

Kandidatennummer: 10018 & 10022

Der Brummtton - Eine Übersichtsarbeit über ein mysteriöses Hörphänomen

Der Brummtton - Eine Übersichtsarbeit über
die mysteriöse Höranomalie

Bachelorarbeit in Audiologie

Betreuer: Markus Drexler

Mai 2023

Kandidatennummer: 10018 & 10022

Der Brummtton - Eine Übersichtsarbeit über ein mysteriöses Hörphänomen

Der Brummtton - Eine Übersichtsarbeit über die
mysteriöse Höranomalie

Bachelorarbeit in Audiologie
Betreuer: Markus Drexl
Mai 2023

Norwegische Universität für Wissenschaft und
Technologie Fakultät für Medizin und
Gesundheitswissenschaften
Abteilung für Neuromedizin und Bewegungswissenschaften

Vorwort

Wir möchten diese Gelegenheit nutzen, um unserem Betreuer, Markus Drexl, für seine hervorragende Betreuung zu danken. Vielen Dank für all Ihre Unterstützung und Ihr Wissen, das Sie während des gesamten Prozesses mit uns geteilt haben. Und danke, dass Sie uns mit dem Konzept des "Erfolgslebnisses" vertraut gemacht haben.

Kurzfassung

Hintergrund: Der "Brumnton" ist ein Begriff, der ein Phänomen beschreibt, bei dem eine kleine Anzahl von Menschen auf der ganzen Welt von einem tieffrequenten Ton belästigt wird, den die Mehrheit nicht hört. Dieses Phänomen hat kürzlich in den norwegischen Medien Aufmerksamkeit erregt. Da es bei "The Hum" um die Wahrnehmung von Geräuschen und das damit verbundene Unbehagen geht, kann dies in der audiologischen Fachwelt von großer Bedeutung.

Zweck: Ziel dieser Arbeit ist es, verschiedene Theorien aufzustellen, die helfen können, den Grund für das "Brummen" aus audiologischer Sicht zu erklären und dadurch zu untersuchen, warum nur wenige Menschen in der Lage sind, einen niederfrequenten Ton zu hören.

Methode: Diese Arbeit wurde als Literaturstudie, genauer gesagt als Übersichtsarbeit, durchgeführt. Es wurde ein breites Spektrum an Literatur herangezogen, um das betreffende Problem zu erhellen.

Ergebnisse und Diskussion: Es wurden Theorien und verschiedene Mechanismen vorgestellt, die an der Wahrnehmung von tieffrequentem Schall beteiligt sein könnten. Die akustischen Eigenschaften von tieffrequentem Schall lassen es möglich erscheinen, dass die Empfindung durch externen Schall entsteht. Bestehende Forschungen zeigen, dass die Hörschwellen der einzelnen Personen unterschiedlich sind. Darüber hinaus gibt es Personen mit erhöhter Empfindlichkeit ohne offensichtliche Ursache. Die Forschung zeigt, dass Tinnitus auch im unteren Frequenzbereich auftreten kann, und wird in mehreren Studien als mögliche Ursache für die Wahrnehmung von "The Hum" genannt.

Schlussfolgerung: Die wahrscheinlichste Erklärung für den "Brumnton" ist eine Kombination aus Personen mit erhöhter Sensibilität, die externe Geräusche

wahrnehmen, und einer anderen Gruppe, die einen niederfrequenten Tinnitus nach außen trägt.

Abstrakt

Hintergrund: Der "Brumnton" ist ein Begriff, der ein Phänomen beschreibt, bei dem eine kleine Anzahl von Menschen auf der ganzen Welt von einem tieffrequenten Ton belästigt wird, den die Mehrheit nicht hört. Dieses Phänomen hat vor kurzem in Norwegen Aufmerksamkeit erregt Medien. Da sich "The Hum" auf das Empfinden von Geräuschen und Lärmbeschwerden bezieht, könnte es für die audiologische Gemeinschaft von großer Bedeutung sein.

Zielsetzung: Das Ziel dieser Arbeit ist es, verschiedene Theorien zu untersuchen, die helfen können, den Grund für das Brummen aus audiologischer Sicht zu erklären, und auf diese Weise herauszufinden, warum nur wenige Menschen in der Lage sind, einen niederfrequenten Ton zu hören.

Methoden: Die vorliegende Arbeit ist eine Literaturstudie, genauer gesagt eine Übersichtsstudie. Es wurde ein breites Spektrum an Literatur herangezogen, um die vorliegende Problematik zu erhellen.

Ergebnisse und Diskussionen: Es wurden Theorien und verschiedene Mechanismen vorgestellt, die an der Wahrnehmung von tieffrequentem Schall beteiligt sein könnten. Die akustischen Eigenschaften von tieffrequentem Schall lassen vermuten, dass die Empfindung durch externen Schall ausgelöst wird. Bestehende Untersuchungen zeigen, dass die Hörschwellen verschiedener Personen unterschiedlich sind. Darüber hinaus gibt es Personen mit erhöhter Empfindlichkeit ohne offensichtliche Ursache. Die Forschung zeigt, dass Tinnitus auch im unteren Frequenzbereich auftreten kann, und wird in mehreren Studien als mögliche Ursache für die Wahrnehmung von "The Hum" genannt.

Schlussfolgerung: Die wahrscheinlichste Erklärung für den "Brumnton" ist eine Kombination aus Personen mit erhöhter Sensibilität, die externe Geräusche wahrnehmen, und einer anderen Gruppe, die einen

niederfrequenten Tinnitus nach außen trägt.

Inhalt

1. Einführung	1
1.1 Klangwahrnehmung und niederfrequenter Schall	2
1.2 Der natürliche Filter des Ohrs	3
1.3 Überempfindlichkeit	4
1.4 Tinnitus	4
1.5 Spontane otoakustische Emissionen (SOAE)	4
2. Problemstellung	6
3. Methodik	7
4. Hauptkörper	10
4.1 "Das Brummtton-Phänomen"	10
4.2 Geographie	10
4.3 Oslofjord Hum	11
4.4 Niederfrequenter Ton	12
4.5 Infraschall	15
4.6 Schallausbreitung und -dämpfung	16
4.7 Lärmmessung und Gewichtung	18
4.8 Aufbau und Anatomie des Ohrs	18
4.9 Der natürliche Filter und die Dämpfung des Ohrs	20
4.9.1 Ohrknochen-Kette	20
4.9.2 Helicotrema	21
4.9.3 Innere Haarzellen	21
4.10 Empfindlichkeit und Hörschwellen im Tieftonbereich	22
4.11 Tinnitus	24
4.12 Spontane otoakustische Emissionen (SOAE)	25
5. Diskussion	27
5.1 Externes Audio	27
5.2 Internes Audio	28
5.3 Patientengruppen	29
6. Schlussfolgerung	31
7. Der Weg nach vorn	32
Referenzen	33

1. Einführung

Der Alltag kann von viel Lärm geprägt sein, sei es in Form von Verkehrslärm, Bauarbeiten, Nachbarn oder anderen unerwünschten Geräuschen. Eine bestimmte Art von Lärm hat aufgrund ihres charakteristischen Klangs den Namen "The Hum" erhalten. Der "Brumnton" ist ein Begriff, der ein geheimnisvolles Geräusch beschreibt, das ein kleiner Prozentsatz der Bevölkerung auf der ganzen Welt hört. Es wird aus vielen Ecken der Welt gemeldet und hat nicht immer eine klare Ursache oder logische Erklärung. Von den Betroffenen wird "The Hum" als ein niederfrequentes Brummen beschrieben, das dem Geräusch eines Dieselmotors im Leerlauf ähneln kann (Årdal, 2022; Leventhall et al., 2003). Das Phänomen gibt es schon seit langem, mit Berichten aus dem Vereinigten Königreich in den frühen 1970er Jahren und den USA in den frühen 1990er Jahren (Deming, 2004). In jüngerer Zeit haben unter anderem Berichte aus Taos in den USA, Windsor in Kanada, Frankfurt in Deutschland und Auckland in Neuseeland das Rätsel zum Leben erweckt (Kanada, 2014; Deming, 2004; Mullins & Kelly, 1995). In jüngster Zeit wurde auch in unserem Land über das Phänomen berichtet, insbesondere im Zusammenhang mit dem Osloer Fjord, und es erhielt Rückenwind durch eine Reportage, über die der NRK und andere im Herbst 2022 berichteten (Årdal, 2022).

In einigen wenigen Fällen konnte eine Schallquelle als Ursache für das Brummen identifiziert werden, wie z. B. im Fall des "Windsor-Brumms", während es in vielen anderen Fällen ein ungelöstes Rätsel bleibt. Eine faszinierende Tatsache ist, dass selbst bei einer Erklärung nur wenige Menschen das betreffende Geräusch wahrnehmen. Durch die Populärkultur wie die Fernsehserien X-Files (Manners, 1995) und American Dad (O'Day, 2022) hat das Phänomen eine Spielfilm aus dem Jahr 2015 mit dem Titel "The Hum" (The Hum (2015) - IMDb, n.d.) und urbane Legenden haben ihren Weg zu einem Publikum gefunden, das sie oft in eine verschwörerische Richtung deutet und nicht unbedingt glaubt, dass es eine audiologische, medizinische oder sogar rationale Erklärung für das, was sie erleben, gibt.

So aufregend elektromagnetische Felder, unterirdische Zivilisationen, streng geheime Experimente oder die süßen geflüsterten Worte von Mutter Erde an diejenigen, die dafür offen sind, auch sein mögen, die Idee ist hoffentlich, plausiblere Erklärungen für das zu finden, was vor sich geht, mit dem Verdacht, dass es Menschen gibt, die ein echtes Problem in

der Kern, der davon profitieren wird, wenn er im Umgang mit dem Gesundheitssystem und der Gesellschaft im Allgemeinen ernst genommen wird.

Eine interessante Frage, die sich stellt, ist, warum nur ein kleiner Teil der Bevölkerung in der Lage ist, diesen tieffrequenten Ton tatsächlich zu hören. Es gibt derzeit drei Theorien, die helfen können, die Ursache zu erklären. Diese Theorien beruhen auf der Tatsache, dass die Ursachen damit zusammenhängen können:

- Überempfindlichkeit (H. Møller & Pedersen, 2004; Walford, 1983)
- Niederfrequenter Tinnitus (Pedersen et al., 2008; Walford, 1983)
- Spontane otoakustische Emissionen (SOAE) (Frosch, 2013)

1.1 Klangwahrnehmung und niederfrequenter Schall

Der Frequenzbereich, in dem ein normal hörender Mensch Schall wahrnehmen kann, wird häufig mit 20 bis 20.000 Hz definiert (H. Møller & Pedersen, 2004). Dieser Frequenzbereich scheint auf den Ober- und Untergrenzen der Messungen für "Equal Loudness Contours" (ELC) zu basieren, den Kurven, die in der Audiologie verwendet werden, um zu bestimmen, wie laut Frequenzen sein müssen, damit sie als gleich laut wahrgenommen werden (International Standard Organisation, 2003). Obwohl es nützlich ist, sich auf obere und untere Grenzwerte zu beziehen, ist es praktisch möglich, Hörschwellen sowohl oberhalb als auch unterhalb dieses Bereichs von 20 bis 20.000 Hz zu messen. Dies haben Yeowart & Bryan (1967) in ihren Experimenten in den 1960er Jahren gezeigt, bei denen sie Schwellen bis hinunter zu 1,5 Hz gemessen haben. In der alltäglichen klinischen Praxis wird ein Audiologe selten unter 250 Hz gehen, und was unterhalb von 125 Hz vor sich geht, ist für die meisten Menschen fast terra incognita. Bei Beschwerden im Zusammenhang mit tieffrequenten Tönen muss aber genau dieser Bereich unterhalb von 125 Hz untersucht werden.

Die Definition von Tieffrequenz variiert je nach Kontext und anderen Faktoren. Im audiologischen Kontext bezieht sich der Begriff "tiefe Frequenz" auf den Bereich unter 500 Hz, wenn es sich um einen Hörverlust im Tieftonbereich handelt. In der

Akustik entspricht die tiefe Frequenz gewöhnlich dem Bereich von 200 Hz und darunter (Leventhall et al., 2003; Shera, 2022). Das Gehör ist im Bereich von 200 bis 10.000 Hz am empfindlichsten, und die meisten Forschungsarbeiten über

Das Hören ist natürlich mit diesem Frequenzbereich verbunden (H. Møller & Pedersen, 2004). Für den Bereich unter 20 Hz wird der Begriff Infraschall verwendet. Die Vorsilbe "infra" bedeutet "unter" oder "unterhalb" und impliziert, dass es sich bei Infraschall um einen Schall handelt, der in einem Frequenzbereich außerhalb der menschlichen Wahrnehmung liegt, was nicht ganz richtig ist. Es stimmt jedoch, dass das Gehör für tieffrequenten Schall viel weniger empfindlich ist als für Schall im "hörbaren" Frequenzspektrum (Salt & Hullar, 2010).

Niederfrequenter Schall verhält sich etwas anders als höhere Frequenzen. Aufgrund des langwelligen Charakters des Niederfrequenzschalls kann er sich über größere Entfernungen ohne nennenswerten Energieverlust ausbreiten und wird weitaus weniger durch geometrische und atmosphärische Dämpfungen beeinträchtigt (Berglund et al., 1996; Silva et al., 2021). Wenn sie auf Hindernisse treffen, haben sie außerdem die Fähigkeit, sich zu biegen, anstatt zu reflektieren, wofür hochfrequente Schallwellen anfälliger sind (Everest & Pohlmann, 2015, Kapitel 7). Dies spiegelt sich in einer Reihe von Alltagssituationen wider, wie z. B. dem häufigen Hören von Bässen in der Ferne eines Konzertsaals oder einer Diskothek.

1.2 Der natürliche Filter des Ohrs

Der Mensch nimmt auch tieffrequenten Schall etwas anders wahr als die höheren Frequenzen des Spektrums. Das Ohr ist zwar so konstruiert, dass es dem Menschen das bestmögliche Hören bei den wichtigsten Frequenzen ermöglicht, aber es verfügt auch über Mechanismen, um Schall bei weniger relevanten Frequenzen herauszufiltern, was im Alltag beispielsweise dazu beiträgt, die inneren Geräusche des Körpers herauszufiltern. Es gibt drei Hauptmechanismen, die für das Herausfiltern von niederfrequentem Schall verantwortlich sind. Diese Mechanismen bestehen aus der Gehörknöchelchenkette, die das Schallsignal unterhalb von 1000 Hz um 6 dB pro Oktave abschwächt, dem Helicotrema, das durch die Umleitung des Differenzdrucks zwischen der Scala vestibuli (SV) und der Scala tympani (ST) Frequenzen unterhalb von 100 Hz um 6 dB pro Oktave abschwächt, und den inneren Haarzellen, die Frequenzen unterhalb von etwa 470 Hz ebenfalls um 6 dB pro Oktave abschwächen (Salt & Hullar, 2010). Zusammen machen diese Mechanismen eine Dämpfung von 18 dB pro Oktave für Frequenzen unter 100 Hz

aus.

Es gibt sowohl natürliche als auch vom Menschen verursachte Quellen für infra- und tieffrequenten Schall. Turbulenzen, Meereswellen und seismische Aktivitäten können auf natürliche Weise Schall und Lärm in den niedrigsten Frequenzen erzeugen, aber auch vom Menschen geschaffene Quellen wie Maschinen, Boden- und Flugverkehr oder leistungsstarke Lautsprecher können dazu beitragen (Berglund et al., 1996). In den letzten Jahrzehnten ist vor allem die Entwicklung von Windparks im Zusammenhang mit der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien zu einem beliebten Thema in der Öffentlichkeit geworden, oder vielleicht eher in den Ohren der Öffentlichkeit (Carlile et al., 2018).

1.3 Überempfindlichkeit

Wenn man in der Audiologie von Überempfindlichkeit spricht, denkt man natürlich an die Diagnose Hyperakusis, die eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber Geräuschen beinhaltet, bei der selbst schwache Geräusche als unerträglich laut wahrgenommen werden können (Baguley, 2013). Im Kontext dieser Arbeit ist Hypersensibilität jedoch eher ein Begriff für einen theoretischen Zustand, bei dem eine Person tieffrequente Töne mit abnorm niedrigen Hörschwellen hört oder nicht in der Lage ist, die niedrigsten Frequenzen in dem Maße herauszufiltern, wie es normalerweise erwartet wird.

1.4 Tinnitus

Tinnitus ist ein bekanntes Phänomen, aber der breiten Öffentlichkeit ist er stereotyp als Ohrensausen bekannt. Für die Allgemeinheit ist es das relativ hochfrequente Geräusch, mit dem man nach einem Konzert aufwacht und das einen an die schlechten Entscheidungen erinnert, die man in der Nacht zuvor getroffen hat, und in gewissem Maße ist es richtig, dass es die oberen Frequenzen sind, die am meisten von dieser Beschwerde betroffen sind (Han et al., 2009). Wie Walford (1983) in seiner Studie zeigt, ist Tinnitus im gesamten Frequenzspektrum zu finden, auch bei den unteren Frequenzen.

1.5 Spontane otoakustische Emissionen (SOAE)

SOAEs sind eine weitere mögliche Erklärung für die Wahrnehmung tieffrequenter Geräusche ohne scheinbar eindeutige Quelle. Otoakustische Emissionen (OAEs) sind Geräusche, die in der Cochlea entweder spontan auftreten oder durch Stimuli ausgelöst werden. Am bekanntesten in der norwegischen Audiologie ist vielleicht die Verwendung von transienten otoakustischen Emissionen bei

im Zusammenhang mit dem Neugeborenen-Hörscreening. Im Rahmen dieser Arbeit sind jedoch die SOAEs von Interesse. SOAEs sind im normalen Ohr vorhanden und werden vom Gehirn herausgefiltert, so dass sie nicht hörbar sind, aber es gibt Fälle, in denen Menschen in der Lage sind, ihre eigenen Emissionen wahrzunehmen (Long, 1998; Penner, 1989).

In den folgenden Abschnitten der Arbeit wird der Schwerpunkt hauptsächlich auf den drei Möglichkeiten liegen. Die Theorie dazu wird vorgestellt, ebenso wie Mechanismen im Zusammenhang mit tieffrequenten Geräuschen, die Wahrnehmung dieser Geräusche und die Möglichkeit von intern erzeugtem Lärm objektiver oder subjektiver Natur.

2. Problemstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, zu untersuchen, ob "Das Brummen" mit Hilfe der Audiologie erklärt werden kann, ob es sich um die Wahrnehmung von Geräuschen aus einer externen Schallquelle handelt oder ob interne Geräusche den Hintergrund des Phänomens bilden. Was ist in jedem Fall

Interessanterweise scheinen etwa 2 % der Bevölkerung dieses Gefühl zu haben.

Was führt dazu, dass eine Person in einem Haushalt ein Geräusch hört, während andere im selben Haushalt nichts davon ahnen? Die Frage für diese Aufgabe lautet also:

- *Warum nehmen nur wenige Menschen einen tieffrequenten Ton wahr, der auch als "Brummtton" bekannt ist?*

Hinter einer Fassade aus Verschwörungstheorien und schlampigen

Nachrichtenartikeln gibt es zweifellos echte Menschen mit einem echten Leiden, das ihr Leben negativ beeinflusst. Erhebungen in Dänemark zeigen, dass Menschen, die mit

Niederfrequenter Lärm wird als "Qual" empfunden (H. Møller & Lydolf, 2002).

Allerdings ist das Thema unter Audiologen relativ unbekannt, und zusammen mit einer potenziellen Patientengruppe, die dem Gesundheitssystem misstraut, könnte es sich lohnen zu fragen, ob es sich möglicherweise um eine Art von Problem handelt, das in den Bereich der Audiologie fällt (Leventhall, 2009; Walford, 1983).

Nun, da das Phänomen

offenbar die norwegischen Fjorde erreicht hat (Årdal, 2022), ist "The Hum" auch für die klinische und akademische Gemeinschaft in Norwegen von weitaus größerer Bedeutung.

Wenn in dieser Arbeit vom "Brummen" die Rede ist, so geschieht dies in der Annahme, dass es sich um ein Phänomen handelt, das entweder durch relativ niederfrequente Geräusche in der Umgebung des Menschen oder durch eine

Erkrankung wie Tinnitus oder hörbare SOAEs ausgelöst wird. Es wird jedoch eingeräumt, dass sowohl in den Medien als auch in Fachzeitschriften mehrere mögliche Erklärungen angeführt wurden.

3. Methodik

Aveyard (2014) definiert eine Literaturübersicht als eine umfassende Studie mit dem Ziel, Literatur zu einem bestimmten Thema zu analysieren und zu interpretieren, um ein ausgewähltes Thema zu beleuchten (Aveyard, 2014). Es gibt mehrere Gründe, warum eine Literaturübersicht nützlich und wertvoll sein kann. Unter anderem kann sie durch den Vergleich von Ähnlichkeiten und Unterschieden zwischen verschiedenen Studien neue Einsichten und Erkenntnisse liefern, was sonst nicht möglich wäre.

durch die Durchsicht einzelner Studien möglich gewesen wäre. Darüber hinaus können Literaturübersichten von unschätzbarem Wert für praktizierende Angehörige der Gesundheitsberufe sein, die die Pflicht haben, sich über neue Forschungsergebnisse in ihrem eigenen Bereich auf dem Laufenden zu halten, aber nicht unbedingt die Zeit oder die Möglichkeit haben, alle verfügbaren Forschungsergebnisse zu überprüfen (Aveyard, 2014).

Es gibt mehrere Unterkategorien von Literaturübersichten. Eine davon ist der Scoping Review. Ein Scoping Review, eine relativ neue Forschungsmethode, hat derzeit keine allgemeingültige Definition, sondern zielt darauf ab, eine große Menge an verfügbaren Daten in einem breiten Bereich zu erfassen (Levac et al., 2010; Pham et al., 2014). Ein Scoping Review umfasst oft einen größeren Umfang an Literatur, einschließlich der sogenannten "grauen Literatur". Bei der grauen Literatur handelt es sich um Veröffentlichungen außerhalb der formalen Kanäle, von denen angenommen wird, dass sie das Thema aus einer breiten Perspektive beleuchten (Pham et al., 2014).

In dieser Arbeit wird aus mehreren Gründen ein Scoping Review als Methode verwendet. Ein Scoping Review untersucht das Thema in seiner ganzen Breite und ermöglicht eine offenere Fragestellung, was in dieser Arbeit gut genutzt wurde. Eine breite Auswahl von

Die Literatur wurde in dieser Arbeit ebenfalls gut genutzt, da es notwendig war, verschiedene Unterthemen und Disziplinen heranzuziehen, um die möglichen

kausalen Erklärungen für das als "Brumnton" bekannte Phänomen zu ergründen.

Arksey & O'Malley (2005) betonen fünf notwendige Schritte für die Durchführung eines Scoping Reviews;

1. *Identifizierung des Problems.*
2. *Identifizierung und Sammlung relevanter Forschungsergebnisse.*
3. *Auswahl der Literatur.*
4. *Kartierung der Literatur.*
5. *Zusammenfassen der Literatur und Berichten über die Ergebnisse.*

Die Identifizierung der Problemstellung wurde bereits in dieser Arbeit vorgestellt. Nach Aveyard (2014) soll die Klärung der Problemstellung zu einem besseren Verständnis des Themenbereichs führen und die Interaktion mit Patienten oder Klienten verbessern (Aveyard, 2014). Die im Rahmen dieser Arbeit formulierte Problemstellung wurde in diesem Sinne formuliert, um ein besseres Verständnis für das Thema zu schaffen und damit der betroffenen Patientengruppe zu helfen.

Die Literatur wurde hauptsächlich über die Suchmaschinen Oria, PubMed und Google Scholar gesammelt. Die anfänglich festgelegte Suchstrategie basierte auf dem Einschlusskriterium, dass die Literatur das Phänomen "Brummtton" beinhalten und eine von Experten begutachtete Veröffentlichung sein sollte. Der auf begutachtete Zeitschriften beschränkte Suchbegriff "The Hum" ergab 265 399 Treffer in Oria, und es wurde schnell festgestellt, dass die Mehrzahl der Treffer irrelevant war und oft zu den Bereichen Zoologie und Seismologie gehörte. Die Suchphrase wurde dann um Wörter wie "Sound", "Low Frequency" und "Noise" erweitert, was zu 121 Treffern führte, von denen vier Artikel nach einer inhaltlichen Prüfung aufgenommen wurden.

Die weitere Literatursammlung erfolgte nach der sogenannten "Schneeballsystematik", d. h. die Referenzliste der bereits aufgenommenen Literatur wurde zum Aufbau einer größeren Bibliothek genutzt (Pham et al., 2014). Während des Screening-Prozesses wurde auch das Wissen über einzelne Autoren mit bedeutenden Beiträgen in ihren jeweiligen Bereichen ermittelt, und ihre Namen

wurden bei weiteren Recherchen zur Ergänzung der Literaturliste verwendet.
Die Bibliographie.

Über die Ursache des Phänomens "Der Brumnton" besteht derzeit kein Konsens. Auf dieser Grundlage war es auch notwendig, verschiedene Nachrichtenartikel und andere "graue Literatur" einzubeziehen, um das Phänomen selbst und sein Ausmaß zu veranschaulichen. Bei der Auswahl der grauen Literatur wurde nach bestem Wissen und Gewissen darauf geachtet, die Quellen so neutral wie möglich zu halten, um Einseitigkeiten zu vermeiden.

Um die Qualität und Validität der einbezogenen Literatur zu gewährleisten, wurden in erster Linie von Fachleuten begutachtete Veröffentlichungen aus den letzten 10 Jahren berücksichtigt. Es war jedoch notwendig, auch Literatur zu berücksichtigen, die älter ist, da es offensichtlich keine große Anzahl von Forschungsarbeiten zu diesem Thema gibt.

Zusammengefasst hat dies zu einer Übersichtsarbeit geführt, die die Literatur über "The Hum" mit begutachteter Forschung zu möglichen kausalen Erklärungen für das Phänomen aus audiologischer Sicht kombiniert. Als Literaturübersicht Die gesammelten Materialien bilden natürlich die Grundlage sowohl für den folgenden Hauptteil als auch für die Diskussion.

4. Hauptteil

4.1 "Das Brummtton-Phänomen"

Es besteht kaum ein Zweifel daran, dass es eine echte Gruppe von Menschen gibt, die in ihrem Alltag entweder durch externe tieffrequente Schallquellen oder durch die Wahrnehmung von Phantomgeräuschen in diesem Frequenzbereich, z. B. durch Tinnitus, belästigt werden. Ein faszinierender Aspekt von "The Hum" ist sein etwas verschwörerischer Charakter und die Tatsache, dass sich um das Phänomen fast eine eigene kleine Kultur entwickelt hat. Durch die Medien und die Unterhaltung ist "The Hum" allmählich bekannter geworden, im Guten wie im Schlechten.

Man sollte meinen, dass eine stärkere Sensibilisierung für Lärmbelästigung etwas Positives wäre, doch in Wirklichkeit bedeutet dies auch, dass sich in der Öffentlichkeit eine große Menge an Fehlinformationen und schlimmstenfalls Phantasien festsetzen (Leventhall et al., 2003). Für diejenigen, die mit dem Phänomen nicht vertraut sind, lässt es sich als tieffrequentes Rauschen zusammenfassen, das von relativ wenigen Menschen wahrgenommen wird. Es wird häufig geschätzt, dass etwa zwei Prozent der Bevölkerung in der Lage sind, das Geräusch wahrzunehmen (Frosch, 2016), aber diese Zahl mag etwas unsicher erscheinen, da sie offenbar aus unveröffentlichten Studien stammt (Deming, 2004). Bei näherer Betrachtung stellt sich jedoch heraus, dass dieser Anteil aus Umfragen unter Bewohnern der Kleinstadt Taos in den USA stammt, einer Stadt, die auch zu den bekannteren Fällen des Phänomens gehört (Mullins & Kelly, 1995).

4.2 Geographie

Zwar gibt es bereits seit den 1950er Jahren Belege für Fälle von "Brummen" oder die Belästigung von Menschen durch tieffrequente Geräusche, doch scheint das Phänomen erst 20 Jahre später, in den 1970er Jahren, größere öffentliche Aufmerksamkeit zu erlangen und von der britischen Boulevardpresse aufgegriffen zu werden (Deming, 2004). Das Vereinigte Königreich scheint besonders anfällig für Fälle zu sein, wobei Bristol eine lange Geschichte von "The Hum" hat, über die erstmals in den 1960er Jahren berichtet wurde (BBC, 2016). Auch aus Leeds wurden Fälle des Phänomens gemeldet (BBC, 2022), ebenso wie aus Largs an der Westküste Schottlands, über das in den Medien berichtet wurde (Deming, 2004). In

Nordamerika sind ebenfalls mehrere Fälle bekannt, darunter das bereits erwähnte Taos sowie Kokomo, Indiana und Windsor, Kanada (Deming, 2004).

Windsor, Kanada, ist von besonderem Interesse, da das Problem offenbar zu Beginn der Coronavirus-Pandemie gelöst wurde. Eine benachbarte Hütte auf der Insel Zug auf der US-amerikanischen Seite der Grenze stellte ihre industrielle Tätigkeit ein, was zu einem Rückgang der Lärmbeschwerden in dem Gebiet führte (NPR, 2020). Erwähnenswert ist auch, dass die kanadischen Behörden 2014 in diesem Gebiet Lärmmessungen durchführten und eine Aktivität im Frequenzbereich um 35 Hz feststellten. Die Quelle des Lärms wurde zu diesem Zeitpunkt jedoch nicht identifiziert, was wahrscheinlich auf die Schwierigkeiten bei der Lokalisierung von Niederfrequenzen zurückzuführen ist.

sowie bürokratische Herausforderungen im Zusammenhang mit den nationalen Grenzen (Kanada, 2014).

4.3 Oslofjord-Brumm

Im Herbst 2022 wurden in den norwegischen Medien ein Handvoll Artikel veröffentlicht. Dazu gehörte ein von NRK geführtes Interview mit einer Frau, die von einem nicht identifizierten tieffrequenten Geräusch belästigt wird, das als "Oslofjord-Brumm" bezeichnet wird (Årdal, 2022). Dieselbe Frau steht auch hinter einer über Facebook organisierten Gruppe, die Menschen zusammenbringt, die ähnliche Erfahrungen mit einem unbekanntem Geräusch oder Rumpeln machen. Mit Stand von heute (Mai 2023) hat die Gruppe etwa 2000 Mitglieder. Es ist davon auszugehen, dass diese Zahl nicht die gesamte Population derjenigen repräsentiert, die das tieffrequente Geräusch hören.

Einige ausgewählte Zitate von Mitgliedern der Facebook-Gruppe "Oslofjord Hum" lauten:

"Es ist wie ein Motor, der im Hintergrund läuft und läuft. Abends ist es am lautesten und wird nachts oft noch lauter."

"Mein Sohn hat heute Abend das Brummen gehört. Er sagte, es klang wie eine Baumaschine, die auf und ab fährt."

"Ich habe ein Geräusch gehört, das wie ein Lastwagen mit laufendem Motor klingt, eine Art gleichmäßiges Dröhnen. Ich habe nachgesehen, aber in der Nähe nichts entdeckt, was dieses Geräusch erzeugen könnte. Ich höre es zu jeder Tages- und

Nachtzeit, aber ich glaube nicht, dass es die ganze Zeit da ist.

4.4 Niederfrequenter Schall

Kurz gesagt, Schall entsteht, wenn eine Schallquelle vibriert. Die Schwingungen lösen eine oszillierende Bewegung in den Molekülen des Mediums aus, in dem sich der Schall ausbreitet, z. B. Luft, und erzeugen so Druckwellen oder Schallwellen (Everest & Pohlmann, 2015, Kapitel 1). Die Schallwelle eines einfachen reinen Tons lässt sich anhand einer Sinuswelle veranschaulichen, wie in Abbildung 1 dargestellt.

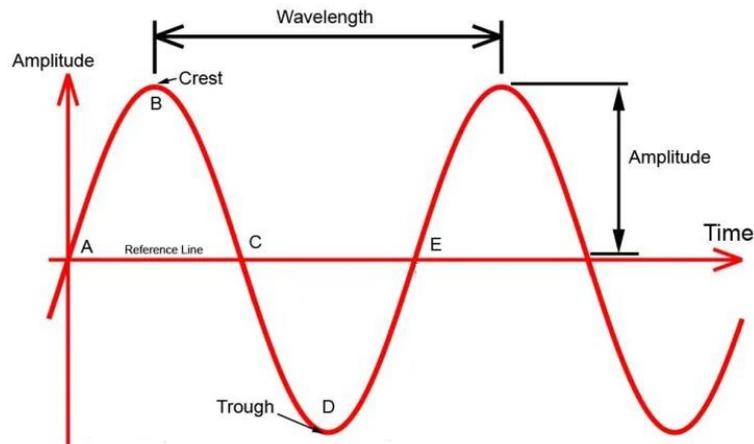


Abbildung 1 - Sinuswelle ("Sinuswelle", 2021)

Abbildung 1 veranschaulicht eine Sinuswelle, die durch die Wellenlänge λ und die Amplitude A . Die Wellenlänge λ beschreibt den Abstand zwischen zwei Punkten auf der Kurve, an denen sich die Welle in der gleichen Phase befindet, d. h. den Abstand eines Wellenzyklus, während die Amplitude beschreibt Intensität. Die Frequenz eines reinen Tons ist ein Maß für die Anzahl der Zyklen, die eine Welle pro Sekunde durchläuft, und wird in Hertz (Hz) gemessen. Die Beziehung zwischen Wellenlänge, Frequenz und Schallgeschwindigkeit lässt sich mit Gleichung 1 ausdrücken.

$$1: \quad \lambda = \frac{c}{f}$$

λ ist die Wellenlänge, c ist die Schallgeschwindigkeit in einem bestimmten Medium

und f ist die Frequenz. Frequenz und Wellenlänge sind umgekehrt proportional, d. h. eine höhere Frequenz führt zu einer geringeren Wellenlänge und umgekehrt. Die Schallgeschwindigkeit hängt von mehreren Faktoren ab, z. B.

Temperatur, Druck, Feuchtigkeit und dem Medium, in dem er sich ausbreitet (Kapoor et al., 2018). Die Schallgeschwindigkeit entspricht etwa 344 m/s in Luft bei 20°C.

Tabelle 1 zeigt einen kleinen Überblick über die Wellenlängen bei verschiedenen Frequenzen.

Tabelle 1 - Übersicht über die Wellenlängen bei verschiedenen Frequenzen

Frequenz (Hz)	1	10	50	100	150	200
Wellenlänge λ (m)	344	34,4	6,9	3,4	2,3	1,7

Wie in der Einleitung erwähnt, wird der hörbare Bereich traditionell als ein Bereich zwischen 20 und 20.000 Hz für eine normal hörende Person angesehen, wobei die obere Grenze mit dem Alter abnimmt (Berglund et al., 1996). Der Frequenzbereich über 20.000 Hz wird als Ultraschall und der Bereich unter 20 Hz als Infraschall bezeichnet. Die Begriffe ultra und infra werden aus dem Lateinischen mit "oberhalb" bzw. "unterhalb" übersetzt, was impliziert, dass es sich um einen Bereich außerhalb des Hörbereichs handelt, was in Wirklichkeit nicht ganz korrekt ist. Leventhall (2007) weist darauf hin, dass sowohl Ober- als auch Untergrenzen aus den Messungen abgeleitet wurden, die die Grundlage für die Entwicklung der Equal Loudness Contours (ELC) bilden und eher als akademischer und rechtlicher Standard denn als absolute Grenze dienen, an die sich die Natur hält (Leventhall, 2007). Der ELC ist in Abbildung 2 dargestellt.

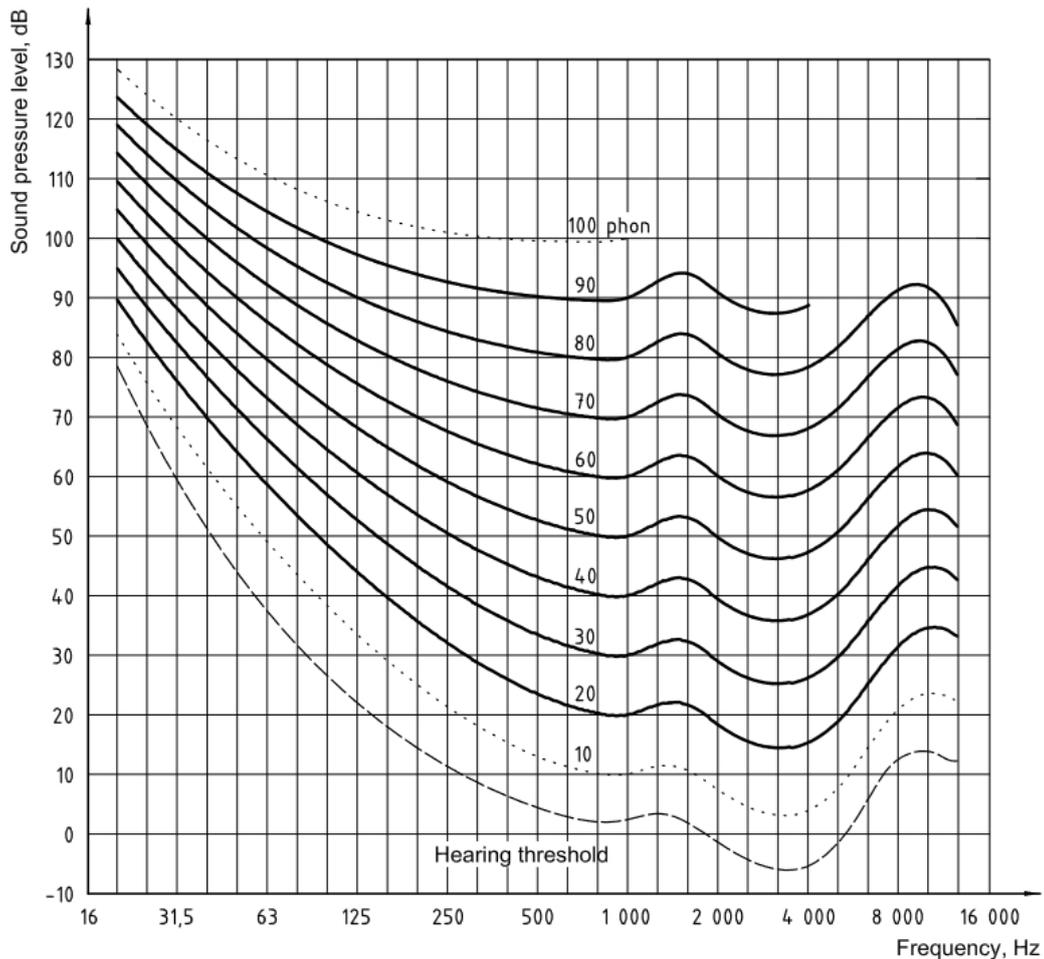


Abbildung 2 - Gleiche Lautheitskonturen (International Standard Organisation, 2003)

ELC ist ein Versuch zu zeigen, wie der Schalldruck von Frequenz zu Frequenz variiert, um eine konstante wahrgenommene Lautstärke zu erreichen. Anhand von Abbildung 2 und einem Ton von 40 dB SPL bei 1000 Hz, der der entsprechenden 40-Phonogramm-Kurve folgt, kann man sehen, dass bei einer niedrigeren Frequenz wie 125 Hz der Schalldruck auf fast 60 dB SPL erhöht werden muss, damit ein Hörer die beiden Töne als gleich stark empfindet.

Ein Blick auf Abbildung 2 und die ELC-Kurven zeigt, dass der Dynamikbereich bei niedrigen Frequenzen schnell komprimiert wird, verglichen mit dem, was z. B. bei 1000 Hz zu sehen ist. In der Praxis bedeutet dies, dass ein Anstieg des dB SPL bei den niedrigsten Frequenzen viel stärker wahrgenommen wird. Yeowart & Bryan (1967) stellen fest, dass unterhalb von 4 Hz ein Anstieg von 1 dB SPL ausreicht, um einen Ton von unhörbar auf deutlich hörbar zu machen (Yeowart & Bryan, 1967).

Die Definition des Begriffs "niedrige Frequenz" variiert je nach Fachgebiet oder Beruf, und in früheren Artikeln über niedrige Frequenzen wurde beispielsweise 250 Hz als Obergrenze für niedrige Frequenzen verwendet (Berglund et al., 1996). Im Hinblick auf die Audiologie wird sich der Begriff "niedrige Frequenz" im Folgenden jedoch auf Frequenzen unter 125 Hz beziehen, da dies die niedrigste Frequenz ist, mit der ein Audiologe in einem klinischen Kontext zu tun hat.

4.5 Infrschall

Infrschall ist per Definition Schall unterhalb von 16 oder 20 Hz und wird im Volksmund als Schall angesehen, der nicht gehört wird, weil er "unterhalb" des hörbaren Frequenzspektrums liegt (Leventhall, 2007). In Wirklichkeit funktioniert das Ohr nicht ganz so, und es wurden Messungen der Hörschwellen bis hinunter zu 1,5 Hz durchgeführt. Klar ist jedoch, dass relativ hohe Schalldrücke erforderlich sind, um bei solchen Frequenzen eine Hörwahrnehmung zu erreichen. Yeowart & Bryan (1967) verwenden in ihren Experimenten einen durchschnittlichen Schalldruck von 132,3 dB SPL bei 1,5 Hz, um eine Reaktion zu erzielen (Yeowart & Bryan, 1967). In jüngerer Zeit wurden Messungen mit Plug-in-Telefonen bis zu 2,5 Hz durchgeführt (Kuehler et al., 2015). In dieser Arbeit sollte die in jüngerer Zeit akzeptierte Definition von Infrschall als Schall unterhalb von 16 Hz (International Standard Organisation, 2003) beibehalten werden, mit der Maßgabe, dass dies nicht mehr als ein relativ allgemeiner Begriff zur kollektiven Beschreibung der niedrigsten Frequenzen sein kann.

Eine realere Veränderung in diesem Bereich des Frequenzspektrums könnte in der Art und Weise liegen, wie Schall wahrgenommen wird. In demselben Artikel von Yeowart & Bryan (1967) werden Beobachtungen darüber gemacht, wie Versuchspersonen ihre Wahrnehmung von Schall im Frequenzbereich unter 20 Hz beschreiben:

- *Frequenzen über 20 Hz: "Glatt"/"Tonal"*
- *Frequenzen 5 - 15 Hz: "Rauh"/"Popping"*
- *Frequenzen unter 5 Hz: "Tuckern"/"Zischen"*

4.6 Schallausbreitung und -abschwächung

Niederfrequenter Schall verhält sich anders als höherfrequenter Schall. Er kann sich unter anderem über größere Entfernungen ausbreiten und wird in Gegenwart von Hindernissen wie Wänden und Fenstern in wesentlich geringerem Maße gedämpft (Silva et al., 2021). Die Dämpfung bezieht sich auf die Verringerung der Intensität von einer Schallquelle zu einem Empfänger und erfolgt hauptsächlich durch Streuung oder Absorption (Kapoor et al., 2018).

Es gibt verschiedene Formen der Dämpfung, aber die wichtigsten Faktoren sind die atmosphärische und die geometrische Dämpfung. Die atmosphärische Dämpfung bezieht sich auf die Fähigkeit der Luft, Schallenergie zu absorbieren, wenn sich der Schall durch die Luft bewegt. Über größere Entfernungen geht die Schallenergie durch verschiedene Prozesse verloren, die im Zusammenhang mit der Wechselwirkung der Schallwellen mit der Luft auftreten. Die atmosphärische Dämpfung ist besonders ausgeprägt bei hohen Frequenzen und hat nur geringe Auswirkungen auf tiefe Frequenzen. Der Absorptionskoeffizient α ist ebenso wie die Schallgeschwindigkeit von der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit, aber auch von der Frequenz abhängig (Kapoor et al., 2018). Abbildung 3 veranschaulicht den Absorptionskoeffizienten α in Luft bei einer Umgebungstemperatur von 20°C, 20 % Luftfeuchtigkeit und 1 Atmosphärendruck (atm) über verschiedene Frequenzen.

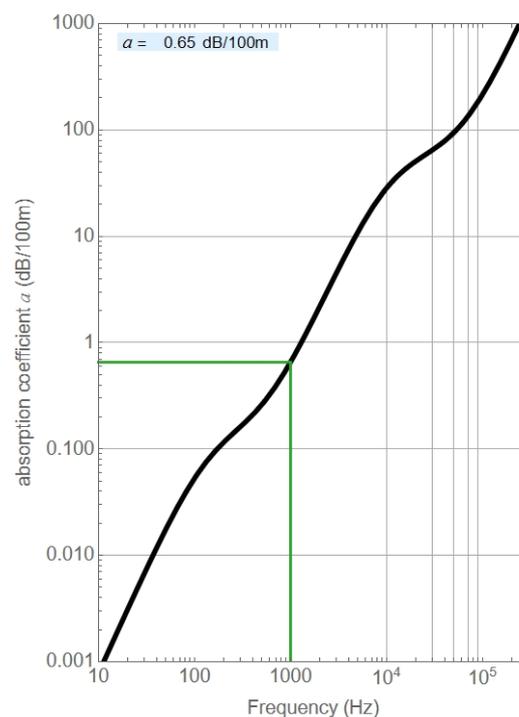


Abbildung 3 - Absorptionskoeffizient α als Funktion der Frequenz (modifiziert aus: Russell, 2016)

Wie in Abbildung 3 dargestellt, ist der Absorptionskoeffizient für niedrige Frequenzen sehr niedrig und die atmosphärische Dämpfung wirkt über größere Entfernungen fast wie ein Tiefpassfilter (Kapoor et al., 2018).

Die geometrische Dämpfung ist im Gegensatz zur atmosphärischen Dämpfung unabhängig von der Frequenz. Die geometrische Dämpfung beschreibt die Beziehung zwischen dem Schalldruck und dem Abstand von einer Schallquelle sowie die Verringerung der Intensität mit zunehmendem Abstand zwischen Schallquelle und Empfänger. Als Ergebnis der geometrischen Dämpfung tritt im Freifeld eine Dämpfung auf, die 6 dB pro Verdoppelung des Abstands von der Schallquelle entspricht (Everest & Pohlmann, 2015, Kapitel 3).

In der Praxis wird die Schallausbreitung durch zusätzliche Faktoren wie Bodendämpfung, Dämpfung durch Hindernisse, Reflexion usw. beeinflusst. Wenn sich der Schall in Bodennähe ausbreitet, wird er durch die Absorption und Reflexion des Bodens gedämpft. Das Ausmaß der Dämpfung hängt von der Art der Oberfläche ab, wobei weiche Oberflächen, wie z. B. Gras, zu einer viel höheren Dämpfung führen als harte Oberflächen, wie z. B. Beton. Reflexionen vom Boden können auch zu einem Bodeneffekt führen, bei dem sich der Schall nicht nur direkt von der Schallquelle zum Empfänger ausbreitet, sondern auch einen sekundären Ausbreitungsweg durch Reflexionen vom Boden bildet. Je nach Amplitude und Phase der verschiedenen Schallwellen können Bodeneffekte zu konstruktiven oder destruktiven Interferenzen führen, die das Schallsignal verstärken bzw. abschwächen (Garg & Maji, 2014; Kapoor et al., 2018).

Die allgemeine Topografie spielt ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Schallausbreitung. Wenn sie auf Hindernisse wie Gebäude oder andere physische Hindernisse treffen, können Schallwellen reflektiert und/oder gebeugt werden. Beugung tritt auf, wenn eine Welle auf ein Hindernis oder eine Öffnung trifft, und bezieht sich auf die Fähigkeit einer Welle, sich um ein Hindernis herum zu biegen, anstatt reflektiert oder absorbiert zu werden. Ob eine Welle reflektiert oder gebeugt wird, hängt von der Wellenlänge und der Größe des Hindernisses ab. Schallwellen mit einer Wellenlänge, die größer ist als das Hindernis, können das betreffende

Hindernis nahezu unbeeinflusst passieren (Everest & Pohlmann, 2015, Kapitel 7).
Daher werden hochfrequente Töne mit kurzen Wellenlängen oft reflektiert, während
niederfrequente Töne mit langen Wellenlängen gebeugt werden.

Daraus lässt sich schließen, dass sich tieffrequenter Schall über weite Entfernungen ausbreiten kann, ohne von den oben genannten Dämpfungsfaktoren wesentlich beeinflusst zu werden. Es ist daher nicht ausgeschlossen, dass dieses niederfrequente Geräusch, das als "Brummen" bezeichnet wird, von einer externen Schallquelle herrührt.

4.7 Lärmmessung und Gewichtung

Wenn Lärm eine der möglichen Erklärungen sein soll, die untersucht werden, wäre es lohnenswert zu prüfen, wie Lärmmessungen nach norwegischen Standards durchgeführt werden und welche Grenzwerte für Lärmemissionen bestehen. Vor allem, wenn man eine Situation in Betracht zieht, in der der Patient den Lärm aufgrund einer erhöhten Empfindlichkeit wahrnimmt und sich auf ihn in einer Weise konzentriert, die an Hyperakusis erinnert, oder zu denjenigen gehört, die eine überdurchschnittlich hohe Hörschwelle bei niedrigen Frequenzen haben.

Lärm kann mit verschiedenen dB-Bewertungen über das Frequenzspektrum hinweg gemessen werden. Traditionell wird die dBA-Bewertung verwendet, wenn es um die Festlegung von Gesetzen, Vorschriften oder Normen geht. In Norwegen wird zum Beispiel die Norm *NS 8175:2019* oder *TEK19* verwendet, um Grenzwerte für zulässige Lärmpegel in Gebäuden festzulegen. Die Norm legt ihre Werte in dBA fest, aber mit einem Anhang für zulässige Werte für die Frequenzbänder um 31,5 Hz, 63 Hz und 125 Hz, wenn der Verdacht auf hohe Aktivität in den niedrigsten Frequenzen besteht.

Andere Formen der Gewichtung von Lärmmessungen sind dBC und dBZ. Bei der C-Bewertung werden die unteren Frequenzen weniger stark gewichtet als bei der A-Bewertung, und bei der Z-Bewertung gibt es fast gar keine Gewichtung. Es gibt auch eine G-Bewertung, die sich speziell auf den Bereich von 10-20 Hz bezieht (Leventhall et al., 2003).

4.8 Der Aufbau und die Anatomie des Ohrs

Während ein Audiologe über gute Kenntnisse und Instrumente zur Messung von Hörschwellen zwischen 125 Hz und 8000 Hz verfügt, ist es eher ungewöhnlich, sich

in einem klinischen Kontext außerhalb dieses Bereichs zu bewegen. Die Hochfrequenz-Audiometrie wird in gewissem Umfang eingesetzt, oft im Rahmen der Nachsorge von Patienten, die sich einer Behandlung mit ototoxischen Medikamenten unterziehen, aber wenn man unter 125 Hz geht, wird es schwieriger, mit einem normalen Audiometer eine Schwellenmessung zu erhalten.

Akustische Wellen, die auf das Ohr treffen, erreichen schließlich das Gehirn als elektrischer Impuls, der vom Hörnerv weitergeleitet wird, aber bevor die Reise zu Ende ist, durchläuft das Signal eine Reihe von Stationen und Veränderungen auf dem Weg. Von Interesse ist dabei der periphere Teil des Systems, also das, was zwischen dem Trommelfell und den inneren Haarzellen passiert (Casale et al., 2023).

Das Mittelohr umfasst den Bereich zwischen dem Trommelfell und dem ovalen Fenster der Cochlea. Die akustische Energie, die das Trommelfell in Bewegung setzt, überträgt diese Schwingungen dann über die Gehörknöchelchenkette, die aus Amboss, Hammer und Steigbügel besteht (Casale et al., 2023).

Der Steigbügel bringt die Schwingungen durch das ovale Fenster, das mit der Scala vestibuli (SV) verbunden ist und zur Scala tympani (ST) führt, zur Cochlea; beide Kanäle sind mit Perilymphe gefüllt. Dazwischen liegt die Scala media (SM), in der sich das Rindenorgan befindet, das wiederum die äußeren und inneren Haarzellen beherbergt. Diese inneren Haarzellen sind es, die letztlich auf die Vibrationen reagieren und die mechanische Energie in ein elektrisches Signal umwandeln, das über das zentrale Hörsystem an das Gehirn weitergeleitet werden kann (Casale et al., 2023).

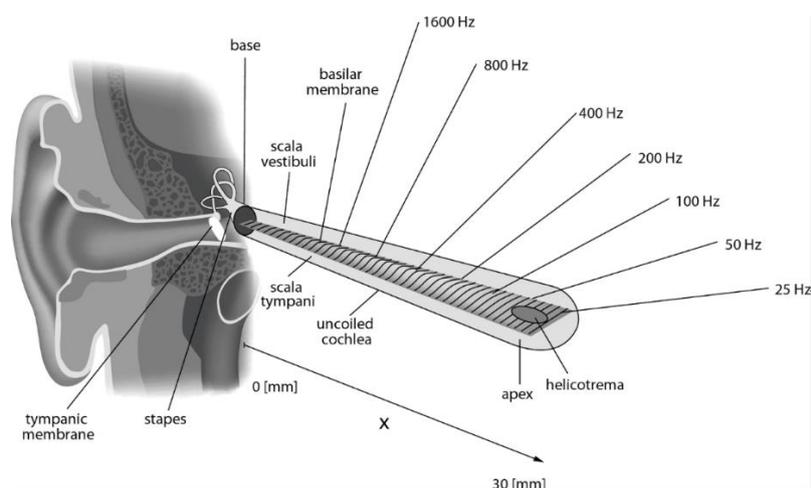


Abbildung 4 - Überblick über die verschiedenen Strukturen im Ohr und in der Cochlea (Kern et al., 2008)

Abbildung 4 zeigt eine erweiterte Cochlea. Die Frequenzen in Hz beziehen sich auf die tonotopische Verteilung der Frequenzen auf der Basilarmembran vom basalen bis zum apikalen Ende der Cochlea, wo das Helicotrema markiert ist.

4.9 Der natürliche Filter und die Dämpfung des Ohrs

Eine gute Darstellung, wie das Ohr Schall unterhalb von 1000 Hz dämpft, ist die Darstellung der "drei Filter", die von Salt & Hullar (2010) diskutiert werden. Die Wirkung dieser Filter ist in Abbildung 5 dargestellt. Normalerweise wird Schall unterhalb von 1000 Hz vom menschlichen Ohr im Verhältnis zu Schall oberhalb dieser Schwelle weiter gedämpft. Einzeln betrachtet, führen diese drei Filter zu einer zusätzlichen Dämpfung von 6 dB pro Oktave und könnten insgesamt zu einer Dämpfung von 18 dB

Dämpfung der niederfrequenten Töne unter 100 Hz.

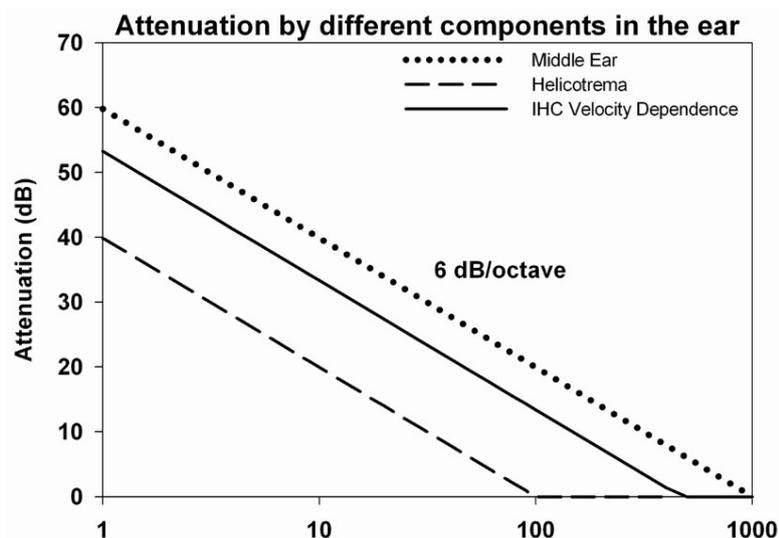


Abbildung 5 - Dämpfung als Ergebnis der "drei Filter". Die X-Achse stellt die Frequenz dar (Salt & Hullar, 2010).

4.9.1 Ohrknochen-Kette

Der erste Filter im menschlichen Ohr befindet sich im Mittelohr, genauer gesagt in der Gehörknöchelchenkette. Die Gehörknöchelchenkette besteht aus einer geringen Masse und einer hohen Steifigkeit, was sie für die Übertragung von niederfrequenten Tönen ungeeignet macht (Kim & Koo, 2015; Salt & Hullar, 2010). Zwei Schlüsseleigenschaften, die die Resonanzfrequenz eines Objekts bestimmen, sind Masse und Steifigkeit, wobei eine hohe Masse die Übertragung bei niedrigen

Frequenzen und eine hohe Steifigkeit die Übertragung bei hohen Frequenzen begünstigt (Kim & Koo, 2015). Die geringe Masse und hohe Steifigkeit der Gehörknöchelchenkette führt also zu

Dämpfung von Schallsignalen unter 1000 Hz entsprechend 6 dB pro Oktave (Salt & Hullar, 2010).

4.9.2 Helicotrema

Am apikalen Ende des SV, wo der SV auf den ST trifft, befindet sich eine Öffnung, die Helicotrema genannt wird. Das Helicotrema trägt zur Bestimmung der Hörempfindlichkeit im niedrigen Frequenzbereich durch Shunting. Shunting beschreibt den Prozess, bei dem sich Flüssigkeit von einem Teil eines Organismus zu einem anderen bewegt, in diesem Fall zwischen SV und ST. Durch den Shunt wird der Differenzdruck im SV und ST beseitigt, was die Bewegung der Basilarmembran und damit die Wahrnehmung von Schall verhindert (Jurado & Marquardt, 2016). Es hat sich gezeigt, dass der Shunt durch das Helicotrema den Frequenzbereich unter 100 Hz beeinflusst, wo eine Dämpfung von 6 dB pro Oktave auftritt, aber es wird vermutet, dass die volle Wirkung bei Frequenzen unter 40 Hz einsetzt (Jurado & Marquardt, 2016; Salt & Hullar, 2010). Die Größe des Helicotremas kann sich ebenfalls auf die Dämpfung und die Hörempfindlichkeit im niedrigen Frequenzbereich auswirken. Ist das Helicotrema ungewöhnlich schmal oder blockiert, kann der Druck zwischen SV und ST nicht schnell genug ausgeglichen werden, was zu einer höheren Hörempfindlichkeit führt (H. Møller & Pedersen, 2004).

4.9.3 Innere Haarzellen

Der dritte Filter tritt in den inneren Haarzellen des Cortischen Organs auf, die im Gegensatz zu den äußeren Haarzellen keine physische Verbindung zur Tectorialmembran haben. Die inneren Haarzellen, die mit der Flüssigkeit im Innenohr verbunden sind, reagieren auf die Geschwindigkeit der Verschiebung der Basilarmembran, während die äußeren Haarzellen auf die Verschiebung selbst reagieren (Drexel et al., 2016). Die Geschwindigkeit der Bewegung der Basilarmembran nimmt mit abnehmender Frequenz der Reize ab, was die Empfindlichkeit der inneren Haarzellen beeinflusst. Die äußeren Haarzellen, die auf die Bewegung reagieren, sind daher im niedrigen Frequenzbereich empfindlicher. Da es die inneren Haarzellen sind, mit denen wir "hören", wirken sie als Dämpfungsfaktor, der 6 dB pro Oktave im Frequenzbereich unter etwa 470 Hz

entspricht (Drexl et al., 2016; Salt & Hullar, 2010).

Im Gegensatz zur Dämpfung durch die Gehörknöchelchenkette und das Heliotrema bleibt dieser Filter bei einer Absenkung der Frequenz nicht dauerhaft bestehen.

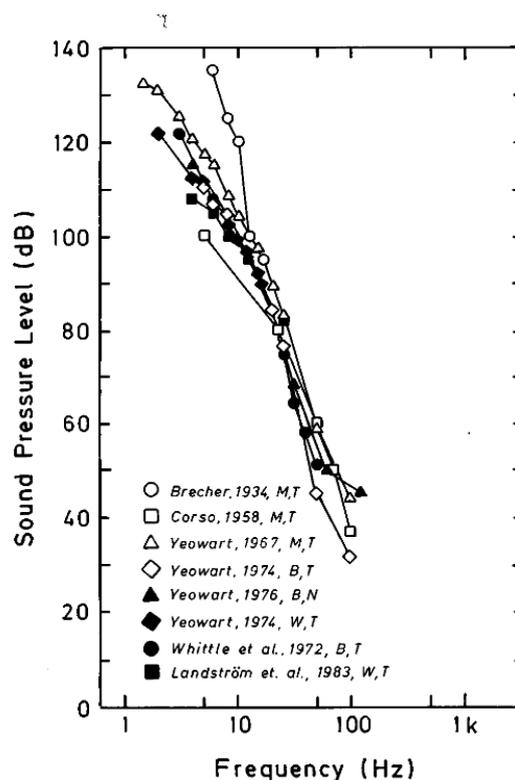
Während die drei Filter insgesamt zu einer Dämpfung führen können, die 18 dB pro Oktave zwischen 100 und 20 Hz entspricht, kommt es beim dritten Filter zu einer Veränderung, die Folgendes bewirkt

Die Dämpfung erreicht bei 10 Hz nur 12 dB pro Oktave. Diese Verringerung ist darauf zurückzuführen, dass die inneren Haarzellen durch starke Reaktionen der äußeren Haarzellen stimuliert werden, die auf Reize bei viel niedrigeren Frequenzen reagieren.

Intensität als die inneren (Salt & Hullar, 2010).

4.10 Empfindlichkeit gegenüber tiefen Frequenzen und Hörschwellen

Für den Audiologen hört das Audiogramm im klinischen Kontext bei 125 Hz auf, aber Hörschwellen können auch bei viel niedrigeren Frequenzen gemessen werden, sofern die richtige und kalibrierte Ausrüstung vorhanden ist. Studien über die menschliche Hörempfindlichkeit bei niedrigen Frequenzen sind spärlich, aber es gibt einige Forschungsarbeiten in diesem Bereich. Berglund (1996) fasst die in verschiedenen Studien ermittelten Hörschwellen für tiefe Frequenzen zusammen. Diese Zusammenfassung ist in Abbildung 6 dargestellt.



*Abbildung 6 - Hörschwellen für tiefe Frequenzen aus früheren Untersuchungen (M: Monoaural. B: Binaural. T: Ton. N: Lärm
W: Ganzkörper) (Berglund et al., 1996)*

Abbildung 6 veranschaulicht die Ergebnisse von acht verschiedenen Studien aus den Jahren 1934 bis 1983 und ist ein Vergleich ihrer Messungen der Hörschwellen im Frequenzbereich unter 100 Hz. Die Abbildung zeigt, dass die Wahrnehmung von Tönen sowohl bei niedrigen als auch bei tiefen Frequenzen nicht aufhört, sondern dass Menschen in der Lage sind, sie wahrzunehmen, wenn die Intensität hoch genug ist.

Abbildung 7 veranschaulicht die Ergebnisse neuerer Forschungen in Form von Messungen mit Plug-in-Telefonen von Kuehler et al. (2015), die u. a. mit den Messungen von Yeowart & Bryan aus dem Jahr 1967 verglichen wurden.

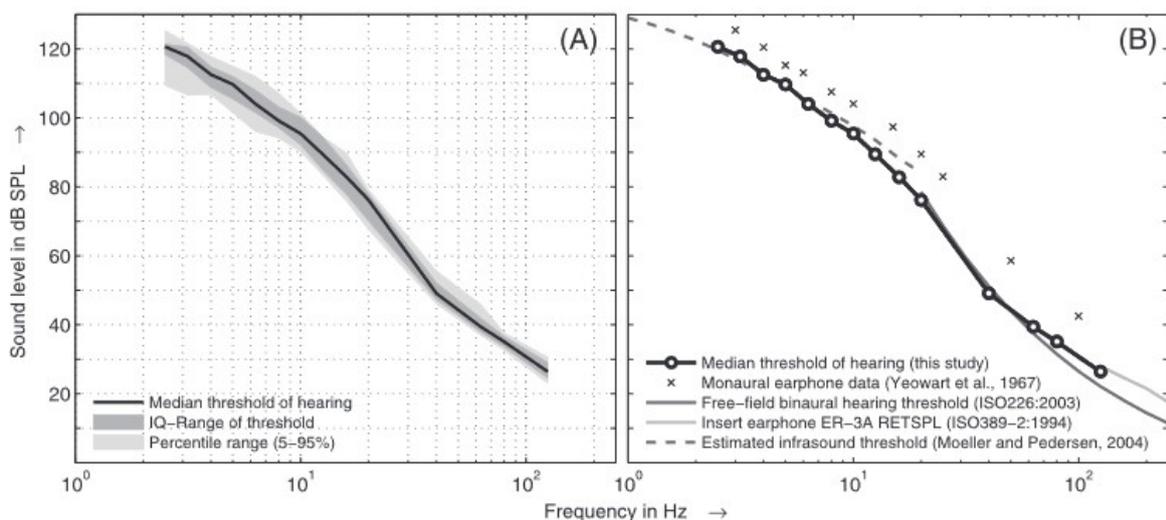


Abbildung 7 - (A) zeigt die Ergebnisse von Schwellenwertmessungen mit Einsatztelefonen; (B) zeigt den Median der Schwellenwerte der aktuellen Messung im Vergleich zu früheren Daten (Kuehler et al., 2015)

Abbildung 7(A) zeigt die Ergebnisse der Schwellenwertmessungen und eine zunehmende Streuung bei den niedrigen Frequenzen. Abbildung 7(B) zeigt die Unterschiede zwischen älteren und neueren Erhebungen. Møller & Pedersen (2004) weisen darauf hin, dass die Unterschiede möglicherweise auf Entwicklungen in der Technologie und Methodik zurückzuführen sind.

Abbildung 8 zeigt die Schwellenwerte von drei Personen mit ungewöhnlich

empfindlicher Tieftonhörschwelle im Vergleich zu angenommenen normalen Schwellenwerten gemäß ISO 226:2003. Die Daten wurden von Møller & Pedersen (2004) in drei weiteren Studien ermittelt.

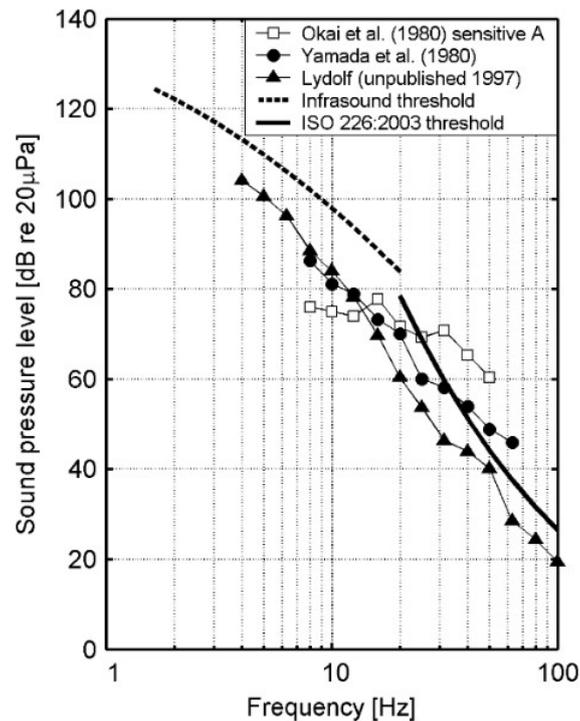


Abbildung 8 - Hörschwellen bei drei besonders empfindlichen Personen (H. Møller & Pedersen, 2004).

Abbildung 8 soll veranschaulichen, dass beim Menschen offenbar Schwellenwerte auftreten können, die relativ weit unter dem Durchschnitt liegen, und zwar in dem Maße, wie andere Variablen als nur die natürliche Streuung der Schwellenwerte der Empfindlichkeit zugrunde liegen können (H. Møller & Pedersen, 2004).

4.11 Tinnitus

Tinnitus ist für die meisten Audiologen ein bekanntes Phänomen. Tinnitus, der auch als Ohrensausen bezeichnet wird, ist die Wahrnehmung von Geräuschen ohne eine externe Schallquelle. Tinnitus ist eine Erkrankung, die in der heutigen Gesellschaft immer häufiger vorkommt, insbesondere bei Menschen mit Hörverlust (Baguley et al., 2013). Tinnitus ist derzeit nicht heilbar, aber es gibt verschiedene Formen der Behandlung, um die mit Tinnitus verbundenen Symptome zu lindern, z. B. Klangtherapie und kognitive Verhaltenstherapie (McFerran et al., 2019). Tinnitus kann erhebliche Auswirkungen auf die wahrgenommene Lebensqualität haben und zu Erkrankungen wie Depressionen, Angstzuständen und Schlafmangel führen oder

diese verschlimmern (Baguley et al., 2013; A. R. Møller, 2011; Tye-Murray, 2020).

Tinnitus kann in subjektive und objektive Unterarten unterteilt werden, wobei der subjektive Tinnitus nur von der betroffenen Person wahrgenommen wird, während der objektive Tinnitus von einem Außenstehenden beobachtet oder gemessen werden kann. Er kann auch weiter danach kategorisiert werden, ob er kontinuierlich oder pulsierend ist (Baguley et al., 2013). Objektiver Tinnitus kann beispielsweise als Folge von Aktivitäten in Blutgefäßen oder Muskeln in der Nähe der Cochlea auftreten, wie etwa bei einer temporomandibulären Dysfunktion (Han et al., 2009; A. R. Møller, 2011).

Tinnitus hat in der Regel eine höhere Tonlage, tritt aber auch bei niedrigeren Frequenzen auf. In einer von Walford (1983) durchgeführten Untersuchung wurde festgestellt, dass 55 von 229 Tinnitus-Patienten einen niederfrequenten Tinnitus unter 200 Hz hatten (Walford, 1983).

Studien zeigen auch, dass niederfrequenter Tinnitus eine hohe Prävalenz bei Menschen mit Ménière-Krankheit hat (Ueberfuhr et al., 2017).

4.12 Spontane otoakustische Emissionen (SOAE)

Eine weitere mögliche Erklärung für die Wahrnehmung tieffrequenter Töne ohne offensichtliche Quelle sind SOAE. SOAEs sind akustische Signale, die in der Cochlea ohne irgendeinen auslösenden Reiz erzeugt werden. Die Signale wandern dann in das Mittelohr und dann zum Außenohr, wo sie mit empfindlichen Mikrofonen messbar sind, wenn sie laut genug sind, um sich von anderen Hintergrundgeräuschen im Körper abzuheben. Der Hintergrund für diese Signale ist die Elektromotilität der äußeren Haarzellen, die durch ihre Aktivität beim Empfang und der Verstärkung eingehender akustischer Signale aus externen Quellen zu ihrer eigenen Schallerzeugung beitragen (Shera, 2022).

Mit anderen Worten: Die Cochlea ist ein aktives Organ, und diese Aktivität erzeugt buchstäblich Schall. Die Töne sind selten so laut, dass sie ohne Hilfsmittel gehört werden können, aber laut genug, um mit empfindlichen Mikrofonen messbar zu sein. SOAEs sind im normalen Ohr vorhanden und werden vom Gehirn herausgefiltert, so dass sie nicht hörbar sind, aber es gibt Fälle, in denen Menschen in der Lage sind, ihre eigenen Emissionen wahrzunehmen (Long, 1998; Penner, 1989).

Niederfrequente SOAE sind besonders schwierig zu messen und nachzuweisen, da ein Großteil der physiologischen Geräusche im gleichen Frequenzbereich liegt, was

es schwierig macht, das Signal von den körpereigenen Geräuschen zu unterscheiden (DeRuiter & Ramachandran, 2017, Kapitel 19).

Es gibt Theorien, dass die Wahrnehmung tieffrequenter Geräusche ohne externe Schallquelle mit SOAE in Verbindung stehen könnte. Dies wird vor allem von Frosch (2013) vertreten, der Forschungen zu diesem Thema und seinem Zusammenhang mit "The Hum" veröffentlicht hat. Diese Theorie basiert auf der Vorstellung, dass der Schall von den äußeren Haarzellen in das Mittelohr gelangt und dann von denselben Zellen verstärkt wird, die ihn zuerst erzeugt haben, also einer Rückkopplungsschleife nicht unähnlich. Leider ist diese Theorie, wie Frosch (2013) selbst in seinen Schlussfolgerungen feststellt, aufgrund der bereits erwähnten Schwierigkeiten, niederfrequente SOAE von Körpergeräuschen zu unterscheiden, nur schwer zu beweisen (Frosch, 2013).

5. Diskussion

In dieser Arbeit werden Theorien und Mechanismen vorgestellt, die helfen können, die Frage zu beantworten, warum nur ein kleiner Teil der Bevölkerung in der Lage ist, einen tieffrequenten Ton zu hören, der den Namen "Brummtton" erhalten hat. Auf den folgenden Seiten werden die verschiedenen Theorien auf der Grundlage der gesammelten Literatur und mit einem audiologischen Ansatz diskutiert.

Zunächst stellt sich die Frage, ob der beobachtete Schall interner oder externer Natur ist. Aufgrund der akustischen Eigenschaften von tieffrequentem Schall und seiner Fähigkeit, relativ ungehindert große Entfernungen zu überwinden, kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine externe Schallquelle die Ursache für die Wahrnehmung ist. In der Praxis wird jedoch häufig berichtet, dass ein großer Teil der Testgruppen an verschiedenen Orten, z. B. auch in schalltoten Räumen, immer noch das wahrnimmt, was sie als "Das Brummen" bezeichnen (Yamada et al., 2012), was darauf hindeutet, dass der Schall intern erzeugt wird.

5.1 Externes Audio

Wenn es eine externe Geräuschquelle gibt, stellt man sich natürlich die Frage: "*Warum hört nicht jeder dieses Geräusch?*". Dies war in Windsor, Kanada, der Fall, wo eine industrielle Aktivität offenbar Lärm um 35 Hz erzeugte. Nach Berichten von Anwohnern wurden von den Behörden Lärmmessungen durchgeführt, um die Quelle zu lokalisieren (Kanada, 2014).

Die dauerhafte Stilllegung von Industrietätigkeiten im Zusammenhang mit der Coronavirus-Pandemie führte zu einem Rückgang der Meldungen (NPR, 2020). Darüber hinaus wird vermutet, dass einzelne Fälle durch Maßnahmen zur Lärmreduzierung oder durch einen Umzug der Betroffenen "gelöst" wurden (Pedersen et al., 2008).

Wie bereits in dieser Arbeit betont wurde, können die Hörschwellen im tieffrequenten Bereich bei verschiedenen Personen sehr unterschiedlich sein. Walford (1983) zeigt in seinen Studien, dass in benachbarten Frequenzen eines

Ohres erhebliche Unterschiede auftreten können. Bei einem der Kandidaten von Walford (1983), einem

Unterschied in den Hörschwellen von fast 15 dB HL zwischen 40 und 50 Hz (Walford, 1983). Zusätzlich zu dieser natürlichen Streuung wurden auch Fälle von ungewöhnlich empfindlichen Hörschwellen im niedrigen Frequenzbereich bei Personen ohne offensichtliche Ursache festgestellt. Obwohl die Ursache nicht klar ist, könnte dies theoretisch als Folge eines ungewöhnlich schmalen oder blockierten Heliotremas auftreten (H. Møller & Pedersen, 2004).

Am häufigsten wird die Audiometrie im Frequenzbereich von 125 bis 8000 Hz durchgeführt, da dies die wichtigsten Frequenzen für Sprache sind. In einigen Fällen ist es von Interesse, Audiometrie im Frequenzbereich über 8000 Hz durchzuführen, aber vom klinischen Standpunkt aus gesehen wird sie nicht im niedrigen Frequenzbereich durchgeführt. Es gibt nur eine begrenzte Anzahl von Forschungsarbeiten, die sich auf diesen Bereich des Hörens konzentrieren, und die vorhandenen Untersuchungen wurden an relativ kleinen Populationen durchgeführt. Aus diesem Grund ist es schwierig, sich ein vollständiges Bild vom Ausmaß der erhöhten Empfindlichkeit und von etwaigen physischen Bedingungen zu machen, die damit zusammenhängen könnten.

5.2 Internes Audio

Die Alternative zum Hören einer externen Schallquelle wäre die interne Wahrnehmung eines Geräusches, entweder objektiver oder subjektiver Natur. So wird beispielsweise vermutet, dass Erkrankungen wie Ménières und Superior Canal Dehiscence (SCD) Elemente enthalten, die zu einer erhöhten Empfindlichkeit im Niederfrequenzbereich führen können. Diese Theorien werden jedoch als unwahrscheinlich angesehen, da sie mit einem völlig anderen Symptombild einhergehen, einschließlich ausgeprägter vestibulärer Symptome (Kontorinis & Lenarz, 2022; Ueberfuhr et al., 2017).

Eine wahrscheinlichere Quelle für die Wahrnehmung von Innengeräuschen ist Tinnitus. Während Tinnitus, wie er allgemein bekannt ist, am häufigsten bei höheren Frequenzen auftritt, kann er auch bei niedrigeren Frequenzen auftreten (Han et al., 2009). Dies wird in mehreren Studien mit Personen, die von niederfrequentem Lärm betroffen sind, nachgewiesen. Walford (1983) führt Experimente mit Ohrenschützern

durch, um zu untersuchen, ob die Empfindung des Probanden interner oder externer Natur ist. Pedersen et al. (2008) und Yamada et al. (2012) verwenden kontrollierte Umgebungen, um ähnliche Ergebnisse zu erzielen. Alle Studien kommen zu dem Schluss, dass ein Teil der Teilnehmer eher einen Tinnitus als eine externe Schallquelle wahrnimmt.

Es ist umstritten, ob Tinnitus subjektiver oder objektiver Natur ist. Objektiver Tinnitus kann aufgrund verschiedener Ursachen auftreten, darunter vaskuläre oder mechanische Ursachen (Han et al., 2009). SOAE ist ein Beispiel für einen mechanischen Hintergrund für einen messbaren objektiven Tinnitus. Obwohl selten, gibt es Fälle, in denen Menschen ihre eigenen SOAE hören. Obwohl SOAEs theoretisch auch bei niedrigeren Frequenzen auftreten können, sind sie schwer von physiologischen Geräuschen zu unterscheiden, die bei der Messung als Hintergrundgeräusche. Mehrere Studien deuten darauf hin, dass es möglich ist, SOAE mit Aspirin zu reduzieren oder zu eliminieren, eine Methode, die theoretisch zur Unterscheidung von subjektivem Tinnitus verwendet werden kann (Long, 1998; Penner, 1989).

5.3 Patientengruppen

Es lässt sich nicht leugnen, dass die Patientengruppe, die an der Sensation "Der Brummtton" beteiligt ist, einige besondere Merkmale aufweist, die für das Problem von Bedeutung sein können.

In mehreren Studien wurde u. a. festgestellt, dass sich Patienten häufig gegen die Diagnose Tinnitus oder eine Erklärung für das, was sie hören, wehren und darauf bestehen, dass die Quelle extern sein muss (Leventhall, 2009; Walford, 1983; Yamada et al., 2012). Es ist schwieriger, eine Erklärung dafür zu finden, warum dies der Fall ist, aber es kann spekuliert werden, dass es für Menschen einfacher ist, ein niederfrequentes Geräusch zu externalisieren.

Die von "The Hum" Betroffenen sind in hohem Maße frustriert, verzweifelt und in ihrer Lebensqualität beeinträchtigt. Erhebungen aus Dänemark zeigen vor allem das Problem des Schlafes und der Konzentration, und dass die Empfindung des "Brummens" als "Störung" wahrgenommen wird (H. Møller & Lydolf, 2002). Eine Sammlung von Briefen von Betroffenen aus England spiegelt dieses Schlafproblem ebenfalls wider. Walford (1983) beschreibt auch, dass einige der Briefschreiber so beunruhigt sind, dass sie Selbstmordgedanken hatten (Walford, 1983).

Auf der Grundlage von Selbstberichten und einer Überprüfung der Literatur stimmen die mit dem "Brummen" verbundenen Beschwerden häufig mit Beschwerden überein, die üblicherweise mit Tinnitus in Verbindung gebracht werden. Dazu gehören Belästigung, Einschlafschwierigkeiten und verminderte Schlafqualität, Angst und Depression (Han et al., 2009; Leventhall, 2009; Yamada et al., 2012). Walford (1983) erwähnt auch, dass diese Gruppe aufgrund ihrer Überzeugung, dass Geräusche externer Natur sind, aktiv nach einer Geräuschquelle sucht. Dies kann sicherlich ein zusätzlicher Faktor sein, der mit dem erhöhten Stress im Zusammenhang mit dem Thema zusammenhängt.

In Theorie und Literatur wird versucht, die Frage zu klären, warum einige wenige Menschen in der Lage sind, einen Ton zu hören, den fast niemand hört. Es ist nicht möglich, eine bestimmte Ursache festzustellen. Die wahrscheinlichste Erklärung ist, dass es eine Mischung aus Fällen gibt, in denen Menschen mit erhöhter Empfindlichkeit ein externes Geräusch hören, und dass es eine andere Gruppe gibt, die gleichzeitig an Tinnitus leidet. Dies steht im Einklang mit früheren Studien in diesem Bereich, die zeigen, dass die Ursache für die Wahrnehmung von tieffrequenten Geräuschen nicht homogen ist, sondern eher eine Mischung aus Sensibilität und Tinnitus darstellt (Pedersen et al., 2008; Walford, 1983; Yamada et al., 2012). Sicher ist, dass tieffrequenter Lärm, unabhängig davon, ob er intern oder extern erzeugt wird, die Lebensqualität der Menschen stark beeinträchtigen kann.

6. Schlussfolgerung

Auf der Grundlage der verfügbaren Literatur ist es schwierig, eine direkte Schlussfolgerung darüber zu ziehen, warum eine kleine Anzahl von Menschen einen tieffrequenten Ton hört, den die Mehrheit offenbar nicht wahrnimmt. Es wurden Theorien aufgestellt, ob dies darauf zurückzuführen ist, dass Personen mit einer erhöhten Empfindlichkeit im Tieftonbereich externe Schallquellen wahrnehmen, oder ob die Empfindung ihre Wurzeln in einem Tinnitus haben könnte.

Das wahrscheinlichste Ergebnis scheint eine Mischung aus den beiden Theorien zu sein, bei der einige Personen tatsächlich ein externes Geräusch wahrnehmen, während andere an einem Tinnitus leiden, den sie nach außen tragen. Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen früherer Studien von Walford (1983), Pedersen et al. (2008) und Yamada et al. (2012).

Sicherer ist, dass das "Brummen" ein echtes Ärgernis und keine urbane Legende ist. Angesichts der offensichtlichen Hauptmechanismen Hörempfindlichkeit und Tinnitus ist es wahrscheinlich, dass dieses Thema für den Bereich der Audiologie von Bedeutung ist.

7. Der Weg in die Zukunft

Die Feststellung, warum eine kleine Anzahl von Menschen ein Geräusch hört, das fast niemand sonst hört, kann eine schwierige Aufgabe sein. Zunächst könnte es sinnvoll sein, das Ausmaß des Phänomens zu kartieren, insbesondere innerhalb Norwegens, um einen geografischen Überblick zu erhalten. Darüber hinaus könnte es von Interesse sein, Faktoren wie die demografische Zusammensetzung, die Beschreibung der wahrgenommenen Geräusche durch die Kandidaten und den Grad des Unbehagens zu untersuchen.

Der nächste Schritt sollte darin bestehen, festzustellen, ob eine Schallquelle vorhanden ist. Dies kann z. B. durch Schallmessungen erfolgen. In diesem Zusammenhang müssen mehrere Faktoren berücksichtigt werden, darunter die dB-Bewertung. In diesem Fall kann es notwendig sein, von dBA abzurücken, da dies Auswirkungen auf den genauen Geräuschpegel im niedrigen Frequenzbereich hat. Darüber hinaus wird es als notwendig erachtet, die Betroffenen mit einer erweiterten audiologischen Testbatterie zu testen, um die Hörschwellen und andere mögliche physiologische Bedingungen zu erfassen.

Aus klinischer Sicht wird es wichtig sein, die Betroffenen mit Aufrichtigkeit und Ernsthaftigkeit zu behandeln. Wie Leventhall (2003) hervorhebt, kann sich die Gruppe gegenüber dem Gesundheitssystem verletzlich fühlen und befürchten, aufgrund der frivolen Kultur, die das Phänomen "The Hum" umgibt, abgewiesen zu werden. Wie Veldboom (2022) zeigt, ist es jedoch möglich, die Situation für die Patienten mit Hilfsmitteln wie einer Geräuschmaskierung zu verbessern, um die Aufmerksamkeit von dem unerwünschten Geräusch abzulenken.

Referenzen

Årdal, O. K. (2022, 2. Oktober). *Hege hört etwas, das fast niemand sonst hören kann.*

NRK. https://www.nrk.no/kultur/xl/the-hum_-hege-hoyrer-noko-nesten-ingen-andre-hoyrer-1.16121231

Aveyard, H. (2014). *Doing a literature review in health and social care: Ein praktischer Leitfaden*

(Dritte Auflage). McGraw-Hill Education, Open University Press.

Baguley, D. (Hrsg.) (2013). *Tinnitus: A multidisciplinary approach* (2nd ed). Wiley-Blackwell.

Baguley, D., McFerran, D., & Hall, D. (2013). Tinnitus. *The Lancet*, 382(9904), 1600-1607.

[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)60142-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)60142-7)

BBC (2016, 19. Januar). Der seltsame Fall des Bristol-Brumms. *BBC*

News. <https://www.bbc.com/news/magazine-35344544>

BBC (2022, 7. Dezember). Das Brummen: Dorfbewohner sagen, sie würden von einem

mysteriösen Geräusch "gequält". *BBC News*. <https://www.bbc.com/news/uk-england-leeds-63610977>

Berglund, B., Hassmén, P., & Job, R. F. S. (1996). Quellen und Auswirkungen von niederfrequentem Lärm.

The Journal of the Acoustical Society of America, 99(5), 2985-3002.

<https://doi.org/10.1121/1.414863>

Kanada, G. A. (2014, Mai 23). *Zusammenfassung der Ergebnisse der "Windsor Hum*

Study". [https://www.international.gc.ca/department-](https://www.international.gc.ca/department-ministere/windsor_hum_results-bourdonnement_windsor_resultats.aspx?lang=eng)

[ministere/windsor_hum_results-](https://www.international.gc.ca/department-ministere/windsor_hum_results-bourdonnement_windsor_resultats.aspx?lang=eng)

[bourdonnement_windsor_resultats.aspx?lang=eng](https://www.international.gc.ca/department-ministere/windsor_hum_results-bourdonnement_windsor_resultats.aspx?lang=eng)

Carlile, S., Davy, J. L., Hillman, D., & Burgemeister, K. (2018). A Review of the Possible

Wahrnehmbare und physiologische Auswirkungen von Windturbinenlärm. *Trends in*

Hearing, 22, 233121651878955. <https://doi.org/10.1177/2331216518789551>

Casale, J., Kandle, P. F., Murray, I. V., & Murr, N. (2023). Physiologie, Cochlea-Funktion.

In Physiologie, *Cochlea-Funktion*. StatPearls Publishing.

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK531483/>

Deming, D. (2004). *Das Brummen: Ein anomales Geräusch, das auf der ganzen Welt gehört wird*.

DeRuiter, M., & Ramachandran, V. (2017). *Basic Audiometry Learning Manual* (Zweite Auflage). Plural Publishing Inc.

Drexl, M., Krause, E., Gürkov, R., & Wiegrebe, L. (2016). Responses of the Human Inner Ear to Low-Frequency Sound. In P. van Dijk, D. Başkent, E. Gaudrain, E. de Kleine, A. Wagner, & C. Lanting (Eds.), *Physiology, Psychoacoustics and Cognition in Normal and Impaired Hearing* (Vol. 894, pp. 275-284). Springer International Publishing.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-25474-6_29

Everest, F. A., & Pohlmann, K. C. (2015). *Masterhandbuch der Akustik* (6. Auflage).

McGraw-Hill Education.

Frosch, F. G. (2013). Brummen und otoakustische Emissionen können durch denselben Mechanismus entstehen. *Journal of Scientific Exploration*, 27(4), 603-6242.

Frosch, F. G. (2016). Manifestationen eines weltweit wahrgenommenen tieffrequenten Geräusches unbekanntem Ursprungs, auch bekannt als "the Hum" oder "Taos Hum". *The International Tinnitus Journal*, 20(1). <https://doi.org/10.5935/0946-5448.20160011>

Garg, N., & Maji, S. (2014). Eine kritische Überprüfung der wichtigsten Verkehrslärm-Modelle: Strategies and implications. *Environmental Impact Assessment Review*, 46, 68-81.

<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.02.001>

Han, B. I., Lee, H. W., Kim, T. Y., Lim, J. S., & Shin, K. S. (2009). Tinnitus: Merkmale, Ursachen, Mechanismen und Behandlungen. *Journal of Clinical Neurology (Seoul, Korea)*, 5(1), 11-19. <https://doi.org/10.3988/jcn.2009.5.1.11>

- Internationale Normungsorganisation (2003). *ISO226* (ISO 226:2003(E)).
- Jurado, C., & Marquardt, T. (2016). Die Wirkung des Heliotremas auf die Wahrnehmung tieffrequenter Lautheit. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *140*(5), 3799-3809. <https://doi.org/10.1121/1.4967295>
- Kapoor, R., Ramasamy, S., Gardi, A., Schyndel, R., & Sabatini, R. (2018). Acoustic Sensors for Air and Surface Navigation Applications. *Sensors*, *18*(2), 499. <https://doi.org/10.3390/s18020499>
- Kern, A., Heid, C., Steeb, W.-H., Stoop, N., & Stoop, R. (2008). Biophysikalische Parameter Modifikation könnte wesentliche Hörlücken überwinden. *PLOS Computational Biology*, *4*(8), e1000161. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1000161>
- Kim, J., & Koo, M. (2015). Mass and Stiffness Impact on the Middle Ear and the Cochlear Partition. *Journal of Audiology and Otology*, *19*(1), 1-6. <https://doi.org/10.7874/jao.2015.19.1.1>
- Kontorinis, G., & Lenarz, T. (2022). Dehiszenz des oberen Bogenganges: A narrative review. *The Journal of Laryngology & Otology*, *136*(4), 284-292. <https://doi.org/10.1017/S0022215121002826>
- Kuehler, R., Fedtke, T., & Hensel, J. (2015). Infraschall und tieffrequente Ohrhörer-Einsatz-Hörschwelle. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *137*(4), EL347- EL353. <https://doi.org/10.1121/1.4916795>
- Levac, D., Colquhoun, H., & O'Brien, K. K. (2010). Scoping-Studien: Vorantreiben der Methodologie. *Implementation Science : IS*, *5*, 69. <https://doi.org/10.1186/1748-5908-5-69>
- Leventhall, G. (2007). Was ist Infraschall? *Fortschritte in Biophysik und Molekularbiologie*, *93*(1-3), 130-137. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2006.07.006>

- Leventhall, G. (2009). Niederfrequenter Lärm. Was wir wissen, was wir nicht wissen und was wir gerne wissen würden. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 28(2), 79-104. <https://doi.org/10.1260/0263-0923.28.2.79>
- Leventhall, G., Benton, S., & Pelmear, P. (2003). *A Review of Published Research on Low Frequency Noise and its Effects* [Projektbericht]. Ministerium für Umwelt, Ernährung und ländliche Angelegenheiten.
<https://westminsterresearch.westminster.ac.uk/item/935y3/a-review-of-published-research-on-low-frequency-noise-and-its-effects>
- Lang, G. (1998). Wahrnehmungskonsequenzen der Wechselwirkungen zwischen spontanen otoakustische Emissionen und externe Töne. I. Monaurale Diplakusis und Nachklänge. *Hearing Research*, 119(1-2), 49-60. [https://doi.org/10.1016/S0378-5955\(98\)00032-X](https://doi.org/10.1016/S0378-5955(98)00032-X)
- McFerran, D. J., Stockdale, D., Holme, R., Large, C. H., & Baguley, D. M. (2019). Why Is There Keine Heilung für Tinnitus? *Frontiers in Neuroscience*, 13, 802.
<https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00802>
- Møller, A. R. (Hrsg.) (2011). *Lehrbuch des Tinnitus*. Springer.
- Møller, H., & Lydolf, M. (2002). *Eine Fragebogenerhebung zu Beschwerden über Infraschall und niederfrequenten Lärm*. 21(2).
- Møller, H., & Pedersen, C. S. (2004). Gehör bei niedrigen und Infraschallfrequenzen. *Lärm & Gesundheit*.
- Mullins, J. H., & Kelly, J. P. (1995, Herbst). Taos Hum. *Echoes - The Newsletter of The Acoustical Society of America*, 5(3). <https://acousticalsociety.org/wp-inhalt/uploads/2018/02/v5n3.pdf>
- NPR (2020, August 4). It Took A Pandemic: Mystery Of Windsor Hum Is Solved. *NPR*.
<https://www.npr.org/2020/08/04/898853311/it-took-a-pandemic-mystery-of->

windsor-hum-is-solved

- Pedersen, C. S., Møller, H., & Waye, K. P. (2008). Eine detaillierte Studie über Beschwerden über tieffrequenten Lärm. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 27(1), 1-33. <https://doi.org/10.1260/026309208784425505>
- Penner, M. J. (1989). Aspirin beseitigt Tinnitus, der durch spontane otoakustische Emissionen verursacht wird: Eine Fallstudie. *Archives of Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 115(7), 871-875. <https://doi.org/10.1001/archotol.1989.01860310109034>
- Pham, M. T., Rajić, A., Greig, J. D., Sargeant, J. M., Papadopoulos, A., & McEwen, S. A. (2014). Ein Scoping-Review der Scoping-Reviews: Weiterentwicklung des Ansatzes und Verbesserung der Konsistenz. *Methoden der Forschungssynthese*, 5(4), 371-385. <https://doi.org/10.1002/jrsm.1123>
- Russell, D. A. (2016). *Absorption und Abschwächung von Schall in der Luft*. <https://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/Absorption/Absorption.html>
- Salt, A. N., & Hullar, T. E. (2010). Reaktionen des Ohrs auf niederfrequente Töne, Infraschall und Windturbinen. *Hearing Research*, 268(1-2), 12-21. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2010.06.007>
- Shera, C. A. (2022). Pfeifen, während es funktioniert: Spontane otoakustische Emissionen und der Cochlea-Verstärker. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 23(1), 17-25. <https://doi.org/10.1007/s10162-021-00829-9>
- Silva, L. T., Magalhães, A., Silva, J. F., & Fonseca, F. (2021). Auswirkungen von tieffrequentem Lärm aus industriellen Quellen in Wohngebieten. *Applied Acoustics*, 182, 108203. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108203>
- Sinuswelle (2021, 17. November). *Mathematische*

Geheimnisse.

<https://mathematicalmysteries.org/sine-wave/>

- Tye-Murray, N. (2020). *Grundlagen der auditiven Rehabilitation: Kinder, Erwachsene und ihre Familienmitglieder* (Fünfte Auflage). Plural Publishing Inc.
- Ueberfuhr, M. A., Wiegrebe, L., Krause, E., Gürkov, R., & Drexl, M. (2017). Tinnitus bei Normalhörenden nach Exposition gegenüber intensivem tieffrequenten Schall und bei Patienten mit Ménière-Krankheit. *Frontiers in Neurology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fneur.2016.00239>
- Walford, R. E. (1983). A Classification of Environmental "Hums" and Low Frequency Tinnitus. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2.
- Yamada, S., Inukai, Y., Takagi, K., Sebayashi, T., Koyama, S., Tanaka, Y., & Horie, Y. (2012). *Fallstudien zu Feldmessungen von niederfrequentem Schall und Beschwerden durch eine gemeinnützige Organisation zur Unterstützung von Beschwerdeführern in den Bereichen Lärm, Vibrationen und niederfrequenter Lärm in Japan*. 31(4).
- Yeowart, S., & Bryan, M. E. (1967). *Die monoaurale M.A.P.-Hörschwelle bei Frequenzen von 1.5 bis 100 c/s*.

