

Leitfaden „Nichtionisierende Strahlung“

Infraschall

Der Leitfaden „Nichtionisierende Strahlung“ **Infraschall** wurde vom Arbeitskreis Nichtionisierende Strahlung des Fachverbandes für Strahlenschutz e. V. (Mitgliedsgesellschaft der International Radiation Protection Association - IRPA - für die Bundesrepublik Deutschland und die Schweiz erarbeitet).

Er gibt zu der jeweiligen Strahlungsart die physikalischen Grundlagen, den derzeitigen wissenschaftlichen Erkenntnisstand über biologische Wirkungen, zulässige Expositionswerte und durchzuführende Schutzmaßnahmen an.

Dem Arbeitskreis gehören Experten auf dem Gebiet der nichtionisierenden Strahlung aus den Niederlanden, Österreich, der Schweiz und Deutschland an.

Ziel ist es, mit dem Leitfaden allen Interessierten die notwendigen Informationen an die Hand zu geben, um mit nichtionisierender Strahlung richtig umzugehen.

Der Leitfaden enthält zurzeit folgende Teile:

- Sonnenstrahlung
- Ultraviolettstrahlung künstlicher Quellen
- Sichtbare und Infrarote Strahlung
- Laserstrahlung
- Lichteinwirkungen auf die Nachbarschaft
- Elektromagnetische Felder
- **Infraschall**
- Ultraschall

Verfasser: Rüdiger Borgmann

Stand: 25.02.2005

Redaktion:

Herr
Prof. Dr. Hans-Dieter Reidenbach, FH-Köln,
Sekretär des AK-NIR
Fachhochschule Köln - Forschungsbereich HLT
Betzdorfer Str. 2
50679 Köln

Telefon: +49 221 - 8275 2208

Telefax: +48 221 - 885256

E-Mail: hans.reidenbach@fh-koeln.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung
2	Physikalische Eigenschaften
3	Auftreten des Infraschalls
4	Wirkungen auf den Menschen
5	Grenzwerte für Infraschallbelastungen
5.1	Frequenzbewertung
5.2	Infraschallbelastung am Arbeitsplatz
5.3	Anhaltswerte für die Allgemeinbevölkerung (Immissionsschutz)
6	Schutzmaßnahmen
7	Messgeräte und Messausrüstung für den Infraschall
7.1	Schallpegelmesser
7.2	Dosimeter und integrierende Messgeräte
7.3	Frequenzfilter
7.4	Aufzeichnungsgeräte
7.5	Kalibriereinrichtung
8	Zusammenfassung
9	Literatur
10	Adressen

1 Einleitung

Mit "Infraschall" wird der Luftschall bezeichnet, der mit tiefen Frequenzen im Grenzbereich und zum großen Teil außerhalb des normalen Hörens im Arbeits- und Wohnbereich des Menschen auftritt. Er wird in der Regel durch „Lärm“ im normalen Hörbereich überlagert und ist ihm in seinen Auswirkungen ähnlich. Obwohl in der Vergangenheit das Phänomen des Infraschalls in verschiedener Hinsicht untersucht wurde, liegen bisher nur wenige fundierte Kenntnisse und Ergebnisse über das Auftreten und die Wirkung des Infraschalls vor.

2 Physikalische Eigenschaften

Unter Infraschall versteht man Luftschallwellen mit Frequenzen unterhalb des menschlichen Hörbereiches. Als Grenzfrequenz zum "Hörschall" wird allgemein $f = 20$ Hz betrachtet. Als internationaler Standard wurde der Infraschallbereich in der ISO 7196 [15] mit den Terzfrequenzbändern von 2 Hz bis 16 Hz Nennmittenfrequenz definiert. Viele Untersuchungen betrachten daher den Frequenzbereich bis zu einer unteren Terzmittenfrequenz von 2 Hz bzw. unteren Grenzfrequenz von 1,78 Hz.

Für den Infraschall gelten wie für den Hörschall die physikalischen Gesetze der Akustik. Von dem Bereich des Hörschalls und dem Bereich des Ultraschalls unterscheidet sich der Infraschall durch die wesentlich größere Wellenlänge beim Ausbreitungsvorgang (s. Tabelle 1).

Tabelle 1: Wellenlänge in Abhängigkeit von der Frequenz

Frequenz f [Hz]	2	5	20	100	1k	10k	20k	40k
Wellenlänge λ	170	68	17	340	34	3,4	17	8,5
	m			cm			mm	
	Infraschall			Hörschall			Ultraschall	

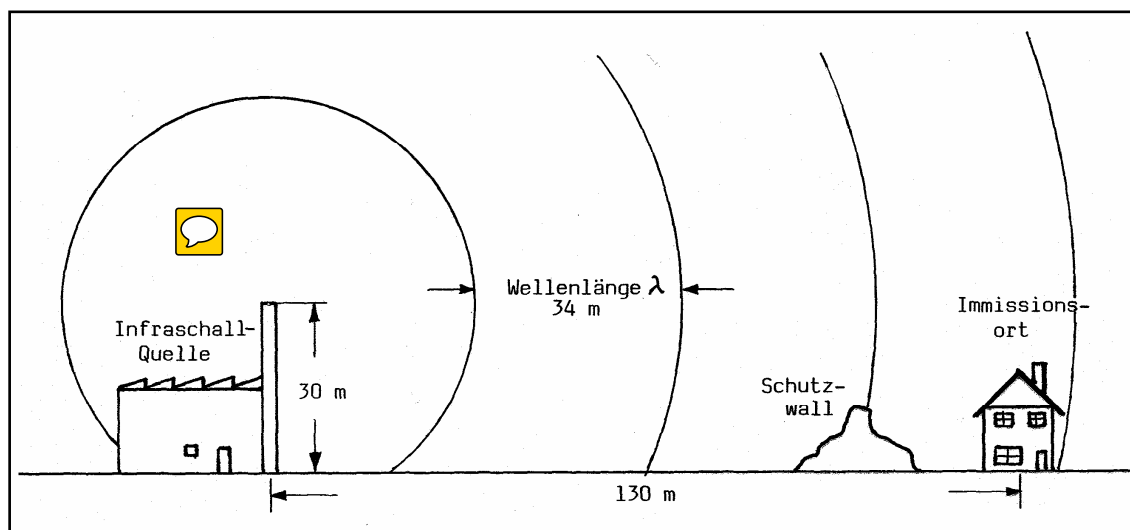


Abb. 1: Ausbreitung einer Infraschallwelle bei 10 Hz – Dimensionsvergleich -

Die Wellenlängen von Infraschallsignalen mit 17 m bis 170 m sind damit groß im Verhältnis zu der Umgebung, in der sie auftreten. Durch dieses Größenverhältnis sowie durch relativ langsame Schalldruckschwankungen ergeben sich gegenüber dem Hörschall abweichende Eigenschaften. Die Ausbreitungsdämpfung durch Luftabsorption ist äußerst gering. Die Schalldämmung von Bauteilen (z.B. Fenster oder Leichtbauwände) beträgt nur wenige dB (0 bis 10 dB). Die Abschirmung von Infraschallwellen durch ein Hindernis (Schutzwall) ist ebenfalls sehr gering.



Infraschall kann nur durch große, in Phase schwingende Flächen oder Strömungsvorgänge mit großem Volumen erzeugt werden. Bei schwingenden Flächen, die in ihrer Ausdehnung klein gegenüber der Wellenlänge des Infraschalls sind, findet aufgrund der relativ langsamen Druckschwankungen im Nahbereich ein Druckausgleich statt, so dass für das Fernfeld die Infraschallquelle quasi nicht existiert (aerodynamischer Kurzschluss).

Der Infraschall steht häufig in direkter Verbindung mit Festkörperschwingungen (Körperschall) im selben Frequenzbereich. Diese als Erschütterungen bezeichneten Schwingungen können Infraschall abstrahlen. Bei Oberflächenwellen, wie sie z.B. durch Sprengungen ausgelöst werden, kann die wesentlich schnellere Körperschallwelle über den Erdboden den Sprengimpuls in größere Entfernung (30 km) übertragen, und dort als Luftschall abstrahlen. Die gleichzeitig durch die Sprengung ausgelöste Luftschallwelle erreicht diesen Punkt erst mit einigen Minuten Verzögerung. Umgekehrt kann auch eine Schalldruckwelle mit entsprechender Druckamplitude Gebäudeteile, wie Fenster oder Decken, zum Schwingen anregen. Daher sollte bei allen Situationen, bei denen die Einwirkung von Infraschall vermutet wird, auch das Vorhandensein von tieffrequenten Festkörperschwingungen überprüft werden.

Die Schallpegelabnahme bei der Ausbreitung der Schallwelle erfolgt fast ohne Energieverlust nur nach den geometrischen Gesetzen und beträgt bei der in der Regel kugelförmigen Ausbreitung der Welle 6 dB pro Entfernungsverdoppelung. Es können sich aber dabei Interferenzen über ebenen Bodenflächen und vor ausgedehnten Wänden ausbilden, die einen stark schwankenden, nicht monoton abnehmenden Schallpegelverlauf ergeben. Vor ausgedehnten flächenhaften Hindernissen kommt es zu einem Druckstau und einer damit verbundenen Schalldruckerhöhung. Zwischen Gebäudefassaden können sich stehende Wellen ausbilden.

In Wohnräumen mit 20 m² bis 25 m² Fläche liegen die Grundmoden für die Ausbildung von stehenden Wellen über 20 Hz, so dass diese Räume sich im Infraschallbereich wie Druckkammern verhalten. Bei passendem Verhältnis vom Raumvolumen zur Fensteröffnung kann der Wohnraum wie ein Helmholtzresonator mit Resonanzfrequenzen von ca. 2 Hz bis 8 Hz wirken. In großen Industriehallen wie auch in Versammlungsräumen und Kirchen bilden sich dagegen stehende Wellen im Infraschallbereich aus.

3 Auftreten des Infraschalls

Infraschallwellen werden bei zahlreichen physikalischen Vorgängen und Ereignissen ausgelöst. Nach den Entstehungsursachen kann man zwei Gruppen unterscheiden:

Natürliche Quellen:

- Windströmungen und Luftturbulenzen bei extremen meteorologischen Situationen;
- Erdbeben und Vulkaneruptionen;
- Wasserfälle und Meeresbrandung.

Technische Quellen:

- Heizungs- und Klimaanlage einschließlich Abgaskamine;
- Windenergieanlagen;
- Gasturbinen;
- Verdichterstationen, pneumatische Förderanlagen;
- Be- und Entlüftungsanlagen;
- Industrie- und Gewerbeanlagen mit Stanzen, Rüttlern, Vibratoren, Kompressoren;
- Bauwerke (Hochhäuser, Tunnel, Brücken);
- Verkehrsmittel (Pkw, Lkw, Bahn, Schiffe, Flugzeuge, Strahltriebwerke, Hubschrauber);
- Sprengungen und großkalibrige Geschütze;
- **Lautsprechersysteme in geschlossenen Räumen (Diskotheken).**

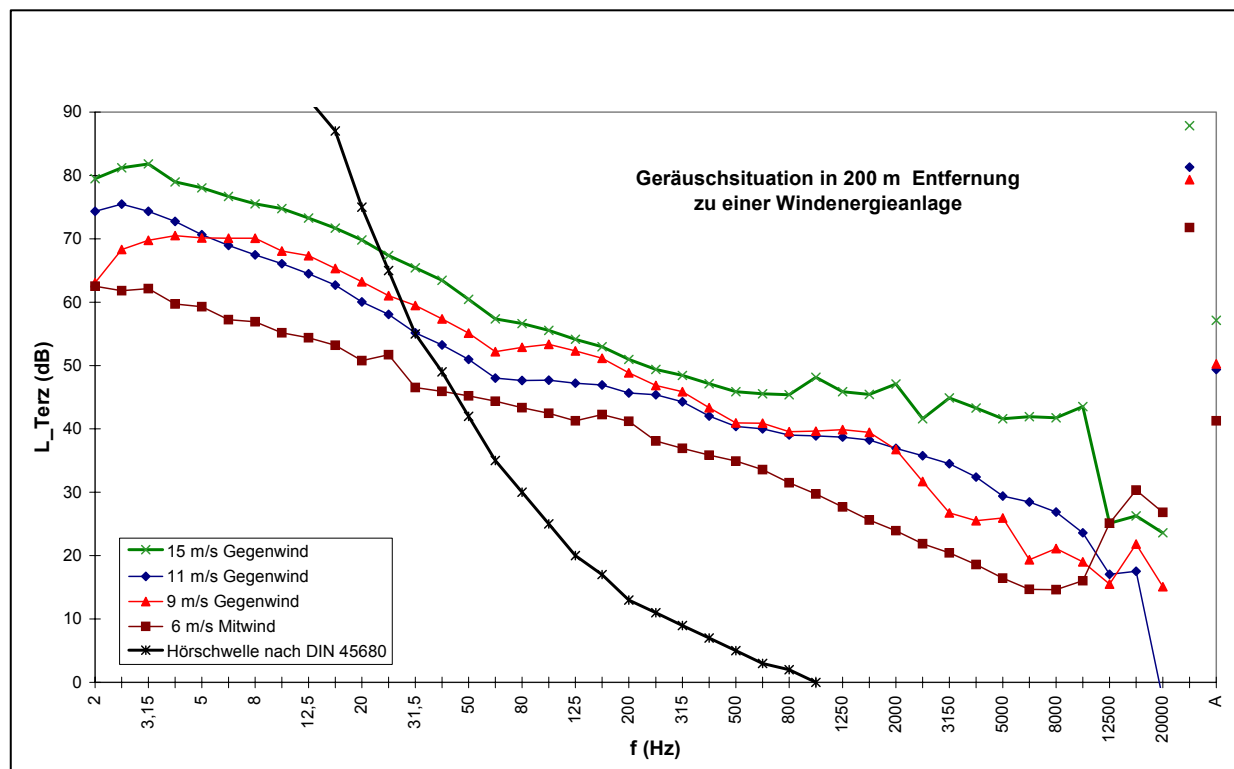


Abb.2: Schallimmissionen einer Windenergieanlage [12]

Emissionen natürlicher Quellen treten zwar mit hohen Pegeln im Infraschallbereich (Wind bis 135 dB) in einem relativ großen Einwirkungsbereich auf. Da sie aber selten und nur kurzzeitig auf den Menschen einwirken, haben sie keine besonderen Auswirkungen. Technische Quellen dagegen wirken, wenn auch räumlich begrenzt, ständig oder zumindest längere Zeit, auf den Menschen ein. Hierbei werden zusammen mit dem Infraschall häufig auch Schallemissionen im Hörschallbereich abgestrahlt [16,17].

Tabelle 2: Zusammenstellung maximal ermittelter Dauerschallpegel im Infra- und Hörschallbereich nach Magnusson und Malmquist [17]

Geräuschquellen	Infraschallpegel dB(IL) ¹⁾	Hörschallpegel dB(A)
<u>Industrie</u>		
Röstanlagen-Fabrik/Gebäude/Öfen	109	96
Eisenhütten, Hochöfen	103	99
Elektro-Hochofen	117	102
Ölbrenner zum Erhitzen von Gußformen	115	102
Mine, Förderschacht	100	(80)
Heizkraftwerk im Kesselraum	96	94
Kompressoren-Raum	115	107
Asphalt-Zerkleinerungsanlage	94	97
Gesteinsmühle	121	104
Wasserkraftwerk (unterirdisch)	130 max. bei 1,5 Hz	78
Gasturbinenhalle	109	112
Sägegatter	98	95
Zellstoffwerk	112	108
Druckerei, Rotationspresse	85	103
Heizkraftwerk-Maschinenhalle	82	87
<u>Schiffe</u>		
Tankschiff: gemessen am Lufteinlaßkanal	116	74
neben der Kommandobrücke	111	77
Torpedoboot-Maschinenraum	107	70
<u>Verkehrsmittel</u>		
Pkw Citroen, Seitenfenster offen	126	75
Pkw VW, Seitenfenster offen	126	83
Schnellzug, Schlafwagenabteil		
Fenster offen	107	55
Flugzeug Caravelle	96	84
Flugzeug DC-9	93	93
Diesel-Lastkraftwagen	103	96
Diesel-Lokomotive (langsame Fahrgeschw.		
Seitenfenster offen)	105	77
Elektro-Lokomotive (Bergfahrt)	111	86
<u>Arbeitsplätze und allgemeine Aufenthaltsorte</u>		
Unterirdische Räume, Lüftungsanlage	90	89
Leseraum Lüftungsanlage	90	60
Aussichtsturm 155 m Höhe	89	69
Appartementhaus, 23.Etage	84	56
Büroräume	97	52
Büroräume, Lüftungsanlage	80	33
Gehöruntersuchungszentrum, Sala	77	34
Gehöruntersuchungszentrum, Västerås	74	22
Büroräume in einem ruhigen Stadtviertel	53	33

¹⁾Schalldruckpegel im Frequenzbereich 1 Hz bis 20 Hz

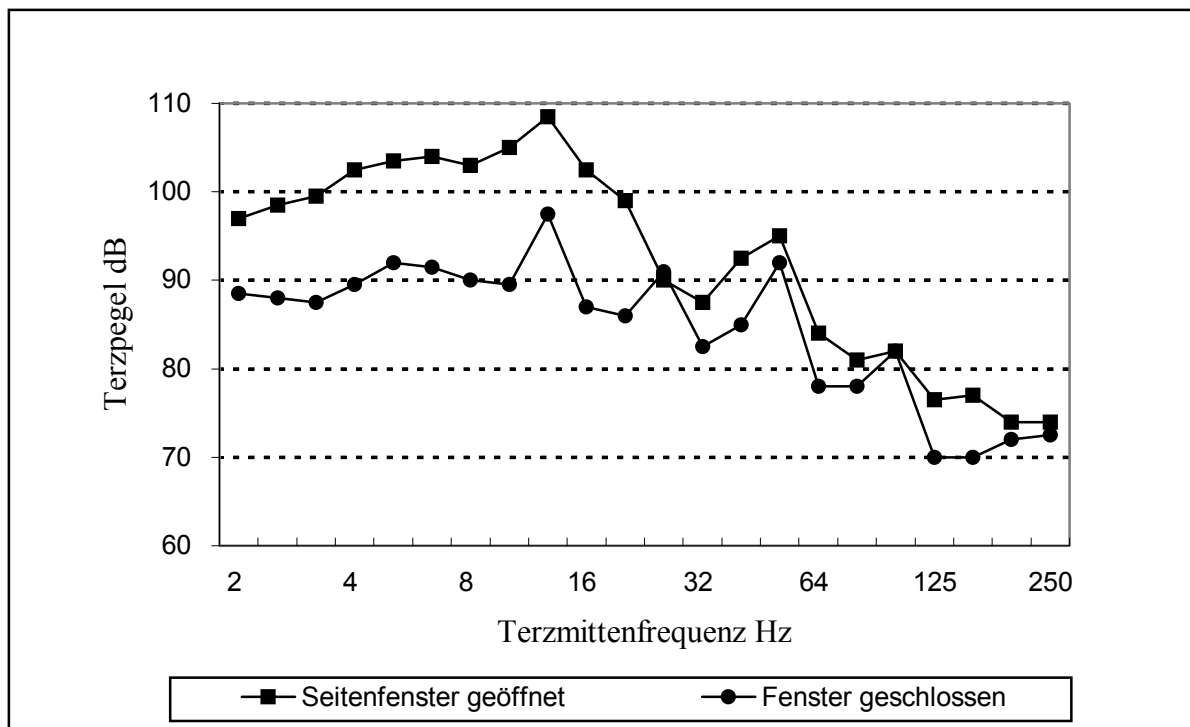


Abb. 3: Schalldruckpegel in einem Pkw bei 90 km/h

Erhebliche Infraschallexpositionen können unter bestimmten Bedingungen in Verkehrsmitteln (Pkw, Bus, Verkehrsflugzeug, Schiffen (s. Abb. 3)) und an Verkehrsbauwerken (Brücken, Tunnel) auftreten.

Bei industriellen Anlagen sind vor allem an bestimmten Arbeitsplätzen hohe Infraschallpegel möglich (s. Abb. 4). Werden Maschinen mit großen betriebsbedingten Schwingungen durch eine ungünstige Aufstellung an großflächige Gebäudeteile (Wände, Dächer) angekoppelt, so kommen in der benachbarten Wohnbebauung manchmal noch relativ hohe Infraschallimmissionen im Bereich von 100 bis 110 dB vor. Auch in großen Gebäuden wie Kongreßzentren, Schulen und Krankenhäusern können durch Heizungs-, Installations- und Lüftungsanlagen Infraschallbelastungen entstehen, die Werte bis ebenfalls 110 dB erreichen können.

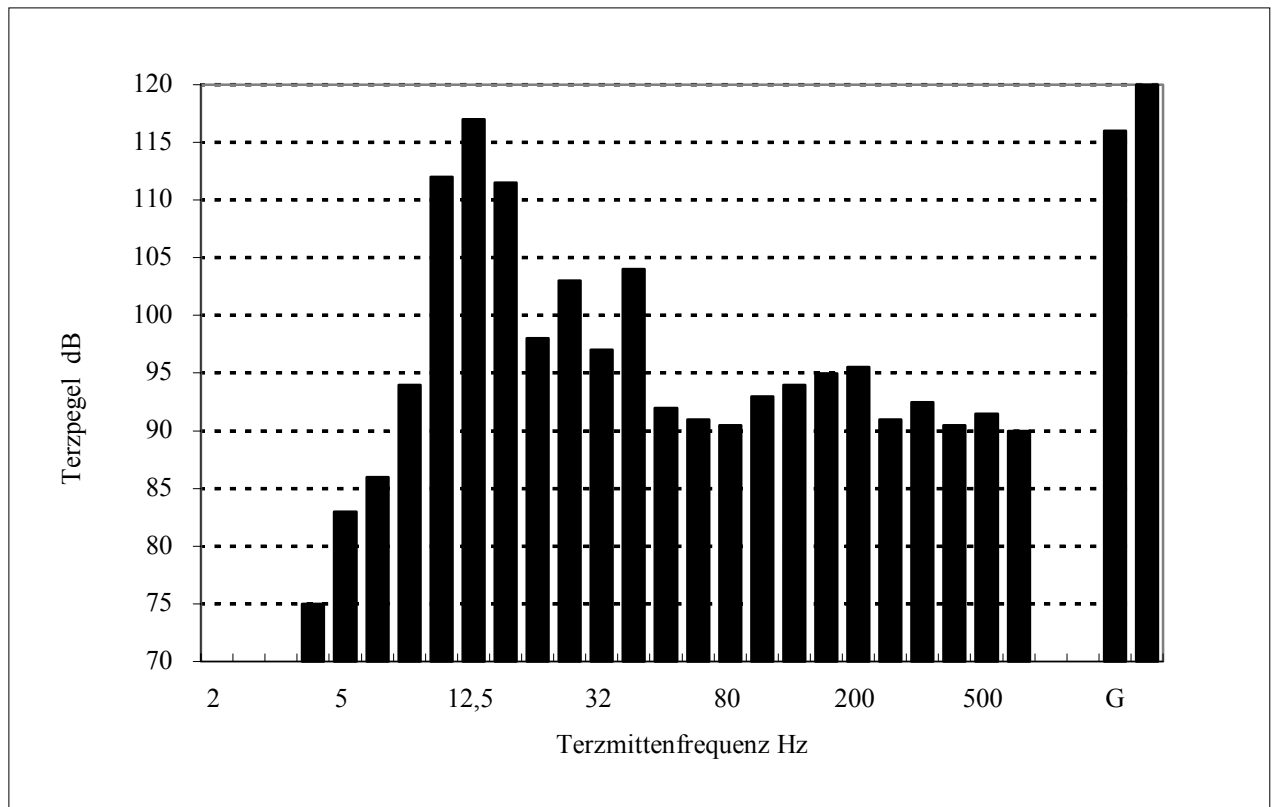


Abb. 4: Auspacktrommel für Eisenguss- und Formteile in 5 m Entfernung

Bei allen bisher erwähnten technischen Schallquellen ist die Abstrahlung von Infraschall ein nicht beabsichtigter oder unerwünschter Nebeneffekt. In ganz seltenen Fällen wie z.B. das Reinigen von Kesseln, Luftwärmern und Filtern durch das "Infrafon" wird der Infraschall gezielt erzeugt. Die spektakulärste geplante Verwendung, die vielfach in der Literatur zitiert wird, war die Entwicklung einer Infraschallquelle zu militärischen Zwecken in den 50er und 60er Jahren ("Todesposaune von Marseille"). Die von Gavreau [9] konzipierte Basskanone scheiterte an den Dimensionen dieser Pfeife sowie an der Energiezufuhr.

Die vorliegenden Erhebungen über Infraschall zeigen, dass an Arbeitsplätzen erhebliche Infraschallpegel auftreten können, im Wohn- und Erholungsbereich Infraschall vereinzelt im Freien anzutreffen ist und innerhalb der Wohnungen der Infraschall gegenüber anderen Schwingungsimmissionen relativ selten mit wahrnehmbaren Pegeln vorkommt.

4 Wirkungen auf den Menschen

Während tieffrequente Bodenschwingungen (Erschütterungen) den menschlichen Körper unmittelbar anregen und einzelne innere Organe in Resonanzschwingungen bringen können, bleibt der Körper bei Infraschallexpositionen in Ruhe. Die Luftdruckschwankungen wirken nur auf die im Körper vorhandenen gasgefüllten Hohlräume, wie Lunge, Nasen- und Stirnhöhle sowie Darmbereich ein. Während es bei diesen Körperteilen selbst bei relativ hohen Pegeln zu keinen besonderen Auswirkungen kommt - abgesehen vielleicht von einer Sprachmodulation

durch den mit der Infraschall-Frequenz vibrierenden Brustkorb -, ist das Mittelohr als Hohlraum auch für diese Frequenzen sensibel.

Die Annahme, daß man Infraschall nicht wahrnehmen kann, wird durch verschiedene grundlegende Untersuchungen widerlegt. So stellte bereits Yeowart [32] fest, daß bei entsprechend hohen Schalldruckpegeln ein "Höreffekt" entsteht. Die von ihm in den Infraschallbereich ausgedehnte Hörschwelle wurde von Möller bestätigt und durch Kurven gleicher Lautstärke ergänzt [21,22].

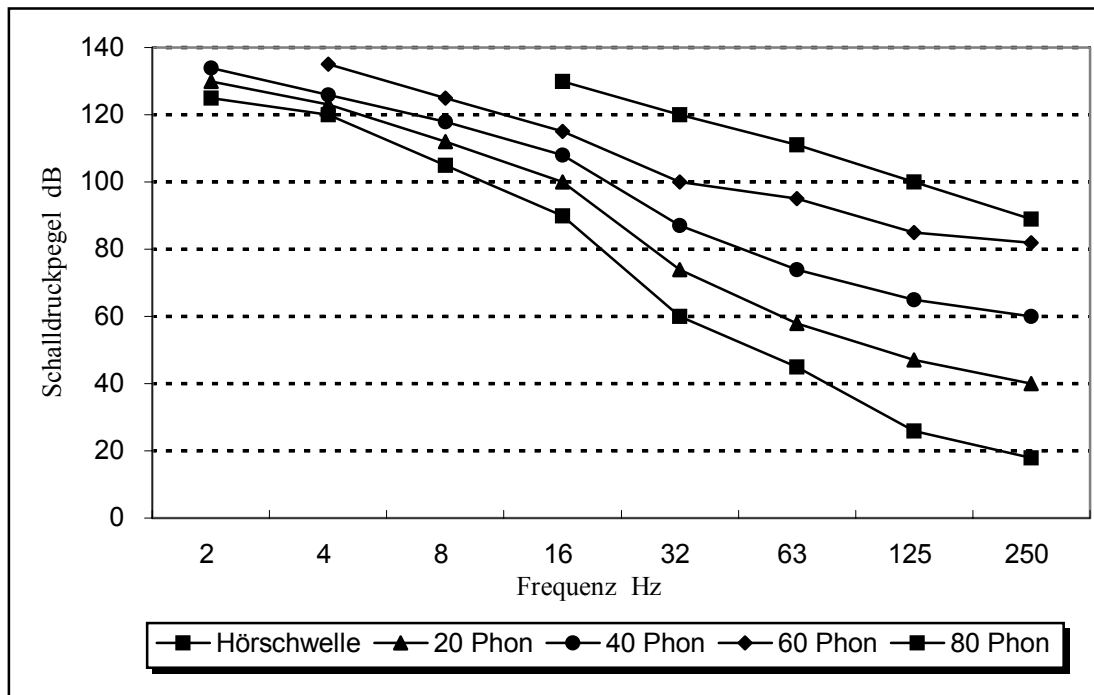


Abb. 5: Hörschwelle und Kurven gleicher Lautstärke im Bereich tiefer Frequenzen (n. Yeowart, Möller)

Das Gehör ist schon bei Frequenzen unterhalb 100 Hz immer weniger in der Lage, das Schallsignal einer bestimmten Frequenz zuzuordnen (Tonhöhenempfindung); bei 20 Hz erfolgt nur noch eine undeutliche Schallempfindung, die am besten mit Flattern zu beschreiben ist. Dieser Gehöreindruck ergibt sich bei ausreichend hohen Pegeln auch bei noch tieferen Frequenzen. Er ist durch die zwar langsamen, aber relativ großen Bewegungen der Basilarmembran zu erklären. Die "Hörbarkeit" tiefer Frequenzen kann teilweise auch durch nichtlineare Verzerrungen des Schallsignals im Mittel- und Innenohr erklärt werden. Die dabei entstehenden Klirrprodukte liegen als Oberwellen im Hörbereich.

Über die Auswirkungen von Infraschall auf den Menschen liegen zahlreiche Untersuchungen und Aussagen vor, die sich teilweise widersprechen. Als obere Grenze für Infraschalleinwirkungen, die bereits nach 10-minütiger Einwirkdauer zum Reißen der Alveolarhüllen (Lungenbläschen) und damit zum Tod des Lebewesens führen, wird 170 dB angegeben [11] (s. Abb. 6). Bei Pegeln über 160 dB ist mit einer mechanischen Beschädigung des Trommelfells sowie des Mittel- und Innenohres zu rechnen.

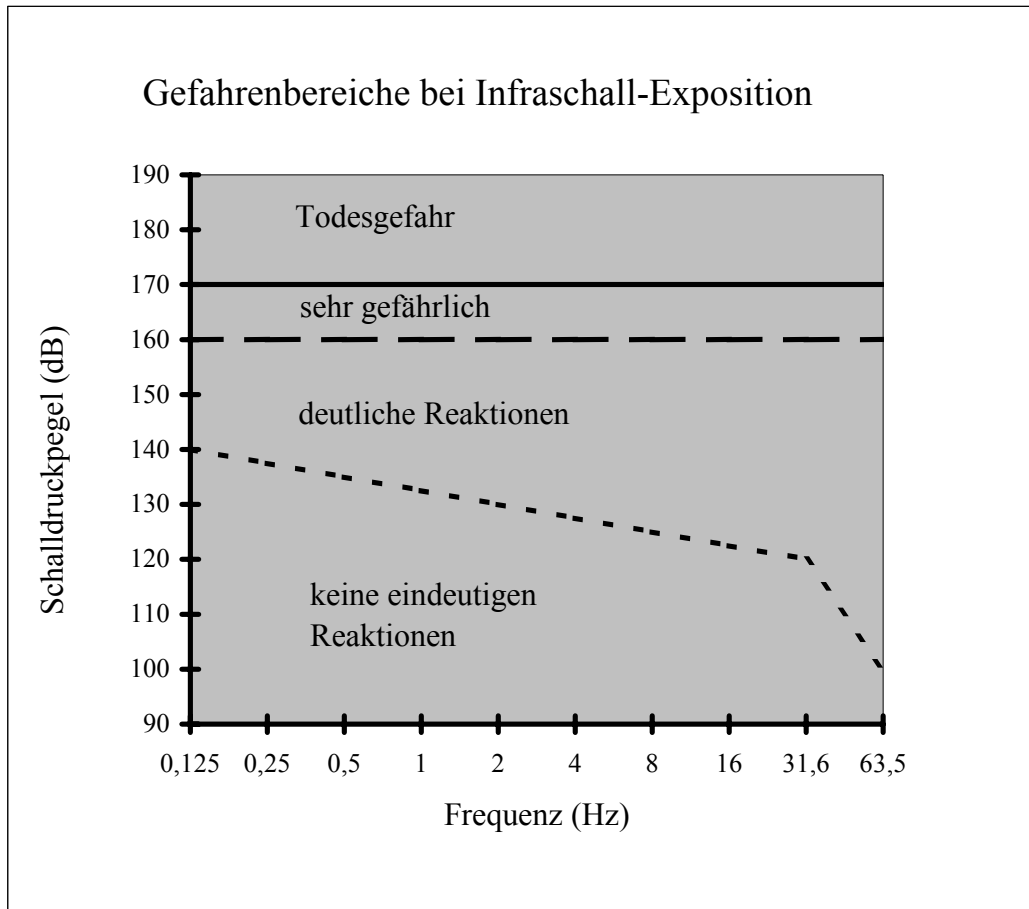


Abb. 6: Gefährdungsbereich bei Infraschallexpositionen

Bei Infraschallpegeln von 140 bis 155 dB wurden folgende Reaktionen und Erscheinungen beobachtet und durch Untersuchungen weitgehend bestätigt [11,25]:

- Störung des Gleichgewichtes, Übelkeit, Nausea (Seekrankheit),
- Atembeschwerden, Kopfschmerzen,
- Veränderung der Atem- und Pulsschlagfrequenz,
- Ermüdung, Schläfrigkeit, Benommenheit,
- Abnahme des Leistungs- und Konzentrationsvermögens,
- Verlängerung der Reaktionszeit,
- Anstieg des diastolischen Blutdruckes (Abfall des systolischen Blutdruckes nicht signifikant),
- allgemeine Streßreaktionen,
- Veränderungen des Nystagmus (unkontrollierte Bewegungen der Augenpupillen),
- Tinnitus (Ohrklingen und Rauschen).

Bei geringeren Pegeln bis 120 dB treten diese Erscheinungen nur vereinzelt und teilweise nur zu Beginn der Infraschalleinwirkung auf und sind meist nicht eindeutig als Reaktion auf diese Einwirkung nachzuweisen.

Wie auch beim Hörschall tritt bei Infraschallexpositionen eine vorübergehende, bei längerer Einwirkung eine dauernde Hörschwellenverschiebung auf, die sich weit in den normalen Hörbereich ausdehnt (bis zu Frequenzen von 1 kHz). Bei Pegeln von 130 bis 140 dB wurden Verschiebungen von 10 bis 12 dB festgestellt. Der Infraschall hat dabei eine maskierende Wirkung für den unteren und mittleren Hörbereich (Gehörstöpsel-Effekt). Ein quantitativer Zusammenhang zwischen Infraschallexposition und Hörverlust konnte bisher nicht gefunden werden, ist aber zu vermuten.

Physiologische Wirkungen unter 100 dB Schalldruckpegel ließen sich nicht feststellen. Dagegen treten ab der Wahrnehmbarkeitsschwelle psychologische Auswirkungen auf. Diese mit Störung und Belästigung zu bezeichnenden Erscheinungen äußern sich in Unsicherheit und Angstgefühlen, Sensibilisierung und Fixierung auf diese Geräusche. Da vielfach der Infraschall mit Geräuschen im Audio-Bereich oder mit Erschütterungen gekoppelt ist und sich in einigen Fällen durch Sekundäreffekte, wie klappernde Türen und Fenster, bemerkbar macht, sind diese Reaktionen nicht eindeutig dem Infraschall zuzuordnen. Man kann aber davon ausgehen, daß die Störwirkung (Annoyance) bereits ab der Wahrnehmbarkeitsschwelle auftritt [13,19,31].

Fast alle aufgeführten Wirkungen des Infraschalls auf den Menschen kommen auch im Audio-Bereich, zumindest bei den unteren Frequenzen, vor. Lediglich die Beeinflussung des Gleichgewichtsorgans, das im Innenohr integriert ist, kann als infraschallspezifische Reaktion betrachtet werden. Da die Kurven gleicher Lautheit in diesem Frequenzbereich nahe beieinander liegen (geringer Dynamikbereich zwischen Wahrnehmungsschwelle und Schmerzschwelle), wirken Infraschallsignale bereits bei eindeutiger Wahrnehmung als stark belästigend [22].

Bei Untersuchungen am Arbeitsplatz [16] wurde festgestellt, dass bei Anwesenheit von tiefen Frequenzen und Infraschall bei gleichzeitiger Lärmbelastung im normalen Hörbereich des Menschen folgenden Reaktionen auftreten:

- Ermüdung, Konzentrationsabbau während der Arbeit
- Anspannung, Unbehaglichkeit
- Belästigung und Ablenkung von Tätigkeit bzw. Arbeitsaufgabe
- Reizbarkeit
- erhöhte Müdigkeit nach der Arbeit

Der Infraschall führt demnach zu einer Verstärkung der Effekte, die bereits im normalen Hörbereich bei mittlerer und hoher Lärmbelastung auftreten. Entsprechende Untersuchungen wurden im Nachbarschaftsbereich zwar nicht durchgeführt; man kann aber ähnliche Auswirkungen annehmen.

5 Grenzwerte für Infraschallbelastungen

5.1 Frequenzbewertung

Da die Wirkung von tieffrequenten Schall sehr stark von der Frequenz abhängt, wurden für die Erfassung und Beurteilung Bewertungskurven ähnlich wie im Audio-Bereich eingeführt.

Die Norm für Schallpegelmesser DIN EN 60651 [5] sieht neben der unbewerteten Schalldruckerfassung „linear“ (lin bzw. flat) zwei unterschiedliche Frequenzbewertungen vor, die auch für den Infraschallbereich definiert sind. Die Frequenzbewertung A führt eine ohrgemäße Bewertung der Schallsignale bei niedrigen und mittleren Pegeln im normalen Hörbereich durch, und ist für die Erfassung und Bewertung von tieffrequentem Lärm ungeeignet [1]. Die Frequenzbewertung C entspricht der Lautheitsbewertung des Ohres bei hohen Pegeln (> 80 dB) und kann bedingt auch für Infraschall eingesetzt werden.

In der Norm ISO 7196 [15] ist die Bewertungskurve G für den Infraschall definiert, die eine Frequenzgewichtung mit Schwerpunkt bei 16 Hz vornimmt (s. Abb. 7). Erfahrungen mit dieser Bewertungskurve liegen bisher nicht vor. Als Grenz- bzw. Anhaltswert für Infraschallbelastungen am Arbeitsplatz werden 85 dB(G) vorgeschlagen. Im Nachbarschaftsbereich liegen diese Pegel im Bereich von 45 bis 55 dB(G) [21] in den Wohnräumen, bei 50 bis 65 dB(G) im Außenbereich (Terrasse oder Balkon).

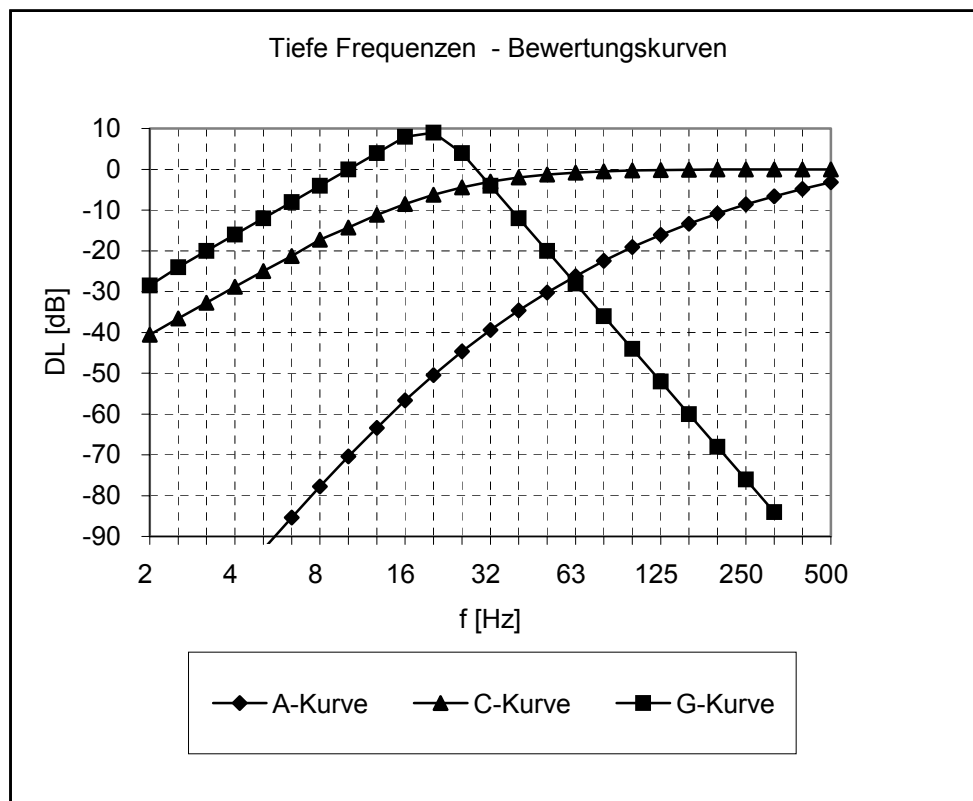


Abb. 7: Frequenzbewertungskurven im tieffrequenten Bereich nach ISO 7196 [15] und DIN EN 60651 [5]

Verschiedene Autoren und Standards geben in sogenannten Noise-Rating-Verfahren Grenzwerte für bandbegrenzte Geräuschanteile an. Die Grenzwerte orientieren sich an der Hörschwelle im zugehörigen Frequenzbereich und sind als Oktav- oder Terzpegel [6] üblich.

5.2 Infraschallbelastung am Arbeitsplatz

Aufgrund der bisher wenig abgesicherten, zum Teil auch widersprüchlichen Messergebnisse wurden nur in einigen Ländern und nur für bestimmte Einwirkungssituationen Richt- oder Grenzwerte eingeführt. So gibt es in **Schweden** und **Norwegen** Grenzwerte für die Einwirkung am Arbeitsplatz in Fabriken. In Schweden dürfen bei einem 8 h-Arbeitstag im Frequenzbereich 2 bis 20 Hz 110 dB nicht überschritten werden. In Norwegen liegt der Grenzwert für 4 bis 31,5 Hz bei 120 dB [2].

Der polnische Standard PN-86/N-01338 sieht folgende Pegel als zulässig für einen Arbeitstag (8h) an:

Tabelle 3: *Anhaltswerte für Infraschall-Belastung am Arbeitsplatz*

Zulässiger Schalldruckpegel [dB] „Lärmdosis“	Mittenfrequenz des Oktavbandes			
	4	8	16	31.5
1. Kategorie Gesundheitsschäden <i>kursiv: maximal zulässiger Pegel</i>	110	110 <i>137</i>	110 <i>137</i>	105 <i>132</i>
2. Kategorie Überwachungsaufgaben	90	90	90	85
3. Kategorie Verwaltungsaufgaben; Konstruktions- Büro; theoretische Arbeiten	85	85	85	80

Bei einer umfangreichen Erhebung an Arbeitsplätzen in Polen [21] wurden in den Kategorien 2 und 3 häufig Überschreitungen festgestellt. In der Kategorie 1 traten sie nur selten auf.

Von H.v.Gierke und C.W. Nixon [10] wurden für kurz andauernde Infraschalleinwirkungen, wie sie bei Start- und Landevorgängen in der Raumfahrt auftreten, folgende frequenzabhängige Grenzwerte für die Einwirkung von Infraschall angegeben:

Tabelle 4: Grenzwerte für Infraschallbelastungen nach Gierke, Nixon

	Frequenz Hz			
	1	5	10	20
Dauer h	Schalldruckpegel dB			
1	145	138	135	132
8	136	129	126	123
24	131	124	121	118

Diese Werte können nicht auf Langzeitexpositionen übertragen werden.

In Deutschland sind bisher keine Grenz- oder Anhaltswerte für den Infraschall am Arbeitsplatz festgelegt. Zur Vermeidung von Gehörschäden ist ein frequenzmäßig unbewerteter Spitzenpegel $L_{\text{peak}} \leq 140$ dB eingeführt, der auch Infraschallexpositionen bei diesem Wert begrenzen würde, sofern das Meßgerät diesen Frequenzbereich mit erfasst. Weitere Hinweise finden sich in der VDI-Richtlinie 2058 [27]. Der unbewertete Schalldruck sollte nach dieser Richtlinie folgende Schalldruckpegel nicht überschreiten:

120 dB bei 20 Hz

131 dB bei 1 Hz

Für Kontrollbereiche, Verwaltungs- und Entwicklungsbüros wären sicherlich die Grenzwerte der DIN 45 680 [4] für die Tageszeit anzustreben.

5.3 Anhaltswerte für die Allgemeinbevölkerung (Immissionsschutz)

Für den Bereich des Immissionsschutzes wurden bisher keine verbindlichen Grenzwerte festgelegt. In Japan bestehen Bestrebungen, die Wahrnehmbarkeitsschwelle als Grenze für zulässige Infraschallimmissionen festzulegen [31]. Auch in Großbritannien besteht die Ansicht, dass die Störfunktion mit der Wahrnehmung beginnt [26]. Das wurde in jüngerer Zeit durch Untersuchungen von H. Møller in Dänemark bestätigt [22]. In den Niederlanden gibt es Überlegungen, die 95% Hörschwelle als Grenzwert für Infraschallimmissionen festzulegen [26]. Diese Werte beziehen sich alle auf Immissionen innerhalb von Wohnräumen. Für den Außenbereich einschließlich Sport- und Erholungsfläche werden von Kubicek höhere Grenzwerte vorgeschlagen [17].

In der DIN 45 680 [4] wird die Hörschwelle der DIN 45 630 Bl. 2 [3] als Grenzwertkurve betrachtet und bis 8 Hz erweitert. Sie ist für den Frequenzbereich von 10 (8) Hz bis 80 (100) Hz anzuwenden und umfaßt also einen Teil des Infraschalls und den tieffrequenten Hörschall. Das in dieser Norm angegebene Beurteilungsverfahren stellt zunächst durch einen Vergleich des A-bewerteten Schalldruckpegels mit dem C-bewerteten Pegel am Immissionsort (hier Innenraum) fest, ob tiefe Frequenzen überwiegen. Ist die Differenz $L_C - L_A$ größer als 20 dB, so liegen tiefe

Frequenzanteile im Sinne dieser Norm vor. Das Geräusch wird dann durch eine Frequenzanalyse in die spektralen Anteile mit Terzbandbreite aufgeteilt. Überschreiten die einzelnen Terzpegel die Werte der Richtwerttabelle im Beiblatt zur DIN 45 680 [4], liegen unzulässige Immissionen für Einzeltöne oder auch für das gesamte Geräusch vor. Es wird dabei zwischen der Tages- und der Nachtzeit (s. Abb. 8) unterschieden.

Da bei der Vorprüfung der Schalldruck mit der Frequenzbewertung C erfaßt wird, sind Signalanteile unter 50 Hz zunehmend stärker abgesenkt. Reine oder überwiegende Infraschall-Expositionen werden mit diesem Verfahren nicht immer erkannt, so dass bei einem Verdacht auf Infraschalleinwirkung eine Frequenzanalyse des Geräusches mindestens bis zu einer unteren Grenzfrequenz von 10 Hz erfolgen sollte.

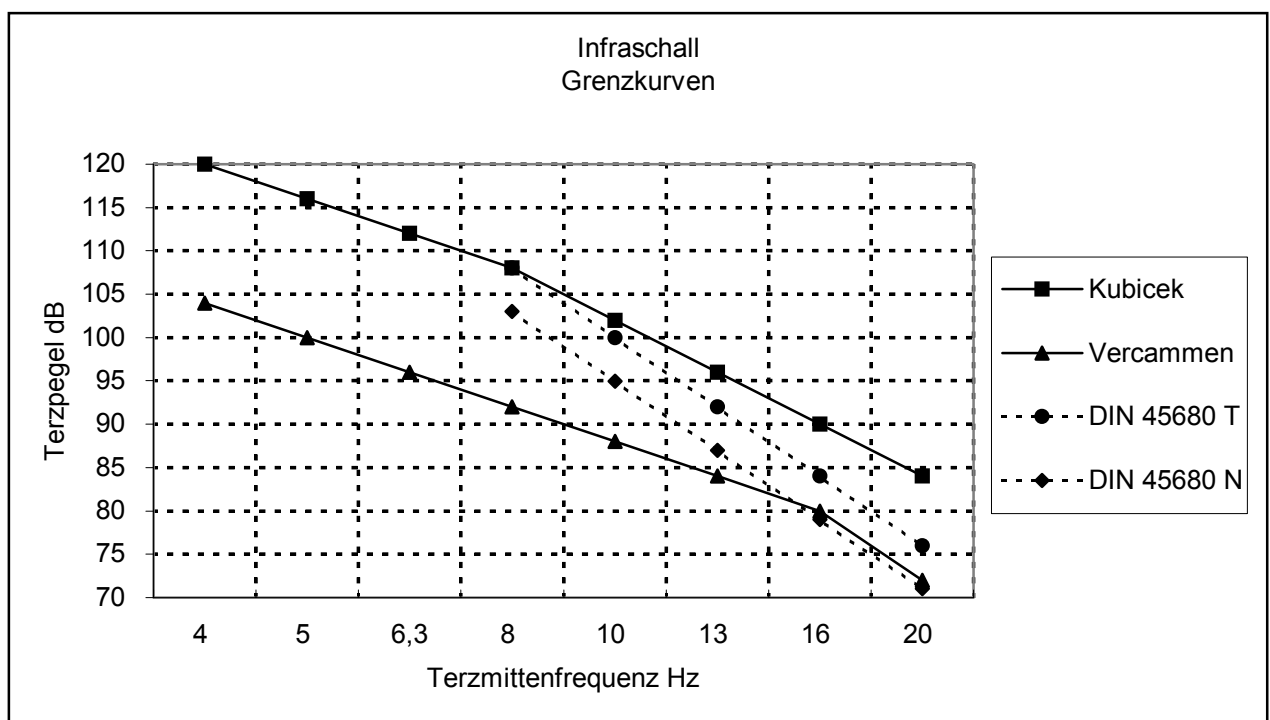


Abb. 8: Grenzkurven für Infraschall-Immissionen

6 Schutzmaßnahmen

Hinweise über spezielle Schutzmaßnahmen gegenüber der Einwirkung von Infraschall sind in der Literatur kaum vorhanden. Prinzipiell eignen sich die für den Luftschall im Hörbereich angewendeten aktiven (an der Quelle) sowie passiven (beim Betroffenen) Schallschutzmaßnahmen. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen ist aber aufgrund der großen Wellenlänge des Infraschalls, wie auch aufgrund des niedrigen Dämmverhaltens von Bauelementen, bei tiefen Frequenzen im Vergleich zum Hörschall stark herabgesetzt.

So verfügen Bauelemente wie Leichtbauwände, Dächer, Fenster und Tore, die als passive Schutzmaßnahmen verwendet werden, nur über eine geringe Schalldämmung. Schutzwälle besitzen nur eine geringe Abschirmung in diesem Frequenzbereich. Schalldämpfer nach dem Absorptionsprinzip können z.B. bei Heizungs- und Klimaanlage in der Regel nicht eingesetzt werden, da sie für eine merkbare Schallminderung zu groß dimensioniert werden müssten. Eine wesentliche Schallpegelverringerung ergibt sich erst bei einer Dicke des Absorptionsmaterials von einem Viertel der Wellenlänge des Infraschalls (5-10 m), da hier die Schallschnelle ihr Maximum hat.

In einzelnen Fällen konnten bei ausreichenden räumlichen und statischen Verhältnissen Resonanz-Absorber oder Bypass-Schalldämpfer eine deutliche Pegelsenkung im Infraschallbereich erreichen.

Bei industriellen Großanlagen kann durch eine Schwingungsisolierung der Antriebsaggregate sowie stark vibrierenden Maschinen (Stanzen, Rüttler) gegenüber dem Fundament [29,30] eine Anregung des umgebenden Gebäudes und damit eine Abstrahlung des Infraschalls durch Wand- und Dachflächen weitgehend vermieden werden. Durch konstruktive Maßnahmen an Maschinen oder an einzelnen Maschinenelementen wie Vermeidung von Unwuchten und Ankopplung von großen schwingenden Flächen lassen sich Infraschallemissionen im Einzelfall wesentlich verringern.

In den letzten Jahren wurden aktive Maßnahmen zur Emissionsminderung tieffrequenter Quellen entwickelt. Zur Verhinderung von Gebäudevibrationen, die dann als Luftschall abgestrahlt werden, kommen z.B. elektronisch gesteuerte Schwingungselemente zum Einsatz. Aber auch die direkte Luftschallabstrahlung einer tieffrequenten Quelle kann durch elektroakustische Maßnahmen (Lautsprecher) reduziert werden, wie z. B. die Abgasgeräusche einer 11 MW Gasturbine [8].

7 Messgeräte und Messausrüstung für den Infraschall

Für Messungen von Infraschall im Bereich des Immissions- und Arbeitsschutzes stehen verschiedene Mess- und Auswertegeräte für den normalen Hörschall (Audiobereich) zur Verfügung, die mit einer unteren Frequenzbereichbegrenzung bei 2 Hz auch für Infraschallsignale verwendbar sind.

7.1 Schallpegelmesser

Der Schallpegelmesser wandelt das akustische Signal (Schalldruck am Messort) in ein pegelproportionales elektrisches Signal um. Dabei erfolgt nach der Umformung des Signals durch das Mikrofon als elektroakustischen Wandler eine Frequenzbewertung, eine Gleichrichtung und Effektivwertbildung mit den definierten Zeitkonstanten F, S oder I, bei einzelnen Messverstärkern mit einer frei wählbaren Zeitkonstante sowie eine Logarithmierung bis

zur Pegelanzeige. Die technischen Anforderungen sind in der Norm DIN EN 60651 [5] festgelegt. Sie unterscheidet verschiedene Genauigkeitsklassen:

- Schallpegelmesser der Klasse 2 für die Überwachung von Betriebszuständen an Anlagen, für die überschlägige Bestimmung von Emissionsdaten sowie für Informationsmessungen am Immissionsort
- Präzisionsschallpegelmesser der Klasse 1 als eichfähiges Messgerät für rechtsverbindliche Messungen im Bereich des Immissionsschutzes und des Arbeitsschutzes
- Labormessgeräte der Klasse 0 für Untersuchungen in akustischen Laboren und Prüfständen

Die Geräte der Klasse 0 und 1 sind in der Regel auch für Infraschall-Messungen geeignet. Sie müssen dazu mit einem Mikrofon ausgestattet sein, dessen untere Grenze des Übertragungsbereiches bei 2 Hz liegt.

7.2 Dosimeter und integrierende Messgeräte

Zur Mittelwertbildung des Schalldruckpegels am Messort werden integrierende Messgeräte oder für den Arbeitsschutz auch Dosimeter eingesetzt. Die energetische Mittelung (L_{eq}) während der Messzeit erfolgt nach den Genauigkeitsanforderungen der DIN IEC 804 [7]. Außerdem können einige Geräte die Pegelverteilung während einer Messung speichern und die Summenhäufigkeitspegel $L_{x\%}$ berechnen.

7.3 Frequenzfilter

Für die Beurteilung tieffrequenter Geräusche ist in der Regel eine Frequenzanalyse erforderlich. Sie kann durch Terz- oder Oktavfilter [6] bei konstanten Geräuschen zeitversetzt oder bei schwankenden Signalen durch einen Echtzeit-Terz-Analysator simultan über den zu untersuchenden Frequenzbereich erfolgen. Für den Infraschall stehen nur einige meist netzgebundene Frequenzanalysatoren zur Verfügung. Einzelne Hersteller bieten Geräte mit den speziellen Frequenzbewertungskurven für tiefe Frequenzen an.

Für eine schmalbandige Frequenzauflösung sowie für singuläre (transiente) Ereignisse muss eine Fouriertransformation durch ein Rechnersystem erfolgen. Einige Hersteller bieten Frequenzanalysatoren an, die mit einer umfangreichen Auswertesoftware ausgestattet sind, die auch bei Infraschall eingesetzt werden kann.

7.4 Aufzeichnungsgeräte

7.4.1 Pegelschreiber:

Für die Darstellung des Pegelverlaufes am Messort können Pegelschreiber verwendet werden, die vom vorgeschalteten Schallpegelmesser gesteuert werden. Sie erlauben eine unmittelbare Kennzeichnung der Geräuschsituation vor Ort und sind bei integrierenden Messgeräten zur Dokumentation des Messablaufes unbedingt erforderlich.

7.4.2 Magnetbandspeicher:

Bei stark schwankenden Geräuschsituationen muss das Originalsignal auf einen geeigneten Datenträger (Tonbandgerät mit Aufzeichnung in Analog-, PCM- oder Digitaltechnik) zusätzlich mit einem ausführlichen Kommentar auf einer weiteren Spur gespeichert werden. Dann ist nachträglich durch eine Darstellung des Pegelverlaufes und durch Frequenzanalysen eine Aufschlüsselung des Geräuschgeschehens im Labor möglich. Für die Aufzeichnung von Infraschallsignalen kommen nur Aufzeichnungen in PCM- oder Digitaltechnik in Betracht.

7.4.3 Transientenspeicher:

Einmalige Ereignisse können für die spätere Auswertung durch Rechnerspeicher mit vorgeschaltetem schnellen Analog/Digitalwandler mit einer Auflösung im ms-Bereich gespeichert werden.

7.5 Kalibriereinrichtung

Für den Betrieb und die Überwachung der Messgeräte ist eine akustische und elektrische Kalibriereinrichtung einschließlich einer Kalibrierschallquelle (Normschallquelle) erforderlich. Für den Bereich des Infraschalls stehen zur Zeit nur Sonderanfertigungen dieser Einrichtung zur Verfügung.

8. Zusammenfassung

Die vorliegenden Untersuchungen und Ergebnisse zeigen, dass der Infraschall gegenüber den Geräuschen im normalen Hörbereich von untergeordneter Bedeutung ist, sich aber durchaus negativ auf den Menschen auswirken kann. Reaktionen treten erst eindeutig über der Wahrnehmungsschwelle auf. Diese wird durch Infraschall-Expositionen in einigen Fällen am Arbeitsplatz überschritten. Im Bereich des Nachbarschaftsschutzes treten hohe Infraschallpegel nur selten auf. Bei vielen Beschwerden über "Infraschall" handelt es sich um Schallimmissionen im tieffrequenten Bereich zwischen 20 und 100 Hz, in dem die Frequenzbewertungskurve A, die in den einschlägigen Normen und Richtlinien (TA Lärm, VDI 2058) vorgeschrieben wird, offensichtlich um 10-15 dB zu niedrig bewertet [24,29]. Daher sollte für den tieffrequenten Bereich, der den Infraschall zumindest teilweise mit einschließt, die Beurteilung der Lärmimmissionen

[24] nach dem neuen Bewertungsverfahren gemäß DIN 45 680 [4] für den Immissionsschutz erfolgen.

Da die Technisierung im Lebensraum des Menschen weiter zunimmt, müssen die Infraschall-Expositionen wie die allgemeine Lärmsituation weiterhin beobachtet werden. Sie sollten durch geeignete Maßnahmen gesenkt, zumindest ein weiteres Ansteigen verhindert werden.

9 Literatur

- [1] Broner, N., Leventhall, H.G.: Low Frequency Noise Annoyance and the dB(A)
Acoustics Letters Vol. 2, 1978
- [2] Brüel, P.: ISO Working Group Work for Infrasound and Ultrasound with particular Relation to Determination of Standards and Limitations for Working Environments, FANAK B 1/AK 1 Nr. 2-79
- [3] DIN 45 630 T.2 „Grundlagen der Schallmessung; Normalkurven gleicher Lautstärkepegel“, Beuth Verlag Berlin 09.1967
- [4] DIN 45680 „Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft“, Beuth Verlag Berlin 03.1997
- [5] DIN EN 60651 „Schallpegelmesser“, Beuth Verlag Berlin 1994
- [6] DIN EN 61260 „Elektroakustik Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven“, Beuth Verlag Berlin 03.1996
- [7] DIN IEC 804 „Integrierende mittelwertbildende Schallpegelmesser“, Beuth Verlag Berlin 01.1987
- [8] Epstein, As.H.; Ffowcs Williams, J.E.: Active supressions of compressor instabilities; AIAA 10th Aeroacoustics Conference, AIAA-86-1992
- [9] Gavreau, V. et al.: Infrasons, Acustica 17 (1966), 1-10
- [10] Gierke, v. H.E.; Nixon, C.W.: Effects of Intense Infrasound on Man; Infrasound and Low Frequency Vibration ed.W. Tempest; Academic Press, London, New York, San Francisco (1976)
- [11] Gono, F.: Infraschall und seine Wirkung auf Menschen; Arbeitsmedizin, Sozialmedizin, Präventivmedizin, Heft 7, Juli 1978
- [12] Hammerl, Ch.: Schalltechnische Langzeit-Untersuchungen an einer Windenergieanlage; Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Mai 1998

- [13] Ising, H.; Schwarze, D.: Infraschallwirkung auf den Menschen, Zeitschrift für Lärmbekämpfung 29, 70-82 (1982)
- [14] ISO 226: "Acoustics - Normal equal-Loudness level contours", 5.1987
- [15] ISO 7196: "Acoustics - Frequency Weighting Characteristic for Infrasound Measurements" 3.1995
- [16] Kjellberg, A.; Tesarz, M.; Landström, U.; Holmberg, K.: Subjective Response Patterns Related to Low Frequency Noise; Proceedings of the 8th International Meeting on Low Frequency Noise & Vibration; Göteborg Juni 1997
- [17] Kubicek, R.: Vorkommen, Messung, Wirkung und Bewertung von extrem tieffrequentem Schall einschließlich Infraschall in der kommunalen Wohnwelt, Dissertation TH Zwickau, 1989
- [18] Magnusson, L. ; Malmquist, N.: Infraschall am Arbeitsplatz, Vorkommen und Wirkung, Schweden 1973/74
- [19] Leventhall, H.G.: Man-made Infrasound: Its Occurrence and some subjective Effects, Colloques internationaux du Centre National de la recherche scientifique Paris Sept. 73
- [20] Mirowska, M.: An Investigation and the Assessment of Annoyance of Low Frequency Noise in the Dwellings, Proceedings of the 8th International Meeting on Low Frequency Noise & Vibration; Göteborg Juni 1997
- [21] Møller, H.: Annoyance from Audible Infrasound; Proceedings of the 3rd International Meeting of Low Frequency, Noise and Vibration, Sept. 1985
- [22] Møller, H.: Effects of Infrasound on Man, Aalborg University Press, 1984
- [23] Pawlacyk-Luszczynska, M.: Occupational Exposure to Infrasonic Noise in Poland, Proceedings of the 8th International Meeting on Low Frequency Noise & Vibration; Göteborg Juni 1997
- [24] Piorr, D. Wietlake, K.H.: Assessment of Low Frequency in the Vicinity of Industrial Noise Sources; Proceedings of the 5th International Conference on Low Frequency, Noise and Vibration, Oxford, September 1989
- [25] Schust, M.: Biologische Wirkung von vorwiegend luftgeleitetem Infraschall; Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin Ld 7; Dortmund/Berlin 1997
- [26] Vasudevan, R.N.; Gordon, Edin G.: Experimental study of Annoyance due to Low Frequency Environment; Applied Acoustica (10) 1977
- [27] VDI-Richtlinie 2058 Blatt 2: Beurteilung von Lärm hinsichtlich Gehörgefährdung; Beuth Verlag Berlin Juni 1988

- [28] Vercammen, M.L.S.: Setting Limits for Low Frequency Noise; Proceedings of the 5th International Conference on Low Frequency Noise and Vibration, Oxford Sept. 1989
- [29] Wietlake, K.H.: Beurteilung und Minderung tieffrequenter Geräusche; Bericht Nr. 38 der Landesanstalt für Immissionsschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 1983
- [30] Wietlake, K.H.; Quantz, J.F.: Minderung tieffrequenter Geräusche, aufgezeigt an konkreten Fällen; Schalltechnik '93; VDI Bericht 1040, 1993
- [31] Yamada, S.; Kosakoc, T.; Bunya, K.; Amemya, T.: Hearing of Low Frequency Sound and Influence on Human Body, Proceedings of the Conference on Low Frequency Noise and Hearing, ed. Henrik Møller and Per Rubak, Aalborg, May 1980
- [32] Yeowart, N.S.: Thresholds of Hearing and Soundness for Very Low Frequencies, in Infrasound and Low Frequency Vibration, ed. W. Tempest; Academic Press, London, New York, San Francisco 1976

11 Adressen

Bayerisches Landesamt für Umweltschutz
 Referat 2/4 „Akustische und optische Messtechnik“
 86177 Augsburg
 Tel.: 0821 9071-0