

DIN ISO 532-1

ICS 17.140.01

Einsprüche bis 2020-02-13

Entwurf

**Akustik –
Verfahren zur Berechnung der Lautheit –
Teil 1: Verfahren nach E. Zwicker
(ISO 532-1:2017, korrigierte Fassung 2017-11);
Text Deutsch und Englisch**

Acoustics –
Methods for calculating loudness –
Part 1: Zwicker method (ISO 532-1:2017, Corrected version 2017-11);
Text in German and English

Acoustique –
Méthodes de calcul d'isophonie –
Partie 1: Methode Zwicker (ISO 532-1:2017, Version corrigée 2017-11);
Texte en allemand et anglais

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2019-12-13 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nals@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN/VDI-Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS), 10772 Berlin, Saatwinkler Damm 42/43, 13627 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 136 Seiten

DIN/VDI-Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS)

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort	3
Nationaler Anhang NA (informativ) Literaturhinweise	4
Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich.....	8
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe	8
4 Festlegung von Eingangssignal und Messgeräteausrüstung	12
5 Verfahren für stationäre Geräusche	13
5.1 Allgemeines.....	13
5.2 Beschreibung des Verfahrens	14
5.3 Berechnung der Lautheit und des Lautstärkepegels.....	18
6 Verfahren für zeitvariante Geräusche.....	20
6.1 Allgemeines.....	20
6.2 Beschreibung des Verfahrens	21
6.3 Rechenalgorithmus	22
6.4 Anleitung zur Bestimmung der Lautheit von zeitvarianten Geräuschen.....	23
7 Angabe der Daten.....	24
Anhang A (normativ) Numerische Einzelheiten und Programmcode für die Berechnung der Lautheit von stationären und zeitvarianten Geräuschen (Prüfimplementierung)	25
A.1 Hintergrund	25
A.2 Filterkoeffizienten von Terzbandfiltern.....	25
A.3 Einzelheiten des Verfahrens nach E. Zwicker	31
A.4 Programm zur Berechnung der Lautheit nach den Verfahren für stationäre Geräusche und für zeitvariante Geräusche	39
Anhang B (normativ) Prüfsignal zur Validierung der Implementierung	60
B.1 Hintergrund	60
B.2 Terzpegel als Eingang für die stationäre Lautheit.....	60
B.3 Synthetische Signale für stationäre Lautheit	60
B.4 Synthetische Signale für die zeitvariante Lautheit.....	61
B.5 Technische Signale für die zeitvariante Lautheit	61
Anhang C (informativ) Grafische Benutzeroberfläche für die Berechnung der Lautheit von stationären und zeitvarianten Geräuschen	63
Anhang D (informativ) Anleitung für die Bestimmung der Lautheit bei Verwendung von Kopfhörermikrofonen	68
Anhang E (informativ) Erwägungen zur Unsicherheit.....	69
Literaturhinweise	72

Nationales Vorwort

Dieses Dokument enthält die deutsche Übersetzung der Internationalen Norm ISO 532-1:2017, korrigierte Fassung 2017-11, die im Technischen Komitee ISO/TC 43 „Acoustics“ erarbeitet wurde, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 001-01-02-08 UA „Psychoakustische Messtechnik“ im DIN/VDI-Normenausschuss Akustik, Lärmminderung und Schwingungstechnik (NALS).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Für die in diesem Dokument zitierten internationalen Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 226:2003	siehe	DIN ISO 226:2006-04
ISO 3740	siehe	DIN EN ISO 3740
ISO 9612	siehe	DIN EN ISO 9612
ISO 11200	siehe	DIN EN ISO 11200
ISO 80000-8:2007	siehe	DIN EN ISO 80000-8:2008-01
IEC 61260-1:2014	siehe	DIN EN 61260-1:2014-10
IEC 61672-1:2013	siehe	DIN EN 61672-1:2014-07
IEC/TS 60318-7	siehe	DIN IEC/TS 60318-7 (DIN SPEC 45608)

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 61260-1:2014-10, *Elektroakustik — Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven — Teil 1: Anforderungen (IEC 61260-1:2014); Deutsche Fassung EN 61260-1:2014*

DIN EN 61672-1:2014-07, *Elektroakustik — Schallpegelmesser — Teil 1: Anforderungen (IEC 61672-1:2013); Deutsche Fassung EN 61672-1:2013*

DIN EN ISO 3740, *Akustik — Bestimmung der Schallleistungspegel von Geräuschquellen — Leitlinien zur Anwendung der Grundnormen*

DIN EN ISO 9612, *Akustik — Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz — Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 (Ingenieurverfahren)*

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*

DIN EN ISO 80000-8:2008-01, *Größen und Einheiten — Teil 8: Akustik (ISO 80000-8:2007, berichtigt 2007-08-15); Deutsche Fassung EN ISO 80000-8:2007*

DIN IEC/TS 60318-7 (DIN SPEC 45608), *Akustik — Simulatoren des menschlichen Kopfes und Ohres — Teil 7: Kopf- und Rumpfsimulator für Messungen an Hörgeräten*

DIN ISO 226:2006-04, *Akustik — Normalkurven gleicher Lautstärkepegel (ISO 226:2003)*

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsorganisationen (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Themen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Für eine Erläuterung des freiwilligen Charakters von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT) berücksichtigt, siehe www.iso.org/iso/foreword.html

Dieses Dokument wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 43, *Acoustics* erarbeitet.

Diese erste Ausgabe ersetzt ISO 532:1975, die technisch überarbeitet wurde.

Eine Auflistung aller Teile der Normenreihe ISO 532 ist auf der ISO-Internetseite abrufbar.

Diese berichtigte Fassung von ISO 532-1:2017 enthält die folgende Berichtigung:

— Tabelle A.9 wurde berichtigt.

Einleitung

Lautheit und Lautstärkepegel sind zwei Wahrnehmungsattribute des Schalls, die die absolute und relative Empfindung der von einer Person unter bestimmten Hörbedingungen wahrgenommenen Schallstärke beschreiben. Aufgrund der bei verschiedenen Menschen unvermeidlichen individuellen Unterschiede sind sowohl Lautheit als auch Lautstärkepegel ihrem Wesen nach statistische Schätzfunktionen, die durch ihre jeweiligen Lagemaßzahlen und Streuungsmaße charakterisiert werden, die für eine bestimmte Stichprobe der Gesamtbevölkerung bestimmt werden.

Das Ziel der Normenreihe ISO 532 ist, auf physikalischen Eigenschaften des Schalls basierende Rechenverfahren zur Abschätzung der Lautheit und des Lautstärkepegels von Geräuschen festzulegen, die von Personen mit otologisch normalem Hörvermögen unter bestimmten Hörbedingungen wahrgenommen werden. Jedes dieser Verfahren liefert Einzelwerte, die in vielen wissenschaftlichen und technischen Anwendungen zur Abschätzung der wahrgenommenen Lautheit und des Lautstärkepegels von Geräuschen genutzt werden können, ohne für jede dieser Anwendungen gesonderte Untersuchungen mit menschlichen Beobachtern durchführen zu müssen. Da es sich bei der Lautheit um eine Wahrnehmungsgröße handelt, die von Mensch zu Mensch variieren kann, stellt jeder rechnerisch erhaltene Lautheitswert nur einen Schätzwert für die durchschnittliche Lautheit dar, die von einer Gruppe von Individuen mit otologisch normalem Hörvermögen wahrgenommen wird.

ISO 532-1 und ISO 532-2 legen zwei verschiedene Verfahren zur Berechnung der Lautheit fest, die für gegebene Geräusche zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Aufgrund der Tatsache, dass sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine allgemeine Präferenz für das eine oder andere Verfahren angeben lässt, obliegt es dem Anwender, das für die gegebene Situation am besten geeignete Verfahren auszuwählen. Um die Auswahl zu erleichtern, werden im Folgenden einige wesentliche Merkmale jedes dieser Verfahren beschrieben.

Das erste Verfahren dieses Dokuments beschreibt die Berechnung der Lautheit und des Lautstärkepegel von stationären Geräuschen und basiert auf DIN 45631:1991. Das zweite Verfahren dieses Dokuments deckt die Vorgehensweisen für die Berechnung der Lautheit und des Lautstärkepegels von willkürlichen nichtstationären (zeitvarianten) Geräuschen ab, was die stationären Geräusche als Sonderfall mit einschließt, und basiert auf DIN 45631/A1:2010.

Dieses Dokument enthält außerdem einen Programmcode für beide Verfahren, der zu Schätzwerten für die Lautheit und den Lautstärkepegel von stationären und zeitvarianten Geräuschen führt. Darüber hinaus enthält es ein ausführbares Computerprogramm für beide Verfahren. Die angewendete Software ist für die Berechnung von Lautheitswerten, in Bezug auf die sich andere Implementierungen mit festgelegten Toleranzen überprüfen lassen, normativ und stellt dem Anwender zusätzliche Funktionen zur Verfügung.

Das im vorliegenden Dokument festgelegte Verfahren für stationäre Geräusche weicht von dem in der vorigen Ausgabe ISO 532:1975 enthaltenen Verfahren B insofern leicht ab, als es Berichtigungen für tiefe Frequenzen festlegt und die Beschreibung des Ansatzes auf ausschließlich numerische Anweisungen beschränkt, was eine eindeutige Softwarebeschreibung erlaubt. Aus Kontinuitätsgründen entspricht das im vorliegenden Dokument angegebene Verfahren ISO 226:1987 und nicht der jüngeren, überarbeiteten Fassung ISO 226:2003.

Aufbauend auf dem allgemeinen Konzept des Verfahrens für stationäre Geräusche umfasst das Verfahren für zeitvariante Geräusche eine Verallgemeinerung des von E. Zwicker entwickelten Ansatzes auf willkürliche, nichtstationäre Geräusche. Diese Verallgemeinerung verträgt sich bei Anwendung auf stationäre Geräusche naturgemäß mit dem Verfahren für stationäre Geräusche insofern, als sich damit die gleichen Lautheitswerte ergeben wie bei dem Verfahren für stationäre Geräusche.

Das in ISO 532-2 festgelegte Moore-Glasberg-Verfahren ist auf stationäre Geräusche begrenzt und auf Töne, Breitbandgeräusche und komplexe Klänge mit scharflinigen Spektralkomponenten anwendbar. Das in ISO 532-2 festgelegte Verfahren unterscheidet sich von den in ISO 532:1975 festgelegten Verfahren. Das in ISO 532:1975 festgelegte Verfahren A (Lautheit nach Stevens) wurde gestrichen, weil es eher selten angewendet wurde und seine Vorhersagen bei Klängen mit starken tonalen Komponenten nicht ausreichend genau waren. Das in ISO 532-2 beschriebene Verfahren erhöht zudem die Präzision der für den Bereich der tiefen Frequenzen berechneten Lautheit und ermöglicht Lautheitsberechnungen auch unter Bedingungen, in denen beide Ohren jeweils unterschiedliche Geräusche empfangen. Dieses Verfahren sorgt erwiesenermaßen für eine gute Anpassung an die in ISO 226:2003 festgelegten Kurven gleicher Lautstärkepegel und an die in ISO 389-7:2005 festgelegte Bezugshörschwelle.

ANMERKUNG Die Geräuschemissionen/-immissionen von Betriebsmitteln oder Maschinen können auch anhand anderer Größen, die in verschiedenen Internationalen Normen festgelegt sind (siehe z. B. ISO 1996-1, ISO 3740, ISO 9612 und ISO 11200), beurteilt werden.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt zwei Verfahren für die Abschätzung der Lautheit und des Lautstärkepegels von Geräuschen fest, die von otologisch normalen Personen unter bestimmten Hörbedingungen wahrgenommen werden. Das erste Verfahren ist für stationäre Geräusche und das zweite Verfahren für willkürliche, nichtstationäre (zeitvariante) Geräusche, einschließlich stationärer Geräusche als Sonderfall, vorgesehen.

Beide Verfahren sind auf jedes beliebige Geräusch anwendbar, das mit Hilfe eines Mikrofons als Einkanalmessung oder als Mehrkanalmessung, z. B. mit Hilfe eines Kunstkopfes (siehe Anhang D), aufgezeichnet wurde. Da die meisten wichtigen technischen Geräusche zeitvariant sind, ist ein Modell der zeitvarianten Lautheit vorzuziehen.

Beide Verfahren basieren auf dem von E. Zwicker aufgestellten Algorithmus [14]. Das Verfahren für stationäre Geräusche ist aus Kontinuitätsgründen angegeben und bietet die Möglichkeit der Verwendung von gemessenen Terzbandpegeln als Eingabe. Bei dem allgemeineren Verfahren für willkürliche Geräusche wird das jeweilige Lautheitsprofil anhand von gemessenen Zeitsignalen durch Anwendung eines Signalverarbeitungsmodells berechnet, das sich direkt auf physiologische und psychologische Eigenschaften des menschlichen Hörapparats bezieht. Die Lautheit wird aus dem Profil der spezifischen Lautheit berechnet. Dieses Verfahren bietet erwiesenermaßen eine gute Anpassung an die Ergebnisse vieler Lautheitsversuche mit synthetischen und technischen Geräuschen.

Für die vollautomatisierte Anwendung des Verfahrens sind weder Vorkenntnisse über die Eigenschaften des Geräusches (z. B. Breitband- oder Schmalbandgeräusche, tonaler Anteil) noch Interaktionen des Anwenders bzw. Benutzers erforderlich.

Die Bewertung der schädlichen Wirkung von Schallereignissen ist nicht Gegenstand des vorliegenden Dokuments.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 61260-1:2014, *Electroacoustics — Octave-band and fractional-octave-band filters — Part 1: Specifications*

IEC 61672-1:2013, *Electroacoustics — Sound level meters — Part 1: Specifications*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <http://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>

3.1

otologisch normale Person

Person in normalem Gesundheitszustand, die frei von allen Anzeichen oder Symptomen einer Ohrenerkrankung ist, deren Gehörgänge nicht von Cerumen verschlossen sind und die bisher keiner übermäßigen Lärmeinwirkung ausgesetzt war, keine möglicherweise ototoxischen Medikamente eingenommen oder familiär bedingten Hörverlust erlitten hat

[QUELLE: ISO 226:2003, 3.1]

3.2

Schalldruckpegel

L_p

10-facher dekadischer Logarithmus des Verhältnisses des Quadrats des Schalldrucks p zum Quadrat eines Bezugswertes p_0 , ausgedrückt in Dezibel

$$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} \text{ dB}$$

wobei der Bezugswert p_0 20 µPa beträgt

Anmerkung 1 zum Begriff: Wegen praktischer Begrenzungen der Messgeräte ist p^2 immer das Quadrat eines frequenzbewerteten, bandbegrenzten oder zeitbewerteten Schalldrucks. Falls eine spezielle Frequenz- und Zeitbewertung nach IEC 61672-1 und/oder spezielle *Frequenzbänder* (3.3) angewendet wird bzw. werden, sollte dies durch geeignete weitere Indizes am Formelzeichen angegeben werden; so bezeichnet z. B. $L_{p,AS}$ den A-bewerteten Schalldruckpegel mit einer Zeitbewertung S (für slow = langsam). Frequenzbewertungen, wie z. B. die A-Bewertung, sollten nicht angewendet werden, wenn es um die Festlegung von Schalldruckpegeln für die Zwecke der Berechnung der *Lautheit* (3.18) nach dem hier festgelegten Verfahren geht.

Anmerkung 2 zum Begriff: Diese Definition stimmt technisch mit der in ISO 80000-8:2007, 8-22 angegebenen überein.

3.3

Frequenzband

zusammenhängender Bereich von Frequenzen, die zwischen zwei festgelegten Grenzfrequenzen liegen

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein Frequenzband ist durch zwei Werte gekennzeichnet, die seine Lage im Frequenzspektrum festlegen, z. B. seine untere und seine obere Grenzfrequenz.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Frequenz wird in Hz angegeben.

[QUELLE: IEC 60050-702:1992, 702-01-02]

3.4

Filter

Gerät oder mathematische Operation, das bzw. die im Falle der Anwendung auf ein komplexes Signal Energie von Signalkomponenten bestimmter Frequenzen durchlässt, während es/sie die Energie von Signalkomponenten aller anderen Frequenzen wesentlich dämpft

3.5

Grenzfrequenz

tiefste (f_l) oder höchste (f_h) Frequenz, jenseits der die Antwort des *Filters* (3.4) auf ein sinusförmiges Signal –3 dB in Bezug auf die höchste zwischen f_l und f_h gemessene Antwort nicht überschreitet

3.6

Bandpassfilter

Bandpass

Filter (3.4), das Signalenergie innerhalb eines bestimmten *Frequenzbandes* (3.3) durchlässt und den größten Teil der Signalenergie außerhalb dieses Frequenzbandes abweist

3.7

Filterbandbreite

Δf

Differenz zwischen f_h und f_l für ein *Bandpassfilter* (3.6)

3.8

Terzband

Frequenzband (3.3) mit der Mittenfrequenz f_T und einer Breite von einer Dritteloktave

Anmerkung 1 zum Begriff: Zur Festlegung der Mittenfrequenz im Sonderfall eines Terzbandes wird anstelle des Index c der Index T verwendet.

Anmerkung 2 zum Begriff: Breite einer Dritteloktave, wie in IEC 61260-1 festgelegt.

3.9

Bandsperfilter

Filter (3.4), das Signalenergie innerhalb eines bestimmten *Frequenzbandes* (3.3) abweist und den größten Teil der Signalenergie außerhalb dieses Frequenzbandes durchlässt

Anmerkung 1 zum Begriff: Schmalbandsperfilter werden auch als Kerbfilter bezeichnet.

3.10

Terzbandpegel

L_T

Schalldruckpegel (3.2) eines in einem *Frequenzband* (3.3) von der Breite einer Dritteloktave enthaltenen Geräusches

3.11

Geräuschspektrum

Darstellung der Stärken (und in einigen Fällen auch der Phasen) der Komponenten eines komplexen Geräusches in Abhängigkeit von der Frequenz

3.12

Frequenzgruppe

Frequenzgruppenfilter

Filter (3.4) innerhalb der menschlichen Cochlea, das die Frequenzauflösung des Hörapparats mit Eigenschaften beschreibt, die üblicherweise anhand der Ergebnisse von Maskierungsversuchen abgeschätzt werden

3.13

Frequenzgruppenbreite

Bandbreite einer *Frequenzgruppe* (3.12)

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Werte der Frequenzgruppenbreite in Hz entsprechen den in [22] festgelegten Werten.

Anmerkung 2 zum Begriff: Jede Frequenzgruppe hat eine Breite von einer Einheit auf der *Tonheitsskala* (3.14).

3.14

Tonheitsskala

Frequenzskalentransformation, die so erfolgt, dass ein Frequenzanstieg gleich einer *Frequenzgruppe* (3.13) zu einem Anstieg von einer Einheit auf der Tonheitsskala führt

Anmerkung 1 zum Begriff: Frequenzen auf der Tonheitsskala werden in Bark angegeben.

BEISPIEL Der Wert der Frequenzgruppe für eine Mittenfrequenz von 1 000 Hz beträgt näherungsweise 160 Hz, sodass ein Anstieg der Frequenz von 920 Hz auf 1 080 Hz einem Schritt von einem Bark entspricht.

3.15

Frequenzgruppenpegel

L_{CB}

Schalldruckpegel (3.2) eines in einer *Frequenzgruppe* (3.12) enthaltenen Geräusches

3.16

Lautstärkepegel

Schalldruckpegel (3.2) einer frontal einfallenden, sinusförmigen, ebenen und binaural dargestellten Welle mit einer Frequenz von 1 000 Hz, der von *otologisch normalen Personen* (3.1) als gleich laut wie das gegebene Geräusch beurteilt wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Lautstärkepegel wird in Phon angegeben.

3.17

rechnerischer Lautstärkepegel

L_N

Lautstärkepegel (3.16), der nach der Vorgehensweise eines Vorhersagemodells berechnet wird

3.18

Lautheit

wahrgenommene Stärke eines Geräusches, die in Abhängigkeit von den akustischen Eigenschaften des Geräusches und den spezifischen Hörbedingungen von *otologisch normalen Personen* (3.1) geschätzt wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Lautheit wird in Sone angegeben.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Lautheit ist in erster Linie eine Funktion des *Schalldruckpegels* (3.2), obgleich sie auch von der Frequenz, der Wellenform, der Bandbreite und der Dauer des betreffenden Geräusches abhängt.

Anmerkung 3 zum Begriff: Ein Sone ist die Lautheit eines Geräusches mit einem *Lautstärkepegel* (3.16) von 40 phon.

Anmerkung 4 zum Begriff: Ein Geräusch, das doppelt so laut wie ein anderes Geräusch ist, wird durch Verdopplung der Sone-Zahl beschrieben.

3.19

rechnerische Lautheit

N

Lautheit (3.18), die nach der Vorgehensweise eines Vorhersagemodells berechnet wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Die rechnerische Lautheit wird mit N_F oder N_D bezeichnet und in Sone angegeben. Die Buchstaben F und D zeigen an, dass die Berechnung entweder von einem Einfall des Schalls im Freifeld (F) oder von einem Einfall im Diffusfeld (D) ausgeht.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die rechnerische Lautheit entspricht der Lautheit, die von einem Durchschnitt einer Gruppe von Personen mit otologisch normalem Hörvermögen wahrgenommen werden würde, deren Köpfe in der Position des Mikrofons zentriert sind. Sie entspricht dem diotischen Hören (an beiden Ohren das gleiche Geräusch).

3.20

spezifische Lautheit

N'

Lautheit (3.18), die über ein *Frequenzband* (3.3) mit der Bandbreite einer *Frequenzgruppe* (3.12) um die betreffende Frequenz herum erzeugt wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Die spezifische Lautheit wird in Sone/Bark angegeben.

Anmerkung 2 zum Begriff: Diese Definition und die hier angegebene Einheit unterscheiden sich von den Angaben in ISO 532-2.

3.21

Perzentil-Lautheit

N_X

Lautheit (3.18), die in $X\%$ des Messzeitraums erreicht oder überschritten wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Perzentil-Lautheit wird in Sone angegeben.

4 Festlegung von Eingangssignal und Messgeräteausrüstung

Das Eingangssignal wird mit Hilfe eines Schallerfassungssystems gemessen, das mindestens ein Mikrofon, einen Vorverstärker und einen Verstärker umfasst. Die Messgeräteausrüstung muss, soweit möglich, die in IEC 61672-1:2013 für Klasse 1 festgelegten Anforderungen erfüllen. Die Wellenform des Zeitsignals wird mit Hilfe eines A/D-Wandlers abgetastet (gesampelt). Bei der in A.4 dargestellten Prüfimplementierung ist eine Abtastrate von 48 kHz erforderlich. Sollte das Eingangssignal in einer anderen Abtastrate vorliegen, so ist die Abtastrate in 48 kHz zu konvertieren. Um die Anwendung zu erleichtern, wird zusätzlich eine Quelldatei zur Verfügung gestellt, die einen Algorithmus für das Up-Sampling von Signalen mit Abtastraten von 32 kHz oder 44,1 kHz enthalten (siehe '//BLOCK Resampling').

Zur Vereinfachung wurde der Programmcode so erweitert, dass er nun die Verwendung von Zeitsignalen in Form von WAVE-Dateien für den Algorithmus zur Berechnung der Lautheit ermöglicht. Die Daten können im 16-Bit-Integer- oder im 32-Bit-Float-Format vorliegen (korrekte Schalldruckwerte, keine normalisierten Daten). Im Falle eines 16-Bit-Integer-Formats müssen eine geeignete Kalibrierdatei und der entsprechende Kalibrierwert angegeben werden. Die entsprechenden Algorithmen sind ebenfalls in der zusätzlichen Quelldatei enthalten.

Die Art des Schallfelds [Freifeld (F) oder Diffusfeld (D)] muss festgelegt werden.

Die Terzband-Schalldruckpegel werden mit Hilfe von Terzbandfiltern der Klasse 1 nach IEC 61260-1:2014 mit Mittenfrequenzen, die den gesamten Bereich von 25 Hz bis 12,5 kHz abdecken, bestimmt. Um Unsicherheiten der Lautheitsberechnung zu verringern, werden Filterkoeffizienten zur Verfügung gestellt (A.2). Die Terzbandfilter sind als Tschebyscheff-Filter 6. Ordnung mit drei Stufen 2. Ordnung ausgelegt. Diese Filter sind auf eine Dämpfung von 20 dB bei den Mittenfrequenzen der angrenzenden Bänder optimiert (bei 12,5 kHz wird nur das untere Band betrachtet). Das bedeutet, dass z. B. ein 1-kHz-Ton mit einem Schalldruckpegel von 70 dB bei unterschiedlichen Mittenfrequenzen folgende Pegel erzeugt: 50 dB bei 800 Hz, 70 dB bei 1 kHz und 50 dB bei 1,25 kHz.

Das Verfahren für stationäre Geräusche bietet auch die Möglichkeit der Verwendung von Terzbandpegeln als Eingang, die mit Hilfe eines Schallpegelmessers der Klasse 1 nach IEC 61672-1:2013 und eines Filters der Klasse 1 nach IEC 61260-1:2014 gemessen wurden.

ANMERKUNG Ein Softwarepaket einschließlich der Auflistung des Programmcodes steht unter <http://standards.iso.org/iso/532/-1/ed-1/en> gratis zum Download bereit.

5 Verfahren für stationäre Geräusche

5.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt wird ein Verfahren für die Berechnung der Lautheit und des Lautstärkepegels von stationären Geräuschen mit Hilfe objektiver Messdaten und eines von E. Zwicker und seinen Kollegen entwickelten Rechenverfahrens festgelegt [14]. Die errechneten Daten ermöglichen es, die Lautheit festzulegen und somit unterschiedliche stationäre Geräusche quantitativ nach der jeweils erwarteten wahrgenommen Lautheit zu bewerten. Diese Vorgehensweise gilt für alle stationären Geräusche.

Bei dem im vorliegenden Dokument angegebenen Verfahren für stationäre Geräusche handelt es sich um eine Aktualisierung des in ISO 532:1975 angegebenen Verfahrens B, die eine modifizierte Behandlung der Energie von tiefen Frequenzen zur Verfügung stellt. Im Gegensatz zu den grafischen Verfahren basiert die Berechnung auf einem algorithmischen Ansatz. Die modifizierte Behandlung von Frequenzen unter 300 Hz folgt strikt dem in DIN 45631:1991 angegebenen Ansatz, der zur Verbesserung der Grenzabweichung der rechnerisch erhaltenen Lautheit eingeführt wurde. Seither hat diese modifizierte Version weitreichende Anwendung gefunden und somit frühere Anwendungen von ISO 532:1975, Verfahren B häufig ersetzt. Sie lässt sich daher als unmittelbare Fortsetzung des häufig angewendeten Verfahrens nach E. Zwicker ansehen.

Das Ziel größtmöglicher Kontinuität verhinderte alle sonstigen Änderungen, weil der Vorteil einiger geringfügiger Anpassungen als geringer als der Verlust an Kontinuität und Vergleichbarkeit der Daten angesehen wurde. Aus Kontinuitätsgründen entspricht das im vorliegenden Dokument angegebene Verfahren ISO 226:1987 und nicht der jüngeren, überarbeiteten Fassung ISO 226:2003.

Die Vorgehensweise besteht in einer bestimmten Abfolge von Schritten. Für eine genaue Festlegung der einzelnen Schritte wird der Anwender auf eine ausführliche Beschreibung in 5.2 und auf den in A.4 angegebenen Programmcode verwiesen. Beide Beschreibungen der Vorgehensweise werden bereitgestellt, um das Verständnis der Vorgehensweise zu erleichtern. Es lässt sich vorhersehen, dass Anwender, die die Lautheit nach dem Verfahren für stationäre Geräusche zu berechnen wünschen, eine Implementierung des Algorithmus, der durch das in A.4 angegebene Computerprogramm zur Verfügung gestellt wird, oder andere Implementierungen in Übereinstimmung mit den im nachstehenden Absatz angegebenen Toleranzen nutzen werden.

Die in Anhang A angegebene Implementierung muss als das Prüfverfahren angewendet werden, gegen das andere Implementierungen zu prüfen sind, um die Übereinstimmung mit dem vorliegenden Dokument festzustellen.

Jede Implementierung ist zulässig, sofern deren Rechenwerte der spezifischen Lautheit für sämtliche der in B.2 und B.3 angegebenen stationären Prüfsignale

- um höchstens $\pm 5\%$ von den von der Prüfimplementierung errechneten spezifischen Lautheitswerten oder um höchstens $\pm 0,1$ sone/Bark abweichen; und wenn
- die Abweichung der Gesamtlautheit höchstens $\pm 5\%$ oder $\pm 0,1$ sone beträgt.

Jeder Implementierungsanbieter muss eine Erklärung der Konformität mit dem vorliegenden Dokument bereitstellen, in der die bei Verwendung der in Anhang B angegebenen Prüfsignale erhaltenen Ergebnisse angegeben sind, z. B. als Teil des für die betreffende Lösung bereitgestellten Benutzerhandbuchs. Um die Anwendung zu erleichtern, werden die Prüfsignale und die Tabellen der Ergebnisse der Prüfimplementierung (einschließlich der Toleranzen) elektronisch (als WAVE- und EXCEL-Dateien) zur Verfügung gestellt. Eine Modifizierung des Prüfsignals ist nicht zulässig.

ANMERKUNG Ein Softwarepaket einschließlich der WAVE- und EXCEL-Dateien steht unter <http://standards.iso.org/iso/532/-1/ed-1/en> gratis zum Download bereit.

5.2 Beschreibung des Verfahrens

Das Verfahren zur Berechnung der Lautheit umfasst drei Schritte. Diese Schritte stellen ein Mittel für die Zusammenfassung und Umrechnung der Terzbandpegel zur Verfügung, mit deren Hilfe sich der Gesamtlautstärkepegel erhalten lässt. Diese Schritte sind im Folgenden beschrieben und werden durch das in Bild 1 gezeigte Blockdiagramm veranschaulicht. Zur näheren Erläuterung wird ein Beispiel eines Fabrikgeräuschs in einem Diffusschallfeld vorgestellt (siehe Bild 2). Obgleich auf der Abszisse Grenz- bzw. Mittenfrequenzen aufgetragen werden, ist Bild 2 auf die Tonheit skaliert. In jedem Terzband sind „Leitern“ sichtbar, deren „Sprossen“ mögliche Werte der jeweiligen Terzbandpegel darstellen.

Schritt 1

Dieser Schritt trägt der Tatsache Rechnung, dass der menschliche Hörapparat bei tiefen Frequenzen unterhalb von 300 Hz weniger empfindlich ist als bei höheren Frequenzen. Dies erfolgt, indem die jeweiligen Terzbandpegel vor der Aufnahme in das in Bild 2 dargestellte Diagramm entsprechend abgesenkt werden. Die Einzelheiten dieser Korrekturen finden sich in Tabelle A.3.

Schritt 2

Eine Annäherung an Frequenzgruppen durch Terzbänder ist nur bei Frequenzen oberhalb von etwa 300 Hz annehmbar. Bei tieferen Frequenzen sind Terzbänder kleiner als die Frequenzgruppen, weswegen zwei oder mehr Terzbänder addiert werden müssen, um eine Näherung an die Frequenzgruppen zu erhalten. Dies ist bei allen bewerteten Terzbändern zwischen 20 Hz und 90 Hz ($L_{CB'1}$), bei den drei Terzbändern zwischen 90 Hz und 180 Hz ($L_{CB'2}$) und bei den beiden Terzbändern zwischen 180 Hz und 280 Hz ($L_{CB'3}$) der Fall. In diesen Fällen muss eine Annäherung an den Frequenzgruppenpegel durch Leistungssummation in den gegebenen Terzbändern vorgenommen werden. Die in Bild 2 fett dargestellten waagerechten Linien mit der Breite von etwa einer Frequenzgruppe bei tiefen Mittenfrequenzen wurden auf diese Weise anhand der kleineren, waagerechten, dünnen Balken, die den gemessenen Terzbandpegeln entsprechen, erhalten.

Schritt 3

Vor der Aufnahme der berichtigten Terzbandpegel in das Diagramm (zwecks Umwandlung der Pegel in die entsprechende Kernlautheit, siehe A.3) muss festgestellt werden, ob das Spektrum unter Diffusfeld- oder Freifeldbedingungen erhalten wurde. In dem in Bild 2 dargestellten Beispiel erfolgte dies durch Verwendung der entsprechenden Leiterstruktur, die bestimmten Lautheitswerten Spektralwerte zuweist. ISO 532:1975 und DIN 45631:1991 enthielten grafische Darstellungen unterschiedlicher Leiterstrukturen für einen großen Bereich von Terzbandpegeln im Diffus- oder Freifeld. In der Praxis werden die entsprechenden Werte der Leiterstruktur gegenwärtig jedoch in Zahlentabellen festgelegt. Zur Vereinfachung und Erleichterung der Anwendung verwendet das vorliegende Dokument eine C-Implementierung des Algorithmus anstelle spezieller Tabellen zur Festlegung aller numerischen Zuordnungen. Zur Festlegung des angewendeten Algorithmus sind die Buchstaben „D“ für Diffusfeld- und „F“ für Freifeldbedingungen zu verwenden.

Danach wird bei jedem Frequenzband ein Anstieg hin zur höheren Frequenzgruppe addiert, und die Fläche unterhalb der Verteilung der spezifischen Lautheit wird summiert. Der spezifische Wert des zu addierenden Anstiegs ist von den jeweiligen Terzbandpegeln und Mittenfrequenzen abhängig. Auch hierfür lassen sich die detaillierten Angaben den oben erwähnten grafischen Darstellungen bzw. den in A.3 enthaltenen Tabellen entnehmen. Nach Eingabe der berichtigten Terzbandpegel in das Diagramm beginnt das Profil der spezifischen Lautheit mit einem vertikalen Anstieg auf den gemessenen Terzbandpegel, bleibt dann auf dem dem betreffenden Terzbandpegel entsprechenden Hauptwert und fällt anschließend mit einem bestimmten Steigungsmaß ab, es sei denn, der Pegel ist im nächsten Terzband höher; in diesem Falle steigt das Profil vertikal auf den dem nächsten Terzband entsprechenden Pegel an. Sowohl das Terzbandspektrum als auch das Lautheitsprofil werden in dem in Bild 2 dargestellten Diagramm in Form durchgezogener Linien hervorgehoben.

Wenn der nächste Terzbandpegel niedriger ist, folgt die Verringerung der spezifischen Lautheit hin zu höheren Mittenfrequenzen den gestrichelten Linien, entsprechend dem oberen Anstieg. Auf diese Weise wird das als „Lautheitsprofil“ abgekürzte Profil der endgültigen spezifischen Lautheit über der Tonheit bestimmt und durch die höchsten, fett durchgezogenen Linien in Bild 2 angezeigt. Bei Schmalbandgeräuschen trägt dieser obere Anstieg in erheblichem Maße zur Gesamtlautheit, d. h. zur Gesamtfläche unterhalb der Kurve, bei. Daher trägt er speziell zur Gesamtlautheit von Sinustönen bei. Bild 2 zeigt mit der punktierten Linie ein Beispiel für einen 1-kHz-Ton mit einem Schalldruckpegel von 70 dB. Im Allgemeinen zeigen Terzbandfilter ein Übersprechen in Richtung benachbarter Filter von annähernd –20 dB. Das bedeutet, dass ein 1-kHz-Ton mit einem Schalldruckpegel von 70 dB bei unterschiedlichen Mittenfrequenzen folgende Pegel erzeugt: 50 dB bei 800 Hz, 70 dB bei 1 kHz und 50 dB bei 1,25 kHz. Daher nimmt die Steilheit des unteren Anstiegs des Lautheitsprofils ab.

Die durchgezogene Kurve in Bild 2 zeigt das Lautheitsprofil eines Fabrikgeräuschs. Die resultierende Fläche erstreckt sich von tiefen bis zu hohen Frequenzen. Sie wird von der nach oben zeigenden Geraden auf der linken und rechten Seite des Gesamtdiagramms und von der horizontalen unteren Abszisse begrenzt. Die Fläche innerhalb dieser Grenzen ist schraffiert dargestellt. Um diese Fläche quantitativ zu berechnen, wird eine rechteckige Fläche gleichen Inhalts gezeichnet, deren Basis die Breite des Diagramms ist. Die Höhe dieses Rechtecks ist ein Maß für die Gesamtfläche, die durch Schattierung von links oben nach rechts unten dargestellt ist. Anhand dieser Höhe (der Strich-Punkt-Linie) lässt sich die Lautheit oder der Lautstärkepegel aus den Skalen auf der rechten oder linken Seite des Diagramms ablesen. Aus dem in Bild 2 dargestellten Diffusfeld-Beispiel lassen sich eine rechnerische Lautheit N_D von 24 sone und ein entsprechender Lautstärkepegel $L_{N,D}$ von 86 phon entnehmen. Der gemessene Schall hat ein vergleichsweise breites Spektrum. Der Abstand zwischen dem gemessenen Schalldruckpegel von 73 dB oder dem A-bewerteten Schalldruckpegel von 68 dB einerseits und dem rechnerisch erhaltenen Lautstärkepegel von 86 phon andererseits ist somit verhältnismäßig groß.

Die grafische Vorgehensweise, die im Ergebnis zu einem Lautheitsprofil führt, hat den Vorzug, dass Teilflächen im Diagramm spezifischen Teilen der Lautheit entsprechen. Daher zeigt das Diagramm in vielen Fällen eindeutig, welche Teilfläche vorherrschend ist oder welcher Teil stark zur Gesamtlautheit beiträgt. Bei vielen Anwendungen ist es häufig von großer Bedeutung, zunächst denjenigen Anteil des Geräusches zu verringern, der die größte Fläche im Lautheitsprofil einnimmt. Andererseits zeigt das Diagramm, welche Teile des Spektrums im Verhältnis zu den benachbarten Teilen so klein sind, dass sie teilweise oder sogar vollständig maskiert werden. In Bild 2 z. B. trägt der Terzbandpegel von 51 dB bei der Mittenfrequenz von 630 Hz nicht zur Lautheit bei, weil er vollständig maskiert wird, was sich daraus ergibt, dass dieser Terzbandpegel unterhalb der schattierten Kurve liegt, die die Gesamtfläche begrenzt und bei dieser Frequenz vom Terzbandpegel bei 500 Hz aus ansteigt.

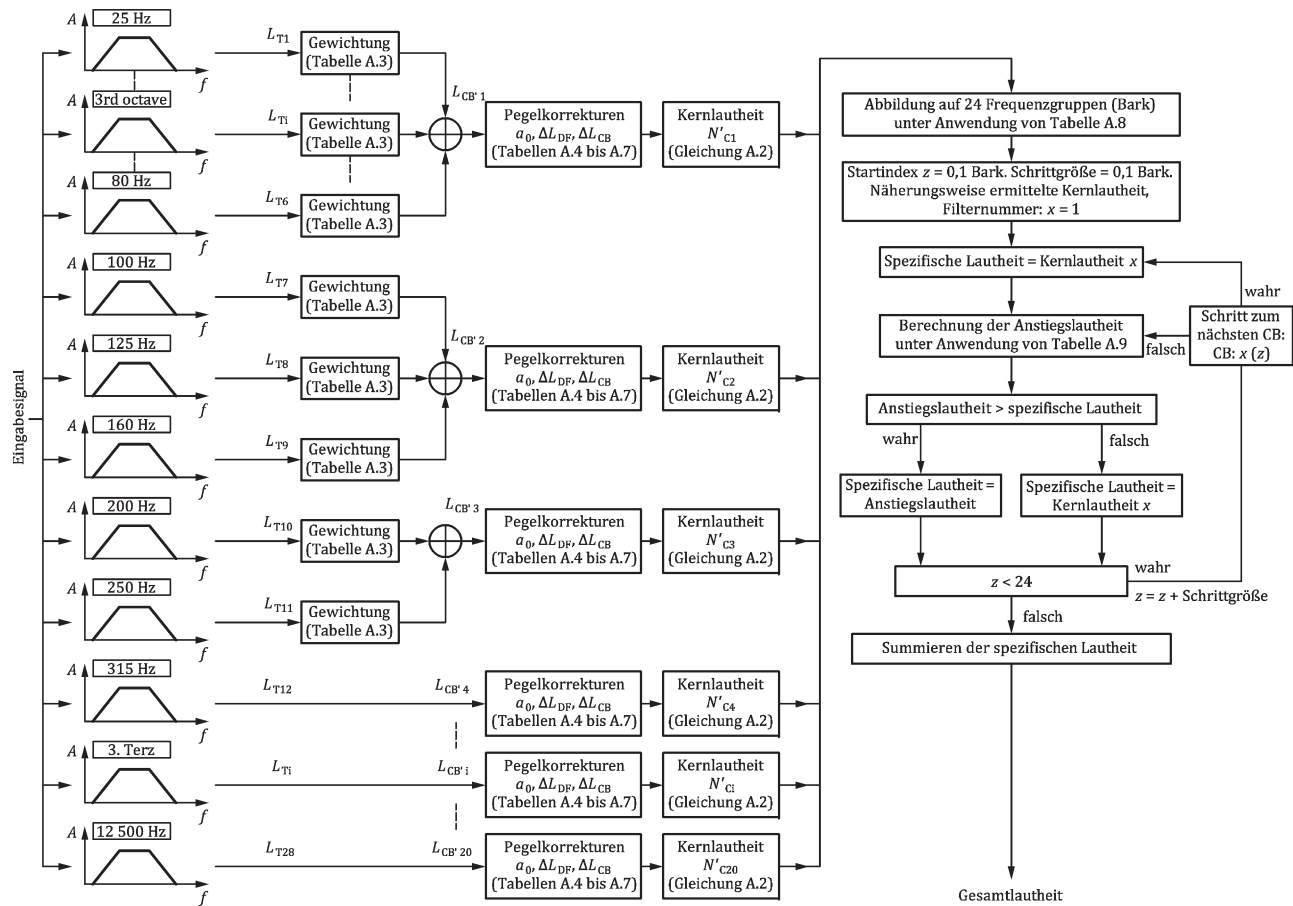
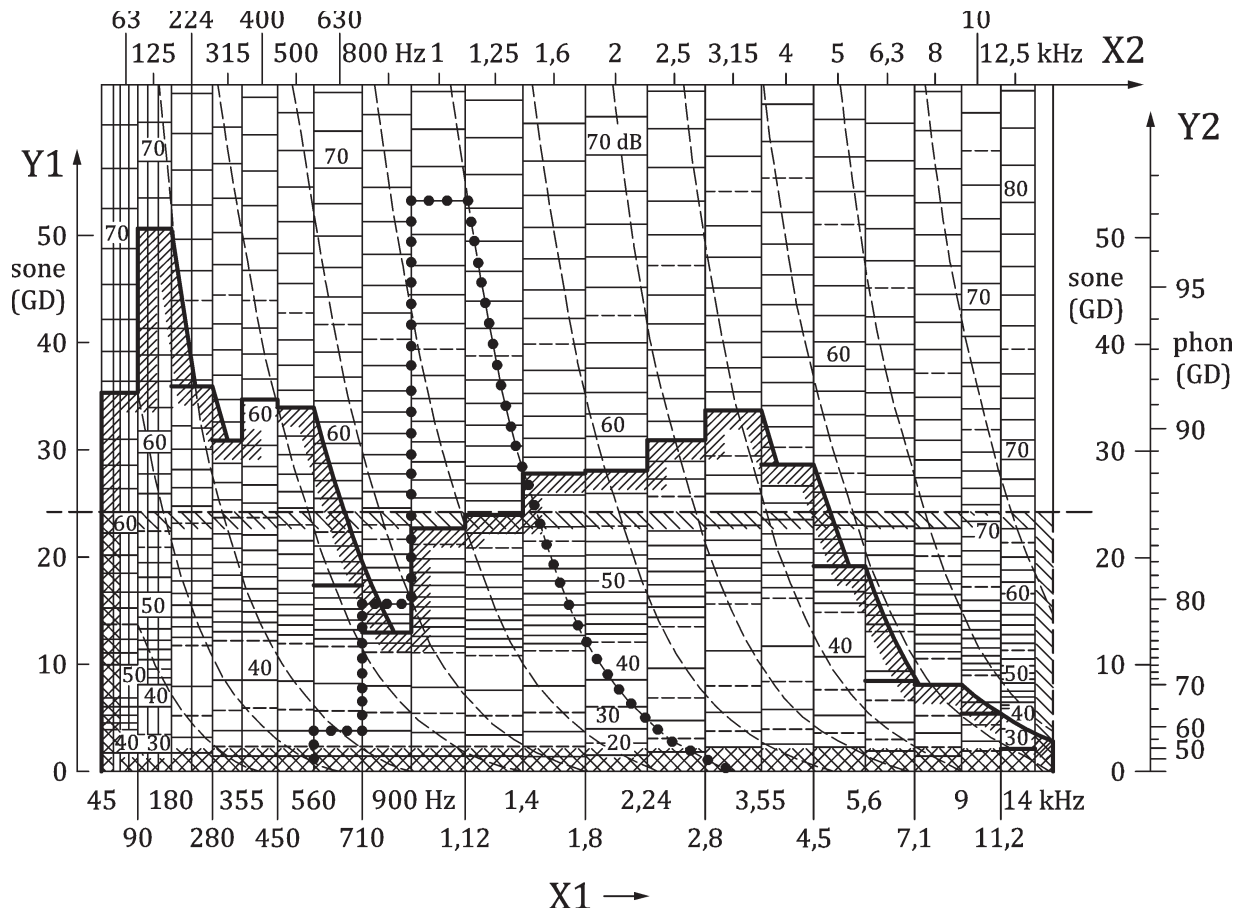


Bild 1 — Blockdiagramm des im vorliegenden Dokument festgelegten Rechenverfahrens, Verfahren für stationäre Geräusche

Bild 2 zeigt ein schematisches Diagramm des grafischen Berechnungsalgorithmus, wie im vorliegenden Dokument, Verfahren für stationäre Geräusche, nach DIN 45631:1991 implementiert.



Legende

- X1 Grenzfrequenz von Terzbändern
- X2 Mittenfrequenz
- Y1 Skala der Gesamtlautheit
- Y2 Skala des entsprechenden Lautstärkepegels

Bild 2 — Beispiel für die Vorgehensweise bei der Lautheitsberechnung mit Hilfe von grafischen Darstellungen, die die gemessenen Terzbandpegel eines Fabrikgeräusches in einem Diffusfeld anzeigen (siehe Anhang A)

Erläuterung zu Bild 2: Die spezifische Lautheit wird auf der Ordinate abgetragen, während die Tonheit in Form von Grenzfrequenzen der Terzbänder auf der Abszisse abgetragen wird. Die von der *fetten durchgezogenen Linie* umgebene und von *links unten* nach *rechts oben* schraffierte Fläche zeigt die Gesamtlautheit des Geräusches an. Diese Fläche wird näherungsweise mit Hilfe einer rechteckigen Fläche gleicher Breite ermittelt, deren Höhe jedoch durch die von *links oben* nach *rechts unten* schraffierte Fläche angezeigt wird. Die Höhe dieser rechteckigen Fläche macht die Gesamtlautheit auf der linken Skala und den entsprechenden Lautstärkepegel auf der rechten Skala kenntlich. Die punktierte Kurve stellt das Lautheitsprofil eines 1-kHz-Tons mit einem Schalldruckpegel von 70 dB dar.

5.3 Berechnung der Lautheit und des Lautstärkepegels

Die Lautheit kann anhand angegebener Terzband-Schalldruckpegel (Funktion 'f_loudness_from_levels' in A.4) oder anhand rechnerisch erhaltener Terzbandpegel basierend auf Zeitsignalen (Funktion 'f_loudness_from_signal' in A.4) berechnet werden. Die Terzbandpegel oder das Zeitsignal (als WAVE-Datei) lassen sich auf einfache Weise mit Hilfe der Befehlszeile oder der grafischen Benutzeroberfläche der in Anhang C beschriebenen Software eingeben. Das entsprechende Schallfeld (F oder D) muss festgelegt werden. Bei dem Verfahren für stationäre Geräusche wird die Lautheit in Sone und der Lautstärkepegel in Phon angegeben [siehe Gleichung (1) bis Gleichung (3)].

$$N = 2^{0,1\left(\frac{L_N}{\text{phon}} - 40\right)} \text{ sone} \quad (1)$$

Dabei ist

$$L_N \geq 40 \text{ phon}$$

und

$$L_N = \left[40 + 33,22 \lg\left(\frac{N}{\text{sone}}\right) \right] \text{ phon} \quad (2)$$

Dabei ist

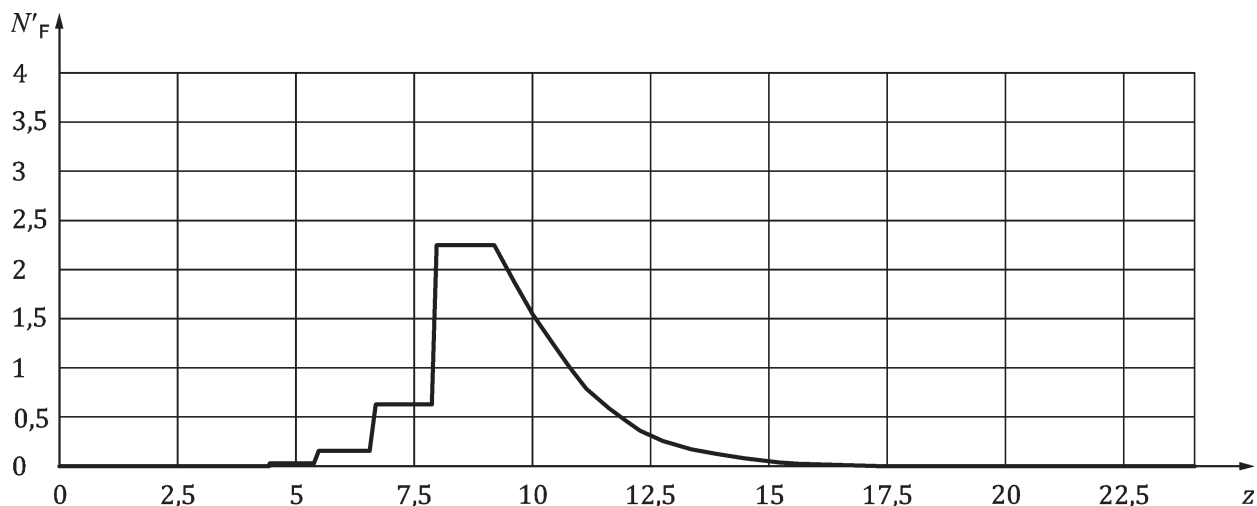
$$N \geq 1 \text{ sone}$$

bzw.

Die Beziehung für $N < 1$ sone lautet

$$L_N = 40 \left(\frac{N}{\text{sone}} + 0,0005 \right)^{0,35} \text{ phon} \quad (3)$$

Das in Bild 3 dargestellte Beispiel zeigt das Profil der spezifischen Lautheit über der Tonheit für einen Einzelton mit der Frequenz $f = 1$ kHz und dem Terzband-Schalldruckpegel $L_T = 70$ dB in einem Freifeld. Die spezifische Lautheit N'_F in Sone/Bark wird auf der Tonheitsskala z aufgetragen. Die Tonheitsskala ist in die Einheit Bark eingeteilt; jede der 24 Frequenzgruppen hat eine Breite von 1 Bark. Die Eingabe für das Rechenprogramm basiert auf einer Terzbandpegelanalyse, die zu Pegeln führt, die durch eine typische Seitendämpfung von 20 dB/Terzband für $f_T < 1$ kHz und $f_T > 1$ kHz reduziert werden. Der Beitrag des Terzbandes für $f_T < 1$ kHz zur Gesamtfläche bleibt vergleichsweise gering. Bei $f_T > 1$ kHz werden die Terzbänder durch den oberen Anstieg von $f_T = 1$ kHz maskiert. Die rechnerische Gesamtlautheit des Einzeltons führt zu $N_F = 8$ sone mit dem rechnerischen Lautstärkepegel $L_{N,F} = 70,0$ phon.



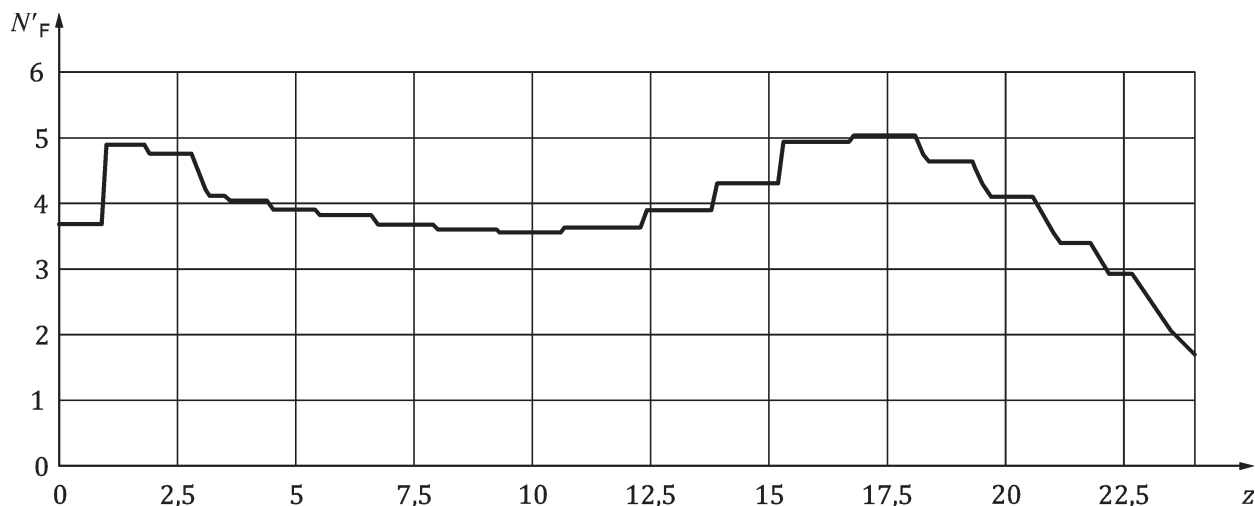
Legende

N'_F spezifische Lautheit, in Sone/Bark

z Frequenzgruppenrate, in Bark

Bild 3 — Beispiel des Profils der spezifischen Lautheit über der Tonheit für einen Einzelton in einem Freifeld

Das Beispiel in Bild 4 zeigt das Profil der spezifischen Lautheit über der Tonheit für Rosa Rauschen in einem Freifeld mit einem konstanten Terzbandpegel $L_T = 78$ dB. Für die Lautheit dieses Breitbandgeräuschs ergibt das Rechenprogramm einen Wert von $N_F = 95,0$ sone und einen Lautstärkepegel von $L_{N,F} = 105,7$ phon. Zum Vergleich: Der A-bewertete Schalldruckpegel in diesem Beispiel ist $L_A = 90$ dB.



Legende

N'_F spezifische Lautheit, in sone/Bark

z Tonheit, in Bark

Bild 4 — Beispiel des Profils der spezifischen Lautheit über der Tonheit eines Rosa Rauschens in einem Freifeld

6 Verfahren für zeitvariante Geräusche

6.1 Allgemeines

Dieses Verfahren legt die Anforderungen und die Vorgehensweise zur Bestimmung der Lautheit von willkürlichen Geräuschen fest. Bei Anwendung der Vorgehensweise für stationäre Geräusche zur Berechnung der Lautheit von zeitvarianten Geräuschen sind die erhaltenen Werte zu gering. In diesem Abschnitt wird daher eine Vorgehensweise beschrieben, die für die Simulation der zeitbezogenen Schallverarbeitung durch den menschlichen Hörapparat bei der Bewertung der Lautheit von zeitvarianten Geräuschen angewendet werden kann.

Diese Vorgehensweise umfasst eine Abfolge von zusätzlichen Schritten, die in Bild 5 veranschaulicht wird. Für eine genaue Festlegung der einzelnen Schritte wird der Anwender auf eine ausführliche Beschreibung in 6.2, 6.3 und auf den in A.4 angegebenen Programmcode verwiesen. Die Beschreibung der Vorgehensweise wird bereitgestellt, um das Verständnis der Vorgehensweise zu erleichtern. Es lässt sich jedoch vorhersehen, dass Anwender, die die Lautheit nach dem Verfahren für zeitvariante Geräusche zu berechnen wünschen, den Algorithmus, der durch das in A.4 angegebene Computerprogramm zur Verfügung gestellt wird, oder die in Anhang C wiedergegebene ausführbare Software nutzen werden.

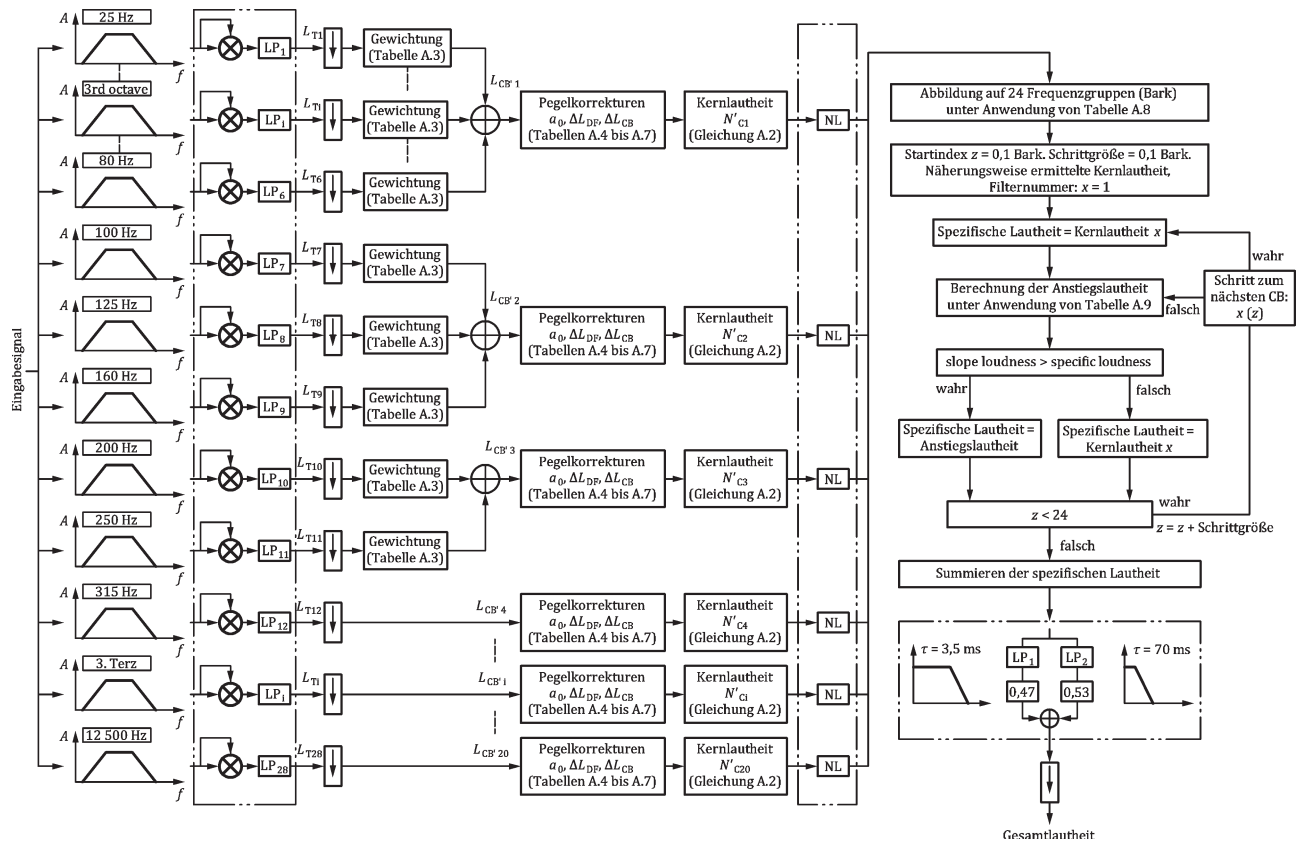
Die in Anhang A angegebene Implementierung muss als das Prüfverfahren angewendet werden, gegen das andere Implementierungen zu prüfen sind, um die Übereinstimmung mit dem vorliegenden Dokument festzustellen.

Jede Implementierung ist zulässig, sofern

- deren berechnete Funktion der spezifischen Lautheit über der Zeit für sämtliche der in B.4 angegebenen zeitvarianten Prüfsignale innerhalb einer zeitlichen Toleranz von ± 2 ms um höchstens ± 5 % von der von der Prüfümplementierung errechneten Funktion der spezifischen Lautheit über der Zeit oder um höchstens $\pm 0,1$ sone/Bark abweicht. Die Toleranz kann innerhalb einer zeitlichen Toleranz von ± 2 ms auf ± 10 % der von der Prüfümplementierung errechneten Funktion der spezifischen Lautheit über der Zeit oder auf $\pm 0,2$ sone/Bark erweitert werden, jedoch nur für höchstens 1 % der abgetasteten Funktion der spezifischen Lautheit über der Zeit unter Anwendung einer Zeitauflösung von 2 ms, und falls
- die Abweichung der Funktion der Gesamtlautheit über der Zeit für alle in B.4 und B.5 angegebenen zeitvarianten Prüfsignale innerhalb einer zeitlichen Toleranz von ± 2 ms höchstens ± 5 % oder $\pm 0,1$ sone beträgt. Die Toleranz kann innerhalb einer zeitlichen Toleranz von ± 2 ms auf ± 10 % der von der Prüfümplementierung errechneten Funktion der Lautheit über der Zeit oder auf $\pm 0,2$ sone erweitert werden, jedoch nur für höchstens 1 % der abgetasteten Funktion der Lautheit über der Zeit unter Anwendung einer Zeitauflösung von 2 ms.

Jeder Implementierungsanbieter muss eine Erklärung der Konformität mit dem vorliegenden Dokument bereitstellen, in der die bei Verwendung der in Anhang B angegebenen Prüfsignale erhaltenen Ergebnisse angegeben sind, z. B. als Teil des für die betreffende Lösung bereitgestellten Benutzerhandbuchs. Um die Anwendung zu erleichtern, werden die Prüfsignale und die Tabellen der Ergebnisse der Prüfümplementierung (einschließlich der Toleranzen) elektronisch (als WAVE- und EXCEL-Dateien) zur Verfügung gestellt. Eine Modifizierung der Prüfsignale (z. B. durch das Anhängen von Nullen) ist nicht zulässig.

ANMERKUNG Ein Softwarepaket einschließlich der WAVE- und EXCEL-Dateien steht unter <http://standards.iso.org/iso/532/-1/ed-1/en> gratis zum Download bereit.



ANMERKUNG Elemente die zusätzlich zu Bild 1 hinzukommen, sind innerhalb der Kästen mit strichpunktiierten Linien dargestellt.

Bild 5 — Blockdiagramm des im vorliegenden Dokument festgelegten Rechenverfahrens, Verfahren für willkürliche Geräusche

6.2 Beschreibung des Verfahrens

Die Berechnung der Lautheit von willkürlichen Geräuschen basiert auf der Berechnung der Lautheit von stationären Geräuschen. Miteinander gemein haben die beiden Vorgehensweisen die Spektralanalysen mit Terzbandfiltern. Obgleich diese Berechnungen Normen (IEC 61260-1) mit festgelegten Toleranzbändern folgen, ist für die Durchführung der Lautheitsberechnung eine genauere Festlegung der Filter erforderlich. Eine wichtige Voraussetzung ist eine Dämpfung von 20 dB bei den Mittenfrequenzen der benachbarten Frequenzbänder. Insofern ist das Ziel des vorliegenden Dokuments, die Unsicherheiten der bestehenden Normen durch Festlegung aller mathematischen Fakten der Algorithmen zu verringern, angefangen mit der Wellenform des Zeitsignals und abschließend mit den Funktionen der spezifischen Lautheit und der Gesamtlautheit über der Zeit [15]. Es können 16-Bit-Integer-Daten in Verbindung mit einem Bezugssignal mit bekanntem Schalldruckpegel (für die Kalibrierung) oder 32-Bit-Float-Daten (Eingabe als Schalldruck in Pascal) verwendet werden. Für die Verarbeitung wird in der in Anhang A angegebenen Prüfumplementierung eine allgemeine Abtastrate f_s von 48 kHz gewählt. Im Falle der Verwendung der Prüfumplementierung muss die Abtastung bei Signalen mit anderen Abtastaten mit dieser allgemeinen Abtastate wiederholt werden. Um die Anwendung zu erleichtern, wird zusätzlich eine Quelldatei (siehe **'//BLOCK Resampling'**) zur Verfügung gestellt, die einen Algorithmus für das Up-Sampling von Signalen mit Abtastaten von 32 kHz oder 44,1 kHz enthalten.

Die zeitliche Bewertung der Verfahren für stationäre und zeitvariante Geräusche zeigt signifikante Unterschiede; und es bedarf einer detaillierten Modellierung des nichtlinearen Dämpfungsverhaltens des menschlichen Hörapparats. Darüber hinaus muss eine Reihe von sehr komplexen Höreigenschaften, wie z. B. die Auswirkungen von zeitlicher Summation und Nachverdeckung, berücksichtigt werden.

Die Vorgehensweise eignet sich im Grundsatz zur Berechnung der Lautheit aller zeitvarianten Geräusche. Geräusche mit ausgeprägten Zeitstrukturen, wie z. B. die von Hubschraubern und Dieselmotoren verursachten Geräusche aber auch gesprochene Sprache, führen zu Ergebnissen, die sich in einer Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsgebiete verwenden lassen.

6.3 Rechenalgorithmus

Das Eingangssignal wird mit Hilfe einer Anordnung von 28 Terzbandfiltern der Klasse 1 nach IEC 61260-1:2014 mit Mittenfrequenzen f_T von 25 Hz bis 12 500 Hz gefiltert, die als Tschebyscheff-Filter 6. Ordnung mit drei Stufen 2. Ordnung ausgelegt sind. Die Filterkoeffizienten sind in Tabelle A.1 und Tabelle A.2 für eine Abtastrate f_s von 48 kHz mit 6 signifikanten Stellen angegeben. Ein Parameter für die Optimierung der Filterkoeffizienten war eine Dämpfung von 20 dB bei den Mittenfrequenzen der benachbarten Frequenzbänder (mit Ausnahme von $f_T = 12\,500$ Hz wird nur das untere Frequenzband betrachtet).

Die Ausgangssignale der Filterreihe werden quadriert und durch Tiefpassfilter 3. Ordnung geglättet. Diese Tiefpassfilter bestehen aus drei identischen, in Reihe geschalteten Tiefpassfiltern erster Ordnung. Der entsprechende Digitalfilterentwurf ist in Bild 6 dargestellt.

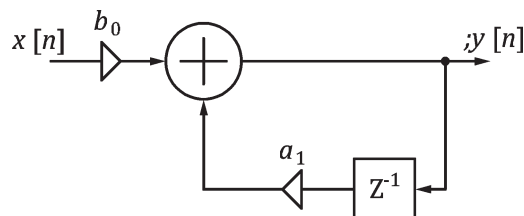


Bild 6 — Filterstruktur eines Tiefpassfilters erster Ordnung

Die Filterausgabe wird mit Hilfe der rekursiven Gleichung (4) mit den gegebenen Filterkoeffizienten berechnet.

$$\begin{aligned}
 y[n] &= b_0 x[n] + a_1 y[n-1] \\
 b_0 &= 1 - \exp\left(-\frac{1}{f_s \tau}\right) \\
 a_1 &= \exp\left(-\frac{1}{f_s \tau}\right)
 \end{aligned} \tag{4}$$

Die frequenzabhängige Zeitkonstante ist in Gleichung (5) angegeben.

$$\tau = \begin{cases} \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{f_T} & \text{für } f_T \leq 1 \text{ kHz} \\ \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{1 \text{ kHz}} = \frac{2}{3} \text{ ms} & \text{für } f_T > 1 \text{ kHz} \end{cases} \tag{5}$$

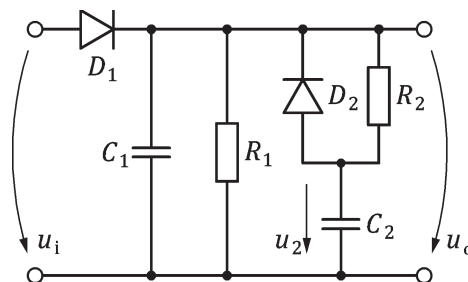
Die geglätteten Signale werden für eine verringerte Rechenzeit einem Downsampling mit einem Reduktionsfaktor von 24 unterzogen (zeitliche Auflösung: 0,5 ms, d. h. Abtastrate: 2 kHz).

Der für zeitvariante Geräusche errechnete Terzbandpegel L_T wird bis zur Berechnung der Kernlautheitswerte in gleicher Weise wie bei stationären Geräuschen verarbeitet. Block N' umfasst die Transformation des Schallpegels in die spezifische Lautheit, wie im Verfahren für stationäre Geräusche beschrieben.

Das zeitlich nichtlineare Dämpfungsverhalten des Hörapparats wird in Block NL simuliert. Der Abfall nach kurzen Signalen ist steiler als der bei langen Signalen.

Für die im Block NL erfolgende Signalverarbeitung zeigt Bild 7 ein Beispiel einer Netzwerksimulation. In A.4 ist ein Rechenprogramm (in C) angegeben, das mit '//BLOCK NL' beginnt. Die Berechnung erfolgt intern mit einer Abtastrate von 48 kHz (lineare Interpolation des Eingangssignals, Abtastung mit 2 kHz), um die Zeiten der Leitfähigkeit der Dioden besser simulieren zu können.

Für die zeitliche Bewertung der Gesamtlautheit werden zwei Tiefpassfilter erster Ordnung (Zeitkonstanten 3,5 ms und 70 ms) auf die Summe der Werte der spezifischen Lautheit angewendet, um das von der Dauer abhängige Verhalten der Lautheitswahrnehmung bei kurzen Impulsen zu simulieren. Ein Signal mit einer Dauer von 10 ms wird als etwa halb so laut wahrgenommen wie ein Signal mit einer Dauer von 100 ms. Die Tiefpassfilterung erfolgt mit einer Abtastrate von 48 kHz (lineare Interpolation der ursprünglich mit zeitlichen Abständen von 0,5 ms berechneten Werte der spezifischen Lautheit), um eine bessere Anpassung an die Kennlinie des Tiefpassfilters zu erhalten. Die Gesamtlautheit ist die einem Downsampling auf 500 Hz (zeitliche Auflösung: 2 ms) unterzogene, gewichtete Summe der tiefpassgefilterten Signale (Faktor 0,47 bzw. 0,53).



Legende

$$\tau_{\text{short}} = R_1 \cdot C_1 = 5 \text{ ms}$$

$$\tau_{\text{long}} = R_1 \cdot (C_1 + C_2) = 15 \text{ ms}$$

$$\tau_{\text{var}} = R_2 \cdot C_2 = 75 \text{ ms}$$

ANMERKUNG Siehe den Block NL in Bild 5.

Bild 7 — Äquivalenter Blockschaltplan für die Simulation des zeitlichen Dämpfungsverhaltens des Hörapparats

6.4 Anleitung zur Bestimmung der Lautheit von zeitvarianten Geräuschen

Die Schalldrucksignale werden mit Mikrofonen aufgenommen. Die Messungen können entweder mit Hilfe eines Mikrofons als Einkanalmessung oder als Mehrkanalmessung, z. B. mit Hilfe eines Kunstkopfes (siehe Anhang D) durchgeführt werden, um richtungsabhängigen Wirkungen Rechnung zu tragen. Im Ergebnis führt diese Berechnung zu einer zeitlichen Abfolge von spezifischen Lautheitsspektren $N'(z, t)$ oder der summierten Lautheit $N(t)$.

Das Zeitintervall zwischen den Spektren bzw. den Einzelwerten muss 2 ms betragen. Eine Erweiterung dieses Intervalls in der Darstellung durch Auslassung einzelner Spektren bzw. Werte kann zu Ungenauigkeiten bei der weiteren Bewertung führen, falls die untersuchten Signale eine hohe zeitliche Variabilität zeigen.

Aufgrund der Tatsache, dass das statistische Mittel der zeitvarianten Lautheit im Allgemeinen zu Ergebnissen führt, die im Vergleich zur bewerteten Lautheit zu gering sind, muss bei Angabe der wahrgenommenen Gesamtlautheit, z. B. für Schallemissionen, auch die Perzentil-Lautheit N_5 angegeben werden. Zusätzlich hierzu dürfen andere Perzentilwerte der Lautheit angegeben werden.

N_5 ist für Impulse ungeeignet, weil die Perzentil-Lautheit N_5 in hohem Maße von der Messdauer abhängt. Die Messdauer sollte zumindest erwähnt werden, und sie sollte für alle betrachteten Impulse gleich sein.

ANMERKUNG Bei in jüngerer Zeit durchgeführten Studien wurde eine höhere Korrelation zwischen der wahrgenommenen Gesamtlautheit und anderen Einzelwerten als N_5 , wie z. B. der Funktion des Energiemittels des Lautstärkepegels über der Zeit [16] und dem kubischen Mittelwert der Lautheit [17], festgestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Funktion des Energiemittels des Lautstärkepegels über der Zeit (für Lautheitswerte größer als 1 sone) einem Durchschnitt von N mit einer Potenz von $1/\lg(2)$, näherungsweise gleich 3,322, mit anschließender Anwendung eines Potenzgesetzes mit dem Exponenten $\lg(2)$ entspricht.

7 Angabe der Daten

Der Prüfbericht muss die folgenden Angaben enthalten:

- a) das betrachtete Geräusch;
- b) eine Verweisung auf das vorliegende Dokument, d. h. ISO 532-1;
- c) das angewendete Rechenverfahren [Verfahren für stationäre Geräusche (Abschnitt 5) oder Verfahren für zeitvariante Geräusche (Abschnitt 6)];
- d) das für die Berechnung ausgewählte Schallfeld [Freifeld (F) oder Diffusfeld (D)];
- e) bei Anwendung des Verfahrens für stationäre Geräusche:
 - 1) die Art der Eingabedaten [Terzbandpegel oder Zeitsignale];
 - 2) die Lautheit in Sone;
 - 3) falls gefordert, die spezifische Lautheit in Sone/Bark;
 - 4) falls gefordert, der Lautstärkepegel in Phon;
- f) bei Anwendung des Verfahrens für zeitvariante Geräusche:
 - 1) die Lautheit/Zeit-Funktion in Sone;
 - 2) falls gefordert die Funktion der spezifischen Lautheit über der Zeit, in Sone/Bark;
 - 3) falls gefordert, die Lautheit ($N_{\max}$) und die Lautheit (N_5), in Sone.

ANMERKUNG Erwägungen zu den Unsicherheiten sind in Anhang E dargelegt.

Anhang A (normativ)

Numerische Einzelheiten und Programmcode für die Berechnung der Lautheit von stationären und zeitvarianten Geräuschen (Prüfimplementierung)

A.1 Hintergrund

Dieser Anhang enthält eine Implementierung für die Berechnung der Lautheit von stationären und zeitvarianten Geräuschen. Diese hat das Ziel, das Verständnis der Vorgehensweise zu erleichtern. Darüber hinaus soll sie als Prüfimplementierung dienen, in Bezug auf die andere Implementierungen zu prüfen sind. Zu den Anforderungen an die Übereinstimmung siehe 5.1 oder 6.1.

ANMERKUNG Ein Softwarepaket einschließlich der Auflistung des Programmcodes steht unter <http://standards.iso.org/iso/532/-1/ed-1/en> gratis zum Download bereit.

A.2 Filterkoeffizienten von Terzbandfiltern

Jedes Terzbandfilter besteht aus drei Stufen zweiter Ordnung [Bild A.1 und Gleichung (A.1)]. Deren Filterkoeffizienten sind in Tabellen in Form ihrer Abweichung von einer Bezugstabelle angegeben (Tabellen A.1 und A.2). Jeder Verstärkungsfaktor wird jeweils einmal auf den entsprechenden Terzbandfilter angewendet.

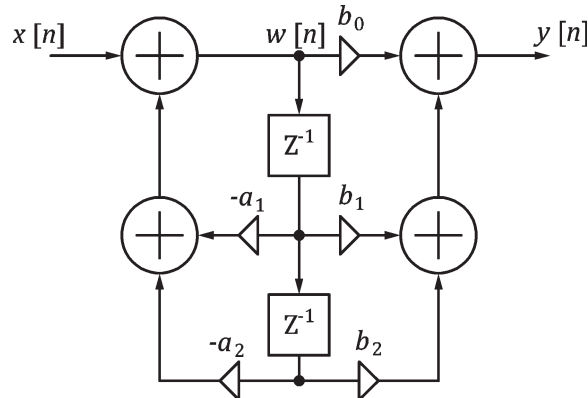


Bild A.1 — Filterstruktur eines Filters 2. Ordnung

$$\begin{aligned} w[n] &= a_0 x[n] - a_1 w[n-1] - a_2 w[n-2] \\ y[n] &= b_0 w[n] + b_1 w[n-1] + b_2 w[n-2] \end{aligned} \tag{A.1}$$
$$\begin{aligned} a_i &= a_{ir} - a_{id}, i = 0, 1, 2 \\ b_i &= b_{ir} - b_{id}, i = 0, 1, 2 \end{aligned}$$

Tabelle A.1 — Filterkoeffizienten von Terzbandfiltern (Bezugstabelle)

Bezug	b_{0r}	b_{1r}	b_{2r}	a_{0r}	a_{1r}	a_{2r}
1. Abschnitt	1	2	1	1	-2	1
2. Abschnitt	1	0	-1	1	-2	1
3. Abschnitt	1	-2	1	1	-2	1

Tabelle A.2 — Filterkoeffizienten von Terzbandfiltern (Abweichung von der Bezugstabelle für 28 Terzbandfilter)

25 Hz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-6,70260e-4	6,59453e-4
2.	0	0	0	0	-3,75071e-4	3,61926e-4
3.	0	0	0	0	-3,06523e-4	2,97634e-4
Verstärkung	4,30764e-11					

31,5 Hz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-8,47258e-4	8,30131e-4
2.	0	0	0	0	-4,76448e-4	4,55616e-4
3.	0	0	0	0	-3,88773e-4	3,74685e-4
Verstärkung	8,59340e-11					

40 Hz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-1,07210e-3	1,04496e-3
2.	0	0	0	0	-6,06567e-4	5,73553e-4
3.	0	0	0	0	-4,94004e-4	4,71677e-4
Verstärkung	1,71424e-10					

50 Hz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-1,35836e-3	1,31535e-3
2.	0	0	0	0	-7,74327e-4	7,22007e-4
3.	0	0	0	0	-6,29154e-4	5,93771e-4
Verstärkung	3,41944e-10					

63 Hz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-1,72380e-3	1,65564e-3
2.	0	0	0	0	-9,91780e-4	9,08866e-4
3.	0	0	0	0	-8,03529e-4	7,47455e-4
Verstärkung	6,82035e-10					

80 Hz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-2,19188e-3	2,08388e-3
2.	0	0	0	0	-1,27545e-3	1,14406e-3
3.	0	0	0	0	-1,02976e-3	9,40900e-4
Verstärkung	1,36026e-9					

100 Hz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-2,79386e-3	2,62274e-3
2.	0	0	0	0	-1,64828e-3	1,44006e-3
3.	0	0	0	0	-1,32520e-3	1,18438e-3
Verstärkung	2,71261e-9					

125 Hz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-3,57182e-3	3,30071e-3
2.	0	0	0	0	-2,14252e-3	1,81258e-3
3.	0	0	0	0	-1,71397e-3	1,49082e-3
Verstärkung	5,40870e-9					

160 Hz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-4,58305e-3	4,15355e-3
2.	0	0	0	0	-2,80413e-3	2,28135e-3
3.	0	0	0	0	-2,23006e-3	1,87646e-3
Verstärkung	1,07826e-8					

200 Hz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-5,90655e-3	5,22622e-3
2.	0	0	0	0	-3,69947e-3	2,87118e-3
3.	0	0	0	0	-2,92205e-3	2,36178e-3
Verstärkung	2,14910e-8					

250 Hz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-7,65243e-3	6,57493e-3
2.	0	0	0	0	-4,92540e-3	3,61318e-3
3.	0	0	0	0	-3,86007e-3	2,97240e-3
Verstärkung	4,28228e-8					

315 Hz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-1,00023e-2	8,29610e-3
2.	0	0	0	0	-6,63788e-3	4,55999e-3
3.	0	0	0	0	-5,15982e-3	3,75306e-3
Verstärkung	8,54316e-8					

400 Hz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-1,31230e-2	1,04220e-2
2.	0	0	0	0	-9,02274e-3	5,73132e-3
3.	0	0	0	0	-6,94543e-3	4,71734e-3
Verstärkung	1,70009e-7					

500 Hz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-1,73693e-2	1,30947e-2
2.	0	0	0	0	-1,24176e-2	7,20526e-3
3.	0	0	0	0	-9,46002e-3	5,93145e-3
Verstärkung	3,38215e-7					

630 Hz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-2,31934e-2	1,64308e-2
2.	0	0	0	0	-1,73009e-2	9,04761e-3
3.	0	0	0	0	-1,30358e-2	7,44926e-3
Verstärkung	6,71990e-7					

800 Hz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-3,13292e-2	2,06370e-2
2.	0	0	0	0	-2,44342e-2	1,13731e-2
3.	0	0	0	0	-1,82108e-2	9,36778e-3
Verstärkung	1,33531e-6					

1 kHz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-4,28261e-2	2,59325e-2
2.	0	0	0	0	-3,49619e-2	1,43046e-2
3.	0	0	0	0	-2,57855e-2	1,17912e-2
Verstärkung	2,65172e-6					

1,25 kHz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-5,91733e-2	3,25054e-2
2.	0	0	0	0	-5,06072e-2	1,79513e-2
3.	0	0	0	0	-3,69401e-2	1,48094e-2
Verstärkung	5,25477e-6					

1,6 kHz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-8,26348e-2	4,05894e-2
2.	0	0	0	0	-7,40348e-2	2,24476e-2
3.	0	0	0	0	-5,34977e-2	1,85371e-2
Verstärkung	1,03780e-5					

2 kHz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-1,17018e-1	5,08116e-2
2.	0	0	0	0	-1,09516e-1	2,81387e-2
3.	0	0	0	0	-7,85097e-2	2,32872e-2
Verstärkung	2,04870e-5					

2,5 kHz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-1,67714e-1	6,37872e-2
2.	0	0	0	0	-1,63378e-1	3,53729e-2
3.	0	0	0	0	-1,16419e-1	2,93723e-2
Verstärkung	4,05198e-5					

3,15 kHz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-2,42528e-1	7,98576e-2
2.	0	0	0	0	-2,45161e-1	4,43370e-2
3.	0	0	0	0	-1,73972e-1	3,70015e-2
Verstärkung	7,97914e-5					

4 kHz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-3,53142e-1	9,96330e-2
2.	0	0	0	0	-3,69163e-1	5,53535e-2
3.	0	0	0	0	-2,61399e-1	4,65428e-2
Verstärkung	1,56511e-4					

5 kHz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-5,16316e-1	1,24177e-1
2.	0	0	0	0	-5,55473e-1	6,89403e-2
3.	0	0	0	0	-3,93998e-1	5,86715e-2
Verstärkung	3,04954e-4					

6,3 kHz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-7,56635e-1	1,55023e-1
2.	0	0	0	0	-8,34281e-1	8,58123e-2
3.	0	0	0	0	-5,94547e-1	7,43960e-2
Verstärkung	5,99157e-4					

8 kHz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-1,10165e0	1,91713e-1
2.	0	0	0	0	-1,23939e0	1,05243e-1
3.	0	0	0	0	-8,91666e-1	9,40354e-2
Verstärkung	1,16544e-3					

10 kHz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-1,58477e0	2,39049e-1
2.	0	0	0	0	-1,80505e0	1,28794e-1
3.	0	0	0	0	-1,32500e0	1,21333e-1
Verstärkung	2,27488e-3					

12,5 kHz	b_{0d}	b_{1d}	b_{2d}	a_{0d}	a_{1d}	a_{2d}
1.	0	0	0	0	-2,50630e0	1,42308e-1
2.	0	0	0	0	-2,19464e0	2,76470e-1
3.	0	0	0	0	-1,90231e0	1,47304e-1
Verstärkung	3,91006e-3					

A.3 Einzelheiten des Verfahrens nach E. Zwicker

Dieser Anhang enthält alle sonstigen Einzelheiten, die für eine unabhängige Bewertung dieser Lautheit benötigt werden. Darüber hinaus ermöglicht der in A.4 angegebene Programmcode unabhängige Implementierungen des Verfahrens nach E. Zwicker in Übereinstimmung mit DIN 45631:1991.

Während der zur Beschreibung der Verfahren im vorliegenden Dokument angewendete grafische Ansatz zur Förderung der Beachtung der grundlegenden Höreffekte und bei der Auswertung der Ergebnisse sehr nützlich sein kann, werden für die konkreten Berechnungen Zahlenwerte benötigt. Daher bedeutet die Anwendung des Ansatzes auf Terzband-Spektraldaten im Wesentlichen die Nutzung von Zahlentabellen. Diese Werte werden im Zusammenhang mit dem Programmcode und zwecks größerer Klarheit auch in den nachstehenden Tabellen angegeben.

Da die im vorliegenden Dokument beschriebenen Korrekturen für tiefe Frequenzen jedoch eine Modifizierung des zuvor in ISO 532:1975 festgelegten Verfahrens B bedeuten, werden diese Korrekturen in

Tabelle A.3 ausdrücklich und im Einzelnen festgelegt. Diese Korrekturen entsprechen genau den in DIN 45631:1991 festgelegten, mit der sie im Jahre 1991 eingeführt wurden.

Wie in 5.3, Schritt 1 beschrieben, muss der Tatsache, dass der Hörapparat bei Frequenzen unterhalb von 300 Hz weniger empfindlich ist, Rechnung getragen werden. Hierzu werden die in Tabelle A.3 aufgeführten Bewertungen angewendet. Für Frequenzen zwischen 25 Hz und 250 Hz werden acht Pegelbereiche mit gewichteten Terzbandpegeln zwischen ≤ 45 dB und ≤ 120 dB betrachtet.

Tabelle A.4 enthält die den Übertragungseigenschaften des menschlichen Ohrs entsprechenden Pegelkorrekturen a_0 , in Dezibel, die von den näherungsweise ermittelten Frequenzgruppenpegeln $L_{CB'}$ zu subtrahieren sind. Im Falle eines Diffusschallfeldes muss die Pegeldifferenz ΔL_{DF} (Tabelle A.5) addiert werden. Falls der resultierende Pegel den Frequenzgruppenpegel an der Schwelle in Ruhe, L_{TQ} (Tabelle A.6), überschreitet, müssen die durch die Näherungen der kritischen Bandbreite bedingten Korrekturen, ΔL_{CB} (Tabelle A.7), subtrahiert werden und werden die Werte der Kernlautheit N'_C nach Gleichung (A.2) berechnet:

$$N'_C = 0,0635 \times 10^{0,025 L_{TQ}} \left((1-s+s \times 10^{0,1 (L_{CB'}-L_{TQ})})^{0,25} - 1 \right) \quad (A.2)$$

mit dem Schwellenfaktor $s = 0,25$

Tabelle A.8 zeigt die Abbildung der Mittenfrequenzen f_T von Terzbandfiltern auf Bark, und Tabelle A.9 zeigt die Steilheit von oberen Anstiegen für die spezifische Lautheit in Abhängigkeit vom Wertebereich der spezifischen Lautheit und der Frequenzgruppennummer. Bei der Berechnung der spezifischen Lautheit handelt es sich um einen Prozess, bei dem in Schritten von 0,1 Bark beginnend bei 0,1 Bark und abschließend mit 24 Bark iteriert wird, wie in Bild 1 (im rechten Teil des Blockdiagramms) dargestellt. Die Gesamtlautheit wird durch Integration der Werte der spezifischen Lautheit erhalten.

Tabelle A.3 — Bewertung von Terzband-Schalldruckpegels L_T für Mittenfrequenzen f_T unterhalb von 300 Hz; Korrekturen ΔL , in Dezibel

Bereich	$L_T + \Delta L$	f_T , Hz										
		25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250
I	≤ 45 dB	-32	-24	-16	-10	-5	0	-7	-3	0	-2	0
II	≤ 55 dB	-29	-22	-15	-10	-4	0	-7	-2	0	-2	0
III	≤ 65 dB	-27	-19	-14	-9	-4	0	-6	-2	0	-2	0
IV	≤ 71 dB	-25	-17	-12	-9	-3	0	-5	-2	0	-2	0
V	≤ 80 dB	-23	-16	-11	-7	-3	0	-4	-1	0	-1	0
VI	≤ 90 dB	-20	-14	-10	-6	-3	0	-4	-1	0	-1	0
VII	≤ 100 dB	-18	-12	-9	-6	-2	0	-3	-1	0	-1	0
VIII	≤ 120 dB	-15	-10	-8	-4	-2	0	-3	-1	0	-1	0

Das folgende Beispiel dient zur Veranschaulichung der Anwendung von Tabelle A.3.

BEISPIEL Für das Terzband mit $f_T = 40$ Hz ist der Terzbandpegel $L_T = 78$ dB. Die Bewertung ist

im Bereich I: $L_T + \Delta L = (78 - 16)$ dB = 62 dB > 45 dB

im Bereich II: $L_T + \Delta L = (78 - 15)$ dB = 63 dB > 55 dB

im Bereich III: $L_T + \Delta L = (78 - 14)$ dB = 64 dB < 65 dB

Daher ist der gewichtete Terzbandpegel $L_{T,W} = 64$ dB.

Tabelle A.4 — Pegelkorrektur entsprechend den Übertragungseigenschaften des menschlichen Ohres, a_0 , in Dezibel, für Mittenfrequenzen f_T

f_T Hz	a_0 dB
25,0	0,0
31,5	
40,0	
50,0	
63,0	
80,0	
100,0	0,0
125,0	
160,0	
200,0	0,0
250,0	
315,0	0,0
400,0	0,0
500,0	0,0
630,0	0,0
800,0	0,0
1 000,0	0,0
1 250,0	0,0
1 600,0	-0,5
2 000,0	-1,6
2 500,0	-3,2
3 150,0	-5,4
4 000,0	-5,6
5 000,0	-4,0
6 300,0	-1,5
8 000,0	2,0
10 000,0	5,0
12 500,0	12,0

Tabelle A.5 — Pegelabweichung für das Diffusschallfeld, ΔL_{DF} , in Dezibel, für Mittenfrequenzen f_T

f_T Hz	ΔL_{DF} dB
25,0	0,0
31,5	
40,0	
50,0	
63,0	
80,0	
100,0	0,0
125,0	
160,0	
200,0	0,5
250,0	
315,0	0,9
400,0	1,2
500,0	1,6
630,0	2,3
800,0	2,8
1 000,0	3,0
1 250,0	2,0
1 600,0	0,0
2 000,0	−1,4
2 500,0	−2,0
3 150,0	−1,9
4 000,0	−1,0
5 000,0	0,5
6 300,0	3,0
8 000,0	4,0
10 000,0	4,3
12 500,0	4,0

Tabelle A.6 — Frequenzgruppenpegel an der Schwelle in Ruhe, L_{TQ} , in Dezibel, ohne Berücksichtigung der Übertragungseigenschaften des menschlichen Ohres, a_0 , für Mittenfrequenzen f_T

f_T Hz	L_{TQ} dB
25,0	30
31,5	
40,0	
50,0	
63,0	
80,0	
100,0	18
125,0	
160,0	
200,0	12
250,0	
315,0	8
400,0	7
500,0	6
630,0	5
800,0	4
1 000,0	3
1 250,0	3
1 600,0	3
2 000,0	3
2 500,0	3
3 150,0	3
4 000,0	3
5 000,0	3
6 300,0	3
8 000,0	3
10 000,0	3
12 500,0	3

Tabelle A.7 — Anpassung der Terzbandpegel an die entsprechenden Frequenzgruppenpegel aufgrund unterschiedlicher Bandbreite für Mittenfrequenzen f_T ; Korrekturen, ΔL_{CB} , in Dezibel

f_T Hz	ΔL_{CB} dB
25,0	–0,25
31,5	
40,0	
50,0	
63,0	
80,0	
100,0	–0,60
125,0	
160,0	
200,0	–0,80
250,0	
315,0	–0,80
400,0	–0,50
500,0	0,00
630,0	0,50
800,0	1,10
1 000,0	1,50
1 250,0	1,70
1 600,0	1,80
2 000,0	1,80
2 500,0	1,70
3 150,0	1,60
4 000,0	1,40
5 000,0	1,20
6 300,0	0,80
8 000,0	0,50
10 000,0	0,00
12 500,0	–0,50

Tabelle A.8 — Abbildung der Mittenfrequenzen f_T von Terzbandfiltern auf Bark

f_T Hz	Durch Näherung ermittelte Frequenzgruppennummer dB	Frequenzgruppen- nummer Bark
25,0	1	0,9
31,5		
40,0		
50,0		
63,0		
80,0		
100,0	2	1,8
125,0		
160,0		
200,0	3	2,8
250,0		
315,0	4	3,5
400,0	5	4,4
500,0	6	5,4
630,0	7	6,6
800,0	8	7,9
1 000,0	9	9,2
1 250,0	10	10,6
1 600,0	11	12,3
2 000,0	12	13,8
2 500,0	13	15,2
3 150,0	14	16,7
4 000,0	15	18,1
5 000,0	16	19,3
6 300,0	17	20,6
8 000,0	18	21,8
10 000,0	19	22,7
12 500,0	20	23,6
–	21	24,0

ANMERKUNG Die durch Näherung erhaltenen Frequenzgruppen 1 bis 20 enthalten ihre jeweilige Kernlautheit. Die durch Näherung erhaltene Frequenzgruppe 21 ist leer, es wird nur die Anstiegslautheit berücksichtigt.

Tabelle A.9 — Steilheit der oberen Anstiege für die spezifische Lautheit in Abhängigkeit vom Wertebereich der spezifischen Lautheit und der Frequenzgruppennummer

Index	Spezifische Lautheit	Frequenzgruppe							
		1	2	3	4	5	6	7	> 7
1	$0,000 \leq N' < 0,035$	0,06	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
2	$0,035 \leq N' < 0,100$	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05
3	$0,100 \leq N' < 0,150$	0,12	0,11	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
4	$0,150 \leq N' < 0,220$	0,16	0,15	0,14	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11
5	$0,220 \leq N' < 0,300$	0,27	0,21	0,20	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17
6	$0,300 \leq N' < 0,420$	0,40	0,33	0,26	0,24	0,22	0,22	0,22	0,22
7	$0,420 \leq N' < 0,820$	0,59	0,53	0,51	0,50	0,42	0,42	0,42	0,42
8	$0,820 \leq N' < 1,360$	0,72	0,67	0,64	0,63	0,62	0,62	0,62	0,62
9	$1,360 \leq N' < 2,130$	1,50	1,20	0,94	0,86	0,82	0,82	0,82	0,82
10	$2,130 \leq N' < 3,100$	1,95	1,45	1,30	1,15	1,10	1,10	1,10	1,10
11	$3,100 \leq N' < 4,400$	2,40	1,70	1,50	1,35	1,30	1,30	1,30	1,30
12	$4,400 \leq N' < 6,100$	2,90	2,30	2,10	1,90	1,80	1,70	1,70	1,70
13	$6,100 \leq N' < 9,000$	3,70	3,00	2,80	2,35	2,20	2,20	2,20	2,20
14	$9,000 \leq N' < 11,50$	4,50	3,80	3,60	3,20	2,90	2,70	2,70	2,70
15	$11,50 \leq N' < 15,10$	6,20	5,40	4,60	4,00	3,50	3,20	3,20	3,20
16	$15,10 \leq N' < 18,00$	7,80	6,70	5,60	4,90	4,40	3,90	3,90	3,90
17	$18,00 \leq N' < 21,50$	9,00	7,50	6,00	5,10	4,50	4,50	4,50	4,50
18	$21,50 \leq N'$	13,0	8,20	6,30	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50

A.4 Programm zur Berechnung der Lautheit nach den Verfahren für stationäre Geräusche und für zeitvariante Geräusche

Ein Softwarepaket einschließlich der Auflistung des Programmcodes steht unter <http://standards.iso.org/iso/532/-1/ed-1/en> gratis zum Download bereit.

```

/*****
/* Loudness calculation according to ISO 532-1, */
/* methods for stationary and time-varying sounds */
/* This implementation requires signals sampled at 48 kHz! */
*****/

#include <math.h>      /* for sqrt, exp, pow, floor, log10 */
#include <stdlib.h>    /* for memory allocation */

/* Loudness calculation methods */
enum _LoudnessMethod
{
    LoudnessMethodStationary = 0,
    LoudnessMethodTimeVarying = 1,
};

/* Sound field types */
enum _SoundField
{
    SoundFieldFree = 0,
    SoundFieldDiffuse = 1,
};

/* Error codes */
enum _LoudnessErrorCodes
{
    LoudnessErrorOutputVectorTooSmall = -1,
    LoudnessErrorMemoryAllocFailed = -2,
    LoudnessErrorUnsupportedMethod = -3,
    LoudnessErrorSignalTooShort = -4,
};

/* Inputfile data structure */
struct InputData
{
    int      NumSamples;
    double   SampleRate;
    double   *pData;
};

/* Reference value for intensity calculation */
#define I_REF      4e-10

/* Sampling rate to which third-octave-levels are downsampled */
#define SR_LEVEL    2000

/* Number of third octave bands */
#define N_LEVEL_BANDS  28

```

```
/* Number of Bark bands (resolution 0.1 Bark) */
#define N_BARK_BANDS      240

/* Number of lower critical bands consisting of more than one
/* third octave band */
#define N_LCBS            3

/* Number of third octave bands for N_LCBS lower bands */
#define N_LCB_BANDS      11
/* Number of core loudness values */
#define N_CORE_LOUDN     21

/* Number of level ranges for consideration of equal loudness contours
*/
#define N_RAP_RANGES      8

/* Number of loudness and critical band ranges for calculating
/* steepness of upper slopes in the specific loudness -
/* critical-band-rate pattern */
#define N_RNS_RANGES      18
#define N_CB_RANGES      8

/* Constants for third octave filters */
#define N_FILTER_STAGES  3
#define N_FILTER_COEFS   6

/* Factors for virtual upsampling/inner iterations */
#define NL_ITER           24
#define LP_ITER           24

/* Time constants for non-linear temporal decay */
#define TSHORT            0.005
#define TLONG             0.015
#define TVAR              0.075

////////////////////////////////////
// BLOCK   Memory management
////////////////////////////////////

static void freeRaggedArray(double** raggedArray, int numArrays)
{
    int i;
    for (i = 0; i < numArrays; i++)
    {
        if (raggedArray[i] != NULL)
        {
            free(raggedArray[i]);
        }
    }
}

static int callocRaggedArray(double** raggedArray, int numArrays, int
lengthArray)
{

```

```
int i;
for (i = 0; i < numArrays; i++)
{
    raggedArray[i] = (double*)calloc(lengthArray, sizeof(double));
    if (raggedArray[i] == NULL)
    {
        freeRaggedArray(raggedArray, i - 1);
        return LoudnessErrorMemoryAllocFailed;
    }
}
return 0;
}

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
// BLOCK NL
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////

/* Inputfile structure */
struct NlLpData
{
    double B[6] /* coefficients */
    , UoLast /* Uo, last sample */
    , U2Last; /* U2, last sample */
};

/* Initializes constants B and states of capacitors C1 and C2,
   1/delta_t = sampling rate */
struct NlLpData f_init_nl_lp(double SampleRate)
{
    double Lambda1, Lambda2, P, Q, Den, E1, E2, DeltaT;
    double Tvar = TVAR;
    double Tshort = TSHORT;
    double Tlong = TLONG;

    struct NlLpData NlLp;
    DeltaT = 1 / SampleRate;
    P = (Tvar + Tlong) / (Tvar*Tshort);
    Q = 1/(Tshort*Tvar);
    Lambda1 = -P/2 + sqrt(P*P/4 - Q);
    Lambda2 = -P/2 - sqrt(P*P/4 - Q);
    Den = Tvar * (Lambda1 - Lambda2);
    E1 = exp(Lambda1 * DeltaT);
    E2 = exp(Lambda2 * DeltaT);

    NlLp.B[0] = (E1 - E2) / Den;
    NlLp.B[1] = ((Tvar * Lambda2 + 1) * E1 - (Tvar * Lambda1 + 1) * E2) / Den;
    NlLp.B[2] = ((Tvar * Lambda1 + 1) * E1 - (Tvar * Lambda2 + 1) * E2) / Den;
    NlLp.B[3] = (Tvar * Lambda1 + 1) * (Tvar * Lambda2 + 1) * (E1 - E2) / Den;
    NlLp.B[4] = exp(-DeltaT / Tlong);
    NlLp.B[5] = exp(-DeltaT / Tvar);

    /* At beginning capacitors C1 and C2 are discharged */
    NlLp.UoLast = 0;
}
```