

**GuSZ Gutachter- und Sachverständigen Zentrum für Umweltmessungen GmbH**  
**SACHVERSTÄNDIGE u. GUTACHTER d. Deutschen Gutachter- u. Sachverständigen Verbandes**

für meteorologische Messungen, Körperschall-Nachweise, EMV HF + NF Messungen,  
Akustische + Mikrobare Schall- & Infraschall- Nachweismessungen nach DIN / ISO / TA-Lärm  
Kalibrierungsservice / Eichungsservice / Radon-Belastungsmessung  
Entwicklung & Vertrieb mikrobarometrischer Seismik & Infraschall-Messtechnik

**Stellungnahme zu tieffrequenter Schallbelastung in Korrelation  
mit/zu Vibrationsbelastungen (Körperschall) und deren Wechselwirkung**

Tieffrequente Geräuscheinwirkungen sind nach DIN 45680 zu beurteilen.

Die DIN 45680 wird z.Zt. überarbeitet, da ein Schutzkonzept nach heutigem Verständnis etwa 90 % bis 95 % der Betroffenen schützen soll. Dies wird durch die 18 Jahre alte DIN 45680 (1997), die von einer 50%-Hörschwelle ausgeht, nicht gewährleistet. Eine 50%-Hörschwelle bedeutet, dass 50 % der Bevölkerung auch unterhalb dieser Schwelle Geräusche hören können. Um etwa 90 % aller Betroffenen in das Schutzkonzept der DIN 45680 einzubeziehen, kommt als Referenzhörschwelle für die überarbeitete DIN 45680 eine um 10 dB verminderte Hörschwelle nach DIN ISO 226 zur Anwendung. Wird die „neue“ Referenzhörschwelle der überarbeiteten DIN 45680 zu Messbewertungen herangezogen, so ist an vielen Messungsorten (in den Häusern von Betroffenen) von vorhandenen kritischen, tieffrequenten Belastung auszugehen.

Im direkten Wohnumfeld vieler Betroffener Personen, können langanhaltende (immer wiederkehrende) tieffrequente Geräusche, insbesondere zu Zeiten in denen andere Geräuschbelastungen niedrig sind, schon dann zu erheblichen Belästigungen führen, wenn sie im Bereich unter der Hörschwelle liegen. Gleichzeitig sind erhöhte Risiken für Übelkeit, Kopfschmerzen/schwerer Kopf, Schmerz in Armen oder Beinen, Benommenheit, innere Unruhe, Konzentrationsschwierigkeiten sowie Schlafstörungen zu verzeichnen. Reale Quellen emittieren in der Regel sowohl tieffrequenten Luftschall als auch tieffrequente Schwingungen die – je nach Übertragungsstrecke – auch ineinander übergehen können /vgl. Glossar Sekundärer Luftschall). Bei der Beurteilung von tieffrequentem Schall muss daher die Wechselwirkung mit tieffrequenten Schwingungen (Vibrationen) berücksichtigt werden. Nach heutigem Kenntnisstand ist davon auszugehen, dass sich die Wahrnehmungsschwelle für tieffrequenten Luftschall in Anwesenheit von Vibrationen erniedrigt und sich nachteilige Wirkungen auf den Menschen bei einer Kombinationswirkung von tieffrequentem Luftschall und Vibrationen verstärken. Adverse Effekte können daher bei einer Kombinationsbelastung bereits bei Schallpegeln auftreten die bis zu 5dB unter der neuen Referenzhörschwelle liegen (entspricht 15 dB unter der alten Referenzhörschwelle). Zur sicheren Vermeidung von gesundheitlichen Beeinträchtigungen ist daher aus präventivmedizinischer Sicht bei langzeitiger Exposition zu fordern, dass tieffrequente Schallimmissionen im Wohnbereich auf Werte begrenzt werden, die mit Sicherheit unter der individuellen Wahrnehmungsschwelle liegen!

Die tieffrequenten Luftschallimmissionen sind geeignet die Lebensqualität der Bewohner eines Hauses massiv zu beeinträchtigen. Eine Gesundheitsbeeinträchtigung dieser kann hier ebenso nicht ausgeschlossen werden.

Die von Betroffenen hier empfunden gesundheitlichen Beeinträchtigungen, sind mehrheitlich im Zusammenhang mit tieffrequenten Geräuschbelastungen, möglicherweise verbunden mit leichten Vibrationen, hinlänglich bekannt.

## Schutzkonzept und individuelle Hörschwellen

Der Hörschwellenpegel für normal hörende Personen ist definiert als der Schallpegel, der, bei otologisch gesunden Erwachsenen im Alter von 18 bis 25 Jahren in wiederholten Versuchen unter festgelegten Bedingungen, zu 50 % richtigen Antworten führt. Da der Norm-Hörschwellenpegel ein statistisch abgeleiteter Wert ist, gibt es individuelle Streuungen um diesen nominalen Hörschwellenpegel. In Studien mit jungen, otologisch gesunden Erwachsenen wurden Standardabweichungen von 3-10 dB verzeichnet.

Bei tieffrequenten Geräuschen (< 200 Hz) ist von einer Standardabweichung von etwa 6 dB auszugehen. Die individuellen Unterschiede im Hörschwellenpegel sind bei der Beurteilung von tieffrequenten Geräuschen von großer Bedeutung, da ein Schutzkonzept nach heutigem Verständnis etwa 90 % der Betroffenen umfassen sollte. Dies wird durch die alte DIN 45680 nicht gewährleistet, die den Gruppenmittelwert (50%-Wert) als Referenzhörschwelle definiert. Die DIN 45680 (1997) ist daher seit 2005 in Überarbeitung und wird an heutige Anforderungen angepasst. Ausgangsbasis der Anpassung bildet die Hörschwelle der aktuellen DIN ISO 226, die auf der Grundlage von neueren skandinavischen Untersuchungen bis hinunter zu 8 Hz extrapoliert wird. Gleichzeitig wird bei der Anpassung der Referenzhörschwelle für die „neue“ DIN 45680 die Streuung der individuellen Hörschwellen im tieffrequenten Bereich (von Person zu Person) mit einer Standardabweichung von 6 dB berücksichtigt. Um nicht nur 50 % sondern etwa 90 % aller individuellen Hörschwellen in das Schutzkonzept der „neuen“ DIN 45680 einzubeziehen, wird als Referenzhörschwelle für die neue DIN 45680 die um 10 dB verminderte Hörschwelle der DIN ISO 226 eingeführt.

Zu beachten ist weiterhin die Erkenntnis, dass bei einer tieffrequenten Geräuschbelastung die zeitlichen Schwankungen (bzgl. Amplituden und Frequenzen), also die Zeitstruktur, eine spezifische Belästigungsquelle darstellen. Diese spezifische Belästigung wird mit der bestehenden DIN 45680 ebenfalls nicht erfasst. In der „neuen“ DIN 45680 wird zur Lösung dieses Problems eine Pegelstatistik eingesetzt.

Auch die Forderung der „alten“ DIN 45680, dass die Differenz zwischen dem A- und C- bewerteten Summenpegel größer/gleich 20 dB sein muss, um eine Messung nach DIN 45680 auszulösen, hat sich nicht bewährt. In der „neuen“ DIN 45680 wird ein Summen-pegel größer/gleich 15 dB gefordert, um auch atypischen Situationen gerecht zu werden. Nach der „neuen“ DIN 45680 ist am Messungsort (Messpunkt) von einer tieffrequenten Geräuschbelastung auszugehen.

Wird die Referenzhörschwelle der „neuen“ DIN 45680 herangezogen, so zeigt sich bei Messungen „in Häusern Betroffener“, eine kritische, tieffrequente Belastungen in dem Terzband 100 Hz (die „neue“ DIN 45680 wird um das Terzband 100 Hz erweitert, die Referenzhörschwelle liegt bei 100 Hz unter 20 dB). Bereits die „alte DIN 45680“ forderte eine Messung an dem Punkt im Raum mit der höchsten tieffrequenten Belastung, der zum normalen Aufenthaltsbereich gezählt werden kann.

Für den sensiblen Teil der Bevölkerung stellen tieffrequente Schallbelastungen über der Hörschwelle eine erhebliche Einschränkung der Lebensqualität dar. Personen die in Ihrer normalen Umgebung eine starke Belästigung durch tieffrequente Geräusche angaben, zeigten in experimentellen Untersuchungen eine stärkere psychologische und physiologische Reaktion bei einer Beschallung mit tieffrequenten Geräuschen. Die Reaktion der sensiblen Personen reichte von starker Belästigung über motorische Veränderungen bis hin zu Herzfrequenzerhöhungen. Diese Reaktionen wurden in der normal sensiblen Kontrollgruppe nicht beobachtet. In einer weiteren Studie (Okai et al. 1980), wurde 30 Personen verschiedenen tieffrequenten Tönen (8 bis 50 Hz) ausgesetzt. Für die sensiblen Personen wurde eine beträchtlich niedrigere Schwelle für die Wahrnehmung der Infraschall- bzw. niederfrequenten Töne gefunden, im Vergleich mit der Restgruppe.

## Belästigung und Langzeiteffekte durch tieffrequente Geräusche in der Wohnumgebung

Belästigung durch Lärm ist eng mit lärmbedingten Störungen des Schlafs oder mit Störungen anderer Aktivitäten verbunden. Belästigung kann Disstress auslösen, indem sie Angst, Bedrohung, Ärger, Unbestimmtheit, Ungewissheit, eingeschränkte Kommunikations- und Freiheitserleben, Erregbarkeit durch Wehrlosigkeit und Einschränkung der Lebensqualität ausdrückt. In das Belästigungsurteil gehen sowohl akustische Faktoren ein, als auch auf das Individuum bzw. die exponierte Gruppe bezogene Variablen, die als nicht-akustische Einflüsse (non-acoustical factors) bezeichnet werden.

Demzufolge sind individuelle Schwankungen in den Belästigungsurteilen zu verzeichnen (Langdon 1976; Weinstein 1978). Akustische Faktoren erklären normalerweise etwa 20- 30 % der Varianz, während individuelle Faktoren wie z.B. die Lärmempfindlichkeit einen ähnlich großen Teil der Schwankungen in Belästigungsurteilen erklären (Job 1988).

Übersichtssarbeiten über nicht-akustische Einflüsse liegen z.B. von Jones u. Davis, Cohen und Weinstein oder Kjelberg vor.

Für tieffrequente Geräusche sind ebenfalls individuelle Streuungen zu verzeichnen, doch liegen hier weniger Untersuchungen vor, die es gestatten nicht-akustische Einflussgrößen zu identifizieren.

Ausgewählte Untersuchungen zur Belästigung durch tieffrequente Geräusche im Arbeits- oder Wohnumfeld sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Ausgewählte Untersuchungen zur Belästigung durch tieffrequente Geräusche im Arbeits- oder Wohnumfeld

(Erst)Autor	Jahr	Altersgruppe	Wohnbereich	Arbeitsbereich
Vasudevan	1977	Erw.	X	
Vasudevan	1982	Erw.	X	
Persson	1988	Erw.	X	
Cocchii	1992	Erw.		X
Landström	1994	Erw.	X	
Persson Waye	1995	Erw.	X	
Holmberg	1996	Erw.		X
Holmberg	1997	Erw.		X
Mirowska	1998	Erw.	X	
Berg, van den	1999	Erw.	X	
Persson Waye	2001	Erw.	X	
Pawlaczyk-Luszczynska	2002	Erw.		X
Pawlaczyk-Luszczynska	2003	Erw.		X

Tabelle 1 - Ausgewählte Untersuchungen zur Belästigung durch tieffrequente im Arbeits- oder Wohnumfeld

Umfangreiche Übersichtsarbeiten zur Belästigung durch tieffrequente Geräusche sind von Persson Waye (1995) und Leventhall (2003) veröffentlicht worden. Eine Beschreibung der meisten in der Tabelle 1 aufgelisteten Arbeiten ist in diesen Übersichtsarbeiten enthalten. Auf eine Vorstellung der umfangreichen Studien wird daher in dieser Stellungnahme verzichtet.

Die Ergebnisse der Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen (vgl. auch Leventhall 2004):

- Probleme mit tieffrequenten Geräuschen treten sowohl in ländlichen als auch in städtischen Gegenden auf und sind statistisch unabhängig vom Geschlecht, vom Familienstand, vom Arbeitsstatus oder chronischen Beschwerden.
- Das tieffrequente Geräusch wird normalerweise im Innenraum stärker wahrgenommen.
- Die belästigenden tieffrequenten Geräusche liegen häufig an oder unter der nominalen Hörschwelle und werden nur von einer Minderheit der Betroffenen gehört.
- Die Belästigung ist größer wenn das tieffrequente Geräusch zeitlich schwankt.
- Die Wahrnehmung tritt häufiger nachts als am Tage auf.
- Die meisten Beschwerdeführer sind für ihr Alter normalhörend.
- Medizinische Untersuchungen schließen Tinnitus (Ohrgeräusche) als alternative Ursache bei zwei Drittel der Beschwerdeführer aus (Pedersen et al. 2008).

Eine tieffrequente Geräuschbelastung in Wohnungen im Bereich der Hörschwelle muss nach den vorliegenden Studien als erhebliche Belästigungsquelle eingestuft werden und ist nach Untersuchungen von Benton (1994, 1997) als gesundheitsgefährdender Stressor einzustufen. „In this way, chronic psychological damage may result from long-term exposure to low-level low frequency noise“ (Leventhall 2003).

### **Reaktionen des schlafenden Menschen**

Die schlafstörende Wirkung von nächtlichem Lärm ist wissenschaftlich anerkannt. Für Verkehrsgeräusche gibt es eine große Anzahl von Studien, in denen die Wirkung auf den Schlaf und das Wohlbefinden untersucht wurde (vgl. Thiessen 1978, Öhrström et al 1990, Griefahn 1991, Maschke et al. 1997 etc.) In den tieffrequenten Energieanteil in den untersuchten Verkehrsgeräuschen ist jedoch meist wenig bekannt. So ist bei vielen Publikationen lediglich der A-bewertete Schalldruckpegel angegeben. Die Anzahl von Schlafstudien die hinsichtlich der Wirkung von tieffrequenten Verkehrsgeräuschen ausgewertet werden können ist daher noch klein. Für tieffrequente Geräusche aus stationären Quellen (z.B. Lüfter) sind ebenfalls nur wenige Studien verfügbar. Ältere Studien zeigten, dass tieffrequente Geräusche die Schlafqualität stark beeinflussen, besonders die Einschlafzeit und die Müdigkeit am Morgen (vgl. Berglund et al. 1996, Literaturschau). Neuere Untersuchungen (die seit 1998 durchgeführt wurden) sind in der Tabelle 2 mit ihren wesentlichen Ergebnissen zusammengefasst

Tabelle 2 – Auswirkungen tieffrequenter, nächtlicher Geräusche an oder über der normalen Wahrnehmungsschwelle (Maschke 2005) Darstellung der Studien

Tabelle 2: Auswirkungen tieffrequenter, nächtlicher Geräusche an oder über der normalen Wahrnehmungsschwelle [Maschke 2005]. Darstellung der Studien im Anhang.

(Erst)Autor	Jahr	Altersgruppe	Schlafstörung	Müdigkeit	Erreg. Angst	Depressionen	Cortisolrhythmik	Allergie Asthma
Mirowska	1998	Erw.	▲			▲		
Verzini	1999	Erw.	▲	▲	▲			
Persson Waye	2001	Erw.	▲	▲				
Møller	2002	Erw.	(▲)					
Ising	2002	Kinder					▼	▲
Persson Waye	2003a	Erw.	(▲)					
Persson Waye	2003b	Erw.	▲				▼	
Persson Waye	2003b	Erw.					(—)	

- ▲ = Vermehrt, erhöht  
 ▼ = Vermindert, erniedrigt, gestört  
 — = Kein Unterschied  
 ( ) = Methodisch bedenklich
- Erw. = Erwachsene  
 Erreg. = Erregbarkeit

Die neueren Untersuchungen (vgl. Tabelle 2) im letzten Jahrzehnt, bestätigen die schlafstörende Wirkung von unerwünschten, nächtlichen, tieffrequenten Geräuschen (Lärm) an oder über der normalen Wahrnehmungsschwelle ebenso wie eine erhöhte Müdigkeit am Morgen. Zusätzlich muss von einer Störung der Cortisolrhythmik ausgegangen werden, die bereits bei sehr geringen Schalldruckpegeln einsetzt. Die Störung der nächtlichen Cortisolrhythmik kann als Indikator von chronischem Stress angesehen werden (vgl. Born et al. 2000). Dies wird z.B. auch durch Untersuchungen mit depressiven Patienten bestätigt (Deuschle et al 1997). Bestimmte Formen der Depression sind nachweislich auf eine chronisch gestörte zirkadiane Rhythmik zurückzuführen.

Eine langfristige, nächtliche Belastung mit tieffrequenten Geräuschen an oder über der Wahrnehmungsschwelle führt zum nichterholsamen Schlaf (DGSM 20001) und ist nach heutigem Erkenntnisstand als Gesundheitsgefährdung einzustufen.

### Vibrationen (Körperschall)

Vibrationen stellen dort, wo sie mit hinreichender Stärke oder Dauer im Wohnbereich auftreten, ein ernstes Umweltproblem dar. Das belegen z.B. die Auswertung von Messwerten, die im Rahmen von Lärmeingaben im Bundesland Brandenburg gewonnen wurden (Findeis et al. 2004). 45 % der Lärmeingaben betrafen Vibrationen im Wohnbereich. Quellen der Vibrationen waren zumeist Heizungspumpen und andere technische Gebäudeausrüstungen sowie Kühlaggregate und Ventilatoren in gewerblich genutzten Räumen. Den engen Zusammenhang zwischen Schwingungs- und tieffrequenten Luftschallimmissionen in Wohnräumen und die Wirkungen derartiger Immissionen gibt nach Findeis et al (2004) das folgende Beispiel wieder:

Eine Kompressorenstation löste in einer ca. 100 m entfernten Wohnung heftige Beschwerden aus. Die daraufhin auf dem Fußboden und an den Zimmerwänden durchgeführten Schwingungsmessungen ergaben eine Schwinggeschwindigkeit von 0,1 mm/s bei einer Frequenz von 33 Hz. Vibrationen dieser Stärke werden in Laborexperimenten noch nicht bzw. gerade eben wahrgenommen.

Die Bewohner beklagten, dass die Belastung bei Ihnen ein unangenehmes Gefühl in der Magengegend erzeugte, das nach kurzer Zeit zur Übelkeit führt. Als Ursache der Beschwerde konnte das Zusammenwirken von leichten Vibrationen mit tieffrequenten Luftschallimmissionen (stehende

Wellen) ermittelt werden. Zur Beeinträchtigung des Wohlbefindens tragen nicht nur die Vibrationen sowie der tieffrequente Luftschall bei, sondern auch Sekundäreffekte, wie z.B. sichtbare Bewegungen von Gegenständen.

### Einwirkung tieffrequenter, mechanische Schwingungen auf den Menschen

Die Analyse des menschlichen Körpers als mechanisches System zeigt, dass er als (relativ kompliziertes) System von Masse-Feder-Teilsystemen interpretiert werden kann. Jedes Teilsystem hat seine eigene Resonanzfrequenz und die Wechselwirkung zwischen den Teilsystemen hängt zusätzlich von der Körperhaltung ab (Stehen, hocken, sitzen, liegen etc.).

Auf der Grundlage vereinfachter mechanischer Modelle (vgl. Abbildung 2) und den Ergebnissen aus Forschungen mit Personen die Schwingungen ausgesetzt waren (vgl. z.B. Smith 2002), lassen sich Schwingungsbeurteilungskriterien ableiten, die teilweise in internationale Normen bzw. nationale Vorschriften übernommen wurden.

Bei der Beurteilung der Einwirkung auf den Menschen sind Grundsätzlich vier Parameter zu berücksichtigen: Schwingpegel, Frequenz(verteilung), Einwirkungsdauer und Bezugsachse zum Körper. Daneben sind weitere situative Einflussgrößen zu beachten wie z.B. die Umgebungstemperatur oder die Geräuschbelastung im „hörbaren“ Bereich.

Als nationale Regelwerke für die Ermittlung und Beurteilung der einwirkenden Schwingungen am Arbeitsplatz sind die VDI 2057 in Verbindung mit DIN 45669 und DIN 45671 heranzuziehen. In der VDI 2057 werden (neben der Fühlschwelle 0,1 mm/s) Richtwerte für das Beurteilungskriterium „Gesundheit“ in Abhängigkeit von der täglichen Expositionsdauer angegeben. Die Richtwerte wurden jedoch aus Werten abgeleitet, die unter Laboratoriumsbedingungen bei sitzenden Personen zur Schmerzwahrnehmung führten (halb so hoch wie die Schmerzschwelle).

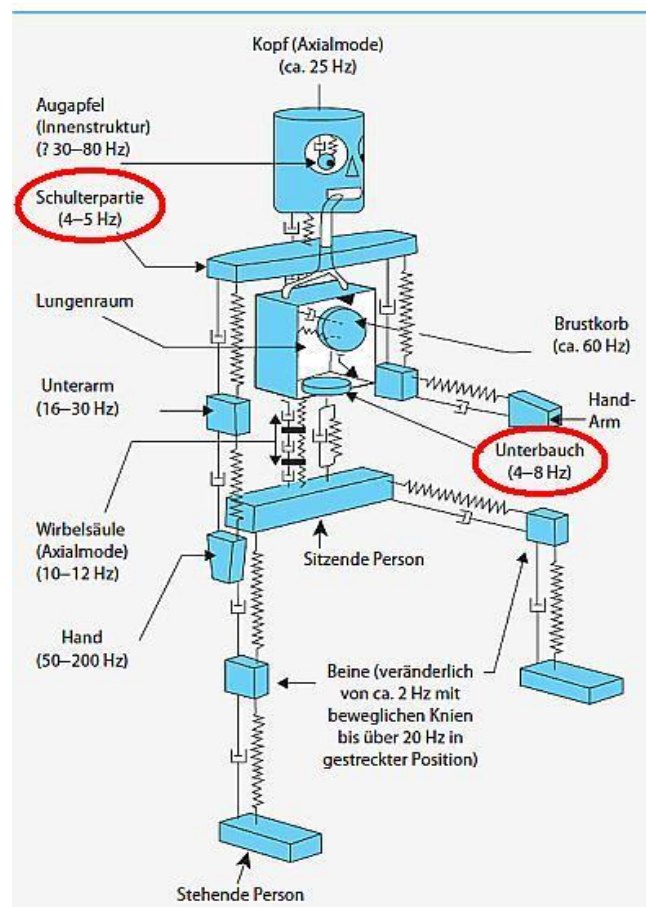


Abbildung 2 – Einfaches mechanisches Modell des menschlichen Körpers mit seinen Resonanzfrequenzen (Bruel&Kjaer)

Richtwerte für die Beurteilungskriterien „Leistungsfähigkeit“ und „Wohlbefinden“ werden in der VDI 2057 nicht genannt, da diese – nach Meinung des Autor – zu stark von vielfältigen Faktoren (z.B. Alter, Geschlecht, Gesundheitszustand, Konstitution, Tätigkeit und Arbeitsumgebung) beeinflusst werden. Anhaltswerte für vergleichbare Bereiche (Unbehagensgrenze, Leistungsgrenze) sind jedoch international publiziert worden. Sie liegen erwartungsgemäß im Bereich der Fühlschwelle nach VDI 2057.

Bewertungskriterien für Vibrationen am Arbeitsplatz können für Vibrationen im Wohnumfeld jedoch nur eingeschränkt angesetzt werden, da bei einer Exposition im Wohnbereich u.a. zu beachten ist, dass

- Besonders schutzbedürftige Bevölkerungsgruppen (Säuglinge, Kinder, alte Menschen, Kranke) betroffen sein können (vgl. VDI 2057, Bl. 3, Anm. 5)
- Die Exposition auch in den besonders sensiblen Nachtstunden auftreten kann und
- Die Einwirkung im Wohnumfeld häufig mit einer Sensibilisierung bzw. Konditionierung verbunden ist.

So wird nach Findeis et al. 2004 von vielen Betroffenen berichtet, dass Vibrationen – z.B. nach dem Einzug in eine neue Wohnung – zunächst gar nicht wahrgenommen werden. Nach mehreren Wochen Einwirkung werden sie verspürt, und nach längerer Einwirkung vielfach als unerträglich bezeichnet.

### Auswirkungen von Schwingungen in der Wohnumgebung

Die Anzahl von Studien die hinsichtlich der Wirkung von Vibrationen im Wohnumfeld ausgewertet werden können, ist im Gegensatz zu Studien am Arbeitsplatz sehr klein. Die Verfügbaren Untersuchungen sind in der Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Auswirkungen von Vibrationen im Wohnumfeld bzw. üblichen Wohnsituationen

(Erst)Autor	Jahr	Altersgruppe	Schlaf (qualität)	Irritationen	Kopfschmerzen	Benommenheit
Arnberg	1990	Erw.	▼			
Nagai	1989	Erw.		▲	▲	▲

▲ = Vermehrt, erhöht

▼ = Vermindert, erniedrigt, erschwert

— = Kein Unterschied

( ) = Methodisch bedenklich

Tabelle 3 – Auswirkungen von Vibrationen im Wohnumfeld bzw. üblichen Wohnsituation

Zur gesundheitlichen Beeinträchtigungen bei tieffrequenten Schwingungen kann zusammenfassend festgehalten werden, dass die Wirkung jahrelanger Exposition in der Wohnumgebung bisher nicht ausreichend untersucht wurde. Vorliegende Untersuchungen legen jedoch nahe, dass leichte Vibrationen im Wohnbereich zu vergleichbaren Effekten führen, wie intensive Vibrationen am Arbeitsplatz. Zu sicheren Vermeidung von nachteiligen (adversen) Effekten ist daher zu empfehlen, in Wohnbereichen die Fühlschwelle nach VDI 2057 deutlich zu unterschreiten.

### Wechselwirkung von tieffrequenter Schallbelastung nach Vibrationen

Reale Quellen emittieren in der Regel gleichzeitig sowohl tieffrequenten Luftschall als auch tieffrequente Schwingungen die – je nach Übertragungsstrecke – auch ineinander übergehen können. Die

isolierte Betrachtung der Wirkung von tieffrequentem Luftschall oder tieffrequenten Schwingungen (Vibrationen) ist daher nur gültig, sofern keine (beobachtenswerten) Wechselwirkungen zu verzeichnen sind.

Bei tieffrequentem Luftschall in Verbindung mit Vibrationen sind im Labor jedoch ausgeprägte Wechselwirkungen zu verzeichnen, die zu einer Absenkung der Wahrnehmungsschwelle für tieffrequente Geräusche und zu verstärkten vegetativen sowie neuro-psychischen Reaktionen führen können. Dies zeigen Experimente von Sueki et al. 1989 in denen Luftschall-Wahrnehmungsschwellen bei 10, 12,5, 16, 20, 25, 31,5 und 40 Hz. Mit und ohne Vibrationen (10, 20, 40 Hz.) ermittelt wurden.

Die Ergebnisse zeigen, dass tieffrequenter Schall die Wahrnehmungsschwelle für Vibrationen herabsetzt und Vibrationen die Wahrnehmungsschwellen für tieffrequenten Luftschall (vgl. Abb. 3).

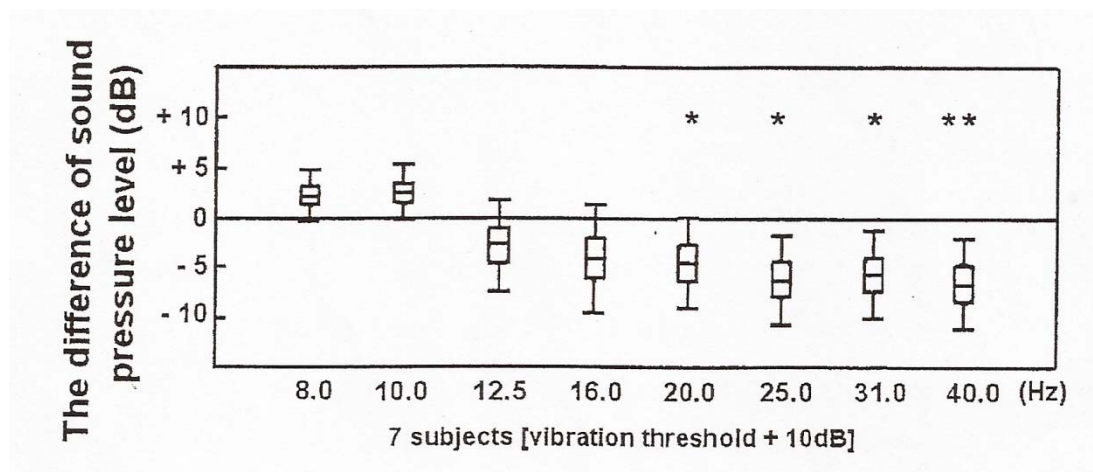


Abbildung 3 – Die Veränderung der Hörschwelle für männliche Versuchspersonen bei gleichzeitiger Darbietung von Vibrationen mit 20 Hz (nach Sueki et al. 1989)

Dieser Effekt trat auch auf, wenn die Vibrationen in einem Frequenzbereich dargeboten wurden, als die tieffrequenten Geräusche.

Die besondere Bedeutung einer Kombinationsbelastung zeigen auch weitere Studien, die in der Tabelle 4 zusammengefasst sind.

Tabelle 4: Ausgewählte Auswirkungen einer Kombinationsbelastung von Vibrationen und tieffrequenten Geräuschen im Vergleich zu einer Belastung mit nur einer Quelle

(Erst)Autor	Jahr	Altersgruppe	Wahrnehmung	Belästigung	Kopfschmerzen	Matt / Kraftlos	HRV*
Sueki	1989	Erw.	▼		▲	▲	
Bellmann	1999	Erw.	▼				
Ljungberg	2004	Erw.		▲			
Björ	2007						▼

\* Herzfrequenzvariabilität

▲ = Vermehrt, erhöht

— = Kein Unterschied

▼ = Vermindert, erniedrigt, erschwert

( ) = Methodisch bedenklich

Tabelle 4 – Ausgewählte Auswirkungen einer Kombinationsbelastung von Vibrationen und tieffrequenten Geräuschen im Vergleich zu einer Belastung mit nur einer Quelle

Zu den Wechselwirkungen einer tieffrequenten Geräuschbelastung mit gleichzeitig auf-tretenden Vibrationen kann zusammenfassend festgehalten werden, dass die Wirkung langfristiger Exposition in der Wohnumgebung bisher nicht genügend untersucht wurde. Die vorliegenden experimentellen Untersuchungen legen jedoch nahe, dass auch im Wohnbereich die Wahrnehmungsschwelle für tieffrequenten Luftschall durch Vibrationen herabgesetzt wird. Dies ist auch dann zu erwarten, wenn die nominale Fühlschwelle noch nicht erreicht wird (vgl. z.B. Findeis et al. 2004). Zur sicheren Vermeidung von nachteiligen (adversen) Effekten bzw. gesundheitlichen Beeinträchtigungen (wie der VAD) durch eine tieffrequente Schallbelastung ist daher zu empfehlen, in Wohnbereichen die 95%-Hörschwelle in allen Terzpegeln zu unterschreiten.



## **Beeinträchtigungen durch tieffrequente Geräuschbelastungen**

### ***Vibroacoustic disease (VAD; Vibroakustische Erkrankung)***

Der vibroakustische Erkrankung (VAD) wird in Deutschland bisher wenig Beachtung geschenkt. Aus den vorliegenden wissenschaftlichen Arbeiten (mehr als 50 Publikationen) geht hervor, dass eine langfristige Belastung mit tieffrequenten Geräuschen (LFN), die in der Regel mit Vibrationen verbunden ist, die vibroakustische Erkrankung verursacht. VAD wurde zuerst bei Werktätigen, wie Flugzeugtechnikern, kommerziellen und militärischen Piloten, Maschinenbauern, Restaurantarbeitern und Diskjockeys bemerkt. In der Zwischenzeit ist VAD auch in Bevölkerungsgruppen beobachtet worden, die tieffrequenten Umweltgeräuschen ausgesetzt waren, wie sie in unserer technisierten Umwelt auftreten (Torres et al. 2001, Alves-Pereira 2007).

1987 wurde die erste Autopsie an einem verstorbenen VAD Patienten vorgenommen. Das Ausmaß der LFN induzierten Schädigung war für die Untersucher überraschend groß (Castello Branco et al. 1999).

1992 begann eine Reihe von Tierversuchen, um eine tiefere Einsicht zu gewinnen, wie Gewebe auf den kombinierten Stressor von tieffrequentem Luftschall und Vibrationen antwortet.

Sowohl beim Menschen als auch in den Tierversuchen verursachte der LFN-Stressor eine Verdickung von kardiovaskulären Strukturen (Herzmuskel- und Blutgefäßstrukturen). Die perikardiale Verdickung (Verdickung des Herzbeutels) ohne entzündliche Prozesse und in Abwesenheit diastolischer Dysfunktion (krankhafte Veränderungen der diastolischen Blutdruckfunktion; zweiter Wert der Blutdruckmessung) ist daher das klinische Kennzeichen von VAD (Castello Branco et al. 2001, 2003a,b). Depressionen, gesteigerte Erregbarkeit und Aggressivität, eine Neigung zur Selbstisolation und verminderte kognitive Geschicklichkeiten (Denkflexibilität) sind weitere Teile des klinischen Bildes von VAD.

## Quellen-/ Literaturverzeichnis

- Alves-Pereira, Castelo Branco, NAA. (2007): In-Home Wind Turbine Noise is conducive to Vibroacoustic Disease. Second International Meeting at Wind Turbine Noise Lyon France September 20 - 21, 2007
- Arnberg, PW; Bennerhult, O; Eberhardt, JL (1990): Sleep disturbances caused by vibrations from heavy road traffic. JASA; VOL: 88 (3); 1486-1493
- Bellmann et al. (1999): Perception of sound and vibration at low frequencies DAGA 99, Berlin
- Benton, S. (1997): Low frequency noise and the impact upon an individuals quality of life: Oase study reports. Jnl Low Freq Noise Vibn 16, 203-208
- Benton, S., and Leventhall, H. G. (1994): The role of "background stressors" in the formation of annoyance and stress responses. Jnl Low Freq Noise Vibn 13, 95-102
- Berg, van den GP; Passchier-Vermeer, W. (1999): Assessment of low frequency noise complaints. Proc Internoise'99, Fort Lauderdale
- Bruel & Kjaer: Messungen im Umweltschutz. Firmenschrift BG 0063-12
- Castelo Branco, NAA. (1999): A unique case of vibroacoustic disease. A tribute to an extraordinary patient. Aviation, Space and Environmental Medicine 70 (3, Suppl): A27-31
- Castelo Branco, NAA.; Äguas, A.; Sousa Pereira, A.; Monteiro, E.; Fragata, JIG.; Grande, NR. (2001): The pericardium in noise-exposed individuals. Internoise 2001, The Hague, Holland: 1003-6.
- Castelo Branco, NAA.; Fragata, Ji.; Martins, AP.; Monteiro, E.; Alves-Pereira, M. (2003a): Pericardial cellular death in vibroacoustic disease. Proceedings of the 8th International Congress of Noise as a Public Health Problem, Rotterdam, Holland: 376-377.
- Castelo Branco, NAA.; Fragata, JL; Monteiro, E.; Alves-Pereira, M. (2003b): Pericardial features in vibroacoustic disease patients. Proceedings of the 8th International Congress of Noise as a Public Health Problem, Rotterdam, Holland: 380-381.
- Cocchi, A; Fausti, P; Piva, S. (1992): Experimental characteristics of the low frequency noise annoyance arising from industrial plants. Jnl Low Freq Noise Vibn 11, 124-132
- Cohen, S; Weinstein, N (1981): Nonauditory effects of noise an behaviour and health. J Social Issues 37, 36-70
- DIN 1320 (1997-06): Akustik - Begriffe. Beuth Verlag, Berlin
- DIN 45630-2 (1967-09): Grundlagen der Schallmessung — Normalkurven gleicher Lautstärkepegel. Beuth Verlag, Berlin
- DIN 45645-1 Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen - Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft. Beuth Verlag, Berlin
- DIN 45669 (1995-06): Messung von Schwingungsmissionen. Beuth Verlag, Berlin
- DIN 45671 (1990) Messungen von Schwingungen am Arbeitsplatz. Beuth Verlag, Berlin
- DIN 45680 (1997-3): Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft. Beuth Verlag, Berlin
- DIN ISO 226 (2006): Akustik - Normalkurven gleicher Lautstärkepegel. Beuth-Verlag, Berlin
- Findeis, H; Peters, E. (2004): Disturbing effects of low frequency sound immissions and vibrations in residential buildings. Noise and Health 6(23), 29-35
- Holmberg, K., Landström, U., Säderberg, L., and Kjellberg, A. (1996): Hygienic assessment of low frequency noise annoyance in working environments. Jnl Low Freq Noise Vibn 15, 7-16
- Holmberg, K., Landstrom, U., and Kjellberg, A. (1997): Low frequency noise level variations and annoyance in working environments. Jnl Low Freq Noise Vibn 16, 81-88
- ISO/CD 226-1: International Standard Organization. Acoustics. Equal loudness level contours for otologically normal listeners. Part 1: Reference thresholds of Kearing under free-field and diffuse-field listening conditions, Switzerland, 1993 Job R F S. (1988)
- Job R F S. (1988) Community response to noise: A review of factors influencing the relationship between noise exposure and reaction. J. Acust Soc AM 83, 991-1001.
- Jones, DM; Davies, DR. (1984): Individuell differences in sensitivity in the response to noise. In: Jones, M; Chapman, AJ. (eds): Noise and society. John wiley & son, Chichester, 125-153

- Kjellberg, A. (1990): Subjective, behavioural and psychophysiological effects of noise. *Scand J Work Environ Health* 16, 29-38
- Kyriakides, K.; Leventhall, H.G. (1977): Some effects of infrasound on task performance. *J. Sound Vibration* 50, 369-388
- Landström, U., Kjellberg, A., Söderberg, L., and Nordström, B. (1994): Measures against ventilation noise: Which tone frequencies are least and most annoying. *Jni Low Freq Noise Vibn* 13, 81-88
- Leventhall, HG. (2003): A review of published research on low frequency noise and its effects. Prepared for Defra. [www.defra.gov.uk](http://www.defra.gov.uk)
- Leventhall, HG. (2004): Low frequency noise and Annoyance. *Noise and Health* 6(23); 59-72
- Lindvall, T.; Radford, E.P. (1973): Measurement of annoyance due to exposure to environmental factors. *Environ. Res.* 6, 1-36
- Ljungberg, J; Neely, G; Lundström, R (2004): Cognitive performance and subjective experience during combined exposures to whole-body vibration and noise. *international archives of occupational and environmental health*; VOL: 77 (3); 217-21
- Maschke, C.; Borgmann, R. (2007): Überarbeitung der DIN 45680 aktueller Stand. DAGA 2007
- Mirowska, M. (1998): An investigation and assessment of annoyance of low frequency noise in dwellings. *J. Low Freq. Noise Vibr.* 17, 119-126
- Møller, H.; Lydolf, M. (2002): A questionnaire survey of complaints of infrasound and low-frequency noise. *J. Low Freq. Noise Vibr. Active Control.* 21, 53-64.
- Møller, H; Pedersen, CS. (2004): Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise and Health* 6(23) 37-57
- Okai, O; Saito, M; Tak, M; Mochizuki, A; Nishiwak, N; Mori, T; Fujio, M. (1980): Physiological parameter in human response to infrasound. in: Møller, H; Rubak, .P (eds): *Proceedings of the Conference on Low Frquency Noise and Hearing*, Aalborg, Denmark, 121-129.
- Pawlaczyk-Luszczynska, M.; Dudarewicz, A.; Waszkowska, M. (2002): Annoyance of low frequency in control rooms. In: Selamet, A.; Singh, R.; Maling, G.C. (eds): *Proceedings of the Internoise 2002 in Dearborn (USA)*, paper 118
- Pawlaczyk-Luszczynska, M.; Dudarewicz, A.; Waszkowska, M.; Sliwinska-Kowalska, M. (2003): Assessment of Annoyance from and broadband noises. In: Selamet, A.; Singh, R.; Maling, G.C. (eds): *Proceedings of the Internoise 2002*, paper 118
- Persson Waye, K; Rylander, R. (1988): Disturbance from low-frequency noise in the environment: A survey among the local environmental health authorities in Sweden. *J of Sound and Vibr* 121(2), 339-345
- Persson Waye, K. (1995): On the effects of environmental low frequency noise. Department of environmental Medicine, Göteborg, Sweden
- Persson Waye, K.; Rylander, R. (2001): The prevalence of annoyance and effects after lang-term exposure to low frequency noise. *Journal of sound and vibration* 2001, 240, p. 483-497
- Smith, D.S. (2002): Characterizing the effect of airborne Vibration on human body vibration response
- Sueki, M.; Noba, M.; Nakagomi, Kubota, S.; Okamura, A.; Kosaka, T.; Watanabe, T.; Yamada, S. (1989): Study on Mutual Effects of Low Frequency Noise and Vibration. *J. Low Fre-quency Noise and Vibration* 8, 66-75
- Torres, R; Tirado, G; Roman, A; Ramirez, R; Colon, H; Araujo, A; Pais, F; Marciniak, W; Nobrega, J; Bordalp e Sä, A; Lopo Tune, JMC; Castelo Branco, MSNAA; Alves-Pereira, M; Castelo Branco, NAA. (2001): Vibroacoustic disease induced by long-term exposure to sonic booms. *Internoise 2001; The Hague; Holland*: 1095-1098
- Vasudevan, R N; Leventhall, HG. (1982): A study of annoyance due to low frequency noise in the home. *J Low Freq Noise Vibr* 1, 157-165
- Vasudevan, RN; Gordon, CG. (1977): Experimental study of annoyance due to low frequency environmental noise. *Applied Acoustics* 10, 57-69
- VDI 2057 (1987-04): Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf

- Watanabe, T; Moller, H. (1990): Hearing thresholds and equal loudness contours in free field at frequencies below 1 kHz. J Low Freq Noise Vibr 9, 135-148
- Weinstein, ND. (1978): Individual differences in relations to noise: A longitudinal study in a College dormitory. J Appl Psychol 63, 458-466
- WHO, World Health Organisation (1986): Charta zur Gesundheitsförderung. In: T. Abelin, Z. J. Brzezinski (Hrsg.): Measurement in Health Promotion, and Protection Kopenhagen (WHO Regional Publications) European Series No 22; p. 653-658
- Yamada, S.; Watanabe, T; Kosaka, T; Negishi, H; Watanabe, H. (1986): Physiological effects of low frequency noise. J Low Freq Noise Vibr 5, 14-25.

## Anhang

### **Literatur „Schlaf“**

Im Folgenden wird eine Übersicht über Studien, hinsichtlich der Wirkung von tieffrequenten Geräuschen auf den Schlaf gegeben. Die Auswahl der Studien wurde anhand der Beschreibung der Geräuschexposition vorgenommen. Als Einschlusskriterium wurde, zusätzlich zu den A bewerteten Schalldruckpegeln, die Angabe von C-bewerteten Schalldruckpegeln oder die Angabe von Frequenzspektren gefordert.

In einer Studie von Mirowska (1998) wurden 30 Probanden, die über tieffrequenten Geräusche in ihren Häusern klagten, mit einer gleichen Anzahl von Probanden verglichen die hinsichtlich Alter, Geschlecht und Wohnsituation (Mehrfamilienhäuser) vergleichbar waren, aber keine tieffrequente Geräuschbelastung aufwiesen.

Die Studie zeigte ein vermehrtes Auftreten von chronischen Schlafstörungen und Depressionen unter den Probanden, die über tieffrequente Geräusche in ihren Häusern klagten. Subjektive Daten über die Schlafqualität, die Einschlafzeit oder die Müdigkeit am Morgen wurden nicht erhoben. Da nur Alter, Geschlecht und Wohnsituation berücksichtigt wurden, ist nicht auszuschließen, dass die ermittelten Unterschiede auf nicht kontrollierte, nichtakustische Einflussgrößen (Confounder) zurückzuführen sind.

Verzini et al. (1999) fand, dass sich die Schallenergie im Frequenzbereich von 20 bis 160 Hz signifikant auf Schlafstörung, Konzentrationsschwierigkeiten, Erregbarkeit, Angst und Ermüdung auswirkt. Die Untersuchung wurde mit 98 Probanden durchgeführt die in städtischen Bereichen lebten und durch tieffrequente Geräusche von Hausinstallationen, Klimaanlage, Gewerbeanlagen oder durch Verkehrsgeräusche aus Tunneln belastet waren.

In der Querschnittuntersuchung, die 279 Personen umfasste, wurden keine signifikanten Unterschiede in selbstberichteten Schlaferleben zwischen Personen gefunden, die in ihren Häusern Geräuschen mit einem linearen Frequenzspektrum ausgesetzt waren, verglichen mit Personen die bei tieffrequenten Geräuschen von Belüftungsanlagen oder Wärmepumpen schliefen (Persson Waye and Rylander 2001a). Es zeigte sich jedoch, dass die Schwierigkeit einzuschlafen, die Müdigkeit am Morgen, sich am Morgen träge und verspannt zu fühlen, einen bedeutend höheren Grad unter jenen Personen aufwies, die sich von tieffrequenten Geräuschen belästigt fühlten. Eine signifikante Dosisantwortbeziehung wurde ermittelt zwischen der Belästigung bzw. der gestörten Ruhe und dem tieffrequenten Energieanteil in den Geräuschen. Terzbandenanalysen zeigten, dass die tieffrequente Exposition im Frequenzbereich von 50 – 200 Hz an oder über der normalen Wahrnehmungsschwelle lagen (ISO 389 7.1996).

Die Geräusche mit einem linearen Frequenzspektrum erreichten bzw. überstiegen die normale Wahrnehmungsschwelle ab etwa 100 Hz. Die Schalldruckpegel betragen 26 bis 36 dB(A) bzw. 49 bis 60 dB(C) in den Wohnungen mit tieffrequenter Geräuschexposition und 24 bis 33 dB(A) bzw. 41 bis 49 dB(C) in Wohnungen mit linearen Geräuschspektren.

Von Möller und Lydolf (2002) wurde in Dänemark ein Fragebogen an die regionalen Umweltverwaltungen und an Interessenverbände für Infraschall- und tieffrequente Geräusche verteilt. In 16 Monaten (1998-1999) gingen 198 gültige Fragebogen ein. Die Auswertung der Antworten ergab,

dass Schlafstörungen (Insomnia) und Konzentrationsprobleme die häufigsten Probleme waren, über die 67,5% bzw. 67% der Probanden berichteten. Da keine Messung der Exposition vorgenommen wurde, ist bei dieser Befragung nicht auszuschließen, dass andere Einflussgrößen außer der tieffrequenten Geräuschexposition für die Symptome (mit)verantwortlich waren. Dieser Frage wird in einer gegenwärtig andauernden Folgeuntersuchung nachgegangen.

Von besonderem Interesse ist eine von Ising et al. (2002) durchgeführte Querschnittsstudie. Es ist eine der wenigen Studien, in denen die Auswirkung tieffrequenter Energieanteile von LKW-Geräuschen auf nachteilige (adverse) gesundheitsbezogene Effekte untersucht wurden.

56 Kinder im Alter von 7 – 10 Jahren nahmen an einer medizinischen Vorsorgeuntersuchung teil und füllten ebenso wie ihre Mütter einen Fragebogen aus. Außerdem wurde bei den Kindern die Ausscheidung von freiem Cortisol in zwei Harnproben um 1 Uhr nachts und nach dem Erwachen mittels HPLC ermittelt. Die Kinder lebten entweder an einer stark befahrenen Straße mit 24 h Schwerlastverkehr oder in einem ruhigen Bereich. An der stark befahrenen Straße wurde der Schallpegel während fünf Nächte gemessen. In den Schlafzimmern wurden typische Messungen des kurzfristigen maximalen Lautstärkepegels (L<sub>max</sub> und LC<sub>max</sub>) und des Frequenzspektrums durchgeführt.

Während der Nacht fuhr durchschnittlich alle 2 Minuten ein LKW mit einem L<sub>max</sub> > 80 dB(A), an den Häusern vorbei. Die Innenraumpegel der lärmbelasteten Kinder lagen bei L<sub>max</sub> = 33-52 dB(A) bzw. 55-78dB(C). Das Frequenzspektrum hatte sein Maximum unterhalb von 100 Hz. Für die Kinder der Kontrollgruppe waren die entsprechenden Werte L<sub>max</sub> = 20-43 dB(A) bzw. 30-54 dB(C). 74% der lärmbelasteten Kinder öffneten nie ihre Fenster, verglichen mit 25% der ruhig lebenden Kontrollgruppe. Die Ausscheidung von freiem Cortisol und seinen Metaboliten war in der ersten Hälfte der Nacht signifikant korreliert mit der C-bewerteten Lärmbelastung LC<sub>max</sub> (Kovariablen: Alter, Geschlecht, Wochentag), mit Schlafstörungen, dem Erinnerungsvermögen und der Fähigkeit sich zu konzentrieren. Die Cortisolausscheidung in der zweiten Hälfte der Nacht war nicht signifikant mit dem Schallpegel korreliert.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei Kindern tieffrequente Geräusche während der Nacht zu erhöhten chronischen Ausscheidung von freiem Cortisol (in der ersten Hälfte der Nacht) führen können und damit zu ernsten Störungen des Schlaf-Wach-Rhythmus. Diese Störungen waren signifikant mit dem C-bewerteten Maximalpegel (LC<sub>max</sub>) sowie mit dem Auftreten von Allergien und/oder Asthma bronchiale assoziiert.

Persson Wayne et al. (2003a) untersuchte den Grad der Belästigung sowie von Schlafstörungen in einer städtischen Untersuchungspopulation (n=41) deren Wohnungen auf einer Seite (Hof, Garten) tieffrequenten Installationsgeräuschen ausgesetzt waren und auf der anderen Seite (Straße) Verkehrsgeräuschen. Die Untersuchung zeigt, dass die Schlafräume von Personen, die sehr starke oder extreme

Belästigung bzw. gestörte Ruhe durch Installationsgeräusche angaben, zu 44% bzw. 53% zum Hof zeigten, während die entsprechenden Prozentsätze für Personen die sehr starke oder extreme Belästigung bzw. gestörte Ruhe durch Verkehrslärm angaben, nur zu 26% bzw. 30% zur Straße zeigten.

Die durchschnittlich gemessenen Innenraumpegel durch Installationsgeräusche betragen 31 dB(A), 50 dB(C) bei geschlossenem Fenster und der berechnete Innenraumpegel durch Verkehrslärm betrug während der Nacht LA<sub>eq</sub>=21 bis 31 dB (23-7:00 h) sowie L<sub>max</sub>= 50-51 dB. In beiden Gruppen berichteten insgesamt 63%, dass ihr Schlaf gestört war, die Mehrheit der Kommentare verwies auf Installations- bzw. Verkehrs- lärm. Die berichteten Schlafstörungen waren zwischen den Gruppen vergleichbar, mit Ausnahme der Angabe der morgendlichen Müdigkeit.

Es ist anzumerken, dass die Stichprobe in dieser Untersuchung zu klein war um andere Faktoren, die den Schlaf beeinflussen, zu kontrollieren.

Die Wirkungen nächtlicher Verkehrsgeräusche und tieffrequenter Belüftungsgeräusche auf die Cortisolkonzentration und die subjektive Schlafqualität wurde in einer explorativen Studie untersucht, an der zwölf männliche Probanden teilnahmen (Persson Waye et al. 2003b).

Die Probanden schliefen fünf aufeinanderfolgende Nächte in einem Schlaflabor. Nach einer Eingewöhnungsnacht und einer Bezugsnacht wurden die Probanden beschallt mit Verkehrsgeräuschen (35 dB LAeq 22-8:00h, 50 dB LAmax) oder LFN (40 dB LAeq 22-08:00h) mit einer zusätzlichen Bezugsnacht dazwischen. Das Frequenzspektrum des Lüftungsgeräusches wies den höchsten Schalldruckpegel (69 dB) bei 50 Hz auf. Darüber hinaus wurde das Lüftungsgeräusch amplitudenmoduliert (Amplitudenmodulation 2 Hz; 100%), um dem Geräusch einen „Rumpel“ Charakter zu geben.

Das Frequenzspektrum des Verkehrsgeräusches hatten seine höchsten Schalldruckpegel von 47 und 49 dB bei 63 und 80 Hz.

Freies Cortisol im Speichel wurde sofort nach dem Erwachen und in drei Intervalle von jeweils 15 Minuten nach dem Erwachen bestimmt. Die Cortisolreaktion in den Bezugsnächten war normal. Die Cortisolreaktion in den Nächten mit tieffrequenten Lüftungsgeräuschen war (30 Minuten nach dem Erwachen) signifikant vermindert, während die Cortisolreaktion in den Nächten mit Verkehrsgeräuschen nur moderat vermindert war und sich nicht signifikant von Bezugsnächten unterschied.

Im Vergleich mit den Bezugsnächten brauchten die Probanden in den Nächten mit Lüftungsgeräuschen längere Zeit zum Einschlafen (verlängerte Schlaflatenz). Die Studie zeigt auch, dass in den Nächten mit Belüftungsgeräuschen eine schlechtere Stimmung (mood) am Morgen mit einer erniedrigten Cortisolkonzentration (30 Minuten nach dem Erwachen) verbunden war.

Die Wirkung der tieffrequenten Geräusche auf die Cortisolantwort konnte in einer nachfolgenden Untersuchung mit den gleichen Belüftungsgeräuschen (Persson Waye et al. 2003b) nicht reproduziert werden. Die zweite Untersuchung wurde jedoch – abweichend von der ersten Untersuchung – an verschiedenen Wochentagen durchgeführt und die Studie zeigt eine signifikante Abhängigkeit der Cortisolreaktion von den Wochentagen.

Es ist davon auszugehen, dass die abweichenden Ergebnisse in der zweiten Untersuchung auf die unterschiedliche Cortisolreaktion an den verschiedenen Wochentagen (zirkaseptaner Rhythmus) zurückzuführen sind. Die Existenz von starken zirkaseptanen Rhythmen in der Cortisolreaktion wurde bereits von Maschke et al. (2002) nachgewiesen.

### **Literatur „Vibrationen im Wohnumfeld“**

Amberg et al. (1990) untersuchten die Auswirkungen von Vibrationen bzw. Geräuschen wie sie durch Schwerlastverkehr verursacht werden (150 Ereignisse pro Nacht) sowie die Kombination von Vibrationen und Geräuschen auf den Schlaf, die subjektive Schlafqualität und der Leistung. Die Untersuchungen wurden unter kontrollierten Laborbedingungen mit männlichen und weiblichen Teilnehmern im Alter 20-35 Jahre durchgeführt. Die Beine der Betten waren durch Löcher im Boden mit jeweils einem Vibrator (Rüttler) verbunden. Die vertikalen Schwingungen (>10 Hz) wurden von der Matratze gedämpft, während leichte horizontale Schwingungen auftraten. Die Untersuchungen zeigten, dass Schwerlastverkehr begleitet von Vibrationen, den Schlaf erheblich stärker stört, als Schwerlastverkehr ohne Vibrationen. Die REM-Schlafdauer, die insgesamt durch Vibrationen signifikant verkürzt wurde, war im Sinne einer Dosis- Wirkungs-Beziehung verkürzt wenn die Intensität der Vibrationen erhöht wurde.

Die subjektive Schlafqualität war schlechter für höhere als für die niedrigere Vibrations- Intensitäten. Die Leistungsfähigkeit am Morgen wurde durch starke Vibrationen negativ beeinflusst. Die Untersuchung belegt, dass Vibrationen im Wohnumfeld negative Auswirkungen auf den Schlaf haben.

In einer Feldstudie untersuchten Nagai et al. (1989) die Abhängigkeit neuro-psychischer Störungen von Vibrationen und tieffrequenten Geräuschen, die durch Straßenverkehr auf einer Autobahn hervorgerufen wurden. Ein Fragebogen über Lebensbedingungen wurde von 368 exponierten Familien und 97 Kontrollfamilien beantwortet. Zusätzlich wurde ein Gesundheitsfragebogen von 988 belasteten Familienmitgliedern und 283 Mitgliedern der Kontrollfamilien beantwortet. Irritationen,

Kopfschmerzen, einen schweren Kopf, Schmerz in den Armen oder Beinen sowie Benommenheit wurden häufiger von Familienmitgliedern berichtet die durch Vibrationen und tieffrequente Geräusche belastet waren, im Vergleich zu Familienmitgliedern aus den Kontrollfamilien. Die Häufigkeit dieser Symptome zeigte im Sinne einer Dosis-Wirkungs-Beziehung eine signifikante Abhängigkeit von der Entfernung des Immissionsortes zur Autobahn. Da die tieffrequenten Geräusche in den Wohnungen weit unterhalb der Schwelle der Wahrnehmung lagen, wurde davon ausgegangen, dass der tieffrequente Schall nicht als Ursache der neuro-psychischen Störung angesehen werden kann. Die Autoren vermuten, dass die Einwohner aufgrund chronischer Schlaflosigkeit, hervorgerufen durch die Vibrationen, in Bezug auf tieffrequente Geräusche sensibilisiert wurden und sich mit der Zeit die beschriebenen neuro-psychischen Störungen entwickelten.

### **Literatur Wechselwirkungen**

Eine umfangreiche Studie mit 36 Studenten wurde in Japan von Sueki et al. (1989) durchgeführt. In den Experimenten wurden sowohl die Luftschall-Wahrnehmungsschwellen bei 10, 12,5, 16, 20, 25, 31,5 und 40 Hz als auch adverse Luftschalleffekte mit und ohne Vibrationen (10, 20, 40 Hz) ermittelt. Darüber hinaus wurden die Vibrations-Wahrnehmungsschwellen mit und ohne Luftschall (5, 10 oder 20 dB über der Luftschall-Wahrnehmungsschwelle) sowie adverse Vibrationseffekte (10, 20, 40 Hz) bestimmt.

Die Ergebnisse zeigten u.a., dass tieffrequenter Schall die Wahrnehmungsschwelle für Vibrationen herabsetzt und wahrnehmbare Vibrationen die Wahrnehmungsschwellen für tieffrequenten Luftschall. Die adversen Effekte von tieffrequentem Schall und mechanischen Schwingungen addierten sich und waren mit abnehmender Frequenz ( $10 < f < 40$  Hz) sowie steigender Intensität stärker ausgeprägt. Kopfschmerzen traten bereits nach 5 Minuten signifikant verstärkt bei Probanden auf, die gleichzeitig Infraschall und Vibrationen ausgesetzt waren im Vergleich zu jenen, die nur mit Infraschall oder nur mit Vibrationen belastet wurden. Die Probanden fühlten sich bei einer Kombinationsbelastung signifikant „zerschlagener“, matter (languor) und spürten die Belastung signifikant stärker im Kopf, Brustkorb (chest) oder Unterleib (abdomen).

Bellmann et al. (1999) untersuchten den Einfluss von Vibrationen auf die Kurven gleicher Lautstärke, die die Wahrnehmung von tieffrequenten Geräuschen häufig mit der Empfindung von Vibrationen verbunden ist. Die Untersuchungsreihe wurde mit einem einheitlichen Auswerteverfahren durchgeführt, da die bisher in der Literatur beschriebenen Studien zur gemeinsamen Wahrnehmung von Geräuschen und Vibrationen nur schwer miteinander vergleichbar sind. Als Testfrequenzen wurden Terzbänder von 16 bis 80 Hz eingesetzt. Die Vibrationen hatten die gleiche Frequenz wie die jeweilige Terzmittelfrequenz und einen konstanten Beschleunigungspegel von  $0,1 \text{ m/s}^2$ : Die Mittelwerte waren in Anwesenheit der Vibration geringer (nicht signifikant) und die Standardabweichung vergrößerte sich in Anwesenheit der Vibrationen signifikant auf 6 bis 9,5 dB. Die Autoren fordern, dass die gleichzeitige Einwirkung von tieffrequentem Schall und Vibrationen in weiteren Studien untersucht werden muss.

Ljungberg et al. (2004) untersuchten die Auswirkungen von tieffrequenten Geräuschen und Vibrationen für jede Quelle getrennt sowie bei kombinierter Belastung unter verschiedenen Intensitäten. 54 Teilnehmer (27 Männer und 27 Frauen) mit einem mittleren Alter von 25 Jahren, wurden für jeweils 20 Minuten einer sinusförmigen Ganzkörpervibration, einem Hubschraubergeräusch im Bereich von 21 Hz, der Kombinationsbelastung sowie einer ruhigen Kontrollsituation ausgesetzt. Die Teilnehmer wurden nach dem Zufallsprinzip in 3 Intensitätsgruppen aufgeteilt (niedrige Intensität (77 dB(A) und  $1,0 \text{ m/s}^2$ ), mittlere Intensität (81 dB(A)/ $1,6 \text{ m/s}^2$ ) und hohe

Intensität (86 dB(A)/2,5 m/s<sup>2</sup>). In jedem Durchgang wurde das Kurzzeitgedächtnis getestet (visual Sternberg paradigm) und die Reaktionszeit gemessen. Direkt im Anschluss an die Exposition beurteilten die Teilnehmer den Schwierigkeitsgrad der Aufgabe und die Belästigungsintensität der Belastung. Die Ergebnisse zeigen keinen Unterschied in den Reaktionszeiten. Die Teilnehmer beurteilten den Kurzzeitgedächtnistest bei gleichzeitiger Exposition von Helikoptergeräusch und Vibrationen als signifikant schwieriger im Vergleich zu den anderen Belastungssituationen und die Exposition als signifikant stärker belästigend.

Björ und Mitarbeiter (2007) untersuchten die Auswirkung von Vibrationen der Hand mit und ohne tieffrequente Geräuschbelastung auf die Herzfrequenzvariabilität. Darüber hinaus wurde die Auswirkung der tieffrequente Geräuschbelastung allein auf die Herzfrequenzvariabilität ermittelt sowie eine Kontrollsituation angeboten. 10 Frauen und Männer, von denen Informationen über deren Arbeitsplatz, den Gesundheitszustand, Medikamenteneinnahmen, Hörvermögen und die körperliche Betätigung erfragt wurden, nahmen an der Studie teil. Während der 15 Minuten dauernden Versuche (jeweils 30 Minuten Pause) wurde das Elektrokordiaogramm kontinuierlich registriert und die Spektrale Leistung (niederfrequente, mittelfrequente, hochfrequente Komponente) ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl Vibrationen als auch tieffrequente Geräusche die Spektrale Leistung (gegenläufig) beeinflussen. Werden Vibrationen und tieffrequente Geräusche gleichzeitig angeboten, so ist die spektrale Leistung ebenfalls reduziert. Die Autoren folgern einen starken Einfluss der Vibrationen auf die Herzfrequenzvariabilität.