



## Methoden zur Einhaltung von Auslöse- und maximalen Expositionswerten zum Lärm

M. Schmidt

**Forschung  
Projekt F 1898**

M. Schmidt

**Methoden zur Einhaltung von Auslöse- und  
maximalen Expositionswerten zum Lärm**

Dortmund/Berlin/Dresden 2011

Diese Veröffentlichung ist der Abschlussbericht zum Projekt „Methoden zur Einhaltung von Auslöse- und maximalen Expositionswerten zum Lärm zur Unterstützung der LärmVibrationsArbSchV“ – Projekt F 1898 – im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

Autor: Dr. Manfred Schmidt  
Müller-BBM GmbH  
Robert-Koch-Str. 11, 82152 Planegg

Unter Mitarbeit von: Dipl.-Ing. (FH) Mirco Ebersold  
Dr.-Ing. Gisbert Gralla  
Dipl.-Phys. Paul Geißler

Titelfoto: Uwe Völkner, Fotoagentur FOX, Lindlar/Köln

Umschlaggestaltung: Rainer Klemm  
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Herstellung: Bonifatius GmbH, Paderborn

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin  
Friedrich-Henkel-Weg 1 – 25, 44149 Dortmund  
Telefon 0231 9071-0  
Fax 0231 9071-2454  
poststelle@baua.bund.de  
www.baua.de

Berlin:  
Nöldnerstr. 40 – 42, 10317 Berlin  
Telefon 030 51548-0  
Fax 030 51548-4170

Dresden:  
Proschhübelstr. 8, 01099 Dresden  
Telefon 0351 5639-50  
Fax 0351 5639-5210

Alle Rechte einschließlich der fotomechanischen Wiedergabe und des auszugsweisen Nachdrucks vorbehalten.  
Aus Gründen des Umweltschutzes wurde diese Schrift auf chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt.

ISBN 978-3-88261-135-9

# Inhaltsverzeichnis

Kurzreferat	9
Abstract	11
Résumé	13
1 Einleitung	15
2 Ziel und Aufgaben der Untersuchung	17
3 Aktueller Stand der Gesetzgebung und der Normung	18
3.1 Basis des betrieblichen Arbeitsschutzes	18
3.2 Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung LärmVibrationsArbSchV	18
3.2.1 Grundlagen	18
3.2.2 Gefährdungsbeurteilung für die Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten	19
3.2.3 Schutzmaßnahmen	20
3.3 Normen zur Messung der Lärmexposition am Arbeitsplatz	21
4 Grundbegriffe	24
4.1 Definition „Arbeitsstätten“ und „Arbeitsplätze“	24
4.2 Definitionen für die Zeitdauer der Arbeit, der Tätigkeit, der Messung und der Beurteilung der Lärmexposition	25
4.2.1 Arbeitszeiten	25
4.2.2 Tätigkeitsbezogene Zeiten	26
4.2.3 Bezugszeiten	27
4.2.4 Messzeiten	27
4.3 Akustische Definitionen und Messgrößen	27
4.3.1 Lärmemission, Lärmimmission und Lärmexposition	27
4.3.2 Schalldruckpegel	29
4.3.3 Frequenzbewertete Schalldruckpegel	31
4.3.4 Zeitbewertete Schalldruckpegel und Spitzenschalldruckpegel	32
4.3.5 Momentane Schalldruckpegel zur Erfassung der Lärmimmission und Lärmexposition	36
4.3.6 Arten von Lärmpegel-Zeitverläufen	36
4.3.7 Mittelungspegel $L_m$ und äquivalenter Dauerschallpegel $L_{eq}$	37
4.3.8 Lärmexposition	39
4.3.9 Arbeitsplatzbezogener Emissionswert $L_{pA}$	42
4.4 Gefährdung durch Lärmexposition	42

4.5	Lärmkarte	42
4.6	Lärmbereich	42
4.7	Lärmminderungsprogramm	43
5	Akustische Messgeräte zur Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz	44
5.1	Grundlagen für Lärmessung am Arbeitsplatz	44
5.2	Integrierender Schallpegelmesser	44
5.3	Lärmdosimeter	45
5.4	Schallkalibrator	47
5.5	Forderungen an akustische Geräte zur Messung der Lärmexposition	48
6	Messunsicherheiten bei Schallpegelmessungen	49
6.1	Messgrößen	49
6.2	Begriffe	51
6.3	Unsicherheiten beim Messen	54
6.3.1	Ursachen	54
6.3.2	Systematische Abweichungen	55
6.3.3	Zufällige Abweichungen	56
6.4	Versuchsbedingungen	57
6.5	Bestimmung der Messunsicherheit auf der Grundlage der DIN V EN V 13005 (GUM-Modell)	57
6.5.1	Definitionen	57
6.5.2	Grundlagen für die Bestimmung der Messunsicherheit	58
6.6	Analytisch-rechnerische Ermittlung der Messunsicherheit von Lärmessungen	61
6.6.1	Berechnung der Standardunsicherheit aus statistischen Maßzahlen von Schallpegelstichproben – Ermittlungsmethode A	61
6.6.1.1	Voraussetzungen	61
6.6.1.2	Arithmetischer Schallpegel-Mittelwert $L_{\bar{x}}$	62
6.6.1.3	Schallpegel-Variationsweite $\Delta L_v$	63
6.6.1.4	Standardabweichung der Schallpegel-Einzelwerte $\Delta L_{sL_i}$	63
6.6.1.5	Standardabweichung des Schallpegel-Mittelwertes $\Delta L_{s\bar{L}}$	63
6.6.2	Berechnung der Standardunsicherheit aus Schallpegelvariationsweiten für normalverteilte Schallpegel – Ermittlungsmethode B	65
6.6.3	Vertrauensgrenzen und Vertrauensbereich des Schallpegel-Mittelwertes aus Beobachtungsreihen	66
6.7	Unsicherheit des Messgerätes und des Kalibrators	70

6.7.1	Grundlagen	70
6.7.2	Beiträge zur Messunsicherheit	70
6.7.3	Berechnung der Messunsicherheit	72
6.7.4	Ergebnisse der Berechnungen	74
6.7.5	Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse	76
6.8	Unsicherheitsanalyse von Lärmessverfahren auf der Grundlage der GUM	79
6.8.1	Formulierung eines Modells und dessen Eingangsgrößen	79
6.8.2	Beurteilung der Einflusskomponenten ( $X_i$ )	83
6.8.3	Schlussfolgerungen aus den Unsicherheitsanalysen für die Lärmtypen I, II und III	86
6.8.4	Berechnung der Standardunsicherheit $u(x_i)$ und der Messunsicherheit für die Unsicherheitsbeiträge $\Delta L_{\text{Methode}}$ und $\Delta L_{\text{Messgerät}}$	87
6.8.5	Angabe der Messunsicherheit bei Lärmessungen	89
7	Messverfahren	91
7.1	Lärmexpositionspegel und Spitzenschalldruckpegel	91
7.1.1	Tages-Lärmexpositionspegel	91
7.1.2	Wochen-Lärmexpositionspegel	92
7.1.3	C-bewerteter Spitzenschalldruckpegel	92
7.2	Wegweiser für die Auswahl eines Messverfahrens	93
7.3	Die Messunsicherheit und ihre wirtschaftliche Bedeutung	95
7.4	Methoden für die Ermittlung des A-bewerteten äquivalenten Dauerschallpegels $L_{pAeq,Te}$ für die Lärmtypen I bis IV	95
7.4.1	Übersicht der verschiedenen Messmethoden zur Messwertermittlung	95
7.4.2	Anwendung der Messmethoden auf eine gleichförmig konstante Lärmexposition mit einer Schallpegel-Variationsweite $\Delta L_v = L_{\max} - L_{\min} \leq 5 \text{ dB(A)}$ – Lärmtyp I	96
7.4.2.1	Praxisbeispiele in der Industrie	96
7.4.2.2	Lärmtyp I: Gleichförmig konstante Lärmexposition	97
7.4.3	Anwendung der Messmethoden auf eine zeitlich stark veränderliche Lärmexposition mit einer Schallpegel-Variationsweite $\Delta L_v = L_{\max} - L_{\min} > 5 \text{ dB(A)}$ - Lärmtyp II bis IV	101
7.4.3.1	Lärmtyp II: Stark regellos veränderliche Lärmexposition	102
7.4.3.2	Lärmtyp III: Periodisch veränderliche Lärmexpositionen	112
7.4.3.3	Lärmtyp IV: Stark veränderliche Lärmexposition bestehend aus den Lärmtypen I, II und III innerhalb einer Arbeitsschicht	115
7.5	Messverfahren für die Ermittlung des C-bewerteten Spitzenschalldruckpegels $L_{pC,peak}$	122

7.6	Darstellung der Lärmimmissions-Messwerte in Lärmkarten und Praxisbeispiel	126
7.7	Überblick und Arbeitsschritte für die Ermittlung der Lärmexposition am Arbeitsplatz	133
8	Verfahren zur Bestimmung der individuellen Dämmwirkung von Gehörschutz bei Personen in der Arbeitsumwelt	137
8.1	Einleitung	137
8.2	Gehörschutzarten	140
8.2.1	Kapselgehörschutz	140
8.2.2	Gehörschutzstöpsel	140
8.2.2.1	Vor Gebrauch zu formende Gehörschutzstöpsel	140
8.2.2.2	Fertig geformte Gehörschutzstöpsel	141
8.2.2.3	Bügelstöpsel	141
8.2.2.4	Gehörschutzotoplastiken	142
8.3	Laborverfahren zur Bestimmung der Dämmwirkung von Gehörschutz	142
8.3.1	Überprüfung der Dämmwirkung nach ISO 4869-1	142
8.3.2	REAT – Messverfahren nach ANSI S12.6-2008	143
8.4	Beschreibung von In-Situ-Messverfahren zur Bestimmung der individuellen Dämmwirkung von Gehörschutz	144
8.4.1	Subjektive Verfahren	144
8.4.1.1	IntegraFit	144
8.4.1.2	FitCheck	146
8.4.1.3	CapaTest	147
8.4.1.4	VeriPro	150
8.4.2	Objektive Verfahren	152
8.4.2.1	MIRE – Microphone In Real Ear-Verfahren	152
8.4.2.2	Messung der Lärmdosis im äußeren Gehörgang beim Tragen von Gehörschutz mit dem Lärmdosimeter „Quiet Dose“	155
8.4.2.3	Ear Seal Integrity Test	156
8.4.2.4	PAC – Phonak Attenuation Control System	158
8.5	Bewertung der Messverfahren	160
8.6	Abschlussbetrachtungen zu den Messverfahren	161
8.7	Praktische Vorgehensweise zur Berücksichtigung der Dämmwirkung von Gehörschutz im Hinblick auf die Einhaltung der maximal zulässigen Expositionswerte	162
9	Kriterien für den Vergleich mit den Auslösewerten	165
9.1	Grundsätze für die Beurteilung der Lärmexposition	165

9.2	Beurteilung des Lärmexpositionspegels	169
9.3	Beurteilung des Spitzenschalldruckpegels	170
10	Zusammenfassung und Ausblick	173
11	Literaturverzeichnis	178
Anhang	Tabellen 1 bis 7	183



# Methoden zur Einhaltung von Auslöse- und maximalen Expositionswerten zum Lärm

## Kurzreferat

Dieser Forschungsbericht befasst sich mit der Messtechnik und den Messverfahren zur Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz und insbesondere deren Messunsicherheit. Die Untersuchung schließt auch die Verfahren zur Bestimmung der individuellen Dämmwirkungen des Gehörschutzes der Beschäftigten ein.

In einem vorangestellten kurzen Teil werden die Normen zur Messung der Lärmexposition am Arbeitsplatz vergleichend beschrieben.

Es folgt eine systematische Zusammenstellung der Begriffe zur Lärmexposition. Die richtige Anwendung der Begriffe ist die entscheidende Voraussetzung für die fachlich korrekte Ermittlung des Tages-Lärmexpositionspegels  $L_{EX,8h}$  und des Spitzenschalldruckpegels  $L_{pC,peak}$  sowie für die Entwicklung der Messverfahren.

Zusätzlich werden die Forderungen an die akustischen Geräte zur Messung der Lärmexposition auf der Basis der Normen DIN EN 61672-1 und DIN EN 61252 und den in der Praxis gewonnenen Messerfahrungen zusammengestellt.

Im Hauptteil des Forschungsberichtes werden ausführlich die Messunsicherheiten bei Schallpegelmessungen erarbeitet und die vier voneinander abgrenzbaren Methoden zur Ermittlung der Lärmexposition dargestellt:

1. kontinuierliche Messung über einen Gesamtmesszeitraum (z. B. eine Arbeitsschicht),
2. kontinuierliche Messung in Teilmesszeiten des Gesamtmesszeitraumes,
3. Stichprobenmessung im Gesamtmesszeitraum und
4. kombinierte Messung im Gesamtmesszeitraum (Kombination aus den Messmethoden 1 bis 3).

Die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Messwerte, der Messgrößen, der Ergebnisgrößen und der Messunsicherheiten wird an Hand von Beispielen erläutert.

Auf der Grundlage der Unsicherheitsanalysen von verschiedenen Lärmmessverfahren wird gezeigt, dass in der Regel nennenswerte Unsicherheitsbeiträge nur von der Messmethode in Verbindung mit dem Messobjekt ( $\Delta L_{U\text{-Methode}}$ ) und dem Messgerät plus Kalibrierung ( $\Delta L_{U\text{-Messgerät}}$ ) herrühren.

Daher kann die Messunsicherheit bei Lärmmessungen im Zusammenhang mit der Ermittlung des Lärmexpositionspegels  $L_{EX}$  und des Spitzenschalldruckpegels  $L_{pC,peak}$  auf der Grundlage des Leitfadens „Guide to the Expression of Uncertainty in Masurement“ (GUM) wie folgt angegeben werden:

$$\Delta L_U(L_{EX}, L_{pC,peak}) = \sqrt{\Delta L_{U-Methode}^2 + \Delta L_{U-Messgerät}^2}$$

mit

$\Delta L_{U-Methode}$	durch die Messmethode in Verbindung mit dem Messobjekt und all ihren Einflussfaktoren verursachte Unsicherheit
$\Delta L_{U-Messgerät}$	durch das Messgerät bzw. die Messanordnung hervorgerufene Unsicherheit
$\Delta L_U(L_{EX}, L_{pC,peak})$	Messunsicherheit für die Messgröße des Messverfahrens

Die Angabe des Lärmexpositionspegels mit der Messunsicherheit erfolgt dann in einfacher Weise durch  $L_{EX,8h} \pm \Delta L_U$  in dB(A) und die Angabe des Spitzenschalldruckpegels durch  $L_{pC,peak} \pm \Delta L_U$  in dB(C).

Für die Darstellung der Messwerte, der Messgrößen, der Ergebnisgrößen und der Messunsicherheiten wird im Forschungsbericht eine einheitliche Beschreibungssystematik erarbeitet, die eine einheitliche Darstellung in Pegelschreibweise ermöglicht. Für die Messverfahren zur Bestimmung des Tageslärm-Expositionspegels  $L_{EX,8h}$ , des Wochenlärmexpositionspegels  $L_{EX,40h}$  und des Spitzenschalldruckpegels  $L_{pC,peak}$  wird ein Auswahl-schema vorgeschlagen.

Darüber hinaus werden verschiedene In-Situ-Messverfahren zur Bestimmung der individuellen Dämmwirkung von Gehörschutz beschrieben, welche nach teilweise gleichen, teilweise unterschiedlichen Prinzipien funktionieren. Vom Messprinzip her werden die Messverfahren in subjektive und objektive Verfahren unterteilt. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand und der bisherigen Betrachtung der hier untersuchten Messsysteme gibt es keines, welches uneingeschränkt zu empfehlen wäre, um universell die individuellen Dämmwirkungen von Gehörschützern korrekt zu bestimmen. Für den Nachweis, ob unter Einbeziehung der dämmenden Wirkung von Gehörschutz die maximal zulässigen Expositionswerte eingehalten werden oder nicht, wird die „Oktavbandmethode“ vorgeschlagen.

Abschließend werden Kriterien für die Beurteilung des Lärmexpositionspegels  $L_{EX}$  und des Spitzenschalldruckpegels  $L_{pC,peak}$  in Verbindung mit ihren Messunsicherheiten begründet entwickelt und empfohlen. Auf dieser Grundlage kann geprüft werden, ob die Auslösewerte oder die maximal zulässigen Expositionswerte unterschritten, erreicht oder überschritten sind.

### Schlagwörter:

LärmVibrationsArbSchV, Lärmemission, Lärmimmission, Lärmexposition, Tages-Lärmexpositionspegel, Spitzenschalldruckpegel, Lärmdosis, Impulslärm, Lärm-messverfahren, Messunsicherheit, Gehörschutz, individuelle Dämmwirkung, REAT-Messverfahren, MIRE-Messverfahren, Lärmbewertung

# Methods to comply with the noise action values and exposure limit values

## Abstract

This research report deals with the measuring technology, measuring methods and, in particular, the measuring uncertainty for the determination of noise exposure at the workplace. It also includes methods to determine the individual transmission loss of different types of hearing protectors used by employees.

In the first part of the report, the standards for noise exposure measurements at the workplace are described and compared.

Subsequently, the technical terms concerning noise exposure are systematically summarized. A proper understanding of these terms is a decisive prerequisite for the correct determination of the daily noise exposure level  $L_{EX,8h}$  and the peak sound pressure level  $L_{pC,peak}$  as well as for the development of measuring methods.

In addition, the requirements on acoustic devices for noise exposure measurements are summarized on the basis of the standards DIN EN 61672-1 and DIN EN 61252 and experience gained from measurements.

In the main part of the research report, the measuring uncertainty of sound level measurements will be described in detail and four methods to determine the noise exposure are presented:

1. continuous measurements during a whole measuring period (e.g. during one working shift),
2. continuous measurements during parts of the whole measuring period,
3. random tests during the whole measuring period and
4. combined measurements during the whole measuring period (combination of measuring methods 1 and 3).

The procedures used to determine the measuring values, the measuring quantities, the results and the measuring uncertainties will be explained on the basis of examples.

On the basis of an uncertainty analysis of various noise measuring methods it is shown that, normally, relevant contributions to uncertainty can only be caused by the measuring method in connection with the object to be measured ( $\Delta L_{U-method}$ ) and the measuring device plus calibration ( $\Delta L_{U-instrument}$ ).

In connection with the determination of the noise exposure level  $L_{EX}$  and the peak sound pressure level  $L_{pC,peak}$  and on the basis of the „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM) the measuring uncertainty for noise measurements can be stated as follows:

$$\Delta L_U(L_{EX}, L_{pC,peak}) = \sqrt{\Delta L_{U-method}^2 + \Delta L_{U-instrument}^2}$$

with

$\Delta L_{U\text{-method}}$	uncertainty caused by the measuring method in connection with the measuring object and all influencing factors
$\Delta L_{U\text{-instrument}}$	uncertainty caused by the measuring device and the test set-up
$\Delta L_U(L_{EX}, L_{pC,peak})$	measuring uncertainty for the quantity measured by the measuring method

The noise exposure level with the measuring uncertainty can then easily be stated as  $L_{EX,8h} \pm \Delta L_U$  in dB(A), and the peak sound pressure level as  $L_{pC,peak} \pm \Delta L_U$  in dB(C).

For the presentation of the measured values, the measured quantities, the results and the measuring uncertainties, a standardized system is elaborated, which enables a uniform presentation in the form of levels.

A selection scheme for the measuring methods to determine the daily noise exposure level  $L_{EX,8h}$ , the weekly noise exposure level  $L_{EX,40h}$  and the peak sound pressure level  $L_{pC,peak}$  is suggested.

Additionally, different in-situ measuring methods to determine the individual transmission loss of different types of hearing protectors are described, which work partly according to the same, partly according to different principles. Concerning the measuring principle, the measuring methods are divided into subjective and objective methods. According to the present knowledge and the examination of the investigated measuring systems so far, there is no universal system to correctly determine the individual transmission loss of different types of hearing protectors which can be recommended without any restrictions. To verify whether the permissible exposure limit values can be complied with or not when taking into account the transmission loss of hearing protectors, the "octave band method" is recommended.

Finally, criteria to assess the noise exposure level  $L_{EX}$  and the peak sound pressure level  $L_{pC,peak}$  in connection with their measuring uncertainties are developed and recommended. On this basis, it can be checked whether the noise levels fall below, achieve or exceed the action values or the permissible exposure limit values.

### Key words:

LärmVibrationsArbSchV, noise emission, noise immission, noise exposure, daily noise exposure level, peak sound pressure level, noise dose, impulsive noise, noise measuring method, measurement uncertainty, hearing protector, individual transmission loss, REAT measuring method, MIRE measuring method, noise rating

# Méthodes pour respecter les valeurs de déclenchement et d'exposition maximale au bruit

## Résumé

Ce rapport de recherche présente la technologie de mesure, des procédés de mesure pour la détermination de l'exposition au bruit au poste de travail et surtout de leur incertitude de mesure. Cette étude comprend également les méthodes pour déterminer les effets insonorisants individuels de la protection de l'ouïe des ouvriers.

Dans une brève partie précédente, les normes respectives à la mesure de l'exposition au bruit au travail seront décrites et comparées.

Ensuite, un résumé systématique est donné sur les termes techniques de l'exposition au bruit. La propre utilisation de ces termes est essentielle pour la détermination techniquement correcte du niveau d'exposition quotidienne au bruit  $L_{EX,8h}$  et du niveau de pression acoustique de crête  $L_{pC,peak}$  ainsi que pour le développement des méthodes de mesure.

De plus, les exigences aux instruments acoustiques pour mesurer l'exposition au bruit seront résumées sur la base des normes DIN EN 61672-1 et DIN EN 61252 et des expériences de mesures faites en pratique.

La partie principale du rapport de recherche élabore en détail les incertitudes des mesures de niveaux acoustiques et décrit les quatre méthodes différentes pour déterminer l'exposition au bruit, à savoir :

1. la mesure continue pendant une durée de mesure totale (p. ex. un temps de travail posté),
2. la mesure continue à temps partiels de la durée de mesure totale,
3. la mesure aléatoire pendant la durée de mesure totale et
4. la mesure combinée pendant la durée de mesure totale (combinaison des méthodes de mesure 1 à 3).

La méthode pour déterminer les valeurs de mesure, les grandeurs mesurées, les grandeurs résultantes et les incertitudes de mesure est expliquée à l'aide d'exemples.

Par l'analyse de l'incertitude de méthodes de mensuration de bruit, il est possible de montrer qu'en règle générale les contributions d'incertitude significatives proviennent seulement de la méthode de mesure en combinaison avec l'objet de mesure ( $\Delta L_{U-méthode}$ ) et l'instrument de mesure plus le calibrage ( $\Delta L_{U-instrument}$ ).

Par conséquent, l'incertitude de mesure en mesurant le bruit pour déterminer le niveau de l'exposition au bruit  $L_{EX}$  et le niveau de pression acoustique de crête  $L_{pC,peak}$ , peut être indiquée sur la base du guide « Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement » (GUM), de la façon suivante :

$$\Delta L_U(L_{EX}, L_{pC,peak}) = \sqrt{\Delta L_{U-méthode}^2 + \Delta L_{U-instrument}^2}$$

avec

$\Delta L_{U-méthode}$	incertitude causée par la méthode de mesure conjointement avec l'objet de mesure et tous leurs facteurs d'influence
$\Delta L_{U-instrument}$	incertitude causée par l'instrument de mesure ou l'arrangement de mesure
$\Delta L_U(L_{EX}, L_{pC,peak})$	incertitude de mesure pour la grandeur mesurée de la méthode de mesure

Le niveau d'exposition au bruit avec l'incertitude de mesure est simplement indiqué par  $L_{EX,8h} \pm \Delta L_U$  en dB(A) et le niveau de pression acoustique de crête par  $L_{pC,peak} \pm \Delta L_U$  en dB(C).

Pour la représentation des valeurs mesurées, des grandeurs de mesure, des grandeurs résultantes et des incertitudes de mesure, un système de description uniforme est élaboré dans le rapport de recherche permettant ainsi une représentation uniforme en niveaux acoustiques.

Un schéma est proposé afin de pouvoir choisir les méthodes de mesure pour la détermination du niveau d'exposition quotidienne au bruit  $L_{EX,8h}$ , du niveau d'exposition hebdomadaire au bruit  $L_{EX,40h}$  et du niveau de pression acoustique de crête  $L_{pC,peak}$ .

Différentes méthodes de mesure sur site seront décrites pour déterminer l'effet insonorisant de protecteurs de l'ouïe, qui fonctionnent en partie selon des principes égaux et en partie selon des principes différents. Concernant le principe de mesure, les méthodes de mesure sont subdivisées en procédés subjectifs et procédés objectifs. Selon l'état des connaissances actuelles, il n'y a aucune méthode qui pourrait être recommandée sans réserves pour déterminer universellement et correctement les effets insonorisants des protecteurs de l'ouïe. La « méthode de bande d'octave » est proposée pour démontrer si les valeurs d'exposition maximum admissibles sont effectivement respectées, tout en tenant compte de l'effet absorbant de la protection de l'ouïe.

Finalement, les critères pour l'évaluation du niveau d'exposition au bruit  $L_{EX}$  et du niveau de pression acoustique de crête  $L_{pC,peak}$  en fonction de leurs incertitudes de mesure seront développés et recommandés de façon justifiée. Sur cette base, il est possible de contrôler si les valeurs de déclenchement ou les valeurs d'exposition maximum admissibles restent inférieures, sont atteintes ou si elles sont dépassées.

### Mots clés:

LärmVibrationsArbSchV, émission de bruit, immission de bruit, durée d'exposition, niveau d'exposition quotidienne au bruit, niveau de pression acoustique de crête, dose de bruit, impulsion sonore, méthode de mensuration de bruit, incertitude de mesure, protecteurs de l'ouïe, isolation acoustique individuelle, méthode de mensuration REAT, méthode de mensuration MIRE, évaluation du bruit

# 1 Einleitung

Die nach der Lärm- und Vibrations-Arbeitschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV) [2] zu verwendenden Messgrößen zur Beurteilung der Lärmexposition am Arbeitsplatz sind der Tageslärmexpositionspegel und der Spitzenschalldruckpegel. Entsprechend § 4 der LärmVibrationsArbSchV sind die Messungen dieser Größen nach dem Stand der Technik durchzuführen. Dabei sind die Messverfahren und -geräte den vorhandenen Arbeitsplatz- und Expositionsbedingungen anzupassen. Dies betrifft insbesondere

- die Eigenschaften des zu messenden Lärms,
- die Dauer der Einwirkung und
- die Umgebungsbedingungen.

Außerdem müssen die Messverfahren und -geräte geeignet sein, die jeweiligen physikalischen Größen mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen, so dass eine Entscheidung hinsichtlich der Über- oder Unterschreitung der festgesetzten Auslöse- und maximal zulässigen Expositionswerte sicher getroffen werden kann.

Die Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung legt zwar fest, dass die Größen zur Lärmexposition nach dem Stand der Technik zu ermitteln sind, schreibt aber kein genormtes Messverfahren zur Ermittlung der Lärmexposition vor. Gegenwärtig gilt:

1. Die jetzt gültige Messnorm DIN EN ISO 9612 „Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz“ vom September 2009 [5] ist ein teilweiser Ersatz für die DIN 45 645 Teil 2 zur „Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen“ [4]. Sie soll zweckmäßigerweise und besonders dann angewendet werden, wenn genaue Lärmbelastungsstudien oder epidemiologische Studien im Zusammenhang mit der Entstehung von Gehörschäden oder anderen negativen Lärmwirkungen durchgeführt werden sollen. Für ein praxistaugliches Vorgehen bei der Erfassung von Lärmarbeitsplätzen ist es nicht in jedem Fall zielführend Messungen und aufwändige Berechnungen der Messunsicherheit nach DIN EN ISO 9612 durchzuführen. In Ergänzung zur DIN EN ISO 9612 fehlen Messverfahren zur Messung des Lärms am Arbeitsplatz, die den geforderten Stand der Technik für Lärmmessungen erfüllen.
2. Die LärmVibrationsArbSchV legt die maximal zulässigen Expositionswerte unterhalb des Gehörschutzes fest, d. h. der auf das Gehör des Beschäftigten wirkende Lärm darf unter Einbeziehung der dämmenden Wirkung des Gehörschutzes den Tageslärmexpositionspegel von 85 dB(A) und den Spitzenschalldruckpegel von 137 dB(C) nicht überschreiten und ist messtechnisch nachzuweisen.

Zur zuverlässigen Erfassung der persönlichen Lärmexpositionen an den Arbeitsplätzen und zum Nachweis der wirksamen individuellen Dämmung des Gehörschutzes eines Arbeitnehmers werden daher geeignete effiziente Messverfahren benötigt.

Es existiert in der Praxis das Problem, wie messtechnisch ermittelte Werte zum Tageslärmexpositionspegel und zum Spitzenschalldruckpegel, die mit einer Messun-

sicherheit behaftet sind, hinsichtlich der Auslösewerte und nicht zu überschreitenden maximal zulässigen Expositionswerte zu beurteilen sind.

Nach § 5 der LärmVibrationsArbSchV darf der Arbeitgeber mit der Durchführung der Messungen nur Personen beauftragen, die über die dafür notwendige Fachkunde und die erforderlichen Einrichtungen verfügen. Es kommt deswegen darauf an, den neuen Anforderungen gerecht zu werden und dem Fachpersonal in Zukunft eine Handlungsanweisung zur Verfügung zu stellen, die fachlich korrekt, politisch akzeptiert und praxistauglich ist.



## 2 Ziel und Aufgaben der Untersuchung

Ziel des Forschungsprojektes ist die Entwicklung eines für die Praxis zweckmäßigen Messverfahrens, das die Messunsicherheit berücksichtigt und dem Stand der Technik entspricht. Das Messverfahren einschließlich seiner Unsicherheit muss für die Feststellung einer Über- oder Unterschreitung der Auslösewerte geeignet sein.

Aus dieser Zielstellung heraus ergeben sich für die Untersuchung folgende sieben Teilziele:

1. Zusammenstellung der Forderungen an akustische Geräte zur Messung der Lärmexposition
2. Untersuchung der Messunsicherheiten bei Messgeräten und -verfahren
3. Vorschlag für die Berücksichtigung der Messunsicherheiten bei der Ermittlung von  $L_{EX,8h}$  und  $L_{pC,peak}$
4. Übersicht von Messverfahren zur praxisgerechten Vorgehensweise bei der Bestimmung der Lärmexposition
5. Zusammenstellung und Vergleich existierender Verfahren zur In-Situ-Messung der individuellen Schalldämmung von Gehörschutz
6. Vorschlag für eine messtechnische Verfahrensweise zur Berücksichtigung der Dämmwirkung von Gehörschutz
7. Empfehlung einer Beurteilungsmethode für den Vergleich der Ergebnisgrößen  $L_{EX,8h}$  und  $L_{pC,peak}$  mit den Auslöse- und maximal zulässigen Expositionswerten

## **3 Aktueller Stand der Gesetzgebung und der Normung**

### **3.1 Basis des betrieblichen Arbeitsschutzes**

Die Basis für den betrieblichen Arbeitsschutz in der Wirtschaft und im öffentlichen Dienst bildet die EG-Arbeitsschutz-Rahmenrichtlinie 89/391/EWG [6], national umgesetzt im Arbeitsschutzgesetz mit den Grundpflichten für Arbeitgeber, wie den Grundsätzen **Gefahrenverhütung, Gefährdungsbeurteilung, Gefährdungsminimierung, Gefahrenbekämpfung an der Quelle, Berücksichtigung des Standes der Technik**, Vorrang kollektiver vor individuellen Schutzmaßnahmen sowie mit Rechten und Pflichten für Arbeitnehmer.

### **3.2 Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung LärmVibrationsArbSchV**

#### **3.2.1 Grundlagen**

Lärm am Arbeitsplatz kann je nach Belastung und Beanspruchung des Menschen die Gesundheit, das Wohlbefinden, die Arbeitssicherheit und die Leistungsfähigkeit beeinträchtigen.

Die EG-Richtlinie 2003/10/EG [7] zum Schutz der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch Lärm, die am 15.02.2003 auf europäischer Ebene in Kraft getreten ist, wurde am 09.03.2007 mit der Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibration in nationales deutsches Recht umgesetzt. Seitdem hat die Beurteilung der Lärmgefährdung von Arbeitnehmern am Arbeitsplatz nach den Regelungen der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung zu erfolgen.

Lärm im Sinne dieser Verordnung ist jeder Schall, der zu einer Beeinträchtigung des Hörvermögens oder zu einer sonstigen mittelbaren oder unmittelbaren Gefährdung von Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten führen kann.

Die wesentlichen Unterschiede zu den bislang üblichen Verfahren gemäß UVV Lärm [8] und Arbeitsstättenverordnung [9] sind:

- Es wird nur noch die personenbezogene Exposition betrachtet. Die ortsbezogene Betrachtungsweise des Beurteilungspegels ist nicht mehr vorgesehen.
- Es werden untere und obere Auslösewerte für die Lärmexposition definiert, bei deren Erreichen oder Überschreiten Maßnahmen durchzuführen sind.
- Es werden maximal zulässige Expositionswerte am Ohr der Beschäftigten definiert, die in keinem Fall überschritten werden dürfen. Dabei wird die dämmende Wirkung des Gehörschutzes berücksichtigt.

Im Folgenden werden die wesentlichen Bestimmungen der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung zusammengefasst.

In Abschnitt 1, § 2 der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung werden folgende Begriffe definiert:

- **Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX, 8h}$**

Über die Zeit gemittelter (A-frequenzbewerteter) Lärmexpositionspegel, bezogen auf eine 8-h-Schicht.

- **Wochen- Lärmexpositionspegel  $L_{EX, 40h}$**

Über die Zeit gemittelter (A-frequenzbewerteter) Lärmexpositionspegel, bezogen auf eine 40-h-Woche.

- **Spitzen-Schalldruckpegel  $L_{pC, peak}$**

Höchstwert des momentanen C-frequenzbewerteten Schalldruckpegels.

In Abschnitt 3, § 6 der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung werden die Auslösewerte wie folgt festgelegt:

- Oberer Auslösewert:  $L_{EX, 8h} = 85 \text{ dB(A)}$   
 $L_{pC, peak} = 137 \text{ dB(C)}$
- Unterer Auslösewert:  $L_{EX, 8h} = 80 \text{ dB(A)}$   
 $L_{pC, peak} = 135 \text{ dB(C)}$

Die dämmende Wirkung des Gehörschutzes wird dabei nicht berücksichtigt.

Die Auslösewerte sind entscheidend für die Einleitung von präventiven Maßnahmen.

In Abschnitt 3, § 8 werden die maximal zulässigen Expositionswerte wie folgt festgelegt:

- Maximal zulässige Expositionswerte:  $L_{EX, 8h} = 85 \text{ dB(A)}$   
 $L_{pC, peak} = 137 \text{ dB(C)}$

Die maximal zulässigen Expositionswerte beziehen sich auf den Schall, der auf das Gehör des Beschäftigten einwirkt. Die dämmende Wirkung des Gehörschutzes wird dabei berücksichtigt.

Die maximal zulässigen Expositionswerte sind erforderlich, um Hörschäden zu vermeiden. Der Lärm, der das Ohr erreicht, darf unter keinen Umständen einen der maximal zulässigen Expositionswerte überschreiten.

### 3.2.2 Gefährdungsbeurteilung für die Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten

Wie bereits oben verdeutlicht, ist die Gefährdungsbeurteilung der Beschäftigten von zentraler Bedeutung.

Sie umfasst im Wesentlichen die folgenden Punkte:

- a) *die Art, das Ausmaß und die Dauer der Exposition,*
- b) *die Auslösewerte und Expositionswerte gem. Abschnitt 3 § 6 Satz 1 und die Expositionswerte nach § 8 Abs. 2,*
- c) *die Verfügbarkeit alternativer Arbeitsmittel, die so ausgelegt sind, dass die Lärmerzeugung verringert wird,*
- d) ....
- e) ....
- f) ....
- g) *die Herstellerangaben zu Lärmemissionen.*

Nach LärmVibrationsArbSchV muss der Arbeitgeber ermitteln, welche Maßnahmen gemäß § 7 (Maßnahmen zur Vermeidung oder Verringerung der Lärmexposition), § 8 (persönlicher Gehörschutz), § 8 Abs. 2 (Begrenzung der Lärmexposition) und § 11 (Unterweisung der Beschäftigten) zu treffen sind. Grundlage der Gefährdungsbeurteilung ist der Vergleich des Tages-Lärmexpositionspegels und des Spitzenschalldruckpegels mit den Auslöse- und Expositionswerten.

Außerdem sind bei der Gefährdungsbeurteilung mögliche Wechsel- oder Kombinationswirkungen zwischen Lärm und ototoxischen Substanzen sowie Vibrationen zu berücksichtigen. Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass z. B. die Kombination von Lärm- und Ganzkörpervibration auf das Gehör zu Wechselwirkungen führt [3].

### 3.2.3 Schutzmaßnahmen

Der Tages-Lärmexpositionspegel kann sich auf einen Arbeitsort mit zeitlich veränderlichen Schallpegeln (ortsfester Arbeitsplatz) oder auf mehrere Aufenthaltsorte mit zeitlich und örtlich veränderlichen Schallpegeln (ortsveränderlicher Arbeitsplatz) beziehen.

Der Tages-Lärmexpositionspegel kann daher ohne Weiteres unter dem oberen Auslösewert von  $L_{EX,8h} = 85 \text{ dB(A)}$  liegen, auch wenn an unterschiedlichen Arbeitsorten des zugehörigen Arbeitsplatzes in der Arbeitstätte die Schalldruckpegel mehr als 85 dB(A) betragen. Die Aufenthaltsorte des Arbeitsplatzes können auf verschiedenen Maschinenebenen, Räumen, Geschossen usw. sein, beispielsweise in einem Kraftwerk, einer Druckerei oder einer Chemieanlage.

Die ermittelten Tages-Lärmexpositionspegel sind entscheidend für die Einleitung der im Zusammenhang mit den unteren und oberen Auslösewerten vorgesehenen Maßnahmen.

Die maximal zulässigen Expositionswerte dürfen nicht überschritten werden, um irreversible Hörschäden bei den Arbeitnehmern zu vermeiden. Der Lärm, der das Ohr mit Gehörschutz erreicht, muss unter den maximal zulässigen Expositionswerten liegen.

Bei Erreichen und Überschreiten der Auslösewerte sind die folgenden Maßnahmen durchzuführen:

Untere Auslösewerte ( $L_{EX,8h} \geq 80\text{dB(A)}$  oder  $p_{peak} \geq 112\text{ Pa}$  ( $L \geq 135\text{ dB (C)}$ ))

- Informations- und Unterweisungspflicht der Beschäftigten
- Gehörschutz zur Verfügung stellen
- Anspruch auf eine vorbeugende audiometrische Untersuchung

Obere Auslösewerte ( $L_{EX,8h} \geq 85\text{dB(A)}$  oder  $p_{peak} \geq 140\text{ Pa}$  ( $L \geq 137\text{ dB (C)}$ ))

- Lärmbereiche ermitteln und kennzeichnen sowie den Zugang beschränken
- Lärminderungsprogramm erarbeiten und umsetzen
- Gehörschutz-Tragepflicht
- Anspruch auf eine Untersuchung des Gehörs durch den HNO-Arzt
- Gesundheitsakte

### 3.3 Normen zur Messung der Lärmexposition am Arbeitsplatz

*ISO 1999: Akustik, Bestimmung der Lärmbelastung am Arbeitsplatz und Abschätzung der lärmbedingten Hörminderung, 1990 [10]*

Für die korrekte Messung der Lärmexposition von Arbeitnehmern schreibt die EG-Richtlinie 2003/10/EG vor, eine objektive Messmethode anzuwenden. Die Richtlinie schlägt dazu die ISO-Norm 1999 aus dem Jahr 1990 vor. In dieser Norm wurde schon 1990 der Tages-Lärmexpositionspegel definiert. Es wird dort der formelmäßige Zusammenhang für die Berechnung des Tages-Lärmexpositionspegels dargestellt, jedoch im Hinblick auf die Messmethodik und -strategie erfolgt nur eine relativ grobe Beschreibung der messtechnischen Erfassung. Danach kann prinzipiell der Tages-Lärmexpositionspegel am Arbeitsplatz  $L_{EX,8h}$  nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$L_{EX,8h} = L_{Aeq} + 10 \log \frac{T}{T_r} \quad \text{in dB(A)} \quad (3.1)$$

Das heißt die Bestimmung des Tages-Lärmexpositionspegels  $L_{EX,8h}$  erfolgt über die Messung des äquivalenten A-bewerteten Dauerschalldruckpegels  $L_{Aeq}$  für die tatsächliche Dauer der Arbeitsschicht  $T$  und einer Korrektur aus dem Verhältnis der tatsächlichen Arbeitsschichtdauer  $T$  zur Referenzbeurteilungszeit von  $T_r = 8\text{ h/Tag}$ . Dieser Tages-Lärmexpositionspegel stimmt näherungsweise mit dem in DIN 45645, Teil 2 festgelegten Beurteilungspegel  $L_{Ar}$  überein.

In ISO 1999 [10] werden keine Angaben zur Ermittlung der Messunsicherheit gemacht und es erfolgt keine Angabe zur Genauigkeitsklasse des gesamten Messverfahrens.

*DIN EN ISO 9612: Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz; Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 (Ingenieurverfahren), September 2009 [5]*

In der DIN EN ISO 9612: 2009-09 wird ein Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 beschrieben, mit dem die Lärmexposition von Beschäftigten an Arbeitsplätzen gemessen und die Lärmexpositionspegel berechnet werden können. Zu dem Verfahren ge-

hören auch Festlegungen zur Behandlung von Fehlern und zur Berechnung der Messunsicherheit.

Zur Ermittlung der Lärmexposition unterscheidet die Norm drei Messstrategien:

- tätigkeitsbezogene Messungen (Strategie 1),
- berufsbildbezogene Messungen (Strategie 2),
- ganztagsbezogene Messungen (Strategie 3).

Die Bestimmung der Messunsicherheit für alle drei Strategien erfolgt auf der Grundlage der in DIN ENV 13005 (GUM) [11] beschriebenen Verfahren.

Die Norm stellt Handhabungsmethoden zur Abschätzung der Messunsicherheit für alle drei Strategien zur Verfügung. Allerdings ist zu bemerken, dass die Berechnungen der Unsicherheiten der Ergebnisse für alle drei Strategien aufwändig sind und in der Regel den Einsatz spezieller Rechenprogramme erfordern. Die Messunsicherheit für den Spitzenschalldruckpegel muss nach dieser Norm nicht angegeben werden.

Die DIN EN ISO 9612 beschreibt sehr detailliert die Messung der Lärmbelastung von Beschäftigten an Arbeitsplätzen und die Berechnung des Lärmexpositionspegels. Sie geht sehr detailliert, ausführlich und sehr gründlich auf die einzelnen Schritte wie Arbeitsanalyse, Auswahl der Messstrategie, Durchführung der Messung, Ermittlung von Messunsicherheiten, Berechnung und Darstellung der Ergebnisse ein.

Aus der Sicht des Praktikers erscheint die Anwendung dieser Norm für die Ermittlung genauer Lärmbelastungsstudien oder epidemiologischen Studien, die im Zusammenhang mit der Verursachung von Gehörschäden oder anderen negativen Lärmwirkungen stehen, angebracht zu sein.

*DIN 45645-2: Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen; Teil 2: Geräuschimmissionen am Arbeitsplatz, Juli 1997 [4]*

Die Norm beschreibt die Durchführung von Geräuschimmissionsmessungen an Arbeitsplätzen, wobei drei Genauigkeitsklassen unterschieden werden. Die in ihr dargelegten Messverfahren haben sich aus der Erfahrung heraus bewährt. Die daraus gewonnenen Ergebnisse erlauben die Beurteilung der Lärmexposition sowohl hinsichtlich der Gehörgefährdung als auch hinsichtlich der Störwirkung und Lästigkeit.

Bei der Ermittlung der Messunsicherheit wird einerseits unterschieden zwischen der Unsicherheit des Messgerätes und dessen Genauigkeitsklasse und andererseits der Unsicherheit, die durch zufällige Einflüsse bei der Lärmbelastung hervorgerufen wird.

Eine Messunsicherheit für den Spitzenschalldruckpegel muss nach dieser Norm nicht angegeben werden.

In Teilen entspricht diese deutsche Messnorm nicht mehr dem heutigen Wissensstand der LärmVibrationsArbSchV und den neuen Anforderungen der Normung.

## Schlussfolgerungen

Unterschiede zwischen den einzelnen beschriebenen Normen bestehen unter anderem hinsichtlich der folgenden Punkte:

- Die Begriffe „personenbezogener Beurteilungspegel“ und „ortsbezogener Beurteilungspegel“, wie sie in der DIN 45645-2 verwendet werden, kommen in dieser Art und Weise in der DIN EN ISO 9612 nicht vor. Auch in der LärmVibrations-ArbSchV sind in dieser Form diese Begriffe nicht enthalten. Der „personenbezogene Beurteilungspegel“ entspricht dem heutigen „Tages-Lärmexpositionspegel“. Der „ortsbezogene Beurteilungspegel“ entfällt ganz und gar in den neuen Vorschriften.
- In der DIN 45645-2 sind nur zwei Messstrategien erwähnt, und zwar die tätigkeitsbezogene Messstrategie (entspricht der Strategie 1 in DIN EN ISO 9612) und die berufsbildbezogene (entspricht der Strategie 2 in der DIN EN ISO 9612). Die dritte Strategie nach DIN EN ISO 9612, die sogenannte ganztagsbezogene Messung, kommt in der deutschen Norm und auch in der ISO 1999 nicht vor.  
Der Begriff „Wochen-Lärmexpositionspegel“ ist in der LärmVibrationsArbSchV und der DIN 45645-2 erklärt. In der DIN EN ISO 9612 taucht dieser Begriff nicht explizit auf, jedoch ist er im Abschnitt 3.2 in der Anmerkung 2 erwähnt.
- In den deutschen Normen werden drei Genauigkeitsklassen unterschieden, die als „Präzisionsmessung“ (Klasse 1), „Betriebsmessung“ (Klasse 2) und „orientierende Messung“ (Klasse 3) bezeichnet werden. Diese Klasseneinteilung gibt es nicht in der Norm DIN EN ISO 9612. Dort gibt es im Untertitel eine Angabe zur Genauigkeitsklasse über die Zusatzbezeichnung „Genauigkeitsklasse 2“ (Ingenieurverfahren). Daher kennt die DIN EN ISO 9612 keine Unterscheidung hinsichtlich solcher Genauigkeitsklassen.

Bei der Durchsicht der Messnormen wird deutlich, dass keine der Normen in vollständiger Übereinstimmung mit den Anforderungen der LärmVibrationsArbSchV steht.

## 4 Grundbegriffe

### 4.1 Definition „Arbeitsstätten“ und „Arbeitsplätze“

Die Auslösewerte und die maximal zulässigen Expositionswerte beziehen sich auf das Gehör des Menschen am Arbeitsplatz in Arbeitsstätten. Daher spielt die Definition der Arbeitsstätte und des Arbeitsplatzes im Zusammenhang mit den Messverfahren eine besondere Rolle und ist für die Festlegung von Messverfahren von grundlegender Bedeutung.

Nach der Arbeitsstättenverordnung - ArbStättV - vom 12.08.2004, BGBL 1, Seite 2179, § 2(2) [9] bedeuten die beiden Begriffe Folgendes:

#### Definition „Arbeitsstätten“

*"Arbeitsstätten sind:*

*Orte in Gebäuden oder im Freien, die sich auf dem Gelände eines Betriebes oder einer Baustelle befinden und die zur Nutzung für Arbeitsplätze vorgesehen sind, andere Orte in Gebäuden oder im Freien, die sich auf dem Gelände eines Betriebes oder einer Baustelle befinden und zu denen Beschäftigte im Rahmen ihrer Arbeit Zugang haben."*

Arbeitsstätten sind zusammengefasst:

- Arbeitsräume in Gebäuden einschließlich Ausbildungsstätten,
- Werkhallen,
- Arbeitsplätze auf dem Betriebsgelände im Freien und
- Baustellen.

Zur Arbeitsstätte gehören

- Verkehrswege,
- Lager-, Maschinen- und Nebenräume,
- Pausen-, Bereitschafts-, Liegeräume und Räume für körperliche Ausgleichsübungen,
- Umkleide-, Wasch- und Toilettenräume und Sanitätsräume.

Die Definition „Arbeitsplatz“ ist wichtig, weil sich die Auslösewerte und die maximal zulässigen Expositionswerte der LärmVibrationsArbSchV auf den Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  und den Spitzenschalldruckpegel  $L_{pC,peak}$  des Arbeitsplatzes des Arbeitnehmers beziehen und **alle** aus den Überschreitungen der Auslösewerte und maximal zulässigen Expositionswerte bedingten **wirtschaftlichen, medizinischen und juristischen Konsequenzen** darauf basierend abgeleitet werden.



## Definition „Arbeitsplätze“

*„Bereiche von Arbeitsstätten, in denen sich Beschäftigte bei der von ihnen ausübenden Tätigkeit regelmäßig über einen längeren Zeitraum oder im Verlauf der täglichen Arbeitszeit nicht nur kurzfristig aufhalten müssen.“*

Diese ungenaue Definition wurde konkretisiert durch den Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik in den Leitlinien des Unterausschusses für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik zur Arbeitsstättenverordnung LV 40 [12].

Dort heißt es:

*„Arbeitsplätze im Sinne der Definition (§ 2, Abs. 2 Arbeitsstättenverordnung) liegen nach allgemeiner Auffassung dann vor, wenn sich Beschäftigte zur Verrichtung ihrer Arbeitsaufgabe in abgrenzbaren Bereichen einer Arbeitsstätte entweder mindestens zwei Stunden täglich oder an mindestens 30 Arbeitstagen\*) im Jahr aufhalten müssen“.*

*\*) Arbeitstag mit 8 h Arbeitszeit*

Vor diesem Hintergrund soll hier unter Arbeitsplatz Folgendes verstanden werden:

*Der Arbeitsplatz ist ein festgelegter regionaler Bereich in der Arbeitsstätte, in dem die Arbeitsaufgaben/Tätigkeiten verrichtet werden. Er kann sich auch aus Tätigkeiten an verschiedenen Aufenthaltsorten zusammensetzen. Am Arbeitsplatz ist ein Beschäftigter ständig oder überwiegend regelmäßig tätig. Müssen sich Beschäftigte zur Ausführung ihrer Arbeitsaufgabe in abgrenzbaren Bereichen einer Arbeitsstätte entweder mindestens zwei Stunden täglich oder an mindestens 30 Arbeitstagen\*) im Jahr aufhalten, so liegt im Sinne der Definition (§ 2, Abs. 2 Arbeitsstättenverordnung) ein Arbeitsplatz vor.*

*\*) Arbeitstag mit 8 h Arbeitszeit*

Es werden **ortsfeste** und **ortsveränderliche Arbeitsplätze** unterschieden.

## 4.2 Definitionen für die Zeitdauer der Arbeit, der Tätigkeit, der Messung und der Beurteilung der Lärmexposition

### 4.2.1 Arbeitszeiten

#### **Jahresarbeitszeit $T_J$**

Jahresarbeitszeit  $T_J$  = ca. 220 Arbeitstage mit täglich 8 h entsprechen 1760 h Arbeitsstunden.

In der Regel existieren am Arbeitsplatz in allen Arbeitsschichten in einem Jahr gleichartige Lärmexpositionen. In solchen Arbeitsschichten, die in der Regel 8 h betragen und in denen aus akustischer Sicht näherungsweise vergleichbare Bedingungen herrschen, bestehen bei den Überschreitungen der Auslösewerte auch an allen Arbeitstagen im Jahr ähnliche Lärmexpositionsgefährdungen.

Beispielsweise kann sich die Jahresarbeitszeit wie folgt zusammensetzen:

- alle Arbeitsschichten,
- alle Tagschichten,
- alle Nachtschichten,
- Tage mit besonderen Arbeitsbedingungen.

### **Wochenarbeitszeit $T_W$**

Wochenarbeitszeit  $T_W = 5 \text{ d} = 35 \text{ bis } 40 \text{ Stunden}$ .

In den meisten Bundesländern gilt die 40-Stunden-Arbeitswoche.

### **Tagesarbeitszeit $T_e = \text{Schichtarbeitszeit} = \text{tatsächliche Zeitdauer des Arbeitstages}$**

Die Tagesarbeitszeit wird in der Regel durch die Schichtarbeitszeit vorgegeben. Sie beträgt häufig im Durchschnitt 8 h. Schichtarbeit zeichnet sich dadurch aus, dass mehrere Personen zu verschiedenen Tageszeiten am gleichen Arbeitsplatz oder an der gleichen Arbeitsaufgabe arbeiten. Erfahrungsgemäß liegen die Tagesarbeitszeiten zwischen 7 h und 10 h.

## **4.2.2 Tätigkeitsbezogene Zeiten**

### **Teileinwirkzeit $T_i$**

Die Teileinwirkzeiten  $T_i$  sind eigenständige Zeitabschnitte innerhalb der Schicht- oder Tagesarbeitszeit  $T_e$ .

In der Regel ergeben sich die Teileinwirkzeiten  $T_i$  durch Tätigkeiten an verschiedenen Aufenthaltsorten des Arbeitsplatzes. Es wird angenommen, dass innerhalb von  $T_i$  die Merkmale für die Lärmexposition gleich bleiben. Die Tagesarbeitszeit  $T_e$  setzt sich in der Regel aus mehreren Teileinwirkzeiten  $T_i$  für verschiedene Tätigkeiten zusammen.

Es gilt:

$$T_e = \sum_{i=1}^n T_i \quad (4.1)$$

mit

$T_e$  Tagesarbeitszeit in h oder min

$T_i$  Teileinwirkzeit, in der eine bestimmte Tätigkeit ausgeführt wird, in h oder min

$n$  Anzahl der Teileinwirkzeiten  $T_i$

### 4.2.3 Bezugszeiten

#### **Tages-Bezugszeitdauer $T_0 = 8 h$**

Die Festlegung einer Bezugszeitdauer ist eine Konvention. Sie ist in Vorschriften und Regelwerken zum Lärmschutz sowie durch die Aufgabenstellung vorgegeben. Für die Ermittlung des Tages-Lärmexpositionspegels  $L_{EX,8h}$  am Arbeitsplatz gilt nach der LärmVibrationsArbSchV als Bezugszeitdauer  $T_0 = 8 h$  auch dann, wenn die tatsächliche Dauer der Arbeitsschicht von 8 h abweicht.

#### **Wochen-Bezugszeitdauer $T_W = 40 h$**

Die Berechnung der Lärmexposition erfolgt typischerweise für einen Arbeitstag. Es kann jedoch Gründe geben, die durchschnittliche Lärmexposition für eine Woche zu ermitteln. Daher gibt die LärmVibrationsArbSchV für die Ermittlung des Wochen-Lärmexpositionspegels  $L_{EX,40h}$  am Arbeitsplatz als Bezugszeitdauer  $T_W = 40 h$  an.

### 4.2.4 Messzeiten

Die Messzeit  $T_M$  ist durch den Zeitpunkt und die Dauer der Messung festgelegt. Sie muss so gewählt werden, dass der innerhalb dieses Zeitintervalls gemessene äquivalente Dauerschallpegel  $L_{Aeq}$  die Lärmexposition für die gesamte Arbeitsschicht oder die Teileinwirkzeit  $T_i$  charakterisiert.

In den meisten Fällen muss sich die Messung mit der Messzeit  $T_M$  nicht über die gesamte Arbeitsschicht  $T_e$  oder gesamte Teileinwirkzeit  $T_i$  erstrecken.

In manchen Fällen entspricht die Messdauer  $T_M$  der Dauer einer Arbeitsschicht  $T_e$ .

## 4.3 Akustische Definitionen und Messgrößen

### 4.3.1 Lärmemission, Lärmimmission und Lärmexposition

**Schall** besteht seiner physikalischen Natur nach aus mechanischen Schwingungen elastischer Medien im Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz. Schall ist durch physikalische Größen eindeutig und objektiv beschreibbar. Schall setzt sich in der Regel aus verschiedenen unregelmäßig zueinander stehenden Tonfrequenzen mit den zugehörigen Amplituden zusammen. Diese Tongemische werden in der Regel **Geräusche** genannt. Wenn sie störend sind oder das Gehörorgan gar schädigen, nennt man Geräusche **Lärm**.

Von besonderer Bedeutung sind die schalltechnischen Begriffe *Lärmemission*, *Lärmimmission* und *Lärmexposition* in Verbindung mit ihren Kenngrößen:

**Lärmemission:**

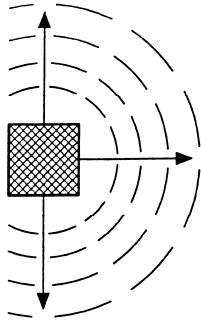
Der von einer bestimmten Maschine, Gerät oder Anlage in die Umwelt abgestrahlte Luftschall.

Messgrößen:

Schalleistungspegel  $L_{WA}$  in dB(A),

Emissionsschalldruckpegel am Arbeitsplatz  $L_{pA}$  in dB(A),

Emissions-Spitzenschalldruckpegel am Arbeitsplatz  $L_{pC,peak}$  in dB(C).

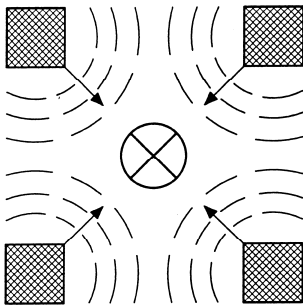
**Lärmimmission:**

Alle Geräusche, die unter den tatsächlich angetroffenen Bedingungen an einem Ort innerhalb einer Zeit einwirken, egal, ob ein Arbeitnehmer zugegen ist oder nicht.

Messgrößen:

Schalldruckpegel  $L_{pA}$  oder  $L_{pAeq}$  in dB(A),

Spitzenschalldruckpegel  $L_{pC,peak}$  in dB(C).

**Lärmexposition am ortsfesten Arbeitsplatz:**

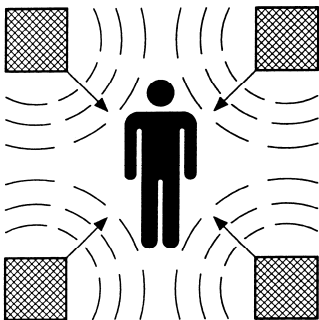
Alle Geräusche, die innerhalb einer festgelegten Zeit  $T$  unter den tatsächlich angetroffenen Bedingungen am Ohr einer Person eintreffen.

Messgrößen:

Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  in dB(A),

Wochen-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,40h}$  in dB(A),

Spitzenschalldruckpegel  $L_{pC,peak}$  in dB(C).



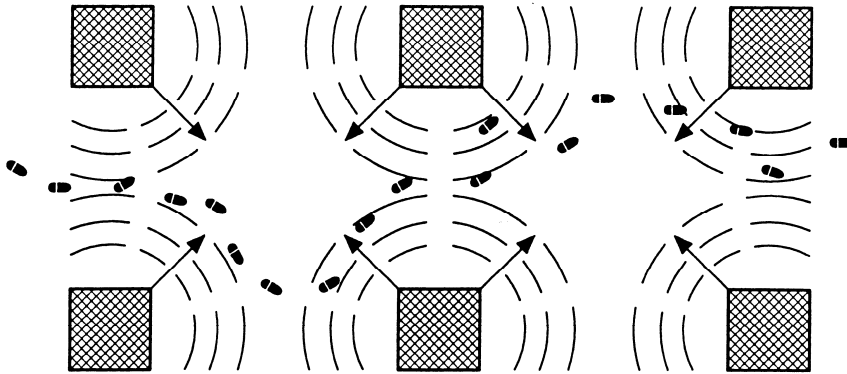
**Abb. 4.1** Veranschaulichung des Unterschiedes zwischen Lärmemission, Lärmimmission und Lärmexposition [13]

### Lärmexposition am ortsveränderlichen Arbeitsplatz:

Alle Geräusche, die innerhalb einer festgelegten Zeit  $T$  unter den tatsächlich ange-  
troffenen Bedingungen am Ohr einer Person eintreffen.

Messgrößen:

Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  in dB(A),  
Wochen-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,40h}$  in dB(A),  
Spitzenschalldruckpegel  $L_{pC,peak}$  in dB(C).

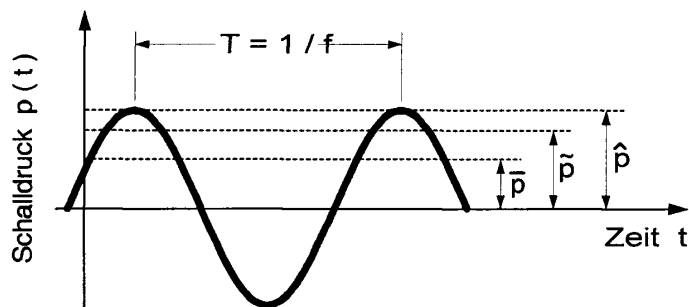


**Abb. 4.2** Veranschaulichung der Lärmexposition für eine Person, die ihren Aufenthaltsort wechselt [13]

#### 4.3.2 Schalldruckpegel

Abb. 4.3 zeigt den Zusammenhang zwischen Spitzen-, Effektiv- und arithmetischem Mittelwert für den Schallwechseldruck  $p(t)$  einer Schallschwingung.

##### Schalldruck - Effektivwert



**Abb. 4.3** Zeitfunktion  $p(t)$  für eine Schallschwingung mit eingetragenen Spitzenwert, Effektivwert und arithmetischem Mittelwert

Es gelten folgende Beziehungen:

Mit

$p(t)$	Zeitfunktion des Schalldruckes
$\hat{p}$	Spitzenwert in Pa
$\bar{p}$	arithmetischer Mittelwert in Pa
$\tilde{p}$	Effektivwert in Pa
$T$	Periodendauer in s
$f$	Frequenz, Anzahl der Schwingungen je Sekunde in Hz

lässt sich der Effektivwert nach folgender Gleichung berechnen:

$$\tilde{p} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (4.2)$$

Für einen reinen harmonischen Schallwechseldruck gelten folgende Beziehungen zwischen den einzelnen Größen:

Effektivwert

$$\tilde{p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \hat{p} \approx 0,71 \cdot \hat{p} \quad (4.3)$$

$$\tilde{p} = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \bar{p} \approx 1,11 \cdot \bar{p} \quad (4.4)$$

arithmetischer Mittelwert

$$\bar{p} = \frac{2}{\pi} \cdot \hat{p} \approx 0,64 \cdot \hat{p} \quad (4.5)$$

$$\bar{p} = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \tilde{p} \approx 0,90 \cdot \tilde{p} \quad (4.6)$$

Da sich der Hörbereich über mehr als sechs Zehnerpotenzen des Schalldrucks erstreckt, rechnet man in der Akustik nicht mit dem Schalldruck selbst, sondern mit einem logarithmischen Maß, dem *Schalldruckpegel*  $L_p$  in Dezibel (abgekürzt: dB), der, wenn keine Verwechslung mit anderen Schallpegeln möglich ist, kurz *Schallpegel*  $L$  genannt wird.

Der Schalldruckpegel ist definiert als

$$L_p = 10 \cdot \lg \left( \frac{\tilde{p}^2}{p_0^2} \right) = 20 \cdot \lg \left( \frac{\tilde{p}}{p_0} \right) \quad (4.7)$$

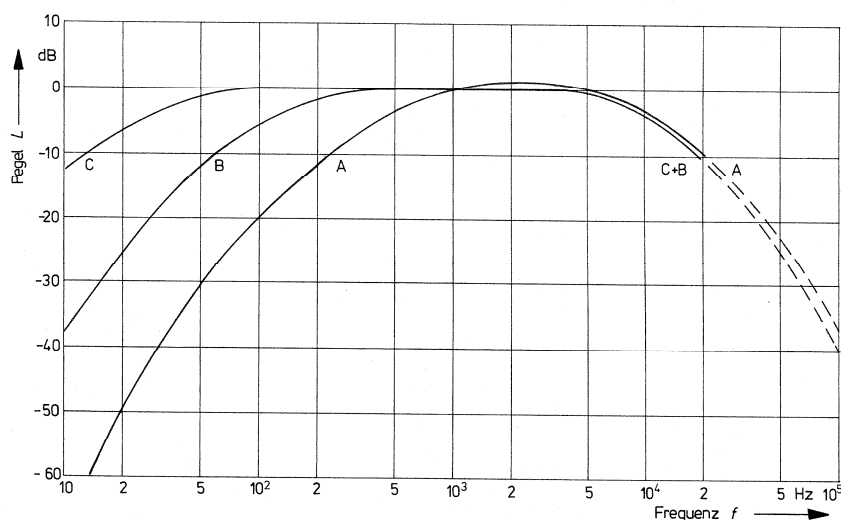
Da ohne weitere Indizierung immer der Effektivwert gemeint ist, wird der Index „~“ üblicherweise weggelassen. Der Bezugsschalldruck

$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2 = 20 \text{ } \mu\text{ Pa} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ } \mu\text{ b}$$

entspricht dem Schalldruckpegel  $L_p = 0 \text{ dB}$ . Er wurde so gewählt, weil früher dort die Hörschwelle eines normal hörenden Menschen bei 1000 Hz angenommen wurde (tatsächlich liegt sie etwas höher).

### 4.3.3 Frequenzbewertete Schalldruckpegel

Die Lautstärkeempfindung ist eine Funktion der Frequenz. Daher wurden zur groben Näherung an das Lautstärkeempfinden des Menschen drei verschiedene international genormte Bewertungskurven festgelegt, genannt „A“- , „B“- und „C“-Bewertung. Sie sind in Abb. 4.4 dargestellt.



**Abb. 4.4** Frequenzbewertungskurven in Schallpegelmessern [43]

Moderne Schallpegelmesser können die entsprechende Bewertung direkt während der Messung durchführen.

In solchen Schallpegelmessern ist ein elektrisches Netzwerk eingebaut, das den Frequenzgang der **Frequenzbewertung A** nach DIN EN 61672-1 [15] hat. Mit der A-Bewertung zeigt der Schallpegelmesser z. B. bei 50 Hz bei gleichem Schalldruck ca. 30 dB weniger an als bei 1000 Hz.

Die „A“-Bewertung verarbeitet ein Signal in einer Weise, die einer umgekehrten Kurve gleicher Lautstärke bei niedrigen Schalldruckpegeln entspricht, die „B“-Bewertung nähert sich einer Kurve bei mittleren, die „C“-Bewertung bei hohen Schalldruckpegeln.

Durch die Frequenzbewertungskurve A werden die Kurven gleicher Lautstärkepegel für reine Töne grob nachgebildet. Dadurch wird bei der Messung von Schallimmis-

sionen berücksichtigt, dass Schalle mit tiefen Frequenzen bei gleicher Stärke leiser und auch weniger lästig sind als solche mit mittleren und hohen Frequenzen.

Zusätzlich zu diesen Frequenzbewertungen besitzen Schallpegelmessers normalerweise auch noch eine lineare oder „LIN“-Bewertung. Hierbei wird das Signal nicht bewertet, sondern unverändert zur nächsten Verstärkerstufe geleitet.

In der Schallmesspraxis hat sich international der A-bewertete Schallpegel oder A-Schallpegel  $L_A$  (auch „Schallpegel in dB(A)“) durchgesetzt.

Die A-Bewertung wird heute unabhängig von der Höhe des Pegels benutzt, sie ist also nicht mehr auf Geräusche mit niedrigen Pegeln beschränkt. Daher stellt die A-Frequenzbewertung eine Konvention dar.

*Von Bedeutung für die Messungen von Lärmexpositionen an Arbeitsplätzen in Arbeitsstätten ist die Frequenzbewertung „A“ und „C“.*

#### 4.3.4 Zeitbewertete Schalldruckpegel und Spitzenschalldruckpegel

Der Schalldruck ist i. A. zeitlich veränderlich. Wie schnell die Anzeige des Schallpegelmessers den zeitlichen Änderungen des Schalldruckes folgt, hängt von der am Schallpegelmessers eingestellten Zeitbewertung ab.

Die Zeitbewertung dient mehreren Zwecken, so dass für Schallpegelmessers verschiedene Anzeigetragheiten vorgegeben werden. Es ist dies die Zeitbewertung „S“, „F“ und „I“. Die jeweilige Zeitbewertung soll insbesondere

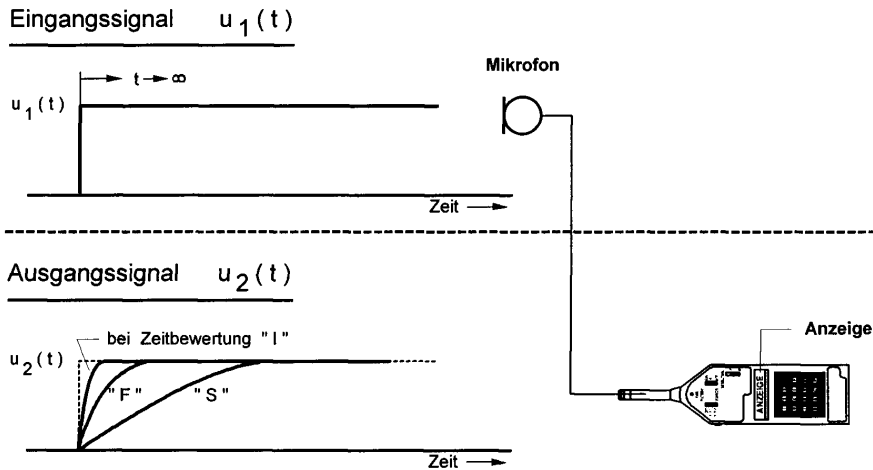
- a) die Anzeige mit der Kurzzeitwahrnehmung oder anderen akuten Wirkungen auf den Menschen optimal in Übereinstimmung bringen,
- b) eine sichere Ablesung der schwankenden Pegel ermöglichen,
- c) schnell aufeinander folgende Schallereignisse unterscheidbar machen,
- d) die Weiterverarbeitung zu einem wirkungsäquivalenten Langzeit-Beurteilungswert erlauben.

Die Zeitbewertungsschaltung dient der Realisierung der oben genannten Anzeigearten, die durch entsprechende Zeitkonstanten definiert sind:

S (Slow = Langsam)	Anstiegs- und Abfallzeitkonstante	$\tau_1 = \tau_2 = 1000 \text{ ms,}$
F (Fast = Schnell)	Anstiegs- und Abfallzeitkonstante	$\tau_1 = \tau_2 = 125 \text{ ms,}$
I (Impuls = Impuls)	Anstiegszeitkonstante und Abfallzeitkonstante	$\tau_1 = 35 \text{ ms,}$ $\tau_2 = 1500 \text{ ms,}$
Peak	Anstiegs- und Abfallzeitkonstante	$\tau_1 = \tau_2 \approx 10 \text{ bis } 50 \text{ } \mu\text{s.}$

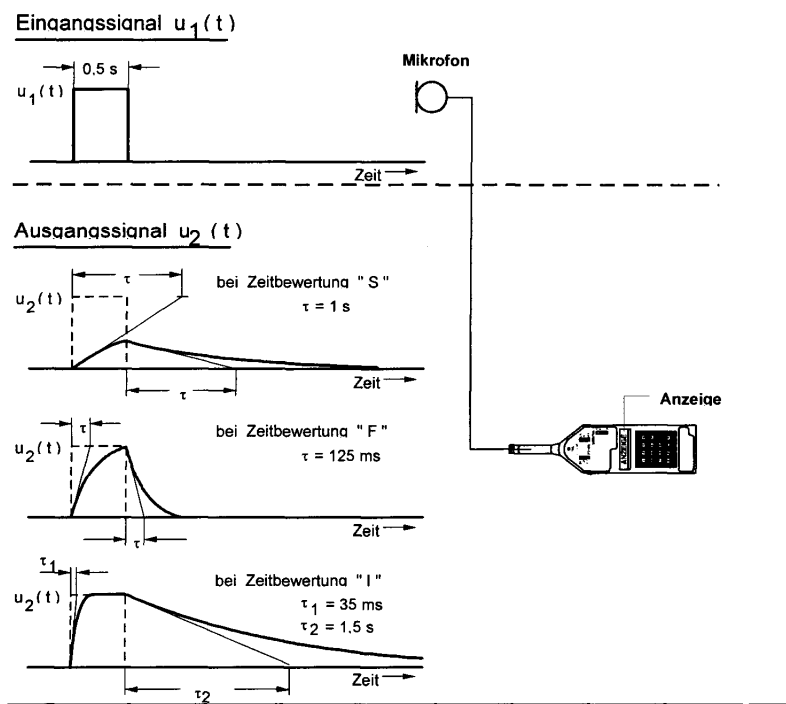
Für konstanten Schall zeigen alle drei Zeitbewertungen „S“, „F“, „I“ denselben Wert an, siehe dazu Abb. 4.5.





**Abb. 4.5** Anzeigeverhalten eines Schallpegelmessers in den Zeitbewertungen „S“, „F“ und „I“ bei einem konstanten Schallsignal

Die Abb. 4.6 zeigt das unterschiedliche Zeitbewertungsverhalten bei einem Schallimpuls kurzer Dauer.



**Abb. 4.6** Anzeigeverhalten eines Schallpegelmessers in den Zeitbewertungen „S“, „F“ und „I“ bei einem kurzen Schallsignal mit einer Dauer von 0,5 s

Wenn die Dauer des Schallpegelimpulses wesentlich kürzer ist als die am Schallpegelmessers eingestellte Zeitkonstante  $\tau$ , so wird die Anzeige des Schallpegelmessers einen geringeren Wert anzeigen.

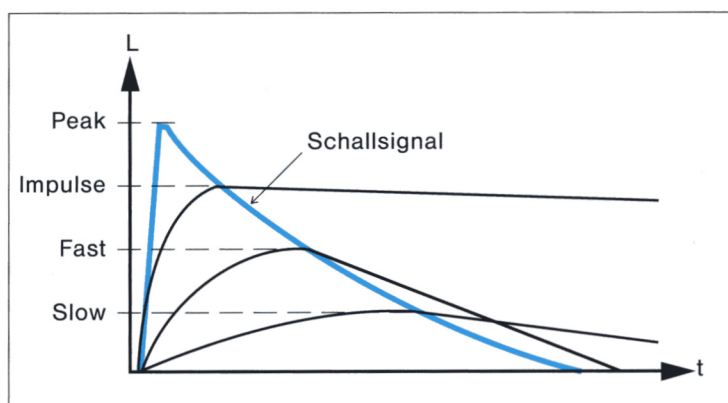
In Pegelschreibweise gilt für die Anzeige am Schallpegelmessers für einen Aufwärtssprung eines Schallimpulses:

$$L_{\text{ANZ}} = \hat{L} + 10 \lg \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \text{ in dB} \quad (4.8)$$

mit

- $L_{\text{ANZ}}$  Anzeige des Schallpegelmessers,
- $\hat{L}$  Spitzenpegel des Schallimpulses in dB,
- $\tau$  Zeitkonstante, die die Anzeigeträgheit des Schallpegelmessers beschreibt,
- $t$  Dauer des Schallsignals.

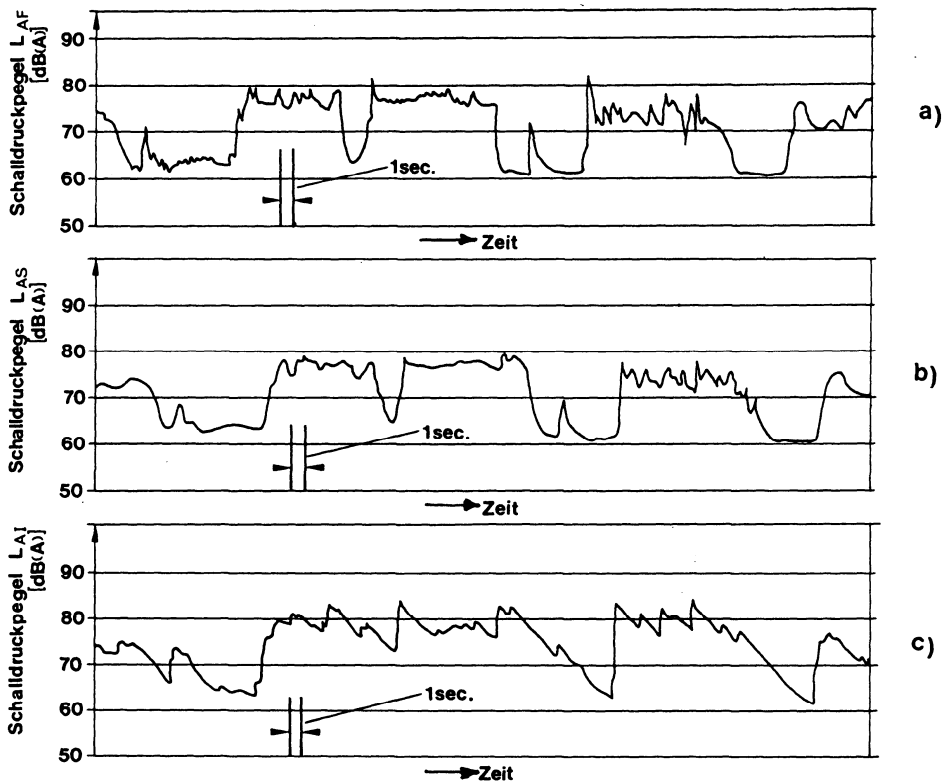
Einige Schallpegelmessers bieten als zusätzliche Möglichkeit eine nahezu verzögerungsfreie Messung des absoluten Spitzenpegels (Peakwert). Abb. 4.7 zeigt den Einfluss der Zeitbewertungen bei der Messung eines sehr kurzen Schallimpulses (qualitativ).



**Abb. 4.7** Anzeigeverhalten eines Schallpegelmessers in den Zeitbewertungen „S“, „F“, „I“ und „Peak“ bei der Messung eines Schallimpulses von sehr kurzer Dauer [17]

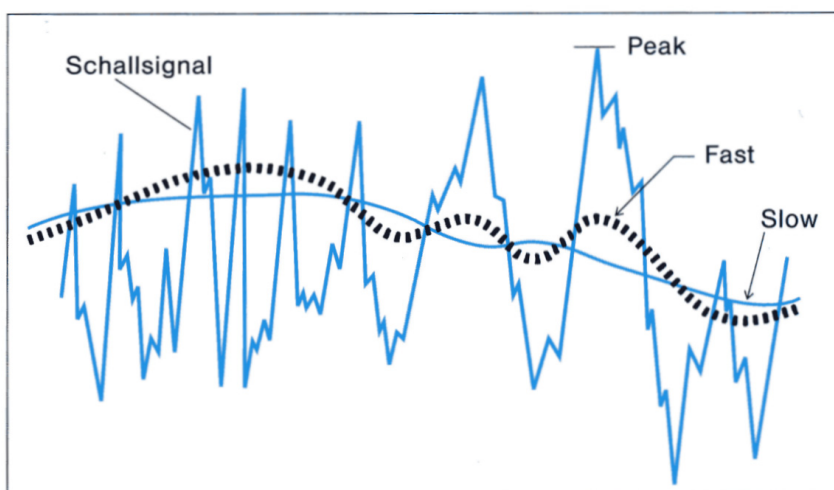
In der Regel können mit modernen Schallpegelmessern Messungen mit den Zeitbewertungen „S“, „F“, „I“ und „Peak“ durchgeführt werden.

Mit der Zeitbewertung „F“ folgt die Anzeige dem Schallpegelwechsel schneller als mit der Zeitbewertung „S“, die deshalb eine leichtere Ablesung des Mittelwertes gestattet. Mit der Zeitbewertung „I“ folgt die Anzeige von plötzlichen Pegelanstiegen besonders schnell (siehe Abb. 4.8).



**Abb. 4.8** Wirkungen der Zeitbewertungen bei Schalldruckpegeländerungen, dargestellt in einem Pegelschrieb für ein zeitlich sich änderndes Geräusch (Kappstation eines Sägewerkes) in der Anzeigedynamik nach [16]  
 a) Schnell „F“      b) Langsam „S“      c) Impuls „I“

Abb. 4.9 zeigt für ein und dasselbe sehr kurze impulshaltige Schallsignal die qualitative Wirkung der Zeitbewertungen auf den gemessenen Schalldruckpegel zur Bestimmung der Lärmexpositionen.



**Abb. 4.9** Spitzenwert („Peak“) und Effektivwerte „Fast“ und „Slow“ eines impulshaltigen Schallsignals [17]

*Von besonderer Bedeutung für die Messungen von Lärmexpositionen an Arbeitsplätzen in Arbeitsstätten sind die Zeitbewertungen: „F“, „S“ und „Peak“.*

#### **4.3.5 Momentane Schalldruckpegel zur Erfassung der Lärmimmission und Lärmexposition**

Zur Erfassung der Lärmimmission und der Lärmexposition werden folgende momentane Schalldruckpegel verwendet:

##### **A-Schalldruckpegel**

Der A-Schalldruckpegel  $L_A$  ist der mit der A-Bewertung nach DIN EN 61672 [15] bestimmte Schalldruckpegel. Er ist ein Maß für die Stärke des Lärms.

##### **AF-bewerteter Schalldruckpegel $L_{AF}$**

Schalldruckpegel, gemessen mit der Frequenzbewertung „A“ und der Zeitbewertung „F“.

$L_{AFmax}$  ist der Maximalwert innerhalb eines Messzeitintervalls.

##### **AS-bewerteter Schalldruckpegel $L_{AS}$**

Schalldruckpegel, gemessen mit der Frequenzbewertung „A“ und der Zeitbewertung „S“.

$L_{ASmax}$  ist der Maximalwert innerhalb eines Messzeitintervalls.

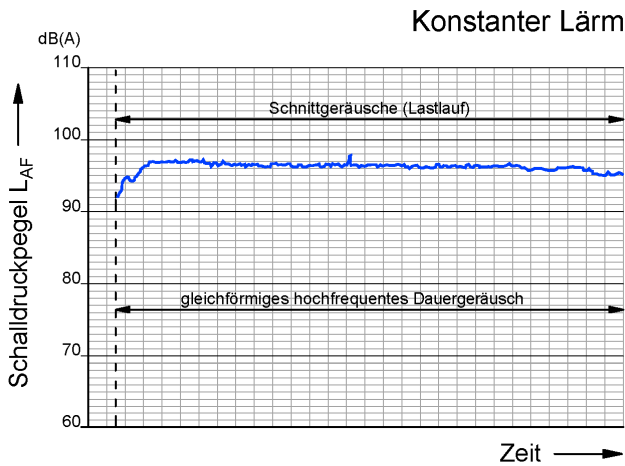
##### **Peak-bewerteter Schalldruckpegel $L_{pC,peak}$**

Schalldruckpegel, gemessen mit der Frequenzbewertung „C“ und mit der Zeitbewertung „Peak“.

$L_{pC,peak}$  ist der Spitzenschalldruckpegel innerhalb eines Messzeitintervalls.

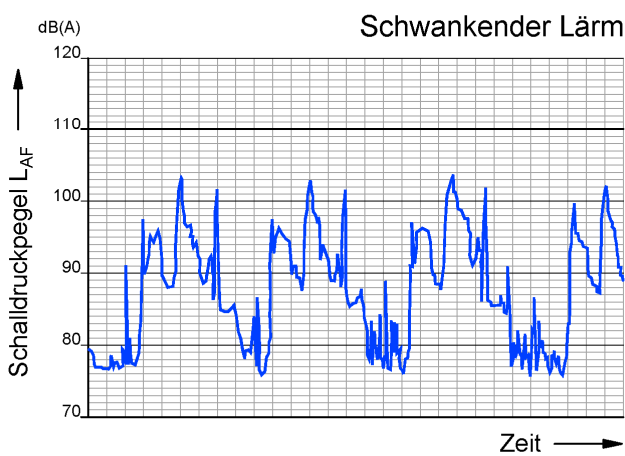
#### **4.3.6 Arten von Lärmpegel-Zeitverläufen**

Die Einteilung der in der Praxis am Arbeitsplatz vorkommenden Lärmpegel-Zeitverläufe ist zweckmäßig für die Anwendung von Messmethoden, wie sie im Abschnitt 6 beschrieben werden. Abb. 4.10 gibt eine Übersicht der Lärmarten.



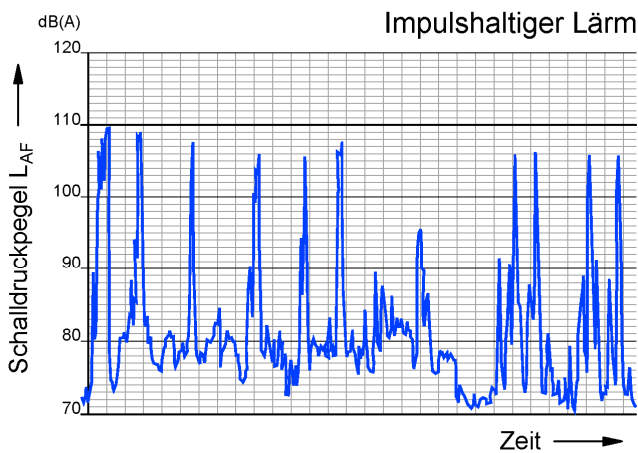
Beispiel für Arbeitsplatz:  
Längsschneidemaschine

Textilindustrie, Energiewirtschaft  
(Kraftwerk), Petroindustrie, Steine  
und Erden



Beispiel für Arbeitsplatz:  
Kombinierte Fräs- und Sägemaschine

Metallindustrie, Bauindustrie,  
Holzindustrie, Landwirtschaft, Bergbau



Beispiel für Arbeitsplatz:  
Richten von Kleinteilen

Montagehalle, Stahlbau,  
Metallindustrie,

**Abb. 4.10** Arten von Schallpegel-Zeitverläufen, wie sie üblicherweise an Arbeitsplätzen in Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft vorkommen

#### 4.3.7 Mittelungspegel $L_m$ und äquivalenter Dauerschallpegel $L_{eq}$

Aus den momentanen Schallpegeln (s. Abschnitt 4.3.4 und 4.3.5) können Mittelwerte in einem betrachteten Zeitintervall gebildet werden. Die Mittelung kann zeitlich und/oder örtlich erfolgen.

International ist allgemein der Mittelungspegel oder äquivalente Dauerschallpegel  $L_{AFm} = L_{eq} = L_{AS}$  die Messgröße für die Darstellung der Lärmimmissionen und Lärmexpositionen.

Der Mittelungspegel  $L_m$  ist der über ein betrachtetes Zeitintervall  $T$  nach Gl. (4.9)

$$L_m = 10 \cdot \lg \left[ \frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,1 L_A(t)} dt \right] \text{ in dB(A)} \quad (4.9)$$

aus dem Zeitverlauf  $L_A(t)$  des A-Schallpegels gebildete Mittelwert.

Wenn sich die Bezugszeit  $T_0$  aus mehreren Zeitabschnitten  $i$  mit den Dauern  $T_i$ , mit den konstanten Pegeln oder den Mittelungspegeln  $L_{m,i}$  zusammensetzt, ist der Mittelungspegel für die Bezugszeit  $T_0$  wie folgt zu berechnen:

$$L_m = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{T_0} \sum_i T_i \cdot 10^{0,1 L_{m,i}} \right) \quad (4.10)$$

Wird besonders auf die zeitliche Mittelung hingewiesen, so wird der Mittelungspegel „äquivalenter Dauerschallpegel  $L_{eq}$ “ genannt. Er ist in folgender Weise definiert:

$$L_{eq} = \frac{q}{0,3} \cdot \lg \left( \frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,3 L(t)/q} dt \right) \quad (4.11)$$

Nur wenn der Äquivalenzparameter<sup>1</sup> (Halbierungsparameter)  $q = 3$  dB ist, dann stimmen der „äquivalente Dauerschallpegel  $L_{eq}$ “ und der „Mittelungspegel  $L_m$ “ überein. Vergleiche mit Gl. (4.11).

Unter Berücksichtigung von  $q = 3$  dB ergibt sich für den äquivalenten Dauerschallpegel  $L_{eq}$  folgender formelmäßiger Zusammenhang:

$$L_{eq} = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,1 L(t)} dt \right) = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{T \cdot p_0^2} \int_0^T p^2(t) dt \right) \quad (4.12)$$

Bei örtlicher Mittelung wird der Mittelungspegel speziell benannt (z. B. als Messflächenschalldruckpegel) und mit  $\bar{L}$  bezeichnet. Der kombinierte Hinweis auf zeitliche und örtliche Mittelung ist  $\bar{L}_{eq}$ .

Je nach Wahl der Zeit- und Frequenzbewertung sind die entsprechenden *äquivalenten Dauerschallpegel bzw. Mittelungspegel* anzugeben:

$$L_{Aeq}, L_{AFeq}, L_{ASeq}.$$

---

<sup>1</sup> Der Äquivalenzparameter gibt die Pegelerhöhung an, die einer Halbierung der Einwirkzeit äquivalent ist.

Mit geeigneten Messgeräten wird die Mittelung nach Gleichung (4.12) automatisch durchgeführt und der Mittelungspegel am Ende des Messzeitintervalls direkt angezeigt.

#### 4.3.8 Lärmexposition

Lärmexposition ist im engeren Sinn eine Einwirkung von Schall in einer Arbeitsumgebung auf den Arbeitnehmer.

Umfangreiche retrospektive Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen der Lärmexposition und dem dadurch verursachten Gehörschaden beim Menschen ergaben, dass bei Lärmeinwirkungen bis zu 135 dB(A) **die Lärmdosis  $B_L$**  als maßgebliche Größe für die Schadenswirkung angenommen werden kann.

Die Lärmdosis nach Kraak [31] ist allgemein definiert als:

$$B_L = \int_0^{T_E} |\rho_A(t)|^n dt \quad (4.13)$$

mit

$T_E$  Gesamteinwirkungszeit der Lärmexposition,  
 $\rho_A(t)$  A-bewerteter Schalldruck,  
 $n$  Bewertungsexponent.

Der optimale Bewertungsexponent liegt etwa bei  $n = 1$ , d. h. für den äquivalenten Dauerschallpegel wäre der Äquivalenzparameter  $q = 6$  in Formel 4.12 einzusetzen. Dessen jedoch ungeachtet wird die Lärmdosis international mit dem Exponenten  $n = 2$  gemessen. Deshalb spricht man auch von der Energiedosis  $E$ . Sie ist das Zeitintegral des quadrierten A-bewerteten Momentanschalldruckes einer bestimmten Lärmeinwirkung, z. B. über einen Arbeitstag. Als Gleichung geschrieben ist die A-bewertete Energiedosis:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} \rho_A^2(t) dt \quad (4.14)$$

mit

$\rho_A^2(t)$  Quadrat des A-bewerteten Momentanschalldruckes als Funktion der Zeit während der Integrationszeit,  
 $t_1$  Beginn der Integrationszeit,  
 $t_2$  Ende der Integrationszeit.

Die Einheit der Energiedosis  $E$  ist Quadrat-Pascal-Stunden ( $\text{Pa}^2\text{h}$ ), wenn der A-bewertete Schalldruck in Pa und die Laufzeit  $t$  in h angegeben werden.

Zwischen der Energiedosis  $E$  und dem äquivalenten Dauerschallpegel  $L_{pAeq}$  mit dem Äquivalenzparameter  $q = 3$  gilt die Beziehung:

$$E = p_0^2 \cdot T_0 \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,8h}} \quad (4.15)$$

mit

$$\begin{aligned} p_0 & \text{ Bezugsschalldruck, } p_0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa} \\ T_0 & \text{ Bezugszeitdauer, } T_0 = 8 \text{ h} \end{aligned}$$

Der äquivalente Dauerschallpegel  $L_{pAeq}$  kann aus der Energiedosis wie folgt berechnet werden:

$$L_{pAeq} = 10 \log \frac{E}{E_0} \text{ dB} - 10 \log \frac{T}{T_0} \text{ dB} + 94 \text{ dB} \quad (4.16)$$

mit

$$\begin{aligned} T & \text{ Bezugszeitdauer } 8 \text{ h,} \\ E_0 & \text{ } 1 \text{ Pa}^2\text{h,} \\ T_0 & \text{ } 1 \text{ h.} \end{aligned}$$

Demnach entspricht die Energiedosis von  $1 \text{ Pa}^2\text{h}$  etwa der achtstündigen Lärmeinwirkung bei einem äquivalenten Dauerschallpegel von  $85 \text{ dB(A)}$ .

Die folgende Tab. 4.1 zeigt den Zusammenhang zwischen verschiedenen Energiedosen  $E$  und den zugehörigen äquivalenten Dauerschallpegeln  $L_{pAeq}$  für eine Bezugszeit von  $8 \text{ h}$ .



**Tab. 4.1** 8-stündige Energiedosis  $E$  und entsprechend zugehöriger äquivalenter Dauerschallpegel  $L_{pAeq}$ , z. B. für eine 8-h-Arbeitsschicht

$E$ Pa <sup>2</sup> h	$L_{Aeq,8hn}$ dB
0,32	80
0,40	81
0,51	82
0,64	83
0,80	84
1,01	85
1,27	86
1,60	87
2,02	88
2,54	89
3,20	90
4,03	91
5,07	92
6,39	93
8,04	94
10,12	95
12,74	96
16,04	97
20,19	98
25,42	99
32,00	100
40,29	101
50,72	102
63,85	103
80,38	104
101,19	105

Bemerkung:

Für die „Energiedosis“ wird in einigen Normen, z. B. in DIN EN 61252 [45] und anderen Dokumenten, das Wort „Schallexposition“ verwendet.

Die Definition in [45] lautet: *Die Schallexposition ist eine physikalische Größe, die an einem gegebenen Ort durch das Zeitintegral des Quadrates des frequenzbewerteten Momentanschalldrucks sowohl den Druck als auch seine Dauer(!) berücksichtigt.* Die Definition und die Formel 4.15 drücken deutlich das Dosisprinzip aus.

Das Wort „Schallexposition“ sagt entsprechend seiner Bedeutung nach nichts anderes aus, als das ein Mensch einer bestimmten *momentanen Schalleinwirkung* ausgesetzt ist. Insofern steht das Wort „Schallexposition“ nicht im Einklang mit dem physikalischen Inhalt nach Formel 4.15. Viel treffender ist daher der Begriff „Schallenergiesedosis“.

Um im sprachlichen Kontext der hier zu untersuchenden Thematik zu bleiben, wird im Folgenden anstelle des Wortes „Schallexposition“ das Wort „Lärmdosis“ und anstelle des Wortes „Personenschallexposimeter“ das Wort „Lärmdosimeter“ verwendet. Unter „Lärmexposition“ wird hier, wie oben beschrieben und wie in Abb. 4.1 gezeigt, die Einwirkung von Schall auf Personen verstanden. Dabei wird die „Lärmexposition“ durch die Messgröße „Lärmdosis“ quantifiziert.

#### 4.3.9 Arbeitsplatzbezogener Emissionswert $L_{pA}$

Die zweite Größe zur Beurteilung der Schallemission einer Maschine ist neben dem Schalleistungspegel der arbeitsplatzbezogene Emissionswert  $L_{pA}$ . Er sagt aus, wie laut es an dem der Maschine direkt zugeordneten Arbeitsplatz wäre, wenn nur der Lärm dieser Maschine und nicht der von anderen Maschinen oder den Reflexionen von der Decke und den Wänden herrührende Schall dort einwirken würde. Siehe insbesondere DIN EN ISO 11200 bis DIN EN ISO 11205 [18] bis [23].

#### 4.4 Gefährdung durch Lärmexposition

Eine Gefährdung durch Lärmexposition liegt für den Betroffenen dann vor, wenn die Lärmexposition eine Beeinträchtigung der Gesundheit, insbesondere im Sinne einer Gehörgefährdung, zur Folge hat oder zu einer erhöhten Unfallgefahr führt. Dies ist dann der Fall, wenn die Auslösewerte überschritten werden (s. Abschnitt 3).

#### 4.5 Lärmkarte

Als Lärmkarte bezeichnet man die Darstellung der ortsbezogenen Lärmimmissionspegel in der Karte eines Maschinenaufstellungsplanes. Eine Lärmkarte zeigt die Verteilung der Lärmimmissionspegel in anschaulicher Form und erleichtert damit die Aufstellung eines Lärminderungsplanes.

#### 4.6 Lärmbereich

Lärmbereich im Sinne der LärmVibrationsArbSchV ist ein Bereich mit einer Lärmexposition, in dem der ortsbezogene Lärmimmissionspegel 85 dB(A) oder den Höchstwert des C-bewerteten Spitzenschalldruckpegels von 137 dB(C) erreicht oder überschreitet. Mit „Höchstwert“ ist der in der Arbeitsschicht höchste vorkommende Spitzenschalldruckpegel  $L_{pC,peak}$  gemeint.

Bereiche mit ortsbezogenen Lärmimmissionspegeln von 85 dB(A) und mehr, in denen gleichzeitig die Tages-Lärmexpositionspegel oder der Höchstwert des C-bewerteten Spitzenschalldruckpegels von 137 dB(C) überschritten sind, sind „kennzeichnungspflichtige Lärmbereiche“. Der Lärmbereich ist durch ein Hinweisschild zu kennzeichnen.

## 4.7 Lärminderungsprogramm

Der Unternehmer hat nach dem Stand der Technik ein Programm technischer Maßnahmen und Maßnahmen der Arbeitsgestaltung zur Lärminderung für die kennzeichnungspflichtigen Lärmbereiche aufzustellen und durchzuführen.

§ 2, Absatz 7 in [2] legt dazu Folgendes fest:

„Der Stand der Technik ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zum Schutz der Gesundheit und zur Sicherheit der Beschäftigten gesichert erscheinen lässt. Bei der Bestimmung des Standes der Technik sind insbesondere vergleichbare Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen heranzuziehen, die mit Erfolg in der Praxis erprobt worden sind. Gleiches gilt für die Anforderungen an die Arbeitsmedizin und die Arbeitshygiene.“

Das Programm ist in Schriftform vorzulegen. Folgende Bestandteile bilden die Grundlage für ein Lärminderungsprogramm:

- Lärmkarte,
- Lärmquellenzusammenstellung,
- Arbeitsplatz-Belegung,
- Ursachenanalyse,
- Maßnahmen mit Zeitplan und Prioritätenstufung,
- Lärminderungsprognose.

Die Maßnahmen, entsprechend dem Lärminderungsprogramm, sollen eine Lärmgefährdung soweit wie möglich verringern. Einzelheiten dazu siehe in [14].

## 5 Akustische Messgeräte zur Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz

### 5.1 Grundlagen für Lärmessung am Arbeitsplatz

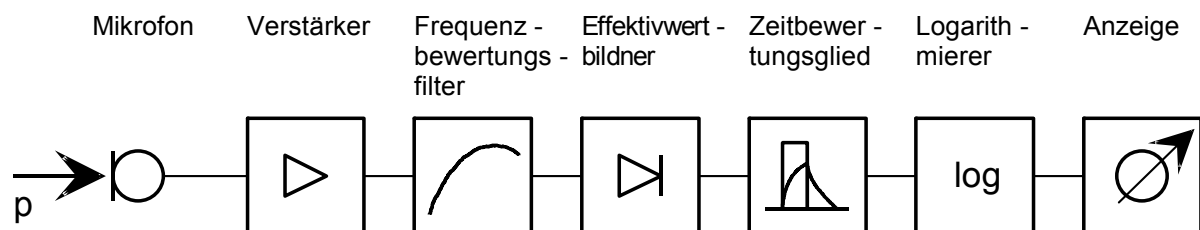
Vom Ergebnis einer Lärmpegelmessung wird erwartet, dass die Messwerte eine allgemeine Aussagekraft besitzen und sowohl untereinander als auch mit den vorgegebenen Auslösewerten und maximal zulässigen Expositionswerten vergleichbar sind.

Die Schallpegelmesser werden im Wesentlichen in drei Gruppen unterteilt. Es gibt die Gruppe der konventionellen Schallpegelmesser, die der integrierenden mittelwertbildenden Schallpegelmesser und die der Lärmdosimeter. Für die Lärmessungen am Arbeitsplatz können sowohl die integrierenden mittelwertbildenden Schallpegelmesser nach DIN EN 61672-1 [15] als auch die am Körper zu tragenden Lärmdosimeter nach DIN EN 61252 [45] eingesetzt werden.

Die Normen DIN EN 61672-1 und DIN EN 61252 bilden aus der Sicht der Autoren den aktuellen Wissensstand der Messtechnik zur Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz ab. Folgerichtig kann davon ausgegangen werden, dass Geräte, die die Anforderungen der beiden Normen erfüllen, den Stand der Technik repräsentieren.

### 5.2 Integrierender Schallpegelmesser

Im Allgemeinen entspricht ein Schallpegelmesser einer Kombination aus einem Mikrofon, einem Signalprozessor und einer Anzeigevorrichtung. Der typische Aufbau eines Schallpegelmessers ist in Abb. 5.1 skizziert.



**Abb. 5.1** Komponenten eines Schallpegelmessers (von links nach rechts: Mikrofon, Vorverstärker, A, C oder Bandpassfilter, Effektivwertbildner, Zeitbewertungsglied (Zeitkonstanten), Logarithmierer und Anzeige)

Wesentliche Merkmale und Anforderungen an Schallpegelmesser sind in DIN EN 61672-1 [15] definiert. Schallpegelmesser gemäß EN 61672-1:2003 sind demnach dazu bestimmt, Schall zu messen, der allgemein im Bereich des menschlichen Hörvermögens liegt. In der Norm werden zwei Leistungsklassen von Schallpegelmessern festgelegt: Klasse 1 und Klasse 2.

Den Schallpegelmessern der Klasse 1 und Klasse 2 liegen im Allgemeinen die gleichen Auslegungszielwerte zu Grunde. Nur die Grenzabweichungen und der Bereich der Betriebstemperaturen unterscheiden sich. Für Klasse 1 werden dieselben oder geringere Grenzabweichungen wie für Klasse 2 gefordert.

Für die Lärmmessungen am Arbeitsplatz sind sowohl die Geräte der Klasse 1 als auch die der Klasse 2 geeignet. Wie im Abschnitt 6.7 gezeigt, sind jedoch bei bestimmten Messungen, wie z. B. bei der Messung von Lärmimpulsen, bei hochfrequentem und schmalbandigen Lärm sowie bei Messungen bei niedrigen Temperaturen unter dem Nullpunkt Messgeräte der Klasse 1 zu verwenden.

Generell ist zu beachten, dass die Auswahl des Messgerätes die Unsicherheit der Messungen beeinflusst.



**Abb. 5.2** Integrierende Schallpegelmessern der Klasse 1 (von links nach rechts: B&K 2250; CEL 430/1)

### 5.3 Lärmdosimeter

Die Anforderungen an Lärmdosimeter sind in DIN EN 61252 [45] festgelegt.

Ein Lärmdosimeter ist dazu vorgesehen, die Schallexposition als das Zeitintegral des Quadrats des momentanen A-frequenzbewerteten Schalldrucks zu messen.

Die Hauptanwendung eines Lärmdosimeters besteht in der Messung der Schallexposition in der Nähe des Kopfes einer Person. Das Mikrofon des Dosimeters kann dabei auf der Schulter, dem Kragen oder an anderer Stelle nahe dem Ohr getragen werden. In vielen praxisüblichen Situationen ist es jedoch – z. B. aufgrund von Abschattungseffekten – wahrscheinlich, dass sich die Schallexposition, die das Gerät anzeigt, das von einer Person getragen wird, von der unterscheidet, die in Abwesenheit der Person gemessen würde. Dies ist bei der Beurteilung der gemessenen Schallexposition zu berücksichtigen.

Bei der Ausführung von Lärmdosimetern kann man generell unterscheiden zwischen Aggregaten mit Anzeige und Mikrofonverlängerungskabel, mit denen das Messmikrofon an der „Normposition“ auf der Schulter des zur Ermittlung der relevanten Messparameter ausgewählten Mitarbeiters befestigt wird, sowie eigenständigen Messkapseln (DoseBadges), die es sowohl mit als auch ohne Anzeige gibt und die als „Klette“ auf der Schulter des Mitarbeiters an der Messposition befestigt werden.

Die Auswertung erfolgt bei den Dosimetern entweder direkt im Gerät und/oder nachgeschaltet im PC/Laptop.

Personenschallexposimeter bzw. Lärmdosimeter inklusive Mikrofon und Mikrofonkabel müssen den Anforderungen der DIN EN 61252 entsprechen. Auch hier gilt, dass Lärmdosimeter, welche die Anforderungen der Klasse 1 erfüllen, bevorzugt einzusetzen sind und generell benutzt werden sollten, falls Lärm mit dominierenden hohen Frequenzen gemessen werden muss oder sehr niedrige Temperaturen vorliegen.

Für Lärmdosimeter lässt die DIN EN 61252 relativ große Grenzabweichungen für Frequenzen oberhalb von 4000 Hz zu. Dies kann zu einer ungenauen Erfassung von hochfrequenten Geräuschen führen. Um die Unsicherheit bei der Messung eines Geräusches mit dominierenden hochfrequenten Anteilen zu reduzieren, kann es notwendig sein, ein Messgerät einzusetzen, für das der Hersteller bei hohen Frequenzen einen engeren Toleranzbereich angibt. Alternativ kann ein Schallpegelmesser der Klasse 1 nach IEC 61672-1 ausgewählt werden. Lärmdosimeter können darüber hinaus eine Messbereichsschwelle bei rund 70 dB haben. Es sollte demzufolge jeweils geprüft werden, ob dies das Messergebnis beeinflusst.

Bei der Verwendung von Dosimetern können unerwünschte Nebengeräusche, wie die (eigene) Sprache, Geräusche von Radios etc. in den Messwerten enthalten sein.



**Abb. 5.3** Lärmdosimeter der Klasse 1 und 2 (von links nach rechts: Noise Pro DLX-1 (Klasse 1); Brüel & Kjaer 4444 (Klasse 2); CR 110 A-Aufnehmer (Klasse 2))

## 5.4 Schallkalibrator

Die Anforderungen an Kalibratoren sind in DIN EN 60942 [29] genannt.

Kalibratoren sind demnach dafür ausgelegt, einen bekannten oder mehrere bekannte Schalldruckpegel bei einer oder mehreren Kennfrequenzen zu erzeugen, wenn sie an festgelegte Mikrofonbauarten in festgelegten Ausführungsformen angekoppelt werden. Der von einem Schallkalibrator erzeugte Schalldruckpegel kann von Umgebungsparametern wie statischem Luftdruck, Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte abhängen.

Auch Kalibratoren werden gemäß DIN EN 60942 in unterschiedliche Klassen eingeteilt (Klasse LS mit den geringsten Grenzabweichungen sowie Klasse 1 und Klasse 2).

Schallkalibratoren werden gemäß DIN EN 60942 hauptsächlich in zwei Anwendungsfällen eingesetzt:

- zur Bestimmung des elektroakustischen Druck-Übertragungskoeffizienten von festgelegten Mikrofonbauarten in festgelegten Ausführungsformen,
- zur Überprüfung oder Einstellung des Gesamtübertragungskoeffizienten von akustischen Messgeräten oder Messeinrichtungen.



**Abb. 5.4** Schallkalibratoren der Klasse 1 (von links nach rechts: B&K 4231; Larson Davis CAL250; Cassella CEL-110/1)

## 5.5 Forderungen an akustische Geräte zur Messung der Lärmexposition

Schallpegelmessgerät und Lärmdosimeter, die zur Bestimmung des Lärmexpositionspegels verwendet werden, sollten folgende Eigenschaften aufweisen:

- integrierend (mittelwertbildend)
- Klasse: 1 oder 2
- Darstellung des Pegel-Zeitverlaufs
- Aufnahme spektraler Daten – Terz-/ Oktavverlauf
- Frequenzbewertungen: A und C
- primärer Messbereich: 30 - 140 dB
- Messbereich für  $L_{C,peak}$ : - 150 dB
- Dynamik:  $\geq 70$  dB
- Frequenzbereich: 31,5 Hz – 12,5 kHz
- Zeitbewertungen: S, F, (I), peak
- Messgrößen:  $L_{Aeq}$ ,  $L_{C,peak}$
- Schnittstelle für PC
- ggf. Eichfahigkeit

Die Schallmessgerate sollten generell in der Lage sein, die A-bewerteten Pegel  $L_{Aeq}$  und den Spitzenschalldruckpegel  $L_{C,peak}$  gleichzeitig zu messen.

Auf eine ausreichende Möglichkeit zur Aussteuerung des Gerätes ist zu achten, insbesondere um auch die Lärmexposition durch impulshaltige Geräusche korrekt erfassen zu können.

In der DIN EN ISO 9612 [5] sind zudem Anforderungen hinsichtlich der regelmäßigen Überprüfung der Messgeräte spezifiziert.

Demnach ist die Übereinstimmung des Kalibrators mit DIN EN 60942 und der gesamten Messgeratekette mit IEC 61672-1, IEC 61252 oder anderen relevanten Normen in bestimmten Zeitabständen durch ein qualifiziertes Laboratorium zu überprüfen, das die Rückführung von Kalibrierungen auf geeignete Normale sicherstellt. Zudem wird empfohlen, den Schallkalibrator und die Übereinstimmung des Messsystems mit den Anforderungen der IEC 61672-1 in Zeitabständen von nicht mehr als zwei Jahren überprüfen zu lassen, sofern nationale Bestimmungen nichts anderes vorschreiben. Das Datum der letzten periodischen Überprüfung und der Name des ausführenden Laboratoriums sind zu erfassen und im Messbericht anzugeben.

Für bestimmte Messaufgaben kann die Verwendung eines geeichten Schallmessgerates gesetzlich vorgeschrieben sein, z. B., wenn es sich um öffentliche Überwachungsaufgaben oder Gutachten im Rahmen von gerichtlichen Verfahren handelt.



## 6 Messunsicherheiten bei Schallpegelmessungen

### 6.1 Messgrößen

Wenn in der Lärmmesstechnik mit Schallpegeln statistische Berechnungen durchgeführt werden sollen, bestehen häufig Bedenken, ob der „Schallpegel“ im physikalischen Sinn die geeignete Messgröße zur Berechnung statistischer Maßzahlen ist oder ob nicht die „reine“ physikalische Größe wie die „Schallintensität“ oder der „Schalldruck“ den Berechnungen zugrunde zu legen ist. Im Folgendem wird daher erläutert, dass der „Schallpegel“ eine physikalische Messgröße ist, mit der zweckentsprechend auch statistische Untersuchungen durchgeführt werden können.

Nach DIN 1319-1 [24] bedeutet „Messung“ das Ausführen von geplanten Tätigkeiten zur Ermittlung der Messgröße mit seiner Einheit. Vor jeder Messung muss daher die Frage beantwortet werden, welche Messgröße zu erfassen ist. Die Wahl der Messgröße beeinflusst entscheidend das Messverfahren. Die Messung einer physikalischen Größe besteht in einem Vergleich der zu messenden Größe mit einer zuvor willkürlich festgelegten Einheit und der Ermittlung des dazugehörigen Zahlenwertes, der angibt, wie oft die Einheit in der zu messenden Größe enthalten ist. Jede physikalische Größe ( $G$ ) kann deshalb dargestellt werden als Produkt aus einem Zahlenwert  $\{G\}$  und der Einheit  $[G]$ :

$$\text{physikalische Größe} = \text{Zahlenwert} \times \text{Einheit}$$

Die Gleichung lautet dann:

$$G = \{G\} \cdot [G]. \quad (6.1)$$

Bei Messungen können nur gleichartige Eigenschaften miteinander verglichen werden, d. h. die Schallintensität eines Schallfeldes an einem bestimmten Ort kann nur mit einer Einheit gleicher Eigenschaften, also einer Schallintensitäteneinheit, verglichen werden.

Innerhalb einer Zeit ( $T$ ) werden in der Schallmesstechnik Schallfeldgrößen gemessen. Sie sind abhängig vom Ort (Ortskoordinaten  $x, y, z$ ) und dem Zeitpunkt ( $t$ ).

#### Zeit

$t$  in s

#### Messort

$x, y, z$  in m

Die üblichen physikalischen Messgrößen im Luftschallfeld sind:

**Schalldruck  $p = p(x, y, z, t)$**

Effektivwert des Schalldruckes

$$\tilde{p} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad \text{in Pa} \quad (6.2)$$

**Schallschnelle  $v = v(x, y, z, t)$**

Effektivwert der Schallschnelle

$$\tilde{v} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad \text{in m/s} \quad (6.3)$$

**Schallintensität  $I = I(x, y, z, t)$**

Momentane Schallintensität einer ebenen Welle

$$I = \tilde{v} \cdot \tilde{p} \quad \text{in W/m}^2 \quad (6.4)$$

Diese Größen sind die Basismessgrößen der Akustik. Eine Messgröße kann im Allgemeinen auch von mehreren physikalischen Größen abhängen, insbesondere kann sie, wie oben gezeigt, zeit- und/oder ortsabhängig sein. Aus den Basisgrößen lassen sich abgeleitete physikalische Größen angeben. Das sind beispielsweise die Schallleistung  $P$ , die Schallintensität  $I$ , die Schallenergiegedichte  $E$  usw.

Schallfeldgrößen werden nicht als Basismessgröße, wie z. B. Schalldruck  $p$  in Pa vom Schallpegelmessgerät angezeigt, sondern als Schallpegel. Die Messung des Schalldruckpegels an einem bestimmten Ort, hervorgerufen durch eine Schallquelle, ist der einfache Fall der unmittelbaren Messung einer physikalischen Schallfeldgröße.

Wird besonders auf die zeitliche Mittelung hingewiesen, so wird der Mittelungspegel „äquivalenter Dauerschallpegel  $L_{\text{eq}}$ “ genannt. Das ist der Pegel des über die Messzeit oder Bezugszeit  $T$  zeitlich gemittelten Schalldruckquadrates

$$L_{\text{eq}} = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,1L(t)} dt \right) = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{T \cdot p_0^2} \int_0^T p^2(t) dt \right) \quad \text{in dB.} \quad (6.5)$$

Würde man zur Berechnung von statistischen Maßzahlen eine Umrechnung des Schallpegels in die eigentliche physikalische Größe, z. B. Schalldruck oder Intensität, vornehmen, so würde das für den Messtechniker im Hinblick auf die Messung und Auswertung einen wesentlich höheren Aufwand bedeuten als bisher.

**Es wird daher in unseren weiteren Betrachtungen als physikalische Größe der Schalldruckpegel  $L$  (kurz „Schallpegel“) als Messgröße verstanden. Nach dem bisher Gesagten handelt es sich deshalb um eine physikalische Messung.**

Definitionsgemäß ist Lärm jedoch Schall, der stört oder belästigt oder das psychische und physische Wohlbefinden beeinträchtigt oder die Gesundheit sogar schädigen kann. Der Begriff des Lärms ist also unmittelbar mit dem Menschen verknüpft. Das heißt, Lärm an sich, ohne Bezug auf den Menschen, kann es rein formal nicht geben. Es handelt sich dann um Schall. Bei Lärmmessungen sind die Frequenz- und Zeitbewertungen entsprechend den physiologischen Gegebenheiten des Menschen zu berücksichtigen.

Physikalische Schallmessung und Lärmmessung unterscheiden sich darin, dass bei der Lärmmessung die physikalische Größe und deren gleichzeitige Bewertung entsprechend den menschlichen Empfindungen eine geschlossene Einheit bilden. Dies ist der entscheidende Unterschied zwischen Schallmessung und Lärmmessung.

Es wird daher bei den hier zu betrachtenden Messungen zur Lärmexposition der bewertete Schallpegel als physikalische Größe zugrunde gelegt und in folgender Form angegeben:

$$L_{XY} = \{L_{XY}\} [L_{XY}] \quad (6.6)$$

- X Frequenzbewertung „A“ oder „C“
- Y Zeitbewertung „F“, „S“ oder „peak“

Messgrößen der Lärmexposition sind im Allgemeinen der Mittelungspegel oder äquivalente Dauerschallpegel  $L_{AFm} = L_{eq} = L_{ASm}$  und der Spitzenschalldruckpegel  $L_{pC,peak}$ .

In Bezug auf die LärmVibrationsArbSchV hat man es mit speziellen Messgrößen zu tun. Nach den Grundsätzen der Messtechnik muss die Messgröße selbst nicht unmittelbarer Gegenstand der Messung sein. Sie kann auch indirekt über bekannte **physikalische oder festgelegte mathematische Beziehungen** mit denjenigen Größen zusammenhängen, denen die unmittelbaren Messungen gelten.

Beträgt die Messzeit  $T_M$  zur Ermittlung des äquivalenten Dauerschallpegels nach Gl. 6.5  $T_M = 8$  h bzw.  $T_M = 40$  h, so ergibt sich als Messgröße der Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{Ex,8h}$  bzw. der Wochen-Lärmexpositionspegel  $L_{Ex,40h}$ .

## 6.2 Begriffe

### Messwert

Zahlenwert, der zur Messgröße gehört und der Ausgabe eines Schallpegelmessers oder einer Schallpegelmesseinrichtung eindeutig zugeordnet ist.

## Messergebnis

Aus den Werten der Lärmpegelmessung gewonnener Schätzwert für den wahren Wert der Messgröße „*Lärmexpositionspegel*  $L_{EX}$ “. Er stellt das Resultat der Messung dar. Die Bestimmung des „*wahren Lärmexpositionspegels*  $L_{EX}$ “ erfolgt durch die Anwendung statistischer Schätzmethoden.

Die Grundlage für das Schätzen des „*wahren Lärmexpositionspegels*  $L_{EX}$ “ sind die aus der Messung gewonnen einzelnen Messwerte des Schallpegels und die bekannten systematischen Abweichungen, auch bekannte physikalische Beziehungen und sonstige Kenntnisse und Erfahrungen.

Vielfach wird das Messergebnis aus einem oder mehreren Messwerten gleicher oder verschiedener Größenarten ermittelt. Bereits ein einzelner Schallpegel ( $L_{AFm} = L_{eq} = L_{AS}$ ) oder Spitzenschalldruckpegel  $L_{pC,peak}$  kann das Messergebnis sein.

## Messobjekt

Träger der Messgröße. Messobjekte können Vorgänge oder Zustände sein. Bei den Lärmmessungen wird hier unter Messobjekt das zeit- und ortsabhängige Schallfeld an den Arbeitsorten von Menschen verstanden. Für die Messgröße „Schallpegel“ eines vorliegenden Schallfeldes ist der „Zustand des Schallfeldes“ selbst das Messobjekt.

## Messprinzip

Das Messprinzip bildet die physikalische Grundlage der Messung. Es erlaubt es, anstelle der Messgröße auch eine andere Größe zu messen, um aus deren Wert eindeutig den Wert der Messgröße zu ermitteln. Es beruht auf einer immer wieder herstellbaren physikalischen Erscheinung mit bekannten Gesetzmäßigkeiten zwischen der Messgröße und den anderen Größen. Gemessen wird der Schallwechseldruck, der im Schallpegelmesser zeit- und frequenzbewertet wird. Der Schallpegelmesser verarbeitet diese Werte zu einem bewerteten Schallpegel.

Die Messprinzipien zur Messung des Schallpegels können beispielsweise umgesetzt werden durch die Anwendung von Schallpegelmessgeräten, Schallexpositionsdosimetern, integrierenden Schallpegelmessern und Frequenzanalytoren unter Verwendung von Kondensatormikrofonen, piezoelektrischen Mikrofonen oder Elektretmikrofonen.

Die Zeitermittlungen erfolgen nach analytisch-experimentellen und analytisch-rechnerischen Messprinzipien.

## Messmethode

Vorgehensweise bei der Lärmmessung, die unabhängig vom Messprinzip ist. Sie dient der Messwertgewinnung und -auswertung.

### *Lärmessmethoden*

Bei der Messung des Lärms kennt man allgemein folgende Methoden:

1. Kontinuierliche Messungen über einen Gesamtmesszeitraum, z. B. über eine Arbeitsschicht,
2. Kontinuierliche Messungen mit der Zerlegung des Gesamtmesszeitraumes in Teilmesszeiten,
3. Stichprobenmessungen von Einzelschallpegeln  $L_{Ai}$  oder Kurzzeit- $L_{pAeqi}$  zur Ermittlung des äquivalenten Dauerschallpegels  $L_{pAeq}$  für eine Arbeitsschicht unter Anwendung statistischer Methoden.

### *Zeitermittlungsmethoden (aufgabenbezogen)*

Bei der Zeitermittlung werden analytisch-experimentelle Methoden und analytisch-rechnerische Methoden angewendet.

#### *Analytisch-experimentell durch Fremdaufschreibung des Untersuchers*

1. Manuelle Zeiterfassung am Arbeitsplatz (Stoppuhr),
2. Zeiterfassung mit Hilfe statistischer Verfahren
  - A. Multimoment Häufigkeitsverfahren (MMH)
  - B. Multimoment Zeitmessverfahren (MMZ)),
3. Interviewmethode.

#### *Analytisch-experimentell durch Selbstaufschreibung*

1. Durch die Arbeitsperson unter Zuhilfenahme von Tätigkeitslisten mit Angabe der Dauer und Häufigkeit der Vorkommnisse.
2. Durch Arbeitsmittel mit Hilfe von Aufzeichnungsgeräten (z. B. Computerlogfiles).

#### *Analytisch-rechnerisch*

1. Durch Vergleichen und Schätzen, z. B. Vergleich des Arbeitsablaufes, für den die Zeit zu ermitteln ist, mit ähnlichen Arbeiten, für die Zeiten vorliegen. Alternativ kann beim Schätzen die Soll-Zeit für den Arbeitsablauf auch aus der Erinnerung oder Erfahrung bestimmt werden.
2. Durch bereits festgelegte Planzeiten, Richtzeiten, Normzeiten.
3. Durch Berechnen von Prozesszeiten.

### **Messverfahren**

Ist die praktische Anwendung des vorgegebenen Messprinzips und einer Messmethode. Es legt Vereinbarungen fest, unter welchen Versuchsbedingungen die Messwertgewinnung und -auswertung stattfinden und die definierte Größe gemessen werden soll.

## Messunsicherheit $\Delta L_U$

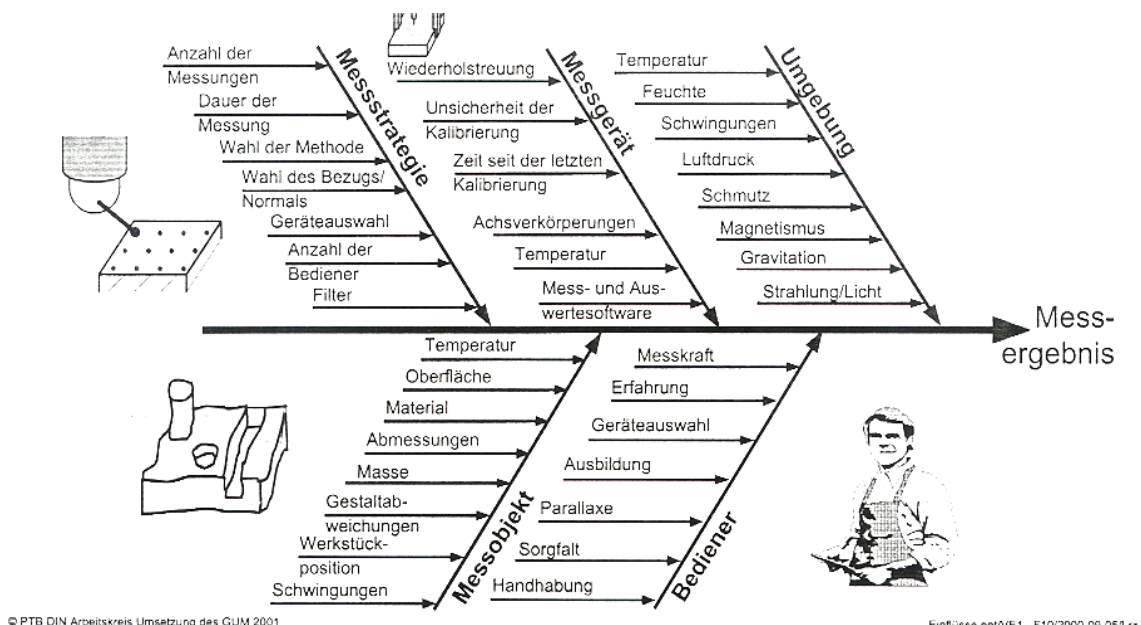
Sie ist ein Kennwert, der zusammen mit dem Messergebnis zur Kennzeichnung eines Wertebereichs für den wahren Wert der Messgröße dient. Die Messunsicherheit charakterisiert die Streuung des Lärmexpositionspegels.

Zu jeder Ermittlung des Tages-Lärmexpositionspegels  $L_{EX,8h}$  ist die Messunsicherheit  $\Delta L_U$  anzugeben. Die Messgrößen - hier: Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  und Wochen-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,40h}$  und der Spitzenschalldruckpegel  $L_{pC,peak}$  - werden in Verbindung mit den Messunsicherheiten nach den Gleichungen 6.61 bis 6.63 in Abschnitt 6.8.5 angegeben.

## 6.3 Unsicherheiten beim Messen

### 6.3.1 Ursachen

Jedes Messergebnis einer Messgröße wird in der Regel beeinflusst durch die in Abb. 6.1 gezeigten Einflusskomponenten. Danach werden Unsicherheiten hervorgerufen durch die Unvollkommenheit des Messverfahrens, des Messgerätes und des Messobjektes. Außerdem besteht eine Beeinflussung der Messgröße durch Umgebungseinflüsse und dem Verhalten des Untersuchers, wobei sich auch alle zeitlichen Änderungen dieser Einflüsse auswirken. In dem weiter unten beschriebenen Verfahren sind dann die allgemeinen Einflusskomponenten für die Ermittlung der Lärmexposition konkret angegeben. Die Messunsicherheit ergibt sich aus den systematischen und zufälligen Abweichungen während der Messung.



**Abb. 6.1** Einflusskomponenten auf die Unsicherheit von Messergebnissen, nach [25]

### 6.3.2 Systematische Abweichungen

Treten durch bestimmte Ursachen immer in gleicher Weise Messabweichungen auf, so heißen sie systematische Abweichungen. Es gibt,

1. systematische Abweichungen, die während der Messung einen konstanten Betrag und ein **bestimmtes** Vorzeichen (entweder „+“ oder „-“) haben. Ursache dafür kann die falsche Justierung des Messgerätes oder ein in einer Richtung falsch tendierendes Messgerät oder eine Messmethode sein.
2. systematische Abweichungen, die durch die Messung nicht erfasst werden können und ein **unbestimmtes** Vorzeichen haben. Diese werden beispielsweise hervorgerufen durch Umwelteinflüsse wie z. B. die Temperatur, die Feuchtigkeit, die Abnutzung, die Alterung sowie die subjektive Einschätzung von Beobachtern, z. B. das Ablesen von Zahlenwerten von Messinstrumenten usw.

Durch einfache Wiederholung gleichartiger Messungen lassen sich systematische Abweichungen nicht erkennen.

Die Höhe des Schallpegels und andere akustische Größen der Geräuschquellen hängen entscheidend vom Aufbau, der räumlichen Umgebung und den Betriebsbedingungen ab. Diese Abhängigkeiten können in systematischen Abweichungen erkannt werden. Beispielsweise bei den zu untersuchenden Schallquellen in Arbeitsstätten ist aus der Erfahrung bekannt, dass gerade die mechanische Leistung mit der akustischen Leistung eng verknüpft ist. Es gibt den direkten Zusammenhang: Anstieg mechanischer Leistung bewirkt einen Anstieg der akustischen Leistung und umgekehrt. Daher spielt die Betriebsweise von Maschinen und Anlagen eine wichtige Rolle. Man weiß, dass in der Regel eine 100%ige Auslastung der Maschine in einer Arbeitsstätte einen höheren Schallpegel erzeugt als eine 75%ige oder sogar nur 50%ige Auslastung.

Damit ist die Richtung des Vorzeichens der systematischen Abweichung bekannt. Man kann prinzipiell davon ausgehen, dass bei einer geringeren Leistung der Anlage auch der Schallpegel niedriger ist, und das gilt auch im umgekehrten Fall. Ähnliches Verhalten zeigen in der Regel auch die Band- und Taktgeschwindigkeiten von Arbeitsbändern.

Die Größe der systematischen Abweichungen wird in den meisten Fällen unterschätzt. Die genaue Ermittlung der systematischen Abweichungen ist jedoch nur teilweise möglich. Sie lassen sich oft nicht getrennt bestimmen. **Soweit systematische Abweichungen nach dem Vorzeichen ermittelt werden können, sind die Messwerte entsprechend zu korrigieren [11]**

Die nicht erfassten systematischen Abweichungen, zu denen auch die zugelassenen Toleranzen der Messgeräte zu rechnen sind, sind entweder dem Betrag nach bekannt oder müssen eingeschätzt werden. **Wegen des unbestimmten Vorzeichens können die Messwerte jedoch nicht mit ihnen korrigiert werden, sondern diese Abweichungen gehen in die Messunsicherheit mit ein.**

### 6.3.3 Zufällige Abweichungen

Durch nicht erfassbare Änderungen

- der Messmethode,
- des Messgerätes/der Messanordnung,
- des Messobjektes (veränderlicher Zustand des Schallfeldes),
- der Messumgebung und
- der Messperson

treten zufällige Abweichungen auf. Die Hauptursachen für solche zufälligen Abweichungen sind im Grunde die gleichen wie für die systematischen Abweichungen. Jedoch sind hier die Einflusskomponenten nicht erfassbar und ergeben keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung.

Oft gelingt es jedoch durch genauere Beobachtungen, die Ursachen von zunächst für zufällig gehaltene Abweichungen aufzudecken und diese dann erfassten systematischen Abweichungen zuzuordnen und korrigierbar zu machen.

Die wichtigsten Ursachen für die zufälligen Abweichungen bei akustischen Messungen liegen im Messobjekt (Zustand des Schallfeldes) selbst. Bei den hier zu betrachtenden Messobjekten handelt es sich bei der Messung in der Regel um stochastische Vorgänge, bei denen die Messgröße eine Zufallsvariable ist, d. h. das Messobjekt unterliegt häufig zeitlichen und örtlichen Schwankungen, und damit auch die Messgröße selbst. Dies ist ein starkes charakteristisches Merkmal zufälliger Abweichungen.

Unter solchen Bedingungen ist es nicht mehr möglich, von einem sog. *wahren Wert* der Messgröße zu sprechen, sondern die Messgröße lässt sich nur noch durch statistische Parameter beschreiben. D. h. nicht beherrschbare und nicht einseitig gerichtete Einflusskomponenten während mehrerer Messungen am selben Messobjekt innerhalb einer Messreihe führen zu Streuungen der Messwerte um einen Mittelwert der beobachteten Messreihe und damit zu stark zufälligen Abweichungen der Messwerte in einem Bereich, als dessen Schätzwert der Mittelwert angesehen wird. Für zufällige Abweichungen lassen sich zwar grundsätzlich die Ursachen ermitteln, ihr Betrag und ihr Vorzeichen lassen sich, da es sich um Zufallsvariablen handelt, jedoch nicht vorhersagen. Damit können natürlich auch die Messwerte nicht korrigiert werden, sie bleiben daher unsicher. Diese Abweichungen/Zufallsstreuungen gehen in die Messunsicherheit des Messergebnisses ein und können durch geeignete statistische Größen gekennzeichnet und durch einen Schätzwert zahlenmäßig angegeben werden. Voraussetzung ist, dass genügend Messwerte vorliegen. Die Theorie für die Behandlung zufälliger Abweichungen wird von der mathematischen Statistik bereitgestellt.



## 6.4 Versuchsbedingungen

Die Einflusskomponenten der Untersuchung sind so exakt wie möglich zu erfassen. Eine Abschätzung der Unsicherheit ist nur möglich, wenn die Einflusskomponenten quantitativ bekannt sind oder die Bedingungen sich nicht ändern. Falls sich die Bedingungen ändern, müssen die Messungen unter den neuen Verhältnissen wiederholt und eine neue Messunsicherheit ermittelt werden.

Bei der Auswahl des Messtages wird daher unterstellt, dass an allen Tagen der Woche näherungsweise gleich gearbeitet wird und die Betriebsbedingungen ähnlich sind. Dies kann man absichern, indem man einen repräsentativen Arbeitstag auswählt. Damit werden die Restunsicherheiten in Grenzen gehalten. Sollten diese Bedingungen nicht eingehalten werden können und unterscheiden sich die Tages-Lärmexpositionspegel von Schicht zu Schicht sehr stark, so besteht die Möglichkeit, die Messgröße für eine Arbeitswoche zu bestimmen.

## 6.5 Bestimmung der Messunsicherheit auf der Grundlage der DIN V EN V 13005 (GUM-Modell)

### 6.5.1 Definitionen

Die im Zusammenhang mit der Berechnung der Messunsicherheit verwendeten Begriffe sind [11] entnommen und werden entsprechend verwendet. Die wichtigsten Begriffe sind nachfolgend mit ihrer Definition aufgeführt.

- Unsicherheit des Messergebnisses:  
Dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden kann.
- Erweiterte Messunsicherheit (Symbol  $U$ ):  
Kennwert, der einen Bereich um das Messergebnis kennzeichnet, von dem erwartet werden kann, dass er einen großen Anteil der Verteilung der Werte umfasst, die der Messgröße vernünftigerweise zugeordnet werden können.
- Standardunsicherheit (Symbol  $u$ ):  
Als Standardabweichung ausgedrückte Unsicherheit des Ergebnisses einer Messung.
- Kombinierte Standardunsicherheit (Symbol  $u_c$ ):  
Standardunsicherheit eines Messergebnisses, wenn dieses Ergebnis aus den Werten einer Anzahl anderer Größen gewonnen wird. Sie ist gleich der positiven Quadratwurzel einer Summe von Gliedern, wobei die Glieder die Varianzen  $u^2$  dieser anderen Größen danach gewichtet sind, wie das Messergebnis mit Änderungen dieser Größen variiert.
- Erweiterungsfaktor (Symbol  $k$ ):  
Zahlenfaktor, mit dem die kombinierte Standardunsicherheit multipliziert wird, um eine erweiterte Messunsicherheit zu erhalten.

- Sensitivitätskoeffizient:

Der Sensitivitätskoeffizient ist die partielle Ableitung der Ergebnisfunktion nach einer Eingangsgröße bei dem Wert der Eingangsgröße. Bei den hier durchgeführten Berechnungen der kombinierten Standardunsicherheit wird jede (Einzel-)Standardunsicherheit mit dem Sensitivitätsfaktor multipliziert, quadriert und dann mit den weiteren Beiträgen summiert. Die Wurzel aus dieser Summe ist dann die kombinierte Standardunsicherheit.

- Fehlergrenzen:

Der Begriff „Fehlergrenzen“ wird in [11] nicht verwendet. Die Fehlergrenzen sind die vereinbarten oder garantierten Höchstwerte für positive oder negative Abweichungen der Anzeige (Ausgabe) einer Messeinrichtung vom wahren Wert.

Fehlergrenzen sind begrifflich streng zu unterscheiden von den Messfehlern und der Messunsicherheit. Wenn im Folgenden der Begriff „Fehlergrenzen“ verwendet wird, so wird damit stets eine Rechteckverteilung der Messwerte assoziiert. Nach GUM kann aus einer Rechteckverteilung der Breite  $2a$  die Standardabweichung  $\sigma$  mit

$$\sigma = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

berechnet werden.

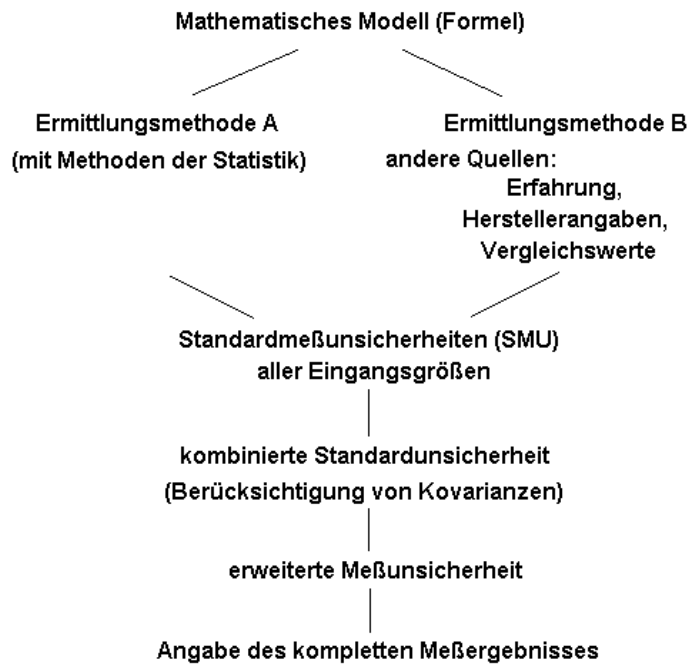
### 6.5.2 Grundlagen für die Bestimmung der Messunsicherheit

Die Qualität einer Messung besteht darin, wie genau der wahre Wert der Messgröße bestimmt werden kann. Die Berechnung der Messunsicherheit nach GUM geht von allgemeinen Regeln zur Ermittlung und Angabe der Messunsicherheit aus. Die GUM beschäftigt sich in erster Linie mit der Angabe der Unsicherheit bei der Messung einer wohldefinierten physikalischen Größe, der sogenannten Messgröße, die durch einen im Wesentlichen eindeutigen Wertebereich charakterisiert werden kann.

Die Methode zur Ermittlung der Angabe der Messunsicherheit eines Messergebnisses sollte nach DIN ENV 13005 [11] wie folgt beschaffen sein:

- Universell: Die Methode muss auf alle Arten von Messungen anwendbar sein.
- In sich konsistent: Die Größe, mit welcher die Messunsicherheit angegeben wird, muss sich direkt aus den zu ihr beitragenden Komponenten herleiten lassen und unabhängig von der Gruppierung dieser Komponenten und ihrer Zerlegung in Unterkomponenten sein.
- Übertragbar: Die für ein Messergebnis ermittelte Messunsicherheit muss direkt als Komponente zur Ermittlung der Messunsicherheit bei einer anderen Messung verwendet werden können, bei der das erste Ergebnis verwendet wird.

Abb. 6.2 zeigt in einer Gesamtübersicht die Methoden zur Ermittlung und Angabe der Unsicherheit.



**Abb. 6.2** Übersicht der Methoden zur Ermittlung und Angabe der Messunsicherheit und seiner Messgröße nach [11]

Zur Ermittlung der Messunsicherheit (erweiterte Messunsicherheit) sind folgende Schritte notwendig:

A) Modellbildung „ $f(X_i)$ “ beschreiben

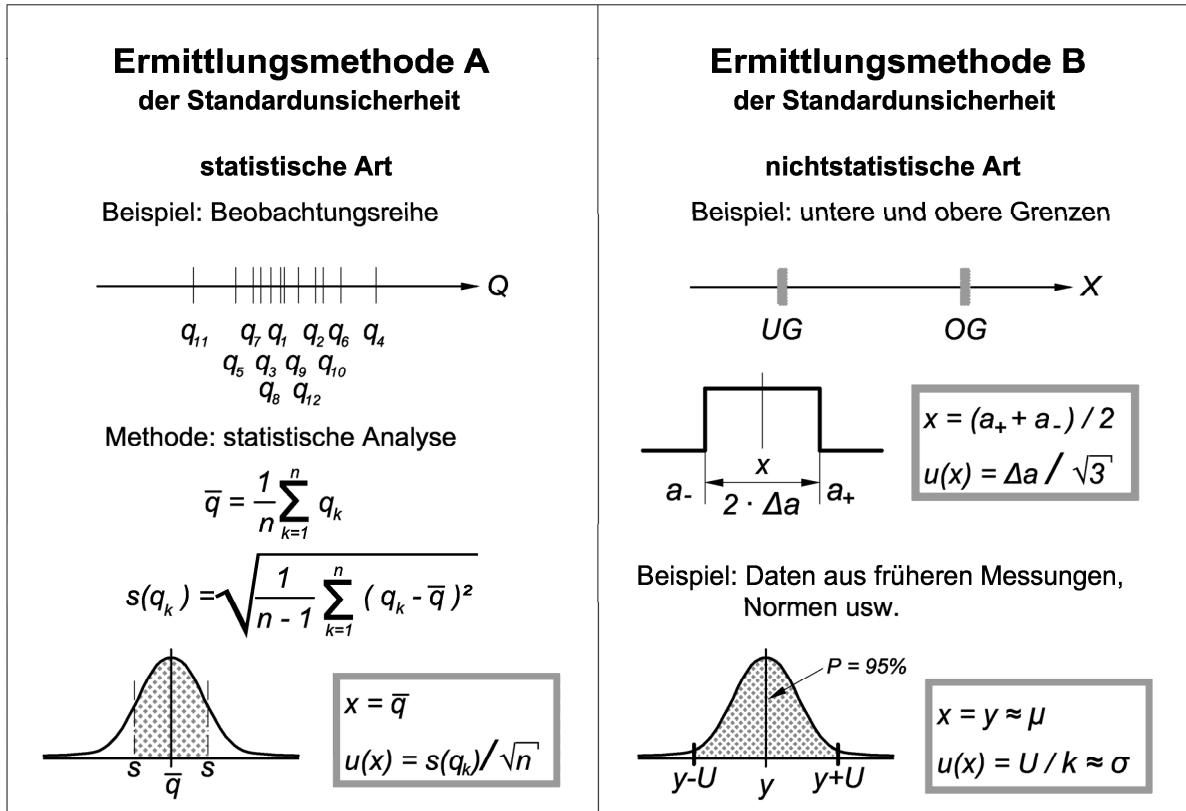
Der Messprozess ist in einem Modell zu beschreiben. Die Beziehung zwischen der Messgröße  $Y$  und den Eingangsgrößen  $X_i$ , von denen  $Y$  abhängt, ist anzugeben. Die Funktion  $f(X_i)$  muss jede Eingangsgröße, die eine wesentliche Komponente zur Unsicherheit des Messergebnisses darstellt, enthalten.

B) Eingangsgrößen  $X_i$  ermitteln

Durch eine statistische Analyse von Messwerten oder auf eine andere Art und Weise ermittelte Schätzwerte  $x_i$  der Eingangsgröße  $X_i$  sind zu ermitteln.

C) Standardunsicherheit „ $u(x_i)$ “ nach Methode A und/oder Methode B ermitteln

Die Standardunsicherheit  $u(x_i)$  für jeden Eingangsschätzwert  $x_i$  ist zu ermitteln. Liegen einzelne Messwerte vor, dann ist die Standardunsicherheit nach der Ermittlungsmethode A [11] zu berechnen. Liegen Eingangsschätzwerte vor, die auf eine andere Art und Weise gewonnen werden, dann wird die Standardunsicherheit nach der Ermittlungsmethode B [11] durchgeführt.



**Abb. 6.3** Übersicht zur Bestimmung der Standardunsicherheit nach der Ermittlungsmethode A und B nach [11]

D) Kombinierte Messunsicherheit „ $u_c(y)$ “ berechnen

Die kombinierte Messunsicherheit ist aus den extra bestimmten Empfindlichkeitskoeffizienten  $c_i$  und den Standardunsicherheiten der Eingangsgrößen  $u(x_i)$  zu berechnen.

E) Erweiterte Messunsicherheit „ $U$ “ angeben

Ist die Angabe einer erweiterten Unsicherheit  $U$  erforderlich, die den Zweck hat, einen Bereich von  $y - U$  bis  $y + U$  anzugeben, von dem erwartet werden kann, dass er einen großen Anteil der Verteilung von Werten umfasst, die der Messgröße  $Y$  sinnvollerweise zugeordnet werden können, so multipliziert man die kombinierte Standardunsicherheit  $u_c(y)$  mit einem Erweiterungsfaktor  $k$ .

F) Vollständiges Messergebnis „ $y \pm U$ “ angeben

Vollständige Angabe des Messergebnisses zusammen mit der erweiterten Unsicherheit  $U$ .

## 6.6 Analytisch-rechnerische Ermittlung der Messunsicherheit von Lärmmessungen

### 6.6.1 Berechnung der Standardunsicherheit aus statistischen Maßzahlen von Schallpegelstichproben – Ermittlungsmethode A

#### 6.6.1.1 Voraussetzungen

Mit Mitteln der Statistik soll die Standardunsicherheit aus der Standardabweichung der an einem Arbeitsplatz gemessenen Schalldruckpegel für den Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  und den Wochen-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,40h}$  berechnet werden.

Konzept 1:

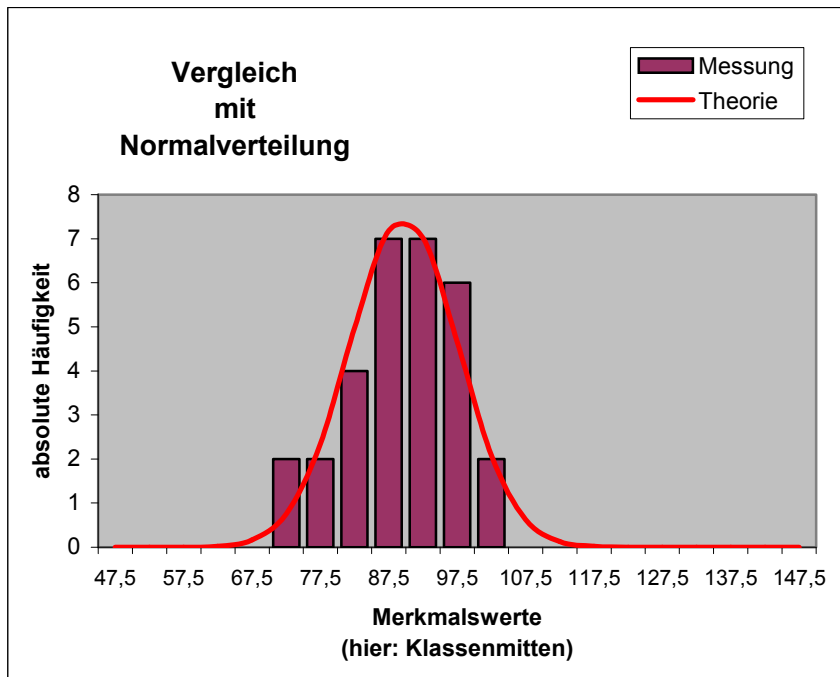
Dabei wird der Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  und der Wochen-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,40h}$  als Zufallsgröße behandelt und die  $N$  gemessenen Werte  $L$  als Stichprobe einer Grundgesamtheit angesehen. Für die Ermittlung eines Vertrauensbereiches nimmt man an, dass die Grundgesamtheit der o. g. Pegel normalverteilt ist. Diese Vorgehensweise entspricht der Ermittlungsmethode A nach GUM (siehe Abb. 6.3).

Für dieses Konzept werden in der Literatur plausible Begründungen genannt, u. a. von Kurze [33], Piorr [35] sowie von Probst und Donner [34]. Zudem wird im Bereich der Angabe von Geräuschemissionswerten, meist Schalleistungspegel oder Schalldruckpegel, stets von einer Normalverteilung der möglichen Ergebnisse bei der Anwendung der Norm, ausgegangen.

Konzept 2:

Demgegenüber wird in dem Verfahren der VDI 3723, Blatt 1 u. Blatt 2 ([36], [37]) das bezogene Schalldruckquadrat (Intensität) als Zufallsvariable betrachtet, bei der Berechnung von Vertrauensgrenzen wird dort angenommen, dass die intensitätsproportionalen Größen normalverteilt sind. Dieses Konzept wird u. a. von Martinez [38] und Heiß [39] angewendet.

Hier wird das Konzept 1 verwendet, das auf der Grundlage der Normalverteilung der Stichprobenwerte beruht. Es ist in der praktischen Durchführung einfacher und durchgängiger bei der Schätzung der Unsicherheiten von Messungen und die Unterschiede zu Konzept 2 sind im Allgemeinen nicht sehr groß. Beispielsweise zeigen sich bei der Prüfung der empirischen Verteilungen von Schallpegel-Messwerten an Arbeitsplätzen in einer Werkhalle gute Übereinstimmungen der Messwerte mit dem theoretischen Verlauf der Normalverteilung. Siehe beispielsweise in Abb. 6.4 den Vergleich der empirisch gewonnenen Häufigkeitsverteilung von Schallpegeln aus einer Stichprobe an einem Arbeitsplatz im Fertigungsmittelbau.



**Abb. 6.4** Vergleich der empirischen Verteilung von Schallpegel-Messwerten aus einer eigenen Stichprobe am Arbeitsplatz „Betriebsmittelwechsel“ mit der Normalverteilung

#### 6.6.1.2 Arithmetischer Schallpegel-Mittelwert $L_{\bar{x}}$

Der arithmetische Mittelwert ergibt sich aus:

$$L_{\bar{x}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n L_i \quad (6.7)$$

Für sehr viele Einzelmesswerte geht der Schallpegelmittelwert  $L_{\bar{x}}$  über in den Erwartungswert  $L_{\mu}$ . D. h.

$$L_{\mu} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n L_i \quad (6.8)$$

Im Folgenden wird aus Gründen der Übersichtlichkeit

$$L_{\bar{x}} = \bar{L} \quad (6.9)$$

gesetzt.

### 6.6.1.3 Schallpegel-Variationsweite $\Delta L_V$

Man erhält den ersten Aufschluss über die Streuung der Pegelmesswerte, indem man den kleinsten und größten Pegelwert der Messreihe betrachtet. Es kann angenommen werden, dass die Standardabweichung der Pegelwerte umso größer ist, je stärker diese voneinander abweichen.

Die Schallpegel-Variationsweite  $\Delta L_V$  ist die Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten Schallpegel einer empirischen Verteilung.

$$\Delta L_V = L_{\max} - L_{\min} \quad (6.10)$$

Der Vorteil liegt in ihrer leichten Verständlichkeit und Bestimmbarkeit. Sie ist für die Verwendung von Stichproben geeignet.

### 6.6.1.4 Standardabweichung der Schallpegel-Einzelwerte $\Delta L_{sL_i}$

Die Standardabweichung ist charakteristisch für die Streuung der Schallpegel  $L_i$ , die bei einer Schallmessung auftreten. Sie ist die wichtigste Rechengröße für die zahlenmäßige Abschätzung der zufälligen Abweichungen der Einzel-Schallpegel  $L_i$  einer Messreihe um ihren Schallpegel-Mittelwert  $\bar{L}$ .

$$\Delta L_{sL_i} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2} \quad (6.11)$$

Die Gl. 6.11 zeigt, dass die Abweichungen der Einzelwerte vom Mittelwert nicht mit dem gleichen Gewicht eingehen. Große Abweichungen vom Schallpegelmittelwert tragen stärker bei als kleine. Auf diese Weise wird eine Messreihe mit stark streuenden Schallpegelmesswerten durch einen großen Wert von  $\Delta L_{sL_i}$  bestimmt.

Wächst die Anzahl „n“ der Messungen bei gleichbleibenden Messbedingungen am gleichen Messobjekt, so strebt die Standardabweichung gegen einen Grenzwert. Dieser Grenzwert ist die Standardabweichung  $\sigma$  der Grundgesamtheit. In der hier üblichen Schreibweise gilt:

Für  $n \rightarrow \infty$  ist

$$\Delta L_{sL_i} = \Delta L_{\sigma} \quad (6.12)$$

### 6.6.1.5 Standardabweichung des Schallpegel-Mittelwertes $\Delta L_{s\bar{L}}$

Die Standardabweichung des Schallpegelmittelwertes wird nach folgender Beziehung berechnet:

$$\Delta L_{s\bar{L}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2} \quad (6.13)$$

Sie besitzt eine kleinere mittlere Abweichung als die Standardabweichung der Einzelmesswerte der Schallpegel  $L_i$ , d. h.  $\Delta L_{s\bar{L}} < \Delta L_{sL_i}$

Auf der Basis der Standardabweichung der Einzelwerte  $\Delta L_{sL_i}$  nach Gl. 6.11 kann die Standardabweichung des Schallpegelmittelwertes  $\Delta L_{s\bar{L}}$  in folgender Weise angegeben werden

$$\Delta L_{s\bar{L}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \Delta L_{sL_i} \quad (6.14)$$

Die Standardabweichung des Schallpegelmittelwertes aus „ $n$ “ Beobachtungen verhält sich also zur mittleren Abweichung der Einzelbeobachtung nach der Gesetzmäßigkeit wie  $\frac{1}{\sqrt{n}}$ .

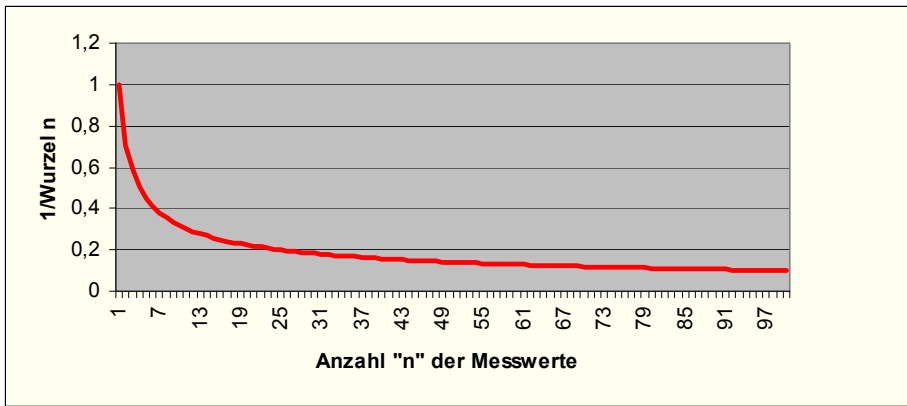
Standardabweichung des Schallpegelmittelwertes  $\Delta L_{s\bar{L}}$  aus einer Beobachtungsreihe entspricht der Ermittlung der Standardunsicherheit „ $u(x_i)$ “ nach der Methode A der GUM.

Durch die Vergrößerung der Anzahl der Messungen „ $n$ “ lässt sich die Genauigkeit des Mittelwertes vergrößern. Durch den Nenner  $\sqrt{n}$  wird allerdings bei einer Erhöhung von „ $n$ “ die Abnahme von  $\Delta L_{s\bar{L}}$  am Anfang schnell stattfinden, später aber immer langsamer vor sich gehen. Dazu siehe Abb. 6.5.

Soll beispielsweise die aus sechs Messungen berechnete mittlere Abweichung  $\Delta L_{s\bar{L}}$  des Mittelwertes auf die Hälfte reduziert werden, dann wären nach Abb. 6.5 25 Messungen nötig. Die Kurve zeigt, dass bei der Erhöhung der Stichprobenwerte bis ca.  $n = 30$  noch eine gute Verbesserung der Genauigkeit erzielt werden kann. Die Erhöhung der Stichproben oberhalb von  $n = 30$  führt offenbar zu keiner wesentlichen Verringerung der Standardunsicherheit.

Insofern ist es problematisch, bereits ungenaue Messungen mit hohen Stichprobenzahlen durch eine noch größere Anzahl von Beobachtungen bzw. Messungen ausgleichen zu wollen, um so die Standardunsicherheit zu verkleinern.





**Abb. 6.5** Funktionale Abhängigkeit der mittleren Abweichung  $\Delta L_{s\bar{L}}$  des Mittelwertes von der Anzahl der Messungen

### 6.6.2 Berechnung der Standardunsicherheit aus Schallpegelvariationsweiten für normalverteilte Schallpegel – Ermittlungsmethode B

Für die Schallpegelvariationsweite gilt nach Gleichung 6.10

$$\Delta L_v = L_{\max} - L_{\min} \quad \text{in dB.}$$

Für angenäherte normalverteilte Beobachtungen lässt sich auf der Grundlage der Schallpegelvariationsweite  $\Delta L_v$  die Standardabweichung  $\Delta L_{sL_i}$  wie folgt schätzen [41].

Es gilt für Stichproben bis  $n \leq 12$

$$\Delta L_{sL_i} = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \Delta L_v \quad \text{in dB.} \quad (6.15)$$

Liegt die Anzahl „n“ der Stichprobe zwischen 20 bis 40, so gilt:

$$\Delta L_{sL_i} = \frac{1}{4} \cdot \Delta L_v \quad \text{in dB.} \quad (6.16)$$

Befindet sich die Stichprobenzahl in der Nähe von 100, so gilt:

$$\Delta L_{sL_i} = \frac{1}{5} \cdot \Delta L_v. \quad (6.17)$$

Für größere Stichproben als 400 gilt:

$$\Delta L_{sL_i} = \frac{1}{6} \cdot \Delta L_v. \quad (6.18)$$

Die Standardabweichung des Schallpegelmittelwertes aus „ $n$ “ Beobachtungen ist dann:

$$\Delta L_{s\bar{L}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \Delta L_{sL_i} \quad (6.19)$$

Auf der Basis der o. g. Gleichungen kann die Standardunsicherheit  $u(x_i)$  aus der Schallpegelvariationsweite für nicht erfassbare zufällige Änderungen, die möglicherweise durch die Messmethode, das Messobjekt, die Messumgebung und das Verhalten des Messenden verursacht werden, nach der Ermittlungsmethode B berechnet werden.

Nach den Erfahrungen der Untersucher stimmen die für die gleichen Lärmverteilungen berechneten Standardabweichungen der Schallpegelmittelwerte aus normalverteilten Stichproben nach Gl. 6.11 und 6.13 mit denen nach den Gleichungen 6.15 bis 6.19 berechneten gut überein.

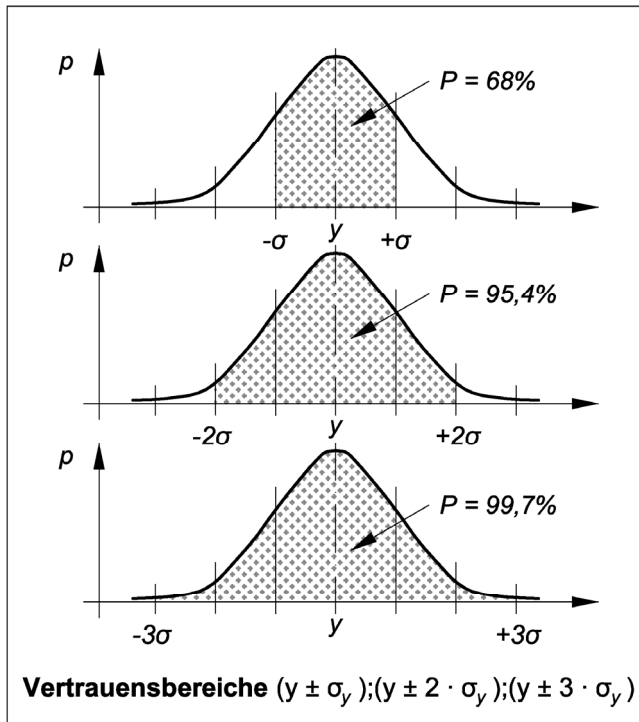
### 6.6.3 Vertrauensgrenzen und Vertrauensbereich des Schallpegelmittelwertes aus Beobachtungsreihen

Bei zeitlich veränderlichem Lärm ist es möglich, durch Stichprobenmessungen von äquivalenten Dauerschallpegeln  $L_{pAeq}$  von beispielsweise einer Sekunde Dauer den äquivalenten Dauerschallpegel einer Schicht und damit den Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  zu bestimmen. Mit Mitteln der Statistik lässt sich der Vertrauensbereich berechnen, der den Erwartungswert der jeweiligen Größe auf einem vorgegebenen Vertrauensniveau einschließt.

Für eine begrenzte Anzahl von Stichproben wird bei der Schätzung des Vertrauensbereiches für den Mittelwert von der t-Verteilung ausgegangen. Die T-Verteilung oder Student - Verteilung ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung einer stetigen Zufallsgröße mit einer Wahrscheinlichkeitsdichte. Wenn  $n \rightarrow \infty$ , nähert sich die t-Verteilung der Normalverteilung.

Der Term  $t = t_{1-\alpha, n}$  der t-Verteilung hängt vom gewählten Vertrauensniveau  $P = 1 - \alpha$  und außerdem von der Anzahl der Einzelwerte „ $n$ “ ab. Dabei ist  $\alpha$  die Irrtumswahrscheinlichkeit.

Abb. 6.6 zeigt, welche Bedeutung die Auswahl des Vertrauensniveaus  $P$  für die Standardabweichung  $\sigma$  der Grundgesamtheit einer Normalverteilung hat. Bei der Einschätzung biologischer Risiken wird in der Regel ein Vertrauensniveau von  $P = 99,9\%$  [41] verwendet. Bei dem hier einzuschätzenden Gesundheitsrisiko sollte mindestens ein Vertrauensniveau von  $P = 95\%$  angewandt werden.



**Abb. 6.6** Verschiedene Vertrauensbereiche  $y \pm \sigma$  für den Mittelwert der Grundgesamtheit einer Normalverteilung in Verbindung mit dem Vertrauensniveau  $P$

Für einen zweiseitigen Vertrauensbereich gilt:

$$\bar{L} - \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot \Delta L_{sL_i} \leq \bar{L}_u \leq \bar{L} + \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot \Delta L_{sL_i} \quad (6.20)$$

Bei der Ermittlung des Lärmexpositionspegels interessiert in der Regel nur einseitig, ob die Auslösewerte eindeutig über- oder unterschritten werden. Daher wird für die Messunsicherheit des Erwartungswertes der Messgröße der einseitige Vertrauensbereich berechnet:

obere Vertrauensgrenze

$$\bar{L}_u \leq \bar{L} + \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot \Delta L_{sL_i} \quad (6.21)$$

und untere Vertrauensgrenze

$$\bar{L}_u \geq \bar{L} - \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot \Delta L_{sL_i} \quad (6.22)$$

Hierbei entspricht der *äquivalente Dauerschallpegel*  $L_{Aeq,8h}$  dem Erwartungswert der Messgröße

$$L_{Aeq,8h} = L_{EX,8h} = \bar{L}_u$$

und  $\frac{t}{\sqrt{n}} \cdot \Delta L_{sL_i}$  der Messunsicherheit mit all ihren Einflussfaktoren auf die Messgröße.

Die Messunsicherheit aus den nicht erfassbaren zufälligen Änderungen der Einflussfaktoren kann aus einer Beobachtungsreihe einer Messung damit wie folgt ausgedrückt werden:

$$\Delta L_U = \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot \Delta L_{sL_i} \quad (6.23)$$

Mittelwert und Standardabweichung  $\Delta L_{sL_i}$  werden nach den entsprechenden Gleichungen aus den Abschnitten 6.6.1 und 6.6.2 berechnet.

Gemäß der einseitigen Fragestellung im Hinblick auf „Einhaltung“ oder „Überschreitung“ der Auslösewerte durch den Lärmexpositionspegel, können die  $t$ -Werte aus Tab. 6.1 für den einseitigen Fall und mit einem Vertrauensniveau von 95 % verwendet werden.

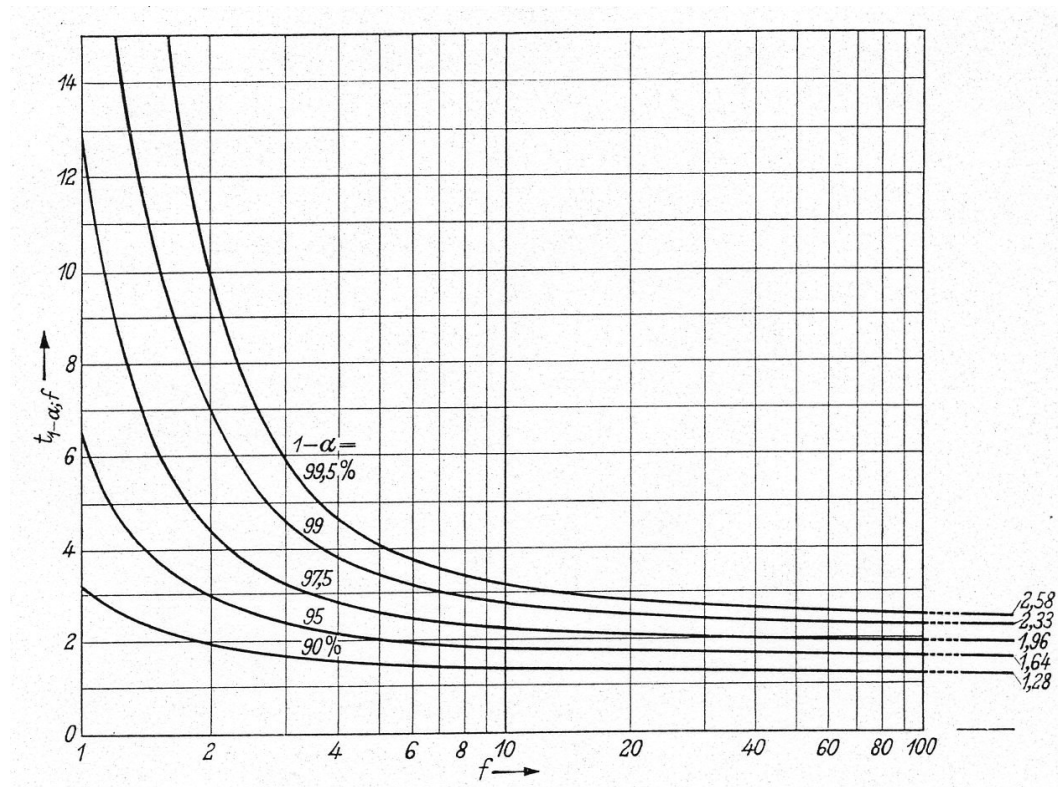
**Tab. 6.1** Wert von  $t$  für die Bildung des einseitigen Vertrauensbereiches bei einem Vertrauensniveau  $P = 1 - \alpha$  von 95 % in Abhängigkeit vom Freiheitsgrad  $f$

Anzahl der Freiheitsgrade $f = n - 1$	Wert von $t$ aus der $t$ -Verteilung nach [40]
1	6,13
2	2,92
3	2,35
4	2,13
5	2,02
6	1,94
7	1,89
8	1,86
9	1,83
10	1,81
11	1,80
12	1,78
20	1,72
30	1,70
40	1,68
50	1,68
100	1,66
$\infty$	1,65

Aufschlussreich für eine vereinfachte Vorgehensweise bei der Ermittlung der Messunsicherheit ist das Verhalten des Wertes  $t_{1-\alpha;f}$  in Abhängigkeit vom Vertrauensniveau  $P$  und vom Freiheitsgrad. Abb. 6.7 zeigt den charakteristischen Verlauf der

t-Werte. Man erkennt, dass sich die Werte von  $t$  zwischen den Freiheitsgraden  $f = n - 1 = 10$  und 100 bei einem Vertrauensniveau von  $P = 95\%$  nur geringfügig ändern.

Gerade in diesem Bereich  $f \approx 10$  bis 100 liegt ein in der Praxis gerade noch vertretbarer Stichprobenumfang einer Beobachtungsreihe für die Erfassung von Schallpegeln am Arbeitsplatz. Es wird daher zur vereinfachten Bildung der erweiterten Messunsicherheit  $U = k \cdot u_c(y)$  nach [11] vorgeschlagen, den Wert  $t_{1-\alpha;30} = 1,70$  als Erweiterungsfaktor „ $k$ “ zu verwenden.



**Abb. 6.7** Werte  $t_{1-\alpha;f}$  der t-Verteilung bei einem Vertrauensniveau  $P = 1 - \alpha$  für den einseitigen Vertrauensbereich in Abhängigkeit vom Freiheitsgrad  $f = n - 1$  [40]

Interessiert beispielsweise der Wert der Messgröße mit seiner Messunsicherheit einseitig nach oben bei beliebiger Messunsicherheit nach unten und liegt der Erwartungswert von  $L_{EX}$  mit dem Vertrauensniveau entsprechender Wahrscheinlichkeit unter der Auslöseschwelle z. B. von 80 dB(A), so kann man von einer sicheren Einhaltung des Auslösewertes reden. Es besteht folgender formelmäßiger Zusammenhang:

$$L_{EX} + \Delta L_U \text{ (obere Vertrauensgrenze)} < \text{Auslösewert.} \quad (6.24)$$

Diese Betrachtung gilt auch für die Überschreitung:

$$L_{EX} - \Delta L_U \text{ (untere Vertrauensgrenze)} \geq \text{Auslösewert.} \quad (6.25)$$

Liegt dieser Wert über der Auslöseschwelle, so kann man von einer sicheren Überschreitung ausgehen.

## 6.7 Unsicherheit des Messgerätes und des Kalibrators

### 6.7.1 Grundlagen

Die Messunsicherheit einer Lärmexpositionsmessung setzt sich aus der durch die Messmethode und dem Messobjekt mit all ihren Einflussfaktoren verursachte Unsicherheit  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  und der durch Messgerät, Kalibrator bzw. Messanordnung verursachte Unsicherheit  $\Delta L_{U\text{-Messgerät}}$  zusammen (siehe Abschnitt 6.8).

Die Messunsicherheit  $\Delta L_U$  für die Messgrößen  $L_{EX}$  und  $L_{pC,peak}$  des Messverfahrens (Messmethode + Messgerät) stellt sich nach Gleichung 6.60 wie folgt dar:

$$\Delta L_U(L_{EX}, L_{pC,peak}) = \sqrt{\Delta L_{U\text{-Methode}}^2 + \Delta L_{U\text{-Messgerät}}^2}$$

Im Folgenden wird die Unsicherheit  $\Delta L_{U\text{-Messgerät}}$  von Schallmessgeräten nach DIN ENV 13005 [11] (Deutsche Fassung des „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (GUM)) berechnet und zusammengestellt. Dabei wird als „Messgerät“ ein Schallpegelmesser der Klasse 1 in Verbindung mit einem Schallkalibrator der Klasse 1 und ein Schallpegelmesser der Klasse 2 in Verbindung mit einem Schallkalibrator der Klasse 2 betrachtet. Die Spezifikationen der betrachteten Geräte ergeben sich aus DIN EN 61 672 –1 [15] bzw. DIN EN 60 942 [29]. Die Berechnungen sind aus [42] entnommen.

### 6.7.2 Beiträge zur Messunsicherheit

Die nachfolgend in Tab. 6.2 angegebenen Beiträge werden für die Berechnung der Messunsicherheit verwendet. Die Angaben sind den beiden Normen [15] bzw. [29] entnommen. Es handelt sich dabei um zulässige Fehlergrenzen.

Ist nur ein Wert  $\delta$  angegeben, so handelt es sich um symmetrische Fehlergrenzen. Die Anzeige des Schallpegelmessers darf unter den angegebenen Randbedingungen um  $\pm \delta$  von der Messgröße  $Y$  abweichen. Sind zwei Werte  $a$ ,  $b$  angegeben, so liegt die Anzeige im Bereich  $Y - a$  und  $Y + b$ .

**Tab. 6.2** Fehlergrenzen für Schallpegelmesser und Schallkalibratoren

Größe	Definition	Schallpegelmesser DIN EN 61672 –1 [15]		Schallkalibratoren DIN EN 60942 [29]	
		Klasse 1	Klasse 2	Klasse 1	Klasse 2
$\delta_{\text{Bezug}}$	Fehlergrenzen unter Bezugsbedingungen <sup>1)</sup>	0,7 dB	1,0 dB	0,25 dB	0,40 dB
$\delta_{\text{Langzeit}}$	Max. zul. Änderung der Anzeige innerhalb von 20 s	---	---	0,07 dB	0,15 dB
$\delta_{\text{Versorgungsspannung}}$	Auswirkung bei Änderung der Versorgungsspannung	---	---	0,10 dB	0,20 dB
$\delta_{\text{Klirrfaktor}}$	Max. Erhöhung des Schalldruckpegels durch den Klirrfaktor des Kalibrators <sup>2)</sup>	---	---	0,00 dB + 0,21 dB	0,00 dB + 0,26 dB

Größe	Definition		Schallpegelmesser DIN EN 61672 –1 [15]		Schallkalibratoren DIN EN 60942 [29]	
			Klasse 1	Klasse 2	Klasse 1	Klasse 2
$\delta_{\text{Richtung}}$	Max. zul. Änderung für Schalleinfallswinkel innerhalb der Grenzen von $\pm 30^\circ$ gegen die Bezugsrichtung	Frequenzbereich			---	---
		250 Hz - 1000 Hz	1,0 dB	2,0 dB		
		> 1000 Hz – 2000 Hz	1,0 dB	2,0 dB		
		> 2000 Hz - 4000 Hz	1,5 dB	4,0 dB		
		> 4000 Hz - 8000 Hz	2,5 dB	6,0 dB		
		> 8000 Hz –12500Hz	4,0 dB	---		
$\delta_{\text{Frequenz}}$	Fehlergrenzen für das Übertragungsmaß im Frequenzbereich 40 Hz – 12 500 Hz	Terzmittenfrequenz			---	---
		40 Hz bis 80 Hz	1,0 dB	2,0 dB		
		100 Hz bis 800 Hz	1,0 dB	1,5 dB		
		250 Hz bis 800 Hz	1,0 dB	1,5 dB		
		1000 Hz	0,7 dB	1,1 dB		
		1250 Hz	1,0 dB	1,5 dB		
		1600 Hz bis 2000 Hz	1,0 dB	2,0 dB		
		2500 Hz bis 3150 Hz	1,0 dB	2,5 dB		
		4000 Hz	1,0 dB	3,0 dB		
		5000 Hz	1,5 dB	3,5 dB		
		6300 Hz	+1,5 dB -2,0 dB	4,5 dB		
		8 000 Hz	+1,5 dB -2,0 dB	5,0 dB		
		10 000 Hz	+ 2 dB -3 dB	+ 5 dB - $\infty$		
		12 000 Hz	+ 2 dB -5 dB	+ 5 dB; - $\infty$		
$\delta_{\text{Pegellinearität}}$	Fehlergrenzen für Pegellinearität		0,8 dB	1,1 dB	---	---
$\delta_{\text{Impuls}}$	Fehlergrenzen für die Anzeige von Tonimpulsen bei Zeitbewertung F	Tonimpulsdauer			---	---
		1000 ms	0,5 dB	1,0 dB		
		500 ms	0,5 dB	1,0 dB		
		200 ms	0,5 dB	1,0 dB		
		100 ms	1,0 dB	1,0 dB		
		50 ms	1,0 dB	+1,0 dB -1,5 dB		
		20 ms	1,0 dB	+ 1,0 dB -2,0 dB		
		10 ms	1,0 dB	+ 1,3 dB; -2,0 dB		
		5 ms	1,0 dB	+ 1,3 dB -2,5 dB		
		2 ms	+1,0 dB -1,5 dB	+1,0 dB; -2,5 dB		
		1 ms	+1,0 dB -2,0 dB	+1,0 dB; -3,0 dB		
		0,5 ms	+1,0 dB -2,5 dB	+1,0 dB -4,0 dB		

Größe	Definition	Schallpegelmessgerät DIN EN 61672 –1 [15]		Schallkalibratoren DIN EN 60942 [29]	
		Klasse 1	Klasse 2	Klasse 1	Klasse 2
	0,25 ms	+1,0 dB -2,5 dB	+1,5 dB -5,0 dB		
$\delta_{\text{Spitzenschallpegel}}$	Fehlergrenzen für die Anzeige des Spitzenschallpegels (5.12)	2,0 dB	3,0 dB	---	---
$\delta_{\text{Auflösung}}$	Fehlergrenzen bedingt durch die endliche Auflösung des Gerätes	0,05 dB	0,05 dB	---	---
$\delta_{\text{Luftdruck}}$	Fehlergrenzen bei Änderung des statischen Luftdruckes 650 hPa – 1080 hPa	0,9 dB	1,6 dB	0,25 dB	0,40 dB
$\delta_{\text{Temperatur}}$	Fehlergrenzen bei Temperaturänderungen zwischen -10°C u. +50°C	0,5 dB	1,0 dB		
$\delta_{\text{Luftfeuchte}}$	Fehlergrenzen bei Änderung der rel. Luftfeuchte im Bereich 25 % bis 90 %	0,5 dB	1,0 dB		
$\delta_{\text{Windschirm}}$	Fehlergrenzen bei Verwendung eines Windschirmes	-0,12 dB; 0 dB <sup>4)</sup>	-0,12 dB; 0 dB <sup>6)</sup>	---	---
	Fehlergrenzen bei Verwendung eines Stativs	0,6 dB <sup>5)</sup>	0,6 dB <sup>6)</sup>	---	---

- Die Bezugsbedingungen sind nach [15] vom Hersteller eines Schallpegelmessgerats anzugeben und beziehen sich auf eine Kalibrierfrequenz (zwischen 160 Hz und 1250 Hz), einen Bezugswert des Schalldruckpegels (bevorzugt 94 dB) und einen Bezugsschallbereich. Zum Beispiel sind für die Schallanalysatoren B&K 2250, 60 und 70 [26], [27] die Bezugsfrequenz 1 kHz, der Bezugsschalldruckpegel 94 dB und der Bezugsmessbereich 30 dB bis 110 dB. Die Bezugstemperatur beträgt 20 °C. Für den Schallkalibrator B&K 4231 [28] sind die Bezugsbedingungen 20 °C, 1013 hPa, 65 % rel. Feuchte.
- Der zulässige Klirrfaktor beträgt bei Schallkalibratoren der Klasse 1 maximal 2,5 %, bei Geräten der Klasse 2 maximal 3 %. Dies entspricht einer Erhöhung des Schalldrucks um 0,21 dB bzw. 0,26 dB.
- Die Fehlergrenzen gelten nach [15] für Prüfsignale der Frequenz 31,5 Hz und 8000 Hz. Für Prüfsignale mit 500 Hz sind die Fehlergrenzen um 1 dB geringer. Da in der Praxis speziell bei impulsförmigen Signalen, bei denen die Messung des Spitzenschallpegels besonders wichtig ist, die Frequenz kaum gemessen werden kann (und auch theoretisch oft gar nicht bestimmbar ist), werden hier grundsätzlich die höheren Fehlergrenzen verwendet.
- Die Fehlergrenzen bei Verwendung eines Windschirms sind frequenz- und richtungsabhängig und liegen für Frequenzen zwischen 500 Hz und 5 kHz und Einfallswinkel zwischen  $\pm 30^\circ$  nach [26] für den Windschirm UA 160 zwischen -0,12 dB und 0,04 dB ohne Softwarekorrektur. Zur Vereinfachung wird für alle Schalleinfallswinkel und alle Frequenzen eine Unsicherheit -0,12 dB bis 0 dB angenommen.
- Angaben nach [32] bei Verwendung des Stativs UA 0587.
- Für Klasse 2 Schallpegelmessgerate sind bzgl. Windschirm und Stativ keine Fehlergrenzen bekannt, hilfsweise werden bis auf Weiteres die Fehlergrenzen für Klasse 1-Geräte angenommen.

### 6.7.3 Berechnung der Messunsicherheit

Die Berechnung der kombinierten Standardunsicherheit des Ergebnisses einer Messung erfolgt für Schalle, die durch die Angabe ihrer Terzpegel beschrieben sind. Die frequenzabhängigen Unsicherheitsbeiträge werden entsprechend dem jeweiligen Terzpegel des Schalls gewichtet, die frequenzunabhängigen liefern einen von der Art des Schalls unabhängigen Beitrag. Es wird angenommen, dass die einzelnen Unsicherheitsbeiträge nicht miteinander korreliert sind.

Für einen Schall, der durch *einen* Terzpegel charakterisiert werden kann, kann die kombinierte Standardunsicherheit des Messergebnisses durch geometrische Addition der Standardunsicherheiten der Einzelbeiträge bestimmt werden, wobei zu-



nächst die Einzelbeiträge danach gewichtet werden, wie das Ergebnis mit den Änderungen dieser Größen variiert.

Nachdem alle Unsicherheiten der Einzelbeiträge durch die Angabe der Fehlergrenzen in der Form  $\pm \delta x$  beschrieben werden können und keine weiteren Informationen über die Art der Wahrscheinlichkeitsverteilungen vorliegen, ist gemäß [11] eine Rechteckverteilung anzunehmen und die Standardabweichung  $u_i$  jedes Einzelbeitrages als

$$u_i = \delta x_i / \sqrt{3} \quad (6.26)$$

zu berechnen. Die Standardunsicherheit des Gesamtergebnisses  $u_c$  (kombinierte Standardunsicherheit) kann dann berechnet werden zu

$$u_c = \sqrt{\sum_i u_i^2} \quad (6.27)$$

und die um den Faktor  $k$  erweiterte Messunsicherheit  $U$  zu

$$U = k \cdot u_c. \quad (6.28)$$

Das Ergebnis einer Messung mit dem Messwert  $y$  kann dann in der Form

$$Y = y \pm U \quad (6.29)$$

angegeben werden, wobei der Wert von  $k$  ebenfalls anzugeben ist. Bei Verwendung von  $k = 1,7$  liegt das Ergebnis bei der einseitigen Fragestellung mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % in dem durch  $\pm U$  definierten Bereich.

Für einen Schall, der durch die Angabe *mehrerer* Terzpegel  $L_i$  bestimmt ist, müssen die frequenzabhängigen Unsicherheitsbeiträge (hier  $\delta_{\text{Richtung}}$  und  $\delta_{\text{Frequenz}}$ ) zunächst aus einer mit den jeweiligen Terzpegeln des Schalls gewichteten Addition bestimmt werden. Ausgehend von der Addition der Terzpegel  $L_i$  in den einzelnen Terzbändern kann der Pegel des Gesamtschalls zu

$$L_{\text{Gesamt}} = 10 \cdot \lg \sum_i 10^{0,1 \cdot L_i} \text{ dB} \quad (6.30)$$

berechnet werden. Bezeichnet man die Fehlergrenzen für die Bestimmung eines einzelnen Terzpegels  $i$  mit  $\delta L_i$ , so kann der gewichtete Unsicherheitsbeitrag dieses Terzpegels  $\delta L_{\text{gew } i}$  zu

$$\delta L_{\text{gew } i} = \frac{\partial(L_{\text{Gesamt}})}{\partial L_i} \cdot \delta L_i = \frac{10^{0,1 L_i}}{\sum_i 10^{0,1 L_i}} \cdot \delta L_i \quad (6.31)$$

berechnet werden. Der Gesamt-Unsicherheitsbeitrag  $\delta L$  aller Terzen kann sodann als Wurzel aus der Summe der Quadrate der Einzelbeiträge  $\delta L_{\text{gew } i}$  zu

$$\delta L = \sqrt{\sum_i \delta L_{\text{gew } i}^2} \quad (6.32)$$

berechnet werden.

Die Messunsicherheit  $U$  des Gesamtergebnisses kann dann, wie oben beschrieben, weiter berechnet werden.

#### 6.7.4 Ergebnisse der Berechnungen

Die Berechnungen werden für Schallpegelmesser und Kalibratoren der Klassen 1 und 2 und für Kurzzeitmessungen und Langzeitmessungen durchgeführt.

Bei Kurzzeitmessungen wird davon ausgegangen, dass sich die Umgebungsbedingungen während der Messung nicht wesentlich ändern, dass der Schall von vorne eintrifft und kein Windschirm oder Stativ verwendet wird.

Bei Langzeitmessungen können sich die Umgebungsbedingungen während der Messung erheblich ändern, die Ausrichtung des Schallpegelmessers auf die Schallquelle kann im Bereich  $\pm 30^\circ$  variieren, außerdem wird die Verwendung eines Windschirms und eines Stativs angenommen.

In jedem Fall wird davon ausgegangen, dass der Schallpegelmesser vor dem Einsatz mit einem Kalibrator der gleichen Klasse wie die des Schallpegelmessers kalibriert wird. In Tab. 6.3 sind die für die Berechnung verwendeten Fehlergrenzen angegeben. Die Fehlergrenzen, die sich auf den Schallpegelmesser beziehen, sind in senkrechter Schrift geschrieben, die, die sich jeweils auf den Kalibrator beziehen, in Kursivschrift.

Die Berechnungen sind für schmalbandige Schalle bei 100 Hz, 1000 Hz und 5000 Hz sowie für industrietypischen Lärm nach [31] durchgeführt. Dabei wird von kontinuierlichen Schallen ohne besondere Impulshaltigkeit ausgegangen. Ist der Schall stark impulshaltig, so erhöht sich die Messunsicherheit, und zwar umso mehr, je kürzer die Impulse sind. Für das Berechnungsbeispiel wird die Frequenzbewertung A, die Zeitbewertung F und eine Impulsdauer von 1 ms angenommen.

Die Messung des C-bewerteten Spitzenschallpegels ist insbesondere bei kurzen Schallimpulsen und impulshaltigen Geräuschen relevant. Diese Schalle sind stets breitbandig, weshalb als Unsicherheitsbeitrag der Frequenzbewertung  $\delta_{\text{Frequenz}}$  für industrietypischen Lärm verwendet wurde. Alle anderen Beiträge werden entsprechend der angegebenen Messszenarien (also Kurzzeitmessung oder Langzeitmessung, Klasse 1 oder Klasse 2) verwendet.

Als Ergebnis  $U$  ist die mit  $k = 1,7$  erweiterte Messunsicherheit angegeben.

**Tab. 6.3** Parameter für die Berechnung der Messunsicherheit und das Ergebnis für unterschiedliche Schallarten

	Kurzzeitmessung, Schallpegelmesser der Klasse I	Kurzzeitmessung, Schallpegelmesser der Klasse II	Langzeitmessung, Schallpegelmesser der Klasse I	Langzeitmessung, Schallpegelmesser der Klasse II
<b>Parameter</b>				
$\delta_{\text{Bezug}}$	$\pm 0,25 \text{ dB}$	$\pm 0,40 \text{ dB}$	$\pm 0,25 \text{ dB}$	$\pm 0,40 \text{ dB}$
$\delta_{\text{Langzeit}}$	$\pm 0,07 \text{ dB}$	$\pm 0,15 \text{ dB}$	$\pm 0,07 \text{ dB}$	$\pm 0,15 \text{ dB}$
$\delta_{\text{Versorgungsspannung}}$	$\pm 0,10 \text{ dB}$	$\pm 0,20 \text{ dB}$	$\pm 0,10 \text{ dB}$	$\pm 0,20 \text{ dB}$
$\delta_{\text{Klirrfaktor}^*)}$	$0 \text{ dB} - 0,21 \text{ dB}$	$0 \text{ dB} - 0,26 \text{ dB}$	$0 \text{ dB} - 0,21 \text{ dB}$	$0 \text{ dB} - 0,26 \text{ dB}$
$\delta_{\text{Richtung}}$	---	---	100 Hz: $\pm 1,0 \text{ dB}$ 1 kHz: $\pm 1,0 \text{ dB}$ 5 kHz: $\pm 2,5 \text{ dB}$ Verkehr: $\pm 0,32 \text{ dB}$ Industrie: $\pm 0,46 \text{ dB}$	100 Hz: $\pm 2,0 \text{ dB}$ 1 kHz: $\pm 2,0 \text{ dB}$ 5 kHz: $\pm 6,0 \text{ dB}$ Verkehr: $\pm 0,70 \text{ dB}$ Industrie: $\pm 1,02 \text{ dB}$
$\delta_{\text{Frequenz}}$	100 Hz: $\pm 1,0 \text{ dB}$ 1 kHz: $\pm 1,0 \text{ dB}$ 5 kHz: $\pm 1,5 \text{ dB}$ Industrie: $\pm 0,39 \text{ dB}$	100 Hz: $\pm 2,0 \text{ dB}$ 1 kHz: $\pm 1,1 \text{ dB}$ 5 kHz: $\pm 3,5 \text{ dB}$ Industrie: $\pm 0,67 \text{ dB}$	100 Hz: $\pm 1,0 \text{ dB}$ 1 kHz: $\pm 1,0 \text{ dB}$ 5 kHz: $\pm 1,5 \text{ dB}$ Industrie: $\pm 0,39 \text{ dB}$	100 Hz: $\pm 2,0 \text{ dB}$ 1 kHz: $\pm 1,1 \text{ dB}$ 5 kHz: $\pm 3,5 \text{ dB}$ Industrie: $\pm 0,67 \text{ dB}$
$\delta_{\text{Pegellinearität}}$	$\pm 0,8 \text{ dB}$	$\pm 1,1 \text{ dB}$	$\pm 0,8 \text{ dB}$	$\pm 1,1 \text{ dB}$
$\delta_{\text{Impuls}^*)}$	+1 dB; -2 dB	+1 dB; -3 dB	+1 dB; -2 dB	+1 dB; -3 dB
$\delta_{\text{Spitzenschallpegel}}$	$\pm 2 \text{ dB}$	$\pm 3 \text{ dB}$	$\pm 2 \text{ dB}$	$\pm 3 \text{ dB}$
$\delta_{\text{Auflösung}}$	$\pm 0,05 \text{ dB}$	$\pm 0,05 \text{ dB}$	$\pm 0,05 \text{ dB}$	$\pm 0,05 \text{ dB}$
$\delta_{\text{Umgebung, Kalibrator}}$	$\pm 0,25 \text{ dB}$	$\pm 0,40 \text{ dB}$	$\pm 0,25 \text{ dB}$	$\pm 0,40 \text{ dB}$
$\delta_{\text{Luftdruck, Schallpegelmesser}}$	---	---	$\pm 0,9 \text{ dB}$	$\pm 1,6 \text{ dB}$
$\delta_{\text{Temperatur}}$	---	---	$\pm 0,5 \text{ dB}$	$\pm 1,0 \text{ dB}$
$\delta_{\text{Luftfeuchte}}$	---	---	$\pm 0,5 \text{ dB}$	$\pm 1,0 \text{ dB}$
$\delta_{\text{Windschirm}^*)}$	---	---	-0,12 dB; 0 dB	-0,12 dB; 0 dB
$\delta_{\text{Stativ}}$	---	---	$\pm 0,6 \text{ dB}$	$\pm 0,6 \text{ dB}$
<b>Messunsicherheit, Ergebnis</b>				
$U_{100 \text{ Hz}} (k = 1,7)$	<b>1,31 dB</b>	<b>2,33 dB</b>	<b>2,07 dB</b>	<b>3,74 dB</b>
$U_{1000 \text{ Hz}} (k = 1,7)$	<b>1,31 dB</b>	<b>1,65 dB</b>	<b>2,07 dB</b>	<b>3,37 dB</b>
$U_{5000 \text{ Hz}} (k = 1,7)$	<b>1,71 dB</b>	<b>3,66 dB</b>	<b>3,25 dB</b>	<b>7,27 dB</b>
$U_{\text{Industrielärm}} (k = 1,7)$	<b>1,00 dB</b>	<b>1,41 dB</b>	<b>1,65 dB</b>	<b>2,78 dB</b>
$U_{\text{Industrielärm, Impuls}} (k = 1,7)$	<b>1,75 dB</b>	<b>2,41 dB</b>	<b>2,21 dB</b>	<b>3,40 dB</b>
$U_{\text{Spitzenschallpegel}} (k = 1,7)$	<b>2,18 dB</b>	<b>3,26 dB</b>	<b>2,57 dB</b>	<b>4,05 dB</b>
Pegelkorrektur Klirrfaktor und Windschirm**)	0,11 dB	0,13 dB	0,17 dB	0,19 dB
Pegelkorrektur Impulshaltigkeit **)	0,50 dB	1,00 dB	0,50 dB	1,00 dB

\*) Die unsymmetrischen Fehlergrenzen können wie folgt angegeben werden

$\delta_{\text{Klirrfaktor}}$	= 0,105 dB $\pm$ 0,105 dB	für Klasse 1,
$\delta_{\text{Klirrfaktor}}$	= 0,13 dB $\pm$ 0,13 dB	für Klasse 2,
$\delta_{\text{Windschirm}}$	= -0,06 dB $\pm$ 0,06 dB	für den Windschirm,
$\delta_{\text{Impuls}}$	= -0,5 dB $\pm$ 1,5 dB	für die Impulshaltigkeit für Klasse 1 bzw.
$\delta_{\text{Impuls}}$	= -1,0 dB $\pm$ 2,0 dB	für die Impulshaltigkeit für Klasse 2.

Für die Berechnungen der Unsicherheit des Gesamtergebnisses sind lediglich die variablen Anteile maßgeblich. Die Pegelangabe selbst ist dann um die in den Zeilen „Pegelkorrektur“ angegebenen Werte zu korrigieren.  
 \*\*) Die Pegelkorrektur ist positiv, da sowohl der Klirrfaktor des Kalibrators als auch die Verwendung des Windschirmes als auch die Impulshaltigkeit zu einer zu geringen Pegelanzeige führt.

Die Berechnung der in Tab. 6.3 angegebenen Ergebnisse ist im Detail beispielhaft in Tab. 6.4 für eine Kurzzeitmessung mit Schallpegelmessern der Klasse 1 und einen schmalbandigen Schall bei 100 Hz dargestellt.

In der ersten Spalte ist die relevante Fehlergrenze eingetragen, in der zweiten die zugehörige Standardunsicherheit (Fehlergrenze dividiert durch Wurzel aus 3), in der dritten der Sensitivitätskoeffizient, in der vierten die Varianz.

In der letzten Zeile ist in der Spalte „Varianz“ die Summe der Einzelvarianzen eingetragen und in der Spalte „Standardunsicherheit“ die Wurzel daraus.

**Tab. 6.4** Berechnungsbeispiel erweiterte Messunsicherheit Kurzzeitmessung für Schallpegelmesser Klasse 1, schmalbandiger Schall bei 100 Hz

	Fehlergrenzen	Standard-unsicherheit	Sensitivitäts-koeffizient	Varianz
$\delta_{\text{Bezug}}$	$\pm 0,25$ dB	0,144 dB	1	0,02083
$\delta_{\text{Langzeit}}$	$\pm 0,07$ dB	0,040 dB	1	0,00163
$\delta_{\text{Versorgungsspannung}}$	$\pm 0,10$ dB	0,058 dB	1	0,00333
$\delta_{\text{Klirrfaktor}}$	0 dB; 0,21 dB	0,061 dB	1	0,00367
$\delta_{\text{Richtung}}$	---	0,185 dB	0	0,00000
$\delta_{\text{Frequenz}}$	$\pm 1,00$ dB	0,577 dB	1	0,33335
$\delta_{\text{Pegellinearität}}$	$\pm 0,80$ dB	0,462 dB	1	0,21334
$\delta_{\text{Auflösung}}$	$\pm 0,05$ dB	0,029 dB	1	0,00083
$\delta_{\text{Umgebung, Kalibrator}}$	$\pm 0,25$ dB	0,144 dB	1	0,02083
Summe	---	<b>0,773 dB</b>		<b>0,59784</b>

Die mit  $k = 1,7$  erweiterte Messunsicherheit beträgt 1,31 dB. Die Pegelkorrektur von 0,11 dB ist vorab dem Ergebnis zuzuschlagen.

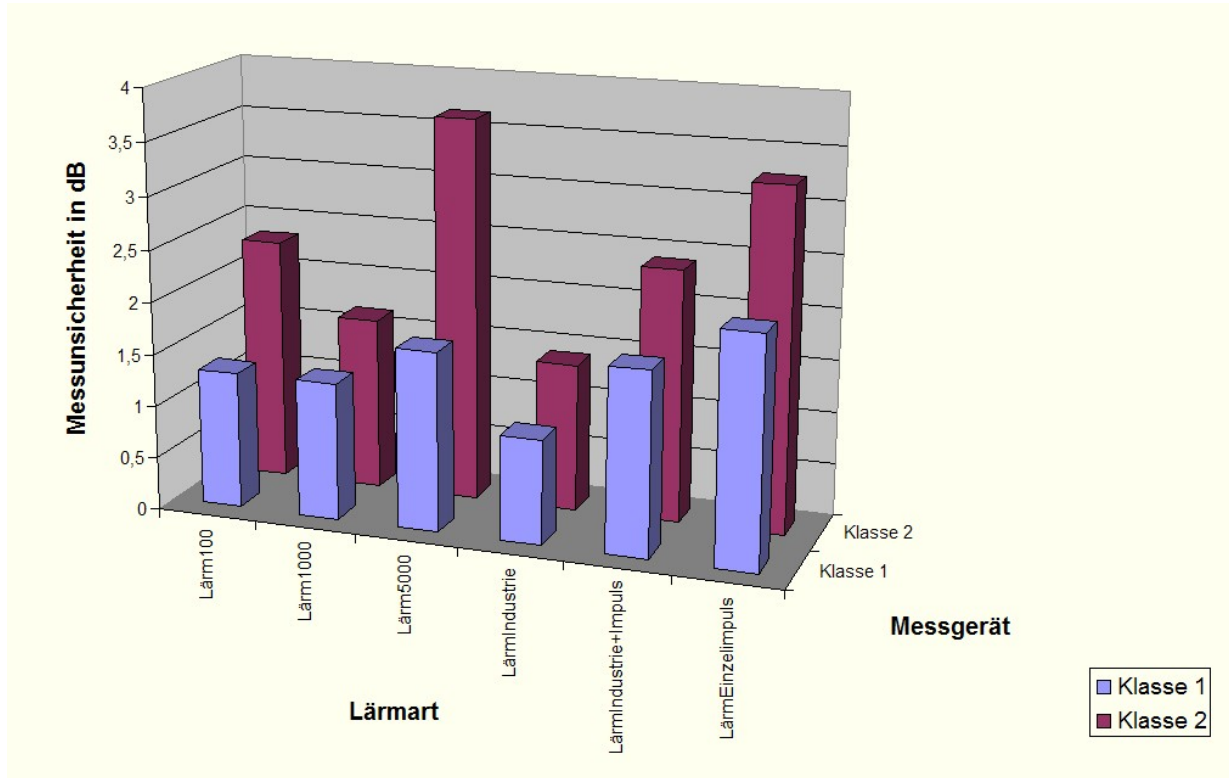
### 6.7.5 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

Die Abb. 6.8 und 6.9 zeigen wie die Messunsicherheiten der Messgeräte der Klasse 1 und 2 bei den Messungen von schmalbandigen und breitbandigen Schallen erheblich differieren.

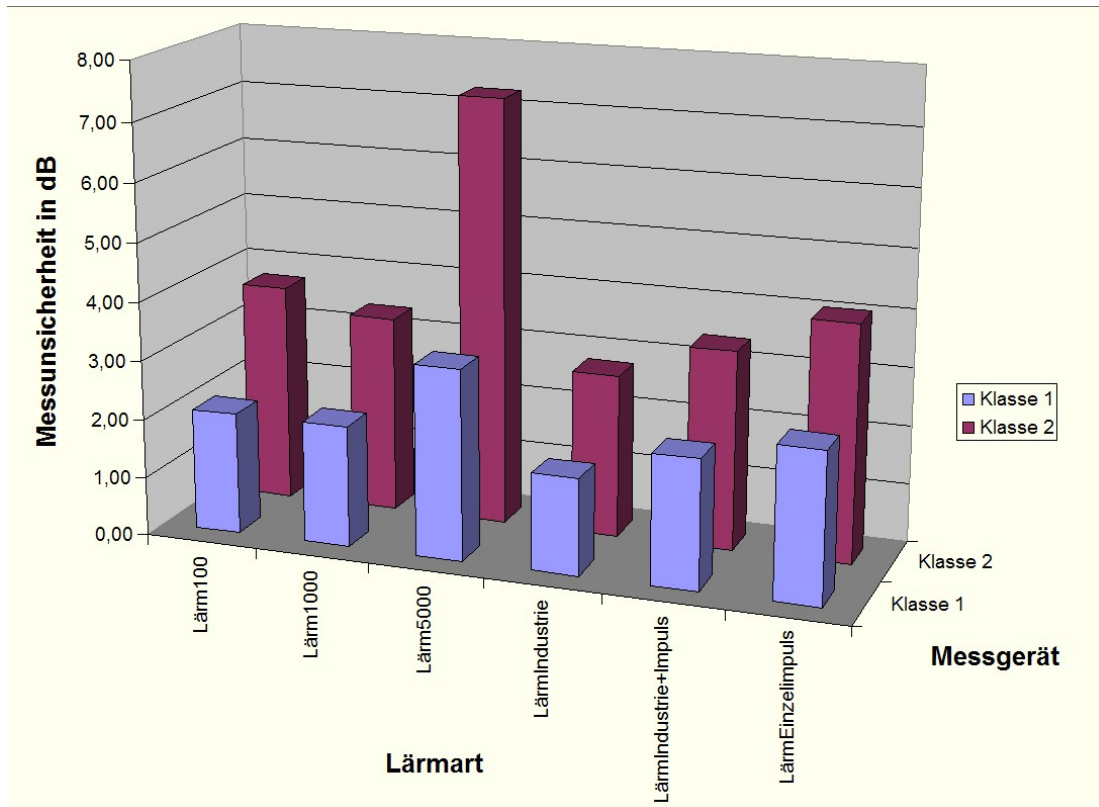
Während für ein Schmalbandgeräusch bei 100 Hz je nach Durchführung der Messung mit Unsicherheiten zwischen 1,3 dB und 3,7 dB gerechnet werden muss und für ein Schmalbandgeräusch bei 5 kHz sogar mit Unsicherheiten zwischen 1,7 dB und 7,3 dB, liegt die Unsicherheit bei der Messung eines breitbandigen Geräusches, wie beispielsweise einem typischen Industriegeräusch, lediglich zwischen 1,0 dB und 2,8 dB. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die die Gesamtunsicherheit wesentlich bestimmenden Beiträge  $\delta_{\text{Richtung}}$  und  $\delta_{\text{Frequenz}}$  frequenzabhängig sind und diese Bei-

träge geringer werden, je mehr Frequenzbänder zum Gesamtschall beitragen. Bei der Messung von Schmalbandgeräuschen dürfte deshalb in der Regel eine differenzierte Betrachtung der Messunsicherheit erforderlich sein.

Das Gleiche gilt für stark impulshaltige Schalle mit kurzen Impulsdauern, bei denen nicht nur zusätzliche Beiträge zur Unsicherheit zu berücksichtigen sind, sondern auch eine Korrektur des angezeigten Wertes erforderlich werden kann.



**Abb. 6.8** Kurzzeitmessungen: Messunsicherheit  $\Delta L_{U-\text{Messgerät}}$  von Messgeräten der Klasse 1 und 2 in Abhängigkeit von verschiedenen Lärmarten ( $k = 1,7$ )



**Abb. 6.9** Langzeitmessungen: Messunsicherheit  $\Delta L_{U-\text{Messgerät}}$  von Messgeräten der Klasse 1 und 2 in Abhängigkeit von verschiedenen Lärmarten ( $k = 1,7$ )

Für die praktische Anwendung werden die Ergebnisse aus der Tab. 6.3 in einer übersichtlichen Form in den Tab. 6.5 und 6.6 zusammengefasst.

**Tab 6.5** Kurzzeitmessungen: Messunsicherheit  $\Delta L_{U-\text{Messgerät}}$  von Messgeräten der Klasse 1 und 2 in Abhängigkeit von verschiedenen Lärmarten

Lärmart	Messunsicherheit Klasse 1 $k = 1,7$	Messunsicherheit Klasse 2 $k = 1,7$
	$\Delta L_{U-\text{Messgerät}}$ in dB	$\Delta L_{U-\text{Messgerät}}$ in dB
Industrielärm	1,0	1,4
Impulshaltiger Industrielärm	1,8	2,4
Impulslärm (Einzelimpulse)	2,2	3,3
Hochfrequenter schmalbandiger Industrielärm	1,7	3,7

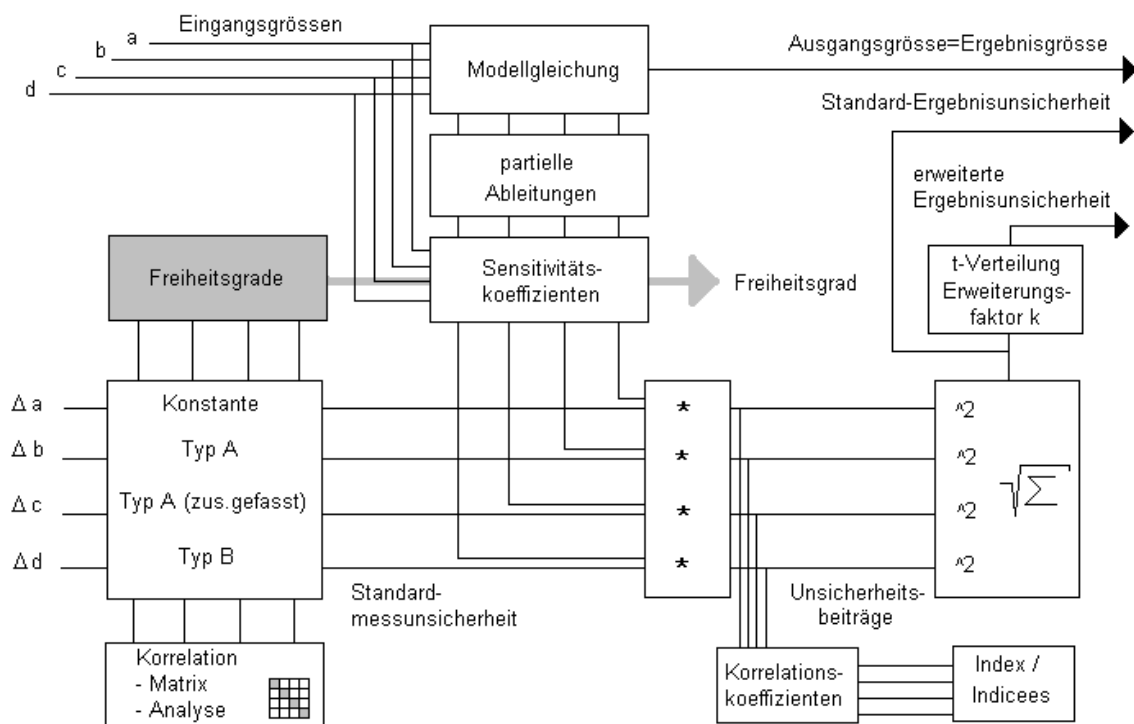
**Tab. 6.6** Langzeitmessungen Messunsicherheit  $\Delta L_{U\text{-Messgerät}}$  von Messgeräten der Klasse 1 und 2 in Abhängigkeit von verschiedenen Lärmarten

Lärmart	Messunsicherheit Klasse 1 $k = 1,7$	Messunsicherheit Klasse 2 $k = 1,7$
	$\Delta L_{U\text{-Messgerät}}$ in dB	$\Delta L_{U\text{-Messgerät}}$ in dB
Industrielärm	1,7	2,8
Impulshaltiger Industrielärm	2,2	3,4
Impulslärm (Einzelimpulse)	2,6	4,1
Hochfrequenter schmalbandiger Industrielärm	3,3	7,3

## 6.8 Unsicherheitsanalyse von Lärmmessverfahren auf der Grundlage der GUM

### 6.8.1 Formulierung eines Modells und dessen Eingangsgrößen

Auf der Grundlage der Arbeitsschritte A bis F nach Abschnitt 6.5.2 und der schematischen Übersicht zur Berechnung der Messunsicherheit nach Abb. 6.10 wird im Folgenden ein Modell für die Berechnung der Messunsicherheit für Lärmmessungen an Arbeitsplätzen entwickelt.



**Abb. 6.10** Schema zur Berechnung der Messunsicherheit

Die Grundlage zur Ermittlung des Tages- Lärmexpositionspegels  $L_{EX,8h}$  bildet die folgende Formel:

$$L_{EX,8h} = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{T_M \cdot \rho_0^2} \int_0^{T_M} p_A^2(t) dt \right) + 10 \cdot \lg \frac{T_e}{T_0} \quad \text{in dB(A)} \quad (6.33)$$

Nach Einführung des Schalldruckpegels für das Quadrat des Schalldruckes erhält man Gl. 6.34.

$$L_{EX,8h} = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} 10^{0,1L_A(t)} dt \right) + 10 \cdot \lg \frac{T_e}{T_0} \quad \text{in dB(A)} \quad (6.34)$$

Ersetzt man das Integral in Gl. 6.34 durch die Summenbildung, um somit zeitlich abgrenzbare und vom Lärmpegel deutlich unterscheidbare Lärmsituationen zu erfassen, führt dies zu Gl. 6.35:

$$L_{EX,8h} = 10 \cdot \lg \frac{1}{T_e} \cdot \sum_{i=1}^m T_i \cdot 10^{\frac{L_{pAeqi}}{10}} + 10 \cdot \lg \frac{T_e}{T_0} \quad \text{in dB(A)} \quad (6.35)$$

Es bedeuten:

$p_A(t)$	A-bewerteter Schalldruck,
$L_A(t)$	Lärmpegel in dB(A) in der Schichtarbeitszeit $T_e$ ,
$L_{pAeqi}$	äquivalenter Dauerschallpegel innerhalb der Teileinwirkzeit $T_i$ ,
$T_e$	Schichtarbeitszeit
$T_i$	Teileinwirkzeit; eigenständiger Zeitabschnitt für eine charakteristische Lärmsituation,
$T_M$	Messzeit $T_M$ innerhalb der typischen Arbeitsschicht $T_e$ oder der Teileinwirkzeit $T_i$
$T_0$	Bezugszeitdauer, $T_0 = 8 \text{ h}$ .

Diese geschlossene mathematische Beziehung zeigt, dass die Ergebnisgröße  $L_{EX,8h}$  im Wesentlichen abhängig ist:

- vom veränderlichen Charakter des Lärmpegels  $L_A(t)$  und der Messzeit  $T_M$  innerhalb der Bezugszeit  $T_0$ , ausgedrückt durch die Messgröße  $L_{pAeqi}$  und
- der Ermittlung der Zeit der typischen Arbeitsschicht  $T_e$  und der Bestimmung der Teileinwirkzeit  $T_i$ .

Die Messunsicherheit der maßgeblichen Eingangsgröße  $L_{pAeqi}$  in Gl. 6.35 und ihre spektrale Verteilung sind eine Funktion vieler verschiedener Einflusskomponenten. Messunsicherheitsbeiträge für die Bestimmung des äquivalenten Dauerschallpegels  $L_{pAeqi}$  lassen sich in folgender Art und Weise beschreiben:

$$L_{pAeqi} = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_v, \dots, X_N) = L_{pAeqi, \text{Messwert}} + \Delta L_{i \text{Messmethode}} + \Delta L_{i \text{Messgerät}} + \Delta L_{i \text{Messobjekt}} + \Delta L_{i \text{Messumgebung}} + \Delta L_{i \text{Messender}} \quad (6.36)$$



mit

$\Delta L_i$  Unsicherheitsbeiträge für die Ermittlung des  $L_{pAeqi}$ .

Die Messpraxis zeigt, dass hauptsächlich drei Lärmkonstellationen unterschieden werden können:

**Lärmtyp I** : zeitlich gleichförmige konstante Lärmexposition mit einer Schallpegel-Variationsweite  $\Delta L_V = L_{\max} - L_{\min} \leq 5 \text{ dB(A)}$ .

**Lärmtyp II** : zeitlich stark veränderliche Lärmexposition mit einer Schallpegel-Variationsweite  $\Delta L_V = L_{\max} - L_{\min} > 5 \text{ dB(A)}$ .

**Lärmtyp III**: zeitlich periodisch veränderliche Lärmexposition mit einer Schallpegel-Variationsweite  $\Delta L_V = L_{\max} - L_{\min} > 5 \text{ dB(A)}$ .

Für den Unsicherheitsbeitrag der Eingangsgröße  $L_{pAeqi}$  des jeweiligen Lärmtyps wird folgende Modellgleichung für die Unsicherheitsbeiträge aufgestellt:

$$\Delta(L_{pAeqi}) = \Delta L_{\text{Messmethode}} + \Delta L_{\text{Messgerät}} + \Delta L_{\text{Messobjekt}} + \Delta L_{\text{Messumgebung}} + \Delta L_{\text{Messender}} \quad (6.37)$$

mit

$i = \text{I, II oder III}$ .

Auf dieser Grundlage können die Unsicherheitsbeiträge für den Lärmtyp I, II, III oder der Kombination aus den Lärmtypen I, II und III ermittelt werden.

Für die kombinierte Varianz des Lärmexpositionspegels  $\Delta L^2(L_{EX,8h})$  lässt sich auf der Basis des analytischen Ausdruckes nach Gl 6.35 in Verbindung mit der Modellgleichung für die Eingangsgröße  $L_{pAeqi}$  Gl. 6.37 die folgende Gleichung angeben:

$$\Delta L^2(L_{EX,8h}) = (c_I \cdot \Delta L_I)^2 + (c_{II} \cdot \Delta L_{II})^2 + (c_{III} \cdot \Delta L_{III})^2 + (c_{T_e} \cdot \Delta T_e)^2 \quad (6.38)$$

mit

$$c_i = \frac{\partial(L_{EX})}{\partial(L_{pAeqi})} \quad \text{mit } i = \text{I, II oder III} \quad (6.39)$$

$$c_{T_e} = \frac{\partial(L_{EX})}{\partial(T_e)} \quad (6.40)$$

Die Empfindlichkeitskoeffizienten errechnen sich bei der Kombination der Lärmtypen I, II, III innerhalb einer Arbeitsschicht wie folgt:

$$c_I = c_{II} = c_{III} = \frac{\partial(L_{EX})}{\partial(L_{pAeqi})} = \frac{T_i}{T_0} \cdot \frac{10^{0,1L_{pAeqi}}}{10^{0,1L_{EX,8h}}} \quad (6.41)$$

Liegen für den eigenständigen Zeitabschnitt  $T_i$  eines Lärmtyps I, II oder III verschiedene Werte von  $T_i$  vor, so ist Gl. 6.38 entsprechend zu erweitern und es gilt:

$$\Delta L^2(L_{EX,8h}) = (c_I \cdot \Delta L_I)^2 + (c_{IT} \cdot \Delta T_I)^2 + (c_{II} \cdot \Delta L_{II})^2 + (c_{IIT} \cdot \Delta T_{II})^2 + (c_{III} \cdot \Delta L_{III})^2 + (c_{IIIT} \cdot \Delta T_{III})^2 \quad (6.42)$$

$$c_{iT} = \frac{\partial(L_{EX})}{\partial(T_i)} \text{ mit } i = I, II \text{ oder } III$$

Die Empfindlichkeitskoeffizienten für Unsicherheitsbeiträge der eigenständigen Zeitabschnitte  $T_i$  errechnen sich bei der Kombination der Lärmtypen I, II, III innerhalb einer Arbeitsschicht nach [5] wie folgt

$$c_{iT} = c_{IIT} = c_{IIIT} = \frac{\partial(L_{EX})}{\partial(T_i)} = \frac{4,34}{T_0} \cdot \frac{10^{0,1L_{pAeqi}}}{10^{0,1L_{EX,8h}}} \cdot \text{ in dB/h.} \quad (6.43)$$

Die kombinierte Standardunsicherheit  $\Delta L(L_{EX,8h})$  für den Lärmexpositionspegel ist die positive Quadratwurzel aus der Summe der Varianzen

$$\Delta L(L_{EX,8h}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (c_i \Delta L_i)^2 + \sum_{i=1}^N (c_{iT} \Delta T_i)^2}$$

Im Folgenden werden mögliche Einflusskomponenten ( $X_i$ ), die eine Auswirkung auf die Unsicherheit des äquivalenten Dauerschallpegels  $L_{pAeqi}$  und damit auf den Lärmexpositionspegel  $L_{EX}$  haben können, entsprechend der Modellgleichung Gl. 6.36 zusammengestellt.

A) Schätzwert der Eingangsgröße ( $L_{pAeqi}$ (Messwert))

B) Messmethode ( $\Delta L_{\text{Messmethode}}$ )

Die Messmethoden werden ausführlich in Abschnitt 7.3 beschrieben.

1. Messmethode 1: Kontinuierliche Messung über einen Gesamtmesszeitraum (z. B. Arbeitsschicht) ( $X_1$ )
2. Messmethode 2: Kontinuierliche Messung in Teilmesszeiten als Teil des Gesamtmesszeitraumes ( $X_2$ )
3. Messmethode 3: Stichprobenmessung im Gesamtmesszeitraum ( $X_3$ )
4. Messmethode 4: Kombinierte Messung im Gesamtmesszeitraum (Kombination aus den Methoden 1 bis 3) ( $X_4$ )

C) Messgerät ( $\Delta L_{\text{Messgerät}}$ )

1. Messgerät ( $X_5$ )
2. Kalibrierung ( $X_6$ )

D) Messobjekt = Schallfeld ( $\Delta L_{\text{Messobjekt}}$ )

1. Betriebsweise der Maschinen und Anlagen, sowohl der „eigenen“ als auch der weiter entfernt liegenden (z. B. 100 %, 80 %, 50 % usw. der Leistung) ( $X_7$ )
2. Material (z. B. Fallhöhe, Materialstärke und -art in der Metallindustrie, Holzbearbeitung usw.) ( $X_8$ )
3. Technologischer Fluss (z. B. Band- und Taktgeschwindigkeiten) ( $X_9$ )
4. Funktionaler und technischer Zustand einer Maschine ( $X_{10}$ )
5. Exemplarstreuung des Maschinentyps, z. B. bei mobilen Arbeitsmaschinen ( $X_{11}$ )
6. Lage der Aufenthaltsorte des Arbeitsplatzes zu den Maschinen und Anlagen ( $X_{12}$ )
7. Abtastung des Schallfeldes durch die Mikrofonposition ( $X_{13}$ )
8. Verwendung von Zusatz- und Anbaugeräten an Bau- und Landmaschinen ( $X_{14}$ )
9. Handhabung und Übungsgrad der Arbeitsperson bei der Nutzung handgeführter und handgehaltener Maschinen ( $X_{15}$ )
10. Akustische Parameter der Arbeitsräume und Fahrerkabinen auf mobilen Arbeitsmaschinen (z. B. Raumabmessungen, mittlerer Absorptionsgrad, Abschirmung zwischen Lärmquelle und Messort, geöffnete Türen und Fenster, z. B. bei mobilen Arbeitsmaschinen) ( $X_{16}$ )
11. Fahrweise des Arbeitnehmers bei der Bedienung von mobilen Arbeitsmaschinen ( $X_{17}$ )
12. Arbeitsorganisation (z. B. Zusammenarbeit zwischen den Menschen an den Maschinen und Anlagen) ( $X_{18}$ )

E) Messumgebung ( $\Delta L_{\text{Messumgebung}}$ )

1. Windeinflüsse an Arbeitsplätzen in Freianlagen der Industrie und Landwirtschaft oder mobilen Arbeitsgeräten, z. B. Straßenfertiger und Traktoren ohne Kabine ( $X_{19}$ )
2. Extreme hohe Lufttemperaturen und Strahlungswärme in der Nähe von Industrieöfen ( $X_{20}$ )
3. Extrem niedrige Temperaturen ( $X_{21}$ )
4. Mechanische Schläge auf das Mikrofon oder an der Kleidung reibendes Mikrofon. ( $X_{22}$ )
5. Nicht typische Lärmquellen, Sprache der Beteiligten, Musik und Sprache von Radios oder Lautsprecheranlagen, seltene Geräusche wie Alarmsignale, untypisch selbsterzeugter Lärm ( $X_{23}$ )

F) Messperson ( $\Delta L_{\text{Messperson}}$ )

1. Tätigkeits-Zeitanalyse, z. B. Interviewmethode, gegebenenfalls in Verbindung mit einer Stoppuhr zur Ermittlung von Tätigkeitszeiten oder Anwendung eines spezielleren Verfahrens, z. B. Multimomentstudie ( $X_{24}$ )
2. Auswahl des Messtages ( $X_{25}$ )

**6.8.2 Beurteilung der Einflusskomponenten ( $X_i$ )**

Zu 6.8.1 A) Messwert der Eingangsgröße

Dem Messwert  $L_{pAeq}$  an sich wird keine Unsicherheit zugeordnet.

### Zu 6.8.1 B) Messmethode ( $X_1$ bis $X_4$ )

Nach bisherigen Erkenntnissen sind alle vier Messmethoden gut geeignet, um den Messwert, d. h. den äquivalenten Dauerschallpegel  $L_{pAeq}$ , zu ermitteln.

Aus einer Müller-BBM-Untersuchung ist bekannt, dass z. B. die „tätigkeitsbezogene Messung im Gesamtmesszeitraum( $X_4$ )“, d. h. eine kontinuierliche Messung des äquivalenten Dauerschallpegels  $L_{pAeq}$  mit einem integrierenden Schallpegelmessgerät innerhalb verschiedener tätigkeitsbezogener Zeiten, näherungsweise den gleichen Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX}$  liefert, wie die Anwendung der „kontinuierlichen Messung über einen Gesamtmesszeitraum ( $X_1$ )“, bei der ein Lärmdosimeter unter sonst gleichen Messbedingungen verwendet wurde (siehe Beispiele 13, 14 und 15 im Abschnitt 7.4.3.3).

Die „kontinuierliche Messung in Teilmesszeiten ( $X_2$ )“ und die „Stichprobenmessung ( $X_3$ )“ können bei einer nicht repräsentativen Auswahl der Messzeit bzw. des Stichprobenumfangs zu größeren Messunsicherheiten führen, und zwar dann, wenn die geräuschrelevanten Parameter in der Messzeit bzw. in der Stichprobe nicht enthalten sind.

Es ist ersichtlich, dass bei nicht korrekter Anwendung der jeweils ausgewählten Messmethode ( $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ) der Lärmexpositionspegel und die damit verbundene Messunsicherheit beeinflusst werden kann.

### Zu 6.8.1 C) Messgerät ( $X_5$ bis $X_6$ )

Die zu ermittelnde Messgröße „äquivalenter Dauerschallpegel  $L_{pAeq}$ “ oder „Lärmdosis  $E$ “ werden mit einem Schallpegelmessgerät oder einem Lärmdosimeter gemessen. Der äquivalente Dauerschallpegel kann mit einem integrierenden Schallpegelmessgerät direkt gemessen oder indirekt mit Hilfe eines Lärmdosimeters bestimmt werden. Die Lärmdosis  $E$  wird mit einem Lärmdosimeter gemessen.

In den Abschnitten 6.7.4 und 6.7.5 werden die Messunsicherheiten für die Schallpegelmessgeräte der Klasse 1 und der Klasse 2 in Verbindung mit den zugehörigen Kalibratoren in den Tab. 6.5 und 6.6 angegeben. Danach liegen für Kurzzeitmessungen die Messunsicherheiten für ein Messgerät der Klasse 1 in Abhängigkeit von der Lärmart in der Industrie zwischen 1,0 und 2,2 dB und für einen Schallpegelmessgerät der Klasse 2 zwischen 1,4 und 3,7 dB.

Bei entsprechenden Langzeitmessungen können sich die Messunsicherheiten durch entsprechende Umgebungsschwankungen vergrößern, so dass für die unterschiedlichen Lärmarten in der Industrie für einen Schallpegelmessgerät der Klasse 1 die Messunsicherheiten zwischen 1,7 und 3,3 dB und für ein Messgerät der Klasse 2 zwischen 2,8 und 7,3 dB liegen (siehe Tab. 6.6).

### Zu 6.8.1 D) Messobjekt = Schallfeld ( $X_7$ bis $X_{18}$ )

Die unter Abschnitt D) „Messobjekt“ aufgeführten Einflusskomponenten haben einen Zufallscharakter und können im weitesten Sinne unter dem Begriff „Messbedingun-

gen“ zusammengefasst werden. Zu den Messbedingungen zählen, wie oben beispielsweise angegeben, die Betriebsweise der Maschinen und Anlagen, die Materialänderungen, die funktional-technischen Zustände der Maschinen oder anderer Lärmquellen einschließlich zusätzlicher Arbeitsgegenstände sowie in Räumen die akustischen Raumparameter wie Raumabmessungen, mittlerer Schallabsorptionsgrad, Abschirmung zwischen Lärmquelle und Nachweisort, geöffnete und geschlossene Fenster usw. Dies sind alles geräuschrelevante Einflusskomponenten, die zu mehr oder weniger starken Schwankungen des Schallpegels am Arbeitsplatz führen.

Die Schwankung des Pegels hängt außerdem von den unterscheidbaren Tätigkeiten am selben oder verschiedenen Orten der Arbeitsperson ab.

Die Einflusskomponenten führen in der Regel zu nicht erfassbaren Änderungen des Schallfeldes, in dem sich der Beschäftigte aufhält. Die Schalländerungen im Schallfeld können durch statistische Mess- und Auswertemethoden beschrieben werden.

Mittels der Anwendung einer der o. g. Messmethoden ( $X_1$  bis  $X_4$ ) im Zusammenhang mit der Verwendung statistischer Verfahren lässt sich auf der Grundlage von mehreren unabhängigen Einzelmessungen der wahrscheinliche Wert schätzen sowie die Messunsicherheit berechnen. Die Messunsicherheit wird umso kleiner sein, je größer die Anzahl der unabhängigen Einzelmessungen und je kleiner die Schallpegelvariationsweite der Einzelmesswerte ist. Darüber hinaus wird die Messunsicherheit ebenfalls klein sein, wenn die auftretende Lärmsituation kontinuierlich über die gesamte Schichtzeit  $T_e$  erfasst wird.

Entsprechend der DIN EN ISO 9612 [5] spielt die Mikrofonposition, insbesondere bei ohrnahen Schallquellen, eine wichtige Rolle. Das betrifft insbesondere handgeführte Geräte, z. B. Bohrhämmer, Bolzensetzgeräte, handgeführte Fräsen, Sägen usw. Hier kann es zu einer Unterschätzung des Lärmexpositionspegels kommen. Auch wird darauf hingewiesen, dass beim Einsatz von am Körper des Beschäftigten befestigten Messgeräten, sogenannten Lärmdosimetern, oder in Fällen eines sehr dicht am Körper des Beschäftigten positionierten Mikrofons die Messergebnisse durch Abschirmeffekte und Reflexion am Körper beeinflusst werden. Das ist insbesondere bei hochfrequenten Geräuschen und bei Lärmimpulsen am Ohr zu erwarten.

Die möglichen Abweichungen können jedoch durch entsprechende Festlegungen im Messverfahren klein gehalten werden.

In der DIN EN ISO 9612 gibt man für die Mikrofonposition eine Standardunsicherheit von 1 dB an.

Erfahrungsgemäß führen die unter 6.8.1 D) aufgeführten Einflussfaktoren gegenüber denen in 6.8.1 B), C), E) und F) zu den weitaus größeren Unsicherheitsbeiträgen (siehe dazu beispielsweise Tab. 4 im Anhang).

Zu 6.8.1 E) Messumgebung ( $X_{19}$  bis  $X_{23}$ )

Der Fehler durch Windeinflüsse kann durch einen Windschirm klein gehalten werden. Wie in Tab. 6.2 gezeigt, liegen die Fehlergrenzen zwischen 0 bis 0,12 dB.

Die Berücksichtigung von extremen Temperaturen kommt nur bei besonderen Messeinsätzen in Frage. Die Messunsicherheit muss dann anhand der Messanordnung bzw. dem Messgerät abgeschätzt und evtl. zugeordnet werden.

Für nicht typische Lärmquellen wie Sprache der Beteiligten, Musik und Sprache von Radios oder Lautsprecheranlagen sowie seltene Geräusche und untypischen selbst-erzeugten Lärm wurde in einer mehrtägigen Studie festgestellt, dass bei Lärmexpositionen über 85 dB keine Abweichungen gegenüber der tatsächlichen Lärmsituation festzustellen waren.

#### Zu 6.8.1 F) Messperson ( $X_{24}$ bis $X_{25}$ )

In der Regel kann man bei der Tätigkeitszeitanalyse davon ausgehen, dass die manuelle Zeiterfassung am Arbeitsplatz durch eine sogenannte Interviewmethode durchgeführt wird. Geht man beispielsweise von einem 10%igen Schätzfehler der Zeit aus, das wäre bei einem Mittelwert von z. B. 400 min und einer damit zu erwartenden Abweichung von  $\pm 40$  min, dann liegt der Unsicherheitsbeitrag bei  $\pm 0,44$  dB.

Die Unsicherheit aufgrund der Auswahl des Messtages kann klein gehalten werden, indem auf der Grundlage der Arbeitsplatzanalyse ein repräsentativer Arbeitstag gewählt wird.

### 6.8.3 Schlussfolgerungen aus den Unsicherheitsanalysen für die Lärmtypen I, II und III

Mit der Beurteilung der Einflusskomponenten wird gezeigt, dass die Unsicherheitsbeiträge

- Messmethode,  $\Delta L_{\text{Messmethode}}$
- Messgerät + Kalibrierung,  $\Delta L_{\text{Messgerät}}$
- Messobjekt = Schallfeld,  $\Delta L_{\text{Messobjekt}}$
- Messumgebung,  $\Delta L_{\text{Messumgebung}}$  und
- Messender,  $\Delta L_{\text{Messender}}$ .

zur Messunsicherheit der Ergebnisgröße  $L_{\text{EX},8\text{h}}$  unterschiedlich stark beitragen. Die Unsicherheitsanalysen der Messmethoden für die Lärmtypen I, II und III in den Tab. 1 bis 7 im Anhang geben darüber detailliert Auskunft.

Wie unter 6.8.1 A) bis 6.8.1 F) festgestellt, liegen die wichtigsten Ursachen für die zufälligen Abweichungen im Messobjekt, d. h. im Zustand des Schallfeldes, das insbesondere von einer Vielzahl von Einflussfaktoren geprägt wird. Das heißt, der veränderliche Zustand des Schallfeldes wird am stärksten durch die Änderung des Schalldruckes charakterisiert, der als physikalische Größe quadratisch in die Ergebnisgröße  $L_{\text{EX},8\text{h}}$  und  $L_{\text{EX},40\text{h}}$  eingeht. Durch die Unsicherheitsanalyse kommt man zu dem Schluss, dass sich die Unsicherheitsbeiträge der Messmethode und des Messobjektes nicht trennen lassen. Insofern ist es folgerichtig, dass die beiden Unsicherheitsbeiträge in einem Unsicherheitsbeitrag zusammengefasst werden zu:

$$\Delta L_{\text{Methode}} = \Delta L_{\text{Messmethode}} + \Delta L_{\text{Messobjekt}} \quad (6.44)$$

Um den Einfluss der anderen oben beschriebenen Faktoren so klein wie nur irgendwie möglich zu halten, muss man entsprechende Randbedingungen für die Messungen festlegen. Dies geschieht in der Regel durch ein Messverfahren. Das genau die Tätigkeiten beschreibt, wie sie bei der Ausführung der Messung unter Festlegung einer Messmethode angewendet werden müssen.

Trotzdem kann dann immer noch davon ausgegangen werden, dass für die genannten Einflussfaktoren kleine Unsicherheitsbeiträge bleiben. Diese kleinen, nicht bestimmbar Änderungen sind dann wiederum ein Teil des Unsicherheitsbeitrages des Messobjektes, d. h. des Zustands des Schallfeldes.

Damit ergeben sich nennenswerte bestimmbare Unsicherheitsbeiträge nur aus

- der Messmethode in Verbindung mit dem Messobjekt ( $\Delta L_{\text{Methode}}$ ) und
- Messgerät + Kalibrierung ( $\Delta L_{\text{Messgerät}}$ ).

Unter diesen Bedingungen ergibt sich die Modellgleichung zu:

$$L_{pAeqi} = L_{pAeqi; \text{Messwert}} + \Delta L_{i\text{Methode}} + \Delta L_{i\text{Messgerät}}. \quad (6.45)$$

#### 6.8.4 Berechnung der Standardunsicherheit $u(x_i)$ und der Messunsicherheit für die Unsicherheitsbeiträge $\Delta L_{\text{Methode}}$ und $\Delta L_{\text{Messgerät}}$

Wie oben erläutert klassifiziert die GUM den Unsicherheitsbeitrag nach der Ermittlungsmethode Typ A und Typ B. Dabei bedeuten:

Typ A: Auswertung durch statistische Analysen von Messreihen,

Typ B: Auswertung mit anderen Mitteln als der statistischen Analyse von Messreihen.

Die GUM unterscheidet nicht zwischen zufälligen und systematischen Unsicherheitskomponenten. Dabei ist allerdings vorausgesetzt, dass man erkannte systematische Messabweichungen, sofern das möglich ist, entweder durch technische Maßnahmen beseitigt oder aber rechnerisch korrigiert.

#### Berechnung der kombinierten Standardunsicherheit $u_c(y)$ (siehe Abschnitt 6.5.2, Absatz D)

Die kombinierte Standardunsicherheit  $u_c(y)$  der Messgröße  $Y$  wird aus den Unsicherheiten der Eingangsgrößen berechnet. Hierzu ist es erforderlich, dass die Unsicherheiten als sogenannte Standardunsicherheiten  $u_i = u(x_i)$  angegeben werden. Bei statistisch ermittelten Unsicherheiten entspricht die Standardunsicherheit der Standardabweichung  $s$  des Mittelwertes der Stichprobe.

Sind die Eingangsgrößen  $X_i$  nicht korreliert, so lassen sich deren Unsicherheiten durch gewichtete quadratische Summation zur kombinierten Messunsicherheit von  $Y$  zusammenfassen.

Die kombinierte Varianz  $u_c^2(y)$  kann deshalb wie folgt dargestellt werden:

$$u_c^2(y) = \left[ \frac{\partial f}{\partial x_1} \right]^2 u^2(x_1) + \left[ \frac{\partial f}{\partial x_2} \right]^2 u^2(x_2) + \dots + \left[ \frac{\partial f}{\partial x_N} \right]^2 u^2(x_N) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i). \quad (6.46)$$

Die Gewichtskoeffizienten  $c_i$  (Empfindlichkeitskoeffizienten) sind durch die sogenannte partielle Ableitung der Modellfunktion  $f$  nach der Eingangsgröße  $X_i$  gegeben:

$$c_i = \frac{\partial f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)}{\partial X_i}. \quad (6.47)$$

Damit ergibt sich die kombinierte Varianz  $u_c^2(y)$  aus der Summe der einzelnen Varianzen:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N [c_i \cdot u(x_i)]^2 \equiv \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (6.48)$$

Anhand der Summendarstellung kann man erkennen, mit welchem Beitrag jede geschätzte Varianz zur kombinierten Varianz  $u_c^2(y)$  beiträgt. Die folgende Formel zeigt die Zerlegung in die einzelnen Summanden:

$$u_c^2(y) = (u_1^2(y) + u_2^2(y) + \dots + u_{N-1}^2(y) + u_N^2(y)) \quad (6.49)$$

Werden die kombinierten Varianzen in Gl. 6.48 unter separater Behandlung der Standardunsicherheiten nach den Ermittlungsmethoden A und B nach GUM errechnet, so kann man die nach der gleichen Methode ermittelten Standardunsicherheiten auch zusammenfassen zu:

$$u_c^2(y) = (u_{cA}^2(y) + u_{cB}^2(y)). \quad (6.50)$$

Die Möglichkeit die kombinierte Varianz  $u_c^2(y)$  zu zerlegen, wird hier auf die zu untersuchenden Lärmessverfahren angewandt.

Wie oben gezeigt ergeben sich nennenswerte bestimmbar Unsicherheitsbeiträge bei der Lärmessung aus

$$\Delta(L_{EX}) = \Delta(L_{pAeqi}) = \Delta L_{\text{Methode}} + \Delta L_{\text{Messgerät}} \quad (6.51)$$

Die Unsicherheitsbeiträge  $\Delta L_{\text{Methode}}$  und  $\Delta L_{\text{Messgerät}}$  werden auf der Grundlage der GUM berechnet nach:

$$u_c^2(L_{EX}) = u_{c\text{Methode}}^2 + u_{c\text{Messgerät}}^2 \quad (6.52)$$

Zur Ermittlung der Varianz  $u_{c\text{Methode}}^2$  wird sowohl die Ermittlungsmethode A als auch B wie folgt angewandt:



$$u_{\text{cMethode}}^2(y) = (u_{\text{cA}}^2(y) + u_{\text{cB}}^2(y)) \quad (6.53)$$

Für die Erhebung der Varianz  $u_{\text{cMessgerät}}^2$  wird die Ermittlungsmethode B verwendet und ergibt sich damit zu:

$$u_{\text{cMessgerät}}^2(y) = (u_{\text{cB}}^2(y)). \quad (6.54)$$

Die kombinierte Standardunsicherheit für den Expositionspegel  $u_{\text{c}}(L_{\text{EX}})$  ist die positive Quadratwurzel aus den kombinierten Varianzen der „Methode“ und des „Messgerätes“

$$u_{\text{c}}(L_{\text{EX}}) = \sqrt{u_{\text{cMethode}}^2 + u_{\text{cMessgerät}}^2} \quad (6.55)$$

Berechnung der erweiterten Messunsicherheit  $U$  (siehe Abschnitt 6.5.2, Absatz E)

Für die erweiterte Unsicherheit gilt:

$$U = k \cdot u_{\text{c}}(L_{\text{EX}}) \quad (6.56)$$

$$U(L_{\text{EX}}) = \sqrt{k^2 (u_{\text{cMethode}}^2 + u_{\text{cMessgerät}}^2)} \quad (6.57)$$

$$U(L_{\text{EX}}) = \sqrt{(k \cdot u_{\text{cMethode}})^2 + (k \cdot u_{\text{cMessgerät}})^2} \quad (6.58)$$

Mit  $k \cdot u_{\text{cMethode}} = U_{\text{Methode}}$  und  $k \cdot u_{\text{cMessgerät}} = U_{\text{Messgerät}}$  folgt daraus

$$U(L_{\text{EX}}) = \sqrt{U_{\text{Methode}}^2 + U_{\text{Messgerät}}^2} \quad (6.59)$$

Zur Bildung der erweiterten Messunsicherheit wird entsprechend dem Vorschlag im Abschnitt 6.6.3 in den folgenden Betrachtungen und in den Praxisbeispielen der Erweiterungsfaktor  $k = 1,7$  angegeben und für Berechnungen verwendet.

Vollständige Angabe der erweiterten Messunsicherheit  $U$  (siehe Abschnitt 6.5.2, Absatz E)

Das Ergebnis kann dann durch  $Y = y \pm U$  angegeben werden.

### 6.8.5 Angabe der Messunsicherheit bei Lärmmessungen

Zu jeder Ermittlung des Lärmexpositionspegels  $L_{\text{EX}}$  und des Spitzenschalldruckpegels  $L_{\text{pC,peak}}$  sind die Messunsicherheiten anzugeben. Wegen einer einheitlichen Beschreibungssystematik und Darstellungsweise von Lärmexpositionspegeln mit ihren Messunsicherheiten innerhalb der Lärmesstechnik, wird auf die Messunsicherheit  $U$  die in der Akustik gewohnte Pegelschreibweise angewandt:

$$\Delta L_{\text{U}}(L_{\text{EX}}, L_{\text{pC,peak}}) = \sqrt{\Delta L_{\text{U-Methode}}^2 + \Delta L_{\text{U-Messgerät}}^2} \quad (6.60)$$

mit

$\Delta L_{U\text{-Methode}}$	durch die Messmethode und dem Messobjekt mit all ihren Einflussfaktoren verursachte Unsicherheit
$\Delta L_{U\text{-Messgerät}}$	durch das Messgerät + Kalibrierung verursachte Unsicherheit
$\Delta L_U(L_{EX}, L_{pC,peak})$	Messunsicherheit für die Ergebnisgröße der Messung ( $k = 1,7$ )

Die Angabe des Tages-Lärmexpositionspegels mit der Messunsicherheit erfolgt dann in einfacher Weise nach

$$L_{EX,8h} \pm \Delta L_U \text{ in dB(A),} \quad (6.61)$$

die Angabe des Wochen-Lärmexpositionspegels nach

$$L_{EX,40h} \pm \Delta L_U \text{ in dB(A),} \quad (6.62)$$

die Angabe des Spitzenschalldruckpegels nach

$$L_{pC,peak} \pm \Delta L_U \text{ in dB(C).} \quad (6.63)$$

## 7 Messverfahren

### 7.1 Lärmexpositionspegel und Spitzenschalldruckpegel

#### 7.1.1 Tages-Lärmexpositionspegel

Der Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  dient zur Kennzeichnung der durchschnittlichen Lärmeinwirkung an einem Arbeitsplatz. Er ist hier der über eine Arbeitsschicht von  $T_0 = 480$  min (8 Stunden) Dauer gemittelte Lärmpegel.  $L_{EX,8h}$  ist ein Maß für die Stärke der Lärmexposition am Arbeitsplatz. Der Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  setzt sich zusammen aus dem äquivalenten Dauerschallpegel  $L_{pAeq}$  während der Schichtarbeitszeit  $T_e$  und eventuell einer Zeitkorrektur, die sich aus dem Verhältnis von Schichtarbeitszeit  $T_e$  und Bezugszeitdauer  $T_0$  berechnet. Prinzipiell wird der Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  nach Gleichung (7.1) gebildet:

$$L_{EX,8h} = L_{pAeq,T_e} + 10 \cdot \lg \frac{T_e}{T_0} \text{ in dB(A)} \quad (7.1)$$

mit

$L_{pAeq,T_e}$	äquivalenter Dauerschallpegel in der typischen Arbeitsschicht in dB(A),
$T_e$	Schichtarbeitszeit in h,
$T_0$	Bezugszeitdauer, $T_0 = 8$ h.

Für die Ermittlung des Tages-Lärmexpositionspegels  $L_{EX,8h}$  am Arbeitsplatz gilt als Bezugszeitdauer  $T_0 = 8$  h, auch dann, wenn die tatsächliche Dauer der Arbeitsschicht von 8 h abweicht. Erfahrungsgemäß liegt die Schichtarbeitszeit  $T_e$  zwischen 7 h und 11 h. Sie kann sich aus Teileinwirkzeiten zusammensetzen:

$$T_e = \sum_{i=1}^n T_i \quad (7.2)$$

mit

$T_i$	Teileinwirkzeit in h,
$n$	Anzahl der unterschiedenen Teileinwirkzeiten.

Der Tages-Lärmexpositionspegel ist ohne Impuls- und Tonzuschlag zu bestimmen.

Bei der Ermittlung des Tages-Lärmexpositionspegels  $L_{EX,8h}$  wird vorausgesetzt, dass während der Arbeitsschicht, in der die Messung durchgeführt wird, die dort vorkommenden Betriebszustände über viele Schichten gleichartig sind.

Der Tages-Lärmexpositionspegel ist im Allgemeinen von Arbeitsplatz zu Arbeitsplatz einer Arbeitsstätte verschieden.

Die Grundsätze für die Ermittlung der Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX, 8h}$  an ortsfesten Arbeitsplätzen gelten entsprechend analog für ortsveränderliche Arbeitsplätze, z. B. auf fahrbaren Maschinen, Fahrzeugen, Arbeiten mit handgehaltenen und handgeführten Geräten in einem bestimmten regionalen Bereich, z. B. Forstarbeiter mit Kettensäge bei Waldarbeiten.

In den Fällen, in denen die Tagesbeurteilungspegel sehr unterschiedlich sind, darf ausnahmsweise als Bezugszeit eine wöchentliche Arbeitszeit von 40 h der Beurteilung zugrunde gelegt werden.

### 7.1.2 Wochen-Lärmexpositionspegel

Sind die Lärmexpositionen an den einzelnen Arbeitstagen stark unterschiedlich, so lässt sich für einen solchen Arbeitsplatz keine längerfristig typische tägliche Lärmexposition angeben. Das ist z. B. auch dann der Fall, wenn an einzelnen Tagen der Woche überhaupt keine Lärmexposition besteht. Liegen solche Fälle vor, darf der Wochen-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,5d}$  ausnahmsweise als wöchentlicher Mittelwert der einzelnen Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$L_{EX,5d} = 10 \cdot \lg \left[ \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \cdot 10^{0,1(L_{EX,8h})} \right] \text{ in dB(A).} \quad (7.3)$$

Bezieht man obige Gleichung auf die Wochenarbeitszeit von 40 h, erhält man für den Wochenbeurteilungspegel:

$$L_{EX,40h} = 10 \cdot \lg \left[ \frac{1}{40} \sum_{i=1}^m T_i \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Aeqi}} \right] \text{ in dB(A)} \quad (7.4)$$

mit

- $L_{Aeqi}$  äquivalenter Dauerschallpegel  $L_{Aeqi}$  für die Teileinwirkzeit  $T_i$  in dB(A),
- $T_i$  Dauer der Teileinwirkzeit innerhalb der Woche in h,
- $T_0$  5 d- bzw. 40 h- Bezugszeitdauer,
- $m$  Anzahl der unterschiedenen Teileinwirkzeiten innerhalb der Woche,
- $L_{EX,5d}; L_{EX,40h}$  äquivalenter Dauerschallpegel für die Arbeitswoche in dB(A).

### 7.1.3 C-bewerteter Spitzenschalldruckpegel

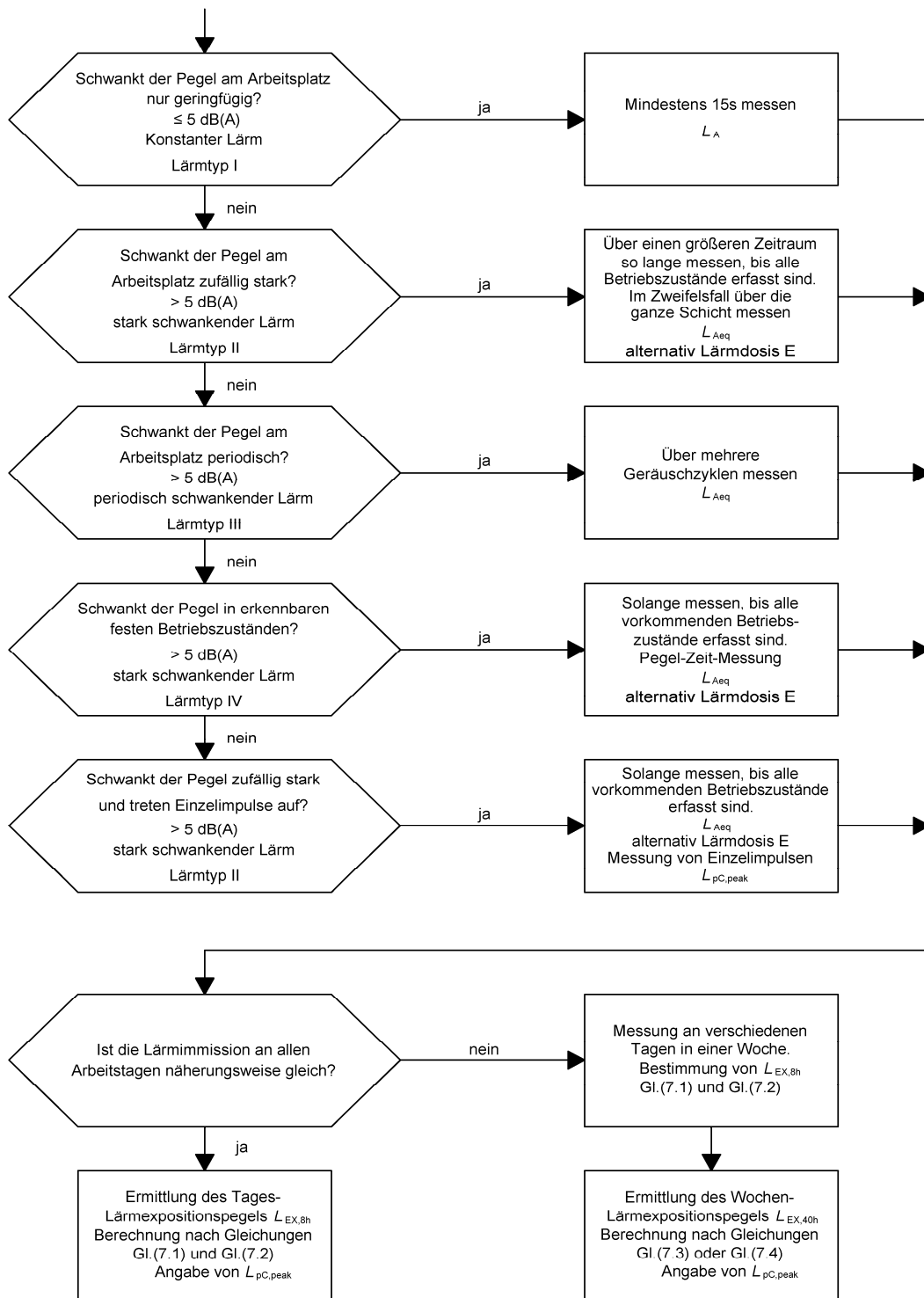
Zur Beurteilung der Lärmexposition nach der „Lärm-Vibrations-Arbeitsschutz-Verordnung“ [2] ist als zweite Messgröße bei stark impulshaltigem Lärm der Spitzenschalldruckpegel  $L_{pC,peak}$  zu messen. Schon ein einmaliger Schallimpuls in der Arbeitsschicht mit einem Spitzenwert von  $L_{pC,peak} = 137$  dB(C) oder mehr macht die Kennzeichnung der Arbeitsstätte als Lärmbereich erforderlich mit der Konsequenz der Einleitung weiterer Schutzmaßnahmen.

## 7.2 Wegweiser für die Auswahl eines Messverfahrens

Bei den Pflichten der Arbeitgeber nimmt die Gefährdungsbeurteilung für die Arbeitsplätze eine besonders wichtige Rolle ein. Im Rahmen ihrer Pflichten gemäß Abschnitt 2, § 3 der LärmVibrationsArbSchV müssen die Arbeitgeber die Gefährdung durch Lärm beurteilen und erforderlichenfalls Messungen der Lärmexposition vornehmen lassen. Dabei können die Arbeitnehmer der Lärmexposition unmittelbar oder künftig ausgesetzt sein.

§ 4 und § 5 der Verordnung gehen davon aus, dass die Messungen fachkundig und nach dem Stand der Technik durchgeführt und geeignete Messverfahren und -geräte verwendet werden, die eine Entscheidung über die Einhaltung der festgesetzten Auslösewerte und maximal zulässigen Expositionswerte erlauben.

Der Wegweiser nach Abb. 7.1 für die Auswahl eines Messverfahrens bildet die Grundlage für die Ermittlung der Lärmexposition. Er ist ein Vorschlag für die einheitliche Erhebung von Tages- und Wochen-Lärmexpositionspegeln an Arbeitsplätzen in Arbeitsstätten und bildet damit gleichzeitig die Basis für die Beurteilung der Gehörgefährdung.



**Abb. 7.1** Auswahlschema für ein Messverfahren zur Bestimmung des Tages-Lärmexpositionspegels  $L_{EX,8h}$ , des Wochen-Lärmexpositionspegels  $L_{EX,40h}$  und des Spitzenschalldruckpegels  $L_{pC,peak}$

### 7.3 Die Messunsicherheit und ihre wirtschaftliche Bedeutung

Wie in Abschnitt 6.8.5 dargelegt, gehört zu jeder Ermittlung des Tages- oder Wochen-Lärmexpositionspegels  $L_{EX,8h}$  bzw.  $L_{EX,40h}$  und des Spitzenschalldruckpegels  $L_{pC,peak}$  eine Messunsicherheit  $\Delta L_U$ .

Der zur Messwertermittlung nötige Aufwand ist von der jeweiligen realen Lärmexpositionssituation und den Anforderungen an die Messunsicherheit  $\Delta L_U$  abhängig. Daher muss sich der Anspruch an die Messunsicherheit nach dem Zweck der Messung richten.

- Der Aufwand bei der Messwertermittlung ist klein, wenn eine eindeutige Auslöse-/Expositionswertüberschreitung oder Auslöse-/Expositionswertunterschreitung zu erwarten ist.
- Der Aufwand wird groß, wenn der Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  in Verbindung mit der Messunsicherheit  $\Delta L_U$  den Auslöse- oder Expositionswert einschließt und eine Unterscheidung nur durch eine Verkleinerung des Unsicherheitsbereiches  $\Delta L_U$  des Tages-Lärmexpositionspegels  $L_{EX,8h}$  erzielt werden kann.

Jede Verringerung der Messunsicherheit  $\Delta L_U$  erhöht den notwendigen Aufwand an investierter Zeit sowie den Aufwand an qualifiziertem Fachpersonal und unter Umständen höherwertigen und damit teuren Messgeräten oder -ausrüstungen. Übertriebene Forderungen an die Messunsicherheit erhöhen unter Umständen die Kosten für Messeinsätze erheblich.

Andererseits muss im Hinblick auf die möglicherweise entstehenden Kosten bei der Planung und Realisierung von Lärminderungsmaßnahmen eine dem Zweck der Messung angepasste Messunsicherheit gefordert werden. Eine nicht angemessene Festlegung der Genauigkeit der Messung und der Messunsicherheit und die damit möglicherweise verbundene Fehlentscheidung über die Nichteinhaltung des oberen Auslösewertes kann die Kosten für die Lärminderung an Maschinen, Geräten und Arbeitsstätten in eine unverträgliche Höhe treiben.

### 7.4 Methoden für die Ermittlung des A-bewerteten äquivalenten Dauerschallpegels $L_{pAeq,Te}$ für die Lärmtypen I bis IV

#### 7.4.1 Übersicht der verschiedenen Messmethoden zur Messwertermittlung

Das Ziel der Messwertermittlung ist die Bestimmung des **A-bewerteten äquivalenten Dauerschallpegels  $L_{pAeq,Te}$  für eine typische Arbeitsschicht** als Grundlage für die Bestimmung des Tages-Lärmexpositionspegels  $L_{EX,8h}$  einschließlich seiner Messunsicherheit  $\Delta L_U$ .

Für die Ermittlung von  $L_{pAeq,Te}$  können folgende voneinander abgrenzbare Methoden angegeben werden.

1. **Messmethode 1: Kontinuierliche Messung über einen Gesamtmesszeitraum (z. B. Arbeitsschicht).** Kontinuierliche Messung des äquivalenten Dauerschallpegels  $L_{pAeq}$  während einer Gesamtmesszeit, z. B. eine Arbeitsschicht  $T_e$  mit einem integrierenden Schallpegelmessgerät oder einem Lärmdosimeter.
2. **Messmethode 2: Kontinuierliche Messung in Teilmesszeiten des Gesamtmesszeitraumes.** Kontinuierliche Messung des äquivalenten Dauerschallpegels  $L_{pAeq}$  während der Arbeitsschicht  $T_e$  mit einem integrierenden Schallpegelmessgerät oder einem Lärmdosimeter, jedoch mit einer Messzeit, die viel kleiner als die Zeit der Arbeitsschicht ist, jedoch als repräsentative Zeitstichprobe für die gesamte Arbeitsschicht angesehen werden kann,  $T_M \ll T_e$ .
3. **Messmethode 3: Stichprobenmessung im Gesamtmesszeitraum.** Messung von Einzelschallpegeln  $L_{Ai}$  oder Kurzzeit- $L_{pAeqi}$  zur Ermittlung des äquivalenten Dauerschallpegels  $L_{pAeq}$  für eine Arbeitsschicht unter Anwendung statistischer Methoden.
4. **Messmethode 4: Kombinierte Messung im Gesamtmesszeitraum** (Kombination aus den Messmethoden 1 bis 3): Ist eine Messstrategie, die sich aus den oben beschriebenen drei Messmethoden zusammensetzt und besonders geeignet ist für tätigkeitsbezogene Messungen. Es erfolgt eine kontinuierliche Messung des äquivalenten Dauerschallpegels  $L_{pAeq}$  innerhalb verschiedener tätigkeitsbezogener Zeiten und an unterschiedlichen Arbeitsorten. In Abhängigkeit von der Tätigkeit wird die Schichtarbeitszeit in Teileinwirkzeiten zerlegt, in denen kontinuierliche Messungen oder Stichprobenmessungen durchgeführt werden.

Das in der konkreten Situation anzuwendende Messverfahren richtet sich nach dem Charakter der Lärmexposition, der maßgeblich durch den Tätigkeitsverlauf am Arbeitsplatz in Verbindung mit den genutzten und bestehenden Maschinen und Anlagen bestimmt wird. Die detaillierte Arbeitsplatzanalyse ist eine wesentliche Voraussetzung, um den Charakter der Lärmexposition über die Schichtzeit vorausschauend zu erkennen und dessen Verlauf einzuschätzen. Der Messende hat damit die Verantwortung, auf der Grundlage seiner Fachkompetenz ein vom Zeitaufwand wirtschaftliches und effektives Messverfahren auszuwählen.

Im Folgenden sollen daher verschiedene Messmethoden aufgezeigt werden, die es erlauben, mit dem entsprechenden Vorwissen durch eine Arbeitsplatzanalyse eine wirtschaftlich und fachlich vertretbare Lärmmessung zur Ermittlung des Lärmexpositionspegels am Arbeitsplatz durchzuführen.

#### 7.4.2 Anwendung der Messmethoden auf eine gleichförmig konstante Lärmexposition mit einer Schallpegel-Variationsweite

$\Delta L_v = L_{\max} - L_{\min} \leq 5 \text{ dB(A)} - \text{Lärmtyp I}$

##### 7.4.2.1 Praxisbeispiele in der Industrie

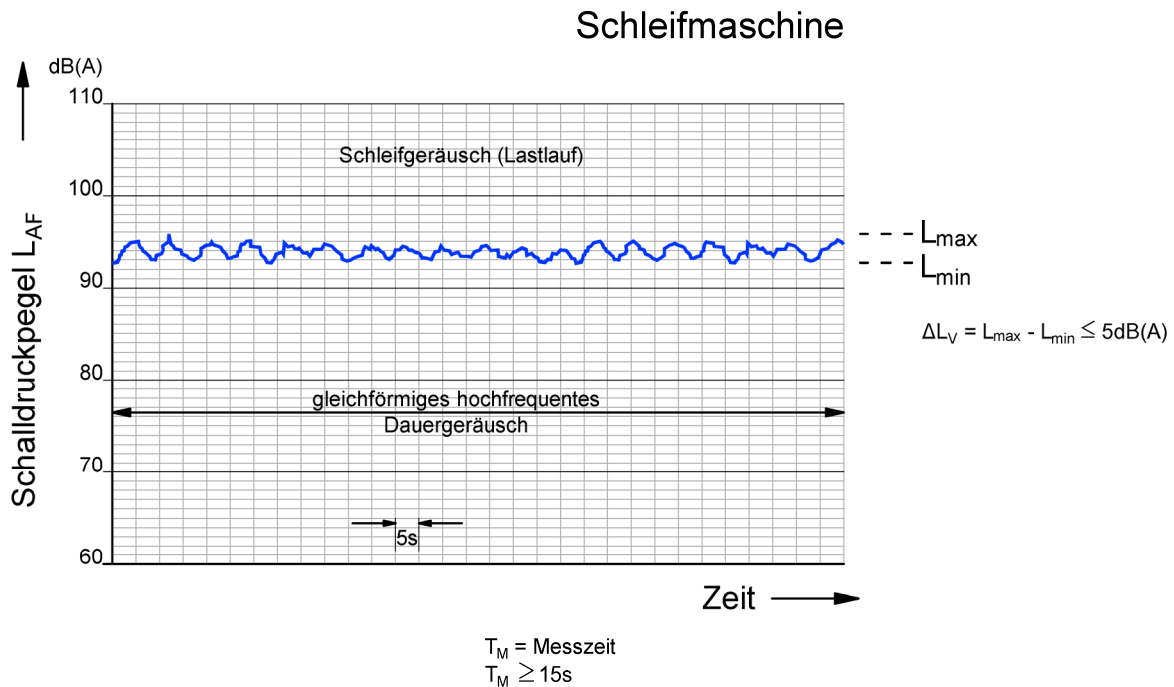
Bei nahezu konstantem Lärm mit einer Lärmpegel-Variationsweite  $\Delta L_v$  der Einzelschallpegel von höchstens 5 dB(A), wie sie beispielsweise in Webereien, Spinnereien, Zwirnereien, Kraftwerken, Druckereien usw. vorkommen, können kurze Mess-



zeiten oder kleine Stichproben gewählt werden, die ausreichen, um aus den Kurzzeitmessungen den Tages-Lärmexpositionspegel zu bestimmen.

#### 7.4.2.2 Lärmtyp I: Gleichförmig konstante Lärmexposition

Eine Arbeitsschicht (8 h) lang wirkt eine nahezu konstante Lärmexposition auf den Beschäftigten am Arbeitsplatz. Die Geräusche werden durch Schleifmaschinen hervorgerufen. Sie laufen ununterbrochen.



**Abb. 7.2** Schallpegel-Zeitverlauf einer nahezu konstanten Lärmexposition – Lärmtyp I

### **Anwendung der Messmethode 2 auf den Lärmtyp I** **Kontinuierliche Messung in Teilmesszeiten des Gesamtmesszeitraumes**

#### Messwertermittlung

Der äquivalente Dauerschallpegel  $L_{pAeq, T_e}$ , wie er in Gl. 7.1 gefordert wird, lässt sich direkt mit einem integrierenden Schallpegelmessgerät messen. Für die Messung ist hier eine Messzeit von  $T_M \geq 15\text{ s}$  ausreichend.

#### Messgröße

$$L_{pAeq, T_M} = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,1L(t)} dt \right) \text{ in dB(A)}$$

Wenn die Schichtarbeitszeit  $T_e$  des Beschäftigten kürzer oder länger ist als die Bezugszeitdauer, so muss der  $L_{pAeq,Te}$  nach Gl. 7.1 korrigiert werden.

### Ergebnisgröße

Der Messwert aus der Kurzzeitmessung entspricht dann dem Tages-Lärmexpositionspegel

$$L_{EX,8h} = L_{pAeq,T_M}$$

### Messunsicherheit

Die Messunsicherheit wird nach Abschnitt 6.8.5, Gl. 6.60 wie folgt berechnet:

$$\Delta L_U(L_{EX}) = \sqrt{\Delta L_{U-Methode}^2 + \Delta L_{U-Messgerät}^2} \text{ in dB(A)}$$

Wie im Abschnitt 6.8.3 gezeigt, sind für die Berechnung der *Methodenunsicherheit*  $\Delta L_{U-Methode}$  die Unsicherheitsbeiträge aus der Messmethode  $\Delta L_{Messmethode}$  in Verbindung mit dem Messobjekt  $\Delta L_{Messobjekt}$  relevant. Jedoch ist in der Regel über die Unsicherheit der Messmethode nichts oder nur wenig bekannt. Beide Beiträge werden daher im Unsicherheitsbeitrag  $\Delta L_{U-Methode}$  zusammengeführt. Zur Berechnung der Methodenunsicherheit  $\Delta L_{U-Methode}$  werden aus der Tab. 1 im Anhang nur die bekannten und die nach Formeln berechenbaren Unsicherheitsbeiträge der einzelnen beteiligten Merkmalsgrößen nach Spalte 3 verwendet.

Die *Messgeräteunsicherheit*  $\Delta L_{U-Messgerät}$  für Kurzzeitmessungen kann der Tab. 6.5 in Abschnitt 6.7.5 entnommen werden.

### Beispiel 1

Die kontinuierliche Messung über einen Messzeitraum von mehr als 15 s mit einem integrierenden Schallpegelmessgerät der Klasse 1 ergab einen *äquivalenten Dauerschallpegel* von  $L_{EX,8h,Messwert} = L_{pAeq} = 94,0 \text{ dB(A)}$  für die nahezu konstante Lärmexposition.

Die *Methodenunsicherheit*  $\Delta L_{U-Methode}$  wird aus den in Anh., Tab. 1 bekannten Unsicherheitsbeiträgen berechnet. Die einzelnen beteiligten Unsicherheitsbeiträge für Beispiel 1 lassen sich in der folgenden Gleichung formelmäßig zusammenfassen:

$$\Delta L_{U-Methode} = k \sqrt{\Delta L_{Schallfeld}^2 + \Delta L_{Mikro}^2}$$

Die Varianz für  $\Delta L_{Schallfeld}^2 = 0,25$  erhält man aus Anh., Tab. 1, Zeile 3.1, Spalte 10 und die Varianz für  $\Delta L_{Mikro}^2 = 0,25$  aus Anh., Tab. 1, Zeile 3.2, Spalte 10. Die Berechnung erfolgt mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 1,7$  (siehe dazu Abschnitt 6.6.3).

$$\Delta L_{U-Methode} = 1,7 \sqrt{0,25 + 0,25} = 1,2 \text{ dB}$$

Die Messgeräteunsicherheit  $\Delta L_{U\text{-Messgerät}}$  erhält man aus Tab. 6.5 in Abschnitt 6.7.5 für den Fall der Kurzzeitmessung. Für ein Messgerät der Klasse 1 ergibt sich bei der Messung von Industrielärm mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 1,7$  eine Messunsicherheit von

$$\Delta L_{U\text{-Messgerät}} = 1,0 \text{ dB.}$$

Damit berechnet sich die Messunsicherheit für das Ergebnis der Messung bei Anwendung der Messmethode 2 zu

$$\Delta L_U(L_{EX}) = \sqrt{\Delta L_{U\text{-Methode}}^2 + \Delta L_{U\text{-Messgerät}}^2} = \sqrt{1,2^2 + 1,0^2} = 1,6 \text{ dB.}$$

Die Angabe des Tages-Lärmexpositionspegels mit seiner Messunsicherheit erfolgt in folgender Weise

$$\begin{aligned} L_{EX,8h} &= L_{EX,8h,\text{Messwert}} \pm \Delta L_U \text{ in dB(A),} \\ L_{EX,8h} &= 94,0 \pm 1,6 \text{ dB(A).} \end{aligned}$$

### Beispiel 2

Für ein Klasse 2-Gerät ergibt sich für dieselbe Lärmsituation eine Messunsicherheit von  $\Delta L_U(L_{EX}) = 1,8 \text{ dB}$  mit  $\Delta L_{U\text{-Methode}} = 1,2 \text{ dB}$  ( $k = 1,7$ ) und  $\Delta L_{U\text{-Messgerät}} = 1,4 \text{ dB}$  ( $k = 1,7$ ).

## **Anwendung der Messmethode 3 auf den Lärmtyp I Stichprobenmessung im Gesamtmesszeitraum**

### Messwertermittlung

Alternativ kann der *äquivalente Dauerschallpegel*  $L_{pAeq}$  aus einer Stichprobe mit z. B. zehn Einzelmesswerten oder mehr berechnet werden. Verändert sich der Effektivwert des Schalldruckes zeitlich oder örtlich und soll der mittlere Schalldruckpegel bestimmt werden, so wird meist der Schallpegel des quadratischen Mittelwertes des Schalldruckes ermittelt.

### Messgröße

Es gilt:

$$L_{pAeq} = L_{pAm} = 10 \cdot \lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{p_i}{p_0} \right)^2 = 10 \cdot \lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{Ai}}{10}} \text{ in dB(A).} \quad (7.5)$$

Für kleine Schallpegel-Variationsweiten  $\Delta L_v = L_{\max} - L_{\min} \leq 5 \text{ dB}$  kann anstelle des mittleren Schallpegels nach Gl. 7.5 auch der arithmetische Mittelwert von Schallpegeln gebildet werden:

$$\bar{L}_A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_{Ai} \text{ in dB(A)} \quad (7.6)$$

mit

$L_{Ai}$  Einzelwerte der A-bewerteten Schallpegel,  
 $n$  Anzahl der Einzelmesswerte des A-bewerteten Schallpegels.

### Ergebnisgröße

Der Messwert aus der Stichprobenmessung entspricht dann dem Tages-Lärmexpositionspegel

$$L_{EX,8h} \approx L_{pAeq} \approx L_{pAm} \approx \bar{L}_A.$$

### Messunsicherheit

Die Messunsicherheit  $\Delta L_U(L_{EX})$  wird nach Abschnitt 6.8.5, Gl. 6.60 berechnet.

Wie im Abschnitt 6.8.3 gezeigt, sind für die Berechnung der *Methodenunsicherheit*  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  die Unsicherheitsbeiträge aus der Messmethode  $\Delta L_{\text{Messmethode}}$  in Verbindung mit dem Messobjekt  $\Delta L_{\text{Messobjekt}}$  relevant. Jedoch ist in der Regel über die Unsicherheit der Messmethode nichts oder nur wenig bekannt. Beide Beiträge werden daher im Unsicherheitsbeitrag  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  zusammengeführt. Zur Berechnung der Methodenunsicherheit  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  werden aus der Tab. 2 im Anhang nur die bekannten und die nach Formeln berechenbaren Unsicherheitsbeiträge der einzelnen beteiligten Merkmalsgrößen nach Spalte 3 verwendet.

Die *Messgeräteunsicherheit*  $\Delta L_{U\text{-Messgerät}}$  für Kurzzeitmessungen kann der Tab. 6.5 in Abschnitt 6.7.5 entnommen werden.

### Beispiel 3

Es wurden elf 1-Sekunden- $L_{pAeqi}$  gemessen:

$$\begin{aligned} L_{pAeq1} &= 94,3 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq2} &= 93,7 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq3} &= 94,8 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq4} &= 96,0 \text{ dB(A)}; \\ L_{pAeq5} &= 95,4 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq6} &= 92,6 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq7} &= 91,0 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq8} &= 94,2 \text{ dB(A)}; \\ L_{pAeq9} &= 94,1 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq10} &= 92,0 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq11} &= 93,9 \text{ dB(A)}. \end{aligned}$$

Die Messung aus den elf Stichproben mit einem Schallpegelmessgerät der Klasse 1 ergab einen *äquivalenten Dauerschallpegel*  $L_{EX,8h,\text{Messwert}} = L_{pAeq} = 94,0 \text{ dB(A)}$ .

Die *Methodenunsicherheit*  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  wird aus den in Anh., Tab. 2 bekannten Unsicherheitsbeiträgen berechnet. Die einzelnen beteiligten Unsicherheitsbeiträge für Beispiel 3 lassen sich in der folgenden Gleichung formelmäßig zusammenfassen:

$$\Delta L_{U\text{-Methode}} = k \sqrt{\Delta L_{\text{Schallfeld}}^2 + \Delta L_{\text{Mikro}}^2}.$$

Die Varianz  $\Delta L_{\text{Schallfeld}}^2$  wird nach Gl. 6.7 und Gl. 6.13 berechnet:

$$\Delta L^2_{\text{Schallfeld}} = \frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2.$$

Für die elf o. g. Messwerte erhält man eine Varianz von  $\Delta L^2_{\text{Schallfeld}} = 0,16$ . Die Varianz von  $\Delta L^2_{\text{Mikro}} = 0,25$  ergibt sich aus Anh., Tab. 2, Zeile 3.2, Spalte 10. Die Berechnung erfolgt mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 1,7$  (siehe dazu Abschnitt 6.6.3).

$$\Delta L_{\text{U-Methode}} = 1,7 \sqrt{0,16 + 0,25} = 1,1 \text{ dB}$$

Die Messgeräteunsicherheit  $\Delta L_{\text{U-Messgerät}}$  erhält man aus Tab. 6.5 in Abschnitt 6.7.5 für den Fall der Kurzzeitmessung. Für ein Messgerät der Klasse 1 ergibt sich bei der Messung von Industrielärm mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 1,7$  eine Messunsicherheit von

$$\Delta L_{\text{U-Messgerät}} = 1,0 \text{ dB.}$$

Damit berechnet sich die Messunsicherheit für das Ergebnis der Messung bei Anwendung der Messmethode 3 zu

$$\Delta L_{\text{U}}(L_{\text{EX}}) = \sqrt{\Delta L_{\text{U-Methode}}^2 + \Delta L_{\text{U-Messgerät}}^2} = \sqrt{1,1^2 + 1,0^2} = 1,5 \text{ dB.}$$

Die Angabe des Tages-Lärmexpositionspegels mit seiner Messunsicherheit erfolgt in folgender Weise

$$\begin{aligned} L_{\text{EX},8\text{h}} &= L_{\text{EX},8\text{h},\text{Messwert}} \pm \Delta L_{\text{U}} \text{ in dB(A)}, \\ L_{\text{EX},8\text{h}} &= 94,0 \pm 1,5 \text{ dB(A)}. \end{aligned}$$

#### Beispiel 4

Für ein Klasse 2-Gerät ergibt sich für dieselbe Lärmsituation eine Messunsicherheit von  $\Delta L_{\text{U}}(L_{\text{EX}}) = 1,8 \text{ dB}$  mit  $\Delta L_{\text{U-Methode}} = 1,1 \text{ dB}$  ( $k = 1,7$ ) und  $\Delta L_{\text{U-Messgerät}} = 1,4 \text{ dB}$  ( $k = 1,7$ ).

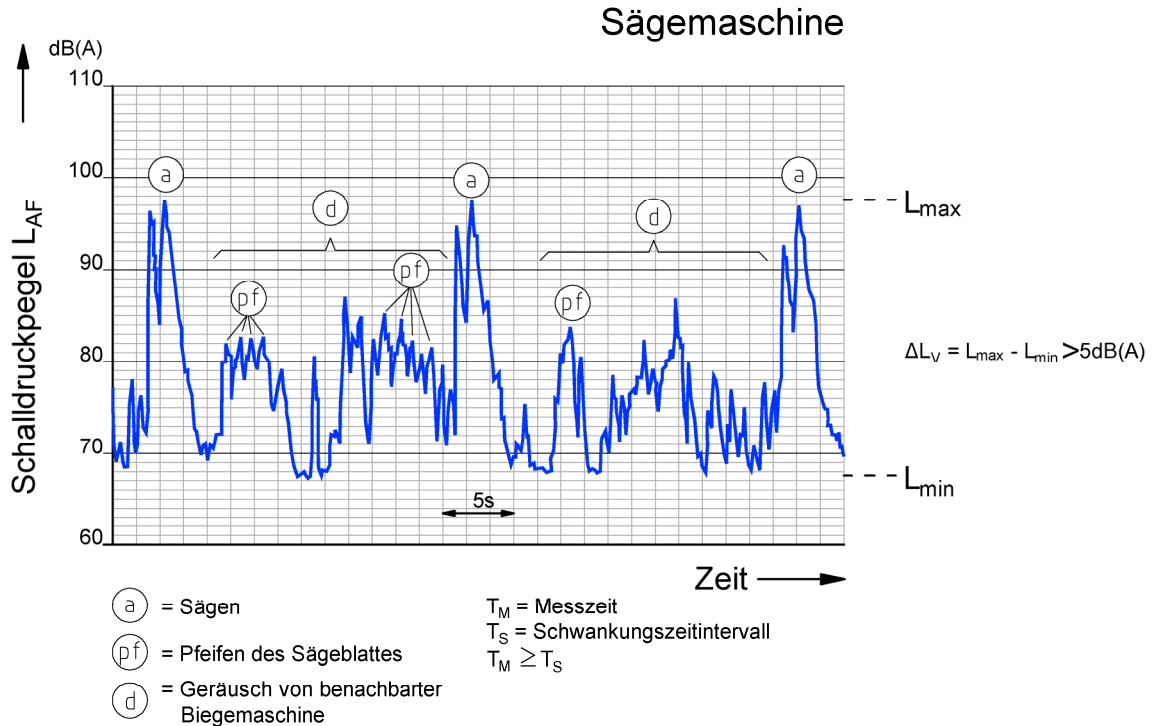
### **7.4.3 Anwendung der Messmethoden auf eine zeitlich stark veränderliche Lärmexposition mit einer Schallpegel-Variationsweite**

$$\Delta L_{\text{v}} = L_{\text{max}} - L_{\text{min}} > 5 \text{ dB(A)} - \text{Lärmtyp II bis IV}$$

Bei zeitlich stark veränderlichen Lärmexpositionen mit einer Schallpegel-Variationsweite von mehr als 5 dB(A), wie sie beispielsweise in Metallwerkstätten, Gießereien, Blechbearbeitungsstätten, Maschinenbau, Behälterbau, Schiffswerften, Bergbau, Fahrzeugbau usw. vorliegen, kommt es sehr darauf an Messzeiten zu wählen, die hinreichend sind, um aus den Kurz- und/oder Langzeitmessungen den repräsentativen Tages-Lärmexpositionspegel für den Arbeitsplatz zu bestimmen.

### 7.4.3.1 Lärmtyp II: Stark regellos veränderliche Lärmexposition

Einwirkung einer stark veränderlichen Lärmexposition auf den Beschäftigten am Arbeitsplatz in einer Arbeitsschicht in einer Metallwerkstatt.



**Abb. 7.3** Schallpegel-Zeitverlauf einer stark veränderlichen Lärmexposition - Lärmtyp II

#### **Anwendung der Messmethode 1 auf den Lärmtyp II** **Kontinuierliche Messung über einen Gesamtmesszeitraum (Arbeitsschicht)**

##### Messwertermittlung

Liegt zeitlich stark veränderlicher Lärm oder sogar impulshaltiger Lärm vor, so ist es in der Regel zweckmäßig, kontinuierliche Messungen mit einem integrierenden Schallpegelmessgerät oder einem Lärmdosimeter durchzuführen. Damit lässt sich für jedes Geräusch unmittelbar der äquivalente Dauerschallpegel  $L_{Aeq}$  direkt durch die Messung über eine Arbeitsschicht bestimmen.

##### Messgröße

Messung mit einem integrierenden Schallpegelmessgerät oder einem Lärmdosimeter und einer gewählten Messzeit  $T_M$ , die der Arbeitsschichtzeit  $T_e$  entspricht.

$$L_{pAeq, T_e} = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{T_e \cdot p_0^2} \int_0^{T_e} p^2(t) dt \right) \text{ in dB(A)}$$

Ergebnisgröße

$$L_{EX,8h} = L_{pAeq,T_e} + 10 \cdot \lg \frac{T_e}{T_0} \quad \text{in dB(A)}$$

mit

$$\begin{array}{ll} L_{pAeq,T_e} & \text{äquivalenter Dauerschallpegel der typischen Arbeitsschicht in dB(A),} \\ T_e & \text{Arbeitsschichtzeit in h,} \\ T_0 & \text{Bezugszeitdauer, } T_0 = 8 \text{ h.} \end{array}$$

Unter der Annahme, dass  $T_M = T_e = T_0$  ist gilt für die Ergebnisgröße

$$L_{EX,8h} = L_{pAeq,T_e} \quad \text{in dB(A).}$$

Messunsicherheit

Die Messunsicherheit  $\Delta L_U(L_{EX})$  wird nach Abschnitt 6.8.5, Gl. 6.60 berechnet.

Wie im Abschnitt 6.8.3 gezeigt, sind für die Berechnung der *Methodenunsicherheit*  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  die Unsicherheitsbeiträge aus der Messmethode  $\Delta L_{\text{Messmethode}}$  in Verbindung mit dem Messobjekt  $\Delta L_{\text{Messobjekt}}$  relevant. Jedoch ist in der Regel über die Unsicherheit der Messmethode nichts oder nur wenig bekannt. Beide Beiträge werden daher im Unsicherheitsbeitrag  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  zusammengeführt. Zur Berechnung der Methodenunsicherheit  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  werden aus der Tab. 3 im Anhang nur die bekannten und die nach Formeln berechenbaren Unsicherheitsbeiträge der einzelnen beteiligten Merkmalsgrößen nach Spalte 3 verwendet.

Die *Messgeräteunsicherheit*  $\Delta L_{U\text{-Messgerät}}$  für Langzeitmessungen kann der Tab. 6.6 in Abschnitt 6.7.5 entnommen werden.

Beispiel 5

In einer Fertigungswerkstatt wird durch eine kontinuierliche Messung über den Gesamtmesszeitraum der Arbeitsschicht von 8 h an einem Montagearbeitsplatz mit einem integrierenden Schallpegelmessgerät der Klasse 1 gemessen. Der 8-h-Messwert betrug

$$L_{EX,8h,\text{Messwert}} = L_{pAeq,8h} = 90,2 \text{ dB(A).}$$

Die *Methodenunsicherheit*  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  wird aus den in Anh., Tab. 3 bekannten Unsicherheitsbeiträgen berechnet. Die einzelnen beteiligten Unsicherheitsbeiträge für Beispiel 5 lassen sich in der folgenden Gleichung formelmäßig zusammenfassen:

$$\Delta L_{U\text{-Methode}} = k \sqrt{\Delta L_{\text{Schallfeld}}^2 + \Delta L_{\text{Mikro}}^2}$$

Die Varianz für  $\Delta L^2_{\text{Schallfeld}} = 0,00$  erhält man aus Anh., Tab. 3, Zeile 3.1, Spalte 10 und die Varianz für  $\Delta L^2_{\text{Mikro}} = 1,00$  aus Anh., Tab. 3, Zeile 3.2, Spalte 10. Der Berechnung erfolgt mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 1,7$  (siehe dazu Abschnitt 6.6.3).

$$\Delta L_{\text{U-Methode}} = 1,7 \sqrt{0,00 + 1,00} = 1,7 \text{ dB}.$$

Die Messgeräteunsicherheit  $\Delta L_{\text{U-Messgerät}}$  erhält man aus Tab. 6.6 in Abschnitt 6.7.5 für den Fall der Langzeitmessung. Für ein Messgerät der Klasse 1 ergibt sich bei der Messung von Industrielärm mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 1,7$  eine Messunsicherheit von

$$\Delta L_{\text{U-Messgerät}} = 1,7 \text{ dB}.$$

Damit berechnet sich die Messunsicherheit für das Ergebnis der Messung bei Anwendung der Messmethode 1 zu

$$\Delta L_{\text{U}}(L_{\text{EX}}) = \sqrt{\Delta L_{\text{U-Methode}}^2 + \Delta L_{\text{U-Messgerät}}^2} = \sqrt{1,7^2 + 1,7^2} = 2,4 \text{ dB}.$$

Die Angabe des Tages-Lärmexpositionspegels mit seiner Messunsicherheit erfolgt in folgender Weise

$$L_{\text{EX},8\text{h}} = L_{\text{EX},8\text{h},\text{Messwert}} \pm \Delta L_{\text{U}} \text{ in dB(A)}$$

$$L_{\text{EX},8\text{h}} = 90,2 \pm 2,4 \text{ dB(A)}.$$

### Beispiel 6

Für ein Klasse 2-Gerät, z. B. Lärmdosimeter, ergibt sich für dieselbe Lärmsituation eine Messunsicherheit von  $\Delta L_{\text{U}}(L_{\text{EX}}) = 3,3 \text{ dB}$  mit  $\Delta L_{\text{U-Methode}} = 1,7 \text{ dB}$  ( $k = 1,7$ ) und  $\Delta L_{\text{U-Messgerät}} = 2,8 \text{ dB}$  ( $k = 1,7$ ).

## **Anwendung der Messmethode 2 auf den Lärmtyp II Kontinuierliche Messung in Teilmesszeiten des Gesamtmesszeitraumes**

### Messwertermittlung

Bei der kontinuierlichen Messung in einer Teilmesszeit des Gesamtmesszeitraumes einer Arbeitsschicht muss bei der Festlegung der Messzeit immer bedacht werden, dass sie größer ist als ein möglicherweise wiederkehrendes Zeitintervall, innerhalb dessen der Lärmpegel schwankt.

Die Messzeit ist in der Regel dann ausreichend, wenn sich der angezeigte *äquivalente Dauerschallpegel* bei der Einwirkung von sehr hohen Lärmpegeln nicht mehr ändert. Tut er es doch, dann ist die Messzeit nicht ausreichend und es muss die Messzeit verlängert werden. Die Messungen können dann abgebrochen werden, wenn der  $L_{\text{pAeq}}$  stabil bei einem Wert verharrt und durch Vorwissen bekannt ist, dass der weitere Lärmpegelverlauf sich so verhält, wie er in der Messzeit beobachtet wurde. So ist es möglich, kürzere Teilmesszeiten zu verwenden.



Messgröße

$$L_{pAeq, T_M} = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{T_M \cdot p_0^2} \int_0^{T_M} p^2(t) dt \right) \text{ in dB(A).}$$

Der nach dieser Formel erhaltene Messwert mit einer kürzeren Messzeit  $T_M$  als die Arbeitsschicht entspricht dann dem A-bewerteten äquivalenten Dauerschallpegel  $L_{pAeq, Te}$  für eine typische Arbeitsschicht.

$$L_{pAeq, Te} \approx L_{pAeq, T_M} \text{ in dB(A)}$$

Ergebnisgröße

Der Messwert aus der kontinuierlichen Messung in einer Teilmesszeit entspricht dann dem Tages-Lärmexpositionspegel

$$L_{EX, 8h} \approx L_{pAeq, Te} \approx L_{pAeq, T_M}$$

Messunsicherheit

Die Messunsicherheit  $\Delta L_U(L_{EX})$  wird nach Abschnitt 6.8.5, Gl. 6.60 berechnet.

Wie im Abschnitt 6.8.3 gezeigt, sind für die Berechnung der *Methodenunsicherheit*  $\Delta L_{U-Methode}$  die Unsicherheitsbeiträge aus der Messmethode  $\Delta L_{Messmethode}$  in Verbindung mit dem Messobjekt  $\Delta L_{Messobjekt}$  relevant. Die Tabelle 4 im Anhang zeigt die Unsicherheitsbeiträge  $\Delta L_{Messmethode}$  in Abhängigkeit von der Auswahl der Messzeit für den Lärmtyp II.

Da sich auch hier die Unsicherheitsbeiträge der Messmethode und des Messobjektes nicht trennen lassen werden auch hier die beiden Beiträge im Unsicherheitsbeitrag  $\Delta L_{U-Methode}$  zusammengeführt. Zur Berechnung der Methodenunsicherheit  $\Delta L_{U-Methode}$  werden aus der Tab. 4 im Anhang nur die bekannten und die nach Formeln berechenbaren Unsicherheitsbeiträge der einzelnen Merkmalsgrößen nach Spalte 3 verwendet.

Die *Messgeräteunsicherheit*  $\Delta L_{U-Messgerät}$  für Kurzzeitmessungen kann der Tab. 6.5 in Abschnitt 6.7.5 entnommen werden.

Beispiel 7

In einer Fertigungswerkstatt soll an einem ortsfesten Montagearbeitsplatz die Lärmexposition ermittelt werden. Durch die Arbeitsanalyse und das Wissen über den technologischen Ablauf kann angenommen werden, dass die Lärmpegelverteilung in der Arbeitsschicht zufälligen Änderungen unterworfen ist, die sich jedoch gleichmäßig über die Arbeitsschicht verteilen. Es wurde daher eine kontinuierliche Messung mit einer verkürzten Messzeit durchgeführt. Die Messung fand solange statt, bis sich der angezeigte A-bewertete äquivalente Dauerschallpegel  $L_{pAeq}$  nicht mehr änderte.

Die Messung mit einem Schallpegelmesser der Klasse 1 ergab einen *äquivalenten Dauerschallpegel* von  $L_{EX,8h,Messwert} = L_{pAeq} = 90,8 \text{ dB(A)}$ .

Aus der kontinuierlichen Messung ist der maximale Lärmpegel von  $L_{\max} = 98 \text{ dB(A)}$  und der minimale von  $L_{\min} = 68 \text{ dB(A)}$  bekannt. Somit beträgt die Schallpegelvariationsweite  $\Delta L_v = L_{\max} - L_{\min} = 30 \text{ dB(A)}$ .

Die Methodenunsicherheit  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  wird aus den in Anh., Tab. 4 bekannten Unsicherheitsbeiträgen berechnet. Die einzelnen beteiligten Unsicherheitsbeiträge für Beispiel 7 lassen sich in der folgenden Gleichung formelmäßig zusammenfassen:

$$\Delta L_{U\text{-Methode}} = k \sqrt{\Delta L_{\text{Messmethode}}^2 + \Delta L_{\text{Messobjekt}}^2}$$

Dabei beinhaltet der Unsicherheitsbeitrag von  $\Delta L_{\text{Messmethode}}^2$  nur die Varianz  $\Delta L_{\text{Messzeit}}^2$  und der von  $\Delta L_{\text{Messobjekt}}^2$  nur die Varianz  $\Delta L_{\text{Mikro}}^2$ .

Damit erhält man

$$\Delta L_{U\text{-Methode}} = k \sqrt{\Delta L_{\text{Messzeit}}^2 + \Delta L_{\text{Mikro}}^2}$$

Die Varianz für  $\Delta L_{\text{Messzeit}}^2$  wird aus der Schallpegelvariationsweite  $\Delta L_v = L_{\max} - L_{\min} = 30 \text{ dB(A)}$  nach Gl. 6.17 und Gl. 6.19 berechnet.

Zunächst erfolgt die Berechnung der Standardabweichung (Gl. 6.17)

$$\Delta L_{sL_i} = \frac{1}{5} \cdot \Delta L_v = 6 \text{ dB}$$

Bei einer genügend langer Messzeit wird unterstellt, dass  $n \geq 100$  ist. Die Standardabweichung des Schallpegelmittelwertes (Gl. 6.19) aus „n“ Beobachtungen ist dann:

$$\Delta L_{sL} = \Delta L_{\text{Messzeit}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \Delta L_{sL_i} = 0,6 \text{ dB}$$

Für die kontinuierliche Messung erhält man eine Varianz von  $\Delta L_{\text{Messzeit}}^2 = 0,36$  (siehe auch Anh., Tab. 4, Zeile 1.8, Spalte 10). Die Varianz von  $\Delta L_{\text{Mikro}}^2 = 1,00$  ergibt sich aus Anh., Tab. 4, Zeile 3.2, Spalte 10. Die Berechnung erfolgt mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 1,7$  (siehe dazu Abschnitt 6.6.3).

$$\Delta L_{U\text{-Methode}} = 1,7 \sqrt{0,36 + 1,00} = 2,0 \text{ dB}$$

Die Messgeräteunsicherheit  $\Delta L_{U\text{-Messgerät}}$  erhält man aus Tab. 6.5 in Abschnitt 6.7.5 für den Fall der Kurzzeitmessung. Für ein Messgerät der Klasse 1 ergibt sich bei der Messung von Industrielärm mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 1,7$  eine Messunsicherheit von

$$\Delta L_{U\text{-Messgerät}} = 1,0 \text{ dB}$$

Damit berechnet sich die Messunsicherheit für das Ergebnis der Messung bei Anwendung der Messmethode 2 zu

$$\Delta L_U(L_{EX}) = \sqrt{\Delta L_{U\text{-Methode}}^2 + \Delta L_{U\text{-Messgerät}}^2} = \sqrt{2,0^2 + 1,0^2} = 2,2 \text{ dB} .$$

Die Angabe des Tages-Lärmexpositionspegels mit seiner Messunsicherheit erfolgt in folgender Weise

$$L_{EX,8h} = L_{EX,8h,\text{Messwert}} \pm \Delta L_U \text{ in dB(A),}$$

$$L_{EX,8h} = 90,8 \pm 2,2 \text{ dB(A).}$$

### Beispiel 8

Für ein Klasse 2-Gerät ergibt sich für dieselbe Lärmsituation eine Messunsicherheit von  $\Delta L_U(L_{EX}) = 2,4 \text{ dB}$  mit  $\Delta L_{U\text{-Methode}} = 2,0 \text{ dB}$  ( $k = 1,7$ ) und  $\Delta L_{U\text{-Messgerät}} = 1,4 \text{ dB}$  ( $k = 1,7$ ).

### Sonderfall – Messungen ohne Vorwissen

Werden Messungen ohne Vorwissen durchgeführt und ist dabei die empirische Lärmpegelverteilung zerklüftet sowie in verschiedenen Zeitabschnitten stark zufallsbedingten Schwankungen unterworfen, so ist bekannt, dass bei einer kontinuierlichen Messung mit festen Messzeiten von wenigen Minuten die Messunsicherheit bezogen auf den Erwartungswert der Grundgesamtheit von 480 min unverhältnismäßig hoch sein kann. Allein bei einer Messzeit von 15 min kann der Unsicherheitsbeitrag erheblich sein (siehe Anh., Tab. 4, Zeile 1.1, Spalte 10).

Wählt man für Lärmpegelverteilungen, wie sie in Autoreparaturwerkstätten, Schlosereien, mechanischen Werkstätten usw. vorkommen, z. B. eine Messzeit von nur 15 Minuten, so muss man, wie die Tab. 4 im Anhang zeigt, mit erheblichen Unsicherheiten rechnen. Dem kann man nur begegnen, indem man auf der Grundlage des fachlichen Wissens eine genügend lange Messzeit auswählt. Gleiche Messzeiten sollten insbesondere dann verwendet werden, wenn mit den Messwerten weitere statistische Auswertungen stattfinden sollen.

### Beispiel 9

In ungünstigen Fällen, wie beispielsweise in einer Autoreparaturwerkstatt, kann bei einer festen Messzeit von 15 Minuten folgende Messunsicherheit erwartet werden. Die Messung mit einem Schallpegelmesser der Klasse 1 ergab einen *äquivalenten Dauerschallpegel* von  $L_{EX,8h,\text{Messwert}} = L_{pAeq} = 89,4 \text{ dB(A)}$ .

Die *Methodenunsicherheit*  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  wird aus den in Anh., Tab. 4 bekannten Unsicherheitsbeiträgen berechnet. Die einzelnen beteiligten Unsicherheitsbeiträge für Beispiel 9 lassen sich in der folgenden Gleichung formelmäßig zusammenfassen:

$$\Delta L_{U\text{-Methode}} = k \sqrt{\Delta L_{\text{Messzeit}}^2 + \Delta L_{\text{Mikro}}^2}$$

Die Varianz für  $\Delta L^2_{\text{Messzeit}} = 12,25$  erhält man aus Anh., Tab. 4, Zeile 1.1, Spalte 10 und die Varianz für  $\Delta L^2_{\text{Mikro}} = 1,00$  aus Anh., Tab. 4, Zeile 3.2, Spalte 10. Der Berechnung erfolgt mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 1,7$  (siehe dazu Abschnitt 6.6.3)

$$\Delta L_{\text{U-Methode}} = 1,7 \sqrt{12,25 + 1,00} = 6,2 \text{ dB}$$

Die Messgeräteunsicherheit  $\Delta L_{\text{U-Messgerät}}$  erhält man aus Tab. 6.5 in Abschnitt 6.7.5 für den Fall der Kurzzeitmessung. Für ein Messgerät der Klasse 1 ergibt sich bei der Messung von Industrielärm mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 1,7$  eine Messunsicherheit von

$$\Delta L_{\text{U-Messgerät}} = 1,0 \text{ dB.}$$

Damit berechnet sich die Messunsicherheit für das Ergebnis der Messung bei Anwendung der Messmethode 2 zu

$$\Delta L_{\text{U}}(L_{\text{EX}}) = \sqrt{\Delta L_{\text{U-Methode}}^2 + \Delta L_{\text{U-Messgerät}}^2} = \sqrt{6,2^2 + 1,0^2} = 6,3 \text{ dB.}$$

Die Angabe des Tages-Lärmexpositionspegels mit seiner Messunsicherheit erfolgt in folgender Weise

$$L_{\text{EX},8\text{h}} = L_{\text{EX},8\text{h},\text{Messwert}} \pm \Delta L_{\text{U}} \text{ in dB(A)}$$

$$L_{\text{EX},8\text{h}} = 89,4 \pm 6,3 \text{ dB(A).}$$

### Beispiel 10

Für ein Klasse 2-Gerät ergibt sich für dieselbe Lärmsituation eine Messunsicherheit von  $\Delta L_{\text{U}}(L_{\text{EX}}) = 6,4 \text{ dB}$  mit  $\Delta L_{\text{U-Methode}} = 6,2 \text{ dB}$  ( $k = 1,7$ ) und  $\Delta L_{\text{U-Messgerät}} = 1,4 \text{ dB}$  ( $k = 1,7$ ).

### **Anwendung der Messmethode 3 auf den Lärmtyp II**

**Stichprobenmessung im Gesamtmesszeitraum** (Stichprobennahme zu zufälligen Zeiten)

#### Messwertermittlung

Alternativ kann der *äquivalente Dauerschallpegel*  $L_{\text{pAeq}}$  aus einer Stichprobe mit z. B. 30 Einzelmesswerten oder mehr berechnet werden. Verändert sich der Effektivwert des Schalldruckes zeitlich und örtlich und soll der mittlere Schalldruckpegel bestimmt werden, so wird der Schallpegel des quadratischen Mittelwertes des Schalldruckes ermittelt.

#### Messgröße

Es gilt:

$$L_{\text{pAeq}} = L_{\text{pAm}} = 10 \cdot \lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{p_i}{p_0} \right)^2 = 10 \cdot \lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{A_i}}{10}} \text{ in dB(A).}$$

### Ergebnisgröße

Der Messwert aus der Stichprobenmessung entspricht dann dem Tages-Lärmexpositionspegel

$$L_{EX,8h} \approx L_{pAeq} \approx L_{pAm} .$$

### Messunsicherheit

Die Messunsicherheit  $\Delta L_U(L_{EX})$  wird nach Abschnitt 6.8.5, Gl. 6.60 berechnet.

Es werden die Unsicherheitsbeiträge aus der Messmethode  $\Delta L_{\text{Messmethode}}$  und dem Messobjekt  $\Delta L_{\text{Messobjekt}}$  zum Unsicherheitsbeitrag  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  zusammengeführt. Zur Berechnung der *Methodenunsicherheit*  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  werden aus der Tab. 5 im Anhang nur die bekannten und die nach Formeln berechenbaren Unsicherheitsbeiträge der einzelnen beteiligten Merkmalsgrößen nach Spalte 3 verwendet.

Die *Messgeräteunsicherheit*  $\Delta L_{U\text{-Messgerät}}$  für Kurzzeitmessungen kann der Tab. 6.5 in Abschnitt 6.7.5 entnommen werden.

### Beispiel 11

In einer Fertigungswerkstatt wurden dreißig 1-Sekunden- $L_{pAeqi}$  zu zufälligen Zeiten während der Arbeitsschicht an einem ortsfesten Montagearbeitsplatz gemessen.

$$\begin{aligned} L_{pAeq1} &= 68,0 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq2} &= 81,0 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq3} &= 76,5 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq4} &= 91,5 \text{ dB(A)}; \\ L_{pAeq5} &= 96,8 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq6} &= 84,3 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq7} &= 98,0 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq8} &= 91,2 \text{ dB(A)}; \\ L_{pAeq9} &= 85,6 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq10} &= 76,8 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq11} &= 72,3 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq12} &= 82,1 \text{ dB(A)}; \\ L_{pAeq13} &= 77,3 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq14} &= 81,4 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq15} &= 83,4 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq16} &= 82,6 \text{ dB(A)}; \\ L_{pAeq17} &= 83,6 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq18} &= 80,5 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq19} &= 77,3 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq20} &= 79,2 \text{ dB(A)}; \\ L_{pAeq21} &= 79,8 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq22} &= 68,3 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq23} &= 86,5 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq24} &= 87,9 \text{ dB(A)}; \\ L_{pAeq25} &= 89,7 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq26} &= 88,3 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq27} &= 89,7 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq28} &= 73,0 \text{ dB(A)}; \\ L_{pAeq29} &= 72,6 \text{ dB(A)}; & L_{pAeq30} &= 95,0 \text{ dB(A)} \end{aligned}$$

Die Messung aus den 30 Stichproben mit einem Schallpegelmessgerät der Klasse 1 ergibt einen *äquivalenten Dauerschallpegel* von  $L_{EX,8h(\text{Messwert})} = L_{pAeq} = 88,8 \text{ dB(A)}$ .

Die *Methodenunsicherheit*  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  wird aus den in Anh., Tab. 5 bekannten Unsicherheitsbeiträgen berechnet. Die einzelnen beteiligten Unsicherheitsbeiträge für Beispiel 11 lassen sich in der folgenden Gleichung formelmäßig zusammenfassen:

$$\Delta L_{U\text{-Methode}} = k \sqrt{\Delta L_{\text{Schallfeld}}^2 + \Delta L_{\text{Mikro}}^2} .$$

Die Varianz  $\Delta L_{\text{Schallfeld}}^2$  wird nach Gl. 6.7 und Gl. 6.13 berechnet

$$\Delta L_{\text{Schallfeld}}^2 = \frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2 .$$

Für die o. g. Messwerte erhält man eine Varianz von  $\Delta L^2_{\text{Schallfeld}} = 1,96$ . Die Varianz von  $\Delta L^2_{\text{Mikro}} = 1,00$  ergibt sich aus Anh., Tab. 5, Zeile 3.3, Spalte 10. Die Berechnung erfolgt mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 1,7$  (siehe dazu Abschnitt 6.6.3).

$$\Delta L_{\text{U-Methode}} = 1,7 \sqrt{1,96 + 1,00} = 2,9 \text{ dB}$$

Die Messgeräteunsicherheit  $\Delta L_{\text{U-Messgerät}}$  erhält man aus Tab. 6.5 in Abschnitt 6.7.5 für den Fall der Kurzzeitmessung. Für ein Messgerät der Klasse 1 ergibt sich bei der Messung von Industrielärm mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 1,7$  eine Messunsicherheit von

$$\Delta L_{\text{U-Messgerät}} = 1,0 \text{ dB.}$$

Damit berechnet sich die Messunsicherheit für das Ergebnis der Messung bei Anwendung der Messmethode 3 zu

$$\Delta L_{\text{U}}(L_{\text{EX}}) = \sqrt{\Delta L_{\text{U-Methode}}^2 + \Delta L_{\text{U-Messgerät}}^2} = \sqrt{2,9^2 + 1,0^2} = 3,1 \text{ dB.}$$

Die Angabe des Tages-Lärmexpositionspegels mit seiner Messunsicherheit erfolgt in folgender Weise

$$\begin{aligned} L_{\text{EX},8\text{h}} &= L_{\text{EX},8\text{h},\text{Messwert}} \pm \Delta L_{\text{U}} \text{ in dB(A),} \\ L_{\text{EX},8\text{h}} &= 88,8 \pm 3,1 \text{ dB(A).} \end{aligned}$$

### Beispiel 12

Für ein Klasse 2-Gerät ergibt sich für dieselbe Lärmsituation eine Messunsicherheit von  $\Delta L_{\text{U}}(L_{\text{EX}}) = 3,2 \text{ dB}$  mit  $\Delta L_{\text{U-Methode}} = 2,9 \text{ dB}(k = 1,7)$  und  $\Delta L_{\text{U-Messgerät}} = 1,4 \text{ dB}(k = 1,7)$ .

## **Anwendung der Messmethode 3 auf den Lärmtyp II**

**Stichprobenmessung im Gesamtmesszeitraum** (Stichprobennahme zu festen Zeiten)

### Messwertermittlung

Entsprechend einem sog. **Klassier-Verfahren** können in bestimmten Zeitabschnitten von z. B. 5 s oder weniger Schallpegel abgelesen oder aus einem Pegelschrieb bestimmt oder vom Schallpegelmesser ausgegeben werden. Die so erfassten Schallpegel werden dann rechnerisch gemittelt. Bei diesem Verfahren ist mit Messfehlern dann zu rechnen, wenn beispielsweise Lärmimpulse durch das gewählte Zeitraster der Pegelabtastung nicht genau erfasst werden. Siehe dazu Abb. 7.3.

### Messgröße

Aus den einzelnen Schallpegelmesswerten  $L_{\text{Ai}}$  wird der *A-bewertete äquivalente Dauerschallpegel*  $L_{\text{Aeq},T_m}$  während der Messzeit  $T_m$  wie folgt berechnet:

$$L_{pAeq,T_M} = 10 \cdot \lg \frac{1}{\sum_{i=1}^m n_i} \cdot \sum_{i=1}^m n_i \cdot 10^{\frac{L_{Ai}}{10}} \quad \text{in dB(A)} \quad (7.7)$$

mit

- $L_{Ai}$  mittlerer Schallpegel der  $i$ -ten Schallpegelklasse in dB(A)  
 $n_i$  Anzahl der Schallpegelmesswerte  $L_{Ai}$  in der  $i$ -ten Schallpegelklasse  
 $m$  Anzahl der Schallpegelklassen.

Für eine ausführliche Beschreibung des Rechenverfahrens siehe DIN 45641 [44].

Der Messwert dieser Messung mit einer kürzeren Messzeit  $T_M$  als die Arbeitsschicht entspricht dann dem A-bewerteten äquivalenten Dauerschallpegel  $L_{pAeq,T_e}$  für eine typische Arbeitsschicht.

$$L_{pAeq,T_e} \approx L_{pAeq,T_M}$$

### Ergebnisgröße

$$L_{EX,8h} = L_{pAeq,T_e} + 10 \cdot \lg \frac{T_e}{T_0} \quad \text{in dB(A)}$$

mit

- $L_{pAeq,T_e}$  äquivalenter Dauerschallpegel in dB(A) der typischen Arbeitsschicht,  
 $T_e$  effektive Einwirkdauer während der typischen Arbeitsschicht in h,  
 $T_0$  Bezugszeitdauer,  $T_0 = 8$  h.

### Messunsicherheit

Die Messunsicherheit  $\Delta L_U(L_{EX})$  wird nach Abschnitt 6.8.5, Gl. 6.60 berechnet.

Es werden die Unsicherheitsbeiträge aus der Messmethode  $\Delta L_{\text{Messmethode}}$  und dem Messobjekt  $\Delta L_{\text{Messobjekt}}$  zum Unsicherheitsbeitrag  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  zusammengeführt. Zur Berechnung der *Methodenunsicherheit*  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  werden aus der Tab. 5 im Anhang nur die bekannten und die nach Formeln berechenbaren Unsicherheitsbeiträge der einzelnen beteiligten Merkmalsgrößen nach Spalte 3 verwendet. Die berechenbaren Unsicherheitsbeiträge sind auf der Grundlage der Messwerte und ihrer empirischen Häufigkeitsverteilung nach den Gleichungen in Abschnitt 6.6.1 zu ermitteln.

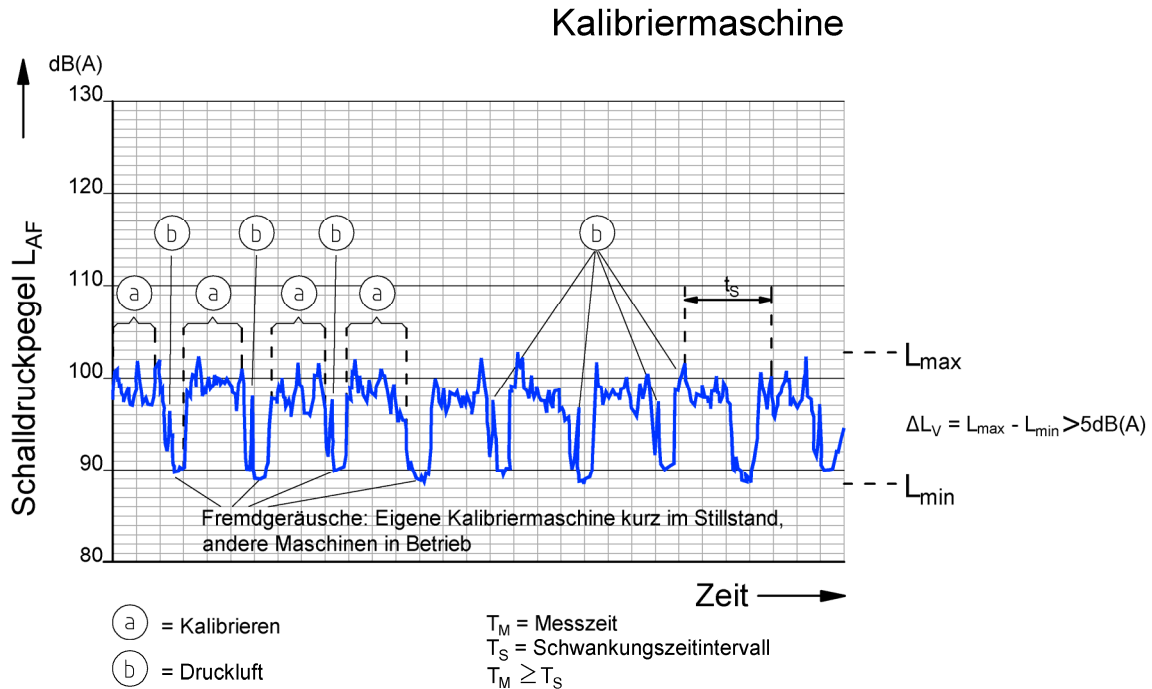
Die *Messgeräteunsicherheit*  $\Delta L_{U\text{-Messgerät}}$  für Kurzzeitmessungen kann der Tab. 6.5 in Abschnitt 6.7.5 entnommen werden.

### Beispiel

Die Ermittlung des Tageslärnexpositionspegels  $L_{EX,8h}$  und seine Messunsicherheit  $\Delta L_U(L_{EX})$  erfolgt in analoger Weise wie in den Beispielen 11 und 12 unter Berücksichtigung der Tab. 5 im Anhang.

### 7.4.3.2 Lärmtyp III: Periodisch veränderliche Lärmexpositionen

Bei einer periodisch veränderlichen Lärmexposition ist die Messzeit so zu legen, dass ein oder mehrere vollständige Geräuschzyklen erfasst werden; siehe Abb. 7.4.



**Abb. 7.4** Schallpegel-Zeitverlauf einer periodisch veränderlichen Lärmexposition am Messort – Lärmtyp III

### **Anwendung der Messmethode 2 auf den Lärmtyp III** **Kontinuierliche Messung in Teilmesszeiten des Gesamtmesszeitraumes**

#### Messwertermittlung

Mit einem integrierenden Schallpegelmessgerät ist kontinuierlich über mehrere Geräuschzyklen zu messen.

#### Messgröße

$$L_{pAeq, T_M} = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{T_M \cdot p_0^2} \int_0^{T_M} p^2(t) dt \right) \text{ in dB(A)}$$

Der Messwert dieser Messung, gemessen mit einer sehr viel kürzeren Messzeit  $T_M$  als die Arbeitsschicht, entspricht dann dem A-bewerteten äquivalenten Dauerschallpegel  $L_{pAeq, T_e}$  für eine typische Arbeitsschicht.

$$L_{pAeq, T_e} \approx L_{pAeq, T_M}$$



Ergebnisgröße

$$L_{EX,8h} = L_{pAeq,T_e} + 10 \cdot \lg \frac{T_e}{T_0} \quad \text{in dB(A)}$$

mit

$L_{pAeq,T_e}$  äquivalenter Dauerschallpegel der typischen Arbeitsschicht in dB(A),  
 $T_e$  effektive Einwirkdauer während der typischen Arbeitsschicht in h,  
 $T_0$  Bezugszeitdauer,  $T_0 = 8$  h.

Messunsicherheit

Die Messunsicherheit  $\Delta L_U(L_{EX})$  wird nach Abschnitt 6.8.5, Gl. 6.60 berechnet.

Es werden die Unsicherheitsbeiträge aus der Messmethode  $\Delta L_{\text{Messmethode}}$  und dem Messobjekt  $\Delta L_{\text{Messobjekt}}$  zum Unsicherheitsbeitrag  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  zusammengeführt. Zur Berechnung der *Methodenunsicherheit*  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  werden aus der Tab. 6 im Anhang nur die bekannten und die nach Formeln berechenbaren Unsicherheitsbeiträge der einzelnen beteiligten Merkmalsgrößen nach Spalte 3 verwendet. Der Unsicherheitsbeitrag  $\Delta L_{\text{Schallfeld}}$  wird über die Schallpegelvariationsweite sowie den Gl. 6.15 und Gl. 6.19 abgeschätzt und der für die Mikrofonposition  $\Delta L_{\text{Mikro}}$  kann dem Anh., Tab. 6, Zeile 3.2, Spalte 10 entnommen werden.

Die *Messgeräteunsicherheit*  $\Delta L_{U\text{-Messgerät}}$  für Kurzzeitmessungen ist in der Tab. 6.5 in Abschnitt 6.7.5 zu finden.

Beispiel

Die Ermittlung des Tageslärnexpositionspegels  $L_{EX,8h}$  und seine Messunsicherheit  $\Delta L_U(L_{EX})$  erfolgt in analoger Weise wie in den Beispielen 7 und 8 unter Berücksichtigung der Tab. 6 im Anhang.

### **Anwendung der Messmethode 3 auf den Lärmtyp III Stichprobenmessung im Gesamtmesszeitraum**

Messwertermittlung

Durchführung von integrierenden Messungen über mindestens drei Einzelgeräuschzyklen.

Bildung von Mittelwert und Standardabweichung aus mindestens drei Einzelwerten  $L_{pAeqi}$  für jeweils einen Geräuschzyklus.

Messgröße

$$L_{pAeq} = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{T \cdot p_0^2} \int_0^T p^2(t) dt \right) \text{ in dB(A).}$$

Es gilt:

$$L_{pAeq} = L_{pAm} = 10 \cdot \lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{p_i}{p_0} \right)^2 = 10 \cdot \lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{Aeqi}}{10}} \text{ in dB(A)} \quad (7.8)$$

Unterscheiden sich die  $L_{pAeq}$  der Geräuschzyklen um nicht mehr als 5 dB voneinander, dann gilt auch:

$$\bar{L}_{pAeq} = L_{pAm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_{Aeqi} \text{ in dB(A)} \quad (7.9)$$

mit

- $L_{Aeqi}$  äquivalenter Dauerschallpegel des jeweiligen Geräuschzyklus in dB(A),  
 $n$  Anzahl der Einzelmesswerte der äquivalenten Dauerschallpegel.

Ergebnisgröße

Der Messwert aus der Stichprobenmessung entspricht dem Tages-Lärmexpositionspegel:

$$L_{EX,8h} \approx L_{pAeq} \approx L_{pAm} \approx \bar{L}_{pAeq}$$

Messunsicherheit

Die Messunsicherheit  $\Delta L_U(L_{EX})$  wird nach Abschnitt 6.8.5, Gl. 6.60 berechnet.

Wie im Abschnitt 6.8.3 gezeigt, sind für die Berechnung der *Methodenunsicherheit*  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  die Unsicherheitsbeiträge aus der Messmethode  $\Delta L_{\text{Messmethode}}$  in Verbindung mit dem Messobjekt  $\Delta L_{\text{Messobjekt}}$  relevant. Jedoch ist in der Regel über die Unsicherheit der Messmethode nichts oder nur wenig bekannt. Beide Beiträge werden daher im Unsicherheitsbeitrag  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  zusammengeführt. Zur Berechnung der Methodenunsicherheit  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  werden aus der Tab. 7 im Anhang nur die bekannten und die nach Formeln berechenbaren Unsicherheitsbeiträge der einzelnen beteiligten Merkmalsgrößen nach Spalte 3 verwendet. Der Unsicherheitsbeitrag  $\Delta L_{\text{Schallfeld}}$  wird detailliert nach Gl. 6.13 berechnet, der für die Mikrofonposition  $\Delta L_{\text{Mikro}}$  kann dem Anh., Tab. 7, Zeile 3.2, Spalte 10 entnommen werden.

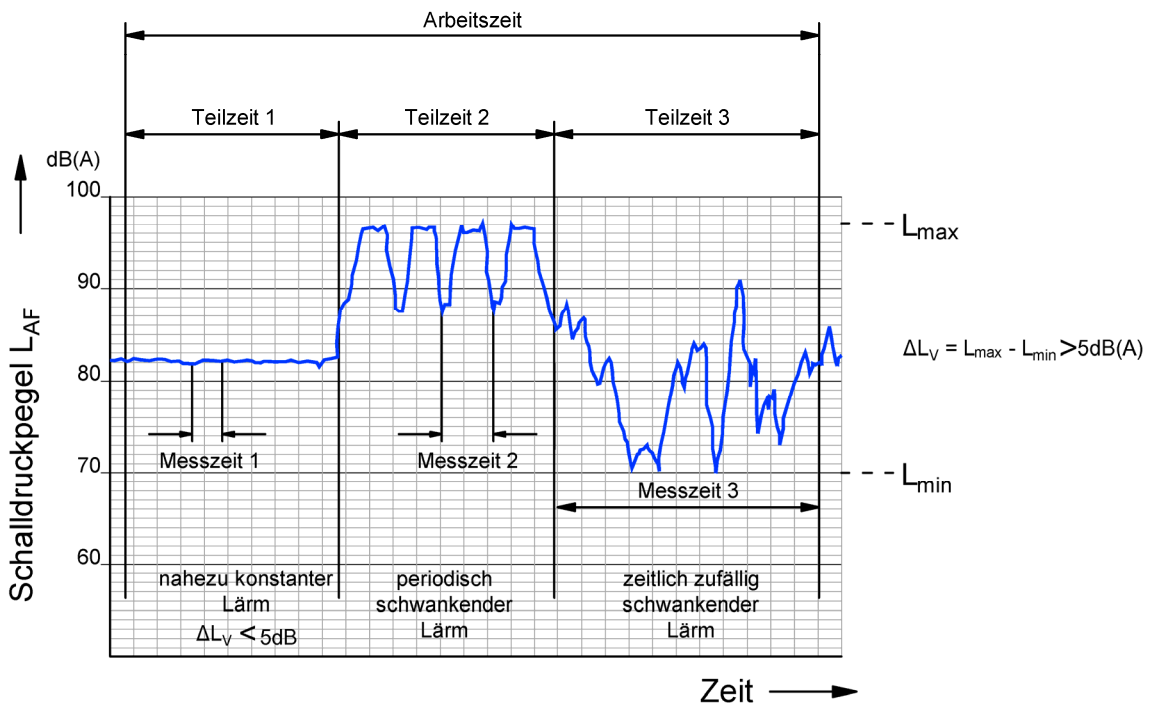
Die *Messgeräteunsicherheit*  $\Delta L_{U\text{-Messgerät}}$  für Kurzzeitmessungen ist in der Tab. 6.5 in Abschnitt 6.7.5 zu finden.

Beispiel

Die Ermittlung des Tageslärme xpositionspegels  $L_{EX,8h}$  und seine Messunsicherheit  $\Delta L_U(L_{EX})$  erfolgt in analoger Weise wie in den Beispielen 3 und 4 unter Berücksichtigung der Tab. 7 im Anhang.

### 7.4.3.3 Lärmtyp IV: Stark veränderliche Lärmexposition bestehend aus den Lärmtypen I, II und III innerhalb einer Arbeitsschicht

Wenn die Lärmexposition am Arbeitsplatz in einer Arbeitsschicht in Abhängigkeit von der Tätigkeit in manchen Zeitabschnitten nahezu konstant und in anderen zeitlich und örtlich stark veränderlich oder auch periodisch ist, empfiehlt es sich, entweder die **kontinuierliche Messung** oder die **kombinierte Messung über einen Gesamtmesszeitraum (Arbeitsschicht)** anzuwenden.



**Abb. 7.5** Schallpegel-Zeitverlauf einer zeitlich und örtlich sehr stark veränderlichen Lärmexposition – Lärmtyp IV

## Anwendung der Messmethode 1 auf den Lärmtyp IV Kontinuierliche Messung über einen Gesamtmesszeitraum (Arbeitsschicht)

### Messwertermittlung

Hat man kein Vorwissen über die zeitliche Verteilung des Schallpegels in Abhängigkeit von der Tätigkeit, so ist eine kontinuierliche Messung mit einem **integrierenden Schallpegelmesser** oder einem **Lärmdosimeter** erforderlich. Damit lässt sich unmittelbar der äquivalente Dauerschallpegel  $L_{Aeq}$  direkt durch Messung über eine Arbeitsschicht bestimmen, wobei die Messzeit der Dauer der Arbeitsschicht entspricht.

### Messgröße

$$L_{pAeq,Te} = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,1L(t)} dt \right) = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{T \cdot p_0^2} \int_0^T p^2(t) dt \right) \text{ in dB(A)}$$

### Ergebnisgröße

$$L_{EX,8h} = L_{pAeq,Te} + 10 \cdot \lg \frac{T_e}{T_0} \quad \text{in dB(A)}$$

mit

$L_{pAeq,Te}$	äquivalenter Dauerschallpegel einer typischen Arbeitsschicht in dB(A),
$T_e$	effektive Einwirkdauer während der typischen Arbeitsschicht in h,
$T_0$	Bezugszeitdauer, $T_0 = 8$ h.

### Messunsicherheit

Die Messunsicherheit  $\Delta L_U(L_{EX})$  wird nach Abschnitt 6.8.5, Gl. 6.60 berechnet.

Wie im Abschnitt 6.8.3 gezeigt, sind für die Berechnung der *Methodenunsicherheit*  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  die Unsicherheitsbeiträge aus der Messmethode  $\Delta L_{\text{Messmethode}}$  in Verbindung mit dem Messobjekt  $\Delta L_{\text{Messobjekt}}$  relevant. Jedoch ist in der Regel über die Unsicherheit der Messmethode nichts oder nur wenig bekannt. Beide Beiträge werden daher im Unsicherheitsbeitrag  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  zusammengeführt. Zur Berechnung der Methodenunsicherheit  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  werden aus der Tab. 3 im Anhang nur die bekannten und die nach Formeln berechenbaren Unsicherheitsbeiträge der einzelnen beteiligten Merkmalsgrößen nach Spalte 3 verwendet.

Die *Messgeräteunsicherheit*  $\Delta L_{U\text{-Messgerät}}$  für Langzeitmessungen kann der Tab. 6.6 in Abschnitt 6.7.5 entnommen werden.

Beispiel 13

Für einen Arbeitsplatz in einer Druckerei sollte der Tages-Lärmexpositionspegel ermittelt werden. Es war auf Grund der Arbeitsanalyse zu erwarten, dass der Drucker viele variable Tätigkeiten im Leitstand, der Rotation und in anderen Bereichen auszuführen haben würde, so dass auf Grund dieser Situation angenommen werden musste, dass die Schallexposition erheblichen Schwankungen unterliegen würde. Es wurde daher beschlossen, eine kontinuierliche Messung mit einem Lärmdosimeter (s. Abb. 7.6) über den Gesamtmesszeitraum der Arbeitsschicht durchzuführen.



**Abb. 7.6** Lärmdosimeter von Brüel & Kjaer, Typ 4436, Gerät der Klasse 2

Der 8-h-Messwert betrug

$$L_{EX,8h, \text{Messwert}} = L_{pAeq,8h} = 92,0 \text{ dB(A)}.$$

Die Methodenunsicherheit  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  wird aus den in Anh., Tab. 3 bekannten Unsicherheitsbeiträgen berechnet. Die einzelnen beteiligten Unsicherheitsbeiträge für Beispiel 13 lassen sich in der folgenden Gleichung formelmäßig zusammenfassen:

$$\Delta L_{U\text{-Methode}} = k \sqrt{\Delta L_{\text{Schallfeld}}^2 + \Delta L_{\text{Mikro}}^2}.$$

Die Varianz für  $\Delta L_{\text{Schallfeld}}^2 = 0,00$  erhält man aus Anh., Tab. 3, Zeile 3.1, Spalte 10 und die Varianz für  $\Delta L_{\text{Mikro}}^2 = 1,00$  aus Anh., Tab. 3, Zeile 3.2, Spalte 10. Der Berechnung erfolgt mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 1,7$  (siehe dazu Abschnitt 6.6.3).

$$\Delta L_{U\text{-Methode}} = 1,7 \sqrt{0,00 + 1,00} = 1,7 \text{ dB}.$$

Die Messgeräteunsicherheit  $\Delta L_{U\text{-Messgerät}}$  erhält man aus Tab. 6.6 in Abschnitt 6.7.5 für den Fall der Langzeitmessung. Für ein Messgerät der Klasse 2 ergibt sich bei der Messung von Industrielärm mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 1,7$  eine Messunsicherheit von

$$\Delta L_{U\text{-Messgerät}} = 2,8 \text{ dB}.$$

Damit berechnet sich die Messunsicherheit für das Ergebnis der Messung bei Anwendung der Messmethode 1 zu

$$\Delta L_U(L_{EX}) = \sqrt{\Delta L_{U\text{-Methode}}^2 + \Delta L_{U\text{-Messgerät}}^2} = \sqrt{1,7^2 + 2,8^2} = 3,3 \text{ dB.}$$

Die Angabe des Tages-Lärmexpositionspegels mit seiner Messunsicherheit erfolgt in folgender Weise

$$L_{EX,8h} = L_{EX,8h,\text{Messwert}} \pm \Delta L_U \text{ in dB(A),}$$

$$L_{EX,8h} = 92,0 \pm 3,3 \text{ dB(A).}$$

### Beispiel 14

Für ein Klasse 1-Lärmdosimeter ergibt sich für dieselbe Lärmsituation eine Messunsicherheit von  $\Delta L_U(L_{EX}) = 2,4 \text{ dB}$  mit  $\Delta L_{U\text{-Methode}} = 1,7 \text{ dB}$  ( $k = 1,7$ ) und  $\Delta L_{U\text{-Messgerät}} = 1,7 \text{ dB}$  ( $k = 1,7$ ).

## **Anwendung der Messmethode 4 auf den Lärmtyp IV** **Kombinierte Messung im Gesamtmesszeitraum (tätigkeitsbezogene Messung)**

### Messwertermittlung

Es wird eine getrennte Erfassung des äquivalenten Dauerschallpegels  $L_{Aeqi}$  für die einzelnen Tätigkeiten in den Teileinwirkzeiten  $T_i$  vorgenommen. Auf dieser Grundlage wird der Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  rechnerisch bestimmt. Messungen während der Teileinwirkzeiten besitzen den Vorteil, dass man bei geeigneten Pegel-Zeitverläufen mit relativ kurzen Messzeiten die mittleren Schallpegel bestimmen kann (Abb. 7.5).

### Messgröße

Der *A-bewertete äquivalente Dauerschallpegel*  $L_{pAeq,Te}$  der typischen Arbeitsschicht berechnet sich aus:

$$L_{pAeq,Te} = 10 \cdot \lg \frac{1}{T_e} \cdot \sum_{i=1}^m t_i \cdot 10^{\frac{L_{pAeqi}}{10}} \quad \text{in dB(A)} \quad (7.10)$$

mit

- $L_{pAeqi}$     A-bewerteter äquivalenter Dauerschallpegel während der i-ten Teiltätigkeitszeit in dB(A),
- $t_i$ :        Teiltätigkeitszeiten in h,
- $T_e$ :        typische Schichtarbeitszeit in h,
- $m$ :        Anzahl der Teiltätigkeitszeiten.

### Ergebnisgröße

$$L_{EX,8h} = L_{pAeq,Te} + 10 \cdot \lg \frac{T_e}{T_0} \quad \text{in dB(A)}$$

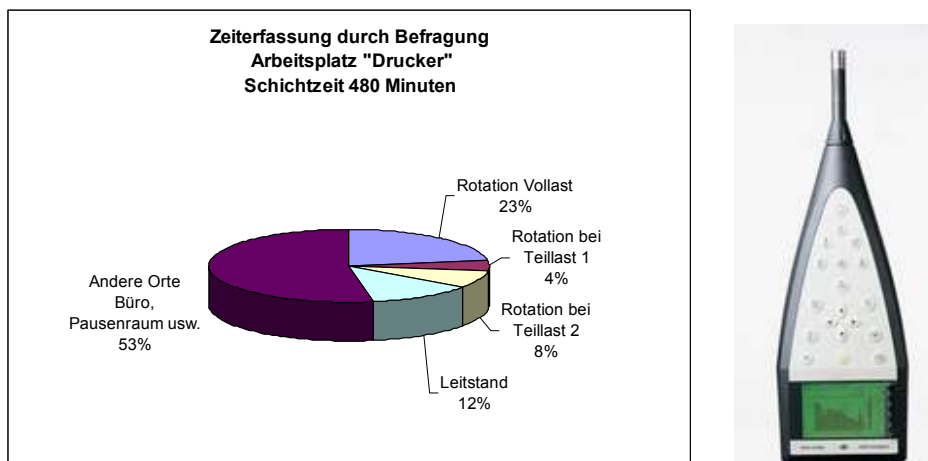
### Messunsicherheit

Die Messunsicherheit  $\Delta L_U(L_{EX})$  ergibt sich nach Gl. 6.38 bis 6.43 in Abschnitt 6.8.1 und Gl. 6.60 in Abschnitt 6.8.5 in Verbindung mit den Tabellen 1 bis 7 im Anhang.

### Beispiel 15

Parallel zur Lärmmessung am Arbeitsplatz in einer Druckerei (siehe Beispiel 13) wurde auf der Basis der Messmethode 4 der Tages-Lärmexpositionspegel ermittelt. Es war auf Grund der Arbeitsanalyse zu erwarten, dass der Drucker viele variable Tätigkeiten im Leitstand, der Rotation und in anderen Bereichen auszuführen hat. Im Einzelnen konnten folgende Arbeitsorte und Tätigkeiten ermittelt werden:

- Leitstand
  - Überwachungstätigkeit
- Rotation
  - Belegexemplar-Entnahme am Schuppenband
  - Platten sortieren am Sortiertisch
  - Platten stellen
  - Platten schließen
  - Farben rühren/nachfüllen
  - Umrüstung/Kontrolle/Wartung
- Andere Orte: Büro, Pausenraum usw.



**Abb. 7.7** Prozentualer Anteil der Teiltätigkeitszeiten  $T_i$  an der Gesamtzeit der typischen Arbeitsschicht (480 min) eines Druckers (links in der Abbildung). Die Messungen wurden mit einem Integrierenden Schallpegelmessgerät 2260 von Brüel & Kjaer der Klasse 1 durchgeführt (rechts in der Abbildung).

**Tab. 7.1** Personenbezogener Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  für den Arbeitsplatz in der Druckerei

Nr. Tätigkeit	Arbeitsort und Betriebszustand während der Tätigkeit	Lärmtyp	Lärmimmissionspegel am Arbeitsplatz $L_{pAeqi}$ dB(A)	Teileinwirkzeit $T_i$ min
1	Rotation bei Volllast	I	98	108
2	Rotation bei Teillast 1	I	92	21
3	Rotation bei Teillast 2	I	80	39
4	Leitstand	I	73	58
5	Andere Orte: Büro, Pausenraum usw.	II	60	254
	Schichtzeit $T_{8h}$			480
	Tages-Lärmexpositionspegel $L_{EX,8h}$		91,8	

Aus der Schallpegel-Zeitverteilung ergibt sich ein Tages-Lärmexpositionspegel von

$$L_{EX,8h, \text{Messwert}} = L_{pAeq,8h} = 91,8 \text{ dB(A)}.$$

Für die Unsicherheitsberechnung werden die Lärmexpositionspegel an den Arbeitsorten in die oben definierten Lärmtypen eingestuft.

Für die Berechnung der Unsicherheiten von verschiedenen Lärmtypen gilt die Gl. 6.38:

$$\Delta L^2(L_{EX,8h}) = (c_{I1} \cdot \Delta L_{I1})^2 + (c_{II1} \cdot \Delta L_{II1})^2 + (c_{I2} \cdot \Delta L_{I2})^2 + (c_{Te} \cdot \Delta T_e)^2.$$

Die Arbeitsplatzanalyse hat ergeben, dass bei der Zeitschätzung für die Arbeitsschicht keine Unsicherheit vorliegt. Die Arbeitsschichtzeit beträgt genau 480 min. Damit entfällt der Term  $(c_{Te} \cdot \Delta T_e)^2$ . Außerdem wird unterstellt, dass die relativen Fehler bei der Bestimmung von Teileinwirkzeiten  $T_i$  kleiner als 10 % sind. Damit kann der durch die Zeitschätzung verursachte Unsicherheitsbeitrag vernachlässigt werden.

Die Tab. 7.1 zeigt, dass für den Arbeitsplatz „Drucker“ die Lärmtypen I und II vorliegen. Es gilt damit für die Berechnung der kombinierten Varianz  $\Delta L^2(L_{EX,8h})$  des Tages-Lärmexpositionspegels:

$$\Delta L^2(L_{EX,8h}) = (c_{I1} \cdot \Delta L_{pAeqI1})^2 + (c_{I2} \cdot \Delta L_{pAeqI2})^2 + (c_{I3} \cdot \Delta L_{pAeqI3})^2 + (c_{I4} \cdot \Delta L_{pAeqI4})^2 + (c_{II1} \cdot \Delta L_{pAeqII1})^2$$

mit

$$c_{I1} = c_{I2} = c_{I3} = c_{I4} = c_{II1} = \frac{\partial(L_{EX})}{\partial(L_{pAeqi})} = \frac{T_i}{T_0} \cdot \frac{10^{0,1L_{pAeqi}}}{10^{0,1L_{EX,8h}}}$$

nach Gl. 6.41 und den Einzelvarianzen  $\Delta L^2_{pAeqi}$  für die Lärmtypen I und II

$$\Delta L^2_{pAeqi} = \Delta L^2_{iMethode} + \Delta L^2_{iMessgerät}$$

mit

$$i = I \text{ und II.}$$



Die Unsicherheitsbeiträge für die Ergebnisse der Messungen während der Teiltätigkeiten berechnen sich wie folgt:

#### *Unsicherheit für die Messung während der Teiltätigkeit 1*

Die Einzelvarianz  $\Delta L^2_{pAeq1}$  wird für den Lärmtyp I aus den in Anh., Tab. 1 bekannten Varianzen der Merkmalsgrößen berechnet. Die beteiligten Varianzen lassen sich in der folgenden Gleichung zusammenfassen:

$$\Delta L^2_{pAeq1} = \Delta L^2_{Schallfeld} + \Delta L^2_{Mikro} + \Delta L^2_{Messgerät}$$

Die Varianz für  $\Delta L^2_{Schallfeld} = 0,25$  erhält man aus Anh., Tab. 1, Zeile 3.1, Spalte 10 und die Varianz für  $\Delta L^2_{Mikro} = 0,25$  aus Anh., Tab. 1, Zeile 3.2, Spalte 10 und die für  $\Delta L^2_{Messgerät} = 0,35$  aus Anh., Tab. 1, Zeile 2.1, Spalte 10. Mit dem nach Gl. 6.41 berechneten Empfindlichkeitskoeffizienten von  $c_{11} = 0,9464$  erhält man für Lärmtyp I im Zeitabschnitt 1 den folgenden Unsicherheitsbeitrag:

$$\begin{aligned} (c_{11} \cdot \Delta L_{pAeq1})^2 &= c_{11}^2 (\Delta L^2_{Schallfeld} + \Delta L^2_{Mikro} + \Delta L^2_{Messgerät}), \\ (c_{11} \cdot \Delta L_{pAeq1})^2 &= (0,9464)^2 (0,25 + 0,25 + 0,35) = 0,76132. \end{aligned}$$

#### *Unsicherheit für die Messung während der Teiltätigkeit 2*

Ermittlung wie unter Teiltätigkeit 1, jedoch ist der Empfindlichkeitskoeffizient hier  $c_{12} = 0,0462$ .

$$(c_{12} \cdot \Delta L_{pAeq2})^2 = (0,0462)^2 (0,25 + 0,25 + 0,35) = 0,00181$$

#### *Unsicherheit für die Messung während der Teiltätigkeit 3*

Ermittlung wie unter Teiltätigkeit 1, jedoch ist der Empfindlichkeitskoeffizient hier  $c_{13} = 0,0054$ .

$$(c_{13} \cdot \Delta L_{pAeq3})^2 = (0,0054)^2 (0,25 + 0,25 + 0,35) = 0,00002$$

#### *Unsicherheiten für die Messung während der Teiltätigkeit 4*

Ermittlung wie unter Teiltätigkeit 1, jedoch ist der Empfindlichkeitskoeffizient hier  $c_{14} = 0,0016$ .

$$(c_{14} \cdot \Delta L_{pAeq4})^2 = (0,0016)^2 (0,25 + 0,25 + 0,35) = 0,00000$$

#### *Unsicherheit für die Messung während der Teiltätigkeit 5*

Während der Teiltätigkeit 5 wurde für den Lärmtyp II eine Schallpegelvariationsweite von 20 dB festgestellt und solange gemessen bis sich der  $L_{pAeq}$  nicht mehr änderte. Die beteiligten Varianzen lassen sich in der folgenden Gleichung zusammenfassen:

$$\Delta L^2_{pAeqII1} = \Delta L^2_{Schallfeld} + \Delta L^2_{Mikro} + \Delta L^2_{Messgerät} .$$

Die Varianz für  $\Delta L^2_{\text{Schallfeld}} = 0,83$  erhält man aus Gl. 6.16 und Gl. 6.19, dabei wird angenommen, dass der Messzeit mindestens 30 Stichproben zugeordnet werden können. Die Varianz für  $\Delta L^2_{\text{Mikro}} = 1,00$  aus Anh., Tab. 4, Zeile 3.2, Spalte 10 und die für  $\Delta L^2_{\text{Messgerät}} = 0,35$  aus Anh., Tab. 4, Zeile 2.1, Spalte 10. Mit dem nach Gl. 6.41 berechneten Empfindlichkeitskoeffizienten von  $c_{II1} = 0,0004$  erhält man für Lärmtyp II im Zeitabschnitt 5 den folgenden Unsicherheitsbeitrag:

$$\begin{aligned} (c_{II1} \cdot \Delta L_{pAeqII1})^2 &= c_{II1}^2 (\Delta L^2_{\text{Schallfeld}} + \Delta L^2_{\text{Mikro}} + \Delta L^2_{\text{Messgerät}}) \\ (c_{II1} \cdot \Delta L_{pAeqII1})^2 &= (0,0004)^2 (0,83 + 1,00 + 0,35) = 0,00000 \end{aligned}$$

Die kombinierte Varianz  $\Delta L^2(L_{EX,8h})$  erhält man nun aus der Summe der Einzelvarianzen:

$$\begin{aligned} \Delta L^2(L_{EX,8h}) &= (c_{I1} \cdot \Delta L_{pAeqI1})^2 + (c_{I2} \cdot \Delta L_{pAeqI2})^2 + (c_{I3} \cdot \Delta L_{pAeqI3})^2 + (c_{I4} \cdot \Delta L_{pAeqI4})^2 + \\ &\quad (c_{II1} \cdot \Delta L_{pAeqII1})^2 \\ \Delta L^2(L_{EX,8h}) &= 0,76132 + 0,00181 + 0,00002 + 0,00000 + 0,00000 = 0,76315 \end{aligned}$$

Damit berechnet sich die Messunsicherheit  $\Delta L_U(L_{EX,8h})$  für das Ergebnis der Messung bei Anwendung der Messmethode 4 (tätigkeitsbezogene Messung) und der Benutzung des Erweiterungsfaktors  $k = 1,7$  (siehe dazu Abschnitt 6.6.3) zu

$$\Delta L_U(L_{EX,8h}) = k \sqrt{\Delta L^2(L_{EX,8h})} = 1,7 \sqrt{0,763} = 1,5 \text{ dB.}$$

Die Angabe des Tages-Lärmexpositionspegels  $L_{EX,8h}$  mit seiner Messunsicherheit  $\Delta L_U$  erfolgt in folgender Weise

$$\begin{aligned} L_{EX,8h} &= L_{EX,8h, \text{Messwert}} \pm \Delta L_U \text{ in dB(A),} \\ L_{EX,8h} &= 91,8 \pm 1,5 \text{ dB(A).} \end{aligned}$$

Das Ergebnis  $L_{EX,8h} = 91,8 \pm 1,5 \text{ dB(A)}$  aus der tätigkeitsbezogenen Messung, gemessen mit einem integrierenden Schallpegelmessgerät der Klasse 1 nach der Messmethode 4 (Kombination aus den Messmethoden 1 bis 3) und das Ergebnis  $L_{EX,8h} = 92,0 \pm 2,4 \text{ dB(A)}$  (siehe Beispiel 14), ermittelt aus einer kontinuierlichen Messung nach der Messmethode 1 mit einem Lärmdosimeter der Klasse 1 über eine Arbeitsschicht, stimmen sehr gut überein. Im statistischen Sinn sind beide Ergebnisse gleichwertig.

## 7.5 Messverfahren für die Ermittlung des C-bewerteten Spitzenschalldruckpegels $L_{pC, \text{peak}}$

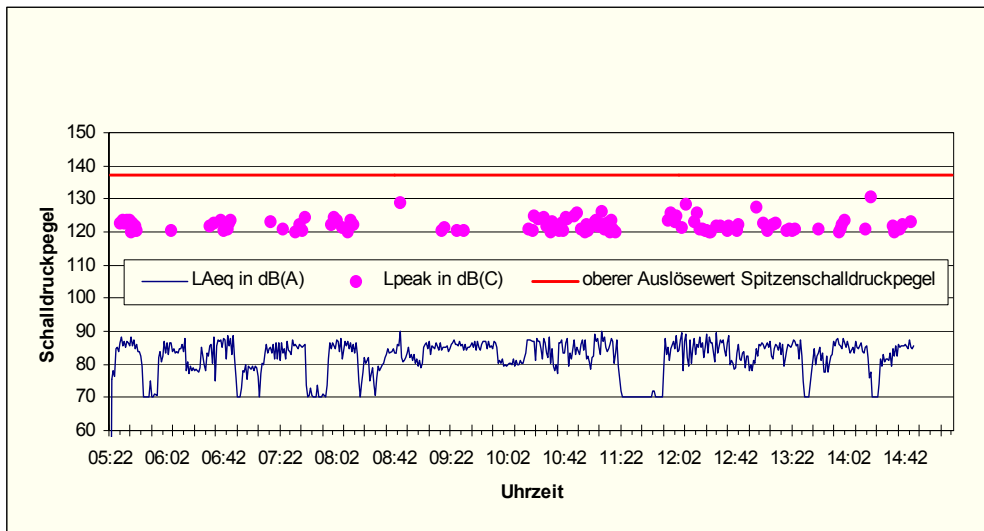
Wenn an Arbeitsplätzen besonders laute Lärmimpulse auftreten, so ist der Spitzenschalldruckpegel  $L_{pC, \text{peak}}$  zu messen. Die Messung des Spitzenschalldruckpegels muss mit der Zeitbewertung „peak“ in der Frequenzbewertung „C“ erfolgen. Viele neuere Messgeräte können den Spitzenschalldruckpegel parallel zum äquivalenten Dauerschallpegel messen und die maximal aufgetretenen Werte speichern und zur Anzeige bringen [48].

Bei den folgenden aufgeführten Tätigkeiten, Arbeitsverfahren und Arbeitsmitteln kann angenommen werden, dass beträchtliche Spitzenschalldruckpegel vorkommen:

- Ankörnen,
- Bolzensetzwerkzeuge,
- Druckluftnagler,
- Holzhackmaschinen,
- Meißel-, Niet-, Richt- und Bohrhämmer,
- Müllaufgabetrichter,
- Schlagschrauber,
- Stanzen,
- Transportvorgänge mit Aufprall- oder Anschlaggeräuschen,
- Schlagscheren,
- Schmiedehämmer.

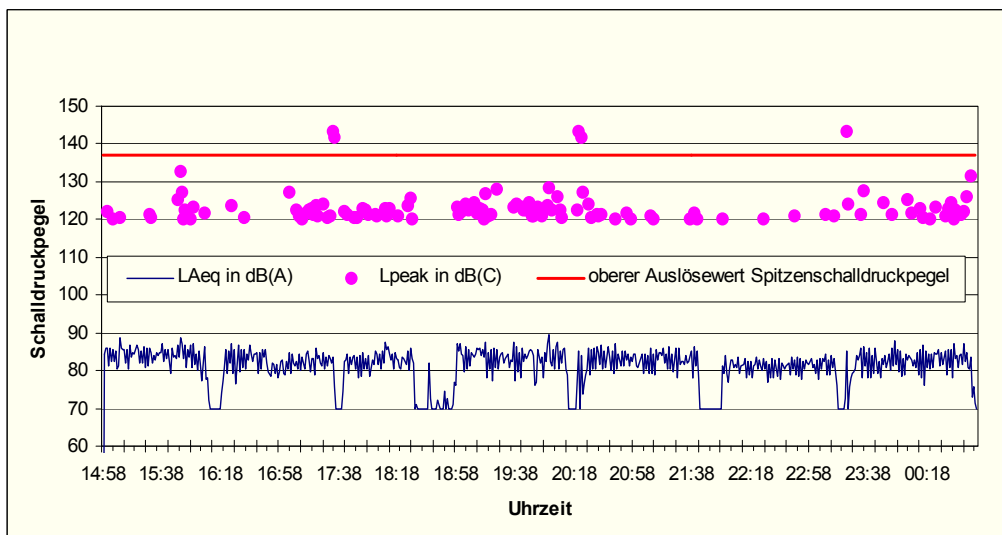
### Messwertermittlung

In den Abb. 7.8 und 7.9 sind beispielhaft Lärmpegel-Zeitverläufe mit Lärmimpulsen für einen Arbeitsplatz in der Karosseriebehandlungshalle eines Automobilherstellers dargestellt. Die Messergebnisse stammen aus einer Lärmdosimetermessung nach der Messmethode 1. Es ist zu erkennen, dass einzelne Pegelspitzen in Abb. 7.9 den oberen Auslösewert überschreiten. Dabei handelt es sich um vereinzelte Schallergebnisse während der Spätschicht. In der Frühschicht waren dagegen keine Überschreitungen zu beobachten. In einem Kontrollversuch konnte jedoch festgestellt werden, dass viele Lärmimpulsspitzen nicht reproduzierbar waren und keiner bestimmten Tätigkeit zugeordnet werden konnten. Eine Ursache könnte das versehentliche Anschlagen des Mikrofons beim Arbeiten an der Karosserie sein. Bei der Bewertung der Spitzenschalldruckpegel müssen solche einzelnen Überschreitungen, die eventuell durch ein untypisches Verhalten hervorgerufen werden, ausgeschlossen werden. Es ist daher wichtig, dass die Messung von Spitzenschalldruckpegeln unter Beobachtung und unter reproduzierbaren Bedingungen geschieht. Eine automatische Aufzeichnung kann daher in diesem Falle nicht zielführend sein.



**Abb. 7.8** Pegel-Zeitverlauf einer Lärmdosimetermessung in der Frühschicht am Arbeitsplatz einer Karosseriebehandlungshalle

Bei der automatischen Aufzeichnung der Spitzenschalldruckpegel mit einem Lärmdosimeter und einer Überschreitung von Spitzenpegeln kann dies zunächst nur als Indiz gewertet werden, insbesondere dann, wenn durch das technologische Verfahren keine erheblichen Spitzenschalldruckpegel zu erwarten sind. Durch eine genaue Überprüfung muss dieser Spitzenschalldruckpegel auch nachweisbar mit einer Tätigkeit, einem Arbeitsverfahren usw. verbunden sein.



**Abb. 7.9** Pegel-Zeitverlauf einer Lärmdosimetermessung in der Spätschicht am Arbeitsplatz einer Karosseriebehandlungshalle

Daher ist es angebracht, in einer Kontrollmessung den Spitzenschalldruck, der mit dem Lärmdosimeter ermittelt wurde, mit einem Schallpegelmesser zu überprüfen.

Messgröße und Ergebnisgröße

Es wird der Spitzenschalldruckpegel  $L_{pC,peak}$  gemessen, der gleichzeitig die Ergebnisgröße ist.

Messunsicherheit

Die Messunsicherheit  $\Delta L_U(L_{pC,peak})$  wird nach Gl. 6.60 berechnet.

Die Messgeräteunsicherheit  $\Delta L_{U-Messgerät}$  kann, je nach Klasse des Messgerätes, der Tab. 6.5 oder 6.6 in Abschnitt 6.7.5 entnommen werden.

Beispiel 16

Der für die Tätigkeit nachweisbare gemessene Spitzenschalldruckpegel beträgt  $L_{pC,peak} = 141$  dB(C).

Für die Messunsicherheit nach Gl. 6.60 gilt:

$$\Delta L_U = \sqrt{\Delta L_{U-Methode}^2 + \Delta L_{U-Messgerät}^2} \text{ in dB.}$$

Da ein einzelner Messwert das Messergebnis repräsentiert, ist die Gesamtunsicherheit vom Messprinzip, d. h. von der Messgeräteunsicherheit  $\Delta L_{U-Messgerät}$  und von der Unsicherheit durch die Mikrofonposition abhängig.

Die Unsicherheit der Mikrofonposition  $\Delta L_{Mikro} = 1$  dB geht in die Methodenunsicherheit  $\Delta L_{U-Methode}$  ein. Damit ist

$$\Delta L_{U-Methode} = 1,7 \text{ dB (k = 1,7).}$$

Bei Langzeitmessungen mit einem Lärmdosimeter der Klasse 2 ergibt sich nach Tab. 6.6 in Abschnitt 6.7.5 eine Messgeräteunsicherheit von

$$\Delta L_{U-Messgerät} = 4,1 \text{ dB (k = 1,7).}$$

Für den Messwert des Spitzenschalldruckpegels  $L_{pC,peak}$ , der gleichzeitig das Ergebnis darstellt, erhält man eine Messunsicherheit von

$$\Delta L_U(L_{pC,peak}) = \sqrt{1,7^2 + 4,1^2}.$$

Sie beträgt  $\Delta L_U(L_{pC,peak}) = 4,4$  dB.

Der C-bewertete Spitzenschalldruckpegel  $L_{pC,peak}$  wird geschrieben

$$L_{pC,peak} = L_{pC,peak,Messwert} \pm \Delta L_U \text{ in dB(C),}$$

$$L_{pC,peak} = 141,0 \pm 4,4 \text{ dB(C).}$$

Beispiel 17

Für ein Klasse 1-Lärmdosimeter bekommt man für denselben Lärmimpuls bei einer Langzeitmessung eine Messunsicherheit von  $\Delta L_U(L_{pC,peak}) = 3,1$  dB mit  $\Delta L_{U\text{-Methode}} = 1,7$  dB ( $k = 1,7$ ) und  $\Delta L_{U\text{-Messgerät}} = 2,6$  dB ( $k = 1,7$ ), Tab. 6.6 in Abschnitt 6.7.5).

Der C-bewerteten Spitzenschalldruckpegels  $L_{pC,peak}$  ergibt dann:

$$L_{pC,peak} = 141,0 \pm 3,1 \text{ dB(C)}.$$

Beispiel 18

Für eine Kurzzeitmessung mit einem Klasse 1-Schallpegelmessgerät erhält man für denselben Lärmimpuls eine Messunsicherheit von  $\Delta L_U(L_{pC,peak}) = 2,8$  dB, mit  $\Delta L_{U\text{-Methode}} = 1,7$  dB ( $k = 1,7$ ) und  $\Delta L_{U\text{-Messgerät}} = 2,2$  dB ( $k = 1,7$ ), Tab. 6.5 in Abschnitt 6.7.5).

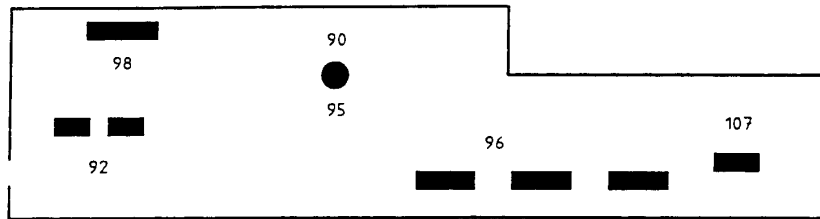
Für den C-bewerteten Spitzenschalldruckpegel  $L_{pC,peak}$  ergibt sich dann:

$$L_{pC,peak} = 141,0 \pm 2,8 \text{ dB(C)}.$$

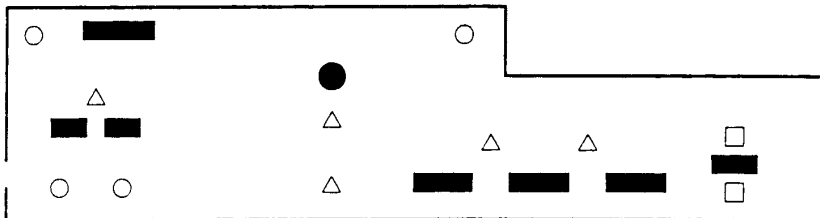
## 7.6 Darstellung der Lärmimmissions-Messwerte in Lärmkarten und Praxisbeispiel

Die Lärmkarte ist ein wichtiges Hilfsmittel bei der Beurteilung der Lärmbelastung in Arbeitsstätten sowie bei der Festlegung der Prioritäten für Lärminderungsmaßnahmen.

In der Lärmkarte werden jene Bereiche in der Arbeitsstätte aufgezeigt und hervorgehoben, in denen eine Gefährdung des Gehörs durch zu hohe Schallpegel zu befürchten ist. Das Ausmaß der Belastung wird damit an jedem Arbeitsplatz sichtbar. Unter Berücksichtigung der Anzahl der betroffenen Arbeitnehmer können Schwerpunkte für die Minderung des Lärms getroffen werden. Abb. 7.10 zeigt die prinzipiellen Darstellungsmöglichkeiten der Lärmimmissionen an Arbeitsplätzen in Arbeitsstätten.

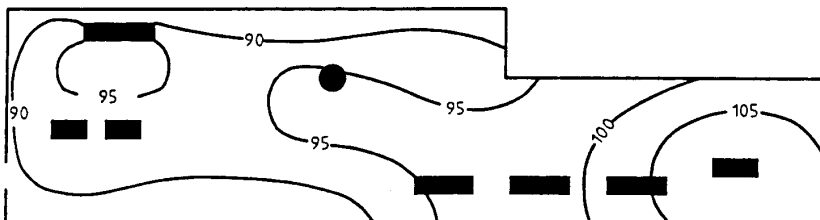


a) Angabe des Geräuschpegels am Arbeitsplatz

b) Angabe von Bereichen mit bestimmten Geräuschpegeln  
(Für solche Lärmkarten werden häufig farbige Darstellungen benutzt.)

Legende

- bis zu 90 dB
- △ 90 dB bis 100 dB
- über 100 dB



c) Kurven gleichen Geräuschpegels (hier mit einer Schrittweite von 5 dB)

**Abb. 7.10** Verschiedene Darstellungen von Lärmimmissionen in Lärmkarten an Arbeitsplätzen [13]

Lärmkarten können nach [13] für verschiedene Zwecke benutzt werden:

- um die Geräuschimmission an Arbeitsplätzen einzuschätzen,
- um laute Bereiche und dominierende Schallquellen zu kennzeichnen,
- um Lärmbereiche festzustellen, in denen die Lärmexpositionspegel die jeweils zutreffenden Auslösewerte überschreiten,
- um die tatsächliche Geräuschsituation zu einer speziellen Zeit zu veranschaulichen,
- als wichtiges Hilfsmittel in der Planungsphase neuer Arbeitsplätze,
- als Hilfsmittel, um die akustische Wirkung nach Durchführung einer Änderung an einer Maschine, in einem Arbeitsprozess oder der Arbeitsplatzgestaltung bewerten zu können,
- um die Wirksamkeit von durchgeführten oder geplanten Maßnahmen nachprüfen zu können,
- als Hilfsmittel für die Ausarbeitung von Langzeit-Lärminderungsprogrammen,
- als Hilfsmittel für den Dialog und die Koordinierung zwischen den betroffenen Personenkreisen,
- um die dem Lärm ausgesetzten Personen aufzuklären,
- als Hilfsmittel bei der Durchführung von Programmen zur Überwachung der Hörfähigkeit und um das Tragen von persönlichen Gehörschutzmitteln motivierend zu unterstützen.

Die Informationen aus der Lärmkarte sind nicht dafür geeignet, die Ursachen der Schallentstehung, Schallübertragung und Schallabstrahlung zu beschreiben. Zur genauen Festlegung von Maßnahmen an Maschinen, Geräten, Anlagen und Arbeitsstätten sind diagnostisch systematische Untersuchungen an den Geräuschquellen und deren Umgebung nötig.

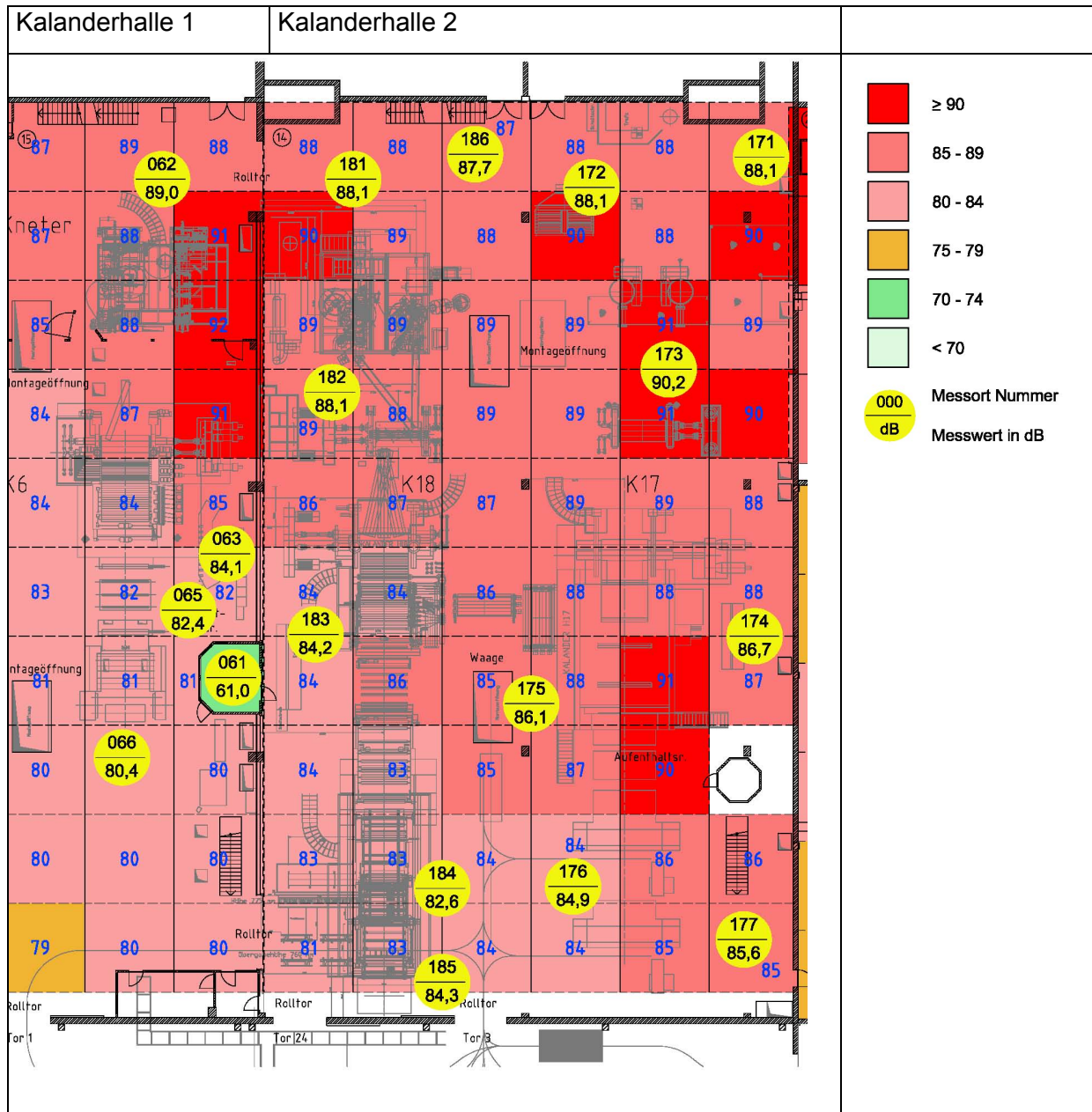
### Beispiel 19

Zur Einschätzung des personenbezogenen Tages-Lärmexpositionspegels  $L_{EX,8h}$  an den Arbeitsplätzen in einer Kalanderralle und für die Planung eines Langzeit-Lärminderungsprogramms wurde eine detaillierte Lärmkarte angefertigt.

### Messwertermittlung

Es wurden die äquivalenten Dauerschallpegel  $L_{pAeq}$  am Ort gemessen. Das Ergebnis für die örtliche Verteilung der Lärmimmission zeigt die Abb. 7.11 in einer Lärmkarte.





**Abb. 7.11** Lärmimmissionspegel in der Kalanderhalle 1 und 2, dargestellt in einer Lärmkarte

### Ergebnisgröße

Zur Berechnung des Tages-Lärmexpositionspegels wurde die Gesamtarbeitszeit (z. B. Schicht) der Beschäftigten in Teileinwirkzeiten mit den dazugehörigen Lärmimmissionen unterteilt (z. B. Aufenthalt am Bedienplatz, im Umfeld der Kalander, Bereich der Mühlen etc.). Für die Berechnung des personenbezogenen Tages-Lärmexpositionspegels  $L_{EX,8h}$  wurde der ortsbezogene Lärmimmissionspegel  $L_{pAeqi}$  für die verschiedenen Aufenthaltsorte des Arbeitnehmers aus der Lärmkarte entnommen und  $L_{EX,8h}$  wie folgt berechnet:

$$L_{EX,8h} = 10 \lg \left[ \frac{1}{T_0} \sum_i^n \left( T_i \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,T_i}} \right) \right]$$

$L_{Aeq,T_i}$  = gemessener A-bewerteter energieäquivalenter Schalldruckpegel in der Teileinwirkzeit  $i$  (z. B. 86,7 dB(A) am Steuerpult Kalanders usw.)

$T_i$  = Teileinwirkzeit, in der der Schallpegel gemessen wurde (z. B. 23,5 % von 8,0 h Aufenthaltszeit am Steuerpult usw.)

$T_0$  = Bezugszeitdauer = 8 Stunden

Das Ergebnis zeigt Tab. 7.2.

**Tab. 7.2** Personenbezogener Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  für den Maschinenführer „Kalanders“ auf der Grundlage ortsfest gemessener Lärmimmissionen an den durch die Tätigkeit sich ergebenden Arbeitsorten

Nr. Tätigkeit	Arbeitsort und Betriebszustand während der Tätigkeit	Lärmtyp	Lärmimmissionspegel am Arbeitsort $L_{pAeqi}$ dB(A)	Teileinwirkzeit $T_i$ min
1	Steuerpult Kalanders	I	86,7	113
2	Abwickler Kalanders	I	84,9	112
3	Kontrollgang im Umfeld des Kalanders	I	88,5	225
4	Pausenraum	II	55,0	30
	Schichtzeit $T_{8h}$			480
	Tages-Lärmexpositionspegel $L_{EX,8h}$		87,1	

Aus der Schallpegel-Zeitverteilung ergibt sich ein Tages-Lärmexpositionspegel von

$$L_{EX,8h, \text{Messwert}} = L_{pAeq,8h} = 87,1 \text{ dB(A)}.$$

### Messunsicherheit

Die Messunsicherheit  $\Delta L_U(L_{EX})$  ergibt sich nach Gl. 6.38 bis 6.43 in Abschnitt 6.8.1 und Gl. 6.60 in Abschnitt 6.8.5 in Verbindung mit den Tabellen 1 bis 7 im Anhang.

Für die Unsicherheitsberechnung werden die Lärmexpositionspegel an den Arbeitsorten in die oben definierten Lärmtypen eingestuft.

Für die Berechnung der Unsicherheiten von verschiedenen Lärmtypen gilt die Gl. 6.38:

$$\Delta L^2(L_{EX,8h}) = (c_{I} \cdot \Delta L_I)^2 + (c_{II} \cdot \Delta L_{II})^2 + (c_{III} \cdot \Delta L_{III})^2 + (c_{T_e} \cdot \Delta T_e)^2.$$

Die Arbeitsplatzanalyse hat ergeben, dass bei der Zeitschätzung für die Arbeitsschicht keine Unsicherheit vorliegt. Die Arbeitsschichtzeit beträgt genau 480 min. Damit entfällt der Term  $(c_{T_e} \cdot \Delta T_e)^2$ . Außerdem wird unterstellt, dass die relativen Fehler bei der Bestimmung von Teileinwirkzeiten  $T_i$  kleiner als 10 % sind. Damit kann der durch die Zeitschätzung verursachte Unsicherheitsbeitrag vernachlässigt werden.

Die Tab. 7.2 zeigt, dass für den Arbeitsplatz „Kalander“ die Lärmtypen I und II vorliegen. Es gilt damit für die Berechnung der kombinierten Varianz  $\Delta L^2(L_{EX,8h})$  des Tages-Lärmexpositionspegels:

$$\Delta L^2(L_{EX,8h}) = (c_{I1} \cdot \Delta L_{pAeqI1})^2 + (c_{I2} \cdot \Delta L_{pAeqI2})^2 + (c_{I3} \cdot \Delta L_{pAeqI3})^2 + (c_{II1} \cdot \Delta L_{pAeqII1})^2$$

mit

$$c_{I1} = c_{I2} = c_{I3} = c_{II1} = c_{II2} = \frac{\partial(L_{EX})}{\partial(L_{pAeqi})} = \frac{T_i}{T_0} \cdot \frac{10^{0,1L_{pAeqi}}}{10^{0,1L_{EX,8h}}}$$

nach Gl. 6.41 und den Einzelvarianzen  $\Delta L^2_{pAeqi}$  für die Lärmtypen I und II

$$\Delta L^2_{pAeqi} = \Delta L^2_{iMethode} + \Delta L^2_{iMessgerät}$$

mit

$$i = I \text{ und II.}$$

Die Unsicherheitsbeiträge für die Ergebnisse der Messungen während der Teiltätigkeiten berechnen sich wie folgt:

#### *Unsicherheit für die Messung während der Teiltätigkeit 1*

Die Einzelvarianz  $\Delta L^2_{pAeqI1}$  wird für den Lärmtyp I aus den in Anh., Tab. 1 bekannten Varianzen der Merkmalsgrößen berechnet. Die beteiligten Varianzen lassen sich in der folgenden Gleichung zusammenfassen:

$$\Delta L^2_{pAeqI1} = \Delta L^2_{Schallfeld} + \Delta L^2_{Mikro} + \Delta L^2_{Messgerät}$$

Die Varianz für  $\Delta L^2_{Schallfeld} = 0,25$  erhält man aus Anh., Tab. 1, Zeile 3.1, Spalte 10 und die Varianz für  $\Delta L^2_{Mikro} = 0,25$  aus Anh., Tab. 1, Zeile 3.2, Spalte 10 und die für  $\Delta L^2_{Messgerät} = 0,35$  aus Anh., Tab. 1, Zeile 2.1, Spalte 10. Mit dem nach Gl. 6.41 berechneten Empfindlichkeitskoeffizienten von  $c_{I1} = 0,2142$  erhält man für Lärmtyp I im Zeitabschnitt 1 den folgenden Unsicherheitsbeitrag:

$$\begin{aligned} (c_{I1} \cdot \Delta L_{pAeqI1})^2 &= c_{I1}^2 (\Delta L^2_{Schallfeld} + \Delta L^2_{Mikro} + \Delta L^2_{Messgerät}), \\ (c_{I1} \cdot \Delta L_{pAeqI1})^2 &= (0,2142)^2 (0,25 + 0,25 + 0,35) = 0,03899. \end{aligned}$$

#### *Unsicherheit für die Messung während der Teiltätigkeit 2*

Ermittlung wie unter Teiltätigkeit 1, jedoch ist der Empfindlichkeitskoeffizient hier  $c_{I2} = 0,1403$ .

$$(c_{I2} \cdot \Delta L_{pAeqI2})^2 = (0,1403)^2 (0,25 + 0,25 + 0,35) = 0,01673$$

#### *Unsicherheit für die Messung während der Teiltätigkeit 3*

Ermittlung wie unter Teiltätigkeit 1, jedoch ist der Empfindlichkeitskoeffizient hier

$$c_{13} = 0,6455.$$

$$(c_{13} \cdot \Delta L_{pAeq13})^2 = (0,6455)^2 (0,25 + 0,25 + 0,35) = 0,35416$$

#### Unsicherheit für die Messung während der Teiltätigkeit 4

Während der Teiltätigkeit 4 wurde für den Lärmtyp II eine Schallpegelvariationsweite von 20 dB festgestellt und solange gemessen bis sich der  $L_{pAeq}$  nicht mehr änderte. Die beteiligten Varianzen lassen sich in der folgenden Gleichung zusammenfassen:

$$\Delta L_{pAeqII1}^2 = \Delta L_{Schallfeld}^2 + \Delta L_{Mikro}^2 + \Delta L_{Messgerät}^2.$$

Die Varianz für  $\Delta L_{Schallfeld}^2 = 0,83$  erhält man aus Gl. 6.16 und Gl. 6.19, dabei wird angenommen, dass der Messzeit mindestens 30 Stichproben zugeordnet werden können. Die Varianz für  $\Delta L_{Mikro}^2 = 1,00$  aus Anh., Tab. 4, Zeile 3.2, Spalte 10 und die für  $\Delta L_{Messgerät}^2 = 0,35$  aus Tab. A, Zeile 2.1, Spalte 10. Mit dem nach Gl. 6.41 berechneten Empfindlichkeitskoeffizienten von  $c_{II1} = 0,00004$  erhält man für den Lärmtyp II im Zeitabschnitt 4 den folgenden Unsicherheitsbeitrag:

$$\begin{aligned} (c_{II1} \cdot \Delta L_{pAeqII1})^2 &= c_{II1}^2 (\Delta L_{Schallfeld}^2 + \Delta L_{Mikro}^2 + \Delta L_{Messgerät}^2) \\ (c_{II1} \cdot \Delta L_{pAeqII1})^2 &= (0,00004)^2 (0,83 + 1,00 + 0,35) = 0,00000 \end{aligned}$$

Die kombinierte Varianz  $\Delta L^2(L_{EX,8h})$  erhält man nun aus der Summe der Einzelvarianzen:

$$\begin{aligned} \Delta L^2(L_{EX,8h}) &= (c_{11} \cdot \Delta L_{pAeq11})^2 + (c_{12} \cdot \Delta L_{pAeq12})^2 + (c_{13} \cdot \Delta L_{pAeq13})^2 + (c_{II1} \cdot \Delta L_{pAeqII1})^2 \\ \Delta L^2(L_{EX,8h}) &= 0,03899 + 0,01673 + 0,35416 + 0,00000 = 0,40988 \end{aligned}$$

Damit berechnet sich die Messunsicherheit  $\Delta L_U(L_{EX,8h})$  für das Ergebnis der Messung bei Anwendung der Messmethode 4 (tätigkeitsbezogene Messung) und der Benutzung des Erweiterungsfaktors  $k = 1,7$  (siehe dazu Abschnitt 6.6.3) zu

$$\Delta L_U(L_{EX,8h}) = k \sqrt{\Delta L^2(L_{EX,8h})} = 1,7 \sqrt{0,4099} = 1,1 \text{ dB}.$$

Die Angabe des Tages-Lärmexpositionspegels  $L_{EX,8h}$  mit seiner Messunsicherheit  $\Delta L_U$  erfolgt in folgender Weise

$$\begin{aligned} L_{EX,8h} &= L_{EX,8h, \text{Messwert}} \pm \Delta L_U \text{ in dB(A)}, \\ L_{EX,8h} &= 87,1 \pm 1,1 \text{ dB(A)}. \end{aligned}$$

#### Berücksichtigung von Gehörschutz

Bei der Anwendung von Gehörschutz zur Einhaltung der maximal zulässigen Expositionswerte wird deutlich, wie wichtig Lärmkarten sind, wenn es darum geht über die „Kombinierte Messmethode (Messmethode 4)“, den persönlichen Gehörschutz für die Beschäftigten auszuwählen.

Hier wird vereinfacht davon ausgegangen, dass der Gehörschutz eine Dämmwirkung von 20 dB besitzt.

Die Tab. 7.3 zeigt, dass bei der Auswahl von Gehörschutz die Arbeitsphasen zwingend zu berücksichtigen sind, um einerseits die richtige Schutzwirkung für die lärmintensiven Phasen festzulegen und andererseits in Arbeitsphasen mit deutlich niedrigerem Schallpegel als der lautesten Lärmphase eine Überprotektion zu vermeiden.

Bei einer Messung mit einem von einem Beschäftigten am Körper getragenen Lärmdosimeter nach Messmethode 1 würden die detaillierten Informationen, wie sie in Tab. 7.3 gezeigt werden, nicht zur Verfügung stehen. Der personenbezogene Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  würde nur als Einzahlwert vorliegen.

**Tab. 7.3** Personenbezogener Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  für den Maschinenführer „Kalander“ unter Berücksichtigung von Gehörschutz

Arbeitsbereich	$L_{pAeqi}$ [dB(A)]	Verweildauer $T_i$ [min]	Zeitkorrektur bezogen auf 8 h [dB]	Tages-Lärmexpositionspegel	
				ohne Gehörschutz $L_{EX,8h}$ [dB(A)]	mit Gehörschutz $L^*_{EX,8h}$ [dB(A)]
Steuerpult Kalander	86,7	113	-6,3	80,4	60,4
Abwickler Kalander	84,9	112	-6,3	78,6	58,6
Kontrollgang im Umfeld des Kalanders	88,5	225	-3,3	85,2	65,2
Pausenraum	55,0	30	-12,0	43,0	(43,0)
Schichtzeit $T_{8h}$		480			
<b>Tages-Lärmexpositionspegel <math>L_{EX,8h}</math> und <math>L^*_{EX,8h}</math> für den „Maschinenführer Kalander“</b>				87,1	67,1

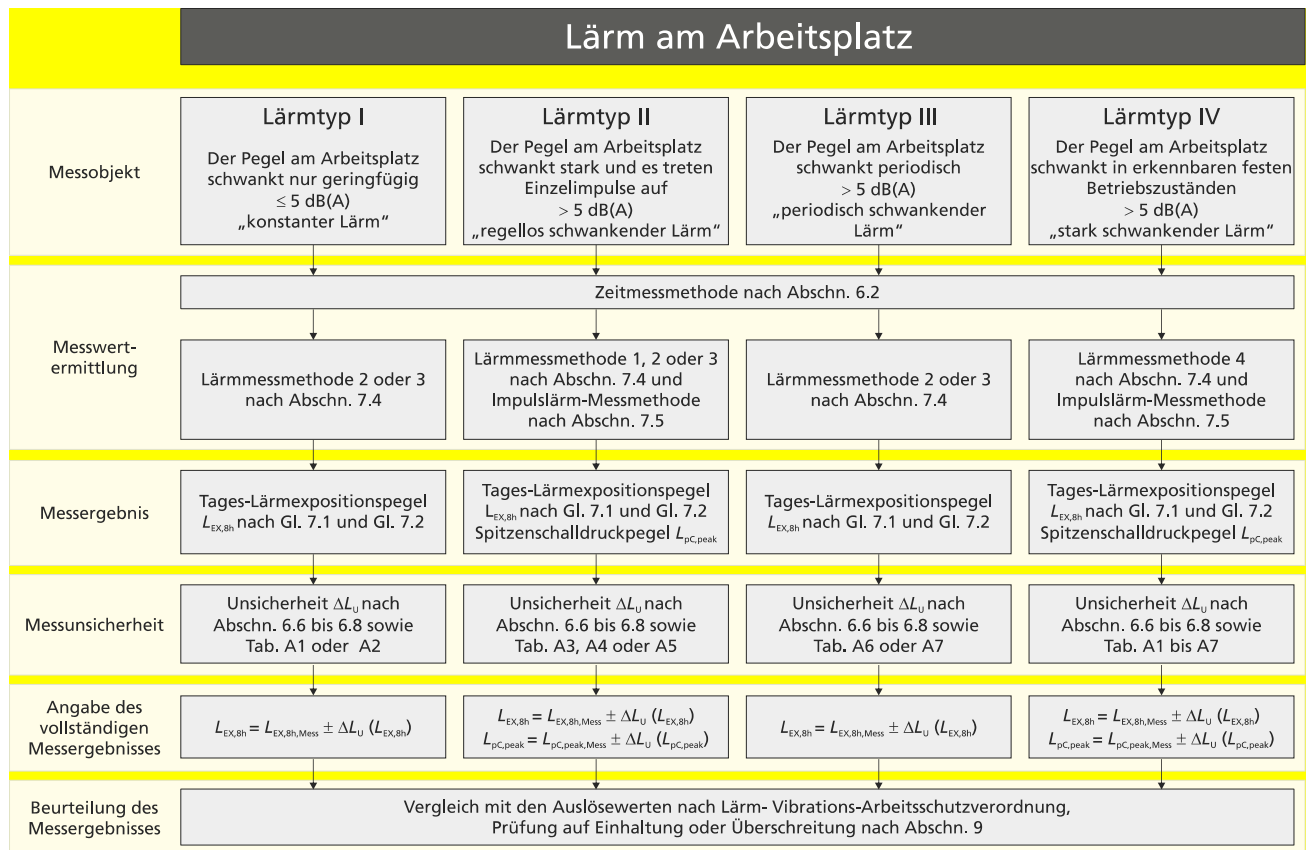
Die exakte Berechnung des am Ohr wirksamen Tages-Lärmexpositionspegels  $L^*_{EX,8h}$  mit Gehörschutz ist nach DIN EN 458 [53] durchzuführen (siehe Abschnitt 8.7).

## 7.7 Überblick und Arbeitsschritte für die Ermittlung der Lärmexposition am Arbeitsplatz

Die Basis für die Beurteilung der Gehörgefährdung ist die Bestimmung des Tages-Lärmexpositionspegels  $L_{EX,8h}$  für einen repräsentativen Arbeitstag. Wenn gleichzeitig an den Arbeitsplätzen noch besonders starke Lärmimpulse auftreten, so ist ebenfalls der Spitzenschalldruckpegel  $L_{pC,peak}$  zu messen.

Der Abschnitt 7 befasst sich ausführlich mit den Messmethoden zur Ermittlung des Lärmexpositionspegels, des Spitzenschalldruckpegels und deren Messunsicherheiten.

Die Abb. 7.12 gibt einen Überblick der Arbeitsschritte zur Ermittlung der Lärmexposition am Arbeitsplatz.



**Abb. 7.12** Überblick und Arbeitsschritte zur Ermittlung der Lärmexposition am Arbeitsplatz

### Messobjekt

Die Erfassung der Lärmexposition für den repräsentativen Arbeitstag setzt eine sorgfältige Arbeitsplatzanalyse voraus. Sie ist die Voraussetzung dafür, dass das Messobjekt „Lärm am Arbeitsplatz“ genau nach den Lärmtypen 1 bis 4 definiert werden kann. Ziel der Arbeitsplatzanalyse ist die Beschreibung eines repräsentativen Arbeitstages einschließlich aller Tätigkeiten und der üblichen Pausen.

Es ist darauf zu achten, dass alle verfahrenstechnischen Ereignisse, die zur Lärmexposition beitragen, messtechnisch erfasst werden, d. h. auch einzelne kurzzeitige Lärmexpositionen mit hohen Lärmpegeln oder einzelnen Lärmimpulsen, die als Spitzenschalldruckpegel gemessen werden. Zur Beschreibung eines repräsentativen Arbeitstages gehört nach DIN EN ISO 9612 [5] Folgendes:

- Arbeitsaufgaben und deren zeitliche Verteilung während des Arbeitstages sowie die Benennung des Inhaltes der Arbeitsaufgaben,
- Hauptlärmquellen und laute Arbeitsbereiche,
- Arbeitsabläufe und alle für die Lärmbelastung relevanten Ereignisse.

Darüber hinaus ist das Messobjekt genauer durch die Einflussfaktoren, die eine Auswirkung auf die Unsicherheit des Lärmexpositionspegels haben können, zu beschreiben (siehe Abschnitt 6.8.1 und 6.8.2).

### *Messwertermittlung*

Erst auf der Grundlage des Vorwissens durch die Arbeitsplatzanalyse ist es möglich, eine Messwertermittlung mit Hilfe der entsprechenden Zeitmess- und Lärmmessmethoden durchzuführen.

Nach der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung wird die Lärmexposition personenbezogen betrachtet. Das Messergebnis, der zu bestimmende Tages-Lärmexpositionspegel, ist danach ein Kennwert, um die auf einen einzelnen Beschäftigten oder eine Beschäftigtengruppe von gleichartig belasteten Beschäftigten einwirkende Lärmexposition zu beschreiben. Die Bestimmung des Tages-Lärmexpositionspegels lässt sich jedoch sowohl für eine personenbezogene als auch für eine ortsbezogene Beurteilung anwenden, indem man die auf einen festen Ort bzw. Arbeitsplatz einwirkende Lärmexposition so erfasst, als wolle man die Belastung für eine Person ermitteln, die sich dort über die gesamte oder einen Teil der Arbeitsschicht aufhält. Man kann daher zwischen *ortsfesten* und *personengebundenen* Messungen unterscheiden [48] [49]:

- *ortsfeste Messung*: Messung mit einem Handschallpegelmesser an einem bestimmten Ort, ggf. unter Nachführung des Mikrofons entsprechend den Bewegungen des Beschäftigten,
- *personengebundene Messung*: Messung mit einem vom Beschäftigten am Körper getragenen Lärmdosimeter.

In einer großen Freianlage der petrochemischen Industrie wurden parallel sowohl personengebundene Messungen mit einem Lärmdosimeter (direkte Bestimmung des Tages-Lärmexpositionspegels) als auch ortsfeste Messungen mit einem Schallpegelmesser (indirekte Bestimmung des Tages-Lärmexpositionspegels) zur Ermittlung der Lärmexpositionen für dieselben *ortsveränderlichen Arbeitsplätze* durchgeführt. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass beide Messungen näherungsweise den gleichen Tages-Lärmexpositionspegel liefern und diese sich nur geringfügig unterscheiden [47].

Bei der Festlegung der Messung auf „*ortsfest*“ oder „*personengebunden*“ muss man von der jeweiligen Zielstellung zur technischen, organisatorischen und medizinischen Prävention ausgehen. Während die *personengebundene Messung* allein darauf abzielt, die Lärmbelastung des Beschäftigten am Arbeitsplatz zu erfassen, bezweckt die *ortsfeste Messung*, sowohl die Lärmbelastung am Arbeitsplatz zu bestimmen als auch laute Bereiche und dominierende Schallquellen zu kennzeichnen sowie Lärmbereiche festzustellen, in denen die Auslösewerte überschritten werden. Es kann darüber hinaus durch die ortsfesten Messungen an Referenzmesspunkten die Wirksamkeit von Schallschutzmaßnahmen nachgeprüft werden. Die ortsfeste Messung ist auch ein Hilfsmittel für die Ausarbeitung von Langzeit-Lärminderungsprogrammen bzw. dient zur Festlegung und Koordinierung des Tragens von persönlichen Gehörschutzmitteln (siehe Abschnitt 7.6 und Beispiel 19).

### *Angabe des Messergebnisses mit der Messunsicherheit*

Zur vollständigen Angabe des Messergebnisses gehört die Messunsicherheit. Das ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn der ermittelte Tages-Lärmexpositionspegel in der Nähe eines Auslösewertes liegt und entschieden werden muss, ob dieser un-

ter- oder überschritten wird. Die Ermittlung der Messunsicherheit erfolgt nach den Abschnitten 6.6 bis 6.8 und je nach Lärmtyp nach den Tabellen 1 bis 7 im Anhang.

### *Beurteilung des Messergebnisses*

Nach der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung müssen die Messverfahren und -geräte geeignet sein zu entscheiden, ob die festgesetzten Auslösewerte eingehalten werden oder nicht. Auf der Grundlage des Abschnittes 9 kann die Beurteilung des vollständigen Messergebnisses erfolgen.



## 8 Verfahren zur Bestimmung der individuellen Dämmwirkung von Gehörschutz bei Personen in der Arbeitsumwelt

### 8.1 Einleitung

Überschreiten Lärmpegel die Auslöseschwellen für die Lärmexposition und wirken sie über längere Zeiträume auf den Menschen ein, so können sie zu einer dauerhaften Schädigung des Gehörs und anderen gesundheitlichen Problemen führen. Aus diesem Grund dient der Gehörschutz zum sofortigen Schutz vor gefährlicher Schalleinwirkung auf das Gehör, aber auch zum Schutz vor lästigen und störenden Geräuschen.

Das Tragen von Gehörschutz ist heute fester Bestandteil des Schallschutzes am Arbeitsplatz. Normen und Richtlinien legen fest, ab welcher Lärmexposition Gehörschutz getragen bzw. vom Arbeitgeber bereitgestellt werden muss. Nach der Lärm-VibrationsArbSchV [2] sind die maßgeblichen Messgrößen zur Beurteilung der Lärmexposition am Arbeitsplatz der Tageslärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  sowie der Spitzenschalldruckpegel  $L_{pC,peak}$ . In [2] sind außerdem maximal zulässige Expositionspegel am Ohr des Arbeitnehmers ( $L_{EX,8h} < 85 \text{ dB(A)}$ ,  $L_{pC,peak} < 137 \text{ dB(A)}$ ) festgelegt. Diese Maximalwerte gelten allerdings unter Berücksichtigung der Dämmwirkung von Gehörschutz, d. h. es ist der Pegel entscheidend, der unterhalb des Gehörschutzes am Ohr des Arbeitnehmers anliegt. Kennt man den am Arbeitsplatz vorliegenden Geräuschpegel und ist die Dämmwirkung des Gehörschutzes, z. B. aus Herstellerangaben bekannt, kann der am Ohr unter dem Gehörschutz vorliegende Pegel rechnerisch abgeschätzt werden.

Hersteller von Gehörschutz geben für ihre Produkte Dämmwerte meist in Form der HML-Werte (HML: High, Middle, Low) und des SNR-Wertes (SNR: Single Noise Level Reduction) an. Diese Werte sind gemäß der Baumusterprüfung nach EN 352-1/-2 [54], [55] angegeben. Das entsprechende Laborverfahren für die subjektive Bestimmung der Dämmwirkung ist in Deutschland in der DIN ISO 4869-1 [50] beschrieben. Bei diesem Verfahren wird unter strengen Laborbedingungen und mit erfahrenen Testpersonen die Dämmwirkung eines Gehörschutzes bestimmt.

Die tatsächliche individuelle Dämmwirkung des Gehörschutzes eines Arbeitnehmers bei täglichem Gebrauch kann aus verschiedenen Gründen weitaus geringer sein als die nach der Baumusterprüfung angegebene Dämmwirkung. Gehörschutz kann bei nicht korrekter Trageweise sogar wirkungslos sein.

Im Folgenden sind beispielhaft einige Gründe aufgeführt, die zu einer Verminderung der Dämmwirkung von Gehörschutz führen.

#### **Kapselgehörschutz:**

- Gehörschutzkapsel umschließt das Ohr nicht vollständig.
- Andrückkraft des Federbügels ist zu gering.
- Auftreten von Leckagen durch z. B. Schmuck, Brille, dichtes Haar.

### Formbare Gehörschutzstöpsel:

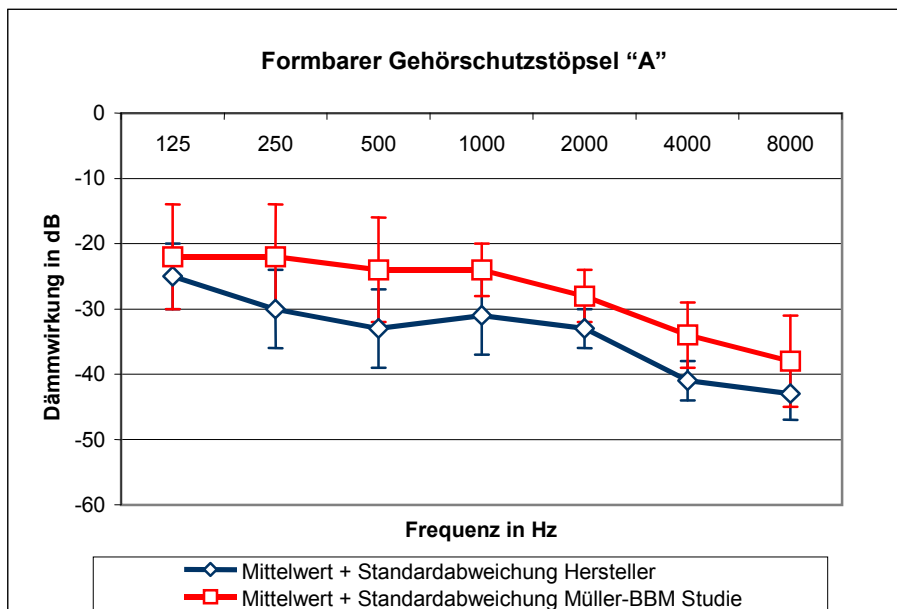
- Gehörschutz wird nicht genau nach Anweisung eingesetzt.
- Gehörschutz sitzt nicht tief genug im Gehörgang.
- Gehörgang ist zu eng/zu weit.

### Gehörschutzotoplastiken

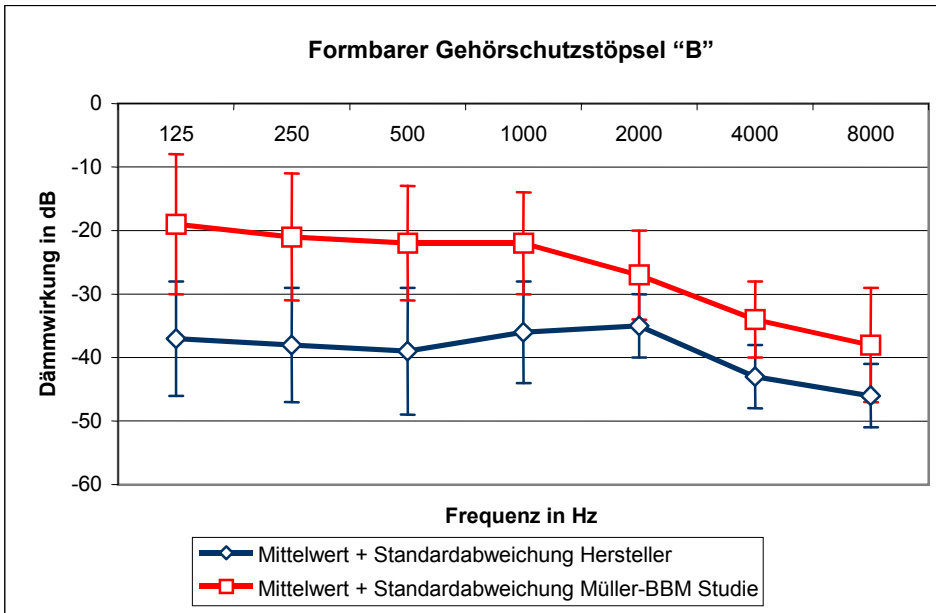
- Otoplastik ist nicht richtig eingesetzt.
- Ungenauigkeiten bei der Passform der Otoplastik, schlechter Sitz, Leckagen.
- Dämmfilter nicht korrekt eingesetzt.

Diese und andere Gründe können die Ursache dafür sein, dass die tatsächliche Dämmwirkung eines Gehörschutzes stark von der Angabe der Dämmwerte des Herstellers abweicht.

Im Jahre 2008 wurde von Müller-BBM eine Studie(unveröffentlicht) durchgeführt, bei der die Dämmwirkung von verschiedenen handelsüblichen Gehörschutzstöpseln in Anlehnung an das Laborverfahren nach DIN ISO 4869-1 [50] bestimmt wurde. Allerdings wurden bei der Versuchsdurchführung praxisgerechtere Versuchsbedingungen geschaffen als nach dem Laborverfahren nach [50], indem die Probanden den Gehörschutz ungeübt und nur nach den Anweisungen auf den Verpackungen einsetzten. Es wurden die Oktavpegelspektren der Dämmwirkung für die verschiedenen Gehörschutzstöpsel bestimmt und der Mittelwert über alle Probanden mit den Angaben des jeweiligen Herstellers verglichen. Beispielhaft sind im Folgenden zwei vergleichende Diagramme gezeigt, in denen jeweils die ermittelten Dämmwirkungen aus der Müller-BBM-Studie den Herstellerangaben gegenübergestellt sind.



**Abb. 8.1** Vergleich der Dämmwirkung eines vor Gebrauch zu formenden Gehörschutzstöpsels „A“, ermittelt gemäß der Baumusterprüfung (blaue Kurve) und nach einem praxisnahen Verfahren (rote Kurve)



**Abb. 8.2** Vergleich der Dämmwirkung eines vor Gebrauch zu formenden Gehörschutzstöpsels „B“, ermittelt gemäß der Baumusterprüfung (blaue Kurve) und nach einem praxisnahen Verfahren (rote Kurve)

Bei Betrachtung der beiden Diagramme fällt auf, dass sich zwischen den Dämmwerten nach dem praxisnahen Verfahren und den Dämmwerten nach Herstellerangaben teilweise starke Abweichungen ergeben und die Dämmwirkung nach den Herstellerangaben in beiden Fällen deutlich höher ist. Im Falle der weiteren untersuchten Gehörschutzstöpsel ergeben sich ähnliche Abweichungen zu den Herstellerangaben. Dies weist darauf hin, dass ohne die strengen Laborbedingungen nach DIN ISO 4869-1 [50] die von den Herstellern angegebenen Dämmwirkungen in der Praxis effektiv selten erreicht werden.

Demzufolge kann der vom Hersteller angegebene Dämmwert des Gehörschutzes ein Gefühl falscher Sicherheit vermitteln. Auch andere Studien, z. B. in [65], zeigen, dass beim betrieblichen Einsatz von Gehörschutz die angegebenen Dämmwirkungen entsprechend der Baumusterprüfung kaum erreicht werden.

Durch die Festlegung im § 8 der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung ist die genaue Kenntnis der tatsächlichen individuellen Dämmwirkung des Gehörschutzes aber notwendig.

Es ist deshalb ein Messverfahren erforderlich, das es ermöglicht, die individuelle Dämmwirkung von Gehörschutz zu bestimmen, um so unter Berücksichtigung einer Messunsicherheit den tatsächlich am Ohr unterhalb des Gehörschutzes vorliegenden Pegel bestimmen zu können. Bei Kenntnis des Lärmexpositionspegels  $L_{EX}$  und der individuellen Dämmwirkung  $D_e$  (Dämmwirkung) mit ihrer Messunsicherheit  $\Delta L_U$  des Gehörschutzes, ließe sich der unterhalb des Gehörschutzes auf das Ohr einwirkende und mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % behaftete Schalldruckpegel  $L^*_{EX}$  wie folgt berechnen:

$$L^*_{EX}(f_{oct}) = L_{EX}(f_{oct}) - D_e(f_{oct}) + \Delta L_U(f_{oct}). \quad (8.1)$$

## 8.2 Gehörschutzarten

Für den Gebrauch von Gehörschutz in der Arbeitsumwelt gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Arten und Bauformen. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Kapselgehörschutz (bzw. Gehörschutzkapseln) und Gehörschutzstöpseln. Wichtigstes Kriterium für die Auswahl eines bestimmten Gehörschutzes ist seine jeweilige Dämmwirkung. Daraus ergibt sich der Einsatzbereich des Gehörschutzes. Aber auch Tragekomfort und Handhabbarkeit sind entscheidende Eigenschaften.

### 8.2.1 Kapselgehörschutz

Als Kapselgehörschutz gelten alle Bauformen, die beide Ohrmuscheln vollständig mit einer Kapsel umschließen. Dabei wird unterschieden zwischen

- konventionellem Kapselgehörschutz,
- speziellem Kapselgehörschutz (z. B. mit pegelabhängiger Dämmwirkung oder mit aktiver Geräuschunterdrückung),
- kombiniertem Kapselgehörschutz mit anderen persönlichen Schutzausrüstungen (z. B. Schutzhelm und/oder Gesichtsschutz/Schutzbrille).



**Abb. 8.3** Beispiele für typische Kapselgehörschützer. Links: konventioneller Kapselgehörschutz (Quelle: Peltor). Rechts: Kapselgehörschutz mit Helm und Gesichtsschutz (Quelle: Oregon)

### 8.2.2 Gehörschutzstöpsel

Gehörschutz, der im Gehörgang oder in der Ohrmulde getragen wird, gilt als Gehörschutzstöpsel. Man unterscheidet folgende Bauformen:

- vor Gebrauch zu formende Gehörschutzstöpsel,
- fertig geformte Gehörschutzstöpsel/ Bügelstöpsel,
- Gehörschutzotoplastiken.

#### 8.2.2.1 Vor Gebrauch zu formende Gehörschutzstöpsel

Vor Gebrauch zu formende Gehörschutzstöpsel bestehen meist aus einem polymeren Schaumstoff (selten aus Wachs oder Gehörschutzwatte). Der Gehörschutzstöpsel wird durch den Anwender zu einer dünnen Rolle vorgeformt und dann in den Gehörgang eingesetzt. Nach kurzer Zeit dehnt sich der Gehörschutzstöpsel aufgrund seiner Materialeigenschaften wieder aus und dichtet so den Gehörgang ab.



**Abb. 8.4** Bauformen typischer, vor Gebrauch zu formender Gehörschutzstöpsel (Quelle links: Bilsom, rechts: EAR)

#### 8.2.2.2 Fertig geformte Gehörschutzstöpsel

Fertig geformte Gehörschutzstöpsel können vom Anwender ohne vorherige Formgebung direkt ins Ohr eingesetzt werden. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Ausführungen. Die am weitesten verbreitete Form ist der Lamellengehörschutzstöpsel. Um die verschiedenen Gehörgangswerten zu berücksichtigen, besitzen Lamellengehörschutzstöpsel mehrere weiche, quergestellte, kreisförmige Lamellen wachsenden Durchmessers.



**Abb. 8.5** Beispiel eines typischen fertig geformten Lamellengehörschutzstöpsels (Quelle: Bilsom)

#### 8.2.2.3 Bügelstöpsel

Bei den sogenannten Bügelstöpseln sind die fertig geformten Gehörschutzstöpsel an einem Bügel befestigt. So wird ein schnelles Auf- und Absetzen des Gehörschutzes gewährleistet und ein Verlieren der einzelnen Stöpsel erschwert.



**Abb. 8.6** Bügelstöpsel (Quelle: Bilsom)

#### 8.2.2.4 Gehörschutzotoplastiken

Gehörschutzotoplastiken sind eine besondere Form der fertig geformten Gehörschutzstöpsel. Aus einem Abdruck der Ohrmulde und des Gehörgangs (ähnlich wie bei einer Hörgeräteotoplastik) wird ein individuell angepasster Gehörschutzstöpsel erstellt. Häufig lässt sich die Dämmwirkung von Gehörschutzotoplastiken durch Verwendung unterschiedlich stark dämmender, austauschbarer Filter variieren. So kann der Gehörschutz der jeweiligen Lärmsituation am Arbeitsplatz angepasst werden.



**Abb. 8.7** Beispiel für eine Gehörschutzotoplastik mit austauschbarem Filterstopfen (Quelle: Hearsafe)

### 8.3 Laborverfahren zur Bestimmung der Dämmwirkung von Gehörschutz

Zur Bestimmung der Dämmwirkung von Gehörschutz gibt es zwei hauptsächlich angewandte Laborverfahren:

- die Prüfung der Dämmwirkung von Gehörschutz nach ISO 4869-1 [50],
- die Prüfung nach der amerikanischen Norm ANSI S12.6-2008 [56].

Im Folgenden werden beide Verfahren kurz beschrieben.

#### 8.3.1 Überprüfung der Dämmwirkung nach ISO 4869-1

Das Messverfahren nach ISO 4869-1 [50] (in Deutschland DIN ISO 4869-1) ist eine subjektive Methode zur Messung der Dämmwirkung von Gehörschutz. Basis für die Bestimmung der Dämmwirkung sind die Hörschwellen von Testpersonen mit und ohne Gehörschutz. Die Dämmwirkung des Gehörschutzes wird aus der Hörschwel-  
lendifferenz ermittelt.

Die Testpersonen sind erfahrene Probanden, die durch den Experimentator explizit über das Einsetzen des Gehörschutzes geschult werden. So wird erreicht, dass Dämmwirkungen entsprechend den Vorgaben des Laborverfahrens gemessen werden.

Die Bestimmung der Hörschwelle erfolgt binaural entsprechend ISO 8253-2 [52]. Die Darbietung des Prüfschalls (Rosa Rauschsignal in Terzbandbreite) erfolgt im diffusen Schallfeld.

Die Hörschwelle mit und ohne Gehörschutz wird für die Oktaven von 63 – 8000 Hz ermittelt. Aus dem sogenannten Oktavpegelverfahren lassen sich dann entsprechend ISO 4869-2 die HML-Werte und der SNR-Wert berechnen.

Die mit diesem Verfahren bestimmten Dämmwerte liegen nah an der maximalen Dämmwirkung des zu prüfenden Gehörschutzes. Wie bereits oben geschildert, werden diese Werte unter praxisüblichen Tragebedingungen üblicherweise nicht erreicht.

Der APV-Wert (Assumed Protection Value) berücksichtigt die interindividuellen Schwankungen über die Versuchspersonen, indem vom Mittelwert die Standardabweichung abgezogen wird. Aber auch diese Werte sind in der Regel höher als die Praxiswerte.

### **8.3.2 REAT – Messverfahren nach ANSI S12.6-2008**

Das REAT (ReaEar Attenuation at Threshold)-Messverfahren nach der amerikanischen Norm ANSI S12.6-2008 [56] ist ein subjektives Messverfahren zur Ermittlung der Dämmwirkung von Gehörschutz. Anhand des in dieser Norm beschriebenen Verfahrens kann die Dämmwirkung von Gehörschutz unter Laborbedingungen bestimmt werden. Das Messverfahren nach [56] ist vom Prinzip her vergleichbar mit dem Messverfahren nach ISO 4869-1 [50].

Das grundlegende Messprinzip von REAT-Messverfahren basiert auf der Hörschwellenfindung mit und ohne Gehörschutz. Die sich daraus ergebende Differenz ist die Dämmwirkung des Gehörschutzes.

Nach [56] ist das Messverfahren ein Laborverfahren, bei dem unter idealisierten Bedingungen die Dämmwirkung des Gehörschutzes bestimmt wird. Das Verfahren ist in zwei Methoden unterteilt. Methode A zielt darauf ab, die bestmögliche Dämmwirkung des Gehörschutzes zu ermitteln. Methode B soll praxisnähere Bedingungen nachbilden und somit Ergebnisse liefern, die der realen Tragesituation im Arbeitsalltag näher sind. Der wesentliche Unterschied zwischen beiden Methoden liegt in der Auswahl der Probanden und dem Einfluss durch den Experimentator. Während bei Methode A gut geschulte und erfahrene Probanden teilnehmen und der Experimentator genau auf korrekte Verwendung des Gehörschutzes achtet, werden bei Methode B Probanden mit wenig und keiner Erfahrung ausgewählt und der Gehörschutz wird nur nach der Bedienungsanleitung des Herstellers durch den Probanden selbst eingesetzt. Man geht davon aus, dass Methode B das Verhalten der Nutzer in der Praxis besser abbildet.

## 8.4 Beschreibung von In-Situ-Messverfahren zur Bestimmung der individuellen Dämmwirkung von Gehörschutz

In Abschnitt 8.3 wurden zwei Laborverfahren zur Bestimmung der Dämmwirkung von Gehörschutz beschrieben. Aufgrund der erforderlichen Laborbedingungen sind diese Verfahren für eine Anwendung vor Ort in den Betrieben ungeeignet.

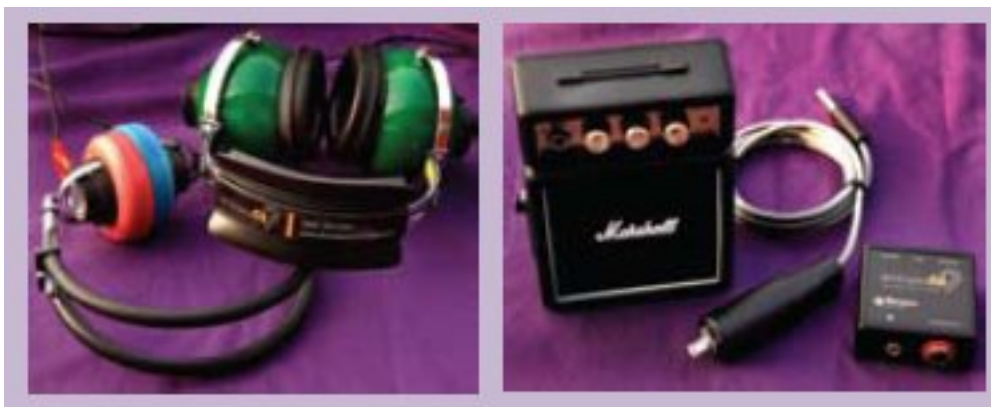
Im Folgenden werden daher verschiedene In-Situ-Messverfahren zur Bestimmung der Dämmwirkung von Gehörschutz beschrieben, welche nach teilweise gleichen, teilweise unterschiedlichen Prinzipien funktionieren. Die Beschreibung und die anschließende Beurteilung der Messverfahren basieren auf uns vorliegenden Informationen zu den jeweiligen Systemen und einer anschließenden Bewertung ausschließlich in Hinblick auf die oben genannte Problemstellung. Die Messsysteme wurden nicht auf Funktionalität oder Ähnliches getestet und es wurden keine Praxisversuche durchgeführt.

Vom Messprinzip her werden die Messverfahren in subjektive und objektive Verfahren unterteilt.

### 8.4.1 Subjektive Verfahren

#### 8.4.1.1 IntegraFit

Das Messverfahren *IntegraFit* der Firma Workplace Integra (USA) ist ein subjektives Messverfahren, bei dem die persönliche Dämmwirkung von Gehörschutz (PAR = Personal Attenuation Rating) über eine Hörschwellendifferenzmessung bestimmt wird. Dabei wird die Hörschwelle des Probanden mit und ohne Gehörschutz bestimmt. Die Differenz zwischen den beiden Hörschwellen ergibt die individuelle Dämmwirkung des Gehörschutzes. Grundlage des Verfahrens ist eine Messsoftware, die z. B. auf einem Notebook installiert werden kann. Zur weiteren Ausrüstung gehören Testkopfhörer und ein kleiner Lautsprecher (siehe Abb. 8.8).



**Abb. 8.8** Messausrüstung des *IntegraFit*-Messsystems bestehend aus Kopfhörern, einem kleinen Lautsprecher und einem Signalgeber. Die Messsoftware kann von der Homepage des Herstellers auf ein Notebook heruntergeladen werden [58].



Voraussetzung für die Durchführung der Messung ist eine möglichst störgeräuschfreie Umgebung, wie zum Beispiel eine Schallschutzkabine oder ein sehr ruhiger Raum.

Die Darbietung des Prüfschalls - in diesem Falle ein 500 Hz-Ton - erfolgt wahlweise über Kopfhörer oder über den Lautsprecher. Mit Hilfe eines Signalgebers signalisiert der Proband, wann er den Testton hört. Durch die Verwendung des Lautsprechers kann auch Kapselgehörschutz getestet werden.

Optional liefert der Hersteller auch ein Audiometer, mit dem neben einer allgemeinen Bestimmung der Hörschwelle auch die Gehörschutzprüfung mittels *IntegraFit* durchgeführt werden kann.

**Tab. 8.1** Übersicht über das Messverfahren *IntegraFit*

Technische Ausstattung, Daten und Prüfungen	Messverfahren <i>IntegraFit</i>
Messgerätebasis:	PC-basiert, Audiometer (optional)
Zubehör:	Signalgeber, Kopfhörer, Lautsprecher, Audiometer (optional)
Art des Prüflings:	Gehörschutzstöpsel, Otoplastiken Kapselgehörschutz
Anforderungen an den Messraum mit Kopfhörer:	Störgeräuschfreier Raum
Anforderungen an den Messraum mit Lautsprecher:	Schallschutzkabine
Messprinzip „Kopfhörer“:	Hörschwellenmessung monaural für linkes und rechtes Ohr getrennt
Messprinzip „Lautsprecher“:	Hörschwellenmessung binaural für beide Ohren gleichzeitig
Messmethode:	Subjektive Kopfhöreraudiometrie und subjektive Freifeldaudiometrie
Prüfschallfeld:	Definiert über Kopfhörer Undefiniert über Lautsprecher
Prüfschall:	Ton
Testfrequenz(en):	500 Hz
Messergebnis:	Einzahlwert in dB bei 500 Hz

Vor- und Nachteile des Messverfahrens in Bezug auf die Anforderungen einer genauen Bestimmung des Lärmexpositionspegels  $L^*_{EX}(f_{oct})$  nach der LärmVibrationsArbSchV:

#### *Vorteile*

Der wesentliche Vorteil von *IntegraFit* ist, dass die Dämmwirkung des Gehörschutzes praxistauglich überprüft werden kann. Es ist kein Herausnehmen oder Modifizieren des Gehörschutzes vor Beginn der Messung notwendig.

Bei Benutzung des Lautsprechers kann zudem auch die Dämmwirkung von Kapselgehörschutz geprüft werden. Dies ist bei der Prüfung über Kopfhörer nicht möglich.

### Nachteile

Da es sich um ein subjektives Verfahren handelt, spielt der „Faktor Mensch“, also der Proband, eine wichtige Rolle. Die Zuverlässigkeit des Messergebnisses ist abhängig von Faktoren wie Aufmerksamkeit, Kooperationsbereitschaft, Ohrerkrankungen usw.

Nachteilig ist auch, dass der Test nur bei einer Frequenz (500 Hz) durchgeführt wird. Dies verkürzt zwar die Dauer des Tests, verkleinert allerdings auch den Informationsgehalt des Ergebnisses, welches daher nicht geeignet ist, den Lärmexpositionspegel  $L^*_{EX}(f_{oct})$  zu bestimmen.

Zudem kann die Bestimmung der Hörschwelle durch ein zu starkes Störgeräusch verfälscht werden, weshalb eine sehr ruhige Umgebung benötigt wird. Die Kopfhörer müssen eine sehr gute Dämmung des Außengeräusches gewährleisten. Die Qualität muss der eines Audiometrikopfhörers entsprechen.

#### 8.4.1.2 FitCheck

Ein weiteres Messverfahren, das die Dämmwirkung über die Hörschwellendifferenz bestimmt, ist das System *FitCheck* der Firma Michael & Associates (USA). *FitCheck* ist ebenfalls ein PC-basiertes System. Die Darbietung des Prüfschalls erfolgt ausschließlich über Kopfhörer. Die Dämmwirkung von Kapselgehörschutz kann mit diesem System nicht getestet werden. Anders als bei *IntegraFit* werden bei *FitCheck* mehrere Testfrequenzen (250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz) verwendet. Die Probandin bekommt den Prüfschall über Kopfhörer dargeboten und hält einen Signalgeber in der Hand, mit dem sie signalisiert, wann sie das Testsignal hört [59].

**Tab. 8.2** Übersicht *FitCheck*

Technische Ausstattung, Daten und Prüfungen	Messverfahren <i>FitCheck</i>
Messgerätebasis:	PC-basiert,
Zubehör:	Signalgeber, Kopfhörer
Art des Prüflings:	Gehörschutzstöpsel, Otoplastiken
Anforderungen an den Messraum mit Kopfhörer:	Störgeräuschfreier Raum
Anforderungen an den Messraum mit Lautsprecher:	Entfällt
Messprinzip:	Hörschwellenmessung monaural für linkes und rechtes Ohr getrennt
Messmethode:	Subjektive Kopfhöreraudiometrie
Prüfschallfeld:	Definiert über Kopfhörer
Prüfschall:	Ton
Testfrequenz(en):	250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz
Messergebnis:	Einzahlwerte in dB bei den Testfrequenzen

Vor- und Nachteile des Messverfahrens in Bezug auf die Anforderungen einer genauen Bestimmung des Lärmexpositionspegels  $L^*_{EX}(f_{oct})$  nach der LärmVibrationsArbSchV:

### *Vorteile*

Der wesentliche Vorteil von *FitCheck* ist, dass die Dämmwirkung des Gehörschutzes praxistauglich überprüft werden kann. Es ist kein Herausnehmen oder Modifizieren des Gehörschutzes vor Beginn der Messung notwendig.

Die Dämmwirkung wird bei verschiedenen Frequenzen getestet. Insofern ist das Testergebnis geeignet, den individuellen Lärmexpositionspegel  $L^*_{EX}(f_{oct})$  eingeschränkt für die Oktavmittenfrequenzen von 250 Hz bis 4000 Hz zu bestimmen.

### *Nachteile*

Da für die Darbietung des Prüfschalls ausschließlich Kopfhörer verwendet werden, entfällt hier die Möglichkeit zur Überprüfung der Dämmwirkung von Kapselgehörschutz. Zudem ist auch hier eine sehr ruhige Umgebung Voraussetzung für eine korrekte Bestimmung der Hörschwelle und damit der individuellen Dämmwirkung des Gehörschutzes.

Da es sich auch bei *FitCheck* um ein subjektives Verfahren handelt, spielen auch hier die oben beschriebenen individuellen Faktoren des Probanden eine wichtige Rolle für die genaue Ermittlung der Hörschwelle.

#### 8.4.1.3 CapaTest

Die Firma Labor Cotral (Frankreich) bietet im Rahmen ihres Gehörschutzprogramms die Überprüfung der Cotral-Otoplastiken mit dem Messverfahren *CapaTest*<sup>2</sup> an. Bei dem PC-basierten Messsystem wird über eine Hörschwellendifferenzmessung die Dämmwirkung von Cotral-Otoplastiken bestimmt.

---

<sup>2</sup> Zum Zeitpunkt der Sichtung des Messverfahrens *CapaTest* war das Verfahren noch in der Entwicklungsphase. Änderungen in der Verfahrensweise sind demnach möglich.



**Abb. 8.9** Messausrüstung für den *CapaTest*, bestehend aus Notebook, Kopfhörer, externer Soundkarte und Signalgeber [60]

Vor Beginn der Messung wird der sogenannte Lärmbereich (aus dem Lärmkataster der jeweiligen Firma) eingegeben. Dieser wird zur Berechnung der Schalldämmung (HML- und SNR-Werte) in einem späteren Schritt benötigt. Zusätzlich wird die Dämmkurve des in die Otoplastik eingesetzten Cotral-Dämmfilters eingegeben.

Es folgt die Messung der Hörschwelle, zuerst ohne und dann mit eingesetzter Otoplastik. Die Bestimmung der Hörschwelle (Cotral spricht vom „Wahrnehmungspegel“) erfolgt bei einem umfassenden Test für die Oktaven 63 – 8000 Hz. Optional ist auch ein Schnelltest über die Oktavmittenfrequenzen 125, 1000 und 4000 Hz möglich. Die Darbietung des Prüfschalls (Einzeltöne) erfolgt über Kopfhörer. Die jeweils getestete Frequenz wird in zufälliger Reihenfolge angeboten, um eine Manipulation der Messwerte zu vermeiden. Dabei wird während der Messung auch zufällig zwischen linkem und rechtem Ohr gewechselt.

Aus der gemessenen Hörschwellendifferenz und dem eingangs eingegebenen Lärmbereich wird der SNR-Wert der Otoplastik für beide Ohren errechnet.

Als Ergebnis wird jedoch nicht die Dämmwirkung des Gehörschutzes angegeben, sondern der am Ohr zu erwartende Lärmexpositionspegel  $L^*_{EX}$ . Zudem erfolgt eine Beurteilung der Dämmwirkung entsprechend Anh., Tab. 2 aus der Norm EN 458 [53] (z. B. „unzureichend“, „annehmbar“, „zu hoch (Überprotektion)“ etc.).

**Tab. 8.3** Übersicht *CapaTest*

Technische Ausstattung, Daten und Prüfungen	Messverfahren <i>CapaTest</i>
Messgerätebasis:	PC-basiert,
Zubehör:	Kopfhörer, Signalgeber, externe Soundkarte
Art des Prüflings:	Cotral-Otoplastiken
Anforderungen an den Messraum mit Kopfhörer:	Störgeräuschfreier Raum
Anforderungen an den Messraum mit Lautsprecher:	Entfällt
Messprinzip:	Hörschwellenmessung, monaural für linkes und rechtes Ohr getrennt
Messmethode:	Subjektive Kopfhöreraudiometrie
Prüfschallfeld:	Definiert über Kopfhörer
Prüfschall:	Ton
Testfrequenz(en):	Schnelltest: 125, 1000, 4000 Hz Umfassender Test: 63, 125, 250, 5000, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz
Messergebnis:	Am Ohr vorliegender Restschallpegel $L^*_{EX}$ in dB(A)

Vor- und Nachteile des Messverfahrens in Bezug auf die Anforderungen einer genauen Bestimmung des Lärmexpositionspegels  $L^*_{EX}(f_{oct})$  nach der LärmVibrationsArbSchV:

#### *Vorteile*

Durch die Berücksichtigung des vorliegenden Lärmbereichs kann der Gehörschutz über entsprechende Auswahl des verwendeten Filters der Lärmsituation angepasst werden. Durch die Ergebnisausgabe in Form des Lärmexpositionspegels  $L^*_{EX}(f_{oct})$  hat der Benutzer sofort Kenntnis darüber, ob der maximal zulässige Expositionswert nach [1] eingehalten werden würde, wenn die weitere Lärmexposition in der Arbeitsschicht unverändert andauert.

Bei Messung der Hörschwellen wird der Prüfschall zufällig wiedergegeben, wodurch eine Manipulation der Messwerte vermieden wird.

#### *Nachteile*

Nachteilig ist, dass durch Verwendung eines vorgegebenen Lärmbereichs und der Umrechnung der Dämmkurve von Oktavpegeln in den SNR-Wert durch starke Mittelwertbildung ein „Verschmieren“ des Ergebnisses entsteht. Die tatsächliche individuelle Dämmwirkung aus der Hörschwellendifferenzmessung bleibt dem Benutzer vorenthalten.

Aufgrund des Programmverlaufs ist das Verfahren nur für Cotral-Otoplastiken geeignet. Andere Gehörschutztypen können nicht getestet werden.

Da es sich auch beim *CapaTest* um ein subjektives Verfahren handelt, spielen auch hier die oben beschriebenen Faktoren hinsichtlich des Probanden eine wichtige Rolle für die genaue Ermittlung der Hörschwelle.

#### 8.4.1.4 VeriPro

Das *VeriPro*-Messverfahren von Sperian Protection (USA) ist ein subjektives Messverfahren, mit dem über einen subjektiven Lautstärkeabgleich zwischen offenem und verschlossenem Ohr die Dämmwirkung von Gehörschutz bestimmt werden kann.

Das *VeriPro*-System ist PC-basiert. Die Darbietung des Prüfschalls erfolgt über Kopfhörer. Abb. 8.10 zeigt die Messausrüstung für das *VeriPro*-System.



**Abb. 8.10** Messausrüstung für das *VeriPro*-System bestehend aus Notebook mit *VeriPro*-Software, externer Soundkarte und Kopfhörer [61]

Zu Beginn der Messung muss der Proband einen Lautstärkeabgleich zwischen linkem und rechtem Ohr (jeweils ohne Gehörschutz) durchführen. Zuerst hört er das Testsignal auf dem rechten Ohr und muss die Lautstärke für das linke Ohr so einstellen, dass die Lautstärkeempfindung auf beiden Ohren gleich ist. Dieser Vorgang wird für alle Testfrequenzen (250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz) durchgeführt. Dann setzt der Proband seinen Gehörschutz in das rechte Ohr ein und stellt die Lautstärke so ein, dass sie der des linken Ohres entspricht. Dies wird bei allen Testfrequenzen durchgeführt. Derselbe Vorgang wird danach für das linke Ohr durchgeführt.

Durch den vorherigen Lautstärkeabgleich bei offenen Ohren ergibt sich nun aus der Lautstärkedifferenz zwischen verschlossenem und offenem Ohr die persönliche Dämmwirkung des Gehörschutzes für beide Ohren (PAR = personal attenuation ratio).

**Tab. 8.4** Übersicht *VeriPro*

Technische Ausstattung, Daten und Prüfungen	Messverfahren <i>VeriPro</i>
Messgerätebasis:	PC-basiert,
Zubehör:	Kopfhörer, externe Soundkarte
Art des Prüflings:	Gehörschutzstöpsel, Otoplastiken
Anforderungen an den Messraum mit Kopfhörer:	Störgeräuschfreier Raum
Anforderungen an den Messraum mit Lautsprecher:	Entfällt
Messprinzip:	Lautstärkeabgleich zwischen rechtem und linkem Ohr mit und ohne Gehörschutz
Messmethode:	Lautstärkeabgleich
Prüfschallfeld:	Definiert über Kopfhörer
Prüfschall:	Ton
Testfrequenz(en):	250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz
Messergebnis:	Einzahlwerte in dB bei den Testfrequenzen

Vor- und Nachteile des Messverfahrens in Bezug auf die Anforderungen einer genauen Bestimmung des Lärmexpositionspegels  $L^*_{EX}(f_{oct})$  nach der LärmVibrationsArbSchV:

#### *Vorteile*

Zur Durchführung des Verfahrens muss der Gehörschutz nicht modifiziert werden. Allerdings muss der Gehörschutz zu Beginn der Messung entfernt werden, um den Lautstärkeabgleich bei unverschlossenen Ohren durchführen zu können.

#### *Nachteile*

Das *VeriPro*-Verfahren ist sehr subjektiv, d. h. der „Faktor Mensch“ spielt hier eine besonders große Rolle. Da hier ein Lautstärkeabgleich zwischen beiden Ohren stattfindet, kann die Messung durch eine gestörte Lautstärkeempfindung, z. B. durch einen Hörschaden (z. B. Recruitment), stark verzerrt werden. Auch die Aufmerksamkeit, Geduld und Kooperationsbereitschaft des Probanden spielt eine entscheidende Rolle.

Da der Lautstärkeabgleich für beide Ohren bei verschiedenen Testfrequenzen durchgeführt werden muss, ist das Verfahren relativ zeitaufwendig.

Da zur Darbietung des Prüfschalls Kopfhörer verwendet werden, ist die Überprüfung der Dämmwirkung von Kapselgehörschutz nicht möglich.

## 8.4.2 Objektive Verfahren

### 8.4.2.1 MIRE – Microphone In Real Ear-Verfahren

#### *Allgemeines*

Die Bestimmung der Dämmwirkung von Gehörschutz über ein MIRE-Verfahren basiert auf der ISO-Norm 11904-1 (Bestimmung der Schallimmission von ohrnahen Schallquellen – Teil 1: Verfahren mit Mikrofonen in menschlichen Ohren (MIRE-Verfahren) [57]), bei dem die Schallimmission ohrnaher Schallquellen mit einem im Gehörgang platzierten Miniaturmikrofon gemessen wird.

Im Falle der Ermittlung der Dämmwirkung von Gehörschutz über ein MIRE-Verfahren wird dieses Messprinzip so modifiziert, dass der Schalldruck vor und hinter dem Gehörschutz über zwei Mikrofone gemessen wird. Bei entsprechender Beschallung kann so die Schalldruckpegeldifferenz zwischen den beiden Mikrofonen bestimmt werden, die unter Berücksichtigung der Übertragungsfunktion des verschlossenen Gehörgangs (TFOE = transfer function of occluded ear) der Dämmwirkung durch den Gehörschutz entspricht. Damit ist ein MIRE-Verfahren ein objektives Verfahren zur Bestimmung der individuellen Dämmwirkung von Gehörschutz.

Die Ermittlung der Schalldruckpegeldifferenz vor und hinter dem Gehörschutz erfolgt durch die Verwendung zweier Mikrofone. Üblicherweise befinden sich beide Mikrofone außerhalb des Gehörgangs, wobei an ein Mikrofon ein sehr dünner, biegeweicher Sondenschlauch angeschlossen ist. Dieser Sondenschlauch kann entweder am Gehörschutz vorbei oder, bei entsprechender Modifizierung des Gehörschutzes, durch ihn hindurch in den Gehörgang gelegt werden, so dass hiermit über das angeschlossene Mikrofon der Schalldruckpegel im Gehörgang hinter dem Gehörschutz gemessen werden kann. Bei Durchführung des Sondenschlauchs durch den Gehörschutz muss der Schlauch so beschaffen sein, dass ein normales Einsetzen des Gehörschutzstöpsels immer noch möglich ist. Auch darf durch den Sondenschlauch kein Einbruch der Schalldämmung, z. B. durch Leckage, entstehen.

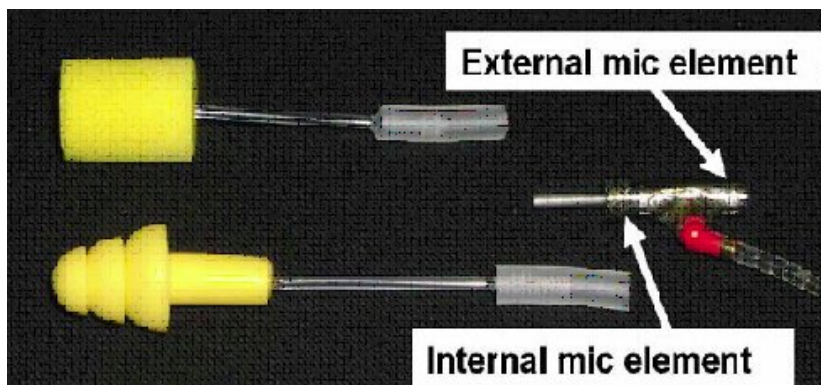
Für den Fall, dass sich das zweite Mikrofon im Gehörgang befindet, muss das Mikrofonkabel so verlegt werden, dass die Schalldämmung bzw. das Einsetzen des Gehörschutzes nicht beeinträchtigt wird. Zudem muss beim Einsetzen des Mikrofons in den Gehörgang vorsichtig vorgegangen werden, um das Trommelfell nicht zu verletzen.



### MIRE-Messverfahren EARFit

Ein typisches Beispiel für ein MIRE-Messverfahren zur Bestimmung der individuellen Dämmwirkung von Gehörschutz ist das System *EARFit* der Firma Aero Technologies (USA). Bei diesem Messverfahren liegen beide Mikrofone außerhalb des Ohres und sind in Ohrnähe angebracht. Ein Mikrofon misst den Schalldruckpegel außerhalb des Ohres. Das zweite Mikrofon misst über einen Sondenschlauch den Schalldruckpegel hinter dem Gehörschutz. Der Sondenschlauch wird mittig durch den Gehörschutz hindurch in den Gehörgang eingeführt. Hierzu muss der Gehörschutzstöpsel entsprechend modifiziert werden. Als Messsignal dient ein breitbandiges Rauschen, welches über einen Lautsprecher dargeboten wird. Der Lautsprecher befindet sich frontal vor dem Probanden in 30 cm Abstand. Das Messsystem misst innerhalb von 10 s die Schalldruckpegel bei sieben Testfrequenzen (125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz) und bildet die Pegeldifferenz zwischen den beiden Mikrofonen.

Abb. 8.11 zeigt den modifizierten Gehörschutz mit dem Sondenschlauch.



**Abb. 8.11** Zwei unterschiedliche Gehörschutzstöpsel, die mit einem Sondenschlauch versehen sind, an den das externe Mikrofonelement angeschlossen wird [62]

**Tab. 8.5** Übersicht *EARFit*

Technische Ausstattung, Daten und Prüfungen	Messverfahren <i>EarFit</i>
Messgerätebasis:	PC-basiert
Zubehör:	Externes Dual-Mikrofonelement, Lautsprecher
Art des Prüflings:	Gehörschutzstöpsel, theoretisch auch Otoplastiken und Kapselgehörschutz
Anforderungen an den Messraum mit Kopfhörer:	Entfällt
Anforderungen an den Messraum mit Lautsprecher:	Störgeräuschfreier Raum
Messprinzip:	Messung des Schalldruckpegels vor und hinter dem Gehörschutz und Bildung der Differenz
Messmethode:	Pegeldifferenzmessung
Prüfschallfeld:	Undefiniert
Prüfschall:	Breitbandrauschen
Testfrequenz(en):	125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz
Messergebnis:	Einzahlwerte in dB bei den Testfrequenzen

Vor- und Nachteile des Messverfahrens in Bezug auf die Anforderungen einer genauen Bestimmung des Lärmexpositionspegels  $L^*_{EX}(f_{oct})$  nach der LärmVibrationsArbSchV:

#### *Vorteile*

Der größte Vorteil von *EARFit* ist, dass sich relativ schnell und objektiv die Pegelminderung eines Gehörschutzes ermitteln lässt. Durch die Verwendung zweier Mikrofone und die Bildung der Pegeldifferenz zwischen beiden lässt sich bei Verwendung eines entsprechend breitbandigen Rauschsignals im Prinzip für einen beliebigen Frequenzbereich die Pegelminderung innerhalb einer Messung erfassen.

Das MIRE-Verfahren lässt sich bei Beschallung über Lautsprecher prinzipiell für alle Gehörschutztypen anwenden.

#### *Nachteile*

Im Falle des Verfahrens mit modifiziertem Gehörschutz lässt sich die individuelle Dämmwirkung eines persönlichen Gehörschutzes nicht bestimmen. Für die Messung muss immer der modifizierte Gehörschutz verwendet werden. Es ist also nicht möglich, einen Beschäftigten von seinem Arbeitsplatz zu holen und direkt die Dämmwirkung seines Gehörschutzes zu testen. Zudem kann man davon ausgehen, dass die Dämmwirkung durch die Modifikation mit dem Sondenschlauch zumindest geringfügig beeinflusst wird.

Wird der Sondenschlauch nicht durch den Gehörschutz hindurch, sondern an ihm vorbei verlegt, besteht die Gefahr, dass an dieser Stelle eine Leckage auftritt und die Schalldämmung somit herabgesetzt wird.

Durch Messung der Pegeldifferenz vor und hinter dem Gehörschutz wird nicht die tatsächliche individuelle Dämmwirkung bestimmt, da die Übertragungsfunktion des Gehörgangs mit berücksichtigt werden muss. Die Übertragungsfunktion des SONDENSCHLAUCHS führt zudem vermutlich zu weiteren Ungenauigkeiten.

#### 8.4.2.2 Messung der Lärmdosis im äußeren Gehörgang beim Tragen von Gehörschutz mit dem Lärmdosimeter „Quiet Dose“

Der US-amerikanische Gehörschutzhersteller Sperian Hearing Protection bietet im Rahmen seiner Produktpalette ein Lärmdosimeter Namens „Quiet Dose“ an. Bei diesem Dosimeter wird allerdings im Unterschied zu herkömmlichen Dosimetern der Schalldruckpegel im Gehörgang hinter dem Gehörschutz gemessen. Das Messgerät arbeitet daher grundlegend nach dem MIRE-Prinzip.

Für jedes Ohr wird an einem mit einem Sondenschlauch präparierten Gehörschutzstöpsel je ein Mikrofon des Dosimeters angebracht. Der Sondenschlauch wird durch die Mitte des Gehörschutzstöpsels geführt. Gemessen wird der Schalldruckpegel direkt hinter dem Gehörschutz. Das Dosimeter kann über die ganze Arbeitszeit getragen werden und somit die im Gehörgang des Arbeitnehmers während des Arbeitstages vorliegende Lärmexposition für linkes und rechtes Ohr messen.

Inwiefern der mit dem Lärmdosimeter „Quiet Dose“ gemessene Schalldruckpegel mit dem Auslösewert verglichen werden kann, entzieht sich der Kenntnis der Untersucher.

Der Hersteller macht keine Angaben, inwiefern die Software innerhalb des Messgerätes das Übertragungsverhalten des Mikrofons, des Sondenschlauchs sowie die Schallfeldveränderungen bei verschlossenem Gehörgang berücksichtigt. Die ISO 11904-1 [57] schreibt vor, den im Gehörgang gemessenen Schalldruckpegel um eine Freifeld- bzw. Diffusfeldkorrektur zu korrigieren. Ob dieser Berechnungsalgorithmus im Messgerät berücksichtigt wird, ist nicht bekannt.



**Abb. 8.12** Links: Lärmdosimeter „Quiet Dose“ und rechts: präparierter Gehörschutzstöpsel mit Mikrofon im Ohr eines Trägers (Quelle: Sperian Hearing Protection)

Vor- und Nachteile des Messverfahrens in Bezug auf die Anforderungen einer genauen Bestimmung des Lärmexpositionspegels  $L^*_{EX}(f_{oct})$  nach der LärmVibrationsArbSchV:

#### *Vorteile*

Wie bereits oben erwähnt, ist das Lärmdosimeter „Quiet Dose“ grundlegend geeignet, die Lärmexposition und damit den Lärmexpositionspegel  $L^*_{EX}$  unter Berücksichtigung von Gehörschutz direkt zu messen. Zudem kann die Lärmexposition des Arbeitnehmers über eine gesamte Arbeitsschicht gemessen werden.

#### *Nachteile*

Wesentlicher Nachteil des beschriebenen Messverfahrens ist, dass die Messung hinter dem Gehörschutz nur mit einem modifizierten Gehörschutz erfolgen kann. Welchen Einfluss die Perforation des Gehörschutzstöpsels mit dem Sondenschlauch hat, ist nicht geklärt. Es ist daher nur eine teilweise realistische Tragesituation gegeben.

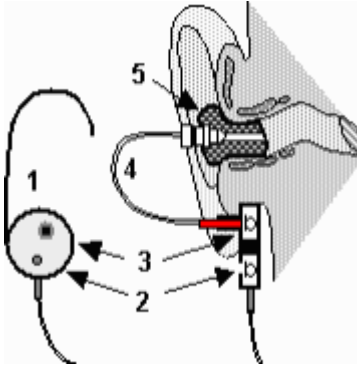
Mit dem Lärmdosimeter „Quiet Dose“ wird der Lärmexpositionspegel  $L^*_{EX}$  im Gehörgang gemessen. Das Messverfahren ermittelt jedoch nicht gleichzeitig den vorm Ohr befindlichen Schalldruckpegel, der zur Bestimmung der individuellen Dämmwirkung von Gehörschutz einer Arbeitsperson notwendig wäre. Insofern kann man mit dem Lärmdosimeter „Quiet Dose“ die Dämmwirkung von Gehörschutz nicht ermittelt werden.

Zudem kann nur der vom Hersteller modifizierte Gehörschutz verwendet werden. Es wäre vorteilhaft, einen beliebigen Gehörschutz tragen zu können und die Lärmexposition beim Tragen dieses Gehörschutzes zu messen.

#### 8.4.2.3 Ear Seal Integrity Test

Das *Ear Seal Integrity Test*-Verfahren der Firma Hearing Tech (Australien) misst, ähnlich wie bei einem MIRE-Verfahren, die Schalldruckpegel vor und hinter dem Gehörschutz und bildet die Differenz aus den beiden Messwerten. Allerdings ist dieses Messverfahren ausschließlich für die hauseigenen ELACIN-Gehörschutzotoplastiken mit wechselbarem Dämmfilter ausgelegt. Absicht des Messverfahrens ist es in erster Linie, Undichtigkeiten durch schlechten Sitz bzw. schlechte Passform der Otoplastik, die mit einer herabgesetzten Schalldämmung einhergeht, zu erkennen.

Zur Ermittlung der Dämmwirkung durch die Otoplastik werden zwei Mikrofone verwendet. Diese befinden sich an einer Vorrichtung, die an der Ohrmuschel aufgehängt wird. Ein Mikrofon ist dabei an einen Sondenschlauch angeschlossen. Dieser Sondenschlauch wird über einen Adapter an der Stelle der Otoplastik positioniert, an der sich üblicherweise der Dämmfilter des Gehörschutzes befindet. Der Filter wird hierzu entfernt. Der Adapter ist so konzipiert, dass er die Öffnung schalldicht abschließt und sich das Ende des Sondenschlauchs innerhalb der Filterbohrung befindet. Das angeschlossene Mikrofon misst so den Schalldruckpegel im Gehörgang hinter der Otoplastik. Das zweite Mikrofon misst den Schalldruckpegel vor dem Ohr. Einen schematischen Messaufbau des *Ear Seal Integrity Test* zeigt Abb. 8.13.



**Abb. 8.13** Schematischer Messaufbau des *Ear Seal Integrity Tests*.  
 1. Mikrofonvorrichtung, 2. Mikrofon zur Messung des Schalldruckpegels vor dem Ohr, 3. Mikrofon zur Messung des Schalldruckpegels hinter der Otoplastik, 4. Sondenschlauch, 5. Otoplastik.

Gemessen wird der Schalldruckpegel in einem Frequenzbereich von 200 bis 400 Hz. Das angeschlossene sog. „Seal Integrity Meter“-Messgerät (SI-Meter) berechnet die Differenz beider Mikrofone und zeigt das Ergebnis, die „Attenuation“ (Pegelminderung), als Einzahlwert an (per LED-Anzeige).

Das Messsignal ist ein sog. „EE“-Tone, der über einen Lautsprecher an der Rückseite des sog. „EE-Tone-Generator“ abgestrahlt wird. Hierzu wird der Generator in 30 cm Abstand vom zu testenden Ohr gehalten.

Wenn das Messgerät eine Schalldämmung von mind. 17,5 dB anzeigt, ist die Otoplastik nach Aussage des Messsystems in Ordnung. Andernfalls wird eine Nachbesserung der Otoplastik angeraten.

**Tab. 8.6** Übersicht Ear Seal Integrity Test

Technische Ausstattung, Daten und Prüfungen	Messverfahren <i>Ear Seal Integrity Test</i>
Messgerätebasis:	PC-basiert
Zubehör:	Externe Mikrofonvorrichtung, SI-Meter, EE-Tone Generator
Art des Prüflings:	ELACIN - Otoplastiken
Anforderungen an den Messraum mit Kopfhörer:	Entfällt
Anforderungen an den Messraum mit Lautsprecher:	Störgeräuschfreier Raum
Messprinzip:	Messung des Schalldruckpegels vor und hinter dem Gehörschutz und Bildung der Differenz
Messmethode:	Pegeldifferenzmessung
Prüfschallfeld:	Undefiniert
Prüfschall:	„EE-Tone“
Testfrequenz(en):	Zwischen 200 und 400 Hz
Messergebnis:	Einzahlwerte in dB über LED-Anzeige

Vor- und Nachteile des Messverfahrens in Bezug auf die Anforderungen einer genauen Bestimmung des Lärmexpositionspegels  $L^*_{EX}(f_{oct})$  nach der LärmVibrationsArbSchV:

#### *Vorteile*

Das Messsystem ist mit wenigen, einfach zu bedienenden Geräten ausgestattet und lässt sich somit schnell und einfach einsetzen. Es ermöglicht damit die schnelle Überprüfung der Dichtigkeit von ELACIN-Gehörschutzotoplastiken.

#### *Nachteile*

Das Messverfahren eignet sich nicht zur Bestimmung der individuellen Dämmwirkungen von Gehörschützern in der Arbeitsumwelt. Das Messsystem kann nur die Pegelminderungen für die jeweils präparierten ELACIN-Otoplastiken bestimmen. Es kann nur die Dichtigkeit der Otoplastik selbst überprüft werden.

Die Dämmwirkung bzw. die Dichtigkeit wird nur in einem sehr schmalen Frequenzbereich gemessen (200 – 400 Hz).

Die Anzeige des Ergebnisses ist sehr ungenau, da nur ein grober Dämmwert über eine LED-Anzeige angegeben wird.

Das Messverfahren ist nur für ELACIN-Gehörschutzotoplastiken geeignet, andere Gehörschutzarten können nicht überprüft werden.

#### 8.4.2.4 PAC – Phonak Attenuation Control System

Der Hörgeräte- und Gehörschutzhersteller Phonak (Schweiz) hat ein Messsystem zur Überprüfung der Dämmwirkung seiner hauseigenen „Serenity“-Gehörschutzotoplastiken entwickelt. Hierzu kommt ein Service-Mitarbeiter von Phonak in den entsprechenden Betrieb und überprüft mit dem Messsystem *PAC* die Dämmwirkung der Gehörschutzotoplastiken der Beschäftigten.

Auch *PAC* basiert auf einem Prinzip der Messung des Schalldruckpegels vor und hinter dem Gehörschutz.

Die „Serenity“-Gehörschutzotoplastik hat eine Bohrung mit herausnehmbarem Dämmfilter. Zur Überprüfung der Dämmwirkung wird dieser Stopfen entfernt und an dessen Stelle wird die Mikrofommessvorrichtung eingesetzt. Mit Hilfe zweier darin befindlicher Mikrofone wird der Schalldruckpegel vor und hinter dem Gehörschutz gemessen. Die Darbietung des Messsignals erfolgt über Kopfhörer. Die Messsoftware bildet die Differenz und gibt diese als Dämmwirkung für den jeweiligen Gehörschutz aus.

**Tab. 8.7** Übersicht *PAC*

<b>Technische Ausstattung, Daten und Prüfungen</b>	<b>Messverfahren <i>PAC</i></b>
Messgerätebasis:	PC – basiert
Zubehör:	Kopfhörer, Mikrofonadapter
Art des Prüflings:	Phonak - Otoplastiken
Anforderungen an den Messraum mit Kopfhörer:	Störgeräuschfreier Raum
Anforderungen an den Messraum mit Lautsprecher:	Entfällt
Messprinzip:	Messung des Schalldruckpegels vor und hinter dem Gehörschutz und Bildung der Differenz
Messmethode:	Pegeldifferenzmessung
Prüfschallfeld:	Definiert über Kopfhörer
Prüfschall:	Breitbandrauschen
Testfrequenz(en):	125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz
Messergebnis:	Einzahlwerte in dB bei den Testfrequenzen

Vor- und Nachteile des Messverfahrens in Bezug auf die Anforderungen einer genauen Bestimmung des Lärmexpositionspegels  $L^*_{EX}(f_{oct})$  nach der LärmVibrationsArbSchV:

#### *Vorteile*

Die Messung selbst ist nicht sehr zeitaufwendig, da die Dämmwirkung für einen breiten Frequenzbereich gleichzeitig für beide Ohren bestimmt werden kann.

Es besteht zudem keine Forderung nach einem besonderen bzw. besonders leisen Messraum. Dadurch kann die Messung gut in der Arbeitsumwelt (direkt im Betrieb) durchgeführt werden.

#### *Nachteile*

Da zur Messung der Dämmwirkung ein Herausnehmen der Otoplastik notwendig ist, kann die Überprüfung nie direkt, d. h. so, wie der Beschäftigte gerade den Gehörschutz trägt, stattfinden. Zudem muss die Gehörschutzotoplastik durch Austauschen der Dämmfilter mit dem Mikrofonadapter modifiziert werden.

Nachteil des *PAC*-Systems ist, dass es nur für „Serenity“-Gehörschutzotoplastiken von Phonak anwendbar ist. Eine Überprüfung anderer Gehörschutzarten ist nicht möglich.

## 8.5 Bewertung der Messverfahren

Wichtigstes Kriterium für die Bewertung der sieben beschriebenen In-Situ-Messverfahren ist, dass die individuelle Dämmwirkung von Gehörschutz idealerweise genau so bestimmt werden sollte, wie der Gehörschutz gerade vom Beschäftigten getragen wird, d. h. die Einflussnahme auf den Gehörschutz durch Herausnehmen oder Manipulieren in irgendeiner Form sollte möglichst gering sein. Zudem sollte mit dem Messverfahren möglichst jeder Typ von Gehörschutz überprüft werden können.

In der folgenden Tab. 8.8 wird die Verwendbarkeit der Messverfahren zur Bestimmung der individuellen Dämmwirkung von Gehörschutz verglichen.

**Tab. 8.8** Eignung der im Abschnitt 8.4 vorgestellten In-Situ-Messverfahren für die Bestimmung der individuellen Dämmwirkung von Gehörschutz

Kriterium	Subjektive Verfahren				Objektive Verfahren		
	<i>IntegraFit</i>	<i>FitCheck</i>	<i>CapaTest</i>	<i>VeriPro</i>	<i>EARFit</i>	<i>Ear Seal Integrity Test</i>	<i>PAC</i>
Verwendbar für Gehörschutzstöpsel?	ja	ja	nein	ja	ja	nein	nein
Verwendbar für Kapselgehörschützer?	ja	nein	nein	nein	ja	nein	nein
Verwendbar für Gehörschutzotoplastiken?	ja	ja	ja <sup>3</sup>	ja	ja	ja <sup>4</sup>	ja <sup>5</sup>
Manipulation des Gehörschutzes notwendig?	nein	nein	nein	nein	ja/nein <sup>6</sup>	ja	ja
Herausnehmen des Gehörschutzes zu Beginn der Messung notwendig?	nein	nein	ja	ja	ja	ja	ja

Aus Tab. 8.8 ist ersichtlich, dass die objektiven Messverfahren *EARFit*, *Ear Seal Integrity Test* und *PAC* für eine Bestimmung der individuellen Dämmwirkung in der Arbeitsumwelt nach oben genannten Kriterien eher ungeeignet sind. Bei allen drei Verfahren muss der Gehörschutz zu Beginn der Messungen entfernt und entsprechend manipuliert werden.

<sup>3</sup> Mit diesem Messverfahren können nur Cotral-Gehörschutzotoplastiken überprüft werden.

<sup>4</sup> Mit diesem Messverfahren können nur ELACIN-Gehörschutzotoplastiken überprüft werden.

<sup>5</sup> Mit diesem Messverfahren können nur Serenity-Gehörschutzotoplastiken überprüft werden.

<sup>6</sup> Wird der verwendete Sondenschlauch am Gehörschutz vorbei in den Gehörgang eingeführt, ist theoretisch keine Manipulation des Gehörschutzes notwendig.



Die Messverfahren *Ear Seal Integrity Test* und *PAC* sind zudem nur auf die Überprüfung der entsprechenden Gehörschutzotoplastiken der jeweiligen Hersteller ausgelegt. Eine Überprüfung anderer Gehörschutztypen ist mit diesen Messverfahren nicht möglich.

Mit Ausnahme des Systems *CapaTest* ergibt sich im Falle der subjektiven Messverfahren ein breiterer Anwendungsbereich. Die Messverfahren *IntegraFit*, *FitCheck*, *VeriPro* sind prinzipiell geeignet, die Dämmwirkung von Gehörschutzstöpseln und Gehörschutzotoplastiken gleichermaßen zu überprüfen. Da bei allen subjektiven Messverfahren bis auf das System *IntegraFit* die Darbietung des Prüfschalls ausschließlich über Kopfhörer erfolgt, ist allerdings mit diesen Messverfahren die Überprüfung der Dämmwirkung von Kapselgehörschützern nicht möglich.

Im Falle von *IntegraFit* und *FitCheck* ist ein Herausnehmen oder eine Manipulation des Gehörschutzes vor Beginn der Messung nicht notwendig, wodurch diese beiden Messverfahren gut geeignet sind, die Dämmwirkung des Gehörschutzes direkt so zu überprüfen, wie er vom Arbeitnehmer gerade getragen wird. Bei *CapaTest* und *VeriPro* muss vor Beginn der Messung der Gehörschutz entfernt werden, wodurch die tatsächliche Trageweise des Gehörschutzes bereits verfälscht wird.

Größter Nachteil der subjektiven Verfahren ist, dass durch den starken Einfluss des Probanden auf die Messergebnisse die Fehlerwahrscheinlichkeit erhöht ist. Insbesondere bei *VeriPro*, bei dem die Dämmwirkung über einen Lautstärkeabgleich ermittelt wird, kann die subjektive Komponente großen Einfluss auf das Ergebnis haben.

## 8.6 Abschlussbetrachtungen zu den Messverfahren

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand und der bisherigen Betrachtung der hier vorgestellten Messverfahren gibt es kein Messverfahren, welches uneingeschränkt zu empfehlen wäre, die individuelle Dämmwirkung von Gehörschutz in der Arbeitsumwelt nach den genannten Kriterien korrekt zu bestimmen.

Von den vorgestellten Verfahren ist offensichtlich die Bestimmung der Dämmwirkung über eine subjektive Hörschwellendifferenzmessung die geeignetere Lösung, da hierzu keine Modifikationen am Gehörschutz durchgeführt werden müssen. Zudem entspricht ein solches Verfahren eher der Messung nach ISO 4869-1 [50], wodurch sich eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit den Herstellerangaben ergibt. Allerdings wird nach den hier vorgestellten Verfahren die Schalldämmung monaural und normalerweise über Kopfhörer bestimmt. Die Bestimmung der Schalldämmung nach ISO 4869-1 erfolgt dagegen binaural in einem diffusen oder freien Schallfeld. Der Einfluss des Unterschieds zwischen monauraler und binauraler Messung und der unterschiedlichen Schallfelder auf das Messergebnis ist noch zu prüfen.

Bei einer subjektiven Messmethode bestehen diverse Unwägbarkeiten, welche teilweise großen Einfluss auf das Messergebnis haben können. Faktoren wie Konzentrationsfähigkeit des Probanden, Motivation, Kooperationsbereitschaft etc. können sich nachteilig bei der Hörschwellenbestimmung auswirken. Zudem können diverse körperliche Faktoren wie bereits bestehende Hörschäden (Hörverlust, Recruitment,

Tinnitus etc.), Einnahme ototoxischer Substanzen, Erkrankungen am Mittelohr usw. Einfluss auf das Messergebnis haben.

Nur durch eine kompetente Fachkraft können diese Unwägbarkeiten, die Einfluss auf die Bestimmung der Dämmwirkung haben, in Grenzen gehalten werden. Das kann durch eine ausführliche Befragung durch den Untersucher geschehen. Wenn, wie oben beschrieben, medizinische Indikationen vorliegen, muss man das Ergebnis der individuellen Dämmwirkung in Frage stellen, denn die korrekte Bestimmung der Hörschwelle geht von normalhörenden, jungen Menschen im Alter von 20 Jahren aus.

Zudem ist der Einfluss von Umgebungslärm zu berücksichtigen. Nur wenn der Umgebungslärm keinen Einfluss auf die Ruhehörschwelle hat, kann das Messergebnis als korrekt angesehen werden. Wenn durch Umgebungslärm die Hörschwelle künstlich angehoben wird, dann fällt die gemessene Dämmwirkung  $D_E$  des Gehörschutzes kleiner aus, als sie tatsächlich ist.

## 8.7 Praktische Vorgehensweise zur Berücksichtigung der Dämmwirkung von Gehörschutz im Hinblick auf die Einhaltung der maximal zulässigen Expositionswerte

Wie in Abschnitt 8.6 bereits beschrieben, ist nach dem derzeitigen Erkenntnisstand keines der vorgestellten Messverfahren uneingeschränkt geeignet, die individuelle Dämmwirkung von Gehörschutz während des praktischen Einsatzes am Arbeitsplatz eindeutig zu bestimmen. Damit ist es mit den Messverfahren nur bedingt möglich nachzuweisen, ob durch die Anwendung von persönlichem Gehörschutz der Lärmexpositionspegel  $L^*_{EX}$  oder der Spitzenschalldruckpegel  $L^*_{pC,peak}$  unterhalb des maximal zulässigen Expositionswertes liegt und somit die Gefährdung des Gehörs beseitigt ist.

Da die im Abschnitt 8.6 dargestellten Verfahren nur sehr eingeschränkt und nicht universell für die Nachweisführung der individuellen Dämmwirkung von Gehörschutz tauglich sind, wird aus der Sicht der Untersucher alternativ die modifizierte Anwendung der Oktavbandmethode nach [53] vorgeschlagen.

Die Oktavbandmethode erlaubt eine direkte Berechnung des Tageslärmexpositionspegels mit Gehörschutz. Zum Schutz vor Gehörschädigungen muss der individuelle Gehörschutz so ausgewählt werden, dass der Lärmexpositionspegel  $L^*_{EX}$  kleiner als 85 dB(A) ist, d. h. unter dem maximal zulässigen Expositionswert liegt.

Bei Kenntnis des Oktavspektrums des Geräusches am betroffenen Arbeitsplatz lässt sich einer auf diese Lärmsituation angepasster Gehörschutz aussuchen und der zu erwartende Lärmexpositionspegel  $L^*_{EX}$  ermitteln. Dazu werden die von den Herstellern angegebenen Mittelwerte der Schalldämmungen der Gehörschützer  $\Delta L_{mf}$  und die Standardabweichungen  $\Delta L_{of}$  benötigt. Indem handelsüblicher Gehörschutz der Baumusterprüfung nach EN 352-1/-2 [54], [55] unterliegt, kann von der Korrektheit dieser Werte ausgegangen werden. Da die Schalldämmwerte jedoch unter Laborbedingungen bestimmt werden, würden diese die Schutzwirkung für die tägliche Anwendung in der Praxis nicht korrekt abbilden bzw. überschätzen. Nach DIN EN ISO 4869-2 [51] wird deshalb nicht der Mittelwert der Schalldämmung, son-

dem der sogenannte APV-Wert (Assumed Protection Value)  $\Delta L_{APVf}$  verwendet. Hierzu wird der Mittelwert der Schalldämmung  $\Delta L_{mf}$  um die Standardabweichung  $\Delta L_{\sigma f}$  reduziert.

Die so erhaltene Dämmwirkung kann damit für 84 % der Träger für einen durchschnittlich benötigten Umfang der Schutzwirkung erreicht werden. Für die Berechnung des  $\Delta L_{APVf}$ -Wertes gilt:

$$\Delta L_{APVf} = \Delta L_{mf} - \Delta L_{\sigma f} \quad (8.2)$$

dabei ist

$\Delta L_{APVf}$	Wert der angenommenen Schutzwirkung des Gehörschützers in dB für die Mittenfrequenz des Oktavbandes $f$ ,
$\Delta L_{mf}$	Mittelwert der Schalldämmung des Gehörschutzes in dB für die Mittenfrequenz des Oktavbandes $f$ ,
$\Delta L_{\sigma f}$	Standardabweichung in dB für die Mittenfrequenz des Oktavbandes $f$ .

In der Berechnung von  $\Delta L_{APVf}$  nach Gl. 8.2 sind verschiedene Unwägbarkeiten, die beim Einsetzen und Tragen des Gehörschutzes auftreten und die Schutzwirkung herabsetzen können, nicht berücksichtigt. Wie aus einer früheren Studie des BGIA aus dem Jahre 1989 [66] bekannt, muss auf Grund der im Abschnitt 8.1 aufgeführten Ursachen für die Verminderung der Dämmwirkung von Gehörschutz ein Praxisabschlag auf den  $\Delta L_{APVf}$ -Wert vorgenommen werden. Die Verwendung der aus dieser Studie [66] hervorgegangenen Praxisabschläge ist heute üblich. Im Rahmen einer vergleichbar angelegten Studie des BGIA aus dem Jahre 2009 [65] werden die Praxisabschläge im Wesentlichen bestätigt und die verschiedenen Gehörschutzgruppen weiter differenziert. Man kann davon ausgehen, dass die im Rahmen der aktuellen Studie ermittelten Praxisabschläge recht gut die verschiedenen Einflussfaktoren auf die Schalldämmung durch Tragefehler etc. für einen großen Teil der Benutzer abbilden.

Mit den durch die Studie [65] validierten Praxisabschlägen ist es möglich, eine praktikable und ausreichend genaue Bestimmung des Tages-Lärmexpositionspegels  $L^*_{EX,8h}$  der unterhalb des Gehörschutzes am Ohr des Arbeitnehmers zu erwarten ist, vorzunehmen. Man kann deshalb davon ausgehen, dass die individuelle Dämmwirkung des Gehörschutzes des Arbeitnehmers durch den Praxisabschlag  $\Delta L_{Abschlag}$  gut abgebildet wird und der auf dieser Grundlage ermittelte Lärmexpositionspegel  $L^*_{EX}$  geeignet ist, die sichere Einhaltung der maximal zulässigen Expositionswerte nachzuweisen.

Die Praxisabschläge  $\Delta L_{Abschlag}$  nach [65] sind im Folgenden aufgeführt:

- vor Gebrauch zu formende Gehörschutzstöpsel	9 dB
- fertig geformte Gehörschutzstöpsel	5 dB
- Bügelstöpsel	5 dB
- Kapselgehörschutz	5 dB
- Otoplastiken (mit regelmäßiger Funktionskontrolle)	3 dB
- Otoplastiken (ohne Funktionskontrolle)	6 dB
- Kombination aus Kapselgehörschutz und Gehörschutzstöpseln	9 dB

Unter Berücksichtigung des Praxisabschlages wird vorgeschlagen, den am Ohr wirksamen Lärmexpositionspegel  $L^*_{EX}$  nach folgender Formel zu berechnen:

$$L^*_{EX} = 10 \cdot \lg \sum_{f=63}^{8000} 10^{0.1(L_{Af} - \Delta L^*_{APVf})} \quad (8.3)$$

dabei ist

- $L^*_{EX}$  am Ohr unter dem Gehörschutz wirksamer Lärmexpositionspegel,  
 $L_{Af}$  A-bewerteter Oktavband-Schalldruckpegel ( $L_{Aoct}$ ) des Geräusches in dB im Oktavband  $f$ ,  
 $\Delta L^*_{APVf}$   $\Delta L_{APVf} - \Delta L_{Abschlag}$  in dB,  
 $\Delta L_{APVf}$  Wert der angenommenen Schutzwirkung des Gehörschützers in dB für die Mittenfrequenz des Oktavbandes  $f$  nach Gl. 8.2,  
 $\Delta L_{Abschlag}$  Praxisabschlag für den gewählten Gehörschutz in dB nach [65].

Folgendes Beispiel soll die Berechnung verdeutlichen. Es wird das Lärmspektrum für einen Arbeitsplatz in einer Papiermaschinen-Halle verwendet. Als Gehörschutz werden Bügelstöpsel benutzt.

**Tab. 8.9** Bestimmung des Lärmexpositionspegels  $L^*_{EX}$  nach der Oktavbandmethode unter Berücksichtigung des  $\Delta L_{APVf}$ -Wertes sowie des Praxisabschlages  $\Delta L_{Abschlag}$

	Oktavmittenfrequenz in Hz								Summe	
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
Geräuschspektrum $L_{Af}$	71	78	82	85	86	86	84	81	92	dB(A)
Dämmung Bügelstöpsel $\Delta L_{mf}$	20	25	21	19	23	29	36	36	-	dB
Standardabweichung $\Delta L_{of}$	6	4	3	4	4	5	5	6	-	dB
$\Delta L_{APVf} = \Delta L_{mf} - \Delta L_{of}$	14	21	18	15	19	24	31	30	-	dB
$\Delta L_{Abschlag}$ für Bügelstöpsel	5								-	dB
$\Delta L^*_{APVf} = \Delta L_{APVf} - \Delta L_{Abschlag}$	9	16	13	10	14	19	26	25		dB
$L^*_{EX,oct} = L_{Af} - \Delta L^*_{APVf}$	62	62	69	75	72	67	58	56	78	dB(A)
$L^*_{EX,8h}$ nach Gl. 8.3	-	-	-	-	-	-	-	-	78	dB(A)

Die Bestimmung des Lärmexpositionspegels  $L^*_{EX}$  nach der Oktavbandmethode unter Berücksichtigung des  $\Delta L_{APVf}$ -Wertes sowie eines Praxisabschlages  $\Delta L_{Abschlag}$  für die entsprechenden Gehörschutztypen kann nach derzeitigem Kenntnisstand als die Methode mit der größten Praxistauglichkeit sowie Sicherheit angesehen werden.

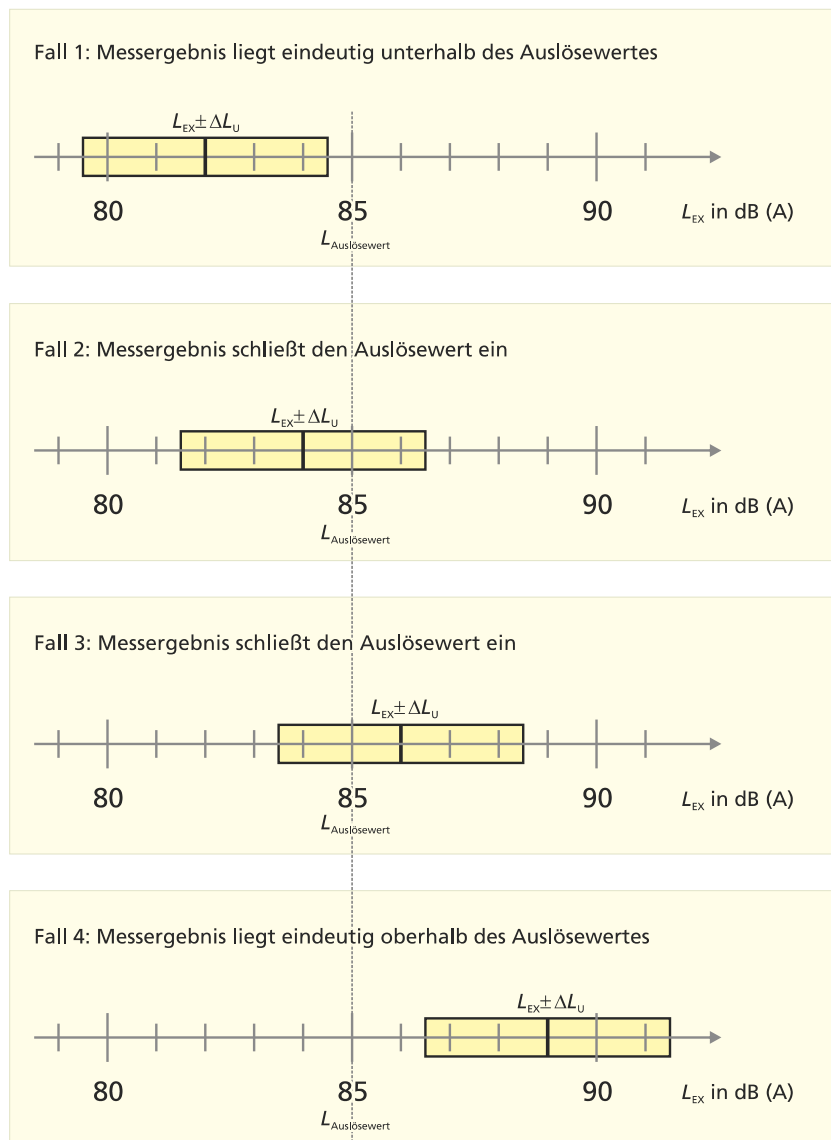
Nach der Lärm- und Vibrationsarbeitsschutzverordnung [1] ist bei Impulslärm neben der Einhaltung des oberen Auslösewertes von 85 dB(A) sicherzustellen, dass auch der obere Auslösewert für den Spitzenschalldruckpegel von  $L_{pC,peak} = 137$  dB(A) unter Berücksichtigung der Dämmwirkung von Gehörschutz unterschritten wird.

Für Impulslärm ist die oben beschriebene Oktavbandmethode prinzipiell auch geeignet, jedoch wird in der Regel bei Impulslärm nur der Spitzenschalldruckpegel  $L_{pC,peak}$  gemessen und nicht dessen Schallspektrum. Daher sollte für die Beurteilung von Impulslärm weiterhin die Methode nach Anhang B der DIN EN 458 [53] verwendet werden.

## 9 Kriterien für den Vergleich mit den Auslösewerten

### 9.1 Grundsätze für die Beurteilung der Lärmexposition

Bei den Messungen zur Überprüfung der Einhaltung bzw. der Überschreitung der Auslösewerte von 80 dB(A) bzw. 85 dB(A) zur Vermeidung von Lärmschwerhörigkeiten der Arbeitnehmer ist in jedem Fall die Messunsicherheit  $\Delta L_U$  zu ermitteln und anzugeben. Um eine sichere Kenntnis darüber zu gewinnen, ob der Auslösewert eingehalten oder überschritten wird, ist eine Prüfung unter Einbeziehung der Messunsicherheit  $\Delta L_U$  durchzuführen. Aufgrund der Zuordnung der Messunsicherheit  $\Delta L_U$  zum vollständigen Messergebnis  $L_{EX}$  können sich bei der Beurteilung bezüglich der Einhaltung und der Überschreitung der Auslösewerte verschiedene Konstellationen ergeben.



**Abb. 9.1** Mögliche Beurteilungskonstellationen für das vollständige Ergebnis des Lärmexpositionspegels  $L_{EX}$  im Vergleich mit dem Auslösewert

Die Abbildung 9.1 zeigt die verschiedenen Beurteilungskonstellationen für das vollständige Ergebnis des Lärmexpositionspegels  $L_{EX}$ . Es gilt danach, die folgenden vier Fälle zu unterscheiden:

- Fall 1: Der Mittelwert des Lärmexpositionspegels liegt deutlich unter dem Auslösewert und der um die Messunsicherheit erhöhte Mittelwert des Lärmexpositionspegels befindet sich ebenfalls unter dem Auslösewert,
- Fall 2: Der Mittelwert des Lärmexpositionspegels liegt unter dem Auslösewert, aber der um die Messunsicherheit erhöhte Mittelwert des Lärmexpositionspegels befindet sich über dem Auslösewert,
- Fall 3: Der Mittelwert des Lärmexpositionspegels liegt über dem Auslösewert, aber der um die Messunsicherheit verminderte Mittelwert des Lärmexpositionspegels befindet sich unter dem Auslösewert,
- Fall 4: Der Mittelwert des Lärmexpositionspegels liegt deutlich über dem Auslösewert und der um die Messunsicherheit verminderte Mittelwert des Lärmexpositionspegels befindet sich ebenfalls über dem Auslösewert.

Wird demnach die Messunsicherheit in die Beurteilung des Messergebnisses einbezogen, so entsteht neben den Bereichen der eindeutigen Über- und Unterschreitung ein Unsicherheitsbereich, der den Auslösewert einschließt. Im Fall 1 und Fall 4 kann für den Lärmexpositionspegel eindeutig die Unterschreitung bzw. Überschreitung des Auslösewertes nachgewiesen werden.

Der Fall 2 (siehe Abb. 9.1) macht deutlich, dass bei einem Ergebnis des Lärmexpositionspegels von  $L_{EX,8h} = 84 \pm 2,5 \text{ dB(A)}$  der Tages-Lärmexpositionspegel mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % auch bei 86,5 dB(A) vorkommen kann. Ebenso zeigt der Fall 3 (siehe Abb. 9.1), dass bei einem Ergebnis von  $L_{EX,8h} = 86 \pm 2,5 \text{ dB(A)}$  der  $L_{EX,8h}$  auch bei 83,5 dB(A) liegen kann. In diesen Fällen ist eine eindeutige Aussage nicht möglich. Die Messunsicherheit schließt den Auslösewert ein. Damit auch in diesen Fällen eine Entscheidung getroffen werden kann, müssen zusätzliche Vereinbarungen festgelegt werden. Das kann auf zwei Wegen erfolgen, und zwar

- durch die Einführung eines Abbruchkriteriums mit einer entsprechenden Erweiterung des singulären Auslösewertes in einen Auslösewertebereich oder
- einer weiteren Verringerung der Messunsicherheit.

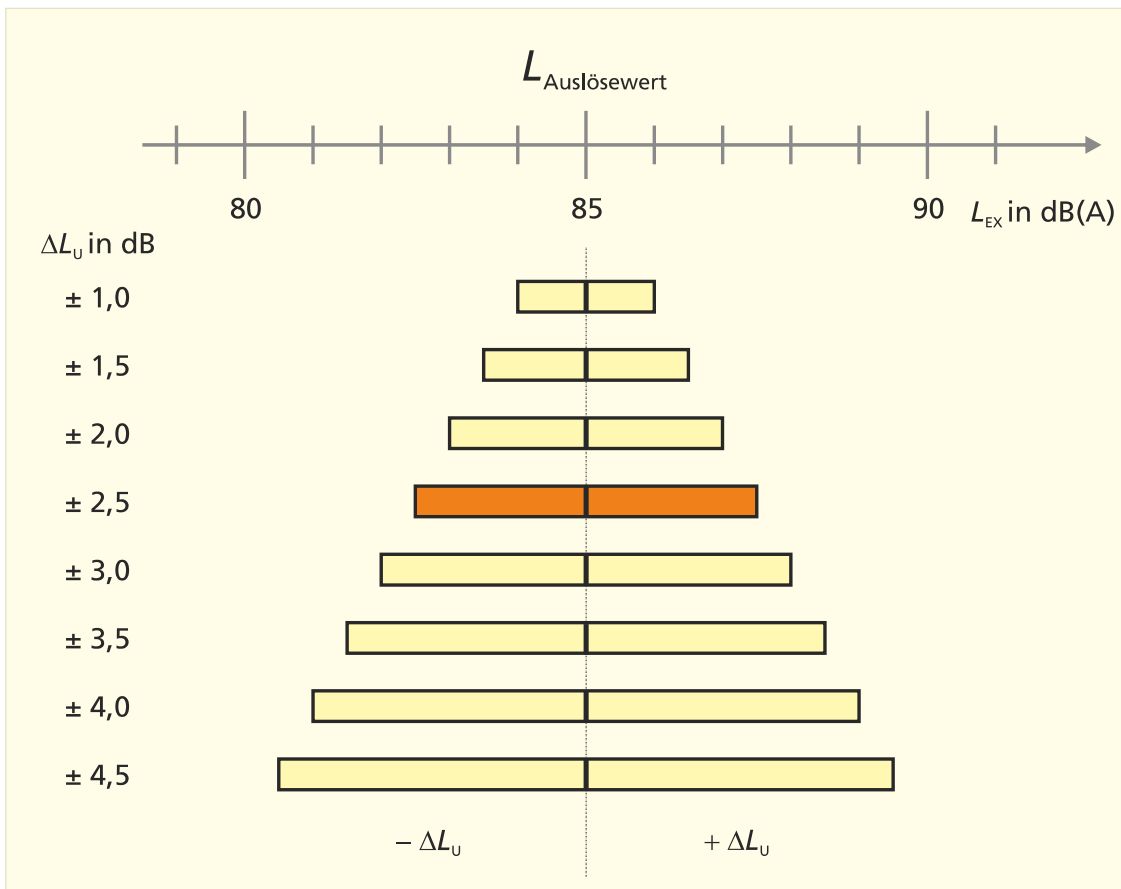
In der Regel erreicht man eine Verringerung der Messunsicherheit durch präzisere Messgeräte und/oder verfeinerte Messmethoden, was jedoch meist teuer und aufwendig ist.

Um zu einem beurteilbaren Messergebnis zu kommen, ist es daher zweckmäßig, ein Abbruchkriterium für den Untersuchungsaufwand der Messung einzuführen. Es wird folgende Definition vorgeschlagen:

*Wird eine Messunsicherheit von  $\Delta L_U(L_{EX}) \leq 2,5 \text{ dB}$  erreicht oder unterschritten, so kann der messtechnisch ermittelte Wert des Lärmexpositionspegels unmittelbar mit dem Auslösewert verglichen werden.*

Die Festlegung des Abbruchkriteriums verfolgt den Zweck, den Untersuchungsaufwand für eine Lärmexpositions-messung in wirtschaftlichen Grenzen zu halten, ohne

dabei auf Korrektheit und Einhaltung des Schutzzieles zu verzichten. Wird auf den Fall 2 das Abbruchkriterium angewendet, so würde man zu dem Ergebnis kommen, dass der Auslösewert bei einem Lärmexpositionspegel von 84 dB(A) eingehalten wird, obwohl der Lärmexpositionspegel mit einer 95%igen Wahrscheinlichkeit auch bei 86,5 dB(A) liegen könnte und somit eine Überschreitung vorläge. Auch der Fall 3 in Abbildung 9.1 zeigt bei der Anwendung des Abbruchkriteriums, dass mit 86 dB(A) eine Überschreitung festgestellt werden würde, obwohl mit einer 95%igen Wahrscheinlichkeit der Auslösewert mit einem Tages-Lärmexpositionspegel von 83,5 dB auch unterschritten sein könnte. Die Fälle 2 und 3 zeigen, dass bei der Anwendung eines Abbruchkriteriums der Auslösewert sich um die Messunsicherheit erweitert. Das heißt aus dem singulären Auslösewert wird ein Auslösewertebereich.



**Abb. 9.2** Gegenüberstellung der Messunsicherheiten  $\Delta L_U$  ( $L_{\text{EX}}$ ) für die Festlegung eines Abbruchkriteriums einer Messung und dessen Auswirkung auf die Erweiterung des Auslösewertes in einen Auslösewertebereich

Die Abbildung 9.2 zeigt, wie in Abhängigkeit von der Festlegung der Höhe der Messunsicherheit für ein Abbruchkriterium sich der Auslösewert in einen Auslösewertebereich erweitert. Es muss daher der Frage nachgegangen werden: „Wie groß darf der Bereich der Messunsicherheit sein?“.

Damit eine eindeutige, rechtlich verbindliche Entscheidung möglich ist, muss das Abbruchkriterium, nach welchem die Einhaltung bzw. Überschreitung des Auslösewertes beurteilt wird, festgelegt werden.

Bei der Festlegung eines Abbruchkriteriums für die Ermittlung der Messunsicherheit müssen folgende Gesichtspunkte berücksichtigt werden:

1. Wie ist das Gehörschadensrisiko bei einer Fehlbeurteilung einzuschätzen?
2. Welche wirtschaftlichen, medizinischen und juristischen Konsequenzen hat die Einhaltung bzw. Überschreitung des Auslösewertes zur Folge?

Zu 1.: Aus Abbildung 9.2 ist zu erkennen, dass z. B. bei Messunsicherheiten von  $\pm 3,5$  dB und größer sich der Bereich für den Auslösewert auf 88 dB und mehr vergrößern würde, wenn sich der Mittelwert des Expositionspegels in der Nähe des Auslösewertes befindet. Beispielsweise hätte dies zur Folge, dass ein Tages-Lärmexpositionspegel mit  $L_{EX,8h} = 84,5 \pm 3,5$  dB(A) bis 88 dB(A) tolerierbar wäre, obwohl der Mittelwert von 84,5 dB(A) unter dem Auslösewert liegt. Dies wäre ein unhaltbarer Zustand, weil gerade bei der Belastung der Lärmexponierten mit Tages-Lärmexpositionspegeln von 88 dB(A) bis 90 dB(A) und darüber das Risiko für lärmbedingte Hörverluste stark ansteigen würde[31].

Berechnet man andererseits den altersbegleitenden und lärmbedingten Hörverlust nach ISO 1999 [10] für eine 60-jährige männliche Personengruppe mit einer Expositionsdauer von 40 Arbeitsjahren und einem Tages-Lärmexpositionspegel von  $L_{EX,8h} = 85,0 \pm 2,5$  dB(A), d. h. einer akzeptablen oberen Grenze von 87,5 dB(A), so erhöht sich der Hörverlust gegenüber der Vergleichsgruppe mit einem Tages-Lärmexpositionspegel von 85,0 dB(A) bei den Audiometerfrequenzen 2000 Hz bis 6000 Hz um geringfügige 2 bis 4 dB.

Zu 2.: Im Abschnitt 7 wird in den Praxisbeispielen für die Lärmtypen 1 bis 4 und bei der Anwendung der Messgeräte der Klasse 1 und der Messmethoden 1 bis 4 gezeigt, dass Messunsicherheiten  $\Delta L_U(L_{EX}) \leq \pm 2,5$  dB erreicht werden können. Das Ziel: Messunsicherheiten von  $\Delta L_U(L_{EX}) \leq \pm 1$  dB zu erhalten, sind auf Grund der Unsicherheitsbilanzen in den Tabellen 1 bis 7 im Anhang nicht möglich. Im Abschnitt 7.3 wird auf die Messunsicherheit und ihre wirtschaftliche und juristische Bedeutung eingegangen.

Aus den dargelegten Gründen kann eine vertretbare Messunsicherheit für ein Abbruchkriterium daher nur lauten: *Eine für alle beteiligten Personengruppen tolerierbare Messunsicherheit muss so klein wie nötig sein.* Insofern scheint die Festlegung einer Messunsicherheit von  $\Delta L_U(L_{EX}) \leq \pm 2,5$  dB für einen Abbruch der messtechnischen Untersuchung plausibel und für die Praxis zweckmäßig zu sein. Auf dieser Grundlage käme man zu einem beurteilbaren Messergebnis mit einem in relativ kleinen Grenzen liegenden Unsicherheitsbereich.

Wegen des Zufallscharakters der Einflusskomponenten auf die Lärmexposition am Arbeitsplatz kann durch eine Messung niemals mit einer absoluten Sicherheit entschieden werden, ob der Auslösewert, der sich im Unsicherheitsbereich des vollständigen Messergebnisses befindet, eingehalten oder überschritten wird. Es bleibt immer eine gewisse Wahrscheinlichkeit für eine Fehlbeurteilung. Wenn das Verfahren zur Beurteilung der Messergebnisse eindeutig festgelegt ist, kann wenigstens eine rechtlich begründbare Sicherheit gewährleistet werden.



## 9.2 Beurteilung des Lärmexpositionspegels

Sind im Hinblick auf die Messunsicherheit die Kriterien für die Beurteilung des Lärmexpositionspegels  $L_{EX}$  auf Einhaltung oder Nichteinhaltung nach Tab. 9.1 erfüllt, dann ist eine eindeutige Aussage im Hinblick auf die Einhaltung bzw. Überschreitung der Auslösewerte, bezogen auf den Arbeitsplatz, gegeben. In diesen Fällen ist kein erhöhter Untersuchungsaufwand notwendig, da eine Entscheidung möglich ist.

**Tab. 9.1** Kriterien für die Beurteilung des Lärmexpositionspegels  $L_{EX}$  auf Einhaltung oder Nichteinhaltung im Vergleich mit dem Auslösewert  $L_{Auslösew.}$  am Arbeitsplatz

Messunsicherheit $\Delta L_U (L_{EX})$ in dB	Auslösewert $L_{Auslösew.}$		
	wird eingehalten	keine Entscheidung möglich	wird überschritten
$\leq 2,5$ dB	$L_{EX} < L_{Auslösew.}$	-	$L_{EX} \geq L_{Auslösew.}$
$> 2,5$ dB	$L_{EX} + \Delta L_U < L_{Auslösew.}$	$L_{EX} - \Delta L_U < L_{Auslösew.} \leq L_{EX} + \Delta L_U$ <i>Für eine Entscheidung ist <math>\Delta L_U</math> durch erhöhten Messaufwand und/oder höhere Anforderungen an das Messgerät zu verringern.</i>	$L_{EX} - \Delta L_U \geq L_{Auslösew.}$

Nach Tab. 9.1 gelten die Auslösewerte als eingehalten für

$$L_{EX} + \Delta L_U < \text{Auslösewert} \quad (9.1)$$

und als überschritten für

$$L_{EX} - \Delta L_U \geq \text{Auslösewert.} \quad (9.2)$$

Kann auf Grund der Prüfung auf Einhaltung nach Gl. 9.1 bzw. auf Überschreitung nach Gl. 9.2 nicht eindeutig eine Entscheidung herbeigeführt werden und liegt damit der Auslösewert zwischen der unteren und der oberen Schranke des Lärmexpositionspegels

$$L_{EX} - \Delta L_U < \text{Auslösewert} \leq L_{EX} + \Delta L_U, \quad (9.3)$$

so ist für eine Entscheidung zu überprüfen, ob die Messunsicherheit folgende Bedingung erfüllt

$$\Delta L_U \leq 2,5 \text{ dB.} \quad (9.4)$$

Ist das der Fall, dann gilt für eine Entscheidung

$$\text{Einhaltung} \quad L_{EX} < \text{Auslösewert,} \quad (9.5)$$

$$\text{Überschreitung} \quad L_{EX} \geq \text{Auslösewert.} \quad (9.6)$$

Für den Fall

$$\Delta L_U > 2,5 \text{ dB} \quad (9.7)$$

und

$$L_{EX} - \Delta L_U < \text{Auslösewert} \leq L_{EX} + \Delta L_U \quad (9.8)$$

ist durch die Verbesserung der Klasse des Messgerätes und/oder durch einen erhöhten Untersuchungsaufwand die Messunsicherheit  $\Delta L_U$ , solange zu verringern, bis eine Entscheidung möglich ist.

### 9.3 Beurteilung des Spitzenschalldruckpegels

Bei Impulslärm ist die Einhaltung der Auslösewerte entsprechend der Lärm-Vibrations-Arbeitsschutzverordnung zu überprüfen. Daher müssen alle vorkommenden Spitzenschalldruckpegel  $L_{pC,peak}$  während der Tätigkeit des Beschäftigten am Arbeitsplatz in einer Arbeitsschicht erfasst werden. Zur Bewertung ist der höchste vorkommende Spitzenschalldruckpegel auszuwählen. Wie oben bereits beschrieben, stellt ein einzelner Messwert ein Ergebnis dar. Auch der einzelne gemessene Spitzenschalldruckpegel wird mit einer Messunsicherheit versehen.

Für die Angabe der Messunsicherheit gilt:

$$L_{pC,peak} \pm \Delta L_U \text{ in dB(C)}. \quad (9.9)$$

Die Auslösewerte gelten als eingehalten für

$$L_{pC,peak} + \Delta L_U < \text{Auslösewert (135 dB(C) und 137 dB(C))} \quad (9.10)$$

und als überschritten für

$$L_{pC,peak} - \Delta L_U \geq \text{Auslösewert (135 dB(C) und 137 dB(C))} \quad (9.11)$$

Kann der Nachweis auf Einhaltung nach Gl. 9.10 bzw. auf Überschreitung nach Gl. 9.11 auch unter Verwendung von Schallpegelmessgeräten der Klasse 1 nicht eindeutig geführt werden und liegt damit der Auslösewert zwischen der unteren und der oberen Schranke des Spitzenschalldruckpegels

$$L_{pC,peak} - \Delta L_U < \text{Auslösewert} \leq L_{pC,peak} + \Delta L_U,$$

so wird, wegen der möglichen akuten Schädigungsgefahr des Innenohres und der statistischen Aussage, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % der Spitzenschalldruckpegel  $L_{pC,peak}$  auch an der oberen Grenze des Unsicherheitsbereiches liegen kann, vorgeschlagen, das Messergebnis im Nachweis als eine „Überschreitung“ einzustufen, auch wenn der gemessene Spitzenschalldruckpegel unterhalb des Auslösewertes liegt und der um die Messunsicherheit erhöhte Wert des Spitzenschalldruckpegels über dem Auslösewert.

Beispiel 20

Entsprechend Beispiel 16 im Abschnitt 7.5 erhält man für den dort beschriebenen Arbeitsplatz ein Ergebnis für den C-bewertete Spitzenschalldruckpegel  $L_{pC,peak}$  von

$$L_{pC,peak} = 141,0 \pm 4,4 \text{ dB(C)}.$$

Zur Prüfung auf Einhaltung des Auslösewertes wird die obere Grenze des Unsicherheitsbereiches der Messgröße  $L_{pC,peak}$  ermittelt

$$L_{pC,peak,o} = L_{pC,peak} + \Delta L_U \text{ (obere Grenze)}$$

und für die untere Grenze des Unsicherheitsbereiches

$$L_{pC,peak,u} = L_{pC,peak} - \Delta L_U \text{ (untere Grenze)}.$$

Für das o. g. Beispiel ergeben sich folgende Grenzen für den Spitzenschalldruckpegel:

$$\begin{aligned} L_{pC,peak,o} &= 141 + 4,4 \text{ (obere Grenze)} = 145,4 \text{ dB(C)}, \\ L_{pC,peak,u} &= 141 - 4,4 \text{ (untere Grenze)} = 136,6 \text{ dB(C)}. \end{aligned}$$

Für die Überschreitung des Auslösewertes gilt:

$$L_{pC,peak,u} \geq \text{Auslösewert } 137 \text{ dB(C)}$$

Obwohl der gemessene Spitzenschalldruckpegel 141 dB(C) beträgt und damit deutlich über dem oberen Auslösewert liegt, kann nicht eindeutig nachgewiesen werden, dass der Auslösewert von 137 dB(C) überschritten wird, weil  $L_{pC,peak,u}$  mit 136,6 dB(C) nicht gleich bzw. größer als der Auslösewert ist.

Hätte man die Messung, wie im Beispiel 17 gezeigt, mit einem Lärmdosimeter der Klasse 1 durchgeführt und ebenfalls einen  $L_{pC,peak} = 141 \text{ dB(A)}$  gemessen, so käme man mit einer Messunsicherheit von  $\Delta L_U(L_{pC,peak}) = 3,1 \text{ dB}$ , wie in Beispiel 17 angegeben, zu folgendem Ergebnis:

$$L_{pC,peak} = 141,0 \pm 3,1 \text{ dB(C)}.$$

Für diesen Fall ergeben sich dann folgende Grenzen für den Spitzenschalldruckpegel:

$$\begin{aligned} L_{pC,peak,o} &= 141 + 3,1 \text{ (obere Grenze)} = 144,1 \text{ dB(C)}, \\ L_{pC,peak,u} &= 141 - 3,1 \text{ (untere Grenze)} = 137,9 \text{ dB(C)}. \end{aligned}$$

Der Vergleich zeigt für die Überschreitung

$$L_{pC,peak,u} \geq \text{Auslösewert (137 dB(C))}$$

$$137,9 \text{ dB(C)} > 137 \text{ dB(C)}$$

Bei der Verwendung eines Klasse 1-Gerätes hätte man die Überschreitung des oberen Auslösewertes von 137 dB(C) nachweisen können.

Die Unsicherheitsbetrachtungen für Impulslärm in den Abschnitten 6.7.5, 7.5 und 9.3 zeigen, dass die differenzierte Beurteilung von Spitzenschalldruckpegeln in bezug auf den unteren Auslösewert von 135 dB(C) und den oberen Auslösewert von 137 dB(C) problematisch bzw. teilweise nicht möglich ist. Würde beispielsweise das Ergebnis lauten  $L_{pC,peak} = 134,0 \pm 4,4$  dB(C), dann läge der Messwert zwar unter den beiden Auslösewerten, jedoch würde der Unsicherheitsbereich beide Auslösewerte einschließen.

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

### Zusammenfassung

Die nach der Lärm- und Vibrations-Arbeitschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV) zu ermittelnden Messgrößen zur Beurteilung der Lärmexposition am Arbeitsplatz sind der Tageslärmexpositionspegel und der Spitzenschalldruckpegel. Entsprechend § 4 der LärmVibrationsArbSchV sind die Messungen dieser Größen nach dem Stand der Technik durchzuführen. Die Verordnung legt zwar fest, dass die Größen zur Lärmexposition nach dem Stand der Technik zu ermitteln sind, schreibt jedoch kein genormtes Messverfahren zur Ermittlung der Lärmexposition vor.

Die jetzt gültige Messnorm DIN EN ISO 9612 „Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz“ vom September 2009 deckt die Forderung nach § 4 der Verordnung nur zum Teil ab. In Ergänzung zur DIN EN ISO 9612 fehlen einfache Messverfahren zur Erfassung des Lärms am Arbeitsplatz, die den geforderten Stand der Technik für Lärmmessungen erfüllen. Neu gegenüber früheren gesetzlichen Bestimmungen ist, dass die Verordnung maximal zulässige Expositionswerte unterhalb des Gehörschutzes festlegt, d. h. der auf das Gehör des Beschäftigten wirkende Lärm darf unter Einbeziehung der dämmenden Wirkung des Gehörschutzes den Tageslärmexpositionspegel von 85 dB(A) und den Spitzenschalldruckpegel von 137 dB(C) nicht überschreiten und ist messtechnisch nachzuweisen.

Ziel des Forschungsvorhabens ist daher die Entwicklung zweckmäßiger Messverfahren für die Praxis, die die Messunsicherheiten nach GUM berücksichtigen und damit dem Stand der Technik entsprechen. Außerdem verfolgt die Arbeit das Ziel, eine begründete Beurteilungsmethode für die Feststellung einer Über- oder Unterschreitung der Auslösewerte vorzuschlagen, mit dem Zweck, den Untersuchungsaufwand für eine Lärmexpositionsmessung in wirtschaftlichen Grenzen zu halten, ohne dabei auf Korrektheit und Einhaltung des Schutzzieles zu verzichten. Darüber hinaus soll der Erkenntnisstand von In-Situ-Messverfahren zur Bestimmung der individuellen Dämmwirkung von Gehörschutz ermittelt und bewertet, sowie ein Vorschlag für eine messtechnische Verfahrensweise unterbreitet werden.

In der Arbeit wird von Grundbegriffen und Definitionen ausgegangen, die eine wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung der Messverfahren darstellen. Es wird eine enge Verbindung zu den akustischen Definitionen und Messgrößen hergestellt, die schematisch in den Grundbegriffen „Lärmemission“, „Lärmimmission“, „Lärmexposition“ und „Lärmdosis“ veranschaulicht werden. Insbesondere wird die Definition des „Arbeitsplatzes“ herausgearbeitet, weil sich die Auslösewerte und die maximal zulässigen Expositionswerte der LärmVibrationsArbSchV auf den Tageslärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  und den Spitzenschalldruckpegel  $L_{pC,peak}$  des Arbeitsplatzes des Arbeitnehmers beziehen und alle aus den Überschreitungen der Auslösewerte und maximal zulässigen Expositionswerte bedingten *wirtschaftlichen, medizinischen und juristischen Konsequenzen* darauf basierend abgeleitet werden.

Anders als in der DIN EN ISO 9612, die von drei verbal festgelegten Strategien ausgeht und damit spezifische Vor- und Nachteile aufweist, wird hier von einem modularen physikalischen Lösungsansatz ausgegangen, der seinen Ursprung in der Kate-

gorisierung der Schallpegel-Zeitverläufe hat und von vier Lärmtypen I, II, III und IV ausgeht, wie sie üblicherweise an Arbeitsplätzen in der Industrie, dem Gewerbe und der Landwirtschaft vorkommen.

Bei der Ermittlung der Messgrößen wird in der vorliegenden Untersuchung von den Grundsätzen der Messtechnik ausgegangen, deren Bestandteile die messtechnischen Begriffe wie *Messwert*, *Messprinzip*, *Messmethode*, *Messverfahren*, *Messergebnis* und *Messunsicherheit* sind. Außerdem wird gezeigt, dass die Messnormen DIN EN 61672-1 und DIN EN 61252 derzeit den aktuellen Erkenntnisstand der Lärmesstechnik abbilden. Demzufolge kann davon ausgegangen werden, dass Geräte, die die Anforderungen der jeweiligen Normen erfüllen, den Stand der Technik repräsentieren. Die Forderungen an akustische Geräte zur Messung der Lärmexposition werden auf der Basis der Normen und den in der Praxis gewonnenen Messerfahrungen zusammengestellt.

Im Hauptteil des Forschungsberichtes werden ausführlich vier voneinander abgrenzbare Methoden zur Ermittlung der Lärmexposition vorgestellt und die Bestimmung der Messunsicherheit bei Schallpegelmessungen gezeigt. Die Messmethoden sind:

1. kontinuierliche Messung über einen Gesamtmesszeitraum (z. B. eine Arbeitsschicht),
2. kontinuierliche Messung in Teilmesszeiten des Gesamtmesszeitraumes,
3. Stichprobenmessung im Gesamtmesszeitraum und
4. kombinierte Messung im Gesamtmesszeitraum (Kombination aus den Messmethoden 1 bis 3).

Die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Messwerte, der Messgrößen, der Ergebnisgrößen und der Messunsicherheiten wird an Hand von Beispielen erläutert.

Für die Messmethoden zur Bestimmung des Tageslärm-Expositionspegels  $L_{EX,8h}$ , des Wochenlärmmexpositionspegels  $L_{EX,40h}$  und des Spitzenschalldruckpegels  $L_{pC,peak}$  wird ein Auswahl-schema vorgeschlagen. Die Tabelle „Arbeitschritte zur Ermittlung der Lärmexposition am Arbeitsplatz“ erleichtert die Anwendung der in der Arbeit entwickelten Messmethoden.

In einigen Beispielen wird der Unterschied zwischen „*ortsfester*“ und „*personengebundene*“ Messung herausgearbeitet. Es wird gezeigt, dass an „*ortsveränderlichen Arbeitsplätzen*“ die Lärmbelastung sowohl „*ortsfest*“ als auch „*personengebunden*“ gemessen werden kann. Bei der Festlegung der Messung auf „*ortsfest*“ oder „*personengebunden*“ muss man von der jeweiligen Zielstellung zur technischen, organisatorischen und medizinischen Prävention ausgehen. Während die personengebundene Messung allein darauf abzielt, die Lärmbelastung zu erfassen, bezweckt die ortsfeste Messung, sowohl die Lärmbelastung zu bestimmen als auch laute Bereiche und dominierende Schallquellen zu erkennen sowie Lärmbereiche festzustellen und zu kennzeichnen, in denen die Auslösewerte überschritten werden. Es kann darüber hinaus durch die „*ortsfeste Messung*“ an Referenzmesspunkten die Wirksamkeit von Schallschutzmaßnahmen nachgeprüft werden. Die ortsfeste Messung ist auch ein Hilfsmittel für die Ausarbeitung von Langzeit-Lärminderungsprogrammen bzw. dient zur Festlegung und Koordinierung des Tragens von persönlichen Gehörschutzmitteln.

Wegen der Vorteile der „*ortsfesten Messung*“ im Hinblick auf die Planung von technischen und organisatorischen Schallschutz wird ihr als Ergebnis dieser Untersuchung grundsätzlich der Vorzug gegenüber der „*personengebundenen Messung*“ eingeräumt.

Die möglichen Einflusskomponenten, die eine Auswirkung auf die Unsicherheit des äquivalenten Dauerschallpegels  $L_{pAeqi}$  und damit auf den Lärmexpositionspegel  $L_{EX}$  haben können, werden entsprechend der GUM-Modellierung umfangreich zusammengestellt und ihre Effekte auf das Ergebnis „Lärmexpositionspegel  $L_{EX}$ “ beurteilt. Die Unsicherheitsanalyse der Lärmmessverfahren zeigt, dass in der Regel nennenswerte Unsicherheitsbeiträge nur von

- der Messmethode in Verbindung mit dem Messobjekt ( $\Delta L_{U\text{-Methode}}$ ) und
- dem Messgerät plus Kalibrierung ( $\Delta L_{U\text{-Messgerät}}$ )

herrühren. Daher kann die Messunsicherheit bei Lärmmessungen im Zusammenhang mit der Ermittlung des Lärmexpositionspegels  $L_{EX}$  und des Spitzenschalldruckpegels  $L_{pC,peak}$  auf der Grundlage des Leitfadens „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM) wie folgt angegeben werden:

$$\Delta L_U(L_{EX}, L_{pC,peak}) = \sqrt{\Delta L_{U\text{-Methode}}^2 + \Delta L_{U\text{-Messgerät}}^2}$$

Die Angabe des Lärmexpositionspegels mit der Messunsicherheit erfolgt dann in einfacher Weise durch  $L_{EX,8h} \pm \Delta L_U$  in dB(A) und die Angabe des Spitzenschalldruckpegels durch  $L_{pC,peak} \pm \Delta L_U$  in dB(C). Zur Berechnung der erweiterten Messunsicherheit  $\Delta L_U$  wird nach GUM der Erweiterungsfaktor „*k*“ benötigt. Der Wert für den Erweiterungsfaktor wird aus der t-Verteilung begründet abgeleitet. Empfohlen wird  $k = t_{1-\alpha;30} = 1,70$  ( $P = 95\%$ ).

Die *Methodenunsicherheit*  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  setzt sich aus den Unsicherheitsbeiträgen der Messmethode  $\Delta L_{\text{Messmethode}}$  und dem des Messobjektes  $\Delta L_{\text{Messobjekt}}$  zusammen. In der Regel ist jedoch über die Unsicherheit der Messmethode nichts oder nur wenig bekannt. Beide Beiträge werden daher im Unsicherheitsbeitrag  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  zusammengeführt. Zur Berechnung der Methodenunsicherheit  $\Delta L_{U\text{-Methode}}$  werden die Unsicherheitsbeiträge der einzelnen beteiligten Merkmalsgrößen aus den Unsicherheitstabellen im Anhang des Forschungsberichtes und die nach Formeln berechenbaren Beiträge verwendet.

Die *Messgeräteunsicherheiten*  $\Delta L_{U\text{-Messgerät}}$  werden in Abhängigkeit von den Lärmarten „impulshaltig“, „schmalbandig“ und „breitbandig“ berechnet und in Tabellen zusammengestellt. Dabei wird als „Messgerät“ ein Schallpegelmessgerät der Klasse 1 in Verbindung mit einem Schallkalibrator der Klasse 1 und ein Schallpegelmessgerät der Klasse 2 in Verbindung mit einem Schallkalibrator der Klasse 2 betrachtet. Die Ergebnisse dazu zeigen, wie stark die Messunsicherheiten der Messgeräte der Klasse 1 und 2 bei der Durchführung von Messungen von impulshaltigen, schmalbandigen und breitbandigen Schallen differieren. Während bei Impulslärm je nach Durchführung der Messung mit Unsicherheiten zwischen 2,2 dB und 4,1 dB gerechnet werden muss und für ein Schmalbandgeräusch bei 5 kHz sogar mit Unsicherheiten zwischen 1,7 dB und 7,3 dB, liegt die Unsicherheit bei der Messung eines breitbandigen Ge-

räusches, wie beispielsweise einem typischen Industriegeräusch, lediglich zwischen 1,0 dB und 2,8 dB. Bei der Messung von Impulslärm und Schmalbandgeräuschen dürfte deshalb in der Regel eine differenzierte Betrachtung der Messunsicherheit erforderlich sein.

In dieser Forschungsarbeit wird gezeigt, dass die entwickelten Messmethoden und die Zusammenstellung der Berechnungsmöglichkeiten zur Bestimmung der Messunsicherheiten in Verbindung mit den Unsicherheitsanalysen in den Tabellen im Anhang einem „Baukastenprinzip“ folgen. Darin liegt der Vorteil der hier vorgestellten Methoden zur Erfassung der Lärmexposition und Bestimmung der Messunsicherheit.

Für die Darstellung der Messwerte, der Messgrößen, der Ergebnisgrößen und der Messunsicherheiten wird eine einheitliche Beschreibungssystematik erarbeitet, die eine zusammengehörende Darstellungsweise in Pegelschreibweise ermöglicht.

Neben der Entwicklung der Lärmessverfahren werden in dieser Forschungsarbeit acht verschiedene In-Situ-Messverfahren zur Bestimmung der individuellen Dämmwirkung von Gehörschutz analysiert. Sie funktionieren nach teilweise gleichen, teilweise unterschiedlichen Prinzipien. Die Beschreibungen und die Beurteilungen der Messverfahren basieren auf den uns vorliegenden Informationen. Vom Messprinzip her werden sie in subjektive und objektive Messverfahren unterteilt.

Die Analyse zeigt, dass keines der hier untersuchten Messsysteme uneingeschränkt geeignet ist, um universell für möglichst alle Gehörschutzarten die individuelle Dämmwirkung von Gehörschützern im In-Situ-Messverfahren korrekt zu bestimmen.

Offensichtlich ist die Bestimmung der Dämmwirkung über eine subjektive Hörschwellendifferenzmessung eine geeignete Lösung, da hierzu keine Manipulation und Modifikation am Gehörschutz durchgeführt werden muss. Zudem entspricht ein solches Verfahren eher der Messung nach ISO 4869-1, wodurch sich eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit den Herstellerangaben ergibt.

Für den Nachweis, ob unter Einbeziehung der dämmenden Wirkung von Gehörschutz die maximal zulässigen Expositionswerte eingehalten werden oder nicht, wird vorgeschlagen, die „Oktavbandmethode“ zu verwenden. Grundlage dafür sind neueste Erkenntnisse zur dämmenden Wirkung von Gehörschützern in der betrieblichen Praxis.

Für die Beurteilung des Lärmexpositionspegels  $L_{EX}$  und des Spitzenschalldruckpegels  $L_{pC,peak}$  in Verbindung mit ihren Messunsicherheiten werden begründete Bewertungskriterien entwickelt und empfohlen. Auf dieser Basis kann geprüft werden, ob die Auslösewerte oder die maximal zulässigen Expositionswerte unter- oder überschritten sind.

Im Vergleich zu den bekannten Messnormen ISO 1999, *DIN EN ISO 9612*, *DIN 45645-2* und auch der früheren berufsgenossenschaftlichen Verordnung *BGV B 3*, die keine Verfahren zur Bestimmung der Messunsicherheiten von Einzel-lärmimpulsen angeben, wird hier erstmalig die Bestimmung und Beurteilung für Spitzenschalldruckpegel mit ihren Messunsicherheiten vorgeschlagen.



Die in diesem Forschungsvorhaben vorgestellten Messverfahren einschließlich der Bestimmung der Messunsicherheiten sind effektive Verfahren für die Praxis, mit denen man zuverlässig die persönlichen Lärmexpositionen an den Arbeitsplätzen ermitteln kann und damit die Kriterien der Lärm- und Vibrations-Arbeitschutzverordnung erfüllt.

Der Vorteil der entwickelten Messmethoden zur Lärmmessung einschließlich der Rechenverfahren zur Bestimmung der Messunsicherheit besteht darin, dass die Messmethoden wie ein modulares System aufgebaut sind und damit fast jede Lärmkonstellation am Arbeitsplatz effizient erfasst werden kann ohne dabei auf Genauigkeit und Einhaltung des Schutzzieles zu verzichten.

#### Ausblick

Die Ausführlichkeit der Arbeit hat für die breite praktische Anwendung durch die Nutzer gewisse Grenzen, insofern wäre es für ein einwandfreies technisches Vorgehen wünschenswert den Inhalt so zu straffen, dass richtungsweisende einheitliche Arbeitsunterlagen entstehen und ein pragmatisches Vorgehen für jede schalltechnisch fachkundige Person möglich ist.

Nach dem derzeitigen Erkenntnisstand ist keines der analysierten In-Situ-Messverfahren uneingeschränkt geeignet, die individuelle Dämmwirkung von Gehörschutz während des praktischen Einsatzes am Arbeitsplatz eindeutig zu bestimmen. Mit den analysierten In-Situ-Messverfahren ist es nur bedingt möglich nachzuweisen, ob durch die Anwendung von persönlichem Gehörschutz der Lärmexpositionspegel  $L^*_{EX}$  oder der Spitzenschalldruckpegel  $L^*_{pC,peak}$  unterhalb des maximal zulässigen Expositionswertes liegt und somit die Gefährdung für das Gehörs beseitigt ist.

Da die Messverfahren zur Bestimmung der individuellen Dämmwirkung von Gehörschutz nur sehr eingeschränkt und nicht universell für die Nachweisführung am Arbeitsplatz tauglich sind, wird aus der Sicht der Untersucher alternativ die umfassend für alle Gehörschutzarten geeignete „Oktavbandmethode“ vorgeschlagen. Diese Methode gehört jedoch nicht zu den objektiven Messverfahren. Insofern bleibt es künftigen Untersuchungen vorbehalten

- durch Versuche an Probanden die Leistungsfähigkeit der gegenwärtig am Markt vorhandenen Messsysteme im Labor und der Praxis zu testen bzw.
- durch die Neuentwicklung eines Messsystems die Möglichkeit zu eröffnen den Lärmexpositionspegel  $L^*_{EX}$  oder den Spitzenschalldruckpegel  $L^*_{pC,peak}$  direkt zu messen, wie es z. B. ansatzweise mit dem Lärmdosimeter „Quiet Dose“ des US-amerikanischen Gehörschutzherstellers möglich erscheint (s. Abschn. 8.4.2.2).

## 11 Literaturverzeichnis

- [1] **GUM: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**, Herausgeber BIPM, Sèvres, 2008
- [2] **Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung - LärmVibrationsArbSchV) vom 6.3.2007**. BGBl. 2007 Teil I Nr. 8 vom 8.3.2007, S. 261 – 277
- [3] **Schmidt, M.:** Die kombinierte Wirkung des Lärms und der Ganzkörpervibration auf das Gehör des Landmaschinenfahrers. Zeitschrift für Lärmbekämpfung, Band 39 (1992), Nr. 2, S. 43 – 51
- [4] **DIN 45645-2:** Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen. Teil 2: Geräuschemessungen am Arbeitsplatz. 1997-07
- [5] **DIN EN ISO 9612:** Akustik – Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz; Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 (Ingenieurverfahren). September 2009
- [6] **EG-Arbeitsschutz-Rahmenrichtlinie 89/391/EWG**
- [7] **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)**. Amtsblatt der Europäischen Union L42, 15.02.2003, S. 28 – 44
- [8] **BGV B 3 (bisher: VBG 121) Lärm vom 1. Januar 1990 in der Fassung vom 1. Januar 1997**. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (zurückgezogen)
- [9] **Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung ArbStättV) vom 12. August 2004**. BGBl. I Nr. 44, 24.08.2004, S. 2179
- [10] **ISO 1999:** Acoustics - Determination of occupational noise exposure and estimation of noise-induced hearing impairment. Second edition 1990-01-15
- [11] **DIN V ENV 13005:** Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. 1999-06
- [12] **Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LAS):** Leitlinien zur Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV). C2-22 Abs 2 Definition Arbeitsplätze
- [13] **DIN EN ISO 11690-1:** Akustik - Richtlinien für die Gestaltung lärmarmen maschinenbestückter Arbeitsstätten. Teil 1: Allgemeine Grundlagen. 1997-02

- [14] **Schmidt, M.:** Planning Noise Control Measures at workplaces based on the EC directive 2003/10/EC. Noise at work, Lille, Frankreich 2007
- [15] **DIN EN 61672-1:** Elektroakustik. Schallpegelmesser. Teil 1: Anforderungen. 2003-10
- [16] **Bohny, H.-M. u. a.:** Lärmschutz in der Praxis. 1. Auflage. München Oldenbourg. 1986
- [17] **Schweizerische Unfallversicherungsanstalt, Arbeitssicherheit:** Gehörgefährdender Lärm am Arbeitsplatz. Report 44057. d. 3. Auflage Febr. 1997. Luzern
- [18] **DIN EN ISO 11200:** Akustik - Geräuschabstrahlung von Maschinen und Geräten - Leitlinien zur Anwendung der Grundnormen zur Bestimmung von Emissions-Schalldruckpegeln am Arbeitsplatz und an anderen festgelegten Orten. 1996-07
- [19] **DIN EN ISO 11201:** Akustik - Geräuschabstrahlung von Maschinen und Geräten - Messung von Emissions-Schalldruckpegeln am Arbeitsplatz und an anderen festgelegten Orten; Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene. 1996-07
- [20] **DIN EN ISO 11202:** Akustik - Geräuschabstrahlung von Maschinen und Geräten - Messung von Emissions-Schalldruckpegeln am Arbeitsplatz und an anderen festgelegten Orten; Verfahren der Genauigkeitsklasse 3 für Messungen unter Einsatzbedingungen. 1996-07
- [21] **DIN EN ISO 11203:** Akustik - Geräuschabstrahlung von Maschinen und Geräten - Bestimmung von Emissions-Schalldruckpegeln am Arbeitsplatz und an anderen festgelegten Orten aus dem Schalleistungspegel. 1996-07
- [22] **DIN EN ISO 11204:** Akustik - Geräuschabstrahlung von Maschinen und Geräten - Messung von Emissions-Schalldruckpegeln am Arbeitsplatz und an anderen festgelegten Orten. Verfahren mit Umgebungskorrekturen. 1996-07
- [23] **DIN EN ISO 11205:** Akustik - Geräuschabstrahlung von Maschinen und Geräten - Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 zur Bestimmung von Emissions-Schalldruckpegeln am Arbeitsplatz und an anderen festgelegten Orten unter Einsatzbedingungen aus Schallintensitätsmessungen. 2004-05
- [24] **DIN 1319-1:** Grundlagen der Messtechnik. Teil 1: Grundbegriffe. Januar 1995
- [25] **Unterlagen des Lehrganges „Messunsicherheit nach GUM praxisgerecht bestimmen“.** PTB. Berlin 2001
- [26] **Brüel & Kjaer:** Hand-held Analyzers Types 2250 and 2270. Dezember 2007
- [27] **Brüel & Kjaer:** Modul-Schallanalysator 2260. 1995

- [28] **Brüel & Kjaer:** Akustischer Kalibrator Typ 4231, technische Dokumentation. 2000
- [29] **DIN EN 60 942:** Schallkalibratoren. 2004
- [30] **DIN EN 1793-3:** Lärmschutzeinrichtungen an Straßen, Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften, Teil 3: Standardisiertes Verkehrslärmspektrum. November 1997
- [31] **Kraak, W.:** Vorausbestimmung der Gehörbeeinträchtigung durch Lärm. S. 284. In: Taschenbuch der Akustik. Hrsg. Fasold, W.; Kraak, W.; Schirmer, W. Berlin: Verlag Technik, 1984
- [32] **Brüel & Kjaer:** Sound Analysis Software BZ 7201. Technical Documentation. 1997
- [33] **U. Kurze:** Abschätzung der Unsicherheit von Immissionsprognosen. Zeitschrift für Lärmbekämpfung. 2001. S. 166-171
- [34] **W. Probst, U. Donner:** Die Unsicherheit des Beurteilungspegels bei der Immissionsprognose, Zeitschrift für Lärmbekämpfung. 2002. S. 86-90
- [35] **D. Piorr:** Zum Nachweis der Unsicherheit von Geräuschimmissionswerten mittels Prognose. Zeitschrift für Lärmbekämpfung. 2001. S. 172-175
- [36] **VDI 3723, Blatt 1:** Anwendung statistischer Methoden bei der Kennzeichnung schwankender Geräuschimmissionen. Mai 1993
- [37] **VDI 3723, Blatt 2:** Anwendung statistischer Methoden bei der Kennzeichnung schwankender Geräuschimmissionen; Teil 2: Qualitätsprüfung bei der Beurteilung von Geräuschsituationen. März 2006
- [38] **S. C. Martinez:** Qualität von Immissionsprognosen nach TA Lärm. Zeitschrift für Lärmbekämpfung. 2000. S. 39-44
- [39] **A. Heiß:** Verteilungsrelationen von Schallemission, Ausbreitungsdämpfung und Immission und Auswirkungen auf die Prognose- und Messunsicherheit der Immission. CFA/DAGA '04. Strasbourg. 2004. S. 787-788
- [40] **Graf, U.; Henning, H.; Stange, K.:** Formeln und Tabellen der mathematischen Statistik. 1966. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York
- [41] **Sachs, L.:** Angewandte Statistik. 8. Auflage 1991. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York
- [42] **Gralla, G.:** Unsicherheiten der Ergebnisse von Messungen mit Schallpegelmessgeräten – Berechnungen nach DIN EN 13005 (GUM). Müller-BBM Bericht Nr. M27 297/28. 26. Mai 2009

- [43] **Veit, I.:** Technische Akustik: Grundlagen der physikalischen, physiologischen und Elektroakustik. 5. Auflage. Würzburg, Vogelverlag. 1996
- [44] **DIN 45641:** Mittelung von Schallpegeln. 1990-06
- [45] **DIN EN 61252:** Elektroakustik. Anforderungen an Personenschallexposimeter. 2003-05
- [46] **Lohr, R.; Reichelt, M.:** Untersuchung zum Einsatz integrierender Messgeräte bei der Erfassung und Bewertung der Lärmimmission mit regelloser Zeitstruktur. Information ZAG Technische Arbeitshygiene. Neubrandenburg 15 (1982) 1. S. 48-51
- [47] **Knauer, D.:** Praxisnahe Methode zur Ermittlung und Bewertung der Lärmgefährdung am Arbeitsplatz. Vergleich des indirekten und direkten Messverfahrens am Beispiel einer großen Freianlage der petrochemischen Industrie. Diplomarbeit, Hochschule Coburg 2009
- [48] **Technische Regel zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung, TRLV Lärm, Teil 2:** Messung von Lärm. 23.03.2010
- [49] **Lärmschutzarbeitsblatt, LSA 01-400:** Ermittlung des Lärmexpositionspiegels am Arbeitsplatz, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Sankt Augustin, Oktober 2007
- [50] **ISO 4869-1:** Gehörschützer – Subjektive Methode zur Messung der Schalldämmung. Dezember 1990
- [51] **DIN EN ISO 4869-2:** Akustik - Gehörschützer - Teil 2: Abschätzung der beim Tragen von Gehörschützern wirksamen A-bewerteten Schalldruckpegel. August 1995
- [52] **ISO 8253-2:** Audiometrische Prüfverfahren – Teil 2: Schallfeld-Audiometrie mit reinen und schmalbandigen Prüfsignalen. Oktober 1994
- [53] **DIN EN 458:** Gehörschützer – Empfehlungen für Auswahl, Einsatz, Pflege und Instandhaltung – Leitfaden. Februar 2005
- [54] **DIN EN 352-1:** Gehörschützer – Allgemeine Anforderungen; Teil 1: Kapselgehörschützer. April 2003
- [55] **DIN EN 352-2:** Gehörschützer – Allgemeine Anforderungen; Teil 2: Gehörschutzstöpsel. April 2003
- [56] **ANSI/ASA S12.6 – 2008:** Methods for measuring the real-ear attenuation of hearing protectors. Melville, NY. 2008
- [57] **ISO 11904-1:** Acoustics – Determination of sound immission from sound sources placed close to the ear. Oktober 2002

- [58] **Workspace Integra:** Produktinformationen IntegraFit
- [59] **Michael & Associates Inc.:** Produktinformationen FitCheck
- [60] **Labor Cotral GmbH:** Produktinformationen CapaTest
- [61] **Howard Leight/Sperian Protection:** Produktinformationen VeriPro
- [62] **EAR/Aero Technologies:** Produktinformationen EARFit
- [63] **Hearing Tech:** Produktinformationen Ear Seal Integrity Test
- [64] **Phonak:** Produktinformationen PAC
- [65] **Dantscher, S.; Sickert, P.; Liedtke, M.:** Schalldämmung von Gehörschützern in der betrieblichen Praxis – Studie von 2005 bis 2007-, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung 2009. BGIA-Report 4/2009
- [66] **Pfeiffer, B.;** Kuhn, H.-D.; Specht, U.; Knipfer, C.: Schalldämmung von Gehörschützern in der betrieblichen Praxis. BIA-Report 5/89. Hrsg. BIA, Sankt Augustin 1989
- [67] **DIN EN ISO 3740:** Akustik. Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen. Leitlinien zur Anwendung der Grundnormen. März 2001

## Anhang

<b>Anh., Tab. 1</b>	Unsicherheitsanalyse für den Lärmtyp I auf der Grundlage der Messmethode 2 – Kontinuierliche Messung in Teilmesszeiten des Gesamtmesszeitraumes	184
<b>Anh., Tab. 2</b>	Unsicherheitsanalyse für den Lärmtyp I auf der Grundlage der Messmethode 3 – Stichprobenmessung im Gesamtmesszeitraum	186
<b>Anh., Tab. 3</b>	Unsicherheitsanalyse für den Lärmtyp II auf der Grundlage der Messmethode 1 – Kontinuierliche Messung über einen Gesamtmesszeitraum (Arbeitsschicht)	188
<b>Anh., Tab. 4</b>	Unsicherheitsanalyse für den Lärmtyp II auf der Grundlage der Messmethode 2 – Kontinuierliche Messung in Teilmesszeiten des Gesamtmesszeitraumes	190
<b>Anh., Tab. 5</b>	Unsicherheitsanalyse für den Lärmtyp II auf der Grundlage der Messmethode 3 – Stichprobenmessung im Gesamtmesszeitraum	193
<b>Anh., Tab. 6</b>	Unsicherheitsanalyse für den Lärmtyp III auf der Grundlage der Messmethode 2 – Kontinuierliche Messung in Teilmesszeiten des Gesamtmesszeitraumes	195
<b>Anh., Tab. 7</b>	Unsicherheitsanalyse für den Lärmtyp III auf der Grundlage der Messmethode 3 – Stichprobenmessung im Gesamtmesszeitraum	197





Anh., Tab. 1 (Fortsetzung)

Nr.	Ursache	Größe	Schätzwert	Fehlergrenzen	Verteilungsfunktion	Standardmessunsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Varianz	Quelle	Bemerkung
(1)	(2)	$X_i$ (3)	$x_i$ (4)	$\Delta x_i$ (5)	(6)	$u(x_i)$ (7)	$c_i$ (8)	$c_i \cdot u(x_i) = u_i(y)$ (9)	$u_i^2(y)$ (10)	(11)	(12)
4.2	sonst	$\Delta L_{x_i}$	0 dB	--	--	0,00	1	0,00	0,00	--	Zum Teil in $\Delta L_{\text{Messobjekt}}$ enthalten. Untypischer Lärm ist durch eine Festlegung im Messverfahren auszuschließen.
<b>5 Messperson <math>\Delta L_{\text{Messperson}}</math></b>											
5.1	Falls Ursache bekannt, Einschätzung vornehmen	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
5.2	sonst	$\Delta L_{x_i}$	0 dB	--	--	0,00	1	0,00	0,00	--	Abweichungen vernachlässigbar. Durch Vorwissen über die technischen Prozesse gehen die Abweichungen gegen Null.



Anh., Tab. 2 (Fortsetzung)

Nr.	Ursache	Größe	Schätzwert	Fehlergrenzen	Verteilungsfunktion	Standardmessunsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Varianz	Quelle	Bemerkung
(1)	(2)	$X_i$ (3)	$x_i$ (4)	$\Delta x_i$ (5)	(6)	$u(x_i)$ (7)	$c_i$ (8)	$c_i \cdot u(x_i) = u_i(y)$ (9)	$u_i^2(y)$ (10)	(11)	(12)
4.2	sonst	$\Delta L_{-x_i}$	0 dB	--	--	0,00	1	0,00	0,00	--	Zum Teil in $\Delta L_{\text{Messobjekt}}$ enthalten. Untypischer Lärm ist durch eine Festlegung im Messverfahren auszuschließen.
<b>5 Messperson <math>\Delta L_{\text{Messperson}}</math></b>											
5.1	Falls Ursache bekannt, Einschätzung vornehmen	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
5.2	sonst	$\Delta L_{-x_i}$	0 dB	--	--	0,00	1	0,00	0,00	--	Abweichungen vernachlässigbar. Durch Vorwissen über die technischen Prozesse gehen die Abweichungen gegen Null.

**Anh., Tab. 3** Unsicherheitsanalyse für den Lärmtyp II auf der Grundlage der Messmethode 1  
 – Kontinuierliche Messung über einen Gesamtmeszeitraum (Arbeitsschicht)

**Lärmtyp II:** Zeitlich stark veränderliche Lärmimmission mit einer Schallpegel-Variationsweite  $\Delta L_V = L_{\max} - L_{\min} > 5 \text{ dB(A)}$

Modellgleichung:  $\Delta(L_{\text{eqTYP II}}) = \Delta L_{\text{Messmethode}} + \Delta L_{\text{Messgerät+Cal}} + \Delta L_{\text{Messobjekt}} + \Delta L_{\text{Messumgebung}} + \Delta L_{\text{Messperson}}$

Nr.	Ursache	Größe $X_i$ (3)	Schätzwert $x_i$ (4)	Fehlergrenzen $\Delta x_i$ (5)	Verteilungsfunktion (6)	Standardmessunsicherheit $u(x_i)$ (7)	Sensitivitätskoeffizient $c_i$ (8)	Unsicherheitsbeitrag $c_i \cdot u(x_i) = u_i(y)$ (9)	Varianz $u_i^2(y)$ (10)	Quelle (11)	Bemerkung (12)
<b>1 Messmethode <math>\Delta L_{\text{Messmethode}}</math></b>											
1.1	Kontinuierliche Messung über die Arbeitsschicht	$\Delta L_{\text{Messmeth.}}$	0 dB	nicht bekannt	Annahme normalverteilt	nicht bekannt	1	nicht bekannt	nicht bekannt	--	Durchführung der Messung über eine repräsent. Arbeitsschicht. Methode ist für große Schallpegelvariationsweiten sehr gut geeignet.
<b>2 Messgerät und Kalibrierung <math>\Delta L_{\text{Messgerät}}</math> (gilt für Industrielärm ohne Impulse)</b>											
2.1	Klasse 1	$\Delta L_{\text{LangK1}}$	0 dB	s. Tabelle 6.2	Rechteck	1,00	1	1,00	1,00	Abschn. 6.7	Langzeitmessung
2.2	Klasse 2	$\Delta L_{\text{LangK2}}$	0 dB	s. Tabelle 6.2	Rechteck	1,65	1	1,65	2,72		Langzeitmessung
<b>3 Messobjekt <math>\Delta L_{\text{Messobjekt}}</math></b>											
3.1	Schallfeldänderung	$\Delta L_{\text{Schallfeld}}$	0 dB	--	normal	0,00 *)	1	0,00	0,00	siehe auch Tabelle 4	Betriebsbedingungen sehr instabil. Messzeit $T_M$ 480 min. bzw. eine volle Arbeitsschicht; Damit sind alle zufälligen Zustände erfasst.
3.2	Mikrofonposition	$\Delta L_{\text{Mikro}}$	0 dB	--	normal	1,00	1	1,00	1,00	DIN EN ISO 9612 [5]	Örtliche Abtastung des Schallfeldes durch die Mikrofonposition.

\*)  $u(x_i)$  strebt bei  $n \rightarrow \infty$ ,  $T \rightarrow \infty$  gegen die Standardabweichung ( $\sigma$ ) der Grundgesamtheit. Sie wird hier sehr klein und wird daher Null gesetzt.

Anh., Tab. 3 (Fortsetzung)

Nr.	Ursache	Größe	Schätzwert	Fehlergrenzen	Verteilungsfunktion	Standardmessunsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Varianz	Quelle	Bemerkung
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
<b>4 Messumgebung <math>\Delta L_{\text{Messumgebung}}</math></b>											
4.1	Falls Ursache bekannt, Einschätzung vornehmen	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
4.2	sonst	$\Delta L_{x_i}$	0 dB	--	--	0,00	1	0,00	0,00	--	Zum Teil in $\Delta L_{\text{Messobjekt}}$ und $\Delta L_{\text{Messgerät}}$ enthalten. Untypischer Lärm ist durch eine Festlegung im Messverfahren auszuschließen.
<b>5 Messperson <math>\Delta L_{\text{Messperson}}</math></b>											
5.1	Falls Ursache bekannt, Einschätzung vornehmen	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
5.2	sonst	$\Delta L_{x_i}$	0 dB	--	--	0,00	1	0,00	0,00	--	Abweichungen vernachlässigbar. Durch Vorwissen über die technischen Prozesse gehen die Abweichungen gegen Null.

**Anh., Tab. 4** Unsicherheitsanalyse für den Lärmtyp II auf der Grundlage der Messmethode 2  
 – Kontinuierliche Messung in Teilmesszeiten des Gesamtmesszeitraumes

**Lärmtyp II:** Zeitlich stark veränderliche Lärmimmission mit einer Schallpegel-Variationsweite  $\Delta L_V = L_{\max} - L_{\min} > 5 \text{ dB(A)}$

Modellgleichung:  $\Delta(L_{\text{eqTypII}}) = \Delta L_{\text{Messmethode}} + \Delta L_{\text{Messgerät+Gal}} + \Delta L_{\text{Messobjekt}} + \Delta L_{\text{Messumgebung}} + \Delta L_{\text{Messperson}}$

Nr.	Ursache	Größe	Schätzwert	Fehlergrenzen	Verteilungsfunktion	Standardmessunsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Varianz	Quelle	Bemerkung
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
<b>1 Messmethode <math>\Delta L_{\text{Messmethode}}</math></b>											
	Kontinuierliche Messung in Teilmesszeiten	$\Delta L_{\text{Messmeth.}}$	--	--	--	--	--	--	--	--	Durchführung der Messung über einen repräsentativen Messzeitraum. Ist für große Schallpegelvariationsweiten geeignet.
Wahl einer Messzeit $T_M$											
1.1	15 Minuten	$\Delta L_{15}$	0 dB	--	normal	3,50	1	3,50	12,25	--	Zeitliche Abtastung des Schallfeldes, das eine regellose Zeitstruktur und starke zufallsbedingte Schwankungen aufweist.
1.2	20 Minuten	$\Delta L_{20}$	0 dB	--	normal	3,00	1	3,00	9,00	Lohr u. Reichelt [46]	Berechnung von $u(x_i)$ nach $u(x_i) = U/k$ mit $U$ nach [46] u. $k = 2$
1.3	30 Minuten	$\Delta L_{30}$	0 dB	--	normal	2,50	1	2,50	6,25		
1.4	45 Minuten	$\Delta L_{45}$	0 dB	--	normal	2,00	1	2,00	4,00		
1.5	60 Minuten	$\Delta L_{60}$	0 dB	--	normal	1,50	1	1,50	2,25		
1.6	90 Minuten	$\Delta L_{90}$	0 dB	--	normal	1,00	1	1,00	1,00		
1.7	120 Minuten	$\Delta L_{120}$	0 dB	--	normal	0,50	1	0,50	0,25		
1.8	Messzeit solange wählen, bis sich der $L_{\text{eq}}$ nicht mehr ändert.	$\Delta L_{\text{Messzeit}}$	0 dB	--	normal	0,60 nach Gl. 6.17 $n \geq 100$ , $\Delta L_V \leq 30 \text{ dB}$ nach Gl. 6.19	1	0,60	0,36	Abschnitt 6.6.2	
1.9	480 Minuten	$\Delta L_{480}$	0 dB	--	normal	0,00	1	0,00	0,00	Lohr u. Reichelt [46]	

)  $u(x_i)$  strebt bei  $n \rightarrow \infty$ ,  $T \rightarrow \infty$  gegen die Standardabweichung ( $\sigma$ ) der Grundgesamtheit. Sie wird hier sehr klein und wird daher Null gesetzt.

Anh., Tab. 4 (Fortsetzung)

Nr.	Ursache	Größe	Schätzwert	Fehlergrenzen	Verteilungsfunktion	Standardmessunsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Varianz	Quelle	Bemerkung
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
<b>2 Messgerät und Kalibrierung <math>\Delta L_{\text{Messgerät}}</math> (gilt für Industrielärm ohne Impulse)</b>											
Kurzzeitmessung											
2.1	Klasse 1	$\Delta L_{\text{KurzK1}}$	0 dB	s. Tabelle 6.2	Rechteck	0,59	1	0,59	0,35	Abschn. 6.7	Auswählen, wenn sich die Umgebungsbedingungen in der Messzeit nicht ändern.
2.2	Klasse 2	$\Delta L_{\text{KurzK2}}$	0 dB	s. Tabelle 6.2	Rechteck	0,82	1	0,82	0,68		
Langzeitmessung											
2.3	Klasse 1	$\Delta L_{\text{LangK1}}$	0 dB	s. Tabelle 6.2	Rechteck	1,00	1	1,00	1,00	Abschn. 6.7	Auswählen, wenn in der Messzeit sich die Umgebungsbedingungen, wie z. B. T in °C ändern, wahrscheinlich in einer Arbeitsschicht.
2.4	Klasse 2	$\Delta L_{\text{LangK2}}$	0 dB	s. Tabelle 6.2	Rechteck	1,65	1	1,65	2,72		
<b>3 Messobjekt <math>\Delta L_{\text{Messobjekt}}</math></b>											
3.1	Schallfeldänderung	$\Delta L_{\text{Schallfeld}}$	--	--	--					siehe Zeile 1 $\Delta L_{\text{Messmethode}}$	Betriebsbedingungen sehr instabil.
3.2	Mikrofonposition	$\Delta L_{\text{Mikro}}$	0 dB	--	normal	1,00	1	1,00	1,00	DIN EN ISO 9612 [5]	Örtliche Abtastung des Schallfeldes durch die Mikrofonposition.
<b>4 Messumgebung <math>\Delta L_{\text{Messumgebung}}</math></b>											
4.1	Falls Ursache bekannt, Einschätzung vornehmen	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
4.2	sonst	$\Delta L_{\text{Xi}}$	0 dB	--	--	0,00	1	0,00	0,00	--	Zum Teil in $\Delta L_{\text{Messobjekt}}$ enthalten. Untypischer Lärm ist durch eine Festlegung im Messverfahren auszuschließen.

Anh., Tab. 4 (Fortsetzung)

Nr.	Ursache	Größe	Schätzwert	Fehlergrenzen	Verteilungsfunktion	Standardmessunsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Varianz	Quelle	Bemerkung
(1)	(2)	$X_i$	$x_i$	$\Delta x_i$	(6)	$u(x_i)$	$c_i$	$c_i \cdot u(x_i) = u_i(y)$	$u_i^2(y)$	(11)	(12)
<b>5 Messperson <math>\Delta L_{\text{Messperson}}</math></b>											
5.1	Falls Ursache bekannt, Einschätzung vornehmen	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
5.2	sonst	$\Delta L_{x_i}$	0 dB	--	--	0,00	1	0,00	0,00	--	Abweichungen vernachlässigbar. Durch Vorwissen über die technischen Prozesse gehen die Abweichungen gegen Null.



**Anh., Tab. 5** Unsicherheitsanalyse für den Lärmtyp II auf der Grundlage der Messmethode 3 – Stichprobenmessung im Gesamtmeßzeitraum

**Lärmtyp II:** Zeitlich stark veränderliche Lärmimmission mit einer Schallpegel-Variationsweite  $\Delta L_V = L_{\max} - L_{\min} > 5 \text{ dB(A)}$

Modellgleichung:  $\Delta(L_{\text{eq(TypII)}}) = \Delta L_{\text{Messmethode}} + \Delta L_{\text{Messgerät+Cal}} + \Delta L_{\text{Messobjekt}} + \Delta L_{\text{Messumgebung}} + \Delta L_{\text{Messperson}}$

Nr.	Ursache	Größe $X_i$	Schätzwert $x_i$	Fehlergrenzen $\Delta x_i$	Verteilungsfunktion	Standardmessunsicherheit $u(x_i)$	Sensitivitätskoeffizient $c_i$	Unsicherheitsbeitrag $c_i \cdot u(x_i) = u_i(y)$	Varianz $u_i^2(y)$	Quelle	Bemerkung
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
<b>1 Messmethode <math>\Delta L_{\text{Messmethode}}</math></b>											
	Stichprobenmessung im Gesamtmeßzeitraum		0 dB	nicht bekannt	Annahme normalverteilt	nicht bekannt	1	nicht bekannt	nicht bekannt	--	Mindestens 1 s - $L_{pAeq}$ messen. Die Stichprobenanzahl muss mindestens 30 Messwerte betragen und die Stichprobennahme zu zufälligen Zeiten erfolgen.
<b>2 Messgerät und Kalibrierung <math>\Delta L_{\text{Messgerät}}</math> (gilt für Industrielärm ohne Impulse)</b>											
2.1	Klasse 1	$\Delta L_{\text{KurzK1}}$	0 dB	s. Tabelle 6.2	Rechteck	0,59	1	0,59	0,35	Abschn. 6.7	Kurzzeitmessung
2.2	Klasse 2	$\Delta L_{\text{KurzK2}}$	0 dB	s. Tabelle 6.2	Rechteck	0,82	1	0,82	0,68		Kurzzeitmessung
<b>3 Messobjekt <math>\Delta L_{\text{Messobjekt}}</math></b>											
3.1	Schallfeldänderung	$\Delta L_{\text{Schallfeld}}$	0 dB	--	normal	detailliert berechnen nach Gl. 6.13	1	berechnen	berechnen	Abschnitt 6.6.1	Betriebsbedingungen sehr instabil. Anzahl der Stichproben $n \geq 30$ , Freiheitsgrad = $n - 1$ .
3.2	Schallfeldänderung stark ausgeprägt	$\Delta L_{\text{Schallfeld}}$	--	--	--	2,30 Schätzung $u(x_i)$ -MAX aus $\Delta L_V = 50 \text{ dB}$	1	2,30	5,29	nach Erfahrung selten	Nutzung der Gl. 6.16 u. 6.19 bei $\Delta L_V = 50 \text{ dB}$ und $n \geq 30$
3.3	Mikrofonposition	$\Delta L_{\text{Mikro}}$	0 dB	--	normal	1,00	1	1,00	1,00	DIN EN ISO 9612 [5]	Örtliche Abtastung des Schallfeldes durch die Mikrofonposition.

Anh., Tab. 5 (Fortsetzung)

Nr.	Ursache	Größe	Schätzwert	Fehlergrenzen	Verteilungsfunktion	Standardmessunsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Varianz	Quelle	Bemerkung
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
		$X_i$	$x_i$	$\Delta x_i$		$u(x_i)$	$c_i$	$c_i \cdot u(x_i) = u_i(y)$	$u_i^2(y)$		
<b>4 Messumgebung <math>\Delta L_{\text{Messumgebung}}</math></b>											
4.1	Falls Ursache bekannt, Einschätzung vornehmen	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
4.2	sonst	$\Delta L_{x_i}$	0 dB	--	--	0,00	1	0,00	0,00	--	Zum Teil in $\Delta L_{\text{Messobjekt}}$ enthalten. Untypischer Lärm ist durch eine Festlegung im Messverfahren auszuschließen.
<b>5 Messperson <math>\Delta L_{\text{Messperson}}</math></b>											
5.1	Falls Ursache bekannt, Einschätzung vornehmen	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
5.2	sonst	$\Delta L_{x_i}$	0 dB	--	--	0,00	1	0,00	0,00	--	Abweichungen vernachlässigbar. Durch Vorwissen über die technischen Prozesse gehen die Abweichungen gegen Null.

**Anh., Tab. 6** Unsicherheitsanalyse für den Lärmtyp III auf der Grundlage der Messmethode 2  
 – Kontinuierliche Messung in Teilmesszeiten des Gesamtmeßzeitraumes

**Lärmtyp III:** Zeitlich periodisch veränderliche Lärmimmission mit einer Schallpegel-Variationsweite  $\Delta L_V = L_{\max} - L_{\min} > 5 \text{ dB(A)}$

Modellgleichung:  $\Delta(L_{\text{eqTYP III}}) = \Delta L_{\text{Messmethode}} + \Delta L_{\text{Messgerät+Cal}} + \Delta L_{\text{Messobjekt}} + \Delta L_{\text{Messumgebung}} + \Delta L_{\text{Messperson}}$

Nr.	Ursache	Größe	Schätzwert	Fehlergrenzen	Verteilungsfunktion	Standardmessunsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Varianz	Quelle	Bemerkung
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
<b>1 Messmethode <math>\Delta L_{\text{Messmethode}}</math></b>											
	Kontinuierliche Messung in Teilmesszeiten	$X_i$	$x_i$	$\Delta x_i$	Annahme normalverteilt	nicht bekannt	1	nicht bekannt	nicht bekannt	--	Solange messen bis sich der $L_{pAeqi}$ an der Anzeige nicht ändert, sichere zeitliche Stichprobe gewährleisten.
<b>2 Messgerät und Kalibrierung <math>\Delta L_{\text{Messgerät}}</math> (gilt für Industrielärm ohne Impulse)</b>											
2.1	Klasse 1	$\Delta L_{\text{KurzK1}}$	0 dB	s. Tabelle 6.2	Rechteck	0,59	1	0,59	0,35	Abschn. 6.7	Kurzzeitmessung
2.2	Klasse 2	$\Delta L_{\text{KurzK2}}$	0 dB	s. Tabelle 6.2	Rechteck	0,82	1	0,82	0,68		Kurzzeitmessung
<b>3 Messobjekt <math>\Delta L_{\text{Messobjekt}}</math></b>											
3.1	Schallfeldänderung	$\Delta L_{\text{Schallfeld}}$	0 dB	--	normal	berechnen nach Gl. 6.15 und Gl. 6.19	1	berechnen	berechnen	Abschn. 6.6.2	Betriebsbedingungen sind stabil. Messzeit $T_M$ größer als das Schwankungszeitintervall wählen.
3.2	Mikrofonposition	$\Delta L_{\text{Mikro}}$	0 dB	--	normal	0,5	1	0,5	0,25	DIN EN ISO 3740 [67]	Örtliche Abtastung des Schallfeldes durch die Mikrofonposition.

Anh., Tab. 6 (Fortsetzung)

Nr.	Ursache	Größe	Schätz- wert	Fehler- grenzen	Verteilungs- funktion	Standardmess- unsicherheit	Sensitivitäts- koeffizient	Unsicherheits- beitrag	Varianz	Quelle	Bemerkung
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
<b>4 Messumgebung <math>\Delta L_{\text{Messumgebung}}</math></b>											
4.1	Falls Ursache bekannt, Einschätzung vornehmen	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
4.2	sonst	$\Delta L_{x_i}$	0 dB	--	--	0,00	1	0,00	0,00	--	Zum Teil in $\Delta L_{\text{Messobjekt}}$ enthalten. Untypischer Lärm ist durch eine Festlegung im Messverfahren auszuschließen.
<b>5 Messperson <math>\Delta L_{\text{Messperson}}</math></b>											
5.1	Falls Ursache bekannt, Einschätzung vornehmen	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
5.2	sonst	$\Delta L_{x_i}$	0 dB	--	--	0,00	1	0,00	0,00	--	Abweichungen vernachlässigbar. Durch Vorwissen über die technischen Prozesse gehen die Abweichungen gegen Null.

**Anh., Tab. 7** Unsicherheitsanalyse für den Lärmtyp III auf der Grundlage der Messmethode 3  
 – Stichprobenmessung im Gesamtmeszeitraum

**Lärmtyp III:** Zeitlich periodisch veränderliche Lärmimmission mit einer Schallpegel-Variationsweite  $\Delta L_V = L_{\max} - L_{\min} > 5 \text{ dB(A)}$

Modellgleichung:  $\Delta(L_{\text{eqTYP III}}) = \Delta L_{\text{Messmethode}} + \Delta L_{\text{Messgerät+Cal}} + \Delta L_{\text{Messobjekt}} + \Delta L_{\text{Messumgebung}} + \Delta L_{\text{Messperson}}$

Nr.	Ursache	Größe	Schätzwert	Fehlergrenzen	Verteilungsfunktion	Standardmessunsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Varianz	Quelle	Bemerkung
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
<b>1 Messmethode <math>\Delta L_{\text{Messmethode}}</math></b>											
	Stichprobenmessung im Gesamtmeszeitraum	--	0 dB	nicht bekannt	Annahme normalverteilt	nicht bekannt	1	--	--	--	Mindestens drei Geräuschzyklen zu zufälligen Zeiten messen.
<b>2 Messgerät und Kalibrierung <math>\Delta L_{\text{Messgerät}}</math> (gilt für Industrielärm ohne Impulse)</b>											
2.1	Klasse 1	$\Delta L_{\text{Kurzkl1}}$	0 dB	s. Tabelle 6.2	Rechteck	0,59	1	0,59	0,35	Abschn. 6.7	Kurzzeitmessung
2.2	Klasse 2	$\Delta L_{\text{Kurzkl2}}$	0 dB	s. Tabelle 6.2	Rechteck	0,82	1	0,82	0,68		Kurzzeitmessung
<b>3 Messobjekt <math>\Delta L_{\text{Messobjekt}}</math></b>											
3.1	Schallfeldänderung	$\Delta L_{\text{Schallfeld}}$	0 dB	--	normal	detailliert berechnen nach Gl. 6.13	1	berechnen	berechnen	Abschn. 6.6.1	Betriebsbedingungen instabil. Anzahl der Stichproben $n \geq 3$ , Freiheitsgrad = $n - 1$ .
3.2	Mikrofonposition	$\Delta L_{\text{Mikro}}$	0 dB	--	normal	0,50	1	0,50	0,25	DIN EN ISO 3740 [67]	Örtliche Abtastung des Schallfeldes durch die Mikrofonposition.

Anh., Tab. 7 (Fortsetzung)

Nr.	Ursache	Größe	Schätzwert	Fehlergrenzen	Verteilungsfunktion	Standardmessunsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Varianz	Quelle	Bemerkung
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
<b>4 Messumgebung <math>\Delta L_{\text{Messumgebung}}</math></b>											
4.1	Falls Ursache bekannt, Einschätzung vornehmen	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
4.2	sonst	$\Delta L_{x_i}$	0 dB	--	--	0,00	1	0,00	0,00	--	Zum Teil in $\Delta L_{\text{Messobjekt}}$ enthalten. Untypischer Lärm ist durch eine Festlegung im Messverfahren auszuschließen.
<b>5 Messperson <math>\Delta L_{\text{Messperson}}</math></b>											
5.1	Falls Ursache bekannt, Einschätzung vornehmen	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
5.2	sonst	$\Delta L_{x_i}$	0 dB	--	--	0,00	1	0,00	0,00	--	Abweichungen vernachlässigbar. Durch Vorwissen über die technischen Prozesse gehen die Abweichungen gegen Null.