

Eine detaillierte Studie über Beschwerden über tieffrequenten Lärm

Christian Sejer Pedersen, Henrik Møller und Kerstin Persson ^{Waye1}

Abteilung für Akustik, Abteilung für elektronische Systeme, Universität Aalborg,

Dänemark E-Mail: [cp] [hm] @acoustics.aau.dk

1jetzt bei Arbeits- und Umweltmedizin

Universität Göteborg, Schweden

E-Mail: kerstin.persson-waye@amm.gu.se

ABSTRACT

Von 203 Fällen von niederfrequenten Beschwerden wurde eine Zufallsauswahl von 21 Fällen untersucht. Das Hauptziel war die Beantwortung der Frage, ob die Belästigung durch ein äußeres physikalisches Geräusch oder durch ein wahrgenommenes, aber physikalisch nicht vorhandenes Geräusch, d. h. durch einen tieffrequenten Tinnitus, verursacht wird. In den Wohnungen der Beschwerdeführer wurden Geräuschaufnahmen gemacht, denen die Beschwerdeführer in blinden Hörversuchen ausgesetzt wurden. Darüber hinaus wurde die tieffrequente Hörfunktion der Beschwerdeführer untersucht und die Merkmale des störenden Geräuschs abgeglichen. Die Ergebnisse zeigten, dass ein Teil der Beschwerdeführer durch ein physikalisches Geräusch (20-180 Hz) belästigt wird, während andere unter niederfrequentem Tinnitus (wahrgenommene Frequenz 40-100 Hz) leiden. Physikalische Geräusche bei Frequenzen unter 20 Hz (Infraschall) sind in keinem der untersuchten Fälle für die Belästigung verantwortlich - oder überhaupt hörbar - und keiner der Beschwerdeführer hat eine außergewöhnliche Hörempfindlichkeit bei niedrigen Frequenzen. Bei vergleichbaren Fällen tieffrequenter Lärmbeschwerden im Allgemeinen ist davon auszugehen, dass in einem wesentlichen Teil der Fälle physikalischer Schall verantwortlich ist, während in einem weiteren wesentlichen Teil der Fälle tieffrequenter Tinnitus verantwortlich ist.

1. EINFÜHRUNG

In vielen Fällen von Lärmbelästigung geht es um Lärm, der einen erheblichen Anteil an tiefen Frequenzen aufweist. Die Beschwerdeführer beschreiben den Lärm in der Regel als "Rumpeln". Zu den Quellen gehören Kompressoren, Lüftungsanlagen und langsam laufende oder im Leerlauf befindliche Motoren. Die Fälle werden oft gelöst, entweder durch die Anwendung herkömmlicher Lärmgrenzwerte und Messmethoden oder durch die Anwendung spezieller Verfahren für niedrige Frequenzen, wie sie von einigen Ländern eingeführt wurden: Österreich [1], Dänemark [2] (erläutert in [3]), Deutschland [4], Polen [5] (erläutert in [6]), die Niederlande [7], Japan [8] (erläutert in [9]), Schweden [10] (Kriterien) und [11] (Messverfahren, übersetzt und erläutert in [12]).

Es gibt jedoch eine Gruppe von Fällen, in denen die Betroffenen angeben, dass sie durch den Lärm belästigt werden, ihnen aber nicht in einer Weise geholfen wird, die sie als zufriedenstellend empfinden. Dies führt häufig zu wiederholten Beschwerden, Wut auf die Behörden, einem Gefühl der Hilflosigkeit und Berichten in der Tagespresse. Bis zu einem gewissen Grad weisen diese Fälle einige gemeinsame Merkmale auf. Oft gibt es keine offensichtliche Lärmquelle, und oft werden nur eine oder wenige Personen belästigt. Viele der Fälle befinden sich in allgemein ruhigen Gebieten, und wenn Messungen durchgeführt werden, zeigen sie oft niedrige Werte.

Eine detaillierte Studie über Beschwerden über tieffrequenten Lärm

Aufgrund dieser Umstände wird oft misstraut, dass ein reales, physisches Geräusch die Ursache für die Belästigung ist. Eine Erklärung könnte sein, dass die belästigten Personen an einem inneren Geräusch leiden. Dieses Phänomen wird als **Tinnitus bezeichnet** ("*die Empfindung von Geräuschen in den Ohren, im Kopf oder um den Kopf herum in Abwesenheit einer externen Schallquelle*" [13]; "*die Wahrnehmung eines Geräuschs in Abwesenheit eines externen Geräuschs am Ohr*" [14]). Tinnitus kann durch eine abnorme Aktivität an verschiedenen Stellen des auditorischen Systems entstehen, aber die genauen Mechanismen sind nicht bekannt.

Tinnitus kann auch bei Personen mit ansonsten normalem Gehör auftreten [15], [16], [17], [18], [19], [20]. Wenn die Belästigung durch ein reales, physikalisches Geräusch verursacht wird, könnte eine Erklärung in einer ungewöhnlich niedrigen Hörschwelle der belästigten Person liegen. Auch die individuelle Zunahme der Lautstärke über der Schwelle und/oder die individuelle Empfindlichkeit gegenüber Lärm können eine Rolle spielen.

Es ist nicht auszuschließen, dass einige Fälle einfach nur schlecht untersucht werden und dass sie mit herkömmlichen Mitteln hätten gelöst werden können, wenn ihnen nur die nötige Aufmerksamkeit geschenkt worden wäre. In diesem Zusammenhang kann es eine Rolle spielen, dass einige Beschwerdeführer den Begriff *Infraschall* für den Lärm verwenden. Da in der Regel davon ausgegangen wird, dass Infraschall nicht gehört werden kann, kann die bloße Verwendung dieses Begriffs dazu führen, dass der Beschwerdeführer als weniger vertrauenswürdig angesehen wird und dass infolgedessen die weitere Bearbeitung solcher Fälle gestoppt oder behindert wird. Dies scheint manchmal zu geschehen, selbst wenn seit langem bekannt ist, dass Infraschall hörbar ist, wenn er ausreichend intensiv ist (Übersicht in [21]), und selbst wenn nicht davon ausgegangen werden kann, dass die belästigte Person weiß, ob die Frequenz eines Geräuschs unter oder über 20 Hz liegt (20 Hz wird gewöhnlich als obere Grenze des Infraschallbereichs angesehen [22]).

1.1 Frühere Studien

In der Literatur finden sich viele Berichte über einzelne oder wenige Fälle von Problemen mit tieffrequentem Lärm (z. B. [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35]), [36], [37], [38], [39]). Einige sind anekdotischer Natur, insbesondere solche, über die in der Tagespresse berichtet wird. Es wurden nur wenige systematische Studien über viele Fälle durchgeführt.

Walford [40] unterschied bei 48 Beschwerdeführern zwischen physikalischem Schall und internem Schall, indem er die Beschwerdeführer das störende Geräusch mit und ohne Ohrenschützer hören ließ. Es wurden keine Schallmessungen vorgenommen. Vor dem Test hatte jeder Beschwerdeführer im Labor ein künstliches Geräusch so eingestellt, dass es die gleiche Tonhöhe wie das störende Geräusch hatte, und einen Gehörschutz gewählt, der das künstliche Geräusch deutlich dämpfte. Die angepassten Geräusche lagen im Bereich von 16-196 Hz. Sargent [41] führte eine umfassende Studie mit Fragebögen durch, die von 295 Beschwerdeführern ausgefüllt wurden. Sechszwanzig von ihnen wurden für weitere Untersuchungen ausgewählt, bei denen ein künstliches Geräusch auf die bestmögliche Übereinstimmung mit dem störenden Geräusch eingestellt wurde. Um das störende Geräusch zu identifizieren, wurden Vergleiche mit Lärmmessungen in ihren Wohnungen angestellt. Außerdem wurden zehn der ausgewählten Beschwerdeführer einer audiologischen Untersuchung unterzogen. Berg [42] führte in neunzehn Fällen von Beschwerden über tieffrequente Geräusche Lärmmessungen durch und verglich die Terzpegel mit den nationalen Kriterien von Schweden [43] und Deutschland [4], den von Vercammen [44] vorgeschlagenen Kriterien und der normalen Hörschwelle für reine Töne [45]. In einer deutschen Studie (anonym [46]) wurden Lärmmessungen in dreizehn Fällen von Beschwerden über tieffrequenten Lärm durchgeführt und die tieffrequenten Terzpegel mit den individuellen Reintonhörschwellen der Beschwerdeführer verglichen. Moorhouse et al. [47] (über die auch Waddington et al. [48] berichten) untersuchten elf Fälle von Beschwerden über tieffrequenten Lärm, indem sie Protokolle über das Auftreten störender Geräusche, wie sie von den Beschwerdeführern wahrgenommen wurden, mit bestimmten Geräuschereignissen und dem zeitlichen Verlauf bestimmter Frequenzen, wie sie in Geräuschaufzeichnungen beobachtet wurden, verglichen.

Es ist wichtig, den Umfang einer bestimmten Untersuchung zu beachten und sich über eine sachdienliche Interpretation der Ergebnisse im Klaren zu sein. Vergleiche mit bestehenden Kriterien reichen aus, um zu zeigen, ob Lärminderung vor einem rechtlichen Hintergrund gerechtfertigt ist, während

Eine detaillierte Studie über Beschwerden über tieffrequenten Lärm

Vergleiche mit der Hörschwelle Aufschluss darüber geben können, ob ein hörbares Geräusch vorhanden ist oder nicht. Aufgrund der Lautheitssummierung in den kritischen Frequenzbändern sind Vergleiche von Terzpegeln mit Reinton-Hörschwellen (normal oder individuell) jedoch mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Von den fünf größeren Studien hat nur die Korrelationsstudie [47] versucht, einen kausalen Zusammenhang zwischen dem gemessenen Lärm und der Belästigung nachzuweisen. Mit Ausnahme einer frühen Studie über zwei Fälle [23] wurde in keiner der Studien der gemessene Schall den Beschwerdeführern vorgespielt, um eine direkte Bestätigung dafür zu erhalten, dass sie tatsächlich den störenden Schall gemessen hatten.

Eine besondere Herausforderung für solche Studien ist die Methode zur Messung der

Schall. Insbesondere bei tiefen Frequenzen führen stehende Wellen zu erheblichen frequenzabhängigen Schwankungen des Schallpegels im Raum, und an einer einzigen Messposition können bestimmte Frequenzen schlecht repräsentiert sein {Pedersen, Møller, et al. 2007 1780 /id} [49]. Nur wenige der genannten Untersuchungen haben sich systematisch mit dem Problem der stehenden Wellen befasst, z. B. durch Messungen an mehr als einer Position.

1.2 Aktuelle Studie

In unserer Abteilung haben wir bisher etwa 200 Fälle von niederfrequenter Lärmbelastigung registriert [50], [51]. Ziel der vorliegenden Studie war es, eine Zufallsstichprobe davon gründlich zu untersuchen und, wenn möglich, jeden einzelnen Fall zu erklären. Da es eine Vielzahl von Erklärungen geben könnte, wurde es als wichtig erachtet, mehr als nur einige wenige Fälle einzubeziehen, damit aus den Ergebnissen möglicherweise einige allgemeine Schlussfolgerungen abgeleitet werden können. Trotz der umfangreichen Ressourcen, die in jedem einzelnen Fall erforderlich sind, wurde beschlossen, 22 Fälle zu untersuchen¹.

Ein zentraler Punkt war die Beantwortung der Fragen, ob die Belästigung durch ein physikalisches Geräusch verursacht wurde oder nicht, und wenn ja, welche Frequenzen dafür verantwortlich waren. An dem Ort, an dem die Belästigung auftrat, wurden Aufnahmen gemacht und den Beschwerdeführern unter kontrollierten Bedingungen im Labor vorgespielt. Der abgedeckte Frequenzbereich lag bei 2-350 Hz, und für die Tests wurde eine spezielle Niederfrequenz-Expositionsanlage in unserem Labor verwendet [52]. Mit Hilfe von Blindtests wurde ermittelt, ob die Beschwerdeführer die Geräusche in ihrer Wohnung hören konnten. Bei denjenigen, die ihn hören konnten, wurden Erkennungstests durchgeführt, um festzustellen, ob die aufgenommenen Geräusche dem störenden Geräusch ähnlich waren. Anhand der Ergebnisse dieser Tests können die Beschwerdeführer in die folgenden drei Kategorien eingeteilt werden:

1. Der Beschwerdeführer konnte das aufgezeichnete Geräusch hören und berichtete, dass es dem störenden Geräusch ähnelte.
2. Der Beschwerdeführer konnte das aufgezeichnete Geräusch hören, berichtete aber, dass es dem störenden Geräusch nicht ähnelte.
3. Der Beschwerdeführer konnte den aufgezeichneten Ton nicht hören.

Bei der ersten und der letzten Kategorie liegt die Schlussfolgerung nahe, dass die zu Hause empfundene Belästigung durch ein physikalisches Geräusch verursacht wird bzw. nicht verursacht wird. Für Beschwerdeführer, die in die zweite Kategorie fallen, gibt es keine offensichtliche und einfache Schlussfolgerung, und es ist möglicherweise nicht möglich, eine endgültige Schlussfolgerung zu ziehen.

Für die gehörten Geräusche wurden Blindtests und Wiedererkennungstests für die in vier Frequenzunterbänder unterteilten Geräusche durchgeführt, um herauszufinden, welche Frequenzen hörbar und möglicherweise für die Belästigung verantwortlich sind.

Die Labortests bei den Beschwerdeführern umfassten auch die Untersuchung ihres Gehörs im Tieftonbereich (Schwellenwerte und Lautheitsfunktion). Darüber hinaus wurde versucht, die Merkmale des störenden Geräuschs zu ermitteln, indem künstliche Geräusche (Töne und Geräuschbänder) mit verschiedenen Frequenzen und Pegeln abgespielt wurden.

Die Aufnahmen wurden an dem Ort gemacht, an dem die Belästigung auftrat, d. h. in allen Fällen zu Hause und in Innenräumen. Da Messungen an einzelnen Positionen im Allgemeinen unzureichend sind und bestimmte Frequenzkomponenten praktisch nicht erfasst werden können [49], wurden Aufnahmen an vielen Positionen im Raum gemacht. Die Aufnahmen wurden nicht nur für den Labortest verwendet, sondern auch analysiert und mit Umweltkriterien in Dänemark und Schweden verglichen.

Es lag nicht im Rahmen der Studie, auf eine bestimmte Lärmquelle hinzuweisen oder in die einzelnen Fälle einzudringen, um eine Verringerung des Lärms zu erreichen. Die Probanden wurden jedoch über die Ergebnisse in ihrem eigenen Fall

**Eine detaillierte Studie über Beschwerden über
tieffrequenten Lärm**

informiert und erhielten Kopien der Messergebnisse, die sie für mögliche weitere Initiativen nutzen können.

Die Aufnahmen wurden in der Zeit von August 2003 bis Dezember 2004 gemacht. Aufgrund eines bedauerlichen Fehlers im Belüftungssystem der Expositionsanlage und noch bedauerlicherer Verzögerungen bei der Reparatur mussten die Laboruntersuchungen

¹ Ein Proband zog sich vor den Labortests zurück, so dass die endgültige Studie 21 Probanden umfasste.

mehrere Male verschoben. Sie wurden schließlich im Frühjahr und Sommer 2006 durchgeführt, als alle Probanden nach Aalborg eingeladen wurden, um jeweils einen ganzen Tag lang teilzunehmen.

2. METHODEN

2.1 Themen

Zweiundzwanzig Probanden wurden aus der Gruppe von 203 Personen ausgewählt, die an unserer früheren Umfrage zu Lärmproblemen bei niedrigen Frequenzen teilgenommen hatten [50] (vollständiger Bericht auf Dänisch in [51]). Zwanzig Personen wurden nach dem Zufallsprinzip ausgewählt, während zwei Personen aufgrund ihrer langjährigen Kontakte zur Universität ausgewählt wurden. Vor dem Auswahlverfahren wurden 69 Personen aus der ursprünglichen Gruppe entfernt (30 Personen, die bereits berichtet hatten, dass das Problem durch Lärminderung gelöst wurde, weil sie umgezogen waren oder aus anderen Gründen, 30 Personen, zu denen wir den Kontakt verloren hatten, und 9 Personen aus verschiedenen anderen Gründen). Eine Ersatzperson wurde ausgewählt, wenn eine ausgewählte Person nicht mehr genervt war (kam 12 Mal vor), oder nicht teilnehmen wollte oder konnte (kam 22 Mal vor). Bei der Zufallsauswahl wurden Einschränkungen gemacht, um die geografische und geschlechtsspezifische Verteilung nahe an der der ursprünglichen Gruppe zu halten.

Leider zog sich ein Proband kurz vor den Laborexperimenten von der Teilnahme zurück. Zu diesem Zeitpunkt war es nicht möglich, einen Ersatzteilnehmer zu finden, und das Experiment endete mit nur 21 Probanden.

Die endgültige Gruppe der Probanden bestand zu 38,1 % aus Männern (34,8 % in der ursprünglichen Gruppe), 52,4 % stammten aus Orten mit Postleitzahlen unter 3700 (etwa Kopenhagen und Nordseeland) (53,2 % in der ursprünglichen Gruppe), und das Durchschnittsalter (zum Zeitpunkt der Einreichung des Fragebogens) betrug 53,5 Jahre (55,5 Jahre in der ursprünglichen Gruppe). Alle Probanden hatten im Fragebogen angegeben, dass sie den Lärm mit den Ohren wahrnehmen (98 % in der ursprünglichen Gruppe), fünf Probanden hatten berichtet, dass sie die einzige Person sind, die den Lärm hören kann, und 13 hatten Behörden um Hilfe gebeten, die meisten von ihnen mehr als einmal.

Alle Probanden wurden am selben Tag, an dem die Laborexperimente stattfanden, von einem HNO-Arzt untersucht. Diese Untersuchungen umfassten Otomikroskopie, Reinton- und Impedanzaudiometrie sowie kalorische Tests. Die Probanden erwiesen sich als otoneurologisch normal, mit Ausnahme eines Falles von Präponderanz, zwei Fällen von leichter linksseitiger relativer Schwerhörigkeit, vier Fällen mit einem Einbruch bei 6 kHz, der auf eine lärmbedingte Schwerhörigkeit hinweist, und einem Fall von Presbyakusis. Eine Versuchsperson (Versuchsperson O) erwähnte bei den Laboruntersuchungen, dass das störende Geräusch vor einiger Zeit verschwunden war, möglicherweise nachdem an einer vermuteten Lärmquelle einige Veränderungen vorgenommen worden waren.

2.2 Aufzeichnungen

Die Aufnahmen wurden in der Wohnung jedes Probanden in dem Raum gemacht, in dem der Lärm am störendsten war, in der Regel im Wohn- oder Schlafzimmer. Der Strom wurde ausgeschaltet, die Fenster wurden geschlossen, und alle Probanden bestätigten, dass das Geräusch noch vorhanden war, bevor die Aufnahmen gemacht wurden. Viele der Probanden berichteten, dass der Lärm nicht immer gleich laut war, und es wurden nur Messungen vorgenommen, wenn er für sie deutlich hörbar war. Wenn möglich, waren die Probanden während der Aufnahmen anwesend oder tauchten ab und zu auf, um zu bestätigen, dass das Geräusch nicht verschwunden war. Alle Probanden bis auf zwei (Proband K und Q) bestätigten die Anwesenheit des Geräusches zumindest am Ende der Messungen erneut. Das Aufnahmegerät und alle Personen befanden sich während der Aufnahmen außerhalb des Raumes.

In allen Fällen gab es störende Geräusche wie vorbeifahrende Autos, entfernte landwirtschaftliche Maschinen usw., die deutlich hörbar waren. Die Versuchspersonen wurden gebeten, diese Geräusche zu identifizieren, und alle

Eine detaillierte Studie über Beschwerden über tieffrequenten Lärm

Versuchspersonen bestätigten, dass sie nicht zu den störenden niederfrequenten Geräuschen gehörten. Die Aufnahmen mussten oft wiederholt oder sogar um Stunden, Tage oder noch längere Zeiträume verschoben werden, wenn das störende Geräusch nicht vorhanden war oder wenn es zu viele Störungen gab. Viele Aufnahmen mussten am Abend oder in der Nacht gemacht werden. An Tagen mit Regen oder störendem Wind (nächster offizieller Messwert < 7 m/s, meist viel niedriger (Freifläche 10 m Höhe, 10-

Minuten-Durchschnitt), viel weniger am Ort der Messung).

Das Problem der stehenden Wellen bei niedrigen Frequenzen wurde durch Aufnahmen an 20 Mikrofonpositionen in jedem Raum gelöst. Die Mikrofonpositionen wurden so gewählt, dass es möglich war, mehrere Ergebnisse der dänischen [2] und schwedischen [11] Messmethoden zu erhalten. Die Messpositionen umfassten auch dreidimensionale Ecken (3D-Ecken), die die Pegel, denen Personen im Raum ausgesetzt sein können, besser widerspiegeln [49]. Einzelheiten zu den Messmethoden finden Sie in Anhang A.

Es wurde ein vierkanaliges Aufnahmesystem (01 dB Harmonie mit vier Ein-Zoll-Mikrofonen GRAS Typ 40 EN und Vorverstärkern Typ 26AK, kombinierte untere Grenzfrequenz von -3 dB unter 1 Hz, Abtastfrequenz 6400 Hz) verwendet. Die Aufnahmen erfolgten in jeweils vier Positionen, so dass alle Aufnahmen in fünf Aufnahmezeiträumen erfolgten. Jede Aufzeichnungsperiode dauerte drei Minuten, und es wurde versucht, so wenig Störungen wie möglich zu haben, damit später kürzere "saubere" Perioden für die Verwendung als Stimuli und für die Analyse gefunden werden konnten. Dies war eine zeitraubende Aufgabe, und sehr oft mussten die Aufzeichnungen aufgrund von Störungen wiederholt werden. Die Messungen in einem Haus dauerten von einigen Stunden bis zu mehr als einem ganzen Tag.

2.3 Analyse der Aufnahmen und Auswahl der Stimuli

Perioden der Aufnahmen ohne störende Geräusche wie vorbeifahrende Autos usw. wurden durch Anhören des Tons (oft mit höherem als dem natürlichen Pegel) mit Hilfe von Spektrogrammen gefunden. Diese Perioden wurden mit Hilfe von Spektrogrammen und Terzbandanalysen sowie durch Zuhören weiter analysiert, und repräsentative 5-Sekunden-Perioden wurden für die Verwendung als Stimuli in den Blindtests und den Wiedererkennungstests ausgewählt. Die Stimuli wurden so ausgewählt, dass prominente tieffrequente Komponenten der aufgezeichneten Geräusche mit den höchsten Pegeln in jeder Wohnung vertreten waren. Für jeden Fall wurden mindestens zwei Stimuli ausgewählt, einer aus einer 3D-Ecke und einer aus einer anderen Position, aber in einigen Fällen war es notwendig, mehr als zwei Stimuli aufzunehmen. Die Stimuli werden mit *S1*, *S2* usw. bezeichnet.

Außerdem wurde für alle Versuchspersonen ein einziger Stimulus verwendet. Dieser Stimulus wurde von den Versuchsleitern als ein Stimulus ausgewählt, der gut zu den typischen Beschreibungen des störenden Geräusches passt, die von den Beschwerdeführern gegeben wurden. Der Stimulus stammte aus der Wohnung von Proband B und wird im Folgenden mit *REF* bezeichnet.

Die Versuchspersonen P und Q waren Nachbarn und glaubten, durch dasselbe Geräusch belästigt zu werden. Sie benannten Räume, die nur durch eine gemeinsame Wand getrennt waren. Die aufgezeichneten Geräusche unterschieden sich jedoch etwas; in den Aufnahmen von Versuchsperson P war ein sehr deutlicher 100-Hz-Ton zu hören, während in den Aufnahmen von Versuchsperson Q eine solche Komponente zwar vorhanden, aber nicht besonders ausgeprägt war. Versuchsperson Q war eine der beiden Personen, die das Vorhandensein des Tons weder während noch nach den Aufnahmen bestätigten, weshalb eine Aufnahme von Versuchsperson P in den Blindtest von Versuchsperson Q einbezogen wurde (als *S4*).

Im Folgenden wird ein Beispiel für die Analyse und die Auswahl eines Stimulus gegeben. Abbildung 1 zeigt Spektrogramme von Aufnahmen in vier verschiedenen Mikrofonpositionen im gleichen Zeitintervall. Da die Hörschwelle im tieffrequenten Bereich stark mit der Frequenz variiert, wurde der Schalldruckpegel jeder Spektralkomponente relativ zur normalen Hörschwelle gewichtet. Die Schwellenbewertung der Spektrogramme hilft bei der Identifizierung potenziell hörbarer Frequenzkomponenten, aber die Spektrogramme können nicht direkt zeigen, ob sie hörbar sind oder nicht, da dies davon abhängt, wie die Frequenzkomponenten durch die Hörfunktion summiert werden (Konzept der kritischen Bandbreite).

Der Lärm eines vorbeifahrenden Autos ist als vertikale Linie bei etwa 90 Sekunden zu erkennen. Beim Anhören der Aufnahmen mit Hilfe der

Eine detaillierte Studie über Beschwerden über tieffrequenten Lärm

Spektrogramme wurde der Zeitraum von 0-52 Sekunden als relativ ungestört empfunden. Für diesen Zeitraum wurden detailliertere Spektrogramme und Terzanalysen erstellt; siehe Abbildung 2 und Abbildung 3. Daraus sowie aus wiederholtem Hören wurde Kanal 1 im Zeitraum von 15-20 Sekunden ausgewählt - ein Zeitraum, der praktisch ungestört war, und die Position, an der der Pegel der ausgeprägten

Frequenzkomponente bei 100 Hz am höchsten war. Höhere Oberwellen sind als graue Linien bei 200, 300 und 400 Hz zu erkennen. Das Fehlen dieser 100-Hz-Komponente in Kanal 3 verdeutlicht die Probleme mit stehenden Wellen.

Abbildung 4 zeigt Terzanalysen der 53 in den Blindtests verwendeten Stimuli.

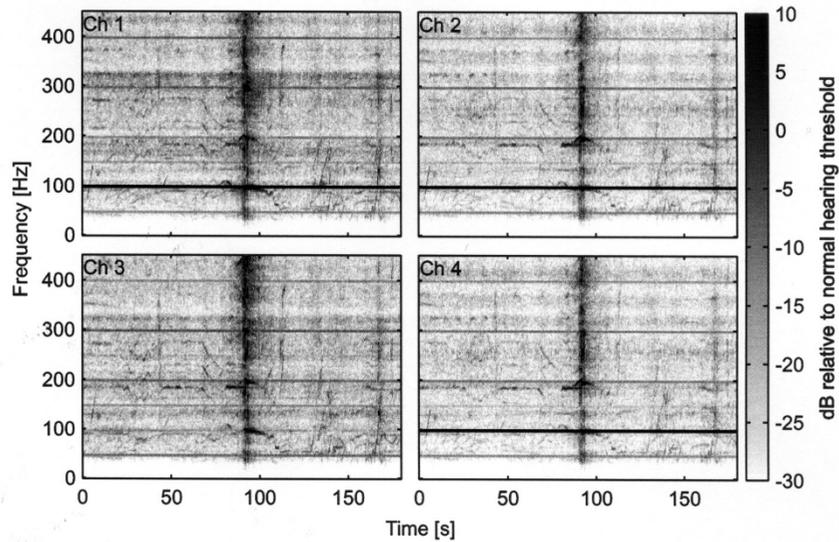


Abbildung 1: Beispiel für schwellenwertgewichtete Spektrogramme von Aufnahmen aus vier Mikrofonpositionen in einer Messperiode (3D-Eckpositionen, Proband P). Pegel, die mehr als 10 dB über und 30 dB unter der Schwelle liegen, sind schwarz bzw. weiß. Reintonschwellen aus ISO 389-7 [45] und für den Infraschallbereich basierend auf Møller & Pedersen [21], mit zusätzlichen Daten aus [53] [54] und [55].

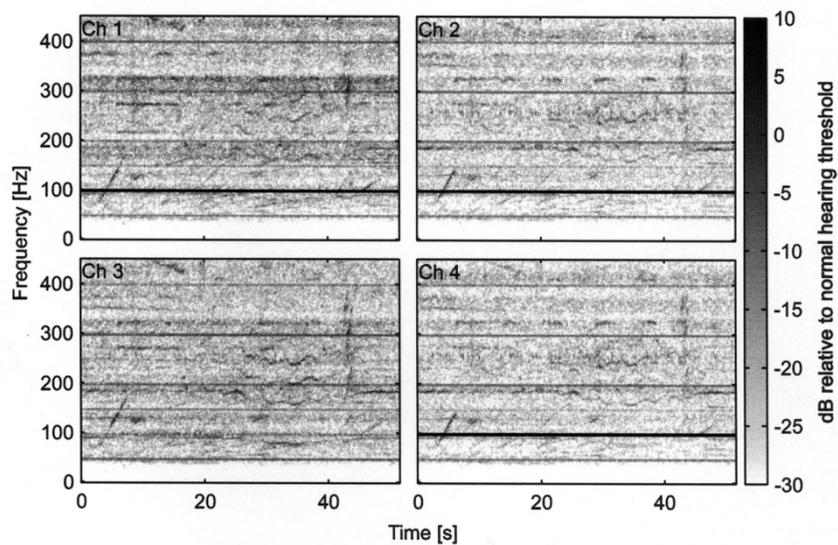


Abbildung 2: Zoom auf den relativ ungestörten Zeitraum von 0-52 s aus Abbildung 1.

Eine detaillierte Studie über Beschwerden über tieffrequenten Lärm

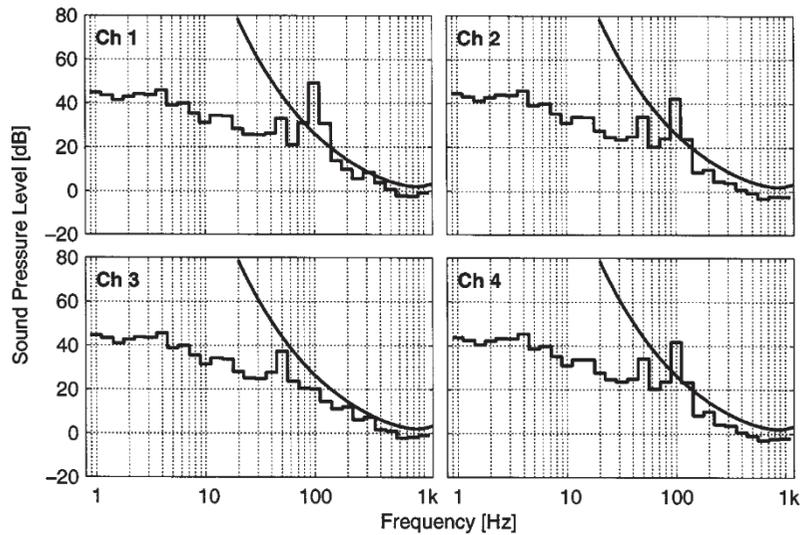


Abbildung 3: Terzanalysen des relativ ungestörten Zeitraums von 0-52 s aus Abbildung 1. Die glatte Kurve zeigt die normale Hörschwelle für reine Töne (ISO 389-7 [45]).

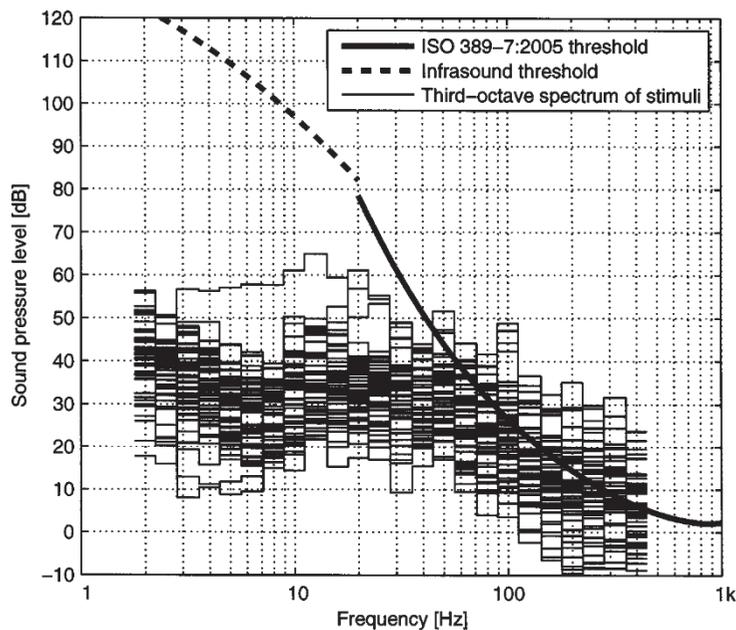


Abbildung 4: Terzanalysen aller 53 Stimuli, aufgetragen mit der normalen Hörschwelle [45] und einer Infraschallschwelle basierend auf Møller & Pedersen [21], mit zusätzlichen Daten aus [53], [54] und [55].

2.4 Testaufbau

Für die Laborexperimente wurde eine neue Tieftonprüfanlage [52] verwendet. Die Anlage nutzt eine fortschrittliche digitale Signalverarbeitung zur Steuerung des Signals für jeden der 40 Lautsprecher und erzeugt dadurch ein homogenes Schallfeld in einem großen Teil des Raums. Die Anlage deckt den Frequenzbereich von 2 bis 350 Hz (-3 dB-Frequenzen) ab und ermöglicht somit eine kontrollierte Wiedergabe des Infraschall- und des Tieftonbereichs mit einer angemessenen Überlappung in den mittleren Frequenzen. Die Anlage ist mit einem Belüftungssystem ausgestattet, das einen ausreichenden Luftstrom für eine kontinuierliche Belegung des Raums gewährleistet, wobei der Hintergrundgeräuschpegel für alle Terzbänder mehr als 10 dB unter der normalen

Reintonhörschwelle liegt. Der Hintergrundgeräuschpegel

Eine detaillierte Studie über Beschwerden über tieffrequenten Lärm

in der Hörposition gemessenen Geräusche sind in Abbildung 5 für den Zustand mit ausgeschalteter Lüftung, eingeschalteter Lüftung und eingeschalteter Lüftung plus Kühlkompressor dargestellt (der Kühlkompressor war nur selten in Betrieb). An fünf Tagen des Versuchszeitraums führte ein defektes Lager in einer Umwälzpumpe zu einem deutlich hörbaren Geräusch der Lüftungsanlage. An diesen Tagen (Versuche mit den Versuchspersonen A, E, I, M und R) wurde die Lüftungsanlage während der Versuche abgeschaltet und in den längeren Pausen Frischluft durch den Betrieb der Anlage gewonnen.

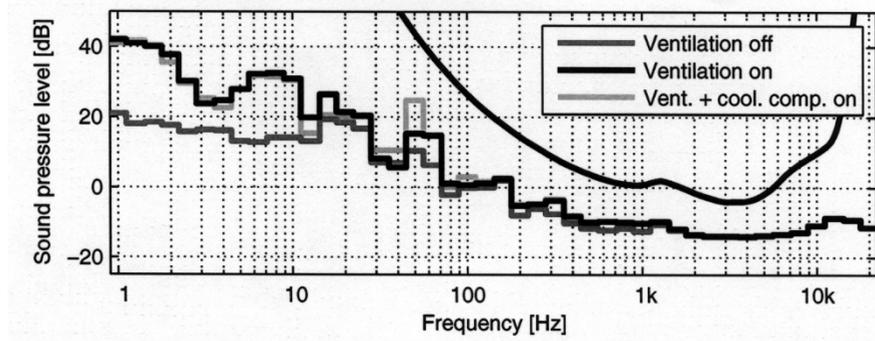


Abbildung 5: Terzanalyse des an der Hörposition in der Niederfrequenz-Testanlage gemessenen Hintergrundgeräusches im Vergleich zur Diffusfeld-Reintönigkeitshörschwelle [45]: Lüftung aus, Lüftung an und Lüftung und Kühlkompressor an. Die Werte oberhalb von ca. 2000 Hz spiegeln das Grundrauschen des Messmikrofons und des Vorverstärkers wider.

Die Versuchsperson saß in einem Sessel mit Blick auf eine Wand mit 20 Lautsprechern und auf eine weitere Wand mit 20 Lautsprechern hinter ihr, wie in Abbildung 6 dargestellt. Die Lautsprecherwände waren mit einem grauen Stoff bespannt, so dass die Lautsprecher und die Bewegungen der Membranen verborgen waren. Während der Experimente wurde die Versuchsperson über eine Kamera beobachtet, und eine Gegensprechanlage ermöglichte dem Experimentator die Kommunikation mit der Versuchsperson.

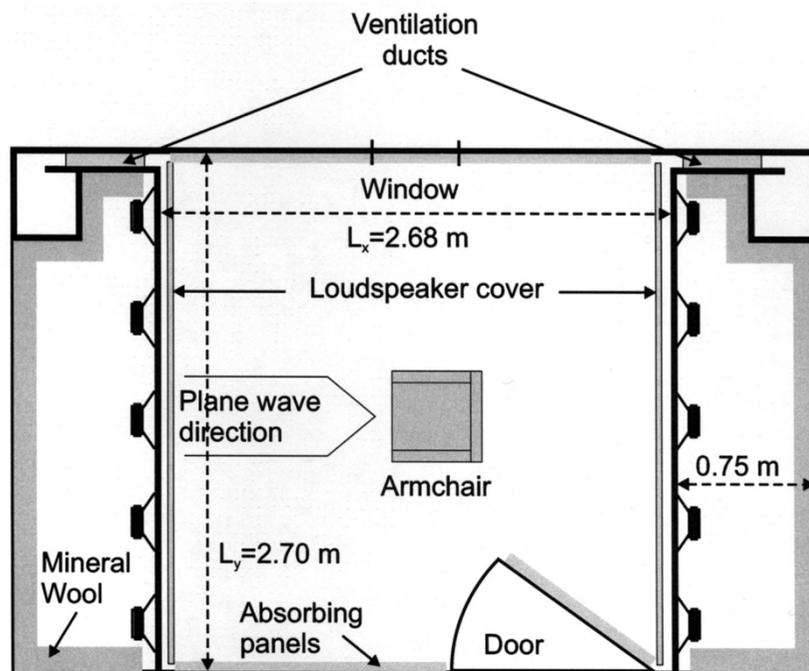


Abbildung 6: Schema der Tieftonprüfanlage von oben gesehen. Die Versuchsperson saß im Sessel mit Blick auf eine Lautsprecherwand.

2.5 Messungen der tieffrequenten Hörfunktion

Die tieffrequente Reinton-Hörschwelle jedes Probanden wurde in den Oktavfrequenzen von 8 Hz bis 250 Hz mit einer leicht modifizierten Version der Standard-Aufstiegsmethode [56] gemessen. Die Modifikation bestand darin, dass nach jedem Anstieg Pegelschritte von -7,5 dB statt -10 dB verwendet wurden, eine Modifikation, die von Lydolf et al. [57] vorgeschlagen wurde, um verschachtelte Präsentationspegel und damit eine höhere Auflösung zu erhalten.

Für jeden Probanden wurde eine Kontur gleicher Lautheit für die Oktavfrequenzen von 8 bis 250 Hz mit Hilfe eines Zwei-Alternativen-Forced-Choice-Maximum-Likelihood-Verfahrens bestimmt, wie es von Moller und Andresen [58] beschrieben wurde. Es wurde ein Referenzton von 250 Hz mit einem Pegel von 20 dB über der individuellen Hörschwelle verwendet. Es ist zu beachten, dass der Kontur kein bestimmter Lautheitswert zugeordnet werden kann, da dies voraussetzen würde, dass die Vergleiche mit einem 1-kHz-Ton durchgeführt werden. Für eine Person mit durchschnittlichem Hörvermögen würde sie jedoch in der Nähe einer 19-Phon-Kontur liegen [59].

Die Tondauer für die Bestimmung der Schwellenwerte und der gleichen Lautstärke betrug 2 Sekunden plus lineare Ein- und Ausblendrampen von jeweils 250 ms. Die Antworten wurden über eine Antwortbox mit Lichtern und Tasten gegeben.

2.6 Blindtests mit Originalaufnahmen

Die Blindtests basierten auf einem Drei-Intervall-Forced-Choice-Paradigma. Der Stimulus wurde in einem von drei Fünf-Sekunden-Intervallen dargeboten, die durch Lichter auf einer kleinen Tafel angezeigt wurden. Das Intervall mit dem Stimulus wurde zufällig ausgewählt, während der anderen beiden Intervalle herrschte Stille. Die Aufgabe der Versuchsperson bestand darin, mit den Tasten unter den Lichtern anzuzeigen, welches Intervall den Reiz enthielt. Eine vierte Taste konnte verwendet werden, um anzuzeigen, dass die Versuchsperson keinen Ton hörte. Auf natürlicher Ebene liegt das Risiko falsch negativer und positiver Ergebnisse für das Gehörte in der Größenordnung von 1 %. Eine ausführliche Erläuterung des gesamten Verfahrens findet sich in Anhang B.

2.7 Erkennungstests mit Originalaufnahmen

Nach den Blindtests wurden die Geräusche, die in natürlicher Lautstärke oder mit +5 dB zu hören waren, nacheinander abgespielt, und die Versuchsperson wurde gefragt, welches der Geräusche dem störenden Geräusch zu Hause am ähnlichsten sei. Wenn nur ein Geräusch zu hören war, wurde die Versuchsperson gefragt, ob dieses Geräusch dem störenden Geräusch ähnelte. Die Versuchsperson wurde auch gefragt, ob das ausgewählte Geräusch lauter oder leiser war als das Geräusch zu Hause. Die Abfolge der Geräusche konnte so oft wiederholt werden, wie die Testperson wollte.

2.8 Blindtests mit gefilterten Aufnahmen

Die Geräusche aus der Wohnung des Probanden, die in den Blindtests gehört wurden, wurden in vier Frequenzbereiche gefiltert, und die Blindtests wurden mit den gefilterten Geräuschen durchgeführt, wobei das gleiche Verfahren wie bei den Originalgeräuschen angewandt wurde. Die Frequenzbereiche waren: <20 Hz (Infraschall), 20-60 Hz, 60-180 Hz und >180 Hz (bezeichnet als INF, LF1, LF2 bzw. MF). Bei den Hoch- und Tiefpassfiltern handelte es sich um digitale Tschebychev-Filter 5. Ordnung mit einer Durchlassband-Welligkeit von 0,5 dB.

2.9 Erkennungstests mit gefilterten Aufnahmen

Für jedes Geräusch wurden die gefilterten Versionen, die mit natürlichem Pegel oder mit +5 dB gehört wurden, in einem Erkennungstest verwendet, ähnlich wie bei den ungefilterten Geräuschen. Es ist zu beachten, dass in diesem Test gefilterte Versionen desselben Geräuschs verglichen wurden, während im ersten Erkennungstest ungefilterte Versionen verschiedener Geräusche verglichen wurden.

2.10 Anpassung von störenden Geräuschen

Einige physikalische Eigenschaften des störenden Geräuschs in der Wohnung wurden in einem Anpassungsversuch geschätzt. Mit Hilfe der Antworten der Versuchspersonen stellte der Versuchsleiter die Frequenz und den Pegel eines Tons ein, bis die Tonhöhe und der Pegel so weit wie möglich mit dem störenden Geräusch in der Wohnung übereinstimmten. Zusätzlich wurden Terzbänder dargeboten, um zu untersuchen, ob das störende Geräusch eher geräuschbandförmig als tonal war. Für beide Signale wurde eine Frequenz

Es wurde eine Auflösung von einer Terz verwendet, und der Anpassungsprozess begann immer mit einem reinen Ton bei 250 Hz, 31,4 dB, was einem Pegel entspricht, der 20 dB über der normalen Hörschwelle liegt.

3. ERGEBNISSE

3.1 Beobachtungen im stillen Labor

Acht Versuchspersonen berichteten von einem tieffrequenten Geräusch im Versuchsraum, auch wenn kein Ton ausgestrahlt wurde (Versuchspersonen A, D, G, J, K, M, N und T). Einige erwähnten es, sobald sie sich setzten, während andere es erst später während der Experimente berichteten. In einigen Fällen wurde es als ähnlich wie das lästige Geräusch in der Wohnung beschrieben, während es in anderen Fällen als etwas anders empfunden wurde. In diesen Fällen wurde die Lüftung für den Rest des Experiments abgestellt, was jedoch im Allgemeinen keinen Einfluss auf die Geräuschempfindung der Versuchspersonen hatte. In den längeren Pausen wurde die Lüftungsanlage eingeschaltet, um für Frischluft zu sorgen. Die Empfindung eines mehr oder weniger konstanten tieffrequenten Geräusches, das in keinem Zusammenhang mit den Stimuli steht, kann natürlich die Experimente beeinflussen, aber die Experimente wurden auch bei diesen Probanden so gut wie möglich durchgeführt.

3.2 Messungen der tieffrequenten Hörfunktion

Drei Probanden (A, J und N) gaben bei einigen Frequenzen sehr uneinheitliche Antworten. Dies führte dazu, dass mehrere Versuche unternommen wurden, die Stoppkriterien der Schwellenwert- oder Gleichlautheitsverfahren zu erfüllen, die jedes Mal bei einem anderen Pegel endeten. Bei einer Versuchsperson (Versuchsperson F) lag die Kontur der gleichen Lautheit bei mehreren Frequenzen unterhalb des gemessenen Schwellenwerts, auch wenn die Antworten bei jedem der Verfahren einigermaßen konsistent erschienen. Bei den übrigen Probanden funktionierten die Verfahren gut. Die Ergebnisse für diese Personen sind in Abbildung 7 (Hörschwellen) und Abbildung 8 (Konturen gleicher Lautheit) dargestellt. Abbildung 8 zeigt auch (in grau) die Konturen der gleichen Lautheit, die relativ zur individuellen Hörschwelle angegeben sind.

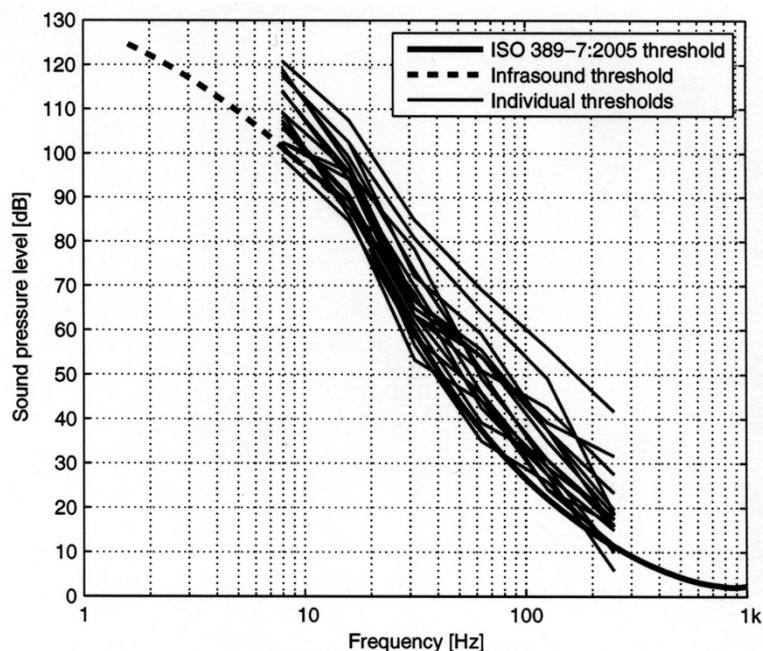


Abbildung 7: Individuelle Hörschwellen (dünne Linien), normale Hörschwelle oberhalb von 20 Hz [45] (dicke Linie) und Infraschallschwelle basierend auf Møller & Pedersen [21], mit zusätzlichen Daten aus [53], [54] und [55] (gestrichelte Linie). (Probanden A, F, J, N nicht eingeschlossen).

Eine detaillierte Studie über Beschwerden über tieffrequenten Lärm

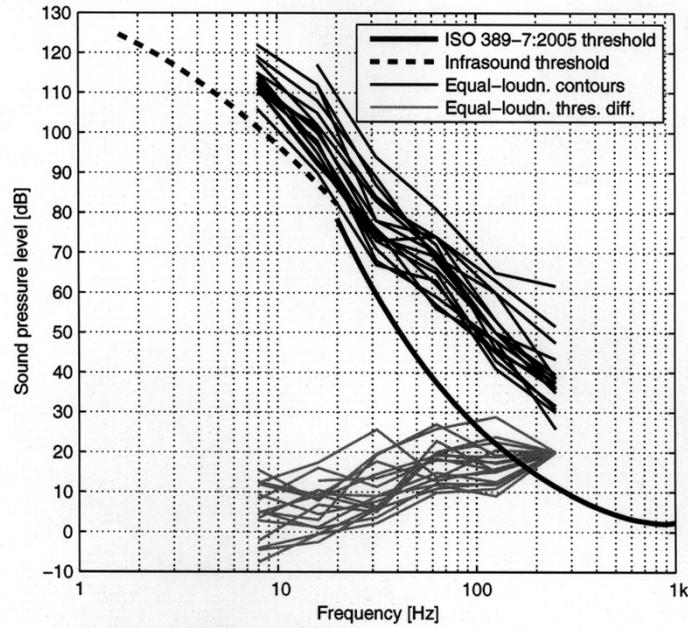


Abbildung 8: Individuelle Gleichlautheitskonturen (dünne Linien), dieselben relativ zur individuellen Hörschwelle (graue Linien), normale Hörschwelle oberhalb von 20 Hz [45] (dicke Linie) und Infraschallschwelle basierend auf Møller & Pedersen [21], mit zusätzlichen Daten aus [53], [54] und [55] (gestrichelte Linie). (Probanden A, F, J, N nicht eingeschlossen).

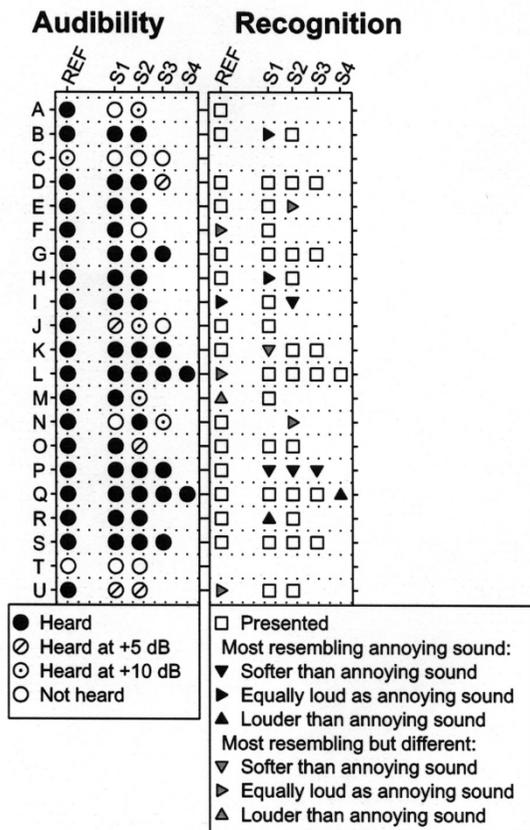


Abbildung 9: Ergebnisse von Blindtests (links) und Erkennungstests (rechts) mit Originalaufnahmen. Jede Zeile zeigt die Ergebnisse für eine Person. REF bezeichnet das Referenzgeräusch, während S1-S4 Geräusche aus der Wohnung des jeweiligen Probanden bezeichnen. Töne, die abgespielt, aber nicht benannt wurden, sind gekennzeichnet.

3.3 Blindtests und Erkennungstests mit Originalaufnahmen

Das linke Bild in Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der Blindtests mit Originalaufnahmen.

Das rechte Bild in Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der Erkennungstests mit Originalaufnahmen. Der Stimulus, der dem störenden Geräusch am ähnlichsten war, wird durch ausgefüllte Dreiecke dargestellt. Die Ausrichtung des Dreiecks gibt an, wie laut die Versuchsperson den Reiz im Vergleich zu dem störenden Geräusch zu Hause wahrgenommen hat. Wenn berichtet wurde, dass zwei oder mehr Geräusche dem störenden Geräusch gleich gut ähnelten, sind beide (alle) angegeben. Manchmal berichteten die Probanden spontan, dass der Stimulus zwar dem störenden Geräusch ähnelte, aber qualitativ anders war (z. B. fehlte ein Teil des störenden Geräuschs im Stimulus oder der Stimulus war "nicht ganz" wie das störende Geräusch). In diesen Fällen sind die Symbole grau, ansonsten sind sie schwarz.

In Tabelle I. sind die Probanden in die in der Einleitung (Abschnitt 1.2) genannten Kategorien eingeteilt. Eine zusätzliche Kategorie 1a wurde eingeführt, um den spontanen Berichten über qualitative Unterschiede Rechnung zu tragen. Die Themen dieser Kategorie werden später in die Hauptkategorien eingeordnet (Abschnitt 4.4).

Tabelle I.

Einteilung der Probanden in Kategorien auf der Grundlage der Ergebnisse der Blind- und Wiedererkennungstests mit Originalaufnahmen. Die Spalte ganz rechts enthält die Probanden nach der Anpassung in Abschnitt 4.4, wobei die Probanden der Kategorie 1a in die anderen Kategorien eingeordnet werden.

Kategorie	Beschreibung	Themen	Probanden (angepasst)
1	Gehört. Ähnelst störendes Geräusch	B, H, I, P, Q, R	B, E, H, I, P, Q, R
1a	Gehört. Ähnelst lästigen Geräuschen, aber anders	E, K, N	
2	Gehört. Hat keine Ähnlichkeit mit störendes Geräusch	D, F, G, L, M, O, S	D, F, G, K, L, M, N, O, S
3	Nicht gehört	A, C, J, T, U	A, C, J, T, U

3.4 Blindtests und Erkennungstests mit gefilterten Aufnahmen

Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse der Blindtests (links) und der Wiedererkennungstests (rechts) mit gefilterten Aufnahmen. Es ist zu erkennen, dass alle Geräusche, die in der Originalversion zu hören waren, auch in mindestens einer der gefilterten Versionen zu hören waren.

3.5 Anpassung von störenden Geräuschen

Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse des Matchings. Einige Probanden verlangten Töne mit einer Kombination aus mehreren Tönen oder modulierten Tönen, aber solche Töne waren nicht Teil der verfügbaren Anpassungsreize. Die übereinstimmenden Frequenzen liegen im Frequenzbereich von 16-100 Hz.

3.6 Zusammenfassung der Einzelergebnisse

Eine Zusammenfassung der einzelnen Ergebnisse ist in Abbildung 12 dargestellt. Jedes Bild zeigt Daten für eine Person. Gemessene Hörschwellen und gleiche Lautheitskonturen werden zusammen mit Terzanalysen der Stimuli gezeigt, wobei Frequenzbereiche, die in den Blindtests bei natürlichem Pegel hörbar waren, mit dicken grauen oder schwarzen Linien markiert sind, wobei Schwarz einen Frequenzbereich darstellt, der dem störenden Geräusch am ähnlichsten ist. Die

Eine detaillierte Studie über Beschwerden über tieffrequenten Lärm

Ergebnisse der Anpassungstests sind ebenfalls dargestellt. Die Schwellenwert- und Gleichlautheitsdaten für die Versuchspersonen A, F, J und N, die in Abbildung 7 und Abbildung 8 nicht berücksichtigt wurden, sind in den jeweiligen Bildern enthalten. Bei Versuchsperson Q ist der Stimulus mit dem höchsten 100-Hz-Pegel der Stimulus S4, der bei der benachbarten Versuchsperson P aufgezeichnet wurde (siehe Abschnitt 2.3).

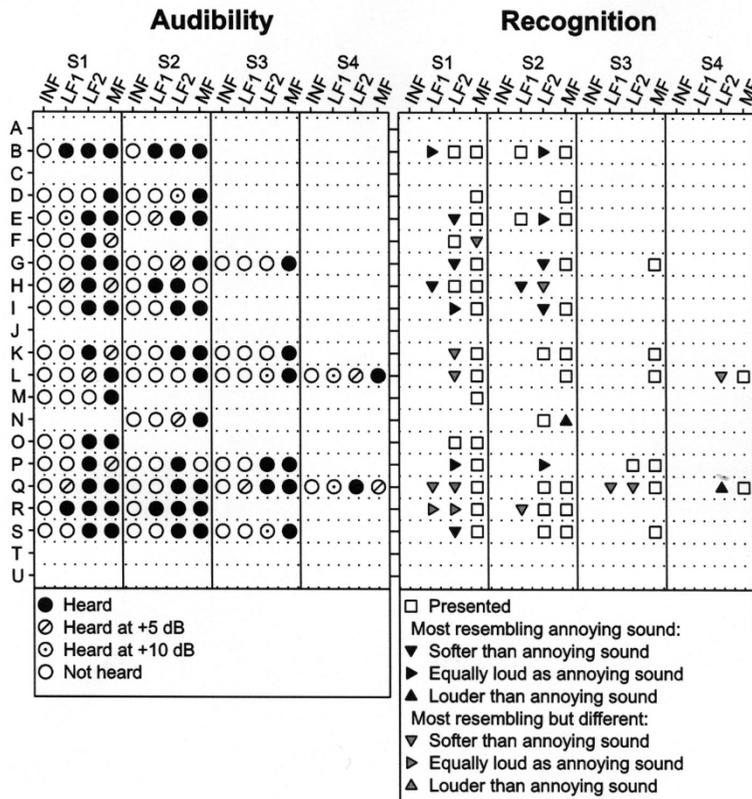


Abbildung 10: Ergebnisse von Blindtests (links) und Erkennungstests (rechts) mit gefilterten Aufnahmen. Jede Zeile zeigt die Ergebnisse für einen Probanden. INF, LF1, LF2 und MF bezeichnen die Frequenzbereiche <20 Hz, 20-60 Hz, 60-180 Hz bzw. >180 Hz. Töne, die wiedergegeben, aber nicht benannt wurden, sind gekennzeichnet.

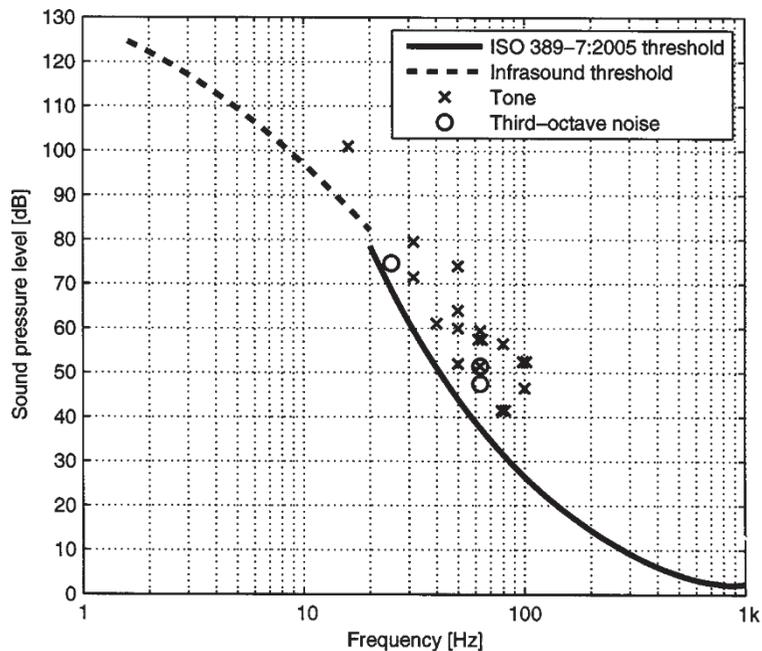


Abbildung 11: Ergebnisse des Anpassungsexperiments, normale Hörschwelle [45] (durchgezogene Linie) und eine Infraschallschwelle (gestrichelte Linie) basierend auf Møller & Pedersen [21], mit zusätzlichen Daten aus [53], [54] und [55]. Wenn zwei Ergebnisse übereinstimmen, wurden die Symbole leicht horizontal verschoben, um beide sichtbar zu machen.

Eine detaillierte Studie über Beschwerden über tieffrequenten Lärm

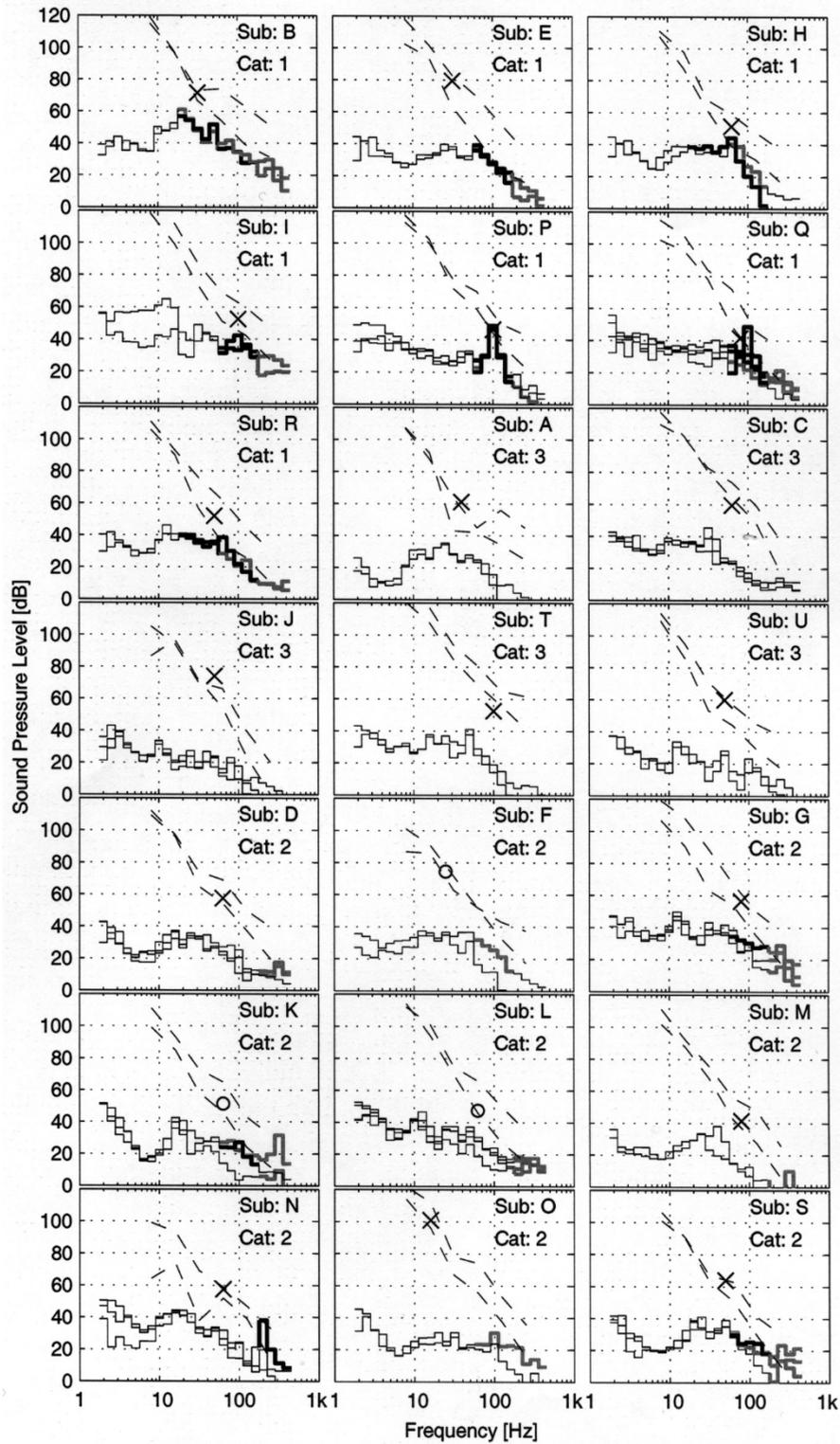


Abbildung 12: Individuelle Daten für jeden Probanden in der Reihenfolge der Kategorien 1-3-2: Terzanalyse der Stimuli, wobei die dicken grauen und schwarzen Linien einen Frequenzbereich darstellen, der für den Probanden in natürlicher Lautstärke hörbar ist (aus Blindtests mit gefilterten Klängen), und schwarz den am meisten ähnelnden Frequenzbereich (aus Wiedererkennungstests mit gefilterten Klängen). Die gestrichelten Linien zeigen die individuellen Hörschwellen und die Konturen gleicher Lautheit. Die Ergebnisse des Anpassungsexperiments sind als x für Töne und als Kreise für Terzrauschen dargestellt.

4. DISKUSSION

4.1 Gemessene Lärmpegel

Die Messungen in den Wohnungen der Beschwerdeführer ergaben eine große Bandbreite an Lärmpegeln. Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, liegen die Terzpegel bei Frequenzen unter 50 Hz alle unterhalb der normalen Hörschwelle, während einige bei höheren Frequenzen die Schwelle überschreiten. Es wurde beobachtet, dass der Schall im Einzelfall zwischen den verschiedenen Mikrofonpositionen stark variierte, was die Ergebnisse von Pedersen et al. [49] unterstützt und verdeutlicht, wie wichtig die Mikrofonposition bei Messungen in Innenräumen bei niedrigen Frequenzen ist (siehe Abschnitt 4.8.1 für weitere Einzelheiten zu den Auswirkungen von Messmethoden).

4.2 Funktion des Gehörs

Aus Abbildung 7 ist ersichtlich, dass die Probanden im Allgemeinen eine Hörschwelle haben, die um oder leicht über der normalen Hörschwelle in den niedrigen und Infraschall-Frequenzbereichen liegt. Dieses Muster scheint mit dem übereinzustimmen, was für eine Gruppe mit der aktuellen Altersverteilung zu erwarten wäre (vielleicht mit Ausnahme eines einzigen Falls, Proband T, obere Kurve bei allen Frequenzen).

Eine außergewöhnliche Hörempfindlichkeit bei niedrigen Frequenzen wird oft als mögliche Erklärung für Lärmbeschwerden bei niedrigen Frequenzen vorgeschlagen. Beispiele für außergewöhnliche Empfindlichkeit bei niedrigen Frequenzen werden in [60] und [61] berichtet (zusammengefasst in [21] mit zusätzlichen unveröffentlichten Daten von Lydolf (1997)). Solche Fälle wurden jedoch in der vorliegenden Untersuchung nicht festgestellt. Auch drei frühere Studien konnten keine außergewöhnliche Hörempfindlichkeit von Beschwerdeführern nachweisen ([40] mit

30 Beschwerdeführer gemessen, [62] mit vier Beschwerdeführern, [54] mit zehn Beschwerdeführern). In der deutschen Studie [46] wurden für einen einzelnen Beschwerdeführer bei einigen Frequenzen extrem niedrige Hörschwellen angegeben, aber die verwendete Methode wurde nicht beschrieben.

Die Mikrostruktur der Hörschwelle ist ein weiteres Phänomen, das als mögliche Erklärung für Beschwerden durch tieffrequenten Lärm genannt wurde [63]. Wenn eine Mikrostruktur vorhanden ist, kann ein schmaler Einbruch der Hörschwelle bei derselben Frequenz wie eine signifikante Komponente des Geräuschs den Ton hörbar machen, auch wenn dies aufgrund des Spektrums und der allgemeinen Schwelle nicht zu erwarten wäre. In der vorliegenden Studie wurden die Mikrostrukturen der Hörschwelle nicht untersucht, aber wenn man eine gewisse Summierung der kritischen Frequenzbereiche berücksichtigt, lassen sich alle hörbaren Frequenzbereiche in Abbildung 12 leicht aus dem Spektrum und den einzelnen Reinton-Hörschwellen erklären.

Wie berichtet, gaben drei Probanden bei der Bestimmung der Schwellenwerte bei einigen Frequenzen sehr uneinheitliche Antworten. Da die aufsteigende Methode in dieser Hinsicht recht empfindlich ist, führte dies zu wiederholten Durchläufen und möglicherweise unzuverlässigen Daten. In diesen Fällen hätte ein Forced-Choice-Verfahren zuverlässigere Daten liefern können. Die inkonsistenten Antworten könnten sehr wohl mit einer mehr oder weniger permanenten Geräuschempfindung zusammenhängen, und es ist zu beobachten, dass die drei Probanden alle zu denjenigen gehören, die über Geräusche im Versuchsraum berichteten, auch wenn keine Geräusche ausgestrahlt wurden.

Die gemessenen Tiefton-Lautstärkekonturen in Abbildung 8 folgen dem "normalen" Trend der Kompression zu tiefen Frequenzen hin (siehe z. B. [21] und [64]), d. h. die Konturen liegen näher an der Hörschwelle (besonders deutlich an den grauen Kurven). Dies bedeutet, dass geringe Änderungen des Pegels zu erheblichen Änderungen der wahrgenommenen Lautheit eines tieffrequenten Tons führen.

Einige Probanden neigen zu einer plötzlichen Verkleinerung des Abstands zwischen ihrer Schwelle und der Kontur gleicher Lautheit. Allerdings ist die Messunsicherheit sowohl bei der Schwellenwert- als auch bei der

Eine detaillierte Studie über Beschwerden über tieffrequenten Lärm

Lautheitsgleichheitsmessung zu groß, um darauf schließen zu können. Die Messunsicherheit kann auch einige wenige Fälle erklären, in denen sich die Hörschwellen- und Lautheitskurven überschneiden. Natürlich kann ein solches Phänomen auch auf zeitlich variierende Hörfunktionen zurückzuführen sein.

4.3 Hörbarkeit verschiedener Frequenzen des aufgenommenen Tons

Ein wichtiges Ergebnis der Blindtests mit gefilterten Aufnahmen (Abbildung 10) ist, dass die Frequenzen unter 20 Hz (Infraschall) in keinem der Fälle hörbar waren - nicht

selbst bei 10 dB über dem aufgezeichneten Pegel. Es ist nicht bekannt, wie groß die kritische Bandbreite in diesem Frequenzbereich ist, aber dieses Ergebnis war zu erwarten, da die Terzpegel bei diesen Frequenzen deutlich (>20 dB) unter der Hörschwelle lagen, wie in Abbildung 4 zu sehen ist. Geräusche im Frequenzbereich 20-60 Hz waren in einigen wenigen Fällen auf natürlichem Niveau hörbar (5 von 36 Tönen, die in gefilterten Versionen präsentiert wurden), aber in den meisten Fällen waren nur die Bereiche 60-180 Hz und/oder >180 Hz auf natürlichem Niveau hörbar.

4.4 Anpassung der Kategorien

Bevor erörtert wird, ob die Belästigung durch physikalische Geräusche verursacht wird oder nicht, ist es angebracht, die Kategorien und Einzelfälle geringfügig anzupassen.

Wenn der typische Stimulus (REF) mit dem störenden Geräusch in der Wohnung eines Probanden vergleichbar war, könnte der Proband - zufällig - diesen im Erkennungstest gewählt haben und nicht ein Geräusch aus der Wohnung. Es ist daher zu prüfen, ob es Probanden gibt, die aufgrund der Existenz des typischen Reizes versehentlich in Kategorie 2 eingestuft wurden. Dazu werden die Antworten der betreffenden Probanden auf den gefilterten Ton näher betrachtet. Drei Versuchspersonen der Kategorie 2 (Versuchspersonen F, L, M) haben den typischen Stimulus im Erkennungstest eingesetzt. Die Versuchspersonen F und L gaben an, dass ein bzw. zwei gefilterte Geräusche dem störenden Geräusch ähnelten, aber keines davon war in natürlicher Lautstärke hörbar. Versuchsperson M konnte nur einen Frequenzbereich einer Aufnahme hören, und dieser wurde nicht als dem störenden Geräusch ähnlich angegeben. Diese Beobachtungen deuten also nicht darauf hin, dass eine der drei Versuchspersonen verlegt worden ist. Es ist auch wichtig, die drei Probanden der Kategorie 1a näher zu betrachten und, wenn möglich, Argumente aus den Tests mit gefilterten Geräuschen zu finden, um sie in eine der Hauptkategorien zu verschieben. In den Tests mit gefilterten Tönen hat die Versuchsperson E denselben Frequenzbereich für zwei Töne benannt, beide Male ohne Vorbehalt, und es gibt genügend Grund, dies als positive Erkennung zu betrachten. Daher ist es gerechtfertigt, diese Versuchsperson in Kategorie 1 einzuordnen. Proband K benannte einen gefilterten Ton, ebenfalls mit Vorbehalt, und ein anderer Ton mit ähnlichen Pegeln in diesem Frequenzbereich wurde nicht benannt. Außerdem war der Vorbehalt dieser Versuchsperson erheblich ("es ähnelt, aber es ist überhaupt nicht dasselbe"), und es ist gerechtfertigt, diese Versuchsperson in Kategorie 2 zu verschieben. In den Tests mit gefilterten Geräuschen hörte Proband N nur den Frequenzbereich >180 Hz und ordnete diesen zu. Das betreffende Geräusch hatte einen markanten Ton um 200 Hz. Eine Vielzahl von tiefen Tönen war in allen Aufnahmen vorhanden, aber dieser außergewöhnliche Ton wurde nur in einer von fünf Aufnahmeperioden gefunden. Eine Erklärung dafür ist nicht bekannt. Die durch einen 200-Hz-Ton hervorgerufene Empfindung wäre normalerweise weniger polternd als das, was oft mit niederfrequentem Lärm assoziiert wird, und die Versuchsperson gab an, dass der Ton lauter war als das störende Geräusch. Es ist daher etwas unsicher, ob die Belästigung durch diesen Ton verursacht wird, und es ist gerechtfertigt, die Versuchsperson in Kategorie 2 einzustufen. Die Kategorien nach diesen Anpassungen sind auf der rechten Seite angegeben

Spalte der Tabelle I.

4.5 Bewertung von Einzelfällen

Im Folgenden werden die Kategorien und insbesondere für Kategorie 2 auch Einzelfälle kommentiert.

4.5.1 Kategorie 1

Die Probanden der Kategorie 1 waren in der Lage, den aufgenommenen Ton zu hören, und sie berichteten, dass der Ton dem störenden Geräusch zu Hause ähnelt. Außerdem wurde bei allen Versuchspersonen ein bestimmter Frequenzbereich bei den Tests mit gefilterten Geräuschen erfolgreich bestimmt. Für diese Probanden

Eine detaillierte Studie über Beschwerden über tieffrequenten Lärm

wird daher der Schluss gezogen, dass die Belästigung durch ein physikalisches Geräusch verursacht wird, und dessen Frequenzbereich wurde identifiziert.

Sechs der sieben Probanden in dieser Kategorie ordneten das störende Geräusch einem Frequenzbereich zu, in dem eine signifikante Energie in den Aufnahmen zu sehen war, und sie benannten den/die gleichen Frequenzbereich(e) im Wiedererkennungstest mit gefilterten Aufnahmen. Diese Beobachtungen sprechen dafür, dass der aufgenommene Ton die Ursache ist

der Belästigung. Bei der Anpassung trafen zwei Probanden (P und Q) sogar den Pegel überraschend gut, während die anderen einen Pegel erreichten, der 7-17 dB über den Terzpegeln in dem betreffenden Frequenzbereich lag. Der etwas höhere Pegel lässt sich leicht durch die Lautheitssummierung im kritischen Band und die Steigung der Schwellen-/Lautheitskonturen rechtfertigen. Keiner der sieben Probanden in dieser Kategorie gehörte zu denjenigen, die über Geräusche im ruhigen Versuchsraum berichteten.

4.5.2 Kategorie 2

Grundsätzlich würde die fehlende Erkennung des aufgenommenen Geräuschs darauf hindeuten, dass die Belästigung nicht durch das Geräusch verursacht wird. Andererseits ist die menschliche Fähigkeit, sich Geräusche zu merken, nicht perfekt, und die Empfindung eines bestimmten Geräuschs kann anders sein, wenn es im Labor gehört wird als unter entspannteren Bedingungen zu Hause. Der aufgezeichnete Ton war in der Tat hörbar, und es kann nicht ausgeschlossen werden, dass physische Geräusche der Grund für die Belästigung sein könnten.

Drei Probanden der Kategorie bedürfen besonderer Bemerkungen. Wie in Abschnitt 2.1 erwähnt, gab Proband O an, dass das störende Geräusch schon vor einiger Zeit verschwunden sei, so dass die Erkennungs- und Zuordnungstests nur von begrenztem Wert sind und die Daten in der Schlussfolgerung unberücksichtigt bleiben. Bei dieser Versuchsperson ist es kaum möglich - und von geringer Bedeutung - zu klären, ob die Belästigung durch ein physikalisches Geräusch verursacht wurde oder nicht. Versuchsperson N nannte einen aufgezeichneten Ton mit einem markanten Ton um 200 Hz, der dem störenden Geräusch ähnelte (siehe Abschnitt 4.4). Der Ton trat jedoch nur in einem der fünf Aufnahmezeiträume auf, und es kann nicht eindeutig festgestellt werden, dass es sich um das störende Geräusch handelt. Wenn dies nicht der Fall ist, deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Belästigung nicht durch ein physikalisches Geräusch verursacht wird (die Versuchsperson berichtete über Geräusche im ruhigen Versuchsraum, konnte keine anderen Geräusche oder Frequenzbereiche hören und passte sich einer Frequenz an, die weit unterhalb des 200-Hz-Tons lag). Versuchsperson M hatte nach den Aufnahmen festgestellt, dass sich der störende Ton nicht in der Lautstärke verändert, wenn sie sich im Haus bewegt, während andere tieffrequente Töne dies aufgrund von stehenden Wellen tun. Die Versuchsperson hatte erkannt, dass ein interner Ton dafür verantwortlich ist, und fand heraus, dass der Ton bei etwa 80 Hz liegt. Dies wurde in den Experimenten bestätigt, bei denen der Ton in einem ruhigen Labor auftrat, und der Anpassungstest bestätigte sogar die Frequenz.

Bei den übrigen sechs Probanden der Kategorie 2 können verschiedene Hinweise darauf hindeuten, dass das Problem durch physikalische Geräusche verursacht wird, oder dass dies nicht der Fall ist. Die Erkennung von gefilterten Aufnahmen deutet eher auf physikalische Geräusche hin. Fünf Versuchspersonen (F, G, K, L und S) erkannten gefilterte Aufnahmen, zwei davon (F und L) jedoch nur bei einem Pegel von +5 dB, und bei drei von ihnen (F, K und L) erfolgte die Erkennung mit Vorbehalt. Alle fünf Versuchspersonen gaben an, dass der aufgenommene Ton leiser war als der störende Ton zu Hause, was als Abschwächung des Erkennungshinweises gewertet werden könnte. Drei Versuchspersonen hörten Geräusche im ruhigen Labor (Versuchspersonen D, G, K), was darauf schließen lässt, dass interne Geräusche die Ursache für die Belästigung sein könnten. Eine Versuchsperson (Versuchsperson F) ordnete das störende Geräusch einer Frequenz zu, die weit außerhalb des erkannten Frequenzbereichs lag, was gegen physikalische Geräusche spricht. Die Addition dieser Hinweise für die einzelnen Probanden ergibt keine eindeutigen Hinweise, und es wird nicht für möglich gehalten, Schlussfolgerungen für diese sechs Probanden zu ziehen. Es wird angenommen, dass ein interaktiverer Prozess mit Messung und sofortiger Wiedergabe des Geräusches auch in diesen Fällen zur Erklärung führen kann.

4.5.3 Kategorie 3

Es wurden umfangreiche Maßnahmen ergriffen, um sicherzustellen, dass das

Eine detaillierte Studie über Beschwerden über tieffrequenten Lärm

störende Geräusch während der Aufnahmen vorhanden ^{war}² und dass die den Versuchspersonen dargebotenen Stimuli den höchsten gefundenen Pegeln entsprachen. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass in allen Fällen, in denen die Versuchspersonen die Reize nicht in natürlicher Lautstärke hören konnten, die Belästigung andere Gründe als ein physikalisches Geräusch hat.

Aus Abbildung 12 ist ersichtlich, dass für die Probanden dieser Kategorie die übereinstimmenden störenden Geräusche im Allgemeinen deutlich über den in ihren Wohnungen herrschenden Pegeln liegen. Es ist festzustellen, dass zwei der fünf Probanden in dieser Kategorie die Geräusche bei +5 % hören konnten.

²Es ist anzumerken, dass die beiden Probanden, die das Vorhandensein des Geräusches nach den Aufnahmen nicht bestätigten (siehe Abschnitt 2.2), nicht zu dieser Kategorie gehören.

dB (Versuchspersonen J und U), aber sie empfanden ihn nicht als ähnlich störend wie das Geräusch. Ferner ist festzustellen, dass drei dieser Probanden (Proband A, J und T) zu denjenigen gehörten, die über ein tieffrequentes Gefühl berichteten, während sie in dem ruhigen Versuchsraum saßen. Zwei der Probanden (Proband A und J) gehörten zu denjenigen, die bei den Messungen der Hörfunktion widersprüchliche Antworten gaben.

Aus Abbildung 12 ist ersichtlich, dass in allen Fällen der Kategorie die angepassten Frequenzen bei 100 Hz oder darunter liegen. Da die Belästigung nicht durch physikalische Geräusche hervorgerufen wird, wäre es daher angemessen, den Begriff *niederfrequenter Tinnitus* zu verwenden. Die Autoren sind sich bewusst, dass der Begriff Tinnitus meist - und insbesondere von Laien - für eine hochfrequente Empfindung verwendet wird ("*tinnitus, a sensation of ringing in the ears*", [65]), aber in den allgemeinen Definitionen ([13], [14]) spricht nichts gegen die Verwendung des Begriffs im Zusammenhang mit einer tieffrequenten Empfindung. Diese Möglichkeit wird auch in Informationsmaterial von Berufsverbänden für die Öffentlichkeit erwähnt, z. B. "*Tinnitus, Klingeln, Brummen, Rauschen, Zirpen, Schlagen, Brummen*" [66] und "*Tinnitus-Geräusche werden unterschiedlich als Klingeln, Pfeifen, Brummen und Summen beschrieben*" [67].

In der medizinischen Literatur wird tieffrequenter Tinnitus bei bestimmten Erkrankungen erwähnt [68], [69], [70]. Tieffrequente Schwerhörigkeit und tieffrequenter Tinnitus sind charakteristische Symptome des Morbus Menière [71], [72], treten aber viel zu häufig auf, um (isoliert) als Prodromalzeichen dieser Krankheit angesehen zu werden [73], [74].

In früheren Studien über Beschwerden durch tieffrequente Geräusche wurde von Walford [40] auch der Begriff "tieffrequenter Tinnitus" für die Fälle verwendet, in denen das störende Geräusch nachweislich von innen kommt. Zusätzlich zu den Möglichkeiten des externen und internen Geräuschs ging Walford von der Hypothese aus, dass ein nicht-akustisches externes Feld die Geräuschempfindung hervorrufen und somit verantwortlich sein könnte. In zwei Fällen erwähnte er ein elektromagnetisches Feld als Möglichkeit, was jedoch nie bestätigt wurde. Berg [33] verwendet ebenfalls den Begriff Niederfrequenz-Tinnitus. Walfords Studie [40] legt ebenfalls nahe, dass Tinnitus, der als tieffrequenter Ton wahrgenommen wird, nicht ungewöhnlich ist. Zusätzlich zu den Personen, die sich über tieffrequente Geräusche beklagten, hatte er auch eine Kontrollgruppe von 229 Tinnitus-Patienten aus einer neuro-otologischen Klinik eines Krankenhauses. Von diesen stimmten 55 (24 %) mit ihrem Tinnitus auf Geräusche mit einer Frequenz unter 200 Hz überein. In anderen Studien (z. B. König et al. [75]) gab es überhaupt keine Patienten, deren Tinnitus auf Frequenzen unter 1000 Hz abgestimmt war, was auf eine Art Vorauswahl hindeutet, möglicherweise in Verbindung mit einer engeren Definition von Tinnitus. In der klinischen Praxis könnte auch der Mangel an Geräten für die Tinnitus-Anpassung bei niedrigen Frequenzen eine Rolle spielen.

4.5.4 Zusammenfassung der Bewertungen

Bei sieben Versuchspersonen (alle Versuchspersonen der Kategorie 1) ist der physikalische Schall für die Belästigung verantwortlich. Bei sechs Versuchspersonen (alle Versuchspersonen in Kategorie 3 plus Versuchsperson M) wird die Belästigung nicht durch physikalische Geräusche verursacht, und diese Fälle werden durch niederfrequenten Tinnitus erklärt. Bei einem Probanden (Proband N) wurde ein 200-Hz-Ton gefunden, der möglicherweise verantwortlich ist, aber ein niederfrequenter Tinnitus kann nicht ausgeschlossen werden. Bei einem Probanden (Proband O) ist das Geräusch schon vor einiger Zeit verschwunden, und es ist kaum möglich, den Grund für die Belästigung zu finden. Die übrigen sechs Probanden (Probanden der Kategorie 2 mit Ausnahme der Probanden M, N und O) konnten eines oder mehrere der aufgezeichneten Geräusche hören, aber es konnte kein spezifisches physikalisches Geräusch bestimmt werden, und es ist nicht möglich, zu entscheiden, ob ein physikalisches Geräusch oder ein niederfrequenter Tinnitus für die Belästigung verantwortlich ist.

4.6 Pegel der störenden Geräusche

Aus Abbildung 12 ist ersichtlich, dass die Pegel der angepassten Geräusche im Allgemeinen nahe an der individuellen Hörschwelle liegen, sowohl bei Fällen mit Körperschall als auch bei Fällen mit niederfrequentem Tinnitus. In der Literatur gibt es viele Berichte darüber, dass Lautheit und Belästigung bei niedrigen Frequenzen steil über die Hörschwelle ansteigen (z. B. [76], [64], [21], [77], [78]). In der vorliegenden Studie spiegelt sich der steile Anstieg der Lautheit auch in der Kompression der Hörschwellen und der Lautheitskurven wider, die in

Abschnitt 4.2. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung reichen nicht aus, um festzustellen, ob dieser steile Anstieg der Lautstärke und der Belästigung bei Personen, die sich über tieffrequenten Lärm beschwerten, stärker ausgeprägt ist als bei anderen. Wenn dies der Fall ist, könnte dies mit einer bedingten Reaktion auf das bloße Hören von tieffrequenten Geräuschen zusammenhängen, die sich als Ergebnis einer langfristigen Belästigung entwickelt hat (unabhängig davon, ob die Quelle physisch oder intern ist). Wie von Persson Waye [79] vorgeschlagen, könnte dies im Lichte der jüngsten Erkenntnisse über die Funktion unseres subkortikalen Systems mit der Amygdala und seiner ungewöhnlichen Fähigkeit, zu lernen und auf negative Geräusche und insbesondere auf Geräusche, die mit Angst und Gefahr verbunden sind, zu reagieren, erklärt werden [80], [81].

4.7 Verallgemeinerung der Ergebnisse

Auch wenn sich die vorliegende Studie auf die Klärung von Einzelfällen konzentriert, wurden diese nach dem ^{Zufallsprinzip}³ aus einer bestimmten Gruppe ausgewählt, und es ist möglich, Statistiken abzuleiten, die allgemein für ähnliche Fälle gelten.

Die Beschwerdeführer in der Gruppe, aus der die Probanden ^{tatsächlich} ausgewählt wurden⁴, können als *Personen* charakterisiert werden, *die nach ihrem eigenen Verständnis ein ungelöstes Problem der Belästigung durch tieffrequenten Lärm haben*. Es liegt auf der Hand, dass die Gruppe durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird, z.B. das Problemverständnis und die Motivation der einzelnen Personen, sich zu engagieren, die Methode der vorangegangenen Untersuchung [50], deren Anmeldeverfahren und Bekanntmachung, die Beharrlichkeit von Einzelpersonen und Behörden bei der Suche nach einer Lösung usw. Einige dieser Faktoren werden in jeder ähnlichen Gruppe ähnlich auftreten, während andere für die Gruppe, aus der die Probanden ausgewählt wurden, spezifisch sind. Wenn sich die 30 Beschwerdeführer, zu denen wir den Kontakt verloren hatten, von der Gesamtgruppe unterschieden, hätte dies auch zu einer Verzerrung unserer Probandengruppe geführt. Das Gleiche gilt für die 22 ausgewählten Beschwerdeführer, die nicht teilnehmen wollten (siehe Abschnitt 2.1). Es ist jedoch zu betonen, dass die Teilnahme für die Probanden recht anspruchsvoll war; es ist völlig verständlich, dass die Beschwerdeführer die Teilnahme ablehnten, und niemandem wird ein Vorwurf gemacht, wenn er nicht teilnimmt.

Bei 33 % der Probanden (sieben von 21) wurde bestätigt, dass die Belästigung durch ein physikalisches Geräusch verursacht wurde. Geht man von einer Binomialverteilung aus, beträgt das entsprechende 80 %-Konfidenzintervall 20-49 %. In 29 % der Fälle (sechs von 21) wurde ein tieffrequenter Tinnitus bestätigt, für den das 80 %-Konfidenzintervall 16-44 % beträgt. Ungeklärte Fälle sind in einem unbekanntem Anteil auf physikalische Geräusche oder Tinnitus zurückzuführen. Mit den Vorbehalten, die sich aus den im vorigen Absatz genannten Umständen ergeben, kann im Allgemeinen geschlossen werden, dass physikalische Geräusche für einen erheblichen Teil dieser Fälle verantwortlich sind (mindestens 20 %), während niederfrequenter Tinnitus für einen weiteren erheblichen Teil der Fälle verantwortlich ist (mindestens 16 %).

4.8 Bewertung von Fällen nach den dänischen und schwedischen Leitlinien für tieffrequenten Lärm

Die sieben Fälle der Kategorie 1, bei denen die Belästigung durch ein bestimmtes physikalisches Geräusch erklärt wird, werden anhand der dänischen und schwedischen Leitlinien bewertet. Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse der beiden Methoden sowie den Leistungsmittelwert der acht 3D-Ecken für die längstmöglichen ungestörten Zeiträume. Die Anforderung an die Dauer der Messperiode im schwedischen Leitfadens (30 Sekunden) wird in den meisten Fällen erfüllt, während die des dänischen Leitfadens (5 Minuten) in keinem der Fälle eingehalten wird. Aus den Spektrogrammen aller Aufnahmen von Probanden dieser Kategorie geht jedoch hervor, dass die störenden Geräusche recht gleichmäßig sind, so dass die Dauer keinen Einfluss auf das Ergebnis hat.

Wie in Anhang A angegeben, gibt es bei den verwendeten Messpositionen drei

Eine detaillierte Studie über Beschwerden über tieffrequenten Lärm

verschiedene Ergebnisse für die schwedische Methode und 24 für die dänische Methode. Für alle Messmethoden werden Terzpegel sowie G-gewichtete Pegel angegeben

³ Zwei Fälle wurden vorausgewählt (siehe Abschnitt 2.1); dies geschah jedoch ohne vorherige Kenntnis möglicher Ergebnisse, und die Einbeziehung dieser Fälle soll die Daten nicht durch Verzerrungen beeinträchtigen. Die beiden vorausgewählten Fälle fielen jeweils in die Kategorien 1 und 3.

⁴ Beschwerdeführer, bei denen das Problem gelöst war, wurden entweder vor oder nach der Zufallsauswahl entfernt, siehe Abschnitt 2.1.

(L_{pG}) und A-bewertete Pegel für den Frequenzbereich 10-160 Hz ($L_{pA,LF}$ gemäß den dänischen Leitlinien). Die Abbildung zeigt auch die in den schwedischen Leitlinien angegebenen Grenzwerte für Terzpegel und den in den dänischen Leitlinien für $L_{pA,LF}$ angegebenen Grenzwert für Wohnungen (25 dB tagsüber, 20 dB abends und nachts). Der dänische Grenzwert von 85 dB für L_{pG} liegt oberhalb der Skala in der Abbildung.

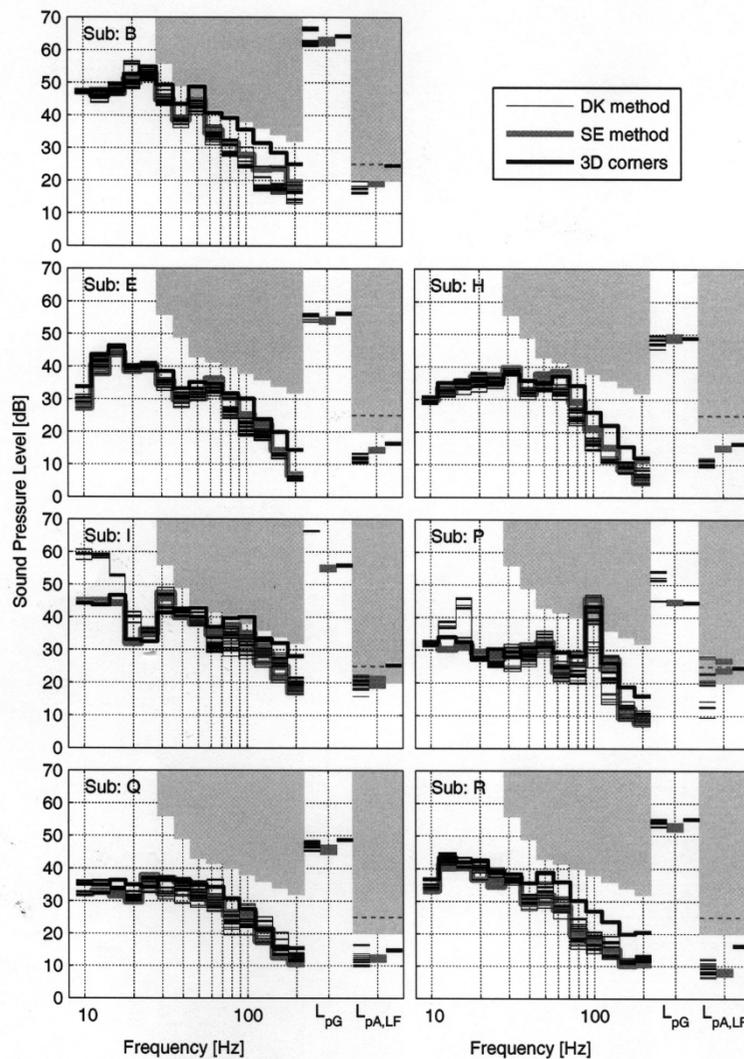


Abbildung 13: Vergleich aller möglichen Ergebnisse der Messmethoden im Vergleich zu den dänischen und schwedischen Grenzwerten. Die grauen Flächen stellen die Grenzwerte in Dänemark (für $L_{pA,LF}$) und Schweden (für Terzpegel) dar. Der dänische L_{pG} -Grenzwert von 85 dB liegt oberhalb der Skala und ist nicht dargestellt. Für L_{pG} und $L_{pA,LF}$ sind die Linien in der Reihenfolge aufgetragen: DK-Methode, SE-Methode und 3D-Ecken.

4.8.1 Messmethoden

Es ist nicht Aufgabe der vorliegenden Untersuchung, die Messmethoden zu bewerten, aber einige Bemerkungen sind angebracht. Bei den niedrigsten Frequenzen (<25-50 Hz, wahrscheinlich abhängig von der Raumgröße) zeigen die Pegel der dritten Oktave im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung zwischen den Methoden. Dies ist natürlich, da bei diesen Frequenzen die Wellenlänge im Vergleich zu den Raumabmessungen groß ist und der Pegel innerhalb des Raums weniger schwankt als bei höheren Frequenzen. Ausnahmen sind in den Ergebnissen für die Probanden I und P zu sehen, die jedoch eher auf Unterschiede im Klang zwischen den Messperioden als auf räumliche Variationen

**Eine detaillierte Studie über Beschwerden über
tieffrequenten Lärm**

zurückzuführen sind. (Die abweichenden Spektren stammen aus demselben Aufnahmezeitraum). Die Übereinstimmung zwischen den Methoden bei den niedrigsten

Frequenzen (und Unstimmigkeiten bei den Probanden I und P) spiegeln sich in den Ergebnissen für L_{pG} wider. Bei höheren Frequenzen, d. h. über 25-50 Hz, stimmen die Terzwerte weniger gut überein. Es gibt sogar erhebliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Ergebnissen der dänischen Methode. Die höchsten Pegel werden in der Regel mit dem Leistungsmittelwert der 3D-Ecken erzielt, die niedrigsten mit der dänischen Methode. Die Abweichungen oberhalb von 25-50 Hz spiegeln sich auch in den Ergebnissen für $L_{pA,LF}$ wider. Die größte Abweichung ist bei Proband P zu beobachten, wo die mit der dänischen Methode ermittelten Pegel einen Bereich von fast 20 dB umfassen. In diesem Fall wird der Klang von einem einzigen Terzband dominiert (eigentlich ein 100-Hz-Ton, siehe Abschnitt 4.9).

Die Ergebnisse stehen im Einklang mit den Resultaten von Pedersen et al. [49], die den Pegel, der in 10 % eines Raumes überschritten wird, als Zielwert für Messungen von tieffrequenten Geräuschen in Räumen vorgeschlagen haben. Dieser Pegel liegt nahe an den höchsten Pegeln im Raum, wobei jedoch vermieden wird, dass die Pegel nur in kleinen Teilen des Raums vorhanden sind. Somit dient er als gute Schätzung des Pegels, dem die Menschen in dem Raum normalerweise ausgesetzt sind. Sie haben gezeigt, dass insbesondere die dänische Messmethode mit einer großen Unsicherheit behaftet ist und ein hohes Risiko birgt, dass die Ergebnisse unterhalb des Zielwerts liegen.

4.8.2 Vergleiche mit Grenzwerten

Von den sieben Fällen weisen zwei (Probanden B und P) Werte auf, die den schwedischen Grenzwert überschreiten (bei Verwendung der schwedischen Messmethode), und zwei (Probanden I und P) haben Werte, die die dänischen Grenzwerte überschreiten (bei Verwendung der dänischen Messmethode). Bei letzteren überschreiten jedoch nur einige der Ergebnisse der dänischen Methode die Grenzwerte. Der Leistungsdurchschnitt der 3D-Ecken liegt jedoch in allen drei Fällen sowohl über den schwedischen als auch über den dänischen Grenzwerten.

Die große Unsicherheit bei den Messergebnissen, insbesondere bei der dänischen Methode, ist ein großes Problem bei der Beurteilung solcher Fälle. Die extrem große Schwankung im Fall des Probanden P wurde bereits erwähnt, aber auch der Fall des Probanden B ist ein unglückliches Beispiel. Es wurden tatsächlich Werte von $L_{pA,LF}$ oberhalb der 20 dB-Grenze festgestellt in mehreren der ursprünglichen Messungen (Bereich 16,6-23,2 dB), aber die Auswahl Verfahren für die Positionen in der dänischen Messmethode führte dazu, dass das Ergebnis im Bereich von 16,9-19,8 dB lag. Diese Werte liegen alle unter dem Grenzwert von 20 dB, auch wenn es keinen Zweifel daran gibt, dass der Grenzwert von 20 dB an vielen Stellen im Raum überschritten wird.

Es ist nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung, die nationalen Grenzwerte von Dänemark und Schweden zu bewerten. Es ist jedoch erwähnenswert, dass die Grenzwerte selbst bei Verwendung der besten verfügbaren Messmethode (Leistungsmittelwert von 3D-Ecken) und selbst dann, wenn keiner der Beschwerdeführer eine ungewöhnliche Hörempfindlichkeit aufwies, nur in drei der sieben Fälle von tieffrequentem Lärm auf Probleme mit niedrigen Frequenzen hinweisen. In der Literatur gibt es Belege dafür, dass Lärm unterhalb der dänischen Grenzwerte auch für Personen, die nicht über tieffrequenten Lärm klagen, störend sein kann (z. B. [62], [82], [83]).

4.9 Analysen der störenden tieffrequenten Geräusche

Es liegt nicht im Rahmen dieser Untersuchung, die Quelle des störenden tieffrequenten Schalls zu finden; eine detaillierte Frequenzanalyse könnte jedoch einige Informationen über die Art des Schalls liefern. Für die Fälle, in denen physikalische Geräusche für die Belästigung verantwortlich waren, sind in Abbildung 14 die Leistungsmittelwerte der FFT-Analysen mit 0,1 Hz-Auflösung aus den acht 3D-Ecken dargestellt. Diese Spektren befinden sich nicht an einer bestimmten Stelle in den Räumen, sondern repräsentieren jede Frequenzkomponente bei Pegeln, die geringfügig unter den höchsten Pegeln liegen, die in den Räumen vorhanden sind (siehe Abschnitt 4.8.1).

Eine detaillierte Studie über Beschwerden über tieffrequenten Lärm

Allgemein lässt sich feststellen, dass die Geräusche in allen Fällen komplexer Natur sind und mehrere Obertöne enthalten. Dies deutet darauf hin, dass die Quelle(n) in jedem Fall aus rotierenden Teilen oder Kolben besteht/bestehen, die mit festen (Umdrehungs-)Frequenzen laufen (z. B. Pumpen/Kompressoren, Motoren, Ventilatoren und Lüftungsanlagen).

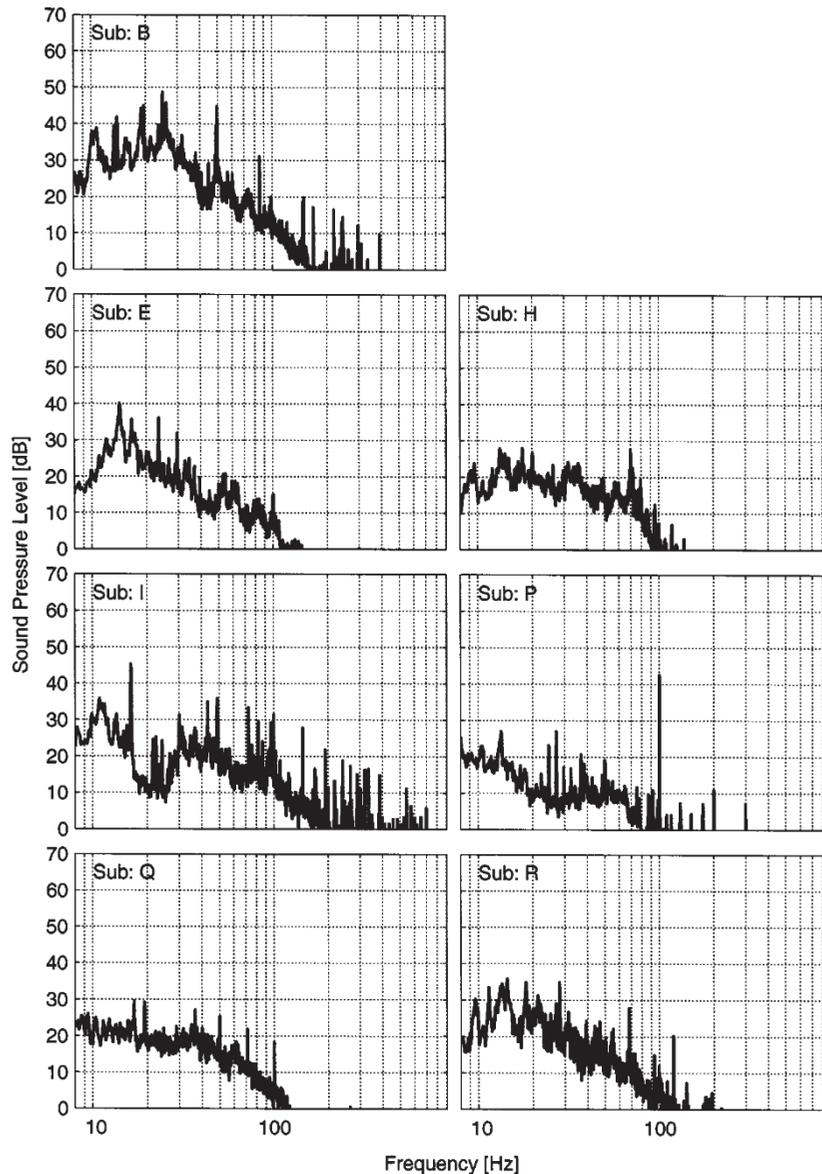


Abbildung 14: Leistungsmittelwert der FFT-Spektren mit einer Frequenzauflösung von 0,1 Hz (Hanning-Fenster mit 50 % Überlappung) aus den acht Eckpositionen für jeden der eindeutigen Fälle von niederfrequentem Rauschen.

4.10 Behandlung von Beschwerden über tieffrequenten Lärm

Bei Beschwerden über tieffrequenten Lärm ist es wichtig, die Art des Problems zu ermitteln, bevor man Maßnahmen beschließt. Wenn die Belästigung nicht durch ein physikalisches Geräusch verursacht wird, hilft keine Lärminderung oder Bekämpfung potenzieller Quellen. Wenn physische Geräusche das Problem sind, ist jeder Hinweis auf Tinnitus unangebracht. Wie diese Untersuchung zeigt, ist es möglich, dass unzureichende Messungen dazu führen, dass ein potenziell störendes Geräusch nicht aufgedeckt wird. Andererseits werden die Messsysteme, da sie sehr empfindlich sind, immer einen Teil der Geräusche messen, und es wurde festgestellt, dass in allen 21 Fällen dieser Studie tonale Komponenten gefunden werden können. Die Tatsache, dass ein Geräusch gemessen werden kann, bedeutet nicht unbedingt, dass es hörbar ist und/oder die Belästigung verursacht.

Die Pegelschwankungen innerhalb eines Raumes können manchmal als einfaches Mittel dienen, um herauszufinden, ob ein störendes Geräusch von innen oder außen kommt. Wenn eine langsame Bewegung im Raum den Pegel und den Charakter des Geräuschs verändert, ist dies ein Hinweis auf stehende Wellen und

**Eine detaillierte Studie über Beschwerden über
tieffrequenten Lärm**

ein Indiz dafür, dass ein externes Geräusch dafür verantwortlich ist. Wenn nicht, deutet dies auf ein internes

solide. Die Methode erfordert jedoch ein hohes Maß an Mitarbeit und Verständnis der belastigten Person und ist möglicherweise nur in einigen Fällen anwendbar. Außerdem kann sie bei den niedrigsten Frequenzen völlig versagen. Ein Ohrenschützertest, wie er von Walford [40] verwendet wird, kann in einigen Fällen nützlich sein, ist aber unsicher, da der Ohrenschützer möglicherweise nicht in der Lage ist, externe tieffrequente Geräusche zu dämpfen, und er kann physiologische Geräusche verstärken [84]. Wenn das Geräusch nicht nur an einem bestimmten Ort, sondern auch in anderen ruhigen Umgebungen und an anderen geografischen Orten gehört wird, könnte dies auch auf ein internes Geräusch hinweisen.

Eine kürzlich durchgeführte Studie [85] zeigte, dass 25 % der Tinnitus-Betroffenen anfänglich (vor der Tinnitus-Diagnose) glaubten, das Geräusch sei ein echtes Geräusch, z. B. von Haushaltsgeräten oder den Nachbarn. Die Studie befasste sich nicht speziell mit Fällen von niedrigen Frequenzen, aber es gibt keinen Grund zu der Annahme, dass es unter diesen mehr Fälle von echtem Geräusch gibt als unter Fällen von höheren Frequenzen.

Für die Beschwerdeführer, bei denen die Belästigung durch ein physikalisches Geräusch mit niedrigen Frequenzen verursacht wird, besteht die natürliche Lösung darin, den Lärm zu reduzieren. Manchmal ist es jedoch schwierig, die Lärmquelle zu finden, und wie in einigen Fällen der vorliegenden Studie festgestellt wurde, kann der Lärm auch dann störend sein, wenn die Grenzwerte nicht überschritten werden. In solchen Fällen kann es schwierig sein, den Eigentümer der Lärmquelle zu überzeugen, eine Lösung zu finden. Wahrscheinlich ist eine Bewertung der Grenzwerte angebracht.

Für die Beschwerdeführer mit niederfrequentem Tinnitus kann das Wissen, dass das Geräusch innerlich erzeugt wird, auf verschiedene Weise zur Bewältigung des Problems beitragen. Tinnitus kann Symptom einer Vielzahl von Krankheiten sein, die mit den Ohren, dem Herz-Kreislauf-System, dem Stoffwechsel, dem Hormonhaushalt, Stress, Medikamenten, Zähneknirschen usw. zusammenhängen, und die Identifizierung und Heilung der Krankheit kann den Tinnitus abschwächen oder sogar beseitigen. In vielen Fällen ist es jedoch nicht möglich, die Ursache eines Tinnitus zu diagnostizieren. Mentale Entspannungstherapie und Hypnose scheinen in einigen Fällen zu helfen, aber wissenschaftliche Beweise für diese Methoden stehen noch aus. Allein die Anerkennung von Tinnitus als offizielle (und nicht seltene) Diagnose kann helfen.

Die Verwendung höherfrequenter Maskierungstöne kann als letztes Mittel eingesetzt werden, wenn keine andere Lösung gefunden wird. Hier könnte es ein Problem sein, in einer ruhigen Umgebung mit einem gut isolierten Haus zu leben oder einen Hörverlust bei höheren Frequenzen zu haben, da diese Faktoren die mögliche Maskierung durch höherfrequente Töne verringern.

5. SCHLUSSFOLGERUNG

Es wurden einundzwanzig Fälle von Beschwerden über tieffrequenten Lärm untersucht. In sieben Fällen (33 %) wird die Belästigung durch physikalische Geräusche verursacht, während die Beschwerdeführer in sechs Fällen (29 %) an niederfrequentem Tinnitus leiden. In einem Fall ist möglicherweise ein bestimmter Ton verantwortlich, aber ein niederfrequenter Tinnitus kann nicht ausgeschlossen werden. In einem Fall ist das Geräusch schon vor einiger Zeit verschwunden, und es ist kaum möglich, den Grund für die Belästigung zu finden. In den übrigen sechs Fällen ist es nicht möglich, aus der vorliegenden Studie zu schließen, ob die Belästigung durch physikalische Geräusche verursacht wird oder nicht, aber es wird angenommen, dass ein interaktiverer Prozess mit Messung und sofortiger Wiedergabe des Geräuschs auch in diesen Fällen zur Erklärung führen kann.

Auch wenn die genauen Proportionen der Kategorien für tieffrequente Lärmbeschwerden im Allgemeinen nicht zutreffen mögen, so ist doch davon auszugehen, dass physikalische Geräusche in einem wesentlichen Teil der Fälle verantwortlich sind, während tieffrequenter Tinnitus in einem weiteren wesentlichen Teil der Fälle verantwortlich ist.

Frequenzen unter 20 Hz (Infraschall) sind in keinem der untersuchten Fälle für die Belästigung verantwortlich oder überhaupt hörbar, und keiner der

Eine detaillierte Studie über Beschwerden über tieffrequenten Lärm

Beschwerdeführer hat eine außergewöhnliche Hörempfindlichkeit bei niedrigen Frequenzen. Bei den bestätigten Fällen von Körperschall sind die störenden Komponenten Töne oder Tonkombinationen im Frequenzbereich 20-180 Hz. Bei bestätigtem oder möglichem niederfrequenten Tinnitus liegen die Frequenzen der wahrgenommenen Geräusche im Bereich von 16-100 Hz. Unabhängig davon, ob das störende Geräusch physikalisch oder intern erzeugt wird, liegt sein Pegel oder sein angepasster Pegel nicht wesentlich über der individuellen Hörschwelle. Dies bestätigt den häufig berichteten schnellen Anstieg der Belästigung mit einem Pegel über der Hörschwelle bei diesen

Frequenzen. Anhand des Materials lässt sich nicht feststellen, ob sich Personen, die sich über tieffrequente Geräusche beschweren, in diesem Punkt von anderen Personen unterscheiden.

Es lag nicht im Rahmen der Studie, auf eine bestimmte Lärmquelle hinzuweisen oder in die einzelnen Fälle einzudringen, um eine Verringerung des Lärms zu erreichen. In allen Fällen, in denen physikalische Geräusche für die Belästigung verantwortlich sind, zeigen die Analysen jedoch ein komplexes Geräusch mit mehreren harmonischen Tönen. Dies deutet darauf hin, dass die jeweilige(n) Quelle(n) aus rotierenden Teilen oder Kolben besteht/bestehen, die mit festen (Umdrehungs-)Frequenzen laufen (z. B. Pumpen/Kompressoren, Motoren, Ventilatoren und Lüftungsanlagen).

Die Position der Mikrofone ist bei der Messung tieffrequenter Geräusche in Innenräumen entscheidend. Dieses Problem wird in den dänischen Leitlinien für tieffrequente Lärmessungen nur unzureichend behandelt, und die damit erzielten Ergebnisse können mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sein. Bei Anwendung geeigneter Messmethoden werden die dänischen Grenzwerte in drei von sieben Fällen überschritten, die durch physikalischen tieffrequenten Lärm verursacht wurden.

QUITTUNG

Die Autoren danken den Probanden für ihre Teilnahme an den Experimenten und dem Oto-Rhino-Laryngologen Peder Christian Frandsen und seinen Kollegen für die Untersuchung der Probanden in der Klinik. Die Studie wurde finanziell vom Marie & M. B. Richters Fond, dem Dänischen Forschungsrat für Technologie und Produktionswissenschaften und der Universität Aalborg unterstützt.

REFERENZEN

1. ÖNORM S 5007, "Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft", *Österreichisches Normungsinstitut, Österreich*, (1996).
2. Miljøstyrelsen, "Lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer i eksternt miljø (in Dänisch, trans: "Niederfrequenter Lärm, Infraschall und Vibrationen in der Umwelt, Orientierung Nr. 9 der dänischen Umweltschutzbehörde"), 1997, **Orientering fra Miljøstyrelsen nr. 9**, 1-50, Miljøstyrelsen, Dänemark.
3. Jakobsen, J., "Danish guidelines on environmental low frequency noise, infrasound and vibration", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2001, **20** (3), 141-148.
4. DIN 45680, "Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft: "Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft, Deutsches Institut für Normung", *Deutsches Institut für Normung, Deutschland*, (1997).
5. Mirowska, M., "Ocena hałasu niskoczęstotliwościowego w pomieszczeniach mieszkalnych (auf Polnisch, trans: "Bewertung von tieffrequentem Lärm in Wohnungen, Instruktion Nr. 358/98 des ITB - Institut für Bauforschung")", 1998, **Instrukcja 358/98**, 1-15, Instytut Techniki Budowlanej, Warschau, Polen.
6. Mirowska, M., "Evaluation of Low-Frequency Noise in Dwellings. New Polish Recommendations", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2001, **20** (2), 67-74.
7. Nederlandse Stichting Geluidhinder, "NSG-Richtlijn Laagfrequent Geluid (in Dutch, trans: "Richtlinien für tieffrequenten Lärm, Niederländische Stiftung gegen Lärmbelästigung")", 1999, 1-25, Nederlandse Stichting Geluidhinder, Niederlande.

Eine detaillierte Studie über Beschwerden über tieffrequenten Lärm

8. Umweltministerium, "Handbook to deal with low-frequency noise", 2004, Umweltministerium, Japan.
9. Kamigawara, K., Yue, J., Saito, T., and Hirano, T., "Publication of "Handbook to Deal with Low Frequency Noise (2004)""", *11th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibration and its Control*, 2004, 157-161, Maastricht, The Netherlands.
10. Socialstyrelsen, "Buller inomhus (auf Schwedisch, übersetzt: "Niederfrequenter Lärm in Wohnungen")", 2005, **SOSFS 2005:6 (M) Allmänna råd**, Socialstyrelsen, Schweden.
11. Simmons, C., "Vägledning för mätning av ljudnivå i rum vid låga frekvenser - fältprovning (auf Schwedisch, übersetzt: "Richtlinien für die Messung von Schallpegeln in Räumen bei niedrigen Frequenzen, Nationales Amt für Gesundheit und Wohlfahrt")", 1996, **SP INFO 1996:17**, Socialstyrelsen, Schweden.
12. Socialstyrelsen, "Indoor noise and high sound levels", 1996, **SOSFS 1996:7/E**, Socialstyrelsen, Schweden.
13. Kurzes medizinisches Wörterbuch: "Tinnitus n.", erhältlich bei <http://www.oxfordreference.com/views/ENTRY.html?subview=Main&entry=t60.el O145>, abgerufen am 29-3-2007.
14. Moore, B. C. J., "Cochlear hearing loss: physiological, psychological and technical issues", 2007, 2. Auflage, 1-344, John Wiley & Sons, Ltd, **ISBN 978-0-470-51633-1**.
15. Eggermont, J., "On the pathophysiology of tinnitus; A review and a peripheral model", *Hearing Research*, 1990, **48**, 111-124.
16. Vesterager, V., "Vierzehntägige Zeitschrift: Tinnitus-Untersuchung und -Behandlung", *British Medical Journal*, 1997, **314** (7082), 728-731.
17. Baguley, D. M., "Mechanismen des Tinnitus", *British Medical Bulletin*, 2002, **63**, 195-212.
18. Møller, AR., "Pathophysiologie des Tinnitus", *Otolaryngologic clinics of North America*, 2003, **36** (2), 249-266.
19. Henry, JA., Dennis, KC., und Schechter, MA., "General Review of Tinnitus: Prevalence, Mechanisms, Effects, and Management", *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 2005, **48**, 1204-1235.
20. Savastano, M., "Merkmale des Tinnitus: Untersuchung von über 1400 Patienten", *J.Otolaryngol.* 2004, **33** (4), 248-253.
21. Møller, H. und Pedersen, C. S., "Hören bei niedrigen und Infraschallfrequenzen", *Lärm & Gesundheit*, 2004, **6** (23), 37-57.
22. ISO 7196, "Akustik - Frequenzbewertungskennlinie für Infraschallmessungen", *Internationale Organisation für Normung, Genf*, (1995).
23. Vasudevan, R. N. und Gordon, C. G., "Experimental study of annoyance due to low frequency environmental noise", *Applied Acoustics*, 1977, **10**, 57-69.

24. Yamada, S., "Occurrence and Control of Low Frequency Noise Emitted from an Icecream Storehouse", *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, 1982, **1** (1), 19-21.
25. Nishiwaki, N., Fujio, N., und Mori, T., "Low Frequency Noise from a Big Building Due to Oscillatory Forces of a Machine", *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, 1982, **1** (1), 22-27.
26. Vasudevan, R. N. und Leventhall, H. G., "A Study of Annoyance Due to Low Frequency Noise in the Home", *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, 1982, **1** (3), 157-164.
27. Vasudevan, R. N. und Leventhall, H. G., "Annoyance Due to Environmental Low Frequency Noise and Source Location - a Case Study", *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, 1989, **8** (2), 30-39.
28. Howell, K., "A Review of Low Frequency Noise Investigations by British Gas", *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, 1993, **12** (2), 45-66.
29. Motylewski, J., Zmierczak, T., Nadolski, W., und Wasala, T., "Infrasounds in Residential Area - A Case Study", *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, 1994, **13** (2), 65-70.
30. Lundin, A. und Åhman, M., "Fallbericht: Is Low-Frequency Noise from Refrigerators in a Multi-Family House a Cause of Diffuse Disorders?", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 1998, **17** (2), 65-70.
31. Mirowska, M., "An Investigation and Assessment of Annoyance of Low Frequency Noise in Dwellings", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 1998, **17** (3), 119-126.
32. Tempest, W., "Annoyance from "inaudible" infrasound", *9th International meeting - Low Frequency Noise and Vibration*, 2000, 181-184.
33. Berg, F. G. P. v. d., "Tinnitus als Ursache von Beschwerden durch niederfrequenten Lärm", *Inter-noise*, 2001, 1529-1532, Den Haag, Niederlande.
34. Sorensen, M. F., "Assessment of noise with low frequency line spectral cases", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2001, **20** (4), 205-208.
35. Manley, D. M. J. P., Styles, P., und Scott, J., "Perception of the Public of Low Frequency Noise", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2002, **21** (1), 37-44.
36. Manley, D. M. J. P. und Carstairs, I., "When quiet means loud-experiencing Low-frequency Sound? - a case study", *10th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibration and its Control*, 2002, 69-89, York, England.
37. Rushforth, I., Moorhouse, A., und Styles, P., "A Case Study of Low Frequency Noise Assessed Using DIN 45680 Criteria", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2002, **21** (4), 181-198.
38. Mirowska, M., "Problems of Measurement and Evaluation of Low-Frequency Noise in Residential Buildings in the Light of Recommendations and the New European Standards", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2003, **22** (4), 203-208.

Eine detaillierte Studie über Beschwerden über tieffrequenten Lärm

39. Feldmann, J. und Pitten, F. A., "Effects of Low Frequency Noise on Man - A Case Study", *Noise & Health*, 2004, **7** (25), 23-28.
40. Walford, R. E., "A Classification of Environmental "Hums" and Low Frequency Tinnitus", *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, 1983, **2** (2), 60-84.
41. Sargent, J. W., "Eine Studie über Beschwerden über niederfrequenten Umgebungslärm", *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 1995, **17 Teil 4**, 17-24.
42. Berg, F. G. P. v. d., "Low Frequency Sounds in Dwellings: A Case Control Study", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2000, **19** (2), 59-71.
43. Socialstyrelsen, "Buller inomhus och höga ljudnivåer (auf Schwedisch, übersetzt: "Niederfrequenter Lärm in Wohnungen und hohe Schallpegel", Nationale Behörde für Gesundheit und Wohlfahrt)", 1996, **SOSFS 1996:7**, Socialstyrelsen, Schweden.
44. Vercammen, M. L. S., "Low-Frequency Noise Limits", *Journal of Low-Frequency Noise and Vibration*, 1992, **11** (1), 7-13.
45. ISO 389-7, "Akustik - Referenznullpunkt für die Kalibrierung von audiometrischen Geräten - Teil 7: Referenzschwelle des Gehörs unter Freifeld- und Diffusfeld-Hörbedingungen", *Internationale Organisation für Normung, Genf*, (2005).
46. Anonymer Verfasser, "Untersuchung des Brummtone-Phänomens", 2002, 1-57, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Luftqualität, Lärm, Verkehr.
47. Moorhouse, A., Waddington, D., und Adams, M., "Proposed criteria for the assessment of low frequency noise disturbance", 2005, **DEFRA NANR45**, 1-113, DEFRA, Acoustics Research Centre, Salford University.
48. Waddington, D., Moorhouse, A. T., und Adams, M., "Field Measurements in the Development of Methods for the Assessment of Low Frequency Noise", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2007, **26** (3), 155-164.
49. Pedersen, S., Møller, H., und Persson-Waye, K., "Measurement of low frequency and infrasonic noise in rooms", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2007, **26** (4), 249-270.
50. Møller, H. und Lydolf, M., "A questionnaire survey of complaints of infrasound and low-frequency noise", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2002, **21** (2), 53-63.
51. Møller, H. und Lydolf, M., "En spørgeskemaundersøgelse af klager over infralyd og lavfrekvent støj - endelig rapport (in Danish)", 2002, **ISBN 87-90834-30-5**, 1-134, Abteilung für Akustik, Universität Aalborg.
52. Santillan, A. O., Pedersen, C. S., und Lydolf, M., "Experimental implementation of a low-frequency global sound equalization method based on free field propagation", *Applied Acoustics*, 2007, **68**, 1063-1085.

53. Inukai, Y., Nakamura, N., und Taya, H., "Unangenehme und akzeptable Grenzen von Niederfrequenzgeräuschen", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2000, **19** (3), 135-140.
54. Inukai, Y. und Yamada, S., "Thresholds, psychometric functions and detection ratios below thresholds of low frequency noise in ordinary adults and complainants", *11th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibration and its Control*, 2004, 129-138, Maastricht, The Netherlands.
55. Watanabe, T. und Yamada, S., "Masking of low frequency sound by band noise and its psychological response", *11th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibration and its Control*, 2004 (11), 377-382, Maastricht, The Netherlands.
56. ISO 8253-1, "Akustik - Audiometrische Prüfverfahren - Teil 1: Grundlegende Reinton-Luft- und Knochenleitungsschwellen-Audiometrie", *Internationale Organisation für Normung, Genf*, (1989).
57. Lydolf, M. *et al.*, "Binaurale Freifeld-Hörschwelle für reine Töne zwischen 20 Hz und 16 kHz". *Dissertation*, Universität Aalborg, (1999).
58. Møller, H. und Andresen, J., "Loudness of Pure Tones at Low and Infrasonic Frequencies", *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, 1984, **3** (2), 78-87.
59. ISO 226, "Acoustics - Normal equal-loudness-level contours", *Internationale Organisation für Normung, Genf*, (2003).
60. Okai, O., Saito, M., Taki, M., Mochizuki, A., Nishiwaki, N., Mori, T., and Fujio, M., "Physiological parameters in human response to infrasound", *Conference on low frequency noise and hearing*, 1980, 121-129, Aalborg, Denmark, Aalborg University Press, Denmark.
61. Yamada, S., Kosaka, T., Bunya, K., und Amemiya, T., "Hearing of low frequency sound and influence on human body", *Conference on low frequency noise and hearing*, 1980, **55** (4), 814-818, Aalborg, Dänemark, Aalborg University Press.
62. Poulsen, T., "Annoyance of Low Frequency Noise (LFN) in the Laboratory Assessed by LFN-Sufferers and Non-Sufferers", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2003, **22** (4), 191-201.
63. Frost, G. P., "An Investigation into the Microstructure of the Low Frequency Auditory Threshold and of the Loudness Function in the Near Threshold Region", *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, 1987, **6** (1), 34-39.
64. Suzuki, Y. und Takeshima, H., "Equal-loudness-level contours for pure tones", *Journal of Acoustical Society of America*, 2004, **116** (2), 918-933.
65. Oxford English Dictionary Online, 2. Auflage: "tinnitus", erhältlich bei <http://dictionary.oed.com/cgi/entry/50253117>, abgerufen am 29-3-2007.
66. Mayo-Stiftung für medizinische Ausbildung und Forschung: "Tinnitus", verfügbar unter <http://www.mayoclinic.com/health/tinnitus/DS00365>, abgerufen am 29.3.2007.

**Eine detaillierte Studie über Beschwerden über
tieffrequenten Lärm**

67. Britische Tinnitus-Vereinigung: "Was ist Tinnitus?", verfügbar unter http://www.tinnitus.org.uk/information/info_sheets/front_page/what_is_tinnitus.htm, abgerufen am 29.3.2007.
68. Brugel, F. J. und Schorn, K., "Wichtige Aspekte des zervikalen Tinnitus", *Laryngo- Rhino-Otologie*, 1991, **70** (6), 321-325.
69. Astor, FC., Lechtenberg, CL., Banks, RD., Hanft, KL., Hanson, MR., Salanga, VD., und DeSai, M., "Proposed algorithm to aid the diagnosis of cerebellopontine angle tumors", *Southern Medical Journal*, 1997, **90** (5), 514-517.
70. Schaaf, H., Kampe, S., und Hesse, G., "Tinnitus nach Anästhesie", *Anaesthetist*, 2004, **53** (4), 358-361.
71. Horner, K. C., "Old theme and new reflections - hearing impairment associated with endolymphatic hydrops", *Hearing Research*, 1991, **52** (1), 147-156.
72. Shea, JJ. und Ge, X., "Dexamethason-Perfusion des Labyrinths plus intravenöses Dexamethason bei Morbus Menière", *Otolaryngologic clinics of North America*, 1996, **29** (2), 353-358.
73. Schaaf, H., Seling, B., Rienhoff, NK., Laubert, A., Nelting, M., und Hesse, G., "Ist ein tieffrequenter schwankender Hörverlust ohne Labyrinthwindel der erste Schritt zum Morbus Menière?", *HNO*, 2001, **49** (7), 543-547.
74. Schaaf, H. und Hesse, G., "Tieffrequente schwankende Schwerhörigkeit ohne labyrinthischen Schwindel - eine echte Erkrankung? Eine Follow-up-Studie nach 4 und 10 Jahren", *HNO*, 2007, **55** (8), 630-637.
75. König, O., Schaette, R., Kempter, R., und Gross, M., "Verlauf des Hörverlusts und Auftreten von Tinnitus", *Hearing Research*, 2006, **221**, 59-64.
76. Andresen, J. und Möller, H., "Equal Annoyance Contours for Infrasonic Frequencies", *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, 1984, **3** (3), 1-9.
77. Subedi, J. K., Yamaguchi, H., und Matsumoto, Y., "Annoyance of Low Frequency Tones and Objective Evaluation Methods", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2005, **24** (2), 81-96.
78. Inukai, Y., Taya, H., und Yamada, S., "Thresholds and Acceptability of Low Frequency Pure Tones by Sufferers", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2005, **24** (3), 163-169.
79. Persson Waye, K., "Health aspects of low frequency noise", *Inter-noise*, 2006, Honolulu, USA.
80. Tranel, D., "Emotional processing and the human amygdale", *Trends in Cognitive Sciences*, 1997, **1** (2), 46-47.
81. Armony, L., Servan-Schreiber, D., Cohen, J. D., und Ledoux, J. E., "Computational modelling of emotion: explorations through the anatomy and physiology of fear conditioning", *Trends in Cognitive Sciences*, 1997, **1** (1), 28-34.

82. Inukai, Y., Yamada, S., Ochiai, H., und Tokita, Y., "Acceptable limits and their percentiles for low frequency noise in ordinary adults and complainants", *11th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibration and its Control*, 2004, 117-127, Maastricht, The Netherlands.
83. Inukai, Y., Taya, H., Yamada, S., und Ochiai, H., "Acceptability of narrow band noise and complex noise at low frequencies", *12th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibration and its Control*, 2006, 89-98, Bristol, United Kingdom.
84. Anderson, C. M. B. und Whittle, L. S., "Physiological Noise and the Missing 6 dB", *Acustica*, 1971, **24**, 261-272.
85. Royal National Institute for Deaf People (Pressemitteilung): "Sie denken, Sie haben laute Nachbarn? It could be tinnitus!", abrufbar unter http://www.rnid.org.uk/mediacentre/press/2007/ntw_07.htm, abgerufen am 29-3-2007.
86. Simmons, C., "Measurement of Low Frequency Sound in Rooms", 1996, **1996:10**, Schwedisches Nationales Prüf- und Forschungsinstitut.

APPENDIX A - Messverfahren

Wenn die Probanden Bereiche nennen konnten, in denen der Schall besonders störend war, wurden drei Positionen in diesen Bereichen ausgewählt. Wenn nicht - und das war sehr oft der Fall - wurden drei Positionen in repräsentativen Wohnbereichen so gewählt, dass sie den dänischen Richtlinien [2] (auf Englisch erläutert in [3]) entsprachen, d.h. Höhe 1-1,5 m, mindestens 0,5 m von Wänden und größeren Möbeln entfernt und nicht in der Mitte des Raumes. Eine Mikrofonposition war die "Eckposition" gemäß den schwedischen Richtlinien [11] (siehe [86] für die englische Version mit zusätzlichen Erläuterungen und Datenbeispielen),

d. h. die Position mit dem höchsten C-bewerteten Pegel in der Nähe der Ecken der zweidimensionalen Bodenebene (0,5 m von den Wänden entfernt) und in einer Höhe zwischen 0,5 und 1,5

m. Im Folgenden wird dies als *SE-Ecke* bezeichnet. Oft war es nicht möglich oder schwierig, ein eindeutiges Maximum zu finden, entweder weil der C-bewertete Pegel mit der Zeit stark schwankte oder weil der Pegel nicht stark mit der Position variierte. Gemäß den dänischen Leitlinien wurden die Messpositionen auch als "Eckpositionen" ausgewählt,

d.h. in der Nähe von Ecken der zweidimensionalen Bodenebene (0,5-1,0 m von den Wänden entfernt) in einer Höhe von 1,0-1,5 m. Acht solcher DK-Eckpositionen wurden ausgewählt, vier mit Abständen von 0,5 m und vier mit Abständen von 1,0 m zu benachbarten Wänden, alle in einer Höhe von 1,25 m. Schließlich wurden acht Positionen in dreidimensionalen Ecken (Abstand zu Wänden, Boden oder Decke von wenigen Zentimetern) gewählt, im Folgenden als 3D-Ecken bezeichnet. Eine neuere Studie [49] hat gezeigt, dass *3D-Ecken* nützliche Positionen für die Messung von tieffrequentem Schall in Räumen sind.

Sowohl der schwedische als auch der dänische Leitfaden verwenden den Leistungsdurchschnitt einer Ecke (bzw. SE- oder DK-Ecke) und zwei Positionen in repräsentativen Wohnbereichen. Mit den vorliegenden Messungen ist es somit möglich, drei verschiedene Ergebnisse des schwedischen Messverfahrens (drei Optionen für die Wahl von zwei Positionen in repräsentativen Bereichen) und 24 verschiedene Ergebnisse des dänischen Messverfahrens (acht Eckauswahlen mal drei Auswahlen von zwei anderen Positionen)⁵ zu berechnen. Für kleine Räume (<20 m²) erlaubt die dänische Methode jedoch die Verwendung des Leistungsmittelwerts von zwei DK-Eckpositionen in jeder ihrer Bodenebenen-Ecken, in welchem Fall die vorliegenden Aufnahmepositionen die Berechnung von 24 verschiedenen Ergebnissen ermöglichen (relevant und verwendet für die Probanden G, I, J, P und T). Darüber hinaus kann der Leistungsdurchschnitt aller 3D-Ecken berechnet werden, wie in [49] vorgeschlagen.

⁵ Die schwedische und die dänische Regelung für Positionen in repräsentativen Wohnbereichen unterscheiden sich, und nur die dänische Regelung wird streng befolgt. In den schwedischen Regeln wird die Ernennung durch den Beschwerdeführer nicht erwähnt, die zu vermeidenden Bereiche umfassen nicht nur die Mitte des Raumes, sondern auch Bereiche um 1/4 und 3/4 der Länge und Breite des Raumes, die Höhe sollte 0,6, 1,2 oder 1,6 m betragen.

APPENDIX B - Blindtestverfahren

Ein Test, ob eine Versuchsperson ein bestimmtes Geräusch hören kann, bestand aus einem Muster von *Untertests*. In einem Untertest wurden aufeinanderfolgende Darbietungen gegeben, bis entweder drei richtige Antworten hintereinander ("bestanden") oder zwei falsche Antworten ("nicht bestanden") erzielt wurden. Ein Untertest bestand also aus 2-6 Präsentationen. Im vollständigen Test wurden aufeinanderfolgende Untertests durchgeführt. Obwohl es in erster Linie darum ging, festzustellen, ob die Versuchsperson den Ton in natürlicher Lautstärke hören konnte, wurden auch Darbietungen mit 5 und 10 dB über dem natürlichen Pegel einbezogen, wenn der natürliche Pegel zunächst nicht gehört wurde.

Es wurde ein komplexes Muster von Präsentationen verwendet, um eine gute statistische Sicherheit zu erreichen und gleichzeitig die Anzahl der Präsentationen gering zu halten. Das vollständige Flussdiagramm ist in Abbildung 15 dargestellt. Für jedes Geräusch wurde der Test mit dem natürlichen Pegel begonnen, und wenn ein Untertestmuster von *Pass-Pass* oder *Pass-Fail-Pass* erzielt wurde, wurde der natürliche Pegel als gehört akzeptiert. Wenn dies nicht der Fall war, wurden Untertests mit höheren Pegeln durchgeführt, und wenn sowohl +10 dB als auch +5 dB bestanden wurden, wurde ein zweiter Versuch unternommen, um ein *Pass-Pass*- oder *Pass-Fail-Pass*-Muster bei natürlichem Pegel zu erhalten. Wenn dieser Versuch fehlschlug, gab es die Möglichkeit, +5 dB oder +10 dB als gehört zu akzeptieren. Somit waren zwei Untertests für den natürlichen Pegel und +5 dB erforderlich, während für +10 dB ein Durchgang erforderlich war.

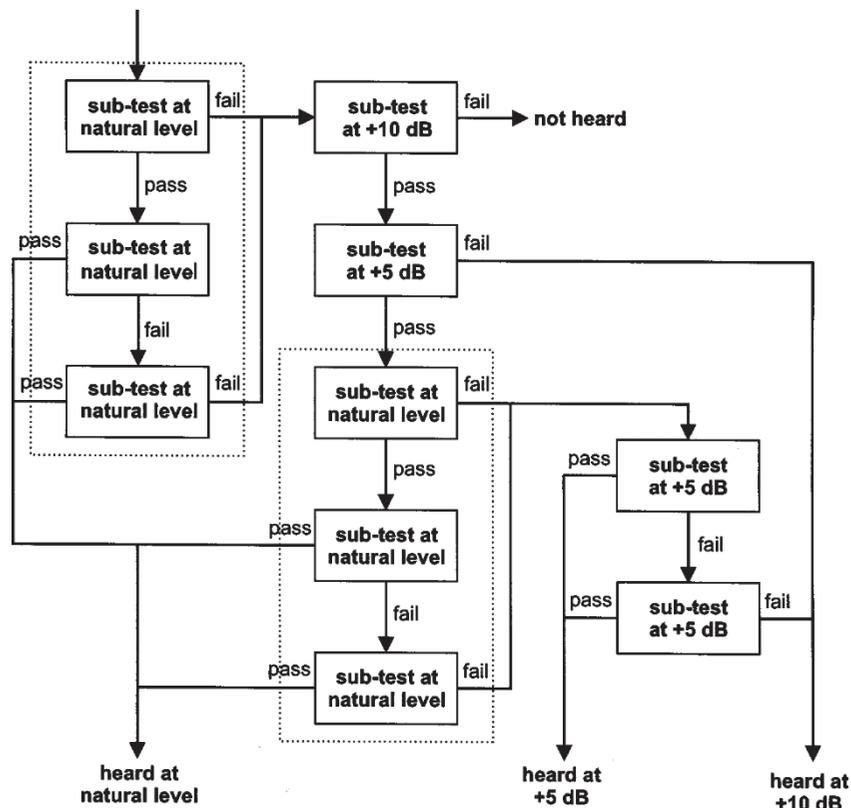


Abbildung 15: Flussdiagramm des Blindtestverfahrens. Ein Untertest besteht aus aufeinanderfolgenden Präsentationen, bis entweder drei richtige Antworten in Folge ("bestanden") oder zwei falsche Antworten ("nicht bestanden") erhalten werden (2-6 Präsentationen). Die beiden Optionen für das Muster "bestanden" oder "nicht bestanden" auf natürlicher Ebene sind in den gestrichelten Rechtecken dargestellt.

Wenn es sich bei dem Stimulus tatsächlich um das störende Geräusch handelte, waren falsche Antworten nicht zu erwarten, insbesondere nicht, da die Stimuli unter den höchsten Pegeln im Raum ausgewählt worden waren. Ein falsches

negatives Ergebnis, d. h. ein "kann nicht hören", obwohl die Versuchsperson den Reiz tatsächlich hören kann (Fehler vom Typ 2), war daher im Prinzip unwahrscheinlich. Dennoch waren bei dem Test mehrere zufällige falsche Antworten oder eine Erkennungswahrscheinlichkeit von weniger als 100 % möglich. Die rechte Spalte der Tabelle II zeigt das Risiko falsch negativer Ergebnisse, wobei eine Erkennungswahrscheinlichkeit von 90 % angenommen wird. Die linke Spalte

Eine detaillierte Studie über Beschwerden über tieffrequenten Lärm

der Tabelle zeigt das Risiko falsch positiver Ergebnisse, d. h. das Risiko, durch reines Raten ein "can hear"-Ergebnis zu erhalten (Fehler vom Typ 1).

Tabelle II.

Wahrscheinlichkeit falsch positiver Ergebnisse (Fehler vom Typ 1) und falsch negativer Ergebnisse (Fehler vom Typ 2). Für falsch positive Ergebnisse wird eine Entdeckungswahrscheinlichkeit von 33 % (reiner Zufall) angenommen, für falsch negative Ergebnisse 90 %. Angenommene Wahrscheinlichkeiten für andere als die in der Zeile angegebenen Werte sind in den Anmerkungen angegeben.

	falsch positiv	falsch negativ
natürlich	1.0% ¹	
Ebene	2.0% ²	0.6% ⁵
	0.1% ³	
+5 dB	1.0% ⁴	9.7% ⁶
+10 dB	7.1%	9.3% ⁷

Anmerkungen: 133% Erkennung bei +5 und +10 dB, 2100% Erkennung bei +5 und +10 dB 333% Erkennung bei +10 dB. 4100% Erkennung bei +10 dB, 5100% Erkennung bei +5 und +10 dB, 6100% Erkennung bei +10 dB, 33% bei natürlichem Pegel, 733% Erkennung bei natürlichem Pegel und +5 dB.

Die Methode war für ein einzelnes Geräusch recht schnell, aber für den Test mehrerer Geräusche waren mehrere Vorführungen erforderlich. Insbesondere Präsentationen, bei denen das Geräusch nicht zu hören ist, sind ermüdend, und es ist für die Versuchsperson verwirrend, wiederholt ein Intervall auswählen zu müssen, auch wenn nichts zu hören ist. Um die Anzahl solcher Darbietungen zu verringern, wurde eine vierte Taste, "nicht hörbar", vorgesehen. Eine "konnte-nicht-hören"-Antwort zählte als eine einzige falsche Antwort, nicht als ein nicht bestandener Subtest. Diese vierte Taste könnte die Statistik beeinträchtigen, indem sie das Risiko falsch positiver Ergebnisse senkt und das Risiko falsch negativer Ergebnisse erhöht (was gut bzw. schlecht ist). Bei der vorliegenden Probandengruppe wurde es jedoch als wichtiger erachtet, das Experiment kurz zu halten, als alle Voraussetzungen für die Statistik strikt einzuhalten. Außerdem waren alle Versuchspersonen hoch motiviert, den Ton zu hören, und das Risiko, dass sie die vierte Taste betätigen würden, wenn sie auch nur die leiseste Ahnung hätten, in welchem Intervall sich der Stimulus befindet, wurde als gering angesehen.