

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)

## Die Effektive Lärmdosis (ELD) – Grundlagen und Verwendung

Martin Liedtke

*M. Liedtke: Die Effektive Lärmdosis (ELD) – Grundlagen und Verwendung. Zbl Arbeitsmed 63 (2013) 66–79*

**Schlüsselwörter:** Lärmdosis, Lärmschwerhörigkeit, Berufskrankheit 2301, ISO 1999:1990, Hörminderungsäquivalenzen

### **Zusammenfassung:**

*Im Bereich der Prävention wird für die Beurteilung der Gefährdung durch Lärm am Arbeitsplatz erfolgreich der Tages-Lärmexpositionsspiegel verwendet. Chronische Gehörschäden können sich durch arbeitstägliche Lärmeinwirkung über viele Jahre und Jahrzehnte entwickeln. Ist der Tages-Lärmexpositionsspiegel über die gesamte Expositionsdauer konstant, so kann er zusammen mit der Gesamtexpositionsdauer auch für die Beurteilung der Lärmgefährdung für das gesamte Berufsleben verwendet werden. Finden sich in einer Belastungsbiographie hingegen Abschnitte mit unterschiedlicher Dauer und wechselnden Tages-Lärmexpositionsspiegeln, so kann die Gesamtdosis nicht mehr durch einen dieser Tages-Lärmexpositionsspiegel und eine Dauer charakterisiert werden, da eine Lärmdosis sowohl die Höhe aller Tages-Lärmexpositionsspiegel als auch alle Expositionsdauern berücksichtigen muss.*

*Das über die Dauer einiger Stunden nachgewiesene Energieäquivalenzprinzip vereinfacht die Berechnung des Tages-Lärmexpositionsspiegels für über den Arbeitstag verteilte Einzelbelastungen unterschiedlicher Pegelhöhe und Dauer. Die Gültigkeit des Energieäquivalenzprinzips bedeutet, dass die gleiche Gesamtschallenergie auch die gleiche lärmbedingte permanente Hörschwellenverschiebung hervorruft, unabhängig vom zeitlichen Verlauf der Lärmexpositionen und der Erholungsphasen. Die Erkenntnisse über Wirkungen langfristiger (z.B. mehrjähriger) Lärmexposition zeigten aber, dass das Energieäquivalenzprinzip nicht für langfristige Lärmbelastungen gilt. Die Lärmdosisberechnung für einen Arbeitstag kann daher nicht auf langfristige Expositionen übertragen werden. Dosis-Wirkungsmodelle, die auf der Hypothese der Gültigkeit des Energieäquivalenzprinzips auch für langfristige Lärmeinwirkungen basieren, konnten sich deshalb nicht etablieren. Aus diesem Grund wurde für die Beurteilung langfristiger Lärmeinwirkungen die Effektive Lärmdosis (ELD) auf Basis des in der ISO 1999 beschriebenen Lärmdosis-Wirkungsmodells entwickelt. Die ISO 1999 stützt sich auf mehrere kausalanalytisch qualitätsgesicherte arbeitsmedizinisch-epidemiologische Studien mit quantitativ belastbaren Dosis-Häufigkeits-Beziehungen auf der Ursachenseite. Es wird exemplarisch gezeigt, wie die ELD für mehrere Belastungsabschnitte ermittelt wird und wie ELD-Werte und ihr zeitlicher Verlauf interpretiert und verwendet werden können. Für eine effiziente Gestaltung der Expositionsermittlung werden Hinweise gegeben, wie Beschäftigungsabschnitte erkannt werden können, die für die ELD und ihren zeitlichen Verlauf ohne Einfluss sind und daher vernachlässigt werden können.*

## The Effective Noise Dose (END) – Basic Principles and Application

*Martin Liedtke: The Effective Noise Dose (END) – Basic Principles and Application. Zbl Arbeitsmed 63 (2013) 66–79*

**Key words:** Noise dose, hearing impairment, occupational disease, ISO 1999:1990, hearing deterioration equivalencies

### **Abstract:**

*In the field of prevention the daily noise exposure level is successfully applied for the assessment of noise exposure at the workplace. Chronic hearing disorder may emerge from noise exposure per working day during many years and decades. The daily noise exposure level in combination with the total exposure duration can be used for the assessment of noise exposure of the entire professional life, in case the daily noise exposure level was constant for the whole exposure duration. If an exposure biography shows periods with diverse durations and varying daily noise exposure levels, the total dose can no longer be characterised by one of these daily noise exposure levels and a duration, because a noise dose has to consider the amount of all daily noise exposure levels as well as all exposure durations. The equal-energy principle, which has been substantiated for the period of several hours, simplifies the calculation of the daily noise exposure level for single exposures of diverse levels and durations spread throughout a working day. The validity of the equal-energy principle means, that the same total sound energy provokes the same noise induced permanent hearing threshold shift independent from the chronological sequence of the noise*

---

Der Autor:

Dr. rer. nat. Dipl. Phys. Martin Liedtke ■ Leiter des Fachbereichs Arbeitsgestaltung – Physikalische Einwirkungen des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) ■ Alte Heerstrasse 111 ■ 53757 Sankt Augustin

*exposures and recovery periods. But the findings about effects of long-term (e.g. perennial) noise exposure exhibited, that the equal-energy principle is not valid for long term exposure. Therefore the noise dose calculation for one working day cannot be transferred to long-term exposures. Dose response models, which were based upon the hypothesis of the validity of the equal-energy principle for long-term noise exposure, could not be established. For this reason the Effective Noise Dose (END), which is based upon the noise dose response model described by ISO 1999, was developed for the assessment of long-term noise exposures. ISO 1999 relies on several causal-analytic quality-assured occupational-medical epidemiological studies with quantitatively resilient dose response relationships in the part of the cause. It is shown, how the END is determined for several exposure sections and how END values and their chronological sequence can be construed and used. For an efficient arrangement of the exposure determination advice is given, how sections of employment can be identified, which do not affect the END or its chronological sequence and which can therefore be neglected.*

## 1. Einführung

Schwerhörigkeit ist als „Volkskrankheit“ zu betrachten. Sie weist ein erfahrungsgemäß breites Ursachenspektrum auf der Wirkungsseite auf, das nicht bevorzugt arbeitsbedingt ist. Legt man Prävalenzangaben aus anderen europäischen Ländern zugrunde, so wird geschätzt, dass in Deutschland derzeit zwischen 20.000 und 35.000 Kinder und Jugendliche von einer Schwerhörigkeit mit mindestens 40 dB (auf dem besseren Ohr) betroffen sind (Robert Koch-Institut 2006).

Schwerhörigkeit kann durch vielfältige Ursachen entstehen: z.B. durch chronische Mittelohrentzündung, Otosklerose, Exostosen, Stenosen, chronische Tubenventilationsstörung, Geschwülste, Schwerhörigkeit bedingt durch Stoffwechsel- und Kreislaufstörungen, Morbus Menière, Akustikusneurinom und zentrale Hörstörungen. Die Altersschwerhörigkeit schließlich umfasst einen gut dokumentierten Anteil an peripherem Hörverlust (= Innenohrverlust durch Verlust von Haarsinneszellen) und einen bislang noch nicht umfassend aufgeklärten zentralen Hörverlust (= Verlust an komplexen Verarbeitungsstrategien in den höheren Zentren der Hörbahn durch Verlust an Synapsen, veränderter Zeitauflösung, verlängerter Laufzeit usw.) (Mazelova et al. 2003, Freigang et al. 2011).

Auch Lärmeinwirkung, die ein bestimmtes Ausmaß überschreitet, kann Gehörschäden verursachen. Die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) wies im Jahr 2010 knapp 35.000 laufende Berufskrankheitenrenten Lärmschwerhörigkeit aus. Abhängig von der Art der Schalleinwirkung sind die Schädigungsmechanismen zu unter-

scheiden (Bundesministerium für Arbeit und Soziales 2008); für Messung und Angabe entsprechender Werte der Lärmeinwirkung sind einige schalltechnische Parameter notwendig und gebräuchlich.

### 1.1 Akute Gehörschäden durch Lärmeinwirkungen

Akute Gehörschäden durch extrem hohe Schalldruckpegel können schon durch einmalige Einwirkung innerhalb von Millisekunden entstehen. Mit derartigen Schäden muss bei Schallereignissen gerechnet werden, deren Spitzenschalldruckpegel 150–160 dB überschreiten (Liedtke 2010a, Feldmann & Brusis 2012, Dieroff 1994) [dB: Dezibel, zehnfacher dekadischer Logarithmus des Verhältnisses des quadrierten Effektivwertes des Schalldrucks zum quadrierten Bezugsdruck; Anmerk. d. Autors]. Für untersuchte Schallereignisse wurde eine gute Übereinstimmung des Spitzenschalldruckpegels von 160 dB mit dem SEL = 125 dB(A) und  $L_{A\text{max}} = 135$  dB gefunden (Maue 2009) [SEL: engl. „single event level“;  $L_{A\text{max}}$ : maximaler Schalldruckpegel, gemessen mit der Frequenzbewertung A und der Zeitbewertung Impuls (I); Anmerk. d. Autors]. Der Wert  $L_{A\text{max}} = 135$  dB wird von der VDI-Richtlinie 2058 Blatt 2 (Verein Deutscher Ingenieure 1988) und der Wert SEL = 125 dB(A) wird von Hohmann (Hohmann 1984) als Schwellenwert für das Entstehen akuter Gehörschäden durch einmalige Schallereignisse angegeben. Im Rahmen der Betrachtungen zur Effektiven Lärmdosis werden akute Gehörschäden durch einmalige Schallereignisse an dieser Stelle nur zur Abgrenzung gegenüber chronischen Gehörschäden erwähnt.

### 1.2 Chronische Gehörschäden durch Lärmeinwirkungen

Chronische Gehörschäden können sich durch arbeitstägliche Lärmeinwirkung über viele Jahre und Jahrzehnte entwickeln. Das Merkblatt zu der Berufskrankheit Nr. 2301 führt hierzu aus (Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung 2008):

*„Bei einem Tages-Lärmexpositionspegel von mehr als 90 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 dB (A) erreicht oder überschreitet.“*

Bemerkenswert ist, dass hier die Angabe einer Dosis für das Entstehen von chronischen Gehörschäden in Form eines einzelnen Wertes nicht möglich war. Für die Umschreibung einer Dosischwelle wird der Tages-Lärmexpositionspegel und die Angabe der Expositionsdauer in Jahren herangezogen. *„Der Tages-Lärmexpositionspegel ( $L_{EX,8h}$ ) ist der über die Zeit gemittelte Lärmexpositionspegel bezogen auf eine Achtstundenschicht. Er umfasst alle am Arbeitsplatz auftretenden Schallereignisse“* (Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung 2007). *„Der Tages-Lärmexpositionspegel ( $L_{EX,8h}$ ) ist ein A-bewerteter äquivalenter Dauerschallpegel, der (personenbezogen) für die Dauer eines repräsentativen Arbeitstages zu ermitteln und auf eine Achtstundenschicht (Zeitdauer von acht Stunden) zu beziehen ist.“* (Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung 2010).

Der Tages-Lärmexpositionspegel allein kann also hinsichtlich chronischer Ge-

hörschäden nicht als Dosiswert genutzt werden, denn er beschreibt nur die Exposition eines repräsentativen Arbeitstages. Innerhalb eines Tages entstehen aber nicht die zu betrachtenden chronischen Gehörschäden. Die Aussage „Gehörschäden können ab einem  $L_{EX,8h}$  von 85 dB(A) entstehen“ ist im Sinne einer sicheren Lärmprävention hilfreich und sinnvoll. Sie stellt aber keine ausreichend spezifizierte hinreichende Voraussetzung für das Entstehen von chronischen Gehörschäden dar.

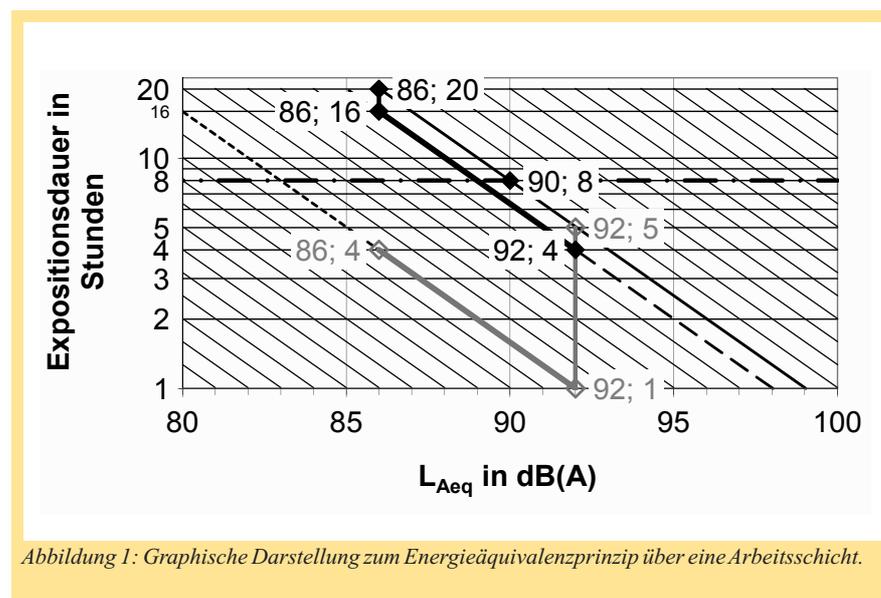
Die Angabe von Dosissschwellen im BK-Merkblatt in Form von „ $L_{EX,8h} = 90$  dB(A)“ zusammen mit „lang andauernder Einwirkung“ und von „ $L_{EX,8h} = 85$  dB(A)“ zusammen mit „langjährigem Lärm“ ist sehr grob. Im Merkblatt wird auch der Begriff „mehrjährig“ gebraucht. Es bleibt unklar, ob ab einem  $L_{EX,8h} = 85$  dB oder = 90 dB und einer Expositionsdauer von nur 2 oder gar erst 40 Jahren mit der Entstehung von lärmbedingten Gehörschäden zu rechnen ist. Außerdem weisen heute anzutreffende Erwerbsbiographien häufig eine Vielzahl von Beschäftigungsabschnitten mit unterschiedlichen Tages-Lärmexpositionspegeln und unterschiedlichen Dauern in Jahren auf. Relationen der entsprechenden beruflichen Gesamtexpositionen zu den im BK-Merkblatt genannten beiden, ungenau umrissenen Dosissschwellen lassen sich für derartige Belastungen nicht mehr durch einfache Abschätzung gewinnen.

Aus den angeführten Gründen ergibt sich der Bedarf für eine „Effektive Lärmdosis“, die sowohl Expositionshöhen in Form der Lärmexpositionspegel als auch die zugehörigen Expositionsdauern in Jahren berücksichtigt und die in der Lage ist, das tatsächliche Gefährdungspotenzial der Gesamtbelastung anzugeben.

## 2. Erkenntnisstand

### 2.1 Die A-Bewertung

Durch die Frequenzbewertung A werden die Schallpegel in Abhängigkeit ihrer Frequenz durch ein bewertendes Filter gewichtet, das den Frequenzgang des menschlichen Gehörs berücksichtigen soll. Schallpegel, die mit der A-Bewertung gewichtet wurden, weisen ent-



weder in ihrem Formelzeichen ein „A“ auf – z.B. „ $L_A$ “ – oder der angegebene Wert in Dezibel „dB“ wird mit einem „(A)“ versehen: „dB(A)“. Eine Ausnahme stellt der  $L_{EX,8h}$  dar, der nach Definition A-bewertet angegeben wird (International Organisation for Standardization 1990), und nicht notwendiger Weise ein „A“ aufweisen muss. Da die meisten industriellen Daten mit Bezug auf lärmbedingte permanente Hörschwellenverschiebung (NIPTS: Noise induced permanent threshold shift) als frequenzbewertete Werte vorlagen, schlug das Intersociety Committee 1967 die Verwendung von A-bewerteten Schalldruckpegeln zur Entwicklung von Kriterien zur Gehörschädigung vor (Intersociety Committee 1967). In vielen Publikationen wurde seither gezeigt, dass A-bewertete Pegel eine vertrauenswürdige Einschätzung der Gehörgefährdung in den meisten industriellen Arbeitsbereichen ermöglichen (z.B. Passchier-Vermeer 1968 und Cohen et al. 1972). Im Rahmen der Bewertung der Gehörgefährdung und der Anwendung von Gehörschadenskriterien ist die A-Bewertung international (International Organisation for Standardization 1990), europäisch (Rat 1986 und Europäisches Parlament und Rat 2003) und in Deutschland (Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung 2007) seit langem normativ und gesetzlich verankert.

### 2.2 Das Energieäquivalenzprinzip

Die Gültigkeit des „Energieäquivalenzprinzips“ im Bereich der Gehörschädigung bedeutet, dass der gleiche Betrag der auf das Ohr treffenden Schallenergie auch jeweils den gleichen Betrag an Hörverlust bewirkt. Diese These der für Gehörschädigung maßgebenden Schallenergie postulierte Eldred schon 1955 (Eldred et al. 1955). Als Ergebnis eines 1981 durchgeführten internationalen Impulslärm-Kolloquiums (Gierke et al. 1982) wurde festgehalten: Es gibt einen beachtlichen Bestand an experimentellen Belegen für das Energieäquivalenzprinzip in Bezug auch auf fluktuierenden Lärm (aber frei von Impulsen mit  $L_{peak} > 145$  dB) für Expositionsdauern bis zu einigen Stunden. Der Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  ist ein Schallparameter, der den Schallenergieäquivalent und A-bewertet über eine Arbeitsschicht erfasst. Mit der Verwendung des  $L_{EX,8h}$  für die Beschreibung der Exposition eines repräsentativen Arbeitstages wurde die Gültigkeit des Energieäquivalenzprinzips über eine Arbeitsschicht in gesetzliche bzw. normative Regelungen übernommen (Rat 1986, International Organisation for Standardization 1990, Europäisches Parlament und Rat 2003, Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung 2007). Da die Gefahr einer Schädigung nur für Lärm mit Impulsen bis  $L_{peak} = 145$  dB durch den Tages-Lärmexpositi-

onspegel ( $L_{EX,8h}$ ) erfasst werden kann (Gierke et al. 1982), sehen z.B. die europäische Lärm-Richtlinie von 1986 (Rat 1986) und die internationale Norm ISO 1999 (International Organisation for Standardization 1990) eine Erfassung und Bewertung von Schallimpulsen mit  $L_{peak} > 140$  dB getrennt vom  $L_{EX,8h}$  vor. Die europäische Lärm-Richtlinie von 2003 (Europäisches Parlament und Rat 2003) und die deutsche Verordnung (Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung 2007) senkten den Wert bezogen auf die Auslösung bestimmter Präventionsmaßnahmen auf  $L_{peak} = 137$  dB(C) bzw. = 135 dB(C) ab.

Die Bestimmung des Tages-Lärmexpositionspegels  $L_{EX,8h}$  für mehrere Tätigkeiten mit unterschiedlichen A-bewerteten äquivalenten Dauerschallpegeln  $L_{Aeq,i}$  ist dank des Energieäquivalenzprinzips recht einfach (International Organisation for Standardization 1990):

$$L_{EX,8h} = 10 \cdot \lg \left[ \frac{1}{8h} \sum_{i=1}^n \left( T_i \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,i}} \right) \right]$$

$T_i$ : Dauer der Einwirkung mit  $L_{Aeq,i}$  in Stunden

In Abbildung 1 findet sich eine graphische Darstellung zum Energieäquivalenzprinzip über eine Arbeitsschicht. Auf der Abszisse sind A-bewertete äquivalente Dauerschallpegel  $L_{Aeq}$  aufgetragen und auf der Ordinate die Expositionsdauer von einer Stunde bis zwanzig Stunden. Die von schräg links oben nach rechts unten verlaufenden Geraden verbinden jeweils energieäquivalente Punkte miteinander. Am Schnittpunkt einer Geraden mit der horizontalen Strichpunkt-Linie (8-Stunden-Linie) kann der  $L_{EX,8h}$  abgelesen werden: Z.B. weisen alle Punkte der Geraden durch den Punkt 90 dB / 8 Stunden („90; 8“) einen  $L_{EX,8h} = 90$  dB auf.

In Abbildung 1 wurde ein einfaches Beispiel gewählt, so dass die Berechnung des  $L_{EX,8h}$  für zwei Belastungsabschnitte graphisch nachvollzogen werden kann: Ein Exponierter wurde vier Stunden mit einem  $L_{Aeq} = 86$  dB beschallt, und weitere vier Stunden mit einem  $L_{Aeq} = 92$  dB. In der Graphik wird nun der Punkt „86; 4“ aufgesucht. Alle

energieäquivalenten Punkte zu „86; 4“ liegen auf der fein gestrichelten Geraden und ihrer Verlängerung bis zur Abzisse (graue Linie). Entlang dieser Geraden auf der grauen Linie ergibt sich auf der Höhe des zweiten  $L_{Aeq}$  (92 dB) im Punkt „92; 1“ eine energieäquivalente Dauer von einer Stunde. Als Gesamtbelastung ergeben sich aus einer Stunde bei 92 dB(A) und vier Stunden bei 92 dB(A) der grauen, vertikalen Linie nach oben folgend fünf Stunden bei 92 dB(A). Der Punkt „92; 5“ liegt auf der Geraden mit energieäquivalenten Punkten zum Punkt „90; 8“, dem Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h} = 90$  dB.

Die Reihenfolge der Summation spielt keine Rolle: Der schwarzen Linie folgend sind vier Stunden Exposition mit 92 dB(A) (Punkt „92; 4“) energieäquivalent mit 16 Stunden bei 86 dB(A) (Punkt „86; 16“). 16 und 4 Stunden bei 86 dB(A) ergeben 20 Stunden bei 86 dB(A). Der Punkt „86; 20“ liegt auf der Geraden energieäquivalenter Punkte zum Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h} = 90$  dB. Auch bei Vertauschung der Reihenfolge ergibt sich der gleiche Tages-Lärmexpositionspegel.

Alle energieäquivalenten Punkte zu einem beliebigen  $L_{EX,8h}$  liegen auf parallelen Geraden zu den in Abbildung 1 gezeigten Geraden. Alle diese Geraden weisen die Eigenschaft auf, dass eine Halbierung der Expositionsdauer in einer Erhöhung des  $L_{Aeq}$  um 3 dB(A) resultiert, um auf der Geraden der energieäquivalenten Punkte zu bleiben. Die Berechnungen sind daher durch die einfache mathematische Formel (1) zu beschreiben.

### 2.3 ISO 1999 – „Bestimmung der berufsbedingten Lärmexposition und Einschätzung der lärmbedingten Hörschädigung“

Das Projekt zur Entwicklung der ISO 1999 wurde vom zuständigen Technischen Komitee „Akustik“ der International Organisation for Standardization (ISO) im Jahre 1958 initiiert, um die Bestimmung der berufsbedingten Lärmexposition und die Einschätzung der lärmbedingten Hörschädigung zu standardisieren. Immer noch befasst sich ein beträchtlicher Teil der heute gültigen

ISO 1999 (International Organisation for Standardization 1990) mit der „Beschreibung und Messung von Lärmexposition“. Voraussetzung zur Entwicklung von belastbaren Dosis-Wirkungsbeziehungen zur Lärmeinwirkung waren internationale Projekte zur Normung der Messverfahren in den Bereichen Lärmmessung am Arbeitsplatz und Audiometrie. Die Beschreibung des Verfahrens zur Lärmmessung am Arbeitsplatz wurde deshalb wichtiger Bestandteil der seit 1971 publizierten Versionen der ISO 1999. Daher verwundert es nicht, dass auf die Beschreibung und die Festlegungen der ISO 1999 zur Ermittlung der Lärmbelastung an Arbeitsplätzen noch heute in gesetzlichen Regelungen zurückgegriffen wird (Europäisches Parlament und Rat 2003). In der ISO 1999 wurden umfangreiche sicherheitstechnisch belastbare, objektive Messdatenkollektive (Lärmmessungen am Arbeitsplatz und Audiogramme) aus der Zeit 1950 – 1984 verwendet. Beispielfhaft seien hier die in der ISO 1999 enthaltenen Studien von Burns und Robinson (Burns & Robinson 1970) und Passchier-Vermeer (Passchier-Vermeer 1968, 1977, 1986) genannt.

Die Auswahl der Datensätze in den Studien der ISO 1999 folgte strengen Kriterien. So wurden in der Datenbasis A, die in diesem Beitrag ausschließlich verwendet wird, nur Daten von „otologisch normalen“ Personen verwendet. Diese waren Personen in einem normalen Gesundheitszustand, die keinerlei Zeichen oder Symptome einer Ohrerkrankung zeigten und deren Gehörgänge keinen Ohrschmalzpfropf aufwiesen. Außerdem durften sie keinerlei unzulässiger Lärmexposition ausgesetzt worden sein. Als unzulässig wurde Exposition gegenüber Kriegslärm (z.B. Geschützlärm) und gemischte oder außerberufliche Exposition angesehen. Außerdem führte das Tragen von Gehörschutz zum Ausschluss. Als Beispiel der strengen Selektion mag die in den ISO 1999-Daten enthaltene Studie von Gallo & Glorig (Gallo & Glorig 1964) dienen: Aus den Daten von 2176 Personen wurden schließlich die Daten von 490 Exponierten ausgewählt, d.h. mehr als 75 % der Daten konnten aufgrund der stren-

gen Auswahlkriterien nicht berücksichtigt werden.

Durch das strenge Screening innerhalb der ISO 1999-Studien und der Datenerhebungen im Zeitraum 1950 bis 1984, in dem an Arbeitsplätzen kaum Gehörschutz getragen wurde, liegen in der ISO 1999 kausalanalytisch qualitätsgesicherte arbeitsmedizinisch-epidemiologische Studien mit quantitativ belastbaren Dosis-Häufigkeits-Beziehungen auf der Ursachenseite vor.

Das in der ISO 1999 beschriebene Modell ist das einzige als internationale Norm veröffentlichte Lärmdosis-Wirkungsmodell. 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 anhaltend hohe Bedeutung der in der ISO 1999 beschriebenen Erkenntnisse.

ISO 1999 enthält ein mathematisches Modell zur Berechnung der zu erwartenden Hörverluste für Gruppen ohne Lärmbelastung und für einheitlich lärm-belastete Gruppen. Dieses Modell stellt die mathematische Formulierung der erhaltenen, quantitativ belastbaren Dosis-Wirkungs-Beziehungen dar. Permanente Hörschwellenverschiebungen (PTS – permanent threshold shift) aufgrund altersbegleitender Effekte einerseits und durch lärmbedingte Effekte andererseits werden nicht einfach addiert. In die Berechnung gehen folgende Einflussgrößen ein:

- der Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  in dB,
- 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 und 100 dB,
- Lebensalter über 18 Jahre und
- Expositionsdauer von 0 bis 40 Jahre.

Die Aussagen des Modells beschrän-

ken sich auf Gruppen ohne außerberuflich bedingte Hörminderungen. Die Berechnung ergibt die Hörverluste bei den Frequenzen 0,5; 1; 2; 3; 4 und 6 kHz in Fraktile von 0,05 bis 0,95. Das Fraktile 0,05 besagt beispielsweise, dass bei 5 % der Lärmexponierten ein Hörverlust zu erwarten ist, der gleich oder größer als der von der ISO 1999 ausgewiesene Wert ist.

Auch ISO 1999 enthält bzw. bestätigt das Energieäquivalenzprinzip über eine Arbeitsschicht. Expositionen über eine bestimmte Anzahl von Jahren, die bezüglich des  $L_{Aeq}$  und der Dauer der Lärmeinwirkung pro Arbeitsschicht entlang einer der Geraden in Abbildung 1 liegen, haben nach ISO 1999 jeweils exakt die gleiche lärmbedingte PTS zur Folge. Anders formuliert: Wird ein beliebiger Expositionspunkt mit  $L_{Aeq}$  und Dauer pro Arbeitsschicht in Stunden herausgegriffen, so liegen für eine bestimmte Gesamtexpositionsdauer in Jahren nach ISO 1999 und damit auch nach dem Energieäquivalenzprinzip (Abschnitt 2.2) alle Punkte mit gleicher PTS auf derjenigen Geraden parallel zu den gezeigten Geraden in Abbildung 1, die den herausgegriffenen Expositionspunkt enthält. Dies gilt unabhängig vom Fraktile, von der audiometrischen Frequenz, vom Geschlecht, vom Lebensalter und der Gesamtexposition in Jahren. Die genannten Parameter verändern jeweils nur die absolute Höhe der PTS für eine Gerade oder für eine dazu parallele Gerade der Abbildung 1 nicht aber die Lage dieser PTS-äquivalenten Geraden selbst. Dies bedeutet, dass Formel (1) bzw. Abbildung 1 ein universelles Instrument zur Ermittlung der PTS-gerechten Lärmdosis für jedes exponierte Individuum darstellt, solange der  $L_{EX,8h}$  über die gesamte Expositionsdauer von mehreren Jahren konstant war.

#### 2.4 Praktische Anwendung der ISO 1999 bisher

Lärmbedingte PTS auch für schon als erheblich anzusehende Lärmexpositionen (z.B.  $L_{EX,8h} = 90$  dB und 35 Jahre Expositionsdauer) sind gering gegenüber der Streuung der altersbegleitenden Effekte einer nicht Lärm exponierten Kontrollgruppe. Dies mag das folgende

Beispiel verdeutlichen: Nach ISO 1999, Datenbasis A (otologisch normale Personen), ergibt sich für eine nicht lärmexponierte Population aus 55-jährigen Männern eine PTS von 40 dB (0,05 Fraktile) bis –4 dB (0,95 Fraktile) bei 3 kHz. Eine Population aus 55-jährigen Männern, aber diesmal 35 Jahre mit  $L_{EX,8h} = 90$  dB exponiert, würde nach ISO 1999 eine PTS von 54 dB (0,05 Fraktile) bis 4 dB (0,95 Fraktile) bei 3 kHz entwickeln. Weist nun z.B. ein 55-jähriger Mann eine PTS von 40 dB bei 3 kHz auf, so kann daraus hinsichtlich einer lärmbedingten PTS und damit einer möglichen Lärmexposition nichts abgeleitet werden; denn 5 % der (otologisch normalen) Männer seines Alters erreichen mindestens diese PTS ohne Lärmeinwirkung.

Da ISO 1999 eine Beziehung zwischen Lärmeinwirkung und lärmbedingter PTS (NIPTS) für große Populationen (auch mit Individuen unterschiedlichen Alters), die gegenüber bestimmtem Lärm exponiert waren, in Form statistischer Verteilungen angibt, kann sie kaum für ein einzelnes Individuum sinnvoll verwendet werden. Daher nutzen Gutachter in Deutschland und anderen Ländern die ISO 1999 bestenfalls für eine zusätzliche Plausibilitätsprüfung.

Auch bei diesen Plausibilitätsprüfungen sind Erkenntnisse aus der Gutachtenpraxis zu beachten. Denn auf Grundlage des Verlaufs der Audiogrammkurve kann nicht aus einer „typischen  $C_5$ -Senke“ auf eine lärmbedingte Ursache geschlossen werden. Auch andere Hörstörungen können zu dem tonaudiometrischen Bild führen, welches wir als typisches „Lärmaudiogramm“ zu bezeichnen gewohnt sind (Brusis 2009). 1980 schon hatte Brusis über einige typische Lärmaudiogramme berichtet, denen jedoch andere Krankheitsbilder (angeborenes Leiden, Herzinfarkt, Streptomyzintoxikation, schweres Schädelhirntrauma) zugrunde lagen (Brusis 1980).

Für die Festlegung von Schwellenwerten in der Lärmprävention hat sich die ISO 1999 hingegen bestens bewährt, da allgemeine Präventionsmaßnahmen immer eine Population als Zielgruppe haben. Sie diene daher den beratenden

Experten bei der Erarbeitung der europäischen Richtlinie zum Schutz der Arbeitnehmer vor Lärm (Europäisches Parlament und Rat 2003) als Grundlage.

## 2.5 Dosis-Wirkungsmodelle für langfristige Lärmexposition – Lärmdosis

1970 wurde von Burns und Robinson auf der Grundlage ihrer Studienergebnisse postuliert, dass die durch Exposition gegenüber Industrielärm bedingte PTS eine (einfache) Funktion der Schallenergie sei (Burns and Robinson 1970). Das „Energieäquivalenzprinzip“ bedeute auch für langfristige Lärmexposition, dass gleiche Gesamtschallenergie auch die gleiche PTS hervorrufe. Es wurde dabei angenommen, dass das Gehör als „physikalischer Schallenergie-Integrator“ arbeite, der unabhängig von dem langfristigen zeitlichen Verlauf der Schallexposition eine Reduktion seiner Empfindlichkeit (PTS) allein abhängig von der insgesamt aufgenommenen Schallenergie entwickelt. Die Publikation (Burns and Robinson 1970) enthielt aber schon einige Spekulationen, dass der Hörverlust eventuell Sättigungseffekte zeigt, wenn er in Dezibel ausgedrückt wird. Diese eventuellen Sättigungseffekte könnten hervorgerufen werden durch altersbegleitende Effekte oder allein lärmbedingt sein oder es könnten auch beide Ursachen zusammenwirken.

Zur Berechnung des Risikos einer PTS bzw. eines Gehörschadens für die Summe aller Lärmbelastungen im Laufe eines Arbeitslebens hat 1975 von Lüpke sein Risikomaß veröffentlicht, das eine energieäquivalente Summierung der Belastungen aus den einzelnen Abschnitten verwendet (Lüpke 1975). Auch 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.

Diesen Dosis-Wirkungsmodellen ist gemeinsam, dass ihre Ergebnisse unabhängig von der zeitlichen Reihenfolge

der einzelnen Belastungsabschnitte sind. Die Ergebnisse hängen nur von der gesamten aufgenommenen Schallenergie (mit Frequenzbewertung A) ab. Eine Verdoppelung der Schallenergie hat jeweils unabhängig vom Ausgangspunkt die gleiche Steigerung des Dosis-Kennwertes zur Folge.

## 2.6 Kritik an den Dosis-Wirkungsmodellen für langfristige Lärmexposition

Scheiblechner publizierte 1974 seine Untersuchungsergebnisse zur Validierung des „Energieäquivalenzprinzips“ für langjährige Schallexposition (Scheiblechner 1974). Für seine vielfältigen Analysen wurden 649 Industrielärm exponierte Arbeiter mittels einer Sammlung von 25.000 Protokollen nach strengen Kriterien ausgewählt. Diese Analysen ergaben, dass das „Energieäquivalenzprinzip“ für langjährige Exposition abzulehnen sei. Darüber hinaus sei die PTS resultierend aus verschiedenen Faktoren wie z.B. Lärm und Alter nicht einfach additiv.

Dieroff vermerkte 1979 „zur Hypothese des Energieäquivalentes“, dass es durchaus nicht gleich sei, in welchem Zeitverhältnis die Energie auf ein Hörorgan eingewirkt hat (Dieroff 1979). Es spiele also auch der Erholungsmechanismus eine ausschlaggebende Rolle.

Auch nach Feldmann und Brusis wird in der Regel nicht beobachtet, dass der Hörverlust bei gleichbleibender Schalleinwirkung auf der dB-Skala über Jahre hinweg gleichmäßig fortschreitet (Feldmann & Brusis 2012). 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 sehr vielen Studien der letzten Jahrzehnte dokumentiert worden und ist mit dem Energieäquivalenzprinzip nicht vereinbar.

Physiologisch plausibel ist die Gültigkeit des Energieäquivalenzprinzips nur für die Dauer einer Arbeitsschicht: Anhaltende Stimulation der Haarzellen kann die metabolischen Bestandteile (Sauerstoff und Glukose) erschöpfen, die zur Abdeckung des erhöhten Energiebedarfs 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; denn die Absonderung von Sauerstoff und Glukose durch die Stria vascularis an die Flüssigkeit im Innenohr sichert als langsamer Diffusionsprozess in längeren Erholungsphasen die Energiezufuhr der Haarzellen für weitere Lärmexposition.

## 2.7 ISO 1999 und die Dosis-Wirkungsmodelle für langfristige Lärmexposition

Da sich die Erkenntnisse der ISO 1999 auf mehrere kausalanalytisch qualitätsgesicherte arbeitsmedizinisch-epidemiologische Studien mit quantitativ belastbaren Dosis-Häufigkeits-Beziehungen auf der Ursachenseite gründen, enthält sie auch die Erkenntnisse (Scheiblechner 1974, Dieroff 1979, Feldmann & Brusis 2012), die Anlass zu der berechtigten Kritik an den Dosis-Wirkungsmodellen für langfristige Lärmexposition (z.B. Burns & Robinson 1970 und v. Lüpke 1975) gaben. Die mathematische Beschreibung der in der ISO 1999 dokumentierten Dosis-Wirkungsbeziehung berücksichtigt den Sättigungseffekt. Dieser Effekt bewirkt, dass trotz gleicher aufgenommener Gesamtschallenergie die beobachtete NIPTS abhängig vom Verlauf der Exposition über längere Zeiträume ist.

Ein einfaches Beispiel mag die Wirkung des Sättigungseffekts und den Widerspruch der in der ISO 1999 beschriebenen Erkenntnisse für langfristige Lärmexposition mit den in den anderen Dosis-Wirkungsmodellen enthaltenen illustrieren:  $H'$  sei die permanente Gesamt-PTS aus alterbegleitenden und lärmbedingten Effekten und  $H$  gebe die PTS für eine gleiche Population aber ohne Lärmeinwirkung an. Wurden 60-jährige Männer 34 Jahre lang arbeitstäglich jeweils 4 Stunden mit 86 dB(A) und 4 Stunden mit 92 dB(A) exponiert (ergibt ein  $L_{EX,8h} = 90$  dB unabhängig von der

Reihenfolge, s. Beispiel im Abschnitt 2.2), so ergibt sich nach ISO 1999 für das Fraktile 0,05 eine Differenz zwischen  $H'$  und  $H$  von  $H'-H = 10$  dB. Wurde die gleiche Population 17 Jahre lang mit  $L_{EX,8h} = 86$  dB und weitere 17 Jahre mit  $L_{EX,8h} = 92$  dB belastet, dann ergibt sich nach ISO 1999  $H'-H = 12$  dB. Bei Umkehrung der zeitlichen Abfolge der beiden Abschnitte, d.h. zunächst 17 Jahre mit  $L_{EX,8h} = 92$  dB und dann 17 Jahre mit  $L_{EX,8h} = 86$  dB, ergibt sich für  $H'-H = 11$  dB. In allen drei Fällen ergeben sich unterschiedlich hohe NIPTS, obwohl die Gesamtchallengerie jeweils gleich ist.

### 3. Aufgabenstellung

Für die Einschätzung der Gehörgefährdung unterschiedlicher Lärmeinwirkungen innerhalb einer Arbeitsschicht hat sich der Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  bewährt. Er wurde daher in internationalen Dokumenten z.B. der WHO und ISO und in nationalen gesetzlichen Regelungen verankert. D.h. obwohl sich je nach Fraktile für einen bestimmten  $L_{EX,8h}$  und eine bestimmte Expositionsdauer in Jahren ganz unterschiedliche PTS ergeben (s. Kap. 2.4), sind für alle Fraktile die in Abbildung 1 (und damit die in Formel (1)) gezeigten Eigenschaften gültig: Auch wenn eine Population aus 55-jährigen Männern, die 35 Jahre mit  $L_{EX,8h} = 90$  dB exponiert wurde, nach ISO 1999 eine PTS von 54 dB (0,05 Fraktile) bis 4 dB (0,95 Fraktile) bei 3 kHz entwickelt (s. Abschnitt 2.4), so ist für jedes Fraktile die jeweils erreichte PTS unabhängig von der tatsächlichen Lage des Expositionspunktes auf der Geraden durch den Punkt „90 dB(A), 8 h“ in Abbildung 1. Dies bedeutet, die in Abbildung 1 gezeigten Geraden (und alle dazu parallelen Geraden) sind Linien gleicher NIPTS. Da diese Geraden für ein bestimmtes  $L_{EX,8h}$  für alle Fraktile identisch sind, sind sie Fraktile-unabhängig. Das für die Fraktile Gesagte gilt in gleicher Weise auch für die audiometrischen Frequenzen, das Geschlecht, das Lebensalter und die Gesamtexposition in Jahren. Wie in Abschnitt 2.3 ausgeführt steht damit ein universelles Instrument zur Ermittlung der PTS-gerechten Lärmdosis

für jedes exponierte Individuum zur Verfügung, solange der  $L_{EX,8h}$  über die gesamte Expositionsdauer von mehreren Jahren konstant war. Damit sind für diesen Fall Fraktile-unabhängige „Hörminderungs-Äquivalenzen“ und ein „Hörminderungs-Ranking“ bekannt.

Da für langfristige Lärmexpositionen das Energieäquivalenzprinzip nicht gilt und Effekte wie „Sättigung“ auftreten, ist kein so einfacher Dosis-Wirkungs-Zusammenhang zu erwarten, wie er für die Situation bis zur Dauer einer Arbeitsschicht (Abbildung 1 und Formel (1)) bekannt und etabliert ist. Zu prüfen ist daher, ob sich mit den Konzepten „Hörminderungs-Äquivalenzen“ und „Hörminderungs-Ranking“ in der Praxis brauchbare Dosis-Wirkungs-Beziehungen auch für langfristige Lärmeinwirkungen mit von einzelnen Wochen-, Monats- oder Jahresabschnitten zum nächsten Abschnitt wechselnden  $L_{EX,8h}$  ableiten lassen.

## 4. Methodik

### 4.1 Hörminderungsäquivalenzen

Basierend auf der ISO 1999 wurden Berechnungen von lärmbedingten hörschwellenverschiebungsäquivalenten Kurven (NIPTS-äquivalenten Kurven) durchgeführt (Liedtke 2010b). Auf dieser Grundlage und unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der Fachliteratur (z.B. Feldmann & Brusis 2012) wurden die Kurven für 4 kHz für die

Entwicklung einer Dosis-Wirkungsbeziehung für langfristige Lärmeinwirkungen ausgewählt.

Abbildung 2 zeigt die NIPTS-äquivalenten Kurven für die Frequenz 4 kHz für eine lärmexponierte Population (Fraktile 0,95 bis 0,05) über eine Expositionsdauer von knapp einem Jahr bis zu 40 Jahren. Es werden nur Kurven gezeigt, die den Punkt  $L_{EX,8h} = 90$  dB / Expositionsdauer  $t = 5$  Jahre enthalten. Auf der Abszisse sind die Tageslärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  und auf der Ordinate die Expositionsdauern in Jahren aufgetragen. Zunächst fällt auf, dass die NIPTS-äquivalenten Punkte nicht auf Geraden liegen – wie in Abbildung 1 über die Dauer einer Arbeitsschicht – sondern auf gekrümmten Linien. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass hier nicht das Energieäquivalenzprinzip gilt und andere Effekte wie z.B. die Sättigung auftreten. Alle Punkte einer Kurve in Abbildung 2 weisen die gleiche NIPTS auf wie die NIPTS, die am Punkt  $L_{EX,8h} = 90$  dB und Expositionsdauer  $t = 5$  Jahre der jeweiligen Kurve anzutreffen ist. Der gewählte Punkt ist beispielhaft und die abgeleiteten Erkenntnisse sind prinzipieller Natur: Die NIPTS-äquivalenten Kurven liegen für die Fraktile 0,05 bis 0,5 (gestrichelte Linien) übereinander (Liedtke 2010b). Dies bedeutet, dass für die Hälfte einer lärmexponierten Population (0,05 Fraktile bis 0,50 Fraktile) der Verlauf der NIPTS-Äquiva-

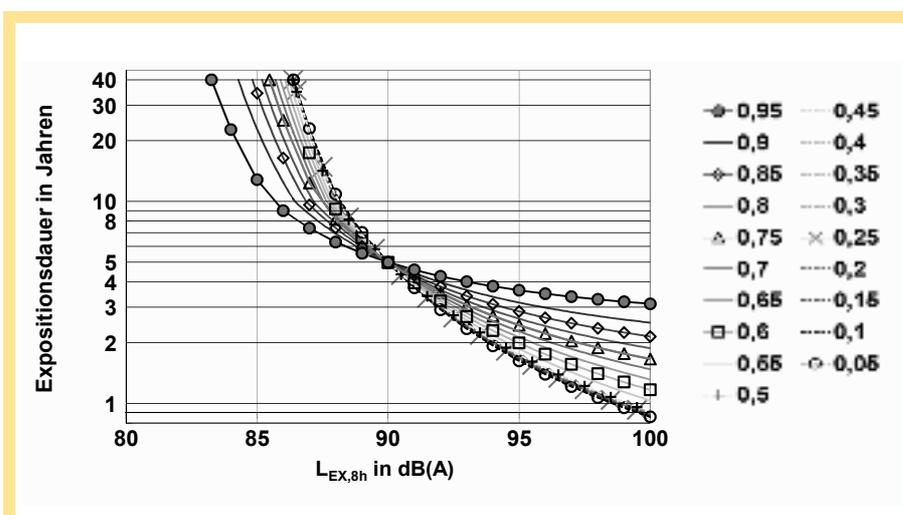


Abbildung 2: NIPTS-äquivalente Kurven nach Fraktile für die Frequenz 4 kHz einer lärmexponierten Population.

lenzkurven unabhängig vom Fraktile angegeben werden kann. Es handelt sich um diejenige Hälfte, deren Hörschwellen empfindlich auf Lärm reagieren. Im Bereich  $Q = 0,03$  liegen die Fälle der anerkannten beruflichen Lärmschwerhörigkeit (BK 2301). Eine Extrapolation der ISO 1999 außerhalb ihres Gültigkeitsbereiches bis zum Fraktile  $Q = 0,01$  ergibt nur vernachlässigbare Abweichungen von der Kurve bei  $Q = 0,05$ .

Auf dieser Grundlage lassen sich in Abbildung 3 für die Fraktile  $Q \leq 0,5$  NIPTS-äquivalente Kurven für unterschiedliche Werte der „Effektiven Lärmdosis“ zeichnen. Nach Königsteiner Empfehlung (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung 2012) wird die Lärmexposition für das gesamte Arbeitsleben durch die Berechnung der „Effektiven Lärmdosis“ (ELD) auf den einheitlichen Pegel von 90 dB(A) bezogen und in Lärmjahren angegeben. Diese ELD ermögliche dem Gutachter eine vergleichende Einschätzung bei der Beurteilung der Exposition unterschiedlicher Versicherter. Je mehr Lärmjahre sich ergeben, umso höher war die Belastung. Der Wert dieser ELD in Lärmjahren lässt sich im Schnittpunkt einer Kurve in Abbildung 3 mit der vertikalen Strich-Punkt-Geraden durch  $L_{EX,8h} = 90$  dB ablesen. Die unterste Kurve verbindet die NIPTS-äquivalenten Punkte zu 0,05 Lärmjahren und die zweite Kurve von unten diejenigen zu 0,1 Lärmjahren. Beispielhaft wurde für eine Exposition von  $L_{EX,8h} = 92$  dB über 2,4 Jahre hinweg der Punkt („92; 2,4“) im Diagramm eingetragen. Die gestrichelte NIPTS-äquivalente Kurve durch diesen Punkt schneidet die vertikale Strich-Punkt-Gerade im Punkt  $L_{EX,8h} = 90$  dB und 4 Jahre („90; 4“). Ist eine Person nur mit  $L_{EX,8h} = 92$  dB über 2,4 Jahre exponiert worden, so beträgt die ELD für diese Exposition daher 4 Lärmjahre.

Der Punkt  $L_{EX,8h} = 81$  dB und 40 Jahre liegt NIPTS-äquivalent zu 0,6 Lärmjahren und der Punkt 82 dB(A) und 40 Jahre zu 0,9 Lärmjahren. Selbst einzeln auftretende Expositionen von sehr langer Dauer haben bei  $L_{EX,8h} < 80$  dB nur zu vernachlässigenden Werten der Effektiven

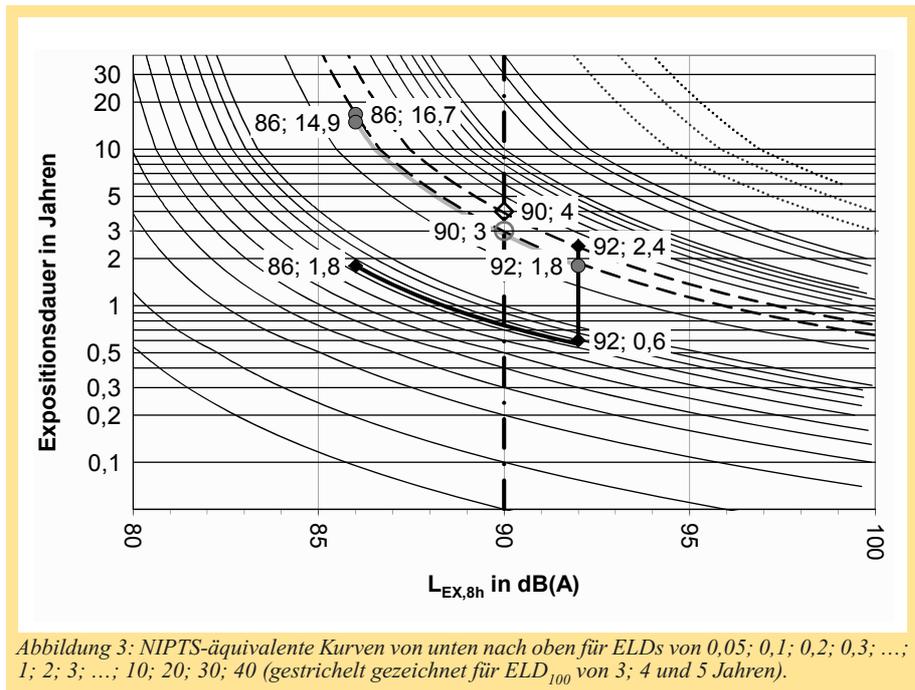


Abbildung 3: NIPTS-äquivalente Kurven von unten nach oben für ELDs von 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; ...; 1; 2; 3; ...; 10; 20; 30; 40 (gestrichelt gezeichnet für ELD<sub>100</sub> von 3; 4 und 5 Jahren).

Lärmdosis zur Folge. Falls dann weitere Expositionen mit höheren  $L_{EX,8h}$  hinzukommen, haben sie häufig keinen Einfluss auf das Endergebnis, wie im Folgenden noch gezeigt wird (Abschnitt 5.4).

Um eine NIPTS-Äquivalenz hoher Effektiver Lärmdosen (z.B.  $L_{EX,8h} = 95$  dB und  $t > 5$  Jahre) zu niedrigeren  $L_{EX,8h}$  herzustellen, ist es möglich durch Extrapolation auch Werte von z.B. 200 oder 20000 Lärmjahren zu berechnen. Die Grundlage des mathematischen Modells der ISO 1999 bilden aber die im Rahmen von epidemiologischen Studien an Menschen gewonnenen Daten. Die Gültigkeit der ISO 1999 wurde daher auf maximal 40 Expositionsjahre beschränkt (International Organisation for Standardization 1990). Ergeben sich im Sonderfall hoher Expositionen rechnerisch Werte von  $ELD > 40$  Jahren, so kann das Ergebnis entweder die Angabe „ELD  $> 40$  Jahre“ sein oder das Ergebnis wird innerhalb des Gültigkeitsbereiches der ISO 1999 umgerechnet auf NIPTS-äquivalente Expositionsdauern bezogen auf  $L_{EX,8h} = 100$  dB; das ELD, das sich auf  $L_{EX,8h} = 100$  dB bezieht, wird als „ELD<sub>100</sub>“ notiert. Die drei gepunkteten NIPTS-äquivalenten Kurven in Abbildung 3, die sich rechts oben befinden, setzen den Bereich von  $ELD > 40$  Jahren fort. Ein ELD von 40 Jahren entspricht

einem ELD<sub>100</sub> von 1,9 Jahren. In Abbildung 3 sind die 3 ELD<sub>100</sub>-Kurven für 3, 4 und 5 Jahre gezeigt.

#### 4.2 Ermittlung der ELD für mehrere Belastungsabschnitte

Da bei der Berechnung der ELD epidemiologisch gewonnene Erkenntnisse wie z.B. diejenigen über den Sättigungseffekt berücksichtigt werden, hat die Chronologie der Belastungsabschnitte einen Einfluss auf das Ergebnis: Der Sättigungseffekt entsteht dadurch, dass zu Beginn einer Lärmexposition die Hörschwelle lärmbedingt wesentlich schneller abwandert als zum Ende eines Belastungsabschnittes. Finden sich in einer Belastungsbiographie bezüglich des  $L_{EX,8h}$  nur ansteigende Stufen, so wird mit dieser Chronologie der Belastungen eine sehr hohe NIPTS erreicht, da jeder Abschnitt den Beginn einer höheren Belastung darstellt und die Abwanderung der Hörschwelle hier besonders schnell stattfindet. Läuft hingegen die Belastungsbiographie des geschilderten Falls hinsichtlich der Reihenfolge der Belastungsabschnitte rückwärts ab, so ergeben sich hinsichtlich des  $L_{EX,8h}$  lauter absteigende Stufen. Der Sättigungseffekt bewirkt hier in einem nachfolgenden Belastungsabschnitt geringere PTS-Zunahme als in denjenigen,

die ohne vorangegangene Belastungen allein durch den betrachteten nachfolgenden Belastungsabschnitt erzielt werden.

Daraus ergeben sich z. B. für Situationen gleicher aufgenommener Gesamt-schallenergie aber Änderung der zeitlichen Abfolge von Abschnitten unterschiedliche Werte. Als Beispiel sind zwei Situationen in Abbildung 3 eingetragen. Zur Berechnung der jeweiligen ELD folgen wir intuitiv dem schon in Abbildung 1 angewandten Verfahren:

1.) Einer Exposition von  $L_{EX,8h,1} = 86$  dB über  $t_1 = 22$  Monate (1,8 Jahre) folgt eine weitere Exposition von  $L_{EX,8h,2} = 92$  dB über ebenfalls  $t_2 = 22$  Monate (1,8 Jahre). In der Abbildung 3 wird nun der Punkt „86; 1,8“ aufgesucht. Alle NIPTS-äquivalenten Punkte zu „86; 1,8“ liegen in Abbildung 3 auf der gedachten NIPTS-äquivalenten Kurve mit einem ELD von 0,75 Jahren, die zwischen den gezeichneten Kurven mit  $ELD = 0,7$  und  $ELD = 0,8$  liegt. Entlang dieser Kurve auf der schwarz gezeichneten Linie ergibt sich auf der Höhe des  $L_{EX,8h,2}$  (92 dB) im Punkt „92; 0,6“ eine NIPTS-äquivalente Dauer von  $t'_1 = 0,6$  Jahren. Als Gesamtbelastung ergeben sich aus 0,6 Jahren bei 92 dB(A) und 22 Monaten (1,8 Jahren) bei 92 dB(A) der schwarzen, vertikalen Linie nach oben folgend  $t_{ges} = 2,4$  Jahre bei  $L_{EX,8h,2} = 92$  dB(A). Der Punkt „92; 2,4“ liegt auf der oberen, gestrichelten Kurve mit NIPTS-äquivalenten Punkten zum Punkt „90; 4“ ( $L_{EX,8h,Ref}$ ,  $t'_{ges}$ ) und es ergibt sich daher ein ELD von 4 Jahren.

2.) Tauscht man nun die Reihenfolge der beiden Expositionen unter 1.) dann wird deutlich, dass die Reihenfolge der Summation von Belastungen über lange Zeiträume hinweg eine wichtige Rolle spielt: Der grauen Kurve in Abbildung 3 folgend sind 22 Monate (1,8 Jahre) Exposition mit 92 dB(A) (Punkt „92; 1,8“) NIPTS-äquivalent mit 14,9 Jahren bei 86 dB(A) (Punkt „86; 14,9“). 14,9 und 1,8 Jahre (22 Monate) bei 86 dB(A) ergeben 16,7 Jahre bei 86 dB(A). Der Punkt „86; 16,7“ liegt auf der NIPTS-äquivalenten Kurve mit  $ELD = 3$  Jahre (untere gestrichelte Kurve). Bei Vertau-

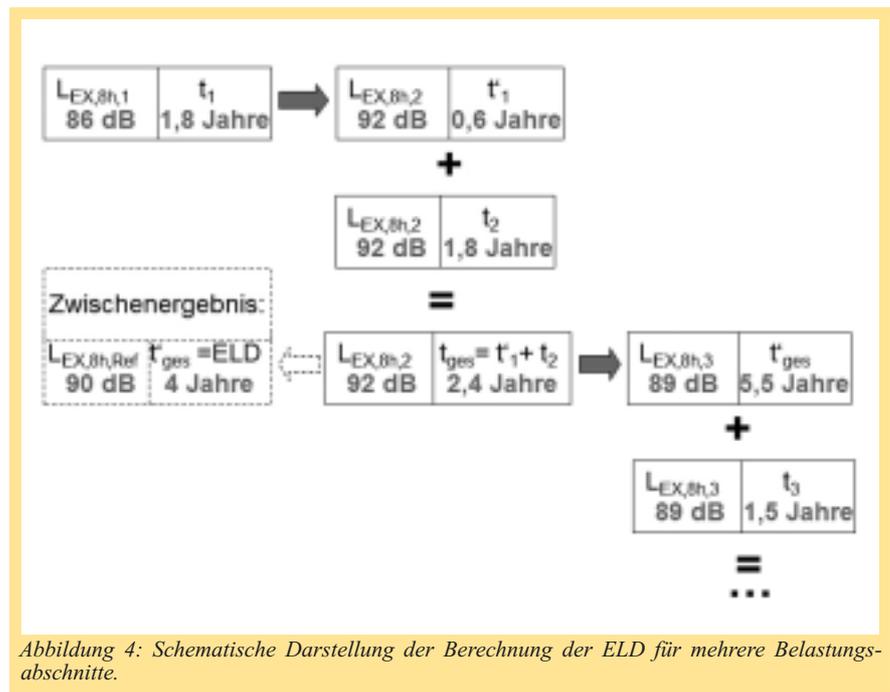


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Berechnung der ELD für mehrere Belastungsabschnitte.

schung der Reihenfolge der Belastungsabschnitte ergibt sich also für die beschriebene Situation eine Differenz der ELD von einem Lärmjahr.

Hinter dem hier beschriebenen Verfahren steckt die Berechnung der NIPTS für 4 kHz nach ISO 1999 für die Exposition  $L_{EX,8h} = 86$  dB und 1,8 Jahre. Sie wird für das Fraktile  $Q = 0,05$  nach ISO 1999 berechnet. Nun wird die Dauer für das gleiche Fraktile  $Q$  und eine Exposition mit  $L_{EX,8h} = 92$  dB ermittelt, die genau die schon berechnete NIPTS ergibt: Sie lautet 0,6 Jahre. Da dieser Umrechnungsvorgang unabhängig vom gewählten Fraktile  $Q$  für  $Q \leq 0,5$  ist, lautet das Ergebnis auch 0,6 Jahre, wenn ein anderes Fraktile  $Q$  mit  $Q \leq 0,5$  gewählt wird. Nach (Liedtke 2010b) ergeben sich entlang der NIPTS-äquivalenten Kurven für die Fraktile  $Q \leq 0,5$  nahezu deckungsgleiche Audiogramme, d. h. die audiometrische Frequenz hat einen zu vernachlässigenden Effekt auf Lage und Form der NIPTS-äquivalenten Kurven in Abbildung 3. Wäre der Exponierte also mit  $L_{EX,8h} = 92$  dB und 0,6 Jahren statt mit  $L_{EX,8h} = 86$  dB und 1,8 Jahren (22 Monaten) belastet worden, so wäre für ihn das gleiche Audiogramm ermittelt worden unabhängig davon, zu welchem Fraktile er gehört (solange er zu der Hälfte der Population gehört, die das emp-

findlichere Gehör aufweist). Für kontinuierliche Exposition mit einem einzigen  $L_{EX,8h}$  über einen Zeitraum von 0,6 und zusätzlich 1,8 Jahren ist das Verfahren zur Summation (Abschnitt 2.3) bekannt: Es ergibt sich aus 0,6 und 1,8 Jahren eine Gesamtdauer von 2,4 Jahren. Die nun für  $L_{EX,8h} = 92$  dB und 2,4 Jahren und das Fraktile  $Q = 0,05$  nach ISO 1999 berechnete NIPTS ist genauso hoch wie für eine Exposition mit  $L_{EX,8h} = 90$  dB und 4 Jahren ( $ELD = 4$  Lärmjahre). Auch diese Umrechnung ist fraktile-unabhängig (für  $Q \leq 0,5$ ) und ergibt für alle Individuen derjenigen Populationshälfte mit dem empfindlichen Gehör den gleichen ELD-Wert von 4 Lärmjahren.

Da bei der ELD-Ermittlung die Reihenfolge der Berücksichtigung der Belastungsabschnitte einen Einfluss auf das Ergebnis hat, muss die ELD immer sukzessive durch Kombination mit dem jeweils nächsten Belastungsabschnitt in der chronologisch richtigen Reihenfolge berechnet werden. Das Prinzip der Ermittlung der ELD aus mehreren Belastungsabschnitten (Liedtke 2010b) wird in Abbildung 4 deutlich. Sie stellt die Ermittlung der ELD für die beiden unter „1.“ betrachteten Belastungsabschnitte (Exposition mit  $L_{EX,8h,1} = 86$  dB über  $t_1 = 1,8$  Jahre gefolgt von  $L_{EX,8h,2} = 92$  dB über ebenfalls  $t_2 = 1,8$  Jahre) und zusätz-

lich exemplarisch für einen weiteren Abschnitt schematisch dar: Zunächst wird die Expositionsdauer des ersten Abschnitts ( $t_1 = 1,8$  Jahre) in die NIPTS-äquivalente Dauer ( $t'_1 = 0,6$  Jahre) bezogen auf den  $L_{EX,8h,2}$  ( $= 92$  dB  $= L_{EX,8h}$  des zweiten Belastungsabschnitts) umgerechnet. Danach können die beiden Dauern  $t'_1 = 0,6$  Jahre und  $t_2 = 1,8$  Jahre einfach zu  $t_{ges} = 2,4$  Jahre addiert werden, da sich beide Dauern auf den gleichen  $L_{EX,8h}$  ( $L_{EX,8h,2} = 92$  dB) beziehen. Das Wertepaar  $L_{EX,8h,2} = 92$  dB und  $t_{ges} = 2,4$  Jahre kann nun als Beschreibung der Gesamtdosis der ersten beiden Abschnitte aufgefasst werden. Damit sind die beiden ersten Abschnitte zu einem Abschnitt zusammengefasst, der nun als neuer, erster Abschnitt aufgefasst wird und der mit dem nachfolgenden (dritten) Abschnitt auf die gleiche Weise kombiniert werden kann, wie der erste und der zweite Abschnitt:  $t_{ges} = 2,4$  Jahre wird dazu in die NIPTS-äquivalente Dauer  $t'_{ges} = 5,5$  Jahre bezogen auf  $L_{EX,8h,3} = 89$  dB umgerechnet und ergibt zusammen mit  $t_3 = 1,5$  Jahre die neue Gesamtdauer von 7 Jahren ... Bei Bedarf kann die Lärmdosis am Ende des zweiten Abschnitts mit  $t_{ges}$  in die NIPTS-äquivalente Dauer bezogen auf  $L_{EX,8h,Ref} = 90$  dB umgerechnet werden. Die Dauer  $t'_{ges} = 4$  Jahre gibt dann die bis zu diesem Zeitpunkt angesammelte ELD in Lärmjahren als Zwischenergebnis an.

## 5. Diskussion – Verwendung und Interpretation von ELD-Werten

Der über eine Lärmexpositionsbiographie wachsende ELD-Wert gibt jeweils die Anzahl der Expositionsjahre an, die bei einer einheitlichen, kontinuierlichen Exposition mit einem  $L_{EX,8h} = 90$  dB die gleiche PTS zur Folge haben würde, wie diejenige PTS, die zum betrachteten Zeitpunkt in der jeweiligen Expositionsbio-graphie vorliegt. 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 Hörschwellenverschiebungen

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. 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 Lärmeffekts im Hinblick auf die Ermittlung der beruflichen Lärmdosis ohne eine Aussage zu möglichen Beeinträchtigungen des sozialen Sprachgehörs zu ermöglichen. Im Rahmen der Begutachtung beruflicher Lärmschwerhörigkeit soll die ELD daher nur ergänzend im Rahmen der Ermittlung der arbeitstechnischen Voraussetzungen berechnet und angegeben werden. Mit der ELD steht damit ein Instrument zur Einschätzung der beruflichen „Lärmlebensdosis“ bereit, das bekannte und etablierte Dosis-Wirkungs-Beziehungen für langfristige Lärmeinwirkungen mit von einzelnen Wochen-, Monats- oder Jahresabschnitten zum nächsten Abschnitt wechselnden  $L_{EX,8h}$  nutzbar macht. Die ELD dient der Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Begutachtung und der Gleichbehandlung der Versicherten hinsichtlich der Ermittlung der arbeitstechnischen Voraussetzungen für das Entstehen einer beruflichen Lärmschwerhörigkeit.

### 5.1 ELD größer als 40 Jahre

Die mathematischen Formeln zur ELD lassen numerisch Extrapolationen über 40 Jahre Expositionsdauer hinaus zu. In der Praxis kommen Expositionen bis 50 Jahre Dauer vor, so dass eine Extrapolation bis 50 Jahre als sinnvoll erscheint. Das Ergebnis aus einer weiteren reichenden Extrapolation bis hin zu mehreren hundert oder tausend Jahren dagegen wäre so sinnvoll, wie die im

Rahmen der Fahrradergometrie gewonnenen Daten zu menschlicher Leistung und Puls auf z.B. 2000 Watt und 1238 Schläge pro Minute zu extrapolieren. Denn zur ELD-Berechnung wird ein Verfahren verwendet, das auf an Menschen gewonnenen Daten und Erkenntnissen zur Hörfähigkeit basiert (International Organisation for Standardization 1990). Daher müssen die Expositionsdauern als Ergebnis der ELD-Berechnungen auf die maximal mögliche berufliche Lärmexpositionsdauer begrenzt werden. Für Sonderfälle mit  $ELD > 40$  Jahren kann das Ergebnis innerhalb des Gültigkeitsbereiches der ISO 1999 (International Organisation for Standardization 1990) auf NIPTS-äquivalente Expositionsdauern ( $ELD_{100}$ ) bezogen auf  $L_{EX,8h} = 100$  dB umgerechnet werden. Aber auch für die  $ELD_{100}$  sind Werte größer als 40 Jahre (bzw. extrapoliert größer als 50 Jahre) nicht sinnvoll.

### 5.2 Berücksichtigung von Belastungsabschnitten mit $L_{EX,8h} < 85$ dB

Auch wenn in der Vergangenheit fast immer Belastungsabschnitte mit  $L_{EX,8h} \geq 85$  dB für die Entwicklung einer lärmbedingten Schwerhörigkeit verantwortlich gemacht wurden, so liegen in der ISO 1999 (International Organisation for Standardization 1990) Erkenntnisse vor, die Lärm bedingte PTS auch unter  $L_{EX,8h} = 85$  dB quantitativ beschreiben. Bei entsprechend längerer Einwirkungszeit können danach Belastungen mit  $L_{EX,8h} < 85$  dB je nach betrachteter audiometrischer Frequenz genauso große NIPTS hervorrufen, wie entsprechend kürzere Belastungen bei  $L_{EX,8h} \geq 85$  dB: Die NIPTS (beispielsweise bei 4 kHz), die sich z.B. für 6,7 Jahren Expositionsdauer bei  $L_{EX,8h} = 84$  dB ergibt, ist nach ISO 1999 (International Organisation for Standardization 1990) für die Hälfte der Population mit empfindlichen Gehör genauso groß, wie für 4,1 Jahre bei  $L_{EX,8h} = 85$  dB. Beide Expositionen ergeben jeweils eine ELD von einem Jahr. Auch 14,7 Jahre bei  $L_{EX,8h} = 83$  dB ergeben eine ELD von einem Jahr. Da auch PTS bedingt durch Lärm mit  $L_{EX,8h} < 85$  dB detailliert, qualitativ und quantitativ in der ISO 1999 (International Organisation for Stan-

standardization 1990) beschrieben werden, ist eine Kappung von Belastungen mit  $L_{EX,8h} < 85$  dB nicht ohne Weiteres zu rechtfertigen, denn die ISO 1999 stützt sich auf mehrere kausalanalytisch qualitätsgesicherte arbeitsmedizinisch-epidemiologische Studien mit quantitativ belastbaren Dosis-Häufigkeits-Beziehungen auf der Ursachenseite.

Da sich die Folgen von Lärmeinwirkungen am schnellsten und deutlichsten bei 4 kHz zeigen, wurden die in der ISO 1999 (International Organisation for Standardization 1990) beschriebene PTS für diese audiometrische Frequenz ausgewählt, um die ELD-Berechnungsverfahren festzulegen. Die Nulleffektschwelle für 4 kHz liegt in der ISO 1999 (International Organisation for Standardization 1990) bei  $L_{EX,8h} = 75$  dB; erst oberhalb von  $L_{EX,8h} = 75$  dB sind NIPTS zu erwarten. Für die Frequenzen 3 kHz, 2 kHz und 1 kHz liegen die Nulleffektschwellen bei  $L_{EX,8h} = 77$  dB bzw.  $L_{EX,8h} = 80$  dB bzw.  $L_{EX,8h} = 89$  dB. Im Sonderfall sieht die Königsteiner Empfehlung (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung 2012) die Berechnung des prozentualen Hörverlustes aus dem Tonaudiogramm statt aus dem Sprachaudiogramm vor. Dabei werden nur PTS bei den drei audiometrischen Frequenzen 1, 2 und 3 kHz berücksichtigt. Da das soziale Sprachgehör bei fehlendem Sprachaudiogramm ersatzweise annähernd durch die Hörfähigkeit von Tönen bei 1, 2 und 3 kHz charakterisiert werden kann, und signifikante PTS in diesem Sinne bei diesen Frequenzen frühestens ab etwa  $L_{EX,8h} = 80$  dB auftreten, könnten Beiträge zur ELD aus Belastungsabschnitten mit z.B.  $L_{EX,8h} < 80$  dB unberücksichtigt bleiben.

### 5.3 Kombination von zusammengehörenden Belastungsabschnittsgruppen

Grundsätzlich werden für die Bestimmung der ELD sukzessive die bis zu einem Belastungsabschnittswechsel angefallene Gesamtbelastung mit der Belastung des nächsten Abschnitts zu einer neuen Gesamtbelastung kombiniert (Abbildung 4). Ist daher die ELD bis zu einem bestimmten Belastungsabschnittswechsel bekannt, müssen bei der erneu-

Tabelle 1: Schwellen für die Expositionsdauer  $t_2$  in Jahren einer nachfolgenden Belastung mit  $L_{EX,8h,2}$  für einen signifikanten Einfluss auf die Gesamt-ELD bei vorangegangener Belastung mit  $ELD = 1, 2, 3, 4$  und  $5$  Lärmjahren.

$L_{EX,8h,2}$ [dB]	80	81	82	83	84	85	86	87	88
ELD = 1 Jahre	> 50	> 50	14,9	2,71	0,66	0,34	0,2	0,13	0,1
ELD = 2 Jahre	> 50	> 50	> 50	21,95	3,76	1,02	0,3	0,17	0,11
ELD = 3 Jahre	> 50	> 50	> 50	> 50	10,74	2,25	0,69	0,2	0,12
ELD = 4 Jahre	> 50	> 50	> 50	> 50	23,87	4,1	1,08	0,38	0,13
ELD = 5 Jahre	> 50	> 50	> 50	> 50	> 45	6,66	1,55	0,5	0,21

ten Berechnung der ELD diesmal aber unter Berücksichtigung weiterer, folgender Belastungen nicht alle Daten ( $L_{EX,8h}$  und Dauer) aus den Abschnitten vor dem bestimmten Belastungsabschnittswechsel erneut einzeln berücksichtigt werden. Vielmehr können für einen ersten Belastungsabschnitt für ein ELD ein  $L_{EX,8h,1} = 90$  dB (für ein  $ELD_{100} L_{EX,8h,1} = 100$  dB) mit der dazugehörigen Dauer  $t_1$  angenommen werden, die gleich dem ELD- ( $ELD_{100}$ -) Wert bis zu dem bestimmten Belastungsabschnittswechsel ist.

### 5.4 Betrachtungen zur effizienten Gestaltung der Expositionsermittlung

Auch wenn die ELD durch die Berücksichtigung der in den Studien gefundenen Effekte berechnet werden muss und Schätzungen der ELD nur in sehr einfachen Fällen annähernd richtige Ergebnisse ergeben, so gilt auch hier der Grundsatz, dass durch Berücksichtigung eines weiteren Belastungsabschnittes die ELD nur erhöht werden oder gleich bleiben kann; sie wird niemals geringer werden. Sollte in der Praxis eine als für das Entstehen einer beruflichen Lärmschwerhörigkeit ausreichende ELD-Schwelle überschritten werden, so könnte damit ein Teil der arbeitstechnischen Voraussetzungen für das Entstehen einer entsprechenden Berufskrankheit gegeben sein. Hier ist anzumerken, dass eine derartige Schwelle bisher nicht verbindlich festgelegt wurde. Aber selbst nach Festlegung einer solchen ELD-Schwelle wäre mit Überschreiten dieser Schwelle noch kein ursächlicher Zusammenhang zwischen Lärmeinwirkung und einem Gehörschaden nachgewiesen, denn auch der Verlauf der beruflichen Lärmeinwirkung mit vorhandenen Befunden muss abge-

glichen werden, um einen ursächlichen Zusammenhang darlegen zu können (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung 2012).

Da für den Nachweis eines ursächlichen Zusammenhangs zwischen Lärmeinwirkung und Gehörschaden zum einen eine ausreichende berufliche Gesamtdosis vorliegen muss und zum anderen der Verlauf der beruflichen Exposition zum Befundverlauf passen muss, werden hierzu im Folgenden für eine effiziente Gestaltung der Expositionsermittlung Hinweise gegeben, wie Beschäftigungsabschnitte erkannt werden können, die für die ELD und ihren zeitlichen Verlauf ohne Einfluss sind und daher vernachlässigt werden können. Dies ist insbesondere für Belastungen relevant, die nur mit größerem Aufwand (z.B. Nachstellen von Arbeitsprozessen) ermittelt werden können, für die aber z.B. ein  $L_{EX,8h}$ - und/oder ein  $t$ -Bereich abgeschätzt werden können. Würde nun die größte Belastung aus dem geschätzten Bereich keinen Einfluss auf die ELD und ihren zeitlichen Verlauf haben, so kann die aufwändige Ermittlung entfallen. Stattdessen wird die größte Belastung aus dem geschätzten Bereich zu Grunde gelegt.

#### 5.4.1 Signifikanz der Gehörgefährdung einzelner Belastungsabschnitte hinsichtlich der beruflichen Gesamtdosis

Im Folgenden werden numerische Betrachtungen zur Signifikanz der Gehörgefährdung einzelner Belastungsabschnitte hinsichtlich der beruflichen Gesamtdosis vorgenommen:

Damit ein Belastungsabschnitt die Gesamt-ELD überhaupt verändern kann, muss durch seinen Beitrag die Gesamt-

ELD nach Kombination mit diesem Belastungsabschnitt um mindestens 0,05 Lärmjahre vergrößert werden. Veränderungen kleiner 0,05 Lärmjahre gehen durch Rundung auf zehntel Lärmjahre verloren.

Tabelle 1 zeigt den Einfluss einer nachfolgenden Belastung mit  $L_{EX,8h,2}$  (1. Zeile) bei vorangegangenen Belastungen, die die angegebene ELD (1. Spalte) ergeben. Wird die angegebene Expositionsdauer  $t_2$  in Jahren bei dem jeweiligen  $L_{EX,8h,2}$  und dem jeweils erreichten ELD nicht überschritten, so hat der nachfolgende Belastungsabschnitt keinen Einfluss auf das Ergebnis und kann vernachlässigt werden. In der Praxis bedeutet dies: Ergibt eine Abschätzung, dass z.B. nach Erreichen von  $ELD = 2$  Lärmjahren die nachfolgende Belastung mit  $L_{EX,8h,2} \leq 85$  dB und einem Jahr Expositionsdauer mit Sicherheit nicht überschritten, so braucht diese nachfolgende Exposition hinsichtlich der Bestimmung der Gesamt-ELD nicht genauer ermittelt zu werden, da sie keinen Einfluss auf die Gesamt-ELD haben kann, denn der zugehörige Schwellenwert in Tabelle 1 lautet 1,02 Jahre und wurde nicht überschritten. Diese Betrachtung kann für jeden Belastungsabschnittwechsel angewandt werden.

Erscheint eher eine vorangegangene Belastung oder Belastungsgruppe vernachlässigbar zu sein, so gestaltet sich die Betrachtung des signifikanten Einflusses auf die Gesamt-ELD komplexer. Dieser Fall dürfte aber nur sehr selten vorkommen und wird daher hier nicht genauer betrachtet, da er nur für ungewöhnlich geringe ELD ( $ELD < 0,05$ ) der vorangegangenen Belastung relevant ist.

#### 5.4.2 Signifikanz der Gehörgefährdung einzelner Belastungsabschnitte hinsichtlich der Übereinstimmung des Verlaufs der beruflichen Exposition mit dem Befundverlauf

Abbildung 5 zeigt den Verlauf der NIPTS für 4 kHz (schwarze Kurve) in Abhängigkeit von der Expositionsdauer für die über Jahre gleichbleibende Belastung mit  $L_{EX,8h} = 90$  dB. Die Abhängigkeit des relativen, zeitlichen Verlaufs der NIPTS vom Fraktile, vom Geschlecht

und vom Lebensalter ist generell für Fraktile  $< 0,50$  vernachlässigbar (Liedtke 2010b). Dies bedeutet, dass durch Stauchung oder Streckung der Ordinatenskala die NIPTS-Verlaufskurven für gleiche  $L_{EX,8h}$  für die Fraktile  $< 0,50$  zur Deckung gebracht werden können. Daher wird auch der zeitliche Verlauf der NIPTS für individuell unterschiedliche, wechselnde Belastungen innerhalb einer Expositionsbiographie als relatives Maß für die individuelle Ausbildung einer NIPTS herangezogen (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung 2012, Liedtke 2010b). Die Ordinate weist für diesen Zweck keine absoluten PTS- / NIPTS-Zahlenwerte auf.

Die schwarze Kurve in Abbildung 5 zeigt sehr deutlich den für die NIPTS typischen Verlauf einer Sättigung: Zunächst ist ein steiler Anstieg zu erkennen, der mit zunehmender Expositionsdauer immer mehr abflacht. Es wird deutlich, dass eine Erhöhung der ELD (entspricht der Expositionsdauer für  $L_{EX,8h} = 90$  dB) um einen konstanten Betrag mit zunehmender Gesamt-ELD immer geringere Erhöhungen der lärmbedingten PTS nach sich zieht. So ergibt die Erhöhung der Effektiven Lärmdosis um ein Lärmjahr von einem auf zwei Lärmjahre, der Kurve in Abbildung 5 folgend, nur eine Erhöhung der lärmbedingten PTS um 57 %. Die weitere Erhöhung von zwei auf drei Lärmjahre

bringt noch 24 % NIPTS-Zuwachs und die Zunahme der ELD von vier auf fünf Lärmjahre hat nur noch eine Zunahme der NIPTS um 10 % zur Folge. Dies bedeutet, dass eine lärmbedingte PTS am deutlichsten zu Beginn der Lärmexposition in den Audiogrammen nachweisbar ist.

Für die Anwendung des Konzepts der NIPTS-Äquivalenzen zur Ermittlung der ELD ist wesentlich, dass  $H'$  mit dem  $H$  des gleichen Individuums in Bezug gesetzt wird.  $H'$  ist dabei die PTS nach der Lärmexposition und  $H$  ist die PTS für den hypothetischen Fall des Fehlens jeglicher NIPTS-relevanten Lärmexposition. Daher ist die ELD als Maß für den Lärmeffekt zu einem bestimmten Zeitpunkt auch unabhängig vom Alter. In epidemiologischen Studien werden nur  $H'$  und  $H$  beobachtet. Der Verlauf von  $H'-H$  für eine über die Jahre gleichbleibende Exposition mit  $L_{EX,8h}$  muss – anders als der Verlauf der NIPTS – aber auch den Effekt des fortschreitenden Alters berücksichtigen. Dieser Verlauf folgt für das Fraktile 0,5 einer männlichen Population, die zu Beginn der Exposition 18 Jahre alt war und wie in Abbildung 5 fünf Jahre mit  $L_{EX,8h} = 90$  dB exponiert war, dem Verlauf der NIPTS (Die maximale Abweichung ist in diesem Beispiel kleiner als 4 ‰). Für Fraktile  $< 0,5$  und/oder ältere Populationen ergibt sich mit zunehmender Expositi-

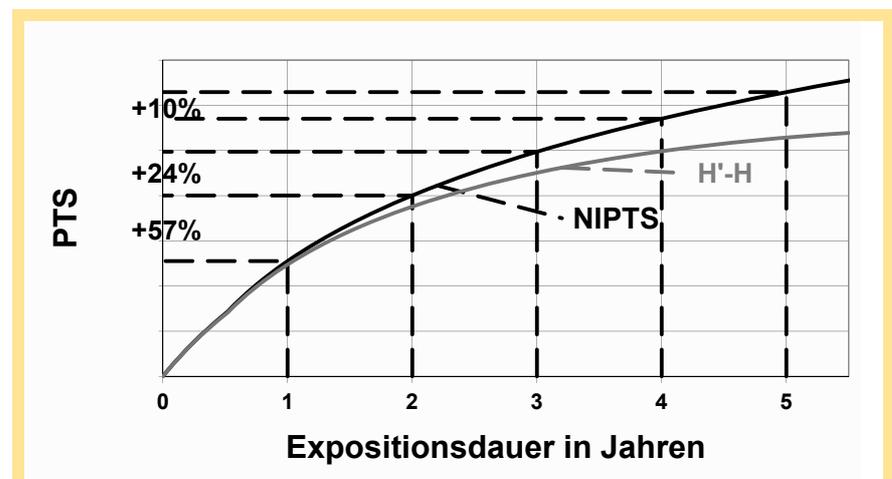


Abbildung 5: Verlauf der NIPTS (schwarze Kurve) und von  $H'-H$  (graue Kurve) jeweils für 4 kHz in Abhängigkeit von der Expositionsdauer für die über Jahre gleichbleibende Belastung mit  $L_{EX,8h} = 90$  dB.  $H'-H$  ist dargestellt für Männer, 0,05 Fraktile, Datenbasis A der ISO 1999, mit einem Alter von 55 Jahren zu Beginn der Exposition.

onsdauer für  $H'-H$  eine Verringerung der PTS im Vergleich zur NIPTS und damit noch eine zusätzliche Abflachung der Kurve. In Abbildung 5 zeigt die graue Kurve exemplarisch den  $H'-H$ -Verlauf für Männer des Fraktils 0,05 (Datenbasis A der ISO 1999), die zu Beginn der Exposition 55 Jahre alt waren. Die graue Kurve zeigt gegenüber der schwarzen Kurve den Einfluss des zunehmenden Lebensalters auf die beobachtbare Differenz  $H'-H$ . Dieser Einfluss des Alters ist ein weiterer, wichtiger Aspekt, der im Folgenden aus einem weiteren Blickwinkel betrachtet wird:

Es stellt sich heraus, dass bei jeweils der gleichen Exposition, der Populationen unterschiedlichen Lebensalters ausgesetzt werden, die Differenzen der PTS  $H'$  der Lärm exponierten Population und der PTS  $H$  einer nicht exponierten Vergleichsgruppe (d.h.  $H'-H$ ) umso geringer ausfallen, je älter eine Population ist (International Organisation for Standardization 1990). Abbildung 6 zeigt exemplarisch diese Differenz bei 4 kHz für Männer des 0,05 Fraktils nach ISO 1999, Datenbasis A. Die gezeigten Kurven können durch Streckung oder Stauchung entlang der Ordinate zur Deckung gebracht werden. Es zeigt sich, dass der Nachweis der lärmbedingten PTS einer im höheren Lebensalter erfolgten Exposition schwierig ist, da diese lärmbedingte PTS mit zunehmendem Alter immer kleiner ausfällt. Zudem nimmt die altersbegleitende PTS und auch Ihre Streubreite über die Fraktile mit zunehmendem Alter überproportional zu.

Wird der zeitliche Verlauf der NIPTS als relatives Maß für die individuelle Ausbildung einer NIPTS in Einzelfällen herangezogen (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung 2012, Liedtke 2010b), so ist zu beachten, dass zwar die zeitliche Entwicklung der NIPTS korrekt berücksichtigt wird, der Effekt des Tragens von Gehörschützern, des Lebensalters und durch Erkrankungen in diesen Diagrammen aber nicht berücksichtigt werden kann. Im Audiogramm hingegen wird immer statt der NIPTS die Gesamt-PTS dokumentiert, die sich aufgrund aller hörschwellenverschiebenden Effekte entwickelt hat. Die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der NIPTS als rela-

ves Maß für die individuelle Ausbildung einer NIPTS könnte auch im Rahmen der arbeitsmedizinischen Vorsorge als Prognose für zukünftige Belastungen die Grundlage für die Forderung der gewissenhaften, konsequenten Nutzung von Gehörschützern oder auch für die Forderung der Nutzung bestimmter, besonders sicher anzuwendender Gehörschützer sein oder sie wird zur Visualisierung zurückliegender Belastungen z.B. für die Motivation zum Tragen von Gehörschützern genutzt (Liedtke 2010b).

Lässt sich nach einer Zunahme der ELD kein entsprechender, die altersbegleitende PTS überlagernder Lärmefekt im Audiogramm entdecken, so kann das vielfältige Ursachen haben. Die erfreulichste Ursache ist, der Exponierte hat sich ausreichend vor Lärm geschützt. Es könnte aber auch eine eventuell unbekannte, vorangegangene Lärmexposition dafür sorgen, dass nachfolgende Lärmefekte kleiner ausfallen als erwartet (s. z.B. schwarze Kurve in Abbildung 5). Oder der Exponierte war im Zeitraum der Einwirkung fortgeschrittenen Alters und der Lärmefekt ist deshalb geringer ausgeprägt.

Nach diesen eher qualitativen Betrachtungen zur Signifikanz der Gehörgefährdung einzelner Belastungsabschnitte hinsichtlich der Übereinstimmung des Verlaufs der beruflichen Exposition mit dem Befundverlauf stellt sich die Frage zur Größenordnung der

zu erwartenden  $H'-H$ : Welche Belastungen sind erforderlich, um überhaupt einen Effekt im Befundverlauf beobachten zu können? Die zusätzlich durch Lärm hervorgerufene Hörschwellenverschiebung  $H'-H$  ist für kleine Fraktile, junge Populationen, Männer und zu Beginn der Lärmexposition am größten. In diesem Sinne ergibt eine „worst-case“-Betrachtung für 18-jährige Männer des 0,01 Fraktils (ISO 1999 über die Grenze von 0,05 hinaus extrapoliert) ein  $H'-H = 1$  dB ab einer Belastung von  $ELD = 0,17$  Lärmjahren. Für das 0,05 Fraktile ergibt sich für das gleiche  $H'-H$  eine ELD von 0,18 Lärmjahren. Ein  $H'-H$  von 5 dB ergibt sich für 19-jährige Männer des 0,05 Fraktils erst ab einer ELD von 1,15 Lärmjahren. Für die eher typischen Fälle der beruflichen Lärmschwerhörigkeit, 55-jährige Männer des 0,05 oder des 0,01 Fraktils, ergibt sich ein  $H'-H = 1$  dB erst oberhalb einer Belastung von  $ELD = 0,30$  Lärmjahren. Und ein  $H'-H = 5$  dB ergibt sich oberhalb einer  $ELD = 2,81$  Lärmjahren. Derartige Betrachtungen sind auch sehr gut geeignet, den Ermittlungsaufwand für die Exposition deutlich zu verringern. Denn die mögliche Festlegung einer Signifikanzschwelle (als kleinster ELD-Sprung, der im „worst-case“ im Befundverlauf oder als Summe aller ELD-Sprünge im letzten Befund sichtbar sein sollte), die deutlich höher liegt als eine ELD-Differenz von 0,05 Jahren in Abschnitt 5.4.1,

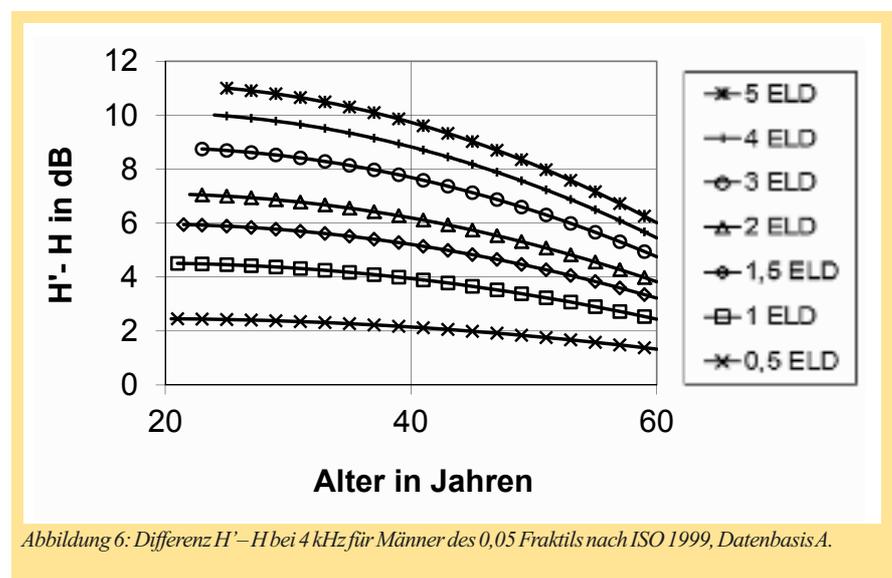


Abbildung 6: Differenz  $H'-H$  bei 4 kHz für Männer des 0,05 Fraktils nach ISO 1999, Datenbasis A.

# BSM

Das Standardwerk  
von Bernhard Tenckhoff  
und Silvester Siegmann



„Vernetztes Betriebs-sicherheitsmanagement“ ist mehr als ein Fachbuch. Es ist eine übersichtliche und praxisnahe Anleitung. Hier finden Sie alles, was Sie über Aufbau und Möglichkeiten eines Management-Systems für Betriebs-sicherheit wissen müssen.

1. Auflage 2009 | 536 Seiten, gebunden |  
49,90 EUR | ISBN 978-3-87284-061-5

~~EUR 49,00~~

**Jetzt zum  
Aktionspreis  
von EUR 25,00  
inkl. Versand!**

Ja, ich möchte das Buch kaufen.

**Infos und Bestellung unter:**

Tel.: +49 62 21 64 46-30  
Fax: +49 62 21 64 46-40

Vangerowstraße 14/1  
69115 Heidelberg

chv@konradin.de

könnte die genaue und möglicherweise aufwändige Ermittlung von Bagatell-Belastungen erübrigen.

## Literatur

Intersociety Committee (1967) Ad Hoc Intersociety Guidelines for Noise Exposure Control. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 28, 418–424

Brusis T (1980) Aktuelle Probleme in der Begutachtung der Lärmschwerhörigkeit. Arbeitsmedizin, Sozialmedizin, Präventivmedizin; 15: 287–292.

Brusis T (2009) Aus der Gutachtenpraxis: C 5 -Senke = Lärmschwerhörigkeit?. Laryngo-Rhino-Otol 2009; 88: 733–735

Bundesministerium für Arbeit und Soziales (Hrsg. 2007) Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (Lärm und Vibrations-Arbeitschutzverordnung – Lärm-VibrationsArbSchV) vom 06.03.2007 (BGBl I S 261), zuletzt geändert durch Art. 5 der Verordnung vom 18.12.2008 (BGBl I, S 2768)

Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung (Hrsg. 2008) Merkblatt zu der Berufskrankheit Nr. 2301 der Anlage zur Berufskrankheiten-Verordnung: Lärmschwerhörigkeit. Bek. d. BMAS v. 01.07.2008 – IVa4–45222–2301, publiziert im GMBI 2008/39: 798 ff.

Bundesministerium Arbeit und Soziales (2010) Technische Regel zur Lärm-Vibrations-Arbeitschutzverordnung – 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, 362 ff.

Burns W, Robinson D W (1970): Hearing and Noise in Industry, London, HMSO (Her Majesty's Stationary Office), Appendix 10.

Cohen, A (1972) Amicaglia, J. R.; Carpenter, P.: Temporary Threshold Shift in Hearing from Exposure to Different Noise Spectra at Equal dBA Level. J. Acoust. Soc. Am. 51, 503.

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2012) Empfehlung für die Begutachtung der Lärmschwerhörigkeit (BK-Nr. 2301) – Königsteiner Empfehlung

Dieroff H-G (1979) Einige Tendenzen der Lärmhörschadenforschung in der internationalen Literatur. Z. ges. Hyg. 25, H.2, 100–102

Dieroff H-G (1994) Lärmschwerhörigkeit, 3. völlig überarb. und erw. Auflage, unter Mitarbeit von Beck C, Deitmer T et al. Fischer, Jena Stuttgart 1994, S. 80 ff.

Eldred F E, Gannon W J, v. Gierke H (1955) 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

Europäisches Parlament und Rat (2003) RICHTLINIE 2003/10/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 6. Februar 2003 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (Lärm)

Feldmann H & Brusis T (2012) Das Gutachten des Hals-Nasen-Ohren-Arztes, 7. vollständig überarbeitete Auflage. Stuttgart: Thieme Verlag

Freigang C, Schmidt L, Wagner J, Eckardt R., Steinhagen-Thiessen E, Ernst A, Rübsamen, R

(2011) Evaluation of central auditory discrimination abilities in older adults. Frontiers in Aging Neuroscience 3:6

Gallo R, Glorig A (1964) Permanent threshold shift changes produced by noise exposure and aging. Am. indust. Hyg. Ass. J., 23, 237–245

v. Gierke H E, Robinson D W, Karmy S J (1982) Results of a Workshop on impulse noise and auditory hazard. J. Sound Vib., 83, 579–584

Hellbrück J (1993) Hören. Physiologie, Psychologie und Pathologie. Göttingen: Hogrefe

Hohmann B (1984) Untersuchung zur Gehörschädlichkeit von Impulslärm. Technische Dissertation, ETH, Zürich

International Organisation for Standardization (1990) ISO 1999: Acoustics – Determination of occupational noise exposure and estimation of noise-induced hearing impairment, Genf

Liedtke M (2010a) Akute Gehörschäden durch extrem hohe Schalldruckpegel. HNO 58 Nr. 2: 106–109

Liedtke M (2010b) Effektive Lärmdosis basierend auf Hörminderungsäquivalenzen nach ISO 1999. Arbeitmed. Sozialmed. Umweltmed. 45: 612–623

Maue JH (2009) Die Bedeutung des Spitzenschalldruckpegels für die Beurteilung industrieller Arbeitsplätze. Sicherheitsingenieur 40: 52–55

Mazelova J, Popelar J, Syka J (2003) Auditory function in presbycusis. Peripheral vs. central changes. Exp Gerontol 38: 87–94.

Passchier-Vermeer W (1968) Hearing Loss Due to Exposure to Steady-State Broadband Noise. Report No. 35. Institute for Public Health Eng., The Netherlands

Passchier-Vermeer W (1977) Hearing Levels of Non-Noise Exposed Subjects and of Subjects Exposed to Constant Noise During Working Hours, Report B367, Research Institute for Environmental Hygiene, The Netherlands, June 1977

Passchier-Vermeer W (1986) The effects of age, otological factors and occupational noise exposure on hearing threshold levels of various populations. Basic and Applied Aspects of Noise-induced Hearing Loss, Salvi, Richard J, Henderson D, Hamernik R P, and Colletti V (editors), Plenum Press, New York and London.

Rat (1986) Richtlinie 86/188/EWG des Rates vom 12. Mai 1986 ueber den Schutz der Arbeitnehmer gegen Gefährdung durch Laerm am Arbeitsplatz, Amtsblatt nr. L 137 vom 24/05/1986 S. 0028 – 0034

Robert Koch-Institut (2006) Heft 29 – Hörstörungen und Tinnitus aus der Reihe „Gesundheitsberichterstattung des Bundes“, Berlin.

Scheiblechner H (1974) The Validity of the 'Energy Principle' for Noise-Induced Hearing Loss. Audiology 13, 93–111

Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg. 1988) VDI 2058 Blatt 2. Beurteilung von Lärm hinsichtlich Gehörgefährdung. Beuth, Berlin

v. Lüpke A (1975) Ein Langzeit-Dosismaß für die Bewertung des Gehörschädigungsrisikos. Die Berufsgenossenschaft November 1975, S. 445–447.