

# Infraschall und tieffrequenter Schall – ein Thema für den umweltbezogenen Gesundheitsschutz in Deutschland?

## Mitteilung der Kommission „Methoden und Qualitätssicherung in der Umweltmedizin“

Das Ziel des vorliegenden Statusberichtes besteht darin, das Thema „Infraschall“ auf seine Relevanz für den vorsorgenden Gesundheitsschutz zu überprüfen, den gegenwärtigen Wissensstand zu evaluieren und gegebenenfalls Forschungsbedarf aufzuzeigen.

### 1 Schall

Physikalisch betrachtet entsteht Schall durch die Ausbreitung von Wellen in der Luft oder in sonstigen elastischen Medien, z. B. Boden oder Wasser (z.B. [1]). Daher können Schallarten nach ihrem Ausbreitungsmedium in Luftschall, Flüssigkeitsschall und Körperschall unterteilt werden [1, 2]. Schall erreicht in der Regel über die Luft das menschliche Gehör. Die von einer Schallquelle abgestrahlte Luftschallenergie (Emission) verteilt sich bei ungehinderter Ausbreitung kugelförmig, und die Schallenergie nimmt demzufolge mit wachsender Entfernung von der Schallquelle ab. Bei größerer Entfernung sind darüber hinaus Ausbreitungsverluste (z. B. Dissipation, Bodenabsorption) zu beachten [3].

Wahrnehmung bezeichnet im Allgemeinen den Vorgang der bewussten Aufnahme von Informationen eines Lebewesens über seine Sinne. Das für die Wahrnehmung von Schall zuständige Sinnesorgan ist das Ohr. Tieffrequente Schallereignisse können darüber hinaus auch mit anderen Organen wahrgenommen werden (taktile sowie vestibuläre

Wahrnehmung). Im Rahmen der Psychoakustik wird von Hörschall gesprochen, wenn der Schallreiz sowohl eine Lautstärkewahrnehmung als auch eine Tonhöhenwahrnehmung hervorruft. Der Bereich sehr tiefer Frequenzen, in dem die Wahrnehmungskomponente Tonhöhe nicht mehr existiert, wird als Infraschall bezeichnet (Abb. 1).

### 2 Definition und Wahrnehmung von Infraschall und tieffrequentem Schall

In der ISO 7196 (1995) [4] wird für den Infraschall (infrasound) ein Frequenzbereich von 1–20 Hz als internationaler Standard ausgewiesen und mit einer eigenen Frequenzbewertung „G“ versehen [5],

womit er den tieffrequenten Hörschallbereich nicht umfasst. Da die Effekte von Infraschall und tieffrequentem Hörschall sich jedoch nicht qualitativ unterscheiden, ist eine solche Abgrenzung aus umweltmedizinischer Sicht nicht besonders zweckmäßig.

Bereits unterhalb von 100 Hz verändern sich Qualität und Art der akustischen Wahrnehmung: Töne werden deutlich schlechter, unterhalb 50 Hz [6] bzw. 20 Hz [7, 8] bzw. 18–16 Hz [9] gar nicht mehr wahrgenommen. Im tieffrequenten Schallbereich, unterhalb von 200 Hz [10] oder in Anlehnung nach DIN 45680 [11] von 100 Hz, ist der Übergang vom „Hören“ (Lautstärke- und Tonhöhenwahrnehmung) zum „Fühlen“ fließend. Tieffrequente Schallimmissionen werden

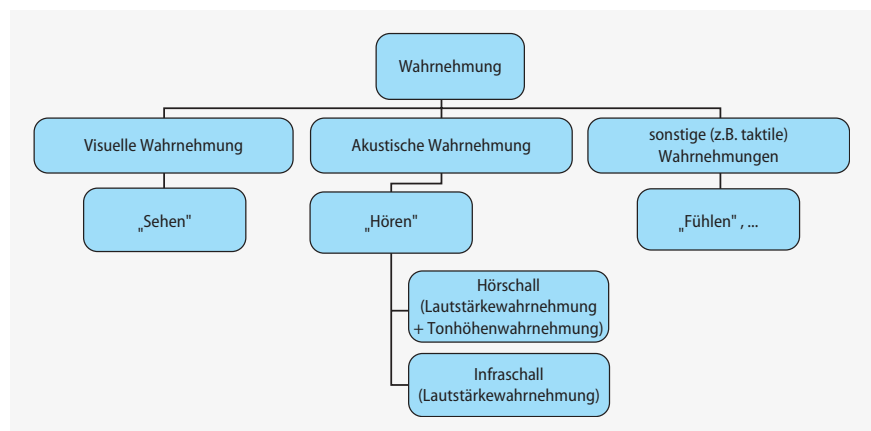


Abb. 1 ▲ Zur Einordnung der akustischen Wahrnehmung

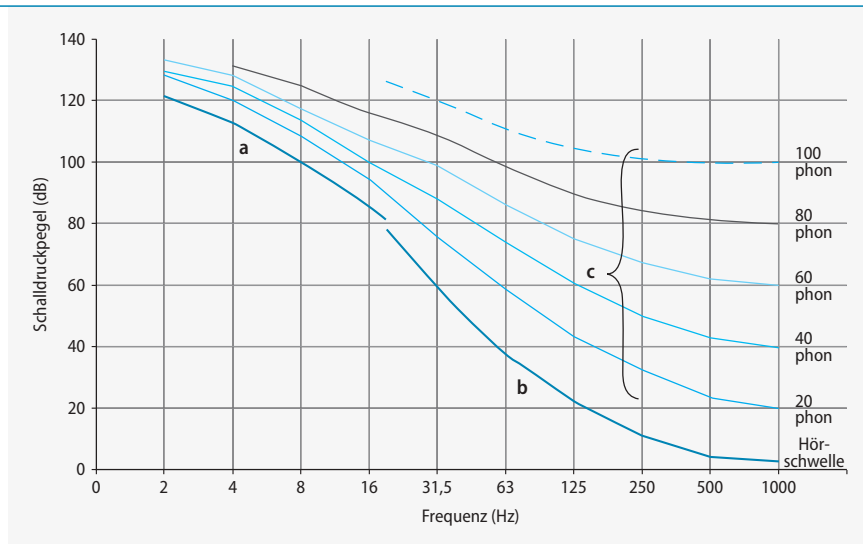


Abb. 2 ▲ Hörschwelle und Kurven gleicher Lautstärke im Frequenzbereich unter 1000 Hz (Darstellung in Anlehnung an Møller und Andresen (1984) [14]). a: nach Møller und Pedersen (2004) [8], b: nach DIN EN ISO 389-7 (2006) [15], c: Kurven gleicher Lautstärke: Im Frequenzbereich von 20–1000 Hz nach DIN ISO 226 (2003) [16], im Frequenzbereich < 20 Hz nach Møller und Andresen (1984) [14]. Alle Kurven wurden in den Intervallen zwischen den angegebenen Frequenzen linearisiert.

häufig als Ohrendruck, Vibrationen oder Unsicherheitsgefühl beschrieben [6]. Generell gilt, je tiefer die Frequenz, desto höher muss der Schalldruckpegel (gemessen in Dezibel (dB)) sein, damit der Mensch eine Wahrnehmung erfährt. Nach diesem Prinzip steigt der Schalldruckpegel an, bis bei einer Frequenz von etwa 1,5 Hz [7] bzw. 0,5 Hz [12] die absolute Wahrnehmungsgrenze erreicht wird (bei 4 Hz liegt die Schwelle bei über 100 dB) [8, 13] (■ Abb. 2).

Durch die fehlende bzw. eingeschränkte Tonwahrnehmung gibt es ein Hören im engen Sinne nicht mehr, wodurch die Mess- und Beurteilungsverfahren, wie sie im normalen Hörbereich üblich sind, nicht mehr angewendet werden können [7]. Tieffrequenter Schall kann in Form einer indirekten Art und Weise des „Hörens“ wahrgenommen werden [12]. Hier kommen vor allem Mechanorezeptoren in Betracht. Sie vermitteln Druck-, Berührungs-, Kitzel- und Vibrationswahrnehmungen [17]. Unterhalb 10 Hz können sogar die Schalldruckschwankungen wahrgenommen werden [8]. Körpervibrationen entstehen durch tieffrequenten Schall und Umgebungsvibrationen. Sie sind eine wichtige Stimulation, die die menschliche Wahrnehmung und auch ihre Reaktionen auf tieffrequenten Schall beeinflussen können [12].

Infraschall bzw. tieffrequenter Schall haben – oberhalb der „Hörschwelle“ – eine stärkere Störwirkung als Schallpegel des tonalen Hörbereiches [7]. Das liegt unter anderem daran, dass bei tiefen Frequenzen die Kurven gleicher Lautstärke enger beieinander liegen als bei höheren (■ Abb. 2). Der individuell unterschiedliche Bereich zwischen „Hörschwelle“ und auralem Schmerzempfinden wird mit abnehmender Frequenz immer kleiner [18]. Daher können schon ab der „Hörschwelle“ extraaurale Wirkungen auftreten [19]. Infraschall wird lästig, wenn er deutlich wahrnehmbar ist [20]. Bei tieffrequenten Geräuschen um 20 Hz ist von einer Verdoppelung der Lautstärke bei 5 dB auszugehen – im Gegensatz zu ca. 10 dB bei Frequenzen im normalen Hörbereich [9]. Tiefe Frequenzen ( $\leq 100$  Hz) sind auch für den Schutzbereich von Erschütterungsimmissionen relevant, der sich auf Gebäude und auf Menschen in den Gebäuden erstreckt [21].

Es gibt darüber hinaus Hinweise auf für tieffrequenten Schall außerordentlich sensible Personen [8]. Bei diesen kann die Wahrnehmungsschwelle um ca. 10 dB niedriger liegen [22]. Leventhal [10] schätzt sogar, dass bei sensiblen Personen die Hörschwelle um mindestens 12 dB niedriger anzusetzen ist. Babisch [7] beschreibt eine kleine, im Hinblick auf

tieffrequenten Schall besonders aufmerksame und sensible Bevölkerungsgruppe: Die betroffenen Personen leiden an einer Zwangsaufmerksamkeit, aufgrund derer sie sich ständig auf diesen tieffrequenten Ton konzentrieren müssen, sobald dieser die Hörschwelle erreicht und nicht durch höherfrequente Geräusche überdeckt wird. Sie berichten unter anderem von chronischer Erschöpfung („fatigue“). Maschke et al. [23] empfehlen, die Richtwerte für tieffrequente Luftschallimmissionen so zu legen, dass 95 % der Bevölkerung geschützt sind, und sich nicht auf den Medianwert (Hörschwelle) zu beziehen. Für Schlafräume sollte die nominale Wahrnehmbarkeitsschwelle für tieffrequenten Schall [11, 23] daher um 10 dB unterschritten werden.

Resümee: Es gibt bei 16–20 Hz keine distinkte Hörgrenze, unterhalb derer keine „Hörwahrnehmung“ mehr erfolgt, sondern vielmehr einen nicht eindeutig abgrenzbaren Übergangsbereich, in dem lediglich die Tonhöhenwahrnehmung, nicht aber andere Wahrnehmungsgrößen, verschwinden. Für den umweltbezogenen Gesundheitsschutz wird daher empfohlen, auf eine Trennung in tieffrequenten Hörschall und Infraschall zu verzichten und einen einheitlichen Frequenzbereich für tieffrequenten Schall zu etablieren, der aufgrund seiner Wirkungsbesonderheiten den Frequenzbereich bis 200 Hz umfassen sollte. Diese breite Arbeitsdefinition soll keineswegs die Besonderheiten von Infraschall in den Hintergrund rücken. Er wird in der vorliegenden Stellungnahme als Bereich des tieffrequenten Schallbereichs angesehen, der sich durch das Fehlen der Tonhöhenwahrnehmung auszeichnet. Er bedarf aufgrund seiner Wahrnehmungsbesonderheiten und der derzeitigen Erfassungsschwierigkeiten (Details siehe unter Messverfahren) einer besonderen Beachtung.

### 3 Ausbreitung, Schutzmöglichkeiten, Emittenten und Messverfahren von Infraschall und tieffrequentem Schall

Tieffrequenter Schall unterscheidet sich vom sonstigen Hörschall durch seine deutlich größeren Wellenlängen (■ Tabelle 1), die damit in der gleichen Grö-

Tabelle 1

**Frequenz und Wellenlängen von tieffrequentem Luftschall**

Frequenz (Hz)	1	5	10	16	20	25	50	100	150	200
Wellenlänge (m)	340	68	34	21,25	17	13,6	6,8	3,4	2,27	1,7

ßenordnung wie die Abmessungen der Umgebungsstrukturen liegen (z.B. Häuser, Räume und Brücken) [5]. Im Bereich um 25–150 Hz haben Wellenlängen die gleichen Dimensionen wie Räume [9] (■ **Tabelle 1**).

Durch dieses Größenverhältnis sowie durch die relativ langsamen Schalldruckschwankungen ergeben sich gegenüber dem sonstigen Hörschall abweichende Eigenschaften. So treten in Räumen „stehende Wellen“ als Resonanzeffekt auf, wenn die Frequenz der Schallanregung mit einer Eigenfrequenz des Raumes zusammenfällt [5]. Zum Beispiel treten in einem Raum von 4×5×2,5 m Größe tieffrequente Resonanzen ab 34 Hz aufwärts auf [9]. Insbesondere in der Nähe von räumlichen Begrenzungsflächen (Wänden) treten dann erhöhte Schalldruckpegel auf [5]. Darüber hinaus können Resonanzen den Schall auch örtlich abschwächen [9].

Aufgrund der Schallwellenlänge zeigen herkömmliche Absorptions- oder Dämmungsmaßnahmen, z. B. Lärmschutzwände, kaum Wirkung. So können sich die Wellen weitestgehend ungehindert ausbreiten, während der Ausbreitung vielfache Veränderungen erfahren und ohne wesentliche Abschwächung übertragen werden [5, 13]. Diese Eigenschaften bewirken, dass tieffrequenter Schall als Bestandteil von breitbandigen Geräuschen der technischen Umwelt (z. B. Verkehr) immer als wesentlicher Geräuschanteil in Wohnungen anzutreffen ist, wohingegen sonstiger Hörschall durch Dämpfungs- und Dämmungseinflüsse abgeschwächt wird [13].

Zur Verminderung von tieffrequentem Schall werden neben konstruktiven Maßnahmen und elektronischen Schwingungsdämpfungselementen auch elektroakustische Maßnahmen in Form von Antischall eingesetzt, der durch Interferenz gezielt bestimmte Schallwellen reduzieren oder auslöschen kann, eine Technik, die als Active Noise Control (ANC) bezeichnet wird [5]. Feldmann und Jakob [13]

weisen darauf hin, dass konventionelle Techniken zur Schalldämmung von Gebäudehüllen bei tieffrequentem Schall nur wenig hilfreich sind.

Die Emittenten von tieffrequentem Schall können in 2 Gruppen (natürliche und technische Quellen) eingeteilt werden. Bei den natürlichen Quellen kann es sich um Wasserfälle und Meeresbrandung, um starke Windströmungen und Luftturbulenzen sowie um Vulkanausbrüche und Erdbeben handeln. Dem gegenüber stehen technische Quellen, die vor allem in städtischer Umgebung überall anzutreffen sind. Bei den technischen Quellen handelt es sich z.B. um

- maschinenbetriebene Nutzgeräte (z.B. Heizungs- und Klimaanlage, Waschmaschinen, Gasturbinen, Kompressoren, Förderanlagen, Pumpen und Rüttler),
- Fahrzeuge (Bahn, Schiffe, Flugzeuge, Hubschrauber etc.),
- Beschallungsanlagen (Konzerte, Diskotheken etc.),
- Bauwerke (Hochhäuser, Tunnel und Brücken),
- Sprengungen und Geschütze (können bis zu 30 km übertragen werden).

Das menschliche Ohr ist bei konstantem Schalldruck für mittlere Frequenzen (1000–4000 Hz) empfindlicher als für tiefe und sehr hohe Frequenzen [24]. Aufgrund internationaler Vereinbarungen wird heute für die meisten Messungen des Schalldruckpegels ein Schallpegelmessgerät mit einem Filternetzwerk eingesetzt, dem A-Bewertungsfilter, dessen Frequenzgang dem des menschlichen Gehörs für „leise“ Töne ähnelt [7, 24] (■ **Abb. 3**). Dieser Bewertungsfilter nimmt bereits während des Messvorgangs eine entsprechende Korrektur der Schallintensität vor. Durch die Verwendung des A-Bewertungsfilters wird eine Annäherung an die frequenzabhängige Empfindlichkeit des Ohrs bei „leisen“ Geräuschen erreicht. Da der A-Bewertungsfilter dieser Empfindung angepasst ist, sollte er insbesondere zur

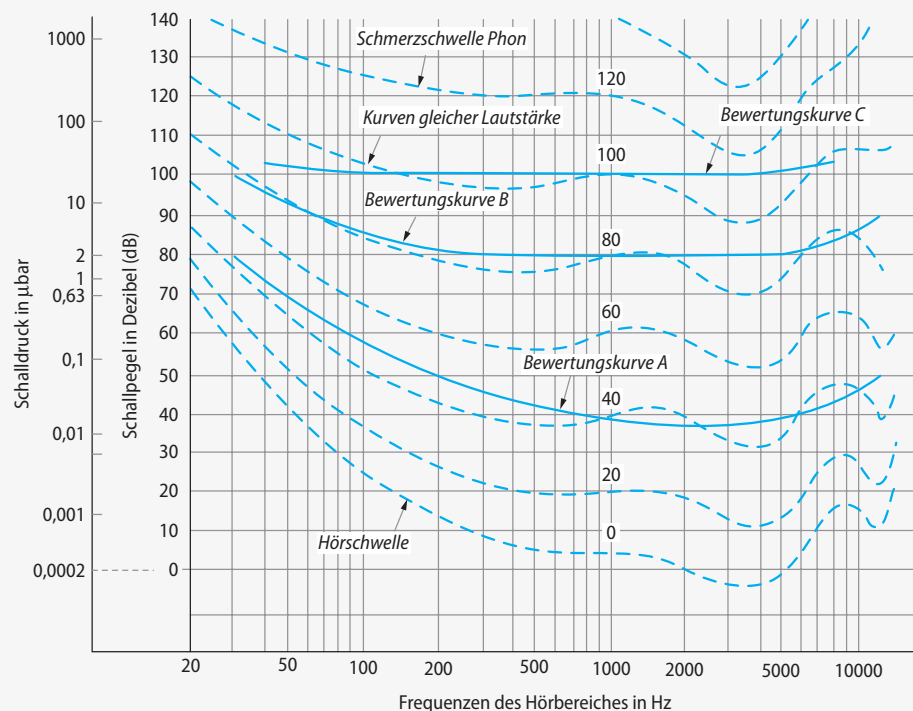
Beurteilung von „lauten“ tieffrequenten Geräuschmissionen nicht herangezogen werden, da eine erhebliche Unterschätzung der Lautheit erfolgt [24].

In Deutschland wird in der Praxis zurzeit der „C-bewertete Schallpegel“ ergänzend verwendet (DIN 45680), der tieffrequente Geräusche im Frequenzbereich von etwa 10–80 Hz besser erfasst als die A-Bewertung (■ **Abb. 3**). Die DIN 45680 soll eingesetzt werden, wenn die Differenz zwischen dem Schallpegel dB(C) und dB(A) mindestens 20 dB beträgt. Da auch die C-Bewertung den Signalanteil unterhalb 50 Hz abschwächt und den unterhalb 10 Hz in der Regel gar nicht berücksichtigt, ist auch der C-bewertete Schalldruckpegel nicht optimal zur Beurteilung von tieffrequentem Schall geeignet [5, 20]. Der C-bewertete Schallpegel hat sich jedoch vor allem für die Erfassung von tieffrequentem Schall in der behördlichen Praxis (mit einer Kombination aus akustischen und mikroseismischen Messtechniken) als flexibel und wirkungsvoll erwiesen [6, 25]. Dies verdeutlicht, dass es tieffrequente Belastungen gibt, die durch den A-Bewertungsfilter nicht erfasst werden. In Analogie zur A-Bewertung lässt dies aber auch vermuten, dass auch bei Anwendung des C-Bewertungsfilters unterhalb 50 Hz tieffrequente Belastungen existieren, die aufgrund seiner beschriebenen Schwächen unterschätzt werden.

Im Frequenzbereich unter 20 Hz wird die G-Bewertung vorgeschlagen (ISO 7196, 1995), die bisher wenig Verwendung findet [5, 20, 27]. Sie legt zur Bewertung von Infraschallsignalen eine Frequenzgangkurve G fest, die nach Stand des Wissens die direkte Wahrnehmung von luftgeleitetem Infraschall repräsentiert [5]. Die G-Bewertung berücksichtigt jedoch nicht die starke Annäherung der Kurven gleicher Lautstärke zu niedrigen Frequenzen (■ **Abb. 2**). Dadurch ist eine wirkungsadäquate Beurteilung erschwert. Es gibt Bestrebungen hier zu Fortschritten zu kommen, die allerdings bisher noch zu keinem tragfähigen Ergebnis geführt haben [28].

In diesem Zusammenhang problematisieren Betke und Remmers [20] die unterschiedlichen Bewertungsverfahren für tieffrequenten Schall (ISO 7196/G-Bewertung, DIN 45680, Hörbarkeitskriteri-

Abb. 3 ► Kurven gleicher Lautstärke und Frequenzbewertungskurven mit A-, B- und C-Bewertungsfilter [26]



um nach Vercammen 1992). Sie schlagen eine erweiterte Lautheitsberechnung nach Zwicker für gleich bleibende Geräusche vor (DIN 45631). Die DIN 45631 umfasst bisher nur den Bereich 25–12.500 Hz und soll nach Betke und Remmers [20] um den Bereich 2–20 Hz erweitert werden, um das gesamte Frequenzspektrum des tieffrequenten Schalls mit einem Verfahren abdecken zu können. Allerdings räumen beide Autoren weiteren Forschungsbedarf ein.

Das „Zwickerverfahren“ (DIN 45631) scheint für den Gesundheitsschutz ein interessanter Ansatzpunkt zu sein: Schusche und Maschke [24] stellen fest, dass es besonders hervorzuheben sei, weil es im Gegensatz zu den Frequenzbewertungskurven die Funktionsweise des menschlichen Gehörs (Frequenzgruppenbildung, Verdeckung und Drosselung) im Hörschallbereich umfassend berücksichtigt. Eine ergänzende Messung von Vibrationen [25, 29] sollte dabei in die Erwägungen mit einbezogen werden.

#### 4 Einschätzung der gesundheitlichen Wirkung von tieffrequentem Schall

Potenziell sind alle Menschen tieffrequentem Schall ausgesetzt, da tieffre-

quenter Schall ubiquitärer Bestandteil des modernen Lebens ist [9]. Daher werden Umwelt- und Gesundheitsbehörden immer wieder mit entsprechenden Problemstellungen konfrontiert. Die Zahl der Beschwerden hinsichtlich tieffrequenter Geräuschbelästigungen hat offenbar zugenommen [13]. Der Leidensdruck der Betroffenen ist häufig groß [23]. Die gesundheitlichen Wirkungen von Schall am Menschen können auraler und extraauraler Natur sein [7, 19].

Nach Babisch [7] liegen keine gesicherten Erkenntnisse über ausschließlich durch tieffrequenten Schall verursachte Gehörschäden vor. Es finden sich jedoch Anhaltspunkte für direkte Schäden am Trommelfell und Mittelohr durch tieffrequenten Schall (einschließlich Infraschall), wenn der unbewertete Schalldruck bei 20 Hz 120 dB und bei 1 Hz 132 dB überschreitet. Die Schmerzschwellenwerte für tieffrequenten Schall liegen bei 140 dB für 30 Hz bis hin zu 165 dB bei 2 Hz [30]. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass bei Menschen mit Mittelohrbeschwerden die Schwelle niedriger liegt [9]. Darüber hinaus gibt es Hinweise, dass Langzeitexpositionen gegenüber tieffrequentem Schall mit sehr hohem Schalldruck Hörverluste verursachen können [9].

Schust [19] analysierte 98 Literaturquellen zum Thema „Infraschall“ und stellt die aurale und extraaurale Wirkung in Tier- und Humanexperimenten bei Kurzzeit- und Langzeitexpositionen nicht in Frage. Die Studien weisen darauf hin, dass Immissionen von Infraschall entweder bei kontinuierlicher Langzeitexposition oder bei sehr intensiven Kurzzeitexpositionen gesundheitliche Schädigungen verursachen können. Lag die Exposition weit oberhalb der Hörschwelle, wurden temporäre Hörschwellenverschiebungen nachgewiesen. In tierexperimentellen Studien zeigte sich, dass die Reaktionen des Organismus frequenz- und pegelabhängig von unspezifischen Aktivierungs- und Stressreaktionen bis zu chronischen pathologischen Veränderungen reichen. Laborversuche am Menschen wiesen bei Schallimmissionen schon ab der „Hörschwelle“ extraaurale Wirkungen nach. Infraschall scheint neben der ermüdenden Wirkung konzentrationsmindernd zu wirken sowie die Leistungsfähigkeit zu beeinträchtigen. Auch treten subjektive Beschwerdebilder wie Benommenheit und Schwingungsgefühl auf. Infraschall scheint spezifisch auf das Vestibularsystem zu wirken. Als am besten gesicherte spezielle Infraschallwirkung gilt eine zunehmende Müdigkeit nach mehrstündiger Exposition sowie

eine Abnahme der Atemfrequenz (die Effekte werden mit zunehmender Frequenz immer geringer, wobei die subjektiv empfundene Lautstärke bei konstantem Pegel zunimmt); die sympathische Aktivierung steigt mit zunehmender Lautstärke [7].

Maschke et al. [23] analysierten die neueste Literatur im Hinblick auf die Auswirkungen von nächtlicher tieffrequenter Schallbelastung auf die Schlafqualität. Für tieffrequente Geräusche an oder über der Wahrnehmungsgrenze wurde eine den Schlaf beeinträchtigende Wirkung und erhöhte Morgenmüdigkeit bestätigt. Des Weiteren kann nach Maschke et al. [23] von einer Störung der nächtlichen Cortisolrhythmik ausgegangen werden, die als Indikator für chronischen Stress angesehen wird.

Zu beachten sind zudem mögliche Resonanzwirkungen auf den menschlichen Körper, wobei je nach Frequenz dieser als Ganzes oder einzelne Organe in Schwingung gebracht werden können [31].

Maschke et al. [23] verweisen zudem explizit auf die Wechselwirkungen zwischen tieffrequenter Schall und Vibrationen. Sie gehen davon aus, dass sich adverse Wirkungen auf den Schlaf bei einer Kombinationswirkung von tieffrequenter Schall und mechanischen Schwingungen verstärken.

Der primäre Effekt von tieffrequenter Schall scheint beim Menschen die Belästigung zu sein [9]. Persson-Waye und Rylander [33a] haben bei 279 Personen im Alter von 15–75 Jahren diverse Symptome abgefragt, die aufgrund anderer Studien als durch tieffrequenten Lärm hervorgerufen gelten (Kopfschmerzen, Verspannungen, Verärgerung, geistige und körperliche Erschöpfung, Unzufriedenheit und Depressivität, Konzentrations-, Schlaf- und Ruhestörungen). Von den Befragten war eine lärmexponierte Gruppe (108 Personen) Geräuschen mit tieffrequenter Charakter ausgesetzt, weitere 171 Personen lebten in vergleichbaren Gebieten, waren aber durch Lärm der sich aus mittleren Frequenzen zusammensetzte belastet. In der Gruppe, in deren Wohnung tieffrequente Geräusche vorherrschten und die zudem angab, durch tieffrequente Geräusche in der Wohnung (Heizpumpen/Ventilatoren) belästigt zu sein (18 Personen), ergab sich ein signifikanter Zusammenhang

zu den angegebenen Symptomen im Vergleich zu den 90 Personen, die angaben, nicht belästigt zu sein; dies galt insbesondere für Müdigkeit am Morgen, vermehrte Schlafstörungen, Einschlafstörungen und eine subjektive Verminderung des Konzentrationsvermögens. Keine signifikant gehäuften Symptome wurden in der Referenzgruppe (171 Personen) ermittelt, die Lärm mit einem „mittleren“ Frequenzcharakter ausgesetzt waren, unabhängig davon, ob sich die Personen belästigt oder nicht belästigt fühlten.

Unter Einbeziehung der Ergebnisse von Poulsen [33] könnte sogar eine Lärmsensibilisierung durch tieffrequente Belästigung vermutet werden. In dieser Studie stuft eine Personengruppe, die zuvor schon über Belästigung durch tieffrequenten Schall berichtet hatte, Verkehrs-, Gewerbe- und Freizeitgeräusche als wesentlich stärker belästigend ein als die unbelastete Kontrollgruppe. Da es sich jedoch auch um grundsätzlich lärmsensiblere Personen handeln kann, besteht zu diesem Punkt weiterer Forschungsbedarf.

Belästigung durch tieffrequenten Schall wird als sehr ernstzunehmendes Problem eingeschätzt [9, 10, 23], das nach Auffassung von Leventhal bisher von Behörden unterschätzt und nicht mit adäquaten Methoden erhoben wird [10]. Möller und Lydolf [34] erfassten 198 Bürgerbeschwerden über Belastung durch Infraschall und tieffrequenten Schall. In der Mehrzahl der Fälle konnten nur einzelne Personen die Schallbelastung hören, doch fast alle beschrieben eine sensorische Wahrnehmung über die Ohren und die meisten in Form von Körper- oder Objektvibration. Messungen zeigten, dass bestehende Schwellenwerte nicht überschritten wurden. Feldmann und Pitten [35] wiesen ebenfalls an einer Fallstudie nach, dass Infraschallfrequenzen wahrgenommen werden konnten, obwohl die Hörschwelle weit unterschritten war.

Die Ergebnisse von Möller und Lydolf [34] sowie von Feldmann und Pitten [35] unterstreichen den Forschungsbedarf in Bezug auf die Wahrnehmung von tieffrequenter Schall und die Grauzone in diesem Bereich. Leventhal [10] schätzt, dass ungefähr 2,5 % einer Bevölkerung um mindestens 12 dB sensitiver sind als der

Durchschnitt. Dies entspricht ca. 1 Million Menschen im Alter von 50–59 Jahren in den 15 Ländern der EU, die Zielgruppe, die die meisten Beschwerden formuliert [10]. Hinweisen auf Belästigung durch tieffrequenten Schall sollte verstärkt nachgegangen werden [35, 36].

Abschließend kann festgehalten werden, dass die schwache Literaturlage deutlich macht, dass weitere Studien zur Aufklärung der Wirkungsmechanismen notwendig sind. Unter Einbeziehung der Erkenntnisse, dass der menschliche Körper ein schwingfähiges System darstellt (**Abb. 4**), ist insbesondere auch die Abklärung der gesundheitlichen Relevanz von durch tieffrequenten Schall verursachten Resonanzphänomenen im menschlichen Organismus erforderlich. So pulsiert z.B. auch der Intracranialraum des menschlichen Kopfes in Frequenzen des Infraschallbereiches [37].

## 5 Expositionseinschätzung hinsichtlich tieffrequenter Schall

Tieffrequente Schallkomponenten werden im Wesentlichen durch schwere, bewegte (einschließlich rotierende) Massen oder durch Turbulenzen sowie Resonanzphänomene hervorgerufen. Mögliche Quellen bei industriellen Anlagen sind Kraftwerke, Brenner, Abgaskamine, Ventilatoren und Pumpen; bei Fahrzeugen sind es Busse, Flugzeuge, Hubschrauber, Schiffe und bei den natürlichen Quellen Luftturbulenzen, Wasserfälle und Meeresbrandungen. (Insgesamt werden Kraftfahrzeuge, Flugzeuge und Eisenbahnen als wichtigste Quellen für tieffrequenten Schall angesehen, wohingegen Schiffs-lärm, Gewerbe- und Baulärm, Sport- und Freizeitlärm sowie Nachbarschaftslärm für die Gesamtbevölkerung eine geringere Bedeutung zugeordnet wird [38].) Hierbei sollte jedoch berücksichtigt werden, dass die meisten Schallpegelmessungen mit dem A-Bewertungsfilter (dB(A)) durchgeführt werden, der die Belastung bei tieffrequenten Geräuschmissionen unterschätzt, und dass noch kein unumstrittenes Verfahren zur Beurteilung von Infraschall – wie auch tieffrequenter Schall – vorliegt (siehe oben). Hierzu führt das Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg aus [36], dass in

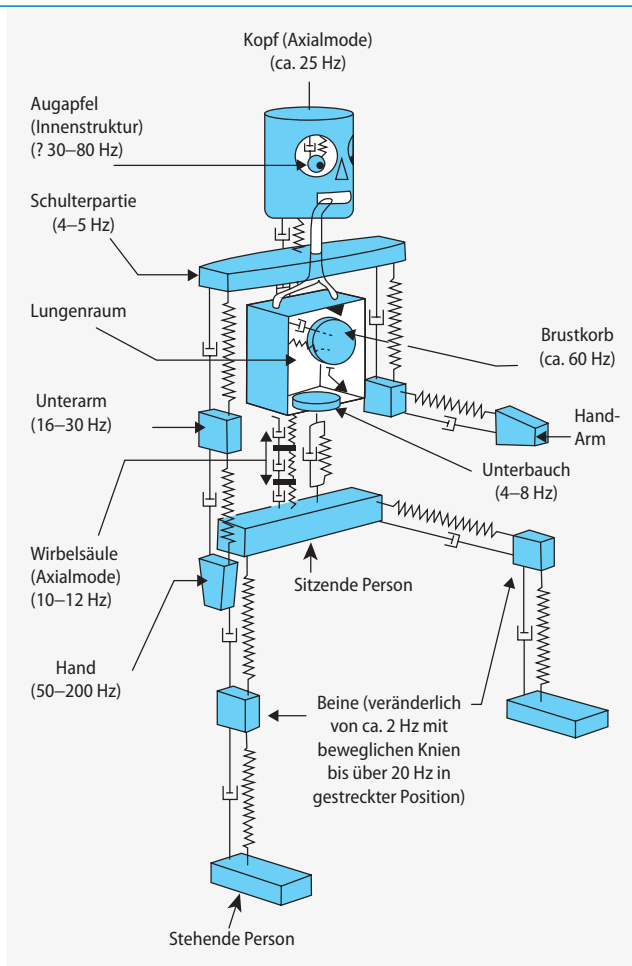


Abb. 4 ► Einfaches mechanisches Modell des menschlichen Körpers mit seinen Resonanzfrequenzen (nach [32])

der Praxis immer wieder Lärmbeschwerden auftreten, „bei denen trotz glaubhaft vorgetragener starker Belästigungen nur relativ niedrige A-bewertete Schalldruckpegel gemessen werden können. Solche Lärmeinwirkungen sind geprägt durch ihre tieffrequenten Geräuschanteile, in der Regel verbunden mit deutlich hervortretenden Einzeltönen.“

Insofern ist derzeit anhand der nur begrenzt verfügbaren Erkenntnisse nicht ausreichend abzuschätzen, welche und wie viele Personengruppen durch tieffrequenten Schall besonders betroffen sind.

## Arbeitsplatz

Die bisherigen Studien zu tieffrequentem Schall wurden vor allem im Bereich der Arbeitsplatzsicherheit durchgeführt. Becker und Schust [5] beschreiben in einer Literaturübersicht vor allem Personen, an deren Arbeitsplatz Infraschall emittierende Maschinen mit hohem Schallpegel laufen (80–130 dB), als besondere Risiko-

gruppe. In Abhängigkeit vom Arbeitsplatz können z.B. Fahrer großer Nutzfahrzeuge, Piloten, Schiffspersonal und Industriearbeiter diesen z. T. erheblichen Belastungen ausgesetzt sein. Da die Zielsetzung dieser Kommissionsmitteilung allerdings auf den Gesundheitsschutz der Allgemeinbevölkerung ausgerichtet ist, soll die hier vorgestellte Problematik nicht weiter vertieft werden.

## Privatbereich

Probleme mit tieffrequenten Schallmissionen sind bekannt geworden im Zusammenhang mit dezentralen Heizkraftwerken [35], Umwälzpumpen (Maschke, 2007 persönliche Mitteilung) sowie im städtischen Bereich mit Kühlaggregaten und Schwerlastverkehr. Ein weiteres Beispiel sind die Emissionen von Windkraftanlagen, die teilweise sehr nah an Wohnbereichen aufgestellt sind. Dazu wurden Messungen und Beurteilungen seitens der Bundesländer [39, 40], der Wind-

energieverbände [41, 42] und Umweltschutzverbände [43] vorgenommen. Sie ergaben einheitlich, dass die festgestellten Infraschallpegel von Windkraftanlagen unterhalb der normalen Wahrnehmungsschwelle liegen.

Da die individuelle Wahrnehmungsschwelle stark um die nominale Wahrnehmungsschwelle streut, muss auch an die besonders sensiblen Personen gedacht werden. Darüber hinaus muss hinsichtlich der gesundheitlichen Bewertung auch der tieffrequente Hörschall beachtet werden. Hierzu liegen bisher keine ausreichenden Daten vor.

Gleiches gilt für die Belastungsquellen im Wohn- und Freizeitbereich (Heimkino, Musikanlagen insbesondere mit speziellem Basslautsprecher, Diskotheken). Diverse Produkte beschallen in Bereichen zwischen 5 Hz und 200 Hz. Sie werden gezielt damit beworben, dass Bässe, Motorengeräusche oder Explosionen nicht nur hörbar, sondern auch spürbar sind. Auch werden spezielle im subsonaren Bereich komponierte „Musikstücke“ angeboten. Über die Expositionsverhältnisse hinsichtlich tieffrequenter Schallkomponenten ist bislang wenig bekannt.

Vor dem Hintergrund der breiten Anwendungsmöglichkeiten und der gegenwärtigen technischen Entwicklung besteht Handlungsbedarf, um die Belastungen des Privatbereichs genauer und differenzierter zu betrachten, insbesondere unter Berücksichtigung von Risikogruppen, wie z.B. Kinder und Jugendliche. Die wissenschaftliche Literaturlage zum Thema „Lärmwirkung auf Schwangere“, insbesondere nicht-arbeitsmedizinische Literatur speziell zum Thema „tieffrequenter Schall“, ist ausgesprochen dürftig. Besonders kritisch müssen die Auswirkungen von Lärm auf den Schlaf von Schwangeren, Wöchnerinnen und Müttern in der postnatalen Phase gesehen werden [44]. Auf europäischer Ebene wird für schwangere Arbeitnehmerinnen in der Rahmenrichtlinie 89/391/EWG festgelegt, dass sie keine Tätigkeiten verrichten sollten, die zu starker niederfrequenter Vibration führen können, da sich hierdurch das Risiko einer Fehl- oder Frühgeburt erhöhen kann. Im privaten Bereich liegen keine Schutzempfehlungen für tieffrequenten Schall bzw. Infraschall vor.

Tieffrequenter Schall (2–200 Hz) ist in der Lage, sowohl bei normal hörenden wie bei schwerhörigen Menschen die Sprachwahrnehmung zu beeinträchtigen [45]. Zwar ist das Ausmaß der Beeinträchtigung bei Schwerhörigen in Relation zu den Normalhörenden durchweg geringer [45], doch lässt allein die Tatsache der zusätzlichen Hörbeeinträchtigung von älteren schwerhörigen Menschen durch tieffrequenten Schall einen gewissen Forschungsbedarf erkennen.

## 6 Zusammenfassung und Bewertung des gegenwärtigen Kenntnisstandes zu tieffrequentem Schall

Der Infraschallbereich reicht nach ISO 7196 von 1–20 Hz, der Hörschallbereich von 20–20.000 Hz. Der Begriff „Infraschall“ wird üblicherweise für einen Frequenzbereich verwendet, in dem eine Tonhöhenwahrnehmung nicht mehr möglich ist (unter 16 Hz bzw. 20 Hz), doch zeigt die Literatur, dass bereits bei Frequenzen unter 100 Hz die Tonhöhenwahrnehmung stark eingeschränkt ist. Infraschall kann vielfältig sensorisch wahrgenommen werden, obwohl die Tonhöhenwahrnehmung fehlt. Infraschall und tieffrequenter Hörschall weisen gemeinsame Eigenschaften und Wirkungsbesonderheiten auf, die eine gemeinsame Klassenbildung nahe legen. Eine alleinige Betrachtung des Infraschalls ist daher für den umweltbezogenen, vorsorgenden Gesundheitsschutz nicht zielführend. Die RKI-Kommission rät aus umweltmedizinischer Perspektive dazu, Infraschall und den tieffrequenten Hörschallbereich gemeinsam zu betrachten. Damit soll ein Signal gesetzt werden, die Eigenschaften und Wirkungen des tieffrequenten Schalls zukünftig im Sinne des Gesundheitsschutzes umfassend zu betrachten und zu bewerten. Inwieweit für Infraschall ein eigener Schutzbereich zu etablieren ist, kann erst auf der Basis einer deutlich besseren Datenlage entschieden werden.

Als vorläufige Arbeitsdefinition wird ein Frequenzbereich von  $\leq 200$  Hz für tieffrequenten Schall vorgeschlagen, der den Infraschallbereich mit umfasst. Die besondere Qualität von Infraschall (unter 16 bzw. 20 Hz) bedarf jedoch verstärkter

Aufmerksamkeit, da bisher nur wenige gesicherte Erkenntnisse, nicht zuletzt wegen einer noch nicht optimalen Erfassungsmethodik, über das Auftreten und die Wirkung von Infraschall vorliegen.

Es muss insgesamt ein deutlicher Mangel an umweltmedizinisch orientierten wissenschaftlichen Studien zu tieffrequentem Schall konstatiert werden. Im Vergleich zum normalen Hörbereich [46] liegen nur wenige gesicherte Erkenntnisse über Auftreten und Wirkung von tieffrequentem Schall vor.

Die Kommission sieht einen großen Handlungs- und Forschungsbedarf in folgenden Bereichen:

- Optimierung der Messmethoden,
- Untersuchungen zum Auftreten von tieffrequentem Schall und seinen Wirkungsmechanismen, bei differenzierter Betrachtung von temporären und dauerhaften Einwirkungen,
- Durchführung methodisch belastbarer epidemiologischer Untersuchungen zur Quantifizierung möglicher Wirkungen (insbesondere nach Langzeitexposition) sowie zur Identifizierung von betroffenen Bevölkerungsgruppen,
- Detailstudien zur gesundheitsrelevanten Belastung von Risikogruppen durch neu identifizierte noch unsichere Risikobereiche (z.B. Heimkino, Musikanlagen).

### Federführung

Dr. Annette K. F. Malsch und Prof. Dr. Claudia Hornberg (Universität Bielefeld, Fakultät für Gesundheitswissenschaften); in Verbindung mit externen Sachverständigen: PD Dr. Christian Maschke, Forschungs- und Beratungsbüro Maschke, Berlin, Dr. Hildegard Niemann, Interdisziplinärer Forschungsverbund Lärm und Gesundheit, TU Berlin

### Kommissionsmitglieder

Dr. A. Beyer (Umweltmed. Ambulanz Berlin-Steglitz/Zehlendorf), Prof. Dr. W. Dott (Universitätsklinikum Aachen, Institut für Hygiene und Umweltmedizin), Prof. Dr. H. Drexler (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin), Prof. Dr. H. Dunkelberg (Universität Göttingen, Abt. Allg. Hygiene u. Umweltmedizin), Prof.

Dr. Th. Eikmann (Universität Gießen, Institut f. Hygiene u. Umweltmedizin), Dr. B. Heinow (Landesamt für Gesundheit und Arbeitssicherheit des Landes Schleswig-Holstein, Dezernat Umweltbezogener Gesundheitsschutz, Kiel), Prof. Dr. C. Hornberg (Universität Bielefeld, Fakultät für Gesundheitswissenschaften), Prof. Dr. Dr. A. D. Kappos (Frankfurt), Prof. Dr. K. E. von Mühlendahl (Kinderhospital Osnabrück, Gemeinnützige Kinderumwelt GmbH), Prof. Dr. D. Nowak (LMU München, Klinikum Innenstadt, Institut u. Poliklinik für Arbeits- und Umweltmedizin), PD Dr. F.-A. Pitten (Institut für Krankenhaushygiene und Infektionskontrolle GbR, Gießen), Dr. W. Stück (Ökologischer Ärztenbund/ISDE, Koblenz), Prof. Dr. M. Schwenk (Tübingen), Dr. R. Suchenwirth (Niedersächsisches Landesgesundheitsamt, Abt. Umweltmedizin/Epidemiologie, Hannover), Prof. Dr. M. Wilhelm (Ruhr-Universität Bochum, Hygiene, Sozial- und Umweltmedizin).

### Ständige Gäste

Dr. U. Winkler (Bundesministerium für Gesundheit, Berlin), Dr. N. Englert (Umweltbundesamt, Berlin), Dr. A. Hahn (Bundesinstitut für Risikobewertung, Berlin)

### Geschäftsstelle im RKI

Dr. D. Eis, Dr. U. Wolf

### Literatur

1. Bergmann L, Schaefer C (1998) Mechanik, Relativität, Wärme. Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. 1. Walter de Gruyter, Berlin
2. Christ E (1989) Belastung durch Lärm. In: Konietzko J, Dupuis H, Letzel S (Hrsg.) Handbuch der Arbeitsmedizin: Arbeitsphysiologie – Arbeitspathologie – Prävention. (Loseblattwerk). Bd. 1, Kapitel II-3.2. Ecomed, Landsberg/Lech
3. Ising H, Kruppa B, Babisch W, et al. (2001) Lärm. In: Wichmann HE, Schlipkötter HW, Füllgraff G (Hrsg.) Handbuch der Umweltmedizin. 22. Erg. Lfg. 7/2001. Kapitel VII-1: Andere Umweltfaktoren. Ecomed, Landsberg/Lech
4. International Organization for Standardization (1995) ISO 7196. Acoustics – Frequency weighting for infrasound measurements. International Organization for Standardization, Genf
5. Becker P, Schust M (1996) Gesundheitsgefährdung durch Infraschall – Bestandsaufnahme. Broschüre der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund
6. Przybilla T (2003) Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräusche. In: Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) Jahresbericht 2003, S. 90–91

7. Babisch W (2002) Physikalische Einflussfaktoren Teil 1: Lärm. In: Beyer A, Eis D (Hrsg.) *Praktische Umweltmedizin*, Band 2: Klinik, Methoden, Arbeitshilfen. Springer, Heidelberg
8. Möller H, Pedersen CS (2004) Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise Health* 6(23):37–57
9. Leventhal HG (2003) A review of published research on low frequency noise and its effects. Bericht für das Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA), London, GB
10. Leventhal HG (2004) Low frequency noise and annoyance. *Noise Health* 6:59–72
11. Deutsches Institut für Normung (1997) DIN 45680. Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschmissionen in der Nachbarschaft. Beuth, Berlin
12. Berglund B, Hassmen P, Job RF (1996) Sources and effects of low-frequency noise. *J Acoust Soc Am* 99(5):2985–3002
13. Feldmann J, Jakob A (2006) Tieffrequenter Wohnlärm – Ursachen, Auswirkungen und Minderungsmöglichkeiten. In: Deutsche Gesellschaft für Akustik (Hrsg.) *Fortschritte der Akustik: Plenarvorträge und Fachbeiträge der 32. Deutschen Jahrestagung für Akustik DAGA 2006*, Braunschweig, Band 1: 97–98
14. Möller H, Andresen J (1984) Loudness of pure tones at low and infrasonic frequencies. *J Low Freq Noise Vibr* 3(2):78–87
15. Deutsches Institut für Normung (2006) DIN EN ISO 389-7. Akustik – Standard-Bezugspegel für die Kalibrierung von audiometrischen Geräten – Teil 7: Bezugshörschwellen unter Freifeld- und Diffusbedingungen (ISO 389-7:2005); Deutsche Fassung EN ISO 389-7:2005. Beuth, Berlin
16. Deutsches Institut für Normung (2003) DIN ISO 226. Akustik – Normalkurven gleicher Lautstärkepegel. Beuth, Berlin
17. Ahrend KD, Dupuis H (1999) Die Vibrationssensibilität und ihre Bedeutung in der Arbeitsmedizin. In: Konietzko J, Dupuis H, Letzel S (Hrsg.) *Handbuch der Arbeitsmedizin: Arbeitsphysiologie – Arbeitspathologie – Prävention* (Loseblattwerk). 24. Erg. Lfg. 11/1999, Bd. 1, Kapitel I-5.2. Ecomed, Landsberg/Lech
18. Schust M (2004) Effects of low frequency noise up to 100 Hz. *Noise Health* 6(23):73–85
19. Schust M (1997) Biologische Wirkung von vorwiegend luftgeleitetem Schall. In: BAuA (Hrsg.) *Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Literaturdokumentation*, Ld. 7. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven
20. Betke K, Remmers H (1998) Messung und Bewertung von tieffrequentem Schall. In: Deutsche Gesellschaft für Akustik (Hrsg.) *Tagungsband der Deutschen Akustiktagung (DAGA) 1998*. DEGA, Oldenburg. <http://www.itap.de/tieffrequent.pdf>
21. Länderausschuss für Immissionsschutz (2000) Hinweise zur Messung, Beurteilung und Verminderung von Erschütterungsmissionen. Beschluss des Länderausschusses für Immissionsschutz (LAI) vom 10. Mai 2000. <http://www.mu.sachsen-anhalt.de/start/fachbereich03/laerm/laermbekaempfung/files/erschuet.pdf>
22. Department for Environment, Food & Rural Affairs (2005) Report: Proposed criteria for the assessment of low frequency noise disturbance 2005. Acoustic Research Centre, Salford University, GB
23. Maschke C, Niemann H, Hecht K, et al. (2006) Tieffrequente Schallbelastung und Schlaf – aktueller Kenntnisstand. In: Deutsche Gesellschaft für Akustik (Hrsg.) *Fortschritte der Akustik: Plenarvorträge und Fachbeiträge der 32. Deutschen Jahrestagung für Akustik DAGA 2006*. DEGA, Braunschweig
24. Schuschke G, Maschke C (2002) Lärm als Umweltfaktor. In: Dott W, Merk HF, Neuser J, et al. (Hrsg.) *Lehrbuch der Umweltmedizin*. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart, S. 251–273
25. Rushforth I, Moorhouse A, Styles P (2002) A case study of low frequency noise assessed using DIN 45680 criteria. *J Low Freq Noise* 21(4):181–198
26. Dott W, Merk HF, Neuser J, et al. (Hrsg.) (2002) *Lehrbuch der Umweltmedizin*. 1. Auflage. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart
27. Department for Environment, Food & Rural Affairs (2001) Report: Low frequency noise 2001. Northern Ireland, Scottish Executive, National Assembly of Wales
28. Maschke C, Borgmann R (2007) Überarbeitung der DIN 45680 – aktueller Stand. In: Deutsche Gesellschaft für Akustik (Hrsg.) *Fortschritte der Akustik: Plenarvorträge und Fachbeiträge der 33. Deutschen Jahrestagung für Akustik DAGA 2007*. DEGA, Stuttgart
29. Rushforth I, Moorhouse A, Styles P (2003) An integrated acoustic/microseismic approach to monitoring low frequency noise & vibration – a case study. *Building Acoustics* 10(1):77–95
30. von Gierke HE, Nixon CW (1976) Effects of intense infrasound on man. In: Tempest W (Hrsg.) *Infrasound and low frequency vibration*. Academic Press, London, S. 115–150
31. Magid EB, Coermann RR, Ziegenruecker GH (1960) Human tolerance to whole body sinusoidal vibration. Short-time, one-minute and three-minute studies. *Aeromed Acta* 31:915–924
32. Brüel&Kjær Sound&Vibration Measurement A/S Messungen im Umweltschutz. Firmenschrift BG 0063-12
33. Poulsen T (2003) Annoyance of low frequency noise (LFN) in the laboratory assessed by LFN-sufferers and non-sufferers. *J Low Freq Noise Vibr Active Control* 22(4):191–201
- 33a. Persson-Waye K, Rylander R (2001) The prevalence of annoyance and effects after long-term exposure to low-frequency noise. *J Sound Vibr* 240:483–497
34. Möller H, Lydolf M (2002) A questionnaire survey of complaints of infrasound and low-frequency noise. *J Low Freq Noise* 21(2):53–63
35. Feldmann J, Pitten FA (2004) Effects of low frequency noise on man – a case study. *Noise Health* 7(25):23–28
36. Landesanstalt für Umweltschutz Baden Württemberg (Hrsg.) (1995) *Lärmbekämpfung – Rueschutz, Analysen, Tendenzen, Projekte in Baden-Württemberg 1995*. Eigenverlag, Karlsruhe
37. Lennaire JJ (1997) Slow pressure waves during intracranial hypertension. *Ann Fr Anesth Reanim* 16(4):394–398
38. Wichmann HE, Schlipköter HW, Fülgraff G (Hrsg.) (1992–2007) *Handbuch der Umweltmedizin*. Ecomed (Loseblattwerk), Landsberg/Lech
39. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (2001) Sachinformationen zu Geräuschemissionen und -immissionen von Windenergieanlagen. Eigenverlag, Essen
40. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (2002) Windenergieanlagen und Immissionsschutz. In: LUA NRW (Hrsg.) *Materialien*, Nr. 63. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen
41. Klug H (2002) Infraschall von Windenergieanlagen: Realität oder Mythos? *DEWI Magazin* 20:6
42. British Wind Energy Association (Hrsg.) (2005) *BWEA Briefing Sheet. Low frequency noise and wind turbines 2005*. BWEA, London
43. BUND NRW (Hrsg.) (2004) *Windkraft in Nordrhein-Westfalen – regionalplanerische Steuerungselemente und Argumente*. In: Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland Landesverband Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) *BundPosition*. Eigenverlag, Düsseldorf
44. Maschke C, Hecht K, Niemann H (2001) Auswirkungen von Lärm auf Schwangere und Mütter in der postpartalen Phase. *Umweltmedizinischer Informationsdienst* 2:11–17
45. Gustafsson HA, Arlinger SD (1994) Masking of speech by amplitude-modulated noise. *J Acoust Soc Am* 95(1):518–529
46. TA Lärm (1998) Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (neue Fassung). Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (TA Lärm) vom 26. August 1998 (GMBI. Nr. 26 vom 28.08.1998 S. 503). <http://www.dflid.de/cgi-bin/TALaerm.pdf>