

Müller-BBM GmbH  
Robert-Koch-Str. 11  
82152 Planegg bei München

Telefon +49(89)85602 0  
Telefax +49(89)85602 111

www.MuellerBBM.com

Dr. Manfred Schmidt  
Telefon +49(89)85602 223  
Manfred.Schmidt@mbbm.com

31. März 2016  
M111460/05 SCHM/DNK

## **Forschungsvorhaben zur Messung und Prognose der Einwirkung tieffrequenter Schalle an Immissionsorten für DIN 45680**

**Abschlussbericht Nr. M111460/05**

**Auftraggeber:** DIN Deutsches Institut für Normung e. V.  
VDI Verein Deutscher Ingenieure  
NALS im DIN und VDI  
10772 Berlin

**Autor::** Dr. Manfred Schmidt

**Mitwirkung:** Dr. Heiko Hansen, Abschnitt 5.7 u. 5.8  
Clemens Böhler  
Matthias Scharff

**Berichtsumfang:** Insgesamt 207 Seiten, davon  
133 Seiten Textteil und  
13 Seiten Anhang A und  
61 Seiten Anhang B.

Müller-BBM GmbH  
HRB München 86143  
USt-IdNr. DE812167190

Geschäftsführer:  
Joachim Bittner, Walter Grotz,  
Dr. Carl-Christian Hantschk, Dr. Alexander Ropertz,  
Stefan Schierer, Elmar Schröder

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>5</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>11</b>
<b>2 Ziel und Aufgabe der Untersuchung</b>	<b>11</b>
<b>3 Begriffe, Definitionen</b>	<b>12</b>
3.1 Begriffe	12
3.2 Definitionen der Schallarten und deren Frequenzbereiche	16
<b>4 Entwicklung eines Verfahrens zur Messung und Bewertung der Einwirkung tieffrequenter Schalle an Immissionsorten</b>	<b>17</b>
4.1 Belästigung durch tieffrequenten Schall	17
4.2 Lästigkeit von tieffrequentem Schall als Grundlage für die Messung, Bewertung und Beurteilung	25
4.2.1 Besonderheiten der Lästigkeit von tieffrequentem Schall (2 Hz bis 100 Hz) gegenüber mittel- und hochfrequentem Hörschall (> 100 Hz)	25
4.2.2 Lautstärke	32
4.2.3 Auswirkungen der A-, B-, C-, G-, Z-Frequenzbewertungen auf tieffrequente Schalle	34
4.2.4 Vergleich von Lautstärke und Lästigkeit	40
4.2.5 Schlussfolgerungen für die Beurteilung von Infraschall (1 Hz bis 16 Hz) und tieffrequentem Schall (8 Hz bis 100 Hz)	41
4.3 Eignung eines Grenzkurvenverfahrens und/oder eines bewerteten Gesamtschalldruckpegelverfahrens zur Beurteilung	42
4.3.1 Konzeptioneller Ansatz	42
4.3.2 Die Wahrnehmungsschwelle als zentrales Kriterium zur Beurteilung von tieffrequentem Schall	42
4.3.3 Grenzkurven zur Beurteilung der Lästigkeit von tieffrequentem Schall in Räumen	49
4.3.3.1 Deutschland	50
4.3.3.2 Europäische Länder	56
4.3.4 Prüfung und Beurteilung von tieffrequentem Schall nach dem Grenzkurvenverfahren	59
4.3.4.1 Entwicklung und Vorschlag zu einer <i>Minimalkurve gleicher Lästigkeit</i> zur Beurteilung tieffrequenter Geräusche	59
4.3.4.2 Ergebnis „Wahrnehmungsschwelle WS“ und „Lästigkeitsgrenze LG1“	61
4.3.4.3 Beurteilung von Beispielen aus der Praxis	63
4.3.5 Ermittlung eines Anhaltswertes zur Beurteilung sowohl tonhaltiger als auch breitbandiger tieffrequenter Schalle – Breitbandverfahren –	67
4.3.5.1 Lästigkeit und Bedeutung des Beurteilungspegels	67
4.3.5.2 Ansatz für die Entwicklung eines höchstzulässigen Lästigkeitspegels (Anhaltswert) in Räumen	68
4.3.6 Bestimmung eines Beurteilungspegels auf der Basis eines X-bewerteten äquivalenten Gesamtschalldruckpegels $L_{X,eq}$ und Zuschlägen nach dem Breitbandverfahren	72
4.3.6.1 Grundgeräuschpegel in Räumen	72

4.3.6.2	Ermittlung eines Beurteilungspegels $L_r$ und des X bewerteten Gesamtschalldruckpegels $L_{X,eq}$	74
4.3.6.3	Zuschlag für Tonhaltigkeit $\Delta L_T$	76
4.3.6.4	Zuschlag für Impulshaltigkeit $\Delta L_I$	76
4.3.6.5	Zuschlag für Pegelschwankung $\Delta L_{S,P}$	76
4.3.6.6	Zuschlag für Frequenzschwankung $\Delta L_{S,F}$	77
4.3.6.7	Beurteilung	77
4.4	Vorschlag für die Messung, Bewertung und Beurteilung von tieffrequentem Schall – Bildungsregeln	78
<b>5</b>	<b>Grundlagen für die Entwicklung eines Verfahrens zur Prognose der Einwirkung von tieffrequentem Schall am Immissionsort</b>	<b>80</b>
5.1	Einleitung	80
5.2	Grundlagen, Begriffe, Definitionen	81
5.3	Kenngößen der Schallimmission für tieffrequenten Schall beim Empfänger	82
5.3.1	Geeignete Schallpegel	82
5.3.2	Beurteilungspegel	83
5.4	Kenngößen der Schallemission für den tieffrequenten Schall	85
5.4.1	Eigenschaften von Schallquellen mit tieffrequenter Schallabstrahlung in der Praxis	85
5.4.2	Beachtung der Eigenheiten der Schallabstrahlung bei der Ermittlung der Schallemissionsgrößen $L_W$ und $K_0$	88
5.4.2.1	Ungerichtete Schallquellen und die besondere Bedeutung von Nah- und Fernfeld bei der Schallabstrahlung von tiefen Frequenzen	88
5.4.2.2	Gerichtete Schallquellen $D_i$	96
5.5	Tieffrequente Luftschallausbreitung bis zum Immissionsort	98
5.5.1	Konzept für ein allgemeines Rechenverfahren	98
5.5.2	Strahlermodelle und räumliche Lage von Schallquelle und Aufpunkt	100
5.5.2.1	Punktschallquellen	100
5.5.2.2	Ausgedehnte Schallquellen wie Linien- und Flächenschallquellen	102
5.5.2.3	Reflexion, Interferenz, stehende Wellen – Schallpegelerhöhung, -verminderung und Auslöschung $D_{r/i}$	104
5.6	Einflüsse auf dem Schallausbreitungsweg	106
5.6.1	Abschirmung durch Hindernisse $D_Z$	106
5.6.2	Verluste durch Absorption in der Luft $D_L$	107
5.6.3	Einfluss von Bodenbeschaffenheit $D_B$	111
5.6.4	Einfluss von Inhomogenitäten der Luft (Temperaturgradient, Wind, Turbulenz) $D_M$	112
5.6.5	Einfluss durch Bebauung $D_G$	115
5.6.6	Einfluss durch Schalldämmung der Außenbauteile $D_W$	115
5.6.7	Einfluss des Raums $K_R$	116
5.7	Prognoseansätze der Geräuschimmissionen von Windenergieanlagen	118
5.8	Bisher vorliegende Prognoseansätze für tieffrequente Geräusche in den einzelnen Bundesländern	121

<b>6</b>	<b>Thesen der Untersuchung und Ausblick</b>	<b>126</b>
6.1	Entwicklung eines Verfahrens zur Messung, Bewertung und Beurteilung	126
6.2	Prognose der Einwirkung von tieffrequentem Schall am Immissionsort	127
6.3	Ausblick zur Novellierung der DIN 45680	127
<b>7</b>	<b>Literatur</b>	<b>128</b>

**Anhang A** Abb. A1: Gegenüberstellung der Hörschwellen nach *DIN ISO 226 (2006)* und der nach *DIN 45680 (1997)*

Abb. A2 bis Abb. A10: Eigene und aus der Literatur ausgewertete Messergebnisse von tieffrequenten Geräuschimmissionen im Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz in Räumen

Tab. A1: Normfrequenzen nach DIN EN ISO 266

Tab. A2: Terzschalldruckpegel, der in dieser Studie vorgeschlagenen Wahrnehmungsschwelle WS und der Lästigkeitsgrenze LG1 zur Beurteilung der Wahrnehmung und Lästigkeit von Einzeltönen, tonhaften, schmalbandigen und breitbandigen tieffrequenten Geräuschen im Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz

**Anhang B** Präsentationen, Teil 1 bis 3 zum Forschungsvorhaben zur „Messung und Prognose der Einwirkung tieffrequenter Schalle an Immissionsorten für DIN 45680“ vorgetragen auf der Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ am 23. März 2016 in Berlin

## Zusammenfassung

Unter den gegenwärtigen neuen technischen Bedingungen von Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien besteht ein schalltechnischer Aufklärungsbedarf zur Messung, Bewertung und Beurteilung tieffrequenter Geräusche. Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines „Verfahrens zur Messung und Bewertung der Einwirkung tieffrequenter Schalle an Immissionsorten“ auf der Basis einer guten Nachbildung des mittleren akustischen Empfindens, das einen möglichst geringen technischen Aufwand erfordert. Darüber hinaus soll ein konzeptioneller Ansatz als Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Verfahrens zur Prognose der Einwirkung von tieffrequenten Schallen an Immissionsorten für Terzschalldruckpegel im Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz erarbeitet werden. Die neuen Erkenntnisse sollen zur Novellierung der DIN 45680 beitragen.

Die in dieser Untersuchung verwendete Terminologie stützt sich auf die allgemein vereinbarten Begriffe der maßgeblichen Normen zur Psycho- und Hörakustik.

Eigene und aus der Literatur ausgewertete 20 Beschwerdefälle zu den tieffrequenten Geräuschimmissionen im Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz in Räumen zeigen, dass die am häufigsten vorkommenden Störfrequenzen der Geräte und Anlagen im Frequenzbereich von 16 Hz bis 100 Hz liegen. Sie sind akustisch stark auffällig und geben sehr häufig immer wieder Anlass zur Beschwerde. In eher wenigen seltenen Fällen liegen sie im Infraschallbereich unterhalb von 16 Hz.

Bei der Erarbeitung des Mess- und Beurteilungsverfahrens spielen die Begriffe „Belästigung“ und „Lästigkeit“ eine zentrale Rolle. Die Untersuchung zeigt, dass Schwellenwerte für Belästigungsreaktionen unter soziologisch-medizinischen Gesichtspunkten ermittelt werden müssen. Im medizinischen Sinn sind „erhebliche Belästigungen“ zu unterscheiden von dem Begriff der „erheblichen Belästigung“ in den maßgeblichen Umweltgesetzen, bei denen es nicht allein auf die Reaktion der Betroffenen ankommt, sondern auch auf die wirtschaftlichen und sozialen Faktoren. Dieser Ansatz wird natürlich auch entsprechend der TA Lärm für die Berücksichtigung tieffrequenter Geräusche gelten. Es kann gezeigt werden, dass Belästigung nicht allein aus der Reizwahrnehmung „Schall“ besteht, sondern sie beruht auch auf negativ bewerteten Folgen der Reizexposition. Nach *Guski (1989)*, *Lercher (1998)* und *Schick (1997)* umfasst die „Belästigung“ die einzelnen Komponenten „Lästigkeit“, „Emotion“, „Störung“ und „psychosomatische Symptome“.

Im Hinblick auf ein anzuwendendes Mess-, Bewertungs-, und Beurteilungsverfahren für extrem tiefe Frequenzgeräusche einschließlich einem Teil des Infraschalls wird in der hier vorliegenden Studie der Frage nachgegangen, ob die Beurteilung der tieffrequenten Geräusche durch ein Grenzkurvenverfahren oder einen frequenzbewerteten Gesamtschalldruckpegel oder durch eine Kombination von beiden Verfahren abgebildet werden kann.

In der Studie wird gezeigt, dass mit der 1 %-Perzentil-Hörschwelle nach *ISO 28961 (2012)* eine untere Grenze der Wahrnehmung für tieffrequenten Schall vorliegt, die vor allem auch die oft in der Literatur und in praktischen Beschwerdefällen besondere Empfindlichkeit von Personen berücksichtigt. Auf der Grundlage der Hörschwellendaten, die auf einer sorgfältigen und umfangreichen Analyse beruhen, und dem in dieser Untersuchung vorgelegten Beweis über die Empfindungsschwellen einzelner Teile des Körpers bei der Wahrnehmung von tieffrequentem Luftschall einschließlich Infraschall wird eine neue Wahrnehmungsschwelle bestehend aus einem Teil der 1 %-Perzentil-Hörschwelle nach *ISO 28961 (2012)* und einer Ergänzung durch Extrapolation für die Terzen 8 Hz, 10 Hz, 12,5 Hz und 16 Hz entwickelt. Es wird daher vorgeschlagen, die neue Wahrnehmungsschwelle WS in die *DIN 45680* aufzunehmen.

Für die Beurteilung von tieffrequenten Geräuschen dürften Grenzkurven gleicher Lästigkeit eine bedeutende Rolle spielen. Sie sind eine Voraussetzung der Anwendung eines Grenzkurvenverfahrens, d. h. Messung des tieffrequenten Schallspektrums und Vergleich mit einer einzelnen Grenzkurve oder einer Grenzkurvenschar. Grenzen der Lästigkeit sind im Hinblick auf ein bestimmtes Schutzziel festgelegt. Der durch das Messverfahren ermittelte Beurteilungspegel wird mit einem Anhaltswert verglichen. Damit ist eine Beurteilung möglich. Durch eine Analyse von national und international bekannten *Grenzkurven gleicher Lästigkeit* zur Beurteilung tieffrequenter Schalle unterhalb von 100 Hz in Räumen wird eine neue Lästigkeitsgrenze LG1 entwickelt und vorgeschlagen. Wird die Lästigkeitsgrenze LG1 überschritten, so kann davon ausgegangen werden, dass das tieffrequente Geräusch als „lästig“ eingestuft werden kann.

Vorzugsweise wird für die detaillierte Prüfung und Beurteilung von tieffrequentem Schall mit deutlich hervortretenden Einzeltönen ein Grenzkurvenverfahren vorgeschlagen. Die Messung des extrem tieffrequenten Schallpegelspektrums zur Durchführung des Grenzkurvenverfahrens ist mit der heutigen Messtechnik problemlos durchführbar. Der große Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass es relativ schnell eine unmittelbare Aussage darüber liefert, ob eine Lästigkeitsgrenzkurve oder an welchen Stellen eine Lästigkeitsgrenzkurve überschritten wird. Es wird deutlich herausgearbeitet, welchen Einfluss das Schallpegelspektrum bei der Lästigkeitsbeurteilung von tieffrequenten Geräuschen hat. Aus der bisherigen psychoakustischen Sicht scheint ein Grenzkurvenverfahren, das auf der Grundlage der Messung von Terzschalldruckpegeln beruht, die geeignete Methode für die Beurteilung von tieffrequentem Schall zu sein. Auch wenn das Grenzkurvenverfahren zur Beurteilung der Lästigkeit von Einzeltönen, tonhaften und schmalbandigen tieffrequenten Geräuschen im Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz favorisiert wird, können damit natürlich auch die üblichen tieffrequenten Industrie- und Gewerbegeräusche beurteilt werden.

Wird gegenüber dem Grenzkurvenverfahren eine Urteilsunsicherheit in Kauf genommen, so kann für die detaillierte Prüfung und Beurteilung von Einzeltönen, tonhaften und schmalbandigen sowie breitbandigen tieffrequenten Geräuschen das universell praktische Breitbandverfahren verwendet werden. Die einfache Messbarkeit bzw. Bestimmbarkeit eines X-frequenzbewerteten Gesamtschalldruckpegels spricht für die Anwendung der Methode. Da eine X-Bewertung in der akustischen Messtechnik noch nicht existiert, kann die Bewertung auch in Berechnungstabellen geschehen. Die Berechnung erfolgt nach:

$$L_{X,eq} = 10 \lg \sum_i 10^{0,1(L_{Terz,eqi} + K_{Xi})}$$

Auf der Basis eines X-frequenzbewerteten Gesamtschalldruckpegels wird der *Beurteilungspegel für ein tieffrequentes Dauergeräusch* gebildet nach:

$$L_r = L_{X,eq} + \Delta L_T + \Delta L_I + \Delta L_{S,P} + \Delta L_{S,F} \quad \text{in dB}$$

mit:

$L_r$	Gesamtbeurteilungspegel für den Raum,
$L_{X,eq}$	X-bewerteter Gesamtschalldruckpegel für tieffrequenten Schall in Form der zusammengefassten bewerteten Terzschalldruckpegel $L_{XTerz,eq}$ ( $f_{Terz} = 8 \text{ Hz bis } 100 \text{ Hz}$ ),
$\Delta L_T$	Tonzuschlag in dB,
$\Delta L_I$	Impulzzuschlag in dB,
$\Delta L_{S,P}$	Pegelschwankungszuschlag in dB,
$\Delta L_{S,F}$	Frequenzschwankungszuschlag in dB.

Danach steht unmittelbar eine Einwertangabe zur Verfügung, die es erlaubt, einen Vergleich zwischen dem gewonnenen Gesamtbeurteilungspegel für den Raum und einem Anhaltswert zur Beurteilung der Lästigkeit durchzuführen.

Die Anhaltswerte in der folgenden Tabelle gelten für die Tag- und Nachtzeit in Aufenthaltsräumen, die Wohnzwecken dienen, und in Räumen mit vergleichbarer Schutzwürdigkeit – unabhängig von der Lage des Gebäudes.

Im Allgemeinen liegen keine erheblichen Belästigungen durch tieffrequente Geräuschimmissionen vor, wenn die Anhaltswerte nicht überschritten werden.

**Tab.** Anhaltswerte für die Tag- und Nachtzeit für den Vergleich mit dem ermittelten Beurteilungspegel  $L_r$  für gleichförmige tieffrequente Schmalband-, Breitband- und Industrie- und Gewerbeschalle

Beurteilungszeit	$L_r$ (8 Hz bis 100 Hz) in dB(X)
Tagstunden	8
Nachtstunden	8

Inwiefern die Anhaltswerte für Beurteilungspegel mit hinzugefügten Zuschlägen für Impulshaltigkeit, Pegel- und Frequenzschwankung gelten, kann im Rahmen dieser Untersuchung nicht geklärt werden. Diese Problematik muss weiteren Analysen vorbehalten bleiben.

Der zweite Teil der Untersuchung beschäftigt sich mit den Grundlagen für die Entwicklung eines Verfahrens zur Prognose der Einwirkung von tieffrequentem Schall am Immissionsort. Genehmigungsverfahren fordern in der Regel einen Nachweis über die Einhaltung von Anhaltswerten an Immissionsorten. Deshalb müssen die für die Festlegung solcher Anhaltswerte verwendeten messtechnischen Größen vorausberechenbar sein. Die Schallimmission muss zumindest grundsätzlich aus der Schallemission berechnet und prognostiziert werden können und umgekehrt.

In der Untersuchung werden die Zusammenhänge zwischen der Schallemission und der Schallimmission im interessierenden Einwirkungsbereich einer geplanten Anlage dargestellt und es wird gezeigt, wie für tieffrequenten Schall bei den vorgegebenen Ausbreitungsbedingungen die Schallimmission ansatzweise berechnet werden kann.

Der von einer Schallquelle im Freien in ihrem Einwirkungsbereich (Umgebung) erzeugte Schalldruckpegel hängt von den Eigenschaften der Schallquelle (Schalldleistung, Richtcharakteristik, Schallspektrum), der Geometrie des Schallfeldes (Lage von Aufpunkt und Schallquelle zueinander, zum Boden und zu Hindernissen im Schallfeld), den durch Topografie, Bewuchs und Bebauung bestimmten örtlichen Ausbreitungsbedingungen und von der Luftabsorption der Witterung ab. Außerdem müssen die Schalldämmungen der Außenbauteile eines Gebäudes und die akustischen Eigenschaften der Räume berücksichtigt werden.

Die Untersuchung zeigt, dass Schallquellen gleich große oder deutlich größere Wellenlängen erzeugen als häufig die linearen räumlichen Abmessungen (Länge, Breite, Höhe) von zu schützenden Aufenthaltsräumen des Menschen. Darüber hinaus können Maschinensysteme, Anlagen und Industriehallen große Abmessungen gegenüber den Wellenlängen haben, so dass deren Flächen maßgeblich zu einer Schallabstrahlung beitragen. Bei den Ermittlungen der Schallemissionen von technischen Anlagen mit tieffrequenten Schallen sind zwingend die Wellennatur des Schalls und die geometrischen Abmessungen der Schallquellen zu beachten. Dazu werden für die Ermittlung der Schallemission entsprechende theoretische und praktische Hinweise zur Überprüfung des Nah- und Fernfeldes für die jeweilige tieffrequente Schallquelle gegeben.

Es wird ein konzeptioneller Ansatz für ein allgemeines Rechenverfahren vorgeschlagen.

Die Schallemission einer Schallquelle wird gekennzeichnet durch den Schallleistungspegel  $L_W$ , die Richtcharakteristik  $D_l$  und die entsprechende Aufstellungsbedingung  $K_0$  im Freien. Für die Schallpegelabnahme auf dem Ausbreitungsweg sind verantwortlich das Abstandsmaß  $D_s$ , das der geometrischen Ausbreitungsdämpfung entspricht, sowie das Abschirmmaß  $D_z$ . Insbesondere sind hier die Zunahme des Schallpegels durch Reflexion bzw. die Abnahme des Schallpegels durch Interferenz  $D_{r/i}$  von Bedeutung. Weiterhin spielen auf dem Ausbreitungsweg Verluste durch Absorption in Luft eine Rolle ( $D_L$ ), der Einfluss der Bodenbeschaffenheit, Bewuchs und Bebauung ( $D_B$ ), der Einfluss der Inhomogenitäten der Luft ( $D_M$ ), z. B. Inversionswetterlagen, instabile Schichtung der Atmosphäre sowie der Einfluss von Gebäuden ( $D_G$ ) und schließlich die Abnahme des Schallpegels infolge der Schalldämmung der Außenwände ( $D_W$ ) und unter Umständen die Berücksichtigung einer Raumrückwirkung durch einen Korrekturfaktor  $K_R$ . Damit lautet die Grundgleichung für einen konzeptionellen Ansatz eines allgemeinen Rechenverfahrens in einer übersichtlichen Kurzfassung:

$$L_{\text{eq,Raum}} = L_{W,\text{Quelle}} - D_{\text{Frei}} - D_{\text{Raum}} \text{ in dB.}$$

Dieser Zusammenhang lässt sich auch in Terzbändern darstellen. Es ist dann:

$$L_{\text{eq,Raum}}(f_{\text{Terz}}) = L_{W,\text{Quelle}}(f_{\text{Terz}}) - D_{\text{Frei}}(f_{\text{Terz}}) - D_{\text{Raum}}(f_{\text{Terz}}) \text{ in dB.}$$

In einem zweiten Schritt ist dann gegebenenfalls unter Berücksichtigung verschiedener Zu- und Abschläge der Beurteilungspegel  $L_f$  für die Schallimmission im zu beurteilenden Raum zu bilden. Damit würde sich der Kreis zum oben beschriebenen Messverfahren und dem Prognoseverfahren schließen.

Die Recherche zu den Prognoseansätzen zur Ermittlung der Geräuschimmissionen von Windenergieanlagen zeigt, dass die Ermittlung der Beurteilungspegel nach TA Lärm und in der Regel eine Schallausbreitungsrechnung nach dem in der DIN ISO 9613-2 (Abschnitt 7.3.2) beschriebenen alternativen Verfahren erfolgt. Darüber hinaus wurde das alternative Verfahren für die Geräuschimmissionsprognose von Windenergieanlagen in der Vergangenheit auch vom Länderausschuss Immissionsschutz (LAI, 2005) für die Schallimmissionsprognose im Rahmen von Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen empfohlen. Eine aktuelle Untersuchung von *Engelen und Piorr (2015)* kommt zu dem Ergebnis, dass für die im Rahmen ihrer Untersuchung betrachteten Windenergieanlagen (Rotordurchmesser ca. 80 m, Nabenhöhen ca. 100 m, Nennleistung im Messmodus ca. 2 MW) ab einem Abstand von ca. 450 m eine deutliche Unterschätzung des nach DIN ISO 9613-2 prognostizierten Immissionspegels gegenüber den gemessenen Pegeln auftritt. Ab einem Abstand von 820 m zwischen den betrachteten WEAs und den jeweiligen Messpunkten liegt der nach DIN ISO 9613-2 (alternatives Verfahren) prognostizierte Immissionspegel statistisch signifikant um mindestens 2,5 dB unterhalb des jeweiligen Messpegels.

Es sind frequenzabhängige Verfahren auf Basis des Interimsverfahrens (angepasstes allgemeines Verfahren nach DIN ISO 9613-2) im Gespräch. Innerhalb der beteiligten Fachkreise gibt es hierzu aktuell noch einen erheblichen Prüfungs- und Klärungsbedarf. Insbesondere in Hinblick auf die Unsicherheiten der jeweiligen Prognoseverfahren, wie z. B. die Gewährleistung einer Immissionsprognose „zur sicheren Seite“, sowie die jeweilige Alltagstauglichkeit der diskutierten Verfahren im künftigen Genehmigungs- und Nachweisverfahren sind noch eine Reihe offener Fragen zu klären. Der fachliche Diskurs zum Thema „Windenergieanlagen“ ist noch nicht abgeschlossen.

Momentan gibt es kein normengerechtes Berechnungsverfahren zur Prognose der Einwirkung von tieffrequenten Geräuschen an Immissionsorten. Im Rahmen von schalltechnischen Untersuchungen für geplante Anlagen erfolgt daher im Hinblick auf tieffrequente Geräuschimmissionen häufig eine Prognose eines Rauminnenpegels nach verschiedenen hilfswisen Methoden zu dieser Thematik und einer anschließenden Bewertung orientierend an der *DIN 45680 (1997)* und den Anhaltswerten in dem dazugehörigen *Beiblatt 1 zur DIN 45680 (1997)*. Die jeweiligen Methoden basieren in der Regel auf einer Erweiterung des Verfahrens zur Schallausbreitungsrechnung nach DIN ISO 9613-2 auf Terzbänder.

Den Autoren der vorliegenden Studie sind derzeit die nachfolgend aufgeführten Prognosemodelle für tieffrequente Geräusche bekannt, die im Rahmen von TA Lärm-Untersuchungen ggf. eingesetzt werden:

1. „Berücksichtigung tieffrequenter Geräusche gemäß TA Lärm in Genehmigungs-, Planfeststellungs- und Baugenehmigungsverfahren – Mustergutachten und Handlungsanleitung“. Studie im Auftrag des Staatlichen Umweltamt Kiel (StUA Kiel) (*Gilg, J., Müller-BBM GmbH, 2001*).
2. Leitfaden „Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen und Luftwärmepumpen“, Bayerisches Landesamt für Umwelt (*BayLfU, 2011*).
3. „Biogasleitfaden Mecklenburg-Vorpommern: Überschlägige Prognose und Beurteilung der tieffrequenten Schallimmissionen des BHKW-Abgaskamins im Freien – Hinweise für die Genehmigung und Überwachung“ (*2012*).
4. „Ansatz für die Schallimmissionsprognose tieffrequenter Geräusche“, Thüringer Landesamt für Umwelt und Geologie (*TLUG, Fritsche, 2013*).

Die vorliegende Studie weist darauf hin, dass alle o. g. Prognosemodelle aus physikalischer Sicht einen Klärungsbedarf aufweisen.

Die Gleichungen der DIN ISO 9613-2 sind nicht ohne weiteres auf den tieffrequenten Bereich erweiterbar. Aufgrund der vergleichsweise großen Wellenlängen ist eine Prognose für räumlich naheliegende Immissionsorte (innerhalb eines Abstands von einigen Wellenlängen, Frequenzbereich unterhalb 100 Hz) physikalisch kaum zu begründen.

# 1 Einführung

Für die Messung und Bewertung tieffrequenter Geräusche wird in der Regel die *DIN 45680 (Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft, 1997)* und das dazugehörige *Beiblatt 1 zu DIN 45680* herangezogen. Allerdings hat die Anwendung der Norm in der Vergangenheit gezeigt, dass in vielen Fällen die erlebte Belästigung von Betroffenen nicht in Übereinstimmung steht mit dem nach *DIN 45680 (1997)* empfohlenem Schutzniveau.

Auf der Grundlage normgerechter Untersuchungen von tieffrequenten Geräuschen in Räumen nach *DIN 45680 (1997)* wird häufig die Einhaltung der Anhaltswerte nach *DIN 45680, Beiblatt 1* nachgewiesen, obwohl eindeutig die Störwirkungen und Belästigungen vorhanden und subjektiv nachweisbar sind. Die Diskrepanz zwischen Schutzniveau und erlebter Belästigung verlangt daher zwingend die Änderung des Mess- und Bewertungsverfahrens nach *DIN 45680 (1997)*.

Die derzeitige notwendige Überarbeitung der Norm aus dem Jahre 1997 soll dem Stand der Technik entsprechen und damit auch noch heute bestehende Probleme der Beurteilung tieffrequenter Geräusche beheben. Es besteht daher ein schalltechnischer Aufklärungsbedarf zur Messung, Bewertung und Beurteilung tieffrequenter Geräusche.

## 2 Ziel und Aufgabe der Untersuchung

Ziel des Vorhabens ist ein Vorschlag für die Entwicklung eines „Verfahrens zur Messung und Bewertung der Einwirkung tieffrequenter Schalle an Immissionsorten“ auf der Basis einer guten Nachbildung des mittleren akustischen Empfindens, das einen möglichst geringen technischen Aufwand erfordert. Das Mess- und Bewertungsverfahren für tieffrequente Schalle im Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz soll die Grundlage für eine möglichst objektive Beurteilung bilden und dazu beitragen, unzulässige Belästigungen oder gar Gesundheitsgefährdungen zu vermeiden. Es soll mit diesem Vorhaben die Basis geschaffen werden, auf der ein validiertes „Mess- und Bewertungsverfahren für tieffrequente Schalle an Immissionsorten“ in der Neufassung der *DIN 45680* etabliert werden kann.

Darüber hinaus soll ein konzeptioneller Ansatz als Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Verfahrens zur Prognose der Einwirkung von tieffrequenten Schallen an Immissionsorten für Terzschalldruckpegel im Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz erarbeitet werden.

Auf einer Literaturrecherche aufbauend wird in dieser Untersuchung als Forschungsmethode die „Literaturanalyse“ angewandt. Im Hinblick auf das Ziel wird ein strukturierter Suchprozess durchgeführt und die wissenschaftlichen Veröffentlichungen werden analysiert und im Hinblick auf das Vorhaben ausgewertet und bewertet.

Das Forschungsvorhaben zielt darauf ab, die noch existierenden großen Wissenslücken auf dem Gebiet der „Messung, Bewertung und Prognose von tieffrequentem Schall“ mindestens partiell zu schließen, wobei die neueren Erkenntnisse zur Novellierung der *DIN 45680* beitragen sollen.

## 3 Begriffe, Definitionen

### 3.1 Begriffe

#### **Schall**

Elastodynamische Schwingungen und Wellen. Schall setzt feste, flüssige, gasförmige oder plasmaförmige Materie voraus. Die Benennung „Schall“ wird sowohl im Sinne eines Sammelbegriffs als auch für eine einzelne Schwingung oder Welle benutzt.

#### **Hörfrequenzbereich**

Frequenzbereich ausgeprägten Hörvermögens beim Menschen. Hörschall (16 Hz bis 20 kHz).

#### **Lärm**

Unerwünschter Hörschall; Hörschall, der zu Störungen, Belästigungen, Beeinträchtigungen oder Schäden führen kann. Lärm hängt von den physikalischen Gegebenheiten ab. Andere Begriffsdefinitionen sind:

Nach *Palmerston*:

Lärm ist eben kein Lärm, sondern Schall, der zur falschen Zeit am falschen Ort zu hören ist.

Nach *Guski*:

Lärm ist Schall der für Betroffene unerwünscht ist oder geeignet, sie psychisch, physisch, sozial oder ökonomisch zu beeinträchtigen.

Nach WHO:

Lärm ist jede Art von Schall, der stört, belästigt oder die Gesundheit beeinträchtigen kann.

Nach Arbeitsring Lärm der DEGA:

Lärm ist ein bewertender Begriff, den man deshalb nicht „messen“ kann.

(Zusammenstellung von *Genuit* in „*Taschenbuch der Angewandten Psychoakustik*“ siehe *Kalivoda, M. u. a., 1998*)

#### **Geräusch**

Schall, der nicht vorwiegend zur Übertragung von Information dient.

Beispiele: Maschinengeräusch, Fahrgeräusch, Wohngeräusch, Stimmengewirr.

#### **Fremdgeräusch**

Schall am Beobachtungsort, der unabhängig vom interessierenden Schall vorhanden ist.

**Beeinträchtigung** (durch Schall)

Unerwünschte Wirkung einer Schalllast, z. B. in Form der Minderung des körperlichen, seelischen oder sozialen Wohlbefindens.

**Störung** (durch Schall)

Bewusste oder unbewusste Behinderung von körperlicher oder geistiger Tätigkeit durch Schall.

**Belästigung** (durch Schall)

Individuell bewertete Beeinträchtigung durch eine Schalllast. Belästigung ist ein Gefühl des Unbehagens, das mit irgendeinem Stoff oder einem Umstand in Verbindung steht, von dem ein Individuum oder eine Gruppe nachteilige Beeinflussung erwartet. Schall selbst gilt als belästigend (im Sinne der Unerwünschtheit), wenn exponierte Personen oder Personengruppen ihn nach Möglichkeit mindern oder vermeiden oder wenn sie das exponierte Gebiet möglichst verlassen würden. „Belästigung“ besteht nicht allein aus der Reizwahrnehmung „Schall“, sondern sie beruht auch auf negativ bewerteten Folgen der Reizexposition. Nach *Guski (1989)*, *Lercher (1998)* und *Schick (1997)* umfasst die „Belästigung“ die einzelnen Komponenten Lästigkeit, Emotion, Störung und psychosomatische Symptome.

**Lästigkeit** (durch Schall)

In der Regel ist Lästigkeit eines Schallreizes gemeint, wie sie in psycho-physiologischen akustischen Laborexperimenten untersucht wird. Zwar sind die Einflüsse der Situation und der Person an solchen Lästigkeitsurteilen beteiligt, aber es lassen sich auch Zusammenhänge zwischen wahrgenommener Lästigkeit und den akustischen Charakteristika des Schallereignisses zeigen.

**Minimalkurve gleicher Lästigkeit**

Kleinster Schalldruckpegel eines tonhaften Geräusches, der bei einem Zuhörer ein Lästigkeitsempfinden auslöst.

**Immissionsort**

Nach der Definition der TA Lärm der Ort im Einwirkungsbereich einer Anlage, an dem die Überschreitung des Immissionsrichtwertes am ehesten zu erwarten wäre. Es ist derjenige Ort, für den die tieffrequente Geräuschbeurteilung vorgenommen wird.

**Psychoakustik**

Psychoakustik ist die Wissenschaft, die sich mit den psychologischen Korrelaten der physikalischen Parameter der Akustik beschäftigt. Die Psychoakustik ist ein Teilgebiet der Psychophysik.

**Psychologie**

Psychologie ist die Wissenschaft, welche die bewussten Vorgänge und Zustände mit ihren Ursachen und Wirkungen sowie ihrer Rolle bei der Entwicklung der Persönlichkeit untersucht. Die Psychologie ist insbesondere auch die Wissenschaft vom Verhalten, einschließlich des Studiums der Motivation, des Lernens, der Wahrnehmung usw.

## **Psychophysik**

Die Psychophysik ist die Wissenschaft, die sich mit den quantitativen Beziehungen zwischen physikalischen und psychologischen Ereignissen beschäftigt.

### **Lautstärke**

Die Lautstärke ist die Intensität der Geräuschempfindung. Sie kann als Lage der Empfindungsstärke auf einer geeignet gewählten Werteskala angegeben werden, die zwischen leise und laut unterscheidet (*Kalivoda, M., 1998*).

### **Frequenzgruppe**

Eine für das menschliche Gehör charakteristische Frequenzbandbreite, innerhalb und außerhalb derer das Gehör nach unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten arbeitet.

### **Rauigkeit**

Amplitudenmodellerte Geräusche erzeugen in Abhängigkeit von der Modulationsfrequenz bei Menschen unterschiedliche Höreindrücke. Während bei tiefen Modulationsfrequenzen ( $< 20$  Hz) die Lautstärke des Geräusches hörbar schwankt, klingt das Geräusch bei höheren Modulationsfrequenzen rau (*Kalivoda, M., 1998*).

### **Schärfe**

Die Schärfe ist eine jener psychoakustischen Größen, welche die Klangfarbenwahrnehmung beschreibt, und hängt vor allem von der spektralen Verteilung ab, die das Geräusch besitzt. Das bedeutet, dass ein Geräusch umso schärfer klingt, je größer der Anteil von hohen Frequenzen im gesamten Spektrum ist. Ein brauchbares Maß zur Beschreibung der Schärfe erhält man, wenn man die Schwerpunktlage in der Verteilung der spezifischen Lautheit über der Tonheitsskala ermittelt. Die Einheit der Schärfe ist Acum, die Werte werden häufig auch als Deziacum angegeben (*Kalivoda, M., 1998*).

### **Frequenztonhöhe**

Maß der Tonhöhe. Es wird in Hz angegeben. Es wird gewonnen, indem ein Sinusschall definierten Pegels durch Frequenzänderung so eingestellt wird, dass er dieselbe Tonhöhe hervorruft wie ein zu beurteilender Schall. Die Frequenz dieses Sinusschalls wird dann als Frequenztonhöhe dem zu beurteilenden Schall zugeordnet.

### **Lautstärkepegel $L_N$ in phon**

Der Lautstärkepegel  $L_N$  ist ein Maß für die Stärke der Empfindung eines Schallvorganges. Der Lautstärkepegel  $L_N$  wird in „phon“ angegeben. Der Lautstärkepegel eines Schalles beträgt  $n$  phon, wenn von normalhörenden Beobachtern dieser Schall (Objektschall) als gleich laut beurteilt wird wie ein Sinuston mit der Frequenz 1000 Hz und dem Schalldruckpegel  $n$  dB, der als ebene fortschreitende Schallwelle genau von vorn auf den Beobachter trifft (Standardschall). Die Bedingungen der Beschallung im Versuch sind dabei anzugeben, z. B. mit Kopfhörern, im Diffusfeld oder im Freifeld.

### **Kurve gleichen Lautstärkepegels $L_N$ in phon (Isophone)**

Kurve, die den Verlauf desjenigen Schalldruckpegels eines Sinus- oder Schmalband-schalls als Funktion der Frequenz bzw. Bandmittenfrequenz angibt, welcher bei einem Zuhörer, der in festgelegter Weise damit beschallt wird, zu einem Hörereignis konstanter Lautheit führt. Die Kurve verbindet diejenigen Punkte reiner Töne in der Hörfläche (Schalldruckpegel über der Frequenz), die als gleich laut empfunden werden.

### **Normalkurve gleichen Lautstärkepegels $L_N$ in phon**

Kurve gleichen Lautstärkepegels  $L_N$  in phon, die den Mittelwert der Lautstärkeempfindung otologisch normaler Personen im Alter von 18 Jahren bis 25 Jahren angibt.

### **Lautheit $N$ in sone**

Die Lautheit  $N$  soll der Stärke der Hörempfindung, welche auf einer Skala „leise – laut“ skaliert wird, von normalhörenden Beobachtern proportional sein. Sie wird in „sone“ angegeben. Da die unmittelbare Bestimmung der Lautheit jedoch sehr schwierig ist, wurde zwischen der Lautheit  $N$  in sone und dem Lautstärkepegel  $L_N$  in phon folgende Beziehung festgelegt:

$$N = 2^{0,1 \cdot (L_N - 40)} \quad \text{in sone.}$$

Dabei ist einer frei fortschreitenden monofrequenten Schallwelle mit der Frequenz 1000 Hz und dem Lautstärkepegel  $L_N = 40$  dB ( $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ ), die frontal auf den Zuhörer trifft, die Lautheit  $N = 1$  sone zugeordnet. Ein Hörereignis, welches von den Zuhörern als  $n$ -mal so laut wie dasjenige mit 1 sone bezeichnet wird, erhält die Lautheit  $n$  sone zugeordnet.

### **Hörschwelle**

Minimaler Schalldruckpegel in dB eines bestimmten Schallsignals, der bei einem Zuhörer eine auditive Wahrnehmung auslöst. Die Hörschwelle ist frequenzabhängig. Dabei sind die Messbedingungen anzugeben, z. B. Hören mit einem oder zwei Ohren im Freifeld oder mit Kopfhörern, und das verwendete psychometrische Messverfahren nach *DIN 1318 (1970)*. Nach *DIN EN ISO 389-7 (2006)* ist es der Schalldruckpegel, bei dem eine Person bei wiederholter Darbietung unter bestimmten Bedingungen in der Hälfte der Fälle die Wahrnehmung des dargebotenen Schallsignals richtig angibt.

### **Bezugshörschwelle**

Schalldruckpegel in dB eines reinen Tones oder eines terzbreiten Rauschens, der bei einer festgelegten Frequenz dem Medianwert der binauralen Hörschwellen otologisch normaler Personen innerhalb der Altersgrenzen von 18 bis 25 Jahren entspricht. Die Bezugshörschwellen unter Freifeld- und Diffusfeldbedingungen sind in *DIN EN ISO 389-7 (2006)* festgelegt.

### ***Hörschwellenpegel $L_{HS}$ in dB im Frequenzbereich von 20 Hz bis 16.000 Hz (Hörverlust)***

Pegeldifferenz zwischen dem Schalldruckpegel der individuellen Hörschwelle eines Ohres eines Zuhörers und dem Schalldruckpegel einer vereinbarten Bezugshörschwelle. Als Testschall wird in solchen Fällen in der Regel ein intermittierender Sinusschall verwendet. Damit kann der Hörschwellenpegel  $L_{HS}$  als Funktion der Frequenz gemessen werden.

## **3.2 Definitionen der Schallarten und deren Frequenzbereiche**

### ***Infraschall (1 Hz bis 16 Hz)***

Schwingungen und Wellen mit Frequenzen unterhalb von 16 Hz werden dem Infraschallbereich zugeordnet. Dabei handelt es sich um Schwingungsvorgänge im Medium Luft unterhalb des menschlichen Hörvermögens, nicht aber außerhalb des menschlichen Wahrnehmungsvermögens.

### ***Hörschall (16 Hz bis 20.000 Hz)<sup>1</sup>***

Hörschall besteht seiner physikalischen Natur nach aus mechanischen Schwingungen elastischer Medien im Frequenzbereich von 16 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. Unter Hörschall versteht man ein Schallereignis, das eine Lautstärke- und Tonhöhenempfindung beim Menschen hervorruft.

### ***Tieffrequenter Schall (in dieser Untersuchung 8 Hz bis 100 Hz)***

Unter dem Begriff „*Tieffrequenter Schall*“ werden hier mechanische Schwingungen und Wellen in elastischen Medien – Gase, Festkörper und Flüssigkeiten – im Frequenzbereich von ca. 8 Hz bis etwa 100 Hz zusammengefasst.

Die heutigen Erkenntnisse bezüglich des tieffrequenten Schalls zeigen, dass er als eine besondere Schallart zu betrachten ist, deren Störf Wirkung und gesundheitliche Schädigung sich nur unzureichend durch den A-bewerteten Schalldruckpegel beschreiben lässt.

Die obere Frequenzgrenze für tieffrequenten Schall wird in der Literatur wegen seiner Wirkungsbesonderheiten sehr verschieden mit 100 Hz, 125 Hz, 160 Hz und 200 Hz angegeben. Der in der Literatur am häufigsten angegebenen oberen Terzfrequenzgrenze von 100 Hz folgend wird in dieser Untersuchung unter tieffrequentem Schall der Schall verstanden, dessen vorherrschende Energieanteile im Frequenzbereich unterhalb der Terzbandgrenzfrequenz von 112 Hz an Aufenthaltsorten von Menschen vorkommen. Der sich daraus ergebende Frequenzbereich wird durch Schallpegelmessungen bei den Norm-Terzfrequenzen von 8 Hz bis 100 Hz, d. h. in zwölf Terzen, erfasst (siehe Tab. A1 im Anhang A).

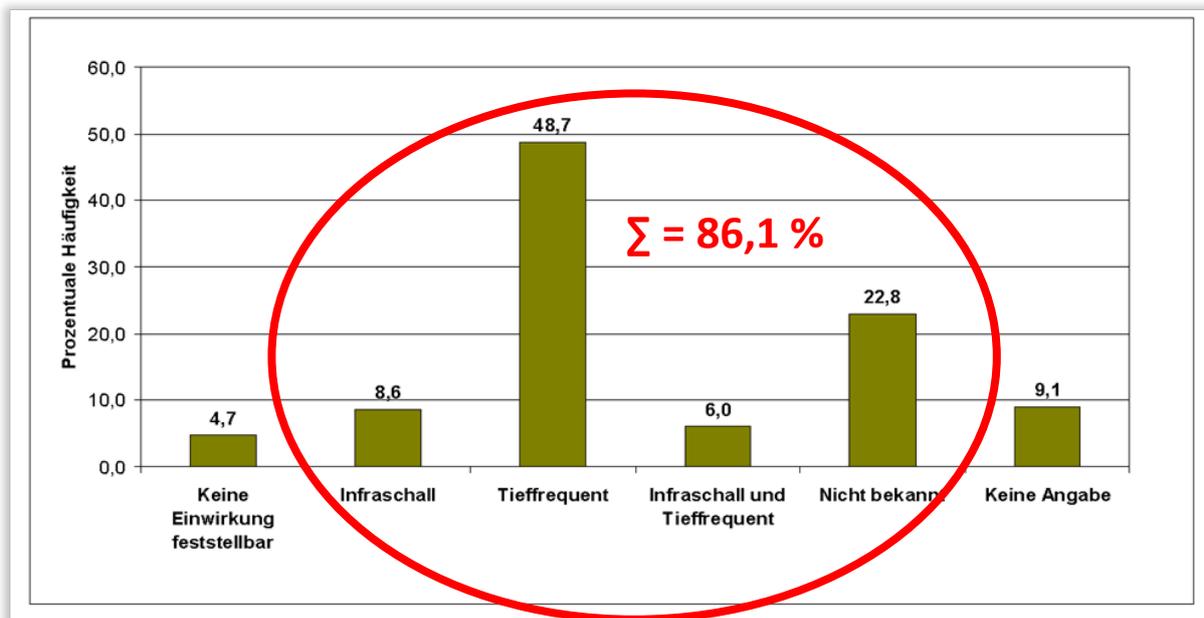
---

<sup>1</sup> In der Literatur wird der Frequenzbereich des Hörschalls häufig verschieden angegeben, weil die Grenzen zwischen Hörschall, Infraschall und Ultraschall nicht scharf, sondern fließend sind. Insofern wäre die Angabe des Frequenzbereiches für Hörschall in den Grenzen von (16 ... 20) Hz bis (16 ... 20) kHz zutreffend. Hier werden die Frequenzbereiche entsprechend den Begriffsbestimmungen der „Technischen Akustik“ festgelegt: Infraschall (< 16 Hz), Hörschall (16 Hz bis 20 kHz), Ultraschall (> 20 kHz).

## 4 Entwicklung eines Verfahrens zur Messung und Bewertung der Einwirkung tieffrequenter Schalle an Immissionsorten

### 4.1 Belästigung durch tieffrequenten Schall

Wie die Beschwerdefälle in der Machbarkeitsstudie des Umweltbundesamtes aus dem Jahr 2014 zeigen, spielen die individuell erlebten Belästigungen durch tieffrequenten Schall einschließlich Infraschall heute mehr denn je eine zentrale Rolle im Immissionsschutz der Wohnumgebung.

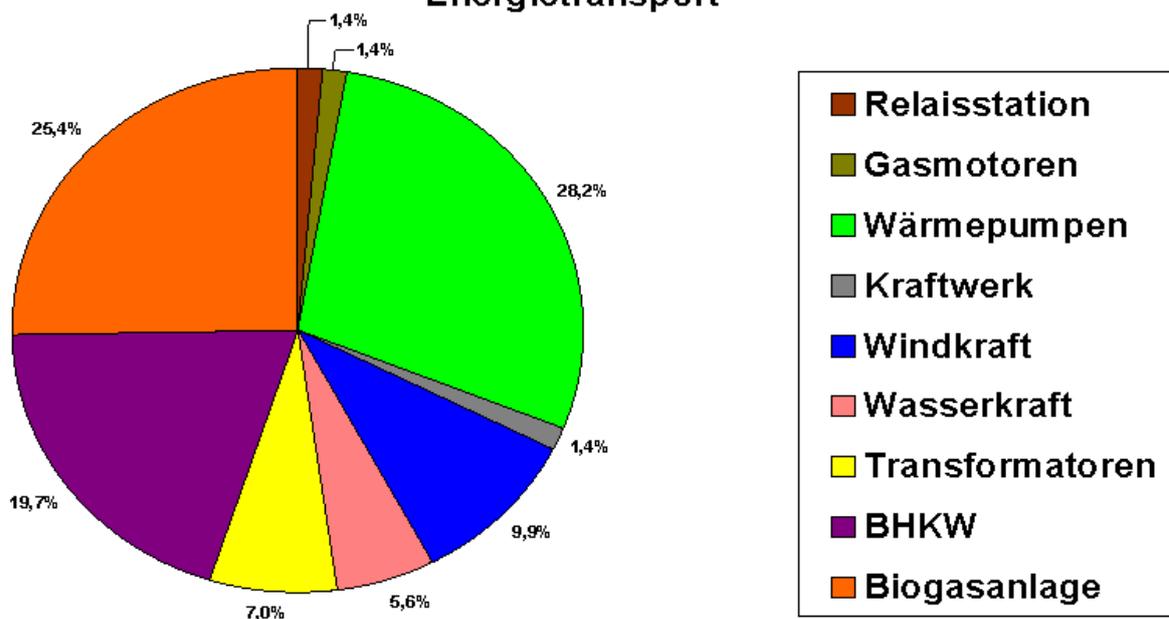


**Abb. 4.1** Häufigkeitsverteilung der festgestellten Beschwerdefälle ( $N = 231$ ) und ihrer Geräuscheinwirkungen (Quelle: UBA, *Machbarkeitsstudie zu Wirkungen von Infraschall*, 2014)

Wie Abb. 4.1 zeigt, waren in 48,7 % der Beschwerdefälle „tieffrequente Geräusche“ rein ursächlich für die Beschwerden. Unterstellt man, dass auch bei der 6 %- und 22,8 %-Gruppe tieffrequente Geräusche indirekt beteiligt sind, dann kommt man bei den Einwirkungen in den Beschwerdefällen für tieffrequente Geräusche auf einen Häufigkeitsanteil von 77,5 %. Berücksichtigt man außerdem noch die Beschwerdefälle durch Infraschall, so wird ein Wert von 86,1 % erreicht. Die Beschwerdefälle mit reiner Ansage für „Infraschall“ von 8,6 % spielen zahlenmäßig eine deutlich untergeordnete Rolle gegenüber den anderen vorliegenden Fällen.

Am häufigsten führten die Anlagen der Energieerzeugung und des Energietransportes (33 %) zu Beschwerden über Infraschall und tieffrequenten Schall. Die häufigsten Beschwerden werden mit 28,2 % durch Wärmepumpen verursacht. Es folgen die Biogasanlagen (25,4 %), Blockheizkraftwerke (19,7 %) und die Windenergieanlagen (9,9 %) (siehe Abb. 4.2).

### Detailansicht Gr.III. "Energieerzeugung und Energietransport"



**Abb. 4.2** Häufigkeitsverteilung der festgestellten Beschwerdefälle ( $N = 231$ ) und ihrer Geräuscheinwirkungen sowie Verteilung der Schallquellen innerhalb der Quellengruppen III „Energieerzeugung und Energietransport“ mit 33 % der Beschwerdefälle insgesamt (Quelle: UBA, *Machbarkeitsstudie zu Wirkungen von Infraschall, 2014*)

Der Einsatz von Geräten zur Heizung, Lüftung oder Kühlung von Gebäuden innerhalb von Wohngebieten hat in den vergangenen Jahren stark zugenommen. Dieser Trend wird voraussichtlich anhalten, zumal ein solcher dezentraler Einsatz dieser Geräte im Rahmen der Energiewende politisch erwünscht ist und auch gefördert wird.

**Tab. 4.1** Erwarteter Anteil von Heizungs-Wärmepumpen am Gesamtbestand der ca. 20 Mio. Wärmeerzeuger in Deutschland für das Jahr 2030 (Schulz, C.; Hübel, J. u. a., 2014)

Markt BRD	2012	2030 konservatives Szenario	2030 optimistisches Szenario
Bestandsanteil Heizungs-Wärmepumpen absolut	500.000	1.750.000	3.000.000
Bestandsanteil Heizungs-Wärmepumpen prozentual	2,5 %	8,75 %	15 %
jährliche Absatzzahl Heizungs-Wärmepumpen	59.600	96.000	235.000
Absatzanteil von LWWP	62,8 %	65,1 %	72,3 %
jährliche Absatzzahl LWWP	37.400	62.500	170.000

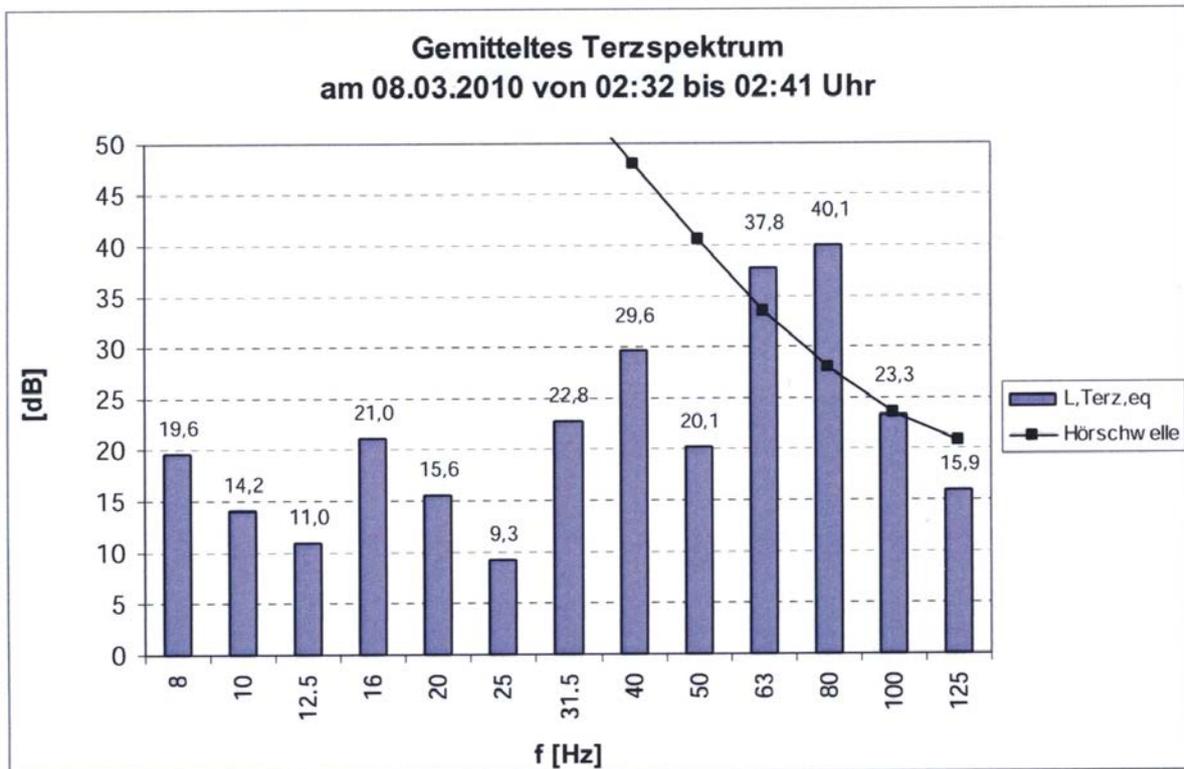
Schulz, C.; Hübelt, J. führen dazu aus:

*„Für die kommenden Jahre wird eine kontinuierliche Zunahme der Absatzzahlen zu erwarten sein. In einem ersten konservativen Szenario erhöht sich die jährliche Absatzzahl der Heizungs-Wärmepumpen bis 2030 auf ca. 96.000, wobei es bereits im Jahr 2025 zur Stagnation kommt und bis 2030 nahezu keine Veränderung auftritt. In einem zweiten optimistischen Szenario steigt die jährliche Absatzzahl der Heizungs-Wärmepumpen bedingt durch politisch günstige Rahmenbedingungen bis zum Jahr 2030 stetig auf bis zu 235.000 an und vervierfacht sich damit gegenüber dem Stand 2012. In beiden Szenarien nimmt insbesondere der prozentuale Anteil der LWWP an der Gesamtzahl der abgesetzten Heizungs-Wärmepumpen zu. Für das Jahr 2030 wird eine Absatzzahl der LWWP zwischen ca. 62.500 und 170.000 erwartet.“* Es handelt sich im Normalfall um nicht genehmigungspflichtige Anlagen nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG), für die genehmigungsrechtlich eine gesonderte schalltechnische Überprüfung nicht zwingend erforderlich ist<sup>2</sup>. Der Begriff „Anlage“ wird oft im Zusammenhang mit Genehmigungsprozeduren für ein oder mehrere meist fest installierte Geräte verwendet. Die jährliche Absatzzahl 2012 betrug 59.600. Nimmt man eine ähnliche Zahl von 60.000 auch für die Folgejahre, so bedeutet dies 60.000-mal im Jahr die Chance auf eine als Belästigung wahrgenommene Geräuscheinwirkung durch eine Wärmepumpe. Zum nächtlichen Belästigungspotenzial kommt also erschwerend die Häufigkeit der Geräte hinzu (Schulz, Hübelt u. a., 2014).

Häufig werden die betreffenden Anlagen durchgängig rund um die Uhr betrieben und strahlen daher auch nachts unvermindert tieffrequente Geräusche ab (siehe Abb. 4.3). All dies zusammen hat zuletzt verstärkt zum Auftreten von Geräuschproblemen im Zusammenhang mit dem Betrieb solcher Geräte und Anlagen geführt.

---

<sup>2</sup> Grundsätzlich ist jedoch auch bei diesen Anlagen nach § 22 BImSchG der Stand der Technik einzuhalten.



**Abb. 4.3** Terzspektrum der Geräuschimmission im Raum, hervorgerufen durch eine Luftwärmepumpe mit tonhaltigem Frequenzverlauf bei tiefen Frequenzen und Überschreitung des Anhaltswertes des Beiblattes 1 der DIN 45680 (Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt, *Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen und Luftwärmepumpen, Ein Leitfaden (Februar 2011)*)

Abb. 4.3 zeigt im Vergleich mit Abb. 4.4 stellvertretend für sehr viele Lärmbeschwerden, welche geringen Schalldruckpegel zu einer Lästigkeit tieffrequenter Schalle im Wohnumfeld führen können und dass häufig die verursachenden Schalldruckpegel im Belastungsbereich 1 und 2 liegen, häufig im Grenzbereich einer Wahrnehmungsschwelle oder darunter.

Ursachen und Probleme beim Einsatz von stationären Geräten, wie z. B. der Quellengruppe I und III nach der UBA-Machbarkeitsstudie zu „Wirkungen von Infraschall von 2014“ in Wohngebieten und ländlichen Bereichen, sind:

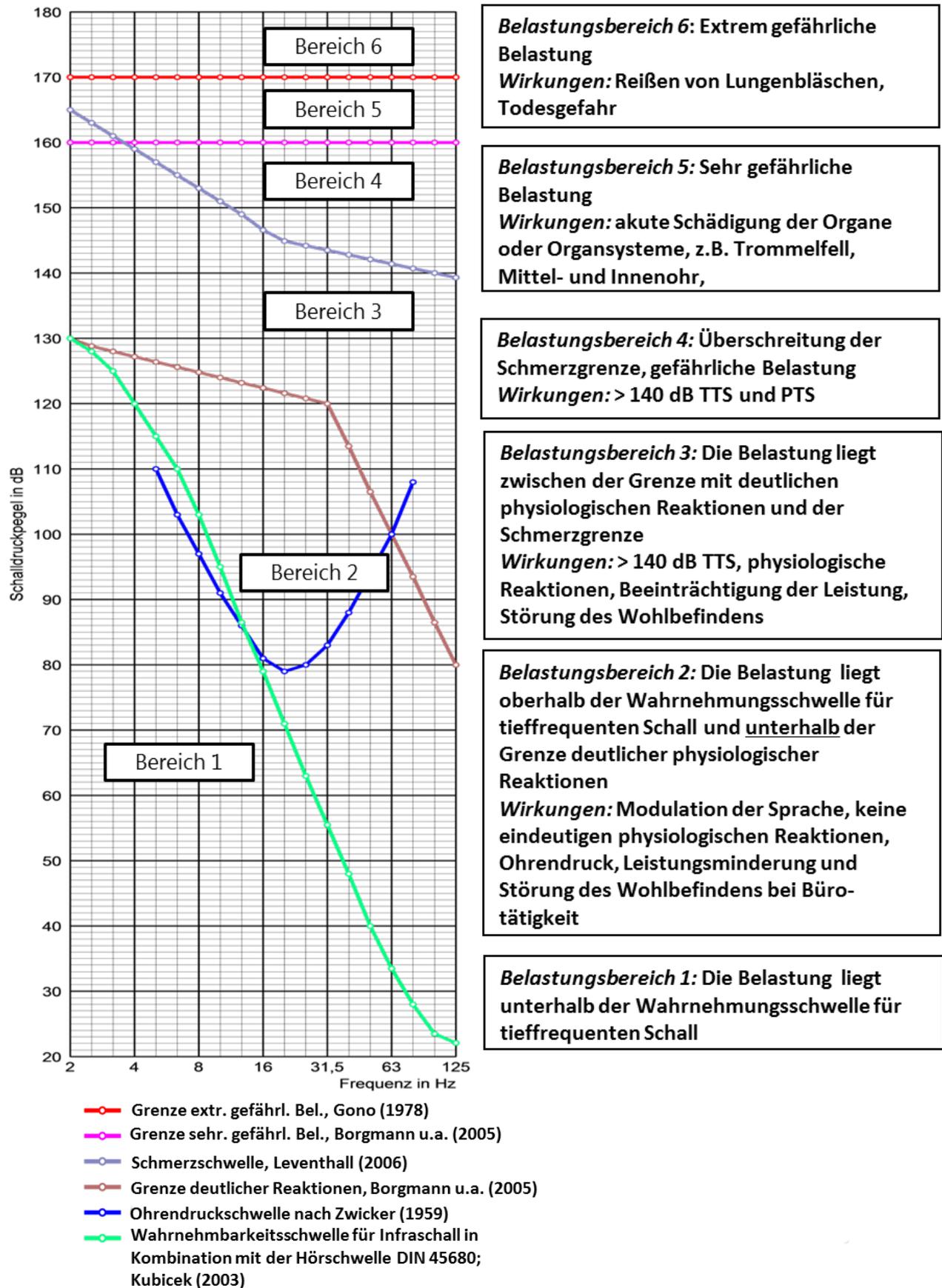
- Zunehmender Einsatz von Geräten zur Heizung, Lüftung oder Kühlung von Gebäuden innerhalb von Wohngebieten, z. B. Wärmepumpen, BHKW, Lüftungs- und Kälteanlagen usw.
- Dezentralisierung der Energieerzeugung.
- Die stationären Geräte sind oft keine genehmigungspflichtigen Anlagen und können daher zunächst ohne gesonderte schalltechnische Überprüfung aufgestellt werden.
- Häufig findet ein durchgängiger stationärer Betrieb solcher Geräte mit unverminderter tieffrequenter Schallimmission in der Nachtzeit statt.
- Heranrückende Wohnbebauung an die Anlagen erneuerbarer Energien.
- Anlagen der Energieerzeugung und des Energietransportes werden manchmal in vormalig eher ruhigeren Wohngebieten und ländlichen Bereichen gebaut.
- Unspezifische Störwirkung von tieffrequentem Schall einschließlich Infraschall (z. B. langsam laufende Diesel- und Gasmotoren, Kompressoren, Schwingsiebe, Kamine, Windenergieanlagen).

- Die anwachsende Anzahl von Windenergieanlagen (WEA) in der Landschaft stört die Bevölkerung („schallunabhängiges, d. h. optisches Problem“, NOCEBO-Effekt).

Nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (§ 5 BImSchG) in Verbindung mit der „Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm“ (TA Lärm, 6. AVwV zum BImSchG) zählen zu den schädlichen Umwelteinwirkungen auch die erheblichen Belästigungen durch Geräusche. Die TA Lärm dient dem Schutz sowie der Vorsorge der Allgemeinheit und der Nachbarschaft vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Geräusche. Sie gilt für genehmigungsbedürftige Anlagen und nicht genehmigungsbedürftige Anlagen nach dem 2. Teil des Bundes-Immissionsschutzgesetzes.

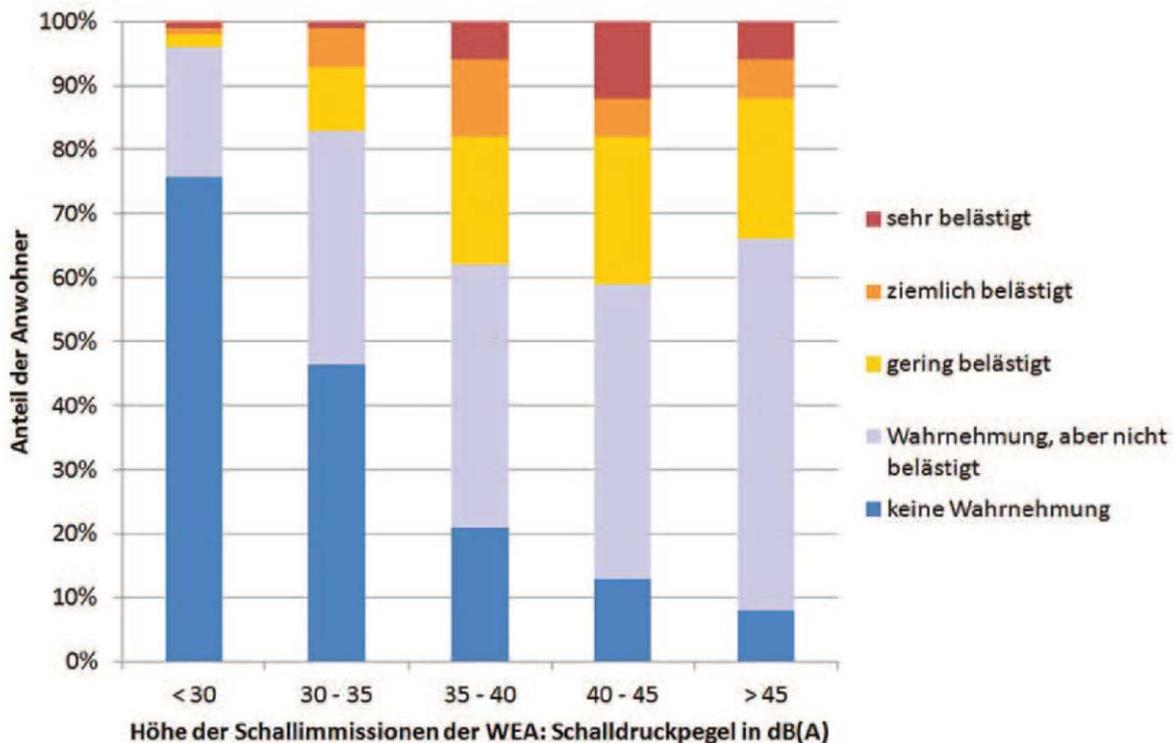
In der Regel wird der Bereich von 10 bis 15 % stark belästigter Personen als Schwelle für lärmbedingte Belästigungen angesehen. Dieser Prozentsatz stimmt mit besonders empfindlichen Personen in der Bevölkerung überein, bei denen der Prozentsatz ebenfalls 10 bis 15 % beträgt. Im Falle von Verkehrslärm liegt der Prozentsatz Belästigter bei 25 % oder mehr. In Abhängigkeit vom Grad der Belästigung macht Hörmann den Vorschlag, bei einem Prozentanteil „stark Gestörter“ von mehr als 25 % „sofortige Schutzmaßnahmen“ vorzusehen und bei „stark Gestörten“ im Bereich von 10 bis 25 % „langfristige Gegenmaßnahmen“ ins Leben zu rufen. Bei kleiner oder höchstens gleich 10 % „stark Gestörter“ hingegen werden keine Immissionsschutzmaßnahmen vorgesehen (Müller, G. u. a., 2004).

Als erhebliche Belästigung im medizinischen Sinn wird im Allgemeinen derjenige äquivalente Dauerschallpegel angesehen, bei dem sich 25 % der Befragten stark belästigt fühlen (Deutscher Bundestag, 1999).



**Abb. 4.4** Schallpegelgebiet von tieffrequentem Schall, strukturiert nach Belastungsbe-reichen 1 bis 6 unter Berücksichtigung der Grenzen für die Wahrnehmung, der physi-ologischen Reaktionen und der Schädigung mit Angabe der zugehörigen Gefährlich-keiten und auralen sowie extraauralen Wirkungen (Quelle: *Schmidt, M., 2014*)

Ein Beispiel dafür, wie akustisch-soziologische Studien zur Bewertung von tieffrequenten Lärmwirkungen in einer repräsentativen Bevölkerungsstichprobe durchgeführt werden können, zeigt eine niederländische Studie von *Pedersen et al.* von 2009 unter 708 Anwohnern, die von *Twardella (2013)* unter dem Gesichtspunkt der „akustischen Belästigung“ ausgewertet wurde. Abb. 4.5 zeigt die Wahrnehmung und Belästigung durch Geräusche von Windenergieanlagen in Abhängigkeit vom A-bewerteten Schalldruckpegel. Der Grad der Belästigung wird deutlich. Dabei zeigen die Ergebnisse, dass bereits bei den niedrigeren Schallimmissionen (< 30 dB(A)) der Windenergieanlagen ein gewisser Anteil vorhanden ist, der sich belästigt oder sogar stark belästigt fühlt. Es wird auch deutlich, dass die Belästigung tendenziell mit dem A-bewerteten Schalldruckpegel steigt.



**Abb. 4.5** Wahrnehmung von und Belästigung durch Geräusche von Windenergieanlagen (WEA) in Abhängigkeit vom A-bewerteten Schalldruckpegel. Ergebnisse einer niederländischen Studie unter 708 Anwohnern (Quelle: *Twardella, D., 2013*)

Eine Voraussetzung für die Festlegung von Schwellenwerten zur akustischen Belästigung durch tieffrequente Geräusche sind Studien zu Belästigungsreaktionen unter soziologisch-medizinischen Gesichtspunkten. In der Regel liegen dann die Schwellenwerte für erhebliche Belästigungen deutlich höher. Das heißt, im medizinischen Sinn sind „erhebliche Belästigungen“ zu unterscheiden von dem Begriff der „erheblichen Belästigung“ in den maßgeblichen Umweltgesetzen, bei denen es nicht allein auf die Reaktion der Betroffenen ankommt, sondern auch auf die wirtschaftlichen und sozialen Faktoren. Dieser Ansatz wird natürlich auch entsprechend der TA Lärm für die Beurteilung tieffrequenter Geräusche gelten. Nach TA Lärm geht es bei den tieffrequenten Geräuschen um die vorherrschenden Energieanteile im Frequenzbereich unter 90 Hz und es ist in diesem Zusammenhang die Frage zu klären, ob von ihnen schädliche Umwelteinwirkungen ausgehen. Dabei ist im Einzelfall nach den örtlichen Verhältnissen zu beurteilen.

Die Definition und der Begriff „Belästigung“ allein sind schon sehr komplex. Der Versuch einer Definition sagt: „Belästigung ist ein Gefühl des Unbehagens, das mit irgendeinem Stoff oder einem Umstand in Verbindung steht, von dem ein Individuum oder eine Gruppe nachteilige Beeinflussung erwartet“. Schall selbst gilt als belästigend (im Sinne der Unerwünschtheit), wenn exponierte Personen oder Personengruppen ihn nach Möglichkeit mindern oder vermeiden oder wenn sie das exponierte Gebiet möglichst verlassen würden. Die Unerwünschtheit von Schall ist also subjektiv.

Belästigung besteht also nicht allein aus der Reizwahrnehmung „Schall“, sondern beruht auch auf negativ bewerteten Folgen der Reizexposition. Nach *Guski (1989)*, *Lercher (1998)* und *Schick (1997)*, zitiert in *Deutscher Bundestag, Sondergutachten zu Umwelt und Gesundheit*, kann die „Belästigung“ folgende einzelne Komponenten umfassen:

- I) Die **Lästigkeit** eines Schallreizes, wie sie in psychophysiologischen Laborexperimenten untersucht wird. Auf der Grundlage bisheriger solcher Untersuchungen kann angenommen werden, dass die Lästigkeit durch Schall zunimmt, wenn
  - a) die Lautstärke ansteigt,
  - b) Einzeltöne oder tonhafte Geräusche im tieffrequenten Bereich vorkommen,
  - c) ausgeprägte Einzeltöne im Spektrum nachweisbar sind,
  - d) die Schallpegelschwankungen eines Geräusches sehr schnell mehr als 5 dB über den mittleren Pegel ansteigen,
  - e) Pegeländerungen sehr kurze Anstiegs- und Abfallzeiten (eine Millisekunde und kürzer) haben, d. h. sogenannte Impulsgeräusche vorliegen,
  - f) der Informationsgehalt des Signals ansteigt,
  - g) starke Frequenzschwankungen auftreten,
  - h) Geräusche auftreten, deren Pegelabstand zum Grundgeräusch z. B. > 10 dB ist.

Zwar sind die Einflüsse der Situation und der Person an solchen Lästigkeitsurteilen beteiligt, aber es lassen sich auch Zusammenhänge zwischen wahrgenommener Lästigkeit und den akustischen Charakteristika des Schallereignisses, wie oben beschrieben, zeigen.

- II) Die **Emotion**, d. h. das Gefühl von Verärgerung, Belästigung oder Störung des persönlichen Wohlbefindens.
- III) Die **Störung** oder Unterbrechung von alltäglichen Aktivitäten, insbesondere Störung der Kommunikation und der Entspannung.
- IV) Psychosomatische **Symptome** wie Reizbarkeit, Gespanntheit, Kopfschmerzen u. Ä.

Aus Untersuchungen ist zu erkennen, dass die psychologischen Lärmwirkungen in der Regel deutlich mit den physikalischen Kennwerten zusammenhängen. Allerdings muss man festhalten, dass die Lästigkeitsurteile im Hinblick auf die Untersuchung der Geräusche nur zu etwa 30 % durch physikalische Prozesse erklärbar sind (*Feldmann, J., 2006*). Die individuellen psychologischen Einflüsse sind messtechnisch nicht erfassbar.

Grundlage für die Erfassung und Festlegung von Grenzen der Lästigkeit sind:

- a) Akustisch soziologische Studien zur Bewertung von tieffrequenten Lärmwirkungen in einer repräsentativen Bevölkerungsstichprobe:
- Auswahl des Befragungsgebietes,
  - Ermittlung eines mittleren Gestörtheitsgrades auf einer Beurteilungsskala,
  - kontinuierliche und langfristige Emissions- und Immissionsmessungen,
  - Erhebung von Daten auf der Grundlage eines qualifizierten Fragebogens,
  - Bearbeitung der Ergebnisse mit mathematisch-statistischen Methoden,
  - Ermittlung von Korrelationen zwischen den Daten.

Solche Untersuchungen gestatten Rückschlüsse auf die Angemessenheit von Grenzwerten sowie von Mess- und Bewertungsverfahren.

- b) WHO-Basiswert („basic limit“) zum Ausschluss jeder negativen Wirkung und WHO-Praxiswert („practical limit“) als Kompromiss zwischen Basiswert und den technischen und sozialökonomischen Möglichkeiten. (Man geht der Frage nach: „Wieviel Prozent mit tieffrequenten Schall Belästigte sind medizinisch bzw. gesellschaftlich tragbar?“)

In der hier vorliegenden Untersuchung wird der Begriff „**Lästigkeit**“ so verwendet, wie er unter I) beschrieben wird. Die subjektiven Einflussgrößen II), III) und IV) sind einer objektiven Beschreibung nicht zugänglich. Von daher werden diese bei den Betrachtungen und Interpretationen der Literatur ausgeklammert.

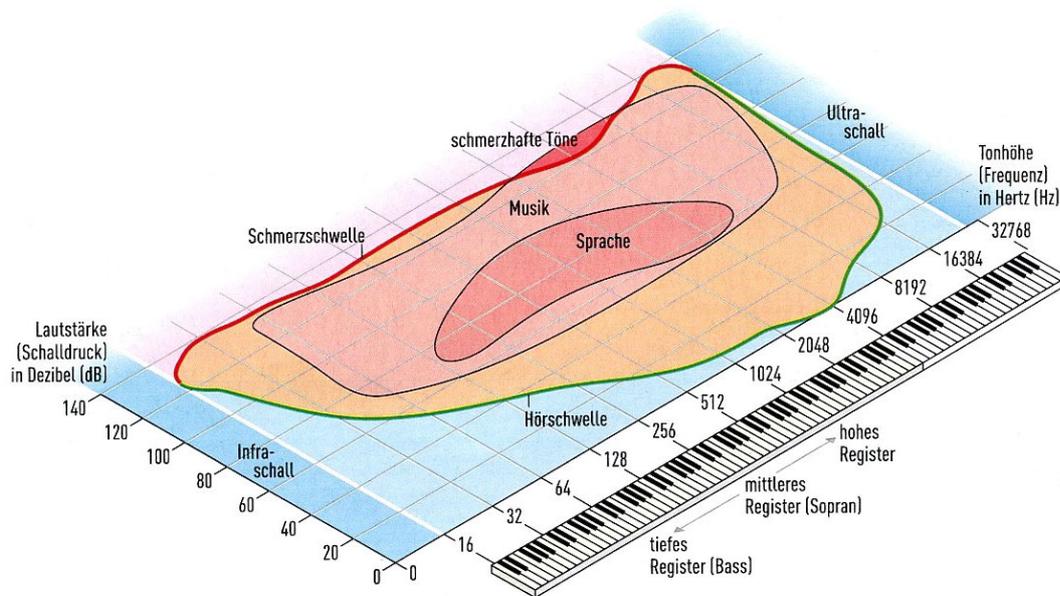
## **4.2 Lästigkeit von tieffrequentem Schall als Grundlage für die Messung, Bewertung und Beurteilung**

### **4.2.1 Besonderheiten der Lästigkeit von tieffrequentem Schall (2 Hz bis 100 Hz) gegenüber mittel- und hochfrequentem Hörschall (> 100 Hz)**

Die jeweiligen Frequenzbereiche der Schallwahrnehmung des Menschen werden nachfolgend kurz erläutert.

Abb. 4.6 zeigt den Frequenz- und Pegelbereich des Schalls, der vom menschlichen Gehör wahrgenommen werden kann. Der Bereich der hörbaren Schalle zwischen Hörschwelle und Schmerzgrenze wird als Hörfläche bezeichnet.

Nach *Kubicek, R. (1989)* kann davon ausgegangen werden, dass im Infraschallbereich unterhalb von 16 Hz eine diskontinuierliche Wahrnehmung der Lautstärke noch existiert, aber nicht mehr die Tonhöhenwahrnehmung.

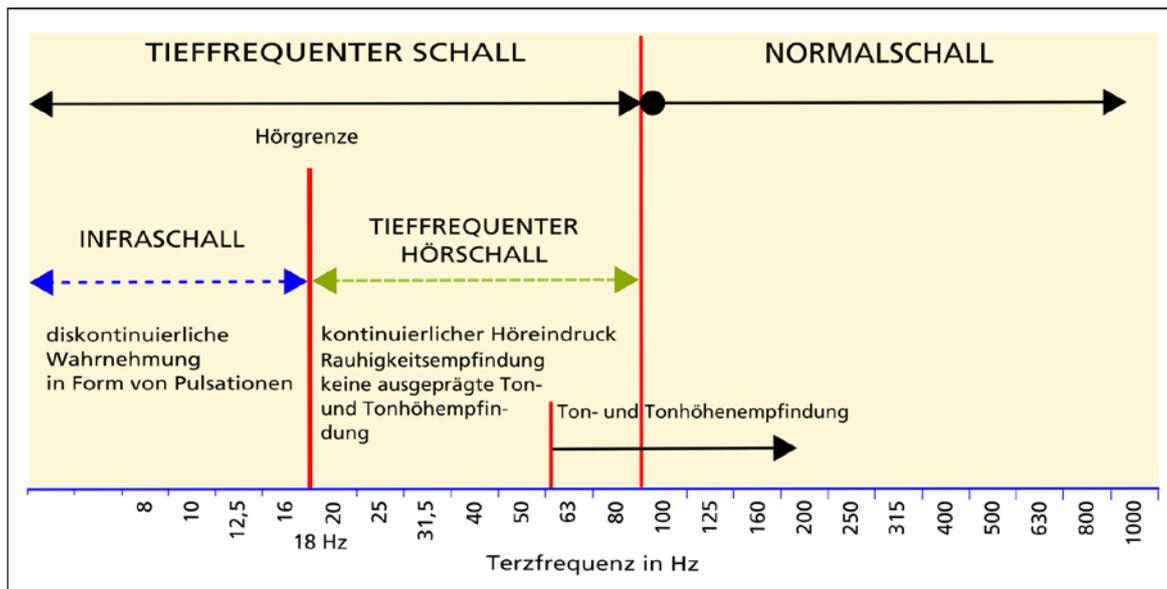


**Abb. 4.6** Infra-, Hör- und Ultraschallbereich einschließlich der Hörfläche des Menschen (Quelle: *GEO-Heft 11/2003*)

Für die Wahrnehmung, Hörempfindung und die Störf Wirkung der Frequenzkomponenten im tieffrequenten Frequenzbereich werden drei verschiedene Kategorien unterschieden, wobei zu bedenken ist, dass die hier aufgezeigten Frequenzbereiche nicht scharf abgegrenzt sind, sondern erfahrungsgemäß von einem Bereich in den nächsten ein allmählicher Übergang stattfindet (Angaben nach *Kubicek, R., 1989*):

1. Frequenzbereich unterhalb von 100 Hz bis etwa 60 Hz  
Übergangsbereich zum normalen Hörschall. Die Ton- und Tonhöhenempfindung sowie die Lautstärkeempfindung sind vorhanden.
2. Frequenzbereich unterhalb von etwa 60 Hz bis zur unteren Hörfrequenzgrenze von ca. 18 Hz  
Bereich des extrem tieffrequenten Schalls. Die Ton- und Tonhöhen- sowie Lautstärkeempfindung sind nur noch schwach ausgeprägt und verschwinden zur Hörgrenze hin völlig – Töne werden nicht mehr glatt, sondern rau gehört (Rauigkeitsempfindung). Es entsteht zusätzlich eine Vibrationsempfindung.
3. Frequenzbereich unterhalb von ca. 18 Hz  
Bereich des Infraschalls. Bei diesen Schallfrequenzen entsteht kein kontinuierlicher Höreindruck mehr, vielmehr erfolgt nur noch eine diskontinuierliche Wahrnehmung von Pulsationen. Bei der Einwirkung von Infraschall auf Menschen kann deshalb nur noch von „Wahrnehmung“, nicht mehr von „Hörbarkeit“, die Rede sein (die Hörbarkeit setzt nach der klassischen Hörtheorie Ton- und Lautstärkeempfindung voraus).

Abb. 4.7 zeigt eine schematische Übersicht der drei oben beschriebenen Frequenzbereiche für die Wahrnehmung von Schall. Wenn wir also den Frequenzbereich von 2 Hz bis 100 Hz betrachten, müssen wir eine Differenzierung der akustischen Wahrnehmung gegenüber Hörschall berücksichtigen.



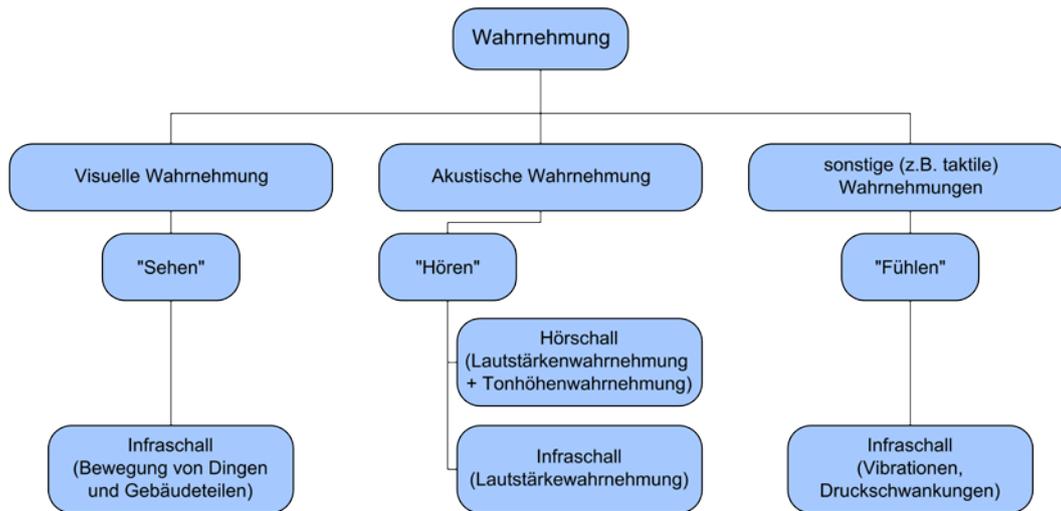
**Abb. 4.7** Frequenzbereiche für die Empfindung und Wahrnehmung von Schall (Kubicek, R., 1989)

Die von Kubicek, R. (1989) beschriebenen Erscheinungen im tieffrequenten Frequenzbereich, wie Rauigkeit und Pulsation, findet man wieder in der Terminologie für tieffrequente Phänomene bei der Entwicklung von Kraftfahrzeugen. Sie werden beispielsweise von Letens, U. (2011) beschrieben. Subjektiver Eindruck von tieffrequenten Geräuschen ist Wummern, Brummen, Donnern, Druck im Kopf usw.

Tieffrequenter Schall kann dem menschlichen Organismus in verschiedener Art und Weise vermittelt werden. Der Mensch hat für sehr tieffrequenten Schall, insbesondere für Infraschall, kein spezifisches Wahrnehmungsorgan, wie es das Gehörorgan für den Hörschall darstellt. Er wird sowohl über das Gehör als offenbar auch über verschiedene andere Rezeptorsysteme aufgenommen und erkannt (Schmidt, M., 1992). Hier kommen vor allem sogenannte Mechanorezeptoren in Betracht. Für die Mechanorezeptoren lässt sich folgende Einteilung vornehmen (Rublack, H., 1978):

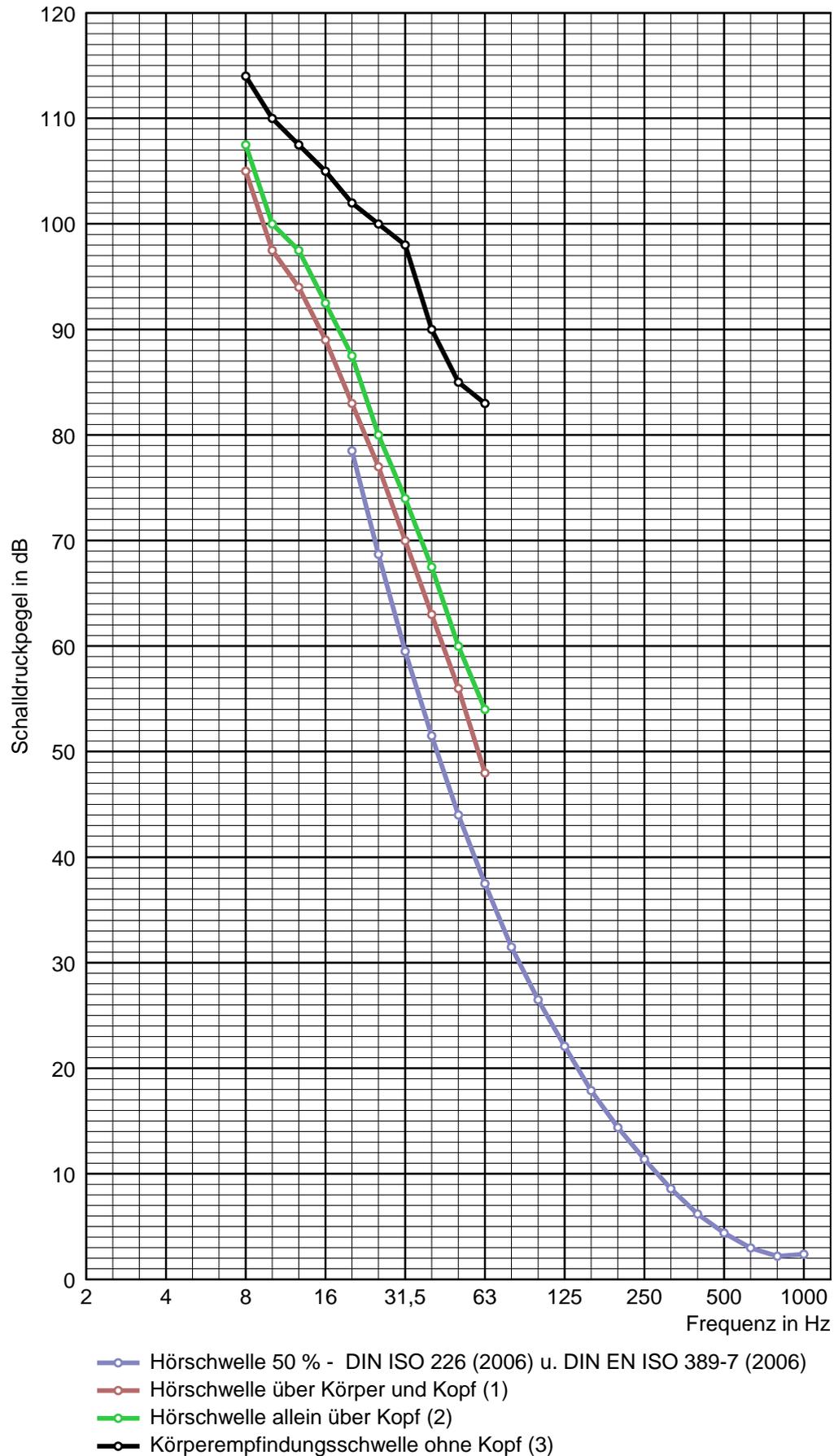
- Haut-, Muskel- und Sehnenrezeptoren; Wahrnehmung von Körpervibrationen oberhalb von 15 Hz (Vibrationsgefühl),
- Vestibularapparat; Wahrnehmung von Vibrationen unterhalb von 15 Hz,
- Barorezeptoren; diese sind vermutlich an der Schwingungsrezeption beteiligt.

Mechanorezeptoren vermitteln Druck-, Berührungs-, Kitzel- und Vibrationswahrnehmungen. Unterhalb von 10 Hz können sogar die Schalldruckschwankungen wahrgenommen werden. Tieffrequente Schalle können also darüber hinaus nicht nur mit dem Ohr, sondern auch mit anderen Organen wahrgenommen werden (taktile sowie vestibuläre Wahrnehmung) (Robert-Koch-Institut, 2007). Die Einordnung der akustischen Wahrnehmung von Hörschall, tieffrequentem Schall und Infraschall zeigt Abb. 4.8.



**Abb. 4.8** Zur Einordnung der akustischen Wahrnehmung von Schall. Wahrnehmung von tieffrequentem Schall einschließlich Infraschall über das Gehörorgan und andere Rezeptorsysteme des Menschen (modifiziert nach *Empfehlung des Robert-Koch-Institutes, 2007*).

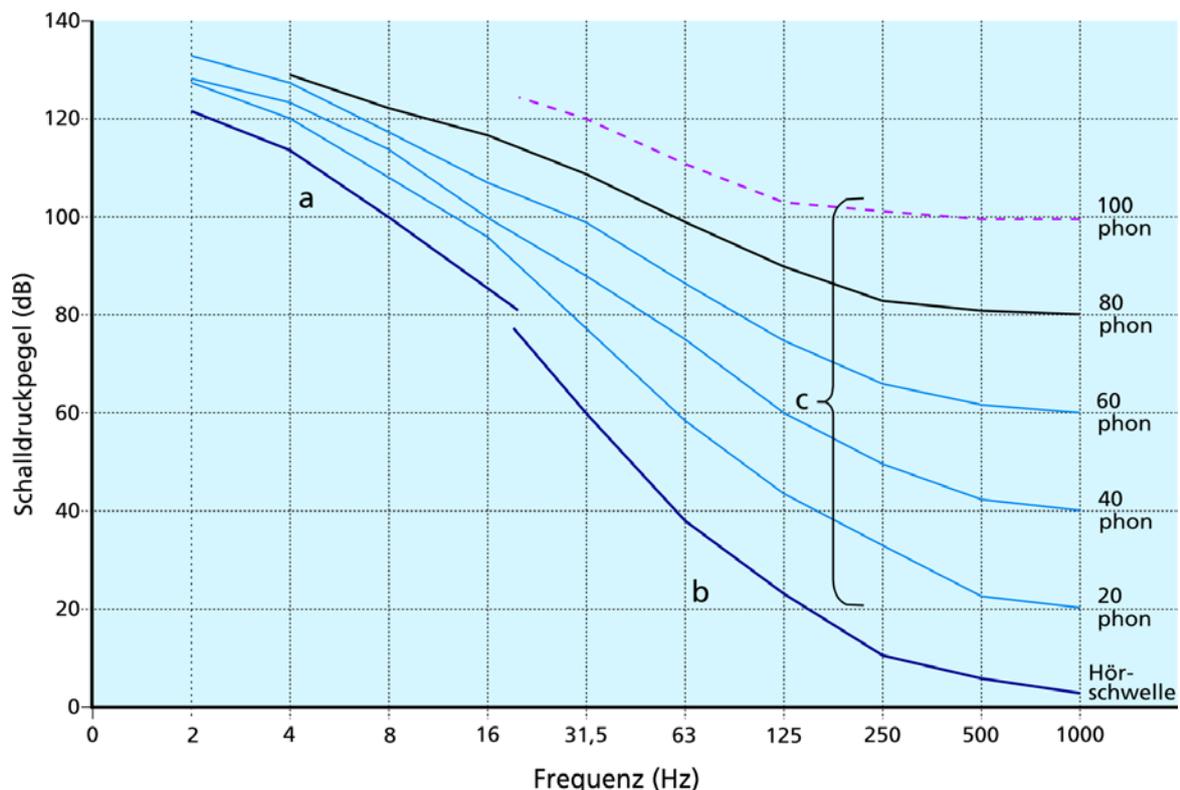
Abb. 4.9 zeigt tendenziell, dass die Wahrnehmung von extrem tieffrequentem Schall und Infraschall nicht allein über das Hörorgan erfolgt, sondern der gesamte Körper beteiligt ist. Festzustellen ist, dass die „*Hörschwelle über Körper und Kopf*“, die „*Hörschwelle allein über den Kopf*“ und die „*Körperempfindungsschwelle außer dem Kopf*“ bei 8 Hz aufeinander zustreben, so dass man unterstellen kann, dass bei sehr tiefen Frequenzen ( $< 8$  Hz) die Wahrnehmung von der „*Körperempfindungsschwelle außer dem Kopf*“ maßgeblich bestimmt wird.



**Abb. 4.9** Darstellung der Empfindungsschwellen einzelner Teile des Körpers bei der Wahrnehmung von tieffrequentem Luftschall einschließlich Infraschall; 1) Hörschwelle über Körper und Kopf, 2) Hörschwelle allein über Kopf, 3) Körperempfindungsschwelle außer Kopf (Quelle: Yamada, S. u. a., 1980)

Jedoch kann man davon ausgehen, dass die durch Infraschall möglicherweise ausgelösten Körperschwingungen eine begrenzte Bedeutung für Menschen im täglichen Leben haben. Tieffrequenter Schall, einschließlich Infraschall, kann Körperschwingungen in verschiedenen Körperteilen auslösen, wenn Schallpegel ca. 20 bis 25 dB bzw. 40 bis 50 dB oberhalb der Hörschwelle liegen (*Twardella, D., 2013*). Die vorkommenden tieffrequenten Schalle, einschließlich Infraschall in den Wohnungen, sind in der Regel nicht hoch genug, um signifikante Körperschwingungen zu verursachen.

Sekundäreffekte wie Rütteln von abgehängten Deckenpaneelen, Bewegungen von lichttechnischen Einrichtungen, Schwingungen von Gebäudedecken, Fenstern und Türen oder Gläserklirren können sowohl visuell als auch taktil wahrgenommen werden.



**Abb. 4.10** Hörschwelle und Kurven gleicher Lautstärke im Frequenzbereich unter 1000 Hz (Darstellung in Anlehnung an *Møller und Andresen (1984)*)

**a:** nach *Møller und Pedersen (2004)*,

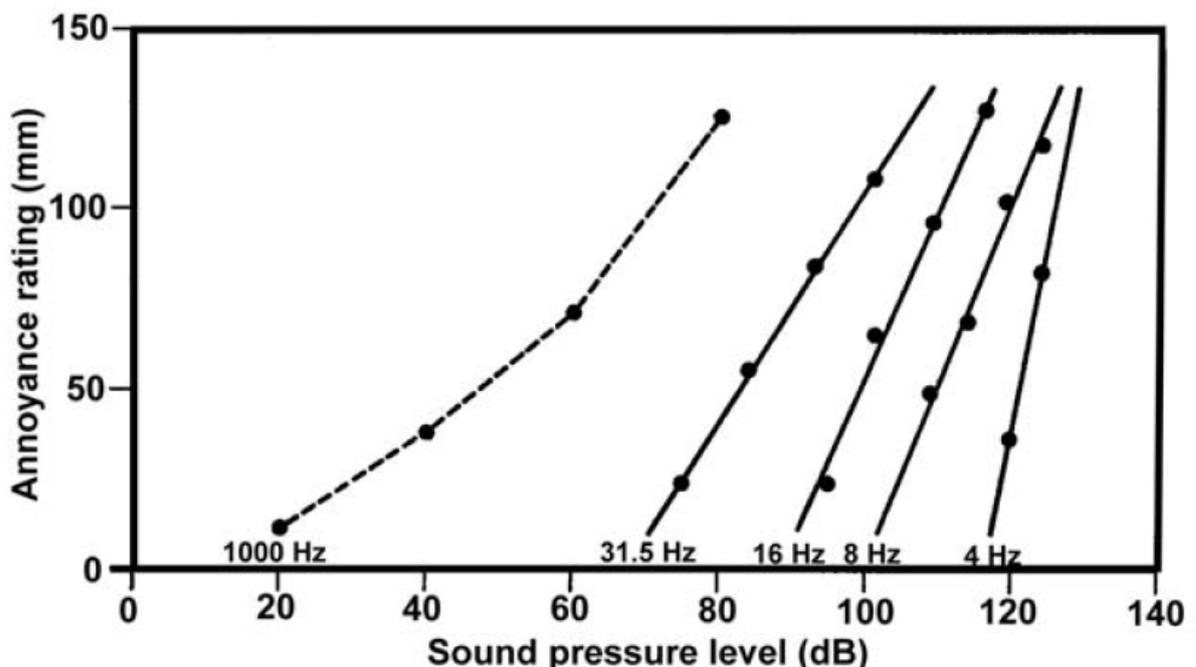
**b:** nach *DIN EN ISO 389-7 (2006)*,

**c:** Kurven gleicher Lautstärke: im Frequenzbereich von 20 bis 1000 Hz nach *DIN ISO 226 (2003)*, im Frequenzbereich < 20 Hz nach *Møller und Andresen (1984)*. Alle Kurven wurden in den Intervallen zwischen den angegebenen Frequenzen linearisiert (Quelle: *Empfehlung des Robert Koch-Institutes, 2007*).

Aus Abb. 4.10 ist zu erkennen, dass bei den tiefen Frequenzen ( $f < 20$  Hz) die Kurven gleicher Lautstärke sehr eng beieinander liegen verglichen mit den Kurven gleicher Lautstärkepegel höherer Frequenzen im Hörschallbereich. Das Gebiet zwischen der „Hörschwelle“ und der „auralen Schmerzschwelle“ wird mit abnehmender Frequenz immer kleiner (Abb. 4.10.a). Durch das Zusammenrücken der Kurven gleicher Lautstärke wird die Verdoppelung der Lautstärke bei tieffrequentem Schall ( $f \leq 20$  Hz) schon bei einer Schallpegeländerung von 5 dB empfunden. Im Gegensatz dazu beträgt die Schallpegeländerung, die einer Verdoppelung der Lautstärke entspricht, bei Frequenzen ( $> 100$  Hz) im mittel- und hochfrequentem Hörschallbereich 10 dB, d. h. bei den tieffrequenten Schallen führen kleine Schallpegeländerungen bereits zu großen Änderungen des Wahrnehmungsempfindens. Daher kann unterstellt werden, dass sich schon bei geringen Überschreitungen der kombinierten „Wahrnehmungs- und Hörschwelle“ im tieffrequenten Bereich extraaurale Wirkungen in Form von „Lästigkeit“ einstellen.

Für tieffrequente Geräusche wird diese Aussage durch frühere Experimente (Kalivoda, M., 1998) bestätigt, in denen man festgestellt hat, dass, wenn bei einem 100 Hz-Ton der Schallpegel um 10 dB angehoben wird, sich nicht wie üblicherweise die Lautheit verdoppelt, sondern sie auf das Vier- bis Fünffache steigt.

Abb. 4.11 zeigt nach Møller, H. (1987), wie die Lästigkeit bei geringer Änderung des Schalldruckpegels bei tiefen Schallfrequenzen steil ansteigt. Bei 4 Hz beträgt die Änderung im Schalldruckpegel, die einer Erhöhung des *annoyance rating* (mm) von ca. 10 mm auf 130 mm entspricht, ca. 10 dB, bei 8 Hz und 16 Hz ca. 20 dB, während bei 31,5 Hz fast 40 dB notwendig sind. Der Vergleich bei 1000 Hz zeigt einen Bereich von annähernd 60 dB.



**Abb. 4.11** Abhängigkeit der Lästigkeit von der Erhöhung des Schalldruckpegels bei reinen Tönen (18 Versuchspersonen) (Quelle: Møller, H., 1987)

#### 4.2.2 Lautstärke

Die Lautstärke ist ein Ausdruck für die Intensität der Schallempfindung. Sie kann als Lage der Hörempfindungsstärke auf einer geeignet gewählten Werteskala angegeben werden, die zwischen leise und laut unterscheidet.

Schallsignale gleichen Schalldruckpegels bei verschiedenen Frequenzen können unterschiedliche Lautstärkewahrnehmungen hervorrufen. Für sinusförmige Schallsignale (reine Töne) wird dieses Verhalten durch die Kurven gleichen Lautstärkepegels (Iso-phonie) beschrieben. Die Normalkurven gleicher Lautstärkepegel sind verankert in der DIN ISO 226 vom April 2006. Die Norm legt Kombinationen von Schalldruckpegeln und Frequenzen gleichförmiger reiner Dauertöne fest, die vom Menschen als gleich laut empfunden werden. Die Kurven gleicher Lautstärkewahrnehmung beschreiben eine der wichtigsten Eigenschaften des menschlichen Gehörs und sind deshalb für die Psychoakustik von wesentlicher Bedeutung. Bei den Kurven gleichen Lautstärkepegels ist zu beachten, dass die angegebenen Kurven für junge Normalhörende gelten, wobei beidohrig abgehörte reine Töne bei frontalem Schalleinfall beurteilt werden.

Die in *DIN ISO 226 (2006)* festgelegten Normalkurven gleicher Lautstärkepegel für reine Töne im freien Schallfeld wurden aus den Ergebnissen von zwölf unabhängigen Untersuchungen im Zeitraum von 1983 bis 2002 mit 304 Versuchspersonen im Alter von 18 bis 25 Jahren (otoakustisch normalhörende Personen) gewonnen.

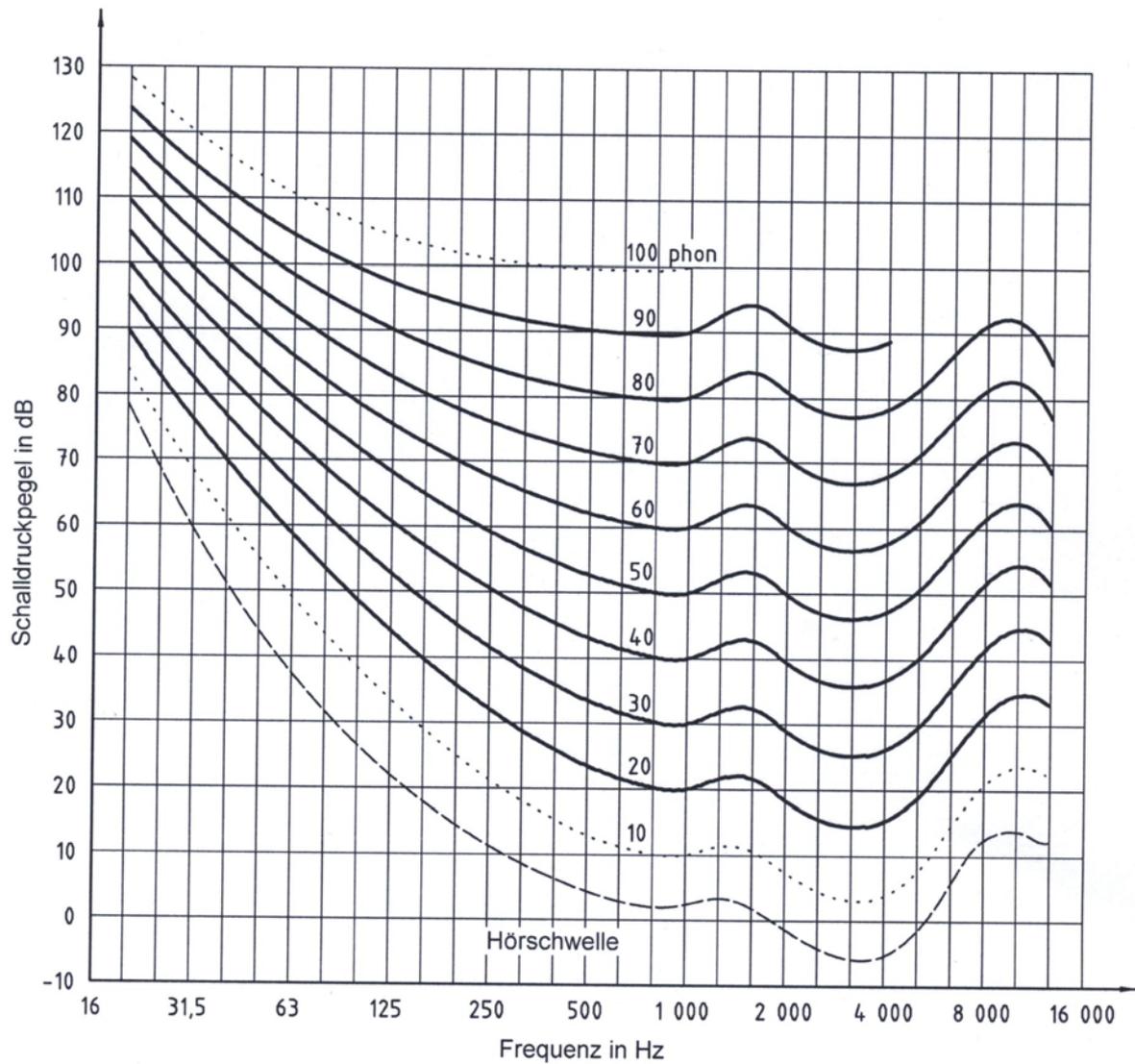
Die Daten und die Kurzbeschreibungen der Untersuchungen mit Untersuchungs-jahr, Land, Schallfeld, Anzahl der Probanden, dem Untersuchungsverfahren, dem Referenzton usw. sind im Anhang C der *DIN ISO 226 (2006)* ausführlich dargestellt.

Die Normalkurven gleicher Lautstärke für reine Töne und binaurales Hören im freien Schallfeld bei frontalem Schalleinfall sind in Abb. 4.12 dargestellt.

Die Normalkurven gleicher Lautstärkepegel gemäß DIN ISO 226 aus dem Jahr 2006 liegen unverkennbar höher als die aus der DIN 45630-2 aus dem Jahr 1967 (vergleiche hierzu Abb. 4.12 mit Abb. 4.13). Bei 20 Hz ist beispielsweise erkennbar, dass die Normalkurven gleicher Lautstärkepegel aus dem Jahr 2006 um **8 dB bis 10 dB(!)** höher liegen als die aus dem Jahr 1967.

Den Vergleich der Hörschwellen nach *DIN ISO 226 (2006)* und *DIN 45630-2 (1967)* über den Frequenzbereich von 20 Hz bis 100 Hz zeigt die Abb. A1 im Anhang. Danach liegt beispielsweise unterhalb von 31,5 Hz die Hörschwelle von 2006 um bis zu 7 dB höher als die von 1967. Die Differenzen der Hörschwellen zeigen sich im Abstand zwischen den beiden Kurven.

Darüber hinaus verlaufen die Kurven nach *DIN ISO 226 (2006)* im tieffrequenten Bereich viel steiler als die Normalkurven gleicher Lautstärkepegel aus der DIN 45630-2 aus dem Jahr 1967.



**Abb. 4.12** Normalkurven gleicher Lautstärkepegel für reine Töne (binaurales Hören im freien Schallfeld bei frontalem Schalleinfall) gemäß *DIN ISO 226 (2006)*

### 4.2.3 Auswirkungen der A-, B-, C-, G-, Z-Frequenzbewertungen auf tieffrequente Schalle

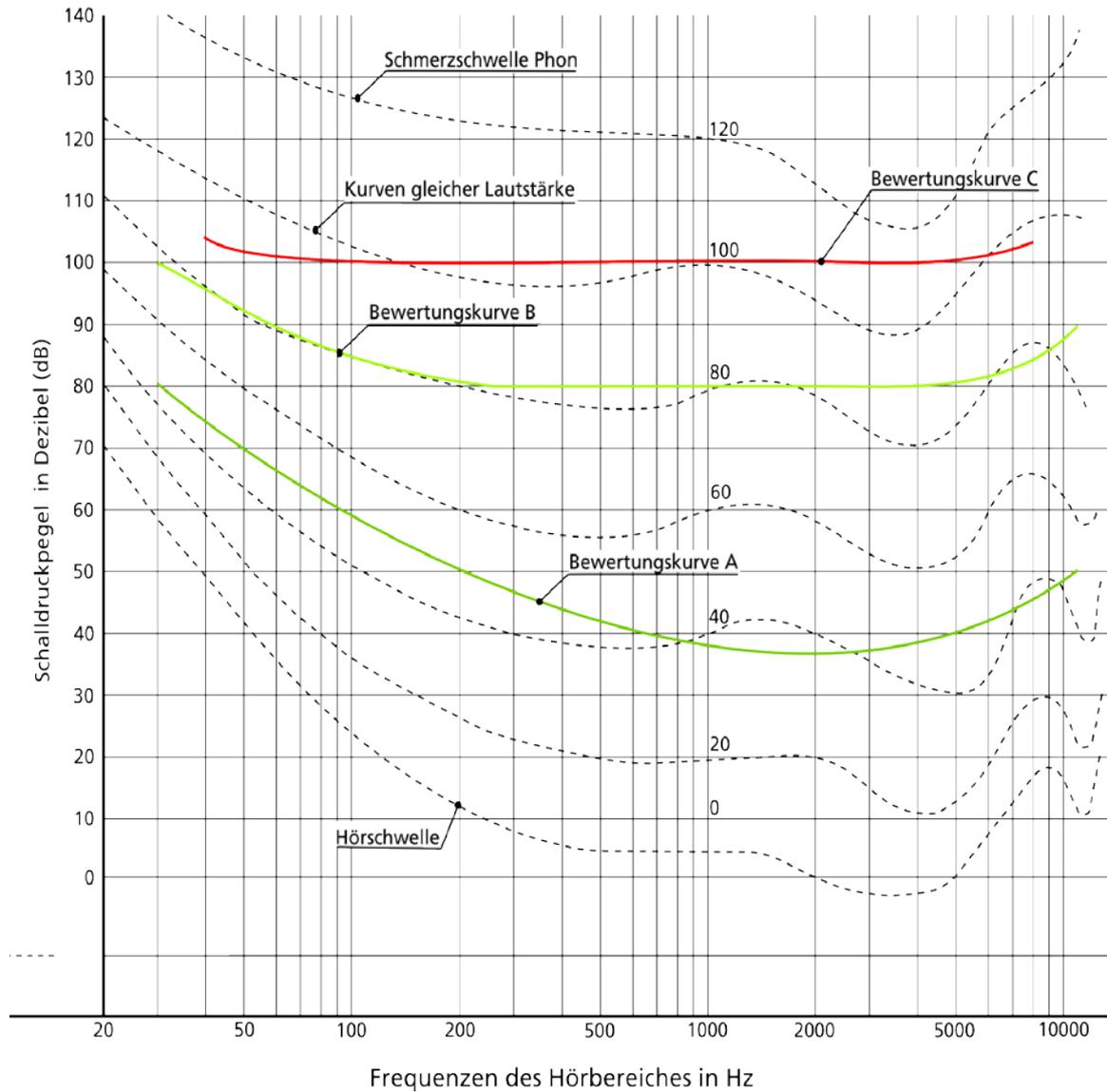
Um die subjektiven Lautstärkeempfindungen quantitativ besser beurteilen und angeben zu können, hat man neben den rein physikalischen Größen des Schalls auch einige physiologische Größen in der Akustik eingeführt. Der Zusammenhang zwischen dem Lautstärkepegel und dem Schalldruckpegel für sämtliche Frequenzen des Hörbereichs ist in Abb. 4.12 durch die Kurven gleicher Lautstärkepegel dargestellt. Die Kurve für 0 Phon ist identisch mit dem Frequenzgang der Hörschwelle. Wie aus Abb. 4.12 zu erkennen ist, ist bei kleinen Lautstärken, z. B. bei 40 phon, die Frequenzabhängigkeit des Schalldruckpegels ausgeprägter als bei großen Lautstärken wie z. B. 80 phon und 100 phon. Nach den Kurven gleicher Lautstärke ist das menschliche Ohr bei konstantem Schalldruck für mittlere Frequenzen empfindlicher als für tiefe und sehr hohe Frequenzen. Eine näherungsweise Einbeziehung der Normalkurven gleicher Lautstärkepegel für reine Töne in Schallpegelmessungen erfolgt mit Hilfe der Frequenzbewertung. Damit soll die Gehörempfindlichkeit berücksichtigt werden. Durch die Frequenzbewertung wird eine, wenn auch nur grobe, Nachbildung der Isophonen zugrunde gelegt. Um diese Frequenzabhängigkeit des menschlichen Hörens näherungsweise bei Schallmessungen zu berücksichtigen, werden für die meisten Messungen des Schalldruckpegels mit einem Schallpegelmesser international Filterdämpfungskurven im Schallpegelmesser eingesetzt.

Vereinfachend wurden in der Vergangenheit drei Bereichen des Lautstärkepegels Frequenzbewertungsfunktionen zugeordnet, die durch die Großbuchstaben A, B und C gekennzeichnet sind (siehe Tab. 4.2).

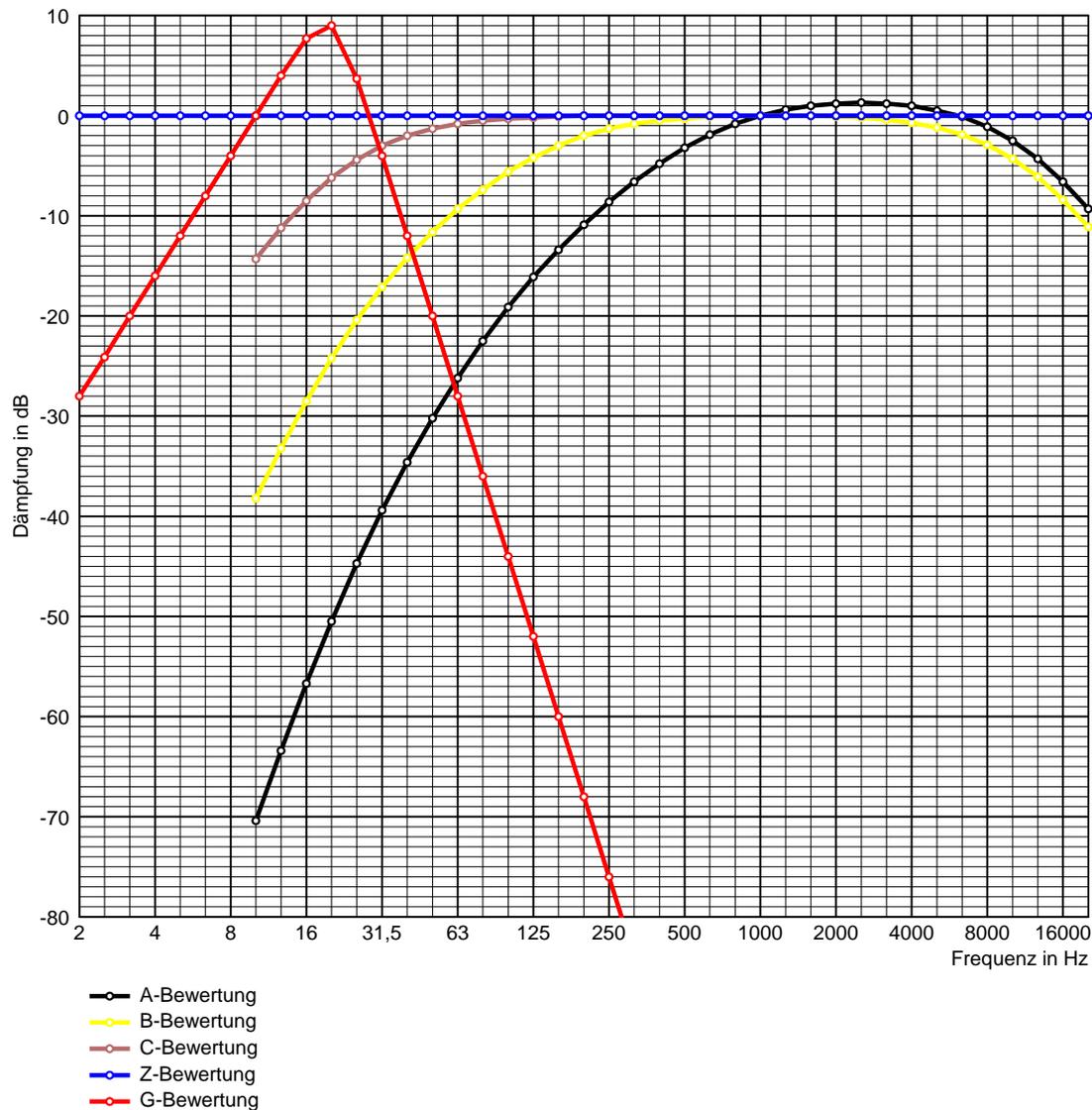
**Tab. 4.2** Bezugsisophone der Frequenzbewertungen A, B und C

Frequenzbewertung	Bezugsisophone
A	40 phon
B	80 phon
C	100 phon

Die Frequenzbewertungskurven A, B, C, wie sie in der Abb. 4.13 eingezeichnet sind, repräsentieren unterschiedliche Lautstärkebereiche entsprechend den Normalkurven gleicher Lautstärkepegel nach DIN 45630-2 aus dem Jahr 1967. Dabei ist die C-Bewertungskurve für die Kurven gleicher Lautstärke in hohen Pegelbereichen zuständig, während die A-Bewertungskurve niedrige Pegelbereiche, und zwar die um die Bezugsisophone 40 phon, vertritt. Die B-Bewertungskurve, die heute keine messtechnische Bedeutung mehr hat, wird hier zur Verdeutlichung des akustischen Sachverhaltes ergänzend mit erwähnt.



**Abb. 4.13** Kurven gleicher Lautstärkepegel aus der DIN 45630-2 aus dem Jahr 1967 für reine Töne und Frequenzbewertungskurven mit den A-, B- und C-Bewertungskurven



**Abb. 4.14** International festgelegte Bewertungskurven für Schallpegelmesser mit den Bewertungsfiltern A, B, C und Z im hier interessierenden tieffrequenten Bereich nach DIN EN 60651 (B-Bewertung) und DIN EN 61672 (A-, C- und Z-Bewertung) und dem G-Bewertungsfilter als Sonderform zur Bewertung von Infraschall nach ISO 7196

Abb. 4.14 zeigt die genormten Dämpfungsverläufe der Frequenzbewertungen A, B, C, G und Z. Mit Ausnahme der Z- und der G-Bewertung stellen die Frequenzbewertungskurven eine relativ grobe Nachbildung der Isophonen dar.

### **A-Frequenzbewertung**

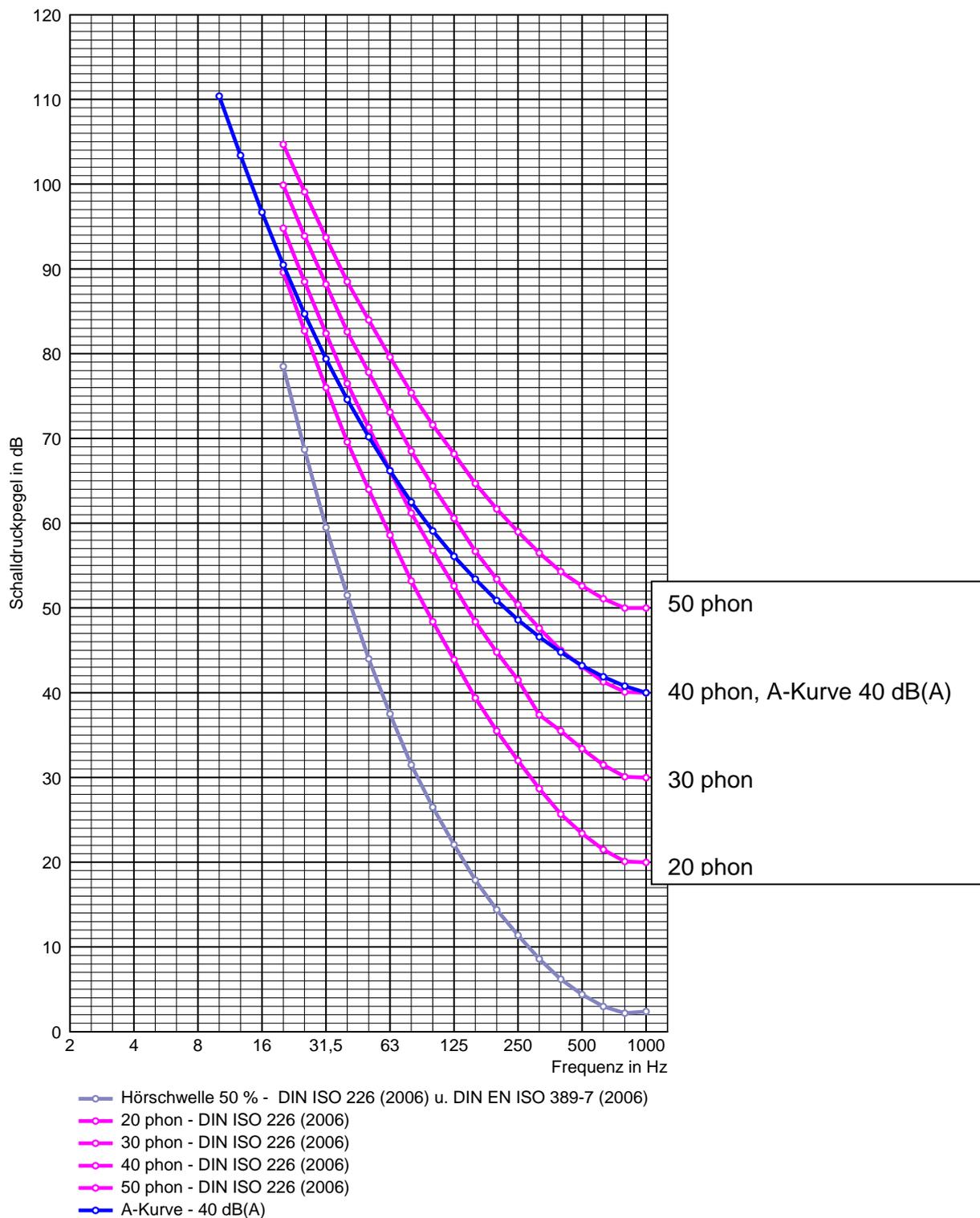
Wie in Abb. 4.13 gezeigt wird, sind die Bewertungskurven A, B, und C an den Verlauf der Kurven gleicher Lautstärkepegel nach DIN 45630-2 aus dem Jahr 1967 angepasst (siehe auch Tab. 4.2). Der Frequenzgang des A-Bewertungsfilters ist sehr grob dem des menschlichen Gehörs für leise Töne angenähert und nimmt während der Messung eine entsprechende Korrektur des Schalldruckes vor. Wie im Abschnitt 4.4.2 allerdings dargestellt, liegen die Normalkurven gleicher Lautstärkepegel nach DIN ISO 226 aus dem Jahr 2006 um 8 dB bis 10 dB(!) höher als die nach DIN 45630-2 aus dem Jahr 1967. Von daher stellt sich die Frage: „Wie folgt die A-Bewertungskurve dem Verlauf der Kurven gleicher Lautstärkepegel nach DIN ISO 226 aus dem Jahr 2006?“.

Abb. 4.15 zeigt das Ergebnis. Verglichen werden die Normalkurven gleicher Lautstärkepegel für reine Töne bei 20, 30, 40 und 50 phon gemäß DIN ISO 226 aus dem Jahr 2006 mit der A-Bewertungskurve bei 40 dB(A). In der Abb. 4.15 ist zu erkennen, dass die 40 dB(A)-Kurve bei 63 Hz die Isophone bei 30 phon und bei 20 Hz die Isophone bei 20 phon schneidet.

Dieses Ergebnis kann für die Schallempfindung wie folgt interpretiert werden:

1. Ein Ton bei der Frequenz von 1000 Hz mit einem unbewerteten Schalldruckpegel von 40 dB entspricht einem A-bewerteten Gesamtschalldruckpegel von 40 dB(A) und einer Lautstärke von 40 phon.
2. Ein Ton bei der Frequenz von 63 Hz mit einem unbewerteten Schalldruckpegel von 66 dB entspricht einem A-bewerteten Gesamtschalldruckpegel von 40 dB(A), jedoch einer Lautstärke von 30 phon.
3. Ein Ton bei der Frequenz von 20 Hz mit einem unbewerteten Schalldruckpegel von 91 dB entspricht einem A-bewerteten Gesamtschalldruckpegel von 40 dB(A), jedoch einer Lautstärke von 20 phon.

Die Beispiele 1 bis 3 auf der Grundlage des Ergebnisses entsprechend der Abb. 4.15 machen deutlich, dass nach dem heutigen Kenntnisstand zu den Kurven gleicher Lautstärkepegel im tieffrequenten Bereich einzelne Töne durch den A-bewerteten Gesamtschalldruckpegel deutlich überschätzt werden.



**Abb. 4.15** Normalkurven gleicher Lautstärkepegel für reine Töne (binaurales Hören im freien Schallfeld bei frontalem Schalleinfall) bei 20, 30, 40 und 50 phon gemäß *DIN ISO 226 (2006)* im Vergleich mit der A-Bewertungskurve bei 40 dB(A)

Tiefrequente Schallimmissionen führen schon bei sehr geringen Schalldruckpegeln in Wohnungen der Nachbarschaft vielfach zu Beschwerden, auch wenn die nach der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm anzuwendenden Beurteilungskriterien eingehalten sind.

### **C-Frequenzbewertung**

Für die Beurteilung der Lästigkeit von tieffrequenten Geräuschen wird in Deutschland entsprechend der DIN 45680 im Frequenzbereich von etwa 8 Hz bis 100 Hz der C-bewertete Schallpegel ergänzend zum A-bewerteten Schall verwendet: Die DIN 45680, die zur Beurteilung der Geräuschimmission in der Nachbarschaft genutzt wird, soll dann eingesetzt werden, wenn im Rahmen einer Vorprüfung die Differenz zwischen dem Schallpegel in dB(C) und dem in dB(A) mindestens 20 dB beträgt.

Wie die Abb. 4.14 zeigt, wird unterhalb von 125 Hz tieffrequenter Schall durch die C-Bewertung ebenfalls gedämpft, und zwar deutlich, z. B. bei unter 31,5 Hz. Darüber hinaus ist unter 10 Hz der Dämpfungsbereich nicht mehr eindeutig definiert, von daher muss man mit unbekanntem Messunsicherheiten im Infraschallbereich rechnen. Es wird davon ausgegangen, dass bei sehr tieffrequentem Schall hohe Messfehler auftreten können, weil die zulässigen Toleranzen für die Filter in diesem Frequenzbereich sehr groß sind. Daraus folgt: Auch bei der Anwendung der C-Bewertung werden Schalle, die sich im tieffrequenten Belastungsbereich befinden, ebenso wie bei der A-Bewertung falsch eingeschätzt.

Da durch die A-Bewertung eine wesentlich stärkere Absenkung der tieffrequenten Schallanteile erfolgt als durch die C-Bewertung, ist eine deutliche Differenz zwischen beiden Schallpegeln ein Indiz für das Vorliegen von tieffrequentem Schall. Dieser Zusammenhang wird auch sowohl in der aktuell gültigen Norm als auch im aktuellen Normentwurf in der DIN 45680 (Entwurfassung vom September 2013) unter dem Gesichtspunkt der Vorerhebung genutzt, wobei in der Entwurfassung u. a. die Mindestpegeldifferenz zwischen dem C-bewerteten und den A-bewerteten Pegel auf 15 dB abgesenkt wurde.

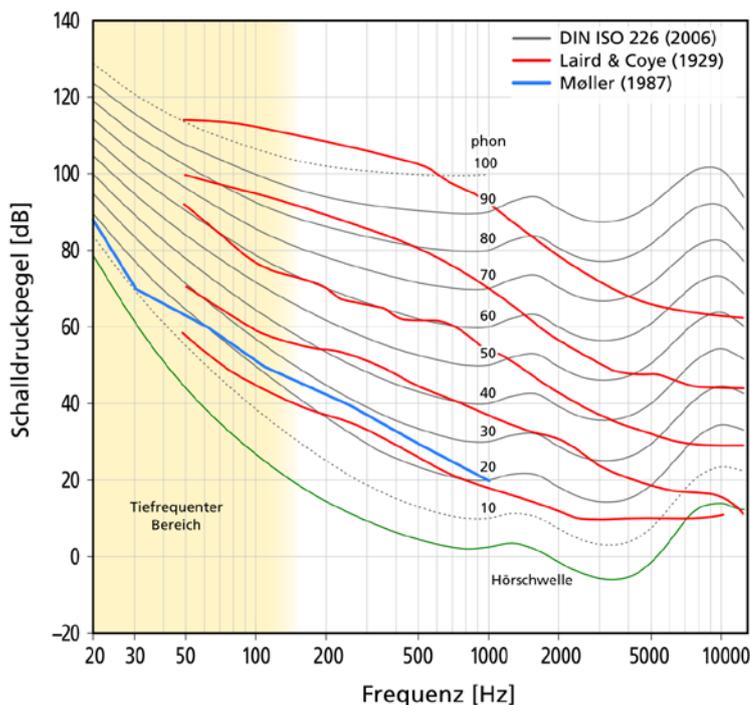
### **G-Frequenzbewertung**

In der internationalen Norm *ISO 7196 (1995)* ist die **Bewertungskurve G** für die Wirkungsäquivalenz des Infraschalls definiert. Diese Bewertungskurve hat eine Frequenzwichtung mit einem Schwerpunkt bei 20 Hz. Durch diese Norm soll insbesondere der Frequenzbereich unter 20 Hz, d. h. der sogenannte Infraschallbereich, bewertet werden. Messtechnisch ist damit eine einfache Ermittlung des G-bewerteten Schalldruckpegels von Geräuschen möglich, wobei die hauptsächlich spektralen Anteile der Geräusche im Bereich von 1 Hz bis 20 Hz liegen. Die G-Bewertungskurve findet bisher in Deutschland wenig Verwendung. Erfahrungen mit der Bewertung und Beurteilung nach *ISO 7196 (1995)* liegen daher bislang kaum vor (*LFU Bayern, 1997*). Die G-Bewertungskurve berücksichtigt nicht den Verlauf der Kurven gleicher Lautstärke bei niedrigen Frequenzen und stellt damit nicht auf eine Lautheitsäquivalenz ab. Für tieffrequenten Hörschall oberhalb des Frequenzbereiches von 20 Hz wird der Hörschall mit ca. 24 dB pro Oktave gedämpft. Insofern steht die G-Frequenzbewertung allein für die Beurteilung von Infraschall (siehe Abb. 4.14). Aus der Sicht des Autors ist der G-bewertete Gesamtschalldruckpegel für eine Maßzahl zur Beurteilung des tieffrequenten Schalls ungeeignet, da nur ein sehr kleiner Frequenzbereich bei der Messung des Gesamtschalldruckpegels berücksichtigt wird.

#### 4.2.4 Vergleich von Lautstärke und Lästigkeit

Das „Hören“ von tieffrequentem Schall als Sinneseindruck des Menschen ist im Grunde kein physikalisch messbares Geschehen, sondern die Empfindung des Schalls und seiner Lästigkeit (*Schönflug, A., 1978*). Es kann nicht allein auf ein physikalisch messbares Ereignis zurückgeführt werden. Allerdings bestehen zwischen extraauralen Wirkungen und den physikalischen Eigenschaften des tieffrequenten Schalls ursächliche Zusammenhänge. Die Verbindung zwischen objektiv messbarer akustischer Erscheinung und der gesundheitlichen Wirkung kann nur vom Mediziner beurteilt werden. Man sollte sich deshalb davor hüten, von einer vermeintlich wissenschaftlichen Exaktheit eines Anhaltswertes in einer neuen DIN 45680 auszugehen.

Physikalische Größen oder Schallempfindungsgrößen, wie der Schalldruckpegel, der Lautstärkepegel oder die Lautheit eines Geräusches, kennzeichnen noch nicht allein das Ausmaß der jeweils empfundenen Störwirkung bzw. Lästigkeit. Die Lästigkeit besteht aus einer physikalisch- und einer persönlichkeitsbedingten Komponente. Beide lassen sich im Grunde nicht voneinander trennen.



**Abb. 4.16** Normalkurven gleicher Lautstärkepegel für reine Töne (binaurales Hören im freien Schallfeld bei frontalem Schalleinfall) nach DIN ISO 226 vom April 2006 und Kurven gleicher Lästigkeit für reine Töne nach *Laird und Coye, 1929* (rot) und Minimalkurve gleicher Lästigkeit für reine Töne nach *Møller, 1987* (blau) und im Vergleich zur Hörschwelle (grün)

Physikalische und psychoakustische Größen des Schalls stellen im Wesentlichen das Bindeglied zwischen physikalischen Messmöglichkeiten und den nur mit psychologischen und soziologischen Methoden zu ermittelnden Empfindungsurteilen dar. Es hat sich gezeigt, dass die Kurven gleicher Lästigkeit anders verlaufen können als die Kurven gleicher Lautstärkepegel bzw. der Lautheit (siehe Abb. 4.16).

Auch *Genuit, K. (1998)* berichtet, dass für nichtstationäre Geräusche und bei tieffrequenter Anregung die Lautheitsmessung nach *ISO 532 B (1975)* keine den subjektiven Empfindungen entsprechenden Ergebnisse erzielt werden.

#### **4.2.5 Schlussfolgerungen für die Beurteilung von Infraschall (1 Hz bis 16 Hz) und tieffrequentem Schall (8 Hz bis 100 Hz)**

- 1) Die Wahrnehmung und die Wirkung des tieffrequenten Schalls (8 Hz bis 100 Hz) mit teilweise Infraschall (1 Hz bis 16 Hz) unterscheidet sich deutlich von mittel- und hochfrequentem Hörschall (> 100 Hz).
- 2) Die psychoakustische Wirkung durch tieffrequenten Schall nach Abb. 4.7 bis Abb. 4.11 zeigt einen deutlichen Unterschied zu mittel- und hochfrequentem Hörschall. Die Abhängigkeit vom Schallpegel präsentiert sich nach anderen Gesetzmäßigkeiten als bei Hörschall oberhalb von 100 Hz. Für Infraschall < 16 Hz kann ein deutlich schnellerer Anstieg der Lästigkeit mit zunehmendem Schallpegel beobachtet werden als bei mittel- und hochfrequentem Schall. Darüber hinaus wird das Maximum der Lästigkeit in diesem Frequenzbereich sehr schnell durch kleine Änderungen des Schalldruckpegels erreicht.
- 3) Der tieffrequente Schall und insbesondere der Infraschall wirken offenbar lästig, sobald sie die Wahrnehmungsschwelle überschritten haben.
- 4) Der tieffrequente Schall wird vom menschlichen Organismus in verschiedener Art und Weise verarbeitet und wahrgenommen (siehe Abb. 4.8 und Abb. 4.9).
- 5) Die Wahrnehmung und die Wirkung von Infraschall für  $f < 16$  Hz mit der verbalen Beschreibung „Brummen“, „Dröhnen“ und „Wummern“ unterscheidet sich deutlich von mittel- und hochfrequentem Hörschall.
- 6) Die tieffrequenten Schalle werden auch als Pulsationen oder Vibrationen diskontinuierlich wahrgenommen. Der sich manchmal einstellende Ohrendruck kann Unsicherheits- oder Angstgefühle auslösen.
- 7) Infraschall sollte wegen seiner Besonderheiten im Hinblick auf die Wirkung auf den Menschen und den extrem hohen Forderungen an die Messtechnik durch eine eigene Mess- und Beurteilungsnorm erfasst werden.

### **4.3 Eignung eines Grenzkurvenverfahrens und/oder eines bewerteten Gesamtschalldruckpegelverfahrens zur Beurteilung**

#### **4.3.1 Konzeptioneller Ansatz**

Im Hinblick auf ein anzuwendendes Bewertungsverfahren für die extrem tieffrequenten Schalle einschließlich des Infraschall muss der Frage nachgegangen werden, ob die Beurteilung der tieffrequenten Geräusche durch ein Grenzkurvenverfahren oder einen bewerteten Gesamtschalldruckpegel oder eine Kombination von beiden abgebildet werden kann.

Die Beurteilung der Lästigkeit kann grundsätzlich durch zwei verschiedene Methoden erfolgen.

1. Anwendung eines Grenzkurvenverfahrens, d. h. Messung des Schallspektrums und Vergleich mit einer einzelnen Grenzkurve oder einer Grenzkurvenschar.
2. Messung eines frequenzbewerteten Gesamtschalldruckpegels und Vergleich mit einem Anhaltswert, der den Grad der Lästigkeit charakterisiert.

Zu 1.

Die Messung des Schallpegelspektrums zur Durchführung des Grenzkurvenverfahrens ist mit der heutigen Messtechnik problemlos durchführbar. Der große Vorteil des Grenzkurvenverfahrens besteht darin, dass es relativ schnell eine unmittelbare Aussage darüber liefert, ob eine Lästigkeitsgrenzkurve oder an welchen Stellen eine Lästigkeitsgrenzkurve überschritten wird. Es wird dadurch berücksichtigt, welchen Einfluss das Schallpegelspektrum bei der Lästigkeitsbeurteilung von tieffrequenten Geräuschen hat. Aus der bisherigen psychoakustischen Sicht scheint ein Terzpegel-grenzkurvenverfahren die geeignete Methode zur Beurteilung zu sein.

Zu 2.

Die einfache Messbarkeit von frequenzbewerteten Gesamtschalldruckpegeln spricht für die Anwendung der Methode nach 2. Danach steht unmittelbar eine Einwertangabe zur Verfügung, die es erlaubt, einen Vergleich zwischen dem gewonnenen Messwert und einem Lästigkeitsgrenzwert durchzuführen.

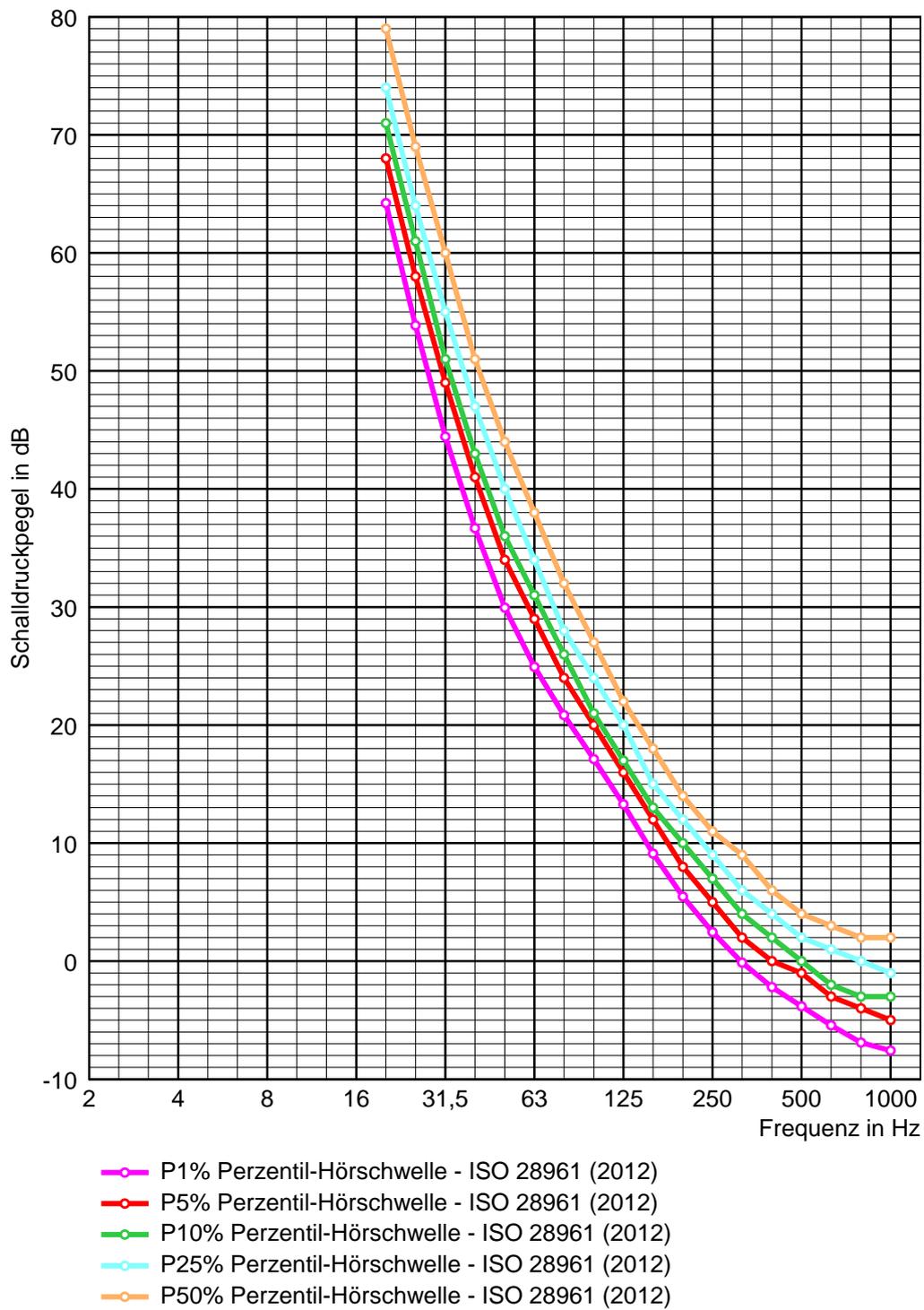
#### **4.3.2 Die Wahrnehmungsschwelle als zentrales Kriterium zur Beurteilung von tieffrequentem Schall**

Im Sinne einer Lärmvorsorge muss es darauf ankommen, den größten Teil der Bevölkerung in die Lärmerfassung einzubeziehen und durch eine geeignete Schallbeurteilung zu schützen. Um dieser Forderung gerecht zu werden, sind die Ergebnisse des internationalen Normenentwurfes *ISO 28961 (2012)*, in dem ein Verfahren zur Berechnung von Perzentilen aus der Hörschwellenverteilung vorgestellt wird, von fundamentaler Bedeutung, und zwar insbesondere deshalb, weil die Hörschwellendaten auf sorgfältigen und umfangreichen Analysen verschiedener internationaler wissenschaftlicher Untersuchungen beruhen. Für die hier vorliegende Untersuchung ist dabei die nach *ISO 28961 (2012)* berechnete P1 %-Perzentil-Hörschwelle von besonderem Interesse.

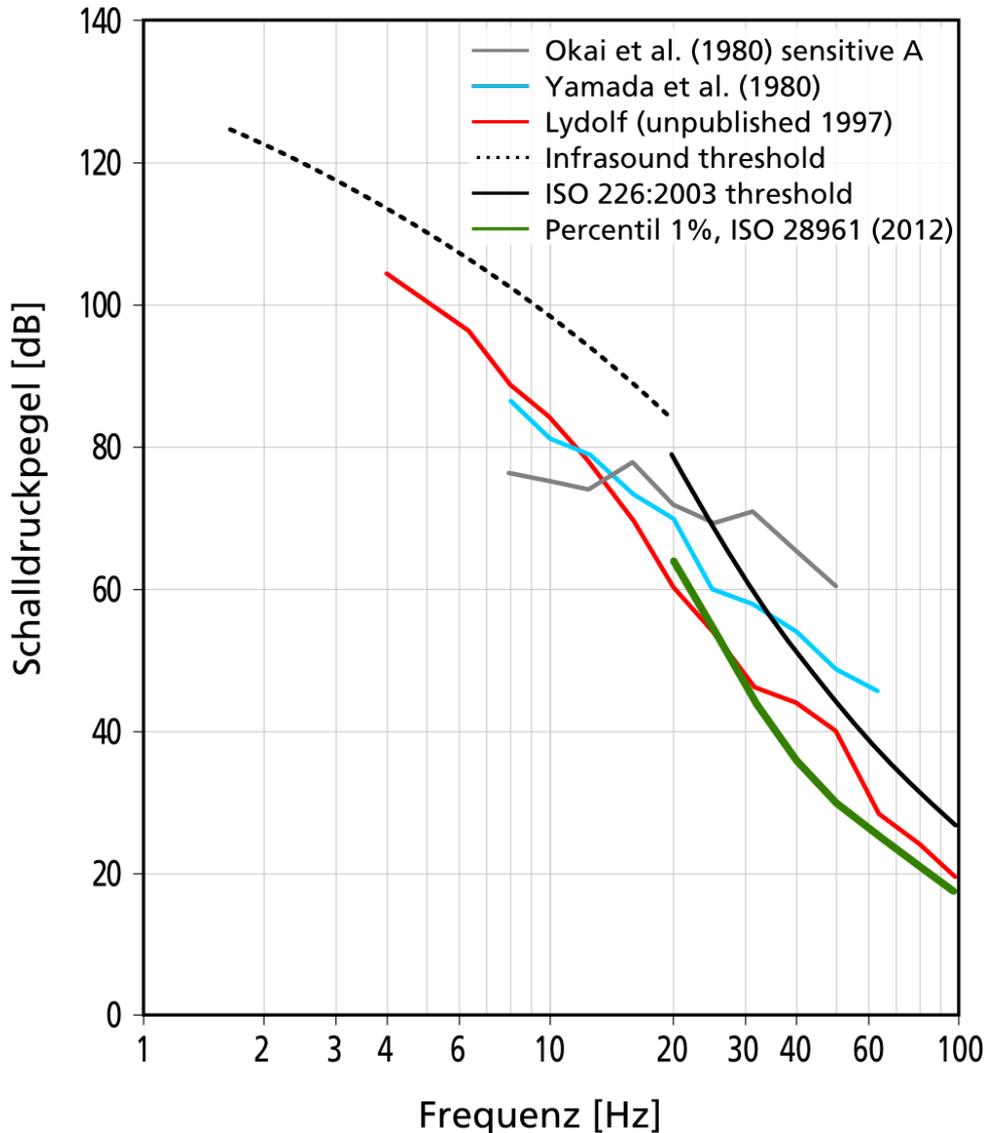
Die P1 %-Perzentil-Hörschwelle verweist darauf, dass unterhalb dieser Schwelle weniger als ein Prozent der normalhörenden jungen Menschen noch Schall im tieffrequenten Bereich wahrnehmen.

Immerhin gibt es auch Personen mit individuell besonders niedrigen Wahrnehmungsschwellen für tiefe Frequenzen. Diese Menschen können tieffrequente Geräusche besser hören bzw. wahrnehmen, als es nach der Hörschwelle der *DIN 45680 (1997)* für 8 Hz bis 125 Hz zu erwarten wäre. Abb. 4.18 belegt, dass auch besonders geräuschempfindliche Personen bei der Anwendung der P1 %-Perzentil-Hörschwelle berücksichtigt würden.

Die Entwicklung einer neuen Wahrnehmungsschwelle bestehend aus einem Teil der P1 %-Perzentil-Hörschwelle nach *ISO 28961 (2012)* und einer Ergänzung durch Extrapolation für die Terzen 8 Hz, 10 Hz, 12,5 Hz und 16 Hz zeigen Abb. 4.17 bis Abb. 4.20.

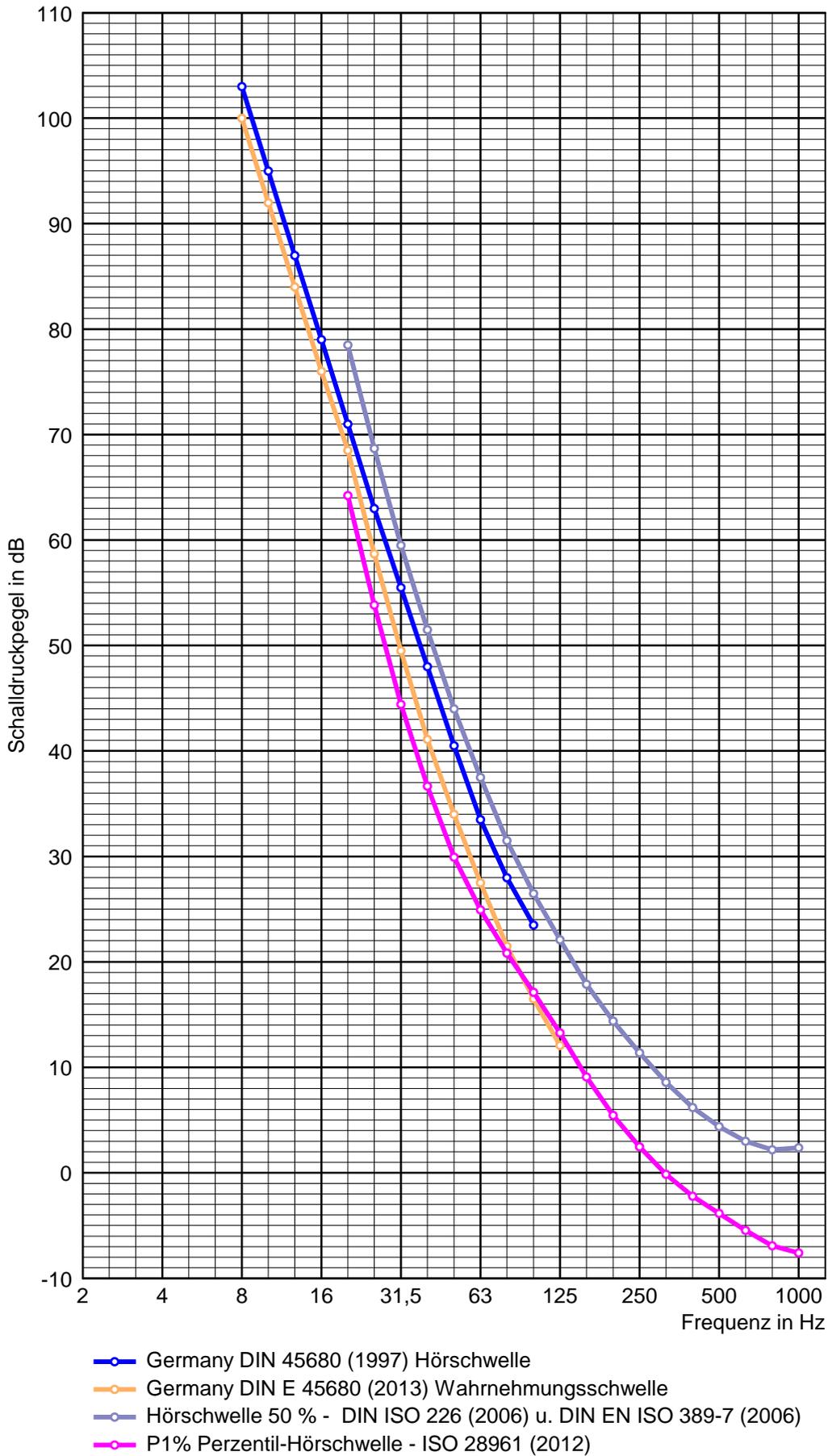


**Abb. 4.17** Perzentilkurven der Hörschwellenverteilung gemäß *ISO 28961 (2012)*



**Abb. 4.18** Hörschwellen von drei besonders empfindlichen Personen im Vergleich mit der P1 %-Perzentilkurve der Hörschwelle nach *ISO 28961 (2012)* (Quelle: *Schmidt, M., 2015*)

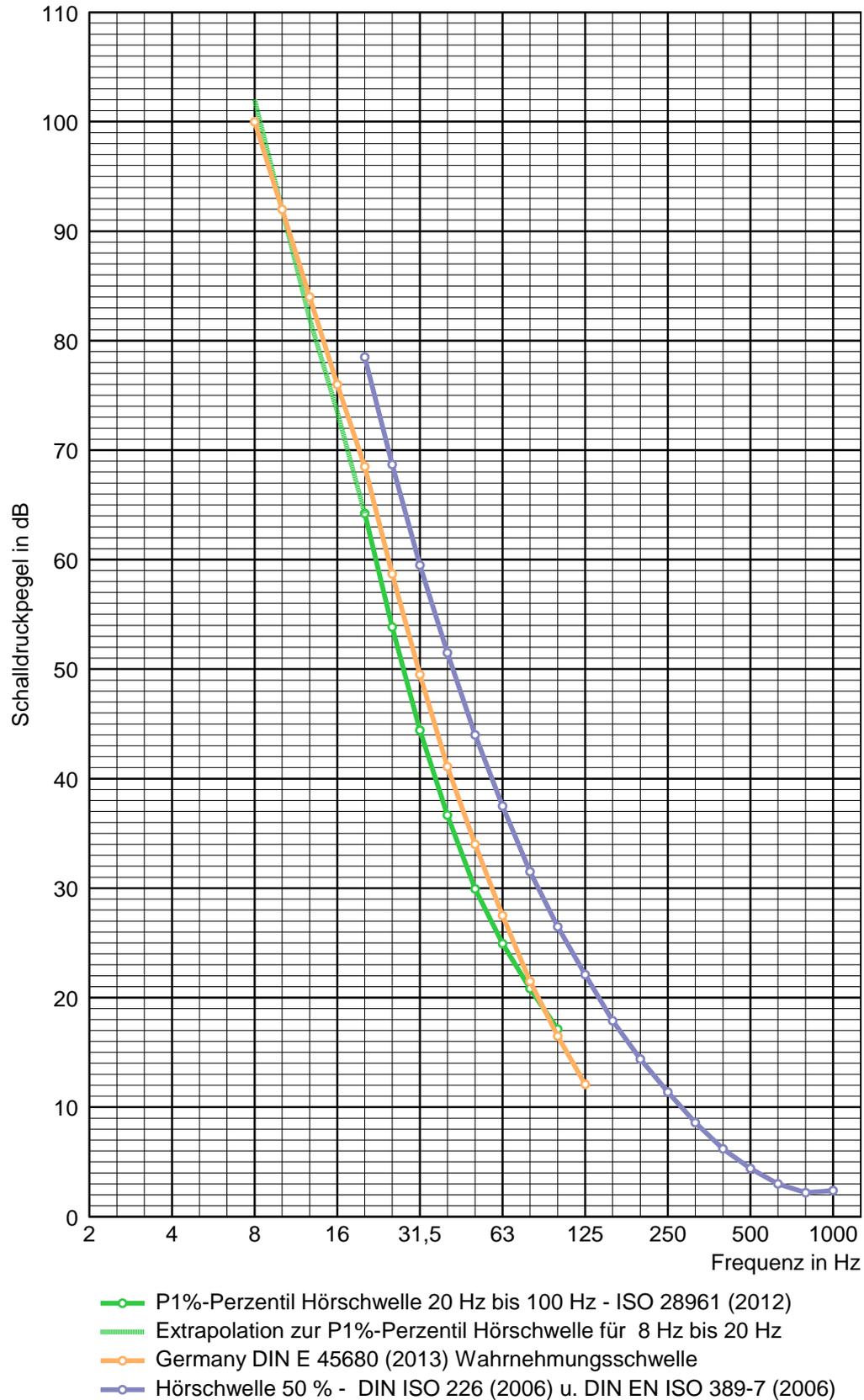
Abb. 4.19 zeigt im Vergleich die Bezugshörschwelle nach *DIN EN ISO 389-7 (2006)* sowie die Hörschwellenpegel nach *DIN 45680 (1997)*, die Wahrnehmungsschwelle gemäß dem aktuellen Stand der *DIN 45680 (2013)* und die P1 %-Perzentil-Hörschwelle nach *ISO 28961 (2012)*. In der Abb. 4.19 wird deutlich, dass die P1 %-Perzentil-Hörschwelle in der Gegenüberstellung mit den Hör- und Wahrnehmungsschwellen die tiefste wissenschaftlich begründete Hörschwelle ist. Die P1 %-Perzentil-Hörschwelle bringt zum Ausdruck, dass nur noch weniger als 1 % der Normalhörenden tieffrequenten Schall wahrnehmen könnten. Mit der P1 %-Perzentil-Hörschwelle liegt eine untere Grenze der Wahrnehmung für tieffrequenten Schall vor, die in hohem Maße die oft in der Literatur und in praktischen Beschwerdefällen beschriebene besondere Empfindlichkeit von Personen berücksichtigt. Von *Schmidt, M. (2015)* wird dies im Forschungsprojekt zu Kurven gleicher Lautstärke für *DIN 45680* „Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft“ nachgewiesen.



**Abb. 4.19** Bezugshörschwelle nach *DIN EN ISO 389-7 (2006)*, P1 %-Perzentil-Hörschwelle nach *ISO 28961 (2012)* sowie zum Vergleich der Hörschwellenpegel nach *DIN 45680 (1997)* und die Wahrnehmungsschwelle gemäß dem aktuellen Stand des Entwurfes der *DIN 45680 (2013)*

Die Erweiterung der P1 %-Perzentil-Hörschwelle nach *ISO 28961 (2012)* für die Terzmittenfrequenzen 8 Hz, 10 Hz, 12,5 Hz und 16 Hz erscheint dem Autor aufgrund der bisherigen Erfahrung mit der Wahrnehmungsschwelle gemäß dem aktuellen Stand des *Entwurfes der DIN 45680 (2013)* als gerechtfertigt. Abb. 4.20 zeigt die Bildung der neuen Wahrnehmungsschwelle (grüne Kurve) bestehend aus einem Teil der P1 %-Perzentil-Hörschwelle nach *ISO 28961 (2012)* und einer Ergänzung durch Extrapolation.

Basierend auf den Ergebnissen in Abb. 4.17 bis Abb. 4.20 wird vorgeschlagen, die neue Wahrnehmungsschwelle in eine neue DIN 45680 für einen Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz aufzunehmen.



**Abb. 4.20** Bildung einer neuen Wahrnehmungsschwelle (grüne Kurve) bestehend aus einem Teil der P1 %-Perzentil-Hörschwelle nach *ISO 28961 (2012)* und einer Ergänzung durch Extrapolation im Vergleich mit der Wahrnehmungsschwelle gemäß dem Entwurf der *DIN 45680 (2013)*

### 4.3.3 Grenzkurven zur Beurteilung der Lästigkeit von tieffrequentem Schall in Räumen

Grenzen der Lästigkeit werden im Hinblick auf ein bestimmtes Schutzziel festgelegt. Der durch das Messverfahren ermittelte Beurteilungspegel am Immissionsort wird mit einem maximal zulässigen Grenzwert verglichen. Damit ist eine Beurteilung möglich.

Nach TA Lärm ist das Schutzziel im Immissionsschutz die Vermeidung einer erheblichen Belästigung bzw. von schädlichen Umwelteinwirkungen im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Je nach rechtlicher Verbindlichkeit oder wissenschaftlichem Kenntnisstand werden die maximal zulässigen Immissionswerte als *Grenz-, Richt- oder Anhaltswerte* bezeichnet. Diese Abstufung ist wichtig, um deutlich zu machen, welche Rechtsfolgen mit der Überschreitung eines solchen Wertes verbunden sind.

- a) Als *Grenzwerte* werden solche Werte bezeichnet, bei deren Überschreitung eine unmittelbare bestimmte Rechtsfolge eintritt, z. B. Erstattungsansprüche oder, wie beim Arbeitsplatzlärm, z. B. die Entscheidung über eine anerkannte Berufskrankheit.
- b) Mit *Richtwerten* lässt sich im Regelfall entscheiden, ob das vorgegebene Schutzziel erreicht oder verletzt ist.
- c) Durch den Begriff *Anhaltswert* wird zum Ausdruck gebracht, dass es sich um einen Beurteilungsvorschlag handelt und für dessen umfassende Absicherung noch weitere wissenschaftliche Erkenntnisse gesammelt werden müssen.

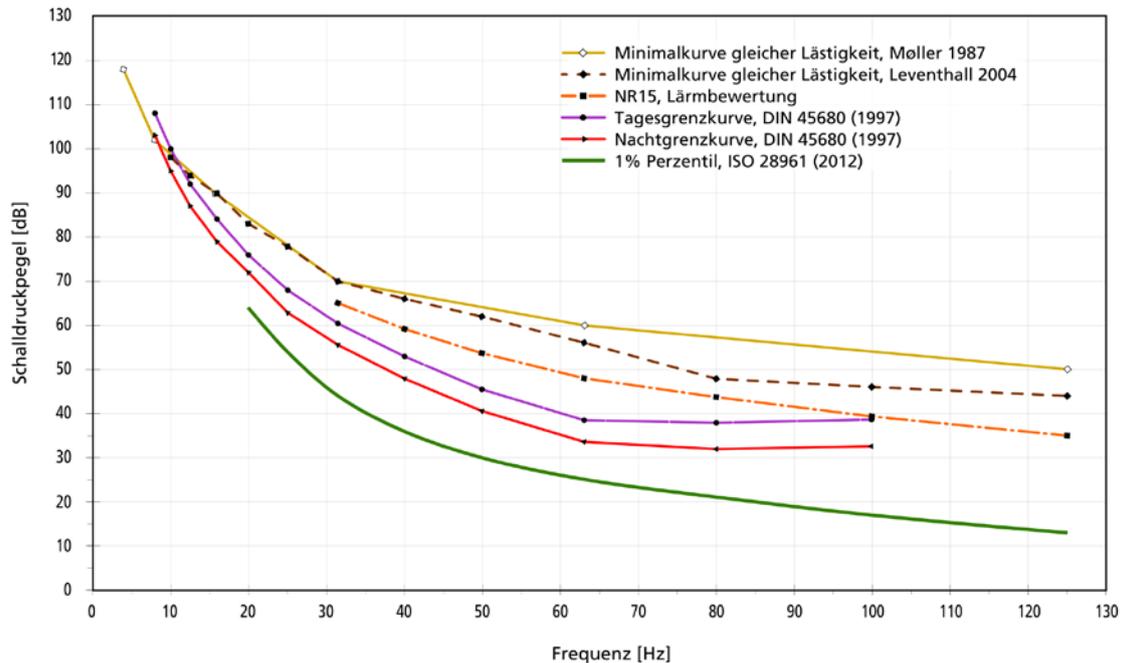
Für die Beurteilung von tieffrequenten Geräuschen dürften die *Minimalkurven gleicher Lästigkeit* eine bedeutende Rolle spielen. Abb. 4.21 zeigt die Abweichung der zusammengestellten Kurven verschiedener Untersucher und bereits in Normen verwendeter im Vergleich mit der P1 %-Perzentil-Hörschwelle. Die Kurvenschar macht deutlich, dass zwischen den so genannten *Minimalkurven gleicher Lästigkeit* starke Differenzen bis z. T. 20 dB auftreten können.

Offenbar gibt es keine internationale Übereinstimmung, welchen Verlauf eine Minimalkurve haben könnte. Es wird davon ausgegangen, dass die Versuchsbedingungen sehr uneinheitlich sind und der Begriff „Lästigkeit“ einer ausnehmend subjektiven Auffassung der Untersucher entspricht. Für akustische Untersuchungen im tieffrequenten Bereich fehlen festgelegte Versuchsbedingungen in internationalen Standards.

Von daher können hier festgestellte *Minimalkurven gleicher Lästigkeit* nach obiger Begriffsbestimmung nur Anhaltswerte darstellen.

Im Folgenden wird das Ziel verfolgt, auf der Grundlage des bisher bekannten Wissens eine *Minimalkurve gleicher Lästigkeit* als Grundlage eines Mess-, Bewertungs- und Beurteilungsverfahrens abzuleiten.

Definitionsgemäß soll hier in der Studie unter einer *Minimalkurve gleicher Lästigkeit* Folgendes verstanden werden: *kleinster Schalldruckpegel eines tonhaften Geräusches, der bei einem Zuhörer ein Lästigkeitsempfinden auslöst.*



**Abb. 4.21** *Minimalcurven gleicher Lästigkeit* verschiedener Untersucher und aus Normen (Quelle: Schmidt, M., 2015)

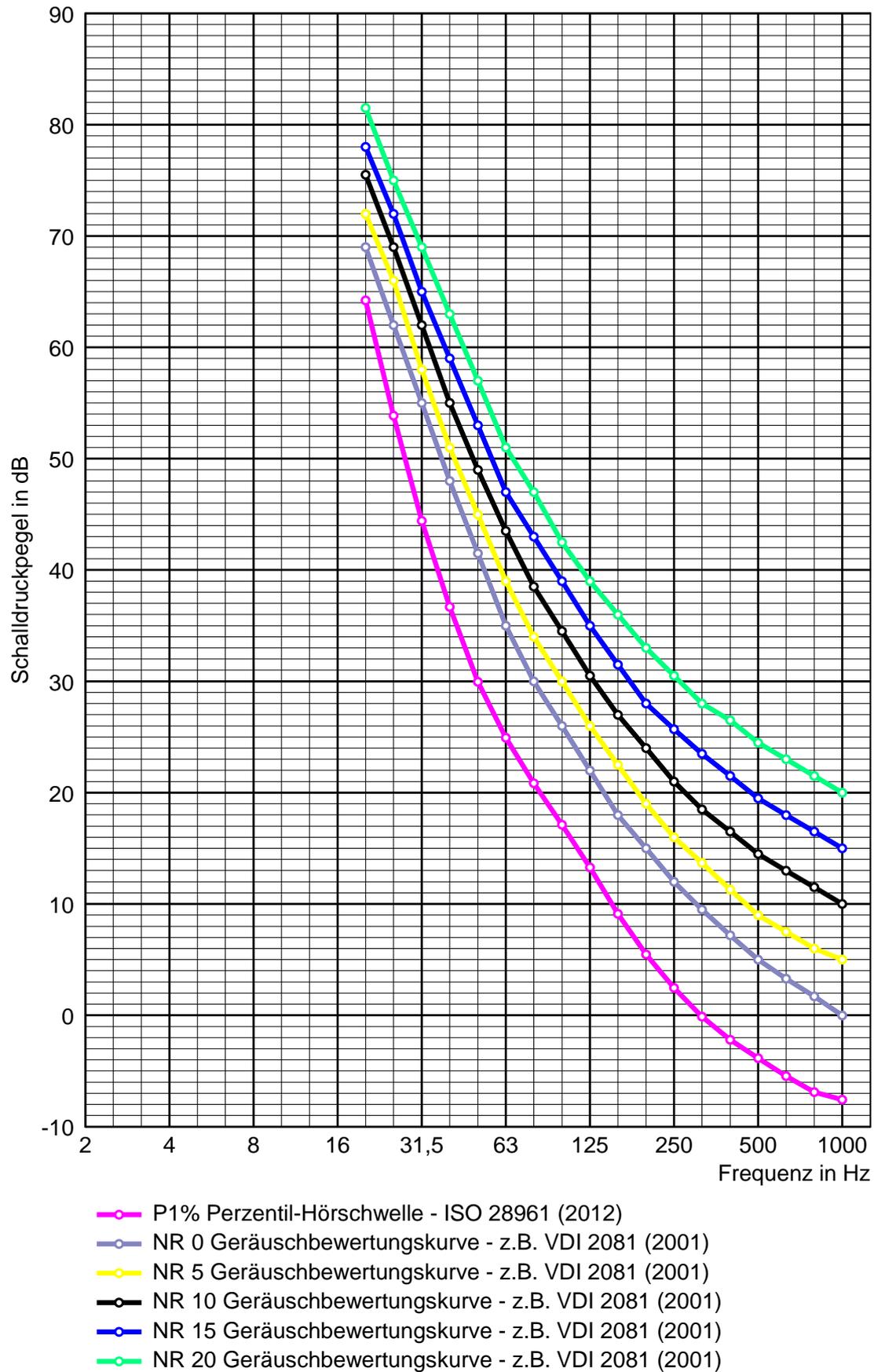
Im Folgenden wird untersucht, ob sich aus den nationalen und internationalen Normen sowie der Literatur eine *Minimalkurve gleicher Lästigkeit* ableiten lässt.

#### 4.3.3.1 Deutschland

##### *N-Kurven gleicher Lästigkeit, z. B. in VDI-Richtlinien 2081*

Die N-Kurven haben durch Normen und Richtlinien, z. B. *VDI-Richtlinie 2081 (2001)*, wieder an Bedeutung gewonnen. Bei breitbandigen Geräuschen mit deutlich herausragenden Einzeltönen, wie sie z. B. bei Ventilatoren auftreten, erhält man ein falsches Bild, wenn nur der A-bewertete Schallpegel angegeben wird. Physiologisch wird ein sich hervorhebender Einzelton als störender empfunden als ein breitbandiges Rauschen. Kurven gleicher Lästigkeit, bei denen die Frequenzzusammensetzung des Geräusches berücksichtigt wird, werden als sogenannte NR-Grenzkurven bezeichnet (siehe Abb. 4.22). Die Grenzkurven geben in jeder Oktave oder jeder Terz einen Maximalwert vor, der von den Schallpegeln der Störschallquelle nicht überschritten werden darf. D. h. es müssen sämtliche Terz- oder Oktavpegel des Geräusches in einem Aufenthaltsraum unter der Grenzkurve liegen. In Deutschland werden die Grenzkurven für Geräusche gleicher Lästigkeit beispielsweise in der *VDI-Richtlinie 2081 (2001)* verwendet oder international in der britischen Handlungsanleitung für die Gestaltung der Umwelt (siehe auch Schmidt, M., 2015).

Abb. 4.22 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt der NR-Geräuschbewertungskurven zur Beurteilung der Lästigkeit von hervortretenden Einzeltönen oder schmalbandigen Geräuschen von raumluftechnischen Anlagen, insbesondere auch für tieffrequente Geräusche unterhalb von 125 Hz im Vergleich mit der P1 %-Perzentil-Hörschwelle. Welche hohen Anforderungen an die Einhaltung von tieffrequenten Geräuschen beispielsweise in einem Raum gestellt werden können, zeigt die NR0- und NR5-Geräuschbewertungskurve zur Beurteilung der Lästigkeit von hervortretenden Einzeltönen oder schmalbandigen Geräuschen von raumluftechnischen Anlagen.



**Abb. 4.22** NR-Geräuschbewertungskurven zur Beurteilung der Lästigkeit von hervortretenden Einzeltönen oder schmalbandigen Geräuschen von raumluftechnischen Anlagen, insbesondere auch für tieffrequente Geräusche unterhalb von 125 Hz im Vergleich mit der P1 %-Perzentil-Hörschwelle

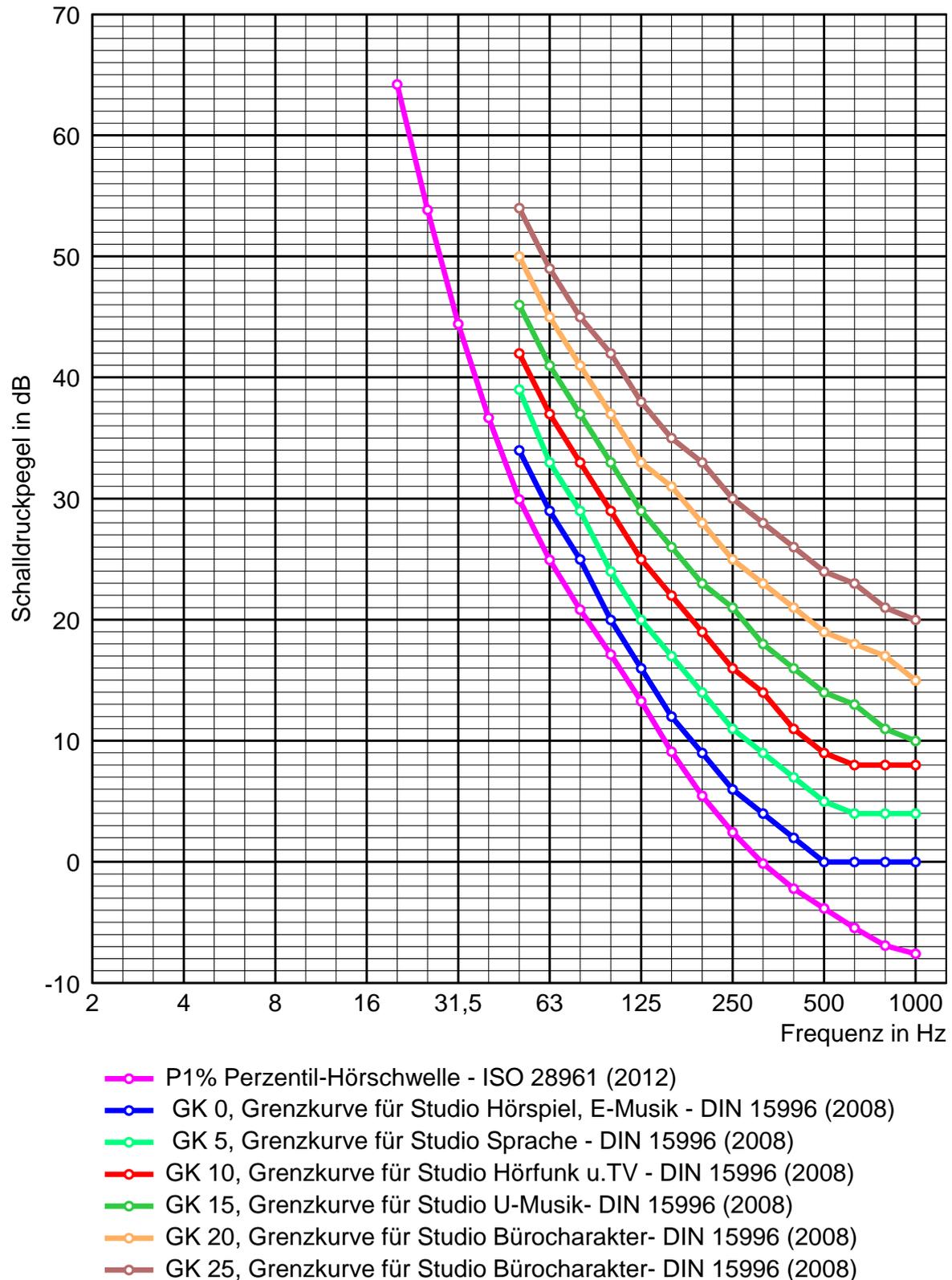
*GK-Kurven zur Beurteilung von Schall in Studios zur Bild- und Tonverarbeitung*

Zur Beurteilung und Bearbeitung von Schallereignissen müssen die Abhörbedingungen in einem für diesen Zweck geeigneten Raum bestimmte akustische Kriterien erfüllen. Dabei werden die Abhörbedingungen im Wesentlichen durch das im Raum vorhandene Dauergeräusch, den akustischen Einfluss des Raumes auf das zu bearbeitende Signal und die Eigenschaften des Tonmonitors bestimmt. Dauergeräusche sind alle Geräusche, die bei eingeschalteten haus- und studiotecnischen Anlagen auftreten. Entsprechend der Nutzung des Raumes wird vom Anwender ein höchstzulässiger Dauergeräuschpegel festgelegt.

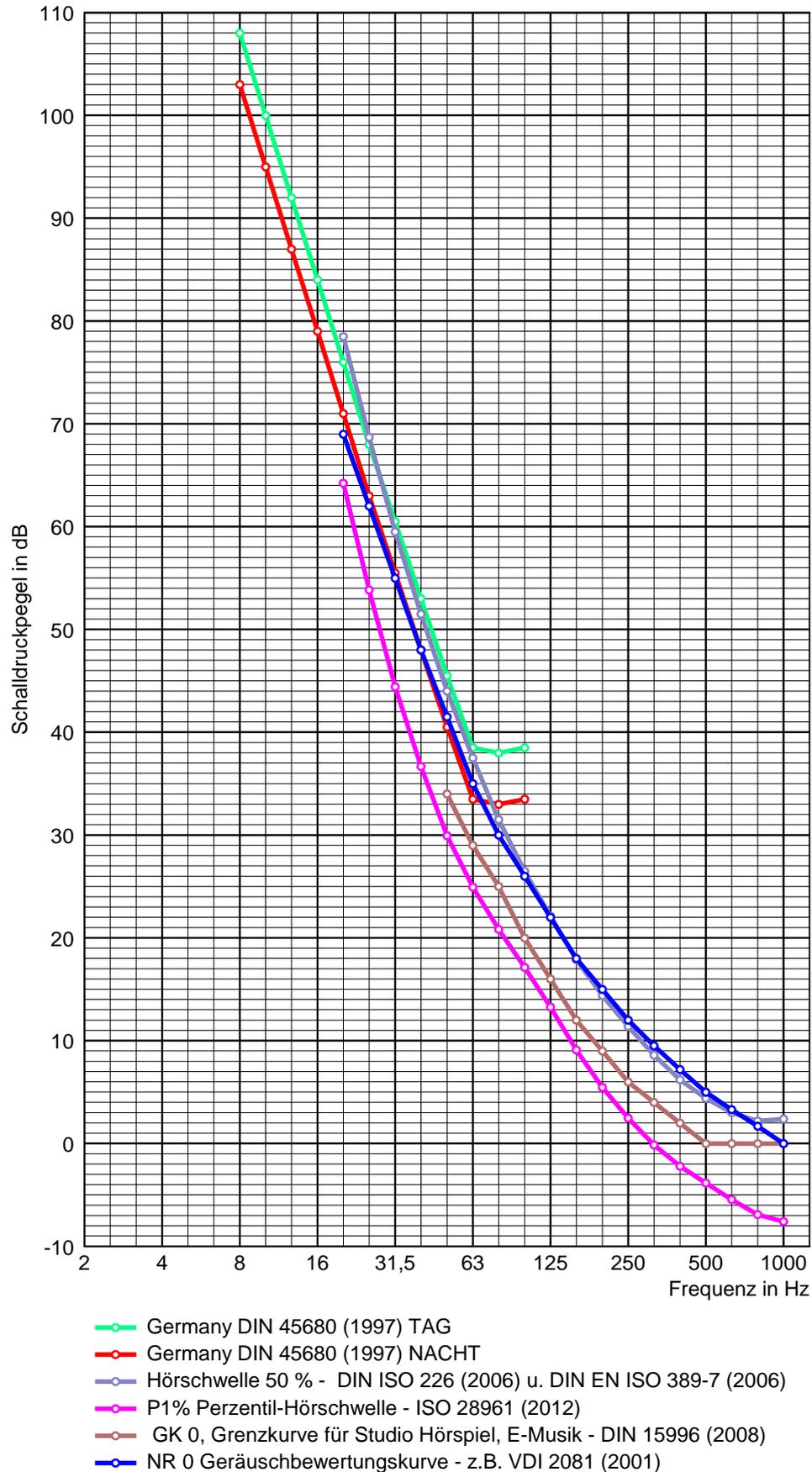
Wegen der möglichen Tonhaltigkeit werden Grenzkurven und keine Einzahlwerte vorgeschrieben. Die höchstzulässigen Dauergeräuschpegel werden für die Terzmittenfrequenzen in Form von Grenzkurven angegeben. Überschreitungen der Grenzkurven in Abhängigkeit von der Raumnutzung sind nicht zulässig. Es dürfen tieffrequente Schalle im Frequenzbereich von 50 Hz bis die hier interessierenden 100 Hz bestimmte höchstzulässige Werte nicht überschreiten. Wie hoch die akustischen Anforderungen in Abhängigkeit von der Raumnutzung sein können, zeigen die GK-Kurven in Abb. 4.23.

Die Ergebnisse in Abb. 4.24 erlauben folgende Interpretationen für eine *Minimalkurve gleicher Lästigkeit* des tieffrequenten Schalls:

1. Die *Minimalkurven gleicher Lästigkeit* für den Tag und die Nacht nach *DIN 45680 (1997)* unterscheiden sich nur geringfügig von der NR0-Geräuschbewertungskurve nach *VDI 2081 (2001)* und der P50 %-Perzentil-Hörschwelle nach *DIN ISO 226 (2006)*, jedoch liegen sie deutlich höher als die P1 %-Perzentil-Hörschwelle nach *ISO 28961 (2012)*.
2. Deutlich unter den *Minimalkurven gleicher Lästigkeit* für den Tag und die Nacht nach *DIN 45680 (1997)* und der P50 %-Perzentil-Hörschwelle nach *DIN ISO 226 (2006)* liegt die GK0-Grenzkurve zur Beurteilung der Lästigkeit von Dauergeräuschen in Studios zur Bild- und Tonverarbeitung. Dagegen befindet sie sich nur noch ca. 3 bis 4 dB über der P1 %-Perzentil-Hörschwelle nach *ISO 28961 (2012)*. Dieser Vergleich zeigt, welche hohen Anforderungen an die Einhaltung tieffrequenter Geräusche in Räumen gestellt werden und dass nur eine geringfügige Überschreitung der P1 %-Perzentil-Hörschwelle zur Lästigkeit führen kann.
3. Die Gegenüberstellung der in Deutschland bekannten *Minimalkurven gleicher Lästigkeit* macht deutlich, dass Anforderungen an tieffrequente Geräusche in Räumen sogar unter der normalen P50 %-Perzentil-Hörschwelle auftreten können.



**Abb. 4.23** GK-Grenzkurven zur Beurteilung der Lästigkeit von Dauergeräuschen in Studios zur Bild- und Tonverarbeitung. Das Dauergeräusch darf keine tonalen oder periodischen Schallkomponenten enthalten, insbesondere auch für tieffrequenten Schall unterhalb von 125 Hz.



**Abb. 4.24** Vergleich von *Minimalkurven gleicher Lästigkeit* aus deutschen Normen, die für die Beurteilung der Lästigkeit tieffrequenter Schalle, auch unterhalb von 100 Hz, in Räumen gelten

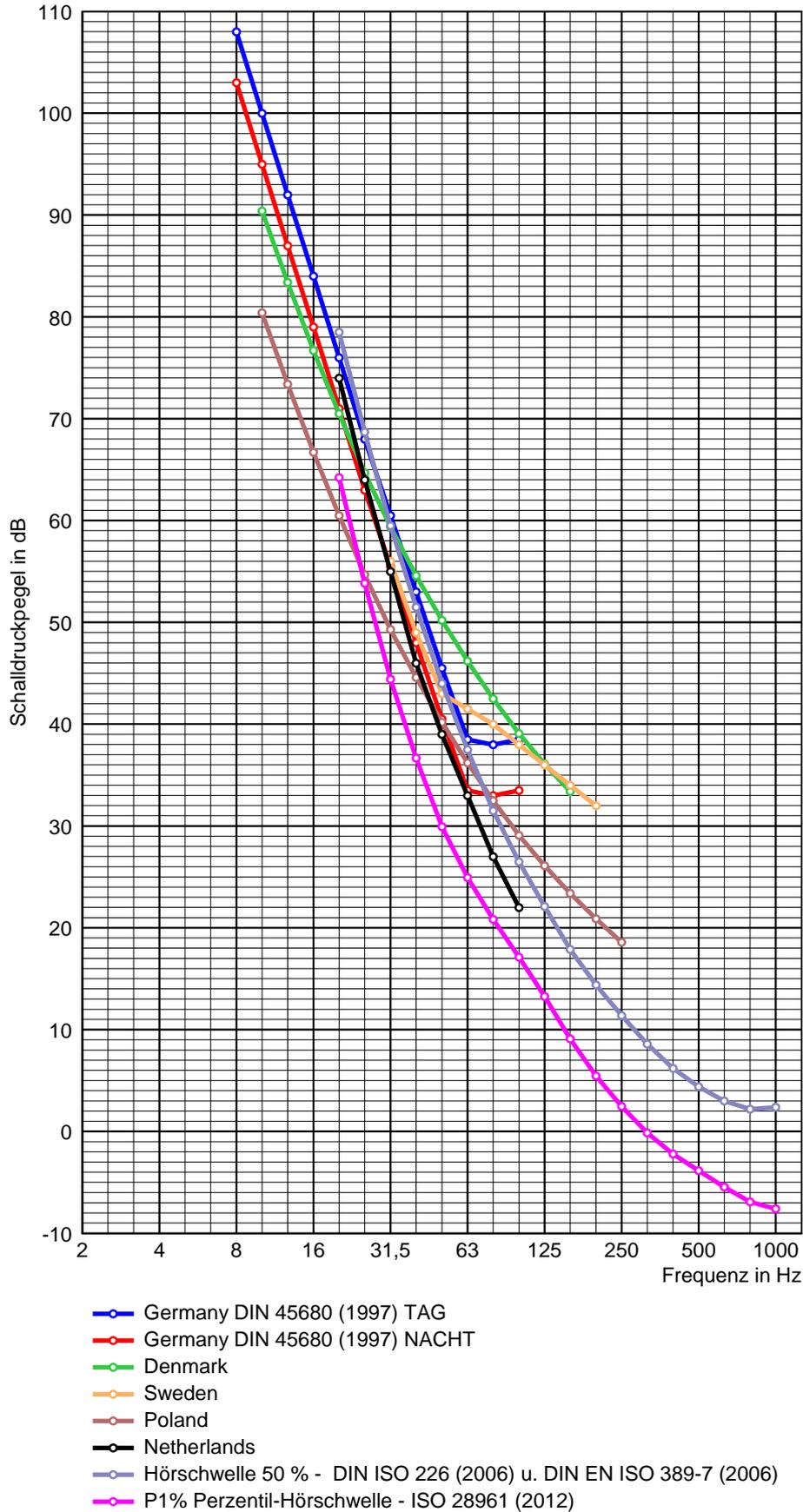
#### 4.3.3.2 Europäische Länder

In verschiedenen europäischen Ländern wie Dänemark, Schweden, Polen und den Niederlanden existieren in den Regelwerken *Minimalkurven gleicher Lästigkeit für tieffrequente Geräusche*. Die Referenzwerte in den Richtlinien unterschiedlicher Länder zur Begrenzung von tieffrequenten Schall sind in Abb. 4.25 den *Minimalkurven gleicher Lästigkeit* für den Tag und die Nacht nach *DIN 45680 (1997)* gegenübergestellt.

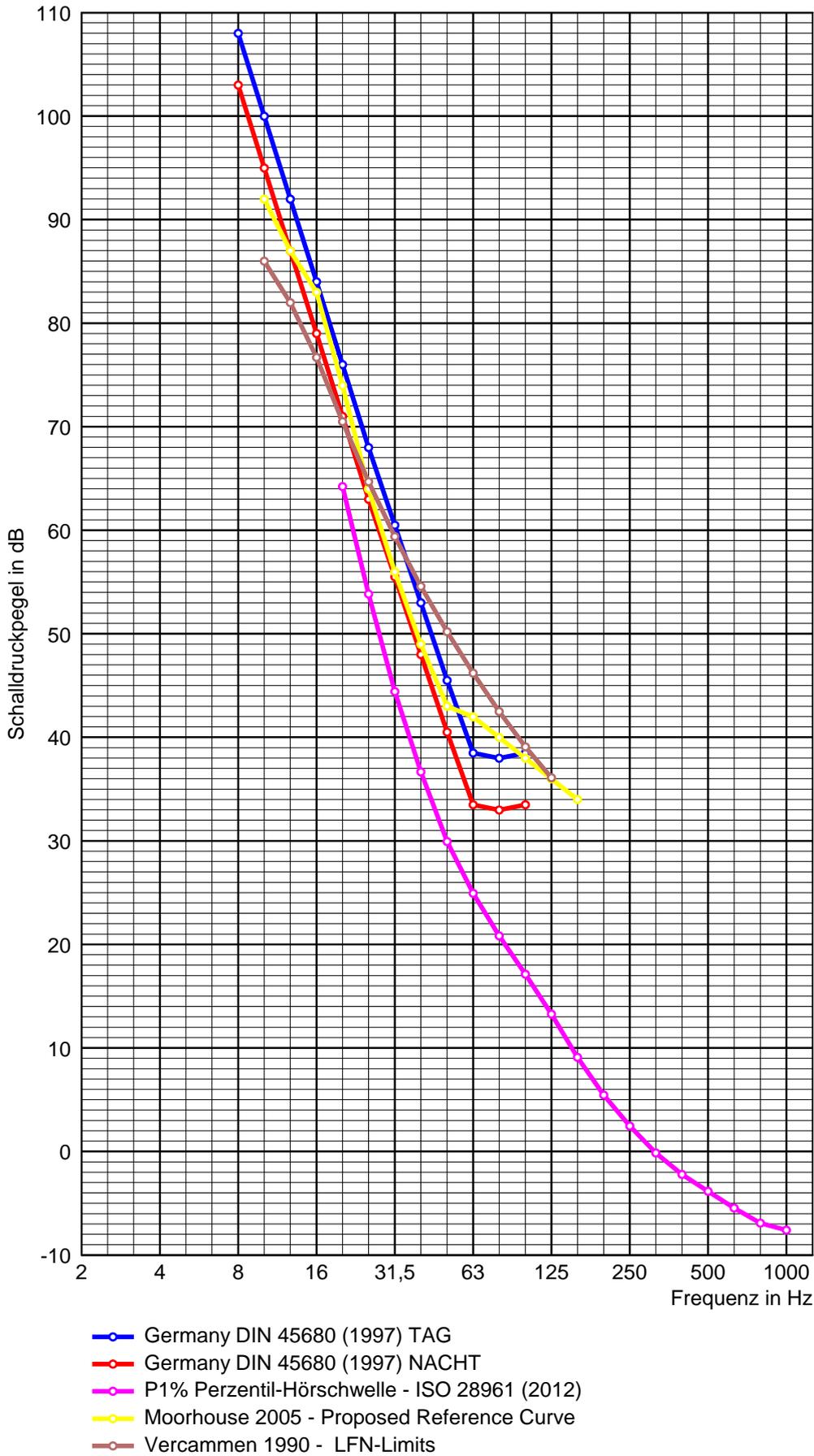
Die Zusammenstellung der *Minimalkurven gleicher Lästigkeit* im Ländervergleich präsentiert folgende überraschende Ergebnisse:

1. Die *Minimalkurven gleicher Lästigkeit* der Länder Schweden, Niederlande und Dänemark stimmen im Kerngebiet der tieffrequenten Geräusche unterhalb von 63 Hz sehr gut mit der Minimalkurve für die Nacht nach *DIN 45680 (1997)* überein.
2. Die Kurven gruppieren sich alle um die P50 %-Perzentil-Hörschwelle nach *DIN ISO 226 (2006)*.
3. Nur die Werte der polnischen Richtlinie zeigen Abweichungen von den Ergebnissen nach obigem Punkt 1 und 2. Offenbar gelten bei tieferen Frequenzen unterhalb von 40 Hz strengere Schallschutzforderungen als bei allen anderen europäischen Ländern (siehe Abb. 4.25).

Weitere Untersuchungen, wie sie im Ergebnis in Abb. 4.26 gezeigt werden, stützen die obigen Ergebnisse. Die Gegenüberstellung der *Minimalkurven gleicher Lästigkeit* für den Tag und die Nacht nach der deutschen Norm *DIN 45680 (1997)* mit denen aus der *internationalen* Literatur für die Beurteilung der Lästigkeit tieffrequenter Schalle unterhalb von 100 Hz in Räumen nach *Vercammen, M. (1990)* und *Moorhouse, A. u. a. (2005)* bestätigen die Überlegung, dass die *Minimalkurven gleicher Lästigkeit* für die Nacht nach der deutschen Norm *DIN 45680 (1997)* gegenüber allen anderen die niedrigsten vorkommenden *Minimalkurven gleicher Lästigkeit* nach dem derzeitigen Erkenntnisstand sind. Die Ergebnisse in diesem Abschnitt sprechen daher für eine relativ sichere *Minimalkurve gleicher Lästigkeit* nach der deutschen Norm *DIN 45680 (1997)*.



**Abb. 4.25** Vergleich von *Minimalkurven gleicher Lästigkeit* europäischer Länder, die für die Beurteilung der Lästigkeit tieffrequenter Schalle unterhalb von 100 Hz in Räumen gelten



**Abb. 4.26** Vergleich der *Minimalkurven gleicher Lästigkeit* für den Tag und die Nacht nach der deutschen Norm *DIN 45680 (1997)* mit denen aus der internationalen Literatur für die Beurteilung der Lästigkeit tieffrequenter Schalle unterhalb von 100 Hz in Räumen

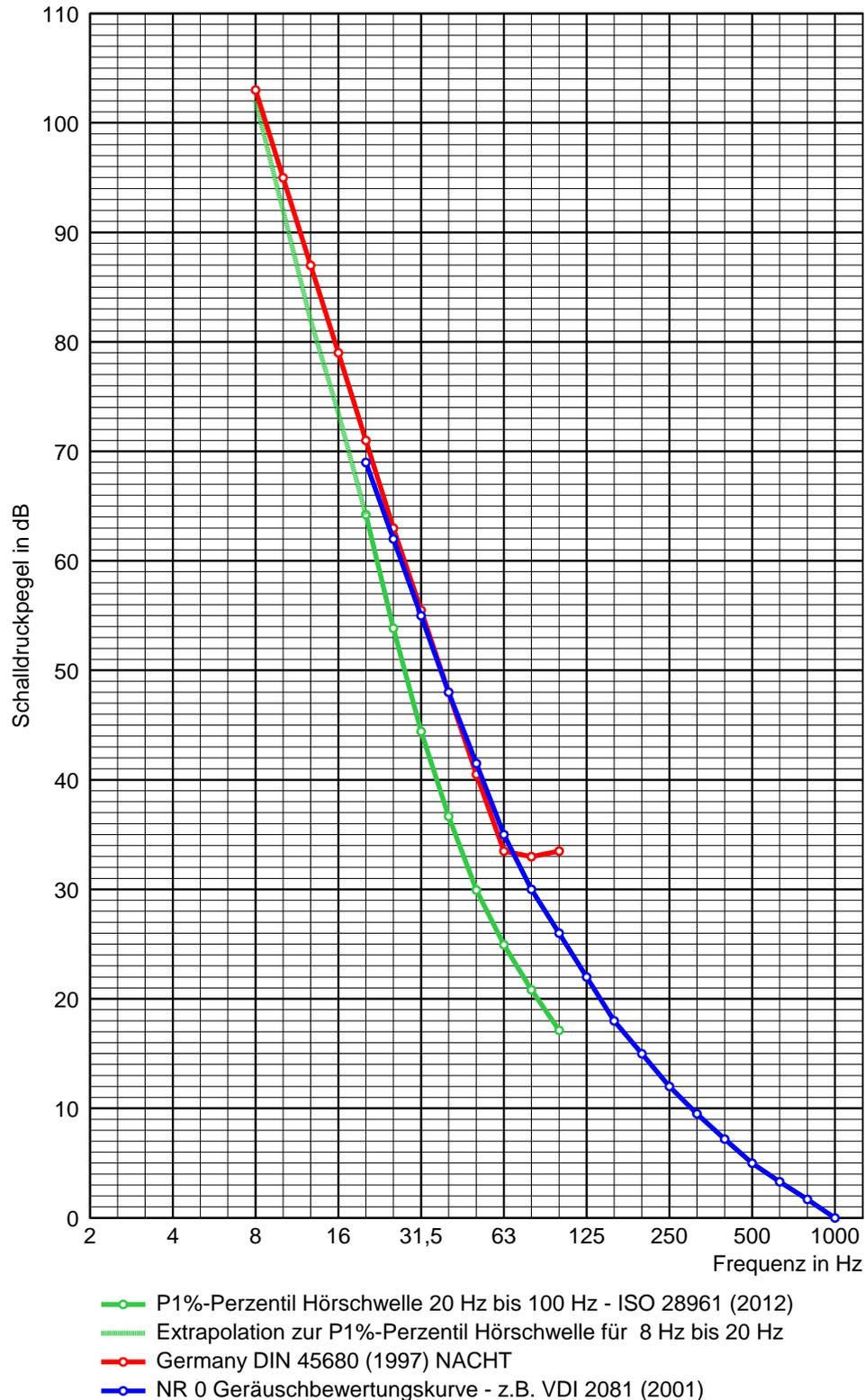
#### 4.3.4 Prüfung und Beurteilung von tieffrequentem Schall nach dem Grenzkurvenverfahren

Ein Grenzkurvenverfahren dient der Beurteilung von Frequenzanalysen und es stellt damit ein Schallbewertungsverfahren dar, bei welchem einzelne Frequenzanteile in ihrer Störwirkung und/oder Lästigkeit auf den Menschen geprüft werden. Im Folgenden wird auf der Grundlage von frequenzanalytischen Gesichtspunkten ein Verfahren für die Beurteilung tieffrequenter Schalle entwickelt.

##### 4.3.4.1 Entwicklung und Vorschlag zu einer *Minimalkurve gleicher Lästigkeit* zur Beurteilung tieffrequenter Geräusche

Wie im Abschnitt 4.3.3 gezeigt wird davon ausgegangen, dass die *Minimalkurve gleicher Lästigkeit* für die Nacht nach der deutschen Norm *DIN 45680 (1997)* gegenüber allen anderen in Abb. 4.24 bis Abb. 4.26 die niedrigste vorkommende *Minimalkurve gleicher Lästigkeit* nach dem derzeitigen Erkenntnisstand ist. Damit ist der Ansatz für die Entwicklung einer *Grenze* im Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz gegeben. Die Darstellung der international anerkannten NR 0-Geräuschbewertungskurve zur Beurteilung der Lästigkeit von tieffrequenten Geräuschen im Frequenzbereich von 20 Hz bis 100 Hz in Abb. 4.27 zeigt eine gute Übereinstimmung mit der *Minimalkurve gleicher Lästigkeit* für die Nacht nach der deutschen Norm *DIN 45680 (1997)*. Beide Kurven wurden zu einer neuen *Minimalkurve gleicher Lästigkeit* für den Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz verarbeitet. Diese Kurve ist eine wesentliche Voraussetzung, um ein Mess-, Bewertungs- und Beurteilungsverfahren zu entwerfen.

Im Folgenden wird die *Minimalkurve gleicher Lästigkeit* für den Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz nur noch mit **Lästigkeitsgrenze LG1** bezeichnet.



**Abb. 4.27** Entwicklung einer Minimalkurve gleicher Lästigkeit aus den Anhaltswerten für die Nachtzeit aus der *DIN 45680 (1997)* und der international anerkannten NR 0-Geräuschbewertungskurve zur Beurteilung der Lästigkeit von tieffrequenten Geräuschen im Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz

#### 4.3.4.2 Ergebnis „Wahrnehmungsschwelle WS“ und „Lästigkeitsgrenze LG1“

Die Abschnitte 4.3.2 und 4.3.3 zeigen einige wichtige grundsätzliche Erkenntnisse für die Entwicklung eines Mess- und Beurteilungsverfahrens.

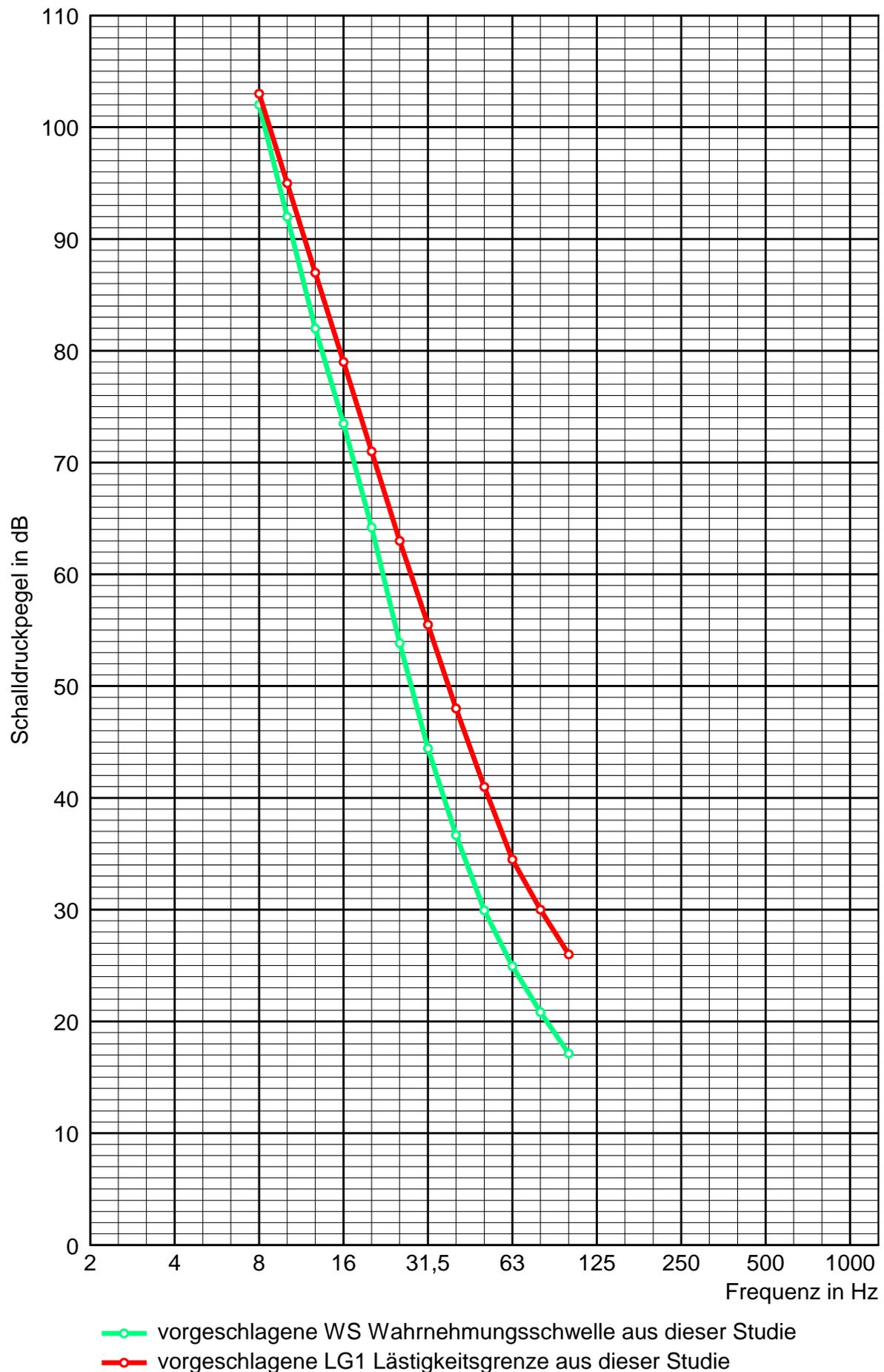
In Abschnitt 4.3.2 wird dargestellt, wie aus den Hörschwellendaten der *ISO 28961 (2012)* und auf Basis der P1 %-Perzentil-Hörschwelle mit Hilfe der Extrapolation für die Terzen 8 Hz, 10 Hz, 12,5 Hz und 16 Hz eine neue begründete Wahrnehmungsschwelle WS als zentrales Kriterium zur Beurteilung von tieffrequentem Schall geschaffen wird.

In den Abschnitten 4.3.3 und 4.3.4.1 wird die Entwicklung der „Lästigkeitsgrenze LG1“ beschrieben. Wird die Lästigkeitsgrenze LG1 überschritten, so kann davon ausgegangen werden, dass tieffrequente Geräusche als „lästig“ eingestuft werden können.

Die in Abb. 4.28 präsentierte „Wahrnehmungsschwelle WS“ und „Lästigkeitsgrenze LG1“ werden für die Aufnahme in eine neue DIN 45680 vorgeschlagen.

Welche Bedeutung hat nun die „Wahrnehmungsschwelle WS“ und die „Lästigkeitsgrenze LG1“ ?

Bei der Überschreitung der „Wahrnehmungsschwelle WS“ kann davon ausgegangen werden, dass tieffrequenter Schall von einer Person zwar wahrgenommen werden kann, aber nicht zwangsläufig von ihr als lästig empfunden werden muss. Erst bei der Überschreitung der „Lästigkeitsgrenze LG1“ kann angenommen werden, dass eine Person den wahrgenommenen tieffrequenten Schall als lästig empfindet.



**Abb. 4.28** Vorschlag einer Wahrnehmungsschwelle WS und einer Lästigkeitsgrenze LG1 zur Beurteilung der Lästigkeit von Einzeltönen, tonhaften und schmalbandigen tieffrequenten Geräuschen im Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz

#### 4.3.4.3 Beurteilung von Beispielen aus der Praxis

##### Praxisbeispiel 1

Abb. 4.29 zeigt die Messergebnisse einer Untersuchung bei einer Beschwerdeführerin in einem an einen Serverraum angrenzenden Schlafzimmer. Die Untersuchung wird auf der Grundlage der *DIN 45680 (1997)* durchgeführt. Auf der Basis der Messergebnisse in Abb. 4.29 kommt man zum Ergebnis, dass die Spitzen der Terzschalldruckpegel bei 25 Hz und bei 50 Hz keine Überschreitung der Hörschwelle zeigen und damit nicht wahrnehmbar sein können. Der Vergleich mit den Anhaltswerten für die Nachtzeit entsprechend dem Beiblatt der *DIN 45680 (1997)* führt zu der Aussage, dass keine erhebliche Belästigung durch tieffrequente Geräusche vorliegt.

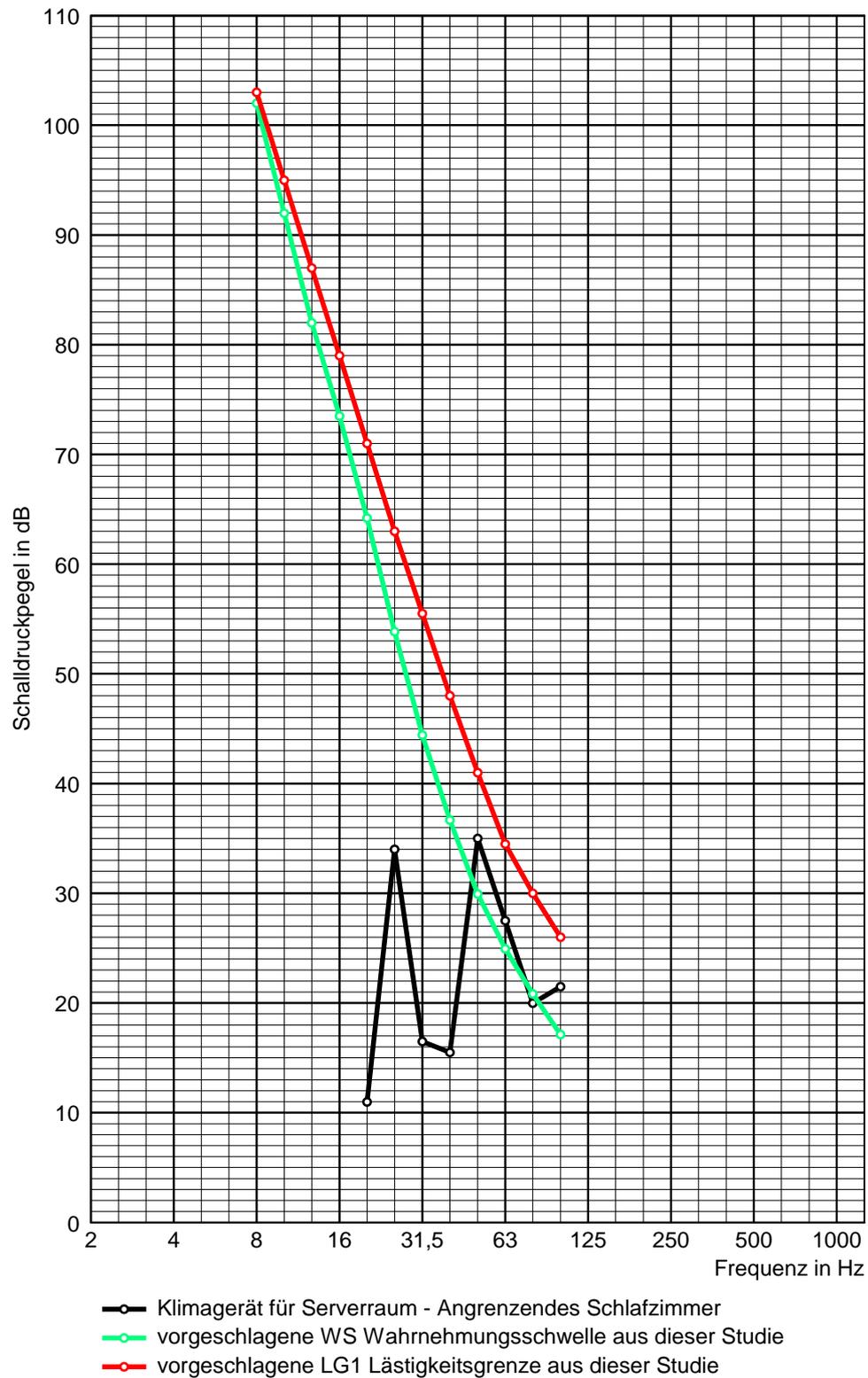
Werden in Abb. 4.29 die Messwerte mit der vorgeschlagenen Wahrnehmungsschwelle WS und der Lästigkeitsgrenze LG1 aus der vorliegenden Studie verglichen, so liegen die Terzschalldruckpegel bei 50 Hz und 63 Hz über der Wahrnehmungsschwelle WS, jedoch unter Lästigkeitsgrenze LG1. Das bedeutet, es könnte das tonhafte Geräusch gehört werden. Allerdings liegen die beiden Terzschalldruckpegel unter der Lästigkeitsgrenze LG1, von daher kann davon ausgegangen werden, dass das Geräusch zwar hörbar, aber nicht zwingend lästig ist.

Der Unterschied zur Aussage nach *DIN 45680 (1997)* „... , dass die Spitzen der Terzschalldruckpegel bei 25 Hz und bei 50 Hz keine Überschreitung der Hörschwelle zeigen und damit nicht wahrnehmbar sein können“ liegt nun darin, dass man auf der Grundlage des Vergleiches mit der neuen vorgeschlagenen Wahrnehmungsschwelle WS der Beschwerdeführerin immerhin bestätigt, dass das tieffrequente Geräusch von ihr wahrgenommen werden kann.

##### Praxisbeispiel 2 und 3

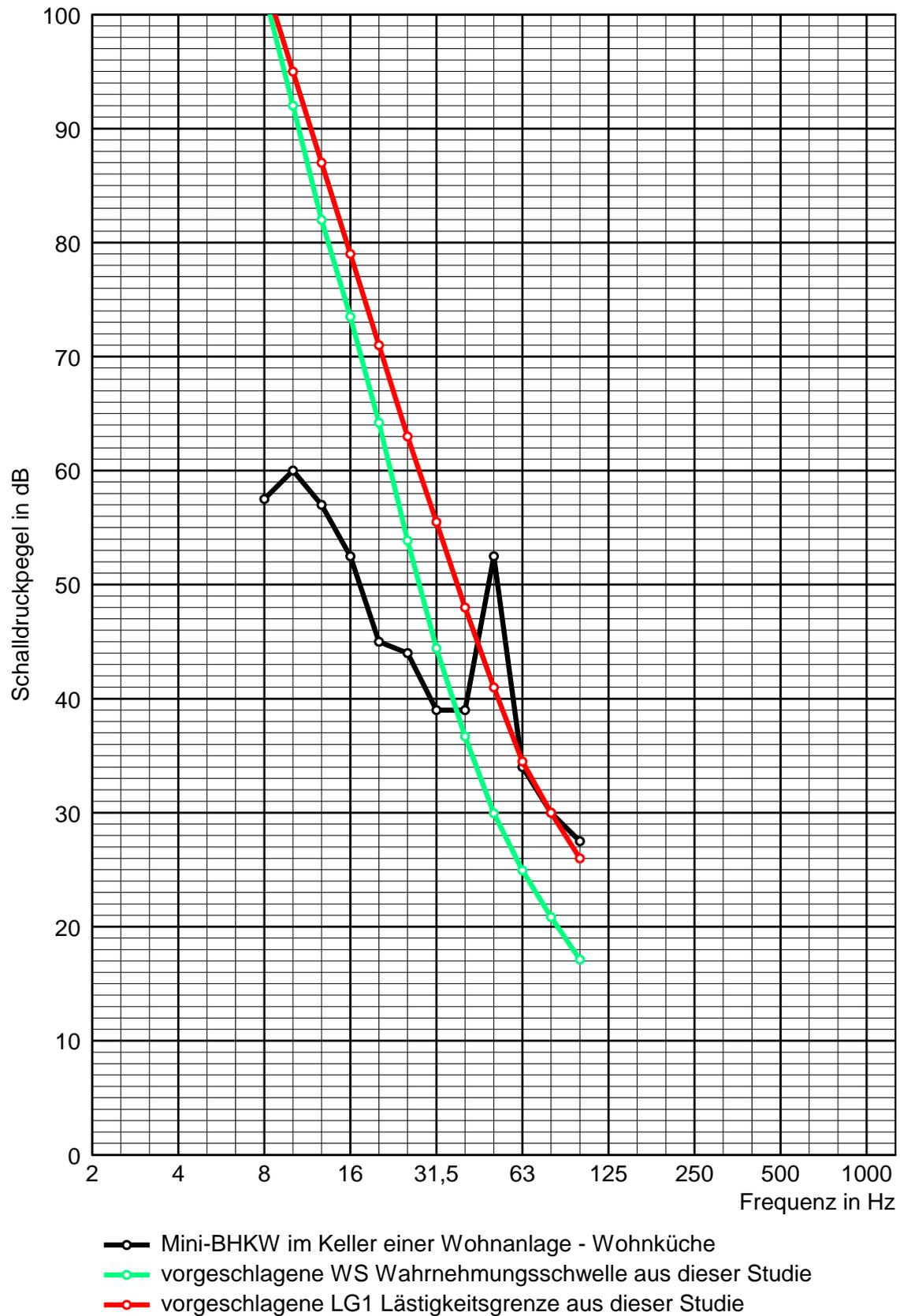
Abb. 4.30 zeigt die Messergebnisse einer Untersuchung in einer Wohnküche und Abb. 4.31 die in einem von einer Exzenterpresse 100 m entfernten Wohnhaus. In beiden Fällen wird die Lästigkeitsgrenze LG1 deutlich überschritten. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die beiden tieffrequenten Geräusche als „lästig“ eingestuft werden können.

## Praxisbeispiel 1



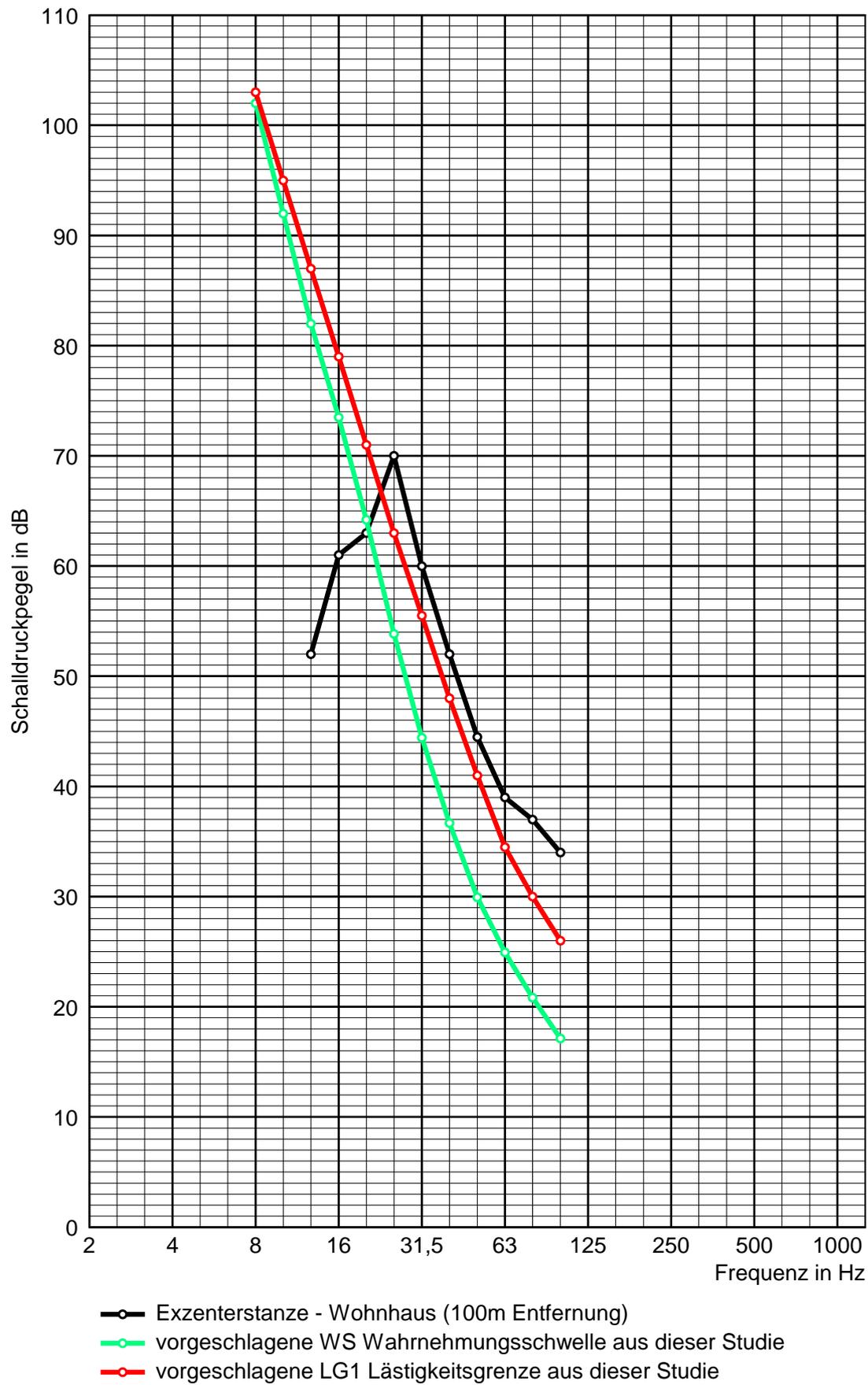
**Abb. 4.29** Beurteilung eines Geräuschbeispiels anhand der Wahrnehmungsschwelle WS und der Lästigkeitsgrenze LG1

Praxisbeispiel 2



**Abb. 4.30** Messergebnisse eines Geräuschbeispiels aus der Untersuchung in einer Wohnküche anhand der Wahrnehmungsschwelle WS und der Lästigkeitsgrenze LG1

Praxisbeispiel 3



**Abb. 4.31** Beurteilung eines Geräuschbeispiels anhand der Wahrnehmungsschwelle WS und der Lästigkeitsgrenze LG1

#### 4.3.5 Ermittlung eines Anhaltswertes zur Beurteilung sowohl tonhaltiger als auch breitbandiger tieffrequenter Schalle – Breitbandverfahren –

##### 4.3.5.1 Lästigkeit und Bedeutung des Beurteilungspegels

Wie bereits oben gezeigt betreffen die tieffrequenten Geräusche verschiedene Schallquellen aus den unterschiedlichsten gewerblichen und industriellen Bereichen. Von daher muss z. B. ein Messverfahren, mit dem tieffrequenter Schall ermittelt werden soll, auf fast alle Arten der tieffrequenten Schalle ohne Unterschied der Schallquellen und der Schallart anwendbar sein. Merkmale eines zu entwickelnden Messverfahrens müssen sein:

- die Verwendung einheitlicher Messgrößen,
- die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Schallimmissionen untereinander,
- die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit einem Anhaltswert, der eine Lästigkeitsgrenze markiert,
- die Nachvollziehbarkeit und die Reproduzierbarkeit der Messungen.

Anliegen dieser Untersuchung ist die Vermeidung oder Verringerung nachteiliger Wirkungen durch tieffrequenten Schall auf den Menschen. Es wird davon ausgegangen, dass für die Kennzeichnung der Stärke der tieffrequenten Schallimmission deren verwendete Messgröße so zu wählen ist, dass aus ihren Zahlenwerten auf die Stärke der möglichen Lästigkeit geschlossen werden kann.

Wegen der dünnen Datenlage sind der erreichbaren Korrelation zwischen Messgrößen und Urteilen der vom tieffrequenten Schall Betroffenen allerdings enge Grenzen gesetzt, und zwar aus den folgenden Gründen:

1. Die Korrelation zwischen tieffrequentem Schall und der Lästigkeit ist nur unvollkommen bekannt und, wie sich in der Vergangenheit gezeigt hat, im Allgemeinen nicht durch eine einfache Beziehung darstellbar.
2. Der Einfluss der Lästigkeit eines tieffrequenten Schalls auf den Menschen ist nicht nur sehr vielfältig, sondern – wie oben bereits beschrieben – auch von physikalisch nicht messbaren Faktoren, von sogenannten Moderatoren, abhängig. Dazu gehört u. a. die Einstellung des Betroffenen zum Geräusch, seine physikalische und psychische Verfassung, seine Gewöhnung an das Geräusch und seine Sensibilisierung sowie die Information, die es für ihn enthält.

Der Beurteilungspegel als Größe zur Beurteilung von tieffrequentem Schall muss weitestgehend die Lästigkeitsäquivalenz repräsentieren und trotzdem einfach darstellbar sein. Das erleichtert die allgemeine Anwendung von Vorschriften und das Festsetzen von Anhaltswerten.

Die Genehmigungsverfahren z. B. für Anlagen nach der *Vierten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen – 4. BImSchV)* fordern in der Regel einen Nachweis über die Einhaltung von Immissionsrichtwerten nach TA Lärm. Deshalb müssen die für die Festlegung solcher Immissionsrichtwerte verwendeten messtechnischen Größen vorausberechenbar sein. Die Schallimmission muss daher zumindest grundsätzlich aus der Schallemission berechnet und prognostiziert werden können und umgekehrt.

Darüber hinaus ist dringend zu empfehlen, bei der Neuarbeitung und Neufestlegung einheitlicher Messgrößen eines Messverfahrens auf die bestehenden gesetzlichen Regelungen und Normen Rücksicht zu nehmen.

Die veränderlichen tieffrequenten Schallimmissionen können allgemein durch einen Mittelungspegel gekennzeichnet werden.

Ist die Belästigung durch ein tieffrequentes Geräusch im Wohnbereich zu beurteilen, und zwar besonders, wenn es um den Einwirkungsbereich durch Einzelanlagen geht, wo zu erwarten ist, dass hier von der Wirkung her eine besondere Auffälligkeit vorhanden ist, so ist der Beurteilungspegel aus dem Basisschalldruckpegel und den entsprechenden Zusätzen zu bilden, die die Lästigkeit charakterisieren. Ton- und Impulsschlag sind anzugeben, um auf das Vorhandensein solcher Auffälligkeitsmerkmale und die Notwendigkeit ihrer vorrangigen Beseitigung hinzuweisen.

#### 4.3.5.2 Ansatz für die Entwicklung eines höchstzulässigen Lästigkeitspegels (Anhaltswert) in Räumen

Das in Abschnitt 4.3.4 beschriebene Grenzkurvenverfahren gilt streng genommen für Töne, schmalbandige Schalle und höchstens breitbandige Schalle mit Einzeltönen. Die Erfahrung zeigt, dass für die Beurteilung breitbandiger tieffrequenter Schallspektren ohne deutlich hervortretende Einzeltöne das Grenzkurvenverfahren auch geeignet ist. Der große Vorteil des Grenzkurvenverfahrens besteht darin, dass es relativ schnell eine unmittelbare Aussage darüber liefert, ob eine Lästigkeitsgrenzkurve oder an welchen Stellen eine Lästigkeitsgrenzkurve überschritten wird. Es wird dadurch berücksichtigt, welchen Einfluss das Schallpegelspektrum bei der Lästigkeitsbeurteilung von tieffrequenten Geräuschen hat. Aus der Sicht des Autors ist das Grenzkurvenverfahren für die Beurteilung tieffrequenter Schalle in Räumen ein sicheres Verfahren.

Alternativ wird hier in dieser Untersuchung aus dem Grenzkurvenverfahren ein Verfahren entwickelt, das auf einer Einwertangabe eines frequenzbewerteten Gesamtschalldruckpegels beruht. Im Folgenden wird es als Breitbandverfahren bezeichnet. In der Regel hat es den Vorteil der einfachen Messbarkeit eines frequenzbewerteten Gesamtschalldruckpegels. Nach der Messung und Auswertung steht unmittelbar eine Einwertangabe als frequenzbewerteter Gesamtschalldruckpegel zur Verfügung. Er wird mit einem Anhaltswert verglichen.

Zur Entwicklung eines Anhaltswertes für die Anwendung des Breitbandverfahrens wird von drei tieffrequenten Modellschallen ausgegangen. Die Modellschalle werden sowohl nach dem Grenzkurvenverfahren (siehe Abschnitt 4.3.4) als auch anhand des frequenzbewerteten Gesamtschalldruckpegels beurteilt. Dabei wird so vorgegangen, dass die vorgeschlagene Lästigkeitsgrenze LG1 durch ihren Ordinatenwert mit dem Schalldruckpegel  $L_0$  bei 1000 Hz gekennzeichnet wird. Dabei muss die anzuwendende Dämpfungskurve zur Ermittlung des Gesamtschalldruckpegels den gleichen Verlauf wie die vorgeschlagene Lästigkeitsgrenze LG1 besitzen. Wir bezeichnen den höchstzulässigen frequenzbewerteten Gesamtschalldruckpegel mit  $L_x$ . Die ausgewählten Modellschalle sind in Abb. 4.32 dargestellt. Dabei handelt es sich um

1. einen tieffrequenten Schmalbandschall (Schall 1,  $L_{X1}$ ), dessen Schallspektrum in einer der Terzen die vorgeschlagene Lästigkeitsgrenze LG1 berührt, jedoch in allen anderen spektralen Bereichen deutlich vernachlässigbare Schallanteile aufweist,
2. einen tieffrequenten Breitbandschall (Schall 2,  $L_{X2}$ ), dessen Schallspektrum im gesamten interessierenden Frequenzbereich (Terzbänder mit Mittenfrequenzen von 8 Hz bis 100 Hz) an der Lästigkeitsgrenze LG1 anliegt,
3. einen typischen tieffrequenten Industrie- und Gewerbeschall (Schall 3,  $L_{X3}$ ) (siehe auch Anhang A) mit einem Schallspektrum, das nur in einigen wenigen Terzen die Lästigkeitsgrenze LG1 berührt.

In allen drei Fällen führt die Beurteilung nach dem Grenzkurvenverfahren zur gleichen Aussage: „Die Lästigkeitsgrenze wird gerade erreicht.“ Somit halten alle drei Schalle trotz unterschiedlicher Schallspektren die Lästigkeitsgrenze LG1 ein.

Die Einwertangabe als Anhaltswert wird aus der Lästigkeitsgrenze LG1 ermittelt. Dazu wird ein höchstzulässiger frequenzbewerteter Gesamtschalldruckpegel als Anhaltswert auf der Basis der Lästigkeitsgrenze LG1 und der Abwägung der drei Modellschalle berechnet. Wie der Einfluss der Schallbandbreite der einzelnen Schalle berücksichtigt wird und wie ein sinnvoll festgelegter Anhaltswert entsteht, zeigt die folgende Zusammenstellung:

Ordinatenwert mit dem Schalldruckpegel  $L_0$  bei 1000 Hz:

$$L_0 = 0 \text{ dB}$$

Schall 1:  $L_{X1} = L_0 + 10 \log n \text{ dB}$   
 $n = \text{Zahl der erfassten Terzbereiche}$   
Für  $n = 1$  (Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz) gilt:

$$L_{X1} = L_0 + 0 \text{ dB} = 0 \text{ dB.}$$

Schall 2:  $L_{X2} = L_0 + 10 \log n \text{ dB}$   
Für  $n = 12$  (Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz) gilt:

$$L_{X2} = L_0 + 11 \text{ dB} = 11 \text{ dB.}$$

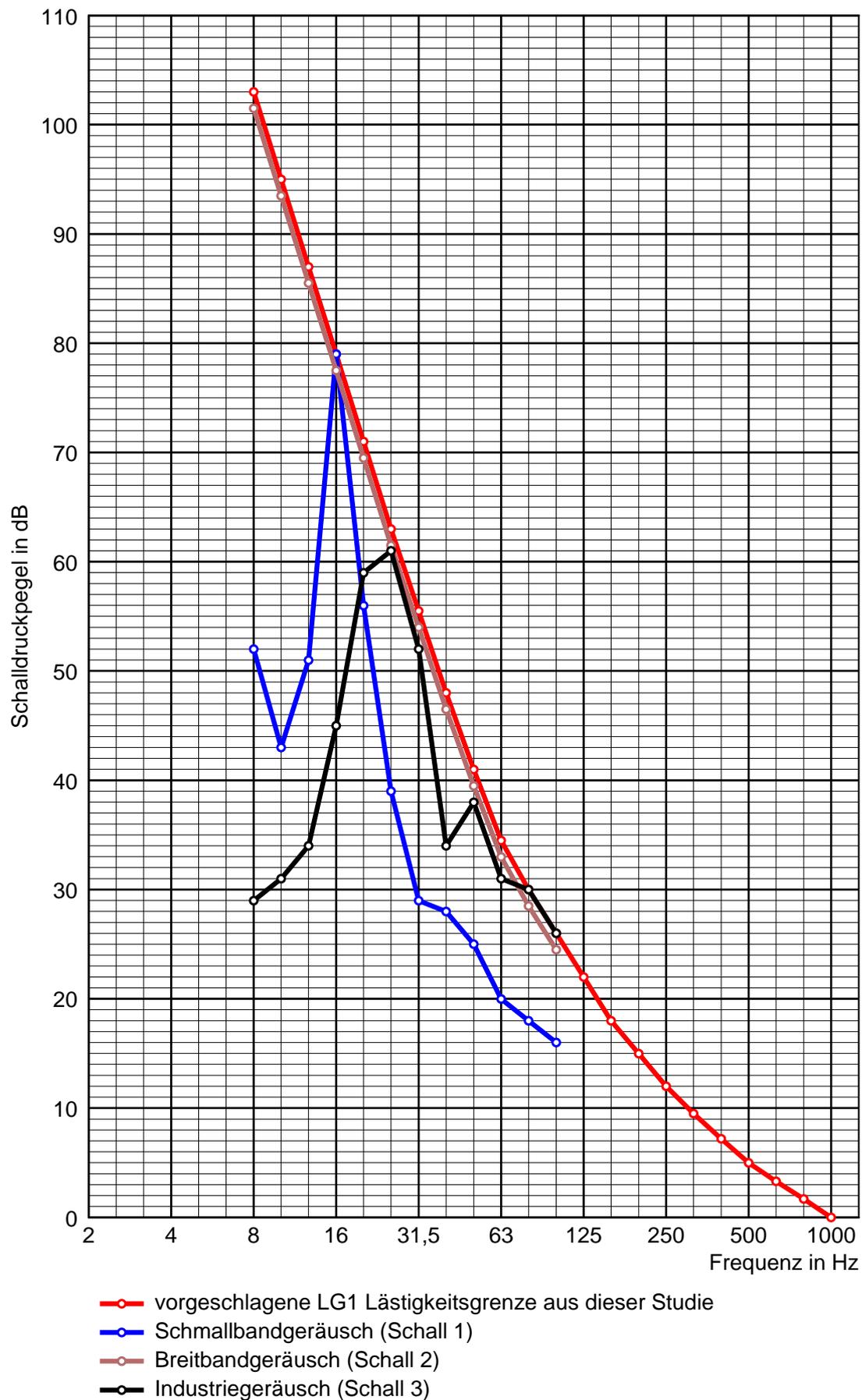
Schall 3:  $L_{X3} = L_0 + 10 \log n \text{ dB}$   
Für  $n = 3$  bis 6 (Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz) gilt:

$$L_{X3} = L_0 + (5 \text{ bis } 8) \text{ dB} = 5 \text{ bis } 8 \text{ dB.}$$

Die Schalle 1 und 2 erfassen die möglichen Extremfälle. Dagegen repräsentiert Schall 3 häufige typische tieffrequente Industrie- und Gewerbeschalle. Um für den am häufigsten vorkommenden Schall 3 den Bewertungsfehler gegenüber dem Grenzkurvenverfahren möglichst klein zu halten, könnte man den Anhaltswert als X-frequenzbewerteten Gesamtschalldruckpegel festlegen auf

$$\text{Anhaltswert in Räumen von } L_{X3} = L_{\text{Anhalt}} \approx 8 \text{ dB.}$$

Die Beurteilung erfolgt dann durch den Vergleich von Anhaltswert  $L_{\text{Anhalt}} \approx 8 \text{ dB}$  mit dem X-bewerteten Gesamtschalldruckpegel  $L_{\text{X,eq}}$  für tieffrequenten Schall. Dies gilt in der Regel für Dauergeräusche. Es müsste noch weiter untersucht werden, welcher Anhaltswert am sinnvollsten festgelegt werden sollte und was typischerweise für tieffrequente Schalle zutrifft.



**Abb. 4.32** Modellschalle: Schmalbandschall (Schall 1), Breitbandschall (Schall 2) und Industrie- und Gewerbeschall (Schall 3) für die Entwicklung eines höchstzulässigen frequenzbewerteten Gesamtschalldruckpegels (Anhaltswertes) für die Beurteilung der Lästigkeit breitbandiger tieffrequenter Schalle in Räumen

#### 4.3.6 Bestimmung eines Beurteilungspegels auf der Basis eines X-bewerteten äquivalenten Gesamtschalldruckpegels $L_{X,eq}$ und Zuschlägen nach dem Breitbandverfahren

##### 4.3.6.1 Grundgeräuschpegel in Räumen

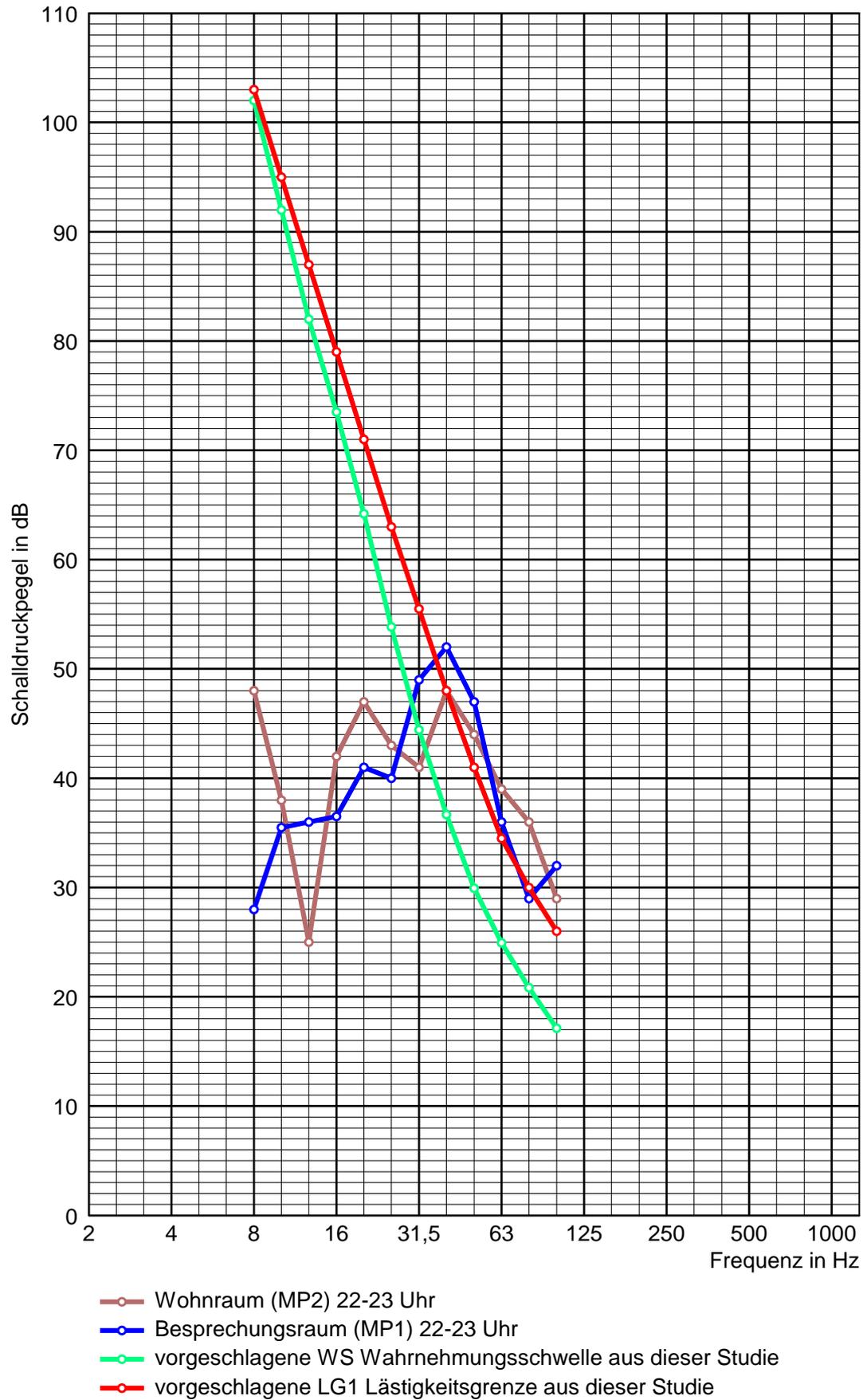
Tieffrequente Geräuschereignisse mit Schalldruckpegeln, die sich vom Grundgeräusch deutlich abheben, ziehen beim Betroffenen in der Regel die Aufmerksamkeit auf sich und werden häufig als besonders stark lästig empfunden. Zu den Geräuschquellen, bei denen dies der Fall sein kann, gehören beispielsweise Klimageräte, Luft-Wärme-Pumpen, Lüfter und Lüftungsgeräte, Mini-Blockheizkraftwerke usw. in Wohngebieten oder Windenergieanlagen im ländlichen Bereich.

Das in Wohnräumen sehr niedrige Grundgeräuschpegel insbesondere bei ländlichen Einzelwohnanlagen auftreten können zeigt Tab. 4.3. Insofern können tieffrequente Geräusche, die 10 dB und mehr über dem Grundgeräusch liegen eine besondere Störwirkung hervorrufen.

**Tab. 4.3** Abendliche A-bewertete Grundgeräuschpegel  $L_{GA}$  in Wohnungen bei geschlossenen und dichten Fenstern mit ausreichender Luftschalldämmung nach VDI 4100

Wohnsituation	$L_{GA}$ in dB
Ruhige ländliche Einzelwohnlage	15
Wohngebiete ohne stärkere Einwirkung von Außenlärm	20
Wohnungen mit erhöhter Außenlärmbelastung, z. B. in Kern- und Mischgebieten und im Einwirkungsbereich lauter Straßen	25
Wohnungen an lauten Straßen	30

Wie Abb. 4.33 zeigt, ist es besonders wichtig, das Grundgeräusch zu messen. Allein das Grundgeräusch kann tieffrequenten Schall enthalten und die Lästigkeitsgrenze überschreiten. In Abb. 4.33 ist für einen Messpunkt MP 2 (innerhalb eines Gebäudes) ein Terzspektrum für den Zeitraum 22:00 bis 23:00 Uhr dargestellt. Der Innenpegel liegt für den extrem tieffrequenten Schall mit dem Übergang zu Infraschall bis 31,5 Hz unterhalb der Wahrnehmungsschwelle WS. Oberhalb von 31,5 Hz bis 80 Hz und 100 Hz Terzmittenfrequenz liegen die Werte der linearen Terzschalldruckpegel jedoch oberhalb der vorgeschlagenen Wahrnehmungsschwelle WS und der Lästigkeitsgrenze LG1. Insofern ist allein schon das Grundgeräusch auffällig und möglicherweise lästig. Wird das Grundgeräusch bei der Messung nicht richtig erfasst, kann es bei der Beurteilung eines Anlagengeräusches zu Fehlbeurteilungen führen.



**Abb. 4.33** Die linearen Terzschalldruckpegel des Grundgeräusches in den Räumen des städtischen Bereiches überschreiten schon allein bei etwa 31,5 Hz bis 80 Hz und 100 Hz Terzmittenfrequenz die Wahrnehmungsschwelle WS und die Lästigkeitsgrenze LG1.

#### 4.3.6.2 Ermittlung eines Beurteilungspegels $L_r$ und des X bewerteten Gesamtschall- druckpegels $L_{X,eq}$

Mit der Bildung eines Beurteilungspegels  $L_r$  wird in der vorliegenden Untersuchung grundsätzlich ein Vorschlag unterbreitet, zwischen den akustischen Größen und der Stör- und Lästigkeitswirkung eines tieffrequenten Geräusches Äquivalenz herzustellen. Der Beurteilungspegel  $L_r$  setzt sich zusammen aus dem X-bewerteten Gesamtschalldruckpegel  $L_{X,eq}$  und den unten aufgeführten Zuschlägen. Der Beurteilungspegel wird mit dem vorgegebenen Anhaltswert nach Abschnitt 4.3.5.2 verglichen wird.

##### *X bewerteter Gesamtschalldruckpegel $L_{X,eq}$*

Der X-bewertete Gesamtschalldruckpegel berechnet sich aus den einzelnen bewerteten Terzschalldruckpegeln  $L_{X, Terz, eq}$  im Bereich von 8 Hz bis 100 Hz mit Hilfe der Tab. 4.4 zum X-bewerteten Gesamtschalldruckpegel  $L_{X,eq}$  durch logarithmisch energetische Addition nach Gl. 4.1. Dabei bleiben Terzen, in denen der Terzschalldruckpegel kleiner als der zugehörige Wert der Lästigkeitsgrenze LG1 ist, unberücksichtigt. Überdeckt das Grundgeräusch die Wahrnehmungsschwelle WS und die Lästigkeitschwelle LG1 deutlich, so dürfen diese Terzschalldruckpegel zur Bildung des X-bewerteten Gesamtschalldruckpegels  $L_{X,eq}$  nicht herangezogen werden (siehe Abb. 4.33).

$$L_{X,eq} = 10 \lg \sum_i 10^{0,1(L_{Terz,eqi} + K_{Xi})} \quad (4.1)$$

Die Korrekturwerte  $K_{Xi}$  der X-Bewertung sind in der folgenden Tabelle angegeben.

**Tab. 4.4** Korrekturwerte  $K_{Xi}$  der X-Bewertung

Terzmittenfrequenzen in Hz	$K_{Xi}$ in dB
8	-103,0
10	- 95,0
12,5	- 87,0
16	-79,0
20	-71,0
25	-63,0
31,5	-55,5
40	-48,0
50	-41,0
63	-34,5
80	-30,0
100	-26,0

*Beurteilungspegel  $L_r$* 

Der X-bewertete Gesamtschalldruckpegel  $L_{X,eq}$  ist ein mittlerer Lästigkeitspegel. Er allein ist nicht ausreichend zur Beschreibung der Lästigkeit. Gegenüber dem Grenzkurvenverfahren bestehen durch die Bildung eines Einzahlwertes Urteilsunsicherheiten, die durch Zuschläge ausgeglichen werden müssen. Das betrifft die Spektrumsform und die Zeitfunktion des Geräusches. Deshalb müssen zur Beurteilung der Lästigkeit weitere schallbezogene Variablen in Form von Zuschlägen zum X-bewerteten Gesamtschalldruckpegel  $L_{X,eq}$  Berücksichtigung finden. Durch Hinzufügen von Zuschlägen kann aus dem  $L_{X,eq}$  ein Beurteilungspegel gebildet werden, der die Lästigkeit verschiedener Schallarten berücksichtigt, z. B. ein Impulzzuschlag von 2 bis 4 dB zur Berücksichtigung schneller Schallpegeländerungen. Der Beurteilungspegel als Bindeglied zwischen akustischer Empfindung und messbarem Schallvorgang korreliert stark mit dem X-bewerteten Gesamtschalldruckpegel  $L_{X,eq}$  und bestimmt in hohem Maße die Lästigkeit eines Geräusches.

Der *Beurteilungspegel für ein tieffrequentes Dauergeräusch* kann gebildet werden nach

$$L_r = L_{X,eq} + \Delta L_T + \Delta L_I + \Delta L_{S,P} + \Delta L_{S,F} \quad \text{in dB} \quad (4.2)$$

mit:

$L_r$	Gesamtbeurteilungspegel für den Raum,
$L_{X,eq}$	X-bewerteter Gesamtschalldruckpegel für tieffrequenten Schall in Form der zusammengefassten bewerteten Terzschalldruckpegel $L_{XTerz,eq}$ ( $f_{Terz} = 8 \text{ Hz bis } 100 \text{ Hz}$ ),
$\Delta L_T$	Tonzuschlag in dB,
$\Delta L_I$	Impulzzuschlag in dB,
$\Delta L_{S,P}$	Pegelschwankungszuschlag in dB,
$\Delta L_{S,F}$	Frequenzschwankungszuschlag in dB.

Wie stets bei der Beurteilung von Geräuschimmissionen hängt das Ausmaß der Belästigung außerdem von der Dauer und der Häufigkeit ab. Schwächere Immissionen, die oft oder langfristig auftreten, können die gleiche Belästigungswirkung haben wie stärkere Immissionen, die selten oder nur kurzzeitig auftreten. Dies wird in der Regel durch die Anwendung des äquivalenten Dauerschallpegels  $L_{X,eq}$  berücksichtigt. Eine Minderung des Pegels um 3 dB ist danach einer Halbierung der Einwirkungsdauer äquivalent.

Der *Beurteilungspegel für veränderliche tieffrequente Geräusche* kann gebildet werden nach

$$L_r = 10 \lg \left[ \frac{1}{T_r} \cdot \sum_{i=1}^N T_i \cdot 10^{0,1 \cdot (L_{X,eq_i} + \Delta L_{T_i} + \Delta L_{I_i} + \Delta L_{S,P_i} + \Delta L_{S,F_i})} \right] \quad (4.3)$$

Erfahrungsgemäß wird es notwendig sein, eine Begrenzung der Zuschläge vorzunehmen, allgemein in der Form:

$$\Delta L_T + \Delta L_I + \Delta L_{S,P} + \Delta L_{S,F} \leq x \text{ dB.} \quad (4.4)$$

#### 4.3.6.3 Zuschlag für Tonhaltigkeit $\Delta L_T$

Die belästigende Wirkung tiefer Frequenzen ist in der Regel stärker als bei mittleren und höheren Frequenzen. Die Änderungen im Zeit- und Frequenzbereich der Geräusche werden vom Betroffenen als sehr unangenehm empfunden. Eigene Messungen in der Nachbarschaft von Industrie und Gewerbe zeigen, dass Einzeltöne und tonhafte Geräusche meist besonders lästig sind. Insbesondere tritt in Wohnungen durch den stationären Einsatz von energiebetriebenen Geräten der technischen Gebäudeausrüstungen, z. B. Klimageräte, Luft-Wärme-Pumpen, Lüftungsgeräte, Mini-Blockheizkraftwerke, als Sonderproblem eine tieffrequente Tonhaltigkeit der Geräuschimmission bei sehr niedrigen Frequenzen  $< 100$  Hz bis an die Grenze zum Infraschall auf.

Wie hoch die Zuschläge für die Tonhaltigkeit anzusetzen sind, bedarf weiterer Untersuchungen. Zum Einstieg in das Thema könnten z. B. die VDI 2058, Bl. 1 und die DIN 45681 dienen.

#### 4.3.6.4 Zuschlag für Impulshaltigkeit $\Delta L_I$

Impulshaltige und intermittierende Geräusche wirken lästiger als gleichförmige Geräusche. Bedeutsam für die Lästigkeit ist die Anstiegszeit des Geräusches, d. h. wie schnell ein Geräusch seinen Maximalwert erreicht. Tieffrequente Schallimpulse haben sehr kurze Anstiegs- und Abfallzeiten. Einzelne regelmäßige und unregelmäßige Schallimpulse können wesentlich lästiger sein als gleichförmiger Dauerschall.

Wie hoch die Zuschläge für die Impulshaltigkeit anzusetzen sind, bedarf weiterer Untersuchungen. Zum Einstieg in das Thema könnten z. B. die TA Lärm, die VDI 2058, Bl. 1, DIN 45645, Teil 1, 18. BImSchV und VDI 3723, Bl. 2. dienen. Der derzeit in Deutschland im Geräuschimmissionsschutz gebräuchliche Impulzzuschlag wird aus der Differenz zwischen dem Taktmaximalpegel  $L_{AFTeq}$  und dem energieäquivalenten Dauerschallpegel  $L_{AFeq}$  gebildet. Hinweise hierzu können der DIN 45645, Teil 1 entnommen werden.

#### 4.3.6.5 Zuschlag für Pegelschwankung $\Delta L_{S,P}$

Breitbandige und insbesondere tonhaltige tieffrequente Geräusche mit deutlichen periodischen Schwankungen des Schalldruckpegels sind in der Regel lästiger als gleichförmig konstante Geräusche. Bei solchen Schallpegeländerungen beruht die Lästigkeit auf dem Ausmaß der Veränderung des Schalldruckpegels.

Der Zuschlag für die Pegelschwankung  $\Delta L_{S,Pegel}$  müsste eine der Schallpegel-Variationsweite ( $\Delta L_v = L_{max} - L_{min}$ ) proportionale Korrekturgröße sein. Dazu sind weitere Untersuchungen nötig, um Zuschläge für Pegelschwankungen abzuleiten.

4.3.6.6 Zuschlag für Frequenzschwankung  $\Delta L_{S,F}$ 

Ändert sich die Frequenz eines hervortretenden Einzeltones im Frequenzbereich bis 500 Hz z. B. mit einer Modulationsfrequenz von 4 Hz, so wird das Geräusch subjektiv als besonders störend empfunden. Die Auswertung des Frequenzhubs könnte als Maß für die Lästigkeit einer Frequenzschwankung verwendet werden. Dazu sind weitere Untersuchungen nötig.

## 4.3.6.7 Beurteilung

In Tab. 4.5 werden Anhaltswerte (siehe Abschnitt 4.3.5.2) für die Tages- und Nachtzeit für die Beurteilung tieffrequenter Geräusche vorgeschlagen. Sie gelten in Aufenthaltsräumen, die Wohnzwecken dienen, und in Räumen mit vergleichbarer Schutzwürdigkeit – unabhängig von der Lage des Gebäudes.

Im Allgemeinen liegen keine erheblichen Belästigungen durch tieffrequente Geräuschimmissionen vor, wenn die Anhaltswerte nicht überschritten werden.

**Tab. 4.5** Anhaltswerte für die Tag- und Nachtzeit zum Vergleich mit dem ermittelten Beurteilungspegel  $L_r$  für gleichförmige tieffrequente tonhaltige Geräusche sowie Schmalband-, Breitband- und Industrie- und Gewerbegeräusche

Beurteilungszeit	$L_r$ (8 Hz bis 100 Hz) dB(X)
Tagstunden	8
Nachtstunden	8

Inwiefern die Anhaltswerte für Beurteilungspegel mit hinzugefügten Zuschlägen für Impulshaltigkeit, Pegel- und Frequenzschwankung gelten, kann im Rahmen dieser Untersuchung nicht geklärt werden. Diese Problematik muss weiteren Analysen vorbehalten bleiben.

#### 4.4 Vorschlag für die Messung, Bewertung und Beurteilung von tieffrequentem Schall – Bildungsregeln

Im Folgenden wird ein Vorschlag für die Messung, Bewertung und Beurteilung von tieffrequentem Schall zur Beurteilung der Lästigkeit in Räumen der Wohnnachbarschaft vorgestellt:

##### A) Vorerhebung

- Messung des A- und Z-bewerteten Schalldruckpegels  $L_A$  und  $L_Z$  innerhalb des betroffenen Raumes bei geschlossenen Fenstern und Türen an der lautesten Stelle, an der sich Personen regelmäßig aufhalten.
- Wenn möglich, ist nach dem gleichen Prinzip bei abgeschalteter Störquelle das Grundgeräusch zu messen. In vielen Fällen lässt sich die Quelle des Störgeräusches im Vorfeld nicht eindeutig bestimmen.
- Bildung der Schalldruckpegeldifferenz  $\Delta L = L_Z - L_A$ .  
Ist die Differenz  $L_Z - L_A \leq 20$  dB, so sind die gültigen Mess- und Bewertungsverfahren für Hörschall (16 Hz bis 20.000 Hz) anzuwenden, z. B. DIN 45645-1 in Verbindung mit TA Lärm.
- Ist die Differenz  $L_Z - L_A > 20$  dB, so ist die tieffrequente Schallimmission detailliert nach dem Grenzkurvenverfahren B) und/oder dem Breitbandverfahren C) detailliert zu beurteilen.

##### B) Detaillierte Prüfung und Beurteilung von tieffrequentem Schall nach einem Grenzkurvenverfahren entsprechend Abschnitt 4.3.4

- Messung des äquivalenten Terzschalldruckpegels  $L_{\text{Terz,eq}}$  für die Terzfrequenzen von 8 Hz bis 100 Hz bei geschlossenen Türen und Fenstern am Ort der höchsten tieffrequenten Schallbelastung, an dem sich Personen regelmäßig aufhalten.
- Wenn möglich, ist nach dem gleichen Prinzip bei abgeschalteter Störquelle das Grundgeräusch zu messen. Zur sachgerechten Beurteilung müssen Störgeräusch und Grundgeräusch deutlich voneinander getrennt werden.
- Vergleich der gemessenen Terzschalldruckpegel  $L_{\text{Terz,eq}}$  mit der Wahrnehmungsschwelle  $WS$  wie in Abb. 4.20 in Abschnitt 4.3.2 gezeigt und Markierung der Terzfrequenzbereiche mit Überschreitung der Wahrnehmungsschwelle  $WS$  in einem Diagramm. Der Abbildung kann dann die Aussage entnommen werden: „Tieffrequenter Schall kann prinzipiell wahrgenommen werden.“
- Modifizierte Prüfung und Beurteilung der Lästigkeit von Einzeltönen, tonhaften und schmalbandigen tieffrequenten Geräuschen im Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz anhand der Lästigkeitsgrenze  $LG1$  nach dem Grenzkurvenverfahren (siehe Abschnitt 4.3.4.3).

- C) Detaillierte Prüfung und Beurteilung von Einzeltönen, tonhaften und schmalbandigen sowie breitbandigen tieffrequenten Geräuschen nach einem *Breitbandverfahren* gemäß Abschnitt 4.3.6.
- Messung des äquivalenten Terzschalldruckpegels  $L_{\text{Terz,eq}}$  für die Terzfrequenzen von 8 Hz bis 100 Hz bei geschlossenen Türen und Fenstern am Ort der höchsten tieffrequenten Schallbelastung, an dem sich Personen regelmäßig aufhalten.
  - Wenn möglich, ist nach dem gleichen Prinzip bei abgeschalteter Störquelle das Grundgeräusch zu messen. Zur sachgerechten Beurteilung müssen Störgeräusch und Grundgeräusch deutlich voneinander getrennt werden.
  - Vergleich der gemessenen Terzschalldruckpegel  $L_{\text{Terz,eq}}$  mit der Wahrnehmungsschwelle  $WS$  wie in Abb. 4.20 in Abschnitt 4.3.2 gezeigt und Markierung der Terzfrequenzbereiche mit Überschreitung der Wahrnehmungsschwelle  $WS$  in einem Diagramm. Der Abbildung kann dann die Aussage entnommen werden: „Tieffrequenter Schall kann prinzipiell wahrgenommen werden.“
  - Bildung des X-bewerteten Terzschalldruckpegel  $L_{\text{XTerz,eq}}$  im Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz mit Hilfe von Tab. 4.4. Die Pegel  $L_{\text{XTerz,eq}}$  werden energetisch zum X-bewerteten Gesamtschalldruckpegel  $L_{\text{X,eq}}$  nach Gl. 4.1 addiert. Hierbei bleiben die Terzen, in denen die Terzschalldruckpegel kleiner als die zugehörigen Werte der Lästigkeitsgrenze  $LG1$  sind, unberücksichtigt. Der X-bewertete Gesamtschalldruckpegel  $L_{\text{X,eq}}$  ist ein mittlerer Lästigkeitspegel, dem gegebenenfalls weitere Zuschläge hinzugefügt werden und woraus ein Beurteilungspegel ermittelt wird.
  - Ermittlung des Beurteilungspegels  $L_r$  ohne oder mit Zuschlägen nach Abschnitt 4.3.6.2:  
$$L_r = L_{\text{X,eq}} + \Delta L_T + \Delta L_I + \Delta L_{\text{S,P}} + \Delta L_{\text{S,F}} \quad \text{in dB.}$$
  - Modifizierte Prüfung und Beurteilung von Einzeltönen, tonhaften und schmalbandigen sowie breitbandigen tieffrequenten Geräuschen unterhalb von 100 Hz nach Abschnitt 4.3.6.7.

## 5 Grundlagen für die Entwicklung eines Verfahrens zur Prognose der Einwirkung von tieffrequentem Schall am Immissionsort

### 5.1 Einleitung

Durch die Planung eines angemessenen Schallschutzes sollen die Menschen in schutzbedürftigen Räumen, insbesondere in Wohnungen, gegenüber tieffrequentem Schall (8 Hz bis 100 Hz) geschützt werden. Andererseits muss natürlich auch die rechtmäßige Nutzung von vorhandenen und auch geplanten Anlagen möglich sein. Dabei sollen Konflikte zwischen dem möglicherweise von tieffrequentem Schall Betroffenen und dem Anlagenbetreiber bzw. Planer vermieden werden. Es ist daher zwingend erforderlich, eine Handlungsanleitung für die Planung von Anlagen mit tieffrequenter Schallabstrahlung bereitzustellen, die insbesondere einen wirksamen Schallschutz berücksichtigt. In einem ersten Schritt kommt es darauf an, einen konzeptionellen Ansatz als Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Verfahrens zur Prognose der Einwirkung von tieffrequenten Schallen an Immissionsorten für Schalldruckpegel im Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz zu erarbeiten.

Bei der Erarbeitung eines konzeptionellen Ansatzes muss es gestattet sein, einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Berücksichtigung aller wesentlichen Einflüsse zu finden. Darüber hinaus ist insbesondere die Praktikabilität zu berücksichtigen.

Ausgangspunkt in der Literaturanalyse ist der Erkenntnisstand über die physikalischen Eigenschaften des tieffrequenten Schalls (8 Hz bis 100 Hz) einschließlich Infraschall und die DIN ISO 9613-2 „Akustik – Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien – Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren“ vom Oktober 1999 sowie die DIN SPEC 45660-1 „Leitfaden zum Umgang mit der Unsicherheit in der Akustik und Schwingungstechnik – Teil 1: Unsicherheit akustischer Kenngrößen“ vom Mai 2014.

Die Kenntnis der grundlegenden physikalischen Gesetze der Schallausbreitung im Freien ist notwendig, um berechnen zu können, welche Schallimmissionen im Einwirkungsbereich einer geplanten Anlage zu erwarten sind (Schallimmissionsprognose), und um Schallschutzmaßnahmen so zu planen, dass bestimmte Grenz- oder Richtwerte in der Nachbarschaft nicht überschritten werden.

Es sollen die Zusammenhänge zwischen der Schallemission und der Schallimmission im interessierenden Einwirkungsbereich einer geplanten Anlage dargestellt werden. Es wird hier gezeigt, wie für tieffrequenten Schall bei den vorgegebenen Ausbreitungsbedingungen die Schallimmission berechnet werden könnte. Nach VDI 2714 hängt der von einer Schallquelle im Freien in ihrem Einwirkungsbereich (Umgebung) erzeugte Schalldruckpegel von den Eigenschaften der Schallquelle (Schallleistung, Richtcharakteristik, Schallspektrum), der Geometrie des Schallfeldes (Lage von Aufpunkt und Schallquelle zueinander, zum Boden und zu Hindernissen im Schallfeld), den durch Topografie, Bewuchs und Bebauung bestimmten örtlichen Ausbreitungsbedingungen und von der Luftabsorption der Witterung ab. Das Schema über den Zusammenhang der Schallemission und -immission zeigt Abb. 5.1.

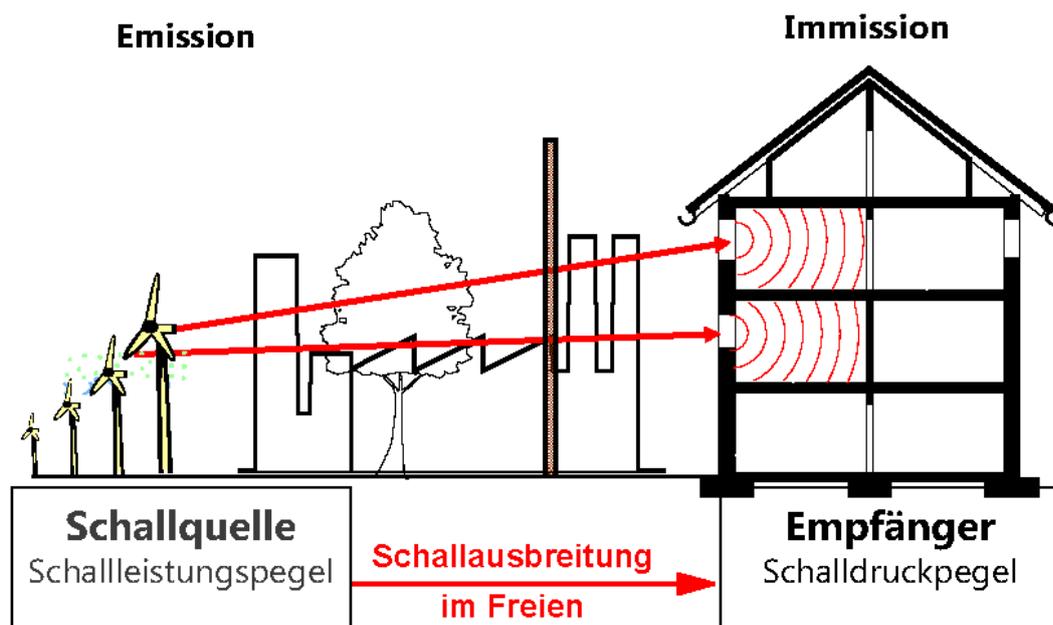


Abb. 5.1 Schema der Schallemission und -immission

## 5.2 Grundlagen, Begriffe, Definitionen

### *Akustisches Nahfeld*

Schallfeldbereich nahe an einer Schallquelle, wo die komplexen Amplituden von Schalldruck und Schallschnelle nicht zu vernachlässigende Unterschiede im Phasenwinkel aufweisen.

### *Akustisches Fernfeld*

Schallfeldbereich, der so weit von einer Schallquelle entfernt ist, dass die komplexen Amplituden von Schalldruck und Schallschnelle (annähernd) gleiche Phasenwinkel aufweisen.

## 5.3 Kenngrößen der Schallimmission für tieffrequenten Schall beim Empfänger

### 5.3.1 Geeignete Schallpegel

Wie im Abschnitt 4.1 und 4.2.4 beschrieben setzt sich die Lästigkeit aus einer physikalisch und einer persönlichkeitsbedingten Komponente zusammen. Beide lassen sich im Grunde nicht voneinander trennen. Studien zeigen, dass es für die physikalisch bedingte Komponente einen Zusammenhang zwischen wahrgenommener Lästigkeit und den akustischen Charakteristika eines Schallereignisses gibt. Ein Hauptmerkmal ist, dass die Lästigkeit zunimmt, wenn die Lautstärke ansteigt. Das Zu- und Abnehmen der Lautstärke kann durch den Schalldruckpegel gekennzeichnet werden.

*Mellert und Weber (1981)* fanden, dass der äquivalente Dauerschallpegel  $L_{eq}$  eine valide veränderliche physikalische Größe bei der Beurteilung der Lästigkeit ist. Darüber hinaus ist der äquivalente Dauerschallpegel  $L_{eq}$  ebenfalls für die Lästigkeit von Bedeutung, wenn sich das zu beurteilende tonhafte, tieffrequente Geräusch aus dem Grundgeräuschpegel heraushebt und damit eine besondere Störwirkung hervorruft. Diese akustische Eigenschaft des Schalls wird durch die effektive Dauer der Geräuscheinwirkung im äquivalenten Dauerschallpegel  $L_{eq}$  berücksichtigt. Hier liegt der Ansatz für das Prinzip des äquivalenten Dauerschallpegels. Daher wird als Ausgangsgröße für die Beurteilung von tieffrequenten Schallimmissionen der äquivalente Dauerschallpegel  $L_{eq}$  empfohlen (*Schmidt, M., 2011*).

Der äquivalente Dauerschallpegel kann verhältnismäßig einfach gemessen werden. International ist allgemein der Mittelungspegel oder äquivalente Dauerschallpegel  $L_{eq} = L_{Fm} = L_{Sm}$  die Messgröße für die Darstellung der Lärmimmissionen. Der Mittelungspegel  $L_m$  ist der über ein betrachtetes Zeitintervall  $T$  nach Gleichung

$$L_m = 10 \cdot \lg \left[ \frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,1L(t)} dt \right] \text{ in dB} \quad (5.1)$$

aus dem Zeitverlauf  $L(t)$  des Schallpegels gebildete energetische Mittelwert.

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

$$L_m = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{T_0} \sum_i T_i \cdot 10^{0,1 L_{m,i}} \right) \text{ in dB.} \quad (5.2)$$

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

$$L_{eq} = \frac{q}{0,3} \cdot \lg \left( \frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,3L(t)/q} dt \right) \text{ in dB.} \quad (5.3)$$

Nur wenn der Äquivalenzparameter<sup>3</sup> (Halbierungsparameter)  $q = 3$  dB ist, dann stimmen der „äquivalente Dauerschallpegel  $L_{\text{eq}}$ “ und der „Mittelungspegel  $L_m$ “ überein; vergleiche Gl. 5.3 mit Gl. 5.1.

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

$$L_{\text{eq}} = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,1L(t)} dt \right) = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{T \cdot p_0^2} \int_0^T p^2(t) dt \right) \text{ in dB} \quad (5.4)$$

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  $\bar{L}_{\text{eq}}$ .

Die Lästigkeit eines tieffrequenten Geräusches hängt neben der Höhe des Schallpegels außerdem im Wesentlichen von seinem Spektrum und seiner zeitlichen Struktur ab. Wie in Abschnitt 4 vorgeschlagen, kann die Beurteilung der Lästigkeit von tieffrequenten Geräuschen auf der Grundlage von Grenzkurven erfolgen. Die äquivalenten Dauerschallpegel sind daher für die einzelnen Terzmittenfrequenzen zu ermitteln. Die Ermittlung von Terzschalldruckpegeln ist allgemein international üblich. Auch das Lautstärkeberechnungsverfahren nach *Zwicker* beruht auf der Ermittlung von Terzschalldruckpegeln.

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

$$L_{\text{ZF, Terz, eq}} \quad (5.5)$$

Es wäre noch zu prüfen, ob nicht die Zeitbewertung „Slow“ für die Messung von tieffrequenten Geräuschen besser geeignet ist als die Zeitbewertung „Fast“.

Die Einführung von psychoakustischen Größen würde alle Messungen und Berechnungen erheblich erschweren. Außerdem wären umfangreiche Vorarbeiten erforderlich, um die Lautstärke nach *Zwicker* zu ermitteln. Alle bisherigen Untersuchungen zur Schallimmission und Schallemission beziehen sich national wie international auf entsprechende Schalldruckpegel (*Schmidt, M., 2011*). Im hier vorgestellten Ansatz werden daher psychoakustische Größen nicht verwendet.

### 5.3.2 Beurteilungspegel

Die physikalischen Stimulusvariablen zur Beschreibung der Lästigkeit sind objektive Größen, die von den Signaleigenschaften des Schalls abhängen. Sie sind unabhängig von der individuellen Lärmempfindlichkeit der Person und repräsentieren allein die akustisch bedingten Komponente der Lästigkeit.

Die Messung tieffrequenter Geräusche und deren Beurteilung sind sehr vielschichtig und umfassend. Trotzdem sollen die für eine Berechnung und Beurteilung erforderlichen Eingangsgrößen mit der üblichen Schallmesstechnik gemessen werden können.

<sup>3</sup> Der Äquivalenzparameter gibt die Pegelerhöhung an, die einer Halbierung der Einwirkzeit äquivalent ist.

Das hier in dieser Studie beschriebene Konzept zur Kennzeichnung der Lästigkeit des tieffrequenten Schalls in Räumen ist ein prinzipieller Vorschlag auf der Grundlage der Erfassung physikalischer Messgrößen. Für die Kennzeichnung der Stärke der Schallimmission hat sich national und international der **Beurteilungspegel**  $L_r$  bewährt. Er ist eine Größe, um die Lästigkeit während der Beurteilungszeit  $T_r$  unter Berücksichtigung von Zuschlägen oder Abschlägen für bestimmte Geräusche, Zeiten oder Situationen zu beschreiben. Allgemein gilt für das hier beschriebene Konzept für den **Beurteilungspegel**  $L_r$ , bei dem gegebenenfalls **Zuschläge**  $K_i$  berücksichtigt werden, z. B. Impulzzuschlag, Tonzuschlag oder Zuschläge für Ruhezeiten usw., folgende Gleichung:

$$L_r = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{T_r} \sum_{i=1}^n T_i \cdot 10^{0,1(L_{X,eq,T_i} + K_i)} \right) \text{ in dB} \quad (5.6)$$

Im Sinne einer praktikablen Lösung wird empfohlen, dass sich der Beurteilungspegel  $L_r$  auf der Grundlage einer Basislautstärke in Form eines X-bewerteten Gesamtschalldruckpegels  $L_{X,eq}$  (siehe Abschnitt 4.3.6.2) und aus einem Tonzuschlag  $\Delta L_T$ , Impulzzuschlag  $\Delta L_I$ , Pegelschwankungszuschlag  $\Delta L_{S,P}$  und einem Frequenzschwankungszuschlag  $\Delta L_{S,F}$  bilden lässt. Allgemein gilt dann für die Bildung des Beurteilungspegel  $L_r$  beispielsweise eines tieffrequenten Dauergeräusches in einem Raum:

$$L_r = L_{X,eq} + \Delta L_T + \Delta L_I + \Delta L_{S,P} + \Delta L_{S,F} \text{ in dB} \quad (5.7)$$

mit:

$L_r$	Gesamtbeurteilungspegel für den Raum,
$L_{X,eq}$	X-bewerteter Gesamtschalldruckpegel für tieffrequenten Schall in Form der zusammengefassten bewerteten Terzschalldruckpegel $L_{X,Terz,eq}$ ( $f_{Terz} = 8 \text{ Hz bis } 100 \text{ Hz}$ ),
$\Delta L_T$	Tonzuschlag in dB,
$\Delta L_I$	Impulzzuschlag in dB,
$\Delta L_{S,P}$	Pegelschwankungszuschlag in dB,
$\Delta L_{S,F}$	Frequenzschwankungszuschlag in dB.

Der X-bewertete Gesamtschalldruckpegel  $L_{X,eq}$  für tieffrequenten Schall berechnet sich aus den X-bewerteten Terzschalldruckpegeln  $L_{X,Terz}$  (siehe Abschnitt 4.3.6.2 und Tab. 4.4) für den Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz nach der Gl. 4.1.

$$L_{X,eq} = 10 \lg \sum_i 10^{0,1(L_{Terz,eq,i} + K_{X,i})} \text{ in dB} \quad (5.8)$$

Wie die einzelnen Messgrößen konkret zu bestimmen sind, wird im Abschnitt 4 ausführlich dargestellt.

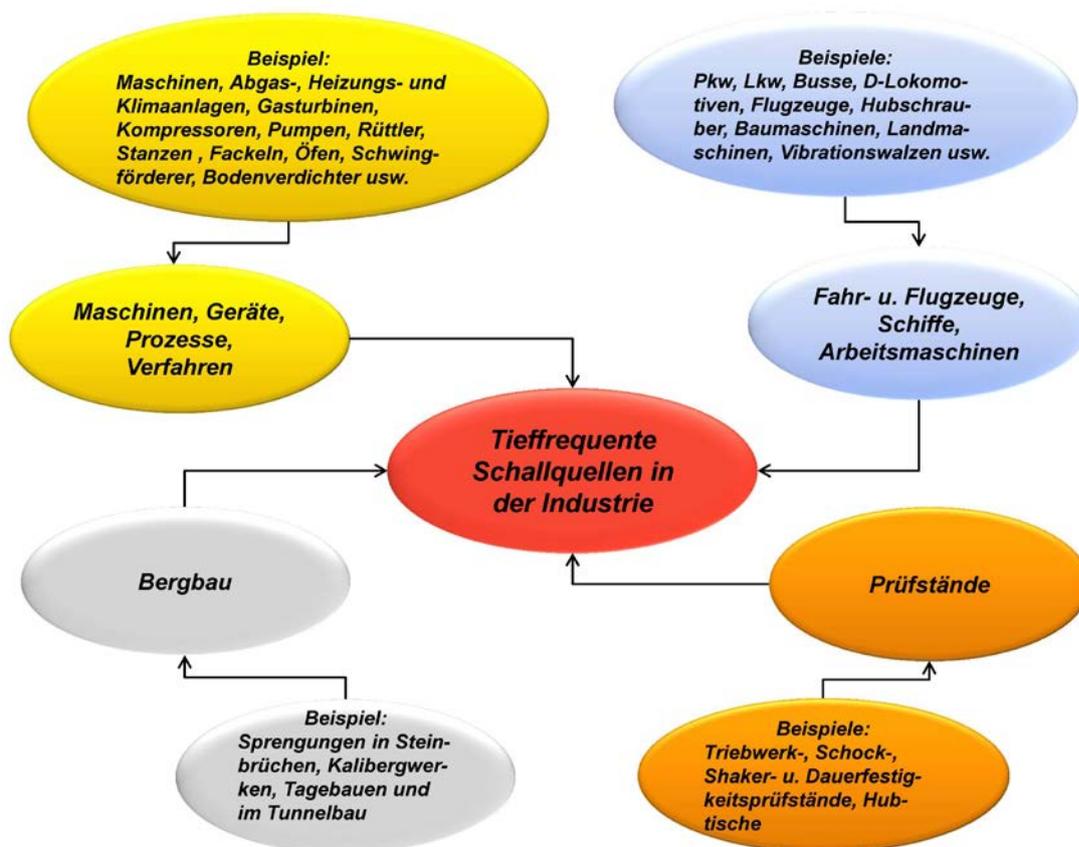
Es ist empfehlenswert, dass die hier beschriebenen Kenngrößen zur Schallimmission für tieffrequenten Schall am Immissionsort eine gemeinsame Grundlage sowohl für ein Messverfahren als auch für ein Prognoseverfahren bilden.

## 5.4 Kenngrößen der Schallemission für den tieffrequenten Schall

### 5.4.1 Eigenschaften von Schallquellen mit tieffrequenter Schallabstrahlung in der Praxis

Tieffrequenter Schall wird meist durch schwere bewegte Massen, Verbrennungsvorgänge, Turbulenzen oder Resonanzphänomene hervorgerufen. Solche Geräusche können ständig oder kurzzeitig auf den Menschen einwirken. In der Regel strahlen technische Schallquellen mit tieffrequenterem Schall auch gleichzeitig Hörschall ab. Es sollen hier nur technische Schallquellen betrachtet werden, die in Verbindung mit einem Energieumwandlungsprozess Schallenergie aus anderen Energiearten erzeugen und tieffrequenten Schall abstrahlen. Bei der vorrangig physikalischen Betrachtungsweise dieses Vorganges verwendet man den Begriff der Schallquelle.

Sind die Menschen von diesen tieffrequenten Einwirkungen betroffen, dann können Beeinträchtigungen, Störungen, Belästigungen oder im schlechtesten Fall Schädigungen hervorgerufen werden. In Abb. 5.2 sind Schallquellen aufgeführt, die für die akustische Belastung des Menschen im tieffrequenten Bereich besonders relevant sind. Dabei sind die Schallerzeugungsmechanismen sehr unterschiedlich oder es bestehen mehrere, die zu einem Gesamtschall beitragen.



**Abb. 5.2** Schallquellen, die Hörschall und gleichzeitig tieffrequenten Schall unterhalb von 100 Hz abstrahlen (Quelle: (Schmidt, M., 2014))

### **Relevanter Frequenzbereich tieffrequenten Hörschalls einschließlich des Infraschalls realer Schallquellen**

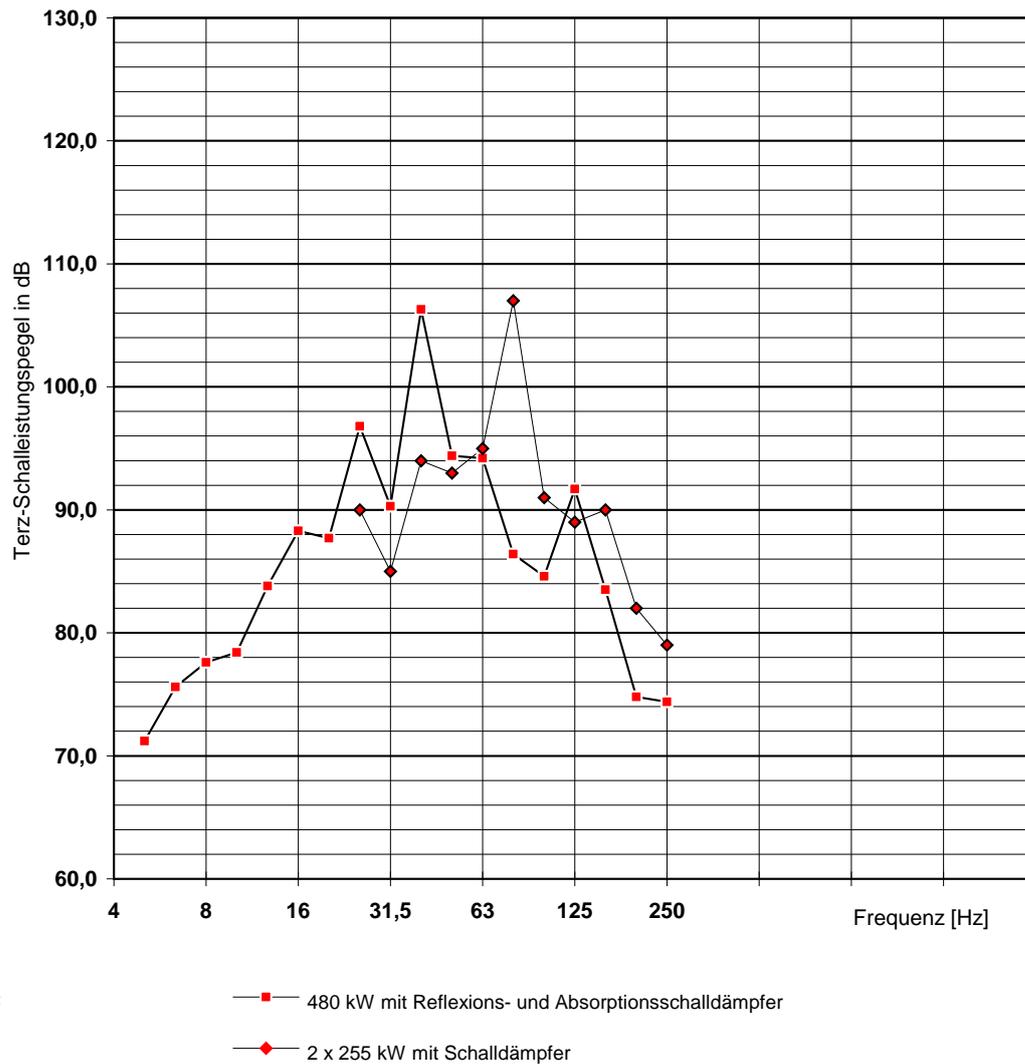
Für die Beurteilung der Lästigkeit von tieffrequenten Geräuschimmissionen ist von Interesse, in welchem Bereich die Störfrequenzen der Geräte und Anlagen liegen, die immer wieder Anlass zur Beschwerde geben. Im Anhang A und B des „Forschungsberichtes zu Kurven gleicher Lautstärke für DIN 45680“ sind Terz-Schalleistungsspektralektren und für die Schallimmissionen in Räumen die Terz-Schalldruckpegelspektren einiger der in Abb. 5.2 gezeigten Schallquellen mit tieffrequenter Geräuschabstrahlung zusammengefasst dargestellt (*Schmidt, M., 2015*). Die Sammlung entstand aus Messergebnissen in besonders störenden Fällen.

Wie die Schallspektren in Anhang A und B des „Forschungsberichtes zu Kurven gleicher Lautstärke für DIN 45680“ zeigen, gibt es in der Industrie- und Anlagentechnik eine Vielzahl von Schallquellen, welche erhebliche tieffrequente Geräuschimmissionen im Wohnumfeld hervorrufen (*Schmidt, M., 2015*). Das betrifft am häufigsten den tieffrequenten Schall im Frequenzbereich von

#### **16 Hz bis 125 Hz.**

In eher wenigen Fällen betrifft dies den Infraschallbereich unter 16 Hz. Die höchsten Terzschalldruckpegel kommen am häufigsten im Frequenzbereich oberhalb von 16 Hz vor (siehe Abb. A10 im Anhang A).

In Abb. 5.3 werden beispielhaft die markanten Schalleistungspegelspitzen von Blockheizkraftwerken mit Abgasanlagen in den Terzbändern unterhalb von 125 Hz gezeigt. Typischerweise liegen die pegelbestimmenden Frequenzen bei  $f = 40$  Hz und  $f = 80$  Hz.



2

**Abb. 5.3** Schalleistungspegel von Blockheizkraftwerken mit Abgasanlagen

### **Wellenlängen $\lambda$ des tieffrequenten Hörschalls einschließlich des Infrashalls realer Schallquellen**

Nach *Reichardt, W. (1960)* ist für die Schallabstrahlung und die Schallausbreitung „die Wellenlänge  $\lambda$  das Maß aller Dinge“.

Wie man Tab. 5.1 entnehmen kann, sind die Wellenlängen von tieffrequentem Schall und Infrashall groß im Verhältnis zu den Abmessungen von Wohn- und Arbeitsräumen (z. B. 4,0 m x 3,5 m x 3,0 m) und den Menschen umgebenden Gegenständen. Damit ergeben sich für tieffrequenten Hörschall gegenüber dem mittel- und hochfrequenten Hörschall zum Teil abweichende räumliche Phänomene.

**Tab. 5.1** Wellenlängen  $\lambda$  von tieffrequentem Hörschall einschließlich Infraschall in Abhängigkeit von den Terzmittenfrequenzen von 1 Hz bis 125 Hz (Wellenlängen gerundet) bei 20 °C

Terzmittenfrequenzen $f_m$ in Hz	1,0	1,25	1,6	2,0	2,5	3,15	4,0	5,0	6,3	8,0	10,0	12,5
Wellenlänge $\lambda$ in m	344	275	215	172	138	109	86	69	55	43	34	28

Terzmittenfrequenzen $f_m$ in Hz	16,0	20,0	25,0	31,5	40,0	50,0	63,0	80,0	100,0	125,0
Wellenlänge $\lambda$ in m	22	17	14	11	9	7	6	4	3,4	3

gelb: die in dieser Untersuchung interessierenden Wellenlängen

## Ausgedehnte Schallquellen

Die technischen Schallquellen der Industrie und des Gewerbes, wie Rohrleitungen, Förderrinnen und -bänder, Prozessfelder, Mühlen und Schwingförderanlagen, Windkraftanlagen, Triebwerksprüfstände, Industrieöfen usw., die tieffrequenten Schall abstrahlen, haben oft auch erhebliche Abmessungen, d. h. auch ausgedehnte Flächen, die Schall abstrahlen.

### 5.4.2 Beachtung der Eigenheiten der Schallabstrahlung bei der Ermittlung der Schallemissionsgrößen $L_W$ und $K_0$

In Abschnitt 5.4.1 wird gezeigt, dass die Schallstrahler gleich große oder deutlich größere Wellenlängen erzeugen als häufig die linearen räumlichen Abmessungen (Länge, Breite, Höhe) von zu schützenden Aufenthaltsräumen des Menschen. Darüber hinaus können Maschinensysteme, Anlagen und Industriehallen große Abmessungen gegenüber den Wellenlängen haben, so dass deren Flächen maßgeblich zu einer Schallabstrahlung beitragen.

#### 5.4.2.1 Ungerichtete Schallquellen und die besondere Bedeutung von Nah- und Fernfeld bei der Schallabstrahlung von tiefen Frequenzen

Bei den Ermittlungen der Schallemissionen von technischen Anlagen mit tieffrequenten Schallen sind zwingend die Wellennatur des Schalls und die geometrischen Abmessungen der Schallquellen zu beachten.

Die Schallfelder der technischen Schallquellen können in der Regel als Kugelwellenfelder modelliert werden, jedoch sind bei den tiefen Frequenzen bestimmte Kriterien für die Ermittlung der Schallemission in einer bestimmten Entfernung von der Quelle zu beachten. Die Begriffe „Nahfeld“ und „Fernfeld“ werden sehr häufig nicht einwandfrei von den Ausdrücken „Freifeld“ und „Diffusfeld“ getrennt und bekommen hier unter dem Blickwinkel der Prognose der Schallausbreitung von tieffrequentem Schall eine vornehmliche Bedeutung.

Das Nah- und Fernfeld wird durch die Schallquelle selbst erzeugt. Dabei kann man sich vorstellen, dass das Nahfeld einer Schallquelle der Bereich ist, in dem wechselförmige Strömungsvorgänge stattfinden, die in fester Beziehung zum Schallstrahler selbst stehen.

Im Nahfeld sind der Schalldruck  $p$  und die Schallschnelle  $v$  nicht in Phase. Die Schallkennimpedanz ist nicht gleich  $\rho \cdot c$ . Im Fernfeld der Schallquelle sind die stattfindenden Strömungsvorgänge weitestgehend abgeklungen und die für die Schallausbreitung charakteristischen Wechsellvorgänge zwischen den akustischen Feldgrößen finden statt. Im Fernfeld sind der Schalldruck  $p$  und die Schallschnelle  $v$  in Phase, wobei die Schallkennimpedanz gleich  $\rho \cdot c$  ist. Vereinfacht soll das Nah- und Fernfeld am Beispiel des Kugelstrahlers erläutert werden.

Betrachtet man nur die ortsabhängigen Amplituden des Schallfeldes, so ergibt sich nach *Schirmer, W. u. a. (1971)*

für den Schalldruck  $p$

$$p \sim \frac{1}{r} \quad (5.9)$$

und für die Schallschnelle  $\underline{v}$

$$\underline{v} \sim \frac{1}{r} \left( 1 + \frac{1}{jkr} \right) \quad (5.10)$$

Die Schallschnelle  $\underline{v}$  ist komplex und vom Phasenwinkel abhängig. Der Betrag von  $\underline{v}$  ist somit

$$\hat{v} = |\underline{v}| \sim \frac{1}{r} \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{1}{kr} \right)^2} \quad (5.11)$$

Dabei ist  $r$  der Abstand zwischen Quelle und Aufpunkt und  $k$  die Kreiswellenzahl

$$k = \frac{\omega}{c}$$

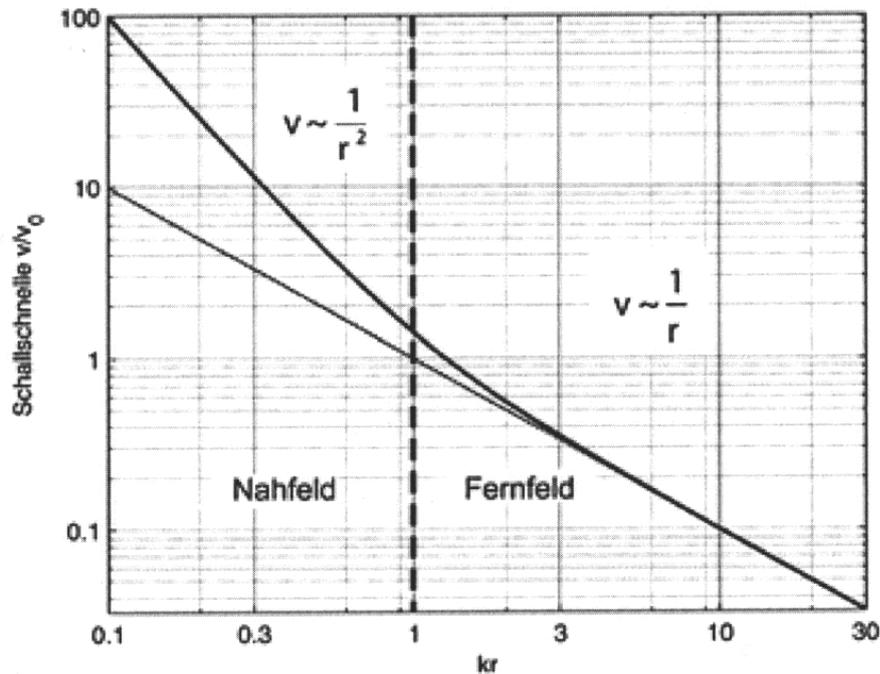
Die beiden Gleichungen 5.9 und 5.11 können in folgender Weise interpretiert werden:

1. Der **Schalldruck** (siehe Gl. 5.9) in der Kugelwelle, d. h. der Schalldruckverlauf, ist umgekehrt proportional zur Entfernung von der Schallquelle:

$$p \sim \frac{1}{r} \quad (5.12)$$

Das bedeutet, bei Verdopplung des Abstandes von der Schallquelle wird der Schalldruck halbiert. Der Schalldruckpegel vermindert sich um 6 dB. Bei einer Halbierung der Entfernung zum Mittelpunkt der Schallquelle verdoppelt sich also der Schalldruck. Der Schalldruckpegel nimmt um 6 dB zu.

2. Bei der **Schallschnelle** (siehe Gl. 5.11) ist zu erkennen, dass sie aus zwei Anteilen besteht, und zwar aus einem zum Schalldruck gleichphasigen Anteil, der proportional zu  $1/r$  von der Schallquelle abnimmt (dieser Anteil ist für den Leistungstransport ins Fernfeld verantwortlich), und aus einem gegenüber dem Schalldruck um  $90^\circ$  phasenverschobenen Anteil, der proportional zu  $1/r^2$  von der Schallquelle abnimmt. Das kann so interpretiert werden, dass die Schallschnelle in unmittelbarer Nähe der Schallquelle sehr rasch abfällt. Damit besteht für die Schallschnelle ein schnell abklingendes Nahfeld (siehe Abb. 5.4). Somit ist dieser Anteil für die Blindleistung in Strahlernähe verantwortlich.



**Abb. 5.4** Verlauf der Schallschnelle beim Übergang vom Nahfeld zum Fernfeld, bezogen auf die Schallschnelle  $v_0$  bei  $kr=1$

Daraus ist Folgendes ersichtlich:

Für  $k \cdot r \ll 1$  ist  $\frac{1}{kr} \gg 1$ , d. h.  $v \sim \frac{1}{r^2}$ ,  $p$  und  $v$  sind nicht in Phase.

Für  $k \cdot r \gg 1$  ist  $\frac{1}{kr} \ll 1$ , d. h.  $v \sim \frac{1}{r}$ ,  $p$  und  $v$  sind in Phase.

Das sogenannte Fernfeld der Kugelstrahler wird damit durch die Bedingung  $k \cdot r \gg 1$  beschrieben.

Mit der Kreiswellenzahl  $k$

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (5.13)$$

folgt daraus:

$$k \cdot r = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot r}{c} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \gg 1. \quad (5.14)$$

Allerdings gilt für Gl. 5.14 eine Phasenverschiebung von  $45^\circ$  zwischen  $p$  und  $v$ .

### **Nahfeld**

Legt man die Phasenverschiebung von  $45^\circ$  als Übergang zwischen Nahfeld und Fernfeld zugrunde und nimmt man damit einen Fehler der Wirkschalleistung in Kauf, so kann der Nahfeldbereich in folgender Art und Weise ausgedrückt werden:

$$r < \frac{c}{\omega} = \frac{c}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{\lambda}{2 \cdot \pi}. \quad (5.15)$$

Das heißt, es sind Orte, deren Entfernung  $r$  von der Quelle klein im Verhältnis zur betrachteten Wellenlänge  $\lambda$  ist. Nahfeldverhältnisse sind gekennzeichnet durch einen hohen Anteil akustischer Blindleistung und eine nur geringe Wirkschalleistung bzw. Intensität im Quellbereich. Die akustische Blindleistung im Nahfeld der Schallquelle kann man sich in folgender Art und Weise vorstellen, z. B. dass die durch eine äußere Kraft ausgelöste Bewegung der Luftmoleküle nur dann ohne Phasenverschiebung in Schalldruck umgesetzt wird, wenn das Medium keine Ausweichmöglichkeiten hat. Bei einer Kugelwelle dagegen führt nur ein Teil der Geschwindigkeit, bei der die Teilchen in ein mit der Entfernung zunehmendes Luftvolumen eingeschoben werden, zu einer Verdichtung des Mediums.

### **Fernfeld**

Dem Nahfeld folgt das Fernfeld, in welchem der Schalldruckpegel z. B. bei einer Kugelwelle infolge  $p \sim 1/r$  mit 6 dB pro Entfernungsverdopplung abnimmt. Für das Fernfeld gilt dann bei einer Phasenverschiebung von  $45^\circ$  zwischen Schalldruck und Schallschnelle der Bereich, wo

$$r > \frac{c}{\omega} = \frac{\lambda}{2 \cdot \pi} \quad (5.16)$$

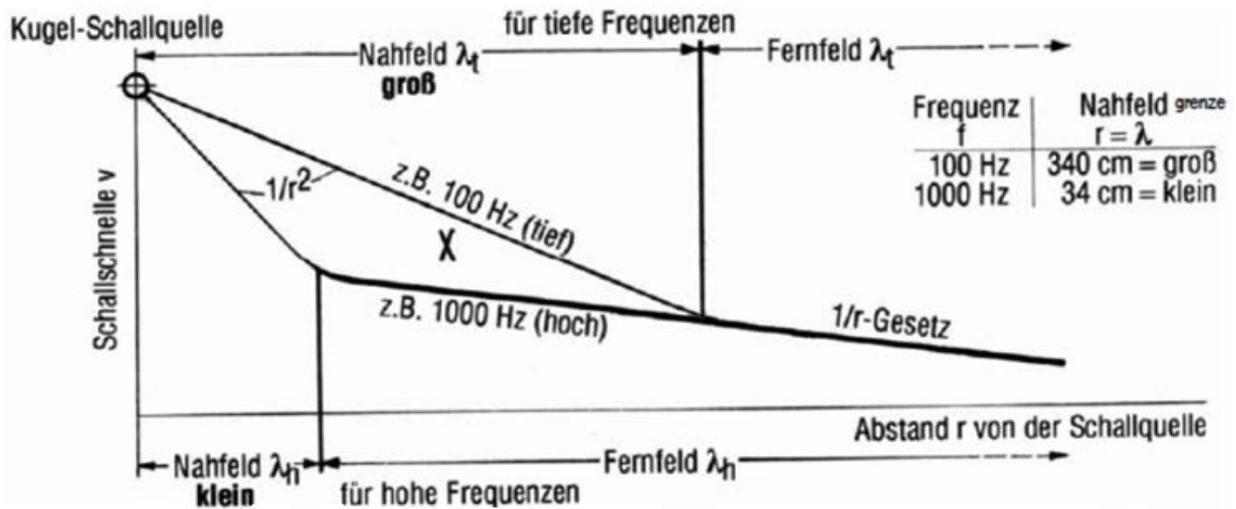
ist. Das heißt, es sind Orte, deren Entfernungen  $r$  von den Quellen groß sind im Verhältnis zu den betrachteten Wellenlängen  $\lambda$ .

Nach *Reichardt, W. (1960)* spielt die Phasenverschiebung zwischen Schalldruck  $p$  und Schallschnelle  $v$  in der Nähe einer Schallquelle nur bis etwa  $\lambda \approx r$  eine praktische Rolle. Bei annähernder Gleichheit von Wellenlänge  $\lambda$  und der Entfernung  $r$  besteht zwischen Schalldruck  $p$  und Schallschnelle  $v$  nur noch eine Phasenverschiebung von  $9^\circ$  und ein Fehler in Bezug auf die Wirkleistung von nur 1 %. Das heißt, erst bei  $r > \lambda$  befinden sich Schallschnelle und Schalldruck in Phase und es liegt ein Fernfeld vor.

### **Hinweise für die Praxis**

Nahfeld und Fernfeld einer Schallquelle sind nur im Zusammenhang mit dem Verhältnis des Abstandes  $r$  des Aufpunktes von der Schallquelle zur Wellenlänge  $\lambda$  des Schallsignals zu sehen.

Welche Auswirkungen das für die Abstände von Messorten und Immissionsorten haben kann, ist beispielsweise Abb. 5.5 zu entnehmen. Sie zeigt, wie sich die Nahfeld- und die Fernfeldgrenze auf die Ermittlung der Schallemission im Hinblick auf den Abstand zu einem Mess- oder Immissionsort darstellt.



**Abb. 5.5** Unterschiede der Nahfeld- und der Fernfeldgrenze in Bezug auf die Schallschnelle bei kleinen und großen Wellenlängen des Schalls

Um die Schalleistung auf der Basis einer Schalldruckmessung richtig zu bestimmen, muss man sich in das Fernfeld der Schallquelle begeben, dann wird die Schalleistung richtig auf der Grundlage des Schalldruckes ermittelt. Der mit „Nahfeld“ bezeichnete Bereich befindet sich nahe der Strahleroberfläche. Wie oben gezeigt, vermindert sich mit zunehmendem Abstand von seiner Oberfläche die Phasenverschiebung zwischen Schalldruck und Schallschnelle und das Nahfeld geht nahtlos in das Fernfeld über. Wichtig ist demnach die Unterscheidung zwischen Nahfeld und Fernfeld einer Schallquelle. Dies spielt insbesondere dann eine Rolle, wenn es sich um ausgedehnte Schallquellen handelt und darüber hinaus noch um eine Schallabstrahlung von tieffrequentem Schall unterhalb von 100 Hz. Für die Kennzeichnung des Grenzbereiches bzw. der Grenze zwischen Nah- und Fernfeld gibt es unterschiedliche Kriterien, die entsprechend definiert wurden. Es ist daher für die in der Praxis zu betrachtenden Schallquellen festzulegen, anhand welcher Kriterien die Begriffe „Nahfeld“ und „Fernfeld“ verwendet werden oder ob für eine bestimmte Anwendung alle Kriterien erfüllt sein müssen.

### Fernfeldbedingung 1 für die Praxis (Geometrie)

Die Fernfeldbedingung 1 beruht auf der Annahme, dass alle Teilbereiche einer Schallquelle zum jeweiligen Immissionsort die gleiche entfernungsbedingte Amplitudenabnahme aufweisen. Dies ist in der Regel dann erfüllt, wenn der Abstand zwischen der Schallquelle und dem Immissionsort  $r$  groß ist gegenüber der größten linearen Abmessung  $l_{\max}$  der Schallquelle. Daraus folgt folgende Bedingung:

$$r \geq l_{\max} \quad (5.17)$$

$l_{\max}$  größte lineare Abmessung der Quelle,  
 $r$  Abstand zwischen Quelle und Immissionsort.

Unter dieser Fernfeldbedingung erscheint die Quelle geometrisch betrachtet sehr klein. Von daher liefern alle Teile oder Teilquellen eines Strahlers am Immissionsort näherungsweise den gleichen Beitrag. Die häufig anzutreffende Bedingung  $r > 2 l_{\max}$  soll Fehler durch das Nahfeld vermeiden und möglichst senkrechten Schalldurchgang durch die Messfläche gewährleisten. Bei Einhaltung dieser Bedingung geht man davon aus, dass man sicher im Fernfeld liegt. So können geometrisch bedingte Fehler bei der Ermittlung der Schalleistung vermieden werden.

### **Fernfeldbedingung 2 für die Praxis (Wellennatur)**

Die Fernfeldbedingung 2 beruht auf der Forderung, dass im Fernfeld die Phasenunterschiede zwischen Schalldruck und Schallschnelle vernachlässigbar sind. Auf diesen Kriterien beruht auch die Definition von Nahfeld und Fernfeld nach DIN 1320. Für einen gleichphasigen Verlauf von Druck und Schnelle steht der Impedanzterm  $1 / \rho_0 \cdot c$ .

In der Literatur wird der Übergang zwischen Nahfeld und Fernfeld häufig auch bei  $r = \lambda$  angesetzt. Der Abstand liegt somit nach Gleichung 5.15 um den Faktor  $2\pi$  weiter von der Quelle entfernt. An dieser Stelle beträgt der Phasenunterschied zwischen Druck und Schnelle nur noch ca.  $9^\circ$ .

$$r \geq \lambda \quad (5.18)$$

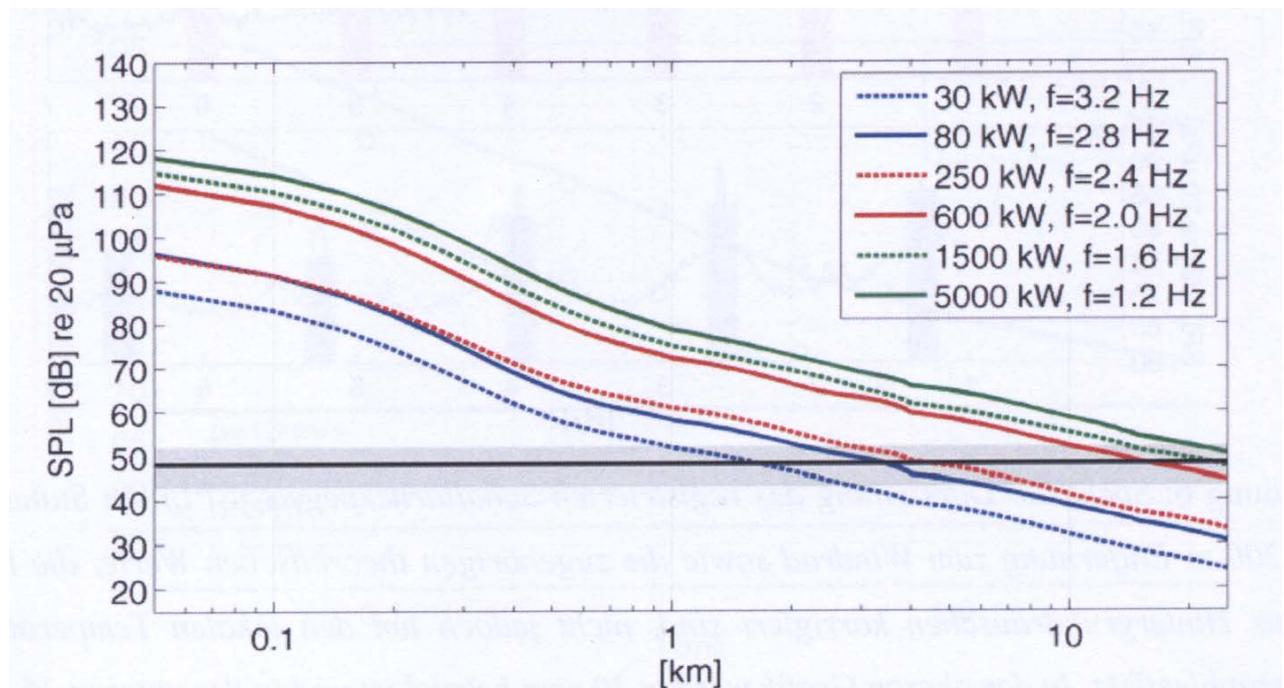
In den meisten praktischen Fällen kann ein Schallfeld als Fernfeld angesehen werden, wenn für den Fernfeldbereich die o. g. genannten Bedingungen 1 und 2 erfüllt sind. Ist eine der Bedingungen nicht erfüllt, dann befindet man sich im Nahfeld der Schallquelle.

### **Messtechnische Überprüfung von Nah- und Fernfeld**

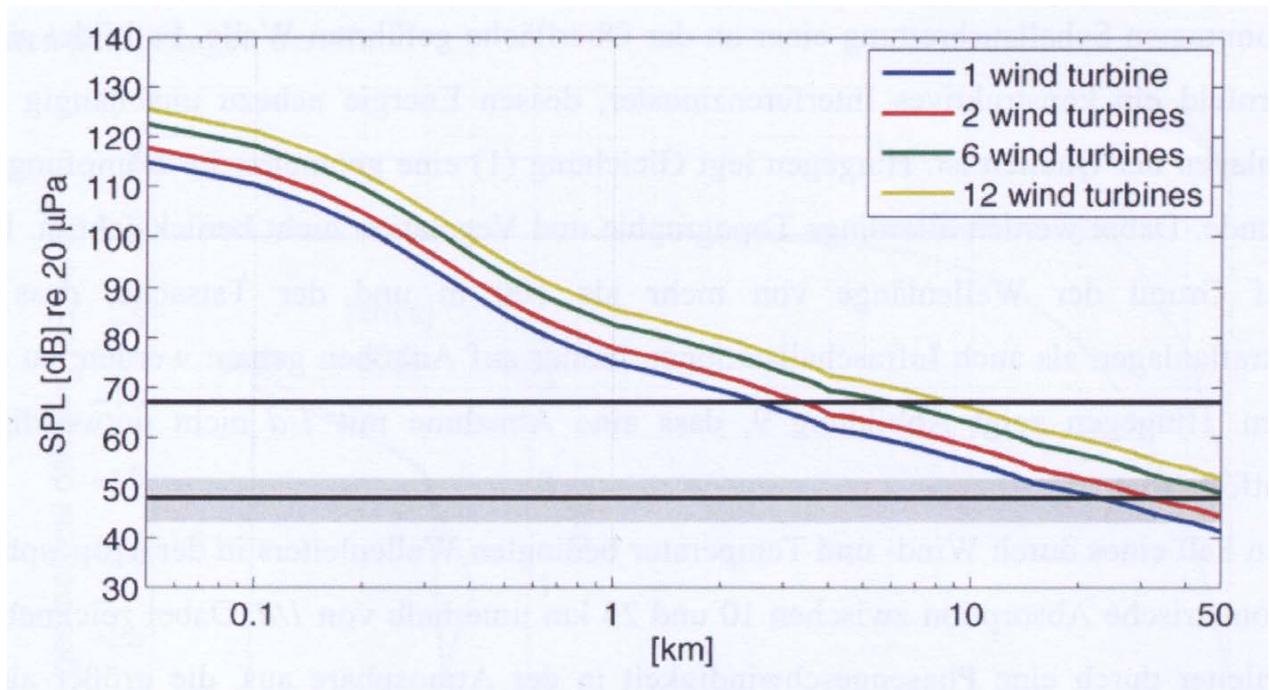
Im eigentlichen Sinn zeigen sich das Fern- und Freifeld exakt bei dem zu erwartenden 6 dB-Abfall je Entfernungsverdopplung. Ist das nicht der Fall, kann dafür verantwortlich sein, dass man sich noch im Nahfeld der Schallquelle befindet. Hier finden die bereits oben beschriebenen Ausgleichsvorgänge in Strahlernähe statt. Wenn im Bereich  $r < l_{\max}$  der Einfluss des Schallstrahlers überwiegt und dabei ebene Wellen (0 dB-Abfall je Entfernungsverdopplung) oder Zylinderwellen (3 dB-Abfall je Entfernungsverdopplung) abgestrahlt werden, bedeutet das, man befindet sich nicht exakt im Fernfeld. Wenn solche Phänomene bei der Messung existieren, dann gilt natürlich auch im Umkehrschluss, dass man für die Berechnungen im Nahfeld die entsprechenden später angegebenen Formeln (Tab. 5.2 auf Seite 102) für ebene Wellen und Zylinderwellen anwenden muss. Das betrifft in der Regel im Bereich der Industrie ausgedehnte Schallquellen wie Linien- und Flächenschallquellen.

### Beispiel aus der Praxis

Welche Rolle Nah- und Fernfeld bei der Ausbreitung von tieffrequenter Schall spielen, zeigen die Infraschallmessungen von *Ceranna u. a.* Sie untersuchten eine Windkraftanlage vom Typ Vestas V47 mit einer Leistung von 200 kW und führten in Abhängigkeit von der Entfernung Infraschallmessungen entlang eines 2 km langen West-Ost-Profiles durch. Parallel zu den Messungen wurden auf der Grundlage baulicher Parameter der WEA und unter Berücksichtigung der Entfernung der Messpunkte auf dem West-Ost-Profil die Schalldruckpegel der Harmonischen berechnet. Eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Werten konnte im Fernfeld ( $r > \lambda = 172 \text{ m}$  bei 2 Hz und 600 kW), d. h. konkret ab dem Messpunkt in einer Entfernung von 200 m von der Anlage, ermittelt werden. Abb. 5.6 und Abb. 5.7 zeigen, dass die Schalldruckpegel unterhalb von 200 m die Eigenschaften haben, die man im Nahfeld für Schalldrücke erwarten kann. Die Schallpegelabnahme folgt nicht der  $1/r$ -Gesetzmäßigkeit und beträgt bei Entfernungsverdopplung nur ca. 2 dB bis 4 dB. Erst jenseits von 200 m konnte die Abnahme nach dieser Gesetzmäßigkeit (6 dB pro Entfernungsverdopplung) beobachtet werden.



**Abb. 5.6** Verlauf des berechneten abgestrahlten Schalldruckpegels mit der Entfernung zur Quelle für die 2. Flügelharmonische. Der grau unterlegte Bereich markiert das Hintergrundrauschen zwischen 1 Hz und 3 Hz.



**Abb. 5.7** Verlauf des berechneten abgestrahlten Schalldruckpegels mit der Entfernung zur Quelle für die 2. Flügelharmonische eines Windparks bestehend aus 1, 2, 6 und 12 Windrädern mit 600 kW Leistung. Der grau unterlegte Bereich markiert das Hintergrundrauschen zwischen 1 Hz und 3 Hz.

### ***Ermittlung des Schalleistungspegels im Fernfeld***

Wenn die Fernfeldbedingungen 1 und 2 erfüllt sind, kann der Schalleistungspegel nach Gl. 5.19 auf der Grundlage von Schalldruckpegelmessungen bestimmt werden.

Der Schalleistungspegel ist dann:

$$L_W = L_p + 10 \lg \frac{S_H}{S_0} = L_p + D_s \quad \text{in dB} \quad (5.19)$$

mit

- $L_W$  Schalleistungspegel der Quelle in dB,
- $L_p$  Schalldruckpegel auf der Hüllfläche in dB,
- $S_H$  Hüllfläche in  $\text{m}^2$ ,
- $S_0$  Bezugsfläche  $S_0 = 1 \text{ m}^2$ ,
- $D_s$  Abstandsmaß in dB.

Bei ungerichteter Schallausbreitung im freien Raum verteilt sich die Schalleistung im Abstand  $r$  von (der Mitte) einer punktförmigen Schallquelle gleichmäßig auf einer Kugelfläche  $S_H = 4\pi r^2$  und der Schallleistungspegel  $L_W$  lässt sich in einfacher Weise ermitteln über eine Schalldruckpegelmessung

$$L_W = L_p + 10 \lg \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot r^2}{S_0} \right) = L_p + 20 \lg \left( \frac{r}{r_0} \right) + 11 \text{ in dB} \quad (5.20)$$

mit

$r$  Abstand von der Mitte der punktförmigen Schallquelle zum Messort auf einer kugelförmigen Messfläche,

$r_0$  Bezugsabstand = 1 m.

In der Praxis problematisch ist, dass der Abstand des Messortes von der Schallquelle oft nicht beliebig weit entfernt gewählt werden kann, weil bei Vorhandensein mehrerer Schallquellen der Nutz-/Störpegelabstand für eine einzelne Quelle bei größerem Abstand immer schlechter wird.

Messungen im Nahfeld haben den Vorteil, dass sich ein besserer Nutz-Stör-Abstand ergibt. Im Nahfeld lässt sich die Schalleistung wegen der beschriebenen Besonderheiten der Schalldruckmessung aber oft nur anhand von Intensitätsmessungen bestimmen.

#### 5.4.2.2 Gerichtete Schallquellen $D_1$

Zur akustischen Beschreibung einer Geräuschquelle gehört auch die Kenntnis über die Richtwirkung der Schallabstrahlung, um zu erkennen, „wo“ verstärkt oder vermindert Schall in Richtung auf einen Aufpunkt im Vergleich zu einer ungerichtet strahlenden Schallquelle abgegeben wird.

Das Richtwirkungsmaß wird mit  $D_1$  beschrieben. Es gibt an, um wieviel der Schalldruckpegel der Quelle in einer vorgegebenen Richtung bei gleichem Abstand höher (oder niedriger) ist als der einer ungerichteten Quelle gleicher Schalleistung.

Die obige Gleichung wird dann zu

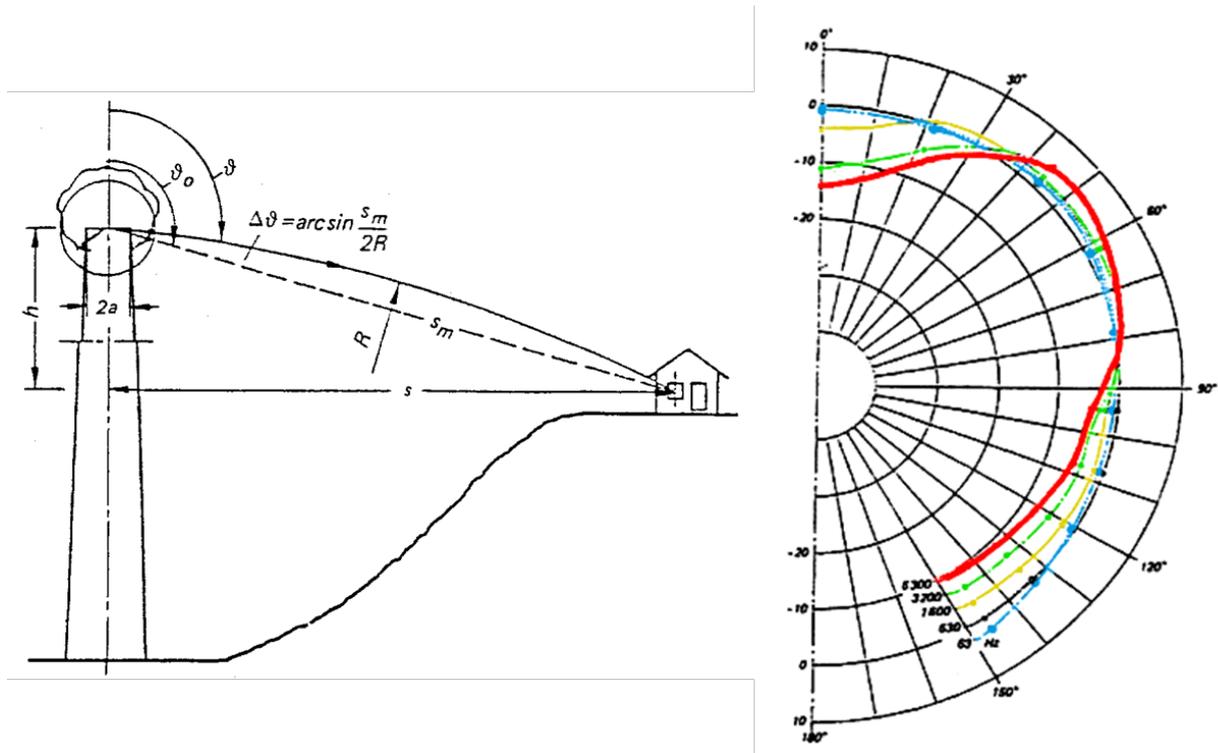
$$L_W = L_p - D_1 + 20 \lg \left( \frac{r}{r_0} \right) + 11 \text{ in dB.} \quad (5.21)$$

Das Richtwirkungsmaß hängt in der Regel nicht nur von der Richtung, sondern auch von der Frequenz ab, mit

$$D_1(f) = L_{pi}(f) - L_p(f). \quad (5.22)$$

Sowohl der Schallleistungspegel als auch das Richtwirkungsmaß  $D_1$  können frequenzabhängig angegeben werden.

Ein typisches Beispiel für eine Schallquelle mit Richtwirkung ist eine Kaminmündung.



**Abb. 5.8** Richtwirkung eines Kamins (Quelle: Reinicke, W. u. a., 1981)

In Abb. 5.8 sind die Verhältnisse für ein durchströmtes Abluftrohr (Mündungsdurchmesser 0,15 m, Machzahl 0,05, Temperaturdifferenz zwischen Abluft und Außenluft 30 K) als Modell für eine Kaminmündung dargestellt. Aus dem Richtdiagramm (Abb. 5.8, rechts) kann das Richtwirkungsmaß  $D_1$  für verschiedene Frequenzen und Winkel zur Mündung abgelesen werden. Bei tiefen Frequenzen (63 Hz, blaue Linie) strahlt die Mündung nahezu kugelförmig ab. Bei hohen Frequenzen (6300 Hz, rote Linie) ist eine deutliche Abweichung von der kugelförmigen Schallabstrahlung zu beobachten.

Auch schallabstrahlende Gebäudefassaden (Dach, Wand) weisen auf Grund der Abschirmung durch das Gebäude selbst eine Richtwirkung auf. Näherungswerte für diese Richtwirkungsmaße sind z. B. in VDI 2714 enthalten. Inwiefern diese Werte für schallabstrahlende Flächen mit Frequenzen unterhalb von 100 Hz gelten, bedarf jedoch einer Überprüfung.

Die Richtwirkung einer Schallquelle kann durch Reflexion und Streuung auf dem Ausbreitungsweg, z. B. innerhalb von großflächigen Industrieanlagen, teilweise aufgehoben werden.

### **Fazit für tiefe Frequenzen (8 Hz bis 100 Hz)**

1. Bei einer ungerichtet abstrahlenden Schallquelle ist das Richtwirkungsmaß für alle Richtungen 0 dB. Bei Schallquellen mit tieffrequentem Schall erfolgt die Abstrahlung wenig gerichtet und  $D_1$  kann in solchen Fällen gleich 0 dB gesetzt werden (siehe beispielsweise Abb. 5.9, rechte Bildhälfte, blaue Linie).
2. Gerichtete Abstrahlungen von tiefen Frequenzen können nur dann erfolgen, wenn die linearen Abmessungen strahlender Flächen ( $m^2$ ) viel größer als die Wellenlängen  $\lambda(m)$  sind.

3. Auch Linien- und Flächenschallquellen können in genügend großer Entfernung wie Punktschallquellen behandelt werden. Der Übergang z. B. bei der Linien- und Punktquelle liegt etwa im Abstand  $r = \lambda/2$ . In Abständen  $r < \lambda/2$  wirkt die Quelle wie eine Linie mit einem 3 dB-Pegelabfall pro Entfernungsverdoppelung. Für größere Abstände wirkt sie jedoch wie eine Punktquelle mit 6 dB-Pegelabfall pro Entfernungsverdoppelung. Der Fernbereich der Flächenschallquelle liegt bei

$$r \gg \frac{\sqrt{S}}{\pi}$$

mit  $S$  = Fläche des Strahlers in  $\text{m}^2$ .

4. Die Messpraxis zeigt jedoch, dass meistens nahe an der Schallquelle gemessen wird, um schon allein den Einfluss von Fremdgeräuschen gering zu halten. Mit Hilfe der unten angegebenen Formeln in Tab. 5.2 auf Seite 102 kann man auf die Schalleistung zurückrechnen und bei der Vorausberechnung die Gleichungen für die Punktschallquellen anwenden, wenn die Immissionsorte sich entsprechend den Bedingungen 1 und 2 im Fernfeld befinden.

## 5.5 Tieffrequente Luftschallausbreitung bis zum Immissionsort

### 5.5.1 Konzept für ein allgemeines Rechenverfahren

Auf der Grundlage der VDI 2714 „Schallausbreitung im Freien“, der DIN ISO 9613-2 „Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien“ und der VDI 2720 „Schallschutz durch Abschirmung im Freien“ wird hier zunächst ein mögliches allgemeines Rechenverfahren betrachtet. Dabei wird nur die Luftschallausbreitung und nicht die Körperschallausbreitung berücksichtigt. Im allgemeinen Fall interessiert der von Industrie- und Gewerbeanlagen hervorgerufene Schalldruckpegel an einem Immissionsort im Freien. Bei diesem Ansatz für ein Rechenverfahren wird davon ausgegangen, dass die Luftschallausbreitung vom Quellenbereich bis in den Raum eines Gebäudes betrachtet wird.

Die Schallemission einer Schallquelle wird gekennzeichnet durch den Schalleistungspegel  $L_W$ , die Richtcharakteristik  $D_I$  und die entsprechende Aufstellungsbedingung  $K_0$  im Freien. Für die Schallpegelabnahme auf dem Ausbreitungsweg sind verantwortlich das Abstandsmaß  $D_s$ , das der geometrischen Ausbreitungsdämpfung entspricht, sowie das Abschirmmaß  $D_z$ . Insbesondere sind hier die Zunahme des Schallpegels durch Reflexion bzw. die Abnahme des Schallpegels durch Interferenz  $D_{r/i}$  von Bedeutung. Weiterhin spielen auf dem Ausbreitungsweg Verluste durch Absorption in Luft eine Rolle ( $D_L$ ), der Einfluss der Bodenbeschaffenheit, Bewuchs und Bebauung ( $D_B$ ), der Einfluss der Inhomogenität der Luft ( $D_M$ ) sowie der Einfluss von Gebäuden ( $D_G$ ) und schließlich die Abnahme des Schallpegels infolge der Schalldämmung der Außenwände ( $D_W$ ) und unter Umständen die Berücksichtigung einer Raumerückwirkung durch einen Korrekturfaktor  $K_R$ . Damit lautet die Grundgleichung für ein allgemeines Rechenverfahren:

$$L_{\text{eq,Raum}} = (L_W + D_I + K_0) - (D_s \pm D_{r/i} + D_z + D_L + D_B + D_M + D_G) - (D_W \pm K_R) \text{ in dB}$$

( Schallquelle ) ( Ausbreitungsweg ) ( Raum )

(5.23)

Hierbei sind

$L_{eq,Raum}$	äquivalenter Dauerschallpegel am Immissionsort in einem Raum,
$L_W$	Schalleistungspegel der Schallquelle,
$D_I$	Richtwirkungsmaß der Schallquelle,
$K_0$	Raumwinkelmaß für die Aufstellung der Schallquelle,
$D_s$	Dämpfung aufgrund geometrischer Ausbreitung,
$D_{r/i}$	Schallpegelerhöhung durch Mehrfachreflexionen bzw. Verminderung durch Interferenz,
$D_Z$	Dämpfung aufgrund der Abschirmung durch Hindernisse,
$D_L$	Dämpfung aufgrund der Luftabsorption,
$D_B$	Dämpfung aufgrund eines Bodeneffektes,
$D_M$	Meteorologiedämpfungsmaß,
$D_G$	Bebauungsdämpfungsmaß,
$D_W$	Schallpegeldifferenz infolge der Schalldämmung des Außenbauteils,
$K_R$	Korrektur für eine Raumrückwirkung, hervorgerufen durch Raummoden.

Die Beziehung für  $L_{eq,Raum}$  gilt für Punkt-, Linien- und Flächenschallquellen. Die Pegelgrößen  $L_{eq,Raum}$ ,  $L_W$ ,  $D_I$ ,  $D_{r/i}$ ,  $D_Z$ ,  $D_L$ ,  $D_B$ ,  $D_W$  und  $K_R$  sind frequenzabhängig.

Mit

$L_{WQuelle} = (L_W + D_I + K_0)$ :	Zusammenfassung der Quelleigenschaften als Schalleistungspegel,
$D_{Frei} = (D_s \pm D_{r/i} + D_Z + D_L + D_B + D_M + D_G)$ :	Zusammenfassung aller Freifeldeinflüsse und
$D_{Raum} = (D_W \pm K_R)$ :	Zusammenfassung der Abnahme des Schallpegels infolge der Schallpegeldifferenz $D_W$ (außen – innen) und des Korrekturgliedes für Raumeigenschaften $K_R$

lässt sich die Gleichung (5.23) in einer Kurzfassung angeben:

$$L_{eq,Raum} = L_{WQuelle} - D_{Frei} - D_{Raum} \text{ in dB.} \quad (5.24)$$

Dieser Zusammenhang lässt sich auch in Terzbändern darstellen. Es ist dann:

$$L_{eq,Raum}(f_{Terz}) = L_{W,Quelle}(f_{Terz}) - D_{Frei}(f_{Terz}) - D_{Raum}(f_{Terz}) \text{ in dB.} \quad (5.25)$$

Auf der Grundlage der oben dargestellten Gleichungen (5.23) bis (5.25) kann zunächst der äquivalente Dauerschallpegel  $L_{eq,Raum}(f_{Terz})$  für die Schallbelastung in einem Raum berechnet werden.

Zwischen einem Prognose- und Messverfahren besteht aufgrund der hier durchgeführten Untersuchung der folgende Zusammenhang zwischen den Schalldruckpegeln in einem Raum:

$$L_{\text{eq,Raum}}(f_{\text{Terz}}) \text{ nach Prognoseverfahren} \equiv L_{\text{Terz,eq}} \text{ nach Messverfahren} \quad \text{in dB} \quad (5.26)$$

Die Terzschalldruckpegel bilden die Grundlage für das Mess-, Bewertungs- und Beurteilungsverfahren für tieffrequenten Schall.

Es könnten dann auf der Grundlage der Terzschalldruckpegel entsprechend Abschnitt 4.3 und 4.4 folgende Beurteilungsverfahren angewandt werden:

- Vorerhebung nach Abschnitt 4.4,
- Grenzkurvenverfahren nach Abschnitt 4.3.4,
- Breitbandverfahren nach Abschnitt 4.3.6.

Aus den einzelnen Terzschalldruckpegeln der Prognose kann in einem zweiten Schritt nach dem Breitbandverfahren unter Berücksichtigung verschiedener Zu- und Abschläge der Beurteilungspegel  $L_r$  nach Gl. 4.2 für die Schallimmission des zu beurteilenden Raumes gebildet werden.

## 5.5.2 Strahlermodelle und räumliche Lage von Schallquelle und Aufpunkt

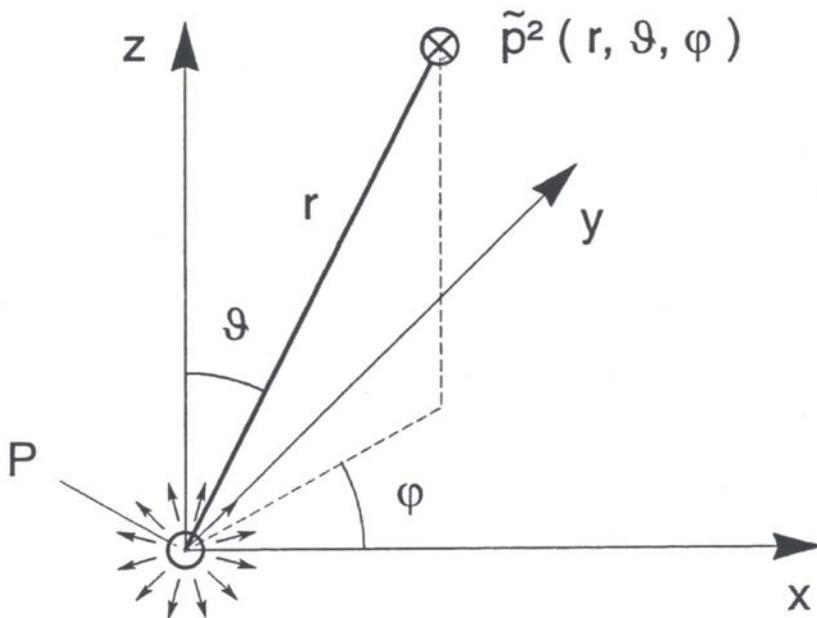
Wie oben im Abschnitt 5.4.2 gezeigt, muss für eine Schallquelle, die tieffrequenten Schall abstrahlt, geklärt werden, ob für den Abstand zum Immissionsort die Fernfeldbedingungen 1 und 2 erfüllt sind. Es muss die Grenze für das Nahfeld ermittelt werden, um festzustellen, ob sich der Immissionsort im Fernfeld befindet und bekannt ist, ob der Schalldruckpegel mit  $1/r$  abnimmt.

Wenn man sich beliebig weit von der Quelle entfernt befindet und somit die Quelle klein gegenüber der Entfernung  $r$  ist, dann kann man sich für die Schallimmissionsberechnung ihre gesamte Schalleistung als von einem Punkt in ihrer Mitte ausgehend denken. Erst ab der Stelle einer Schallquelle, die deutlich um wenigstens das Zweifache größer ist als die größte Ausdehnung  $l_{\text{max}}$  der Schallquelle, kann die Schallquelle als Punktschallquelle im Freifeld behandelt werden.

Wann die Schallquelle also als klein anzusehen ist, hängt vom Einzelfall ab und muss speziell geprüft werden. Darüber hinaus gibt es im industriellen Bereich ausgedehnte Schallquellen; z. B. Triebwerk-, Schockshaker- und Dauerfestigkeitsprüfstände sowie Windenergieanlagen stellen oft für einen nahe gelegenen Immissionsort eine ausgedehnte Schallquelle dar. Fällt der gemessene Schalldruckpegel an einer solchen Schallquelle nicht um 6 dB je Abstandsverdoppelung, so genügt die Schallquelle nicht den Bedingungen für eine Einzelschallquelle. In solchen Fällen kann es sein, dass der Abstand zwischen Quelle und Immissionsort nicht groß genug gegenüber der Schallquellenabmessung ist, so dass sich hier geometrische Nahfeldeffekte bemerkbar machen (Gruhl, S.; Kurze, U. J., 2006).

### 5.5.2.1 Punktschallquellen

Die Schallemission einer Punktschallquelle wird durch ihren Schalleistungspegel im Spektrum, ihre Richtwirkung und das Raumwinkelmaß gekennzeichnet (Gruhl, S.; Kurze, U. J., 2006).



**Abb. 5.9** Zur Schallausbreitung einer Punktschallquelle im freien Schallfeld

Im freien Schallfeld um eine Einzelschallquelle, in dem von Verlusten durch Luftabsorption, Anisotropie durch Temperaturverteilung und Strömung abgesehen werden kann, errechnet sich das Schalldruckquadrat aus

$$\tilde{p}^2(x, y, z) = \frac{P \cdot \rho \cdot c \cdot \Gamma^2}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \frac{4 \cdot \pi}{\Omega} \quad (5.27)$$

und der Schalldruckpegel aus

$$L = (L_W + D_1 + K_0) - D_s \text{ in dB} \quad (5.28)$$

- $\tilde{p}$  Effektivwert des Schalldruckes in Pa,
- $P$  Schalleistung in W,
- $\rho \cdot c$  Bezugs-Schallkennimpedanz = 400 Pa · s/m,
- $\Gamma$  Richtwirkungsfaktor,
- $\Omega$  Raumwinkel in sr,
- $r$  Abstand Immissionsort / Quelle in m =  $\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$ ,
- $L$  Schalldruckpegel bezogen auf 20  $\mu$ Pa in dB,
- $L_W$  Schalleistungspegel bezogen auf 1 pW in dB,
- $D_1$  Richtwirkungsmaß = 10 lg  $I^2$  in dB,
- $K_0$  Raumwinkelmaß, bezogen auf den Raumwinkel  $4 \pi$  der Vollkugel = 10 lg  $(4 \pi / \Omega)$  in dB,
- $D_s$  Abstandsmaß, bezogen auf eine Kugel mit 1 m<sup>2</sup> Oberfläche = 10 lg  $[4 \pi r^2 / (1 \text{ m}^2)]$  in dB.

Die geometrische Spiegelung einer ungerichtet abstrahlenden Schallquelle an einer ebenen Fläche, z. B. am Boden, liefert das Raumwinkelmaß

$$K_0 = 10 \lg \left[ 1 + \frac{r_p^2 + (h_Q - h_A)^2}{r_p^2 + (h_Q + h_A)^2} \right] \text{ dB.} \quad (5.29)$$

mit

$r_p$  Abstand Schallquelle – Immissionsort parallel zur reflektierenden Fläche,  
 $h_Q$  Abstand Schallquelle – reflektierende Fläche,  
 $h_A$  Abstand Immissionsort – reflektierende Fläche.

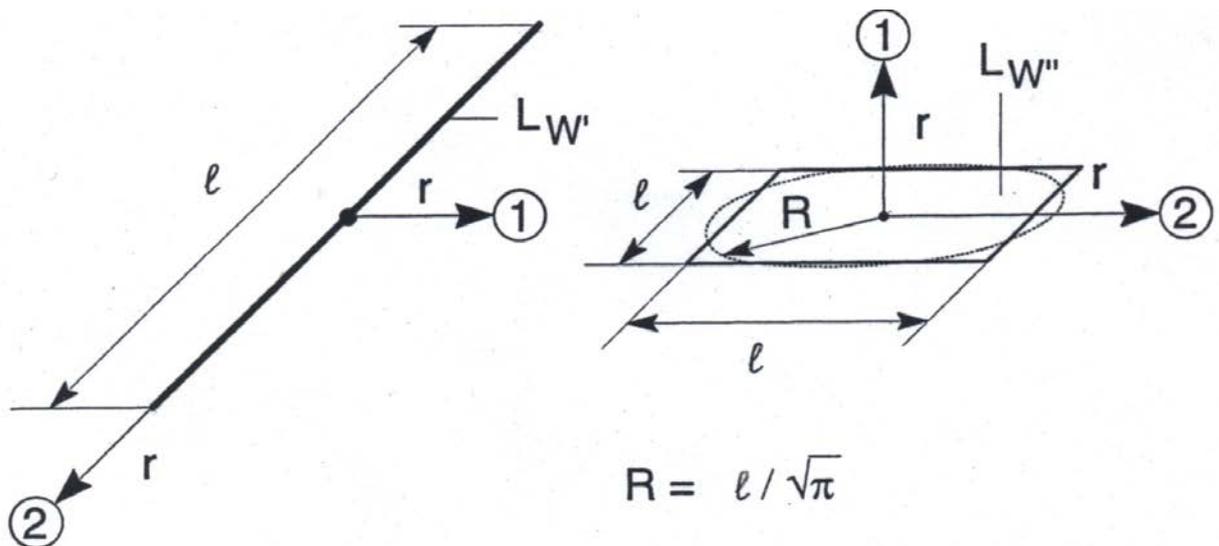
### 5.5.2.2 Ausgedehnte Schallquellen wie Linien- und Flächenschallquellen

Für die Prognose empfiehlt es sich, ausgedehnte Schallquellen durch Linien- oder Flächenschallquellen zu modellieren. Das könnte dann der Fall sein, wenn der Abstand zum Immissionsort nicht groß gegenüber der Schallquellenabmessung ist, so dass sich geometrische Nahfeldeffekte zeigen könnten. Damit lassen sich mathematisch geschlossene Lösungen für die Schallfeldverteilung angeben. In der nachfolgenden Tab. 5.2 sind einige Berechnungsformeln für die Schallfeldverteilung aufgelistet.

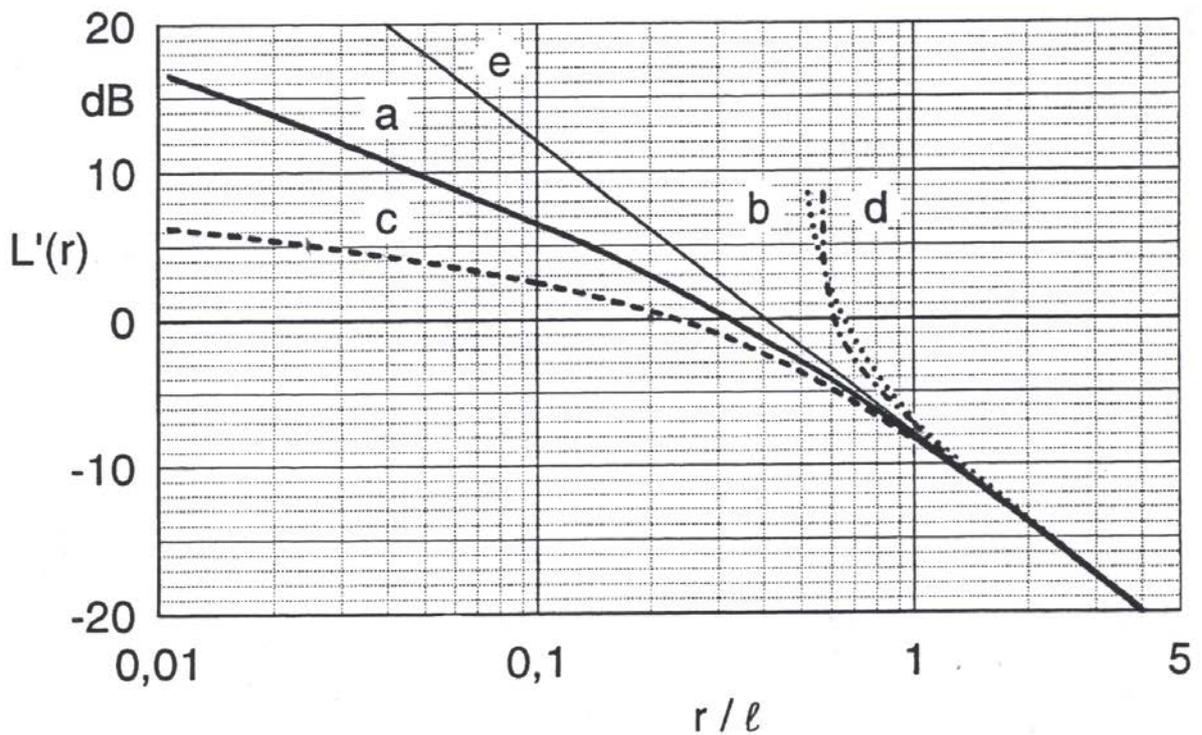
**Tab. 5.2** Schalldruckpegel im Abstand  $r$  von der Mitte inkohärenter Linien- und Flächenquellen mit der größten Abmessung  $l$ ,  $l_0 = 1$  m, Abstrahlung in den Halbraum (Quelle: Gruhl, S.; Kurze, U. J., 2006)

Schallquelle	Ausbreitungsrichtung	Schalldruckpegel
Linienquelle	<b>a (1)</b> : senkrecht zur Achse	$L = L_W - \left[ 20 \lg \frac{l}{l_0} - 10 \lg \left( \frac{1}{r} \arctan \frac{l}{2r} \right) + 5 \right] \text{ dB}$
	<b>a (1)</b> : für $r/l \leq 0,15$	$L = L_W - \left[ 20 \lg \frac{l}{l_0} + 10 \lg \frac{r}{l} + 3 \right] \text{ dB}$
	<b>a (2)</b> : in der Richtung der Achse für $r > l/2$	$L = L_W - \left[ 20 \lg \frac{l}{l_0} + 10 \lg \left( \frac{r^2}{l^2} - \frac{1}{4} \right) + 8 \right] \text{ dB}$
Flächenquelle quadratisch	<b>b (1)</b> : senkrecht zur Flächenebene	$L = L_W - \left[ 20 \lg \frac{l}{l_0} - 10 \lg \left\{ \ln \left( 1 + \frac{l^2}{\pi \cdot r^2} \right) \right\} + 3 \right] \text{ dB}$
	<b>b (2)</b> in der Flächenebene für $r > l/\sqrt{\pi}$	$L = L_W - \left[ 20 \lg \frac{l}{l_0} - 10 \lg \left\{ -\ln \left( 1 - \frac{l^2}{\pi \cdot r^2} \right) \right\} + 3 \right] \text{ dB}$

Die Bezeichnungen in der Tab. 5.2 nehmen Bezug auf die Abb. 5.10.  $L_W$  ist der Gesamtschallleistungspegel aller Teilquellen.  $L_{W'} = L_W - 10 \lg (l/l_0)$  dB wird als längenspezifischer und  $L_{W''} = L_W - 20 \lg (l/l_0)$  dB als flächenbezogener Schallleistungspegel bezeichnet. In Abb. 5.11 sind einige Schallausbreitungsgesetze grafisch dargestellt (Gruhl, S.; Kurze, U. J., 2006).



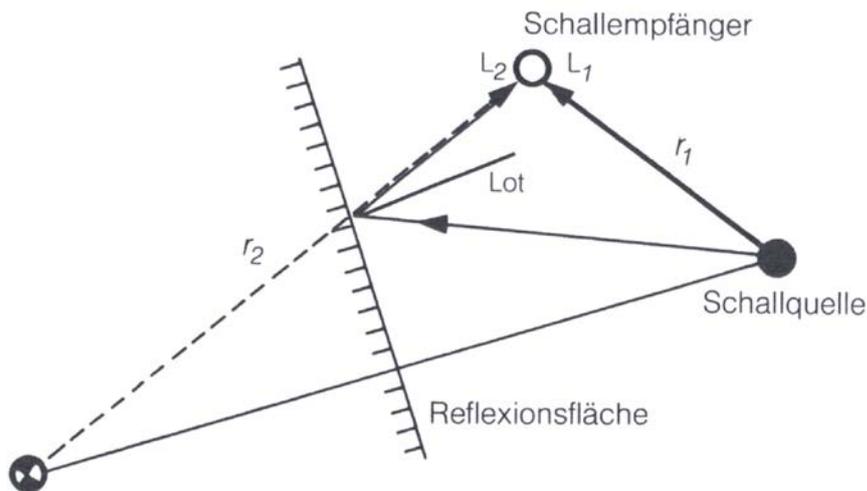
a) b)  
**Abb. 5.10** Schallausbreitung von inkohärenten a) Linien- und b) Flächenquellen



**Abb. 5.11** Entfernungabhängigkeit des Schalldruckpegels im Freifeld um inkohärente Linien- und Flächenschallquellen.  $L'(r) = L(r) - L_W + 20 \log (r/l_0)$ ,  
a: Linienquelle, Richtung 1; b: Linienquelle, Richtung 2; c: Flächenquelle, Richtung 1; d: Flächenquelle Richtung 2; e: Punktquelle

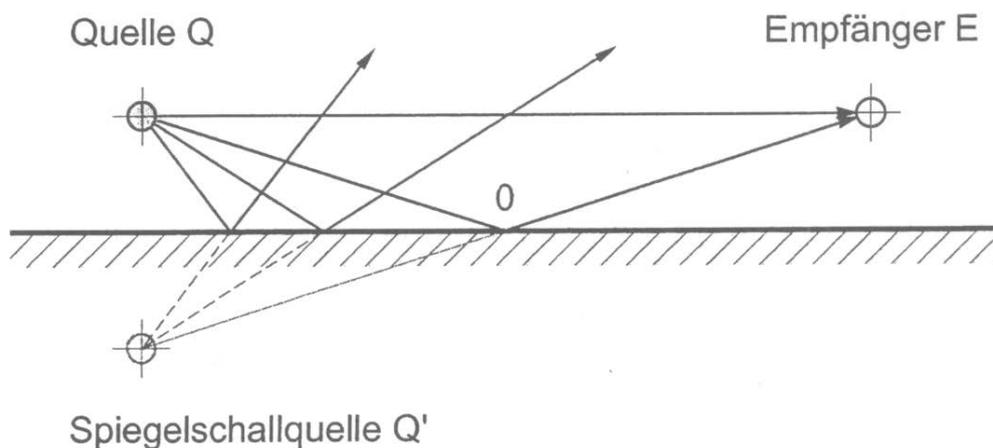
### 5.5.2.3 Reflexion, Interferenz, stehende Wellen – Schallpegelerhöhung, -verminderung und Auslöschung $D_{r/i}$

Wenn eine Schallwelle auf ein großes Hindernis fällt, wird sie in andere Richtungen abgelenkt. Die Abmessungen des Hindernisses müssen groß gegenüber der Wellenlänge sein. Trifft ein Schallstrahl auf eine ebene Oberfläche, so dringt ein kleiner Anteil der Schallenergie in die Oberfläche ein und breitet sich dort als Schwingungsenergie aus. Der überwiegende Anteil der Schallenergie wird nach den Gesetzen der geometrischen Optik (Einfallswinkel = Ausfallswinkel) reflektiert (siehe Abb. 5.12).



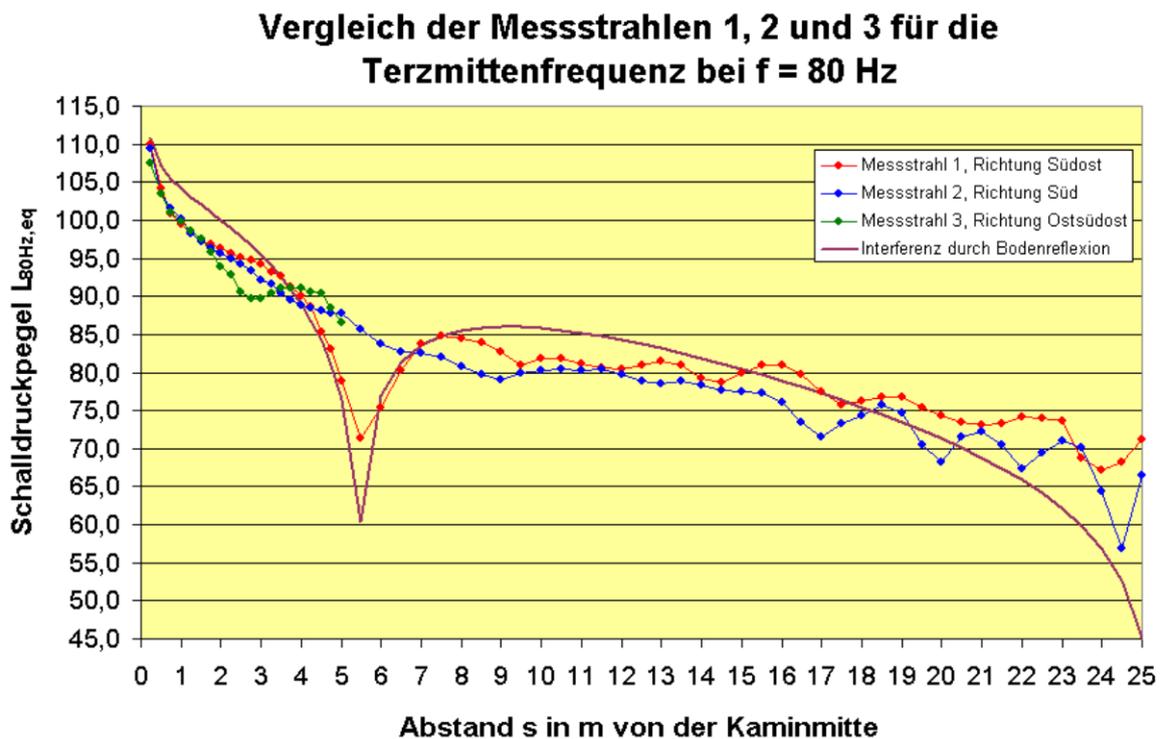
**Abb. 5.12** Spiegelung einer Schallquelle am Gebäude

Eine besondere Eigenschaft von tieffrequentem Schall spielt bei der Reflexion von Schallwellen mit Wellenlängen von mehr als 3,4 m ( $f = 100$  Hz) bis zu 344 m ( $f = 1$  Hz) an sehr großen Gebäuden und mit Sicherheit am Boden eine Rolle .



**Abb. 5.13** Spiegelung einer Schallquelle am Boden

Tatsächlich sind die Dinge bei dieser Art von Reflexionen wesentlich komplizierter als in der Abb. 5.12 und 5.13 dargestellt. Die Originalschallquelle und die Spiegelschallquelle sind nicht "inkohärent". Durch Interferenz zwischen dem Direktschall und dem am Boden reflektierten Schall kann es in bestimmten Frequenzbereichen zu einer mehr oder weniger starken Auslöschung, aber auch zu einer (geringfügigen) gegenseitigen Verstärkung kommen. Diese Effekte beschreibt Tröger, T. (2009) in seiner Diplomarbeit auf der Grundlage einer Untersuchung an einem Blockheizkraftwerk mit einem 12 Zylinder-V-Motor der Marke MAN bei einer elektrischen Leistung von  $P_{el} = 300 \text{ kW}$ , wobei im Betriebszustand das Abgas über einen 5,5 m hohen Kamin abgeleitet wird. Die Messungen an der Anlage wurden entlang dreier Messstrahlen in einer Höhe von jeweils  $h = 5,5 \text{ m}$  (Höhe der Kaminöffnung) und bis zu einem Abstand von  $s = 25 \text{ m}$  (MS 1 und 2) bzw.  $s = 5 \text{ m}$  (MS 3) von der Mitte des Abgaskamins durchgeführt. Die Ergebnisse der Messung und Berechnung zeigt Abb. 5.14.



**Abb. 5.14** Mess- und Berechnungsergebnisse des Schalldruckpegelverlaufes bei der Terzmittenfrequenz von 80 Hz entlang der Messstrahlen 1 bis 3 bis zu einem Abstand von  $s = 25 \text{ m}$ , verursacht durch ein Blockheizkraftwerk (Quelle: Tröger, T., 2009)

Die Ergebnisse interpretiert Tröger, T., 2009 wie folgt:

*„Die theoretisch ermittelten Werte ergeben Auslöschungen bei  $s = 5,5 \text{ m}$  und bei  $s \approx 25 \text{ m}$  und Verstärkungen bei  $s = 2 \text{ m}$  und  $s = 9 \text{ m}$ . Diesen theoretischen Schalldruckpegelverlauf spiegelt der MS 1 relativ gut wider. Eine Auslöschung ist bei  $s = 5,5 \text{ m}$  zu erkennen, eine geringe Verstärkung wird bei  $s = 3 \text{ m}$  und bei  $s = 8 \text{ m}$  beobachtet. Diese relativ ausgeprägte Auslöschung ist eindeutig auf die Interferenz durch Bodenreflexion zurückzuführen. Eine annähernd gleichartige Auslöschung konnte im MS 2 bei  $s = 24,5 \text{ m}$  nachgewiesen werden. In diesem Bereich fällt die theoretische Kurve sehr stark ab.“*

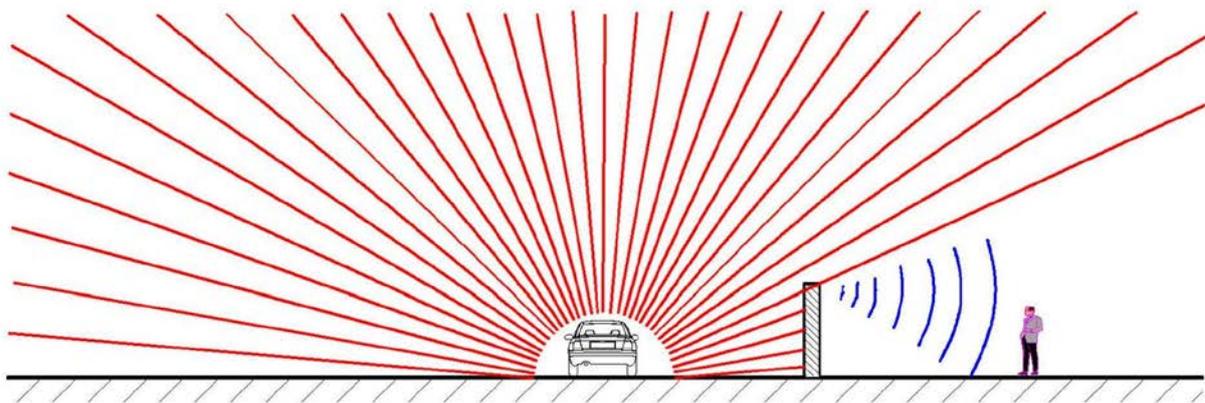
### Fazit für die Ausbreitung von Schall mit tiefen Frequenzen (8 Hz bis 100 Hz)

Im Gegensatz zu höheren Frequenzen (> 100 Hz) wird tieffrequenter Schall unterhalb von 100 Hz und somit mit Wellenlängen von 3,4 m und größer am Boden stark reflektiert und führt durch Interferenz zu starken punktuellen Auslöschungen oder Verstärkungen des Schalldruckes entlang des Ausbreitungsweges. Insofern ist bei tieffrequenten Schallen in einer Prognose zu klären, inwieweit die Interferenzerscheinungen am Immissionsort eine Rolle spielen.

## 5.6 Einflüsse auf dem Schallausbreitungsweg

### 5.6.1 Abschirmung durch Hindernisse $D_z$

Würde die Strahlengeometrie (siehe rote Strahlen in Abb. 5.15) streng gelten, so wäre die Schallquelle hinter der Wand nicht hörbar. Tatsächlich wird aber an den Kanten eines Hindernisses Schall ähnlich wie Licht auch in die Schattenzone dahinter gebeugt. Dadurch wird die abschirmende Wirkung von Wänden, Wällen oder Häuserzeilen begrenzt, und zwar umso stärker, je größer die Wellenlänge ist.



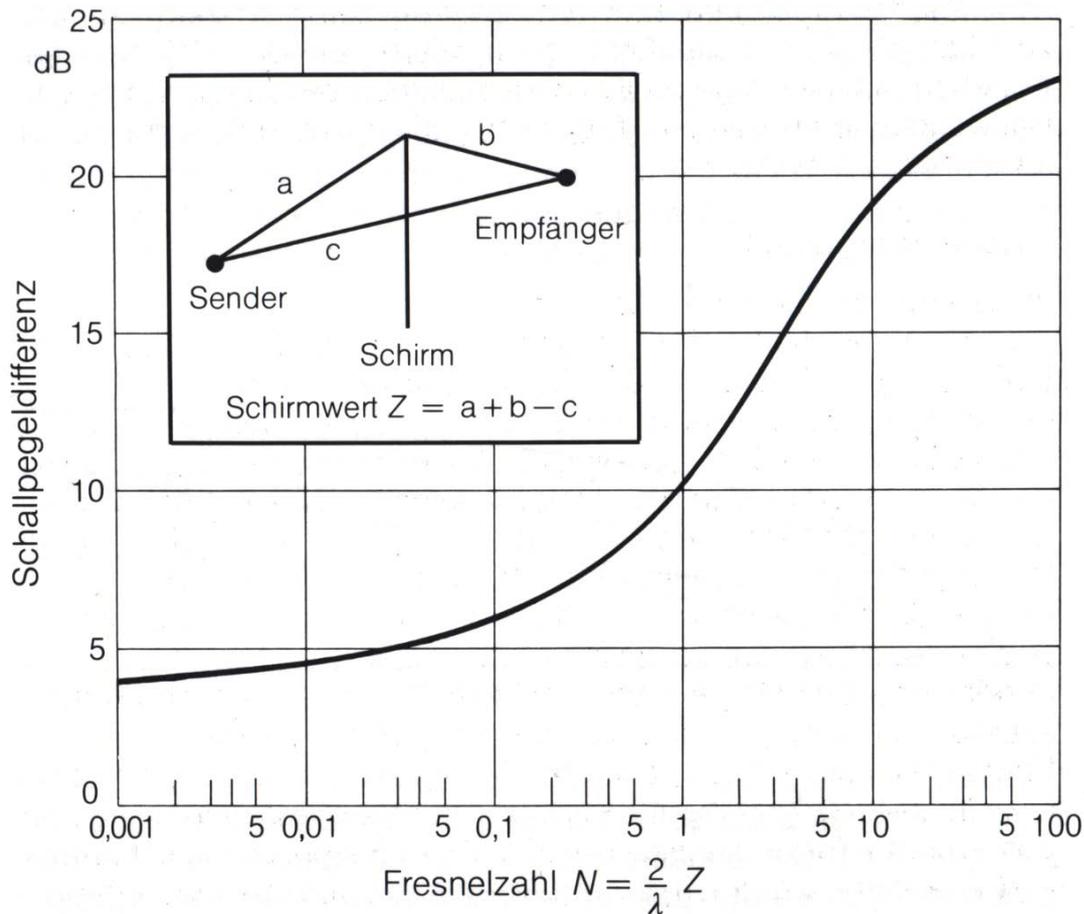
**Abb. 5.15** Abschattung und Beugung

An den Kanten des Hindernisses findet eine Beugung statt, die nach der Beugungstheorie berechnet werden kann. Wenn das Hindernis eine gerade Beugungskante besitzt und quer zur Ausbreitungsrichtung so lang ist, dass die Beugung um die Seitenkanten vernachlässigt werden kann, dann ist die Pegelminderung durch die Abschirmwirkung gegeben durch:

$$D_z = 10 \cdot \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} + 5 \text{ dB} . \quad (5.30)$$

Dabei sind:

$N = (2/\lambda) \cdot z$	Fresnel-Zahl,
$z = a + b - c$	Schirmwert,
$a + b$	kürzester Weg zwischen Quelle und Empfänger über Oberkante Schallschirm,
$c$	direkte Verbindung zwischen Quelle und Empfänger,
$z < 0$	wenn die Gerade Schallquelle-Empfänger vom Hindernis nicht geschnitten wird.



**Abb. 5.16** Pegelminderung gegenüber freier Schallausbreitung als Funktion der Fresnel-Zahl  $N$  für ein senkrecht zur Verbindungslinie zwischen Punktschallquelle und Empfänger liegendes langes Hindernis

### **Fazit für die Ausbreitung von Schall mit tiefen Frequenzen (8 Hz bis 100 Hz)**

Für tieffrequente Schalle unterhalb von 100 Hz strebt die Pegelminderung eines Schallschutzschirmes einem Wert von ca. 4 dB zu. Allerdings gilt das nur bis ca. 63 Hz ( $\lambda = 5,5$  m). Um eine Abschirmwirkung zu erzielen, müssen die Abmessungen der Hindernisse groß gegenüber der Wellenlänge sein. Schon anhand von Schall mit 31,5 Hz ( $\lambda = 11$  m) ist zu erkennen, dass man an geometrische und bautechnische Grenzen stößt. Zur Einschätzung der Wirkung von Abschirmungen muss offenbar eine Staffelung des Frequenzbereiches unterhalb von 100 Hz erfolgen. Erst wenn genauere Erkenntnisse darüber vorliegen, kann entschieden werden, inwiefern Abschirmungen im tieffrequenten Bereich zur Schallminderung auf dem Ausbreitungsweg beitragen.

### **5.6.2 Verluste durch Absorption in der Luft $D_L$**

Viskosität, Wärmeleitfähigkeit und Molekularschwingungen sind Eigenschaften des realen Gases, in dem sich die Schallwelle bewegt. Bei der Schallausbreitung in Luft geht in der Regel je Weglängeneinheit ein kleiner Bruchteil der Schallenergie durch Umwandlung in Wärme (Dissipation) verloren. Dieser Vorgang, der der Schallwelle Energie entzieht, wird als *Absorption* beschrieben.

Man unterscheidet zwischen

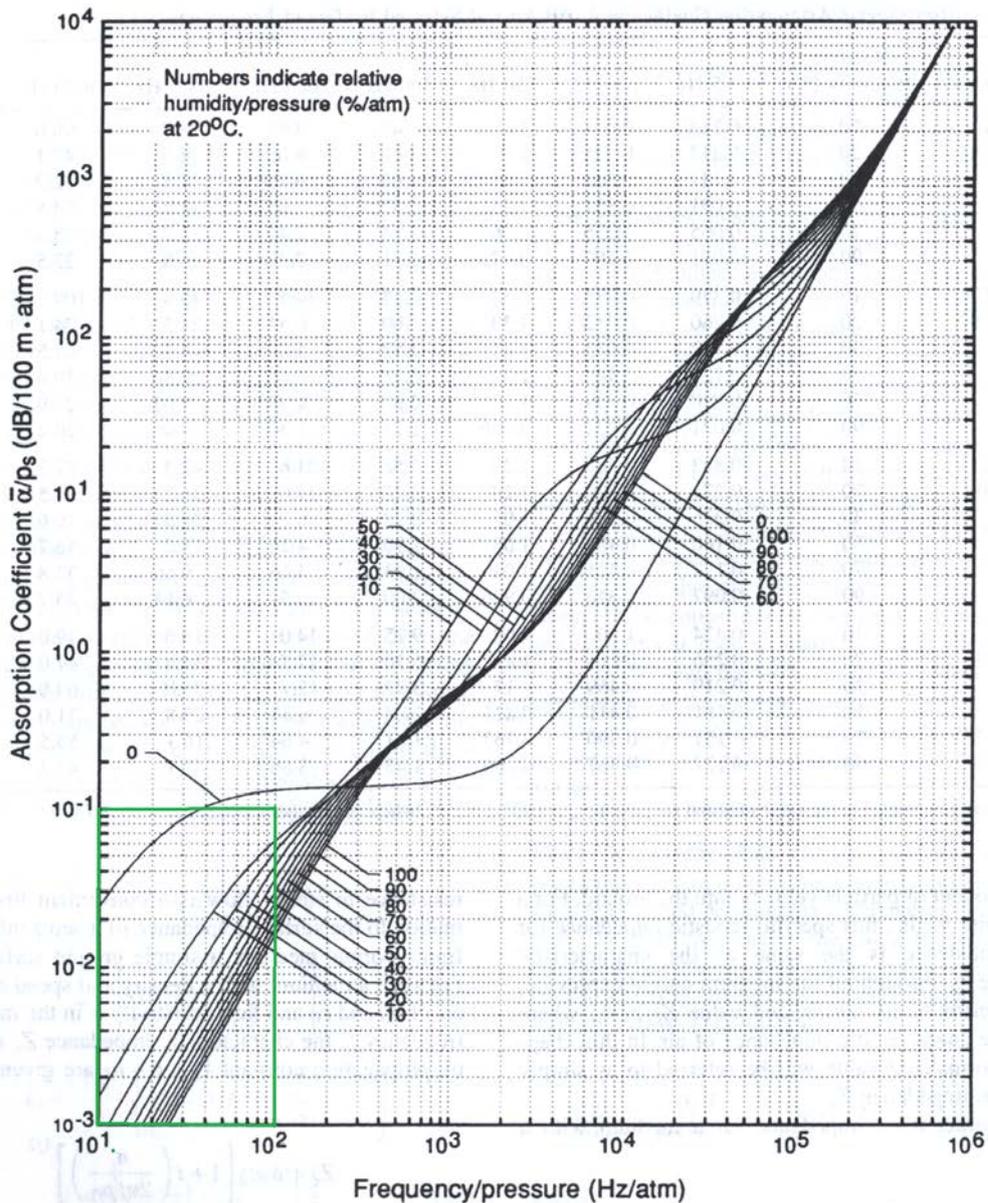
- Absorption durch Wärmeleitfähigkeit und Viskosität und
- Absorption durch Relaxationsprozesse in den Molekülen der Luft (molekulare Absorption).

Relaxationsprozesse sind Vorgänge, bei denen es zu Änderungen im Schwingungszustand der Moleküle kommt. Diese Prozesse tragen den größten Teil zur Absorption bei und hängen ab von der Zusammensetzung der Luft, der Luftfeuchte und der Temperatur. Sie sind frequenzabhängig. Dadurch verringert sich der Schalldruckpegel gegenüber der freien Schallausbreitung zusätzlich um das Schallabsorptionsmaß (Luftabsorptionsmaß)

$$D_L = \alpha_L s \text{ in dB.} \quad (5.31)$$

Der Schall-Dämpfungskoeffizient  $\alpha_L$  ist von der Temperatur, von der relativen Feuchte und erheblich von der Frequenz und damit der Weglänge „s“ abhängig.

In der gängigen Praxis wird üblicherweise mit Dämpfungskoeffizienten gerechnet, die für eine Temperatur von 10 °C und eine relative Feuchte von 70 % gelten.



**Abb. 5.17** Dämpfungskoeffizient der Luft (dB/100 m) als Funktion der relativen Luftfeuchte und der Frequenz bei 20 °C (der interessierende Frequenzbereich ist grün eingerahmt (Quelle: Bass, H. E. u. a., 1995)

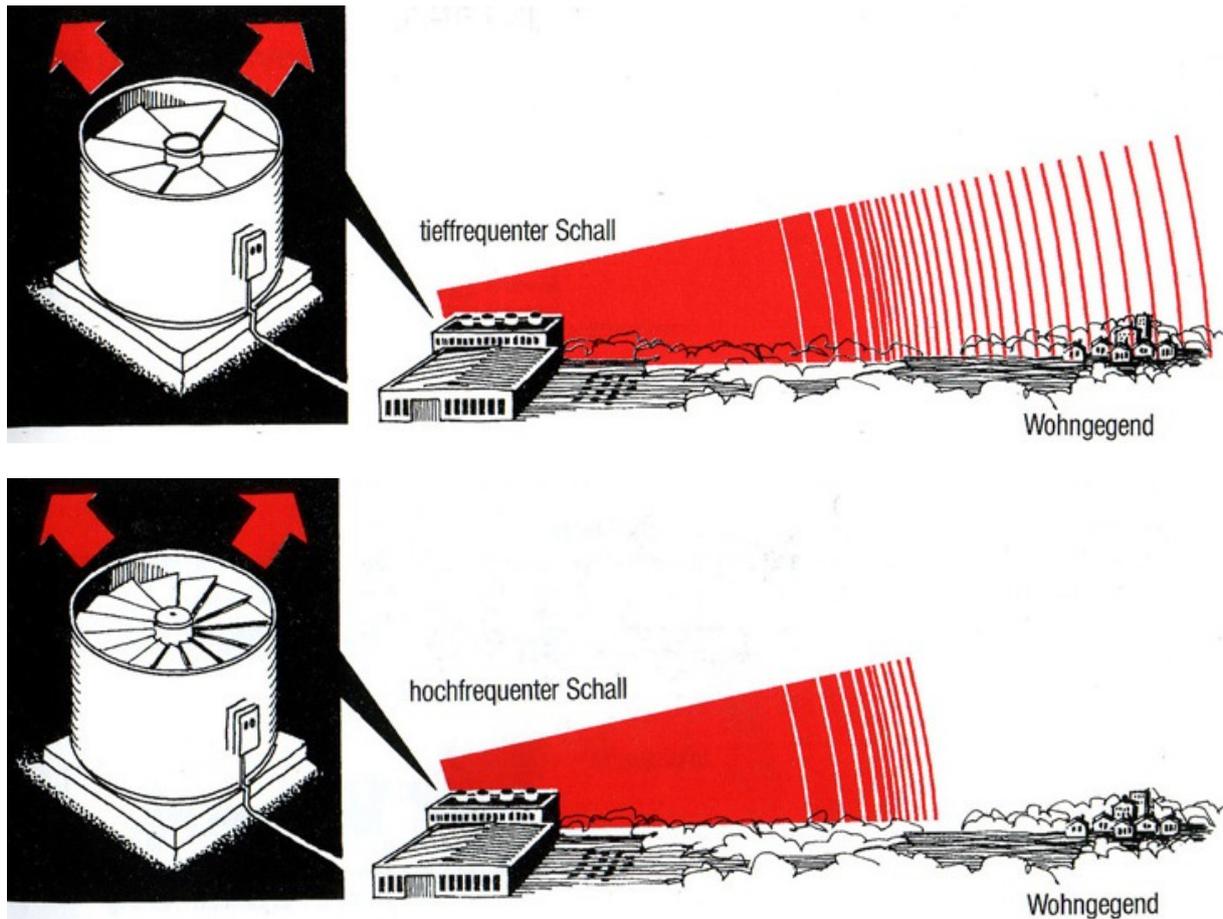
Bei hohen Frequenzen beträgt sie einige dB je 100 m Laufweg. Tab. 5.3 und Abb. 5.17 zeigen bei tiefen Frequenzen < 100 Hz, dass die Zusatzdämpfung durch Absorption in der Luft für die praktisch Anwendung nahezu als „Null“ angenommen werden kann.

**Tab. 5.3** Dämpfungskoeffizient der Luft als Funktion der Terzfrequenzen bei einer relativen Feuchte von 80 % und einer Lufttemperatur von 10 °C (*Jakobsen, J., 2012*)

<b>1/3 octave centre frequency in Hz</b>	<b>50</b>	<b>63</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>
$\alpha_a$ in dB/km	0,07	0,11	0,17	0,26	0,38	0,55	0,77	1,02	1,3
<b>1/3 octave centre frequency in Hz</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>630</b>	<b>800</b>	<b>1000</b>	<b>1250</b>	<b>1600</b>	<b>2000</b>	
$\alpha_a$ in dB/km	1,6	2,0	2,4	2,9	3,6	4,6	6,3	8,8	
<b>1/3 octave centre frequency in Hz</b>	<b>2500</b>	<b>3150</b>	<b>4000</b>	<b>5000</b>	<b>6300</b>	<b>8000</b>	<b>10000</b>		
$\alpha_a$ in dB/km	12,6	18,8	29,0	43,7	67,2	105	157		

**Fazit für die Ausbreitung von Schall mit tiefen Frequenzen (8 Hz bis 100 Hz)**

Bei tiefen Frequenzen ist die Luftabsorption kaum wirksam. Das ist der Grund, dass z. B. vom Geräusch einer tieffrequenten Schallquelle in größerer Entfernung oft nur noch tieffrequente Anteile wahrnehmbar sind. Schallquellen, die vornehmlich tieffrequenten Schall emittieren, wirken im Nahbereich oft untergeordnet, können aber einen erheblichen Beitrag in größerer Entfernung haben (siehe Abb. 5.18). Inwiefern eine Unterteilung im Hinblick auf die Wirksamkeit der Luftabsorption im Frequenzbereich bei 100 Hz und darunter gemacht werden muss, ist weiteren konkreten Untersuchungen vorbehalten, denn immerhin liegt nach Tab. 5.3 der Dämpfungskoeffizient bei 100 Hz bei 0,26 dB/km und bei 50 Hz um ein Viertel niedriger. Die den Autoren bekannten Prognoseansätze für tieffrequente Geräusche in den einzelnen Bundesländern berücksichtigen die Luftabsorption nicht. Inwiefern die Luftabsorption bei sehr großem Abstand, beispielsweise von mehreren Kilometern zwischen Immissionsort und Windenergieanlage, zu berücksichtigen ist, muss weiteren konkreten Betrachtungen vorbehalten bleiben.



**Abb. 5.18** Schematische Darstellung der Auswirkung der Luftabsorption auf dem Ausbreitungsweg von tief- und hochfrequentem Schall bis zum Immissionsort (Quelle: Ingemannsson, S., 2003)

### 5.6.3 Einfluss von Bodenbeschaffenheit $D_B$

In Bodennähe kommt es bedingt durch Absorption am Boden, durch Schallstreuung in der Luft und aufgrund von Interferenzerscheinung zwischen Direktschall und reflektierten Schallstrahlen zu einer weiteren Schalldruckpegelminderung.

Für die Dämpfung  $A_{gr}$  aufgrund des Bodeneffektes bietet die DIN ISO 9613-2 zwei Verfahren an: das allgemeine und ein alternatives Verfahren. Allerdings gelten sie nur nach DIN ISO 9613-2 bis 63 Hz und nicht darunter.

#### **Fazit für die Ausbreitung von Schall mit tiefen Frequenzen (8 Hz bis 100 Hz)**

Im Hinblick auf eine Einschätzung der Wirksamkeit der Bodenbeschaffenheit im Frequenzbereich bei 100 Hz und darunter müssen weitere konkrete Betrachtungen folgen.

#### 5.6.4 Einfluss von Inhomogenitäten der Luft (Temperaturgradient, Wind, Turbulenz) $D_M$

Die Geschwindigkeit  $c$ , mit der sich Schall in einem Gas ausbreitet (Schallgeschwindigkeit), ist

$$c = \sqrt{\kappa \frac{\mathcal{R}}{M} T} \quad \text{m/s.} \quad (5.32)$$

Darin ist  $\kappa$  das Verhältnis der spezifischen Wärme bei konstantem Druck und bei konstantem Volumen,  $\mathcal{R}$  die allgemeine Gaskonstante,  $M$  das Molekulargewicht des Gases und  $T$  die absolute Temperatur.

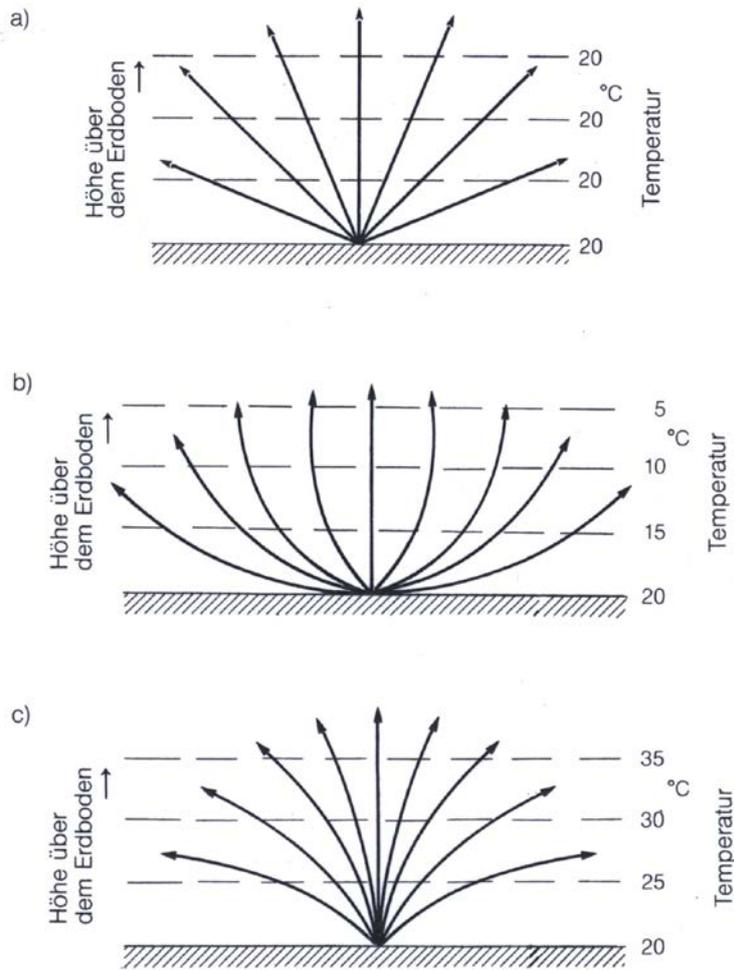
Für die Schallgeschwindigkeit  $c$  in Luft gilt mit  $\mathcal{R} = 8315 \text{ Joule}/(\text{K} \cdot \text{kmol})$ ,  $\kappa = 1,4$  und  $M = 28,967 \text{ kg/kmol}$

$$c = 20\sqrt{273 + \vartheta} \quad \text{m/s} \quad (5.33)$$

mit

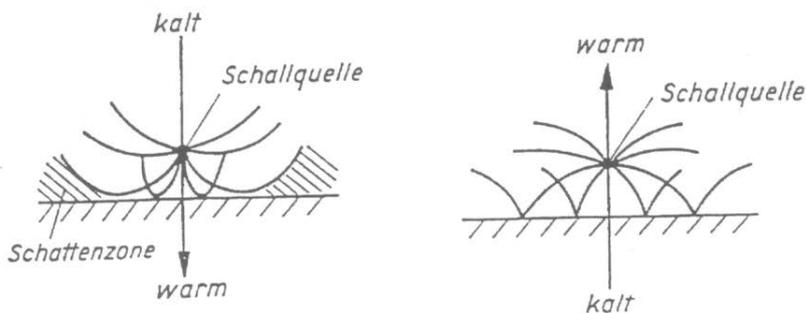
$$\vartheta = \text{Temperatur in } ^\circ\text{C}.$$

Die Schallgeschwindigkeit nimmt also mit der Temperatur zu. Schallstrahlen werden deshalb beim Übergang von einer Luftschicht in eine andere mit höherer oder niedriger Temperatur gebrochen und breiten sich nicht mehr geradlinig aus. Dies ist in Abb. 5.19 illustriert.



**Abb. 5.19** Schallausbreitung bei Temperaturänderung in der Atmosphäre (schematisch)

- a) keine Temperaturänderung mit der Höhe über dem Erdboden (Beispiel 20 °C)
- b) Temperaturabnahme nach oben
- c) Temperaturzunahme nach oben (Temperaturinversion)



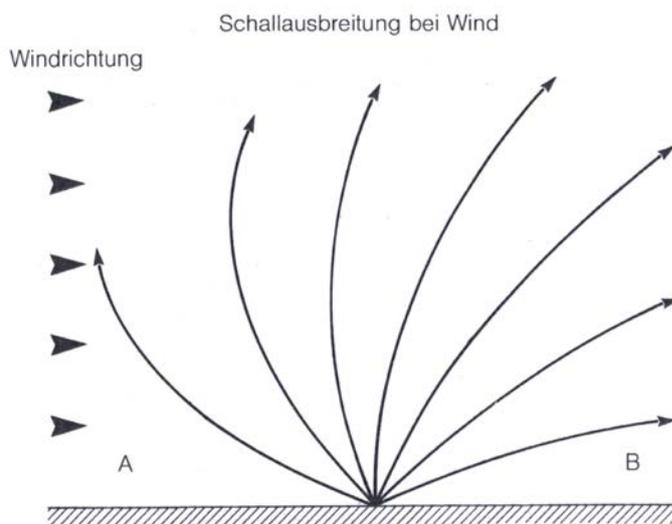
Negativer Temperaturgradient

Positiver Temperaturgradient  
(Inversionswetterlage)

**Abb. 5.20** Schallausbreitung bei vertikaler Temperaturschichtung

In den meisten Fällen nimmt die Temperatur über freien Flächen mit der Höhe ab (linke Seite in Abb. 5.20). Dann ist die Schallgeschwindigkeit in Bodennähe größer als weiter oben; die Schallwellen werden nach oben gebrochen. In einem bestimmten Abstand von der Schallquelle bildet sich eine Schattenzone aus – selbst, wenn die Quelle in einiger Höhe über dem Boden abstrahlt; der Schall ist fast nicht mehr wahrzunehmen. Insbesondere nachts und morgens kann eine umgekehrte Luftschichtung, eine sogenannte Inversionswetterlage, vorhanden sein, bei der die Schallstrahlen zum Boden hin gebrochen werden, siehe rechte Seite in Abb. 5.20. Die Schallquelle ist rundum auch in größeren Abständen noch deutlich hörbar.

Einen wesentlich größeren Einfluss auf die Schallausbreitung als die Temperatur hat der Wind. Die bekannte Tatsache, dass sich der Schall mit dem Wind weiter ausbreitet als gegen den Wind, ist darauf zurückzuführen, dass infolge von Reibung am Boden die Geschwindigkeit sinkt. Es bildet sich ein positiver Windgradient aus. Da sich die Schallausbreitungsgeschwindigkeit vektoriell aus Wind- und Schallgeschwindigkeit zusammensetzt, werden die Schallstrahlen mit dem Wind zum Boden hin und gegen den Wind vom Boden weg gebrochen. Es bilden sich Schattenzonen im Gegenwindsektor aus, die in etwa 300 m bis 1000 m Entfernung von der Quelle beginnen und in denen zusätzliche Pegelminderungen von 20 bis 30 dB auftreten können.

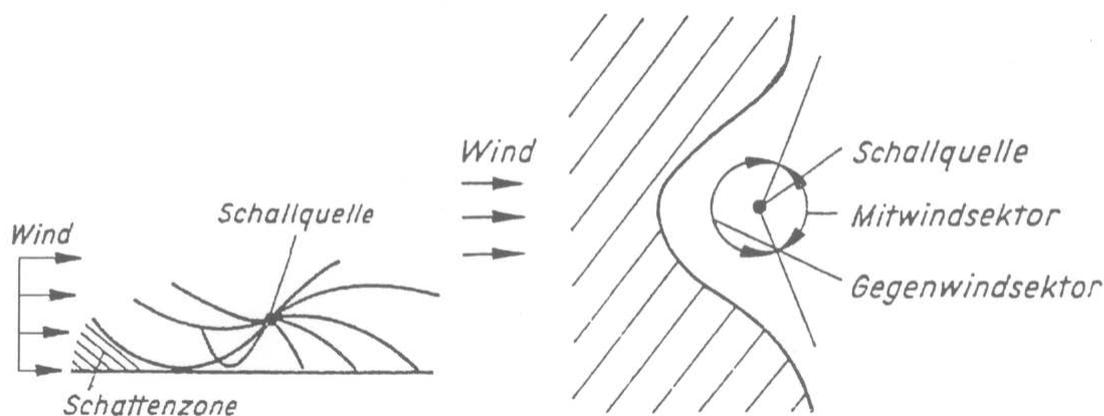


**Abb. 5.21** Schallausbreitung bei Wind

Bereich A: in Gegenwindrichtung Ausbildung einer Schallschattenzone, Schallstärke kleiner als bei Windstille,

Bereich B: in Mitwindrichtung, Schallstärke größer als bei Windstille.

Bemerkung: Die Zu- und Abnahme der Schallstärke an einem Ort ist abhängig von der Windgeschwindigkeit.



**Abb. 5.22** Schallausbreitung bei Windeinfluss

### **Fazit für die Ausbreitung von Schall mit tiefen Frequenzen (8 Hz bis 100 Hz)**

Die Einflüsse von Wind und Temperatur überlagern sich. Ihre Gesamtwirkung lässt sich aufgrund der örtlich und zeitlich unterschiedlichen Witterungsbedingungen nicht durch allgemein gültige Zahlenangaben beschreiben. Es sind daher statistische Verfahren anzuwenden. Klar dürfte jedoch sein, dass bei tieffrequentem Schall auch eine Mitwindsituation berücksichtigt werden muss. Inwiefern für eine meteorologische Korrektur  $C_{\text{met}}$  mit einem konstanten, richtungsunabhängigen Wert von  $C_{\text{met}} = C_0 = 2 \text{ dB}$  oder mit anderen Werten der Windstatistik gerechnet werden kann, ist noch zu klären.

#### **5.6.5 Einfluss durch Bebauung $D_G$**

Der Einfluss von Bebauung auf die Schallausbreitung kann im Prinzip für eine konkrete Situation durch die Effekte Abschirmung und Reflexion berechnet werden. Insbesondere bei Mehrfachreflexionen kann die Rechengenauigkeit allerdings leiden.

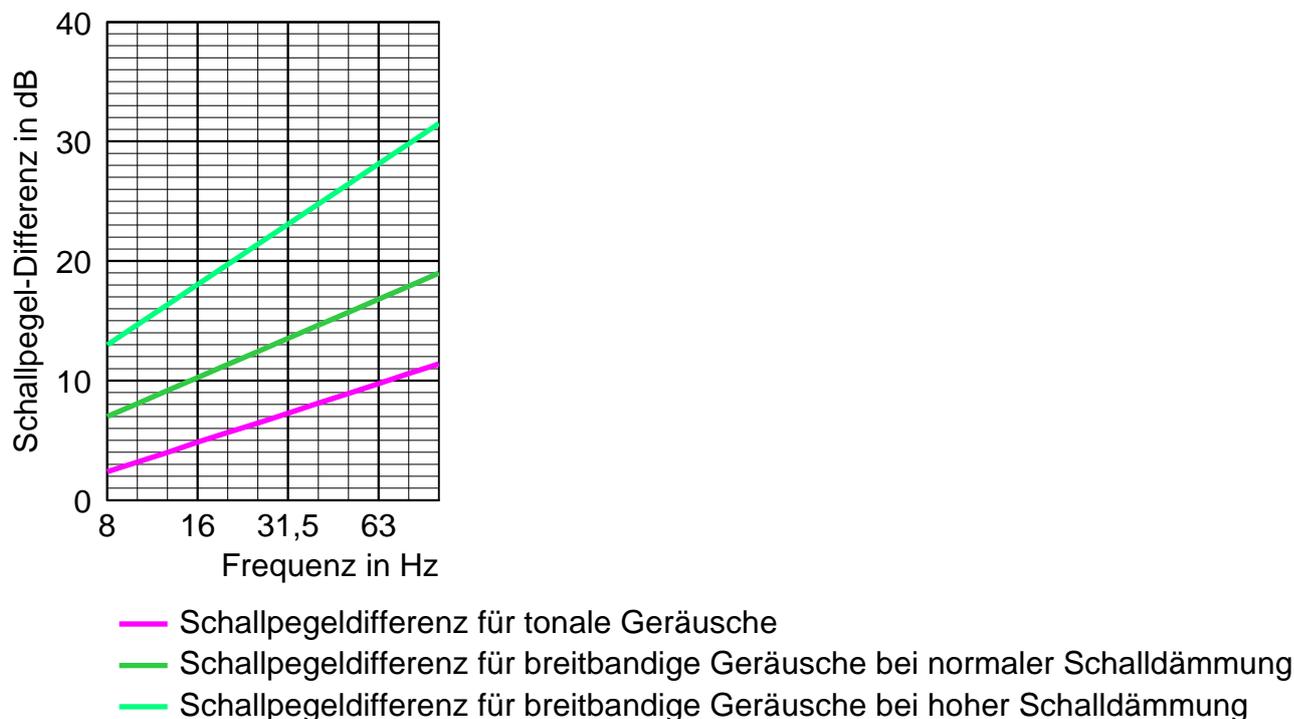
DIN ISO 9613-2 gibt ein Verfahren an, mit dem das A-bewertete Dämpfungsmaß  $A_{\text{haus}}$  abgeschätzt werden kann. Demnach sollte  $A_{\text{haus}}$  10 dB nicht überschreiten.

#### **5.6.6 Einfluss durch Schalldämmung der Außenbauteile $D_W$**

Befindet sich in der Nähe einer Schallquelle mit tieffrequentem Schall z. B. ein Wohngebäude, so werden die tieffrequenten Schallanteile ohne weiteres wegen der geringen Dämmwirkung (geschätzt  $R \approx 0$  bis 10 dB) von Wänden, Fenstern, Türen und Toren auf die Räume übertragen.

Die genormten Messverfahren zur Bestimmung des Schalldämmmaßes von Bauteilen beginnen üblicherweise im Terzbereich mit der Mittenfrequenz 100 Hz. Erst ab dieser Frequenz sind die Ergebnisse der angewendeten Messverfahren hinreichend genau. Es liegen deshalb so gut wie keine Daten für die Schalldämmung von Bauteilen bei tiefen Frequenzen vor. Neuere Normen der Reihe DIN EN ISO 140 gestatten eine Ausweitung des Messbereiches nach unten bis zur Terz mit der Mittenfrequenz 50 Hz.

Inwieweit tieffrequenter Schall durch das zumeist schalltechnisch schwächste Bauteil eines Hauses, das Fenster, welches als Tiefpassfilter wirkt, in einen Wohnraum eindringt, lässt sich nur über Schallpegeldifferenzen „außen – innen“ klären. Dem Müller-BBM-Mustergutachten und der Handlungsanleitung für das Staatliche Umweltamt Kiel aus dem 2001, kann man einige systematische Messungen der Pegeldifferenzen „außen – innen“ entnehmen. Die Differenzen sind in allen Fällen positiv, d. h. der Schalldruckpegel im Gebäude ist niedriger als außerhalb. Die Ergebnisse der Schallpegeldifferenzen  $D_W$  „außen – innen“ sind in Abb. 5.23 dargestellt.



**Abb. 5.23** Mittelwerte der Schallpegeldifferenzen zwischen dem Schalldruckpegel „außen und innen“ bei geschlossenen Fenstern – betrifft tonale und breitbandige Geräusche, die Eigenfrequenzen des Raums werden nicht angeregt.

### 5.6.7 Einfluss des Raums $K_R$

In Räumen normaler Größe können tieffrequente Raumeigenresonanzen ("Moden") durch innerhalb und außerhalb des Raumes befindliche Schallquellen angeregt werden. In geschlossenen Räumen kann es durch tieffrequenten Schall zu störenden Raumresonanzen kommen.

Stimmen die Erregerfrequenzen der Schallquelle mit den akustischen Raummoden überein, können sich stehende Schallwellen ausbilden. In den Räumen formieren sich im Wellenfeld deutliche Schallwechseldruckmaxima und -minima. Dies führt zu sehr starken Schalldruckpegelerhöhungen an bestimmten Orten des Raumes. Es kommt zu einer starken Orts-, Frequenz- und Zeitabhängigkeit des Schallfeldes. Üblicherweise steigen dabei die Schalldruckpegel vor den Wänden und in Raumecken besonders an. Wegen des langwelligen Charakters der Schallwellen ist eine Ortung der Schallquelle, d. h. die Feststellung der Richtung, aus der der tieffrequente Schall einfällt, durch den Betroffenen nicht möglich.

Bei welchen Frequenzen sich diese stehenden Wellen ausbilden können, hängt von den Abmessungen der parallelen Raumbegrenzungsflächen ab. Es müssen eine halbe Wellenlänge oder deren Vielfache mit der Entfernung zwischen den parallelen Raumbegrenzungsflächen übereinstimmen.

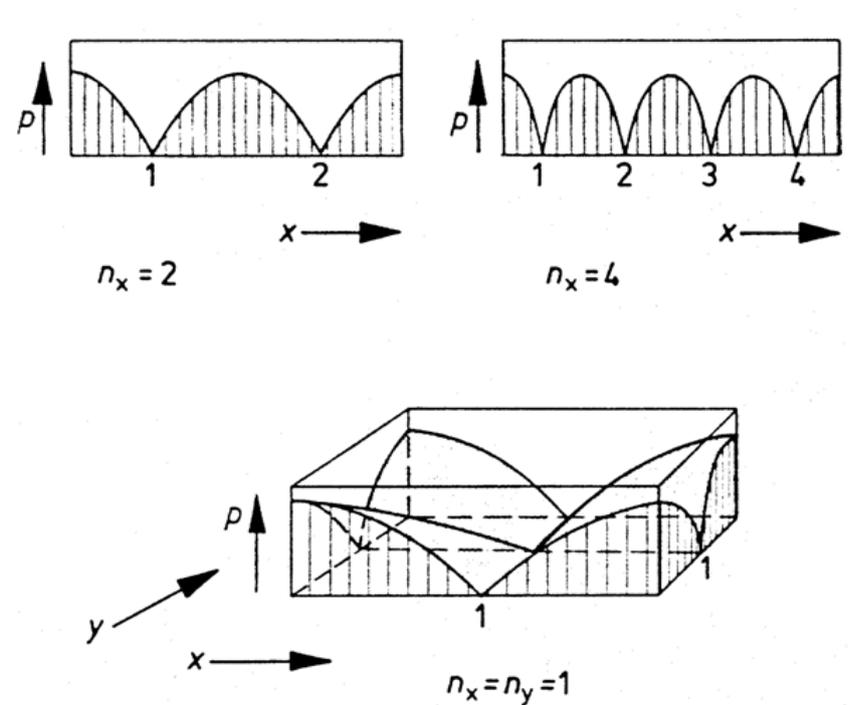
Die tiefste anregbare Eigenfrequenz liegt also bei einer Frequenz, bei der eine halbe Wellenlänge mit der größten Raumabmessung übereinstimmt.

$$\lambda = 2 \cdot l \quad (5.34)$$

$$f_0 = \frac{c}{2l} \quad (5.35)$$

- $\lambda$  : Wellenlänge,
- $c$  : Schallgeschwindigkeit = 344 m/s bei der Temperatur von 20 °C,  
Dichte der Luft von 1,21 kg/m<sup>3</sup>,
- $f_0$  : Frequenz der tiefsten möglichen Mode in einer Richtung in einem  
Arbeitsraum (Eigenfrequenz des Raumes),
- $l$  : größter Abstand zwischen zwei parallelen Raumbegrenzungsflächen in einer  
Richtung.

Bei höheren Frequenzen als der Raumeigenfrequenz können sich mehrere stehende Wellen in allen Raumrichtungen ausbreiten. Ein Beispiel für die Verteilung des Schallfeldes innerhalb eines Raumes für höhere mögliche Moden ist in Abb. 5.24 dargestellt.



**Abb. 5.24** Beispiele für die Schalldruckverteilung in einem Raum, der verschiedene Raumeigenfrequenzen besitzt

## 5.7 Prognoseansätze der Geräuschimmissionen von Windenergieanlagen

Der Bau und Betrieb von Windenergieanlagen (WEA) mit einer Gesamthöhe von mehr als 50 m ist grundsätzlich mit einem Genehmigungsverfahren nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) verbunden. Sofern die Anlagen nicht fernab von menschlichen Siedlungen, beispielsweise in einem Offshore-Windpark, errichtet werden, ist in der Regel im Rahmen des Genehmigungsverfahrens auch eine Beurteilung der Geräuschimmission für den Schutz des Menschen erforderlich.

Für genehmigungsbedürftige Anlagen nach BImSchG ist für die Beurteilung der Geräuschimmissionen der geplanten Anlagen die Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (*TA Lärm, 1998*) heranzuziehen. Für die schalltechnische Prognose geplanter Anlagen verweist die TA Lärm auf die DIN ISO 9613-2.

Nach DIN ISO 9613-2 werden für die Schallausbreitungsrechnung zwei Verfahren angegeben: das allgemeine Verfahren nach Abschnitt 7.3.1 und das alternative Verfahren nach Abschnitt 7.3.2. Beide Verfahren basieren in ihren Grundzügen auf der nachfolgenden Gleichung:

$$L_{FT}(DW) = L_W + D_C - A \quad (5.36)$$

mit

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc} \quad (5.37)$$

Dabei ist  $L_{FT}(DW)$  der am Immissionsort prognostizierte äquivalente Dauerschalldruckpegel in Oktavbandbreite und  $L_W$  der Oktavband-Schalleistungspegel der Punktschallquelle.  $D_C$  stellt eine Richtwirkungskorrektur dar, welche ungleich Null ist, sofern die von der Punktquelle abgestrahlte Schallenergie nicht als uneingeschränkt kugelförmig angenommen werden darf. Für bodennahe Quellen wird für gewöhnlich eine Abstrahlung in den Halbraum angenommen. Entsprechend beträgt die Richtwirkungskorrektur überschlägig (ohne weitere quellspezifische Richtwirkungen) etwa  $D_C = 3$  dB.

In dem Dämpfungsterm  $A$  sind die verschiedenen auf dem Ausbreitungsweg auftretenden Teildämpfungen summiert. Die jeweiligen Teildämpfungen sind im Einzelnen:

- $A_{div}$  : Dämpfung aufgrund der geometrischen Ausbreitung,
- $A_{atm}$  : Dämpfung aufgrund von Luftabsorption,
- $A_{gr}$  : Dämpfung aufgrund des Bodeneffektes,
- $A_{bar}$  : Dämpfung aufgrund von Abschirmungen,
- $A_{misc}$  : Dämpfung aufgrund verschiedener anderer Effekte.

Zur Ermittlung eines Langzeitmittelungspegels  $L_{AT}(LT)$  wird ferner noch eine meteorologische Korrektur  $C_{met}$  berücksichtigt, welche die Witterungsverhältnisse am Standort (insbesondere eine Windstatistik) berücksichtigt.

Für die Ermittlung der Beurteilungspegel nach TA Lärm erfolgt in der Regel eine Schallausbreitungsrechnung nach dem in der DIN ISO 9613-2 (Abschnitt 7.3.2) beschriebenen alternativen Verfahren. Darüber hinaus wurde das alternative Verfahren für die Geräuschimmissionsprognose von Windenergieanlagen in der Vergangenheit auch vom Länderausschuss Immissionsschutz (LAI, 2005) für die Schallimmissionsprognose im Rahmen von Genehmigungsverfahren empfohlen.

Hinsichtlich der Genauigkeiten des Berechnungsverfahrens werden bei der Prognose nach DIN ISO 9613-2 (Tabelle 5) lediglich Angaben für Abstände zwischen Quelle und Empfänger von bis zu  $d = 1.000$  m und für mittlere Höhen von Quelle bzw. Empfänger von bis zu  $h = 30$  m angegeben. Bereits seit Längerem wird vermutet, dass die von Windenergieanlagen gemessenen Geräuschimmissionen von den Prognosewerten nach DIN ISO 9613-2 bei Abständen oberhalb von 1.000 m und Quellhöhen oberhalb von 30 m über Gelände voneinander abweichen können (Engelen u. a., 2015). Eine aktuelle Untersuchung von Engelen & Piorr (2005) kommt zu dem Ergebnis, dass für die im Rahmen ihrer Untersuchung betrachteten Windenergieanlagen (Rotordurchmesser ca. 80 m, Nabenhöhen ca. 100 m, Nennleistung im Messmodus ca. 2 MW) ab einem Abstand von ca. 450 m eine deutliche Unterschätzung des nach DIN ISO 9613-2 prognostizierten Immissionspegels gegenüber den gemessenen Pegeln auftritt. Ab einem Abstand von 820 m zwischen den betrachteten WEA und den jeweiligen Messpunkten liegt der nach DIN ISO 9613-2 (alternatives Verfahren) prognostizierte Immissionspegel statistisch signifikant<sup>4</sup> um mindestens 2,5 dB unterhalb des jeweiligen Messpegels.

Als Grund für die Unterschätzung des nach dem alternativen Verfahren der DIN ISO 9613-2 prognostizierten Immissionspegels wird von Engelen & Piorr eine rechnerische Überschätzung der Bodendämpfung  $A_{gr}$  angegeben. Gemäß DIN ISO 9613-2, Gleichung 10, berechnet sich die Bodendämpfung zu

$$A_{gr} = 4,8 - (2h_m/d) (17 + (300/d)) \text{ [dB]} \geq 0 \text{ dB.} \quad (5.38)$$

Dabei ist  $h_m$  die mittlere Höhe des Schallausbreitungsweges über dem Boden und  $d$  der Abstand zwischen Quelle und Empfänger. Für große Werte des Abstands  $d$  (bzw. kleine Werte von  $h_m/d$ ) strebt  $A_{gr}$  gegen einen rechnerischen Grenzwert für die Bodendämpfung von 4,8 dB. Engelen & Piorr (2005) folgern aus der Analyse der Mess- und Prognoseergebnisse für die betrachteten Windenergieanlagen sowie aus einer Literaturrecherche, dass die berechnete Bodendämpfung für hohe Quellen und große Quell-Empfänger-Abstände  $d$  nach der o. g. Formel im Vergleich zur tatsächlich wirksamen teilweise deutlich zu hoch liegt.

Im Rahmen von Genehmigungsverfahren hat die Prognose und Beurteilung nach TA Lärm grundsätzlich „zur sicheren Seite“ zu erfolgen, d. h. für die prognostizierten Beurteilungspegel soll mit einiger Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden können, dass diese eine Obergrenze des durch den realen Anlagenbetrieb zu erwartenden Immissionsbeitrags darstellen. Um den oben genannten Defiziten bei der Schallausbreitungsrechnung nach DIN ISO 9613-2 entgegen zu treten, soll künftig mit der VDI 4101, Blatt 2 ein Verfahren zur Verfügung gestellt werden, welches die Schallausbreitungsrechnung nach DIN ISO 9613-2 für WEA's entsprechend ergänzt. Die VDI 4101, Blatt 2 ist derzeit beim NALS in Bearbeitung.

<sup>4</sup> Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %.

Für die Übergangszeit bis zur Einführung der VDI 4101, Blatt 2 wurde zwischenzeitlich ein Interimsverfahren eingeführt und für die Schallausbreitungsrechnung bei Windenergieanlagen empfohlen. Grundlage des Interimsverfahren ist ein einfaches akustisches Ersatzmodell auf Basis des allgemeinen Berechnungsverfahrens zur Schallausbreitung der DIN ISO 9613-2. Dabei sollen für die in den o. g. Gleichungen 5.35 und 5.36 angegebenen Terme insbesondere folgende Modifikationen berücksichtigt werden:

$$\begin{aligned}D_C &= 0 \text{ dB,} \\A_{gr} &= -3 \text{ dB,} \\C_{met} &= 0 \text{ dB.}\end{aligned}$$

Der im Interimsverfahren angegebene Ansatz für die Richtwirkungskorrektur von  $D_C = 0$  dB gilt für eine hohe, ungerichtete, ins Freie abstrahlende Punktquelle. Der frequenzunabhängig angesetzte *negative* Bodeneffekt  $A_{gr} = -3$  dB berücksichtigt eine vollständige (dämpfungslöse) Reflexion des Schalls am Boden. Die meteorologische Korrektur  $C_{met} = 0$  dB entspricht einem konservativen Ansatz für die Schallprognose „zur sicheren Seite“, bei der grundsätzlich eine witterungsbedingt günstige Schallausbreitung zwischen Quelle und Empfänger (Mitwindsituation) zugrunde gelegt wird. Nach *Engelen & Piorr (2005)* entsprechen die Prognoseergebnisse nach dem Interimsverfahren in etwa den Prognoseergebnissen nach dem allgemeinen Verfahren unter Berücksichtigung eines (schall-)harten Bodens nach DIN ISO 9613-2 (Bodenfaktor  $G = 0$ ). Sie stellen für die von ihnen untersuchten Windenergieanlagen fest, dass Pegeldifferenzen zwischen den gemessenen und den nach Interimsverfahren prognostizierten Immissionspegeln im statistischen Mittel um 0 dB streuen, mit einer Standardabweichung von ca. 1,1 dB.

Die Diskussionen um die Geräuschimmissionsprognose von Windkraftanlagen sind aktuell jedoch nicht abgeschlossen. Zur Diskussion steht u. a. wiederum ein Verfahren, das auf einer modifizierten Schallausbreitungsrechnung nach dem alternativen Verfahren der DIN ISO 9613-2 basiert. Dabei erfolgt die Berechnung für das Oktavband mit der Mittenfrequenz von 500 Hz und unter Berücksichtigung der Berechnungsterme  $A_{gr} = 0$  dB,  $D_\Omega = 3$  dB und  $C_{met} = 0$  dB. Für die Luftdämpfung wird einheitlich ein Wert von 1,9 dB/km angesetzt; dies entspricht dem Luftdämpfungskoeffizient nach Tabelle 2 der DIN ISO 9613-2 bei 500 Hz (relative Luftfeuchte 70 %, Temperatur 10 °C). Nach ersten Ergebnissen liegen die hiermit ermittelten Immissionspegel auf der sicheren Seite. Ein weiteres Hinweispapier des Länderausschusses für Immissionsschutz (LAI) ist aktuell in der Vorbereitung, lag bei Fertigstellung der vorliegenden Untersuchung jedoch noch nicht vor.

Auch weiterhin sind jedoch frequenzabhängige Verfahren auf Basis des Interimsverfahrens (angepasstes allgemeines Verfahren nach DIN ISO 9613-2) im Gespräch. Innerhalb der beteiligten Fachkreise gibt es hierzu aktuell noch erheblichen Prüfungs- und Klärungsbedarf. Insbesondere in Hinblick auf die Unsicherheiten der jeweiligen Prognoseverfahren, die Gewährleistung einer Immissionsprognose „zur sicheren Seite“ sowie die jeweilige Alltagstauglichkeit der diskutierten Verfahren im künftigen Genehmigungs- und Nachweisverfahren sind die oben dargestellten Diskussionen noch nicht abgeschlossen.

## 5.8 Bisher vorliegende Prognoseansätze für tieffrequente Geräusche in den einzelnen Bundesländern

Für Geräusche, die vorherrschende Energieanteile im Frequenzbereich unter 90 Hz (tieffrequente Geräusche) besitzen, ist nach Nummer 7.3 der TA Lärm im Einzelfall nach den örtlichen Verhältnissen zu beurteilen, ob von ihnen schädliche Umwelteinwirkungen ausgehen.

Schädliche Umwelteinwirkungen können dabei nach TA Lärm insbesondere auftreten, wenn bei deutlich wahrnehmbaren tieffrequenten Geräuschen innerhalb schutzbedürftiger Räume bei geschlossenen Fenstern die nach Nummer A.1.5 des Anhangs der TA Lärm ermittelte Differenz  $L_{Ceq} - L_{Aeq}$  den Wert von 20 dB überschreitet. Hinweise zur Ermittlung und Bewertung tieffrequenter Geräusche enthält Nummer A.1.5 des Anhangs zur TA Lärm, der wiederum auf die DIN 45680 (Ausgabe März 1997) und das dazugehörige Beiblatt 1 verweist.

Wie bereits in den vorangehenden Kapiteln erläutert, enthält die TA Lärm kein Prognoseverfahren für die Berechnung von Körperschallübertragungen und für die Geräuschübertragung innerhalb von Gebäuden. Ebenso enthält die DIN 45680 als reine Messnorm – auch in der aktuell vorliegenden Entwurfsfassung vom September 2013 – keine Regelungen zur Prognose tieffrequenter Geräusche.

Im Rahmen von schalltechnischen Untersuchungen für geplante Anlagen erfolgt daher im Hinblick auf tieffrequente Geräuschimmissionen häufig eine Prognose eines Rauminnenpegels nach verschiedenen hilfsweisen Methoden zu dieser Thematik und einer anschließenden Bewertung orientierend an der *DIN 45680 (1997)* und den Anhaltswerten in dem dazugehörigen *Beiblatt 1 zur DIN 45680 (1997)*.

Die jeweiligen Methoden basieren in der Regel auf einer Erweiterung der Verfahren zur Schallausbreitungsrechnung nach DIN ISO 9613-2<sup>5</sup> auf Terzbänder mit den Mittenfrequenzen von 10 Hz bis 80 Hz, wobei in Sonderfällen, wenn geräuschbestimmende Anteile diesem Frequenzbereich dicht benachbart sind, dieser Bereich um eine Terz nach oben oder unten erweitert wird.

Der hilfsweise berechnete Geräuschimmissionspegel für tiefe Frequenzen (< 100 Hz) bezieht sich zunächst auf einen Außenpegel am maßgeblichen Immissionsort nach TA Lärm (in einem Abstand von 0,5 m vor dem geöffneten Fenster). Zur hilfsweisen Berechnung eines Rauminnenpegels innerhalb geschlossener Räume wird in der Regel eine Pegeldifferenz  $\Delta L$  abgezogen, welche die Pegelabnahme beim „Schalldurchtritt“ durch die Außenbauteile des betrachteten Gebäudes repräsentiert<sup>6</sup>.

Wie oben ausgeführt gibt es für die Prognose tieffrequenter Geräusche lediglich hilfsweise Methoden und Verfahren. Ein wünschenswertes vereinheitlichtes Prognoseverfahren existiert nicht. Den Autoren der vorliegenden Studie sind derzeit die nachfolgend aufgeführten Prognosemodelle für tieffrequente Geräusche bekannt, die ggf. im Rahmen von TA Lärm Untersuchungen eingesetzt werden:

<sup>5</sup> Siehe hierzu die Erläuterungen in den vorhergehenden Abschnitten, z. B. im Abschnitt 5.7.

<sup>6</sup> Eine Ausnahme von dieser Regel betrifft das nachfolgend erläuterte Berechnungsmodell des Biogasleitfadens Mecklenburg-Vorpommern, welches ausschließlich auf den Außenpegel abstellt.

1. „Berücksichtigung tieffrequenter Geräusche gemäß TA Lärm in Genehmigungs-, Planfeststellungs- und Baugenehmigungsverfahren – Mustergutachten und Handlungsanleitung“. Studie im Auftrag des Staatlichen Umweltamts Kiel (StUA Kiel) (*Gilg, J., Müller-BBM GmbH, 2001*).
2. „Leitfaden Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen und Luftwärmepumpen“, Bayerisches Landesamt für Umwelt (*BayLfU, 2011*).
3. „Ansatz für die Schallimmissionsprognose tieffrequenter Geräusche“, Thüringer Landesamt für Umwelt und Geologie (*TLUG, Fritsche, C., 2013*).
4. „Biogasleitfaden Mecklenburg-Vorpommern: Überschlägige Prognose und Beurteilung der tieffrequenten Schallimmissionen des BHKW-Abgaskamins im Freien – Hinweise für die Genehmigung und Überwachung“ (*2012*).

Alle vorgenannten Prognosemodelle basieren auf einem vereinfachten Ansatz nach der DIN ISO 9613-2. Dieser wird nachfolgend schematisch vorgestellt:

$$L_{\text{Terz,eq,außen}} = L_{\text{W,eq,Terz}} - A_{\text{div}} + K_0 \quad (5.39)$$

Dabei ist

- $L_{\text{Terz,eq,außen}}$  : Mittelungspegel je Terz, außerhalb am Aufpunkt,  
 $L_{\text{W,eq,Terz}}$  : Schalleistungspegel je Terz, in dB,  
 $A_{\text{div}}$  : geometrische Dämpfung (kugelförmig),  
 $K_0$  : Raumwinkelmaß (z. B. Halbraum  $K_0 = 3$  dB).

$A_{\text{div}}$  wird dabei gemäß DIN ISO 9613-2 mit

$$A_{\text{div}} = 20 \log (d/d_0) + 11 \text{ [dB]} \quad (5.40)$$

parametrisiert ( $d$ : Abstand zwischen Quelle und Empfängerpunkt in Metern,  $d_0 = 1$  m).

Die Bezeichnung des Raumwinkelmaßes  $K_0$  variiert zwischen den verschiedenen Ansätzen, ist jedoch grundsätzlich mit der Richtwirkungskorrektur  $D_C$  nach DIN ISO 9613-2 vergleichbar. In dem in Nummer 3 genannten Prognosemodell des TLUG wird ein modifiziertes Raumwinkelmaß  $K_{0,\text{mod}} = 6$  dB verwendet. In der überschlägigen Prognose des Biogasleitfaden Mecklenburg-Vorpommern wird statt eines Raumwinkelmaßes ein negativer Bodeneffekt  $A_{\text{gr}} = -3$  dB abgezogen (d. h. Verstärkung, vgl. Abschnitt 5.7). Weitere Dämpfungsterme, beispielsweise für Hindernisse ( $A_{\text{bar}}$ ) oder eine zusätzliche Bodendämpfung, werden vereinfachend für gewöhnlich nicht berücksichtigt. Eine meteorologische Korrektur  $C_{\text{met}}$  im Sinne der DIN ISO 9613-2 wird nicht berücksichtigt.

Zur Ermittlung des Innenpegels aus dem prognostizierten Außenpegel wird in den o. g. Prognosemodellen 1 bis 3 eine terzbandbezogene Pegeldifferenz  $\Delta L$  berücksichtigt:

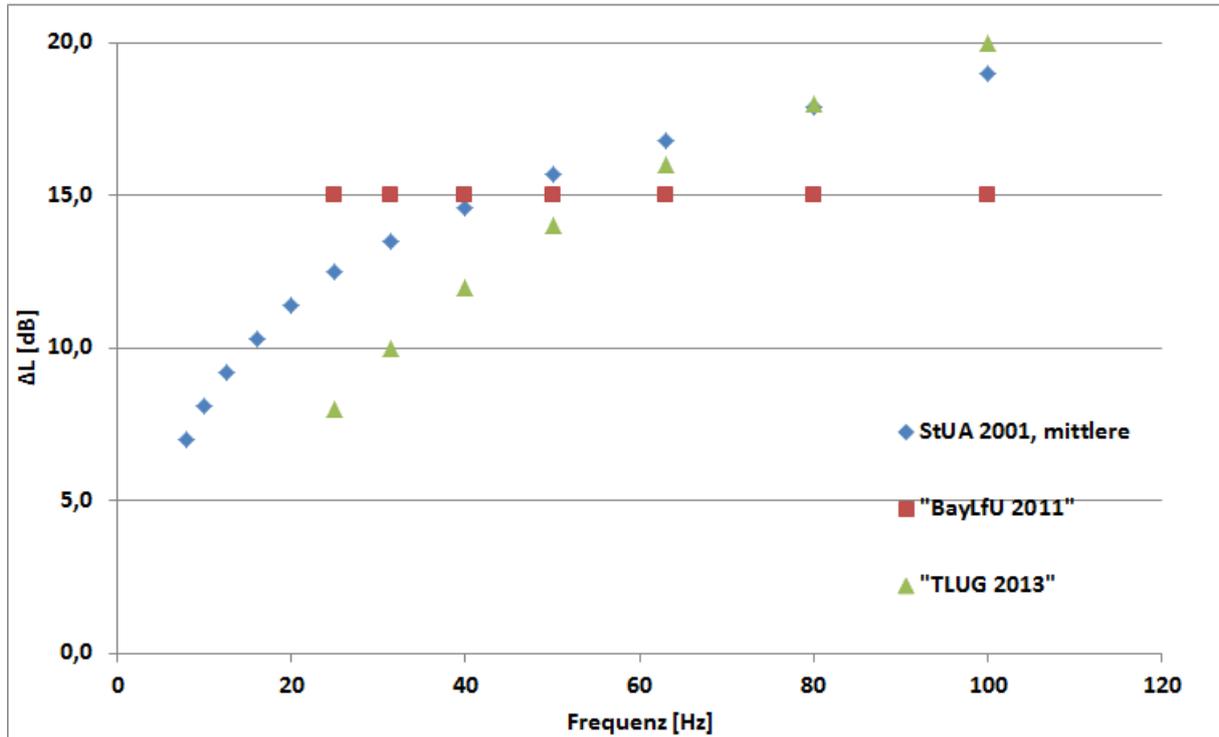
$$L_{\text{Terz, eq, innen}} = L_{\text{Terz, eq, außen}} - D \quad (5.41)$$

$D$ : „Schalldurchtritt“, Schallpegeldifferenz außen *minus* innen, je Terzband

Die jeweiligen Werte  $\Delta L$  sind in der nachfolgenden Tab. 5.4 und Abb. 5.25 dargestellt. Die angegebenen Werte für den Schalldurchtritt basieren für die Prognosemodelle 1 (*StUA Kiel, Gilg, J., 2001*) und 3 (*TLUG, Fritsche, C., 2013*) auf Literaturangaben. *Fritsche (2013)* orientiert sich dabei an den Ergebnissen von *Jakobsen, J. (2012)*. Das Prognosemodell 2 (*BayLfU, 2011*) nimmt, basierend auf Erfahrungswerten für das resultierende Schalldämmmaß in den Terzen 50 bis 100 Hz, einen konstanten Wert für  $\Delta L$  von 15 dB für die Terzmittenfrequenzen oberhalb von 20 Hz an.

**Tab. 5.4** Schalldurchtritt“  $\Delta L$  für verschiedene Prognosemodelle

Terzmitten- frequenz	Prognose- model 1 ( <i>StUA Kiel, 2001,</i> „mittlere Schall- dämmung“)	Prognose- model 1 ( <i>StUA Kiel, 2001,</i> „hohe Schall- dämmung“)	Prognose- model 2 ( <i>BayLfU, 2011</i> )	Prognose- model 3 ( <i>TLUG, 2013</i> )
[Hz]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
8	7,0	13,0		
10	8,1	14,7		
12,5	9,2	16,3		
16	10,3	18,0		
20	11,4	19,7		
25	12,5	21,3	15,0	8,0
31,5	13,5	23,0	15,0	10,0
40	14,6	24,6	15,0	12,0
50	15,7	26,3	15,0	14,0
63	16,8	28,0	15,0	16,0
80	17,9	29,6	15,0	18,0
100	19,0	31,3	15,0	20,0



**Abb. 5.25** Darstellung des „Schalldurchtritts“  $\Delta L$  für verschiedene Prognosemodelle

Abweichend von den Prognoseverfahren 1 bis 3 wird bei dem Berechnungsmodell des Biogasleitfadens Mecklenburg-Vorpommern (Prognosemodell 4) keine Schallpegeldifferenz  $\Delta L$  abgezogen. Bei der Beurteilung wird vielmehr auf den Außenpegel vor dem geöffneten Fenster abgestellt.

Allen Prognoseverfahren gemein ist, dass nach der Prognose des jeweiligen Terzpegels (Innen- oder Außenpegel) ein Vergleich mit der Hörschwelle nach *DIN 45680 (1997)* stattfindet.

Dabei erfolgt für die Prognosemodelle 1 bis 3 eine Bewertung in Anlehnung an das hier als bekannt vorausgesetzte Verfahren nach dem *Beiblatt 1 zur DIN 45680 (1997)*. Demnach wären, sofern die Anhaltswerte des Beiblattes 1 zur DIN 45680 für die prognostizierten Terz-Innenpegel eingehalten werden, nach den Kriterien des Beiblattes im Allgemeinen keine erheblichen Belästigungen durch tieffrequente Geräusche zu erwarten.

Eine Ausnahme hiervon stellt wiederum das Berechnungsmodell des Biogasleitfadens Mecklenburg-Vorpommern dar, welches ein eigenes Bewertungsschema zugrunde legt. Das Schema ist in der nachfolgenden Tabelle dargelegt. Die im Rahmen der überschlägigen Prognose zugrunde gelegten Schalleistungspegel  $L_{W,eq, Terz}$  in dB würden nach dem Biogasleitfaden Mecklenburg-Vorpommerns in den Genehmigungsbescheid aufgenommen und die Einhaltung der Schalleistungspegel wäre als Teil der Auflagen zur Genehmigung nach Inbetriebnahme nachzuweisen.

**Tab. 5.5** Bewertungsschema nach dem *Biogasleitfaden Mecklenburg-Vorpommern (2012)*

Nr.	Prüfkriterium [dB]	Beurteilung	Aktion
1	$L_{\text{Terz,eq,außen}} - L_{\text{HS}}^* \leq -10$	Die Anhaltswerte der DIN 45680 werden mit großer Sicherheit unterschritten.	Anlage ist ohne weitere Auflagen genehmigungsfähig. Eine Herstellerbescheinigung ist vorzulegen.
2	$-10 < L_{\text{Terz,eq,außen}} - L_{\text{HS}} \leq -3$	Die Anhaltswerte der DIN 45680 werden unterschritten.	Die prognostizierten Schallleistungspegel je Terz ( $L_{\text{wTerz,eq}}$ ) sind durch Messung nach Inbetriebnahme zu überprüfen.
3	$L_{\text{Terz,eq,außen}} - L_{\text{HS}} > -3$	Die Anhaltswerte der DIN 45680 werden möglicherweise überschritten.	Weitere schallmindernde Maßnahmen zur Absenkung der Schalleistungspegel je Terz ( $L_{\text{wTerz,eq}}$ ) sind zwingend erforderlich und im Genehmigungsverfahren nachzuweisen.

$L_{\text{HS}}^*$ : Hörschwellenpegel nach *DIN 45680 (1997)*

Alle vorgenannten Prognoseverfahren basieren auf dem Schalleistungspegel je Terz  $L_{\text{W,eq,Terz}}$  in dB. Bei geplanten Anlagen liegt ein entsprechender Schalleistungspegel in der Regel nicht vor. In den technischen Datenblättern zu den geplanten Anlagenteilen wird, wenn überhaupt, lediglich ein oktavbandbezogener Pegel für den Frequenzbereich unterhalb von 100 Hz (z. B. für die 63 Hz- und gelegentlich für die 31,5 Hz-Oktave) angegeben, aus dem wiederum hilfswise Ansätze für die terzbezogenen Schalleistungspegel abgeleitet werden müssen. Gelegentlich können für geplante Anlagen auch terzbezogene Emissionspegel an vergleichbaren bestehenden Anlagen gemessen und für die Prognose herangezogen werden. Grundsätzlich jedoch sind die Eingangsdaten, auch vor dem Hintergrund der in den vorangegangenen Abschnitten aufgeführten messtechnischen Erfassung tieffrequenter Geräusche im Nahbereich, für die o. g. Prognosemodelle 1 bis 4 oftmals mit Unsicherheiten verbunden.

Darüber hinaus sind alle o. g. Prognosemodelle aus physikalischer Sicht zu hinterfragen. Die Gleichungen der DIN ISO 9613-2 sind, wie in den vorangegangenen Abschnitten behandelt, nicht ohne Weiteres auf den tieffrequenten Bereich erweiterbar. Aufgrund der vergleichsweise großen Wellenlängen ist eine Prognose für räumlich nahe liegende Immissionsorte (innerhalb eines Abstands von einigen Wellenlängen, Frequenzbereich unterhalb 100 Hz) physikalisch kaum zu begründen.

## 6 Thesen der Untersuchung und Ausblick

### 6.1 Entwicklung eines Verfahrens zur Messung, Bewertung und Beurteilung

1. Unter den gegenwärtigen neuen technischen Randbedingungen im Zusammenhang mit dem meist dezentralen Betrieb von Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien besteht ein *schalltechnischer Aufklärungsbedarf* zur Messung, Bewertung und Beurteilung tieffrequenter Geräusche.
2. Im Rahmen dieser Studie ausgewertete 20 Beschwerdefälle zu tieffrequenten Geräuschimmissionen im Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz in Räumen zeigen, dass die am häufigsten vorkommenden *Störfrequenzen* der Geräte und Anlagen im Frequenzbereich von 16 Hz bis 125 Hz liegen. In eher wenigen seltenen Fällen liegen sie im Infraschallbereich unter 16 Hz.
3. *Infraschall* sollte wegen seiner Besonderheiten im Hinblick auf die Wirkung auf den Menschen und die zu beachtenden Eigenheiten in der zu seiner Bestimmung erforderlichen Messtechnik durch eine eigene Mess- und Beurteilungsnorm erfasst werden.
4. *Belästigung* allein besteht nicht nur aus der Reizwahrnehmung „Schall“, sondern sie beruht auch auf negativ bewerteten Folgen der Reizexposition. Nach *Guski (1989)*, *Lercher (1998)* und *Schick (1997)* umfasst die „Belästigung“ die einzelnen Komponenten „Lästigkeit“, „Emotion“, „Störung“ und „psychosomatische Symptome“.
5. Die in dieser Untersuchung vorgeschlagene neue *Wahrnehmungsschwelle WS* berücksichtigt in hohem Maße die oft in der Literatur und in praktischen Beschwerdefällen beschriebene besondere Empfindlichkeit von Personen.
6. Aus der Analyse von national und international bekannten Minimalkurven gleicher Lästigkeit zur Beurteilung tieffrequenter Schalle unterhalb von 100 Hz in Räumen lässt sich eine *Lästigkeitsgrenze LG1* ableiten. Wird sie überschritten, so kann davon ausgegangen werden, dass das tieffrequente Geräusch als „lästig“ eingestuft werden kann.
7. Das zur Beurteilung der Lästigkeit von Einzeltönen, tonhaften, schmalbandigen und breitbandigen tieffrequenten Industrie- und Gewerbegeräuschen vorgeschlagene *Grenzkurvenverfahren* im Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz wird von den Autoren dieser Studie favorisiert, weil es die sicherste Beurteilung liefert.
8. Alternativ zum Grenzkurvenverfahren wird für die detaillierte Prüfung und Beurteilung von Einzeltönen, tonhaften und schmalbandigen sowie breitbandigen tieffrequenten Geräuschen das universell anwendbare praktische *Breitbandverfahren* vorgeschlagen. Es erfüllt die Forderung nach einem Beurteilungsverfahren mit einer Einwertangabe.
9. Die in dieser Untersuchung entwickelten *Anhaltswerte* gelten für die Tag- und Nachtzeit in Aufenthaltsräumen, die Wohnzwecken dienen, und in Räumen mit vergleichbarer Schutzwürdigkeit – unabhängig von der Lage des Gebäudes.

## 6.2 Prognose der Einwirkung von tieffrequentem Schall am Immissionsort

1. Die *Prognose* der Einwirkung von tieffrequentem Schall am Immissionsort geht in dieser Studie davon aus, dass die Schallimmission zumindest grundsätzlich aus der Schallemission berechnet und prognostiziert werden kann und umgekehrt.
2. Der von einer *Schallquelle im Freien* in ihrem Einwirkungsbereich (Umgebung) erzeugte Schalldruckpegel hängt ab von den Eigenschaften der Schallquelle (Schalleistung, Richtcharakteristik, Schallspektrum), der *Geometrie des Schallfeldes* (Lage von Aufpunkt und Schallquelle zueinander, zum Boden und zu Hindernissen im Schallfeld), den durch Topografie, Bewuchs und Bebauung bestimmten örtlichen Ausbreitungsbedingungen und von der Luftabsorption der Witterung.
3. Das *Berechnungsverfahren nach der DIN ISO 9613-2* kann nicht ohne weiteres auf den tieffrequenten Bereich erweitert werden.
4. Der in dieser Studie vorgeschlagene konzeptionelle Ansatz *für ein allgemeines Rechenverfahren* schafft die Voraussetzung für die Ermittlung eines Beurteilungspegels  $L_r$  in Räumen auf der Grundlage von Terzschalldruckpegeln im tieffrequenten Bereich (8 Hz bis 100 Hz). Damit würde sich der Kreis zum oben beschriebenen Messverfahren und dem Prognoseverfahren schließen.
5. Momentan gibt es *kein normgerechtes Berechnungsverfahren* zur Prognose der Einwirkung von extrem tieffrequenten Geräuschen an Immissionsorten.
6. Die Untersuchung weist darauf hin, dass alle bisher hilfsweise verwendeten *Prognosemodelle*, die in der Regel auf einer Erweiterung des Verfahrens zur Schallausbreitungsrechnung nach DIN ISO 9613-2 und Terzbändern beruhen, aus physikalischer Sicht noch Klärungsbedarf aufweisen.

## 6.3 Ausblick zur Novellierung der DIN 45680

1. *Vorschlag 1:* Im Sinne der Lärmvorsorge wird vorgeschlagen, die neu entwickelte *Wahrnehmungsschwelle WS* in eine neue DIN 45680 aufzunehmen.
2. *Vorschlag 2:* Zur Beurteilung der tieffrequenten Geräusche wird vorgeschlagen, die *Lästigkeitsgrenze LG1* bei der Beurteilung tieffrequenter Schalle zu berücksichtigen.
3. *Vorschlag 3:* Für die Messung und Prognose tieffrequenter Geräusche werden Terzschalldruckpegel befürwortet. Zur Beurteilung wird das *Grenzkurven- und/oder das Breitbandverfahren* empfohlen.
4. *Vorschlag 4:* Das Grenzkurven- und Breitbandverfahren ist in der *Praxis* zu erproben.
5. *Vorschlag 5:* Es ist ein detailliertes *Prognosemodell zur Vorhersage* von tieffrequentem Schall am Immissionsort zu entwickeln, das mit der künftigen DIN 45680 kompatibel ist.

## 7 Literatur

**Achtzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes** (18. BImSchV) vom 18. Juli 1991 (BGBl. I Nr. 45 vom 26.07.1991 S. 1588), zuletzt geändert am 9. Februar 2006 durch Artikel 1 der Ersten Verordnung zur Änderung der Sportanlagenlärmschutzverordnung (BGBl. I Nr. 7 vom 13.02.2006 S. 324).

**Bass, H. E., u. a.:** Atmospheric Absorption of Sound: Further Developments. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 97, 1995. S. 680 – 683.

**Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.):** Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen und Luftwärmepumpen. Ein Leitfaden. Eigenverlag. Augsburg. 2011.

**Bayerisches Landesamt für Umwelt und Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (Hrsg.):** Windkraftanlagen – beeinträchtigt Infraschall die Gesundheit? Eigenverlag, Augsburg, 2012.

**Biogasleitfaden Mecklenburg-Vorpommern:** Überschlägige Prognose und Beurteilung der tieffrequenten Schallimmissionen des BHKW-Abgaskamins im Freien – Hinweise für die Genehmigung und Überwachung (2012).

**Ceranna, L. u. a.:** Der unhörbare Lärm von Windkraftanlagen – Infraschallmessungen an einem Windrad nördlich von Hannover. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Referat B3.11, Seismologie. Hannover.

**Deutscher Bundestag, 14. Wahlperiode:** Sondergutachten zu Umwelt und Gesundheit, Risiken richtig einschätzen, Umweltbedingte Lärmwirkungen, Drucksache 14/2300, Berlin 1999.

**DIN 1318:** Lautstärkepegel; Begriffe, Messverfahren. September 1970.

**DIN EN ISO 266:** Akustik, Normfrequenzen. August 1997.

**DIN 1320:** Akustik – Begriffe. Dezember 2009.

**DIN 15996:** Bild- und Tonbearbeitung in Film-, Video- und Rundfunkbetrieben – Grundsätze und Festlegungen für den Arbeitsplatz. Mai 2008.

**DIN 45645-1:** Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen – Teil 1: Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft. Juli 1996.

**DIN 45680:** Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft. März 1997.

**DIN 45680(E):** Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräuschimmissionen. Entwurf. September 2013.

**DIN 45681:** Akustik – Bestimmung der Tönhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen. März 2005.

**DIN EN 60651:** Schallpegelmesser (IEC 60651:1979 + A1:1993); Deutsche Fassung EN 60651:1994 + A1:Mai 1994 (zurückgezogen).

**DIN EN 61672-1:** Elektroakustik – Schallpegelmesser – Teil 1: Anforderungen. Juli 2014.

**DIN EN ISO 140-5 :** Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 5: Messung der Luftschalldämmung von Fassadenelementen und Fassaden an Gebäuden. Dezember 1998.

**DIN EN ISO 389-7:** Akustik – Standard-Bezugspegel für die Kalibrierung von audiometrischen Geräten – Teil 7: Bezugshörschwellen unter Freifeld- und Diffusfeldbedingungen. April 2006.

**DIN ISO 226:** Akustik – Normalkurven gleicher Lautstärkepegel. April 2006.

**DIN ISO 9613-2:** Akustik – Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien, Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren. Oktober 1999.

**DIN SPEC 45660-1:** Leitfaden zum Umgang mit der Unsicherheit in der Akustik und Schwingungstechnik, Teil 1: Unsicherheit akustischer Kenngrößen. Mai 2014.

**Empfehlung des Robert Koch-Institutes:** Infraschall und tieffrequenter Schall – ein Thema für den umweltbezogenen Gesundheitsschutz in Deutschland? Mitteilung der Kommission „Methoden und Qualitätssicherung in der Umweltmedizin“. Springer Medizin Verlag. 2007.

**Engelen, J., Piorr, D.:** Messtechnische Untersuchung der Schallausbreitung hoher Windenergieanlagen, Lärmbekämpfung, Nr. 6, November 2015.

**Fasold, W., Kraak, W. (Hrsg.):** Taschenbuch der Akustik. Teil 1. 1984.

**Feldmann, J., Jakob, A.:** Tieffrequente Lärmimmissionen in Wohnungen – Ursachen, Auswirkungen, Minderung. FG Technische Akustik, DAGA 2006.

**Genuit, K.:** Gehörgerechte Schallmeßtechnik. In: Taschenbuch der Angewandten Psychoakustik. Springer-Verlag Wien New York, 1998. 149 – 165.

**Gruhl, S.; Kurze, U. J.:** Schallausbreitung und Schallschutz in Räumen. In Technischer Lärmschutz. Hrsg.: Schirmer, W. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

**Heim, S.; Hinkelmann, D.; Ebersold, M.:** Schallausbreitung im Freien. In: Handbuch des Seminars „Schallschutz bei Industrieanlagen – Grundlagen für die Planung und Ausführung“ der Firma Müller-BBM. Eigenverlag. Planegg. 2015.

**Hinweise zum Schallimmissionsschutz bei Windenergieanlagen,** Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI), 2005.

**Ingemansson, S.; Elvhammer; H.:** Lärmbekämpfung. Forschungsanwendung Fa 8. Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Bremerhaven, 2003.

**ISO 226:** Akustik – Normalkurven gleicher Lautstärkepegel. 2003-08.

**ISO 532 B:** Akustik; Verfahren zur Berechnung des Lautstärkepegels. Juli 1975.

**ISO 7196:** Akustik – Frequenzbewertungs-Charakteristik für Infraschallmessungen. März 1995.

**ISO 28961:** Akustik – Statistische Verteilung der Hörschwellenwerte von normalhörenden Personen im Alter von 18 bis 25 Jahren unter Freifeldbedingungen. 2012-01

**Jakobsen, J.:** Danish Regulation of Low Frequency Noise from Wind Turbines. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, Vol. 31, Number 4, 2012.

**Kalivoda, M., T., Steiner, J. W. (Hrsg):** Taschenbuch der Angewandten Psychoakustik. Springer Wien New York. 1998.

**Kubicek, R.:** Vorkommen, Messung, Wirkung und Bewertung von extrem tieffrequentem Schall einschließlich Infraschall in der kommunalen Wohnwelt. Dissertation TH Zwickau. 1989.

**Kühner, D.:** Schallimmissionsprognosen und Messung nach TA Lärm. Zeitschrift für Lärmbekämpfung, Nr. 46, 1999.

**Kurze, U. J.:** Noise reduction by barriers. Journal Acoustic Society America. Vol. 55. Nr. 3. März 1974.

**Laird, D. A., Coye, K.:** Psychological measurements of annoyance as related to pitch and loudness. J. Acoust. Soc. Am. 1 (1929), 158 – 163.

**Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI):** „Hinweise zum Schallimmissionsschutz bei Windenergieanlagen“. 2005.

**Lenzen, A., Schmidt, M., Böhm, W.:** Sachkundiger für Lärm bei stationären Geräten in Wohngebieten – Texte 51/2014 : UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT – Projektnummer 30504, UBA-FB- Nr.: 001963 Dessau-Roßlau. Eigenverlag. 2014.

**Letens, U. u. a.:** „Ohrendruck, ein unterschätztes Geräuschphänomen?“ In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2011. 37. deutsche Jahrestagung für Akustik. Düsseldorf. 2011.

**Leventhall, H. G.:** Low frequency noise and annoyance. Noise & Health, 2004, 6, 59 – 72.

**Moorhouse, A.; Waddington, D.; Adams, M.:** Proposed criteria for the assessment of low frequency noise disturbance. University of Salford, DEFRA NANR45: Project report, February 2005.

**Møller, H.:** Annoyance of Audible Infrasound. Journal of Low frequency Noise and Vibration, Vol. 6, No. 1, 1987.

**Müller, G.; Möser, M.:** Taschenbuch der Technischen Akustik, 3. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg New York, 2004.

**Müller-BBM GmbH:** Berücksichtigung tieffrequenter Geräusche gemäß TA Lärm in Genehmigungs-, Planfeststellungs- und Baugenehmigungsverfahren. Mustergutachten und Handlungsanleitung. Angefertigt für das Staatliche Umweltamt Kiel. Bericht Nr. 44 932 / 7. 13.02.2001.

**Pietz, I.:** Gegenüberstellung theoretisch erwartbarer und messtechnisch erhobener Eigenschaften tieffrequenter Schallausbreitung im Freifeld – untersucht an Beispielen limitierter 75 Hz-Schallwellen aus Blockheizkraftwerken (BHKW) von Biogasanlagen. Hochschule Mittweida, Fachbereich Mathematik, Physik, Informatik. Diplomarbeit. Mittweida. 2007.

**Piorr, D. :** Müssen Emissionsdaten für die Planung von Quellen, die nachts betrieben werden sollen, auch nachts erhoben werden?, DAGA München. 2005).

**Reichardt, W.:** Grundlagen der Elektroakustik. Akademische Verlagsgesellschaft. Leipzig. 1960.

**Reinicke, W. u.a.:** Schallabstrahlung von Schornsteinen, Messung und technische Möglichkeiten zu ihrer Minderung. Forschungsbericht Nr.105.03.301 Umweltbundesamt, Berlin 1981.

**Rublack, H.:** Wirkungen mechanischer Schwingungen auf den Organismus. In: Zeitschrift für gesamte Hygiene. Berlin. 24 (1978). 9. S. 649 – 666.

**Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz** (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm) vom 26. August 1998, GMBI 1998, Nr. 26, S. 503.

**Schirmer, W. u. a.:** Lärmbekämpfung, Physikalische Grundlagen und praktische Maßnahmen der Lärmbekämpfung an Maschinen und in Produktionsanlagen. Verlag Tribüne. Berlin. 1971.

**Schönflug, A.:** Individuelle Unterschiede der Leistungsbeeinflussung durch Schall bei Feinmontagetätigkeiten. Diss. A, TU Dresden, 1978.

**Schmidt, M.:** Schallschutzmaßnahmen. In: Handbuch des Seminars „Schallschutz bei Industrieanlagen – Grundlagen für die Planung und Ausführung“ der Firma Müller-BBM. Eigenverlag. Planegg. 2015.

**Schmidt, M.:** Forschungsprojekt zu Kurven gleicher Lautstärke für DIN 45680 Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft. Abschlussbericht Nr. M111460/04. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. VDI Verein Deutscher Ingenieure, Berlin. März 2015.

**Schmidt, M.:** Auftreten und Bewerten tieffrequenter Geräusche am Arbeitsplatz – ein funktionaler Ansatz für praxisorientierte Mess- und Beurteilungsverfahren. Müller-BBM, DAGA. März 2014. Oldenburg.

**Schmidt, M.:** Tieffrequente Geräuschimmissionen in der Wohn- und Arbeitsumwelt – Wirkung, Messung, Beurteilung, Minderung. Handbuch zur Fachtagung „Lärmschutz“, Müller-BBM Eigenverlag. Planegg. 2014.

**Schmidt, M.:** Auftreten und Wirkung tieffrequenter Geräusche am Arbeitsplatz – Stand des Wissens und Empfehlungen für die Praxis. Abschlussbericht. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Dortmund/Berlin. 2013.

**Schmidt, M.:** Methoden zur Einhaltung von Auslöse- und maximalen Expositionswerten zum Lärm. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) Dortmund. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben F1898. Dortmund/Berlin. 2011.

**Schmidt, M.:** Die kombinierte Wirkung des Lärms und der Ganzkörperschwingungen auf das Gehör des Landmaschinenfahrers. Zeitschrift für Lärmbekämpfung, Band 39 (1992), Nr. 2, S. 43 – 51.

**Schulze, Ch.; Hübelt, J.:** Ermittlung der Geräuschemissionen und Möglichkeiten zur Lärminderung bei Luft-Wasser-Wärmepumpen, Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH, Blumenstraße 80, 01307 Dresden1 ILK Dresden – Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden2, im Auftrag des UMWELTBUNDESAMTES Dessau-Roßlau. 2014.

**Tröger, T.:** Untersuchung der Eigenschaften von tieffrequenten Geräuschemissionen bei Blockheizkraftwerken (BHKWs) zur Formulierung spezifischer Nebenbestimmungen des tieffrequenten Lärmschutzes im baurechtlichen und immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren. Hochschule Mittweida, Fachbereich Mathematik, Physik, Informatik. Diplomarbeit. Mittweida. 2009.

**Thüringer Landesamt für Umwelt und Geologie:** Ansatz für die Schallimmissionsprognose tieffrequenter Geräusche, Eigenverlag, Jena, 2013.

**Twardella, D.:** Bedeutung des Ausbaus der Windenergie für die menschliche Gesundheit. Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit. UMID 3. München. 2013.

**Umweltbundesamt (UBA):** Machbarkeitsstudie zu Wirkungen von Infraschall. Entwicklung von Untersuchungsdesigns für die Ermittlung der Auswirkungen von Infraschall auf den Menschen durch unterschiedliche Quellen. Juni 2014.

**Unterausschuss NA 001-02-03-19 UA „Schallausbreitung im Freien“, NALS im DIN und VDI:** Dokumentation zu Schallausbreitung, Interimsverfahren zur Prognose der Geräuschemissionen von Windkraftanlagen, Fassung 2015-05.1, 2015.

**VDI 2058 Blatt 1:** Beurteilung von Arbeitslärm in der Nachbarschaft. 1985-09 (zurückgezogen).

**VDI 2058 Blatt 3:** Beurteilung von Lärm am Arbeitsplatz unter Berücksichtigung unterschiedlicher Tätigkeiten. August 2014.

**VDI 2081 Blatt 1:** Geräuscherzeugung und Lärminderung in Raumluftechnischen Anlagen. Juli 2001.

**VDI 2714:** Schallausbreitung im Freien. Januar 1988 (zurückgezogen).

**VDI 2720 Blatt 1:** Schallschutz durch Abschirmung im Freien. März 1997.

**VDI 3723 Blatt 2:** Anwendung statistischer Methoden bei der Kennzeichnung schwankender Geräuschemissionen – Teil 2: Qualitätsprüfung bei der Beurteilung von Geräuschsituationen. 2006-03.

**VDI 4100:** Schallschutz im Hochbau – Wohnungen – Beurteilung und Vorschläge für erhöhten Schallschutz. Oktober 2012.

**VDI 4101 Blatt 2:** Schallausbreitung im Freien unter Berücksichtigung meteorologischer und topographischer Bedingungen – Windenergieanlagen, geplantes Dokument im Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI, Berlin 20.

**Vercammen, M.:** Setting Limits for Low Frequency Noise. Journal of Low Frequency Noise and Vibration. Vol. 8, No. 4, S. 105 – 109, 1989/1990.

**Weinzierl, S. (Hrsg.):** Handbuch der Audiotechnik, Springer-Verlag, Berlin 2008.

**Yamada, S. u. a.:** Body Sensation of Low Frequency Noise of Ordinary Persons and Profoundly Deaf Persons. Journal of Low Frequency Noise and Vibration. Vol. 2, No. 3, S. 32 – 36, 1983.

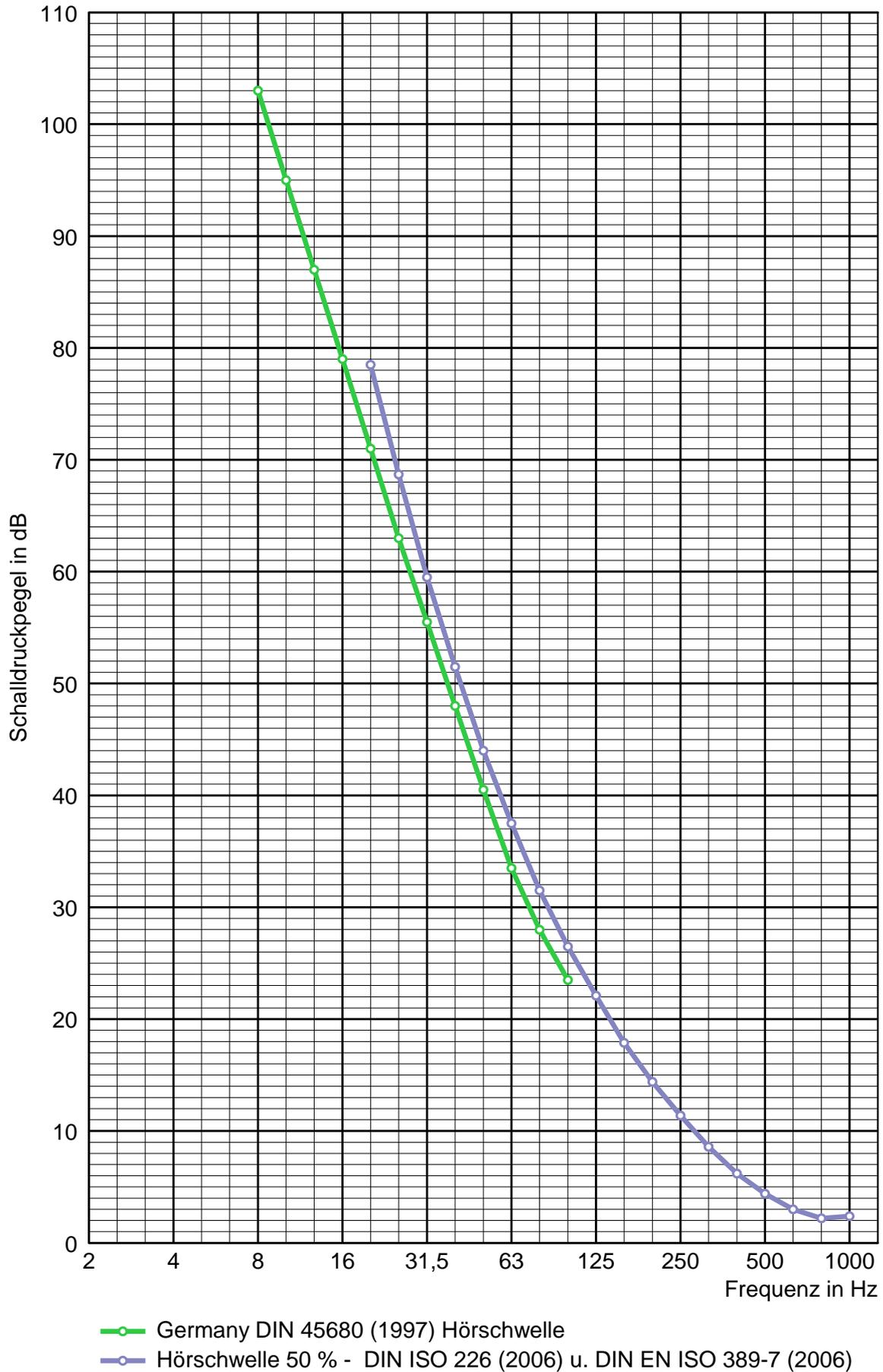
## Anhang A

**Abb. A1:** Gegenüberstellung der Hörschwellen nach *DIN ISO 226 (2006)* und der nach *DIN 45680 (1997)*

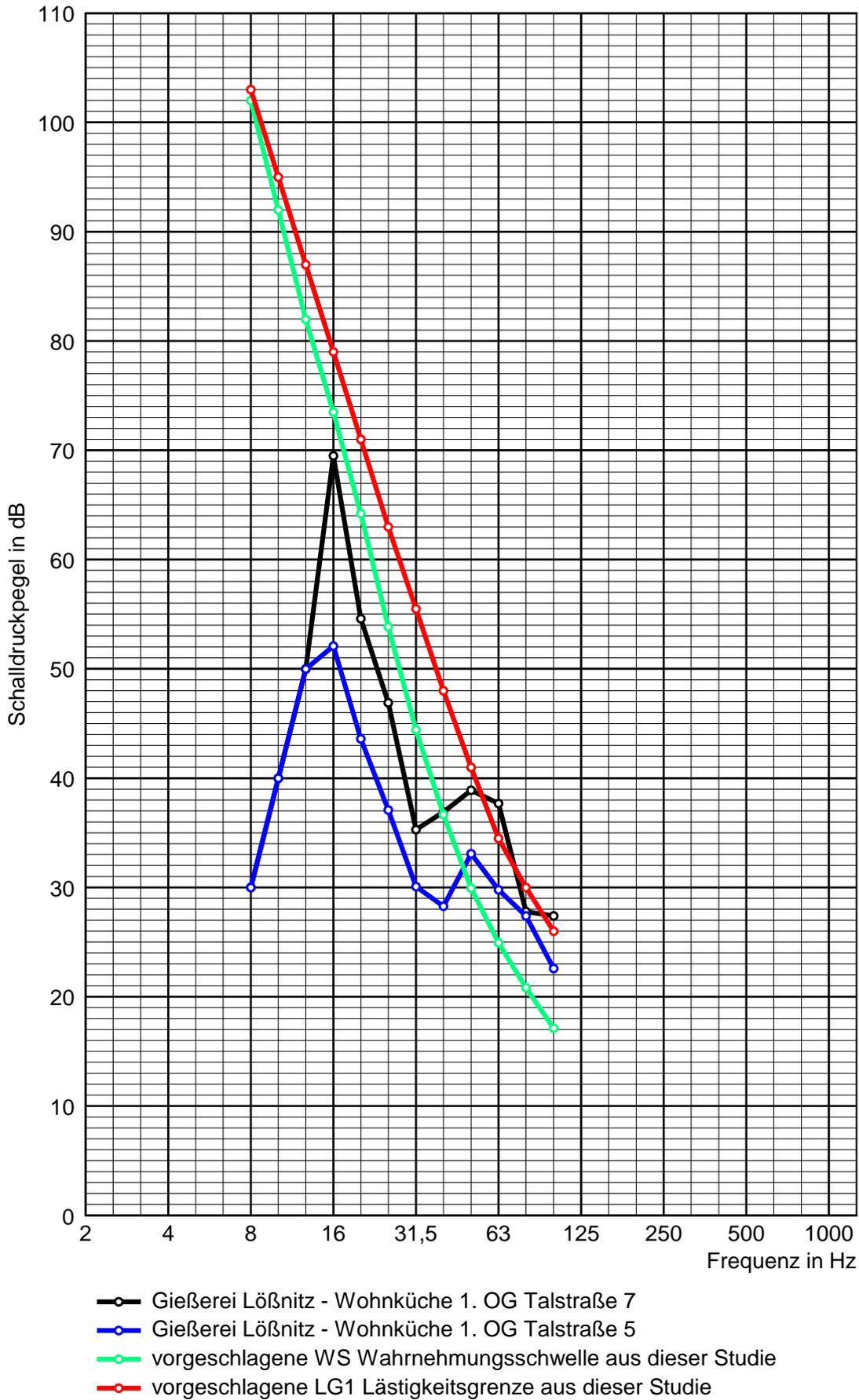
**Abb. A2 bis Abb. A10:** Eigene und aus der Literatur ausgewertete Messergebnisse von tieffrequenten Geräuschemissionen im Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz in Räumen

**Tab. A1:** Normfrequenzen nach DIN EN ISO 266

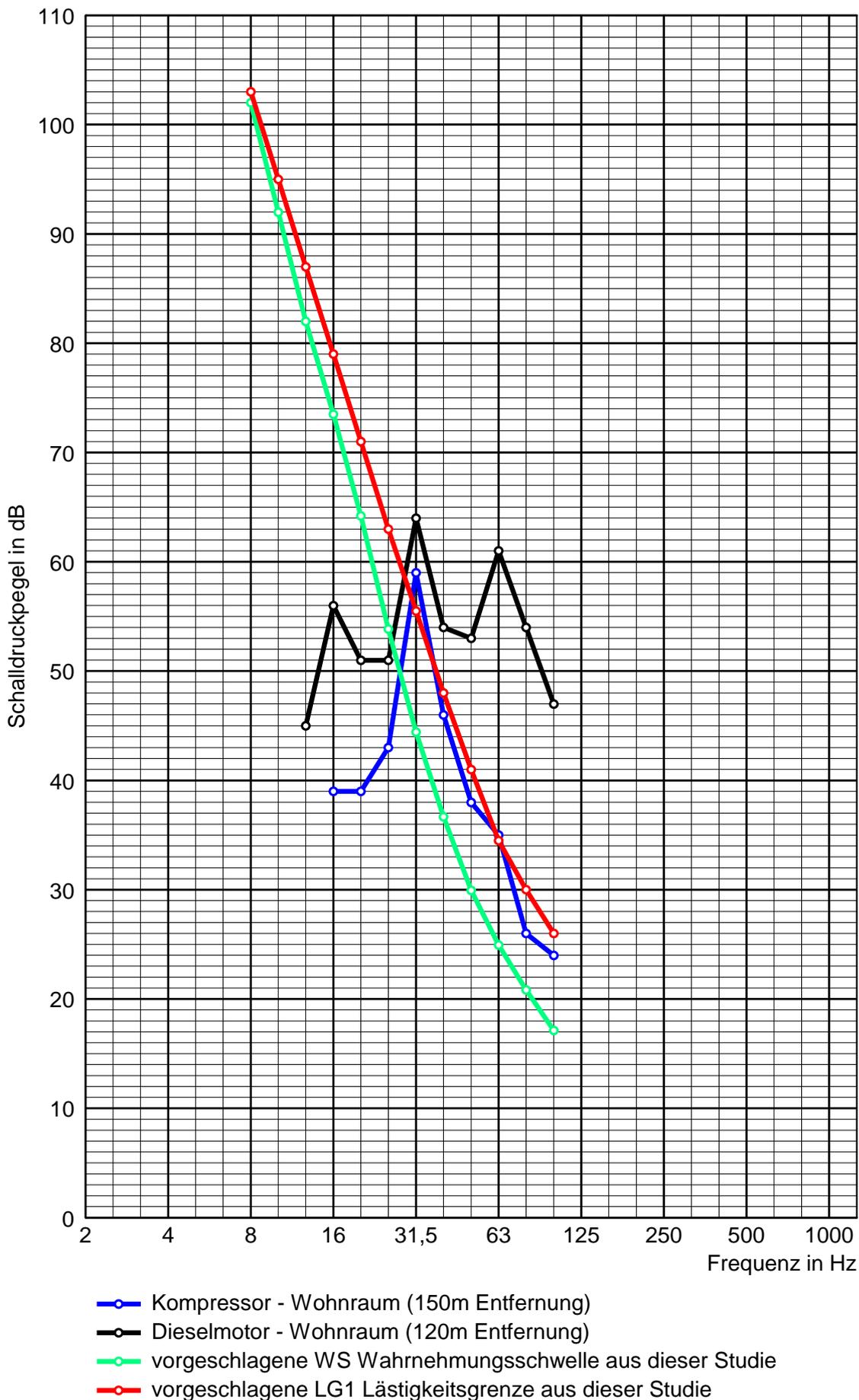
**Tab. A2:** Terzschalldruckpegel, der in dieser Studie vorgeschlagenen Wahrnehmungsschwelle WS und der Lästigkeitsgrenze LG1 zur Beurteilung der Wahrnehmung und Lästigkeit von Einzeltönen, tonhaften, schmalbandigen und breitbandigen tieffrequenten Geräuschen im Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz



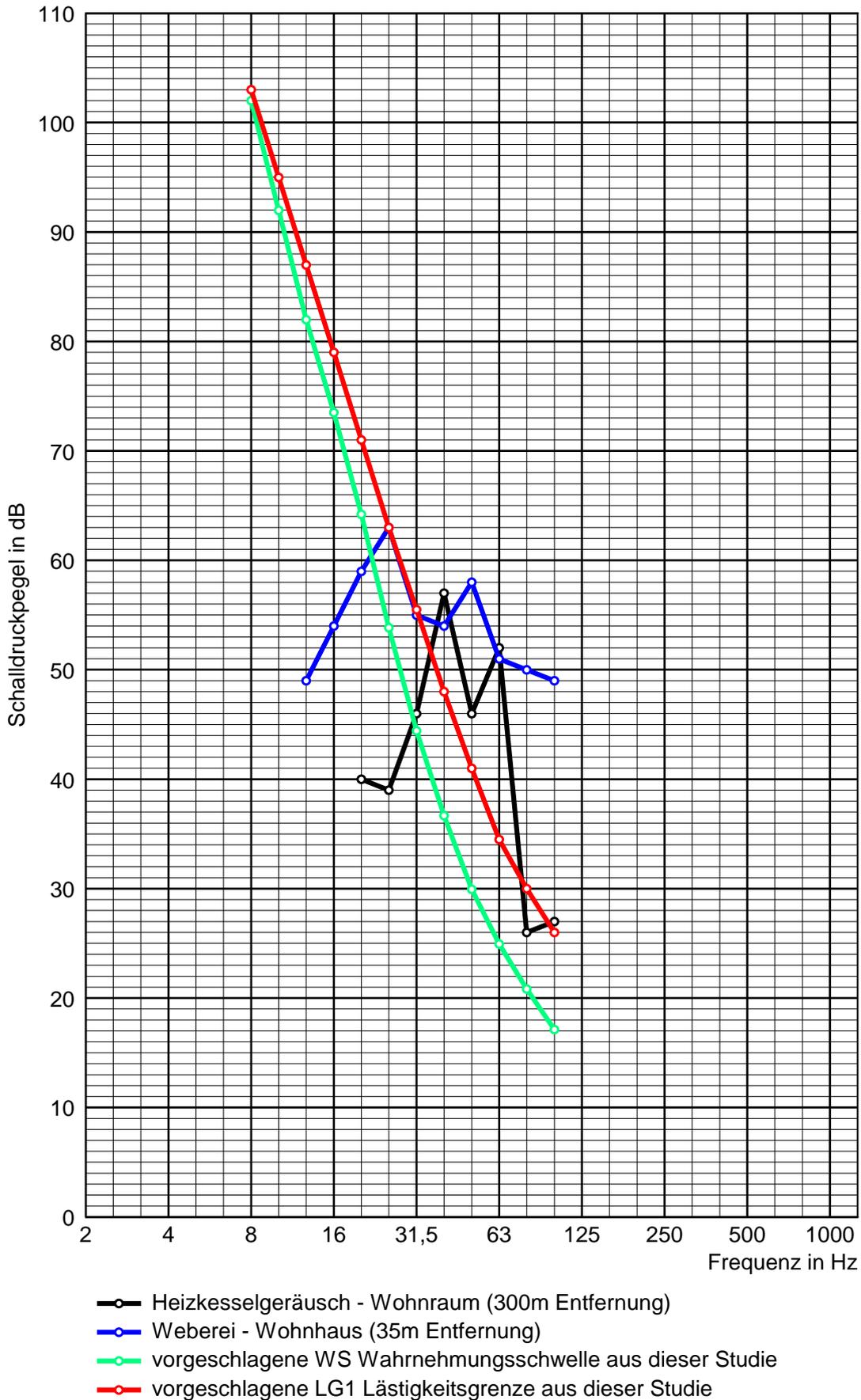
**Abb. A1** Gegenüberstellung der Hörschwellen nach *DIN ISO 226 (2006)* und der nach *DIN 45680 (1997)*



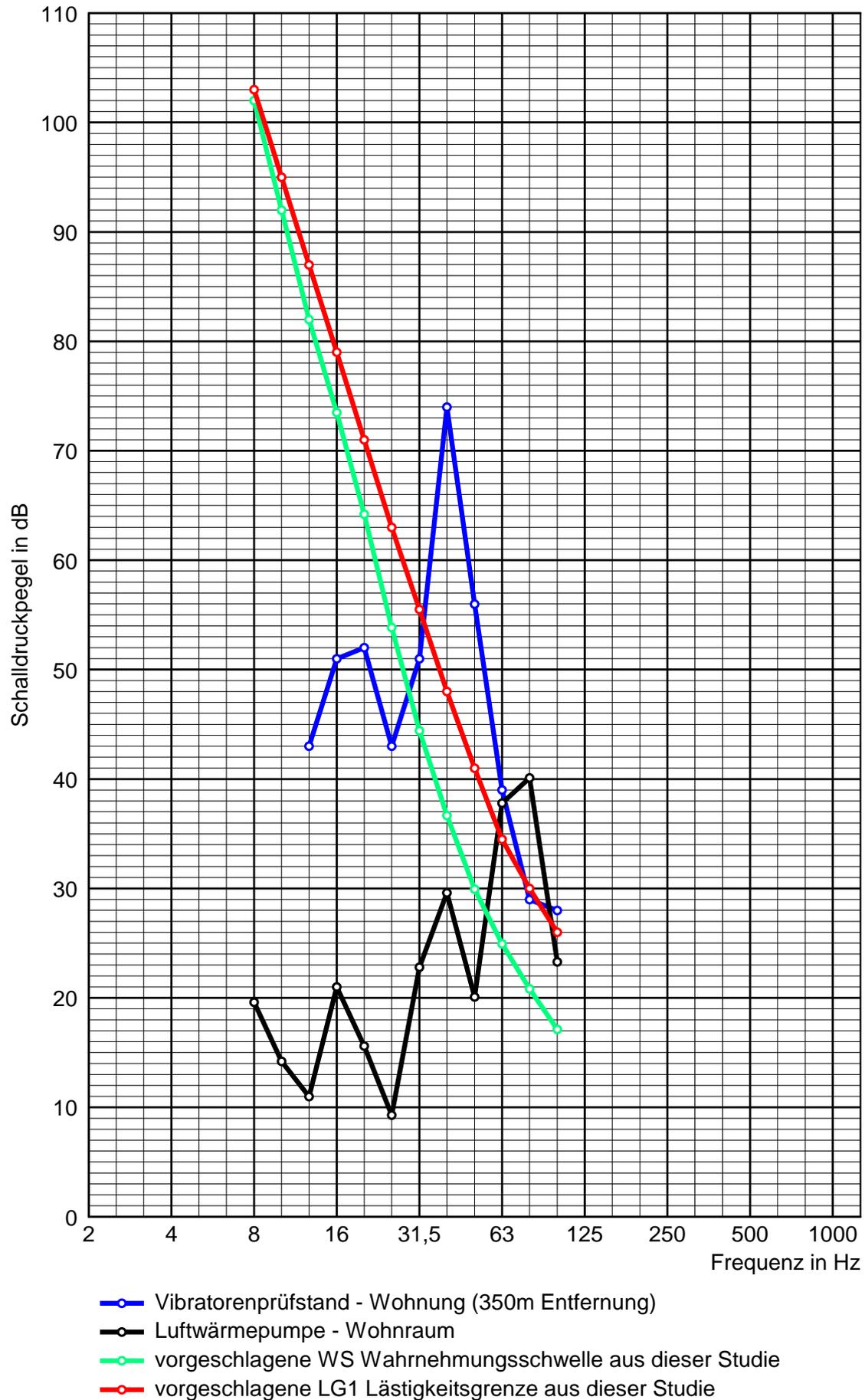
**Abb. A2** Terzschalldruckpegel von tieffrequentem Schall in einer Wohnküche im Vergleich mit der Wahrnehmungsschwelle WS und der Lästigkeitsgrenze LG1 nach dem Grenzkurvenverfahren (siehe Abschnitt 4.3.4)



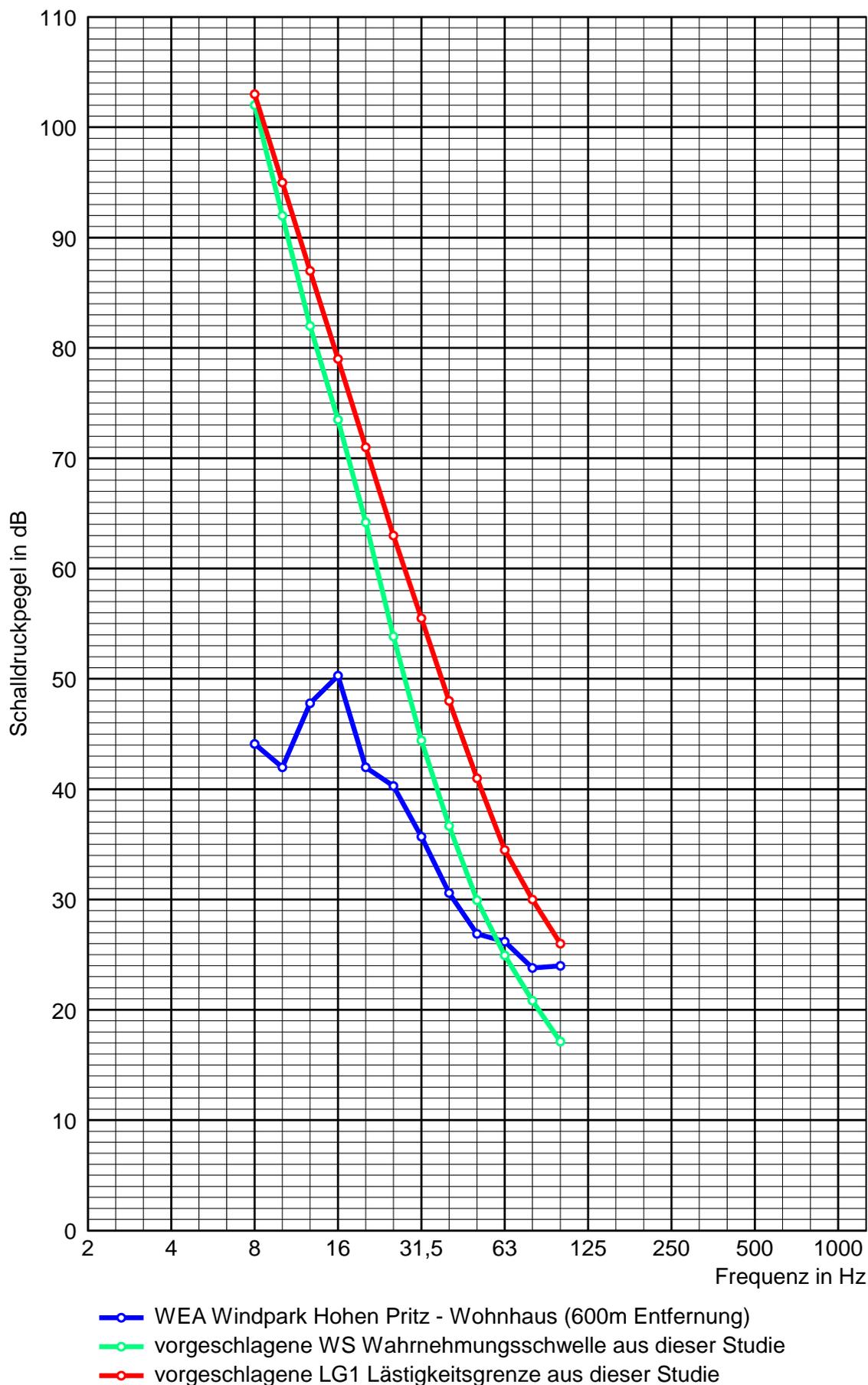
**Abb. A3** Terzschalldruckpegel von tieffrequentem Schall in Wohnräumen im Vergleich mit der Wahrnehmungsschwelle WS und der Lästigkeitsgrenze LG1 nach dem Grenzkurvenverfahren (siehe Abschnitt 4.3.4)



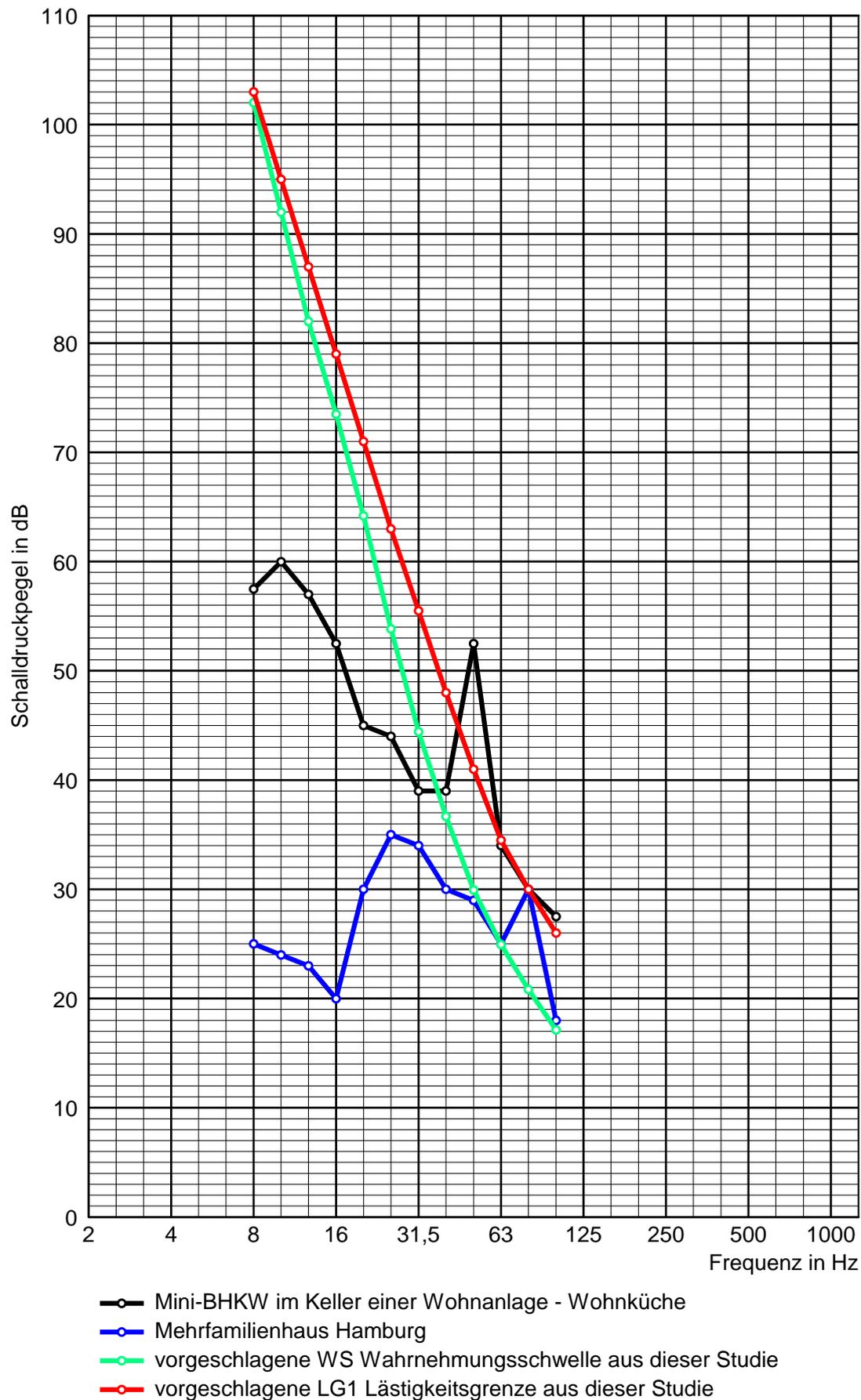
**Abb. A4** Terzschalldruckpegel von tieffrequentem Schall in Wohnräumen im Vergleich mit der Wahrnehmungsschwelle WS und der Lästigkeitsgrenze LG1 nach dem Grenzkurvenverfahren (siehe Abschnitt 4.3.4)



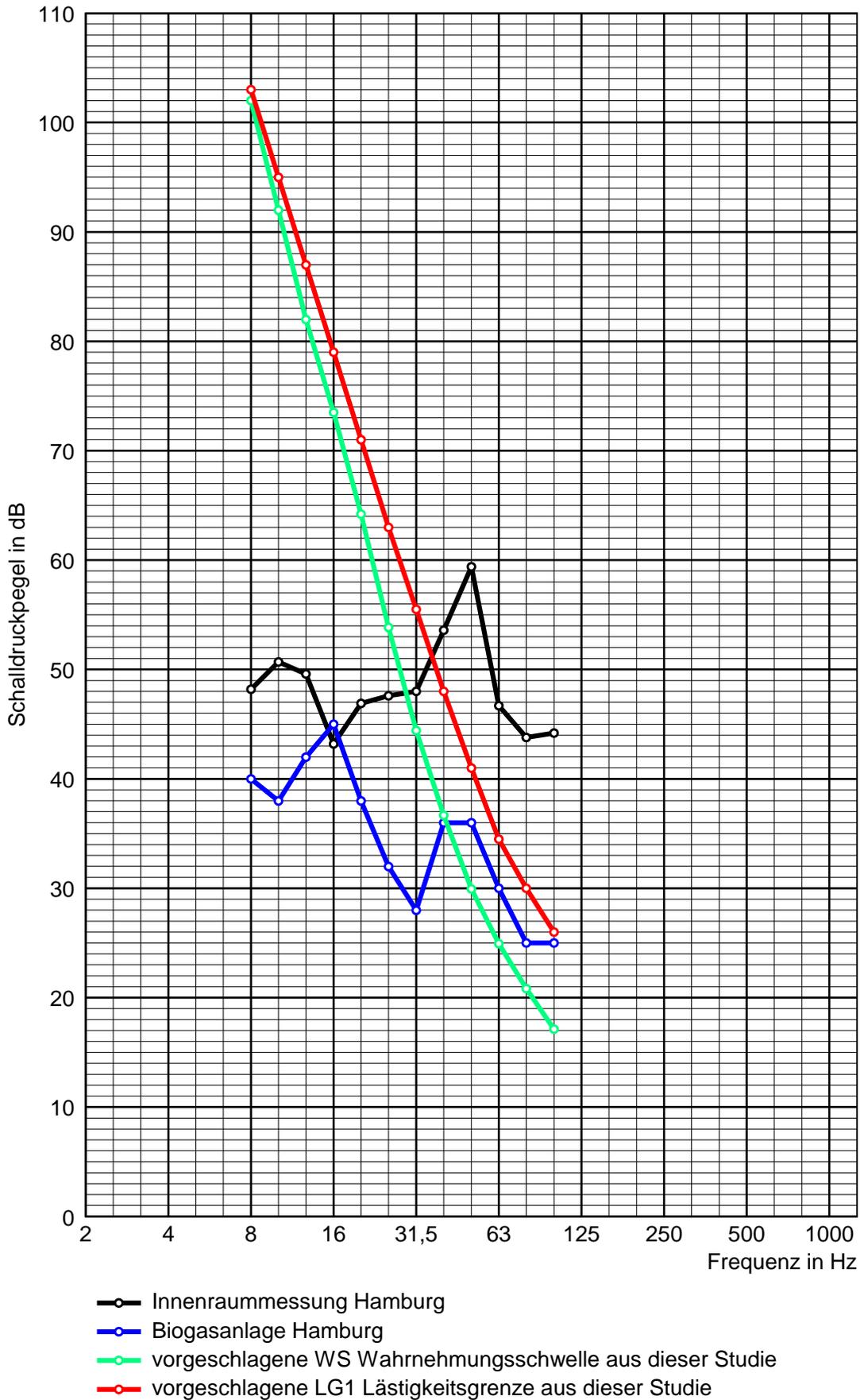
**Abb. A5** Terzschalldruckpegel von tieffrequentem Schall in Wohnräumen im Vergleich mit der Wahrnehmungsschwelle WS und der Lästigkeitsgrenze LG1 nach dem Grenzkurvenverfahren (siehe Abschnitt 4.3.4)



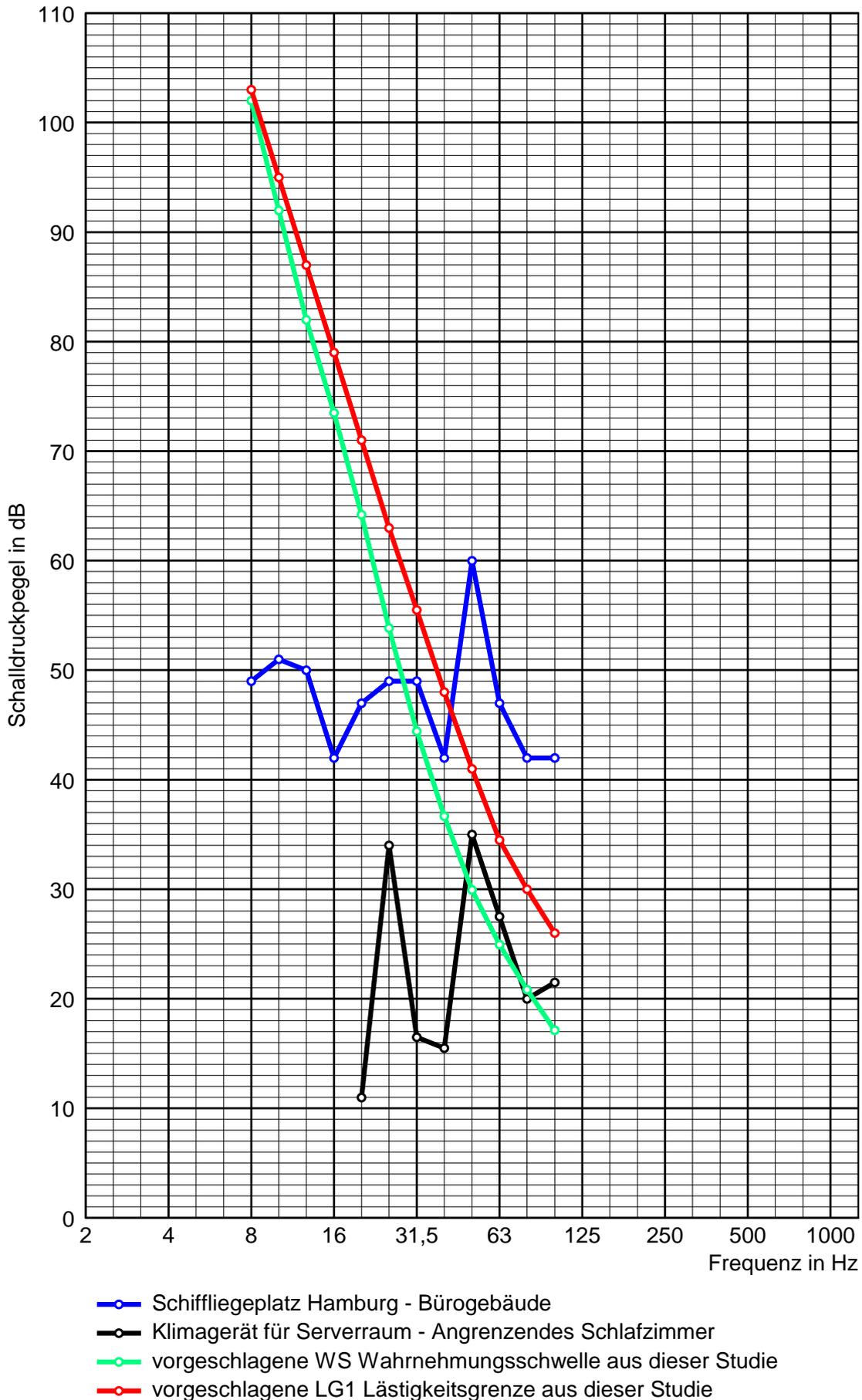
**Abb. A6** Terzschalldruckpegel von tieffrequentem Schall in einem Wohnhaus verursacht durch einen Windpark im Vergleich mit der Wahrnehmungsschwelle WS und der Lästigkeitsgrenze LG1 nach dem Grenzkurvenverfahren (siehe Abschnitt 4.3.4)



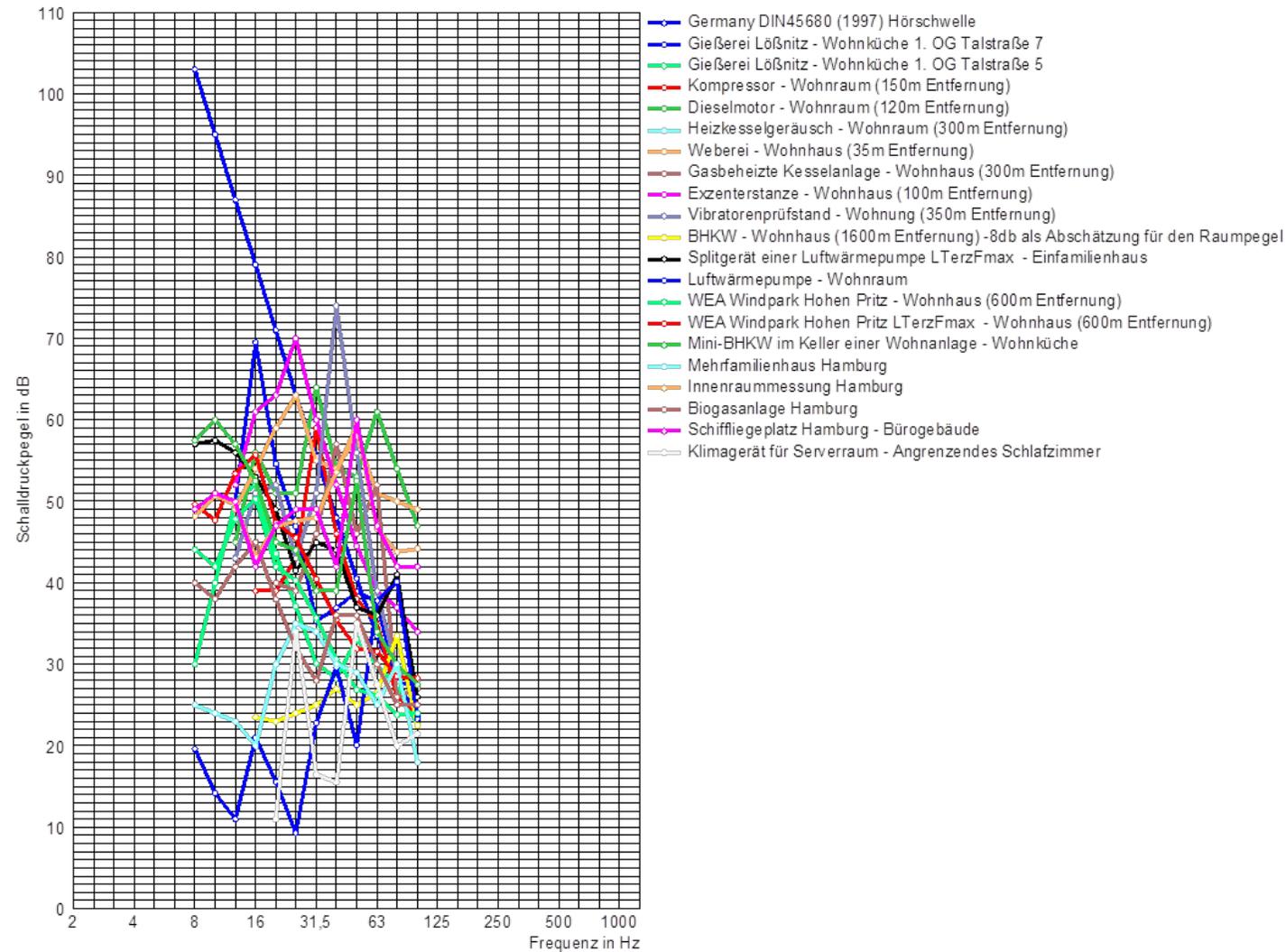
**Abb. A7** Terzschalldruckpegel von tieffrequentem Schall in einer Wohnküche und einem Wohnraum im Vergleich mit der Wahrnehmungsschwelle WS und der Lästigkeitsgrenze LG1 nach dem Grenzkurvenverfahren (siehe Abschnitt 4.3.4)



**Abb. A8** Terzschalldruckpegel von tieffrequentem Schall in Wohnräumen im Vergleich mit der Wahrnehmungsschwelle WS und der Lästigkeitsgrenze LG1 nach dem Grenzkurvenverfahren (siehe Abschnitt 4.3.4)



**Abb. A9** Terzschalldruckpegel von tieffrequentem Schall in einem Büro und einem Schlafzimmer im Vergleich mit der Wahrnehmungsschwelle WS und der Lästigkeitsgrenze LG1 nach dem Grenzkurvenverfahren (siehe Abschnitt 4.3.4)



**Abb. A10** Eigene und aus der Literatur ausgewertete 20 Beschwerdefälle zu den tieffrequenten Geräuschmissionen im Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz in Räumen zeigen, dass die am häufigsten vorkommenden *Störfrequenzen* der Geräte und Anlagen im Frequenzbereich von 16 Hz bis 100 Hz liegen. In eher wenigen seltenen Fällen liegen sie im Infraschallbereich unterhalb von 16 Hz.

Tab. A1 Normfrequenzen nach DIN EN ISO 266

Normfrequenz in Hz	Oktave	Terz
1,00	x	x
1,25		x
1,60		x
2,00	x	x
2,50		x
3,15		x
4,00	x	x
5,00		x
6,30		x
8,00	x	x
10,0		x
12,5		x
16,0	x	x
20,0		x
25,0		x
31,5	x	x
40,0		x
50,0		x
63,0	x	x
80,0		x
100,0		x
125,0	x	x
160,0		x

**Tab. A2** Terzschalldruckpegel der in dieser Studie vorgeschlagenen Wahrnehmungsschwelle WS und der Lästigkeitsgrenze LG1 zur Beurteilung der Wahrnehmung und Lästigkeit von Einzeltönen, tonhaften, schmalbandigen und breitbandigen tieffrequenten Geräuschen im Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz

<b>Terzmittenfrequenzen in Hz</b>	<b>Wahrnehmungsschwelle WS in dB</b>	<b>Lästigkeitsgrenze LG1 in dB</b>
8	102,0	103,0
10	92,0	95,0
12,5	82,0	87,0
16	73,5	79,0
20	64,2	71,0
25	53,9	63,0
31,5	44,4	55,5
40	36,7	48,0
50	30,0	41,0
63	24,9	34,5
80	20,8	30,0
100	17,1	26,0

## **Anhang B**

**Präsentationen, Teil 1 bis 3, zum Forschungsvorhaben zur  
„Messung und Prognose der Einwirkung tieffrequenter Schalle an  
Immissionsorten für DIN 45680“ vorgetragen auf der Sitzung des Arbeitskreises  
„Überarbeitung von DIN 45680“ am 23. März 2016 in Berlin**

MÜLLER-BBM

## Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“

Normenausschuss Akustik, Lärminderung und  
Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI

Berlin, am 23. März 2016

MÜLLER-BBM

## Entwicklung eines Verfahrens zur Messung und Bewertung der Einwirkung tieffrequenter Schalle an Immissionsorten Teil 1

Dr. Manfred Schmidt  
Müller-BBM GmbH

19. Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“  
Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im  
DIN und VDI, 23.03.2016, Berlin

## Inhalt

1. Ziel und Aufgabe der Untersuchung
2. Belästigung durch tieffrequenten Schall
3. Lästigkeit von tieffrequentem Schall als Grundlage für die Messung, Bewertung und Beurteilung
4. Eignung eines Grenzkurvenverfahrens
5. Eignung eines bewerteten Gesamtschalldruckpegelverfahrens
6. Vorschlag zur Messung, Bewertung und Beurteilung von tieffrequentem Schall – Bildungsregeln –

## 1. Ziel und Aufgabe der Untersuchung

MÜLLER-BBM

### Ziel und Aufgabe der Untersuchung

- Entwicklung eines „Verfahrens zur Messung und Bewertung der Einwirkung tieffrequenter Schalle an Immissionsorten“
- Schaffung der Grundlagen für eine möglichst objektive Beurteilung tieffrequenter Schalle im Frequenzbereich mit den Terzmittenfrequenzen von 8 Hz bis 100 Hz
- Erstellung der Voraussetzungen, auf deren Basis ein validiertes „Mess- und Bewertungsverfahren für tieffrequente Schalle an Immissionsorten“ in der Neufassung der DIN 45680 etabliert werden kann

23.03.2016

Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin

5

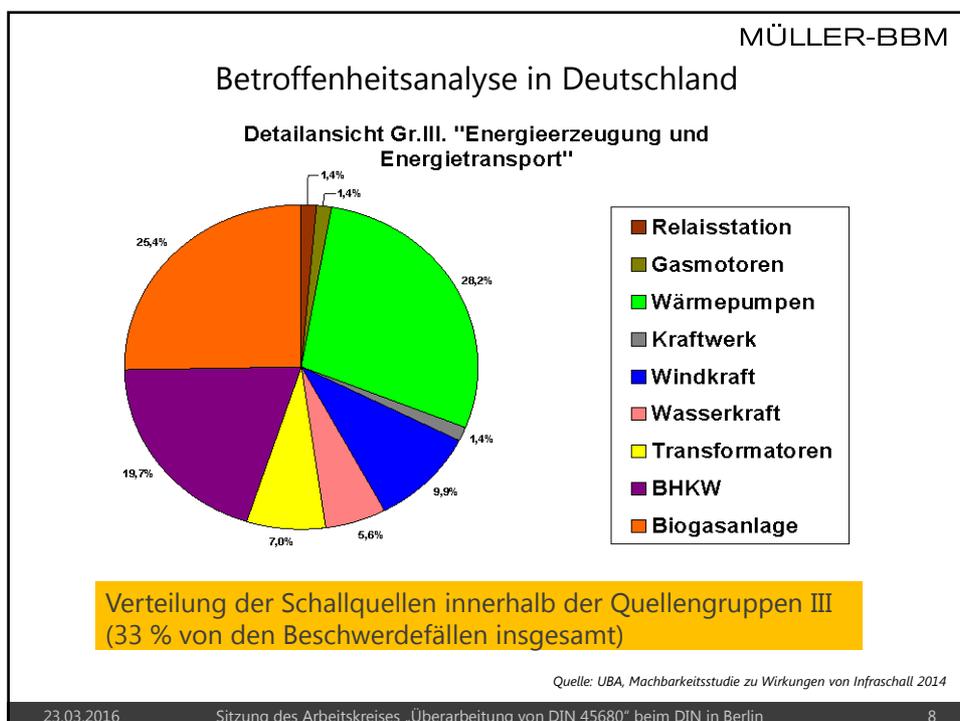
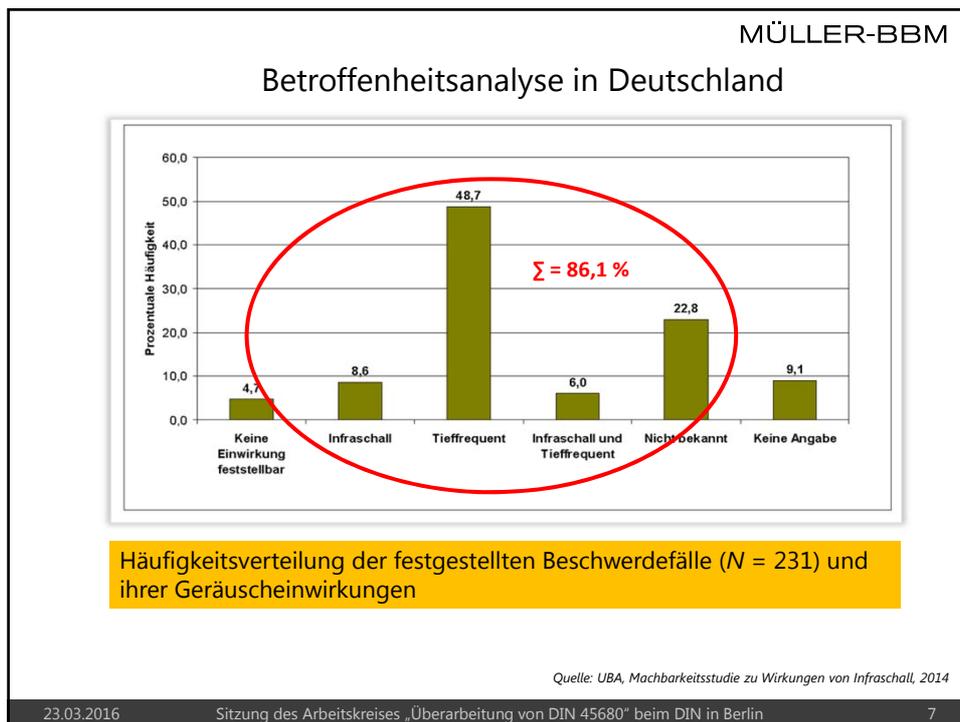
## 2. Belästigung durch tieffrequenten Schall

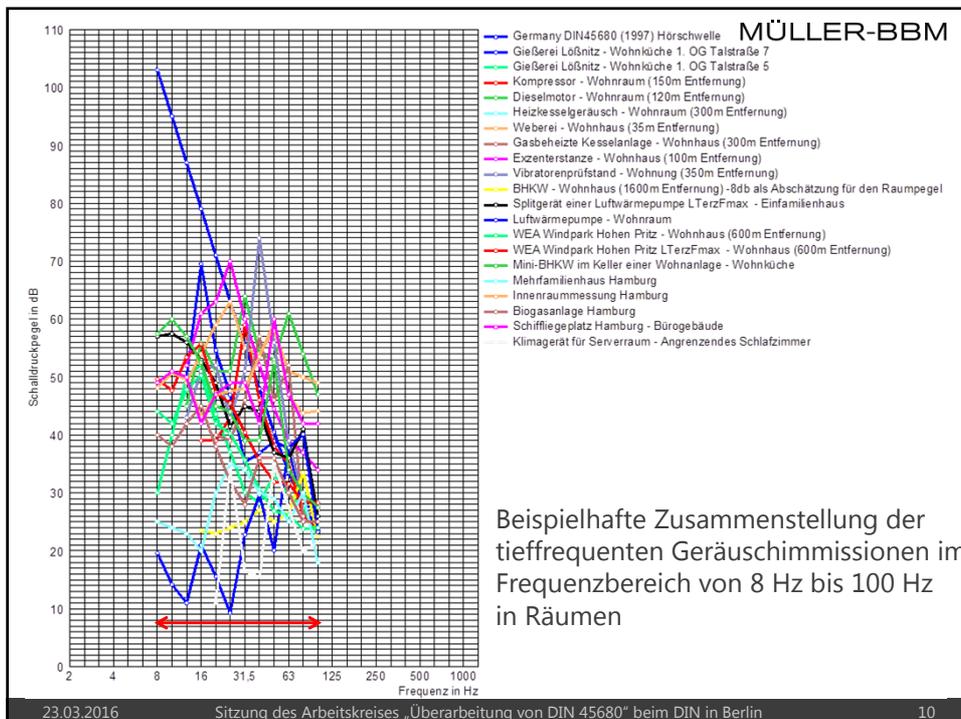
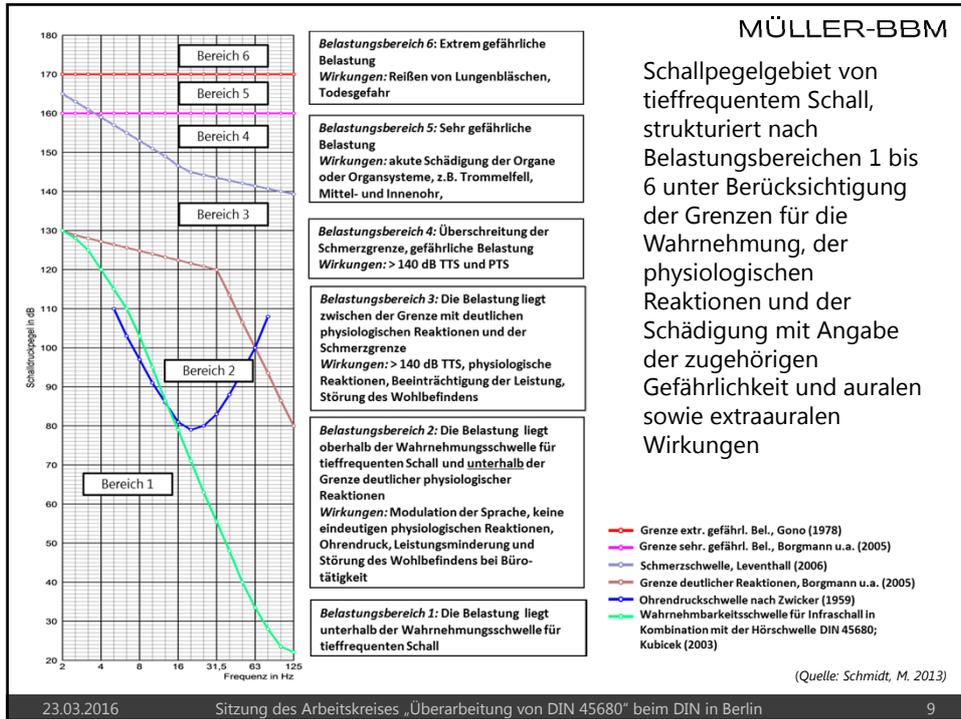
Tieffrequente Terzfrequenzspektren der Geräuschimmission in Räumen

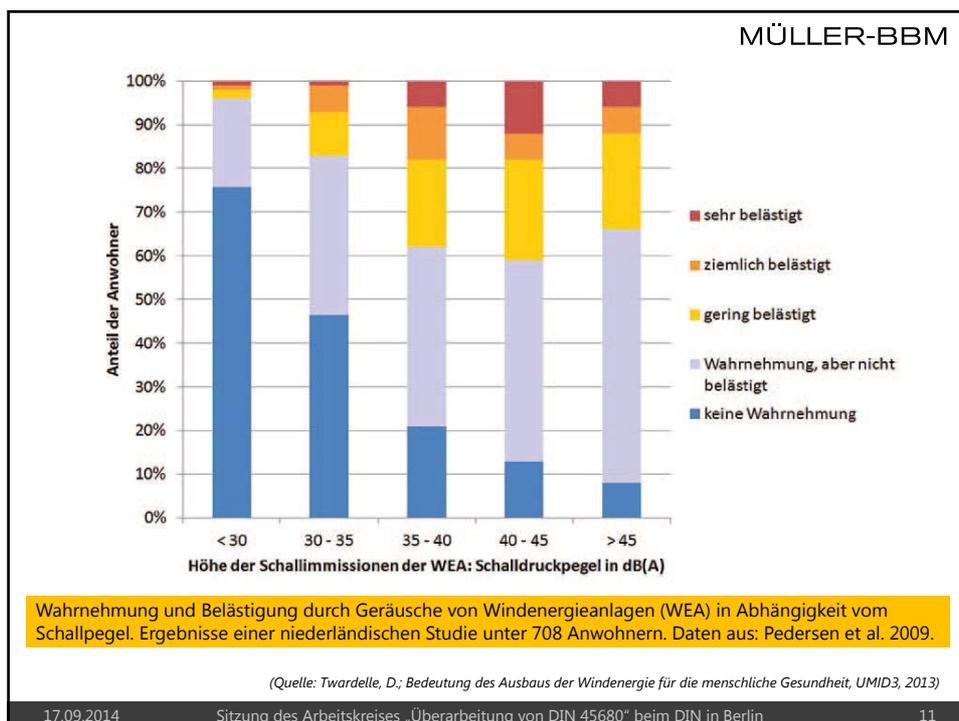
Definition der Frequenzbereiche:

Tieffrequenter Schall  $f_{\text{Terz}} = 8 - 100 \text{ Hz}$

Infraschall  $f_{\text{Terz}} < 16 \text{ Hz}$







MÜLLER-BBM

**Belästigung** besteht nicht allein aus der Reizwahrnehmung „Schall“, sondern sie kann folgende einzelne Komponenten umfassen:

- **I)** die **Lästigkeit** eines Schallreizes, wie sie in psychophysiologischen Laborexperimenten untersucht wird  
Auf der Grundlage bisheriger solcher Untersuchungen kann angenommen werden, dass die Lästigkeit durch Schall zunimmt.
- **II)** die **Emotion**, d. h. das Gefühl von Verärgerung, Belästigung oder Störung des persönlichen Wohlbefindens
- **III)** die **Störung** oder Unterbrechung von alltäglichen Aktivitäten, insbesondere Störung der Kommunikation und der Entspannung
- **IV)** psychosomatische **Symptome** wie Reizbarkeit, Gespanntheit, Kopfschmerzen u. Ä.

23.03.2016 Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin 12

## 3. Lästigkeit von tieffrequentem Schall als Grundlage für die Messung, Bewertung und Beurteilung

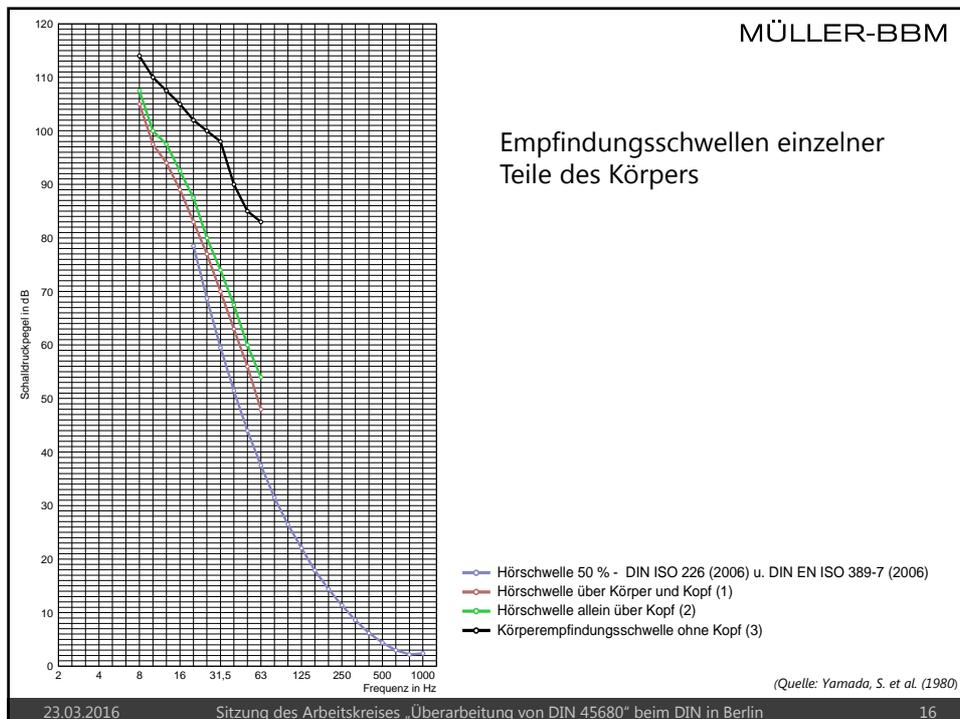
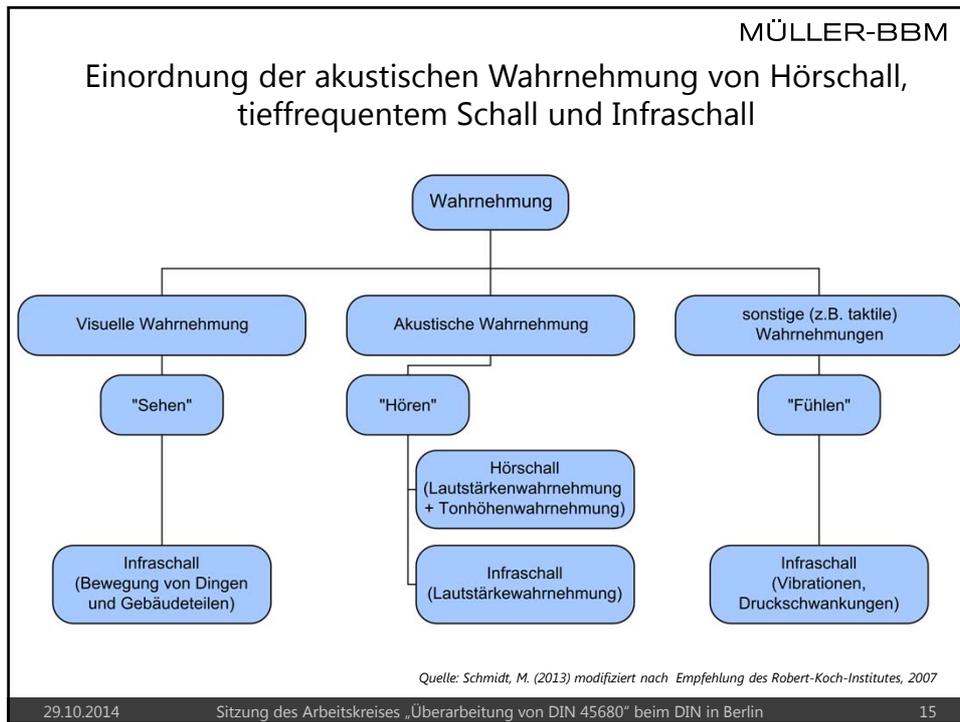
3.1 Besonderheiten der Lästigkeit

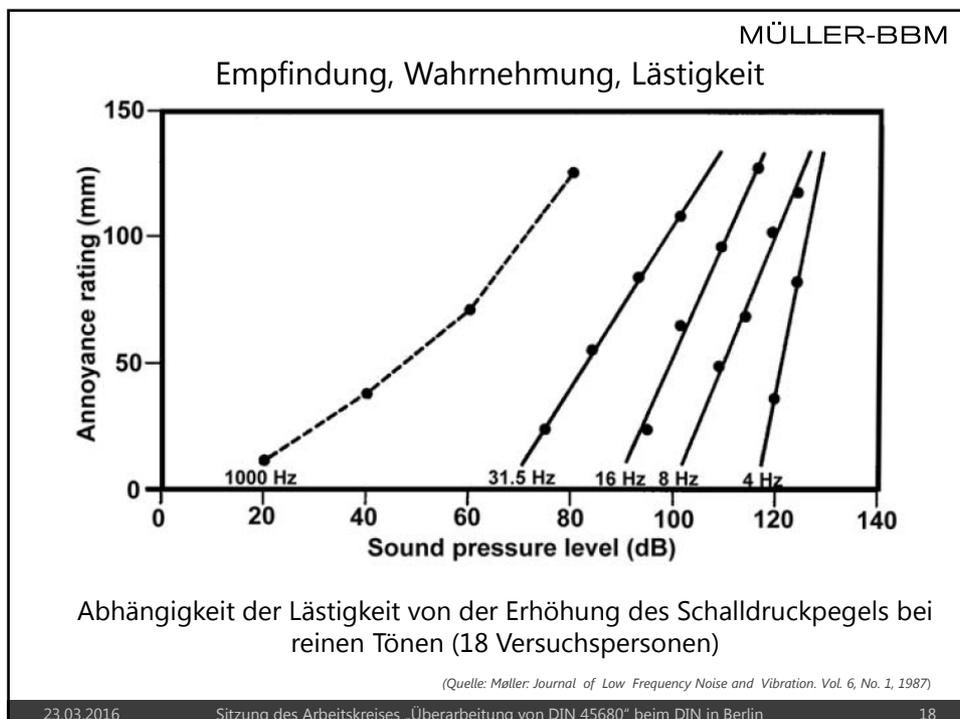
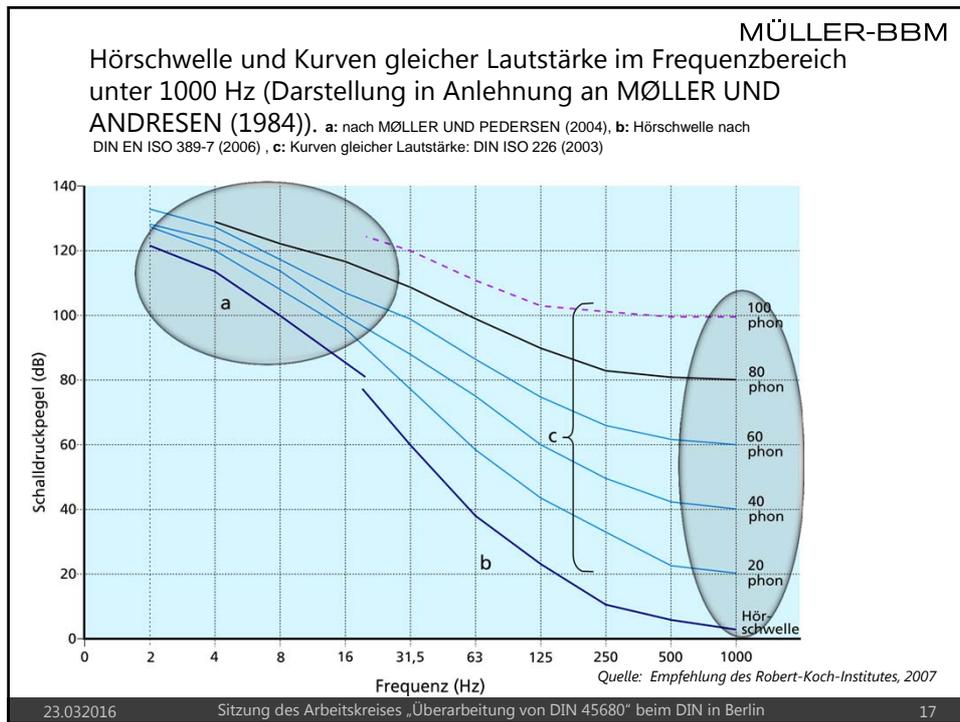
3.2 Lautstärke und Frequenzbewertung

3.3 Vergleich von Lautstärke und Lästigkeit

MÜLLER-BBM

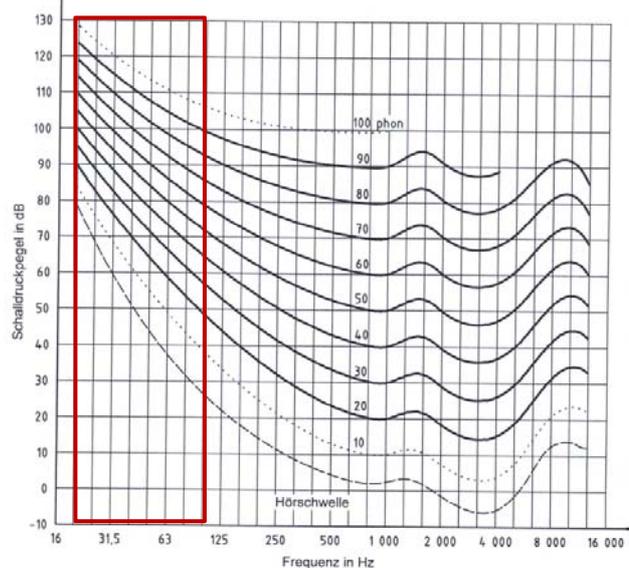
### 3.1 Besonderheiten der Lästigkeit von tieffrequentem Schall

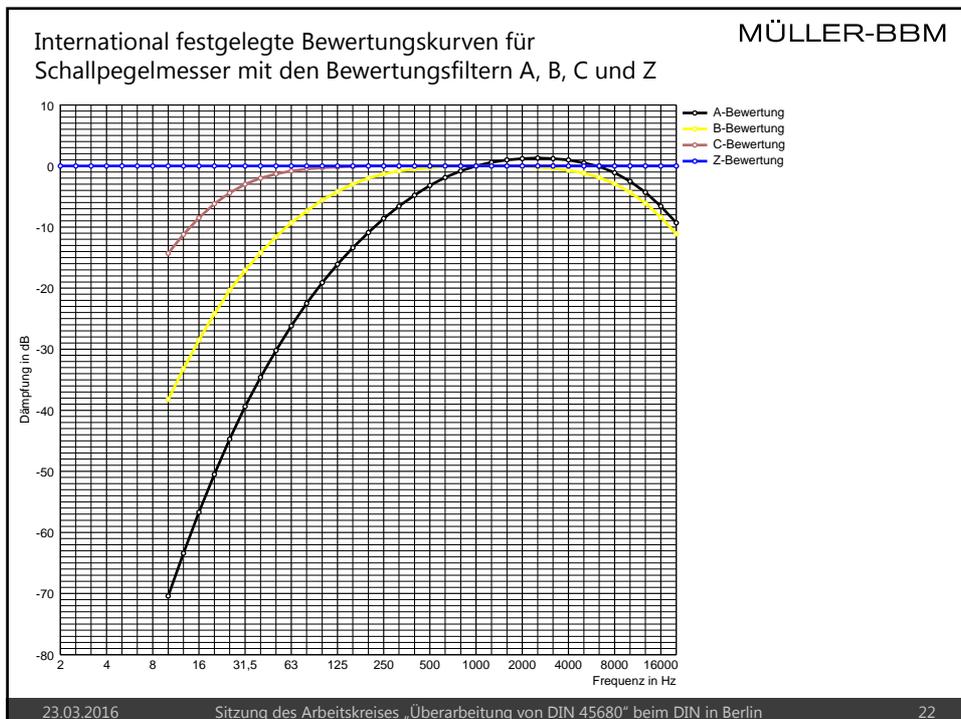
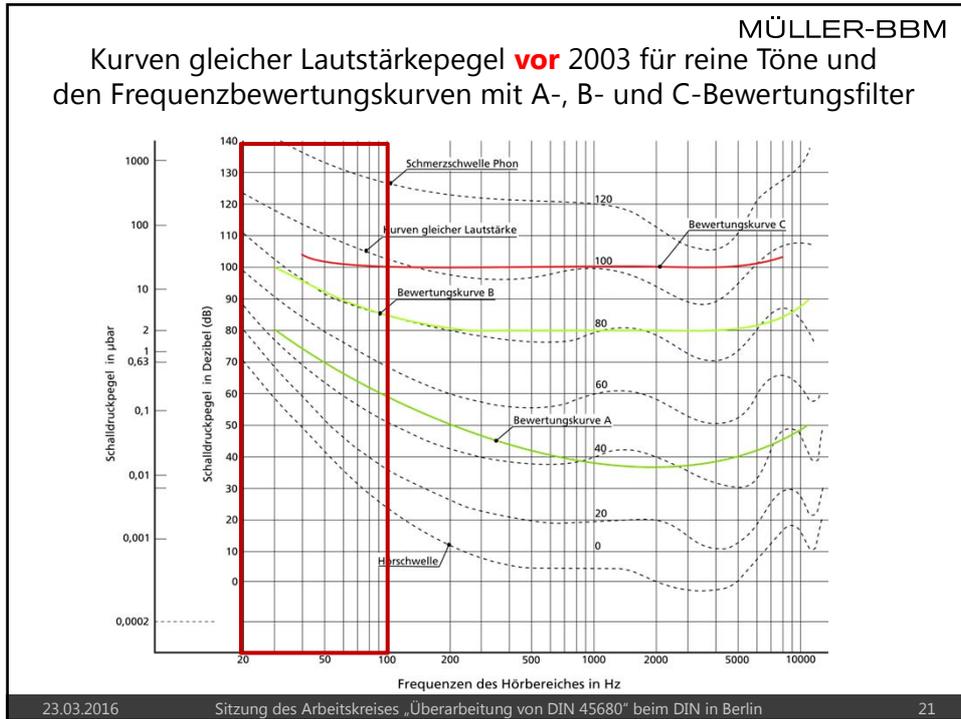


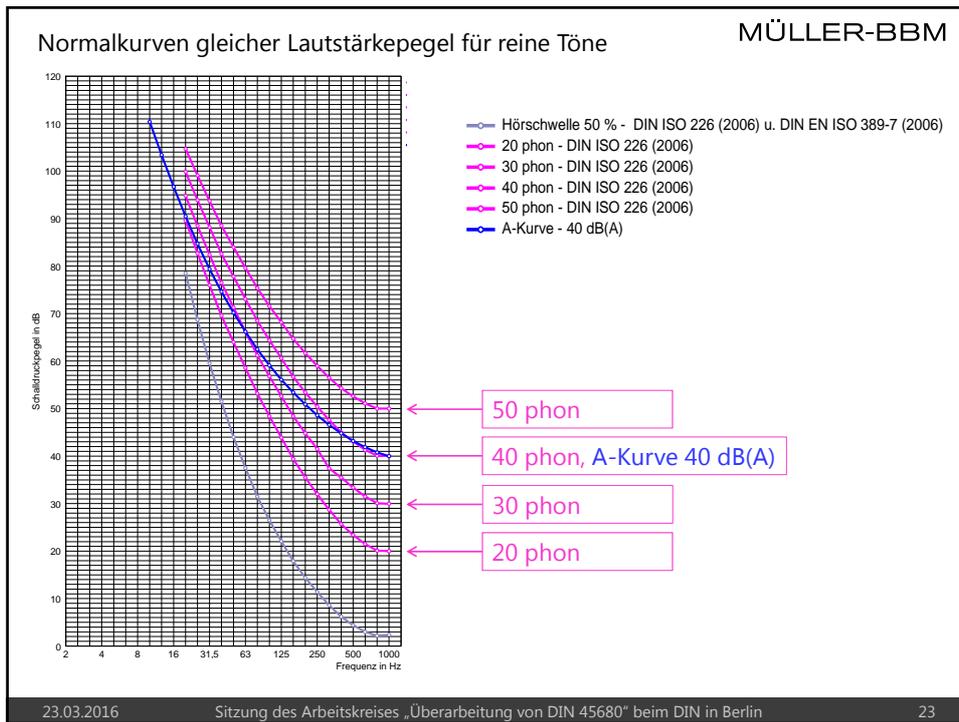


## 3.2 Lautstärke und Frequenzbewertung

Normalkurven gleicher Lautstärkepegel für reine Töne (binaurales Hören im freien Schallfeld) gemäß DIN ISO 226 (2006)







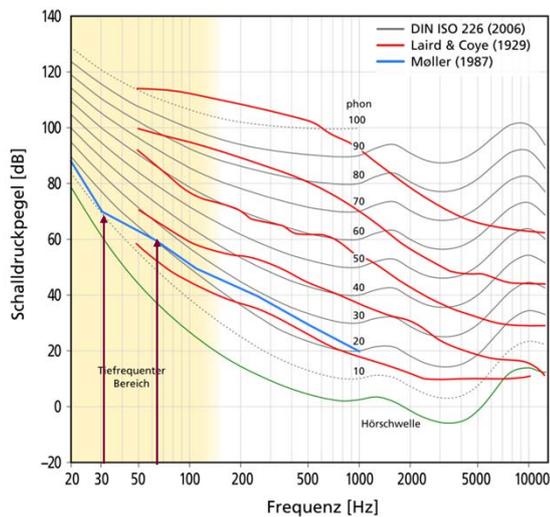
MÜLLER-BBM

## 3.3 Vergleich von Lautstärke und Lästigkeit

23.03.2016 Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin 24

## Empfindung, Wahrnehmung, Lästigkeit MÜLLER-BBM

Normalkurven gleicher Lautstärkepegel für reine Töne nach  
DIN ISO 226 (2006) und Kurven gleicher Lästigkeit



(Quelle: Schmidt, M. 2013)

23.03.201

Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin

25

## 4. Eignung eines Grenzkurvenverfahrens

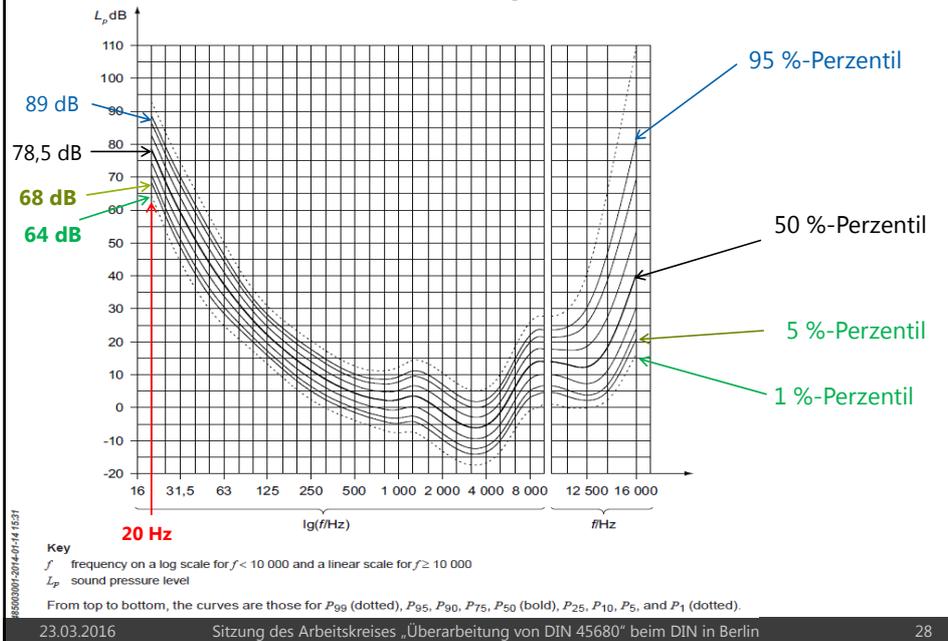
4.1 Die Hörschwelle als zentrales Kriterium zur Beurteilung von tieffrequentem Schall

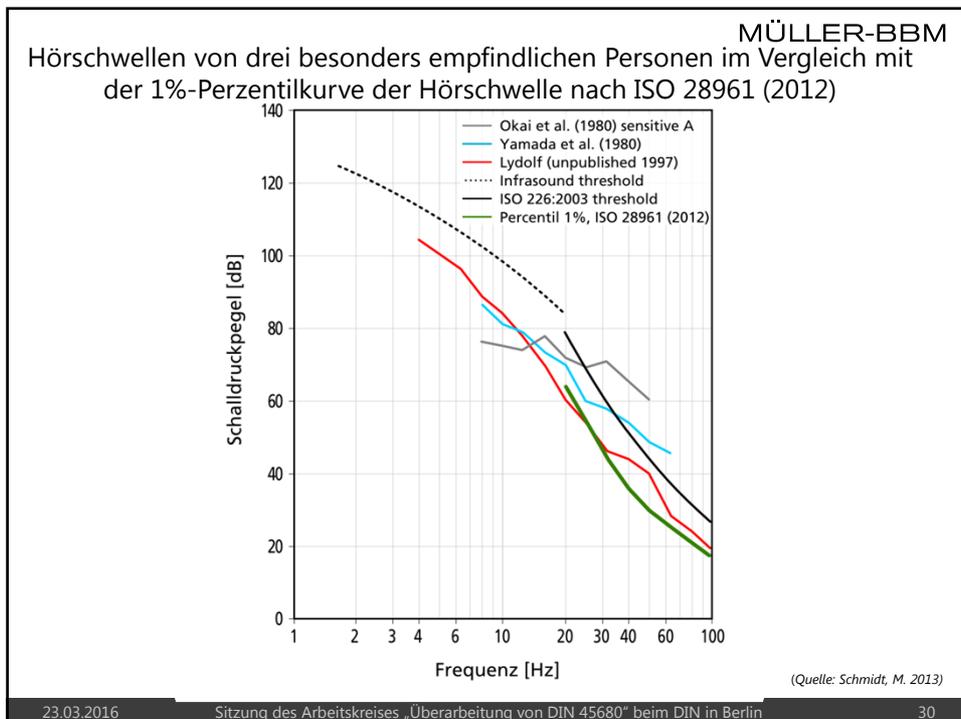
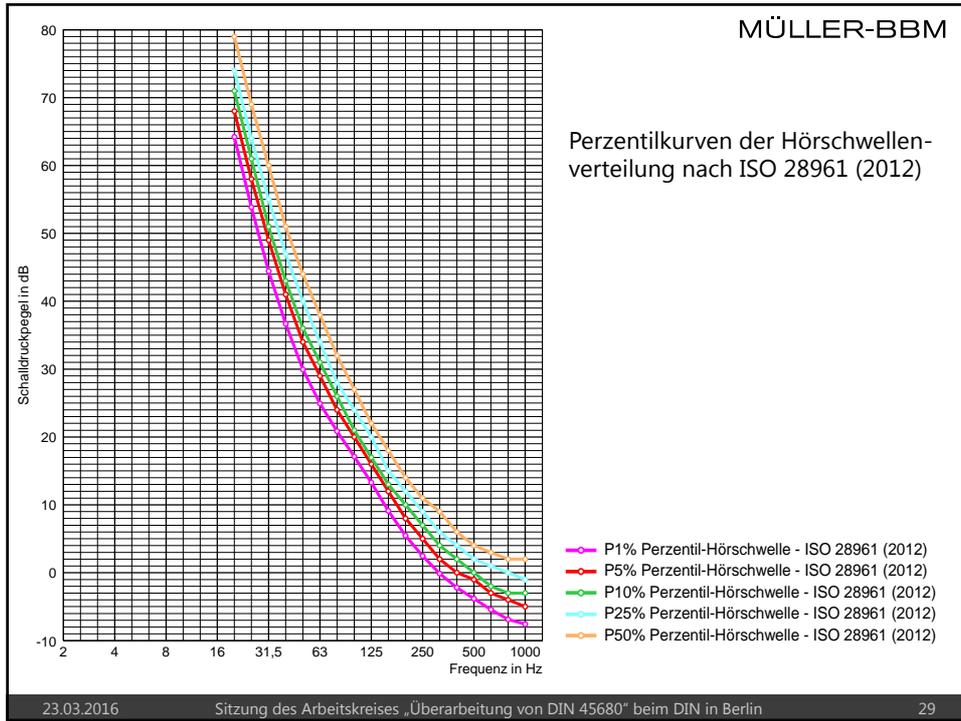
4.2 Grenzkurven zur Beurteilung der Lästigkeit

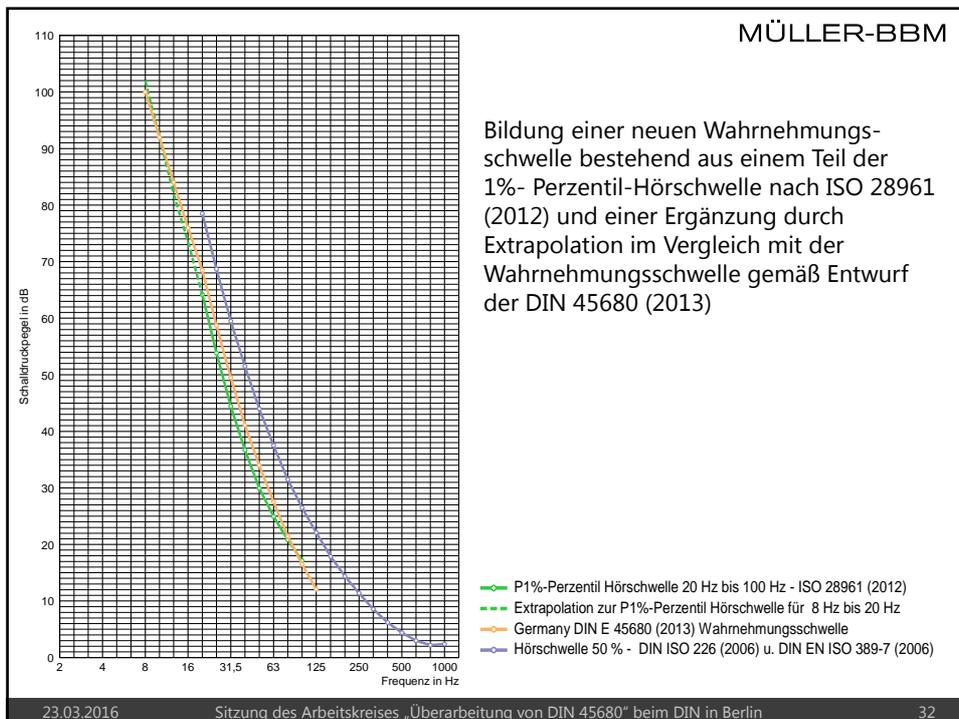
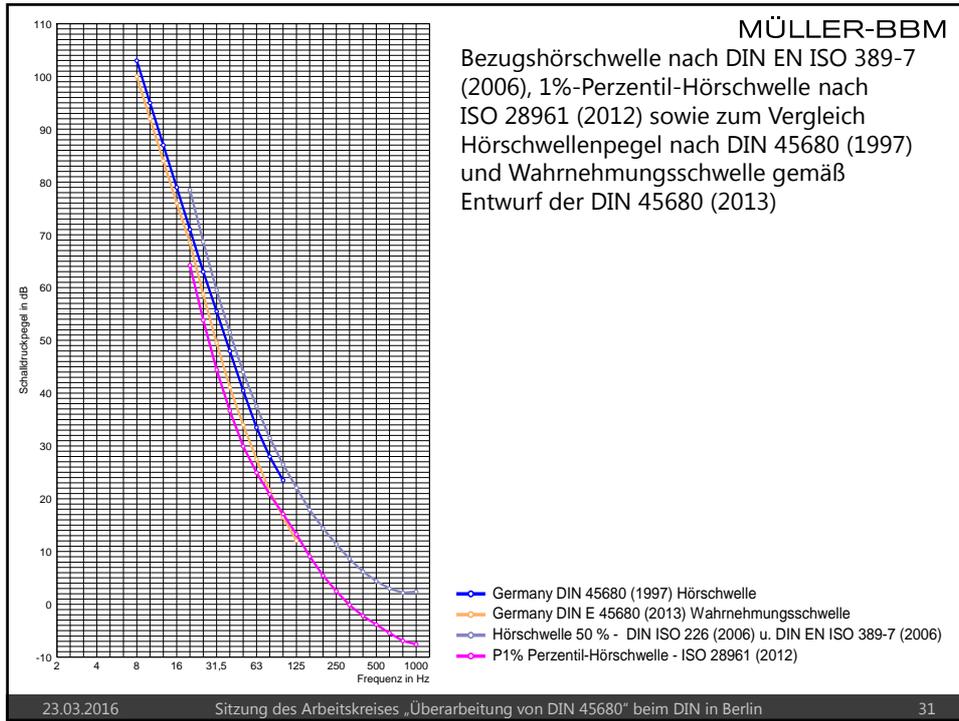
4.3 Prüfung und Beurteilung von tieffrequentem Schall auf deutlich hervortretende Einzeltöne  
– Grenzkurvenverfahren –

# 4.1 Die Hörschwelle als zentrales Kriterium zur Beurteilung von tieffrequentem Schall

Perzentilcurven der Hörschwellenverteilung nach ISO 28961 vom Januar 2012

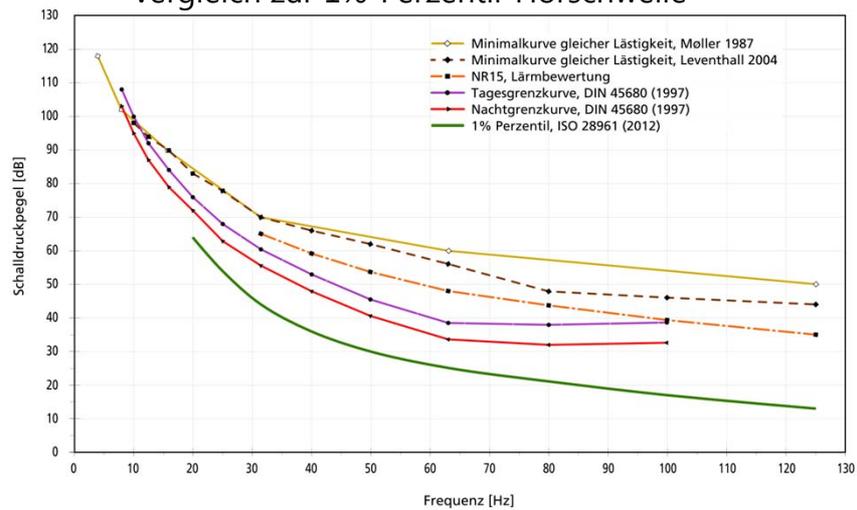




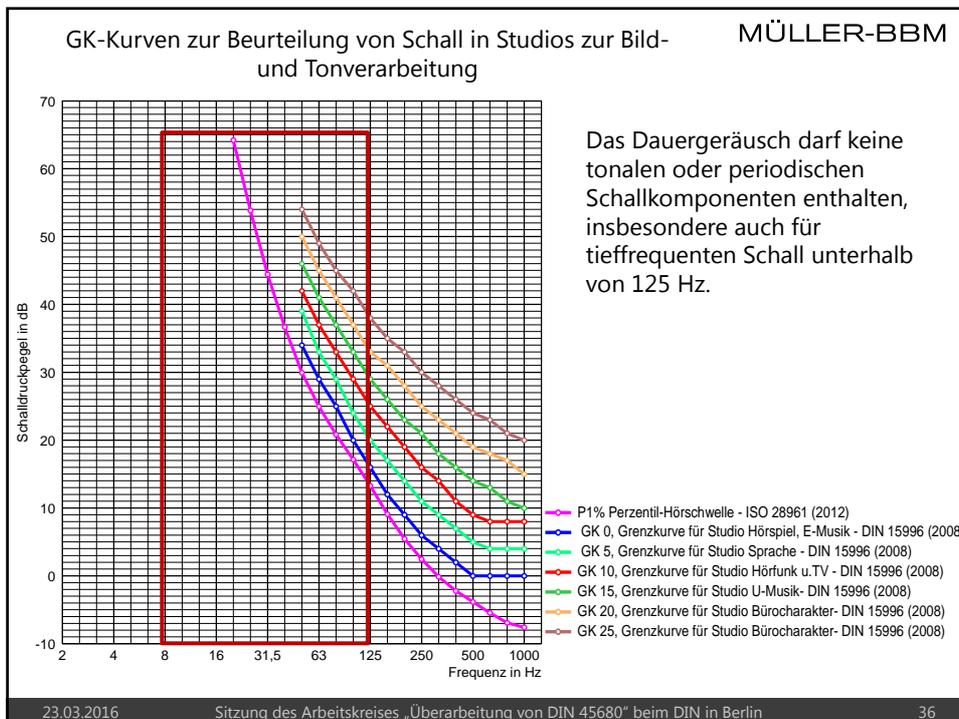
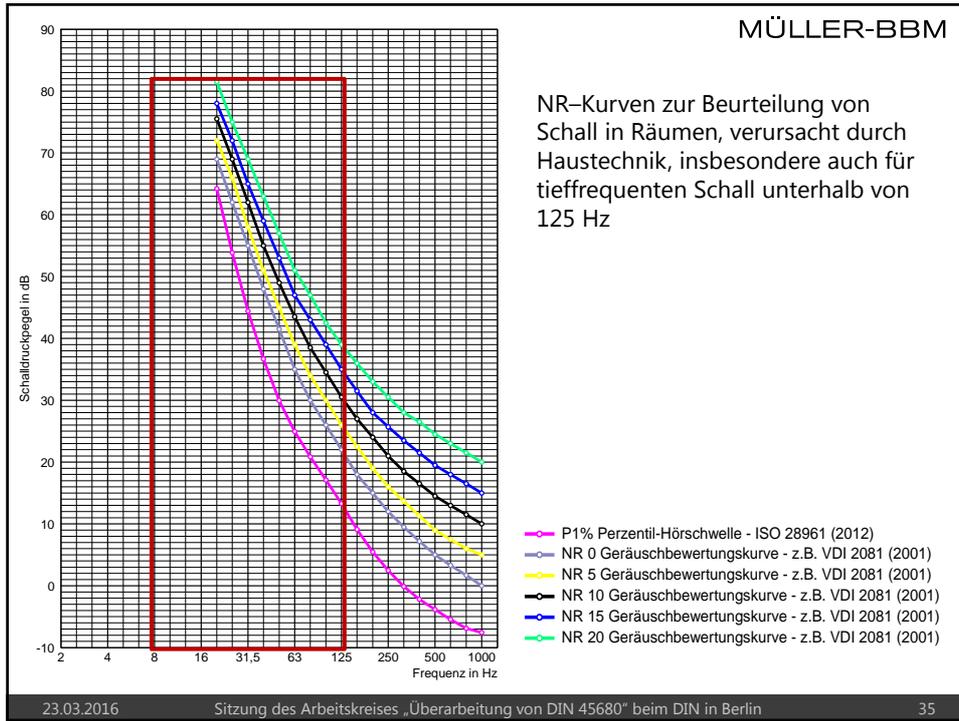


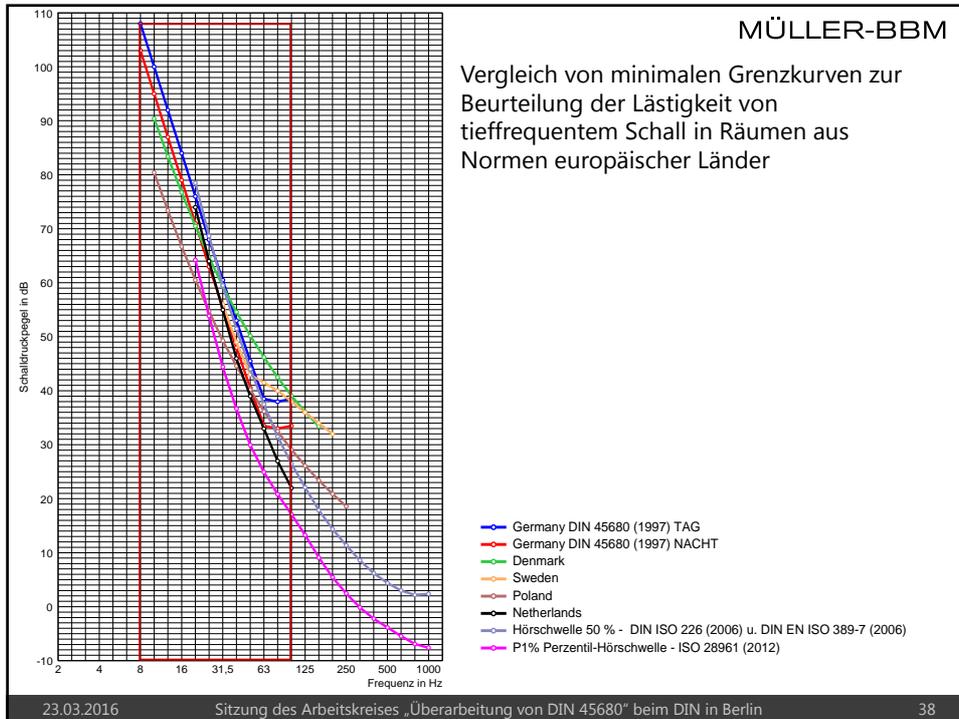
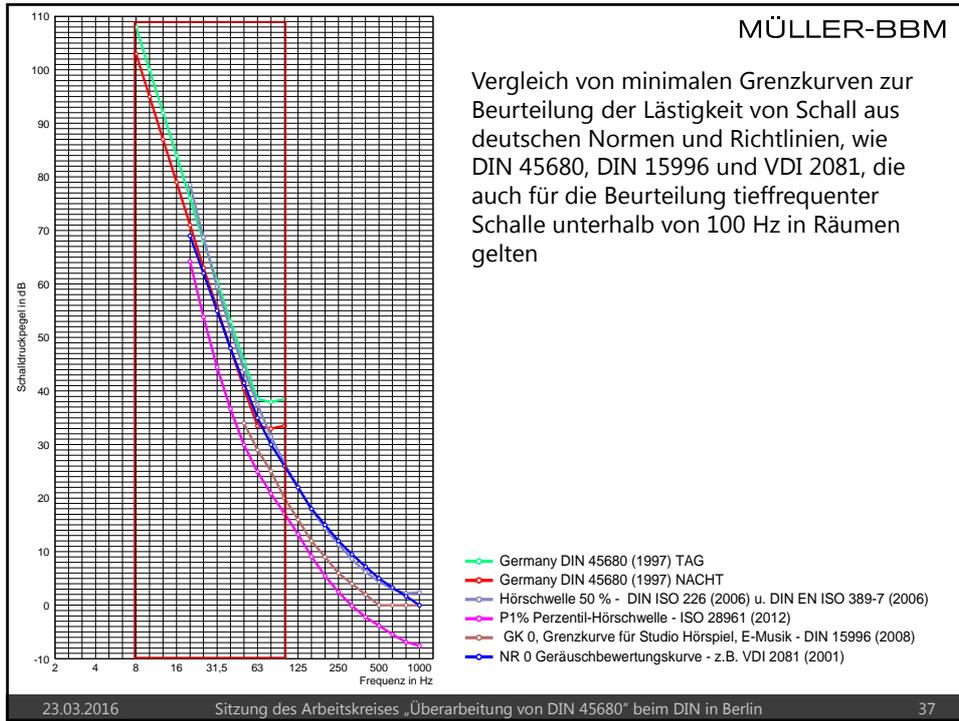
## 4.2 Grenzkurven zur Beurteilung der Lästigkeit von tieffrequentem Schall in Räumen

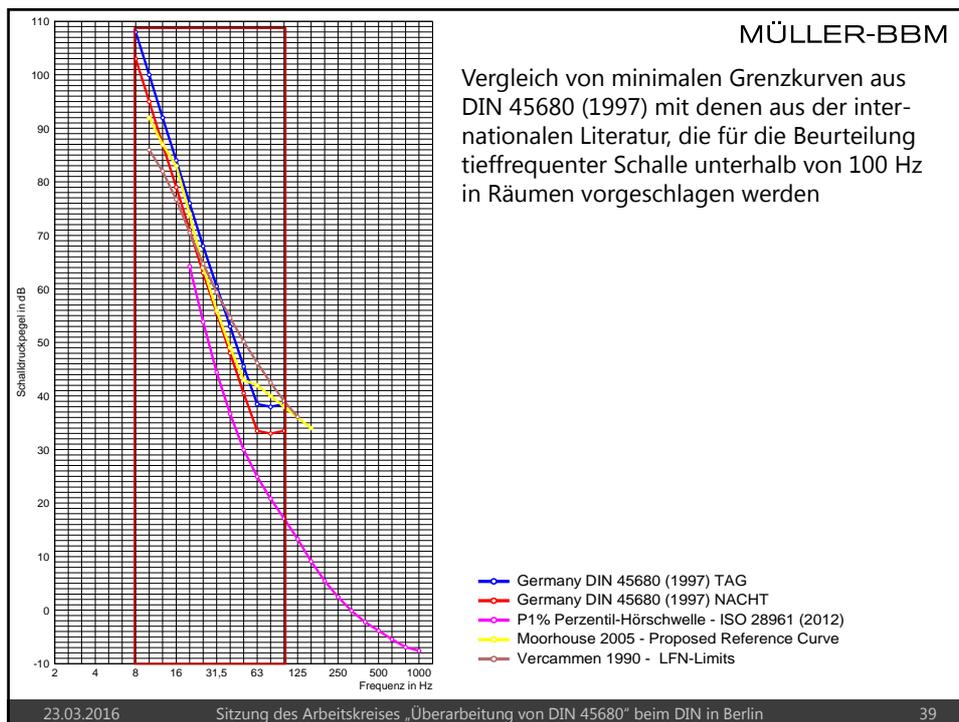
### Zusammenfassung von Lästigkeitsgrenzkurven im Vergleich zur 1%-Perzentil-Hörschwelle



(Quelle: Schmidt, M. 2013)



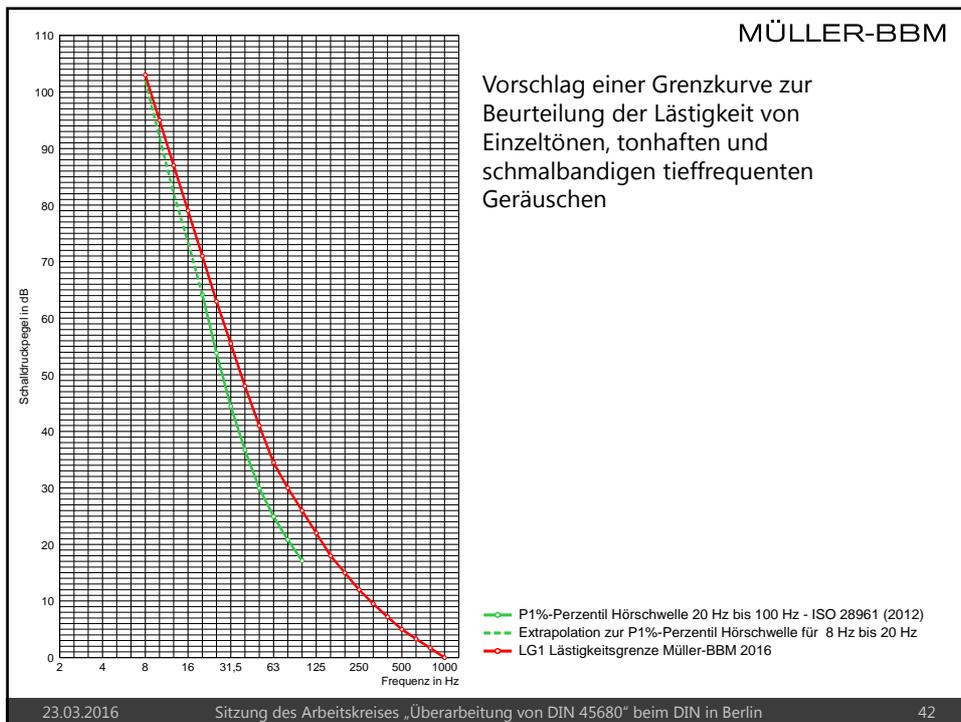
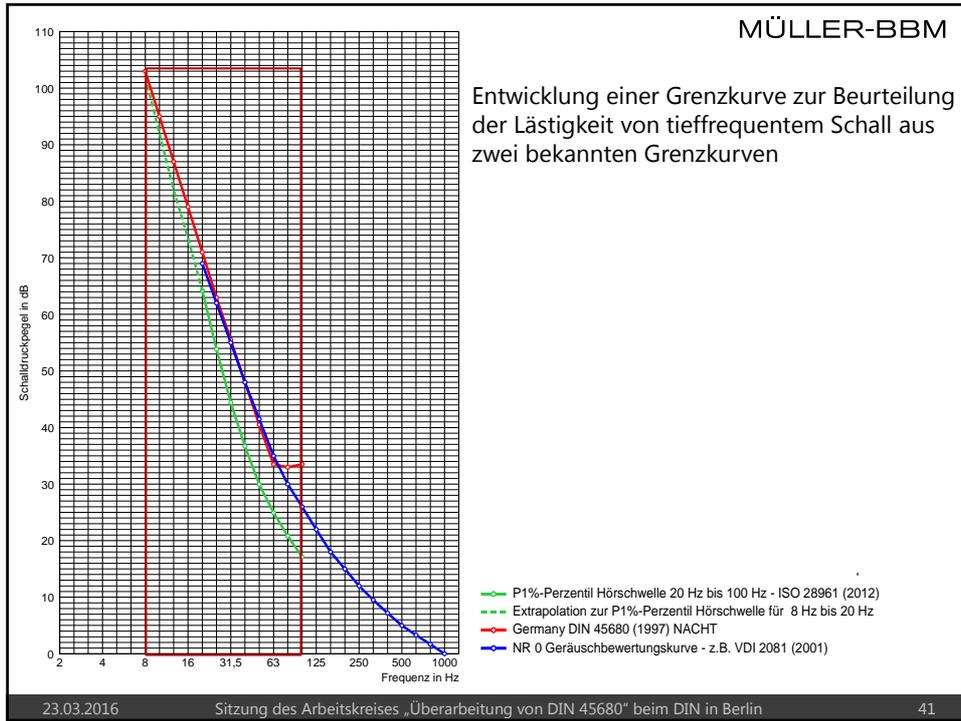


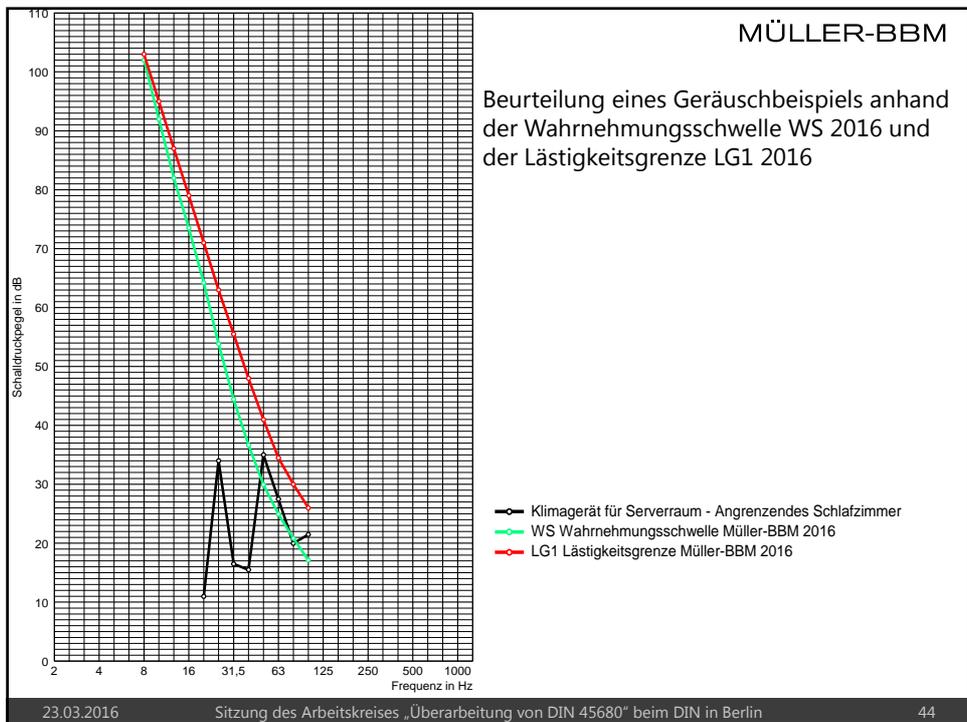
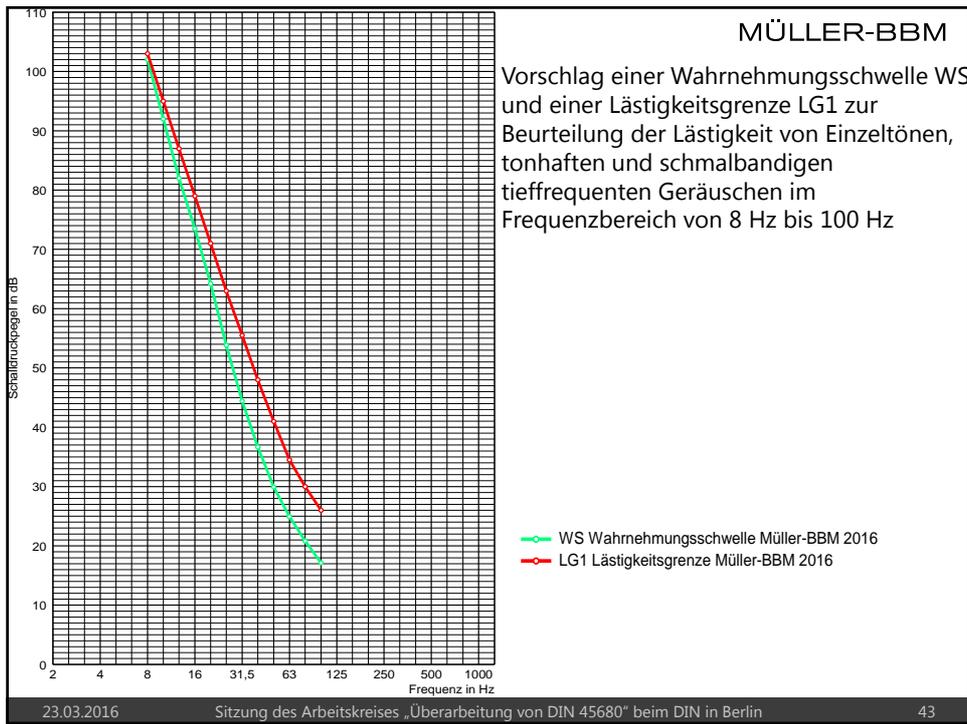


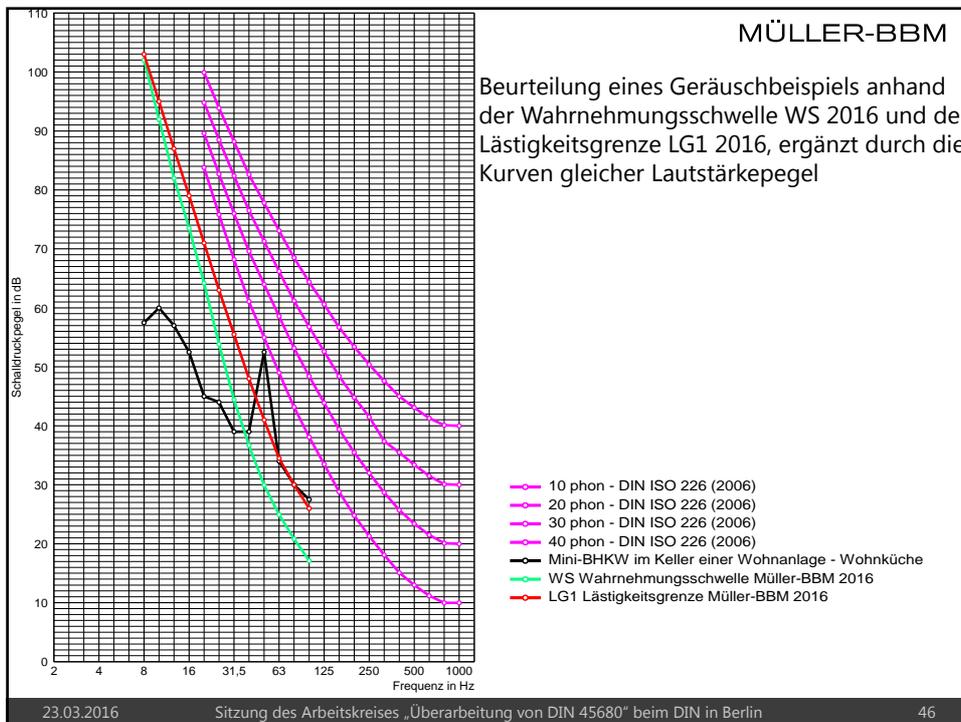
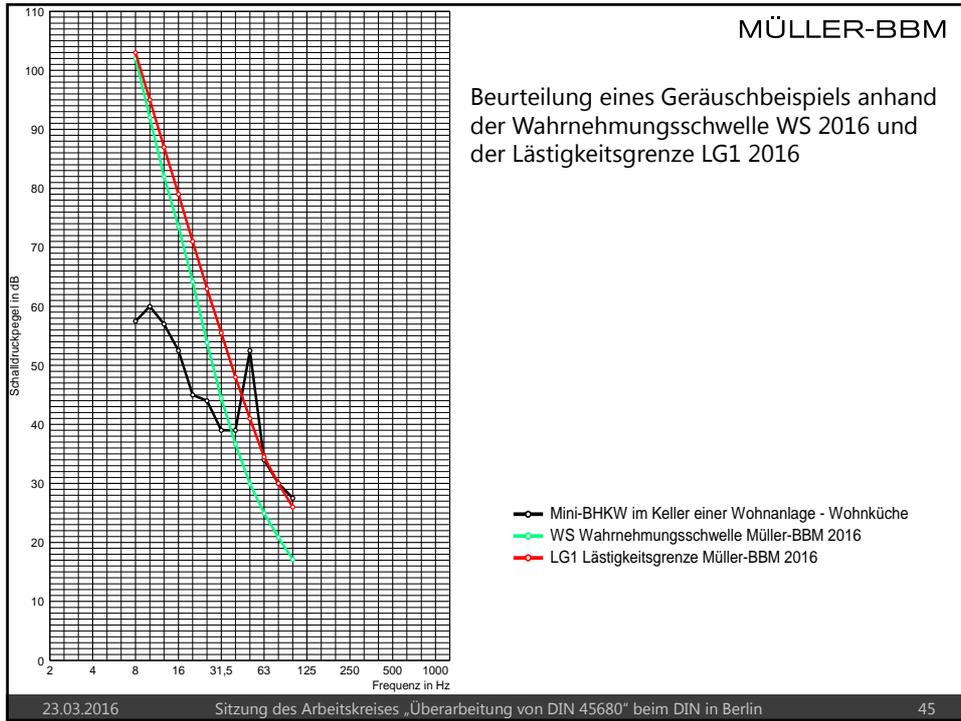
MÜLLER-BBM

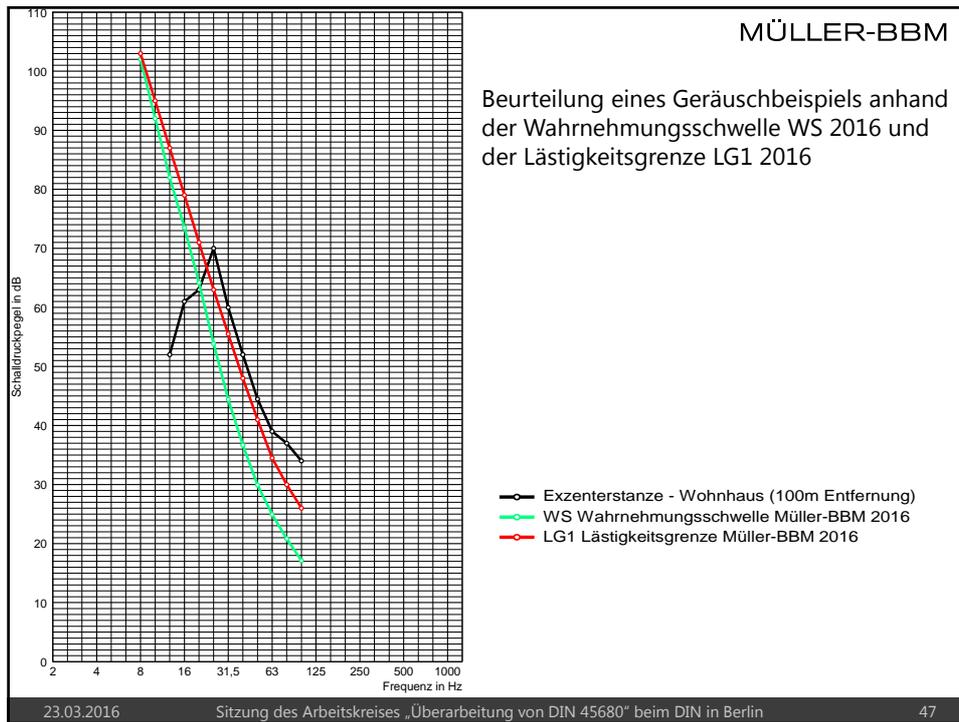
### 4.3 Prüfung und Beurteilung von tieffrequentem Schall auf deutlich hervortretende Einzeltöne – Grenzkurvenverfahren –

23.03.2016 Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin 40









## 5. Eignung eines bewerteten Gesamtschalldruckpegelverfahrens

- 5.1 Ermittlung eines Anhaltswertes zur Beurteilung breitbandiger tieffrequenter Schalle
- 5.2 Grundgeräuschpegel in Wohnräumen
- 5.3 Ermittlung eines frequenzbewerteten Gesamtschalldruckpegels  $L_{X,eq}$

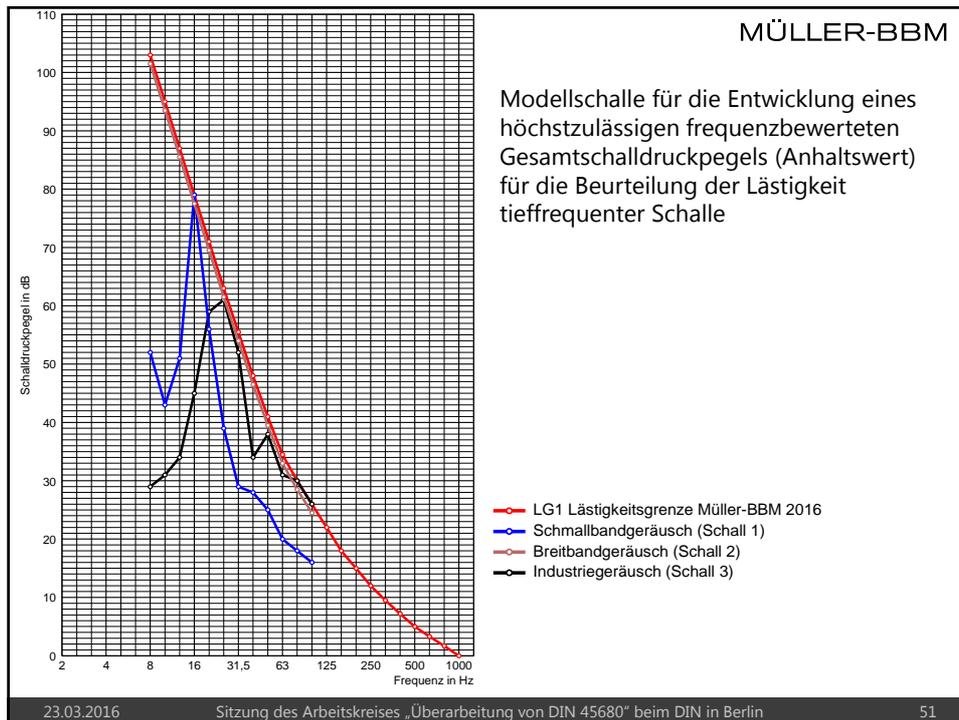
## 5.1 Ermittlung eines Anhaltswertes zur Beurteilung breitbandiger tieffrequenter Schalle

Voraussetzung ist die Lästigkeitsgrenze LG 1 2016, die Form und Lage der Grenzkurve zur Beurteilung der Lästigkeit von tieffrequentem Schall angibt.

## Ansatz für die Entwicklung eines höchstzulässigen Gesamtschalldruckpegels (Anhaltswert)

Der Ansatz bezieht sich auf ausgewählte Modellschalle.  
Dabei handelt es sich um:

1. einen tieffrequenten *Schmalbandschall (Schall 1)*, dessen Schallspektrum in einer der Terzen die „Lästigkeitsgrenze LG1 2016“ berührt, jedoch in allen anderen spektralen Bereichen deutlich vernachlässigbare Schallanteile aufweist
2. einen tieffrequenten *Breitbandschall (Schall 2)*, dessen Schallspektrum im gesamten interessierenden Frequenzbereich (Terzbänder mit Mittenfrequenzen von 8 Hz bis 100 Hz) an der „Lästigkeitsgrenze LG1 2016“ anliegt
3. einen üblichen tieffrequenten *Industrie- und Gewerbeschall (Schall 3)* mit einem Schallspektrum, das nur in einigen wenigen Terzen die „Lästigkeitsgrenze LG1 2016“ berührt



MÜLLER-BBM

## Ermittlung eines Anhaltswertes

Schall 1:  $L_{X1} = L_0 = 0 \text{ dB}$

Schall 2:  $L_{X2} = L_0 + 10 \log n \text{ dB}$

$n =$  Zahl der erfassten Terzbereiche

Für  $n = 12$  (Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz) gilt:

$$L_{X2} = L_0 + 11 \text{ dB} = 11 \text{ dB.}$$

Schall 3:  $L_{X3} = L_0 + (5 \text{ bis } 8) \text{ dB} = 5 \text{ bis } 8 \text{ dB.}$

**Anhaltswert als frequenzbewerter  
Gesamtschalldruckpegel von  
 $L_X = L_0 + 8 \text{ dB} \approx 8 \text{ dB}$**

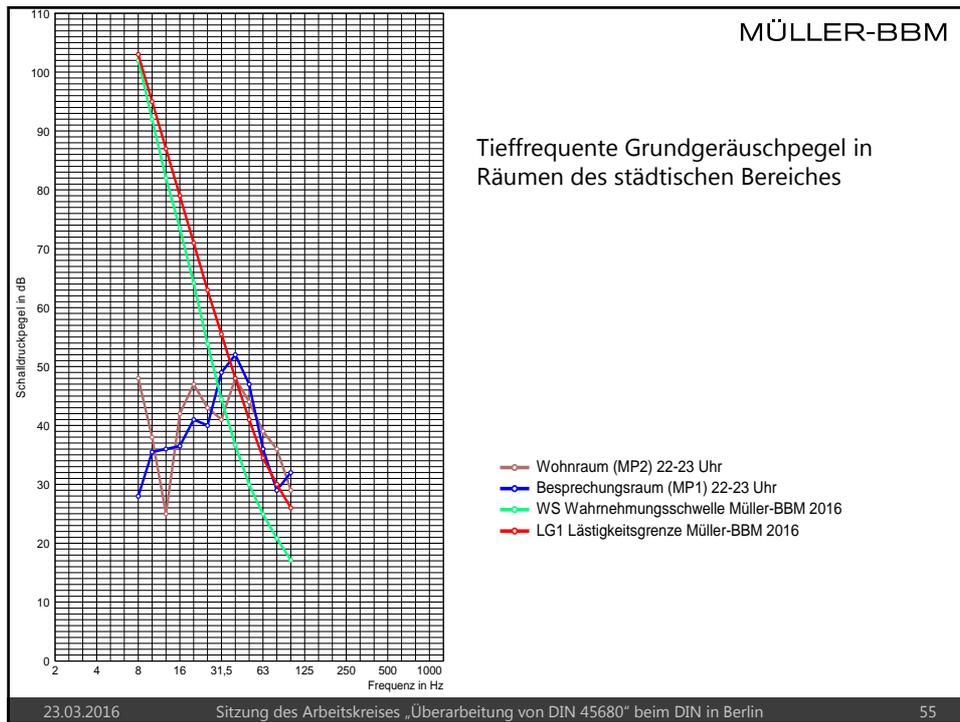
23.03.2016 Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin 52

## 5.2 Grundgeräuschpegel in Räumen

Übliche abendliche A-bewertete Grundgeräuschpegel  $L_{GA}$  in Wohnungen bei geschlossenen und dichten Fenstern mit ausreichender Luftschalldämmung

VDI 4100 Schallschutz im Hochbau, Wohnungen, Beurteilung und Vorschläge für erhöhten Schallschutz (2012)

Wohnsituation	$L_{GA}$ in dB
Ruhige ländliche Einzelwohnlage	15
Wohngebiete ohne stärkere Einwirkung von Außenlärm	20
Wohnungen mit erhöhter Außenlärmbelastung, z. B. in Kern- und Mischgebieten, und im Einwirkungsbereich lauter Straßen	25
Wohnungen an lauten Straßen	30



MÜLLER-BBM

5.3 Ermittlung eines X-bewerteten  
Gesamtschalldruckpegels  $L_{X,eq}$   
– Breitbandverfahren –

23.03.2016 Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin 56

MÜLLER-BBM

Bildung des X-bewerteten Gesamtschalldruckpegels  $L_{X,eq}$

$$L_{X,eq} = 10 \lg \sum_i 10^{0,1(L_{Terz,eqi} + K_{Xi})}$$

Terzmittenfrequenzen in Hz	$K_{Xi}$ in dB
8	-103
10	-95
12,5	-87
16	-79
20	-71
25	-63
31,5	-55,5
40	-48
50	-41
63	-34,5
80	-30
100	-26

23.03.2016 Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin 57

MÜLLER-BBM

Anhaltswerte für den Vergleich mit  
dem X-bewerteten  
Gesamtschalldruckpegel  $L_{X,eq}$

Beurteilungszeit	$L_{X,eq}$ (8 Hz bis 100 Hz) dB(X)
Tagesstunden	8
Nachtstunden	8

23.03.2016 Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin 58

## 6. Vorschlag zur Messung, Bewertung und Beurteilung von tieffrequentem Schall – Bildungsregeln –

MÜLLER-BBM	
Mess- und Beurteilungsverfahren	
Messung von $L_A$ und $L_Z$ in Räumen und Bildung von $\Delta L = L_Z - L_A$	
Prüfung der Pegeldifferenz	
Bei $L_Z - L_A > 20$ dB, Mess- und Beurteilungsverfahren für tieffrequenten Schall Messung von $L_{\text{Terz,eq}}$ von 8 Hz bis 100 Hz Vergleich von $L_{\text{Terz}}$ mit der Wahrnehmungsschwelle WS 2016 von 8 Hz bis 100 Hz Prüfung u. Beurteilung deutlich hervortretender Einzeltöne – Grenzkurvenverfahren - Prüfung u. Beurteilung tieffrequenter Geräusche <u>ohne</u> deutlich hervortretende Einzeltöne - Breitbandverfahren - Beurteilung nach Lästigkeitsgrenzkurve 2016 und Anhaltswert 2016	Bei $L_Z - L_A \leq 20$ dB, Mess- und Beurteilungsverfahren für Hörschall Messung und Beurteilung von $L_A$ von 16 Hz bis 20.000 Hz nach 45645-1 und TA Lärm
23.03.2016	Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin
60	

## 7 Zusammenfassung

MÜLLER-BBM

1. *Geräuschspektren* zeigen, dass am häufigsten tieffrequente Geräusche im Frequenzbereich von **16 Hz** bis **125 Hz** zu Störungen führen. In eher wenigen Fällen betrifft es den Infraschall unter 16 Hz.
2. *Wahrnehmung* von extrem tieffrequentem Schall und Infraschall erfolgt nicht allein über das Hörorgan, sondern der gesamte Körper ist beteiligt.
3. *Infraschall* sollte wegen seiner Besonderheiten im Hinblick auf die Wirkung auf den Menschen und den Eigenheiten in der Messtechnik durch eine eigene Mess- und Beurteilungsnorm erfasst werden.
4. Vorschlag einer *Wahrnehmungsschwelle WS 2016* bestehend aus einem Teil der 1%-Perzentil-Hörschwelle nach ISO 28961 (2012) und einer Ergänzung durch Extrapolation
5. Vorschlag einer *Lästigkeitsschwelle LG1 2016* und eines *Anhaltswertes*
6. Darstellung eines *Grenzkurvenverfahrens* zur Beurteilung von tieffrequentem Schall mit deutlich hervortretenden Einzeltönen
7. Darstellung eines *Breitbandverfahrens* zur Beurteilung von tieffrequentem Schall ohne deutlich hervortretende Einzeltöne

23.03.2016

Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin

61

MÜLLER-BBM

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

[www.MuellerBBM.de](http://www.MuellerBBM.de)

# Grundlagen für die Entwicklung eines Verfahrens zur Prognose der Einwirkung von tieffrequentem Schall am Immissionsort Teil 2

Dr. Manfred Schmidt  
Müller-BBM GmbH

Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“  
Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im  
DIN und VDI, 23.03.2016, Berlin

## Inhalt

1. Ziel und Aufgabe der Untersuchung
2. Eigenschaften von Schallquellen und deren Eigenheiten bei der Schallabstrahlung
3. Konzept für ein allgemeines Rechenverfahren
4. Strahlermodelle, Punkt-, Linien- und Flächenschallquellen
5. Einflüsse auf dem Schallausbreitungsweg
6. Prognoseansätze

# 1. Ziel und Aufgabe der Untersuchung

MÜLLER-BBM

## Ziel und Aufgabe der Untersuchung

- Entwicklung eines konzeptionellen Ansatzes als Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Verfahrens zur Prognose der Einwirkung von tieffrequentem Schall an Immissionsorten
- Schaffung der Grundlagen für eine Beurteilung tieffrequenter Schalle im Frequenzbereich mit den Terzmittenfrequenzen von 8 Hz bis 100 Hz

## 2. Eigenschaften von Schallquellen und deren Eigenheiten bei der Schallabstrahlung

MÜLLER-BBM

**Ausgedehnte Schallquellen**

Übersicht Schallemitenten

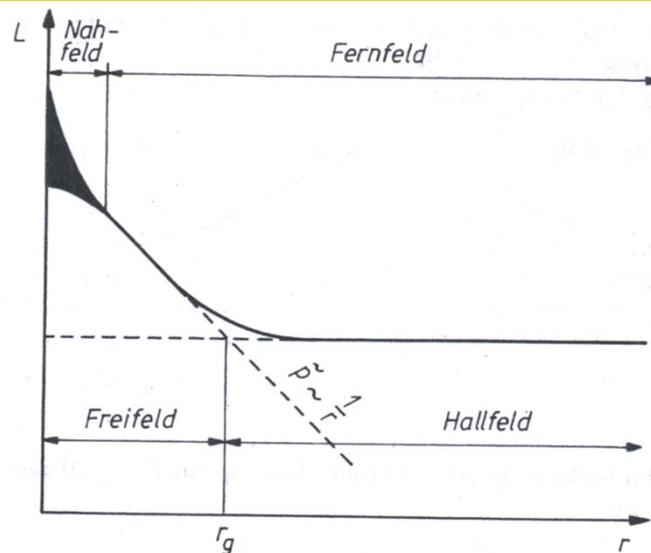
The diagram shows a photograph of a block heating plant with several callout boxes pointing to specific noise sources:

- Motorkühlung** (Engine cooling)
- Abgaskamin** (Exhaust chimney)
- Wärmespeicher, Rohrleitungen im Freien** (Heat storage, outdoor piping)
- Raumb- und -entlüftung** (Room and ventilation)
- Fassadenteile (Tore, Fenster, Montageöffnung, ...)** (Facade parts: doors, windows, installation openings, ...)
- Verbrennungs-luftansaugung** (Combustion air suction)

Einzelschallquellen an einem Blockheizkraftwerk

23.03.2016      Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin      6

## Eigenschaften von Schallquellen und deren Eigenheiten bei der Schallabstrahlung



23.03.2016

Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin

7

## Fernfeldbedingung 1 für die Praxis (Geometrie)

- Annahme, dass alle Teilbereiche einer Schallquelle zum jeweiligen Immissionsort die gleiche entfernungsbedingte Amplitudenabnahme aufweisen. Das ist dann der Fall, wenn gilt:

$$r \geq l_{\max}$$

$l_{\max}$  größte lineare Abmessung der Quelle,  
 $r$  Abstand zwischen Quelle und Immissionsort

- Die häufig anzutreffende Bedingung  $r > 2 l_{\max}$  soll Fehler durch das Nahfeld sicher vermeiden und möglichst senkrechten Schalldurchgang durch die Messfläche gewährleisten.

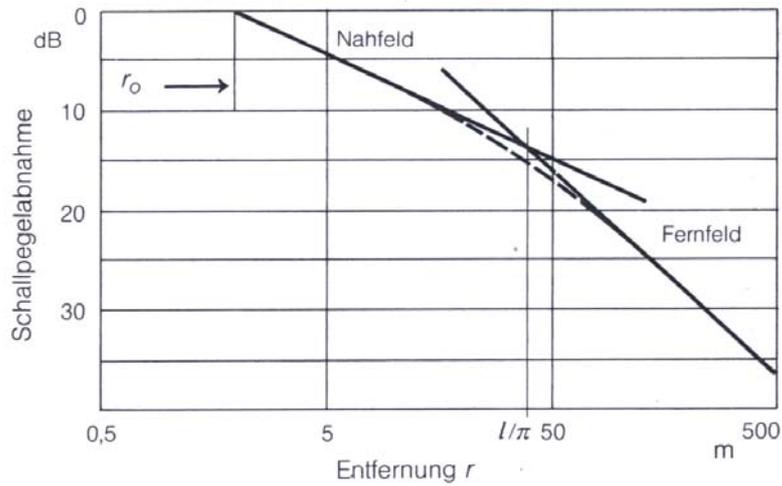
23.03.2016

Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin

8

Eigenschaften von Schallquellen und deren Eigenheiten bei der Schallabstrahlung

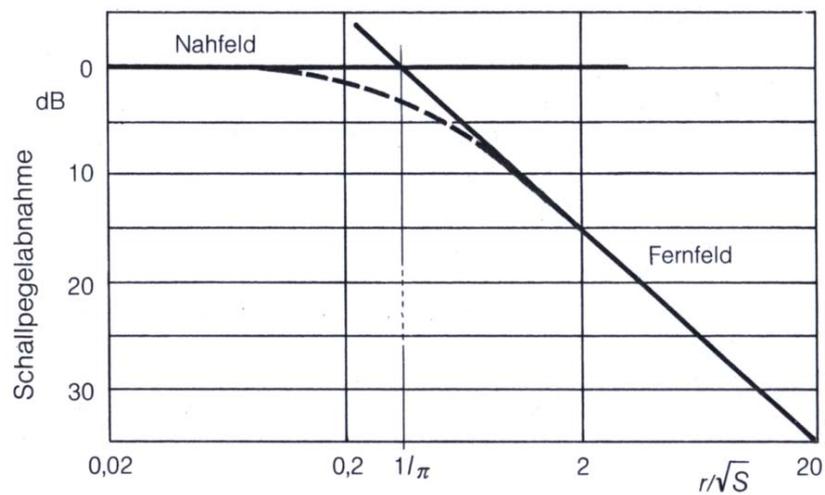
Linienschallquelle  $l = 100\text{m}$



Quelle: Tabellarium Schallschutz, Rheinhold & Mahla GmbH München, 1984

Eigenschaften von Schallquellen und deren Eigenheiten bei der Schallabstrahlung

Flächenschallquelle



Quelle: Tabellarium Schallschutz, Rheinhold & Mahla GmbH München, 1984

## Fernfeldbedingung 2 für die Praxis (Wellennatur)

### Nahfeld

- Entfernung  $r$  von der Quelle ist klein im Verhältnis zur betrachteten Wellenlänge  $\lambda$
- Hoher Anteil akustischer Blindleistung
- Nur geringe Wirkschallleistung bzw. Intensität im Quellbereich

$$r < \frac{c}{\omega} = \frac{c}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{\lambda}{2 \cdot \pi}$$

### Fernfeld

- Entfernung  $r$  von der Quelle ist groß im Verhältnis zur betrachteten Wellenlänge  $\lambda$

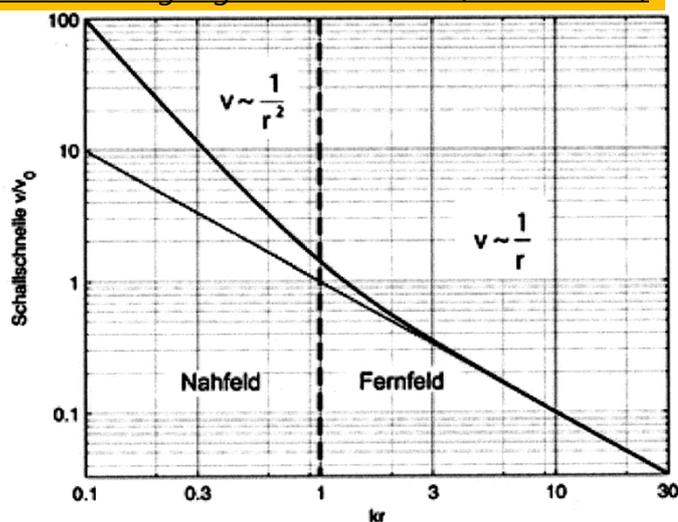
$$r > \frac{c}{\omega} = \frac{\lambda}{2 \cdot \pi}$$

23.03.2016

Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin

11

## Fernfeldbedingung 2 für die Praxis (Wellennatur)



Schallschnelle beim Übergang vom Nah- zum Fernfeld bei  $k^*r = 1$   
mit  $k^*r = 2 \pi r / \lambda$

23.03.2016

Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin

12

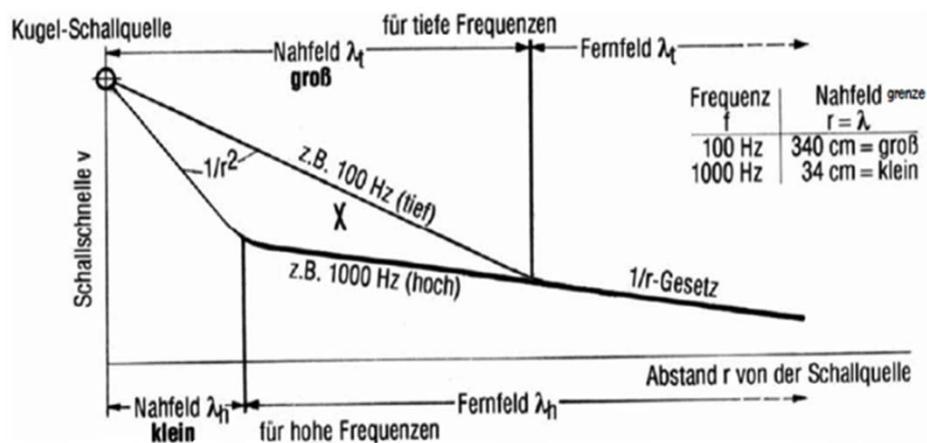
### Fernfeldbedingung 2 für die Praxis (Wellennatur)

- Phasenverschiebung zwischen Schalldruck  $p$  und Schallschnelle  $v$  spielt nur bis etwa  $r \approx \lambda$  eine praktische Rolle.
- Erst bei  $r > \lambda$  befinden sich Schalldruck und Schallschnelle in Phase und es liegt ein Fernfeld vor.
- An der Stelle  $r = \lambda$  beträgt der Phasenunterschied zwischen Schalldruck und Schallschnelle nur noch ca.  $9^\circ$ .

$$r \geq \lambda$$

### Fernfeldbedingung 2 für die Praxis (Wellennatur)

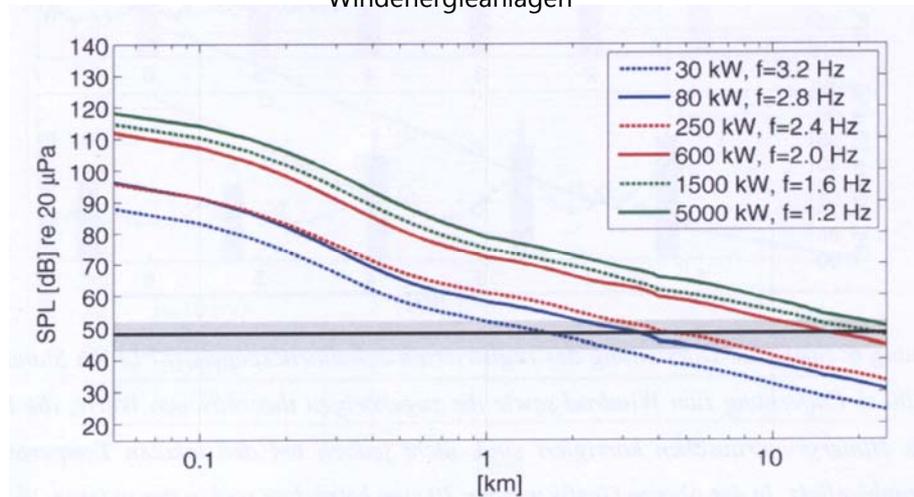
Unterschiede der Nahfeld- und der Fernfeldgrenze in Bezug auf die Schallschnelle  $v$  bei kleinen und großen Wellenlängen  $\lambda$  des Schalls



### Beispiel aus der Praxis

MÜLLER-BBM

Verlauf des berechneten abgestrahlten Schalldruckpegels mit der Entfernung zur Quelle für die 2. Flügelharmonische von Windenergieanlagen

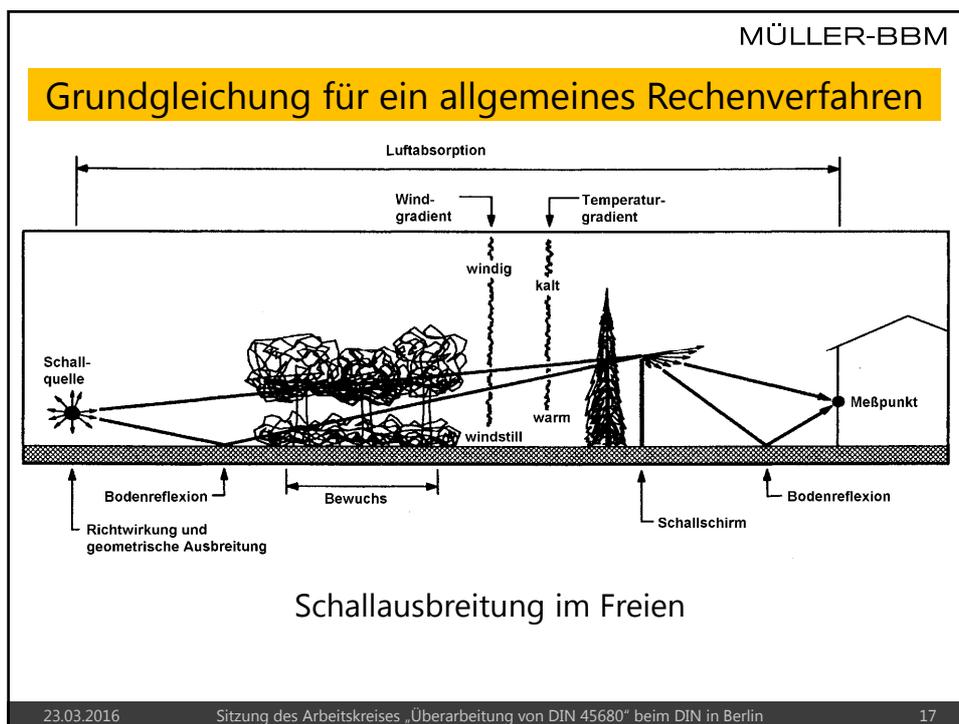


23.03.2016

Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin

15

### 3. Konzept für ein allgemeines Rechenverfahren



MÜLLER-BBM

**Grundgleichung für ein allgemeines Rechenverfahren**

$$L_{eq,Raum} = (L_W + D_1 + K_0) - (D_s \pm D_{r/i} + D_Z + D_L + D_B + D_M + D_G) - (D_W \pm K_R) \text{ in dB}$$

( Schallquelle )      (      Ausbreitungsweg      )      ( Raum )

Hierbei sind

- $L_{eq,Raum}$  äquivalenter Dauerschallpegel am Immissionsort in einem Raum,
- $L_W$  Schalleistungspegel der Schallquelle,
- $D_1$  Richtwirkungsmaß der Schallquelle,
- $K_0$  Raumwinkelmaß für die Aufstellung der Schallquelle,
- $D_s$  Dämpfung aufgrund geometrischer Ausbreitung,
- $D_{r/i}$  Schallpegelerhöhung durch Mehrfachreflexionen bzw. Verminderung durch Interferenz,
- $D_Z$  Dämpfung aufgrund der Abschirmung durch Hindernisse,
- $D_L$  Dämpfung aufgrund der Luftabsorption,
- $D_B$  Dämpfung aufgrund eines Bodeneffektes,
- $D_M$  Meteorologiedämpfungsmaß,
- $D_G$  Bebauungsdämpfungsmaß,
- $D_W$  Schallpegeldifferenz infolge der Schalldämmung des Außenbauteils,
- $K_R$  Korrektur für eine Raumrückwirkung, hervorgerufen durch Raummoden.

23.03.2016      Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin      18

## Grundgleichung für ein allgemeines Rechenverfahren

Mit

$$L_{W\text{Quelle}} = (L_W + D_1 + K_0):$$

Zusammenfassung der Quelleigenschaften als Schalleistungspegel,

$$D_{\text{Frei}} = (D_s \pm D_{r/l} + D_Z + D_L + D_B + D_M + D_G):$$

Zusammenfassung aller Freifeldeinflüsse,

$$D_{\text{Raum}} = (D_W \pm K_R):$$

Zusammenfassung der Abnahme des Schallpegels infolge der Schallpegeldifferenz  $D_W$  (außen – innen) und des Korrekturgliedes für Raumeigenschaften  $K_R$

lässt sich die Gleichung in einer Kurzfassung angeben:

$$L_{\text{eq,Raum}} = L_{W\text{Quelle}} - D_{\text{Frei}} - D_{\text{Raum}} \text{ in dB}$$

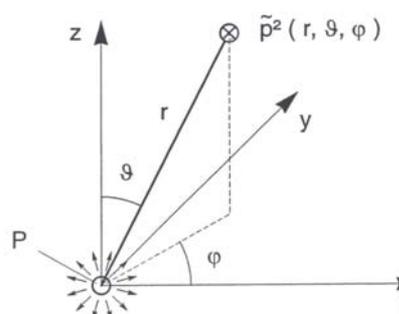
Dieser Zusammenhang lässt sich auch in Terzbändern darstellen. Es ist dann:

$$L_{\text{eq,Raum}}(f_{\text{Terz}}) = L_{W\text{Quelle}}(f_{\text{Terz}}) - D_{\text{Frei}}(f_{\text{Terz}}) - D_{\text{Raum}}(f_{\text{Terz}}) \text{ in dB.}$$

## 4. Strahlermodelle, Punkt-, Linien- und Flächenschallquellen

MÜLLER-BBM

**Zur Schallausbreitung einer Punktschallquelle im freien Schallfeld**



Schalldruckquadrat

Schalldruckpegel

$$\tilde{p}^2(x,y,z) = \frac{P \cdot \rho \cdot c \cdot \Gamma^2 \cdot 4 \cdot \pi}{4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \Omega}$$

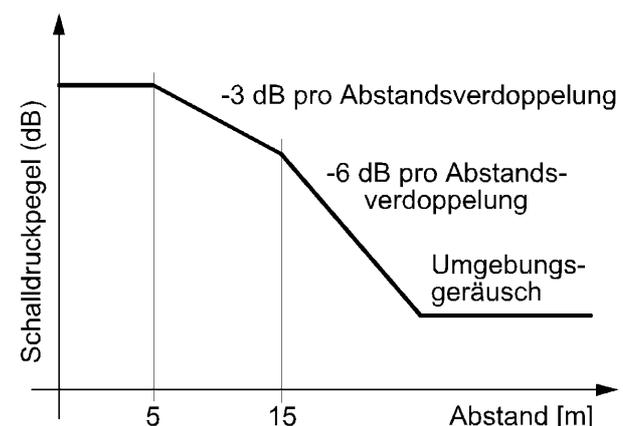
$$L = (L_W + D_1 + K_0) - D_s \text{ in dB}$$

Abstandsgesetz: 6 dB Pegelabnahme pro Abstandsverdopplung

23.03.2016
Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin
21

MÜLLER-BBM

**Zur Schallausbreitung einer Flächenschallquelle im freien Schallfeld**



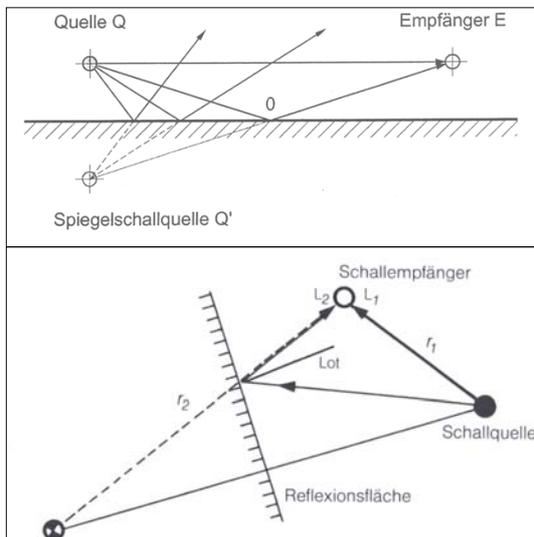
Beispiel: Prinzipieller Schalldruckpegelverlauf im Abstand zu einer abstrahlenden Fläche (15 x 5 m<sup>2</sup>)

23.03.2016
Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin
22



MÜLLER-BBM

## Reflexion, Interferenz, stehende Wellen – Schallpegelerhöhung und -verminderung $D_{r/i}$



Spiegelung einer  
Schallquelle am Boden

Spiegelung einer  
Schallquelle am Gebäude

23.03.2016

Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin

25

MÜLLER-BBM

## Reflexion, Interferenz, stehende Wellen – Schallpegelerhöhung und -verminderung $D_{r/i}$

### Fazit für die Ausbreitung von Schall mit tiefen Frequenzen (8 Hz bis 100 Hz)

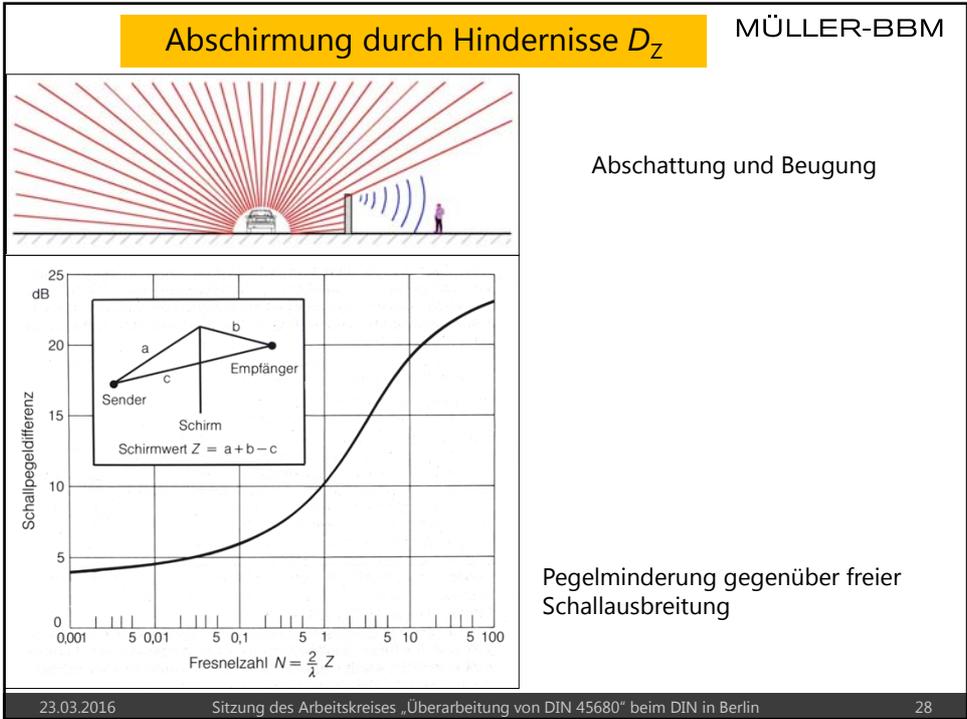
- Tieffrequenter Schall unterhalb von 100 Hz wird am Boden stark reflektiert und führt durch Interferenz zu starken punktuellen Auslöschungen oder Verstärkungen des Schalldruckes entlang des Ausbreitungsweges.
- In einer Prognose ist zu klären, inwieweit die Interferenzerscheinungen auf dem Ausbreitungsweg und am Immissionsort eine Rolle spielen. Dazu gibt es Berechnungsansätze.

23.03.2016

Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin

26

# 5. Einflüsse auf dem Schallausbreitungsweg



## Abschirmung durch Hindernisse $D_Z$

MÜLLER-BBM

### Fazit für die Ausbreitung von Schall mit tiefen Frequenzen (8 Hz bis 100 Hz)

- Für tieffrequente Schalle unterhalb von 100 Hz strebt die Pegelminderung einem Wert von ca. 4 dB zu.
- Gilt nur bis ca. 63 Hz ( $\lambda = 5,5$  m).
- Um Abschirmwirkungen zu erzielen, müssen die Abmessungen der Hindernisse sehr groß gegenüber den Wellenlängen sein.
- Schon anhand von Schall mit 31,5 Hz ( $\lambda = 11$  m) ist zu erkennen, dass man an geometrische und bautechnische Grenzen stößt.
- Zur Einschätzung der Wirkung von Abschirmungen muss offenbar eine Staffelung des Frequenzbereiches unterhalb von 100 Hz erfolgen.
- Erst wenn genauere Erkenntnisse darüber vorliegen, kann entschieden werden, inwiefern Abschirmungen im tieffrequenten Bereich zur Schallminderung auf dem Ausbreitungsweg beitragen.

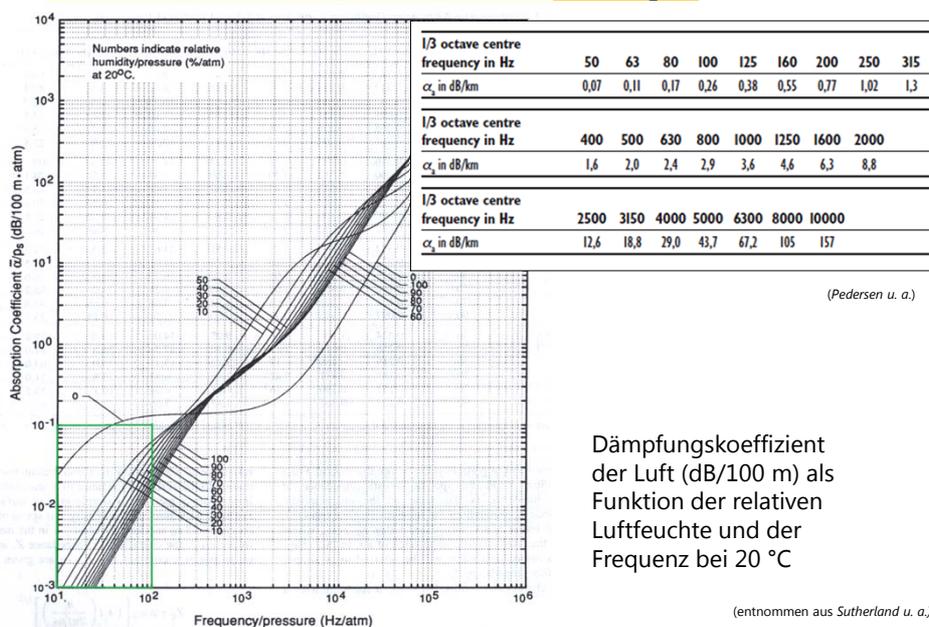
23.03.2016

Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin

29

## Verluste durch Absorption in der Luft $D_L$

MÜLLER-BBM



23.03.2016

Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin

30

MÜLLER-BBM

### Verluste durch Absorption in der Luft $D_L$

#### Fazit für die Ausbreitung von Schall mit tiefen Frequenzen (8 Hz bis 100 Hz)

- Bei tiefen Frequenzen ist die Luftabsorption kaum wirksam.
- Schallquellen, die vornehmlich tieffrequenten Schall emittieren, wirken im Nahbereich untergeordnet, können aber einen erheblichen Beitrag in größerer Entfernung haben.
- Inwiefern eine Unterteilung im Hinblick auf die Wirksamkeit im Frequenzbereich bei 100 Hz und darunter gemacht werden muss, ist weiteren konkreten Untersuchungen vorbehalten .
- Nach Tab. von *Pedersen* liegt der Dämpfungskoeffizient bei 100 Hz bei 0,26 dB/km und bei 50 Hz um ein Viertel niedriger.

23.03.2016

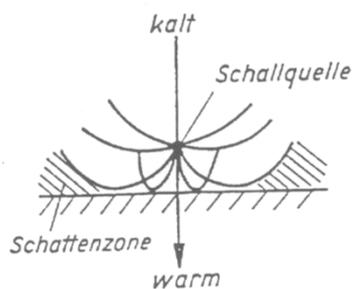
Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin

31

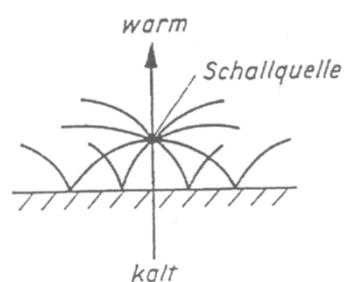
MÜLLER-BBM

### Einfluss von Inhomogenitäten der Luft $D_M$ (Temperaturgradient, Wind, Turbulenz)

#### Schallausbreitung bei vertikaler Temperaturschichtung



Negativer Temperaturgradient

Positiver Temperaturgradient  
(Inversionswetterlage)

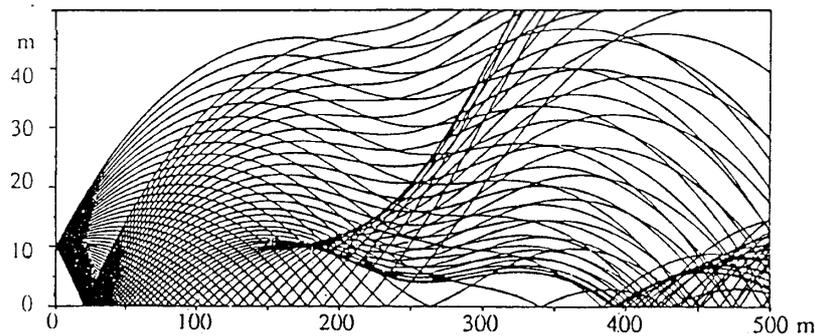
23.03.2016

Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin

32

### Einfluss von Inhomogenitäten der Luft $D_M$ (Temperaturgradient, Wind, Turbulenz)

- Witterungsflüsse wie Temperatur und Wind schwanken örtlich und zeitlich sehr stark. Es lassen sich daher nur statistische Aussagen über die in größeren Entfernungen von einer Anlage hervorgerufenen Schalldruckpegel machen.
- Schallstrahlen sind in der Realität keine Kreisbögen, sondern komplizierte Kurven.



23.03.2016

Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin

33

### Einfluss von Inhomogenitäten der Luft $D_M$ (Temperaturgradient, Wind, Turbulenz)

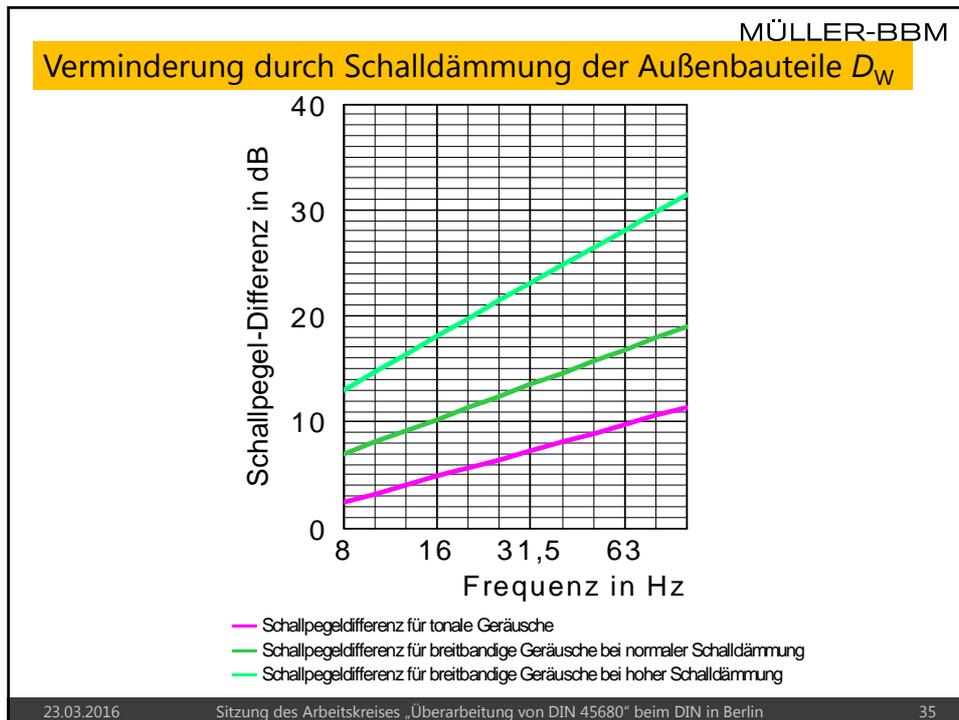
#### Fazit für die Ausbreitung von Schall mit tiefen Frequenzen (8 Hz bis 100 Hz)

- Die Einflüsse von Wind und Temperatur überlagern sich. Ihre Gesamtwirkung lässt sich nicht durch allgemein gültige Zahlenangaben beschreiben.
- Bei tieffrequentem Schall muss auch die Mitwindsituation berücksichtigt werden.
- Ein Meteorologische Korrektur  $C_{\text{met}}$  mit einem konstanten, richtungsunabhängigen Wert von  $C_{\text{met}} = C_0 = 2 \text{ dB}$  oder mit anderen Werten wäre noch zu klären.

23.03.2016

Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin

34



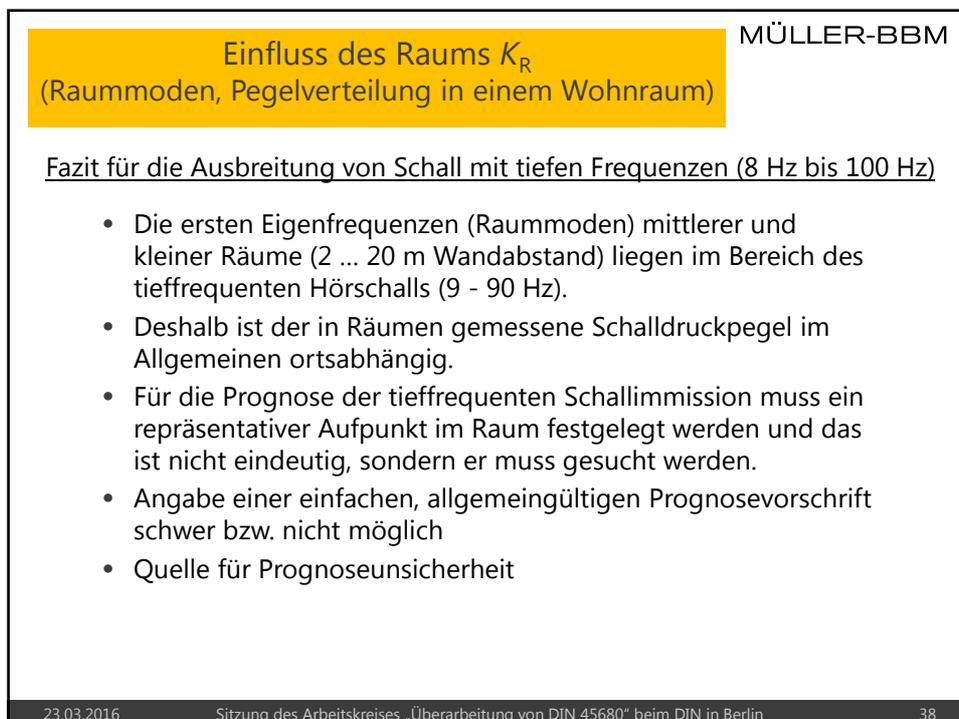
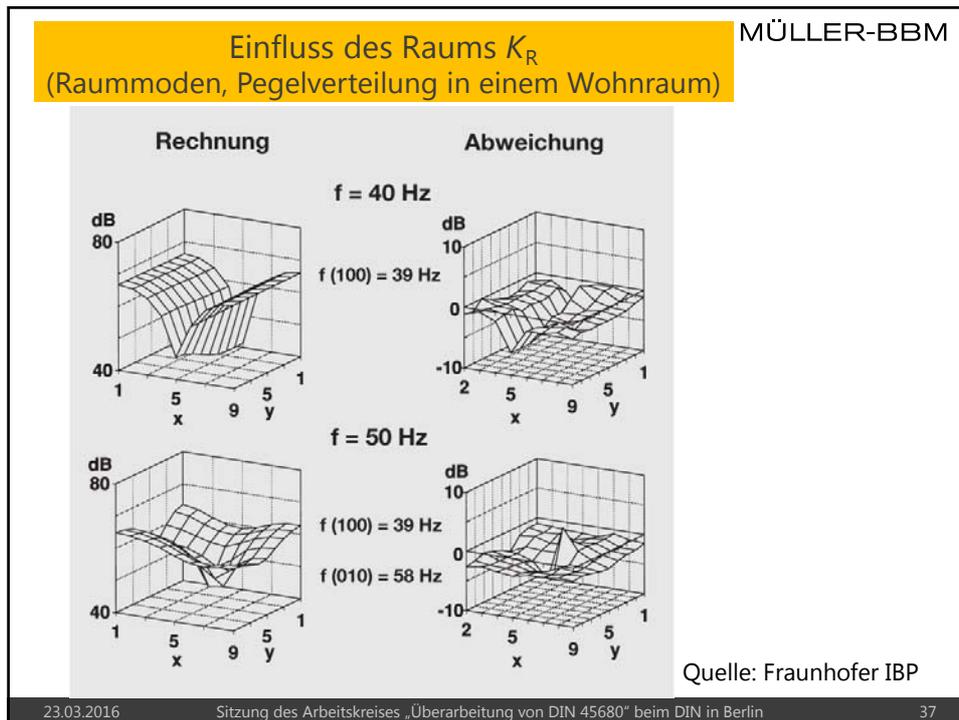
MÜLLER-BBM

**Verminderung durch Schalldämmung der Außenbauteile  $D_W$**

Fazit für die Ausbreitung von Schall mit tiefen Frequenzen (8 Hz bis 100 Hz)

- Es liegen so gut wie keine Daten für die Schalldämmung von Bauteilen bei tiefen Frequenzen vor.
- Neuere Normen der Reihe DIN EN ISO 140 gestatten eine Ausweitung des Messbereiches nach unten bis zur Terz mit der Mittenfrequenz 50 Hz.
- Die Verwendung von Schalldruckpegeldifferenzen von Außenbauteilen wäre vorstellbar.

23.03.2016 Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ beim DIN in Berlin 36



MÜLLER-BBM

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

[www.MuellerBBM.de](http://www.MuellerBBM.de)

MÜLLER-BBM

# Prognoseansätze der Geräuschimmissionen von Windenergieanlagen

## Teil 3

Dr. Heiko Hansen  
Müller-BBM GmbH

Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“  
Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im  
DIN und VDI, 23.03.2016, Berlin

1

## 1. Grundlagen entsprechend TA Lärm und DIN ISO 9613-2

## Grundlagen

- Bau und Betrieb von Windenergieanlagen (WEA) mit einer Gesamthöhe von mehr als 50 m: Genehmigungsverfahren nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) verbunden
- Genehmigungsbedürftige Anlagen nach BImSchG: Beurteilung der Geräuschemissionen der geplanten Anlagen die Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm, 1998)
- TA Lärm: Prognose nach DIN ISO 9613-2

## Prognose nach DIN ISO 9613-2

1.  $L_{ff}(DW) = L_W + D_C - A$
2.  $A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc.}$

- $L_{ff}(DW)$ : äquivalente Dauerschalldruckpegel
- $D_C$ : Richtwirkungskorrektur (Halbraum: 3 dB)
- $A_{div}$ : geometrische Dämpfung
- $A_{atm}$ : Luftabsorption
- $A_{gr}$ : Bodeneffekt
- $A_{bar}$ : Abschirmungen
- $A_{misc.}$ : Dämpfung verschiedener anderer Effekte
- meteorologische Korrektur:  $C_{met}$

## Prognose nach DIN ISO 9613-2

- Prognose (für WEA): alternatives Verfahren (LAI 2005)
- Bodendämpfung  $A_{gr}$  frequenzunabhängig parametrisiert:
 
$$A_{gr} = 4,8 - (2h_m/d)(17 + (300/d)) \text{ [dB]} \geq 0 \text{ dB}$$
  - $h_m$ : mittlere Höhe des Schallausbreitungswegs
  - $d$ : Abstand zwischen Quelle und Empfänger
- $d$  groß  $\rightarrow A_{gr} \sim 4,8 \text{ dB}$

## Prognose nach DIN ISO 9613-2

- Angaben zur Genauigkeit:  $d \leq 1.000 \text{ m}$  und  $h \leq 30 \text{ m}$
- Prognosedefizite für hohe Quellen und große Abstände
- Engelen & Piorr, Messung und Prognose an WEAs (ZfL 11/2015, 2 MW,  $\varnothing$  ca. 80 m, Nabenhöhen ca. 100 m)

*Prognose vs. Messung:*

- ab ca. 450 m deutliche Unterschätzung in der Prognose
- ab ca. 820 m mehr als 2,5 dB unterhalb des Messpegels!

## Prognose und Beurteilung nach TA Lärm

- Ergänzung für WEAs: VDI 4101, Blatt 2  
(NA 001-02-03-19 UA, NALS, in Bearbeitung)
- Interimsverfahren (LAI, 03/2015):
  - *Allgemeines* Verfahren der DIN ISO 9613-2
  - $D_C = 0$  dB, hohe ungerichtete Punktquelle
  - $A_{gr} = -3$  dB, negative Bodendämpfung!
  - $C_{met} = 0$  dB, („sichere Seite“: Mitwindsituation)
- Statistisches Mittel streut um 0 dB, Standardabweichung von ca. 1,1 dB (Engelen & Piorr 2015)

## Prognose und Beurteilung nach TA Lärm

- Diskussion nicht abgeschlossen!
- Hinweispapier des Länderausschusses für Immissionsschutz (LAI) aktuell in Vorbereitung:  
Alternatives Verfahren der DIN ISO 9613-2:  
( $f = 500$  Hz,  $A_{gr} = 0$  dB,  $D_{\Omega} = 3$  dB und  $C_{met} = 0$  dB, Luftdämpfung 1,9 dB/km)
- Erheblicher Prüfungs- und Klärungsbedarf!
  - Unsicherheiten der jeweiligen Prognoseverfahren,
  - Immissionsprognose „zur sicheren Seite“,
  - Alltagstauglichkeit

## 2. Prognose tieffrequenter Geräusche für Immissionsorte in der Wohnnachbarschaft

MÜLLER-BBM

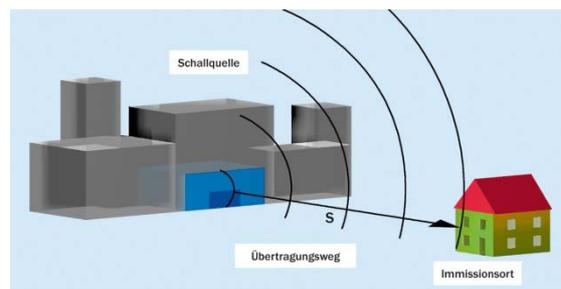
### Prognose von tieffrequenten Geräuschen

- Keine (einheitlichen) Prognoseverfahren
- Überschlägige Prognosemodelle:
  - 1) Berücksichtigung tieffrequenter Geräusche gemäß TA Lärm in Genehmigungs-, Planfeststellungs- und Baugenehmigungsverfahren - Mustergutachten und Handlungsanleitung; Studie im Auftrag des Staatlichen Umweltamts Kiel (StUA Kiel), Müller-BBM 2001
  - 2) Leitfaden Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen und Luftwärmepumpen, Bayerisches Landesamt für Umwelt (BayLfU), 2011

## Prognose von tieffrequenten Geräuschen

- 3) Ansatz für die Schallimmissionsprognose tieffrequenter Geräusche, Thüringer Landesamt für Umwelt und Geologie (TLUG), 2013  
→ Ermittlung eines Innenpegels und Bewertung nach DIN 45680 (1997)
- 4) Biogasleitfaden Mecklenburg-Vorpommern: Überschlägige Prognose und Beurteilung der tieffrequenten Schallimmissionen des BHKW-Abgaskamins im Freien – Hinweise für die Genehmigung und Überwachung (Anlage 4, 0/2012).  
→ Ermittlung eines Außenpegels und Vergleich mit der Hörschwelle.

## Prognose in Anlehnung an DIN ISO 9613-2

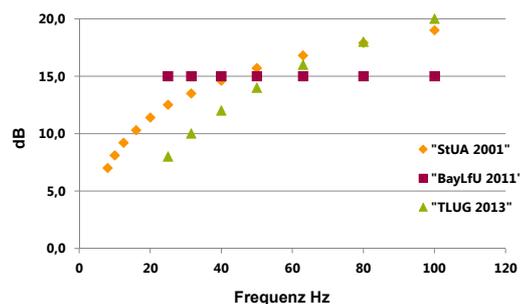


- $L_{\text{Terz,eq,außen}} = L_{\text{W,eq,Terz}} - A_{\text{div}} + K_0 (-A_{\text{bar}} - A_{\text{gr}} - \dots)$
- $L_{\text{Terz,eq,außen}}$ : Mittelungspegel je Terz, außerhalb
- $L_{\text{W,eq,Terz}}$ : Schalleistungspegel je Terz (dB)
- $A_{\text{div}}$ : geom. Dämpfung (kugelförmig)
- $K_0$ : Raumwinkelmaß (z. B. Halbraum  $K_0 = 3$  dB)
- $A_{\text{bar}}$ : Hindernisse
- $A_{\text{gr}}$ : Bodendämpfung

## Innenpegel

$$L_{\text{Terz,eq,innen}} = L_{\text{Terz,eq,außen}} - D$$

- $D$ : Schalldurchtritt, Schallpegeldifferenz außen - innen, je Terzband



23.03.2016

13

## Ansatz Studie STUA Kiel

BHKW-Kamin  $\leftrightarrow$  Immissionsort 25 m

Frequenz Hz	Hz	25	31,5	40	50	63	80	(100)
Schalleistungspegel Kamin	dB	52,6	51,9	53,4	60,9	52,8	56,8	70,2
$A_{\text{div}} (d = 25 \text{ m})$	dB	39,0	39,0	39,0	39,0	39,0	39,0	39,0
$K_0$	dB	3	3	3	3	3	3	3
Schalldruckpegel außen $L_{\text{Terz,eq}}$	dB	16,6	15,9	17,4	25,0	16,8	20,9	34,3
Pegeldifferenz für mittlere Schalldämmung der Außenbauteile	dB	-12,5	-13,5	-14,6	-15,7	-16,8	-17,9	-19,0
Schalldruckpegel innen $L_{\text{Terz,eq}}$	dB	4,1	2,4	2,8	9,3	0,0	3,0	15,3
Hörschwelle	dB	63,0	55,5	48,0	40,5	33,5	28,0	23,5
Überschreitung der Hörschwelle	dB	-58,9	-53,1	-45,2	-31,2	-33,5	-25,0	-8,2

Anhaltswerte nicht überschritten!

23.03.2016

14

## Ansatz des Biogasleitfaden Mecklenburg-Vorpommern

- BHKW-Kamin  $\leftrightarrow$  Immissionsort 25 m

1	Frequenz [Hz]		50	63	80	100
2	Schalleistungspegel $L_{w, \text{Terz}, \text{eq}}$	dB	60,9	52,8	56,8	70,2
3	Abstand d [m]	m	25,0	25,0	25,0	25,0
4	Abstandsmaß $A_{\text{div}} = 20 \lg(d/d_0) + 11$	dB	39,0	39,0	39,0	39,0
5	Bodeneffekt $A_{\text{gr}}$	dB	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0
6	Abschirmung $A_{\text{bar}}$	dB	0,0	0,0	0,0	0,0
7	Mittelungspegel außen $L_{\text{Terz}, \text{eq}, \text{außen}}$	dB	24,9	16,8	20,8	34,2
8	Hörschwelle, Pegel $L_{\text{HS}}$	dB	40,5	33,5	28,0	23,5
9	Über- bzw. Unterschreitung der Hörschwelle $L_{\text{Terz}, \text{eq}, \text{außen}} - L_{\text{HS}}$	dB	-15,6	-16,7	-7,2	10,7

## Biogasleitfaden Mecklenburg-Vorpommern

Nr.	Prüfkriterium [dB]	Beurteilung	Aktion
1	$L_{\text{Terz}, \text{eq}, \text{außen}} - L_{\text{HS}} \leq -10$	Die Anhaltswerte der DIN 45680 werden mit großer Sicherheit unterschritten.	Anlage ist ohne weitere Auflagen genehmigungsfähig. Eine Herstellerbescheinigung ist vorzulegen.
2	$-10 < L_{\text{Terz}, \text{eq}, \text{außen}} - L_{\text{HS}} \leq -3$	Die Anhaltswerte der DIN 45680 werden unterschritten.	Die prognostizierten Schalleistungspegel je Terz ( $L_{w, \text{Terz}, \text{eq}}$ ) sind durch Messung nach Inbetriebnahme zu überprüfen.
3	$L_{\text{Terz}, \text{eq}, \text{außen}} - L_{\text{HS}} > -3$	Die Anhaltswerte der DIN 45680 werden möglicherweise überschritten.	Weitere schallmindernde Maßnahmen zur Absenkung der Schalleistungspegel je Terz ( $L_{w, \text{Terz}, \text{eq}}$ ) sind zwingend erforderlich und im Genehmigungsverfahren nachzuweisen.

Teil des Genehmigungsbescheids!

## Prognose von tieffrequenten Geräuschen

- Vorgestellte Verfahren zu hinterfragen
- Schalldurchtritt  $D$ ?
- Physikalische Begründung (vgl. Schmidt 2016)
- Einheitliche Verfahren wünschenswert