

Müller-BBM GmbH
Robert-Koch-Straße 11
82152 Planegg / München

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

www.MuellerBBM.de

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

30. März 2015
SCHM/DNK

Forschungsprojekt zu Kurven gleicher Lautstärke für DIN 45680

Abschlussbericht Nr. M111460/04

Auftraggeber:

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

Autor:

Dr. Manfred Schmidt

Berichtsumfang:

Insgesamt 120 Seiten, davon
63 Seiten Textteil,
20 Seiten Anhang A,
7 Seiten Anhang B
3 Seiten Anhang C und
27 Seiten Anhang D.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
1 Einleitung	7
2 Ziel und Aufgabe der Untersuchung	8
3 Grundlagen, Begriffe, Definitionen	8
3.1 Festlegung von Grenzen	8
3.2 Begriffe	8
3.2.1 Begriffe der Hörakustik	9
3.2.2 Schallarten, deren Frequenzbereiche und Wellenlängen	11
4 Auftreten von tieffrequentem Schall, der vielfach zu Beschwerden führt	13
4.1 Betroffenheitsanalyse in Deutschland	13
4.2 Tieffrequente Schallspektren	15
4.2.1 Frequenzspektrale Verteilung der Schallemission von Schallquellen	15
4.2.2 Tieffrequente Terzfrequenzspektren der Geräuschmission in Räumen	16
5 Hörschwellen und Kurven gleicher Lautstärkepegel	18
5.1 DIN EN ISO 389-7 vom April 2006 – Akustik – Bezugshörschwellen unter Freifeld- und Diffusfeldbedingungen	18
5.2 Nicht standardisierte Hörschwellen im Frequenzbereich von 2 Hz bis 125 Hz	20
5.2.1 Studien zu einer Normalhörschwelle im tieffrequenten Frequenzbereich	20
5.2.2 Studien zu den tieffrequenten Hörschwellen besonders empfindlicher Personen im Frequenzbereich von 2 Hz bis 125 Hz	27
5.3 ISO 28961 vom Januar 2012 – Acoustics – statistical distribution of hearing	29
5.4 Die Abhängigkeit der Hörschwellen in Bezug auf das Alter und das Geschlecht	31
5.4.1 DIN EN ISO 7029 (E) vom September 2014 – Akustik – Statistische Verteilung von Hörschwellen in Bezug auf das Alter und das Geschlecht	31
5.4.2 Untersuchungen der Hörschwelle im tieffrequenten Frequenzbereich in Abhängigkeit vom Alter	35
5.5 DIN ISO 226 vom April 2006 – Akustik – Normalkurven gleicher Lautstärkepegel	37
6 Physiologische, psychoakustische und soziologische Betrachtungen zur Lästigkeit von tieffrequentem Schall als Grundlage für die Messung und Beurteilung	40
6.1 Empfindung, Wahrnehmung, Lästigkeit	40
6.2 Psychoakustische Aspekte	42
6.3 Soziologische Aspekte	43
7 Vorschläge zur Weiterentwicklung der DIN 45680 (1997)	45
7.1 Empfehlung einer Hörschwelle für tieffrequenten Schall	45
7.2 Entwurf zur Beschreibung der Lästigkeit mit physikalischen Stimulusvariablen	49
7.2.1 Gedanken zur technischen Kennzeichnung des tieffrequenten Schalls in Räumen	49
7.2.2 Schallpegel und dessen Stärke, Dauer, Häufigkeit – $L_{\text{Terz,eq}}$	50
7.2.3 Zuschlag für Tonhaltigkeit ΔL_T	51
7.2.4 Zuschlag für Impulshaltigkeit ΔL_I	51
7.2.5 Zuschlag für Pegelschwankung $\Delta L_{S,\text{Pegel}}$	51
7.2.6 Zuschlag für Frequenzschwankung $\Delta L_{S,\text{Frequenz}}$	52

7.3	Verschiedene Anhaltspunkte für eine Beurteilung tieffrequenter Geräusche	52
7.3.1	Kurven gleicher Lästigkeit nach <i>Møller (1987)</i>	52
7.3.2	N-Kurven gleicher Lästigkeit, z. B. in VDI-Richtlinien 2081	53
7.3.3	Kurven gleicher Unannehmlichkeit, zitiert in <i>Leventhall, H. G. (2004)</i>	54
7.3.4	Zusammenfassung von minimalen Grenzkurven gleicher Lästigkeit für tieffrequente Geräusche	56
8	Thesen der Untersuchung und Ausblick	57
9	Literaturverzeichnis	59

Anhang A **Beispielsammlung Schallemission**

Anhang B **Beispielsammlung Schallimmission**

Anhang C **Bezugshörschwellen**

Anhang D **Forschungsergebnisse auf 16. Arbeitskreis-Sitzung**

Zusammenfassung

Für die Messung und Bewertung tieffrequenter Geräusche gilt die DIN 45680 (*Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft, 1997*). Die Anwendung der Norm hat in der Vergangenheit gezeigt, dass in vielen Fällen die erlebte Belästigung eines Betroffenen nicht in Übereinstimmung steht mit dem nach DIN 45680 (1997) festgelegten Schutzniveau. Von daher besteht unter den gegenwärtigen Erkenntnissen ein Aufklärungsbedarf für eine Novellierung der DIN 45680.

In der Untersuchung sollte geprüft werden, welche der Hörschwellenkurven aus dem Schrifttum für eine Wahrnehmungskurve in einer Neufassung der DIN 45680 vertretbar sind. Außerdem war zu analysieren, welche physikalischen Stimulusfaktoren zur Beschreibung der Geräuschbelästigung für ein einfaches Mess- und Bewertungsverfahren geeignet sind. Vorschläge zur Novellierung der DIN 45680 (1997) sollten unterbreitet werden.

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

Für die Normung von Mess- und Bewertungsverfahren ist von Interesse, in welchem Frequenzbereich die tieffrequenten Störfrequenzen der Geräte und Anlagen liegen, die immer wieder Anlass zur Beschwerde geben. Wie die Zusammenstellungen der Schallspektren in den Abschnitten 4.2 und 4.3 und im Anhang A und B zeigen, gibt es in der Anlagentechnik und im Bereich erneuerbarer Energien eine Vielzahl von Schallquellen, welche dazu geeignet sind, erhebliche tieffrequente Geräuschimmissionen im Wohnumfeld hervorzurufen. Das betrifft am häufigsten den tieffrequenten Schall im Frequenzbereich von 16 Hz bis 125 Hz. In eher wenigen Fällen geht es um den Infraschall unter 16 Hz.

Bei der Prüfung der Hörschwellen stützt sich die Untersuchung auf allgemein wissenschaftlich anerkannte Hörschwellenkurven in der Normung und im Schrifttum.

Die DIN EN ISO 389-7 (2006) beschreibt die Bezugshörschwellen für die Terzmittelfrequenzen von 20 Hz bis 18.000 Hz, die für Freifeld- und Diffusfeldbedingungen gelten. Gegenüber der DIN 45630-2 vom September 1967 und der DIN EN ISO 389-7 vom Dezember 1998 wurden einige wesentliche Änderungen vorgenommen. Die Hörschwellenwerte wurden auf der Grundlage von Untersuchungen aus verschiedenen Ländern ermittelt, wobei die Daten auf spezieller Auswertung basieren. Die bis zu diesem Zeitpunkt bekannten Daten stellen momentan die verlässlichste Basis der Untersuchungen dar. In dieser Norm werden Hörschwellendaten festgelegt, die für otologisch normale Personen im Altersbereich von 18 bis 25 Jahren gelten.

Die Studien zur Ermittlung einer nichtstandardisierten Hörschwelle im Frequenzbereich von 2 Hz bis 125 Hz zeigen, dass sich die Erkenntnisse auf kleine Fallzahlen, d. h. auf wenige Versuchspersonen, stützen. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass die Hörschwelle im tieffrequenten Bereich unterhalb von 20 Hz in seiner Treffsicherheit als Aussage für die Grundgesamtheit sehr unsicher ist. Wenn die nichtstandardisierte Hörschwelle im Frequenzbereich von 2 Hz bis 125 Hz verwendet werden soll, ist eine Validierung der Daten notwendig. Dass es Personen mit außergewöhnlich hohem Hörempfinden im Frequenzbereich des tieffrequenten Schalls einschließlich Infraschall gibt, kann bestätigt werden.

Die Hörschwelle der aktuell gültigen Norm DIN 45680 (1997) stimmt fast mit der 25 %-Perzentil-Hörschwelle nach ISO 28961 (2012) überein. Das bedeutet, etwa 25 % der Menschen können besser hören bzw. wahrnehmen, als es die Hörschwelle der DIN 45680 (1997) beschreibt.

Die Hörverluste in Bezug auf Alter und Geschlecht werden in der DIN EN ISO 7029 (E) vom September 2014 beschrieben. Die Norm ergänzt in hervorragender Weise die ISO 28961 (2012). Damit kann auch zur Hörschwelle in Abhängigkeit vom Alter und Geschlecht eine Aussage getroffen werden. Bei otologisch normal hörenden Personen ist der Hörverlust bei Männern mit zunehmendem Alter im Mittel höher als bei Frauen. Die Norm berücksichtigt die Hörschwellenabweichungen für die audiometrischen Frequenzen von 125 Hz bis 8.000 Hz. Unterhalb von 125 Hz wurden Hörschwellenabweichungen nicht ermittelt. Jedoch lässt sich vermuten, dass gerade in der Gruppe der 50-, 60-, 70- und 80-jährigen Personen auch unterhalb von 125 Hz mit einer Hörschwellenabweichung zu rechnen ist. Der Norm liegen Daten von 6.434 männlichen und 17.150 weiblichen Probanden zu Grunde. Berücksichtigt wurden die Untersuchungen aus fast fünf Jahrzehnten, nämlich aus der Zeit von 1965 bis 2008.

Die Hörkurven gleicher Lautstärkewahrnehmung in DIN ISO 226 vom April 2006 beschreiben eine der wichtigsten Eigenschaften des menschlichen Gehörs und sind deshalb für die Psychoakustik von wesentlicher Bedeutung. Maßgeblich für die DIN ISO 226 (2006) ist, dass die zum damaligen Zeitpunkt aktuell vorliegenden Daten zur Feststellung der Normalkurven gleicher Lautstärke neuerlich ausgewertet wurden. 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 und 304 Versuchspersonen im Alter von 18 bis 25 Jahren gewonnen. *Møller, H., Pedersen, C. S. (2004)* unternahmen den Versuch, die Kurven gleicher Lautstärkepegel für den tieffrequenten Frequenzbereich unterhalb von 20 Hz an die Kurven gleicher Lautstärkepegel nach ISO 226 (2003) anzupassen.

Im Abschnitt 6 wird deutlich, dass die Kurven gleicher Lästigkeit anders verlaufen als die Kurven gleicher Lautstärkepegel bzw. der Lautheit nach DIN ISO 226 (2006). Die Kurven gleicher Lästigkeit folgen also nicht zwangsläufig den Kurven gleicher Lautstärke, auch nicht im tieffrequenten Bereich unterhalb von 125 Hz. Auch *Genuit (1998)* berichtet darüber, dass für nichtstationäre Geräusche und bei tieffrequenter Anregung die Lautheitsmessung nach ISO 532 (1975) keine der subjektiven Empfindung entsprechenden Ergebnisse erzielt.

Im Sinne einer Lärmvorsorge muss es darauf ankommen, den größten Teil der Bevölkerung in die Lärmerfassung einzubeziehen und durch eine geeignete Geräuschbeurteilung zu schützen. Mit der 1 %-Perzentil-Hörschwelle liegt eine untere Grenze der Wahrnehmung für tieffrequenten Schall vor, die vor allem die Empfindlichkeit von Personen berücksichtigt. Wie die Ausführungen in den Normen deutlich machen, beruhen die Hörschwellendaten auf sorgfältigen und umfangreichen Analysen. Deshalb kann man davon ausgehen, dass unterhalb dieser Schwelle weniger als ein Prozent der Menschen noch Schall im tieffrequenten Bereich wahrnehmen. Vor diesem Hintergrund wird vorgeschlagen, die 1 %-Perzentil-Hörschwelle in eine neue DIN 45680 für einen Frequenzbereich von 20 Hz bis 125 Hz aufzunehmen.

Die physikalischen Stimulusvariablen zur Beschreibung der Lästigkeit sind objektive Größen, die allein von den Signaleigenschaften abhängen. Sie sind unabhängig von der individuellen Lärmempfindlichkeit der Person.

Allein die physikalische Erfassung tieffrequenter Geräusche und deren Beurteilung ist demnach sehr vielschichtig und umfassend. Trotzdem sollten die tieffrequenten Geräusche mit der üblichen Schallmesstechnik gemessen werden können.

Das beschriebene Konzept zur Kennzeichnung des tieffrequenten Schalls in Räumen ist ein prinzipieller Vorschlag auf der Grundlage der Erfassung physikalischer Messgrößen. Wie die einzelnen Messgrößen ganz konkret zu messen oder zu bestimmen sind, muss weiteren Untersuchungen vorbehalten bleiben.

Im Sinne einer praktikablen Lösung wird deshalb vorgeschlagen, ein Konzept zur Erfassung des tieffrequenten Schalls zu wählen, das sich auf einen Basisschalldruckpegel und Zuschläge stützt. Es beruht darauf, dass sich ein Beurteilungspegel L_r für jedes Terzband auf der Grundlage einer Basislautstärke in Form eines Terzschalldruckpegels $L_{\text{Terz,eq}}$ und aus dem Tonzuschlag ΔL_T , Impulszuschlag ΔL_I , Pegelschwankungszuschlag $\Delta L_{S,\text{Pegel}}$ und einem Frequenzschwankungszuschlag $\Delta L_{S,\text{Frequenz}}$ bilden lässt:

$$L_{r,\text{Terz}} = L_{\text{Terz,eq}} + \Delta L_T + \Delta L_I + \Delta L_{S,\text{Pegel}} + \Delta L_{S,\text{Frequenz}} \text{ in dB.}$$

Am Ende des Abschnittes 7 werden verschiedene Anhaltspunkte für eine Beurteilung tieffrequenter Geräusche gegeben.

1 Einleitung

Seit einigen Jahren ist ein vermehrtes Auftreten von Beschwerden über tieffrequente Geräuschimmissionen zu beobachten. Auslöser dieser Beschwerden sind häufig Anlagen zur Energieerzeugung sowie Lüftungs- und Klimatechnik, welche insbesondere durch die verstärkte Dezentralisierung solcher Anlagen nah an die Verbraucher heranrücken. Auch großtechnische Anlagen in den verschiedenen Industriezweigen verursachen mitunter tieffrequente Geräusche, die zu Beschwerden führen. Unabhängig von der Quelle haben tieffrequente Geräuschimmissionen oft ein erhebliches Belästigungspotential im Wohnumfeld. Für die Messung und Bewertung tieffrequenter Geräusche gilt die DIN 45680 (*Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft, 1997*). Allerdings hat die Anwendung der Norm in der Vergangenheit gezeigt, dass in vielen Fällen die erlebte Belästigung eines Betroffenen nicht in Übereinstimmung steht mit dem nach DIN 45680 (1997) festgelegten Schutzniveau. Die Norm berücksichtigt beispielsweise nur Geräuschanteile, die eine „mittlere“ Hörschwelle überschreiten. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass es häufig Personen gibt, die eine deutlich herabgesetzte Hörschwelle besitzen, und dass bei diesen Betroffenen bereits Belästigungen auftreten, obgleich die „mittlere“ Hörschwelle nach Norm DIN 45680 (1997) nicht überschritten ist. Von daher besteht unter den gegenwärtigen Erkenntnissen ein Aufklärungsbedarf für eine Novellierung der DIN 45680.

Im Schrifttum und hierbei insbesondere auch in verschiedenen Normen werden die Hörschwellenpegel sehr unterschiedlich angegeben. Beispielsweise werden die Perzentile der Hörschwellenverteilung in ISO 28961 (*Akustik – Statistische Verteilung von Freifeld-Normalhörschwellen, 2012*) ausführlich dargestellt. Jedoch weichen die Hörschwellenpegel von den Werten der Hörschwelle in DIN 45680 (1997) und seinem Entwurf DIN (E) 45680 (2013) deutlich ab. Auch die in DIN ISO 226 (*Akustik – Normalkurven gleicher Lautstärkepegel, 2006*) enthaltenen Hörschwellenpegel stehen nicht in Übereinstimmung mit der DIN 45680 (1997). Es ist daher klarzustellen, welche Hörschwellenpegel für eine Hörschwelle in einer Neufassung der DIN 45680 festzulegen sind.

Darüber hinaus ist aus einem Vortrag von *Krahé* bekannt, dass gerade ältere Beschwerdeführer persönliche Hörschwellen haben, die unverkennbar über der 50 % Perzentil-Hörschwellenkurve von jungen Leuten im Alter von 18 bis 25 Jahren nach DIN ISO 226 (2006) liegen. Von daher erhebt sich die Frage, wie die Daten aus der Literatur über die Veränderung des Hörvermögens in Abhängigkeit vom Alter für Bevölkerungsgruppen otologisch normaler Personen in die Betrachtungen der DIN 45680 (1997) einzubeziehen sind. Außerdem wäre zu beurteilen, wie sich die Hörschwellenkurven zwischen Männern und Frauen unterscheiden (siehe beispielsweise DIN EN ISO 7029 (*Akustik – Statistische Verteilung von Hörschwellen in Bezug auf das Alter und das Geschlecht, 2014*)).

Die mögliche enge kausale Bindung von akustischer Wahrnehmbarkeit bei Überschreitung der Hörschwelle und dem Belästigungserleben muss dahingehend überdacht werden, ob es Personen mit deutlich abgesenkter Hörschwelle gibt, bei denen Belästigungen früher auftreten können, als bei Überschreiten der Hörschwelle nach DIN 45680 (1997) zu erwarten wäre.

Die Kurven gleicher Lautstärke stehen in engem Zusammenhang mit der Belästigung durch Geräusche. Es ist bekannt, dass mit einer Zunahme der Geräuschbelästigung zu rechnen ist, wenn die Lautstärke (Lautheit) steigt. Darüber hinaus gibt es noch andere physikalische Stimulusfaktoren, wie z.B. Impulsgehalt, Schallpegel- und/oder Frequenzschwankung des Geräusches usw., die zur Belästigung beitragen. Das sind in der Regel schallbezogene Variablen, die zu einer Belästigungsempfindung führen können. Es ist daher einzuschätzen, welchen Einfluss die zusätzlichen physikalischen Stimulusfaktoren beim Grad der Belästigung besitzen. Dabei ist zu berücksichtigen, wie Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit von Messergebnissen mit einem erträglichen Messaufwand durch ein objektives Mess- und Bewertungsverfahren zu erreichen sind.

Dem Forschungsvorhaben liegt die Idee zugrunde, zu untersuchen, inwieweit zwischen einer guten Nachbildung des mittleren menschlichen Empfindens und einem möglichst geringen technischen Aufwand eine objektive Beurteilung der Geräuschsituation hergestellt werden kann.

2 Ziel und Aufgabe der Untersuchung

Ziel der Untersuchung ist die Prüfung der allgemein wissenschaftlich anerkannten Hörschwellenkurven im Schrifttum und deren Eignung als Grundlage für eine Wahrnehmungskurve in der Neufassung der DIN 45680. Darüber hinaus ist in Verbindung mit den Kurven gleicher Lautstärke zu prüfen, welche physikalischen Stimulusfaktoren zur Beschreibung der Geräuschbelästigung geeignet sind. Vorschläge zur Novellierung der DIN 45680 (1997) sind zu unterbreiten.

3 Grundlagen, Begriffe, Definitionen

3.1 Festlegung von Grenzen

Basis für die Festlegung von Grenzen ist die Gesamtheit aller standardgerechten wissenschaftlichen Arbeiten und epidemiologischen Untersuchungen zur Gesundheitsproblematik. Bei der Festlegung von Grenzen sind gesicherte gesundheitsrelevante Effekte zu berücksichtigen.

3.2 Begriffe

Die in diesem Dokument verwendete Terminologie stützt sich auf die allgemein vereinbarten Begriffe der maßgeblichen Normen zur Hörakustik. Im Folgenden werden die verwendeten Begriffe aufgeführt.

3.2.1 Begriffe der Hörakustik

Otologisch normale Person

Person in normalem Gesundheitszustand, die frei von allen Anzeichen oder Symptomen einer Ohrenerkrankung ist. Die beiden Gehörgänge sind nicht verschlossen. Die Person war sowohl in privater als auch in beruflicher Hinsicht keiner übermäßigen Lärmeinwirkung ausgesetzt. Sie hat keine ototoxischen Medikamente eingenommen und ein familiär bedingter Hörverlust ist nicht vorhanden.

Auditiv

Das Gehör betreffend; auf das Gehör bezogen, gehörmäßig.

Binaural

Das beidohrige Hören betreffend.

Frequenztonhöhe

Maß der Tonhöhe. Es wird in Hertz 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 Schmalbandschalls 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 gleichlaut 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:

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

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

Minimale 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.

Tonaudiogramm

Diagramm, welches den Hörschwellenpegel L_{HS} eines Sinusschalls als Funktion von dessen Frequenz zeigt.

Schmerzschwelle

Kleinster Schalldruckpegel, der bei einem Zuhörer deutlich Schmerzen im Ohr auslöst. Die Messbedingungen sind im Einzelnen anzugeben.

Minimalkurve gleicher Lästigkeit

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

3.2.2 Schallarten, deren Frequenzbereiche und Wellenlängen

Infraschall (1 Hz bis 16 Hz)

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

Hörschall (16 Hz bis 20.000 Hz)¹

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 Hörschall (16 Hz bis 140 Hz)

Die heutigen Erkenntnisse bezüglich des tieffrequenten Schalls zeigen, dass er als eine besondere Schallart zu betrachten ist, deren Störwirkung 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 125 Hz folgend, wird in dieser Untersuchung unter tieffrequentem Schall der Schall verstanden, dessen vorherrschende Energieanteile im Frequenzbereich unter 140 Hz an Aufenthaltsorten von Menschen vorkommen. Der sich daraus ergebende Frequenzbereich wird durch Schallpegelmessungen bei den Norm-Terzfrequenzen von 16 Hz bis 125 Hz, d. h. in zehn Terzen erfasst (siehe Tab. A1 im Anhang A).

¹ 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).

Wellenlängen λ des tieffrequenten Hörschalls einschließlich des Infraschalls

Wie man der Tab. 3.1 entnehmen kann, sind die Wellenlängen von tieffrequentem Schall und Infraschall groß im Verhältnis zu den Abmessungen von Wohnbauten und den Menschen umgebenden Gegenständen, in denen sie auftreten können. Damit ergeben sich für tieffrequenten Hörschall gegenüber dem mittel- und hochfrequenten Hörschall zum Teil abweichende räumliche Phänomene.

Tab. 3.1 Wellenlängen λ von tieffrequentem Hörschall einschließlich Infraschall in Abhängigkeit von den Terzmittenfrequenzen von 1 Hz bis 125 Hz (Wellenlängen gerundet)

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 λ 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 λ in m	22	17	14	11	9	7	6	4	3,4	3

4 Auftreten von tieffrequentem Schall, der vielfach zu Beschwerden führt

4.1 Betroffenheitsanalyse in Deutschland

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 viele dieser Geräte im Rahmen der Energiewende politisch erwünscht und auch gefördert sind. Es handelt sich im Normalfall um nicht genehmigungspflichtige Anlagen im Sinne des im Sinne des Bundesimmissionsschutzgesetzes, die ohne weitere schalltechnische Überprüfung aufgestellt werden können. Häufig werden die betreffenden Anlagen durchgängig rund um die Uhr betrieben und strahlen daher auch nachts unvermindert Geräusche ab. All dies zusammen hat zuletzt verstärkt zum Auftreten von Geräuschproblemen im Zusammenhang mit dem Betrieb solcher Geräte und Anlagen geführt (Lenzen, A. u. a., 2014).

Geräte, die mit niedrigen Drehzahlen arbeiten, haben häufig ein erhebliches Konfliktpotenzial in der Nachbarschaft. Dabei ist vielfach die Beschwerdeursache eine tieffrequente Geräuschimmission mit meist deutlich markanter Spitze in einem Terzband, das unterhalb von 125 Hz liegt. Solche Quellen zeigen Abb. 4.1 und 4.2, die im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zu den „Wirkungen von Infraschall“ vom UBA ermittelt wurden (UBA, 2014).

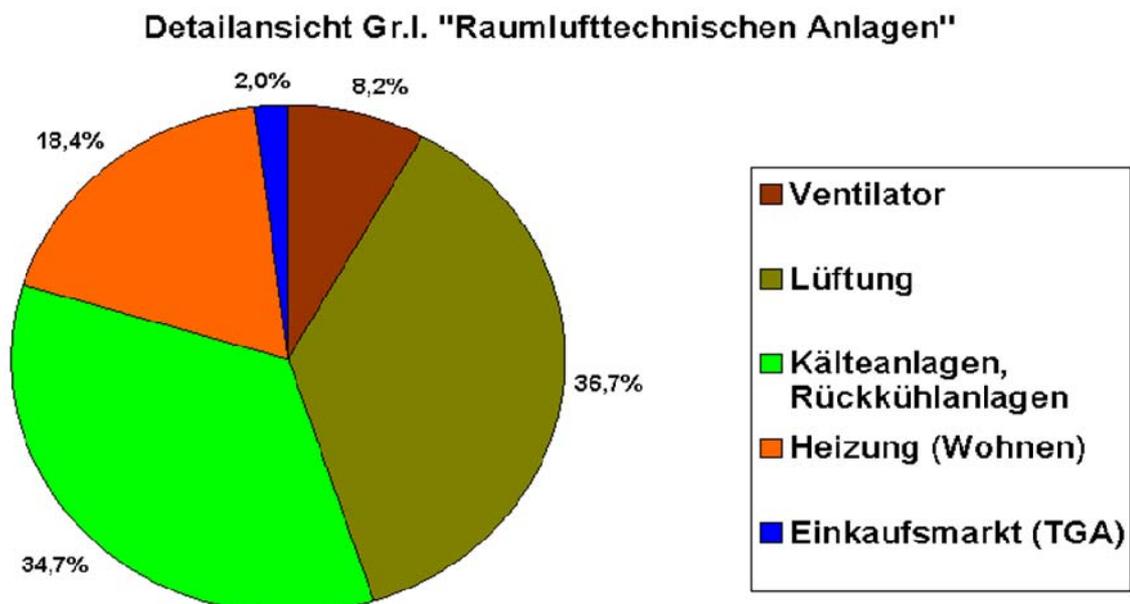


Abb. 4.1 Verteilung der Schallquellen innerhalb der Quellengruppen I (23 % von den Beschwerdefällen insgesamt) (Quelle: UBA, Machbarkeitsstudie zu Wirkungen von Infraschall, 2014)

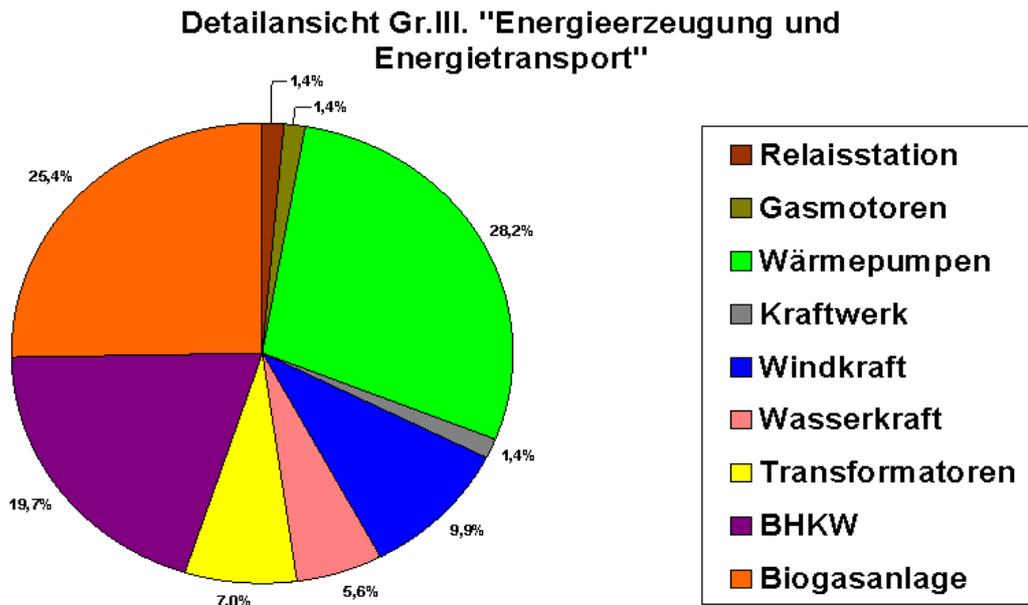


Abb. 4.2 Verteilung der Schallquellen innerhalb der Quellengruppen III (33 % von den Beschwerdefällen insgesamt) (Quelle: UBA, Machbarkeitsstudie zu Wirkungen von Infraschall, 2014)

Wie Abb. 4.3 zeigt, waren in 48,7 % der Beschwerdefälle tieffrequente Geräusche rein ursächlich für die Beschwerde. 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 %. Das Umweltbundesamt berichtet, dass die Beschwerdefälle mit Infraschall alleine (8,6 %) eine deutlich untergeordnete Rolle gegenüber den anderen vorliegenden Fällen spielen.

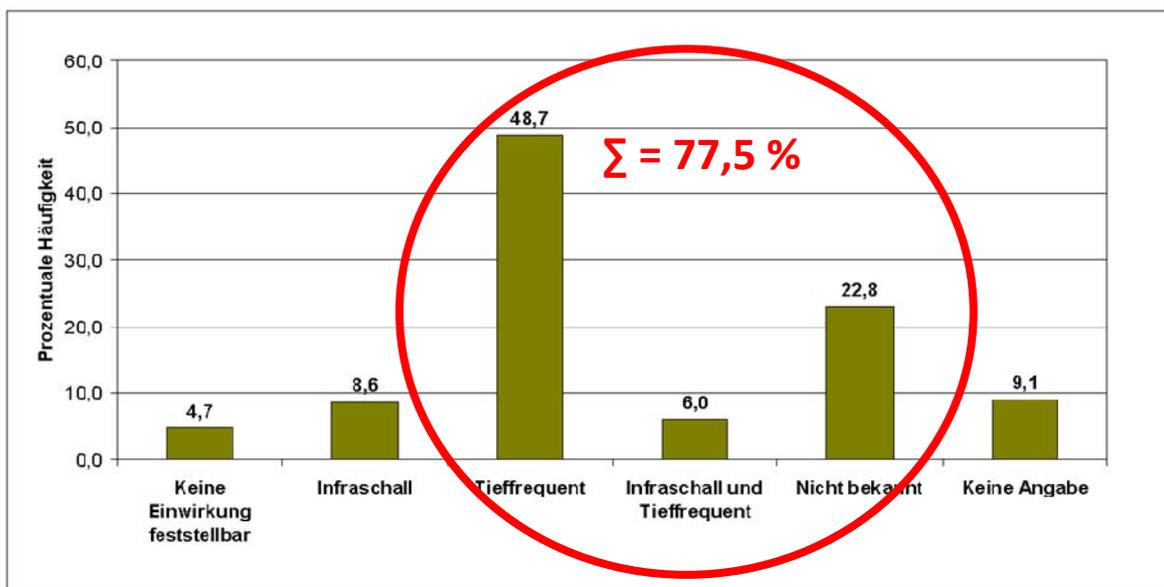


Abb. 4.3 Häufigkeitsverteilung der festgestellten Einwirkungen im Beschwerdefall (N231) (Quelle: UBA, Machbarkeitsstudie zu Wirkungen von Infraschall, 2014)

4.2 Tieffrequente Schallspektren

Für die Normung von Bewertungsverfahren ist von Interesse, in welchem Bereich die tieffrequenten Störfrequenzen der Geräte und Anlagen liegen, die immer wieder Anlass zur Beschwerde geben. Deshalb werden im Anhang A für die Schallemissionen die Terz-Schalleistungspegelspektren und im Anhang B für die Schallimmissionen in Räumen die Terz-Schalldruckpegelspektren einiger tieffrequenter Schallquellen zusammengefasst dargestellt. Die Zusammenstellung entstand aus Messergebnissen in besonders störenden Fällen, die von Müller-BBM z. T. bearbeitet wurden.

Wie die Schallspektren in Anhang A und B zeigen, gibt es in der Industrie- und Anlagentechnik eine Vielzahl von Schallquellen, welche dazu geeignet sind, erhebliche tieffrequente Geräuschimmissionen im Wohnumfeld hervorzurufen. Das betrifft am häufigsten den tieffrequenten Schall von 16 Hz bis 125 Hz. In eher weniger Fällen, den Schall von unter 16 Hz, den sogenannten Infraschall. Die höchsten Terzschalldruckpegel kommen am häufigsten im Frequenzbereich oberhalb von 16 Hz vor.

Im Abschnitt 4.2.1 und 4.2.2 wird stellvertretend an vier kleinen Beispielen dieses Frequenzbereichsphänomen deutlich gemacht.

4.2.1 Frequenzspektrale Verteilung der Schallemission von Schallquellen

Aus den hier folgenden Beispielen und denen in den Anhängen A und B wird deutlich, dass die maßgeblichen Schallerergerfrequenzen der Schallquellen sehr häufig oberhalb von 16 Hz, jedoch unterhalb von 125 Hz liegen. Hier werden beispielhaft die markanten Schalleistungspegelspitzen in den Terzbändern unterhalb von 125 Hz gezeigt.

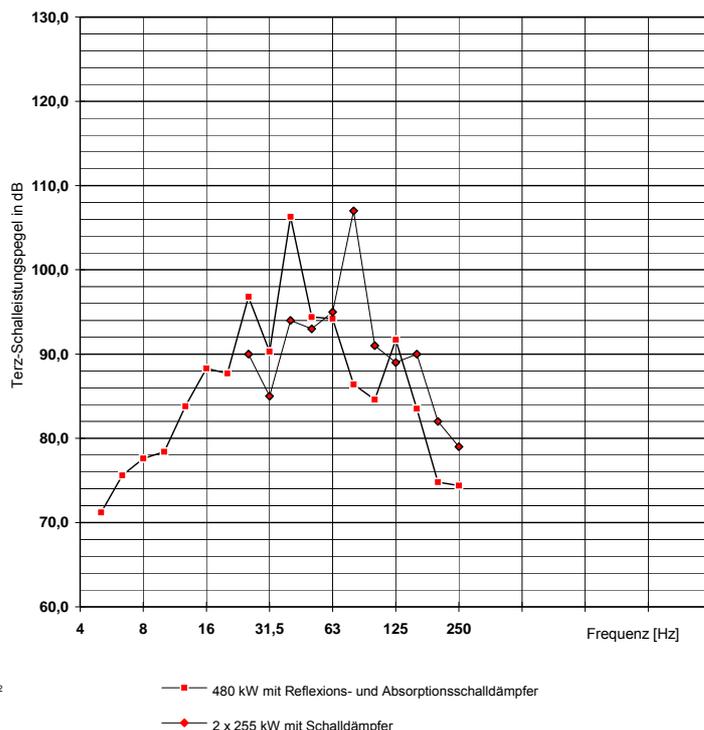


Abb. 4.4 Schalleistungspegel von Blockheizkraftwerken mit Abgasanlagen

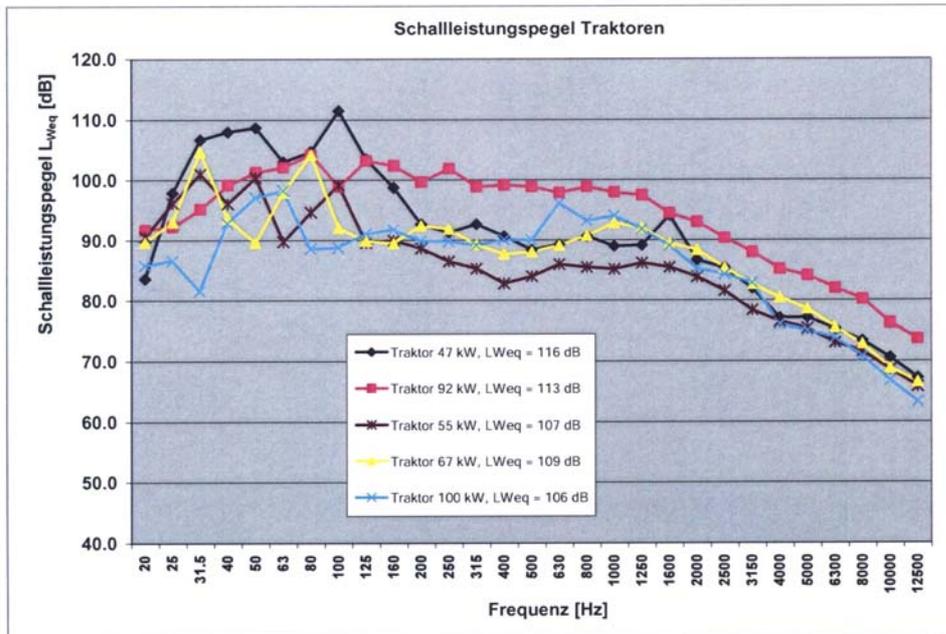


Abb. 4.5 Schalleistungspegel von Traktoren im Fahrsilobetrieb (LfU, 2011)

4.2.2 Tieffrequente Terzfrequenzspektren der Geräuschimmission in Räumen

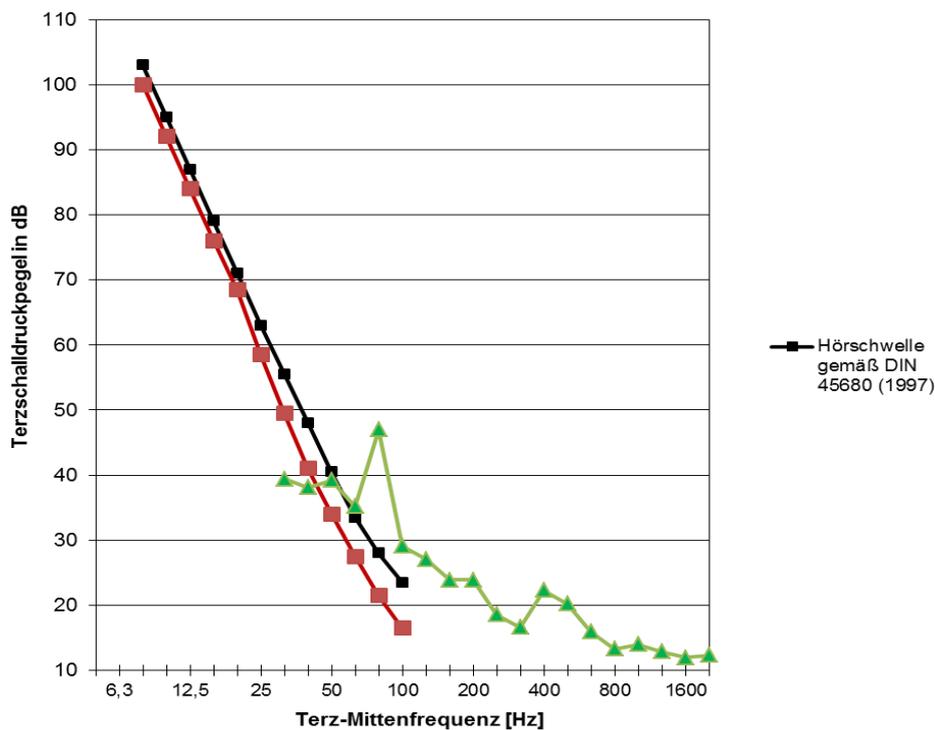


Abb. 4.6 Terzspektrum der Geräuschimmission im Raum, hervorgerufen durch eine Biogasanlage, $L_{Aeq} = 28,5$ dB(A), $L_{Ceq} = 48,1$ dB(A), $L_{Ceq} - L_{Aeq} = 19,6$ dB, schwarze Kurve: Hörschwelle gemäß DIN 45680 (1997), braune Kurve: Wahrnehmungsschwelle gemäß DIN(E) 45680 (2013) (Hofmann, M. 2014)

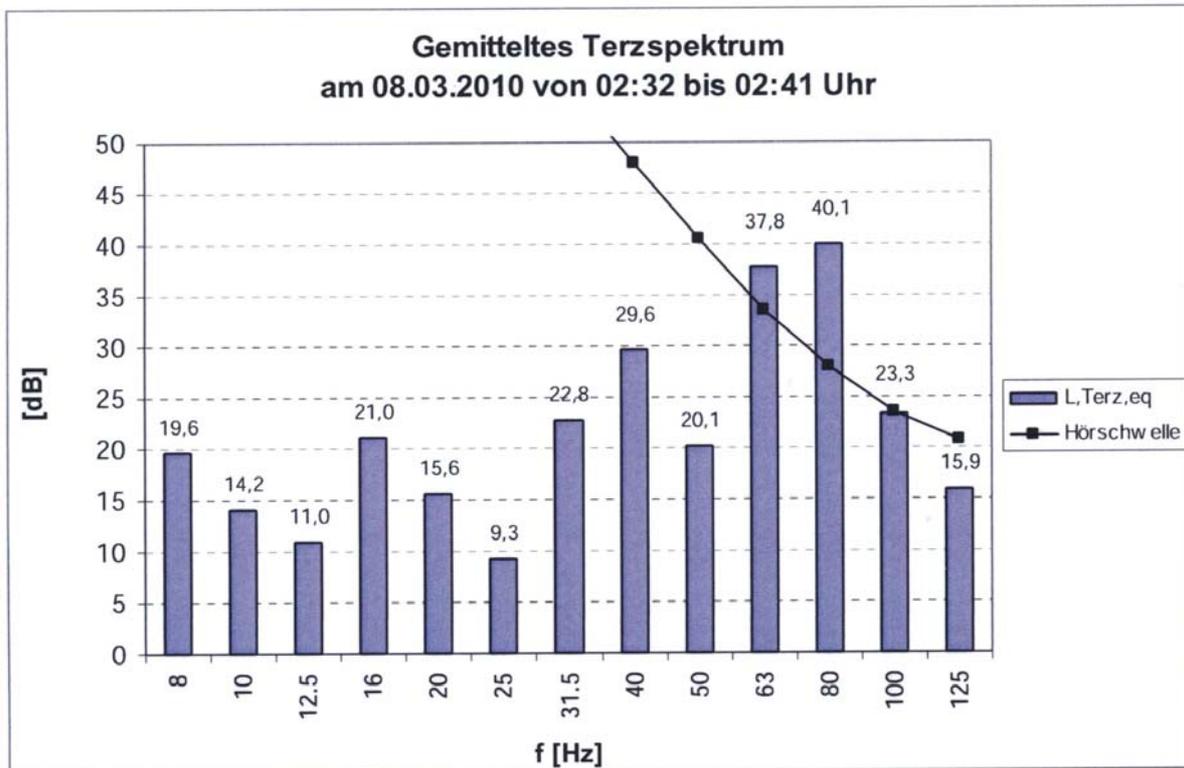


Abb. 4.7 Terzspektrum der Geräuschimmission im Raum, hervorgerufen durch eine Luftwärmepumpe mit tonhaltigem Frequenzverlauf bei tiefen Frequenzen und Überschreitung der Hörschwelle nach DIN 45680 (Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen und Luftwärmepumpen, Ein Leitfaden (Februar 2011))

Im Leitfaden für die Verbesserung des Schutzes gegen Lärm bei stationären Geräten vom 28.08.2013 heißt es: „*Treten bei Klimageräten, Kühlgeräten, Lüftungsgeräten und Luft-Wärme-Pumpen tieffrequente Geräuschemissionen auf, so sind die Emissionen in der Regel erst ab dem Terzband mit der Mittenfrequenz 50 Hz zu beobachten (z. B. wechselstrombetriebene Kompressoren und Lüfter). Bei Mini-Blockheizkraftwerken ist zu berücksichtigen, dass die Motordrehzahl variabel sein kann. Unabhängig davon können hier aber auch bei fester Motordrehzahl Geräuschemissionen in Terzbändern unter 50 Hz auftreten.*“ (Quelle: Leitfaden für die Verbesserung des Schutzes gegen Lärm bei stationären Geräten Stand 28.08.2013)

5 Hörschwellen und Kurven gleicher Lautstärkepegel

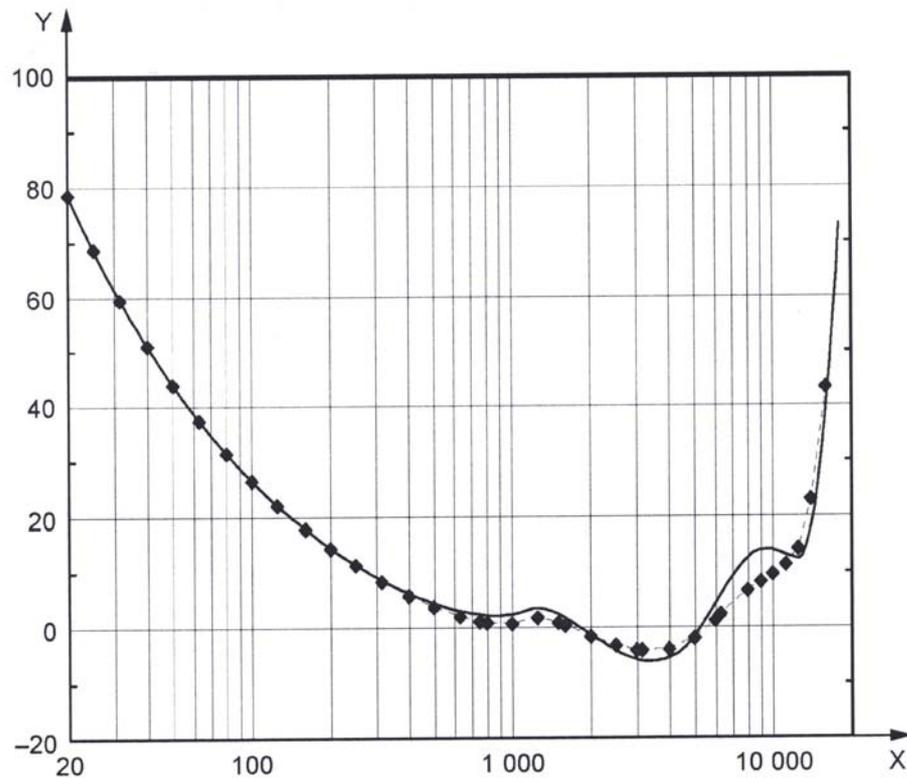
5.1 DIN EN ISO 389-7 vom April 2006 – Akustik – Bezugshörschwellen unter Freifeld- und Diffusfeldbedingungen

Die Norm beschreibt die Bezugshörschwellen, die für Freifeld- und Diffusfeldbedingungen gelten. Gegenüber der DIN 45630-2 vom September 1967 und der DIN EN ISO 389-7 vom Dezember 1998 wurden einige wesentliche Änderungen vorgenommen. Es ist bekannt, dass die Hörschwelle von Mensch zu Mensch sehr variiert. Für eine Gruppe otologisch normaler Personen in einem beschränkten Altersbereich können aber Werte bestimmt werden, die das mittlere Verhalten der Gruppe beschreiben. In dieser Norm werden Hörschwellendaten festgelegt, die für otologisch normale Personen im Altersbereich von 18 bis 25 Jahren gelten. Die Hörschwelle für das Freifeld basiert auf wesentlich mehr Datenmaterial als in der früheren DIN 45630-2 (1967). Zusätzlich wird die Hörschwelle im Diffusschallfeld angegeben. Die Daten beziehen sich auf

- a) reine Töne, die binaural in einer sich frei ausbreitenden ebenen Schallwelle gehört werden, wobei sich der Hörer direkt der Schallquelle gegenüber befindet (frontaler Schalleinfall), und deren Schalldruckpegel in der sich frei ausbreitenden Schallwelle an der Position des Mittelpunktes des Kopfes des Hörers in Abwesenheit des Hörers gemessen wird;
- b) terzbandbreites (weißes oder rosa) Rauschen, das binaural im diffusen Schallfeld gehört wird und dessen Schalldruckpegel im Schallfeld an der Position des Mittelpunktes des Kopfes des Hörers in Abwesenheit des Hörers gemessen wird.

Die Hörschwellenwerte wurden auf der Grundlage von Untersuchungen aus verschiedenen Ländern ermittelt, wobei die Daten auf spezieller Auswertung basieren. Die bis zu diesem Zeitpunkt bekannten Daten stellen momentan die verlässlichste Basis der Untersuchungen dar. Die Bezugshörschwellen für reine Töne bei binauralem Hören im freien Schallfeld (frontaler Schalleinfall) und für Terzrauschen bei binauralem Hören im diffusen Schallfeld zeigt die Abb. 5.1. Die Daten für die Bezugshörschwellen unter Freifeld- und Diffusfeldbedingungen zeigen eine gute Übereinstimmung.

Die experimentellen Daten, die die Basis für die Ermittlung der Bezugshörschwellen unter Freifeld- und Diffusfeldbedingungen bilden, werden im Anhang A der Norm DIN EN ISO 389-7 (2006) ausführlich beschrieben.



Legende

- X Frequenz, Hz
 Y Schalldruckpegel, dB
- Freifeld
 ---◆--- Diffusfeld

Abb. 5.1 Bezugshörschwellen für reine Töne bei binauralem Hören im freien Schallfeld (frontaler Schalleinfall) und für Terzrauschen bei binauralem Hören im diffusen Schallfeld gemäß DIN EN ISO 389-7 vom April 2006

Für die Terzmittenfrequenzen von 20 Hz bis 18.000 Hz werden die Bezugshörschwellen in der Tabelle C 1 im Anhang C dargestellt, um die Differenzen der Bezugshörschwellen zwischen Freifeld- und Diffusfeld-Bedingungen auch quantitativ deutlich zu machen.

5.2 Nicht standardisierte Hörschwellen im Frequenzbereich von 2 Hz bis 125 Hz

5.2.1 Studien zu einer Normalhörschwelle im tieffrequenten Frequenzbereich

Zur Ermittlung einer Hörschwelle im Frequenzbereich von 2 Hz bis 125 Hz wurden einige Studien in den vergangenen Jahrzehnten durchgeführt. In den Untersuchungen zur Hörschwelle im Infraschallbereich wird davon ausgegangen, dass bei ausreichend hohen Schalldruckpegeln eine Wahrnehmung über das Gehör möglich ist. Die Untersuchungen weisen darauf hin, dass die Hörschwelle im Infraschallbereich eine gute Fortsetzung der Hörschwelle im Hörschallbereich darstellt.

Die folgenden Abb. 5.2 bis 5.5 präsentieren Hörschwellen aus wissenschaftlichen Studien unabhängiger Forschergruppen. *Møller und Pedersen* zeigen die Entwicklung einer Hörschwelle für tieffrequente Geräusche über die Jahrzehnte.

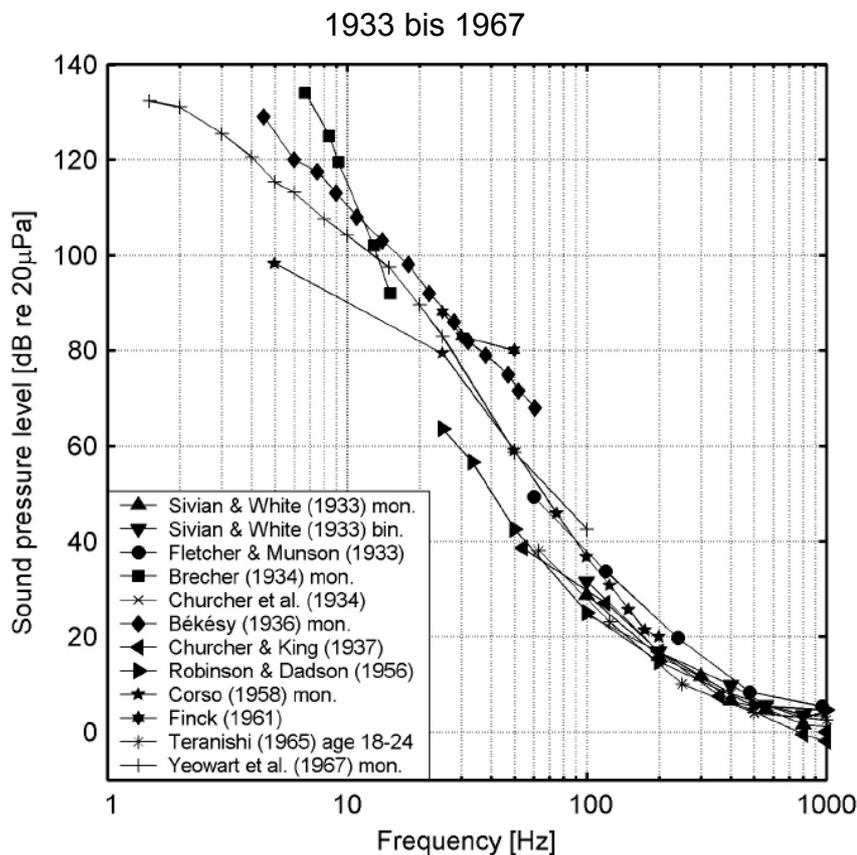


Abb. 5.2 Gemessene Hörschwellen im tieffrequenten Frequenzbereich in den Jahren von 1933 bis 1967 (Quelle: Møller, H., Pedersen, C. S.: Hearing at low and infrasonic frequencies, *Noise & Health* 2004; 6:23, 37 – 57)

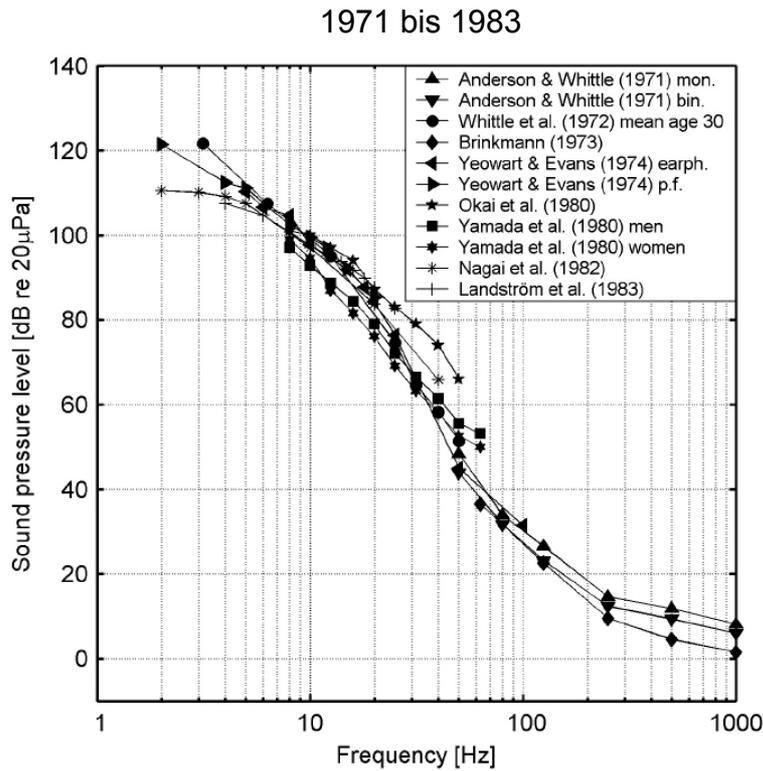


Abb. 5.3 Gemessene Hörschwellen im tieffrequenten Frequenzbereich in den Jahren von 1971 bis 1983 (Quelle: Møller, H., Pedersen, C. S.: Hearing at low and infrasonic frequencies, *Noise & Health* 2004; 6:23, 37 – 57)

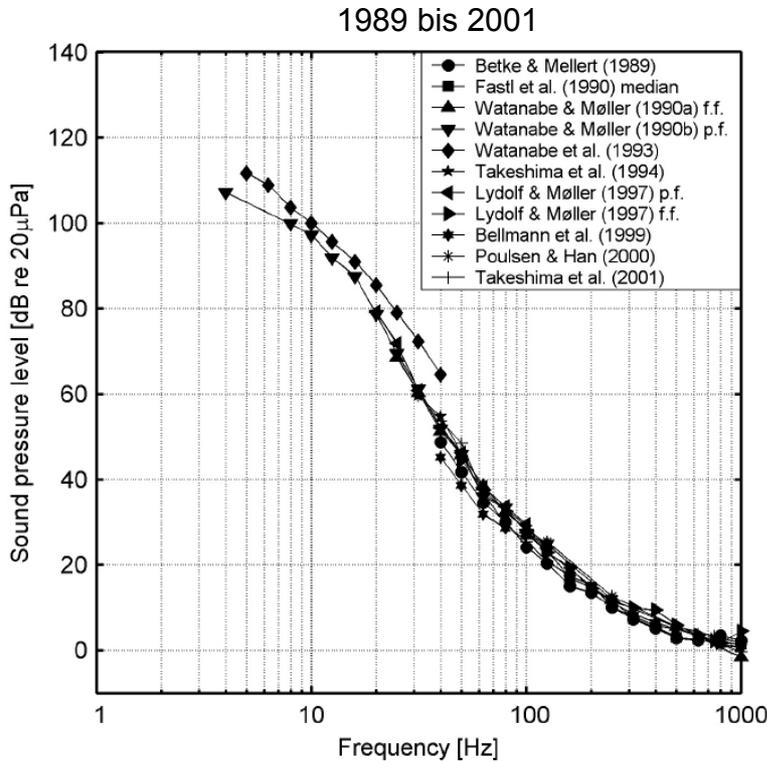


Abb. 5.4 Gemessene Hörschwellen im tieffrequenten Frequenzbereich in den Jahren von 1989 bis 2001 (Quelle: Møller, H., Pedersen, C. S.: Hearing at low and infrasonic frequencies, *Noise & Health* 2004; 6:23, 37 – 57)

Die o.g. Ergebnisse in den Abb.5.2 bis 5.4 lassen sich durch Regression der Einzelwerte als nichtstandardisierte Normalhörschwelle zusammenfassen. Die Abb.5.5 stellt sie dar. Außerdem wird der Versuch unternommen den Anschluss der nichtstandardisierte Normalhörschwelle im tieffrequenten Frequenzbereich unterhalb von 20 Hz an die Hörschwelle nach ISO 226 (2003) zu vollziehen.

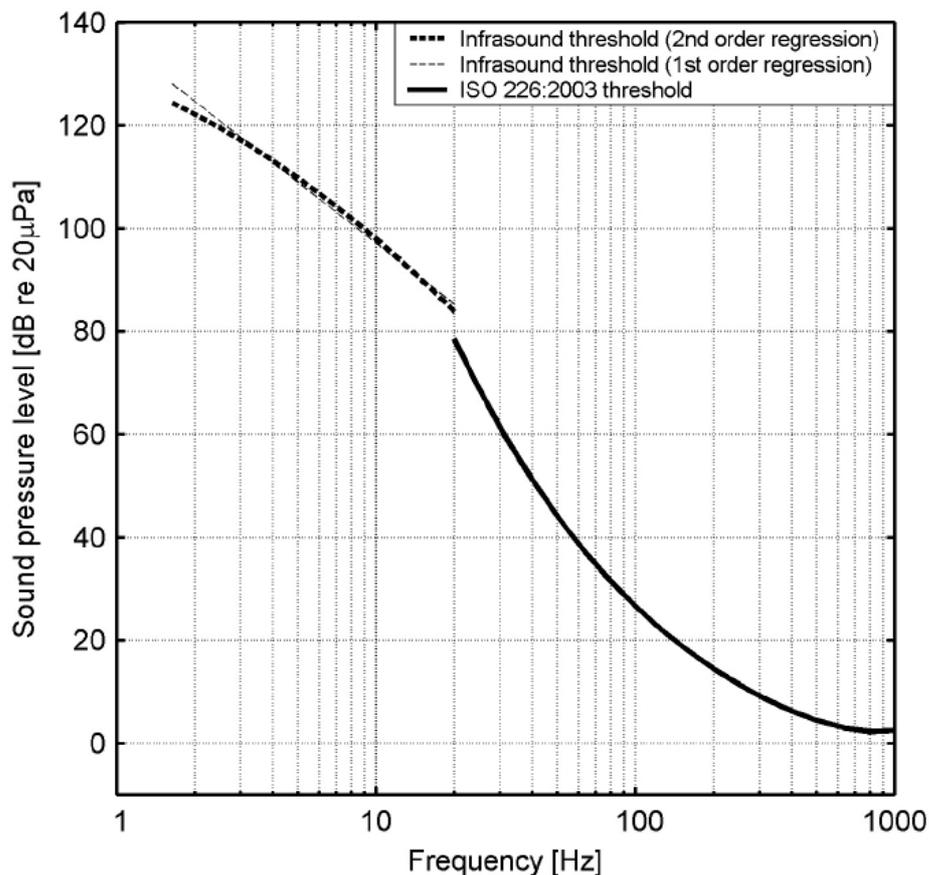


Abb. 5.5 Hörschwelle gemäß ISO 226 (2003) mit Anschluss an die nichtstandardisierte Normalhörschwelle im tieffrequenten Frequenzbereich unterhalb von 20 Hz (Quelle: Møller, H., Pedersen, C. S.: Hearing at low and infrasonic frequencies, Noise & Health 2004; 6:23, 37 – 57)

Soweit es möglich war, wurden von Müller-BBM die zugänglichen Daten der o.g. Untersuchungen im originalen Schrifttum gesichtet und ausgewertet. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tab. 5.1 aufgelistet.

Tab. 5.1 Untersuchungen zu den Hörschwellen im tieffrequenten Bereich für die Jahre 1958 bis 1997

Untersucher	Corso	Yeowart, Bryan & Tempest	Whittle et al	Yeowart & Evans		Moller & Andresen	
Titel der Untersuchung	"Absolute thresholds for tones of low frequencies"	"Monaural MAP Threshold of Hearing at Frequencies From 1.5 to 100 cs"	"The Audibility of Low-Frequency Sounds"	"Thresholds of audibility for very low-frequency pure tones"		"Loudness of Pure Tones at Low and Infrasonic Frequencies"	
Jahr d. Veröff.	1958	1967	1971	1974		1984	
Land	USA	England	England	England		Dänemark	
Schallfeld/Methode	Druckkammer	Kopfhörer (monaural)	Druckkammer	Druckkammer (binaural)	Kopfhörer (binaural)	Reflexionsarmer Raum	Infraschall Testkammer
Frequenzbereich	5 bis 200 Hz	1,5 Hz bis 100 Hz	3,15 Hz bis 50 Hz	2 Hz bis 20 Hz	5 Hz bis 100 Hz	63 Hz und 1000 Hz	5 Hz bis 63 Hz
Gemessen bei Einzelfrequenzen (in Hz)	-	1.5, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 50, 100	3.15, 6.3, 12.5, 25, 31.5, 40, 50	2, 4, 5, 8, 10, 12, 15, 20	5, 6, 8, 10, 15, 18, 20, 25, 50, 100	63, 1000	2, 4, 8, 16, 31.5, 63
Anzahl der Versuchspersonen	15	10	Gruppe (i) 23 Gruppe (ii) 35 Gesamt 58	12	5	20	
Alter der Versuchspersonen	-	nicht angegeben	Gruppe (i) 30 Gruppe (ii) 47; 30 bis 47	23 – 33		18 – 25	

Fortsetzung Tab. 5.1 Untersuchungen zu den Hörschwellen im tieffrequenten Bereich für die Jahre 1958 bis 1997

Untersucher	Watanabe & Moller		Lydolf & Moller	Okai	Yamada et.al.	Nagai et.al	Landstrom et.al	Watanabe et.al.
Titel der Untersuchung	"Hearing Thresholds and Equal Loudness Contours in Free Field at Frequencies Below 1kHz"	"Low Frequency Hearing Thresholds in Pressure Field and in Free Field"	"New measurements of the threshold of hearing and equal-loudness contours at low frequencies"	"Physiological parameters in human response to infrasound"	"Hearing of low frequency sound and influence on human body"	"The threshold of sensation for infrasound"	"Exposure to infrasound - Perception and changes in wakefulness"	"A study on the psychological evaluation of low frequency noise"
Jahr d. Veröff.	1991	1991	1997	1980	1980	1982	1983	1993
Land	Dänemark			Japan	Japan		Schweden	Dänemark
Schallfeld/Methode	Freifeld	Druckfeld	Druckkammer	Druckkammer	Druckkammer	Druckkammer	Druckkammer	Druckkammer
Frequenzbereich	25 Hz bis 1000 Hz	4 Hz bis 125 Hz	20 Hz bis 100 Hz	8 Hz bis 50 Hz	8 Hz bis 63 Hz	2 Hz bis 40 Hz	4 Hz bis 25 Hz	5 Hz bis 40 Hz
Gemessen bei Einzel-frequenzen (in Hz)	25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 250, 500, 1000	4, 8, 10, 12.5, 16, 20, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, 125		8, 10, 12.5, 16, 20, 25, 31.5, 40, 50	8, 16, 31.5, 63		4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25	
Anzahl der Versuchs-personen	12	12	14 plus 9	30 (28 gesund)	24	62	20	20
Alter der Versuchs-personen	18 – 30 (23.2)	18 – 30 (23.2)		20 – 60	Ø 20		36 – 37 (Ø 33)	

Die menschliche Hörschwelle ist individuell sehr unterschiedlich. Sie variiert insbesondere am oberen und unteren Ende des Hörspektrums stärker als im mittleren Bereich des Hörschalls. In der Untersuchung von Kurakata, K. (2008) wird gezeigt, wie im tieffrequenten Bereich die Hörschwellenwerte streuen (siehe Abb. 5.6).

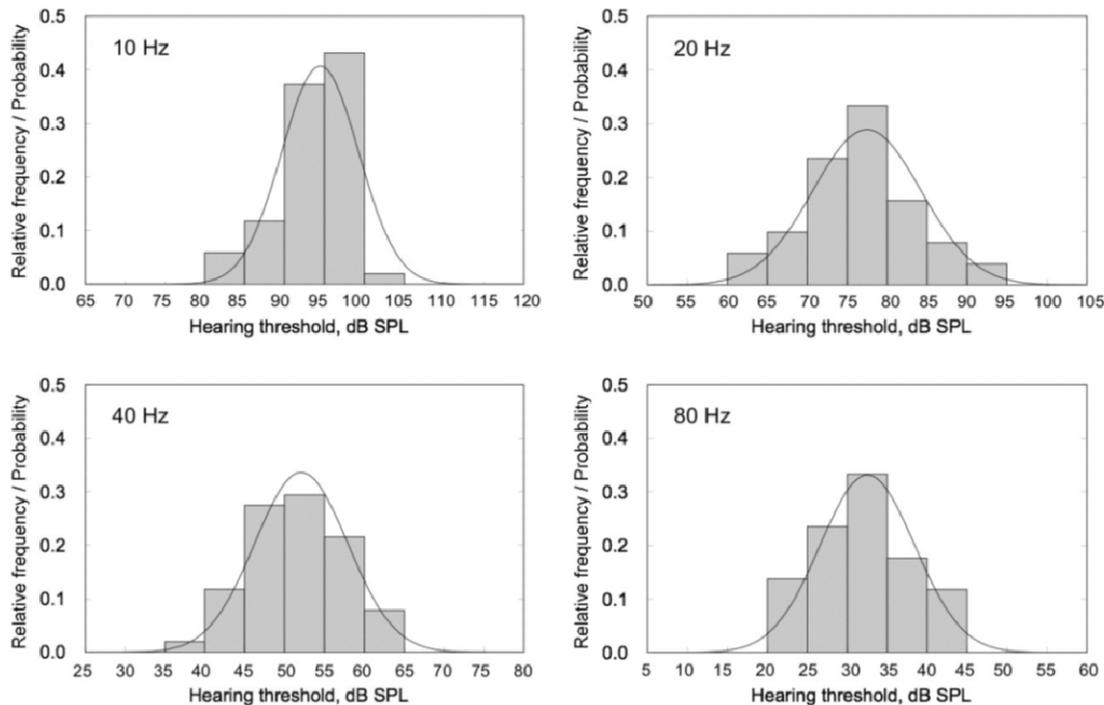


Abb. 5.6 Empirische Verteilung der Hörschwellenpegel bei 10 Hz, 20 Hz, 40 Hz und 80 Hz, gemessen im freien Schallfeld im Vergleich mit der statistischen Normalverteilungskurve (Quelle: Kenji Kurakata and Tazu Mizunami, The Statistical Distribution of Normal Hearing Thresholds for Low-Frequency Tones; Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Noise Control, Vol. 27, No. 2, 2008, Pages 97 – 104)

Aus der empirischen Verteilung der Hörschwellenpegel gemäß Abb. 5.6 erhält man den ersten Aufschluss über deren Streuung, indem man den kleinsten und größten Schalldruckpegel der Messreihe betrachtet. Es kann angenommen werden, dass die Standardabweichung der Schalldruckpegel umso größer ist, je stärker diese auseinander liegen.

Die Schallpegel-Variationsweite ΔL_V der Hörschwellenwerte ist die Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten Schalldruckpegel der empirischen Verteilung. Es gilt für das Beispiel in Abb. 5.6:

$$\Delta L_{V10\text{Hz}} = L_{H\text{max}} - L_{H\text{min}} = 25 \text{ dB}$$

$$\Delta L_{V20\text{Hz}} = L_{H\text{max}} - L_{H\text{min}} = 35 \text{ dB}$$

$$\Delta L_{V40\text{Hz}} = L_{H\text{max}} - L_{H\text{min}} = 30 \text{ dB}$$

$$\Delta L_{V80\text{Hz}} = L_{H\text{max}} - L_{H\text{min}} = 25 \text{ dB}$$

Allerdings ist die Standardabweichung s die maßgeblichere Größe für die Streuung einer Stichprobe als die Schallpegel-Variationsweite ΔL_v . Die Standardabweichung s ist die wichtigste Rechengröße für die zahlenmäßige Abschätzung der zufälligen Abweichungen der Einzel-Hörschwellenpegel L_{Hi} einer Messreihe um ihren Schallpegel-Mittelwert \bar{L}_H .

Für die unten angegebenen Berechnungen werden die in der ISO 28961 (2012) angegebenen Standardabweichung s der Hörschwellenpegel L_H verwendet.

Es wird davon ausgegangen, dass bei so großen Streuungen, wie sie oben in Abb.5.6 gezeigt werden, hinlänglich große Stichproben notwendig sind. Es ist daher wichtig, bei der Versuchsplanung zu überlegen, wie groß Stichproben für Hörschwellenuntersuchungen eigentlich sein müssten. Es gilt: je weniger Versuchspersonen zur Verfügung stehen, umso geringere Aussicht besteht, die Hörschwelle durch den Schätzwert \bar{x} einer Stichprobe als Aussage für die Grundgesamtheit zu sichern.

Für intervallskalierte Daten gilt für die Berechnung der Größe einer Stichprobe:

$$n \geq \frac{u^2 \cdot s^2}{e^2}$$

mit

n Umfang der Stichprobe

u der u -Wert, welcher dem vorgegebenen Sicherheitsniveau der Normalverteilung entspricht (z. B. $u_{0,05} = 1.96$ und für $u_{0,01} = 2.58$, siehe Tafel für die Normalverteilung)

s Standardabweichung einer Stichprobe

$e = |\bar{x} - \mu|$ Absolutbetrag der Differenz zwischen Schätzwert \bar{x} und Parameter des arithmetischen Mittels μ der Grundgesamtheit.

Zur Einschätzung der Anzahl der Versuchspersonen in Tab. 5.1 wurde hier der Stichprobenumfang für die Prüffrequenz von 20 Hz, 40 Hz und 80 Hz berechnet.

Wie groß muss die Stichprobe einer Hörschwellenuntersuchung für tieffrequenten Schall unterhalb von 20 Hz sein, wenn eine statistische Sicherheit von 95 % gelten soll und ein Fehler $e = 1$ dB zugelassen und auf Grund der Untersuchungen zur ISO 28961 (2012) für 20 Hz eine Standardabweichung von $s_{20\text{Hz}} = 6,14$ dB, für 40 Hz von $s_{40\text{Hz}} = 6,37$ dB und für 80 Hz von $s_{80\text{Hz}} = 4,58$ dB angenommen wird?

$e = 1$ dB soll hier bedeuten, dass sich der Stichprobenmittelwert \bar{x} vom wahren Wert der Grundgesamtheit μ höchstens um den Betrag von 1 dB unterscheidet.

$$n_{20\text{Hz}} \geq \frac{1,96^2 \cdot 6,14^2}{1^2} \approx 145$$

$$n_{40\text{Hz}} \geq \frac{1,96^2 \cdot 6,37^2}{1^2} \approx 156$$

$$n_{80\text{Hz}} \geq \frac{1,96^2 \cdot 4,58^2}{1^2} \approx 81$$

Die Ergebnisse machen deutlich, dass die Strichprobe einer Hörschwellenuntersuchung um so größer sein muss, je tieffrequenter die zu untersuchende Hörprüffrequenz ist.

Wegen der kleinen Fallzahlen in den Untersuchungen nach Tab. 5.1 wird davon ausgegangen, dass die Hörschwelle im tieffrequenten Bereich unterhalb von 20 Hz sehr unsicher ist. Wenn die Hörschwelle nach Abb. 5.5 verwendet werden soll, ist eine Validierung der Daten notwendig.

Im Vergleich zur nichtstandardisierten Normalhörschwelle im tieffrequenten Bereich (< 20 Hz), wird im Gegensatz dazu im Abschnitt 5.1 gezeigt, dass die Bezugshörschwelle nach DIN EN ISO 389-7 (2006) auf der Grundlage großer Untersucherzahlen vieler wissenschaftlicher Untersuchungen normiert wurde.

5.2.2 Studien zu den tieffrequenten Hörschwellen besonders empfindlicher Personen im Frequenzbereich von 2 Hz bis 125 Hz

Die Erfahrung bei der Bearbeitung praktischer Beschwerdefälle deutet darauf hin, dass es Personen mit einer besonders niedrigen Wahrnehmungsschwelle für tieffrequenten Schall gibt. Diese Menschen können tieffrequente Geräusche besser hören bzw. wahrnehmen, als es nach der Hörschwelle der DIN 45680 (1997) zu erwarten wäre. Deshalb ist der Frage nachzugehen: Sind Untersuchungen bekannt, die darauf hinweisen, dass es Personen mit einer besonders niedrigen Wahrnehmungsschwelle für tiefe Frequenzen gibt?

Die Studien, wie z. B. von *Okai et al. (1980)*, *Yamada et al. (1980)* und *Lydolph, unveröffentlicht, 1997*, zitiert in *Møller, H., Pedersen, C. S. (2004)*, erwähnen Personen mit außergewöhnlich hohem Hörempfinden im Frequenzbereich des tieffrequenten Schalls einschließlich Infraschall. Abb. 5.7 zeigt drei Fälle im Vergleich zur ISO 226 (2003) und der vorgeschlagenen normalen Hörschwelle bei Frequenzen im Infraschallbereich. *Møller, H., Pedersen, C. S. (2004)* haben bei der Annahme einer Normalverteilung der Hörschwelle im Frequenzbereich des tieffrequenten Schalls einschließlich Infraschall eine Standardabweichung von 5 dB berechnet. In Abb. 5.7 weisen jedoch die empfindlichen Personen Hörschwellenpegel auf, die 20 dB unter dem Mittelwert der Normalhörschwellen für tieffrequenten Schall einschließlich Infraschall (gestrichelte und glatte Kurve) liegen. Die Hörschwellenabweichungen der besonders hörempfindlichen Personen sind so groß, dass sie sich sogar außerhalb der doppelten Standardabweichung befinden. Deshalb wird von *Møller, H., Pedersen, C. S. (2004)* angenommen, dass es für die hohen Schallpegelabweichungen der Hörschwellenwerte schallempfindlicher Personen noch andere Erklärungen für die Schallwahrnehmung der niedrigen Hörschwellen geben muss. Die Forscher vermuten, dass neben der Hörempfindung noch andere Rezeptorsysteme an der Wahrnehmung von tieffrequentem Schall beteiligt sind (*Møller, H., Pedersen, C. S. (2004)*).

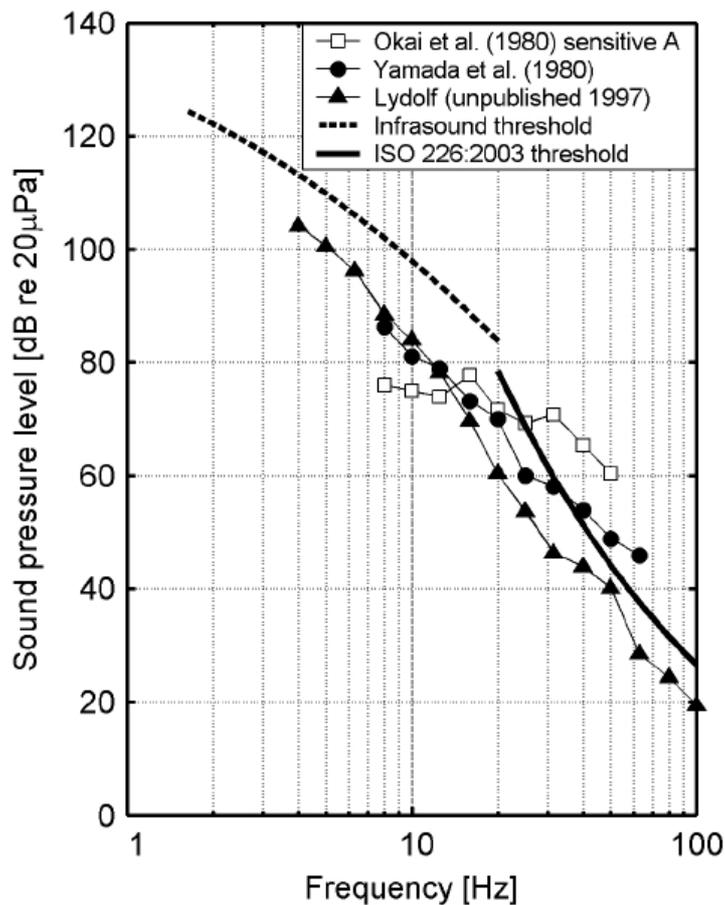


Abb. 5.7 Hörschwellen von drei besonders empfindlichen Personen in den o. g. Untersuchungen (Quelle: Møller, H., Pedersen, C. S.: Hearing at low and infrasonic frequencies, *Noise & Health*, 2004; 6:23, 37 – 57)

So werden z. B. von Salt (*Perception-based protection from low-frequency sounds may not be enough – Internoise 2012*) Versuchsergebnisse im Infraschallbereich an Mehrschweinchen (Guinea Pig) diskutiert, die auf das menschliche Gehör übertragen werden. Salt beschäftigt sich mit den inneren und äußeren Haarzellen in der Hörschnecke. Die inneren Haarzellen sind flüssigkeitsgekoppelt und liefern der lokalen Schnelle proportionale Signale. D. h. mittlere und hohe Frequenzen können gut erfasst werden, sehr tiefe Frequenzen mit langsamen Bewegungen in der Flüssigkeit können die inneren Haarzellen kaum anregen. Demgegenüber sind die äußeren Haarzellen in der Hörschnecke sensitiv gegenüber Verschiebung und können deshalb auch sehr niedrige Frequenzen erfassen. Die Empfindlichkeit liegt etwa um 25 dB unter den üblicherweise angegebenen Hörschwellen für Infraschall. Untersuchungen mit Versuchspersonen zur Überprüfung der Annahmen von Salt liegen, soweit im Rahmen dieser Arbeit prüfbar, jedoch derzeit nicht vor. Es muss bezweifelt werden, ob die Untersuchungen von Salt uneingeschränkt auf den Menschen übertragen werden können.

5.3 ISO 28961 vom Januar 2012 – Acoustics – statistical distribution of hearing

Der internationale Normentwurf stellt ein Verfahren zur Berechnung von Perzentilen aus der Hörschwellenverteilung zur Verfügung. Die schwankenden Hörschwellenpegel verteilen sich statistisch um einen Mittelwert. Der Mittelwert der Hörschwellenverteilung steht in Übereinstimmung mit der DIN ISO 226 (2006) und der DIN EN ISO 389-7 (2006). In DIN EN ISO 389-7 ist die Bezugshörschwelle festgelegt. Sie stimmt mit dem 50 % Perzentilwert der hier vorliegenden Norm ISO 28961 (2012) überein.

Die Mittelwert- und Perzentilwerthörschwellen sind unter folgenden Bedingungen festgelegt:

- a) das Schallfeld in Abwesenheit des Hörers besteht aus einer frei fortschreitenden ebenen Welle (Freifeld),
- b) die Schallquelle befindet sich unmittelbar vor dem Hörer (Schalleinfall von vorn),
- c) die Schallsignale sind reine Sinustöne,
- d) der Schalldruckpegel wird in Abwesenheit des Hörers an dem Ort gemessen, an dem sich der Mittelpunkt des Kopfes des Hörers befinden würde,
- e) das Hören erfolgt binaural,
- f) die Hörer sind otologisch normale Personen im Alter von 18 bis 25 Jahren.

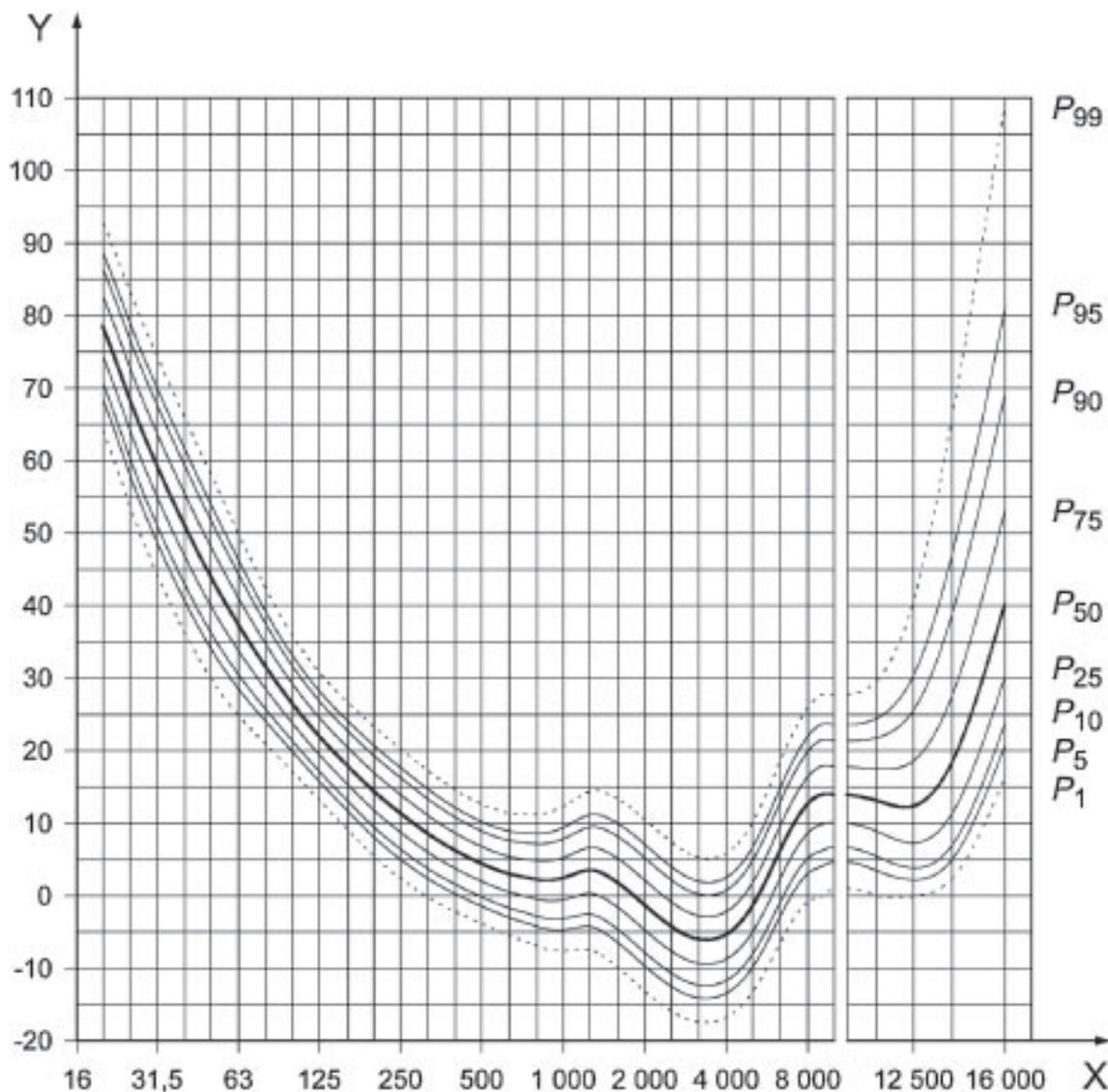


Abb. 5.8 Perzentilkurven der Hörschwellenverteilung gemäß ISO 28961 (2012)

Eine sehr gute Darstellung der Hörschwellenverteilung findet sich auch in den Publikationen von *Kenji Kurakata (2008)* (Quelle: Kenji Kurakata and Tazu Mizunami, The Statistical Distribution of Normal Hearing Thresholds for Low-Frequency Tones; Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Noise Control, Vol. 27, No. 2, 2008, Pages 97 – 104).

Tab. 5.2 zeigt die Bezugshörschwelle nach DIN EN ISO 389-7 (2006) mit Angabe der Standardabweichung und der Perzentil-Hörschwellen nach ISO 28961 (2012) in dem hier interessierenden Frequenzbereich von 20 Hz bis 125 Hz und gibt einen Überblick für die Einordnung der Hörschwellenpegel nach der DIN 45680 (1997).

Darin bedeutet beispielsweise „*P_{1%}-Perzentil-Hörschwelle*“, dass unterhalb dieser Schwelle weniger als ein Prozent der Menschen noch Schall im tieffrequenten Bereich wahrnehmen.

Tab. 5.2 Bezugshörschwelle nach DIN EN ISO 389-7 (2006) mit Angabe der Standardabweichung und den Perzentil-Hörschwellen nach ISO 28961 (2012) sowie zum Vergleich der Hörschwellenpegel nach DIN 45680 (1997) und der Wahrnehmungsschwelle gemäß Entwurf der DIN 45680 (2013)

Terz- frequenz f_{Terz} Hz	Werte der Bezugs- hörschwelle nach DIN EN ISO 389-7 (2006) dB	Standard- abweichung σ_f Bezugshör- schwelle ISO 28961 (2012) dB	P _{1%} - Perzentil- Hörschwelle ISO 28961 (2012) dB	P _{5%} - Perzentil- Hörschwelle ISO 28961 (2012) dB	P _{10%} - Perzentil- Hörschwelle ISO 28961 (2012) dB	P _{25%} - Perzentil- Hörschwelle ISO 28961 (2012) dB	Hör- schwellen- pegel DIN 45680 (1997) dB	Wahr- nehmungsschwelle DIN (E) 45680 (2013) dB
20	78,5	6,14	64	68	71	74	71,0	68,5
25	68,7	6,38	54	58	61	64	63,0	58,7
31,5	59,5	6,48	44	49	51	55	55,5	49,5
40	51,1	6,37	36	41	43	47	48,0	41,1
50	44,0	6,04	30	34	36	40	40,5	34,0
63	37,5	5,40	25	29	31	34	33,5	27,5
80	31,5	4,58	21	24	26	28	28,0	21,5
100	26,5	4,03	17	20	21	24	23,5	16,5
125	22,1	3,79	13	16	17	20	-	12,1

Die Hörschwelle der aktuell gültigen Norm DIN 45680 (1997) stimmt fast mit der P_{25%}-Perzentil-Hörschwelle nach ISO 28961 überein. Das bedeutet: Etwa 25 % der Menschen können besser hören bzw. wahrnehmen, als es die Hörschwelle der DIN 45680 (1997) beschreibt.

5.4 Die Abhängigkeit der Hörschwellen in Bezug auf das Alter und das Geschlecht

5.4.1 DIN EN ISO 7029 (E) vom September 2014 – Akustik – Statistische Verteilung von Hörschwellen in Bezug auf das Alter und das Geschlecht

Die altersbedingten Hörverluste werden in der DIN EN ISO 7029 (E) vom September 2014 beschrieben. Die Norm ergänzt in hervorragender Weise die ISO 28961 (2012). Damit kann auch zur Hörschwelle in Abhängigkeit vom Alter und Geschlecht eine Aussage getroffen werden. Die individuellen Unterschiede werden deutlich. *Robinson und Dadson* untersuchten schon 1956 die Hörschwellen in Abhängigkeit vom Alter. In der Untersuchung von Robinson und Dadson wird gezeigt, dass die Alterung des Hörorgans relativ zeitig einsetzt. Die eingeschränkte Hörfähigkeit kann schon bei 30-jährigen Personen eindeutig nachgewiesen werden. Insbesondere bei hohen Frequenzen beginnt ein allmähliches Nachlassen der Hörfähigkeit. Es kommt zu einer für den Betroffenen zunächst wenig störenden, häufig auch unbemerkten Hörschwellenverschiebung im Hochtonfrequenzbereich.

Schon in früheren Untersuchungen wurde festgestellt, dass bei otologisch normal hörenden Personen der Hörverlust bei Männern mit zunehmendem Alter im Mittel höher ist als bei Frauen. Deshalb wird in der DIN EN ISO 7029 (E) (2014) zwischen Männern und Frauen unterschieden, da sich der Unterschied für Gruppen älterer Personen als signifikant erwiesen hat. Der altersbedingte Hörverlust nimmt in Abhängigkeit von der Geräuschbelastung im hochfrequenten Hörbereich deutlich schneller zu als im tieffrequenten Bereich.

Nach DIN EN ISO 7029 (E) (2014) ist davon auszugehen, dass die Abnahme der Hörfähigkeit nicht notwendigerweise durch das Altern selbst verursacht wird, sondern durch viele verletzende Einflüsse während des Lebens, die im Einzelnen allerdings nicht bekannt sind.

Die internationale Norm beruht auf einer sorgfältigen Analyse von Daten aus der Literatur über die Veränderung des Hörvermögens in Abhängigkeit vom Alter. Die Daten wurden aus Untersuchungen abgeleitet, bei denen reine Töne von einem Kopfhörer zum Ohr übertragen wurden. In dem nunmehr vorliegenden Normentwurf wurde gegenüber der früheren Ausgabe folgende Änderung vorgenommen:

- a) Die erwartete mediane und statistische Verteilung von Hörschwellen wurde neu bewertet. Die nunmehr vorliegende Ausgabe der Norm beschreibt das Hörempfindlichkeitsprofil von Menschen seit einigen Jahren genauer.
- b) Die Schätzgenauigkeit der zu erwartenden medianen und statistischen Verteilung der Hörschwellen wurde durch Ändern der verwendeten Gleichung generell verbessert.
- c) Die Berechnungen wurden auch für eine Altersgruppe bis zu einem Alter von 80 Jahren durchgeführt.

Es erfolgt eine statistische Beschreibung der Hörschwellenabweichungen für Bevölkerungsgruppen mit verschiedenen Altersstufen, und zwar für den audiometrischen Frequenzbereich von 125 Hz bis 8.000 Hz. Die in der DIN EN ISO 7029 (E) (2014) vorliegenden Daten sind für die Abschätzung der Höhe des Hörverlustes anwendbar, der bei einer Personengruppe auf Grund einer bestimmten Ursache hervorgerufen wird. Der Vergleich ist zulässig, wenn die untersuchte Bevölkerungsgruppe sich aus Personen zusammensetzt, die otologisch normal sind.

Die Daten in dieser Norm dürfen außerdem dazu verwendet werden, das Hörvermögen einer einzelnen Person, bezogen auf die für die Altersgruppe der Personen normale Verteilung, sowie die Hörschwellenabweichung zu ermitteln. Die definierte Hörschwellenabweichung und der in anderen Normen definierte Hörschwellenpegel drücken die Hörschwelle einer Person oder eines einzelnen Ohres bezogen auf

- a) den Medianwert der Hörschwelle einer Bevölkerungsgruppe von 18-jährigen Personen bzw.
- b) einen in den verschiedenen Teilen von ISO 389 festgelegten Bezugspegel aus.

Abb. 5.9 zeigt die Medianwerte der zu erwartenden Hörschwellenabweichung in Abhängigkeit von der Frequenz f und vom Alter für Männer und Abb. 5.10 für Frauen.

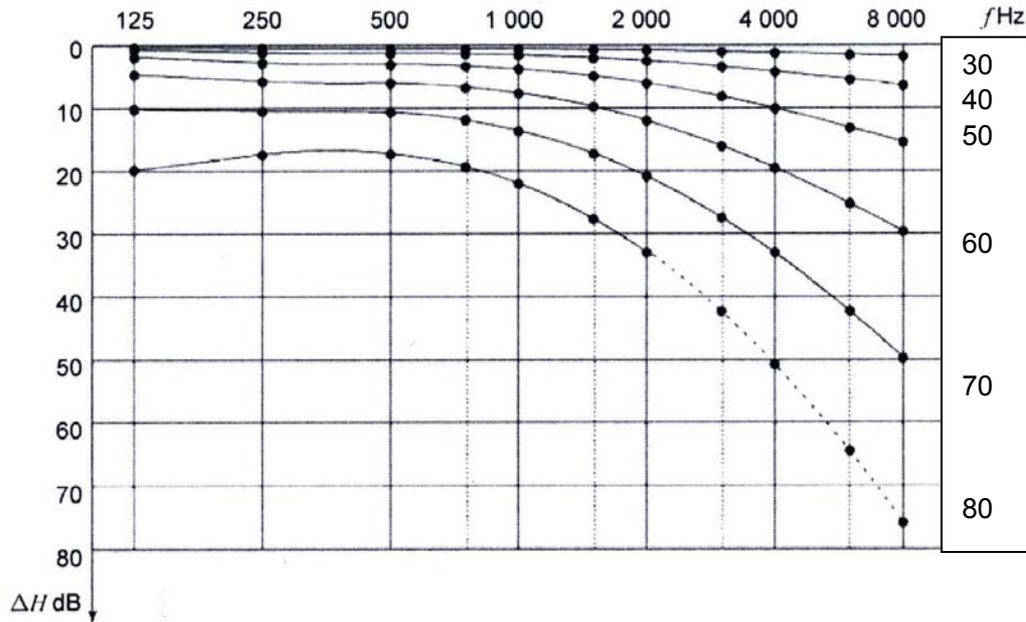


Abb. 5.9 Medianwerte der erwarteten Hörschwellenabweichungen in Abhängigkeit von der Frequenz f und vom Alter für Männer; von oben nach unten zeigen die Kurven ΔH -Werte für ein Alter von 30, 40, 50, 60, 70 oder 80 Jahren gemäß DIN EN ISO 7029 (E) (2014)

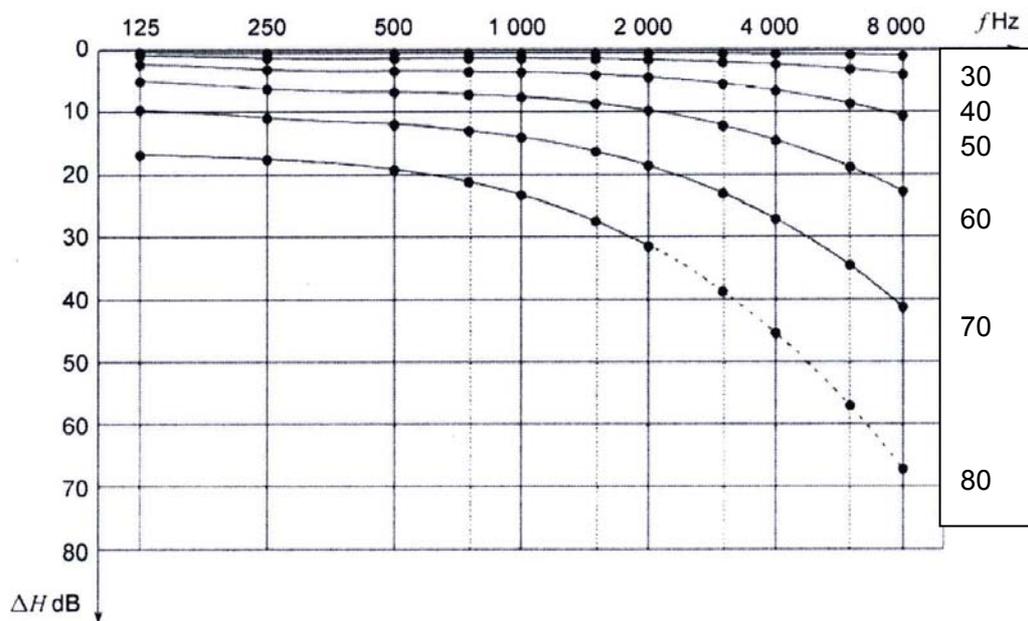


Abb. 5.10 Medianwerte der erwarteten Hörschwellenabweichungen ΔH in Abhängigkeit von der Frequenz f und vom Alter für Frauen; von oben nach unten zeigen die Kurven ΔH -Werte für ein Alter von 30, 40, 50, 60, 70 oder 80 Jahren gemäß DIN EN ISO 7029 (E) (2014)

Die Norm berücksichtigt die Hörschwellenabweichungen für die audiometrischen Frequenzen von 125 Hz bis 8.000 Hz. Unterhalb von 125 Hz wurden Hörschwellenabweichungen nicht ermittelt. Jedoch lassen die gezeigte Abbildungen vermuten, dass sowohl bei den Frauen als auch bei den Männern in der Gruppe der 50, 60, 70 und 80-jährigen Personen auch unterhalb von 125 Hz Hörschwellenabweichungen zu erwarten sind.

Tab. 5.3 zeigt die Untersuchungen für die Hörschwellen der audiometrischen Frequenzen von 125 Hz bis 8.000 Hz. Der zu erwartende Median und die statistische Verteilung wurden von Daten aus den in den Tabellen aufgeführten Quellen abgeleitet. Es wird angegeben: der Untersucher, das Jahr der Messung, das Untersucherland, der Frequenzbereich, die Anzahl der Probanden, der Altersbereich in Jahren sowie die angewandte Statistikmethode.

Tab. 5.3 Untersuchungen der Hörschwellen für audiometrische Frequenzen von 125 Hz bis 8000 Hz

Untersuchung	[9]	[10]	[11]	[12]
Jahr der Messung	Männer, 1965 – 1991; Frauen, 1978 – 1991	1960 – 1986	1992 – 2002	1996 – 1998
Land	U.S.A.	England	Japan	Norwegen
Hz	500 – 8 000	250 – 8 000	125 – 8 000	250 – 8 000
Anzahl der Probanden	Männer, 681 Frauen, 416	Männer, 172 Frauen, 399	Männer, 831 Frauen, 690	Männer, 4 435 Frauen, 14 984
Altersbereich, Jahre	17 – 90	18 – 80	15 – 84	20 – 89
Angewandte Statistikmethode	Mittelwert	Median, Mittelwert, 25 te und 75 te Perzentile, Standardabweichung	Mittelwert	Median, 25 te und 75 te Perzentile

Untersuchung	[13]	[14]	[15]	[18]
Jahr der Messungen	1996 – 2005	2006	2006 – 2008	2004 – 2005
Land	Japan	Japan	Japan	Frankreich
Hz	125 – 8 000	125 – 8 000	125 – 8 000	250 – 8 000
Anzahl der Probanden	Männer, 152 Frauen, 139	Männer, 20 Frauen, 32	Männer, 210 Frauen, 280	Männer, 85 Frauen, 210
Altersbereich, Jahre	15 – 29, 60 – 89	15 – 17	18 – 79	70 – 96
Angewandte Statistikmethode	Median, Mittelwert, 5 te – 95 te Perzentile, Standardabweichung	Median, Mittelwert, 5 te – 95 te Perzentile, Standardabweichung	Median, Mittelwert, 5 te – 95 te Perzentile, Standardabweichung	s_u, s_l

Der Norm liegen Daten von 6.434 männlichen und 17.150 weiblichen Probanden zu Grunde. Berücksichtigt wurden die Untersuchungen aus fast fünf Jahrzehnten, nämlich aus der Zeit von 1965 bis 2008.

5.4.2 Untersuchungen der Hörschwelle im tieffrequenten Frequenzbereich in Abhängigkeit vom Alter

In Untersuchungen von *Moorhouse, A. T (2009)* wurde festgestellt, dass ältere Personen, die unter tieffrequenten Geräuschen leiden, deutlich schlechtere Hörschwellen aufweisen als jüngere Teilnehmer.

Dass sich die Hörschwellen im tieffrequenten Bereich in Bezug auf das Alter unterscheiden, wird schon in einer früheren Untersuchung von *Teranishi (1965)* berichtet. Er bildete fünf Altersgruppen mit zehn bis elf Probanden. Zwischen den Altersgruppen zeigten sich Hörschwellenunterschiede.

Auch *Whittle et al. (1972)*, der eine Gruppe mit einem Durchschnittsalter von 30 Jahren (23 Probanden) und eine mit einem Durchschnittsalter von 47 Jahren (35 Probanden) bildete, stellte einen Alterseffekt zwischen den Gruppen fest.

Die Daten dieser Untersuchungen werden in Abb. 5.12 dargestellt.

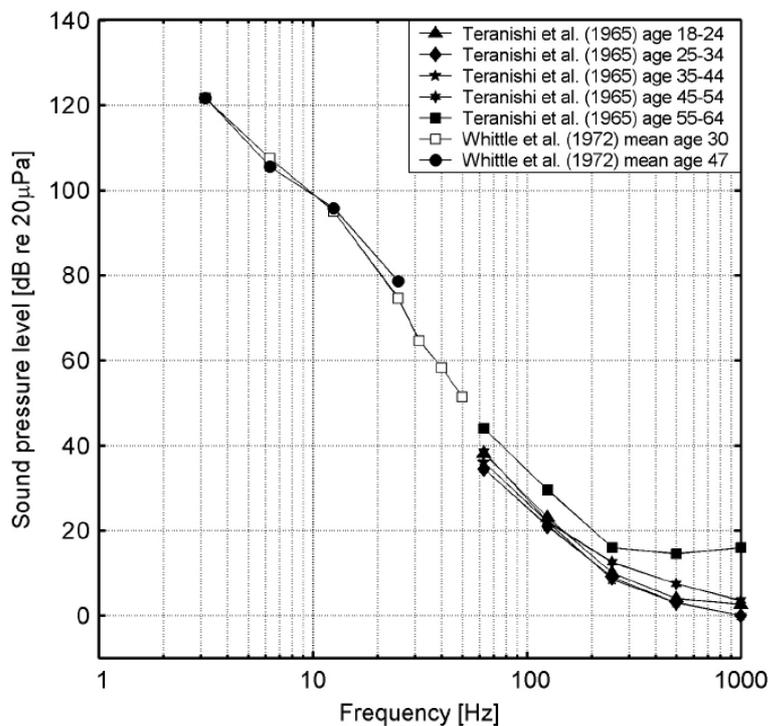


Abb. 5.12 Tieffrequente Hörschwellen für verschiedene Altersgruppen (Quelle: Møller, H., Pedersen, C. S.: Hearing at low and infrasonic frequencies, *Noise & Health*, 2004; 6:23, 37 – 57)

Obwohl bei Beschwerdeführern Hörschwellen gemessen wurden, die deutlich über der Bezugshörschwelle von 18- bis 25-Jährigen liegen, und damit unterstellt werden kann, dass diese Personen unempfindlich gegenüber tieffrequentem Hörschall sein müssten, behaupten diese Personen, dass sie den tieffrequenten Schall einschließlich Infraschall wahrnehmen. Das wirft die Frage auf: Gibt es neben dem Gehör noch andere Rezeptorsysteme zur Wahrnehmung von tieffrequentem Schall?

Nach Schmidt, M. (2013 und 2014) ist davon auszugehen, dass tieffrequenter Schall dem menschlichen Organismus in verschiedener Art und Weise vermittelt werden kann. 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 auch über verschiedene Rezeptorsysteme aufgenommen und erkannt. Hier kommen vor allem sogenannte Mechanorezeptoren in Betracht. Für die Mechanorezeptoren lässt sich folgende Einteilung vornehmen

- Haut-, Muskel- und Sehnenrezeptoren; Wahrnehmung von Körpervibrationen oberhalb von 15 Hz (Vibrationsgefühl),
- Vestibularapparat; Wahrnehmung 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). Die Einordnung von Hörschall, tieffrequentem Schall und Infraschall in Bezug auf die Wahrnehmung zeigt Abb. 5.13.

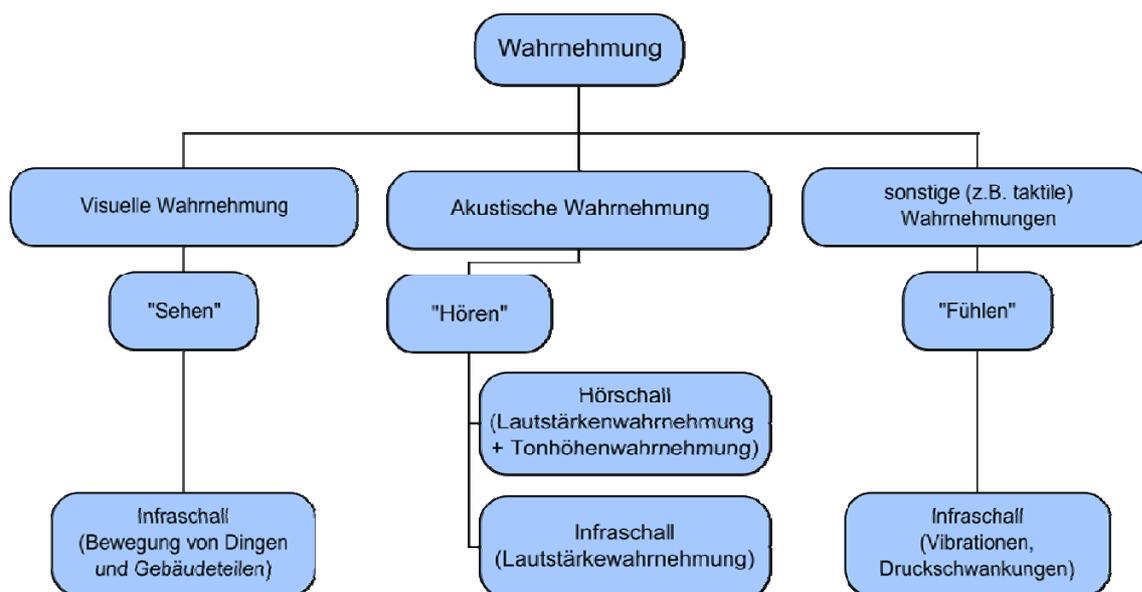


Abb. 5.13 Zur Einordnung der akustischen Wahrnehmung als Teil der Wahrnehmung des Menschen in Bezug auf Hörschall, tieffrequenten Schall, Infraschall bis hin zu Vibrationen (Schmidt 2013, modifiziert nach der Empfehlung des Robert Koch-Institutes, 2007)

5.5 DIN ISO 226 vom April 2006 – Akustik – Normalkurven gleicher Lautstärkepegel

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. Maßgeblich für die DIN ISO 226 aus dem Jahre 2006 ist, dass die zum damaligen Zeitpunkt aktuell vorliegenden Daten zur Feststellung der Normalkurven gleicher Lautstärke neuerlich ausgewertet wurden. Die dabei entstandenen Daten werden als Zahlenwerte für die Normfrequenzen der Terzen von 20 Hz bis 12500 Hz angegeben. Aus Gründen der Datenanalyse und der Datensicherheit wurden die Lautstärkepegel in DIN ISO 226 (2006) zwischen 20 phon und 90 phon veröffentlicht. Die Norm erläutert ausführlich im Anhang die Herleitung der Normalkurven gleicher Lautstärke aufgrund wissenschaftlicher Untersuchungen, wobei aus pragmatischen Gründen auf die Festlegung der Hörschwelle nicht eingegangen wird, sondern dies findet in der DIN EN ISO 389-7 (2006) statt.

Bedingungen für die Anwendung

Wie bereits oben beschrieben legt die Norm Kombinationen von Schalldruckpegeln und Frequenzen reiner Dauertöne fest, die vom Menschen als gleich laut empfunden werden. Die Festlegungen in dieser Norm gelten nur unter folgenden Annahmen:

- a) Das Schallfeld besteht bei Abwesenheit des Hörers aus einer sich frei ausbreitenden ebenen Welle.
- b) Die Schallquelle befindet sich direkt vor dem Hörer.
- c) Die Schallsignale sind reine Töne. Der Frequenzbereich geht von Normfrequenzen der Terzen von 20 Hz bis 12.500 Hz aus.
- d) Der Schalldruckpegel wird in Abwesenheit des Hörers an der Position des Mittelpunktes seines Kopfes gemessen.
- e) Das Hören erfolgt binaural.
- f) Die Hörer sind otologisch normale Personen im Alter von 18 bis 25 Jahren.

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 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 frontalen Schalleinfall sind in der beigefügten Abb. 5.14 dargestellt.

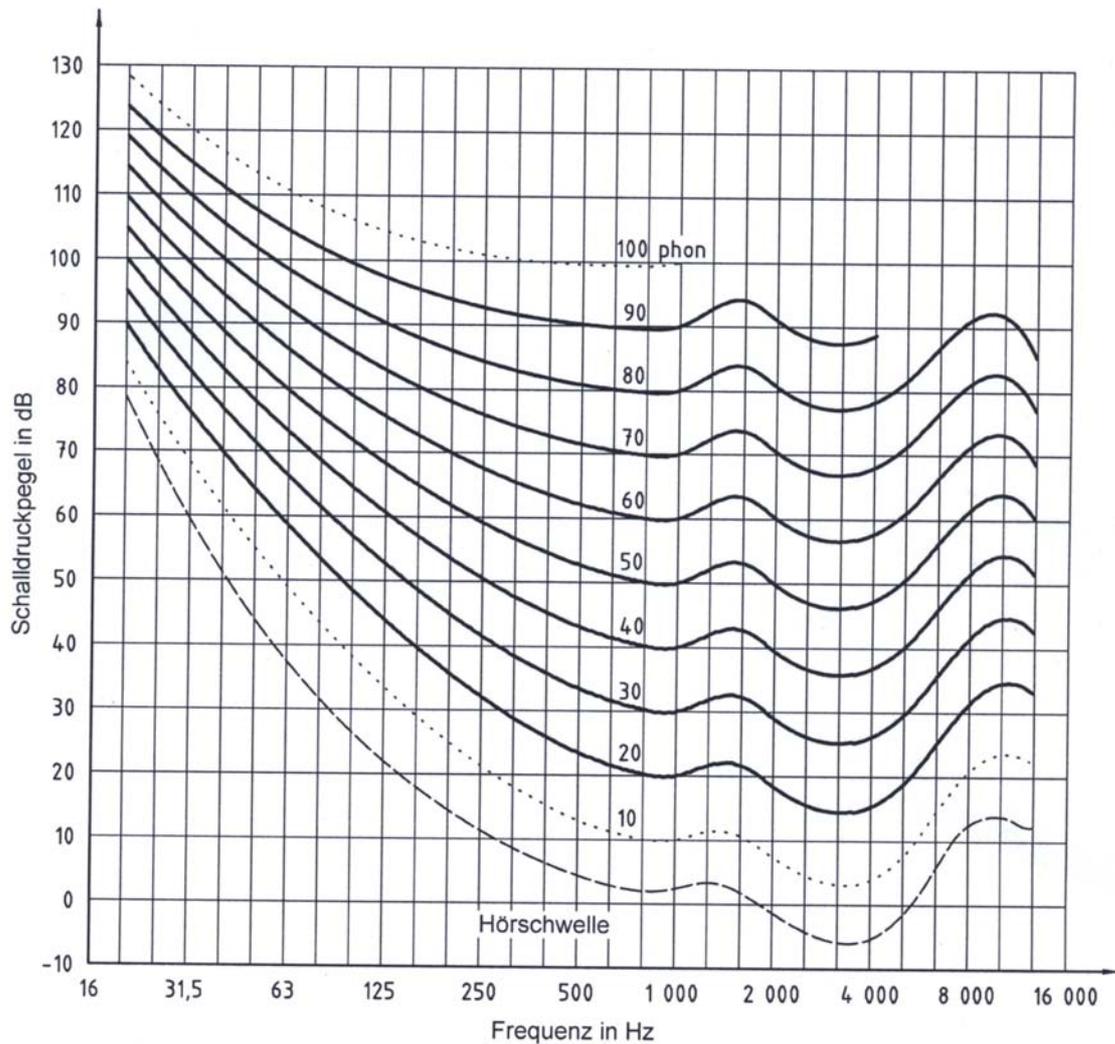


Abb. 5.14 Normalkurven gleicher Lautstärkepegel für reine Töne (binaurales Hören im freien Schallfeld bei frontalem Schalleinfall) gemäß DIN ISO 226 (2006)

Abb. 5.15 zeigt den Versuch, die Kurven gleicher Lautstärkepegel für den tieffrequenten Frequenzbereich unterhalb von 20 Hz an die Kurven gleicher Lautstärkepegel nach ISO 226 (2003) anzupassen. Die Ergebnisse gelten für reine Töne und binaurales Hören.

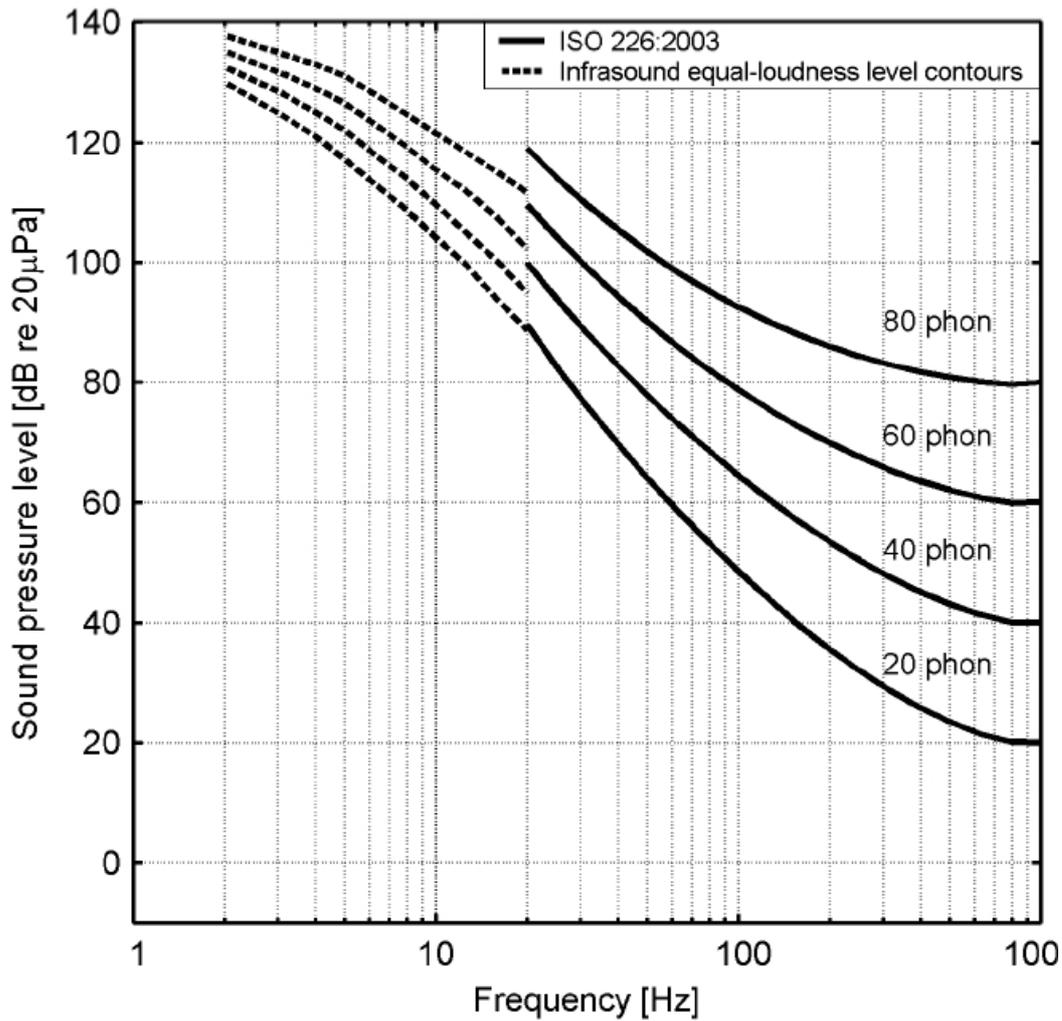


Abb. 5.15 Kurven gleicher Lautstärkepegel für Infraschall angenähert an die Kurven gleicher Lautstärkepegel für reine Töne und binauralem Hören (Quelle: Møller, H., Pedersen, C. S.: Hearing at low and infrasonic frequencies, *Noise & Health*, 2004; 6:23, 37 – 57)

6 Physiologische, psychoakustische und soziologische Betrachtungen zur Lästigkeit von tieffrequentem Schall als Grundlage für die Messung und Beurteilung

6.1 Empfindung, Wahrnehmung, 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. Es kann nicht allein auf ein physikalisch messbares Ereignis zurückgeführt werden.

Die Empfindung ist vor allem ein neurophysiologisch und neuropsychologisch definierter Begriff. Er hat Eingang gefunden in die Medizin und die Biologie als ein durch eine Reizeinwirkung hervorgerufener Elementarvorgang, der nach den Vorstellungen der Psychologie zur Wahrnehmung wird. Unter „Empfindung“ wird somit eine Vorbedingung der Wahrnehmung und eine erste Stufe solcher neuronalen Vorgänge verstanden, die letztlich eine Wahrnehmung ermöglichen.

Die Schallwahrnehmung stützt sich in der Regel auf psychophysikalische Reizreaktionsmessungen. Dabei wird der funktionale Zusammenhang zwischen Reiz und der Empfindungsgröße „Schall“ ermittelt. Unterschiedliche funktionale Abhängigkeiten signalisieren unterschiedliche Empfindungsgrößen. Der auf das Gehör einwirkende physikalische Reiz (Schallvorgang) ruft unter geeigneten Bedingungen (Pegel, Frequenz, Gehörszustand usw.) eine Hörempfindung hervor, die zu einer bewussten Wahrnehmung führen kann. Bei Untersuchungen wird das Gehör dann in der Regel als „Black Box“ aufgefasst, wobei die Eingangsgröße der objektiv messbare Schallreiz, Ausgangsgröße die Empfindung oder die Wahrnehmung der Versuchsperson ist.

Immerhin bestehen zwischen Lästigkeit und den physikalischen Eigenschaften des tieffrequenten Schalls ursächliche Zusammenhänge. Tieffrequenter Schall gilt als Belästigung (im Sinne der Unerwünschtheit von Schall), wenn exponierte Personen ihn nach Möglichkeit mindern oder vermeiden würden. Die Belästigungsempfindung enthält einerseits schallbezogene Stimulusvariablen, andererseits auf den Exponierten bezogene individuelle Variablen.

Geräusche sind demnach dann belästigend, wenn sie von einer Bezugsperson als nicht übereinstimmend mit ihren augenblicklichen Handlungen (z. B. geistige Arbeit) oder mit ihren Intentionen erlebt werden. Grundsätzlich hängt damit der Grad der auftretenden Belästigung sowohl von der physikalischen Geräuschkulisse als auch von einer Reihe subjektiver Faktoren wie der Sensibilisierung auf das Geräusch (Konditionierung), Ärger, Stress, allgemeiner Gesundheitszustand und sozialen Faktoren ab.

Die Belästigung durch Geräusche ist allerdings nur zu etwa 30 % durch physikalische Prozesse erklärbar (nach *Feldmann, 2006*). Die individuellen psychologischen Einflüsse sind messtechnisch nicht erfassbar.

Wie Abb. 6.1 deutlich macht, verlaufen die Kurven gleicher Lästigkeit ganz anders als die Kurven gleicher Lautstärkepegel bzw. der Lautheit nach DIN ISO 226 (2006). *Laird und Coye* (1929) stellen dies schon in einer Untersuchung von 1929 fest. *Møller* (1987) untersuchte die Kurven gleicher Lästigkeit für reine Töne im Frequenzbereich von 4 Hz bis 1000 Hz. In Abb. 6.1 ist die Minimalcurve gleicher Lästigkeit (kleinster Schalldruckpegel eines tonhaften Geräusches, der bei einem Zuhörer deutlich eine Lästigkeit auslöst) dargestellt. Die Kurven gleicher Lästigkeit folgen also nicht zwangsläufig den Kurven gleicher Lautstärke, auch nicht im tieffrequenten Bereich unterhalb von 125 Hz. Beispielsweise erzeugt nach *Laird und Coye* ein Ton von 800 Hz und 20 phon die gleiche Lästigkeit wie ein Ton von 50 Hz und etwa 10 phon. Für den tieffrequenten Schallbereich nach *Møller* (blaue Kurve) gilt z. B., ein Ton von 60 Hz und 20 phon hat die gleiche Lästigkeit wie ein Ton von 30 Hz und 10 phon.

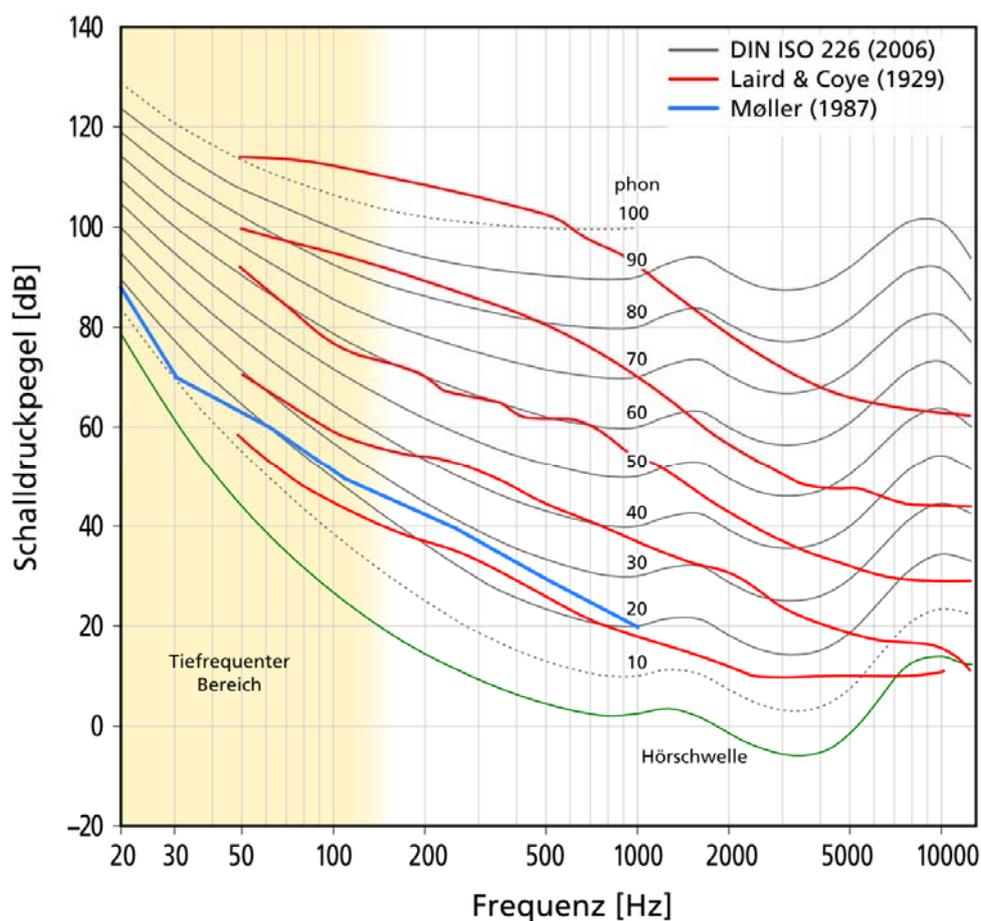


Abb. 6.1 Normalkurven gleicher Lautstärkepegel für reine Töne (binaurales Hören im freien Schallfeld bei frontalem Schalleinfall) nach DIN ISO 226 vom April 2006 und Kurven gleicher Lästigkeit für reine Töne nach *Laird und Coye* (rot, 1929) und der Minimalcurve gleicher Lästigkeit für reine Töne nach *Møller* (blau, 1987) im Vergleich zur Hörschwelle (grün)

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

Die Abb. 6.2. zeigt nach *Møller (1987)*, wie die Lästigkeit bei geringer Änderung des Schalldruckpegels bei tiefen Schallfrequenzen steil ansteigt. Bei 4 Hz beträgt die Änderung 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. Bei tiefen Frequenzen wird das Maximum der Lästigkeit sehr schnell durch kleine Änderungen des Schalldruckpegels erreicht.

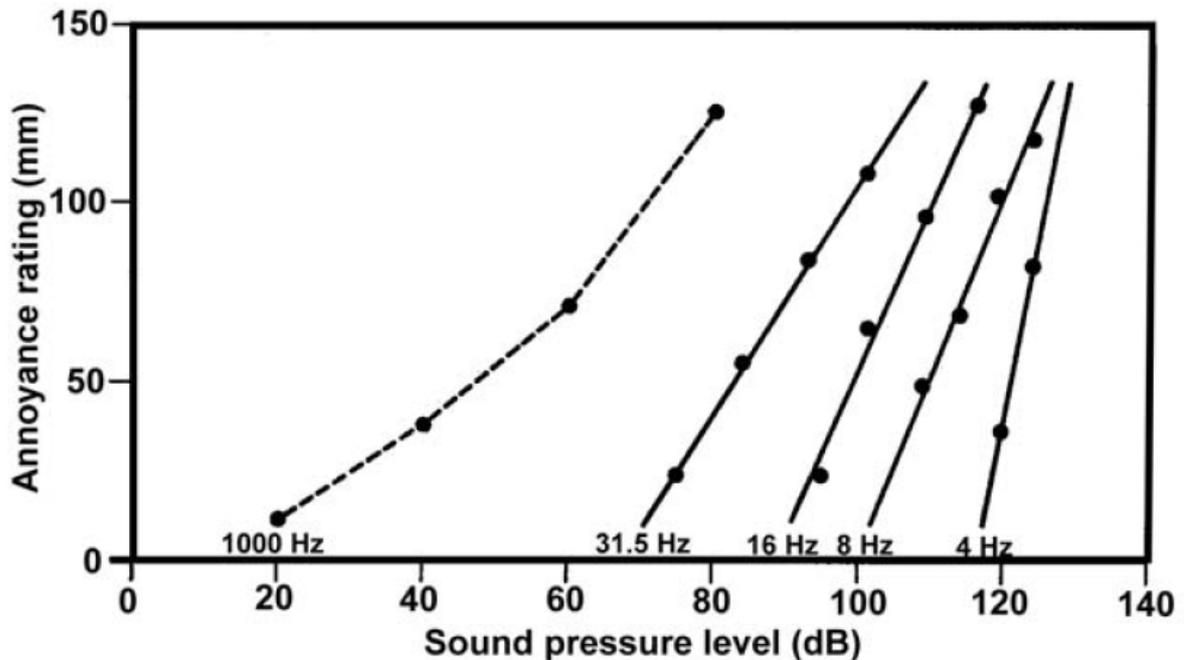


Abb. 6.2 Abhängigkeit der Lästigkeit von der Erhöhung des Schalldruckpegels bei reinen Tönen (18 Versuchspersonen) (Quelle: Møller: Low frequency noise and vibration. Vol. 6, No. 1, 1987)

6.2 Psychoakustische Aspekte

Bei einem Mess- und Bewertungsverfahren ist von Wichtigkeit, dass im tieffrequenten Bereich Schallpegeländerungen zu stärkeren Veränderungen in der Wahrnehmung führen als bei mittleren und hohen Frequenzen. So führt, wie in Abb. 6.3 gezeigt, eine Schallpegelerhöhung um 5 dB bei Frequenzen zwischen 20 Hz und 90 Hz in etwa zu einer Verdopplung der Lautheit. Bei mittleren und höheren Frequenzen muss der Schalldruckpegel zur Verdopplung der Lautheit um etwa 10 dB angehoben werden. Daher kann vermutet werden, dass bei Überschreitung der Wahrnehmungs- und Hörschwelle die Wirkungsbereiche sehr dicht beieinanderliegen und damit bei Belastung durch tieffrequenten Schall aurale und extraaurale Wirkungen sich stark überlappen.

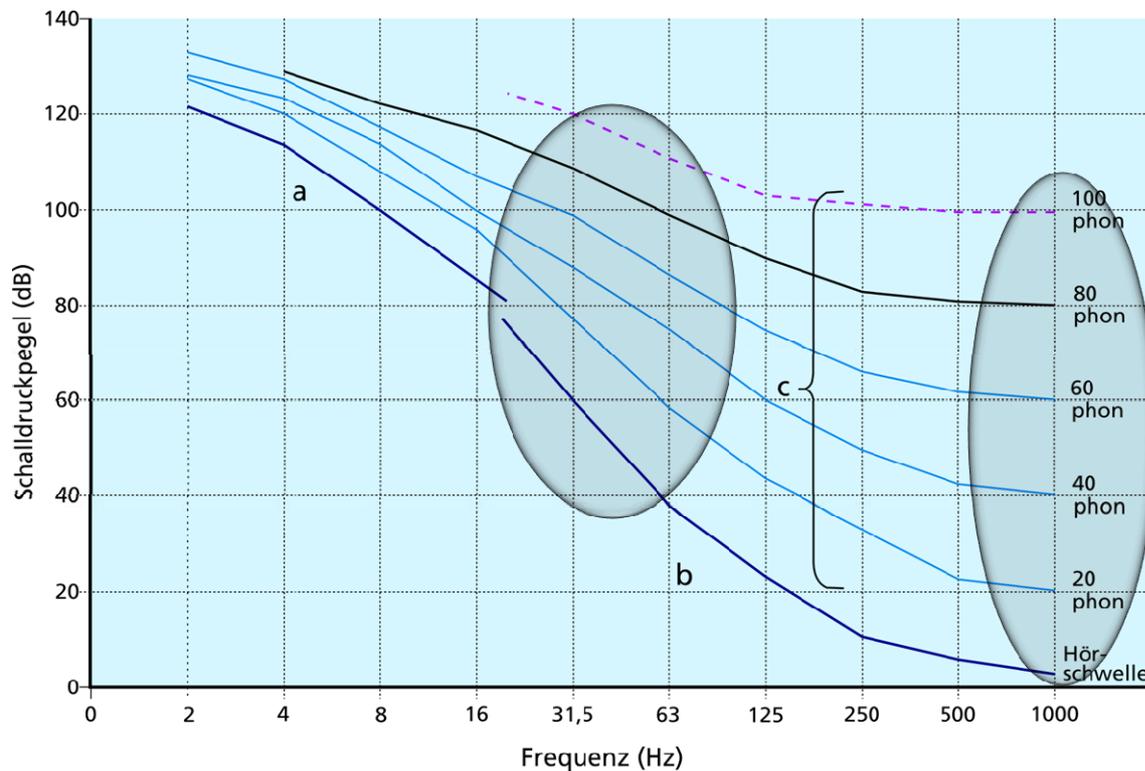


Abb. 6.3 Hörschwelle und Kurven gleicher Lautstärke im Frequenzbereich unter 1000 Hz (Darstellung in Anlehnung an *Møller und Andresen (1984)*).

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)

Tieffrequente Geräusche spielen eine bedeutende Rolle bei den Lärmbeschwerden. Wenn bei einem 100 Hz-Ton der Schallpegel um 10 dB angehoben wird, dann verdoppelt sich nicht wie üblicherweise die Lautheit, sondern sie steigt auf das vier- bis fünffache, das ergaben schon frühere Experimente (Quelle: Manfred Kalivoda, Taschenbuch der Angewandten Psychoakustik).

6.3 Soziologische Aspekte

Physikalische und psychoakustische Größen des Schalls stellen das Bindeglied zwischen physikalischen Messmöglichkeiten und den nur mit psychologischen und soziologischen Methoden zu ermittelnden Empfindungsurteil dar.

Aussagen verschiedener Versuchspersonen oder derselben Versuchsperson im Wiederholungsfall sind in der Regel nicht genau gleich. Von daher unterliegen die Ergebnisse von Hörversuchen stets mehr oder weniger großen interindividuellen und intraindividuellen Streuungen. Wegen der großen intraindividuellen und interindividuellen Schwankungen können allgemeingültige Ergebnisse nur abgeleitet werden, wenn mit ausreichend großen Anzahlen von Probanden Untersuchungen durchgeführt und deren Aussagen statistisch ausgewertet werden (Fasold, W. u. Kraak, W. 1984).

Gerade bei Windenergieanlagen werden gesundheitliche Wirkungen des Infraschalls auf den Menschen immer wieder in der Literatur genannt. Darüber berichtet *Twardella* im Journal UMID 3 2013 im Artikel die „*Bedeutung des Ausbaus der Windenergie für die menschliche Gesundheit*“. Dort wird festgestellt, dass gesundheitliche Wirkungen des Infraschalls aufgrund der sehr niedrigen Schalldruckpegel im Infraschallbereich nicht zu erwarten sind. Allerdings fand man heraus, dass ein vergleichsweise hohes Belästigungspotential durch die niedrigen Schallimmissionen des Hörschalls der WEA vorhanden ist, dessen Ursachen aber noch unklar sind. Die Überlagerung von Hörschall mit Infraschall könnte dabei eine Rolle spielen. Um die Belästigung durch Schall von Windenergieanlagen deutlich zu machen, werden die Ergebnisse von epidemiologischen Studien dargestellt. Dort heißt es: „*In einigen epidemiologischen Studien wurde die Lärmbelastigung unter Anwohnern von WEA untersucht (Pedersen, Waye, 2004; Pederson, Waye, 2007; Pedersen et al., 2009). Hierbei wurden die Anwohner mittels einer 5-stufigen Skala gefragt, ob sie die Geräusche von WEA wahrnehmen und ob sie sich dadurch belästigt fühlen. Parallel wurden die durch die WEA verursachten Schallpegel an der Außenfassade der Wohnhäuser geschätzt. Dabei zeigte sich bereits bei den niedrigen Schallimmissionen der WEA ein gewisser Anteil, der sich belästigt oder sogar stark belästigt fühlt.*“

Ein Ergebnis der niederländischen Studie unter 708 Anwohnern (*Pedersen et al., 2009*) ist beispielhaft in Abb. 6.4 dargestellt.

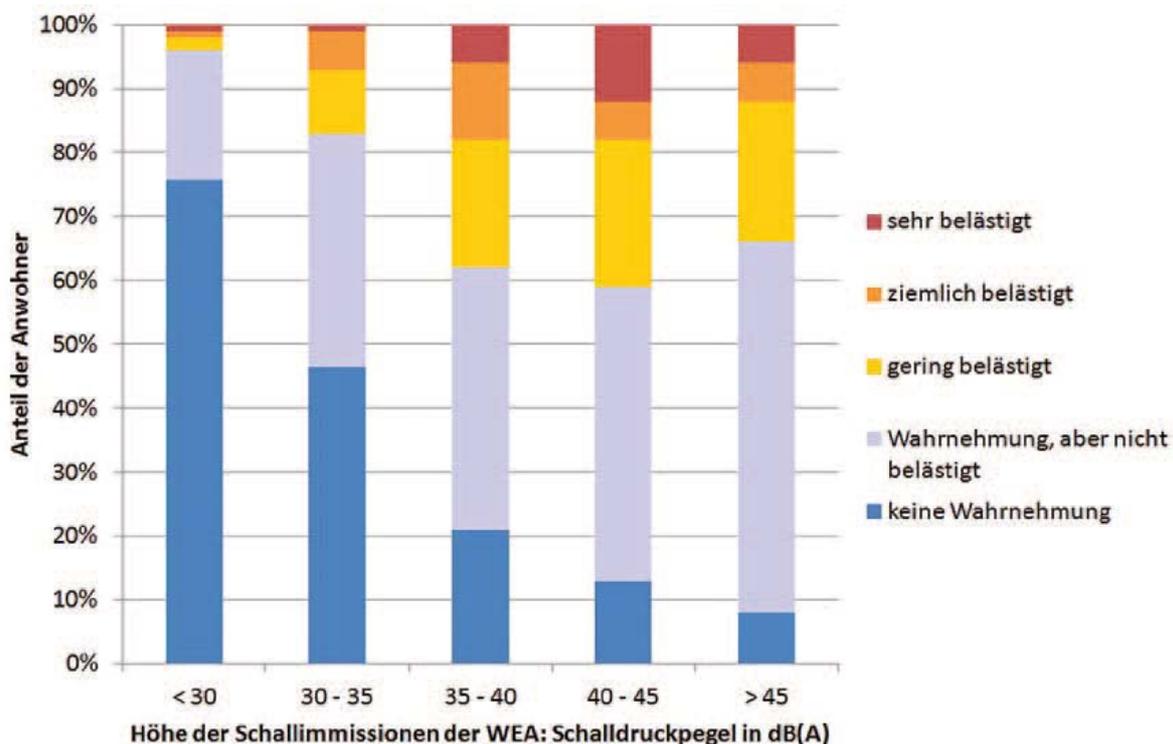


Abb. 6.4 Wahrnehmung von und Belästigung durch Geräusche von Windenergieanlagen (WEA) in Abhängigkeit vom A-bewerteten Schalldruckpegel. Ergebnisse einer niederländischen Studie unter 708 Anwohnern. Quelle: *Twardella, D. (2013)* mit Daten aus: *Pedersen et al., (2009)*.

Im Zusammenhang mit der Beurteilung von tieffrequenten Geräuschen verschiedener Industrieeräuschquellen wäre es wünschenswert, wenn derartige Praxisstudien auch die Grundlage für die Beurteilung tieffrequenter Geräusche bilden könnten.

7 Vorschläge zur Weiterentwicklung der DIN 45680 (1997)

7.1 Empfehlung einer Hörschwelle für tieffrequenten Schall

Beschwerdefälle aus der Praxis zeigen immer wieder, dass es eine Reihe von Personen gibt, die sehr tieffrequente Geräusche mit sehr geringen Schalldruckpegeln wahrnehmen. In diesen Fällen liegen die Schalldruckpegel der tieffrequenten Geräusche häufig unterhalb der der Hörschwellenpegel nach DIN 45680 (1997).

Wie im Abschnitt 5.3 festgestellt, befinden sich die Hörschwellenpegel nach DIN 45680 (1997) zwischen der 25%- und der 30%-Perzentil-Hörschwelle nach ISO 28961 (2012), was bedeutet, dass etwa 25 bis 30 % der Menschen besser hören können, als es die Hörschwelle der DIN 45680 (1997) beschreibt.

Wie oben gezeigt beruht die Hörschwellenverteilung auf statistischen Auswertungen. In Abb. 7.1 sind die 1 %-, 5 %- und 10%-Perzentilkurven der Hörschwelle im Vergleich mit den nichtstandardisierten Hörschwellen verschiedener Untersucher im tieffrequenten Bereich und Infraschallbereich dargestellt. Alle drei Perzentilschwellen liegen deutlich unter den Hörschwellen der verschiedenen Untersucher.

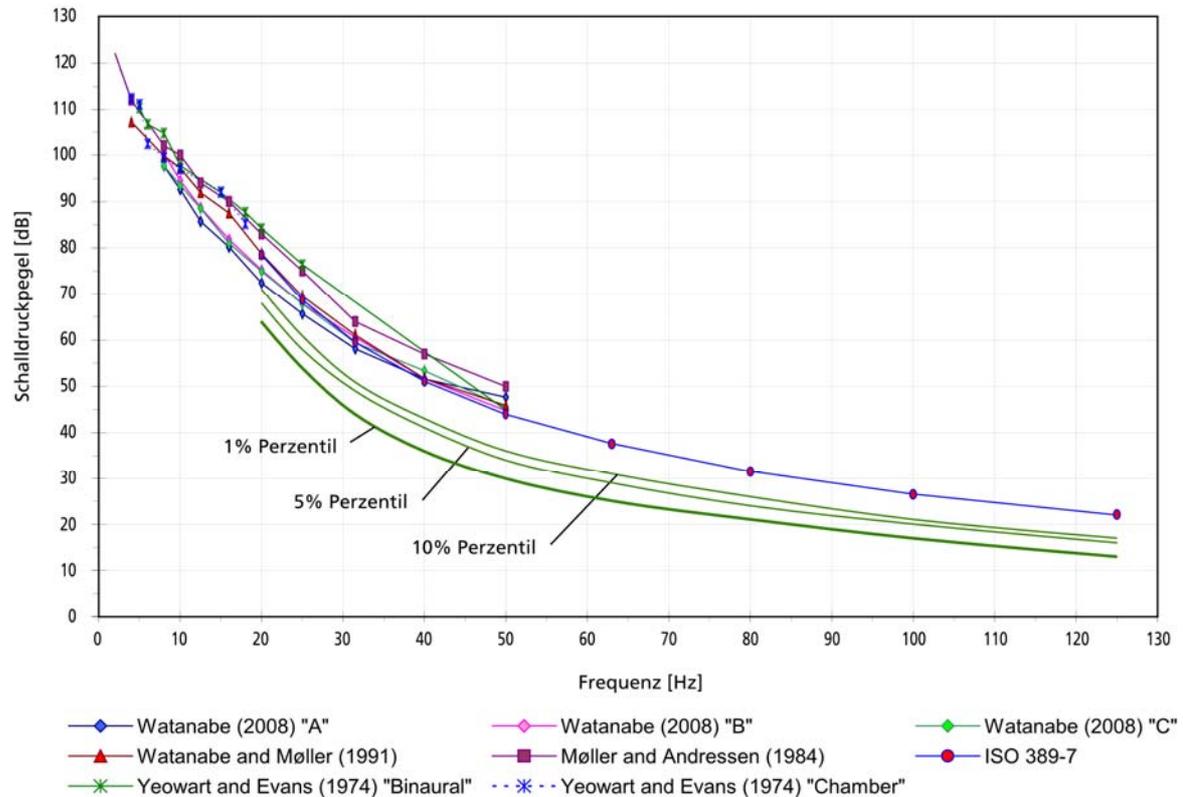


Abb. 7.1 Hörschwellen im tieffrequenten und Infraschallbereich von verschiedenen Untersuchern aus den Jahren von 1974 bis 2008 im Vergleich mit den 1 %-, 5 %- und 10 %-Perzentilkurven der Hörschwelle nach ISO 28961 (2012) und der Hörschwelle nach ISO 389-7 (2005), die der 50 %-Perzentilkurve der Hörschwelle gemäß ISO 28961 (2012) entspricht

(Diagramm modifiziert und ergänzt, Quelle: Howe, B., Low frequency noise and infrasound associated with wind turbine generator systems a literature review, RFP No. OSS-078696, 2010)

Abb. 7.2 zeigt den Vergleich von typischen Schallpegeldaten zweier Windenergieanlagen mit den verschiedenen Hörschwellen im tieffrequenten Bereich der unterschiedlichen Untersucher und den 1 %-, 5 %- und 10 %-Perzentilkurven der Hörschwellenverteilung nach ISO 28961 (2012) und der Hörschwelle nach ISO 389-7 (2005).

Verwendet man beispielsweise die 1 %-PerzentilHörschwelle als Grenze der minimalen Wahrnehmbarkeit, so verlagert sich der Wahrnehmbarkeitsbereich für die in Abb. 7.2 angegebenen Geräusche der Windenergieanlagen zu deutlich tieferen Geräuschfrequenzen, nämlich von 50 Hz auf 25 Hz.

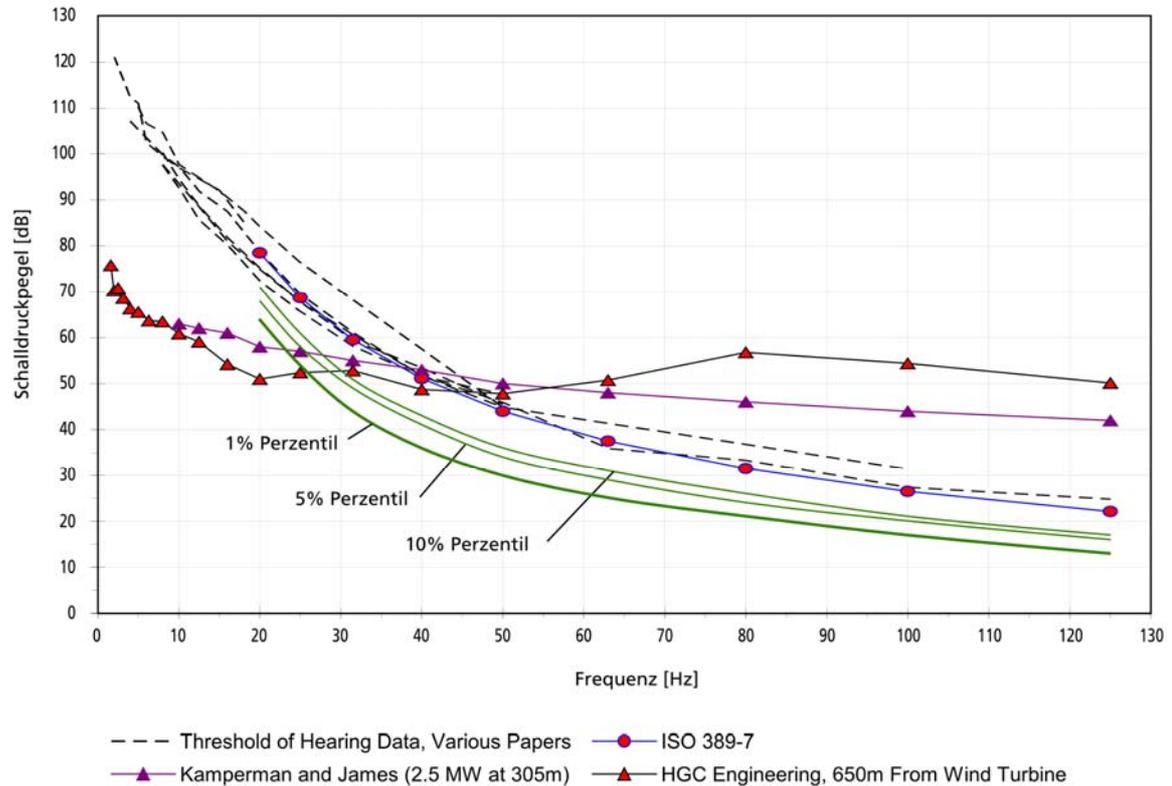


Abb. 7.2 Vergleich mit den typischen Schallpegeldaten von zwei Windenergieanlagen und den 1 %-, 5 %- und 10 %-Perzentilkurven der Hörschwelle nach ISO 28961 (2012) und der Hörschwelle nach ISO 389-7 (2005)

(Diagramm modifiziert und ergänzt, Quelle: Howe, B., Low frequency noise and infrasound associated with wind turbine generator systems a literature review, RFP No. OSS-078696, 2010)

Wie im Abschnitt 5.2.2 dargelegt, gibt es 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. 7.3 belegt, dass auch besonders geräuschempfindliche Personen bei der Anwendung der 1 %-Perzentil-Hörschwelle berücksichtigt werden.

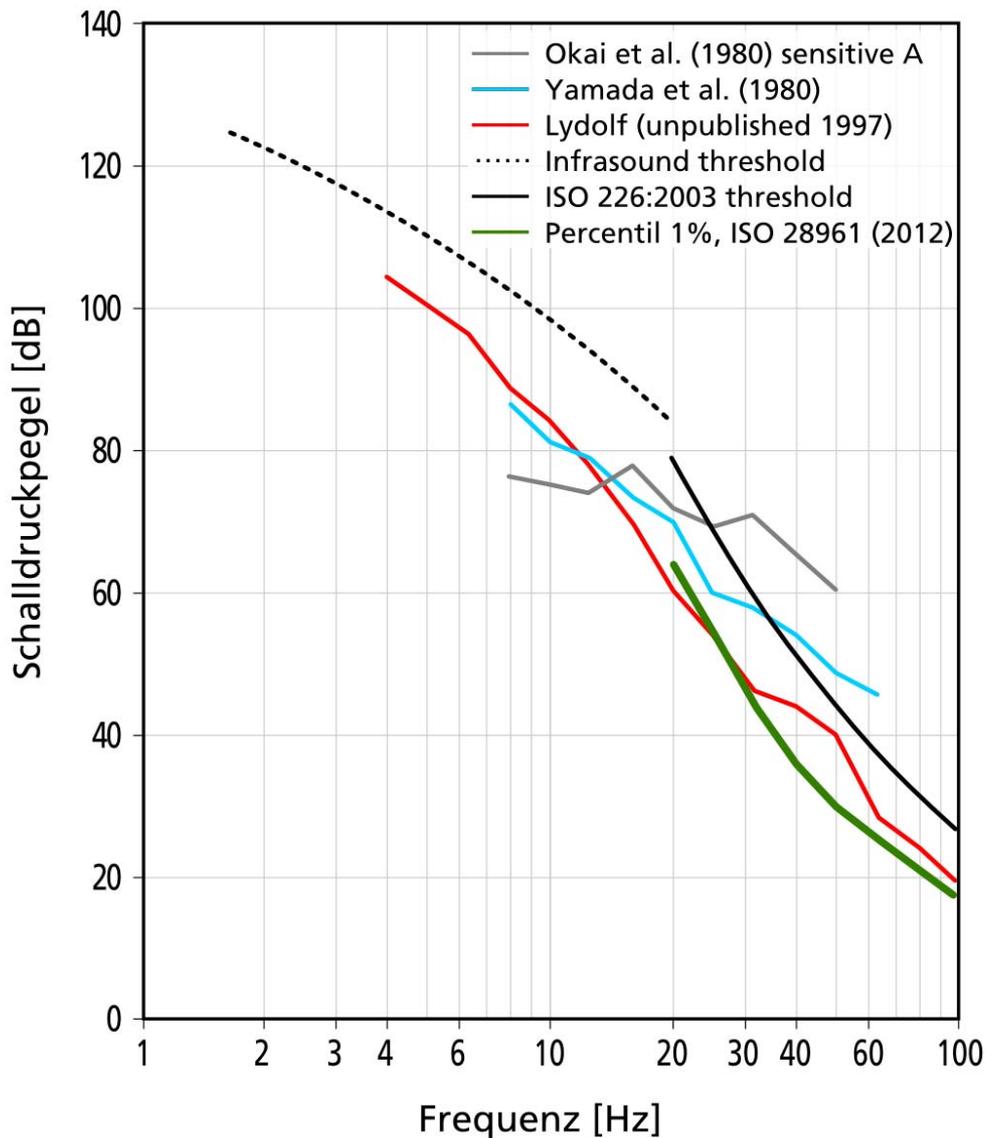


Abb. 7.3 Hörschwellen von drei besonders empfindlichen Personen aus den Betrachtungen nach Abschnitt 5.2.2 im Vergleich mit der 1 %-Perzentilkurve der Hörschwelle nach ISO 28961 (2012)

Im Sinne einer Lärmvorsorge muss es darauf ankommen, den größten Teil der Bevölkerung in die Lärmerfassung einzubeziehen und durch eine geeignete Beurteilung zu schützen. Mit der 1 %-Perzentil-Hörschwelle liegt eine untere Grenze der Wahrnehmung für tieffrequenten Schall vor, die vor allem die Empfindlichkeit von Personen berücksichtigt. Wie die Ausführungen in den Normen deutlich machen, beruhen die Hörschwellendaten auf sorgfältigen und umfangreichen Analysen. Deshalb kann man davon ausgehen, dass unterhalb dieser Schwelle weniger als ein Prozent der Menschen noch Schall im tieffrequenten Bereich wahrnehmen. Vor diesem Hintergrund wird vorgeschlagen die 1 %-Perzentil-Hörschwelle in eine neue DIN 45680 für einen Frequenzbereich von 20 Hz bis 125 Hz aufzunehmen.

7.2 Entwurf zur Beschreibung der Lästigkeit mit physikalischen Stimulusvariablen

7.2.1 Gedanken zur technischen Kennzeichnung des tieffrequenten Schalls in Räumen

Trotz der bekannten Schwierigkeiten bei der Festlegung von Mess- und Beurteilungsgrößen sind Schallmesswerte und Schallimmissionsrichtwerte für verschiedene Zwecke erforderlich, beispielsweise im Verwaltungsrecht bei der Abwicklung von Genehmigungsverfahren für Industrie und Gewerbe. Sie sind eine Voraussetzung für die Planungssicherheit von Investitionen bei gleichzeitigem Schutz der Bevölkerung.

Die folgenden Überlegungen stützen sich auf allgemeingültige Schallpegelmessungen und die Ermittlung von Zuschlägen, die den Signalcharakter tieffrequenter Geräusche berücksichtigen. Der Frequenz- und Pegelbereich von tieffrequentem Hörschall ($f > 8$ Hz) ist mit den heute üblichen Schallpegelmessern messtechnisch ohne besondere Maßnahmen sehr gut erfassbar.

Die Messung und Beurteilung soll dazu beitragen, unzulässige Belästigungen oder gar Gesundheitsgefährdungen zu vermeiden. Es sollten daher auf der Grundlage der bisherigen Erkenntnisse für tieffrequenten Schall Mess- und Beurteilungsgrößen erarbeitet werden. Zur Beurteilung tieffrequenter Geräusche im Bereich der Lästigkeit muss allerdings von den herkömmlichen Messverfahren zur Ermittlung von bewerteten Schalldruckpegeln abgewichen werden. Dies betrifft auch den Messort und die Frequenzbewertung. Wie im Abschnitt 7.1 dargelegt erscheint auf der Basis des jetzigen Wissensstandes die Analyse und Beurteilung der Überschreitungspiegel der 1 %-Perzentilhörschwelle nach ISO 28961 (2012) generell der richtige Weg zu sein.

Die physikalischen Stimulusvariablen sind objektive Größen, die allein von den Signaleigenschaften abhängen. Sie sind näherungsweise unabhängig von der individuellen Lärmempfindlichkeit der Person.

Die Lärmbelastung nimmt zu, wenn:

- a) die Lautstärke und die Lautheit 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 (1 ms 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. größer als 10 dB ist.

Allein die physikalische Erfassung tieffrequenter Geräusche und deren Beurteilung ist demnach sehr vielschichtig und umfassend. Trotzdem sollten die tieffrequenten Geräusche mit der üblichen Schallmesstechnik gemessen werden können.

Die hier im Folgenden beschriebene Konzeption zur Kennzeichnung des tieffrequenten Schalls in Räumen ist ein prinzipieller Vorschlag auf der Grundlage der Erfassung physikalischer Messgrößen. Wie die einzelnen Messgrößen ganz konkret zu messen oder zu bestimmen sind, muss weiteren Untersuchungen vorbehalten bleiben.

Im Sinne einer praktikablen Lösung wird deshalb vorgeschlagen, ein Konzept zur Erfassung des tieffrequenten Schalls zu wählen, das sich auf einen Basisschalldruckpegel und Zuschläge stützt. Es beruht darauf, dass sich ein Beurteilungspegel L_r für jedes Terzband auf der Grundlage einer Basislautstärke in Form eines Terzschalldruckpegels $L_{\text{Terz,eq}}$ und aus dem Tonzuschlag ΔL_T , Impulzzuschlag ΔL_I , Pegelschwankungszuschlag $\Delta L_{S,\text{Pegel}}$ und einem Frequenzschwankungszuschlag $\Delta L_{S,\text{Frequenz}}$ bilden lässt:

$$L_{r,\text{Terz}} = L_{\text{Terz,eq}} + \Delta L_T + \Delta L_I + \Delta L_{S,\text{Pegel}} + \Delta L_{S,\text{Frequenz}} \text{ in dB.}$$

Aus der Erfahrung wird es notwendig sein, eine Begrenzung der Zuschläge vorzunehmen. Allgemein in der Form:

$$\Delta L_T + \Delta L_I + \Delta L_{S,\text{Pegel}} + \Delta L_{S,\text{Frequenz}} \leq x \text{ dB.}$$

7.2.2 Schallpegel und dessen Stärke, Dauer, Häufigkeit – $L_{\text{Terz,eq}}$

Die Lautstärke (Lautheit) als Bindeglied zwischen akustischer Empfindung und messbarem Schallvorgang korreliert stark mit dem Schalldruckpegel und bestimmt in hohem Maße die Lästigkeit eines Geräusches. Die Angabe eines Einzahlwertes zur Kennzeichnung tieffrequenter Lästigkeit mit einfachen Bewertungsfiltren ist nicht zielführend, weil es in der Regel bei niedrigen Schalldruckpegeln zu einer deutlichen Unterschätzung der Lautheit und damit der Lästigkeit kommen kann.

Für tiefe Schallfrequenzen erweist sich die Verwendung von unbewerteten Schallpegeln, z. B. in Terzen, für die Beurteilung des Geräusches deutlich günstiger als die Verwendung bewerteter Schalldruckpegel.

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, z. B. Windenergieanlagen im ländlichen Bereich oder Klimagaräte, Luft-Wärme-Pumpen, Lüftungsgeräte, Mini-Blockheizkraftwerke in „Reinen Wohngebieten (WR)“ usw.

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_{eq} berücksichtigt. Eine Minderung des Pegels um 3 dB ist danach einer Halbierung der Einwirkungsdauer äquivalent.

Mit der Verwendung des äquivalenten Dauerschallpegels L_{eq} handelt es sich grundsätzlich um den Versuch der Herstellung einer Lautstärkeäquivalenz, wobei die Frage nach der Lästigkeitsäquivalenz nicht gelöst ist.

Der Schalldruckpegel allein ist nicht ausreichend zur Beschreibung der Lästigkeit (siehe oben a) bis h)). Deshalb müssen zur Beurteilung der Lästigkeit weitere schallbezogene Variablen in Form von Zuschlägen zum Basisschalldruck Berücksichtigung finden.

7.2.3 Zuschlag für Tonhaltigkeit ΔL_T

Die belästigende Wirkung ist im Bereich tiefer Frequenzen stärker als bei mittleren und höheren Frequenzen. Die Änderungen im Zeit- und Frequenzbereich der Geräusche werden vom Betroffenen als sehr unangenehm empfunden. Eigene Messanalysen in der Nachbarschaft von Industrie und Gewerbe zeigen, dass Einzeltöne und tonhafte Geräusche meist besonders lästig sind (siehe Praxisfälle in Anhang A und B). Insbesondere tritt in Wohnungen durch den stationären Einsatz von energiebetriebenen Geräten der technischen Gebäudeausrüstungen, z. B. Klimageräte, Luft-Wärmepumpen, Lüftungsgeräte, Mini-Blockheizkraftwerke, als Sonderproblem eine tieffrequente Tonhaltigkeit der Geräuschimmission bei sehr niedrigen Frequenzen < 100 Hz bis an die Grenze zum Infraschall auf. Gerade in diesen Fällen ist die Lästigkeit oft viel größer, als nach dem in A-Bewertung gemessenen Schalldruckpegel zu erwarten wäre.

Zum Beispiel Tonhaltigkeit nach TA Lärm und VDI 2058, Bl. 1:

Liegt bei einer Terzanalyse der Terzpegel um mehr als 5 dB über den Nachbarterzfrequenzen, so ist bei dem Geräusch ein Tonhaltigkeitszuschlag gerechtfertigt.

7.2.4 Zuschlag für Impulshaltigkeit ΔL_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.

Zum Beispiel Impulshaltigkeit nach TA Lärm, VDI 2058, DIN 45645, Teil 1, 18. BlmSchV, VDI 3723, Bl. 2

Der derzeit in Deutschland im Geräuschimmissionsschutz gebräuchliche Impulsschlag wird aus der Differenz zwischen dem Taktmaximalpegel $L_{AF_{Teq}}$ und dem energieäquivalenten Dauerschallpegel $L_{AF_{eq}}$ gebildet.

7.2.5 Zuschlag für Pegelschwankung $\Delta L_{S,Pegel}$

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.

7.2.6 Zuschlag für Frequenzschwankung $\Delta L_{S, \text{Frequenz}}$

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.

7.3 Verschiedene Anhaltspunkte für eine Beurteilung tieffrequenter Geräusche

7.3.1 Kurven gleicher Lästigkeit nach Møller (1987)

Um Geräusche beurteilen zu können, ermittelte Møller (1987) sogenannte Grenzkurven gleicher Lästigkeit für Töne und Terzbandrauschen (siehe Abb. 7.4).

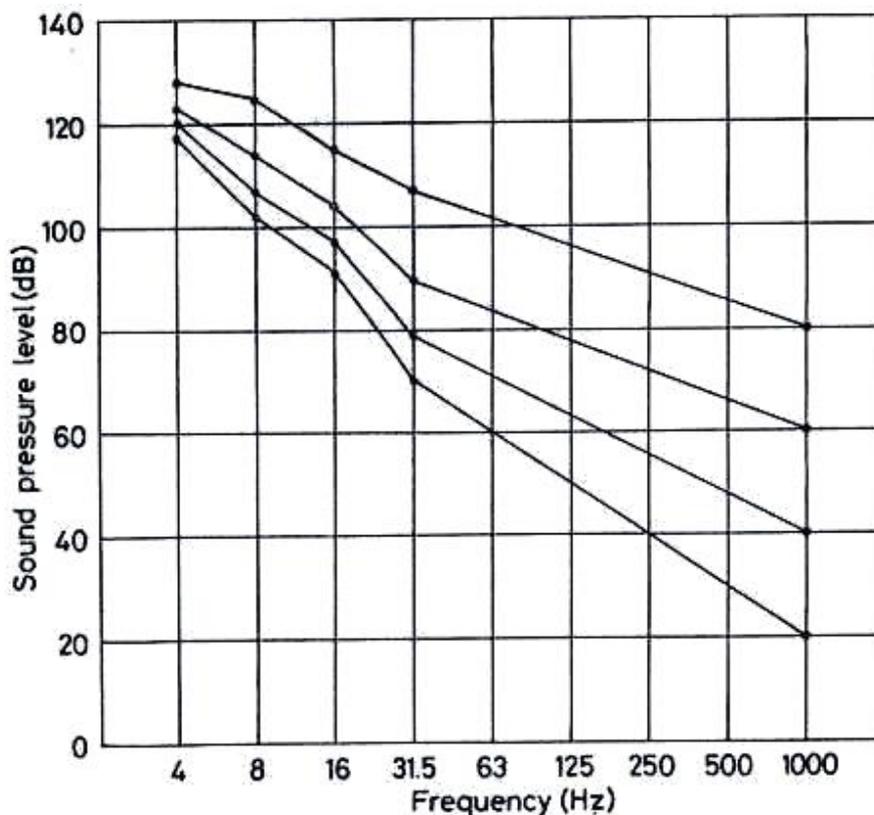


Abb. 7.4 Kurven gleicher Lästigkeit für reine Töne und Terzbandrauschen ($n = 18$)

Wegen der Unterschätzung der tatsächlich empfundenen Lautstärke und der Lästigkeit bei tieffrequenten Geräuschen könnte man sich vorstellen, für die Beurteilung des Terzbeurteilungspegels $L_{r, \text{Terz}}$ in einem ersten Schritt eine Minimalkurve gleicher Lästigkeit einzuführen. Die minimale Kurve gleicher Lästigkeit nach Møller (1987) zeigt, dass offenbar Infraschall, sobald dieser die Hörschwelle nach DIN EN ISO 389-7 überschreitet und deutlich wahrnehmbar ist, auch als lästig empfunden wird (siehe Abb. 7.5). Oberhalb von 30 Hz ist offenbar ein deutlich größerer Überschreitungspegel notwendig, um ein tonhaftes Geräusch als lästig zu empfinden. Ob diese Erkenntnisse auch im Zusammenhang mit 1%-Perzentil Hörschwelle gelten, müsste durch Untersuchungen geprüft werden.

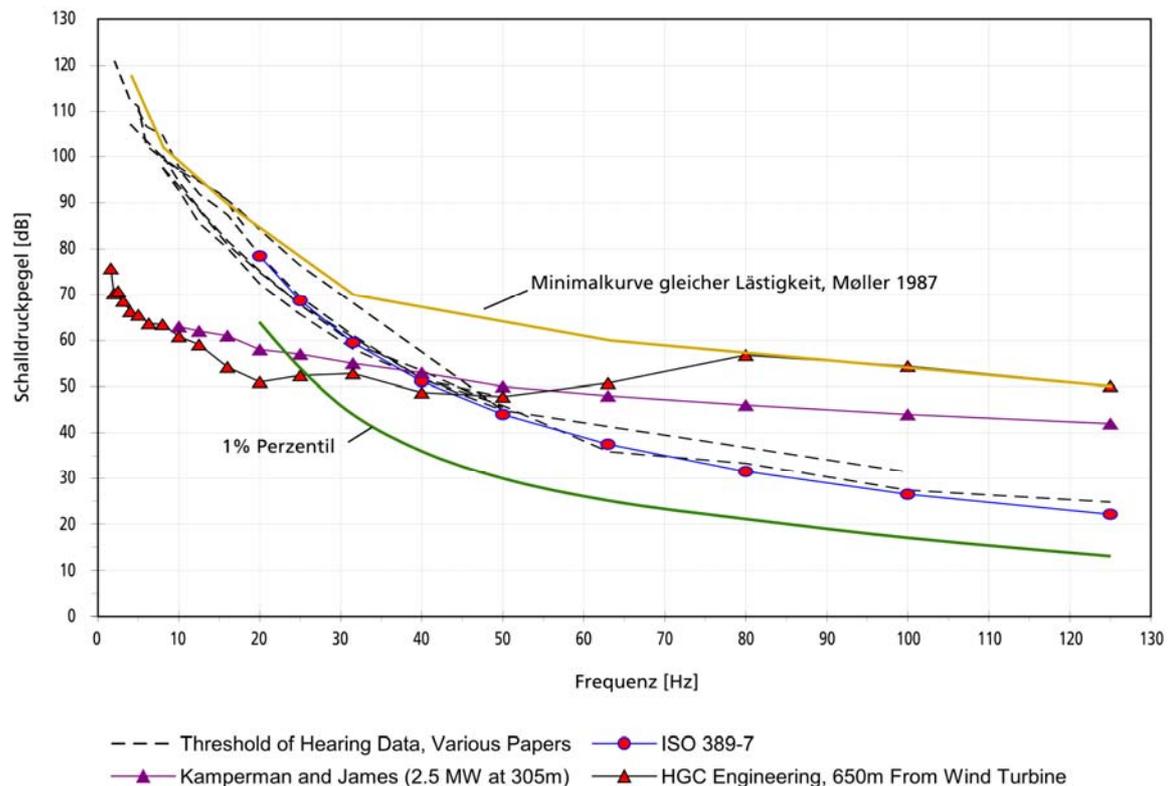


Abb. 7.5 Vergleich der verschiedenen Hörschwellen verschiedener Untersucher mit den typischen Schallpegelkurven von zwei Windenergieanlagen und der 1 %-Perzentilhörschwelle nach ISO 28961 (2012) und der Bezugshörschwelle nach ISO 389-7 (2005) sowie der Minimalkurve gleicher Lästigkeit nach *Møller (1987)* gelb (Diagramm modifiziert, Quelle: Howe, B., Low frequency noise and infrasound associated with wind turbine generator systems, a literature review, RFP No. OSS-078696, 2010)

7.3.2 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. Die Erstellung von Kurven gleicher Lästigkeit, bei denen die Frequenzzusammensetzung des Geräusches berücksichtigt wird, werden als sogenannte NR-Grenzkurven bezeichnet. Die Grenzkurven geben in jeder Oktave einen Maximalwert vor, der von den Oktavpegeln zur Einhaltung eines frequenzübergreifenden Schallpegels nicht überschritten werden darf. D. h. es müssen sämtliche Oktavpegel des Geräusches in einem Aufenthaltsraum unter der Grenzkurve liegen. In Deutschland werden die Grenzkurven für Geräusche gleicher Lästigkeit in der VDI-Richtlinie 2081 verwendet.

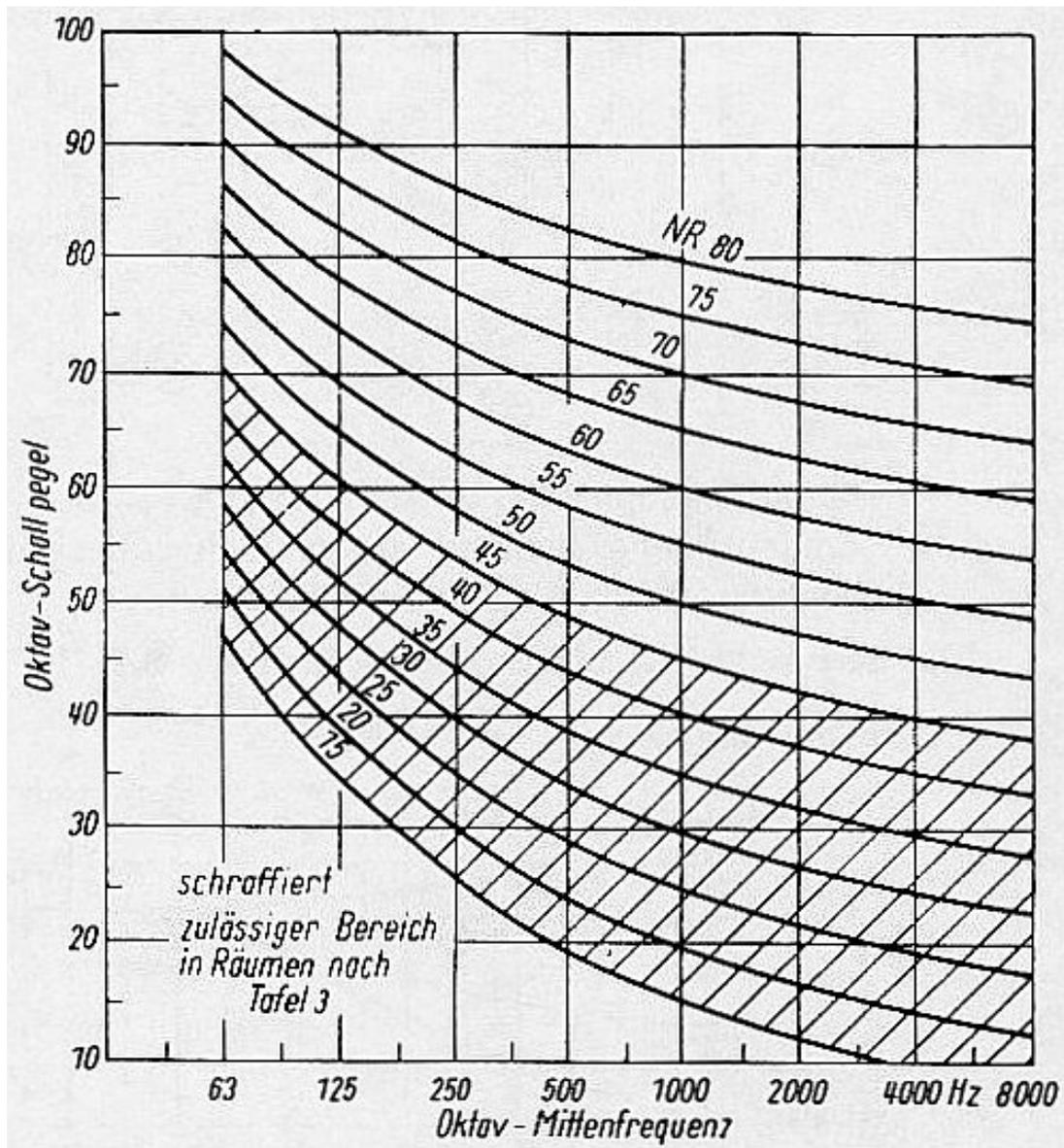


Abb. 7.6 N-Kurven zur Lärmbewertung, hier auch bei tieffrequenten Geräuschen unterhalb von 125 Hz

7.3.3 Kurven gleicher Unannehmlichkeit, zitiert in *Leventhall, H. G. (2004)*

Inukai et al. (2000) bestimmte die Kurven gleicher Unannehmlichkeit von 39 Probanden über einen Ton-Frequenzbereich von 10 Hz bis 500 Hz. Es wurden fünf Ebenen gebildet

1. nicht unangenehm (1)
2. etwas unangenehm (2)
3. unangenehm (3)
4. ziemlich unangenehm (4)
5. sehr unangenehm (5)

Die Zahlen 1, 2, 3, 4, 5 kennzeichnen die Stärke der Unannehmlichkeit in Abhängigkeit von der Frequenz und dem Schalldruckpegel. Alle Kurven gleicher Unannehmlichkeit sind annähernd linear und haben eine negative Steigung von 5 bis 6 dB pro Terz. Für Wohn- und Schlafzimmer wurden akzeptable Grenzen für tieffrequente Geräusche ermittelt. Beispielsweise liegt in diesem Laborversuch die selbst eingestellte akzeptable Grenze in einem angenommenen Schlafzimmer mehr als 10 dB über der Hörschwelle.

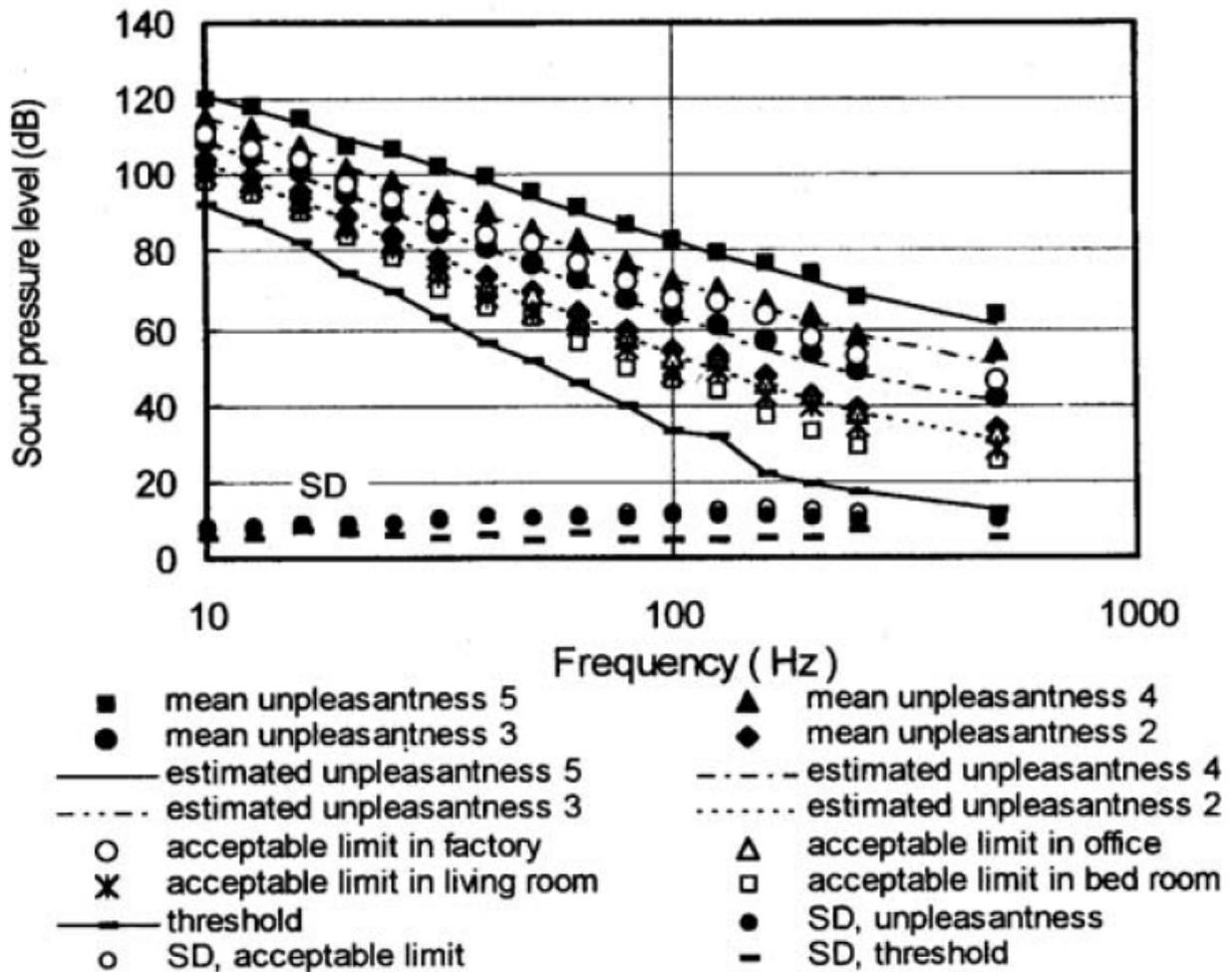


Abb. 7.7 Kurven gleicher Unannehmlichkeit (Quelle: Leventhall, H. G., Low frequency noise and annoyance. *Noise & Health*, 2004; 6: 59 – 72)

7.3.4 Zusammenfassung von minimalen Grenzkurven gleicher Lästigkeit für tieffrequente Geräusche

Für die Beurteilung² von tieffrequenten Geräuschen dürften die Grenzkurven gleicher Lästigkeit eine bedeutende Rolle spielen. Sie stellen die Grundlage für ein Beurteilungsverfahren dar. Abb. 7.8 zeigt die Abweichung der zusammengestellten Kurven verschiedener Untersucher und bereits in Normen verwendete Lästigkeitsgrenzkurven im Vergleich mit der 1 %-Perzentil-Hörschwelle. Die Kurvenschar macht deutlich, dass zwischen den Kurven starke Differenzen bis z. T. 20 dB auftreten können. Die Suche nach einer geeigneten *minimalen Grenzkurve gleicher Lästigkeit* dürfte weiteren Untersuchungen vorbehalten sein.

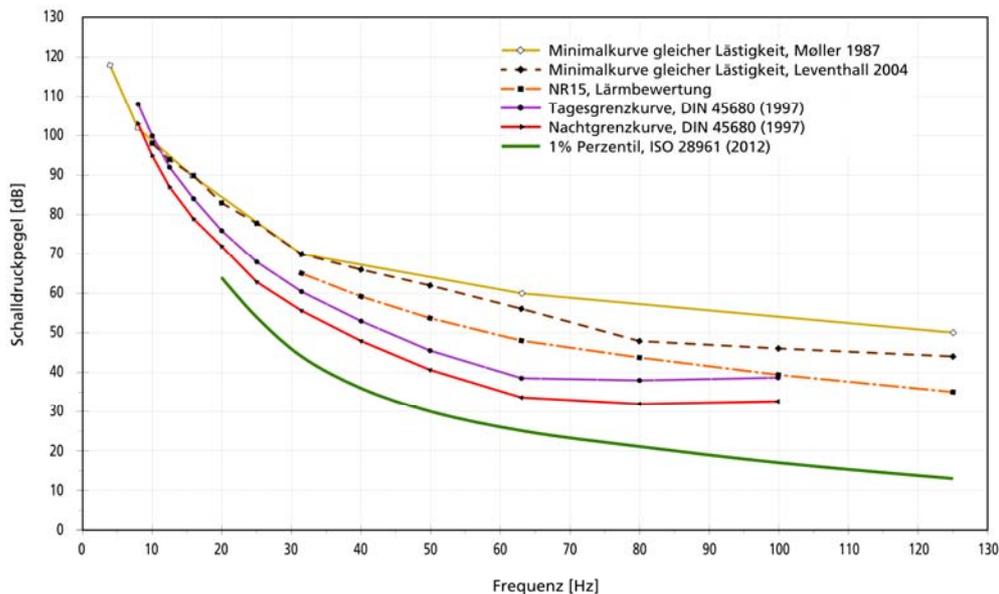


Abb. 7.8 Minimale Grenzkurven gleicher Lästigkeit verschiedener Untersucher und aus Normen

² Die Begriffe „Bewertung“ und „Beurteilung“ müssen differenziert betrachtet werden. „Bewertung“ sagt nichts über den Grad der tatsächlichen Belästigung durch tieffrequente Geräusche aus, sondern bewertet das Geräusch an sich. Im Gegensatz dazu vertritt der Begriff „Beurteilung“ die Wahrnehmung eines chemischen, physikalischen oder sonstigen Sachverhaltes, der eng verbunden ist mit einem Urteil im Hinblick auf den Grad der belästigenden oder gesundheitsschädlichen Wirkung. Dies kann allerdings nur im Zusammenhang mit Anhalts-, Immissionsricht- oder Grenzwerten geschehen. Um Missverständnisse zu vermeiden, wird hier deutlich gemacht, dass sich ein genormtes Beurteilungsverfahren aus folgenden drei Bestandteilen zusammensetzt:

- Messgrößen zur physikalischen Erfassung des Schalls,
- Bewertungsgrößen für den Schall zur Herstellung einer Lästigkeitsäquivalenz und Bilden eines Beurteilungspegels,
- Vergleich eines Beurteilungspegels mit einer Beurteilungsgrenze zur Angabe der Ausprägung der Lästigkeitswirkung.

8 Thesen der Untersuchung und Ausblick

1. Das *Schutzniveau* der DIN 45680 (1997) und DIN (E) 45680 (2013) ist nicht ausreichend.
2. Die *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.
3. Die *DIN EN ISO 389-7 (2006)*: Die Hörschwellendaten für einen Bereich von 20 Hz bis 16.000 Hz sind momentan die verlässlichsten für Freifeld- und Diffusfeldbedingungen.
4. Die *nichtstandardisierte Hörschwelle* im Frequenzbereich von 2 Hz bis 125 Hz ist in seiner statistischen Aussage sehr unsicher. (Außerdem Anwendung verschiedener Untersuchungsmethoden!).
5. Die *Hörschwelle* nach *DIN 45680 (1997)* stimmt fast mit der 25 %-Perzentil-Hörschwelle nach ISO 28961 (2012) überein und die des *Entwurfes* liegt z. T. über der 5 %- und unter der 1 %-Perzentil-Hörschwelle nach ISO 28961.
6. Die *DIN EN ISO 7029 (E)*: Die *Hörschwelle* bei *Männern (6.434!)* ist mit zunehmendem Alter im Mittel höher als bei *Frauen (17.150!)*. Auch unterhalb von 125 Hz ist mit einer Verschlechterung der Hörschwelle im Alter zu rechnen.
7. *DIN ISO 226 (2006)*: Die *Hörkurven gleicher Lautstärkepegel* beschreiben eine der wichtigsten Eigenschaften des menschlichen Gehörs und sind deshalb für die Psychoakustik von wesentlicher Bedeutung ($N = 304 VP$).
8. *Kurven gleicher Lästigkeit* verlaufen anders als die *Kurven gleicher Lautstärkepegel* bzw. der Lautheit nach DIN ISO 226 (2006).
9. Der Entwurf zur *Beschreibung der Lästigkeit* beruht darauf, dass sich ein Beurteilungspegel L_r für jedes Terzband auf der Grundlage einer Basislautstärke in Form eines Terzschalldruckpegels $L_{Terz,eq}$ und aus dem Tonzuschlag ΔL_T , Impulszuschlag ΔL_I , Pegelschwankungszuschlag $\Delta L_{S,Pegel}$ und einem Frequenzschwankungszuschlag $\Delta L_{S,Frequenz}$ in der folgenden Form bilden lässt: $L_{r,Terz} = L_{Terz,eq} + \Delta L_T + \Delta L_I + \Delta L_{S,Pegel} + \Delta L_{S,Frequenz}$ in dB und zur Darstellung der Lästigkeitsäquivalenz zwischen physikalischen Größen und Wahrnehmung geeignet ist.
10. Für die Beurteilung tieffrequenter Geräusche spielen die *Grenzkurven gleicher Lästigkeit* eine bedeutende Rolle.

Ausblick zur Novellierung der DIN 45680

1. *Vorschlag 1:* Im Sinne der *Lärmvorsorge* schlagen wir die Aufnahme der *1 %-Perzentil-Hörschwelle* für einen Frequenzbereich von 20 Hz bis 125 Hz gemäß ISO 28961 (2012) vor und empfehlen eine Extrapolation der *1 %-Perzentil-Hörschwelle* im Frequenzbereich von 8 Hz bis 20 Hz.
2. *Vorschlag 2:* Für die *Messung* tieffrequenter Geräusche werden *physikalische Größen* befürwortet, und zwar mit einem Konzept, das sich auf einen *Basisschalldruckpegel* und *Zuschläge* stützt.
3. *Vorschlag 3:* Es wird empfohlen, die aus dem Schrifttum bekannten *minimalen Grenzkurven gleicher Lästigkeit* für ihre Eignung zur *Beurteilung* tieffrequenter Geräusche zu prüfen.

9 Literaturverzeichnis

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)

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

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz: Leitfaden für die Verbesserung des Schutzes gegen Lärm bei stationären Geräten (Klimageräte, Kühlgeräte, Lüftungsgeräte, Luft-Wärme-Pumpen und Miniblockheizkraftwerke). Stand 28.08.2013

Corso, J. F.: Absolute thresholds for tones of low frequencies. Am. J. Psychol. Vol. 71. 367. 1958

DIN ISO 226: Akustik – Normalkurven gleicher Lautstärkepegel (ISO 226:2003). April 2006

DIN EN ISO 389-7: Akustik – Standard-Bezugspegel für die Kalibrierung von audiometrischen Geräten – Teil 7: Bezugshörschwellen unter Freifeld- und Diffusfeldbedingungen (ISO 389-7:2005); Deutsche Fassung EN ISO 389-7:2005. 2006-04

DIN EN ISO 7029 (Entwurf): Akustik – Statistische Verteilung von Hörschwellen in Bezug auf das Alter und das Geschlecht (ISO/CD 7029:2014). September 2014

DIN 1318: Lautstärkepegel. Begriffe, Meßverfahren. September 1970

DIN 45630-2: Grundlagen der Schallmessung; Normalkurven gleicher Lautstärkepegel. September 1967 (zurückgezogen)

DIN 45631: Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum, Verfahren nach E. Zwicker. März 1991

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, Beiblatt 1: Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft – Hinweise zur Beurteilung bei gewerblichen Anlagen. März 1997

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

DIN 45680(E), Beiblatt 1: Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräuschimmissionen – Hinweise zur Beurteilung – Technische Anlagen. September 2013

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

DIN 61672: Schallpegelmesser, Teil 1 :Anforderungen. Oktober 2003

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

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. 1998. 149 – 165

Hofmann, M., Wunderlich, R.: Fallbeispiele von tieffrequentem Schall in der Praxis und deren Bewertung nach dem gültigen Regelwerk. Müller-BBM Fachtagung Lärmschutz – Tieffrequente Geräuschimmissionen in der Wohn- und Arbeitsumwelt. Planegg. 2014

Howe, B.: Low frequency noise and infrasound associated with wind turbine generator systems. A literature review. RFP No. OSS-078696. 2010

Inukai, Y., Nakamura, N., and Taya, H.: Unpleasantness and acceptable limits of low frequency sound. *Jnl Low Freq Noise Vibn* 19, 2000.

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

ISO 532 : Akustik – Verfahren zur Berechnung des Lautstärkepegels. 1975-07

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

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

Kurakata, K., Mizunami, T. u. a.: The Statistical Distribution of Normal Hearing Thresholds for Low-Frequency Tones; *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Noise Control*. Vol. 27. No. 2. 2008. 97 – 104

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

Landström, U., Lundström, R., Byström, M.: Exposure to infrasound – Perception and changes in wakefulness. *J. Low Freq. Noise and Vib.* Vol. 2 (1). 1 – 11. 1983

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

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

Lips, W.: Besonderheiten der Lärminderung von tieffrequentem Schall einschließlich Infraschall an Arbeitsplätzen in der Industrie und in der Umgebung. VDI Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (Suva) und Fachhochschule Luzern. Technik & Architektur. Müller-BBM Fachtagung Lärmschutz – Tieffrequente Geräuschmissionen in der Wohn- und Arbeitsumwelt. Planegg. 2014

Lydolf, M., Møller, H.: New measurements of the threshold of hearing and equal-loudness contours at low frequencies. *Proceedings of the 8th International meeting on Low Frequency Noise and Vibration.* Gothenburg. Sweden. 76 – 84. 1997

Møller, H., Pedersen, C. S.: Hearing at Low and Infrasonic Frequencies. *Noise & Health* 6 (23). 2004. 37 – 57

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

Møller, H., Andresen, J.: Loudness of pure tones at low infrasonic frequencies. *Journal of Low Frequency Noise and Vibration.* Vol. 3 (2). 1984. 78 – 87. 1984

Moorhouse, A. T., Waddington, D. C., Adams, M. A.: A procedure for assessment of low frequency noise complaints, *JASA* 126 (3), September 2009, 1132 – 1141

Müller-BBM: 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

Nagai, N., Matsumoto, K., Takeuchi, H., Takeda, S.: The threshold of sensation for infrasound. *Journal of Low Frequency Noise and Vibration.* Vol. 1 (4). 165 – 173. 1982

Okai, O., Saito M., Taki, M., Mochizuku, A., Nishiwaki, Ni, Mori, T., Fujoi, M.: Physiological parameters in human response to infrasound. *Proceedings of the Conference on Low Frequency Noise and Hearing.* 7 – 9 May 1980 in Aalborg Denmark. 121 – 129. 1980

Robinson, D. W., Dadson, M. A.: A re-determination of the equal-loudness relations for pure tones. *British J. App. Phy.* Vol. 7. 166 – 181. 1956

Salt, A. N.: Perception-based protection from low-frequency sounds may not be enough. Department of Otolaryngology Washington University School of Medicine. St. Louis, Missouri, USA. *Internoise.* 2012

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.: 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

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

Teranishi, R: Study about measurement of loudness. On the problems of minimum audible sound, Research of the Electrotechnical Laboratory, No.658, Tokyo (1965)

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

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

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

Watanabe, T., Møller, H.: Hearing thresholds and equal loudness contours in free field at frequencies below 1 kHz. J. Low Freq. Noise Vib.. Vol. 9 (4). 135 – 148. 1990a

Watanabe, T., Møller, H.: Low frequency hearing thresholds in pressure field and in free field. J. Low Freq. Noise Vib. Vol. 9 (3). 106 – 115. 1990b

Watanabe, T., Ozawa, K., Suzuki, M., Uematu, T., Kosaka, T., Yamada, S.: A study on the psychological evaluation of low frequency noise. Proceedings of 7th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibration. Edingburgh. 14 – 16 April 1993. 173 – 178

Whittle, L. D., Collings, S. J., Robinson, D. W.: The audibility of low frequency sounds. J. Sound Vib. Vol. 21 (4). 431 – 448. 1972

Yamada, S., Kosaka, T., Bunya, K., Amemiya, T.: Hearing of low frequency sound and influence on human body. Proceedings of the Conference on Low Frequency Noise and Hearing. 7 – 9 May 1980 in Aalborg Denmark. 95 – 102

Yeowart, N. S., Bryan, M. E., Tempest, W.: The monaural M.A.P. threshold of hearing at frequencies from 1.5 to 100 c/s. J. Sound Vib. Vol. 6 (3). 335 – 342. 1967

Yeowart, N. S., Evans, M. J.: Thresholds of audibility for very low-frequency pure tone. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 55 (4). 814 – 818. 1974

Anhang A

Beispielsammlung Schallemission

Auszug aus dem Mustergutachten und Handlungsanleitung zur „Berücksichtigung tieffrequenter Geräusche gemäß TA Lärm in Genehmigungs-, Planfeststellungs- und Baugenehmigungsverfahren“, Müller-BBM Bericht 2001

Beispielsammlung tieffrequenter Schallquellen

Im Folgenden sind die Terz-Schalleistungsspektren einiger tieffrequenter Schallquellen zusammengefasst.

Diese Sammlung entstand teilweise aus Messergebnissen in besonders störenden Fällen.

Dabei kann das Auftreten von tieffrequenten Geräuschanteilen auf nicht vorhersehbare Resonanzen, schlecht dimensionierte oder verschmutzte Schalldämpfer oder Ähnliches zurückzuführen sein. Die Sammlung erhebt nicht den Anspruch, für einzelne Schallquellarten typisch zu sein. Eine generelle Untersuchung einzelner Maschinenarten auf ihre Geräuscherzeugung im tieffrequenten Bereich wurde nicht durchgeführt.

Die Sammlung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Tab. A1 Normfrequenzen

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

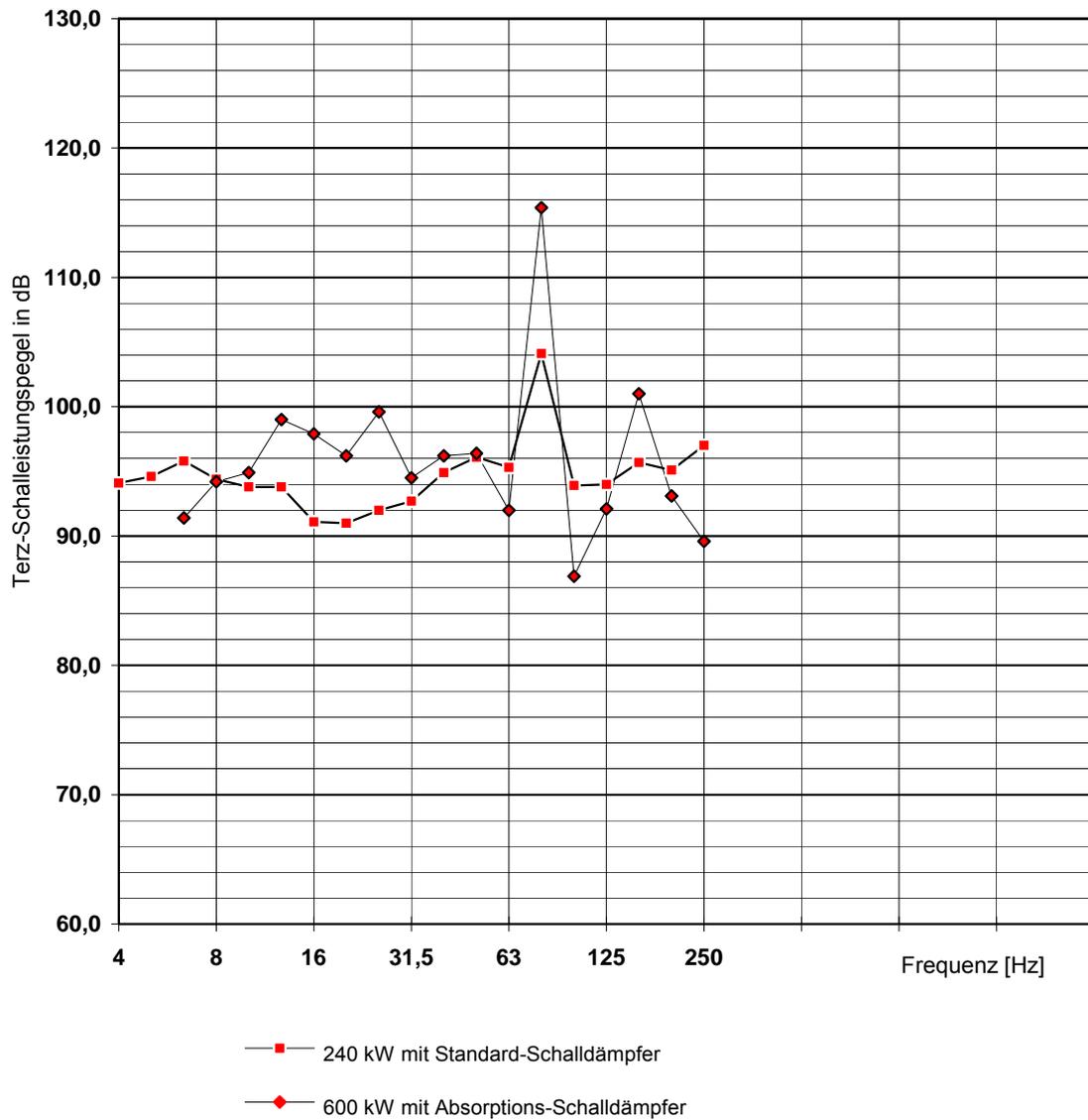


Abb. A1 Kraftstromgeneratoren, Schalleistungspegel von Abgasanlagen

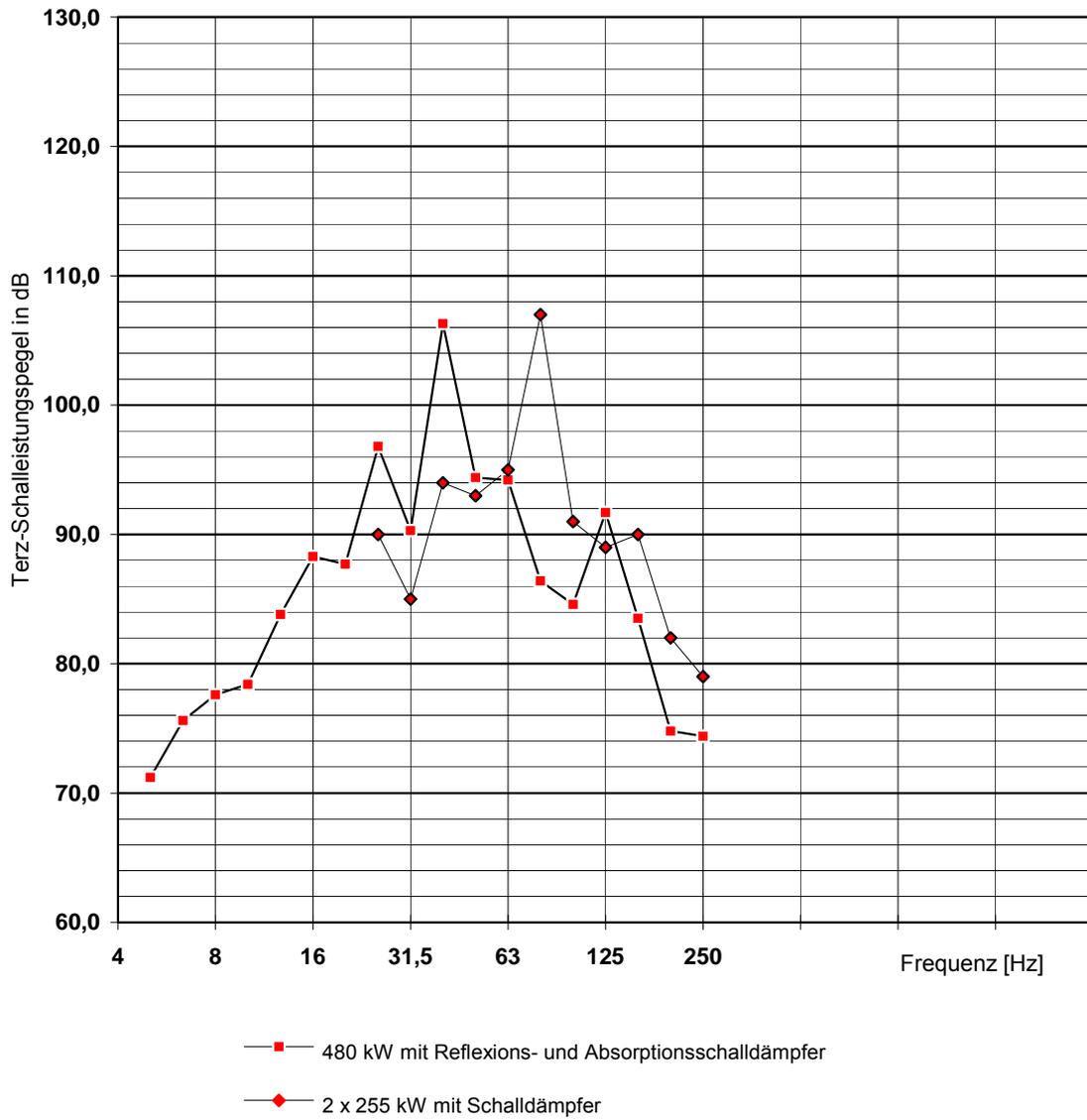
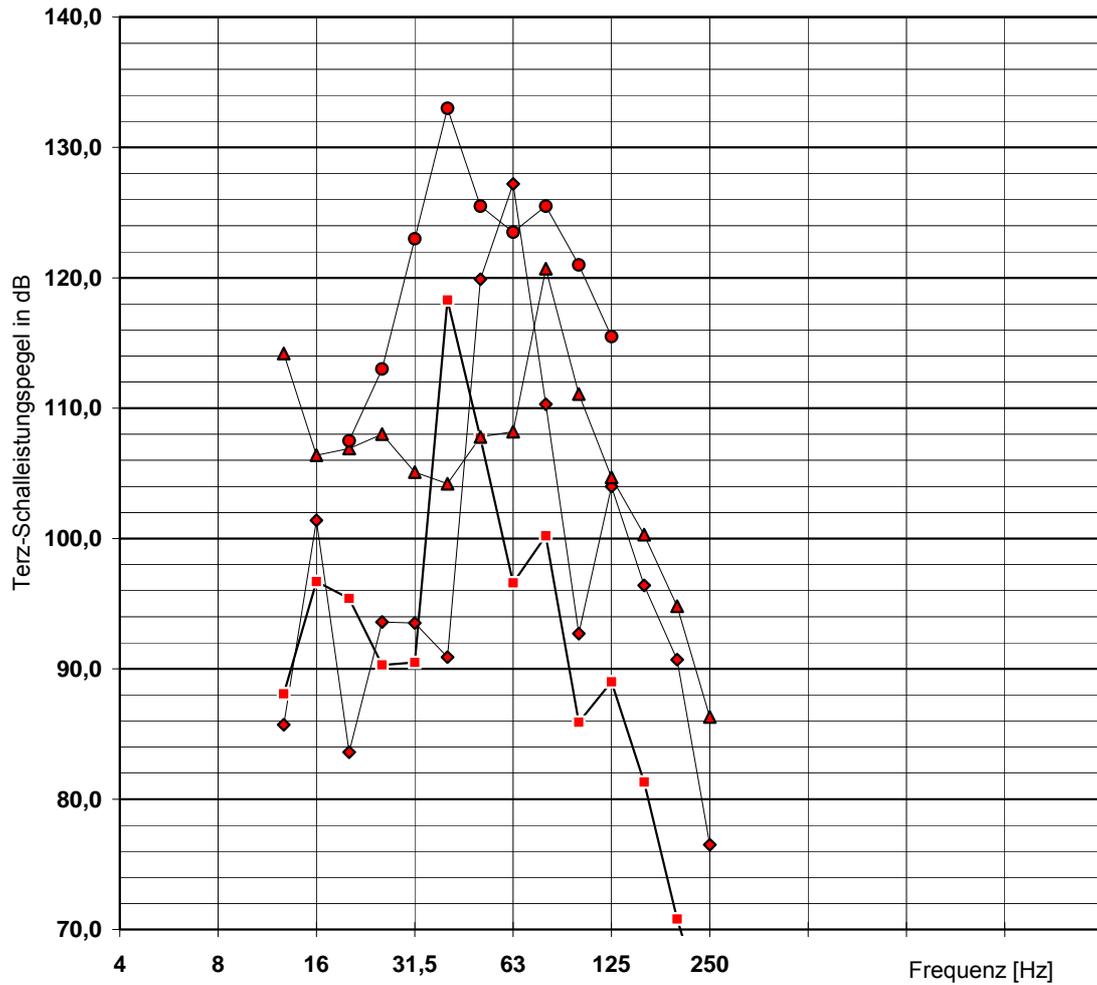


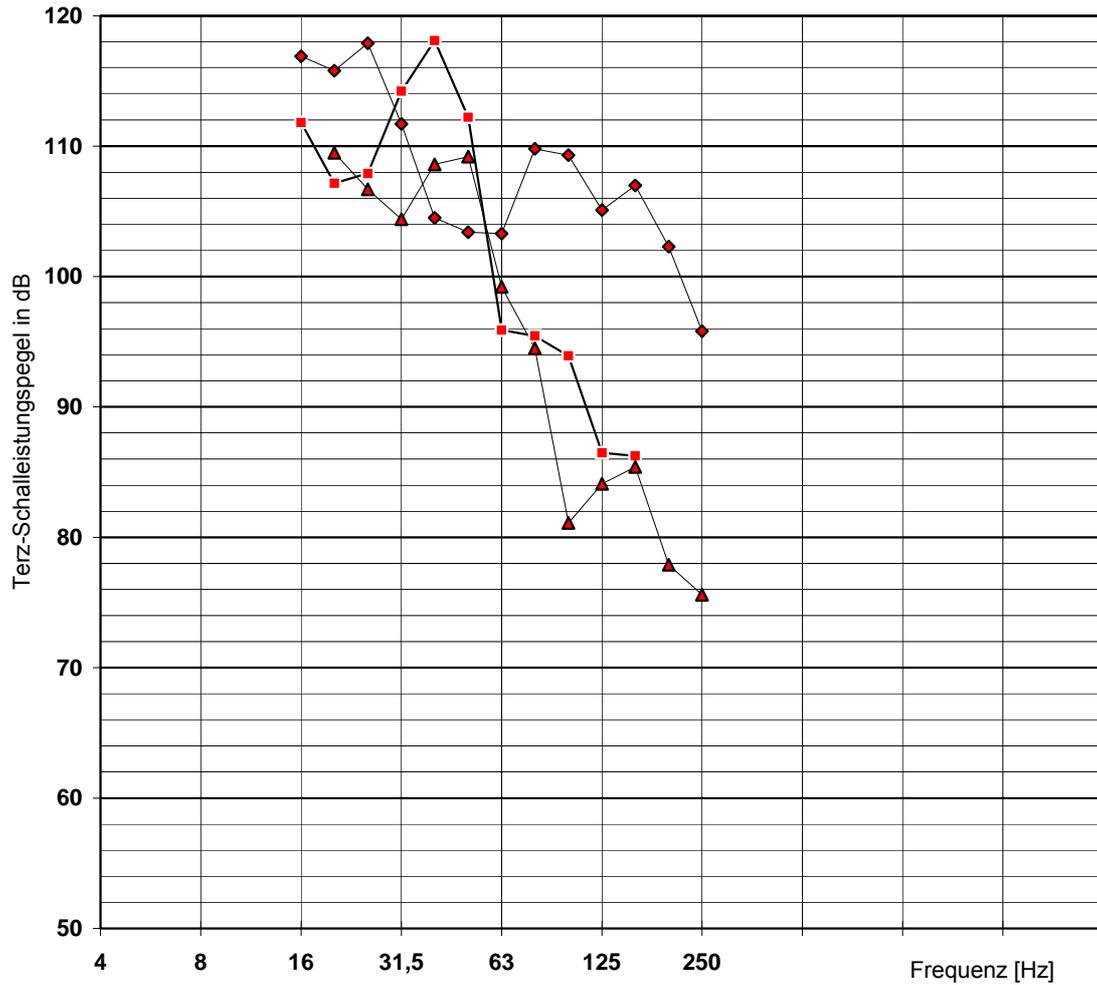
Abb. A2 Blockheizkraftwerke, Schalleistungspegel von Abgasanlagen



4

- Binnenschiff mit verschmutztem Abgasschalldämpfer, Leerlauf 700 rpm
- ◆— Binnenschiff mit verschmutztem Abgasschalldämpfer, 250 PS 1000 rpm
- ▲— Binnenschiff mit verschmutztem Abgasschalldämpfer, 825 PS 1525 rpm
- Dieselmotor Fährschiff [15]

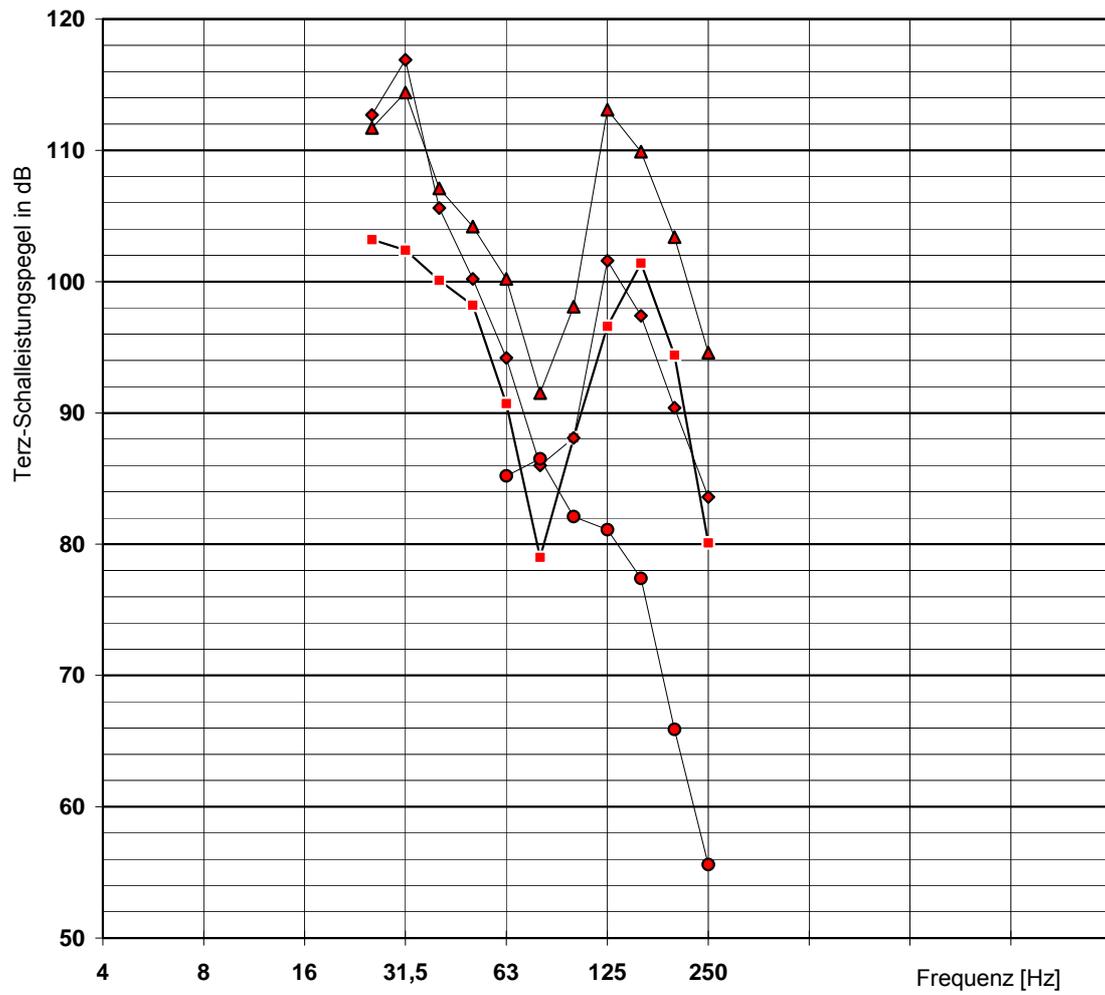
Abb. A3 Motoren auf Schiffen, Schalleistungspegel von Abgasanlagen



5

- Heizwerk mit Gaskesseln 2x25 t/h und 2x74 t/h [28]
- ◆— Kraftwerkskessel 160 MW,el , Schornsteinmündung mit Schalldämpfer [29]
- ▲— Heizkessel 140 t/h, Schornsteinmündungen mit Schalldämpfer [30]

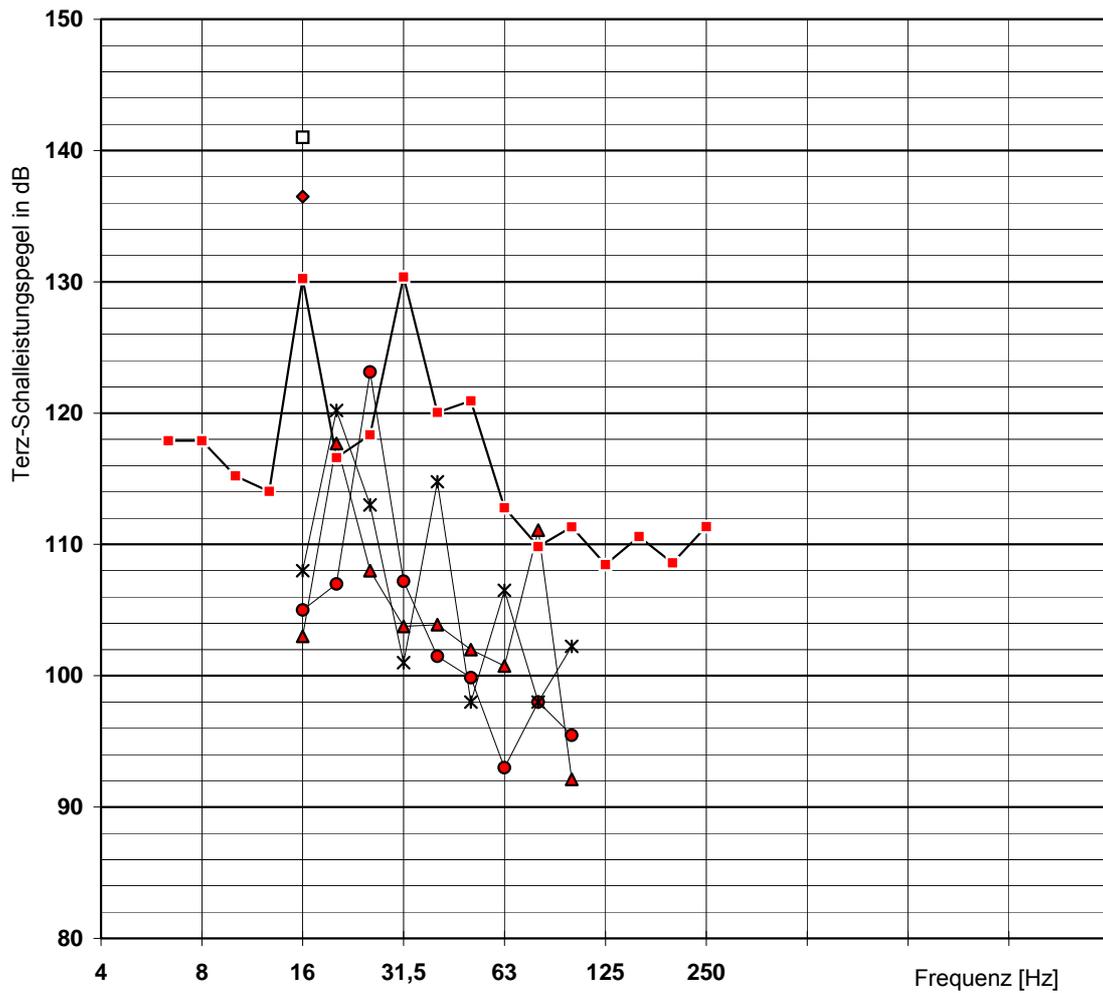
Abb. A4 Gasgefeuerte Kraftwerks- und Heizkessel, Schalleistungspegel an den Schornsteinmündungen



11

- 2300 kW, Abgasrohr, ohne Schalldämpfer [32]
- ◆— 3500 kW, Abgasrohr, ohne Schalldämpfer [32]
- ▲— 3840 kW, Abgasrohr, ohne Schalldämpfer [32]
- Heizkessel 3,5 MW, th, Schornsteinmündung mit Schalldämpfer [31]

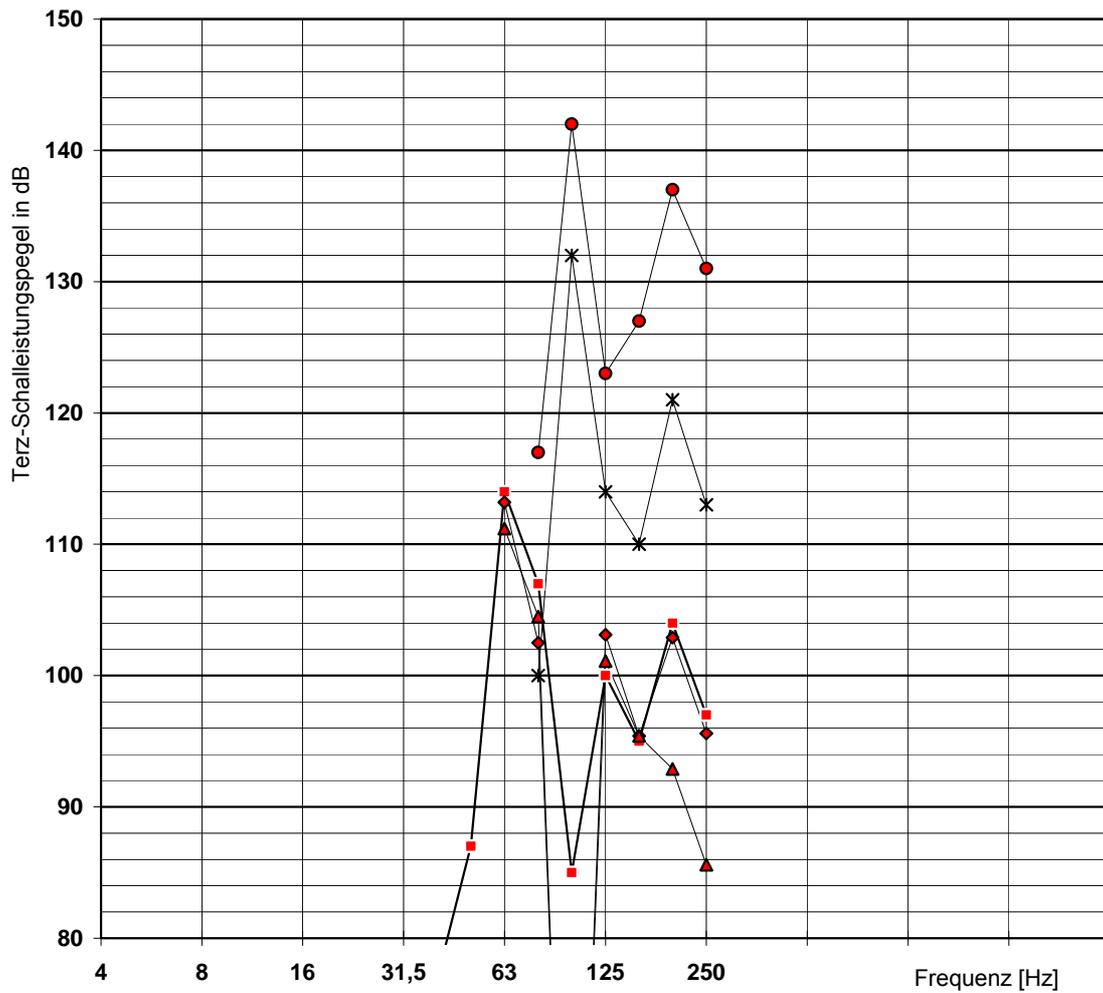
Abb. A5 Heizkessel, Schalleistungspegel an Abgasrohren



12

- Sandsieb auf Schiff [M+P]
- ◆— Sandsieb auf Schiff [M+P]
- ▲— Kiesklassiersieb [5]
- Sandklassiersieb [5]
- ×— Vorklassiersieb [5]
- - □ - - Kiessieb [20]

Abb. A6 Kies- und Sandsiebe, Schalleistungspegel



10

- unbelegter Tisch, bedämpft [22]
- ◆— unbelegter Tisch, bedämpft und mit Absorptionsmaterial versehen [22]
- ▲— belegter Tisch, bedämpft und mit Absorptionsmaterial versehen [22]
- unbelegter Tisch [23]
- ×— unbelegter Tisch, bedämpft [23]

Abb. A7 Betonfertigteile-Rütteltische, Schalleistungspegel

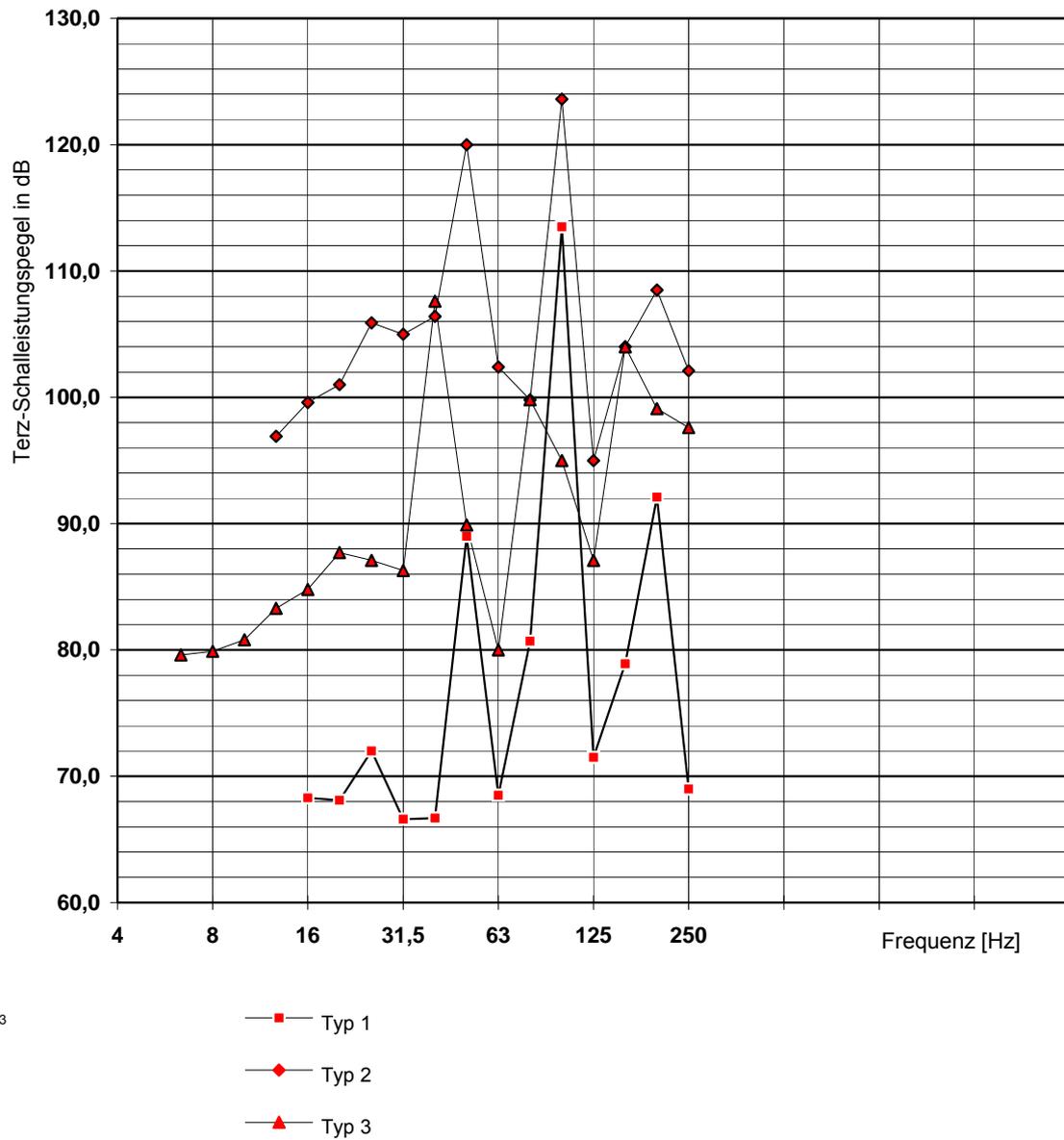
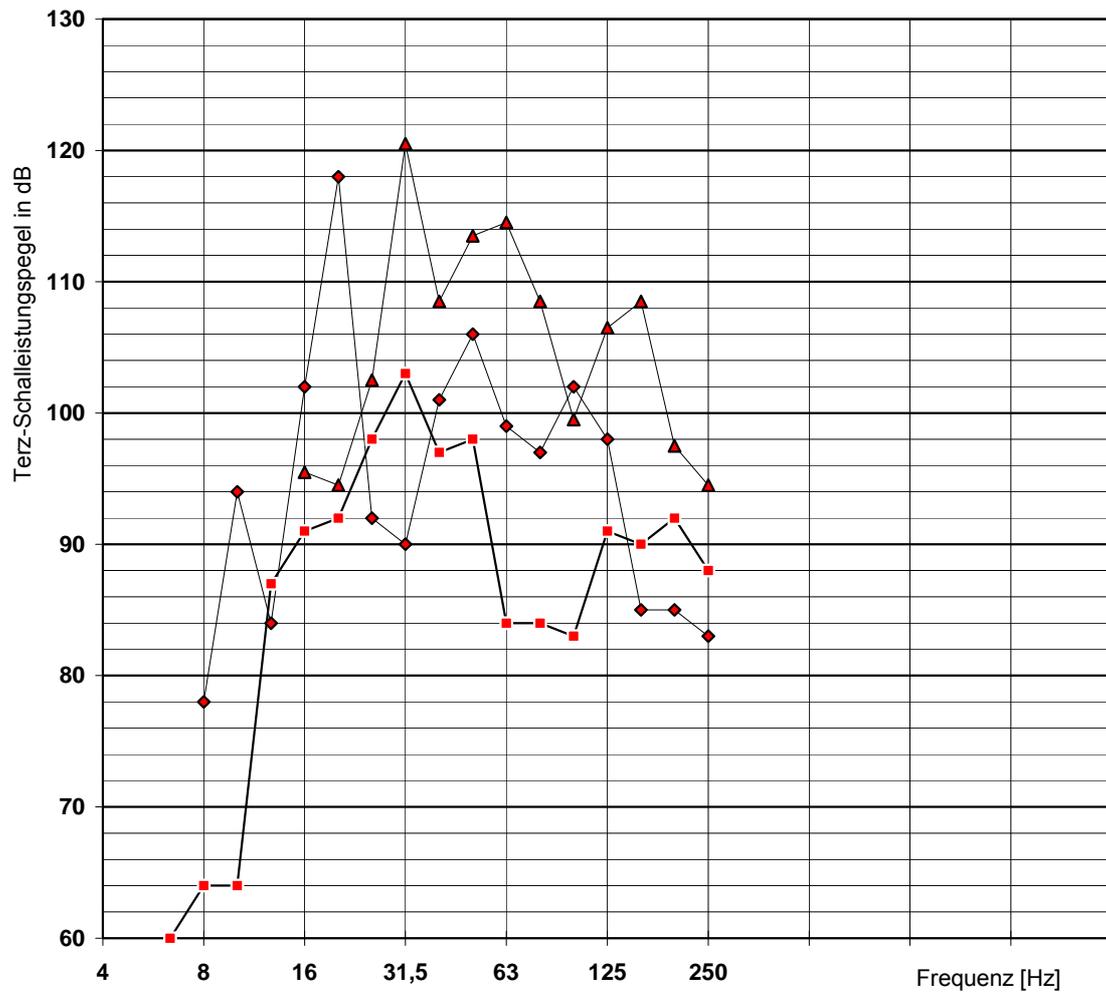


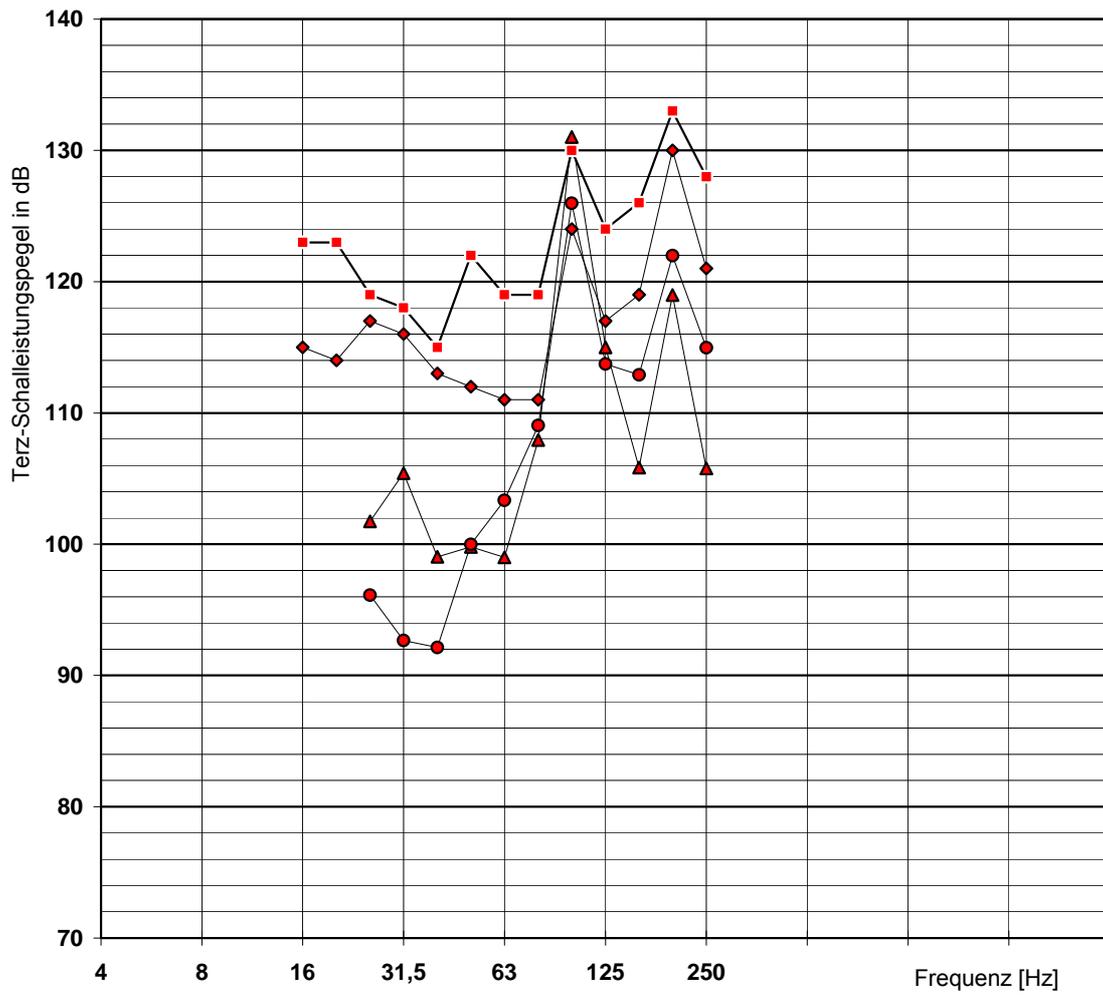
Abb. A8 Drehkolbengebläse, Schalleistungspegel an der Ansaugöffnung ohne Schalldämpfer



9

- Kolbenkompressor [11]
- ◆— Kolbenkompressor [16]
- ▲— Kolbenkompressor [7]

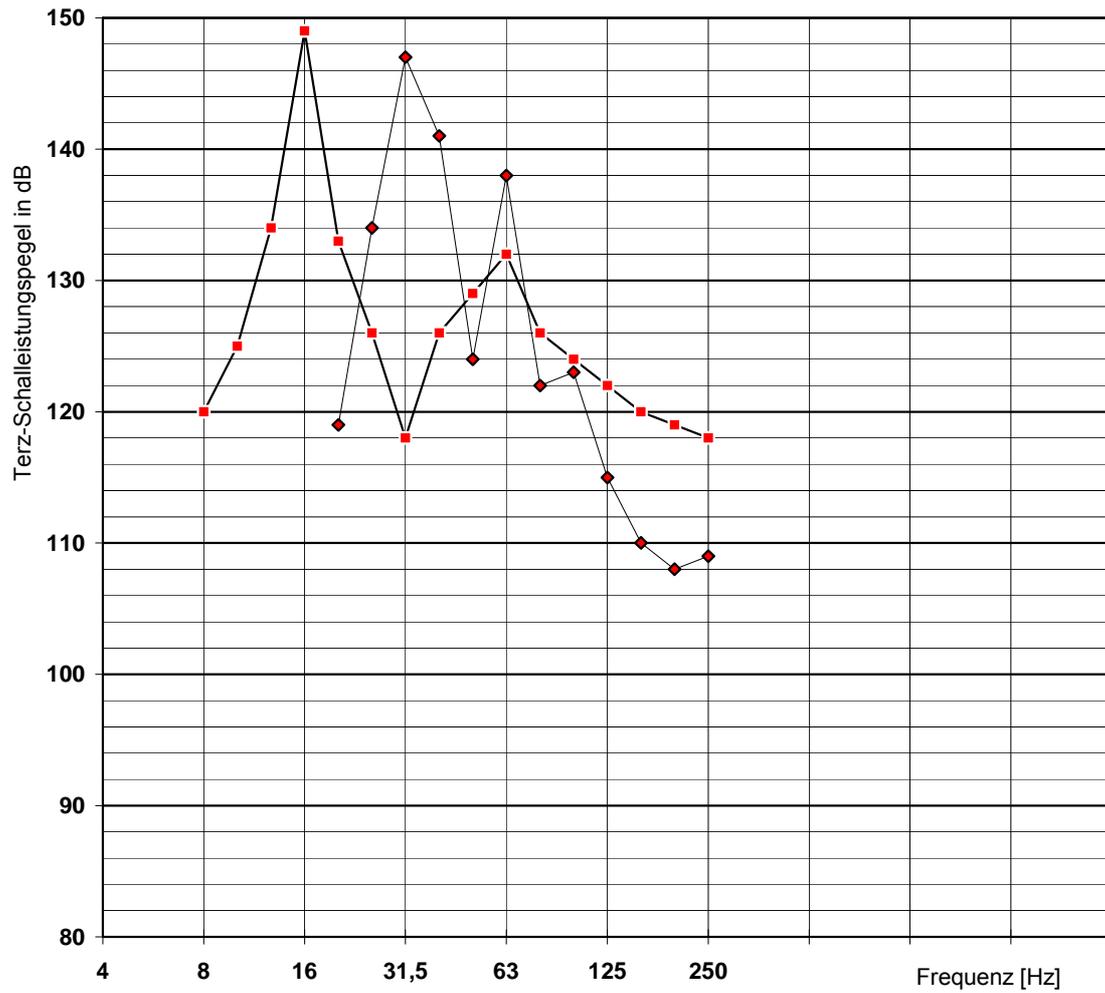
Abb. A9 Kolbenkompressoren, Schalleistungspegel an der Ansaugöffnung



8

- Lichtbogenofen, Anfang der Schmelze [17]
- ◆— Lichtbogenofen, Ende der Schmelze [17]
- ▲— Pfannofen [18]
- Pfannofen [18]

Abb. A10 Elektroöfen zur Stahlerzeugung, Schalleistungspegel



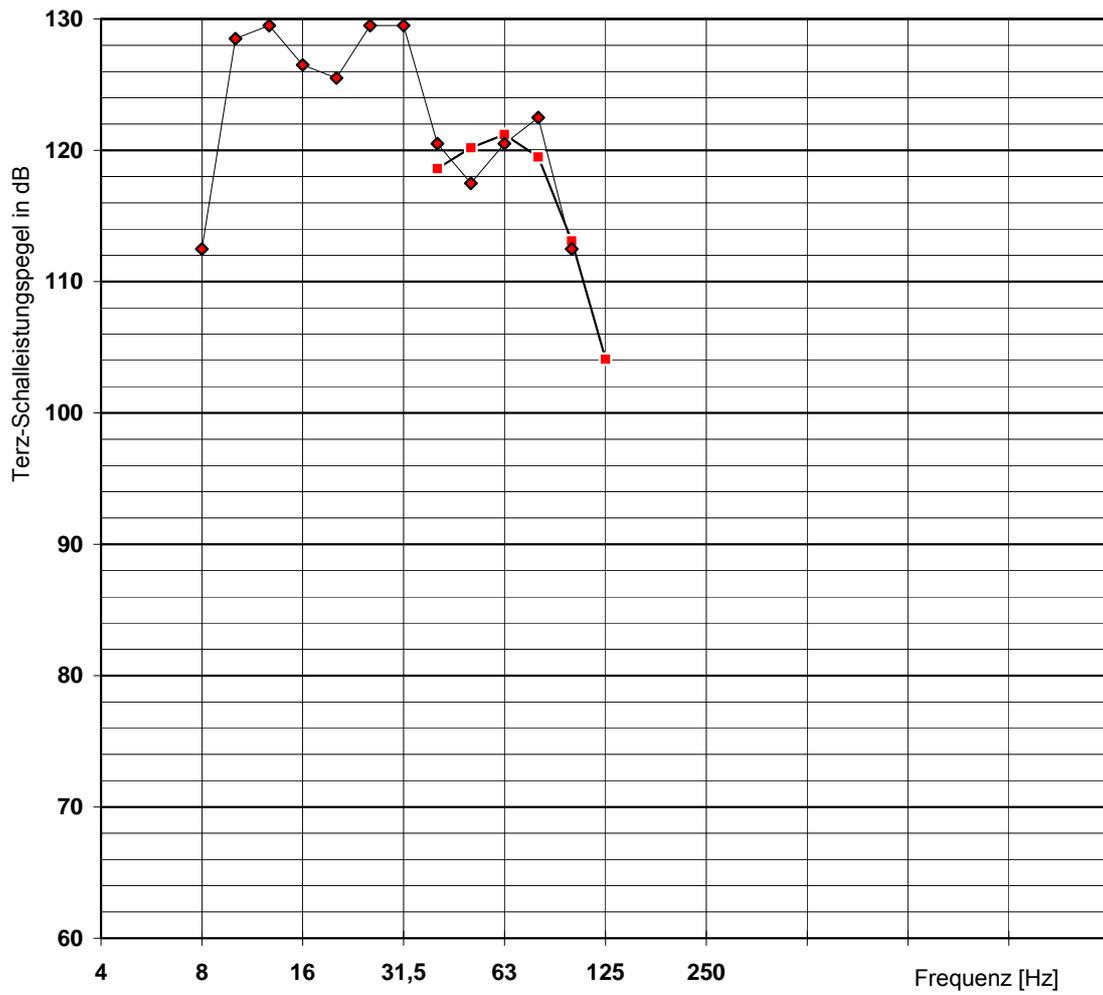
7

—■— Durchsatz 10 t/h Gas + ? t/h Dampf [19]

—◆— Durchsatz 16 t/h Gas + 6 t/h Dampf [19]

Abb. A11 Bodenfackeln, Schalleistungspegel bei ungünstigen Betriebszuständen¹⁾

¹⁾ Rückkopplung der Gaszufuhr mit Eigenschwingungen des Fackelinnenraumes



13

—■— Gasturbine 52 MW, mit Schalldämpfer [33]

—◆— Gasturbine 112 MW, mit Schalldämpfer [34]

Abb. A12 Gasturbinen ohne Abhitzekessel, Schalleistungspegel

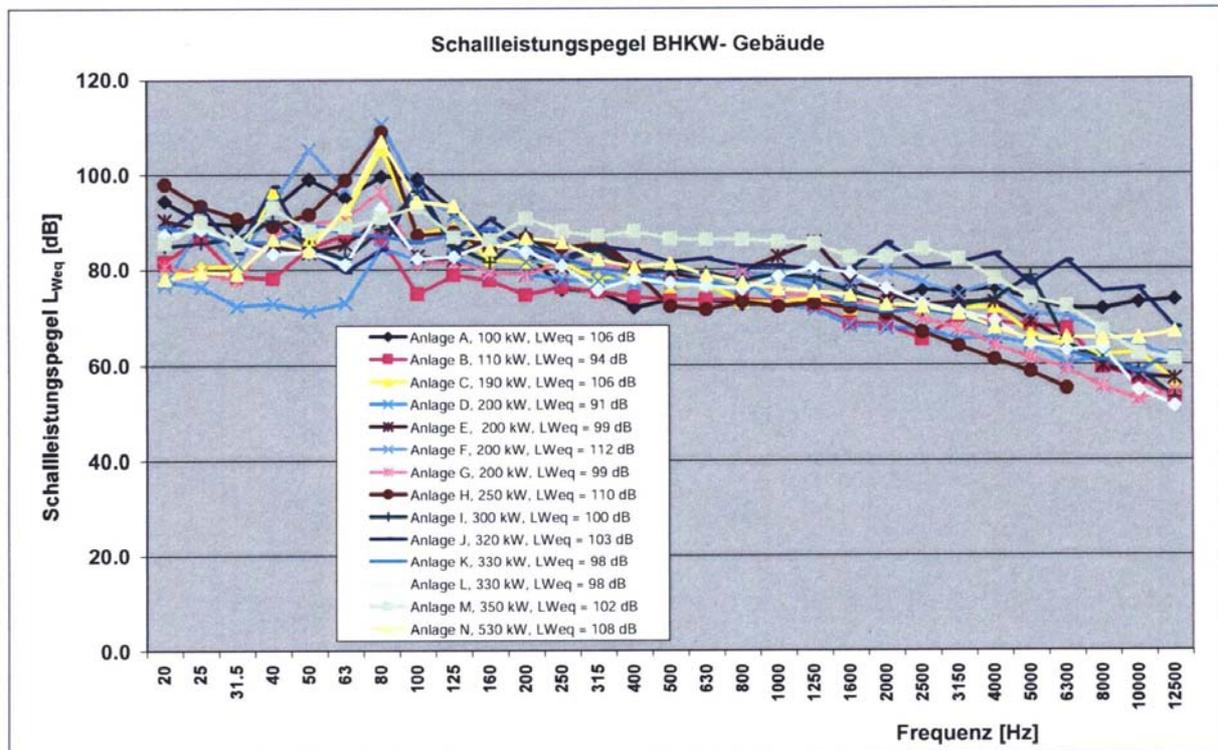


Abb. A13 Immissionswirksame Terz-Schalleistungspegel L_{Weq} von BHKW-Gebäuden, LfU-Messung (Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen und Luftwärmepumpen, Ein Leitfaden (Februar 2011))

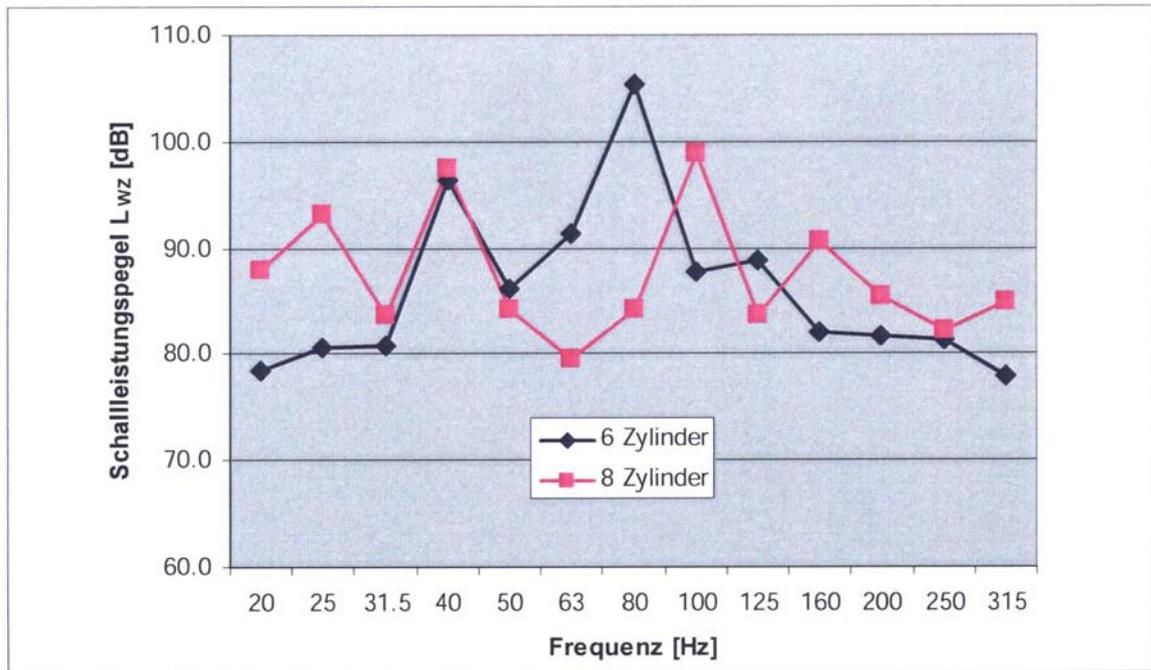


Abb. A14 Emissionsspektren von BHKW-Gebäuden mit Gasmotoren mit sechs und acht Zylindern bei 1500 U/min in den dominanten Frequenzen bei 80 Hz und 100 Hz (Anlage C und J), LfU-Messung (Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen und Luftwärmepumpen, Ein Leitfaden (Februar 2011))

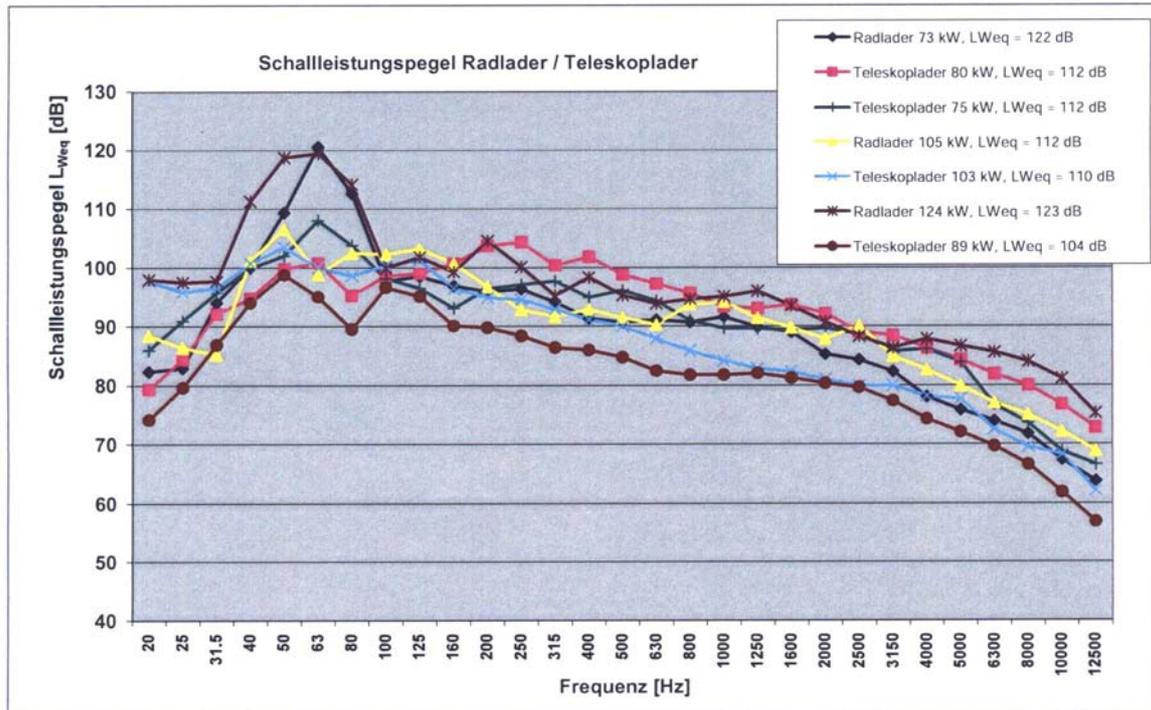


Abb. A15 Schalleistungspegel L_{Weq} von Radladern und Teleskopladern beim Beschicken des Substratdosierers, kW-Angaben entsprechen der Motorleistung des Fahrzeugs, LfU-Messung (Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen und Luftwärmepumpen, Ein Leitfaden (Februar 2011))

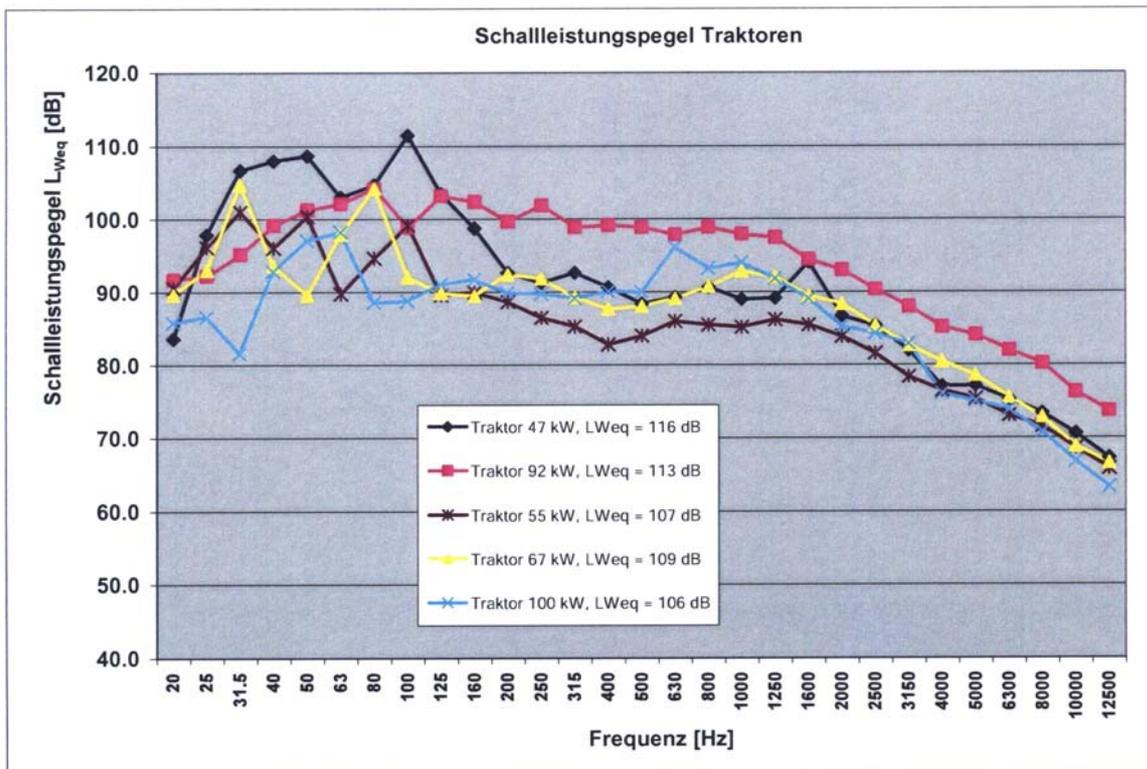


Abb. A16 Schalleistungspegel L_{Weq} von Traktoren bei der Substrataufnahme im Fahrsilo bzw. Dosierbeschickung, kW-Angaben entsprechen der Motorleistung des Fahrzeugs, LfU-Messung (Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen und Luftwärmepumpen, Ein Leitfaden (Februar 2011))

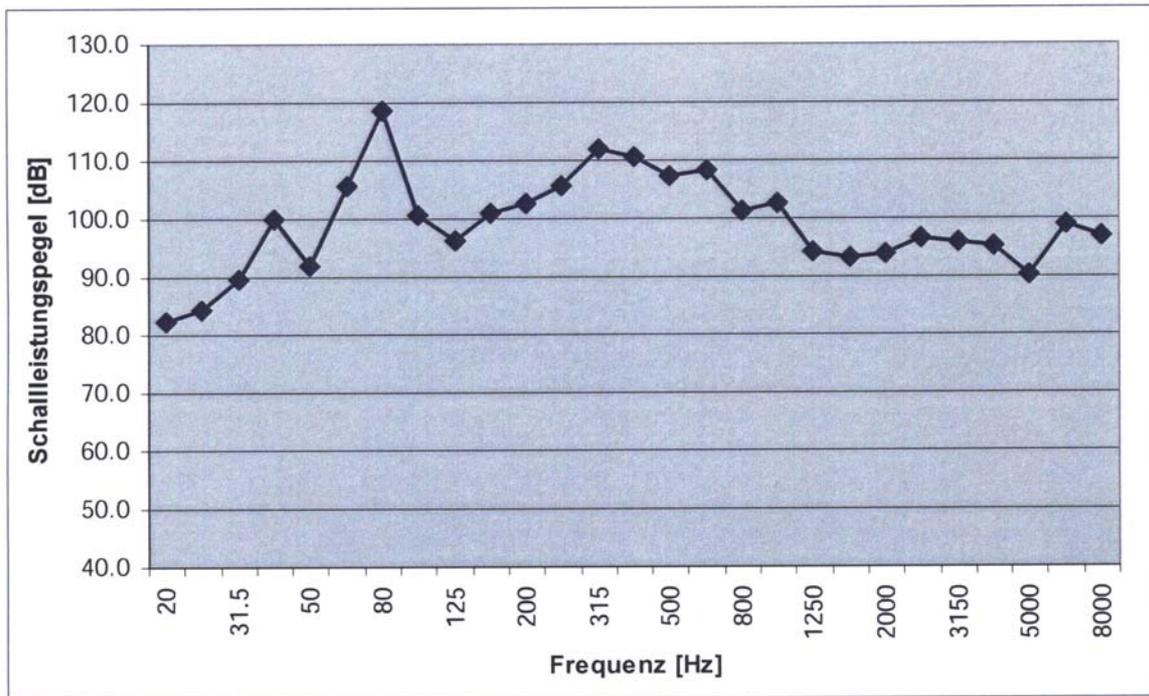


Abb. A17 Beispiel für ungedämpfte Abgas-Schalleistungspegel eines 12-Zylinder-Gasmotors bei 370 kW_{el}, Herstellerangabe; $L_{WZ} = 121$ dB; $L_{WA} = 114$ dB(A) (Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen und Luftwärmepumpen, Ein Leitfaden (Februar 2011))

Anhang B

Beispielsammlung Schallimmission in Räumen

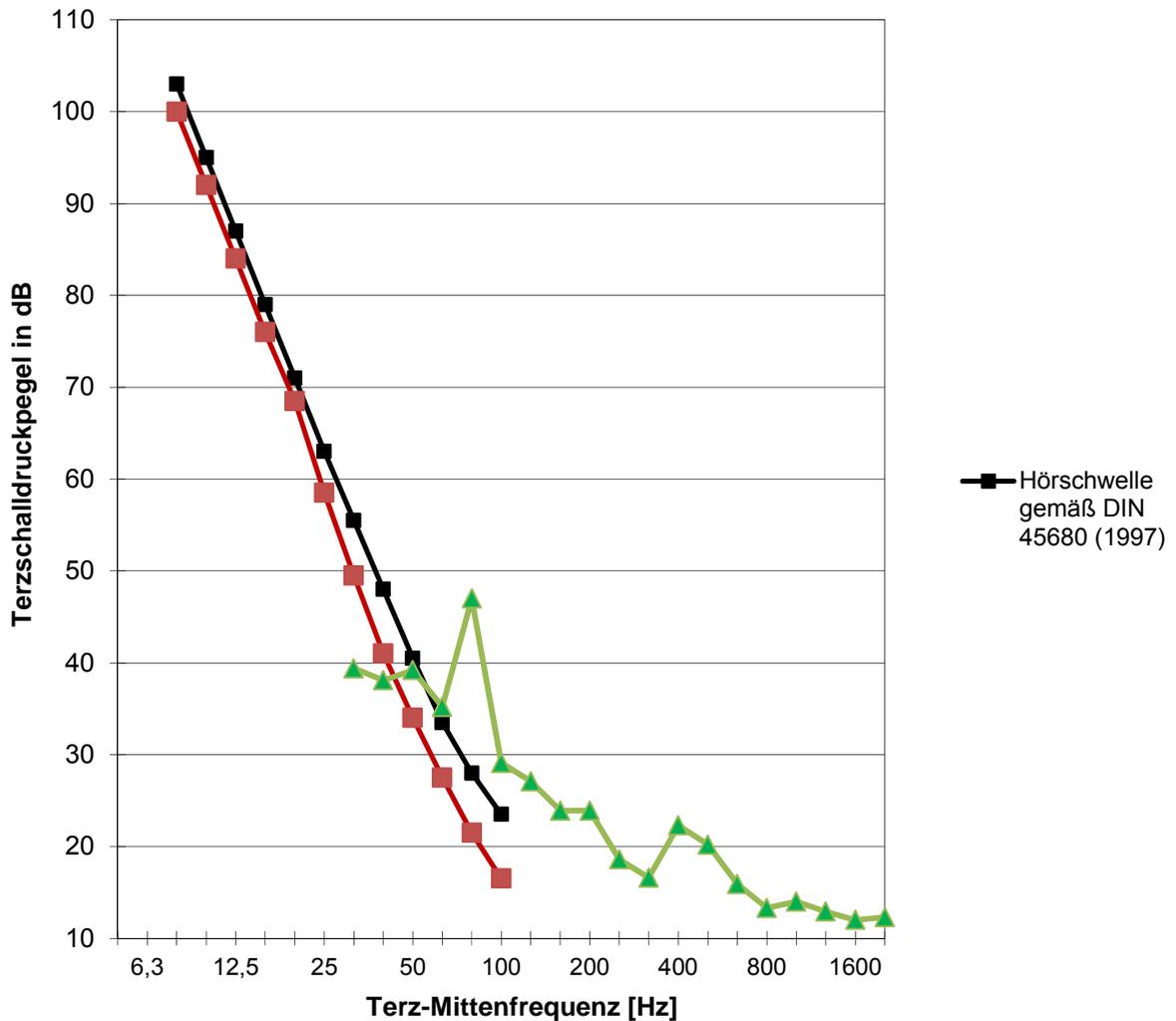


Abb. B1 Terzspektrum der Schallimmission im Raum, hervorgerufen durch eine Biogasanlage, $L_{Aeq} = 28,5$ dB(A), $L_{Ceq} = 48,1$ dB(A), $L_{Ceq} - L_{Aeq} = 19,6$ dB
 schwarze Kurve: Hörschwelle gemäß DIN 45680 (1997)
 braune Kurve: Wahrnehmungsschwelle gemäß DIN (E) 45680 (2013)
 (Quelle: Michael Hofmann und Dr. Reinhard Wunderlich, IBAS Ingenieurgesellschaft mbH, Fallbeispiele von tieffrequentem Schall in der Praxis und deren Bewertung nach dem gültigen Regelwerk, Müller-BBM Fachtagung Lärmschutz 2014)

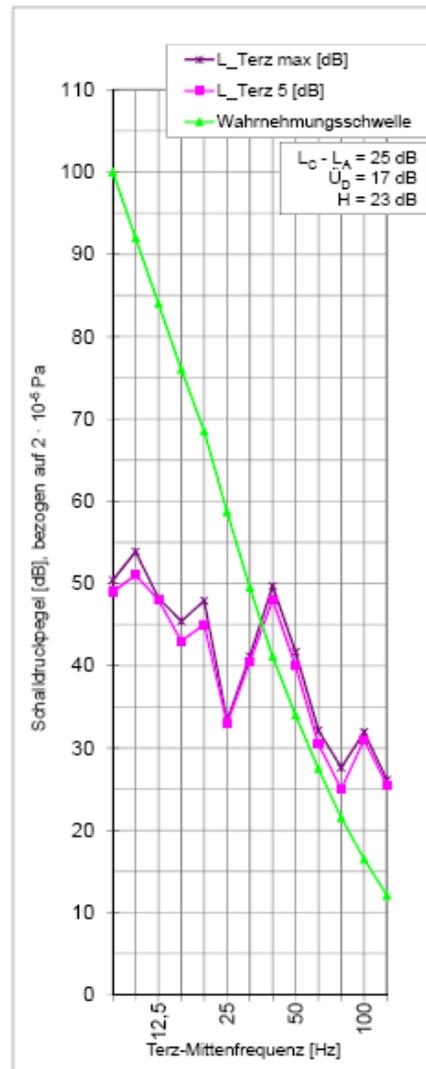
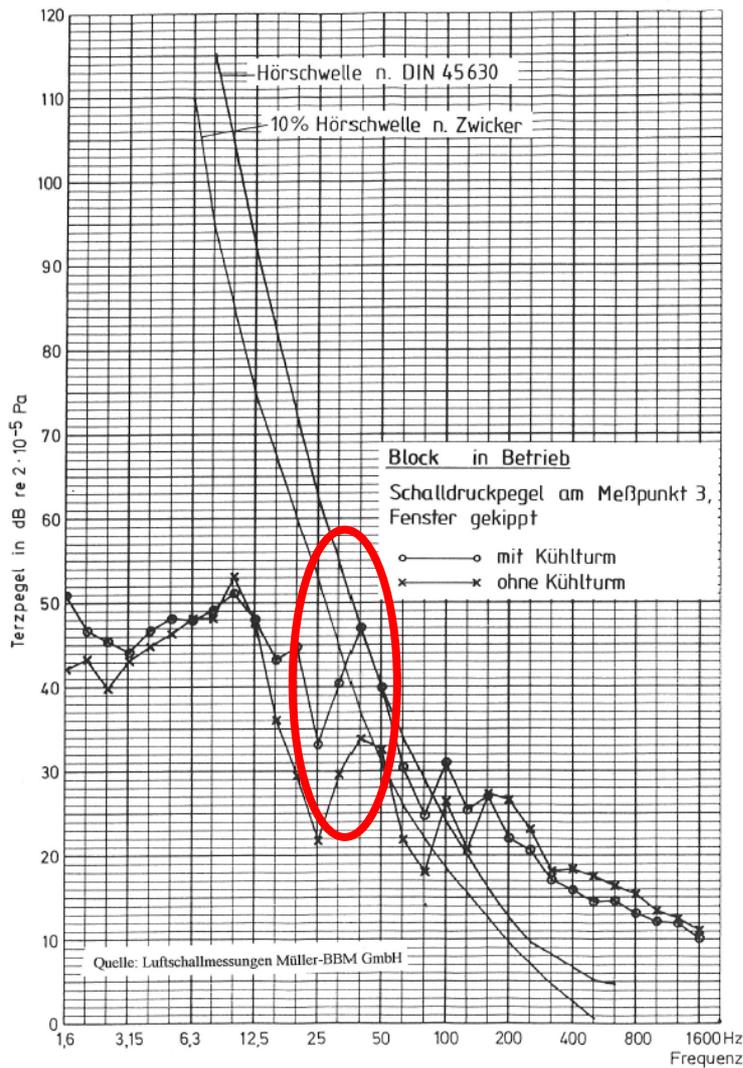


Abb. B2 Ventilatorkühlturm ca. 700 m Abstand: Messung im Schlafzimmer, Bewertung DIN (E) 45680 (2013)
(Quelle: Müller-BBM GmbH und Michael Hofmann und Dr. Reinhard Wunderlich, IBAS Ingenieurgesellschaft mbH, Fallbeispiele von tieffrequentem Schall in der Praxis und deren Bewertung nach dem gültigen Regelwerk, Müller-BBM Fachtagung Lärmschutz 2014)

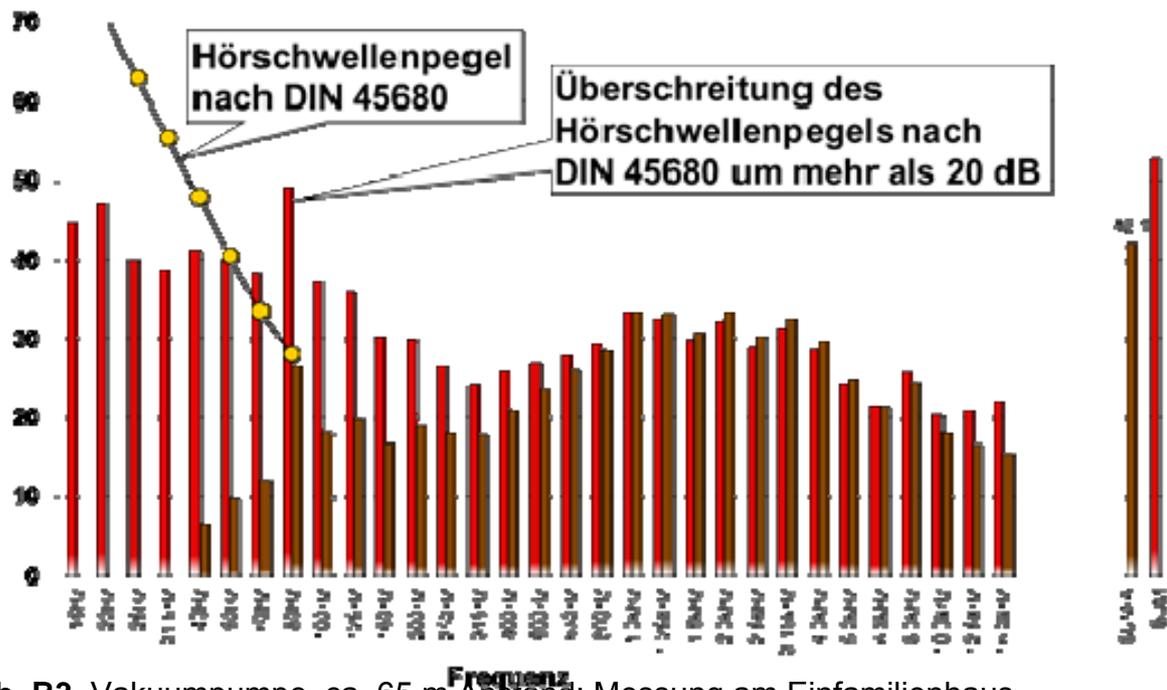


Abb. B3 Vakuumpumpe, ca. 65 m Abstand: Messung am Einfamilienhaus (Quelle: Walter Lips: Besonderheiten der Lärminderung von tieffrequentem Schall einschließlich Infraschall an Arbeitsplätzen in der Industrie und in der Umgebung; VDI Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (Suva) und Fachhochschule Luzern, Technik & Architektur, Müller-BBM Fachtagung Lärmschutz 2014)

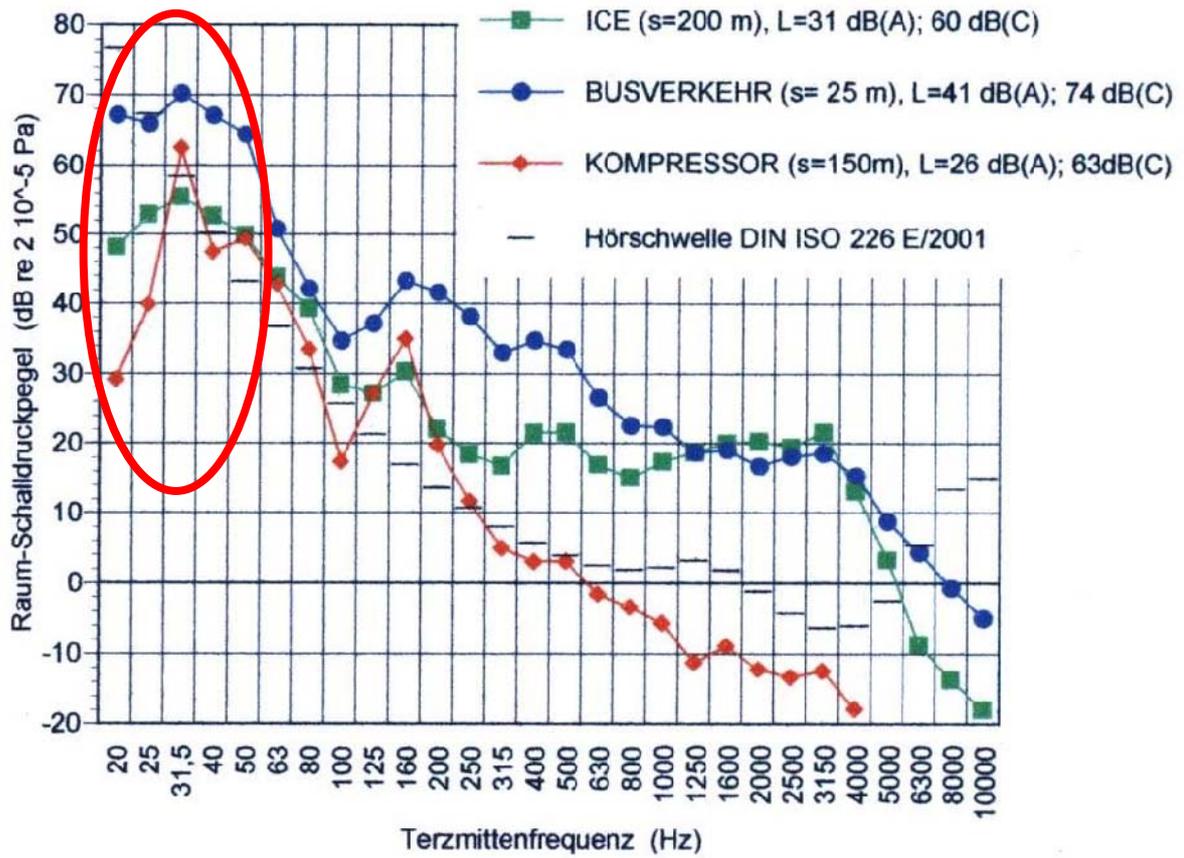


Abb. B4 In Räume übertragene Schallimmissionen (Quelle: Feldmann u. Jakob, DAGA 2006)

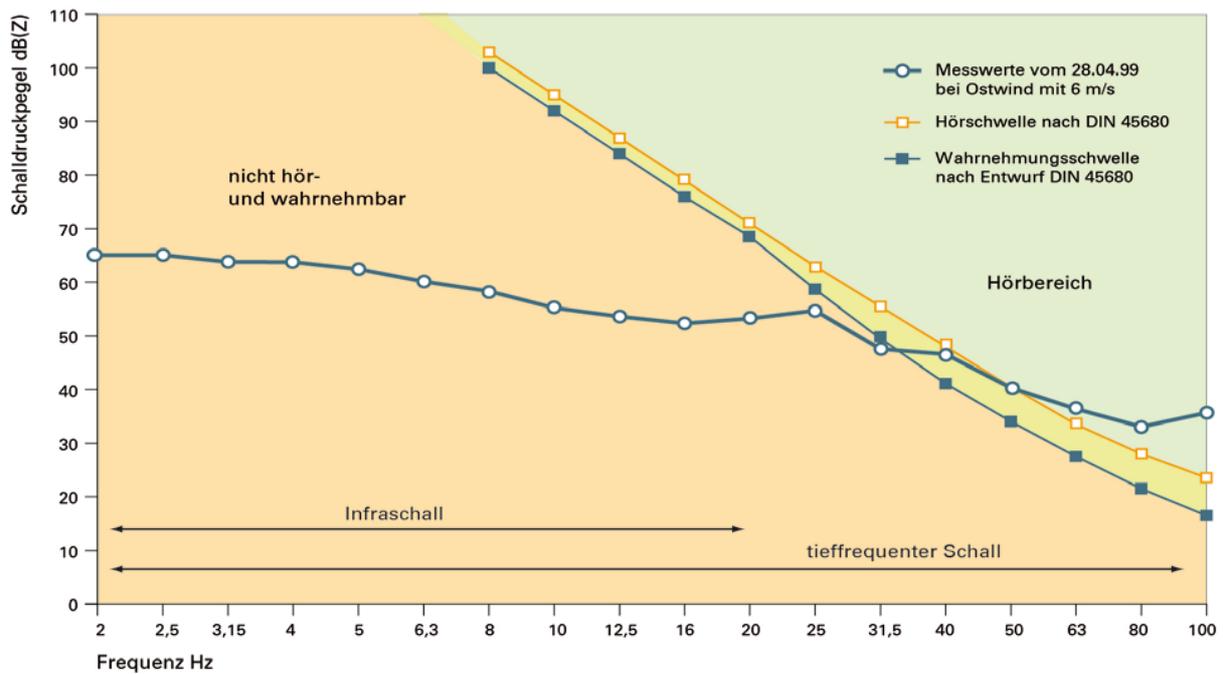


Abb. B5 Die Windenergieanlage erzeugt Schallwellen, die von auf einem Balkon in 250 m Entfernung stehenden Menschen nur oberhalb 40 Hertz gehört werden können. Der Infraschall ist nicht wahrnehmbar, da er unterhalb der Hör- und Wahrnehmungsschwelle liegt. (Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Windkraftanlagen – beeinträchtigt Infraschall die Gesundheit? (2012))

+

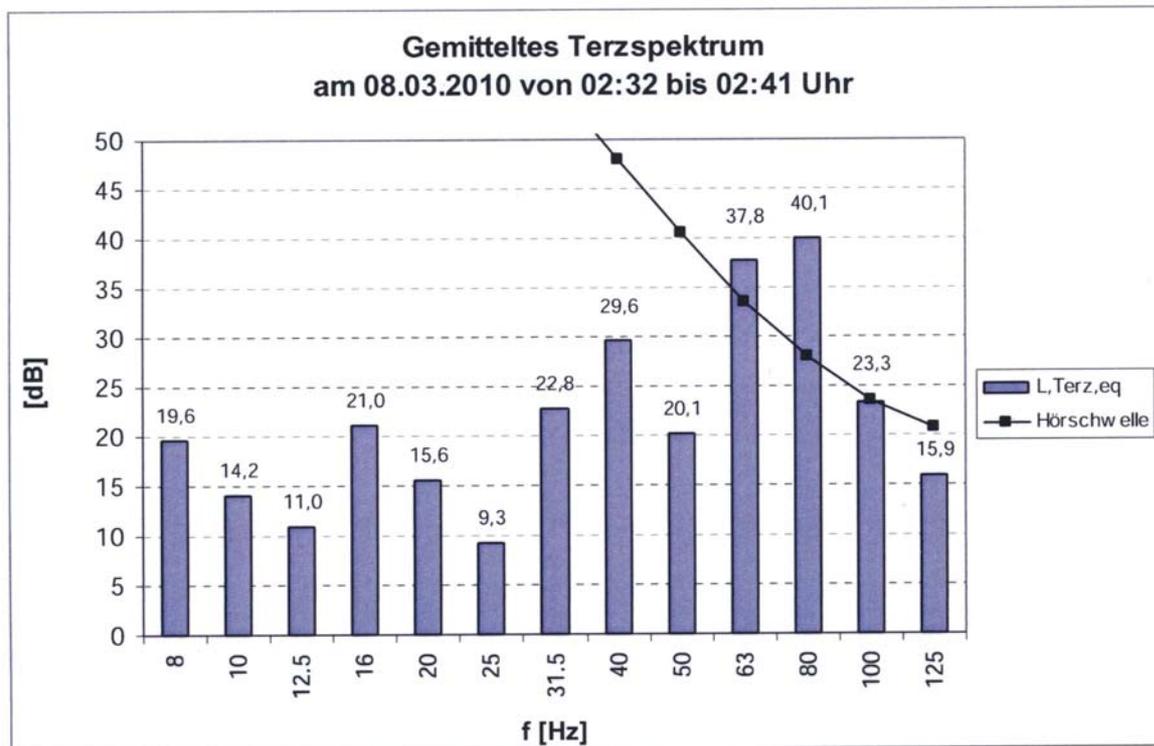


Abb. B6 Terzanalyse einer Raum-Innenmessung nach DIN 45680 (1997) wegen einer Luftwärmepumpe mit tonhaltigem Frequenzverlauf bei tiefen Frequenzen und Überschreitungen (Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen und Luftwärmepumpen, Ein Leitfaden (Februar 2011))

Anhang C

Bezugshörschwellen für die festgelegten Hörbedingungen und Differenzen zwischen den Schalldruckpegeln in den zwei Schallfeldarten für die Hörschwelle gemäß DIN EN ISO 389-7 (2006)

Frequenz f Hz	Bezugshörschwelle unter		Differenz $\Delta L = T_f - T'_f$ dB
	Freifeld-Bedingungen (frontaler Schalleinfall) T_f (bezogen auf 20 μ Pa) dB	Diffusfeld-Bedingungen T'_f (bezogen auf 20 μ Pa) dB	
20	78,5 ^a	78,5	0
25	68,7	68,7	0
31,5	59,5	59,5	0
40	51,1	51,1	0
50	44,0	44,0	0
63	37,5	37,5	0
80	31,5	31,5	0
100	26,5	26,5	0
125	22,1	22,1	0
160	17,9	17,9	0
200	14,4	14,4	0
250	11,4	11,4	0
315	8,6	8,4	0,2
400	6,2	5,8	0,4
500	4,4	3,8	0,6
630	3,0	2,1	0,9
750	2,4	1,2	1,2
800	2,2	1,0	1,2
1000	2,4	0,8	1,6
1250	3,5	1,9	1,6
1500	2,4	1,0	1,4
1600	1,7	0,5	1,2
2000	-1,3	-1,5	0,2

Frequenz f Hz	Bezugshörschwelle unter		Differenz $\Delta L = T_f - T'_f$ dB
	Freifeld-Bedingungen (frontaler Schalleinfall) T_f (bezogen auf 20 μ Pa) dB	Diffusfeld-Bedingungen T'_f (bezogen auf 20 μ Pa) dB	
2500	-4,2	-3,1	-1,1
3000	-5,8	-4,0	-1,8
3150	-6,0	-4,0	-2,0
4000	-5,4	-3,8	-1,6
5000	-1,5	-1,8	0,3
6000	4,3	1,4	2,9
6300	6,0	2,5	3,5
8000	12,6	6,8	5,8
9000	13,9	8,4	5,5
10000	13,9	9,8	4,1
11200	13,0	11,5	1,5
12500	12,3	14,4	-2,1
14000	18,4	23,2	-4,8
16000	40,2	43,7	-3,5 ^a
18000	73,2 ^a	-	-

^a Bei 20 Hz und 18 000 Hz wurden experimentelle Daten für T_f bzw. bei 16 000 Hz für ΔL jeweils nur von einem Laboratorium berichtet.

Anhang D

**Ergebnisse zum „Forschungsprojekt zu Kurven
gleicher Lautstärke für DIN 45680“
vorgetragen auf der 16. Sitzung des Arbeitskreises
„Überarbeitung der DIN 45680“ am 03. März 2015 in Planegg**

Forschungsergebnisse auf 16. Arbeitskreis-Sitzung

MÜLLER-BBM

16. Sitzung des Arbeitskreises *„Überarbeitung von DIN 45680“*

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

Planegg, am 03. März 2015

MÜLLER-BBM

Forschungsprojekt zu Kurven gleicher Lautstärke für DIN 45680

Dr. Manfred Schmidt
Müller-BBM GmbH

16. Sitzung des Arbeitskreises *„Überarbeitung von DIN 45680“*
Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im
DIN und VDI, 03. März 2015, Planegg

Inhalt

1. Ziel und Aufgabe der Untersuchung
2. Auftreten von tieffrequentem Schall, der vielfach zu Beschwerden führt
3. Hörschwellen und Kurven gleicher Lautstärkepegel
4. Lästigkeit von tieffrequentem Schall als Grundlage für die Messung und Beurteilung
5. Vorschläge zur Weiterentwicklung der DIN 45680 (1997)
6. Zusammenfassung

1. Ziel und Aufgabe der Untersuchung

Ziel und Aufgabe der Untersuchung

- Prüfung allgemein wissenschaftlich anerkannter Hörschwellenkurven im Schrifttum und deren Eignung als Grundlage für eine Wahrnehmungskurve in der Neufassung der DIN 45680.
- In Verbindung mit den Kurven gleicher Lautstärke war zu untersuchen, welche physikalischen Stimulusfaktoren prinzipiell zur Beschreibung der Geräuschbelastigung geeignet sind.
- Unterbreitung von Vorschlägen zur Novellierung der DIN 45680 (1997).

2. Auftreten von tieffrequentem Schall, der vielfach zu Beschwerden führt

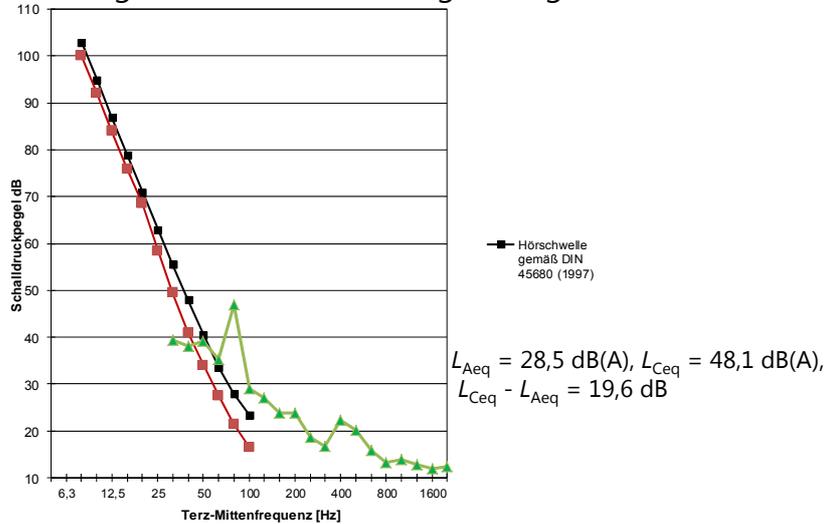
Tieffrequente Terzfrequenzspektren der Geräuschimmission in Räumen

Definition der Frequenzbereiche:

Tieffrequenter Schall $f_{\text{Terz}} = 2 - 125 \text{ Hz}$

Infraschall $f_{\text{Terz}} < 20 \text{ Hz}$

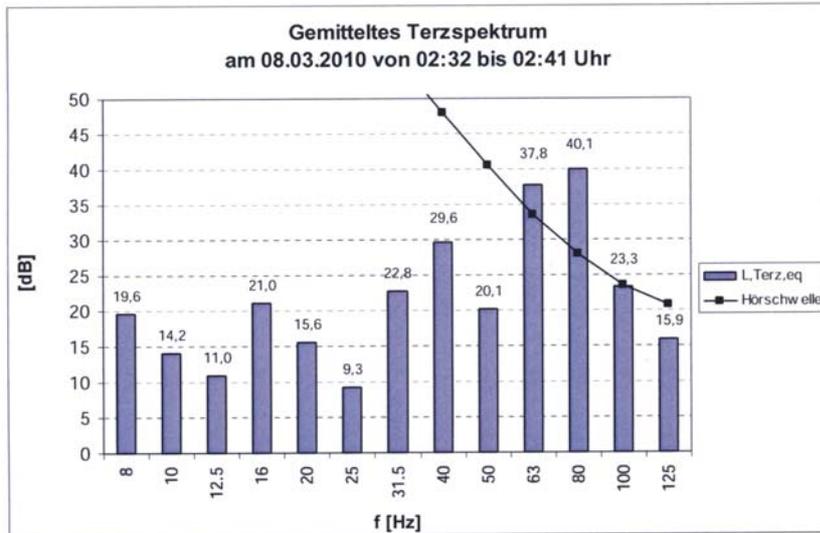
Terzspektrum der Geräuschimmission im Raum, MÜLLER-BBM hervorgerufen durch eine Biogasanlage



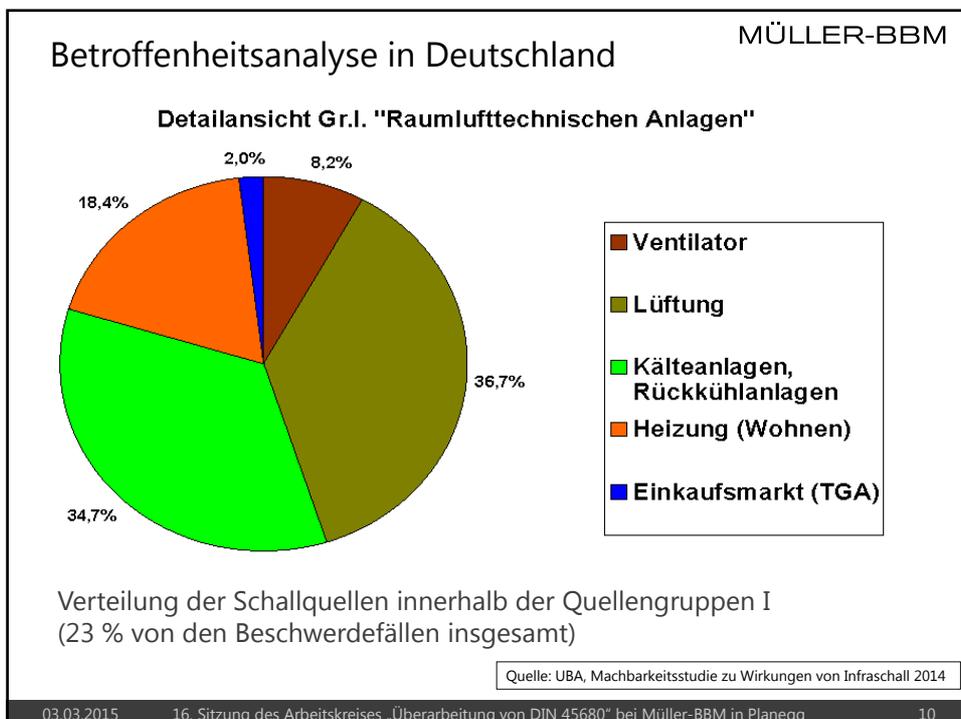
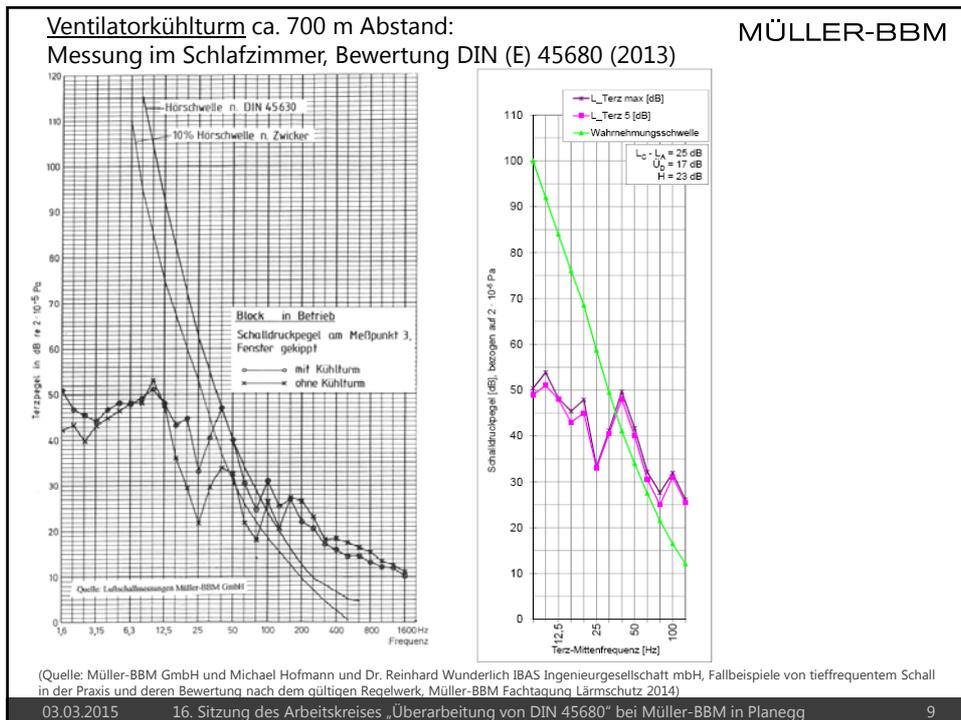
schwarze Kurve: Hörschwelle gemäß DIN 45680 (1997)
 braune Kurve: Wahrnehmungsschwelle gemäß DIN(E) 45680 (2013)
 (Quelle: Michael Hofmann und Dr. Reinhard Wunderlich IBAS Ingenieurgesellschaft mbH, Fallbeispiele von tieffrequentem Schall in der Praxis und deren Bewertung nach dem gültigen Regelwerk, Müller-BBM Fachtagung Lärmschutz 2014)

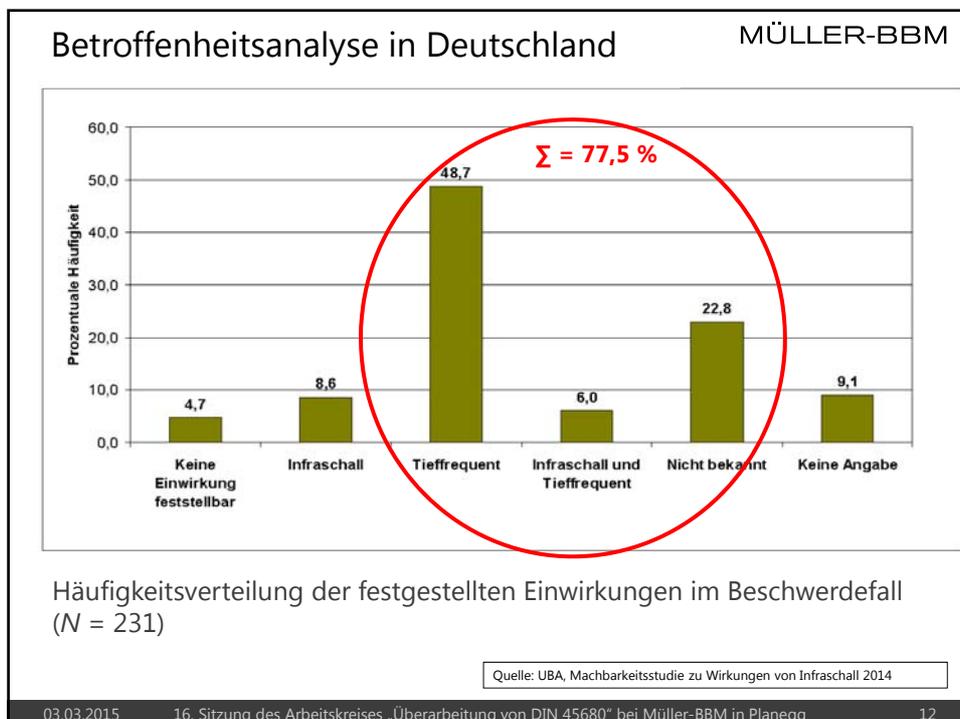
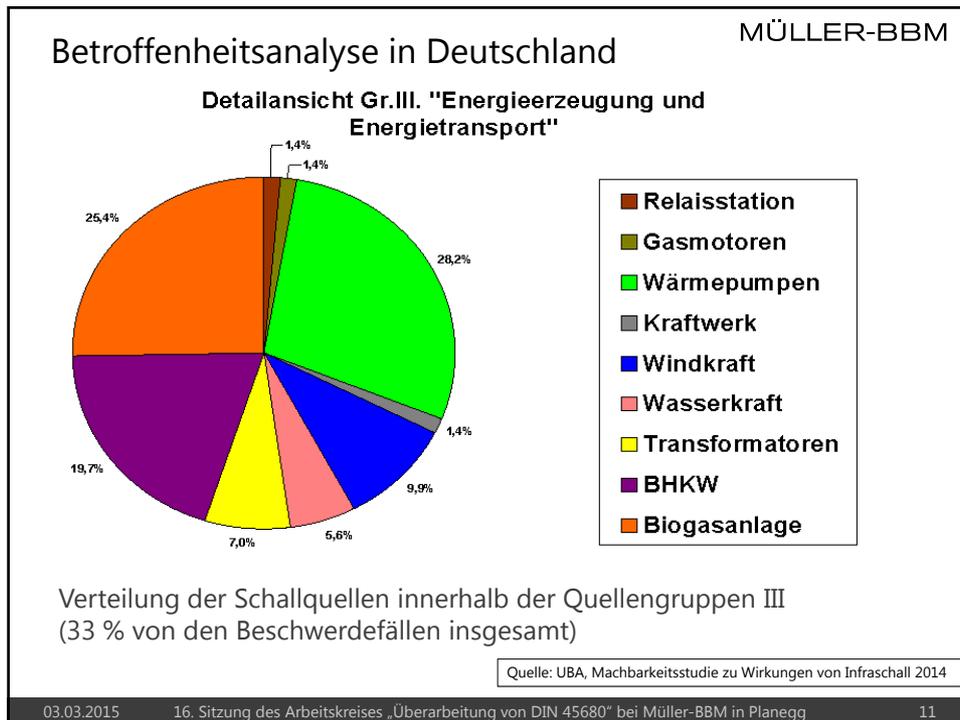
MÜLLER-BBM

Terzspektrum der Geräuschimmission im Raum, hervorgerufen durch eine Luftwärmepumpe mit tonhaltigem Frequenzverlauf bei tiefen Frequenzen



(Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen und Luftwärmepumpen, Ein Leitfaden (Februar 2011))



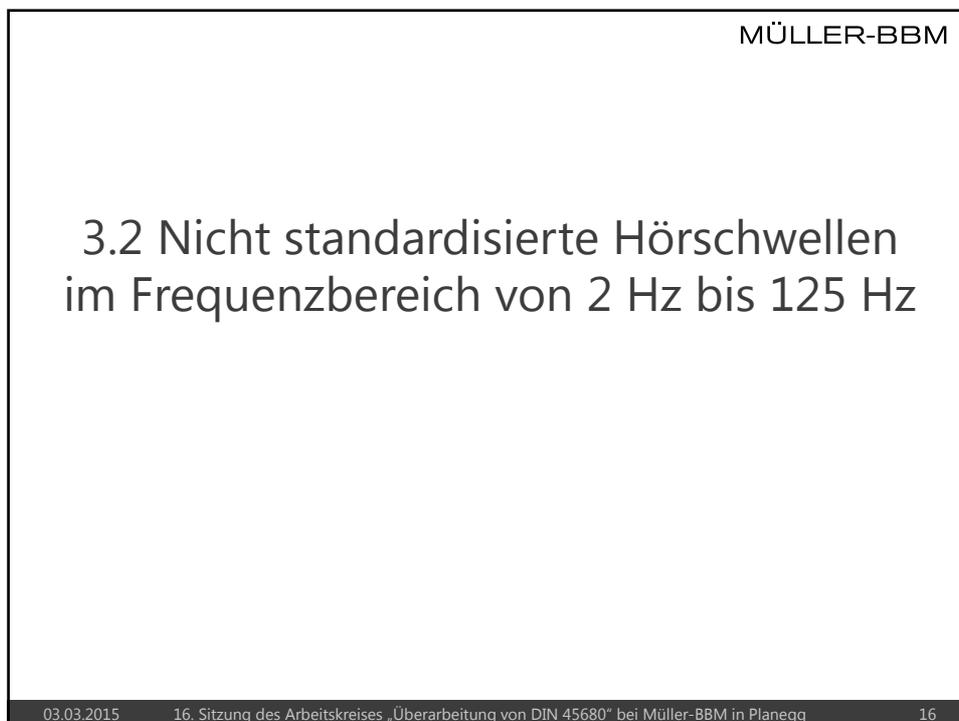
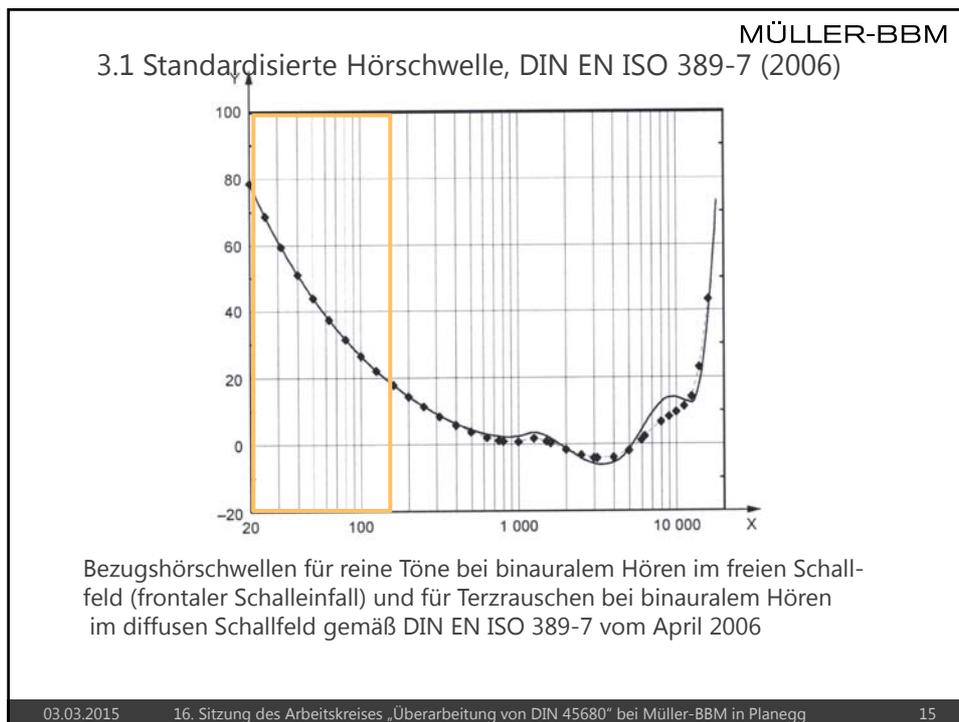


3. Hörschwellen und Kurven gleicher Lautstärkepegel

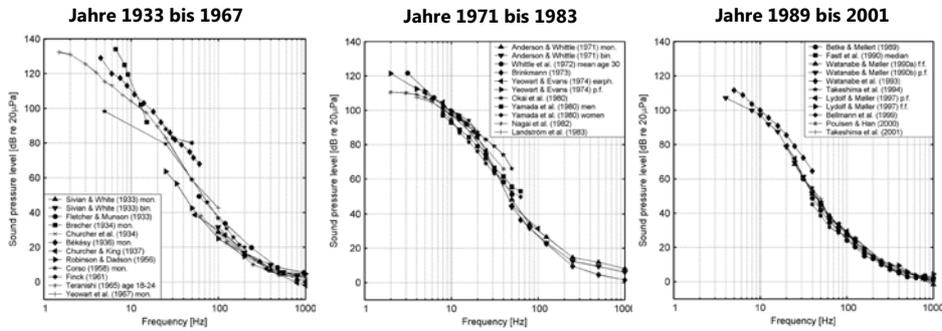
- 3.1 DIN EN ISO 389-7 vom April 2006 – Akustik – Bezugshörschwellen unter Freifeld- und Diffusfeldbedingungen
- 3.2 Nicht standardisierte Hörschwellen im Frequenzbereich von 2 Hz bis 125 Hz
- 3.3 ISO 28961 vom Januar 2012 – Acoustics – statistical distribution of hearing
- 3.4 Die Abhängigkeit der Hörschwellen in Bezug auf das Alter und das Geschlecht gemäß DIN EN ISO 7029 (E) (2014)
- 3.5 DIN ISO 226 vom April 2006 – Akustik – Normalkurven gleicher Lautstärkepegel

MÜLLER-BBM

3.1 DIN EN ISO 389-7 vom April 2006 – Akustik – Bezugshörschwellen unter Freifeld- und Diffusfeldbedingungen

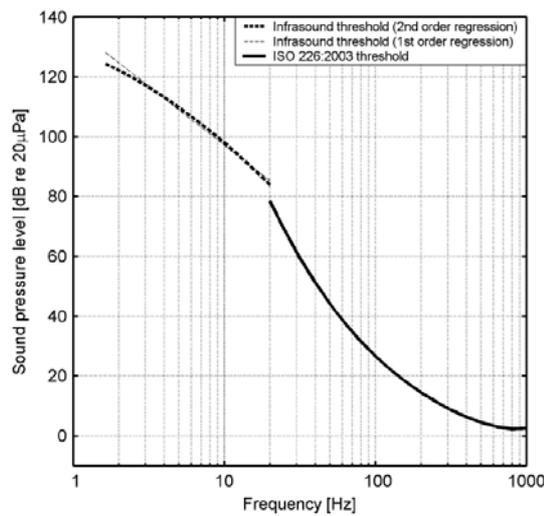


Entstehung einer nicht standardisierten Hörschwelle im Frequenzbereich von 2 Hz bis 125 Hz



(Quelle: Møller, H., Pedersen, C. S.: Hearing at low and infrasonic frequencies, Noise Health 2004; 6:23, 37 – 57)

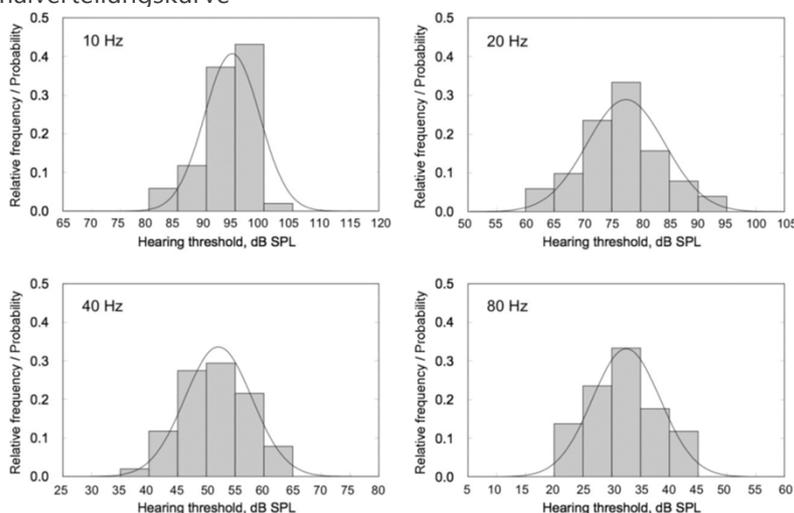
Hörschwelle nach (ISO 226, 2003) mit Anschluss an eine nicht standardisierte Hörschwelle im tieffrequenten Frequenzbereich unterhalb von 20 Hz



(Quelle: Møller, H., Pedersen, C. S.: Hearing at low and infrasonic frequencies, Noise Health 2004; 6:23, 37 – 57)

MÜLLER-BBM

Empirische Verteilung der Hörschwellenpegel bei 10 Hz, 20 Hz, 40 Hz und 80 Hz, gemessen im freien Schallfeld im Vergleich mit der statistischen Normalverteilungskurve



(Quelle: Kenji Kurakata and Tazu Mizunami, The Statistical Distribution of Normal Hearing Thresholds for Low-Frequency Tones; Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Noise Control, Vol. 27, No. 2, 2008, Pages 97 – 104)

03.03.2015

16. Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ bei Müller-BBM in Planegg

19

MÜLLER-BBM

Berechnung der Größe einer Stichprobe für Hörschwellenuntersuchungen:

$$n \geq \frac{u^2 \cdot s^2}{e^2}$$

- n Umfang der Stichprobe
 u der u -Wert, welcher dem vorgegebenen Sicherheitsniveau der Normalverteilung entspricht (z. B. $u_{0,05} = 1.96$ und für $u_{0,01} = 2.58$, siehe Tafel für die Normalverteilung)
 s Standardabweichung einer Stichprobe, hier gemäß ISO 28961 (2012)
 e $e = |\bar{x} - \mu|$ Absolutbetrag der Differenz zwischen Schätzwert \bar{x} und Parameter des arithmetischen Mittels μ der Grundgesamtheit.

$$n_{20\text{Hz}} \geq \frac{1,96^2 \cdot 6,14^2}{1^2} \cdot \approx 145$$

$$n_{40\text{Hz}} \geq \frac{1,96^2 \cdot 6,37^2}{1^2} \cdot \approx 156$$

$$n_{80\text{Hz}} \geq \frac{1,96^2 \cdot 4,58^2}{1^2} \cdot \approx 81$$

03.03.2015

16. Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ bei Müller-BBM in Planegg

20

MÜLLER-BBM

Auswahl der Untersuchungen zu Hörschwellen im tieffrequenten Bereich für die Jahre 1991 und 1993

Untersucher	Watanabe & Møller		Watanabe et.al.
Titel der Untersuchung	"Hearing Thresholds and Equal Loudness Contours in Free Field at Frequencies Below 1 kHz"	"Low Frequency Hearing Thresholds in Pressure Field and in Free Field"	"A study on the psychological evaluation of low frequency noise"
Jahr d. Veröff.	1991	1991	1993
Land	Dänemark		Dänemark
Schallfeld / Methode	Freifeld	Druckfeld	Druckkammer
Frequenzbereich	25 Hz bis 1000 Hz	4 Hz bis 125 Hz	5 Hz bis 40 Hz
Gemessen bei Einzelfrequenzen (in Hz)	25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 250, 500, 1000	4, 8, 10, 12.5, 16, 20, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, 125	
Anzahl der Versuchspersonen	12	12	20
Alter der Versuchspersonen	18 - 30 (23.2)	18 - 30 (23.2)	

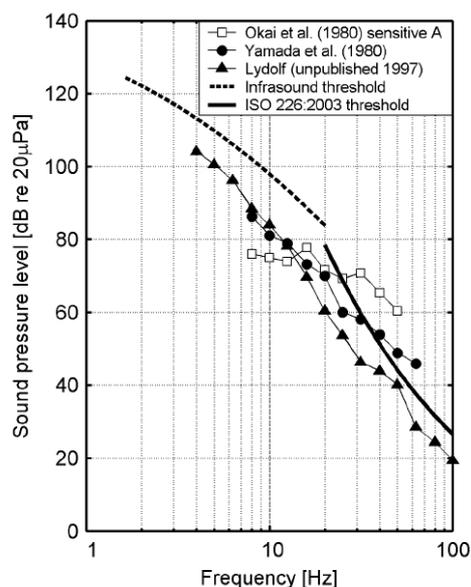
03.03.2015

16. Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ bei Müller-BBM in Planegg

21

MÜLLER-BBM

Hörschwellen von drei besonders empfindlichen Personen



(Quelle: Møller, H., Pedersen, C. S.: Hearing at low and infrasonic frequencies, Noise Health 2004; 6:23, 37 – 57)

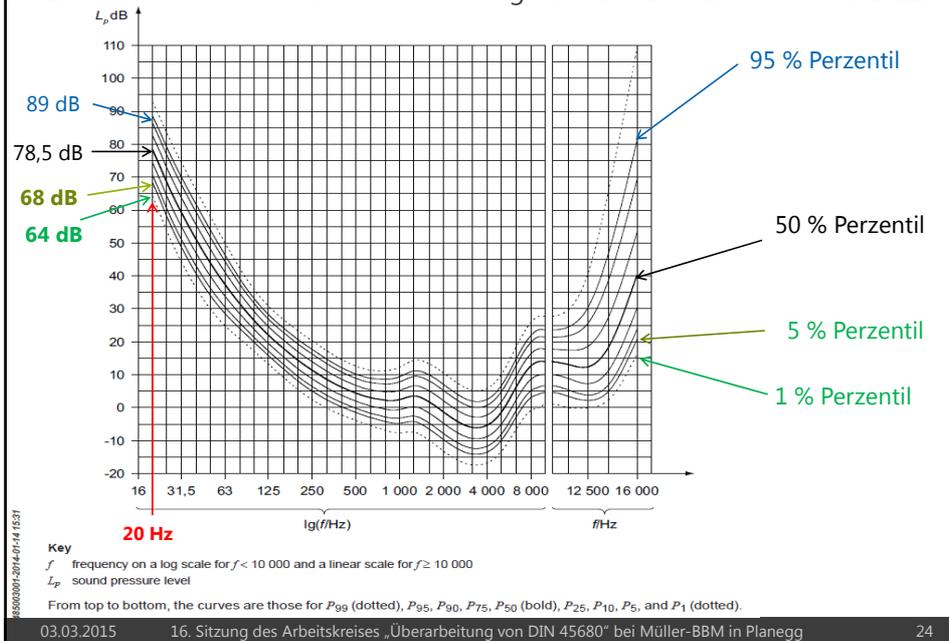
03.03.2015

16. Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ bei Müller-BBM in Planegg

22

3.3 ISO 28961 vom Januar 2012 – Acoustics – statistical distribution of hearing

Perzentilcurven der Hörschwellenverteilung nach ISO 28961 vom Januar 2012



MÜLLER-BBM

Bezugshörschwelle nach DIN EN ISO 389-7 (2006) mit Angabe der Standardabweichung und den Perzentil-Hörschwellen nach ISO 28961 (2012) sowie zum Vergleich der Hörschwellenpegel nach DIN 45680 (1997) und der Wahrnehmungsschwelle gemäß Entwurf der DIN 45680 (2013)

Terz- frequenz f_{Terz} Hz	Werte der Bezugs- hörschwelle nach DIN EN ISO 389-7 (2006) dB	Standard- abweichung σ_f Bezugshör- schwelle ISO 28961 (2012) dB	P _{1%} - Perzentil- Hörschwelle ISO 28961 (2012) dB	P _{5%} - Perzentil- Hörschwelle ISO 28961 (2012) dB	P _{10%} - Perzentil- Hörschwelle ISO 28961 (2012) dB	P _{25%} - Perzentil- Hörschwelle ISO 28961 (2012) dB	Hör- schwellen- pegel DIN 45680 (1997) dB	Wahr- nehmungs- schwelle DIN (E) 45680 (2013) dB
20	78,5	6,14	64	68	71	74	71,0	68,5
25	68,7	6,38	54	58	61	64	63,0	58,7
31,5	59,5	6,48	44	49	51	55	55,5	49,5
40	51,1	6,37	36	41	43	47	48,0	41,1
50	44,0	6,04	30	34	36	40	40,5	34,0
63	37,5	5,40	25	29	31	34	33,5	27,5
80	31,5	4,58	21	24	26	28	28,0	21,5
100	26,5	4,03	17	20	21	24	23,5	16,5
125	22,1	3,79	13	16	17	20	-	12,1

03.03.2015

16. Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ bei Müller-BBM in Planegg

25

MÜLLER-BBM

3.4 DIN EN ISO 7029 (E) vom September 2014 – Akustik – Statistische Verteilung von Hörschwellen in Bezug auf das Alter und das Geschlecht

03.03.2015

16. Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ bei Müller-BBM in Planegg

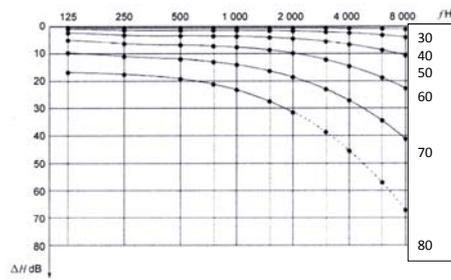
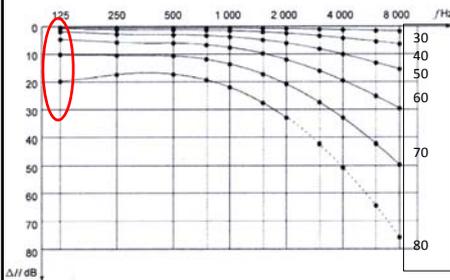
26

MÜLLER-BBM

Medianwerte der erwarteten Hörschwellenabweichungen in Abhängigkeit von der Audiometerfrequenz f und vom Alter von oben nach unten zeigen die Kurven ΔH -Werte für ein Alter von 30, 40, 50, 60, 70 oder 80 Jahren gemäß DIN EN ISO 7029 (E) (2014)

Männer
N = 6.434

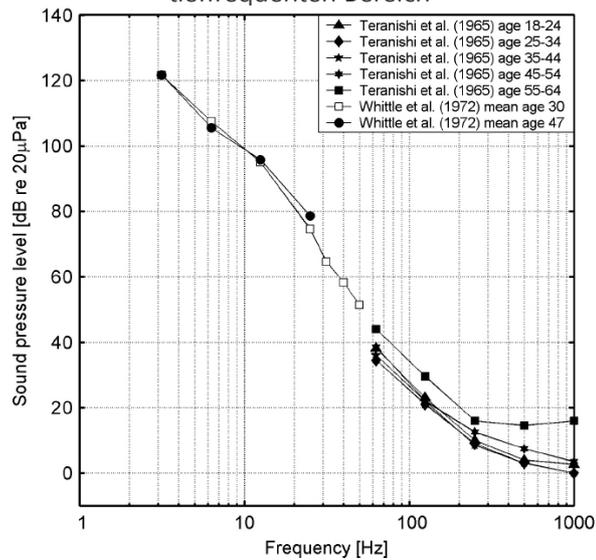
Frauen
N = 17.150



Frequenzbereich 125 bis 8.000 Hz

Hörschwellen für verschiedene Altersgruppen im tieffrequenten Bereich

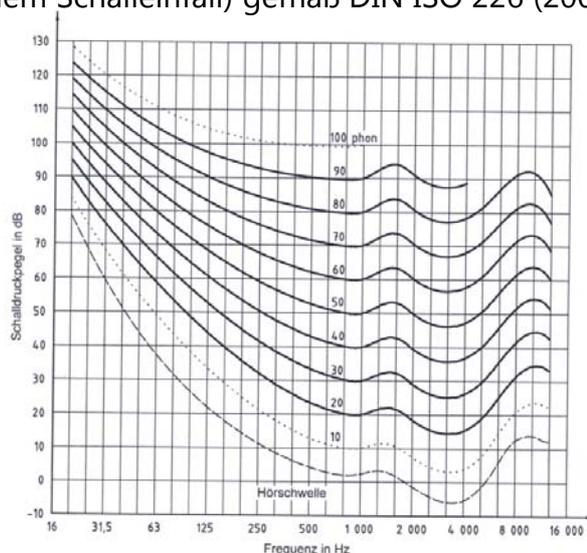
MÜLLER-BBM



Hier: Frequenzbereich 3 Hz bis 125 Hz

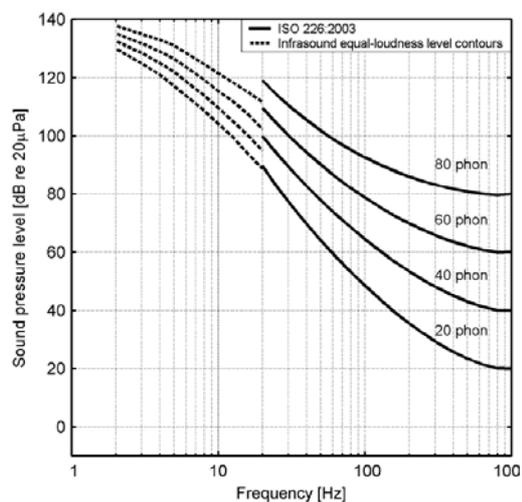
3.5 DIN ISO 226 vom April 2006 – Akustik – Normalkurven gleicher Lautstärkepegel

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



MÜLLER-BBM

Kurven gleicher Lautstärkepegel für Infraschall angenähert an
die Kurven gleicher Lautstärkepegel für reine Töne und
binaurales Hören



(Quelle: Møller, H., Pedersen, C. S.: Hearing at low and infrasonic frequencies, Noise Health, 2004; 6:23, 37 – 57)

03.03.2015

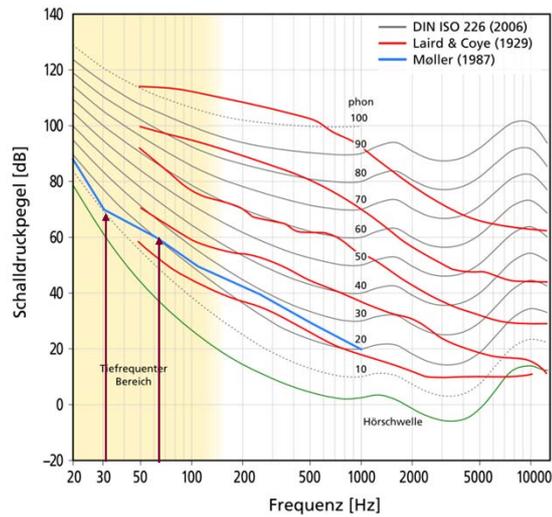
16. Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ bei Müller-BBM in Planegg

31

4. Lästigkeit von tieffrequentem Schall als Grundlage für die Messung und Beurteilung

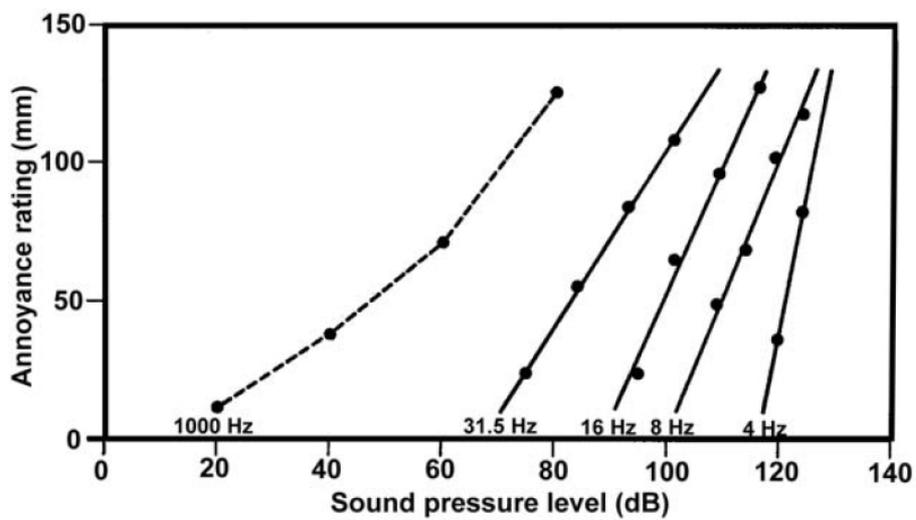
Empfindung, Wahrnehmung, Lästigkeit MÜLLER-BBM

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



Empfindung, Wahrnehmung, Lästigkeit MÜLLER-BBM

Abhängigkeit der Lästigkeit von der Erhöhung des Schalldruckpegels bei reinen Tönen (18 Versuchspersonen)



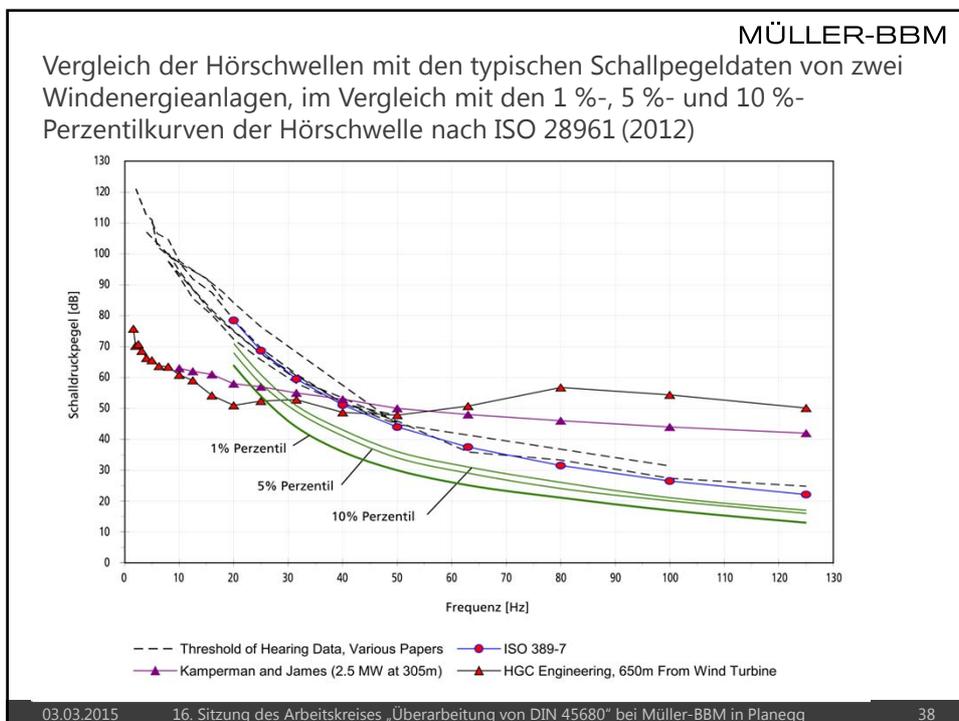
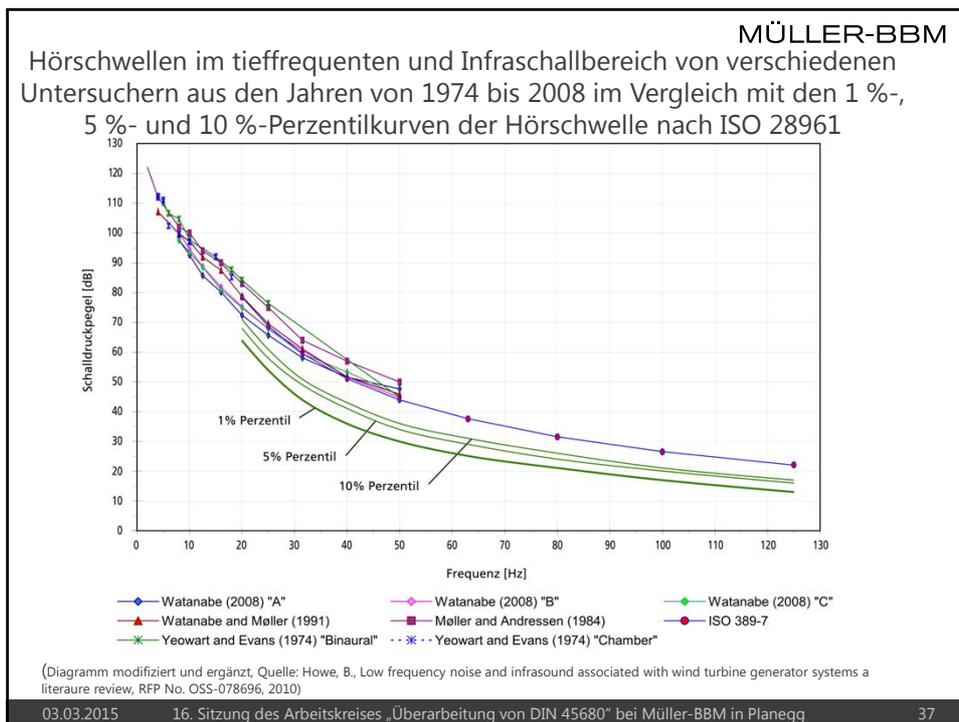
(Quelle: Möller: Low frequency noise and vibration. Vol. 6, No. 1, 1987)

5. Vorschläge zur Weiterentwicklung der DIN 45680 (1997)

- 5.1 Empfehlung einer Hörschwelle für tieffrequenten Schall
- 5.2 Entwurf zur Beschreibung der Lästigkeit mit physikalischen Stimulusvariablen
- 5.3 Verschiedene Anhaltspunkte für eine Beurteilung tieffrequenter Geräusche

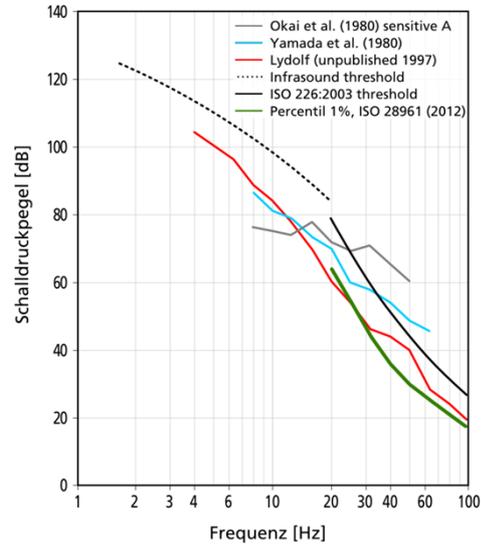
MÜLLER-BBM

5.1 Empfehlung einer Hörschwelle für tieffrequenten Schall



MÜLLER-BBM

Hörschwellen von drei besonders empfindlichen Personen im Vergleich mit der 1 %-Perzentilkurve der Hörschwelle nach ISO 28961 (2012)



03.03.2015

16. Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ bei Müller-BBM in Planegg

39

MÜLLER-BBM

5.2 Entwurf zur Beschreibung der Lästigkeit mit physikalischen Stimulusvariablen

03.03.2015

16. Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ bei Müller-BBM in Planegg

40

MÜLLER-BBM

Die Lästigkeit eines Geräusches steigt an, wenn:

- die Lautstärke ansteigt,
- Einzeltöne oder tonhafte Geräusche vorkommen,
- ausgeprägte Einzeltöne im Spektrum nachweisbar sind,
- Schallpegelschwankungen eines Geräusches vorliegen,
- Impulsgeräusche vorhanden sind,
- starke Frequenzschwankungen auftreten,
- Geräusche, deren Störabstände zu einem Grundgeräusch z. B. größer als 10 dB sind.

Wie stets bei der Beurteilung von Geräuschimmissionen hängt das Ausmaß der Lästigkeit u. a. von der Stärke, der Dauer und der Häufigkeit der Geräuschimmissionen ab.

03.03.2015

16. Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ bei Müller-BBM in Planegg

41

MÜLLER-BBM

Konzeption zur Kennzeichnung des tieffrequenten Schalls in Räumen

Das pragmatische Konzept beruht darauf, dass sich ein **Beurteilungspegel** L_r für jedes Terzband auf der Grundlage einer **Basislautstärke** in Form eines **Terzschalldruckpegels** $L_{\text{Terz,eq}}$ und aus dem **Tonzuschlag** ΔL_T , **Impulszuschlag** ΔL_I , **Pegelschwankungszuschlag** $\Delta L_{S,\text{Pegel}}$ und einem **Frequenzschwankungszuschlag** $\Delta L_{S,\text{Frequenz}}$ bilden lässt:

$$L_{r,\text{Terz}} = L_{\text{Terz,eq}} + \Delta L_T + \Delta L_I + \Delta L_{S,\text{Pegel}} + \Delta L_{S,\text{Frequenz}} \text{ in dB.}$$

Aus der Erfahrung wird es notwendig sein, eine Begrenzung der Zuschläge vorzunehmen. Allgemein in der Form:

$$\Delta L_T + \Delta L_I + \Delta L_{S,\text{Pegel}} + \Delta L_{S,\text{Frequenz}} \leq x \text{ dB.}$$

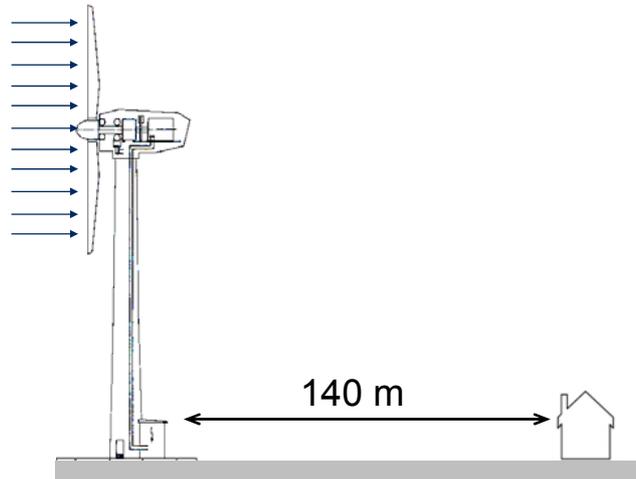
03.03.2015

16. Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ bei Müller-BBM in Planegg

42

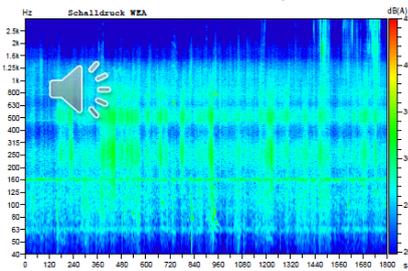
▪ **Windkraftanlagen**

2 MW elektrische Leistung, Luvläufer, aktive Blattverstellung

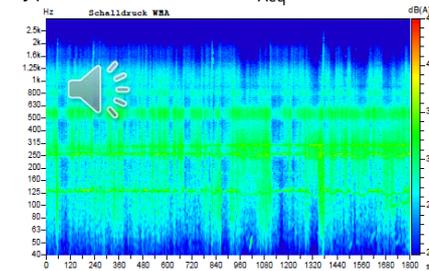


▪ **Windkraftanlagen 2 MW elektrische Leistung**

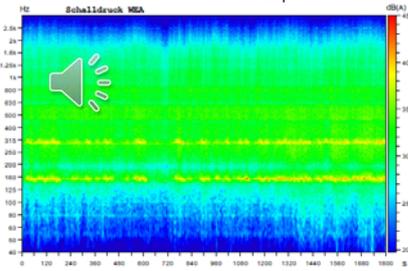
Typ B: mit Getriebe $L_{Aeq} = 53 \text{ dB(A)}$



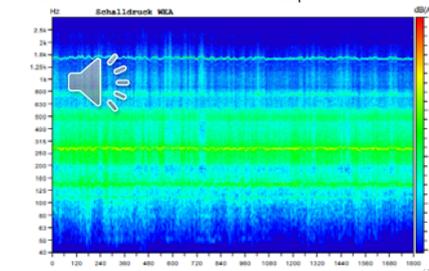
Typ C: ohne Getriebe $L_{Aeq} = 53 \text{ dB(A)}$

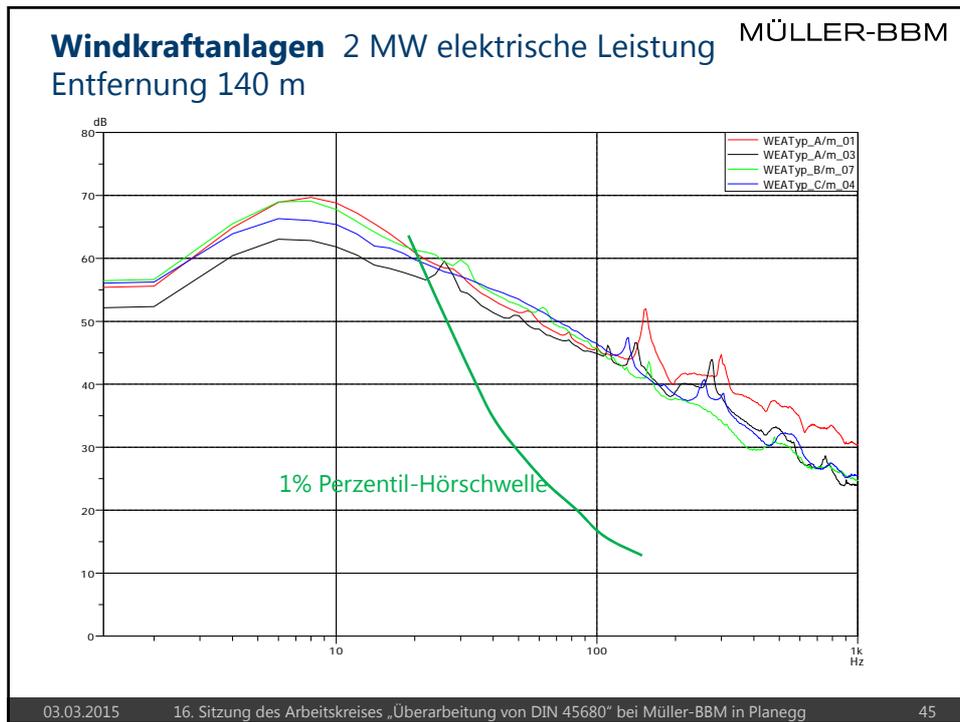


Typ A: mit Getriebe $L_{Aeq} = 59 \text{ dB(A)}$



Typ A: Schallschutz $L_{Aeq} = 54 \text{ dB(A)}$

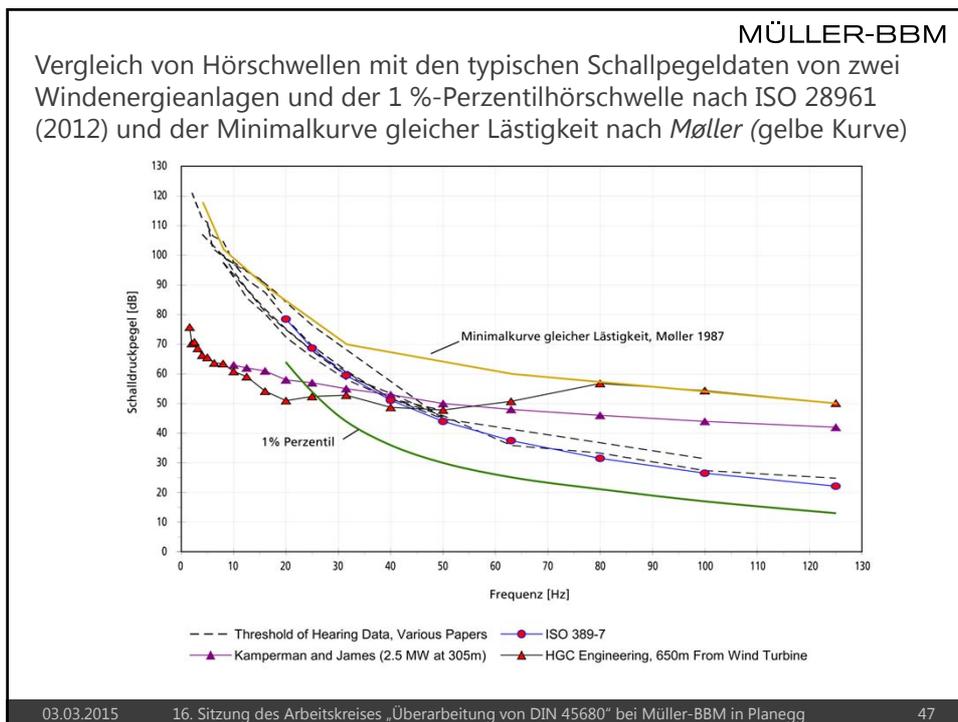




MÜLLER-BBM

5.3 Verschiedene Gesichtspunkte für eine Beurteilung tieffrequenter Geräusche

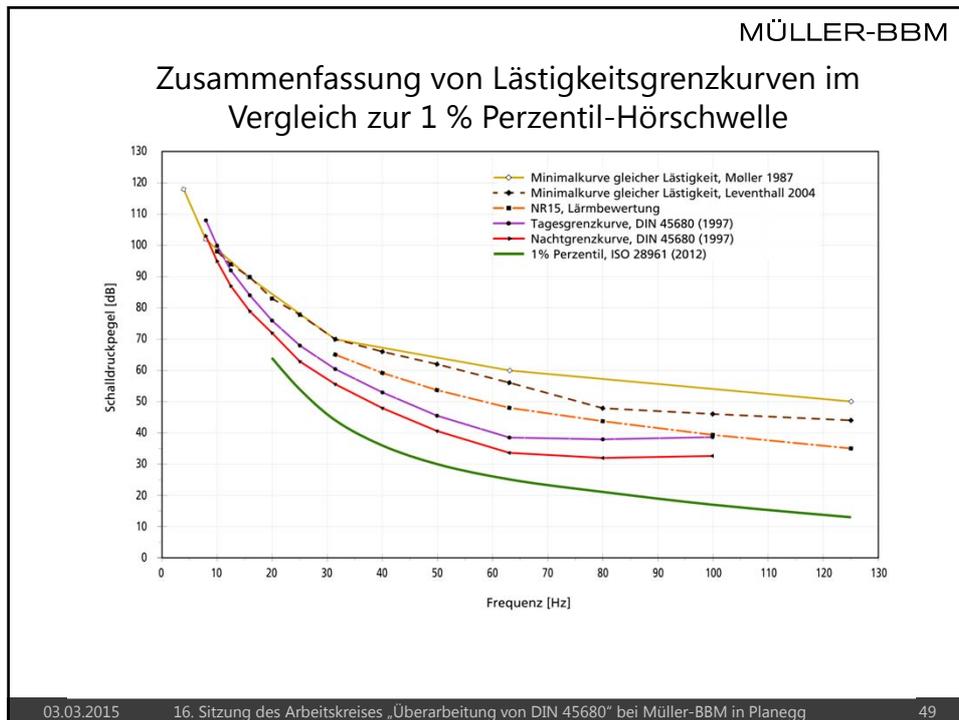
03.03.2015 16. Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ bei Müller-BBM in Planegg 46



▪ Windkraftanlage
Schallimmissionen einer Anlage der 2 MW Klasse

Am Fuß des Turms	$L_{Aeq} = 51 \text{ dB(A)}$
Entfernung* 160 m in Windrichtung	$L_{Aeq} = 49 \text{ dB(A)}$
Entfernung* 660 m in Windrichtung	$L_{Aeq} = 42 \text{ dB(A)}$
Entfernung* 1.100 m in Windrichtung	$L_{Aeq} = 39 \text{ dB(A)}$

* Horizontalabstand am Boden



- MÜLLER-BBM
- ## 6 Zusammenfassung
1. *Schutzniveau* der DIN 45680 (1997) und DIN (E) 45680 (2013) nicht ausreichend.
 2. *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.
 3. Die *DIN EN ISO 389-7 (2006)*: Die Hörschwellendaten für einen Bereich von **20 Hz** bis **16.000 Hz** sind momentan die verlässlichsten für Freifeld- und Diffusfeldbedingungen.
 4. Die *nichtstandardisierte Hörschwelle* im Frequenzbereich von **2 Hz** bis **125 Hz** ist in seiner statistischen Aussage sehr unsicher. (Außerdem Anwendung verschiedener Untersuchungsmethoden !).
 5. Die *Hörschwelle* nach *DIN 45680 (1997)* stimmt fast mit der 25 % Perzentil-Hörschwelle nach ISO 28961 (2012) überein u. die des *Entwurfes* liegt z.T. über der 5% und unter der 1 % Perzentil-Hörschwelle nach ISO 28961.
 6. Die *DIN EN ISO 7029 (E)*: Die *Hörschwelle* bei *Männern (6.434!)* ist mit zunehmendem Alter im Mittel höher als bei *Frauen (17.150!)*. Auch unterhalb von **125 Hz** ist mit einer Verschlechterung der Hörschwelle im Alter zu rechnen.
- 03.03.2015 16. Sitzung des Arbeitskreises „Überarbeitung von DIN 45680“ bei Müller-BBM in Planegg 50

6 Zusammenfassung

MÜLLER-BBM

7. Die *DIN ISO 226 (2006)*: Die *Hörkurven gleicher Lautstärkepegel* beschreiben eine der wichtigsten Eigenschaften des menschlichen Gehörs und sind deshalb für die Psychoakustik von wesentlicher Bedeutung ($N = 304 VP$).
8. *Kurven gleicher Lästigkeit* verlaufen anders als die *Kurven gleicher Lautstärkepegel* bzw. der Lautheit nach DIN ISO 226 (2006).
9. Entwurf zur *Beschreibung der Lästigkeit* mit physikalischen Größen.

Vorschläge zur Novellierung der DIN 45680

10. *Vorschlag 1* : Im Sinne der *Lärmvorsorge* schlagen wir die Aufnahme der *1%-Perzentil-Hörschwelle* für einen Frequenzbereich von 20 Hz bis 125 Hz gemäß ISO 28961 (2012) vor.
11. *Vorschlag 2* : Für die *Messung* tieffrequenter Geräusche werden *physikalische Größen* befürwortet, und zwar mit einem Konzept, das sich auf einen *Basisschalldruckpegel* und *Zuschläge* stützt.
12. *Vorschlag 3* : Es wird empfohlen, die aus dem Schrifttum bekannten *Kurven gleicher Lästigkeit* für ihre Eignung zur *Beurteilung* tieffrequenter Geräusche zu prüfen.

MÜLLER-BBM

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Dr. Manfred Schmidt
Müller-BBM GmbH

www.MuellerBBM.de