

# Effektive Lärmdosis basierend auf Hörminderungs- äquivalenzen nach ISO 1999

M. Liedtke

(eingegangen am 09.12.2009, angenommen am 13.09.2010)

**SONDERDRUCK**  
aus ASU, Heft 11/2010

## Abstract/Zusammenfassung

### Effective Noise Dose based on hearing deterioration equivalencies adapted from ISO 1999

**Aim:** For the workplace conditions leading to occupational hearing impairment, publications – for example the German occupational disease bulletin BK-2301 (BMGS 2008) – specify the required exposure duration at a daily noise exposure level of 90 dB(A) or 85 dB(A) only imprecisely as “long-term” or “for some years”. For the purposes of occupational medical care, such information is not adequate for the prediction of noise-induced aggravation of already existing hearing loss. Therefore, occupational medical care and assessment of work-related criteria within the scope of the appraisal require an Effective Noise Dose to express the life-time occupational noise dose determined on an acknowledged scientific basis from the data for existing exposure periods or expected future periods. Then this noise dose would only have to be compared with a threshold value.

**Methods:** Noise-induced equivalent hearing threshold shift curves are calculated on the basis of ISO 1999:1990. An Effective Noise Dose is developed to express the occupational noise dose in a form which allows the noise exposures during all periods to be taken into account hearing threshold shift equivalently.

**Results:** It is demonstrated that the equivalent hearing threshold shift curves are independent of sex, age and of fractile for the fractiles  $Q < 0.50$ . The Effective Noise Dose is calculated using the given mathematical formulae and algorithms.

**Conclusions:** For occupational medical care purposes the noise-induced equivalent hearing threshold shift curves can be consulted to assess the risks of future exposure – for exam-

ple in regard to additional measures within further employment in a noisy environment of persons suffering from hearing deterioration.

Based on the procedure presented here, adapted from ISO 1999, an Effective Noise Dose is deduced for an individual of that half of the population which is most sensitive to hearing loss or hearing impairment; this Effective Noise Dose is valid for the working life exposure of that individual.

**Keywords:** hearing impairment – occupational disease – Effective Noise Dose – hearing deterioration equivalencies – ISO 1999

### Effektive Lärmdosis basierend auf Hörminderungs- äquivalenzen nach ISO 1999

**Ziel:** Zu den arbeitstechnischen Voraussetzungen für das Entstehen von Hörschäden finden sich in der Literatur – zum Beispiel im BK-2301-Merkblatt (BMGS 2008) – zur erforderlichen Expositionsdauer nur wenig präzise Angaben, wie „langjährig“ und „mehrjährig“ bezogen auf Tageslärmmexpositionspegel von 90 dB(A) bzw. 85 dB(A). Im Rahmen der arbeitsmedizinischen Vorsorge sind diese Angaben nicht geeignet, um eine Abschätzung hinsichtlich lärmbedingter, weiterer Verschlechterungen schon bestehender Hörminderungen zu ermöglichen. Für die arbeitsmedizinische Vorsorge und die Beurteilung der arbeitstechnischen Voraussetzungen im Rahmen der Begutachtung ist daher eine Effektive Lärmdosis erforderlich, die nach anerkannten wissenschaftlichen Erkenntnissen aus den Angaben zu den vorliegenden oder noch zu erwartenden Belastungsabschnitten eine berufliche Lärm-Lebensdosis ermittelt, die nur noch in Relation zu einem Schwellenwert gesetzt werden muss.

**Methode:** Basierend auf der ISO 1999:1990 werden Berechnungen von lärmbedingten hörschwellenverschiebungsäquivalenten Kurven durchgeführt. Zur Beschreibung der Dosis des beruflichen Lärms wird eine Effektive Lärmdosis entwickelt, die es erlaubt, alle Lärmexpositionen aus den einzelnen Belastungsabschnitten hörschwellenverschiebungsäquivalent zu berücksichtigen.

**Ergebnis:** Es wird gezeigt, dass die hörschwellenverschiebungsäquivalenten Kurven geschlechtsunabhängig, altersunabhängig und fraktilunabhängig für Fraktile  $Q < 0,50$  sind. Die Effektive Lärmdosis wird mittels der aufgelisteten mathematischen Formeln und Algorithmen berechnet.

**Schlussfolgerungen:** Zur Beurteilung der Gefährdung durch zukünftige Belastungen – z. B. hinsichtlich zusätzlicher Maßnahmen im Rahmen der Weiterbeschäftigung von Personen mit lärmbedingten Hörminderungen im Lärm – können im Rahmen der arbeitsmedizinischen Vorsorge die Hörschwellenverschiebungsäquivalenzen herangezogen werden.

Basierend auf dem hier vorgestellten Verfahren auf Grundlage der ISO 1999 wird für ein Individuum aus derjenigen Hälfte der Bevölkerung mit dem in Bezug auf Hörminderung oder Hörschädigung empfindlichsten Gehör eine für sein Arbeitsleben gültige Effektive Lärmdosis (ELD) abgeleitet.

**Schlüsselwörter:** Lärmschwerhörigkeit – Berufskrankheit – Effektive Lärmdosis – Hörminderungsäquivalenzen – ISO 1999

Arbeitsmed. Sozialmed. Umweltmed 2010; 45: 612–623

► **Einleitung und Ziele**

**Kennwerte zur Beschreibung der Lärmexposition**

Im Bereich der betrieblichen Lärmprävention wird der Lärmexpositionspegel ( $L_{EX,8h}$  oder in Ausnahmefällen  $L_{EX,40h}$  nach Lärm-VibrationsArbSchV (BMAS 2007) – früher der Beurteilungspegel  $L_r$  nach UVV Lärm) herangezogen, um im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung zu entscheiden, ob Auslösewerte oder Grenzwerte erreicht bzw. überschritten werden. An deren Erreichen bzw. Überschreitung sind bestimmte Präventionsmaßnahmen geknüpft. Ein Erreichen oder Überschreiten dieser Auslösewerte ( $L_{EX,8h} = 80 \text{ dB(A)}$  bzw.  $85 \text{ dB(A)}$  oder  $L_{C,peak} = 135 \text{ dB}$  bzw.  $137 \text{ dB}$ ) ist aber nicht hinreichend, um eine Lärmschwerhörigkeit zu entwickeln.

Der Lärmexpositionspegel berücksichtigt nur die längerfristig typische Belastung über einen Belastungsabschnitt (z. B. Tätigkeit mit längerfristig gleich bleibender Belastung über mehrere Monate, Jahre oder Jahrzehnte). Er repräsentiert daher nur das Risiko einer Hörschwellenverschiebung/eines Gehörschadens für einzelne Belastungsabschnitte im Rahmen der Prävention, ohne deren Dauer (in z. B. Jahren) zu berücksichtigen.

Um eine möglicherweise unmittelbar gehörschädigende Lärmeinwirkung durch extrem hohe Schalldruckpegel (z. B. Knalle, Explosionen) zu beurteilen, ist der maximale „I“ bewertete Schalldruckpegel  $L_{AI,max}$  (oder der  $L_{pC,peak}$ ) heranzuziehen. Einmalige Schallergebnisse von mehr als  $L_{AI,max} = 135 \text{ dB}$  können im Einzelfall akute Gehörschäden hervorrufen (VDI 2058-2:1988). Dieser Wert entspricht etwa dem Wertebereich von  $150\text{--}160 \text{ dB(C,peak)}$  (Liedtke 2010).

**Das Energieäquivalenzprinzip als Maß der Gehörfähigung**

Die These der für Gehörschädigung maßgebenden Schallenergie ist schon 1955 publiziert worden (Eldred 1955). Eldred postulierte, dass der gleiche Betrag der auf das Ohr treffenden Schallenergie auch jeweils den gleichen Betrag an Hörverlust bewirkt. Zu Beginn der Lärmwirkungsforschung hinsichtlich Gehörschädigung war dies ein brauchbarer Ansatz. Das Ergebnis eines 1981 durchgeführten internationalen Impulslärm-Kolloquiums (Gierke 1982) stellt einen bis heute gültigen Stand der Erkenntnisse dar: Es gibt einen beachtlichen Bestand an experimentellen Belegen für das Energieäquivalenzprinzip in Bezug auch auf fluktuierenden Lärm (aber frei von Impulsen mit  $L_{peak} > 145 \text{ dB}$ ) für Expositionsdauern

bis zu einigen Stunden. In der Praxis wird daher die Gültigkeit des Energieäquivalenzprinzips für eine Arbeitsschicht (8 Stunden) angenommen. Dies ist physiologisch plausibel: Anhaltende Stimulation der Haarzellen kann die Energiereserven (z. B. Sauerstoff und Glukose) erschöpfen, die zur Abdeckung des erhöhten metabolischen Bedarfs notwendig sind. Die Folgen für die Zelle sind bis zu einem bestimmten Ausmaß der Stimulation reversibel, wenn der Zelle Erholung gegönnt wird (Hellbrück 1993). Daher ist aufgrund physiologischer Überlegungen davon auszugehen, dass bedingt durch (z. B. nächtliche) Erholungsphasen das Energieäquivalenzprinzip nicht ohne Weiteres auf Zeiträume von z. B. mehreren Jahren übertragbar sein dürfte.

Tatsächlich zeigt die Erfahrung, dass das Energieäquivalenzprinzip nicht für lange Zeiträume gilt, d. h. einige Monate oder Jahre: In der Regel wird nicht beobachtet, dass der Hörverlust bei gleich bleibender Schalleinwirkung auf der dB-Skala über Jahre hinweg gleichmäßig fortschreitet (Feldmann 2006). Vielmehr entwickelt sich der Hörverlust in den ersten Expositionsjahren sehr rasch, erreicht aber dann oft eine Sättigung oder schreitet nur noch langsam fort. Diese Sättigung ist in vielen Studien der letzten Jahrzehnte dokumentiert worden.

**Das Risikomaß nach von Lüpke**

Zur Berechnung des Risikos einer Hörschwellenverschiebung/eines Gehörschadens für die Summe aller Belastungen im Laufe eines Arbeitslebens wurde 1975 das Risikomaß  $R$  nach von Lüpke veröffentlicht, das eine energieäquivalente Summierung der Belastungen aus den einzelnen Abschnitten verwendet (von Lüpke 1975). Von Lüpke stellte fest, dass der Verlauf zwar nicht zum vielfach genannten Bild der „Sättigung“ passt. Eine andere Studie habe aber gezeigt, dass gerade im Bereich um 2 kHz keine Sättigung stattfindet. Genau dieser Bereich spiele eine zentrale Rolle für die Bewertung einer Beeinträchtigung des Sprachverständnisses durch eine Lärmschädigung.

Abbildung 1 zeigt das Diagramm zur Ermittlung des Risikomaßes  $R$  nach von Lüpke bei einheitlicher Lärmeinwirkung und Formel (1) ermöglicht die Berechnung von  $R$ .

$$R = 2 \cdot \lg \left[ \sum_i \left( \frac{t_i}{t_0} \right) \cdot 10^{(0,1 \cdot D_i/D_0)} \right] \quad (1)$$

Mit:  $t_0 = 1 \text{ Jahr}$  und  $D_0 = 1 \text{ dB}$   
 $D_i = L_{ri} - 85 \text{ dB}$   
 Zeiten mit  $L_{ri} < 85 \text{ dB}$  werden nicht berücksichtigt

Für die Entwicklung dieses Risikomaßes wurden ca. 1700 Fälle entschädigter Lärmschwerhörigkeit der Süddeutschen Eisen- und Stahl-Berufsgenossenschaft aus dem Zeitraum 1969 bis 1978 ausgewertet. Nur ca. 6,8 % der für die Auswertung ausgewählten Fälle wiesen ein Risikomaß  $\leq 3$  auf (von Lüpke 1978). Alle Fälle mit einem Risikomaß  $> 3$  waren mit Expositionspegeln  $L_{ri} \geq 90 \text{ dB(A)}$  verbunden. Zudem dürfte der größte Teil der Fälle mit  $R \leq 3$  auch im Bereich  $L_{ri} \geq 90 \text{ dB(A)}$  aber mit Expositionsdauern unterhalb von 18 Jahren gelegen haben. Das heißt, in höchstens einigen wenigen der untersuchten Fälle (ein kleiner Teil der 6,8 %) könnte möglicherweise ein Schaden im Sinne entschädigter Lärmschwerhörigkeit durch Expositionen im Bereich  $L_{ri} < 90 \text{ dB(A)}$  entstanden sein.

Nachteil dieses Risikomaßes ist, dass die Wirkung des Lärms auf das Gehör unterhalb von  $90 \text{ dB(A)}$  überschätzt wird. Dies zeigt die nun vorgelegte Analyse der ISO 1999 (s. unten). Vorteil des Risikomaßes ist seine einfache Berechnung, da es auf dem Energieäquivalenzprinzip basiert. Insbesondere ist das Berechnungsergebnis unabhängig von der Reihenfolge der Belastungsabschnitte.

**Anforderungen an eine Effektive Lärmdosis (ELD)**

Die beruflichen, gehörfährenden Lärmbelastungen liegen mittlerweile überwiegend im Bereich  $85\text{--}90 \text{ dB(A)}$ . Es wird ein Modell benötigt, das die Dosis-Wirkungs-Beziehung auch in diesem Bereich ausreichend genau beschreibt.

Die LärmVibrationsArbSchV (BMAS 2007) verlangt nun auch die Dokumentation der Expositionen im Bereich  $80\text{--}85 \text{ dB(A)}$ . Da in Zukunft diese Expositionsdaten zusätzlich vorliegen, wird vermehrt die Frage nach der willkürlichen Spezifikation gestellt werden, die die für die Berücksichtigung im Risikomaß nach von Lüpke notwendige Mindestexpositionspegel auf  $85 \text{ dB(A)}$  ohne Ansehen der Expositionsdauer festlegt. Zusätzlich sollte das Dosis-Wirkungs-Modell daher auch Expositionen unterhalb  $85 \text{ dB(A)}$  berücksichtigen.

Im BK-2301-Merkblatt (BMGS 2008) finden sich zur Lärmdosis nur allgemeine Hinweise wie:

„Bei einem Tages-Lärmexpositionspegel von mehr als  $90 \text{ dB(A)}$  und lang andauernder Einwirkung besteht für einen beträchtlichen Teil der Betroffenen die Gefahr einer Gehörschädigung. Gehörschäden werden auch bereits durch langjährigen Lärm verursacht, dessen Tages-Lärmexpositionspegel den Wert von  $85 \text{ dB(A)}$  erreicht oder überschreitet.“

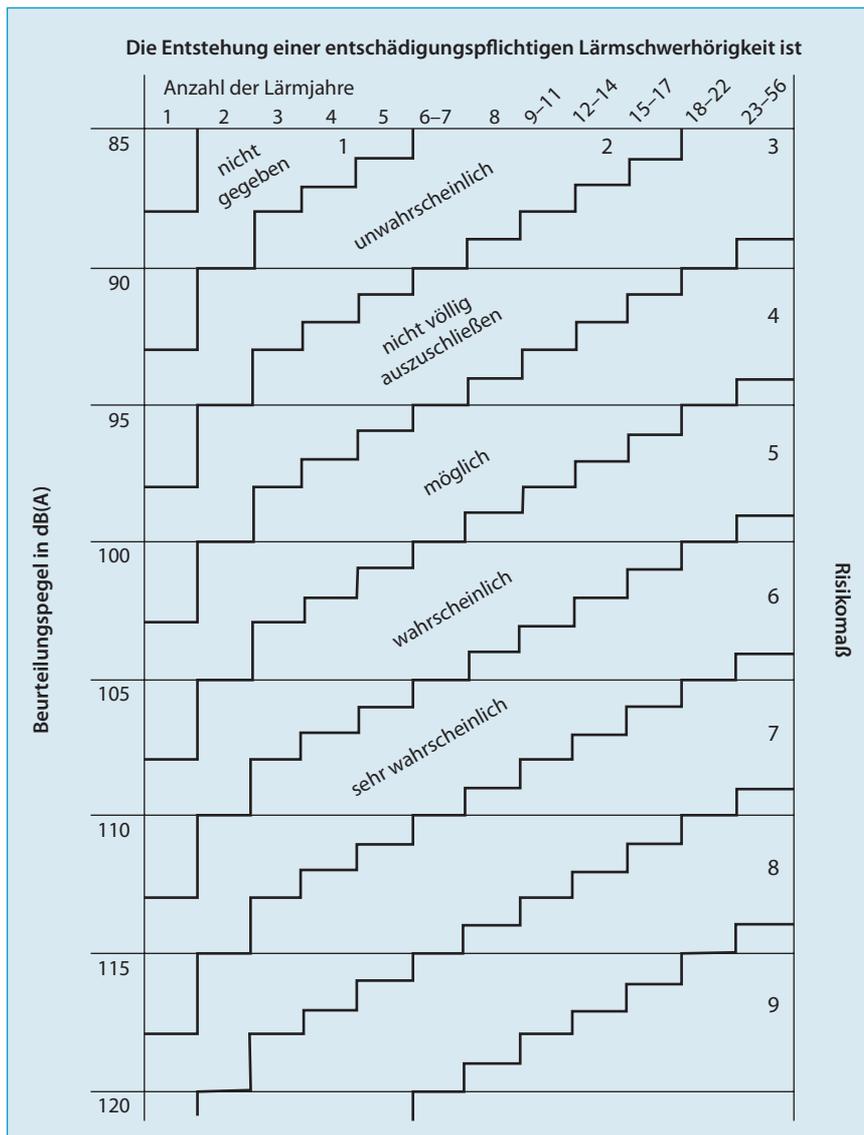


Abb. 1: Diagramm zur Ermittlung des Risikomaßes nach von Lüpke bei einheitlicher Lärmeinwirkung. Die Risikobeurteilung zu den Werten von  $R$  gelten auch bei nicht einheitlicher Lärmbelastung während eines Arbeitslebens (aus v. Lüpke 1975)

Fig. 1: Diagram for the determination of the "risk dose" for uniform noise exposure according to von Lüpke. The assessment of the risk referring to the  $R$  values applies also to non-uniform noise exposure during a working life (taken from v. Lüpke 1975)

„Am Arbeitsplatz kann Lärm nach mehrjähriger Einwirkung zu Lärmschäden des Gehörs führen. Bei sehr hohen Lautstärken sind bleibende Gehörschäden auch schon nach wenigen Tagen oder Wochen möglich.“

Die allgemeinen Angaben des 1. Absatzes sollten im Sinne der Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Gleichbehandlung auf nachvollziehbarer, wissenschaftlicher Basis durch eine Effektive Lärmdosis konkretisiert werden. Zu den arbeitstechnischen Voraussetzungen akuter Gehörschäden durch „sehr hohe Lautstärken“ finden sich hinreichende Angaben in der VDI 2058-2 und (Liedtke 2010) (s. oben).

### ► Kollektiv und Methode

#### Abschätzung des Hörverlustes nach ISO 1999

**Einführung in die ISO 1999.** ISO 1999 enthält ein mathematisches Modell zur Berechnung der zu erwartenden Hörverluste für Gruppen ohne Lärmbelastung und für einheitlich lärm-belastete Gruppen. In die Berechnung gehen folgende Einflussgrößen ein:

- der Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  in dB(A), d. h. der A-bewertete, energieäquivalente, auf acht Stunden bezogene Dauerschallpegel,

- die Expositionsdauer  $t$  in Jahren,
- das Lebensalter in Jahren,
- das Geschlecht.

Als Grenzen für die Gültigkeit des Modells werden angegeben:

- $L_{EX,8h}$  zwischen 75 dB(A) und 100 dB(A),
- Lebensalter über 18 Jahre und
- Expositionsdauer von 0 bis 40 Jahren.

Die Aussagen des Modells beschränken sich auf Gruppen ohne außerberuflich bedingte Hörminderungen. Die Berechnung ergibt die Hörverluste bei den Frequenzen  $f$  0,5; 1; 2; 3; 4 und 6 kHz in Fraktile  $Q$  von 0,05 bis 0,95. Das Fraktile  $Q$  von 0,05 besagt beispielsweise, dass bei 5 % der Lärm-exponierten ein Hörverlust zu erwarten ist, der gleich oder größer als der von der ISO ausgewiesene Wert ist (Abb. 2). ISO 1999 ist das einzige als internationale Norm veröffentlichte Lärmdosis-Wirkungs-Modell. Diese Norm ist auch dafür gedacht, die Gefahr der Entwicklung von Gehörschäden durch arbeitstäglich wiederholte oder regelmäßige berufliche Lärmexposition zu berechnen. Für 15 der 18 in der ISO 1999 aufgeführten Literaturstellen konnte der Verfasser ermitteln, dass insgesamt in 44 Studien fast 45 000 Individuen im Zeitraum 1950 bis 1984 untersucht wurden. Mit den heutigen Expositionsbedingungen, die sich hinsichtlich der Schwankung der Lärmeinwirkungen und der Verwendung von Gehörschützern deutlich unterscheiden, und der dadurch erschwerten Ableitung einer Dosis-Wirkungs-Beziehung auf Basis neuer Daten erklärt sich die hohe Bedeutung der in der ISO 1999 beschriebenen Erkenntnisse.

#### Lärmbedingte und altersbegleitende Hörschwellenverschiebung.

Die lärmbedingte und altersbegleitende Hörschwellenverschiebung einer lärmexponierten Population wird HTLAN („hearing threshold level associated with age and noise“), kurz  $H'$  in Dezibel genannt und nach ISO 1999 wie folgt berechnet:

$$H' = H + N - \frac{HN}{120} \quad (2)$$

$H$  ist die altersbegleitende Hörschwellenverschiebung, HTLA („hearing threshold level associated with age“) in Dezibel. Für die Berechnung der HTLAN einer Population muss die HTLA dieser Population bekannt sein. ISO 1999 sieht zwei Möglichkeiten basierend auf zwei unterschiedlichen Datenquellen vor:

1. Eine otologische normale Population (ISO 7029:2000) und
2. eine andere vom Nutzer der ISO 1999 ausgewählte, geeignete Population.

1.) wird von der ISO 1999 als „Datenbasis A“ im Anhang A der ISO 1999 beschrieben. Für 2.) wird im Anhang B der ISO 1999 ein Beispiel angegeben. Die Werte für die Datenbasis A werden als Funktion des Alters, des Geschlechts, des Fraktils  $Q$  und der Frequenz  $f$  berechnet. Für die Erstellung der Abb. 2 wurde Datenbasis A verwendet.

$N$  ist die tatsächliche oder mögliche lärmbedingte permanente Hörschwellenverschiebung NIPTS („noise-induced permanent threshold shift“) in Dezibel. Die Werte von  $N$  werden als Funktion des Expositionspegels  $L_{EX,8h}$ , der Expositionsdauer  $t$ , des Fraktils  $Q$  und der Frequenz  $f$  berechnet. Der Effekt der Lärmexposition auf eine Population, beschrieben durch von Lärm verursachte Hörschwellenverschiebungen zusätzlich zur HTLA, wird als „HTLAN minus HTLA“ ( $H' - H$ ) beschrieben. ( $H' - H$ ) ist nur dann gleich der NIPTS ( $N$ ), wenn der Term  $HN/120$  vernachlässigt werden kann.

**Grundlagen für eine Effektive Lärmdosis auf der Basis der ISO 1999.** Aus (2) lässt sich leicht folgende Formel ableiten, die die Wirkung des Lärms auf eine Population beschreibt:

$$H' - H = \left(1 - \frac{H}{120}\right) \cdot N \quad (3)$$

$H(t_1, L_{EX,8h,1}) - H$  sei der Effekt des Lärms auf eine Population (1) von Individuen des gleichen Lebensalters, die einheitlich der Expositionsdauer  $t_1$  in Jahren und dem Expositionspegel  $L_{EX,8h,1}$  in dB(A) ausgesetzt war.  $H(t_2, L_{EX,8h,2}) - H$  seien die Werte einer zweiten Population (2) von Individuen des gleichen Lebensalters wie die der Population (1), die aber einheitlich über die Dauer  $t_2$  in Jahren mit dem Expositionspegel  $L_{EX,8h,2}$  in dB(A) exponiert war. Durch Gleichsetzen der beiden Lärmeffekte können nun für unterschiedliche Expositionspegel hörschwellenverschiebungsäquivalente Dauern berechnet werden:

$$H\left(1 - \frac{H}{120}\right) \cdot N(t_1, L_{EX,8h,1}) = H(t_1, L_{EX,8h,1}) - H = H(t_2, L_{EX,8h,2}) - H = H\left(1 - \frac{H}{120}\right) \cdot N(t_2, L_{EX,8h,2}) \quad (4)$$

Aus (4) ergibt sich:

$$N(t_1, L_{EX,8h,1}) = N(t_2, L_{EX,8h,2}) \quad (5)$$

Liegen die Werte  $t_1$ ,  $L_{EX,8h,1}$  und  $L_{EX,8h,2}$  fest, so kann  $t_2$  berechnet werden.  $t_2$  ist dabei die Dauer, die die Population (2) bei einem Expositionspegel  $L_{EX,8h,2}$  benötigt, um die gleiche Hörschwellenverschiebung zu entwickeln, wie Population (1) bei einem Expositionspegel  $L_{EX,8h,1}$  und einer Expositionsdauer von  $t_1$ .

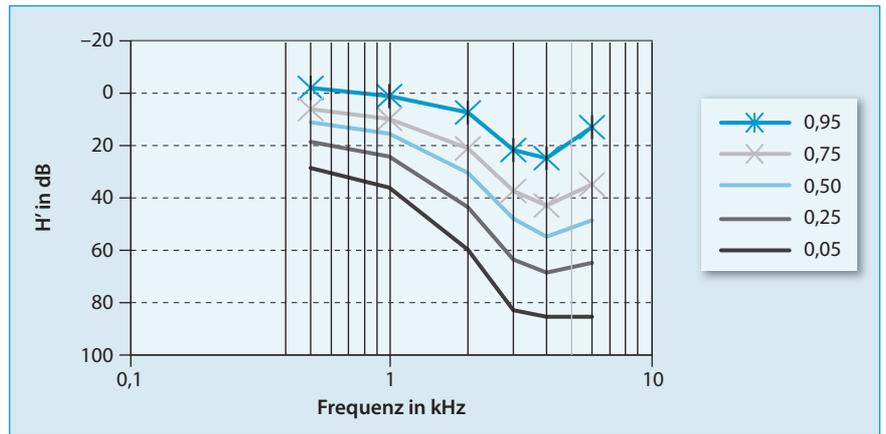


Abb. 2: Permanente Hörschwellenverschiebung (HTLAN bzw.  $H'$ ) nach ISO 1999 für die Fraktile  $Q$  0,05; 0,25; 0,5; 0,75 und 0,95 gegen die Frequenz  $f$  einer männlichen Population aufgetragen, alle Individuen 55 Jahre alt und 35 Jahre mit  $L_{EX,8h} = 100$  dB(A) exponiert

Fig. 2: Permanent hearing threshold shift (HTLAN or  $H'$ ) according to ISO 1999 for fractiles  $Q$  0.05; 0.25; 0.5; 0.75 and 0.95 plotted versus frequency  $f$  for a male population, all individuals 55 years old and exposed for 35 years at  $L_{EX,8h} = 100$  dB(A)

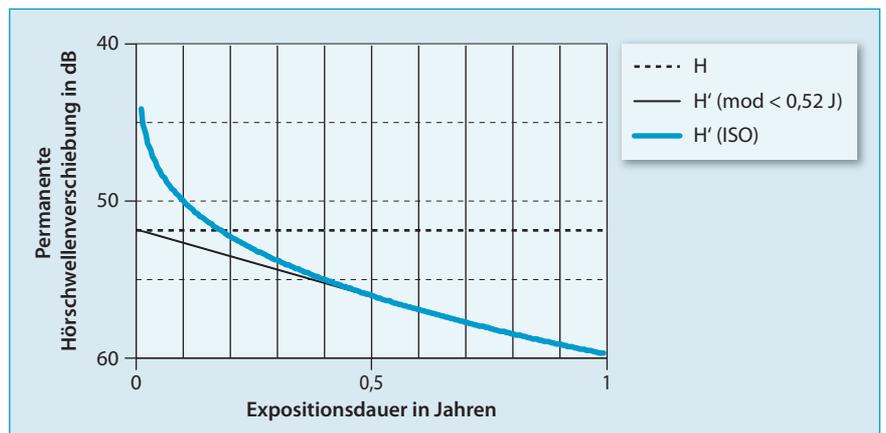


Abb. 3: Permanente Hörschwellenverschiebung  $H'$  (ISO) für 4 kHz nach ISO 1999, Datenbasis A, für 55-jährige Männer des Fraktils 0,05, die mit  $L_{EX,8h} = 100$  dB(A) exponiert waren.  $H'$  (mod < 0,52 J) zeigt die entsprechend für die Effektive Lärmdosis verwendete Modifikation für Expositionsdauern < 0,52 Jahre.  $H$  ist die permanente Hörschwellenverschiebung nach ISO 1999 für die gleiche Populationsgruppe ohne Lärmexposition

Fig. 3: Permanent hearing threshold shift  $H'$  (ISO) for 4 kHz according to ISO 1999, database A, for men aged fifty-five from fractile 0.05 exposed to  $L_{EX,8h} = 100$  dB(A).  $H'$  (mod < 0.52 years) presents the corresponding modification for exposure duration < 0.52 years used for the Effective Noise Dose.  $H$  is the permanent hearing threshold shift according to ISO 1999 for the same population group without exposure to noise

Diese Berechnung ist unabhängig vom Geschlecht und vom Lebensalter, da nur  $H$ , aber nicht  $N$  von diesen Parametern abhängt, und in (5)  $H$  nicht mehr vorkommt. Denn  $H$  ist für beide Populationen (1) und (2) gleich groß, da es unabhängig von der Lärmexposition ist. Beide Populationen (1) und (2) weisen dann das gleiche  $N$  auf. Um hörschwellenverschiebungsäquivalente Wertepaare oder Kurven für  $H' - H$  zu bestimmen reicht es daher aus, (NIPTS)-äquivalente Wertepaare oder Kurven zu berechnen.

### NIPTS-äquivalente Kurven

#### Modifikationen der ISO 1999 für Fraktile kleiner 0,50.

Abbildung 3 zeigt mit der Darstellung „ $H'$ (ISO)“ die permanente Hörschwellenverschiebung  $H'$  für 4 kHz nach ISO 1999 (Formel (2)) für 55-jährige Männer des Fraktils 0,05, die mit  $L_{EX,8h} = 100$  dB(A) exponiert waren. Für Expositionsdauern kleiner als 2 Monate zeigen Exponierte („ $H'$ (ISO)“) der genannten Gruppe nach ISO 1999 eine Verbesserung des Hörvermögens gegenüber den nichtexponierten Männern des

gleichen Alters und Fraktile „ $H'$ “, abzulesen an jeweils geringeren Werten für die PTS. Dies ist nicht plausibel, denn die PTS kann durch Lärmexposition nur vergrößert werden. Ursache sind negative NIPTS-Werte für Expositionsauern kleiner als 2 Monate. Nach den Angaben der ISO 1999 selbst ist der Wert für NIPTS ohne Lärmexposition gleich Null; mit Lärmexposition muss NIPTS positive Werte annehmen. Obwohl in den Studien, die die ISO 1999 verwendet, Messwerte zu Exponierten mit geringen Expositionsauern (z. B. 1 oder 2 Monate) berücksichtigt wurden, liefert ISO 1999 für kurze Expositionsauern keine plausiblen Werte. Zum Zeitpunkt der Erarbeitung der ISO 1999 wurde offenbar der Bereich kurzer Expositionsauern als nicht relevant angesehen. Im Rahmen dieses Beitrags und mit Bezug auf häufig über Monate und Jahre wechselnde Expositionspegel der Beschäftigten wird für entsprechende Berechnungen eine auch für kurze Expositionsauern gültige Formel benötigt.

Zur Berechnung von  $H'$  (ISO) für Fraktile  $< 0,50$  (wie z. B. in Abb. 3 gezeigt) verwendet ISO 1999 den Parameter  $d_u$ , der wie folgt berechnet wird:

$$d_u = [X_u + Y_u \lg(t)] (L_{EX,sh} - L_0)^2 \quad (6)$$

$X_u$ ,  $Y_u$  sind Funktionen der Audiometriefrequenz.

$t$ : Expositionsauer in Jahren,

$L_0$ : Grenzpegel nach ISO 1999 für  $L_{EX,sh}$  größer als  $L_0$ . Falls  $L_{EX,sh}$  kleiner ist als  $L_0$ , ist  $L_{EX,sh}$  gleich  $L_0$  zu setzen.

Für den Bereich  $t < 0,52$  Jahre wird für Fraktile  $< 0,50$  im Rahmen der Berechnungen zur Effektiven Lärmdosis die folgende, modifizierte Formel verwendet, deren Verlauf in Abb. 3 durch „ $H'$  (mod  $< 0,52$  J)“ beschrieben wird:

$$d_u = \frac{\lg(t+1)}{\lg(11)} \cdot [X_u + Y_u] (L_{EX,sh} - L_0)^2 \quad (7)$$

Für die Frequenzen 0,5, 1 und 6 kHz ergeben sich analog Korrekturen für den Bereich  $t < 9$  Tage. Für 3 kHz ergeben sich Korrekturen für  $t < 0,86$  Jahre und für 2 kHz wird der gesamte Bereich  $t < 10$  Jahre durch Formel (7) beschrieben. Ziel aller Modifikationen ist es, die Formeln der ISO 1999 nur dort zu modifizieren, wo sie eindeutig unplausible Ergebnisse liefern.

Da die ISO 1999, bezogen auf 4 kHz, die Grundlage der Effektiven Lärmdosis bildet (s. unten), wurden die vorgenommenen Modifikationen zwar insgesamt exemplarisch, aber detailliert für diese Frequenz dargestellt. Für Fraktile  $\geq 0,50$  ergeben sich not-

wendige Modifikation für andere Bereiche der Expositionsauer. Da dieser Fraktilbereich für die Entwicklung der Effektiven Lärmdosis irrelevant ist, kann an dieser Stelle auf eine genaue Darstellung dort notwendiger Modifikationen verzichtet werden.

**NIPTS-äquivalente Kurven für verschiedene Frequenzen.** In Abb. 4 sind die NIPTS-äquivalenten Kurven für die Frequenzen dargestellt, die in der ISO 1999 angegeben werden. Für die numerischen Berechnungen wurden die Modifikationen der ISO 1999 verwendet, wie sie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben werden. Alle Punkte einer Kurve weisen die gleiche lärmbedingte permanente Hörschwellenverschiebung (NIPTS) auf wie die NIPTS, die am Punkt  $L_{EX,sh} = 90$  dB(A) und  $t = 5$  Jahre der jeweiligen Kurve anzutreffen ist. Ein Hinweis zur Wahl dieses Punktes findet sich in Kapitel „Schlussfolgerung“. In diesem Abschnitt ist der gewählte Punkt beispielhaft und die abgeleiteten Erkenntnisse sind prinzipieller Natur, d. h. unabhängig von der Wahl einer Schwelle im Kapitel „Schlussfolgerung“. Die 500-Hz-Kurve kann nicht dargestellt werden, da für 500 Hz der Grenzschalldruckpegel nach ISO 1999 93 dB(A) beträgt, d. h. erst für Schalldruckpegel oberhalb von 93 dB(A) werden lärmbedingte Hörschwellenverschiebungen angegeben.

Der Grenzschalldruckpegel für 1 kHz beträgt nach ISO 1999 89 dB(A). Die lärmbedingten permanenten Hörschwellenverschiebungen sind sehr gering (NIPTS beträgt bei  $L_{EX,sh} = 90$  dB(A) und  $t = 5$  Jahren ca. 0,1 dB). Die 1-Hz-Kurve ist daher für eine Verwendung innerhalb einer Lärmdosis nicht geeignet, da die mit ihr beschriebenen Lärmeffekte zu gering sind.

Die 2-kHz-Kurve wurde unterhalb von  $t = 10$  Jahren vollständig modifiziert (s. oben). Diese Modifikation konnte nicht anhand der audiometrischen Basisdaten der ISO 1999 geprüft werden, da diese nicht zur Verfügung standen. Außerdem sind für die 2-kHz-Kurve die Lärmeffekte deutlich kleiner als bei 3, 4 und 6 kHz (s. Abb. 2). Daher scheidet auch die 2-kHz-Kurve für die Entwicklung einer Lärmdosis aus.

Die lärmbedingte permanente Hörschwellenverschiebung ist für eine gegebene Belastung nach ISO 1999 für die Frequenz 4 kHz am größten. Da hier der größte Effekt beobachtet wird, ist anzunehmen, dass auch der Lärmeffekt durch die ISO 1999 bei 4 kHz präziser beschrieben wird, als bei anderen Frequenzen. Für 6 kHz ist der Lärmeffekt nach ISO 1999 geringer als für 3 kHz oder 4 kHz. Die 4-kHz-NIPTS-äquivalente Kurve bildet daher eine gute Grund-

lage für die Entwicklung einer Effektiven Lärmdosis. Zudem zeigt sich klinisch die Lärmschwerhörigkeit nach Feldmann et al. (2006) mit großer Regelmäßigkeit zu Beginn in einer umschriebenen Hochtonsenke um 4–6 kHz. Nach dem Merkblatt zu der Berufskrankheit Nr. 2301 (BMGS 2008) kann schon die beginnende Gehörschädigung durch Lärm mittels Tonaudiogramm durch typischen pathognomonischen Hörverlust im Frequenzbereich um 4000 Hz (sog. c5-Senke) festgestellt werden. In der Fachliteratur ist zu lesen, dass die Hörschwelle bei 4 kHz empfindlicher auf Lärm reagiert als die Schwelle bei 3 kHz. Der Grenzschalldruckpegel für 4 kHz ist nach ISO 1999 75 dB(A). Damit ist er der kleinste der in ISO 1999 angegebenen Grenzschalldruckpegel. Im Folgenden wird daher die NIPTS-äquivalente Kurve bei 4 kHz für die Effektive Lärmdosis herangezogen. Damit werden Expositionen ab einem Schalldruckpegel von  $L_{EX,sh} = 75$  dB(A) berücksichtigt.

#### NIPTS-äquivalente Kurven für verschiedene Fraktile.

Abbildung 5 zeigt die NIPTS-äquivalenten Kurven für die Frequenz 4 kHz für eine lärmexponierte Population. Für die numerischen Berechnungen wurden erneut die Modifikationen der ISO 1999 verwendet, wie sie oben beschrieben werden. Alle Punkte einer Kurve weisen die gleiche lärmbedingte permanente Hörschwellenverschiebung (NIPTS) auf wie die NIPTS, die am Punkt  $L_{EX,sh} = 90$  dB(A) und  $t = 5$  Jahre der jeweiligen Kurve anzutreffen ist. Ein Hinweis zur Wahl dieses Punktes findet sich im Kapitel „Schlussfolgerung“. In diesem Abschnitt ist der gewählte Punkt beispielhaft und die abgeleiteten Erkenntnisse sind prinzipieller Natur – d. h. unabhängig von der Wahl einer Schwelle im Kapitel „Schlussfolgerung“.

Es zeigt sich, dass die Kurven der Fraktile 0,05 bis 0,5 fast genau zur Deckung kommen, hingegen die Kurven der Fraktile oberhalb 0,50 deutlich unterschiedliche Verläufe zeigen. Die Abweichung zwischen den Fraktile 0,10 und 0,05, d. h. [NIPTS ( $Q = 0,10$ ) – NIPTS ( $Q = 0,05$ )] beträgt maximal 0,08 dB(A) bei einem Expositionspegel von 99,5 dB(A) und minimal –0,03 dB(A) bei 88,1 dB(A). Diese Abweichungen, jeweils bezogen auf das 0,05 Fraktile, wachsen kontinuierlich bei steigendem  $Q$  bis sie maximal 0,56 dB(A) bei 99,5 dB(A) und –0,16 dB(A) bei 88,1 dB(A) für das Fraktile 0,50 erreichen. Untersuchung der Kurvenscharen für andere Wertepaare  $L_{EX,sh}$  und  $t$  ergaben keine signifikant höheren Abweichungen als für das Paar 90 dB(A) und 5 Jahre.

Da diese Abweichungen wesentlich geringer sind als die Unsicherheiten der ermittelten Expositionspegel ( $L_{EX,8h}$ ), können die genannten Abweichungen vernachlässigt werden. Dies bedeutet, dass für die Hälfte einer lärmexponierten Population (0,05 Fraktile bis 0,50 Fraktile) der Verlauf der NIPTS-Äquivalenzkurven unabhängig vom Fraktile angegeben werden kann. Es handelt sich um diejenige Hälfte, deren Hörschwellen empfindlich auf Lärm reagieren. Extrapolation der ISO 1999 außerhalb ihres Gültigkeitsbereiches bis zum Fraktile  $Q = 0,01$  ergibt nur vernachlässigbare Abweichungen von der Kurve bei  $Q = 0,05$ . Im Bereich  $Q = 0,03$  liegen die Fälle der anerkannten beruflichen Lärmschwerhörigkeit (BK 2301), denn als Summe der anerkannten BK-2301-Fälle für die Jahre 1988–2007 ergibt sich aus den Daten der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) für den Bereich der gewerblichen Berufsgenossenschaften eine Zahl von ca. 110 000 Fällen bei ca. 3,5 Millionen Lärmexponierten. Die Zahl 3,5 Millionen ergibt sich aus der Anzahl der im Bereich der gewerblichen Berufsgenossenschaften durchgeführten Gehörvorsorgeuntersuchungen und Abschätzungen der Experten. Der Anteil der anerkannten BK-2301-Fälle außerhalb des Bereichs der gewerblichen Berufsgenossenschaften bezogen auf die Gesamtzahl der Fälle betrug im Jahre 2007 6 % und kann daher im Rahmen dieser Betrachtung vernachlässigt werden.

Wenn der Lärmereffekt für das Fraktile 0,50 bis zum Fraktile 0,05 sehr präzise durch eine einzige Kurve beschrieben werden kann, liegt es nahe anzunehmen, dass diese Beschreibung des Effekts auch für Fraktile  $Q < 0,05$  hinreichend genau ist. Daher wird unterstellt, dass die 0,05-Fraktile-Kurve auch für Fraktile mit  $Q < 0,05$  die NIPTS-äquivalenten Kurven hinreichend genau beschreibt. Damit ließe sich die Schwellenkurve der hinreichenden Exposition für die arbeitstechnische Voraussetzung im Sinne des Entstehens einer beruflichen Lärmschwerhörigkeit genau beschreiben, wenn erst einmal ein Punkt (ein Expositionspegel und eine Expositionsdauer) festgelegt würde.

Mit den NIPTS-äquivalenten Kurven für die Frequenz 4 kHz und für das Fraktile  $Q = 0,05$  sind NIPTS-Äquivalenzen gefunden, die unabhängig vom Geschlecht, unabhängig vom Lebensalter und unabhängig vom Fraktile Lärmereffektäquivalenzen beschreiben. Diese Lärmereffektäquivalenzen haben Gültigkeit für jedes Individuum derjenigen Hälfte der Bevölkerung, die aus den Individuen mit dem für Lärm empfindlichsten Gehör besteht.

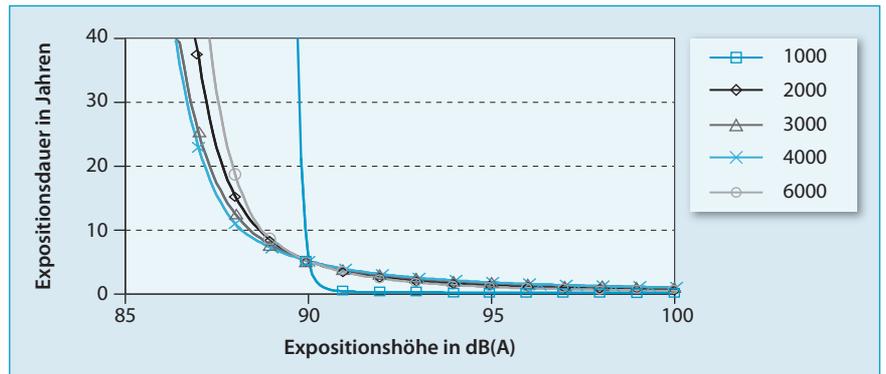


Abb. 4: NIPTS-äquivalente Kurven für das 0,05 Fraktile einer lärmexponierten Population  
Fig. 4: NIPTS-equivalent curves for the fractile 0.05 for the audiometric frequencies of a population exposed to noise

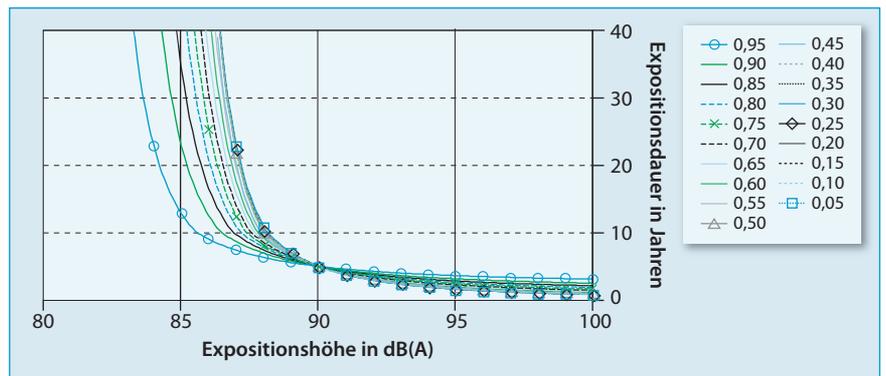


Abb. 5: NIPTS-äquivalente Kurven nach Fraktile für die Frequenz 4 kHz einer lärmexponierten Population  
Fig. 5: NIPTS-equivalent curves for the frequency 4 kHz for the fractiles of a population exposed to noise

► Ergebnisse

**Effektive Lärmdosis auf der Basis der ISO 1999**

**Berechnungen der NIPTS-Äquivalenzen.** Für eine gegebene Lärmexposition beschrieben durch den Expositionspegel  $L_{EX,8h,1}$  in dB(A) und die Expositionsdauer  $t_1$  in Jahren lässt sich die zu einem Expositionspegel  $L_{EX,8h,2}$  in dB(A) NIPTS-äquivalente Expositionsdauer  $t_2$  wie folgt berechnen:

für  $L_{EX,8h,1} \leq 75$ :  $N = 0$   
für  $L_{EX,8h,1} > 75$ :

■ für  $t_1 \leq 0,52$  Jahre:

$$N = \frac{\log(t_1 + 1)}{\log(11)} (L_{EX,8h,1} - 75)^2 \cdot a \quad (8)$$

■ für  $0,52 < t_1 < 10$  Jahre:

$$N = (L_{EX,8h,1} - 75)^2 \left[ \frac{\log(t_1 + 1)}{\log(11)} \cdot b + c + d \cdot \log(t_1) \right] \quad (9)$$

■ für  $t_1 \geq 10$  Jahre:

$$N = (L_{EX,8h,1} - 75)^2 \cdot (e + f \cdot \log(t_1)) \quad (10)$$

für  $t_2 \leq 0,52$  Jahre:  $t_2 = 10^x - 1$  mit:

$$x = \frac{N \cdot \log(11)}{(L_{EX,8h,2} - 75)^2 \cdot a} \quad (11)$$

für  $0,52 < t_2 < 10$  Jahre ist die folgende Gleichung zu lösen (z. B. iterativ):

$$N = (L_{EX,8h,2} - 75)^2 \left[ \frac{\log(t_2 + 1)}{\log(11)} \cdot b + c + d \cdot \log(t_2) \right] \quad (12)$$

Für  $t_2 \geq 10$  Jahre:  $t_2 = 10^x$  mit:

$$x = \frac{\frac{N}{(L_{EX,8h,2} - 75)^2} - e}{f} \quad (13)$$

Die Konstanten sind:

- a 0,0730286
- b 0,05
- c 0,0082245
- d 0,0148041
- e 0,0332245
- f 0,0398041

Gültigkeitsgrenzen sind:

- $0 \leq t_1 \leq 40$  Jahre;
- $75 \leq L_{EX,8h,1} \leq 100$  dB(A);
- $75 \leq L_{EX,8h,2} \leq 100$  dB(A) und
- $0 \leq t_2 \leq 40$  Jahre

Die Kurven nach (11) und (12) schneiden sich bei  $t_2 = 0,52$  Jahre und  $t_2 = 10$  Jahre. Die Formeln nach (11), (12) und (13) liefern im Punkt  $t_2 = 10$  Jahre alle das gleiche Ergebnis. Eine erste Berechnung von  $t_2$  nach Formel (11) ermöglicht daher eine sichere Entscheidung, welche der drei Formeln (11) oder (12) oder (13) anzuwenden ist, d. h. ob  $t_2 \leq 0,52$  oder  $0,52 < t_2 < 10$  Jahre oder  $t_2 \geq 10$  Jahre ist.

**NIPTS-Äquivalenz-Kurven.** Durch Berechnung aller NIPTS-Äquivalenzen zu einem Wertepaar, z. B.  $L_{EX,8h,1} = 90$  dB(A) und  $t_1 = 5$  Jahre, ergibt sich die NIPTS-Äquivalenzkurve zu diesem Wertepaar. Erfolgt dies in 1-dB(A)-Schritten von  $L_{EX,8h,1} = 76$  dB(A) bis 100 dB(A) für jeweils  $t_1 = 5$  Jahre, so entsteht Abb. 6. Ein Hinweis zur Wahl der

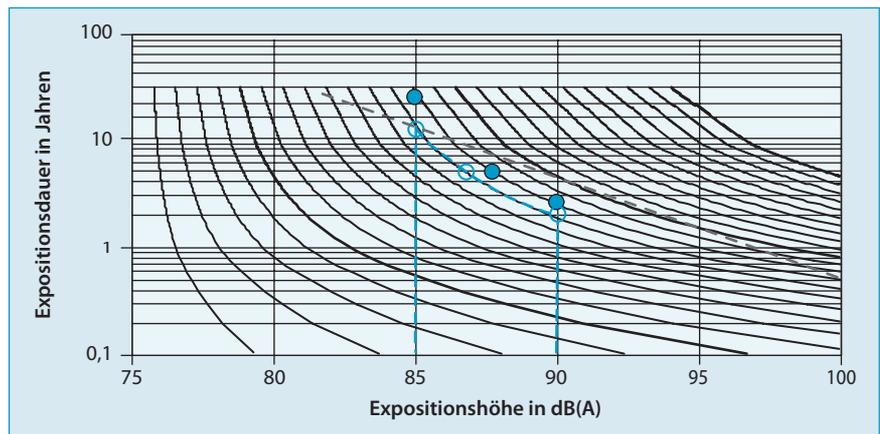


Abb. 6: NIPTS-äquivalente Kurven für Expositionspiegel von links nach rechts 76 dB(A), 77 dB(A), 78 dB(A) ... 100 dB(A) jeweils bezogen auf die NIPTS bei einer Expositionsdauer von 5 Jahren  
 Fig. 6: NIPTS-equivalent curves for exposure levels from left to right 76 dB(A), 77 dB(A), 78 dB(A) ... 100 dB(A) each for the NIPTS associated with an exposure duration of 5 years

Dauer von 5 Jahren findet sich im Kapitel „Schlussfolgerung“. In diesem Abschnitt ist der gewählte Punkt beispielhaft und die abgeleiteten Erkenntnisse sind prinzipieller

Natur – d. h. unabhängig von der Wahl einer Schwelle im Kapitel „Schlussfolgerung“ können auch NIPTS-Äquivalenzkurven zu anderen Expositionsdauern berechnet werden. Tabelle 1 gibt NIPTS-äquivalente Wertepaare zu den in Abb. 6 gezeigten Kurven an: Sucht man zu einer gegebenen Expositionsdauer (erste Spalte) in der jeweiligen Zeile einen gegebenen Expositionspiegel auf, so sind alle Wertepaare, die sich aus Expositionspiegeln der Spalte dieses gegebenen Expositionspiegels mit den zugehörigen Expositionsdauern aus der ersten Spalte bilden lassen, NIPTS-äquivalent zu dem gegebenen Wertepaar.

Die NIPTS-Äquivalenzkurven unterscheiden sich deutlich von Energie-Äquivalenzkurven (z. B. Risikomaß nach von Lüpke): Letztere Kurven würden in dem doppellogarithmischen Diagramm (Abb. 6), als Geraden mit einer Steigerung des Expositionspiegels von 3 dB(A) pro Halbierung der Expositionsdauer erscheinen; als Beispiel wurde eine entsprechende Gerade mit gestrichelter Linie eingezeichnet, die alle Punkte verbindet, die energieäquivalent zum Punkt 90 dB(A)/5 Jahre sind. Der oben genannte Sättigungseffekt wird dagegen nur durch die NIPTS-Kurven beschrieben: Die NIPTS-Kurven in Abb. 6 werden zu hohen Pegeln hin immer flacher; dies bedeutet, dass sich die Expositionsdauer mit gleicher Schädigungswirkung bei Erhöhung des Expositionspiegels um z. B. 3 dB(A) schnell weit mehr als verdoppelt.

Im Rahmen der arbeitsmedizinischen Vorsorge ermöglicht Abb. 6 oder Tabelle 1 die Abschätzung der Gefahr lärmbedingter, weiterer Verschlechterungen schon bestehender Hörminderungen. Soll zum Beispiel eine Person mit Hörminderung, die noch

Tabelle 1: Tabellarische Darstellung der NIPTS-Äquivalenzen: Die  $L_{EX,8h}$ -Werte in dB(A) einer Spalte stellen bezogen auf die Expositionsdauer (in Spalte 1) der jeweiligen Zeile die NIPTS-äquivalenten Wertepaare dar

Table 1: Tabular presentation of NIPTS equivalencies: Within a column the  $L_{EX,8h}$  values in dB(A) referring to the exposure duration (column 1) of the particular row represent the NIPTS-equivalent pair of variates

Expositionsdauer [Jahre]	$L_{EX,8h}$ [dB(A)]															
0,1	79,4	96,9														
0,2	78,2	90,9	94,0	97,2												
0,3	77,6	88,2	90,9	93,5	96,2	98,8										
0,4	77,3	86,7	89,0	91,4	93,7	96,0	98,4									
0,5	77,1	85,6	87,8	89,9	92,0	94,2	96,3	98,4								
0,6	76,9	84,7	86,7	88,6	90,6	92,5	94,5	96,4	98,4							
0,7	76,8	84,1	85,9	87,7	89,5	91,3	93,1	95,0	96,8	98,6						
0,8	76,7	83,6	85,3	87,0	88,7	90,4	92,1	93,9	95,6	97,3	99,0					
0,9	76,6	83,2	84,8	86,4	88,1	89,7	91,3	93,0	94,6	96,3	97,9	99,5				
1	76,6	82,9	84,4	86,0	87,6	89,1	90,7	92,3	93,8	95,4	97,0	98,6				
2	76,3	81,3	82,5	83,8	85,0	86,3	87,5	88,8	90,0	91,3	92,6	93,8				
3	76,1	80,6	81,7	82,9	84,0	85,1	86,2	87,4	88,5	89,6	90,7	91,9	97,5			
4	76,1	80,3	81,3	82,4	83,4	84,5	85,5	86,6	87,6	88,7	89,7	90,8	96,0			
5	76,0	80,0	81,0	82,0	83,0	84,0	85,0	86,0	87,0	88,0	89,0	90,0	95,0	100,0		
6	76,0	79,8	80,8	81,7	82,7	83,7	84,6	85,6	86,6	87,5	88,5	89,4	94,3	99,1		
7	75,9	79,7	80,6	81,5	82,5	83,4	84,3	85,3	86,2	87,1	88,1	89,0	93,7	98,4		
8	75,9	79,6	80,5	81,4	82,3	83,2	84,1	85,0	85,9	86,8	87,8	88,7	93,2	97,8		
9	75,9	79,5	80,3	81,2	82,1	83,0	83,9	84,8	85,7	86,6	87,5	88,4	92,8	97,3		
10	75,9	79,4	80,3	81,1	82,0	82,9	83,8	84,6	85,5	86,4	87,3	88,1	92,5	96,9		
20	75,8	79,1	79,9	80,7	81,5	82,3	83,1	83,9	84,7	85,5	86,4	87,2	91,2	95,3		
30	75,8	78,9	79,7	80,5	81,2	82,0	82,8	83,6	84,4	85,1	85,9	86,7	90,6	94,5		
40	75,8	78,8	79,6	80,3	81,1	81,8	82,6	83,4	84,1	84,9	85,6	86,4	90,2	94,0		

fünf Jahre im Lärm tätig sein soll, in einem Bereich mit  $L_{EX,8h} = 81 \text{ dB(A)}$  weiter beschäftigt werden, so ist die zu erwartende Hörschwellenverschiebung nach 5 Jahren ohne Gehörschützer genauso groß wie durch eine Exposition von  $84,4 \text{ dB(A)}$  über 1 Jahr. In Tabelle 1 sucht man dazu die Zeile auf, die in der ersten Spalte fünf Jahre Expositions-dauer ausweist. In dieser Zeile findet sich in der vierten Spalte die Angabe  $81,0 \text{ dB(A)}$ . Wertepaare aus der vierten Spalte wie z. B.  $81,3 \text{ dB(A)}$  und 4 Jahre,  $81,7 \text{ dB(A)}$  und 3 Jahre usw. sind NIPTS-äquivalent zu  $81 \text{ dB(A)}$  und 5 Jahren.

Bezogen auf einen Pegel von  $90 \text{ dB(A)}$  ergibt sich für eine gleichmäßige Exposition über 40 Jahre von  $85 \text{ dB(A)}$  eine NIPTS-äquivalente Dauer von 2,9 Jahren, für  $86 \text{ dB(A)}$  4,3 Jahre, für  $87 \text{ dB(A)}$  6,5 Jahre, für  $88 \text{ dB(A)}$  9,9 Jahre, für  $89 \text{ dB(A)}$  19,4 Jahre und für  $90 \text{ dB(A)}$  40 Jahre.

**Berechnung der Effektiven Lärmdosis für mehrere Beschäftigungsabschnitte.**

Die Entwicklung der lärmbedingten Hörschwellenverschiebung ist – auch nach ISO 1999 – abhängig von den vorangegangenen Belastungen. Tauscht man zwei Belastungsabschnitte mit unterschiedlichen Expositionspegeln, so werden am Ende unterschiedliche Hörschwellenverschiebungen festzustellen sein.

Daher reicht es nicht aus, für jeden Belastungsabschnitt die NIPTS-äquivalente Dauer bezogen auf einen Expositionspegel (z. B.  $90 \text{ dB(A)}$ ) zu berechnen und am Ende die einzelnen Dauern zu addieren. Vielmehr muss jeweils die NIPTS-äquivalente Dauer eines Belastungsabschnittes bezogen auf den Expositionspegel des darauf folgenden Belastungsabschnittes berechnet werden, um die beiden einzelnen Expositions-dauern, die sich dann auf den gleichen Expositionspegel beziehen, addieren zu können. Das Ergebnis für diese beiden Belastungsabschnitte, als Expositionspegel und NIPTS-äquivalente Gesamtdauer, stellt die Lärmdosis dieser beiden Belastungsabschnitte dar. Folgt ein weiterer Belastungsabschnitt, so wird dieses Ergebnis als ein neuer, erster Belastungsabschnitt aufgefasst, und das beschriebene Verfahren für die Berechnung der Lärmdosis zweier Belastungsabschnitte kann erneut angewandt werden.

Ein Beispiel mag mit Hilfe der Abb. 6 die durchzuführenden Berechnungen grafisch veranschaulichen: In einem ersten Abschnitt lag über 15 Jahre eine Belastung mit  $L_{EX,8h} = 85 \text{ dB(A)}$  vor. Es folgte ein zweiter Abschnitt mit 2 Jahren und  $90 \text{ dB(A)}$ . In Abb. 6 wird auf der Abszisse der Expositionspegel des ersten Abschnitts,  $85 \text{ dB(A)}$ , aufgesucht. Der Punkt  $85 \text{ dB(A)}/15 \text{ Jahre}$

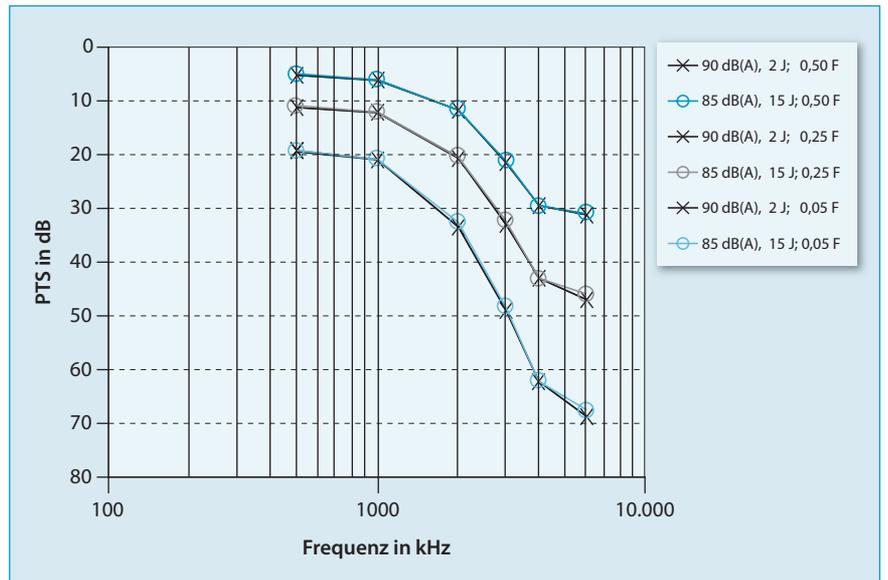


Abb. 7: Audiogramme abhängig vom Fraktile (F) für 58-jährige Männer nach ISO 1999, Datenbasis A, für die NIPTS-äquivalenten Belastungen  $90 \text{ dB(A)}$  für 2 Jahre (J) und  $85 \text{ dB(A)}$  für 15 Jahre (J)  
 Fig. 7: Audiograms dependent on fractile (F) for men aged 58 according to ISO 1999, data base A, for the NIPTS-equivalent exposure  $90 \text{ dB(A)}$  during 2 years (J) and  $85 \text{ dB(A)}$  during 15 years (J)

ist in Abb. 6 mit einem Kreis markiert. Er liegt auf der Kurve mit äquivalenten NIPTS zum Punkt  $87 \text{ dB(A)}$  und 5 Jahren, der ebenfalls mit einem Kreis in der Abbildung gekennzeichnet ist. Der Schnittpunkt dieser Kurve mit der Senkrechten zur Abszisse durch den Expositionspegel des zweiten Belastungsabschnittes,  $90 \text{ dB(A)}$ , gibt die zur ersten Belastung NIPTS-äquivalente Dauer bezogen auf  $90 \text{ dB(A)}$  an; sie beträgt 2 Jahre. Der Punkt  $90 \text{ dB(A)}/2 \text{ Jahre}$  ist mit einem weiteren Kreis versehen. Nun kann die Expositions-dauer des zweiten Belastungsabschnitts (2 Jahre bezogen auf  $90 \text{ dB(A)}$ ) und die NIPTS-äquivalente Dauer des ersten Abschnitts (2 Jahre bei  $90 \text{ dB(A)}$ ) zu 4 Jahren addiert werden. Das Endergebnis kann nun noch auf einen gewünschten Referenzpegel umgerechnet werden, um zu entscheiden, ob eine für die Lärmdosis festgelegte Schwelle überschritten wurde. Würde die Schwelle zum Beispiel bei  $90 \text{ dB(A)}$  und 5 Jahren liegen, so ist im vorliegenden Fall keine weitere Umrechnung notwendig. Die Schwelle wurde nicht überschritten ( $4 \text{ Jahre} < 5 \text{ Jahre}$ ). Eine Änderung der zeitlichen Abfolge der Belastungsabschnitte durch gegenseitigen Austausch der beiden Abschnitte im Beispiel ergibt als Lärmdosis 2,6 Jahre, bezogen auf einen Referenzpegel von  $90 \text{ dB(A)}$ , d. h. also deutlich weniger als im ursprünglichen Beispiel. Dies zeigt insbesondere, dass im Gegensatz zum Risikomaß nach von Lüpke (s. oben) das Ergebnis nicht unabhängig von der Reihenfolge der Berücksichtigung

der Belastungsabschnitte ist. Im Einzelnen kann die Berechnung mittels Abb. 6 grafisch nachvollzogen werden:  $90 \text{ dB(A)}$  während 2 Jahren entspricht 15 Jahren bei  $85 \text{ dB(A)}$ ; als Gesamtwert ergibt sich:  $15 + 15 = 30 \text{ Jahre}$  bei  $85 \text{ dB(A)}$ ; umgerechnet auf  $90 \text{ dB(A)}$  – Folgen der Kurve mit äquivalenten NIPTS zum Punkt  $88 \text{ dB(A)}$  und 5 Jahren – ergibt sich  $2,6 \text{ Jahre}$  bezogen auf  $90 \text{ dB(A)}$ . Die drei genannten Punkte ( $30 \text{ Jahre}/85 \text{ dB(A)}$ ;  $5 \text{ Jahre}/88 \text{ dB(A)}$ ;  $2,6 \text{ Jahre}/90 \text{ dB(A)}$ ) sind im Diagramm mit ausgefüllten Kreisen versehen. Konkreter zeigt Abb. 7 das Beispiel, in dem die zugehörigen Audiogramme nach ISO 1999 herangezogen werden. Nachteil ist, dass im Gegensatz zur abstrakteren und damit umfassenderen Darstellung in Abb. 6 nun auch Alter, Geschlecht und Fraktile eine Rolle spielen. Deutlich wird aber, dass für die NIPTS-äquivalente Belastungen  $90 \text{ dB(A)}$  für 2 Jahre und  $85 \text{ dB(A)}$  für 15 Jahre.

Im Rahmen der Berechnungen kann es vorkommen, dass der Gültigkeitsbereich der Formeln (10) bis (13), d. h. also der Gültigkeitsbereich der ISO 1999, verlassen wird; es können Expositions-dauern  $t > 40 \text{ Jahre}$  auftreten.

Es werden dabei folgende Fälle unterschieden:

- Fall 1: Ist der Belastungsabschnitt, auf den eine vorangegangene Belastung umgerechnet wird, mit einem geringen Expositionspegel versehen, so kann meist die Belastung mit geringem Pegel bei der Dosisberechnung vernachlässigt werden.

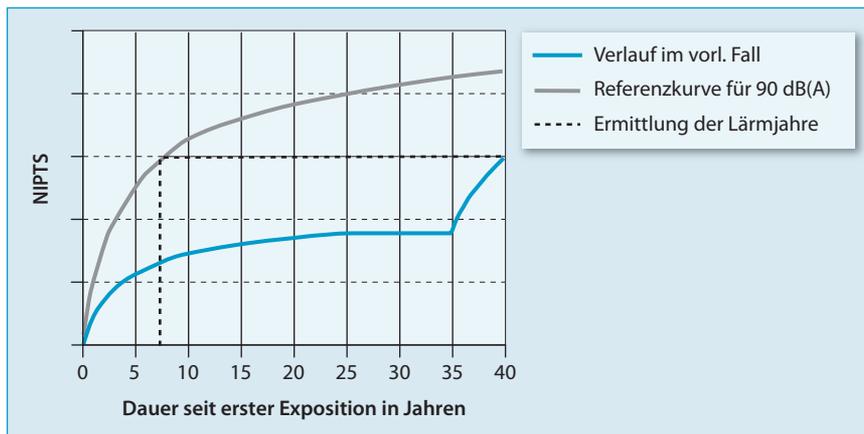


Abb. 8: Verlauf der NIPTS für eine Exposition von 85 dB(A) über 25 Jahre, anschließend 10 Jahre kein Lärm und am Ende 90 dB(A) für 5 Jahre. Die Abhängigkeit des dargestellten Verlaufs vom Fraktile  $< 0,50$  ist vernachlässigbar

Fig. 8: Progression of NIPTS for an exposure to 85 dB(A) during 25 years, followed by 10 years no exposure and finally 90 dB(A) during 5 years. The progression shown depends insignificantly on the fractile for fractiles  $< 0.50$

- Fall 2: Ergibt sich erst durch die Addition der beiden Expositionszeiten ein Wert größer als 40 Jahre, so sollte derjenige Belastungsabschnitt unberücksichtigt bleiben, der – bezogen auf den gleichen Expositionspegel – die geringere Expositionsdauer aufweist.

Werden Belastungsabschnitte nicht berücksichtigt, so kann zur Kontrolle die Berechnung parallel außerhalb des Gültigkeitsbereiches durchgeführt werden, um abzuschätzen, welchen Einfluss das Weglassen von Belastungsabschnitten auf das Endergebnis hat. So führt die Umrechnung eines Belastungsabschnitts mit einem Pegel von 92 dB(A) und einer Dauer von 7 Jahren auf einen darauf folgenden Abschnitt mit 87 dB(A) Pegel und 2 Jahren Dauer auf eine NIPTS-äquivalente Dauer von 249 Jahren. Die Abschätzung zeigt, dass der zweite Belastungsabschnitt die Lärmdosis um weniger als 1 % erhöhen würde. Die Umrechnung wird nicht ausgeführt und der zweite Belastungsabschnitt wird vernachlässigt. Dies sollte bei der Bewertung des Endergebnisses allerdings dann berücksichtigt werden, wenn eine Schwelle gerade nicht erreicht wird.

Um für die arbeitsmedizinische Vorsorge den zurückliegenden und gegebenenfalls zukünftigen Verlauf der Gehörgefährdung eines Beschäftigten durch Lärm darzustellen, eignen sich die Zwischenergebnisse der beschriebenen Berechnung nicht, da sich die Expositionspegel von Belastungsabschnitt zu Belastungsabschnitt verändern. Auch die Umrechnung eines jeden Zwischenergebnisses auf einen Referenzpegel

(z. B. 90 dB(A)) gewährleistet nicht eine Bewertung der Gefährdung, die jeden Abschnitt in quantitativ vergleichbarer Weise berücksichtigt, denn der Anteil eines Abschnitts an der Gesamtdosis hängt von dem Bezugspegel ab, auf den die Zwischenergebnisse bezogen werden.

Eine Darstellung, die alle Belastungsabschnitte in gleicher Weise berücksichtigt, findet sich als Beispiel in Abb. 8. Sie zeigt den Verlauf der NIPTS, wie er sich nach Abschnitten „Berechnungen der NIPTS-Äquivalenzen“ und „Berechnung der Effektiven Lärmdosis für mehrere Beschäftigungsabschnitte“ berechnen lässt. Die betrachtete Exposition lag bei 85 dB(A) über 25 Jahre, anschließend 10 Jahre kein Lärm und am Ende 90 dB(A) für 5 Jahre. Die Abhängigkeit des dargestellten Verlaufs vom Fraktile  $< 0,50$  ist vernachlässigbar. Erkennbar ist auch der oben erwähnte Sättigungseffekt. Soll z. B. für einen 55-jährigen Beschäftigten vor Aufnahme einer geplanten 5-jährigen Tätigkeit in einem Bereich mit 90 dB(A) eine Abschätzung der Gefährdung und Vorschlag entsprechender Maßnahmen durch den Arbeitsmediziner erfolgen, so kann in Abb. 8 abgelesen werden, dass mit einer signifikanten Zunahme der lärmbedingten Hörschwellenverschiebung zu rechnen ist, sollte der Beschäftigte für die nächsten 5 Jahre nicht sicher geschützt sein. In diesem Falle sollte der Beschäftigte entsprechend beraten werden (z. B. zum konsequenten Tragen des Gehörschützers) und es sollten – je nach individueller Hörfähigkeit – verkürzte Abstände der Vorsorgeuntersuchungen in Erwägung gezogen werden. Dabei ist insbesondere zu

beachten, dass die altersbegleitende Hörschwellenverschiebung in der Darstellung der Abb. 8 nicht berücksichtigt werden kann, diese aber einen mit zunehmendem Lebensalter überproportionalen Beitrag zur messbaren Hörschwellenverschiebung liefert.

Um einen Bezug zum Verlauf einer Referenzexposition herstellen zu können, ist in Abb. 8 der Verlauf für eine über den gezeigten Zeitraum gleichbleibende Exposition mit 90 dB(A) gezeigt. Es zeigt sich, dass die Zunahme der NIPTS zu Beginn der Lärmexposition am größten ist. Damit wird deutlich, dass insbesondere bei Lärmexposition Vorsorgeuntersuchungen und eventuell notwendige Schutzmaßnahmen nur wirksam sein können, wenn sie konsequent vor Beginn einer Lärmexposition durchgeführt werden. Der nach Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge (BMAS 2008) vorgeschriebenen Erstuntersuchung vor Aufnahme der Tätigkeit kommt daher besondere Bedeutung zu. Zusätzlich wird dem Arbeitgeber in der TRLV (Technische Regel zur Lärm-Vibrations-Arbeitsschutzverordnung) Lärm Teil 1 (BMAS 2010) auferlegt, die Tätigkeit mit Lärmexposition erst aufnehmen zu lassen, wenn eine Gefährdungsbeurteilung vorgenommen wurde und die daraus resultierenden Maßnahmen des Arbeitsschutzes ergriffen wurden. Darüber hinaus kann mit dem Verlauf der Referenzexposition die Lärmdosis des Beispiels bezogen auf 90 dB(A) für jeden beliebigen Zeitpunkt ermittelt werden: Folgt man z. B. der gestrichelten Linie am Ende der Exposition horizontal bis zum Schnittpunkt mit der Referenzkurve und dann vertikal zum Schnittpunkt mit der x-Achse, so kann man dort die NIPTS-äquivalente Dauer bezogen auf 90 dB(A) ablesen: 7,4 Jahre.

## ► Diskussion

### Verwendung der ISO 1999

Die ISO 1999 gibt die Beziehung zwischen Lärmeinwirkung und lärmbedingter, permanenter Hörschwellenverschiebung (NIPTS) für Menschen unterschiedlichen Alters an. Diese Beziehung wird für große Populationen, die gegenüber bestimmtem Lärm exponiert sind, in Form einer statistischen Verteilung angegeben. Bisher wurde daher Folgendes angenommen (Pfeiffer et al. 1985):

„Versicherungsrechtlich erhebliche, die Sprachkommunikation behindernde Schwerhörigkeit entwickelt sich nur bei höchstens 2 % der entsprechend exponierten Population. Damit ist eine besondere Lärmemp-

findlichkeit nur bei einem kleinen Teil der in Lärmereichen Beschäftigten gegeben. Diese Teilpopulation besonders lärmempfindlicher Personen ist zum weit überwiegenden Teil in der Perzentile 5 % mit den größten Hörverlusten der ISO 1999 enthalten, für die die Norm nicht mehr gilt.

Damit ist die Anwendbarkeit der Norm für die Abschätzung versicherungsrechtlich erheblicher Lärmschwerhörigkeit im Allgemeinen zu verneinen. Es können lediglich Aussagen derart gemacht werden, dass für 5 % der Exponierten größere Hörverluste, als bei der Fraktile 0,05 aufgeführt, zu erwarten sind.“

Diese Aussagen beziehen sich nur auf die Werte der nach ISO 1999 berechneten, lärmbedingten Hörverluste, die im Allgemeinen am Rande der beschriebenen statistischen Verteilung und insbesondere über diesen Rand hinaus mit großer werdenden Unsicherheiten behaftet sind. Die hier vorgestellte Effektive Lärmdosis dagegen verfolgt das Konzept von lärmbedingten Hörschwellenverschiebungsäquivalenzen. Die absolute Höhe der Hörschwellenverschiebung spielt keine Rolle. Die Hörschwellenverschiebungsäquivalenzen verändern sich erstaunlicherweise nicht in Abhängigkeit vom Fraktile im Bereich 0,05 bis 0,50. Da die Effektive Lärmdosis auf einer Eigenschaft des Lärmereffekts beruht, die unabhängig vom Fraktile ist (für  $Q < 0,50$ ), kann – wie ausgeführt – davon ausgegangen werden, dass die beschriebene Effektive Lärmdosis auch für die Fraktile  $< 0,05$  Gültigkeit hat. Die oben zitierte Einschätzung hinsichtlich des Nutzens der ISO 1999 bezogen auf die Fraktile  $< 0,05$  muss also im Hinblick auf die Effektive Lärmdosis auf der Grundlage der neuen Erkenntnisse revidiert werden.

„Grenzen der Anwendung: Die Norm ISO 1999 gilt vor allem für Populationen. Die Anwendungsmöglichkeiten der Norm auf Einzelfälle sind sehr begrenzt, weil z. B. besondere Lärmempfindlichkeiten aus Vor- und Nebenschäden nicht berücksichtigt werden können, und weil mit Berufswechsel verbundene Änderungen der Lärmqualität (Frequenzzusammensetzung, Impulshaltigkeit, Beurteilungspegel) in dem Modell nicht berücksichtigt werden“ (Pfeiffer et al. 1985).

Da die durch die Effektive Lärmdosis beschriebene Eigenschaft (NIPTS-Äquivalenzen) einheitlich für die Hälfte der Exponierten mit Lärmempfindlichkeit gültig ist, d. h. für alle Fraktile  $Q < 0,50$  unabhängig vom Fraktile, beschreibt diese Effektive Lärmdosis auch für jedes Individuum dieser Fraktile die Gefahr lärmbedingter Hör-

schwellenverschiebungen ohne Aussagen zur absoluten Höhe der Verschiebungen zu tätigen. Obwohl die Hörschwellenverschiebungen, und zwar sowohl die altersbegleitenden als auch die lärmbedingten, nach ISO 1999 eine große Streuung aufweisen, gelingt es mit der Effektiven Lärmdosis dadurch, dass sie nur Relationen (Äquivalenzbeziehungen) nutzt und nicht absolute Werte der Hörschwellenverschiebung verwendet, Schwellenkurven gleicher Schädigung einheitlich zu beschreiben.

Es werden allerdings besondere Lärmempfindlichkeiten aus Vor- und Nebenschäden nicht berücksichtigt. Dies und auch alle anderen Inhalte des bisherigen medizinischen Gutachtens bleiben weiterhin Aufgabe des Mediziners. Nach dem Königsteiner Merkblatt (HVBG 1996) bildet ohnehin der sprachaudiometrische Befund in der Regel die wichtigste Grundlage für die Bewertung der MdE (Minderung der Erwerbsfähigkeit). Die Effektive Lärmdosis berücksichtigt nur das Tonaudiogramm und dort ausschließlich die Hörschwellenverschiebung bei 4 kHz. Die aber für die Sprache relevanten Frequenzen liegen alle unterhalb von 4 kHz. Die Effektive Lärmdosis dient daher nur der möglichst präzisen Beschreibung des Lärmereffekts im Hinblick auf die Ermittlung der beruflichen Lärmdosis ohne eine Aussage zu möglichen Beeinträchtigungen des sozialen Sprachgehörs zu ermöglichen. Es sollte daher nur ergänzend im Rahmen der Ermittlung der arbeitstechnischen Voraussetzungen berechnet und angegeben werden. Es stellt nach Auffassung des Verfassers lediglich ein Instrument zur Einschätzung der beruflichen „Lärmlebensdosis“ für den medizinischen Gut-

achter dar. Damit dient es der Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Begutachtung und der Gleichbehandlung der Versicherten hinsichtlich der Ermittlung der arbeitstechnischen Voraussetzungen, da es die allgemeinen Angaben des Königsteiner Merkblattes (HVBG 1996) konkretisiert.

Die Effektive Lärmdosis berücksichtigt nun auch Änderungen der Lärmqualität durch Wechsel des Arbeitsplatzes (s. oben). Änderungen der Frequenzzusammensetzung und der Impulshaltigkeit werden nach heutigem Erkenntnisstand hinreichend durch den  $L_{EX,8h}$  beschrieben (Maué 1988).

**Vergleich mit der VDI 2058 Blatt 2 und dem Risikomaß nach von Lüpke**

In der VDI 2058 Blatt 2 wird zu „Gehörgefährdung durch Lärmbelastung – Beurteilungspegel und Expositionsjahre“ ausgeführt:

„Bei ohrgesunden Personen ist nicht anzunehmen, dass sich ein Gehörschaden ... entwickelt, wenn die Dauer der Lärmbelastung bei einem Beurteilungspegel von 90 dB 6 Jahre, von 87 dB 10 Jahre und 85 dB 15 Jahre nicht überschreitet.“

Abbildung 9 zeigt, dass das Risikomaß nach von Lüpke für  $R = 2,4$  (s. oben) mit den in der VDI-Richtlinie genannten drei Wertepaaren übereinstimmt. Der Bereich unterhalb und links der Kurve des Risikomaßes stellt den Bereich dar, für den nach VDI 2058-2 nicht anzunehmen ist, dass sich bei ohrgesunden Personen ein Gehörschaden entwickelt.

Abbildung 9 zeigt außerdem, dass das Risikomaß nach von Lüpke insbesondere im Bereich unterhalb 90 dB(A) deutlich von der Effektiven Lärmdosis abweicht.

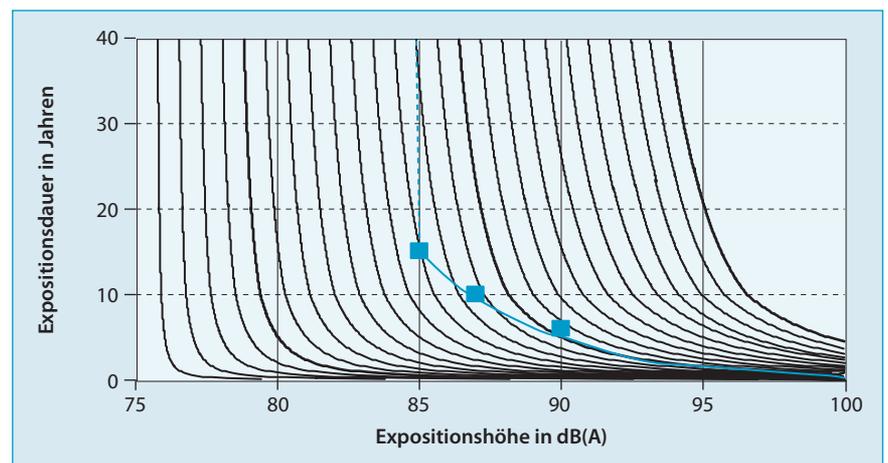


Abb. 9: NIPTS-äquivalente Kurven wie in Abb. 6 zusammen mit dem Risikomaß nach von Lüpke mit  $R = 2,4$  (blaue Kurve) und den von der VDI 2058 Blatt 2 angegebenen 3 Punkten (ausgefüllte Vierecke)  
 Fig. 9: NIPTS-equivalent curves as shown in Fig. 6 but together with the "Risikomaß" (risk index) according to von Lüpke with  $R = 2.4$  (blue line) and the three points (solid rectangles) specified by VDI 2058 Blatt 2

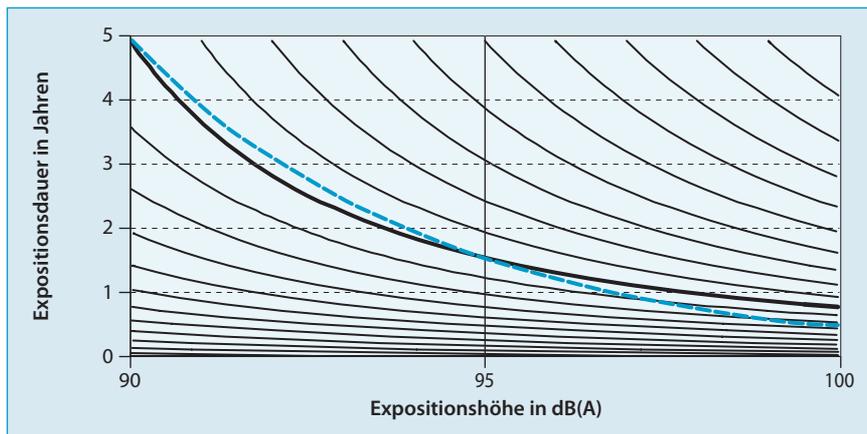


Abb. 10: Kurven wie in Abb. 9. Es wird der Ausschnitt 90 dB(A) bis 100 dB(A) und 0 bis 5 Jahre gezeigt  
 Fig. 10: Curves as shown in Fig. 9. The section 90 dB(A) to 100 dB(A) and 0 to 5 years is shown

Nachteil des Risikomaßes ist daher, dass die Wirkung des Lärms auf das Gehör unterhalb von 90 dB(A) überschätzt wird. Unter Betrachtung der von von Lüpke verwendeten Daten (von Lüpke 1975) ist anzunehmen, dass die Ausweitung des für den Bereich  $L_{\text{ri}} \geq 90$  dB(A) gültigen Risikomaßes auf Bereiche unterhalb 90 dB(A) eine durch die Datenlage unzureichend gestützte Extrapolation darstellt. Unterhalb 90 dB(A) muss außerdem das Lebensalter für die Untersuchung von von Lüpke als nicht zu vernachlässigender Confounder angesehen werden.

Weiterer Nachteil des Risikomaßes ist, dass Expositionen mit  $L_{\text{EX},8\text{h}} = 85$  dB(A) ( $= L_{\text{ri}}$ ) berücksichtigt werden, Expositionen mit  $L_{\text{EX},8\text{h}} < 85$  dB(A) ( $= L_{\text{ri}}$ ) aber nicht. Nach von Lüpke und VDI 2058 Blatt 2 (Grenze ist  $R=2,4$ ) wird für Pegel ab  $L_{\text{EX},8\text{h}} = 85$  dB(A) die Gefahr des Entstehens von Gehörschäden ab einer Dauer von 15 Jahren angegeben. Unverständlich ist, dass nach VDI 2058 und Risikomaß nach von Lüpke für Expositionen von 84,9 dB(A) über z. B. 30 Jahre nicht anzunehmen ist, dass sich ein Gehörschaden entwickelt. Die beschriebenen Unzulänglichkeiten des Risikomaßes nach von Lüpke haben offenbar dazu geführt, dass sich die Verwendung dieses Risikomaßes bisher nicht durchsetzen konnte.

Das Risikomaß nach von Lüpke, das fast ausschließlich auf der Grundlage von Daten aus dem Bereich oberhalb von 90 dB(A) entwickelt wurde (s. oben), stimmt in diesem Bereich recht gut mit der Effektiven Lärmdosis überein (Abb. 10). Die beste Übereinstimmung ergibt sich mit den Punkten der Kurve, die NIPTS-äquivalent zum Punkt  $L_{\text{EX},8\text{h}} = 90$  dB(A) und  $t = 5$  Jahre sind. Die NIPTS-äquivalenten Kurven wurden hierzu in 0,1 dB(A)-Schritten zur Ermitt-

lung der Fehlerquadratsummen berechnet. Daher ergibt sich die Empfehlung, dieses Wertepaar im Rahmen der Ermittlung der arbeitstechnischen Voraussetzungen als hinreichend für das Entstehen eines Hörschadens im Sinne der VDI 2058 Blatt 2 anzusehen.

#### Verwendung von NIPTS-Äquivalenzen

Die Verwendung von NIPTS-Äquivalenzen mag umständlich erscheinen. Das vorgestellte Lärmdosismodell berücksichtigt aber auf Basis empirisch gewonnener Daten (ISO 1999:1990) neben anderen Effekten z. B. auch den Sättigungseffekt (s. oben), der zwar bekannt aber mathematisch nicht einfach zu beschreiben ist: Bei fortgesetzter, gleichbleibender Lärmexposition verringert sich zunehmend die lärmbedingte Abwanderung der Hörschwelle. Allein aus diesem Effekt ergibt sich, dass die Lärmwirkung hinsichtlich lärmbedingter Hörschwellenverschiebungen abhängig ist von der Vorgeschichte (vorausgegangene Belastungen) des betrachteten Gehörs. Dies wiederum bedeutet, dass insbesondere für Belastungen in mehreren, aufeinander folgenden Abschnitten unterschiedlicher Expositionspegel kein einfacher funktioneller Zusammenhang zwischen Lärmdosis, Expositionspegel und -dauer gefunden werden konnte.

#### ► Schlussfolgerung

#### Verwendung der neuen Effektiven Lärmdosis in der Arbeitsmedizinischen Vorsorge

Die Effektive Lärmdosis basierend auf Hörminderungsäquivalenzen nach ISO 1999 kann zur Abschätzung der Gefährdung herangezogen werden. Würde

zum Beispiel eine Schwelle hinsichtlich eines bestimmten Expositionspegels und einer bestimmten Expositionsdauer für zukünftige Lärmexpositionen ohne weitere Maßnahmen als bedenklich für die Weiterbeschäftigung von Personen mit Hörminderungen im Lärm angesehen, dann kann mit Hilfe der Abb. 6 oder Tabelle 1 für den Beschäftigten hinsichtlich seiner individuellen, zu erwartenden Beschäftigungsdauer im Lärm (in Jahren) der noch zulässige Expositionspegel für diese Schwelle angegeben werden.

Als weitere Maßnahme könnte z. B. die sichere Einhaltung des unteren Auslösewertes nach LärmVibrationsArbSchV (BMAS 2007) von  $L_{\text{EX},8\text{h}} = 80$  dB(A) unter dem Gehörschutz und/oder die „Qualifizierte Unterweisung und Benutzung von Gehörschutz“ nach TRLV (Technische Regel zur Lärm-Vibrations-Arbeitsschutzverordnung) Lärm Teil 3 (BMAS 2010), Abschnitt 6.3.3, 2. Absatz gefordert werden. Hilfreich dürften insbesondere auch eine Darstellung sein, wie sie in Abb. 8 gezeigt wird. Zusätzlich könnte das Ergebnis der Abschätzung als ein Element der Motivation zum effektiven Tragen von Gehörschützern genutzt werden.

#### Empfehlung zur Festlegung von Belastungsschwellen hinsichtlich lärmbedingter Hörschäden

Nach Brusis (2006) kann eine Lärmschwerhörigkeit nie durch einen Untersuchungsbefund bewiesen werden. Vielmehr handelt es sich bei der Diagnose stets nur um eine Wahrscheinlichkeitsdiagnose. Neben der Abgrenzung zu anderen Arten der Schwerhörigkeit ist daher auch eine „adäquate Lärmbelastung bzw. langjährige Lärmarbeit“ (Brusis 2006) für die Entwicklung einer Lärmschwerhörigkeit wesentliche Voraussetzung. Daher ist es erforderlich, Belastungsschwellen mit Blick auf Hörschäden hinsichtlich ihrer Entstehung durch Lärm festzulegen. Nur so kann für den Gutachter ein Instrument bereitgestellt werden, dass ihm eine nachvollziehbare und transparente Bewertung hinsichtlich einer „adäquaten Lärmbelastung bzw. langjährigen Lärmarbeit“ ermöglicht.

Eine Berechnung von Hörschwellen nach ISO 1999 mag vereinfachend illustrieren, warum es sich bei Lärmschwerhörigkeit immer um eine Wahrscheinlichkeitsdiagnose handelt, und warum die Ermittlung der arbeitstechnischen Voraussetzungen wesentlich für die Beurteilung der Ursache einer vorliegenden Schwerhörigkeit ist:

Wird bei einem (otologisch normalen) 55-Jährigen eine permanente Hörschwellenverschiebung (PTS) von 40 dB bei 3 kHz festgestellt und ist nichts über seine Lärmexposition bekannt, so kann es sich z. B. um ein Individuum handeln, das

- zum 0,05 Fraktile gehört, das ohne jegliche Lärmexposition diese PTS entwickelt ( $H^P-H=0$  dB) oder
- zum 0,10 Fraktile gehört, das nach 9 Jahren Exposition mit 87 dB(A) diese PTS aufweist ( $H^P-H=5,4$  dB) oder
- zum 0,40 Fraktile gehört, das nach 32 Jahren Exposition mit 95 dB(A) diese PTS zeigt ( $H^P-H=20,5$  dB).

Hierbei wird unterstellt, dass der 55-Jährige keinen Gehörschutz benutzt hat.

Es wurde ein Schwellenpunkt (90 dB(A) und 5 Jahre) ermittelt, der sich auf den in der VDI-Richtlinie 2058 Blatt 2 definierten Hörschaden („Hörminderungen mit audiometrisch nachweisbaren Merkmalen eines Haarzellschadens, die bei 3 kHz 40 dB überschreiten“) bezieht (s. oben).

Würde dieser Schwellenpunkt (Expositionspegel:  $L_{EX,8h,1} = 90$  dB(A), Expositionsdauer:  $t_1 = 5$  Jahre) im Rahmen der Ermittlung der arbeitstechnischen Voraussetzungen für das Entstehen einer beruflichen Lärmschwerhörigkeit als hinreichend angesehen, so könnte nun diejenige Dauer  $t_2$  berechnet werden, die bei Exposition gegenüber einem anderen Expositionspegel  $L_{EX,8h,2}$  notwendig ist, um die gleiche Hörschwellenverschiebung zu erzeugen, wie sie beim Exponierten durch 90 dB(A) während 5 Jahren entstanden wäre (s. oben).

Zusätzlich kann nach dem Abschnitt „Berechnung der Effektiven Lärmdosis für mehrere Beschäftigungsabschnitte“ aus verschiedenen Belastungsabschnitten unterschiedlicher Expositionspegel und Dauer eine Gesamtdauer bezogen auf einen Referenzexpositionspegel (z. B. 90 dB(A)) berechnet werden, die den Vergleich der gesamten beruflichen Lärmexposition mit dem festgelegten Schwellenpunkt ermöglicht.

Daher schlägt der Autor als Schwelle für die arbeitstechnische Voraussetzung für das Entstehen von Hörschäden – im Sinne der VDI-Richtlinie 2058 Blatt 2 – 5 Jahre bei 90 dB(A) vor. Für Hörminderungen im Sinne der VDI-Richtlinie 2058 Blatt 2, die nicht das Ausmaß von Hörschäden im Sinne der gleichen Richtlinie erreichen, können niedrigere Schwellen, vorzugsweise Dauern kleiner als 5 Jahre bei 90 dB(A) festgelegt werden. Die hier vorgeschlagene Effektive Lärmdosis lässt sich auf jede beliebige Schwelle in gleicher Weise anwen-

den unabhängig von der Höhe der jeweiligen Schwelle. Zur Vereinfachung kann mittels Konvention ein Bezugsexpositionspegel (z. B. 90 dB(A)) festgelegt werden, so dass die gesamte, berufliche Dosis nur noch durch einen Wert, die NIPTS-äquivalente Expositionsdauer in Jahren, beschrieben wird. Auch diese Expositionsdauer wird mittels der NIPTS-Äquivalenzen berechnet und mag als „Lärmjahre“ bezeichnet werden. Eine berufliche Gesamtdosis von einem Lärmjahr wäre dann NIPTS-äquivalent mit einer Exposition über 1 Jahr bei 90 dB(A), unabhängig von den tatsächlichen Expositionspegeln und -dauern.

► Literatur

- 1 BMAS, Bundesministerium für Arbeit und Soziales. Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (LärmVibrationsArbSchV). Bundesgesetzblatt 2007, Teil I Nr. 8, Bonn 08.03.2007.
- 2 BMAS, Bundesministerium für Arbeit und Soziales. Verordnung zur Rechtsvereinfachung und Stärkung der arbeitsmedizinischen Vorsorge (ArbMedVV). Bundesgesetzblatt 2008 Teil I Nr. 62, Bonn 23.12.2008.
- 3 BMAS, Bundesministerium für Arbeit und Soziales. Technische Regel zur Lärm-Vibrations-Arbeitsschutzverordnung – Lärm – Teil 1: Beurteilung der Gefährdung durch Lärm. Bek. d. BMAS v. 15.1.2010 – IIIb5-34517-1 publiziert im GMBI 2010/Nr. 18-20, S. 362 ff.
- 4 BMGS, Bundesministerium für Gesundheit und Soziale Sicherung. Merkblatt zu der Berufskrankheit Nr. 2301 der Anlage zur Berufskrankheiten-Verordnung (BKV). Bek. d. BMAS v. 1.7.2008 – IVa4-45222-2301 publiziert im GMBI 2008/39, S. 798 ff.
- 5 Brusis T. Die berufliche Lärmschwerhörigkeit – Diagnose, Differentialdiagnose und Begutachtung. Trauma und Berufskrankheit 2006; 8: 65–72.
- 6 Eldred FE, Gannon WJ, v. Gierke H. Criteria for short time exposure of personnel to high intensity jet air craft noise. Air Craft Noise, Rept. WADC-TN-355. Aerospace Medical Laboratory, Wright-Patterson AFB, Ohio 1955.
- 7 Feldmann H, unter Mitarbeit von: Alberty J, Brusis T, Deitmer T, Delank KW, Hartmann S, Hüttenbrink K-B, Stoll W. Das Gutachten des Hals-Nasen-Ohren-Arzt, 6. Aufl. Stuttgart: Thieme, 2006.
- 8 v. Gierke HE, Robinson DW, Karmy SJ. Results of a workshop on impulse noise and auditory hazard. J Sound Vib 1982; 83: 579–584.
- 9 Hellbrück J. Hören. Physiologie, Psychologie und Pathologie. Göttingen: Hogrefe, 1993.
- 10 HVBG, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften. Empfehlungen des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften für die Begutachtung der beruflichen Lärmschwerhörigkeit – Königsteiner Merkblatt. 4. Aufl. St. Augustin: HVBG, 1996.
- 11 ISO 1999. Acoustics – Determination of occupational noise exposure and estimation of noise-induced hearing impairment. International Organisation for Standardization, Genf; 1990.
- 12 ISO 7029. Acoustics – Statistical distribution of hearing thresholds as a function of age. International Organisation for Standardization, Genf; 2000.
- 13 Liedtke M. Akute Gehörschäden durch extrem hohe Schalldruckpegel. HNO 2010; 58: 106–109.
- 14 Lüpke A von. Ein Langzeit-Dosismaß für die Bewertung des Gehörschädigungsrisikos. Die Berufsgenossenschaft November 1975: 445–447.
- 15 Lüpke A von. Analyse von 1700 entschädigten Lärmschwerhörigkeiten in Metallbetrieben, IFL-Report Nr. 1–78, Institut für Lärmbekämpfung des Hauptverbandes der Gewerblichen Berufsgenossenschaften e.V., Mainz, 1978.
- 16 Maue JH. Impulslärm an Arbeitsplätzen – der energieäquivalente Dauerschallpegel als Beurteilungskriterium für das Hörschadensrisiko. BIA-Report 3/1988. St. Augustin.
- 17 Pfeiffer BH, Martin R, Niemeyer W. Neufassung der ISO 1999 (1984). Zur Anwendung im System der Prävention und Begutachtung der Lärmschwerhörigkeit in der Bundesrepublik Deutschland. Z Lärmbekämpfung 1985; 32: 31–43.
- 18 VDI 2058 Bl. 2. Beurteilung von Lärm hinsichtlich Gehörgefährdung. Berlin: Beuth, 1988.

**Anschrift des Verfassers:**  
 Dr. rer. nat. Dipl.-Phys. Martin Liedtke  
 Institut für Arbeitsschutz der Deutschen  
 Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)  
 Alte Heerstraße 111  
 53757 Sankt Augustin  
 E-Mail: martin.liedtke@dguv.de