

L I S - B e r i c h t e

Nr. 38

Beurteilung und Minderung
tieffrequenter Geräusche

Herausgeber:

Landesanstalt für Immissionsschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen
Wallneyer Str. 6

D-4300 Essen 1

1983

ISSN 0720-8499

Beurteilung und Minderung
tieffrequenter Geräusche

K.H. Wietlake

I n h a l t s v e r z e i c h n i s

	Seite
Zusammenfassung	7
Summary	8
1. Einleitung	10
2. Tieffrequente Geräusche; Definition und physikalisch bedingte Besonderheiten	
2.1. Definition	11
2.2. Entstehung	13
2.3. Ausbreitung	15
2.3.1. Luftschallausbreitung	17
2.3.2. Körperschallausbreitung	23
2.4. Resonanzeinfluß in geschlossenen Räumen	24
2.4.1. Biegeeigenschwingungen der raumbegrenzenden Strukturen	25
2.4.2. Resonanzeinfluß des Raumvolumens	26
3. Die akustische Wahrnehmung von Geräuschen und deren Bewertung	33
3.1. Hörschwelle	33
3.2. Lautstärkepegel u. A-bewerteter Schallpegel von Geräuschen	35
3.2.1. Abweichungen in der Beurteilung von Sinustönen nach der A-Bewertung und den Hörversuchen	37
3.2.2. Abweichungen in der Beurteilung von Geräuschen nach der A-Bewertung und dem ZWICKER-Verfahren	38
4. Gesamt-Auswirkungen der üblichen Meß- und Beurteilungsverfahren auf die Bewertung tieffrequenter Geräusche	46

5.	Vorschlag zur Beurteilung tieffrequenter Geräusche	50
5.1.	Das vorgeschlagene Verfahren in Kurzfassung	52
5.2.	Vor- und Nachteile des Verfahrens	53
6.	Anwendung des vorgeschlagenen Verfahrens auf konkrete Fälle mit Vorstellungen zur Minderung	54
6.1.	Einwirkung eines Kompressorgeräusches	54
6.2.	Einwirkung eines Heizungsgeräusches	56
6.3.	Einwirkung eines Lüftergeräusches	57
6.4.	Einwirkung eines Dieselmotorgeräusches	60
6.5.	Einwirkung eines Webereigeräusches	63
7.	Zielvorstellung	65
	Schrifttum	66

BEURTEILUNG UND MINDERUNG TIEFFREQUENTER GERÄUSCHE

K. H. Wietlake

Z u s a m m e n f a s s u n g

Geräusche mit vorherrschenden Anteilen im Frequenzbereich bis etwa 150 Hz werden hier als tieffrequent bezeichnet. Im Nachbarschaftsbereich führen diese tieffrequenten und im allgemeinen tonhaltigen Geräusche vielfach zu erheblichen Belästigungen. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn sie gleichbleibend über längere Zeit auftreten und durch ausgeprägte Einzeltöne bestimmt werden. Die Beschwerden über tieffrequente Geräusche verstummen auch dann nicht, wenn die nach den einschlägigen Regelwerken - wie TA-Lärm und VDI-Richtlinie 2058 - anzusetzenden Richtwerte nachweislich eingehalten sind. In diesem Bericht wird aufgezeigt, daß nach den gültigen Meß- und Beurteilungsverfahren tieffrequente Geräusche im Vergleich zu mittel- und hochfrequenten Geräuschen aus der Sicht der Belästigten unterbewertet werden. Dies ist im wesentlichen darauf zurückzuführen, daß die Beurteilung von Geräuscheinwirkungen auf Menschen in Wohnungen aus Meßwerten abgeleitet wird, die außen vor dem betroffenen Wohnraum erfaßt werden. Resonanzeinflüsse des Wohnraumes, die im allgemeinen nur bei tieffrequenten Geräuschen auftreten, bleiben hierbei unberücksichtigt. Um die Einwirkungen solch tieffrequenter Geräuschmissionen besser als bislang beurteilen zu können, wird hier eine Korrektur des Beurteilungsverfahrens vorgeschlagen:

- 1) Der Meßort wird gegenüber den üblichen Verfahren von außen nach innen verlegt
- 2) Anstelle des A-bewerteten Gesamtschallpegels wird das unbewertete Terzspektrum des Geräusches ermittelt

- 3) Als Beurteilungs-Kriterium wird die Auffälligkeit des zu beurteilenden tieffrequenten Geräusches nach den Ausführungen der VDI-2058 unter Einbeziehung des in der Wohnung dauernd vorhandenen, tieffrequenten Anteils des Hintergrundgeräusches herangezogen.

An fünf konkreten Fällen wird die Vorgehensweise vorgestellt. Dabei wird aufgezeigt, wie durch zweckmäßige Minderungsmaßnahmen die hier herausgestellte Auffälligkeit und damit die Störwirkung tieffrequenter Geräusche beseitigt werden kann.

S u m m a r y

Sounds characterized by dominant frequencies in the range of up to 150 Hz are here defined as low frequency sound. Such low frequency and generally pure-tone-containing sounds are the cause of considerable annoyances in the neighborhood. This is particularly true if they remain steady for a longer period of time. Complaints about low frequency noise do not cease when limit values determined according to the Technical Directives for Noise Abatement (TA-Lärm) and the VDI-Guideline 2058 are met. In this report it is shown that the presently employed measurement and evaluation methods underestimate low frequency noise in comparison to medium and high frequency noise from the point of view of the annoyed. The reason for this is to be attributed to the fact that the evaluation of the noise effects on man in his dwelling is based on the results of measurements taken outside his living quarters. Resonances caused by the room which generally occur only at low frequencies remain disregarded. In order to improve the evaluation of the effects of low frequency noise some corrections of the present method are recommended:

- 1) The site of the measurements used to date should be transferred from outside of the dwelling to inside the dwelling.

- 2) Instead of the A-weighted total sound level the unweighted third-octave-band-spectrum of the sound should be determined.
- 3) The perceptiveness of the low frequency sound as defined in the VDI-Guideline 2058 is to be used as an evaluation criterion taking into account the low frequency part of the background noise which is continuously present in the dwelling.

The method is demonstrated on five examples. In the process of this it is shown, how through adequate noise reduction measures the perceptiveness, which has been emphasized, and thus the annoyance of low frequency sound can be eliminated.

1. E i n l e i t u n g

Die Beurteilung der Geräuschmission im Nachbarschaftsbereich sollte von einer Modellvorstellung ausgehen, mit der die störenden Eigenschaften des Geräusches unter Einbeziehung wesentlicher Umgebungseinflüsse möglichst eindeutig mit der auf den Menschen ausgeübten Wirkung verknüpft werden können. Nach den bislang gesammelten Erfahrungen ist ein derartiges Modell meßtechnisch nicht zu realisieren. Die in der TA-Lärm [1] und VDI-Richtlinie 2058 [2] enthaltenen Beurteilungsmodelle sind als Ersatzverfahren anzusehen. Die Belästigung des Menschen durch ein auf ihn einwirkendes Schallereignis ist neben den physikalischen Merkmalen des Ereignisses und des menschlichen Ohres von einer Vielzahl nichtphysikalischer Einflußgrößen abhängig, so beispielsweise von der Umgebungssituation, die nicht allein durch die Gebietsausweisung charakterisiert wird, von der eigenen Einstellung zum Geräusch, vom Wohlbefinden und dergleichen mehr. Dazu wird in einer soziopsychologischen Fluglärmuntersuchung [3] ausgeführt: "Die Reaktion des Individuums auf Schall ist nicht als einfache Funktion des energetischen Schalldruckes und anderer physikalischer Parameter der Schallausbreitung aufzufassen, sondern als Zuordnungsprozeß, in welchem die von einer Schallquelle erzeugten Reize in physikalische Erregungsenergie umgewandelt, weitergeleitet und schließlich in internen Bezugssystemen gedeutet und bewertet, d.h. interpretiert werden. Diese Reizinterpretationen führen dann in einem weiteren Zuordnungsprozeß zu Reaktionen, welche das Verhalten des Individuums auf die Reize aus seiner Umgebung darstellen".

Nach Befragungsuntersuchungen [4] sollen die akustischen Kenngrößen, die bei der Einwirkung von Lärm durch die allgemein angewandten physikalischen Meßgrößen beschrieben werden, nur etwa 30 % der Gesamtwirkung ausmachen. Daß trotzdem die Geräuschbeurteilung im wesentlichen nur auf die physikalischen Meßgrößen aufgebaut ist, dürfte dadurch begründet sein, daß die übrigen Einflußgrößen nur mit hohem finanziellen Aufwand und zeitintensiven Erhebungen ermittelt werden können.

Die akustischen Meßgrößen bei den in den Regelwerken vorgestellten

Modellen zur Beurteilung von Geräuschen sind im wesentlichen die Frequenz und der Schalldruck des Geräusches. Sie werden meßtechnisch unter Benutzung der Frequenzbewertungskurve A, die in grober Näherung das Hörempfinden des menschlichen Ohres beschreibt, zu einer Einwertangabe des bewerteten Gesamtschallpegels "A" zusammengefaßt, woraus die Information über die Frequenzzusammensetzung des Geräusches nicht mehr ersichtlich ist. Aus einer Vielzahl derartiger Gesamtpegel für einzelne Meßzeiten wird nach den Ausführungen der Regelwerke ein zeitlicher Mittelungspegel für den Beurteilungszeitraum und daraus unter Berücksichtigung von Zuschlägen der Beurteilungspegel ermittelt.

Die hier zu behandelnden tieffrequenten Geräusche stellen hinsichtlich ihrer Störf Wirkung häufig einen Sonderfall dar, der auch bei Berücksichtigung eines Einzeltonzuschlages dann noch zu Beschwerden führt, wenn der Richtwert nicht von dem Beurteilungspegel überschritten wird. Darüber wird in einer Reihe von Veröffentlichungen [5, 6, 7, 8] berichtet. Auch eigene Feststellungen bei der Bearbeitung von Nachbarschafts-Beschwerden zeigen, daß die Wirkung von tieffrequenten Geräuschen mit den vorhandenen Beurteilungsmodellen meist unzureichend beschrieben wird. In dieser Arbeit wird eine Vorgehensweise zur Diskussion gestellt, mit der das bestehende Beurteilungsverfahren für tieffrequente Geräusche verbessert wird.

Außerdem wird auf Minderungsmaßnahmen eingegangen, die in konkreten Fällen bei tieffrequenter Geräuscheinwirkung zum Erfolg geführt haben. Sie zeigen u.a., daß die Minderung tieffrequenter Geräusche durch gezielte Maßnahmen an der Quelle meist mit geringerem Aufwand und zahlenmäßig größerem Erfolg zu erreichen ist als durch Sekundärmaßnahmen, wie Kapseln oder Dämpfen.

2. T i e f f r e q u e n t e G e r ä u s c h e ; D e f i n i t i o n u n d p h y s i k a l i s c h b e d i n g t e B e s o n d e r h e i t e n

2.1. Definition

Tieffrequente Schallereignisse umfassen im wesentlichen den Frequenzbereich von etwa 1 Hz bis zu etwa 150 Hz. Die Obergrenze ist

fließend; sie wurde beispielsweise auf einer internationalen Fachtagung [5] über tieffrequente Geräusche als Konvention zu 150 Hz festgelegt. Diese Festlegung wird auch hier übernommen, denn in dem Bereich bis etwa 150 Hz liegen in den hier behandelten Beschwerdefällen mit tieffrequenter Geräuscheinwirkung die vorherrschenden Geräuschanteile.

Die Festlegung des Frequenzbereiches für tieffrequente Geräusche auf 1... 150 Hz erfaßt auch den Bereich unterhalb der allgemein angegebenen Grenze des Hörschalles von 20 Hz. Dieser untere Bereich von 1... 20 Hz wird Infraschall genannt [6]. Im Gegensatz zu der allgemeinen Auffassung haben Untersuchungen von YEOWART [9] gezeigt, daß auch Schallereignisse im Infraschallbereich ab einer bestimmten Schalldruckgrenze bis herab zu etwa 1 Hz vom menschlichen Ohr erfaßt werden können. Die durch Versuche festgestellte Frequenzabhängigkeit der menschlichen Hörschwelle im Bereich von 1 Hz bis 20 kHz ist in Abbildung 1 veranschaulicht.

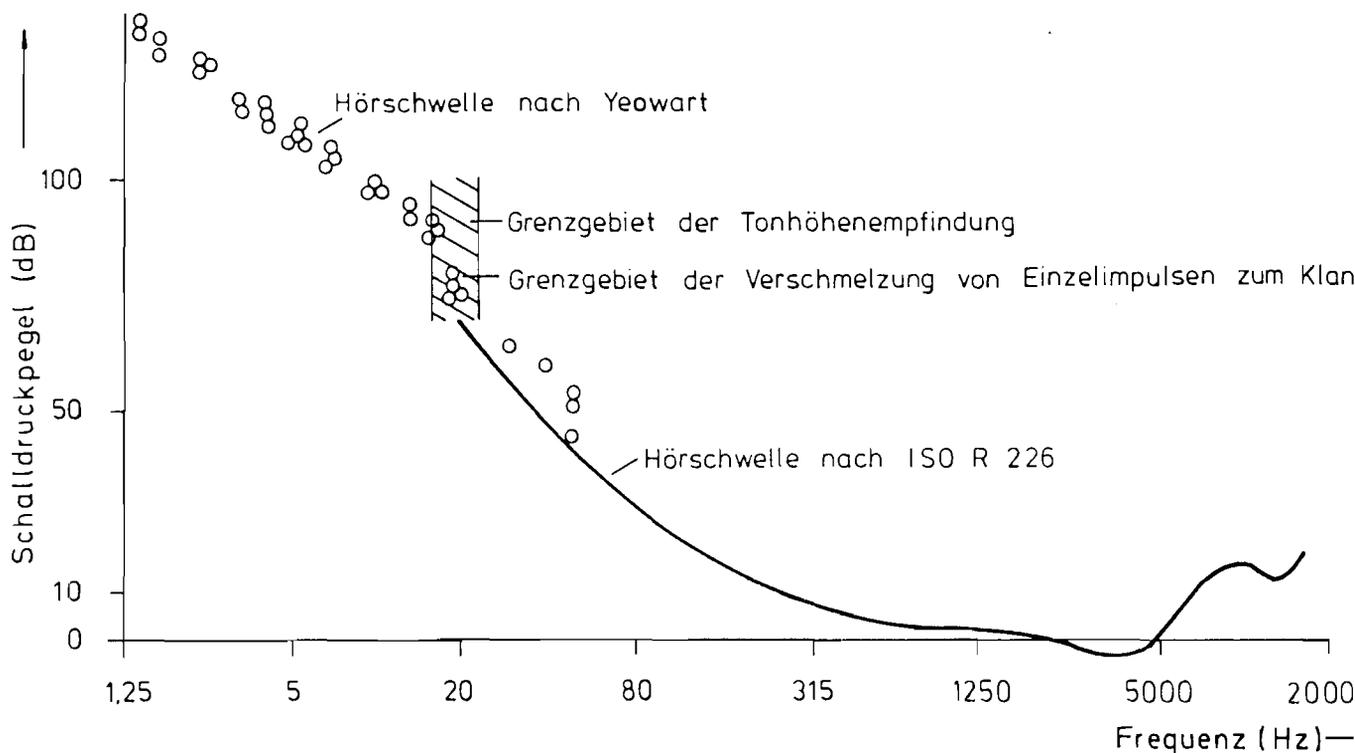


Abb. 1: Frequenzabhängigkeit der menschlichen Hörschwelle bis ins Infraschallgebiet [9]

Abbildung 1 zeigt, daß die Hörschwellenkurve zwischen 1,5 Hz und 1 kHz einen Pegelunterschied von etwa 130 dB aufweist. Im Vergleich dazu beträgt der Pegelunterschied der Hörschwelle im Gehörschallbereich zwischen 20 Hz und 1 kHz nur etwa 70 dB.

Trotz des kontinuierlichen Übergangs der Hörschwelle vom Gehörschall zum Infraschall ist eine Abgrenzung im Frequenzbereich um etwa 20 Hz sinnvoll, weil nach ISING und SCHWARZE [6] oberhalb etwa 20 Hz eine Impulsfolge zu einem kontinuierlichen Klang verschmilzt und unterhalb von etwa 20 Hz die Tonhöhenempfindung verschwindet. Ähnliche Wahrnehmungen liegen auch im visuellen Bereich vor, wo eine Bildfolge oberhalb von 16 Hz zu einer kontinuierlichen Bewegung verschmilzt. Auch im Infraschallbereich können somit vom Menschen grundsätzlich hörbare Empfindungen von fühlbaren Empfindungen unterschieden werden. Der Bereich unterhalb 20 Hz ist daher bei der Beurteilung tieffrequenter Geräusche mit zu beachten.

2.2. Entstehung

Hinsichtlich der Entstehung gibt es bei den tieffrequenten Geräuschen keine grundsätzlichen Besonderheiten. Von den drei allgemein zu unterscheidenden Entstehungsmechanismen

- a) Stoßanregungen in festen Körpern bzw. schlagartige Druckschwankungen in flüssigen oder gasförmigen Medien
- b) periodische Krafteinwirkungen auf Festkörper bzw. periodische Druckschwankungen flüssiger oder gasförmiger Medien
- c) stochastische Krafteinwirkungen auf Festkörper bzw. Strömungsvorgänge in flüssigen und gasförmigen Medien

sind die beiden letztgenannten Gruppen meist für die in der Praxis besonders störenden tieffrequenten Geräusche verantwortlich.

Zu den wesentlichen technischen Quellen, die zu Belästigungen durch tieffrequente Geräusche führen, gehören:

- Ventilatoren mit tieffrequenten Drehklangtönen
- Auspuffanlagen langsam laufender Verbrennungsmotoren
- Transformatoren mit ihrem Netzbrummen
- schienegebundene Verkehrsanlagen
- Brenner von Heizungsanlagen
- langsam laufende Siebe und Mühlen mit ihren großflächig bewegten Massen
- Webstühle, Druckmaschinen u. dgl.

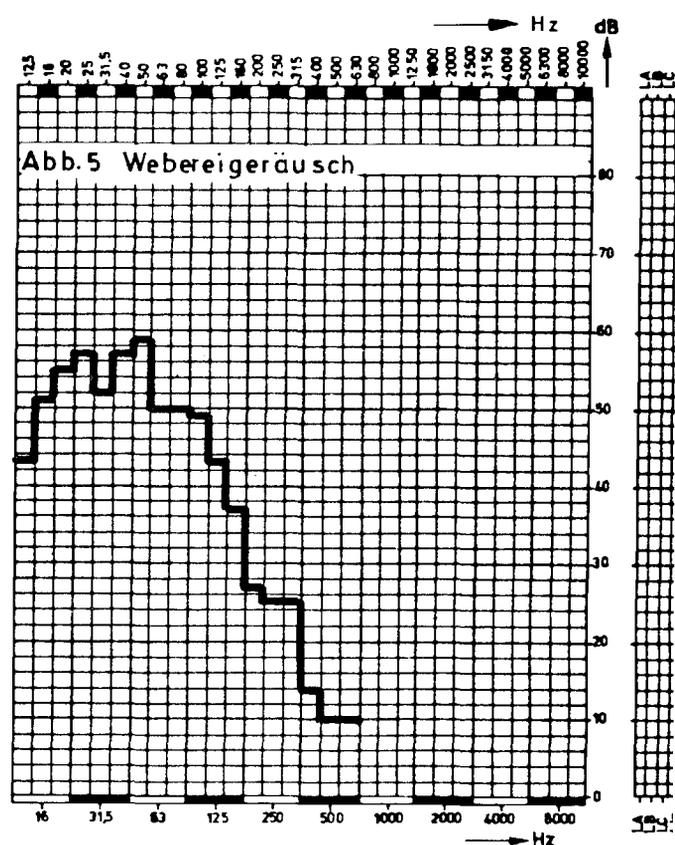
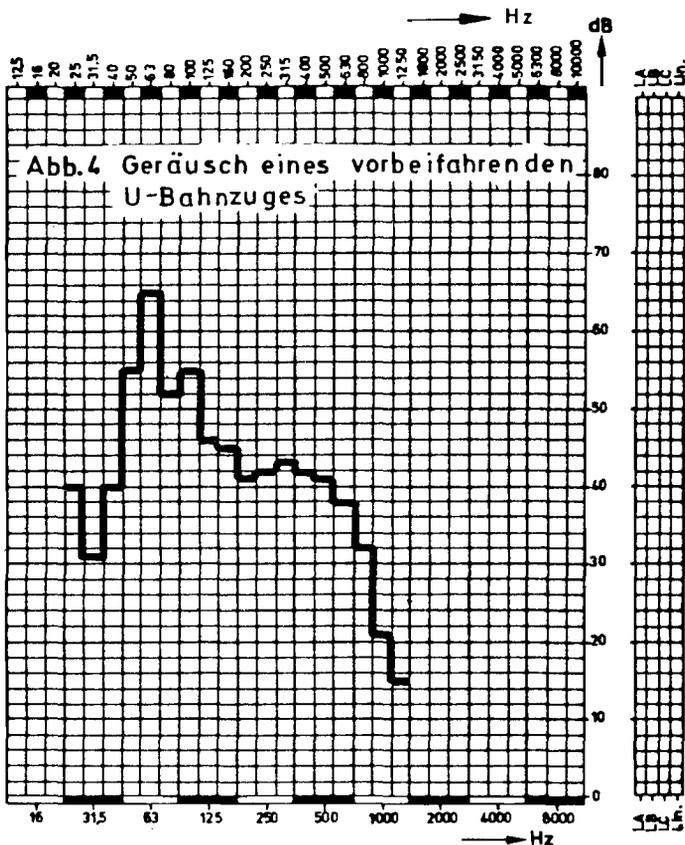
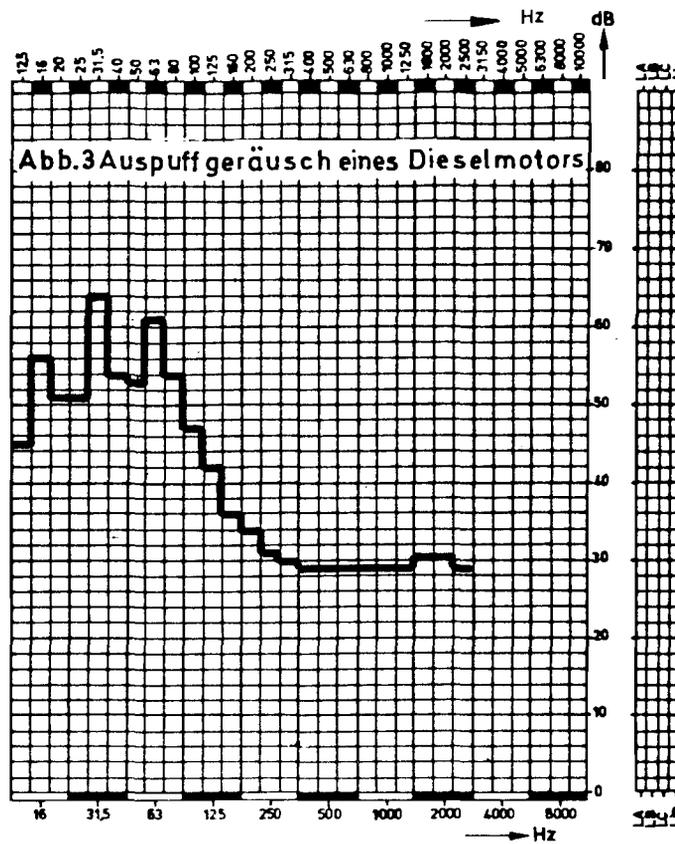
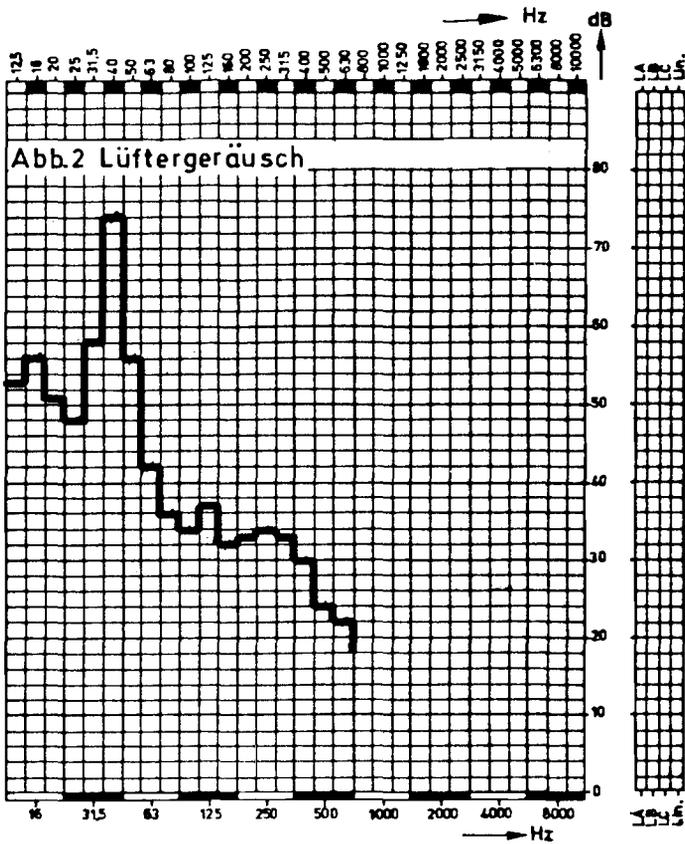


Abbildung 2....5: Terzspektren von tieffrequenten Geräuschen

In den Abb. 2...5 sind beispielhaft Terzspektren von Geräuschen mit vorwiegend tieffrequenten Anteilen wiedergegeben, die auf periodischen und stochastischen Krafteinwirkungen beruhen. Diese vier ausgewählten Spektren wurden innerhalb von Räumen bei geschlossenen Türen und Fenstern ermittelt. Alle Spektren sind durch ausgeprägte Terzbandgipfel im Frequenzbereich unterhalb von 150 Hz gekennzeichnet, die durch diskrete Einzeltöne verursacht wurden. Derartige Spektren sind für tieffrequente Geräusche charakteristisch. Sieht man von kurzzeitig auftretenden Geräuschen wie dem U-Bahngeräusch ab, so ist meist von einer gleichbleibenden Dauereinwirkung auszugehen, die sich nicht selten auch auf die Nachtzeit ausdehnt. Aus dem Verhalten der Betroffenen bei Geräuscheinwirkungen mit derart tieffrequenten Anteilen ist zu erkennen, welcher störender Einfluß auf sie ausgeübt wird. So werden stark betroffene Wohnräume kaum genutzt, Betten und Sitzmöbel unbewußt so gestellt, daß sie sich in Bereichen mit Druckknoten, d.h. an Stellen relativ niedriger Schallpegel befinden. Nicht selten wird versucht, der tieffrequenten Störwirkung durch Überblendung des Geräusches mit Musik zu entgehen, d.h. unbewußt eine Verdeckung des tieffrequenten Geräusches herbeizuführen. Eine erhebliche Verbesserung der Situation ist immer dann festzustellen, wenn eine Beseitigung oder Minderung der Terzgipfel im tieffrequenten Bereich erreicht wird.

2.3. Ausbreitung

Bei der Ausbreitung eines Schallereignisses von der Quelle in die Nachbarschaft sind im wesentlichen zwei Übertragungswege zu unterscheiden:

- a) Luftschallausbreitung
- b) Körperschallausbreitung

Abbildung 6 veranschaulicht diese beiden Schallausbreitungen.

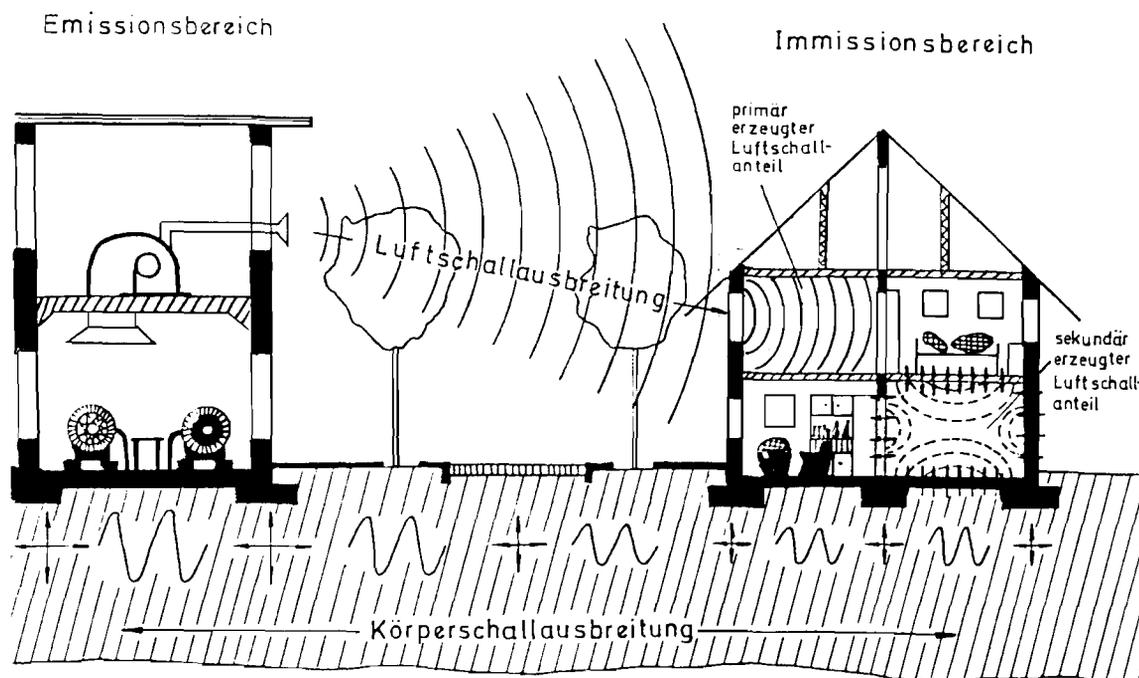


Abb. 6: Luft- und Körperschallausbreitung

Der von der Quelle direkt über Luftdruckschwankungen oder indirekt über schwingende Bewegungen der Maschinenstrukturen erzeugte Luftschall breitet sich über die Luft in die Nachbarschaft aus. Es ist dies der nach Konvention am Immissionsort primär erzeugte Luftschall. Im Gegensatz dazu wird von sekundär erzeugtem Luftschall [10] gesprochen, wenn mechanische Schwingungen von Maschinen über Festkörper - beispielsweise über das Fundament und den Baugrund - als Körperschall weitergeleitet und erst im Immissionsbereich durch Abstrahlung von den Raumbegrenzungsflächen in Luftschall umgewandelt werden. Dieser Sekundärschall wird im allgemeinen Sprachgebrauch - physikalisch nicht richtig - auch als Körperschallanteil bezeichnet. CREMER und HECKL haben den Körperschall in [11] definiert.

2.3.1. Luftschallausbreitung

In Anlehnung an den Entwurf der VDI-Richtlinie 2714 "Schallausbreitung im Freien" [12] wird hier von einem vereinfachten Ausbreitungsmodell für den Luftschall vom Quellenbereich bis in den Wohnbereich ausgegangen, siehe dazu Abb. 7. Dabei ist eine Geräuschquelle im Freien angenommen, deren Luftschall auf dem Ausbreitungsweg bis in ein Wohngebäude verfolgt wird, das sich hier in etwa 800 m Abstand von der Quelle befindet. Für die Pegelabnahme auf dem Ausbreitungsweg sind die geometrische Ausbreitungsdämpfung ΔL_G , das Abschirmmaß ΔL_Z , das Luftabsorptionsmaß ΔL_L , das Bodendämpfungsmaß ΔL_B , das Witterungsdämpfungsmaß ΔL_M und der sich aus den maßgebenden Bauteildämmwerten ergebende Wohngebäude-Dämmwert D als wesentliche Größen zu betrachten. Hinzu kommt dann noch die später besprochene Raumrückwirkung.

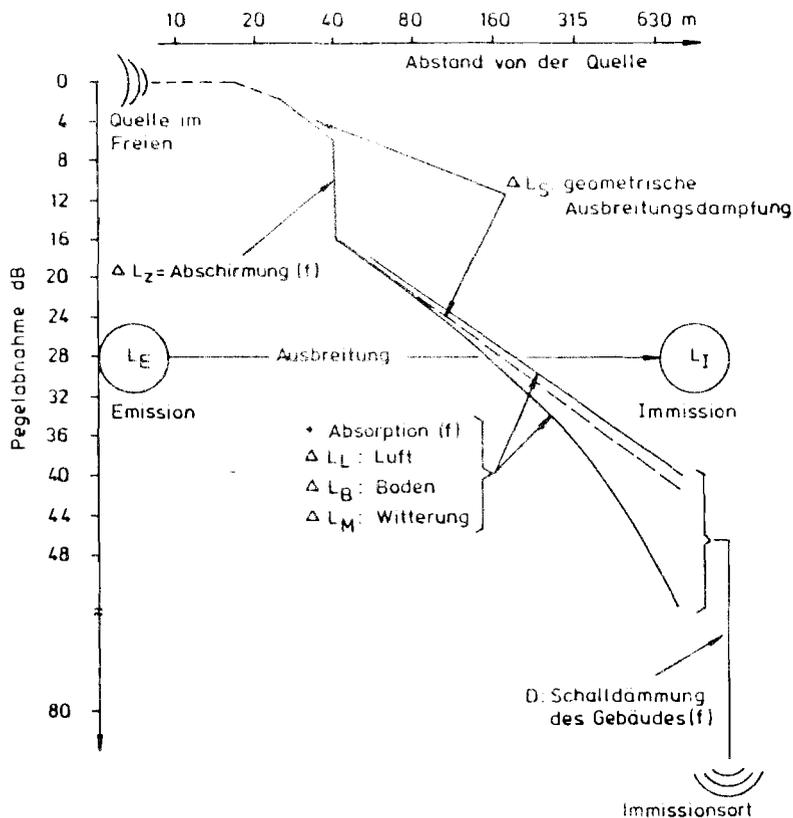


Abb. 7: Vereinfachtes Luftschall-Ausbreitungsmodell

Bei der Minderung des Schallpegels im Verlauf seiner Ausbreitung wirken im allgemeinen alle genannten physikalischen Effekte mehr oder weniger gemeinsam mit. Der Immissionspegel L_I errechnet sich unter Vernachlässigung der Raumbückwirkung nach folgender Beziehung:

$$L_I = L_E - \Delta L_S - \Delta L_Z - \Delta L_L - \Delta L_B - \Delta L_M - D \quad \text{in dB} \quad (1)$$

mit:

- L_I = Schallpegel in einer Wohnung
- L_E = Emissionspegel im Freien
- ΔL_S = Abstandsmaß
- ΔL_Z = Abschirmmaß
- ΔL_L = Luftabsorptionsmaß
- ΔL_B = Bodendämpfungsmaß
- ΔL_M = Witterungsdämpfungsmaß
- D = Dämmwert des Wohngebäudes

Bei tieffrequenten Geräuschen ist die Abschwächung auf dem Ausbreitungsweg im Freien im Gegensatz zu höherfrequenten Geräuschen im wesentlichen nur von der frequenzunabhängigen geometrischen Ausbreitungsdämpfung ΔL_S abhängig. Bei kugelförmiger Schallwellenausbreitung, die in ausreichend großer Entfernung von punktförmigen Schallquellen angenommen werden kann, beträgt die geometrische Ausbreitungsdämpfung zwischen zwei Abständen s_0 und s_1 :

$$\Delta L_S = 20 \lg \frac{s_1}{s_0} \quad \text{in dB} \quad (2)$$

Woraus sich eine Pegelminderung von 6 dB je Abstandsverdoppelung ergibt.

Bei höherfrequenten Schallereignissen sind zusätzlich noch weitere Dämpfungsglieder stark pegelmindernd wirksam. So haben die insbesondere bei geringen Abständen zwischen Quelle und Empfänger eingesetzten Schallschirme - wie auch andere Hindernisse auf dem Ausbreitungsweg - eine frequenzabhängige Wirkung. Abbildung 8 veranschaulicht den nach FLEISCHER [13] bei Schallschirmen vorhandenen Frequenzeinfluß auf das zu erreichende Abschirmmaß ΔL_z .

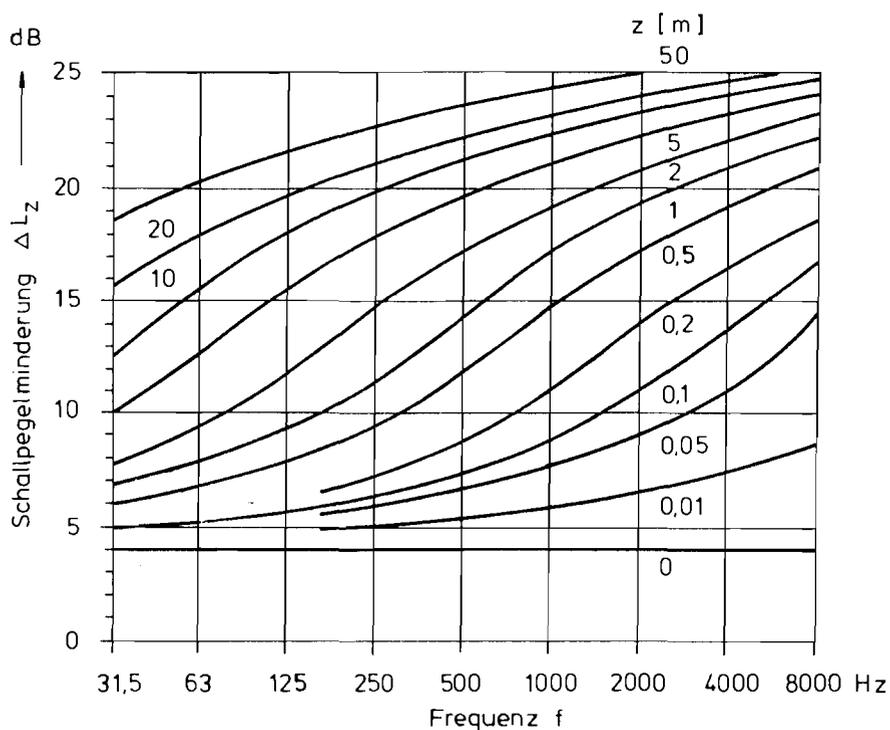
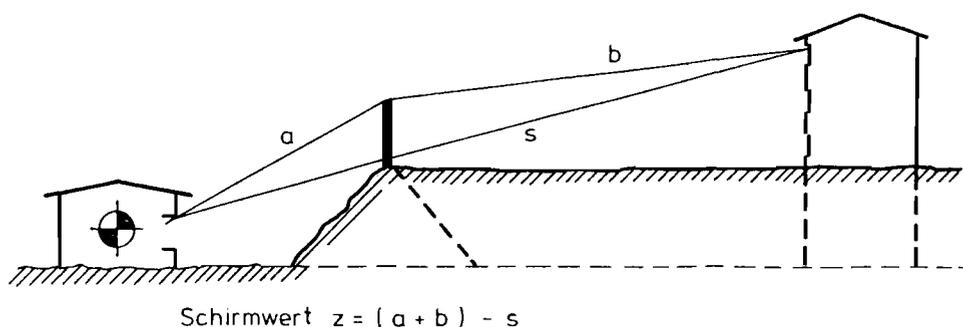


Abb. 8: Pegelminderung eines Schallschirmes in Abhängigkeit von der Frequenz des Geräusches und vom Schirmwert z

Bei einem Schirmwert von beispielsweise $z = 0,5$ m wird danach ein 1-kHz-Ton um etwa 15 dB gemindert und ein 30-Hz-Ton um etwa 6 dB. Die Pegelrelation würde sich somit bei diesen beiden Tönen durch die frequenzabhängige Wirkung des Schallschirmes um 9 dB unterscheiden.

Als weiteres stark frequenzabhängiges Dämpfungsglied ist in Abbildung 9 der Luftabsorptions-Koeffizient herausgestellt [14] .

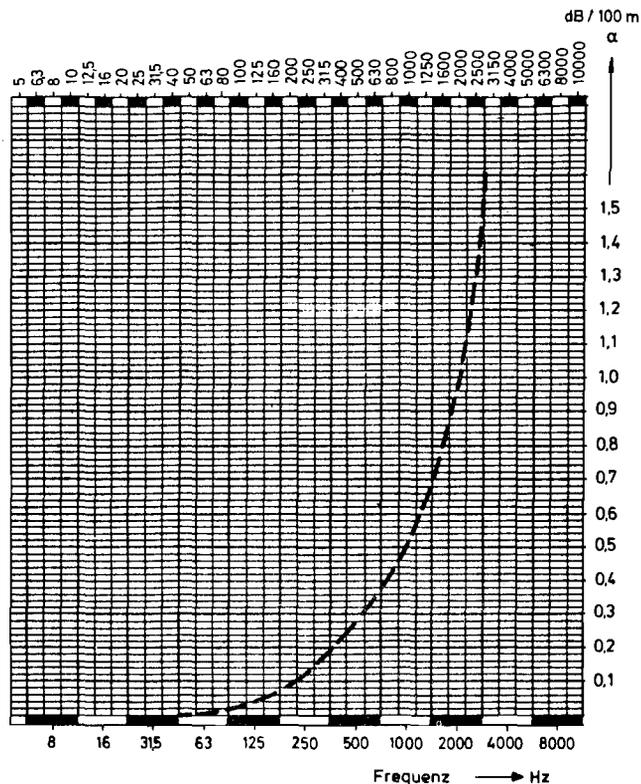


Abb. 9: Luftabsorptions-Koeffizient α für reine Töne und Luft von 20°C sowie 50 % relativer Feuchtigkeit in dB/100 m

Zwischen 50 und 1000 Hz steigt der Absorptions-Koeffizient beispielsweise um den Faktor 50 an. Tieffrequenter Schall kann sich somit zumindest über große Entfernungen ungehinderter in Luft ausbreiten als hochfrequenter Schall. Dies ist u.a. auch der Grund dafür, daß bei großem Abstand von einem Spielmannszug nur die tieffrequenten Paukenschläge zu hören sind. Auch das von Nebelhörnern weit durchdringende Signal mit Frequenzen um ca. 200 Hz beruht auf einem ähnlichem Effekt.

Die Zusatzdämpfung ΔL_B durch Bodenabsorption ist von der Art des Geländes, der Höhe des Schallstrahles über dem Gelände, der Länge des Schallweges und auch von der Frequenz abhängig. Experimentell wurde das Ausmaß dieser Dämpfung u.a. von PARKIN und SCHOLLES [15] festgestellt, aus deren Ergebnissen drei Dämpfungskurven ausgewählt und in Abb. 10 wiedergegeben sind. Sie wurden über einen Ausbreitungsweg von etwa 350 m ermittelt, wobei das Gelände eben war und sich die abstrahlende Quelle sowie das Empfangsmikrofon mit ca. 1,5 m Höhe nur relativ dicht über dem Boden befanden. In diesem geringen Bodenabstand werden höhere Dämpfungen erzielt als in größeren Höhen, siehe dazu [16] .

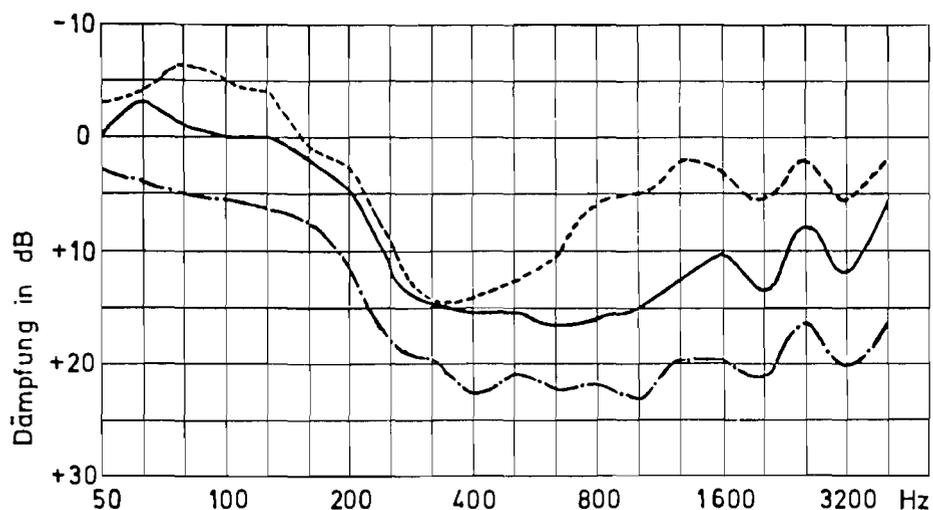


Abb. 10: Zusatzdämpfungsmaß ΔL_B durch Bodenabsorption nach [15] über einen ebenen Ausbreitungsweg von ca. 350 m

- Gegenwind ca. 5m/s
- Windstille
- · - · - Mitwind ca 5m/s

Der in der Mitte verlaufende Kurvenzug wurde bei Windstille ermittelt und beschreibt damit die unter den gegebenen Randbedingungen allein auf das Gelände zurückzuführende Zusatzdämpfung. Man erkennt, daß im tieffrequenten Bereich im Gegensatz zum darüber liegenden Frequenzbereich praktisch keine Dämpfung auftritt.

Die beiden übrigen Kurven wurden unter Windeinfluß ermittelt, und zwar die obere Kurve in einer Gegenwindsituation, wobei der Wind mit einer Geschwindigkeit von etwa 5 m/s vom Mikrofön auf die Quelle zuwehte und die untere Kurve in einer Mitwindsituation bei ebenfalls 5 m/s Windgeschwindigkeit. Der Wind wirkt sich zwar wesentlich auf das Ausmaß der Zusatzdämpfung aus, aber nur geringfügig auf den hier besonders interessierenden Frequenzgang. In beiden Fällen werden die tieffrequenten Geräuschanteile durch die frequenzabhängige Zusatzdämpfung im Vergleich zu den höherfrequenten Anteilen angehoben.

Weiterhin wird die Ausbreitung tieffrequenten Luftschalls gegenüber höherfrequentem Schall beim Durchgang durch feste Strukturen weniger beeinträchtigt, so z.B. beim Übergang des Luftschalls von außen in ein Gebäude. Die Schalldämmung eines Bauteiles - wie Fenster und Wände - ist nämlich stark frequenzabhängig. Im allgemeinen werden die Dämmwerte von Bauteilen, aus denen sich der Dämmwert des Gebäudes zusammensetzt, zwar nur bis herunter zu Frequenzen von 100 Hz angegeben. Von der Landesanstalt für Immissionsschutz des Landes NW wurden die Luftschalldämmwerte von Bauelementen im eingebauten Zustand auch im tieffrequenten Bereich bestimmt. Hierbei wurden beispielsweise für eine Kalksandsteinmauer von 36 cm Dicke Dämmwerte von 44 dB bei 1 kHz und von nur 24 dB bei 50 Hz festgestellt und für ein Fenster mit einer Einfachverglasung von 5 mm Dicke ca. 30 dB bei 1 kHz und nur 11 dB bei 25 Hz. Die Meßwerte sind in [17] veröffentlicht.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß der Luftschall auf dem Ausbreitungsweg von der Quelle bis in die Wohnung in seiner Frequenzzusammensetzung durch die aufgezeigten Einflußgrößen erheblich verändert wird, wobei sich der tieffrequente Anteil in der Wohnung stärker ausprägt als im Quellenbereich.

2.3.2. Körperschallausbreitung

Körperschall kann auf seinem Ausbreitungsweg von der Quelle bis zu den luftschallabstrahlenden Strukturen im Nachbarschaftsbereich gedämpft und gedämmt werden. Unter Dämpfung wird dabei wie beim Luftschall die Umwandlung von Schallenergie in Wärme verstanden, sie wird durch den Verlustfaktor d gekennzeichnet (oft auch η genannt) [11] . Mit Körperschalldämmung ist vorrangig die Verhinderung der Körperschallausbreitung durch Reflexion an elastischen Schichten angesprochen.

Die Ausbreitung ist derart komplex, daß es hier nicht möglich ist, ein allgemeingültiges Modell aufzustellen. Das hängt einerseits mit der großen Anzahl verschiedener Festkörper zusammen und andererseits damit, daß in diesen Festkörpern zwei Wellentypen und Kombinationen davon auftreten. Bei der vorher behandelten Luftschallausbreitung interessiert dagegen nur ein Medium und nur eine Wellenart. Auch bei der Körperschallausbreitung sind die wesentlichen Dämm- und Dämpfungsmaße frequenzabhängige Größen, wobei die tieffrequenten Anteile erheblich weniger an der Ausbreitung gehindert werden als höherfrequente Anteile. So wird beispielsweise von CREMER/HECKL [11] für die Dämpfung von Longitudinal-, Quasilongitudinal-, Transversal- und Torsionswellen auf einer Ausbreitungsstrecke Δs folgende Beziehung angegeben:

$$\Delta L = \frac{8,7 \cdot \pi \cdot \eta \cdot \Delta s \cdot f}{c} \text{ in dB} \quad (3)$$

worin: ΔL Körperschalldämpfung in dB

Verlustfaktor des durchlaufenen Materials

Δs Ausbreitungsstrecke in m

c Ausbreitungsgeschwindigkeit im durchl. Material in m/s

f Frequenz in s^{-1}

Wählt man einen sandigen Boden als durchlaufenes Material und setzt für $\eta = 0,03$ und für $c = 200$ m/s, so errechnet sich bei einer Ausbreitungsstrecke von 10 m für 50 Hz eine Dämpfung von 2 dB, für 100 Hz 4 dB und für 1 kHz 40 dB.

Die Dämpfung ist somit bei höherfrequentem Körperschall erheblich größer als bei tieffrequentem. Ähnlich sieht es bei der Dämmung des Körperschalls aus. Dies führt dazu, daß der nach der Ausbreitung im Nachbarschaftsbereich auf die luftschallabstrahlenden Strukturen - Wände, Decken, Fenster - einwirkende Körperschall meist bevorzugt tieffrequente Anteile enthält. Somit ist auch verständlich, daß der von diesen schwingenden Strukturen abgestrahlte Luftschallanteil meist nur noch aus tieffrequenten Anteilen besteht. In der Praxis ist dies bei Körperschalleinwirkungen festzustellen, die beispielsweise durch benachbarte Webereien sowie unterirdische Verkehrsanlagen oder auch durch baulich mit der betroffenen Wohnung verbundene Kleinbetriebe - wie Druckereien, Wäschereien, Metzgereien, Bäckereien u. dgl. - verursacht werden. Schwierig ist meist der meßtechnische Nachweis, ob und inwieweit die vorhandene Geräuscheinwirkung in einem konkreten Fall auf Körperschallübertragung zurückzuführen ist. In der LIS wird z. Zt. versucht, ein praktisches Verfahren für derartige Fälle zu erarbeiten. Es soll dazu beitragen, die Einleitung von Minderungsmaßnahmen in Zukunft gezielter vornehmen zu können. Zur Beseitigung des Primärschalls sind nämlich im allgemeinen andere Maßnahmen notwendig als zur Beseitigung des Sekundärschalls.

2.4. Resonanzeinfluß in geschlossenen Räumen

Werden tieffrequente Schallereignisse in geschlossene Räume übertragen, so können sie durch Resonanzeinflüsse erheblich verstärkt werden. Dies ist der Fall, wenn die Schallereignisse tonhaltig sind und die Wellenlänge der Einzeltöne in geeigneter Weise mit den Raumabmessungen übereinstimmt oder die Tonfrequenzen von Körperschall mit Biegeeigenfrequenzen der raumbegrenzenden Strukturen zusammenfallen. Dadurch werden stehende Schallwellen im Raum oder Biegeeigenschwingungen von Bauteilen verursacht, wodurch zumindest in einzelnen Raumbereichen relativ hohe Pegel bei vergleichsweise geringem Schalleinfall verursacht werden. Die stehenden Wellen können sowohl vom Primärschall als auch vom Sekundärschall erregt werden, die Biegeeigenschwingungen der raumbegrenzenden Strukturen dagegen im allgemeinen nur durch Körperschall. Bei hochfrequenten Schallereignissen sind die Resonanzerscheinungen weitgehend ausge-

schlossen. Stehende Wellen bilden sich nicht aus, weil mit steigender Erregerfrequenz die Schallabsorption der raumbegrenzenden Strukturen meist ansteigt und die möglichen Resonanzfrequenzen bei einem vorgegebenen Raum dann so dicht beieinanderliegen, daß der Raum angenähert diffus ausgeschallt wird. Außerdem liegen die Biegeeigen-schwingungen 1. Ordnung von Wänden und Decken, bei denen im wesentlichen eine resonanzbedingte Schwingungsaufschaukelung erfolgen kann, aufgrund der Bauteilabmessungen im tieffrequenten Bereich.

2.4.1. Biegeeigen-schwingungen der raumbegrenzenden Strukturen

Stimmen die Erregerfrequenzen tieffrequenten Körperschalls mit den Biegeeigenfrequenzen raumbegrenzender Strukturen überein, werden die Strukturen zu Resonanzschwingungen angeregt. Das Ausmaß der Schwingungsvergrößerung infolge Resonanz ist von dem Dämpfungsmaß D des schwingenden Gebildes abhängig und wird durch die Resonanzüberhöhung V_R ausgedrückt.

$$V_R = \frac{1}{2 D} \quad (4)$$

worin D : Dämpfungsmaß nach LEHR mit Werten zwischen 0 und 1

Die Resonanzüberhöhung von Bauteilen kann im Mittel zu etwa $V_R=10$ angesetzt werden, d.h. die Bauteilschwingungen werden durch den Resonanzeinfluß um den Faktor 10 verstärkt. Wie sich dieser Resonanzeinfluß auf den abgestrahlten Luftschall auswirkt, zeigt das folgende Beispiel:

Geht man davon aus, daß von einem Bauteil ohne Resonanzeinwirkung durch den Körperschall der Luftschallpegel L erzeugt wird, so würde unter Resonanzeinfluß mit einer Resonanzüberhöhung V_R der Luftschallpegel um den Wert

$$\Delta L = 20 \lg V_R \quad \text{in dB} \quad (5)$$

ansteigen. Bei $V_R = 10$ ergibt sich danach ΔL zu 20 dB.

Selbstverständlich bedeutet dies nicht, daß dadurch der Raumpegel allgemein in diesem Frequenzbereich um 20 dB resonanzbedingt höher liegen würde, denn es ist unwahrscheinlich, daß in einem konkreten Fall alle raumbegrenzenden Bauteile gleichzeitig zu Resonanzschwingungen angeregt werden. Eine Erhöhung bis zu etwa 10 dB kann jedoch in Wohnungen durchaus auftreten.

2.4.2. Resonanzeinfluß des Raumvolumens

Von CREMER und MÜLLER [18] ist ein vereinfachendes Modell zur Bestimmung von Eigenschwingungen in Rechteckräumen erarbeitet worden. Der Rechteckraum wurde gewählt, weil hierbei die mathematischen Beziehungen noch relativ einfach sind und weil es die zweifellos häufigste Bauform ist. Bei Vernachlässigung der Dämpfung und der weiteren Annahme, daß die raumbegrenzenden Flächen als starr angenommen werden können und nur geringe Schallabsorption haben, errechnen sich die Eigenfrequenzen der Raumeigenschwingungen nach folgender Beziehung:

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad \text{in Hz} \quad (6)$$

worin:

- f : Resonanzfrequenz in Hz
 c : Schallgeschwindigkeit in Luft in m/s (hier 340 m/s)
 x, y u. z : Raumkoordinaten
 l_x, l_y, l_z : Raumabmessungen in m
- n : Anzahl der Druckminima in der jeweiligen Raumkoordinate, wobei jeweils nur max. zwei Größen gleichzeitig = 0 sind
- n_x : 0, 1, 2, 3,
- n_y : 0, 1, 2, 3,
- n_z : 0, 1, 2, 3,

Das vorgestellte Modell geht von einem stark idealisierten Rechteck-

raum aus, der u.a. frei von allen Möbeln und Insassen zu betrachten ist. Kleine Abweichungen von den geforderten Bedingungen können bereits große Abweichungen in den Schallfeldverhältnissen verursachen. In dem 3. Beispiel zu den Raumresonanzen werden derartige Abweichungen verdeutlicht.

Zur Erläuterung der möglichen Eigenschwingungsformen ist in Abbildung 11 der max. effektive Schalldruckverlauf in einem Raum für denjenigen Zustand wiedergegeben, bei dem $n_y = 4$ und n_x sowie $n_z = 0$ sind. Es wird somit die Eigenschwingung mit der Resonanzfrequenz $f_{0,4,0}$ angeregt.

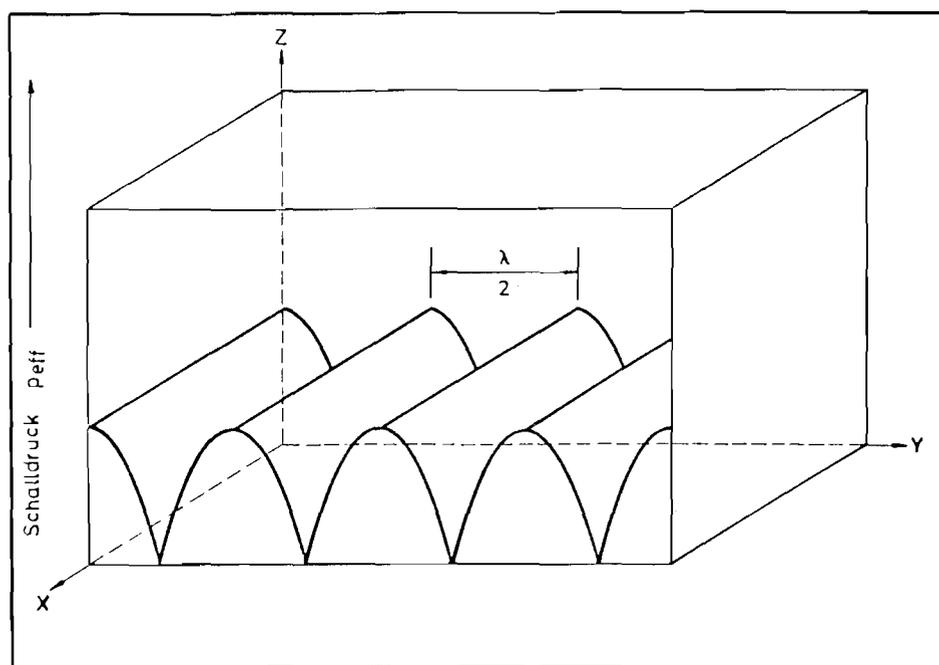


Abb. 11: Eigenschwingung eines Raumvolumens mit der Eigenfrequenz $f_{0,4,0}$

In diesem Fall ist der Pegelverlauf allein von der Raumabmessung in der y-Koordinate abhängig.

An drei in der Praxis aufgetretenen Fällen, die im Rahmen des Nachbarschaftsschutzes bearbeitet wurden, wird die Pegelerhöhung im Raum bei Anregung stehender Wellen verdeutlicht.

1. Beispiel Einwirkung eines tieffrequenten Lüftergeräusches auf einen Büroraum

Ein über Dach ausblasender Axiallüfter mit einer Drehzahl von 336 U/min und 7 Schaufeln emittiert ein stark tonhaltiges tieffrequentes Geräusch, das über die Luft in die Nachbarschaft und in einen Büroraum übertragen wird. In diesem Raum sind subjektiv eindeutig Druckknoten und -bäuche festzustellen. In einem der Druckbäuche wurde das in Abbildung 2 wiedergegebene Terzspektrum ermittelt; dieses enthält einen deutlich aus dem übrigen Bereich herausragenden Terzgipfel bei der Mittenfrequenz 40 Hz. Dieser Gipfel wird - wie die Frequenzanalyse des Lüftergeräusches in Abb. 12 zeigt - durch einen Einzelton von 39 Hz bestimmt, der dem Drehklanggrundton des Ventilators, d.h. dem Produkt aus der sekundlichen Lüfterdrehzahl 5,6 Hz und der Schaufelzahl 7, zuzuordnen ist.

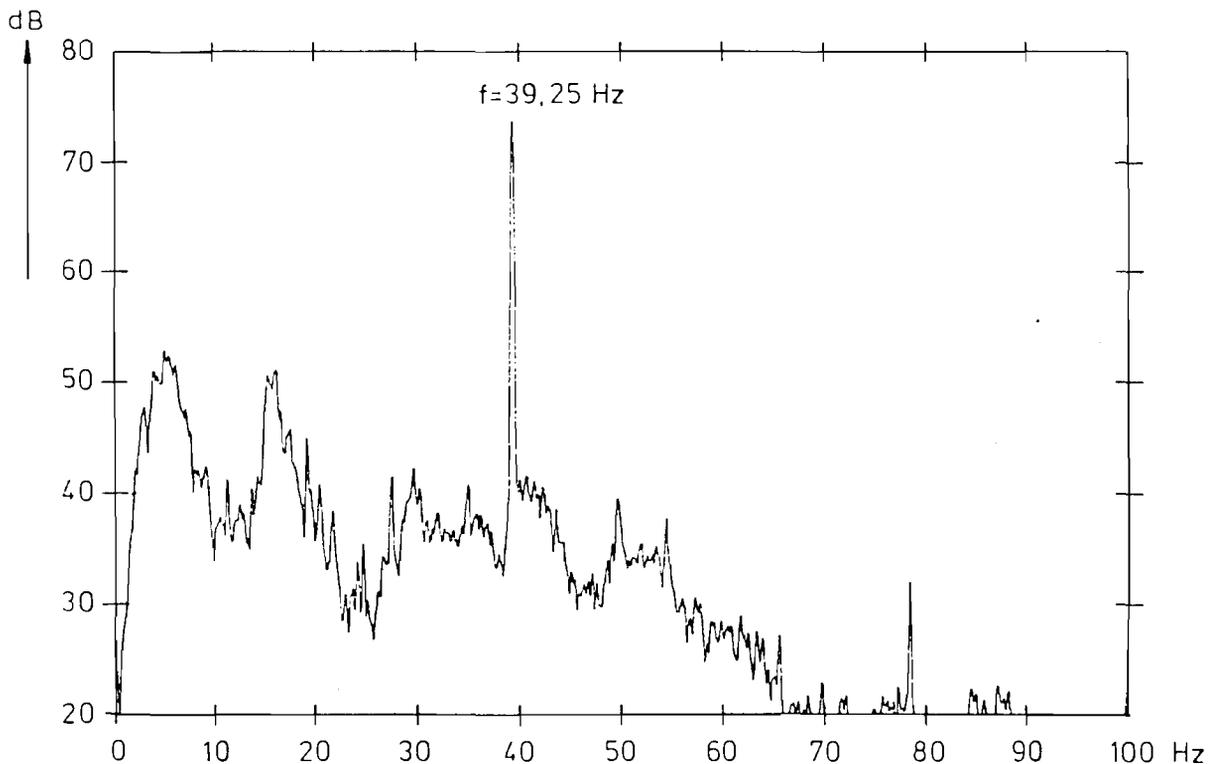


Abb. 12: Einzeltonspektrum des Lüftergeräusches nach Abb. 2

Für den quaderförmigen Büroraum mit den Abmessungen $l_x = 4,0 \text{ m}$;

$l_y = 5,8$ m und $l_z = 3,0$ m errechnen sich nach Gleichung 6 unterhalb 100 Hz die in Tabelle 1 aufgelisteten 15 Resonanzfrequenzen. Davon liegt der Wert für $f_{1,0,0}$ mit 43 Hz nur dicht oberhalb der hier überwiegenden Erregerfrequenz von $f = 39$ Hz, so daß Resonanz angenommen werden konnte. Diese Annahme wurde meßtechnisch bestätigt, denn über die x-Richtung des Raumes bildete sich eine stehende Welle aus. Entlang der Längswände (l_y) befinden sich Druckbäuche, und entlang der Symmetrieffläche in Längsrichtung (y) bildet sich ein Druckminimum aus. Der Pegelunterschied des 39 Hz-Tones zwischen Maximum und Minimum im Raum wurde hier mit bis zu 15 dB ermittelt. Geht man davon aus, daß der 39 Hz-Ton im wesentlichen über die vorhandenen Fensterscheiben von außen in den Raum übertragen wird, so errechnet sich aus dem Außenpegel von 83 dB und dem vor Ort an einem vergleichbaren Fenster erfaßten Dämmwert von $\Delta L = 23$ dB bei 39 Hz ein Innenpegel von ca. 60 dB. Dieser Wert liegt um 14 dB unter den meßtechnisch ermittelten Maximalwerten von 74 dB im Raum, so daß hier diese 14 dB als Resonanzeinfluß angesehen werden können.

Tabelle 1: Resonanzfrequenzen eines quaderförmigen Büroraumes mit den Abmessungen $l_x = 4$ m, $l_y = 5,8$ m u. $l_z = 3$ m

Frequenz f_{n_x, n_y, n_z}	n_x	n_y	n_z
29 Hz	0	1	0
43 Hz	1	0	0
52 Hz	1	1	0
57 Hz	0	0	1
59 Hz	0	2	0
64 Hz	0	1	1
71 Hz	1	0	1
72 Hz	1	2	0
77 Hz	1	1	1
81 Hz	0	2	1
85 Hz	2	0	0
87 Hz	0	3	0
90 Hz	2	1	0
92 Hz	1	2	1
97 Hz	1	3	0

2. Beispiel: Einwirkung eines tieffrequenten Webereigeräusches auf einen Wohnraum

Von einer mit 60 Schützenwebstühlen bestückten Weberei wird Körperschall über den Baugrund in die Nachbarschaft auf ein baulich nicht mit der Weberei verbundenes Wohnhaus übertragen. Das Haus befindet sich in 35 m Abstand vom flächenmäßigen Schwerpunkt der Webstühle. Der Körperschall regt über die Strukturen des Gebäudes in den einzelnen Räumen die Luft zu Schwingungen an und wird damit in Luftschall umgesetzt. In einem Raum des Hauses führt dieses Geräusch zu erheblichen Belästigungen; es ist hier nach subjektiver Wahrnehmung erheblich lauter als in allen übrigen Räumen des Wohnhauses. In diesem Wohnraum mit den Abmessungen $l_x = 6,65$ m, $l_y = 3,86$ m und $l_z = 2,86$ m ergab sich bei geschlossenen Türen und Fenstern an einer besonders lauten Stelle in etwa Raummitte das in Abbildung 5 wiedergegebene Terzspektrum. Man erkennt, daß sich das Geräusch im wesentlichen aus tieffrequenten Anteilen zusammensetzt und daß es durch Terzgipfel im Bereich 20 und 50 Hz geprägt wird. Diese Terzgipfel werden durch Einzeltöne im Bereich von etwa 24, 28, 42 u. 53 Hz bestimmt. Nach Gleichung 6 errechnen sich für diesen ebenfalls quaderförmigen Raum die niedrigsten vier Resonanzfrequenzen zu:

$$f_{1,0,0} = 26 \text{ Hz}; f_{0,1,0} = 44 \text{ Hz}; f_{1,1,0} = 51 \text{ Hz} \text{ und } f_{2,0,0} = 52 \text{ Hz}$$

Man erkennt, daß alle Resonanzfrequenzen nahezu mit den ermittelten Einzeltönen übereinstimmen, so daß auch in diesem Fall davon auszugehen ist, daß die relativ hohen Terzpegel auf Resonanzeinwirkung zurückzuführen sind. Vergleicht man diese Pegel mit denjenigen, die in den übrigen leiseren Räumen festgestellt wurden, und setzt etwa gleiche Erregung voraus, so ergeben sich Pegelunterschiede von 10 bis 15 dB. Auch in diesem, auf Körperschallerregung beruhenden Fall, kann somit von einer resonanzbedingten Erhöhung der Einzeltonpegel im Wohnraum von etwa 10 ... 15 dB ausgegangen werden.

3. Beispiel: Einwirkung eines Kompressorgeräusches auf zwei unmittelbar nebeneinanderliegende und baulich gleiche Wohnräume

Die Geräuschquelle ist ein elektrisch angetriebener doppelseitig arbeitender Kolbenkompressor mit einer Drehzahl von 990 U/min. Aus dieser Drehzahl und der Kolbenzahl 2 errechnet sich der Drehklang-Grundton zu $(990 : 60) \cdot 2 = 33 \text{ Hz}$, der sich deutlich aus dem Geräusch heraushebt. Die hier an drei unterschiedlichen Meßstellen ermittelten Terzspektren des Kompressorgeräusches sind in Abb. 13 wiedergegeben.

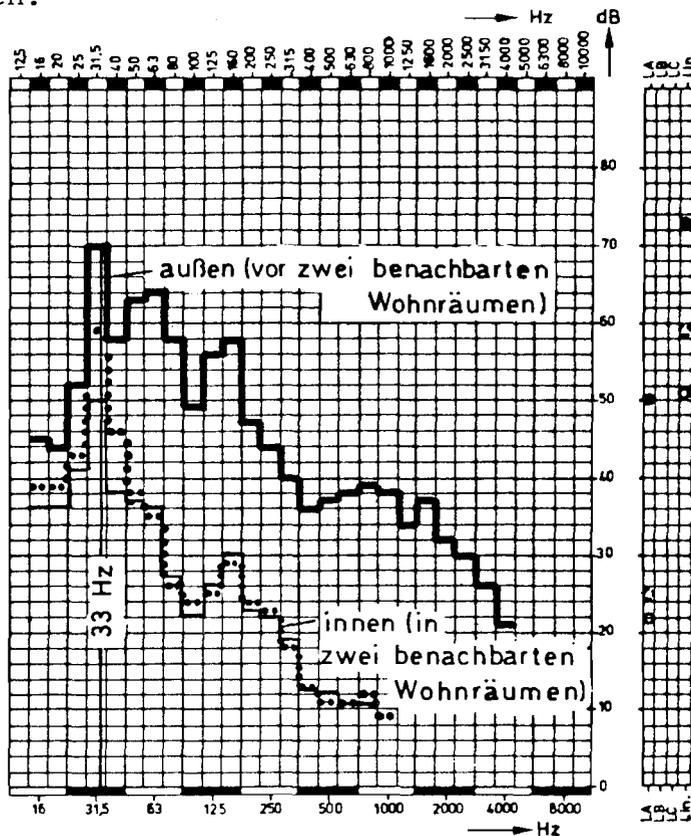


Abb. 13: Terzspektrn eines Kompressorgeräusches

Alle drei Spektren wurden in etwa 150 m Abstand von dem Kompressor aufgenommen, und zwar das mit der geschlossenen Linie vor den geöffneten Fenstern zweier benachbarter Wohnräume und die beiden gestrichelt und punktiert dargestellten Spektren innerhalb zweier praktisch vergleichbarer Wohnräume bei geschlossenen Türen und Fenstern.

Vergleicht man zunächst die außen und innen aufgenommenen Spektren, so wird die bereits besprochene Änderung der Frequenzzusammenset-

zung beim Übergang des Luftschalls von außen in ein Gebäude verdeutlicht. Die Innengeräusche werden im Gegensatz zu dem Außen-geräusch im wesentlichen nur noch durch den tieffrequenten Terzpegel bei 31,5 Hz bestimmt. Der tieffrequente Anteil, auf das Gesamtgeräusch bezogen, ist innen stärker vertreten als außen.

Vergleicht man weiterhin die beiden innen ermittelten Spektren miteinander, so zeigen sich praktisch nur Unterschiede im Bereich des Terzpegels bei 31,5 Hz. In dem einen Fall beträgt der Terzpegel 59 dB und im anderen Fall 50 dB. Dieser Unterschied von 9 dB ist nach subjektivem Eindruck darauf zurückzuführen, daß in dem lautereren Raum stehende Wellen auftreten und in dem leiseren Raum nicht und das, obwohl beide nebeneinanderliegenden Räume baulich gleich sind und auch praktisch gleichartig beschallt werden. Möglicherweise hat das in beiden Räumen voneinander abweichende Mobiliar das Resonanzverhalten unterschiedlich beeinflußt. Eine rechnerische Ermittlung der Resonanzfrequenzen war hier nach dem vereinfachten Modell nicht möglich, da es sich um stark von einem Quader abweichende Räume handelte.

Die drei aufgeführten Beispiele sind sicherlich als Sonderfälle anzusehen. Sie zeigen jedoch, daß tonhaltige tieffrequente Geräusche in solchen Fällen die Luft in geschlossenen Räumen zu Eigenschwingungen anregen und dadurch resonanzbedingte Pegelerhöhungen bis zu etwa 15 dB bewirken können.

3. Die akustische Wahrnehmung von Geräuschen und deren Bewertung

Hörschallereignisse mit einem bestimmten Reiz führen über unsere Ohren zu bestimmten Wahrnehmungen. Die Verknüpfung zwischen Schaller- eignissen und Hörereignissen ist bei den im täglichen Leben auftre- tenden Geräuschen sehr kompliziert und kann im allgemeinen nur ver- einfacht wiedergegeben werden. Hörversuche zur Bestimmung des Zu- sammenhangs wurden im größeren Rahmen nur mit Sinustönen durchge- führt. Der Bereich der hörbaren Töne reicht frequenzmäßig von etwa 20 Hz bis 20 kHz und pegelmäßig von der Hörschwelle bis zur Schmerz- schwelle. Die so begrenzte Fläche wird Hörfläche genannt; siehe dazu Abb. 14.

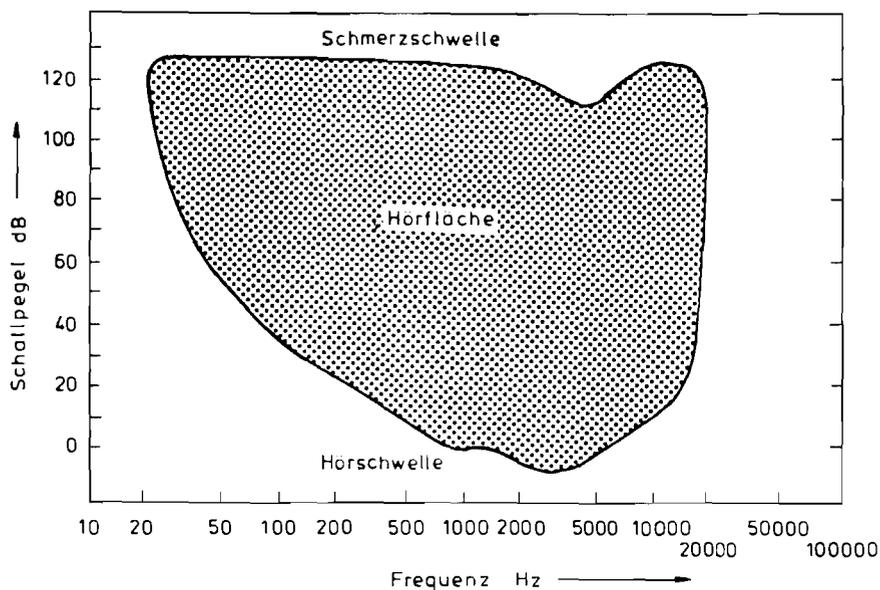


Abb. 14: Hörfläche

3.1. Hörschwelle

Die Hörschwellenkurve ist frequenzabhängig und bildet die Grenze zwischen den hörbaren und unhörbaren Schallpegeln. Im allgemeinen wird die Hörschwelle nur für den Gehörschallbereich angegeben, da nur in diesem Bereich vom Menschen Ereignisse hinsichtlich Tonhöhe und Lautstärke wahrgenommen werden können. Töne unterhalb etwa 20 Hz werden nicht mehr wahrgenommen. Es wurde schon darauf hingewiesen, daß mit dem menschlichen Ohr Luftschall mit Frequenzen unterhalb etwa 20 Hz, d.h. im Infraschallbereich, als Reiz ohne Frequenz-

zuordnung wahrgenommen wird, soweit die Hörschwelle nach Abb. 1 überschritten wird. Infraschallereignisse führen im Nachbarschaftsbereich nur selten zur Belästigung, denn die zur Überschreitung der Hörschwelle notwendigen Pegel werden hier meist nicht erreicht. Mit den Ausführungen zum Infraschallbereich soll hier lediglich herausgestellt werden, daß auch dieser Bereich in Sonderfällen beachtet werden muß und daß nicht grundsätzlich davon ausgegangen werden kann, Infraschall sei nicht hörbar.

Die in Normen und Veröffentlichungen wiedergegebenen Hörschwellen sind jeweils aus einer Vielzahl von Untersuchungen abgeleitet worden und stellen Mittelungskurven dar. In den zuständigen Regelwerken wie DIN 45630 [19] und auch ISO R 226 fehlt eine Angabe über die vorgenommene Art der Mittelung und auch über die Streubreite. Aus Veröffentlichungen wissenschaftlicher Untersuchungen, z.B. von ZWICKER und FELDTKELLER [20] oder WAGNER, SZADKOWSKI und LEHNERT [21] sind Angaben über den Streubereich bekannt. Er beträgt in dem hier interessierenden tieffrequenten Bereich nach [20] etwa 20 dB für 80 % von über 100 Versuchspersonen, siehe Abb. 15. Danach können zehn von hundert Personen einen tieffrequenten Ton auch dann gerade noch hören, wenn dessen Pegel um etwa 10 dB unterhalb der Hörschwellenkurve nach [19] liegt.

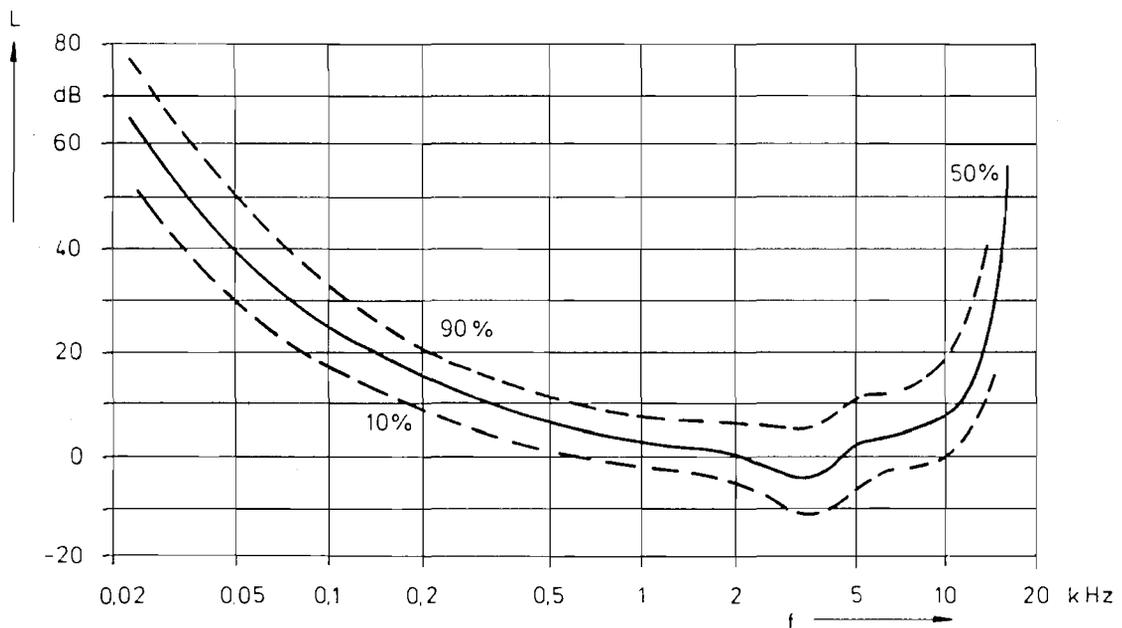


Abb. 15: Streubereich der Hörschwellen von jungen Versuchspersonen mit gesundem Gehör [20]

Alle ermittelten Hörschwellenkurven zeigen übereinstimmend, daß das menschliche Ohr für tieffrequente Töne im allgemeinen wesentlich unempfindlicher ist als für höherfrequente Töne.

ZWICKER und FELDTKELLER [20] haben ergänzend festgestellt, daß sich die Hörschwelle im tieffrequenten Bereich bei gesunden Menschen mit zunehmendem Alter kaum ändert und somit praktisch für alle Altersgruppen gültig ist. Für den höherfrequenten Bereich trifft dies nicht zu. So wurden beispielsweise bei 60jährigen im Bereich von etwa 10 kHz um etwa 20 dB höhere Schwellwerte festgestellt als bei 20jährigen, siehe Abb. 16. Dies dürfte ein Grund mit dafür sein, daß insbesondere ältere Menschen über tieffrequente Geräuscheinwirkungen klagen. Bei ihnen entfällt meist der Effekt, daß die tieffrequenten Anteile subjektiv durch höherfrequente Anteile verdeckt werden.

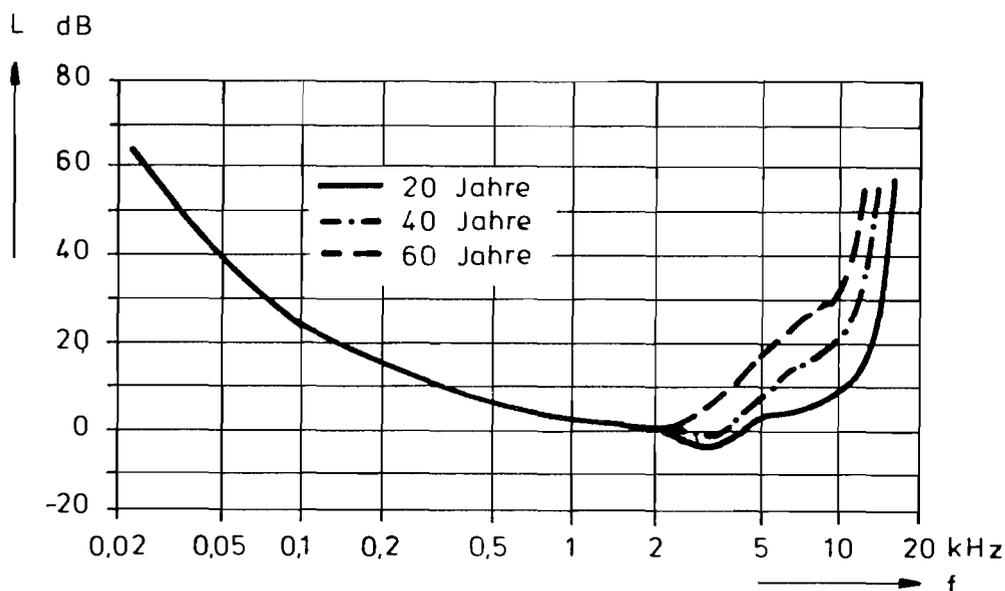


Abb. 16: Verschlechterung der Hörschwelle bei hohen Frequenzen mit zunehmendem Alter

3.2. Lautstärkepegel und A-bewerteter Schallpegel von Geräuschen

Die vom Menschen empfundene Lautstärke ist nur für sinustönförmige Schallereignisse einfach zu ermitteln. Dabei wird auf die in Abb. 17 dargestellten Kurven gleicher Lautstärke zurückgegriffen, die aus Hörversuchen mit Sinustönen ermittelt wurden [19].

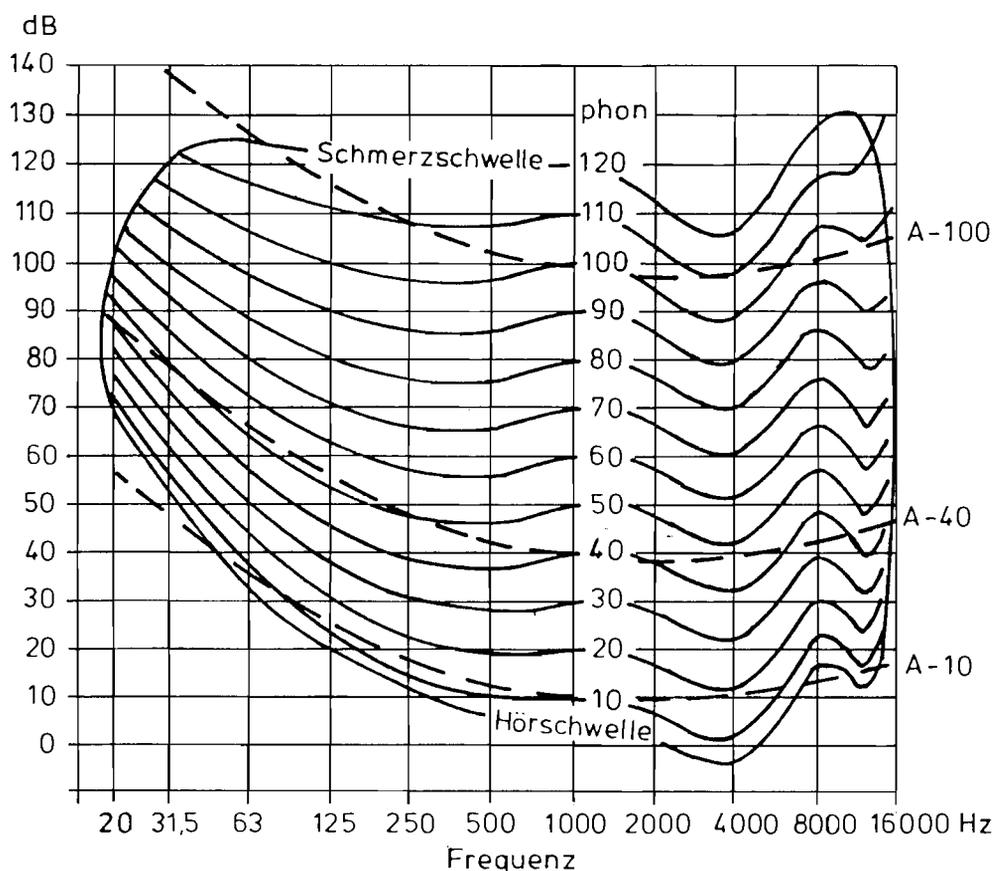


Abb. 17: Kurven gleicher Lautstärke [19] und daraus abgeleitete Kurven A-10, A-40 und A-100

Die einzelnen Kurven gleicher Lautstärke sind gekennzeichnet durch ihren Pegelwert bei 1 kHz; hier sind Lautstärkepegel in phon und Schallpegel in dB gleich. So bewirkt ein 1-kHz-Ton mit einem Schallpegel von 40 dB eine Lautstärke von 40 phon und ist beispielsweise einem 63-Hz-Ton von ca. 60 dB lautstärkemäßig gleichzusetzen. Für die in der Praxis auftretenden Geräusche unterschiedlicher Art gilt diese Verknüpfung jedoch nicht, weil die Kurven gleicher Lautstärke nach Abb. 17 nicht allgemeingültig sind, sondern nur für die untersuchten Sinustöne gelten. Die gehörrichtige Bestimmung der Lautstärke für die üblichen Geräusche ist deshalb nur mit aufwendigen Verfahren durchführbar, die sich bislang in den Regelwerken nicht durchsetzen konnten. Man benutzt zur Beurteilung von Geräuschen deshalb allgemein ein Näherungsverfahren, bei dem die Lautstärke durch den A-bewerteten Schallpegel L_A ersetzt wird. Aus den pegel- und frequenzabhängigen Kurven gleicher Lautstärke für Sinustöne wurde dazu stark vereinfachend eine pegelunabhängige

A-Kurve abgeleitet, die z. Zt. zur Beurteilung aller Geräusche herangezogen wird. Der festgelegte Verlauf dieser Kurve ist in Abb. 17 als gestrichelter Kurvenzug beispielhaft einigen der wahren Kurven gleicher Lautstärke gegenübergestellt. Man erkennt, daß die einander entsprechenden Kurven in dem hier interessierenden tief-frequenten Bereich mit zunehmender Pegelhöhe immer stärker voneinander abweichen. Diese Unterschiede führen dazu, daß selbst die von reinen Tönen ausgehende Störwirkung durch die A-Bewertung nicht immer übereinstimmend mit den Ergebnissen aus den Hörversuchen beschrieben wird.

3.2.1. Abweichungen in der Beurteilung von Sinustönen nach der A-Bewertung und den Hörversuchen

Zur Veranschaulichung möglicher Abweichungen bei der Beurteilung von Sinustönen nach der A-Bewertung und aus den Hörversuchen dient Abb. 18. Wiedergegeben sind hier aus den Hörversuchen die beiden Kurven gleicher Lautstärke von 40 und 50 phon und die bei 1 kHz durch 40 dB gehende Kurve A-40. Es ist ein im Nachbarschaftsschutz häufig vorkommender Pegelbereich. Nach den Festlegungen gilt:

Sinustöne mit Pegeln auf den ausgezogenen Kurvenzügen bewirken Lautstärken von 40 bzw. 50 phon und Sinustöne mit Pegeln auf dem gestrichelten Kurvenzug bewirken A-Werte von 40 dB(A).

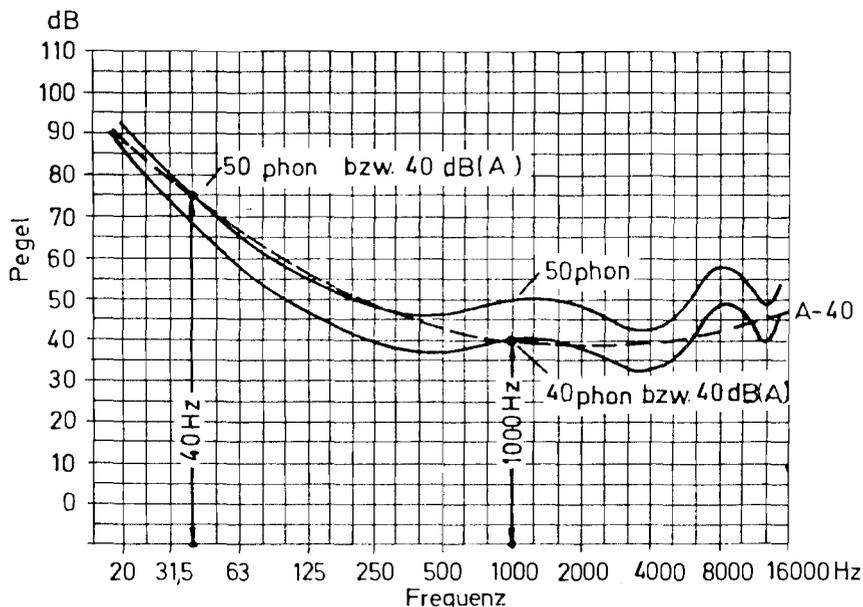


Abb. 18: Beurteilung von Tönen nach der A-Kurve und den Kurven gleicher Lautstärke

Ein Sinuston von 1000 Hz mit einem unbewerteten Schallpegel von 40 dB führt vereinbarungsgemäß zu einer Lautstärke von 40 phon und auch zu einem bewerteten Schallpegel von 40 dB(A). Der bewertete Schallpegel und die gehörrichtige Lautstärke sind somit für dieses Schallereignis zahlenmäßig gleich.

Betrachtet man nun anstelle des 1 kHz-Tones einen tieffrequenten Sinuston von beispielsweise 40 Hz, so wird bei einem unbewerteten Schallpegel von 75 dB wiederum ein bewerteter Schallpegel von 40 dB(A) erzeugt. Diesem Wert von 40 dB(A) steht aber jetzt im tieffrequenten Bereich eine Lautstärke von 50 phon gegenüber. Nach den Hörversuchen ist somit das tieffrequente Ereignis 10 dB lauter als der 1 kHz-Ton, während nach der A-Bewertung beide Töne gleich laut eingestuft werden. Daraus folgt:

Im tieffrequenten Bereich sind die L_A -Werte von Sinustönen im hier ausgewählten Pegelbereich um etwa 10 dB niedriger als nach der gehörrichtigen Lautstärkeermittlung.

Zu diesem Ergebnis kommt man auch, wenn man die A-bewerteten Gesamtpegel eines tief- und hochfrequenten Geräusches mit den Lautstärkewerten vergleicht, die sich nach dem anschließend erläuterten "ZWICKER-Verfahren" [22] für diese Geräusche errechnen.

3.2.2. Abweichungen in der Beurteilung von Geräuschen nach der A-Bewertung und dem ZWICKER-Verfahren

1. Allgemeines zum ZWICKER-Verfahren

Dieses Verfahren beruht auf der Feststellung, daß das Ohr das angebotene Spektrum eines Geräusches in einzelne Bereiche beschränkter Bandbreite zerlegt, diese einzeln hinsichtlich der Lautheitsempfindung bewertet und dann diese Empfindungsanteile summiert. Die Frage nach der Bandbreite dieser Frequenzbereiche ist u.a. von ZWICKER [20] untersucht und beantwortet worden. Es wurde dazu die Lautstärke von Bandpaßrauschen unterschiedlicher Bandbreite bei jeweils gleichem Effektivwert des Schalldrucks nach dem Vergleichsprinzip subjektiv ermittelt. Das Ergebnis der Untersuchung war, daß die wahrgenommene Lautstärke bis zu einer je nach der gewählten Mittenfre-

quenz verschiedenen Bandbreite konstant blieb und bei größer werdender Bandbreite trotz gleichbleibender Energie anwuchs. Die Bandbreite, bis zu der die Lautstärke konstant bleibt, wird Frequenzgruppenbreite genannt. Der gesamte Gehörschallbereich umfaßt 24 solcher Gruppen. Unterhalb 500 Hz ist die Breite der Gruppen mit etwa 100 Hz konstant und oberhalb 500 Hz entspricht sie etwa der konstanten relativen Breite einer Terz. Die Flankensteilheit der einzelnen Gruppen und damit die Abgrenzung voneinander bei unterschiedlichen Pegelhöhen wird durch die Mithörschwellen bestimmt, die ebenfalls durch Hörversuche ermittelt wurden. Dabei ist innerhalb der Gruppen das gleichzeitige Hören frequenzbenachbarter Signale, beispielsweise eines schmalbandigen Rauschens und eines im Pegel und in der Frequenz variierten Tones, untersucht worden. Ein Einzelton bestimmter Frequenz wird hierbei bei geringem Pegel verdeckt und erst ab einem bestimmten Mindestpegel hörbar. Ändert man die Frequenz des verdeckten Tones über den Bereich des Rauschens hinaus, so wird er bei einer bestimmten Frequenz und einem bestimmten Pegel wieder gerade hörbar. Die Verbindung der so ermittelten Wertepaare stellt eine Kurve dar, die als Mithörschwelle bezeichnet wird. Sie fällt nach tiefen Frequenzen steil und nach hohen Frequenzen weniger steil ab. Außerdem ist der Abfall nach hohen Frequenzen hin vom Pegel des Rauschens abhängig; siehe dazu Abb. 19.

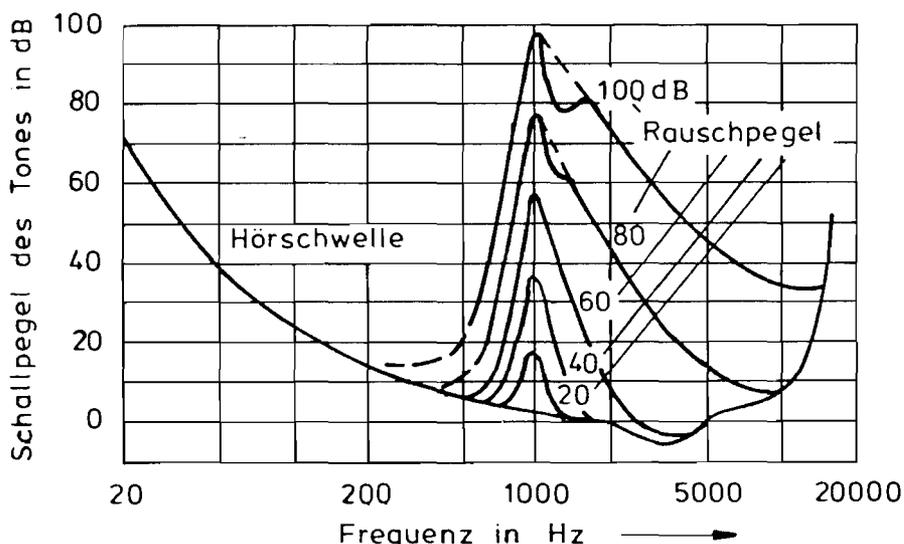


Abb. 19: Mithörschwellen eines Tones bei Verdeckung durch Schmalbandrauschen [20]

Abbildung 19 zeigt die Mithörschwellen von Tönen, die durch Schmalbandrauschen mit der Mittenfrequenz 1 kHz, der Bandbreite 160 Hz und den Schallpegeln 20, 40, 60, 80 und 100 dB verdeckt wurden. Übereinstimmend erreichen alle Mithörschwellen ihr Maximum bei der Mittenfrequenz 1 kHz des Rauschens und liegen hier jeweils etwa 4 dB unter dem Rauschpegel. Unser Gehör ist somit in der Lage, einen unterhalb des Rauschens liegenden Ton in einem bestimmten Bereich schon zu hören. Diese Eigenschaft ist bei hohen und tiefen Frequenzen im Bereich des Maximums annähernd gleich. Dagegen ändert sich nach tiefen Frequenzen hin die Form der Mithörschwelle erheblich; sie wird merklich breiter.

Das ZWICKER-Verfahren zur Berechnung des Lautstärkepegels [22] geht von den Schallpegeln in den einzelnen Frequenzgruppen aus und addiert unter Beachtung der Mithörschwellen die Teil-Lautheiten. Die Ermittlung wird nach ebenen und diffusen Schallfeldern unterschieden. Die Vorgehensweise in der Praxis geschieht folgendermaßen:

- a) Die Schallpegel des Geräusches werden in Terzschritten ermittelt.
- b) Die Terzpegel im unteren Frequenzbereich bis 250 Hz werden nach einem vorgegebenen Schema zu drei Frequenzgruppenpegeln zusammengefaßt.
- c) Die drei Frequenzgruppenpegel und die Terzpegel ab 315 Hz werden in besonders dafür vorgesehene Kurvenblätter eingetragen und nach besonderer Vorschrift miteinander zu einem zusammenhängenden Kurvenzug verbunden.
- d) Die Fläche unter dem Kurvenzug wird in ein flächengleiches Rechteck umgewandelt, das die Breite des Diagramms zur Grundlinie hat.
- e) Die Höhe des Rechtecks kennzeichnet auf dem Ordinatenmaßstab den gesuchten Lautstärkepegel.

Der Ablauf wird an dem nachfolgenden Beispiel veranschaulicht. Zahlentafel 2 enthält die gemessenen Terzpegel eines Getriebegeräusches.

Terz-Mitten-Frequenz (Hz)	Terz-pegel (dB)	Korrektur besonders hoher Pegel unterhalb 63 Hz (dB)	Frequenz- gruppenpegel (dB)
20	62	- 8 = 72	79
25	64		
31,5	66		
40	68		
50	80		
63	72		
80	75		
100	77		82,5
125	79		
160	77		
200	78		82
250	80		
315	77		77
400	80		80
500	75		75
630	81		81
800	89		89
1000	78		78
1250	77		77
1600	80		80
2000	72		72
2500	75		75
3150	71		71
4000	70		70
5000	61		61
6300	59		59
8000	57		57
10000	52		52

Die Terzpegel im Bereich 20 ... 80 Hz, 100 ... 160 Hz und 200 ... 250 Hz werden jeweils zum Frequenzgruppenpegel energetisch aufaddiert. Hierbei ist zu beachten, daß bei besonders hohen Anteilen unterhalb 63 Hz diese hohen Pegel vor dem Addieren nach einem gesonderten Verfahren zu mindern sind. Dies ist hier bei dem zur Mittenfrequenz 50 Hz gehörenden Terzpegel von 80 dB notwendig. Die notwendige Minderung ist aus den in Abb. 17 wiedergegebenen Kurven gleicher Lautstärke abzulesen, und zwar ist festzustellen, welcher Schallpegel bei 80 Hz zu der gleichen Lautstärke führt wie der zu betrachtende herausragende Terzpegel bei der zugehörigen Mittenfrequenz. Im vorliegenden Beispiel führt ein Pegel von 80 dB bei 50 Hz zu einer Lautstärke von 63 phon, und diese Lautstärke wird bei 80 Hz durch einen Schallpegel von 72 dB erzeugt. Infolgedessen ist hier der hohe Pegel von 80 dB um 8 dB auf 72 dB herabzusetzen und erst dann bei der Addition zu berücksichtigen.

Das vorliegende Spektrum wurde im diffusen Feld ermittelt, so daß ein Kurvenblatt für dieses Schallfeld und entsprechend den vorhandenen Pegeln mit einem Eintragungsbereich bis 90 dB auszuwählen ist. Abb. 20 zeigt ein derartiges Kurvenblatt, in das die drei unteren Gruppenpegel und die Terzpegel ab 315 Hz als waagerechte Balken eingetragen sind. Die Balken werden, soweit sie mit zunehmender Frequenz ansteigen, durch senkrechte Linien, und soweit sie mit zunehmender Frequenz abfallen, durch Parallelen zu den gestrichelt vorgegebenen Mithörschwellen miteinander verbunden. Ausgangspunkt dieser Verbindungslinien ist immer der Schnittpunkt zwischen dem jeweiligen Pegel und der zugehörigen oberen Terzgrenzfrequenz. Dabei kann es vorkommen, wie hier im Terzbereich 1 kHz, daß einzelne Pegel nicht mit in den Kurvenzug eingebunden werden, weil die Mithörschwellen sie nicht berühren. Nach dieser Zeichenarbeit wird die Diagrammfläche unter dem Kurvenzug errechnet - hier zu 72 cm^2 - und in eine Rechteckfläche über der vorgegebenen Diagrammbreite von 15,3 cm umgewandelt. Daraus ergibt sich die Höhe des Rechtecks von ca. 4,7 cm; siehe dazu das gestrichelt eingetragene Rechteck in Abb. 20.

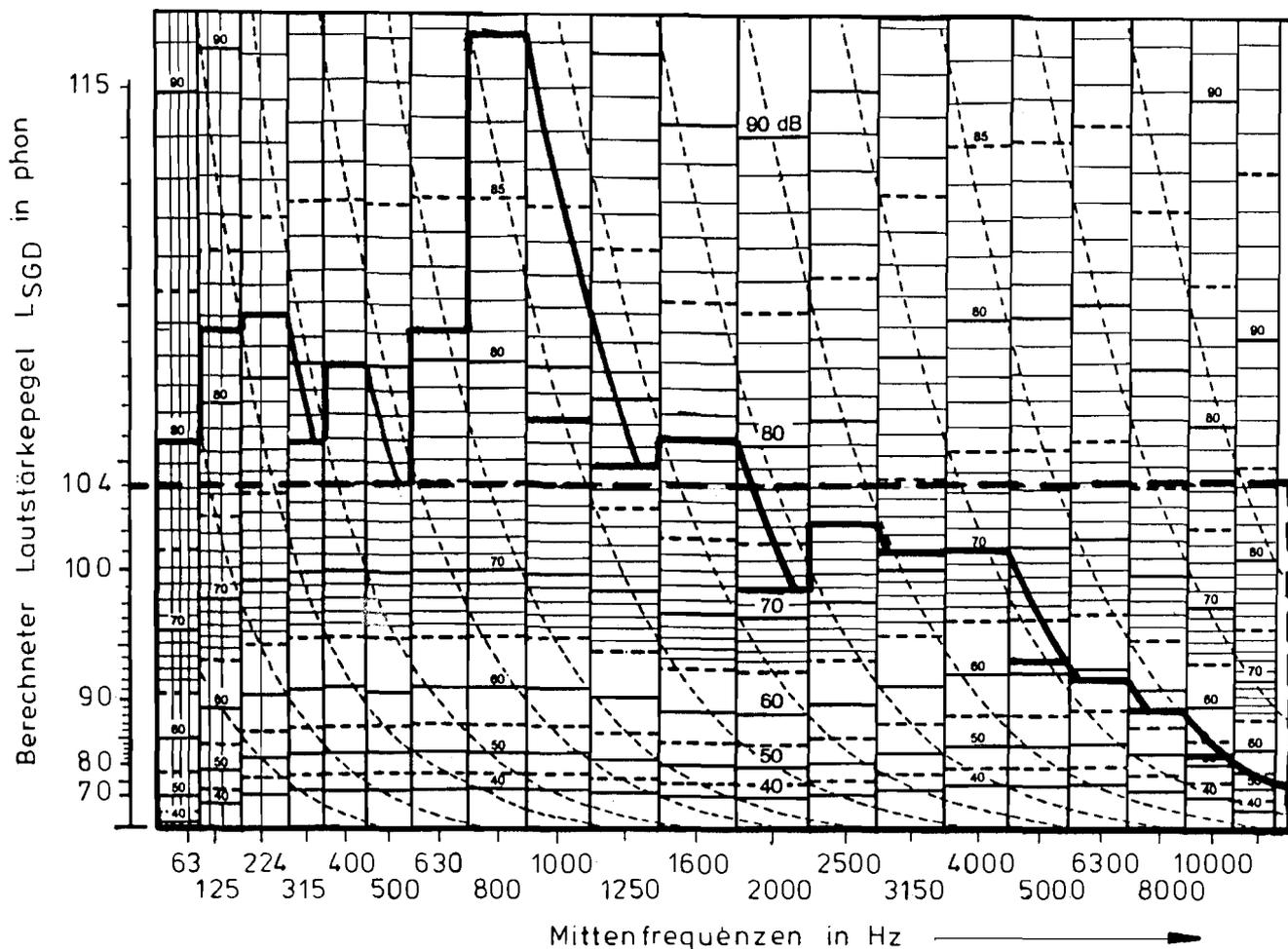


Abb. 20: Anwendung des ZWICKER-Verfahrens

Durch die Höhe des Rechtecks wird auf der Ordinate des Diagramms der Lautstärkepegel des hier beispielhaft ausgewählten Geräusches zu $L_{SGD} = 104$ phon festgelegt. Dabei steht der Index S für Lautstärke, G für Frequenzgruppe und D für diffuses Feld; bei frontalem Schalleinfall würde D durch F ersetzt.

Bei dem hier ausgewählten Geräusch mit einem ausgeprägten tieffrequenten Terzgipfel bei 50 Hz und einem weiteren bei 800 Hz steht dem berechneten Lautstärkepegel von 104 phon ein A-bewerteter Gesamtschallpegel von 91 dB(A) gegenüber. Unter der Annahme, daß mit dem Zwicker-Verfahren die Lautstärke annähernd richtig bestimmt wird, liegt also der nach den Regelwerken [1, 2] für die Beurteilung kennzeichnende A-Wert für dieses Geräusch um 13 dB zu niedrig. Auch wenn der nach den Regelwerken für einzeltonhaltige

Geräusche anzusetzende "Einzeltonzuschlag" von bis zu 6 dB hier dem A-Wert zugefügt wird, liegt dieser Beurteilungswert immer noch um 7 dB unter dem errechneten Lautstärkewert. Im folgenden Beispiel wird aufgezeigt, daß der Unterschied zwischen der Lautstärke und dem A-Wert insbesondere dann auftritt, wenn tieffrequente Anteile das Geräusch bestimmen.

Das in Abb. 21 dick ausgezogene Spektrum beschreibt das Geräusch eines Schnittholztrockners. Es wurde im Freien aufgenommen und wird im wesentlichen durch einen ausgeprägten Terz Gipfel im tieffrequenten Bereich bestimmt.

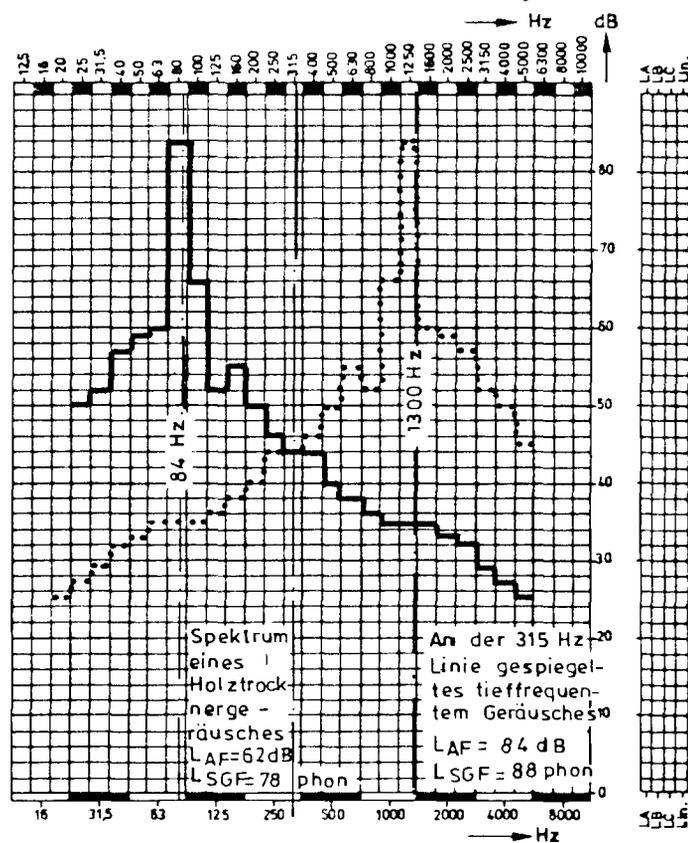


Abb. 21: Gegenüberstellung der A- und Lautstärke-Werte für ein tieffrequentes und ein höherfrequentes Geräusch

Aus diesem Spektrum errechnet sich übereinstimmend mit der Messung ein A-bewerteter Gesamtschallpegel von $L_{AF} = 62$ dB. Nach dem ZWICKER-Verfahren ergibt sich je nach Wahl der Schallfeldbedingung ein Lautstärkepegel von $L_{SGD} = 76$ phon bzw. von $L_{SGF} = 78$ phon, wovon hier im Freien der Wert für ein ebenes Schallfeld zutreffend sein dürfte. Dieser Lautstärkepegel übersteigt den A-Pegel um 16 dB. Auch bei Berücksichtigung des "Einzeltonzuschlages" von 6 dB verbleibt eine Differenz zwischen dem üblichen Beurteilungswert und dem Lautstärkewert von 10 dB. Führt man einen derartigen Vergleich bei einem höherfrequenten Geräusch durch, so ergeben sich erheblich geringere Unterschiede. Zur Veranschaulichung ist dazu in Abbildung 21 ein weiteres Spektrum eingetragen; es ist keinem konkreten Fall zuzuordnen, sondern ergibt sich durch Spiegelung des bislang besprochenen Terzspektrums an der Ordinate durch 315 Hz und beschreibt ein höherfrequentes Geräusch mit ausgeprägtem Einzelton. Für dieses Geräusch errechnet sich ein Gesamtpegel von 84 dB(A) und nach dem ZWICKER-Verfahren unabhängig vom Schalleinfall ein Lautstärkewert von 88 phon. Bei diesem höherfrequenten Geräusch übersteigt somit der Lautstärkepegel den A-Wert nur um 4 dB, im Gegensatz zu 15 dB bei dem tieffrequenten Geräusch. Man erkennt daraus, daß der Unterschied zwischen dem A-bewerteten Gesamtpegel und dem nach dem ZWICKER-Verfahren errechneten Lautstärkewert bei dem ausgewählten tieffrequenten Geräusch um ca. 10 dB größer ist als bei dem gegenübergestellten höherfrequenten Geräusch. Der an diesem Beispiel aufgezeigte Pegelunterschied von 10 dB zwischen Geräuschen unterschiedlicher Frequenzzusammensetzung stimmt zahlenmäßig genau mit der Pegeldifferenz überein, die sich bei dem an Abb. 18 veranschaulichten Vergleich zwischen Tönen unterschiedlicher Frequenz ergab. Es kann somit davon ausgegangen werden, daß tieffrequente Geräusche durch die A-Bewertung in vielen Fällen um 10 dB zu niedrig gegenüber der gehörrichtigeren Lautstärkeermittlung angezeigt werden.

4. Gesamt - Auswirkungen der üblichen Meß - und Beurteilungsverfahren auf die Bewertung tieffrequenter Geräusche

Die vorstehenden Ausführungen haben gezeigt, daß sich tieffrequente Geräusche in wesentlichen Teilbereichen durchaus anders verhalten als die übrigen höherfrequenten. So werden tieffrequente Geräusche auf dem Übertragungsweg nur relativ schwach gedämpft und gedämmt, innerhalb von Räumen können sie leichter durch Resonanzeinflüsse verstärkt werden, und auch bei der Beurteilung werden sie mit den üblichen Verfahren hinsichtlich der tatsächlichen Störwirkung niedriger eingestuft als vergleichsweise hochfrequente Geräusche gleichen A-Pegels.

Nachstehend wird aufgezeigt, wie groß in Einzelfällen die Bewertung frequenzmäßig unterschiedlicher Geräusche voneinander abweichen kann, wenn sie mit den üblichen Beurteilungsverfahren abgehandelt werden.

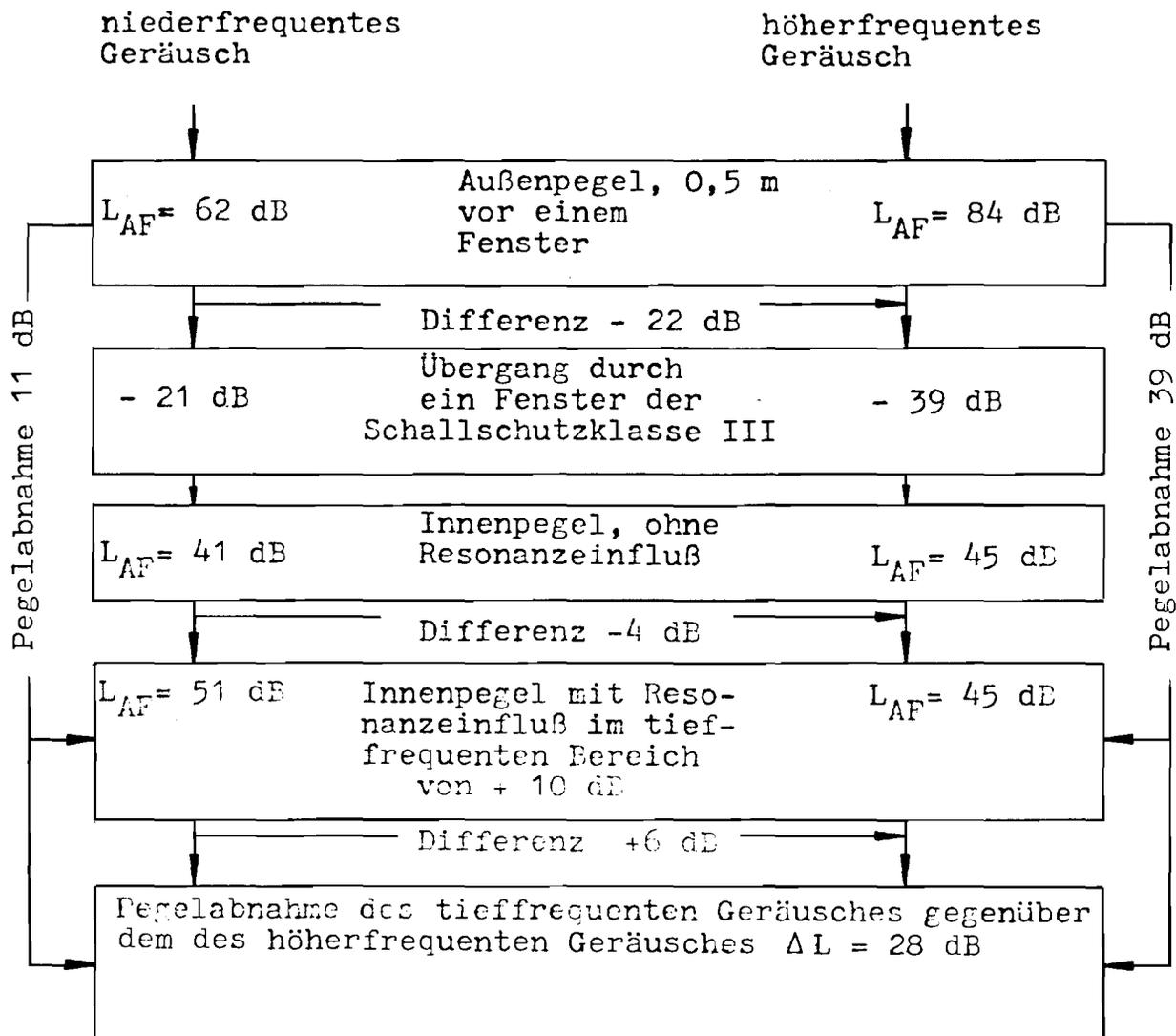
Dabei muß unterschieden werden zwischen Geräuschen, die auf dem Luftschallweg und auf dem Körperschallweg übertragen werden. Obwohl in beiden Fällen eine Beurteilung der Innensituation angestrebt wird, sehen die Regelwerke je nach Übertragungsart Außen- oder Innenmessungen vor. Bei Körperschallübertragung wird innerhalb des am stärksten betroffenen Raumes an der lautesten Stelle gemessen, d.h. die Erhebungen beziehen sich auf den Bereich, in dem das Geräusch auch auf den Menschen einwirkt. Hier werden somit die Übertragungs- und Raumresonanzeinflüsse mit in die Messung einbezogen. Anders ist es bei Geräuschen, die über die Luft in die Nachbarschaft übertragen werden. Die Innensituation wird hierbei im allgemeinen aus Meßwerten abgeleitet, die außen in 0,5 m Abstand vor den geöffneten Fenstern des am stärksten betroffenen Raumes zu ermitteln sind. Durch die Wahl dieses Außenpunktes soll verhindert werden, daß die Meßwerte durch unterschiedliche Schallabsorption im Raum und durch unterschiedliche Schalldämmung der Gebäudeaußenhaut beeinflußt werden. Diese Begründung ist immer dann zutreffend, wenn annähernd gleichartige Geräusche auf unterschiedliche Räume einwirken; sie ist jedoch nicht einsichtig, wenn beispielsweise Geräu-

sche unterschiedlicher Frequenzzusammensetzung auf einen bestimmten Raum einwirken. Hier können sich die eingangs beschriebenen frequenzabhängigen Dämmungen und Resonanzeinflüsse zwischen außen und innen voll auswirken, so daß zumindest bei tonhaltigen tieffrequenten Geräuschen die Innensituation aus dem Außenwert ungünstiger abgeleitet wird als bei den übrigen Geräuschen.

Es ist davon auszugehen, daß tieffrequente Geräusche gegenüber höherfrequenten Anteilen durch unterschiedliche Dämmwerte beim Übergang von außen nach innen bis zu etwa 20 dB und in Einzelfällen durch Resonanzeinflüsse im Raum noch um weitere 10 ... 15 dB, d.h. insgesamt um ca. 35 dB, angehoben werden. Daß sich diese Differenz in Sonderfällen auch weitgehend auf den Gesamtpegel L_A auswirken kann, zeigt das folgende Beispiel.

Dazu nehmen wir an, die beiden Geräusche, deren Spektren in Abb. 21 wiedergegeben sind, wirken einzeln zu unterschiedlichen Zeiten außen vor dem Fenster eines Wohnraumes ein. Das tieffrequente Geräusch liegt hier nach der A-Bewertung um 22 dB niedriger als das hochfrequente. Das vorhandene Wohnraumfenster möge der Schallschutzklasse III angehören und damit im Bereich um 1 kHz einen Dämmwert von 40 dB haben und bei 100 Hz noch um 20 dB dämmen. Der A-bewertete Gesamtpegel des tieffrequenten Geräusches würde damit durch das Fenster rechnerisch um 21 dB herabgesetzt und der des höherfrequenten um 39 dB. Der Pegelunterschied außen von 22 dB wird durch das Fenster somit auf 4 dB gemindert. Geht man nun weiter davon aus, daß das Raumvolumen im Bereich des tieffrequenten Einzeltones von 84 Hz zu Resonanzschwingungen angeregt und dadurch der Pegel des Einzeltones im Druckbauch um ca. 10 dB angehoben würde, so steigt der A-bewertete Gesamtpegel des tieffrequenten Geräusches hier auch um 10 dB an. Unter diesen Randbedingungen errechnen sich im Raum für das tieffrequente Geräusch A-Pegel bis zu 51 dB und für das hochfrequente Geräusch A-Pegel von 45 dB. Das tieffrequente Geräusch liegt somit innerhalb der Wohnung nicht mehr unter dem A-Pegel des hochfrequenten Geräusches, sondern um 6 dB darüber. Relativ zum Pegel des höherfrequenten Geräusches hat sich damit der Pegel des tieffrequenten Geräusches zwischen innen und außen um 28 dB erhöht. Daraus ist ersichtlich, wie wenig sinnvoll die Beurteilung der Innensituation durch den außen gemessenen A-Wert erfolgen kann.

In dem folgenden Ablaufschema wird der beschriebene Weg des Geräusches von außen nach innen verdeutlicht.



Wird bei dem Vergleich zwischen dem tief- und hochfrequenten Geräusch nun auch noch der Einfluß der nicht ohrgerechten A-Bewertung einbezogen, so erhöht sich der gefundene Unterschied weiter um $\approx 10 \text{ dB}$ auf 38 dB .

In Sonderfällen kann somit davon ausgegangen werden, daß tieffrequente Geräusche, die auf dem Luftschallweg von der Quelle in die Nachbarschaft gelangen und nach den Regelwerken außen vor den Wohnungsfenstern zu messen sind, im Vergleich zu höherfrequenten Geräuschen, auf den Innenbereich bezogen, bis zu etwa 40 dB zu niedrig angegeben werden.

Bei tieffrequenten Geräuschen, die auf dem Körperschallweg in die Wohnungen gelangen und nach den Regelwerken innerhalb der Wohnungen an den lautesten Stellen zu messen sind, ist die von hochfrequenten Geräuschen abweichende Beurteilung erheblich geringer. Sie sind hier allein auf die nicht ohrgerechte Bewertung durch die A-Kurve zurückzuführen und betragen etwa bis zu 10 dB.

5. V o r s c h l a g z u r B e u r t e i l u n g t i e f - f r e q u e n t e r G e r ä u s c h e

Die vorstehenden Ausführungen haben gezeigt, warum sich in vielen Fällen Betroffene insbesondere über die Einwirkung tieffrequenter Geräusche auch dann beklagen, wenn nach den Regelwerken die gültigen Richtwerte eingehalten sind. Durch die derzeitigen Beurteilungsmethoden [1, 2] werden tieffrequente Geräusche z.T. erheblich geringer eingestuft als höherfrequente Geräusche gleicher Lautstärke. Bei den in der Landesanstalt für Immissionsschutz des Landes NW bearbeiteten Beschwerdefällen, in denen die Einwirkung tieffrequenter Geräusche auf die Nachbarschaft ausschlaggebend war, wurde deshalb fast immer von den üblichen Beurteilungsverfahren abgewichen. Meist hatten die zuständigen Behörden schon vor der Einschaltung der hiesigen Dienststelle festgestellt, daß im Sinne der Regelwerke zwar keine Richtwertüberschreitung vorliegt, aus subjektiver Sicht aber eine erhebliche Belästigung nicht auszuschließen sei. In derartig gelagerten Fällen geht die Landesanstalt folgendermaßen vor:

1. Die meßtechnischen Erhebungen werden unabhängig davon, ob das Geräusch auf dem Körper- oder Luftschallweg in die Nachbarschaft übertragen wird, auf die Innensituation abgestimmt. Es wird nicht außen vor dem geöffneten Fenster gemessen, sondern im Raum selbst bei geschlossenen Türen und Fenstern an der lautesten Stelle. Dadurch werden die auf dem Übertragungsweg von außen nach innen auftretenden Verzerrungen und auch mögliche Resonanzeinflüsse im Rauminnern mit in die Messungen einbezogen.
2. In Übereinstimmung mit den bestehenden Beurteilungsverfahren für diejenigen Geräusche, die auf dem Körperschallweg übertragen werden, wird bei der Beurteilung tieffrequenter Geräusche auf die Unterteilung nach Wohngebieten verzichtet, dafür wird das Hintergrundgeräusch mit in die Beurteilung einbezogen.
3. Auf die A-Bewertung und den Vergleich mit vorgegebenen Richtwerten wird verzichtet. Stattdessen wird die "Auffälligkeit" des jeweiligen Innengeräusches als Beurteilungsgrundlage herangezogen.

gen. Die Auffälligkeit als zusätzliches Beurteilungskriterium ist in der Einführung der VDI 2058 [2] beschrieben. Hier wird ausgeführt:

"Die Auffälligkeit eines Geräusches trägt nach aller Erfahrung wesentlich zur Wirkung in der Nachbarschaft bei". In Sonderfällen, oder wenn die Zuordnung zu den Richtwerten unklar ist, kann die Auffälligkeit daher als zusätzliches Kriterium dienen. Ein Geräusch im Sinne von [2] ist auffällig, wenn:

- a) das Hintergrundgeräusch insgesamt oder in einzelnen Frequenzbereichen um 10 dB oder mehr von dem Störgeräusch überschritten wird.
- b) das Störgeräusch in Zeiten der Ruhe und Erholung auftritt.
- c) das Störgeräusch sich durch besondere Ton- oder Impulshaltigkeit aus dem gleichmäßigen Grundgeräusch der Anlage heraushebt.
- d) das Störgeräusch in seiner Art in der betroffenen Umgebung fremd oder neu ist.

Die hier interessierenden tieffrequenten Geräusche sind fast immer tonhaltig, heben sich insbesondere im Bereich der Einzeltöne stark von dem jeweiligen Hintergrundgeräusch ab, sind meist für die Umgebung fremd und daher nach [2] durchaus als auffällig zu bezeichnen. Zahlenmäßig läßt sich die so beschriebene Auffälligkeit beispielsweise durch die Differenz zwischen den aus dem störenden Geräusch herausragenden tieffrequenten Terzpegeln und den entsprechenden Terzpegeln des Hintergrundgeräusches angeben. Dieser Unterschied sollte zur Vermeidung der Auffälligkeit entsprechend der vorangestellten Definition kleiner als 10 dB sein, soweit der jeweilige Terzpegel des Hintergrundgeräusches die Hörschwelle des Menschen nicht unterschreitet.

Das Hintergrundgeräusch ist dabei das im Raum vorhandene schwächste Fremdgeräusch, das keiner bestimmten Geräuschquelle zuzuordnen ist. Durch die Einbeziehung des Hintergrundgeräusches in die Beurteilung ist das Verfahren unabhängig davon, ob das tieffrequente Störge-

räusch tags oder nachts auftritt. Es müssen lediglich das über die Zeit gesehen niedrigste Hintergrundgeräusch und die größte Pegeldifferenz zwischen Hintergrund- und störendem Geräusch berücksichtigt werden.

Damit keine unsinnigen Forderungen erhoben werden, muß die Hörschwelle des Menschen als untere Begrenzung mit in das Verfahren einbezogen werden. Wegen des erheblichen Streubereiches der Hörschwelle sollte als untere Grenze etwa diejenige Hörschwelle angesehen werden, die nach den Untersuchungen von ZWICKER [20] in Abb. 15 als 10%-Schwelle angegeben wurde. Diese Kurve liegt bei tiefen Tönen etwa 10 dB unterhalb der Mittelkurve, die in [19] als Hörschwelle genormt ist. Damit wird hier die Auffälligkeit folgendermaßen definiert:

Ein tonhaltiges tieffrequentes Geräusch ist auffällig, wenn die Differenz zwischen den Einzeltonpegeln des tieffrequenten Störgeräusches und den entsprechenden Pegeln des Hintergrundgeräusches 10 dB oder mehr beträgt und gleichzeitig der Hintergrundpegel die 10%-Hörschwellenkurve nicht unterschreitet.

5.1. Das vorgeschlagene Verfahren in Kurzfassung

- a) Von dem Störgeräusch wird innerhalb des am stärksten betroffenen Raumes bei geschlossenen Fenstern und Türen an der lautesten Stelle ein unbewertetes Terzspektrum aufgenommen.
- b) In gleicher Weise wie das Störgeräusch ist bei abgeschalteter Störquelle das Hintergrundgeräusch zu erfassen.
- c) Im tieffrequenten Bereich - bis max. $f = 150$ Hz - sind die Unterschiede zwischen den Terzpegeln des Störgeräusches und den entsprechenden Terzpegeln des Hintergrundgeräusches festzustellen.
- d) Ist der Pegelunterschied in einer Terz größer oder gleich 10 dB, und liegt außerdem der Hintergrundpegel in dieser Terz um nicht mehr als 10 dB unterhalb der mittleren Hörschwellenkurve [19], so ist das Störgeräusch als auffällig und damit auch als störend zu bezeichnen und nach Möglichkeit zu mindern.

5.2. Vor- und Nachteile des Verfahrens

Gegenüber der allgemein üblichen Vorgehensweise hat das Verfahren über die verbesserte Beurteilung hinausgehend den Vorteil, daß sofort ersichtlich ist, in welchem Frequenzbereich und um welchen Betrag die zur Minderung der Auffälligkeit notwendige Pegelabsenkung erfolgen muß. Schwierigkeiten bei der Anwendung des Verfahrens können sich dann einstellen, wenn die Störquelle nicht abzuschalten ist und damit das Hintergrundgeräusch nicht erfaßt werden kann. In einem solchen Fall, der erfahrungsgemäß nur selten eintreten dürfte, müßte das Hintergrundgeräusch geschätzt werden. Beispielsweise könnte die mittlere Hörschwellenkurve als Verlauf für das fehlende Hintergrundspektrum angesetzt werden.

6. Anwendung des vorgeschlagenen Verfahrens auf konkrete Fälle mit Vorstellungen zur Minderung

6.1. Einwirkung eines Kompressorgeräusches

In Abbildung 22 ist für das bereits früher beim Übergang von außen nach innen besprochende Kompressorgeräusch dasjenige Terzspektrum wiedergegeben, das innerhalb des am stärksten betroffenen Wohnraums an der lautesten Stelle bei geschlossenen Fenstern und Türen ermittelt wurde.

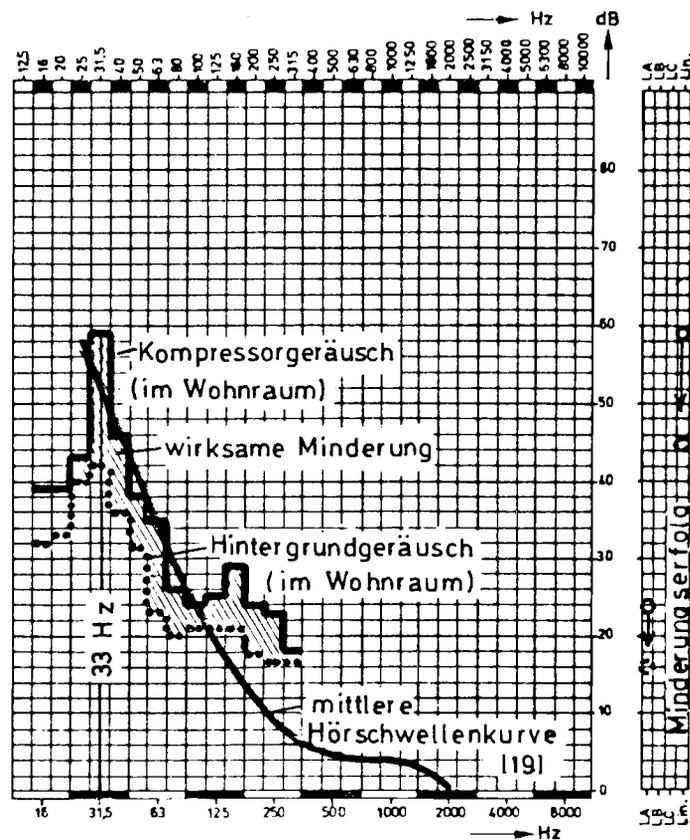


Abb. 22: Einwirkung und Minderung eines Kompressorgeräusches

Der tieffrequente Einzelton 33 Hz verursachte den ausgeprägten Terzgipfel bei der Mittenfrequenz 31,5 Hz, der mit 59 dB um 17 dB oberhalb des zugehörigen Terzpegels des Hintergrundgeräusches von 42 dB lag. Außerdem lag dieser Hintergrundpegel nur um 9 dB, und damit weniger als die festgelegten 10 dB, unter der mittleren Hörschwelle [19], so daß in diesem Fall die als Beurteilungskriterium definierte Auffälligkeit vorlag.

Zur Vermeidung der Auffälligkeit war die festgestellte Pegeldifferenz von 17 dB auf einen Wert von 10 dB oder weniger herabzusetzen. Dazu mußte eine Minderung im Bereich der Terz 31,5 Hz von mindestens $\Delta L = 17 - 9 = 8$ dB angestrebt werden, d.h. der diesen Terzpegel bestimmende Einzelton 33 Hz mußte von 59 auf mindestens 51 dB gemindert werden. Es konnte auf einfache Weise überprüft werden, daß mit einer solchen Minderung die vorhandene Belästigung ausreichend beseitigt werden kann, denn im Nachbarraum lag nach Abbildung 13 der Pegel des 33 Hz-Tones mit 50 dB im angestrebten Bereich. Der Ton war hier nur gerade wahrnehmbar; die Anwohner fühlten sich durch das tieffrequente Geräusch nicht belästigt.

Eine Geräuschminderung durch konstruktive Maßnahmen an der Quelle selbst war hier nicht möglich, so daß auf Sekundärmaßnahmen ausgewichen werden mußte. Zur Lösung des Problems bot sich auf der Emissionsseite eine Kapselung des Kompressors oder auf der Immissionsseite der Austausch des Fensters in dem am stärksten betroffenen Wohnraum durch ein "Schalldämmfenster" an. Durch eine Kapsel würde das Kompressorgeräusch in der gesamten Nachbarschaft verringert, der mit relativ geringen Kosten verbundene Fensteraustausch würde dagegen nur die Geräuschsituation in der am stärksten betroffenen Wohnung verbessern. Ausgeführt wurde im Interesse der gesamten Nachbarschaft eine schalldämmende Kapsel über dem Kompressor. Diese begehbare Kapsel mit einer Grundfläche von etwa 19 m^2 und einer lichten Höhe von ca. 2,4 m wurde doppelschalig erstellt. Die Innenseite besteht aus 28 mm dicken Spanplatten und die Außenseite aus 24 mm dicken Platten. Der Zwischenraum von 100 mm ist mit Sand gefüllt. Als Tür dient eine schalldämmende doppelwandige Einfachtür. Die Kapsel hat eine schallgedämpfte Zuluftöffnung und wird über eine ebenfalls schallgedämpfte Öffnung zwangsentlüftet. Die auf das Innengeräusch bezogene wirksame Minderung ist durch den schraffierten Bereich in Abbildung 22 gekennzeichnet. In dem früher am stärksten betroffenen Raum war das Kompressorgeräusch bei geschlossenen Fenstern nach der Minderung nicht mehr wahrzunehmen. Die Kosten für die Kapsel, die in Eigenarbeit des Betreibers erstellt wurde, betragen 1981 ca. 35.000 DM.

6.2. Einwirkung eines Heizungsgeräusches

In einer gasbeheizten Kesselanlage wurde im Feuerungsraum ein tief-frequentes Geräusch erzeugt und vom Abgasrohr über die Luft ins Freie übertragen. Das Terzspektrum in Abb. 23 veranschaulicht die Frequenzzusammensetzung des rund um die Uhr auf die Nachbarschaft einwirkenden Kesselgeräusches in ca. 300 m Entfernung.

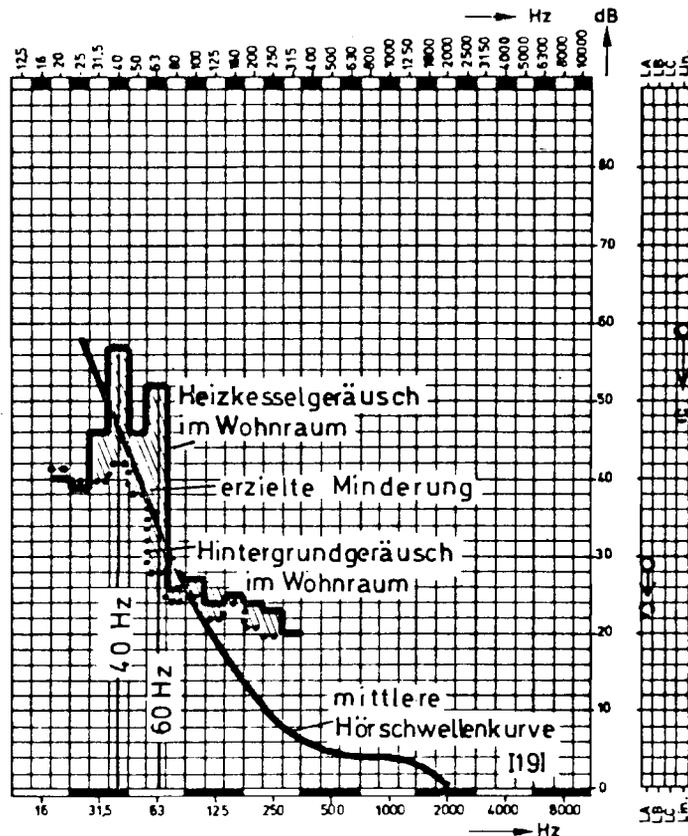


Abb. 23: Einwirkung und Minderung eines Heizungsgeräusches

Im lautesten Bereich des hier betroffenen Wohnraumes betrug der Gesamtpegel des Störgeräusches $L_{AF} = 29$ dB. Auch dieses Geräusch mit seinen beiden ausgeprägten Einzeltönen 40 und 60 Hz ist als auffällig zu bezeichnen. Die Einzeltöne führen zu Terzgipfeln mit Pegeln von 57 und 52 dB, die die zuzuordnenden Terzpegel des Hintergrundgeräusches - die auch hier um weniger als 10 dB unter der mittleren Hörschwelle liegen - um 15 bzw. 24 dB überschreiten. Zur Verminderung der Auffälligkeit mußte der Pegel des Einzeltones 40 Hz um mindestens $\Delta L = 15 - 9 = 6$ dB und der des 60 Hz-Tones um $\Delta L = 24 - 9 = 15$ dB gemindert werden.

Die Minderung wurde durch eine Maßnahme an der Quelle selbst vorgenommen. Durch Messungen bei unterschiedlichen Betriebszuständen

wurde festgestellt, daß das Heizungsgeräusch im wesentlichen durch den Brenner im nachgeschalteten Feuerungsraum verursacht wird. Der Vorgang ist so zu erklären:

Das Abgasvolumen im Feuerungsraum stellt ein schwingungsfähiges System dar, das durch die vom Brenner ausgehenden schwingungserregenden Kräfte zu diskreten tieffrequenten Eigenschwingungen erregt wird.

Diese Eigenschwingungen können durch Änderung der Erregerkräfte bzw. durch Änderung der akustischen Raumeigenschaften beeinflußt werden. Hier wurde die Erregung geändert; der vorhandene Brenner, bei dem die Luftzufuhr über Drosselklappen vor dem Brenner geregelt wurde, ist durch einen neuen Brenner mit integrierter Luftregelung ausgewechselt worden. Damit wurde eine günstigere Luftverteilung erreicht. Die geräuschkmäßige Auswirkung ist aus Abbildung 23 ersichtlich; der schraffiert eingetragene Bereich kennzeichnet die durch den Brenneraustausch erzielte Minderung. Die beiden Einzeltonpegel 40 und 60 Hz wurden um 13 bzw. 24 dB abgesenkt und der Gesamtpegel L_{AF} von 29 auf 23 dB. Damit waren die Beurteilungskriterien erfüllt und die Störwirkung beseitigt. Die Kosten für den neuen Brenner einschließlich Umbau betrugen 1982 ca. 35.000 DM.

6.3. Einwirkung eines Lüftergeräusches

In Abb. 24 sind das an der lautesten Stelle eines Raumes aufgenommene Terzspektrum eines Lüftergeräusches und das beim Stillstand des Lüfters vorhandene Spektrum des Hintergrundgeräusches wiedergegeben. Auch dieses Lüftergeräusch ist auffällig; der Terzbandgipfel bei der Mittenfrequenz 40 Hz überschreitet den entsprechenden Terzbandpegel des Hintergrundgeräusches um 25 dB, und dieser Hintergrundpegel liegt sogar noch oberhalb der Hörschwelle. Hier ist eine Absenkung des Terzpegels 40 Hz um 16 dB erforderlich.

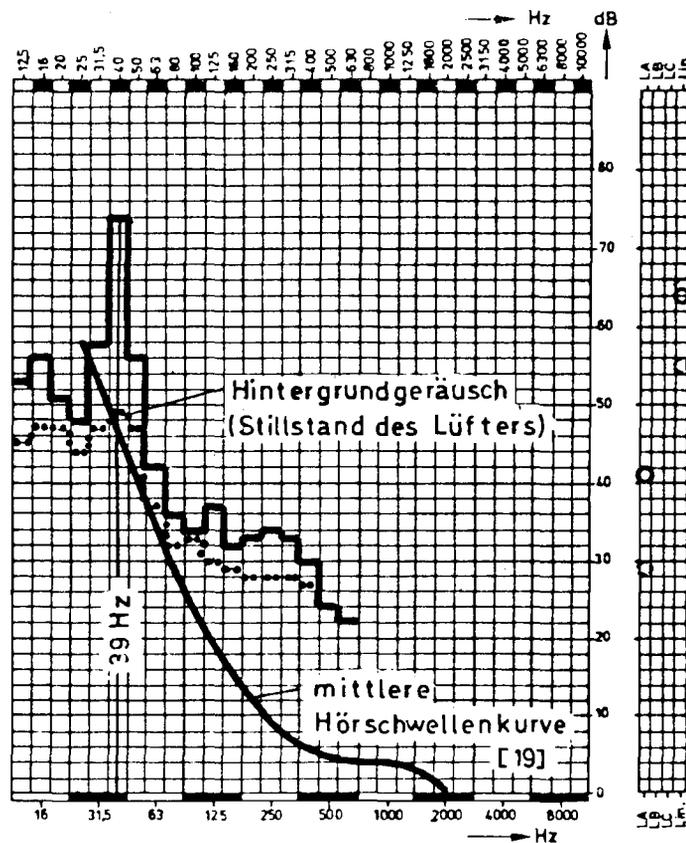


Abb. 24: Terzspektrum eines Lüftergeräusches, aufgenommen innerhalb eines Büroraumes

Minderungsmaßnahmen wurden bislang nicht durchgeführt. Da im vorliegenden Fall der Pegel des auf den Drehklanggrundton zurückzuführenden Einzeltones 39 Hz innerhalb des Raumes - wie eingangs ausgeführt - durch Resonanzeinflüsse bis zu etwa 15 dB angehoben wird, ist hier die Vermeidung der Resonanz die sinnvollste Minderungsmaßnahme. Zweckmäßigerweise könnte dazu die Frequenz des Drehklanggrundtones durch Änderung von Drehzahl oder/und Schaufelzahl des Ventilators aus dem Bereich der Raumeigenfrequenz verschoben werden. Zu dieser Maßnahme ist es bislang noch nicht gekommen. Es wird daher hier auf die Darstellung des Minderungserfolges in einem ähnlich gelagerten Fall mit tieffrequenter Geräuscheinwirkung und Resonanzeinfluß eingegangen. Das Störgeräusch ging in diesem Fall von Vibratoren aus, die in Straßenwalzen eingebaut werden. Die Vibratoren bilden dabei die Achse der Walzen und werden hydraulisch mit Drehzahlen bis zu 2400 U/min angetrieben. In einer ruhigen Wohngegend wurden diese Vibratoren unter Vollast auf einem Prüfstand im Dauer-

betrieb getestet. Die hochgebockten Walzen wurden dabei durch die von den Vibratoren erzeugten schwingungserregenden Kräfte von ca. 20 kN zu erheblichen Schwingungen im Drehzahltakt von etwa 40 Hz der Vibratoren angeregt. Diese tieffrequenten Walzenschwingungen wurden an die umgebende Luft weitergegeben und der so erzeugte Luftschall mit dem deutlich hervortretenden Einzelton von 40 Hz in die Nachbarschaft übertragen. Beschwerden über dieses tieffrequente Geräusch kamen aus einem ca. 350 m vom Prüfstand entfernt stehenden Wohnhaus. Hier war es der Wohnraum, in dem der 40-Hz-Ton besonders laut empfunden wurde. Stehende Wellen waren in diesem Raum deutlich wahrnehmbar. Eine Überprüfung der Raumeigenfrequenzen nach Gl. 6 ergab, daß eine der möglichen Eigenfrequenzen mit der Erregerfrequenz 40 Hz übereinstimmte und somit von einem erheblichen Resonanzeinfluß in diesem Raum auszugehen war. Das in Abb. 25 wiedergegebene Terzspektrum des Vibrationsgeräusches wurde in diesem Wohnraum aufgenommen.

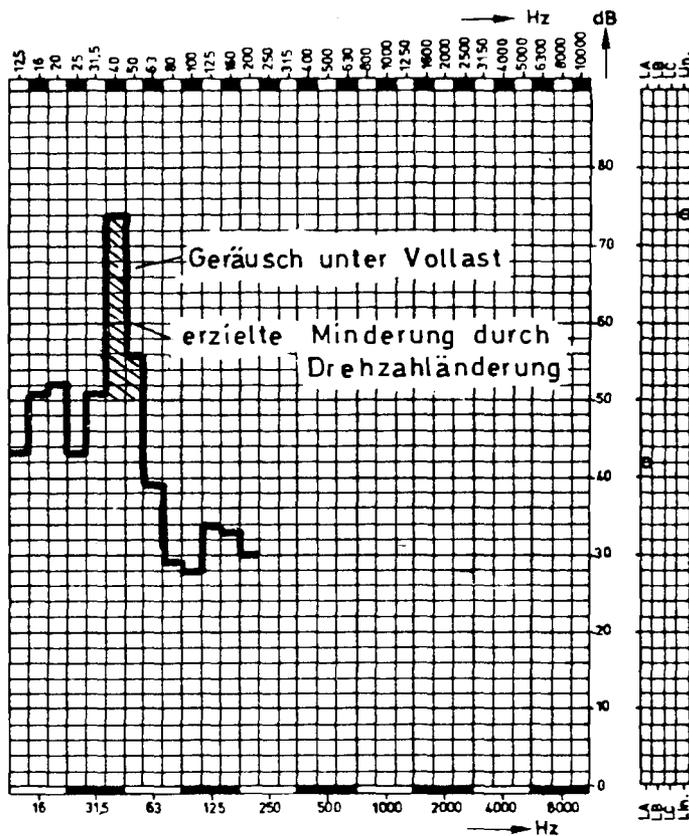


Abb. 25:

Terzspektrum eines Vibrationsgeräusches, aufgenommen in einem Wohnraum in ca. 350 m Abstand von der Quelle

Zur Verbesserung der Situation wurde die Testfrequenz der Vibratoren von 40 Hz um 5 % auf 38 Hz abgesenkt, wodurch einerseits die Erregerkräfte des Vibrators um ca. 10 % herabgesetzt wurden und

andererseits der Resonanzeinfluß im Wohnraum beseitigt wurde. Der Einzeltonpegel wurde dadurch um 18 dB abgesenkt. Die Maßnahme erforderte keine Kosten. Die betroffenen Anwohner haben sich anschließend über das verbliebene Geräusch nicht mehr beschwert.

6.4. Einwirkung eines Dieselmotorgeräusches

In etwa 120 m Abstand von einem Dieselmotorprüfstand wurde die Nachbarschaft durch die Auspuffgeräusche der Motoren stark belästigt. Die Auspuffgeräusche wurden mit den Abgasen über Dach ausgeblasen und in die Nachbarschaft übertragen. Hier sind die Auswirkungen des lautesten Motors veranschaulicht, der mit einer Drehzahl von 600 U/min betrieben wurde und unter Vollast eine Leistung von ca. 3000 kW brachte. Das in Abbildung 26 wiedergegebene Terzspektrum, das beim Betrieb dieses Motors in einem besonders stark betroffenen Wohnraum ermittelt wurde, enthält drei tieffrequente Einzeltöne von 15, 30 und 60 Hz. Sie wurden durch periodisch aufeinanderfolgende "Explosionen" des Gas-Luftgemisches in den Motoren verursacht. Der Grundton dieses Explosionsgeräusches entspricht bei dem hier vorliegenden Viertaktmotor dem Produkt aus der halben sekundlichen Drehzahl 5 Hz und der Zylinderdrehzahl 6 und beträgt 30 Hz.

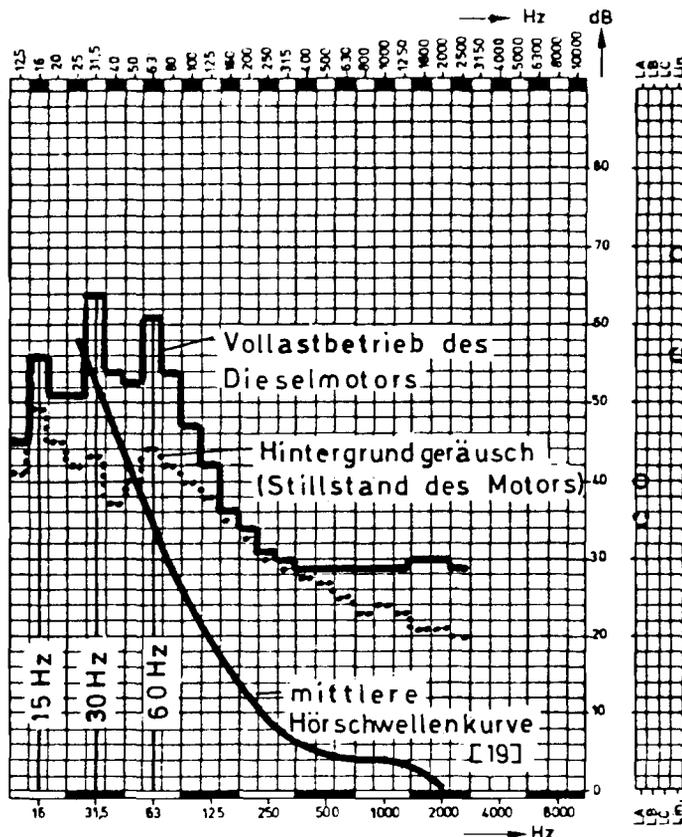


Abb. 26:
Auspuffgeräusch eines
3000-kW-Dieselmotors,
aufgenommen innerhalb
eines Wohnraumes

Auch dieses Geräusch ist auffällig; es sind insbesondere die beiden oberhalb der mittleren Hörschwellenkurve liegenden Terzgipfel bei den Mittenfrequenzen 31,5 Hz und 63 Hz zu betrachten. Der Terzpegel 31,5 Hz liegt um 21 dB oberhalb des zuzuordnenden Hintergrundpegels, und im Terzband 63 Hz beträgt die Pegeldifferenz 17 dB. Die zur Vermeidung der Auffälligkeit notwendige Minderung beträgt im Bereich 31,5 Hz $\Delta L = 21 - 9 = 12$ dB und im Bereich 63 Hz $\Delta L = 17 - 9 = 8$ dB. Zur Geräuschminderung wurden die Abgase des hier herausgestellten Dieselmotors und fünf anderer Motoren von dem Prüfstand über eine Dämpferstrecke und einem nachfolgenden ca. 40 m hohen Abgaskamin ins Freie geleitet. Die Dämpferstrecke besteht nach Angabe der Minderungsfirma aus einer Kombination unterschiedlicher Schalldämpfer, wonach das erste Glied der Dämpferkombination ein Tiefpaßfilter mit Querschnittsprung, das zweite Glied einen Plattenresonator und das dritte Glied einen Reihenresonator darstellt.

Durch diesen Schalldämpfer sind die Ausblasgeräusche im hier interessierenden tieffrequenten Bereich nach Angaben der Minderungsfirma um ca. 20 dB gemindert worden. Die Auffälligkeit des in Abb. 26 herausgestellten Ausblasgeräusches war damit beseitigt, und es traten hier keine weiteren Beschwerden mehr auf.

Aus Gründen der Aktualität sei hier noch auf eine weitere Möglichkeit zur Minderung von Abgasgeräuschen durch Interferenz hingewiesen. In den VDI-Nachrichten Nr. 51 vom 17.12.82 wurde über eine derartige Maßnahme berichtet, die in einem ähnlich gelagerten Fall ausgeführt wurde. Dazu ist festzustellen, daß die Ausnutzung der Interferenz zur Geräuschminderung in praktischen Fällen seit langem ein angestrebtes Wunschziel ist. Dieser Zielvorstellung liegt die Erscheinung zugrunde, daß Schallwellen sich gegenseitig auslöschen können. Voraussetzung dafür ist, daß beide Wellen einander gleich, aber um eine halbe Wellenlänge phasenverschoben aufeinandertreffen. Wo die eine einen Wellenberg hat, muß bei der anderen gerade ein spiegelbildlich gleiches Wellental vorliegen und umgekehrt. Diese Bedingungen sind von den physikalischen Gegebenheiten hergesehen in der Praxis nur in Sonderfällen bei tonhaltigen tieffrequenten Geräuschen zu erfüllen.

Bei dem aufgezeigten Minderungsfall handelt es sich um ein derartiges Geräusch. Es ist das Abgasgeräusch einer 11 MW Gasturbine, das über ein Auspuffrohr ins Freie übertragen wird und sich aus tieffrequenten Anteilen mit Einzeltönen zwischen 20 und 50 Hz zusammensetzt. Über den Umfang des Auspuffrohres verteilt sind entsprechend Abbildung 27 vier Mikrofone angebracht worden, mit denen das Auspuffgeräusch aufgenommen wird. Die erzeugten Meßspannungen wurden nach entsprechender Signalverarbeitung einer Vielzahl von Baßlautsprechern zugeführt und von hier als "Gegengeräusche" abgestrahlt. Die aufgebrauchte elektrische Leistung liegt bei 12 kW und beträgt damit ca. 1 % der von der Gasturbine erzeugten Leistung.

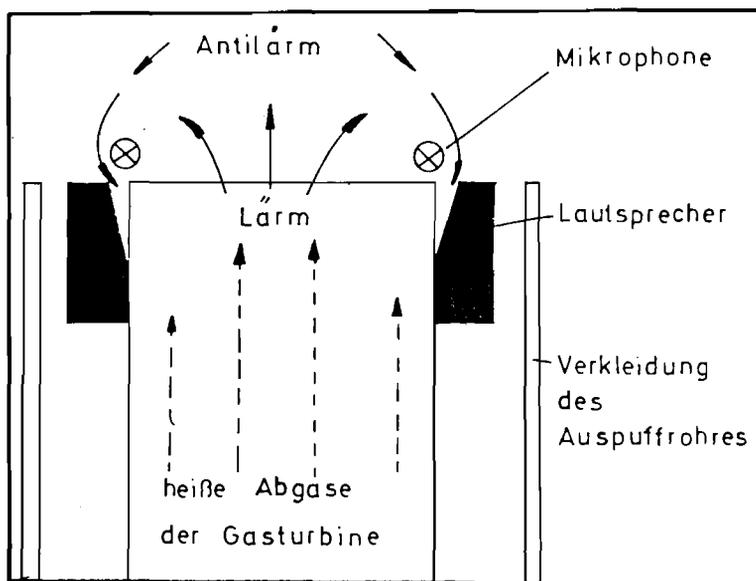


Abb. 27: Geräuschminderung durch Interferenz

Durch diese Maßnahme ist nach der vorliegenden Information der Schallpegel der tieffrequenten Töne bis zu 13 dB gemindert worden. Im Vergleich zu der vorher genannten Minderung eines Abgasgeräusches durch Dämpfer von ca. 20 dB ein recht bescheidener Erfolg. Man erkennt daraus, daß auch mit der sehr aufwendigen Interferenz als Minderungsmaßnahme die Wirksamkeit herkömmlicher Maßnahmen in der Praxis zumindest in dem aufgezeigten Fall nicht übertroffen wurde.

6.5. Einwirkung eines Webereigeräusches

Im Gegensatz zu den bislang beurteilten Geräuschen wird das bereits eingangs angesprochene Webereigeräusch auf dem Körperschallweg von der Quelle über die Straße in ein ca. 35 m entfernt liegendes Wohnhaus übertragen. Das hier in dem am stärksten betroffenen Wohnraum ermittelte Terzspektrum ist in Abbildung 28 wiedergegeben.

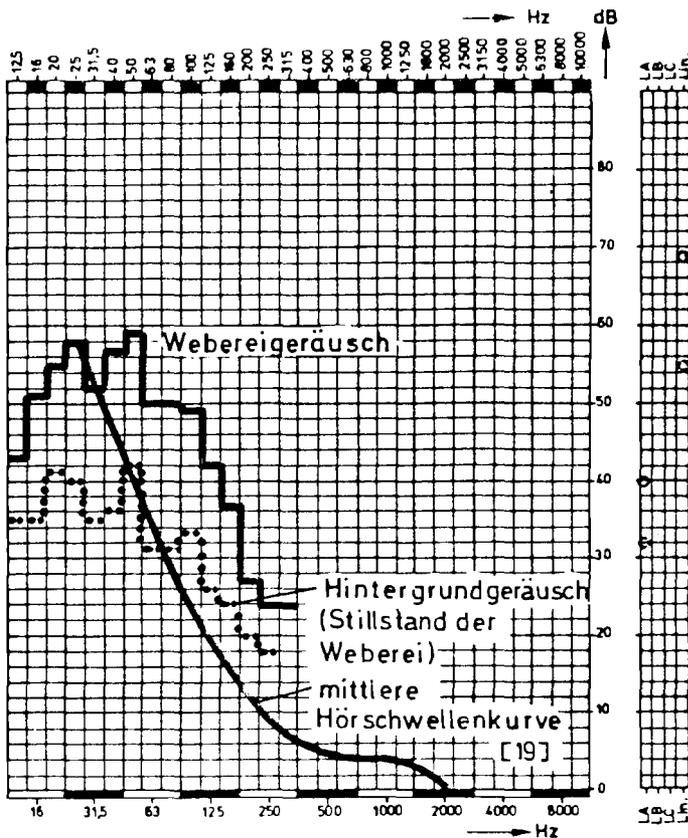


Abb. 28:

Webereigeräusch, das auf dem Körperschallweg über 35 m in einen Wohnraum übertragen wurde

Die beiden Terzpegel bei den Mittenfrequenzen 25 u. 50 Hz erscheinen als Gipfel. Im Bereich 25 Hz beträgt die Pegeldifferenz zwischen Stör- und Hintergrundgeräusch zwar 18 dB, zur Kennzeichnung der Auffälligkeit werden hiervon wegen des relativ niedrig zur Hörschwelle liegenden Hintergrundpegels jedoch nur 12 dB herangezogen. Der 25-Hz-Terzgipfel trägt somit mit 3 dB zur Auffälligkeit des Geräusches bei. Im wesentlichen wird die Auffälligkeit des Webereigeräusches in dieser Situation durch die im Bereich 40 bis 80 Hz liegenden Pegeldifferenzen ausgelöst; sie liegen hier zwischen 19 und 21 dB. Zur Beseitigung der Auffälligkeit müßten im vorliegenden Fall die nachstehend aufgeführten Pegelminderungen in den einzelnen Terzbereichen angestrebt werden:

Terz	Minderung	Terz	Minderung
25 Hz	3 dB	80 Hz	10 dB
31,5 Hz	3 dB	100 Hz	7 dB
40 Hz	12 dB	125 Hz	7 dB
50 Hz	8 dB	160 Hz	4 dB
63 Hz	10 dB		

Als Minderungsmaßnahme ist von der Landesanstalt für Immissionschutz des Landes NW (LIS) eine körperschallisolierte Webstuhlaufstellung vorgeschlagen worden. Z. Zt. wird durch Untersuchungen der LIS an Schaft-Webstühlen geprüft, ob eine derartige Maßnahme zu dem angestrebten Erfolg führt und ob sie betrieblich zu realisieren ist. Die ersten Ergebnisse lassen erkennen, daß zumindest bei Schaft-Webstühlen die angestrebte Minderung möglich sein dürfte.

7. Zielvorstellung

Die Ausführungen dieses Berichtes sollen mit dazu beitragen, daß tieffrequente Geräusche in Zukunft bei der Beurteilung der Einwirkung auf Menschen in Wohnungen kritischer betrachtet werden, als dies bislang im allgemeinen geschieht. Insbesondere für Sonderfälle, bei denen aufgrund des subjektiven Eindrucks eine erhebliche Belästigung durch tonhaltige tieffrequente Geräusche innerhalb von Wohnungen festgestellt wird, obwohl die üblicherweise anzusetzenden Richtwerte eingehalten sind, wird das hier vorgestellte Verfahren zur Beurteilung tieffrequenter Geräusche empfohlen. Der im Vergleich zu den herkömmlichen Beurteilungsverfahren größere gerätetechnische Aufwand wird durch eine gehörrichtigere Beurteilung entschädigt und außerdem durch eine konkrete Beschreibung der erforderlichen Minderung hinsichtlich Pegel und Frequenz. Die möglichen Minderungsmaßnahmen sind bei tieffrequenten Geräuschen immer vom konkreten Fall abhängig und nur selten verallgemeinerungsfähig. Das hängt u.a. mit möglichen Resonanzeinflüssen zusammen. Meist sind Maßnahmen an der Quelle selbst wirtschaftlicher als Sekundärmaßnahmen auf dem Ausbreitungsweg. Nicht selten sind Maßnahmen an der Quelle zur Minderung tieffrequenter Einzeltöne ohne nennenswerten Aufwand durchzuführen. Man sollte sich daher von dem Vorurteil lösen, daß Maßnahmen zur Minderung tieffrequenter Geräusche grundsätzlich mit hohem wirtschaftlichem Aufwand verbunden sein müssen.

S c h r i f t t u m

- [1] Allgemeine Verwaltungsvorschrift über genehmigungsbedürftige Anlagen nach § 16 der Gewerbeordnung - GewO.
Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA-Lärm) vom 6. Juli 1968.
Beilage zum Bundesanzeiger Nr. 137 vom 26. Juli 1968.
- [2] VDI-Richtlinie 2058, Blatt 1:
Beurteilung von Arbeitslärm in der Nachbarschaft. (Juni 1973).
- [3] Untersuchungen über den Fluglärm und seine Wirkungen im Gebiet von drei Schweizer Zivilflughäfen.
Bearb.: Arbeitsgemeinschaft für sozio-physiologische Fluglärmuntersuchungen.
Hrsg.: Eidgenössisches Luftamt der Schweiz, Bern (Juni 1983).
- [4] ROHRMANN, B.:
Sozialwissenschaftliche Forschungsergebnisse zum Umweltproblem Fluglärm.
Kampf dem Lärm, 24 (1977), Heft 4, S. 89...100.
- [5] Proceedings of the Conference on Low Frequency Noise and Hearing
vom 6. bis 9. Mai 1980 in Aalborg, Dänemark.
Lärmbekämpfung, 27 (1980), H. 4, S. 150.
- [6] ISING, H. und G. SCHWARZE:
Infraschallwirkungen auf den Menschen.
Lärmbekämpfung, 29 (1982), S. 79 ... 82.

- [7] BRONER, N.:
Der Einfluß von niederfrequentem Lärm auf den
Menschen.
J. of Sound and Vibration, 58 (1978),
H. 4, S. 483 ... 500.
- [8] FINDEIS, H.:
Zur Bewertung von Vibrationsmessungen in
Wohnungen.
Z. ges. Hyg., 26 (1980), H. 9, S. 655 ... 660.
- [9] YEOWART, N.S.:
Thresholds of Hearing and Loudness for very Low
Frequency Vibration.
London: Academic Press 1976.
- [10] SCHMIDT, H.:
Schalltechnisches Taschenbuch.
Düsseldorf: VDI-Verlag 1968.
- [11] CREMER, L. und M. HECKL:
Körperschall.
Berlin: Springer-Verlag 1964.
- [12] VDI-Richtlinie 2714 (Entwurf):
Schallausbreitung im Freien.
(Dezember 1976).
- [13] FLEISCHER, F.:
Zur Anwendung von Schallschirmen.
Lärmbekämpfung, 14 (1970), H. 6,
S. 131 ... 136.
- [14] AMERICAN NATIONAL STANDARD:
Method for the Calculation of the Absorption
of Sound by the Atmosphere (78/7).

- [15] PARKIN, P.H. und W.E. SHOLES:
The Horizontal Propagation of Sound from a
Jet Engine Close to The Ground, at Hatfield.
J. of Sound and Vibration, 2 (1965), H. 4,
S. 353 ... 374.
- [16] KLEIN, M.:
Untersuchung zur Schallausbreitung im Freien.
LIS-Berichte der Landesanstalt für Immissions-
schutz des Landes NW.
(in Vorbereitung).
- [17] SPLITTGERBER, H. und K.H. WIETLAKE:
Ermittlung der Luftschalldämmung von
Baelementen für Industriebauten am Bau.
LIS-Bericht der Landesanstalt für Immissions-
schutz des Landes NW, H. 4 (1979), S. 4-133.
- [18] CREMER, L. und H.A. MÜLLER:
Die wissenschaftlichen Grundlagen der
Raumakustik, Band II.
S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1976.
- [19] DIN 45630:
Grundlagen der Schallmessung.
Bl. 2: Normalkurven gleicher Lautstärkepegel.
(September 1967).
- [20] ZWICKER, E. und R. FELDTKELLER:
Das Ohr als Nachrichtenempfänger.
S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1967.

- [21] WAGNER, R., G. SZADKOWSKI und G. LEHNERT:
Methodische Einflüsse auf die Reproduzierbarkeit
des Reintonaudiogramms.
Arbeitsmedizin, Sozialmedizin, Präventivmedizin.
7 (1978), S. 142-145.
- [22] DIN 45631:
Berechnung des Lautstärkepegels aus dem
Geräuschspektrum.
Verfahren nach E. Zwicker (Oktober 1967).

Berichte der

LANDESANSTALT FÜR IMMISSIONSSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN, ESSEN

- LIS-Berichte -

Die LIS-Berichte haben spezielle Themen aus den wissenschaftlichen Untersuchungen der LIS zum Gegenstand. Die in der Regel umfangreichen Texte sind nur in begrenzter Auflage vorrätig. Einzelexemplare werden Interessenten auf Anforderung kostenlos zur Verfügung gestellt.

Anforderungen sind zu richten an die

Landesanstalt für Immissionsschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen
Wallneyer Str. 6
4300 E s s e n 1

- Berichte-Nr. 1: KRAUTSCHEID, S. und P. NEUTZ:
(vergriffen) LIDAR zur Fernüberwachung von Staubemissionen.
- Nachweis der Kalibrierfähigkeit eines LIDAR-Systems - (1978).
- Berichte-Nr. 2: BUCK, M.:
(vergriffen) Die Bedeutung unterschiedlicher Randbedingungen bei der Messung und Beurteilung der Luftqualität (1978).
- Berichte-Nr. 3: SCHEICH, G.:
(vergriffen) Entwicklung und Anwendung von Ausbreitungsmodellen und Luftüberwachungsprogramme in den USA (1979).
- Berichte-Nr. 4: SPLITTGERBER, H. und K.H. WIETLAKE:
(vergriffen) Ermittlung der Luftschalldämmung von Bauelementen für Industriebauten am Bau (1979).
- Berichte-Nr. 5: SPLITTGERBER, H.:
(vergriffen) Zur Problematik der Meßgrößen und Meßwerte bei Erschütterungsimmissionen (1979).
- Berichte-Nr. 6: STRAUCH, H. und K.H. GOLDBERG:
(vergriffen) Ermittlung der Dämmwirkung von Dachentlüftern für Werkshallen im Einbauzustand unter Berücksichtigung der baulichen Nebenwege (1979).
- Berichte-Nr. 7: KRAUSE, G.M.H., B. PRINZ UND K. ADAMEK:
(vergriffen) Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Falschfarbenfotografie für die Aufdeckung und Dokumentation von Immissionswirkungen auf Pflanzen (1980).
- Berichte-Nr. 8: WIETLAKE, K.H.:
Erschütterungsminderung durch "Direktabfederung" von Schabotte-Schmiedehämmern (1980).
- Berichte-Nr. 9: STRAUCH, H.:
(vergriffen) Methoden zur Aufstellung von Lärminderungsplänen (1980).
- Berichte-Nr. 10: HILLEN, R.:
Untersuchung zur flächenbezogenen Geräuschbelastungs-Kennzeichnung
-Ziele, Methodik, Ergebnisse- (1980).
- Berichte-Nr. 11: MANN, H., H. GIES und W. STRAMPLAT:
(vergriffen) Erprobung des Staub-Immissionsmeßgerätes FH62I für die kontinuierliche Bestimmung der Schwebstoffkonzentration in Luft (1980).
- Berichte-Nr. 12: GIEBEL, J.:
(vergriffen) Verhalten und Eigenschaften atmosphärischer Sperrschichten (1981).
- Berichte-Nr. 13: BRÖKER, G., H. GLIWA und E. MEURISCH:
Abscheidegrade von biologisch- und chemisch-aktiven Aggregaten zur Desodorierung osmogener Abluft von Tierkörperbeseitigungsanlagen (1981).

- Berichte-Nr. 14: BRANDT, C.J.:
(vergriffen) Untersuchungen über Wirkungen von Fluorwasserstoff auf Lolium Multiflorum und andere Nutzpflanzen (1981).
- Berichte-Nr. 15: WELZEL, K. und H.D. WINKLER:
(vergriffen) Emission und interner Kreislauf von Thallium bei einem Drehrohfen mit Schwebegaswärmeaustauscher zur Herstellung von Portlandzementklinker unter Einsatz von Purpurerz als Eisenträger. - 1. Bericht - (1981).
- Berichte-Nr. 16: PRINZ, B.:
(In Vorbereitung) Umweltpolitik in der VR China und technologische Entwicklung.
- Berichte-Nr. 17: BRÖKER, G. und H. GLIWA:
Untersuchungen zu den Dioxin-Emissionen aus den kommunalen Hausmüllverbrennungsanlagen in Nordrhein-Westfalen (1982).
- Berichte-Nr. 18: BUCK, M., H. IXFELD und K. ELLERMANN:
Die Entwicklung der Immissionsbelastung in den letzten 15 Jahren in der Rhein-Ruhr-Region (1982).
- Berichte-Nr. 19: PFEFFER, H.U.:
Das Telemetrische Echtzeit-Mehrkomponenten-Erfassungssystem TEMES zur Immissionsüberwachung in Nordrhein-Westfalen (1982).
- Berichte-Nr. 20: BACH, R.W.:
Über Schätzfunktionen zur Bestimmung hoher Quantile der Grundgesamtheit luftverunreinigender Schadstoffkonzentrationen aus Stichproben (1982).
- Berichte-Nr. 21: STRAUCH, H.:
Hinweise zur Anwendung flächenbezogener Schalleistungspegel (1982).
- Berichte-Nr. 22: SPLITTGERBER, H.:
Verfahren zur Auswertung von Erschütterungsmessungen und zur Beurteilung von Erschütterungsimmissionen (1982).
- Berichte-Nr. 23: KRAUSE, G.M.H.:
Immissionswirkungen auf Pflanzen - Forschungsschwerpunkte in den Vereinigten Staaten von Amerika. Bericht über eine Reise in die USA und die Teilnahme am 13. Air Pollution Workshop in Ithaca, N. Y., in der Zeit vom 02.05.-24.05.1981 (1982).
- Berichte-Nr. 24: KÜLSKE, S.:
Analyse der Periode sehr hoher lokaler Schadstoffbelastungen im Ruhrgebiet vom 15.01.1982 bis 20.01.1982 (1982).
- Berichte-Nr. 25: VAN HAUT, H. und G.H.M. KRAUSE:
Wirkungen von Fluorwasserstoff-Immissionen auf die Vegetation (1982).
- Berichte-Nr. 26: KOCH, E., V. THIELE, J. GIEBEL, H. STRAUCH und P. ALTENBECK:
Empfehlungen für die problemgerechte Erstellung von Immissionsschutzgutachten in Bauleitplanverfahren (1982).
- Berichte-Nr. 27: MANNS, H., H. GIES und G. NITZ:
(vergriffen) Verbesserung der Zuverlässigkeit und Vergleichbarkeit von Messungen zur Ermittlung aromatischer Kohlenwasserstoffe in der Außenluft (1982).
- Berichte-Nr. 28: PRINZ, B., G.M.H. KRAUSE und H. STRATMANN:
Vorläufiger Bericht der Landesanstalt für Immissionsschutz über Untersuchungen zur Aufklärung der Waldschäden in der Bundesrepublik Deutschland (1982).
- Berichte-Nr. 29: GIEBEL, J.:
Untersuchungen über Zusammenhänge zwischen Sperrschichthöhen und Immissionsbelastung (1983).
- Berichte-Nr. 30: MANNS, H. und H. GIES:
Ergebnisse der Laborprüfung und Optimierung des meßtechnischen Teiles der Ozon-Meßplätze im Meßnetz LIMES-TEMES (1983).

- Berichte-Nr. 31: BEINE, H., R. SCHMIDT UND M. BUCK:
Ein Meßverfahren zur Bestimmung des Schwefelsäure- und Sulfatgehaltes in Luf
(1983).
- Berichte-Nr. 32: BEIER, R. und P. BRUCKMANN:
Messung und Analyse von Kohlenwasserstoff-Profilen im Rhein-Ruhrgebiet (1983).
- Berichte-Nr. 33: FRONZ, W.:
Ermittlung von Verkehrsgeräusch-Immissionen
- zum tageszeitlichen Verlauf des Geräuschpegels und des Verkehrsaufkommens an
Bundes- und Sammelstraßen (1983).
- Berichte-Nr. 34: BRÖKER, G.:
Zusammenfassende Darstellung der Emissionssituation in Nordrhein-Westfalen und
der Bundesrepublik Deutschland für Stickstoffoxide (1983).
- Berichte-Nr. 35: PIORR, D. und R. HILLEN:
Veränderung akustischer Kenngrößen infolge der nächtlichen Abschaltung von
Lichtsignalanlagen (1983).
- Berichte-Nr. 36: BUCK, M., H. IXFELD und K. ELLERMANN:
Benzol-Immissionsmessungen im Lande Nordrhein-Westfalen (1983).
- Berichte-Nr. 37: BACH, R.-W. und H. STRATMANN:
Untersuchungen zur Bestimmung der Aufnahme rate des IRMA-Gerätes bei verschiedenen
Anströmverhältnissen (1983).

Anmerkung:

Die LIS-Berichte - auch die vergriffenen - stehen Interessenten in vielen Universitäts- und Hoch-
schulbibliotheken zur Ausleihe bzw. Einsichtnahme zur Verfügung.