überschreitung polnischer Terzgrenzwerte für die Schalldruckpegelgröße $L_{pF_{max, Terz}}$. Die polnischen Grenzwerte sind jeweils für die Terzfrequenzen von 10 bis 40 kHz definiert und vom Aufbau her nicht direkt mit den deutschen Beurteilungskriterien vergleichbar. Bei der beispielhaften Betrachtung der 20-kHz-Terz existieren in Polen die Grenzwerte $L_{pF_{eq, 8h, Terz 20kHz}} = 90$ dB und $L_{pF_{max, Terz 20kHz}} = 110$ dB, während in Deutschland der $L_{pZeq, Terz 20kHz} = 110$ dB definiert ist [79].

In einer französischen Studie aus dem Jahr 1988 wurden insgesamt 56 Arbeitsplätze an Ultraschall-Schweißmaschinen schallmesstechnisch untersucht und mit den damaligen Grenzwerten der International Radiation Protection Association (IRPA) verglichen. Für die Terzmittenfrequenzen von 10 bis 40 kHz wurden an 18 Arbeitsplätzen Überschreitungen der oberen Grenzwerte festgestellt. An 31 Arbeitsplätzen lag der Schalldruckpegel zwischen dem unteren und oberen Grenzwert. Für die beispielhafte Betrachtung der 20-kHz-Terz betrug der untere Grenzwert 75 dB und der obere 110 dB [116].

Alle drei aufgeführten Studien zeigen, dass trotz generell unterschiedlicher Beurteilungskriterien mehrfache Überschreitungen von Richt- bzw. Grenzwerten an Ultraschall-Schweißmaschinen festgestellt wurden. Bei der Betrachtung der Absätze 2 und 3 dieses Kapitels ist jedoch zu erkennen, dass es hierzu in Expertenkreisen durchaus unterschiedliche Meinungen gibt. Zur Untermauerung dieser Aussage ist anzuführen, dass von Maue [1], der selbst an der Erarbeitung der VDI 3766 beteiligt war, parallel zur Veröffentlichung dieser Richtlinie eine Publikation erschien, in der er diese Uneinigkeit in Expertenkreisen bezogen auf den Arbeitskreis zur Erarbeitung der VDI 3766 offen beschrieb. So bestand im entsprechenden Arbeitskreis lediglich eine Einigkeit darüber, dass luftgeleiteter Ultraschall keine Hörminderungen im Sprachfrequenzbereich verursacht. Zu Wirkungen von Ultraschall im Hörfrequenzbereich oberhalb von 8 kHz wurde im Arbeitskreis keine Einigkeit erzielt, sodass es letztendlich in VDI 3766 auch zu keiner Benennung von Beurteilungskriterien für die Ultraschalleinwirkungen kam. Da aber Ultraschall und seine Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich bei den Beschäftigten vielfach auch zu subjektiven Beeinträchtigungen wie z. B. Kopfschmerzen, Schwindel, Übelkeit und Druckgefühl auf den Ohren führen kann, sieht Maue [1] die Notwendigkeit für entsprechende Richtwerte und hat aus diesem Grund einen Vorschlag mit empfohlenen Höchstwerten in Form von Z-bewerteten maximalen 5-Minuten-Terzbandpegeln ($L_{pZeq, Terz, 5min}$) für die Terzmittenfrequenzen von 16 bis 40 kHz außerhalb der VDI 3766 publiziert (siehe Abschnitt 5.3.1) [1; 112].

Diese dargestellte kontroverse Situation führte beim Verfasser dieses Reports letztendlich dazu, sich neben der ursprünglich vorgesehenen Messserie an Bediener-Arbeitsplätzen von Ultraschall-Schweißmaschinen auch ausführlich mit den Wirkungen von Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich sowie den entsprechenden Beurteilungskriterien auseinanderzusetzen.

Nachfolgend wird zuerst das für die Messserie benutzte Ultraschall-Messsystem vorgestellt und anschließend werden nähere Details zu den Messorten beschrieben. Die Präsentation der Messergebnisse sowie die Diskussion der vorhandenen und vorgeschlagenen Beurteilungskriterien runden dieses Kapitel ab.

6.1 Das Ultraschall-Messsystem

Zur Messung von Ultraschallexpositionen ist eine geeignete Messtechnik erforderlich, die die Anforderungen der VDI 3766 erfüllt (siehe Abschnitt 4.5.3). Eine Marktrecherche ergab, dass es hierzu keine entsprechenden Handschallpegelmessgeräte gibt. Es wurden zwei PC-gebundene Messsysteme gefunden, die den erforderlichen Frequenzbereich bis zur Terzmittenfrequenz von 40 kHz erfassen, aber nicht über alle benötigten Frequenzbewertungen verfügen. Darüber hinaus sind auf dem Markt

geeignete Laborsysteme erhältlich, die jedoch für Feldmessungen nicht praktikabel sind.

Die Kaufentscheidung fiel letztendlich auf das PC-gebundene Messsystem AkuLap der Fa. Dr-Jordan-Design aus Dresden. Entscheidend dafür war die Zusage des Herstellers, alle benötigten Frequenzbewertungen entsprechend VDI 3766 anzupassen bzw. hinzuzufügen. Des Weiteren wurde zusätzlich auch das Ultrafilter (siehe Abschnitt 4.4.5) in die Software integriert.

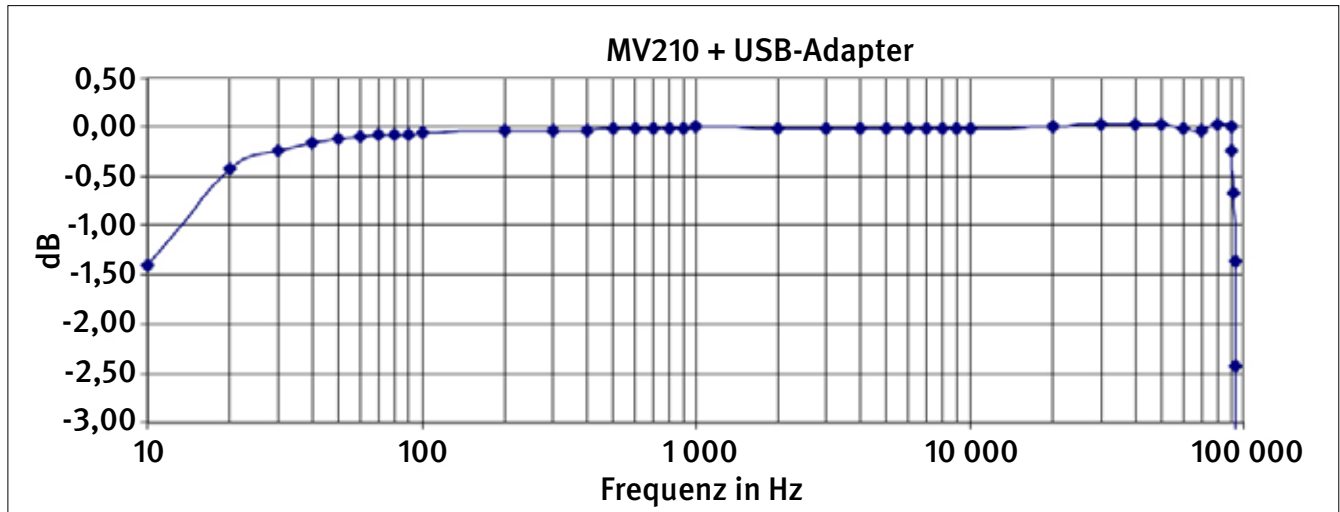
Das Messsystem erfüllt die Anforderungen der Klasse 1 nach DIN EN 61672 1 und besteht aus einem Notebook mit entsprechender Analysesoftware, einem externen Messinterface sowie einer Kombination von 1/4“-Mikrofon und 1/2“-Vorverstärker (Abbildung 24).

Mit dem Messsystem lassen sich Frequenzen bis 96 kHz erfassen und mittels Oktav-, Terz- oder hochauflösender Spektralanalyse darstellen (siehe Abschnitt 4.3). An Frequenzbewertungen verfügt das Messsystem über die Z-, A-, C-, U-, AU- und Ultra-Bewertung (die Ultra-Bewertung wird im Produktflyer als US1-Filter bezeichnet). Ein typischer Frequenzgang von Mikrofon und Vorverstärker ist in Abbildung 25 dargestellt. Für weitere technische Details wird auf den Produktflyer sowie die Kurzanleitung des Messsystems verwiesen [117; 118].

Abbildung 24:
Ultraschall-Messsystem AkuLap der Fa. Dr-Jordan-Design [117]



Abbildung 25:
Typischer Frequenzgang von Mikrofon und Vorverstärker des Ultraschall-Messsystems AkuLab [119]



6.1.1 Filterfehler im Ultraschall-Messsystem

Nach der Lieferung des Ultraschall-Messsystems wurden zunächst kleinere Messübungen durchgeführt, um sich mit dem System vertraut zu machen. Danach wurden in Unternehmen alle Arten von Arbeitsplätzen mit Ultraschalleinwirkungen untersucht. Bei den meisten Messaufträgen handelte es sich um Ultraschall-Schweißmaschinen, Ultraschall-Reinigungsanlagen und Ultraschall-Schneideanlagen. Das Messsystem stellte sich als praxisfreundlich heraus und arbeitete zuverlässig. Nach etwa 30 bis 40 Messungen entstand bei einer Sichtung der bis dahin erhobenen Messwerte bei einigen wenigen Messungen der Verdacht, dass der vom Messsystem ausgegebene L_{pAUeq} einen zu hohen Wert hat. Diese Auffälligkeit ergab sich hauptsächlich bei Messungen an Ultraschall-Schweißmaschinen ohne Schallschutzeinrichtung, die mit einer Arbeitsfrequenz von 20 kHz arbeiteten und bei denen das gemessene Terzspektrum eine bestimmte Charakteristika aufwies. Das war dann der Fall, wenn bei der Messung eine subharmonische Schwingung bei der 10-kHz-Terz vorhanden war und die Pegel der übrigen Terzen kleiner als der Pegel der Subharmonischen ausfielen oder wenn keine subharmonische Schwingung vorhanden war und das gesamte Terzspektrum bis auf die 20-kHz-Terz ein relativ gleichmäßiges Pegelniveau hatte. Da bei der AU-Bewertung die 20-kHz-Terz mit 34,6 dB gedämpft wird, kann in den beiden vorstehend genannten Fallkonstellationen relativ einfach eine Abschätzung des L_{pAUeq} anhand des Terzspektrums erfolgen. Obwohl es sich insgesamt nur um wenige Messungen handelte, in denen der vom Messsystem ausgegebene L_{pAUeq} deutlich über dem abgeschätzten Wert lag, wurde diese Auffälligkeit zum Anlass genommen, einen Excel-Rechner zu programmieren,

der aus dem gemessenen Terzspektrum mittels den aus der Normung hinterlegten Frequenzbewertungskurven die Werte L_{pZeq} , L_{pAeq} und L_{pAUeq} berechnet. Mit dem Excel-Rechner wurden alle bis dahin erhobenen Messwerte nachberechnet und der vorliegende Verdacht bestätigt. Der vom Messsystem herausgegebene L_{pAUeq} war immer höher als der entsprechend berechnete Wert. Der Unterschied zwischen den beiden Werten lag in einem Bereich von 1 dB bis hin zu 12 dB. Mit diesem Ergebnis wurde der Hersteller des Messsystems kontaktiert und gebeten, das AU-Filter zu überprüfen. Der Hersteller reagierte sofort und stellte die Frequenzgänge der im Messsystem integrierten Frequenzbewertungen zur Verfügung (Abbildung 26).

Die U-Bewertung entspricht den Vorgaben der Normung (siehe Abschnitt 4.4.3 und Anhang C). Auffällig ist jedoch, dass sich die U-Bewertung und die AU-Bewertung ab der 10-kHz-Terz nicht unterscheiden, obwohl die AU-Bewertung aus der Summe der A- und U-Bewertung gebildet wird (siehe Abschnitt 4.4.4 und Anhang C). Bis zur 10-kHz-Terz entspricht der AU-Frequenzgang in Abbildung 26 dieser Vorgabe. Ab der 10-kHz-Terz fehlt jedoch der entsprechende Anteil der A-Bewertung. Der Programmierfehler in der Analysesoftware wurde vom Hersteller des Ultraschall-Messsystems sofort korrigiert (Abbildung 27).

Bis zur Behebung des Programmierfehlers waren bereits 35 Messungen an Bediener-Arbeitsplätzen von Ultraschall-Schweißmaschinen erfolgt. Diese Messwerte wurden nicht verworfen, da sie bis auf den L_{pAUeq} korrekt waren. In der Ergebnisdarstellung in Abschnitt 6.3 und Anhang D werden die Ergebnisse dieser Messungen so dargestellt, dass neben dem gemessenen auch der mit dem Excel-Rechner berechnete L_{pAUeq} angegeben wird.

Abbildung 26:
 Frequenzgang der korrekten U-Bewertung (Abbildung oben) sowie der fehlerhaften AU-Bewertung (Abbildung unten) des Ultraschall-Messsystems
 AkuLap [120]

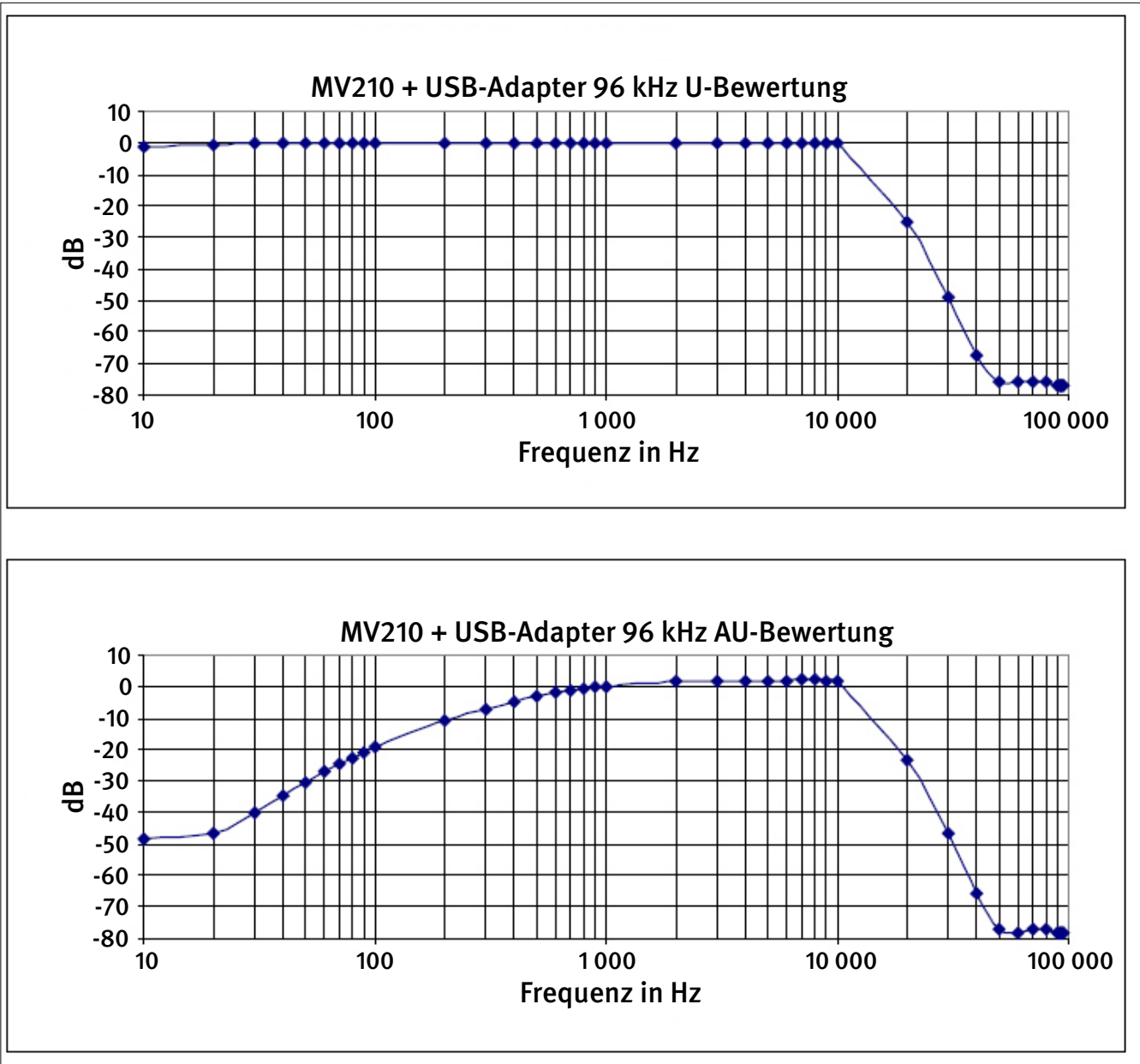
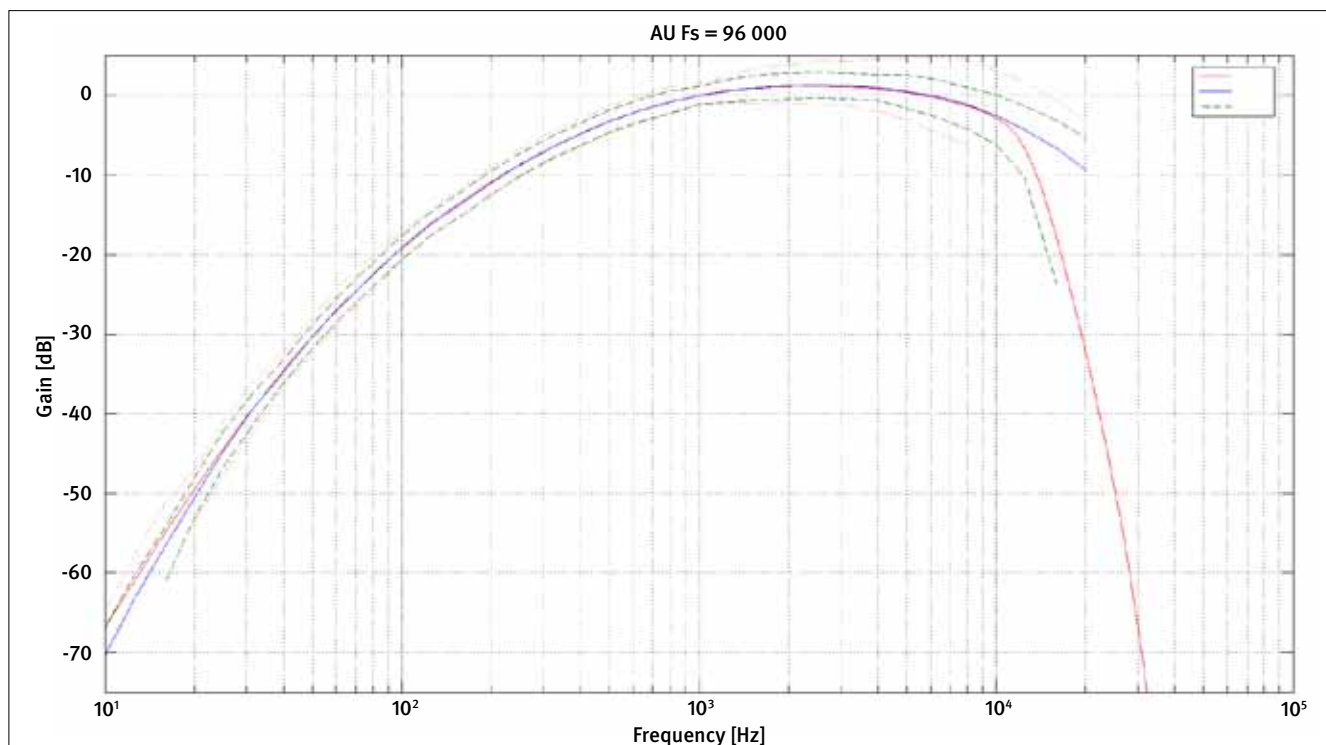


Abbildung 27:
Korrektur AU-Frequenzgang des Ultraschall-Messsystems AkuLap nach Behebung des Programmierfehlers [120]



6.2 Beschreibung der Messorte

Insgesamt wurden im Zeitraum von März 2013 bis April 2015 in 20 verschiedenen Unternehmen 43 Bediener-Arbeitsplätze an Ultraschall-Schweißmaschinen untersucht. Bei den Unternehmen handelte es sich um Hersteller von z. B. elektrotechnischen Geräten, Schaltern, Leuchten, Schreibgeräten, Medizintechnik, Messtechnik und Fahrzeugtechnik.

Die Hersteller der 43 Ultraschall-Schweißmaschinen waren Branson Ultraschall, Herrmann Ultraschall, KLN mecasonic, KSI Theis, MTH (Maschinenbau Technologie Herde), Rinco Ultrasonics, Schunk Sonosystems und Telsonic Ultrasonics. Die untersuchten Maschinen wurden zwischen 1985 und 2013 produziert.

Alle Messungen wurden unter Einhaltung der Messvorschriften aus der Richtlinie VDI 3766, bei repräsentativen Arbeitsbedingungen bezogen auf den jeweiligen Arbeitsplatz, durchgeführt. Das Mikrofon befand sich während den Messungen jeweils in Kopfnähe der Maschinenbediener. Je nach Arbeitsplatzgestaltung haben die Maschinenbediener stehend oder sitzend gearbeitet. Das Verhältnis von Steh- zu Sitz-Arbeitsplätzen betrug 26 zu 17.

Für die Ergebnisdarstellung wurden die Ultraschall-Schweißmaschinen nach ihrer Arbeitsfrequenz und dem Vorhandensein einer Schallschutzeinrichtung gruppiert (Tabelle 9).

Für die Messserie erfolgte keine Vorauswahl von bestimmten Ultraschall-Schweißmaschinen. Die vorstehend aufgeführte Verteilung der Stichprobe ist zufällig und erlaubt keinen Rückschluss auf Repräsentativität.

Tabelle 9:
Gruppierung der 43 Ultraschall-Schweißmaschinen nach ihrer Arbeitsfrequenz und dem Vorhandensein einer Schallschutzeinrichtung

Arbeitsfrequenz in kHz	Anzahl der Ultraschall-Schweißmaschinen	
	ohne Schallschutzeinrichtung	mit Schallschutzeinrichtung
20	26	10
30	1	1
35	4	1

6.3 Messergebnisse

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Messergebnisse beschrieben. Die ausführliche Darstellung aller Messergebnisse ist im Anhang D zu finden.

Die Präsentation der Messergebnisse erfolgt ohne Berücksichtigung von Messunsicherheiten. Aus der geringen Anzahl von Messungen an 30-kHz- bzw. 35-kHz-Ultraschall-Schweißmaschinen können keine allgemeingültigen Aussagen aus den Messwerten abgeleitet werden.

Grundsätzlich sind die Messungen in den Tabellen mittels fortlaufender Nummerierung von 1 bis 43 gekennzeichnet und werden ohne Nennung von weiteren Daten der jeweiligen Ultraschall-Schweißmaschine sowie ohne Unternehmensbezug dargestellt.

Für die Darstellung der Frequenzzusammensetzung der gemessenen Schallsignale wurde die Terzbandanalyse (siehe

Abschnitt 4.3) gewählt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die gemessenen Frequenzspektren an dieser Stelle nur für den Frequenzbereich von 8 bis 40 kHz sowie ohne Beschriftung der einzelnen Datensätze dargestellt. Der gewählte Frequenzbereich entspricht am unteren Ende der in Abschnitt 3.3 festgelegten Definition der Einwirkungsart „Ultraschall und seine Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich“ (ab 8 kHz) und am oberen Ende dem in VDI 3766 vorgeschriebenen Frequenzbereich für Ultraschallmesssysteme (bis 40 kHz) (siehe Abschnitt 4.5.3) Für alle anderen Terzmittenfrequenzen unterhalb von 8 kHz sind die Messwerte in Anhang D aufgeführt. Eine Darstellung von Schmalbandspektren (siehe Abschnitt 4.3) erfolgt im Rahmen dieser Arbeit nicht.

Die nachfolgenden Erläuterungen dienen dem besseren Verständnis der tabellarischen Darstellung, insbesondere der farblichen Hinterlegung von bestimmten Messwerten.

Die folgenden Tabellen dieses Kapitels enthalten die Spalten L_{pAeq} und $L_{pAeq,Hfb}$ lediglich zu Informationszwecken. Alle L_{pAeq} -Werte sind hellblau hinterlegt, da diese Messwerte durch Ultraschallanteile beeinflusst wurden und somit für eine Beurteilung der Hörschallexposition nicht verwendet werden können. In der Spalte $L_{pAeq,Hfb}$ sind berechnete Werte aufgeführt, die eine A-bewertete Exposition im Hörfrequenzbereich (16 Hz bis 16 kHz) beschreiben (siehe Abschnitt 4.6 und Anhang B).

Der anfängliche Filterfehler in der Analysesoftware des Ultraschall-Messsystems führte bei 35 Messungen zu einem fehlerhaften L_{pAUeq} -Wert (siehe Abschnitt 6.1.1). Diese 35 Messungen sind in den Tabellen an den nicht farblich hinterlegten Datenfeldern zu erkennen. Für den L_{pAUeq} -Wert sind in den Tabellen zwei Spalten aufgeführt. In der ersten Spalte, die als $L_{pAUeq-M}$ gekennzeichnet ist, steht der vom Messsystem ausgegebene L_{pAUeq} , wobei die 35 fehlerhaften Werte hellblau hinterlegt sind. Die zweite, als $L_{pAUeq-R}$ bezeichnete Spalte, enthält für die 35 Messungen mit fehlerhaftem AU-Filter den parallel dazu mithilfe eines Excel-Rechners berechneten, korrekten L_{pAUeq} . Grau hinterlegt sind die acht Messungen, die nach der Korrektur der AU-Bewertung in der Analysesoftware durchgeführt wurden. Für diese wurde kein $L_{pAUeq-R}$ angegeben.

Im Rahmen der Messungen wurden keine Analysen hinsichtlich der täglichen Einsatzzeit der Ultraschall-Schweißmaschinen durchgeführt. Aus diesem Grund wird in den Tabellen nur der ermittelte L_{pAUeq} angegeben und keine Aussage zum eigentlichen Richtwert $L_{EXAU,8h}$ aus VDI 3766 gemacht. Da jedoch unter der Voraussetzung einer achtstündigen Einsatzzeit der Ultraschall-Schweißmaschinen der L_{pAUeq} dem $L_{EXAU,8h}$ entspricht, erfolgt in

den Tabellen eine Beurteilung des L_{pAUeq} entsprechend den Kriterien der VDI 3766 bezogen auf den $L_{EXAU,8h}$.

In den Spalten mit Messwerten, für die vorhandene bzw. vorgeschlagene Beurteilungskriterien existieren, sind alle Grenz- bzw. Richtwertüberschreitungen rot hinterlegt. Aus präventiver Sicht sind in den Spalten $L_{pAeq,Hfb}$, $L_{pAUeq-M}$ und $L_{pAUeq-R}$ diejenigen Messwerte gelb hinterlegt, die orientiert an dem unteren Auslösewert aus der LärmVibrationsArbSchV einen Schalldruckpegel von 80 dB überschritten haben. In der Spalte L_{pCpeak} wurden die Messwerte ebenfalls entsprechend dem unteren und oberen Auslösewert nach LärmVibrationsArbSchV farblich markiert. Für die Messwerte $L_{pZeq, Terz 20kHz}$, $L_{pULTRAeq}$, L_{pZpeak} sowie die Z-bewerteten maximalen 5-Minuten-Terzschalldruckpegeln $L_{pZeq, Terz, 5min}$ existieren keine gestuften Grenz- bzw. Richtwerte. Hier wurde ein 3-dB-Bereich unterhalb der Grenz- bzw. Richtwerte gewählt, innerhalb dessen die Messwerte gelb hinterlegt sind. Dieser 3-dB-Bereich entspricht der Unsicherheit der Genauigkeitsklasse 2 nach dem vereinfachten Verfahren für die Zuordnung von Genauigkeitsklassen in der TRLV Lärm [93] und soll dem Betrachter die unmittelbare Nähe dieser Messwerte zu bestehenden Grenz- bzw. Richtwerten aufzeigen.

6.3.1 Ultraschall-Schweißmaschinen mit einer Arbeitsfrequenz von 20 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung

An der Gruppierung der Ultraschall-Schweißmaschinen nach ihrer Arbeitsfrequenz und dem Vorhandensein einer Schallschutzeinrichtung (Tabelle 9) ist zu erkennen, dass der Großteil der in dieser Messserie vorgefundenen Ultraschall-Schweißmaschinen (36 von 43) eine Arbeitsfrequenz von 20 kHz hatte. Von diesen 36 Ultraschall-Schweißmaschinen wurden 26 ohne Schallschutzeinrichtung betrieben.

Die Messwerte, die an den 26 Bediener-Arbeitsplätzen dieser Ultraschall-Schweißmaschinen erhoben wurden, entsprechen den Messorten mit den Nummern 1 bis 26 in der tabellarischen Darstellung der Messergebnisse. Abbildung 28 zeigt die Frequenzspektren dieser 26 Ultraschall-Schweißmaschinen. Die Arbeitsfrequenz von 20 kHz ist bei allen Messorten deutlich zu erkennen. Bis auf Messort 13 ($L_{pZeq, Terz 20kHz} = 97,3$ dB) liegen alle Messwerte $L_{pZeq, Terz 20kHz}$ oberhalb von 100 dB. Auch sind mehrfache Überschreitungen des Grenzwertes $L_{pZeq, Terz 20kHz} = 110$ dB aus VDI 2058 Blatt 2 erkennbar.

Die jeweiligen Pegelspannen an den Terzmittenfrequenzen sind zur Verdeutlichung in Abbildung 29 als Box-Whisker-Diagramm dargestellt.

Abbildung 28:
Frequenzspektrum (8 bis 40 kHz) von 26 Ultraschall-Schweißmaschinen (Arbeitsfrequenz: 20 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung)

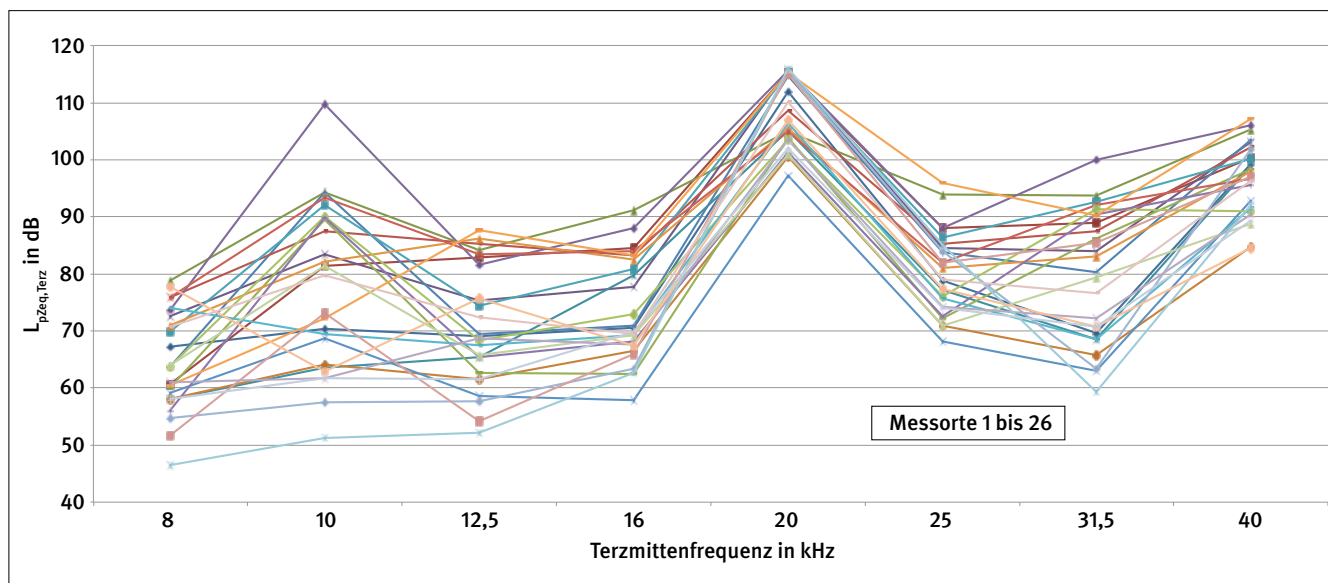
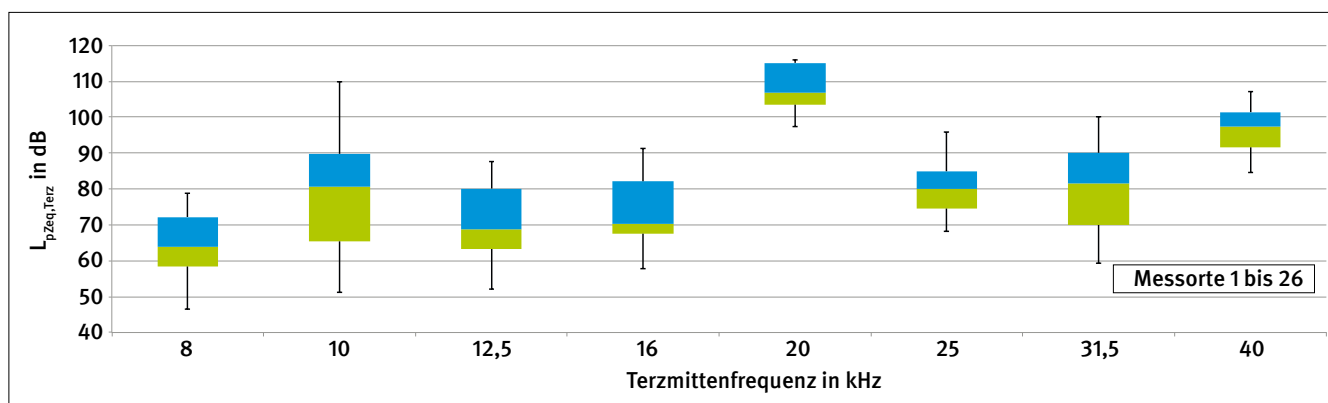


Abbildung 29:
Frequenzspektrum (8 bis 40 kHz) von 26 Ultraschall-Schweißmaschinen (Arbeitsfrequenz: 20 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung), dargestellt als Box-Whisker-Diagramm



Beim Vergleich der 26 Terzspektren ergibt sich in der 20-kHz-Terz, in der die Arbeitsfrequenz liegt, eine Pegelspanne von 19 dB. Die Pegel der 40-kHz-Terz, die die erste Harmonische umfasst, differieren um 22 dB. Anders sieht dies für die Terz der ersten Subharmonischen (10 kHz) aus. Hier beträgt die Pegelspanne der Messwerte 59 dB.

Die große Streuung der Messwerte in der 10-kHz-Terz zeigt, dass das Vorhandensein einer Subharmonischen als Begleiterscheinung des Ultraschalls im Hochfrequenzbereich nicht zwingend als Regel angesehen werden kann.

Die Messwerte mit Bezug zu vorhandenen bzw. vorgeschlagenen Beurteilungskriterien sind entsprechend der in Abschnitt 6.3 gemachten Erläuterungen hinsichtlich der farblichen Hinterlegung von Messwerten in Tabelle 10 aufgeführt.

Der Grenzwert $L_{pZeq, Terz 20kHz} = 110$ dB aus VDI 2058 Blatt 2 wurde an elf der 26 Ultraschall-Schweißmaschinen überschritten. Eine Überschreitung des Richtwertes $L_{EXAU, 8h} = 85$ dB aus VDI 3766 wurde unter der Annahme einer achtstündigen Einsatzzeit der Ultraschall-Schweißmaschinen an 14 Messorten festgestellt. Der

ebenfalls aus VDI 3766 stammende Richtwert $L_{pZpeak} = 140$ dB wurde an zwei Messorten überschritten. In der Kombination aller drei Beurteilungskriterien sind an insgesamt 19 der 26 Ultraschall-Schweißmaschinen (entspricht 73 %) Grenz- bzw. Richtwertüberschreitungen festzustellen.

Der vorgeschlagene Richtwert $L_{pULTRAeq} = 110$ dB zeigt an den gleichen elf Messorten Überschreitungen wie der Grenzwert $L_{pZeq, Terz 20kHz} = 110$ dB aus VDI 2058 Blatt 2.

Die zulässigen Höchstwerte $L_{pZeq, Terz, 5min}$, die von Maue vorgeschlagen wurden, ergeben an insgesamt 13 Ultraschall-Schweißmaschinen eine Überschreitung, wobei es in der kombinierten Betrachtung mit den Richtwerten der VDI 3766 bei 19 Messorten mit überschrittenen Beurteilungskriterien bleibt.

In Abbildung 30 sind die Frequenzspektren der elf Ultraschall-Schweißmaschinen dargestellt, bei denen der $L_{pZeq, Terz 20kHz}$ oberhalb von 110 dB lag.

6 Messung und Beurteilung der Schalleinwirkung an Ultraschall-Schweißmaschinen

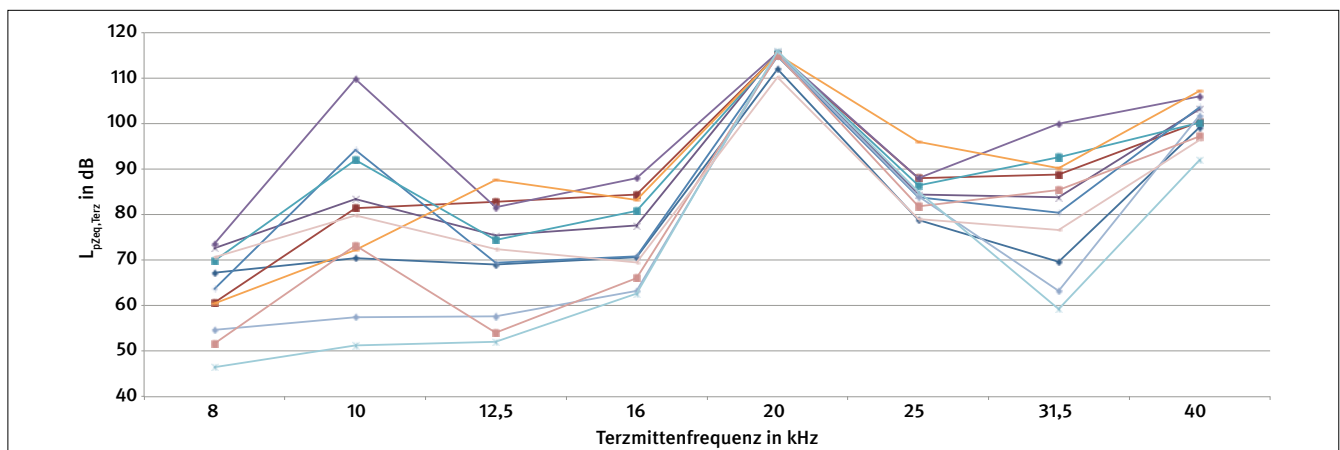
Tabelle 10:

Messwerte zu den Messorten 1 bis 26 mit Bezug zu vorhandenen bzw. vorgeschlagenen Beurteilungskriterien (Bediener-Arbeitsplätze an Ultraschall-Schweißmaschinen, Arbeitsfrequenz: 20 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung)

Lfd. Nr.	Messwerte												
	Diverse Messwerte (energetischer Mittelwert bzw. Maximalwert aus drei Stichproben)								Z-bewerteter maximaler 5-Minuten-Terzschalldruckpegel $L_{pZeq, Terz, 5 \text{ min}}$				
	L_{pAeq}	$L_{pAeq, HFB}$	$L_{pAUeq-M}$	$L_{pAUeq-R}$	$L_{pZeq, Terz 20 \text{ kHz}}$	$L_{pULTReq}$	L_{pCpeak}	L_{pZpeak}	16 kHz	20 kHz	25 kHz	31,5 kHz	40 kHz
1	104,8	80,2	90,9	81,9	112,0	112,2	121,8	131,1	70,8	112,4	79,2	69,8	100,3
2	108,1	84,1	86,3	–	115,2	116,3	133,5	139,1	85,1	116,2	88,9	89,3	101,5
3	100,8	93,4	95,0	92,7	105,0	109,1	126,0	132,6	91,2	105,0	94,0	93,7	105,4
4	108,5	82,9	94,6	84,9	115,7	115,9	126,8	136,7	77,8	116,0	84,5	84,1	103,9
5	97,9	76,4	83,5	75,4	105,1	106,1	121,2	131,4	79,8	105,5	77,5	68,5	99,2
6	94,0	69,8	76,2	70,9	100,5	100,7	120,7	132,0	66,6	100,5	70,9	65,8	84,8
7	107,6	92,0	95,9	92,2	114,7	115,1	135,8	139,2	74,1	115,9	85,2	81,1	104,2
8	101,8	88,8	92,9	88,3	108,7	109,7	130,7	141,5	84,7	110,9	87,2	88,4	106,1
9	96,4	87,2	87,0	–	103,9	105,0	129,0	137,4	63,4	104,6	73,3	88,1	98,5
10	111,0	107,4	111,4	107,4	115,6	116,2	131,4	139,8	91,4	116,2	89,0	100,9	107,1
11	108,9	90,3	94,1	90,6	115,3	115,1	123,4	133,8	80,9	115,3	86,4	92,7	100,2
12	98,5	86,4	89,8	85,3	105,5	106,3	121,2	130,4	83,1	105,7	81,2	83,6	98,3
13	90,0	72,7	77,5	73,1	97,3	98,6	116,8	128,9	58,5	98,0	69,0	65,5	93,6
14	98,9	91,8	95,7	91,6	105,0	105,9	125,7	134,9	84,3	105,6	82,1	92,7	97,1
15	96,8	87,6	92,1	87,7	103,4	103,9	131,0	135,3	74,7	105,1	76,5	92,2	91,1
16	95,0	87,5	91,0	87,5	101,2	102,7	118,9	128,8	69,0	102,0	73,1	90,9	95,7
17	99,8	90,8	91,9	90,9	106,4	106,6	147,9	144,8	69,4	106,9	76,2	68,7	92,2
18	107,1	84,7	85,0	–	115,2	115,9	125,6	139,1	85,5	116,6	96,8	90,4	107,7
19	107,3	70,0	83,5	–	115,4	115,6	125,6	138,2	63,7	115,9	84,8	64,2	102,7
20	106,9	71,8	83,7	–	115,0	115,1	124,0	135,5	67,1	116,1	82,9	86,4	98,6
21	94,0	79,7	85,7	79,8	100,9	101,2	120,1	129,4	70,3	101,7	73,0	80,6	89,2
22	95,3	75,6	76,5	–	103,4	103,6	122,3	133,9	67,9	103,9	74,8	73,4	91,4
23	108,6	67,5	93,8	81,6	116,0	116,0	123,1	132,4	63,9	117,1	86,2	60,5	92,4
24	99,5	78,7	86,4	79,3	107,0	107,0	121,9	131,2	67,6	107,2	77,5	70,9	84,8
25	94,6	70,0	80,2	71,2	102,0	102,2	120,7	130,2	70,2	103,2	74,7	71,0	90,1
26	103,0	84,7	90,3	85,2	110,1	110,3	121,5	130,6	69,8	110,3	79,3	76,9	96,4

Abbildung 30:

Frequenzspektrum (8 bis 40 kHz) von elf Ultraschall-Schweißmaschinen (Arbeitsfrequenz: 20 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung) mit einem $L_{pZeq, Terz 20 \text{ kHz}} > 110 \text{ dB}$



Die Messwerte der 10-kHz-Terz zeigen hier die bereits festgestellte Pegelspanne von 59 dB. Die große Pegelspanne ergibt sich aus den beiden Messwerten der Messorte 10 ($L_{pZeq, Terz 10kHz} = 109,8 \text{ dB}$) und 23 ($L_{pZeq, Terz 10kHz} = 51,2 \text{ dB}$). Die restlichen neun Messwerte der 10-kHz-Terz beschreiben eine Pegelspanne von 36 dB in einem Bereich von 58 bis 94 dB. Die deutliche Ausprägung einer Subharmonischen ist nur an sechs der elf Messorten zu erkennen, während die Ausprägung einer Harmonischen in der 40-kHz-Terzmittenfrequenz an allen Messorten festzustellen ist.

Im Vergleich dazu sind in Abbildung 31 die Frequenzspektren der 15 Ultraschall-Schweißmaschinen zu sehen, bei denen der $L_{pZeq, Terz 20kHz}$ unterhalb von 110 dB lag. Die Pegelspanne der Messwerte beträgt in der 10-kHz-Terz 32 dB in einem Bereich von 62 bis 94 dB. Auch in dieser Abbildung ist nicht an jedem Messort die Ausprägung einer Subharmonischen zu erkennen, während jedoch an allen Messorten die Ausprägung einer Harmonischen vorliegt.

Abbildung 31:
Frequenzspektrum (8 bis 40 kHz) von 15 Ultraschall-Schweißmaschinen (Arbeitsfrequenz: 20 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung) mit einem $L_{pZeq, Terz 20kHz} < 110 \text{ dB}$

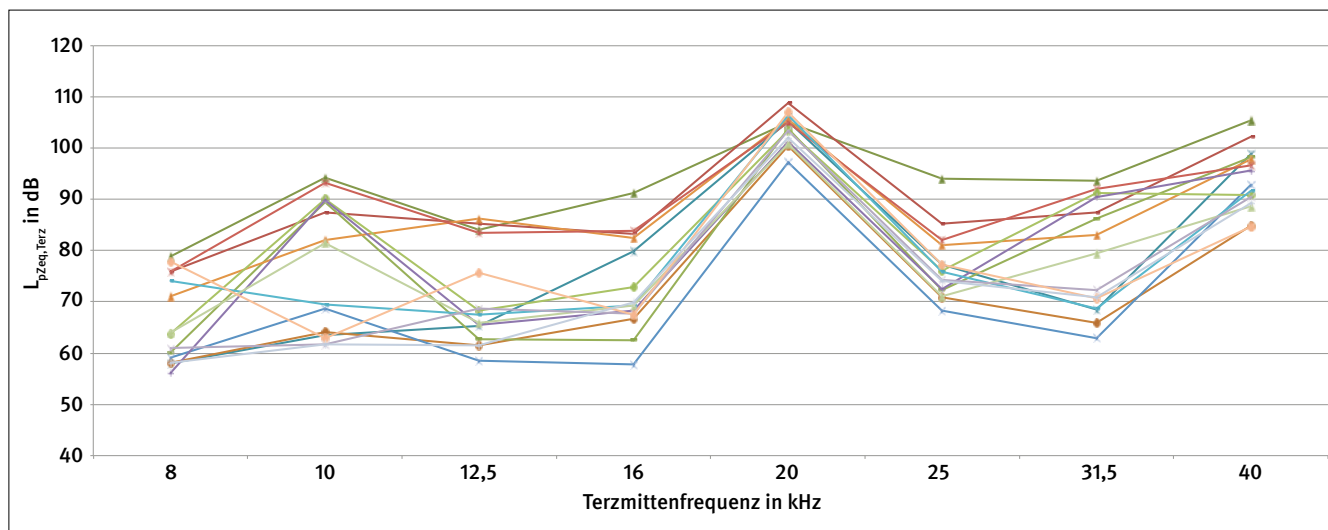
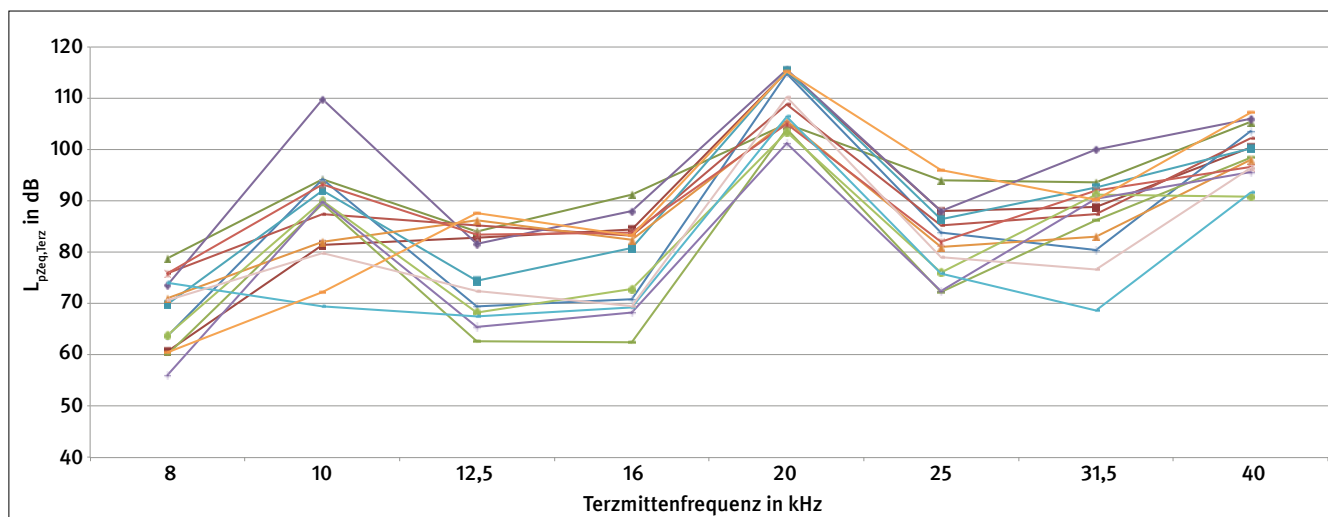


Abbildung 32:
Frequenzspektrum (8 bis 40 kHz) von 14 Ultraschall-Schweißmaschinen (Arbeitsfrequenz: 20 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung) mit einem $L_{pAUeq} > 85 \text{ dB}$

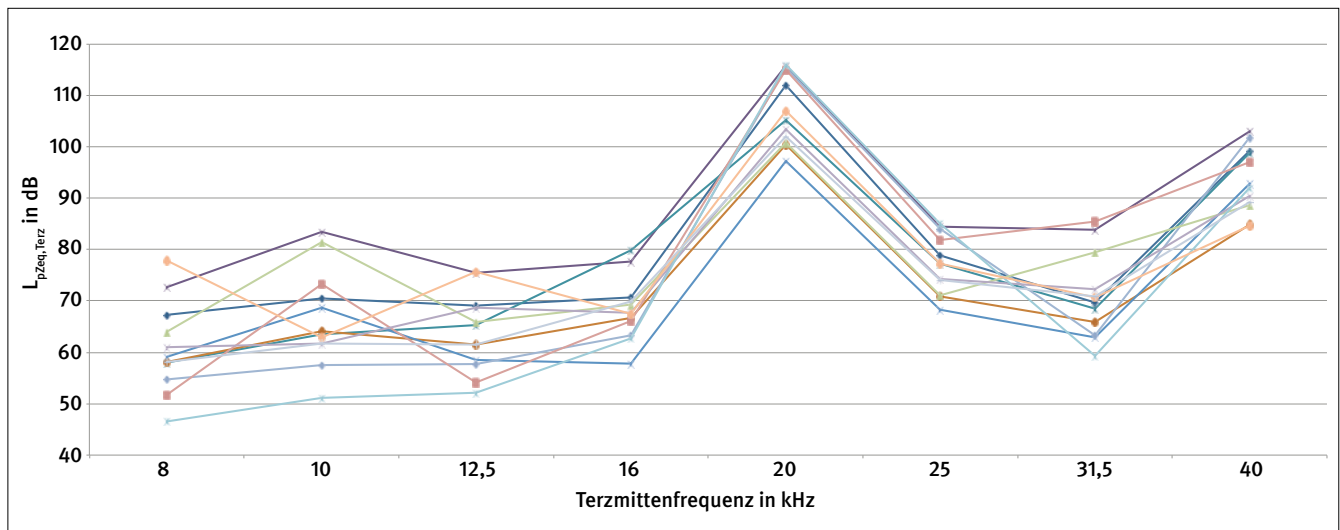


In Abbildung 32 sind die Frequenzspektren der 14 Ultraschall-Schweißmaschinen dargestellt, bei denen der L_{pAUeq} oberhalb von 85 dB lag. In dieser Abbildung ist zu erkennen, dass mit Ausnahme der Messorte 17 und 26 die Überschreitung des Richtwertes $L_{EXAU, 8h} = 85 \text{ dB}$ aus VDI 3766 allein aus den Schalldruckpegeln der Subharmonischen in der 10-kHz-Terz bzw. aus einer Kombination der Schalldruckpegel in der 10-kHz- und 12,5-kHz-Terz resultiert. Die Pegelspanne der Messwerte in der 10-kHz-Terz beträgt 41 dB in einem Bereich von 69 bis 110 dB.

Beim Messort 17 ergibt sich die Überschreitung des $L_{EXAU, 8h}$ -Richtwertes aufgrund hoher Schalldruckpegel im Bereich von ca. 200 Hz bis 1,25 kHz, während beim Messort 26 der Grund dafür in der Summe des relativ konstanten Gesamtspektrums liegt.

Die zwölf Ultraschall-Schweißmaschinen, bei denen der L_{pAUeq} unterhalb von 85 dB lag, sind in Abbildung 33 zu sehen. Hier beträgt die Pegelspanne der Messwerte in der 10-kHz-Terz 32 dB und liegt in einem Bereich von 51 bis 83 dB.

Abbildung 33:
Frequenzspektrum (8 bis 40 kHz) von zwölf Ultraschall-Schweißmaschinen (Arbeitsfrequenz: 20 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung) mit einem $L_{pAUEq} < 85$ dB



An dieser Stelle ist festzuhalten, dass lediglich an zwei der 26 untersuchten Bediener-Arbeitsplätze an 20-kHz-Ultraschall-Schweißmaschinen ohne Schallschutzeinrichtung der Richtwert $L_{EXAU, 8h} = 85$ dB aus VDI 3766 aufgrund von sonstigen Raumpegeln überschritten wurde. In zwölf Fällen resultierte eine Richtwertüberschreitung aufgrund von deutlich ausgeprägten Subharmonischen, während es an den verbleibenden zwölf Messorten aufgrund von weniger stark ausgeprägten bzw. fehlenden Subharmonischen sowie einem ansonsten relativ niedrigen Restspektrum im Raum nicht zu einer Überschreitung des Richtwerts kam.

Im Rahmen der Messungen wurde der Abstand der Ohren zur Sonotrode der Ultraschall-Schweißmaschine nicht dokumentiert. Bei der Auswertung der Messdaten entstand hierzu jedoch die Frage, ob evtl. sitzende Bediener von Ultraschall-Schweißmaschinen im Vergleich zu stehenden Bedienern einen geringeren Abstand der Ohren zur Sonotrode haben und dann in der Folge daraus bei sitzenden Bedienern höhere Schalldruckpegel an den Ohren zu messen sind. Zur Beantwortung dieser Frage wurden in der hier vorliegenden Gruppierung die Bediener-Arbeitsplätze, an denen Grenz- bzw. Richtwertüberschreitungen festgestellt wurden, auf ihre Arbeitsplatzgestaltung analysiert. Das Ergebnis ist in Tabelle 11 abgebildet und zeigt unter Berücksichtigung der kleinen Stichprobe keine klare Auffälligkeit bezogen auf die Fragestellung.

Tabelle 11:
Verhältnis von Steh- zu Sitz-Arbeitsplätzen an Ultraschall-Schweißmaschinen (Arbeitsfrequenz: 20 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung), bezogen auf Datensätze, in denen eine Grenz- bzw. Richtwertüberschreitung des $L_{pZeq, Terz 20kHz}$ bzw. L_{pAUEq} vorlag

	$L_{pZeq, Terz 20kHz} > 110$ dB	$L_{pAUEq} > 85$ dB
12 Steh-Arbeitsplätze	4 (= 33 %)	8 (= 66 %)
14 Sitz-Arbeitsplätze	7 (= 50 %)	6 (= 43 %)

6.3.2 Ultraschall-Schweißmaschine mit einer Arbeitsfrequenz von 30 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung

Es konnte nur an einer Ultraschall-Schweißmaschine mit einer Arbeitsfrequenz von 30 kHz und fehlender Schallschutzeinrichtung gemessen werden. Das entsprechende Frequenzspektrum von Messort 37 ist in Abbildung 34 dargestellt.

Die Arbeitsfrequenz von 30 kHz liegt vollumfänglich innerhalb der Bandbreite der 31,5-kHz-Terzmittenfrequenz (28,1 bis 35,4 kHz) und ist im Frequenzspektrum deutlich zu erkennen. Es ist der Ansatz einer Subharmonischen in der 16-kHz-Terzmittenfrequenz zu sehen, deren Bandbreite von 14,3 bis 18 kHz reicht.

In Tabelle 12 sind die Messwerte mit Bezug zu Beurteilungskriterien aufgeführt. Es liegt weder bei den vorhandenen noch bei den vorgeschlagenen Beurteilungskriterien für luftgeleiteten Ultraschall und seine Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich eine Grenz- bzw. Richtwertüberschreitung vor. Nach der LärmVibrationsArbSchV sind an diesem Arbeitsplatz die beiden unteren Auslösewerte überschritten. Im direkten Vergleich der beiden Schalldruckpegel $L_{pAeq, Hfb}$ und $L_{pAUEq-R}$ ist an dieser Stelle bereits ein kleiner Effekt zu erkennen, der an der 16-kHz-Terzmittenfrequenz durch die hohe Dämmung des U-Filters entsteht, sich aber an diesem Beispiel noch nicht negativ auf die Beurteilung auswirkt.

Abbildung 34:
Frequenzspektrum (8 bis 40 kHz) von einer Ultraschall-Schweißmaschine (Arbeitsfrequenz: 30 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung)

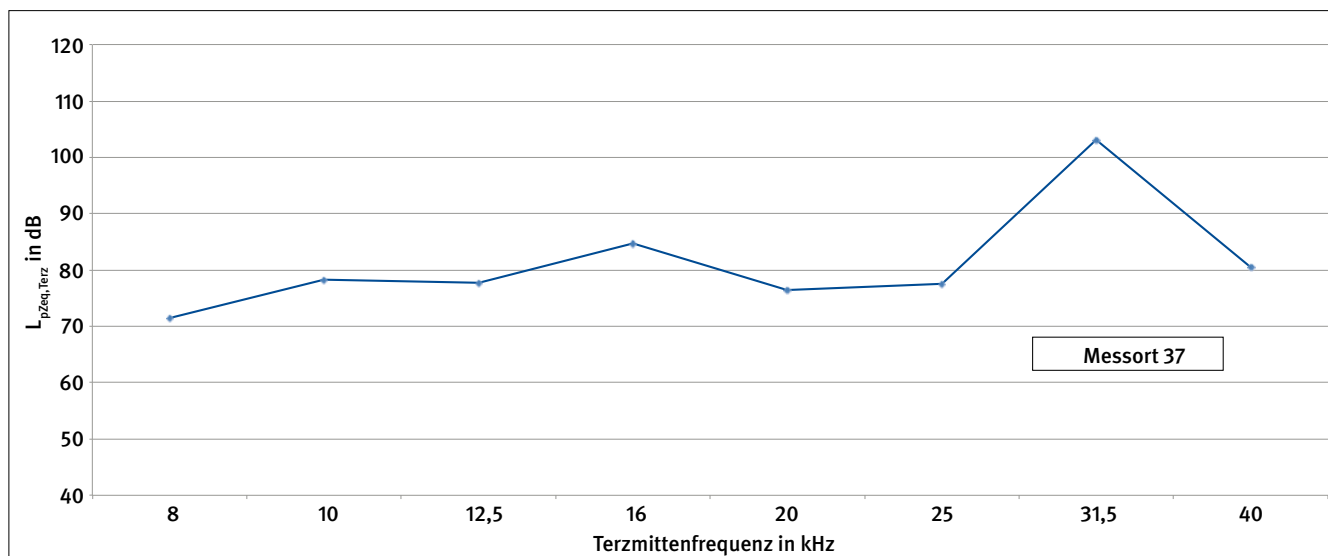


Tabelle 12:
Messwerte zum Messort 37 mit Bezug zu vorhandenen bzw. vorgeschlagenen Beurteilungskriterien (Bediener-Arbeitsplatz an Ultraschall-Schweißmaschine, Arbeitsfrequenz: 30 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung)

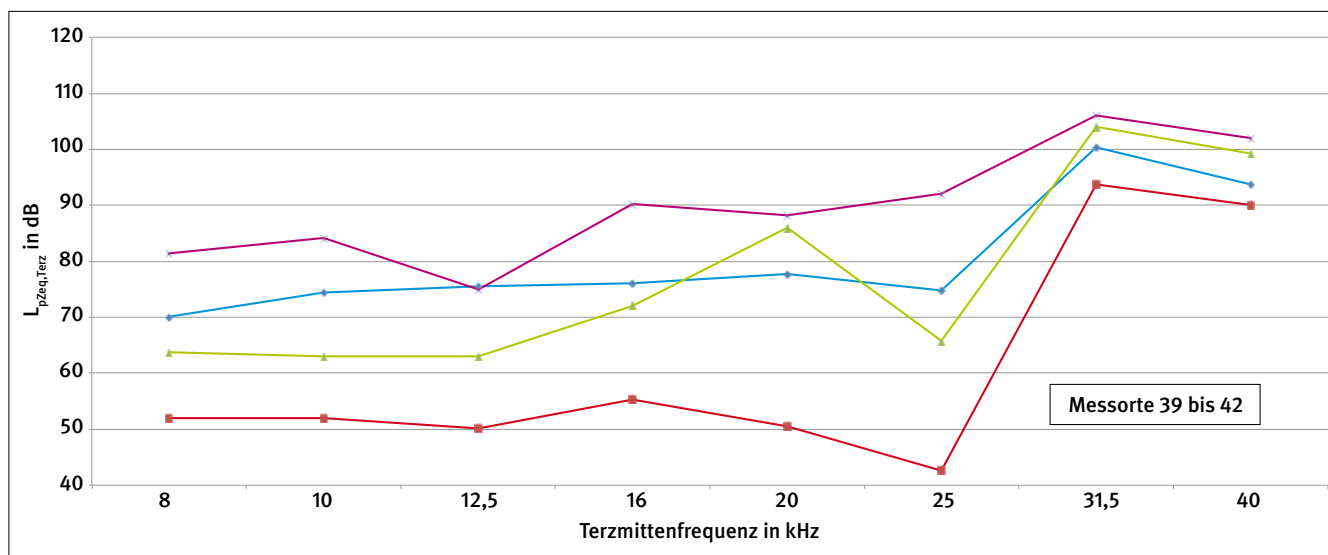
Lfd. Nr.	Messwerte												
	Diverse Messwerte (energetischer Mittelwert bzw. Maximalwert aus drei Stichproben)					Z-bewerteter maximaler 5-Minuten-Terzschalldruckpegel $L_{pZeq, Terz, 5 min}$							
	L_{pAeq}	$L_{pAeq, HFB}$	$L_{pAUeq-M}$	$L_{pAUeq-R}$	$L_{pZeq, Terz 20 kHz}$	$L_{pULTRAeq}$	L_{pCpeak}	L_{pZpeak}	16 kHz	20 kHz	25 kHz	31,5 kHz	40 kHz
37	91,4	83,3	84,8	81,5	76,5	103,3	135,4	134,7	85,5	77,3	78,3	103,5	81,5

6.3.3 Ultraschall-Schweißmaschinen mit einer Arbeitsfrequenz von 35 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung

35 kHz und fehlender Schallschutzeinrichtung. Die entsprechenden Frequenzspektren sind in Abbildung 35 dargestellt.

Die vier Messorte 39 bis 42 beschreiben Bediener-Arbeitsplätze an Ultraschall-Schweißmaschinen mit einer Arbeitsfrequenz von

Abbildung 35:
Frequenzspektrum (8 bis 40 kHz) von vier Ultraschall-Schweißmaschinen (Arbeitsfrequenz: 35 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung)



An diesem Beispiel sind sehr gut die Grenzen der Terzbandanalyse aufzuzeigen (siehe Abschnitt 4.3). Die Arbeitsfrequenz von 35 kHz liegt nah an der oberen Grenzfrequenz der 31,5-kHz-Terzmittenfrequenz (28,1 bis 35,4 kHz), sodass eine eindeutige Erkennung der Arbeitsfrequenz im Frequenzspektrum nicht möglich ist. Gleiches gilt für die Subharmonische, die mit 17,5 kHz nah an der oberen Grenzfrequenz der 16-kHz-Terzmittenfrequenz (14,3 bis 18 kHz) liegt. Beim Messort 41 (hellgrüne Linie) ist die Subharmonische eindeutig zu erkennen, wird aber komplett innerhalb der 20-kHz-Terzmittenfrequenz abgebildet.

Tabelle 13 zeigt die Messwerte mit Bezug zu Beurteilungskriterien. Es liegen keine Grenz- bzw. Richtwertüberschreitungen vorhandener Beurteilungskriterien zu luftgeleitetem Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich vor.

An Messort 42 ist wiederum der Effekt der hohen Dämmung des U-Filters an der 16-kHz-Terzmittenfrequenz zu erkennen. Dieser Effekt hat am Messort 42 eine negative Auswirkung auf das Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung. An dem Schalldruckpegel $L_{pAeq,Hfb} = 87,2$ dB wird deutlich, dass hier im Sinne der LärmVibrationsArbSchV für den Hörfrequenzbereich eine Gehörgefährdung oberhalb des oberen Auslösewertes vorliegt, was aber im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung durch das Beurteilungskriterium $L_{EXAU,8h}$ in diesem Maße nicht abgebildet wird.

Bei den von *Maue* vorgeschlagenen zulässigen Höchstwerten liegt an Messort 42 eine Überschreitung des $L_{pZeq, Terz 16kHz, 5min} = 90$ dB vor.

Tabelle 13:

Messwerte zu den Messorten 39 bis 42 mit Bezug zu vorhandenen bzw. vorgeschlagenen Beurteilungskriterien (Bediener-Arbeitsplätze an Ultraschall-Schweißmaschinen, Arbeitsfrequenz 35: kHz, ohne Schallschutzeinrichtung)

Lfd. Nr.	Messwerte												
	Diverse Messwerte (energetischer Mittelwert bzw. Maximalwert aus drei Stichproben)							Z-bewerteter maximaler 5-Minuten-Terzschalldruckpegel $L_{pZeq, Terz, 5 min}$					
	L_{pAeq}	$L_{pAeq, Hfb}$	$L_{pAUeq-M}$	$L_{pAUeq-R}$	$L_{pZeq, Terz 20 kHz}$	$L_{pULTRAeq}$	L_{pCpeak}	L_{pZpeak}	16 kHz	20 kHz	25 kHz	31,5 kHz	40 kHz
39	86,8	81,6	83,0	81,1	77,7	100,7	108,9	118,0	78,5	79,7	76,9	101,0	94,4
40	79,6	68,9	69,3	68,9	50,6	95,3	109,6	127,3	55,9	50,9	43,1	94,0	90,2
41	88,7	74,3	73,5	–	86,1	105,1	121,6	129,4	73,4	87,3	66,2	104,8	99,8
42	93,5	87,2	88,5	84,7	88,2	107,7	128,2	131,9	91,1	89,5	92,5	107,8	103,8

6.3.4 Ultraschall-Schweißmaschinen mit Arbeitsfrequenzen von 20, 30 und 35 kHz, mit Schallschutzeinrichtung

An insgesamt zwölf Ultraschall-Schweißmaschinen mit Schallschutzeinrichtungen konnten Messungen durchgeführt werden. Davon hatten zehn eine Arbeitsfrequenz von 20 kHz (Messorte 27 bis 36) und jeweils eine die Arbeitsfrequenz 30 kHz (Messort 38) bzw. 35 kHz (Messort 43).

An keinem der zwölf Messorte konnten Grenz- bzw. Richtwertüberschreitungen von vorhandenen sowie vorgeschlagenen Beurteilungskriterien zu Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich festgestellt werden.

Nachfolgend sind hierzu getrennt nach Arbeitsfrequenz jeweils die Frequenzspektren sowie die Messwerte mit Bezug zu Beurteilungskriterien dargestellt.

Bezogen auf die bereits betrachteten Frequenzspektren der Ultraschall-Schweißmaschinen ohne Schallschutzeinrichtungen sind in den folgenden Frequenzspektren für die drei Arbeitsfrequenzen jeweils vergleichbare Charakteristika zu beobachten.

Abbildung 36 und Tabelle 14 zeigen die Messergebnisse von den Ultraschall-Schweißmaschinen mit der Arbeitsfrequenz von 20 kHz (Messorte 27 bis 36).

Die Messergebnisse an der Ultraschall-Schweißmaschine mit der Arbeitsfrequenz von 30 kHz (Messort 38) sind in Abbildung 37 und Tabelle 15 dargestellt.

Abschließend sind in Abbildung 38 und Tabelle 16 die Messergebnisse von der Ultraschall-Schweißmaschine mit der Arbeitsfrequenz von 35 kHz (Messort 43) dargestellt.

Abbildung 36:
Frequenzspektrum (8 bis 40 kHz) von zehn Ultraschall-Schweißmaschinen (Arbeitsfrequenz: 20 kHz, mit Schallschutzeinrichtung)

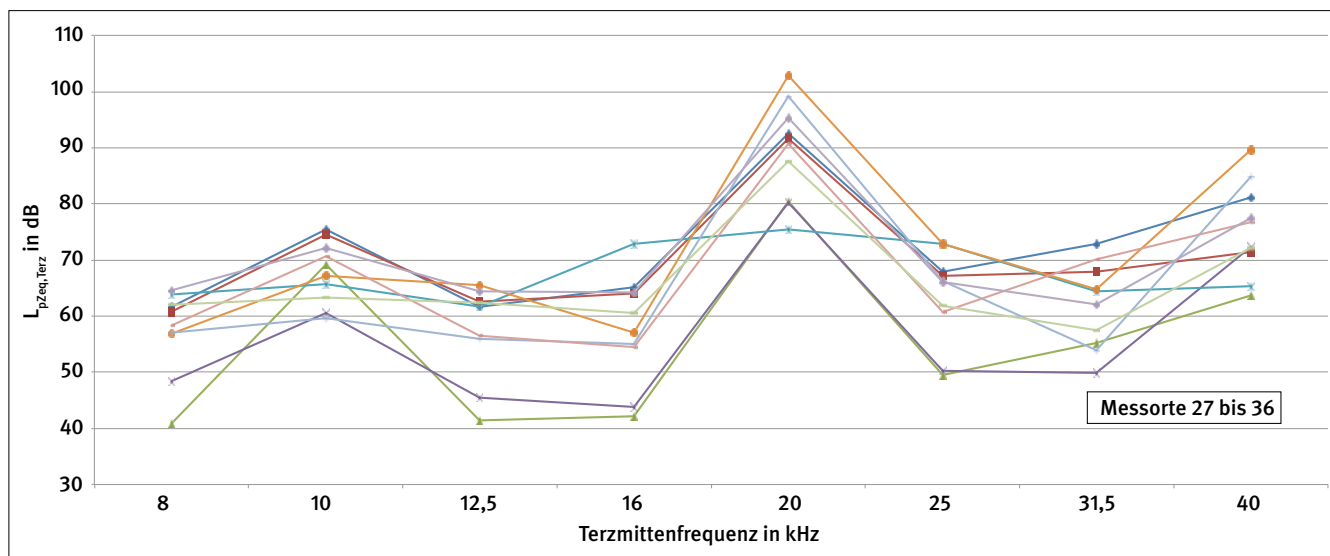


Tabelle 14:
Messwerte zu den Messorten 27 bis 36 mit Bezug zu vorhandenen bzw. vorgeschlagenen Beurteilungskriterien (Bediener-Arbeitsplätze an Ultraschall-Schweißmaschinen, Arbeitsfrequenz: 20 kHz, mit Schallschutzeinrichtung)

Lfd. Nr.	Messwerte												
	Diverse Messwerte (energetischer Mittelwert bzw. Maximalwert aus drei Stichproben)								Z-bewerteter maximaler 5-Minuten-Terzschalldruckpegel $L_{pZeq, Terz, 5 \text{ min}}$				
	L_{pAeq}	$L_{pAeq, HFB}$	$L_{pAUeq-M}$	$L_{pAUeq-R}$	$L_{pZeq, Terz 20 \text{ kHz}}$	$L_{pUTRAeq}$	L_{pCpeak}	L_{pZpeak}	16 kHz	20 kHz	25 kHz	31,5 kHz	40 kHz
27	89,8	78,2	80,6	78,2	92,5	92,9	126,8	129,6	65,4	93,5	68,0	73,3	82,4
28	85,0	75,9	78,7	75,8	91,7	91,8	109,3	115,2	65,0	93,3	69,2	69,6	72,1
29	74,6	68,6	71,9	68,6	80,5	80,6	121,3	123,3	42,6	81,3	50,2	55,6	65,5
30	74,6	69,7	70,6	69,7	80,2	80,8	99,2	106,3	44,9	82,9	52,7	52,5	73,9
31	76,7	75,6	76,7	75,1	75,4	79,0	110,2	117,9	73,8	76,2	73,8	65,3	66,2
32	95,5	71,9	81,3	73,4	102,9	103,1	120,5	130,8	58,5	104,0	73,9	66,9	91,5
33	92,2	76,3	80,2	76,6	99,2	99,4	110,4	120,1	56,5	101,0	67,8	54,9	86,7
34	84,1	75,0	77,1	75,0	90,8	91,0	106,8	115,0	55,1	92,2	61,9	70,5	77,8
35	81,1	73,7	75,2	73,6	87,6	87,8	108,3	114,2	60,9	89,0	62,2	57,9	72,6
36	88,5	77,2	79,8	77,2	95,4	95,5	120,7	120,5	65,5	97,0	67,3	62,9	78,6

6 Messung und Beurteilung der Schalleinwirkung an Ultraschall-Schweißmaschinen

Abbildung 37:

Frequenzspektrum (8 bis 40 kHz) von einer Ultraschall-Schweißmaschine (Arbeitsfrequenz: 30 kHz, mit Schallschutzeinrichtung)

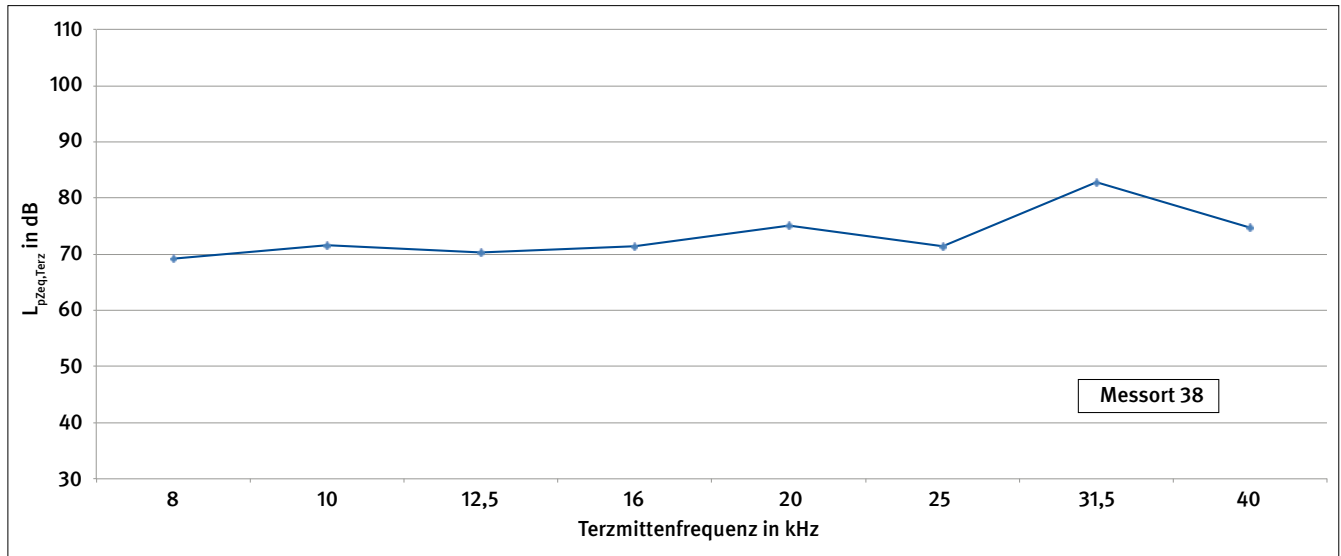


Tabelle 15:

Messwerte zu dem Messort 38 mit Bezug zu vorhandenen bzw. vorgeschlagenen Beurteilungskriterien (Bediener-Arbeitsplatz an Ultraschall-Schweißmaschine, Arbeitsfrequenz: 30 kHz, mit Schallschutzeinrichtung)

Lfd. Nr.	Messwerte												
	Diverse Messwerte (energetischer Mittelwert bzw. Maximalwert aus drei Stichproben)								Z-bewerteter maximaler 5-Minuten-Terzschalldruckpegel $L_{pZeq, Terz, 5 min}$				
	L_{pAeq}	$L_{pAeq, HfB}$	$L_{pAeq, M}$	$L_{pAeq, R}$	$L_{pZeq, Terz, 20 kHz}$	$L_{pULTRAeq}$	L_{pCpeak}	L_{pZpeak}	16 kHz	20 kHz	25 kHz	31,5 kHz	40 kHz
38	80,5	79,4	80,9	79,1	75,0	84,7	112,6	115,7	71,6	75,3	71,6	83,0	74,9

Abbildung 38:

Frequenzspektrum (8 bis 40 kHz) von einer Ultraschall-Schweißmaschine (Arbeitsfrequenz: 35 kHz, mit Schallschutzeinrichtung)

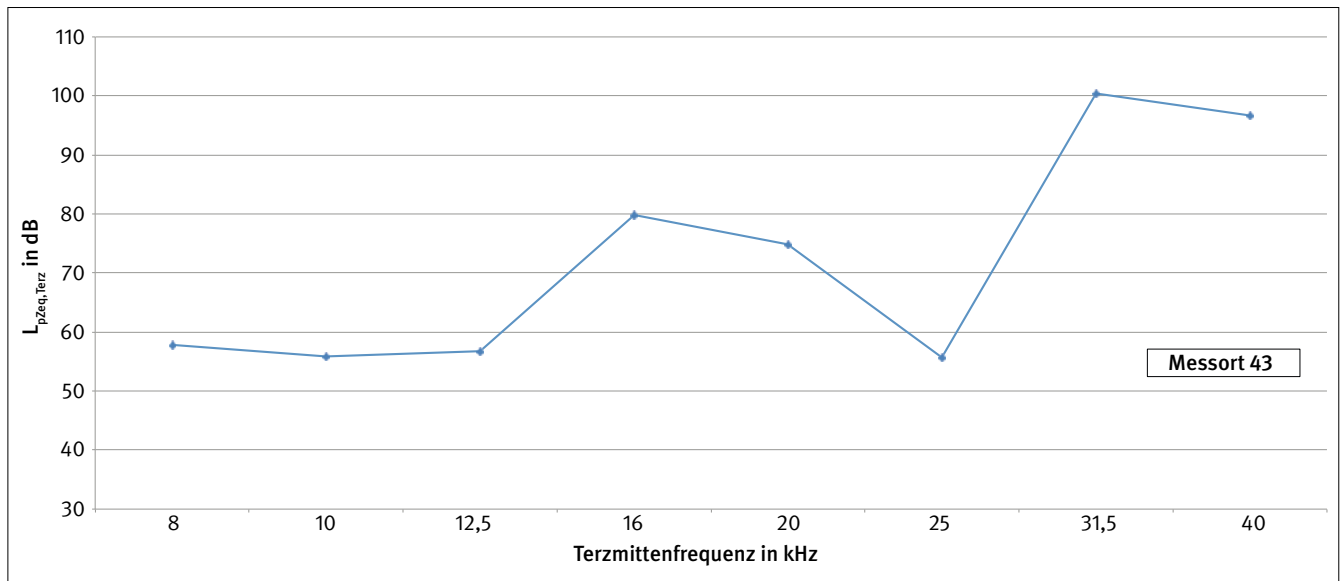


Tabelle 16:

Messwerte zu dem Messort 43 mit Bezug zu vorhandenen bzw. vorgeschlagenen Beurteilungskriterien (Bediener-Arbeitsplatz an Ultraschall-Schweißmaschine, Arbeitsfrequenz: 35 kHz, mit Schallschutzeinrichtung)

Lfd. Nr.	Messwerte													
	Diverse Messwerte (energetischer Mittelwert bzw. Maximalwert aus drei Stichproben)								Z-bewerteter maximaler 5-Minuten-Terzschalldruckpegel $L_{pZeq, Terz, 5 \text{ min}}$					
	L_{pAeq}	$L_{pAeq, HfB}$	$L_{pAUeq-M}$	$L_{pAUeq-R}$	$L_{pZeq, Terz 20 \text{ kHz}}$	$L_{pULTRAeq}$	L_{pCpeak}	L_{pZpeak}	16 kHz	20 kHz	25 kHz	31,5 kHz	40 kHz	
43	85,4	74,4	68,3	–	74,9	102,0	106,3	125,2	80,9	75,7	56,2	102,1	98,4	

6.4 Diskussion zur Beurteilung von luftgeleitetem Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich am Beispiel dieser Messserie

Es gilt als unstrittig, dass es in Deutschland Beurteilungskriterien für luftgeleiteten Ultraschall und seine Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich geben muss, die sich nicht nur auf die 20-kHz-Terzmittenfrequenz beschränken. Zwei entsprechende Vorschläge hierzu wurden im Abschnitt 5.3 beschrieben und anschließend im Rahmen einer Messserie an Ultraschall-Schweißmaschinen vergleichend betrachtet (siehe Abschnitt 6.3). Die Erkenntnisse aus dieser praktischen Anwendung werden nachfolgend beschrieben und diskutiert.

Die beiden Vorschläge gehen von einem unterschiedlichen Beurteilungsansatz aus. Bei dem Beurteilungskriterium $L_{pULTRAeq}$ wird die gesamte Ultraschalleinwirkung ab 16 kHz mit einem zulässigen Höchstwert von 110 dB betrachtet, während *Maue* für jede Terzmittenfrequenz ab 16 kHz einen zulässigen Höchstwert vorgeschlägt. Da die zulässigen Höchstwerte für die Terzmittenfrequenzen ab 20 kHz in dem Vorschlag von *Maue* ebenfalls 110 dB betragen, werden vom Grundsatz her alle Ultraschalleinwirkungen ab 20 kHz mit Schalldruckpegeln oberhalb von 110 dB von beiden Vorschlägen gleichermaßen erkannt.

Bei der Betrachtung von Ultraschalleinwirkungen ab 20 kHz konnten zwei Besonderheiten in den beiden vorgeschlagenen Beurteilungsansätzen beobachtet werden:

- Der Beurteilungsansatz $L_{pULTRAeq}$ betrachtet die gesamte einwirkende Ultraschallenergie. Bei Ultraschall-Schweißmaschinen mit einer Arbeitsfrequenz von 20 kHz fließt auch eine vorhandene Harmonische an der 40-kHz-Terzmittenfrequenz in diese Gesamtbetrachtung hinein. Dadurch kann der zulässige Höchstwert $L_{pULTRAeq} = 110 \text{ dB}$ eine Überschreitung anzeigen, wenn sowohl die Arbeitsfrequenz als auch die Harmonische einen Schalldruckpegel knapp unterhalb von 110 dB haben. In der durchgeführten Messserie ist dies im Ansatz beim Messort 3 zu erkennen. Dort wurde ein $L_{pZeq, Terz 20 \text{ kHz}} = 105 \text{ dB}$ und ein $L_{pZeq, Terz 40 \text{ kHz}} = 105,4 \text{ dB}$ gemessen. Der $L_{pULTRAeq}$ lag in diesem Beispiel mit 109,1 dB nur knapp unter dem zulässigen Höchstwert von 110 dB. Ein vergleichbarer Effekt tritt bei

Ultraschall-Schweißmaschinen mit einer Arbeitsfrequenz von 35 kHz auf. Da die Arbeitsfrequenz nah an der oberen Grenzfrequenz der 31,5-kHz-Terzmittenfrequenz (35,4 kHz) liegt, verteilt sich die einwirkende Energie auf die beiden benachbarten Terzmittenfrequenzen 31,5 und 40 kHz (siehe im Ansatz am Messort 42). Der $L_{pULTRAeq}$ -Beurteilungsansatz würde auch hier die gesamte einwirkende Energie betrachten, während eine terzweise Beurteilung derartige Effekte nicht berücksichtigt.

- Zur Beurteilung wird bei dem vorhandenen Beurteilungskriterium aus VDI 2058 Blatt 2 und bei dem vorgeschlagenen $L_{pULTRAeq}$ -Beurteilungsansatz der energetische Mittelwert aus den drei vorgeschriebenen Stichproben herangezogen. Der Vorschlag von *Maue* nutzt zur Beurteilung den Z-bewerteten maximalen 5-Minuten-Terzschalldruckpegel $L_{pZeq, Terz, 5 \text{ min}}$. Damit wird aus allen Stichproben für jede Terzmittenfrequenz der höchste gemessene Schalldruckpegel mit dem jeweiligen Beurteilungskriterium verglichen. Dies führte in der durchgeführten Messserie dazu, dass an Messort 8 mit dem *Maue*-Vorschlag eine zusätzliche Überschreitung des zulässigen Höchstwertes für die 20-kHz-Terzmittenfrequenz festgestellt wurde.

Maue [1] bemerkt in seinem Vorschlag, dass für die 20-kHz-Terzmittenfrequenz auch deutlich niedrigere Höchstwerte diskutiert werden und aufgrund von Erkenntnissen zukünftiger Untersuchungen die von ihm vorgeschlagenen Höchstwerte möglicherweise nochmals verändert werden müssen. Die Diskussion über die Höhe des zulässigen Höchstwertes für die 20-kHz-Terzmittenfrequenz wird auch von *Acton* [110] und *Howard et al.* [78] geführt (siehe Abschnitt 5.2). Käme es zu einer Reduzierung des Beurteilungskriteriums für die 20-kHz-Terzmittenfrequenz, wäre dies mit dem vorgeschlagenen $L_{pULTRAeq}$ -Beurteilungsansatz nicht umsetzbar.

Als eine besonders kritische Größe ist die 16-kHz-Terz zu sehen. Da der Hörfrequenzbereich bis 16 kHz und der Ultraschallbereich ab 16 kHz definiert ist, die 16-kHz-Terz aber Frequenzen von 14,3 bis 18 kHz einschließt und sich bei 16 kHz nicht aufteilen lässt, entstehen hierdurch Probleme bei der Beurteilung von Hörschall im Beisein von Ultraschall. Am Beispiel von Messort 42 konnte gezeigt werden, dass die hohe Dämpfung des U-Filters an der 16-kHz-Terzmittenfrequenz (-13 dB) zu einer Unterschätzung der Hörschallbelastung führen kann (Vergleich L_{pAUeq} mit $L_{pAeq, HfB}$ an Messort 42).

Des Weiteren kann durch die hohe Dämpfung des U-Filters an der 16-kHz-Terzmittenfrequenz das Risiko des Entstehens von subjektiven Beeinträchtigungen durch luftgeleiteten Ultraschall und seine Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich mit dem Richtwert $L_{EXAU,8h}$ aus VDI 3766 nicht beurteilt werden. An dieser Stelle greift nur der von *Maue* vorgeschlagene Beurteilungsansatz, der für die 16-kHz-Terzmittenfrequenz einen zulässigen Höchstwert von $L_{pZeq, Terz 16kHz, 5min} = 90$ dB vorsieht. Dieser Höchstwert wurde in der durchgeführten Messserie insgesamt dreimal überschritten.

Die Literaturrecherche zu den Wirkungen von luftgeleiteten Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich hat gezeigt, dass die subjektiven Beeinträchtigungen bereits nach einer kurzen Expositionszeit auftreten können. Um derartige unerwünschte Effekte zu vermeiden, sollten zulässige Höchstwerte im Hochfrequenzbereich unabhängig von einer Expositionszeit definiert werden. Beide vorgeschlagenen Beurteilungsansätze verweisen jedoch für die Beurteilung der Einwirkung unterhalb der 16-kHz-Terzmittenfrequenz auf VDI 3766, obwohl der darin enthaltene Richtwert $L_{EXAU,8h}$ sich auf eine ganztägige Einwirkung bezieht.

Der $L_{pULTRAeq}$ -Beurteilungsansatz hat bezogen auf mögliche subjektive Beeinträchtigungen für die 16-kHz-Terzmittenfrequenz kein Konzept, da er für den gesamten Ultraschallbereich ab 16 kHz einen zulässigen Höchstwert von $L_{pULTRAeq} = 110$ dB ansetzt, obwohl die subjektiven Effekte bei deutlich niedrigeren Schalldruckpegeln auftreten können.

Nach Abwägung aller aufgeführten Kriterien spricht sich der Verfasser dieser Arbeit für den von *Maue* vorgeschlagenen Beurteilungsansatz aus.

Unabhängig von den vorgeschlagenen Beurteilungsansätzen gibt es aus der Sicht des Verfassers dieses Reports weitere Punkte, die an dieser Stelle kritisch angeführt werden müssen.

An Arbeitsplätzen mit Ultraschalleinwirkung kann keine Gefährdungsbeurteilung nach LärmVibrationsArbSchV unter Verwendung der Schalldruckpegelgrößen L_{pAeq} bzw. $L_{EX,8h}$ durchgeführt werden (siehe Abschnitt 4.6). Hierfür könnte stellvertretend die Schalldruckpegelgröße $L_{EXAU,8h}$ aus VDI 3766 herangezogen werden, mit der unter Verwendung des U-Filters der vorliegende Ultraschall ausgeblendet wird und somit eine Beurteilung der Hörschallexposition im Sinne der LärmVibrationsArbSchV erfolgen kann. Anhand der durchgeführten Messserie wurde jedoch aufgezeigt, dass durch die hohe Dämpfung des U-Filters an der 16-kHz-Terzmittenfrequenz eine Unterschätzung der Gehörgefährdung im Hörfrequenzbereich entstehen kann. Als Alternative, die den vorstehend aufgeführten Nachteil des $L_{EXAU,8h}$ nicht aufweist, wäre auch die Verwendung der im Rahmen dieser Arbeit definierten Schalldruckpegelgröße $L_{pAeq,Hfb}$ möglich (siehe Abschnitt 4.6 und Anhang B). Da es sich an dieser Stelle um eine konkrete Frage zur Umsetzung einer staatlichen Vorschrift handelt, ist der Gesetzgeber in der Pflicht, hierzu Stellung zu beziehen und ein entsprechendes Regelwerk zu schaffen, in dem die Umsetzung der LärmVibrationsArbSchV auf Arbeitsplätze mit Ultraschalleinwirkung genau beschrieben ist. Damit müssten dann auch offene Fragen zur Berechnung einer Tagesexposition beantwortet werden. Wie wird eine Tagesexposition berechnet, wenn der oder die Beschäftigte mehrere verschiedene Tätigkeiten ausführt, in denen nicht überall Ultraschallanteile vorkommen? Oder konkreter: Wie kann ein L_{pAeq} und ein L_{pAUeq} bzw. ein $L_{pAeq,Hfb}$ zu einer Tagesexposition zusammengefasst werden? Wie heißt die daraus resultierende Schalldruckpegelgröße?

7 Schutzmaßnahmen an Ultraschall-Schweißmaschinen

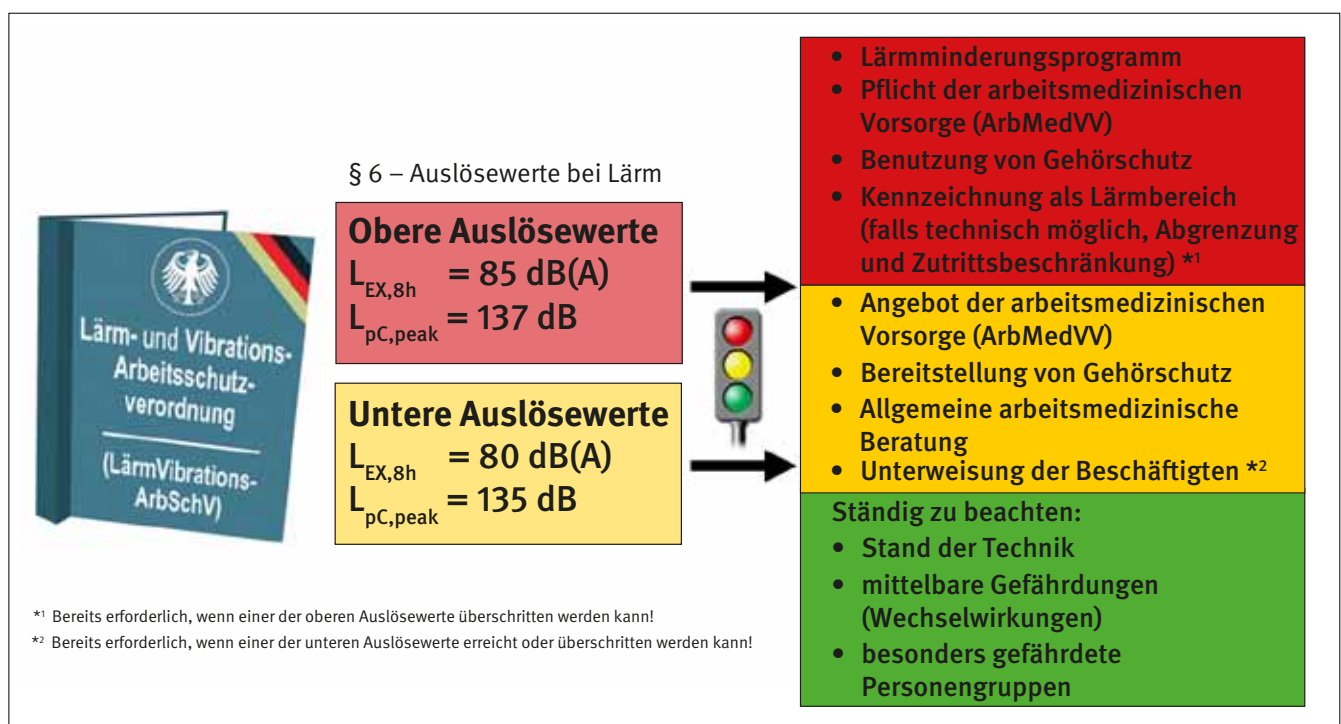
Zur Abrundung des Themengebietes beschäftigt sich dieses Kapitel mit Schutzmaßnahmen, die in Abhängigkeit vom Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung an Bediener-Arbeitsplätzen von Ultraschall-Schweißmaschinen umzusetzen sind.

Bezogen auf die Einwirkung von Ultraschall am Arbeitsplatz gibt es kein staatliches Vorschriften- und Regelwerk mit bindenden Grenzwerten. Die Grenz- bzw. Richtwerte aus VDI 2058 Blatt 2 bzw. VDI 3766 haben lediglich einen empfehlenden Charakter. Gleiches gilt für die zulässigen Höchstwerte aus den beiden in Abschnitt 5.3 vorgeschlagenen Beurteilungsansätzen.

Anders sieht es bei der Schalleinwirkung im Hörfrequenzbereich aus. Hier existiert ein staatliches Vorschriften- und Regelwerk in Form der LärmVibrationsArbSchV, der TRLV Lärm sowie der

Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge (ArbMedVV). Da an Arbeitsplätzen mit Ultraschalleinwirkung die Schalldruckpegelgrößen L_{pAeq} und $L_{EX,8h}$ nicht zur Beurteilung der Hörschalleinwirkung herangezogen werden können und eine entsprechende staatliche Definition zur Umsetzung der LärmVibrationsArbSchV an derartigen Arbeitsplätzen fehlt, bedarf es hier im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung eines gewissen Grades der Improvisation. So ist mittels einer geeigneten Schalldruckpegelgröße (z. B. L_{pAueq} oder $L_{pAeq,Hfb}$) die Einwirkung im Hörfrequenzbereich zu beschreiben und anhand der Auslösewerte der LärmVibrationsArbSchV zu beurteilen (siehe Abschnitt 6.4). In Abhängigkeit vom Beurteilungsergebnis sind dann die entsprechenden Schutzmaßnahmen nach LärmVibrationsArbSchV und ArbMedVV umzusetzen (Abbildung 39) [3; 121].

Abbildung 39: Erforderliche Schutzmaßnahmen nach LärmVibrationsArbSchV, TRLV Lärm und ArbMedVV in Bezug zu den Auslösewerten der LärmVibrationsArbSchV



In Anlehnung an die TRLV Lärm Teil 3: „Lärmschutzmaßnahmen“ sind bei der Festlegung und Durchführung der Schutzmaßnahmen bestimmte Grundsätze zu beachten. So sind die Schutzmaßnahmen nach dem Stand der Technik durchzuführen, um die Gefährdung der Beschäftigten auszuschließen oder so weit wie möglich zu reduzieren. Die Lärmemission muss dabei am Entstehungsort verhindert oder so weit wie möglich verringert werden. Technische Schutzmaßnahmen haben dabei immer Vorrang vor organisatorischen Schutzmaßnahmen und diese wiederum Vorrang vor den persönlichen Schutzmaßnahmen [122].

Im Rahmen dieser Arbeit kann keine umfangreiche Beschreibung aller möglichen Schutzmaßnahmen erfolgen, sodass sich

hierzu nachfolgend auf sekundäre Schallschutzmaßnahmen, organisatorische Schutzmaßnahmen sowie dem Gehörschutz beschränkt wird.

7.1 Sekundäre Schallschutzmaßnahmen (Technische Schutzmaßnahmen)

Die sehr kurzen Wellenlängen des Ultraschalls (z. B. 17 mm bei 20 kHz in Luft im Vergleich zu 34 cm bei 1 kHz) erfahren bereits bei der Ausbreitung in der Luft eine deutliche Schalldämpfung,

also eine hohe Pegelabnahme mit steigendem Abstand zur Schallquelle. Mit relativ einfachen Maßnahmen kann diese Dämpfung auf dem Ausbreitungsweg deutlich erhöht werden. Aus diesem Grund lassen sich an hochfrequenten Schallquellen mit sekundären Schallschutzmaßnahmen, wie z. B. einer Voll- oder Teilkapselung, sehr gute Schallminderungserfolge erzielen [6; 23].

Laut VDI 3766 kann eine ausreichende Dämmung bereits mit einer relativ dünnen Wandung (z. B. 1 mm dickes Aluminiumblech, 19 mm dicke Spanplatte) und einer schallabsorbierenden Auskleidung von 20 bis 30 mm Dicke erreicht werden. Bei jeglicher Art von Kapselung ist jedoch zu berücksichtigen, dass die elektrische Leistung der Ultraschallanlage vollständig in Wärme umgesetzt wird und eine entsprechende Wärmeabfuhr erforderlich ist. Bei einer geeigneten Ausführung der Kapsel sollte sich eine Schalldruckpegelreduzierung von mindestens 20 dB einstellen. Mit einer Teilkapselung, z. B. eine Ummantelung der Sonotrode einer Ultraschall-Schweißmaschine, lassen sich in der Regel nur geringe AU-bewertete Schalldruckpegelminderungen von 3 bis 5 dB erzielen, da auch über das Werkstück und die Maschinenstruktur eine Schallabstrahlung erfolgt [6]. Vergleichbare Angaben finden sich in der Broschüre „Ultraschallanlagen als Lärmquellen“ [23].

Damongeot und *André* [116] beschreiben für Teilkapselungen an Ultraschall-Schweißmaschinen (Ummantelung der Sonotrode) die Möglichkeit, eine Schalldruckpegelreduzierung im Hörfrequenzbereich von bis zu 12 dB und im Ultraschallbereich von bis zu 16 dB erreichen zu können. Mit Vollkapselungen (Außenhaut aus Metall oder Spanplatte und einer Innenauskleidung mit Mineralwolle oder Polyurethanschaum) erzielten sie im Hörfrequenzbereich bis zu 37 dB und im Ultraschallbereich bis zu 31 dB Schalldruckpegelminderung.

Dobrucki et al. [123] stellten für die Frequenz von 20 kHz eine gute Schallabsorption mit 10 mm dicken Keramikfaserplatten und 10 mm dickem Polyurethanschaum fest. Nach der Kapselung einer 20-kHz-Ultraschall-Schweißmaschine mit 10 mm dicken Keramikfaserplatten dokumentierten sie Schalldruckpegelreduzierungen von 25 dB.

Pleban [124] bestätigte mit seinen Untersuchungen, dass Mineralwolle und Polyurethanschaum für den Frequenzbereich von 4 bis 40 kHz sehr gute Absorptionseigenschaften aufweisen. Aus Versuchen mit verschiedenen Materialstärken der Mineralwolle kam er zu dem Ergebnis, dass das Absorptionsvermögen der Mineralwolle sein Maximum erreicht, wenn deren Dicke größer ist als die Wellenlänge der zu absorbierenden Frequenzen.

Das IFA [115] machte bei Lärminderungsberatungen die Erfahrung, dass sich mit der Kapselung von Ultraschall-Schweißmaschinen Schalldruckpegelminderungen von mehr als 20 dB erreichen lassen.

Bei der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messserie an Bediener-Arbeitsplätzen von Ultraschall-Schweißmaschinen handelte es sich bei den Messorten 16 und 28 um die gleiche 20-kHz-Ultraschall-Schweißmaschine. Das Unternehmen hat nach der ersten Messung die Sonotrode der Ultraschall-Schweißmaschine ummantelt (Abbildung 40) und wollte die

erzielte Schalldruckpegelreduzierung mit einer zweiten Messung dokumentiert haben. Nach Umsetzung der Schallschutzmaßnahme wurde eine Reduzierung des $L_{pULTRAeq}$ von 10,9 dB (vorher 102,7 dB, nachher 91,8 dB) und des L_{pAUeq} von 15,2 dB (vorher 91 dB, nachher 75,8 dB) festgestellt (siehe Abschnitt 6.3 und Anhang D).

Abbildung 40: Beispiel einer teilgekapselten Ultraschall-Schweißmaschine



In der durchgeführten Messserie wurde an insgesamt 36 Ultraschall-Schweißmaschinen mit einer Arbeitsfrequenz von 20 kHz gemessen. Davon hatten 26 keine Schallschutzeinrichtung. Hier betrug der arithmetische Mittelwert über alle 26 Messungen für den $L_{pULTRAeq} = 108,9$ dB und für den $L_{pAUeq} = 84,6$ dB. Bei den zehn Ultraschall-Schweißmaschinen mit einer Schallschutzeinrichtung lag der arithmetische Mittelwert für den $L_{pULTRAeq}$ bei 90,2 dB und für den L_{pAUeq} bei 74,3 dB. Es handelte sich bei den zehn Schallschutzeinrichtungen um sechs Vollkapselungen (Abbildung 41) und vier Teilkapselungen (eine ummantelte Sonotrode und drei nicht voll geschlossene Plexiglas-Umbauungen).

Die Ergebnisse der Messserie zeigen, dass an keiner der insgesamt zwölf Ultraschall-Schweißmaschinen mit Schallschutzeinrichtungen eine Grenz- bzw. Richtwertüberschreitung festgestellt wurde. Auf der anderen Seite wurden an 22 der 31 Ultraschall-Schweißmaschinen ohne Schallschutzeinrichtungen (entspricht 71 %) Grenz- bzw. Richtwertüberschreitungen nachgewiesen (siehe Abschnitt 6.3.4). Damit besteht ein Handlungsbedarf hinsichtlich geeigneter Schutzmaßnahmen an derartigen Arbeitsplätzen. Die Kapselung von Ultraschall-Schweißmaschinen ist eine geeignete Schutzmaßnahme und steht aufgrund ihres technischen Ansatzes in der Priorität der Schutzmaßnahmen an erster Stelle.

Abbildung 41:
Beispiel einer vollgekapselten Ultraschall-Schweißmaschine



Aus der Sicht des Verfassers dieses Reports sollten Ultraschall-Schweißmaschinen bereits vom Hersteller aus nur in gekapselter Form vertrieben werden. Eine ähnlich lautende Forderung stellte auch das IFA [115] auf.

Am Ende dieses Kapitels soll nicht unerwähnt bleiben, dass im Rahmen der Messserie an drei verschiedenen Arbeitsplätzen jeweils unmittelbar hinter der Ultraschall-Schweißmaschine die abmontierte Schallschutzhaube auf dem Boden stehend vorgefunden wurde. Als Grund hierfür wurde in allen drei Fällen auf Nachfrage die dadurch erreichte Produktivitätssteigerung angeführt. Derartige Beispiele zeigen aus der Sicht des Verfassers dieses Reports, dass es immer noch nicht überall als selbstverständlich angesehen wird, dass Produktivitätssteigerungen niemals zulasten des Arbeits- und Gesundheitsschutzes gehen dürfen.

7.2 Organisatorische Schutzmaßnahmen

Unter organisatorischen Schutzmaßnahmen sind raum- oder zeitorganisatorische Änderungen zu verstehen, durch die die Anzahl der lärmexponierten Beschäftigten so gering wie möglich gehalten wird und die zur Verminderung des Ausmaßes der täglichen Schallexposition beitragen [122]. Da hinsichtlich der auralen Wirkungen von luftgeleitetem Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich keine Dosis-Wirkungs-Beziehung bekannt ist, kann zur diesbezüglichen Eignung organisatorischer Schutzmaßnahmen für Bediener von

Ultraschall-Schweißmaschinen keine Aussage getroffen werden. Da jedoch an derartigen Arbeitsplätzen bereits nach einigen Minuten subjektive Beeinträchtigungen durch die Schalleinwirkung entstehen können, ist von organisatorischen Schutzmaßnahmen bezogen auf die Bediener der Ultraschall-Schweißmaschinen abzuraten (siehe Abschnitte 3.3.3 und 3.3.4). Anders sieht es zum Schutz von Beschäftigten an benachbarten Arbeitsplätzen aus, wenn diese lediglich der Schalleinwirkung von den Ultraschall-Schweißmaschinen ausgesetzt sind. Eine organisatorische Verlagerung der Ultraschall-Schweißmaschinen in einen separaten Raum oder in eine Schicht mit geringer Personalbesetzung reduziert die Belastung der Beschäftigten an den benachbarten Arbeitsplätzen.

7.3 Gehörschutz (Persönliche Schutzmaßnahmen)

Werden die unteren Auslösewerte der LärmVibrationsArbSchV trotz durchgeführter technischer und/oder organisatorischer Schutzmaßnahmen nicht eingehalten, hat der Arbeitgeber den Beschäftigten einen geeigneten persönlichen Gehörschutz zur Verfügung zu stellen. Als geeignet gilt der Gehörschutz, der durch seine Anwendung die Gehörgefährdung beseitigt oder auf ein Minimum reduziert. Bei der Auswahl des Gehörschutzes muss unter Berücksichtigung der jeweiligen Dämmwirkung sichergestellt werden, dass der auf das Gehör des Beschäftigten einwirkende Lärm die maximal zulässigen Expositionswerte nach § 8 „Gehörschutz“ der LärmVibrationsArbSchV nicht überschreitet. Wird durch die Lärmexposition am Arbeitsplatz einer der oberen Auslösewerte der LärmVibrationsArbSchV erreicht oder überschritten, hat der Arbeitgeber dafür Sorge zu tragen, dass die Beschäftigten den zur Verfügung gestellten persönlichen Gehörschutz bestimmungsgemäß verwenden [3].

Hinweise zur Auswahl, Bereitstellung und Benutzung von Gehörschutz finden sich in DIN EN 458 „Gehörschützer – Empfehlungen für Auswahl, Einsatz, Pflege und Instandhaltung – Leitfaden“ [125], der DGUV Regel 112-194 „Benutzung von Gehörschutz“ [126] sowie der allgemeinen Präventionsleitlinie „Gehörschutz – Auswahl, Bereitstellung und Benutzung“ [127].

Die Hersteller von Gehörschützern müssen die Einhaltung einer in der Normenreihe DIN EN 352 „Gehörschützer – Allgemeine Anforderungen/Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfungen“ definierten Mindestschalldämmung für die Oktaven von 125 Hz bis 8 kHz nachweisen [128]. Die Dämmwirkung von Gehörschützern für Frequenzen oberhalb von 8 kHz wird nicht geprüft und dokumentiert. Aufgrund dessen kann für Arbeitsplätze mit Ultraschalleinwirkung hinsichtlich der Eignung von Gehörschützern keine gesicherte Aussage erfolgen.

Obwohl die Dämmwerte von Gehörschützern im Ultraschallfrequenzbereich nicht bekannt sind, nimmt die Richtlinie VDI 3766 an, dass die Gehörschützer bei korrekter Anwendung im Hochton- und Ultraschallfrequenzbereich zumindest die für hoch- bis mittelfrequente Geräusche (Geräuschklasse HM, siehe hierzu DGUV Regel 112-194) ermittelten Schalldämmwerte erreichen [6; 126].

Berger [129] untersuchte die Dämmwirkung von zehn verschiedenen Gehörschützern (Kapsel und Stöpsel) bis einschließlich der 16-kHz-Terzmittenfrequenz. Dabei kam er zu dem Ergebnis, dass alle getesteten Gehörschützer die hohen Frequenzen bis 17,8 kHz sehr effektiv mit mindestens 32 dB dämmen. Da keine Dämmwerte für Ultraschall verfügbar waren, machte er in der Zusammenfassung die Aussage, dass davon auszugehen ist, dass sich das von ihm untersuchte Dämmverhalten bei den hohen Frequenzen im Hörschallbereich auch bis zu Frequenzen von 32 kHz fortsetzen sollte.

Damongeot und *André* [116] beschrieben in ihrer Studie, dass es zwar aufgrund von Untersuchungen den Anschein hat, dass festgestellte Dämmwerte von Gehörschützern im hochfrequenten Hörschallbereich auf den nahen Ultraschallbereich übertragen werden können, es aus ihrer Sicht aber nicht sicher ist, dass das Gehör der einzige Weg ist, über den der Ultraschall in den Körper gelangen kann. Dieser Zweifel bestärkte die Position der Autoren, dass Gehörschutz an Arbeitsplätzen mit Ultraschalleinwirkung nur das letzte Mittel der Wahl sein darf. Eine Studie von *Lenhardt* [72], die den Eintritt von luftgeleiteten Ultraschall

zwischen 25 und 60 kHz über die Augen bis in die Schnecken beschreibt, unterstützt diese Sichtweise. Dabei kommt es in der Schnecke zur Auslösung einer Hörempfindung, bei der der Autor die Möglichkeit einer Hörschwellenverschiebung oberhalb des Sprachfrequenzbereichs sieht (siehe Abschnitt 3.3.3).

Crabtree und *Behar* [130] untersuchten die Dämmwirkung von zwei Kapselgehörschützern sowie drei Gehörschutzstöpseln bis zu Frequenzen von 22,4 kHz. Dabei wurde eine beträchtliche Variation der Dämmwerte hinsichtlich der verschiedenen Gehörschützer und der Richtung der Schalleinwirkung (frontal bzw. seitlich) festgestellt. Generell höhere Dämmwerte wurden nahezu frequenzunabhängig bei seitlicher Schalleinwirkung ermittelt, während sich bei frontaler Schalleinwirkung im Trend maximale Dämmwerte bei 12,5 kHz zeigten. Die höchste Schalldämmung konnte unabhängig von den einwirkenden Frequenzen oder der Richtung der Schalleinwirkung für den Polyurethan-Gehörschutzstöpsel „E-A-R E-Z-Fit“ dokumentiert werden (in den Terzmittenfrequenzen von 6,3 bis 20 kHz bei frontaler Einwirkung zwischen 48 und 62 dB und bei seitlicher Einwirkung zwischen 53 und 63 dB). Die Autoren kamen zusammenfassend zu dem Ergebnis, dass Gehörschützer an bestimmten Arbeitsplätzen mit Ultraschalleinwirkung das Gehör von Beschäftigten ausreichend sicher schützen können.

8 Zusammenfassung

Als Fazit dieser Arbeit kann festgehalten werden, dass Lärm nicht gleich Lärm ist. Es gibt mehrere verschiedene Schalleinwirkungsarten, die an Arbeitsplätzen auftreten können. So hat sich diese Arbeit neben dem allgegenwärtigen Lärm im Sprachfrequenzbereich mit hochfrequentem Lärm sowie insbesondere mit dem Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich beschäftigt. Darüber hinaus sind weiterhin der Infraschall und tieffrequente Lärm zu erwähnen, die jedoch beide nicht Gegenstand dieser Arbeit waren. All diese Schalleinwirkungsarten können je nach vorliegenden Schalldruckpegeln bei den Beschäftigten unterschiedliche Wirkungen verursachen.

Die Literaturrecherche zu den auralen Wirkungen der verschiedenen, hier betrachteten Schalleinwirkungen ergab zwar Hinweise auf bestimmte Schädigungsmechanismen, ließ aber auch viele Fragen unbeantwortet. Obwohl hochfrequenter Lärm und Ultraschall mit seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich über weite Teile im gleichen Frequenzbereich einwirken, konnte gezeigt werden, dass hierbei unterschiedliche aurale Wirkungen in der Diskussion stehen und somit eine getrennte Betrachtung der beiden Einwirkungsarten gerechtfertigt ist. Speziell zum vorhandenen Wissensstand zu Hörschwellenverschiebungen oberhalb vom Sprachfrequenzbereich muss erwähnt werden, dass diese Erkenntnisse auf Untersuchungen mit Hochtonaudiometern basieren, über deren Zuverlässigkeit in der Literatur kritisch diskutiert wird. Des Weiteren besteht der Großteil der Erkenntnisse zu auralen Wirkungen von Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich aus Studien, die inzwischen 30 bis 50 Jahre alt sind. Als größter Mangel hinsichtlich dieser Einwirkungsart ist das Fehlen von Kenntnissen zu einer Dosis-Wirkungs-Beziehung anzuführen.

Über die Darstellung der verschiedenen Schalleinwirkungsarten hat diese Arbeit deutlich gemacht, dass in der messtechnischen Praxis sensibler mit der Auswahl geeigneter Messtechnik und Messstrategien umgegangen werden muss. Für die Lärmmessung an Arbeitsplätzen mit Ultraschalleinwirkung sind Schalldosimeter und Handschallpegelmessgeräte der Genauigkeitsklasse 2 nicht geeignet. Handschallpegelmessgeräte der Genauigkeitsklasse 1 können an derartigen Arbeitsplätzen zur Messung der unbewerteten Hörschallexposition eingesetzt werden. Die erhobenen Messdaten sind dann jedoch vor der Beurteilung manuell nachzubearbeiten. Dafür kann das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Excel-Tool verwendet werden. Mit dem Erscheinen der Richtlinie VDI 3766 im Herbst 2012 wurden die technischen Anforderungen an Messsysteme zur Messung von Ultraschalleinwirkungen normiert. Ein wirkliches Angebot von entsprechenden feldtauglichen Messsystemen gibt es bis heute noch nicht auf dem Markt.

Die Auflistung der in Deutschland vorhandenen Beurteilungskriterien für gehörgefährdenden Lärm am Arbeitsplatz zeigte, dass sich das staatliche Vorschriften- und Regelwerk strikt auf die Betrachtung von Einwirkungen im Hörschallbereich beschränkt. Im Bereich der Normen und Richtlinien existiert in Deutschland für die Einwirkung von Ultraschall und seinen

Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich nur ein fast 30 Jahre alter Grenzwert aus der Richtlinie VDI 2058 Blatt 2, der sich jedoch lediglich auf die 20-kHz-Terzmittenfrequenz bezieht. In VDI 3766, die sich laut Titel mit der Messung, Bewertung, Beurteilung und Minderung von Ultraschall am Arbeitsplatz beschäftigt, wird der vorliegende Ultraschall mit dem AU-Filter ausgeblendet und mittels eines definierten Richtwertes nur die verbleibende Hörschallexposition zur Vermeidung von Hörminderungen im Sprachfrequenzbereich beurteilt. Zusätzlich enthält diese Richtlinie einen Richtwert zur Beurteilung der Peak-Einwirkungen im definierten Z-bewerteten Frequenzbereich. Mit der durchgeführten Literaturrecherche sowie einem internationalen Vergleich der vorhandenen deutschen Beurteilungskriterien konnte dargelegt werden, dass in Deutschland die Beurteilungskriterien nicht den wissenschaftlichen Kenntnisstand zu den auralen Wirkungen des Ultraschalls und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich abdecken. Hierzu wurden zwei von den derzeitigen Beurteilungskriterien abweichende Ansätze zur Beurteilung von luftgeleitetem Ultraschall und seinen Begleiterscheinungen im Hochfrequenzbereich vorgestellt und im Rahmen einer durchgeführten Messserie diskutiert.

In dieser Messserie wurden insgesamt 43 Bediener-Arbeitsplätze an Ultraschall-Schweißmaschinen untersucht. Von diesen 43 Ultraschall-Schweißmaschinen wurden 31 ohne Schallschutzeinrichtung betrieben. An 22 dieser 31 Ultraschall-Schweißmaschinen ohne Schallschutzeinrichtungen (entspricht 71 %) wurde eine Grenz- oder Richtwertüberschreitung festgestellt. Im Gegenzug dazu konnte an keiner der verbleibenden zwölf Ultraschall-Schweißmaschinen mit Schallschutzeinrichtung eine Grenz- oder Richtwertüberschreitung dokumentiert werden. Nach der Diskussion der Beurteilungskriterien anhand der Ergebnisse der Messserie hat sich der Verfasser dieses Reports für den von *Maue* vorgeschlagenen Beurteilungsansatz ausgesprochen. Als ein weiteres Ergebnis der Messserie ist die Besonderheit der 16-kHz-Terzmittenfrequenz anzuführen. Mit den Messergebnissen konnte belegt werden, dass es an dieser Stelle im Frequenzspektrum durch den Richtwert der VDI 3766 ($L_{EXAU,8h} = 85 \text{ dB}$) zu einer Unterschätzung der Hörschallexposition im Sinne der LärmVibrationsArbSchV kommen kann.

Bezogen auf die Gefährdungsbeurteilung im Sinne der LärmVibrationsArbSchV fehlen staatliche Definitionen dafür, mit welchen Schallpegelgrößen die Hörschallexposition an derartigen Arbeitsplätzen zu beurteilen ist und wie ein entsprechender Tages-Lärmexpositionspegel berechnet wird, wenn Beschäftigte verschiedene Tätigkeiten mit und ohne Ultraschalleinwirkung ausführen.

Das Ergebnis der Messserie in Verbindung mit den Ausführungen zu sekundären Schallschutzmaßnahmen sowie die bestehenden Unsicherheiten hinsichtlich organisatorischer und persönlicher Schutzmaßnahmen bekräftigen die Forderung, Ultraschall-Schweißmaschinen bereits herstellereitig nur mit einer Kapselung zu vertreiben.

Insgesamt gesehen ist mit dieser Arbeit die gesamte Thematik der Ultraschalleinwirkungen am Arbeitsplatz bezogen auf die auralen Wirkungen, die geeignete Messtechnik, die Beurteilungskriterien und die Schutzmaßnahmen wissenschaftlich aufgearbeitet worden. Eine umfangreiche Messserie bestätigte die Notwendigkeit dieser Diskussion. Viele Fragen konnten im Verlauf dieser Arbeit beantwortet werden, es blieben auf der anderen Seite aber auch viele Fragen unbeantwortet. Die Arbeit eignet sich insbesondere zur Sensibilisierung der Öffentlichkeit und gibt viele Ansatzpunkte zur weiteren Diskussion und Forschung.

Zum Aufbau einer möglichst breit aufgestellten und gesicherten Datenbasis sollten weitere industriell genutzte Ultraschalltechnologien (z. B. Ultraschall-Reinigungsbäder und Anlagen, Ultraschall-Schneidemaschinen), bezüglich ihrer Schallimmission auf das Bedienerpersonal, ausführlich messtechnisch untersucht werden.

Im Jahr 1980 beschrieb *Veit* [60] es als verfrüht, konkrete Vorschläge für eine Richtlinie oder Vorschrift zum Umgang mit ultraschallabstrahlenden Maschinen, Geräten oder Anlagen zu unterbreiten. Vielleicht kann diese Arbeit 35 Jahre später auf staatlicher Seite dazu anregen, über die Erstellung einer entsprechenden Technischen Regel nachzudenken. Die Notwendigkeit dazu konnte mit dieser Arbeit aufgezeigt werden.

Literatur

- [1] *Maue, J. H.*: Messung und Beurteilung von Ultraschallgeräuschen am Arbeitsplatz. Technische Sicherheit 2 (2012) Nr. 7/8, S. 51-55
- [2] *Wolff, A.*: Luftgeleiteter Ultraschall am Arbeitsplatz. Technische Sicherheit 4 (2014) Nr. 6, S. 14-17
- [3] Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung – LärmVibrationsArbSchV). BGBl. I (2007), S. 261
- [4] Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung – TRLV Lärm – Teil: Allgemeines. GMBL (2010) Nr. 18-20 vom 23. März 2010, S. 359-362
- [5] VDI 2058 Blatt 2: Beurteilung von Lärm hinsichtlich Gehörgefährdung. Beuth, Berlin 1988
- [6] VDI 3766: Ultraschall – Arbeitsplatz – Messung, Bewertung, Beurteilung und Minderung. Beuth, Berlin 2012
- [7] *Tipler, P. A.; Gerlich, D.*: Physik. 3. korrigierter Nachdruck der 1. Auflage 1994. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag (Spektrum Lehrbuch) 2000
- [8] *Maue, J. H.*: 0 Dezibel + 0 Dezibel = 3 Dezibel. Einführung in die Grundbegriffe und die quantitative Erfassung des Lärms. 9. Aufl. Erich Schmidt, Berlin 2009
- [9] DIN 1320: Akustik – Begriffe. Beuth, Berlin 2009
- [10] *Borgmann, R.*: Leitfaden „Nichtionisierende Strahlung“ – Infraschall (FS-05-136-AKNIR). Hrsg.: Fachverband für Strahlenschutz e. V., 2005. http://osiris22.pi-consult.de/userdata/l_20/p_105/library/data/fs-05-136-aknir_infraschall.pdf, zuletzt geprüft am 2.5.2016
- [11] *Lerch, R.; Sessler, G.; Wolf, D.*: Technische Akustik. Grundlagen und Anwendungen. 1. Aufl. Berlin, Springer 2008
- [12] *Sinambari, G. R.; Sentpali, S.*: Ingenieurakustik. Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele. Unter Mitarbeit von Frieder Kunz. 5. Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden 2014
- [13] *Maue, J. H.*: Lärmessung im Betrieb. Anleitung zur normgerechten Ermittlung der Lärmexposition am Arbeitsplatz und der Geräuschemission von Maschinen. Erich Schmidt, Berlin 2011
- [14] DIN 45641: Mittelung von Schallpegeln. Beuth, Berlin 1990
- [15] ISO 1999: Acoustics – Estimation of noise-induced hearing loss. Beuth, Berlin 2013
- [16] DIN EN ISO 9612: Akustik – Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz – Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 (Ingenieurverfahren). Beuth, Berlin 2009
- [17] *Feldmann, H.; Brusis, T.*: Das Gutachten des Hals-Nasen-Ohren-Arztes. 7. Aufl. Georg Thieme, Stuttgart 2012
- [18] *Weber, W.*: Arbeitssicherheit. Historische Beispiele, aktuelle Analysen. Originalausgabe. Rowohlt, Reinbek bei Hamburg 1988
- [19] Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit 2013. Unfallverhütungsbericht Arbeit. Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund 2014. www.baua.de/suga
- [20] „Lärm-Stress“ am Arbeitsplatz. Nicht das Innenohr betreffende, extra-aurale Lärmwirkungen (DGUV-Information, FB-HM-018). Hrsg.: Fachbereich Holz und Metall der DGUV, Mainz 2013. www.dguv.de, Webcode: d130288
- [21] *Sorge, G.*: Faszination Ultraschall. 1. Aufl. Stuttgart: Teubner (Einblicke in die Wissenschaft) 2002
- [22] *Smagowska, B.*: Ultrasonic noise sources in a work environment. Arch. Acoust. 38 (2013) Nr. 2, S. 169-176
- [23] *Lips, W.; Hohmann, B.*: Ultraschallanlagen als Lärmquellen. 2. Aufl. Hrsg.: Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (Suva), Luzern, Schweiz 1997
- [24] *Bandelin, S.*: Niederfrequenter Ultraschall. Grundlagen, Technik, Anwendungen. Verlag Moderne Industrie, Landsberg am Lech 2006
- [25] *Koch, R.*: Zitat: Eines Tages wird der Mensch den Lärm ... www.aphorismen.de/zitat/183125, zuletzt geprüft 2.5.2016
- [26] *Griefahn, B.*: Lärmwirkungen. Arbeitsmed. Sozialmed. Umweltmed. 48 (2013) Nr. 6, S. 294-297
- [27] *Mehrtens, G.; Valentin, H.; Schönberger, A.*: Arbeitsunfall und Berufskrankheit. Rechtliche und medizinische Grundlagen für Gutachter, Sozialverwaltung, Berater und Gerichte. 8. Aufl. Erich Schmidt, Berlin 2010
- [28] Pschyrembel Klinisches Wörterbuch (2015). 266. Aufl. de Gruyter, Berlin 2014
- [29] DIN EN 60645-1: Akustik – Audiometer Teil 1: Reinton-Audiometer. Beuth, Berlin 2002
- [30] DIN EN ISO 8253-1: Akustik. Audiometrische Prüfverfahren – Teil 1: Grundlegende Verfahren der Luft- und Knochenleitungs-Schwelldenaudiometrie mit reinen Tönen. Beuth, Berlin 2011

- [31] DIN EN 60645-4: Audiometer – Teil 4: Geräte für die Audiometrie in einem erweiterten Hochtonbereich. Beuth, Berlin 1995
- [32] *Schwarze, S.; Notbohm, G.; Gärtner, C.*: Hochtonaudiometrie und lärmbedingter Hörschaden. Ein Beitrag zur Prävention durch Früherkennung eines vulnerablen Gehörs? Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Forschung, Fb 1063. Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund 2005. Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft, Bremerhaven 2005
- [33] *Ahmed, H. O.; Dennis, J. H.; Badran, O.; Ismail, M.; Ballal, S. G.; Ashoor, A.; Jerwood, D.*: High-frequency (10-18 kHz) hearing thresholds: reliability, and effects of age and occupational noise exposure. *Occup. Med.* 51 (2001) Nr. 4, S. 245-258
- [34] *Singh, R.; Saxena, R.; Varshney, S.*: Early detection of noise induced hearing loss by using ultra high frequency audiometry. *Internet J. Otorhinolaryng.* 10 (2008) Nr. 2. <http://ispub.com/IJORL/10/2/4039>, zuletzt geprüft am 2.5.2016
- [35] *Lopes, A. C.; Otubo, K. A.; Basso, T. C.; Marinelli, E. J. I.; Lauris, J. R. P.*: Occupational hearing loss: tonal audiometry x high frequencies audiometry. *Int. Arch. Otorinolaryngol.* 13 (2009) Nr. 3, S. 293-299
- [36] *Mehrpavar, A. H.; Mirmohammadi, S. J.; Ghoreyshi, A.; Mollasadeghi, A.; Loukazadeh, Z.*: High-frequency audiometry: a means for early diagnosis of noise-induced hearing loss. *Noise & Health* 13 (2011) Nr. 55, S. 402-406. DOI: 10.4103/1463-1741.90295
- [37] *Lopes, A. C.; Pasarelli de Melo, A. D.; Santos, C. C.*: A study of the high-frequency hearing thresholds of dentistry professionals. In: *Int. Arch. Otorinolaryngol.* 16 (2012) Nr. 2, S. 226-231. DOI: 10.7162/S1809-97772012000200012
- [38] *Maccá, I.; Scapellato, M. L.; Carrieri, M.; Maso, S.; Trevisan, A.; Bartolucci, G. B.*: High-frequency hearing thresholds: effects of age, occupational ultrasound and noise exposure. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* (2014) DOI: 10.1007/s00420-014-0951-8
- [39] *Schwarze, S.; Notbohm, G.*: Früherkennung eines lärmbedingten Hörschadens mit Hilfe der Hochtonaudiometrie? *Prakt. Arbeitsmed.* 6 (2006), S. 26-30. www.bsafb.de/fileadmin/downloads/pa_6_12_2006/pa6_12_2006_frueherkennung_eines_laermbedingten_hoerschadens.pdf, zuletzt geprüft am 2.5.2016
- [40] *Lawton, B. W.*: Damage to human hearing by airborne sound of very high frequency or ultrasonic frequency. Contract Research Report 343/2001. Hrsg.: Health and Safety Executive, Great Britain 2001
- [41] *Sliwinski, A.*: Assessment of ultrasonic noise hazard in workplaces environment. *Arch. Acoust.* 38 (2013) Nr. 2, S. 243–252.
- [42] *Zubick, H. H.; Tolentino, A. T.; Boffa, J.*: Hearing loss and the high speed dental handpiece. *Am. J. Publ. Health* 70 (1980) Nr. 6, S. 633-635
- [43] *Khan, A. A.; Qasmi, S. A.; Askari, H.; Shakoor, S.; Junejo, S. B.*: Prevalence of noise induced hearing loss among dentists working in Karachi, Pakistan. *Pakistan Oral Dental J.* 34 (2014) Nr. 1, S. 174-177. www.podj.com.pk/March_2014/PODJ-39.pdf, zuletzt geprüft am 2.5.2016
- [44] *Kusserow, H.*: Lärmexposition und Schutzmaßnahmen in Dentallaboren. Informationsveranstaltung „Arbeitsschutz in der Dentaltechnik“. Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse, Köln 2014
- [45] *Brusis, T.; Hilger, R.; Niggeloh, R.; Huedepohl, J.; Thiesen, K.-W.*: Besteht beim Zahnarzt oder beim Zahntechniker die Gefahr einer lärmbedingten Gehörschädigung? *Laryngo-Rhino-Otologie* 87 (2008) Nr. 5, S. 335-340. DOI: 10.1055/s-2007-995328
- [46] *Akbarkhanzadeh, F.*: Effects of high-speed drill noise on dentists' hearing. *Iran. J. Publ. Health.* 7 (1978) Nr. 4, S. 168-179
- [47] *Rahko, A. Al-L.; Karma, P. H.; Rahko, K. T.; Kataja, M. J.*: High-frequency hearing of dental personnel. *Community Dent. Oral Epidemiol.* 16 (1988), S. 268-270
- [48] *Setcos, J. C.; Mahyuddin, A.*: Noise levels encountered in dental clinical and laboratory practice. *Int. J. Prosthodont.* 11 (1998) Nr. 2, S. 150-157
- [49] *Szymanska, J.*: Work-related noise hazards in the dental surgery. *Ann. Agric. Environ. Med.* 7 (2000) Nr. 2, S. 67-70
- [50] *Rytkönen, E.*: High-frequency vibration and noise in dentistry. Doctoral dissertation. University of Kuopio, Kuopio. Department of Environmental Sciences, 2005.
- [51] *Sampaio Fernandes, J. C.; Carvalho, A. P. O.; Gallas, M.; Vaz, P.; Matos, P. A.*: Noise levels in dental schools. *Eur. J. Dent. Educ.* 10 (2006) Nr. 1, S. 32-37
- [52] *Dogan, D. Ö.; Cetin, B.; Özdemir, A. K.; Dogan, M.; Polat, T.; Müderris, S.*: Prevalence of hearing loss on dental laboratory technicians exposed to noise. *Anatol. J. Clin. Investig.* 2 (2008) Nr. 3, S. 113-117
- [53] *Mojarad, F.; Massum, T.; Samavat, H.*: Noise levels in dental offices and laboratories in Hamedan, Iran. *J. Dent. (Tehran)* 6 (2009) Nr. 4, S. 181-186
- [54] *Kumar, P. R.; Sharma, P.; Kalavathy, N.; Kashinath, K. R.*: Hearing damage and its prevention in dental practice. *J. Dent. Sci. Res.* 2 (2011) Nr. 2, S. 32-35

- [55] *Singh, S.; Gambhir, R. S.; Singh, G.; Sharma, S.; Kaur, A.*: Noise levels in a dental teaching institute – A matter of concern! *J. Clin. Exp. Dent.* 4 (2012) Nr. 3, S. 141-145. DOI: 10.4317/jced.50725
- [56] *Nazia Aziz, A.; Fajar, U.; Girishraj; Sameer, K. M.*: Noise induced hearing loss in dental professionals: An audiometric analysis of dental professionals. *IOSR J. Dent. Med. Sci.* 11 (2013) Nr. 3, S. 29-31
- [57] *Johnson, K. B.; Smurzynski, J.; Fagelson, M.; Elangovan, S.*: Hearing loss in the dental office: The effects of high-speed dental drills on dentists' hearing. Department of Audiology and Speech-Language Pathology, East Tennessee State University, Johnson City, TN, USA 2013. www.hearingconservation.org/associations/10915/files/Krisztina_Poster_dentisthearingloss_FINAL.pdf, zuletzt geprüft am 2.5.2016
- [58] *Loutify, Q.; Ibrahim, O.*: Noise levels of dental equipment used in dental college of Damascus University. *Dent. Res. J.* 11 (2014) Nr. 6, S. 624-630
- [59] *Maue, J. H.*: Ermittlung der Lärmexposition mit Hilfe von Schalldosimetern (Kennzahl 210 215). In: IFA-Handbuch Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz. 2. Aufl. 2003. Lfg. 48, V/2006. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin. Erich Schmidt – Berlin 2003 – Losebl.-Ausg. www.ifa-handbuchdigital.de/210215
- [60] *Veit, I.*: Wirkung von Ultraschall auf das Gehör. Bestandsaufnahme. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Forschung, Fb 231. Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund 1980. Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft, Bremerhaven 1980
- [61] *Willershausen, B.; Callaway, A.; Wolf, T. G.; Ehlers, V.; Scholz, L.; Wolf, D.; Letzel, S.*: Hearing assessment in dental practitioners and other academic professionals from an urban setting. *Head Face Med.* 10 (2014) Nr. 1. www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4029368/pdf/1746-160X-10-1.pdf, zuletzt geprüft am 2.5.2016
- [62] *Nassiri, P.; Golbabai, F.; Mahmoudi, M.*: The effect of noise-induced hearing loss on dentists. *Med. J. Islam. Repub. Iran* 7 (1993) Nr. 2, S. 83-86
- [63] *Lehto, T. U.; Laurikainen, E. T.; Aitasalo, K. J.; Pietilä, T. J.; Helenius, H. Y. M.; Johansson, R.*: Hearing of dentists in the long run: a 15-year follow-up study. *Community Dent. Oral Epidemiol.* 17 (1989), S. 207-211
- [64] *Ünlü, A.; Böke, B.; Belgin, E.; Sarmadi, H.*: Effect of equipment used in laboratory environment on dental technicians' hearing threshold. *J. Islam. Acad. Sci.* 7 (1994) Nr. 4, S. 237-240
- [65] *Dickson, E. D. D.*: Some effects of intense sound and ultrasound on the ear. *Proc. R. Soc. Med.* 46 (1952), S. 139-148
- [66] *Acton, W. I.; Carson, M. B.*: Auditory and subjective effects of airborne noise from industrial ultrasonic sources. *Brit. J. Ind. Med.* 24 (1967) Nr. 4, S. 297-304
- [67] *Acton, W. I.*: The effects of industrial airborne ultrasound on humans. *Ultrasonics* (1974), S. 124-128
- [68] Guidelines for the safe use of ultrasound: Part II – Industrial and commercial applications. Safety Code 24. Hrsg.: Canadian Communication Group. Minister of Supply and Services, Ottawa, Canada 1991
- [69] *Schust, M.*: Biologische Wirkung von luftgeleitetem Ultraschall. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Literaturdokumentation, Ld 4. Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund. Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft, Bremerhaven 1996.
- [70] *Howard, C. Q.; Hansen, C. H.; Zander, A. C.*: A review of current ultrasound exposure limits. Hrsg.: School of Mechanical Engineering, The University of Adelaide, Australia 2004
- [71] *Ashihara, K.; Kurakata, K.; Mizunami, T.; Matsushita, K.*: Hearing threshold for pure tones above 20 kHz. *Acoust. Sci. Technol.* 27 (2006) Nr. 1, S. 12-19
- [72] *Lenhardt, M. L.* (Hrsg.): Airborne ultrasonic standards for hearing protection. 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN) 2008. Foxwoods, CT. Virginia Commonwealth University, Richmond, Virginia, USA 2008
- [73] *Sánchez Márquez, J.-S.; Deml, B.; Böckelmann, I.*: Arbeitssicherheit beim Einsatz ultraschallbasierter Technologien. *Technische Sicherheit* 1 (2011) Nr. 3, S. 51-53
- [74] *Grzesik, J.; Pluta, E.*: High-frequency hearing risk of operators of industrial ultrasonic devices. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 53 (1983), S. 77-88
- [75] *Grzesik, J.; Pluta, E.*: Dynamics of high-frequency hearing loss of operators of industrial ultrasonic devices. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 57 (1986), S. 137-142
- [76] *Grzesik, J.; Pluta, E.*: High-frequency-noise-induced hearing loss: a field study on the role of intensity level and accumulated noise dose. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 57 (1986), S. 127-136
- [77] *Wilson, J. D.; Darby, M. L.; Tolle, S. L.; Sever, J. C.*: Effects of occupational ultrasonic noise exposure on hearing of dental hygienists: a pilot study. *J. Dent. Hyg.* 76 (2002) Nr. 4, S. 262-269
- [78] *Howard, C. Q.; Hansen, C. H.; Zander, A. C.* (Hrsg.): Review of current recommendations for airborne ultrasound exposure limits. Acoustics 2005. Busselton, Western Australia, 9.-11.11.2005. School of Mechanical Engineering, The University of Adelaide (Adelaide, Australia): Australian Acoustical Society 2005

- [79] *Pawlaczyk-Luszczynska, M.; Dudarewicz, A.; Sliwinska-Kowalska, M.*: Theoretical predictions and actual hearing threshold levels in workers exposed to ultrasonic noise of impulsive character – A pilot study. *Int. J. Occup. Saf. Ergo.* 13 (2007) Nr. 4, S. 409-418
- [80] *Lenhardt, M. L.*: Ultrasonic hearing in humans: Applications for tinnitus treatment. *Int. Tinnitus J.* 9 (2003) Nr. 2
- [81] *Morgan, S.*: OSHEU Guidance Document NIRP1 – Ultrasonic Radiation. Cardiff University 2010
- [82] *Smagowska, B; Pawlaczyk-Luszczynska, M.*: Effects of ultrasonic noise on the human body – a bibliographic review. *Int. J. Occup. Saf. Ergo.* 19 (2013) Nr. 2, S. 195-202. DOI: 10.1080/10803548.2013.11076978
- [83] *Smagowska, B.*: An objektive and subjektive study of noise exposure within the frequency range from 10 kHz to 40 kHz. *Arch. Acoust.* 38 (2013) Nr. 4, S. 559-563
- [84] *Mikulski, W.; Smagowska, B.*: Ultrasonic noise from ultrasonic drills. *Acustica 2008* (Coimbra, Portugal). www.sea-acustica.es/fileadmin/Coimbra08/id005.pdf, zuletzt geprüft am 2.5.2016
- [85] *Hecker, C.; Drechsel-Schlund, C.; Francks, H.-P.; Plinske, W.; Butz, M.*: Dokumentation des Berufskrankheiten-Geschehens in Deutschland. Daten und Fakten zu Berufskrankheiten: – Lärmschwerhörigkeit – Durch Infektionserreger oder Parasiten verursachte Krankheiten. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin 2008. www.dguv.de/medien/inhalt/zahlen/documents/datenfakten2008.pdf, zuletzt geprüft am 2.5.2016
- [86] Berufskrankheiten-Verordnung vom 31. Oktober 1997. BGBl. I (1997) S. 2623-2626; zul. geänd. durch Artikel 1 der Verordnung vom 22. Dezember 2014, BGBl. I (2014), S. 2397
- [87] Siebtes Buch Sozialgesetzbuch SGB VII, vom 30.07.2014 (01.01.1997). BGBl. I (1996), S. 1254-1317
- [88] Merkblatt zu der Berufskrankheit Nr. 2301 der Anlage zur Berufskrankheiten-Verordnung: Lärmschwerhörigkeit. Hrsg.: Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS). GMBL. (2008) Nr. 39, S. 798-800. www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Berufskrankheiten/pdf/Merkblatt-2301.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 2.5.2016
- [89] Empfehlung für die Begutachtung der Lärmschwerhörigkeit (BK-Nr. 2301). Königsteiner Empfehlung. 2. Aufl. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin 2012. <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/koenig1.pdf>, zuletzt geprüft am 2.5.2016
- [90] *Jürgens, W. W.*: „Lärmschwerhörigkeit“ – Aspekte aus arbeitsmedizinisch-gewerbeärztlicher Sicht. VIII. Lärmkonferenz, Cottbus, 15.11.2001. http://lavg.brandenburg.de/media_fast/4055/laermschwerhoerigkeit.pdf, zuletzt geprüft am 2.5.2016
- [91] *Jansing, P.-J.*: Problem gelöst? – Berufliche Lärmschwerhörigkeit aus Sicht des Gewerbeärztes. *Arbeitsmed. Sozialmed. Umweltmed.* 48 (2013) Nr. 12, S. 760-764
- [92] *Ebner, M.; Schütz, T.*: Die Lärm- und Vibrations-Arbeitschutzverordnung. Praxisleitfaden zur Umsetzung. 1. Aufl. Beuth, Berlin 2010
- [93] Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitschutzverordnung – TRLV Lärm – Teil 2: Messung von Lärm. GMBL. (2010) Nr. 18-20, S. 378-383
- [94] *Möser, M.*: Messtechnik der Akustik. Springer, Heidelberg 2010
- [95] DIN EN 61260-1: Elektroakustik – Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven – Teil 1: Anforderungen. Beuth, Berlin 2014
- [96] 1/2-Inch prepolarized, free-field microphone type 40AE. Product Data and Specifications. Hrsg.: G.R.A.S. Sound & Vibration, Holte, Dänemark 2010. www.gras.dk/40AE.html, zuletzt geprüft am 2.5.2016
- [97] DIN EN 61672-1: Elektroakustik – Schallpegelmesser – Teil 1: Anforderungen. Beuth, Berlin 2014
- [98] *Möser, M.*: Technische Akustik. 9. Aufl. Springer, Berlin 2012
- [99] DIN EN 61012: Filter für die Messung von hörbarem Schall im Beisein von Ultraschall. Beuth, Berlin 1998
- [100] Infrasound and ultrasound filter set type 1627. Instruction manual. Hrsg.: Brüel & Kjaer 1985
- [101] DIN EN 61252: Elektroakustik – Anforderungen an Personenschalllexposimeter. Beuth, Berlin 2003
- [102] DIN EN 61672-1: Elektroakustik – Schallpegelmesser – Teil 1: Anforderungen. Beuth, Berlin 2003
- [103] Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG). BGBl. I (1996), S. 1246-1253
- [104] Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitschutzverordnung – TRLV Lärm – Teil 1: Beurteilung der Gefährdung durch Lärm. GMBL. (2010) Nr. 18-20, S. 362-378
- [105] *Liedtke, M.*: Akute Gehörschäden durch extrem hohe Schalldruckpegel. *HNO* 58 (2010) Nr. 2, S. 106-109. DOI: 10.1007/s00106-009-2059-0
- [106] *Brendel, K.; Lohr, R.*: Leitfaden „Nichtionisierende Strahlung“ – Ultraschall. FS-05-137-AKNIR. Hrsg.: Fachverband

- für Strahlenschutz e.V., 2005. http://osiris22.pi-consult.de/userdata/l_20/p_105/library/data/fs-05-137-aknir_ultraschall.pdf, zuletzt geprüft am 2.5.2016
- [107] *Liedtke, M.*: Effektive Lärmdosis basierend auf Hörminderungsäquivalenzen nach ISO 1999. *Arbeitsmed. Sozialmed. Umweltmed.* 45 (2010) Nr. 11, S. 612-623
- [108] *Liedtke, M.*: Die Effektive Lärmdosis (ELD) – Grundlagen und Verwendung. *Zbl. Arbeitsmed.* 63 (2013), S. 66-79
- [109] TGL 32 630/06, Juni 1986: Arbeitshygiene – Ultraschall am Arbeitsplatz – Grenzwerte, Messung und Bewertung
- [110] *Lawton, B. W.*: Exposure limits for airborne sound of very high frequency and ultrasonic frequency. ISVR Technical Report No. 334. University of Southampton, Institute of Sound & Vibration Research 2013
- [111] Interim guidelines on limits of human exposure to airborne ultrasound. International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association. *Health Physics* 46 (1984) Nr. 4, S. 969-974
- [112] *Maue, J. H.*: Messung und Beurteilung von Ultraschallgeräuschen am Arbeitsplatz. In: DAGA 2012. 38. Jahrestagung für Akustik. 19.-22. März 2012. Darmstadt. S. 487-488
- [113] Ist Ultraschall gesundheitsschädlich? Hrsg.: Herrmann Ultraschall GmbH & Co. KG. www.herrmannultraschall.com/de/faqs, zuletzt geprüft am 2.5.2016
- [114] Inwiefern besteht für den Bediener an einer Ultraschall-Schweißmaschine ein Risiko durch über die Luft übertragene Schalleistung? Dialognummer 22084. Hrsg.: Landesinstitut für Arbeitsgestaltung des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf 2014. <http://komnet.nrw.de/ccnxtg/frame/ccnxtg/danz?lid=DE&did=22084>, zuletzt geprüft am 2.5.2016
- [115] *Maue, J.*: Geräuschanalysen von Ultraschall-Schweißmaschinen. In: Aus der Arbeit des IFA (0170). Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin 2014. <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/aifa0170.pdf>, zuletzt geprüft am 2.5.2016
- [116] *Damongeot, A.; André, G.*: Noise from ultrasonic welding machines: Risks and prevention. *Appl. Acoust.* 25 (1988), S. 49-66
- [117] Ultraschall Mess-System bis 96 kHz. Hrsg.: Dr-Jordan-Design, Dresden 2015. www.akulap.de/joomla/components/com_jshopping/files/demo_products/FLYER_Ultraschall.pdf, zuletzt geprüft am 2.5.2016
- [118] AkuLap Pro. Professionelle Audio Meßtechnik. Kurzanleitung. Hrsg.: Dr-Jordan-Design, Dresden 2011. www.dr-jordan-design.de/Download/kurzanleitung_AkuLap.pdf, zuletzt geprüft am 2.5.2016
- [119] Frequenzgang Ultraschall-Messsystem. Hrsg.: Dr-Jordan-Design, Dresden 2015. www.akulap.de/joomla/index.php/de/shop/product/view/6/57, zuletzt geprüft am 2.5.2016
- [120] Dr-Jordan-Design (2015a): Verwendung der Abbildung mit freundlicher Genehmigung von Dr. *Jordan*, 09.06.2015
- [121] Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge (Arb-MedVV). BGBl. I (2008), S. 2768-2775
- [122] Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitschutzverordnung – TRLV Lärm – Teil 3: Lärmschutzmaßnahmen. GMBL. (2010) Nr. 18-20, S. 384-406
- [123] *Dobrucki, A.; Zoltogorski, B.; Pruchnicki, P.; Bolejko, R.*: Sound-absorbing and insulating enclosures for ultrasonic range. *Arch. Acoust.* 35 (2010) Nr. 2, S. 157-164
- [124] *Pleban, D.*: Method of testing of sound absorption properties of materials intended for ultrasonic noise protection. *Arch. Acoust.* 38 (2013) Nr. 2, S. 191-195. DOI: 10.2478/aoa-2013-0022
- [125] DIN EN 458: Gehörschützer – Empfehlungen für Auswahl, Einsatz, Pflege und Instandhaltung – Leitfaden (Entwurf, vorgesehen als Ersatz für DIN EN 458:2005-02). Beuth, Berlin 2013
- [126] DGUV Regel 112-194: Benutzung von Gehörschutz (Ausg. 1/2015; bisher BGR/GUV-R 194). Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin 2015. <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/112-194.pdf>, zuletzt geprüft am 2.5.2016
- [127] Allgemeine Präventionsleitlinie „Gehörschutz“. Auswahl, Bereitstellung und Benutzung. Hrsg.: Fachausschuss „Persönliche Schutzausrüstungen“ der DGUV, 2009. www.dguv.de/medien/fb-psa/de/regelwerk/leitlinien/praevleit_gehoerschutz.pdf, zuletzt geprüft am 2.5.2016
- [128] DIN EN 352, Teil 1 bis Teil 8: Gehörschützer – Allgemeine Anforderungen/Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfungen. Berlin, Beuth
- [129] *Berger, E. H.*: Protection for Infrasonic and Ultrasonic Noise Exposure (E.A.R.LOG14). Hrsg.: Aero Company, 1984. www.aearo.com/pdf/hearingcons/earlog14.pdf, zuletzt geprüft am 2.5.2016
- [130] *Crabtree, R. B.; Behar, A.*: Measurement of hearing protector insertion loss at ultrasonic frequencies. *Appl. Acoust.* 59 (2000), S. 287-299
- [131] *Maue, J. H.*: Die Bedeutung des Spitzenschalldruckpegels für die Beurteilung industrieller Arbeitsplätze. *Sicherheitsingenieur* 8 (2009), S. 52-55

Abkürzungsverzeichnis

ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
ArbMedVV	Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge
ArbSchG	Arbeitsschutzgesetz
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BIBB	Bundesinstitut für Berufsbildung
BK	Berufskrankheit
BK 2301	Berufskrankheit Nr. 2301
BKV	Berufskrankheitenverordnung
BMAS	Bundesministerium für Arbeit und Soziales
dB	Dezibel
DDR	Deutsche Demokratische Republik
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
ELD	Effektive Lärmdosis
FAQs	Frequently Asked Questions
Hz	Hertz
IFA	Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung
ILO	International Labour Office
INRC	International Non-Ionizing Radiation Committee
IRPA	International Radiation Protection Association
LärmVibrationsArbSchV	Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung
LSV-SpV	Spitzenverband der landwirtschaftlichen Sozialversicherung
MdE	Minderung der Erwerbsfähigkeit
NIHL	Noise-Induced Hearing Loss
PTS	Permanent Threshold Shift
SGB 7	Siebttes Buch des Sozialgesetzbuches
TRLV	Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung
TTS	Temporary Threshold Shift

Formelzeichen

Formelzeichen	Größe	Einheit
f	Frequenz	Hz = 1/s
f_m	Mittenfrequenz eines Frequenzbandes (Oktav oder Terz)	Hz = 1/s
f_o	Obere Durchlassfrequenz eines Frequenzbandes	Hz = 1/s
f_u	Untere Durchlassfrequenz eines Frequenzbandes	Hz = 1/s
$L_{EX,8h}$	Tages-Lärmexpositionspegel	dB
$L_{EXAU,8h}$	AU-bewerteter Tages-Lärmexpositionspegel	dB
$L_{EXZ, Terz, 8h}$	Z-bewerteter Tages-Lärmexpositions-Terzschalldruckpegel	dB
L_N	Lautstärkepegel	phon
$L_{(t)}$	Schallpegel zur Zeit „t“	dB
L_p	Schalldruckpegel	dB
L_{pA}	A-bewerteter Schalldruckpegel	dB
L_{pAeq}	A-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel	dB
$L_{pAeq, Hfb}$	A-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel, begrenzt auf den Hörfrequenzbereich (16 Hz bis 16 kHz) (siehe Anhang B)	dB
L_{pAeqTe}	A-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel über die Zeit T_e	dB
$L_{pAeq, Terz}$	A-bewerteter äquivalenter Terzschalldruckpegel	dB
L_{pAF}	A-bewerteter Schalldruckpegel, Zeitbewertung „F“	dB
L_{pAl}	A-bewerteter Schalldruckpegel, Zeitbewertung „I“	dB
L_{pAeq}	A-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel, Zeitbewertung „I“	dB
L_{pAlmax}	Maximaler A-bewerteter Schalldruckpegel, Zeitbewertung „I“	dB
L_{pAUeq}	AU-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel	dB
$L_{pAUeq-M}$	AU-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel, gemessen (siehe Anhang D)	dB
$L_{pAUeq-R}$	AU-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel, berechnet (siehe Anhang D)	dB
L_{pCpeak}	C-bewerteter Spitzenschalldruckpegel, Zeitbewertung „peak“	dB
L_{peq}	Äquivalenter Dauerschalldruckpegel	dB
L_{pF}	Schalldruckpegel, Zeitbewertung „F“	dB
$L_{pFeq, 8h, Terz}$	Äquivalenter Terzschalldruckpegel über einen 8 Stunden-Zeitraum, Zeitbewertung „F“	dB
$L_{pFeq, 8h, Terz 20kHz}$	Äquivalenter Dauerschalldruckpegel über einen 8 Stunden-Zeitraum für die 20-kHz-Terz, Zeitbewertung „F“	dB
$L_{pFmax, Terz}$	Maximaler Terzschalldruckpegel, Zeitbewertung „F“	dB
$L_{pFmax, Terz 20kHz}$	Maximaler Schalldruckpegel für die 20 kHz-Terz, Zeitbewertung „F“	dB
L_{pI}	Schalldruckpegel, Zeitbewertung „I“	dB
L_{pmax}	Maximaler Schalldruckpegel	dB
L_{ppeak}	Spitzenschalldruckpegel, Zeitbewertung „peak“	dB
L_{pS}	Schalldruckpegel, Zeitbewertung „S“	dB
$L_{pULTRAeq}$	Ultra-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel	dB
L_{pZeq}	Z-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel	dB
$L_{pZeq, Terz}$	Z-bewerteter äquivalenter Terzschalldruckpegel	dB
$L_{pZeq, Terz 10kHz}$	Z-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel für die 10-kHz-Terz	dB
$L_{pZeq, Terz 20kHz}$	Z-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel für die 20-kHz-Terz	dB
$L_{pZeq, Terz 40kHz}$	Z-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel für die 40-kHz-Terz	dB
$L_{pZeq, Terz, 5min}$	Z-bewerteter maximaler 5 Minuten-Terzschalldruckpegel	dB
$L_{pZeq, Terz 16kHz, 5min}$	Z-bewerteter maximaler 5 Minuten-Dauerschalldruckpegel für die 16-kHz-Terz	dB
L_{pZmax}	Maximaler Z-bewerteter Schalldruckpegel	dB
L_{pZpeak}	Z-bewerteter Spitzenschalldruckpegel, Zeitbewertung „peak“	dB
p	Schalldruck	Pa = N/m ²
p_0	Schalldruck an der Hörschwelle (= $2 \cdot 10^{-5}$ Pa)	Pa = N/m ²

Formelzeichen

Formelzeichen	Größe	Einheit
T	Dauer einer Periode, Messdauer	s; min; h
T_e	Effektive Dauer des Arbeitstages (Arbeitsschicht)	s; min; h
T_0	Bezugszeitdauer ($T_0 = 8 \text{ h}$)	s; min; h
τ	Zeitkonstante	s

Anhang A: Unterscheidungsmerkmale akuter Gehörschäden

Tabelle A.1:
Unterscheidungsmerkmale akuter Gehörschäden [5; 17; 27; 105; 131]

Akuter Gehörschaden	Merkmale	Verursachender Schalldruckpegel
Knalltrauma	<ul style="list-style-type: none"> • Dauer der Einwirkung: ca 1 bis 3 ms • Schädigung des Innenohrs (Haarzellschädigung) • Schädigung beidseitig, oft auf dem der Schallquelle zugewandtem Ohr stärker ausgeprägt, Tinnitus möglich • Audiometerkurve hat eine mehr oder weniger breite Senke mit einem Maximum bei 4 bis 6 kHz bzw. einen Schrägabfall bei starker Schädigung • Vollständige Ertaubung kommt nicht vor • Vorübergehende Vertäubung und Tinnitus im Bereich des Schalldruckpegel-Grenzwertes möglich • Beispielhafte Einwirkungen: Schusswaffen, Bolzenschussgeräte, Platzen von Druckschläuchen oder Druckbehälter, Explosion von Knallkörpern, auslösender Airbag • Einwirkung gilt als Arbeitsunfall 	$L_{pAmax} > 135 \text{ dB}$ $L_{pCpeak} > 150 \text{ dB}$
Explosionstrauma	<ul style="list-style-type: none"> • Dauer der Einwirkung: $> 3 \text{ ms}$ • Schädigung des Mittel- und Innenohrs • Schäden können ein oder beidseitig sein, meist Trommelfellruptur, Gehörknöchelchen können beschädigt sein, es gibt auch Fälle ohne Innenohrschädigung • Audiometerkurve meist keine C_5-Senke, häufiger tritt ein Steilabfall oder flacher Verlauf auf • Vollständige Ertaubung auf einem Ohr möglich • Vorübergehende Vertäubung und Tinnitus im Bereich des Schalldruckpegel-Grenzwerte möglich • Beispielhafte Einwirkungen: Explosionen, Sprengungen, Platzen großer Druckbehälter, Blitzschlag • Einwirkung gilt als Arbeitsunfall 	$L_{pAmax} > 135 \text{ dB}$ $L_{pCpeak} > 150 \text{ dB}$
Akutes Lärmtrauma	<ul style="list-style-type: none"> • Dauer der Einwirkung: mehrere Minuten/Stunden • Befund einer beidseitigen fortgeschrittenen Lärmschwerhörigkeit • Vollständige Ertaubung möglich • Vorübergehende Vertäubung und Tinnitus im Bereich des Schalldruckpegel-Grenzwertes und/oder kürzerer Einwirkungszeit möglich • Beispielhafte Einwirkungen: ausströmende Gase/Dämpfe • Einwirkung gilt als Berufskrankheit Nr. 2301 	$L_{pAeqx} > 120 \text{ dB}$ $L_{pCpeak} > 135 \text{ dB}$
Akustischer Unfall	<ul style="list-style-type: none"> • Akuter Hörverlust auf einem Ohr • Tritt in Verbindung mit einer verdrehten Zwangshaltung des Kopfes auf • Meist verbunden mit einem Tinnitus • Vollständige Ertaubung kann vorkommen • Audiometerkurve flach oder wannenförmig • Beispielhafte Einwirkungen: Arbeiten mit Bohr- und Stemmhammer über Kopf oder in engen räumlichen Verhältnissen • Einwirkung gilt als Arbeitsunfall 	$L_{pAeq} \text{ ca. } 90 \text{ bis } 120 \text{ dB}$

Anhang B: Excel-Tool „Ultraschall_LpAUEq_Rechner.xlsm“

Die Norm DIN EN 61672 1 beschreibt Anforderungen an Schallpegelmesser. Im Anwendungsbereich der Norm ist festgelegt, dass Schallpegelmesser dazu bestimmt sind, Schall zu messen, der im Allgemeinen im Bereich des menschlichen Hörvermögens liegt. Des Weiteren wird als Anmerkung angefügt, dass zur Messung von A-bewerteten Hörschallpegeln bei gleichzeitiger Einwirkung einer Schallquelle mit Spektralanteilen über 20 kHz die AU Bewertung verwendet werden kann [97].

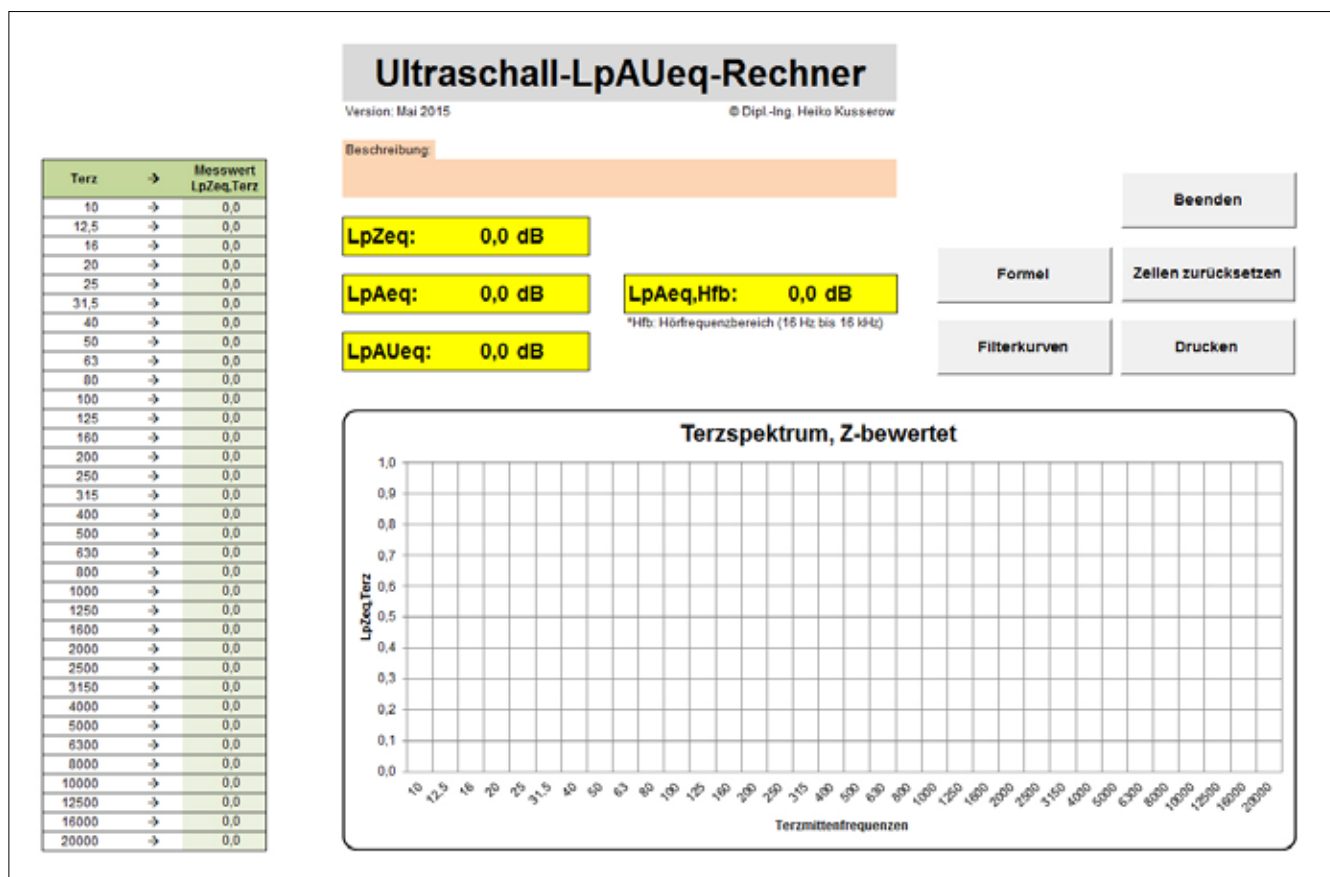
Da es auf dem Markt derzeit keine Schallpegelmesser nach DIN EN 61672 1 gibt, die eine integrierte U- bzw. AU-Bewertung haben, wurde im Rahmen dieser Arbeit das Excel-Tool „Ultraschall_LpAUEq_Rechner.xlsm“ programmiert. Bei Schallmessungen im Beisein von Ultraschall kann mit dem Excel-Tool aus dem gemessenen, unbewerteten Terzspektrum der L_{pAUEq} berechnet werden. Mithilfe dieser Größe kann der AU bewertete

Lärmexpositionspegel $L_{EXAU,8h}$ bestimmt werden, der nach VDI 3766 zur Beurteilung der Schallexposition an Arbeitsplätzen mit Ultraschallanteilen herangezogen wird (siehe Abschnitt 5.1.2). Für die Schallmessung ist ein Schallpegelmesser der Genauigkeitsklasse 1 einzusetzen.

Das Excel-Tool „Ultraschall_LpAUEq_Rechner.xlsm“ ist im Nachgang dieser Arbeit als ein weiterer Baustein in den IFA-Lärmexpositionsrechner aufgenommen worden. Dieser Lärmexpositionsrechner steht im Internet als Excel-Tool zum Download bereit bzw. auch als Webanwendung zur Verfügung (www.dguv.de/ifa, Webcode: d10635).

Nach dem Öffnen der Datei startet Microsoft-Excel mit der nachfolgend dargestellten Oberfläche (Abbildung B.1).

Abbildung B.1:
Startbildschirm des Excel-Tools „Ultraschall_LpAUEq_Rechner.xlsm“



In der Tabelle am linken Fensterrand können für die Terzen von 10 Hz bis 20 kHz die gemessenen, Z-bewerteten Terzpegel $L_{pZeq, Terz}$ eingegeben werden. Der gültige Wertebereich liegt für diese Eingabefelder zwischen 0 und 160 dB und die Darstellung ist auf eine Nachkommastelle begrenzt. Parallel zur Eingabe der Terzpegel baut sich die grafische Darstellung des Z-bewerteten Terzspektrums auf. Gleichzeitig werden die Größen L_{pZeq} , L_{pAeq} , L_{pAUEq} und $L_{pAeq, Hfb}$ berechnet und in den gelb hinterlegten Feldern ausgegeben. Für die Berechnung dieser Werte sind in dem

Excel-Tool die normierten Frequenzbewertungsfilter Z, A und U hinterlegt (siehe Abschnitt 4.4 und Anhang C). Jedem gemessenen Terzpegel $L_{pZeq, Terz}$ wird der entsprechende Dämpfungswert der gleichen Terz aus der zu berechnenden Bewertung (Z, A oder AU) addiert und danach der Gesamtpegel nach dem Gesetz der Pegeladdition berechnet (Gl (B.1)).

$$L_{pXeq} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^N 10^{\frac{(L_{pZeq, Terz,i} + \Delta_{X, Terz,i})}{10}} \right)$$

Bei dem Schalldruckpegel $L_{pAeq,Hfb}$ handelt es sich um eine Schalldruckpegelgröße, die den A-bewerteten äquivalenten Dauerschalldruckpegel für den von 16 Hz bis 16 kHz definierten Hörfrequenzbereich beschreibt. Dieser Schalldruckpegel wurde im Rahmen dieser Arbeit zu Informationszwecken definiert und kommt hauptsächlich bei der Diskussion der Ultraschall-Beurteilungskriterien zum Einsatz (siehe Abschnitte 6.3 und 6.4).

Das Eingabefeld mit dem Titel „Beschreibung“ ist ein Freitextfeld, in dem z. B. für die Dokumentation eine Beschreibung zu dem betrachteten Arbeitsplatz eingegeben werden kann.

Nachfolgend wird die Funktion der fünf Schaltflächen beschrieben:

- Beenden

Beenden des Excel-Tools. Es erfolgt vorher eine Abfrage, ob die Datei gespeichert werden soll oder nicht. Bei der Abfrage besteht die Möglichkeit, den Beenden-Vorgang abubrechen.

Abbildung B.2:

Info-Fenster mit hinterlegter Berechnungsformel: erscheint im Excel-Tool „Ultraschall_LpAUEq_Rechner.xlsm“ nach Betätigung der Schaltfläche „Formel“

Info-Fenster

$$L_{pXeq} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^N 10^{\frac{(L_{pZeq, Terz,i} + \Delta_{X, Terz,i})}{10}} \right)$$

"X" steht für Bewertung Z, A oder AU

Zu den gemessenen Terzpegeln $L_{pZeq, Terz}$ werden die entsprechenden Dämpfungswerte der zu berechnenden Z-, A- oder AU-Bewertung (entspricht dem "X" in der Formel) addiert und danach nach dem Gesetz der Pegeladdition der Gesamtpegel L_{pXeq} berechnet.

- Zellen zurücksetzen

Alle Eingabefelder, die Grafik mit dem Terzspektrum und die Berechnungsergebnisse werden zurückgesetzt.

- Drucken

Es öffnet sich ein Fenster mit der Seitenvorschau. Der Arbeitsbereich des Excel-Tools steht für einen Ausdruck auf einer DIN A4-Seite im Querformat und Druckdatum in der Fußzeile bereit.

- Formel

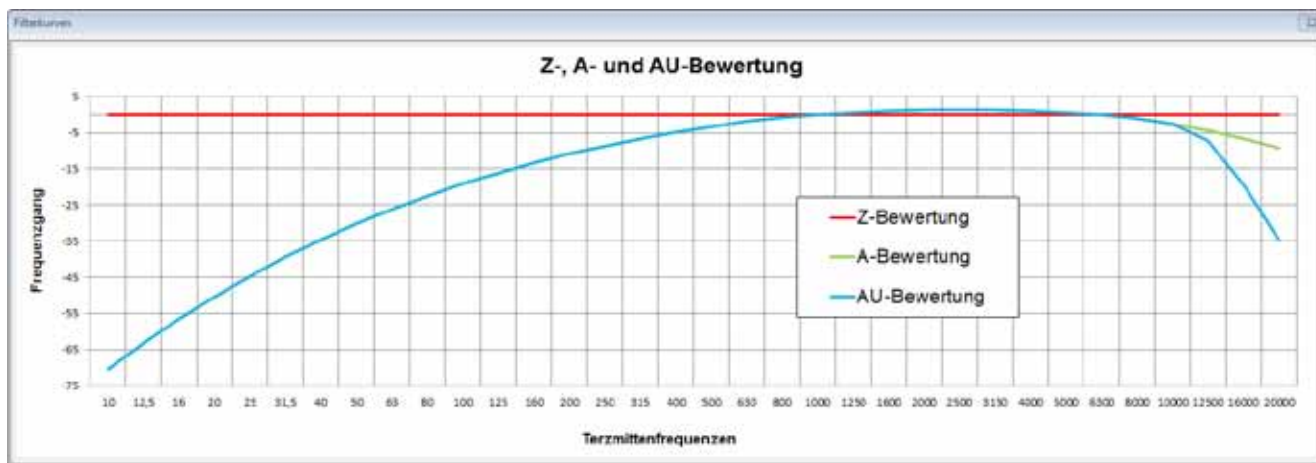
Es öffnet sich ein Info-Fenster, in dem die hinterlegte Berechnungsformel gezeigt wird (Abbildung B.2).

- Filterkurven

Es öffnet sich ein Info-Fenster, in dem der Verlauf der Frequenzbewertungsfiler Z, A und AU abgebildet ist (Abbildung B.3).

Abbildung B.3:

Info-Fenster mit dem Verlauf der Frequenzbewertungsfilter Z, A und AU: erscheint im Excel-Tool „Ultraschall_LpAUeq_Rechner.xlsm“ nach Betätigung der Schaltfläche „Filterkurven“



Anhang C: Frequenzbewertungsfilter

Tabelle C.1:
Frequenzgänge der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Bewertungsfilter (siehe Abschnitt 4.4) [6; 97; 99]

Terz in Hz	Bewertung					
	Z	A	U	AU	Ultra	C
10	0	-70,4	0	-70,4		-14,3
12,5	0	-63,4	0	-63,4		-11,2
16	0	-56,7	0	-56,7		-8,5
20	0	-50,5	0	-50,5		-6,2
25	0	-44,7	0	-44,7		-4,4
31,5	0	-39,4	0	-39,4		-3,0
40	0	-34,6	0	-34,6		-2,0
50	0	-30,2	0	-30,2		-1,3
63	0	-26,2	0	-26,2		-0,8
80	0	-22,5	0	-22,5		-0,5
100	0	-19,1	0	-19,1		-0,3
125	0	-16,1	0	-16,1		-0,2
160	0	-13,4	0	-13,4		-0,1
200	0	-10,9	0	-10,9		0
250	0	-8,6	0	-8,6		0
315	0	-6,6	0	-6,6		0
400	0	-4,8	0	-4,8		0
500	0	-3,2	0	-3,2		0
630	0	-1,9	0	-1,9		0
800	0	-0,8	0	-0,8		0
1 000	0	0,0	0	0,0		0
1 250	0	0,6	0	0,6		0
1 600	0	1,0	0	1,0		-0,1
2 000	0	1,2	0	1,2		-0,2
2 500	0	1,3	0	1,3		-0,3
3 150	0	1,2	0	1,2		-0,5
4 000	0	1,0	0	1,0		-0,8
5 000	0	0,5	0	0,5		-1,3
6 300	0	-0,1	0	-0,1		-2,0
8 000	0	-1,1	0	-1,1	-27,0	-3,0
10 000	0	-2,5	0	-2,5	-11,1	-4,4
12 500	0	-4,3	-2,8	-7,1	-2,6	-6,2
16 000	0	-6,6	-13,0	-19,6	0	-8,5
20 000	0	-9,3	-25,3	-34,6	0	-11,2
25 000	0	-12,4	-37,6	-50,0	0	
31 500	0	-15,7	-49,7	-65,4	0	
40 000	0	-19,3	-61,8	-81,1	0	
50 000	0					

Abbildung C.1:
Frequenzgang der Z-Bewertung (siehe Abschnitt 4.4.1) [6; 97]

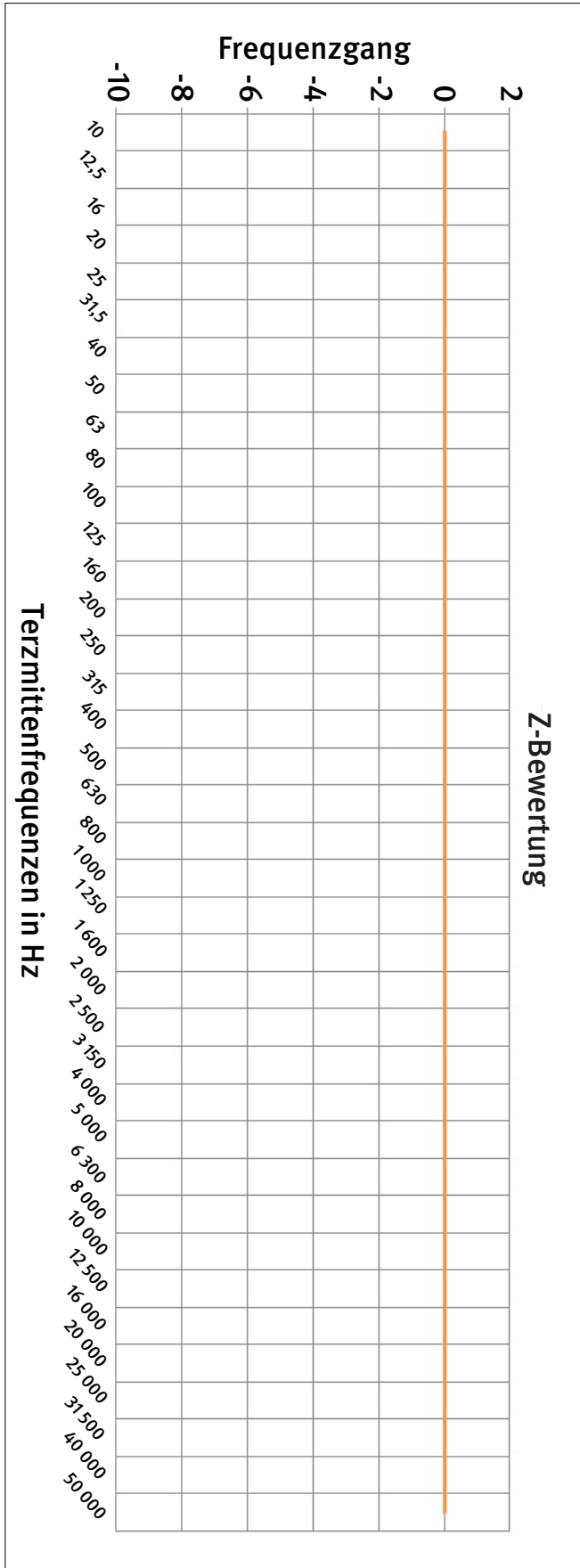


Abbildung C.2:
Frequenzgang der A-Bewertung (siehe Abschnitt 4.4.2) [6; 97; 99]

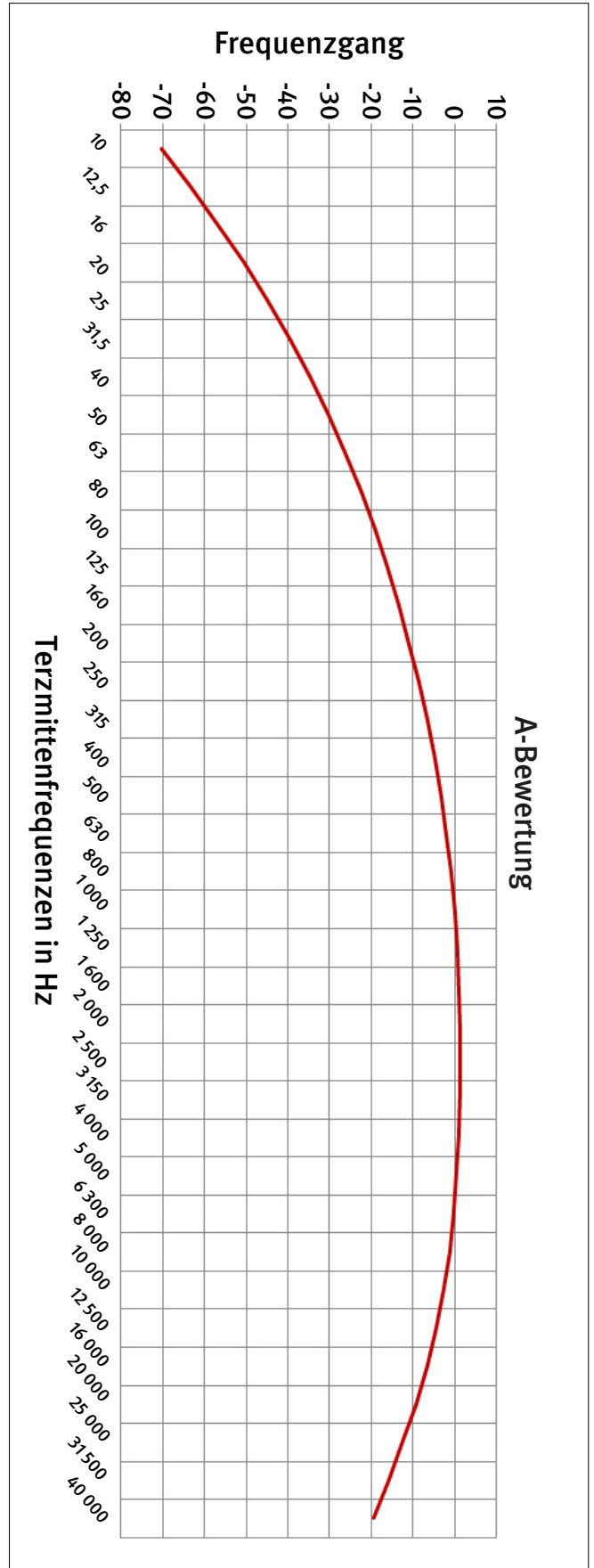


Abbildung C.3:
 Frequenzgang der U-Bewertung (siehe Abschnitt 4.4.3) [99]

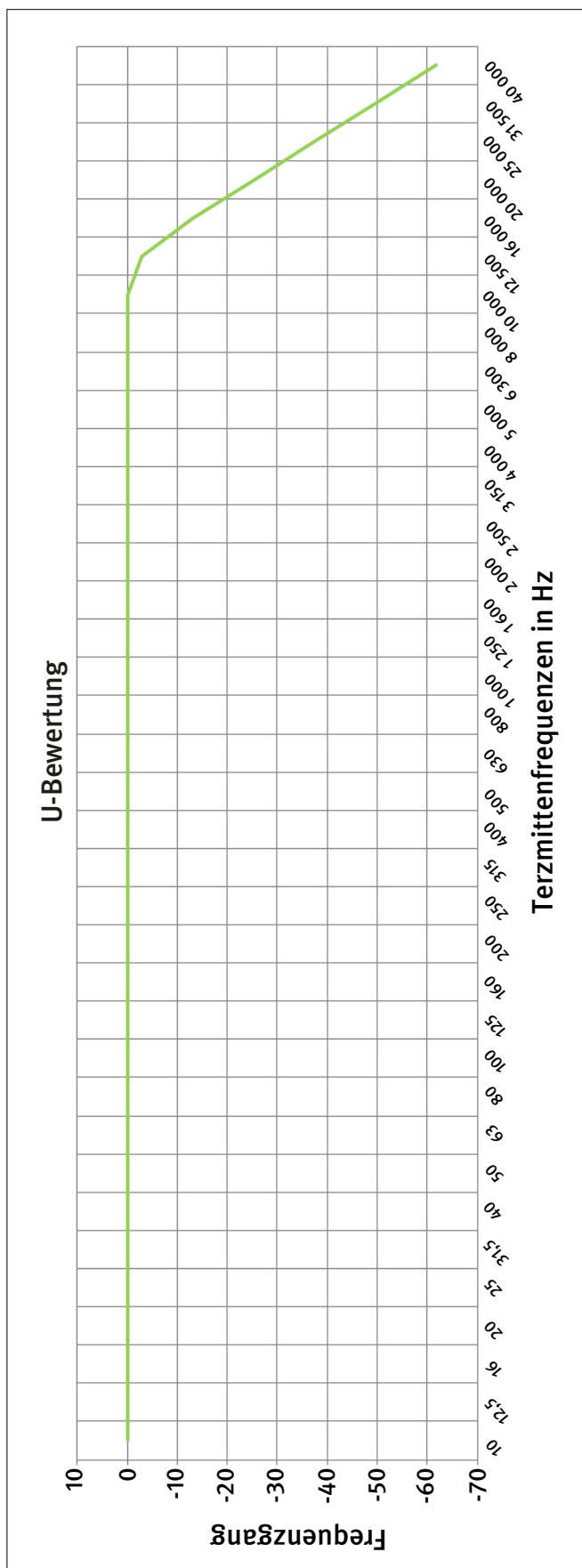


Abbildung C.4:
 Frequenzgang der AU-Bewertung (siehe Abschnitt 4.4.4) [6; 97; 99]

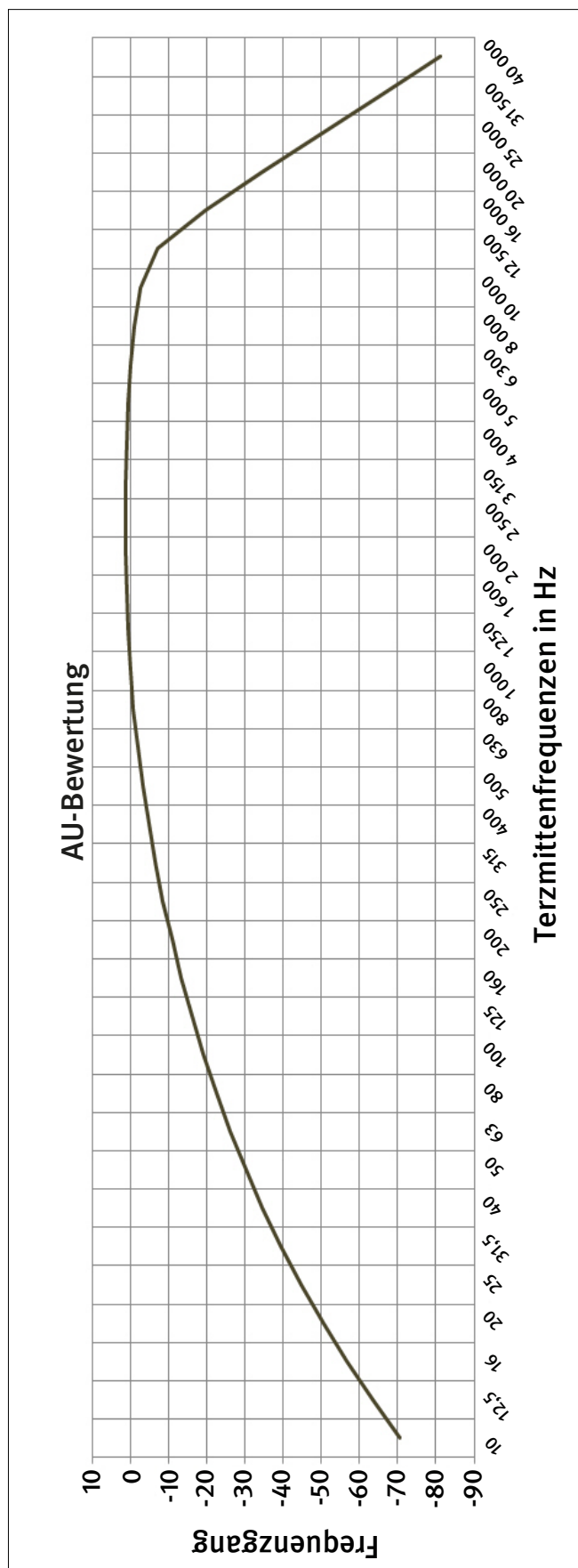


Abbildung C.5:
Frequenzgang der Ultra-Bewertung (siehe Abschnitt 4.4.5)

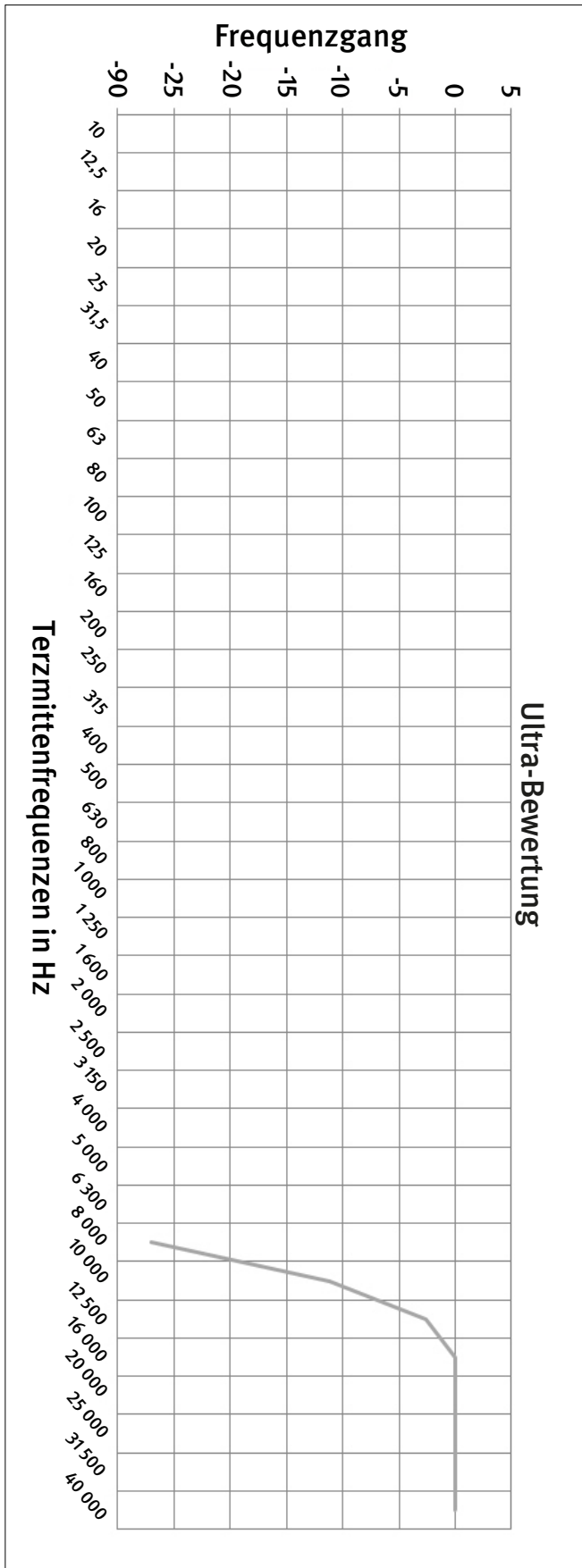


Abbildung C.6:
Frequenzgang der C-Bewertung (siehe Abschnitt 4.4.6) [97]

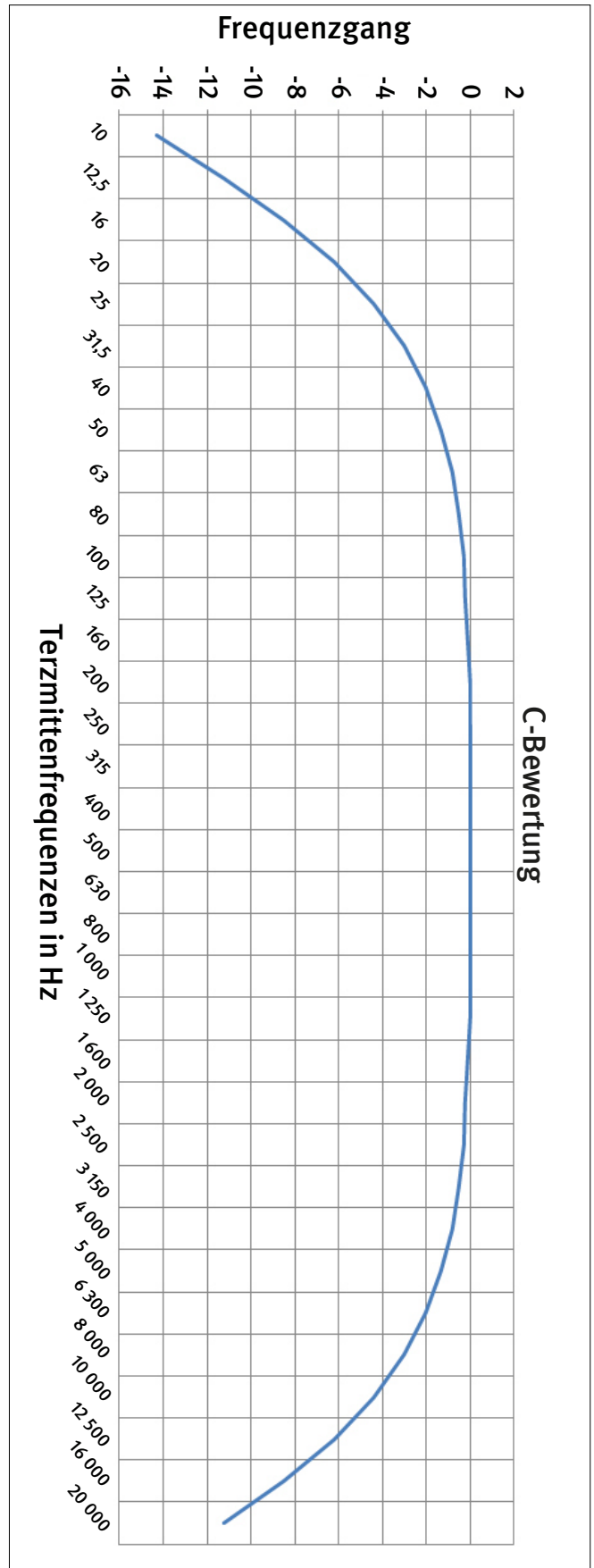
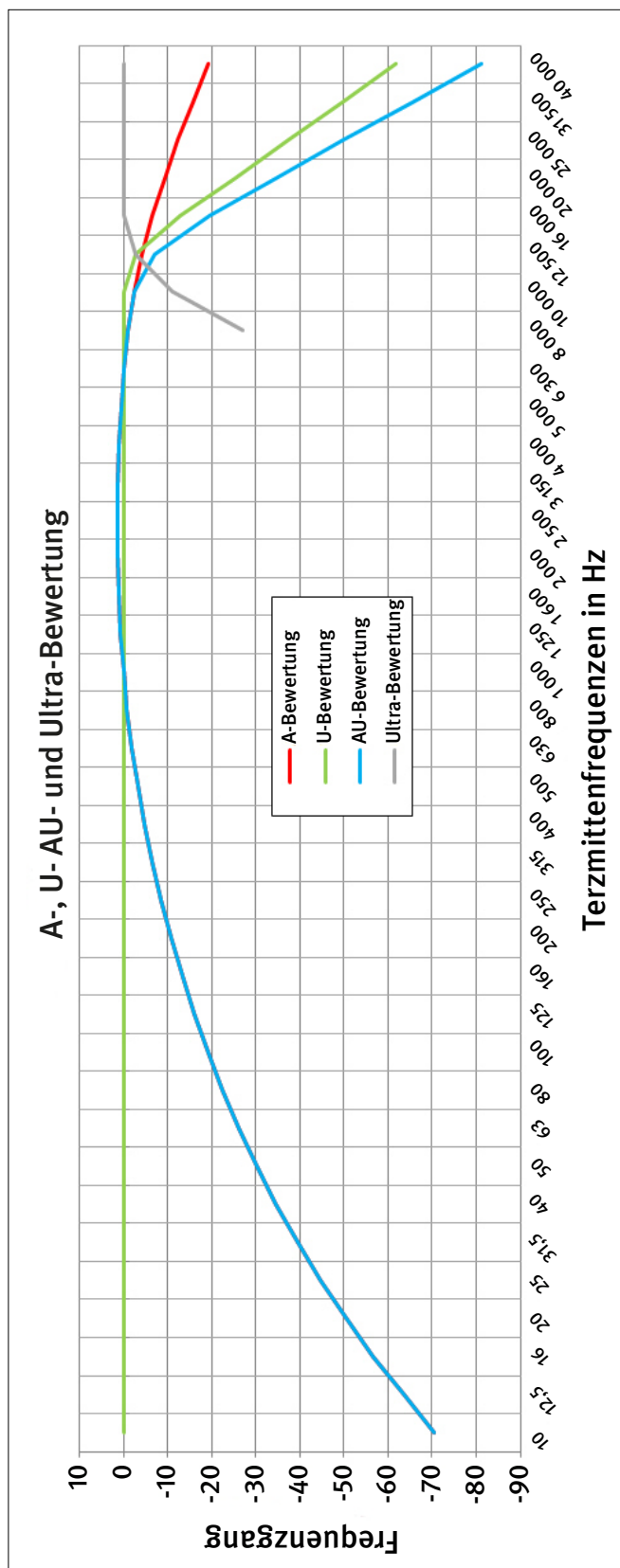


Abbildung C.7:
 Frequenzgänge der A-, U-, AU- und Ultra-Bewertung (siehe Abschnitt 4.4)
 [6; 97; 99]



Anhang D: Messergebnisse Ultraschall-Schweißmaschinen

Auf den nachfolgenden Seiten sind die erhobenen Messwerte aus der Messserie „Bediener-Arbeitsplätze an Ultraschall-Schweißmaschinen“ detailliert dargestellt.

Die Präsentation der Messergebnisse erfolgt ohne Berücksichtigung von Messunsicherheiten.

Die Messergebnisse werden entsprechend der vorgenommenen Gruppierung der Ultraschall-Schweißmaschinen nach ihrer Arbeitsfrequenz und dem Vorhandensein einer Schallschutzeinrichtung (siehe Abschnitt 6.2 und Tabelle 9 auf Seite 51) in folgender Reihenfolge präsentiert:

- Ultraschall-Schweißmaschinen, Arbeitsfrequenz: 20 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung
- Ultraschall-Schweißmaschinen, Arbeitsfrequenz: 20 kHz, mit Schallschutzeinrichtung
- Ultraschall-Schweißmaschine, Arbeitsfrequenz: 30 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung
- Ultraschall-Schweißmaschine, Arbeitsfrequenz: 30 kHz, mit Schallschutzeinrichtung
- Ultraschall-Schweißmaschinen, Arbeitsfrequenz: 35 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung
- Ultraschall-Schweißmaschine, Arbeitsfrequenz: 35 kHz, mit Schallschutzeinrichtung

Für jede dieser Gruppen sind die Messergebnisse in Form von zwei Tabellen dargestellt. Dabei sind in der ersten Tabelle zu jeder Gruppe – jeweils aufgeteilt für die Terzmittenfrequenzen von 80 Hz bis 1,6 kHz (a)) sowie von 2 bis 40 kHz (b)) – die Z-bewerteten Terzspektren der Messorte aufgeführt. Die zweite Tabelle zu jeder Gruppe enthält die Messwerte hinsichtlich der vorhandenen bzw. vorgeschlagenen Beurteilungskriterien.

Die Messungen sind mittels fortlaufender Nummerierung von 1 bis 43 gekennzeichnet und werden ohne Nennung von weiteren Daten der jeweiligen Ultraschall-Schweißmaschine sowie ohne Unternehmensbezug dargestellt.

Die Spalten L_{pAeq} und $L_{pAeq,Hfb}$ dienen lediglich zu Informationszwecken. Alle L_{pAeq} -Werte sind hellblau hinterlegt, da diese Messwerte durch Ultraschallanteile beeinflusst wurden und somit für eine Beurteilung der Hörschallexposition nicht verwendet werden können. In der Spalte $L_{pAeq,Hfb}$ sind berechnete Werte aufgeführt, die eine A-bewertete Exposition im Hörfrequenzbereich (16 Hz bis 16 kHz) beschreiben (siehe Abschnitt 4.6 und Anhang B).

Der anfängliche Filterfehler in der Analysesoftware des Ultraschall-Messsystems führte bei 35 Messungen zu einem fehlerhaften L_{pAeq} -Wert (siehe Abschnitt 6.1.1). Diese 35 Messungen sind in den Tabellen an den nicht farblich hinterlegten Datenfeldern zu erkennen. Für den L_{pAeq} -Wert sind in den Tabellen zwei Spalten aufgeführt. In der ersten Spalte, die als L_{pAeq-M} gekennzeichnet ist, steht der vom Messsystem ausgegebene L_{pAeq} , wobei die 35 fehlerhaften Werte hellblau hinterlegt sind. Die zweite, als L_{pAeq-R} bezeichnete Spalte, enthält für die 35 Messungen mit fehlerhaftem AU-Filter den parallel dazu mithilfe eines Excel-Rechners berechneten, korrekten L_{pAeq} . Grau hinterlegt sind die acht Messungen, die nach der Korrektur der AU-Bewertung in der Analysesoftware durchgeführt wurden. Für diese Messungen wurde kein L_{pAeq-R} angegeben.

Im Rahmen der Messungen wurden keine Analysen hinsichtlich der täglichen Einsatzzeit der Ultraschall-Schweißmaschinen durchgeführt. Aus diesem Grund wird in den Tabellen nur der ermittelte L_{pAeq} angegeben und keine Angabe zum eigentlichen Richtwert $L_{EXAU,8h}$ aus der Richtlinie VDI 3766 gemacht. Da jedoch unter der Voraussetzung einer achtstündigen Einsatzzeit der Ultraschall-Schweißmaschinen der L_{pAeq} dem $L_{EXAU,8h}$ entspricht, erfolgt in den Tabellen eine Beurteilung des L_{pAeq} entsprechend den Kriterien der Richtlinie VDI 3766 bezogen auf den $L_{EXAU,8h}$.

In den Spalten mit Messwerten, für die vorhandene bzw. vorgeschlagene Beurteilungskriterien existieren, sind alle Grenz- bzw. Richtwertüberschreitungen rot hinterlegt. Aus präventiver Sicht heraus sind in den Spalten $L_{pAeq,Hfb}$, L_{pAeq-M} und L_{pAeq-R} diejenigen Messwerte gelb hinterlegt, die orientiert an dem unteren Auslösewert aus der LärmVibrationsArbSchV einen Schalldruckpegel von 80 dB überschritten haben. In der Spalte L_{pCpeak} wurden die Messwerte ebenfalls entsprechend dem unteren und oberen Auslösewert nach LärmVibrationsArbSchV farblich markiert. Für die Messwerte $L_{pZeq, Terz 20kHz}$, $L_{pULTRAeq}$, L_{pZpeak} sowie den Z-bewerteten maximalen 5-Minuten-Terzschalldruckpegeln $L_{pZeq, Terz, 5min}$ existieren keine gestuften Grenz- bzw. Richtwerte. Hier wurde ein 3-dB-Bereich unterhalb der Grenz- bzw. Richtwerte gewählt, innerhalb dessen die Messwerte gelb hinterlegt sind. Dieser 3-dB-Bereich entspricht der Unsicherheit der Genauigkeitsklasse 2 nach dem vereinfachten Verfahren für die Zuordnung von Genauigkeitsklassen in der TRLV Lärm [93] und soll dem Betrachter die unmittelbare Nähe dieser Messwerte zu bestehenden Grenz- bzw. Richtwerten aufzeigen.

Tabelle D.1:

Z-bewertete Terzspektren zu den Messorten 1 bis 26; Bediener-Arbeitsplätze an Ultraschall-Schweißmaschinen, Arbeitsfrequenz: 20 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung

a) Terzmittenfrequenzen 80 Hz bis 1,6 kHz

Lfd. Nr.	L _{pZeq, Terz} -Messwerte (energetischer Mittelwert aus drei Stichproben)													
	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1 kHz	1,25 kHz	1,6 kHz
1	67,3	74,2	68,7	67,4	67,0	67,3	68,0	68,7	68,6	68,9	67,5	67,1	68,0	67,9
2	74,1	75,5	80,4	73,8	72,6	72,7	71,6	72,7	69,5	69,6	67,6	65,7	62,6	59,7
3	50,5	52,6	55,2	54,2	61,2	54,3	57,2	58,1	57,6	59,5	56,7	54,1	55,1	55,4
4	62,1	55,7	55,6	61,2	61,5	59,0	59,8	60,1	61,9	61,0	60,2	57,8	57,9	57,6
5	59,4	57,2	59,3	65,2	62,5	61,9	63,7	63,1	66,7	63,9	64,0	62,5	60,5	60,7
6	63,5	64,7	63,0	63,2	65,9	62,0	59,6	59,4	60,4	58,2	58,4	58,9	53,7	55,3
7	84,9	82,5	82,1	79,0	75,7	75,4	77,1	74,2	73,6	70,8	67,8	67,4	65,4	63,7
8	60,2	62,2	62,6	60,6	60,5	59,9	62,3	62,2	63,4	63,5	66,0	68,6	66,1	68,0
9	72,7	71,6	71,2	69,3	70,3	69,1	67,8	66,3	65,3	63,0	62,5	59,2	58,2	56,5
10	50,9	49,6	53,0	55,3	57,9	56,7	58,4	57,8	59,1	59,2	59,3	59,7	58,1	59,8
11	55,3	60,8	64,6	62,8	67,8	66,4	62,3	60,8	61,3	62,9	61,2	57,7	56,8	66,4
12	54,8	64,7	60,3	59,5	59,1	59,2	60,4	62,0	62,8	62,7	62,7	62,1	63,1	64,1
13	53,1	60,4	54,4	52,9	55,5	58,6	65,7	57,3	58,3	57,3	57,3	57,1	57,9	61,2
14	65,9	68,5	67,5	65,3	66,1	66,7	66,0	67,0	67,3	66,9	65,8	65,6	65,9	64,6
15	70,8	71,9	76,7	74,3	70,4	65,1	61,3	60,5	58,3	58,6	55,8	54,2	52,3	52,3
16	59,4	61,9	58,2	58,3	59,3	56,6	57,4	57,7	58,0	57,4	55,3	54,3	55,7	54,2
17	94,6	93,4	91,4	90,1	89,1	87,3	86,4	85,1	83,7	82,4	81,1	79,7	78,5	77,0
18	63,7	60,9	69,6	67,5	64,4	65,0	62,9	64,8	61,2	59,6	57,2	54,8	52,8	51,3
19	55,4	64,6	64,8	66,6	67,2	64,0	60,2	67,4	64,6	64,8	57,7	56,7	54,9	52,7
20	51,5	57,1	56,3	53,3	59,0	58,8	53,7	55,1	54,4	53,2	51,9	49,5	49,0	50,4
21	54,1	55,3	52,6	55,0	57,8	56,0	55,7	56,9	56,8	57,0	55,0	52,7	52,3	52,1
22	62,7	61,4	66,5	67,8	65,7	67,3	71,3	66,2	63,0	63,5	66,7	65,2	61,0	59,7
23	51,9	60,1	60,8	52,7	59,1	61,4	56,3	61,5	53,9	54,3	55,5	61,4	52,7	53,6
24	51,7	53,2	51,8	54,4	56,8	57,9	58,5	61,8	62,6	61,0	65,5	61,9	59,7	57,0
25	48,5	51,8	53,3	54,5	54,7	54,7	58,2	59,8	58,6	56,8	55,3	53,6	53,3	52,4
26	68,2	70,2	66,9	70,6	68,1	68,3	69,6	68,7	69,2	69,6	70,1	72,4	71,1	71,3

Tabelle D.1:
Fortsetzung

b) Terzmittenfrequenz 2 bis 40 kHz

Lfd. Nr.	L _{pZeq, Terz} -Messwerte (energetischer Mittelwert aus drei Stichproben)													
	2 kHz	2,5 kHz	3,15 kHz	4 kHz	5 kHz	6,3 kHz	8 kHz	10 kHz	12,5 kHz	16 kHz	20 kHz	25 kHz	31,5 kHz	40 kHz
1	67,8	68,7	68,2	67,2	70,0	67,3	67,2	70,4	69,1	70,6	112,0	78,9	69,6	99,2
2	56,0	53,2	50,1	51,3	59,9	66,3	60,7	81,5	82,8	84,5	115,2	88,1	88,9	100,3
3	57,4	59,7	64,1	67,6	79,4	80,8	78,8	94,3	84,1	91,2	105,0	94,0	93,7	105,4
4	59,7	57,1	59,0	64,9	68,2	71,4	72,6	83,4	75,4	77,7	115,7	84,5	83,9	103,1
5	60,5	60,4	60,4	57,2	57,4	63,2	58,0	63,6	65,4	79,8	105,1	77,2	68,5	98,9
6	54,9	53,0	54,2	53,8	54,4	54,7	58,1	64,2	61,6	66,6	100,5	70,9	65,8	84,8
7	62,7	62,7	63,0	62,1	63,0	63,2	63,7	94,2	69,4	70,9	114,7	83,8	80,4	103,5
8	66,7	64,4	65,5	71,2	76,3	81,6	75,9	87,4	85,2	83,3	108,7	85,2	87,5	102,2
9	55,8	57,1	62,9	65,0	61,4	61,9	60,1	89,5	62,7	62,5	103,9	72,3	86,2	98,3
10	58,4	60,4	67,3	67,6	86,2	75,0	73,6	109,8	81,6	88,0	115,6	88,0	100,0	106,0
11	65,7	65,7	70,2	71,9	74,8	72,2	69,9	92,1	74,5	80,9	115,3	86,4	92,7	100,2
12	63,9	65,5	68,5	74,8	72,8	77,2	71,0	82,1	86,2	82,5	105,5	81,0	83,0	97,9
13	60,2	61,4	60,8	59,9	60,6	60,1	59,2	68,7	58,6	57,8	97,3	68,2	63,0	92,8
14	63,5	63,7	67,9	66,3	69,1	80,3	75,9	93,3	83,5	83,9	105,0	82,0	92,0	96,7
15	50,0	48,9	48,9	48,8	64,0	50,4	63,8	90,0	68,3	72,9	103,4	76,0	91,3	90,9
16	59,0	56,0	54,3	54,1	58,1	59,3	56,1	89,9	65,5	68,2	101,2	72,5	90,5	95,6
17	75,4	74,3	72,8	72,0	70,3	69,1	74,0	69,4	67,5	69,2	106,4	75,8	68,6	91,6
18	49,9	49,1	49,2	52,9	66,1	72,2	60,5	72,3	87,6	83,2	115,2	96,0	90,3	107,2
19	51,2	49,7	48,8	49,4	50,2	52,2	54,7	57,5	57,7	63,3	115,4	84,0	63,3	101,8
20	54,0	50,0	51,9	53,7	52,4	51,6	51,7	73,2	54,1	66,0	115,0	81,9	85,5	97,1
21	51,5	51,3	50,1	56,3	68,0	56,0	64,0	81,4	65,8	69,3	100,9	71,0	79,4	88,7
22	58,1	58,0	57,7	61,5	59,7	68,8	61,0	61,7	68,7	67,6	103,4	74,3	72,2	90,5
23	51,7	49,4	54,3	55,8	55,5	50,3	46,5	51,2	52,1	62,7	116,0	85,1	59,3	92,1
24	57,8	57,3	53,8	57,4	54,3	56,7	77,8	62,9	75,7	67,4	107,0	77,3	70,7	84,6
25	52,4	55,3	54,2	57,4	59,2	60,5	58,1	61,7	61,6	69,9	102,0	74,0	70,8	89,3
26	72,2	72,9	74,4	73,9	72,7	72,0	70,7	79,8	72,4	69,5	110,1	79,1	76,7	96,4

Anhang D

Tabelle D.2:

Messwerte zu den Messorten 1 bis 26 mit Bezug zu vorhandenen bzw. vorgeschlagenen Beurteilungskriterien
(Bediener-Arbeitsplätze an Ultraschall-Schweißmaschinen, Arbeitsfrequenz: 20 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung)

Lfd. Nr.	Diverse Messwerte (energetischer Mittelwert bzw. Maximalwert aus drei Stichproben)								Z-bewerteter maximaler 5-Minuten-Terzschalldruckpegel $L_{pZeq, Terz, 5 \text{ min}}$				
	L_{pAeq}	$L_{pAeq, HB}$	$L_{pAUeq, M}$	$L_{pAUeq, R}$	$L_{pZeq, Terz, 20 \text{ kHz}}$	$L_{pULTRAeq}$	L_{pCpeak}	L_{pZpeak}	16 kHz	20 kHz	25 kHz	31,5 kHz	40 kHz
1	104,8	80,2	90,9	81,9	112,0	112,2	121,8	131,1	70,8	112,4	79,2	69,8	100,3
2	108,1	84,1	86,3	–	115,2	116,3	133,5	139,1	85,1	116,2	88,9	89,3	101,5
3	100,8	93,4	95,0	92,7	105,0	109,1	126,0	132,6	91,2	105,0	94,0	93,7	105,4
4	108,5	82,9	94,6	84,9	115,7	115,9	126,8	136,7	77,8	116,0	84,5	84,1	103,9
5	97,9	76,4	83,5	75,4	105,1	106,1	121,2	131,4	79,8	105,5	77,5	68,5	99,2
6	94,0	69,8	76,2	70,9	100,5	100,7	120,7	132,0	66,6	100,5	70,9	65,8	84,8
7	107,6	92,0	95,9	92,2	114,7	115,1	135,8	139,2	74,1	115,9	85,2	81,1	104,2
8	101,8	88,8	92,9	88,3	108,7	109,7	130,7	141,5	84,7	110,9	87,2	88,4	106,1
9	96,4	87,2	87,0	–	103,9	105,0	129,0	137,4	63,4	104,6	73,3	88,1	98,5
10	111,0	107,4	111,4	107,4	115,6	116,2	131,4	139,8	91,4	116,2	89,0	100,9	107,1
11	108,9	90,3	94,1	90,6	115,3	115,1	123,4	133,8	80,9	115,3	86,4	92,7	100,2
12	98,5	86,4	89,8	85,3	105,5	106,3	121,2	130,4	83,1	105,7	81,2	83,6	98,3
13	90,0	72,7	77,5	73,1	97,3	98,6	116,8	128,9	58,5	98,0	69,0	65,5	93,6
14	98,9	91,8	95,7	91,6	105,0	105,9	125,7	134,9	84,3	105,6	82,1	92,7	97,1
15	96,8	87,6	92,1	87,7	103,4	103,9	131,0	135,3	74,7	105,1	76,5	92,2	91,1
16	95,0	87,5	91,0	87,5	101,2	102,7	118,9	128,8	69,0	102,0	73,1	90,9	95,7
17	99,8	90,8	91,9	90,9	106,4	106,6	147,9	144,8	69,4	106,9	76,2	68,7	92,2
18	107,1	84,7	85,0	–	115,2	115,9	125,6	139,1	85,5	116,6	96,8	90,4	107,7
19	107,3	70,0	83,5	–	115,4	115,6	125,6	138,2	63,7	115,9	84,8	64,2	102,7
20	106,9	71,8	83,7	–	115,0	115,1	124,0	135,5	67,1	116,1	82,9	86,4	98,6
21	94,0	79,7	85,7	79,8	100,9	101,2	120,1	129,4	70,3	101,7	73,0	80,6	89,2
22	95,3	75,6	76,5	–	103,4	103,6	122,3	133,9	67,9	103,9	74,8	73,4	91,4
23	108,6	67,5	93,8	81,6	116,0	116,0	123,1	132,4	63,9	117,1	86,2	60,5	92,4
24	99,5	78,7	86,4	79,3	107,0	107,0	121,9	131,2	67,6	107,2	77,5	70,9	84,8
25	94,6	70,0	80,2	71,2	102,0	102,2	120,7	130,2	70,2	103,2	74,7	71,0	90,1
26	103,0	84,7	90,3	85,2	110,1	110,3	121,5	130,6	69,8	110,3	79,3	76,9	96,4

Tabelle D.3:

Z-bewertete Terzspektren zu den Messorten 27 bis 36; Bediener-Arbeitsplätze an Ultraschall-Schweißmaschinen, Arbeitsfrequenz: 20 kHz, mit Schallschutzeinrichtung

a) Terzmittenfrequenzen 80 Hz bis 1,6 kHz

Lfd. Nr.	$L_{pZeq, Terz}$ -Messwerte (energetischer Mittelwert aus drei Stichproben)													
	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1 kHz	1,25 kHz	1,6 kHz
27	69,9	71,2	69,2	67,6	67,4	65,7	66,6	68,0	67,0	67,0	65,9	65,2	66,2	65,2
28	64,9	62,3	61,2	59,3	61,6	60,8	74,8	61,4	59,5	65,3	59,9	59,8	58,5	57,7
29	62,7	62,7	65,6	62,6	63,2	60,2	61,3	59,6	56,9	55,7	54,5	53,3	52,5	49,4
30	51,9	58,1	56,0	59,2	59,4	59,9	60,4	61,2	65,9	60,9	62,0	59,8	57,4	55,8
31	61,9	62,2	62,2	64,0	69,7	64,1	63,2	63,4	63,4	62,6	60,5	61,7	61,3	59,6
32	58,7	59,4	62,4	64,1	60,7	63,2	62,6	64,2	61,8	59,6	59,5	60,7	58,3	58,4
33	72,5	86,3	75,2	67,7	71,0	67,3	68,3	67,0	66,6	66,6	67,9	66,1	64,7	64,4
34	68,5	78,8	71,5	65,3	64,5	64,2	64,5	62,3	63,1	65,9	62,9	63,2	63,3	63,1
35	61,3	62,3	61,0	65,0	65,3	62,4	65,7	63,3	63,8	60,7	60,2	60,6	58,8	60,2
36	71,3	73,6	68,9	67,7	67,4	67,9	68,9	69,0	68,4	67,0	65,0	64,0	63,3	62,7

Tabelle D.3:

Fortsetzung

b) Terzmittenfrequenzen 2 bis 40 kHz

Lfd. Nr.	$L_{pZeq, Terz}$ -Messwerte (energetischer Mittelwert aus drei Stichproben)													
	2 kHz	2,5 kHz	3,15 kHz	4 kHz	5 kHz	6,3 kHz	8 kHz	10 kHz	12,5 kHz	16 kHz	20 kHz	25 kHz	31,5 kHz	40 kHz
27	63,8	63,7	64,5	64,0	64,5	62,8	61,6	75,5	61,6	65,2	92,5	67,9	72,9	81,2
28	59,3	58,7	58,7	58,9	62,6	60,2	60,8	74,5	62,5	64,1	91,7	67,2	68,0	71,5
29	47,4	46,8	44,8	43,3	43,3	42,8	40,8	69,2	41,5	42,1	80,5	49,5	55,3	63,7
30	55,6	54,5	53,7	53,1	52,1	51,1	48,5	60,5	45,5	43,8	80,2	50,2	49,9	72,3
31	59,8	63,3	63,3	60,1	67,0	66,0	63,8	65,8	61,7	72,8	75,4	72,8	64,5	65,4
32	57,5	56,4	55,7	55,9	57,3	60,9	56,8	67,2	65,5	57,1	102,9	72,9	64,8	89,6
33	63,0	62,2	60,5	59,7	58,9	58,0	57,0	59,6	56,0	55,0	99,2	66,2	53,9	84,9
34	61,7	61,5	61,5	60,3	58,6	59,1	58,3	70,7	56,6	54,4	90,8	60,8	70,2	76,7
35	61,3	60,7	63,2	61,6	62,7	61,9	62,1	63,4	62,4	60,5	87,6	61,9	57,5	72,2
36	62,8	63,6	63,5	63,5	63,8	63,6	64,6	72,1	64,5	64,2	95,4	66,1	62,1	77,5

Anhang D

Tabelle D.4:

Messwerte zu den Messorten 27 bis 36 mit Bezug zu vorhandenen bzw. vorgeschlagenen Beurteilungskriterien (Bediener-Arbeitsplätze an Ultraschall-Schweißmaschinen, Arbeitsfrequenz: 20 kHz, mit Schallschutzeinrichtung)

Lfd. Nr.	Diverse Messwerte (energetischer Mittelwert bzw. Maximalwert aus drei Stichproben)								Z-bewerteter maximaler 5-Minuten-Terzschalldruckpegel $L_{pZeq, Terz, 5 \text{ min}}$				
	L_{pAeq}	$L_{pAeq, HFB}$	$L_{pAUeq-M}$	$L_{pAUeq-R}$	$L_{pZeq, Terz 20 \text{ kHz}}$	$L_{pULTRAeq}$	L_{pCpeak}	L_{pZpeak}	16 kHz	20 kHz	25 kHz	31,5 kHz	40 kHz
27	89,8	78,2	80,6	78,2	92,5	92,9	126,8	129,6	65,4	93,5	68,0	73,3	82,4
28	85,0	75,9	78,7	75,8	91,7	91,8	109,3	115,2	65,0	93,3	69,2	69,6	72,1
29	74,6	68,6	71,9	68,6	80,5	80,6	121,3	123,3	42,6	81,3	50,2	55,6	65,5
30	74,6	69,7	70,6	69,7	80,2	80,8	99,2	106,3	44,9	82,9	52,7	52,5	73,9
31	76,7	75,6	76,7	75,1	75,4	79,0	110,2	117,9	73,8	76,2	73,8	65,3	66,2
32	95,5	71,9	81,3	73,4	102,9	103,1	120,5	130,8	58,5	104,0	73,9	66,9	91,5
33	92,2	76,3	80,2	76,6	99,2	99,4	110,4	120,1	56,5	101,0	67,8	54,9	86,7
34	84,1	75,0	77,1	75,0	90,8	91,0	106,8	115,0	55,1	92,2	61,9	70,5	77,8
35	81,1	73,7	75,2	73,6	87,6	87,8	108,3	114,2	60,9	89,0	62,2	57,9	72,6
36	88,5	77,2	79,8	77,2	95,4	95,5	120,7	120,5	65,5	97,0	67,3	62,9	78,6

Tabelle D.5:

Z-bewertetes Terzspektrum zu dem Messort 37; Bediener-Arbeitsplatz an Ultraschall-Schweißmaschine, Arbeitsfrequenz: 30 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung

a) Terzmittenfrequenzen 80 Hz bis 1,6 kHz

Lfd. Nr.	$L_{pZeq, Terz}$ -Messwerte (energetischer Mittelwert aus drei Stichproben)													
	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1 kHz	1,25 kHz	1,6 kHz
37	74,7	76,9	79,3	78,4	78,4	72,9	71,2	70,2	67,3	67,8	66,6	64,5	63,5	63,1

Tabelle D.5: Fortsetzung

b) Terzmittenfrequenzen 2 bis 40 kHz

Lfd. Nr.	$L_{pZeq, Terz}$ -Messwerte (energetischer Mittelwert aus drei Stichproben)													
	2 kHz	2,5 kHz	3,15 kHz	4 kHz	5 kHz	6,3 kHz	8 kHz	10 kHz	12,5 kHz	16 kHz	20 kHz	25 kHz	31,5 kHz	40 kHz
37	62,6	64,5	67,2	65,5	69,2	71,3	71,4	78,3	77,7	84,7	76,5	77,6	103,2	80,5

Tabelle D.6:

Messwerte zu dem Messort 37 mit Bezug zu vorhandenen bzw. vorgeschlagenen Beurteilungskriterien (Bediener-Arbeitsplatz an Ultraschall-Schweißmaschine, Arbeitsfrequenz: 30 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung)

Lfd. Nr.	Diverse Messwerte (energetischer Mittelwert bzw. Maximalwert aus drei Stichproben)								Z-bewerteter maximaler 5-Minuten-Terzschalldruckpegel $L_{pZeq, Terz, 5 \text{ min}}$				
	L_{pAeq}	$L_{pAeq, HFB}$	$L_{pAUeq-M}$	$L_{pAUeq-R}$	$L_{pZeq, Terz 20 \text{ kHz}}$	$L_{pULTRAeq}$	L_{pCpeak}	L_{pZpeak}	16 kHz	20 kHz	25 kHz	31,5 kHz	40 kHz
37	91,4	83,3	84,8	81,5	76,5	103,3	135,4	134,7	85,5	77,3	78,3	103,5	81,5

Tabelle D.7:

Z-bewertetes Terzspektrum zu dem Messort 38; Bediener-Arbeitsplatz an Ultraschall-Schweißmaschine, Arbeitsfrequenz: 30 kHz, mit Schallschutzeinrichtung

a) Terzmittenfrequenzen 80 Hz bis 1,6 kHz

Lfd. Nr.	$L_{pZeq, Terz}$ -Messwerte (energetischer Mittelwert aus drei Stichproben)													
	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1 kHz	1,25 kHz	1,6 kHz
38	60,0	63,4	60,3	67,9	61,4	62,3	65,0	64,9	63,7	62,4	63,3	63,8	65,1	66,1

Tabelle D.7:

Fortsetzung

b) Terzmittenfrequenzen 2 bis 40 kHz

Lfd. Nr.	$L_{pZeq, Terz}$ -Messwerte (energetischer Mittelwert aus drei Stichproben)													
	2 kHz	2,5 kHz	3,15 kHz	4 kHz	5 kHz	6,3 kHz	8 kHz	10 kHz	12,5 kHz	16 kHz	20 kHz	25 kHz	31,5 kHz	40 kHz
38	66,8	67,7	68,1	68,5	68,9	68,4	69,2	71,6	70,4	71,4	75,0	71,4	82,9	74,7

Tabelle D.8:

Messwerte zu dem Messort 38 mit Bezug zu vorhandenen bzw. vorgeschlagenen Beurteilungskriterien (Bediener-Arbeitsplatz an Ultraschall-Schweißmaschine, Arbeitsfrequenz 30 kHz, mit Schallschutzeinrichtung)

Lfd. Nr.	Diverse Messwerte (energetischer Mittelwert bzw. Maximalwert aus drei Stichproben)								Z-bewerteter maximaler 5-Minuten-Terzschalldruckpegel $L_{pZeq, Terz, 5 \text{ min}}$				
	L_{pAeq}	$L_{pAeq, HB}$	$L_{pAeq, M}$	$L_{pAeq, R}$	$L_{pZeq, Terz, 20 \text{ kHz}}$	$L_{pULTRAeq}$	L_{pCpeak}	L_{pZpeak}	16 kHz	20 kHz	25 kHz	31,5 kHz	40 kHz
38	80,5	79,4	80,9	79,1	75,0	84,7	112,6	115,7	71,6	75,3	71,6	83,0	74,9

Tabelle D.9:

Z-bewertete Terzspektren zu den Messorten 39 bis 42; Bediener-Arbeitsplätze an Ultraschall-Schweißmaschinen, Arbeitsfrequenz 35 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung

a) Terzmittenfrequenzen 80 Hz bis 1,6 kHz

Lfd. Nr.	$L_{pZeq, Terz}$ -Messwerte (energetischer Mittelwert aus drei Stichproben)													
	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1 kHz	1,25 kHz	1,6 kHz
39	64,7	78,4	67,6	66,9	66,7	69,4	69,4	69,0	69,7	69,6	68,7	67,6	67,6	67,9
40	55,8	59,9	59,4	59,9	59,8	59,2	62,7	61,1	61,0	60,8	59,2	58,1	57,6	56,2
41	68,6	68,3	70,2	66,9	64,3	65,8	66,4	63,6	65,5	64,0	62,0	59,6	60,9	58,3
42	76,6	71,6	71,9	68,7	66,3	63,2	61,1	59,7	58,4	57,7	56,3	54,3	54,9	56,5

Anhang D

Tabelle D.9:
Fortsetzung (2 bis 40 kHz)

b) Terzmittenfrequenzen 2 bis 40 kHz

Lfd. Nr.	$L_{pZeq, Terz}$ -Messwerte (energetischer Mittelwert aus drei Stichproben)													
	2 kHz	2,5 kHz	3,15 kHz	4 kHz	5 kHz	6,3 kHz	8 kHz	10 kHz	12,5 kHz	16 kHz	20 kHz	25 kHz	31,5 kHz	40 kHz
39	68,5	67,7	68,3	67,8	69,8	70,2	70,1	74,4	75,6	76,1	77,7	74,8	100,3	93,7
40	55,4	56,1	56,3	54,0	55,1	53,4	52,0	52,0	50,1	55,3	50,6	42,6	93,8	90,0
41	57,7	61,8	59,7	59,6	61,9	62,0	63,7	63,0	63,1	72,1	86,1	65,7	104,1	99,2
42	58,3	63,1	58,5	59,9	63,0	71,9	81,4	84,1	74,9	90,2	88,2	92,0	106,1	102,1

Tabelle D.10:
Messwerte zu den Messorten 39 bis 42 mit Bezug zu vorhandenen bzw. vorgeschlagenen Beurteilungskriterien (Bediener-Arbeitsplätze an Ultraschall-Schweißmaschinen, Arbeitsfrequenz: 35 kHz, ohne Schallschutzeinrichtung)

Lfd. Nr.	Diverse Messwerte (energetischer Mittelwert bzw. Maximalwert aus drei Stichproben)								Z-bewerteter maximaler 5-Minuten-Terzschalldruckpegel $L_{pZeq, Terz, 5 \text{ min}}$				
	L_{pAeq}	$L_{pAeq, HB}$	$L_{pAeq, M}$	$L_{pAeq, R}$	$L_{pZeq, Terz, 20 \text{ kHz}}$	$L_{pULTRAeq}$	L_{pCpeak}	L_{pZpeak}	16 kHz	20 kHz	25 kHz	31,5 kHz	40 kHz
39	86,8	81,6	83,0	81,1	77,7	100,7	108,9	118,0	78,5	79,7	76,9	101,0	94,4
40	79,6	68,9	69,3	68,9	50,6	95,3	109,6	127,3	55,9	50,9	43,1	94,0	90,2
41	88,7	74,3	73,5	–	86,1	105,1	121,6	129,4	73,4	87,3	66,2	104,8	99,8
42	93,5	87,2	88,5	84,7	88,2	107,7	128,2	131,9	91,1	89,5	92,5	107,8	103,8

Tabelle D.11:
Z-bewertetes Terzspektrum zu dem Messort 43; Bediener-Arbeitsplatz an Ultraschall-Schweißmaschine, Arbeitsfrequenz: 35 kHz, mit Schallschutzeinrichtung (80 Hz bis 1,6 kHz)

a) Terzmittenfrequenzen 80 Hz bis 1,6 kHz

Lfd. Nr.	$L_{pZeq, Terz}$ -Messwerte (energetischer Mittelwert aus drei Stichproben)													
	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1 kHz	1,25 kHz	1,6 kHz
43	59,8	58,6	51,2	53,9	55,1	54,5	57,4	58,2	57,8	56,9	56,6	56,3	55,1	54,7

Tabelle D.11:
Fortsetzung (2 bis 40 kHz)

b) Terzmittenfrequenzen 2 bis 40 kHz

Lfd. Nr.	$L_{pZeq, Terz}$ -Messwerte (energetischer Mittelwert aus drei Stichproben)													
	2 kHz	2,5 kHz	3,15 kHz	4 kHz	5 kHz	6,3 kHz	8 kHz	10 kHz	12,5 kHz	16 kHz	20 kHz	25 kHz	31,5 kHz	40 kHz
43	53,4	53,8	55,8	57,9	57,7	56,8	57,8	55,9	56,8	79,8	74,9	55,7	100,5	96,7

Tabelle D.12:

Messwerte zu dem Messort 43 mit Bezug zu vorhandenen bzw. vorgeschlagenen Beurteilungskriterien (Bediener-Arbeitsplatz an Ultraschall-Schweißmaschine, Arbeitsfrequenz: 35 kHz, mit Schallschutzeinrichtung)

Lfd. Nr.	Diverse Messwerte (energetischer Mittelwert bzw. Maximalwert aus drei Stichproben)								Z-bewerteter maximaler 5-Minuten-Terzschalldruckpegel $L_{pZeq, Terz, 5 \text{ min}}$				
	L_{pAeq}	$L_{pAeq, HB}$	$L_{pAUeq-M}$	$L_{pAUeq-R}$	$L_{pZeq, Terz, 20 \text{ kHz}}$	$L_{pULTRAeq}$	L_{pCpeak}	L_{pZpeak}	16 kHz	20 kHz	25 kHz	31,5 kHz	40 kHz
43	85,4	74,4	68,3	–	74,9	102,0	106,3	125,2	80,9	75,7	56,2	102,1	98,4

